

# Implementasi *Least Square Method* Dalam Evaluasi Hasil *Upgrading* Transformator Distribusi

Rachmat Sutjipto<sup>\*a)</sup>, Heri Sungkowo<sup>a)</sup>, Harrij Mukti Khristiana<sup>a)</sup>, Dhimas Dhesah Kharisma<sup>a)</sup>, Galang Putra Fauzy<sup>a)</sup>, Faradina Agiesta Anjali<sup>a)</sup>

(Received 24 Oktober 202x || Revised 20 Februari 2025 || Accepted Februari 2025)

**Abstract:** *Overloading in distribution transformers negatively affects operational reliability, efficiency, and equipment lifespan. At Gardu Distribusi C0058 PT PLN (Persero) ULP Bululawang, the transformer with a 160 kVA capacity exceeded the safe loading threshold of 80%, reaching 92.2% in the first semester of 2022 and 90.1% in the second semester of 2022. This study aimed to analyze the effectiveness of the upgrading method as a solution to mitigate overloading issues while ensuring long-term transformer performance. The research employed quantitative analysis with direct measurement, load factor evaluation, and load forecasting using the Least Square method. Before the upgrading process, the transformer experienced a peak load of 147.55 kVA (91.7%), significantly surpassing the recommended safety limits. The upgrading process increased the transformer capacity from 160 kVA to 200 kVA, reducing the loading percentage to 73.57%, which brought it back within the acceptable operational range. Furthermore, load forecasting using the Least Square method predicted that the transformer would remain within a safe load level, reaching 79.73% in 2027, ensuring stability for the next five years. These findings align with previous studies emphasizing the effectiveness of transformer upgrading as an alternative to relocation or additional transformer installation. However, further research is required to evaluate the impact on protective devices and system reliability. This study highlights the viability of upgrading as an efficient and cost-effective strategy for managing transformer overloading in distribution networks.*

**Keywords:** *transformer upgrading, load forecasting, distribution system, load factor, Least Square method*

## 1. Pendahuluan

Pembebanan transformator menjadi faktor penting dalam menjaga kualitas daya listrik yang diterima oleh konsumen. Jika pembebanan melebihi batas persentase yang ditentukan maka akan berdampak pada usia dan kualitas transformator [1], [2]. Salah satu permasalahan utama yang dihadapi dalam sistem distribusi tenaga listrik adalah tingginya pembebanan pada transformator distribusi di beberapa wilayah, khususnya di daerah dengan pertumbuhan konsumsi listrik yang pesat. Misalnya, pada Gardu Distribusi C0058 di PT PLN (Persero) ULP Bululawang, kapasitas transformator sebesar 160 kVA mengalami pembebanan yang relatif tinggi dalam dua semester berturut-turut. Berdasarkan hasil pengukuran pada semester 1 tahun 2022, persentase pembebanan mencapai 92,2%, sedangkan pada semester 2 tahun 2022, nilai tersebut masih berada di angka 90,1%. Nilai ini melampaui batas yang diizinkan berdasarkan Surat Edaran Direksi Nomor 0017.E/DIR/2014 yang merekomendasikan pembebanan maksimal sebesar 80% dari kapasitas nominal transformator [3], [4].

Dalam mengatasi kondisi tersebut maka diperlukan suatu tindakan manajemen transformator seperti relokasi transformator, pemasangan transformator sisipan, serta metode *uprating* transformator [5]. Metode relokasi dan pemasangan transformator tambahan telah digunakan dalam berbagai penelitian sebelumnya, namun sering kali terkendala oleh keterbatasan ruang, biaya, serta ketersediaan transformator cadangan di lokasi yang sama [6]. Oleh karena itu, metode *uprating* transformator menjadi salah satu alternatif yang lebih praktis dan efektif, terutama pada sistem distribusi yang tidak mengalami permasalahan tegangan jatuh seperti di Gardu Distribusi C0058.

Meskipun metode *uprating* telah dikenal sebagai salah satu solusi yang potensial dalam meningkatkan kapasitas transformator, masih terdapat kesenjangan dalam penelitian terkait efektivitas jangka panjang dari metode ini, terutama dalam kaitannya dengan pertumbuhan beban di masa mendatang. Beberapa studi hanya berfokus pada dampak *uprating* terhadap pengurangan pembebanan dalam jangka pendek tanpa mempertimbangkan tren pertumbuhan beban yang akan berpengaruh pada keandalan

sistem distribusi dalam beberapa tahun ke depan seperti yang dilakukan beberapa peneliti berikut. Yasa [7] menganalisis hasil *uprating* gardu KRGK 0136 di PT. PLN (Persero) ULP Karang yang dapat menurunkan pembebanan sampai dengan 73% dari 95% sebelum *uprating*. Analisis dilakukan oleh Parsa et al. [8] memanfaatkan IBM SPSS 29.0 untuk memperoleh persentase pengaruh metode *uprating* terhadap beban lebih. Diketahui bahwa *uprating* mempengaruhi beban lebih dengan korelasi kuat dan arah hubungan positif, sedangkan besar pengaruh metode mempengaruhi beban lebih dengan korelasi sedang dan arah hubungan positif mengacu interval koefisien. Nugraha dan Fauziah [9] menerapkan metode *uprating* pada transformator gardu PNBS di Kabupaten Pangandaran dengan hasil terjadi penurunan pembebanan dari 96% ke hampir 50%. Oleh karena itu, diperlukan analisis yang lebih mendalam mengenai bagaimana transformator yang telah mengalami *uprating* dapat tetap beroperasi secara optimal dalam menghadapi peningkatan permintaan listrik.

