



Analisa Pengaruh Pembebanan dan Temperatur Lingkungan terhadap Umur Transformator 60 MVA Gardu Induk 150/70/20 kV

Vellyn Rizky Mahendra^{1*}, Muhammad Haddin²

^{1,2}Teknik Elektro, Universitas Islam Sultan Agung, Indonesia

*Penulis Korespondensi: vellynrm@gmail.com

Abstract. *The operational issue of the 60 MVA transformer at Maumere 150/70/20 kV Substation is the lack of information regarding the effects of transformer loading and ambient temperature on hot-spot temperature, insulation aging rate, loss of life, and estimated transformer life. This study aims to determine transformer loss of life, analyze the effects of loading and ambient temperature on hot-spot temperature and insulation aging rate, estimate transformer life, and evaluate insulating oil condition based on breakdown voltage test results. The study used transformer loading and ambient temperature data from January to March 2026, along with breakdown voltage test data from 2024 to 2026. The analysis included loading ratio, top-oil temperature, hot-spot temperature, relative aging rate, loss of life, and estimated transformer life. The results show that increasing loading and ambient temperature raises hot-spot temperature and accelerates insulation aging, resulting in greater loss of life and shorter transformer life. During the study period, the equivalent loss of life was 0.01120 pu, with an estimated transformer life of 20.49 years. At constant loading of 80%, 90%, and 100%, the hot-spot temperatures were 76.5°C, 85.7°C, and 96.1°C, with estimated lives of 19.64, 18.94, and 16.5 years, respectively. Ambient temperature increases from 23.1°C to 33.1°C raised the hot-spot temperature from 61.2°C to 71.2°C and increased the relative aging rate by approximately 3.18 times. These findings confirm that higher loading and ambient temperature accelerate insulation aging and reduce transformer life.*

Keywords: 60 MVA Transformer; Ageing Rate; Loading; Loss of Life; Temperature.

Abstrak. Permasalahan pengoperasian Transformator 60 MVA Gardu Induk 150/70/20 kV Maumere adalah belum diketahuinya pengaruh pembebanan dan temperatur lingkungan terhadap temperatur *hot spot*, laju penuaan isolasi, susut umur, dan perkiraan umur transformator. Penelitian ini bertujuan memperoleh nilai susut umur, menganalisis pengaruh pembebanan dan temperatur lingkungan terhadap temperatur *hot spot* dan laju penuaan isolasi, memperkirakan umur transformator, serta mengevaluasi kondisi minyak isolasi berdasarkan hasil pengujian *breakdown voltage*. Metode penelitian menggunakan data pembebanan dan temperatur lingkungan periode Januari–Maret 2026 serta data hasil pengujian *breakdown voltage* tahun 2024–2026. Tahapan analisis meliputi perhitungan rasio pembebanan, temperatur *top oil*, temperatur *hot spot*, laju penuaan relatif, susut umur, dan perkiraan umur transformator. Hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan pembebanan dan temperatur lingkungan meningkatkan temperatur *hot spot* dan laju penuaan relatif yang berdampak pada bertambahnya susut umur transformator. Kondisi pembebanan selama periode penelitian menghasilkan susut umur ekuivalen sebesar 0,01120 pu dengan perkiraan umur transformator sebesar 20,49 tahun. Simulasi pembebanan konstan sebesar 80%, 90%, dan 100% menghasilkan temperatur *hot spot* masing-masing sebesar 76,5°C, 85,7°C, dan 96,1°C dengan perkiraan umur masing-masing sebesar 19,64 tahun, 18,94 tahun, dan 16,5 tahun. Variasi temperatur lingkungan sebesar 23,1°C–33,1°C pada tingkat pembebanan yang sama meningkatkan temperatur *hot spot* dari 61,2°C menjadi 71,2°C serta meningkatkan laju penuaan relatif sekitar 3,18 kali dari nilai awal. Analisis pengaruh pembebanan dan temperatur lingkungan mengungkap bahwa kenaikan kedua parameter tersebut mempercepat penuaan isolasi, meningkatkan susut umur, dan menurunkan perkiraan umur transformator.

Kata Kunci: Laju Penuaan; Pembebanan; Susut Umur; Temperatur; Transformator 60 MVA.

