



UNIVERSITAS INDONESIA

ANALISIS PENGARUH HARMONIK PADA TRANSFORMATOR DAYA

DI INDUSTRI SEMEN

SKRIPSI

INDRA FIRMANSYAH KOSWARA

0706199432

FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS INDONESIA

PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO

KEKHUSUSAN ELEKTRO

DEPOK

JANUARI 2010

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

**Skripsi ini adalah hasil karya saya sendiri,
dan semua sumber baik yang dikutip maupun dirujuk
telah saya nyatakan dengan benar.**

Nama : INDRA FIRMANSYAH.K

NPM : 0706199432

Tanda Tangan :

Tanggal : 14 Desember 2009

HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :

Nama : Indra Firmansyah Koswara

NPM : 0706199432

Program Studi : Teknik Elektro

Judul Skripsi : Analisis Pengaruh Harmonik Pada Transformator Daya di Industri Semen

Telah berhasil dipertahankan di hadapan Dewan Penguji dan diterima sebagai bagian persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia

DEWAN PENGUJI

Pembimbing : Ir. Amien Rahardjo, MT.

(.....)

Penguji : Budi Sudiarto ST, MT.

(.....)

Penguji : Aji Nur Widyanto ST, MT.

(.....)

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 4 Januari 2010

UCAPAN TERIMAKASIH

Puji syukur saya panjatkan kepada Allah SWT, karena atas berkat dan rahmat-Nya, saya dapat menyelesaikan skripsi ini. Penulisan skripsi ini dilakukan dalam rangka memenuhi salah satu syarat untuk mencapai gelar Sarjana Teknik Jurusan Elektro pada Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Saya menyadari bahwa, tanpa bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak, dari masa perkuliahan sampai pada penyusunan skripsi ini, sangatlah sulit bagi saya untuk menyelesaikan skripsi ini.

Dalam penyusunan skripsi ini, penulis banyak mendapatkan bantuan baik materil maupun moril dari berbagai pihak. Oleh karena itu, penulis mengucapkan terima kasih kepada :

- Kedua Orang Tua dan seluruh keluarga besar yang telah memberikan dukungan doa dan motivasi;
- Ir. Amien Rahardjo, MT selaku dosen pembimbing yang telah menyediakan waktu, tenaga, dan pikiran untuk mengarahkan saya dalam penyusunan skripsi ini;
- Teman yang telah banyak membantu saya dalam menyelesaikan skripsi ini terutama kepada Candra, Ari, Bowo, Rio dan Rudi
- Semua pihak yang telah membantu pembuatan skripsi ini yang tidak dapat disebutkan satu-persatu.

Harapan penulis kiranya skripsi ini dapat memberikan pengetahuan yang bermanfaat bagi penulis khususnya dan pembaca pada umumnya. Semoga Allah SWT senantiasa melimpahkan rahmat dan hidayah pada kita semua. Amin.

Depok, 14 Desember 2009

Penulis

**HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI
TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS**

Sebagai sivitas akademik Universitas Indonesia, saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Indra Firmansyah Koswara
NPM : 0706199432
Program Studi : Teknik Elektro
Departemen : Elektro
Fakultas : Teknik
Jenis karya : Skripsi

demi pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Indonesia **Hak Bebas Royalti Noneksklusif (*Non-exclusive Royalty-Free Right*)** atas karya ilmiah saya yang berjudul :

**” ANALISIS PENGARUH HARMONIK PADA TRANSFORMATOR
DAYA DI INDUSTRI SEMEN”**

beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalihmedia/formatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (*database*), merawat, dan memublikasikan tugas akhir saya tanpa meminta izin dari saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok

Pada tanggal : 14 Desember 2009

Yang menyatakan

(Indra Firmansyah Kowara)

ABSTRAK

Nama : Indra Firmansyah. K
Program Studi : Teknik Elektro
Judul : ANALISIS PENGARUH HARMONIK PADA TRANSFORMATOR DAYA DI INDUSTRI SEMEN

Banyaknya aplikasi beban nonlinier pada sistem distribusi tenaga listrik dimana salah satunya komponen penting yang digunakan pada sistem tenaga listrik adalah transformator daya telah membuat arus sistem menjadi sangat terdistorsi dengan persentase kandungan harmonik arus THD (*Total Harmonic Distortion*) yang sangat tinggi. Dari hasil pengukuran di PT. Indocement Tunggal Prakarsa, Tbk diketahui bahwa pada salah satu transformator daya yaitu pada transformator 3 terdapat harmonik dengan persentase THD arus sebesar 26.3 % yang melebihi batas IEEE 519-1992 yang diijinkan yaitu 15 %, harmonik yang dominan adalah harmonik ke-3, ke-5 dan ke-7. Meski demikian pengaruh distorsi harmonik pada komponen secara umum adalah penurunan kinerja dan bahkan merusakkan suatu alat.

Oleh karena itu, pada penulisan ini akan dijelaskan hasil pengamatan pengaruh distorsi harmonik pada kinerja transformator daya sebagai salah satu komponen dasar sistem tenaga listrik. Kinerja transformator daya dapat ditentukan melalui parameter rugi-rugi daya yang terjadi pada transformator pada saat melayani beban non linier. Distorsi harmonik mengakibatkan nilai rugi-rugi daya pada tranformator bertambah proporsional terhadap besar arus komponen-komponen harmonik yang terdapat didalam arus beban.

Kata Kunci : THD (*total harmonic distortion*), Transformator Daya

ABSTRACT

Name : Indra Firmansyah. K
Studi Program : Teknik Elektro
Title : ANALYSIS OF HARMONIC EFFECTS ON POWER TRANSFORMERS AT CEMENT INDUSTRY

Nonlinear load applications on electric power distribution system in which one of the important components used in electrical power systems are power transformers making the current system highly distorted caused by high the percentage THD current harmonic content (total harmonic distortion). Results of measurements in PT. Indocement Tunggal Prakarsa, Tbk is discovered in one of power transformer power labeled as transformer 3 has percentage of harmonic current THD in amount of 26.3% that exceeds the IEEE 519-1992 limits standards which is only allow 15% of the dominant harmonic on the 3rd harmonic, the 5 and to-7. Yet the influence of harmonic distortion on the general component is decreased performance and even damage a tool

Therefore, this writing will be explained by result of observation on harmonic distortion effect at transformers performance which is one of the electric power system fundamental components. Power Transformers performance can be determined through Power losses parameter that happened on transformers when operating with non linear and linear Load. Harmonic Distortion cause Power losses on transformers which is proportionally increase to high harmonic components current in loads current

Keyword : THD (total harmonic distortion), Power Transformers

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	i
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS.....	ii
HALAMAN PENGESAHAN.....	iii
UCAPAN TERIMAKASIH.....	iv
HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI.....	v
ABSTRAK.....	vi
ABSTRACT.....	vii
DAFTAR ISI.....	viii
DAFTAR GAMBAR.....	x
DAFTAR TABEL.....	xi
BAB 1 PENDAHULUAN.....	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Tujuan Penulisan.....	2
1.3. Batasan Masalah.....	2
1.4. Metodologi	2
1.5. Sistematika Penulisan.....	2
BAB II DASAR TEORI	3
2.1. Pengertian Harmonik	3
2.1.1 Deret Fourier.....	5
2.1.2 Orde Harmonik.....	6
2.1.3 Harmonik Ganjil Dan Genap.....	6
2.2. Sumber-Sumber Harmonik	6
2.3. Indeks Harmonik.....	7
2.3.1 <i>Root Mean Square</i> (RMS).....	7
2.3.2 <i>Individual and Total Harmonic Distrotion</i> (IHD &THD).....	8
2.4 Standar Harmonik.....	9
2.5 Efek – Efek Yang Ditimbulkan Oleh Harmonik.....	10
2.5.1 Efek harmonik terhadap penghantar.....	11
2.5.2 Efek Harmonik Terhadap Tranformator daya.....	13

2.5.2.1	Rugi-rugi tembaga.....	16
2.5.2.2	Rugi – Rugi Arus Eddy.....	17
2.5.2.3	Rugi – Rugi Histerisis.....	17
BAB III PENGUMPULAN DATA.....		19
3.1	Transformator	19
3.2	Metode Pengukuran Harmonik pada transformator daya	21
3.3	Metode Pengukuran suhu pada transformator daya	22
3.4	Data Pengukuran	22
BAB IV PENGARUH HARMONIK PADA TRANSFORMATOR DAYA DAN PENANGANANNYA.....		26
4.1	Analisis <i>Total Harmonic Distortion</i> (THD) pada transformator.....	26
4.2	Analisis rugi-rugi daya pada transformator.....	31
4.3	Penanganan Untuk Menimisator Harmonik.....	35
BAB IV KESIMPULAN		36
DAFTAR REFERENSI.....		37
LAMPIRAN		38

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Gelombang Fundamental, Harmonik Ketiga & Hasil Penjumlahannya.....	4
Gambar 2.2	Transformator daya.....	13
Gambar 3.1	Single Line Diagram Transformator Daya.....	21
Gambar 4.1	Spektrum THD Arus Transformator 3.....	29
Gambar 4.2	Spektrum THD Tegangan Transformator 3.....	31



DAFTAR TABEL

Tabel 2.1.	Frekuensi Fundamental dan kelipatannya	3
Tabel 2.2	Limit Distorsi Arus Harmonik Untuk sistem Distribusi < 69 kV.....	10
Tabel 2.3	Limit Distorsi Tegangan Harmonik.....	10
Tabel 2.4	Nilai dari P_{EC-f}	
Tabel 3.1	Spesifikasi Transformator 1.....	19
Tabel 3.2	Spesifikasi Transformator 2.....	20
Tabel 3.3	Spesifikasi Transformator 3.....	20
Tabel 3.4	Data Pengukuran pada Tranformator 1.....	22
Tabel 3.5	Data Pengukuran pada Tranformator 2.....	23
Tabel 3.6	Data Pengukuran pada Tranformator 3.....	23
Tabel 3.7	Pengukuran THD arus di fasa R, pada transformator.....	23
Tabel 3.8	Pengukuran THD Tegangan di fasa R, pada Tranformator.....	24
Tabel 3.9	Pengukuran perubahan suhu pada masing-masing Transformator..	25
Tabel 4.1	Analisa THD arus pada transformator daya	28
Tabel 4.2	Analisa THD Tegangan pada Transformator daya.....	30
Tabel 4.3	Total rugi-rugi pada masing-masing transformator pengaruh harmonik	33
Tabel 4.4	Perubahan temperatur pada masing-masing Tranformator.....	34

DAFTAR ISTILAH

RMS	: <i>Root Mean Square</i>
IHD	: <i>Individual Harmonic Distrotion</i>
THD	: <i>Total Harmonic Distrotion</i>



BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang Masalah

Sistem tenaga listrik dikenal dua beban yaitu beban linier dan non linier. Beban linier akan memberikan bentuk gelombang keluaran yang linier artinya arus yang mengalir sebanding dengan impedansi dan perubahan tegangan, sedangkan pada beban non linier akan memberikan bentuk gelombang keluaran yang tidak sebanding dengan tegangan setiap setengah siklus, sehingga bentuk gelombang arus maupun tegangan keluarannya tidak sama dengan gelombang masukan disebabkan mengalami distorsi. Beban-beban di industri yang bersifat non linear seperti motor listrik, kendali kecepatan motor, elektronika daya (inverter, rectifier, converter). Beban-beban tersebut menggunakan kontrol pensaklaran dengan peralatan semikonduktor. Harmonik juga dapat dibangkitkan oleh komponen-komponen pada sistem tenaga. Transformator dikenal sebagai sumber harmonik jika dioperasikan di atas batas arus yang diijinkan sehingga menyebabkan saturasi.

Harmonik yang mengalir pada sistem tenaga dapat menyebabkan berbagai permasalahan seperti meningkatnya rugi-rugi daya, pemanasan berlebih pada peralatan, rendahnya efisiensi, unjuk kerja peralatan tertentu yang sensitif terhadap distorsi harmonik menjadi turun, dan lain-lain. Pengaruh harmonik tersebut secara teknis maupun ekonomis sangat merugikan sistem tenaga listrik. Oleh karena itu, untuk mengantisipasi permasalahan yang timbul akibat munculnya distorsi harmonik tersebut, terlebih dahulu perlu dilakukan pengukuran terhadap besarnya kandungan harmonik pada suatu sistem tenaga. Pengukuran dapat dilakukan dengan menggunakan peralatan khusus yang mampu mengetahui besarnya kandungan harmonik. Permasalahannya, harga peralatan untuk mengukur kandungan harmonik tersebut relatif mahal, sehingga tidak semua industri (khususnya industri skala menengah/kecil) yang mempunyai permasalahan dengan distorsi harmonik mampu membeli peralatan tersebut dalam rangka mengatasi permasalahannya.

