

Analisis Pembebanan Trafo Distribusi 200 kVA 20 kV/400 V Wilayah Ronggowarsito dari Penyulang 5 Tambak Lorok Milik PT. PLN (Persero) UP 3 Semarang

Yuda Iftiar*, Ida Widiastuti, Agus Adi Nugroho

Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Universitas Islam Sultan Agung, Indonesia

Article Info

Article history:

Submitted March 5, 2024

Accepted April 19, 2024

Published August 1, 2024

Keywords:

Pembebanan trafo,
ketidakseimbangan beban,
arus netral.

*Load transformer,
load imbalances,
neutral current.*

ABSTRACT

Pertumbuhan konsumsi energi listrik mengakibatkan beban pada transformator mengalami peningkatan dan memungkinkan terjadinya kelebihan beban, ketidakseimbangan beban serta potensi rugi daya. Hal ini bisa mengakibatkan kerusakan pada trafo akibat panas yang berlebih, menimbulkan arus netral, mengurangi umur serta keandalan trafo. Agar transformator tetap berfungsi dengan baik, PLN menetapkan standar beban transformator distribusi tidak boleh melebihi 80 %. Tujuan penelitian ini untuk mengukur pembebanan transformator distribusi TBL05-34 200 kVA di Ronggowarsito dan menganalisis karakteristik ketidakseimbangan beban yang menimbulkan potensi kerugian daya. Penelitian dimulai dengan mengumpulkan data arus, tegangan, resistansi netral, serta fluktuasi beban subjek trafo di PT. PLN UP3 Semarang. Selanjutnya dilakukan perhitungan pembebanan transformator, ketidakseimbangan beban, dan kerugian daya pada transformator TBL05-34. Hasilnya menunjukkan ketidakseimbangan beban 7,22 % saat siang dan 5,59 % saat malam. Hal ini masih dikategorikan baik sesuai standar IEEE std. 446-1995 berkisar 5 % - 20 %. Kerugian daya disebabkan arus mengalir melalui netral transformator saat siang 0,877 kW dengan 0,5 %, sedangkan malam hari 0,564 kW dengan 0,3 %. Pembebanan transformator saat siang masih normal 56,68 %, sedangkan malam hari 81,87 % merupakan posisi siaga.

Increasing growth electrical energy consumers will result in load transformers increasing and allowing overloads, load imbalances and power losses. This can damage transformer due to excessive heat, causing neutral current, reducing life and reliability transformer. In order transformer function properly, PLN has set standard distribution transformer load not to exceed 80 %. The aim this research is to measure loading TBL05-34 200 KVA distribution transformer in Ronggowarsito and analyze load imbalance characteristics that may cause potential power losses. This research started by collecting field data subject of transformers at PT. PLN UP3 Semarang to get current, voltage, neutral resistance and load fluctuation values. Then calculated transformer loading, load imbalance and power losses TBL05-34 transformer. As a result, load imbalance is 7.22 % afternoon and 5.59 % night. This categorized as good, according IEEE std. 446-1995 standards ranging from 5 % - 20 %. Power losses caused current flowing through the neutral of the transformer afternoon are 0.877 kW with 0.5 %, while at night 0.564kW with 0.3 %. When the transformer is loaded afternoon, load still normal 56.68 %, at night 81.87 %



Corresponding Author:

Yuda Iftiar,

Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Universitas Islam Sultan Agung,
Jl. Kaligawe Raya Km. 4 Kota Semarang, Jawa Tengah 50112, Indonesia.

Email: *yudaiftiar@gmail.com

1. PENDAHULUAN

Sistem tenaga listrik yang berhubungan langsung dengan pengguna atau konsumen energi listrik disebut sebagai sistem distribusi yang berfungsi sebagai sarana penting untuk mendistribusikan energi listrik. Dalam sistem ini terdapat transformator distribusi yang tugasnya adalah mengubah tegangan dari tegangan menengah (20 kV) menjadi tegangan rendah antara fase-fase (380 V – 400 V) dan fase-netral (220 V) yang kemudian

digunakan untuk kebutuhan industri kecil, kantor, dan rumah tangga. Oleh karena itu, transformator distribusi harus mendistribusikan beban secara merata sehingga tidak ada arus di netral dan tidak menyebabkan kerugian daya sehingga kualitas daya yang dikirimkan ke pelanggan dengan baik [1].

Kejadian arus dalam netral transformator sangat sulit dihindari hal ini menjadi permasalahan yang serius. Penyebabnya dikarenakan Hal ini disebabkan oleh pertumbuhan populasi di suatu wilayah dan penggunaan beban listrik oleh berbagai konsumen. Menurut peraturan Perusahaan Listrik Negara (PLN), beban pada transformator distribusi tidak boleh melebihi 80 %. Jadi, jika kondisi pembebanan yang tinggi, pada transformator akan menjadi kelebihan beban, yang dapat mengurangi umur transformator dan juga dapat menyebabkan kerusakan akibat panas berlebih [2].

Penelitian ini bertujuan untuk mengukur beban pada transformator distribusi TBL05-34 dan menganalisis ketidakseimbangan beban yang bisa berpotensi mengakibatkan kerugian daya akibat arus netral. Metode yang digunakan dimulai dengan mengumpulkan data lapangan tentang transformator dari PT. PLN UP3 Semarang untuk mendapatkan nilai arus dan tegangan serta nilai resistansi netral. Selanjutnya, menentukan diagram satu garis pada *feeder* 5 Tambak Lorok yang memasok arus ke transformator TBL05-34. Kemudian dilakukan perhitungan manual mengenai pemuatan transformator, ketidakseimbangan beban, dan kerugian daya akibat netral pada transformator TBL05-34 yang kemudian dipresentasikan dalam bentuk tabel dan grafik. Manfaat dari penelitian ini adalah dapat menentukan jumlah beban pada transformator distribusi dan ketidakseimbangan beban pada transformator sehingga dapat mengurangi kejadian kerugian daya dan penurunan tegangan serta dapat mempertahankan umur transformator.

Sebelumnya pada tahun 2023 telah ada kajian oleh Amalia membahas tentang analisis pembeban trafo distribusi pada penyulang 6 PT. PLN (PERSERO) ULP WELERI di Desa Gebangan Kecamatan Pageruyung. Hasil penelitian ini ialah ada trafo yang bebannya melebihi kapasitasnya, dan tidak sesuai dengan peraturan dari PT. PLN 156 k/21/MEM/2018. Peraturannya adalah beban trafo hanya sampai 80 % dari kapasitas daya yang tersedia, sedangkan pada trafo ke 6 dengan daya 25 kVA mempunyai beban 88,16 % [3]. Kekurangan penelitian ini tidak membahas mengenai ketidakseimbangan, namun hanya membahas beban dan sisa kapasitas trafo. Data yang digunakan hanya sekali saja pengukuran trafo dalam waktu setahun

Lalu pada tahun 2022 juga ada kajian oleh Syukri membahas tentang analisis pembeban transformator distribusi 20 kV pada penyulang LS5 gardu LSA 249. Tujuannya mengetahui pembebanan pada transformator distribusi dan ketidakseimbangan pada beban. Hasilnya, pengukuran dari ketidakseimbangan beban yang terjadi ketika pagi hari sebesar 15 %, siang hari sebesar 26 %, dan malam hari sebesar 22 %. Rugi-rugi daya yang diakibatkan oleh adanya arus yang mengalir melalui netral transformator ketika pagi hari 0,0088 kW dengan 0,02 %, siang hari sebesar 0,06291 kW dengan 0,15 %, dan malam hari sebesar 0,02462 kW dengan 0,061 % [4]. Kekurangan penelitian ini tidak membahas mengenai nilai pembebanan trafo, hanya membahas ketidakseimbangan beban beserta rugi daya yang ditimbulkan. Juga hasil perhitungan data tidak ditampilkan dalam grafik, hanya disajikan dalam bentuk tabel saja sehingga menyulitkan pembaca dalam memahami konten materi.

Berdasarkan dari referensi penelitian sebelumnya, maka peneliti melakukan unsur keterbaruan (*novelty*) pada penelitian sekarang ini. Di antaranya menambahkan perhitungan data yang kurang lengkap pada pembahasan sebelumnya, yakni analisa pembebanan trafo, ketidakseimbangan beban, dan rugi daya. Kebaruan yang ada di penelitian ini juga dengan melakukan rekapan data trafo selama tiga tahun terakhir yakni dari 2020-2023 fungsinya untuk membandingkan data beban trafo pada tiap tahun, nantinya hasil perhitungan ditampilkan dalam bentuk tabel dan grafik agar lebih mudah dipahami oleh pembaca.

