

Pengaruh Distorsi Harmonik Terhadap Penurunan Kapasitas Daya Trafo Distribusi 3 Fasa 400 kVA di Politeknik Negeri Semarang

Akhmad Jamaah

Jurusan Teknik Elektro Politeknik Negeri Semarang
E-mail : akhmadjamaah@yahoo.com

Abstrak

Politeknik Negeri Semarang sebagai sebuah lembaga pendidikan tinggi vokasi saat ini mempunyai lebih dari 500 unit komputer yang tersebar pada 21 laboratorium komputer/laboratorium multimedia. Setiap laboratorium dilengkapi dengan pendingin ruangan (AC). Sistem catu daya di Polines dilayani oleh 2 (dua) buah trafo yaitu masing-masing ber-daya 400 kVA. Komputer, *printer*, lampu hemat energi dan peralatan pengatur kecepatan motor merupakan beban-beban *non linier* yang menyebabkan timbulnya harmonik pada jaringan sistem tenaga listrik. Kandungan harmonik yang tinggi pada jaringan sistem tenaga listrik akan menyebabkan trafo distribusi mengalami panas berlebih dan apabila tidak segera ditangani akan menyebabkan *life time* trafo menjadi pendek. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui besar harmonik dan pengaruhnya terhadap penurunan kapasitas daya trafo distribusi di Polines dengan cara melakukan pengukuran harmonik trafo dalam keadaan berbeban. Pembebanan trafo sesuai dengan beban yang dibutuhkan Polines dalam melaksanakan kegiatan akademik dan administratif. Metoda analisa yang dipergunakan adalah metoda komperasi antara hasil pengukuran dengan standar IEEE 519-1992. Dengan mengkomparasi hasil pengukuran dengan standar IEEE 519-1992 maka dapat ditentukan apakah perlu *derating* atau tidak. Berdasarkan hasil penelitian ini bahwa kandungan harmonik trafo untuk total kandungan harmonik tegangan (THD_v) semua di bawah standar ($< 5\%$) dan total kandungan harmonik arus (TDD) maupun IHD kedua trafo juga di bawah standar, sehingga tidak perlu dilakukan *derating*. Namun karena pada kenyataannya trafo benar-benar mengalami pemanasan berlebih dalam arti kata panas trafo telah melampaui panas yang diijinkan oleh standar SPLN 8-2: 1991, maka perlu dihitung kenaikan rugi-rugi trafo akibat beban yang mengandung harmonik.

Kata kunci : Beban *non linear*, Harmonik, Transformator, *Derating*.

Abstract

The Semarang State Polytechnic as an institution of higher vocational education currently has more than 500 units computers which is spread out on 21 computer laboratories / multimedia laboratories. Each laboratory is equipped with air conditioner (AC). Power supply system in Polines is served by 2 transformers. The power capacity of transformer are 400 kVA . Computer, printer, energy-efficient lighting and other appliances with motor speed control are a non-linear loads that cause harmonics in the power system network. High content of harmonics on power system network causes overheating to the distribution transformers. It is not treated immediately will cause the transformer life time becomes shorter. The research was aimed to determine harmonics content and its effect on distribution transformers in Polines by performing measurements on transformers under load conditions. The transformers load was in accordance with the required Polines load in academic and administrativ activities. The comparison method between the results of measurements with the IEEE 519-1992 standard is used to analyze the problem. By comparing the measurement results with the IEEE 519-1992 standard, it can be determined whether the transformer need to be derating or not. Based on the results of the research, the harmonic content of the transformer for the total harmonic content of voltage (THD_v) was below the standard ($< 5\%$) and total harmonic current content (TDD) or IHD for the second transformer was also below the standard. So that the transformers did not need for derating. However, due to the fact that transformer was over-heated, it means that the heat of the transformer has gone beyond that allowed by the standard heat SPLN 8-2: 1991, then it needs to be calculated transformer losses increase due to load containing harmonics.

Keywords: *Non linear, Harmonics, Transformers, Derating*

I. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Sebagian besar peralatan listrik yang dipergunakan di Politeknik Negeri Semarang adalah peralatan listrik yang termasuk beban *non linier* seperti: komputer, *printer*, pendingin ruangan (AC), peralatan listrik dengan *switching* elektronik, Lampu Hemat Energi (LHE) dan *Florescent Lamp* (FL) dengan balas elektronik. Pembebanan trafo distribusi oleh beban non-linier akan menimbulkan distorsi harmonik pada sistem tenaga listrik. Sistem tenaga listrik yang mengandung harmonik membawa kerugian pada berbagai alat diantaranya adalah trafo distribusi. Kandungan harmonik yang besar menyebabkan trafo mengalami pemanasan yang berlebih (*over heating*) walaupun beban belum mencapai beban nominal. Kondisi riilnya adalah pada tanggal 15 September 2011 salah satu trafo milik Polines mengalami pemanasan berlebih yakni telah melampaui panas yang diijinkan.