1. LATAR BELAKANG

Gardu induk merupakan bagian penting dalam sistem tenaga listrik yang berfungsi menerima, mengatur, dan menyalurkan energi listrik dari jaringan transmisi menuju jaringan distribusi. Salah satu peralatan utamanya adalah transformator daya yang berperan dalam proses transformasi tegangan dan dituntut beroperasi secara andal serta berkesinambungan sesuai umur yang telah ditetapkan dari pabrikan. Permasalahan pada Transformator 60 MVA

Gardu Induk Maumere adalah belum diketahuinya pengaruh pembebanan aktual dan temperatur lingkungan terhadap temperatur *hot spot*, laju penuaan isolasi, susut umur, dan perkiraan umur transformator. Berdasarkan *logsheet* operasi Januari 2026, pembebanan tertinggi mencapai 66,87%, sedangkan rata-rata pembebanan harian sebesar 24,15%. Rata-rata pembebanan pada waktu beban puncak mencapai 40,39% dan luar waktu beban puncak sebesar 19,03% (PLN ULTG Flores Timur, 2026) . Dampak dari fluktuasi beban tersebut adalah meningkatnya temperatur *top oil* dan temperatur *hot spot* belitan yang dapat mempercepat proses penuaan termal isolasi serta meningkatkan susut umur transformator. Solusinya adalah dilakukan analisis pengaruh pembebanan dan temperatur lingkungan terhadap temperatur *hot spot*, laju penuaan isolasi, susut umur, dan perkiraan umur transformator.

Beberapa penelitian terdahulu tentang analisa umur transformator telah dilakukan, antara lain analisis pengaruh pembebanan dan temperatur terhadap susut umur Transformator 60 MVA GI Kalisari (Maruf & Primadiyono, 2021), analisis pengaruh pembebanan terhadap susut umur Trafo GTG 1.3 PLTGU Tambak Lorok (Sigid, 2008), serta analisis perkiraan umur Trafo 150 kV GI Isimu (Igrisa & Mohamad, 2021). Hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan pembebanan dan temperatur berpengaruh terhadap kenaikan temperatur *hot spot* dan susut umur transformator.

Fokus penelitian ini adalah pada Analisa Pengaruh Pembebanan dan Temperatur Lingkungan Terhadap Umur Transformator. Sebagai objek penelitian ditentukan Trafo 60 MVA GI 150/70/20 KV Maumere.

2. KAJIAN TEORITIS

Tinjauan Penelitian Relevan

Penelitian pada Transformator 60 MVA Unit 1 dan 2 GI 150 kV Kalisari menunjukkan bahwa peningkatan pembebanan dan temperatur menyebabkan kenaikan temperatur *hot spot*, mempercepat laju penuaan isolasi, dan mengurangi sisa umur transformator (Maruf and Primadiyono, 2021). Penelitian pada Trafo GTG 1.3 PLTGU Tambak Lorok memperoleh susut umur sebesar 0,24 pu/hari pada pembebanan 80%, sedangkan pembebanan 100% pada temperatur lingkungan 20°C menghasilkan susut umur 1 pu/hari (Sigid, 2008). Penelitian pada Trafo Tenaga 150 kV GI Isimu juga menunjukkan bahwa pembebanan konstan 100% menghasilkan temperatur *hot spot* 112,75°C dengan susut umur 5,49 pu/hari dan perkiraan umur 5,27 tahun. Penelitian serupa pada Transformator 1 GI Blimbing menunjukkan bahwa perubahan tingkat pembebanan turut memengaruhi umur operasi transformator dan dapat digunakan sebagai dasar evaluasi kondisi transformator (Hermawan et al., 2020). Hasil

penelitian tersebut menjadi landasan bahwa pembebanan dan temperatur merupakan parameter penting dalam analisis penuaan termal transformator.

Transformator

Transformator adalah peralatan tenaga listrik yang mempunyai fungsi menyalurkan tenaga listrik dari suatu level tegangan menuju level tegangan di bawahnya, pada frekuensi yang sama. Trafo menggunakan prinsip elektromagnetik yaitu hukum ampere dan induksi faraday, dimana perubahan arus medan listrik dapat membangkitkan medan magnet dan perubahan medan magnet/fluks medan magnet dapat membangkitkan tegangan induksi.

Perbandingan Rugi Transformator

Untuk keperluan perhitungan temperatur transformator, dibutuhkan nilai perbandingan antara rugi beban total (rugi tembaga pada beban penuh) terhadap rugi beban nol. Perbandingan ini dilambangkan dengan R atau d dan dinyatakan dengan persamaan (1) dan (2).

$$R = \frac{\text{Rugi Total}}{\text{Rugi Tanpa Beban}} \dots\dots\dots (i)$$

atau

$$d = \frac{\text{Rugi Tembaga Daya Pengenal}}{\text{Rugi Beban Nol}} \dots\dots\dots (ii)$$

Rasio Pembebanan Transformator

Tingkat pemanfaatan kapasitas transformator dinyatakan dengan rasio pembebanan (K), yaitu perbandingan antara daya semu (S) terhadap daya semu pengenal (S_r), sebagaimana persamaan (3). Daya semu diperoleh dari daya aktif (P) dan daya reaktif (Q) hasil pengukuran dan dinyatakan pada persamaan (4).

$$K = \frac{S}{S_r} \dots\dots\dots (iii)$$

Dengan: K = rasio pembebanan, S = beban transformator aktual (MVA), S_r = kapasitas rating transformator (MVA).

$$S = \sqrt{(P^2 + Q^2)} \dots\dots\dots (iv)$$

Dengan: S = daya semu (VA), P = daya aktif (W), Q = daya reaktif (VAR).