Penelitian ini mengusulkan pendekatan berbasis metode *Least Square* dalam peramalan beban guna mengevaluasi keberlanjutan kapasitas transformator pasca-*uprating* yang membedakan dengan penelitian sebelumnya. Dengan menggunakan metode ini, penelitian dapat memberikan prediksi pembebanan transformator untuk lima tahun ke depan [10], sehingga dapat diketahui apakah tindakan *uprating* yang dilakukan sudah cukup untuk menjaga transformator tetap berada dalam batas aman hingga periode tertentu. Selain itu, pendekatan ini juga dapat menjadi referensi bagi manajemen aset kelistrikan dalam menentukan strategi pemeliharaan transformator yang lebih proaktif dan berbasis data prediktif [11].

Tujuan penelitian ini untuk menganalisis persentase pembebanan transformator sebelum dan sesudah dilakukan *uprating* pada Gardu Distribusi C0058 di PT PLN (Persero) ULP Bululawang. Penelitian ini juga mengevaluasi dampak *uprating* terhadap pertumbuhan beban selama lima tahun ke depan menggunakan metode *Least Square*, guna memastikan bahwa transformator yang telah di-*uprate* tetap mampu menangani pertumbuhan konsumsi listrik yang terjadi. Hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi referensi dalam pengelolaan

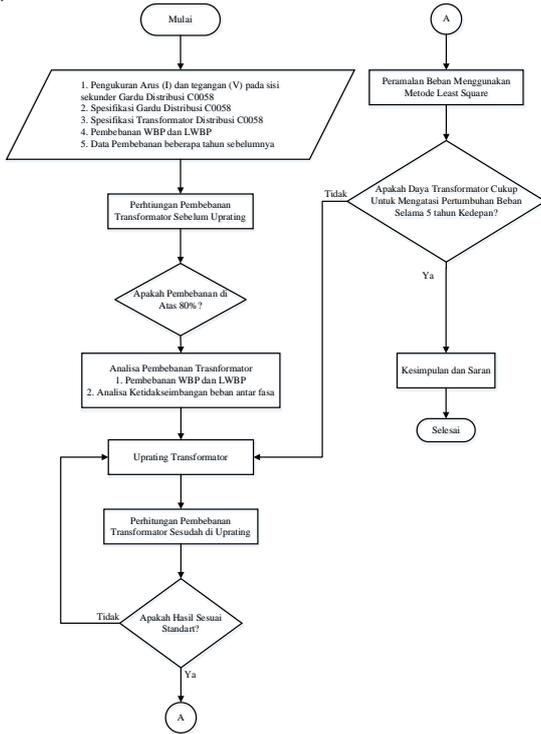
\*Korespondensi: [rachmat.sutjipto@polinema.ac.id](mailto:rachmat.sutjipto@polinema.ac.id)

a) Prodi Teknik Listrik, Jurusan Teknik Elektro, Politeknik Negeri Malang, Malang, Indonesia

transformator distribusi serta dalam perencanaan investasi peralatan distribusi listrik yang lebih efisien.

**2. Metode**

Proses penyelesaian dari penelitian ini menggunakan beberapa langkah utama di antaranya pengumpulan data awal, analisis pembebanan transformator, implementasi *uprating* transformator, pengukuran setelah *uprating*, dan menganalisa pertumbuhan beban selama 5 tahun ke depan pada gardu distribusi C0058 ULP Bululawang dengan Metode *Least Square*. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat di diagram alir penelitian seperti pada Gambar 2.1.



**GAMBAR 2.1 DIAGRAM ALIR PENELITIAN**

**2.1 Pembebanan Transformator**

Pada sistem tenaga listrik di Indonesia, transformator distribusi digunakan untuk menurunkan tegangan dari menengah (20 kV) menjadi tegangan rendah (380/220 V) [12]. Untuk mengetahui besar pembebanan pada suatu transformator distribusi dapat menggunakan Persamaan (2-1) [13].

$$S = (I_R \times V_{R-N}) + (I_S \times V_{S-N}) + (I_T \times V_{T-N}) \quad (2-1)$$

Keterangan:

- S = Daya Transformator (KVA)
- $I_R$  = Arus fasa R
- $V_{R-N}$  = Tegangan fasa R terhadap netral
- $I_S$  = Arus fasa S
- $V_{S-N}$  = Tegangan fasa S terhadap netral
- $I_T$  = Arus fasa T
- $V_{T-N}$  = Tegangan fasa T terhadap netral

Nilai persentase pembebanan pada transformator dapat dihitung dengan Persamaan (2-2).

$$\% \text{beban} = \frac{\text{KVA (beban)}}{\text{KVA (Transformator)}} \quad (2-2)$$

Keterangan:

$$\begin{aligned} \text{KVA (beban)} &= \text{Total daya (beban)} \\ \text{KVA (Transformator)} &= \text{Kapasitas Transformator} \end{aligned}$$

Sebuah transformator distribusi dapat dibebani lebih dari 80% dengan syarat harus sesuai dengan nilai K2 yang telah diizinkan yaitu tidak lebih dari 1,5 [14]. Sehingga, pembebanan transformator dapat dihitung dengan menggunakan cara seperti berikut.

