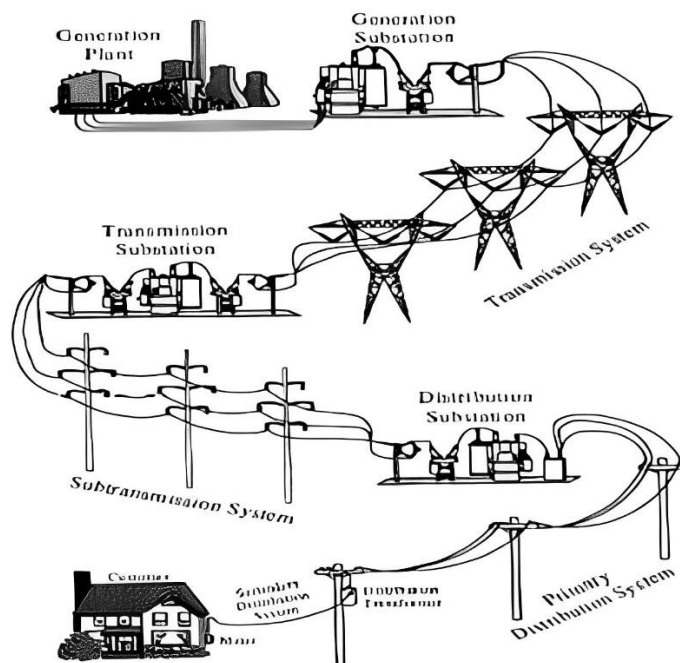


BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

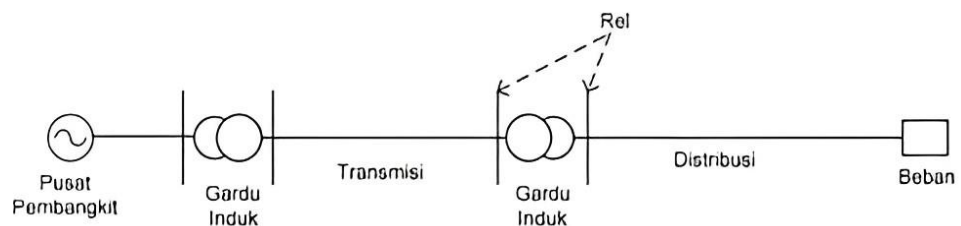
2.1 Sistem Tenaga Listrik

Proses penyaluran tenaga listrik ini melalui beberapa tahapan, dimulai dari pembangkitan energi listrik, yang kemudian disalurkan ke jaringan transmisi (SUTET) menuju ke gardu induk. Dari gardu induk listrik disalurkan melalui jaringan distribusi primer (SUTM), serta lewat gardu distribusi yang terhubung langsung dengan jaringan distribusi sekunder (SUTR) menyalurkan ke konsumen. Dengan demikian, sistem distribusi tenaga listrik menyalurkan tenaga listrik kepada pengguna melalui jaringan tegangan (SUTR), sedangkan saluran transmisi menyalurkan tenaga listrik tegangan ekstra tinggi ke pusat-pusat beban daya tinggi (melalui jaringan distribusi)



Gambar 2. 1 Sistem Tenaga Listrik

Gambar 2.1 menunjukkan bagaimana listrik dihasilkan dan didistribusikan ke konsumen melalui Pusat Pembangkitan, Gardu Induk, Saluran Transmisi, Gardu Induk, Saluran Distribusi, dan terakhir ke beban (konsumen tenaga listrik). Sistem pembangkit terdiri dari satu atau lebih unit pembangkit yang mengubah energi mekanik menjadi energi listrik dan harus mampu menghasilkan tenaga listrik yang cukup untuk memenuhi kebutuhan konsumen. Sistem transmisi menyalurkan energi listrik dari unit pembangkit yang terletak jauh ke sistem distribusi, sedangkan sistem distribusi menyalurkan energi listrik ke konsumen (Suswanto 2009)



