

Analisis Pengaruh *Total Harmonic Distortion* Terhadap *Losses* dan Efisiensi Transformator RSUD Kabupaten Klungkung

Wayan Agus Adi Widiastara¹, I Wayan Rinas², I Wayan Sukerayasa³

Abstract— The rise of harmonic on the power system caused by non linear load operation. Harmonic distortion level or called as Total Harmonic Distortion (THD) on transformer potentially cause the increase of losses therefore will be influential on the efficiency of the transformer. In this study was conducted measurement of the THD on one transformers in RSUD Klungkung which then compared with the result of a THD simulation on simulink MATLAB. V_{THD} based on the result of measurement is 1.51% and result of simulation is 1.49%, I_{THD} on based on the result of measurement is 16.73% and result of simulation is 16.45%. Result of measurement and simulation, it was known that the V_{THD} still meet the IEEE 519-2014 standard, while the I_{THD} do not meet the IEEE 519-2014 standard. Based on the losses analysis without the influence of harmonic, the obtained losses is 0.62kW. Due to the influence of harmonic causing the increase of losses to be 8,885kW. Based on the results of losses analysis without the influence of harmonic, the obtained efficiency calculation result is 99.654%. However the increase of losses as the effect of harmonic influence caused the decline of efficiency to be 95.048%.

Intisari— Timbulnya harmonisa disebabkan karena pengoperasian beban listrik nonlinier. Tingkat distorsi harmonisa atau disebut dengan *Total Harmonic Distortion* (THD) pada transformator berpotensi menimbulkan *losses* sehingga berpengaruh terhadap efisiensi transformator. Dalam penelitian ini dilakukan pengukuran THD pada satu transformator di RSUD Kabupaten Klungkung yang kemudian dibandingkan dengan hasil simulasi THD pada simulink MATLAB. V_{THD} berdasarkan hasil pengukuran yaitu sebesar 1.51% dan berdasarkan hasil simulasi yaitu sebesar 1.49%, I_{THD} berdasarkan hasil pengukuran yaitu sebesar 16.73% dan berdasarkan hasil simulasi yaitu sebesar 16.45%. Hasil pengukuran dan simulasi diketahui bahwa V_{THD} masih sesuai standar IEEE 519-2014, sedangkan I_{THD} diketahui tidak sesuai dengan standar IEEE 519-2014. Berdasarkan analisis *losses* tanpa pengaruh harmonisa, diperoleh *losses* yaitu sebesar 0.62kW. Akibat adanya pengaruh harmonisa sehingga menyebabkan terjadinya peningkatan *losses* menjadi 8,885kW. Berdasarkan hasil analisis *losses* tanpa pengaruh harmonisa, diperoleh hasil perhitungan efisiensi yaitu sebesar 99.654%. Namun terjadinya peningkatan *losses* akibat pengaruh harmonisa sehingga menyebabkan terjadinya penurunan efisiensi menjadi 95.048%.

Kata kunci : Harmonisa, *losses*, efisiensi.

¹Mahasiswa, Jurusan Teknik Elektro dan Komputer Fakultas Teknik Universitas Udayana, Jln. Kampus Bukit Jimbaran 80361 INDONESIA (tel: 0361-703315; fax: 0361-4321; e-mail: adi.widiastara9@gmail.com)

^{2,3}Dosen, Jurusan Teknik Elektro dan Komputer Fakultas Teknik Universitas Udayana, Jln. Kampus Bukit Jimbaran 80361 INDONESIA (tel: 0361-703315; fax: 0361-4321; e-mail: rinas@unud.ac.id, sukerayasa@unud.ac.id).

I. PENDAHULUAN

Transformator berfungsi sebagai penurun tegangan (*step-down*) dari tegangan tinggi ke tegangan rendah maupun sebaliknya. Harmonisa yang timbul pada transformator disebabkan oleh pengoperasian beban-beban listrik nonlinier. Beban nonlinier memiliki bentuk gelombang yang tidak sinusoidal karena telah terdistorsi oleh harmonisa yang ditimbulkan akibat penggunaan perangkat elektronika daya seperti *diode*, *thyristor*, *mosfet* [1].

Tingkat THD pada transformator yang tinggi sehingga melebihi standar yang ditetapkan dapat menyebabkan terjadinya *overheating* (pemanasan berlebih) dan juga peningkatan *losses* (rugi-rugi) sehingga menyebabkan terjadi penurunan efisiensi [2].

Berdasarkan penelitian – penelitian sebelumnya yang terkait dengan harmonisa menyimpulkan bahwa komponen harmonisa dapat menyebabkan terjadinya peningkatan rugi-rugi daya (*losses*) pada transformator saat bekerja melayani beban non linier. Semakin tinggi THD pada sistem maka semakin tinggi pula peningkatan *losses* pada transformator [3][4][5][6]. Berbeda halnya dengan penelitian sebelumnya dimana analisis dilakukan di lingkungan kampus atau industri, namun pada penelitian ini penulis melakukan penelitian di rumah sakit umum yang tentunya memiliki karakteristik beban yang berbedadengan tujuan untuk mengetahui seberapa besar THD yang timbul akibat pengoperasian peralatan-peralatan medis.

Penelitian dilakukan pada salah satu unit transformator di RSUD Kabupaten Klungkung yaitu transformator 1. Setelah dilakukan pengukuran diketahui bahwa V_{THD} pada transformator 1 yaitu 1,51%. Sedangkan I_{THD} pada transformator 1 yaitu 16,73%. Berdasarkan standar IEEE 519-2014 bahwa batasan V_{THD} yang diperbolehkan dengan tegangan nominal di bawah 1kV yaitu sebesar 8% sehingga diketahui bahwa V_{THD} yang terukur masih sesuai standar. Sedangkan untuk menentukan batasan I_{THD} harus dilakukan perhitungan rasio hubung singkatnya (*SCratio*) terlebih dahulu, diketahui bahwa *SCratio* transformator 1 yaitu 25,07 maka batasan I_{THD} yang diperbolehkan yaitu sebesar 8% sehingga diketahui bahwa I_{THD} pada transformator 1 melebihi standar.

