

ANALISIS PREDIKSI USIA PAKAI TRANSFORMATOR DENGAN METODE REGRESI LINEAR

Suganda¹, Fadhila Hayyu Azzahra², Edy Supriyadi³
Teknik Elektro S1, Fakultas Teknologi Industri, Institut Sains dan Teknologi Nasional
Jl. Moh. Kahfi II, Bumi Srengseng Indah, Jagakarsa, Jakarta Selatan 12630
E-mail : suganda@istn.ac.id, fadhilahayyuazzahra@gmail.com, edy_syadi@istn.ac.id

ABSTRAK

Kebutuhan listrik terus mengalami peningkatan setiap tahunnya. Dalam penyaluran daya listrik dibutuhkan transformator distribusi yang dapat bekerja dengan optimal sesuai dengan standard serta jangka waktu yang diharapkan. Agar kinerja dari transformator distribusi selalu optimal maka harus diperhatikan mengenai pembebanannya. Menurut IEC 354, transformator dibebani stabil 100% pada daya pengenalnya dengan kondisi suhu sekitar 20°C dan suhu lilitan mencapai 98°C, maka usia transformator akan mencapai 20 tahun atau 7300 hari dengan susut usia normal 0,0137% per-hari. Dalam studi ini, memprediksi usia pakai transformator dari faktor kenaikan pembebanan ditahun mendatang pada PT. PLN UP3 Jayapura penyulang Anggrek dengan menggunakan metode regresi linear. Data pembebanan yang digunakan adalah transformator distribusi 100 kVA dan transformator distribusi 160 kVA dari tahun 2019-2020. Berdasarkan hasil perhitungan memperlihatkan bahwa prediksi usia transformator distribusi 100 kVA pada 5 tahun mendatang ialah 2 tahun 2 bulan dan transformator distribusi 160 kVA pada 5 tahun mendatang ialah 8 tahun 5 bulan. Berdasarkan studi, didapatkan bahwa transformator distribusi yang beroperasi di PT. PLN UP3 Jayapura setiap tahunnya akan mengalami kenaikan beban, maka semakin cepat pula usia pakai dari transformator distribusi. Hal tersebut dikarenakan panas yang timbul akibat pembebanan dari suatu transformator distribusi. Dengan memprediksi pembebanan dan usia pakai transformator di masa mendatang, maka dapat dilakukan pencegahan terjadinya kerusakan pada transformator distribusi.

Kata Kunci : *Transformator Distribusi, Pembebanan, Suhu, Usia Pakai Transformator Distribusi.*

ABSTRACT

The need of electricity continues to increase every year. In the distribution of electrical power, a distribution transformer is needed that can work optimally according to the standard and the expected time period. So that the performance of the distribution transformer is always optimal, attention must be paid to the loading. According to IEC 354, the transformer is loaded stable 100% at its rated power with a temperature condition of about 20°C and the winding temperature reaches 98°C, the transformer life will reach 20 years or 7300 days with a normal life loss of 0.0137% per day. In this study, predicting the life of the transformer from the load increase factor in the coming year at PT. PLN UP3 Jayapura Anggrek feeder using linear regression method. The loading data used are 100 kVA distribution transformer and 160 kVA distribution transformer from 2019-2020. Based on the calculation results show that the predicted age of the 100 kVA distribution transformer in the next 5 years is 2 years 2 months and the 160 kVA distribution transformer in the next 5 years is 8 years 5 months. Based on the study, it was found that the distribution transformer operating in PT. PLN UP3 Jayapura every year will experience an increase in load, so the faster of the distribution transformer lifetime will be. This is due to the heat that arises following by the loading of a distribution transformer. By predicting the load and service life of the transformer in the future, there things can be taken to prevent damage of the distribution transformer.

Keywords : *Distribution Transformer, Loading, Temperature, Transformer Lifetime.*

I. PENDAHULUAN

Transformator merupakan pusat dari sistem transmisi dan distribusi. Maka dari itu transformator diharapkan bisa beroperasi dalam kondisi terbaik. Mempertimbangkan kerja keras transformator seperti itu, maka perlu juga dijaga semaksimal mungkin. Oleh karena itu, sistem dan

peralatan yang baik dan tepat harus digunakan dalam memelihara transformator. Berdasarkan prinsip tersebut maka kondisi transformator harus selalu dipantau dan dirawat. Karena, jika kondisi pembebanan yang tidak stabil dapat mempengaruhi usia pakai dari sebuah transformator. Oleh karena itu, akan

dibahas mengenai analisis prediksi usia pakai transformator dengan metode regresi linear.

II. LANDASAN TEORI

2.1 Tinjauan Pustaka

Mancon Sitanggang tentang studi perkiraan umur transformator distribusi dengan metode tingkat tahunan yang difokuskan terhadap umur relatif per periode changeout dalam per unit rating dasar (Ar), diperlukan data yang akurat mengenai beban harian sampai dengan beban tahunan. Hal ini dikarenakan memerlukan perhitungan titik yang mencakup seluruh periode changeout. Proses studi yang dilakukan ialah perhitungan dari perkiraan jumlah periode changeout (EL) dengan lamanya periode chargeout sebuah transformator distribusi tersebut. [5]

Palindungan Gultom, dkk. Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui susut umur transformator yang beroperasi di PT. PLN (Persero) kota Pontianak feeder Raya 10 dengan memfokuskan pada data pembebanan berlebih. Pada penelitian digunakan data pembebanan transformator yang beroperasi di kota Pontianak dengan data pembebanan diatas 80% dari kapasitas transformator. [6]

