ANALISIS DAMPAK *TOTAL HARMONIC DISTORTION* TERHADAP *LOSSES* DAN *DERATING* PADA TRANSFORMATOR DISTRIBUSI DI FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS RIAU

Robby Dhavitra*, Firdaus, Feranita****

*Alumni Teknik Elektro Universitas Riau ** Jurusan Teknik Elektro Universitas Riau
Kampus Bina Widya KM 12,5 Simpang Baru Pekanbaru 28293
Jurusan Teknik Elektro Universitas Riau
Telepon : (0761) 66595, Fax. 66595, *website* : http//ee.ft.unri.ac.id

E-mail : robbydhavitra.ft@gmail.com

ABSTRACT

One of the aspects that can affect reduced the quality of electricity is the incidence of harmonics on electric waves due to by non linear loads, causing additional losses and led to decrease in work capacity (derating) the distribution transformer. Results of measurement of harmonics in distribution transformers in Riau University engineering faculty for one week, at certain times indicate the value percentage of 12.57% TDD exceeding the IEEE 519-1992 standard is 5%. This proves that the transformer impaired harmonic currents. As for the voltage distortion does not have problems (not exceeding standards). Based on the measurement results of 18.57% current THD cause losses of 19.3 kW and has a value of 27.4% THDF thus decreasing the capacity of power (kVA) installed or derating of 72.6%.

Keywords : Harmonics, Total Harmonic Distortion and Derating

PENDAHULUAN

Pada dasarnya kualitas atau mutu listrik yang baik adalah listrik yang mempunyai tegangan dan frekuensi yang stabil. Namun tidaklah mungkin untuk memenuhi keadaan yang ideal tersebut, karena ada berbagai macam gangguan. Di Indonesia listrik bersumber dari Perusahaan Listrik Negara (PLN) yang memiliki tegangan 220 volt dan frekuensi 50 Hz. Salah satu aspek yang dapat mempengaruhi berkurangnya kualitas listrik adalah timbulnya harmonisa pada gelombang listrik, bentuk gelombang listrik dari tegangan atau arus tidak lagi sinusoidal murni namun sudah mengalami distorsi, walaupun disuplai dengan tegangan sinusoidal. Lampu *fluorescent* yang menggunakan elektronik ballast dan peralatan elektronik dengan SMPS (*Switch Mode Power Supply*) seperti komputer, printer, mesin *photocopy* merupakan beban-beban non linear yang menyebabkan timbulnya harmonisa pada jaringan sistem tenaga listrik. Kadar harmonisa yang tinggi pada sistem tenaga listrik tidak dikehendaki karena merugikan dan dianggap sebagai gangguan dalam sistem tenaga listrik. Pembebanan pada transformator distribusi oleh beban non linear akan menimbulkan penambahan rugi-rugi (*losses*) yang diakibatkan oleh pengaruh tingkat harmonisa. Kinerja transformator distribusi ditentukan oleh parameter rugi-rugi daya yang terjadi pada transformator serta penurunan kapasitas kerja (*derating*) yang terjadi akibat distorsi harmonisa tersebut.

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui tingkat kandungan THD (*Total Harmonic Distortion*) dengan cara melakukan pengukuran pada sistem tenaga, perhitungan *losses* dan *derating* serta analisisnya pada trafo 3 fasa 400 kVA di Fakultas Teknik Universitas Riau, sehingga diketahui apakah sudah sesuai dengan standar yang diperbolehkan pada sistem kelistrikan yang ada sekarang.

BAHAN DAN METODE

Metode yang dilakukan dalam penelitian ini adalah metode komparasi antara hasil pengukuran dengan standar IEEE 519-1992. kemudian akan dihitung *losses* dan *derating* yang terjadi pada transformator akibat pengaruh THD (*total harmonic distortion*).

Peralatan Penelitian

1. Transformator Tiga Fasa
Transformator yang digunakan untuk melayani seluruh beban fakultas teknik sebanyak 2 unit (identik) yang dipasang paralel dengan spesifikasi sebagai berikut :

Nama Pabrik	: PT. Morawa Electrik Transbuana Medan
Tahun Pembuatan	: 2001, Indonesia
Kapasitas Trafo	: 400 kVA
Jumlah phasa	: 3
Frekuensi	: 50 Hz
Tegangan Primer	: 20 kV
Tegangan Sekunder	: 231/400 V
Arus Primer	: 11,55 A
Arus Sekunder	: 577,4
Vektor Group	: DyN5
Impedansi	: 4%
Sistem Pendingin	: ONAN

2. *Power quality analyzer* KEW 6310 Ver. 2.00 produk *Kyoritsu Electrical Instrument Works*, LTD. Tokyo, Japan. Peralatan ini dipergunakan sebagai alat ukur distorsi harmonik, yaitu arus harmonik maupun tegangan harmonik pada transformator (*real-time*) dengan tampilan digital. Melalui alat tersebut akan didapat nilai-nilai parameter V_{rms}, I_{rms}, THD arus maupun tegangan tiap phasa beserta nilai-nilai dan *phase angle* setiap ordenya serta spektrum harmonik.

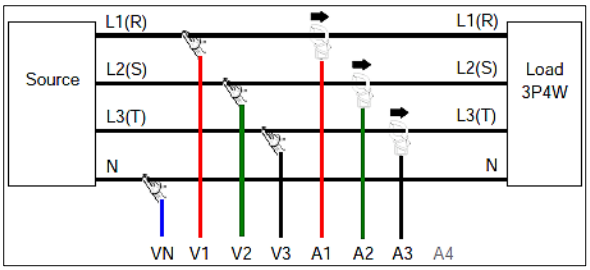
3. *Clamp sensor* M-8125, *range measure* : 500A *type* (ϕ40mm), peralatan ini digunakan untuk sensor arus beban.

4. *Voltage test lead*, M-7141 : 1 Set (*black, red, green, blue*), peraltan ini digunakan untuk mengukur tegangan beban.

5. seluruh peraltan yang terdapat dalam ruang teori maupun laboratorioum yang tenaga listriknya disuplai dari trafo sebagai objek penelitian.

Pengumpulan Data Hasil Pengukuran

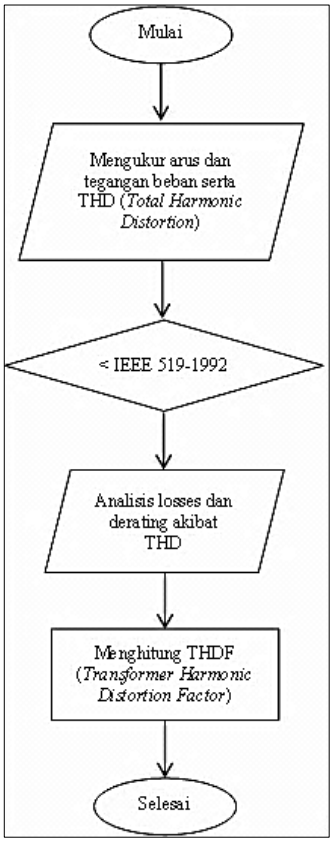
Data yang diperoleh diantaranya yaitu data diagram pembebanan trafo dan data hasil pengukuran yang dilakukan selama 1 minggu (aktivitas rutinitas di fakultas teknik universitas riau) dan data hasil pengukuran pada hari libur nasional. Data hasil pengukuran berupa data yang direkam dengan interval satu (1) jam oleh alat *Power Quality Analyzer* KEW 6310 yang digunakan sebagai alat ukur distorsi harmonik, yaitu arus harmonik maupun tegangan harmonik pada transformator (*real-time*) dengan tampilan digital. Melalui alat tersebut akan didapat nilai-nilai parameter V_{rms}, I_{rms}, THD arus maupun tegangan tiap phasa beserta *phase angle* setiap ordenya dan spektrum harmonik.
Pada penelitian ini pengambilan data dilakukan dengan cara pengukuran kandungan harmonik tegangan dan arus dari sisi sekunder pada kedua trafo dengan beban sesuai dengan keadaan beban di Fakultas Teknik.



