

ANALISIS KETIDAK SEIMBANGAN BEBAN PADA TRANSFORMATOR DISTRIBUSI Di PT. PLN (Persero) RAYON CEPU

Ahmad Saiful Aprilian Ektianto^a, Ir. Agus Darwanto M.T.^a

^a Sekolah Tinggi Teknologi Ronggolawe Cepu

*Penulis Korespondensi, saifulahmad774@gmail.com

Diterima : 30 Maret 2021 - Direview : 30 Juni 2021 - Diterbitkan : 12 Juli 2021

ABSTRAK

Tenaga listrik merupakan sumber energi yang sangat penting bagi kehidupan. Salah satu komponen kelistrikan tersebut adalah trafo distribusi yang digunakan untuk menyalurkan tenaga listrik dari gardu induk ke pusat beban. Pada trafo distribusi sering terjadi ketidakseimbangan beban akibat perbedaan beban pada setiap fasa sisi sekunder trafo. Hal ini menyebabkan arus netral mengalir pada transformator dan dapat mengakibatkan rugi daya. Di PT. PLN (Persero) Rayon Cepu memiliki dua trafo distribusi dengan kapasitas yang sama yaitu 50 kVA tetapi pembebanannya berbeda, trafo CU1-391 / 9 memiliki beban rata-rata 80% sedangkan trafo CU1-400 memiliki pembebanan rata-rata 35 %.

Berdasarkan perhitungan yang telah dilakukan, rata-rata ketidakseimbangan beban pada trafo CU1-391 / 9 selama satu bulan adalah 24,60% pada pukul 11.00-16.00 WIB dan ketidakseimbangan 11,39% pada pukul 17.00-22.00 WIB. Terjadi pula pemutusan aliran listrik akibat arus netral selama satu bulan sebesar 9.03181842 kWh pukul 11.00-16.00 WIB dan listrik mati pukul 14.16844809 kWh pukul 17.00-22.00 WIB serta kerugian yang dialami PLN pada pukul 11.00-16.00 WIB sebesar Rp159.026,47 dan Rp. 249.468,96. pukul 17.00-22.00 WIB. Untuk trafo CU1-400, ketidakseimbangan beban selama satu bulan adalah 68,20% pada pukul 11.00-16.00 WIB dan 64,46% untuk ketidakseimbangan beban pada pukul 17.00-22.00 WIB. Kehilangan daya akibat arus netral sebesar 46.18865203 kWh pukul 11.00-16.00 WIB dan 54.81367038 kWh pukul 17.00-22.00 WIB. Kerugian yang diderita PLN sebesar Rp813.260,22 pada pukul 11.00-16.00 WIB dan kerugian akibat pemborosan energi yang dialami PLN pada pukul 17.00-22.00 WIB sebesar Rp 965.124,03.

Kata kunci: trafo, ketidakseimbangan beban, arus netral, rugi daya.

ABSTRACT

Electric power is a very important source of energy for life. One of the electrical components is a distribution transformer which is used to distribute electric power from the substation to the load center. In distribution transformers, load imbalances often occur due to differences in the load on each phase of the secondary side of the transformer. This causes a neutral current to flow in the transformer and can result in power losses. At PT. PLN (Persero) Rayon Cepu has two distribution transformers with the same capacity, namely 50 kVA but the loading is different, the CU1-391 / 9 transformer has an average load of 80% while the CU1-400 transformer has an average loading of 35%.

Based on the calculations that have been made, the average load imbalance on the transformer CU1-391 / 9 for one month is 24.60% at 11.00-16.00 WIB and 11.39% imbalance at 17.00-22.00 WIB. There was also a power loss due to a neutral current for one month of 9.03181842 kWh at 11.00-16.00 WIB and 14.16844809 kWh for power loss at 17.00-22.00 WIB and losses suffered by PLN at 11.00-16.00 WIB amounting to IDR 159,026,47 and Rp. 249,468.96. at 17.00-22.00 WIB. For the CU1-400 transformer, the load imbalance for one month is 68.20% at 11.00-16.00 WIB and 64.46% for load imbalance at 17.00-22.00 WIB. Power loss due to neutral current is 46.18865203 kWh at 11.00-16.00 WIB and 54.81367038 kWh at 17.00-22.00 WIB. Losses suffered by PLN amounted to IDR 813,260.22 at 11.00-16.00 WIB and losses due to wasted energy experienced by PLN at 17.00-22.00 WIB amounted to IDR 965,124.03

Keywords: transformer, load imbalance, neutral current, power loss.

1. Pendahuluan

Tenaga listrik merupakan salah satu sumber tenaga yang sangat diperlukan bagi kehidupan manusia. Tenaga listrik sudah menjadi kebutuhan pokok manusia. Menurut Y. Simamora dan L. Tobing Seiring berkembangnya teknologi, tenaga listrik juga dimanfaatkan untuk mengoperasikan berbagai alat penunjang kehidupan manusia, baik untuk keperluan rumah tangga maupun industri[1].

Salah satu komponen tenaga listrik adalah transformator distribusi. Transformator distribusi adalah komponen yang digunakan untuk mendistribusikan tenaga listrik dari gardu

induk ke pusat beban atau konsumen[2]. Pada transformator distribusi tiga fasa empat kawat sering terjadi ketidakseimbangan beban. Ketidakseimbangan beban disebabkan oleh perbedaan beban pada tiap-tiap fasa sisi sekunder transformator, yaitu fasa R, fasa S, dan fasa T. Ketidakseimbangan beban antar fasa menyebabkan arus netral mengalir pada transformator. Arus netral yang mengalir dapat mengakibatkan rugi-rugi daya pada transformator[3].

Pada PT. PLN (Persero) Rayon Cepu terdapat dua transformator distribusi dengan kapasitas yang sama yaitu 50 kVA tetapi pembebanannya berbeda, pada transformator

CU1-391/9 memiliki pembebanan rata-rata 80% (tabel 4.1) sedangkan transformator CU1-400 memiliki pembebanan rata-rata sebesar 35% (tabel 4.3). Pada kedua transformator tersebut memiliki pembebanan pada masing-masing fasa. Pada setiap fasa, pembagian beban harus seimbang agar tidak menimbulkan arus netral dan mengakibatkan rugi-rugi daya. Transformator CU1-391/9 dan transformator CU1-400 mengalami pembagian beban yang tidak seimbang. Pada transformator CU1-391/9 memiliki rata-rata ketidakseimbangan beban sebesar 24% (tabel 3.3) dan transformator CU1-400 memiliki rata-rata ketidakseimbangan sebesar 64% (tabel 3.4).