1. Mengelompokkan rata rata pembebanan LWBP (K1) dan WBP (K2).
2. Setelah mengetahui rata rata pembebanan LWBP dan WBP maka dapat harus diketahui lamanya waktu (t) pembebanan.

Nilai K1 dan K2 dapat diperoleh dari hasil perhitungan menggunakan Persamaan (2-3) dan (2-4) [13].

$$K1 = \frac{\text{KVA (Beban LWBP)}}{\text{KVA (Transformator)}} \quad (2-3)$$

$$K2 = \frac{\text{KVA (Beban WBP)}}{\text{KVA (Transformator)}} \quad (2-4)$$

Hasil perhitungan kemudian disesuaikan dengan kurva pembebanan transformator untuk menentukan apakah nilai K2 sudah sesuai dengan ketentuan yang berlaku ( $\leq 1,5$ ).

Perhitungan tingkat ketidakseimbangan beban pada transformator dilakukan dengan menggunakan beberapa koefisien sebagai berikut.

$$a = \frac{I_R}{I_{\text{Rata rata}}} \quad (2-5)$$

$$b = \frac{I_S}{I_{\text{Rata rata}}} \quad (2-6)$$

$$c = \frac{I_T}{I_{\text{Rata rata}}} \quad (2-7)$$

Pada kondisi seimbang, jumlah koefisien a, b dan c adalah 1. Sehingga, rata-rata ketidakseimbangan beban (dalam %) yaitu sebagai berikut [9].

$$U_L = \frac{\{|a-1|+|b-1|+|c-1|\}}{3} \times 100\% \quad (2-8)$$

**2.2 Faktor Pembebanan dan Faktor Kebutuhan**

Faktor pembebanan transformator yang diperbolehkan terhadap suhu lingkungan yang berbeda dapat dilihat dalam Tabel 2.1 [15].

**TABEL 2.1 FAKTOR PEMBEBANAN TRAF0**

Ambient Temperature °C	0	10	20	30	40		
Hot spot temperature rise K	96	88	78	68	58		
$K_{24}$	Distribusi	ONAN	1,17	1,09	1,00	0,91	0,81
	Trafo Daya	ON	1,15	1,08	1,00	0,92	0,82
		OF	1,14	1,08	1,00	0,92	0,83
		OD	1,11	1,06	1,00	0,94	0,87

Faktor kebutuhan (*demand factor*) merupakan perbandingan antara kebutuhan beban maksimum dari sebuah sistem dengan total beban yang terpasang pada sistem tersebut yang dapat dihitung menggunakan Persamaan (2-9).

$$FK = \frac{\text{Kebutuhan beban maksimum}}{\text{Total beban terpasang}} \quad (2-9)$$

**2.3 Peramalan Beban Menggunakan Metode *Least Square***

Dalam memperkirakan beban puncak yang akan terjadi di sistem tenaga listrik dalam beberapa tahun yang akan datang dengan beban di masa masa yang silam dicatat dan kemudian ditarik garis ekstrapolasi disebut metode *Least Square*. Persamaan penentuan parameter metode *Least Square* menggunakan Persamaan (2-10).

$$Y_n = a + bx \quad (2-10)$$

Keterangan:

- a dan b = koefisien  
 Y = diamsusikan jumlah beban (KVA)  
 n = banyak tahun  
 x = waktu tertentu dalam bentuk kode

Koefisien a dan b dapat ditentukan menggunakan Persamaan (2-11) dan (2-12).

$$a = \frac{\sum Y}{n} \quad (2-11)$$

$$b = \frac{\sum XY}{\sum x^2} \quad (2-12)$$

Dalam menentukan nilai X biasanya menggunakan teknik

Tabel 3.1 menunjukkan data pembebanan gardu distribusi di ULP Bululawang pada semester 1. Berdasarkan data pembebanan pada semester 1 tahun 2022 tersebut, diketahui bahwa Gardu

alternatif dengan memberikan kode dengan membagi data menjadi dua kelompok.

### 3. Hasil dan Pembahasan

#### 3.1 Kondisi Transformator Distribusi di PT. PLN (Persero) ULP Bululawang

**SISTEM DISTRIBUSI TENAGA LISTRIK YANG ANDAL MEMERLUKAN PENGELOLAAN KAPASITAS TRANSFORMATOR YANG OPTIMAL AGAR MAMPU MENANGANI BEBAN YANG TERUS BERKEMBANG. TRANSFORMATOR PADA GARDU DISTRIBUSI C0058 PT PLN (PERSERO) ULP BULULAWANG TELAH MENGALAMI PEMBEBANAN BERLEBIH SELAMA DUA SEMESTER BERTURUT-TURUT.**

Distribusi C0058 menduduki peringkat tertinggi dengan persentase pembebanan mencapai angka 92,2% dari kapasitas transformator sebesar 160 kVA.

