

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Sistem distribusi

Menurut Suhadi (2008) sistem distribusi tenaga listrik adalah seluruh sistem mulai dari saluran tegangan menengah hingga saluran tegangan rendah. Sistem distribusi ini terbagi menjadi dua: Saluran udara tegangan menengah (SUTM, 20.000 V) atau saluran distribusi primer, dan saluran tegangan rendah (Saluran Tegangan Rendah – STR, 380/220 V) atau saluran distribusi sekunder.

Distribusi tenaga listrik dapat dilakukan melalui saluran udara atau saluran bawah tanah. Setiap saluran distribusi di lokasi tertentu dilengkapi dengan transformator distribusi, di mana tegangan menengah diturunkan ke tegangan rendah. Dari transformator distribusi, kabel JTR dihubungkan untuk menyalurkan listrik kepada pelanggan.

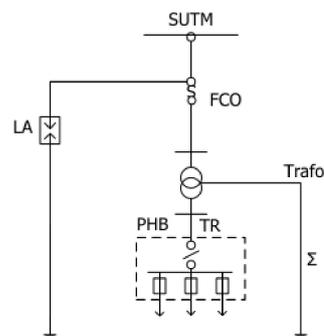
2.2. Saluran Tegangan Rendah

Saluran tegangan rendah adalah saluran listrik yang menghubungkan gardu distribusi tegangan menengah ke konsumen (Suhadi *et al*, 2008). Tegangan sistem ini adalah 220V untuk dua kabel (F – N), dan 380V untuk tiga kabel (R, S, T).

2.3. Gardu Distribusi

Menurut Suhadi (2008) Gardu distribusi adalah rangkaian dari suatu perlengkapan hubung bagi, terdiri dari PHB (Peralatan Hubung Bagi) tegangan menengah dan PHB tegangan rendah. Masing-masing dilengkapi gawai kendali

dengan komponen proteksi. Diagram satu garis untuk gardu portal dapat dilihat pada Gambar 2.1.



Gambar 2. 1. Diagram satu garis gardu portal (Buku 1 PLN, 2010)

Menurut SPLN (2010) berdasarkan konstruksinya, gardu distribusi dibedakan menjadi:

2.3.1. Gardu Pasang Dalam

a. *Closed Type* (Gardu Beton)

Gardu *closed type* adalah gardu distribusi yang memiliki peralatan hubung bagi baik dari *in coming*, sampai *out going*. Peralatan tersebut ditempatkan dalam suatu lemari khusus (Suswanto, 2009).

b. Gardu Kios (Gardu Besi)

Gardu kios adalah gardu yang bangunan keseluruhannya terbuat dari plat besi dengan konstruksi seperti kios (PLN Buku 4, 2010).

2.3.2. Gardu Pasang Luar

a. Gardu Portal

Gardu yang instalasinya dipasang pada dua tiang dan memiliki pengamanan jenis *Cut-Out* (FCO) untuk melindungi transformator dari hubung singkat dan *Lightning Arrester* untuk melindungi dari tegangan tinggi jika terjadi sambaran petir (PLN Buku 4, 2010).

b. Gardu Cantol

Gardu cantol adalah gardu transformator yang seluruh instalasinya dipasang pada satu tiang. Transformator yang digunakan biasanya memiliki daya ≤ 100 kVA dengan Fase 3 atau Fase 1 (PLN Buku 4, 2010).

2.4. Daya Dalam Sistem Tiga Fasa

2.4.1. Daya Pada Sistem Tiga Fasa Hubung Bintang (Y)

Jika suatu beban yang seimbang terhubung dengan hubung bintang (Y), tegangan pada masing-masing penghantar akan sama dengan nilai tegangan dikali $\sqrt{3}$, dan arus yang mengalir melalui tiap fasa akan sama (Stevenson, 1983). Ilustrasi sistem tiga fasa hubung bintang dapat dilihat pada Gambar 2.2.

$$V_p = |V_{an}| = |V_{bn}| = |V_{cn}| \quad (2.1)$$

Di mana:

V_p :Tegangan fasa (V)
 V_{an} :Tegangan antara fasa a ke netral (V)
 V_{bn} :Tegangan antara fasa b ke netral (V)
 V_{cn} :Tegangan antara fasa c ke netral (V)

Dan jika besar fasa I_p untuk suatu beban terhubung bintang adalah:

$$I_p = |I_{an}| = |I_{bn}| = |I_{cn}| \quad (2.2)$$

Di mana:

I_p : Arus fasa (A)
 I_{an} : Arus antara fasa a ke netral (A)
 I_{bn} : Arus antara fasa b ke netral (A)
 I_{cn} : Arus antara fasa c ke netral (A)

Maka daya tiga fasa keseluruhannya adalah

$$P = 3 \cdot V_p \cdot I_p \cdot \cos \varphi$$

Atau untuk satu fasa (2.3)

$$P = V_p \cdot I_p \cdot \cos \varphi$$

Di mana:

P : Daya aktif (W)
 V_p : Tegangan fasa (V)
 I_p : Arus fasa (A)
 $\cos \varphi$: Sudut dimana arus fasa tertinggal oleh tegangan fasanya

Jika V_L dan I_L adalah besar tegangan antar penghantar dan arus penghantar, maka daya pada beban terhubung bintang adalah:

$$V_p = \frac{V_L}{\sqrt{3}} \text{ dan } I_p = I_L \quad (2.4)$$

Di mana:

V_p : Tegangan fasa (V)
 V_L : Tegangan saluran (V)
 I_p : Arus fasa (A)
 I_L : Arus saluran (A)

Dengan mensubstitusi persamaan (2.3) dan (2.4) akan menghasilkan:

$$P = \sqrt{3} V_L I_L \cos \varphi \quad (2.5)$$

Di mana:

P : Daya aktif (W)
 V_L : Tegangan saluran (V)
 I_L : Arus saluran (A)
 $\cos \varphi$: Perbedaan sudut antara arus dan tegangan.