Tingginya I_{THD} yang diketahui telah melebihi standar nantinya akan dianalisis pengaruhnya terhadap *losses* dan efisiensi transformator RSUD Kabupaten Klungkung. Analisis distorsi harmonisa disimulasikan menggunakan software Simulink MATLAB dengan menggunakan Fast Fourier Transform tools.



II. TRANSFORMATOR DAN PENGARUH THD PADA TRANSFORMATOR

A. Transformator

Transformator berfungsi sebagai penurun tegangan dari tegangan tinggi ke tegangan rendah maupun sebaliknya tanpa mengubah frekuensi fundamentalnya. Dalam analisis I_{THD} pada transformator diperlukan nilai *Short Circuit Ratio* untuk menentukan batas maksimum THD yang direkomendasikan berdasarkan IEEE Standard 519-2014 sehingga dapat diketahui apakah I_{THD} pada transformator sudah sesuai standar atau tidak.

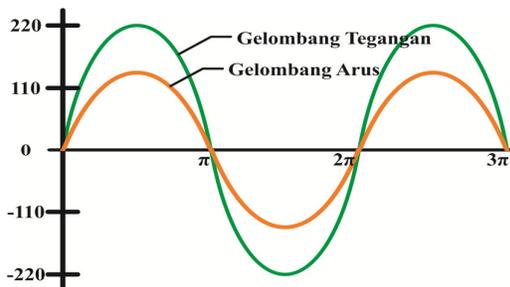
Short Circuit Ratio pada transformator dapat dihitung dengan menggunakan persamaan sebagai berikut [1]:

$$Short\ Circuit\ Ratio = \frac{I_{SC}}{I_L} \tag{1}$$

Dimana I_{SC} merupakan arus hubung singkat, dan I_L merupakan arus beban penuh.

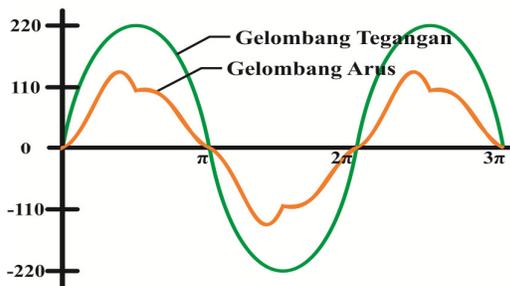
B. Beban Linier dan Non Linier

Beban linier merupakan beban yang memiliki gelombang berbentuk linier. Pada beban linier ini, bentuk gelombang arus akan mengikuti bentuk gelombang tegangan seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Bentuk Gelombang Beban Linier

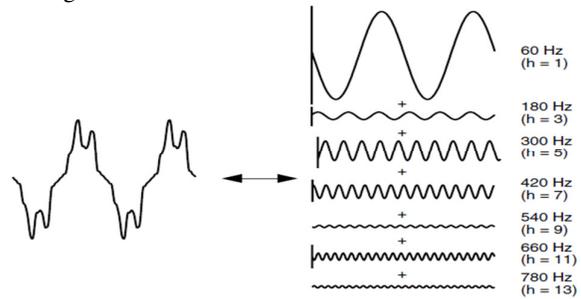
Sedangkan beban non linier merupakan beban yang gelombang arusnya tidak proporsional terhadap gelombang tegangannya sehingga bentuk gelombang arusnya tidak sama dengan bentuk gelombang tegangannya karena telah terdistorsi oleh arus harmonisa yang timbul akibat penggunaan perangkat elektronika daya seperti *diode, thyristor, mosfet* [1]. Bentuk gelombang beban nonlinier dapat dilihat pada gambar 2.



Gambar 2. Bentuk Gelombang Beban Nonlinier

C. Total Harmonic Distortion

Harmonisa adalah pembentukan gelombang-gelombang yang merupakan kelipatan dari frekuensi fundamentalnya. Gelombang tegangan maupun arus yang awalnya berupa sinusoidal murni akan terdistorsi menjadi tidak sinusoidal murni lagi.



Gambar 3. Distorsi gelombang akibat harmonisa [1]

Harmonisa tegangan dapat mengakibatkan terjadinya peningkatan *core-loss* (rugi besi). Sedangkan harmonisa arus dapat mengakibatkan terjadinya peningkatan rugi-rugi tembaga. Secara keseluruhan rugi-rugi yang timbul akibat harmonisa merujuk pada terjadinya pemanasan berlebih (*overheating*) pada transformator [1].

D. Standar Harmonisa Berdasarkan IEEE 519-2014

Untuk standar V_{THD} yang diperbolehkan diatur sesuai dengan *Point of Common Coupling* (PCC) dimana tiap tingkatan tegangan memiliki standar yang berbeda-beda, begitu pula dengan I_{THD} yang diatur dengan standar yang berbeda-beda sesuai PCC dan perhitungan rasio hubung singkatnya.

1) *Standar V_{THD} IEEE 519-2014*: Berdasarkan IEEE standard 519-2014 tentang nilai batas maksimum distorsi harmonisa tegangan pada sistem dapat dilihat pada Tabel 1.

TABEL I
VOLTAGE DISTORTION LIMITS

Bus Voltage (V) at PCC	Individual Harmonic (%)	Total Harmonic Distortion (%)
$V \leq 1$ kV	5,0	8,0
1 kV $< V < 69$ kV	3,0	5,0
69 kV $< V < 161$ kV	1,5	2,5
161 kV $< V$	1,0	1,5

2) *Standar I_{THD} IEEE 519-2014*: Sedangkan batas I_{THD} yang direkomendasikan bagi pelanggan yang terhubung dengan sistem tegangan berkisar antara 120 V sampai 69 kV disesuaikan dengan *short circuit ratio* (rasio hubung singkat).