1.2. TUJUAN PENULISAN

- Studi tentang Pengaruh Harmonik Pada Transformator daya di industri semen

1.3. BATASAN MASALAH

Agar tidak menyimpang dari pokok bahasan yang telah ditentukan maka penulis akan membatasi masalah sebagai berikut :

- Membahas pengaruh harmonisa terhadap 3 buah transformator daya (400 kVA, 1600 kVA dan 1600 kVA, 20kV- 400V).
- Menganalisa pengaruh harmonik terhadap transformator daya.

1.4. METODOLOGI

Penulisan skripsi ini berdasarkan metode tinjauan pustaka dan metode lapangan dengan cara melakukan pengukuran pada transformator daya pada saat melayani beban non linier.

1.5. SISTEMATIKA PENULISAN

Bab I Pendahuluan. Bab ini membahas mengenai latar belakang, tujuan penulisan, batasan masalah, dan sistematika penulisan untuk memberikan gambaran umum mengenai penulisan skripsi ini. Bab II Dasar Teori. Bab ini berisikan tinjauan pustaka yang melandasi pokok permasalahan yang akan dibahas seperti : teori harmonik, sumber harmonik, Efek-efek yang ditimbulkan oleh harmonik. Bab III. Pengumpulan Data, bab ini berisi data pengukuran transformator daya. Bab IV membahas tentang analisis data pengaruh harmonik pada transformator daya dan penanganannya. Bab V Kesimpulan. membahas kesimpulan

BAB II DASAR TEORI

2.1 Pengertian Harmonik

Sistem tenaga listrik dirancang untuk beroperasi pada frekuensi 50 Hz atau 60 Hz. Akan tetapi pada aplikasinya beberapa beban menyebabkan munculnya arus / tegangan yang frekuensinya merupakan kelipatan 50 / 60 Hz. Frekuensi 50 / 60 Hz disebut frekuensi fundamental dan kelipatannya disebut harmonik atau harmonik saja, seperti yang ditunjukkan pada tabel 2.1.

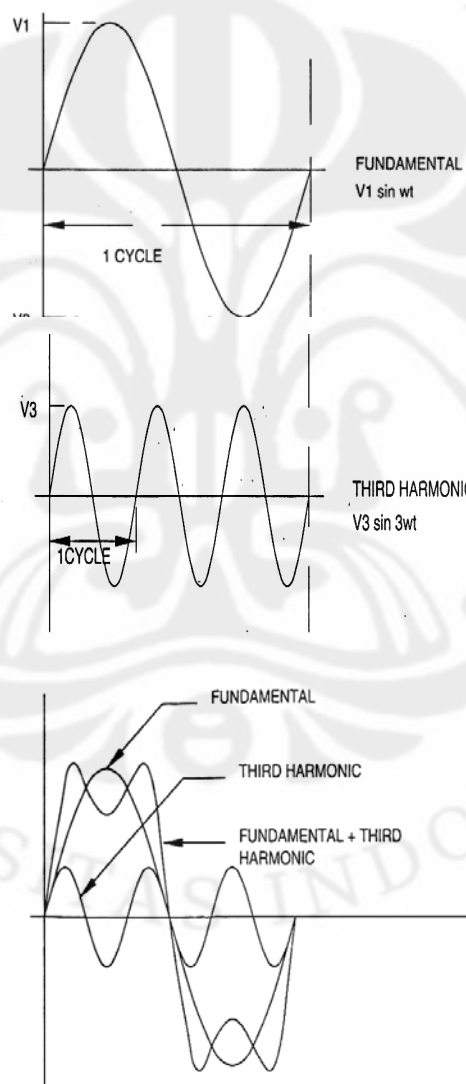
Tabel 2.1. Frekuensi Fundamental dan kelipatannya

Frekuensi (Hz)	Istilah
50	Frekuensi Fundamental
100	Harmonik Pertama
150	Harmonik Kedua
200	Harmonik Ketiga
.....

Keberadaan harmonik ini membawa kerugian pada beberapa alat, salah satunya adalah transformator daya. Akibat dari banyaknya persentase kandungan harmonisa akan berakibat pada semakin buruknya kualitas sumber daya listrik. Umumnya arus sistem distribusi tenaga listrik yang terdistorsi tersebut didominasi oleh arus harmonisa orde ganjil frekuensi rendah, yakni arus harmonisa orde tiga, lima, tujuh, sebelas, dan seterusnya. Harmonik adalah gangguan yang terjadi dalam sistem distribusi tenaga listrik yang disebabkan adanya distorsi gelombang arus dan tegangan. Distorsi gelombang arus dan tegangan ini disebabkan adanya pembentukan gelombang-gelombang dengan frekuensi kelipatan bulat dari frekuensi fundamentalnya. Hal ini disebut frekuensi harmonik yang timbul pada bentuk gelombang aslinya sedangkan bilangan bulat pengali frekuensi dasar disebut angka urutan harmonik. . Jika f adalah frekuensi fundamental dari suatu sistem, maka frekuensi orde n ($1,2,3,\dots,n$) adalah nf yaitu 50Hz, 100Hz, 150Hz dan seterusnya Gelombang-gelombang ini kemudian menumpang pada gelombang murni / aslinya sehingga terbentuk gelombang cacat yang merupakan

jumlah antara gelombang murni sesaat dengan gelombang harmoniknya. Harmonik urutan genap biasanya memiliki rms yang lebih kecil dibandingkan harmonik urutan ganjil.

Jumlah antara frekuensi fundamental dan kelipatannya, akan menyebabkan frekuensi fundamental tidak lagi berbentuk sinus murni, tetapi mengalami distorsi. Gambar 2.1 menunjukkan sebuah gelombang sinus yang terdistorsi akibat adanya harmonik pertama, ketiga dan kelima. Nampak bahwa bentuk gelombang berubah sama sekali dari bentuk sebuah gelombang sinus. Hal ini akan menyebabkan perubahan pada nilai besaran-besaran gelombang tersebut (nilai rms)



Gambar 2.1 Gelombang Fundamental, Harmonik Ketiga & Hasil Penjumlahannya

2.1.1 Deret Fourier

Dalam menganalisa besarnya nilai jumlah gelombang antara gelombang asli dan harmonisanya dapat digunakan analisis deret fourier. Gelombang dikatakan memenuhi syarat jika gelombang tersebut periodik dengan perioda T bila $f(t) = f(t + T)$ untuk semua t . Jika $f(t)$ periodik dan memenuhi kondisi Dirichelet, maka deret fourier adalah

$$f(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos n\omega t + b_n \sin n\omega t) \dots\dots\dots(2-1)$$

dengan koefisien a_0, a_n, b_n masing masing adalah :

$$a_0 = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) dt \dots\dots\dots(2-2)$$

$$a_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cos n\omega t dt \dots\dots\dots(2-3)$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \sin n\omega t dt \dots\dots\dots(2-4)$$

Kondisi dirichelet adalah :

1. Bila gelombang diskontinyu, hanya terdapat jumlah diskontinuitas yang terbatas dalam perioda T .
2. Gelombang memiliki nilai rata-rata yang terbatas pada perioda T
3. Gelombang memiliki jumlah maksimum dan minimum yang terbatas dalam perioda T .

Berdasarkan deret fourier diatas didapatkan bahwa gelombang yang mengintrodusir harmonisa-harmonisa ganjil yaitu harmonisa ketiga, kelima, ketujuh dan seterusnya.

Bila syarat-syarat tersebut dipenuhi, deret Fourier dapat dinyatakan dalam bentuk dimana n adalah orde harmonisa, yaitu bilangan 1,2,3...dst. Pada kasus di

sistem tenaga listrik, umumnya orde yang dominan adalah orde ganjil saja (3,5,7,11 dst.). Orde $n=1$ menyatakan komponen dasar atau fundamental dari gelombang. Suku a_0 menyatakan komponen dc atau nilai rata-rata dari gelombang, yang mana umumnya komponen ini tidak muncul dalam jaringan sistem arus bolak-balik. Bila gelombang arus atau tegangan berbentuk sinusoidal sempurna, maka orde $n=1$ saja yang ada. Gelombang yang cacat (terdistorsi) memiliki koefisien-koefisien dengan indeks n . Amplituda harmonisa biasa dinyatakan sebagai :

$$C_h = \sqrt{a_n^2 + b_n^2}, \quad n \geq 1 \dots\dots\dots (2-5)$$

Nilai-nilai c sebagai fungsi n seringkali digambarkan dalam suatu barchart dan dikenal dengan 'spektrum frekuensi' gelombang.

2.1.2 Orde Harmonik

Orde harmonik menunjukkan komponen frekuensi tunggal yang terdapat pada gelombang campuran. Misalnya, $n = 5$ menunjukkan orde harmonik kelima dengan frekuensi yang merupakan kelipatan lima kali dari frekuensi fundamental. Jika frekuensi fundamental adalah 50 Hz, maka frekuensi orde ke-5 adalah $5 \times 50 = 250$ Hz

2.1.3 Harmonik Ganjil dan Harmonik Genap

Sesuai dengan namanya, harmonik ganjil adalah harmonik ke-3, 5, 7, 9, 11 dan seterusnya, sedangkan harmonik genap adalah ke-2, 4, 6, 8, 10 dan seterusnya. Harmonik ke-1 adalah komponen frekuensi fundamental dari gelombang periodik. Harmonik ke-0 adalah komponen gelombang DC atau konstan. Kebanyakan dari beban non linier menghasilkan dari frekuensi fundamentalnya.

2.2 Sumber-Sumber Harmonik

Dalam sistem tenaga listrik dikenal dua jenis beban yaitu beban linier dan beban non linier. Beban linier adalah beban yang memberikan bentuk gelombang keluaran yang linier artinya arus yang mengalir sebanding dengan impedansi dan

perubahan tegangan, sedangkan beban non linier adalah bentuk gelombang keluarannya tidak sebanding dengan tegangan dalam setiap setengah siklus sehingga bentuk gelombang arus maupun tegangan keluarannya tidak sama dengan gelombang masukannya (mengalami distorsi). Beban non linier umumnya merupakan peralatan elektronik yang didalamnya banyak terdapat komponen semi konduktor. Contoh dari beban non linier : komputer, printer, lampu fluorescent yang menggunakan elektronik ballast, transformator, motor listrik dan elektronika daya, yang juga termasuk ke dalam peralatan beban non linier.

Beban non linier adalah penyebab harmonik, Rasio antara beban non linier dan beban linier akan memberikan adanya beban lebih harmonik. Dibandingkan dengan beban linier yang bentuk gelombang arus maupun tegangan akan selalu berbentuk sinusoidal dengan frekuensi yang sama, maka beban non linier akan mengakibatkan bentuk gelombang sinusoidal berubah bentuk menjadi tidak murni sinusoidal.

2.3 Indeks Harmonik

Dalam pengukuran harmonik ada beberapa petunjuk penting yang harus dimengerti, yaitu Individual Harmonic Distortion and Total Harmonic Distortion (IHD & THD).