Gambar 1. Diagram Pengukuran Pada Jaringan Tiga Fasa (*Instruction Manual Power Quality Analyzer* KEW 6310)

Prosedur Penelitian

Penelitian ini dibagi dalam beberapa tahap, lebih jelasnya dapat dilihat pada gambar di bawah ini.



Gambar 2. Diagram Alir Penelitian

Teknik Analisis Data

Untuk menganalisa pengaruh harmonisa terhadap kualitas tegangan dan arus ditentukan oleh indeks harmonik, berikut adalah beberapa pengertian dan persamaan yang terdapat dalam analisis harmonik.

1. *Total Harmonic Distortion* (THD)
THD merupakan rasio antara nilai RMS dari komponen harmonisa dan nilai RMS dari nilai fundamental dan biasanya dinyatakan dalam persen (%). Indeks ini digunakan untuk menyatakan deviasi dari bentuk gelombang periodik yang mengandung harmonisa terhadap gelombang sinusoidal murni. Total Distorsi Harmonik (THD) tegangan dan arus, yaitu :

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{h>1}^{h_{max}} M_h^{\,2}}}{M_1} \qquad (1)$$

Keterangan :
THD = *Total Harmonic Distortion*
M_h = nilai rms arus atau tegangan harmonik ke-*h*
M_1 = nilai rms arus atau tegangan pada frekuensi dasar

Kontribusi masing-masing komponen harmonik terhadap distorsi arus dan tegangan dinyatakan oleh IHD (*Individual Harmonic Distortion*) merupakan rasio nilai RMS dari harmonik individual terhadap nilai RMS fundamental. Nilai IHD untuk harmonik tegangan dan arus pada orde ke-*h* didefinisikan sebagai berikut :

$$\frac{V_h}{V_1} \times 100\% \text{ dan } \frac{I_h}{I_1} \times 100\% \qquad (2)$$

2. *Total Demand Distortion* (TDD)
Tingkat distorsi arus dapat dilihat dari nilai THD, akan tetapi hal tersebut dapat saja salah saat diinterprestasikan. Aliran arus yang kecil dapat memiliki nilai THD yang tinggi, namun tidak menjadi ancaman yang dapat merusak ke sistem tenaga listrik. Beberapa analis mencoba untuk menghindari kesulitan seperti ini dengan melihat THD pada arus beban puncak frekuensi dasar dan bukan melihat sampel sesaat pada frekuensi dasar. Hal ini disebut *total demand distortion* (TDD) dan masuk dalam standar IEEE 519-1992, tentang "*Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power System*". Nilai TDD dapat didefinisikan sebagai berikut :

$$TDD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h_{max}} I_h^{\,2}}}{I_L} \times 100\% \qquad (3)$$

Keterangan :
I_h = arus harmonik orde ke-*h*
I_L = arus beban maksimum pada frekuensi dasar pada PCC (*Point of Common Couplin*)

Terdapat dua cara untuk mengukur I_L, pertama yaitu pada beban yang telah terpasang pada sistem lalu dihitung nilai rata-rata dari arus beban maksimum dari 12 bulan sebelumnya. Sedangkan untuk sistem yang baru, I_L harus diperkirakan berdasarkan profil beban yang akan dipasang. nilai I_L dapat ditentukan dengan persamaan berikut :

$$I_L = \frac{kW}{PF\sqrt{3}kV} A \qquad (4)$$

kW = permintaan rata-rata kilowatt
PF = rata-rata faktor daya
kV = tegangan *line-to-line* di PCC

Hubung singkat tiga phasa pada PCC dapat ditentukan dengan persamaan berikut :

$$I_{SC} = \frac{1000 \times MVA}{\sqrt{3}kV} A \quad (5)$$

Dimana MVA dan kV mewakili kapasitas hubung singkat tiga phasa dalam megavoltampere dan tegangan *line-to-line* di PCC.

3. *Losses* Dan *Derating* Transformator Akibat Harmonisa

Load loss (P_{LL}) transformator dalam per unit, dapat dicari dengan rumus sebagai berikut :

$$P_{LL} = \sum I_h{}^2 + \left(\sum I_h{}^2 \times h^2 \right) \cdot P_{EC-R}(p \cdot u) \quad (6)$$

Keterangan :

P_{EC-R} : faktor *eddy current loss*
h : Orde Harmonisa
I_h : Arus Harmonisa
$\sum I_h{}^2$: Rugi I^2R (rugi tembaga) dalam p.u
$\left(\sum I_h{}^2 \times h^2 \right) P_{EC-R}$: *EddyCcurrent Loss* (p.u)

Tabel 1 *Typical Values of* P_{EC-R}

Type	MVA	*Voltage*	% P_{EC-R}
Dry	≤ 1		3-8
	≥ 1.5	5 kV HV	12-20
	≤ 1.5	15 kV HV	9-15
Oil – filled	≤ 2.5	480 V LV	1
	2.5-5	481 V LV	1-5
	> 5	482 V LV	9-15

Sumber: Dugan, 2004:209

Nilai THDF dapat ditentukan dengan menggunakan rumus sebagai berikut :

$$THDF = \frac{1{,}414 \times (arusphaserms)}{(aruspuncakphasesessat)} \times 100\,\% \quad (7)$$

$$= \frac{1{,}414 \times \left(\frac{1}{3} \times (Ir + Is + It) rms \right)}{\frac{1}{3} \times (Ir + Is + It) puncak} \times 100\,\%$$

kVA baru = THDF x kVA Pengenal

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pelaksanaan pengambilan data pada trafo dilakukan dengan rentang waktu pengukuran selama satu minggu (02 – 08 Juni 2014) dan satu hari libur nasional (27 Mei 2014).

Pemilihan Standar Harmonisa Tegangan Dan Arus

Timbulnya harmonisa telah melatar belakangi terbitnya beberapa standar atau regulasi. Untuk memenuhi kebutuhan standarisasi tersebut, *Institute of Electrical and Electronics Engineer* (IEEE) telah menerbitkan IEEE Std. 519-1992. Standar ini telah diadopsi oleh Amerika, yaitu oleh ANSI (American National Standard Institute).

