JREEC
JOURNAL OF RENEWABLE ENERGY, ELECTRONICS AND CONTROL
homepage URL : https://ejurnal.itats.ac.id/jreec

ANALISA SUSUT UMUR TRANSFORMATOR AKIBAT PENGARUH BEBAN DAN TEMPERATUR PADA TRAFO 150 kV DI GARDU INDUK BUDURAN

Muhammad Reihan Kurniawan[1], Misbahul Munir[2], dan Wahyu Setyo Pambudi[3].
Institut Teknologi Adhi Tama Surabaya.

INFORMASI ARTIKEL

Jurnal JREEC – Volume 06
Nomer 01, April 2026

Halaman:
17 – 27
Tanggal Terbit :
30 April 2026

DOI:
10.31284/j.JREEC.2026.v61i1.86

ABSTRACT

This study aims to analyze the effect of loading and temperature on the age loss of 150 kV power transformers at the Buduran Substation. The main parameters studied include load factor (k), winding temperature ($\Delta\theta_b$), top oil temperature ($\Delta\theta_{td}$), and hot spot temperature (θ_c) and their relationship to the insulation aging rate and the remaining life of the transformer. The results of the analysis show that an increase in the load factor is in line with an increase in the transformer operating temperature, which contributes to an increase in age loss.Under low to medium loading conditions ($k \leq 0.6$), the hot spot temperature is in the range of 45 - 70 °C with a relatively small insulation aging rate, so the remaining life of the transformer is still relatively long, which is around 15 - 20 years. Conversely, under high loading ($k \geq 0.7$), the hot spot temperature increases to 78 - 90 °C and is followed by a significant increase in the age loss rate, reaching more than 10 - 15% per year, so that the remaining life of the transformer is significantly reduced and in some conditions has exceeded its nominal life. Daily loading patterns show that the afternoon and evening periods, especially at 14.00 WIB and 16.00 WIB, have higher load and temperature characteristics, with a greater impact on age loss in the afternoon. In general, the transformer is still operating in stable conditions, but load management and optimization of the cooling system are needed to suppress the rate of insulation aging and extend the service life of the transformer.

keywords: *Load Factor, Insulation Aging, Transformer Life Loss, Hot Spot Temperature, 150 kV Power Transformer*

EMAIL

reihank621@gmail.com 1
munir@itats.ac.id 2
wahyusp@itats.ac.id 3

PENERBIT

Jurusan Teknik Elektro-ITATS
Alamat:
Jl. Arief Rachman Hakim No.100,Surabaya 60117,
Telp/Fax: 031-5997244

Jurnal JREEC by Department of Elecreical

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh pembebanan dan temperatur terhadap susut umur transformator daya 150 kV di Gardu Induk Buduran. Parameter utama yang dikaji meliputi faktor beban (k), temperatur belitan ($\Delta\theta_b$), temperatur top oil ($\Delta\theta_{td}$), dan temperatur hot spot (θ_c) serta keterkaitannya dengan laju penuaan isolasi dan umur sisa transformator. Hasil analisis menunjukkan bahwa peningkatan faktor beban sejalan dengan kenaikan temperatur operasi transformator, yang berkontribusi terhadap bertambahnya susut umur. Pada kondisi pembebanan rendah hingga menengah ($k \leq 0,6$), temperatur hot spot berada pada kisaran 45 - 70 °C dengan laju penuaan isolasi relatif kecil, sehingga umur sisa transformator masih tergolong panjang, yaitu sekitar 15 - 20 tahun. Sebaliknya, pada pembebanan tinggi ($k \geq 0,7$), temperatur hot spot meningkat hingga 78 - 90 °C dan diikuti oleh kenaikan laju susut umur yang signifikan, mencapai lebih dari 10 - 15% per tahun, sehingga umur sisa transformator berkurang secara nyata dan pada beberapa kondisi telah melampaui umur nominalnya. Pola pembebanan harian menunjukkan bahwa periode siang dan sore hari, khususnya pada pukul 14.00 WIB dan 16.00 WIB, memiliki karakteristik beban dan temperatur yang lebih tinggi, dengan dampak susut umur

Engineering is licensed under a Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International License.

yang lebih besar pada sore hari. Secara umum, transformator masih beroperasi dalam kondisi stabil, namun pengelolaan pembebanan dan optimalisasi sistem pendinginan diperlukan untuk menekan laju penuaan isolasi dan memperpanjang umur pakai transformator.