TABEL II
CURRENT DISTORTION LIMITS FOR SYSTEMS RATED 120 V THROUGH 69 kV [7],

I_{SC}/I_L	Maximum Harmonic Current Distortion					
	Individual Harmonic Order (odd harmonic)					
	$3 \leq h \leq 11$	$11 \leq h \leq 17$	$17 \leq h \leq 23$	$23 \leq h \leq 35$	$35 \leq h \leq 50$	THD (%)
$< 20^\circ$	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

> 5	480 V (Low Voltage)	9-15
-----	---------------------	------

E. Losses dan Efisiensi Transformator

1) *Losses Tanpa Pengaruh Harmonisa: Total loss energy* suatu transformator merupakan hasil penjumlahan antara rugi besi dan rugi tembaga. *Total loss energy* dapat dihitung dengan menggunakan persamaan sebagai berikut :

$$Losses = P_i + P_{cu} \tag{2}$$

Dimana P_i merupakan rugi besi, sedangkan P_{cu} merupakan rugi tembaga.

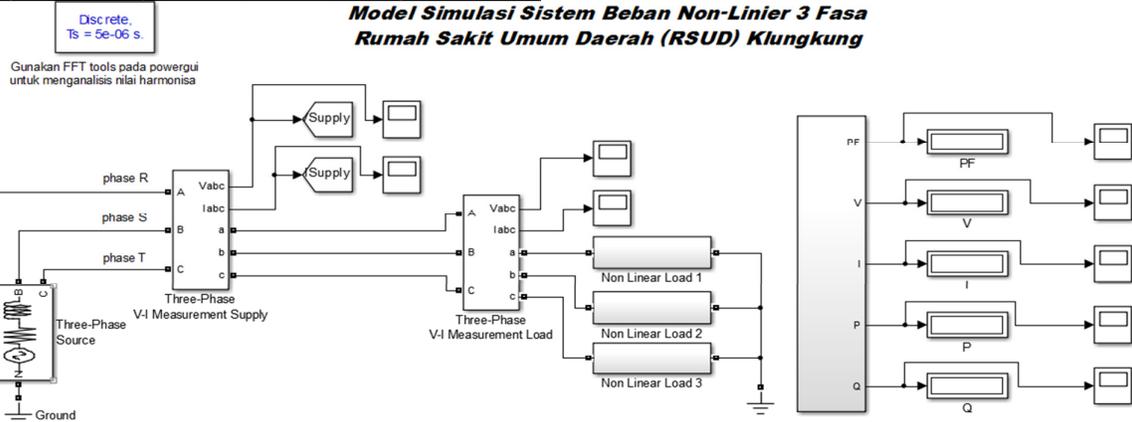
2) *Losses Akibat Pengaruh Harmonisa: Load Loss* akibat pengaruh dari harmonisa dalam satuan perunit dapat dihitung dengan menggunakan persamaan sebagai berikut [1]:

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

Dimana h merupakan harmonisa (%), I_h merupakan arus harmonisa (A), dan P_{EC-R} merupakan *eddy current loss factor*. *Eddy current loss factor* dapat diketahui berdasarkan Tabel 3 berikut :

TABEL III
TYPICAL VALUE OF PEC-R [1],

Type	MVA	Voltage	P _{EC-R} (%)
Dry	≤ 1	-	3-8
	≤ 1,5	5 kV (High Voltage)	12-20
	≤ 1,5	15 kV (High Voltage)	9-15
Oil-filled	≤ 2,5	480 V (Low Voltage)	1
	2,5 – 5	480 V (Low Voltage)	1-5



Gambar 4. Model Simulasi Sistem RSUD Kabupaten Klungkung pada Simulink MATLAB

Komponen-komponen yang digunakan dalam gambar pemodelan sistem di atas yaitu sebagai berikut :

- *Three-Phase Source* yang berfungsi sebagai sumber tiga fasa.
- *Three-Phase V-I Measurement Supply* yang berfungsi sebagai alat ukur parameter sumber tiga fasa.

3) *Efisiensi Transformator*: Tingkat efisiensi suatu transformator dapat dihitung dengan menggunakan persamaan sebagai berikut [8]:

$$\%Efficiency = \left[1 - \frac{\sum Rugi Total}{Daya Input} \right] \times 100\% \tag{4}$$

III. METODE ANALISIS DATA DAN PEMODELAN SISTEM

Penelitian ini dilakukan di Rumah Sakit Umum Daerah (RSUD) Kabupaten Klungkung yang berlokasi di Jalan Flamboyan no.40, Semarapura mulai pada Desember 2015 sampai Maret 2016.

Data yang diperoleh dalam penelitian ini dianalisis dengan prosedur yaitu pertama membuat pemodelan sistem transformator tiga fasa di RSUD Kabupaten Klungkung pada *simulink MATLAB*, Simulasi dilakukan dengan menggunakan FFT tools. FFT merupakan metode analisis sinyal yang handal dimana dapat digunakan untuk menganalisis *waveform distortion*.

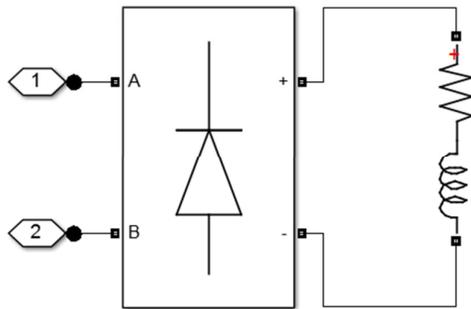
Simulasi yang dilakukan pada *Simulink MATLAB* dengan desain pemodelan yang dirancang merupakan sistem 4 kawat dimana terdiri dari 3 kawat fasa dan 1 kawat netral. Model simulasi yang dirancang pada *Simulink MATLAB* dapat dilihat pada gambar 4.

