

## KERUGIAN DAYA AKIBAT KETIDAKSEIMBANGAN BEBAN TERHADAP ARUS NETRAL PADA TRANSFORMATOR DISTRIBUSI

Eri Suherman<sup>1</sup>, Sofyan Putra Kampay<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Dosen Teknik Elektro Universitas Darma Persada

<sup>2</sup> Jurusan Teknik Elektro Darma Persada

### Abstrak

*Ketersediaan tenaga listrik merupakan kebutuhan pokok bagi kehidupan manusia masa kini. Hal ini merupakan pekerjaan besar bagi penyedia tenaga listrik dalam hal ini PT. PLN (Persero) untuk membuat distribusi tenaga listrik yang baik. Tidak hanya menyediakan tenaga listrik, PT. PLN (Persero) juga dituntut untuk merencanakan distribusi tenaga listrik secara seimbang. Kenyataannya saluran distribusi tenaga listrik sering kali mengalami ketidakseimbangan beban. Penelitian ini akan menganalisa ketidakseimbangan beban yang terjadi di PT. PLN (Persero) Rayon Bantar Gebang. Metode yang dilakukan pada penelitian ini dimulai dengan pencarian pustaka dan referensi – referensi terkait dengan analisa ketidakseimbangan beban. Langkah selanjutnya akan mengumpulkan data lapangan terkait dengan topik pembahasan. Data yang sudah didapat kemudian akan dilakukan beberapa perhitungan dengan rumus yang telah ditentukan untuk mengetahui rugi – rugi (losses) daya akibat ketidakseimbangan beban. Berdasarkan perhitungan yang telah dilakukan, diperoleh bahwa dari lima transformator yang dianalisis empat transformator dalam keadaan tidak seimbang dan 1 transformator dalam keadaan seimbang. Kemudian rugi – rugi (losses) daya akibat adanya arus pada penghantar netral masih dalam batas toleransi yang ditentukan SPLN D3.002-1 2007 yaitu sebesar  $\pm 10\%$ . Rugi – Rugi daya terbesar terdapat pada transformator C dengan persentase sebesar 9,85%.*

**Keyword :** Transformator, rugi-rugi, seimbang

### 1. PENDAHULUAN

Ketidakeimbangan beban pada transformator menyebabkan adanya rugi – rugi daya (losses) dimana arus mengalir di penghantar netral. Pemakaian beban listrik yang tidak seimbang dengan besar langganan daya dapat menyebabkan kerugian. Hal ini menyebabkan tingginya biaya yang dibayarkan setiap bulannya. Ditambah juga dengan diberlakukannya denda pinalti akibatnya factor daya khususnya untuk tegangan menengah .besar rugi – rugi (losses) di sisi *power provider* dalam hal ini PT. PLN (Persero) dan konsumen terutama bagi pelanggan tegangan menengah.

Arus yang mengalir di penghantar netral trafo distribusi ini dikatakan dengan rugi – rugi daya. Dilakukan penelitian ini supaya diketahui berapa rugi – rugi yang terjadi pada transformator distribusi di PT. PLN (Persero) rayon Bantar Gebang Beasi yang disebabkan oleh ketidakseimbangan beban. Standar ketidakseimbangan beban diatur dalam IEEE std 446 – 1980 yaitu sebesar 5% - 20 %. Kemudian rugi – rugi daya akibat adanya arus netral diatur dalam SPLN D3.002-1 2007 yaitu sebesar  $\pm 10\%$ . Analisis rugi – rugi (losses) daya akibat ketidak seimbangan beban pada trafo perlu dilakukan agar dapat mengetahui berapa rugi – rugi (losses) yang terjadi dan diharapkan agar dapat diantisipasi supaya ketidakseimbangan beban tersebut bisa diminimalisir.

## 1. DISTRIBUSI TENAGA LISTRIK

### 2.1. Pengertian Distribusi Tenaga Listrik

Sistem distribusi merupakan bagian dari sistem tenaga listrik. sistem distribusi ini berguna untuk menyalurkan tenaga listrik dari sumber daya listrik besar (*bulk power source*) sampai ke konsumen. Jadi fungsi distribusi tenaga listrik adalah pembagian atau penyaluran tenaga listrik ke beberapa tempat atau pelanggan.