Gambar 2. 2 Diagram Garis Sistem Tenaga Listrik

2.2 Struktur Jaringan Distribusi

Menurut (Suswanto 2009) Sistem distribusi tenaga listrik terdiri dari sebagian bagian, ialah:

1. Pusat Pembangkit Listrik atau Gardu Induk

Jika sistem penyaluran tenaga listrik dilakukan secara langsung pada bagian ini, maka Pusat Pembangkitan Tenaga Listrik merupakan komponen pertama dari sistem penyaluran tenaga listrik. Pusat Pembangkit Listrik biasanya terletak di pinggiran kota dan berbentuk Pusat Pembangkit Listrik Tenaga Diesel (PLTD). Jaringan distribusi primer dan jaringan distribusi sekunder digunakan untuk mendistribusikan listrik ke pusat-pusat beban (konsumen). Jika sistem distribusi tenaga listrik dilakukan secara tidak

langsung, gardu induk merupakan komponen pertama yang berfungsi untuk mereduksi tegangan dari jaringan transmisi dan menyalurkan listrik melalui jaringan distribusi primer.

2. Jaringan Distribusi Primer

Untuk sistem distribusi langsung, jaringan distribusi primer merupakan awal penyaluran tenaga listrik dari Pusat Pembangkitan ke konsumen. Sedangkan sistem distribusi tidak langsung merupakan tahap selanjutnya dari jaringan transmisi dalam rangka penyaluran tenaga listrik ke konsumen. Tegangan sistem jaringan distribusi primer juga dikenal sebagai jaringan distribusi tegangan tinggi (JDTT), adalah 20 kV. Tegangan di atas 20 kV tidak diperbolehkan di perkotaan, karena pada 30 kV akan timbul gejala yang dapat mengganggu frekuensi radio, TV, telekomunikasi, dan telepon.

3. Jaringan Distribusi Sekunder

Jaringan distribusi sekunder (JDTR) atau disebut juga jaringan distribusi tegangan rendah adalah jaringan tenaga listrik yang terhubung langsung dengan konsumen. Hasilnya, besarnya tegangan jaringan distribusi sekunder untuk sistem baru adalah 220/400 V. Tegangan antara fasa dan netral adalah 220 V, sedangkan tegangan antar fasa adalah 400 V.

2.3 Gardu Distribusi

Gardu distribusi merupakan salah satu komponen dari suatu sistem jaringan distribusi yang berfungsi untuk menghubungkan jaringan ke konsumen atau untuk menyalurkan/mendistribusikan tenaga listrik ke beban/konsumen, baik konsumen tegangan menengah maupun konsumen tegangan rendah. Transformator distribusi digunakan untuk menurunkan

tegangan listrik dari jaringan distribusi tegangan tinggi menjadi tegangan terpakai pada jaringan distribusi tegangan rendah (step down transformator); misalkan tegangan 20 KV menjadi tegangan 380 volt atau 220 volt. Sedang transformator yang digunakan untuk menaikkan tegangan listrik (step up transformator), hanya digunakan pada pusat pembangkit tenaga listrik agar tegangan yang didistribusikan pada suatu jaringan panjang (long line) tidak mengalami penurunan tegangan (voltage drop) yang berarti, yaitu tidak melebihi ketentuan voltage drop yang diperkenankan 5% dari tegangan semula. (Suswanto 2009)

2.4 Saluran Udara Tegangan Rendah

Pelanggan disuplai listrik melalui jaringan tegangan rendah. Listrik disuplai oleh gardu distribusi. Karena jaringan ini menggunakan kabel berisolasi pilin dengan tegangan maksimum 1000 (V), maka kabel kumparan TR tidak dapat digunakan untuk penghantar dengan tegangan 20 (kV).

Semua isolasi harus berwarna hitam dan diberi tanda permukaan untuk identifikasi kabel.