**TABEL 3.1 DATA PEMBEBANAN GARDU DISTRIBUSI ULP BULULAWANG SEMESTER 1**

Kode Gardu	Data Gardu		Tanggal Pengukuran	Arus (A)				Pembebanan	
	GI	Daya (kVA)		R	S	T	N	Beban (kVA)	% Beban
C0026	Kebon Agung	200	24/01/2022	200	241	261	116	161.460	80,73%
C0040	Kebon Agung	100	23/03/2022	74	104	72	25	80.750	80,75%
C0057	Kebon Agung	160	07/04/2022	157	166	217	106	128.520	80,33%
C0058	Kebon Agung	160	14/04/2022	200	214	236	107	147.500	92,19%
C0061	Kebon Agung	200	14/02/2022	252	241	290	107	181.656	90,83%
C0076	Kebon Agung	100	19/01/2022	126	123	105	44	82.482	82,48%
C0096	Kebon Agung	160	13/04/2022	202	215	175	99	136.160	85,10%
C0131	Kebon Agung	100	25/01/2022	127	126	135	81	86.136	86,14%
C0147	Kebon Agung	75	24/01/2022	107	101	58	62	61.712	82,28%
C0186	Kebon Agung	100	23/01/2022	136	91	153	45	84.740	84,74%
C0266	Kebon Agung	100	14/02/2022	145	93	132	101	83.990	83,99%

Tabel 3.2 menunjukkan data pembebanan gardu distribusi di ULP Bululawang pada semester 2. Pada pengukuran semester 2 persentase pembebanan transformator pada gardu distribusi

C0058 sebesar 90,1%, dan hal ini sudah melebihi standart transformator "normal" seperti terlihat pada Tabel 3.3.

**TABEL 3.2 DATA PEMBEBANAN GARDU DISTRIBUSI ULP BULULAWANG SEMESTER 2**

Kode Gardu	Data Gardu		Tanggal Pengukuran	Arus (A)				Pembebanan	
	Gardu Induk	Daya (kVA)		R	S	T	N	Beban (kVA)	% Beban
C0058	Kebon Agung	160	03/09/2022	201	205	229	115	144.145	90,09%
C0061	Kebon Agung	200	08/08/2022	250	237	304	110	184.303	92,15%
C0076	Kebon Agung	100	06/09/2022	145	135	108	46	91.180	91,18%
C0131	Kebon Agung	100	05/08/2022	133	105	133	82	86.443	86,44%
C0147	Kebon Agung	75	06/07/2022	117	101	75	68	67.683	90,24%
C0266	Kebon Agung	100	11/10/2022	147	90	131	92	83.904	83,90%

**TABEL 3.3 KRITERIA PEMBEBANAN TRANSFORMATOR DISTRIBUSI**

No	Parameter	Normal	Waspada	Darurat
1	Pembebanan	≤80%	80% ≤ x ≤ 90%	≥ 91%
2	Suhu ( <i>hotspot</i> )	≤90°C	90°C ≤ x ≤ 98°C	≥ 98°C

Karena kondisi prosentase pembebanan yang relative tinggi selama 2 semester ini menunjukkan bahwa pada gardu distribusi C0058 diperlukan tindakan manajemen transformator agar kondisi prosentase pembebanannya menjadi "normal" kembali.

Tabel 3.4 menunjukkan nilai pengukuran tegangan dan arus sebelum *uprating* saat Waktu Beban Puncak (WBP) dan pada semester 1. Dari data pada Tabel 3.4 maka dapat dilaksanakan perhitungan prosentase pembebanan transformator sebagai berikut.

$$S = (223 \times 200) + (227 \times 214) + (227 \times 236) = 146,75 \text{ kVA}$$

$$\% \text{beban} = \frac{146,75}{160} = 91,7\%$$

**TABEL 3.4 PEMBEBANAN SEBELUM UPRATING**

Kapasitas Transformator (KVA)	Hasil Pengukuran					
	Tegangan Sekunder (V)			Arus Utama (A)		
	RN	SN	TN	R	S	T
160	223	227	227	200	214	236

### 3.2 Analisa Pembebanan Transformator

#### 3.2.1 Perhitungan Nilai Pembebanan yang Diizinkan Terhadap Rata-rata Pembebanan LWBP (K1) dan WBP (K2)

Tabel 3.5 menunjukkan nilai pembebanan ketika Luar Waktu Beban Puncak (LWBP) dan WBP beserta prosentasenya terhadap kapasitas transformator.

**TABEL 3.5 HASIL PEMBEBANAN LWBP DAN WBP**

Tanggal	Pembebanan LWBP		Pembebanan WBP	
	(kVA)	%	(kVA)	%
30 Maret 2023	81,85	51%	142,51	89%
31 Maret 2023	85,54	53%	145,41	91%
01 April 2023	90,87	57%	143,74	90%
02 April 2023	93,46	58%	147,39	92%

Perhitungan nilai pembebanan yang diizinkan terhadap rata rata pembebanan Luar Waktu Beban Puncak (LWBP) K1

$$S1 = \frac{81,85+85,54+90,87+93,46}{4} = 87,93 \text{ kVA}$$

$$K1 = \frac{S1}{Sr} = \frac{87,93 \text{ kVA}}{160 \text{ kVA}} = 0,55$$

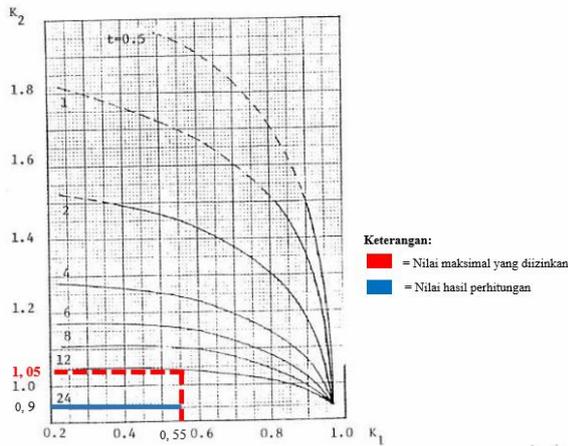
Perhitungan nilai pembebanan yang diizinkan terhadap rata rata pembebanan Waktu Beban Puncak (LWBP) K2

$$S2 = \frac{142,51+144,26+143,74+147,39}{4} = 144,47 \text{ kVA}$$

$$K2 = \frac{S1}{Sr} = \frac{144,47 \text{ kVA}}{160 \text{ kVA}} = 0,90$$

**3.2.2 Analisis Nilai K1 dan K2 Berdasarkan Kurva Pembebanan**

Dari hasil perhitungan di atas, didapatkan nilai K1 sebesar 0,55 dan K2 sebesar 0,90, apabila dimasukkan ke dalam kurva pembebanan transformator maka akan diperoleh hasil sebagai berikut.