Dengan melakukan perhitungan ketidakseimbangan beban pada transformator dapat digunakan untuk memberikan informasi kepada PLN bahwa ketidakseimbangan beban dapat mengakibatkan kerugian materiil. Sehingga dapat ditindak lanjut oleh PLN untuk mengatasi kerugian yang dialami akibat ketidakseimbangan beban pada transformator.

2. Kerangka Teori

2.1 Transformator

Transformator merupakan suatu komponen/alat yang terdiri dari dua atau lebih kumparan yang dihubungkan oleh medan magnetik bersama (*mutual magnetic field*). Bila satu di antara kumparan ini, yang primer dihubungkan dengan sumber tegangan bolak-balik, akan ditimbulkan fluks bolak-balik yang amplitudonya bergantung pada tegangan primer dan jumlah lilitannya. Fluks bersama akan akan menghubungkan kumparan yang lain, yang sekunder, dan akan menginduksikan tegangan didalamnya yang nilainya bergantung dengan jumlah lilitan sekunder^[6].

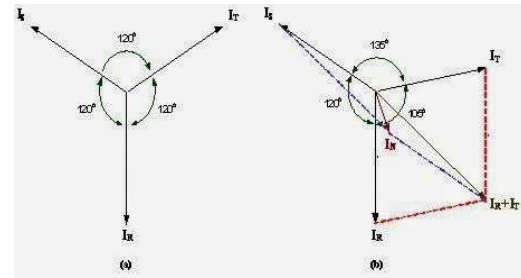
2.2 Ketidakseimbangan Beban

Masalah yang sering timbul pada sistem tiga fasa yaitu beban tidak seimbang, biasanya terjadi karena beban pada salah satu fasa lebih mendominasi dari ketiga fasa tersebut. Jika terjadi ketidakseimbangan beban pada tiga fasa, maka akan mengakibatkan mengalirnya arus pada kawat netral dan perbedaan sudut beban per fasa nya tidak sama dengan 120° ^[10]. Yang dimaksud dengan keadaan beban seimbang adalah suatu keadaan dimana :

- Ketiga vektor arus/tegangan sama besar.
- Ketiga vektor saling membentuk sudut 120° satu sama lain.

Sedangkan yang dimaksud dengan keadaan tidak seimbang adalah keadaan dimana salah satu atau kedua syarat keadaan seimbang tidak terpenuhi. Kemungkinan keadaan tidak seimbang ada tiga, yaitu :

- Ketiga vektor sama besar tetapi tidak membentuk sudut 120° satu sama lain.
- Ketiga vektor tidak sama besar tetapi membentuk sudut 120° satu sama lain.
- Ketiga vektor tidak sama besar dan tidak membentuk sudut 120° satu sama lain.



Gambar 2.1 Vektor Diagram Arus

Gambar (a) menunjukkan vektor diagram arus dalam keadaan seimbang. Terlihat bahwa penjumlahan ketiga vektor arusnya (I_R , I_S , I_T) adalah sama dengan nol sehingga tidak muncul arus netral (I_N). Sedangkan pada Gambar (b) menunjukkan vektor diagram arus yang tidak seimbang. Bahwa penjumlahan ketiga vektor arusnya (I_R , I_S , I_T) tidak sama dengan nol sehingga muncul sebuah besaran yaitu arus netral (I_N) yang besarnya bergantung dari seberapa besar faktor ketidakseimbangannya.

2.3 Perhitungan Arus Beban Pada Transformator

Daya kerja pada transformator menandakan kapasitas transformator tersebut. Karena sudah diketahui rating tegangan pada sisi primer dan sekunder, maka dapat dirumuskan sebagai berikut^[7] :

$$S = \sqrt{3} \times V \times I \dots\dots\dots (2.1)$$

Keterangan :

S = Daya pada transformator (kVA)

V = Tegangan pada transformator (V)

I = Arus jala-jala pada transformator (A)

Menghitung arus beban penuh (I_{fp}) dan arus rata-rata (I_{avr}) dapat menggunakan rumus sebagai berikut^[7]

$$I_{\text{beban penuh}} = \frac{S}{\sqrt{3} \times V} \dots\dots\dots (2.2)$$

$$I_{\text{rata-rata}} = \frac{I_S + I_R + I_T}{3} \dots\dots\dots (2.3)$$

Dengan keterangan :

$I_{\text{beban penuh}}$ = Arus beban penuh (A)

S = Daya transformator (kVA)

V = Tegangan sisi sekunder transformator (kV)

$I_{\text{rata-rata}}$ = Arus rata-rata (A)

I = Arus per fasa (A)

Sedangkan untuk mencari persentase pembebanan pada transformator distribusi dapat digunakan rumus sebagai berikut^[7] :

$$\% \text{ Pembebanan} = \frac{I_{\text{rata-rata}}}{I_{\text{beban penu}}} \times 100\% \dots\dots\dots (2.4)$$

Keterangan :

% pembebanan = persentase pembebanan transformator (%)

2.4 Arus Netral

Arus netral pada sistem distribusi merupakan arus yang mengalir pada penghantar netral pada sistem tiga fasa empat kawat. Munculnya arus netral dapat disebabkan karena ketidakseimbangan beban dan juga karena adanya arus harmonisa sebagai akibat banyaknya penggunaan beban nonlinier.