- *Three-Phase V-I Measurement Load* yang berfungsi sebagai alat ukur parameter beban tiga fasa.
- *Nonlinier Load 1, 2, & 3* yang merupakan *sub-system* beban nonlinier yang terpasang.



- *Powergui* yang dapat digunakan untuk melakukan simulasi spektrum V_{THD} maupun I_{THD} dengan memanfaatkan *Fast Fourier Transform (FFT) tools*.
- *Display* berfungsi sebagai media yang dapat menampilkan parameter-parameter simulasi berupa angka.
- *Scope* berfungsi sebagai media yang dapat menampilkan parameter-parameter simulasi berupa gelombang.

Beban nonlinier yang terpasang diasumsikan merupakan beban yang seimbang dimana beban disuplai dari sumber tiga fasa yang ekuivalen dengan transformator RSUD Kabupaten Klungkung. Model (*mask*) “*Non Linier Load*” yang terdapat pada Gambar 4 di atas merupakan suatu subsistem yang di dalamnya terdapat model simulasi yang menggambarkan suatu rangkaian beban non linier. Model simulasi beban non linier dapat dilihat pada gambar 5.



Gambar 5. Model Simulasi Beban Non Linier

Pemodelan beban menggunakan perangkat elektronika daya yaitu dioda sebagai representatif dari beban non linier. Berdasarkan percobaan yang dilakukan pada *MATLAB*,

diketahui bahwa dioda menghasilkan THD yang lebih tinggi dibandingkan dengan menggunakan *thyristor* atau *mosfet*. Oleh karena itu dioda digunakan untuk memperoleh hasil THD yang maksimal.

Berdasarkan nilai THD yang diperoleh melalui simulasi sehingga dapat dilakukan perhitungan *losses* transformator tanpa pengaruh harmonisa maupun akibat pengaruh harmonisa serta kaitannya dengan efisiensi transformator.

Simulasi yang dilakukan pada *Simulink MATLAB* membutuhkan parameter-parameter sebagai berikut :

- $V_{rms} = 380/\sqrt{2}$
- $f = 50 \text{ Hz}$
- $R_{sumber} = 7,7e^{-3} \Omega$
- $R_{beban} = 1,293 \Omega$
- $L_{sumber} = 8,9e^{-5} \text{ Henry}$
- $L_{beban} = 0,022 \text{ Henry}$

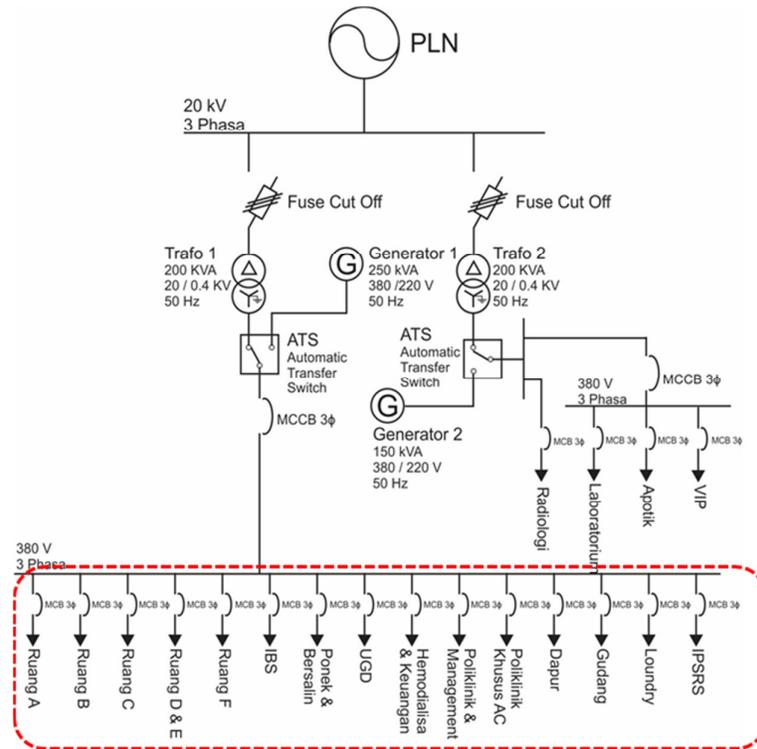
IV. HASIL PENGUKURAN DAN SIMULASI THD

A. Hasil Pengukuran THD

Rumah Sakit Umum Daerah (RSUD) Kabupaten terletak di tengah kota Semarang yang merupakan ibukota Kabupaten Klungkung dengan luas lahan secara keseluruhan 23885 m². Sistem kelistrikan di RSUD Kabupaten Klungkung disuplai dari jaringan PLN melalui penyulang Klungkung. Transformator yang terpasang berkapasitas 200 kVA, dengan tegangan primer 20 kV dan tegangan sekunder 400 V.

Single line diagram dari sistem kelistrikan RSUD Kabupaten Klungkung dapat dilihat pada Gambar 6 dimana pengukuran dilakukan pada SDP transformator 1 saja.

