

Analisis Pengaruh Harmonisa Transformator Distribusi 2500 kVA

Alvera Apridialianti Melkias*, Indriyani, Taufik Hidayat

Teknik Konversi Energi, Politeknik Negeri Bandung

Jl. Gegerkalong Hilir, Ciwaruga Kec. Parongpong, Kabupaten Bandung Barat 40559

E-mail: alveramelkias@polban.ac.id*

Abstract

The high harmonic content in the electrical load or in the power distribution system can result in worse power quality, lower system power factor, distorted system voltage waveform, increased power losses in the system, overheating of the transformer, and inefficient use of electrical energy. So that it can reduce the efficiency of the transformer. The purpose of this study is to analyze the effect of harmonics on a distribution transformer with a capacity of 2500 kVA using a quantitative data collection method, namely primary and secondary data collection. This study offers an integrated approach that includes harmonic measurements and analysis of direct impacts on the efficiency of a 2500 kVA distribution transformer in the context of the automotive industry, which has not been widely reported in the national literature. Based on the results of measurements and calculations on the transformer, the Total Harmonic Distortion Current (THDI) value is + 9% which exceeds the permissible value of 8% while the Total Harmonic Distortion Voltage (THDV) value is + 2% in accordance with the permissible limit of 5%. The analysis results obtained that due to the presence of harmonics in the electrical distribution system, the distribution transformer experienced a decrease in its efficiency value by 2%, which was originally without harmonics the transformer efficiency was 98.8% and due to the presence of harmonics the transformer efficiency became 96.8%. The combination of real-time harmonic measurements and calculations in the industry not only offers technical advantages, but also strategically supports efficiency, reliability of the electrical system, and smarter data-based decision making.

Keywords: Efficiency, Harmonics, Distribution Transformer

Abstrak

Tingginya kandungan harmonisa yang terdapat pada beban listrik atau pada sistem distribusi tenaga listrik dapat mengakibatkan kualitas daya menjadi lebih buruk, faktor daya sistem menjadi lebih rendah, bentuk gelombang tegangan sistem terdistorsi, rugi-rugi daya pada sistem meningkat, pemanasan lebih pada transformator, dan penggunaan energi listrik menjadi tidak efisien. Sehingga dapat menurunkan efisiensi dari transformator. Tujuan penelitian ini yakni menganalisis pengaruh harmonisa transformator distribusi dengan kapasitas 2500 kVA dengan metode pengambilan data secara kuantitatif yakni pengumpulan data primer serta sekunder. Penelitian ini menawarkan pendekatan terpadu yang mencakup pengukuran harmonisa dan analisis dampak langsung terhadap efisiensi transformator distribusi 2500 kVA dalam konteks industri otomotif, yang belum banyak dilaporkan pada literatur nasional. Berdasarkan hasil pengukuran dan perhitungan pada transformator nilai Total Harmonic Distortion Arus (THDI) sebesar $\pm 9\%$ yang melebihi nilai yang diijinkan yaitu sebesar 8% sedangkan nilai Total Harmonic Distortion Tegangan (THDV) sebesar $\pm 2\%$ sesuai dengan batas yang diijinkan yaitu sebesar 5%. Hasil analisis diperoleh bahwa akibat adanya harmonisa pada sistem distribusi listrik menyebabkan trafo distribusi mengalami penurunan nilai efisiensinya sebesar 2%, yang semula tanpa adanya harmonisa efisiensi trafo sebesar 98,8% dan akibat adanya harmonisa efisiensi trafo menjadi 96,8% Kombinasi pengukuran dan perhitungan harmonisa secara real-time di industri tidak hanya menawarkan keunggulan teknis, tetapi juga strategis mendukung efisiensi, keandalan sistem kelistrikan, dan pengambilan keputusan berbasis data yang lebih cerdas.

Kata kunci: Efisiensi, Harmonisa, Transformator Distribusi

1. Pendahuluan

Energi listrik merupakan salah satu kebutuhan yang digunakan untuk menunjang aktivitas kehidupan baik di industri maupun rumah tangga. PT M merupakan salah satu industri yang bergerak di dunia otomotif sebagai produsen ban di Indonesia yang telah berdiri sejak tahun 1988, dimana setiap harinya perusahaan ini mengonsumsi energi listrik. Sumber energi listrik yang digunakan berasal dari Gardu Induk Sukatani melalui jaringan transmisi tegangan tinggi 150 kV lalu diturunkan menjadi 20 kV hingga sampai ke dalam perusahaan PT M. Energi listrik ini akan digunakan untuk mengoperasikan kegiatan produksi sebesar 60%, *utility* sebesar 26.47%, dan *supporting* sebesar 12.83%, sehingga penyedia energi listrik harus memperhatikan peralatan-peralatan sistem penyaluran energi listrik untuk aktivitas perusahaan. Salah satu peralatan yang digunakan adalah transformator distribusi, alat ini menyalurkan energi listrik ke peralatan produksi. Peralatan tersebut merupakan peralatan dengan beban non linier yang menyebabkan terjadinya harmonisa pada sistem tenaga listrik. Tingginya kandungan harmonisa yang terdapat pada beban listrik atau pada sistem distribusi tenaga listrik dapat mengakibatkan kualitas daya menjadi lebih buruk, faktor daya sistem menjadi lebih rendah, bentuk gelombang tegangan sistem terdistorsi, rugi-rugi daya pada sistem meningkat, pemanasan lebih pada transformator, dan penggunaan energi listrik menjadi tidak efisien. Sehingga dapat menurunkan efisiensi dari transformator.