Perhitungan Temperatur *Hot spot*

Terdapat tiga parameter untuk menentukan temperatur *hot spot* yaitu temperatur lingkungan [*ambient*], temperatur minyak bagian atas [*top oil*], dan temperatur titik terpanas [*hot spot*]. Kenaikan temperatur *top oil* pada kondisi beban stabil dihitung dengan persamaan (5), sedangkan pada kondisi beban yang berubah-ubah terhadap waktu dihitung secara dinamis pada tiap interval pengamatan dengan persamaan (6).

$$\Delta\theta_b = \Delta\theta_{or} \times \left(\frac{1+dK^2}{1+d} \right)^x \dots\dots\dots (v)$$

Dengan: $\Delta\theta_b$ = kenaikan temperatur *top oil* untuk beban stabil ($^{\circ}\text{C}$), $\Delta\theta_{or}$ = kenaikan temperatur *top oil* pada beban pengenalan, d = perbandingan rugi tembaga terhadap rugi beban nol, K = rasio pembebanan, x = eksponen untuk minyak.

$$\Delta\theta_{on} = \Delta\theta_{o(n-1)} + (\Delta\theta_b - \Delta\theta_{o(n-1)}) \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right) \dots\dots\dots (vi)$$

Dengan: $\Delta\theta_{on}$ = kenaikan temperatur *top oil* beban berubah-ubah pada interval ke- n ($^{\circ}\text{C}$), $\Delta\theta_{o(n-1)}$ = kenaikan temperatur minyak awal (pada interval sebelumnya) ($^{\circ}\text{C}$), $\Delta\theta_b$ = kenaikan temperatur minyak pada kondisi stabil ($^{\circ}\text{C}$), t = lama pengamatan per interval (waktu), τ = konstanta waktu minyak (jam).

Selisih antara temperatur *hot spot* dan temperatur *top oil* ($\Delta\theta_{td}$) dihitung menggunakan persamaan (7).

$$\Delta\theta_{td} = (\Delta\theta_{hr} - \Delta\theta_{or}) \times K^{2y} \dots\dots\dots (vii)$$

Dengan: $\Delta\theta_{td}$ = selisih antara *hot spot* dengan *top oil* ($^{\circ}\text{C}$), $\Delta\theta_{hr}$ = kenaikan temperatur *hot spot* pada beban pengenalan ($^{\circ}\text{C}$), $\Delta\theta_{or}$ = kenaikan temperatur *top oil* pada beban pengenalan ($^{\circ}\text{C}$), K = rasio pembebanan, y = eksponen temperatur belitan.

Sedangkan temperatur *hot spot* total (θ_h) merupakan penjumlahan temperatur lingkungan, kenaikan temperatur *top oil*, dan selisih temperatur *hot spot* terhadap *top oil* sebagaimana persamaan (8).

$$\theta_h = \theta_a + \Delta\theta_{on} + \Delta\theta_{td} \dots\dots\dots (viii)$$

Dengan: θ_h = temperatur *hot spot* ($^{\circ}\text{C}$), θ_a = temperatur lingkungan / *ambient* ($^{\circ}\text{C}$), $\Delta\theta_{on}$ = kenaikan temperatur *top oil* beban berubah-ubah ($^{\circ}\text{C}$), $\Delta\theta_{td}$ = selisih antara temperatur *hot spot* dengan *top oil* ($^{\circ}\text{C}$).

Susut Umur Transformator

Susut umur (*loss of life*) transformator merupakan proses penurunan masa guna transformator akibat degradasi isolasi kertas belitan akibat panas berlebih. Menurut IEC 60076-7, transformator dirancang beroperasi selama 20,55 tahun (umur dasar) pada temperatur *hot spot* referensi 98°C . Laju penuaan termal relatif (V) yang menyatakan kecepatan proses penuaan isolasi terhadap kondisi normal dihitung dengan persamaan (9).

$$V = 10^{\left(\frac{\theta_h - 98}{19,93}\right)} \dots\dots\dots (ix)$$

Dengan: V = laju penuaan termal relatif (pu), θ_h = temperatur *hot spot* ($^{\circ}\text{C}$), 98 = temperatur referensi *hot spot* sesuai standar IEC ($^{\circ}\text{C}$), $19,93$ = konstanta empiris berdasarkan standar IEC.

Susut umur ekuivalen merupakan nilai rata-rata laju penuaan relatif transformator selama periode pengamatan. Nilai tersebut diperoleh dengan menjumlahkan laju penuaan relatif pada

setiap interval waktu (V_n), kemudian membaginya dengan jumlah total interval waktu (N) dan dinyatakan dengan persamaan (10).

$$L = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N V \dots\dots\dots(x)$$

Dengan: L = susut umur relatif (pu), n = jumlah dari tiap-tiap interval waktu, N = jumlah total interval waktu ekivalen, V = laju penuaan relatif.