Yolla Yaumul Rizki, dkk merupakan penelitian pembebanan transformator berkapasitas 2×60 MVA di Gardu Induk Garuda Sakti dengan metode pengambilan data per 3 bulan (satu periode). Pada penelitian didapatkan sisa umur transformator dengan pembebanan 62% lebih besar dibandingkan dengan pembebanan diatas 80%. Hal tersebut juga dipengaruhi oleh lamanya pemasangan transformator. [9]

2.2 Transformator

Transformator ialah peralatan listrik yang berfungsi untuk menyalurkan daya atau tenaga listrik arus bolak-balik (AC) dengan menaikan atau menurunkan tegangan berdasarkan prinsip elektromagnetik sesuai dengan kebutuhan atau keinginan kita tanpa mengubah nilai frekuensinya. Dimana perbandingan tegangan antara sisi primer dan sisi sekunder berbanding lurus dengan perbandingan jumlah lilitan dan berbanding terbalik dengan perbandingan arusnya. Transformator dapat juga digunakan sebagai gandengan impedansi antara sumber dan beban, untuk memisahkan satu rangkaian dengan rangkaian yang lain serta menghambat arus searah dengan tetap mengalirkan arus bolak-balik antar rangkaian.

Secara sederhana transformator dapat dibagi menjadi tiga bagian, yaitu lilitan primer, lilitan sekunder dan inti besi. Lilitan primer merupakan bagian transformator yang terhubung dengan rangkaian sumber energi (catu daya). Lilitan

sekunder merupakan bagian transformator yang terhubung dengan rangkaian beban. Inti besi merupakan bagian transformator yang bertujuan untuk mengarahkan keseluruhan fluks magnet yang dihasilkan oleh lilitan primer agar masuk ke lilitan sekunder.



Gambar 1 Transformator Distribusi

2.2.1 Prinsip Kerja Transformator

Transformator terdiri atas dua buah lilitan, yaitu primer dan sekunder yang bersifat induktif. Kedua lilitan ini terpisah secara elektrik namun berhubungan secara magnetis melalui jalur yang memiliki reluktansi rendah. Apabila lilitan primer dihubungkan dengan sumber tegangan bolak-balik maka fluks bolak-balik akan muncul di dalam inti yang dilaminasi, karena lilitan tersebut membentuk rangkaian tertutup maka mengalirlah arus primer. Akibat adanya fluks di lilitan primer maka di lilitan primer terjadi induksi (self induction) dan terjadi pula induksi di lilitan sekunder karena pengaruh induksi dari lilitan primer atau yang biasa disebut sebagai induksi bersama yang menyebabkan timbulnya fluks magnet di lilitan sekunder, maka mengalirlah arus sekunder jika rangkaian sekunder di bebani, sehingga energi listrik dapat ditransfer keseluruhan (secara magnetisasi).

2.2.2 Tipe-tipe Transformator Distribusi

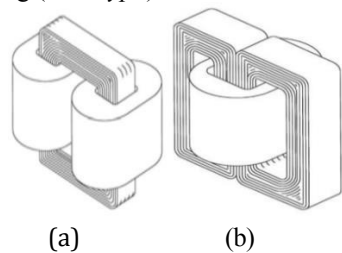
- Gardu Beton
Komponen instalasi ada dalam sebuah bangunan sipil dari batu dan beton (seperti tembok). Kontruksi bangunan gardu ini bertujuan untuk memenuhi persyaratan terbaik bagi sistem keamanan ketenagalistrikan.
- Gardu Kios
Dibangun di lokasi yang tidak memungkinkan didirikanya Gardu Beton atau Gardu tembok. Gardu kios bukan merupakan gardu permanen tetapi hanya merupakan gardu sementara, sehingga dapat mudah untuk dipindah-pindahkan. Kapasitas maksimum transformator yang terpasang adalah 400 kVA.
- Gardu Portal
Gardu tiang tipe terbuka (outdoor) dengan kontruksi ditopang oleh dua tiang atau lebih. Dudukan transformator diletakan minimal sekitar 3 meter di atas tanah. Daya maksimal pada gardu portal adalah 400 kVA.
- Gardu Cantol
Gardu tiang kontruksi luar (outdoor) namun hanya ditopang oleh satu tiang, dimana metode

pemasangannya ada yang langsung dipasang pada tiang dengan bantuan besi sebagai cantolan, atau yang menggunakan satu palang melintang. Kapasitas transformator minimal 25 kVA dan maksimal 100 kVA.

2.2.3 Konstruksi Transformator Distribusi

1. Inti Besi

Terbuat dari lempengan-lempengan baja tipis yang di klem menjadi satu untuk mengurangi panas yang diakibatkan oleh arus eddy. Berfungsi untuk mempermudah jalan fluksi magnetik yang ditimbulkan oleh arus listrik yang melalui kumparan. Secara umum inti transformator terdiri dari dua tipe yaitu tipe inti (*core type*) dan tipe cangkang (*shell type*).



Gambar 2 a)Tipe Inti (b)Tipe Cangkang

2. Kumparan Transformator

Terdiri dari belitan primer dan belitan sekunder yang membentuk suatu gulungan. Bila salah satu belitan diberikan tegangan maka pada belitan tersebut akan membangkitkan fluks pada inti besi kemudian menginduksi belitan lainnya agar timbul tegangan juga.

