

## **BAB II**

### **TINJAUAN PUSTAKA**

#### **A. Hasil Penelitian Terdahulu**

Penelitian yang dilakukan (Elnizar, 2021) tentang analisis rugi-rugi transformator daya 150/20 kV pada Gardu Induk Sutami ULTG Tarahan dirancang untuk memastikan tingkat pemborosan energi harian transformator selama periode 30 hari, sekaligus mencari tahu peningkatan proporsional kerugian ini relatif terhadap pergeseran dari arus beban normal ke arus beban tertinggi. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa Transformator 1 mengalami kerugian energi terbesarnya pada 23 Juli 2019, tercatat sebesar 4.588.204 kW. Untuk Transformator 2, kerugian energi paling signifikan terjadi pada 11 Juli 2019, mencapai 16.246.884 kW. Lebih lanjut, peningkatan arus dari tingkat normal ke puncaknya pada Transformator 1 menyebabkan peningkatan pemborosan energi sebesar 3,66%, sementara peningkatan arus yang sama pada Transformator 2 mengakibatkan peningkatan pemborosan energi sebesar 2,38%.

Penelitian yang dilakukan (Fadli, 2023) pada PLTG Teluk Lembu, Beban memberikan pengaruh yang besar terhadap umur transformator, karena jika pada salah satu fasa beban melebihi batas yang diperbolehkan dapat menyebabkan trafo akan meledak. PT. PLN PLTG Teluk Lembu mempunyai transformator dengan kapasitas 27 MVA yang beroperasi dari tahun 2011 dengan tegangan 150kV/11kV. Berdasarkan wawancara dengan

karyawan di PLTG Teluk Lembu, ada beberapa gangguan yang berpengaruh kepada transformator akibat meningkatnya suhu pada transformator yang berakibat pada umur transformator. Untuk mengatasi hal tersebut PLTG Teluk Lembu telah melakukan berbagai usaha dengan memindahkan sebagian beban pada (fasa) yang berat ke (fasa) yang lebih ringan, tetapi belum sampai menganalisa pengaruh pembebanan itu akan meningkatnya suhu dan mengurangi umur transformator. Dengan permasalahan tersebut, peneliti akan melakukan penelitian susut umur transformator menggunakan metode *trend linear* dengan melakukan peramalan terhadap beban 5 bulan sesudahnya pada transformator daya 3 27 MVA. Penelitian yang dilakukan ini ialah penelitian kuantitatif. Hasil Penelitian menunjukkan bahwa perkiraan sisa umur transformator adalah 9,43 tahun pada bulan Januari dengan peramalan pembebanan 19,2539 MVA. Selain itu, temperatur *hotspot* meningkat seiring dengan kenaikan beban yang menyebabkan semakin besarnya penyusutan umur transformator. Besar susut umur pada transformator yaitu sebesar 0,735 jam/hari dan perkiraan usia paling lama hingga tahun 2031.

Penelitian (Tiasmoro, 2021) tentang analisis pengaruh pembebanan terhadap efisiensi dan susut umur transformator step up 6kv / 70kV di PLTU Sumbawa Barat unit 1 dan 2 2×7 MW PT.PLN (persero) UPK Tambora bertujuan untuk mengetahui sejauh mana pengaruh faktor beban variabel terhadap kinerja dan penurunan umur transformator 6kV/70kV, sekaligus mengidentifikasi tingkat beban ideal untuk efisiensi puncak dan penurunan

umur minimal. Hasil penelitian menunjukkan bahwa PLTU Sumbawa Barat Unit 1 mencapai efisiensi maksimum sebesar 93,3% ketika menghasilkan daya 5,8 MW dari *input* 6,21 MW, berbeda dengan efisiensi minimumnya sebesar 83,9% pada *output* 5,5 MW dari *input* 6,55 MW. Demikian pula, PLTU Sumbawa Barat Unit 2 mencapai efisiensi tertingginya sebesar 95,7% dengan *output* daya 5,5 MW menggunakan daya *input* 5,75 MW, sementara efisiensi terendahnya tercatat sebesar 61,03% dengan *output* 3,3 MW dari *input* 5,41 MW. Secara bersamaan, hilangnya umur transformator di Unit 1 PLTU Sumbawa Barat mencapai 0,0469 jam per hari dengan beban rata-rata 5,8 MW, sementara Unit 2 mengalami hilangnya umur transformator sebesar 0,0311 jam per hari dengan beban rata-rata 5,2 MW. Tingkat pengurangan umur transformator bergantung pada beban yang diberikan; beban yang lebih besar berkaitan dengan pengurangan umur yang lebih besar. Lebih lanjut, Unit 1 beroperasi pada beban yang lebih tinggi daripada Unit 2, yang menjelaskan berkurangnya umur transformator yang diamati pada Unit 2. Lebih lanjut, tingkat beban yang paling efektif untuk operasi PLTU berada dalam kisaran 80-85% dari kapasitas maksimumnya.

Penelitian yang dilakukan (Setijasa, 2023) di Politeknik negeri Semarang memiliki tujuan untuk mengetahui seberapa baik kinerja transformator dan faktor-faktor apa saja yang memengaruhinya. Berdasarkan temuan penelitian, transformator mengalami beberapa jenis rugi-rugi, termasuk rugi-rugi tembaga, rugi-rugi inti, rugi-rugi arus eddy, dan rugi-rugi histeresis, serta distorsi harmonik dan masalah-masalah

lainnya. Karena jumlah rugi-rugi berbanding terbalik dengan efisiensi, rugi-rugi dapat menyebabkan penurunan efisiensi. Rugi-rugi arus eddy dan rugi-rugi histeresis membentuk rugi-rugi inti; dengan demikian, total rugi-rugi arus eddy dan rugi-rugi histeresis sama dengan nilai rugi-rugi inti. Suhu transformator meningkat seiring dengan meningkatnya beban yang ditanganinya, yang mengakibatkan rugi-rugi yang signifikan. Oleh karena itu, rugi-rugi dapat bertambah parah, yang akan menurunkan efisiensi transformator. Ketika rugi-rugi tembaga dan rugi-rugi inti sama pada beban tertentu, efisiensi maksimum tercapai. Harmonik memulainya frekuensi harmonik yang lebih besar daripada frekuensi kerja, yang menurunkan efisiensi transformator.

Penelitian (Tomi, 2023) pada Gardu Iinduk Ulee Kareng bertujuan untuk memastikan metode penghitungan resistansi, rugi-rugi besi ( $P_i$ ), penentuan daya semu, penentuan rugi-rugi tembaga ( $P_{cu}$ ), pemborosan transformator, dan efektivitas transformator. Berdasarkan kesimpulan penelitian, rata-rata daya agregat yang terdistribusi dalam transformator pada titik permintaan tertinggi di pagi dan sore hari, mulai tanggal 1 hingga 5 November 2022, adalah 21,94 kW dan 24,25 kW, secara berurutan. Selama periode 1 hingga 5 November, tingkat kinerja rata-rata transformator listrik pada waktu penggunaan tertinggi, baik pagi maupun sore hari, adalah 99,87%.