2. METODE PENELITIAN

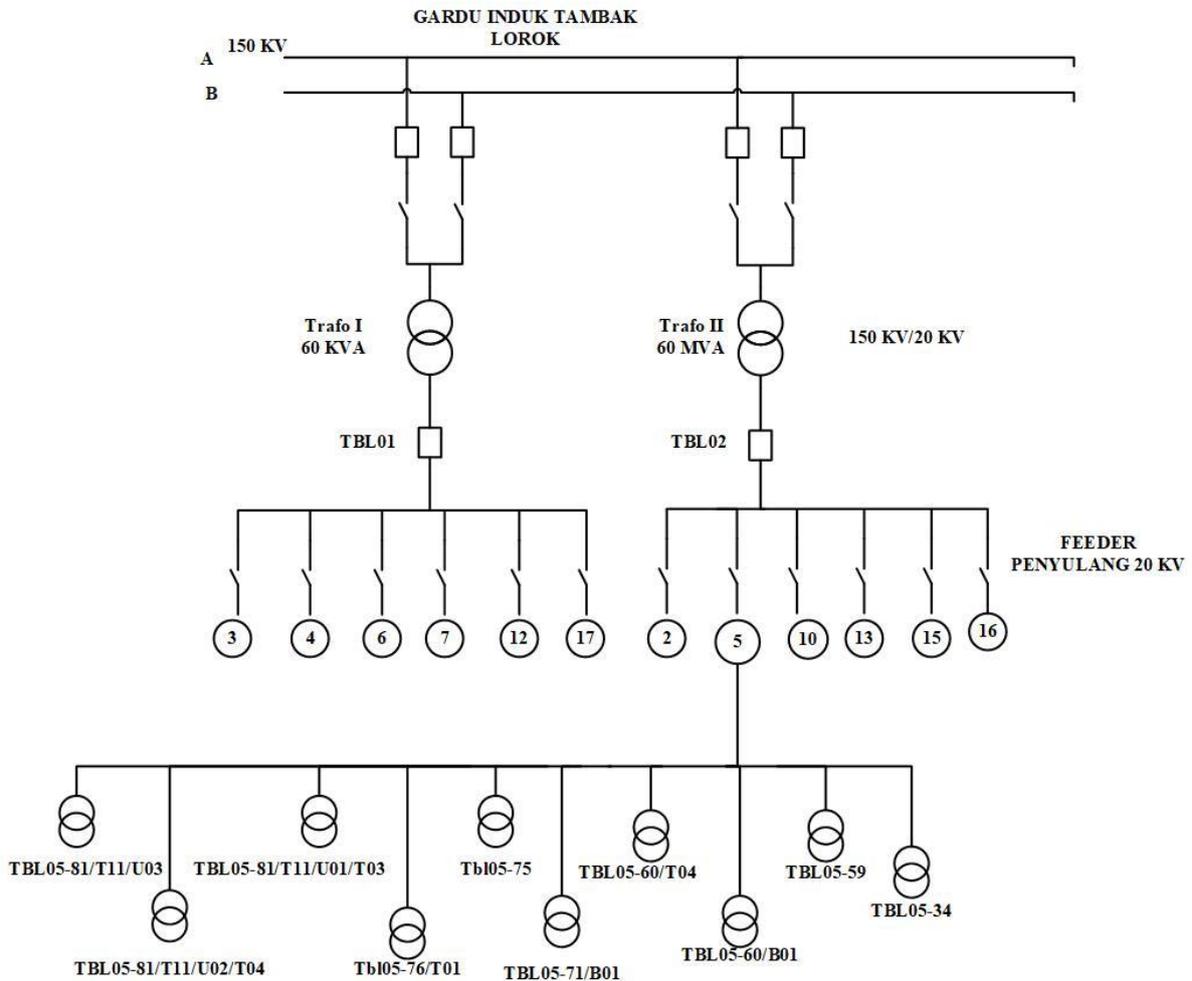
Penelitian tentang “Pemeriksaan Beban Trafo pada PT. PLN (PERSERO) UP3 SEMARANG, peneliti menggunakan jenis metode kuantitatif dan subjektif. Kuantitatif adalah pengumpulan informasi berdasarkan perkiraan internal yang dilakukan dalam pertanyaan ini tentang dari mana asal estimasi tersebut diselesaikan dalam bingkai numerik, sedangkan penyelidikan semacam ini tentang subjektif adalah melakukan penyelidikan berdasarkan informasi estimasi kuantitatif.

Ada beberapa tahapan dalam penelitian ini, yaitu:

1. Melakukan survei lokasi dengan pergi ke PT. PLN (PERSERO) UP3 SEMARANG.
2. Menentukan diagram satu garis yang menunjukkan *feeder* 5 pada gardu induk Tambak Lorok mengalirkan arus ke trafo TBL05-34 di Ronggowarsito.
3. Melakukan pengambilan data beban trafo di antaranya berupa data arus, data tegangan, data tahanan netral. Juga data dari merk trafo ,daya trafo, dan ukuran beban
4. Melakukan pengolahan data dan perhitungan di antaranya yakni pembebanan trafo, ketidakseimbangan beban dan rugi daya akibat arus netral, lalu ditampilkan dalam tabel dan grafik
5. Kemudian melakukan analisa dan pembahasan, lalu disimpulkan pada bagian akhir.

Persiapan penelitian awal meliputi mencari bahan objek dan beberapa referensi pendukung mengenai materi yang akan dibahas. Referensi dapat diperoleh dari buku-buku dan jurnal harian penelitian yang ada maupun berbeda dengan buku-buku sebelumnya. Langkah ini penting untuk menegaskan untuk menyelidiki

bahwa pokok bahasan yang diangkat benar-benar mempunyai premis dan dikuatkan dari berbagai sumber. Langkah selanjutnya, setelah referensi terkumpul, dapat dilanjutkan dengan melihat dan mengumpulkan informasi di lapangan. Jenis informasi yang dituju merupakan informasi yang nantinya akan dilakukan analisis dan perhitungan dalam penelitian. Informasi ini diperoleh dari PLN UP 3 SEMARANG yang sudah bersedia meminta bantuan penawaran untuk dijadikan pertimbangan lokasi sebagai tempat penelitian. Diagram *single line* dari Gardu Induk Tambak Lorok ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Diagram *single line* dari Gardu Induk Tambak Lorok

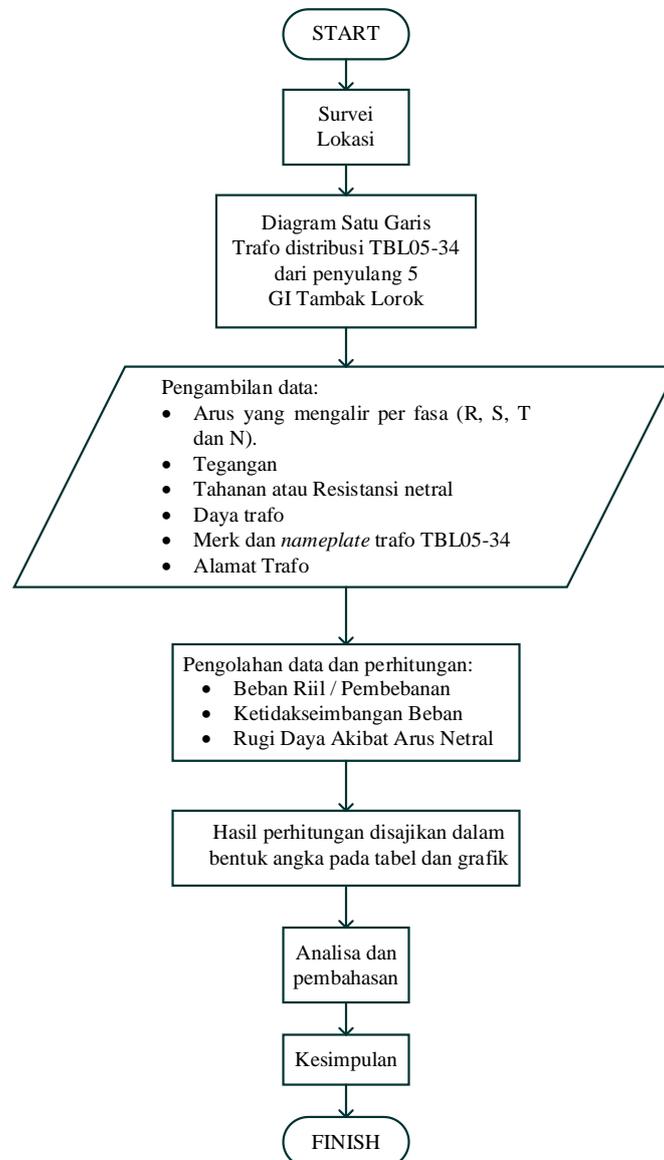
Daerah titik trafo yang dijadikan tempat penelitian di wilayah Ronggowarsito yakni trafo TBL05-34 yang mana disuplai dari penyulang 5 GI Tambak Lorok yang mana dipilih area tersebut dikarenakan adanya identifikasi ketidakseimbangan beban pada transformator. Gambar 2 menunjukkan transformator distribusi 200 kVA di Ronggowarsito.



