

PENERAPAN IEEE 519-2014 TERHADAP IDENTIFIKASI DISTORSI HARMONISA PADA TRANSFORMATOR 3 FASA

Arum Kusuma Wardhany¹, Dezetty Monika^{2*}, Langlang Gumilar³

Dosen Tetap Teknik Elektro Politeknik Negeri Jakarta, Indonesia^{1,2}
Dosen Tetap Teknik Elektro Universitas Negeri Malang, Indonesian³
^{2*} *dezetty.monika@elektro.pnj.ac.id*

ABSTRAK

Transformator merupakan peralatan yang paling merasakan adanya harmonik, karena letaknya yang lebih dekat terhadap beban. Pada transformator, harmonik arus (THD% I) akan menyebabkan peningkatan rugi-rugi tembaga (Cu), sedangkan harmonik tegangan (THD% V) menyebabkan peningkatan rugi-rugi arus Eddy (Eddy Current) sehingga terjadi kerugian daya dan peningkatan temperatur. Pada penelitian ini dilakukan untuk mengetahui gangguan harmonik pada transformator 3 fasa dari pemakaian beban non linier dengan cara mengidentifikasi tingkat dominan harmonik, THD % arus maupun tegangan, peningkatan temperatur dan estimasi kerugian daya yang dimonitoring secara real-time menggunakan software IoT Blink. Hasil pengujian menunjukkan bahwa harmonisa arus pada transformator 3 fasa menimbulkan rugi – rugi tembaga (Cu) sebesar 0,0424 pu (setara 57,98 W) dan rugi arus eddy sebesar 0,0370 p.u (setara 50,60W).

Kata kunci: *Harmonisa, Kerugian Daya, Temperatur, Transformator*

1. PENDAHULUAN

Kemajuan teknologi yang ditandai dengan luasnya penggunaan perangkat berbasis elektronik seperti lampu hemat energi, TV, komputer, kulkas, pendingin ruangan, serta motor pompa yang merupakan beban non-linier menjadi penyebab munculnya harmonik yang dapat mengganggu sistim distribusi tenaga listrik (Anu & Fernandez, 2020)(Khomarudin & Subekti, 2020). Harmonisa adalah gangguan yang terjadi pada sistem distribusi tenaga listrik akibat beban linier yang mengakibatkan terjadinya distorsi gelombang arus dan tegangan sehingga gelombang tidak berbentuk sinusoidal murni lagi. Tingginya harmonisa pada suatu beban atau distribusi tenaga listrik, dapat mengakibatkan kualitas daya menjadi lebih buruk (Ahsan et al., 2020). Karena faktor daya sistem menjadi lebih rendah, bentuk gelombang tegangan sistem terdistorsi, rugi-rugi daya pada sistem meningkat, pemanasan lebih dan penggunaan energi listrik menjadi tidak efisien (Harianto et al., 2018).

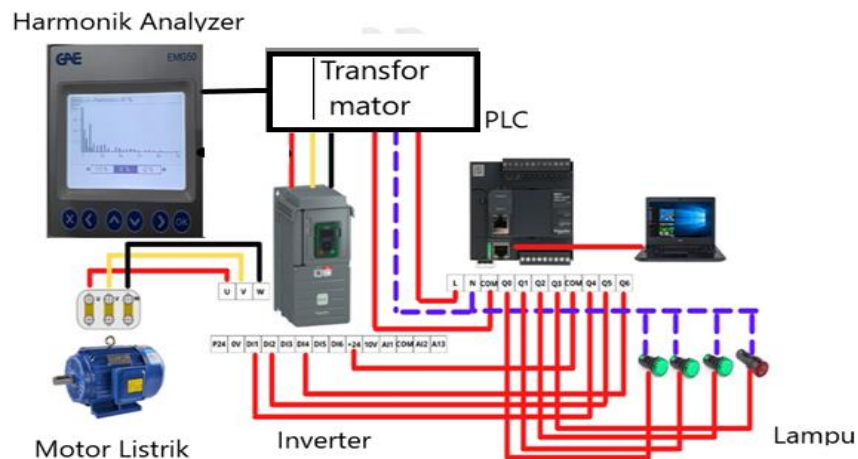
Transformator sangat berperan dalam penyaluran daya kepusat beban dan merupakan peralatan yang paling merasakan adanya harmonik, karena letaknya yang lebih dekat terhadap beban. Pada transformator, arus dengan harmonik dan frekuensi yang tinggi akan menimbulkan tambahan losses akibat bertambahnya rugi-rugi eddy current pada inti (Suresh Kumar & Saravanan, 2015), meningkatnya rugi-rugi akan menaikkan panas transformator (Pengfei et al., 2019). Panas yang ditimbulkan mengakibatkan terjadinya penguraian bahan-bahan transformator seperti kawat tembaga dan komponen lainnya yang dapat mengurangi umur transformator. Transformator dengan kandungan harmonik yang lebih tinggi maka mengakibatkan panas yang lebih tinggi walaupun beban arus lebih kecil (Suryadi, 2017). Berdasarkan iklim Indonesia, standar temperatur transformator distribusi berada pada rentang suhu 20°C sampai 30°C. Peningkatan suhu transformator diatas 6°C dari batas yang diizinkan dapat mengakibatkan menurunnya usia penggunaan transformator (Ariana et al., 2017).

