



UNIVERSITAS INDONESIA

**PENGARUH HARMONISA TERHADAP KINERJA
TRANSFORMATOR ARUS**

SKRIPSI

**AGUNG SUJATMIKO
0806365431**

**FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO
DEPOK
JUNI 2010**



UNIVERSITAS INDONESIA

**PENGARUH HARMONISA TERHADAP KINERJA
TRANSFORMATOR ARUS**

SKRIPSI

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik

**AGUNG SUJATMIKO
0806365431**

**FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO
DEPOK
JUNI 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 : Agung Sujatmiko

NPM : 0806365431

Tanda Tangan :

Tanggal : 15 Juni 2010

HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :

Nama : Agung Sujatmiko

NPM : 0806365431

Program Studi : Teknik Elektro

Judul Skripsi : Pengaruh Harmonisa Terhadap Kinerja Transformator Arus

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 : Aji Nur Widyanto S.T., M.T. (.....)

Penguji : Ir. I Made Ardita Y. M.T. (.....)

Penguji : Budi Sudiarto S.T., M.T. (.....)

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 29 Juni 2010

KATA PENGANTAR DAN UCAPAN TERIMA KASIH

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 Teknik 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. Oleh karena itu, saya mengucapkan terima kasih kepada:

1. Aji Nur Widyanto S.T., M.T., selaku dosen pembimbing yang telah menyediakan waktu, tenaga, dan pikiran untuk mengarahkan saya dalam penyusunan skripsi ini;
2. Dosen-dosen jurusan Teknik Elektro yang banyak memberikan masukan dan pengarahan kepada saya;
3. Kedua orang tua dan keluarga saya yang telah memberikan bantuan dukungan material dan moral kepada saya; dan
4. Sahabat dan rekan-rekan saya yang telah banyak membantu saya dalam menyelesaikan skripsi ini.

Akhir kata, saya berharap Allah SWT berkenan membalas segala kebaikan semua pihak yang telah membantu saya. Semoga skripsi ini membawa manfaat bagi pengembangan ilmu di Indonesia.

Depok, 15 Juni 2010

Penulis

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

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

Nama : Agung Sujatmiko
NPM : 0806365431
Program Studi : Teknik Elektro
Departemen : Teknik Elektro
Fakultas : Teknik
Jenis karya : Skripsi

demikian 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 :

Pengaruh Harmonisa Terhadap Kinerja Transformator Arus

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 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 : 15 Juni 2010

Yang menyatakan

(Agung Sujatmiko)

ABSTRAK

Nama : Agung Sujatmiko
Program Studi : Teknik Elektro
Judul : Pengaruh Harmonisa Terhadap Kinerja Transformator Arus

Fenomena harmonik yang ditimbulkan oleh beban non linier pada sistem tenaga listrik menimbulkan permasalahan kualitas dimana bentuk gelombang suplai akan menjadi terdistorsi sehingga bisa menimbulkan penurunan kinerja dan bahkan akan mengalami kerusakan pada peralatan listrik.

Transformator arus merupakan salah satu peralatan listrik yang berfungsi untuk mentransformasikan arus yang besar pada sisi primer menjadi arus yang kecil di sisi sekunder untuk pengukuran dan proteksi. Akurasi (tingkat ketelitian) adalah kemampuan dari alat ukur untuk memberikan nilai tertentu terhadap harga sebenarnya dari objek yang diukur. Dengan mengetahui tingkat akurasi dari suatu instrumen, maka faktor error yang akan terjadi dapat diketahui.

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh beban harmonik terhadap unjuk kerja transformator arus. Dalam penelitian ini, dilakukan pengujian terhadap Transformator Arus dengan beban harmonik berupa lampu hemat energi.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa besarnya tingkat distorsi arus yang ditimbulkan oleh lampu hemat energi mempengaruhi bentuk gelombang arus. Sehingga membuat error dari transformator arus semakin besar dan mengakibatkan pembacaan pada alat ukur menjadi lebih kecil dari arus RMS nya.

Kata Kunci: Harmonik, distorsi, transformator arus.

ABSTRACT

Name : Agung Sujatmiko
Study Program : Electrical Engineering
Title : Harmonics Effect On Current Transformer Performance

The phenomenon of harmonics caused by nonlinear loads in power systems cause problems where the quality of the supply waveform will be distorted so that it can cause performance degradation and can make damage to electrical equipment.

Current transformer is one of the electrical equipment that serves to transform a large current on the primary side of a small current in the secondary side for measurement and protection. Accuracy (precision) is the ability of a measurement to give a specific value to the actual value of the object to be measured. By knowing the accuracy of an instrument, then the error factor that will occur can be known.

This study aimed to investigate the influence of harmonic loads on the performance of current transformers. In this study, conducted testing on current transformers with harmonic loads such as energy saving lamps.

The results showed that the level of current distortion caused by the influence of energy saving lamp current waveform. Making the error of the transformer and cause greater flow readings on the instruments become smaller than its RMS current.

Keywords: Harmonics, distortion, current transformers.

DAFTAR ISI

	Halaman
Halaman Judul	ii
Halaman Pernyataan Orisinalitas	iii
Halaman Pengesahan	iv
Kata Pengantar dan Ucapan Terima Kasih	v
Halaman Pernyataan Persetujuan Publikasi	vi
Abstrak	vii
Abstact	viii
Daftar Isi	ix
Daftar Gambar	xii
Daftar Tabel	xiii
BAB I PENDAHULUAN	
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Tujuan Penulisan	2
1.3 Permasalahan	2
1.4 Pembatasan Masalah	2
1.5 Metode Penulisan	2
1.6 Sistematika Penulisan	3
BAB II LANDASAN TEORI	
2.1 Pengertian Harmonik	4
2.1.1 Sumber Harmonik	6
2.1.2 Orde Harmonik, Harmonik Ganjil dan Harmonik Genap	7
2.2 Istilah-istilah yang Berkaitan dengan Harmonik	7
2.2.1 Deret <i>Fourier</i>	7
2.2.2 RMS (<i>Root Mean Square</i>)	8
2.2.3 <i>Individual Harmonic Distortion</i> (IHD)	10
2.2.4 <i>Total Harmonic Distortion</i> (THD)	10

2.3	Standar Harmonik	11
2.4	Pengaruh Negatif dari Harmonik	12
2.4.1	Efek Harmonik Terhadap Penghantar	13
2.4.2	Rugi-rugi pada Transformator	16
2.4.2.1	Rugi-rugi Tembaga	16
2.4.2.2	Rugi-rugi Arus Eddy	17
2.4.2.3	Rugi-rugi Histerisis	17
2.5	Transformator Ukur	18
2.5.1	Transformator Arus (Current Transformer)....	19
2.5.2	Prinsip Kerja Trafo Arus	20
2.5.3	Perbedaan Utama Trafo Arus dengan Trafo Daya	22
2.6	Lampu Hemat Energi	22
2.7	Kesalahan Pengukuran	24
2.8	Kelas Alat Ukur	26

BAB III METODOLOGI DAN HASIL PENGUJIAN

3.1	Daftar Peralatan	27
3.2	Rangkaian Pengujian	29
3.3	Langkah-Langkah Pengujian	30
3.3.1	Pengujian Variasi Beban Harmonik dan Beban Non Harmonik	30
3.3.2	Pengujian Variasi Nilai THD	32
3.4	Hasil Pengujian Beban Harmonik dan Beban Non Harmonik	34
3.5	Hasil Pengujian dengan Variasi Nilai THD	35

BAB IV ANALISA HASIL PENGUJIAN

4.1	Analisa Hasil Pengujian Variasi Beban Harmonik dan Beban Non Harmonik	37
4.1.1	Menentukan Persen Kesalahan Transformator Arus	41
4.2	Analisa Pengujian Variasi Nilai THD	45
4.2.1	Menentukan Persen Kesalahan Transformator Arus	47

4.3	Perbandingan antara Ampermeter Analog dan Ampermeter Digital	48
4.4	Analisis Pengaruh Harmonik pada Transformator Arus	49
BAB V PENUTUP		
5.1	Kesimpulan	52
5.2	Saran	52
	Daftar Acuan	53
	Daftar Pustaka	54
	Lampiran-Lampiran	xiv
	Hasil Percobaan Variasi Beban Harmonik	xv
	Hasil Percobaan Variasi Nilai THD	xvi

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Bentuk gelombang yang terdistorsi akibat harmonik ganjil	5
Gambar 2.2	Penjumlahan gelombang fundamental dengan harmonik ke-3.....	5
Gambar 2.3	Distorsi arus yang disebabkan beban nonlinear	6
Gambar 2.4	Spektrum Harmonik	9
Gambar 2.5	Macam-macam bentuk transformator arus	20
Gambar 2.6	Rangkaian Trafo Arus	20
Gambar 2.7	Rangkaian ekivalen trafo arus	21
Gambar 3.1	Harmonic Analyzer	28
Gambar 3.2	Lampu hemat energi	28
Gambar 3.3	Rangkaian Pengujian	29
Gambar 3.4	Transformator arus dan ampermeter	29
Gambar 3.5	Digital Transformer Tester	30
Gambar 3.6	Kabel yang dililitkan pada Trafo arus	32
Gambar 4.1	Spektrum Harmonik IHD arus beban 70%	38
Gambar 4.2	Spektrum Harmonik IHD tegangan beban 70%	39
Gambar 4.3	Diagram Batang arus sekunder trafo arus	43
Gambar 4.4	Diagram garis arus sekunder trafo arus	43
Gambar 4.5	Persen kesalahan akibat beban non harmonik	44
Gambar 4.6	Persen kesalahan akibat beban harmonik	45
Gambar 4.7	Penurunan nilai dari THD arus	46
Gambar 4.8	Grafik kenaikan nilai arus sekunder.....	46
Gambar 4.9	Persen kesalahan pada variasi nilai THD	48

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Frekuensi fundamental dan kelipatannya	4
Tabel 2.2	Limit Distorsi Arus Harmonik (I_h) dalam (%) untuk sistem distribusi < 69 KV	12
Tabel 2.3	Limit distorsi tegangan harmonik	12
Tabel 2.4	Polaritas dari Komponen Harmonik	13
Tabel 2.5	Akibat dari Polaritas Komponen Harmonik	13
Tabel 2.6	Kelas akurasi	26
Tabel 3.1	Spesifikasi alat yang digunakan	27
Tabel 3.2	Variasi beban harmonik	31
Tabel 3.3	Variasi beban dengan lampu pijar	32
Tabel 3.4	Hasil Perngujian	34
Tabel 3.5	Komponen harmonik beban 70%	35
Tabel 3.6	Hasil pengujian dengan variasi nilai THD	35
Tabel 4.1	Besarnya nilai I_{THD} dan V_{THD}	40
Tabel 4.2	Persen Kesalahan Transformator Arus	42
Tabel 4.3	Persen Kesalahan Transformator Arus	47

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Dalam sistem tenaga listrik dikenal dua jenis beban yaitu beban linier dan beban 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 dalam setiap setengah siklus, sehingga bentuk gelombang arus maupun tegangan keluarannya tidak sama dengan gelombang masukannya karena mengalami distorsi.

Beban non linear ini akan menghasilkan gelombang harmonik. Fenomena harmonik yang muncul pada penggunaan beban non linear ini umumnya dihasilkan oleh power suplay, komputer, lampu fluorescent yang menggunakan elektronik balast, power elektronik (Thyristor), dan peralatan elektronik yang didalamnya banyak terdapat komponen semi konduktor atau elektronika daya sebagai rangkaian pengendali motor listrik.

Terdistorsinya gelombang tegangan tersebut, akan menimbulkan permasalahan kualitas dimana bentuk gelombang suplai akan menjadi terdistorsi sehingga bisa menimbulkan penurunan kinerja dan bahkan akan mengalami kerusakan pada peralatan listrik.

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh beban harmonik terhadap unjuk kerja Transformator Arus. Dalam penelitian ini, dilakukan pengujian terhadap Transformator Arus dengan beban harmonik berupa lampu hemat energi yang menggunakan elektronik balast.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa besarnya tingkat distorsi arus yang ditimbulkan oleh lampu hemat energi mempengaruhi bentuk gelombang arus. Sehingga membuat error dari transformator arus semakin besar dan mengakibatkan pembacaan pada alat ukur menjadi lebih kecil dari arus RMS nya.

1.2 Tujuan Penulisan

Adapun tujuan dari penulisan Skripsi ini adalah untuk mengenal lebih dalam mengenai karakteristik harmonik dan untuk mengetahui pengaruh beban harmonik tersebut terhadap kinerja Transformator Arus.

1.3 Permasalahan

Dalam melakukan penelitian ini ada beberapa permasalahan yang timbul, diantaranya adalah :

1. Bagaimana memilih transformator arus yang tepat, sesuai dengan kebutuhan dan spesifikasi alat ukur.
2. Menentukan beban harmonik yang akan digunakan.
3. Bagaimana mengatur pembebanan harmonik sesuai metodologi penelitian.
4. Bagaimana memilih peralatan uji yang tepat, sesuai dengan yang dibutuhkan.
5. Melakukan trouble shooting terkait rangkaian.
6. Kurangnya kepresisian alat dalam pengujian.
7. Melakukan pembacaan pada alat ukur dan menentukan persen error.

1.4 Pembatasan Masalah

Agar tidak menyimpang dari pokok bahasan yang telah ditentukan, maka penulisan pada Skripsi ini sangat diperlukan adanya pembatasan masalah. Adapun pembatasan masalah yang akan dibahas adalah:

- Membahas dan menganalisa pengaruh beban harmonik terhadap kinerja transformator arus, yaitu berkaitan dengan arus keluaran dari transformator arus.

1.5 Metode Penulisan

Metode penulisan yang digunakan dalam penyusunan laporan Skripsi ini adalah:

1. Metode Kepustakaan

Metode ini merupakan pengumpulan data-data melalui buku, jurnal dan eBook yang berkaitan dengan pembuatan Skripsi ini.

2. Metode Observasi

Merupakan metode pencarian informasi, yang berkaitan dengan pembuatan Skripsi ini.

3. Metode Konsultasi dan Diskusi

Merupakan metode dengan cara berdiskusi atau konsultasi langsung kepada dosen pembimbing, dosen pengajar, serta orang-orang yang memahami dan berkompeten tentang judul pembuatan Skripsi ini.

1.6 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan Skripsi ini dibagi dalam beberapa bab, dengan susunan sebagai berikut :

BAB I : PENDAHULUAN

Menjelaskan tentang latar belakang, tujuan penulisan, permasalahan, pembatasan masalah, metode penulisan dan sistematika penulisan.

BAB II : LANDASAN TEORI

Merupakan landasan teori di mana penulis membahas mengenai beberapa teori dasar yang mendukung dalam penyusunan Skripsi ini. Antara lain menjelaskan tentang pengertian harmonik beserta parameter- parameternya dan cara kerja transformator arus.

BAB III : METODOLOGI PENGUJIAN

Menjelaskan tentang metodologi pengujian serta langkah-langkah percobaan.

BAB IV : HASIL PENGUJIAN DAN ANALISA

Bab ini menuliskan hasil pengujian dan menjelaskan analisa dari hasil pengujian, membandingkan arus keluaran dari transformator arus antara beban linier dan beban non linier.

BAB V : PENUTUP

Bab ini memuat tentang kesimpulan dan saran.

BAB II LANDASAN TEORI

2.1 Pengertian Harmonik^[1]

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

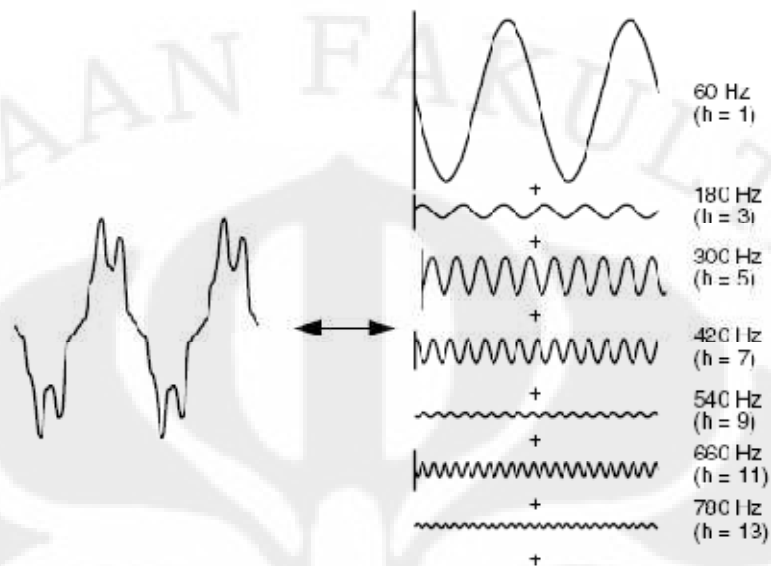
Frekuensi (Hz)	Istilah
50	Frekuensi Fundamental
100	Harmonik Kedua
150	Harmonik Ketiga
200	Harmonik Keempat
250	Harmonik Kelima
Dan seterusnya	Dan seterusnya

Tabel 2.1. Frekuensi fundamental dan kelipatannya

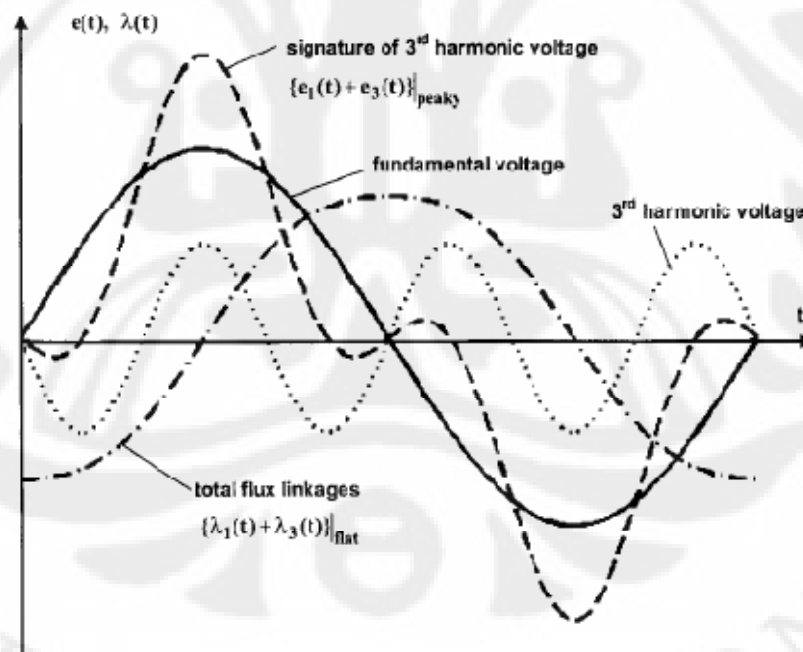
Harmonik adalah gangguan yang terjadi pada sistem distribusi tenaga listrik akibat terjadinya distorsi gelombang arus dan tegangan. Pada dasarnya, harmonik adalah gejala pembentukan gelombang-gelombang dengan frekuensi berbeda yang merupakan perkalian bilangan bulat dengan frekuensi dasarnya. Hal ini disebut frekuensi harmonik yang timbul pada bentuk gelombang aslinya sedangkan bilangan bulat pengali frekuensi dasar disebut angka urutan harmonik atau orde harmonik. Misalnya, frekuensi dasar suatu sistem tenaga listrik adalah 50 Hz, maka harmonik keduanya adalah gelombang dengan frekuensi sebesar 100 Hz, harmonik ketiga adalah gelombang dengan frekuensi sebesar 150 Hz 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 dengan harmonik urutan ganjil. Jumlah antara frekuensi

fundamental dan kelipatannya, akan menyebabkan frekuensi fundamental tidak lagi berbentuk sinus murni, tetapi mengalami distorsi.