**GAMBAR 3.1 KURVA PEMBEBANAN TRANSFORMATOR**

Berdasarkan kurva pembebanan pada Gambar 3.1, dapat disimpulkan bahwa dari nilai K1 sebesar 0,55, didapatkan nilai K2 maksimal yang diizinkan adalah 1,05 dengan waktu operasi selama 12 jam (LWBP).

Dari perhitungan didapatkan nilai K1 sebesar 0,55 dan nilai K2 sebesar 0,90. Meskipun hasil perhitungan K2 sebesar 0,9 masih memenuhi standart yang ditetapkan sesuai dengan SPLN 17:1979, namun nilainya mendekati batas maksimal yang diizinkan (1,05). Oleh karena itu, disarankan untuk mengambil tindakan manajemen transformator agar transformator dapat bekerja dengan optimal.

**3.2.3 Analisis Perhitungan Ketidakseimbangan Beban**

Dari data pengukuran LWPB dan WBP pada tanggal 30 Maret – 2 April 2023 didapatkan nilai hasil pengukuran dari arus dan tegangan. Dari data pengukuran kemudian dilaksanakan proses

analisa dan perhitungan untuk mengetahui tingkat ketidakseimbangan beban antar fasa. Hasil dari analisa ketidakseimbangan beban ini akan digunakan untuk mempertegas dan memperjelas penyebab dari besarnya prosentase pembebanan yang terjadi. Apabila didapatkan hasil lebih dari 20% maka perlu dilakukan upaya untuk pemerataan beban. Untuk hasil perhitungan sebagai berikut.

**a. Ketidakseimbangan beban pada siang hari (LWBP)**

Menentukan nilai koefisien a,b dan c, dimana besarnya arus fasa dalam kondisi tidak seimbang (I) sama dengan besarnya arus rata-rata

$$a = \frac{IR}{I \text{ rata rata}} = \frac{109}{118,3} = 0,92$$

$$b = \frac{IS}{I \text{ rata rata}} = \frac{104}{118,3} = 0,88$$

$$c = \frac{IT}{I \text{ rata rata}} = \frac{142}{118,3} = 1,20$$

Pada kondisi seimbang, besar koefisien a,b dan c adalah 1. Rata-rata ketidakseimbangan beban (dalam %) yaitu sebagai berikut.

$$\text{Rata-rata ketidakseimbangan} = \frac{|a-1|+|b-1|+|c-1|}{3} \times 100\% = \frac{|0,92-1|+|0,88-1|+|1,20-1|}{3} \times 100\% = 4\%$$

**b. Ketidakseimbangan beban pada malam hari (WBP)**

$$a = \frac{IR}{I \text{ rata rata}} = \frac{214}{206,0} = 1,04$$

$$b = \frac{IS}{I \text{ rata rata}} = \frac{194}{206,0} = 0,94$$

$$c = \frac{IT}{I \text{ rata rata}} = \frac{210}{206,0} = 1,02$$

Rata rata ketidakseimbangan beban (dalam %) yaitu sebagai berikut.

$$\text{Rata-rata ketidakseimbangan} = \frac{|a-1|+|b-1|+|c-1|}{3} \times 100\% = \frac{|1,04-1|+|0,94+1|+|1,02-1|}{3} \times 100\% = 4\%$$

Dengan cara yang sama didapatkan hasil ketidakseimbangan antar fasa seperti pada Tabel 3.6. Dapat dilihat bahwa baik pada siang hari maupun malam hari persentase ketidakseimbangan beban relatif rendah, menurut Surat Edaran Direksi No 0017.E/DIR/2014 tentang Metode Pemeliharaan Transformator Distribusi Berbasis Kaidah Manajemen Aset menyatakan bahwa persentase ketidakseimbangan beban (>10%) termasuk dalam kondisi baik. Hal ini memastikan bahwa dalam operasional gardu C0058 tidak terdapat permasalahan tentang ketidakseimbangan beban dan besarnya prosentase pembebanan disebabkan oleh pembebanan lebih dari transformator yang ada pada gardu distribusi tersebut.