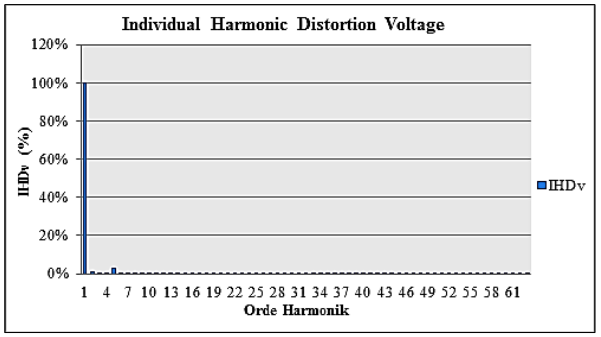
1. Standar Harmonisa Tegangan

Tabel 2 Standar Batas Maksimum Distorsi Tegangan

Bus Voltage at PCC	*Individual Voltage Distortion* (%)	*Total Voltage Distortion THD* (%)
V ≤ 69 kV	3.00	5.00
69 kV < V ≤ 161 kV	1.50	2.50
V > 161 kV	1.00	1.50

Sumber: IEEE Standar 519-1992, tabel 11.1

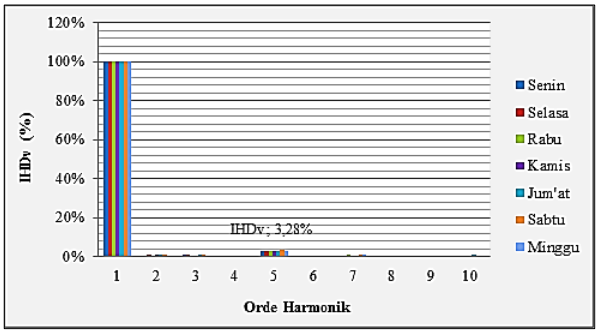
Untuk meninjau standar harmonik tegangan (THDv) maka nilai tegangan pengenal yang dilihat adalah sisi sekunder trafo (PCC) sebesar 400 V < 69 kV sehingga tabel Standar IEEE 519-1992 yang digunakan sebagai dasar tinjauan adalah THDv = 5 % dan IHDv = 3 %.



Gambar 3 Spektrum IHDv Pada Saat Tegangan Maksimum Pengukuran Hari Libur Nasional

Contoh perhitungan IHDv pada orde ke-5 dengan menggunakan persamaan 2, yaitu :

$$\frac{V_5}{V_1}\times 100\,\% = \frac{6{,}628}{234{,}1}\times 100\,\% = 2{,}83\%$$



Gambar 4 Spektrum IHDv Pada Saat Tegangan Maksimum Pengukuran Selama Satu Minggu

Dari hasil analisa IHDv diketahui bahwa trafo distribusi di fakultas teknik mengalami gangguan harmonik ganjil karena nilai IHDv pada orde ke-5 melebihi standar. Perhitungan IHDv pada orde ke-5 sebagai berikut:

$$\frac{V_5}{V_1}\times 100\,\% = \frac{7{,}331}{223{,}9}\times 100\,\% = 3{,}28\%$$

2. Standar Harmonisa Arus

Aliran arus yang kecil dapat memilki nilai THD yang tinggi namun tidak menjadi ancaman yang dapat merusak sistem, walaupun demikian kandungan harmonisa ini tetap berpengaruh terhadap penambahan *losses* dan *derating* pada transformator. Untuk menghindari kesulitan seperti ini dapat dengan melihat THD pada arus beban puncak frekuensi dasar dan bukan melihat sampel sesaat pada frekuensi dasar. Hal ini disebut dengan *Total Demand Distortion* (TDD) dan masuk dalam Standar IEEE 519-1992. Untuk meninjau hasil perhitungan TDD dan IHD arus pada standar IEEE 519-1992, maka dihitung terlebih dahulu nilai I_{SC}/I_L. Permintaan daya rata-rata selama 1 bulan (pada tanggal 12 Mei – 08 Juni 2014) yaitu 100,7 kW dengan cos ϑ rata-rata 0,87. Perhitungan arus beban maksimum (I_L) dan arus hubung singkat (I_{SC}) dengan menerapkan persamaan (4) dan (5), yaitu sebagai berikut :

$$I_L = \frac{100{,}7}{0{,}87\times\sqrt{3}\times 0{,}4} = 167{,}07\text{ A}$$

$$I_{SC} = \frac{1000\times 0{,}4}{\sqrt{3}\times 0{,}4} = 577{,}4\text{ A}$$

Karena transformator ada dua unit, maka I_{SC} atau arus hubung singkat dikali 2, sebagai berikut :

$$I_{SC} = 577{,}4\times 2 = 1154{,}8\text{ A}$$

Maka nilai rasio I_{SC}/I_L adalah sebagai berikut:

$$\frac{I_{SC}}{I_L} = \frac{1154{,}8}{167{,}07} = 6{,}91$$

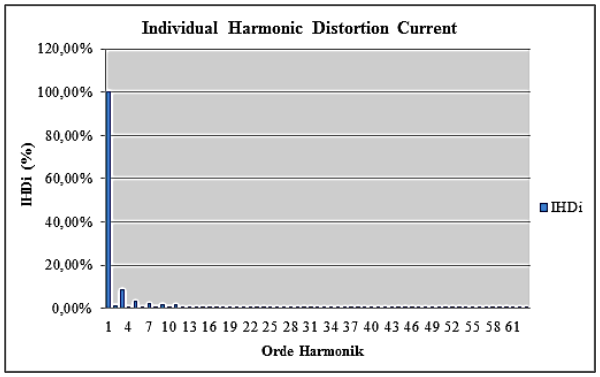
Dari hasil perhitungan I_{SC}/I_L = 6,91 maka sesuai dengan Tabel 3 standar harmonik arus yang digunakan sebagai dasar tinjauan adalah sebagai berikut:

I_{SC}/I_L	= < 20
TDD	= 5,0 %
IHD Orde $h<11$	= 4,0 %
IHD Orde $11\le h<17$	= 2,0 %
IHD Orde $17\le h<23$	= 1,5 %
IHD Orde $23\le h<35$	= 0,6 %
IHD Orde $35\le h$	= 0,3 %

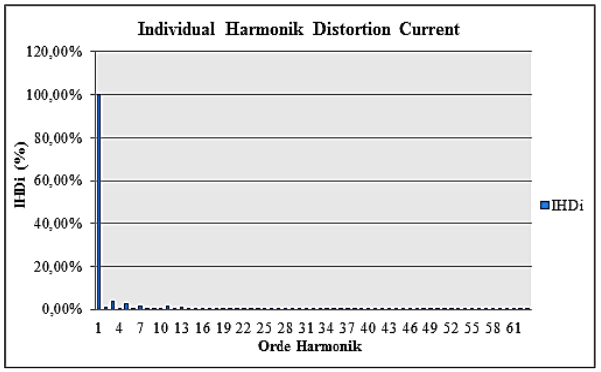
Tabel 3 IEEE Standar 519-1992, Standar Batas Distorsi Arus Harmonisa Maksimum

Maximum Harmonic Current Distortion In Percent I_L						
Individual Harmonic (Odd Harmonics)						
$V_n \leq 69kV$						
I_{SC}/I_L	**< 11**	**11≤h≤17**	**17≤h≤23**	**23≤h≤25**	**35≤h**	**TDD(%)**
<20*	4.0	2.0	1.5	0.6	0.3	5.0
20-50	7.0	3.5	2.5	1.0	0.5	8.0
50-100	10.0	4.5	4.0	1.5	0.7	12.0
100-1000	12.0	5.5	5.0	2.0	1.0	15.0
>1000	15.0	7.0	6.0	2.5	1.4	20.0
$69kV < V_n \leq 161kV$						
<20*	2.0	1.0	0.75	0.3	0.15	2.5
20-50	3.5	1.75	1.25	0.5	0.25	4.0
50-100	5.0	2.25	2.0	0.75	0.35	6.0
100-1000	6.0	2.75	2.5	1.0	0.5	7.5
>1000	7.5	3.5	3.0	1.25	0.7	10.0
$V_n > 69kV$						
<50	2.0	1.0	0.75	0.3	0.15	2.5
≥ 50	3.30	1.5	1.15	0.45	0.22	3.75
Even harmonics are limited to 25% of the odd harmonics above						
Current distortions that result in a dc offset, e.g., hal-wave converters, are not allowed						
**All power generation equipment is limited to these values of current distortion, regardless of actual I_{SC}/I_L*						
Where *I_{SC} = maximum short-circuit current at PCC* *I_L = maximum demand load current (fundamental frequency component) at PCC*						