Perkiraan sisa umur transformator (n) diperoleh dari selisih umur dasar dikurangi hasil perkalian antara usia pakai transformator dengan nilai susut umur sebagaimana persamaan (11).

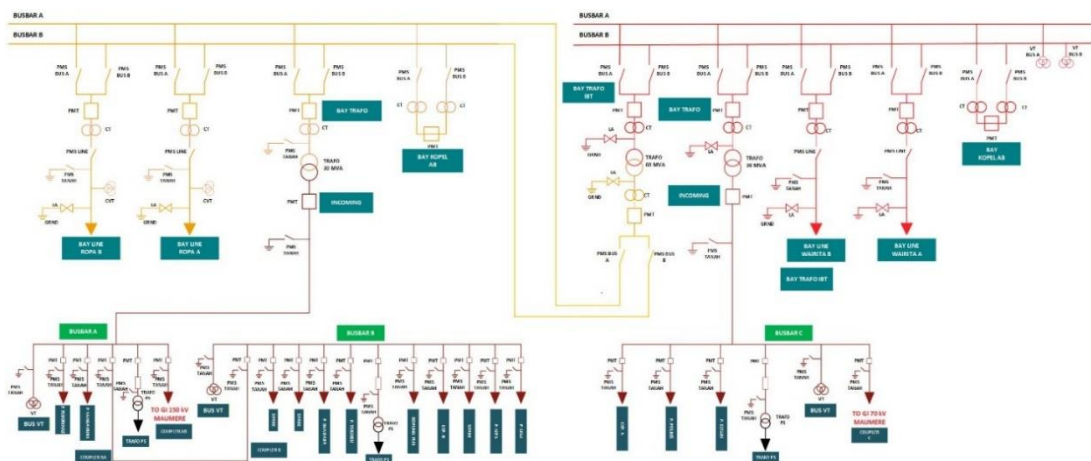
$$n = \text{umur dasar} - (\text{usia pakai} \times \text{susut umur}) \dots\dots\dots(xi)$$

Dengan: n = sisa umur transformator (tahun), *umur dasar* = standar IEC 60076-7 (20,55 tahun), *usia pakai* = lama transformator sudah beroperasi (tahun), L = susut umur relatif (pu).

Selain kondisi termal, kondisi minyak isolasi transformator dievaluasi melalui pengujian *breakdown voltage* (BDV) mengacu pada IEC 60422, yang menyatakan kemampuan isolasi minyak dalam menahan tegangan yang diberikan.

3. METODE PENELITIAN

Penelitian menggunakan pendekatan kuantitatif deskriptif-analitis dan bersifat terapan. Objek penelitian adalah Interbus Transformator 60 MVA yang terpasang di Gardu Induk 150/70/20 kV Maumere. Gambaran objek penelitian ditampilkan pada *Single Line Diagram* (SLD) 150 kV dan 70 kV Gardu Induk Maumere seperti ditunjukkan Gambar 1.



Gambar 1. Single Line Diagram 150/70/20 kV GI Maumere.

Metode penelitian menggunakan data *logsheets* operasi Januari-Maret 2026 dengan interval satu jam, temperatur lingkungan harian dari Stasiun Meteorologi Fransiskus Xaverius

Seda Kabupaten Sikka, serta hasil pengujian BDV pada *main tank* dan OLTC tahun 2024 - 2026. Spesifikasi teknis transformator yang menjadi objek penelitian disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Spesifikasi Transformator 60 MVA.

Parameter	Nilai
Merk	B&D Transformer
Nomor seri	PX18-0088
Tahun pembuatan	2018
Connection	YNyn0
Daya pengenal	36/60 MVA
Pendinginan	ONAN / ONAF
Tegangan primer	150 kV
Tegangan sekunder nameplate	66 kV
Rugi daya pengenal	114,604 kW
Rugi beban nol	31,669 kW

Tahapan penelitian ini disusun dalam diagram alir seperti pada Gambar 2.



Gambar 2. Tahapan Model Penelitian.