**TABEL 3.6 HASIL PERHITUNGAN KETIDAKSEIMBANGAN BEBAN ANTAR FASA**

Tanggal Pengukuran	LWBP			WBP			UnBalance Load (%)	
	Ir	Is	It	Ir	Is	It	LWBP	WBP
30 Maret 2023	0,92	0,88	1,20	1,04	0,94	1,02	13%	4%
31 Maret 2023	0,93	1,00	1,07	0,99	0,94	1,07	5%	5%
01 April 2023	1,04	0,96	1,00	1,04	0,97	0,99	3%	2%
02 April 2023	1,04	0,93	1,03	0,98	0,99	1,03	5%	2%

**3.3 Penentuan Kapasitas Transformator Distribusi**

Dalam menentukan kapasitas transformator distribusi harus diketahui dulu total daya pelanggan gardu distribusi C0058 yaitu sebesar 620.500 VA. Kemudian dihitung faktor kebutuhan dari pemakaian beban maksimum terhadap beban terpasang yaitu

sebagai berikut.

$$FK = \frac{\text{Kebutuhan Beban Maksimum}}{\text{Beban Terpasang}} = \frac{146,75 \text{ kVA}}{620,5 \text{ kVA}} = 0,23$$

Penentuan kapasitas transformator sesudah di *Uprating* disesuaikan dengan tabel IEC 60354, untuk transformator distribusi berjenis pendingin ONAN dengan suhu ambient temperature sebesar 40°C maka load factor yang digunakan adalah 0,81. Data ini digunakan untuk menghitung besarnya kapasitas daya transformator yang dibutuhkan untuk proses *uprating*, sebagai berikut.

$$\text{Daya Trafo} = \frac{100}{81} \times 146,75 \text{ kVA} = 181,18 \text{ kVA}$$

Dari perhitungan tersebut maka dapat ditentukan bahwa besarnya daya nominal transformator yang dibutuhkan yaitu sebesar 200 kVA.

### 3.4 Perhitungan Persentase Pembebanan Setelah *Uprating*

Hasil pengukuran arus dan tegangan setelah *uprating* dapat dilihat di Tabel 3.7. Nilai S dapat dihitung sebagai berikut.

$$\begin{aligned} S &= (IR \times VR - N) + (IS \times VS - N) + (IT \times VT - N) \\ &= (229 \times 201) + (229 \times 205) + (233 \times 229) = 146,3 \text{ kVA} \end{aligned}$$

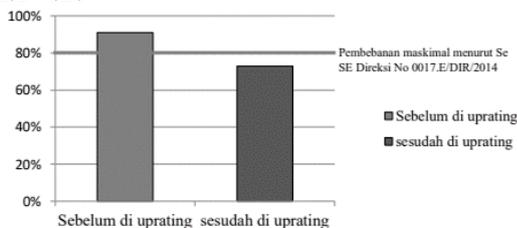
TABEL 3.7 DATA HASIL PENGUKURAN SESUDAH *UPRATING*

Kapastias Transformator (KVA)	Hasil Pengukuran					
	Tegangan Sekunder (V)			Arus Utama (A)		
	RN	SN	TN	R	S	T
200	229	229	233	201	205	229

Nilai persentase pembebanan transformator setelah *uprating* yaitu:

$$\% \text{beban} = \frac{\text{KVA (Beban)}}{\text{KVA (Transformator)}} \times \frac{146,3}{200} = 73\%$$

Gambar 3.2 menunjukkan perbandingan prosentase pembebanan sebelum dan sesudah *uprating*. Prosentase pembebanan pada gardu distribusi ini telah mengalami penurunan dari pembebanan yang semula sebesar 92,2% menjadi 73% dan di bawah pembebanan maksimal menurut SE Direksi No. 0017.E/DIR/2014.



GAMBAR 3.2 PEMBEBANAN SEBELUM DAN SESUDAH *UPRATING*

### 3.5 Analisis Peramalan Beban Dengan Metode *Least Square*

Tabel 3.8 menunjukkan tren kenaikan beban puncak gardu distribusi C0058 mulai tahun 2020-2022. Dari data pada

Tabel 3.8 digunakan untuk melakukan perhitungan peramalan beban dengan menentukan besar parameter Y dan X. Parameter Y menunjukkan besar nilai beban puncak pada setiap tahunnya sedangkan parameter X menunjukkan nilai periode X (Koefisien) yang digunakan pada tahun pertama hingga tahun terakhir yang ditunjukkan di Tabel 3.9.

TABEL 3.8 PENGUKURAN BEBAN GARDU DISTRIBUSI C0058 TAHUN 2020 - 2022

Tahun	2020	2021	2022
Beban Puncak (kVA)	140,59	144,86	146,75

TABEL 3.9 PARAMETER METODE *LEAST SQUARE*

No	Tahun	Beban Puncak (kVA)	X	XY	X <sup>2</sup>
1	2020	140,59	-1	-140,59	1
2	2021	144,86	0	0	0
3	2022	146,75	1	146,75	1
Σ	N=3	432,21	0	6,15	2

- a. Mencari nilai koefisien a untuk menentukan koefisien penggunaan beban listrik pada tahun peramalan pertama (2023).

$$a = \frac{\sum Y}{n} = \frac{432,21}{3} = 144,07 \text{ kVA}$$

- b. Menghitung nilai b untuk menentukan nilai rata rata laju pertumbuhan beban pada setiap tahunnya.

$$b = \frac{\sum XY}{\sum X^2} = \frac{6,15}{2} = 3,08 \text{ Kva}$$

- c. Membuat Persamaan *Least Square*

$$Y_n = a + bx$$

Sehingga dapat diramalkan sebagai berikut.

$$\begin{aligned} Y_{(2023)} &= 144,07 + (3,08 \times 1) \\ &= 147,15 \text{ kVA} \end{aligned}$$

Dengan cara yang sama, didapatkan nilai pembebanan selama beberapa tahun kedepan pada Gardu Distribusi C0058 seperti yang tertera pada Tabel 3.10.