Sumber: IEEE Standar 519-1992, tabel 10.3, tabel 10.4, tabel 10.5

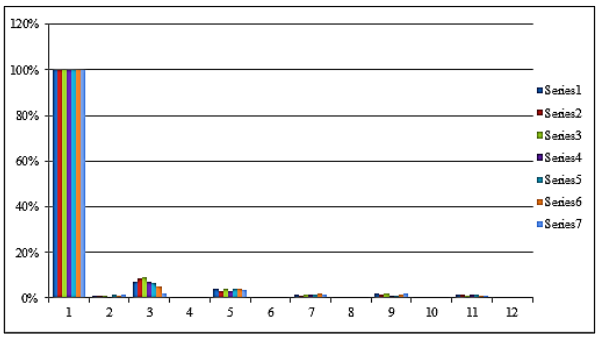


Gambar 5 Spektrum IHDi Pada Saat THDi Max Pengukuran Hari Libur Nasional

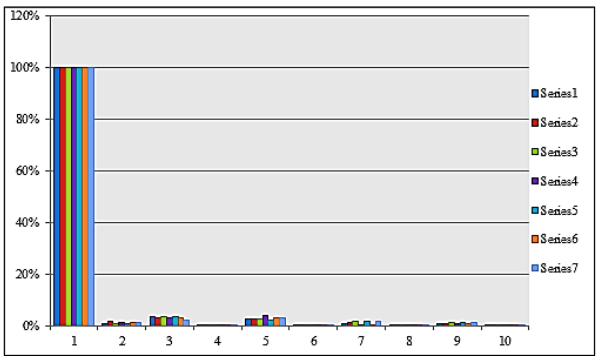


Gambar 6 Spektrum IHDi Pada Saat THDi Min Pengukuran Hari Libur Nasional

Hasil perhitungan TDD dan IHD Arus saat THD arus tertinggi dan THD arus terendah pada pengukuran hari libur nasional dapat dilihat nilai TDD dan IHD arus tidak ada yang melebihi standar, untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada Lampiran (A.1) dan (A.2).



Gambar 7 Spektrum IHDi Pada Saat THDi Max Pengukuran Selama Satu Minggu



Gambar 8 Spektrum IHDi Pada Saat THDi Min Pengukuran Selama Satu Minggu

Dari pengukuran dan perhitungan distorsi harmonisa selama satu minggu dapat dilihat karakteristik level harmonisa yang terjadi, yaitu hampir setiap hari nilai persentase TDD melebihi standar yang diizinkan. Hal ini membuktikan bahwa transformator mengalami gangguan arus harmonik. Hasil perhitungan TDD dan IHD Arus pada saat THD arus tertinggi selama pengukuran satu minggu, dapat dilihat nilai TDD dan IHD arus tidak melebihi standar. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada Lampiran (A.3) dan (A.4).
Namun hal ini tidak terlalu bermasalah karena THD arus yang tinggi terjadi dengan aliran arus yang kecil yang tidak membahayakan sistem, namun demikian kandungan harmonisa ini tetap berpengaruh terhadap penambahan *losses* dan *derating* pada transformator.

Perhitungan *Losses* Pada Transformator Akibat Harmonisa

Trafo memiliki rugi-rugi pada saat kondisi berbeban dan pada saat kondisi tanpa beban. Dari data SPLN D3.002-1 : 2007, maka rugi-rugi trafo pada saat kondisi tanpa beban adalah sebesar 4,445 kW, karena ada dua trafo maka : 4.445 x 2 = 8,890 kW.

Analisis *Losses* Pada Transformator

S = 800 kVA
$\text{Cos}\,\varphi_{\text{rata-rata}} = 0{,}87$

$$P_{BaseSatuPhasa} = \frac{S \cdot Cos\vartheta_{rata-rata}}{\sqrt{3}}$$

$$= \frac{800kVA \times 0{,}87}{\sqrt{3}} = 401{,}84\ kW$$

$$P_{BasetigaPhasa} = S \cdot Cos\vartheta_{rata-rata}$$

$$= 800kVA \times 0{,}87 = 696\ kW$$

Untuk perhitungan *losses* transformator diambil salah satu contoh dimana nilai THD arus tertinggi yaitu 18,57% pada hari Rabu pukul 05.00 WIB, sebagai berikut:

Losses pada phasa T setelah terpengaruh harmonisa dapat dicari dengan cara sebagai berikut:
Untuk orde 1 :

$$I_1\,(PU) = \frac{I_1}{I1} = \frac{38{,}56}{38{,}56} = 1{,}000\ \text{p.u}$$

Dengan cara yang sama, maka diperoleh arus harmonisa dalam satuan per-unit pada phasa T, seperti yang ditunjukkan tabel 4.7 di bawah ini :

Tabel 4 Perhitungan *Losses* Pada Fasa T

Orde (h)	I_h (%)	I_h (A)	I_h (pu)	I_h^2 (pu)	I_h^2 x h^2 (pu)
1	100,0	38,56	1,000	1,000000	1,0000
2	1,40	0,54	0,014	0,000197	0,0008
3	16,82	6,48	0,168	0,028280	0,2545
4	0,32	0,12	0,003	0,000010	0,0002
5	5,62	2,17	0,056	0,003156	0,0789
6	0,48	0,19	0,005	0,000024	0,0008
7	1,93	0,74	0,019	0,000372	0,0182
8	0,40	0,16	0,004	0,000016	0,0010
9	3,47	1,34	0,035	0,001207	0,0978
...	...	...	...	...	...
...	...	...	...	...	...
61	0,15	0,06	0,002	0,000002	0,0088
62	0,33	0,13	0,003	0,000011	0,0423
63	0,24	0,09	0,002	0,000006	0,0229
Jumlah				1,034498	2,3525

Berdasarkan tabel di atas, maka perhitungan rugi-rugi beban (P_{LL}) dalam per unit dapat ditentukan dengan persamaan (6), pada phasa T adalah sebagai berikut:

$$P_{LL} = \sum I_h{}^2 + \left(\sum I_h{}^2 \times h^2\right) \cdot P_{EC-R}(p \cdot u)$$

$$P_{LL} = 1{,}034498 + 2{,}3525 \times 0{,}01 = 1{,}058023 \text{ p.u}$$

Sehingga rugi I^2R (rugi tembaga) bertambah sebesar 0,034498 p.u dan rugi *eddy current* bertambah sebesar 0,013525 p.u.

Penambahan *Losses* Pada Fasa Akibat Harmonisa

Arus harmonisa menyebabkan meningkatnya rugi-rugi tembaga, pada phasa T, sebagai berikut:

Rugi tembaga :

$$P_{CU} = 0{,}034498\, p.u \times 401{,}84\ kW$$
$$= 13{,}86\ kW$$

Rugi *eddy current* :

$$Pi = 0{,}013525\, p.u \times 401{,}84\ kW$$
$$= 5{,}44\ kW$$

Untuk rugi histerisis dapat diabaikan karena nilai dari rugi histerisis sangat kecil. Jadi penambahan *losses* pada phasa T sebesar :

$Losses_{\text{phasa T}}$ = P_{CU} + Pi
= 13,86 + 5,44 = 19,30 kW

Dengan cara yang sama, maka diperoleh nilai *losses* pada phasa R dan S, seperti yang ditunjukkan pada tabel di bawah ini.