Dan daya reaktifnya adalah:

$$Q = 3 V_p I_p \sin \varphi \quad (2.6)$$

$$Q = \sqrt{3} V_L I_L \sin \varphi \quad (2.7)$$

Di mana:

Q : Daya reaktif (Var)

- V_p :Tegangan fasa (V)
 I_p :Arus fasa (A)
 V_L :Tegangan saluran (V)
 I_L :Arus saluran (A)
 $\sin \varphi$:Perbedaan sudut antara arus dan tegangan.

Dan daya semu dapat dicari menggunakan persamaan:

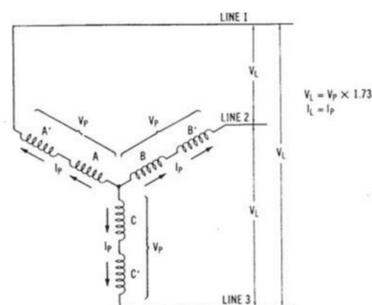
$$|S| = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (2.8)$$

atau

$$|S| = \sqrt{3} V_L I_L \quad (2.9)$$

Di mana:

- S :Daya semu (VA)
 P :Daya aktif (W)
 Q :Daya reaktif (Var)
 V_L :Tegangan saluran (V)
 I_L :Arus saluran (A)



Gambar 2. 2. Sistem bintang (Syufrijal et al, 2014)

2.4.2. Daya Pada Sistem Delta (Δ).

Pada suatu beban yang seimbang terhubung dengan hubung delta (Δ), tegangan pada masing-masing penghantar akan sebanding dengan tegangan antar fasa, dan arus yang mengalir melalui tiap penghantar akan setara dengan nilai arus fasa dibagi $\sqrt{3}$. Ilustrasi sistem tiga fasa hubung bintang dapat dilihat pada Gambar 2.3.

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

Di mana:

V_p :Tegangan fasa (V)
 V_L :Tegangan saluran (V)
 I_p :Arus fasa (A)
 I_L :Arus saluran (A)

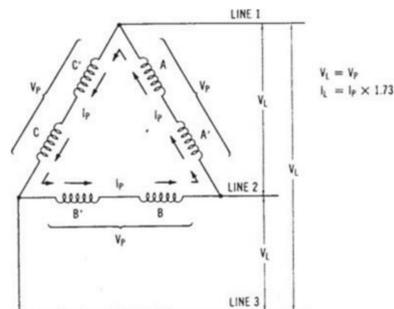
Dan daya aktif yang diserap oleh beban tiga fasa terhubung delta adalah:

$$P_{3\phi} = 3V_p \cdot I_p \cdot \cos\varphi$$

$$P_{3\phi} = \sqrt{3} \cdot V_L \cdot I_L \cdot \cos\varphi \quad (2.11)$$

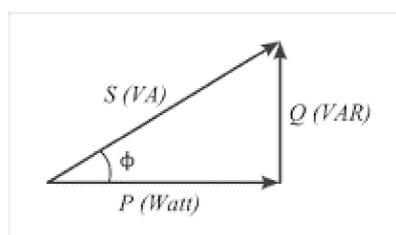
Di mana:

P :Daya aktif (W)
 V_L :Tegangan saluran (V)
 I_L :Arus saluran (A)
 I_p :Arus fasa (A)
 I_L :Arus saluran (A)
 $\cos \varphi$:Perbedaan sudut antara arus dan tegangan.



Gambar 2. 3. Sistem segitiga (Syufrijal et al, 2014)

Hubungan antara daya aktif, daya reaktif, dan daya semu dapat direpresentasikan melalui segitiga daya pada Gambar 2.4.



Gambar 2. 4. Segitiga daya (Syufrijal et al., 2014)

2.5. Transformator

Menurut Chapman (2005) transformator adalah alat yang dapat mengubah tegangan AC (*Alternating Current*) dari satu tingkat tegangan menjadi tegangan AC ke tingkat tegangan lain melalui induksi elektromagnetik tanpa mengubah dayanya.

2.5.1. Transformator Distribusi (Transformator 3 Fasa)

Transformator distribusi merupakan transformator *step-down*, digunakan untuk menurunkan tegangan menengah ke tegangan rendah agar sesuai dengan kebutuhan konsumen (Gönen, 1986). Transformator distribusi di Indonesia memiliki rating tegangan 20.000 V / 400 V. Transformator tiga fasa adalah tiga buah transformator satu fasa yang disusun pada satu inti yang sama dengan hubungan bintang maupun segitiga (Sumanto, 1991).

2.5.2. Prinsip Kerja Transformator

Transformator bekerja berdasarkan prinsip induksi elektromagnet Faraday yang menyatakan bahwa perubahan medan magnet di dalam kawat konduktor menghasilkan arus listrik dalam kawat tersebut.