Note :  = Lokasi Pengukuran



Gambar 6. Single Line Diagram RSUD Kabupaten Klungkung

Berdasarkan hasil pengukuran yang dilakukan pada tiap-tiap SDP, sehingga diperoleh nilai V_{THD} dan I_{THD} tiap fase seperti yang ditunjukkan pada Tabel 4:

TABEL IV
HASIL PENGUKURAN THD

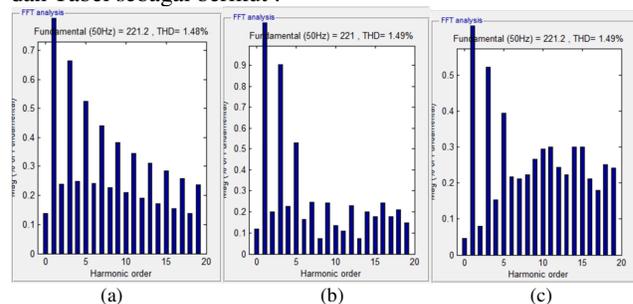
Phasa	V_{THD} (%)	I_{THD} (%)
R	1,52	17,19
S	1,52	15,28
T	1,49	17,71
Rata-rata	1,51	16,73

Hasil pengukuran menunjukkan bahwa rata-rata V_{THD} yang terukur yaitu sebesar 1,51%, sedangkan rata-rata I_{THD} hasil pengukuran yaitu sebesar 16,73%. Tingginya tingkat I_{THD} yang terukur pada transformator disebabkan karena pada RSUD Kabupaten Klungkung banyaknyapengoperasian peralatan-peralatan medis yang tentunya merupakan beban non linier seperti alat hemodialisa (*dialyzer*), *incubator*, *Electro Kardio Graph*, *Hematology Analyzer*, *Blood Analyzer*, *Urine Analyzer*, *Electrolit Analyzer*, *Microscope*, dan berbagai peralatan elektronik lainnya. Secara teori menunjukkan bahwa beban non linier berbanding lurus dengan tingkat harmonisa sehingga diketahui bahwa semakin banyak beban non linier yang dioperasikan maka semakin tinggi pula tingkat THD pada transformator.

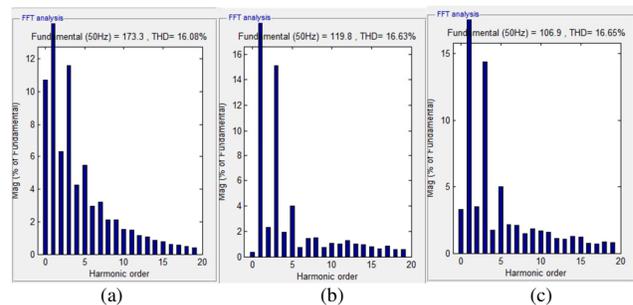
Hasil pengukuran THD ini nantinya akan di analisis berdasarkan IEEE standard 519-2014 untuk mengetahui apakah sudah sesuai standar atau tidak.

B. Hasil Simulasi THD

Dengan menggunakan metode FFT, sehingga diperoleh hasil simulasi THD seperti yang ditunjukkan pada Gambar dan Tabel sebagai berikut :



Gambar 7. Spektrum Gelombang V_{THD} Trafo 1 (a) fase R, (b) Fase S, (c) Fase T



Gambar 8. Spektrum Gelombang I_{THD} Trafo 1 (a) fase R, (b) Fase S, (c) Fase T

TABEL V
HASIL SIMULASI THD



Phasa	V _{THD} (%)	I _{THD} (%)
R	1,48	16,08
S	1,49	16,63
T	1,49	16,65
Rata-rata	1,49	16,45

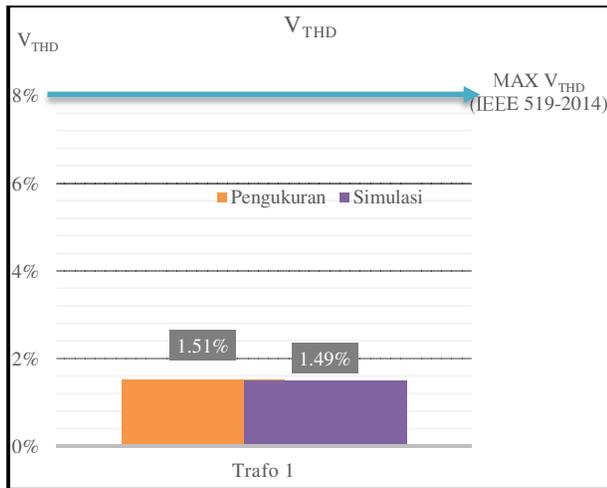
Pada tabel di atas terlihat bahwa THD hasil simulasi tidak berbeda jauh dengan THD hasil pengukuran. Hal ini menunjukkan bahwa simulasi dengan menggunakan *Simulink* *MATLAB* memiliki tingkat keakuratan yang sangat tinggi.

C. Analisis THD Berdasarkan IEEE 519-2014

Berdasarkan IEEE 519-2014 diketahui bahwa standar V_{THD} dengan tegangan nominal di bawah 1 kV yaitu sebesar 8%. Hasil analisis perbandingan V_{THD} dapat dilihat pada Tabel 6 :

TABEL VI
ANALISIS V_{THD} BERDASARKAN IEEE 519-2014

Voltage	V _{THD}		Standar V _{THD} (%)	Ket
	Pengukuran (%)	Simulasi (%)		
V < 1 kV	1,51	1,49	8	Sesuai Standar



Gambar 9. Grafik Perbandingan V_{THD}

Grafik di atas menunjukkan bahwa V_{THD} hasil pengukuran maupun hasil simulasi masih sesuai standar IEEE 519-2014.