3. Minyak Transformator

Komponen penting dalam sistem pendinginan transformator untuk menghilangkan panas akibat rugi-rugi daya transformator. Sebagai bagian dari bahan isolasi, dan Sebagai pendingin minyak transformator. Sehingga dengan kedua kemampuan ini maka minyak diharapkan akan mampu melindungi transformator dari gangguan.

4. Tangki Konservator

Berfungsi untuk menampung minyak cadangan dan uap/udara akibat pemanasan transformator karena arus beban. Diantara tangki dan transformator dipasangkan relai bucholtz yang akan meyerap gas produksi akibat kerusakan minyak.

5. Sistem Pendingin

Pada inti besi dan kumparan – kumparan akan timbul panas akibat rugi-rugi tembaga. Maka panas tersebut mengakibatkan kenaikan suhu yang berlebihan, ini akan merusak isolasi, maka untuk mengurangi kenaikan suhu yang berlebihan tersebut transformator perlu dilengkapi dengan alat atau sistem pendingin untuk menyalurkan panas keluar transformator.

6. Isolator Bushing

Pada ujung kedua lilitan transformator baik primer ataupun sekunder keluar menjadi terminal melalui isolator yang juga sebagai penyekat antar lilitan dengan body badan transformator.

7. Tap Changer

Alat perubah pembandingan transformasi untuk mendapatkan tegangan operasi sekunder yang sesuai dengan tegangan sekunder yang diinginkan dari tegangan primer yang berubah-ubah.

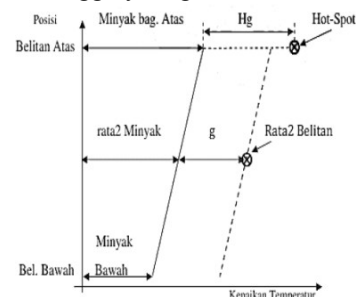
2.3 Usia Pakai Transformator

Besaran pembebanan yang diberikan terhadap transformator juga menentukan kenaikan suhu pada belitan transformator tersebut. Salah satu hal yang mempengaruhi suhu transformator distribusi adalah suhu titik panas. Suhu titik panas merupakan kondisi terpanas dari bagian transformator, yaitu terjadi pada lilitan transformator. Panas yang timbul mengakibatkan penguraian dari komponen transformator yang dapat mempercepat usia pakai transformator. Penurunan kemampuan suatu komponen pada transformator akibat panas disebut penuaan.

Tabel 1 Nilai Susut Usia Akibat Kenaikan Suhu Menurut IEC 354

Suhu Lilitan (°C)	80	86	92	98	104	110	116	122	128	134	140
Susut Usia (p.n)	0,125	0,25	0,5	1	2	4	8	16	32	64	128
Perkiraan Usia (tahun)	>20	>20	>20	20	10	5	2,5	1,25	0,625	0,5125	0,1563

Faktor penuaan atau laju perubahan usia transformator pada setiap kenaikan suhu titik panas diatas suhu normal (98 °C). Standar IEC 354 memberikan faktor beban terus menerus yang akan menghasilkan suhu hot spot 98°C dari berbagai suhu lingkungan dan untuk setiap jenis pendinginan, sehingga memungkinkan untuk menghitung kemampuan pembebanan terus menerus berdasarkan suhu sekitar. Ketika pembebanan secara terus menerus dan nantinya semakin naik mengakibatkan suhu menjadi semakin tinggi, maka terjadi penuaan isolasi yang meningkat pula. Hal ini akan menyebabkan tingginya rugi dielektrik.



Gambar 3 Diagram Temperatur Transformator

Kenaikan temperatur dapat diasumsikan dengan diagram temperatur seperti ditunjukkan gambar diatas. Kenaikan temperatur minyak bagian atas yang diukur selama pengujian kenaikan temperatur, berbeda dengan minyak yang meninggalkan lilitan. Minyak pada bagian atas merupakan campuran sebagian dari minyak yang bersirkulasi sepanjang lilitan.

2.4 Metode Regresi Linear

Perhitungan perkiraan sisa usia transformator dihitung berdasarkan metode perhitungan berfokus pada pembebanan harian dan metode perhitungan berdasarkan peramalan beban transformator menggunakan analisa regresi linear. Analisa deret waktu yang hasilnya berupa persamaan trend yang dapat digunakan untuk peramalan kedepan (*forecasting*). Analisa linear adalah hubungan yang didapat dan dinyatakan dalam bentuk persamaan matematika yang menyatakan hubungan fungsional antar variabel-variabel.

Analisa linear dianggap memiliki tingkat akurasi yang cukup tinggi dalam menganalisa suatu faktor, karena antar variabel nya dapat ditentukan. Analisa linear adalah regresi yang variabel bebasnya (variabel X) berpangkat paling tinggi satu untuk regresi sederhana, yaitu regresi linier yg hanya melibatkan dua variabel (variabel X dan Y). Dalam penelitian ini, nantinya variabel penyebab (X) adalah periode pengambilan data, sedangkan variable akibat (Y) didapat dari data pembebanan.