Berdasarkan uraian latar belakang diatas, maka adapun tujuan penelitian ini yakni menganalisis pengaruh harmonisa terhadap efisiensi transformator dengan batasan masalah yakni transformator yang dikaji berkenis transformator distribusi dengan metode pengambilan data secara kuantitatif yakni pengumpulan data primer serta sekunder. Penelitian ini menawarkan pendekatan terpadu yang mencakup pengukuran harmonisa dan analisis dampak langsung terhadap efisiensi transformator distribusi 2500 kVA dalam konteks industri otomotif, yang belum banyak dilaporkan pada literatur nasional.

2. Metodologi

Transformator adalah suatu alat listrik yang dapat memindahkan dan mengubah energi listrik dari satu atau lebih rangkaian listrik ke rangkaian listrik yang lain, melalui suatu gandengan magnet dan berdasarkan prinsip induksi elektromagnetik [7].

Transformator adalah suatu alat listrik yang dapat memindahkan dan mengubah energi listrik dari satu atau lebih rangkaian listrik ke rangkaian listrik yang lain tanpa merubah frekuensi dari sistem, melalui suatu gandengan magnet dan berdasarkan prinsip induksi elektromagnet. Trafo digunakan secara luas, baik dalam bidang tenaga listrik maupun elektronika. Penggunaan trafo dalam sistem tenaga memungkinkan terpilihnya tegangan yang sesuai dan ekonomis untuk tiap - tiap keperluan misalnya kebutuhan akan tegangan tinggi dalam pengiriman daya listrik jarak jauh [6].

2.1 Transformator Distribusi

Transformator adalah peralatan listrik yang berfungsi untuk mengubah nilai suatu arus atau tegangan dari nilai yang satu ke nilai yang lainnya melalui suatu gandengan magnet dan menggunakan prinsip elektromagnet sedangkan transformator ditribusi adalah peralatan pada tenaga listrik yang berfungsi untuk memindahkan/menyalurkan tenaga listrik arus bolak-balik tegangan rendah ke tegangan menengah atau sebaliknya, pada frekuensi yang sama. Trafo bekerja berdasarkan pada Hukum Faraday. Trafo tiga fasa memiliki tegangan kerja yang tinggi dan biasanya berada pada gardu induk yang berfungsi untuk menurunkan tegangan transmisi (tegangan tinggi) menjadi tegangan distribusi (menengah). Trafo ini bekerja pada tegangan yang memiliki tiga buah fasa sesuai dengan namanya. Secara prinsip transformator ini sama dengan transformator satu fasa, perbedaannya yakni pada sistem satu fasa dan tiga fasa, sehingga sebuah transformator tiga fasa bisa dihubung bintang, segitiga, atau zig-zag [8].

2.2 Jenis Fasa Tegangan Transformator

Fasa tegangan listrik yang umum digunakan adalah tegangan satu fasa dan tegangan tiga fasa. Berdasarkan ini dikenal dua jenis transformator yaitu transformator satu fasa, apabila transformator digunakan untuk memindahkan tenaga listrik satu fasa dan transformator tiga fasa, apabila transformator digunakan untuk memindahkan tenaga listrik tiga fasa. [8]

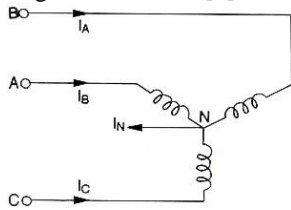
2.3 Hubungan Lilitan Transformator Tiga Fasa

Pada kumparan primer ataupun sekunder dari transformator tiga fasa bisa dihubungkan.

2.3.1 Hubungan Bintang (Y)

Hubungan bintang ialah hubungan transformator tiga fasa, dimana ujung-ujung awal atau akhir lilitan disatukan. Titik dimana tempat penyatuan dari ujung-ujung lilitan merupakan titik netral. Arus transformator tiga phasa dengan kumparan yang dihubungkan bintang yaitu; IA, IB, IC

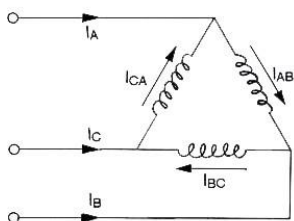
masing-masing berbeda 120° [8].