Pemanasan berlebih disebabkan karena meningkatnya rugi-rugi pada trafo yaitu: rugi berbeban (P_{LL}), rugi I^2R , rugi *Eddy Current* serta rugi sasar lainnya (*other stray*). Kondisi yang demikian berdampak pada penurunan kapasitas daya trafo (*derating transformer*).

Beban *non-linier*, yaitu beban yang mengakibatkan bentuk gelombang arus tidak sinusoidal walaupun disuplai dengan tegangan yang sinusoidal. Gelombang arus yang tidak sinusoidal atau gelombang arus terdistorsi dinamakan harmonik. Kadar harmonik yang tinggi pada sistem tenaga listrik tidak dihindaki karena merugikan dan dianggap sebagai gangguan dalam sistem tenaga listrik.

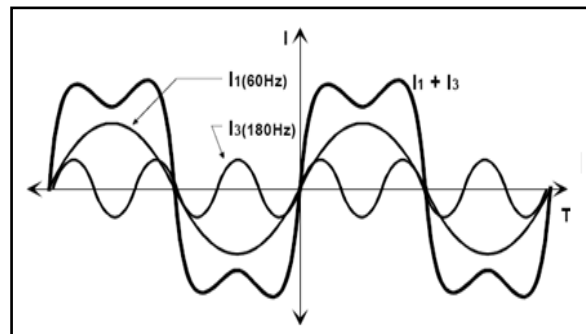
Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui penurunan kapasitas daya trafo karena pengaruh distorsi harmonik dengan cara melakukan pengukuran kandungan distorsi harmonik pada sistem tenaga, perhitungan *derating* dan analisisnya pada trafo distribusi 3 fasa 400 kVA di Politeknik Negeri Semarang.

1.2 Tinjauan Pustaka

a. Teori Harmonik

Harmonik adalah suatu komponen sinusoidal dari suatu periode gelombang yang mempunyai suatu frekuensi yang merupakan kelipatan bulat dari gelombang fundamental tersebut [1]. Jika frekuensi fundamentalnya f , frekuensi harmonik orde ke “n” adalah $n \times f$. Biasanya istilah

harmonik ini digunakan untuk mendefinisikan distorsi gelombang sinus arus dan tegangan pada amplitudo dan frekuensi yang berbeda.



Gambar 1 Gelombang Fundamental Terdistorsi Harmonik Ke-3

Distorsi harmonik disebabkan karena adanya beban *non-linear* dalam sistem tenaga [2]. Peralatan elektronik seperti komputer, *printer*, peralatan listrik dengan *switching* elektronik, Lampu Hemat Energi (LHE) dan *Florescent Lamp* (FL) dengan balas elektronik merupakan beban *non-linear*.

b. Indeks Harmonik

Untuk menganalisis pengaruh harmonik terhadap kualitas tegangan dan arus ditentukan oleh indeks harmonik, yaitu THD (*Total Harmonic Distortion*) dan TDD (*Total Demand Distortion*).

Perbandingan nilai komponen harmonik dengan komponen fundamental biasanya dinyatakan dalam persen, indeks ini disebut dengan THD (*Total Harmonic Distortion*). THD biasanya digunakan untuk menyatakan bentuk penyimpangan bentuk gelombang arus dan tegangan yang mengandung harmonik terhadap gelombang sinusoidal murni dalam satu periode.

$$THD_v = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} V_h^2}}{V_1} \times 100\% \tag{1}$$

$$THD_i = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_1} \times 100\% \tag{2}$$

Persamaan (1) dan (2) merupakan persamaan untuk menentukan nilai THD tegangan dan arus [2]. Kontribusi masing-masing komponen harmonik terhadap distorsi arus dan tegangan dinyatakan oleh IHD (*Individual Harmonic Distortion*).

Nilai IHD untuk harmonik tegangan dan arus pada orde ke-n didefinisikan sebagai berikut:

$$\frac{V_h}{V_1} \times 100\% \quad \text{dan} \quad \frac{I_h}{I_1} \times 100\% \quad (3)$$

Tingkat distorsi arus dapat dilihat dari nilai THD, akan tetapi hal tersebut dapat saja salah saat diinterpretasikan. Aliran arus yang kecil dapat memiliki nilai THD yang tinggi, namun tidak menjadi ancaman yang dapat merusak sistem tenaga listrik. Beberapa analis mencoba 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 Requirement for Harmonic Control in Electrical Power System*”.

Sehingga TDD dapat didefinisikan dengan persamaan sebagai berikut ;

$$TDD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_L} \times 100\% \quad (4)$$

dengan, I_h adalah arus harmonik orde ke-h

I_L adalah arus beban puncak pada frekuensi dasar yang diukur pada PCC (*the maximum demand load current*)

Cara untuk menentukan I_L yaitu dengan menghitung nilai rata-rata beban maksimum selama perioda pengukuran [2].

c. Standar Batas Distorsi Tegangan dan Arus

Batas atau standar untuk besarnya tegangan dan arus harmonik yang diijinkan disesuaikan dengan standar IEEE 519-1992.