## B. Landasan Teori

Pada bagian ini terdiri dari teori-teori pendukung untuk penelitian ini, yang bertujuan untuk memberikan arahan kerja dari penelitian yang akan dilaksanakan.

Jaringan listrik terbagi menjadi beberapa fase, yang memungkinkan kita menggunakan energi listrik untuk berbagai keperluan. Salah satu komponen penting dalam penyaluran listrik kepada masyarakat adalah transformator step-down, yang terdapat di gardu induk distribusi untuk menyalurkan listrik ke rumah-rumah dan bisnis. Transformator daya adalah perangkat listrik yang berfungsi untuk memindahkan energi antar tingkat tegangan yang berbeda. Transformator daya dapat berfungsi sebagai transformator *step-up* maupun *step-down*.

### 1. Transformator

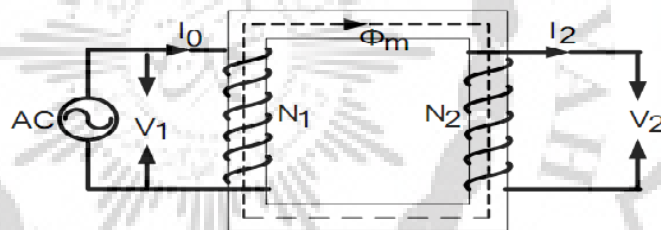
Trafo berfungsi sebagai perangkat yang mampu menyalurkan dan mengubah daya listrik antara dua rangkaian listrik, yang beroperasi pada frekuensi yang sama, memanfaatkan konsep dasar induksi elektromagnetik. (Sinay, 2017). Pada Gardu Induk, Trafo yang digunakan merupakan trafo tiga fasa.

Trafo tiga fasa bekerja dengan memindahkan listrik antar level tegangan, baik dengan menurunkan tegangan dari tinggi ke rendah maupun menaikkan tegangan dari rendah ke tinggi. Sesuai namanya, trafo jenis ini dirancang untuk bekerja dengan sistem tegangan tiga fasa.

Meskipun prinsip dasar trafo tiga fasa dan satu fasa serupa, perbedaan utamanya terletak pada jenis sistem kelistrikan yang digunakan: satu fasa atau tiga fasa. Oleh karena itu, pengkabelan trafo tiga fasa dapat diatur dalam beberapa cara, seperti konfigurasi bintang, segitiga, atau zig-zag. (Ambabunga, 2021).

#### a. Prinsip Kerja Transformator

Transformator merupakan salah satu jenis mesin listrik yang dikategorikan komponen statis karena tidak ada komponen yang bergerak. Alat ini juga menjadi alat penghubung antara sistem listrik satu ke sistem listrik yang lain.



Gambar 2.1 Prinsip Kerja Transformator

(Sumber : Mutiar,2025)

Pada Gambar 2.1 menggambarkan tentang trafo yang terdiri dari dua kumparan yang menggunakan induktansi, yang dikenal sebagai kumparan primer dan sekunder. Meskipun kumparan-kumparan ini tidak terhubung oleh sambungan listrik apa pun, keduanya terhubung secara magnetis melalui jalur yang dirancang untuk meminimalkan resistansi magnetik. Ketika kumparan primer menerima daya dari sumber tegangan yang bergantian, inti laminasi

mengalami medan magnet yang berfluktuasi, dan karena kumparan-kumparan tersebut menciptakan rangkaian yang lengkap, arus primer mulai mengalir. Medan magnet pada kumparan primer menyebabkan induksi di dalam kumparan tersebut, yang dikenal sebagai *Self Induction*. Induksi juga terjadi pada kumparan sekunder karena efek induksi kumparan primer, yang disebut induksi bersama. Proses ini menciptakan fluks magnet pada kumparan sekunder, yang menyebabkan aliran arus jika terdapat beban pada rangkaian sekunder, yang memungkinkan penyaluran energi listrik melalui magnetisasi.

#### **b. Komponen Transformator**

Pada Transformator daya ada beberapa bagian-bagian transformator yang semuanya memegang peranan penting, diantaranya:

- 1) Kumparan Trafo

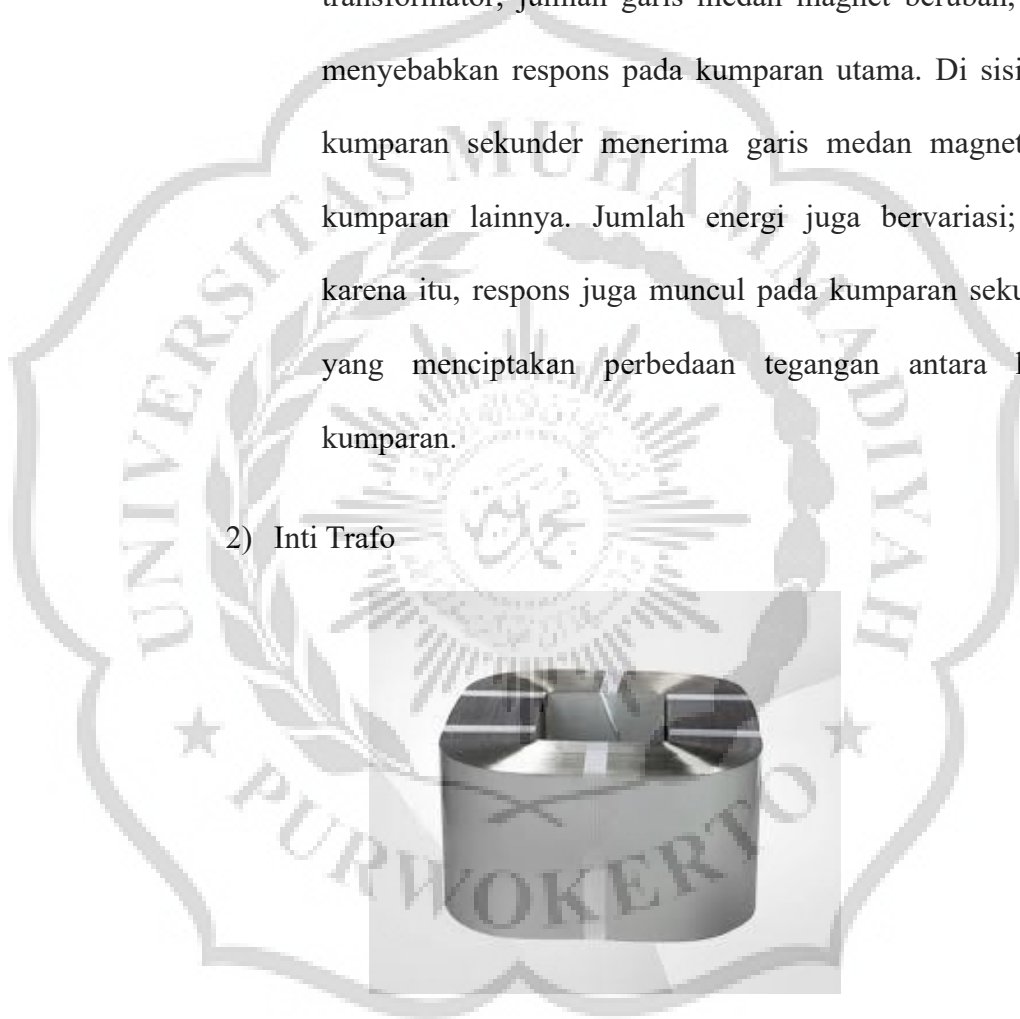


Gambar 2. 2 Kumparan Trafo

(Sumber : Nurhidayat, 2023)