1. Fase R: bergaris satu
2. Fase S: bergaris dua
3. Fase T: bergaris tiga
4. Netral : tidak bergaris

Untuk meningkatkan kehandalan, faktor keamanan, dan lain-lain telah dikembangkan Kabel Twisted Tegangan Rendah (SUTR) dengan LVTC (Low Voltage Twisted Cable). Dalam pemasangan saluran udara, konduktor harus ditarik tidak terlalu kencang atau terlalu longgar sehingga konduktor tidak

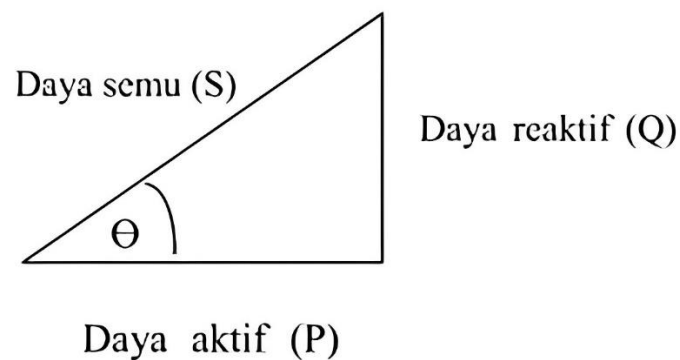
mengalami kerusakan mekanis atau kelelahan akibat tarikan dan ayunan, sekaligus mencapai penghematan dalam penggunaan konduktor. (Hutabarat 2019) .

Tabel 2. 1 Karakteristik Kawat Penghantar Menurut SPLN 64 : 1995

Penampang Penghantar Nominal (mm ²)	Penghantar	Tahanan (Ohm/km)
3 x 35	Cu	0,5240
	Al	0,8680
3 x 50	Cu	0,3870
	Al	0,6410
3 x 70	Cu	0,2680
	Al	0,4430
3 x 95	Cu	0,1930
	Al	0,3200

2.5 Daya

Daya aktif (kW) dan daya reaktif (kVar) merupakan daya semu (kVA) yang dialirkan melalui jaringan distribusi. Hubungan antara daya reaktif, daya aktif, dan daya semu dapat digambarkan dalam segitiga daya seperti yang ditampilkan pada Gambar 2.3 (Syufrijal and Readysal 2014)



Gambar 2. 3 Segitiga Daya

Dari gambar tersebut dapat kita peroleh :

$$S^2 = P^2 + Q^2 \quad (2.1)$$

$$P = S \cos \theta \quad (2.2)$$

$$Q = S \sin \theta \quad (2.3)$$

Daya listrik pada sistem 1 phasa dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$\text{Daya aktif, } P_{1\phi} = V_p \cdot I_p \cos \theta \quad (\text{kW}) \quad (2.4)$$

$$\text{Daya reaktif, } Q_{1\phi} = V_p \cdot I_p \sin \theta \quad (\text{kVar}) \quad (2.5)$$

$$\text{Daya semu, } S_{1\phi} = V_p \cdot I_p^* \quad (\text{kVA}) \quad (2.6)$$

$$S_{1\phi} = (V \angle \alpha) \cdot (I \angle \beta)^*$$

$$S_{1\phi} = (V \angle \alpha) \cdot (I \angle -\beta)$$

$$S_{1\phi} = |V| |I| \angle \alpha - \beta$$

$$S_{1\phi} = |V| |I| \angle \cos(\alpha - \beta) + j |V| |I| \sin(\alpha - \beta)$$

