

## ANALISA PERKIRAAN UMUR TRAF0-2 150/22KV 60MVA GI RUNGKUT BERDASARKAN PENGARUH BEBAN DAN SUHU LINGKUNGAN

Muhammad Bahrudin<sup>1</sup>, Ir. Gatut Budiono, M.Sc<sup>2</sup>

Jurusan Teknik Elektro, Universitas 17 Agustus 1945 Surabaya

Jl. Semolowaru 45 Surabaya 60118

Telp. (031)-5931800, Faks. 031-5927817

E-mail: muhbahrudin16@gmail.com

### ABSTRAK

Transformator daya adalah peralatan penting pada sistem tenaga listrik khususnya pada penyaluran energi listrik, keberadaannya sangat berpengaruh terhadap kontinuitas pelayanan. Transformator daya dapat bekerja 100% (normal sampai 20 tahun sesuai standar IEC 60076-7:2005), apabila beban kontinu dengan suhu lingkungan 20°C dan suhu belitan 98°C, tetapi apabila suhu lingkungan lebih dari 20°C maka umur trafo akan mengalami penurunan. Salah satu faktor yang mempengaruhi umur pemakaian transformator adalah panas yang timbul akibat pembebanan dan suhu sekitar (ambient temperatur). Transformator produksi lokal atau import didesain berdasarkan standar IEC yaitu akan beroperasi normal pada suhu rata-rata 20°C dan suhu harian 30°C. Tujuan penelitian ini yaitu untuk mengetahui perkiraan umur transformator daya unit 2 di GI Rungkut, sehingga dapat dilakukan tindakan untuk memperpanjang umur pakai transformator daya tersebut. Penelitian ini dilaksanakan di Gardu Induk Rungkut, pada transformator unit-2. Dengan parameter yang diamati adalah pembebanan transformator selama bulan Januari–Juni 2021 dan suhu lingkungan pada bulan Januari–Juni 2021. Berdasarkan hasil penelitian Transformator unit-2 Gardu Induk Rungkut dengan pembebanan saat ini 57-65% memiliki nilai susut umur transformator daya sebesar 0,408 p.u atau diperkirakan umur transformator daya dapat digunakan selama 43,01 tahun kedepan. Perkiraan umur transformator melebihi umur dasarnya yaitu 20,55 tahun, dikarenakan pembebanan yang masih mencapai 57-65%.

*Kata Kunci: pembebanan transformator, suhu lingkungan, umur transformator daya*

## 1. PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Perusahaan Listrik Negara (PLN) adalah perusahaan milik negara yang bergerak di bidang ketenagalistrikan baik dari mulai mengoperasikan pembangkit listrik melakukan transmisi atau penyaluran sampai dengan distribusi kepada masyarakat di seluruh wilayah Indonesia. Pada gardu induk sendiri terdapat peralatan yang berperan sangat penting dalam menyuplai energi listrik yaitu transformator daya. Transformator daya adalah salah satu komponen utama pada gardu induk yang berfungsi untuk menaikkan atau menurunkan tegangan yang akan disuplai [1].

Transformator daya dapat bekerja 100% (normal sampai 20 tahun sesuai standar IEC 60076-7:2005), apabila beban kontinu dengan suhu lingkungan 20°C dan suhu belitan 98°C, tetapi apabila suhu lingkungan lebih dari 20°C maka umur trafo akan menurun [2]. Transformator produksi lokal atau import didesain berdasarkan standar IEC yaitu akan beroperasi normal pada suhu rata-rata 20°C dan suhu harian 30°C. Indonesia dengan suhu lingkungan rata-rata 30°C bahkan lebih, penyesuaian pembebanan trafo perlu diperhatikan. Menurut IEE C57.91 1999 umur normal transformator adalah 20,55 tahun [3].

Karena transformator ini beroperasi setiap hari 24 jam, maka penting untuk dilakukan studi tentang perkiraan umur pada transformator yang dipengaruhi oleh beberapa faktor berikut yaitu, pembebanan, suhu trafo, dan suhu lingkungan. Penelitian ini akan

dilakukan dengan mengambil data pada salah satu transformator daya yaitu transformator daya unit 2 yang bertempat di Gardu Induk Rungkut yang berkapasitas 60 MVA.