Gambar 2.1 Bentuk gelombang yang terdistorsi akibat harmonik ganjil^[2]



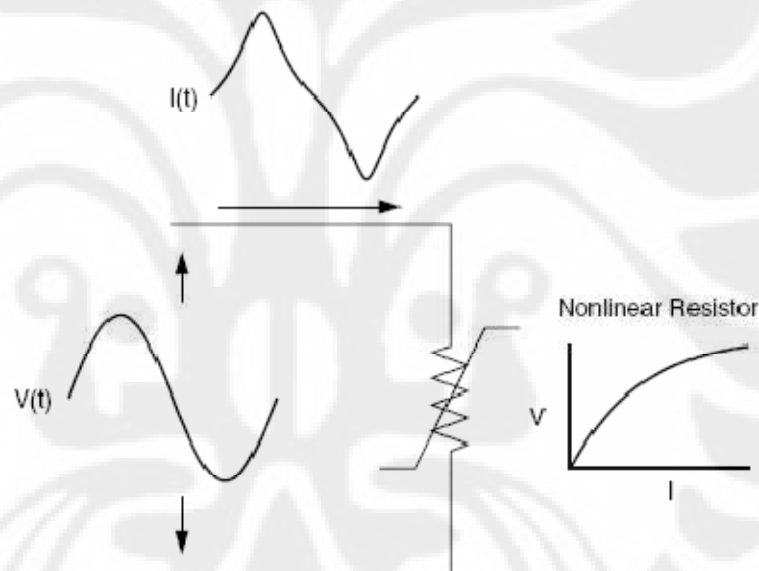
Gambar 2.2 Penjumlahan gelombang fundamental dengan harmonik ke-3^[3]

Pada gambar 2.1, menunjukkan sebuah gelombang sinus yang terdistorsi akibat adanya harmonik pertama, ketiga, kelima, ketujuh, dan seterusnya. Nampak bahwa bentuk gelombang berubah sama sekali dari bentuk sebuah gelombang

sinus. Hal ini akan menyebabkan perubahan pada nilai besaran-besaran gelombang tersebut (misalnya nilai *rms*). Sedangkan pada gambar 2.2, terlihat penjumlahan gelombang fundamental dengan harmonik ke-3, menghasilkan amplitude yang lebih besar.

2.1.1 Sumber Harmonik^[4]

Beban non linier yang umumnya merupakan peralatan elektronik yang didalamnya banyak terdapat komponen semi konduktor, 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.



Gambar 2.3 Distorsi arus yang disebabkan beban nonlinear^[2]

Bentuk gelombang ini tidak menentu dan dapat berubah menurut pengaturan pada parameter komponen semi konduktor dalam peralatan elektronik. Perubahan bentuk gelombang ini tidak terkait dengan sumber tegangannya. Beberapa peralatan yang dapat menyebabkan timbulnya harmonik antara lain power suplay, komputer, printer, lampu fluorescent yang menggunakan elektronik ballast, power elektronik (Thyristor), dan peralatan elektronik yang didalamnya banyak terdapat komponen semi konduktor atau elektronika daya sebagai rangkaian pengendali motor listrik.

Peralatan ini dirancang untuk menggunakan arus listrik secara hemat dan efisien karena arus listrik hanya dapat melalui komponen semi konduktornya selama periode pengaturan yang telah ditentukan. Namun disisi lain hal ini akan menyebabkan gelombang mengalami gangguan gelombang arus dan tegangan yang pada akhirnya akan kembali ke bagian lain sistem tenaga listrik. Fenomena ini akan menimbulkan gangguan beban tidak linier satu phase. Hal di atas banyak terjadi pada distribusi yang memasok pada areal perkantoran/komersial. Sedangkan pada areal perindustrian gangguan yang terjadi adalah beban non linier tiga phase yang disebabkan oleh motor listrik, kontrol kecepatan motor, batere charger, electroplating, dapur busur listrik, dan lain-lain. Peralatan ini banyak menggunakan dioda, silicon controlled rectifier (SCR), transistor dan lain-lain.

2.1.2 Orde Harmonik, Harmonik Ganjil dan Harmonik Genap^[5]

Orde Harmonik menunjukkan komponen frekuensi tunggal yang terdapat pada gelombang campuran. Misalnya, Orde (n) = 5 menunjukkan orde harmonik kelima dengan frekuensi yang merupakan kelipatan lima kali dari frekuensi fundamental. Jika frekuensi fundamentalnya adalah 50 Hz, maka frekuensi orde kelima adalah 250 Hz.

Sesuai dengan namanya, harmonik ganjil adalah harmonik ke-3, 5, 7, 9, 11 dan seterusnya. Sedangkan harmonik genap adalah harmonik 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.

2.2 Istilah-Istilah yang Berkaitan dengan Harmonik

2.2.1 Deret *Fourier*^[5]

Gelombang sinus adalah bentuk gelombang paling dasar yang menyusun berbagai bentuk gelombang lainnya yang ada di dunia kelistrikan. Pada tahun 1822, J.B.J. Fourier, menyatakan bahwa sembarang fungsi periodik pada interval T bisa diwakili oleh deret tak hingga sinusoida yang frekuensinya berkaitan secara harmonis atau dapat dinyatakan sebagai fungsi penjumlahan komponen sinusoida fundamental dengan komponen harmonisa pada deret orde tertinggi pada

frekuensi yang merupakan kelipatan frekuensi fundamentalnya. Analisa harmonisa merupakan cara untuk menganalisis bentuk gelombang terdistorsi, yang merupakan penjumlahan dari besaran dan fasa fundamental dengan harmonisa orde tertinggi pada gelombang periodik. Hasil deretnya dikenal sebagai deret Fourier dan memperlihatkan hubungan antara fungsi waktu dengan fungsi frekuensi.

Suatu fungsi periodik $f(\theta)$ dengan periode 2π yang memenuhi syarat-syarat Dirichelet sebagai berikut:

1. Mempunyai bilangan diskontinuitas yang terbatas dalam suatu periode.
2. Mempunyai maksimum dan minimum yang terbatas dalam satu periode.
3. Integral adalah terbatas (tertentu), dapat dikembangkan menjadi suatu deret Fourier.

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

dengan koefisien a_0, a_n, b_n masing-masing adalah:

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

Nilai f fundamental untuk satu periode yaitu dari 0 hingga T .

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

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

Dimana n adalah indeks harmonik.

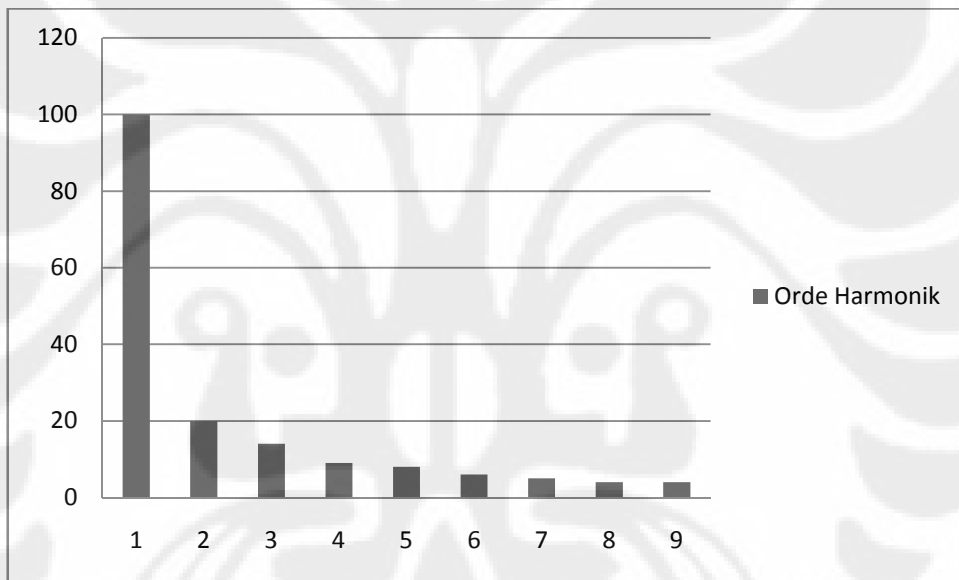
Berdasarkan deret fourier diatas didapatkan bahwa gelombang yang mengintrodusir harmonisa-harmonisa ganjil yaitu harmonisa ketiga, kelima, ketujuh dan seterusnya .Suku a_0 menyatakan komponen dc atau nilairata-rata dari gelombang, yang mana umumnya komponen ini tidak muncul dalam jaringan

sistem arus bolak-balik, dan apabila bentuk gelombang sempurna atau sinusoidal maka orde yang ada adalah orde = 1. Amplitudo harmonisa biasa dinyatakan :

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

Untuk nilai C sebagai fungsi n seringkali digambarkan dalam suatu barchart dan dikenal dengan "Spektrum harmonik" gelombang.

Spektrum harmonik adalah distribusi semua amplitudo komponen harmonik sebagai fungsi orde harmoniknya dan diilustrasikan menggunakan histogram. Gambar di bawah ini merupakan contoh spektrum harmonik. Dari gambar tersebut dapat dikatakan bahwa spektrum merupakan perbandingan arus atau tegangan frekuensi harmonik terhadap arus atau tegangan frekuensi dasar.^[6]



Gambar 2.4 Spektrum Harmonik

2.2.2 RMS (Root Mean Square)^[5]

RMS dapat didefinisikan sebagai akar kuadrat rata-rata dari fungsi yang terdapat amplitudo dari fungsi berkala pada suatu periode, sehingga RMS dapat artikan dengan persamaan berikut:

$$X_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T x^2(t) dt} \dots\dots\dots (2-6)$$

sedangkan untuk menghitung tegangan dan arus atau V_{RMS} , I_{RMS} adalah :

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T V^2(t) dt} \quad \text{atau} \quad V_{rms} = \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} V_n^2} \dots\dots\dots (2-7)$$

atau dapat juga didefinisikan dengan persamaan berikut:

$$V_{rms} = \sqrt{V_1^2 + V_2^2 + V_3^2 + V_4^2 + \dots + V_n^2} \dots\dots\dots (2-8)$$

$$I_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T I^2(t) dt} \quad \text{atau} \quad I_{rms} = \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} I_n^2} \dots\dots\dots (2-9)$$

atau dapat juga didefinisikan dengan persamaan berikut:

$$I_{rms} = \sqrt{I_1^2 + I_2^2 + I_3^2 + I_4^2 + \dots + I_n^2} \dots\dots\dots (2-10)$$

2.2.3 Individual Harmonic Distortion (IHD)^[7]

Individual Harmonic Distortion (IHD) adalah perbandingan antara nilai RMS dari harmonisa individual dengan nilai RMS dari fundamental. Rumus dari IHD adalah sebagai berikut.

$$IHD = \sqrt{\left(\frac{I_{Sn}}{I_{S1}}\right)^2} \times 100\% \dots\dots\dots (2.11)$$

Dimana

IHD = Individual Harmonic Distortion (%)

I_{Sn} = Arus harmonisa pada orde ke-n (A)

I_{S1} = Arus fundamental (I_{rms}) (A)

2.2.4 Total Harmonic Distortion (THD)^[5]

Total Harmonic Distortion (THD) adalah perbandingan antara nilai RMS dari seluruh komponen harmonik terhadap nilai RMS dari fundamental, 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 :

$$V_{THD} = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} V_n^2}}{V_1} \times 100\% \quad \dots\dots\dots (2.12)$$

dimana:

V_n = Nilai tegangan harmonisa (V)

V_1 = Nilai fundamental (V)

n = komponen harmonik maksimum yang diamati

$$I_{THD} = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I_1} \times 100\% \quad \dots\dots\dots (2.13)$$

dimana:

I_n = Nilai arus harmonik (A)

I_1 = Nilai fundamental (A)

n = komponen harmonik maksimum yang diamati

2.3 Standar Harmonik^[5]

Hasil perhitungan sebaiknya tidak melebihi atau sama dengan nilai yang ditetapkan oleh standar yang berlaku. Bila hasilnya lebih maka tingkat harmonik sistem membahayakan komponen-komponen sistem dan sebaiknya harus dipikirkan cara menguranginya. Standar yang dipakai untuk batasan tegangan dan arus harmonik adalah IEEE 519 - 1992.

Ada dua kriteria yang digunakan dalam analisa distorsi harmonik, yang pertama adalah batasan untuk distorsi arus harmonik (I_{THD}) dan yang kedua adalah batasan untuk distorsi tegangan harmonik (V_{THD}). Persentase (%) I_{THD} adalah persentase jumlah total arus yang terdistorsi oleh harmonik terhadap frekuensi fundamentalnya. Untuk standard harmonik arus, ditentukan oleh perbandingan 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

persentase (%) batas untuk harmonik tegangan (V_{THD}), ditentukan dari besarnya tegangan sistem yang terpasang atau dipakai.

I_{sc}/I_L	Orde Harmonik					THD (%)
	$h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h$	
<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 2.2. Limit Distorsi Arus Harmonik (I_h) dalam (%) untuk sistem distribusi < 69 KV

Sumber : IEEE 519-1992 tabel 10.3

Tegangan pada PCC, V_n (KV)	Individual distorsi harmonik (%)	Total distorsi harmonik (%)
$V_n \leq 69$	3,0	5,0
$69 < V_n \leq 161$	1,5	2,5
$V_n > 161$	1,0	1,5

Tabel 2.3. Limit distorsi tegangan harmonik

Sumber : IEEE 519-1992 tabel 11.1

2.4 Pengaruh Negatif dari Harmonik^[7]

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 sebagai akibat timbulnya harmonik ketiga yang dibangkitkan oleh peralatan listrik satu fasa.

Pada keadaan normal, arus beban setiap phase dari beban linier yang seimbang pada frekuensi dasarnya akan saling mengurangi sehingga arus netralnya menjadi nol. Sebaliknya beban nonlinier satu fasa akan menimbulkan harmonik kelipatan tiga ganjil yang disebut triplen harmonik (harmonik ke-3, ke-9, ke-15, ke-21 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 karena saling menjumlah di tiap fasanya.

Harmonik	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Frekuensi (Hz)	50	100	150	200	250	300	350	400	450
Urutan	+	-	0	+	-	0	+	-	0

Tabel 2.4. Polaritas dari Komponen Harmonik

Seperti terlihat pada tabel 2.4, harmonik pertama urutan polaritasnya adalah positif, harmonik kedua urutan polaritasnya adalah negatif dan harmonik ketiga urutan polaritasnya adalah nol, harmonik keempat adalah positif (berulang berurutan sampai seterusnya).

Urutan	Pengaruh Pada Sistem Distribusi
Positif	- Panas
Negatif	- Panas - Menghambat atau memperlambat putaran motor
Nol	- Panas - Menimbulkan atau menambah arus pada kawat netral

Tabel 2.5. Akibat dari Polaritas Komponen Harmonik

Akibat yang dapat ditimbulkan oleh urutan polaritas komponen harmonik (lihat Tabel 2.5) antara lain tingginya arus netral pada sistem 3 phase 4 kawat (sisi sekunder transformator) karena arus urutan nol (zero sequence) dan arus ini akan terinduksi ke sisi primer transformator dan akan berputar pada sisi primer transformator yang biasanya memiliki belitan delta (D). Hal ini akibat pada kawat netral tidak memiliki peralatan pemutus arus untuk proteksi tegangan atau arus lebih.

2.4.1 Efek Harmonik Terhadap Penghantar ^[5]

Pada sistem distribusi arus listrik, kabel atau konduktor (penghantar) merupakan sarana yang dibutuhkan. Adanya gangguan harmonik dalam suatu distribusi arus sangatlah merugikan berdasarkan persamaan I^2R dapat

didefinisikan bahwa nilai arus (I) akan menjadi lebih besar, sedangkan untuk tahanan (R) dapat dibedakan menjadi nilai tahanan arus searah (R_{DC}), efek kulit penghantar (*Skin effect*) dan efek dari kedekatan penghantar (*Proximity effect*)

a. *Skin effect*

Skin effect merupakan akibat dari adanya distribusi arus dipermukaan lebih besar daripada yang ada di dalam penghantar yang mengakibatkan tahanan efektif sistem meningkat. Hal yang mempengaruhi kenaikan dari *skin effect* ini adalah kenaikan frekuensi dan diameter penghantar yang digunakan dalam system distribusi arus listrik.

b. *Proximity effect*

Proximity effect disebabkan oleh adanya medan magnet penghantar mengganggu distribusi arus pada penghantar-penghantar yang berdekatan.