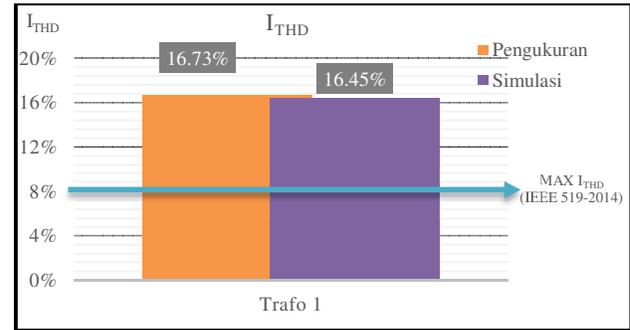
Untuk menganalisis I_{THD} perlu dihitung nilai SC_{ratio} nya terlebih dahulu. Diketahui bahwa arus hubung singkat yaitu 7,597 A dan arus beban penuh yaitu 0,303 A sehingga SC_{ratio} pada transformator dapat dihitung sebagai berikut :

$$SC_{ratio} = \frac{7,597A}{0,303A} = 25,07$$

Berdasarkan standar IEEE 519-2014, dengan SC_{ratio} sebesar 25,07 sehingga standar I_{THD} yang digunakan sebesar 8%. Hasil analisis perbandingan I_{THD} berdasarkan standar IEEE 519-2014 dapat dilihat pada Tabel 7 :

TABEL VII
ANALISIS I_{THD} BERDASARKAN IEEE 519-2014

I _{sc} / I _L	I _{THD}		Standar I _{THD} (%)	Keterangan
	Pengukuran (%)	Simulasi (%)		
25,07	16,73	16,45	8	Tidak Sesuai Standar



Gambar 10. Grafik Perbandingan I_{THD}

Grafik di atas diketahui bahwa I_{THD} hasil pengukuran maupun hasil simulasi melebihi standar IEEE 519-2014. Berdasarkan penelitian-penelitian sebelumnya bahwa tingkat I_{THD} yang tinggi hingga melebihi standar yang telah ditetapkan dapat menyebabkan terjadinya peningkatan *losses* pada transformator [3][4][5][6]. Hal ini tentu sangat berpengaruh terhadap efisiensi dari transformator sehingga perlu dilakukan analisis efisiensi transformator RSUD Kabupaten Klungkung.

V. ANALISIS LOSSES TRANSFORMATOR

A. Analisis Losses Tanpa Pengaruh Harmonisa

Total loss energy dapat dihitung dengan menggunakan persamaan sebagai berikut :

$$Losses = P_i + P_{cu}$$

sehingga diperoleh rugi tembaga pada tiap-tiap SDP dapat dilihat pada tabel 8 :

TABEL VIII
RUGI TEMBAGA PADA TRANSFORMATOR 1

No	SDP	P _{cu} (Watt)
1	Ruang A	0,88
2	Ruang B	1,28
3	Ruang C	5,95
4	Ruang D & E	1,95
5	Ruang F	0,3
6	IBS	22,19
7	Ponek & Bersalin	1,49
8	UGD	20,38
9	Hemodialisa & Keuangan	32,35
10	Poliklinik & Management	2,75
11	Poliklinik Khusus AC	50,76
12	Dapur	1,93
13	Gudang	0,86
14	Loundry	0,55
15	IPSRS	0,01
Total		143,63

Berdasarkan SPLN 50:1997 tentang spesifikasi transformator distribusi, diketahui bahwa untuk transformator 200 kVA memiliki rugi besi (P_i) sebesar 480 Watt [9]. Sehingga *total losses* dapat dihitung sebagai berikut :

$$\begin{aligned} \text{Total Losses} &= P_i + P_{cu} \\ \text{Total Losses}_{\text{Trafo 1}} &= 480 + 143,63 = 623,63 \text{ W} = 0.62 \text{ kW} \end{aligned}$$

B. Analisis Losses Transformator Akibat Pengaruh Harmonisa

Pengukuran yang dilakukan pada transformator 1 diketahui bahwa :

$$\begin{aligned} S &= 200 \text{ kVA} \\ \text{Cos } \phi &= 0,897 \end{aligned}$$

Sehingga nilai $P_{\text{Base satu fasa}}$ yaitu :

$$P_{\text{Base } 1\phi} = \frac{200 \times 0,897}{\sqrt{3}} = 103,57 \text{ kW}$$

Analisis arus harmonisa pada fasa R sampai orde ke-19 sehingga diperoleh hasil sebagai berikut :

TABEL IX
HARMONISA PHASA R

Orde Harmonisa	I_h (A)	I_h (p.u)	I_h^2 (p.u)	$I_h^2 \times h^2$ (p.u)
1	111,1	1,000	1,000000	1,00000
3	12,83	0,115	0,013336	0,12002
5	6,07	0,055	0,002985	0,07463
7	3,57	0,032	0,001033	0,05059
9	2,33	0,021	0,000440	0,03563
11	1,62	0,015	0,000213	0,02573
13	1,17	0,011	0,000111	0,01874
15	0,84	0,008	0,000057	0,01286
17	0,61	0,005	0,000030	0,00871
19	0,44	0,004	0,000016	0,00566
Total			1,018221	1,35257

Berdasarkan hasil perhitungan harmonisa dari orde-1 sampai orde-19 maka dapat dihitung *load loss* pada fasa R dengan menggunakan persamaan sebagai berikut :

$$P_{LL_PhasaR} = 1.018221 + 1,35257 \times 0,01 = 1,0217467 \text{ p.u}$$

Perhitungan di atas menunjukkan bahwa rugi tembaga ($I^2 R$) mengalami peningkatan sebesar 0.018221 p.u atau dalam satuan kW dapat dihitung sebagai berikut :

$$\begin{aligned} P_{cu} \text{ (kW)} &= P_{cu} \text{ (p.u)} \times P_{\text{base } 1\phi} \\ P_{cu} \text{ (kW)} &= 0.018221 \text{ p.u} \times 103,57 \text{ kW} \\ P_{cu} \text{ (kW)} &= 1,887 \text{ kW} \end{aligned}$$

Sedangkan rugi arus eddy (*Eddy-Current Loss*) mengalami peningkatan sebesar 0.0035257 p.u atau dalam satuan kW dapat dihitung sebagai berikut :

$$\begin{aligned} P_e \text{ (kW)} &= P_e \text{ (p.u)} \times P_{\text{base } 1\phi} \\ P_e \text{ (kW)} &= 0.0035357 \text{ p.u} \times 103,57 \text{ kW} \\ P_e \text{ (kW)} &= 0,366 \text{ kW} \end{aligned}$$