Pada Gambar 2.2 merupakan bentuk dari kumparan trafo. Sebuah transformator terdiri dari dua kumparan, kumparan primer dan kumparan sekunder. Arus bolak-balik mengalir melalui salah satu kumparan di dalam transformator; jumlah garis medan magnet berubah, yang menyebabkan respons pada kumparan utama. Di sisi lain, kumparan sekunder menerima garis medan magnet dari kumparan lainnya. Jumlah energi juga bervariasi; oleh karena itu, respons juga muncul pada kumparan sekunder, yang menciptakan perbedaan tegangan antara kedua kumparan.

## 2) Inti Trafo



Gambar 2. 3 Inti Trafo

(Sumber : Nurhidayat, 2023)

Pada Gambar 2.3 menggambarkan bagaimana inti trafo terlihat. Dilihat dari segi universal, pusat trafo terdiri atas 2 jenis, yaitu varian inti dan varian cangkang. Varian inti menggunakan

rangka besi berbentuk persegi yang memberikan pelindung, dan lilitan transformator diposisikan mengelilingi kedua sisi persegi tersebut. Sebaliknya, varian cangkang memiliki rangka pusat berpelindung. Lebih lanjut, lilitan transformator dililitkan mengelilingi lokasi pusat ini. Dalam hal ketahanan terhadap tegangan akibat hubung singkat, transformator tipe cangkang umumnya menunjukkan stabilitas yang lebih baik dibandingkan transformator tipe inti.

### 3) Minyak Trafo



Gambar 2. 4 Minyak Trafo

(Sumber : Nurhidayat, 2023)

Pada Gambar 2.4 merupakan minyak trafo. komponen penting untuk menjaga suhu optimal dengan menyebarkan panas yang dihasilkan dari energi yang hilang, sekaligus melindungi unit. Komposisi minyak trafo meliputi unsur-unsur seperti naftalin, lilin, dan senyawa aromatik.

#### 4) Bushing



Gambar 2. 5 Bushing Trafo  
(Sumber : Nurhidayat, 2023)

Pada Gambar 2.5 merupakan bentuk dari bushing trafo yang berfungsi sebagai saluran yang memfasilitasi transmisi energi listrik dari kumparan internal ke sistem kelistrikan eksternal. Bushing terdiri dari elemen konduktif yang terbungkus dalam bahan isolasi. Komponen isolasi ini memastikan adanya pemisahan antara konduktor bertegangan pada bushing dan struktur logam primer transformator itu sendiri.

#### 5) Pendingin Transformator

Terdapat sebagian jenis pendingin pada transformator ialah

##### a) ONAN (*Oil Natural Air Natural*)

Sistem pendingin ini memakai perputaran minyak serta perputaran hawa secara alamiah. Sirkulasi minyak yang

terjalin diakibatkan oleh perbandingan berat tipe antara minyak yang dingin dengan minyak yang panas.

b) ONAF (*Oil Natural Air Force*)

Sirkulasi oli digunakan dalam sistem pendingin ini.

Biasanya, kipas yang ditenagai motor listrik digunakan untuk mengalirkan udara dengan cara paksaan. Biasanya, cara ini berhasil! Hanya sebagian kipas yang menyala ketika transformator dinyalakan dengan ONAN atau ONAF, tergantung pada seberapa tinggi suhu transformator meningkat, hingga kipas lainnya menyala secara bertahap.

c) OFAF (*Oil Force Air Force*)

Pada sistem ini, perputaran minyak digerakkan dengan memakai kekuatan pompa, sebaliknya perputaran hawa memakai kipas angin.

Tabel 2. 1 Sistem Pendingin

No	Sistem Pendingin	Dalam Trafo		Diluar Trafo	
		Sirkulasi Alami	Sirkulasi Paksa	Sirkulasi Alami	Sirkulasi Paksa
1	AN	-	-	Udara	-
2	AF	-	-	-	Udara
3	ONAN	Minyak	-	Udara	-
4	ONAF	Minyak	-	-	Udara
5	OFAN	-	Minyak	Udara	-
6	OFAF	-	Minyak	-	Udara
7	OFWF	-	Minyak	-	Air
8	ONAN/ONAF	Kombinasi 3 dan 4			
9	ONAN/OFAN	Kombinasi 3 dan 5			
10	ONAN/OFAf	Kombinasi 3 dan 6			
11	ONAN/OFWF	Kombinasi 3 dan 7			

(Sumber : IEC 60076)

### c. Arus Rata-Rata

Arus rata-rata sekunder transformator adalah nilai arus listrik pada sisi keluaran (sekunder) transformator yang diperoleh dengan menghitung rerata dari arus sesaat atau arus terukur dalam periode waktu tertentu. Nilai ini menggambarkan besarnya arus beban yang secara umum mengalir pada sisi sekunder selama rentang pengamatan.

$$I_{avg} = \frac{IR+IS+IT}{3} \quad (2.1)$$

Keterangan :

$I_{avg}$  = Arus Rata-rata

$IR$  = Arus pada Fasa R

$IS$  = Arus pada fasa S

$IT$  = Arus pada fasa T

### d. Rugi-rugi Transformator

Rugi – rugi daya transformator terdiri dari rugi inti atau rugi besi serta rugi tembaga yang terdapat di kumparan primer dan sekunder. Untuk mengurangi kerugian besi, inti besi dengan penampang yang cukup besar harus diambil agar fluks magnet dapat mengalir dengan mudah di dalamnya. Agar mengurangi kerugian tembaga, diperlukan kawat tembaga dengan penampang yang cukup besar untuk menghantarkan arus listrik yang dibutuhkan.