TABEL 1
BATAS DISTORSI TEGANGAN MENURUT STANDAR IEEE 519-1992 [3]

Bus voltage at PCC, V_n (kV)	Individual voltage Distortion (%)	Total voltage distortion THD_v (%)
$V_n \leq 69$	3.0	5.0
$69 < V_n \leq 161$	1.5	2.5
$V_n > 161$	1.0	1.5

Sumber: IEEE Standard 519-1992

TABEL 2
BATAS DISTORSI ARUS MENURUT STANDAR IEEE 519-1992 [3]

$V_n \leq 69 \text{ kV}$						
I_{sc}/I_L	$h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h$	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
$69 \text{ kV} < V_n \leq 161 \text{ kV}$						
< 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
$V_n > 161 \text{ kV}$						
< 50	2.0	1.0	0.75	0.3	0.15	2.5
≥ 50	3.0	1.5	1.15	0.45	0.22	3.75

Sumber: IEEE Standard 519-1992, tabel 10.3, 10.4, 10.5.

dengan :

I_{sc} adalah nilai maksimum arus hubung singkat

I_L adalah arus permintaan maksimum

h adalah orde harmonik

TDD adalah *Total Demand Distortion* (%)

d. Pengaruh Harmonik pada Rugi-Rugi Trafo Berbeban

Rugi-rugi berbeban terdiri dari rugi tembaga belitan, rugi arus eddy dan rugi sasar lainnya (*other stray loss*), atau dalam bentuk persamaan dapat dituliskan:

$$P_{LL} = P_{DC} + P_{EC} + P_{OSL} \text{ (watt)} \quad (5)$$

dengan :

P_{DC} = rugi-rugi yang dihasilkan oleh arus beban dan tahanan dc belitan

P_{EC} = rugi-rugi arus eddy belitan

P_{OSL} = rugi-rugi sasar lain dalam klem, tangki dan lainnya

(1) Pengaruh Harmonik pada Rugi Belitan

Jika harga rms arus beban meningkat dengan adanya komponen harmonik, maka rugi-rugi belitan (P_{DC}) akan bertambah dengan kuadrat arus [4].

$$P_{DC} = R_{DC} \times I_A^2 = R_{DC} \times \left(\sum_{h=1}^{h=h_{\max}} I_{h,rms}^2 \right) \text{ watt} \quad (6)$$

Penambahan faktor yang meningkatkan harga rms arus pada rugi-rugi yang didasarkan pada

kandungan harmonik, dengan I_R adalah arus rating atau arus nominal maka rugi-rugi dapat dituliskan dengan persamaan dalam per-unit.

$$P_{DC}(pu) = R_{DC-R} \sum_{h=1}^{h_{max}} [I_h^2(pu)] \quad (7)$$

dengan :

P_{DC} = rugi-rugi tembaga belitan trafo (watt)

P_{DC-R} = rugi-rugi tembaga belitan pada rating arus (watt)

I_h = arus harmonik (pu)

(2) Pengaruh Harmonik pada Rugi Arus Eddy

Rugi-rugi arus eddy yang dibangkitkan oleh fluks elektromagnetik diasumsikan bervariasi dengan kuadrat arus rms dan kuadrat dari frekuensi [5]. Dalam nilai per unit dapat dituliskan sebagai berikut :

$$P_{EC}(pu) = P_{EC-R}(pu) \cdot \sum_{h=1}^{h_{max}} [I_h(pu)]^2 h^2 \quad (8)$$

dengan:

I_h adalah arus rms pada orde harmonik (pu).

P_{EC-R} adalah rugi arus eddy pada kondisi rating kerja (pu).

TABEL 3
TYPICAL VALUES OF P_{EC-R} [2]

Type	MVA	Voltage	PEC-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	480 V LV	1 – 5
	> 5	480 V LV	9 – 15

Sumber: Dugan, Roger C., 2004

(3) Pengaruh Harmonik pada Rugi Sasar Lainnya

Faktor rugi-rugi harmonik untuk rugi-rugi sasar lain dapat dituliskan dalam bentuk yang sama seperti untuk arus eddy belitan [4]:

$$F_{HL-STR} = \frac{P_{OSL}}{P_{OSL-R}} = \frac{\sum_{h=1}^{h_{max}} \left[\frac{I_h}{I} \right]^2 h^{0,8}}{\sum_{h=1}^{h_{max}} \left[\frac{I_h}{I} \right]^2} = \frac{\sum_{h=1}^{h_{max}} \left[\frac{I_h}{I_1} \right]^2 h^{0,8}}{\sum_{h=1}^{h_{max}} \left[\frac{I_h}{I_1} \right]^2} \quad (9)$$

Oleh karena itu pada beban-beban harmonik, rugi-rugi sasar lain harus dikalikan dengan faktor rugi-rugi harmonik [4]. Berdasarkan riset dan kajian pabrik untuk rugi-rugi sasar (*other stray losses*) tidak berpengaruh kritis pada belitan trafo type kering (*dry type*) maka rugi-rugi ini dapat diabaikan atau sama dengan nol.

e. Derating Trafo

Pengertian *derating* trafo pada penelitian ini adalah upaya menurunkan kapasitas pembebanan trafo yang diakibatkan karena beban berpolusi harmonik agar trafo tidak mengalami pemanasan berlebihan [6].

