



Analisa Teknik dan Permodelan Penentuan Sisa Umur Transformator 20 KV Berdasarkan Profil Beban Lebih pada Jaringan Distribusi

Ahmad Taufiqul Lubab

Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik Elektro, Institut Teknologi PLN

Corresponding Author's e-mail: taufiqul.amd@gmail.com

Article History:

Received: December 25, 2025

Revised: January 15, 2026

Accepted: January 30, 2026

Keywords:

20kV Distribution

Transformers, Loading of

Transformer, Temperature

Hot Spots, Reduction of Age.

Abstract: Excessive or continuous loading above 80% in distribution transformers leads to elevated hot-spot temperatures, accelerated insulation degradation, and a reduced service life. Under standard design assumptions, distribution transformers have an expected operational lifespan of approximately 30 years. At PLN ULP Sumba Jaya, three transformer units (A, B, and C) operate at loading levels exceeding 80%. A modeling-based approach is employed to mitigate accelerated aging and to enhance reliability and asset management in the distribution network. Three distribution transformers (A, B, and C), each rated at 100 kVA, were operated on the same feeder. The implemented modeling approach predicts load growth and the associated loss of life. Transformer A exhibits a relative loss of life of 19.87%, corresponding to an aging rate of 4.77 hours per day and an estimated remaining lifetime of 13.22 years. Transformer B shows a higher relative loss of life of 24.29%, with a daily aging rate of 5.83 hours, resulting in a remaining lifetime of 11.36 years. Transformer C experiences a relative loss of life of 14.39%, equivalent to 3.45 aging hours per day, and retains an estimated remaining lifetime of 15.13 years. The results indicate that sustained overloading accelerates transformer aging, while the use of data-driven modeling enables faster and more effective estimation of the remaining service life without reliance on complex and costly direct testing, thereby supporting timely maintenance actions such as load balancing or the installation of additional distribution substations to extend the transformer's operational lifetime.

Copyright © 2026, The Author(s).

This is an open access article under the CC-BY-SA license



How to cite: Lubab, A. T. (2026). Analisa Teknik dan Permodelan Penentuan Sisa Umur Transformator 20 KV Berdasarkan Profil Beban Lebih pada Jaringan Distribusi. *SENTRI: Jurnal Riset Ilmiah*, 5(1), 88–103. <https://doi.org/10.55681/sentri.v5i1.5522>

PENDAHULUAN

Transformator distribusi merupakan aset penting dalam jaringan tenaga listrik, sehingga keandalannya sangat dipengaruhi oleh kondisi pembebanan. Operasi transformator dengan beban melebihi 80% secara kontinu terbukti meningkatkan suhu hot spot, mempercepat degradasi isolasi, dan menurunkan usia layanannya. Meskipun secara desain transformator memiliki umur operasi teoritis sekitar 30 tahun, pembebanan berlebih dapat menyebabkan susut umur yang signifikan.

Di PLN ULP Sumba Jaya, tiga transformator distribusi (A, B, dan C) beroperasi dengan tingkat pembebanan > 80% pada feeder yang sama. Untuk mencegah percepatan penuaan, dilakukan permodelan prediksi beban dan susut umur selama lima tahun ke depan. Hasil analisis menunjukkan bahwa Transformator A, B, dan C masing-masing

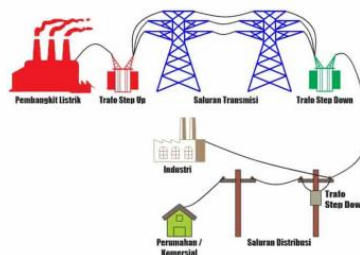
akan mengalami penyusutan umur sebesar 3,5 tahun, 3 tahun, dan 2,5 tahun akibat peningkatan beban hingga mendekati atau melampaui kapasitas nominalnya.

Temuan ini menegaskan bahwa pembebanan berlebih memiliki dampak signifikan terhadap penurunan umur transformator. Permodelan memberikan gambaran yang lebih akurat terkait sisa umur peralatan, sehingga strategi mitigasi seperti pemerataan beban dan penambahan gardu sisip dapat dilakukan secara tepat untuk mempertahankan keandalan aset distribusi.

LANDASAN TEORI

Sistem Ketenagalistrikan

Energi listrik merupakan bentuk energi yang efektif dan efisien, sehingga keberadaannya menjadi kebutuhan utama bagi masyarakat. Dalam upaya menyediakan pasokan listrik bagi pelanggan, diperlukan berbagai perangkat kelistrikan yang saling terintegrasi. Perangkat-perangkat tersebut kemudian dirangkai sehingga membentuk suatu sistem tenaga listrik yang berfungsi secara terpadu.



Gambar 1. Skema penyaluran energi listrik

Sumber: (<https://share.google/y0zGPneGkYi06ELHA>)

Transformator Distribusi

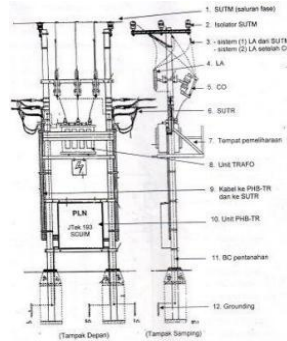
Berdasarkan konsep induksi elektromagnetik, transformator adalah komponen listrik yang memindahkan energi listrik dari satu rangkaian ke rangkaian lainnya dengan kopling magnet. Inti besi berlapis dan dua kumparan yang dikenal sebagai kumparan primer dan kumparan sekunder membentuk trafo dalam bentuk dasarnya. Biasanya, kawat tembaga digunakan untuk membuat kumparan ini, yang dililitkan di sekitar inti trafo. Trafo ini sering digunakan, dan penggunaannya memungkinkan pemilihan voltase ideal untuk memenuhi kebutuhan.



Gambar 2. Transformator Distribusi

Sumber: (<https://www.daelimtransformer.com/20kv-class-three-phase-oil-immersed-distribution-transformer-2590.html>)

Konfigurasi Gardu Tiang Portal pada umumnya Jaringan Tegangan Menengah 20 kV yang terdiri dari peralatan pengaman Pengaman Lebur Cut-Out (FCO) sebagai pengaman hubung singkat transformator dengan elemen pelebur (pengaman lebur link type expulsion) dan Lightning Arrester (LA) sebagai sarana pencegahan naiknya tegangan pada transformator akibat surja petir.