Ketika kumparan primer dihubungkan ke sumber tegangan bolak-balik, arus eksitasi (i_0) mengalir melalui kumparan primer. Arus ini menciptakan perubahan garis fluks magnetik pada inti, menghasilkan Gaya Gerak Listrik (GGL) induksi sesaat di sisi primer e_1 . Di mana ϕ_m adalah nilai maksimum fluks total dalam Webers dan f adalah frekuensi (Hz) dan E adalah tegangan efektif (V).

$$e_1 = v_1 = -N_1 \frac{d\phi}{dt} \quad (2.12)$$

Dan
$$e_2 = v_2 = -N_2 \frac{d\phi}{dt} \quad (2.13)$$

Dimana:

- e_1 : GGL induksi/tegangan sesaat pada kumparan primer (v).
- e_2 : GGL induksi/tegangan sesaat pada kumparan sekunder (v).
- N_1 : Jumlah lilitan kumparan primer
- N_2 : Jumlah lilitan kumparan sekunder
- $d\phi$: Perubahan garis fluks magnetik (wb)
- dt : Perubahan waktu (s)

Fluks magnetik yang menginduksi kumparan primer juga menginduksi kumparan sekunder karena keduanya terhubung secara magnetik oleh inti besi seperti terlihat pada Gambar 2.5. Menurut Kulkarni (2017) Jumlah fluks magnet yang memasuki kumparan sekunder sama dengan fluks magnet kumparan primer.

Dari persamaan (2.12) dan (2.13), didapatkan perbandingan lilitan berdasarkan perbandingan GGL induksi. Perbandingan tersebut dirumuskan sebagai (Kulkarni, 2017):

$$a = \frac{e_1}{e_2} = \frac{N_1}{N_2} = \frac{V_1}{V_2} \quad (2.14)$$

Menurut Sumanto (1991) a adalah nilai perbandingan lilitan transformator (*turn ratio*). Apabila nilai $a < 1$, maka transformator tersebut berfungsi untuk menaikkan tegangan (*step up*) dan jika $a > 1$, transformator berfungsi menurunkan tegangan (*step down*). Dari persamaan (2.12) dan (2.13) fluks pada saat 't' yang dinyatakan dengan $\phi_{(t)} = \phi_m \sin \omega t$, dimana ϕ_m adalah fluks maksimum dalam weber. Sehingga GGL induksi pada kumparan primer adalah:

$$e_1 = -N_1 \frac{d\phi}{dt}$$

$$\begin{aligned}
 e_1 &= -N_1 \frac{d\phi_m \sin \omega t}{dt} \\
 e_1 &= -N_1 \omega \phi_m \cos \omega t \\
 e_1 &= N_1 \omega \phi_m \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right) \quad (2.15)
 \end{aligned}$$

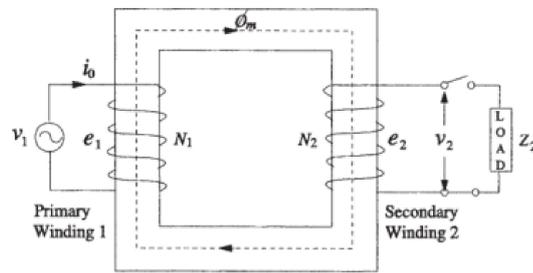
Pada persamaan (2.15), fluks magnetik bolak-balik menimbulkan GGL induksi bolak-balik. Karena N merupakan induktif murni, maka GGL induksi tertinggal 90° terhadap fluks magnetik. Karena $(e_1)_{\text{maks}} = N_1 \omega \phi_m$ maka tegangan efektif E_1 (V) adalah (Sumanto, 1991):

$$\begin{aligned}
 E_1 &= \frac{(e_1)_{\text{maks}}}{\sqrt{2}} \\
 E_1 &= \frac{N_1 \omega \phi_m}{\sqrt{2}} \\
 E_1 &= \frac{2 \pi f N_1 \phi_m \sqrt{2}}{2} \\
 E_1 &= 3.14 \cdot 1.41 f N_1 \phi_m \\
 E_1 &= 4.44 f N_1 \phi_m \quad (2.16)
 \end{aligned}$$

Di mana:

- ϕ_m :fluks total (Weber)
- f :frekuensi (Hz)
- E :Tegangan efektif (V)
- N :jumlah lilitan.

Persamaan (2.16) berlaku untuk tegangan yang diinduksi pada kumparan primer dan sekunder.



Gambar 2. 5. Rangkaian transformator ideal (Kulkarni, 2017)

Apabila transformator dianggap ideal sehingga tidak terdapat rugi-rugian daya, maka daya *input* (P_{in}) akan sama dengan daya *output* (P_{out}), sehingga:

$$\begin{aligned} V_1 I_1 &= V_2 I_2 \\ \frac{I_1}{I_2} &= \frac{V_2}{V_1} \end{aligned} \quad (2.17)$$

Dengan menggabungkan persamaan (2.14) dan (2.17), transformator ideal adalah:

$$\frac{N_1}{N_2} = \frac{V_1}{V_2} = \frac{I_2}{I_1} \quad (2.18)$$

Di mana:

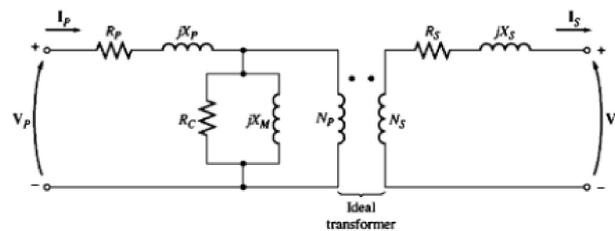
- N_1 : Jumlah lilitan kumparan primer.
- N_2 :Jumlah lilitan kumparan sekunder.
- V_1 : Tegangan primer (V).
- V_2 :Tegangan sekunder (V).
- I_1 : Arus primer (A).
- I_2 :Arus sekunder (A).