Berikut persamaan trend linear yang digunakan dalam prediksi beban transformator di tahun mendatang, sebagai berikut:

$$Y_t = a + b \cdot X_t \dots\dots\dots (1)$$

Ket:

- Yt = Pembebanan pada waktu t
- Xt = Periode waktu t
- a = Konstanta
- b = Koefisien regresi

III. METODE PENELITIAN

3.1 Metode Penelitian

Penelitian diawali dengan studi kepustakaan berdasarkan dokumen maupun literatur sesuai dengan objek yang dilakukan penelitian. Selanjutnya memerlukan data nyata lapangan. Penelitian yang dilakukan oleh penulis berfokus pada menganalisis usia pakai transformator dalam periode 5 tahun mendatang dengan menggunakan metode regresi linear. Transformator merupakan alat yang penting dalam mengendalikan tegangan agar listrik dapat disalurkan dengan baik. Data yang didapatkan akan dilakukan perhitungan secara matematis sesuai dengan langkah penelitian. Hasil perhitungan kemudian akan dianalisis sehingga mendapatkan kesimpulan dari penelitian.

3.2 Objek Penelitian

Objek penelitian ini adalah memprediksi sisa usia pakai dari transformator distribusi dalam periode 5 tahun mendatang untuk mengetahui sisa usia transformator distribusi 100 kVA dan transformator distribusi 160 kVA yang mulai beroperasi tahun 2016 di Unitup 42110 pada PT. PLN UP3 Jayapura, sehingga dapat mengantisipasi pada tahun berapa transformator distribusi tersebut harus diganti agar pemakaiannya tidak melebihi dari kapasitas yang telah ditentukan.

3.3 Data – Data Yang Di Dapat

a) Data Transformator Distribusi

Berikut adalah spesifikasi transformator ditunjukkan pada tabel 2.

Tabel 2 Spesifikasi Transformator

Spesifikasi Transformator	
Tegangan primer	20 kV
Tipe	3 fasa
Jenis Pendinginan	ONAN
Jenis Gardu	Portal
Suhu Ambient	30 °C

b) Data Pembebanan Transformator Distribusi

Berikut merupakan data pembebanan transformator distribusi yang menjadi bahan penelitian:

Tabel 3 Data Transformator 100 kVA

No.	Tahun Operasi	Periode Pengambilan Data	Beban			
			Siang		Malam	
			Daya (kVA)	Persentase (%)	Daya (kVA)	Persentase (%)
1	2019	1	49,88	49,88	57,88	57,88
2		50,24	50,24	59,4	59,4	
3		52,45	52,45	61,04	61,04	
4		53,57	53,57	61,98	61,98	
5	2020	1	55,05	55,05	64,62	64,62
6		57,23	57,23	67,11	67,11	
7		58,97	58,97	68,53	68,53	
8		61,36	61,36	69,92	69,92	

Tabel 4 Data Transformator 100 kVA

No.	Tahun Operasi	Periode Pengambilan Data	Beban			
			Siang		Malam	
			Daya (kVA)	Persentase (%)	Daya (kVA)	Persentase (%)
1	2019	1	60,05	37,53	73,45	45,91
2		66,99	41,87	76,99	48,12	
3		67,47	42,17	79,47	49,67	
4		70,99	44,37	80,99	50,62	
5	2020	1	73,89	46,18	85,89	53,68
6		76,62	47,89	82,62	51,64	
7		77,89	48,68	88,89	55,56	
8		79,60	49,75	91,60	57,25	

3.4 Teori Prediksi Beban Transformator Dengan Metode Regresi Linear

Dalam pengolahan data penelitian dengan menggunakan metode regresi linear terdapat beberapa variabel yang harus ditentukan terlebih dahulu. Dimana variabel tersebut adalah variabel penyebab dan variabel akibat. Variabel penyebab (X) adalah periode pengambilan data dari tahun yang akan diprediksi, sedangkan variabel akibat (Y) adalah didapat dari data persentase pembebanan transformator pada siang hari dan malam hari.

Variabel penyebab dan variabel akibat itu nantinya akan diolah kedalam nilai konstanta (a) dan koefisien regresi (b). Maka untuk menentukan nilai a dan b,

$$a = \frac{(\sum Y)(\sum X^2) - (\sum X)(\sum XY)}{(n)(\sum X^2) - (\sum X)^2} \dots\dots\dots(2)$$

$$b = \frac{(n)(\sum XY) - (\sum X)(\sum Y)}{(n)(\sum X^2) - (\sum X)^2} \dots\dots\dots(3)$$

Umumnya analisa regresi dilakukan bersama dengan analisa korelasi (r). Korelasi merupakan ukuran kesempurnaan hubungan antara variabel nilai r 1 menunjukkan bahwa hubungan variabel X dan Y sempurna. Persamaan koefisien korelasi (r) dapat dicari menggunakan persamaan:

$$r = \frac{n(\sum XY) - (\sum X)(\sum Y)}{\sqrt{\{n(\sum X^2) - (\sum X)^2\} \{n(\sum Y^2) - (\sum Y)^2\}}} \dots\dots\dots(4)$$

Berikut keterangannya:

- a = Konstanta
- b = Koefisien regresi
- n = jumlah data
- ΣX = jumlah periode waktu t
- Σ = jumlah pembebanan pada waktu t
- ΣXY = jumlah periode waktu t dikali jumlah pembebanan pada waktu t