Penelitian ini melakukan pengujian terhadap rugi – rugi daya transformator akibat penggunaan beban non-linier, dampak penggunaan beban non-linier diamati melalui tingkat kandungan harmonisa, THD% Tegangan dan THD% Arus dengan akuisisi data dimonitoring secara real time menggunakan software IoT. Data monitoring akan digunakan sebagai acuan untuk mengestimasi besar kerugian daya, dan peningkatan panas pada transformator yang menyebabkan kinerjanya berkurang, sehingga kerusakan transofrmator akibat rugi daya dan panas dapat diantisipasi.

2. METODE PENELITIAN

2.1. Langkah Penelitian

Penelitian ini dilakukan menggunakan metode eksperimental yang dibagi kedalam beberapa tahap yakni studi literatur, pembuatan instalasi purwarupa, pengukuran parameter – parameter yang diamati, pengolahan data, dan analisis data serta kesimpulan. Gambar 1 menunjukkan bagan rancangan alat yang digunakan dalam mengidentifikasi adanya distorsi harmonik. Transformator 3 Fasa menyalurkan daya ke alat ukur distorsi harmonisa, inverter dan programmable Logic Controller (PLC). Dari inverter, arus listrik yang awalnya sinyal bolak balik (AC) akan diubah menjadi arus searah (DC) dan arus DC ini menjadi yang menjadi *supply* pada sistem kontrol PLC. Kemudian PLC digunakan sebagai pengendali motor AC. Harmonic Analyzer dilakukan menggunakan Power Analyzer Gae 50 dengan akuisisi data menggunakan software IoT pada transformator 3 fasa yang terhubung. Pada penelitian ini software yang digunakan yaitu Blink dapat di *monitoring* secara berkala.



Gambar 1 Bagan Pengambilan data Distorsi Harmonik

Data yang diambil untuk parameter mutu daya listrik yakni spektrum harmonik, THD% arus maupun THD% tegangan dengan menggunakan dengan alat ukur. Data yang diperoleh dianalisis menggunakan teknik analisis kuantitatif menggunakan analisis deskriptif dan inferensial. Tingkat kandungan harmonisa dan nilai simpangan akan dianalisis dan dibandingkan terhadap terhadap standar IEEE.

2.2. Harmonisa pada Transformator

Menurut IEEE Standard 519-1992 (“IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems,” 2014), untuk mengetahui standar batas maksimum THDi pada peralatan, maka harus diketahui terlebih dahulu rasio hubung singkat (short circuit ratio). Dua kriteria yang digunakan untuk mengevaluasi distorsi harmonik pada penelitian ini yaitu batas harmonik untuk arus (THDi) dan batas harmonik untuk tegangan (THDv). Tabel 1 menunjukkan nilai acuan standar Harmonik Arus yang diizinkan berdasarkan IEEE std519-1992. Pada harmonik arus, batas harmonik arus yang diizinkan ditentukan oleh perbandingan I_{sc}/I_L (Kapil, 2019). I_{sc} adalah arus hubung singkat yang ada pada PCC (Point of Common Coupling), sedangkan I_L adalah arus beban.

Tabel 1. Standar Harmonik Arus

ISC/ILOAD	Orde Harmonisa (dalam %)					THD
	<11	11-16	17-22	23-24	>35	
<20	4	2	1.5	0.6	0.3	5
20-50	7	3.5	2.5	1	0.5	8
50-100	10	4.5	4	1.5	0.7	12
100-1000	12	5.5	5	2	1	15
>1000	15	7	6	2.5	1.4	20

Arus hubung singkat dan arus beban, dihitung menggunakan persamaan sebagai berikut (Arrillaga & Watson, 2003)(Tanamal et al., 2019) :

$$I_{sc} = \frac{kVA \times 100}{\%Z \times \sqrt{3} \times kV} \tag{1}$$

$$I_{FL} = \frac{S}{V \times \sqrt{3}} \tag{2}$$

Standar Harmonik tegangan yang diizinkan berdasarkan IEEE std 519-1992 ditampilkan pada table 2. Standar harmonic tegangan ditentukan berdasarkan besarnya tegangan sistem yang dipakai (Ahsan et al., 2020).