Gambar 2. Transformator distribusi 200 kVA di Ronggowarsito

Berdasarkan diagram *single line* penyulang disuplai dari Gardu Induk (GI) Tambak Lorok, lalu tersedia ada 12 jumlah *feeder* penyulang 20 KV dan kemudian yang mengalirkan arus menuju ke titik penelitian yaitu di wilayah Ronggowarsito yakni dari penyulang 5. Di penyulang 5 ini ada beberapa trafo

distribusi yang mengalirkan arus ke beberapa wilayah. Untuk penelitian yang dipilih dengan memilih salah satu titik transformator yakni di daerah Ronggowarsito dengan nomor tiang TBL05-34 mengenai ketidakseimbangan beban antar fasa transformator. Adapun gambar mengenai diagram alir penelitian dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 3. Diagram alir penelitian

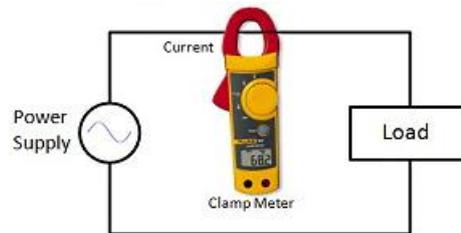
2.1 Pengambilan Sampel Data

Pengukuran tegangan dan beban pada trafo idealnya dilakukan secara berkala sesuai dengan kebutuhan dan praktik terbaik dalam pemeliharaan peralatan listrik. Pengukuran beban trafo bisa dilakukan seminggu sekali, terutama jika trafo tersebut digunakan dalam operasi yang kritis atau jika ada kebutuhan khusus untuk memantau kinerjanya secara rutin, tergantung pada kebijakan dan kebutuhan perusahaan atau organisasi yang mengoperasikan trafo tersebut. Hal ini bertujuan untuk memantau kinerja trafo, mendeteksi potensi masalah atau ketidakseimbangan beban, serta mencegah kerusakan yang lebih besar. Pengukuran beban secara teratur membantu dalam menjaga kinerja trafo dan mencegah potensi masalah yang lebih besar.

Pengukuran pembebanan transformator yang dilakukan pada penelitian ini diambil datanya dari PT. PLN UP 3 Semarang yakni berupa data tegangan dan beban listrik yang dilakukan pengukuran oleh petugas setiap satu tahun sekali pada waktu siang dan malam. Pengukuran dilakukan hanya sekali saja dikarenakan PLN itu memiliki banyak trafo sekitar berjumlah ribuan sehingga banyaknya trafo yang harus diukur, tidak sempat jika diukur secara rutin baik harian/mingguan. Penelitian ini diambil data untuk pembebanan transformator dengan merekap data selama 3 tahun terakhir dari tahun 2020 sampai 2023. Di tahun 2022 tidak ada data pembebanan pada trafo TBL05-34 dikarenakan mungkin terlewat oleh petugas sehingga tidak terukur.

2.1.1 Data Arus Beban dan Tegangan

Pengukuran arus beban pada trafo yang dilakukan oleh petugas PLN biasanya dilakukan dengan menggunakan alat pengukur listrik yang dapat dipasang pada salah satu kabel penghantar yang membawa arus listrik yang keluar dari trafo 3 fasa yakni bagian R, S, T, dan N [5]. Lalu tegangan yang terdapat pada trafo ini adalah tegangan yang dialirkan pada setiap fasanya dan tegangan kerja yang terdapat pada trafo tersebut. Pengukuran ini dapat dilakukan dengan menggunakan alat seperti tang ampere (*clamp meter*) atau alat pengukur arus yang terintegrasi pada multimeter. Biasanya ini adalah kabel *output* yang membawa arus listrik dari trafo ke beban atau sistem listrik lainnya. Juga alat pengukur ini sudah dikalibrasi dengan benar. Lalu dibaca nilai arus yang ditunjukkan oleh alat pengukur arus. Nilai ini merupakan arus beban yang sedang dialirkan oleh trafo pada saat pengukuran dilakukan. *Clamp Meter* juga bisa digunakan untuk mengukur nilai tahanan, tegangan AC, tegangan DC, dan lain sebagainya karena memiliki dua *probe*. Penelitian ini untuk pengukuran beban dilakukan setahun sekali pada waktu siang dan malam. Gambar 4 menunjukkan alat pengukuran arus menggunakan *Clamp Meter*.



Gambar 4. Alat pengukuran arus

Adapun hasil tabulasi arus beban dan tegangan pada transformator rekapan data selama 3 tahun yang dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Tabulasi Arus beban dan Tegangan

Tahun	waktu ukur	Tanggal & Jam	R (A)	S (A)	T (A)	N (A)	$V_{LN}(V)$
2023	siang (09:00:00)	01 Mei 2023	184	177	129	35,8	231
	malam (17:00:00)	08 Mei 2023	277	234	198	28,7	231
2022	siang (9.00.00)	18 November 2022	127	150	78,7	7,8	236
	malam (17:00:00)	25 November 2022	211	246	153	13,4	236
2020 (II)	siang (08:19:19)	30 November 2020	192	168	200	-	226
	malam (17:35:59)	30 November 2020	217	160	203	-	227
2020 (I)	siang (08:46:36)	07 May 2020	236	197	196	-	229
	malam (17:39:01)	07 May 2020	270	255	242	-	227

2.1.2 Data Resistansi Netral Trafo

Tahanan netral pada trafo mengacu pada resistansi listrik antara titik netral pada trafo dan tanah (*ground*). Netral pada trafo adalah titik tengah dari gulungan trafo yang terhubung ke tanah atau sistem *grounding*. Mengukur tahanan netral trafo penting untuk memastikan bahwa koneksi netral terhubung dengan baik dan tidak mengalami resistansi berlebihan. Tahanan netral yang tinggi dapat mengindikasikan masalah pada sambungan atau isolasi dalam trafo, yang dapat menyebabkan kegagalan atau gangguan dalam sistem listrik [6].

Tahanan netral trafo bisa diukur menggunakan ohmmeter atau multimeter yang dilengkapi dengan mode pengukuran resistansi. Harus dipastikan trafo keadaan mati atau trafo tidak dalam keadaan terhubung dengan sumber daya listrik dan mematikan daya suplai ke trafo. Ini sangat penting untuk menghindari cedera atau kerusakan pada alat dan perlengkapan. Lalu menghubungkan *probe* (ujung alat pengukur) dari ohmmeter atau multimeter ke terminal netral trafo. Biasanya, terminal netral trafo dapat ditemukan pada kumparan netral. Nilai tahanan akan dinyatakan dalam satuan ohm (Ω). Hasil pengukuran tahanan netral trafo akan memberikan informasi tentang kondisi netral trafo. Tahanan netral yang stabil dalam rentang tertentu adalah tanda bahwa netral trafo berfungsi dengan baik. Nilai tahanan yang tinggi atau fluktuasi tahanan yang besar mungkin menandakan masalah pada sambungan atau isolasi dalam trafo [7].

Ukuran kawat untuk penghantar netral trafo yang digunakan oleh PLN adalah 50 mm² dengan $R = 0,6842 \Omega / \text{km}$, untuk kawat penghantar fasanya adalah 70 mm² dengan $R = 0,5049 \Omega / \text{km}$. Sedangkan panjang kawat penghantar netral trafo untuk jaringan tegangan rendah diasumsikan 1 km. Dengan demikian, $R_N = 0,6842 \Omega$.