Derating adalah salah satu cara yang dapat dilakukan untuk mengurangi pengaruh harmonik pada trafo distribusi agar trafo akan mempunyai masa pakai (*life-time*) yang panjang sehingga secara ekonomi menguntungkan dan sekaligus menjaga kehandalan sistem tenaga listrik.

Perhitungan untuk menentukan nilai *derating* suatu trafo dapat dilakukan dengan metode penghitungan nilai THDF (*Transformer Harmonic Derating Factor*) (Bambangdjaya, 2011). THDF adalah merupakan faktor pengali yang dapat dipergunakan untuk menghitung besar kapasitas daya baru (kVA_{baru}) sebuah trafo. Pada dasarnya nilai THDF trafo dipengaruhi oleh nilai THD terukur dari sebuah trafo karena dibebani dengan beban non-linear.

Nilai THDF dapat dicari dengan rumus sebagai berikut

$$THDF = \frac{1,414}{CF} \times 100\% \quad (10)$$

$$THDF = 1,414 \frac{(I_{rms})}{(I_{puncak})} \times 100\%$$

dengan :

I_{rms} = arus rms fasa rata-rata (A)

I_{puncak} = arus puncak fasa rata-rata (A)

CF (*Crest Factor*) = I_{puncak} / I_{rms}

Rumus untuk menghitung nilai kVA_{baru} adalah :

$$kVA_{baru} = THDF \times kVA_{penganal} \quad (11)$$

dengan :

kVA_{baru} = kapasitas daya terpasang baru trafo

$kVA_{penganal}$ = kapasitas daya terpasang lama

THDF = *Transformer Harmonic Distortion Factor*

f. Hipotesis

Berdasarkan pada landasan teori dan hasil-hasil penelitian yang pernah dilakukan maka penelitian ini dapat diambil hipotesis sebagai berikut:

1. Trafo dibebani dengan beban *non-linear* seperti: komputer, *printer*, pendingin ruangan (AC), lampu hemat energi (LHE), dan peralatan elektronik lainnya mengakibatkan distorsi harmonik tegangan (THD_v) dan distorsi harmonik arus (TDD) yang cukup besar.
2. THD_v dan TDD hasil pengukuran melampaui standar IEEE 519-1992.
3. Diketahui data harmonik maka dapat dihitung nilai penurunan kapasitas trafo.

II. METODA PENELITIAN

Metoda yang dilakukan dalam penelitian ini adalah metoda komparasi antara hasil pengukuran dengan standar IEEE 519-1992. Apabila hasil pengukuran melebihi standar maka dilakukan perhitungan *derating* dan jika hasil pengukuran dibawah standar tidak dilakukan perhitungan *derating*.

2.1 Alat Penelitian

Alat-alat penelitian ini adalah sebagai berikut:

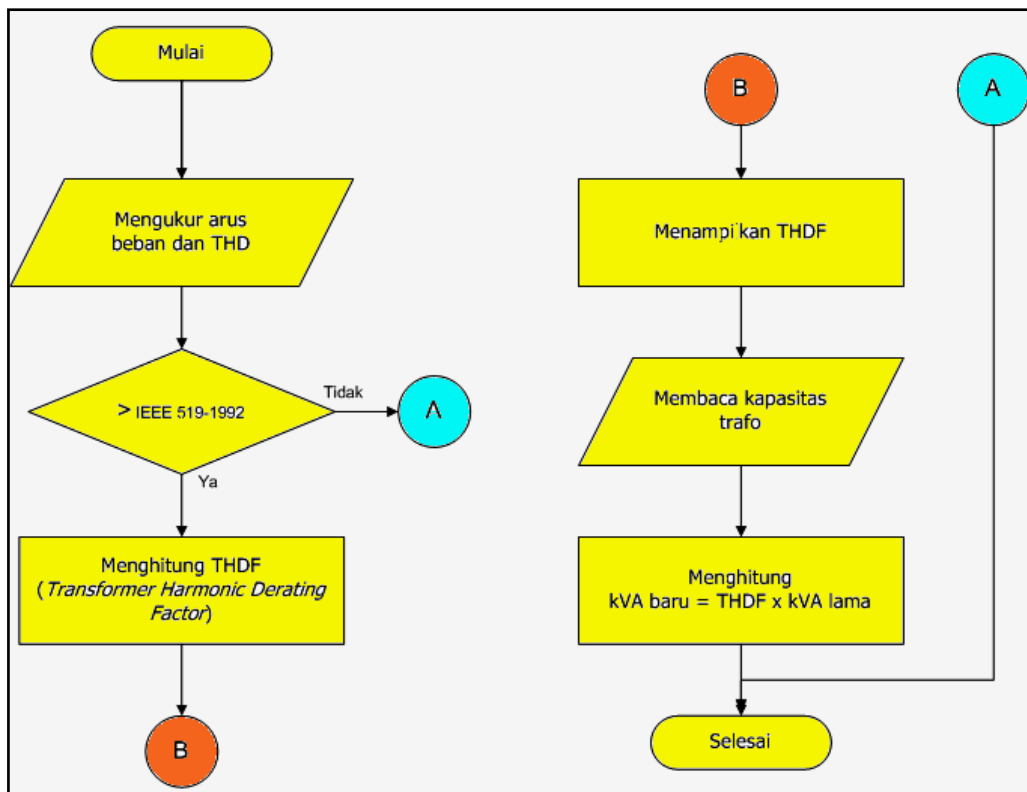
1. Transformator 3 fasa, Produk PT. UNINDO, 400 kVA, 20kV/380V, YNyn6, Impedansi (4%), milik Polines .
2. *Power Quality Analyzer* KEW 6310 Ver. 2.10 produk Kyoritsu Electrical Instrument Works, LTD. Tokyo Japan, peralatan ini dipergunakan untuk mengukur besarnya THD pada transformator (*real-time*) dengan tampilan digital.
3. *Clamp probe/sensor* M-8129, *Range measures*: 300A, 1000A, 3000A, Ø 150 mm, peralatan ini dipergunakan untuk sensor arus beban.
4. *Noncontact InfraRed Thermometer*, KW06-304 produk Krisbow, *wide temperature measures*: -50°C to 750°C . Peralatan ini dipergunakan untuk mengukur suhu trafo.
5. Seluruh peralatan yang terdapat dalam ruang teori maupun laboratorium yang suplai listriknya diambil dari trafo sebagai obyek penelitian.