Rugi daya pada trafo terdiri dari rugi tembaga dan rugi inti yang dimana dapat ditulis dengan persamaan berikut :

$$P_{loss} = P_{cu} + P_i \quad (2.2)$$

Keterangan:

$P_{loss}$  = Rugi daya trafo (W)

$P_{cu}$  = Rugi Tembaga (W)

$P_i$  = Rugi Inti Besi (W)

### 1) Rugi Tembaga

Rugi-rugi tembaga terjadi karena adanya hambatan pada belitan. Kerugian tembaga akan langsung relatif terhadap ukuran tumpukan sehingga meningkatkan arus tumpukan juga akan meningkatkan kerugian tembaga. Ada dua persamaan untuk mencari nilai rugi tembaga diantaranya.

a) Jika diketahui nilai hambatannya

$$P_{cu} = I^2 R \quad (2.3)$$

Keterangan:

$P_{cu}$  = Rugi Tembaga (W)

$I$  = Arus pada tembaga (A)

$R$  = Hambatan Tembaga (R)

b) Jika tidak diketahui nilai hambatannya

$$Pt2 = \left(\frac{S2}{S1}\right)^2 \times Pt1 \quad (2.4)$$

Keterangan :

Pt2 : Rugi Tembaga Saat Beban Tertentu (MW)

Pt1 : Rugi Tembaga Saat Beban Penuh (MW)

S1 : Nilai Nominal Transformator (MVA)

S2 : Beban Yang Dioperasikan (MVA)

## 2) Rugi Inti

Rugi Inti Adalah rugi yang dihasilkan trafo dalam kondisi tanpa beban, dan dalam hal ini tidak bisa diamati secara langsung dikarenakan trafo pada Gardu Induk sudah terkoneksi dengan jaringan distribusi. Besarnya rugi inti ialah sama atau tidak bergantung pada beban yang dioperasikan. Oleh karena itu untuk mengetahui nilai rugi inti dan rugi tembaga penuh dapat dilihat pada Tabel 2.2 berikut.

Tabel 2. 2 Spesifikasi Teknik Transformator

Rating Tegangan	Daya pengenal	Rugi beban nol	Arus beban nol	Rugi beban penuh (75°C)	Impedansi (75°C)	Rugi tegangan pada faktor daya 1,0	Rugi tegangan pada faktor daya 0,8	Efisiensi pada faktor daya 1,0	Efisiensi pada faktor daya 0,8
V	MVA	kW	%	kW	%	%	%	%	%
66/20	5	6	1.5	32	7.5	0.92	5.15	99.25	99.06
	6.3	6.7	1.3	36	7.5	0.85	6.61	99.53	99.41
	10	7.5	1.0	48	10	0.93	6.61	99.53	99.41
	16	9.6	0.9	63	10	0.86	6.77	99.61	99.49
	20	12.8	0.8	77.5	12.5	1.16	8.24	99.60	99.44
	30	20	0.8	100	12.5	1.11	8.24	99.60	99.44
150/20	10	8.5	1.0	42	10	0.92	6.63	99.50	99.37
	20	13	0.85	72	12.5	1.16	8.02	99.45	99.27
	30	23	0.9	103	12.5	1.15	8.65	99.47	99.29
	60	38	0.95	155	12.5	1.18	8.67	99.49	99.31
150/66	30	25	0.9	107	12.5	1.14	8.26	99.56	99.43
	60	39	0.9	225	12.5	1.16	8.27	99.56	99.43
	100	42	0.9	330	12.5	1.16	8.27	99.56	99.43
500/150	500	98	0.45	349	13	0.91	8.39	99.91	99.89

(Sumber : SPLN 1997)

Rugi-rugi inti tersusun dari 2 jenis rugi. Rugi Histeris dan Rugi Arus Eddy, dan Persamaan Rugi inti dapat ditulis dengan rumus berikut.

$$P_i = P_h + P_e \quad (2.5)$$

Keterangan :

$P_i$  = Rugi Inti Besi (W)

$P_h$  = Rugi Histeris (W)

$P_e$  = Rugi Arus Eddy (W)

#### a) Rugi Histeris ( $P_h$ )

Rugi histeresis adalah rugi yang diakibatkan oleh gerakan memutar pada bagian tengah besi. Pada besi yang mengalami transisi substitusi, rugi histeresis per siklus relatif

terhadap wilayah lingkaran histeresis. Rugi histeris dapat ditulis dengan rumus berikut.

$$P_h = K_h \cdot f \cdot B_{max} \quad (2.6)$$

Keterangan :

Ph = Rugi Histeris (W)

Kh = Konstanta

F = Frekuensi (Hz)

Bmax = Fluks maksimum magnetik (Wb/m<sup>2</sup>)

#### **b) Rugi Arus Eddy**

Rugi ini disebabkan oleh aksi yang sedang berlangsung di tengah. Arus pusar tidak sepenuhnya terbentuk oleh tegangan yang dipicu di tengahnya yang membuat penyesuaian transisi yang menarik. Pada dasarnya, tegangan yang diminta pada setrika setara dengan tegangan pada trafo. Dapat dibayangkan bahwa setiap pelat besi merupakan opsional yang dihubungkan pendek. sampai EMF yang diminta di tengah akan relatif terhadap gerak. Persamaan rugi arus eddy dapat ditulis dengan rumus berikut.

$$P_e = K_e \cdot f^2 \cdot B_m^2 \quad (2.7)$$

Keterangan :

Ph = Rugi Histeris (W)

Ke = Konstanta

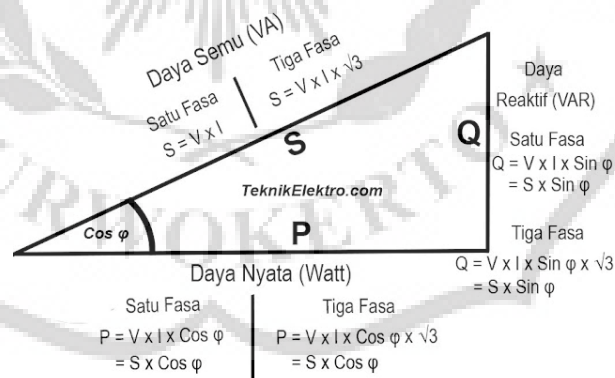
F = Frekuensi (Hz)

B = Fluks Magnetik (Wb/m<sup>2</sup>)

### e. Daya Listrik

#### 1) Segitiga Daya

Untuk memudahkan memahami konsep segitiga daya dimana adalah hubungan antara daya semu, daya nyata, dan daya reaktif. Dan bisa dilambangkan seperti Gambar 2.6 berikut.



Gambar 2. 6 Segitiga Daya

(Sumber : Jamilah, 2022)

Daya listrik didefinisikan sebagai laju hantaran energi listrik dalam sirkuit listrik. Daya Listrik dapat dibagi menjadi 3 macam yang dikenal dengan segitiga daya, yaitu sebagai berikut:

a) Daya Semu (S)

Daya semu merupakan daya listrik yang melalui suatu penghantar transmisi atau distribusi. Daya ini merupakan hasil perkalian antara tegangan dan arus yang melalui penghantar.

- *Line To Netral* (1 Fasa)

$$S = V \times I \quad (2.8)$$

- *Line To Line* (3 Fasa)

$$S = \sqrt{3} \times V \times I \quad (2.9)$$

Keterangan:

S = Daya Semu (VA)

V = Tegangan (Volt)

I = Arus (Ampere)

b) Daya Nyata (P)

Daya nyata merupakan daya listrik yang digunakan untuk keperluan menggerakkan mesin-mesin listrik atau peralatan lainnya.