Tabel 2. Standar Harmonik Tegangan

Bus Voltage at PCC	Individual Voltage Distortion(%)	THD (%)
69 kV and below	3,0	5,0
69,001 kV through 161 kV	1,5	2,5
161,001 kV and above	1,0	1,5

Besarnya nilai load losses atau rugi – rugi daya pada transformator dalam satuan per unit, dihitung menggunakan persamaan berikut (Dugan et al., 2012)

$$P_{LL} = \sum I_h^2 + (\sum I_h^2 \times h^2) P_{EC-R} (p.u) \tag{3}$$

Dengan P_{EC-R} merupakan faktor eddy current loss / komponen rugi eddy current dalam p.u. h merupakan angka harmonisa sedangkan I_h merupakan arus harmonisa. Dan $\sum I_h^2$ merupakan komponen rugi I^2R dalam p.u.

Untuk menghitung besarnya nilai rugi – rugi dalam satuan unit, diperlukan komponen factor eddy current loss, yang mengacu pada table 3 (Dhavitra et al., 2015).

Tabel 3. Faktor Eddy Current Loss

Type	MVA	Voltage	% P_{ECR}
Dry	≤ 1		3-8
	≥ 1.5	5kV HV	12-20
	≤ 1.5	15 kV HV	9-15
Oil-filled	≤ 1	480 V LV	1
	2.5 to 5	480 V LV	1 – 5
	>5	480 V LV	9-15

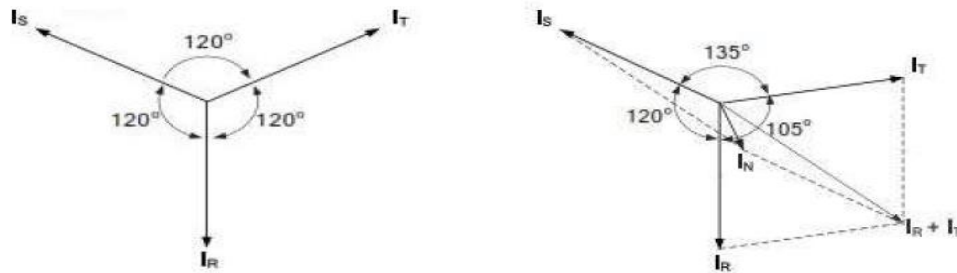
2.3. Ketidakseimbangan Beban

Jika salah satu atau semua fasa pada transformator mengalami perbedaan besarnya vector arus/tegangan dan sudut dari masing-masing fasa maka kondisi tersebut dinamakan ketidakseimbangan. Ada beberapa syarat fasa pada transformator dinyatakan dalam keadaan seimbang, yaitu:

- Nilai yang sama besar untuk ketiga vector arus masing-masing fasa R, S dan T.
- Masing-masing perbedaan sudut untuk ketiga vector sebesar 120° (Paul, 2017).

Jika syarat diatas tidak terpenuhi, maka transformator mengalami kondisi ketidakseimbangan (Rumakat & Fauziah, 2021). Dan jika dilihat dari vektornya, ada beberapa hal yang akan terjadi jika transformator yang mengalami keadaan tidak seimbang, yaitu

- Sudut fasa antara satu dan yang lain tidak membentuk 120° walaupun nilai vector arus fasa R, S dan T sama besar.
- Sebenarnya sudut pada vektor antara fasa sudah membentuk sudut 120° namun tetap terdapat perbedaan pada nilai vektor pada fasa R, S, dan T
- Sudut pada vektor antar fasa tidak membentuk sudut 120° dan terdapat perbedaan juga pada nilai vektor pada fasa R, S, dan T



Gambar 2. Vektor diagram arus ketika seimbang (kiri) dan Vektor diagram arus ketika beban tidak seimbang (kanan)

Masing-masing nilai pada vector pada diagram arus ketika seimbang apabila dijumlahkan akan bernilai nol. Keadaan ini tidak akan memunculkan arus netral (I_N). Sedangkan pada gambar sebelahnya keadaan beban tidak seimbang. Apabila nilai vector dijumlahkan maka terdapat perbedaan nilai pada masing-masing fasa. Selain itu, sudut antar fasanya juga tidak membentuk 120° . Keadaan ini akan memunculkan arus netral (I_N) dan besar dari arus netral

ini berpengaruh pada besar dari faktor ketidakseimbangannya. Dalam sistem tenaga tiga fasa ideal, arus netral adalah jumlah vektor dari arus tiga fasa, harus sama dengan nol. Di bawah kondisi operasi normal, beberapa ketidakseimbangan fasa terjadi mengakibatkan arus netral kecil.