2.2 Analisa Data

Informasi data pembebanan trafo 3 fasa yang telah diperoleh terkini setiap fasa (R, S, T dan N). Variabel daya trafo dan tegangan antar fasa bisa digunakan untuk menghitung arus beban total pada transformator. Sedangkan variabel arus setiap fasa (R,S,T) ini diperlukan untuk menentukan besarnya nilai arus rata-rata pada trafo, setelah itu dilakukan perbandingan antara nilai arus rata-rata dengan arus beban total untuk memperoleh nilai beban riil trafo yang sudah digunakan oleh pelanggan [8].

Pengukuran nilai ketidakseimbangan beban menggunakan variabel arus beban R,S,T dengan cara menentukan nilai koefisien masing-masing fasa yakni perbandingan antara arus per fasa dengan nilai arus rata-rata maka akan didapatkan nilai koefisien jika beban seimbang harusnya masing-masing fasa nilai koefisien bernilai satu, setelah itu bisa dihitung persentase ketidakseimbangan bebannya. bisa digunakan untuk menentukan besarnya nilai ketidakseimbangan beban transformator [9].

Akibat ketidakseimbangan beban maka muncul arus netral maka dengan variabel arus fasa N dan juga tahanan netral ($R_N = 0,6842 \Omega$) digunakan untuk menghitung jumlah potensi rugi daya akibat adanya arus netral yang terjadi pada penghantar transformator. Lalu bisa dihitung persentase rugi daya dengan menggunakan perbandingan antara rugi daya netral dan daya aktif pada trafo [10].

2.2.1 Analisis Beban Riil / Beban Puncak

Pemeriksaan muatan trafo dilakukan dengan menghitung muatan penuh trafo terlebih dahulu, lalu untuk mengetahui arus total, setelah diperoleh baru didapatkan persamaan untuk menghitung arus rata-rata.

Setelah arus rata-rata diketahui, seterusnya perbandingan arus rata-rata dan arus total dikali 100 % untuk mengetahui berapa persen pembebanan yang terdapat pada trafo distribusi TBL05-34 di waktu siang dan malam. Perhitungan beban trafo penting untuk memastikan bahwa transformator beroperasi di dalam batas kapasitasnya, memastikan apakah kondisi trafo keadaan *overload* atau tidak, dan menjaga kestabilan sistem daya. Pemahaman tentang jenis beban, daya aktif, reaktif, dan faktor daya membantu dalam merencanakan dan mengelola transformator dengan efisien [11].

Ditinjau dari tegangan tinggi, daya transformator dapat dituliskan sebagaimana Persamaan (1).

$$S = \sqrt{3}V_{LL}.I \quad (1)$$

Di mana:

$$\begin{aligned} S &= \text{daya trafo (kVA)} \\ V_{LL} &= \text{tegangan fasa-fasa (kV)} \\ I &= \text{arus jala-jala (A)} \end{aligned}$$

Penghitungan nilai persentase pembebanan pada transformator menggunakan Persamaan (2).

$$\%b = \frac{I_{rata-rata}}{I_{FL}} \times 100 \% \quad (2)$$

Di mana:

$$\begin{aligned} \%b &= \text{persentase pembebanan pada trafo (\%)} \\ I_{rata-rata} &= \text{arus rata-rata pada ketiga fasa (A)} \\ I_{FL} &= \text{arus beban ketika penuh (A)} \end{aligned}$$

2.2.2 Analisis Ketidakseimbangan Beban Pada Transformator

Untuk menganalisis ketidakseimbangan beban trafo pada saat siang dan malam hari. Melihat besar persentase ketidakseimbangan beban pada waktu siang atau malam hari. Lalu dari ketidakseimbangan beban yang diperoleh apakah sudah sesuai dengan standar mengenai ketidakseimbangan. Analisis ketidakseimbangan beban pada transformator penting untuk memastikan operasi yang stabil, mencegah kerusakan, dan menjaga efisiensi transformator. Jika terdeteksi ketidakseimbangan beban yang signifikan, tindakan perbaikan atau penyesuaian konfigurasi sistem mungkin diperlukan [12].

Menghitung berapa besar tidak seimbangnnya beban menggunakan Persamaan (3).

$$\begin{aligned} I_R &= a.I \\ I_S &= b.I \\ I_T &= c.I \end{aligned} \quad (3)$$

Dengan:

$$\begin{aligned} I &= \text{arus rata-rata} \\ I_R &= \text{arus di fasa R} \\ I_S &= \text{arus di fasa S} \\ I_T &= \text{arus di fasa T} \\ a, b, c &= \text{koefisien per fasa} \end{aligned}$$

Pemanfaatan koefisien penyesuaian beban, untuk lebih spesifik $a = b = c = 1$, maka arus normal adalah arus tahap dalam keadaan disesuaikan menggunakan Persamaan (4).

$$\%I = \frac{|a-1|+|b-1|+|c-1|}{3} \times 100 \% \quad (4)$$

Di mana:

- $\%I$ = persentase ketidakseimbangan beban
- a = koefisien nilai fasa R
- b = koefisien nilai fasa S
- c = koefisien nilai fasa T

2.2.3 Analisis Rugi Daya Akibat Arus Netral

Dekatnya aliran arus di dalam transformator netral menyebabkan kerugian daya. Setelah jumlah kemalangan netral diketahui, lalu kerugian daya dapat dihitung dengan membandingkan kerugian daya dengan daya transformator. Pemeriksaan rugi daya pada transformator penting untuk memastikan efisiensi operasional dan mencegah peningkatan suhu yang dapat merusak transformator. Dengan pemahaman yang baik tentang sumber-sumber rugi daya, operator dapat mengambil tindakan pencegahan yang tepat [13]. Rugi akibat netral trafo ini dapat menggunakan Persamaan (5).

$$P_N = I_N^2 R_N \quad (5)$$

Di mana:

- P_N = rugi netral penghantar trafo (watt)
- I_N = arus netral trafo (A)
- R_N = resistansi netral penghantar trafo (ohm)

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Hasil Penelitian

Untuk menganalisis data yang telah diperoleh dari PT. PLN (Persero) UP3 Semarang, maka dilakukan perhitungan manual karena persamaan matematis yang digunakan hanya persamaan biasa yang bisa diselesaikan dengan cara manual tanpa menggunakan metode tertentu. Untuk trafo distribusi yang dipilih yakni di wilayah Jl. Ronggowarsito yang disuplai dari penyulang 5 area Semarang Tengah. Tempat tersebut dipilih karena terlihat terjadi diidentifikasi ada ketidakseimbangan beban yang terjadi di masing-masing fasa, hal ini ditunjukkan adanya arus netral pada penghantar trafo. Ketidakseimbangan beban pada trafo distribusi di area Semarang Tengah khususnya wilayah Jl. Ronggowarsito dan juga untuk mengecek apakah keadaan trafo *overload* atau tidak, semisal terjadi *overload* pada trafo ini mengakibatkan sering terjadi peningkatan drop tegangan dan juga menyebabkan ketidakstabilan pada sistem distribusi. Pemakaian listrik lebih banyak terjadi malam hari dibandingkan siang hari. Data mengenai pengukuran beban trafo diperoleh dari PT. PLN (Persero) UP3 Semarang.