- *Line To Netral* (1 FASA)

$$P = V \times I \times \cos \phi \quad (2.10)$$

- *Line To Line* (3 FASA)

$$P = \sqrt{3} \times V \times I \times \cos \phi \quad (2.11)$$

Keterangan:

P = Daya Nyata (Watt)

V = Tegangan (Volt)

I = Arus (Ampere)

$\cos \phi$  = Faktor Daya

c) Daya Reaktif (Q)

Daya reaktif merupakan selisih antara daya semu yang masuk pada penghantar dengan daya aktif pada penghantar itu sendiri, dimana daya ini terpakai untuk daya mekanik dan panas. Daya reaktif ini adalah hasil kali antara besarnya arus dan tegangan yang dipengaruhi oleh faktor daya.

- *Line To Netral* (1 Fasa)

$$Q = V \times I \times \sin \phi \quad (2.12)$$

- *Line To Line* (3 Fasa)

$$Q = \sqrt{3} \times V \times I \times \sin \phi \quad (2.14)$$

Keterangan:

Q = Daya Reaktif (VAR)

V = Tegangan (Volt)

I = Arus (Ampere)

Sin  $\phi$  = Faktor Daya

#### f. Faktor Daya

Faktor daya adalah perbandingan antara daya aktif (P) dengan daya semu (S) pada suatu sistem tenaga listrik. Faktor daya menunjukkan tingkat keefektifan pemakaian daya listrik dalam suatu beban.

$$\cos \phi = \frac{P}{S} \quad (2.14)$$

Keterangan :

$\cos \phi$  = Faktor Daya

$P$  = Daya Nyata (W)

$S$  = Daya Semu (VA)

#### g. Efisiensi Transformator

Efisiensi Transformator Daya dapat didefinisikan sebagai perbandingan antara daya keluaran ( $P_{out}$ ) dengan daya masukan ( $P_{in}$ ). Ditulis dengan persamaan berikut.

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{out} + \sum \text{rugi}} \times 100\% \quad (2.15)$$

Keterangan :

$\eta$  = Efisiensi

$P_{out}$  = Daya Keluaran

$\sum \text{rugi}$  =  $P_i + P_{cu}$

Transformator yang ideal adalah transformator yang memiliki nilai efisiensi 100%, yang berarti transformator tersebut tidak kehilangan daya sama sekali dalam proses transformasi daya dari tegangan tinggi menjadi tegangan menengah. Namun transformator yang ideal ini hampir tidak ada karena adanya faktor rugi – rugi yang terjadi pada transformator, faktor tersebut antara lain dari rugi inti besi atau *core loss* dan faktor rugi dari belitan tembaga atau *copper loss*. Kerugian atau kehilangan daya pada transformator ini disebabkan oleh dua faktor utama tersebut, kerugian daya atau kehilangan daya pada transformator ini disebut juga dengan rugi daya atau *power loss*.

## **2. Cost Losses Transformator**

### **a. Harga Tarif Energi Listrik**

Dalam masa perkembangan industri dan ekonomi yang pesat, permintaan terhadap energi listrik meningkat secara tajam. Listrik bukan sekadar kebutuhan pokok masyarakat, melainkan juga faktor strategis yang berperan penting dalam menunjang pembangunan nasional serta meningkatkan kesejahteraan sosial.(Hasanudin, 2025)

Dengan demikian kebutuhan energi yang akan dipakai pasti akan berbeda beda sesuai dengan kebutuhan konsumen. Oleh karena itu, Perusahaan Listrik Negara atau PLN membuat golongan-

golongan tarif listrik sesuai dengan kebutuhan pelanggan. Sebagai contoh, golongan rumah tangga, bisnis, sosial, dan lain lain.

Menurut (Ulinuha, 2025), biaya tarif listrik yang digunakan dalam menganalisis kerugian biaya transformator daya yaitu sebesar Rp. 1.440,7 per kWh.

#### **b. Menghitung Rugi Energi perhari**

Dikarenakan dibutuhkan data selama sehari dalam waktu perjamnya, dan dengan data pembebanan yang hanya ada dalam waktu beban puncak saja yaitu pada pukul 10.00 WIB dan pukul 19.00 WIB, oleh karena itu memakai perhitungan interval waktu yang mana bisa dihitung antara interval waktu ke waktu yang lain.

Untuk periode satu yaitu jarak waktu dari pukul 10.00 sampai pukul 19.00 adalah 9 jam, dan untuk periode dua yaitu jarak waktu dari pukul 19.00 sampai pukul 10.00 adalah 15 jam.

1) Pukul 10.00 WIB :

$$E_1 = Pcu Total \times 9 \quad (2.16)$$

2) Pukul 19.00 WIB :

$$E_2 = Pcu Total \times 15 \quad (2.17)$$

### c. Menghitung Energi Rugi Beban Harian

Rugi beban harian merupakan rugi rugi yang ditimbulkan akibat operasional transformator dalam sehari.

Untuk menghitung energi rugi beban harian dapat menggunakan persamaan berikut :

$$E_{cu,total} = E_1 + E_2 \quad (2.18)$$

Keterangan :

$E_{cu,total}$  = energi rugi beban harian (kWh)

$E_1$  = energi rugi beban periode satu (10.00 – 19.00)

$E_2$  = energi rugi beban periode dua (19.00 – 10.00)

### d. Menghitung Biaya Energi Rugi Inti

Rugi inti harian merupakan rugi yang ditimbulkan akibat rugi pada inti besi transformator dalam kurun waktu satu hari. Besar rugi inti yang dihasilkan dari transformator berkapasitas daya 60 MVA sebesar 38 kW. Nilai ini terlihat dalam Tabel 4.1. Perrhitungan rugi inti dalam satu hari bisa dihitung dengan rumus berikut ini:

$$E_i = P_{core} \times t \quad (2.19)$$

Keterangan :

$E_i$  = energi rugi inti (kWh)

$P_{core}$  = rugi inti trafo (W)

$t$  = jumlah jam per hari

Menurut (Fikri, 2024) dalam penelitiannya menyebutkan bahwa tarif energi listrik sebesar Rp 1.444,70 / kWh. Oleh karena itu biaya rugi inti perhari dapat dihitung dengan

$$Biaya_i = E_i \times \text{Rp } 1.444,70 \quad (2.20)$$

Keterangan :

$Biaya_i$  = Jumlah biaya dari rugi inti trafo (Rp.)

$E_i$  = energi rugi inti trafo(kWh)

**e. Menghitung Biaya Rugi Beban Trafo**

$$Biaya_{cu} = \text{Rp } 1.444,70 \times E_{cu} \quad (2.21)$$

Keterangan :

$Biaya_{cu}$  = Jumlah biaya rugi beban trafo (Rp)

$E_{cu}$  = energi rugi beban trafo (kWh)

**f. Menghitung Biaya Rugi Energi Total Trafo**

$$Biaya_{total} = Biaya_i + Biaya_{cu} \quad (2.22)$$

Keterangan :

$Biaya_{total}$  = biaya energi total trafo (kWh)

$Biaya_i$  = biaya energi inti trafo (kWh)

$Biaya_{cu}$  = biaya energi beban trafo (kWh)

### **3. Perkiraan Umur Transformator**

#### **a. Pengaruh pembebanan dan suhu terhadap transformator daya**

Dalam pengoperasian suatu transformator distribusi tentunya banyak hal yang dapat terjadi dan mempengaruhi kondisi atau umur transformator. (Kodoati, 2015)

Untuk itu dilakukan upaya-upaya yang dapat mempertahankan umur transformator, seperti pemasangan transformator harus sesuai standar konstruksi, secara rutin melakukan manajemen transformator untuk memantau kondisi transformator, melakukan pengujian dan pemeliharaan transformator secara berkala, mengevaluasi hasil pengukuran beban transformator, melakukan pemerataan beban transformator, mengganti *fuse link* sesuai standar yang berlaku dan sesuai dengan kapasitas transformator, dan melakukan mutasi transformator untuk mengatasi pembebanan lebih.