### 1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan uraian diatas, dapat dirumuskan permasalahan - permasalahan yang akan dibahas, yaitu:

- Bagaimana pengaruh beban, suhu trafo (belitan dan minyak) dan temperatur lingkungan terhadap umur transformator?
- Bagaimana perhitungan perkiraan sisa umur transformator?

### 1.3 Tujuan

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui perkiraan umur dari Transformator unit-2 pada PT. PLN (Persero) Gardu Induk Rungkut, sehingga dapat dilakukan tindakan untuk memperpanjang umur pakai transformator daya tersebut. Dengan mengetahui perkiraan sisa umur transformator tersebut maka dapat dilakukan penggantian transformator sebelum terjadi kerusakan sehingga kontinuitas pelayanan tetap terjaga.

## 2. TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1 Transformator Daya

Transformator daya memiliki peranan sangat penting dalam sistem tenaga listrik. Transmisi sistem tenaga listrik harus memiliki tegangan yang tinggi

agar rugi-rugi daya tidak melebihi rugi-rugi yang diinginkan, maka dari itu dibutuhkan transformator daya untuk menyalurkan daya dari generator yang bertegangan menengah ke transmisi bertegangan tinggi dan juga menyalurkan daya dari transmisi bertegangan tinggi ke jaringan distribusi [4]. Selain itu transformator daya digunakan untuk menaikkan tegangan dari sisi pembangkitan ke sisi transmisi (transformator step up) dan digunakan untuk menurunkan tegangan dari sisi transmisi ke sisi distribusi (transformator step down). Trafo tenaga dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Trafo tenaga

Bagian-bagian utama dari transformator daya yaitu:

#### 1. Inti besi

Inti besi pada transformator berfungsi untuk mempermudah jalannya fluksi, yang ditimbulkan oleh arus listrik yang melalui kumparan dibuat dari lempengan besi tipis berisolasi untuk mengurangi panas yang ditimbulkan rugi-rugi inti besi (eddy current losses) [4].

#### 2. Kumparan Transformator

Kumparan transformator adalah beberapa lilitan kawat berisolasi yang membentuk suatu kumparan. Kumparan tersebut terdiri dari kumparan primer dan kumparan sekunder yang diisolasi baik terhadap inti besi maupun terhadap antar kumparan dengan isolasi padat seperti karton, pertinak dan lain-lain [5].

#### 3. Tangki Pernapasan Transformator Daya

Tangki pernapasan berfungsi untuk menampung penguapan apabila suhu minyak transformator tinggi. Penggunaan media penyerap uap air pada udara di ujung saluran udara melalui saluran pelepasan (venting) untuk menjaga agar minyak tidak terkontaminasi dengan air, hal ini sering disebut dengan silica gel dan minyak tidak keluar mencemari udara disekitarnya [6].

#### 4. Minyak Transformator

Minyak transformator adalah cairan yang dihasilkan dari proses pemurnian minyak mentah. Minyak transformator memegang peranan penting dalam sistem isolasi transformator dan berfungsi sebagai pendingin untuk menghilangkan panas akibat rugi-rugi daya pada transformator serta

mempunyai fungsi ganda, yaitu pendinginan dan isolasi [4].

#### 5. Bodi Transformator atau Tangki

Bodi transformator untuk melindungi komponen-komponen utama diatas inti besi. Bagian bodi transformator ini berbentuk seperti sirip-sirip yang berfungsi untuk mengurangi panas di dalam transformator [6].

### 2.2 Rugi-rugi Daya pada Transformator Daya

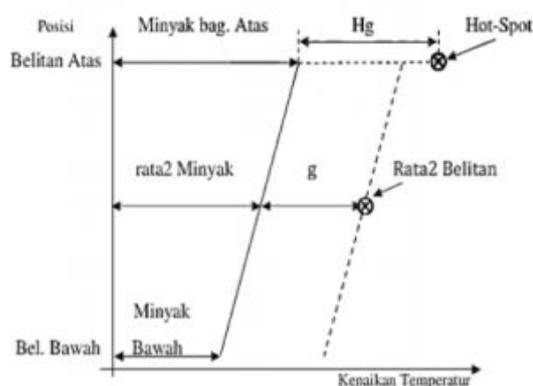
Rugi-rugi terdiri dari rugi inti atau rugi besi dan rugi tembaga yang terdapat pada kumparan primer maupun kumparan sekunder. Rugi-rugi daya terdiri dari rugi arus eddy dan rugi hysteresis [7]. Rugi arus eddy timbul akibat adanya arus pusar pada inti yang menghasilkan panas. Adapun arus pusar ini ditentukan oleh tegangan induksi pada inti yang menghasilkan perubahan-perubahan fluk magnet.