2.4. Arus Netral Akibat Harmonisa

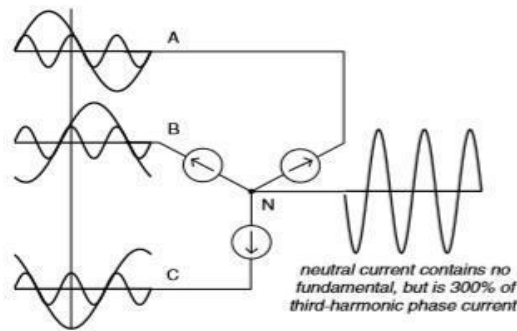
Ada beberapa parameter yang diperlukan dalam menghitung timbulnya arus netral pada transformator. Parameter tersebut seperti arus pada masing-masing fasa R, S, T, dan faktor. Dari nilai faktor daya ($\cos \phi$) maka akan didapatkan besaran magnitude sudut antar fasa. Sehingga didapatkan arus magnitude masing-masing saluran fasa dengan memiliki arah vektor. Bisa dihitung menggunakan persamaan (4), (5) dan (6) dengan \bar{I}_R merupakan arus yang terukur pada fasa R (A), \bar{I}_S merupakan yang terukur pada fasa S (A) dan \bar{I}_T yang terukur pada fasa T (A) (Venikar et al., 2015).

$$\bar{I}_R = I_R \angle (0^\circ + \cos^{-1} \phi) = I_R \cos(0^\circ + \cos^{-1} \phi) + I_R \sin(0^\circ + \cos^{-1} \phi) \quad (4)$$

$$\bar{I}_S = I_S \angle (120^\circ + \cos^{-1} \phi) = I_S \cos(120^\circ + \cos^{-1} \phi) + I_S \sin(120^\circ + \cos^{-1} \phi) \quad (5)$$

$$\bar{I}_T = I_T \angle (240^\circ + \cos^{-1} \phi) = I_T \cos(240^\circ + \cos^{-1} \phi) + I_T \sin(240^\circ + \cos^{-1} \phi) \quad (6)$$

Pada sistem tenaga 3 fasa dengan 4 kawat untuk keadaan seimbang, arus urutan nol dan arus triplen harmonik akan tetap mengalir melalui kawat netral. Triplen harmonik adalah gelombang harmonisa dengan kelipatan ganjil dimulai dengan harmonik ketiga ($h = 3, 9, 15, 21, \dots$).



Gambar 3. Arus Netral akibat harmonisa

Sehingga dengan adanya kandungan harmonisa, dapat memiliki dampak sendiri pada transformer yakni adanya arus netral. Besarnya arus netral yang ditimbulkan akibat adanya kandungan harmonisa dapat dihitung dengan persamaan (7) dan (8).

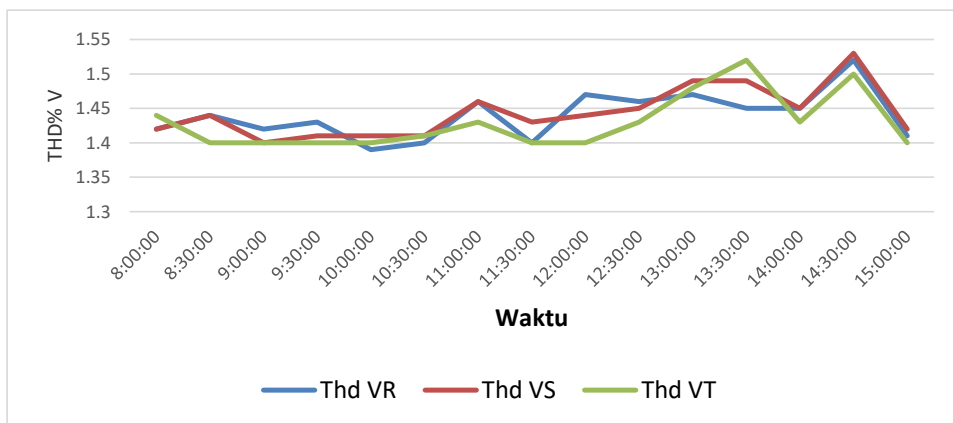
$$THD_{\text{arus urutan fasa nol}} = (IHD_3^2 + IHD_9^2 + IHD_{15}^2)^2 \dots \dots \dots (7)$$

$$I_{\text{urutan nol R}} = THD_{\text{urutan nol}} \times I_R \dots \dots \dots (8)$$

Dengan IHD_3 merupakan orde distorsi harmonisa orde urutan ketiga dan I_R merupakan arus pada sisi saluran R.