TABEL 3.10 HASIL PERHITUNGAN LAJU PERTUMBUHAN BEBAN PADA GARDU DISTRIBUSI C0058

Tahun x	Perkiraan Beban (kVA)	% Pembebanan Sebelum <i>Uprating</i> (160 kVA)	% Pembebanan Sesudah <i>Uprating</i> (200 kVA)
2023 1	147,15	91,97%	73,57%
2024 2	150,22	93,89%	75,11%
2025 3	153,30	95,81%	76,65%
2026 4	156,38	97,73%	78,19%
2027 5	159,45	99,66%	79,73%
2028 6	162,53	101,58%	81,26%
2029 7	165,60	103,50%	82,80%
2030 8	168,68	105,42%	84,34%
2031 9	171,76	107,35%	85,88%

Berdasarkan Tabel 3.10 dapat dilihat bahwa setelah melaksanakan *uprating* pada Gardu Distribusi C0058, dapat mengatasi permasalahan beban lebih selama 5 tahun kedepan dengan persentase pembebanan pada tahun 2027 sebesar 79,73%. Nilai prosentase pembebanan tersebut masih sesuai dengan standart yang disebutkan dalam Surat Edaran Direksi No 58 0017.E/DIR/2014, pembebanan yang diizinkan pada transformator distribusi sebesar 80%.

## 4. Kesimpulan

Penelitian ini berfokus pada penerapan metode *uprating* sebagai solusi untuk mengatasi permasalahan beban lebih pada transformator distribusi di Gardu C0058 PT PLN (Persero) ULP Bululawang. Berdasarkan hasil pengukuran, transformator pada Gardu Distribusi C0058 mengalami pembebanan tertinggi sebesar 147,55 kVA atau 92,2% dari kapasitas nominal 160 kVA. Kondisi ini melebihi batas pembebanan aman 80%, sebagaimana ditetapkan dalam Surat Edaran Direksi No. 0017.E/DIR/2014, sehingga diperlukan intervensi untuk memastikan transformator tetap beroperasi dalam batas yang diizinkan. Solusi yang diterapkan dalam penelitian ini adalah *uprating* transformator dari 160 kVA

menjadi 200 kVA, yang berhasil menurunkan persentase pembebanan menjadi 73,57%. Dengan demikian, transformator yang telah di-*uprate* telah kembali beroperasi dalam kondisi normal dan sesuai dengan standar yang berlaku. Penelitian ini juga melakukan analisis proyeksi pembebanan dalam lima tahun ke depan menggunakan metode *Least Square*. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa pada tahun 2027, pembebanan diperkirakan mencapai 159,45 kVA atau 79,53% dari kapasitas transformator, yang masih berada dalam batas aman di bawah 80%. Hal ini menunjukkan bahwa metode *uprating* tidak hanya efektif dalam jangka pendek, tetapi juga dapat memastikan keandalan transformator dalam menghadapi pertumbuhan beban di masa depan. Hasil penelitian ini sejalan dengan penelitian sebelumnya yang menyatakan bahwa *uprating* transformator merupakan alternatif yang lebih efisien dibandingkan dengan relokasi atau pemasangan transformator tambahan dalam kondisi sistem distribusi yang tidak mengalami permasalahan tegangan [16], [17]. Penelitian ini memberikan kontribusi baru dengan mengintegrasikan metode *Least Square* dalam prediksi beban, yang memberikan gambaran lebih akurat mengenai keberlanjutan performa transformator setelah dilakukan *uprating*. Meski demikian, terdapat beberapa aspek yang dapat dikembangkan lebih lanjut dalam penelitian selanjutnya. Salah satunya adalah analisis dampak *uprating* terhadap keandalan komponen sistem distribusi lainnya, seperti pengaman, penghantar, serta sistem proteksi transformator. Studi lanjutan juga dapat mencakup analisis faktor daya dan harmonisa, yang juga berpengaruh terhadap performa transformator dalam jangka panjang.