Pengaruh harmonisa terhadap tahanan dapat dijelaskan sebagai berikut, harmonisa memiliki frekuensi kelipatan dan frekuensi fundamental. Frekuensi harmonisa ini mempengaruhi besarnya tahanan arus bolak-balik (R_{AC}), akibat efek kulit penghantar (*Skin effect*) dan efek dari kedekatan penghantar (*Proximity effect*). Sehingga rasio perbandingan antara tahanan arus searah dengan tahanan arus bolak-balik yang dilambangkan k_c dapat diperoleh dari persamaan berikut ini,

$$k_c = \frac{R_{ac}}{R_{dc}} = 1 + k_{SE} + k_{PE} \dots\dots\dots (2-14)$$

dimana :

- k_c : Rasio perbandingan R_{dc} dengan R_{ac}
- R_{ac} : Tahanan penghantar pada arus bolak-balik
- R_{dc} : Tahanan arus searah
- k_{SE} : Penambahan tahanan akibat *Skin effect*
- k_{PE} : Penambahan tahanan akibat *Proximity effect*

Letak aliran arus pada suatu penghantar dipengaruhi oleh besarnya frekuensi, semakin besar frekuensi yang di terapkan 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 :

$$x = 0,027678 \sqrt{\frac{f \cdot \mu}{Rdc}} \dots\dots\dots (2.15)$$

Dimana :

- F : frekuensi (Hz)
- μ : permeabilitas magnet dari konduktor
- Rdc : tahanan arus searah

Penambahan nilai tahanan akibat efek kulit (k_{SE}) merupakan fungsi nonlinier dari parameter x tersebut. Suatu metode pendekatan kurva dilakukan untuk mendapatkan perhitungan k_{SE} sehingga didapatkan persamaan orde 5 sebagai berikut, dengan $x \leq 2$.

$$k_{SE} = 10^{-3}(1,04x^5 + 8,24x^4 - 3,24x^3 + 1,447x^2 - 0,2764x + 0,0166) \dots\dots\dots (2.16)$$

Untuk $2 < x \leq 10$ berlaku :

$$k_{SE} = 10^{-3}(-0,2x^5 + 6,616x^4 - 83,345x^3 + 500x^2 - 1061,9x + 769,63) \dots\dots\dots (2.17)$$

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

$$k_{PE} = k_{SE} \sigma^2 \left[\frac{1,18}{k_{SE} + 0,27} + 0,312\sigma^2 \right] \dots\dots\dots (2.18)$$

Dengan σ adalah perbandingan antara diameter penghantar dengan jarak antar penghantar. Setelah didapat nilai k_{SE} dan k_{PE} maka didapat juga nilai Rac. Dengan demikian diperoleh nilai tahanan penghantar saat distorsi (R_h).

$$Rac = kc.Rdc \text{ dan } R_h = Rdc + Rac$$

Sehingga,

$$R_h = Rdc.(kc+1) \dots\dots\dots (2.19)$$

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

$$P_{SR} = \sum_{h=1}^{\infty} I_h^2 \cdot R_h \dots\dots\dots (2-20)$$

dimana :

P_{SR} : Rugi-rugi penghantar

I_h : Arus komponen harmonik

R_h : Tahanan penghantar untuk frekuensi dengan orde ke-h

2.4.2 Rugi-rugi pada Transformator

Rugi-rugi pada transformator secara signifikan akibat kehadiran komponen-komponen harmonik pada tegangan dan arus adalah rugi-rugi tembaga, rugi-rugi histerisis dan rugi-rugi arus eddy.

2.4.2.1 Rugi-rugi Tembaga

Komponen rugi-rugi tembaga pada transformator adalah I^2R , dimana arus (I) akan menjadi lebih besar nilainya akibat terdapat komponen-komponen harmonik. Begitu juga untuk nilai tahanan (R), saat terjadi distorsi harmonik, nilai R juga berubah menjadi nilai tahanan arus searah (R_{DC}) ditambah R_{ac} , 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-komponen harmonik di dalam arus beban dapat dihitung dengan persamaan,

$$P_R = \sum_{h=1}^{\infty} I_h^2 \cdot R_h \dots\dots\dots (2-21)$$

dimana :

P_R : Rugi-rugi tembaga

I_h : Arus komponen harmonik

R_h : Tahanan penghantar untuk frekuensi dengan orde ke-h

Arus harmonik dipengaruhi oleh fenomena yang dikenal sebagai efek kulit (*Skin effect*). Apabila frekuensi arus yang dihasilkan lebih tinggi dari frekuensi fundamentalnya, arus cenderung mengalir pada permukaan dari kawat konduktor. Hal ini mengurangi area efektif cross sectional dari konduktor dan meningkatkan tahanannya (R). 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.

2.4.2.2 Rugi-rugi Arus Eddy

Rugi-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. 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,

$$P_{EC} = P_{EC-f} \cdot \sum_{h=1}^{\infty} I_h^2 \cdot h^2 \dots\dots\dots (2-22)$$

Dimana :

h : bilangan bulat orde komponen harmonik

P_{EC-f} : rugi-rugi arus eddy

I_h : arus rms harmonik ke n

2.4.2.3 Rugi-rugi Histerisis

Bila luas penampang inti (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,

$$e = -N \frac{d\phi}{dt} \dots\dots\dots (2-23)$$

$$W = \int_{+\phi}^{-\phi} Ni d\phi \dots\dots\dots (2-24)$$

Daya sumber untuk mengimbanginya akan sama dengan : -ei dalam interval waktu dt, energi yang diberikan adalah:

$$dW = (-e)i = Ni \frac{d\phi}{dt} \dots\dots\dots (2-25)$$

Untuk $d\phi = A \, dB$ dan $N_i = H \cdot l$ dimana B adalah kerapatan fluks (dalam webber/m) dan H adalah kuat medan magnet (Amper-lilitan/m) maka persamaan di atas menjadi,

$$\int_{-B_m}^{+B_m} W = A l \int H \, dB \dots\dots\dots (2-26)$$

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 dan untuk Fe-Si berkisar antara 1,7 - 2,0, sehingga persamaan di atas menjadi :

$$Ph = \eta \cdot A \cdot l \cdot f \cdot B_m^x \dots\dots\dots (2-27)$$

Dimana,

- Ph : rugi-rugi histerisis
 H : karakteristik material inti
 A : luas penampang
 B_m^x : kerapatan fluks magnet

2.5 Transformator Ukur^[8]

Transformator ukur didesain secara khusus untuk pengukuran dalam sistem daya. Transformator ini banyak digunakan dalam sistem daya karena mempunyai keuntungan, antara lain:

- Memberikan isolasi elektrik bagi sistem daya
- Tahan terhadap beban untuk berbagai tingkatan
- Tingkat keandalan yang tinggi
- Secara fisik lebih sederhana bentuknya, dan
- Secara ekonomi lebih murah

Transformator pengukuran terdiri dari:

- a. Transformator tegangan (Voltage transformer, VT atau Potential Transformer, PT)
- b. Transformator arus (Current Transformer, CT)

Arus dan tegangan pada peralatan daya yang harus dilindungi dirubah oleh transformator arus dan transformator tegangan ke tingkat yang lebih rendah untuk pengoperasian relay. Tingkat-tingkat yang lebih rendah ini diperlukan karena dua alasan, yaitu:

- Tingkat masukan yang lebih rendah ke relay-relay menjadikan komponen-komponen yang digunakan untuk konstruksi relay-relay tersebut secara fisik menjadi cukup kecil, karena itu dilihat dari segi ekonomi biayanya akan lebih murah.
- Dan bagi manusia (pekerja) yang bekerja dengan relay-relay tersebut dapat bekerja dalam suatu lingkungan yang aman.

Daya yang diserap oleh transformator ini untuk melakukan kerjanya tidak seberapa besar, karena beban yang dihubungkan hanya terdiri dari relay-relay dan alat-alat ukur (meteran) yang mungkin hanya digunakan pada waktu tertentu.

Beban pada transformator ukur (CT dan PT) dikenal sebagai muatan (Burden) dari transformator tersebut. Istilah muatan biasanya melukiskan impedansi yang dihubungkan pada kumparan sekunder transformator itu, tetapi dapat juga menetapkan voltampere yang diberikan kepada beban.

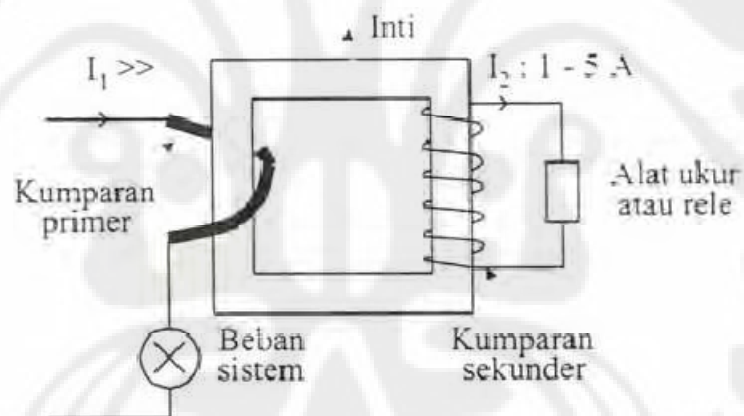
2.5.1 Transformator Arus (Current Transformer)^[9]

Current Transformer atau yang biasa disebut Trafo Arus adalah tipe instrument trafo yang didesain untuk mendukung arus yang mengalir pada kumparan sekunder sebanding dengan arus bolak-balik yang mengalir pada sisi primer. Secara umum Trafo ini digunakan untuk mengukur dan melindungi rele pada industri atau perkantoran yang memakai tegangan tinggi di mana trafo ini mempunyai fasilitas pengukuran yang aman dalam mengukur jumlah arus yang besar begitu juga dengan tegangan yang tinggi.



Gambar 2.5. Macam-macam bentuk transformator arus

Disamping penggunaannya untuk mengukur arus, trafo ini juga dibutuhkan untuk pengukuran daya dan energi, pengukuran jarak jauh dan rele proteksi. Kumputan primer trafo arus dihubungkan secara seri dengan jaringan atau peralatan yang akan diukur arusnya, sedangkan kumputan sekunder dihubungkan dengan peralatan meter dan rele proteksi.



Gambar 2.6. Rangkaian Trafo Arus

Pada umumnya peralatan ukur dan rele membutuhkan arus 1 A atau 5 A. Kawasan kerja trafo arus yang digunakan untuk pengukuran biasanya 0,05 sampai 1,2 kali arus yang akan diukur. Trafo arus untuk tujuan proteksi biasanya harus mampu bekerja lebih dari 10 kali arus pengenalnya.

2.5.2 Prinsip Kerja Trafo Arus^[10]

Prinsip kerja trafo arus sama dengan trafo daya satu fasa. Cara kerja dari trafo arus ini yaitu jika pada kumputan primer mengalir arus I_1 , maka pada

kumparan primer akan timbul gaya gerak magnet sebesar $N_1 \cdot I_1$. Gaya gerak magnet ini memproduksi fluks pada inti.

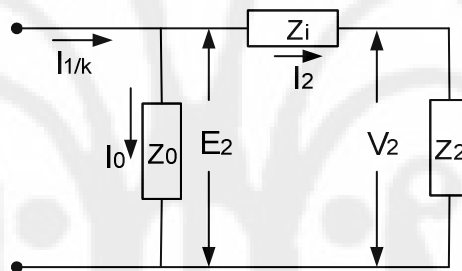
Fluks ini membangkitkan gaya gerak listrik (ggl) pada kumparan sekunder. Jika kumparan sekunder tertutup, maka pada kumparan sekunder mengalir arus I_2 . Arus ini menimbulkan gaya gerak magnet $N_2 \cdot I_2$ pada kumparan sekunder.

Bila trafo tidak mempunyai rugi-rugi (trafo ideal) berlaku persamaan :

$$N_1 I_1 = N_2 I_2 \dots\dots\dots (2.28)$$

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1} \dots\dots\dots (2.29)$$

Gambar Rangkaian Ekuivalen dari Trafo Arus dapat dilihat pada gambar di bawah ini.



Gambar 2.7. Rangkaian ekuivalen trafo arus

Keterangan :

Tegangan terminal sekunder (V_2) tergantung pada impedansi peralatan (Z_2) yang bisa berupa alat ukur / relay, sehingga dapat ditulis persamaan :

$$V_2 = I_2 Z_2 \dots\dots\dots (2.30)$$

Jika tahanan dan reaktansi bocor kumparan trafo dinyatakan (Z_i), maka ggl pada kumparan sekunder harus lebih besar dari pada tegangan sekunder agar rugi-rugi tegangan pada (Z_i) dapat dikompensasi, maka persamaan yang harus dipenuhi adalah :

$$E_2 - V_2 = E_2 - I_2 Z_2 = I_2 Z_i \dots\dots\dots (2.31)$$

Atau

$$E_2 = I_2 (Z_2 + Z_i) \dots\dots\dots (2.32)$$

Dalam prakteknya trafo arus selalu mengandung arus beban nol (I_0), arus ini menimbulkan fluks (Φ) yang dibutuhkan untuk membangkitkan gaya gerak listrik E_2 :

$$E_2 = 4,44 f N_2 \phi = 4,44 f N_2 A B \dots\dots\dots (2.33)$$

di mana :

f = frekuensi tegangan

Φ = fluks magnetik

A = luas penampang inti trafo

B = rapat medan magnetik

Gaya Gerak Listrik (GGL) inilah yang mempertahankan aliran arus I_2 pada impedansi ($Z_2 + Z_i$). Oleh karena itu, amper belitan yang ditimbulkan arus beban nol harus dapat mengimbangi amper belitan yang ditimbulkan arus primer dan sekunder :

$$N_1 I_0 = N_1 I_1 = N_2 I_2 \dots\dots\dots (2.34)$$

2.5.3 Perbedaan Utama Trafo Arus dengan Trafo Daya :

Beberapa perbedaan utama dari trafo arus dengan trafo daya adalah sebagai berikut :

- a. Jumlah belitan kumparan primer sedikit, tidak lebih dari lima belitan.
- b. Arus primer tidak dipengaruhi beban yang terhubung pada kumparan sekunder, karena arus primer ditentukan oleh arus pada jaringan yang di ukur.
- c. Semua beban pada kumparan sekunder dihubungkan seri.
- d. Terminal sekunder trafo arus tidak boleh terbuka, oleh karena itu terminal kumparan sekunder harus selalu dihubungkan dengan beban atau hubung singkat jika bebannya belum dihubungkan.

2.6 Lampu Hemat Energi^[11]

Pada prinsipnya lampu hemat energi merupakan lampu fluorescent yang menggunakan ballast elektronik. Untuk itu, di bawah ini akan dijelaskan tentang lampu fluorescent dan ballast elektronik.

Prinsip kerja lampu fluorescent adalah berdasarkan pelepasan elektron dari kutub negatif ke kutub positif. Elektron yang terlepas ini akan bertabrakan dengan atom gas yang diisikan ke dalam tabung tersebut. Tumbukan elektron dan atom gas ini akan menghasilkan elektron yang akan menabrak atom berikut, dan seterusnya. Adapun atom yang tidak cukup energi untuk lepas dari ikatan atom akan mengalami perpindahan dari tingkat energi rendah ke tingkat energi tinggi. Karena pada tingkat energi tinggi ini keadaan elektron tidak stabil maka ia akan kembali ke lintasan semula (tingkat energi lebih rendah) sambil mengeluarkan gelombang elektromagnetik yang merupakan sinar ultra violet. Sinar ini oleh gas fluorescent dalam sisi tabung diubah menjadi sinar tampak.

Tumbukan yang terjadi di dalam tabung kalau tidak dikendalikan, maka akan menyebabkan panas berlebihan dan tabung akan rusak. Untuk itu dipasang ballast yang berfungsi untuk mengendalikan arus yang mengalir ke dalam tabung lampu. Ballast dapat dibuat dari suatu kawat atau penghantar yang dililit sedemikian rupa atau berupa kumparan (choke coil) berinti besi. Selain itu juga ballast dapat dibuat dari rangkaian elektronik yang disemat ballast elektronik. Ballast ini mempunyai fungsi:

- a) Memberikan pemanasan mula pada elektroda untuk penyediaan elektron bebas dalam jumlah yang banyak.
- b) Memberikan gelombang potensial yang cukup besar untuk mengadakan bunga api antara kedua elektrodanya.
- c) Mencegah terjadinya peningkatan arus bunga api yang melebihi batas yang telah ditentukan dari setiap ukuran lampu.

Seperti yang telah disebutkan sebelumnya lampu hemat energi adalah lampu fluorescent yang menggunakan ballast elektronik. Di bawah ini disebutkan beberapa keuntungan dari penggunaan dengan pemakaian ballast elektronik adalah:

- a) Start yang cepat tanpa kedip, dengan tidak menggunakan starter.
- b) Arusnya yang kecil yaitu 0,1 Ampere, sehingga pemakaian dayanya hemat.
- c) Tanpa efek stroboskop dan tidak menggunakan elektroda yang berkedip dan tidak berdengung (bising).

- d) Faktor daya rata-rata mendekati 0,85 sehingga tidak menggunakan kapasitor sebagai pengkoreksi faktor daya.

Oleh karena itu lampu tabung fluorescent yang menggunakan ballast elektronik sangat cocok untuk ruangan yang membutuhkan tingkat keamanan yang tinggi, karena tingkat keamanan dan kuat penerangan yang dihasilkan sangat baik.

2.7 KESALAHAN PENGUKURAN^[12]

Kesalahan pengukuran selalu ada dan merupakan sifat dari pengukuran, namun diusahakan kesalahan tersebut sekecil mungkin.

Kesalahan-kesalahan dalam pengukuran dapat berupa/berasal dari :

- a. Alat ukur yang tidak presisi.
- b. Kecakapan dalam melakukan pengukuran (pembacaan dan pengoperasian).
- c. Keadaan sekeliling, pada saat pengukuran :
 - Temperatur ruang
 - Ada pemanasan pada alat ukur
 - Posisi nol, yaitu keadaan pegas yang sudah tua dan adanya kelelahan material pegas
 - Medan magnet luar
- d. Kedudukan alat yang tidak tepat

Kesalahan dalam pengukuran disebabkan oleh beberapa faktor, diantaranya adalah :

1. Kesalahan Manusia

- Penyebabnya adalah :
 - a. Kesalahan pembacaan
 - b. Kesalahan perhitungan
 - c. Kesalahan penyetelan
 - d. Kesalahan posisi awal / set nol

- Penanggulangan :
 - a. Hati-hati dalam pengukuran (skala dan tap terminal)
 - b. Batas kemampuan (range pengukuran)
 - c. Pembacaan tidak hanya oleh satu orang
 - d. Pengukuran dilakukan beberapa kali

2. Kesalahan Alat ukur

- Penyebabnya adalah :
 - a. Gesekan
 - b. Kalibrasi
 - c. Kerugian/kebocoran pada kawat penghubung
 - d. Alat rusak
- Penanggulangan :
 - a. Perawatan berkala
 - b. Alat harus dikalibrasi.
 - c. Perbaiki kualitas kabel penghubung dan sambungan

3. Kesalahan/Kondisi Lingkungan

- Penyebab :
 - a. Medan Magnit Luar
 - b. Temperatur ruang
- Penanggulangan :
 - a. Alat harus tertutup rapat pada saat pengukuran.
 - b. Alat harus diletakan dalam ruang dengan temperatur konstan
 - c. Gunakan alat yang tidak banyak terpengaruh terhadap perubahan lingkungan.