Kata kunci: *Transformator Faktor Beban, Penuaan Isolasi, Susut Umur Transformator, Temperatur Hot Spot, Transformator Daya 150 kV*

PENDAHULUAN

Seiring meningkatnya kebutuhan listrik, permintaan energi di berbagai wilayah terus bertambah sehingga PT. PLN (Persero) dituntut untuk menyediakan pasokan listrik yang andal dan berkesinambungan. Keandalan dan stabilitas sistem tenaga listrik sangat bergantung pada kualitas perawatan peralatan, khususnya transformator sebagai komponen utama penunjang kinerja sistem [1][2][3].

Transformator daya merupakan komponen vital dalam sistem tenaga listrik yang berfungsi mengubah level tegangan, namun mengalami degradasi akibat pembebanan dan temperatur operasional. Beban berlebih dan suhu tinggi mempercepat kerusakan isolasi sehingga menurunkan umur pakai transformator. Oleh karena itu, analisis perkiraan umur transformator penting untuk mendukung perencanaan pemeliharaan yang optimal dan pemanfaatan sumber daya yang lebih efisien [4]

Umur transformator dipengaruhi oleh pembebanan dan temperatur, di mana beban berlebih menyebabkan kenaikan suhu yang mempercepat degradasi material dan isolasi internal [5]. Setiap kenaikan suhu sekitar 6°C di atas batas yang ditetapkan dapat menurunkan umur operasional secara signifikan, sehingga pengendalian temperatur menjadi sangat penting. Berdasarkan standar IEC, transformator dirancang beroperasi pada beban penuh selama 24 jam dengan batas maksimum temperatur *hot spot* sebesar 98°C untuk menjaga keamanannya [6]

Di Gardu Induk Buduran, beban puncak transformator terjadi pada pukul 14.00 dan 16.00 WIB, yang berpotensi mempercepat degradasi sifat minyak transformator akibat kenaikan temperatur operasi. Penelitian ini menganalisis susut umur transformator berdasarkan pengaruh pembebanan dan temperatur dengan mengacu pada standar IEC, di mana peningkatan pembebanan pada beberapa transformator terbukti menyebabkan kenaikan temperatur yang dapat mempercepat penuaan isolasi. Oleh karena itu, analisis ini difokuskan untuk mengetahui dampak pembebanan dan temperatur terhadap penurunan umur transformator.

TINJAUAN PUSTAKA

Transformator daya merupakan peralatan listrik statis yang berfungsi menyalurkan daya antar rangkaian melalui prinsip induksi elektromagnetik, sekaligus menyesuaikan tingkat tegangan dan arus sesuai kebutuhan tanpa mengubah frekuensi. Peran transformator sangat penting dalam menunjang keandalan sistem transmisi dan distribusi tenaga listrik. Pembebanan dan temperatur memberikan pengaruh yang signifikan terhadap laju susut umur transformator, di mana kenaikan temperatur hot spot dapat menurunkan ketahanan sistem isolasi. Oleh karena itu, pengendalian dan pemantauan kedua parameter tersebut secara optimal menjadi hal yang sangat penting untuk menjaga kinerja transformator serta memperpanjang umur operasionalnya [7].

Transformator

Transformator merupakan peralatan elektromagnetik statis yang berfungsi mentransfer energi listrik antar rangkaian melalui induksi elektromagnetik dengan frekuensi tetap, menggunakan dua kumparan terpisah, yaitu primer sebagai sisi masukan dan sekunder sebagai sisi keluaran untuk mengubah tingkat tegangan [8]. Pembebanan menjadi salah satu faktor utama yang memengaruhi penurunan umur transformator karena dapat meningkatkan suhu operasi sehingga menimbulkan panas berlebih pada belitan, yang pada akhirnya merusak sistem isolasi dan mempercepat proses penuaan. Selain itu, temperatur internal transformator serta suhu lingkungan sekitar turut menentukan kondisi termal transformator tenaga, di mana suhu lilitan yang terlalu tinggi dapat merusak isolasi dan mengubah karakteristik minyak isolasi. Penurunan kualitas isolasi minyak

tersebut menyebabkan berkurangnya kemampuan isolasi dan berdampak langsung pada masa pakai transformator, sementara pengaruh termal ini dipengaruhi oleh suhu lingkungan, suhu minyak, serta pola pembebanan yang terjadi [9].