Tabel 5 *Losses* Tambahan Akibat Terpengaruh Harmonisa

Phasa	THDi (%)	P_{CU}	Pi	Losses (kW)
R	6,66	1,78	0,94	2,72
S	7,34	2,17	1,88	4,04
T	18,57	13,86	5,44	19,30
Total				26,06

Total *losses* Trafo, yaitu :

$losses_{\text{tanpa beban}}$ + $losses_{\text{akibat harmonisa}}$ = 8,89 kW + 26,06 kW = 34,95 kW

Dari hasil perhitungan, dimana rugi-rugi daya pada transformator akibat beban non linear membuktikan bahwa komponen harmonik turut menyebabkan bertambahnya rugi-rugi daya yang terjadi pada transformator saat bekerja melayani beban non linear. Hal ini diakibatkan oleh bertambahnya nilai rugi-rugi daya yang terdiri dari rugi tembaga dan rugi arus eddy yang selalu terdapat pada transformator saat bekerja melayani beban non linear.

Untuk perhitungan yang lebih lengkapnya dapat dilihat pada lampiran (A.7) dan (A.8), yaitu perhitungan penambahan *losses* transformator akibat arus harmonisa tiap fasanya dengan sampel pada saat THD arus tertinggi pengukuran.

Perhitungan *Derating* Transformator Akibat Harmonisa

Dari hasil perhitungan nilai TDD dan IHD pada waktu-waktu tertentu ada yang melebihi standar sehingga mengakibatkan peningkatan rrugi-rugi dan penurunan efisiensi pada transformator. Dengan adanya penurunan efisiensi tranformator maka akan terjadi penurunan kapasitas daya terpasang (*derating*) pada transformator tersebut, maka perlu dilakukan perhitungan *derating*. Untuk melakukan perhitungan nilai THDF (*Transformator Harmonic Distortion Facktor*). THDF merupakan sebuah nilai atau faktor pengali yang digunakan untuk menghitung besar kapasitas baru (kVA baru) transformator. Perhitungan *derating* saat THD Arus 18,57%, maka nilai THDF dapat ditentukan dengan persamaan (7), yaitu :

$$THDF = \frac{1{,}414 \times \left(\frac{1}{3} \times (131{,}29 + 72{,}8 + 38{,}56)\right)}{\frac{1}{3} \times (449{,}2 + 411{,}5 + 390{,}9)} \times 100\,\%$$
$$= 27{,}4\%$$

Derating trafo (kVA) = 800 kVA – 219,28 kVA
= 580,72 kVA

Derating trafo (kW) = $580{,}72 kVA \times 0{,}87$
= 505,23 kW

Derating Trafo (%) = $\frac{580{,}72}{800} \times 100\%$
= 72,6%

Berdasarkan hasil pengukuran pada transformator distribusi di fakultas teknik Universitas Riau dengan nilai THD arus 18,57% memiliki nilai THDF 27,4% sehingga nilai kapasitas daya (kVA) terpasang menjadi 219,28 kVA karena mengalami penurunan sebesar 72,6%. Semakin besar nilai

THD arus yang terjadi maka akan semakin kecil nilai daya terpasang (kVA baru) transformator atau tingkat penurunan kapasitas daya terpasang transformator tersebut semakin besar.
Pada dasarnya, THDF pada suatu transformator dipengaruhi oleh adanya THD dalam transformator tersebut sebagai akibat adanya penggunaan beban non linear pada sisi beban. Hasil perhitungan *derating* transformator distribusi di fakultas teknik Universitas Riau cukup besar, oleh karena itu sebaiknya perlu dilakukan usaha-usaha untuk mengurangi harmonisa atau THD tersebut seperti memasang filter pada transformator agar apabila ada pengembangan dan penambahan pembebanan pada transformator tidak mengalami kendala.

KESIMPULAN

Berdasarkan pengukuran dan analisa THD (Arus dan Tegangan) beserta *losses* akibat harmonisa pada transformator distribusi di fakultas teknik Universitas Riau pada tanggal 02 Juni – 08 Juni 2014 dan pada tanggal 27 Mei 2014, maka Penulis dapat menyimpulkan sebagai berikut:

1. Pada saat pengukuran, THD arus tertinggi terjadi pada jam 22.00 WIB – 05.00 WIB (bukan waktu beban puncak), yaitu 18,57% dan nilai THD tegangan tertinggi terjadi pada jam 20.00 WIB – 22.00 WIB (saat beban puncak), yaitu 3,5%
2. Dari gambar grafik THD arus pada pengukuran selama satu minggu (Lampiran A.6) dapat ditarik kesimpulan bahwa THD arus tertinggi terjadi pada Fasa T di setiap harinya.
3. Berdasarkan analisa rasio I_{SC}/I_L pada standar IEEE 519-1992, maka transformator distribusi di fakultas teknik Universitas Riau memiliki nilai THDv dan TDD sebesar 5%.
4. Pada pengukuran harmonisa arus dan tegangan pada transformator distribusi fakultas teknik Universitas Riau di hari libur nasional tidak ada yang melebihi standar dan pada pengukuran selama satu minggu (rutinitas) diwaktu-waktu tertentu distorsi arus harmonik ada yang melebihi standar dengan nilai TDD sebesar 12,57%, sedangkan distorsi tegangan tidak ada yang melebihi standar.
5. Dilihat dari spektrum IHD arus dan tegangan selama pengukuran satu minggu dapat ditarik kesimpulan bahwa transformator distribusi fakultas teknik mengalami gangguan arus harmonik ganjil, yang paling dominan adalah harmonisa orde ke-3, ke-5, ke-7 dan ke-9.
6. THD arus sebesar 18,57% akan menimbulkan *losses* sebesar 19,3 kW, hal ini membuktikan bahwa semakin besar THD arus yang mengalir pada transformator, maka penambahan *losses* akibat harmonisa semakin besar pula.
7. Berdasarkan hasil pengukuran THD arus dengan nilai 18,57% memiliki nilai THDF 27,4% sehingga mengalami penurunan kapasitas daya (kVA) terpasang menjadi 219,28 kVA atau memiliki *derating* 72,6%.

SARAN

Untuk pengembangan dalam penambahan pembebanan pada transformator sebaiknya dilakukan usaha-usaha untuk mengurangi harmonisa, seperti memasang filter pada transformator.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Bapak Firdaus, ST., MT dan Ibu Feranita ST., MT selaku pembimbing yang telah mengarahkan dan membimbing Penulis selama penelitian ini. Terima kasih kepada kedua orang tua dan keluarga serta rekan-rekan seperjuangan Teknik Elektro khususnya angkatan 2009 yang telah memberikan dukungan dan motivasi selama ini.