2.3.1 Root Mean square (RMS)

Karena intensitas sebuah sinyal yang bervariasi dengan waktu berubah dari waktu ke waktu, maka tidak tepat untuk menyatakan sebuah sinyal dengan suatu nilai yang dimilikinya pada saat waktu sembarang, Beberapa yang harus diperhatikan adalah intensitas rata-rata sebuah sinyal, definisi nilai rata-rata sebuah sinyal adalah sebagai berikut :

$$X_{Average} = \frac{1}{T} \int_0^T x(t) dt \dots\dots\dots (2.6)$$

Namun, nilai rata – rata tidak memberikan informasi mengenai amplitudo sebuah fungsi berkala, karena nilai ini hanya menyebutkan nilai *offset dc*. Bila informasi

amplitudo diperlukan, maka yang dibutuhkan adalah nilai akar kuadrat rata – rata dari fungsi tersebut (*Root Mean square*), yang didefinisikan sebagai akar kuadrat dari rata – rata kuadrat dari fungsi tersebut pada suatu periode, artinya :

$$X_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T x^2(t) dt} \dots\dots\dots (2.7)$$

Maka, untuk perhitungan dalam tegangan dan arus dinyatakan dalam bentuk :

$$V_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T V^2(t) dt} = \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} V_n^2} \dots\dots\dots (2.8)$$

Atau

$$V_{\text{rms}} = \sqrt{V_1^2 + V_2^2 + V_3^2 + \dots + V_n^2}$$

$$I_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T I^2(t) dt} = \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} I_n^2} \dots\dots\dots (2.9)$$

Atau

$$I_{\text{rms}} = \sqrt{I_1^2 + I_2^2 + I_n^3 + \dots + I_n^2} \dots\dots\dots (2.10)$$

2.3.2 Individual and Total Harmonic Distortion (IHD & THD)

Individual Harmonic Distortion (IHD) adalah perbandingan antara nilai rms dari fundamentalnya, Misal nilai rms dari harmonik ketiganya adalah 30 A dan harmonik kelimanya adalah 35 A, sedangkan nilai rms dari harmonik fundamentalnya adalah 50 A, maka :

IHD ketiga adalah :

$$IHD_3 = \frac{30}{50} = 0,6 \text{ atau } 0,6 \%$$

IHD kelima adalah :

$$\text{IHD}_5 = \frac{35}{50} = 0,7 \text{ atau } 0,7 \%$$

Total Harmonic Distortion (THD) adalah perbandingan antara nilai rms dari seluruh komponen harmonik terhadap nilai rms dari nilai fundamentalnya biasanya dinyatakan dalam persen (%). Nilai dari THD ini digunakan untuk mengukur besarnya penyimpangan dari bentuk gelombang periodik yang mengandung harmonik dari gelombang sinusoidal murninya. Untuk gelombang sinusoidal sempurna nilai dari THD adalah bernilai 0 %. Untuk mencari nilai THD untuk tegangan dan arus dapat menggunakan rumus sebagai berikut :

$$V_{THD} = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} V_n^2}}{V_1} \dots\dots\dots (2.11)$$

Keterangan :

V_n = Nilai tegangan harmonik (Volt)

V_1 = Nilai fundamental (Volt)

n = Komponen harmonik maksimum yang diamati

$$I_{THD} = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I_1} \dots\dots\dots (2.12)$$

Keterangan :

I_n = Komponen Harmonik (Ampere)

I_1 = Komponen fundemntal (Ampere)

n = Komponen harmonik maksimum yang diamati.

2.4 Standar Harmonik

Standar Harmonik adalah berdasarkan IEEE 519 – 1992. Ada dua kriteria yang digunakan untuk mengevaluasi distorsi harmonik, yang pertama adalah batas harmonik untuk arus (I_{THD}) dan yang kedua adalah batasan untuk tegangan (V_{THD}). Presentasi (%) I_{THD} adalah presentase jumlah total arus yang terdistorsi oleh harmonisa terhadap frekuensi fundamentalnya .Batasan untuk harmonik arus

(I_{THD}) ditentukan oleh perbandingan $\frac{I_{sc}}{I_L}$. I_{sc} adalah arus hubung singkat yang ada pada PCC (Point of Common Coupling), sedangkan I_L adalah arus beban fundamental nominal. Sedangkan Presentasi (%) batas untuk harmonisa tegangan (V_{THD}), ditentukan dari besarnya tegangan sistem yang dipakai / terpasang.

Tabel 2.2 Limit Distorsi Arus Harmonik Untuk sistem Distribusi < 69 kV^[5]

MAXIMUM HARMONIC CURRENT DISTORTION In % of fundamental						
Isc / IL	HARMONIC ORDER					<i>Total Harmonic Distortion (THD %)</i>
	<11	11 ≤ h < 17	17 ≤ h < 23	23 ≤ h < 35	35 ≤ h	
	<i>Individual Harmonic Distortion (IHD %)</i>					
<20	4,0	2,0	1,5	0,6	0,3	5
20-50	7,0	3,5	2,5	1,0	0,5	8
50-100	10,0	4,5	4,0	1,5	0,7	12
100-1000	12,0	5,5	5,0	2,0	1,0	15
>1000	15,0	7,0	6,0	2,5	1,4	20

Tabel 2.3 Limit Distorsi Tegangan Harmonik^[5]

Maximum Distortion (%)	System Voltage		
	V ≤ 69 KV	69 < V < 138kV	V > 138kV
Individual Harmonik	3,0	1,5	1,0
Toatal Harmonik	5,0	2,5	1,5

2.5 Efek – Efek Yang Ditimbulkan Oleh Harmonik

Setiap komponen sistem distribusi dapat dipengaruhi oleh harmonik walaupun dengan akibat yang berbeda. Namun demikian komponen tersebut akan mengalami penurunan kinerja dan bahkan akan mengalami kerusakan. Salah satu dampak yang umum dari gangguan harmonik adalah panas lebih pada kawat netral dan transformator sebagai akibat timbulnya harmonik ketiga yang dibangkitkan oleh peralatan listrik satu fasa. Pada keadaan normal, arus beban setiap fasa dari beban linier yang seimbang pada frekuensi dasarnya akan saling mengurangi sehingga arus netralnya menjadi nol. Sebaliknya beban non linier satu fasa akan menimbulkan harmonik kelipatan tiga ganjil yang sering disebut triplen harmonik (harmonik ke-3, ke-9, ke-11 dan seterusnya) yang sering disebut

zero sequence harmonik. Harmonik ini tidak menghilangkan arus netral tetapi dapat menghasilkan arus netral yang lebih tinggi dari arus fasa.

- Orde harmonik $h = 1, 7, 13 \dots$ merupakan urutan positif (+)
- Orde harmonik $h = 5, 11, 17 \dots$ merupakan urutan negatif (-)
- Triplen harmonik $h = 3, 9, 15 \dots$ merupakan urutan nol

Harmonik pertama urutan polaritasnya adalah positif, harmonik kedua urutan polaritasnya adalah negatif dan harmonik ketiga urutan polaritasnya adalah nol, harmonik keempat adalah positif (berulang beurutannya sampai seterusnya)

2.5.1 Efek harmonik terhadap penghantar

Komponen rugi-rugi pada penghantar hanyalah I^2R , dimana arus (I) akan menjadi lebih besar akibat adanya harmonisa sedangkan nilai tahanan (R) dibedakan menjadi nilai tahanan arus searah (R_{dc}), efek kulit (*skin effect*) dan Efek kedekatan penghantar (*proximity effect*).

Efek kulit (*skin effect*) disebabkan distribusi arus dipermukaan lebih besar daripada di dalam penghantar, sehingga tahanan efektif meningkat. Efek kulit meningkat dengan kenaikan frekuensi dan diameter penghantar.

Efek kedekatan (*proximity effect*) disebabkan medan magnet penghantar mengganggu distribusi arus pada penghantar-penghantar yang berdekatan.

Pengaruh harmonisa terhadap tahanan dapat dijelaskan sebagai berikut, harmonisa mempunyai frekuensi kelipatan dari frekuensi fundamental, frekuensi harmonisa ini mempengaruhi besarnya tahanan arus bolak balik (R_{ac}) akibat efek kulit (*skin effect*) dan efek kedekatan (*proximity effect*), sehingga rasio perbandingan antara tahanan arus searah dengan tahanan arus bolak-balik yang dilambangkan k_c dapat diperoleh dari persamaan

$$k_c = \frac{R_{ac}}{R_{dc}} = 1 + k_{SE} + k_{PE} \dots \dots \dots (2.13)$$

dimana :

k_c : rasio perbandingan R_{dc} dengan R_{ac}

R_{ac} : tahanan penghantar pada arus bolak-balik (Ohm)

R_{dc} : tahanan arus searah (Ohm)

- k_{SE} : penambahan tahanan akibat efek kulit (skin effect)
 k_{PE} : penambahan tahanan akibat efek kedekatan (proximity effect)

Letak aliran arus pada suatu penghantar dipengaruhi oleh besarnya frekuensi, semakin besar frekuensi yang diterapkan maka aliran arus akan semakin mendekati permukaan atau menjauh dari pusat penampang penghantar tersebut. Parameter efek kulit (*skin effect*) diperoleh sebagai fungsi dari frekuensi dan tahanan arus searah dengan persamaan sebagai berikut^[2] :

$$x = 0,027678 \sqrt{\frac{f \cdot \mu}{R_{dc}}} \dots\dots\dots (2.14)$$

dimana :

- f : frekuensi dalam (Hz)
 μ : permeabilitas magnet dari konduktor
 R_{dc} : tahanan arus searah dalam $\Omega/1000$ ft

Penambahan nilai tahanan akibat efek kulit (k_{SE}) adalah merupakan fungsi non linear dari parameter x tersebut. Suatu metode pendekatan kurva dilakukan untuk mendapatkan perhitungan k_{SE} sehingga didapatkan persamaan orde-5 sebagai berikut^[2] :

$x \leq 2$ berlaku :

$$k_{SE}(x) = 10^{-3} (1,04x^5 + 8,24x^4 - 3,24x^3 + 1,447x^2 - 0,2764x + 0,0166) \dots\dots\dots (2.15)$$

$2 < x \leq 10$ berlaku :

$$k_{SE}(x) = 10^{-3} (-0,2x^5 + 6,616x^4 - 83,345x^3 + 500x^2 - 1061,9x + 769,63) \dots (2.16)$$

Sedangkan nilai k_{PE} yang merupakan suatu harga penambahan nilai tahanan akibat efek kedekatan (*proximity effect*) dari persamaan :

$$k_{PE} = k_{SE} \sigma^2 + \left(\frac{1,18}{k_{SE} + 0,27} + 0,312 \sigma^2 \right) \dots\dots\dots (2.17)$$

dengan σ adalah perbandingan antara diameter penghantar dengan jarak antar penghantar^[2]. Setelah didapat nilai k_{SE} dan k_{PE} maka didapat juga nilai R_{ac} . Dengan demikian diperoleh nilai tahanan penghantar saat distorsi (R_h),

$$R_{ac} = k_c \cdot R_{dc} \text{ dan } R_h = R_{dc} + R_{ac}$$

sehingga,

$$R_h = R_{dc} \cdot (k_c + 1) \dots\dots\dots (2.18)$$

Besarnya rugi-rugi tembaga atau rugi-rugi penghantar akibat terdapatnya komponen harmonisa didalam arus beban dapat dihitung dengan persamaan :

$$P_{SR} = \sum_{h=1}^{\infty} I_h^2 \cdot R_h \dots\dots\dots (2.19)$$

dimana :

P_{SR} : rugi-rugi penghantar (Watt)

I_h : arus pada frekuensi (Ampere)

R_h : tahanan penghantar untuk frekuensi dengan orde ke h (Ohm)

2.5.2 Efek Harmonik Terhadap Transformator daya

Transformator adalah suatu alat listrik yang dapat memindahkan dan mengubah energi listrik dari satu atau lebih rangkaian listrik ke rangkaian listrik yang lain, melalui suatu gandengan magnet dan berdasarkan prinsip induksi-elektromagnet. Transformator digunakan secara luas, baik dalam bidang tenaga listrik maupun elektronika. Transformator daya bertugas sebagai penyalur tenaga listrik pada beban - beban tegangan rendah. Jika transformator mensuply beban non linier, maka akan timbul arus harmonisa yang akan mengganggu kinerja pada trafo tersebut dari sisi tegangan rendah.



Gambar 2.2 Transformator daya

Bagian bagian transformator

- a. Inti besi berfungsi untuk mempermudah jalan fluksi, yang ditimbulkan oleh arus listrik yang melalui kumparan. Inti besi ini terbuat dari lempengan lempengan besi tipis terisolasi, untuk mengurangi panas (sebagai rugi rugi besi) yang ditimbulkan oleh arus eddy.
- b. Kumparan trafo adalah beberapa lilitan kawat berisolasi akan membentuk suatu kumparan. Kumparan itu diisolasi baik terhadap inti besi maupun terhadap kumparan lain dengan isolasi padat seperti karton, pertina dan lain lain.

Umumnya pada trafo terdapat kumparan primer dan kumparan sekunder. Bila kumparan primer dihubungkan dengan tegangan/arus bolak balik maka pada kumparan tersebut timbul fluksi. Fluksi ini akan menginduksikan tegangan, dan bila pada rangkaian sekunder ditutup maka akan menghasilkan arus pada kumparan ini. Jadi kumparan sebagai alat transformasi tegangan arus.

- c. minyak trafo, sebagian besar trafo tenaga, kumparan kumparan dan intinya di rendam dalam minyak trafo, terutama trafo trafo tenaga yang berkapasitas besar, karena minyak trafo mempunyai media sebagai isolasi sehingga minyak trafo tersebut berfungsi sebagai media pendingin dan isolasi.
- d. Bushing, Merupakan penghubung antara kumparan trafo ke jaringan luar. Bushing adalah sebuah konduktor yang diselubungi oleh isolator, yang sekaligus berfungsi sebagai penyekat antara konduktor tersebut dengan tangki trafo.