#### **b. Kenaikan Beban**

Transformator dalam keadaan bertegangan dan belum dibebani akan timbul rugi-rugi yang dapat menimbulkan kondisi trafo tersebut panas, namun panas yang timbul kecil Transformator mempunyai batas panas yang diijinkan sesuai dengan klas isolasi spesifikasi trafo. Demikian juga minyak isolasi trafo mempunyai batas panas yang diijinkan. Apabila panas-panas tersebut dilampaui

maka isolasi akan rusak dan secara keseluruhan transformator tersebut akan rusak. Panas tersebut harus direduksi dengan memasang sistem pendingin.(Juliansyah, 2018)

Untuk mengetahui tentang seberapa besar persentase pembebanan trafo menggunakan rumus berikut :

$$\%load = \frac{Daya\ Terpakai}{Daya\ Terpasang} \times 100\% \quad (2.23)$$

Untuk mengetahui *ratio* pembebanan menurut (Indian Standards, 1972) bisa menggunakan persamaan berikut :

$$K = \frac{S}{Sr} \quad (2.24)$$

Keterangan :

K = *Ratio* Pembebanan

S = Persentase Pembebanan

Sr = Pembebanan Penuh = 100%

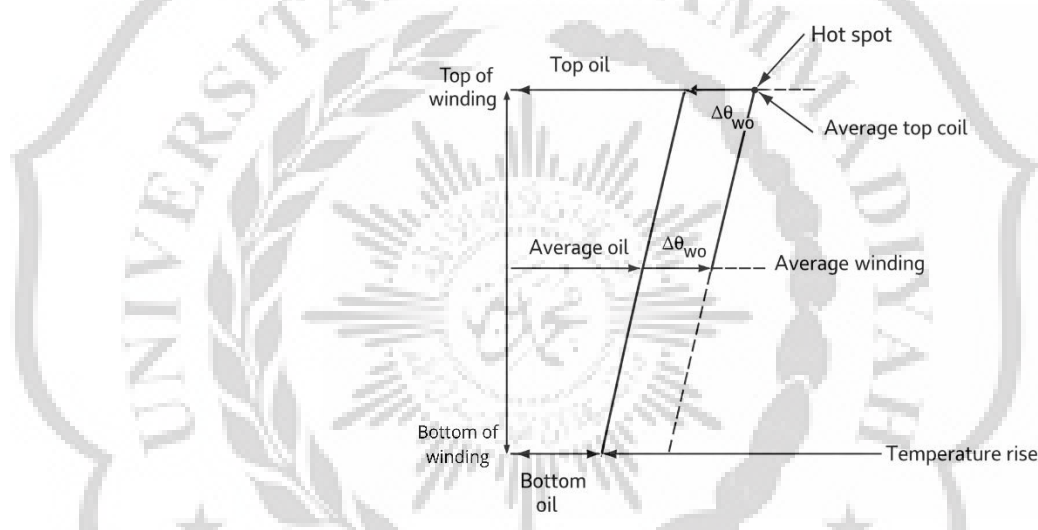
### c. Kondisi untuk nilai daya tertentu

#### 1) Sirkulasi minyak alami

Transformator daya mengalami berbagai kondisi operasional yang dipengaruhi oleh beban dan suhu lingkungan. Salah satu kondisi penting terjadi saat transformator beroperasi pada nilai daya tertentu, di mana akan muncul kenaikan suhu pada beberapa bagian, seperti suhu rata-rata kumparan, suhu rata-rata minyak, selisih antara keduanya, serta kenaikan suhu minyak di bagian atas tangki (*top oil*).

Menurut standar (IEC, 2011), nilai-nilai tersebut dapat diketahui sebagai berikut:

- Kenaikan rata-rata kumparan =  $65^{\circ}\text{C}$
- Kenaikan temperatur *top oil* =  $55^{\circ}\text{C}$
- Kenaikan temperatur rata-rata minyak =  $45^{\circ}\text{C}$
- Selisih antara kenaikan rata-rata suhu kumparan dengan rata-rata kenaikan suhu minyak ( $\Delta\theta_{wo}$ ) =  $21^{\circ}\text{C}$



Gambar 2. 7 Skema Thermal Transformator

(Sumber : Burhan, 2023)

Kenaikan suhu minyak di bagian atas (*top oil*) yang diukur saat pengujian tidak sama dengan suhu minyak yang keluar langsung dari kumparan. Hal ini terjadi karena minyak di bagian atas merupakan campuran dari sebagian minyak yang beredar di sepanjang kumparan. Namun, perbedaan suhu tersebut dianggap tidak terlalu besar sehingga metode pengujian tetap dianggap valid.

Menurut (Muzar, 2018), metode ini dijabarkan menjadi:

- Suhu minyak naik secara bertahap (linear) mengikuti jalur kumparan.
- Rata-rata kenaikan suhu minyak dianggap sama untuk semua kumparan dalam satu kolom.
- Selisih suhu antara minyak di bagian atas kumparan (dianggap sama dengan suhu di puncak) dan minyak di bagian bawah kumparan (dianggap sama dengan suhu di pendingin) dianggap sama untuk semua bagian kumparan.
- Kenaikan suhu rata-rata tembaga di setiap posisi di atas kumparan juga naik secara linear, sejalan dengan kenaikan suhu minyak. Bedanya, ada selisih konstan  $\Delta\theta_{WO}$ , yaitu perbedaan antara kenaikan suhu rata-rata tembaga dan kenaikan suhu rata-rata minyak.
- Suhu rata-rata di puncak kumparan dihitung sebagai kenaikan suhu rata-rata minyak ditambah  $\Delta\theta_{WO}$ .
- Suhu *hotspot* (titik terpanas) lebih tinggi daripada suhu rata-rata di puncak kumparan. Untuk menghitung selisihnya,  $\Delta\theta_{WO}$  diasumsikan bernilai 0,1 pada sirkulasi minyak alami. Dengan asumsi ini, kenaikan suhu *hotspot* setara dengan kenaikan suhu *top oil* ditambah  $1,1 \times \Delta\theta_{WO}$ .

## 2) Sirkulasi minyak paksaan

Pada transformator, suhu minyak di bagian masuk (inlet) dan keluar (outlet) memang berbeda, tetapi perbedaan ini biasanya kecil jika dibandingkan dengan sistem pendinginan alami. Jika kenaikan suhu rata-rata belitan tercatat 65 °C, maka suhu titik terpanas (*hotspot*) biasanya tidak lebih dari 75 °C.