2.5 Penyaluran dan Susut Daya

Misalnya daya sebesar P disalurkan melalui suatu saluran dengan penghantar netral. Apabila pada penyaluran daya ini arus-arus fasa dalam keadaan seimbang, maka besarnya daya dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$P = 3 \times V \times I \times \cos \phi \quad (2.5)$$

Keterangan :

P = Daya

V = Tegangan

I = Arus

$\cos \phi$ = Faktor daya

Jika I adalah besaran arus fasa dalam penyaluran daya sebesar P pada keadaan seimbang, maka penyaluran daya yang sama tetapi dengan keadaan tak seimbang besarnya arus-arus fasa dapat dinyatakan dengan koefisien a, b, dan c sebagai berikut^[12] :

$$I_R = a \times [I] \text{ maka } a = \frac{I_R}{I} \quad (2.6)$$

$$I_S = b \times [I] \text{ maka } b = \frac{I_S}{I} \quad (2.7)$$

$$I_T = c \times [I] \text{ maka } c = \frac{I_T}{I} \quad (2.8)$$

Dengan I_R , I_S , dan I_T berturut-turut adalah arus fase R, S, dan T. Faktor daya ($\cos \phi$) ketiga fase dianggap sama walaupun besarnya arus berbeda, besarnya daya yang disalurkan dapat dinyatakan sebagai berikut :

$$P = (a + b + c) \times V \times I \times \cos \phi \quad (2.9)$$

Apabila persamaan (2.9) dan persamaan (2.5) menyatakan daya yang besarnya sama, maka dari kedua persamaan tersebut dapat diperoleh persyaratan untuk koefisien a, b, dan c yaitu

$$a + b + c = 3$$

Oleh karena itu dapat dicari juga persentase rata-rata ketidakseimbangan beban dengan memasukkan rumus sebagai berikut :

$$\% \text{ Ketidakseimbangan beban} = \frac{\{|a-1|+|b-1|+|c-1|\}}{3} \times 100\% \quad (2.10)$$

2.6 Rugi-Rugi pada Sistem Distribusi

Rugi-rugi pada saluran distribusi merupakan kerugian yang diakibatkan oleh perbedaan antara energi listrik yang digunakan dengan energi listrik yang tersalurkan. Rugi-rugi dibedakan menjadi dua yaitu :

- 1) Rugi-rugi pada saluran penghantar fase.
- 2) Rugi-rugi akibat adanya arus netral pada penghantar netral.

2.6.1 Rugi-rugi pada saluran penghantar fase

Apabila arus mengalir menuju penghantar fase maka penghantar akan panas dan menyebabkan rugi-rugi energi karena pada penghantar terdapat resistansi. Rugi-rugi dengan beban terpusat di ujung dirumuskan sebagai berikut :

$$P_p = 3 \times I^2 \times R_p \quad (2.11)$$

Keterangan :

P_p = Rugi daya pada saluran fase (kW)

I = Arus per fase (A)

R_p = Resistansi (Ω)

2.6.2 Rugi-Rugi Akibat Arus Netral Pada Penghantar Netral

Akibat dari pembebanan yang tidak seimbang antar fasanya, maka akan ada arus yang mengalir pada penghantar netral. Arus tersebut akan menyebabkan rugi daya di sepanjang kawat netral^[8]. Maka dirumuskan sebagai berikut :

$$P_N = I_N^2 \times R_N \quad (2.12)$$

Keterangan :

P_N = Rugi-rugi daya akibat arus mengalir di netral (kW)

I_N = Arus pada netral transformator (A)

R_N = Resistansi pada penghantar netral (Ω)

2.7 Perhitungan Kerugian Energi yang Terbuang

Kerugian yang dimaksud adalah kerugian materiil yang disebabkan rugi-rugi daya pada transformator. Metode menghitung kerugian PLN adalah sebagai berikut :

Untuk mengetahui berapa besar energi yang terbuang akibat adanya arus netral, maka dilakukan perhitungan rugi daya akibat arus netral dikalikan dengan jumlah waktu (jam) operasional. Setelah diketahui berapa besar energi yang terbuang akibat arus netral maka energi yang terbuang dikalikan dengan jumlah rupiah per kWh maka diketahui besar kerugian materiil PLN akibat adanya arus netral.

3. Metodologi

Pada tahap metodologi dilakukan proses studi literatur terlebih dahulu dan pengambilan data, setelah itu dilakukan pengolahan data (perhitungan data) dan analisis dari hasil perhitungan tersebut.

3.1 Bahan

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini meliputi:

1. Data transformator distribusi CU1-391/9 dan CU1-400
2. Data pembebanan transformator

3.2 Data Pengukuran Transformator CU1-391/9

Tabel 3.1 Data Pengukuran Transformator CU1-391/9

September 2020	Siang (11.00-16.00 WIB)				Malam (17.00-22.00 WIB)			
	R (A)	S (A)	T (A)	N (A)	R (A)	S (A)	T (A)	N (A)
1	54,3	47,6	60,9	21,6	61,3	52,6	71,4	31,5
2	62,6	45,3	52,8	20,9	66,9	55,4	77,6	28,3
3	60,2	48,1	56,5	18,8	65,6	46,8	70,4	20,7
4	58,4	49,2	55,3	20,1	70,5	48,7	68,4	24,2
5	55,1	46,8	58,2	19,6	60,2	47,1	73,8	22,8
6	53,8	45,4	50,5	22,1	62,8	50,3	69,5	30,1
7	57,4	43,2	58,1	20,1	56,1	47,7	72,1	27,4
8	59,2	50,5	54,4	23,7	58,4	51,2	67,2	29,3
9	61,3	44,9	55,7	20,5	63,2	54,9	75,3	27,2
10	57,2	51,7	57,1	18,8	72,4	49,2	80,2	21,1
11	58,1	40,3	59,4	21,3	70,9	54,6	78,7	28,1
12	55,9	44,6	60,1	20,4	68,1	50	70,1	24,9
13	58,3	45,3	59,7	22,3	68,1	54,7	76,3	22,5
14	59,8	47,4	57,8	19,7	65	50,2	75,2	24
15	55,2	49,5	60,5	20,5	77,6	54,6	70,4	26,3
16	60,3	52,8	58,9	23,1	64,9	51,9	72,1	25,1
17	56,8	45,2	60,3	21,8	62,8	53,2	69,3	30,6
18	54,7	48,3	62,4	20,6	60,9	50,4	74,9	27,6
19	57,6	47,4	60,3	22,4	65,6	50,8	74,7	28,4
20	61,9	48,3	55,6	20,9	63,5	52,1	79,2	27,7
21	58,4	50,8	58,8	23,1	68,4	51,7	78,3	26,3
22	55,8	46,6	62,7	24,2	67,7	54,3	74,9	29,8
23	59,3	45,9	59,5	21,7	69,5	54,7	76,4	26,9
24	61,8	43,7	59,6	23,5	70,2	50,3	74,7	27,8
25	60,6	44,3	57,3	20,8	69,7	53,5	73,4	28,4
26	57,7	47,2	59,4	21,6	68,4	52,8	75,2	28,5
27	59,5	45,6	60,5	23,1	72,1	50,7	78,8	29
28	56,2	46,9	59,7	20,7	63,9	52,6	73,2	29,5
29	58,3	45,3	59,7	22,3	68,1	54,7	76,3	22,5
30	59,8	47,4	57,8	19,7	65	50,2	75,2	24