Berdasarkan Gambar 2, Tahapan penelitian dimulai dengan menentukan model penelitian sesuai dengan Gambar 1. Tahapan selanjutnya dimulai dengan penentuan data operasi transformator, temperatur lingkungan, dan hasil pengujian *Breakdown Voltage*. Data beban puncak harian diperoleh dari *logsheet* dengan interval pencatatan setiap satu jam, sehingga setiap nilai puncak merepresentasikan satu interval waktu pengamatan. Tahapan

dilanjutkan dengan perhitungan daya semu (S), rasio pembebanan (K), kenaikan temperatur *top oil*, temperatur *hot spot* (θ_h), laju penuaan relatif (V), susut umur (L), serta perkiraan umur (n). Data temperatur lingkungan yang digunakan merupakan temperatur rata-rata harian selama periode penelitian. Nilai tersebut digunakan bersama dengan kenaikan temperatur *top oil* dan selisih temperatur *hot spot* terhadap *top oil* untuk menentukan temperatur *hot spot* transformator. Nilai eksponen minyak (x) ditetapkan sebesar 0,8 dan eksponen temperatur belitan (y) sebesar 1,3. Kenaikan temperatur *top oil* pada beban pengenal ditetapkan sebesar 50°C sesuai data nameplate transformator. Hasil pengujian BDV selanjutnya digunakan sebagai data pendukung untuk memperkuat analisis susut umur transformator.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Kondisi Beban Aktual

Periode data yang digunakan sebagai dasar analisa adalah data logsheet bulan Januari sampai dengan Maret 2026. Beban puncak tertinggi tercatat pada 9 Januari 2026 sebesar 40,12 MVA atau 66,87% dengan temperatur lingkungan 28,1°C. Kondisi beban puncak tersebut digunakan sebagai contoh tahapan perhitungan, sedangkan seluruh data beban puncak harian tetap digunakan dalam analisis selama periode penelitian.

Perhitungan Rasio Pembebanan

Berdasarkan data S pada 9 Januari 2026 sebesar 40,12 MVA, ditentukan K menggunakan persamaan (3).

$$K = \frac{40,12}{60} = 0,6687$$

Perhitungan Temperatur *Hot spot*

Kenaikan *top oil* stabil dihitung menggunakan persamaan (5).

$$\Delta\theta_b = 50 \times \left(\frac{1 + 3,62 \times 0,6687^2}{1 + 3,62} \right)^{0,8}$$

$$\Delta\theta_b = 31,749 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Setelah nilai kenaikan *top oil* stabil didapat. Kemudian menentukan selisih temperatur *hot spot* dengan *top oil* dihitung menggunakan persamaan (7).

$$\Delta\theta_{td} = (68 - 50) \times 0,6687^{2(1,3)}$$

$$\Delta\theta_{td} = 18 \times 0,351$$

$$\Delta\theta_{td} = 6,323 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Temperatur *hot spot* dihitung menggunakan persamaan (8) dengan menjumlahkan temperatur lingkungan, kenaikan temperatur *top oil*, dan selisih temperatur *hot spot* terhadap *top oil*.

$$\theta_h = 28,1 + 31,749 + 6,323$$

$$\theta_h = 66,2 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Perhitungan Laju Penuaan Relatif

Laju penuaan thermal relatif dinyatakan dalam persamaan (9).

$$V = 10^{\left(\frac{66,2-98}{19,93}\right)}$$

$$V = 10^{-1,59}$$

$$V = 0,0256 \text{ pu}$$

Perhitungan Susut Umur

Nilai ekuivalen susut umur yang diperoleh jumlah laju penuaan relatif dengan jumlah hari selama periode penelitian melalui persamaan (10).

$$L = \frac{1}{90} \times (0,01007 + 0,0162 + 0,01097 + 0,0151 + 0,0110 + \dots)$$

$$L = \frac{1}{90} \times 1,00768$$

$$L = 0,01119 \text{ pu}$$

Perhitungan Sisa Umur Transformator

Perkiraan usia pakai atau sisa umur transformator dihitung berdasarkan umur dasar transformator yang ditetapkan oleh standar IEC, yaitu 20,55 tahun, dikurangi usia transformator yang telah digunakan dikalikan nilai susut umur harian.

Untuk mendapatkan hasil perhitungan perkiraan umur transformator dapat menggunakan persamaan (11).

$$n = 20,55 - (5 \times 0,01119)$$

$$n = 20,49 \text{ tahun}$$

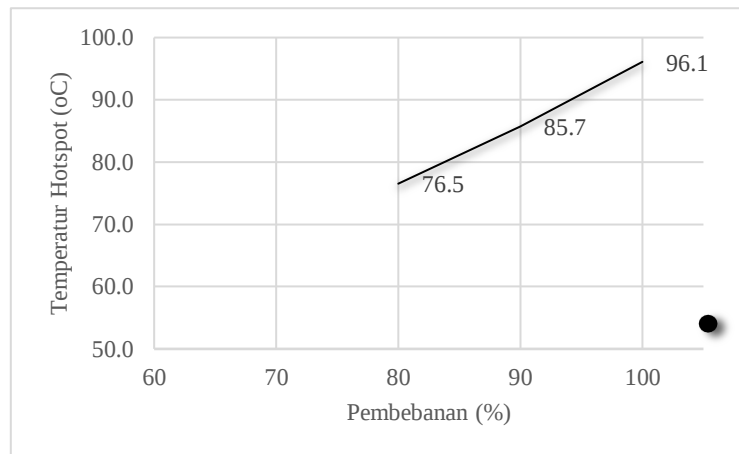
Pengaruh Beban Konstan

Untuk menganalisa pengaruh pembebanan terhadap temperatur *hot spot*, susut umur, dan estimasi umur transformator digunakan simulasi perhitungan beban konstan. Data hasil simulasi ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Hasil Perhitungan pada Pembebanan Konstan.