3. ANALISA DAN PEMBAHASAN

Dampak harmonisa terhadap transformator 3 fasa yang dibebani dengan beban non-linier telah diamati melalui monitoring dan pengukuran selama durasi pengamatan. Gambar 4 menunjukkan %THD_v pada fasa R, S, dan T. Pada grafik terlihat bahwa nilai %THD_v selama pengamatan mengalami fluktuasi dimana nilai terendah terjadi pada pukul 10.00 dengan nilai hasil pengukuran sebesar 1,39%. dan nilai tertinggi %THD_v terjadi pada pukul 14.30 dengan nilai 1,53%. Fluktuasi kenaikan dan penurunan nilai %THD_v selama durasi pengamatan bervariasi antara 0,01% - 0,11% setiap 30 menit waktu pengamatan. Sedangkan nilai harmonik tegangan antar fasa R, S, dan T memiliki besaran nilai yang sama antar fasa, ataupun perbedaan nilai dengan selisih antar fasa sebesar 0,01 – 0,03% dalam waktu pengamatan yang sama. Penelitian terhadap pembebanan transformator dilakukan di area kampus, maka penggunaan beban lebih banyak digunakan pada siang hari yaitu diatas jam 13.00 dan mulai menurun setelah pukul 15.00.



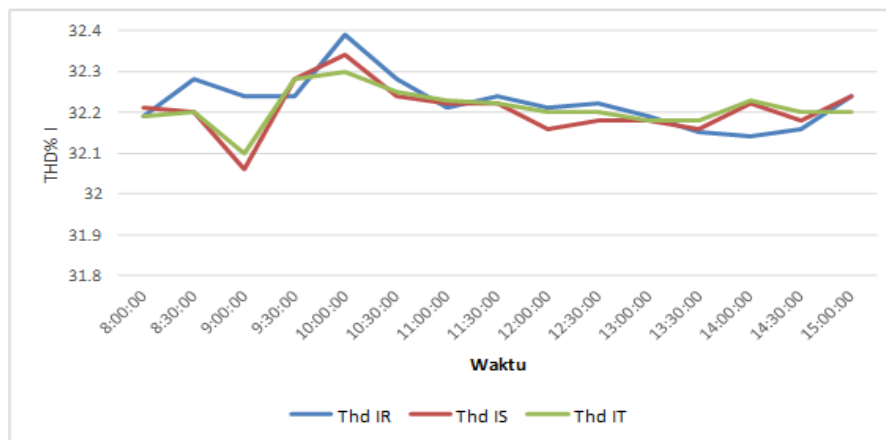
Gambar 4 THD% V pada Fasa R, S dan T

Tabel 4. menunjukkan perbandingan nilai pengukuran THDv dari fasa R, S, dan T dengan nilai standard harmonic tegangan pada tabel 2. Meskipun pada gambar 4 nilai %THDv terlihat berfluktuasi, namun jika dibandingkan dengan nilai VTHD standar diizinkan berdasarkan IEEE std 519-1992 nilai pengukuran harmonic tegangan pada fasa R, S, dan T masih berada dibawah nilai standard sebesar 5%.

Tabel 4. Analisa THD tegangan pada beban

Fasa	THDv Pengukuran (%)	THDv Standard (%)	Keterangan
R	1,439	5	Tidak melebihi standard
S	1,443	5	Tidak melebihi standard
T	1,429	5	Tidak melebihi standard

Selain melakukan pengamatan pada %THDv, pengukuran dan pengujian juga dilakukan untuk mengamati nilai harmonic arus atau %THDi. Gambar 5 menunjukkan grafik %THDi pada fasa R, S, dan T selama waktu pengujian. Grafik pengujian menunjukkan bahwa nilai THD% I pada fasa R, S, dan T selama waktu pengujian bervariasi dengan rentang nilai antara 32,06% sampai 32,39%. Fluktuasi kenaikan dan penurunan nilai %THDi selama durasi pengamatan bervariasi antara 0,01% - 0,16% setiap 30 menit waktu pengamatan. Pada waktu pengamatan yang sama, nilai harmonic arus antar fasa R, S, dan T memiliki besaran nilai yang sama, ataupun memiliki perbedaan nilai dengan selisih antar fasa sebesar 0,02 – 0,18% dalam waktu pengamatan yang sama.



Gambar 5 THD% I pada Fasa R, S dan T

Tabel 5. menunjukkan perbandingan nilai pengukuran harmonic arus dengan nilai standar harmonic arus pada tabel 1. Menurut standar IEEE 519-1992, harmonisa arus ditentukan dari rasio antara I_{sc}/I_L dengan nilai standar yang diizinkan sebesar 8%. Nilai pengukuran harmonic arus pada fasa R, S, dan T menunjukkan bahwa nilai harmonic arus pada rangkaian yang diteliti melebihi dari standar harmonic arus. Menurut standar, nilai THDi yang diizinkan sebesar 8%, sedangkan nilai pengukuran harmonic arus yang diperoleh selama waktu pengamatan jam 8.00 sampai jam 15.00 rata-rata nilai %THDi sebesar 32,2%. Nilai %THDi pengukuran melebihi batas standar sebesar 24,2% dari batas nilai yang diizinkan, atau melebihi nilai standar sebesar 300% dari nilai acuan yang diizinkan.