Gambar 3. Gardu Distribusi Tiang Portal

Prinsip Kerja Transformator

Pada dasarnya transformator terdiri dari kumparan primer dan sekunder yang dibelitkan pada inti ferromagnetik. Berdasarkan letak kumparan terhadap inti, transformator terdiri dari dua macam konstruksi, yaitu tipe inti dan tipe cangkang.

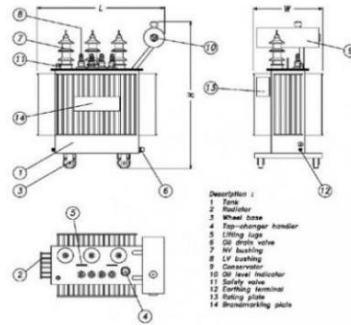
Transformator terdiri atas kumparan primer dan sekunder. Pemberian tegangan bolak-balik pada kumparan primer menimbulkan fluks magnet bolak-balik pada inti yang menginduksi tegangan pada kumparan sekunder, sehingga energi listrik dapat ditransfer secara elektromagnetik ketika rangkaian sekunder dibebani.

Sistem Pendingin Transformator

Minyak transformator berfungsi sebagai media isolasi sekaligus pendingin. Panas yang timbul akibat rugi-rugi besi dan rugi-rugi tembaga pada inti dan kumparan, apabila tidak dikendalikan, dapat meningkatkan suhu dan mempercepat degradasi isolasi. Oleh karena itu, sistem pendinginan diperlukan untuk membuang panas dan menjaga keandalan transformator.

Media yang dipakai pada sistem pendingin dapat berupa: Udara/gas, Minyak, Air. Sedangkan pengalirannya (sirkulasi) dengan cara: 1) Alami dan 2) Tekanan/ paksaan. Sistem pendingin transformator berdasarkan media dan cara pengalirannya dapat diklasifikasikan pada 11 cara Sistem Pendingin Transformator [10]. Salah satu bagian trafo distribusi yang berperan sebagai pernapasan trafo adalah radiator yang ditunjukkan pada **Gambar 4.** No. 2. Radiator meningkatkan luas permukaan pendinginan tangki transformator.

Operasi transformator pada temperatur berlebih mempercepat penuaan isolasi. Isolasi kertas pada belitan yang sulit diganti menjadi komponen kritis, sehingga umur material selulosa tersebut berperan sebagai faktor pembatas umur operasi transformator.



Gambar 4. Konstruksi bagian - bagian Trafo Distribusi

METODE PENELITIAN

Langkah – Langkah Simulasi

Rugi-Rugi Pada Transformator

Rugi-rugi arus eddy disebabkan oleh arus eddy yang diinduksi dalam laminasi inti, dan nilainya adalah sebagai berikut:

$$P_e = K_e^2 \cdot f^2 \cdot B_{maks} \dots\dots\dots 2.1$$

Dimana:

P_e = rugi-rugi arus eddy (Watt)

f = frekuensi (Hertz)

B_{maks} = kecepatan fluks maksimum (Tesla)

K_e = konstanta

Untuk rugi-rugi histerisis:

$$P_h = K_h \cdot f \cdot B_m^{1,5} \dots\dots\dots 2.2$$

Dimana:

P_h = rugi-rugi arus *histerisis* (Watt)

f = frekuensi (Hertz)

P_m = kecepatan fluks maksimum (Tesla)

K_h = konstanta

Jumlah kehilangan inti dipengaruhi oleh variasi fluks inti sebagai fungsi waktu; ini cukup besar, terutama ketika melakukan pengujian laboratorium pada Transformator kapasitas besar. Sedangkan rugi-rugi tembaga dibangkitkan oleh jumlah arus beban berikut yang melewati kawat tembaga:

$$P_{cu} = I^2 \cdot R$$

Dimana:

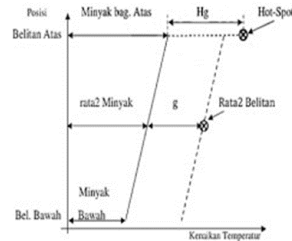
P_{cu} = Rugi pada kawat tembaga (Watt)

I = Arus primer dan sekunder (A)

R = Tahanan primer dan sekunder (Ω)

Penentuan Kenaikan Temperatur

Diagram termal sederhana, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.17 dapat digunakan untuk memperkirakan kenaikan suhu. Diagram di bawah ini adalah representasi sederhana dari distribusi yang lebih canggih.



Gambar 5. Diagram Thermal Transformator

Sumber: (jom.unri.ac.id/index.php/JOMFTEKNIK/article/viewFile/24838/24054)

Dasar Perhitungan

Sebagai dasar untuk melakukan perhitungan pembebanan digunakan karakteristik termal dari transformator distribusi dengan pendinginan ONAN, seperti terdapat pada tabel 1

Tabel 1. Karakteristik Thermal Transformator *ONAN IEC 60354*

<u>Karakteristik Thermal Transformator</u>		<u>Pendingin ONAN</u>
Eksponen Minyak	x	0,8
Eksponen Belitan	y	1,6
Perbandingan Rugi	r	5,0
Konstanta Waktu Minyak	τ_0 (h)	3,0
Suhu Sekitar	θ_a (°C)	20
Kenaikan Suhu Titik Panas	$\Delta\theta_{hr}$ (°C)	78
Gradient Titik Panas ke Minyak (dalam tangki) pada Arus Pengenal	H_{gr} (°C)	23
Kenaikan Suhu Minyak Rata – Rata	$\Delta\theta_{mr}$ (°C)	44
Kenaikan Suhu Minyak Atas	$\Delta\theta_{tr}$ (°C)	55
Kenaikan Suhu Bawah	$\Delta\theta_{br}$ (°C)	33
Kenaikan Suhu Belitan Rata – Rata	$\Delta\theta_{br}$ (°C)	65