2.2 Jalannya Penelitian

Dalam melaksanakan penelitian ini langkah-langkah yang ditempuh adalah sebagai berikut:

1. Pengambilan Data
 - a. Mengukur kandungan harmonik tegangan dan arus dari sisi sekunder trafo III dengan beban sesuai dengan keadaan beban di Polines.
 - b. Mengukur suhu trafo secara berkala selama pengukuran (a).
2. Penyajian Data
 - a. Menampilkan data pengukuran kandungan harmonik dan suhu trafo.
 - b. Memilih standar uji kandungan harmonik hasil pengukuran pada standar IEEE 519-1992.
3. Analisis Data
 - a. Menentukan metoda analisis data pengukuran yakni metoda komperasi antara hasil pengukuran dengan standar IEEE 519-1992.
 - b. Membandingkan hasil pengukuran dengan standar IEEE 519-1992 dan menentukan perlu atau tidak dilakukan perhitungan *derating*.
 - c. Hasil pengukuran kandungan harmonik dibawah standar, tidak perlu dilakukan perhitungan *derating*.
 - d. Menghitung kenaikan rugi-rugi trafo pada beban yang mengandung harmonik untuk trafo III dan trafo I. Hasil perhitungan pada tabel 4.4.
4. Membuat kesimpulan penelitian.

Diagram alir pelaksanaan penelitian ini ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Diagram Alir Penelitian

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Pengumpulan data

Diagram pembebanan trafo uji ditunjukkan pada Gambar 3. Spesifikasi trafo uji adalah sebagai berikut :

Pabrik pembuat : PT. UNINDO
 Tipe : Indoor
 Daya (S) : 400 kVA
 Tegangan kerja (V) : 21/20,5/20/19,5/19 kV//400V
 Impedansi (Z) : 4 %
 Sistem Pendingin : ONAN

Perhitungan arus hubung singkat (I_{SC}), arus beban penuh (I_{FL}) dan arus permintaan maksimum (I_L) trafo adalah:

$$I_{SC} = \frac{400 \text{ kVA} \times 100}{4 \times \sqrt{3} \times 0,4 \text{ kV}} = 14.435,22 \text{ A}$$

$$I_{FL} = \frac{kVA}{\sqrt{3} \times kV} = \frac{400 \text{ kVA}}{\sqrt{3} \times 0,4 \text{ kV}} = 577,37 \text{ A}$$

Sedangkan besar arus permintaan maksimum (*maximum demand load current*) atau I_L selama pengukuran trafo pada hari Rabu dan Kamis tanggal 16 dan 17 Nopember 2011 terjadi pada jam 10.30 tanggal 17 Nopember yaitu :

$$I_L = \frac{440 + 362 + 470}{3} = 424 \text{ A. (nilai rata-rata tertinggi/maksimum sampel pengukuran).$$