Untuk menghitung rugi histerisis (*Hysterisis Loss*) dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut [2] :

$$P_h = K_h \times \sum_{h=1}^{\infty} i_h \times h$$

Dimana

- K_h = Konstanta Histerisis diketahui sebesar 0.26
- i_h = Arus harmonisa
- h = Orde Harmonisa

Sehingga rugi histerisis pada fasa R dapat diperoleh sebagai berikut :

TABEL X
RUGI HISTERISIS PHASA R TRANSFORMATOR I

Orde Harmonisa	I_h (A)	P_h (Watt)
1	111,1	28,886
3	12,83	10,0074
5	6,07	7,891
7	3,57	6,4974
9	2,33	5,4522
11	1,62	4,6332
13	1,17	3,9546
15	0,84	3,276
17	0,61	2,6962
19	0,44	2,1736
Total		75,467

Diketahui bahwa rugi histerisis pada fasa R yaitu sebesar 75,457 W atau 0.075 kW. sehingga dengan demikian total penambahan *losses* pada fasa R akibat pengaruh dari harmonisa dapat dihitung sebagai berikut :

$$\begin{aligned} \text{Losses}_{\text{phasa R}} &= P_{cu} + P_i \\ \text{Losses}_{\text{phasa R}} &= P_{cu} + (P_e + P_h) \\ \text{Losses}_{\text{phasa R}} &= 1,887 + (0,366 + 0,075) \\ \text{Losses}_{\text{phasa R}} &= 2,328 \text{ kW} \end{aligned}$$

Dengan menggunakan cara perhitungan yang sama sehingga diperoleh hasil perhitungan *losses* pada fasa S dan T yang dapat dilihat pada tabel sebagai berikut :

TABEL XI
PENAMBAHAN LOSSES AKIBAT PENGARUH HARMONISA

Fasa	P_{cu} (kW)	P_e (kW)	P_h (kW)	Losses (kW)
Phasa R	1,887	0,366	0,075	2,328
Phasa S	2,591	0,347	0,011	2,949
Phasa T	2,541	0,430	0,016	2,988



Total Losses Transformator 1	8,265
------------------------------	-------

Tabel di atas menunjukkan bahwa pada transformator 1 mengalami penambahan *losses* akibat pengaruh harmonisa sebesar 8,268 kW, sehingga *losses* transformator 1 secara keseluruhan dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut [5] :

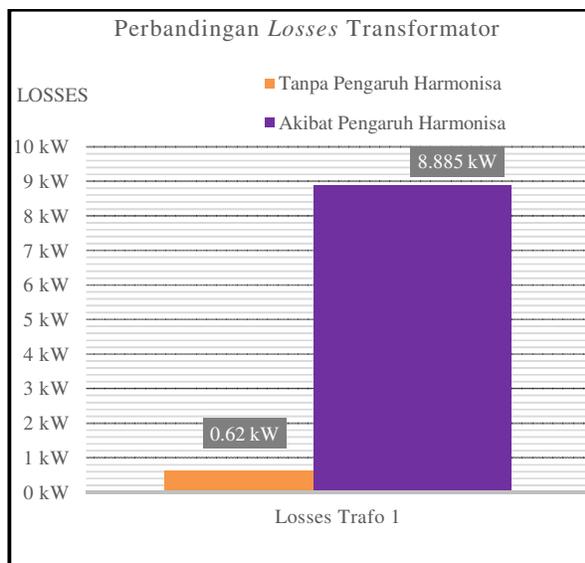
$$\text{Total Losses}_{\text{trafo 1}} = \text{Losses}_{\text{tanpa harm}} + \text{Losses}_{\text{akibat harm}} \\ = 0,62 + 8,265 = 8,885 \text{ kW}$$

$$\text{Susut Trafo} = \frac{\text{Total Losses}}{P_{\text{Base } 3\phi}} \times 100\%$$

$$\text{Susut Trafo} = \frac{8,885}{200 \times 0,897} \times 100\% = 4,953\%$$

Berdasarkan analisis yang telah dilakukan diperoleh hasil *losses* transformator akibat pengaruh harmonisa menjadi 8,885 kW atau sebesar 4,953 % dari total pembebanan transformator.

Berdasarkan hasil perhitungan *losses* pada transformator tanpa pengaruh harmonisa maupun akibat pengaruh harmonisa diperoleh hasil perbandingan sebagai berikut :



Gambar 11. Grafik Perbandingan *Losses* Transformator

Berdasarkan grafik di atas dapat dilihat bahwa rugi-rugi transformator akibat pengaruh harmonisa lebih tinggi dibandingkan dengan rugi-rugi tanpa pengaruh harmonisa.

Losses pada transformator dipengaruhi oleh 2 komponen rugi daya yaitu rugi beban atau rugi tembaga (P_{cu}), dan rugi tanpa beban yang terdiri dari rugi arus eddy (P_e), dan rugi histerisis (P_h). Rugi tembaga yaitu rugi akibat adanya aliran arus yang berlebih yang melewati nilai resistansinya yang dapat menyebabkan terjadinya pemanasan pada kawat tembaga masing-masing kumparan. Rugi arus eddy yaitu rugi-

rugi yang terjadi pada inti besi akibat adanya arus pusar, sedangkan rugi histerisis yaitu rugi-rugi pada inti besi akibat adanya *alternating flux* (fluks bolak-balik)[1].

Sesuai dengan prinsip kerja transformator, adanya arus bolak-balik yang mengalir sehingga menimbulkan fluks magnetik maka akan terjadi proses induksi elektromagnetik pada kumparan transformator. Arus induksi yang mengalir pada kumparan, dan inti besi dapat menyebabkan terjadinya pemanasan berlebih pada transformator. Komponen dari rugi-rugi ini meningkat sesuai dengan kuadrat dari frekuensi arus harmonisa. Semakin tinggi harmonisa maka semakin tinggi pula peningkatan *losses* yang terjadi pada transformator [10].