Karena sudut $\alpha - \beta$ merupakan sudut antara tegangan dan arus, jadi sama dengan sudut θ , maka daya semu menjadi sebagai berikut:

$$\text{Daya semu, } S_{1\phi} = |V| |I| \cos \theta + j |V| |I| \sin \theta$$

$$S_{1\phi} = P_{1\phi} + j Q_{1\phi}$$

$$S_{1\phi} = \sqrt{P^2 + Q^2}$$

Daya listrik pada sistem 3 phasa dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$\text{Daya aktif, } P_{1\phi} = V_p \cdot I_p \cos \theta \quad (\text{kW}) \quad (2.7)$$

$$P_{3\phi} = \sqrt{3} V_L \cdot I_L \cos \theta$$

$$\text{Daya reaktif, } Q_{3\phi} = 3 V_P \cdot I_P \sin \theta \quad (\text{kVar}) \quad (2.8)$$

$$Q_{3\phi} = \sqrt{3} V_L \cdot I_L \sin \theta$$

$$\text{Daya semu, } S_{3\phi} = 3 V_P \cdot I_P^* \quad (\text{kVA}) \quad (2.9)$$

$$S_{3\phi} = \sqrt{3} V_L \cdot I_L^*$$

$$S_{3\phi} = P_{3\phi} + j Q_{3\phi}$$

Jika beban seimbang dihubungkan dengan bintang (Y), tegangan pada setiap impedansi dibagi $\sqrt{3}$ dengan tegangan saluran, dan arus saluran mengalir melalui setiap impedansi, atau:

$$V_P = \frac{V_L}{\sqrt{3}} \quad \text{dan} \quad I_P = I_L \quad (2.10)$$

Keterangan:

V_P = tegangan fasa – netral (Volt)

V_L = tegangan fasa – fasa (Volt)

I_P = arus fasa – netral (Ampere)

I_L = arus fasa – fasa (Ampere)

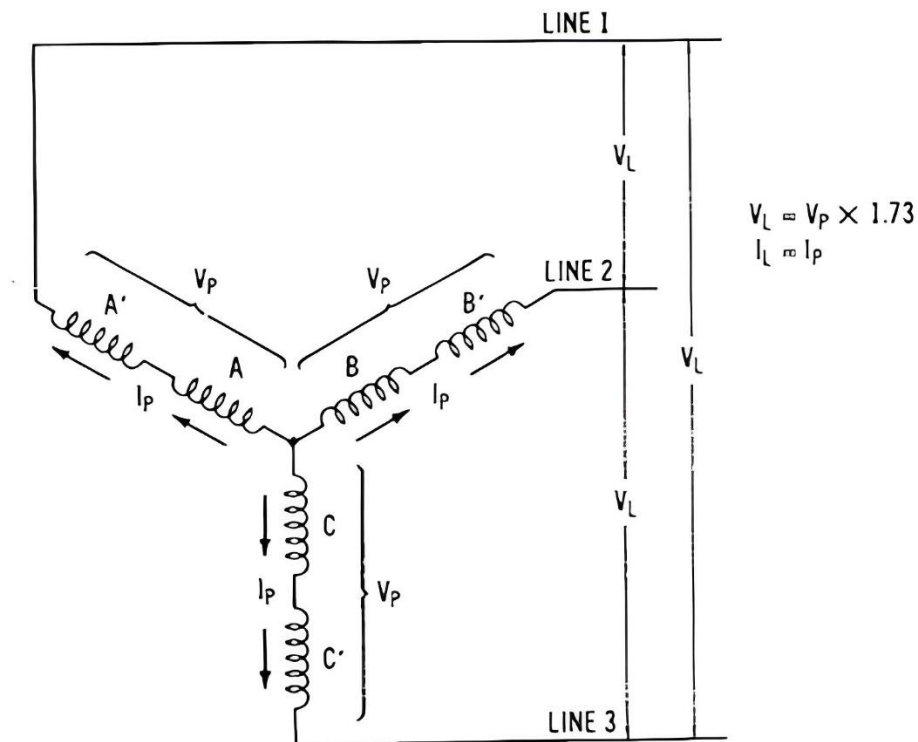
Sehingga beban terhubung bintang (Y) menerima daya aktif, yaitu:

$$P_{3\phi} = 3 V_P \cdot I_P \cos \theta \quad (2.11)$$

$$= 3 \cdot \frac{V_L}{\sqrt{3}} \cdot I_L \cdot \cos \theta$$

$$= 3 \cdot \frac{V_L}{\sqrt{3}} \cdot I_L \cdot \cos \theta \left(\frac{\sqrt{3}}{\sqrt{3}} \right)$$

$$= \sqrt{3} V_L \cdot I_L \cos \theta$$



Gambar 2. 4 Beban Hubung Bintang (Y)