Rangkaian ekuivalen transformator dapat dilihat pada Gambar 2.6. Di dalamnya, komponen utama transformator ideal adalah kumparan N_1/N_2 , di mana N_1 dan N_2 adalah jumlah lilitan pada kumparan primer dan sekunder. Resistansi R_1 dan R_2 adalah komponen rugi-rugi daya (I^2R) pada kumparan primer dan sekunder,

sementara reaktansi X_1 dan X_2 adalah komponen fluks bocor, yaitu fluks yang hanya mengalir melalui salah satu kumparan, baik primer atau sekunder.

Tegangan AC menyebabkan inti transformator mengalami remagnetisasi secara berulang yang dipengaruhi oleh kurva histeresis baja pada inti besinya. Hal tersebut menyebabkan arus magnetisasi tetap ada bahkan saat tidak ada beban yang terhubung. Fluks inti yang berubah-ubah juga menyebabkan sebagian energi hilang dalam bentuk panas pada inti transformator, yang dikenal sebagai rugi histeresis (Machowski, 2008).

Karena inti transformator bersifat konduktif, perubahan fluks ini menghasilkan ggl yang memicu timbulnya arus eddy. Arus eddy menyebabkan panas yang disebut rugi arus eddy. Kedua rugi-rugi; rugi arus eddy dan rugi histeresis disebut rugi-rugi inti P_{inti} . Tegangan yang keluar ditentukan oleh banyaknya kumparan sekunder N_2 (Harlow et al., 2012)



Gambar 2. 6. Diagram ekivalent transformator (Chapman, 2005)

2.6. Pembebanan Transformator

2.6.1. Persentase Pembebanan

Menurut Arifin *et al.*, (2017), pembebanan transformator adalah persentase penggunaan transformator yang sedang terhubung ke beban.

$$\%Pembebanan = \frac{S_{beban}}{S_{transformator}} \times 100\% \quad (2.19)$$

Di mana:

$$S_{beban} = \sum_{F=1}^3 I_L \times V_{L-N} \quad (2.20)$$

Atau:

$$\%Pembebanan = \frac{I_{rata-rata}}{I_{FL}} \times 100\% \quad (2.21)$$

Di mana:

V_{L-N} :Tegangan antar fasa-netral sekunder transformator (A)

I_L :Arus sekunder masing-masing fasa R, S, dan T (A)

Sementara itu, arus beban penuh dapat dicari menggunakan persamaan (Chapman, 2005):

$$I_{FL} = \frac{S}{\sqrt{3} \times V_S} \quad (2.22)$$

Di mana:

I_{FL} :Arus beban penuh sisi sekunder transformator (A)

S :Kapasitas transformator (VA)

V_S :Tegangan sisi sekunder transformator (V)

Tabel 2.1. menunjukkan rentang kondisi pembebanan transformator yang sedang melayani beban Menurut SPLN 1997, dan SPLN 2014.

Tabel 2. 1. Kondisi pembebanan transformator

Kondisi Pembebanan Transformator SPLN 1997				
Kondisi	<i>Underload</i>	Normal	<i>Overload/overblast</i>	
Persentase	0%-40%	40%-80%	80%-100%	
Kondisi Pembebanan Transformator SPLN 2014				
Kondisi	Baik	Cukup	Kurang	Buruk
Persentase	0%-60%	60%-80%	80%-100%	100%

2.6.2. Ketidakseimbangan Beban Pada Transformator

Ketidakseimbangan beban pada transformator terjadi ketika beban yang terhubung pada setiap fasa transformator tidak sama besar, menyebabkan ketidakseimbangan beban (Gönen, 2008).

Menurut SPLN NO. 17 (2014) persentase ketidakseimbangan beban yang baik adalah di bawah 20%. Menurut Dewi *et al.*, (2021) persentase pembebanan pada beban yang tidak seimbang dapat dihitung dengan menggunakan koefisien a, b, dan c.

$$I_{rata-rata} = \frac{|I_R| + |I_S| + |I_T|}{3} \quad (A) \quad (2.23)$$

Di mana:

- I_R : Arus fasa R (A)
- I_S : Arus fasa S (A)
- I_T : Arus fasa T (A)

Dalam keadaan seimbang, nilai koefisien ketiga fasa adalah 1. Keadaan seimbang diilustrasikan seperti terlihat pada Gambar 2.7. Sementara itu, untuk mencari nilai koefisien tiap fasa dapat menggunakan persamaan berikut:

$$a = \frac{I_R}{I_{rata-rata}} \quad (2.24)$$

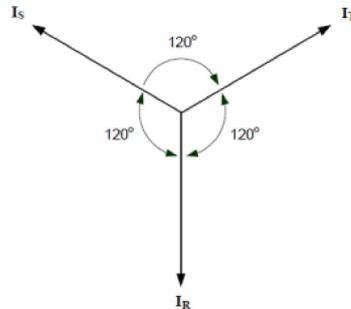
$$b = \frac{I_S}{I_{rata-rata}} \quad (2.25)$$

$$c = \frac{I_T}{I_{rata-rata}} \quad (2.26)$$

Di mana:

- a :Koefisien fasa R
- b :Koefisien fasa S

c :Koefisien fasa T



Gambar 2. 7. Vektor arus seimbang (Dewi et al, 2021)

Dengan mensubstitusikan persamaan (2.24), (2.25), dan (2.26) didapatkan persamaan untuk menghitung persentase ketidakseimbangan beban menggunakan persamaan (2.27), dan pada Tabel 2.2. dapat dilihat persentase kondisi ketidakseimbangan beban menurut SPLN 2014:

$$\%I_{UL} = \frac{(|a - 1|) + (|b - 1|) + (|c - 1|)}{3} \times 100\% \tag{2.27}$$

Di mana:

- %I_{UL} :Persentase ketidakseimbangan beban (%)
- a :Koefisien fasa R
- b :Koefisien fasa S
- c :Koefisien fasa T

Tabel 2. 2. Kondisi ketidakseimbangan transformator
(SPLN NO. 17, 2014).

Kondisi Ketidakseimbangan Beban Pada Transformator				
Persentase ketidakseimbangan arus antar fasa	Baik	Cukup	Kurang	Buruk
	<10%	10% - 20%	20% - <25%	25%

2.7. Rugi-Rugi Daya

Rugi-rugi daya mengakibatkan sebagian energi listrik berubah menjadi panas pada komponen transformator. Menurut SPLN No. 50 Tahun 1997, rugi-rugi daya yang diizinkan untuk transformator distribusi 3 fasa adalah 1,9%.

2.7.1. Rugi-Rugi Tanpa Beban (*No-Load Loss*)

1. Rugi-Rugi Inti Besi

Gaya magnet di dalam transformator selalu berubah karena arus bolak-balik dan menyebabkan panas akibat pergesekan molekul inti besi (Kulkarni, 2017). Terdapat dua jenis rugi-rugi inti:

a. Rugi-Rugi Histeresis

Menurut Kulkarni (2017) rugi-rugi histeresis adalah rugi-rugi yang diakibatkan oleh fluks magnet bolak-balik yang bergesekan dengan molekul besi di inti.

b. Rugi-Rugi *Eddy*

Rugi-rugi *Eddy* adalah pemanasan oleh arus yang terinduksi di inti akibat perbedaan tegangan antara kedua sisinya sehingga membangkitkan arus yang berputar-putar pada laminasi inti besi (Kulkarni, 2017).

2.7.2. Rugi-Rugi Beban (*Load Losses*)

Rugi-rugi beban terjadi saat transformator bekerja melayani beban. Rugi-rugi ini timbul pada kumparan primer dan sekunder, menghasilkan panas pada kumparan dan meningkat seiring dengan peningkatan beban (Martin, 1998).

1. Rugi-rugi Tembaga

Rugi-rugi tembaga adalah rugi-rugi daya yang terjadi karena resistansi kumparan terhadap arus beban (Chapman, 2005).

$$P_{cu} = I^2 \cdot R \quad (2.28)$$

Di mana

P_{cu}	:Rugi-rugi tembaga (W)
I	:Arus (A)
R	:Resistansi kumparan (Ω)

Kondisi pembebanan dibedakan menjadi 2 (dua), rugi-rugi ketika pembebanan seimbang (*balance*), dan rugi-rugi ketika pembebanan tidak seimbang (*unbalance*), (Pan, *et al.* 2018).

Rugi-rugi tembaga ketika pembebanan seimbang

$$P_{cu} = 3 \cdot I_{rata-rata}^2 \cdot R \quad (2.29)$$

Di mana

P_{cu}	:Rugi-rugi tembaga (W)
$I_{rata-rata}$:Arus rata-rata ketiga fasa R, S, dan T sekunder (A)
R	:Resistansi kumparan (Ω)

a) Rugi-rugi tembaga ketika pembebanan tidak seimbang:

$$P_{cu} = (I_R^2 \cdot R) + (I_S^2 \cdot R) + (I_T^2 \cdot R) \quad (2.30)$$

Di mana

P_{cu}	:Rugi-rugi tembaga (W)
I_R	:Arus R sekunder (A)
I_S	:Arus S sekunder (A)
I_T	:Arus T sekunder (A)
R	:Resistansi kumparan (Ω)

2.8. Metode Untuk Mencari Rugi-Rugi Pada Transformator

Menurut Chapman (2005) secara eksperimental, nilai induktansi dan resistansi transformator dapat ditentukan melalui pengujian, yaitu uji hubung terbuka (*open circuit*) dan uji hubung singkat (*short circuit*).

2.8.1. Uji Hubung Terbuka (Open circuit)

Pada uji *open circuit*, kumparan primer transformator dibiarkan terbuka, kumparan sekundernya dihubungkan ke sumber tegangan seperti ilustrasi pada Gambar 2.8.. Dalam kondisi itu, arus *input* akan mengalir melalui cabang eksitasi transformator. Karena nilai R_s dan X_s sangat kecil dibandingkan dengan R_c dan X_m , penurunan tegangan yang terjadi tidak signifikan dan dapat diabaikan. Sehingga, hampir seluruh arus *input* mengalir ke cabang eksitasi. Selanjutnya, tegangan *input*, arus *input*, dan daya *input* transformator diukur untuk menentukan faktor daya dari arus *input* dan besar sudut impedansi eksitasi. Cara untuk menghitung nilai R_c dan X_m adalah dengan menghitung admitansi di cabang eksitasi. Pengujian ini dilakukan untuk mencari rugi-rugi inti