No	Pembebanan (%)	Temperatur Hotspot (C)	Susut Umur (pu)	Perkiraan Umur (tahun)
1	80	76,4	0,07293	19,64
2	90	85,7	0,21124	18,94
3	100	96,1	0,69947	16,5

Karakteristik hubungan antara peningkatan pembebanan dan temperatur *hot spot* belitan transformator menunjukkan bahwa temperatur *hot spot* meningkat seiring dengan bertambahnya pembebanan transformator, seperti disajikan pada Gambar 3.

**Gambar 3.** Hubungan Pembebanan Terhadap Temperatur *Hot spot*.

Pengaruh Temperatur Lingkungan

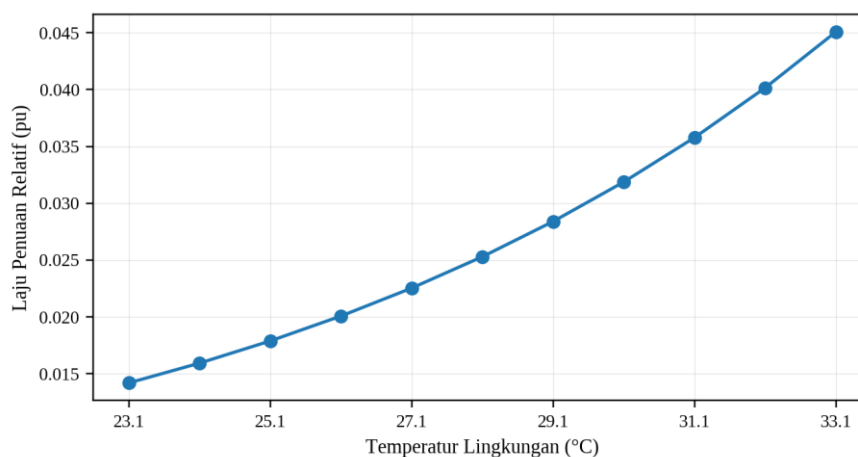
Untuk mengetahui pengaruh perubahan temperatur lingkungan, analisis dilakukan dengan mempertahankan rasio pembebanan tertinggi tanggal 9 Januari 2026 dan disajikan pada Tabel 3.

Tabel 3. Pengaruh Temperatur Lingkungan Pada Beban Tetap.

Beban Tertinggi (MVA)	Temperatur Lingkungan (0C)	Temperatur <i>Hot spot</i> (0C)	Laju Penuaan Relatif (pu)
40,12	23,1	61,2	0,014194654
40,12	24,1	62,2	0,015933105
40,12	25,1	63,2	0,017884468
40,12	26,1	64,2	0,02007482
40,12	27,1	65,2	0,022533428
40,12	28,1	66,2	0,025293148
40,12	29,1	67,2	0,028390856
40,12	30,1	68,2	0,031867949
40,12	31,1	69,2	0,035770888
40,12	32,1	70,2	0,040151829

40,12	33,1	71,2	0,045069314
-------	------	------	-------------

Kenaikan temperatur lingkungan dari 23,1°C menjadi 33,1°C meningkatkan temperatur *hot spot* dari 61,2°C menjadi 71,2°C. Laju penuaan relatif meningkat dari 0,014195 pu menjadi 0,045069 pu atau sekitar 3,18 kali dari nilai awal. Karakteristik perubahan laju penuaan relatif terhadap temperatur lingkungan ditampilkan pada Gambar 4.



Gambar 4. Hubungan Temperatur Lingkungan terhadap Laju Penuaan Relatif.

Kesusaian Hasil Pengujian *Breakdown Voltage*

Data hasil pengujian *breakdown voltage* periode 2024–2026 digunakan sebagai parameter pendukung untuk memperkuat hasil analisis susut umurselama. Nilai BDV *main tank* pada seluruh tahun pengujian berada di atas batas 50 kV, sedangkan nilai BDV OLTC tetap melampaui batas tindakan 30 kV. Nilai *main tank* relatif stabil namun meningkat pada 2026. Nilai uji pada OLTC turun di 2025, kemudian meningkat kembali pada 2026, seperti ditunjukkan pada Tabel 4.

Tabel 4. Hasil Pengujian *Breakdown Voltage*.