3.2 Pemilihan Standar Uji Harmonik Tegangan dan Arus

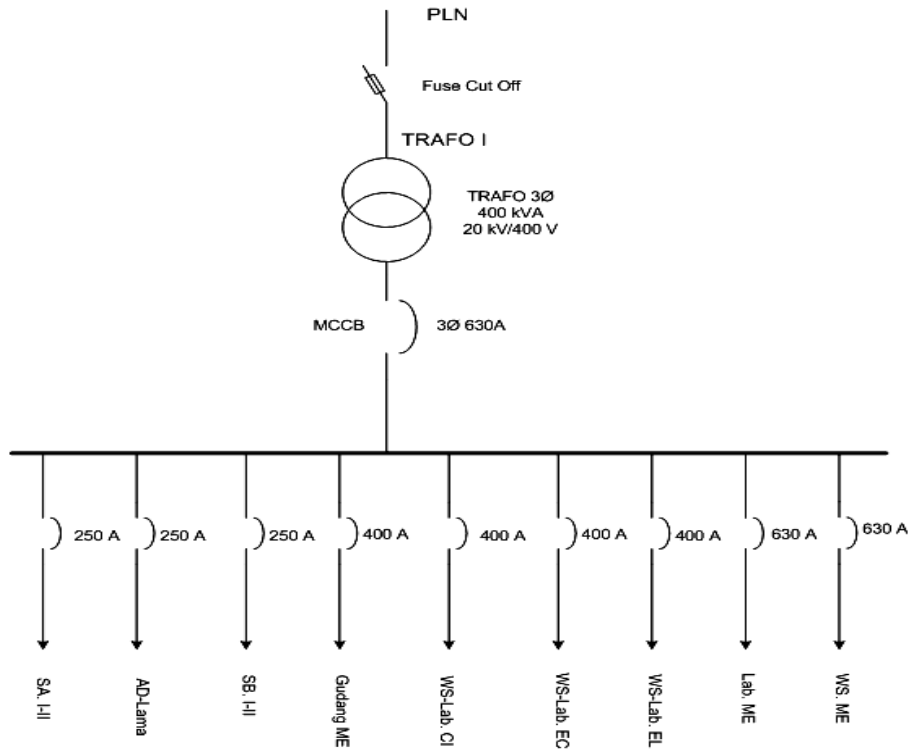
Untuk meninjau hasil pengukuran TDD dan IHD arus pada standar IEEE 519-1992 maka dihitung nilai I_{SC}/I_L yaitu:

$$\frac{I_{SC}}{I_L} = \frac{14.435,22 \text{ A}}{424 \text{ A}} = 34,05$$

Dari hasil perhitungan $I_{SC}/I_L = 34,05$ maka tabel standar yang diambil sebagai dasar tinjauan adalah sebagai berikut:

I_{SC}/I_L	= 20 – 50
TDD	= 8,0 %
IHD Orde < 11	= 7,0 %
IHD Orde 11–16	= 3,5 %
IHD Orde 17-22	= 2,5 %
IHD Orde 23-34	= 1 %
IHD Orde ≥ 35	= 0,5 %

Untuk meninjau standar harmonik tegangan THD_v maka nilai tegangan pengenal yang dilihat adalah sisi sekunder trafo sebesar $400 \text{ V} < 69 \text{ kV}$ sehingga tabel standar yang diambil sebagai dasar tinjauan adalah $THD_v = 5 \%$. Hasil pengukuran harmonik trafo seperti ditunjukkan pada Tabel 4.



Gambar 3 Diagram Pembebanan Trafo Uji

TABEL 4
DATA PENGUKURAN HARMONIK TRAFO

Hari, Tgl	Waktu (WIB)	THD _I (%)			THD _V (%)			I _{RMS} (A)			Suhu (°C)
		R	S	T	R	S	T	R	S	T	
Rabu 16/11/11	08.00	5,1	5,8	5,5	3,9	3,1	2,7	324	285	325	36,9
	08.30	4,9	5,5	5,1	4,0	3,4	3,3	340	284	358	38,6
	09.00	5,8	6,1	5,1	4,0	3,2	3,0	363	297	358	42,8
	09.30	6,3	7,7	5,0	4,1	3,4	3,1	363	275	322	44,5
	10.00	5,7	5,0	5,1	4,0	3,5	3,2	401	313	358	47,2
	10.30	5,9	5,6	5,7	3,9	3,1	3,1	309	263	268	51,7
	11.00	4,9	5,7	3,5	4,1	3,1	3,2	404	307	373	55,1
	11.30	5,9	4,9	5,0	4,4	3,4	3,6	411	366	384	58,4
	12.00	5,5	4,6	4,6	4,5	3,7	3,6	362	341	365	59,1
	12.30	5,9	4,4	5,0	4,1	3,1	3,2	411	325	384	60,4
	13.00	4,5	3,6	3,3	3,9	3,0	3,2	394	337	366	61,7
	13.30	5,0	4,0	3,9	4,0	3,0	3,3	360	321	368	62,5
	14.00	3,9	5,6	4,9	4,0	3,3	3,6	355	370	339	63,8
	14.30	4,2	6,8	4,4	4,0	3,0	3,3	395	381	379	64,7
	15.00	4,1	5,9	4,3	4,1	3,5	3,3	385	393	386	65,6
	15.30	5,2	7,5	5,8	4,0	3,2	3,2	347	339	325	66,2
	16.00	4,8	7,8	5,4	4,5	3,5	3,5	308	305	315	64,2
	16.30	5,3	6,7	5,2	3,7	2,9	3,2	340	328	321	62,1
	17.00	5,3	7,3	5,3	4,1	3,5	3,4	359	329	331	58,2
	17.30	5,8	6,8	5,0	4,3	3,2	3,5	353	343	333	53,2
	Σ	104	117	97,1	81,6	65,1	65,5	7284	6502	6958	
	Avg	5,2	5,9	4,86	4,08	3,26	3,28	364	325	348	