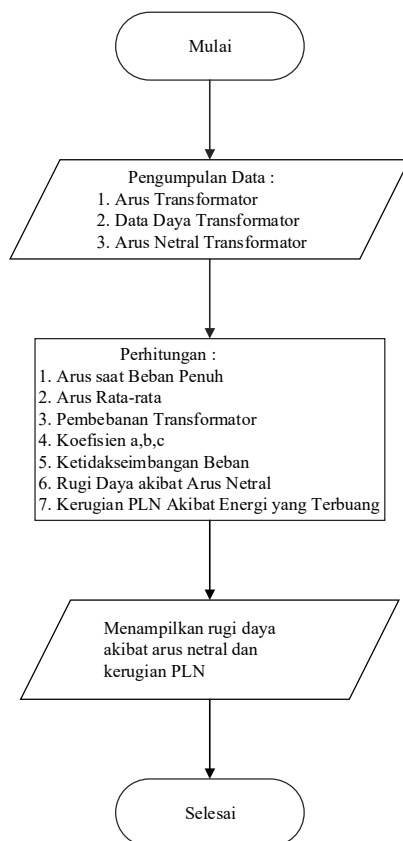
3.2 Data Pengukuran Transformator CU1-400

Tabel 3.2 Pengukuran Transformator CU1-400

September 2020	Siang (11.00-16.00 WIB)				Malam (17.00-22.00 WIB)			
	R (A)	S (A)	T (A)	N (A)	R (A)	S (A)	T (A)	N (A)
1	10,5	6,1	52,1	47	10,8	12,1	53,2	53,4
2	10,7	9,6	52,2	46,1	12,8	12,2	54,8	51,4
3	9,8	8,1	50,8	48,2	11,5	11,7	52,9	50,3
4	10,9	7,3	51,3	47,1	12,1	10,9	53,7	52,8
5	8,2	6,8	50,7	47,8	10,9	11,1	52,2	53,2
6	9,8	7,2	52,8	47,2	10,7	12,8	53,3	53,9
7	10,8	6,9	52,9	48,5	12,1	11,4	53,9	50,4
8	10,1	6,3	51,2	46,9	12,5	11,8	52,4	50,9
9	9,4	6,5	52,7	48,1	11,2	10,3	54,7	52,7
10	11,2	7,9	50,8	48,4	12,9	11,3	52,4	53,1
11	9,3	6,2	51,2	46,9	11,3	12,2	53,8	51,1
12	10,5	9,3	50,3	46,5	12,3	13,8	52,8	51,8
13	8,9	6,5	52,1	47,5	10,4	12,9	53	52,2
14	10,3	7,5	51,9	48,1	12,6	11,4	52,5	52,6
15	9,5	6,4	51,8	47,7	11,1	12,2	52,9	51,2
16	10,2	8,4	50,2	46,6	11,8	12,5	53,2	50,1
17	11,1	6,7	52	46,8	12,7	12,8	52,8	51,3
18	10,2	7,6	51,9	47,4	12,2	13,1	53	52,3
19	8,8	6,1	52,8	48,2	10,6	11,3	52,7	51,2
20	9,2	6,8	50,4	47,2	11,9	12,8	53,1	51
21	8,7	6,2	50,9	47,5	10,3	12,1	52,6	51,1
22	9,1	7,9	52,3	46,3	11,7	12,7	51,5	50,8
23	10,3	8,5	51,8	46,7	12	12,9	52,1	50,6
24	11,3	8,6	52,4	46,9	12,7	12,9	51,6	51,7
25	11,3	9,4	50,7	47,2	12,9	13,4	52,3	52,1
26	10,7	7,4	51,1	46,9	11,8	13,8	53,1	52,3
27	9,4	7,8	52,7	47,2	12,4	13,6	52,1	51,7
28	8,8	6,4	50,8	49,5	10,5	12,7	52,6	51,9
29	9,3	6,9	52,2	47,2	11,5	12,5	52,9	50,7
30	8,9	6,5	51,2	49,3	11,8	12,9	52,4	50,2

3.1 Diagram Alir Perhitungan

Setelah data terkumpul proses selanjutnya ialah perhitungan untuk mempermudah proses analisis. Berikut adalah alur perhitungan yang dijelaskan pada gambar:



Gambar 3.1 Diagram Alir Perhitungan

3.5 Metode Penelitian

Penelitian dimulai dengan pengumpulan data pembebanan secara langsung pada transformator distribusi (CU1-391/9) dan (CU1-400) PT. PLN (Persero) Rayon Cepu. Setelah data yang dibutuhkan terkumpul kemudian dilanjutkan menggunakan bantuan software Ms. Excel untuk melakukan

perhitungan untuk mengetahui seberapa besar ketidakseimbangan beban, besar rugi-rugi daya, dan juga kerugian PLN pada transformator distribusi dengan cara memasukkan semua parameter yang dibutuhkan ke dalam software dengan menggunakan metode komponen-komponen simetris.

4. Hasil dan Pembahasan

4.1 Hasil Penelitian

Berdasarkan cara perhitungan yang telah dibahas di Bab II dengan menggunakan data pembebanan transformator pada tabel 3.3 dan tabel 3.4, diketahui daya dan tegangan sekunder kedua transformator distribusi sebesar 50 kVA dan 400 V.

4.1.1 Perhitungan Arus Beban Penuh ($I_{\text{beban penuh}}$)

1. Transformator CU1-391/9

$$I_{\text{beban penuh}} = \frac{S}{\sqrt{3} \times V}$$

$$I_{\text{beban penuh}} = \frac{50000}{\sqrt{3} \times 400}$$

$$I_{\text{beban penuh}} = \frac{50000}{692,820324} = 72,16878 \text{ Ampere}$$

2. Transformator CU1-400

$$I_{\text{beban penuh}} = \frac{S}{\sqrt{3} \times V}$$

$$I_{\text{beban penuh}} = \frac{50000}{\sqrt{3} \times 400}$$

$$I_{\text{beban penuh}} = \frac{50000}{692,820324} = 72,16878 \text{ Ampere}$$

4.1.2 Perhitungan arus rata-rata ($I_{\text{rata-rata}}$)

Untuk menentukan besarnya arus rata-rata pada transformator dapat menggunakan rumus persamaan 2.3. Pada setiap transformator dapat dihitung arus rata-rata pada jam 11.00-16.00 WIB dan pada saat beban puncak atau pada jam 17.00-22.00 WIB. Dalam hal ini data yang digunakan untuk perhitungan menggunakan data pada tanggal 1 September 2020.