Tenaga listrik yang dihasilkan oleh pembangkit tenaga listrik besar dengan tegangan dari 11 kV sampai dengan 24 kV dinaikkan tegangannya oleh gardu induk dengan transformator penaik tegangan menjadi 70 kV, 154 kV, 220 kV, dan 500 kV yang kemudian disalurkan melalui saluran transmisi. Tujuan menaikkan tegangan ialah memperkecil kerugian daya listrik pada saluran transmisi dimana dalam hal ini kerugian daya adalah sebanding dengan kuadrat arus yang mengalir ( $I^2 \cdot R$ ) dengan daya yang sama bila nilai tegangannya diperbesar maka arus yang mengalir semakin kecil sehingga kerugian daya juga akan kecil. Dari saluran transmisi tegangan diturunkan menjadi 20 kV dengan transformator penurun tegangan pada gardu induk distribusi. Kemudian dengan system tegangan tersebut penyaluran tenaga listrik dilakukan oleh saluran distribusi primer. Kemudian saluran distribusi primer inilah gardu – gardu distribusi mengambil tegangan untuk diturunkan tegangannya dengan trafo distribusi menjadi tegangan rendah yaitu 220/ 380 Volt. Selanjutnya disalurkan oleh saluran distribusi sekunder ke konsumen – konsumen. Dengan ini jelas bahwa sistem distribusi merupakan bagian yang penting dalam sistem tenaga listrik secara keseluruhan.

### 2.2. Pengelompokan Jaringan Distribusi Tenaga Listrik

Untuk kemudahan dan penyederhanaan, lalu diadakan pembagian serta pembatasan – pembatasan sebagai berikut :

1. Daerah I : Bagian pembangkitan (*Generation*).
2. Daerah II : Bagian penyaluran (*transmission*), bertegangan tinggi (HV, UHV, EHV).
3. Daerah III : Bagian distribusi primer, bertegangan menengah (6 kV atau 20 kV).
4. Daerah IV : Bagian beban/ konsumen, instalasi, bertegangan rendah.

Bedasarkan pembatasan – pembatasan tersebut, maka diketahui bahwa porsi materi sistem distribusi adalah daerah III dan IV yang pada dasarnya dapat diklasifikasikan menurut beberapa cara, bergantung dari segi apa klasifikasi itu dibuat. Pembagian dari jaringan diatas dapat diperjelas lebih detail melalui gambar berikut :