Kamis 17/11/11	07.15	4,9	5,9	5,8	3,4	2,9	3,0	185	179	189	40,1	
	07.30	6,0	5,8	5,7	3,7	2,9	2,8	217	188	226	41,8	
	07.45	6,7	5,4	7,2	3,8	3,1	3,0	228	191	257	43,2	
	08.00	6,6	5,9	5,1	3,6	3,1	3,0	258	203	234	44,7	
	08.15	6,6	5,9	5,4	3,7	3,0	3,0	268	218	264	45,5	
	08.30	5,8	5,2	5,8	4,0	3,1	2,9	293	248	274	45,9	
	08.45	5,6	5,5	5,5	4,0	3,2	3,0	312	282	305	46,8	
	09.00	5,3	5,3	5,0	4,0	3,4	3,2	325	287	309	47,5	
	09.15	5,5	5,1	5,1	4,1	3,4	3,1	362	312	358	47,9	
	09.30	4,9	4,3	5,0	4,2	3,4	3,3	344	322	322	48,2	
	09.45	5,5	5,0	5,5	4,1	3,3	3,2	346	303	325	48,6	
	10.00	5,3	4,8	5,5	3,9	3,2	3,0	354	336	305	49,1	
	10.15	5,0	4,7	5,3	3,9	3,3	3,0	384	317	354	51,3	
	10.30	7,9	4,4	5,7	4,1	3,3	2,9	440	362	470	54,7	
	END											
	Σ	81,6	73,2	77,6	54,5	44,6	42,4	4316	3748	4192		
	Avg	5,8	5,2	5,5	3,9	3,2	3,0	308	268	299		

Pada saat mengukur THD_I dan THD_V, sekaligus terukur juga IHD_I dan IHD_V dari orde ke 1 sampai orde ke 63.

3.3 Analisis Data THD_V dan TDD

Metoda evaluasi yang dipergunakan dalam menganalisis hasil pengukuran THD_V dan TDD adalah metoda komperasi antara hasil pengukuran dengan standar. Jika hasil pengukuran ≤ standar maka trafo tidak perlu di *derating*, dan jika hasil pengukuran > standar maka trafo harus di *derating*.

Hasil pengukuran menunjukkan bahwa tidak ada harga THD_V yang melampaui standar yakni semua dibawah standar (< 5,0%), sehingga trafo tidak perlu dilakukan perhitungan *derating*.

Perhitungan TDD dan IHD dilakukan dengan menerapkan persamaan (3) dan (4) menghasilkan nilai $\sum I_h^2 = 219,91$ maka:

$$\begin{aligned}
 1) \ TDD &= \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_L} \times 100\% \\
 &= \frac{\sqrt{219,91}}{466} \times 100\% \\
 &= 3,18\%
 \end{aligned}$$

2) IHD mulai orde ke 2 sampai dengan orde ke 63 dirangkum pada Tabel 5.

TABEL 5
HASIL PERHITUNGAN TDD DAN IHD TRAF0

Orde Harm	TDD /IHD pengkrn (%)	TDD /IHD stand (%)	Ket
TDD	3,18	8,0	< standar
< 11	5,5	7,0	< standar
11 ≤ h < 17	0,6	3,5	< standar
17 ≤ h < 23	0,4	2,5	< standar
23 ≤ h < 35	0,6	1,0	< standar
35 ≤ h	0,47	0,5	< standar

Dari hasil perhitungan nilai TDD maupun IHD semua dibawah standar, hal ini mengandung pengertian bahwa trafo tidak perlu dilakukan perhitungan *derating*. Namun demikian perlu dianalisis penyebab mengapa trafo III mengalami pemanasan.

3.4 Analisis Pengaruh Harmonik pada Trafo

Pengaruh harmonik pada trafo saat berbeban adalah meningkatnya nilai rugi-rugi. Untuk mengetahui besar rugi-rugi trafo saat berbeban dengan beban yang mengandung harmonik maka dihitung variabel-variabel yang mempengaruhi besar kecilnya rugi-rugi itu. Hasil perhitungan ditunjukkan pada Tabel 6.

Rugi-rugi trafo saat berbeban (P_{LL}) terdiri dari rugi tembaga (P_{DC}), rugi *eddy current* (P_{EC}), dan

rugi sasar lainnya (P_{OSL}). Hubungan antara keempatnya adalah seperti ditunjukkan pada persamaan (5) yaitu:

$$P_{LL} = P_{DC} + P_{EC} + P_{OSL}$$

Perhitungan rugi-rugi trafo adalah sebagai berikut:

a. Rugi tembaga

Perhitungan rugi diperoleh dari penerapan persamaan (7) yaitu:

$$P_{DC}(pu) = R_{DC} \sum_{h=1}^{h=h \max} [I_h^2(pu)]$$

$$P_{DC}(pu) = R_{DC} \sum_{h=1}^{h=h \max} [I_h^2(pu)]$$

$$= 1,0004$$

Hasil perhitungan tersebut dapat disimpulkan bahwa akibat beban yang mengandung harmonik maka rugi tembaga meningkat sebesar 0,04 %.