Rugi – Rugi Daya

Rugi-rugi daya merupakan energi listrik yang hilang saat arus mengalir melalui penghantar akibat adanya resistansi dan karakteristik material konduktor. Oleh karena itu, besarnya rugi-rugi daya perlu diperhitungkan dan dikendalikan agar tetap berada dalam batas yang diizinkan. Nilai rugi-rugi daya serta penurunan tegangan pada gardu induk penerima harus dijaga tidak melebihi batas standar maksimum 5% untuk menjamin keandalan sistem kelistrikan. Seiring meningkatnya beban, arus yang mengalir pada konduktor juga bertambah, sehingga rugi-rugi daya dan penurunan tegangan semakin besar. Kondisi ini menimbulkan selisih antara daya dan tegangan yang dikirim dari suatu gardu induk dengan nilai yang benar-benar diterima pada gardu induk tujuan [10].

$$d = \frac{rugi\ pada\ tembaga\ total}{rugi\ beban\ nol}$$

Pembebanan Transformator

Load factor atau faktor beban adalah perbandingan antara nilai beban rata-rata dalam suatu periode waktu tertentu dengan beban puncak yang terjadi pada periode yang sama, misalnya dalam rentang harian atau bulanan [11].

$$K = \frac{s}{Sr}$$

Faktor Daya

Dalam sistem kelistrikan, terdapat perbedaan antara daya dan energi. Daya listrik adalah hasil perkalian antara tegangan dan arus, sementara energi diperoleh dengan mengalikan daya dengan waktu. Daya diukur dalam satuan *Watt*, yang merepresentasikan jumlah energi listrik yang digunakan setiap detik dalam satuan joule [12].

a. Daya Aktif

Daya aktif merupakan komponen daya listrik yang benar-benar digunakan oleh peralatan listrik untuk melakukan kerja nyata, seperti menggerakkan motor, menyalakan lampu, atau menghasilkan panas pada elemen pemanas, dan dinyatakan dalam satuan watt (W) [13].

$$P = \sqrt{3}\ x\ V\ x\ I$$

b. Daya Reaktif

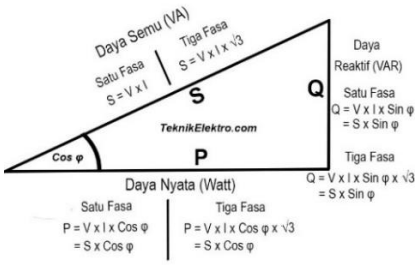
Daya reaktif merupakan komponen daya listrik yang tidak dimanfaatkan secara langsung untuk menghasilkan kerja nyata, namun berperan dalam pembentukan medan magnet atau listrik pada peralatan. Besarnya daya reaktif dipengaruhi oleh jenis dan jumlah beban yang beroperasi dalam sistem. Semakin rendah faktor daya, maka semakin besar daya reaktif yang muncul, sehingga menyebabkan meningkatnya kebutuhan energi semu dan memberikan beban tambahan pada sistem distribusi.

$$P = V\ x\ I\ \ x\ \varphi$$

c. Daya Semu

Daya semu adalah daya yang dihasilkan oleh generator sebagai sumber pembangkit listrik, yang merupakan hasil kombinasi antara daya aktif dan daya reaktif dalam suatu sistem kelistrikan. Besaran daya ini dinyatakan dalam satuan volt ampere (VA).

$$S = VxI$$
$$S = \sqrt{3}\ x\ VxI$$
$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}$$



Gambar 1. Segitiga Daya

Kondisi Nilai Daya Tertentu

Dalam menghitung kenaikan temperatur *hot-spot* dengan sistem sirkulasi minyak alami ($\Delta\theta_{cr}$), digunakan ketentuan bahwa nilai $\Delta\theta_{br}$ mengacu pada standar SPLN 17 A.

$$\Delta\theta_{cr} = (\Delta\theta_{br} + 1.1)\,\Delta\theta_{wo}$$

Untuk menghitung kenaikan temperatur hot-spot dengan sistem sirkulasi minyak paksa ($\Delta\theta_{cr}$), digunakan nilai $\Delta\theta_b$ sesuai standar SPLN 17 A.

$$\Delta\theta_{cr} = \Delta\theta_b\,(\theta_{cr\,alami} - \Delta\theta_b)$$

Kenaikan Temperatur *Hot spot*

Temperatur *hot spot* merupakan parameter suhu yang digunakan untuk mengevaluasi kemampuan termal transformator sekaligus sebagai acuan dalam memperkirakan umur isolasinya. Nilai ini menunjukkan titik suhu tertinggi pada belitan transformator. Karena fluks bocor cenderung berputar secara radial di ujung kumparan, standar IEC 345 menetapkan bahwa temperatur hot spot berada pada kisaran sekitar 90 °C [13].