3.5 Menentukan Usia Pakai Transformator

Prediksi usia transformator pada penelitian ini hanya memfokuskan terhadap pengaruh pembebanan saja. dalam penelitian ini pola pembebanan terbagi menjadi 4 periode pengambilan data. Untuk mengetahui usia pakai transformator maka terlebih dahulu menentukan kecepatan relatif dari kenaikan suhu titik panas. Nilai relatif dari usia pemakaian didefinisikan sebagai:

$$\theta H = \text{beban transformator (\%)} \times T_{\max} \dots\dots\dots(5)$$

$$V = 2^{\frac{\theta H - 98^{\circ}C}{6}} \dots\dots\dots(6)$$

Berikut keterangannya:

- θH = Titik suhu panas (°C)
- Tmax = Suhu 98 (°C)
- V = Kecepatan relatif (V)

Kemudian untuk mengetahui pengurangan atau susut usia dari transformator menggunakan persamaan berikut:

$$\text{Susut usia (24jam)} = (t.V_{\text{siang}}) + (t.V_{\text{malam}}) \dots\dots\dots(7)$$

Berikut keterangannya:

- t = Waktu (jam)
- Vsiang = Kecepatan relative siang hari (V)
- Vmalam = Kecepatan relative malam hari (V)

Setelah mendapatkan nilai-nilai yang dibutuhkan, maka prediksi terhadap usia pakai transformator dapat ditentukan menggunakan persamaan dibawah ini:

$$\text{Prediksi usia pakai pada tahun ke - n} = \frac{\text{Umur dasar} - n}{\text{Susut usia (p.u)}} \dots\dots\dots(8)$$

Berikut keterangannya:

- n = Lama transformator beroperasi (tahun)

3.6 Langkah-Langkah Penelitian

Berikut adalah langkah – langkah penelitian:



Gambar 4 Langkah-Langkah Penelitian

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Prediksi Beban Transformator Dengan Metode Regresi Linear

a) Transformator 100 kVA

- Untuk beban di siang hari:

$$a = \frac{(\sum Y)(\sum X^2) - (\sum X)(\sum XY)}{(n)(\sum X^2) - (\sum X)^2}$$

$$a = \frac{(438,75)(60) - (20)(1113,85)}{(8)(60) - (20)^2}$$

$$a = \frac{(26325) - (22277)}{480 - 400}$$

$$a = \frac{4048}{80}$$

$$a = 50,6$$

$$b = \frac{(n)(\sum XY) - (\sum X)(\sum Y)}{(n)(\sum X^2) - (\sum X)^2}$$

$$b = \frac{(8)(1113,85) - (20)(438,75)}{(8)(60) - (20)^2}$$

$$b = \frac{(8910,8) - (8775)}{480 - 400}$$

$$b = \frac{135,8}{80}$$

$$b = 1,7$$

Persamaan regresi linear sesuai dengan persamaan (1) di siang hari adalah:
 $y = 50,6 + 1,7 X$

- Untuk beban di malam hari:

$$a = \frac{(\sum Y)(\sum X^2) - (\sum X)(\sum XY)}{(n)(\sum X^2) - (\sum X)^2}$$

$$a = \frac{(510,48)(60) - (20)(1291,83)}{(8)(60) - (20)^2}$$

$$a = \frac{(30628,8) - (25836,6)}{480 - 400}$$

$$a = \frac{4792,2}{80}$$

$$a = 59,9$$

$$b = \frac{(n)(\sum XY) - (\sum X)(\sum Y)}{(n)(\sum X^2) - (\sum X)^2}$$

$$b = \frac{(8)(1291,83) - (20)(510,48)}{(8)(60) - (20)^2}$$

$$b = \frac{(10334,64) - (10209,6)}{480 - 400}$$

$$b = \frac{125,04}{80}$$

$$b = 1,56$$

Persamaan regresi linear sesuai dengan persamaan (1) di malam hari adalah:
 $y = 59,9 + 1,56 X$

Tabel 5 Hasil Prediksi Beban Transformator 100 kVA

Tahun	Prediksi Beban (%)	
	Siang Hari	Malam Hari
2021	57,4	66,14
2022	64,2	72,38
2023	71	78,62
2024	77,8	84,86
2025	84,6	91,1

Persentase beban transformator selama priode 5 tahun mendatang akan mengalami peningkatan 4,99% saat beban puncak di tiap tahunnya.

Untuk koefisien korelasinya pada pembebanan siang dan malam hari, sebagai berikut:

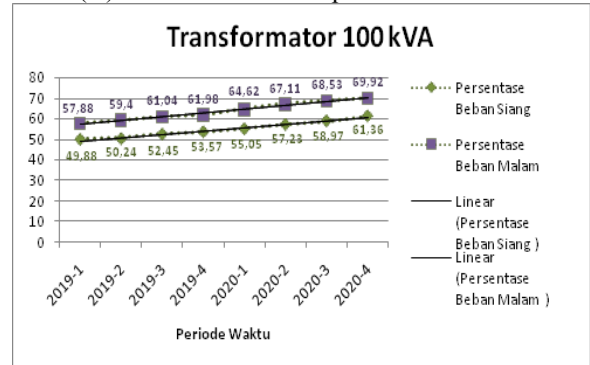
$$r_{siang} = \frac{8(2044,29) - (36)(438,75)}{\sqrt{\{8(204) - (36)^2\} \{8(24181,1) - (438,75)^2\}}}$$

$$r_{siang} = \frac{16354,32 - 15795}{\sqrt{\{336\} \{947,24\}}} = 0,991$$

$$r_{malam} = \frac{8(2372,55) - (36)(510,48)}{\sqrt{\{8(204) - (36)^2\} \{8(32710,5) - (510,48)^2\}}}$$

$$r_{malam} = \frac{18980,4 - 18377,28}{\sqrt{\{336\} \{1094,17\}}} = 0,995$$

Nilai hasil akhir tersebut menandakan bahwa, hubungan variabel penyebab (X) dengan variabel akibat (Y) adalah korelasi sempurna.