Perbedaan antara kenaikan suhu belitan rata-rata kumparan terhadap kenaikan rata-rata suhu minyak adalah ($\Delta\theta_{w0}$) = 210°C. Jadi kenaikan temperature hot-spot ($\Delta\theta_{cr}$) disusun sebagai berikut:

$$\begin{aligned}\Delta\theta_{cr} &= \Delta\theta_{br} + 1.1 \Delta\theta_{w0} \dots\dots\dots 2.3 \\ &= 55^{\circ}\text{C} + 1.1 (21^{\circ}\text{C}) \\ &= 78^{\circ}\text{C}\end{aligned}$$

Dimana:

$\Delta\theta_{cr}$ = Kenaikan Temperatur *Hotspot* (°C)

$\Delta\theta_{br}$ = Kenaikan Temperatur Top Oil (°C)

$\Delta\theta_{w0}$ = Perbedaan kenaikan suhu belitan rata-rata dan kenaikan suhu minyak rata-rata (°C)

Untuk menghitung perbandingan pembebanan terhadap rating menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$K = \frac{s}{sr} \dots\dots\dots 2.4$$

Dimana:

K = Perbandingan antara pembebanan terhadap rating (ratio pembebanan)

S = Beban Transformator (kVA)
 Sr = Kapasitas Transformator (kVA)

Terjadinya perbedaan kenaikan temperatur minyak antara inlet dan outlet umumnya akan lebih kecil dibandingkan dengan sirkulasi minyak secara alami sesuai SPLN 17 a.

Kondisi Beban Stabil

Kenaikan Temperatur Top Oil

Kenaikan temperature top oil sepadan dengan kenaikan temperature pada nilai daya yang dikalikan ratio dari total kerugian dengan eksponen x.

$$\Delta\theta_b = \Delta\theta_{br} \left[\frac{Rk^2+1}{R+1} \right]^x \dots\dots\dots 2.5$$

Dimana:

$\Delta\theta_{br}$ = kenaikan suhu rated = 55 0C untuk ON (Minyak Natural)

θ_b = Kenaikan temperature *Top oil* (0C)

R = Ratio rugi

$$= \frac{\text{Rugi tembaga pada daya pengenal}}{\text{Rugi beban nol}} \dots\dots\dots 2.6$$

X = Konstanta, bernilai 0.8 untuk ONAN

Kenaikan Temperatur Hotspot

Kenaikan hot-spot $\Delta\theta_c$ pada pemakaian beban stabil dapat dihitung menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$\Delta\theta_c = \Delta\theta_b (\Delta\theta_{cr} - \Delta\theta_{br}) k^{2y} \dots\dots\dots 2.7$$

$$\Delta\theta_c = \Delta\theta_{br} \left[\frac{Rk^2 + 1}{R + 1} \right] (\Delta\theta_{cr} - \Delta\theta_{br}) k^{2y}$$

Dimana:

$\Delta\theta_{cr}$ = 78 0C

y = Konstanta (0.8 ONAN)

$\Delta\theta_{br}$ = suhu (Dasar SPLN 17a untuk suhu $\Delta\theta_{br} = 55$ 0C untuk Oil Natural (ON)

K = Perbandingan antara pembebanan terhadap rating (Ratio pembebanan)

Kondisi Beban Berubah – Ubah

Kenaikan Temperatur Top Oil

Kenaikan temperatur Top Oil pada waktu t setelah diberi beban adalah mendekati kenaikan eksponensial sebagaimana dijelaskan pada rumus berikut ini:

$$\Delta\theta_{on} = (\Delta\theta_{bsiang} - \Delta\theta_0) \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right) + \Delta\theta_0 \dots\dots\dots 2.8$$

Dimana:

$\Delta\theta_0$ = Kenaikan dari temperatur awal minyak.

$\Delta\theta_b$ = Kenaikan dari temperature akhir minyak setelah di stabilkan

T = Konstanta waktu minyak dalam jam

T = 3 untuk pendingin ONAN

T = Waktu dalam Jam

Kenaikan Temperatur Hostport

Kenaikan temperatur hotspot pada kondisi sebelum distabilkan sebagai berikut:

$$\Delta\theta_c = \Delta\theta_b (\Delta\theta_{cr} - \Delta\theta_{br}) k^{2y} \dots\dots\dots 2.9$$

$$\Delta\theta_c = \Delta\theta_{br} \left[\frac{Rk^2 + 1}{R + 1} \right] (\Delta\theta_{cr} - \Delta\theta_{br}) k^{2y}$$

Dimana:

$\Delta\theta_c$ = Kenaikan *hots pot*

$\Delta\theta_b$ = Kenaikan dari temperature akhir minyak setelah di stabilkan

$\Delta\theta_{br}$ = Kenaikan suhu rated = 55 °C untuk ON (Minyak Natural)

$\Delta\theta_{cr}$ = Kenaikan temperatur *hotspot (hots pot temperature rise)*

y = Konstanta bernilai (0.8) (*ONAN* dan *ONAF*)

y = Konstanta bernilai (1.0) (*OFAF* dan *OFWF*)

Temperatur hotspot pada waktu tertentu sama dengan persamaan berikut :

$$\theta_c = \theta_a + \Delta\theta_b + \Delta\theta_{otd} \dots\dots\dots 2.10$$

θ_a = Rata-rata suhu harian kabupaten sumba barat daya

$\Delta\theta_b$ = Kenaikan temperatur stabil *Top oil*

$\Delta\theta_{otd}$ = Selisih antara kenaikan *Hot spot* dengan *Top oil*

Penuaan Isolasi Belitan Transformator

Hubungan Montsinger dapat digunakan untuk mendapatkan nilai relatif dari umur pemakaian Transformator pada Temperature θ_c , dibandingkan dengan nilai normal dari umur pemakaian pada temperatur θ_{cr} .

$$V = 2^{(\theta_c - \theta_{cr})/6} \dots\dots\dots 2.11$$

Dimana:

V = Nilai relatif dari umur pemakaian (p.u)

$\Delta\theta_{cr}$ = Kenaikan temperatur hotspot/ hotspot temperature rise 98 0C menurut publikasi IEC 76 (1967)