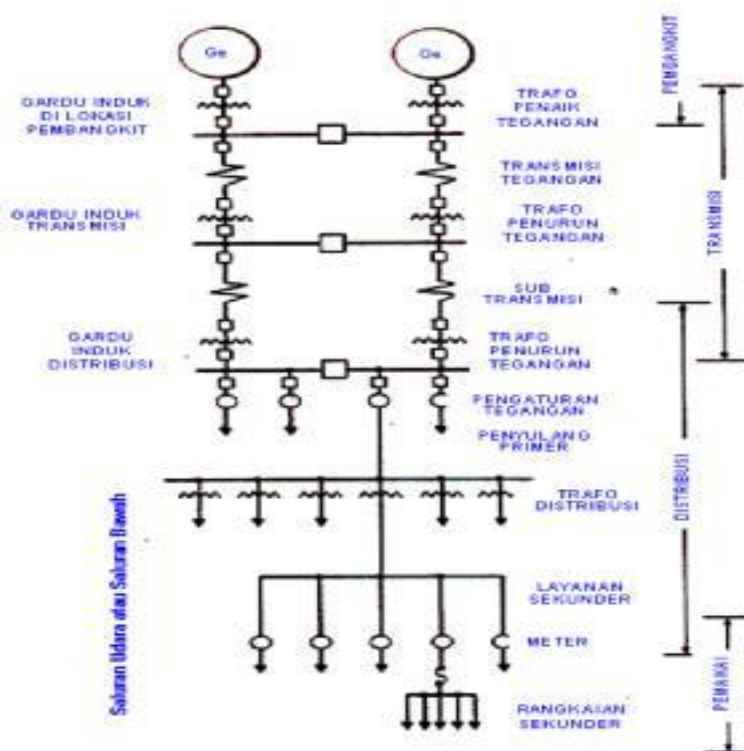
#### 2.2.1 Jaringan Distribusi Primer

Jaringan distribusi primer yaitu jaringan tenaga listrik yang menyalurkan daya listrik dari gardu sub transmisi ke gardu distribusi. Jaringan ini merupakan jaringan tegangan menengah atau jaringan tegangan primer. Biasanya, jaringan ini menggunakan enam

jenis jaringan yaitu sistem radial tertutup atau pengulangan (*loop*), cincin (*ring*), *network spindle* atau *cluster*.

**2.2.2. Jaringan Distribusi Sekunder**

Jaringan ini menggunakan tegangan rendah. Sebagaimana halnya dengan distribusi primer, terdapat pula pertimbangan perihal keadaan pelayanan dan regulasi tegangan. Distribusi sekunder yaitu jaringan tenaga listrik yang menyalurkan daya listrik dari gardu distribusi ke konsumen atau beban. Jaringan ini sering disebut jaringan tegangan rendah.



Gambar. 1 Pengelompokan Jaringan Distribusi Tenaga Listrik

Sistem distribusi sekunder digunakan untuk menyalurkan tenaga listrik dari gardu distribusi ke beban – beban. Pada sistem distribusi sekunder bentuk saluran yang paling banyak digunakan ialah sistem radial. Sistem ini biasanya disebut sistem tegangan rendah yang langsung dihubungkan kepada konsumen/ pemakai tenaga listrik.

**2.3. Transformator**

Transformator merupakan suatu alat listrik statis yang dapat memindahkan dan mengubah tegangan dan arus bolak-balik dari suatu atau lebih rangkaian listrik ke rangkaian listrik yang lain dengan nilai yang sama maupun berbeda besarnya pada frekuensi yang sama, melalui gandengan magnet dan berdasarkan prinsip induksi elektromagnetik. Pada umumnya transformator terdiri atas sebuah inti yang terbuat dari besi berlapis, dan dua buah kumparan, yaitu kumparan primer dan kumparan sekunder. Rasio perubahan tegangan akan tergantung dari rasio jumlah lilitan pada kumparan itu. Biasanya kumparan terbuat dari kawat tembaga atau aluminium yang dililitkan pada kaki inti transformator. Transformator digunakan secara luas baik dalam bidang tenaga listrik maupun elektronika.

Penggunaan transformator dalam sistem tenaga memungkinkan terpilihnya tegangan yang sesuai dan ekonomis untuk tiap-tiap keperluan misalnya, kebutuhan akan tegangan tinggi dalam pengiriman daya jarak jauh. Penggunaan transformator yang sangat sederhana dan handal merupakan salah satu alasan penting dalam pemakaiannya pada penyaluran tenaga listrik arus bolak-balik, karena arus bolak-balik sangat banyak digunakan untuk pembangkitan dan penyaluran tenaga listrik.

Pada penyaluran tenaga listrik arus bolak-balik terjadi kerugian energi sebesar  $R$  watt. Kerugian ini akan banyak berkurang apabila tegangan dinaikkan setinggi mungkin. Dengan demikian maka saluran-saluran transmisi tenaga listrik senantiasa mempergunakan tegangan yang tinggi. Hal ini dilakukan terutama untuk mengurangi kerugian energi yang terjadi, dengan cara mempergunakan transformator untuk menaikkan tegangan listrik di pusat pembangkit dari tegangan generator yang biasanya sebesar 6 kV – 20 kV pada awal transmisi ke tegangan saluran transmisi antara 100 kV – 1000 kV, kemudian menurunkannya lagi pada ujung akhir saluran ke tegangan yang lebih rendah.