Jika beban seimbang dihubungkan dengan delta (Δ), maka tegangan pada setiap impedansi adalah tegangan antara saluran, dan jumlah arus yang melewati setiap impedansi sama dengan dibagi dengan $\sqrt{3}$, atau :

$$V_P = V_L \text{ dan } I_P = \frac{I_L}{\sqrt{3}} \quad (2.12)$$

Arus yang mengalir pada kawat netral diperoleh $I_N = I_a + I_b + I_c = 0$ sehingga:

$$I_N = (I_a + I_b + I_c). \quad (2.13)$$

$$I_N = \sqrt{(I_N(\text{real}))^2 + (I_N(\text{imaginer}))^2} \tan^{-1} \frac{B}{A} \quad (2.14)$$

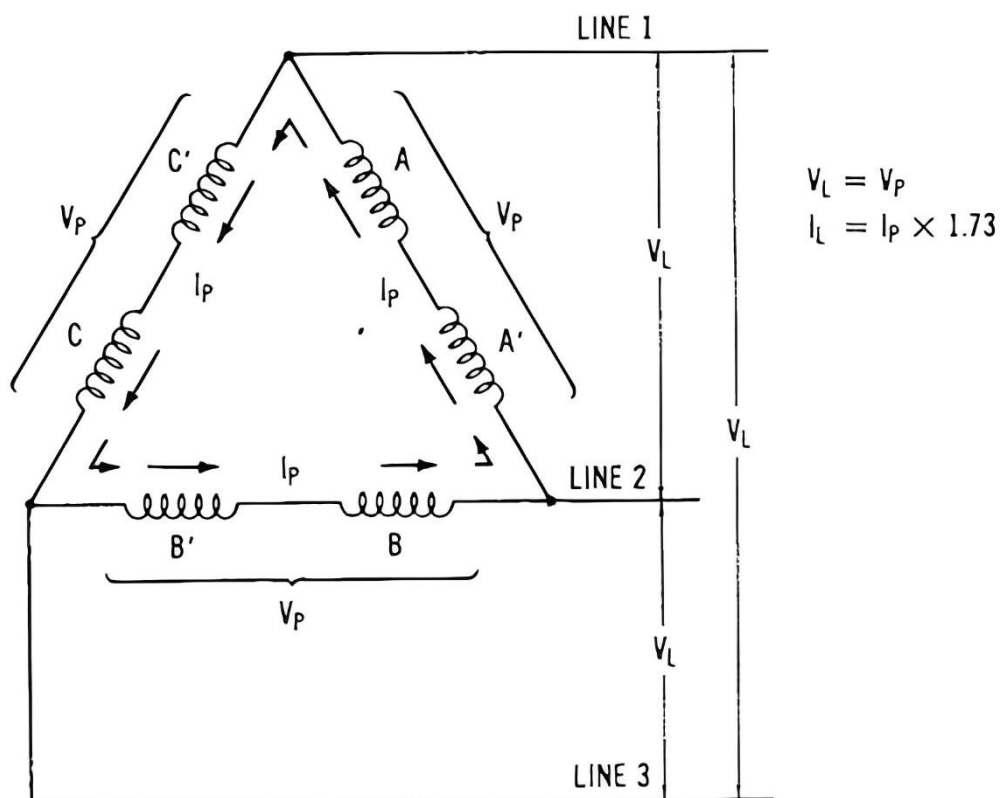
Sehingga beban terhubung delta (Δ) menerima daya aktif yaitu:

$$P_{3\phi} = 3 V_P \cdot I_P \cos \theta \quad (2.15)$$

$$= 3 \cdot V_L \cdot \frac{I_L}{\sqrt{3}} \cos \theta$$

$$= 3 \cdot V_L \cdot \frac{I_L}{\sqrt{3}} \cos \theta \left(\frac{\sqrt{3}}{\sqrt{3}} \right)$$

$$= \sqrt{3} V_L \cdot I_L \cos \theta$$



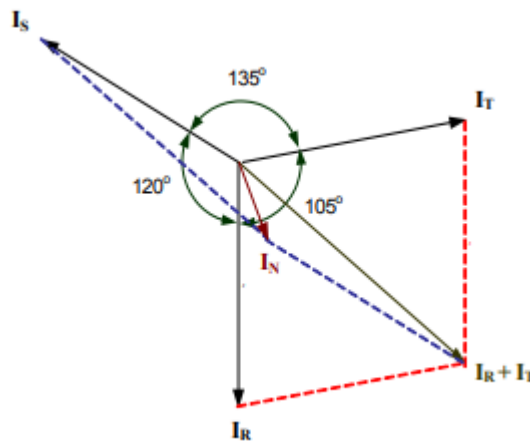
Gambar 2. 5 Beban Hubung Delta (Δ)

2.6 Ketidakseimbangan Beban

Ketidakseimbangan beban pada sistem distribusi tenaga listrik terjadi ketika beban satu fasa pada pelanggan jaringan tegangan rendah tidak seimbang. Akibat ketidakseimbangan beban, arus muncul di netral trafo. Arus yang mengalir pada netral trafo ini menyebabkan rugi-rugi, khususnya rugi-rugi akibat arus netral pada penghantar netral trafo (Juliando 2017)

Keadaan tidak seimbang didefinisikan sebagai kondisi di mana salah satu atau kedua kondisi untuk keadaan seimbang tidak terpenuhi. Ada tiga kemungkinan kondisi tidak seimbang:

- Ketiga vektor berukuran sama, namun tidak membentuk sudut 120° satu sama lain.
- Ketiga vektor tidak sama besar, tetapi membentuk sudut 120° satu sama lain.
- Ketiga vektor tidak berukuran sama, dan tidak membentuk sudut 120° satu sama lain.



Gambar 2. 6 Vektor Diagram arus tidak seimbang

Gambar 2.7 Diagram vektor arus tidak seimbang ditunjukkan Jumlah ketiga vektor arus (I_R , I_S , I_T) tidak sama dengan nol sehingga muncul suatu besaran, yaitu arus netral (I_N) yang besarnya tergantung dari seberapa besar faktor ketidakseimbangannya (Dahlan 2012)

Tabel 2. 2 SPLN No. 17 Tahun 2014

Characteristic Group	Characteristic	Health Index			
		Baik	Cukup	Kurang	Buruk
Load Reading and Profilling	Ketidakeimbangan Arus Antar Fasa	< 10 %	10%-<20%	20%-<25%	≥ 25%

2.7 Perhitungan Ketidakeimbangan Beban pada Trafo Distribusi

Untuk mencari persentase ketidakeimbangan beban, langkah pertama adalah mencari koefisien keseimbangan di mana (Pranoto et al. 2020):

$$I_{rata-rata} = \frac{I_R + I_S + I_T}{3} \quad (2.16)$$

Keterangan:

$$I_R = \text{Arus fasa R (A)}$$

$$I_S = \text{Arus fasa S (A)}$$

$$I_T = \text{Arus fasa T (A)}$$

Adapun untuk mencari nilai rata-rata beban sebagai berikut :

$$\begin{aligned} a &= \frac{I_R}{I_{rata-rata}} \\ b &= \frac{I_S}{I_{rata-rata}} \\ c &= \frac{I_T}{I_{rata-rata}} \end{aligned} \quad (2.17)$$