$$\theta_c = (\theta_a + \Delta\theta_b + \Delta\theta_{td})$$

Untuk mencari perbedaan suhu antara hot spot dan top oil dapat menggunakan persamaan sebagai berikut:

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

Kenaikan Temperatur *Top Oil*

Apabila nilai daya dikalikan dengan rasio total rugi-rugi yang dipangkatkan dengan eksponen *x*, maka kenaikan temperatur yang dihasilkan akan sebanding dengan peningkatan suhu minyak pada bagian atas transformator (*top oil*) [14].

$$\Delta\theta_b = \Delta\theta_{br}\left[\frac{1 + dK^2}{1 + d}\right]^x$$

$$d = \frac{rugi\ pada\ tembaga\ total}{rugi\ beban\ nol}$$

Laju Penuaan *Thermal Relatif*

Temperatur minyak atas dapat ditentukan dengan mengamati minyak yang keluar dari kumparan, di mana minyak tersebut merupakan campuran dari sebagian aliran minyak yang bersirkulasi sepanjang kumparan [11].

$$V = 10^{(\theta c - \theta cr)/19{,}93}$$

Perhitungan Susut Umur Transformator

Apabila beban dan temperatur dijaga konstan dalam suatu periode waktu tertentu, maka besarnya susut umur transformator dapat dihitung dalam satuan waktu, seperti jam, hari, atau bulan [15].

$$L = \frac{h}{3T}\{V + \sum 4V\ odd + \sum 2\,V\ even + V\}$$

Perhitungan Perkiraan Sisa Umur Transformator

Perhitungan perkiraan sisa umur transformator dilakukan untuk mengetahui tingkat keandalan dan kelayakan operasi transformator berdasarkan kondisi pembebanan dan temperatur yang dialaminya [16].

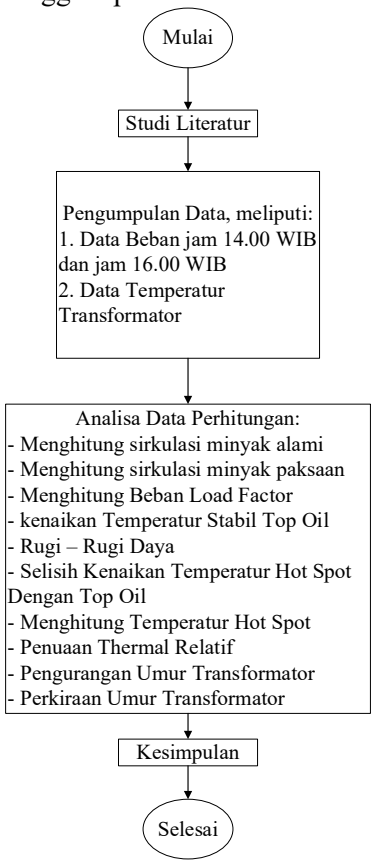
$$sisa\ umur = \frac{umur\ dasar - n}{susut\ umur}$$

Penyajian Data dan Layout

Jenis data dalam penelitian ini adalah data sekunder, yaitu data beban dan data temperatur transformator yang diperoleh dari catatan operasional Gardu Induk. Data beban meliputi daya aktif, daya reaktif, dan daya semu yang digunakan untuk menentukan tingkat pembebanan transformator. Sementara itu, data temperatur mencakup temperatur minyak, belitan, dan temperatur lingkungan sebagai parameter utama dalam analisis kinerja termal. Seluruh data tersebut digunakan untuk menganalisis pengaruh pembebanan terhadap kenaikan temperatur serta dampaknya terhadap susut umur transformator.

METODE

Penelitian ini menggunakan data sekunder, yaitu data beban dan data temperatur transformator yang digunakan sebagai dasar perhitungan susut umur transformator. Tahapan perhitungan meliputi penentuan sirkulasi minyak alami dan sirkulasi minyak paksaan, perhitungan faktor beban (*load factor*), kenaikan temperatur stabil *top oil*, daya semu, serta rugi - rugi daya. Selanjutnya dihitung selisih kenaikan temperatur *hot spot* terhadap *top oil* untuk menentukan temperatur *hot spot*. Berdasarkan nilai tersebut, dilakukan perhitungan penuaan termal relatif, pengurangan umur transformator, hingga diperoleh sisa umur transformator.



Gambar 2. Diagram Alir Penelitian.