PENGU JIAN KE -	TAHUN PENGUJIAN					
	2024		2025		2026	
	MAIN TANK (kV)	OLTC (kV)	MAIN TANK (kV)	OLTC (kV)	MAIN TANK (kV)	OLTC (kV)
1	74,30	43,90	69	35	75,6	81,2
2	69,80	58,00	71,6	46,1	92,5	86,2
3	70,50	62,40	74,3	45,3	97,1	92,7
4	69,90	58,20	74,4	48,3	93,9	81,5
5	69,80	60,70	64,6	42	96	88,5
6	70,70	57,00	72,8	51,4	86,8	83,2
RATA- RATA	70,7	56,70	71,12	44,68	90,32	85,55

5. KESIMPULAN DAN SARAN

Analisis data pembebanan dan temperatur lingkungan pada Transformator 60 MVA GI Maumere periode Januari–Maret 2026 menunjukkan susut umur ekuivalen sebesar 0,01120 pu dengan perkiraan sisa umur mencapai 20,49 tahun. Berdasarkan observasi aktual, pada kondisi pembebanan rendah (32,09%), temperatur *hot spot* tercatat sebesar 46,6°C dengan laju penuaan relatif 0,002629 pu. Namun, saat pembebanan mencapai titik tertingginya (66,87%), temperatur *hot spot* meningkat menjadi 66,2°C yang memicu lonjakan laju penuaan relatif menjadi 0,025293 pu. Temuan ini sejalan dengan penelitian yang dilakukan oleh Maruf dan Primadiyono (2021) pada Transformator 60 MVA GI Kalisari serta Hermawan et al. (2020) pada Transformator 1 GI Blimbing, yang secara konsisten membuktikan bahwa tren peningkatan fluktuasi beban berbanding lurus dengan kenaikan temperatur *hot spot* dan percepatan degradasi termal isolasi transformator.

Lebih lanjut, untuk memvalidasi dampak pembebanan ekstrem, penelitian ini melakukan simulasi pembebanan konstan pada level 80%, 90%, dan 100%. Hasil simulasi menunjukkan penurunan perkiraan umur operasi secara berurutan menjadi 19,64 tahun, 18,94 tahun, dan 16,5 tahun. Hasil ini memperlihatkan ketahanan termal yang relatif lebih baik jika dikomparasikan dengan beberapa kasus pada penelitian terdahulu. Sebagai perbandingan, penelitian Sigid (2008) pada Trafo GTG 1.3 PLTGU Tambak Lorok mencatat bahwa pembebanan 100% pada suhu ambient 20°C menghasilkan susut umur yang sangat ekstrem yakni 1 pu/hari (pembebanan 80% sebesar 0,24 pu/hari). Begitu pula dengan observasi pada Trafo Tenaga 150 kV GI Isimu, di mana pembebanan konstan 100% memicu temperatur *hot spot* hingga 112,75°C, susut umur 5,49 pu/hari, dan menyebabkan sisa umur drop hingga ke angka 5,27 tahun.

Perbedaan degradasi umur yang cukup signifikan pada beban penuh ini (16,5 tahun pada GI Maumere berbanding 5,27 tahun pada GI Isimu) mengindikasikan bahwa karakteristik pendinginan dan profil temperatur lingkungan memegang peranan krusial. Pernyataan ini dibuktikan langsung oleh hasil pengujian variasi temperatur lingkungan pada GI Maumere. Pada tingkat pembebanan yang konstan, peningkatan suhu lingkungan dari 23,1°C menjadi 33,1°C terbukti menaikkan temperatur *hot spot* sebesar 10°C (dari 61,2°C menjadi 71,2°C) dan melipatgandakan laju penuaan relatif hingga 3,18 kali lipat dari nilai awalnya.

Kondisi termal yang belum melampaui batas kritis tersebut juga dikonfirmasi oleh integritas dielektrik minyak isolasi transformator. Hasil pengujian *breakdown voltage* (BDV) pada main tank Transformator GI Maumere untuk tahun 2024, 2025, dan 2026 menunjukkan tren yang sangat baik, yakni berturut-turut sebesar 70,70 kV, 71,12 kV, dan 90,32 kV. Merujuk

pada standar IEC 60422, seluruh nilai tegangan tembus tersebut berada jauh di atas batas aman yang dipersyaratkan (minimum 50 kV). Sinkronisasi antara rendahnya laju susut umur termal secara teoritis dengan tingginya nilai BDV secara pengujian fisik memberikan justifikasi komprehensif bahwa Transformator 60 MVA GI Maumere saat ini masih beroperasi dalam kondisi prima, didukung oleh tingkat pembebanan maksimal (66,87%) yang masih aman dari ancaman penuaan dini.