1. Transformator CU1-391/9

Arus rata-rata pada saat pembebanan jam 11.00-16.00 WIB.

$$I_{\text{rata-rata}} = \frac{I_S + I_R + I_T}{3}$$

$$I_{\text{rata-rata}} = \frac{54,3 + 47,6 + 60,9}{3} = 54,2667 \text{ Ampere}$$

Arus rata-rata pada saat pembebanan jam 17.00-22.00 WIB.

$$I_{\text{rata-rata}} = \frac{61,3 + 52,6 + 71,4}{3}$$

$$I_{\text{rata-rata}} = \frac{185,3}{3} = 61,7667 \text{ Ampere}$$

2. Transformator CU1-400

Arus rata-rata pada saat pembebanan jam 11.00-16.00 WIB.

$$I_{\text{rata-rata}} = \frac{I_S + I_R + I_T}{3}$$

$$I_{\text{rata-rata}} = \frac{10,5 + 6,1 + 52,1}{3}$$

$$I_{\text{rata-rata}} = \frac{76,1}{3}$$

$$I_{\text{rata-rata}} = 22,9 \text{ Ampere}$$

Arus rata-rata pada saat pembebanan jam 17.00-22.00 WIB.

$$I_{\text{rata-rata}} = \frac{I_S + I_R + I_T}{3}$$

$$I_{\text{rata-rata}} = \frac{10,8 + 12,1 + 53,2}{3}$$

$$I_{\text{rata-rata}} = \frac{76,1}{3} = 25,3667 \text{ Ampere}$$

4.1.3 Perhitungan Persentase Pembebanan Transformator

Untuk mengetahui berapa besar persentase pembebanan pada kedua transformator dapat menggunakan rumus persamaan 2.4. Maka perhitungannya sebagai berikut :

1. Transformator CU1-391/9

Persentase pembebanan pada jam 11.00-16.00 WIB.

$$\% \text{Pembelangan} = \frac{I_{rata-rata}}{I_{beban penuh}} \times 100\%$$

$$\% \text{Pembelangan} = \frac{54,2667}{72,16878} \times 100\%$$

$$\% \text{Pembelangan} = 75,194\%$$

Persentase pembebanan pada jam 17.00-22.00 WIB.

$$\% \text{Pembelangan} = \frac{I_{rata-rata}}{I_{beban penuh}} \times 100\%$$

$$\% \text{Pembelangan} = \frac{61,7667}{72,16878} \times 100\%$$

$$\% \text{Pembelangan} = 85,586\%$$

2. Transformator CU1-400

Persentase pembebanan pada jam 11.00-16.00 WIB.

$$\% \text{Pembelangan} = \frac{I_{rata-rata}}{I_{beban penuh}} \times 100\%$$

$$\% \text{Pembelangan} = \frac{22,9}{72,16878} \times 100\%$$

$$\% \text{Pembelangan} = 31,731\%$$

Persentase pembebanan pada jam 17.00-22.00 WIB.

$$\% \text{Pembelangan} = \frac{I_{rata-rata}}{I_{beban penuh}} \times 100\%$$

$$\% \text{Pembelangan} = \frac{25,3667}{72,16878} \times 100\%$$

$$\% \text{Pembelangan} = 35,149\%$$

4.1.4 Perhitungan Koefisien a,b, dan c

Untuk menghitung besarnya koefisien a,b, dan c dapat digunakan persamaan (2.6) sampai (2.7).

1. Transformator CU1-391/9

Besarnya koefisien a,b, dan c pada jam 11.00-16.00 WIB.

$$\begin{aligned} I_R &= a \times [I] \text{ maka } a = \frac{I_R}{I} \\ &= \frac{54,3}{72,16878} \\ &= 0,75 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} I_S &= b \times [I] \text{ maka } b = \frac{I_S}{I} \\ &= \frac{47,6}{72,16878} \\ &= 0,66 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} I_T &= c \times [I] \text{ maka } c = \frac{I_T}{I} \\ &= \frac{60,9}{72,16878} \\ &= 0,84 \end{aligned}$$

Besarnya koefisien a,b, dan c pada jam 17.00-22.00 WIB.

$$\begin{aligned} I_R &= a \times [I] \text{ maka } a = \frac{I_R}{I} \\ &= \frac{61,3}{72,16878} = 0,85 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} I_S &= b \times [I] \text{ maka } b = \frac{I_S}{I} \\ &= \frac{52,6}{72,16878} \\ &= 0,73 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} I_T &= c \times [I] \text{ maka } c = \frac{I_T}{I} \\ &= \frac{71,4}{72,16878} \\ &= 0,99 \end{aligned}$$

2. Transformator CU1-400

Besarnya koefisien a,b, dan c pada jam 11.00-16.00 WIB.

$$\begin{aligned} I_R &= a \times [I] \text{ maka } a = \frac{I_R}{I} \\ &= \frac{10,5}{72,16878} \\ &= 0,15 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} I_S &= b \times [I] \text{ maka } b = \frac{I_S}{I} \\ &= \frac{6,1}{72,16878} = 0,08 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} I_T &= c \times [I] \text{ maka } c = \frac{I_T}{I} \\ &= \frac{52,1}{72,16878} \\ &= 0,72 \end{aligned}$$

Besarnya koefisien a,b, dan c pada jam 17.00-22.00 WIB.

$$\begin{aligned} I_R &= a \times [I] \text{ maka } a = \frac{I_R}{I} \\ &= \frac{10,8}{72,16878} \\ &= 0,15 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} I_S &= b \times [I] \text{ maka } b = \frac{I_S}{I} \\ &= \frac{12,1}{72,16878} \\ &= 0,17 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} I_T &= c \times [I] \text{ maka } c = \frac{I_T}{I} \\ &= \frac{53,2}{72,16878} \\ &= 0,74 \end{aligned}$$

Transformator distribusi dalam keadaan seimbang koefisien a, b, dan c sama dengan 1, tetapi dalam keadaan tidak seimbang nilai koefisien a, b, dan c tidak sama dengan 1 atau arus fase tidak sama dengan arus rata-rata.

