BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Sistem Tenaga Listrik

Menurut Catra Indra Cahyadi et al. (2022**)**, sistem tenaga listrik adalah suatu kesatuan komponen pembangkitan, transmisi, dan distribusi yang bekerja secara terintegrasi untuk menyalurkan energi listrik dari sumber ke beban dengan mempertahankan keandalan, efisiensi, dan kualitas tegangan yang sesuai standar nasional. Sistem tenaga listrik dirancang untuk memastikan bahwa energi yang dihasilkan pada pusat pembangkit dapat sampai ke konsumen dengan rugi-rugi daya seminimal mungkin dan kualitas tegangan tetap stabil sepanjang proses penyaluran.

Menurut A. Setiawan et al. (2020), sistem tenaga listrik didefinisikan sebagai jaringan listrik yang terdiri dari peralatan mekanis dan elektris yang saling berkaitan sehingga mampu menghasilkan, mengalirkan, dan mendistribusikan tenaga listrik secara aman, efisien, dan kontinu. Sistem ini melibatkan pengaturan beban, pengaturan frekuensi, kestabilan sistem, dan perlindungan sistem agar distribusi energi kepada pelanggan tidak mengalami gangguan besar dan memenuhi persyaratan mutu daya. PLN (2022) membagi sistem distribusi menjadi dua bagian utama, yaitu:

1. Jaringan Tegangan Menengah (JTM)**,** beroperasi pada tegangan 6 kV, 12 kV, atau 20 kV.
2. Jaringan Tegangan Rendah (JTR)**,** beroperasi pada tegangan 380/220 V dan merupakan jaringan yang langsung terhubung ke pelanggan.

2.2 Sistem Distribusi Tenaga Listrik

Menurut Hambali (2025), sistem distribusi tenaga listrik merupakan tahap akhir dalam penyaluran energi listrik dari jaringan transmisi ke pengguna akhir setelah tegangan diturunkan melalui gardu distribusi, sehingga aman serta sesuai kebutuhan konsumen. Sistem ini mencakup jaringan primer dan sekunder serta aspek proteksi dan kontrol untuk menjaga keandalan pasokan listrik.

Menurut Anwar, Hafid & Faharuddin (2024), sistem distribusi tenaga listrik merupakan bagian dari keseluruhan sistem tenaga listrik yang berperan langsung dalam penyaluran energi listrik ke konsumen akhir melalui jaringan distribusi dari gardu induk ke titik konsumsi dengan memperhatikan karakteristik beban dan rugi-rugi tegangan untuk mutu layanan yang baik.

Menurut Manopo & Tumaliang (2020), sistem distribusi tenaga listrik adalah subsistem yang mengalirkan listrik dari gardu induk distribusi ke konsumen melalui jaringan distribusi tegangan menengah dan rendah, di mana keandalan sistem tersebut diukur dengan indeks SAIDI dan SAIFI untuk mengevaluasi kontinuitas pasokan listrik.

Menurut Hajar (2025), fungsi utama sistem distribusi adalah menyalurkan tenaga listrik dari gardu induk distribusi ke pelanggan, sehingga sistem ini merupakan komponen penting dalam jaringan tenaga listrik yang langsung berhubungan dengan konsumen dan memengaruhi kualitas layanan kelistrikan.

2.3 Jaringan Tegangan Rendah

Menurut Supendi et al .(2023), Jaringan Tegangan Rendah (JTR) adalah bagian dari jaringan distribusi sekunder yang menyalurkan energi listrik dari