LAMPIRAN

A.1 Hasil Perhitungan TDD dan IHD Arus Pada Saat THD Arus Max Pengukuran Hari Libur Nasional

Tanggal	Orde	TDD dan IHD Standar (%)	TDD dan IHD Pengukuran (%)	Keterangan
Selasa, 27/05/2014	TDD	5,0	3,18	Tidak Melebihi
	$h < 11$	4,0	3,93	Tidak Melebihi
	$11 \le h < 17$	2,0	1,00	Tidak Melebihi
	$17 \le h < 23$	1,5	0,48	Tidak Melebihi
	$23 \le h < 35$	0,6	0,35	Tidak Melebihi
	$35 \le h$	0,3	0,24	Tidak Melebihi

A.2 Hasil Perhitungan TDD dan IHD Arus Pada Saat THD Arus Min Pengukuran Hari Libur Nasional

Tanggal	Orde	TDD dan IHD Standar (%)	TDD dan IHD Pengukuran (%)	Keterangan
Selasa, 27/05/2014	TDD	5,0	3,49	Tidak Melebihi
	$h < 11$	4,0	2,11	Tidak Melebihi
	$11 \le h < 17$	2,0	0,79	Tidak Melebihi
	$17 \le h < 23$	1,5	0,29	Tidak Melebihi
	$23 \le h < 35$	0,6	0,17	Tidak Melebihi
	$35 \le h$	0,3	0,16	Tidak Melebihi

A.3 Hasil Perhitungan TDD dan IHD ArusPada Saat THD Arus Max Pengukuran Selama Satu Minggu

Tanggal	Orde	TDD dan IHD Standar (%)	TDD dan IHD Pengukuran (%)	Keterangan
Senin, 02/06/2014	TDD	5,0	3,38	Tidak Melebihi
	$h < 11$	4,0	3,74	Tidak Melebihi
	$11 \le h < 17$	2,0	0,95	Tidak Melebihi
	$17 \le h < 23$	1,5	0,36	Tidak Melebihi
	$23 \le h < 35$	0,6	0,27	Tidak Melebihi
	$35 \le h$	0,3	0,20	Tidak Melebihi
Selasa, 03/06/2014	TDD	5,0	3,54	Tidak Melebihi
	$h < 11$	4,0	3,49	Tidak Melebihi
	$11 \le h < 17$	2,0	0,93	Tidak Melebihi
	$17 \le h < 23$	1,5	0,51	Tidak Melebihi
	$23 \le h < 35$	0,6	0,24	Tidak Melebihi
	$35 \le h$	0,3	0,21	Tidak Melebihi
Rabu, 04/06/2014	TDD	5,0	4,24	Tidak Melebihi
	$h < 11$	4,0	4,10	Melebihi
	$11 \le h < 17$	2,0	0,70	Tidak Melebihi
	$17 \le h < 23$	1,5	0,43	Tidak Melebihi
	$23 \le h < 35$	0,6	0,29	Tidak Melebihi
	$35 \le h$	0,3	0,20	Tidak Melebihi
Kamis, 05/06/2014	TDD	5,0	4,05	Tidak Melebihi
	$h < 11$	4,0	3,13	Tidak Melebihi
	$11 \le h < 17$	2,0	1,00	Tidak Melebihi

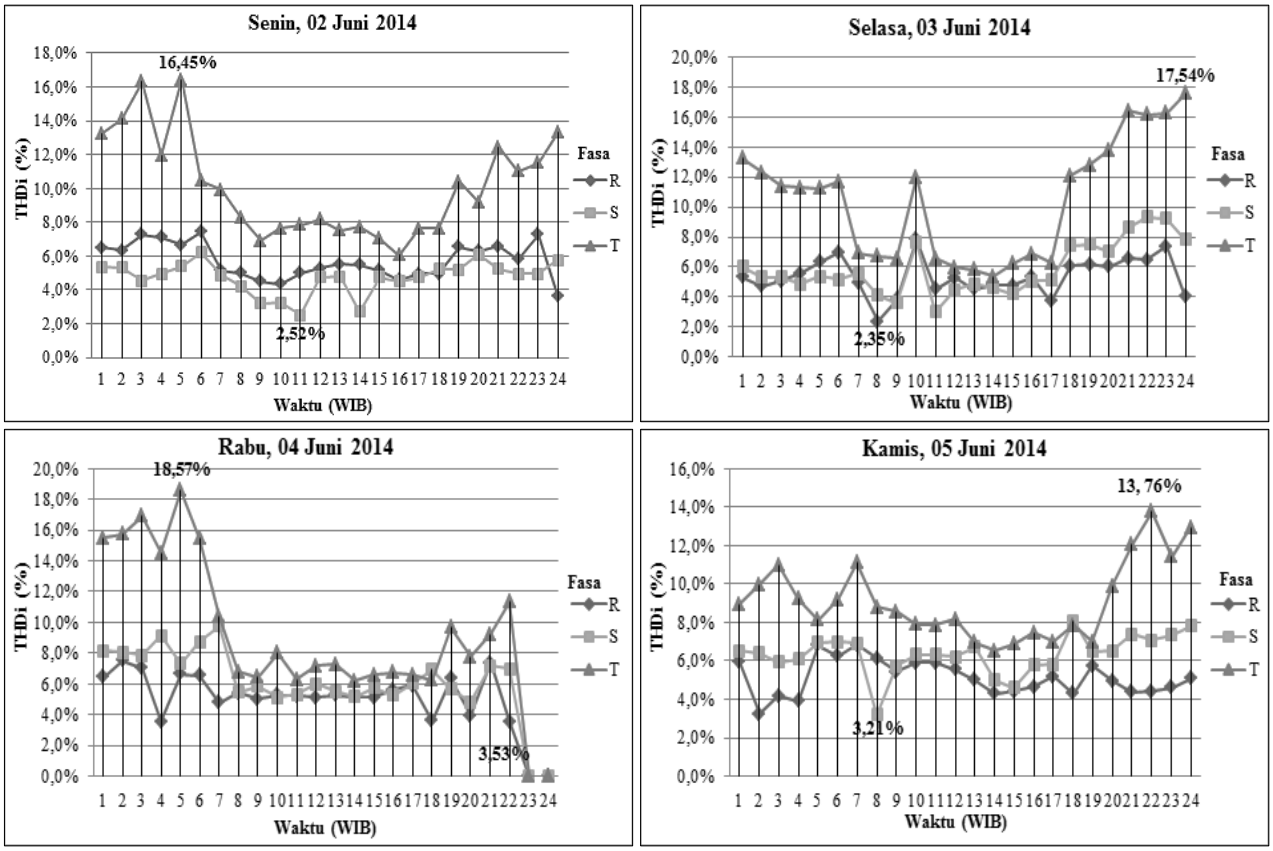
	$17 \le h < 23$	1,5	0,44	Tidak Melebihi
	$23 \le h < 35$	0,6	0,22	Tidak Melebihi
	$35 \le h$	0,3	0,16	Tidak Melebihi
Jum'at, 06/06/2014	TDD	5,0	4,14	Tidak Melebihi
	$h < 11$	4,0	3,24	Tidak Melebihi
	$11 \le h < 17$	2,0	0,74	Tidak Melebihi
	$17 \le h < 23$	1,5	0,38	Tidak Melebihi
	$23 \le h < 35$	0,6	0,22	Tidak Melebihi
	$35 \le h$	0,3	0,15	Tidak Melebihi
Sabtu, 07/06/2014	TDD	5,0	3,36	Tidak Melebihi
	$h < 11$	4,0	3,05	Tidak Melebihi
	$11 \le h < 17$	2,0	0,82	Tidak Melebihi
	$17 \le h < 23$	1,5	0,38	Tidak Melebihi
	$23 \le h < 35$	0,6	0,22	Tidak Melebihi
	$35 \le h$	0,3	0,19	Tidak Melebihi
Minggu, 08/06/2014	TDD	5,0	2,58	Tidak Melebihi
	$h < 11$	4,0	2,27	Tidak Melebihi
	$11 \le h < 17$	2,0	0,57	Tidak Melebihi
	$17 \le h < 23$	1,5	0,38	Tidak Melebihi
	$23 \le h < 35$	0,6	0,26	Tidak Melebihi
	$35 \le h$	0,3	0,18	Tidak Melebihi