Untuk menjaga keamanan, standar masih memperbolehkan adanya tambahan 13°C di atas suhu rata-rata belitan (65°C), sehingga *hotspot* bisa mencapai nilai tertentu tanpa merusak isolasi.

Dalam sistem pendinginan paksa, arus kerja yang dipakai biasanya lebih tinggi dibanding sistem alami. Hal ini lebih ekonomis karena bisa menghasilkan kenaikan suhu minyak rata-rata dan nilai  $\Delta\theta_{WO}$  (selisih suhu belitan–minyak) yang lebih besar. Oleh karena itu, dalam perhitungan sering diasumsikan bahwa kenaikan suhu minyak (top-oil) adalah sekitar 40 °C, sedangkan kenaikan suhu *hotspot* mencapai 78 °C pada daya pengenal transformator. Menurut (Sigid, 2008) untuk menentukan nilai kenaikan temperatur *hotspot*  $\Delta\theta_{cr}$  dapat menggunakan persamaan :

$$\Delta\theta_{cr} = \Delta\theta_b + (\Delta\theta_{cr} - \Delta\theta_b) \quad (2.25)$$

$$\Delta\theta_{cr} = 40 + 38$$

$$\Delta\theta_{cr} = 78^{\circ}C$$

#### d. Kondisi Transformator

##### 1) Kenaikan temperatur konstan *top oil*

Dalam pengoperasian transformator daya, kenaikan temperatur minyak isolasi di bagian atas tangki (*top oil*) merupakan indikator penting dalam analisis termal dan keandalan sistem. Ketika transformator beroperasi dalam kondisi beban stabil, rugi-rugi listrik yang terjadi—baik rugi inti maupun rugi beban—akan dikonversi menjadi panas yang menyebabkan suhu minyak meningkat.

$$\Delta\theta_b = \Delta\theta_{br} \left( \frac{1+dk^2}{1+d} \right)^x \quad (2.26)$$

Keterangan :

k = *Ratio* Pembebanan

d = Perbandingan rugi tembaga daya pengenal dengan rugi beban nol

x = Konstanta

x = 0,9 (untuk ONAN atau ONAF)

x = 0,8 (untuk OFAF atau OFWF)

$\Delta\theta_{br}$  = 55°C untuk tipe ON, dan nilai

$\Delta\theta_{br}$  = 40° untuk tipe OF

## 2) Kenaikan Temperatur *Hotspot*

Dalam sistem transformator daya, titik panas (*hotspot*) pada belitan merupakan area dengan suhu tertinggi yang muncul akibat akumulasi rugi-rugi listrik dan distribusi termal yang tidak merata. Kenaikan temperatur pada titik ini, yang disebut sebagai kenaikan temperatur *hotspot*, menjadi parameter krusial dalam menilai keandalan termal dan umur pakai isolasi belitan.

$$\Delta\theta h = \Delta\theta b + (\Delta\theta_{cr} - \Delta\theta_{br})k^2y \quad (2.27)$$

$$\Delta\theta h = \Delta\theta b \left( \frac{1+dk^2}{1+d} \right)^2 + (\Delta\theta_{cr} - \Delta\theta_{br})k^2y \quad (2.28)$$

Keterangan :

$$\Delta\theta_{cr} = 78^\circ\text{C}$$

d = Perbandingan rugi tembaga daya pengenal dengan rugi beban nol

y = konstanta

y = 0,8 (ONAN dan ONAF)

y = 0,9 (OFAF dan OFWF)

$\Delta\theta_{br}$  = temperature ( $^\circ\text{C}$ )

$\Delta\theta_{br}$  =  $55^\circ\text{C}$  (keadaan ON)

$\Delta\theta_{br}$  =  $40^\circ\text{C}$  (keadaan OFF)

### 3) Kenaikan Temperatur *Top Oil* Untuk Beban yang Berubah

Dalam operasi transformator tenaga, kondisi beban yang diterima tidak selalu konstan, melainkan dapat berubah-ubah sesuai kebutuhan sistem listrik. Perubahan beban ini secara langsung memengaruhi besarnya rugi-rugi listrik yang terjadi pada kumparan maupun inti transformator. Akibatnya, panas yang dihasilkan juga mengalami fluktuasi dan berdampak pada temperatur minyak isolasi, khususnya pada bagian atas tangki yang dikenal sebagai *top oil* temperature. Pemantauan kenaikan temperatur *top oil* menjadi penting karena nilai ini mencerminkan respon termal transformator terhadap variasi beban, sekaligus menjadi indikator utama dalam menilai keandalan dan umur pakai peralatan. (Hu, 2025).

Untuk menemukan nilai kenaikan temperatur *top oil* untuk beban yang berubah  $\Delta\theta_{on}$ , digunakan persamaan berikut:

$$\Delta\theta_{on} = \Delta\theta_{o(n-1)} + \{\Delta\theta_b - \Delta\theta_{o(n-1)}\} \left(1 - \varepsilon^{-\frac{t}{\tau}}\right) \quad (2.29)$$

Keterangan :

$\Delta\theta_o(n - 1)$  = Kenaikan temperature awal minyak

$\Delta\theta_b$  = Kenaikan temperature konstan  
minyak

$t$  = Waktu dalam jam

$\tau$  = Kontanta waktu minyak dalam jam

$\tau$  = 3 (ONAN dan ONAF)

$\tau$  = 2 (OFAF dan OFWF)

$\varepsilon$  = 2,71

e. Selisih Temperatur *Hotspot* dengan Temperatur *Top Oil*

( $\Delta\theta_{td}$ )

Untuk menghitung nilai selisih temperatur *hotspot* dengan *top oil* dapat menggunakan rumus dibawah ini :

$$\Delta\theta_{td} = (\Delta\theta_{cr} - \Delta\theta_{br})k^{2y} \quad (2.30)$$

Keterangan :

$\Delta\theta_{td}$  = Selisih *temperature* antara *hotspot* dengan *top oil* (°C)

$\Delta\theta_{cr}$  = 78°C

$\Delta\theta_{br}$  = 55°C

$k$  = *ratio* pembebanan

$y$  = konstanta

$y$  = 0,8 (untuk ONAN dan ONAF)

$y$  = 0,9 (untuk OFAF dan OFWF)

#### f. Temperatur *Hotspot*

Untuk menemukan nilai temperature *hotspot*  $\theta_c$ , dapat menggunakan persamaan berikut ini :

$$\theta_h = \theta_a + \Delta\theta_{on} + \Delta\theta_{td} \quad (2.31)$$

Keterangan :

$\theta_h$  = temperatur *hotspot* (°C)

$\theta_a$  = tempatur maksimum *ambient* (°C)

$\Delta\theta_{on}$  = kenaikan tempeatur *top oil*

$\Delta\theta_{td}$  = selisih temperatur *hotspot* dengan *top oil*

#### g. Laju Penuaan Thermal Relatif

Laju penuaan thermal relatif pada transformator merupakan konsep yang menjelaskan percepatan degradasi isolasi akibat kenaikan suhu belitan dibandingkan dengan kondisi referensi standar. Prinsip ini berlandaskan hukum Arrhenius, yang menyatakan bahwa laju reaksi kimia meningkat secara eksponensial seiring kenaikan suhu. Dalam konteks transformator, reaksi kimia

yang dimaksud adalah proses degradasi selulosa pada isolasi kertas. Standar (IEC, 2011) menetapkan suhu referensi titik panas belitan sebesar 98°C, di mana laju penuaan dianggap 1 *p.u* (*per unit*). Apabila suhu titik panas meningkat, misalnya hingga 110 °C, maka laju penuaan dapat mencapai 2–3 p.u, artinya umur isolasi berkurang dua hingga tiga kali lebih cepat.