Gambar 5 Hubungan Variabel X dan Y Transformator 100 kVA

b) Transformator 160 kVA

- Untuk beban di siang hari:

$$a = \frac{(\sum Y)(\sum X^2) - (\sum X)(\sum XY)}{(n)(\sum X^2) - (\sum X)^2}$$

$$a = \frac{(358,44)(60) - (20)(912,26)}{(8)(60) - (20)^2}$$

$$a = \frac{(21506,4) - (18245,6)}{480 - 400}$$

$$a = \frac{3260,8}{80}$$

$$a = 40,77$$

$$b = \frac{(n)(\sum XY) - (\sum X)(\sum Y)}{(n)(\sum X^2) - (\sum X)^2}$$

$$b = \frac{(8)(912,26) - (20)(358,44)}{(8)(60) - (20)^2}$$

$$b = \frac{(7298,08) - (7168,8)}{480 - 400}$$

$$b = \frac{129,28}{80}$$

$$b = 1,62$$

Persamaan regresi linear sesuai dengan persamaan (1) di siang hari adalah:
 $y = 40,77 + 1,62 X$

- Untuk beban di malam hari:

$$a = \frac{(\sum Y)(\sum X^2) - (\sum X)(\sum XY)}{(n)(\sum X^2) - (\sum X)^2}$$

$$a = \frac{(412,44)(60) - (20)(1046,26)}{(8)(60) - (20)^2}$$

$$a = \frac{(24746,4) - (20925,2)}{480 - 400}$$

$$a = \frac{3821,2}{80}$$

$$a = 47,77$$

$$b = \frac{(n)(\sum XY) - (\sum X)(\sum Y)}{(n)(\sum X^2) - (\sum X)^2}$$

$$b = \frac{(8)(1046,26) - (20)(412,44)}{(8)(60) - (20)^2}$$

$$b = \frac{(8370,08) - (8248,8)}{480 - 400}$$

$$b = \frac{121,28}{80}$$

$$b = 1,52$$

Persamaan regresi linear sesuai dengan persamaan (1) di malam hari adalah: $y = 47,77 + 1,52 X$

Tabel 6 Hasil Prediksi Beban Transformator 160 kVA

Tahun	Prediksi Beban (%)	
	Siang Hari	Malam Hari
2021	47,25	53,85
2022	53,73	59,93
2023	60,21	66,01
2024	66,69	72,09
2025	73,17	78,17

Persentase beban transformator selama periode 5 tahun mendatang akan mengalami peningkatan 4,86% saat beban puncak tiap tahunnya.

Untuk koefisien korelasinya pada pembebanan siang dan malam hari, sebagai berikut:

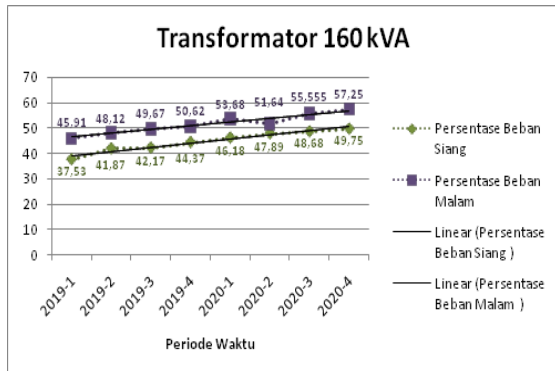
$$r_{siang} = \frac{8(1682,26) - (36)(358,44)}{\sqrt{\{8(204) - (36)^2\} \{8(16179,5) - (358,44)^2\}}}$$

$$= \frac{13458,08 - 12903,84}{\sqrt{\{336\} \{956,77\}}} = 0,978$$

$$r_{malam} = \frac{8(1918,77) - (36)(412,44)}{\sqrt{\{8(204) - (36)^2\} \{8(21364,91) - (412,44)^2\}}}$$

$$= \frac{15350,16 - 14847,84}{\sqrt{\{336\} \{812,53\}}} = 0,963$$

Nilai hasil akhir tersebut menandakan bahwa, hubungan variabel penyebab (X) dengan variabel akibat (Y) adalah sempurna, karena mendekati 1.



Gambar 6 Hubungan Variabel X dan Y Transformator 160 kVA

4.2 Perhitungan Usia Pakai Transformator

a) Transformator 100 kVA

- Siang hari
 $\theta H = \text{beban transformator (\%)} \times T_{max}$

$$\theta H = 57,4 \% \times 98$$

$$\theta H = 56,25 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$V = 2 \left(\frac{\theta H - 98 \text{ }^\circ\text{C}}{6} \right)$$

$$V = 2 \left(\frac{56,25 - 98 \text{ }^\circ\text{C}}{6} \right)$$

$$V = 0,008 \text{ p.u}$$

- Malam hari
 $\theta H = \text{beban transformator (\%)} \times T_{max}$

$$\theta H = 66,14 \% \times 98$$

$$\theta H = 64,82 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$V = 2 \left(\frac{\theta H - 98 \text{ }^\circ\text{C}}{6} \right)$$

$$V = 2 \left(\frac{64,82 - 98 \text{ }^\circ\text{C}}{6} \right)$$

$$V = 0,022 \text{ p.u}$$

Maka, untuk prediksi perhitungan susut usia selama 24 jam ialah sebagai berikut:
 Susut usia (24 jam) = (t.Vsiang) + (t.Vmalam)
 Susut usia (24 jam) = (20 x 0,008) + (4 x 0,022)
 Susut usia (24 jam) = 0,16 + 0,088
 Susut usia (24 jam) = 0,248 p.u