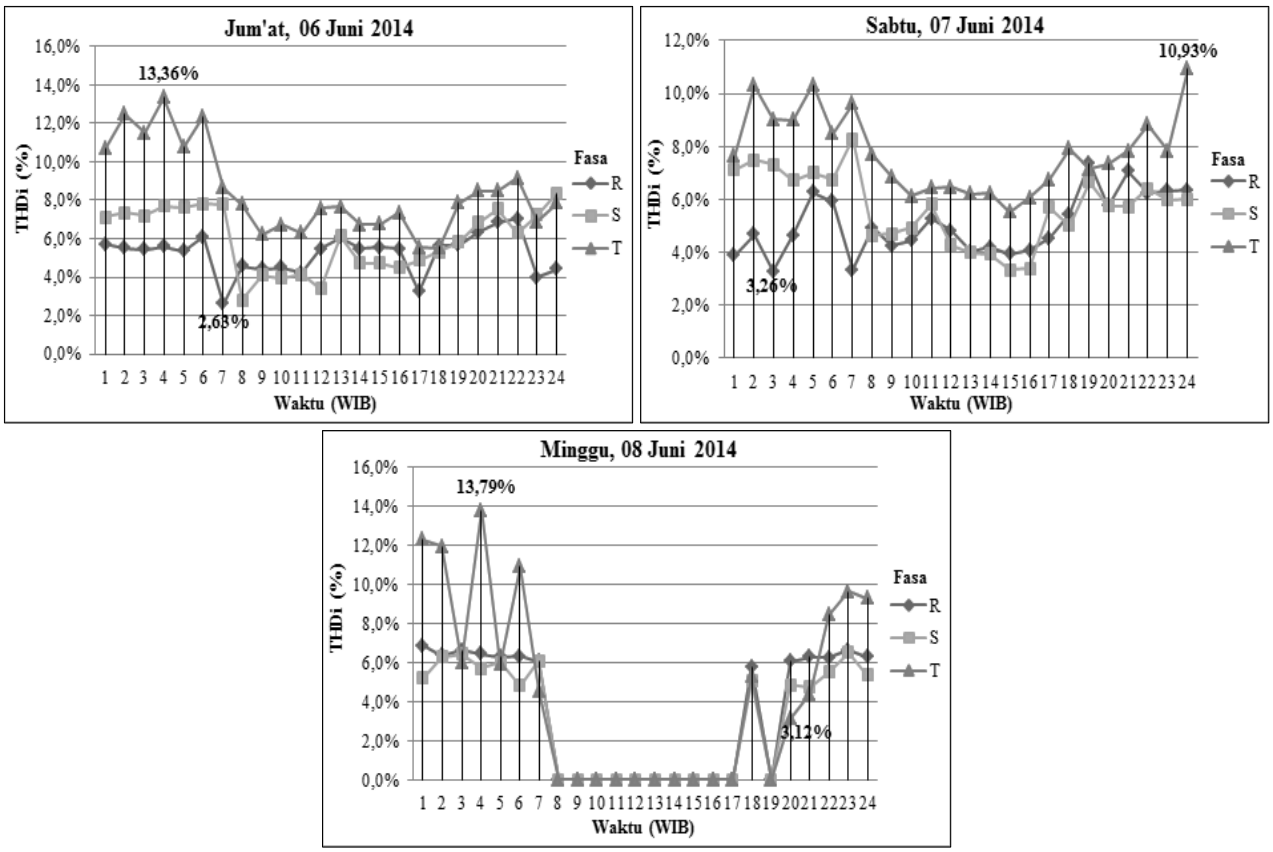
A.4 Hasil Perhitungan TDD dan IHD Arus Pada Saat THD Arus Min Pengukuran Selama Satu Minggu

Tanggal	Orde	TDD dan IHD Standar (%)	TDD dan IHD Pengukuran (%)	Keterangan
Senin, 02/06/2014	TDD	5,0	10,02	Melebihi
	$h < 11$	4,0	1,87	Tidak Melebihi
	$11 \le h < 17$	2,0	0,25	Tidak Melebihi
	$17 \le h < 23$	1,5	0,17	Tidak Melebihi
	$23 \le h < 35$	0,6	0,09	Tidak Melebihi
	$35 \le h$	0,3	0,09	Tidak Melebihi
Selasa, 03/06/2014	TDD	5,0	9,08	Melebihi
	$h < 11$	4,0	1,79	Tidak Melebihi
	$11 \le h < 17$	2,0	0,29	Tidak Melebihi
	$17 \le h < 23$	1,5	0,12	Tidak Melebihi
	$23 \le h < 35$	0,6	0,06	Tidak Melebihi
	$35 \le h$	0,3	0,07	Tidak Melebihi
Rabu, 04/06/2014	TDD	5,0	4,58	Tidak Melebihi
	$h < 11$	4,0	2,25	Tidak Melebihi
	$11 \le h < 17$	2,0	0,53	Tidak Melebihi
	$17 \le h < 23$	1,5	0,22	Tidak Melebihi
	$23 \le h < 35$	0,6	0,11	Tidak Melebihi
	$35 \le h$	0,3	0,12	Tidak Melebihi
Kamis, 05/06/2014	TDD	5,0	12,57	Melebihi
	$h < 11$	4,0	1,96	Tidak Melebihi
	$11 \le h < 17$	2,0	0,22	Tidak Melebihi
	$17 \le h < 23$	1,5	0,14	Tidak Melebihi
	$23 \le h < 35$	0,6	0,08	Tidak Melebihi
	$35 \le h$	0,3	0,07	Tidak Melebihi

Jum'at, 06/06/2014	TDD	5,0	10,09	Melebihi
	$h < 11$	4,0	2,15	Tidak Melebihi
	$11 \le h < 17$	2,0	0,34	Tidak Melebihi
	$17 \le h < 23$	1,5	0,16	Tidak Melebihi
	$23 \le h < 35$	0,6	0,10	Tidak Melebihi
	$35 \le h$	0,3	0,07	Tidak Melebihi
Sabtu, 07/06/2014	TDD	5,0	10,93	Melebihi
	$h < 11$	4,0	1,81	Tidak Melebihi
	$11 \le h < 17$	2,0	0,31	Tidak Melebihi
	$17 \le h < 23$	1,5	0,12	Tidak Melebihi
	$23 \le h < 35$	0,6	0,06	Tidak Melebihi
	$35 \le h$	0,3	0,05	Tidak Melebihi
Minggu, 08/06/2014	TDD	5,0	3,43	Tidak Melebihi
	$h < 11$	4,0	1,94	Tidak Melebihi
	$11 \le h < 17$	2,0	0,55	Tidak Melebihi
	$17 \le h < 23$	1,5	0,25	Tidak Melebihi
	$23 \le h < 35$	0,6	0,20	Tidak Melebihi
	$35 \le h$	0,3	0,13	Tidak Melebihi

A.6 Grafik THD Arus Pada Pengukuran Selama Satu Minggu





A.7 Data Pertambahan *Losses* Akibat Arus Harmonisa Tiap Fasa Pada Transformator Distribusi Di Fakultas Teknik Universitas Riau Pada Pengukuran Hari Libur Nasional

Tanggal	Waktu (WIB)	Fasa	P_{CU} (kW)	P_i (kW)	Daya (kW)	THDi (%)
Selasa, 27/05/2014	07.00	R	2,31	2,12	4,43	7,6
		S	1,90	2,42	4,32	6,9
		T	10,68	5,00	15,68	16,3
	13.00	R	2,16	1,75	3,91	7,3
		S	0,53	0,96	1,48	3,6
		T	4,63	2,47	7,10	10,7
	18.00	R	1,23	1,08	2,32	5,5
		S	0,85	1,17	2,03	4,6
		T	1,62	1,98	3,60	6,3
	22.00	R	2,13	1,52	3,66	7,3
		S	1,66	1,76	3,41	6,4
		T	11,02	4,89	15,91	16,26