Gambar 1. Hubungan Bintang [7]

2.3.2 Hubungan Segitiga (Δ)

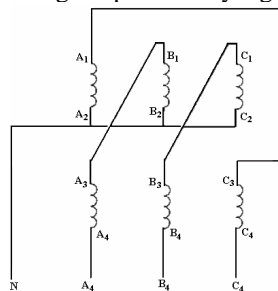
Hubungan segitiga adalah suatu hubungan transformator tiga fasa, dimana cara penyambungannya ialah ujung akhir lilitan fasa pertama disambung dengan ujung mula lilitan fasa kedua, akhir fasa kedua dengan ujung mula fasa ketiga dan akhir fasa ketiga dengan ujung mula fasa pertama. Tegangan trafo 3 (tiga) fasa dengan kumparan yang dihubungkan secara delta, yaitu VAB, VBC, dan VCA, masing-masing berbeda fasa 120°. [8]



Gambar 1. Hubungan Segitiga [8]

2.3.4 Hubungan Zig-Zag (Z)

Transformator zig-zag merupakan transformator dengan tujuan khusus. Salah satu aplikasinya adalah menyediakan titik netral untuk sistem listrik yang tidak memiliki titik netral. Pada transformator zig-zag masing-masing lilitan tiga fasa dibagi menjadi dua bagian dan masing-masing dihubungkan pada kaki yang berlainan. [2]



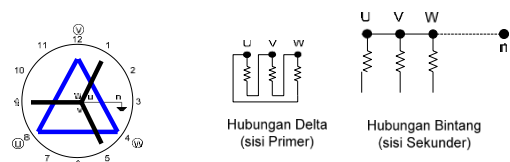
Gambar 3. Hubungan Zig-Zag [2]

Kelompok Hubungan Transformator Vektor tegangan primer dan sekunder suatu transformator dapat dibuat searah atau berlawanan dengan mengubah cara melilit kumparan. Arah tegangan pada transformator tiga fasa akan menimbulkan perbedaan fasa. Arah dan

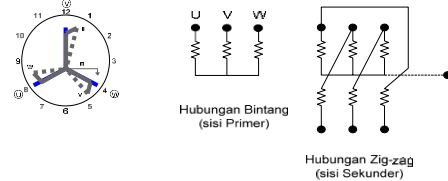
besar fasa tersebut mengakibatkan adanya berbagai kelompok hubungan pada transformator. Kelompok hubungan transformator yang lazim digunakan adalah :

- Angka jam 0 atau group A, kelompok hubungan Dd0, Yy0, Dz0.
- Angka jam 6 atau group B, kelompok hubungan Dd6, Yy6, Dz6.
- Angka jam 5 atau group C, kelompok hubungan Dy5, Yd5, Yz5.
- Angka jam 11 atau group D, kelompok hubungan Dy11, Yd11, Yz11.

Berikut ini merupakan salah satu contoh kelompok hubungan Dy5 dan Yz5 :



Gambar 2. Kelompok Hubungan Dy5 [5]



Gambar 3. Kelompok Hubungan Yz5 [8]

2.4 Harmonisa Pada Sistem Tenaga Listrik

Harmonisa merupakan suatu fenomena yang timbul akibat pengoperasian beban listrik non linier, yang merupakan sumber terbentuknya gelombang frekuensi tinggi (kelipatan dari frekuensi fundamental, misal: 100Hz, 150Hz, 200Hz, 300Hz, dan seterusnya). Harmonisa tegangan atau arus diukur dari besarnya masing-masing komponen harmonik terhadap komponen dasarnya dinyatakan dalam prosennya. Untuk memperoleh suatu parameter yang dipakai untuk menilai harmonisa tersebut dipakai THD. THD dinyatakan dengan persamaan sebagai berikut, yaitu [4]:

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{h_{min}}^{h_{max}} M_h^2}}{M_1} \tag{1}$$

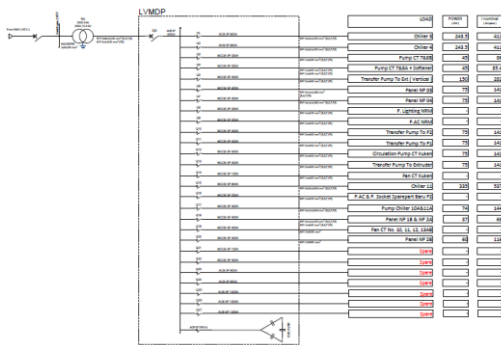
Dimana M_h adalah nilai rms komponen harmonik h dalam jumlah M.