Diagram alir tersebut menunjukkan tahapan metodologi penelitian dalam menganalisis susut umur transformator. Proses dimulai dengan studi literatur sebagai dasar teori dan referensi

perhitungan. Selanjutnya dilakukan pengumpulan data yang meliputi data beban pada siang hari pukul 14.00 WIB dan sore hari pukul 16.00 WIB serta data temperatur transformator. Data yang diperoleh kemudian dianalisis melalui serangkaian perhitungan, yaitu sirkulasi minyak alami dan paksaan, faktor beban, kenaikan temperatur stabil *top oil*, rugi - rugi daya, selisih kenaikan temperatur *hot spot* terhadap *top oil*, penentuan temperatur *hot spot*, penuaan termal relatif, pengurangan umur, hingga perkiraan umur transformator. Hasil dari seluruh tahapan analisis tersebut digunakan sebagai dasar penarikan kesimpulan, yang menandai berakhirnya proses penelitian.

HASIL DAN PEMBAHASAN

1. Hasil Perhitungan Umur Transformator

Hasil Perhitungan Sirkulasi Minyak Alami Pada Trafo

Kenaikan temperatur rata – rata kumparan = $65° C$

Kenaikan temperatur rata – rata minyak = $44° C$

$\Delta\theta_{wo} = 65 - 44 = 21°\text{C}$

$\Delta\theta_{cr} = (\Delta\theta_{br} + 1{,}1)\ \Delta\theta_{wo}$

$\Delta\theta_{cr} = 55 + 1{,}1\ x\ 21$

$\Delta\theta_{cr} = 55 + 23{,}1$

$\Delta\theta_{cr} = 78{,}1\ °\text{C}$

Sirkulasi Minyak Paksa

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

$\Delta\theta_{cr} = 40 + (78{,}1 - 40)$

$\Delta\theta_{cr} = 78{,}1\ °\text{C}$

Menghitung daya semu

$S = \sqrt{P^2 + Q^2}$

$S = \sqrt{14{,}11^2 + 5{,}43^2}$

$S = 15{,}12$ MVA

Rasio Pembebanan Transformator

$$\text{K} = \frac{\text{s}}{\text{Sr}}$$

$$\text{K} = \frac{15{,}12}{60}$$

$\text{K} = 0{,}25$

Menghitung rugi – rugi daya

$$d = \frac{rugi\ pada\ tembaga\ total}{rugi\ beban\ nol}$$

$$d = \frac{220}{38}$$

$$d = 5{,}79$$

Menentukan kenaikan temperatur stabil *top oil*

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

$$\Delta\theta_b = 55\left(\frac{1 + 5{,}79\ .\ 0{,}25^2}{1 + 5{,}79}\right)^{0{,}9}$$

$$\Delta\theta_b = 55\left(\frac{1 + dK^2}{1 + d}\right)^x$$

$$\Delta\theta_b = \ 13{,}01\ °C$$

Menentukan selisih antara temperatur *hot spot* dengan *top oil*

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

$$\Delta\theta_{td} = \ (78{,}1 - 55)0{,}25^{2.0{,}8}$$

$$\Delta\theta_{td} = \ 2{,}55\ °C$$

Menentukan temperatur *hot spot*

$$\theta_c = \ \theta_\alpha \ + \ \Delta\theta_b \ + \ \Delta\theta_{td}$$

$$\theta_c = 29 \ + \ 13{,}01 \ + \ 2{,}55$$

$$\theta_c = \ 45{,}55\ °C$$

Laju penuaan *thermal relative*

$$\mathrm{V} = 10^{(\theta_c - \theta_{cr})/19{,}93}$$

$$\mathrm{V} = 10^{(45{,}55 - 98)/19{,}93}$$

$$\mathrm{V} = \ 0{,}00234\ pu$$

Menghitung susut umur transformator

$$L = \frac{h}{3T}\{V + \sum 4V\ odd + \sum 2\ even + V\}$$

$$L = \frac{1}{3x24}\{0{,}00234 + 4\,(0{,}00234 + 0{,}00234 + 0{,}00234 + 0{,}00234 + 0{,}00234 + 0{,}00234 + 0{,}00234 + 0{,}00234 + 0{,}00234 + 0{,}00234 + 0{,}00234 + 0{,}00234) + 2\,(0{,}00234 + 0{,}00234 + 0{,}00234 + 0{,}00234 + 0{,}00234 + 0{,}00234 + 0{,}00234 + 0{,}00234 + 0{,}00234) + 0{,}00234\}$$

$$L = \frac{1}{72}\ x\ 0{,}16848$$

$$L = \ 0{,}002335\ pu$$

Menghitung perkiraan sisa umur transformator

Sisa umur (n) = umur dasar – (masa pakai trafo x susut umur)