Tabel 5. Analisa THDi arus pada beban

Fasa	THDi Pengukuran (%)	THDi Standard (%)	Keterangan	Nilai Lebih (%)
R	32,23	8	melebihi standard	24,23
S	32,20	8	melebihi standard	24,20
T	32,21	8	melebihi standard	24,21

Selain melakukan pengukuran terhadap %THDv dan %THDi pada jaringan, data harmonik transformator 3 fasa dianalisa untuk mendapatkan besar nilai rugi – rugi yang timbul akibat beban non-linier pada system. Tabel 6 menunjukkan nilai rugi beban dalam satuan unit untuk harmonic 1, 3, 5, 7, 9, dan 11, dan tabel 7 menunjukkan nilai rugi – rugi Cu dan Eddy current.

Tabel 6. Rugi beban trafo dalam satuan unit

Harmonik (h)	I _h (A)	I _h (pu)	I _h ²	I _h ² x h ²
1	3,55	1,00	1,0000	1,0000
3	0,40	0,11	0,0121	0,109
5	0,26	0,073	0,0053	0,132
7	0,10	0,028	0,008	0,392
9	0,10	0,028	0,008	0,648
11	0,12	0,033	0,009	1,089
Jumlah			1,0424	3,370

Tabel 7. Rugi – rugi Cu dan Eddy Current

Fasa	ΣI_h^2 (p.u)	$\Sigma I_h^2 \times h^2$ (p.u)	P _{EC-R} (p.u)	PLL (p.u)	Rugi I ² R (Cu)	Pertambahan Eddy Current (p.u)
R	1,0424	3,370	0,01	1,079	0,0424	0,0370

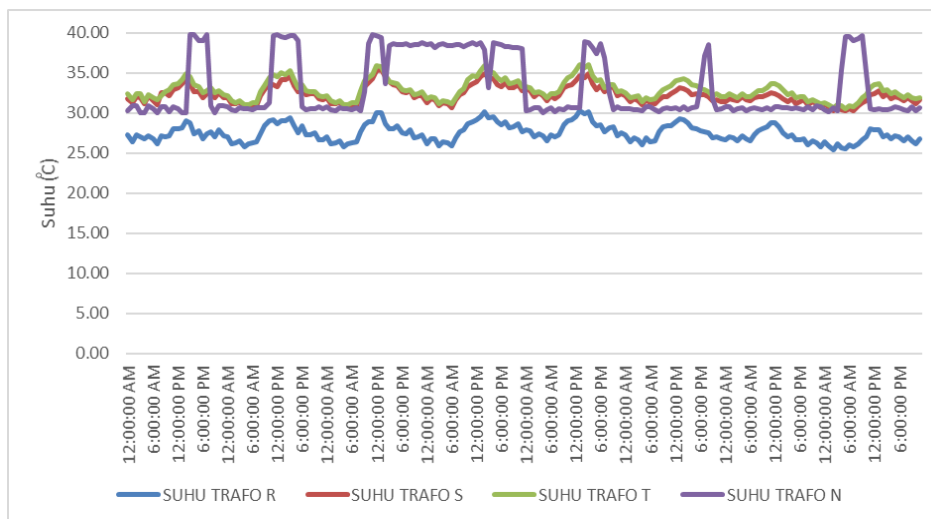
Pada pengukuran rugi-rugi beban transformator yang pada awalnya menggunakan satuan ampere (A) akan diubah dengan satuan per unit (p.u). Satuan p.u digunakan sebagai penyederhanaan nilai perhitungan dalam analisa sistem tenaga listrik. Dan apabila ingin mengetahui nilai sebenarnya maka dapat dirujuk Kembali ke nilai referensinya. Pada Tabel 6, nilai arus harmonisa diubah menjadi satuan p.u. Hal ini didapatkan dari nilai sebenarnya dibandingkan dengan nilai referensi. Nilai sebenarnya diambil dari arus harmonisa pada orde yang akan dihitung dan untuk nilai referensi mengacu pada arus harmonik pada orde 1.

Pada Gambar 5, nilai pengukuran %THDi pada ketiga fasa transformator. Dari hasil pengukuran nilai %THDi dari jam 08.00 – 15.00, terlihat pada fasa R memiliki nilai rata-rata %THDi lebih besar daripada fasa lainnya. Karena hal tersebut maka akan dianalisa juga rugi-rugi tembaga (P_{cu}) dan rugi-rugi eddy current pada fasa R. Pada Tabel 7 terdapat komponen rugi-rugi daya sudah dalam satuan p.u. Untuk transformator digunakan tipe *Oil-filled* dengan kapasitas <1MVA maka nilai %P_{ECR} yang digunakan sebesar 1%.