### 2.3 Pengaruh Pembebanan Transformator

Transformator dalam keadaan bertegangan dan belum dibebani akan timbul rugi-rugi yang dapat menimbulkan kondisi trafo tersebut panas, namun panas yang timbul kecil. Apabila transformator tersebut dibebani maka kumparan dan minyak di dalam trafo akan bertambah panas sesuai dengan kenaikan bebannya atau sebesar  $I^2R$  [8].

### 2.4 Pengaruh Temperatur Transformator

Kenaikan temperatur dapat diasumsikan dengan diagram thermal sederhana. Kenaikkan temperatur minyak atas yang diukur selama pengujian berbeda dengan minyak yang meninggalkan kumparan, pada minyak atas merupakan campuran sebagian dari minyak yang bersirkulasi pada sepanjang kumparan [8]. Diagram thermal dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Diagram thermal

### 2.5 Sistem Pendingin Transformator Daya

Pendingin transformator daya dibutuhkan agar panas yang timbul pada inti besi dan kumparan dapat disalurkan keluar sehingga tidak merusak isolasi di dalam transformator daya. Beberapa jenis pendinginan transformator daya [9], dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Jenis pendingin transformator daya

No	Jenis Pendingin
1	ONAN (Oil Natural Air Natural)
2	ONAF (Oil Natural Oil Forced)
3	OFAF (Oil Forced Air Forced)
4	ODAF (Oil Directed Air Forced)
5	ONWF (Oil Natural Water Forced)
6	OFWF (Oil Forced Water Forced)

## 2.6 Perhitungan Perkiraan Umur Transformator Daya

Perhitungan perkiraan umur transformator ada beberapa persamaan yang harus dipakai agar bisa menentukan berapa sisa umur transformator. Pertama kita harus mengetahui daya semu dari beban trafo, apabila data beban yang diperoleh berupa daya aktif dan daya reaktif maka harus dirubah menjadi daya semu dengan persamaan berikut:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \dots\dots\dots (1)$$

Keterangan:

S : Daya semu

P : Daya aktif

Q : Daya reaktif

Faktor beban merupakan perbandingan antara daya semu (S) beban dan daya semu rating transformator (Sr) [10] dengan persamaan berikut:

$$K = S/S_r \dots\dots\dots (2)$$

Keterangan:

K : faktor beban

S : Beban saat pengukuran (MVA)

Sr : kapasitas beban transformator (MVA)

Selanjutnya menentukan perbandingan rugi-rugi trafo menggunakan persamaan berikut ini [10]:

$$d = \frac{\text{rugi} - \text{rugi tembaga}}{\text{rugi beban nol}} \dots\dots\dots (3)$$

Selanjutnya menentukan kenaikan suhu minyak atas, menggunakan persamaan berikut [10]:

$$\Delta\theta_{ou} = \Delta\theta_{br} \left( \frac{1 + dk^2}{1 + d} \right)^x \dots\dots\dots (4)$$

Keterangan:

$\Delta\theta_{ou}$  : Kenaikan suhu top oil

$\Delta\theta_{br}$  : 40°C ( OF ), 55°C ( ON )

d : Perbandingan rugi trafo

k : Rasio pembebanan

x : 0,9 (ONAN/ONAF), 1,0 (OFAF/OFWF)

Kemudian menghitung selisih antara kenaikan suhu kumparan dengan suhu minyak dengan menggunakan persamaan berikut [10]:

$$\Delta\theta_{wo} = \Delta\theta_k - \Delta\theta_m \dots\dots\dots (5)$$

Keterangan :

$\Delta\theta_{wo}$  : Selisih antara kenaikan suhu kumparan dengan suhu minyak

$\Delta\theta_k$  : Suhu kumparan

$\Delta\theta_m$  : Suhu minyak

Menentukan kenaikan suhu *hotspot* dengan sirkulasi minyak alami, merupakan salah satu variabel untuk menentukan suhu *hotspot* akhir dihitung dengan persamaan berikut [10]:

$$\Delta\theta_{cr} (\text{alami}) = \Delta\theta_{br} + 1.1 \Delta\theta_{wo} \dots\dots\dots (6)$$