Dalam menentukan nilai relatif dari umur pemakaian sebuah transformator dapat menggunakan hubungan Montsinger. Metode Montsinger adalah suatu pendekatan yang digunakan untuk menghitung suhu belitan pada transformator, serta digunakan untuk meramalkan sisa umur transformator berdasarkan kondisi pembebanan yang diterapkan pada masing- masing transformator. Metode ini juga berguna untuk mendapatkan kecepatan relatif pada titik-titik panas di atas suhu normal (98°C) pada beban nominal, suhu lingkungan acuan, dan peningkatan suhu pada belitan transformator. (Burhan, 2023)

Untuk mencari nilai laju penuaan thermal relatif dapat menggunakan persamaan:

$$V = \frac{\text{laju penuaan umur saat } \theta_c}{\text{laju penuaan umur saat } \theta_{cr}} \quad (2.32)$$

Atau,

$$V = 2^{(\theta_h - \theta_{cr})/6} \quad (2.33)$$

Kemudian untuk memudahkan perhitungan diubah menjadi bentuk

Log10 menjadi:

$$V = 10^{(\theta_h - 98)/19,93} \quad (2.34)$$

Keterangan :

$V$  = nilai relatif dari umur pemakaian

$\theta_h$  = *temperature hotspot*

$\theta_{cr}$  = 98°C

Rumus  $V = \frac{\text{laju penuaan umur pada } \theta_c}{\text{laju penuaan umur pada } \theta_{cr}}$  merupakan bentuk

perbandingan relatif laju penuaan isolasi transformator yang mengacu pada konsep *Aging Acceleration Factor (AAF)* dalam standar IEC 60076-7. Standar tersebut menyatakan bahwa laju penuaan isolasi dipengaruhi secara eksponensial oleh suhu *hot-spot* belitan. Dengan membandingkan laju penuaan pada suhu operasi aktual terhadap suhu referensi, diperoleh faktor  $V$  yang menunjukkan tingkat percepatan penuaan isolasi dibandingkan kondisi standar.

### h. Pengurangan Umur Transformator

Pada perhitungan susut umur ini menggunakan faktor pengaruh dari penurunan isolasi saja tanpa menggunakan faktor lain. Untuk menemukan nilai susut umur dapat menggunakan persamaan berikut ini :

Bentuk numerik simpson :

$$L = \frac{1}{24} [V_0 + 4 \sum_{\text{odd}} V_i + 2 \sum_{\text{even}} V_i + V_{24}] \quad (2.35)$$

Keterangan :

$L$  = pengurangan umur (p.u)

$V_0$  = laju penuaan relatif pada waktu awal

$V_0$  = laju penuaan relatif pada waktu tertentu

Bentuk *Piecewise Constant* :

$$L = \frac{t_1 V_{10} + t_2 V_{19}}{24} \quad (2.36)$$

Keterangan :

$t_1$  = interval waktu 1 (10.00-19.00) = 9 jam

$t_2$  = interval waktu 2 (19.00-10.00) = 15 jam

$V_{10}$  = laju penuaan relatif pukul 10.00

$V_{19}$  = laju penuaan relatif pukul 19.00

Karena pada data pembebanan hanya ada dua sampel yaitu pukul 10.00 dan pukul 19.00, maka rumus yang digunakan yaitu dengan rumus bentuk *piecewise constant*.

Fungsi *piecewise constant* adalah fungsi yang nilainya tetap (konstan) dalam setiap segmen domain tertentu, tetapi bisa berubah antar segmen. Fungsi ini sering digunakan dalam analisis teknik, rekayasa, dan pemodelan numerik, terutama untuk mendekati data yang berubah secara diskrit atau bertahap. Contoh umum termasuk fungsi tangga (*step function*), fungsi Heaviside, dan fungsi lantai (*floor function*), yang semuanya memiliki nilai tetap dalam interval tertentu dan mengalami diskontinuitas di batas antar segmen.

Dalam konteks analisis termal, bentuk *piecewise constant* sering digunakan untuk menyederhanakan profil suhu, beban, atau parameter lainnya yang berubah secara bertahap dalam waktu. Misalnya, suhu *hotspot* transformator selama 24 jam dapat dimodelkan sebagai fungsi *piecewise constant* dengan nilai tetap setiap jam, sehingga memudahkan perhitungan laju penuaan thermal relatif secara segmental. (Erick, 2025)

$$L = \frac{t_1 V_{10} + t_2 V_{19}}{24} \quad (2.37)$$

Keterangan :

$t_1$  = interval waktu 1 (10.00-19.00) = 9 jam

$t_2$  = interval waktu 2 (19.00-10.00) = 15 jam

$V_{10}$  = laju penuaan relatif pukul 10.00

$V_{19}$  = laju penuaan relatif pukul 19.00

#### **i. Perkiraan Sisa Umur Transformator**

Umur transformator (L) secara teknis merujuk pada lamanya isolasi dapat bertahan sebelum mengalami kerusakan signifikan. Faktor utama yang mempengaruhi umur ini adalah suhu titik panas belitan (*hot-spot temperature*), suhu minyak atas (*top-oil temperature*), dan beban yang diterima transformator. Ketika transformator beroperasi pada suhu tinggi atau beban berlebih, laju penuaan isolasi meningkat secara eksponensial, sehingga umur efektifnya menjadi lebih pendek dari umur desain.

Untuk menghitung perkiraan umur trafo ( $n$ ) dapat digunakan persamaan berikut :

$$n = \frac{\text{umur dasar} - \text{usia pakai}}{\text{susut umur}} \quad (2.38)$$

Pada Persamaan 2.38 bersumber dari (Sigid, 2008) yang menyatakan :

$$\text{Sisa umur pada tahun ke } n = \text{umur dasar} - (n \times \text{susut umur})$$

$$2 = \text{umur dasar} - (n \times \text{susut umur})$$

$$2 + (n \times \text{susut umur}) = \text{umur dasar}$$

$$n = \frac{\text{umur dasar} - 2}{\text{susut umur}}$$

Sehingga melalui konsep tersebut maka dapat didapatkan persamaan

$$n = \frac{\text{umur dasar} - \text{usia pakai}}{\text{susut umur}} \text{ yang digunakan dalam penelitian ini.}$$