Susut umur dapat dinyatakan dalam penurunan usia (dengan asumsi satu siklus terdiri dari 20 jam beban siang dan 4 jam beban malam). Pembebanan Transformator akan berpengaruh pada kualitas hidup di masa depan. Analisis membuat asumsi bahwa pola tegangan yang diterapkan adalah konstan sepanjang hari dan hanya mempertimbangkan efek dari penurunan isolasi belitan.

$$V \text{ (Berdasarkan satu siklus 24 jam)} = \dots\dots\dots 2.12$$

Susut umur Waktu Beban Puncak (WBP) diukur pada saat beban pada pukul 19.00 WITA pada malam hari, sedangkan susut umur Waktu Beban Puncak Luar (LWBP) diukur pada saat beban pada pukul 10.00 WITA pada pagi hari. Dianggap bahwa untuk pembebanan selama 24 jam atau sehari, waktu beban puncak adalah 4 jam setelah beban malam dan waktu beban puncak luar adalah 20 jam setelah beban siang. Mengingat beban trafo pada tugas akhir ini adalah rumah, maka beban harian pada trafo distribusi adalah sama.

Umur Transformator

Menurut International Electrotechnical Commission (IEC) jika transformator diberi beban maksimum (100%) dari kapasitas daya trafo, trafo akan memiliki umur 20 tahun pada suhu sekitar 20 °C. Berkurangnya umur transformator dipengaruhi oleh suhu. Selama suhu hot spot berjalan 80 °C – 140 °C tingkat laju penuaan transformator untuk setiap kenaikan suhu hot spot 6 °C.

Tabel 2. Nilai Susut Umur akibat Kenaikan Suhu Menurut *IEC 60354*

Suhu Lilitan (°C))	80	86	92	98	104	110	116	122	128	134	140
Susut Umur (p.u)	0,125	0,25	0,5	1	2	4	8	16	32	64	128
Perkiraan Umur (th)	>20	>20	>20	20	10	5	2,5	1,25	0,625	0,5125	0,15625

HASIL DAN PEMBAHASAN

Lokasi Pengambilan Data

Data di ambil di PT. PLN (Persero) UP3 Sumba, ULP Sumba jaya, tepatnya pada salah satu feeder/penyulang Waitabula. Data tersebut adalah data Semester I tahun 2025. Adanya 3 buah transformator yang dibebani lebih > 80% dari kapasitas daya pengenalnya. Menurut aturan di PLN transformator tersebut masuk ke dalam kategori transformator *overload*. Ketiga transformator yang dimaksud adalah transformator distribusi A, B dan transformator distribusi C.

Data Transformator Distribusi A

Data Spesifikasi (nameplate) Trafo A;

Merk : MORAWA

Hubungan : Yzn5

Tahun operasi : 2011

Daya pengenal : 100 KVA, 3 phase

Jenis pendingin : ONAN

Tegangan primer : 20 KV

Tegangan sekunder : 400 V

Rugi Tembaga : 1420 W

Temperatur maksimal semester I tahun 2025: 32 °C

Temperatur rata-rata bulanan (θ_a) : 28,7 °C

Data Beban: Siang: 75,3 kVA dan Malam: 88,6 kVA.

Perhitungan Susut Umur Trafo A:

1. Perhitungan Ratio Pembebanan (K)

$$\text{Beban siang : } K = \frac{s}{sr} = \frac{75,3}{100} = 0,753$$

$$\text{Beban malam : } K = \frac{s}{sr} = \frac{88,6}{100} = 0,886$$

2. Perhitungan Perbandingan Rugi-Rugi (d)

$$R = \frac{\text{Rugi tembaga pada daya pengenal}}{\text{Rugi beban nol}} = \frac{1420}{210} = 6,762$$

3. Perhitungan Kenaikan Temperatur Top Oil

$$\begin{aligned}\text{Beban siang } \Delta\theta_b &= \Delta\theta_{br} \left[\frac{Rk^2+1}{R+1} \right]^x \\ &= 55^\circ\text{C} \left[\frac{6,762 \times 0,753^2+1}{6,762+1} \right]^{0,8} \\ &= 37,66^\circ\text{C}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{Beban malam } \Delta\theta_b &= \Delta\theta_{br} \left[\frac{Rk^2+1}{R+1} \right]^x \\ &= 55^\circ\text{C} \left[\frac{6,762 \times 0,886^2+1}{6,762+1} \right]^{0,8} \\ &= 46,59^\circ\text{C}\end{aligned}$$

Menentukan kenaikan temperatur top oil ($\Delta\theta_{on}$)

Beban siang

$$\begin{aligned}\Delta\theta_{on} &= (\Delta\theta_{bsiang} - \Delta\theta_0) \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right) + \Delta\theta_0 \\ \Delta\theta_{on} &= (37,66^\circ\text{C} - 35,68^\circ\text{C}) \left(1 - e^{-\frac{20}{3}} \right) + 35,68^\circ\text{C} \\ \Delta\theta_{on} &= 37,66^\circ\text{C}\end{aligned}$$

Beban malam

$$\begin{aligned}\Delta\theta_{on} &= (\Delta\theta_{bsiang} - \Delta\theta_0) \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right) + \Delta\theta_0 \\ \Delta\theta_{on} &= (46,59^\circ\text{C} - 37,66^\circ\text{C}) \left(1 - e^{-\frac{20}{3}} \right) + 37,66^\circ\text{C} \\ \Delta\theta_{on} &= 44,27^\circ\text{C}\end{aligned}$$

4. Perhitungan selisih Temperatur antara Hot Spot dengan Top Oil ($\Delta\theta_{td}$)

$$\begin{aligned}\text{Beban siang: } \Delta\theta_{td} &= (\Delta\theta_{cr} - \Delta\theta_{br}) k^{2y} \\ &= (78^\circ\text{C} - 55^\circ\text{C}) 0,753^{2(0,8)} \\ &= (23^\circ\text{C}) 0,635 = 14,61^\circ\text{C} \\ \text{Beban malam: } \Delta\theta_{td} &= (\Delta\theta_{cr} - \Delta\theta_{br}) k^{2y} \\ &= (78^\circ\text{C} - 55^\circ\text{C}) 0,886^{2(0,8)} \\ &= (23^\circ\text{C}) 0,824 = 18,95^\circ\text{C}\end{aligned}$$