Keterangan:

$\Delta\theta_{cr} (\text{alami})$  : Kenaikan suhu temperatur *hotspot* dengan sirkulasi minyak alami

$\Delta\theta_{br}$  : 40 °C (OF), 55°C (ON)

$\Delta\theta_{wo}$  : Selisih antara kenaikan suhu kumparan dengan suhu minyak

Menentukan selisih kenaikan suhu *hotspot* dengan top oil, dengan persamaan berikut [10]:

$$\Delta\theta_{td} = (\Delta\theta_{cr} - \Delta\theta_{to}) K^{2y} \dots\dots\dots (7)$$

Keterangan:

$\Delta\theta_{td}$  : Selisih kenaikan suhu *hotspot* dengan top oil

$\Delta\theta_{cr}$  : Kenaikan suhu *hotspot*

$\Delta\theta_{to}$  : Top oil dengan Standart IEC76 (40 °C )

K : Rasio pembebanan

y : 0,8 pada ONAN dan ONAF

*Hotspot* merupakan suhu tertinggi pada kumparan transformator yang terletak antara kumparan dan inti besi yang tidak tercapai oleh minyak pada saat beban transformator tertinggi. Suhu *hotspot* dihitung berdasarkan rumus [10]:

$$\theta_h = \theta_a + \Delta\theta_{ou} + \Delta\theta_{td} \dots\dots\dots (8)$$

Keterangan:

$\theta_h$  : Suhu *hotspot*

$\theta_a$  : Suhu lingkungan sekitar

$\Delta\theta_{ou}$  : Kenaikan suhu top oil

$\Delta\theta_{td}$  : Selisih suhu *hotspot* dengan top oil

Menentukan laju penuaan thermal relatif, laju penuaan relatif yang dimaksudkan adalah untuk isolasi kertas yang ditingkatkan secara termal adalah di atas satu untuk h lebih besar dari 110 °C. Laju penuaan thermal dihitung berdasarkan rumus [11]:

$$V = e \left( \frac{15000}{383} - \frac{15000}{\theta_h + 273} \right) \dots\dots\dots (9)$$

Keterangan:

$\theta_h$  : Suhu *hotspot*

Menghitung susut transformator menggunakan persamaan berikut [12]:

$$L = \sum_{n=1}^N V_n \times t_n \dots\dots\dots (10)$$

Keterangan:

- L : Susut trafo selama interval tn (p.u.)
- N : Jumlah total interval
- tn : Jumlah tiap interval (selama trafo beroperasi)

Setelah susut diperoleh maka berikutnya yaitu menentukan sisa umur transformator menggunakan persamaan berikut [9]:

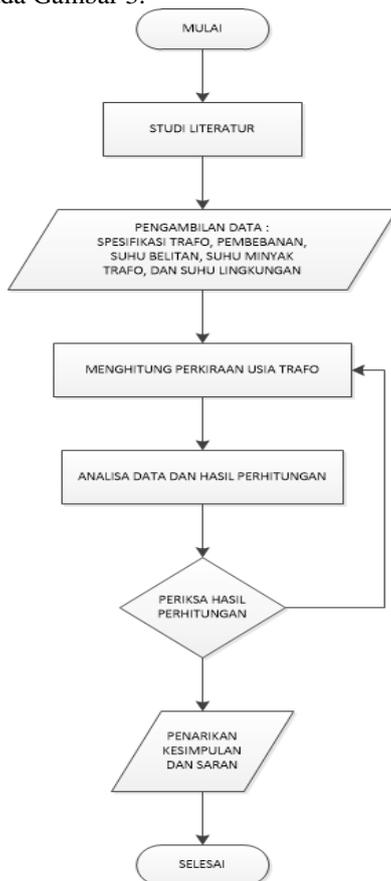
$$\text{Sisa umur trafo} = \frac{\text{Umur dasar} - \text{Umur pemakaian}}{L} \dots\dots\dots (11)$$

Keterangan:

- Umur dasar : Nilai dari umur dasar selama 20,55 tahun standart IEEE tahun 1999
- L : Susut umur trafo (p.u.)