Contoh pada suatu pengukuran tegangan, besar tegangan sebenarnya adalah 100 V, akan tetapi hasil pengukuran menunjukkan nilai 99 V, maka :

- **error absolute** (e_m) = perbedaan antara nilai sebenarnya/seharusnya (yang diharapkan) dengan nilai yang didapat dari hasil pengukuran.

$$e_m = 100 \text{ V} - 99 \text{ V} = 1 \text{ V}$$

- persen kesalahan (**% error**)

$$\% e = [(100 - 99)/100] \cdot 100\% = 1\%$$

- kepresisian relatif (*relative accuracy*),

$$A = 1 - [(100 - 99)/100] = 0,99$$

- persen akurat (**% accuracy**),

$$a = 100\% - 1\% = 99\%$$

2.7 KELAS ALAT UKUR

Batas kesalahan alat ukur memperlihatkan atau menunjukkan ketelitian dan akurasi alat tersebut. Berikut ini merupakan kelas-kelas akurasi dari sebuah alat ukur.

Kelas Akurasi	Keterangan
0,05	Merupakan alat dengan ketelitian/presisi yang sangat tinggi digunakan untuk lab dan alat ukur standar
0,1	
0,2	
0,5	Merupakan alat dengan ketelitian/presisi tinggi dipakai pada pengukuran-pengukuran presisi, alat ini biasanya portable
1	Merupakan alat dengan ketelitian/presisi lebih rendah dari kelas di atasnya, alat ini kecil portable, biasanya dipasang pada panel-panel listrik yang besar.
1,5	Merupakan alat dengan ketelitian/presisi rendah, dimana dalam penggunaannya faktor ketelitian dan presisinya tidak begitu penting.
2,5	
5	

Tabel 2.6. Kelas akurasi

Pada hasil pengukuran atau pengetesan, bila dibandingkan dengan alat standar presisi maka dapat diketahui besarnya kesalahan tersebut konstan atau proporsional.

BAB III

METODOLOGI DAN HASIL PENGUJIAN

Untuk mengetahui pengaruh dari beban harmonik terhadap kinerja transformator arus dilakukan pengukuran secara bertahap, dari beban 5 % sampai 90%, baik beban harmonik maupun beban non harmonik . Pengujian dilakukan di Laboratorium Tegangan Tinggi dan Pengukuran Listrik, Departemen Teknik Elektro Universitas Indonesia.

3.1 Daftar Peralatan

Tabel berikut ini adalah daftar peralatan yang digunakan untuk pengujian yaitu:

No	Nama Alat	Merek	Spesifikasi	Jumlah
1	Trafo Arus / Current Transformer (CT)	TAB	Type MSQ-30, 50/60 Hz, Ratio 30/5, VA=5, Class 1	2
2	Lampu Hemat Energi (LHE)	Tami	20 watt, 170-250 V, 50/60 Hz.	180
3	Lampu Pijar	Philips	100 watt, 220-240 V	11
4	Harmonic Analyzer	Amprobe	Model HA-2000	1
5	Ampermeter Digital	Uni T	UT 70 C	2
6	Miniature Circuit Breaker (MCB)	Schneider Electric	Type C20, 20 A, 230 VAC	1
7	Digital Transformer Tester		Alat inject arus	1

Tabel 3.1. Spesifikasi alat yang digunakan

Transformator Arus yang digunakan pada penelitian ini memiliki rasio arus sebesar 30/5 A merek TAB. *Harmonic Analyzer* digunakan sebagai alat ukur distorsi harmonik, baik harmonik arus maupun harmonik tegangan. Melalui alat tersebut akan didapatkan nilai-nilai parameter yang dibutuhkan untuk analisis pengaruh harmonisa terhadap kinerja transformator arus. Parameter-parameter tersebut antara lain I_{RMS} , V_{RMS} , THD arus maupun tegangan beserta

nilai-nilai setiap ordenya, bentuk gelombang serta spektrum harmonik. Gambar dari *Harmonic Analyzer* dapat dilihat pada gambar berikut ini.



Gambar 3.1. Harmonic Analyzer

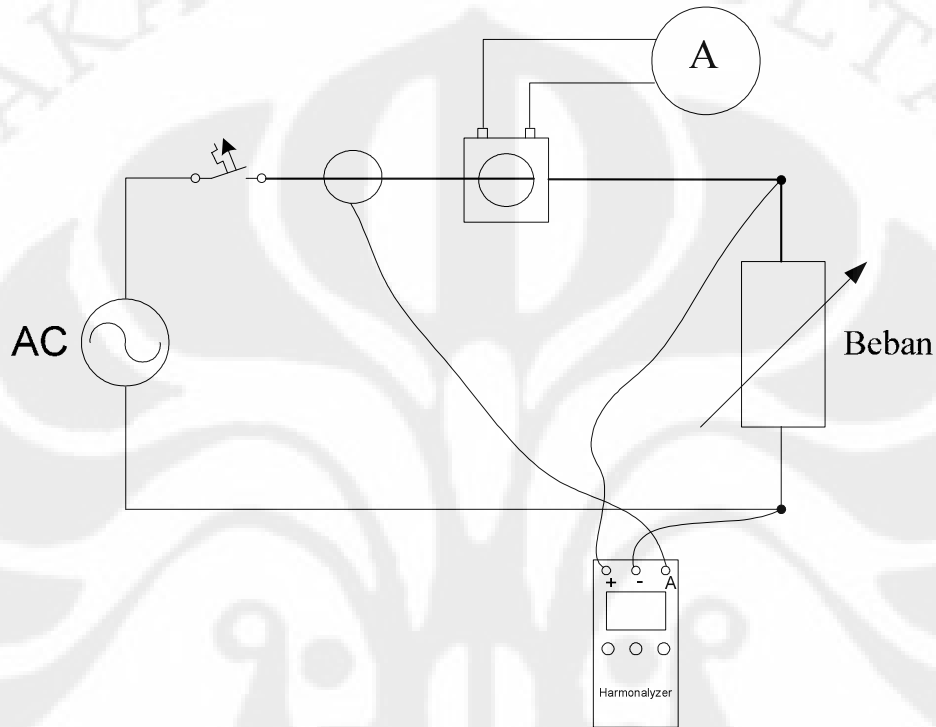
Beban yang digunakan berupa lampu hemat energi (LHE) dengan ballast elektronik. Beban ini termasuk dalam kategori beban non linear yang bisa menyebabkan timbulnya harmonik. Lampu LHE yang dipakai dayanya sebesar 20 Watt merek Tami. Ampermeter digunakan untuk mengukur arus keluaran dari sisi sekunder transformator arus.



Gambar 3.2. Lampu hemat energi

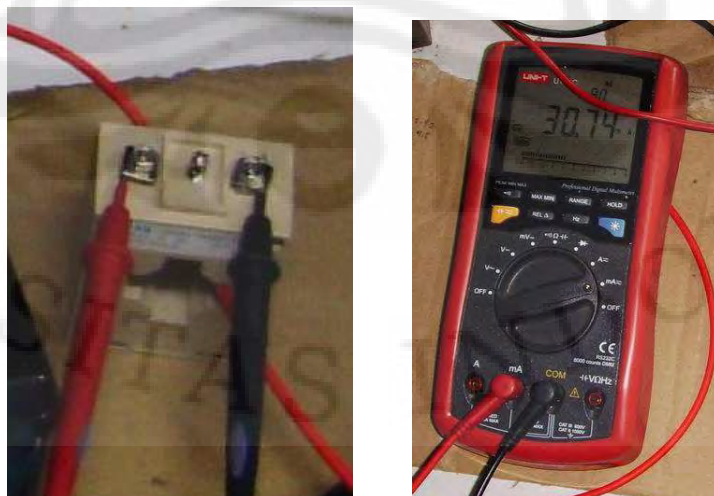
3.2 Rangkaian Pengujian

Rangkaian berawal dari sumber 220 VAC, lalu masuk ke MCB sebagai pengaman dari rangkaian. Pada beban berupa lampu hemat energi dan lampu pijar di rangkai secara paralel. Gambar rangkaian secara keseluruhan dapat dilihat pada gambar 3.3.



Gambar 3.3. Rangkaian Pengujian

Transformator arus dikalungkan pada kabel penghantar pada sisi primer, sedangkan pada sisi sekunder dihubungkan dengan Ampere meter.



Gambar 3.4. Transformator arus dan amperemeter

Harmonic Analyzer memiliki 3 terminal. Untuk mengukur distorsi arus maka *clamp* dari *Harmonic Analyzer* dikalungkan ke kabel penghantar. Sedangkan untuk mengukur distorsi tegangan maka terminal positif dan negatif dari *Harmonic Analyzer* dihubungkan ke fasa dan netral beban.

3.3 Langkah-Langkah Pengujian

3.3.1 Pengujian Variasi Beban Harmonik dan Beban Non Harmonik

Pengukuran dilakukan pada tingkat pembebanan dari transformator arus yang divariasikan dari beban 5 % sampai 90 %, baik dengan pembebanan harmonik maupun beban non harmonik. Dalam pengujian beban yang digunakan tidak sampai beban penuh, melainkan hanya 90%. Berarti arus yang timbul hanya 27 A, hal ini agar transformator arus tidak cepat jenuh atau rusak.

Pembebanan non harmonik disini menggunakan arus *inject* hasil dari alat *Digital Transformer Tester*. Langkah ini dimaksudkan agar tidak ada komponen-komponen harmonik yang timbul, selain itu juga sebagai pembanding pada saat akhir pengukuran apakah arus keluaran dari sisi sekunder transformator arus berbeda atau sama antara beban non harmonik dengan beban harmonik.



Gambar 3.5. Digital Transformer Tester

Sedangkan beban harmonik yang digunakan berupa lampu hemat energi dengan balast elektronik. Lampu ini memiliki spesifikasi 20 watt merk 'Tami'.

Nilai THD arus per lampunya mencapai 78% dan rata-rata arusnya 51 mA per lampunya. Lampu hemat energi ini memiliki karakteristik harmonik yang cukup sehingga dapat dijadikan beban simulasi distorsi harmonik. Pembebanan akan dilakukan bertahap seperti tabel di bawah ini.

Beban	Jumlah lampu	Estimasi Arus (A)
5 %	30	1,5
10 %	60	3,0
15 %	90	4,5
20 %	120	6,0
25 %	150	7,5
30 %	180	9,0
35 %	210 (105x2 lilitan)	10,5
40 %	240 (120x2 lilitan)	12,0
45 %	270 (135x2 lilitan)	13,5
50 %	300 (150x2 lilitan)	15,0
55 %	330 (165x2 lilitan)	16,5
60 %	360 (180x2 lilitan)	17,5
65 %	390 (130x3 lilitan)	19,5
70 %	420 (140x3 lilitan)	21,0
75 %	450 (150x3 lilitan)	22,5
80 %	480 (160x3 lilitan)	24,0
85 %	510 (170x3 lilitan)	25,5
90 %	540 (180x3 lilitan)	27,0

Tabel 3.2 Variasi beban harmonik

Pada jumlah 210 lampu terdapat tulisan 105x2 lilitan. Maksudnya adalah jumlah lampu yang terpasang berjumlah 105 buah. Lalu pada sisi primer transformator arus, sebelum ke beban kabel dililitkan 2 kali melalui body transformator arus. Hal ini dimaksudkan untuk memperoleh arus 2 kali lipatnya apabila dililitkan sebanyak 2 kali. Begitu pula dengan tiga lilitan. Untuk lebih jelasnya dapat di lihat seperti gambar di bawah ini.



Gambar 3.6. Kabel yang dililitkan pada Trafo arus

Pengambilan data diambil setelah beban di hidupkan dan ditunggu sampai kira-kira 3 menit. Hal ini dilakukan karena untuk mengambil data harmonik paling tidak beban harus didiamkan selama 1 menit agar memperoleh keadaan stabil.

3.3.2 Pengujian Variasi Nilai THD

Pada pengujian ini dimaksudkan untuk mengetahui pengaruh dari nilai THD yang berubah terhadap arus keluaran dari trafo arus, apakah dengan nilai THD yang semakin turun akan membuat error pembacaan trafo arus akan semakin baik atau tidak. Pembebanan akan menggunakan variasi antara lampu hemat energi dan lampu pijar. Pembebanan akan dilakukan bertahap seperti tabel di bawah ini. Pembebanan dilakukan pada beban 70%, yang terdiri dari 105 lampu hemat energi. Agar arus mencapai 21 A (70%) maka kabel penghantar dililitkan 4 kali pada sisi primer trafo arus.

Beban	
LHE	LP
105	0
100	1
95	2
88	3
81	4

73	5
65	6
58	7
49	8
40	9
30	10
19	11

Tabel 3.3 Variasi beban dengan lampu pijar

LP adalah lampu pijar dan LHE adalah lampu hemat energi. Pertama-tama beban berupa lampu hemat energi semua, lalu secara bertahap lampu hemat energi diganti dengan lampu pijar dan diusahakan agar arus di primer Trafo Arus tetap 21 A.

Secara lebih terperinci langkah-langkah pengujian adalah sebagai berikut.

1. Siapkan semua peralatan yang dibutuhkan.
2. Atur posisi semua peralatan agar dapat memudahkan pengecekan apabila terjadi kesalahan dalam pengujian.
3. Hubungkan semua peralatan dan material yang akan di uji.
4. Hidupkan power supply dan trafo arus (CT) siap untuk di uji (test).
5. Beri beban kepada CT dari 5 % sampai 90% dengan cara menambah jumlah lampu hemat energi.
6. Catat semua data yang di hasilkan dari percobaan, yaitu dari ampermeter dan *Harmonic Analyzer*.
7. Setelah selesai pengujian CT hingga beban 90%, matikan power supply.
8. Sekarang uji CT dengan alat *inject* sebagai beban non harmonik, berikan nilai arus pada CT sesuai dengan arus primer pada beban harmonik.
9. Beban dinaikkan sampai 90%. Catat semua data yang di hasilkan dari percobaan, yaitu dari ampermeter dan *Harmonic Analyzer*.
10. Variasikan beban dengan mengganti lampu hemat energi dengan lampu pijar sesuai dengan tabel 3.3.

11. Catat semua data yang di hasilkan dari percobaan, yaitu dari ampermeter dan *Harmonic Analyzer*.
12. Pegujian selesai dan rapihkan semua peralatan.
13. Analisa hasil yang di dapat.

3.4 Hasil Pengujian Beban Harmonik dan Beban Non Harmonik

Setelah melakukan pengujian baik dengan pembebanan non harmonik maupun pembebanan harmonik didapatkan hasil seperti tabel berikut ini.

Beban	Jumlah Lampu	IP (A)	IS ₁ (A)	IS ₂ (A)
5 %	30	1,6	0,26	0,11
10 %	60	3,1	0,51	0,24
15 %	90	4,6	0,76	0,40
20 %	120	6,1	1,01	0,52
25 %	150	7,6	1,26	0,83
30 %	180	9,0	1,5	1,01
35 %	210	10,5	1,75	1,27
40 %	240	12,0	2,01	1,45
45 %	270	13,6	2,26	1,65
50 %	300	15,1	2,51	1,75
55 %	330	16,5	2,75	1,99
60 %	360	17,7	2,95	2,07
65 %	390	19,6	3,26	2,42
70 %	420	21,1	3,51	2,58
75 %	450	22,3	3,71	2,60
80 %	480	24,1	4,04	2,91
85 %	510	25,4	4,23	3,04
90 %	540	26,9	4,48	3,24

Tabel 3.4. Hasil Pengujian

Dimana IP merupakan arus primer, IS₁ merupakan arus keluaran dari sisi sekunder transformator arus yang ditimbulkan oleh beban non harmonik,

sedangkan IS_2 merupakan arus keluaran dari sisi sekunder transformator arus yang ditimbulkan oleh beban harmonik.

Sedangkan data-data berupa I_{RMS} , V_{RMS} , THD, Spektrum Harmonik dan nilai-nilai setiap ordenya, selengkapnya disertakan pada lampiran. Nilai THD dapat merepresentasikan besarnya distorsi harmonik yang ditimbulkan. Berikut ini salah satu contoh hasil pengujian pada beban 70% beban harmonik.

➤ **Beban 70%**

$$I_{RMS} = 21,25 \text{ A}$$

$$V_{RMS} = 217,5 \text{ V}$$

$$I_{THD} = 77,9 \%$$

$$V_{THD} = 2,1 \%$$

H	F (Hz)	I (A)	IHD _I (%)	V (V)	IHD _V (%)
1	50	16,76	100	217,4	100
3	150	10,15	60,5	2,488	1,1
5	250	5,072	30,2	2,786	1,2
7	350	4,700	28,0	1,307	0,6
9	450	2,208	13,1	1,730	0,7
11	550	1,547	9,2	0,507	0,2
13	650	1,290	7,6	0,749	0,3
15	750	1,406	8,3	0,814	0,3
17	850	2,015	12,0	0,659	0,3
19	950	1,390	8,2	0,296	0,1

Tabel 3.5. Komponen harmonik beban 70%

3.5 Hasil Pengujian dengan Variasi Nilai THD

Setelah melakukan pengujian dengan memvariasikan beban berupa lampu hemat energi dan lampu pijar didapatkan hasil seperti tabel berikut ini.

Beban		IP (A)	IS (A)	I _{THD} (%)	V _{THD} (%)
LHE	LP				
105	0	21,09	2,561	75,4	2,1
100	1	20,97	2,644	71,9	1,9
95	2	21,03	2,672	66,4	1,9
88	3	20,98	2,704	58,8	1,9
81	4	21,03	2,738	52,8	1,7
73	5	21,08	2,776	46,6	1,8
65	6	21,04	2,814	40,4	1,7

58	7	21,0	2,833	34,4	1,6
49	8	21,04	2,840	28,7	1,7
40	9	21,06	2,845	23,2	1,7
30	10	21,02	2,852	17,4	1,7
19	11	21,09	2,857	10,7	1,7

Tabel 3.6. Hasil pengujian dengan variasi nilai THD

BAB IV

ANALISA HASIL PENGUJIAN

4.1 Analisa Hasil Pengujian Variasi Beban Harmonik dan Beban Non Harmonik

Hasil pengujian pada tabel 3.4 di Bab sebelumnya menunjukkan arus keluaran dari sisi sekunder transformator arus yang ditimbulkan oleh alat inject arus (beban non harmonik) memiliki tingkat akurasi yang tinggi, karena tidak ada kompoen-komponen harmonik yang timbul. Sebagai contoh saat arus primer 9 A akan menghasilkan arus sekunder 1,5 A, hal ini sesuai dengan rasio CT yaitu 30/5.

$$IS = \frac{9}{30} \times 5 = 1,5A$$

Sedangkan saat diberi beban harmonik, arus keluaran dari sisi sekunder transformator arus tidak lagi seakurat sebelumnya. Hasil pembacaan ampermeter menunjukkan arus sekunder pada beban harmonik memiliki selisih yang jauh dari arus sekunder pada beban non harmonik. Hal ini disebabkan besarnya THD arus yang disebabkan oleh lampu hemat energi yang besarnya sekitar 74,5% sampai 78%. Selain itu, faktor yang mempengaruhi kecilnya arus keluaran trafo arus adalah tingginya frekuensi harmonisa. Frekuensi ini mempengaruhi besarnya tahanan arus bolak-balik (R_{AC}), akibat efek kulit penghantar (Skin effect). Efek kulit penghantar ini disebabkan oleh besarnya frekuensi yang dihasilkan oleh harmonisa, yang mempengaruhi besarnya nilai penghantar (R) menjadi lebih besar, sehingga akan menurunkan nilai arus.