N = 20,55 – (216 x $\mathbf{0,002335\ pu}$)

= 20,0455 tahun

2. Hasil Analisa Susut Umur Pada Transformator

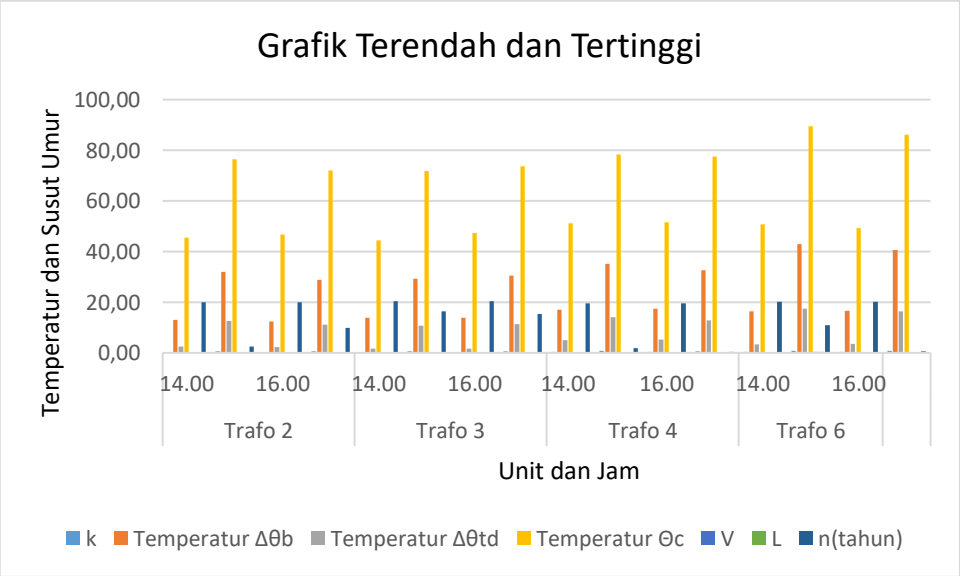
Hasil analisis menunjukkan beban puncak pada siang hari pukul 14.00 WIB dan sore hari pukul 16.00 WIB meningkatkan temperatur belitan, *top oil,* dan terutama temperatur *hot spot* (θ_c), yang mempercepat laju penuaan isolasi transformator daya 150 kV di Gardu Induk Buduran. Pada pembebanan rendah hingga menengah (k ≤ 0,6), temperatur *hot spot* masih berada pada kisaran 45 - 70 °C sehingga laju susut umur relatif kecil dan sisa umur transformator masih tinggi, yaitu sekitar 15 - 20 tahun. Sebaliknya, pada pembebanan tinggi (k ≥ 0,7), temperatur *hot spot* meningkat hingga 71,79 - 89,52 °C dengan daya semu mencapai 36,93 - 50,44 MVA, yang menyebabkan laju susut umur isolasi melebihi 10 - 15% per tahun. Akibatnya, sisa umur transformator menurun drastis hingga hanya tersisa sekitar 1 - 3 tahun pada beberapa kondisi. Oleh karena itu, pengendalian pembebanan dan optimalisasi sistem pendinginan sangat diperlukan untuk menjaga keandalan dan memperpanjang umur transformator.

Tabel 1. Hasil Susut Umur Terendah dan Tertinggi

Unit	Jam	k	Temperatur			V	L	n(tahun)
			Δθb	Δθtd	Θc			
Trafo 2	14.00	0,25	13,01	2,55	45,6	0,00234	0,002335	20,04554
		0,68	31,94	12,59	76,53	0,08371	0,083713	2,468044
	16.00	0,23	12,49	2,20	46,69	0,00266	0,002664	19,97464
		0,63	28,86	11,10	71,95	0,04933	0,049331	9,894603
Trafo 3	14.00	0,19	13,83	1,65	44,48	0,00206	0,002062	20,37676
		0,62	29,17	10,63	71,79	0,04843	0,048434	16,48158
	16.00	0,19	13,80	1,63	47,43	0,00290	0,002902	20,30624
		0,64	30,49	11,31	73,79	0,06100	0,061005	15,42562