gardu/transformator distribusi ke pusat beban (meter pelanggan). JTR pada umumnya beroperasi pada tegangan nominal 220/380 V (fase–netral 220 V, fase–fase 380 V) dan mencakup jalur penghantar udara maupun kabel tanah yang menjangkau rumah tangga, perkantoran, fasilitas publik, dan industri kecil. Pengertian ini menegaskan peran JTR sebagai "ujung" sistem distribusi yang langsung berinteraksi dengan pelanggan sehingga semua karakteristik teknisnya (tegangan kerja, proteksi, dan kapasitas penghantar) harus disesuaikan untuk menjamin mutu layanan. fungsi utama JTR adalah menyampaikan energi dari LVMDP/trafo distribusi ke titik pemakaian akhir (meter pelanggan) sambil menjaga mutu tegangan dan proteksi pada level yang aman. Karakteristik khas JTR meliputi operasi pada tegangan nominal 220/380 V, sensitivitas tinggi terhadap distribusi beban lokal, dan kecenderungan rugi resistif (I^2R) yang lebih dominan dibandingkan jaringan tegangan menengah karena arus yang mengalir relatif lebih besar pada tegangan rendah. Oleh karena itu JTR lebih rentan terhadap jatuh tegangan pada ujung jaringan jika perencanaan penampang konduktor dan panjang saluran kurang diperhitungkan. kualitas tegangan pada JTR dinilai melalui tegangan kerja, jatuh tegangan *(voltage drop)*, dan stabilitas frekuensi; untuk tegangan nominal 220 V fase–netral, standar mutu yang sering digunakan mengacu pada PUIL/PLN yaitu toleransi tegangan sekitar +5%−10% dari nilai nominal (sehingga batas bawah sekitar ~198 V untuk 220 V). Penilaian tegangan ujung jaringan menjadi indikator utama kesesuaian jaringan terhadap standar mutu serta kebutuhan tindakan teknis jika melebihi batas.

Menurut Putra dan Siregar (2021), jaringan tegangan rendah (JTR) merupakan bagian dari sistem distribusi tenaga listrik yang berfungsi menyalurkan

energi listrik dari sisi sekunder transformator distribusi kepada konsumen akhir dengan tingkat tegangan nominal 380/220 volt. Jaringan ini menjadi elemen yang paling dekat dengan pelanggan sehingga kualitas perencanaannya sangat menentukan mutu tegangan, kontinuitas pasokan, serta tingkat keselamatan pemakaian listrik oleh masyarakat.

1. Fungsi JTR
    a. Menyalurkan energi listrik dari trafo distribusi ke pelanggan.
    b. Mengatur pembagian beban dari fasa R, S, dan T ke pelanggan.
    c. Menyediakan titik sambungan untuk instalasi pelanggan.
    d. Mengalirkan arus balik dari pelanggan menuju titik netral transformator.
2. Komponen Utama JTR
    a. Tiang (Pole) JTR Beton, besi, atau kayu

       Sebagai penyangga kabel JTR
    b. Konduktor JTR

       Jenis kabel yang umum digunakan:

       NFA2X (paling umum pada JTR PLN),NYY / NYFGBY (untuk kabel tanah), ABC (*Aerial Bundled Cable*)

2.4 Arus Rata–Rata Sistem

Dalam sistem distribusi tenaga listrik, arus listrik yang mengalir pada penghantar dipengaruhi oleh besar daya beban yang digunakan pelanggan. Semakin besar daya yang digunakan, maka arus yang mengalir pada penghantar juga akan semakin besar. Besarnya arus listrik memiliki hubungan langsung terhadap rugi–rugi daya karena rugi–rugi penghantar berbanding lurus dengan kuadrat arus. Oleh karena

itu, perhitungan arus rata–rata menjadi parameter penting dalam evaluasi efisiensi jaringan distribusi tenaga listrik.

Perhitungan arus rata–rata tiga fasa dapat dinyatakan dengan persamaan :

$$I_{rata} = \frac{I_R + I_S + I_T}{3}$$

Keterangan :

I_{rata} = Rata-rata arus tiga fasa (A)

I_R, I_S, I_T = Arus fasa R, S, T (A)

Persamaan tersebut menunjukkan bahwa nilai arus rata–rata diperoleh dari jumlah arus pada ketiga fasa yang kemudian dibagi tiga. Jika nilai arus pada setiap fasa berbeda jauh, maka sistem dikategorikan mengalami ketidakseimbangan beban yang dapat menyebabkan munculnya arus netral dan meningkatkan rugi–rugi daya pada jaringan distribusi.