VI. ANALISIS EFISIENSI TRANSFORMATOR

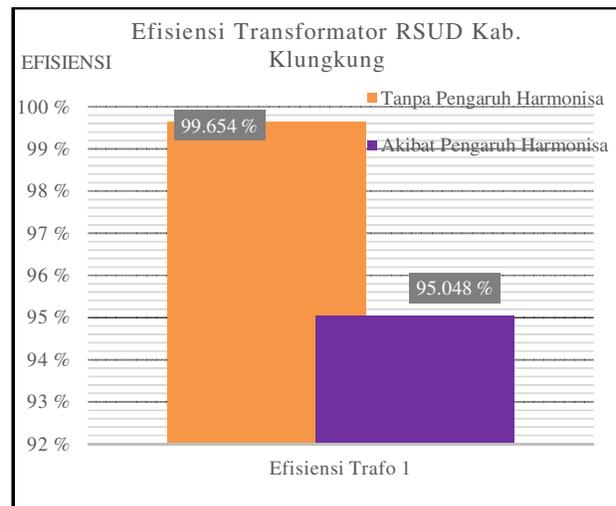
Untuk menghitung efisiensi transformator, harus diketahui terlebih dahulu daya inputnya yang dapat dihitung sebagai berikut :

$$\text{Daya Input}_{\text{Trafo 1}} = 200 \text{ kVA} \times 0,897 = 179,44 \text{ kW}$$

Berdasarkan daya input yang telah diketahui sehingga efisiensi transformator dapat dihitung dengan menggunakan persamaan 4 :

$$\% \text{Efficiency}_{\text{Tanpa Harmonisa}} = \left[1 - \frac{0,62}{179,44} \right] \times 100\% = 99,654\%$$

$$\% \text{Efficiency}_{\text{Akibat Harmonisa}} = \left[1 - \frac{8,885}{179,44} \right] \times 100\% = 95,048\%$$



Gambar 12. Grafik Perbandingan Efisiensi Transformator

Berdasarkan grafik di atas dapat dilihat bahwa efisiensi transformator 1 tanpa pengaruh harmonisa yaitu sebesar 99,654%. Namun setelah terjadi peningkatan *losses* akibat pengaruh dari harmonisa sehingga menyebabkan terjadinya penurunan efisiensi menjadi 95,048%. Berdasarkan analisis yang dilakukan dapat disimpulkan bahwa semakin tinggi *losses* maka semakin rendah efisiensinya, hal tersebut sesuai

dengan teori dimana *losses* berbanding terbalik dengan efisiensi.

VII. KESIMPULAN

Berdasarkan analisis yang telah dilakukan, sehingga dapat diperoleh beberapa simpulan yaitu sebagai berikut :

Berdasarkan hasil perhitungan *losses* tanpa pengaruh harmonisa sehingga diperoleh hasil *losses* pada transformator 1 yaitu sebesar 0,62kW. Akibat adanya pengaruh harmonisa sehingga menyebabkan terjadinya peningkatan *losses* pada transformator 1 menjadi 8,885kW.

Berdasarkan hasil analisis *losses* tanpa pengaruh harmonisa sehingga diperoleh hasil perhitungan efisiensi pada transformator 1 yaitu sebesar 99,654%,namun terjadinya peningkatan *losses* akibat pengaruh harmonisa sehingga menyebabkan terjadinya penurunan efisiensi pada transformator 1 menjadi 95,048%.

Adanya pengaruh harmonisa diketahui bahwa dapat menyebabkan terjadinya peningkatan *losses* pada transformator. Terjadinya peningkatan *losses* pada transformator sehingga berpengaruh terhadap efisiensinya. Dampak negatif yang terjadi pada transformator akibat harmonisa sehingga diperlukan suatu upaya-upaya penanggulangan untuk mereduksi tingkat harmonisa. Hal tersebut salah satunya dapat dilakukan dengan melakukan studi analisis penggunaan filter harmonisa yang kemudian dapat diaplikasikan langsung pada sistem.

REFERENSI

- [1] Dugan, R.C., McGranaghan, M.F., Santoso, S., Beaty, H.W. 2004. Electrical Power System Quality-Second Edition. The McGraw-Hill.
- [2] Harlow, J.H. 2004. Electric Power Engineering. United States of America : CRC Press.
- [3] Agusman, C. 2011. Analisis Perhitungan Rugi-Rugi Daya Transformator Karena Harmonik. Depok : Jurusan Teknik Elektro Universitas Indonesia.
- [4] Dhavitra, R., Firdaus, Feranita. 2015. Analisis Dampak Total Harmonic Distortion Terhadap Losses pada Transformator Distribusi di Fakultas Teknik Riau. Jom FTEKNIK, Vol. 2 (Mei) : 1 - 16.
- [5] Rinas, I.W. 2012. Studi Analisis *Losses* dan *Derating* Akibat Pengaruh THD pada Gardu Transformator Daya di Fakultas Teknik Universitas Udayana. *Teknologi Elektro*, Vol. 11 (Januari - Juni) : 23 - 29.
- [6] Weking, A. I. 2013. Simulasi Penentuan Penempatan Filter Aktif Shunt untuk Mendapatkan Distorsi Daya yang Terkecil di Blue Point Bay Villa & Spa. *Teknologi Elektro*, Vol. 12 (July – Desember) : 29 - 37.
- [7] IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems. IEEE Standard 519-2014.
- [8] Gonen, T. 2008. Electric Power Distribution System Engineering, Second Edition. United States of America : CRC Press.
- [9] SPLN (Standar Perusahaan Listrik Negara) 50:1997. Spesifikasi Transformator Distribusi. 1997.
- [10] De La Rosa, F. C. 2006. Harmonics And Power System. United State of America : Taylor & Francis Group.



{ halaman ini sengaja dikosongkan }