Transformator dirancang untuk menyalurkan daya yang dibutuhkan ke beban dengan rugi-rugi minimum pada frekuensi fundamentalnya. Arus harmonik dan juga tegangan secara signifikan akan menyebabkan panas lebih pada

transformator melebihi batas standar, maka ini adalah tanda bahwa transformator tersebut mengalami distorsi harmonik.

Ada beberapa hal yang dapat menyebabkan panas pada transformator ketika mengandung komponen harmonik^[4] :

- Kenaikan arus RMS,
Jika transformator kapasitasnya hanya untuk kVA yang dibutuhkan beban, arus harmonik dapat mengakibatkan arus *RMS* transformator menjadi lebih besar dari kapasitasnya. Meningkatnya arus *RMS* menyebabkan rugi-rugi penghantar juga bertambah.
- Peningkatan rugi-rugi arus eddy
Ada arus induksi ini mengalir di belitan, di inti, dan di beban penghantar lain yang terlingkupi oleh medan magnet dari transformator dan menyebabkan panas lebih. Komponen rugi-rugi transformator ini meningkat dengan kuadrat dari frekuensi arus penyebab *eddy-current*. Oleh karena itu menjadi komponen yang sangat penting dari rugi-rugi transformator yang menyebabkan pemanasan oleh harmonik.
- Rugi inti
Peningkatan rugi inti yang disebabkan oleh harmonik bergantung pada pengaruh harmonik pada tegangan yang diberikan dari inti transformator. Semakin besar distorsi tegangan maka semakin tinggi pula *eddy-current* di laminasi inti. Peningkatan rugi inti karena harmonik tidak sekritis *eddy-current losses* dan rugi arus RMS.

Rugi-rugi pada transformator terdiri atas dua yaitu:

1. Rugi-rugi tanpa beban atau *no load loss* (P_{NL})
2. Rugi-rugi oleh beban atau *load-related loss* (P_{LL}).

Rugi-rugi oleh beban (P_{LL}) merupakan fungsi dari arus beban, yang terutama adalah rugi-rugi tembaga I^2R (P_R) dan *stray losses* (P_{ST}). *Stray losses* adalah rugi-rugi yang antara lain disebabkan arus eddy yang menimbulkan fluksi elektromagnetik yang menysasar ke kumparan, inti, pelindung magnetik, dinding

tangki dan sebagainya. Untuk arus harmonik yang besar, rugi-rugi arus eddy pada kumparan adalah paling dominan.

$$P_{\text{LOSS}} = P_{\text{NL}} + P_{\text{LL}} \dots\dots\dots (2.21)$$

dan

$$P_{\text{LL}} = P_{\text{R}} + P_{\text{EC}} + P_{\text{ST}} \dots\dots\dots (2.22)$$

Dari uraian sebelumnya, rugi-rugi daya pada transformator secara signifikan akibat kehadiran komponen-komponen harmonik pada tegangan dan terutama pada arus beban adalah rugi-rugi tembaga, rugi-rugi histerisis dan rugi-rugi arus eddy.

2.5.2.1 Rugi-rugi tembaga

Komponen rugi – rugi tembaga pada tranformator adalah I^2R , dimana arus (I) akan dapat menjadi lebih besar nilainya akibat terdapat komponen-komponen harmonik. Begitu juga dengan nilai tahanan (R), saat terjadi distorsi harmonik, nilai R juga berubah menjadi nilai tahanan arus searah (Rdc) ditambah (Rac) yang merupakan nilai tahanan tambahan akibat efek kulit (*skin effect*) dan efek kedekatan penghantar (*proximity effect*) sebagai dampak dari adanya frekuensi-frekuensi harmonik.

Besarnya rugi-rugi tembaga atau rugi-rugi penghantar akibat terdapatnya komponen harmonik didalam arus beban dapat dihitung dengan persamaan :

$$P_{\text{R}} = \sum_{h=1}^{\infty} I_h^2 \cdot R_h \dots\dots\dots (2.23)$$

dimana :

P_{R} = rugi-rugi tembaga (Watt)

I_h = arus komponen harmonik ke-h (Ampere)

R_h = tahanan untuk frekuensi harmonik ke-h (Ohm)

Arus harmonik dipengaruhi oleh fenomena yang dikenal sebagai efek kulit (*skin effect*). Apabila frekuensi arus yang dihasilkan lebih tinggi dari frekuensi fundamentalnya (50 Hz), arus cenderung mengalir pada permukaan dari kawat konduktor. Hal ini mengurangi area efektif cross sectional dari konduktor dan meningkatkan tahanannya. Tahanan yang besar akan menyebabkan rugi-rugi tembaga sebesar (I^2R) yang besar pula. Pendekatan efek tersebut di atas menimbulkan aliran arus dengan distribusi yang tidak sama melalui konduktor.

2.5.2.2 Rugi-rugi Arus eddy

Rugi arus eddy perlu diamati karena distorsi arus beban relatif lebih tinggi. Dengan arus-arus frekuensi harmonisa lebih tinggi menyebabkan bertambahnya rugi-rugi inti yang sebanding terhadap kuadrat arus beban rms dan kuadrat frekuensi. Konsentrasi arus eddy lebih tinggi pada ujung-ujung belitan transformator karena efek kerapatan medan magnet bocor pada kumparan. Bertambahnya rugi-rugi arus eddy karena harmonisa berpengaruh nyata pada temperatur kerja transformator^[2]. Hal ini akan dapat terlihat pada besar rugi-rugi daya nyata (watt) akibat arus eddy ini. Besarnya rugi-rugi total arus eddy dinyatakan dengan suatu persamaan:

$$P_{EC} = P_{EC-f} \cdot \sum_{h=1}^{\infty} I_h^2 \cdot h^2 \dots \dots \dots (2.24)$$

dimana :

P_{EC} : rugi-rugi arus eddy (Watt)

h : bilangan bulat orde komponen harmonik

P_{EC-f} : rugi-rugi arus eddy (p.u of rate I^2R)

I_h : arus rms harmonic ke-n (p.u of rate load rms current)

Untuk mencari faktor *eddy current loss* dapat dilihat pada tabel 3^[3]

Tabel 2.4 Nilai dari P_{EC-f}

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 to 5	480 V LV	1 – 5
	> 5	480 V LV	9 - 15

2.5.2.3 Rugi-rugi Histerisis

Bila luas penampang inti besi (A), panjang rangkaian magnet (l) dan jumlah lilitan (N) maka perubahan fluks yang terjadi $d\Phi$. Untuk suatu perubahan waktu kecil dt adalah $d\Phi/dt$, tegangan induksi (e) dinyatakan dengan :

$$e = -N \frac{d\phi}{dt} \dots \dots \dots (2.25)$$

$$W = \int_{+\phi}^{-\phi} Ni \, d\Phi \dots\dots\dots (2.26)$$

Daya sumber untuk mengimbangnya akan sama dengan: $-e.i$ Dalam interval waktu dt , energi yang diberikan adalah :

$$dW = (-e)i = Ni \frac{d\phi}{dt} \dots\dots\dots (2.27)$$

Untuk $d\Phi = A \, dB$ dan $Ni = H.l$, dimana B adalah kerapatan fluks (weber/m) dan H adalah kuat medan magnet (Ampere-lilitan/m) maka persamaan diatas menjadi :

$$W = A l \int_{-BM}^{+Bm} H \, dB \dots\dots\dots (2.28)$$

Persamaan diatas tidak dapat diturunkan karena fungsi yang tidak diketahui saling berkaitan satu sama lain, menurut percobaan yang dilakukan Charles P Steinmetz bahwa area itu besarnya sebanding dengan frekuensi dan B_m^x , nilai x untuk Fe-C adalah 1,6 sedangkan untuk Fe-Si berkisar antara 1,7 - 2,0 , sehingga persamaan diatas menjadi :

$$Ph = \eta.A.l.f.Bm^x$$

- Ph : Rugi-rugi histerisis (Watt)
- H : karakteristik material inti
- A : luas penampang (Meter)
- .f : frekuensi (Hz)
- Bm^x : kerapatan fluks magnet (Weber)

BAB III PENGUMPULAN DATA

Penulis melakukan pengambilan data untuk pengukuran yaitu di PT. Indocement Tunggal Prakarsa, Tbk. yang berlokasi di Jalan Raya Citeureup, Bogor. Ada 3 buah transformator daya yang digunakan untuk pengumpulan data dilakukan penyusun untuk mempermudah dalam menganalisa pengaruh harmonik pada transformator daya dan penanganannya. Sebelum kita melakukan pengukuran kita hendaknya kita mengetahui spesifikasi Tranformator daya yang digunakan.

3.1 Transformator

Tabel 3.1 Spesifikasi Transformator 1

Manufacturer	ABB Trafo BB N
Year	1997
Phase	3
Frequency	50
Impedance	5,9 %
Power-kVA	400
Primary Voltage – kV	6,6
Primary Ampere – I	35
Secondary Voltage - V	690
Secondary Ampere - I	335
Serial No.	13770255/1.ABB
Type of Cooling	ONAN
Total weight	1620
Weight of Oil	305
Type of oil	Sheel Diala D

Trafo ini digunakan untuk menyuplai Motor Separator mill dan Motor Raw Mill

Tabel 3.2 Spesifikasi Transformator 2

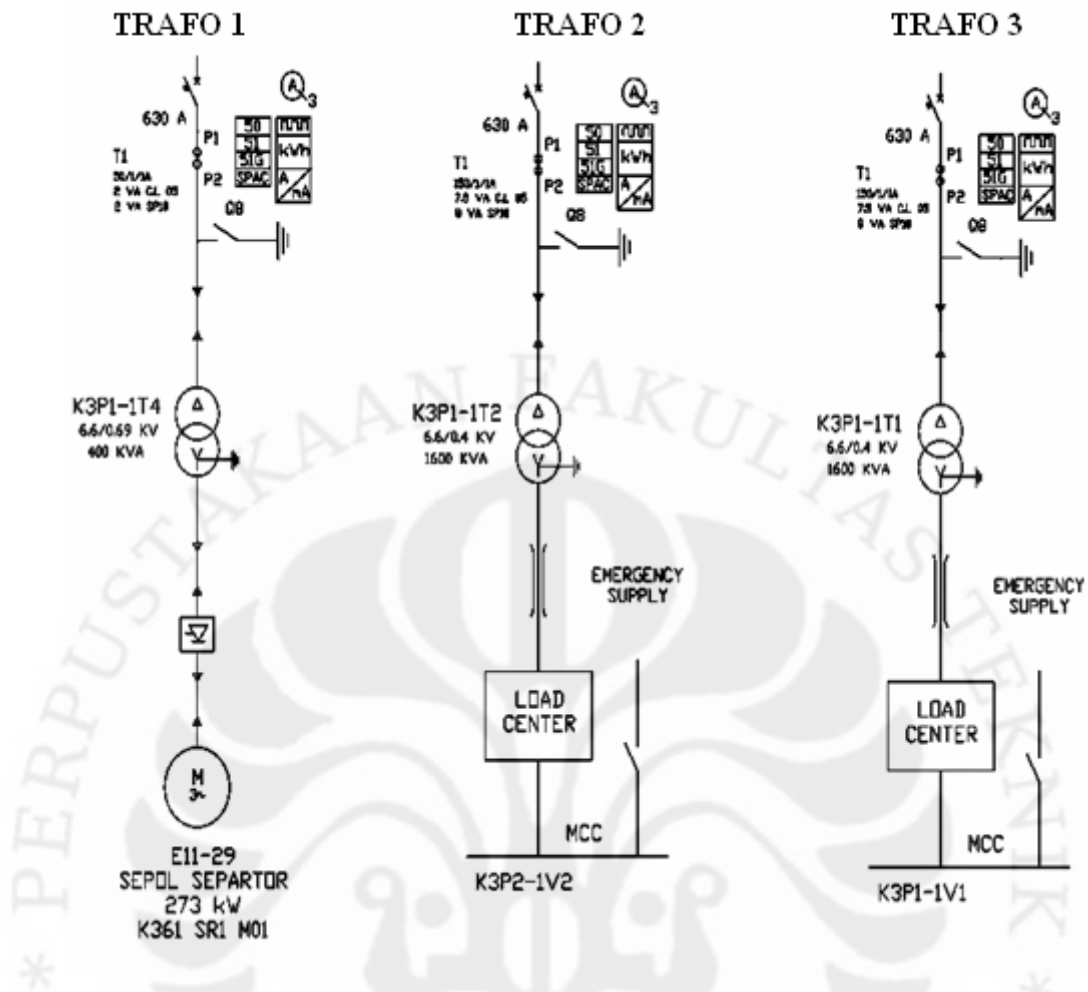
Manufacturer	ABB Trafo BB
Year	1997
Phase	3
Frequency	50
Impedance	5,8 %
Power-kVA	1600
Primary Voltage - kV	6,6
Primary Ampere - I	140
Secondary Voltage - V	400
Secondary Ampere - I	2309
Serial No.	16270073/2.ABB
Type of Cooling	ONAN
Total weight	3800
Weight of Oil	775
Type of oil	Sheel Diala D

Trafo ini digunakan untuk menyuplai Motor-motor transportasi (*conveyor, Bucket, Airslide*) dan *Raw Mill*.