Unit	Jam	k	Temperatur			V	L	n(tahun)
			Δθb	Δθtd	Θc			
Trafo 4	14.00	0,38	17,07	4,98	51,06	0,00441	0,004411	19,59712
		0,74	35,24	14,16	78,40	0,10392	0,103924	1,897602
	16.00	0,39	17,36	5,14	51,50	0,00464	0,004643	19,54707
		0,69	32,56	12,89	77,45	0,09310	0,093102	0,439954
Trafo 6	14.00	0,30	16,39	3,42	50,81	0,00429	0,004811	20,14588
		0,84	43,02	17,50	89,52	0,37551	0,375514	10,99318
	16.00	0,31	16,61	3,56	49,17	0,00355	0,003549	20,2519
		0,81	40,67	16,37	86,03	0,25092	0,250915	0,52687

Data pada tabel 1, terlihat bahwa peningkatan faktor beban (k) pada Trafo 2, 3, 4, dan 6 pada jam 14.00 dan 16.00 WIB secara konsisten diikuti oleh kenaikan temperatur belitan ($\Delta\boldsymbol{\theta_b}$), temperatur top-oil ($\Delta\boldsymbol{\theta_{td}}$), dan temperatur *hot spot* (θ_c), yang berdampak langsung pada meningkatnya laju penuaan isolasi (V) serta menurunnya perkiraan sisa umur transformator. Pada kondisi beban rendah (k sekitar 0,19 - 0,39), nilai V masih sangat kecil sehingga sisa umur transformator berada di kisaran 19 - 20 tahun, sedangkan pada kondisi beban tinggi (k > 0,6) nilai V meningkat signifikan dan menyebabkan sisa umur turun drastis hingga di bawah 3 tahun, bahkan mencapai kurang dari 1 tahun pada Trafo 4 dan Trafo 6 pukul 16.00 WIB. Hal ini menunjukkan bahwa beban puncak memiliki pengaruh dominan terhadap percepatan penuaan isolasi. Dengan demikian, pengendalian pembebanan dan pengelolaan temperatur menjadi faktor kunci dalam mempertahankan keandalan dan umur operasi transformator.



Gambar 3. Grafik Terendah dan Tertinggi

Pada grafik 3 menunjukkan perbandingan nilai terendah dan tertinggi faktor beban (k), temperatur belitan ($\Delta\boldsymbol{\theta_b}$), temperatur *top oil* ($\Delta\boldsymbol{\theta_{td}}$), temperatur *hot spot* (θ_c), laju penuaan isolasi (V), serta sisa umur transformator (n) pada Trafo 2, 3, 4, dan 6 pada pukul 14.00 dan 16.00 WIB. Terlihat bahwa kenaikan faktor beban diikuti oleh peningkatan signifikan pada temperatur *hot spot* (θ_c) yang menjadi parameter paling dominan, kemudian berdampak pada meningkatnya nilai V dan menurunnya sisa umur transformator. Trafo 6 menunjukkan nilai temperatur dan laju penuaan tertinggi dibanding unit lain, yang mengindikasikan kondisi operasi paling kritis. Sebaliknya, pada beban rendah, temperatur dan laju penuaan relatif kecil sehingga sisa umur transformator masih tinggi. Hal ini menegaskan bahwa pengaruh pembebanan terhadap temperatur *hot spot* sangat menentukan tingkat percepatan susut umur transformator.

KESIMPULAN

Beban puncak siang hari pukul 14.00 WIB dan sore hari pukul 16.00 WIB secara langsung meningkatkan temperatur belitan, *top oil*, dan terutama temperatur *hot spot* (θ_c), sehingga mempercepat laju penuaan isolasi dan susut umur transformator daya 150 kV di Gardu Induk Buduran. Pada kondisi pembebanan rendah hingga menengah ($k \leq 0,6$), temperatur *hot spot* berada pada kisaran 45 - 70 °C dengan laju penuaan isolasi yang relatif kecil, sehingga umur sisa transformator masih tergolong tinggi, yaitu sekitar 15 - 20 tahun dan bahkan mencapai 19 - 20 tahun pada beban rendah ($k \leq 0,3$). Sebaliknya, pada pembebanan tinggi ($k \geq 0,7$), daya semu meningkat hingga 36,93 - 50,44 MVA dan menyebabkan temperatur *hot spot* naik signifikan ke kisaran 71,79 - 89,52 °C. Kondisi tersebut memicu peningkatan laju susut umur isolasi hingga melebihi 10 - 15% per tahun. Akibatnya, sisa umur transformator menurun drastis, mulai dari sekitar 1 tahun hingga penurunan ekstrem mencapai 9 - 15 tahun, bahkan pada beberapa kondisi hanya tersisa kurang dari 3 tahun, sehingga pengendalian pembebanan dan optimalisasi sistem pendinginan menjadi sangat diperlukan.