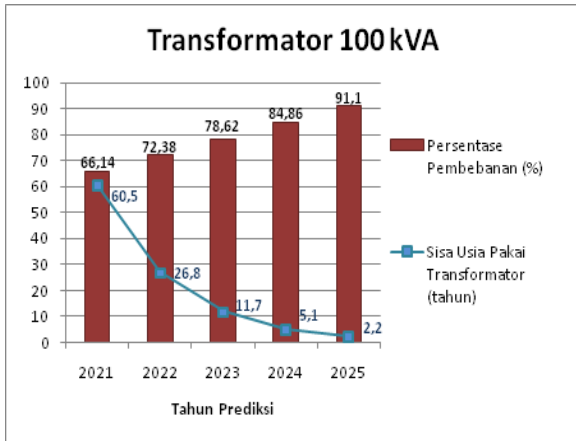
Maka persentase susut usia ialah 24,8%.
 Prediksi usia pakai pada tahun ke - n = $\frac{\text{Umur dasar} - n}{\text{Susut usia (p.u)}}$
 Prediksi usia pakai pada tahun 2021 = $\frac{20 - (2021 - 2016)}{0,248 \text{ p.u}}$

Prediksi usia pakai pada tahun 2021 = 60,48 tahun

Tabel 7 Sisa Usia Pakai Transformator 100 kVA

Tahun	Prediksi Beban (%)		θH (°C)		V (p.u)		Susut Usia (24 jam) (p.u)	Sisa Usia Pakai (tahun)
	Siang Hari	Malam Hari	Beban Siang	Beban Malam	Beban Siang	Beban Malam		
2021	57,40	66,14	56,25	64,82	0,008	0,022	0,248	60,5
2022	64,20	72,38	62,92	70,93	0,017	0,044	0,523	26,8
2023	71,00	78,62	69,58	77,05	0,038	0,089	1,106	11,7
2024	77,80	84,86	76,24	83,16	0,081	0,180	2,340	5,1
2025	84,60	91,10	82,91	89,28	0,175	0,365	4,959	2,2

Untuk transformator 100 kVA pada tahun ke 2025 prediksi pemakaian beban mencapai 91,1% yang mana melebihi dari umumnya batas pengoperasian kapasitas transformator 80% dari kapasitas rating nya. Hal tersebutlah yang mempengaruhi sisa usia pakai dari sebuah transformator pada tahun 2025 tersisa 2,2 tahun. Standard umur dasar sebuah transformator adalah 20 tahun, sedangkan pada transformator distribusi 100 kVA jika dijumlahkan dari tahun pemakaian awal hingga tahun prediksi 2025 maka jumlahnya hanya mencapai 11 tahun. Penurunan standard umur dasar pada transformator 100 kVA ini terjadi karena pemakaian beban yang melebihi dari 80% kapasitas pemakaian, yang berawal sejak tahun 2024. Penurunan standard umur dasar transformator terjadi karena pemakaian beban berlebih yang mengakibatkan suhu titik hotspot lilitan semakin naik karena bekerja melebihi batasannya. Pemakaian beban berlebih ini terjadi karena peningkatan jumlah pengguna energi listrik.



Gambar 7 Grafik Prediksi Usia Pakai Transformator 100 kVA

b) Transformator 160 kVA

- Siang hari
 $\theta H = \text{beban transformator (\%)} \times T_{max}$

$$\theta H = 47,25 \% \times 98$$

$$\theta H = 46,31 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$V = 2 \left(\frac{\theta H - 98 \text{ } ^\circ\text{C}}{6} \right)$$

$$V = 2 \left(\frac{46,31 - 98 \text{ } ^\circ\text{C}}{6} \right)$$

$$V = 0,0025 \text{ p.u}$$

- Malam hari
 $\theta H = \text{beban transformator (\%)} \times T_{max}$

$$\theta H = 53,85 \% \times 98$$

$$\theta H = 52,77 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$V = 2 \left(\frac{\theta H - 98 \text{ } ^\circ\text{C}}{6} \right)$$

$$V = 2 \left(\frac{52,77 - 98 \text{ } ^\circ\text{C}}{6} \right)$$

$$V = 0,0054 \text{ p.u}$$

Maka, untuk prediksi perhitungan susut usia selama 24 jam ialah sebagai berikut:

$$\text{Susut usia (24 jam)} = (t.V_{siang}) + (t.V_{malam})$$

$$\text{Susut usia (24 jam)} = (20 \times 0,0025) + (4 \times 0,0054)$$

$$\text{Susut usia (24 jam)} = 0,05 + 0,0216$$

$$\text{Susut usia (24 jam)} = 0,072 \text{ p.u}$$

Maka persentase susut usia ialah 7,2%.

$$\text{Prediksi usia pakai pada tahun ke } - n = \frac{\text{Umur dasar} - n}{\text{Susut usia (p.u)}}$$