Merek trafo : TRAFINDO
 $S = 200 \text{ kVA} = 200.000 \text{ VA}$
 Tegangan Primer L-L (kV) = 20 kV
 Tegangan Sekunder L-L (V) = 400 V
 Tipe belitan trafo : NYNY0
 Fasa : 3 Fasa
 Cara Pendinginan Trafo : Onan
 Penyulang : TBL05
 Nomor tiang : TBL05-34
 ULP : Semarang Tengah
 Alamat Trafo : Jl. Ronggowarsito
 $\text{Cos } \phi : 0,85$
 Impedansi : 4 %

Untuk ukuran dari kawat penghantar netral trafo yang digunakan oleh PLN adalah 50 mm^2 dengan $R = 0,6842 \Omega / \text{km}$, untuk kawat penghantar fasanya adalah 70 mm^2 dengan $R = 0,5049 \Omega / \text{km}$. Hasil pengukuran parameter trafo dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Pengukuran Trafo

Tahun	Waktu Ukur	Tanggal & Jam	I_R (A)	I_S (A)	I_T (A)	I_N (A)	V_{LN} (V)
2023	siang (09:00:00)	01 Mei 2023	184	177	129	35,8	231
	malam (17:00:00)	08 Mei 2023	277	234	198	28,7	231
2022	siang (9.00.00)	18 November 2022	127	150	78,7	7,8	236
	malam (17:00:00)	25 November 2022	211	246	153	13,4	236
2020(II)	siang (08:19:19)	30 November 2020	192	168	200	-	226
	malam (17:35:59)	30 November 2020	217	160	203	-	227
2020(I)	siang (08:46:36)	07 May 2020	236	197	196	-	229
	malam (17:39:01)	07 May 2020	270	255	242	-	227

3.2 Analisis Beban Puncak

Dalam analisis beban ini perlu diketahui terlebih dahulu arus beban penuh dengan melakukan rekap data yang tersedia dan menggunakan persamaan (1) sebagai berikut.

$$S = 200 \text{ kVA}$$

$$V_{LL} = 0,4 \text{ kV fasa - fasa}$$

$$I_{FL} = \frac{S}{\sqrt{3}V_{LL}}$$

$$I_{FL} = \frac{200.000}{\sqrt{3} \times 400} = 288,68 \text{ A}$$

Perhitungan Arus Beban Tahun 2023

Perhitungan beban rata-rata bisa menggunakan sebagai berikut:

$$I_{rata-rata \text{ siang}} = \frac{I_R + I_S + I_T}{3} = \frac{184 + 177 + 129}{3} = 163,33 \text{ A}$$

$$I_{rata-rata \text{ malam}} = \frac{I_R + I_S + I_T}{3} = \frac{277 + 234 + 198}{3} = 236,33 \text{ A}$$

Menghitung persentase beban dengan menggunakan Persamaan (2) yakni:

a. Beban pada Siang Hari

$$\%I = \frac{I_{rata-rata \text{ siang}}}{I_F} \times 100 \% = \frac{163,33}{288,68} \times 100 \% = 56,58 \%$$

b. Beban pada Malam Hari

$$\%I = \frac{I_{rata-rata \text{ malam}}}{I_F} \times 100 \% = \frac{236,33}{288,68} \times 100 \% = 81,87 \%$$

Cara lain menghitung persentase beban bisa dengan menentukan daya beban sebagai berikut:

$$S = \sqrt{3}V_{LL} \cdot I_{FL}$$

Perhitungan Daya Beban Tahun 2023

a. Pada Siang Hari

$$\begin{aligned} S_{out} &= \sqrt{3}V_{LL} \cdot I_{FL} / 1000 \\ &= 3.400 \cdot \frac{163,3}{1000} \\ &= 113,16 \text{ kVA} \end{aligned}$$

Penentuan beban harian:

$$\begin{aligned} \%S &= \frac{S_{out}}{S_{in}} \times 100 \% \\ &= \frac{113,16 \text{ KVA}}{200 \text{ KVA}} \times 100 \% \\ &= 56,58 \% \end{aligned}$$

b. Pada Malam Hari

$$\begin{aligned} S_{out} &= \sqrt{3}V_{LL} \cdot I_{FL} / 1000 \\ &= \sqrt{3} \cdot 400 \cdot 236,3 / 1000 \\ &= 163,73 \text{ kVA} \end{aligned}$$

Penentuan beban harian :

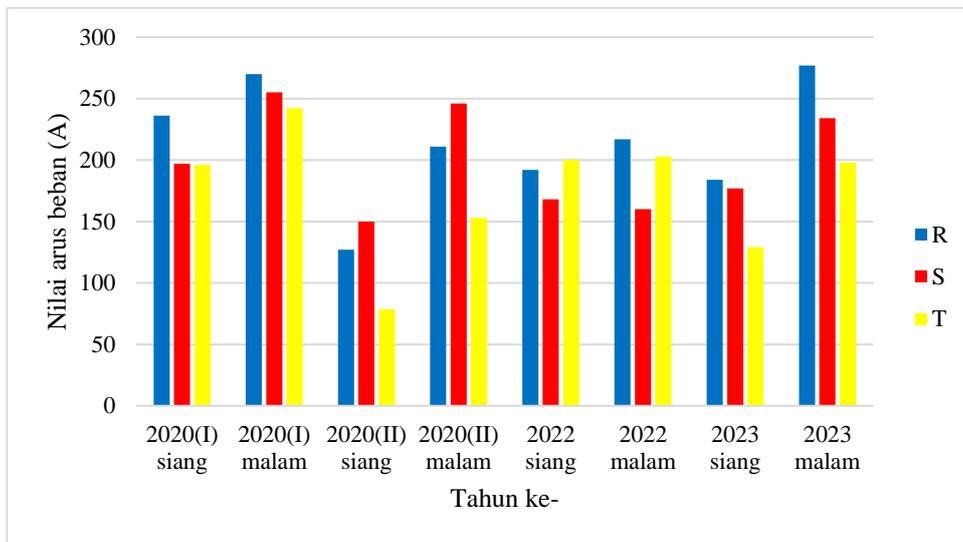
$$\begin{aligned} \%S &= \frac{S_{out}}{S_{in}} \times 100 \% \\ &= \frac{163,73 \text{ KVA}}{200 \text{ KVA}} \times 100 \% \\ &= 81,87 \% \end{aligned}$$

Hasil dari perhitungan beban puncak transformator yang diperoleh dapat dilihat pada Tabel 3.

Tabel 3. Beban Puncak

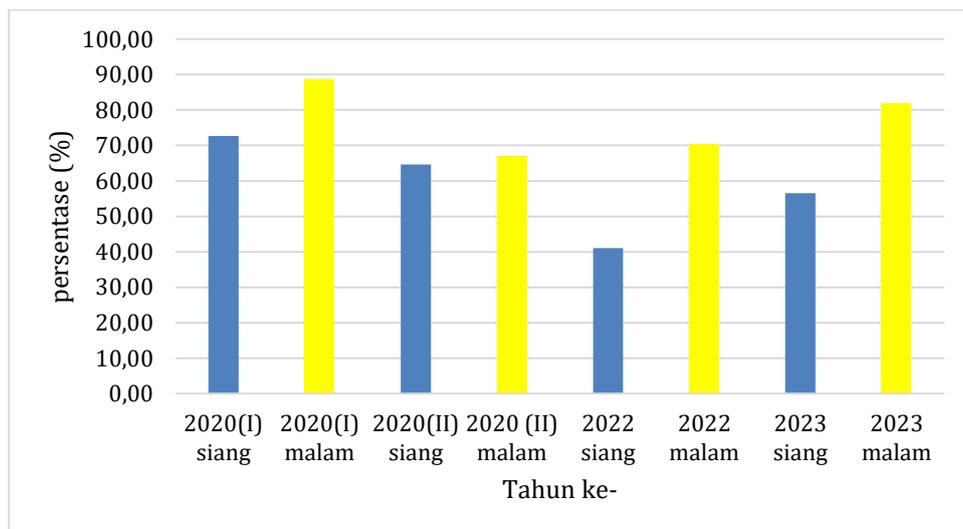
Tahun	I_R (A)	I_S (A)	I_T (A)	Arus rata-rata (A)	S_{Out} (kVA)	Persentase (%)
2023	184	177	129	163,333	113,16	56,58
	67,7	72,1	63,8	236,333	163,73	81,87
2022	127	150	78,7	118,567	82,14	41,07
	211	246	153	203,333	140,87	70,44
2020 Gel. II	192	168	200	186,667	129,32	64,66
	217	160	203	193,333	133,94	66,97
2020 Gel. I	236	197	196	209,7	145,26	72,63
	270	255	242	255,7	177,13	88,56

Perbedaan nilai arus per fasa pada grafik arus beban bisa ditunjukkan pada Gambar 5.



Gambar 5. Grafik arus beban per fasa

Hasil rekapan data persentase beban trafo pada waktu siang dan malam bisa dilihat pada Gambar 6.