Konduktansi dari rugi-rugi inti dapat dicari dengan:

$$G_C = \frac{1}{R_C} \quad (2.31)$$

Di mana:

G_C :Konduktansi rugi inti

R_C :Resistansi inti (Ω)

dan suseptansi magnetnya adalah:

$$B_M = \frac{1}{X_M} \quad (2.32)$$

Di mana:

B_M :Suseptansi magnet

X_M :Reaktansi (Ω)

Karena kedua elemen tersebut paralel, admitansi keduanya bertambah, dan total admitansi eksitasi adalah

$$\begin{aligned} Y_E &= G_C - jB_M \\ &= \frac{1}{R_C} - \frac{1}{jX_M} \end{aligned} \quad (2.33)$$

Di mana:

Y_E :Admitansi eksitasi

R_C :Resistansi inti (Ω)

X_M :Reaktansi (Ω)

Besarnya admitansi eksitasi pada sisi primer dapat ditemukan dari tegangan dan arus selama uji *open circuit* adalah:

$$|Y_E| = \frac{I_{OC}}{V_{OV}} \quad (2.34)$$

Di mana:

Y_E :Admitansi eksitasi

I_{OC} :Arus *open circuit* (A)

V_{OC} :Tegangan *open circuit* (V)

Sudut admitansi rangkaian transformator dapat dihitung berdasarkan faktor daya (Power Factor -PF) dan faktor daya (φ) pada saat uji *open circuit*. Faktor daya (PF) dapat dicari:

$$PF = \cos \varphi = \frac{P_{OC}}{V_{OC}I_{OC}} \quad (2.35)$$

Di mana:

PF :Faktor daya
 I_{OC} :Arus *open circuit* (A)
 V_{OC} :Tegangan *open circuit* (V)
 P_{OC} :Daya *open circuit* (W)

Dan sudut faktor dayanya (ϕ):

$$\phi = \cos^{-1} \frac{P_{OC}}{V_{OV} I_{OC}} \quad (2.36)$$

Di mana:

ϕ :sudut faktor daya
 I_{OC} :Arus *open circuit* (A)
 V_{OC} :Tegangan *open circuit* (V)
 P_{OC} :Daya *open circuit* (W)

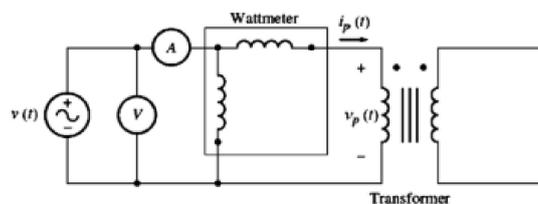
Faktor daya transformator selalu tertinggal (*lag*) dari sudut tegangan sebesar ϕ derajat. Maka, admitansi Y_E adalah:

$$Y_E = \frac{I_{OC}}{V_{OV}} \angle \cos^{-1} PF = \frac{1}{R_C} - \frac{1}{jX_M} \quad (2.37)$$

Di mana:

Y_E :Admitansi eksitasi
 I_{OC} :Arus *open circuit* (A)
 V_{OC} :Tegangan *open circuit* (V)
 R_C :Resistansi inti (Ω)
 X_M :Reaktansi (Ω)

Dengan demikian, nilai R_C dan X_M dapat ditentukan dari data uji *open circuit*.



Gambar 2. 8. Uji hubung terbuka (Chapman, 2005)

2.8.2. Uji Hubung Singkat (*Short circuit*)

Pada uji *short circuit*, terminal sekunder transformator dihubung singkat, dan terminal primer dihubungkan ke sumber tegangan seperti pada Gambar 2.9. Kemudian tegangan *input*, arus, dan daya diukur. Menurut Chapman (2005) Karena tegangan *input* sangat rendah selama uji hubung singkat, arus yang mengalir melalui cabang eksitasi dapat diabaikan. Jika arus eksitasi diabaikan, maka semua penurunan tegangan transformator dapat dianggap sebagai akibat dari elemen seri dalam rangkaian. Pengujian ini dilakukan untuk menghitung rugi-rugi tembaga.

Impedansi sisi primer transformator adalah:

$$|Z_{SE}| = \frac{V_{SC}}{I_{SC}} \quad (2.38)$$

Di mana:

Z_{SE} : Impedansi seri
 I_{SC} : Arus *short circuit* (A)
 V_{SC} : Tegangan *short circuit* (V)

dan faktor daya arus saat uji *short circuit* adalah

$$PF = \cos \varphi = \frac{P_{SC}}{V_{SC} I_{SC}} \quad (2.39)$$

Di mana:

PF : Faktor daya
 I_{SC} : Arus *short circuit* (A)
 V_{SC} : Tegangan *short circuit* (V)
 P_{SC} : Daya *short circuit* (W)

Saat uji ini, sudut impedansi keseluruhan (φ) bernilai positif:

$$\varphi = \cos^{-1} \frac{P_{SC}}{V_{SC} I_{SC}} \quad (2.40)$$

Di mana:

φ : sudut faktor daya
 I_{SC} : Arus *short circuit* (A)
 V_{SC} : Tegangan *short circuit* (V)

P_{SC} : Daya *short circuit* (W)

Sehingga

$$Z_{SE} = \frac{V_{SC} \angle 0^\circ}{I_{SC} \angle -\varphi^\circ} = \frac{V_{SC}}{I_{SC}} \angle \varphi^\circ \quad (2.41)$$