Transformator yang dipakai pada jaringan tenaga listrik merupakan transformator tenaga. Di samping itu ada jenis-jenis transformator lain yang banyak dipergunakan dan pada umumnya merupakan transformator yang jauh lebih kecil. Misalnya transformator yang dipakai dirumah tangga untuk menyesuaikan tegangan dari lemari es dengan tegangan yang berasal dari jaringan listrik umum, transformator yang dipakai pada lampu TL dan transformator-transformator “mini” yang digunakan pada berbagai alat elektronika, seperti penerima radio, televisi dan sebagainya.

### 2.3.1 Prinsip Kerja Transformator

Prinsip kerja transformator adalah berdasarkan hukum *ampere* dan *faraday* yaitu “arus listrik dapat menimbulkan arus listrik.” Jika salah satu kumparan pada trafo dialiri arus listrik, maka timbul gaya garis magnet yang berubah – ubah. Kumparan sekunder akan menerima garis gaya magnet dari kumparan yang besarnya berubah – ubah dan di kumparan sekunder juga timbul induksi yang diakibatkan antara dua ujung kumparan terdapat beda tegangan. Jumlah garis gaya ( $\phi$ , *fluks*) yang masuk kumparan sekunder adalah sama dengan garis faya yang keluar dari kumparan primer.

$$e_1 = -N_1 \frac{d\phi}{dt} \text{ dan } e_2 = -N_2 \frac{d\phi}{dt} \dots\dots\dots(1)$$

$$\frac{e_1}{e_2} = \frac{-N_1 \frac{d\phi}{dt}}{-N_2 \frac{d\phi}{dt}} \dots \dots \dots (2)$$

Jadi :

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} \dots \dots \dots (3)$$

Dimana :

- $e_1$  = GGL induksi/ tegangan sesaat pada kumparan primer (V)
- $e_2$  = GGL induksi/ tegangan sesaat pada kumparan sekunder (V)
- $E_1$  = GGL induksi/ tegangan efektif pada kumparan primer (V)
- $E_2$  = GGL induksi/ tegangan efektif pada kumparan sekunder (V)
- $N_1$  = Jumlah lilitan kumparan primer
- $N_2$  = Jumlah lilitan kumparan sekunder

### 2.3.2 Transformator Berdasarkan Pasangan Kumparan

Transformator dapat dibedakan berdasarkan pasangan kumparan atau lilitannya menjadi :

- Transformator satu belitan.
- Transformator dua belitan.
- Transformator tiga belitan.

Transformator satu belitan adalah lilitan primer merupakan bagian dari lilitan sekunder atau sebaliknya. Trafo satu belitan lebih baik dikenal sebagai "*auto transformer* atau trafo hemat." Trafo dua belitan adalah trafo yang mempunyai dua belitan yaitu sisi tegangan tinggi dan sisi tegangan rendah, dimana kumparan sekunder dan primer berdiri sendiri. Trafo tiga belitan merupakan trafo yang mempunyai belitan primer, sekunder, dan tersier yang masing – masing berdiri sendiri pada tegangan yang berbeda.

### 2.3.3 Transformator Berdasarkan Fungsi

Menurut fungsinya transformator dibagi menjadi 4, yaitu :

- a. Transformator daya.
- b. Transformator distribusi.
- c. Transformator pengukuran.
- d. Transformator elektronik.

#### a) Transformator Daya

Transformator daya adalah trafo yang digunakan untuk pemasok daya. Transformator daya mempunyai dua fungsi yaitu menaikkan tegangan listrik (*step up*) dan menurunkan tegangan listrik (*step down*). Trafo daya tidak dapat digunakan langsung untuk menyuplai beban, karena sisi tegangan rendahnya masih lebih tinggi dari tegangan beban, sedangkan sisi tingginya merupakan tegangan transmisi. Trafo berfungsi sebagai menaikkan tegangan pada sistem dimana tegangan keluaran lebih tinggi dari pada tegangan masukan (misalnya pada pengiriman atau penyaluran daya) dan sebaliknya trafo berfungsi sebagai menurunkan tegangan jika tegangan keluaran

lebih rendah dari pada tegangan masukkan (misalnya menerima atau menyalurkan daya).

b) Transformator Distribusi

Transformator distribusi pada dasarnya sama dengan transformator daya, bedanya adalah tegangan rendah pada trafo daya bila dibandingkan dengan tegangan tinggi trafo distribusi masih lebih tinggi. Kedai tegangan pada transformator distribusi merupakan tegangan distribusi yaitu untuk distribusi tegangan menengah (TM) dan distribusi tegangan rendah (TR). Trafo distribusi digunakan untuk mendistribusikan energi listrik langsung ke lapangan.