4.1.5 Perhitungan Ketidakseimbangan Beban

Besarnya ketidakseimbangan beban pada transformator dapat digunakan rumus persamaan (2.10).

1. Transformator CU1-391/9

Ketidakseimbangan beban pada jam 11.00-16.00 WIB.

$$\begin{aligned} \% \text{Ketidakseimbangan beban} &= \frac{\{0,75-1\} + \{0,66-1\} + \{0,84-1\}}{3} \times 100\% \\ &= \frac{\{-0,25\} + \{-0,34\} + \{-0,16\}}{3} \times 100\% \\ &= 0,25 \times 100\% \\ &= 25\% \end{aligned}$$

Ketidakseimbangan beban pada jam 17.00-22.00 WIB.

$$\begin{aligned} \% \text{Ketidakseimbangan beban} &= \frac{\{0,85-1\} + \{0,73-1\} + \{0,99-1\}}{3} \times 100\% \\ &= \frac{\{-0,15\} + \{-0,17\} + \{-0,01\}}{3} \times 100\% \\ &= 0,11 \times 100\% \\ &= 11\% \end{aligned}$$

2. Transformator CU1-400

Persentase ketidakseimbangan beban pada jam 11.00-16.00 WIB.

$$\begin{aligned} \% \text{Ketidakseimbangan beban} &= \frac{\{0,15-1\} + \{0,08-1\} + \{0,72-1\}}{3} \times 100\% \\ &= \frac{\{-0,85\} + \{-0,92\} + \{-0,28\}}{3} \times 100\% \\ &= 0,6834 \times 100\% \\ &= 68,34\% \end{aligned}$$

Persentase ketidakseimbangan beban pada jam 17.00-22.00 WIB.

$$\begin{aligned} \% \text{Ketidakseimbangan beban} &= \frac{\{0,15-1\} + \{0,17-1\} + \{0,74-1\}}{3} \times 100\% \end{aligned}$$

$$= \frac{\{|-0,85|+|-0,83|+|-0,26|\}}{3} \times 100\%$$

$$= 0,6467 \times 100\%$$

$$= 64,67\%$$

4.1.6 Perhitungan Rugi Daya Akibat Arus Netral

Perhitungan rugi daya dengan menggunakan data pengukuran pada saat malam hari atau pada saat waktu beban puncak. Kawat yang digunakan pada penghantar netral transformator CU1-391/9 berukuran 50 mm² dengan $R = 0,675 \Omega/\text{km}$ dan kawat penghantar netral transformator CU1-400 berukuran 50 mm² dengan $R = 0,6842 \Omega/\text{km}$ (lampiran 3). Maka dapat dihitung besar rugi daya akibat arus netral sebagai berikut :

1. Untuk Transformator CU1-391/9

Untuk perhitungan pada jam 11.00-16.00 WIB.

$$P_N = I_N^2 \times R_N$$

$$= 21,6^2 \times 0,657$$

$$= 306,52992 \text{ watt}$$

$$= 0,30652992 \text{ kWh}$$

Untuk perhitungan pada jam 17.00-22.00 WIB

$$P_N = I_N^2 \times R_N$$

$$= 31,5^2 \times 0,657$$

$$= 651,90825 \text{ watt}$$

$$= 0,65190825 \text{ kWh}$$

2. Untuk Transformator CU1-400

Untuk perhitungan pada jam 11.00-16.00 WIB.

$$P_N = I_N^2 \times R_N$$

$$= 47^2 \times 0,6842$$

$$= 1511,3978 \text{ watt}$$

$$= 1,5113978 \text{ kWh}$$

Untuk perhitungan pada jam 17.00-22.00 WIB.

$$P_N = I_N^2 \times R_N$$

$$= 53,4^2 \times 0,6842$$

$$= 1951,037352 \text{ watt}$$

$$= 1,951037352 \text{ kWh}$$

Dengan menggunakan hasil perhitungan rugi daya akibat arus netral serta lampiran 1 yang menyebutkan bahwa harga per kWh sebesar Rp 1.467,28 dapat digunakan untuk mencari besar kerugian akibat energi yang terbuang dengan cara sebagai berikut:

1. Transformator CU1-391/9

Untuk perhitungan pada pengukuran pada jam 11.00-16.00 WIB.

$$W_N = P_N \times t$$

$$= 0,30652992 \times 12$$

$$= 3,67835904$$

$$\text{Kerugian PLN} = W_N \times \text{Rp per kWh}$$

$$= 3,67835904 \times \text{Rp } 1467,28$$

$$= \text{Rp } 5.397,182652$$

Untuk perhitungan pada pengukuran pada jam 17.00-22.00 WIB.

$$W_N = P_N \times t$$

$$= 0,65190825 \times 12$$

$$= 7,822899$$

$$\text{Kerugian PLN} = W_N \times \text{Rp per kWh}$$

$$= 7,822899 \times \text{Rp } 1.467,28$$

$$= \text{Rp } 11.478,38324$$

2. Transformator CU1-400

Untuk perhitungan pada jam 11.00-16.00 WIB.

$$W_N = P_N \times t$$

$$= 1,5113978 \times 12$$

$$= 18,1367736$$

$$\text{Kerugian PLN} = W_N \times \text{Rp per kWh}$$

$$= 18,1367736 \times \text{Rp } 1.467,28$$

$$= \text{Rp } 26.611,72517$$

Untuk perhitungan pada jam 17.00-22.00 WIB.

$$W_N = P_N \times t$$

$$= 1,951037352 \times 12 = 23,41244822$$

$$\text{Kerugian PLN} = W_N \times \text{Rp per kWh}$$

$$= 23,41244822 \times \text{Rp } 1.467,28$$

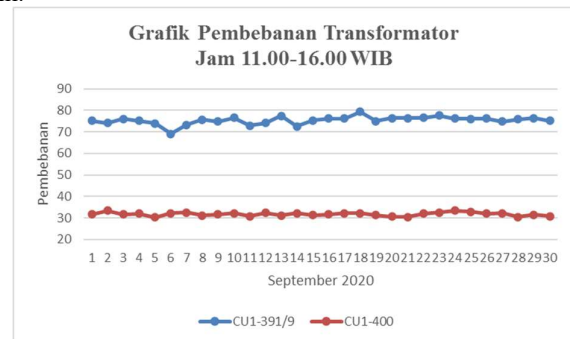
$$= \text{Rp } 34.352,61703$$

4.2 Analisis Hasil Perhitungan

Dengan menggunakan cara perhitungan yang sama, dapat diketahui hasil perhitungan dari besarnya pembebanan pada transformator, ketidakseimbangan beban, rugi daya akibat arus netral, serta kerugian yang ditanggung oleh PLN dalam bentuk rupiah selama satu bulan penuh.