5. Perhitungan Temperatur Hot Spot (θ_c)

$$\begin{aligned}\text{Beban siang: } \theta_c &= \theta_a + \Delta\theta_{on} + \Delta\theta_{otd} \\ &= 28,7^\circ\text{C} + 37,66^\circ\text{C} + 14,61^\circ\text{C} \\ &= 80,96^\circ\text{C}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{Beban malam: } \theta_c &= \theta_a + \Delta\theta_{on} + \Delta\theta_{otd} \\ &= 28,7^\circ\text{C} + 44,24^\circ\text{C} + 18,95^\circ\text{C} \\ &= 91,89^\circ\text{C}\end{aligned}$$

6. Perhitungan Laju Penuaan Thermal Relatif (X)

$$\begin{aligned}\text{Beban siang: } V &= 2^{(\theta_c - \theta_{cr})/6} = 2^{(80,96 - 98)/6} \\ &= 0,14 \text{ p.u}\end{aligned}$$

$$\text{Beban malam: } V = 2^{(\theta_c - \theta_{cr})/6} = 2^{(91,88 - 98)/6}$$

$$= 0,49 \text{ p.u}$$

Jadi perhitungan susut selama 24 jam diperkirakan transformator tersebut diasumsikan 20 jam diluar waktu beban puncak (LWBP) mengikuti beban siang, sedangkan 4 jam pada waktu beban puncak (WBP):

$$\text{Susut umur 24 jam} = (20\text{jam} \times V_{\text{siang}}) + (4 \text{ jam} \times V_{\text{malam}})$$

$$= (20 \text{ jam} \times 0,14) + (4 \text{ jam} \times 0,49)$$

$$= (2,79) + (1,97) = 4,77 \text{ jam}$$

$$\text{Susut umur relatif} = (4,77/24) \times 100 \% = 19,87 \%$$

Perkiraan sisa umur transformator A adalah:

Dengan asumsi bahwa umur dasar transformator distribusi adalah 30 tahun, dan diketahui transformator distribusi A telah beroperasi selama 14 tahun (2011 s.d 2025), maka perhitungan sisa umur pakai transformator distribusi yang seharusnya adalah sebagai berikut:

$$\text{Umur dasar trafo lama beroperasi} = 30 \text{ tahun} - 14 \text{ tahun} = 16 \text{ tahun.}$$

Dikarenakan pembebanan yang berlebih pada transformator

$$\text{Umur yang terpakai} = (2025-2011) \times 19,87 \% = 2,78 \text{ tahun}$$

$$\text{Sisa umur (beban rated)} = 16 - 2,78 = 13,22 \text{ tahun}$$

Transformator A mulai beroperasi yaitu pada tahun 2011, sehingga sampai saat ini transformator dibebani rated maka sisa umur Transformator ini yaitu 13,22 tahun.

Data Transformator Distribusi B

Data Spesifikasi (nameplate) Trafo B;

Merk : TRAFINDO

Hubungan : Yzn5

Tahun operasi : 2010

Daya pengenalan : 100 KVA, 3 phase

Jenis pendingin : ONAN

Tegangan primer : 20 KV

Tegangan sekunder : 400 V

Rugi Tembaga : 1420 W

Temperatur maksimal semester I tahun 2025: 32 °C

Temperatur rata-rata bulanan (θ_a): 28,7 °C

Data Beban: Siang: 78,5 kVA dan Malam: 87,3 kVA

Perhitungan Susut Umur Trafo B:

1. Perhitungan Ratio Pembebanan (K)

$$\text{Beban siang: } K = \frac{s}{sr} = \frac{78,5}{100} = 0,785$$

$$\text{Beban malam: } K = \frac{s}{sr} = \frac{87,3}{100} = 0,873$$

2. Perhitungan Perbandingan Rugi-Rugi (d)

$$R = \frac{\text{Rugi tembaga pada daya pengenalan}}{\text{Rugi beban nol}} = \frac{1420}{210} = 6,762$$

3. Perhitungan Kenaikan Temperatur Top Oil

$$\begin{aligned}\text{Beban siang } \Delta\theta_b &= \Delta\theta_{br} \left[\frac{Rk^2+1}{R+1} \right]^x \\ &= 55^\circ\text{C} \left[\frac{6,762 \times 0,785^2 + 1}{6,762 + 1} \right]^{0,8} \\ &= 39,72^\circ\text{C}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{Beban malam } \Delta\theta_b &= \Delta\theta_{br} \left[\frac{Rk^2+1}{R+1} \right]^x \\ &= 55^\circ\text{C} \left[\frac{6,762 \times 0,873^2 + 1}{6,762 + 1} \right]^{0,8} \\ &= 45,67^\circ\text{C}\end{aligned}$$

Menentukan kenaikan temperatur top oil ($\Delta\theta_{on}$)

Beban siang

$$\begin{aligned}\Delta\theta_{on} &= (\Delta\theta_{bsiang} - \Delta\theta_0) \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right) + \Delta\theta_0 \\ \Delta\theta_{on} &= (39,72^\circ\text{C} - 36,84^\circ\text{C}) \left(1 - e^{-\frac{20}{3}} \right) + 36,84^\circ\text{C} \\ \Delta\theta_{on} &= 39,72^\circ\text{C}\end{aligned}$$

Beban malam

$$\begin{aligned}\Delta\theta_{on} &= (\Delta\theta_{bsiang} - \Delta\theta_0) \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right) + \Delta\theta_0 \\ \Delta\theta_{on} &= (45,67^\circ\text{C} - 39,72^\circ\text{C}) \left(1 - e^{-\frac{4}{3}} \right) + 39,72^\circ\text{C} \\ \Delta\theta_{on} &= 44,10^\circ\text{C}\end{aligned}$$