### 3. METODOLOGI

Metode yang digunakan pada penelitian ini yaitu metode wawancara dengan cara konsultasi langsung dengan pegawai PT. PLN (Persero) UPT Surabaya GI Rungkut dan metode kuantitatif dengan proses pengolahan data. Diagram alir penelitian dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 3. Diagram alir penelitian

### 4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Besarnya daya aktif dan daya reaktif transformator tenaga pada bulan Januari sampai

bulan Juni 2021 dirubah menjadi daya semu (Gambar 4), untuk perhitungannya sebagai berikut:  
Bulan Januari

$$\begin{aligned} S &= \sqrt{P^2 + Q^2} \\ &= \sqrt{37,07^2 + 11,2^2} \\ &= \sqrt{1374,18 + 125,44} \\ &= \sqrt{1499,62} \\ &= 38,724 \text{ MVA} \end{aligned}$$



Gambar 4. Grafik data beban transformator

Setelah mendapat daya semu, maka selanjutnya menghitung faktor beban (Tabel 2). Faktor beban merupakan perbandingan antara daya semu (S) beban dan daya semu rating transformator (Sr) dengan persamaan berikut:

$$\begin{aligned} K &= S/S_r \\ &= 38,724 / 60 \\ &= 0,645 \end{aligned}$$

Tabel 2. Data rasio dan persentase pembebanan

Bulan	Rasio Pembebanan	Presentase Pembebanan %
	K	
Januari	0,645	65%
Februari	0,586	59%
Maret	0,633	63%
April	0,646	65%
Mei	0,566	57%
Juni	0,593	59%

Selanjutnya menentukan perbandingan rugi-rugi trafo menggunakan persamaan berikut ini :

$$\begin{aligned} d &= \frac{\text{rugi} - \text{rugi tembaga}}{\text{rugi beban nol}} \\ &= \frac{114,490}{26,935} = 4,251 \end{aligned}$$

Selanjutnya menentukan kenaikan suhu minyak atas (Tabel 3) menggunakan persamaan berikut:

$$\begin{aligned} \Delta\theta_{ou} &= \Delta\theta_{br} \left( \frac{1 + dk^2}{1 + d} \right)^x \\ \Delta\theta_{ou} &= 55 \left( \frac{1 + 4,251 \times 0,645^2}{1 + 4,251} \right)^{0,9} \\ &= 30,95^\circ\text{C} \end{aligned}$$

Tabel 3. Data kenaikan suhu top oil

Bulan	$\Delta\theta_{ou}$ (°C)
Januari	30,947
Februari	27,838
Maret	30,265
April	30,985
Mei	26,836
Juni	28,164

Menghitung selisih antara kenaikan suhu kumparan dengan suhu minyak (Tabel 4) dengan menggunakan persamaan berikut:

Bulan Januari  

$$\Delta\theta_{wo} = \Delta\theta_k - \Delta\theta_m$$

$$\Delta\theta_{wo} = 59,7 - 57,5$$

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

Tabel 4. Data selisih suhu kumparan dan suhu minyak

Bulan	$\Delta\theta_k$ (°C)	$\Delta\theta_m$ (°C)	$\Delta\theta_k - \delta\theta_m$ (°C)
Januari	59,7	57,5	2,2
Februari	57,9	55,8	2,1
Maret	59,6	57,68	1,92
April	56,75	54,9	1,85
Mei	57,4	55,93	1,47
Juni	57,6	55,12	2,48

Menentukan kenaikan suhu hotspot dengan sirkulasi minyak alami (Tabel 5), merupakan salah satu variabel untuk menentukan suhu hotspot akhir dihitung dengan persamaan berikut:

Bulan Januari  

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

$$\Delta\theta_{cr} (\text{alami}) = 55 + 1.1 \times 2,2$$

$$= 55 + 2,42$$

$$= 57,42 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Tabel 5. Data kenaikan suhu hotspot sirkulasi minyak alami

Bulan	$\Delta\theta_{br}$ (°C)	$1.1 \Delta\theta_{wo}$ (°C)	$\Delta\theta_{cr}$ (°C)
Januari	55	2,42	57,42
Februari	55	2,31	57,31
Maret	55	2,112	57,112
April	55	2,035	57,035
Mei	55	1,617	56,617
Juni	55	2,728	57,728

Berikutnya menentukan selisih kenaikan suhu hotspot dengan top oil (Tabel 6), dengan persamaan berikut:

Bulan Januari  

$$\Delta\theta_{td} = (\Delta\theta_{cr} - \Delta\theta_{to}) K^{2 \times y}$$

$$\Delta\theta_{td} = (57,42 - 40) 0,645^{2 \times 0,8}$$

$$= (17,42) 0,645^{2 \times 0,8}$$

$$= 8,636 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Tabel 6. Data selisih kenaikan suhu hotspot dengan top oil

Bulan	$\Delta\theta_{td}$ (°C)
Januari	8,636
Februari	7,378
Maret	8,235
April	8,472
Mei	6,699
Juni	7,688

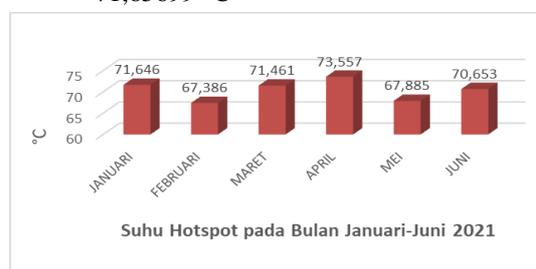
Menentukan suhu hotspot (Gambar 5), dengan persamaan berikut:

Bulan Januari  

$$\theta_h = \theta_a + \Delta\theta_{on} + \Delta\theta_{td}$$

$$\theta_h = 32 + 30,95 + 8,636$$

$$= 71,65699 \text{ } ^\circ\text{C}$$



Gambar 5. Data suhu hotspot

Selanjutnya menghitung laju percepatan thermal relatif transformator untuk beban dan suhu tertentu (Tabel 7), dengan persamaan untuk menghitung  $V$  adalah sebagai berikut:

Bulan Januari  

$$V = e^{\left(\frac{15000}{383} - \frac{15000}{\theta_h + 273}\right)}$$

$$= e^{\left(\frac{15000}{383} - \frac{15000}{71,646 + 273}\right)}$$

$$= 0,0128 \text{ p.u.}$$

Tabel 7. Data hasil perhitungan laju percepatan thermal relatif

Bulan	Beban (MVA)	Faktor Beban	Temperatur Hotspot	$V$ (p.u.)
Januari	38,72	0,645	71,646	0,0128
Februari	35,21	0,586	67,386	0,0074
Maret	37,97	0,633	71,461	0,0125
April	38,77	0,646	73,557	0,0162
Mei	33,99	0,566	67,885	0,0079
Juni	35,58	0,593	70,653	0,0112

Setelah mengetahui  $V$  perbulan maka, dilakukan penjumlahan untuk mendapatkan  $V$  kumulatif yaitu sebesar 0,068 p.u. Setelah mengetahui nilai  $V$  maka selanjutnya menghitung nilai susut, sebagai berikut:

$$L = \sum_{n=1}^N V_n \times t_n$$

$$= \sum_{n=1}^1 0,068 \times 6$$

$$= 0,408 \text{ p.u.}$$

Setelah susut diperoleh maka berikutnya yaitu menentukan sisa umur transformator menggunakan persamaan berikut:

$$\begin{aligned} \text{Sisa umur trafo} &= \frac{\text{Umur dasar} - \text{Umur pemakaian}}{L} \\ &= \frac{20,55 - 3}{0,408} \\ &= 43,01 \text{ Tahun} \end{aligned}$$

Karena rata-rata pemakaian atau pembebanan transformator tidak mencapai 100% dan untuk sekarang hanya dibebani sekitar 57-65%, maka umur transformator bisa lebih panjang dari umur dasarnya. Dimana umur dasar transformator menurut IEEE adalah 20,55 tahun, namun dengan pembebanan sekitar 57%-65% maka sisa umur transformator adalah 43,01 tahun.

Hasil perkiraan umur transformator diatas hanya berasal dari pengaruh penurunan isolasi akibat dari pembebanan, suhu transformator, suhu lingkungan, serta jenis pendingin yang digunakan tanpa memperhitungkan faktor-faktor lain yang dapat mengakibatkan penambahan laju penyusutan umur transformator.

## 5. KESIMPULAN DAN SARAN

### 5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian dapat disimpulkan bahwa Transformator unit-2 Gardu Induk Rungkt dengan pembebanan saat ini 57-65% memiliki nilai susut umur transformator daya sebesar 0,408 p.u atau diperkirakan umur transformator daya dapat digunakan selama 43,01 tahun kedepan. Perkiraan umur transformator melebihi umur dasarnya yaitu 20,55 tahun, dikarenakan pembebanan yang masih mencapai 57-65%.