DAFTAR PUSTAKA

[1] M. Munir *et al.*, "Analisa Rugi – Rugi Daya Pada Penghantar Netral Akibat Sistem Tidak Seimbang dan Efisiensi Transformator Distribusi Rayon Ngagel." Mar. 11, 2023. [Online]. Available: 10.31284/p.snestik.2023.4024

[2] P. Gultom, I. Danial, and M. Rajagukguk, "Studi Susut Umur Transformator Distribusi 20 kV Akibat Pembebanan Lebih di PT.PLN (PERSERO) Kota Pontianak," 2018.

[3] M. B. A. Nugraha, T. Suheta, and F. A. Anggoro, "Evaluasi Kualitas Gas SF6 Pada Peralatan Gas Insulated Switchgear (GIS) 150 kV Kedinding," vol. ISSN (Print) : 2621-3540 ISSN (Online) : 2621-5551, 2025.

[4] A. P. A. Niagara and J. Kalisahak, "Hubungan Power Faktor Isolasi Terhadap Kemampuan Isolasi Transformator Daya 150/20 kV," vol. 10, no. 1, 2017.

[5] A. R. Sultan and A. Achmad, "Analisis Perkiraan Umur Transformator Distribusi Terhadap Pembebanan Di Ulp Mattirotasi Dengan Metode Montsinger," *Pros. Semin. Nas. Tek. Elektro Dan Inform. SNTEI 2023-Tek. List.*, vol. ISSN 2986-2345, 2023.

[6] C. N. Anshar, "Studi Analisa Perkiraan Umur Transformator Distribusi 20 KV Akibat Pembebanan," *J. Tek. Komput. Agroteknologi Dan Sains*, vol. 1, no. 2, pp. 247–253, Jan. 2023, doi: 10.56248/marostek.v1i2.26.

[7] F. Imam, "Analisis Susut Umur Transformator Daya 150 kV Akibat Pembebanan Di PLTGU Keramasan Palembang," 2023.

[8] T. O. Priyono, "Analisa Sisa Umur Pemakaian Transformator Tipe Rectifier Kapasitas 20 kV Berdasarkan Perhitungan Pembebanan Di Chemical Plant Karawang," vol. 10, no. 1, 2022.

[9] A. Maruf and Y. Primadiyono, "Analisis Pengaruh Pembebanan dan Temperatur Terhadap Susut Umur Transformator Tenaga 60 MVA Unit 1 dan 2 Di GI 150 kV Kalisari," vol. 10, no. 1, 2021.

[10] U. Khoirunnisa, B. Bayu Murti, and M. Budiyanto, "Analisis Rugi - rugi Daya Dan Jatuh Tegangan Pada Saluran Transmisi 150 kV Gardu Induk Pandean Lamper-Pudak Payung," *J. Teknol. Dan Vokasi*, vol. 2, no. 2, pp. 54–68, Jul. 2024, doi: 10.21063/jtv.2024.2.2.54-68.

[11] R. Fadli, "Analisis Pengaruh Pembebanan Dan Suhu Lingkungan Terhadap Susut Umur Transformator (Studi Kasus PLTG Teluk Lembu) Pekanbaru," 2022.

[12] R. Alfath Sudiro, L. S. Patras, and G. M. Ch. Mangindaan, "Analisa Rugi – Rugi Daya Pada Jaringan Distribusi Tenaga Listrik Kotamobagu Dan Perbaikan." 2017.

[13] M. K. Mubarok and H. Tasmono, "Studi Pengaruh Rugi - Rugi Transformator Daya Terhadap Efisiensi Transformator Daya 60 MVA Di PT PLN (PERSERO) GI Babat," *J. Taguchi J. Ilm. Tek. Dan Manaj. Ind.*, vol. 3, no. 10, 2023, doi: DOI%20Issue:%2010.46306/tgc.v3i1.

[14] P. Utomo, "Studi Analisis Kualitas Transformator Daya Gardu Induk 150 kV Siantan," 2019.

[15] A. Ridwan, A. Hasad, and M. I. Sikki, "Tegangan Jatuh Jaringan Distribusi pada Penyulang Takar Tegangan Menengah 20 KV Gardu Induk Pondok Kelapa PT.PLN (Persero) Rayon Bantar Gebang," vol. 7, no. 2.

[16] A. Naufal B, Fahroji, S. Lamtiar, and D. widya Kusuma, "Analisis Pengaruh Faktor Daya Terhadap Jatuh Tegangan Pada Jaringan Distribusi Power House Lama Di Bandar Udara Halim Perdanakusuma." 2024.