Dengan memasukkan data – data pada table 6 dan 7 dalam persamaan (3). Maka besarnya nilai rugi – rugi daya yang didapat sebesar 1,079 p.u, dimana nilai PEC-R sesuai tabel 7 adalah 0,01 Berdasarkan hasil pengukuran maka perhitungan rugi-rugi beban (P_{LL}) dalam per unit pada fasa R, S dan T adalah sebagai berikut :

$$\begin{aligned}
 P &= \sqrt{3} \times V \times I \cos\Phi \\
 &= 1,732 \times 234,12 \times 3,55 \times 0,95 \\
 &= 1367,5 \text{ Watt}
 \end{aligned}$$

Nilai rugi – rugi tembaga (P_{Cu}), dan rugi – rugi eddy current (P_{ec}) pada table 7 jika diubah dalam satuan watt adalah: P_{Cu} didapatkan dari perkalian antara rugi-rugi I^2R dan hasil perhitungan P_{LL} dalam satuan watt. Maka hasil yang didapatkan sebesar 57,98 W dan 50,60 W untuk nilai rugi-rugi eddy current (P_{ec}). Sehingga total rugi – rugi daya pada transformator 3 fasa yang didapatkan dari penjumlahan hasil rugi-rugi tembaga dan eddy current adalah sebesar 108,58 W.



Gambar 6. Suhu transformator pada fasa R, S, T dan N

Selain distorsi harmonisa juga mempengaruhi suhu pada transformator. Pada Gambar 6 terlihat suhu transformator sampai mencapai 40C pada fasa N dominan pada jam 12 siang sampai 6 sore. Hal ini disebabkan pada siang hari beberapa peralatan kampus seperti ruang laboratorium dan bengkel lebih banyak digunakan. Peralatan yang digunakan untuk praktek kebanyakan menggunakan lampu hemat energi, motor listrik, komputer dan beban lainnya. Hal itu juga menyebabkan terjadinya ketidakseimbangan beban pada transformator. Ketidakseimbangan beban dapat mengakibatkan adanya arus pada fasa N dan menaiknya suhu pada tranformator.

Arus dengan harmonisa dengan frekuensi yang tinggi akan menimbulkan tambahan losses akibat bertambahnya rugi-rugi edy current pada inti, meningkatnya rugi-rugi akan menaikkan suhu transformator. Demikian pula pada konduktor belitan transformator, skin effect akan terasa lebih besar dan meningkatkan resistasi konduktor, meningkatnya resistansi konduktor belitan akan menaikkan disipasi daya pada belitan yang pada akhirnya akan meningkatkan suhu konduktor. Pada transformator dengan belitan tersier delta, dapat mengurangi harmonisa kelipatan-3 pada sisi primer, perlu diperhatikan rating daya dari transformator tersebut (umumnya 1/3 dari kapasitas trafo) terutama yang terhubung dengan beban berharmonisa tinggi. Meningkatnya disipasi daya baik pada inti maupun belitan akan meningkatkan temperatur yang dapat memperpendek umur dari isolasi belitan maupun minyak transformator.

4. PENUTUP

Pengukuran, pengujian dan Analisa data telah dilakukan pada penelitian ini untuk meneliti dampak harmonisa transformator 3 fasa yang diberikan beban non-linier. Pengoperasian inverter sebagai pengendali motor induksi 3 fasa akan menimbulkan distorsi harmonik arus dengan spektrum frekuensi ke 3, 5, 7, 9, 11 dengan THDI % untuk fasa R, S dan T masing masing sebesar 32,19%; 32,21% dan 32,19% pada transformator 3 fasa yang melebihi standar ditetapkan IEEE No. 519 thn 2014 sebesar $\leq 8\%$. Harmonisa tegangan dengan spektrum frekuensi ke 3,5,7,9,11 dengan THD % untuk fasa R,S dan T masing masing sebesar 1,37%, 1,38% dan 1,40 % dimana nilai ini masih berada dalam nilai standar yang ditetapkan IEE E No. 519 thn 2014 sebesar $\leq 5\%$.

Harmonisa arus yang timbul pada transformator 3 fasa mengakibatkan terjadinya kerugian Cu sebesar 0,0424 pu (setara dengan 57,98 W) dan rugi arus Eddy sebesar 0,0370 p.u (setara dengan 50,60W) yang mengakibatkan terjadinya kenaikan temperature.