Namun, evaluasi kondisi transformator akan menjadi lebih representatif apabila analisis selanjutnya menggunakan profil pembebanan setiap jam, bukan hanya beban puncak harian, serta dilengkapi dengan data pengukuran aktual temperatur minyak dan temperatur belitan (*winding*) pada setiap interval pencatatan beban. Data tersebut diperlukan untuk meningkatkan akurasi analisis temperatur hot spot, laju penuaan isolasi, dan susut umur berdasarkan kondisi operasi aktual transformator.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan terima kasih kepada Prof. Dr. Ir. H. Muhammad Haddin, M.T. selaku dosen pembimbing atas arahan, bimbingan, dan masukan yang diberikan selama penyusunan serta penyempurnaan penelitian ini. Penghargaan dan rasa terima kasih turut disampaikan kepada kedua orang tua serta pasangan atas doa, dukungan, motivasi, dan semangat yang diberikan selama proses penelitian.

DAFTAR REFERENSI

- As, N. R., Andika, G., Supriyadi, E., Elektro, J. T., Teknik, F., Sains, I., Moh, J., Ii, K., & Selatan, J. (2027). Analisa penurunan usia transformator 1250 kVA akibat pembebanan pada transformator di rumah sakit swasta. *STICH Journal*, 34(1), 52–63. <https://doi.org/10.37277/stch.v34i1.2070>
- Azzahra, F. H., Supriyadi, E., S, T. E., Industri, F. T., Sains, I., Moh, J., Ii, K., Indah, B. S., & Selatan, J. (2022). Analisis prediksi usia pakai transformator dengan metode regresi linear. XXIV, 34–42. <https://doi.org/10.37277/s.v24i1.1332>
- Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika. (2026). *Data harian Kabupaten Sikka*. BMKG.
- Budi, R., Utomo, S., & Nugroho, A. (n.d.). *Kualitas minyak transformator*.
- Citra Putri Maharani, I. M. A. N., Septian Ilham N., & A. H. (2024). Pengujian tegangan tembus minyak trafo. *Jurnal Informatika dan Teknik Elektro Terapan*, 12(3), 1623–1629. <https://doi.org/10.23960/jitet.v12i3.4347>
- Halawa, A., & Ridal, Y. (2024). Analisa susut umur transformator terhadap pengaruh pembebanan pada PLTU Teluk Sirih Padang.5(2).

- Hermawan, A., Sutjipto, R., & Irmadhani, S. (2020). Studi pengaruh pembebanan sebagai dasar scheduling maintenance untuk meminimalisir susut umur transformator 1 GI Blimbing. *ELPOSYS: Jurnal Sistem Kelistrikan*, 7(3). <https://doi.org/10.33795/elposys.v7i3.16>
- Hidayat, M. R., Widiyantoro, B., & Institut Teknologi PLN. (n.d.). Analisis kemampuan minyak isolasi transformator daya merek Unindo dengan pengujian dissolved gas analysis dan breakdown voltage di Gardu Induk Serpong. 100–106.
- International Electrotechnical Commission. (2013). *IEC 60422:2013: Mineral insulating oils in electrical equipment—Supervision and maintenance guidance (4.0)*. International Electrotechnical Commission.
- International Electrotechnical Commission. (2018). *International standard*. International Electrotechnical Commission.
- Juwita, R. S. (2023). *Metode regresi linear*.
- Kisan, M., Sangathan, S., Nehru, J., & Pitroda, S. G. (2026).
- 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. 10(1), 19–24.
- Nugraha, R. R., Priatna, E., & Nurdiansyah, R. (2025). Analisis perkiraan sisa umur transformator daya IBT II 500 MVA berdasarkan kondisi beban dan suhu pada Gardu Induk Tegangan Ekstra Tinggi 500 kV Tasikmalaya. 6(1), 1–9.
- Nugroho, S. A., Taufiq, A. J., Nova, D., & Hardani, K. (2019). Perhitungan perkiraan umur transformator akibat pengaruh [judul tidak lengkap]. *Jurnal Riset Rekayasa Elektro*, 1(1), 11–16. <https://doi.org/10.30595/jrre.v1i1.4923>
- Pemeliharaan, B. P. (n.d.). *Pedoman pemeliharaan peralatan penyaluran tenaga listrik PT PLN*.
- PLN ULTG Flores Timur. (2026). *Logsheet operasi transformator IBT 60 MVA Gardu Induk Maumere periode Januari–Maret 2026*. PT PLN (Persero).
- Rohman, A. A. (n.d.). Analisis pengaruh beban puncak terhadap efisiensi dan umur transformator daya 30 MVA di PT PLN (Persero) Gardu Induk 150 kV Blora. 1–12.
- Setiawati, N. E., Munir, M., Wati, T., & Masfufiah, I. (2021). Prediksi sisa umur transformator menggunakan metode backpropagation. 4, 1–6.
- Sigid, P. (2008). *Transformator tenaga*.
- Sutjipto, R. (2018). *Transformator: Edisi revisi*. Polinema Press.
- Yahya Igrisa, Y., Mohamad, Y., & A. I. T. (2021). Analisis perkiraan umur trafo tenaga 150 kV. *Jambura Journal of Electrical and Electronics Engineering*, 3, 101–108. <https://doi.org/10.37905/jjee.v3i2.10784>