Trafo distribusi yang umumnya digunakan adalah trafo penurun tegangan (*step – down*) 20/ 0,4 kV, tegangan fasa – fasa sistem JTR adalah 380 Volt, karena terjadi penurunan (*drop*) tegangan maka tegangan rak TR dibuat diatas 380 Volt agar tegangan pada ujung beban menjadi 380 Volt.

c) Transformator Ukur

Pada umumnya trafo ini digunakan untuk mengukur arus (I) dan tegangan (V). Trafo ini dibuat khusus untuk mengukur arus dan tegangan yang tidak mungkin bisa iukur langsung oleh ampere meter atau voltmotmeter.

d) Transformator Elektronik

Transformator ini prinsip sama seperti transformator daya, tapi kapasitas reaktif sangat kecil, yaitu kurang dari 300 VA yang digunakan untuk keperluan pada rangkaian elektronik

**2.3.4 Beban Pada Transformator**

Daya transformator bila ditinjau dari sisi tegangan primer dapat dirumuskan menjadi sebagai berikut:

$$S = \sqrt{3} \cdot V \cdot I \dots\dots\dots(4)$$

- Dimana :
- S = daya transformator (kVA)
- V = tegangan sisi primer transformator (kV)
- I = arus jala – jala

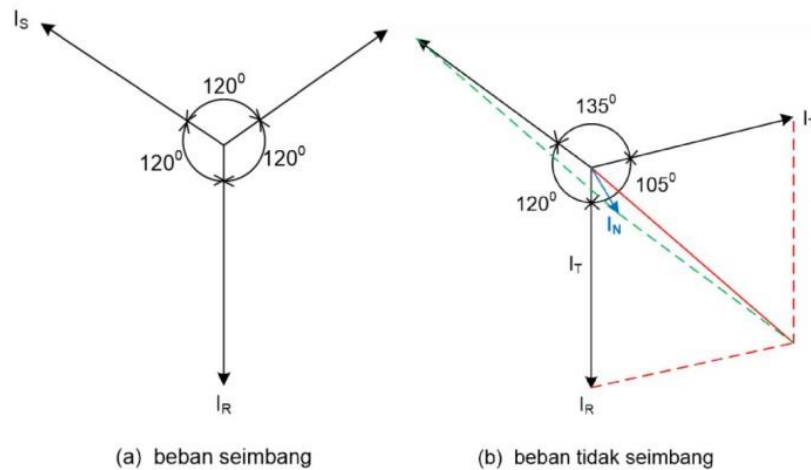
Sehingga untuk menghitung arus beban penuh (*full load*) sisi sekunder trafo menggunakan rumus :

$$I_{FL} = \frac{S}{\sqrt{3} \cdot V} \dots\dots\dots(5)$$

- Dimana :
- $I_{FL}$  = arus beban penuh (A)
- S = daya transformator (kVA)
- V = tegangan sekunder transformator (kV)

Adapun dua keadaan beban pada transformator distribusi yaitu :

- b) Keadaan beban seimbang
  - Ketiga vektor arus sama besar ( $I_R = I_S = I_T = 1$ ).
  - Ketiga vektor tegangan  $V_R, V_S, V_T$  sama besar.
  - Ketiga vektor membentuk sudut  $120^\circ$  satu sama lain.
  - Jumlah arus fasa sama dengan nol ( $I_N = 0$ ).
- c) Keadaan beban tidak seimbang, bilamana :
  - Ketiga vektor sama besar tetapi tidak membentuk sudut  $120^\circ$  satu sama lain.
  - Ketiga vektor tidak sama besar tetapi membentuk sudut  $120^\circ$  satu sama lainnya.
  - Ketiga vektor tidak sama besar dan tidak membentuk sudut  $120^\circ$  satu sama lainnya ( $I_N \neq 0$ ).