#### Referensi

- [1] M. F. Hakim, R. A. Prasajo, R. Duanaputri, B. H. Wijaya, H. D. Fidy Amaral, and Z. F. Emzain, "Transformer oil degradation detection system based on color scale analysis," *Indones. J. Electr. Eng. Comput. Sci.*, vol. 37, no. 1, pp. 15–25, Jan. 2025, doi: 10.11591/ijeecs.v37.i1.pp15-25.
- [2] S. Syukri, T. M. Asyadi, M. Muliadi, and F. Moesnadi, "Analisa Pembebanan Transformator Distribusi 20 kV Pada Penyulang LS5 Gardu LSA 249," *Jambura J. Electr. Electron. Eng.*, vol. 4, no. 2, pp. 202–206, Jul. 2022, doi: 10.37905/JJEEE.V4I2.14500.
- [3] I. M. Sajayasa, I. N. Sunaya, I. N. G. Sangka, and I. G. S. Widharma, "ANALISA PENGARUH ROBEK DECK SEAL PADA TRANSFORMATOR DISTRIBUSI DENGAN MANAJEMEN TRAFU DI PT. PLN (PERSERO) ULP KUTA," *J. Ilm. Vastuwidya*, vol. 7, no. 1, pp. 27–33, Feb. 2024, doi: 10.47532/JIV.V7I1.1013.
- [4] D. P. Dini, "Gangguan Transformator Berbasis Manajemen Transformator Untuk Meningkatkan Kinerja Operasi dan Finansial Di PLN ULP Singaraja I Wayan Sukadana, K. Dody Darmawan, and I. Wayan Utama, "Deteksi Dini Gangguan Transformator Berbasis Manajemen Transformator Untuk Meningkatkan Kinerja Operasi dan Finansial Di PT. PLN ULP Singaraja," *J. Tek. Elektro*, vol. 10, no. 2, pp. 77–85, Jul. 2021, doi: 10.21063/JTE.2021.31331012.
- [5] R. Sutjipto, H. Sungkowo, Epiwardi, and D. D. Kharisma, "Analisis Penggunaan Transformator Sisipan Untuk Mengatasi Rugi Tegangan dan Pembebanan Lebih," *Elposys J. Sist. Kelistrikan*, vol. 10, no. 3, pp. 172–177, Oct. 2023, doi: 10.33795/ELPOSYS.V10I3.4223.
- [6] Nugraha, M. Trian, and D. Fauziah, "Penanggulangan Overload Transformator Distribusi dengan Metode Uprating di Gardu PNBS 20 KV ULP Pangandaran," *Pros. Semin. Nas. Energi*, pp. 293–304, 2021.
- [7] I. W. S. Yasa, "MENGATASI TRANSFORMATOR OVERLOAD DENGAN METODE UPRATING TRANSFORMATOR PADA GARDU DISTRIBUSI," *J. Kaji. Tek. Elektro*, vol. 8, no. 2, pp. 82–91, Aug. 2023, doi: 10.52447/JKTE.V8I2.6745.
- [8] I. M. Parsa and A. C. Abel, "Analisis Metode Uprating Transformator Pada Gardu Distribusi Terhadap Overload Di PT.PLN Ulp Kupang".
- [9] M. T. NUGRAHA and D. FAUZIAH, "Penanggulangan Overload Transformator Distribusi dengan Metode Uprating di Gardu PNBS 20 KV ULP Pangandaran," *Pros. Semin. Nas. Energi, Telekomun. dan Otomasi*, pp. 293–304, 2021, Accessed: Feb. 20, 2025. [Online]. Available: <https://eproceeding.itenas.ac.id/index.php/sneto/article/view/744>
- [10] D. Kassa, M. Tuegeh, and M. Pakiding, "Ketersediaan Energi Listrik Sulawesi Utara Sampai Tahun 2020," *J. Tek. Elektro dan Komput.*, vol. 4, no. 1, pp. 44–54, 2015, doi: 10.35793/JTEK.V4I1.6730.
- [11] M. Sadli and S. Safwandi, "IMPLEMENTASI SISTEM CERDAS LEAST SQUARE DALAM MERAMALKAN PEMENUHAN KEBUTUHAN STOK LISTRIK DI KOTA LHOKSEUMAWE," *J. Ecotipe (Electronic, Control. Telecommun. Information, Power Eng.*, vol. 4, no. 2, pp. 21–29, Oct. 2017, doi: 10.33019/ECOTIPE.V4I2.8.
- [12] C. A. Lestari, Z. Zulfahri, and U. Situmeang, "Analisis Keandalan Sistem Distribusi 20 kV dengan Metode FMEA pada Penyulang Akasia dan Lele PT PLN (Persero) ULP Kota Barat," *SainETIn J. Sains, Energi, Teknol. dan Ind.*, vol. 6, no. 1, pp. 1–7, Dec. 2021, doi: 10.31849/SAINETIN.V6I1.7408.
- [13] R. Sutjipto, A. D. Novfowan, and R. Duanaputri, "Studi Perencanaan Peningkatan Kinerja Trafo Distribusi Dengan Relokasi Antara 2 Buah Trafo," *J. Eltek*, vol. 17, no. 2, p. 69, 2019, doi: 10.33795/eltek.v17i2.161.
- [14] Y. Ambabunga, L. D. Rumpa, and D. Patiung, "ANALISIS JATUH TEGANGAN DAN RUGI DAYA PADA FEEDER (T2) PT PLN (PERSERO) ULP RANTEPAO MENGGUNAKAN ETAP 19.0.1," *J. Dyn. Saint*, vol. 8, no. 1, pp. 100–104, Sep. 2023, doi: 10.47178/DYNAMICS SAINT.V8I1.2161.
- [15] P. Julián *et al.*, "Low Voltage Daily Energy Demand Temperature Dependent Representation by Using Circular Statistics," *Appl. Math.*, vol. 10, no. 3, pp. 61–74, Mar. 2019, doi: 10.4236/AM.2019.103006.
- [16] N. R. D. K. Ningrum, N. L. B. Ginting, H. N. Muflih, M. D. C. Ramadhan, and C. F. Nugraha, "Analisis Perbandingan Uprating dan Sisip Transformator Tiga Fase untuk Mengantisipasi Terjadinya Overload pada Transformator Distribusi Penyulang GJN-12 Nomor Tiang U3-89/1 PT PLN (Persero) ULP Yogyakarta Kota," *J. List. Instrumentasi, dan Elektron. Terap.*, vol. 4, no. 2, Oct. 2023, doi: 10.22146/JULIET.V4I2.87124.
- [17] A. Ar, M. Thahir, and ) Musfira Tahir, "Studi Manajemen Trafo PT PLN (Persero) Unit Layanan Pelanggan Sungguminasa," *Semin. Nas. Tek. Elektro dan Inform.*, vol. 8, no. 1, pp. 344–350, 2022, Accessed: Feb. 20, 2025. [Online]. Available: <https://jurnal.poliupg.ac.id/index.php/sntei/article/view/3546>