2.5 Daya Listrik

Daya listrik didefinisikan sebagai laju pemanfaatan energi listrik dalam suatu sistem kelistrikan. Besarnya daya dipengaruhi oleh nilai tegangan, arus, dan faktor daya. Arus listrik sendiri merupakan aliran muatan listrik yang bergerak melalui suatu penghantar dari potensial tinggi ke potensial rendah.

Pada sistem tiga fasa, daya semu transformator dapat dirumuskan sebagai:

$$S = \sqrt{3} \times V_{LL} \times I_{rata}$$

Keterangan :

S = daya semu transformator (kVA)

V_{LL} = tegangan antar fasa (V)

I_{arata} = arus rata-rata dari masing-masing fasa (A)

2.6 Rugi–Rugi Daya

Rugi–rugi daya merupakan energi listrik yang hilang sepanjang saluran distribusi akibat adanya resistansi pada penghantar. Kehilangan daya ini menyebabkan berkurangnya daya yang diterima oleh beban serta menurunkan efisiensi penyaluran energi listrik. Besarnya rugi–rugi daya sangat dipengaruhi oleh nilai arus yang mengalir, panjang penghantar, serta jenis dan luas penampang kabel yang digunakan. Secara matematis, rugi–rugi daya pada penghantar dapat dihitung dengan persamaan:

$$P_{loss} = I_R{}^2 . R + I_S{}^2 . R + I_T{}^2 . R + I_N{}^2 . R_N$$

Keterangan :

P_{loss} = Rugi-rugi daya penghantar (Watt)

I_R, I_S, I_T = Arus tiap fasa (A)

R = Resistansi penghantar (Ω)

I_N = Arus fasa netral (A)

R_N = Resistansi penghantar netral (Ω)

Persamaan ini menunjukkan bahwa peningkatan arus dan resistansi penghantar akan berbanding lurus dengan besarnya rugi–rugi daya yang terjadi.

2.7 Hubungan Panjang Penghantar, Resistansi, Arus Beban, Ketidakseimbangan Fasa, Arus Netral, dan Rugi–Rugi Daya

Rugi-rugi daya pada jaringan distribusi tenaga listrik merupakan akibat langsung dari adanya hambatan listrik (resistansi) pada penghantar yang dialiri arus. Secara teoritis, besarnya rugi-rugi daya penghantar mengikuti persamaan :

$$P = I_R{}^2 . R + I_S{}^2 . R + I_T{}^2 . R$$

Keterangan :

P_{loss} = Rugi-rugi daya penghantar (Watt)

I_R, I_S, I_T = Arus tiap fasa (A)

R = Resistansi penghantar (Ω)

Persamaan tersebut menunjukkan bahwa rugi-rugi daya dipengaruhi oleh dua faktor utama, yaitu besarnya arus yang mengalir pada penghantar dan nilai resistansi penghantar. Semakin besar arus yang mengalir, maka rugi-rugi daya akan meningkat secara kuadrat. Dengan demikian, peningkatan arus beban memberikan pengaruh yang sangat signifikan terhadap peningkatan losses pada jaringan distribusi.

Nilai resistansi penghantar sendiri dipengaruhi oleh jenis material penghantar, luas penampang konduktor, dan panjang penghantar. Secara umum, resistansi penghantar dapat dinyatakan sebagai :

$$R = r \times L$$

Keterangan :

R = Resistansi total penghantar sepanjang jaringan (Ω)

r = Resistansi penghantar per satuan panjang (m)

L = Panjang penghantar (km)

Berdasarkan persamaan tersebut dapat diketahui bahwa semakin panjang penghantar yang digunakan, maka resistansinya akan semakin besar. Sebaliknya, semakin besar luas penampang penghantar maka resistansi akan semakin kecil. Oleh karena itu, jaringan distribusi dengan panjang saluran yang besar cenderung mengalami rugi-rugi daya yang lebih tinggi dibandingkan jaringan dengan panjang saluran yang lebih pendek.