A.8 Data Pertambahan *Losses* Akibat Arus Harmonisa Tiap Fasa Pada Transformator Distribusi Di Fakultas Teknik Universitas Riau Pada Pengukuran Selama Satu Minggu

Tanggal	Waktu (WIB)	Fasa	P_{CU} (kW)	P_i (kW)	Total *Losses* (kW)	THDi (%)
Senin, 02/06/2014	03.00	R	2,12	1,43	3,55	7,3
		S	0,83	1,52	2,35	4,5
		T	10,72	4,68	15,40	16,3
	05.00	R	1,79	2,15	3,94	6,7
		S	1,18	2,20	3,37	5,4
		T	10,87	5,15	16,02	16,5

	11.00	R	1,01	0,40	1,40	5,0
		S	0,25	0,20	0,45	2,5
		T	2,46	0,62	3,09	7,8
	19.00	R	1,73	1,14	2,87	6,6
		S	1,08	1,17	2,25	5,2
		T	4,36	2,04	6,40	10,4
Selasa, 03/06/2014	08.00	R	0,22	0,19	0,41	2,4
		S	0,68	0,39	1,07	4,1
		T	1,81	0,49	2,31	6,7
	13.00	R	0,82	0,35	1,17	4,5
		S	0,95	0,39	1,34	4,9
		T	1,35	0,40	1,75	5,8
	16.00	R	1,14	0,56	1,71	5,3
		S	1,04	0,79	1,83	5,1
		T	1,88	0,60	2,48	6,9
	00.00	R	0,64	0,68	1,32	4,0
		S	2,46	1,92	4,38	7,8
		T	12,36	5,97	18,33	17,5
Rabu, 03/06/2014	05.00	R	1,78	0,94	2,72	6,7
		S	2,17	1,88	4,04	7,3
		T	13,86	5,43	19,30	18,6
	10.00	R	1,13	0,48	1,60	5,3
		S	1,05	0,51	1,56	5,1
		T	2,59	0,75	3,35	8,0
	14.00	R	1,08	0,38	1,46	5,2
		S	1,08	0,35	1,43	5,2
		T	1,54	0,43	1,97	6,2
	22.00	R	0,50	0,90	1,40	3,5
		S	1,97	1,21	3,18	7,0
		T	5,15	3,21	8,35	11,3
Kamis, 04/06/2014	08.00	R	1,51	0,81	2,32	6,1
		S	0,41	0,63	1,05	3,2
		T	3,12	0,92	4,04	8,8
	14.00	R	0,74	0,34	1,07	4,3
		S	1,00	0,44	1,44	4,9
		T	1,72	0,42	2,14	6,5
	19.00	R	1,32	0,91	2,23	5,7
		S	1,68	1,04	2,72	6,5
		T	1,96	1,10	3,07	7,0
	22.00	R	0,78	0,88	1,66	4,4
		S	2,01	1,63	3,64	7,1
		T	7,61	2,75	10,37	13,8
Jum'at, 05/06/2014	04.00	R	1,26	0,82	2,08	5,6
		S	2,39	1,35	3,75	7,7
		T	7,17	2,78	9,95	13,4
	07.00	R	0,28	0,88	1,16	2,6
		S	2,43	2,10	4,53	2,8
		T	2,99	2,27	5,26	8,6
	16.00	R	1,20	0,51	1,72	5,5
		S	0,81	0,41	1,23	4,5
		T	2,18	0,61	2,79	7,4
	20.00	R	1,62	0,90	2,52	6,4
		S	1,87	1,01	2,88	6,8
		T	2,89	1,86	4,75	8,5

Sabtu, 02/06/2014	03.00	R	0,43	0,73	1,16	3,3
		S	2,14	1,91	4,05	7,3
		T	3,26	2,36	5,62	9,0
	12.00	R	0,92	0,37	1,30	4,8
		S	0,73	0,31	1,04	4,3
		T	1,67	0,47	2,14	6,5
	15.00	R	0,62	0,31	0,93	3,9
		S	0,44	0,21	0,65	3,3
		T	1,23	0,31	1,54	5,5
	00.00	R	1,62	1,12	2,73	6,3
		S	1,45	1,10	2,55	6,0
		T	4,80	3,13	7,93	10,9
Minggu, 02/06/2014	04.00	R	1,67	1,15	2,82	6,5
		S	1,31	1,35	2,66	5,7
		T	7,64	4,00	11,64	13,8
	05.00	R	1,58	0,90	2,48	6,3
		S	1,44	1,34	2,78	6,0
		T	1,40	4,88	6,28	5,9
	18.00	R	1,34	0,72	2,06	5,8
		S	1,02	1,05	2,07	5,0
		T	1,14	1,08	2,21	5,3
	20.00	R	1,47	0,77	2,24	6,1
		S	0,95	0,87	1,81	4,9
		T	0,39	0,87	1,26	3,1

Keterangan : = Saat THD Arus Tertinggi (Max)

= Saat THD Arus Terendah (Min)

DAFTAR PUSTAKA

IEEE Standard 519-1992. *Recommended Practices and requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems*

Dugan, R.C; Rizky. 2001. *Harmonic Considerations for Electrical Distribution Feeders*. National Technical Information Service, Report No. ORNL/sub/81-95011/4 (Cooper power Systems as Bulletin 87011, "Electrical Power System Harmonics, Design Guide")

Dugan, R.C; McGranaghan, M.F; Santoso; Beaty, H.W. 2003. *Electrical Power System Quality – Second Edition*. USA : McGraw-Hill

Liem Ek Bien & Sudarno, 2004. Pengujian Harmonisa dan Upaya Pengurangan Gangguan Harmonisa Pada Lampu Hemat Energi. *JETri,* 4(1), pp.53-64

Setiawan, Awan, 2007. Kajian Pengaruh Harmonisa Terhadap Sistem Tenaga Listrik. Jurnal ELTEK, 5(2), pp.22-31

PT PLN (Persero). SPLN D3.002-1 : 2007. Spesifikasi Transformator Distribusi

Gagarin Irianto, Chairul, dkk, 2008. Mengurangi Harmonisa Pada Transformator 3 Fasa. *JETri*, 7(2), pp.53-68

Zulkarnain, Iskandar, 2009. *Analisis Pengaruh Harmonisa Terhadap Arus Netral, Rugi-Rugi dan Penurunan Kapasitas Pada Transformator Distribusi*. Semarang: Skripsi UNDIP

Agusman, Candra, 2011. *Analisis Perhitungan Rugi-Rugi Daya Transformator Karena Harmonik*. Jakarta: Skripsi UI

Rinas, I Wayan, 2012. Studi Analisis *Losses* dan *Derating* Akibat Pengaruh THD Pada Gardu Transformator Daya Di Fakultas Teknik Universitas Udayana. *Jurnal Teknologi Elektro,* 11(1), pp.23-29

Surbakti, Eka Rahmat, 2013. *Analisa Pengaruh Faktor-K Pada Transformator*. Medan: Skripsi USU

Hasugian, Hotbe, 2013. *Analisis Pengaruh Harmonisa Terhadap Panas Pada Belitan Transformator Distribusi*. Medan: Skripsi USU

Sakaja Frederick, G., Ginting, Satria & Tarmizi Surya, K., 2013. Pengaruh Harmonisa Terhadap Arus Netral Transformator Distribusi (Aplikasi Pada R.S.U Sari Mutiara Medan). Singuda Ensikom, 1(1), pp.11-16