Keterangan:

$$a = \text{Koefisien R}$$

$$b = \text{Koefisien S}$$

$$c = \text{Koefisien T}$$

Pada keadaan seimbang, besarnya koefisien a, b dan c adalah 1 sehingga untuk persentase rata-rata ketidakseimbangan beban dapat dihitung dengan persamaan berikut:

$$\%I_{\text{unbalance}} = \frac{(|a-1|)+(|b-1|)+(|c-1|)}{3} \times 100\% \quad (2.18)$$

2.8 Losses Akibat Arus Netral pada Transformator

Arus mengalir melalui netral trafo sebagai akibat dari ketidakseimbangan beban pada sisi sekunder trafo (R, S, dan T) ini menyebabkan losses (rugi-rugi). Menggunakan standar SPLN D3.002-1 tahun 2007, di mana batas rugi daya adalah 10%. Selain itu, rumus berikut dapat digunakan untuk menghitung losses penghantar netral (Syufrijal and Readysal 2014):

$$P_n = I_n^2 R_n \quad (2.19)$$

Keterangan:

P_n = Losses pada penghantar netral (Watt)

I_n = Arus netral Trafo (A)

R_n = Tahanan pada kawat netral (Ohm)

Untuk menghitung Resistansi Tahanan dapat menggunakan rumus berikut :

$$R_N = \rho \frac{l}{A} \quad (2.20)$$

Keterangan:

R_N = Tahanan pada kawat netral (Ohm)

ρ = Tahanan Jenis Penghantar ($\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$)

l = Panjang penghantar (m)

A = Luas penampang penghantar (mm^2)

Untuk menghitung persentase losses akibat adanya arus netral pada penghantar netral trafo dapat menggunakan rumus berikut:

$$\%P_n = \frac{P_n}{P} \times 100 \quad (2.21)$$

Keterangan:

$\%P_n$ = Persentase Losses pada penghantar netral

P_n = *Losses* penghantar netral

P = Daya aktif trafo

Untuk menghitung nilai *losses* dalam satuan kWh dapat ditentukan dengan mengalikan setiap rugi daya dengan asumsi durasi waktu yang dipakai dalam sehari:

$$W_N = P_n \times t \quad (2.22)$$

Keterangan:

W_N = *Losses* Energi penghantar netral (kWh)

P_N = *Losses* penghantar netral (kW)

t = waktu (h)

2.9 Efisiensi Transformator

Efisiensi Transformator mengacu kepada standar SPLN D3.002-1: 2007 PT PLN (Persero) di mana efisiensi dikatakan baik jika memiliki nilai minimal 97%. Efisiensi transformator adalah perbandingan antara daya output dengan daya input sehingga (Syufrijal and Readysal 2014) :

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100\% \quad (2.23)$$

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{out} + Losses} \times 100\% \quad (2.24)$$

Keterangan:

η = Efisiensi Transformator

P_{out} = Daya Keluar

P_{in} = Daya Masuk

2.10 Saving Biaya

Dengan mengurangi kehilangan energi sebelum penyeimbangan dengan kehilangan energi setelah penyeimbangan, selisih tersebut kemudian dikalikan dengan biaya nominal per kWh. Perhitungan tersebut menghasilkan kesimpulan sebagai berikut (Pranoto et al. 2020):

$$\text{Saving kwh/hari} = \text{Total } W_N \text{ sebelum penyeimbangan} - \text{Total } W_N \text{ setelah penyeimbangan} \quad (2.25)$$

$$\text{Saving kwh/bulan} = \text{Saving kwh/hari} \times 30 \text{ hari} \quad (2.26)$$

Tabel 2. 3 *TARIFF ADJUSTMENT* (Januari-Maret 2023) PLN

Golongan Tarif	Batas Daya	Biaya Pemakaian
R-1/TR	900 VA	Rp. 1.352,00
R-1/TR	1300 VA	Rp. 1.444,70
R-1/TR	2200 VA	Rp. 1.444,70

$$\text{Saving Biaya} = \text{saving kwh} \times \text{biaya pemakaian /kwh} \quad (2.27)$$