Selain panjang penghantar, kondisi pembebanan juga mempengaruhi besarnya losses pada jaringan distribusi. Pada sistem distribusi tiga fasa, kondisi ideal terjadi apabila beban pada fasa R, S, dan T terdistribusi secara merata sehingga arus pada ketiga fasa memiliki nilai yang hampir sama. Dalam kondisi tersebut resultan vektor arus ketiga fasa sama dengan nol sehingga tidak muncul arus pada penghantar netral.

Namun dalam praktiknya, pelanggan jaringan tegangan rendah didominasi oleh pelanggan satu fasa sehingga pembagian beban antar fasa sering kali tidak merata. Ketidakseimbangan beban ini menyebabkan perbedaan arus pada masing-masing fasa dan menghasilkan arus netral yang mengalir pada penghantar netral. Semakin besar ketidakseimbangan beban, maka semakin besar pula arus netral yang timbul.

Arus netral yang mengalir pada penghantar netral juga menghasilkan rugi-rugi daya tambahan yang besarnya mengikuti persamaan :

$$P_N = I_N^2 . R_N$$

Keterangan :

P_N = Rugi-rugi daya akibat arus netral (Watt)

I_N = Arus netral (A)

R_N = Resistansi penghantar netral (Ω)

Selain mengalir melalui penghantar netral, sebagian arus netral dapat mengalir menuju tanah melalui sistem pembumian transformator. Arus tersebut menimbulkan rugi-rugi daya ke tanah yang dapat dihitung menggunakan persamaan :

$$P_G = I_G^2 \cdot R_G$$

Keterangan :

P_G = Rugi-rugi daya akibat arus ke tanah (Watt)

I_G = Arus yang mengalir ke tanah (A)

R_G = Tahanan pembumian (Ω)

Meskipun nilainya relatif kecil dibandingkan rugi-rugi penghantar utama, rugi-rugi akibat arus ke tanah tetap berkontribusi terhadap total losses sistem distribusi.

Di sisi lain, ketidakseimbangan beban antar fasa menyebabkan munculnya arus netral yang menghasilkan rugi-rugi daya tambahan pada penghantar netral dan sistem pembumian. Dengan demikian, panjang penghantar, resistansi, arus beban, ketidakseimbangan fasa, dan arus netral memiliki hubungan yang saling berkaitan dalam menentukan besarnya rugi-rugi daya pada jaringan tegangan rendah.

2.8 Instalasi Listrik

Instalasi listrik merupakan suatu sistem yang terdiri dari peralatan dan perlengkapan listrik yang digunakan untuk menyalurkan energi listrik dari sumber listrik ke titik-titik pemakaian. Instalasi listrik dirancang agar penyaluran energi listrik berlangsung secara aman, andal, dan efisien. Dalam perencanaan dan pemasangannya, instalasi listrik harus mengikuti standar dan peraturan yang berlaku, termasuk standar yang ditetapkan oleh PT PLN (Persero). Perencanaan instalasi listrik umumnya diawali dengan pembuatan gambar rencana yang disesuaikan dengan kondisi dan kebutuhan bangunan. Instalasi yang tidak sesuai standar dapat meningkatkan risiko gangguan, menurunkan kualitas tegangan, serta memperbesar rugi–rugi daya pada

jaringan distribusi.

Beban listrik didefinisikan sebagai seluruh peralatan atau sistem yang menggunakan energi listrik dalam suatu jaringan distribusi. Besarnya beban listrik akan menentukan arus yang mengalir pada penghantar, sehingga berpengaruh langsung terhadap besarnya rugi–rugi daya. Hubungan antara tegangan, arus, dan hambatan pada beban mengikuti hukum Ohm yang dinyatakan dengan persamaan:

Semakin besar beban yang terpasang, maka arus yang mengalir pada jaringan tegangan rendah akan semakin besar, yang pada akhirnya dapat meningkatkan rugi–rugi daya apabila tidak diimbangi dengan pemilihan penghantar dan konfigurasi jaringan yang tepat.