### 5.2 Saran

Saran yang dapat diberikan dari penelitian ini yaitu:

1. Penelitian tentang umur pakai dan kualitas transformator daya sebaiknya dengan memperhitungkan pengaruh gangguan yang dialami dan metode pemeliharaan transformator daya tersebut.
2. Penelitian tentang umur pakai dan kualitas transformator daya selanjutnya lebih memilih trafo daya dengan presentase pembebanan besar (sekitar 80% atau selebihnya) atau dengan produksi, minyak isolasi, tipe pendingin berbeda.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] M. R. Za'im, "Analisis Transformator Daya 3 Fasa 150 KV/ 20 KV Pada Gardu Induk Ungaran PLN Distribusi Semarang", *EDUEL Edu Elektrika Journal.*, vol. 3, no. 2, pp. 9-16, 2014, Available: <http://journal.unnes.ac.id/sju/index.php/eduel>.
- [2] R. Syadad, "Perkiraan Umur Transformator Tenaga di Gardu Induk Banyudono Berdasar Variasi Pembebanan", Skripsi, Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Surakarta, 2019.
- [3] S. A. Nugroho, A. J. Taufiq, dan D. N. K. Hardani, "Perhitungan Perkiraan Umur Transformator Akibat Pengaruh Pembebanan dan Suhu Lingkungan", *Jurnal Riset Rekayasa Elektro.*, vol. 1, no.1, pp. 11-16, 2019, doi: <http://dx.doi.org/10.30595/jrre.v1i1.4923>.
- [4] Badaruddin dan F. A. Firdianto, "Analisa Minyak Transformator Pada Transformator Tiga Fasa di PT X", *Jurnal Teknologi Elektro Universitas Mercu Buana.*, vol. 7, no. 2, pp. 75-83, 2016, doi: <http://dx.doi.org/10.22441/jte.v7i2.828>.
- [5] A. Franager, B. Anto, dan D. Y. Sukma, "Perancangan Transformator Satu Fasa dan Tiga Fasa Menggunakan Perangkat Lunak Komputer", *Jom FTEKNIK.*, vol. 3, no. 2, pp. 1-15, 2016.
- [6] J. Siburian, "Karakteristik Transformator", *Jurnal Teknologi Energi UDA.*, vol. 8, no. 1, pp. 21-28, 2019, Available: <https://jurnal.darmaagung.ac.id/index.php/teknologienergi/article/view/121>.
- [7] M. D. Lubis, "Analisis Pengaruh Rugi-Rugi Total Akibat Pembebanan Terhadap Temperatur dan Efisiensi Transformator Distribusi di PT. Morawa Elektrik Trasbuana, Tanjung Morwa", Skripsi, Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara, Medan, 2019.
- [8] Y. Y. Rizki dan E. Ervianto, "Perkiraan Umur Transformator Berdasarkan Pengaruh Pembebanan dan Temperatur Lingkungan Menggunakan Metode Trend Linear", *Jom FTEKNIK.*, vol. 6, no. 2, pp. 1-8, 2019.
- [9] P. Utomo, "Studi Analisis Kualitas Transformator Daya Gardu Induk 150 KV Siantan", *Jurnal Teknik Elektro Universitas Tanjungpura.*, vol. 1, no. 1, pp. 1-11, 2013, Available: <https://jurnal.untan.ac.id/index.php/jteuntan/article/view/32670/75676581058>.
- [10] Y. Putinela, "Analisis Kualitas dan Perkiraan Sisa Usia Pakai Transformator Daya Pada PLTA Wonogiri Akibat Pembebanan", Skripsi, Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Surakarta, 2020.
- [11] R. Godina, E. M. G. Rodrigues, J. C. O. Matias, and J. P. S. Catalão, "Effect of Loads and Other Key Factors on Oil-Transformer Ageing: Sustainability Benefits and Challenges", *Energies.*, vol. 8, pp. 12147-12186, 2015, doi: <http://dx.doi.org/10.3390/en81012147>.
- [12] K. Najdenkoski, G. Rafajlovski, and V. Dimcev, "Thermal Aging of Distribution Transformers According to IEEE and IEC Standards", *IEEE Power Engineering Society General Meeting.*, pp. 1-5, 2007, doi: <http://dx.doi.org/10.1109/PES.2007.385642>.