Gambar 6. Rekap data persentase beban trafo siang dan malam

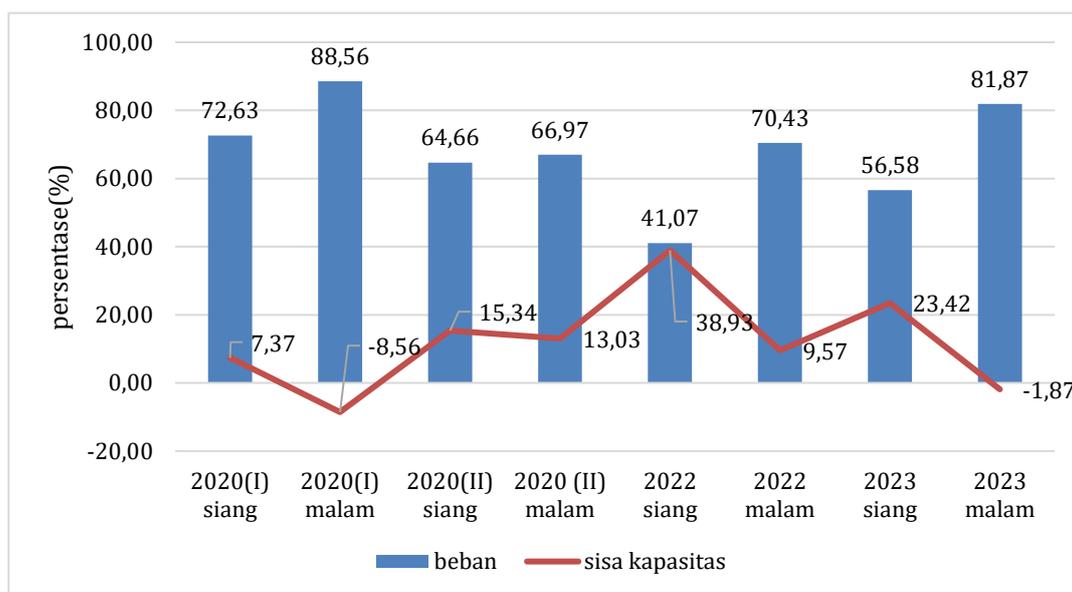
Dari tabel dan grafik di atas menggambarkan bahwa arus yang melewati pada fasa R, S dan T nilainya beda, pada saat siang juga malam hari. Dilihat data bisa dibayangkan bilamana muatan beban trafo dalam kondisi yang tidak seimbang dan beban puncak lebih besar terjadi pada malam hari. Puncak beban dari 2020 - 2023 bernilai sekitar 40 % - 80 %, beban terbesar terjadi pada malam hari di tahun 2023 dan 2020 di Gel. I sudah

melebihi dari 80 %. Lalu beban puncak terkecil terjadi siang hari sekitar 41 %. Diperoleh hasil di tahun 2023 menggambarkan yang mana muatan puncak (WBP = Waktu Beban Puncak) persentase pembebanan cukup tinggi yaitu terjadi pada malam hari yaitu 81,87 %, sedangkan siang hari 56,58 %. Lalu tahun 2022 persentase pembebanan cukup tinggi yaitu terjadi pada malam hari yaitu 70,44 %, sedangkan siang hari pembebanan minimum >40 %. Tahun 2020 Gel. II pembebanan yang hampir sama sedikit selisih antara siang dan malam yakni 64,66 % dan 66,97 %. Di tahun 2020 Gel. I persentase pembebanan yang tinggi pada siang hari 72,63 %, sedangkan malam hari pembebanannya sudah >80 % yaitu bernilai 88,56 %. Kapasitas beban trafo setelah penggunaan beban oleh konsumen dapat dilihat pada Tabel 4.

Tabel 4. Kapasitas Beban Trafo

Tahun	Beban Riil (kVA)	Beban (%)	Sisa Kapasitas (%)	Keterangan
2023	113,16	56,57866667	23,42133333	Siang
	163,73	81,86586667	1,86586667	Malam
2022	82,14	41,07149333	38,92850667	Siang
	140,87	70,43466667	9,56533333	Malam
2020 Gel. II	129,32	64,66133333	15,33866667	Siang
	133,94	66,97066667	13,02933333	Malam
2020 Gel. I	145,26	72,62853333	7,37146667	Siang
	177,13	88,56293333	8,56293333	Malam

Hasil dari perhitungan kapasitas pembebanan dan sisa kapasitas pada trafo yang masih tersedia dapat dilihat pada Gambar 7.



Gambar 7. Kapasitas Beban Trafo

Bisa dilihat dari tabel dan grafik di atas menunjukkan bahwa arus yang mengalir di fasa R, S dan T berbeda, baik saat siang hari dan malam hari. Berdasarkan data dapat dikatakan bahwa beban trafo dalam keadaan tidak seimbang dan beban puncak lebih besar terjadi pada malam hari. Untuk pembebanan trafo yang baik itu nilainya berkisar antara 40 % - 80 %. Hal ini menyesuaikan dengan SPLN No.17 Tahun 1979 bahwa trafo baiknya tidak dibebani lebih dari 80 % dan bebannya juga tidak boleh <40 % (*underloaded*) [14].

Dari tabel dan gambar di atas terlihat bahwa perhitungan beban pada trafo ketika siang dan malam hari dari tahun 2023 hingga 2020 terlihat sudah banyak beban hampir mencapai *overload* dari kapasitas trafo. Penggunaan daya lebih banyak di malam hari karena pemakaian beban terbanyak oleh orang-orang adalah di waktu tersebut. Dari Tabel 3 kapasitas beban pada trafo tahun 2022 dengan kapasitas beban maksimum 70,4 % sudah hampir mendekati 80 % dari kapasitas beban trafo distribusi tiga fasa. Beban maksimum trafo tahun 2020 gel. I sudah mencapai 72,63 % hampir mendekati 80 %, dan pada trafo tahun 2023 saat malam mencapai 81,63 % sudah melebihi 80 %, hal ini sudah melebihi peraturan manajemen PT.PLN karena pada peraturan sendiri pembebanan trafo distribusi adalah 80 %. Apabila trafo digunakan terus menerus dan bisa mengalami kondisi *overload*, maka akan mengalami peningkatan pada suhu dan panas transformator bertambah. Pada hasil

perhitungan untuk menentukan beban yang sudah terpakai dari kapasitas trafo distribusi terjadi kelebihan beban pada trafo pada tahun 2023 saat malam dengan 81,86 %, sudah lebih 1,86 %. Sedangkan peraturan PLN adalah 80 %. Dari sisa kapasitas yang masih bisa digunakan , pada tahun 2020 gel. I yang bebannya melebihi peraturan dari PLN yaitu 80 % memiliki persentase beban 88,56 %. Sedangkan hasil dari perhitungan ini terdapat kelebihan beban 8,56 % pada tahun tersebut. Perbedaan hasil pembebanan trafo ini dibanding dengan penelitian sebelumnya yang pernah ada, jika penelitian saat ini menggunakan rekapan data trafo selama 3 tahun terakhir. Sedangkan penelitian sebelumnya hanya melakukan pengukuran dengan menggunakan satu waktu saja.

3.3 Analisis Ketidakseimbangan Beban dan Rugi-rugi Daya

3.3.1 Analisis Ketidakseimbangan Beban

Dari data di atas dapat dilihat bahwa beban dalam keadaan tidak seimbang. Besar ketidakseimbangan beban yang terjadi dapat diketahui dengan menggunakan Persamaan (3).

$$I_R = a. \text{ I jadi } a = I_R / I_{rata-rata}$$

$$I_S = b. \text{ I jadi } b = I_S / I_{rata-rata}$$

$$I_T = c. \text{ I jadi } c = I_T / I_{rata-rata}$$

a. Ketidakseimbangan Beban Siang Hari

$$a = \frac{I_R}{I_{rata-rata}} = \frac{184}{163,33} = 1,13$$

$$b = \frac{I_S}{I_{rata-rata}} = \frac{177}{163,33} = 1,084$$

$$c = \frac{I_T}{I_{rata-rata}} = \frac{129}{163,33} = 0,79$$

Untuk menentukan persentase ketidakseimbangan beban menggunakan Persamaan (4) yakni:

$$\begin{aligned} \%I &= \frac{|a-1|+|b-1|+|c-1|}{3} \times 100 \% \\ &= \frac{|1,13-1|+|1,084-1|+|0,79-1|}{3} \times 100 \% = 7,28 \% \end{aligned}$$

b. Ketidakseimbangan Beban Malam Hari

$$a = \frac{I_R}{I_{rata-rata}} = \frac{277}{236,33} = 1,17$$

$$b = \frac{I_S}{I_{rata-rata}} = \frac{234}{236,33} = 0,99$$

$$c = \frac{I_T}{I_{rata-rata}} = \frac{198}{236,33} = 0,84$$

Jadi persentase ketidakseimbangan beban adalah:

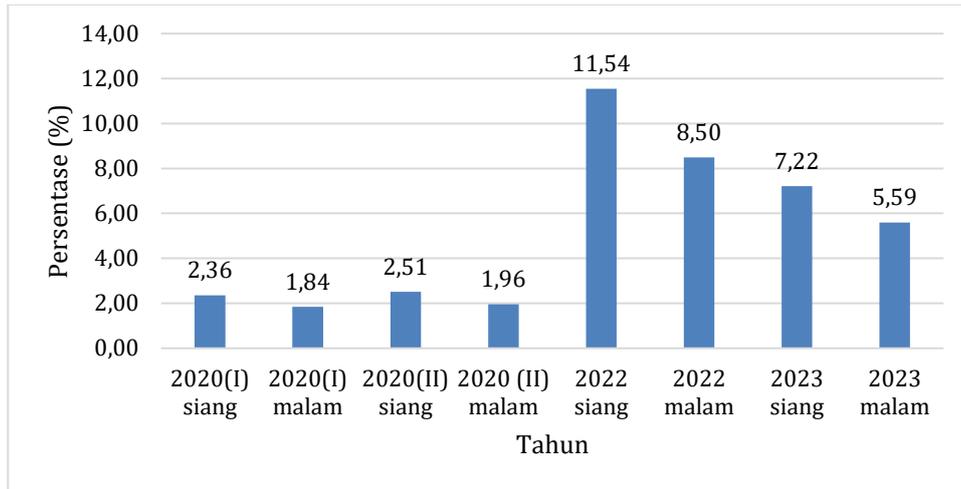
$$\begin{aligned} \%I &= \frac{|a-1|+|b-1|+|c-1|}{3} \times 100 \% \\ &= \frac{|1,17-1|+|0,99-1|+|0,84-1|}{3} \times 100 \% = 5,59 \% \end{aligned}$$

Hasil perhitungan ketidakseimbangan beban untuk lebih jelasnya dapat ditampilkan pada Tabel 5.

Tabel 5. Ketidakseimbangan Beban

Tahun	a (Fasa R)	b (Fasa S)	c (Fasa T)	I_n (A)	Persentase (%)
2023	1,127	1,084	0,790	35,8	7,21700680
	1,172	0,990	0,838	28,7	5,58862247
2022	1,071	1,265	0,664	7,8	11,54418517
	1,038	1,210	0,752	13,4	8,49890710
2020 Gel. II	1,029	0,900	1,071	-	2,50952381
	1,122	0,828	1,050	-	1,96149425
2020 Gel. I	1,126	0,940	0,935	-	2,35877054
	1,056	0,997	0,947	-	1,84050413

Nilai persentase ketidakseimbangan beban transformator ditunjukkan pada Gambar 8.



Gambar 8. Persentase ketidakseimbangan beban

Dari perhitungan di atas mengenai ketidakseimbangan beban dari tahun 2020-2023, terlihat saat siang hari maupun malam hari, pada tahun 2023 terjadi ketidakseimbangan beban 7,22 %, saat malam hari sebesar 5,59 %. Sedangkan dari SPLN No. 17 tahun 2014 dikategorikan baik jika nilai ketidakseimbangan beban transformator <10 % [10]. Menurut standar IEEE 446-1995 di mana untuk standar ketidakseimbangan beban nilai persentase 5 % sampai 20 % apabila nilai persentase ketidakseimbangan beban melebihi dari 20 % maka tidak sesuai dengan standar. Perbedaan dari penelitian yang sebelumnya adalah pada penelitian ini menghitung besar ketidakseimbangan beban, sedangkan penelitian sebelumnya cuman membahas besar pembebanan trafo.

Berdasar tabel 4 melihat rata-rata tidak seimbangnnya beban di trafo dari tahun 2022 - 2023. Rata-rata persentase ketidakseimbangan beban bernilai <10 %. Pada tahun 2020 ketidakseimbangan beban sangat kecil karena persentasenya rata-rata <5 %. Terjadi ketidakseimbangan beban yang besar bilamana nilai koefisien per fasanya jauh di bawah 1 seperti 0,6 maka persentase ketidakseimbangan akan tinggi yakni 11,54 %. Beda halnya dengan nilai koefisien per fasanya mendekati nilai 1 seperti 0,9 maka persentase ketidakseimbangan akan rendah misalnya 1,8 %. Berdasar pada batasan maksimum oleh besar tak imbang muatan yaitu 10 % sudah menyesuaikan data dari SPLN No. 17 Tahun 2014.

3.3.2 Analisis Rugi-rugi Daya

Besar rugi daya yang terjadi pada trafo ini akibat arus yang mengalir di netral trafo adalah terlebih dahulu mengetahui daya trafo sebagai berikut.

Daya aktif bisa dihitung menggunakan Persamaan (17) sebagai berikut:

$$\begin{aligned}\cos \theta &= \frac{P}{S} \\ P_{3\phi} &= S_{3\phi} \cdot \cos \varphi \\ &= 200 \cdot 0,85 \\ &= 170 \text{ KW}\end{aligned}$$

a. Pada Siang Hari

Rugi-rugi pada penghantar netral trafo bisa dihitung menggunakan Persamaan (5) sebagai berikut:

$$\begin{aligned}P_N &= I_N^2 R_N \\ P_N &= (35,8)^2 \cdot 0,6842 \\ &= 876,9 \text{ watt} \\ &= 0,877 \text{ kW}\end{aligned}$$

Jadi persentase rugi-rugi daya akibat daya yang mengalir di netral trafo sebagai berikut:

$$\begin{aligned}\%P_N &= \frac{P_N}{P} \times 100 \% \\ &= \frac{0,877 \text{ kW}}{170 \text{ kW}} \times 100 \% = 0,516 \%\end{aligned}$$

b. Pada Malam Hari

$$\begin{aligned}P_N &= I_N^2 R_N \\ &= (28,7)^2 \cdot 0,6842 \\ &= 563,6 \text{ watt} \\ &= 0,564 \text{ kW}\end{aligned}$$

Jadi persentase rugi daya pada malam hari adalah:

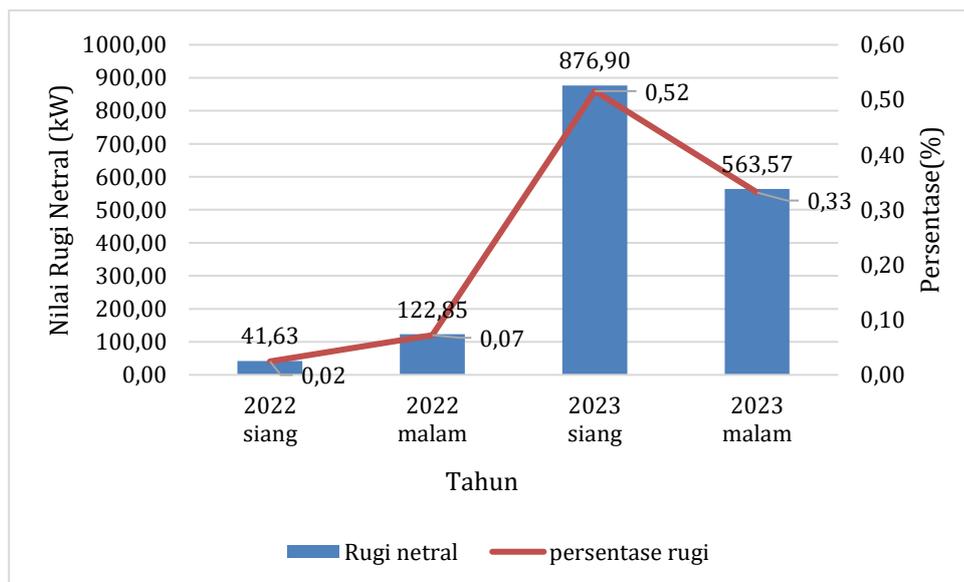
$$\%P_N = \frac{P_N}{P} \times 100 \% = \frac{0,564 \text{ kW}}{170 \text{ kW}} \times 100 \% = 0,33 \%$$

Nilai mengenai rugi daya akibat ketidakseimbangan beban menimbulkan adanya arus netral yang ditunjukkan pada Tabel 6.