2.9 Daya Aktif Keluaran

Hubungan antara daya semu, faktor daya, dan daya aktif menunjukkan bahwa tidak seluruh daya yang disuplai sistem dapat dimanfaatkan secara efektif oleh beban. Faktor daya yang rendah menyebabkan sebagian daya berubah menjadi daya reaktif sehingga efisiensi sistem menurun.

Perhitungan daya aktif keluaran dapat menggunakan persamaan :

$$P_{out} = S \times \cos \phi$$

Keterangan :

P_{out} = Daya aktif keluaran (Watt)

S = Daya semu (VA)

Cos ϕ = Faktor daya

2.10 Rugi–Rugi Daya Akibat Arus Netral

Arus netral muncul akibat adanya ketidakseimbangan beban antar fasa pada sisi sekunder transformator. Arus ini mengalir melalui penghantar netral dan

menimbulkan rugi–rugi daya tambahan pada jaringan tegangan rendah. Besarnya rugi–rugi daya akibat arus netral dapat dihitung dengan persamaan:

$$P_N = I_N^2 \cdot R_N$$

Keterangan :

P_N = rugi–rugi daya pada penghantar netral (Watt)

I_N = arus netral yang mengalir pada penghantar netral (A)

R_N = tahanan penghantar netral (Ω)

Rugi–rugi daya akibat arus netral perlu diperhitungkan karena dapat menurunkan efisiensi penyaluran energi listrik dan mempengaruhi keandalan sistem distribusi, terutama pada jaringan tegangan rendah dengan tingkat ketidakseimbangan beban yang tinggi.

2.11 Rugi–Rugi Daya Akibat Arus ke Tanah

Selain mengalir pada penghantar netral, arus netral juga dapat mengalir ke tanah melalui sistem pembumian. Arus ini akan menimbulkan rugi–rugi daya yang besarnya dapat dihitung dengan persamaan:

$$P_G = I_G^2 \times R_G$$

Keterangan :

PG : rugi–rugi daya akibat arus ke tanah (Watt)

I_G : arus yang mengalir ke tanah (A)

R_G : tahanan pembumian (Ω)

Sistem pembumian yang tidak optimal dapat meningkatkan nilai rugi–rugi daya dan berpotensi menimbulkan gangguan pada sistem distribusi.

2.12 Persentase Rugi–Rugi Daya

Dalam sistem distribusi tenaga listrik, standar rugi–rugi daya digunakan sebagai acuan untuk menilai kualitas penyaluran energi listrik. PT PLN (Persero) melalui SPLN menetapkan bahwa batas maksimum rugi–rugi daya pada sistem distribusi tidak boleh melebihi 8% dari total daya yang disalurkan.

Persentase rugi–rugi daya dapat dihitung menggunakan persamaan :

$$\% P_{loss} = \frac{P_{loss}}{P_{out}} \times 100\%$$

Keterangan :

$\%P_{loss}$ = Persentase rugi–rugi daya

P_{loss} = Total rugi daya (Watt)

P_{out} = Daya keluaran sistem (Watt)

2.13 Penelitian Terkait Terdahulu

Tabel 2.1 Penelitian Terkait Terdahulu

No	Peneliti	Tahun	Judul penelitian	Hasil Penelitian
1.	(Irsyam et al.,)	2023	Analisa Rugi-Rugi Daya (Losses Power) Pada Jaringan Tegangan Rendah pt. Musimmas Batam	Rata-rata arus ≈ 205,7 A; rugi daya untuk kawat 400 mm² = 46,6 W/km (0,046 kW/km); total losses dihitung dan kontribusi arus netral terhadap losses kecil (≈ 0,03 %)
2.	Dewi Nirwana et al.	2022	Analisis Rugi-Rugi Daya pada Jaringan Distribusi Penyulang Jentak di ULP Jeneponto”	Menyediakan analisis rugi-rugi pada jaringan distribusi penyulang; menunjukkan besaran losses pada distribusi primer di wilayah studi.