Melalui alat Harmonic Analyzer dapat kita lihat bahwa arus fundamental yang dihasilkan jauh lebih kecil daripada arus fundamental sesungguhnya, hal ini diakibatkan oleh besarnya harmonik orde ganjil yang ditimbulkan oleh lampu hemat energi. Contoh saat beban 70%, arus I_{RMS} yang terukur sebesar 21,25 A, tetapi arus fundamentalnya ternyata hanya 16,76 A.

Melalui alat Harmonic Analyzer didapatkan nilai-nilai parameter yang dibutuhkan untuk analisis pengaruh beban harmonik terhadap kinerja transformator arus. Parameter-parameter tersebut antara lain I_{RMS} , V_{RMS} , THD

arus maupun tegangan beserta nilai-nilai setiap ordenya, bentuk gelombang serta spektrum harmonik.

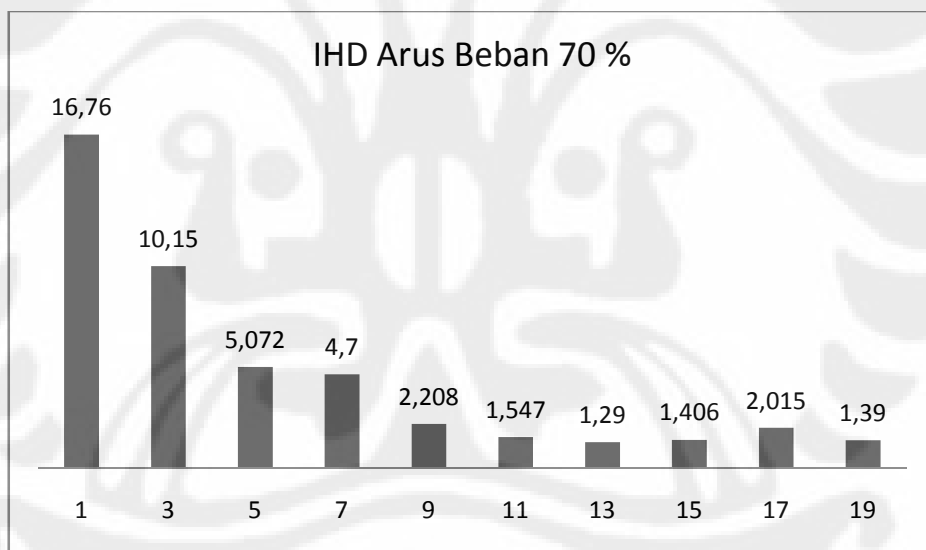
Untuk menghitung besarnya presentase nilai arus atau tegangan setiap orde harmoniknya kita dapat menghitung secara manual dengan menggunakan rumus pada persamaan 2.11. Misalkan kita ingin menghitung besarnya presentase harmonik arus pada beban 70 % orde ketiga melalui persamaan tersebut.

$$IHD = \sqrt{\left(\frac{I_3}{I_1}\right)^2} \times 100\%$$

$$IHD = \sqrt{\left(\frac{10,15}{16,76}\right)^2} \times 100\%$$

$$IHD = 60,56\%$$

Untuk lebih jelasnya kita dapat melihat besarnya arus IHD pada masing-masing orde seperti pada gambar spektrum harmonik berikut ini.



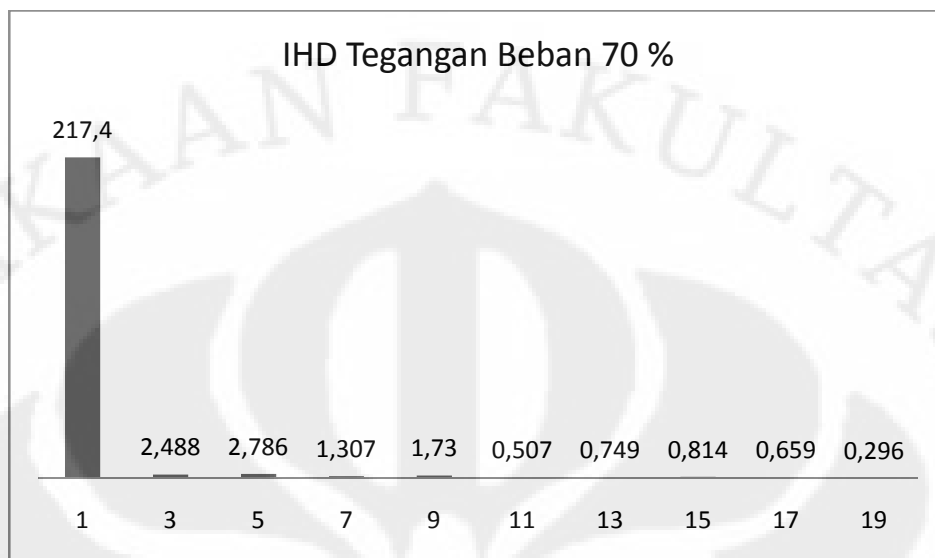
Gambar 4.1. Spektrum Harmonik IHD arus beban 70%

Begitu pula untuk menghitung besarnya presentase harmonik tegangan pada beban 70% orde ketiga melalui persamaan 2.11.

$$IHD = \sqrt{\left(\frac{2,488}{217,4}\right)^2} \times 100\%$$

$$IHD = 1,14\%$$

Untuk lebih jelasnya kita dapat melihat besarnya tegangan IHD pada masing-masing orde seperti pada gambar spektrum harmonik berikut ini.



Gambar 4.2. Spektrum Harmonik IHD tegangan beban 70%

Dari gambar 4.1 sebelumnya dapat diketahui bahwa lampu hemat energi menghasilkan harmonisa arus dengan THD yang besar sekali, khususnya harmonisa ganjil dengan yang paling dominan adalah harmonik orde ke-3 yaitu mencapai nilai 60,56 %, disusul harmonik ke 5, ke 7 dan seterusnya. Sedangkan untuk nilai tegangan besarnya THD hanya sebesar 2,1 %, nilai ini masih dalam kondisi yang diperbolehkan sesuai standar yaitu dibawah 5 %.

Nilai dari persentase THD juga dapat kita hitung dengan menggunakan rumus pada persamaan 2.12 dan persamaan 2.13. Misalkan kita ingin menghitung besarnya persentase THD arus pada beban 70 % melalui persamaan tersebut.

$$I_{THD} = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I_1} \times 100\%$$

$$I_{THD} = \frac{\sqrt{I_3^2 + I_5^2 + I_7^2 + I_9^2 + I_{11}^2 + I_{13}^2 + I_{15}^2 + I_{17}^2 + I_{19}^2}}{I_1} \times 100\%$$

$$I_{THD} = \frac{\sqrt{10,15^2 + 5,072^2 + 4,7^2 + 2,208 + \dots + 1,39^2}}{16,76} \times 100\%$$

$$I_{THD} = 77,28\%$$

Pada alat Harmonic Analyzer tertera nilai I_{THD} sebesar 77,9% sedangkan menurut perhitungan sebesar 77,28%, hal ini disebabkan karena yang ikut dihitung hanyalah harmonik ganjil saja. Hal ini dikarenakan pada alat Harmonic Analyzer tidak dapat menampilkan harmonik genap. Menurut teori yang ada menjelaskan bahwa orde harmonik yang menentukan atau berpengaruh adalah harmonik ganjil, sedangkan besarnya harmonik genap kurang lebih hanya 0,5% sampai 4 % saja. Berdasarkan hasil perhitungan yang ada besarnya I_{THD} tidak jauh berbeda, ini membuktikan bahwa teori yang mengatakan bahwa harmonik genap kurang berpengaruh benar adanya.

Sedangkan untuk menghitung THD dari tegangan dapat menggunakan persamaan 2.12.

$$V_{THD} = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} V_n^2}}{V_1} \times 100\%$$

$$V_{THD} = \frac{\sqrt{V_3^2 + V_5^2 + V_7^2 + V_9^2 + V_{11}^2 + V_{13}^2 + V_{15}^2 + V_{17}^2 + V_{19}^2}}{V_1} \times 100\%$$

$$V_{THD} = \frac{\sqrt{2.488^2 + 2.786^2 + 1.307^2 + \dots + 0,296^2}}{217,4} \times 100\%$$

$$V_{THD} = 2,09\%$$

Dari hasil pengujian, besarnya THD tegangan berkisar antara 1,8% sampai 2,6%. Besarnya THD tegangan ini ternyata jauh lebih kecil daripada THD arusnya. Jadi lampu hemat energi merupakan sumber arus harmonik yang besar. Untuk lebih jelasnya kita dapat melihat perbandingan THD arus dan THD tegangan pada tabel berikut ini.

Beban	I_{THD} (%)	V_{THD} (%)
5 %	74,5	1,8
10 %	74,7	2,1
15 %	77,6	2
20 %	76	2,3
25 %	77,6	2,5
30 %	75,5	2,3

35 %	76,5	2,6
40 %	77,3	2,6
45 %	75,7	2,3
50 %	74,9	2,2
55 %	76,3	2,3
60 %	76,1	2,6
65 %	78	2
70 %	77,9	2,1
75 %	75,8	2,5
80 %	76,5	2
85 %	76,4	2,3
90 %	76,5	2,3

Tabel 4.1. Besarnya nilai I_{THD} dan V_{THD}

Dari tabel 4.3 kita bisa melihat nilai THD arus besarnya stabil yaitu berkisar antara 74,5% sampai 78%. Begitupula dengan nilai THD tegangan yang besarnya berkisar antara 1,8% sampai 2,6%. Hal ini karena beban yang digunakan seragam yaitu hanya lampu hemat energi saja.

4.1.1 Menentukan Persen Kesalahan Transformator Arus

Untuk menentukan persen kesalahan atau persen error (% error) dari transformator arus kita dapat menganalisisnya melalui rumus berikut ini.

$$\%e = \frac{(I_{sebenarnya} - I_{terukur})}{I_{sebenarnya}} \times 100\%$$

Setelah dilakukan penghitungan maka didapat hasil persen kesalahan seperti tabel 4.4 di bawah ini. Dimana I_P merupakan arus primer, I_{S_0} merupakan arus sekunder hasil perhitungan, I_{S_1} merupakan arus keluaran dari sisi sekunder transformator arus yang ditimbulkan oleh alat inject arus (sebagai beban non harmonik), sedangkan I_{S_2} merupakan arus keluaran dari sisi sekunder transformator arus yang ditimbulkan oleh beban harmonik. $Error_1$ merupakan persen error yang ditimbulkan oleh arus beban non harmonik, sedangkan $Error_2$ merupakan persen error yang ditimbulkan oleh arus beban harmonik.

Beban	IP (A)	IS ₀ (A)	IS ₁ (A)	IS ₂ (A)	Error ₁ (%)	Error ₂ (%)
5 %	1,6	0,267	0,26	0,11	2,622	58,801
10 %	3,1	0,517	0,51	0,24	1,354	53,578
15 %	4,6	0,767	0,76	0,40	0,913	47,849
20 %	6,1	1,017	1,01	0,52	0,688	48,869
25 %	7,6	1,267	1,26	0,83	0,552	34,491
30 %	9,0	1,500	1,5	1,01	0	32,667
35 %	10,5	1,750	1,75	1,27	0	27,429
40 %	12,0	2,000	2,01	1,45	0,5	27,5
45 %	13,6	2,267	2,26	1,65	0,309	27,217
50 %	15,1	2,517	2,51	1,75	0,278	30,473
55 %	16,5	2,750	2,75	1,99	0	27,636
60 %	17,7	2,950	2,95	2,07	0	29,831
65 %	19,6	3,267	3,26	2,42	0,214	25,926
70 %	21,1	3,517	3,51	2,58	0,199	26,642
75 %	22,3	3,717	3,71	2,60	0,188	30,051
80 %	24,1	4,017	4,04	2,91	0,57	27,558
85 %	25,4	4,233	4,23	3,04	0,071	28,183
90 %	26,9	4,483	4,48	3,24	0,067	27,727

Tabel 4.2. Persen Kesalahan Transformator Arus

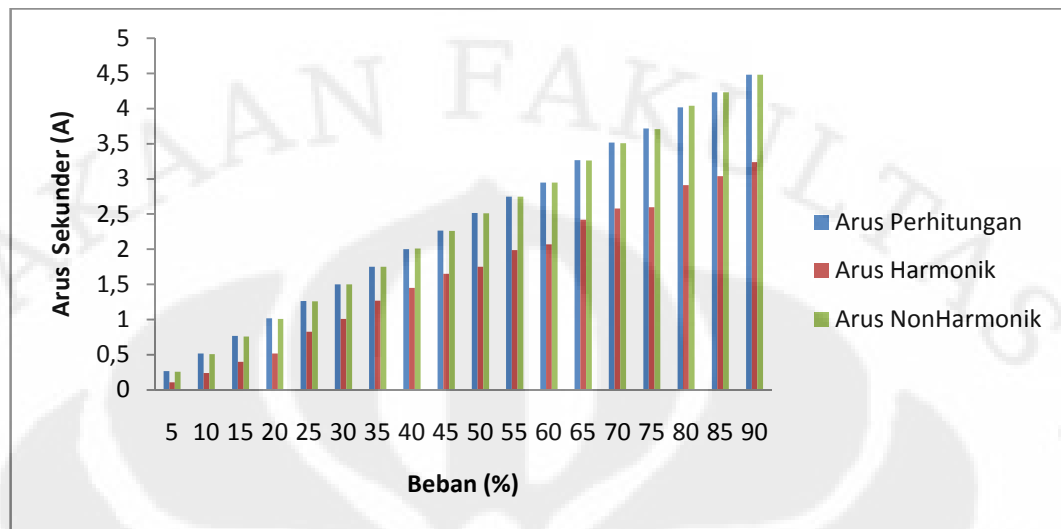
Berdasarkan hasil perhitungan persen error pada tabel 4.2 di atas dapat kita lihat bahwa kinerja trafo arus saat diberi arus inject hasilnya bagus, dimana rata-rata dari persen errornya dibawah 1 %. Hanya pada beban 5 % dan 10 % saja yang diatas 1 %. Adapun contoh perhitungan pada beban 90%, besarnya persen error yang terjadi adalah

$$\%e = \frac{(4,483 - 4,48)}{4,483} \times 100\%$$

$$\%e = 0,067\%$$

Dari tabel 4.2, kita dapat membandingkan hasil arus menurut perhitungan, arus sekunder transformator arus yang ditimbulkan oleh beban harmonik dan arus

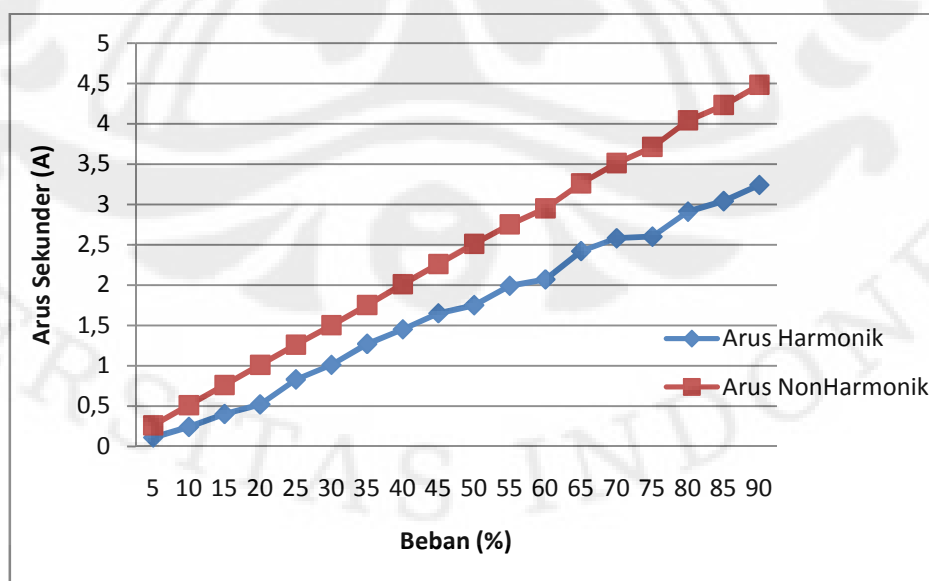
sekunder transformator arus yang ditimbulkan oleh beban non harmonik. Untuk memudahkannya dapat dilihat pada gambar grafik di bawah ini.



Gambar 4.3. Diagram Batang arus sekunder trafo arus

Dari gambar 4.3 di atas terlihat perbedaan yang mencolok antara arus arus sekunder yang ditimbulkan oleh beban harmonik dan arus sekunder yang ditimbulkan oleh beban non harmonik. Sedangkan untuk arus beban non harmonik hasilnya tidak jauh berbeda dari arus yang diharapkan.

Untuk dapat melihat lebih detail penulis mencoba menyajikan dalam diagram garis antara arus beban non harmonik dan arus akibat beban harmonik pada grafik di bawah ini.