Tabel 3.3 Spesifikasi Transformator 3

Manufacturer	ABB Trafo BB
Year	1997
Phase	3
Frequency	50
Impedance	5,8 %
Power-kVA	1600
Primary Voltage - kV	6,6
Primary Ampere - I	140
Secondary Voltage - V	400
Secondary Ampere - I	2309
Serial No.	16270073/3.ABB
Type of Cooling	ONAN
Total weight	3800
Weight of Oil	775
Type of oil	Sheel Diala D

Trafo ini digunakan untuk menyuplai *Raw Mill* dan *EP Raw Mill*



Gambar 3.1 Single Line Diagram Transformator Daya

3.2 Metode Pengukuran Harmonik pada transformator daya

Metode pengukuran yang dilakukan dengan menggunakan alat ukur khusus yaitu KWH meter M-system, yang dapat menunjukkan beberapa parameter yang dibutuhkan untuk mengetahui pengaruh harmonik pada transformator daya. Pengukuran dilakukan pada beban non linier, karena data yang dibutuhkan saat melakukan pengukuran adalah mesin berjalan dengan beban penuh (*full load*) sehingga didapatkan data yang akurat. Adapun parameter-parameter yang didapat dari hasil pengukuran antara lain berupa :

- Frekuensi
- *Total harmonic distortion* (THD) yaitu THD tegangan THD arus
- Daya aktif, daya nyata dan daya reaktif
- *Power faktor* (PF),

Perbandingan THD arus dan THD tegangan dibutuhkan karena akan dianalisa pengaruh harmonik pada transformator daya, pada bab sebelumnya dijelaskan juga bahwa rugi-rugi transformator karena harmonik ada dua yaitu rugi-rugi akibat beban yang dilayani. Dan yang termasuk dalam rugi-rugi daya dalam perhitungan adalah rugi-rugi akibat beban rugi tembaga dan rugi arus eddy. Ada beberapa variabel yang tetap pada transformator daya yaitu permeabilitas konduktor (μ) adalah sebesar 1 untuk logam, tahanan transformator pada arus dc (R_{dc}) adalah sebesar 0.13Ω dan perbandingan antara diameter konduktor dan jarak antar konduktor (δ) adalah $1 \text{ mm}/0.25 \text{ mm}$ atau sama dengan 4.

Perhitungan rugi-rugi daya terdapat pada transformator daya akibat pengaruh harmonik dapat dihitung berdasarkan pada saat beban terpasang adalah beban non linear, hal ini berarti pada arus dan tegangan rangkaian akan muncul distorsi sebagai akibat dari terdapatnya komponen-komponen harmonik yang berasal dari motor induksi dan elektronika daya.

3.3 Metode Pengukuran suhu pada transformator daya

Pada pengukuran suhu dilakukan pada 3 buah transformator pada saat beban penuh. Alat ukur suhu yang dipergunakan adalah termometer infrared digital. Data pengukuran perubahan suhu ini diperlukan untuk mengetahui kebenaran teori yang menyatakan bahwa semakin bertambahnya rugi-rugi arus eddy maka panas yang timbul pada inti transformator daya akan semakin meningkat

3.4 Data pengukuran

Tabel 3.4 Data Pengukuran pada Tranformator 1

Frequency	50 Hz
KW	34,39
KVA	55,078
KVAR	43,084
Peak KW	75,347
Total PF	0.62
Voltage RMS	404.12 V
Current RMS	70.2 A
% THD Arus	8.1
% THD Tegangan	2.18

Tabel 3.5 Data Pengukuran pada Tranformator 2

Frequency	50 Hz
KW	31,622
KVA	50,125
KVAR	38,947
Peak KW	75,128
Total PF	0.63
Voltage RMS	404.22 V
Current RMS	90.8 A
% THD Arus	14.1
% THD Tegangan	3.1

Tabel 3.6 Data Pengukuran pada Tranformator 3

Frequency	50 Hz
KW	774.17
KVA	961.12
KVAR	569.64
Peak KW	1114.3
Total PF	0.8
Voltage RMS	404.29 V
Current RMS	123.76 A
% THD Arus	26.3
% THD Tegangan	3.64

Tabel 3.7 Pengukuran THD arus di fasa R, pada transformator

Orde Harmonik (h)	Frekuensi Harmonik (Hz)	Trafo 1		Trafo 2		Trafo 3	
		I_{THD} 8.1 %	Arus (Ampere)	I_{THD} 14.1%	Arus (Ampere)	I_{THD} 26,3 %	Arus (Ampere)
1	50	100	70.	100	90	100	120.
2	100	4	2.80	6.5	5.85	3	3.60
3	150	6.6	4.62	10.6	9.54	22.7	27.24
4	200	2.6	1.82	4	3.60	0.8	0.96
5	250	2.9	2.03	5.4	4.86	6.7	8.04
6	300	2.1	1.47	2.5	2.25	0.9	1.08
7	350	1.4	0.98	4.1	3.69	4.5	5.40
8	400	1.2	0.84	2.3	2.07	0.7	0.84
9	450	1.3	0.91	2.7	2.43	4.2	5.04
10	500	1.2	0.84	2.1	1.89	0.9	1.08
11	550	1	0.70	1.7	1.53	2.8	3.36
12	600	0.9	0.63	1.2	1.08	0.8	0.96
13	650	0.8	0.56	1.4	1.26	2.7	3.24
14	700	0.7	0.49	1.3	1.17	1.1	1.32
15	750	0.8	0.56	1.5	1.35	2.7	3.24
16	800	0.7	0.49	1.2	1.08	1.1	1.32
17	850	0.6	0.42	1.3	1.17	2.6	3.12
18	900	0.6	0.42	0.9	0.81	0.9	1.08
19	950	0.6	0.42	1	0.90	1.7	2.04

20	1000	0.5	0.35	1.1	0.99	0.9	1.08
21	1050	0.6	0.42	1	0.90	1.5	1.80
22	1100	0.4	0.28	1	0.90	0.8	0.96
23	1150	0.4	0.28	1	0.90	1.3	1.56
24	1200	0.6	0.42	0.9	0.81	0.7	0.84
25	1250	0.5	0.35	0.9	0.81	1.2	1.44
26	1300	0.5	0.35	0.9	0.81	0.7	0.84
27	1350	0.4	0.28	0.8	0.72	0.9	1.08
28	1400	0.4	0.28	0.8	0.72	0.6	0.72
29	1450	0.5	0.35	0.9	0.81	0.8	0.96
30	1500	0.4	0.28	0.8	0.72	0.4	0.48
31	1550	0.5	0.35	0.8	0.72	0.6	0.72

Tabel 3.8 Pengukuran THD Tegangan di fasa R, pada Tranformator

Orde Harmonik (h)	Frekuensi Harmonik (Hz)	Trafo 1		Trafo 2		Trafo 3	
		V _{THD} 2.18 %	Tegangan (Volt)	V _{THD} 3.1%	Tegangan (Volt)	V _{THD} 3.64 %	Tegangan (Volt)
1	50	100	404	100	404	100	404
2	100	0.6	2.424	0.7	2.828	1.1	4.444
3	150	0.9	3.636	1.3	5.252	1.9	7.676
4	200	0.5	2.02	0.5	2.02	0.2	0.808
5	250	0.8	3.232	1.2	4.848	1.5	6.06
6	300	0.4	1.616	0.6	2.424	0.3	1.212
7	350	0.7	2.828	1.1	4.444	1.2	4.848
8	400	0.3	1.212	0.5	2.02	0.1	0.404
9	450	0.7	2.828	1.2	4.848	1.1	4.444
10	500	0.5	2.02	0.5	2.02	0.1	0.404
11	550	0.6	2.424	0.8	3.232	0.9	3.636
12	600	0.4	1.616	0.4	1.616	0.1	0.404
13	650	0.5	2.02	0.7	2.828	0.8	3.232
14	700	0.3	1.212	0.5	2.02	0.3	1.212
15	750	0.5	2.02	0.6	2.424	0.8	3.232
16	800	0.3	1.212	0.4	1.616	0.2	0.808
17	850	0.4	1.616	0.6	2.424	0.7	2.828
18	900	0.2	0.808	0.3	1.212	0.1	0.404
19	950	0.5	2.02	0.5	2.02	0.7	2.828
20	1000	0.3	1.212	0.3	1.212	0.4	1.616
21	1050	0.4	1.616	0.5	2.02	0.6	2.424
22	1100	0.1	0.404	0.3	1.212	0.3	1.212
23	1150	0.3	1.212	0.5	2.02	0.5	2.02
24	1200	0.2	0.808	0.1	0.404	0.1	0.404
25	1250	0.2	0.808	0.3	1.212	0.4	1.616
26	1300	0.2	0.808	0.3	1.212	0.1	0.404
27	1350	0.2	0.808	0.2	0.808	0.2	0.808
28	1400	0.1	0.404	0.1	0.404	0.1	0.404
29	1450	0.3	1.212	0.1	0.404	0.2	0.808
30	1500	0.1	0.404	0.01	0.0404	0.2	0.808
31	1550	0.1	0.404	0.1	0.404	0.1	0.404

Tabel 3.9 Pengukuran perubahan suhu pada masing-masing Transformator

Transformator	Arus Harmonik (A)	Suhu ⁰ C	
		Body	Bushing
Transformator 1	70.2	40	35
Transformator 2	90.8	60	56
Transformator 3	120	70	63



BAB IV

PENGARUH HARMONIK PADA TRANSFORMATOR DAYA DAN PENANGANANNYA

4.1 Analisis *Total Harmonic Distortion* (THD) pada transformator

Hasil pengukuran dan perhitungan dibandingkan untuk kemudian dievaluasi berdasarkan standar harmonisa yang telah ditetapkan. Pengukuran dilakukan pada saat beban penuh (*full load*), untuk mengetahui efek harmonisa secara sistem di transformator daya.

Berdasarkan Tabel 3.7 diketahui bahwa nilai arus harmonik (3,5,7,) yang relatif lebih besar. Melalui data-data pengukuran diambil salah satu contoh perhitungan THD arus yaitu pada trafo 3 dikarenakan trafo 3 melebihi standar yang telah ditentukan. Pada hasil pengukuran arus harmonik ke-3,5,7....31 masing-masing adalah : 27,4 A, 8,04 A, 5,4 A..... 0,72 A

$$\begin{aligned} I_{THD} &= \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I_1} \\ &= \frac{\sqrt{I_3^2 + I_5^2 + I_7^2 \dots I_{31}^2}}{I_1} \\ &= \frac{\sqrt{27,4^2 + 8,04^2 + 5,4^2 \dots 0,72^2}}{120} \\ &= \frac{\sqrt{917,77}}{120} \\ &= 0,252 \\ &= 25,2\% \end{aligned}$$

Dari hasil perhitungan diatas maka diketahui bahwa total arus harmonik yang terjadi melebihi batas standar yang telah ditentukan yaitu sebesar 15%, maka arus harmonik tersebut harus diturunkan, dengan tujuan agar tidak mengganggu fungsi kerja dari beban tersebut dan tidak menimbulkan efek lainnya.

Perhitungan untuk penentuan standar THD arus sebelumnya terlebih dahulu mengitung I_{SC} / I_L :

Pada Transformator 1 :

Diketahui :

$$I_L = 70 \text{ A}$$

$$Z = 5,9 \%$$

$$V = 0,69 \text{ kV}$$

Ditanya : I_{SC} / I_L

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

$$I_{sc} = \frac{400 \times 100}{5,9 \times 1,73 \times 0,69} = \frac{40000}{7} = 5714$$

$$I_{SC} / I_L = \frac{5714}{70} = 81,6$$

Jadi standar yang digunakan adalah THD 12% lihat tabel 2.2 sebab hasil perhitngan I_{SC} / I_L berada pada *range* 50 – 100.