TABEL 6
HASIL PERHITUNGAN VARIABEL RUGI-RUGI TRAFO

h	Ih	(Ih/I1) pu	(Ih/I1) ²	h ²	(Ih) ² x h ²	h ^{0,8}	(Ih/I1) ² x h ^{0,8}
1	319,44	1,000000	1,000000	1	1,000000	1,000000	1,000000
2	0,14	0,000438	0,000002	4	0,000008	1,741101	0,000000
3	1,52	0,004758	0,0000226	9	0,0002038	2,408225	0,000000
4	0,28	0,000877	0,000008	16	0,000123	3,031433	0,000000
5	2,54	0,007951	0,0000632	25	0,0015806	3,623898	0,0000010
6	0,34	0,001064	0,0000011	36	0,0000408	4,192963	0,000000
7	4,32	0,013524	0,0001829	49	0,0089616	4,743276	0,00000164
8	0,53	0,001659	0,0000028	64	0,0001762	5,278032	0,000000
9	3,52	0,011019	0,0001214	81	0,0098354	5,799546	0,00000119
...
...
61	0,08	0,000250	0,0000001	3.721	0,0002334	26,807966	0,000000
62	0,01	0,000031	0,000000	3.844	0,0000038	27,158974	0,000000
63	0,01	0,000031	0,000000	3.969	0,0000039	27,508850	0,000000
		Σ	1,0004133		1,0379154		1,000002945

b. Rugi eddy current

Perhitungan rugi *eddy current* diperoleh dari penerapan persamaan (8) yaitu:

$$P_{EC}(pu) = P_{EC-R}(pu) \cdot \sum_{h=1}^{h=h_{max}} [I_h(pu)]^2 h^2$$

dengan nilai P_{EC-R} diperoleh dari tabel 3 yakni sebesar 1,00, maka:

$$P_{EC}(pu) = 1,00 (1,0379) = 1,0379$$

Dari hasil perhitungan tersebut maka dapat difahami bahwa telah terjadi peningkatan rugi *eddy current* sebesar 0,038 pu atau 3,8 %.

c. Rugi-rugi sasar lainnya

Perhitungan rugi sasar lainnya dapat diketahui dengan menerapkan persamaan (9) yaitu dengan menghitung faktor rugi sasar yaitu,

$$F_{HL-STR} = \frac{\sum_{h=1}^{h=h_{max}} \left[\frac{I_h}{I_1} \right]^2 h^{0,8}}{\sum_{h=1}^{h=h_{max}} \left[\frac{I_h}{I_1} \right]^2}$$

$$F_{HL-STR} = \frac{1,000002945}{1,0004133} = 1,00$$

Hasil perhitungan tersebut diatas terlihat bahwa akibat adanya harmonik rugi sasar lainnya pada trafo tidak mengalami peningkatan.

Dari hasil perhitungan di atas dirangkum pada Tabel 7 yang merupakan data pengaruh beban yang mengandung harmonik terhadap rugi-rugi pada trafo.

TABEL 7

RANGKUMAN PERHITUNGAN RUGI-RUGI TRAFO

P_{DC}	P_{EC}	P_{OSL}	Suhu Tertinggi (°C)
Naik 0,04 %	Naik 3,8 %	Tetap	67,5

Dengan demikian maka pengaruh harmonik yang paling dominan adalah bertambahnya rugi arus eddy. Pertambahan rugi-rugi inilah yang mengakibatkan pemanasan berlebih pada suatu trafo.

IV. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian pengaruh harmonik terhadap penurunan kapasitas daya

trafo distribusi di Politeknik Negeri Semarang, dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

1. Trafo dengan frekuensi pengukuran sebanyak 34 kali menghasilkan THD tegangan 3,51% dan TDD arus adalah 1,53%.
2. THD tegangan dan TDD arus dari trafo tidak melebihi standar IEEE 519-1992 maka tidak perlu dilakukan perhitungan penurunan kapasitas trafo/*derating*.
3. Trafo dengan beban berpolusi harmonik mengakibatkan peningkatan rugi-rugi khususnya rugi arus eddy.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Gusnita, Novi., *Analisis Harmonik Pada Sistem Distribusi*, Tesis S2 Teknik Elektro UGM, Yogyakarta, 2005
- [2] Dugan, Roger C., Mc Granaghan, Mark F., Santoso, Surya., Beaty, H. Wyne., *Electrical Power Systems Quality*, The McGraw-Hill Companies, NewYork, 2004.
- [3] IEEE Std 519-1992, *IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control Power System*, IEEE-SA. Standard Board, Piscataway, USA, 1993.
- [4] Geduldt, Owen Christoper., *The Impact of Harmonic Distortion on Power Transformer Operating Near The Thermal Limit*, Dissertation, University of Johannesburg, 2005.
- [5] IEEE Std C57.110-1998 (R2004), *IEEE Recommended Practice for Establishing Transformer Supplying Nonsinusoidal Load Currents*, IEEE-SA. Standard Board, Piscataway, New-York USA, 2004.
- [6] De Keuleaer, Hans, *Transformer derating*, Leonardo Energy's flagship publication, Brussels, Belgium, 2008.