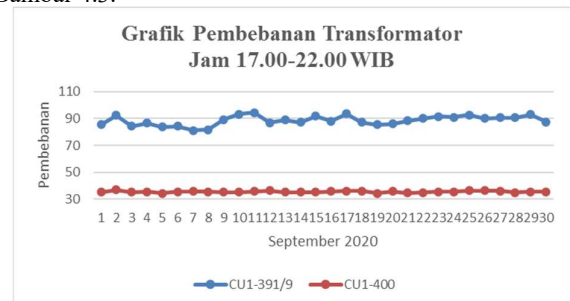
4.2.1 Hasil Perhitungan Pembebanan Pada Dua Transformator

Hasil dari perhitungan pembebanan transformator selama satu bulan penuh pada jam 11.00-16.00 WIB dan jam 17.00-22.00 WIB dapat dilihat pada gambar grafik dibawah ini.



Gambar 4.1 Grafik Pembebanan Transformator Jam 11.00-16.00 WIB

Gambar 4.2 pada garis biru menunjukkan hasil perhitungan pembebanan jam 11.00-16.00 WIB selama satu bulan penuh pada transformator CU1-391/9. Sedangkan pada garis merah menunjukkan hasil perhitungan dari pembebanan jam 11.00-16.00 WIB selama satu bulan penuh pada transformator CU1-400. Untuk pembebanan transformator pada jam 17.00-22.00 WIB dapat dilihat pada Gambar 4.3.



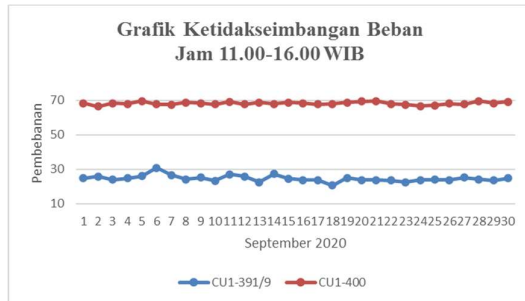
Gambar 4.3 Grafik Pembebanan Transformator Jam 17.00-22.00 WIB

Pada gambar 4.3 garis biru menunjukkan hasil perhitungan pembebanan jam 17.00-22.00 WIB selama satu bulan penuh pada transformator CU1-391/9. Sedangkan

pada garis merah menunjukkan hasil perhitungan dari pembebanan jam 17.00-22.00 WIB selama satu bulan penuh pada transformator CU1-400.

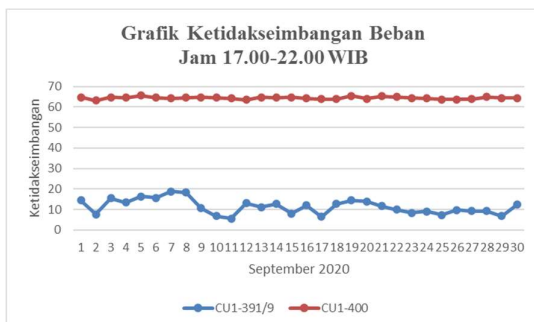
4.2.2 Ketidakseimbangan Beban Dua Transformator

Hasil perhitungan ketidakseimbangan beban dari kedua transformator dapat dilihat pada gambar 4.4 untuk ketidakseimbangan beban pada jam 11.00-16.00 WIB dan gambar 4.5 untuk ketidakseimbangan beban pada jam 17.00-22.00 WIB.



Gambar 4.4 Grafik Ketidakseimbangan Beban Jam 11.00-16.00 WIB

Pada gambar 4.4 garis biru menunjukkan hasil perhitungan ketidakseimbangan beban jam 11.00-16.00 WIB selama satu bulan pada transformator CU1-391/9. Sedangkan pada garis merah menunjukkan hasil pembebanan jam 11.00-16.00 WIB selama satu bulan pada transformator CU1-400. Untuk grafik ketidakseimbangan beban jam 17.00-22.00 WIB dapat dilihat pada gambar 4.5

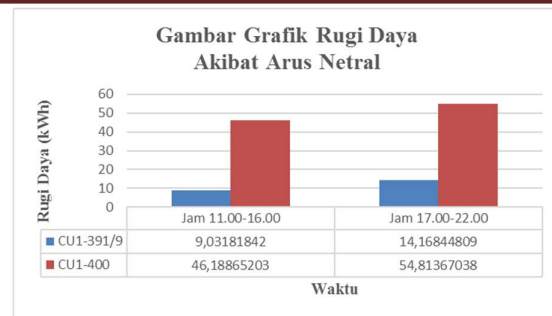


Gambar 4.5 Grafik Ketidakseimbangan Beban Jam 17.00-22.00 WIB

Pada gambar 4.5 garis biru menunjukkan hasil perhitungan ketidakseimbangan beban jam 17.00-22.00 WIB selama satu bulan pada transformator CU1-391/9. Sedangkan pada garis merah menunjukkan hasil pembebanan jam 17.00-22.00 WIB selama satu bulan pada transformator CU1-400.

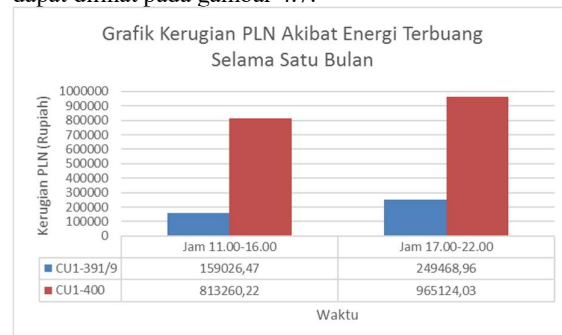
4.2.3 Hasil Perhitungan Rugi daya dan Kerugian Akibat Energi Terbuang

Rugi daya akibat arus netral pada dua transformator dapat dilihat pada gambar 4.6 dan kerugian yang dialami oleh PLN selama satu bulan akibat energi yang terbuang dapat dilihat pada gambar 4.7.