Pada Transformator 2 :

Diketahui :

$$I_L = 90 \text{ A}$$

$$Z = 5,8 \%$$

$$V = 0,4 \text{ kV}$$

Ditanya : I_{SC} / I_L

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

$$I_{sc} = \frac{1600 \times 100}{5,8 \times 1,73 \times 0,4} = \frac{160000}{4} = 40000$$

$$I_{SC} / I_L = \frac{40000}{90} = 444,4$$

Jadi standar yang digunakan adalah THD 15% lihat tabel 2.2 sebab hasil perhitngan I_{SC} / I_L berada pada *range* 100 – 1000.

Pada Transformator 3 :

Diketahui :

$$I_L = 120A$$

$$Z = 5,8 \%$$

$$V = 0,4 \text{ kV}$$

Ditanya : I_{SC} / I_L

$$I_{SC} = \frac{\text{kVA} \times 100}{\% Z \times \sqrt{3} \times \text{kV}}$$

$$I_{SC} = \frac{1600 \times 100}{5,8 \times 1,7 \times 0,4 \times 4} = 40000$$

$$I_{SC} / I_L = \frac{40000}{120} = 333,3$$

Jadi standar yang digunakan adalah THD 15% lihat tabel 2.2 sebab hasil perhitungan I_{SC} / I_L berada pada *range* 100 – 1000.

Tabel 4.1 Analisis THD arus pada transformator daya

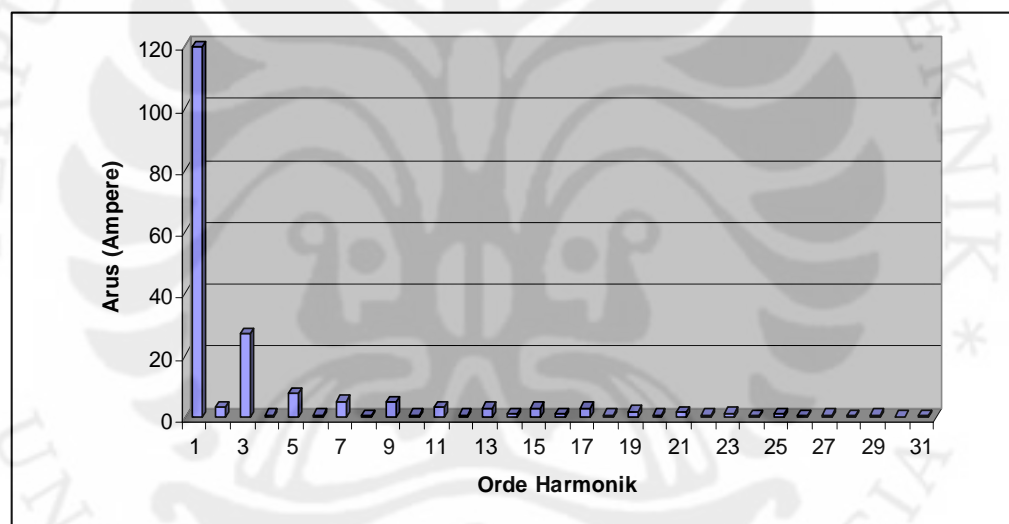
TRANSFORMATOR	(%) THD Arus			EVALUASI
	PENGUKURAN	PERHITUNGAN	STANDAR	
Transformator 1	8.1	7.7	12 %	Di bawah standar
Transformator 2	14.1	13.4	15 %	Di bawah standar
Transformator 3	26.3	25.2	15 %	Melebihi standar

Hasil perhitungan dan pengukuran menunjukkan hasil yang relatif hampir sama artinya peralatan yang dipakai untuk melakukan pengukuran cukup presisi. Dari ketiga transformator yang diukur diperoleh total distorsi arus harmonisa berkisar antara $8,1\% \leq I_{THD} \leq 26,3 \%$ sedangkan hasil perhitungan berkisar antara $7,7 \leq I_{THD} \leq 25,2\%$.

Data ini memperlihatkan bahwa 1 transformator yaitu pada transformator 3 yang memiliki harmonisa melebihi standar baik secara pengukuran maupun perhitungan. Hal ini disebabkan beban non linier yang dipergunakan lebih banyak bila dibandingkan kedua transformator yang lainnya seperti motor listrik,

elektronika daya (inverter, converter) dalam proses kerjanya berlaku sebagai saklar yang bekerja pada setiap siklus gelombang dari sumber tegangan. Proses kerja ini akan menghasilkan gangguan atau distorsi gelombang arus yang tidak sinusoidal. jumlah beban non linier akan menghasilkan gelombang yang kemudian menimbulkan harmonisa pada gelombang arus fundamental. Distorsi harmonik yang besar ini menyebabkan pemanasan lebih pada belitan transformator daya dan akan meyebabkan kenaikan temperatur.

Dengan demikian untuk transformator 3 gangguan harmonisa arus berpotensi besar dari keseluruhan transformator yang diamati. Dengan demikian transformator berpotensi terjadi gangguann harmonisa apabila penggunaan beban tidak linier bertambah. Dalam melakukan perhitungan, standar yang dipakai adalah standar dari IEEE 519-1992 .



Gambar 4.1 Spektrum THD Arus Transformator 3

Dalam melakukan perhitungan THD tegangan digunakan standar untuk tegangan dibawah 69 kV, kemudian dari hasil pengukuran yang telah diperoleh dilakukan perbandingan dengan standar yang sesuai untuk tegangan dibawah 69 kV. Dari hasil perbandingan tersebut dapat diketahui apakah nilai dari hasil pengukuran yang telah dilakukan melebihi batas yang diijinkan atau tidak.

Berdasarkan Tabel 3.8 diketahui bahwa nilai tegangan harmonik (3,5,7,31) yang relatif lebih besar. Melalui data-data pengukuran diambil salah satu contoh perhitungan THD tegangan yaitu pada trafo 3 dikarenakan persentase THD lebih besar daripada THD trafo 1 dan 2. Pada hasil pengukuran tegangan

harmonik ke-3,5,7....31 masing-masing adalah : 7,676 V, 6,06 V, 4,848 V,.....0,404 V

$$\begin{aligned}
 V_{T\ HD} &= \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} V_n^2}}{V_1} \\
 &= \sqrt{\frac{V_3^2 + V_5^2 + V_7^2 + \dots V_{31}^2}{V_1}} \\
 &= \sqrt{\frac{7,676^2 + 6,06^2 + 4,848^2}{404}} \\
 &= \sqrt{\frac{203.04}{404}} \\
 &= 0.035 \\
 &= 3,5 \%
 \end{aligned}$$

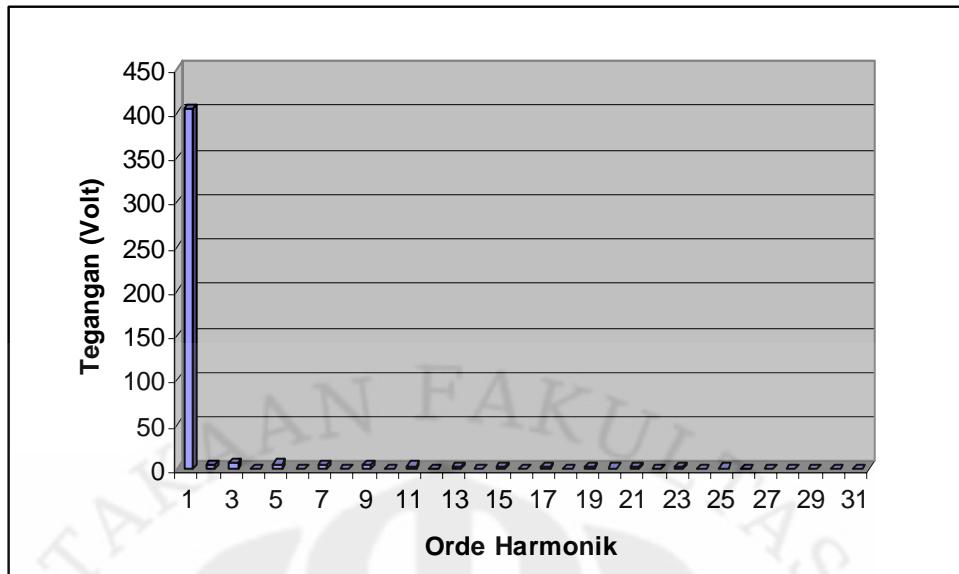
Dari hasil perhitungan diatas maka diketahui bahwa total tegangan harmonik yang terjadi masih dibawah batas standar yang telah ditentukan yaitu sebesar 5%

Berdasarkan data yang dikumpulkan terlihat bahwa total disitorsi tegangan harmonisa untuk ketiga transformator masih dibawah standar (tabel 4.2).

Tabel 4.2 Analisis THD Tegangan pada Transformator daya

TRANSFORMATOR	(%)THD Tegangan			EVALUASI
	PENGUKURAN	PERHITUNGAN	STANDAR	
Transformator 1	2.18	2	5 %	Di bawah standar
Transformator 2	3.1	2.9	5 %	Di bawah standar
Transformator 3	3.64	3.5	5 %	Di bawah standar

Dari tabel diatas terlihat bahwa THD tegangan pada ketiga transformator masih dibawah standar IEEE 519-1992 sehingga hal ini, menunjukkan bahwa distorsi harmonik tidak membahayakan untuk Transformator. Persentasi V_{THD} pada pengukuran berkisar antara 2,18 % - 3,64% hal ini masih dibawah standar yang diijinkan yakni 5%. Adapun spektrum distorsi harmonisa tidak menunjukkan masalah yang berarti atau berbahaya



Gambar 4.2 Spektrum THD Tegangan Transformator 3

4.2 Analisis rugi-rugi daya pada transformator

Tujuan dilakukan perhitungan ini adalah untuk mengetahui rugi-rugi daya transformator yang terjadi pada saat melayani beban non linier, pengamatan dan pengukuran beberapa parameter-parameter untuk mengetahui rugi-rugi daya pada transformator akibat pengaruh harmonik pada ketiga transformator tersebut. Perhitungan yang diperoleh untuk masing-masing transformator terlampir pada lampiran.

Dapat dikatakan bahwa dengan meningkatnya nilai komponen-komponen harmonik atau arus-arus harmonik berarti terjadi juga kenaikan rugi-rugi daya pada transformator akibat beban, yaitu rugi-rugi tembaga dan rugi-rugi arus eddy. Kenaikan rugi-rugi daya transformator adalah akibat bertambahnya nilai RMS arus-arus harmonik yang ditandai dengan kenaikan nilai THD arusnya. Sedangkan harga tahanan penghantar transformator (R_h) tidak terpengaruh oleh kenaikan THD karena nilainya hanya dipengaruhi oleh frekuensi harmonik saja. Sebab konstanta x pada perhitungan perubahan nilai tahanan (R_h) akibat efek kulit (*skin effect*) dan efek kedekatan (*proximity effect*) hanya dipengaruhi oleh frekuensi komponen harmonik, permeabilitas konduktor dan nilai tahanan awal (R_h). Pada pengukuran ini, komponen harmonik yang dapat terbaca hanya sampai orde ke-31, perubahan arus sangat mempengaruhi besarnya rugi-rugi ini.