3.	S kurniati & Sudirman S	2016	Analisis Rugi-Rugi Daya Jaringan Distribusi 20 kV pada Sistem PLN Kota Kupang”	Rugi-rugi aktif berbeda antar penyulang: penyulang dengan losses aktif terkecil 0,189 %, penyulang dengan losses terbesar 1,82 %; jatuh tegangan maksimum pada penyulang Penfui sebesar 3,205 %.
4.	D Martono	2016	“Evaluasi Rugi-Rugi Jaringan yang dilayani oleh PLTS Siding”	Total rugi-rugi daya aktif 596,87 W atau 1,49 %; jatuh tegangan fasa tertinggi 3,258 % (masih di bawah toleransi 4 % menurut SPLN)
5.	B I Bursa	2021	Analisis Rugi-Rugi Daya akibat Ketidakseimbangan Beban pada Jaringan Distribusi Sekunder”	Menunjukkan bahwa ketidakseimbangan beban menyebabkan peningkatan rugi daya dan penurunan kualitas tegangan di jaringan distribusi sekunder.
6.	Rahmat Alfath Sudiro et al.	2020	Analisis Rugi-Rugi Daya pada Jaringan Distribusi Tenaga Listrik Kotamobagu dan Perbaikan (penelitian di Kotamobagu)	Ditemukan bahwa selama distribusi tenaga listrik dari gardu ke konsumen terjadi penurunan kualitas — muncul rugi tegangan dan rugi daya saluran. Hal ini menunjukkan bahwa perencanaan dan pertumbuhan beban perlu diiringi analisis losses agar kualitas daya tetap sesuai standar.
7.	IP Sidabuntar	2017	Analisa Drop Tegangan & Rugi-Rugi Daya pada Sistem Distribusi/Transmis i di sebuah industri/pabri	Rugi daya dan drop tegangan disebabkan oleh panjang saluran dan beban besar — feeder dengan penarikan beban dan panjang kabel besar menunjukkan losses dan penurunan voltase paling signifikan (feeder 1 & feeder 3).

8.	SJ Wattimena	2002	Analysis of Voltage Drop in Low Voltage Network (JTR)	Mengestimasi bahwa total losses dari pembangkitan hingga ke konsumen bisa mencapai ~14% dari total daya yang dihasilkan (termasuk 3% transmission + 11% distribusi), menunjukkan besarnya kontribusi jaringan distribusi terhadap total kerugian.
9.	BS Pamungkas et al.	2024	Analisis Penurunan Jatuh Tegangan dan Losses akibat Sambungan Deret dengan Penambahan Jaringan Tegangan Rendah serta Rekonfigurasi Sambungan Rumah	Dari studi kasus pelanggan rumah di area Jaringan Tegangan Rendah (JTR), ditemukan penurunan tegangan sampai ~178,21 V di titik akhir—melanggar toleransi standar PT PLN (Persero) (±10% terhadap 220 V), menunjukkan bahwa sambungan rumah deret dan konfigurasi jaringan mempengaruhi losses. Setelah rekonfigurasi dan perbaikan jaringan, kondisi dapat diperbaiki
10.	Emad Hussen Sadiq et al.	2022	Power losses evaluation in low voltage distribution network: a case study of 250 kVA, 11/0.416 kV substation	Menunjukkan bahwa ketidakseimbangan beban tiga fasa menyebabkan meningkatnya kerugian tembaga (copper losses). Distribusi beban yang tidak merata menyebabkan arus netral tambahan dan peningkatan resistansi konduktor, sehingga meningkatkan losses. Dengan balancing beban, efisiensi jaringan meningkat secara signifikan.

1.