4. Perhitungan selisih Temperatur antara Hot Spot dengan Top Oil ($\Delta\theta_{td}$)

$$\begin{aligned}\text{Beban siang: } \Delta\theta_{td} &= (\Delta\theta_{cr} - \Delta\theta_{br}) k^{2y} \\ &= (8^\circ\text{C} - 55^\circ\text{C}) 0,785^{2(0,8)} \\ &= (23^\circ\text{C}) 0,679 = 15,61^\circ\text{C} \\ \text{Beban malam: } \Delta\theta_{td} &= (\Delta\theta_{cr} - \Delta\theta_{br}) k^{2y} \\ &= (78^\circ\text{C} - 55^\circ\text{C}) 0,873^{2(0,8)} \\ &= (23^\circ\text{C}) 0,805 = 18,51^\circ\text{C}\end{aligned}$$

5. Perhitungan Temperatur Hot Spot (θ_c)

$$\begin{aligned}\text{Beban siang: } \theta_c &= \theta_a + \Delta\theta_{on} + \Delta\theta_{otd} \\ &= 28,7^\circ\text{C} + 39,72^\circ\text{C} + 15,61^\circ\text{C} \\ &= 84,03^\circ\text{C}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{Beban malam: } \theta_c &= \theta_a + \Delta\theta_{on} + \Delta\theta_{otd} \\ &= 28,7^\circ\text{C} + 44,10^\circ\text{C} + 18,51^\circ\text{C} \\ &= 91,31^\circ\text{C}\end{aligned}$$

6. Perhitungan Laju Penuaan Thermal Relatif (X)

$$\begin{aligned}\text{Beban siang: } V &= 2^{(\theta_c - \theta_{cr})/6} = 2^{(84,03 - 98)/6} \\ &= 0,20 \text{ p.u}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{Beban malam: } V &= 2^{(\theta_c - \theta_{cr})/6} = 2^{(91,31 - 98)/6} \\ &= 0,46 \text{ p.u}\end{aligned}$$

Jadi perhitungan susut selama 24 jam diperkirakan transformator tersebut diasumsikan 20 jam diluar waktu beban puncak (LWBP) mengikuti beban siang, sedangkan 4 jam pada waktu beban puncak (WBP):

$$\text{Susut umur 24 jam} = (20\text{jam} \times V_{\text{siang}}) + (4 \text{ jam} \times V_{\text{malam}})$$

$$= (20 \text{ jam} \times 0,20) + (4 \text{ jam} \times 0,46)$$

$$= (3,98) + (1,85) = 5,83 \text{ jam}$$

$$\text{Susut umur relatif} = (5,83/24) \times 100 \% = 24,29 \%$$

Perkiraan sisa umur transformator B adalah:

Dengan asumsi bahwa umur dasar transformator distribusi adalah 30 tahun, dan diketahui transformator distribusi A telah beroperasi selama 15 tahun (2010 s.d 2025), maka perhitungan sisa umur pakai transformator distribusi yang seharusnya adalah sebagai berikut:

Umur dasar trafo lama beroperasi = 30 tahun – 15 tahun = 15 tahun.

Dikarenakan pembebanan yang berlebih pada transformator

$$\text{Umur yang terpakai} = (2025-2010) \times 24,29 \% = 3,64 \text{ tahun}$$

$$\text{Sisa umur (beban rated)} = 15 - 3,64 = 11,36 \text{ tahun}$$

Transformator B mulai beroperasi yaitu pada tahun 2010, sehingga sampai saat ini transformator dibebani rated maka sisa umur Transformator ini yaitu 11,36 tahun.

Data Transformator Distribusi C

Data Spesifikasi (nameplate) Trafo C;

Merk : TRAFINDO

Hubungan : Yzn5

Tahun operasi : 2012

Daya pengenalan : 100 KVA, 3 phase

Jenis pendingin : ONAN

Tegangan primer : 20 KV

Tegangan sekunder : 400 V

Rugi Tembaga : 1420 W

Temperatur maksimal semester I tahun 2025: 32 °C

Temperatur rata-rata bulanan (θ_a): 28,7 °C

Data Beban: Siang: 73,8 kVA dan Malam: 82,7 kVA

Perhitungan Susut Umur Trafo C:

1. Perhitungan Ratio Pembebanan (K)

$$\text{Beban siang: } K = \frac{s}{sr} = \frac{73,8}{100} = 0,738$$

$$\text{Beban malam: } K = \frac{s}{sr} = \frac{82,7}{100} = 0,827$$

2. Perhitungan Perbandingan Rugi-Rugi (d)

$$R = \frac{\text{Rugi tembaga pada daya pengenalan}}{\text{Rugi beban nol}} = \frac{1420}{210} = 6,762$$

3. Perhitungan Kenaikan Temperatur Top Oil

$$\text{Beban siang } \Delta\theta_b = \Delta\theta_{br} \left[\frac{Rk^2+1}{R+1} \right]^x$$

$$= 55^{\circ}\text{C} \left[\frac{6,762 \times 0,738^2 + 1}{6,762 + 1} \right]^{0,8}$$

$$= 36,71^{\circ}\text{C}$$

Beban malam $\Delta\theta_b = \Delta\theta_{br} \left[\frac{Rk^2 + 1}{R + 1} \right]^x$

$$= 55^{\circ}\text{C} \left[\frac{6,762 \times 0,827^2 + 1}{6,762 + 1} \right]^{0,8}$$

$$= 42,51^{\circ}\text{C}$$

Menentukan kenaikan temperatur top oil ($\Delta\theta_{on}$)

Beban siang

$$\Delta\theta_{on} = (\Delta\theta_{bsiang} - \Delta\theta_0) \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right) + \Delta\theta_0$$

$$\Delta\theta_{on} = (36,71^{\circ}\text{C} - 35,41^{\circ}\text{C}) \left(1 - e^{-\frac{20}{3}} \right) + 35,41^{\circ}\text{C}$$

$$\Delta\theta_{on} = 36,71^{\circ}\text{C}$$

Beban malam

$$\Delta\theta_{on} = (\Delta\theta_{bsiang} - \Delta\theta_0) \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right) + \Delta\theta_0$$

$$\Delta\theta_{on} = (42,51^{\circ}\text{C} - 36,71^{\circ}\text{C}) \left(1 - e^{-\frac{4}{3}} \right) + 36,71^{\circ}\text{C}$$