Melalui data-data dan pengukuran di bawah ini maka rugi-rugi tembaga, rugi-rugi arus eddy diambil salah satu contoh pada transformator 3 maka dapat dihitung di bawah ini :

Frekuensi diambil pada orde 1 sebagai contoh (f)	= 50 Hz
Permeabilitas konduktor (μ)	= 1 untuk jenis logam
Tahanan transformator pada arus dc (Rdc)	= 0.13 Ω
Perbandingan antara diameter konduktor dan jarak antara konduktor (σ)	= 1 mm/0.25mm atau 4
Arus Harmonik	= 120 A

Berdasarkan persamaan (2.14) diperoleh nilai parameter x:

$$x = 0.027678 \sqrt{\frac{50\text{Hz} \cdot 1}{0.13\Omega}} = 0.1238$$

Metode pendekatan kurva dilakukan untuk mendapatkan perhitungan k_{SE} sesuai dengan persamaan (2.15) yaitu dengan $x = 0.1238$ artinya $x \leq 2$ maka diperoleh persamaan :

$$k_{SE}(x) = 10^{-3}(1,04x^5 + 8,24x^4 - 3,24x^3 + 1,447x^2 - 0,2764x + 0,0166)$$

$$k_{SE} = 0.0000003$$

Sedangkan nilai K_{PE} yang merupakan suatu harga penambahan nilai tahanan akibat efek kedekatan didapat dari persamaan (2.17)

$$K_{PE} = 0.0000003 \times (4)^2 \left(\frac{1.18}{0.0000003 + 0.27} + 0.312 (4)^2 \right) = 0.00005$$

Frekuensi harmonik ini juga mempengaruhi besarnya tahanan arus bolak balik (R_{ac}) sebagai akibat dari efek kulit (*skin effect*) dan efek kedekatan (*proximity effect*), sehingga didapat rasio perbandingan antara tahanan arus searah (Rdc) dengan tahanan arus bolak-balik (R_{ac}) yang dilambangkan sebagai k_c . Nilai k_c diperoleh berdasarkan persamaan (2.13):

$$k_c = 1 + 0.0000003 + 0.00005$$

$$k_c = 1,0000503$$

Melalui perhitungan diatas maka diperoleh tahanan penghantar, sesuai dengan persamaan (2.18)

$$R_h = 0.13 (1,0000503 + 1)$$

$$R_h = 0.26001 \, \Omega$$

Sehingga besarnya rugi-rugi tembaga akibat terdapatnya komponen harmonise di dalam arus beban dapat dihitung sesuai dengan persamaan (2.23)

$$P_R = \sum_{h1}^{h \max} 120^2 A \cdot 0.26001 \, \Omega$$

Jadi orde harmonik =1

$$P_R = 14400 \cdot 0.26001$$

$$P_R = 3983,32605 \, W$$

Perhitungan dilakukan sampai dengan orde 31. Untuk perhitungan rugi-rugi arus eddy diambil salah satu contoh yaitu pada transformator 3, dengan menggunakan

persamaan $P_{EC} = P_{EC} \cdot f \cdot \sum_{h=1}^{\infty} I_h^2 \cdot h^2$ untuk mencari faktor *eddy current loss* dapat

dilihat pada tabel 2.4, maka dapat dihitung di hitung di bawah ini :

$$P_{EC} \cdot f : 0.01$$

$$I_h^2 : 0,5184$$

$$h^2 : 961$$

$P_{EC} = 0,01 \cdot 0,5184 \cdot 961 = 4,981824 \, W$. Sehingga rugi-rugi arus eddy yang diperoleh untuk orde 31 yaitu 4,981824 W. Untuk lebih lengkapnya dapat dilihat pada lampiran untuk perhitungan rugi-rugi tembaga dan rugi-rugi arus eddy pada masing-masing transformator.

Maka hasil perhitungan total rugi-rugi yang terdapat pada masing-masing transformator akibat pengaruh harmonik dapat dilihat pada tabel 4.3

Tabel 4.3 Total rugi-rugi pada masing-masing transformator pengaruh harmonik

Transformator	Rugi-rugi arus eddy (watt)	Rugi-rugi tembaga (watt)	Total Rugi-rugi
Transformator 1	60,8049	1281.7076	1342,51
Transformator 2	149,2836	2144.1795	2293,46
Transformator 3	421,3401	3983.3261	4404,66

Dari hasil perhitungan, dimana rugi-rugi daya pada transformator akibat beban non linier membuktikan bahwa komponen harmonik turut menyebabkan bertambahnya rugi-rugi daya yang terjadi pada transformator saat bekerja

melayani beban non linear pada masing-masing transformator. Hal ini diakibatkan oleh bertambahnya nilai rugi-rugi daya yang terdiri atas rugi tembaga dan rugi arus eddy yang selalu terdapat pada transformator saat bekerja melayani beban non linier.

Tabel 4.3 menunjukkan peningkatan rugi-rugi yang terjadi akibat pengaruh harmonik terhadap transformator jelas terlihat pada masing-masing transformator. maka rugi-rugi yang terjadi adalah cenderung meningkat juga. Dengan frekuensi harmonik lebih tinggi menyebabkan rugi-rugi inti yang sebanding terhadap kuadrat arus beban rms dan kuadrat frekuensi. Dan arus eddy lebih tinggi pada ujung belitan pada transformator karena efek kerapatan medan magnet bocor pada kumparan. Pertambahan rugi-rugi arus eddy karena harmonik berpengaruh nyata juga pada temperatur kerja transformator. Untuk lebih jelasnya pengukuran perubahan temperatur pada transformator yang mempunyai keterkaitan dengan panas diperoleh seperti pada tabel 4.4

Tabel 4.4 Perubahan temperatur pada masing-masing Tranformator

TRANSFORMATOR	Arus Harmonik (A)	Rugi-rugi arus eddy (W)	Suhu °C	
			Body	Bushing
Transformator 1	70.2	60,8049	40	35
Transformator 2	90.8	149,2836	60	56
Transformator 3	120	421,3401	70	63

Pengukuran suhu dilakukan pada masing-masing transformator terlihat pada tabel 4.4 bahwa mulai dari transformator 1 sampai transformator 3 perubahan suhu pada inti transformator cenderung lebih meningkat karena efek kerapatan medan magnet bocor pada kumparan. Hal ini membuktikan bahwa semakin bertambahnya rugi-rugi arus eddy maka panas yang timbul pada inti transformator daya akan semakin meningkat.

4.3 Penanganan Untuk Menimalisir Harmonik

Besarnya nilai THD% arus dan tegangan pada suatu sistem dapat disebabkan oleh beberapa faktor. Dalam penelitian, faktor perubah THD% dalam suatu system dapat dilakukan dengan menggunakan beberapa cara penanganannya, diantaranya adalah :

➤ Penggunaan *Zig-Zag Winding*

Harmonik *triplen* adalah harmonik kelipatan tiga yang mengalir di penghantar netral, sebab arus harmonik *triplen* berada pada masing-masing fasa, sehingga saling menjumlahkan di netral untuk pengurangan harmonik triplen adalah dengan pemasangan *zig-zag winding*

➤ Penggunaan Harmonik *filter*

Pada suatu sistem kelistrikan yang memiliki tingkat harmonik yang sangat tinggi, akan dapat membantu dalam menangani gangguan yang ditimbulkan karena efek harmonik tersebut. *Filter* adalah suatu alat yang memiliki fungsi untuk melewatkan frekuensi tertentu. Dengan penambahan *filter* pada suatu sistem tenaga yang mengandung sumber-sumber harmonik, maka penyebaran arus harmonik dapat ditekan sekecil mungkin. Obyek dari filter harmonik adalah untuk menurunkan satu amplitudo atau lebih. Arus atau tegangan pada frekuensi tertentu. Pada saat digunakan untuk mencegah frekuensi tertentu dari pemasukan komponen atau bagian sistem tenaga sangatlah mungkin menggunakan rangkaian penyaring (*filter*) yang berinduktor paralel dan kapastor dimana memberikan impedansi yang besar untuk frekuensi yang relevan. . Salah satu contoh dari harmonik *filter* adalah *fi er* pasif dan *filter* aktif

BAB V

KESIMPULAN

Dari uraian data, serta dari hasil perhitungan dan analisis pada pengaruh harmonik pada transformator daya dan penanganannya, maka dapat disimpulkan bahwa:

1. Berdasarkan hasil pengukuran, diketahui bahwa THD arus pada transformator 3 berada diluar batas yang telah ditentukan IEEE 519-1992 yaitu sebesar 26,3 % (batas standar 15%)
2. THD tegangan pada masing-masing transformator masih berada dalam batas normal yaitu 2,18%, 3,1% dan 3,64% (batas standar IEEE 519-1992 adalah 5%)
3. Keberadaan arus harmonik pada transformator daya berpengaruh terhadap besarnya nilai rugi-rugi transformator. Berdasarkan hasil analisis semakin tinggi total arus harmonik pada transformator (26.3%) maka semakin tinggi pula rugi-rugi beban (4404,66 W)
4. Semakin besar arus harmonik (120 A) maka semakin tinggi suhu yang terukur (70⁰C) persentase kenaikan suhu berkisar antara 14% - 33% pada inti tranformator.
5. Untuk penanganan harmonik dapat dilakukan dengan menggunakan harmonik *filter*

DAFTAR REFERENSI

- [1] Ir. Bambang Hermawanto, M.Sc “Phenomena harmonik di sistem distribusi tenaga listrik, masalah, penyebab, dan usaha mengatasinya” Energi & listrik, Vol. VI no.3, juni 1996
- [2] S. key, Thomas "Cost and benefit of harmonic current for switch-mode power supplies in commercial office building" IEEE Transaction on industries application, vol 32, no 5, sept 1996.
- [3] Roger C. Dugan, Mark F. McGranaghan, H. Wayne Beaty, “*Electrical Power System Quality*,” New York : McGraw-Hill, 1996
- [4] J. Arrilaga, Bradley D.A., Bodger P.S., *Power System Harmonics*, New York: John Wiley & Sons, 2003.
- [5] Burke, James J,”Power Distribution Engineering”. New York: Marcel Dekker, Inc, 1994
- [6] Efendy Luthfe, ”Analisis rugi-rugi pada trafo daya akibat harmonik”, Teknik Elektro Indonesia Universitas Indonesia, 2005

LAMPIRAN 1
Perhitungan rugi-rugi tembaga pada tranformator 1

Orde Harmonik (h)	Frekuensi Harmonik (Hz)	Permeabilitas Konduktor	Tahanan arus searah (Rdc = ohm)	Parameter skin effect (X)	Koefisien Skin Effect (KSE)	μ	KPE	Rasio Rac/Rdc (Kc)	Tahanan Bolak-balik (Rac)	Tahanan Harmonik (Rh)	Arus Harmonik Ih ²	Rugi Tembaga
1	50	1	0,13	0,1238	0,0000003	4	0,00005	1,00005	0,13001	0,26001	4900	1274,03044
3	150	1	0,13	0,2144	0,0000089	4	0,00133	1,00134	0,13017	0,26017	21,3444	5,55325
5	250	1	0,13	0,2768	0,0000289	4	0,00433	1,00436	0,13057	0,26057	4,1209	1,07377
7	350	1	0,13	0,3275	0,0000583	4	0,00874	1,00880	0,13114	0,26114	0,9604	0,25080
9	450	1	0,13	0,3713	0,0000969	4	0,01452	1,01461	0,13190	0,26190	0,8281	0,21688
11	550	1	0,13	0,4105	0,0001448	4	0,02168	1,02182	0,13284	0,26284	0,4900	0,12879
13	650	1	0,13	0,4463	0,0002019	4	0,03024	1,03044	0,13396	0,26396	0,3136	0,08278
15	750	1	0,13	0,4794	0,0002686	4	0,04021	1,04048	0,13526	0,26526	0,3136	0,08319
17	850	1	0,13	0,5104	0,0003447	4	0,05161	1,05196	0,13675	0,26675	0,1764	0,04706
19	950	1	0,13	0,5395	0,0004305	4	0,06445	1,06488	0,13843	0,26843	0,1764	0,04735
21	1050	1	0,13	0,5672	0,0005260	4	0,07873	1,07925	0,14030	0,27030	0,1764	0,04768
23	1150	1	0,13	0,5936	0,0006312	4	0,09446	1,09509	0,14236	0,27236	0,0784	0,02135
25	1250	1	0,13	0,6189	0,0007462	4	0,11164	1,11238	0,14461	0,27461	0,1225	0,03364
27	1350	1	0,13	0,6432	0,0008710	4	0,13028	1,13115	0,14705	0,27705	0,0784	0,02172
29	1450	1	0,13	0,6666	0,0010056	4	0,15037	1,15138	0,14968	0,27968	0,1225	0,03426
31	1550	1	0,13	0,6892	0,0011500	4	0,17193	1,17308	0,15250	0,28250	0,1225	0,03461
												1281,70756