Gambar 2.5. Vektor Diagram Arus.

**2.3.5 Arus Netral Keran Beban Tidak Seimbang**

Untuk arus tiga fasa dari suatu sistem yang tidak seimbang dapat juga diselesaikan dengan menggunakan metode komponen simetris. Dengan menggunakan notasi – notasi yang sama seperti pada tegangan akan didapatkan persamaan – persamaan untuk arus – arus fasanya sebagai berikut :

$$I_a = I_1 + I_2 + I_0 \dots \dots \dots (6)$$

$$I_b = a^2 I_1 + a I_2 + I_0 \dots \dots \dots (7)$$

$$I_c = a I_1 + a^2 I_2 + I_0 \dots \dots \dots (8)$$

Dengan tiga langkah yang telah dijabarkan dalam menentukan tegangan urutan positif, urutan negatif, dan urutan nol terdahulu, maka arus – arus urutan juga dapat ditentukan dengan cara yang sama, sehingga kita dapat juga :

$$I_1 = \frac{1}{3}(I_a + a I_b + a^2 I_c) \dots\dots\dots(9)$$

$$I_2 = \frac{1}{3}(I_a + a^2 I_b + a I_c) \dots\dots\dots(10)$$

$$I_0 = \frac{1}{3}(I_a + I_b + I_c) \dots\dots\dots(11)$$

Disini terlihat bahwa arus urutan nol ( $I_0$ ) merupakan sepertiga dari arus netral atau sebaliknya akan menjadi nol (0) jika dalam sistem tiga fasa empat kawat. Dalam sistem tiga fasa empat kawat ini jumlah arus saluran sama dengan arus netral yang kebalik lewat kawat netral, menjadi :

$$I_N = (I_a + I_b + I_c) \dots\dots\dots(12)$$

Dengan mensubstitusikan persamaan  $I_0$  ke  $I_N$  maka diperoleh :

$$I_N = 3I_0 \dots\dots\dots(13)$$

Dalam sistem tiga fasa empat kawat ini jumlah arus dalam saluran sama dengan arus netral yang kembali lewat kawat netral. Jika arus – arus fasanya seimbang maka arus netralnya akan bernilai nol. Tapi jika arus – arus fasanya seimbang, maka akan ada arus yang mengalir di kawat netral sistem (arus netral akan mempunyai nilai dalam arti tidak nol (0)).

**2. HASIL ANALISIS RUGI – RUGI DAYA AKIBAT KETIDAKSEIMBANGAN BEBAN TERHADAP ARUS NETRAL**

Dari lima transformator yang dianalisis didapatkan hasil bahwa trafo yang ada di PT. PLN (Persero) Rayon Bantar Gebang empat transformator dalam keadaan tidak seimbang keadaan tidak seimbang dan satu transformator dalam keadaan seimbang. Hal ini dapat diketahui berdasarkan hasil analisa masing – masing transformator. Hasil analisa dapat dilihat dibawah ini.

Tabel 2. menunjukkan bahwa pada transformator A fasa T dalam keadaan tidakseimbang. Pada transformator B dalam keadaan seimbang. Pada transformator C dan D fasa R dan fasa S dalam keadaan tidak seimbang. Kemudian pada transformator E fasa R dan T dalam keadaan tidak seimbang.