Di mana:

Z_{SE} : Impedansi seri
 I_{SC} : Arus *short circuit* (A)
 V_{SC} : Tegangan *short circuit* (V)
 φ : sudut faktor daya

Impedansi seri Z_{SE} akan sama dengan:

$$Z_{SE} = R_{eq} + jX_{eq} \quad (2.42)$$

Di mana:

Z_{SE} : Impedansi seri
 R_{eq} : Reistansi ekivalent (Ω)
 X_{eq} : Reaktansi ekivalent (Ω)

Dan untuk menghitung tegangan ekivalen sisi sekunder adalah:

$$V_{p/a} = V_s + R_{eq}I_s + jX_{eq}I_s \quad (2.43)$$

Di mana:

$V_{p/a}$: Tegangan ekivalen sisi sekunder (V)
 V_s : Tegangan sekunder (V)
 R_{eq} : Reistansi ekivalent (Ω)
 X_{eq} : Reaktansi ekivalent (Ω)
 I_s : Arus beban penuh (A)

Dan untuk mencari rugi-rugi inti adalah

$$P_{inti} = \frac{V_{p/a}^2}{R_C/a^2} \quad (2.44)$$

Di mana:

$V_{p/a}$: Tegangan ekivalen sisi sekunder (V)
 R_C/a^2 : Resistansi inti sisi sekunder (Ω)

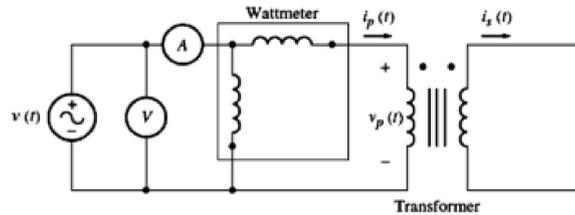
Sehingga, rugi-rugi daya total transformator dapat dituliskan sebagai

berikut:

$$P_{total} = P_{cu} + P_{inti} \quad (2.45)$$

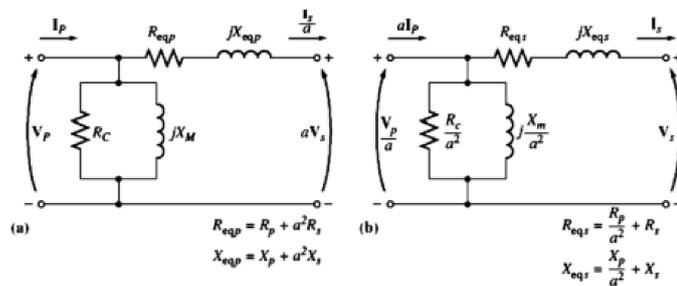
Di mana:

P_{total} :Rugi-rugi total (W)
 P_{cu} :Rugi-rugi tembaga (W)
 P_{inti} :Rugi-rugi inti (W)



Gambar 2. 9. Uji hubung singkat (Chapman, 2005)

Hasil perhitungan dapat digunakan untuk menentukan nilai pada rangkaian ekivalent seperti pada Gambar 2.10.



Gambar 2. 10. Rangkaian ekivalen sisi primer dan sisi sekunder (Chapman, 2005)

2.9. Rugi-Rugi di Saluran Distribusi

Saat listrik mengalir melalui penghantar, sebagian dayanya hilang menjadi panas karena adanya hambatan pada penghantar. rugi-ruginya akan semakin tinggi ketika semakin panjang jarak rendah tegangan salurannya (Syufrijal, 2014).

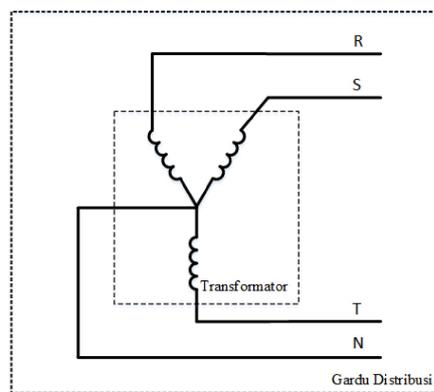
2.9.1. Arus Netral

Dalam sistem tiga fasa terhubung bintang, arus netral adalah jumlah dari tiga arus fasa (Glover, 2015). Menurut Stevenson (1983), sistem tiga fasa dengan

pembebanan seimbang dengan ketiga arus memiliki nilai yang sama dan masing-masing berbeda sudut 120° maka jumlah dari ketiga arus akan sama dengan nol.

Jika pembebanan tidak seimbang, jumlah arus tidak akan sama dengan nol sehingga akan ada arus yang mengalir pada penghantar netral (Stevenson, 1983).

Rangkaian sistem tiga fasa dengan netral dapat dilihat pada Gambar 2.11.



Gambar 2. 11 Rangkaian sistem tiga fasa terhubung bintang dengan netral

2.9.2. Rugi-Rugi Saluran distribusi Pada Kondisi Seimbang

Rugi-rugi daya di saluran distribusi adalah kuadrat arus dan resistansi penghantar yang merupakan representasi dari panjang penghantar (Syufrijal, 2014).