Gambar 4.4. Diagram garis arus sekunder trafo arus

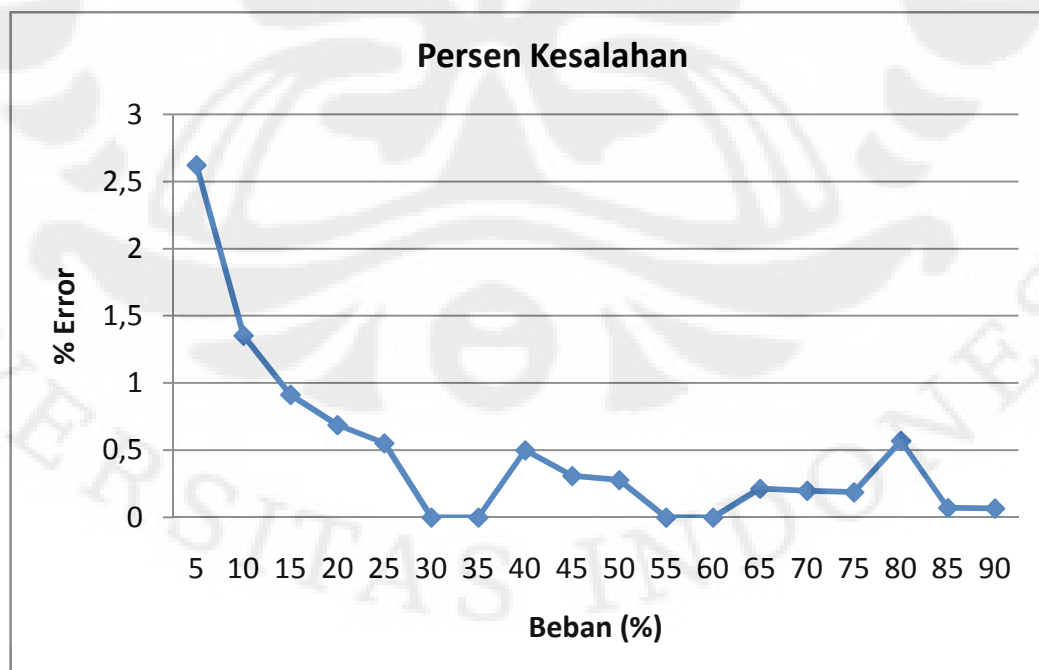
Dari grafik di atas dapat kita lihat arus keluaran dari sisi sekunder transformator arus yang ditimbulkan oleh beban non harmonik cenderung linier. Sedangkan arus keluaran dari sisi sekunder transformator arus yang ditimbulkan oleh beban harmonik memiliki nilai yang lebih kecil. Hal ini diakibatkan oleh besarnya distorsi arus akibat beban lampu hemat energi.

Menurut hasil perhitungan persen error yang diakibatkan oleh beban harmonik memiliki nilai yang sangat besar, yaitu di atas 25%, berarti harmonik yang ditimbulkan oleh lampu hemat energi membuat kinerja dari transformator arus menjadi menurun dan tidak presisi lagi. Adapun contoh perhitungan pada beban 80%, besarnya persen error yang terjadi adalah

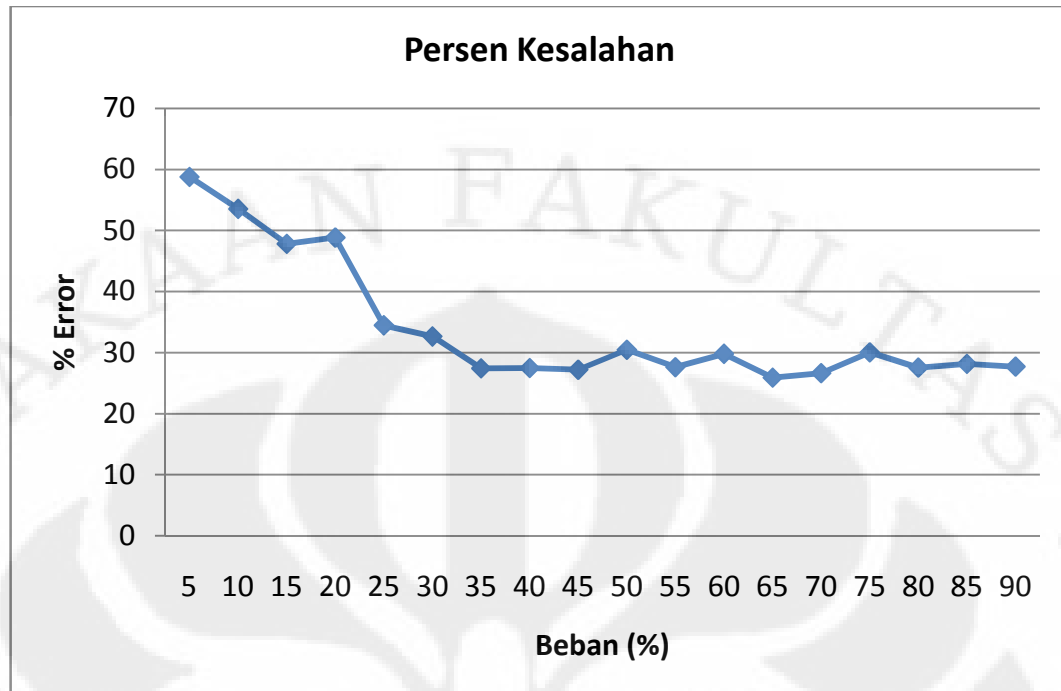
$$\%e = \frac{(4,017 - 2,91)}{4,017} \times 100\%$$

$$\%e = 27,558\%$$

Bila kita lihat pada tabel 4.2, pada beban 5% sampai 20% memiliki persen kesalahan yang besar. Namun Saat beban terus dinaikkan persen kesalahan cenderung semakin kecil dan stabil berkisar antara 26,642% sampai 30,473%. Biasanya trafo arus semakin menunjukkan kepresisiannya apabila beban yang di ukur berkisar antara 60% sampai 90% dari kapasitas trafo arus. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada gambar grafik berikut.



Gambar 4.5 Persen kesalahan akibat beban non harmonik

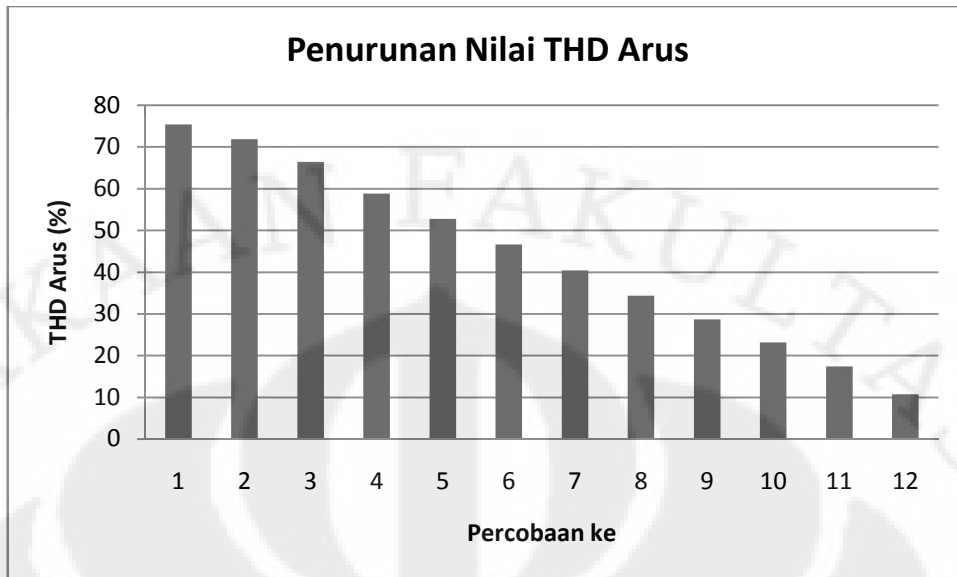


Gambar 4.6 Persen kesalahan akibat beban harmonik

Pada beban non harmonik persen kesalahan trafo arus cukup bagus yaitu di bawah 1%. Sedangkan pada beban harmonik terlihat persen kesalahan masih cukup besar yaitu sekitar 27%.

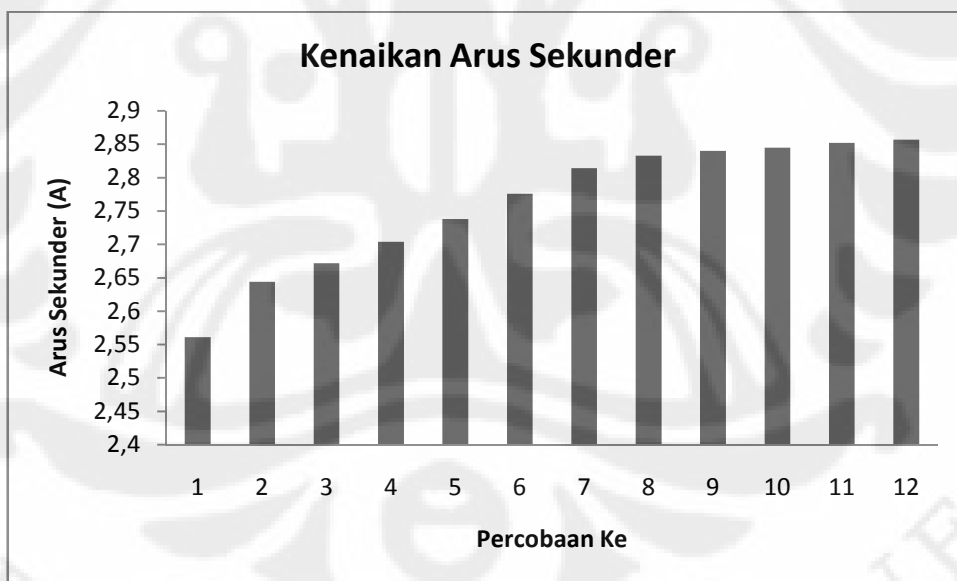
4.2 Analisa Pengujian Variasi Nilai THD

Dengan memvariasikan beban berupa lampu pijar dan lampu hemat energi ternyata dapat mengurangi nilai THD. Dari tabel 3.6 kita dapat melihat dengan bertambahnya lampu pijar nilai THD menjadi turun, baik THD arus maupun THD tegangan. Bila rata-rata THD arus lampu hemat energi sebesar 76,3 %, maka THD arus lampu pijar hanya sebesar 1,8 %. Grafik dari penurunan nilai dari THD arus dapat dilihat pada gambar di bawah ini.



Gambar 4.7. Penurunan nilai dari THD arus

Dengan turunya nilai THD arus, maka pembacaan arus di sekunder Trafo arus mengalami kenaikan walaupun tidak signifikan. Grafik dari kenaikan nilai dari arus sekunder trafo arus dapat dilihat pada gambar di bawah ini.



Gambar 4.8. Grafik kenaikan nilai arus sekunder

4.2.1 Menentukan Persen Kesalahan Transformator Arus

Sama halnya dengan perhitungan sebelumnya, untuk menentukan persen kesalahan atau persen error (% error) dari transformator arus kita dapat menganalisisnya melalui rumus berikut ini.

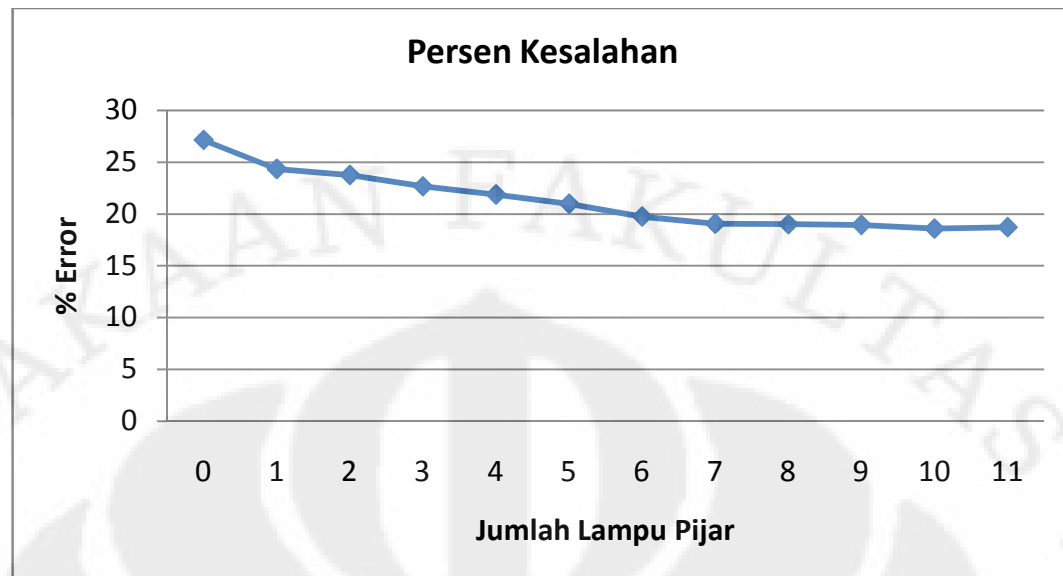
$$\%e = \frac{(I_{\text{sebenarnya}} - I_{\text{terukur}})}{I_{\text{sebenarnya}}} \times 100\%$$

Dari hasil perhitungan persen error didapat hasil seperti tabel di bawah ini.

Beban		IP (A)	IS (A) Perhitungan	IS (A)	Error (%)
LHE	LP				
105	0	21,09	3,515	2,561	27,141
100	1	20,97	3,495	2,644	24,349
95	2	21,03	3,505	2,672	23,766
88	3	20,98	3,497	2,704	22,669
81	4	21,03	3,505	2,738	21,883
73	5	21,08	3,513	2,776	20,987
65	6	21,04	3,507	2,814	19,753
58	7	21,0	3,5	2,833	19,057
49	8	21,04	3,507	2,840	19,011
40	9	21,06	3,51	2,845	18,946
30	10	21,02	3,503	2,852	18,592
19	11	21,09	3,515	2,857	18,720

Tabel 4.3. Persen Kesalahan Transformator Arus

Dari hasil perhitungan persen error di atas terlihat bahwa semakin banyak lampu pijar membuat persen error semakin kecil. Hal ini disebabkan karena nilai THD menjadi turun dengan adanya lampu pijar, sehingga distorsi yang ditimbulkan semakin kecil. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada gambar berikut ini. Terlihat error pengukuran semakin kecil dengan turunnya nilai THD walaupun tidak signifikan.



Gambar 4.9 Persen kesalahan pada variasi nilai THD

4.3 Perbandingan antara Ampermeter Analog dan Ampermeter Digital

Untuk melengkapi pengujian yang sudah ada, dilakukan pengujian untuk membandingkan tingkat kepresisian alat ukur, yaitu dengan menggunakan ampermeter analog dan ampermeter digital secara bergantian pada sisi primer dan sekunder. Pengaturan beban mulai dari beban 10%, 40% dan 70% saja, dengan nilai THD yang divariasikan. Berikut ini data hasil pengujian yang diperoleh,

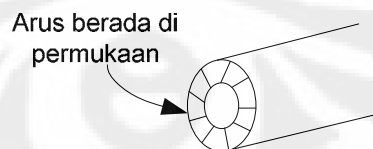
Beban (%)	THD ₁ (%)	Ampermeter Analog		%Error (%)	Ampermeter Digital		%Error (%)
		IP (A)	IS (A)		IP (A)	IS (A)	
10	80,5	3,0	0,24	52	3,02	0,255	49
	45,3	3,0	0,24	52	3,05	0,264	47.2
	4,8	3,0	0,25	50	3,03	0,272	45.6
40	78,9	12,1	1,60	20	12,03	1,634	18.3
	46,3	12,0	1,61	19.5	12,02	1,644	17.8
	8,7	12,1	1,62	19	12,05	1,672	16.4
70	77,7	21,0	2,78	20.57	21,02	2,795	20.14
	38,5	21,1	2,80	20	21,02	2,812	19.66
	10,1	21,1	2,82	19.43	21,04	2,836	18.97

Dari tabel diatas terlihat bahwa antara ampermeter analog dan ampermeter digital memiliki perbedaan nilai. Namun demikian keduanya masih memiliki tingkat persen kesalahan yang cukup besar. Pada saat menggunakan ampermeter analog persen kesalahan masih berikisar antara 19,43 % sampai 20%. Sedangkan pada saat menggunakan ampermeter digital persen kesalahan berikisar antara 16,4% sampai 20,14 %. Persen kesalahan pada trafo arus ini diakibatkan oleh efek kulit penghantar (*Skin effect*). Efek kulit penghantar ini disebabkan oleh besarnya frekuensi yang dihasilkan oleh harmonisa, yang mempengaruhi besarnya nilai penghantar (R) menjadi lebih besar, sehingga akan menurunkan nilai arus.

4.4 Analisis Pengaruh Harmonik pada Transformator Arus

Dari hasil pengujian dengan menggunakan beban harmonik menunjukkan bahwa arus sekunder dari trafo arus memiliki tingkat kesalahan yang cukup tinggi, yaitu arus sekunder menjadi lebih kecil dari hasil perhitungan. Pengaruh harmonisa terhadap tahanan dapat dijelaskan sebagai berikut, harmonisa memiliki frekuensi kelipatan dan frekuensi fundamental. Frekuensi harmonisa ini mempengaruhi besarnya tahanan arus bolak-balik (R_{AC}), akibat efek kulit penghantar (*Skin effect*).

Hal yang mempengaruhi kenaikan dari *skin effect* ini adalah kenaikan frekuensi dan diameter penghantar yang digunakan dalam sistem distribusi arus listrik. *Skin effect* mengakibatkan distribusi arus dipermukaan lebih besar daripada yang ada di dalam penghantar, Hal ini mengurangi area efektif dari konduktor dan meningkatkan tahanannya (R).



Karena luas penampang (A) menjadi lebih kecil, maka tahanan (R) akan menjadi besar sehingga Arus (I) menjadi lebih kecil. Pendekatan efek tersebut di atas menimbulkan aliran arus dengan distribusi yang tidak sama melalui konduktor.

Berikut ini merupakan salah satu contoh perhitungan dengan menggunakan persamaan 2.15 sampai 2.19 yaitu akibat dari efek kulit (*skin effect*). Sebagai contoh adalah perhitungan pada beban 70%. Data-data yang didapat dalam pengujian adalah :

- Sebagai contoh frekuensi diambil saat orde 1, $f = 50$ Hz.
- Permeabilitas konduktor (μ) = 1 untuk jenis logam.
- Tahanan trafo arus (R_{DC}) = 0,2 Ω
- Perbandingan antara diameter konduktor dan jarak antar konduktor (σ) adalah 2 mm / 15 mm atau sama dengan 0,133.
- Arus Harmonik 21,09 A

Berdasarkan persamaan 2.15 diperoleh parameter x ,^[5]

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

$$x = 0,027678 \sqrt{\frac{50 \cdot 1}{0,2}}$$

$$x = 0,438$$

Metode pendekatan kurva dilakukan untuk mendapatkan perhitungan k_{SE} sesuai dengan persamaan 2.16 yaitu dengan $x = 0.438$ diperoleh,

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

$$k_{SE} = 0,00022$$

Frekuensi harmonik ini juga mempengaruhi besarnya tahanan arus bolak balik (R_{ac}) sebagai akibat dari efek kulit (*skin effect*), sehingga di dapat nilai k_c diperoleh dari persamaan 2.14 :

$$K_c = 1 + k_{SE} + k_{PE}$$

$$K_c = 1 + 0,00022 + 0 = 1,00022$$

Maka diperoleh tahanan penghantar sesuai dengan persamaan 2.19

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

$$R_h = 0,2 (1,00022 + 1) = 0,400044 \Omega$$

Pada keadaan awal atau normal besarnya daya (P) adalah

$$P = I^2 R$$

$$P = 21,09^2 \times 0,2 = 88,95762 \text{ watt}$$

Setelah adanya efek kulit (*skin effect*) maka nilai R berubah, sehingga mengakibatkan arus menjadi turun,

$$I = \sqrt{\frac{P}{R}}$$

$$I = \sqrt{\frac{88,95762}{0,400044}}$$

$$I = 14,912 \text{ A}$$

Karena nilai I sekarang hanya 14,912 A maka arus sekunder dari trafo arus kira-kira sebesar,

$$I_s = \frac{5}{30} \times 14,912$$

$$I_s = 2,485 \text{ A}$$

Jadi arus sekunder akibat adanya harmonik menjadi lebih kecil dari arus yang seharusnya.

BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan pengujian yang sudah dilakukan dapat diambil beberapa kesimpulan, diantaranya :

1. Besarnya distorsi arus yang disebabkan oleh beban harmonik menyebabkan pembacaan trafo arus menjadi tidak akurat lagi (menjadi lebih kecil) akibat adanya efek kulit (Skin effect).
2. Persen kesalahan pada transformator arus akibat harmonisa berkisar antara 26,642% sampai 30,473%.
3. Pada beban 70%, saat THD 75,4% persen error yang terjadi sebesar 27,141%. Saat THD 10,7% persen error yang terjadi sebesar 18,720%.
4. Semakin besar nilai THD arus, maka semakin besar persen kesalahan pengukuran pada trafo arus, sebaliknya semakin kecil nilai THD arus, maka semakin kecil nilai persen kesalahan trafo arus.

5.2 Saran

Dalam pembuatan skripsi ini ada beberapa saran yang dapat dilakukan untuk pengembangan dan kesempurnaan skripsi ini antara lain :

1. Pengambilan data hendaknya menggunakan alat yang lebih presisi lagi.
2. Beban yang digunakan hendaknya lebih divariasikan lagi.

DAFTAR ACUAN

- [1] Hasyim Asy'ari, Jatmiko. September 2002. "Pengaruh Harmonik pada Transformator Distribusi dan Penanganannya". Jurnal Teknik Elektro Universitas Muhammadiyah Surakarta.
- [2] Dugan, Roger C., McGranaghan, Mark f., Santoso, Surya, Beaty, H. Wayne. "Electrical Power System Quality Second Edition". 2002. McGraw-Hill.
- [3] Fuchs, Ewald F., dan Masoum, Mohammad A.S., "Power Quality in Power Systems and Electrical Machines". March 2008, Perth, Australia.
- [4] "Harmonik Pada Transformator". Di akses dari <http://listrik-listrik.blogspot.com/2007/03/harmonik-pada-transformator-harmonic-in.html> pada tanggal 28 Februari 2010.
- [5] koswara, Indra Firmansyah. 2009. "Analisis Pengaruh Harmonik Pada Transformator Daya di Industri Semen". Depok : Skripsi Departemen Teknik Elektro FT UI.
- [6] Saleh Anzorulah, Rahmat. 2006. "Pengaruh Jenis dan Bobot Polutan Terhadap Karakteristik Harmonik Arus Bocor Isolator Epoxy Resin". Depok : Skripsi Departemen Teknik Elektro FT UI.
- [7] Chairul Gagarin Irianto, Maula Sukmawidjaja & Aditya Wisnu. Februari 2008. "Mengurangi Harmonisa pada Transformator 3 Fasa". Jurnal Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknologi Industri Universitas Trisakti.
- [8] "Transformator Ukur ". Di akses dari <http://dunia-listrik.blogspot.com/2009/03/transformator-ukur.html> pada tanggal 11 Februari 2010
- [9] "Current Transformer". Di akses dari <http://davidgultom.wordpress.com/2008/06/19/current-transformer/> pada tanggal 21 Februari 2010
- [10] Di akses dari http://202.91.15.14/upload/files/8357_Pertemuan_ke_4.ppt pada tanggal 16 Februari 2010
- [11] Liem Ek Bien, Sudarno. Agustus 2004. "Pengujian Harmonisa dan Upaya Pengurangan Gangguan Harmonisa Pada Lampu Hemat Energi". Jurnal Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknologi Industri Universitas Trisakti.
- [12] Sudiarto, Budi. 2010. "Error dan Hal Penting Dalam Pengukuran Listrik". Depok : Slide Mata Kuliah Pengukuran Besaran Listrik.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Dugan, Roger C., McGranaghan, Mark f., Santoso, Surya, and Beaty, H. Wayne. 2002. "Electrical Power System Quality Second Edition". McGraw-Hill.
- [2] Fuchs, Ewald F., dan Masoum, Mohammad A.S. March 2008. "Power Quality in Power Systems and Electrical Machines". Perth, Australia.
- [3] Kusko, Alexander and Thompson, Marc T. 2007. "Power Quality in Electrical Systems". McGraw-Hill.
- [4] De La Rosa, Francisco C. 2006. "Harmonic and Power Systems". Taylor & Francis Group, LLC.



HASIL PERCOBAAN

VARIASI BEBAN HARMONIK

➤ **Beban 5 % = 30 Lampu**

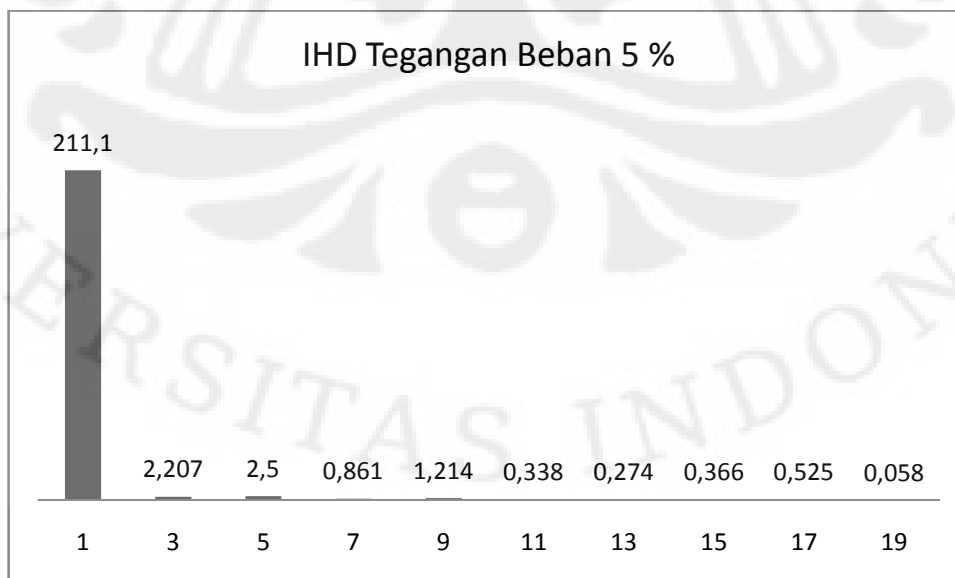
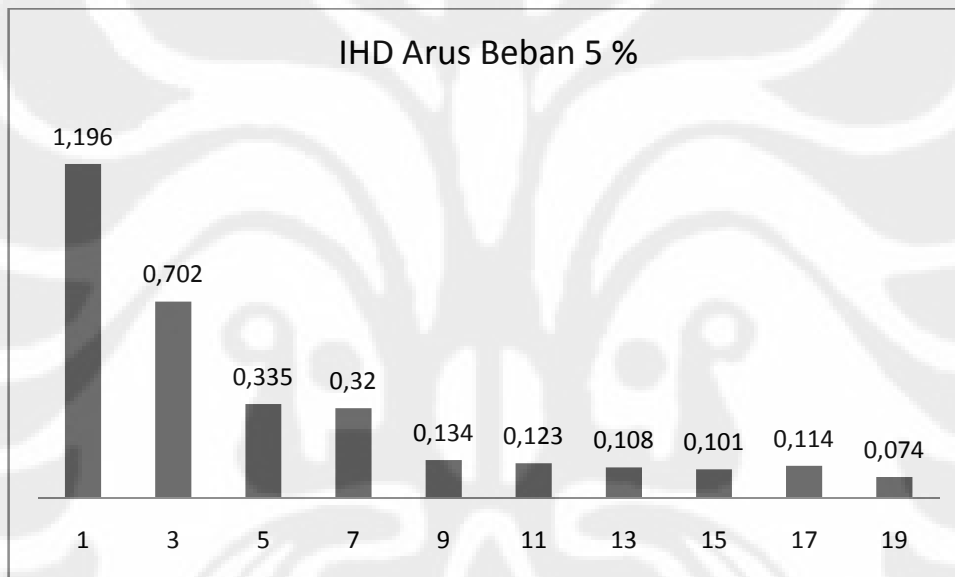
$I_{RMS} = 1,517 \text{ A}$

$V_{RMS} = 211,3 \text{ V}$

$I_{THD} = 74,5\%$

$V_{THD} = 1,8\%$

H	F (Hz)	I (A)	IHD _I (%)	V (V)	IHD _V (%)
1	50	1,196	100	211,1	100
3	150	0,702	58,7	2,207	1,0
5	250	0,335	28,0	2,500	1,1
7	350	0,320	26,8	0,861	0,4
9	450	0,134	11,2	1,214	0,5
11	550	0,123	10,2	0,338	0,1
13	650	0,108	9,0	0,274	0,1
15	750	0,101	8,4	0,366	0,1
17	850	0,114	9,5	0,525	0,2
19	950	0,074	6,2	0,058	0



➤ **Beban 10 % = 60 Lampu**

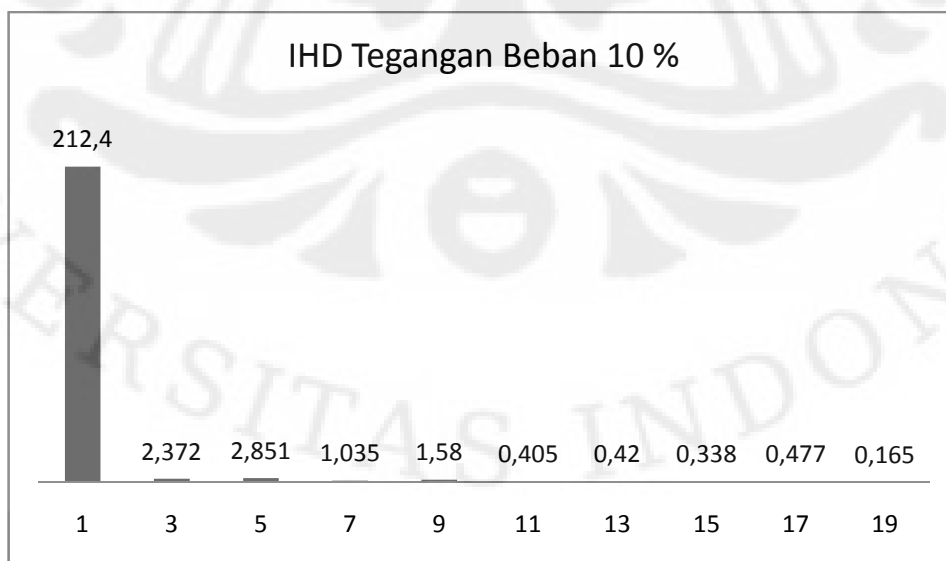
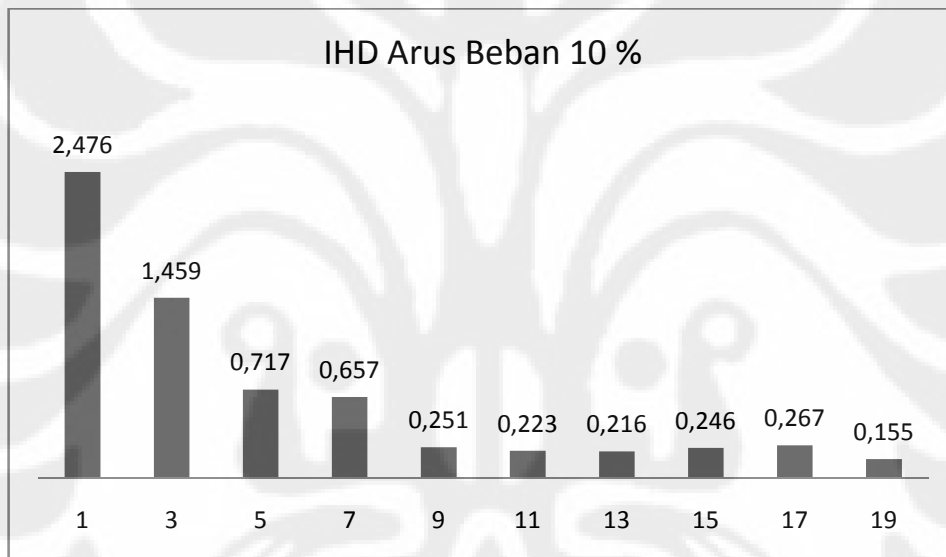
$I_{RMS} = 3,087 \text{ A}$

$V_{RMS} = 212,5 \text{ V}$

$I_{THD} = 74,7\%$

$V_{THD} = 2,1 \%$

H	F (Hz)	I (A)	IHD _I (%)	V (V)	IHD _V (%)
1	50	2,476	100	212,4	100
3	150	1,459	58,9	2,372	1,1
5	250	0,717	28,9	2,851	1,3
7	350	0,657	26,5	1,035	0,4
9	450	0,251	10,1	1,580	0,7
11	550	0,223	9,0	0,405	0,1
13	650	0,216	8,7	0,420	0,1
15	750	0,246	9,9	0,338	0,1
17	850	0,267	10,8	0,477	0,2
19	950	0,155	6,2	0,165	0



➤ **Beban 15 % = 90 Lampu**

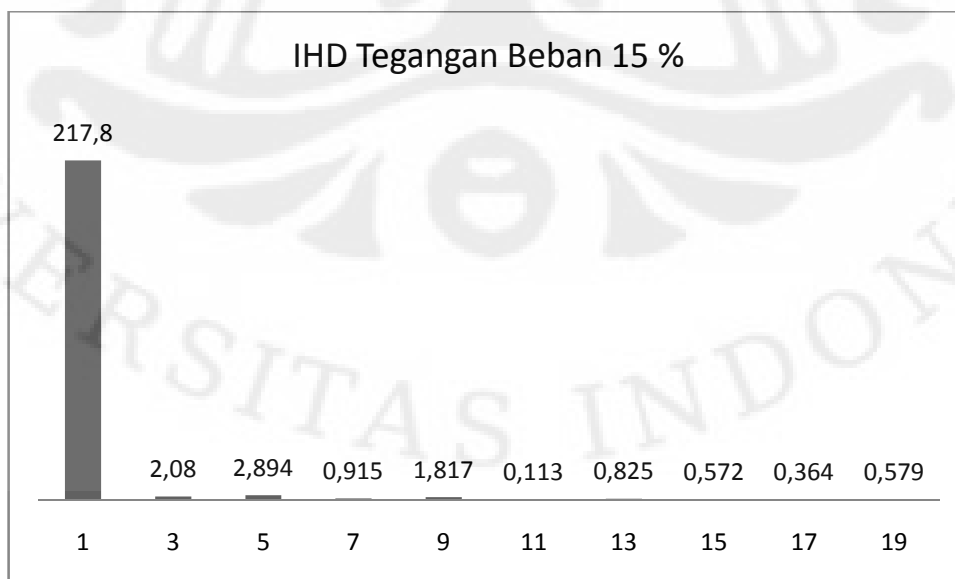
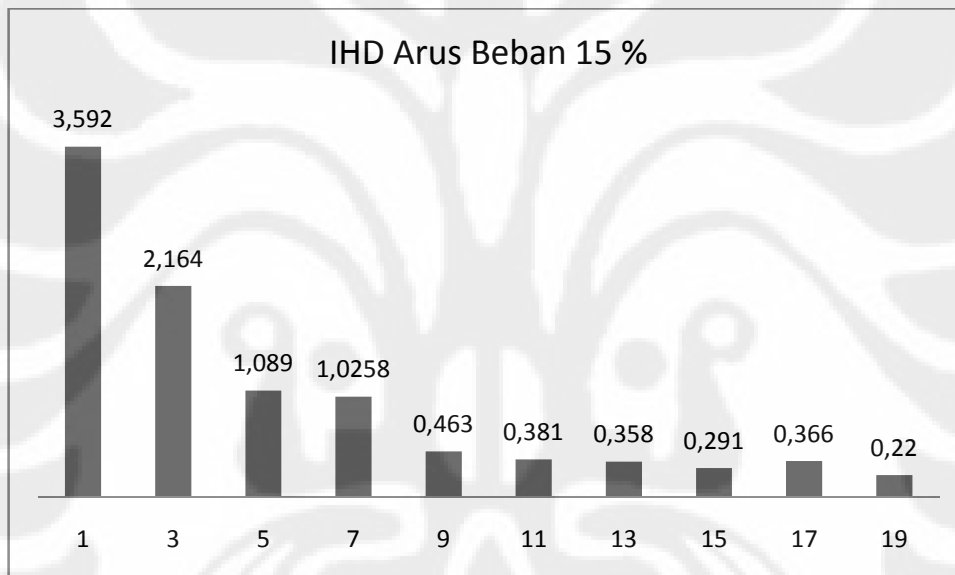
$I_{RMS} = 4,556 \text{ A}$

$V_{RMS} = 217,9 \text{ V}$

$I_{THD} = 77,6 \%$

$V_{THD} = 2 \%$

H	F (Hz)	I (A)	IHD _I (%)	V (V)	IHD _V (%)
1	50	3,592	100	217,8	100
3	150	2,164	60,2	2,080	0,9
5	250	1,089	30,3	2,894	1,3
7	350	1,0258	28,5	0,915	0,4
9	450	0,463	12,8	1,817	0,8
11	550	0,381	10,6	0,113	0
13	650	0,358	0,358	0,825	0,3
15	750	0,291	0,291	0,572	0,2
17	850	0,366	0,366	0,364	0,1
19	950	0,220	0,220	0,579	0,2