Gambar 4.6 Grafik Rugi Daya Akibat Arus Netral

Pada gambar 4.6 dapat dilihat besarnya rugi daya akibat arus netral selama satu bulan. Untuk grafik berwarna biru yaitu transformator CU1-391/9 pada jam 11.00-16.00 WIB rugi daya sebesar 9,0318 kWh dan pada jam 17.00-22.00 WIB sebesar 14,1684 kWh. Sedangkan grafik yang berwarna merah yaitu transformator CU1-400 pada jam 11.00-16.00 WIB rugi daya sebesar 46,1887 kWh dan jam 17.00-22.00 WIB sebesar 54,8137 kWh. Untuk kerugian yang dialami oleh PLN selama satu bulan akibat energi yang terbuang dapat dilihat pada gambar 4.7.



Gambar 4.7 Grafik Kerugian Akibat Energi Terbuang Selama Satu Bulan

Pada gambar 4.7 besar kerugian akibat energi terbuang selama satu bulan pada grafik warna biru yaitu transformator CU1-391/9 pada jam 11.00-16.00 WIB kerugian PLN sebesar Rp 159.026,47 dan jam 17.00-22.00 WIB sebesar Rp 249.468,96. Untuk transformator CU1-400 pada grafik warna merah yaitu besar kerugian PLN pada jam 11.00-16.00 WIB sebesar Rp 813.260,22 dan pada jam 17.00-22.00 WIB sebesar Rp 965.124,03. Hal tersebut dapat terjadi dikarenakan pada saat malam hari penggunaan tenaga listrik lebih besar dibandingkan penggunaan tenaga listrik pada siang hari.

5. Kesimpulan

Berdasarkan hasil perhitungan yang telah dilakukan, pada transformator CU1-391/9 besarnya rata-rata pembebanan pada jam 11.00-16.00 WIB selama satu bulan penuh sebesar 75,40% dan ketidakseimbangan beban 24,60%. Pada jam 17.00-22.00 WIB atau pada saat beban puncak, besar rata-rata pembebanan selama satu bulan sebesar 88,60% dan ketidakseimbangan beban sebesar 11,39%. Sedangkan pada transformator CU1-400 besar rata-rata persentase pembebanan selama satu bulan pada jam 11.00-16.00 WIB sebesar 31,80% dan ketidakseimbangan beban sebesar 68,20%. Pada jam 17.00-22.00 WIB rata-rata

pembebanan selama satu bulan sebesar 35,54% dan ketidakseimbangan beban sebesar 64,46%.

Rugi daya yang dialami pada transformator CU1-391 selama satu bulan pada jam 11.00-16.00 WIB sebesar 9,03181842 kWh dan pada jam 17.00-22.00 WIB sebesar 9,03181842 kWh. Rugi daya yang dialami transformator CU1-400 rugi daya yang dialami selama satu bulan pada jam 11.00-16.00 WIB sebesar 46,19 kWh dan pada jam 17.00-22.00 WIB sebesar 54,81 kWh.

Kerugian yang dialami oleh PLN pada transformator CU1-391/9 karena adanya rugi daya akibat munculnya arus netral sebesar Rp 159.026,47 pada jam 11.00-16.00 WIB dan Rp 249.468,96. besar kerugian PLN pada jam 17.00-22.00 WIB. Pada transformator CU1-400 besar kerugian PLN selama satu bulan sebesar Rp 813.260,22 pada jam 11.00-16.00 WIB dan Rp 965.124,03. Total kerugian yang dialami PLN pada jam 17.00-22.00 WIB.

Daftar Pustaka

- [1] Y. Simamora and P. S. M. L. Tobing, "Analisis Ketidakseimbangan Beban Transformator Distribusi Untuk Identifikasi Beban Lebih Dan Estimasi Rugi-Rugi Pada Jaringan Tegangan Rendah," *Singuda ENSIKOM*, vol. 7, no. 3, pp. 137–142, 2014.
- [2] H. L. Latupeirissa, "Jurnal simetrik vol 7, no. 2, desember 2017," *J. Tek. Elektro*, vol. 7, no. 2, pp. 1–7, 2017.
- [3] J. Sentosa Setiadji, T. Machmudsyah, and Y. Isnanto, "Pengaruh Ketidakseimbangan Beban Terhadap Arus Netral dan Losses pada Trafo Distribusi," *J. Tek. Elektro*, vol. 7, no. 2, pp. 68–73, Jan. 2007, doi: 10.9744/jte.7.2.68-73.
- [4] D. Mulyadi, "Pengaruh Ketidakseimbangan Beban Pada Rugi Daya Saluran Netral Jaringan Distribusi Tegangan Rendah," *Tek. Energi*, vol. 1, no. 1, pp. 11–15, 2011.
- [5] M. D. Tobi, "Analisis Pengaruh Ketidakseimbangan Beban Terhadap Arus Netral Dan Losses Pada Transformator Distribusi Di Pt Pln (Persero) Area Sorong," *Electro Luceat*, vol. 4, no. 1, p. 5, 2018, doi: 10.32531/jelekn.v4i1.80.
- [6] N. Anggraeni, *Faraday Dan Kelistrikan*. Jakarta: Elex Media Komputindo, 2010.
- [7] Kadir, *Transformator*. Jakarta: Elex Media Komputindo, 1989.
- [8] Kadir, *Distribusi dan Utilisasi Tenaga Listrik*. Jakarta: Universitas Indonesia (UI-Press), 2000.
- [9] T. Watiningsih, "Pengaruh Ketidakseimbangan Beban Terhadap Arus Netral Dan Losses Pada Trafo Distribusi," *Teodolita*, vol. 13, no. 2, pp. 58–67, 2012.
- [10] E. Julianto, "Studi Pengaruh Ketidakseimbangan Pembebanan Transformator Distribusi 20KV PT PLN (PERSERO) Cabang Pontianak," *J. Tek. Elektro*, vol. 2, no. 1, pp. 1–6, 2016.
- [11] W. Sarimun.N.MT, *Proteksi Sistem Distribusi Tenaga Listrik, Pertama*. Jakarta: Garamond, 2012.
- [12] Zuhail, *Dasar Teknik Tenaga Listrik dan Elektronika Daya*. Jakarta: PT Gramedia, 1988.