2.5 Objek Penelitian

Berikut spesifikasi Transformator Distribusi yang diteliti:

- Kapasitas Transformator (S): 2500 kVA
- Merek : TRAFINDO
- Frekuensi: 50 Hz
- Voltage Primer : 20 kV
- Voltage Sekunder : 0,4 kV
- System Pendingin : ONAN
- Impedansi (Z) : 7 %
- Type Winding : Dyn 5
- Cos φ (pengukuran) : 0,96
- Rugi Besi (Pi): 4000 W
- Rugi Tembaga (Pcu) : 25000 W

Skema Single Line Diagram Substation



Gambar 6. Single Line Diagram Substation C 2.1 TR 2

2.4.1 Proses Produksi Ban

1) Persiapan Komponen

Perseroan senantiasa memberikan hasil produksi yang maksimal dimulai dengan melakukan ekstra ketelitian dalam hal pemilihan bahan yang akan digunakan, bahan baku yang digunakan dalam proses produksi. Perseroan adalah karet alam, karet sintesis, carbon black, polyster & nylon, steelcord & wire dan bahan kimia lainnya, penggunaan bahan- bahan tersebut telah sesuai dengan pemilihan kualitas dan prosedur perseroan. Seluruh bahan baku yang telah diproses dan dicampurkan dengan beberapa variasi campuran bahan disesuaikan berdasarkan kegunaan dalam konstruksi ban yang akan dihasilkan, secara umum campuran tersebut disebut dengan compound.

2) Perakitan Komponen

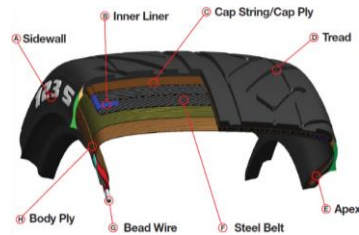
Komponen yang telah selesai diproses maka komponen tersebut siap memasuki proses perakitan menggunakan mesin tire building yang dilakukan di ruangan khusus untuk menghasilkan green tire, proses penghasilan green tire ini dibuat berdasarkan dengan ukuran ban yang telah dirancang

berdasarkan permintaan bagian penjualan Perseroan.

- 3) Seleksi Ban Jadi dan Pemeriksaan Kualitas Proses curing press, ban yang telah jadi akan dikirimkan ke bagian yang diperiksa untuk diperiksa oleh inspektur. Proses pemeriksaan ini dilakukan secara visual yang bertujuan untuk mensortir kondisi ban yang layak maupun kondisi yang mengalami kekurangan dalam proses produksi, selanjutnya adalah proses pemeriksaan keseragaman mesin yakni mesin yang digunakan untuk memeriksa kondisi ban berdasarkan standar yang telah ditetapkan oleh perseroan. Menggunakan mesin yang seluruh proses pemeriksaan ini dilakukan sebelum hasil produksi di distribusikan ke dalam gudang penyimpanan. Standar yang ditetapkan menggunakan standar pemeriksaan kualitas berdasarkan QMS (Quality Management System) mengacu ISO 9001:2008 dan ISOTS16949:2009.

2.4.2 Konstruksi Ban

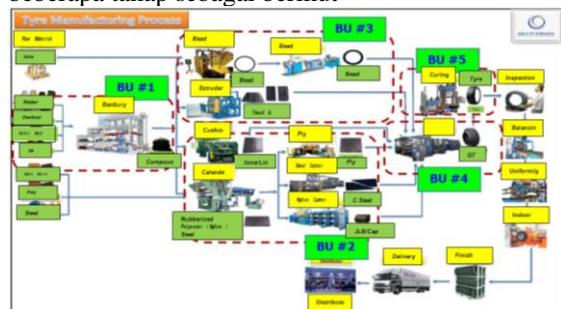
Gambar berikut ini adalah konstruksi ban yang ada pada PT.M



Gambar 7. Kontruksi Ban PCR Radial

2.4.3 Flow Proses Produksi

Pada proses fabrikasi ban dari bahan mentah (Raw Material) hingga menjadi ban, akan melalui beberapa tahap sebagai berikut



Gambar 4. Flow Process Produksi

1. Mixing Process

Material yang digunakan antara lain natural dan syntetic rubber, carbon black, silica, zinc oxide, sulfur, oli dan beberapa material kimia lain. Pada tahap awal, proses yang dilakukan adalah

pencampuran natural dan *synthetic rubber* dengan komposisi yang sebelumnya sudah ditimbang sesuai dengan berat yang ditentukan pada spesifikasi produk yang ingin dibentuk, kemudian diberikan tambahan carbon dan oli pada saat material tersebut masuk kedalam mesin *banbury*. Dalam mesin tersebut terdapat alat yang berfungsi untuk menggiling campuran menjadi lapisan yang disebut *compound*.

2. Bead Building dan Apexing Process

Bead building adalah proses pembuatan bead dengan pelapisan *wire* dengan *compound* kemudian dibentuk lingkaran dengan diameter atau BIC (*Bead In Circle*) yang telah ditentukan. Sedangkan *Bead Apexing* adalah proses assembling bead building dengan Apex bagian-bagian *bead Apexing*.

3. Calendering Process

Calendering adalah proses pelapisan tekstil atau steel cord dengan sheet compound. Proses aplikasi lain adalah untuk pembuatan material ply & steel belt, JLB & cap ply. Aplikasi tersebut dibentuk oleh mesin calender dengan bahan dasar benang (poliester dan nilon) juga steel cord. Poliester maupun nylon yang akan diproses, sebelumnya harus melalui proses pelebaran terlebih dahulu agar material tersebut terbuka untuk kemudian di masukan ke dalam oven dengan suhu 160°C agar pada saat diberikan compound dan bahan-bahan seperti poliester, nilon, dan steel cord dapat merekat dengan sempurna.