**Tabel 1. Rekap Hasil Analisis**

Nama	$I_{rata-rata}$ (A)	I (%)	%Ketidakseimbangan Beban			$I_x$	$P_x (W)$	P (kW)	% $P_x$ (%)
			% $I_R$	% $I_S$	% $I_T$				
Transformator A	66,33	45,95	3	10	22	35	654,13	80	0,82
Transformator B	229,67	50,51	4	3	3	82	461,03	252	0,18
Transformator C	141,67	24,54	31	25	6	190	31515,3	320	9,85
Transformator D	73	50,58	48	33	15	90	3928,5	80	4,91
Transformator E	58,33	40,4	54	14	40	95	4377,1	80	5,4



r E		1				3		7
-----	--	---	--	--	--	---	--	---

**Tabel 2.** Ketidakseimbangan Beban Per Fasa

Nama	Standar IEEE	Fasa R	Fasa S	Fasa T
Transformator A	5% - 20 %			×
Transformator B	5% - 20 %			
Transformator C	5% - 20 %	×	×	
Transformator D	5% - 20 %	×	×	
Transformator E	5% - 20 %	×		×

**Tabel 3.** Rugi – Rugi Daya Terhadap Arus Netral

Nama	SPLN D3.002-1 2007	$I_N (A)$	$\%P_N(\%)$	Keterangan
Transformator A	$\pm 10 \%$	35	0,81	√
Transformator B	$\pm 10 \%$	82	0,18	√
Transformator C	$\pm 10 \%$	190	9,85	√
Transformator D	$\pm 10 \%$	90	4,91	√
Transformator E	$\pm 10 \%$	95	5,47	√

Tabel 3. menjelaskan bahwa rugi – rugi daya terhadap arus netral yang terdapat pada transformator A, transformator B, transformator C, transformator D, dan transformator E masih dalam batas toleransi yang diatur di SPLN D3.002-1 2007. Rugi – rugi daya terhadap arus netral terbesar terjadi pada transformator C yaitu sebesar 9,85 % dan rugi – rugi daya terhadap arus netral terkecil adalah 0,18 pada transformator B

#### 4. KESIMPULAN

1. Ketidakseimbangan beban pada transformator terjadi pada fasa T di transformator A, Kemudian fasa R dan fasa S pada transformator C dan transformator D, fasa R dan fasa T pada transformator E.
2. Pada transformator B beban seimbang.
3. Rugi – rugi daya akibat adanya arus pada netral pada transformator A, transformator B, persentase rugi – rugi daya masih dibawah  $\pm 10\%$  sesuai dengan SPLN D3.002-1 2017.
4. Rugi – rugi daya akibat adanya arus pada netral terbesar terjadi pada transformator C yaitu sebesar 31515,3 W atau sebesar 9,85%.
5. Besar kecil rugi – rugi daya tergantung pada arus netral. Semakin besar arus pada penghantar netral maka semakin besar rugi – rugi (*losses*) daya.

## 5. DAFTAR PUSTAKA

1. Abdul Kadir, **Distribusi dan Utilitas Tenaga Listrik**, Jakarta : UI – Press, 2000.
2. DR. Ramadhoni Syahputra, “**Transmisi dan Distribusi Tenaga Listrik.**” UMY Yogyakarta, 2017.
3. Gamma Ayu Kartika Sari, **Analisis Pengaruh Ketidakseimbangan Beban Terhadap Arus Netral dan Losses pada Trafo Distribusi Studi Kasus pada PT. PLN (Persero) Rayon Blora.** Universitas Muhammadiyah Surakarta, 2018.
4. M. Arifin Siregar, **Analisis Ketidakseimbangan Beban Pada Transformator Distribusi di PT. PLN (Persero) Rayon Panam Pekanbaru.** UIN Suska Riau, 2013.
5. Moh. Dahlan. - . **Akibat Ketidakseimbangan Beban Terhadap Arus Netral dan Losses pada Transformator Distribusi.** FT Universitas Muria Kudus.
6. Panusur S. M. I. Tobing, Rolly Elmondo Sinaga, “**Studi Tentang Pengukuran Parameter Trafo Distribusi Dengan Menggunakan EMT (Electrical Measurement & Data Transmit).**” FT Universitas Sumatra Utara, 2015.
7. ...., **Institute Of Electrical And Electronics Engineers (IEEE) std 446 – 1980**  
..., **Spesifikasi Transformator Bagian I, Standar PLN (SPLN) D3.002-1 2007**