$$\Delta\theta_{on} = 44,27^{\circ}\text{C}$$

4. Perhitungan selisih Temperatur antara Hot Spot dengan Top Oil ($\Delta\theta_{td}$)

Beban siang: $\Delta\theta_{td} = (\Delta\theta_{cr} - \Delta\theta_{br}) k^{2y}$

$$= (78^{\circ}\text{C} - 55^{\circ}\text{C}) 0,738^{2(0,8)}$$

$$= (23^{\circ}\text{C}) 0,615 = 14,15^{\circ}\text{C}$$

Beban malam: $\Delta\theta_{td} = (\Delta\theta_{cr} - \Delta\theta_{br}) k^{2y}$

$$= (78^{\circ}\text{C} - 55^{\circ}\text{C}) 0,827^{2(0,8)}$$

$$= (23^{\circ}\text{C}) 0,738 = 16,97^{\circ}\text{C}$$

5. Perhitungan Temperatur Hot Spot (θ_c)

Beban siang: $\theta_c = \theta_a + \Delta\theta_{on} + \Delta\theta_{otd}$

$$= 28,7^{\circ}\text{C} + 36,71^{\circ}\text{C} + 14,15^{\circ}\text{C}$$

$$= 79,56^{\circ}\text{C}$$

Beban malam: $\theta_c = \theta_a + \Delta\theta_{on} + \Delta\theta_{otd}$

$$= 28,7^{\circ}\text{C} + 42,51^{\circ}\text{C} + 16,97^{\circ}\text{C}$$

$$= 86,65^{\circ}\text{C}$$

6. Perhitungan Laju Penuaan Thermal Relatif (X)

Beban siang: $V = 2^{(\theta_c - \theta_{cr})/6} = 2^{(79,56 - 98)/6}$

$$= 0,12 \text{ p.u}$$

Beban malam: $V = 2^{(\theta_c - \theta_{cr})/6} = 2^{(86,65 - 98)/6}$

$$= 0,27 \text{ p.u}$$

Jadi perhitungan susut selama 24 jam diperkirakan transformator tersebut diasumsikan 20 jam diluar waktu beban puncak (LWBP) mengikuti beban siang, sedangkan 4 jam pada waktu beban puncak (WBP):

$$\begin{aligned}
 \text{Susut umur 24 jam} &= (20\text{jam} \times V_{\text{siang}}) + (4 \text{ jam} \times V_{\text{malam}}) \\
 &= (20 \text{ jam} \times 0,12) + (4 \text{ jam} \times 0,27) \\
 &= (2,38) + (1,08) = 3,45 \text{ jam} \\
 \text{Susut umur relatif} &= (3,45/24) \times 100 \% = 14,39 \%
 \end{aligned}$$

Perkiraan sisa umur transformator C adalah:

Dengan asumsi bahwa umur dasar transformator distribusi adalah 30 tahun, dan diketahui transformator distribusi A telah beroperasi selama 13 tahun (2012 s.d 2025), maka perhitungan sisa umur pakai transformator distribusi yang seharusnya adalah sebagai berikut:

Umur dasar trafo lama beroperasi = 30 tahun – 13 tahun = 17 tahun.

Dikarenakan pembebanan yang berlebih pada transformator

Umur yang terpakai = $(2025-2012) \times 14,39\% = 1,87$ tahun

Sisa umur (beban rated) = $17 - 1,87 = 15,13$ tahun

Transformator A mulai beroperasi yaitu pada tahun 2012, sehingga sampai saat ini transformator dibebani rated maka sisa umur Transformator ini yaitu 15,13 tahun.

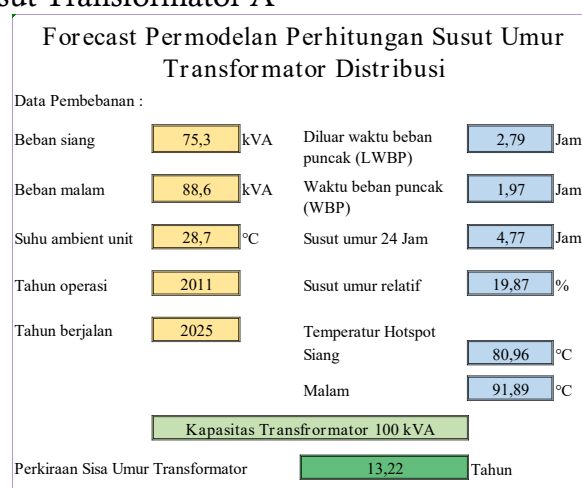
Permodelan Perkembangan Beban Transformator Distribusi

Pekiraan Permodelan Sisa Umur Transformator

Untuk perkiraan sisa umur transformator yang diakibatkan pembebanan, bisa dilihat perkiraan susut umurnya menggunakan permodelan perhitungan dengan memasukan data pengukuran beban gardu dengan menyesuaikan kapasitas terpasang dengan yang diasumsikan daya trafo 100 kVA.

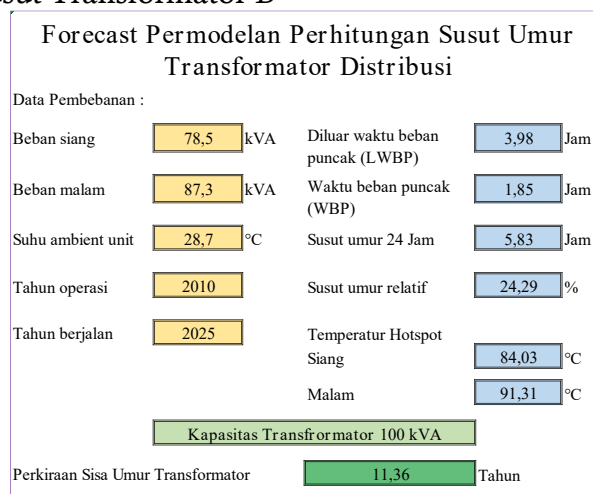
Dengan menginputkan data beban (siang dan malam), suhu ambien rata - rata unit, tahun operasi dan tahun berjalan saat pengambilan data beban sehingga akan didapatkan nilai Luar Waktu beban Puncak (LWBP, waktu beban puncak (WBP), Susut umur 24 jam, susut umur relatif, Temperatr hospot (siang & malam) dan akan di dapatkan juga perkiraan Sisa umur Transformator sesuai gambar permodelan transformator A,B dan C sebagai berikut:

a. Hasil permodelan susut Transformator A

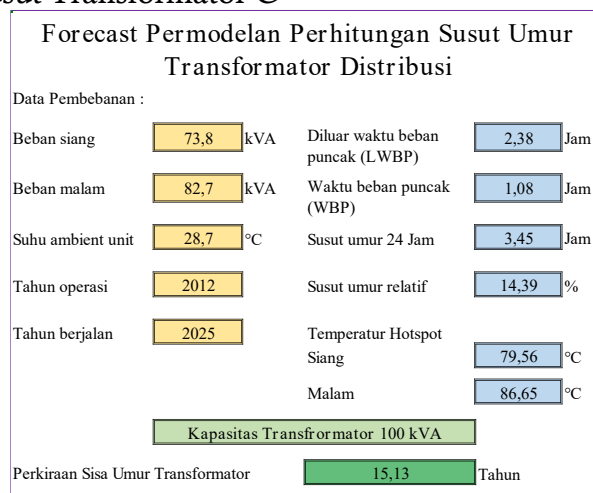


Gambar 6. Permodelan Transformator A

b. Hasil permodelan susut Transformator B

**Gambar 7.** Permodelan Transformator B

c. Hasil permodelan susut Transformator C

**Gambar 8.** Permodelan Transformator C

Pada Gambar 6, 7, dan 8 menunjukkan kenaikan susut umur transformator A, B dan transformator C yang konstan terhadap presentase pembebanan dan temperatur hot spotnya. Semakin naik pembebanan transformator, semakin naik pula temperatur hot spotnya begitu pula susut umur transformator tersebut. Dengan upaya penggunaan forecast permodelan transformator distribusi akan lebih cepat untuk mengetahui sisa umur transformator distribusi A, B maupun C.

KESIMPULAN

Setelah dilakukan pengolahan data-data yang ada dan perhitungan berdasarkan teori- teori terkait, kemudian hasilnya dianalisis, maka dapat disimpulkan beberapa hal sebagai berikut:

1. Transformator Distribusi dengan kode gardu LR012 dengan susut umur relatif sebesar 19,87 % didapatkan susut umur per hari sebesar 4,77 jam, sehingga sisa umur Transformator yang dimiliki selama 13,22 tahun. Transformator Distribusi dengan

kode gardu LR021 dengan susut umur relatif sebesar 24,29 % didapatkan susut umur per hari sebesar 5,83 jam, sehingga sisa umur Transformator tersebut sebesar 11,36 tahun. Transformator Distribusi dengan kode gardu LR032 dengan susut umur relatif sebesar 14,39 % didapatkan susut umur per hari sebesar 3,45 jam, sehingga sisa umur Transformator tersebut sebesar 15,13 tahun. Semakin tinggi pembebanan pada sebuah Transformator maka nilai dari susut umur juga akan semakin besar.

2. Dengan upaya penggunaan pemodelan otomatis dapat dilihat *Forecast* permodelan untuk membantu PLN lebih cepat memperoleh data susut umur trafo dan tidak lagi bergantung pada pengujian langsung yang kompleks dan memerlukan biaya tinggi.
3. Penerapan permodelan umur susut transformator memberikan kemudahan yang signifikan dalam proses pengukuran dan estimasi sisa umur operasi dan memungkinkan evaluasi kondisi transformator secara tepat, akurat, dan berkelanjutan, sehingga mendukung pengambilan keputusan pemeliharaan yang lebih efektif dan tepat waktu guna memperpanjang umur layanan transformator.

DAFTAR REFERENSI

- [1] Maruf, A., & Primadiyono, Y. (2021). Analisis Pengaruh Pembebanan Dan Temperatur Terhadap Susut Umur Transformator Tenaga 60 Mva Unit 1 Dan 2 Di Gi 150 Kv Kalisari. *Edu Elekrika Journal*, 10(1), 1–10.
- [2] Hermawan, A., Sutjipto, R., Irmadhani Hidayat, S., & Berlian Suryaningtyas, F. (2020). Studi Pengaruh Pembebanan sebagai Dasar Scheduling Maintenance untuk Meminimalisir Susut Umur Transformator 1 GI Blimbing. *ELPOSYS: Jurnal Sistem Kelistrikan*, 7(3), 33–38. <https://doi.org/10.33795/elposys.v7i3.16>.
- [3] Febriansyah, I., & Koerniawan, T. (2018). Studi Pengaruh Pembebanan Dan Suhu Terhadap Susut Umur Transformator Tenaga 60 MVA Di Gardu Induk Gandul 150/20 kV Unit 3. <http://156.67.221.169/id/eprint/758>
- [4] PT. PLN (Persero), SPLN D3. 002-1 (2007): Spesifikasi Transformator Distribusi Jakarta
- [5] PT. PLN (Persero), 1979. SPLN 17: Pedoman Pembebanan Transformator Terendam Minyak. Jakarta
- [6] Rusdjaja, T, dkk, 2014. Buku Pedoman Pemeliharaan Transformator Tenaga. Jakarta: PT PLN (Persero).
- [7] Kadir, Abdul. Transformator edisi ketiga. 2010. Jakarta: UI-Press
- [8] Krisnadi, D.I. 2011. Analisis Pengaruh Temperatur Terhadap Masa Guna Dan Pembebanan Darurat Transformator Daya. Tesis. Program Magister Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Indonesia, Depok
- [9] Kurniawan, & Firdaus. 2016. Studi Analisa Pengaruh Pembebanan Dan Temperatur Lingkungan Terhadap Susut Umur Transformator Daya Pada Gardu Induk Garuda Sakti. *Jom FTEKNIK*, 3, 1-6 BARASA, E. D., Simamora, Y., & Azis, H. (2020).
- [10] Analisa Perkiraan Umur Transformator Di Gardu Induk Paniki Berdasarkan Pengaruh Pembebanan. <http://156.67.221.169/3029/>
- [11] Gultom, P., Danial, I., & Rajagukguk, M. (2018). Studi susut umur transformator distribusi 20 KV Akibat pembebanan lebih. *Teknik Elektro*.