4. Cutting Process

Proses *cutting* ini merupakan proses lanjutan dari mesin calender, hasil akhirdari proses ini biasa disebut dengan *Ply* dan *Cap Ply*. *Ply* merupakan lembaran material yang terdiri dari poliester, nilon, dan *compound* yang telah diproses sebelumnya dalam bentuk gulungan panjang di mesin calender yang kemudian dipotong-potong untuk merubah arah atau sudut benang dari 0° menjadi 90°.

5. Cushioning Process

Cushioning adalah proses pembuatan *inner liner*, *under liner* dan *body ply assembly*. Keluaran dari proses ini nantinya akan dilanjutkan untuk diproses pada mesin *tyre building*.

6. Tyre Building Process

Proses ini menghasilkan produk berupa *green tyre* yang kemudian diproses di mesin *curing*. Komponen yang sebelumnya telah diproduksi,

seperti *tread*, *bead*, *sidewall*, *inner liner*, JLB dan *body ply* masuk pada proses perakitan (*assembly*) menjadi *green tyre*.

7. Curing Process

Proses *curing* mempunyai peranan penting dalam industri pembuatan ban. Proses curing merupakan proses akhir dalam proses pembuatan ban. Proses *curing* memproses *green tyre* (ban mentah) menjadi ban yang bisa digunakan. Proses ini berlangsung didalan sebuah cetakan/*mold*.

8. Balance & Uniformity Test

Ban yang selesai diproduksi, kemudian seluruh ban akan masuk ke area inspeksi yang mana ban akan mengalami pengujian menyeluruh untuk memenuhi syarat pengiriman serta memastikan pemenuhan spesifikasi pelanggan. Pengujian dibagi menjadi dua jenis, yaitu pengujian standar untuk seluruh ban dan pengujian khusus. Pengujian standar berlaku untuk seluruh ban yang diproduksi dengan menggunakan pemeriksaan visual oleh operator, kemudian menggunakan mesin *Balancing Test* (kestabilan ban pada kecepatan tinggi) dan *Uniformity Test* (keseragaman bentuk dan struktur ban). Ban akan mendapatkan tanda lulus tes dan masuk ke area finishing setelah memenuhi syarat pengujian.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Perhitungan THD

Perhitungan THDi dan THDv menggunakan data pengukuran arus dan tegangan diambil di waktu jam kerja pukul 14.45 pada Fasa R.

Perhitungan THD arus sebagai berikut :

$$\begin{aligned} \text{THDi} &= \frac{\sqrt{29,8^2 + (-186,9)^2 + 54,1^2 + 4,121^2 + (-22,06)^2 + 15,15^2}}{2126} \times 100\% \\ \text{THDi} &= \frac{\sqrt{888,04 + 34931,61 + 2926,81 + 16,983 + 486,644 + 229,522}}{2126} \times 100\% \\ \text{THDi} &= \frac{\sqrt{39479,609}}{2126} \times 100\% = 9,346\% \end{aligned}$$

Perhitungan THD tegangan sebagai berikut :

$$\begin{aligned} \text{THDv} &= \frac{\sqrt{0,527^2 + (-5,514)^2 + 1,707^2 + 0,21^2 + (-2,988)^2 + 1,814^2}}{390,7} \times 100\% \\ \text{THDv} &= \frac{\sqrt{0,278 + 30,404 + 2,914 + 0,044 + 8,928 + 3,290}}{390,7} \times 100\% \\ \text{THDv} &= \frac{\sqrt{45,858}}{390,7} \times 100\% = 1,733\% \end{aligned}$$

Perhitungan nilai ISC/IL pada standar IEEE 519-1992 maka didapat

$$\begin{aligned} I_{sc} &= \frac{S \times 100}{\text{kV} \times Z(\%) \times \sqrt{3}} = \frac{2500 \times 100}{0,4 \times 7(\%) \times \sqrt{3}} \\ &= 51.549,13 \text{ A} \end{aligned}$$

$$I_L = \frac{I_R + I_S + I_T}{3} = \frac{2126 + 2157 + 2092}{3} = 2125 \text{ A}$$

$$\frac{I_{sc}}{I_L} = \frac{51.549,13}{2125} = 24,26$$

Batasan total distorsi harmonisa arus didapatkan batas nilai THDI ketika $I_{sc}/I_L = 24,26$ adalah sebesar 8%.

3.2 Perhitungan Rugi-Rugi Daya Rugi Tanpa Harmonisa

Berdasarkan SPLN 50 : 1997 tentang spesifikasi transformator distribusi, diketahui bahwa untuk kapasitas transformator (S) 2500 kVA memiliki rugi besi P(i) sebesar 4000 W dan rugi tembaga (Pcu) sebesar 25000 W.