Rugi-rugi saluran distribusi pada saat kondisi seimbang adalah:

Untuk satu fasa

$$P_L = I_{\square}^2 \cdot R_L \quad (2.46)$$

Dan untuk tiga fasa

$$P_L = 3 \cdot I_{rata-rata}^2 \cdot R_L \quad (2.47)$$

Di mana:

- P :Rugi-rugi daya pada penghantar (W/km).
- I :Arus pada penghantar (A)
- $I_{Rata-rata}$:Arus rata-rata pada ketiga penghantar R, S, T (A)

R_L :Tahanan penghantar (Ω)

2.9.3. Rugi-Rugi Saluran distribusi Pada Kondisi Beban Tidak Seimbang

Menurut Pan *et al.*, (2018) pembebanan yang tidak seimbang akan menghasilkan arus netral yang mengalir di penghantar netral. Arus tersebut dapat menyebabkan rugi-rugi daya tambahan. Rugi-rugi saluran distribusi pada saat beban tidak seimbang adalah:

$$P_{UL} = (I_R^2 + I_S^2 + I_T^2) \times R_L + (I_n^2 \times R_n) \quad (2.48)$$

Di mana:

P_n :Rugi-rugi daya pada penghantar netral (W/km).
 I_n :Arus pada penghantar netral (A)
 R_n :Tahanan penghantar netral (Ω)

2.10. Efisiensi

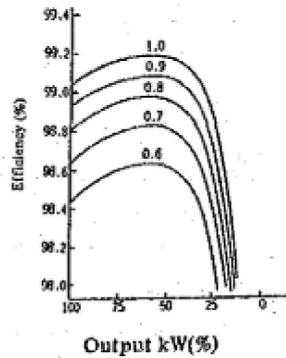
Efisiensi adalah perbandingan antara daya yang keluar dengan daya masuk ditambah rugi-rugi daya total (Chapman, 2005).

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in} + P_{total}} \times 100\% \quad (2.49)$$

Di mana:

η :Efisiensi (%)
 P_{out} :Daya saluran terhubung ke beban (Watt)
 P_{in} :Daya yang masuk ke saluran (Watt)
 P_{total} :Rugi-rugi daya total (W)

Efisiensi akan bervariasi terhadap faktor daya. Faktor daya yang buruk dapat mengurangi efisiensi seperti terlihat pada Gambar 2.12.



Gambar 2. 12. Hubungan Faktor Daya Dengan Efisiensi

2.11. Penelitian Terkait

Dalam pelaksanaan penelitian ini, terdapat beberapa penelitian terdahulu yang berkaitan dengan penelitian yang penulis lakukan sebagai dasar acuan.

No	Nama Peneliti & Tahun	Judul	Hasil
1	Pan, Benren Et Al., 2018	<i>Analysis And Research Of Three-Phase Unbalance In Distribution Transformers</i>	Pembebanan yang tidak seimbang akan meningkatkan rugi-rugi daya di transformator dan di saluran distribusi. Ketidakseimbangan juga menyebabkan drop tegangan meningkat. Selain itu, beban yang tidak seimbang dapat mengurangi usia pakai transformator.
2	Ignatius Et Al., 2015	<i>Analysis Of Copper Losses Due To Unbalanced Load In A Transformer (A Case Study Of New Idumagbo 2 X 15-Mva, 33/11-Kv Injection Substation)</i>	Beban Yang Tidak Seimbang Menghasilkan Rugi-Rugi Tembaga Yang Jauh Lebih Tinggi Dibandingkan Dengan Beban Yang Seimbang. Perbandingan Antara Kerugian Di Bawah Kondisi Pembebanan tidak seimbang Yang Ada Dan Kerugian Di Bawah Kondisi Pembebanan seimbang Menunjukkan Pentingnya Keseimbangan Beban Dalam Meminimalkan Kerugian Transformator Dan Mengoptimalkan Efisiensi Transformator.

No	Nama Peneliti & Tahun	Judul	Hasil
3	Kadir, Aszet. 2019	Analisis Pengaruh Pembebanan tidak seimbang Terhadap Efisiensi Transformator Daya Tiga Fasa Di PT. PLN (Persero) Rayon Daya	Ketidakseimbangan beban memengaruhi efisiensi transformator dan rugi-rugi daya. Ketidakseimbangan beban menyebabkan peningkatan rugi-rugi daya dan penurunan efisiensi transformator.
4	Dewi <i>et al.</i> , (2021)	Analisis Terjadinya Arus Netral Pada Transformator Distribusi 160 kVA	Transformator dengan pembebanan tidak seimbang dapat menyebabkan mengalirnya arus di netral transformator yang menyebabkan terjadinya rugi-rugi daya di mana arus mengalir ke penghantar netral
5	Sogen,, (2018)	Analisis Pengaruh Ketidakseimbangan Beban Terhadap Arus Netral Dan <i>Losses</i> Pada Transformator Distribusi Di PT. PLN (Persero) Area Sorong	Ketidakseimbangan beban pada suatu sistem distribusi tenaga listrik selalu terjadi. Akibat ketidakseimbangan beban tersebut timbulah arus di netral transformator. Arus yang mengalir di netral ini menyebabkan <i>losses</i> , yaitu <i>losses</i> akibat adanya arus netral pada penghantar netral.

Dari tinjauan beberapa jurnal penelitian yang disebutkan, belum ada yang secara khusus membahas dampak pengaruh persentase ketidakseimbangan beban (beban seimbang dan tidak seimbang) terhadap rugi-rugi daya baik rugi-rugi inti, rugi-rugi tembaga. Selain itu, pengaruh rugi-rugi daya terhadap suhu transformator juga dianalisis. Sehingga, penelitian yang dilakukan masih merupakan penelitian yang baru dan belum banyak dilakukan oleh peneliti sebelumnya.