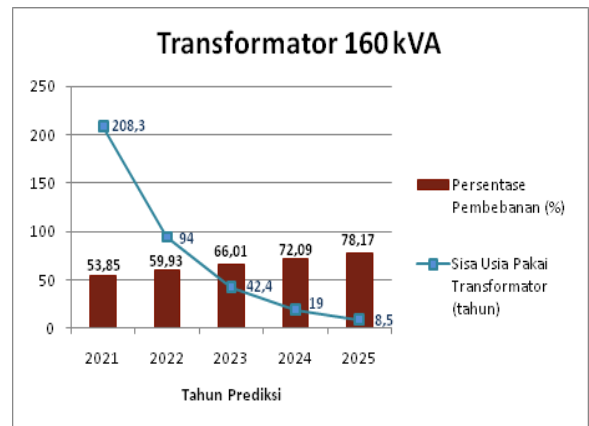
$$\text{Prediksi usia pakai pada tahun } 2021 = \frac{20 - (2021 - 2016)}{0,072 \text{ p.u}}$$

$$\text{Prediksi usia pakai pada tahun } 2021 = 208,3 \text{ tahun}$$

Tabel 8 Sisa Usia Pakai Transformator 100 kVA

Tahun	Prediksi Beban (%)		θH ($^\circ\text{C}$)		V (p.u)		Susut Usia (24 jam) (p.u)	Sisa Usia Pakai (tahun)
	Siang Hari	Malam Hari	Beban Siang	Beban Malam	Beban Siang	Beban Malam		
2021	47,25	53,85	46,31	52,77	0,0025	0,0054	0,07	208,3
2022	53,73	59,93	52,66	58,73	0,0053	0,0107	0,15	94
2023	60,21	66,01	59,01	64,69	0,0111	0,0213	0,31	42,4
2024	66,69	72,09	65,36	70,65	0,0230	0,0424	0,63	19
2025	73,17	78,17	71,71	76,61	0,0480	0,0845	1,30	8,5

Persentase pembebanan transformator 160 kVA pada tahun ke 2025 prediksi pemakaian beban mencapai 78,17% yang mana mendekati batas pengoperasian transformator 80% dari kapasitas ratingnya. Oleh karena itu prediksi sisa usia pakai transformator 160 kVA ditahun 2025 berkisar 8,5 tahun yang mana jika dijumlahkan dari awal pemakaian hingga tahun prediksi 2025 maka jumlahnya mencapai 17 tahun, nilai tersebut mendekati umur dasar transformator yaitu 20 tahun. Dari hasil prediksi beban transformator, dapat diketahui bahwa usia pakai transformator 160 kVA dengan nomor gardu ABE 138-1 yang mulai beroperasi di tahun 2016 pada UP3 Jayapura memiliki sisa usia pakai mendekati 20 tahun, menandakan bahwa pemakaian transformator juga masih sesuai standard.



Gambar 8 Grafik Prediksi Usia Pakai Transformator 160 kVA

V. SIMPULAN

Setelah melakukan pengolahan data, perhitungan dan analisis maka dapat di ambil beberapa kesimpulan, yaitu:

- Hasil prediksi sisa usia pakai transformator 100 kVA pada tahun ke 2025 adalah 2,2 tahun dengan prediksi lama pemakaian transformator 11 tahun dengan prediksi pembebanan mencapai 91,1%.
- Hasil prediksi usia transformator 160 kVA pada tahun ke 2025 adalah 8,5 tahun dengan prediksi lama pemakaian transformator 17 tahun dengan prediksi pembebanan mencapai 78,17%.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Abdul Kadir. 1989. *Transformator*. Jakarta: PT Elex Media Komputindo.
- [2] HaGe. 2009. "Komponen-Komponen Transformator". <http://dunia-listrik.blogspot.com/2009/01/komponen-komponen-transformator.html>. Diakses pada 20 April 2021.
- [3] IEC-354. 1991 Loading For Oil Immersed Power Transformers, International Electronical Comission, Second Edition.
- [4] Kelompok Pembukuan Bidang Transmisi. 1997. SPLN 50 : 1997 Spesifikasi Transformator Distribusi. Jakarta: PLN.
- [5] Mancon Sitanggang. (2009). Studi Perkiraan Umur Transformator Distribusi Dengan Metode Tingkat Tahunan, Teknik Elektro. Universitas Sumatera Utara. Medan.
- [6] Parlindungan Gultom, dkk. "Studi Susut Umur Transformator Distribusi 20 kV Akibat Pembebanan Lebih Di PT.PLN (PERSERO) Kota Pontianak", Jurnal Teknik Elektro Universitas Tanjungpura, Vol. 2 No 1, Pontianak, 2017.
- [7] PLN. SPLN 17A: 1979 Pedoman Transformator Terendam Minyak. Jakarta: PLN.
- [8] Sumargo, Chr. H. 1984. *Pendahuluan Teori Kemungkinan dan Statistika*. Bandung: Penerbit ITB.
- [9] Yolla Yaumil Rizki, dkk. "Perkiraan Umur Transformator Berdasarkan Pengaruh Pembebanan Dan Temperatur Lingkungan Menggunakan Metode Trend Linear". JOM FTEKNIK, Volume 6, Edisi 2 Juli s/d Desember 2019.
- [10] Ryan Septyawan. (2018). Analisis Peramalan Kebutuhan Energi Listrik Pln Area Batam Menggunakan Metode Regresi. Teknik Elektro. Universitas Islam Indonesia. Yogyakarta.