Total rugi-ruginya tanpa harmonisa yaitu :

$$P_{total} = P_i + P_{cu} = 4000 + 25000 = 29000 \text{ W} = \mathbf{29 \text{ kW}}$$

Rugi Akibat Harmonisa

Nilai P1Ø dapat dihitung sebagai berikut :

$$P1\emptyset = S1\emptyset \times \text{Cos}\phi = 1443,376 \times 0,96 = \mathbf{1385,64 \text{ kW}}$$

Besarnya arus harmonisa pada fasa R sampai orde ke-13 sehingga diperoleh hasil sebagai berikut :

Tabel 1. Perhitungan Harmonisa Arus Fasa R

Orde Harmonisa R	Ih (A)	Ih (p.u)	Ih ² (p.u)	Ih ² x h ² (p.u)
1	2126.000	1	1.0000000	1.0000000
3	29.800	0.014017	0.0001965	0.0017683
5	-186.900	-0.08791	0.0077284	0.1932111
7	54.100	0.025447	0.0006475	0.0317296
9	4.121	0.001938	0.0000038	0.0003043
11	-22.060	-0.01038	0.0001077	0.0130278
13	15.150	0.007126	0.0000508	0.0085819
TOTAL			1.0087347	1.2486230

Berdasarkan perhitungan di atas menunjukkan bahwa rugi tembaga (I²R) mengalami peningkatan sebesar 0,0087347 p.u atau dalam satuan kW dapat dihitung dengan persamaan (12) sebagai berikut :

$$PR \text{ (kW)} = P_{cu} \text{ (p.u)} \times P1\emptyset \text{ (kW)}$$

$$PR = 0,0087347 \text{ p.u} \times 1385,64 \text{ kW}$$

$$PR = \mathbf{12,103 \text{ kW}}$$

Nilai rugi arus eddy mengalami peningkatan sebesar 0,248623 p.u atau dalam satuan kW dapat dihitung dengan persamaan (14) sebagai berikut :

$$PEC \text{ (kW)} = PEC\text{-f} \times PE \text{ (p.u)} \times P1\emptyset \text{ (kW)}$$

$$PEC = 1\% \times 0,248623 \text{ p.u} \times 1385,64 \text{ kW}$$

$$PEC = \mathbf{3,445 \text{ kW}}$$

Rugi histerisis dapat dihitung dengan persamaan

(15) sebagai berikut :

$$\text{Ph orde 3} = h \sum I_h \cdot h$$

$$\text{Ph orde 3} = 0,26 \times 29,8 \times 3$$

$$\text{Ph orde 3} = \mathbf{23,244 \text{ Watt}}$$

Tabel 2. Perhitungan Rugi Histerisis pada Fasa R

Orde Harmonisa	Ph fasa R (W)	Ph fasa S (W)	Ph fasa T (W)
1	552.760	560.820	543.920
3	23.244	9.578	14.750
5	242.970	239.460	238.810
7	98.462	97.516	96.351
9	9.643	2.572	5.452
11	63.092	54.111	59.488
13	51.207	53.303	48.909
Jumlah	488.618	456.539	463.759

Jadi, total rugi-rugi daya transformator akibat harmonisa pada fasa R adalah

$$P_{total} = PR + PEC + Ph$$

$$P_{total} = \mathbf{12,103 + 3,445 + 0,489 = 16,037 \text{ kW}}$$

Tabel 3.

Perhitungan Rugi-rugi Tembaga, Arus Eddy dan Histerisis

Orde Harmonisa	Rugi-Rugi Daya Akibat Harmonisa			
	PR (kW)	PEC (kW)	Ph (kW)	Total Rugi-Rugi
Phasa R	12.103	3.445	0.489	16.037
Phasa S	11.186	3.204	0.457	14.846
Phasa T	11.890	3.395	0.464	15.749
Jumlah				46.632

Efisiensi Transformator

$$\text{Total Rugi-Rugi Trafo} = \text{Rugi tanpa harmonisa} + \text{Rugi akibat harmonisa}$$

$$= 29 + 46,632$$

$$= \mathbf{75,632 \text{ kW}}$$

Kenaikan Rugi-Rugi

$$\frac{\text{Total rugi-rugi}}{S \times \text{Cos}\phi} \times 100\% = \frac{75,632}{2500 \times 0,96} \times 100\%$$

$$= \mathbf{3,151 \text{ \%}}$$

Efisiensi Trafo

$$= 100\% - \%$$

$$\text{Kenaikan Rugi-Rugi} = 100\% - 3,151\%$$

$$= \mathbf{96,849 \text{ \%}}$$

3.3. Analisa

Harmonisa merupakan suatu gangguan yang terjadi pada sistem distribusi tenaga listrik akibat terjadinya distorsi gelombang arus dan tegangan. Gelombang-gelombang ini kemudian bercampur pada gelombang murni/aslinya sehingga terbentuk gelombang yang terdistorsi yang merupakan hasil penjumlahan antara gelombang murni sesaat dengan gelombang harmonisanya. Penyebab utama adanya harmonisa ini karena

adanya beban non linier. Di PT M beban non linier ini salah satunya berupa motor induksi dan vsd (*variable speed drive*), sehingga menyebabkan terjadinya harmonisa pada sistem distribusi tenaga listrik. Besarnya harmonisa ini akan mempengaruhi kinerja dari sistem distribusi tenaga listrik terutama pada transformator distribusi.