Tabel 6. Rugi-rugi Daya

Tahun	Arus netral (A)	Rugi netral (KW)	Persen (%)
2023	35,8	876,8981	0,515822405
	28,7	563,5687	0,331510999
2022	7,8	41,6267	0,024486311
	13,4	122,8550	0,072267619
2020 Gel.II	-	-	-
	-	-	-
2020 Gel.I	-	-	-
	-	-	-

Pada tahun 2020 tidak dihitung nilai rugi daya dikarenakan tidak adanya arus netral pada tahun tersebut. Gambar 9 menunjukkan grafik rugi daya akibat arus netral di tahun 2022 dan 2023.



Gambar 9. Rugi daya akibat arus netral

Hasil perhitungan diperoleh rugi daya akibat arus netral di atas, dapat dilihat bahwa saat makin besar tidak seimbang beban yang terjadi, akibatnya akan makin besar rugi daya di transformator. Dengan berdasarkan SPLN No. 50 Tahun 1997 di mana rugi daya yang diizinkan dalam suatu sistem distribusi adalah sebesar 10 % [16]. Semakin besar arus netral I_N yang mengalir di penghantar netral transformator maka semakin besar juga losses yang dihasilkan Untuk tahun 2020 Gelombang II dan I tidak dihitung rugi daya yang melewati pada penghantar netral trafo disebabkan oleh tidak adanya arus netral di waktu tersebut berarti menandakan pada waktu tersebut trafo ketidakseimbangan sangat kecil 1 - 2 % sehingga arus netral nilainya mendekati nol jadi tidak terbaca di pengukuran. Akibat ketidakseimbangan beban tersebut muncullah arus di netral trafo. Arus yang mengalir di netral trafo ini menyebabkan terjadinya potensi / kemungkinan adanya losses (rugi-rugi) dikarenakan tidak ada lamanya waktu sehingga belum terjadi losses akibat adanya arus netral pada penghantar netral trafo, juga losses akibat arus netral yang mengalir ke ground.

Dari Tabel 5 dapat dilihat bahwa rugi-rugi daya terjadi pada tahun 2022 dan 2023. Di tahun 2020 persentase rugi daya tidak dihitung, hal ini terjadi dikarenakan tidak arus netral, maka tidak bisa dihitung rugi dayanya. Untuk rugi daya terbesar yakni persentase 0,5 % dengan arus netralnya 35,8 A. Sedangkan untuk rugi daya terkecil yakni persentase 0,024 % dengan arus netralnya 7,8 A. Berdasar dari penelitian sebelumnya itu

tidak menghitung besar rugi arus netral, maka pada penelitian sekarang menghitung besar rugi daya yang disebabkan oleh arus netral akibat ketidakseimbangan beban.

4. KESIMPULAN

Persentase nilai pembebanan trafo TBL05-34 pada siang hari masih normal sebesar 56,68 %, sementara itu pada malam hari 81,87 %, ini berarti sudah harus posisi siaga. Berkaitan dengan SPLN No. 17 Tahun 2014, nilai persen trafo tertinggi adalah 80 % dan nilai terkecil adalah 40 %, maka nilai persentase pembebanan trafo TBL05-34 bisa dikategorikan masih baik, meski beban saat malam >80 %. Beban seimbang berarti arus netral harus bernilai nol. Setelah dianalisis, diperoleh ketidakseimbangan beban pada siang hari 7,22 % dengan arus netral 35,8 A, sedangkan pada malam hari ketidakseimbangan beban sebesar 5,59 % dengan arus netral 28,7 A. Hal ini masih dikategorikan baik, sesuai standar IEEE std 446-1995 berkisar 5 % - 20 %. Ketidakseimbangan beban tinggi terjadi bilamana nilai koefisien per fasanya jauh di bawah 1. Namun jika nilai koefisien per fasanya mendekati nilai 1, maka persentase ketidakseimbangan akan rendah. Untuk besar nilai potensi rugi daya akibat arus netral pada saat siang hari yakni 0,877 kW dengan persentase 0,5 % dan arus netral 35,8 A. Sementara itu, pada malam hari sebesar 0,564 kW dengan persentase 0,3 % dan arus netral 28,7 A. Semakin besar arus yang melewati penghantar netral transformator, maka semakin besar kerugian daya akibat arus netral. Pada saat perencanaan pemasangan transformator distribusi agar diperhatikan dalam pembebanan agar diperoleh penyesuaian beban. Dalam keadaan mendekati seimbang, arus yang melewati netral trafo juga akan kecil. Ketidakseimbangan beban yang besar mengakibatkan arus yang mengalir pada netral transformator akan besar dan dapat mengakibatkan kerugian daya yang besar.

REFERENSI

- [1] Adi Wirajaya, I. P., Rinas, I. W. and Sukerayasa, I. W., "Studi Analisa Pengaruh Total Harmonic Distortion (THD) terhadap Rugi-Rugi, Efisiensi, dan Kapasitas Kerja Transformator pada Penyulang Kerobokan," *Jurnal SPEKTRUM*, vol. 6, no. 2, hal. 121, 2019. <https://doi.org/10.24843/SPEKTRUM.2019.v06.i02.p17>
- [2] 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, hal. 5, 2018, <https://doi.org/10.32531/jelekn.v4i1.80>
- [3] A. Abdali, K. Mazlumi, and A. Rabiee, "International Journal of Electrical Power and Energy Systems Harmonics impact on hotspot temperature increment of distribution transformers : Nonuniform magnetic-thermal approach," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 157, 2023, hal. 109826, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2024.109826>
- [4] N. Nacar and M. Cikan, "International Journal of Electrical Power and Energy Systems Reconfiguration of 123-bus unbalanced power distribution network analysis by considering minimization of current & voltage unbalanced indexes and power loss," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 157, hal. 109796, 2024, <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2024.109796>
- [5] Khoirunisa, A. A., "Analisis Pembeban Trafo Distribusi Pada Penyulang 6 PT. PLN (Persero) ULP Weleri di Desa Gebangan Kecamatan Pageruyung," *Doctoral dissertation*, Universitas Islam Sultan Agung, 2023.
- [6] R. Afrianda, S. Samsurizal, and A. A. Nurul, "Pengaruh Ketidakseimbangan Beban Terhadap Efisiensi Transformator Distribusi Studi Gardu PT PLN (PERSERO) Area Bekasi," *Jurnal Ilmiah Sutet*, vol. 10, no. 1, hal. 29–38, 2021, <https://doi.org/10.33322/sutet.v10i1.1277>
- [7] Avif, M., Andriawan, A. H., & Prenata, G. D., "Analisis Pembebanan Transformator Daya 300 kVA di Instalasi Pengolahan Air Limbah PT. SIER," *Prosiding Seminar Nasional Karya Ilmiah Mahasiswa*, vol. 1, no. 1, hal. 485-492, 2019.
- [8] Nas, I., "Analisis pembebanan transformator distribusi di PT. PLN (Persero) Rayon Jeneponto," *Skripsi*, Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Makasar, 2017.
- [9] Syukri, S., Asyadi, T. M., Muliadi, M., & Moesnadi, F., "Analisa Pembebanan Transformator Distribusi 20 kV pada Penyulang LS5 Gardu LSA 249," *Jambura Journal of Electrical and Electronics Engineering*, vol. 4, no. 2, hal. 202-206, 2022. <https://doi.org/10.37905/jjee.v4i2.14500>
- [10] IEEE, "IEEE Recommended Practice for Emergency and Standby Power Systems for Industrial and Commercial Applications," IEEE No. 446 Tahun 1995. <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.1987.120315>
- [11] PT. PLN Persero, "Regulasi Harmonisa, Flicker, dan Ketidakseimbangan Tegangan," SPLN D5.004-1:2012.
- [12] Siregar, M. A., "Analisis Ketidakseimbangan Beban pada Transformator Distribusi di PT. PLN (Persero) Rayon Panam Pekanbaru," *Doctoral Dissertation*, Universitas Islam Negeri Sultan Syarif Kasim Riau, 2013.
- [13] S.K. Sahdev, "Basic Engineering With Lab Manual," Khanna Book, India, 2021.
- [14] PT. PLN Persero, "Metode Pemeliharaan Trafo Distribusi Berbasis Kaidah Manajemen Aset," SPLN, Nomor 17. 2014.