LAMPIRAN 2

Perhitungan rugi-rugi tembaga pada transformator 2

Orde Harmonik (h)	Frekuensi Harmonik (Hz)	Permeabilitas Konduktor	Tahanan arus searah (Rdc = ohm)	Parameter skin effect (X)	Koefisien Skin Effect (KSE)	μ	KPE	Rasio Rac/Rdc KC	Tahanan Bolak-balik	Tahanan Harmonik (Rh)	Arus Harmonik Ih ²	Rugi Tembaga
1	50	1	0,13	0,1238	0,0000003	4	0,00005	1,00005	0,13001	0,26001	8100	2106,05032
3	150	1	0,13	0,2144	0,0000089	4	0,00133	1,00134	0,13017	0,26017	91,0116	23,67883
5	250	1	0,13	0,2768	0,0000289	4	0,00433	1,00436	0,13057	0,26057	23,6196	6,15449
7	350	1	0,13	0,3275	0,0000583	4	0,00874	1,00880	0,13114	0,26114	13,6161	3,55576
9	450	1	0,13	0,3713	0,0000969	4	0,01452	1,01461	0,13190	0,26190	5,9049	1,54649
11	550	1	0,13	0,4105	0,0001448	4	0,02168	1,02182	0,13284	0,26284	2,3409	0,61528
13	650	1	0,13	0,4463	0,0002019	4	0,03024	1,03044	0,13396	0,26396	1,5876	0,41906
15	750	1	0,13	0,4794	0,0002686	4	0,04021	1,04048	0,13526	0,26526	1,8225	0,48344
17	850	1	0,13	0,5104	0,0003447	4	0,05161	1,05196	0,13675	0,26675	1,3689	0,36516
19	950	1	0,13	0,5395	0,0004305	4	0,06445	1,06488	0,13843	0,26843	0,8100	0,21743
21	1050	1	0,13	0,5672	0,0005260	4	0,07873	1,07925	0,14030	0,27030	0,8100	0,21895
23	1150	1	0,13	0,5936	0,0006312	4	0,09446	1,09509	0,14236	0,27236	0,8100	0,22061
25	1250	1	0,13	0,6189	0,0007462	4	0,11164	1,11238	0,14461	0,27461	0,6561	0,18017
27	1350	1	0,13	0,6432	0,0008710	4	0,13028	1,13115	0,14705	0,27705	0,5184	0,14362
29	1450	1	0,13	0,6666	0,0010056	4	0,15037	1,15138	0,14968	0,27968	0,6561	0,18350
31	1550	1	0,13	0,6892	0,0011500	4	0,17193	1,17308	0,15250	0,28250	0,5184	0,14645
												2144,17954

LAMPIRAN 3

Perhitungan rugi-rugi tembaga pada transformator 3

Orde Harmonik (h)	Frekuensi Harmonik (Hz)	Permeabilitas Konduktor	Tahanan arus searah (Rdc = ohm)	Parameter skin effect (X)	Koefisien Skin Effect (KSE)	μ	KPE	Rasio Rac/Rdc KC	Tahanan Bolak-balik	Tahanan Harmonik (Rh)	Arus Harmonik I _h ²	Rugi Tembaga
1	50	1	0,13	0,1238	0,0000003	4	0,00005	1,00005	0,13001	0,26001	14400	3744,08945
3	150	1	0,13	0,2144	0,0000089	4	0,00133	1,00134	0,13017	0,26017	742,01760	193,05348
5	250	1	0,13	0,2768	0,0000289	4	0,00433	1,00436	0,13057	0,26057	64,64160	16,84346
7	350	1	0,13	0,3275	0,0000583	4	0,00874	1,00880	0,13114	0,26114	29,16000	7,61494
9	450	1	0,13	0,3713	0,0000969	4	0,01452	1,01461	0,13190	0,26190	25,40160	6,65267
11	550	1	0,13	0,4105	0,0001448	4	0,02168	1,02182	0,13284	0,26284	11,28960	2,96732
13	650	1	0,13	0,4463	0,0002019	4	0,03024	1,03044	0,13396	0,26396	10,49760	2,77092
15	750	1	0,13	0,4794	0,0002686	4	0,04021	1,04048	0,13526	0,26526	10,49760	2,78462
17	850	1	0,13	0,5104	0,0003447	4	0,05161	1,05196	0,13675	0,26675	9,73440	2,59669
19	950	1	0,13	0,5395	0,0004305	4	0,06445	1,06488	0,13843	0,26843	4,16160	1,11712
21	1050	1	0,13	0,5672	0,0005260	4	0,07873	1,07925	0,14030	0,27030	3,24000	0,87578
23	1150	1	0,13	0,5936	0,0006312	4	0,09446	1,09509	0,14236	0,27236	2,43360	0,66282
25	1250	1	0,13	0,6189	0,0007462	4	0,11164	1,11238	0,14461	0,27461	2,07360	0,56943
27	1350	1	0,13	0,6432	0,0008710	4	0,13028	1,13115	0,14705	0,27705	1,16640	0,32315
29	1450	1	0,13	0,6666	0,0010056	4	0,15037	1,15138	0,14968	0,27968	0,92160	0,25775
31	1550	1	0,13	0,6892	0,0011500	4	0,17193	1,17308	0,15250	0,28250	0,51840	0,14645
												3983,32605

LAMPIRAN 4

Perhitungan rugi-rugi arus eddy pada tranformator 1

Orde Harmonik (h)	Frekuensi(Hz)	I _h	I _h ²	I _h ² x h ²	P _{EC-f}	P _{EC}
1	50	70	4900	4900	0,01	60,8049
3	150	4.62	21.3444	192.0996		
5	250	2.03	4.1209	103.0225		
7	350	0.98	0.9604	47.0596		
9	450	0.91	0.8281	67.0761		
11	550	0.70	0.49	59.29		
13	650	0.56	0.3136	52.9984		
15	750	0.56	0.3136	70.56		
17	850	0.42	0.1764	50.9796		
19	950	0.42	0.1764	63.6804		
21	1050	0.42	0.1764	77.7924		
23	1150	0.28	0.0784	41.4736		
25	1250	0.35	0.1225	76.5625		
27	1350	0.28	0.0784	57.1536		
29	1450	0.35	0.1225	103.0225		
31	1550	0.35	0.1225	117.7225		
				6080.493		

LAMPIRAN 5

Perhitungan rugi-rugi arus eddy pada transformator 2

Orde Harmonik (h)	Frekuensi(Hz)	I _h	I _h ²	I _h ² x h ²	P _{EC-f}	P _{EC}
1	50	90	8100	8100	0,01	149,283
3	150	9.54	91.01160	819.1044		
5	250	4.86	23.61960	590.49		
7	350	3.69	13.61610	667.1889		
9	450	2.43	5.90490	478.2969		
11	550	1.53	2.34090	283.2489		
13	650	1.26	1.58760	268.3044		
15	750	1.35	1.82250	410.0625		
17	850	1.17	1.36890	395.6121		
19	950	0.90	0.81000	292.41		
21	1050	0.90	0.81000	357.21		
23	1150	0.90	0.81000	428.49		
25	1250	0.81	0.65610	410.0625		
27	1350	0.72	0.51840	377.9136		
29	1450	0.81	0.65610	551.7801		
31	1550	0.72	0.51840	498.1824		
				14928.36		

LAMPIRAN 6

Perhitungan rugi-rugi arus eddy pada tranformator 3

Orde Harmonik (h)	Frekuensi(Hz)	I _h	I _h ²	I _h ² x h ²	P _{EC-f}	P _{EC}
1	50	120	14400	14400	0,01	421,3401
3	150	27.24	742.01760	6678.158		
5	250	8.04	64.64160	1616.04		
7	350	5.40	29.16000	1428.84		
9	450	5.04	25.40160	2057.53		
11	550	3.36	11.28960	1366.042		
13	650	3.24	10.49760	1774.094		
15	750	3.24	10.49760	2361.96		
17	850	3.12	9.73440	2813.242		
19	950	2.04	4.16160	1502.338		
21	1050	1.80	3.24000	1428.84		
23	1150	1.56	2.43360	1287.374		
25	1250	1.44	2.07360	1296		
27	1350	1.08	1.16640	850.3056		
29	1450	0.96	0.92160	775.0656		
31	1550	0.72	0.51840	498.1824		
				42134.01		

LAMPIRAN 7

Perhitungan %THD arus pada transformator 1

Orde Harmonik	Frekuensi	IHD %	Arus Harmonik (I _h)	(I _h ²)	THD %
1	50	100	70,00		7,7
3	150	6,6	4,62	21,3444	
5	250	2,9	2,03	4,1209	
7	350	1,4	0,98	0,9604	
9	450	1,3	0,91	0,8281	
11	550	1	0,70	0,4900	
13	650	0,8	0,56	0,3136	
15	750	0,8	0,56	0,3136	
17	850	0,6	0,42	0,1764	
19	950	0,6	0,42	0,1764	
21	1050	0,6	0,42	0,1764	
23	1150	0,4	0,28	0,0784	
25	1250	0,5	0,35	0,1225	
27	1350	0,4	0,28	0,0784	
29	1450	0,5	0,35	0,1225	
31	1550	0,5	0,35	0,1225	
				29,4245	

LAMPIRAN 8

Perhitungan %THD arus pada transformator 2

Orde Harmonik	Frekuensi	IHD %	Arus Harmonik (I _h)	(I _h ²)	THD %
1	50	100,00	90,00		13,2
3	150	10,60	9,54	91,0116	
5	250	5,40	4,86	23,6196	
7	350	4,10	3,69	13,6161	
9	450	2,70	2,43	5,9049	
11	550	1,70	1,53	2,3409	
13	650	1,40	1,26	1,5876	
15	750	1,50	1,35	1,8225	
17	850	1,30	1,17	1,3689	
19	950	1,00	0,90	0,8100	
21	1050	1,00	0,90	0,8100	
23	1150	1,00	0,90	0,8100	
25	1250	0,90	0,81	0,6561	
27	1350	0,80	0,72	0,5184	
29	1450	0,90	0,81	0,6561	
31	1550	0,80	0,72	0,5184	
				146,0511	

LAMPIRAN 9

Perhitungan %THD arus pada transformator 3

Orde Harmonik	Frekuensi	IHD %	Arus Harmonik (I _h)	(I _h ²)	THD %
1	50	100,00	120,00		
3	150	22,70	27,24	742,02	
5	250	6,70	8,04	64,64	
7	350	4,50	5,40	29,16	
9	450	4,20	5,04	25,40	
11	550	2,80	3,36	11,29	
13	650	2,70	3,24	10,50	
15	750	2,70	3,24	10,50	
17	850	2,60	3,12	9,73	
19	950	1,70	2,04	4,16	
21	1050	1,50	1,80	3,24	
23	1150	1,30	1,56	2,43	
25	1250	1,20	1,44	2,07	
27	1350	0,90	1,08	1,17	
29	1450	0,80	0,96	0,92	
31	1550	0,60	0,72	0,52	25,2
				917,7552	

LAMPIRAN 10

Perhitungan %THD tegangan pada transformator 1

Orde Harmonik	Frekuensi	IHD %	Tegangan Harmonik (V)	(V ²)	THD %
1	50	100	404		2
3	150	0,9	3,636	13,22	
5	250	0,8	3,232	10,45	
7	350	0,7	2,828	8,00	
9	450	0,7	2,828	8,00	
11	550	0,6	2,424	5,88	
13	650	0,5	2,02	4,08	
15	750	0,5	2,02	4,08	
17	850	0,4	1,616	2,61	
19	950	0,5	2,02	4,08	
21	1050	0,4	1,616	2,61	
23	1150	0,3	1,212	1,47	
25	1250	0,2	0,808	0,65	
27	1350	0,2	0,808	0,65	
29	1450	0,3	1,212	1,47	
31	1550	0,1	0,404	0,16	
				67,41	

LAMPIRAN 11

Perhitungan %THD tegangan pada transformator 2

Orde Harmonik	Frekuensi	IHD %	Tegangan Harmonik (V)	(V ²)	THD %
1	50	100	404		
3	150	1,3	5,252	27,58	
5	250	1,2	4,848	23,50	
7	350	1,1	4,444	19,75	
9	450	1,2	4,848	23,50	
11	550	0,8	3,232	10,45	
13	650	0,7	2,828	8,00	
15	750	0,6	2,424	5,88	
17	850	0,6	2,424	5,88	
19	950	0,5	2,02	4,08	
21	1050	0,5	2,02	4,08	
23	1150	0,5	2,02	4,08	
25	1250	0,3	1,212	1,47	
27	1350	0,2	0,808	0,65	
29	1450	0,1	0,404	0,16	
31	1550	0,1	0,404	0,16	2,9
				139,22	

LAMPIRAN 12

Perhitungan %THD tegangan pada transformator 3

Orde Harmonik	Frekuensi	IHD %	Tegangan Harmonik (V)	(V ²)	THD %
1	50	100	404		3,5
3	150	1,9	7,676	58,92	
5	250	1,5	6,06	36,72	
7	350	1,2	4,848	23,50	
9	450	1,1	4,444	19,75	
11	550	0,9	3,636	13,22	
13	650	0,8	3,232	10,45	
15	750	0,8	3,232	10,45	
17	850	0,7	2,828	8,00	
19	950	0,7	2,828	8,00	
21	1050	0,6	2,424	5,88	
23	1150	0,5	2,02	4,08	
25	1250	0,4	1,616	2,61	
27	1350	0,2	0,808	0,65	
29	1450	0,2	0,808	0,65	
31	1550	0,1	0,404	0,16	
				203,04	