DAFTAR PUSTAKA

Ahsan, E. E., Shobug, M. A., Tanim, M. M. H., & Reza, M. H. (2020). Harmonic Distortion Reduction of Transformerless Inverter's Output Voltage Using 5-Level Single-Phase Inverter and LCL Filter. *2020 2nd International Conference on Advanced Information and Communication Technology, ICAICT 2020*, 251–256. <https://doi.org/10.1109/ICAICT51780.2020.9333510>

Anu, G., & Fernandez, F. M. (2020). Identification of Harmonic Injection and Distortion Power at Customer Location. *Proceedings of International Conference on Harmonics and Quality of Power, ICHQP, 2020-July* (4), 0–4. <https://doi.org/10.1109/ICHQP46026.2020.9177869>

Ariana, I. G., Rinas, I. W., & Arjana, I. G. . (2017). Analisis Pengaruh Harmonisa Terhadap Rugi -Rugi Daya (Losses) Pada Transformator Di Penyulang Sedap Malam. *Teknologi Elektro*, 16(1), 97–106. <https://doi.org/10.24843/mite.1601.14>

Arrillaga, J., & Watson, N. R. (2003). Power System Harmonics. In *John Wiley & Sons Ltd*. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-823346-7.00002-5>

Dhavitra, R., Firdaus, F., & Feranita, F. (2015). Analisis Dampak Total Harmonic Distortion Terhadap Losses Dan Derating Pada Transformator Distribusi Di Fakultas Teknik Universitas Riau. *Jurnal Online Mahasiswa Fakultas Teknik Universitas Riau*, 2(1), 1–16.

Dugan, R. C., McGranaghan, M. F., Santoso, S., & Beaty, H. W. (2012). Power System Quality. In *McGraw Hill Professional* (Third Edit, Vol. 11). <https://doi.org/10.1109/MPER.1992.161462>

Hariato, T., Shalahuddin, Y., & Widining K., D. A. (2018). Filter Pasif Single Tuned LC sebagai Kompensator Harmonisa Pada Beban Listrik Rumah Tangga Menggunakan Matlab Simulink. *Setrum : Sistem Kendali-Tenaga-Elektronika-Telekomunikasi-Komputer*, 7(1), 127–135. <https://doi.org/10.36055/setrum.v7i1.3416>

IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems. (2014). *IEEE Std 519-2014 (Revision of IEEE Std 519-1992)*, 2014, 1–24. <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2014.6826459>

Kapil, S. (2019). *EFFECTIVE DESIGN OF STATCOM CONSIDERING FUNDAMENTAL FREQUENCY CURRENT , ACTIVE HARMONIC FILTERING AND ZERO SEQUENCE CURRENT* (Issue November).

Khomarudin, R., & Subekti, L. (2020). ANALISIS PENGARUH KETIDAKSEIMBANGAN BEBAN DAN HARMONISA TERHADAP ARUS NETRAL PADA TRAFODISTRIBUSI 8 KAPASITAS 500 KVA DI PPSDM MIGAS CEPU. *Jurnal Listrik, Instrumentasi Dan Elektronika Terapan*, 1(2), 28–33.

Paul, D. (2017). Phasor diagram of a single-phase-ground fault current in a high-resistance grounded power system. *2017 IEEE/IAS 53rd Industrial and Commercial Power Systems Technical Conference, I and CPS 2017*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/ICPS.2017.7945108>

Pengfei, J., Shuqi, Z., Xinru, Y., Chao, W., & Jianxin, G. (2019). The On-site Measurement Research of Converter Transformer Harmonic Losses Based on Harmonic Power Source. *ICHVE 2018 - 2018 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application*, 4, 1–3. <https://doi.org/10.1109/ICHVE.2018.8642022>

Rumakat, J., & Fauziah, D. (2021). Analisis Beban Tidak Seimbang Terhadap Arus Netral dan Rugi-Rugi pada Penghantar Netral Transformator di Rayon Baguala Ambon. *Prosiding Seminar Nasional Energi, Telekomunikasi Dan Otomasi SNETO 2021*, 334–345.

Suresh Kumar, V., & Saravanan, V. (2015). Harmonic distortion in a modern cement industry - A case study. *2015 Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC)*, 1–4. <https://doi.org/10.1109/AUPEC.2015.7324887>

Suryadi, A. (2017). Dampak Harmonisa Terhadap Peningkatan Temperatur Transformator Distribusi 1000 kVA di Politeknik Enjineri Indorama. *Jurnal Simetris*, 8(2), 421–432.

Tanamal, H., Herawati, A., Daratha, N., & Anggraini, I. N. (2019). Analisis Pengaruh Beban Tak

Seimbang Terhadap Arus Netral Pada Trafo IV GI Sukamerindu Bengkulu. *Jurnal Amplifier : Jurnal Ilmiah Bidang Teknik Elektro Dan Komputer*, 9(2), 7–13. <https://doi.org/10.33369/jamplifier.v9i2.15377>

Venikar, P. A., Ballal, M. S., Umre, B. S., & Suryawanshi, H. M. (2015). Transformer incipient inter-turn fault detection based on no-load current harmonic analysis. *2015 IEEE Eindhoven PowerTech, PowerTech 2015*, 2, 1–5. <https://doi.org/10.1109/PTC.2015.7232294>