Tabel 4.
Perbandingan Nilai THDi

Perbandingan Hasil Pengukuran dan Perhitungan THDi				
Waktu	Phasa R		Phasa S	
	Pengukuran	Perhitungan	Pengukuran	Perhitungan
14.15	9.286	9.23	8.895	8.852
14.30	9.206	9.165	8.848	8.812
14.45	9.381	9.346	9.017	8.985
15.00	9.423	9.395	9.034	9.008
15.15	9.454	9.42	9.043	9.013
15.30	9.631	9.599	9.268	9.237
15.45	9.629	9.585	9.252	9.222
16.00	9.215	9.184	8.845	8.819

Waktu	Phasa T		Standar THDi (%)
	Pengukuran	Perhitungan	
14.15	9.23	9.162	8
14.30	9.146	9.096	8
14.45	9.302	9.263	8
15.00	9.336	9.293	8
15.15	9.364	9.322	8
15.30	9.526	9.497	8
15.45	9.471	9.432	8
16.00	9.112	9.079	8

Pada tabel 4 di atas dapat diketahui bahwa hasil pengukuran nilai THDI dengan hasil perhitungan mendekati sama pada setiap waktu dan phasanya. Dari hasil perhitungan dan pengukuran besarnya THDI adalah sebesar $\pm 9\%$, nilai ini tidak sesuai dengan standar IEEE Standard 519-1992 yaitu batas maksimum THD arus untuk $I_{sc}/I_L=24,26$ adalah 8%, besarnya THD arus melebihi batasan maksimum yang telah ditentukan.

Pada tabel 5 dapat diketahui bahwa hasil pengukuran nilai THDV dengan hasil perhitungan yang tidak jauh berbeda pada setiap waktu dan phasanya. Hasil perhitungan dan pengukuran nilai THDV ini sesuai dengan standard yang ditetapkan IEEE Standard 519-1992 yaitu batas maksimum THD tegangan menggunakan tegangan dibawah 69 kV yaitu 400 V sehingga batas harmonisa tegangan yang diijinkan untuk sistem dengan

tegangan kurang dari 69 kV adalah 5% untuk THD, besarnya THD tegangan sesuai dengan standard yang telah ditetapkan

Tabel 5.
Perbandingan Nilai THDV

Perbandingan Hasil Pengukuran dan Perhitungan THDV				
Waktu	Phasa R		Phasa S	
	Pengukuran	Perhitungan	Pengukuran	Perhitungan
14.15	1.947	1.732	2	1.807
14.30	1.939	1.786	1.991	1.856
14.45	1.876	1.733	1.936	1.809
15.00	1.891	1.752	1.95	1.819
15.15	1.888	1.75	1.943	1.802
15.30	1.748	1.613	1.822	1.7
15.45	1.753	1.577	1.824	1.688
16.00	1.946	1.795	1.98	1.845

Waktu	Phasa T		Standar THDV (%)
	Pengukuran	Perhitungan	
14.15	2.005	1.686	5
14.30	2.015	1.811	5
14.45	1.967	1.812	5
15.00	1.964	1.749	5
15.15	1.956	1.734	5
15.30	1.84	1.693	5
15.45	1.828	1.64	5
16.00	2.005	1.846	5

Tabel 6.
Perbandingan Rugi-Rugi Daya dan Efisiensi Transformator Tanpa dan Setelah Pengaruh Harmonisa

WAKTU	Rugi Tanpa Harmonisa (kW)	Rugi Akibat Harmonisa (kW)	Rugi Total (kW)	Efisiensi Sebelum Pengaruh Harmonisa (%)	Efisiensi Sesudah Pengaruh Harmonisa (%)
14.15	29	45.187	74.187	98.792	96.909
14.30	29	44.805	73.805	98.792	96.925
14.45	29	46.632	75.632	98.792	96.849
15.00	29	46.964	75.964	98.792	96.835
15.15	29	47.130	76.130	98.792	96.828
15.30	29	49.218	78.218	98.792	96.741
15.45	29	48.842	77.842	98.792	96.757
16.00	29	45.319	74.319	98.792	96.903

Pada Tabel 6 diatas dapat dilihat bahwa rugi trafo tanpa harmonisa didapatkan sebesar 29 kW. Nilai ini didapatkan berdasarkan SPLN 50 : 1997 tentang spesifikasi transformator distribusi, diketahui bahwa untuk kapasitas transformator (S) 2500 kVA, sehingga memiliki rugi besi P(i) sebesar 4000 W dan rugi tembaga (Pcu) sebesar 25000 W. Nilai total rugi-rugi tanpa harmonisa adalah 29000 W atau 29 kW, sedangkan rugi trafo akibat adanya harmonisa setiap waktunya antara

44 kW – 50 kW. Sehingga rugi total pada trafo distribusi didapatkan antara 73 kW – 79 kW setiap waktunya pada pukul 14.15 sampai 16.00 pada tanggal 27 Agustus 2021. Sehingga terlihat bahwa efisiensi trafo tanpa adanya harmonisa sekitar 98,8% dan efisiensi trafo akibat adanya harmonisa turun menjadi sekitar 96,8%. Terlihat bahwa efek harmonisa ini menyebabkan trafo distribusi ini mengalami penurunan efisiensi sebesar 2% akibat adanya harmonisa.

Analisis harmonisa hingga perhitungan rugi daya (I^2R , eddy, histeresis) dalam satu paket studi pada sistem 2500 kVA tergolong jarang dilakukan karena rugi eddy dan histeresis hanya pada rugi inti total pada frekuensi dasar (50 atau 60 HHz) tidak dijabarkan pada harmonisa. Efek harmonisa pada rugi inti lebih diperhitungkan pada desain pabrikasi bukan pada level pengoperasian distribusi. Penggunaan kombinasi pengukuran dan perhitungan harmonisa dalam setting industri real-time menawarkan keunggulan aplikatif karena dapat mendeteksi dini masalah kualitas daya (dengan pengukuran harmonisa secara real-time, misalnya menggunakan power quality analyzer atau smart meter, industri dapat segera mendeteksi lonjakan harmonisa yang berpotensi menyebabkan gangguan pada peralatan sensitif, kerusakan transformator, overheating motor, dan lainnya), perhitungan berbasis model (misalnya perhitungan *Total Harmonic Distortion*/THD, optimalisasi operasional yakni dengan kombinasi pengukuran dan simulasi harmonisa memungkinkan perusahaan untuk mengidentifikasi penyebab dominan harmonisa (nonlinear load seperti VFD, UPS, inverter) dan merancang solusi (misal pemasangan filter pasif/aktif), memberikan data pendukung untuk decision-making terkait penjadwalan beban, switching, atau pemeliharaan, mengurangi downtime dan biaya dengan monitoring harmonisa secara berkelanjutan dan responsif terhadap ambang batas THD bisa mencegah kerusakan peralatan yang mahal, dan memperpanjang umur transformator dan mesin industri lainnya.

4 Simpulan

Berdasarkan hasil pembahasan yang telah dilakukan dapat disimpulkan bahwa :

1. Berdasarkan hasil pengukuran dan perhitungan pada transformator nilai THDI sebesar $\pm 9\%$ yang melebihi nilai yang diijinkan yaitu sebesar 8% sedangkan nilai THDV sebesar $\pm 2\%$ sesuai dengan batas yang diijinkan yaitu sebesar 5 %.
2. Hasil analisis diperoleh bahwa akibat adanya harmonisa pada sistem distribusi listrik

menyebabkan trafo distribusi mengalami penurunan nilai efisiensinya sebesar 2%, yang semula tanpa adanya harmonisa efisiensi trafo sebesar 98,8% dan akibat adanya harmonisa efisiensi trafo menjadi 96,8%.

3. Kombinasi pengukuran dan perhitungan harmonisa secara real-time di industri tidak hanya menawarkan keunggulan teknis, tetapi juga strategis mendukung efisiensi, keandalan sistem kelistrikan, dan pengambilan keputusan berbasis data yang lebih cerdas.

Daftar Pustaka

- [1] Agusman C, Analisis Perhitungan Rugi-Rugi Daya Transformator Karena Harmonik. Depok: Universitas Indonesia. 2011
- [2] Dugan, R.C; McGranaghan, M.F; Santoso; Beaty, H.W. 2003. Electrical Power System Quality - Second Edition. USA : McGraw-Hill.
- [3] Elnizar, Hendri. Gusmedi, Herri., dan Zebua Osea “Analisis Rugi-Rugi (Losses) Transformator Daya 150/20KV di PT. PLN (Persero) Gardu Induk Sutami ULTG Tarahan”. Jurusan Teknik Elektro Universitas Lampung, Bandar Lampung.Jl. Prof. Sumantri Brojonegoro No.1 Bandar Lampung.
- [4] Heathcote, Martin J. *The J & P Transformer Book - A Practical Technology of the Power Transformer*. 12th ed. Oxford: Newnes. An imprint of Butterworth-Heinemann.1998, p.704.
- [5] Muhammad Fadhliansyah “Analisis Perhitungan Rugi-Rugi Transformator Akibat Harmonisa (Studi Kasus Gardu Distribusi SMTI Pontianak)”, Fakultas Teknik, Jurusan Teknik Elektro, Universitas Tanjungpura.
- [6] Sumanto. Teori Transformator Ed 1. Yogyakarta : ANDI OFFSET,1991 hlm 1
- [7] Zuhul dan Zhanggischian, Prinsip Dasar Elektroteknik (Jakarta : PT. Gramedia Pustaka Utama,2004) hlm.631
- [8] Zuhul. Dasar Tenaga Listrik. Bandung : ITB, 1991.