➤ **Beban 20 % = 120 Lampu**

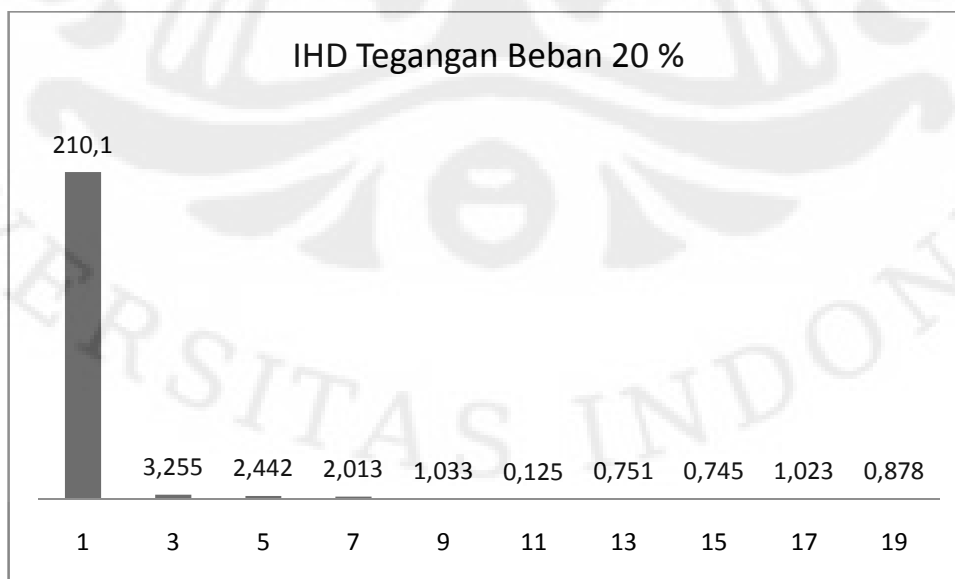
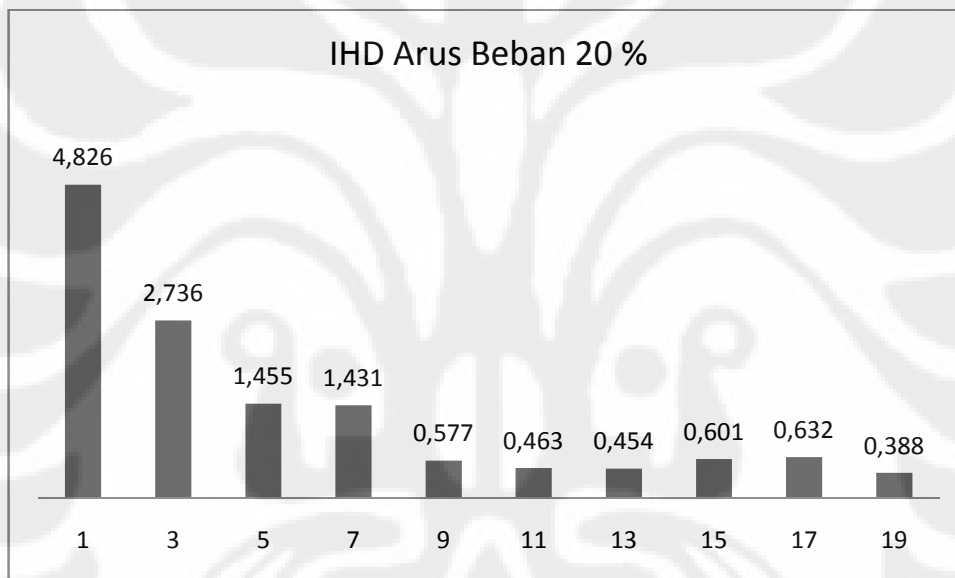
$I_{RMS} = 6,075 \text{ A}$

$V_{RMS} = 210,2 \text{ V}$

$I_{THD} = 76 \%$

$V_{THD} = 2,3 \%$

H	F (Hz)	I (A)	IHD _I (%)	V (V)	IHD _V (%)
1	50	4,826	100	210,1	100
3	150	2,736	56,7	3,255	1,5
5	250	1,455	30,1	2,442	1,1
7	350	1,431	29,6	2,013	0,9
9	450	0,577	11,9	1,033	0,8
11	550	0,463	9,5	0,125	0
13	650	0,454	9,4	0,751	0,3
15	750	0,601	12,4	0,745	0,3
17	850	0,632	13,1	1,023	0,4
19	950	0,388	6,0	0,878	0,4



➤ **Beban 25 % = 150 Lampu**

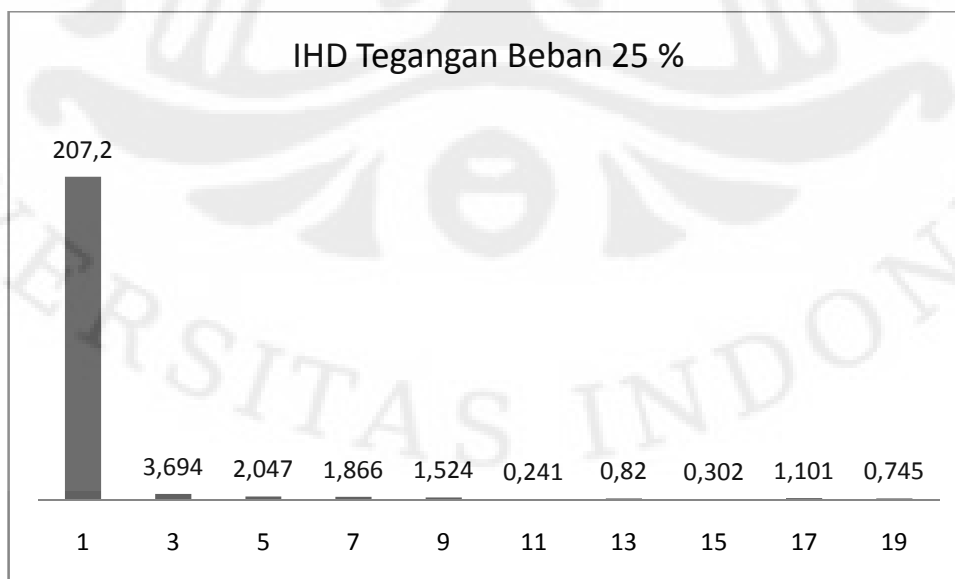
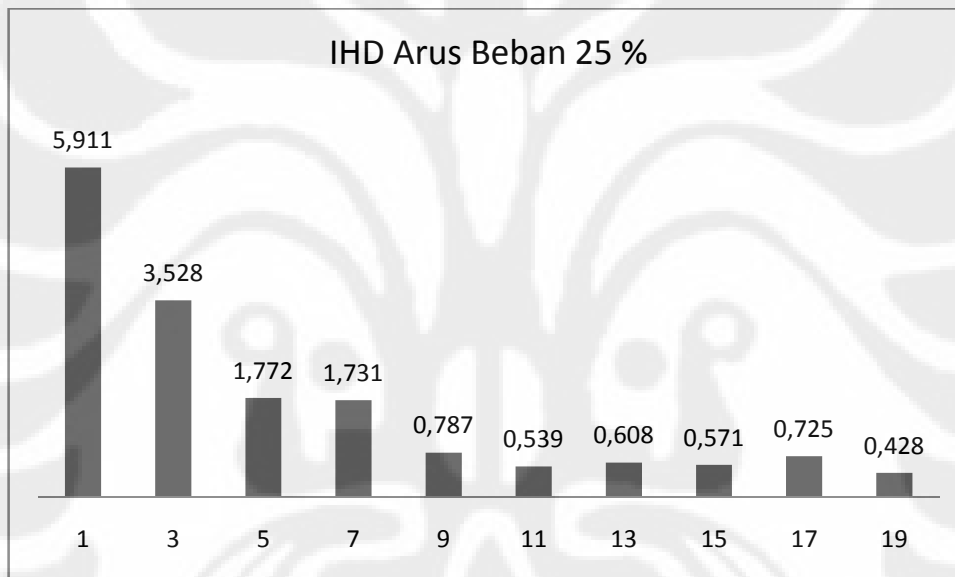
$I_{RMS} = 7,512 \text{ A}$

$V_{RMS} = 207,3 \text{ V}$

$I_{THD} = 77,6\%$

$V_{THD} = 2,5 \%$

H	F (Hz)	I (A)	IHD _I (%)	V (V)	IHD _V (%)
1	50	5,911	100	207,2	100
3	150	3,528	59,6	3,694	1,7
5	250	1,772	29,9	2,047	0,9
7	350	1,731	29,2	1,866	0,9
9	450	0,787	13,3	1,524	0,7
11	550	0,539	9,1	0,241	0,1
13	650	0,608	10,2	0,820	0,3
15	750	0,571	9,6	0,302	0,1
17	850	0,725	12,2	1,101	0,5
19	950	0,428	7,2	0,745	0,3



➤ **Beban 30 % = 180 Lampu**

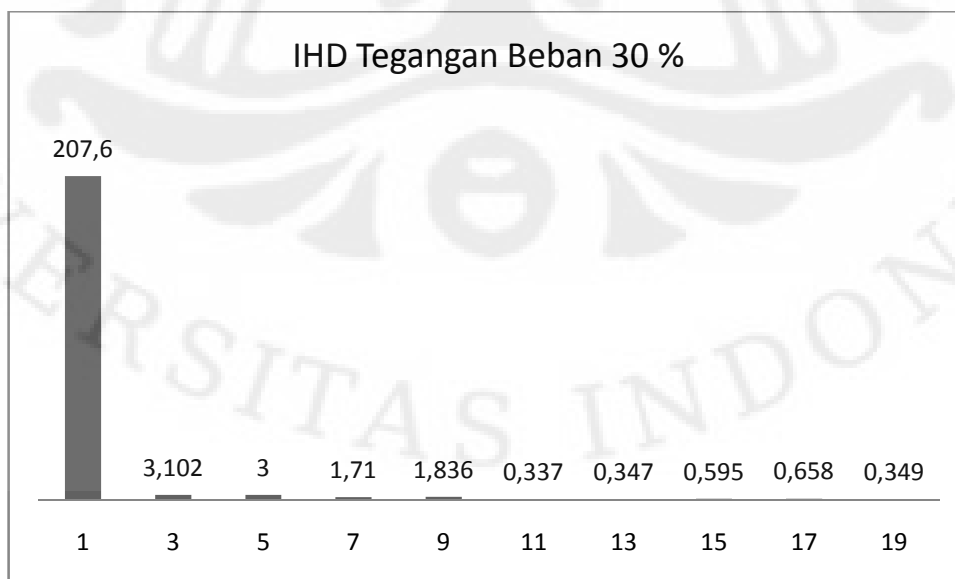
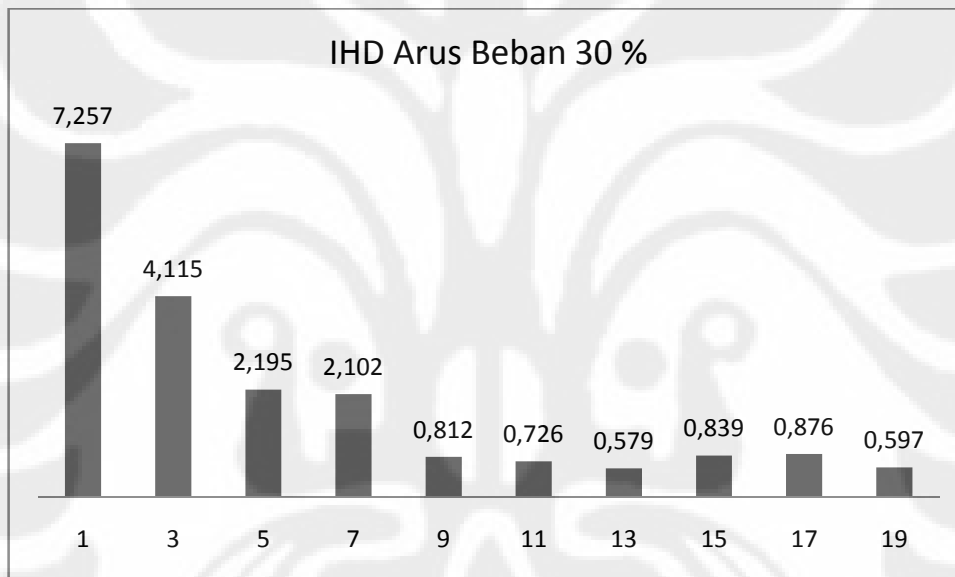
$I_{RMS} = 9,074 \text{ A}$

$V_{RMS} = 207,7 \text{ V}$

$I_{THD} = 75,5 \%$

$V_{THD} = 2,3 \%$

H	F (Hz)	I (A)	IHD _I (%)	V (V)	IHD _V (%)
1	50	7,257	100	207,6	100
3	150	4,115	56,7	3,102	1,4
5	250	2,195	30,2	3,000	1,4
7	350	2,102	28,9	1,710	0,8
9	450	0,812	11,1	1,836	0,8
11	550	0,726	10,0	0,337	0,1
13	650	0,579	7,9	0,347	0,1
15	750	0,839	11,5	0,595	0,2
17	850	0,876	12,0	0,658	0,3
19	950	0,597	8,2	0,349	0,1



➤ **Beban 35 % = 210 Lampu (105 lampu x 2 Lilitan)**

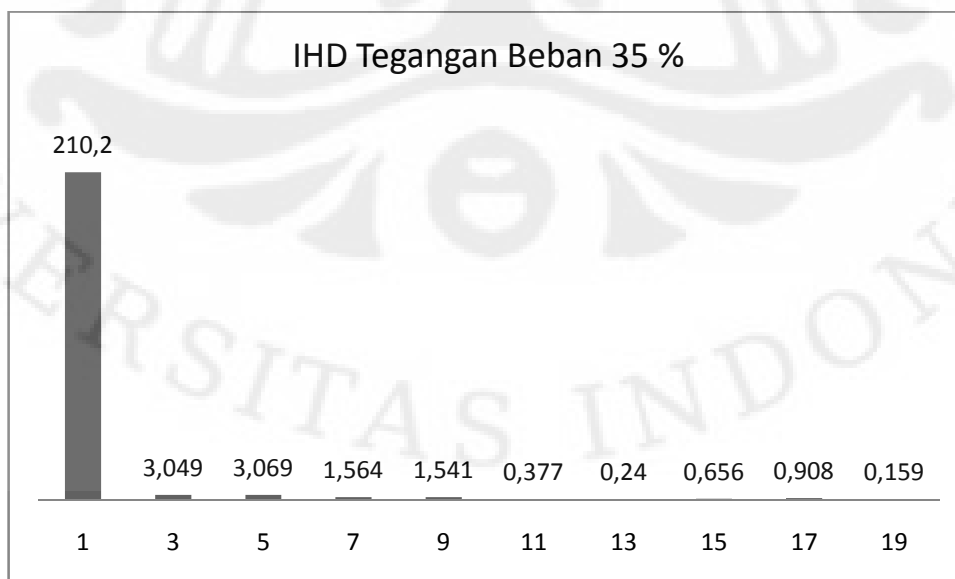
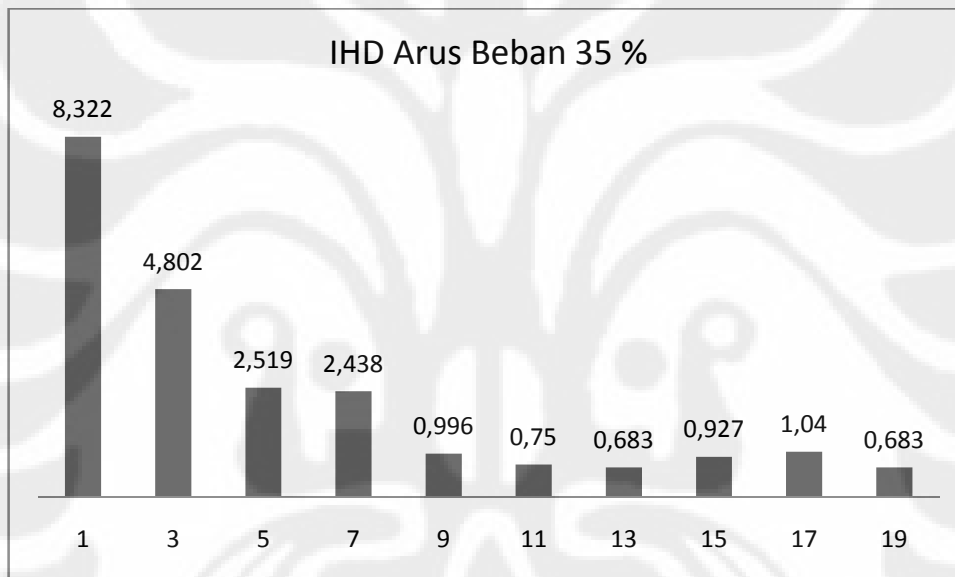
$I_{RMS} = 10,49 \text{ A}$

$V_{RMS} = 210,3 \text{ V}$

$I_{THD} = 76,5 \%$

$V_{THD} = 2,6 \%$

H	F (Hz)	I (A)	IHD _I (%)	V (V)	IHD _V (%)
1	50	8,322	100	210,2	100
3	150	4,802	57,7	3,049	1,4
5	250	2,519	30,5	3,069	1,4
7	350	2,438	29,2	1,564	0,7
9	450	0,996	11,9	1,541	0,7
11	550	0,750	9,0	0,377	0,1
13	650	0,683	8,2	0,240	0,1
15	750	0,927	11,1	0,656	0,3
17	850	1,040	12,5	0,908	0,4
19	950	0,683	8,2	0,159	0



➤ **Beban 40 % = 240 Lampu**

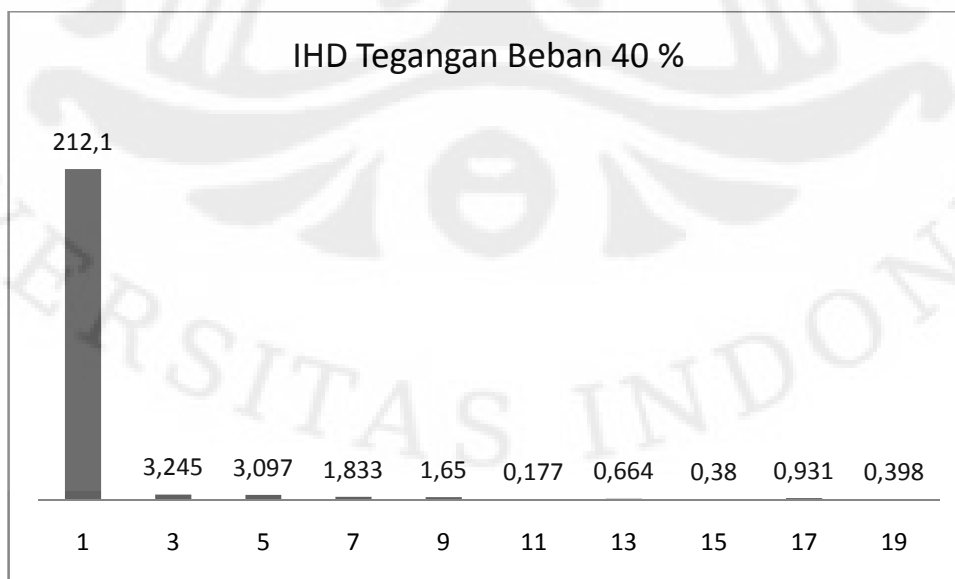
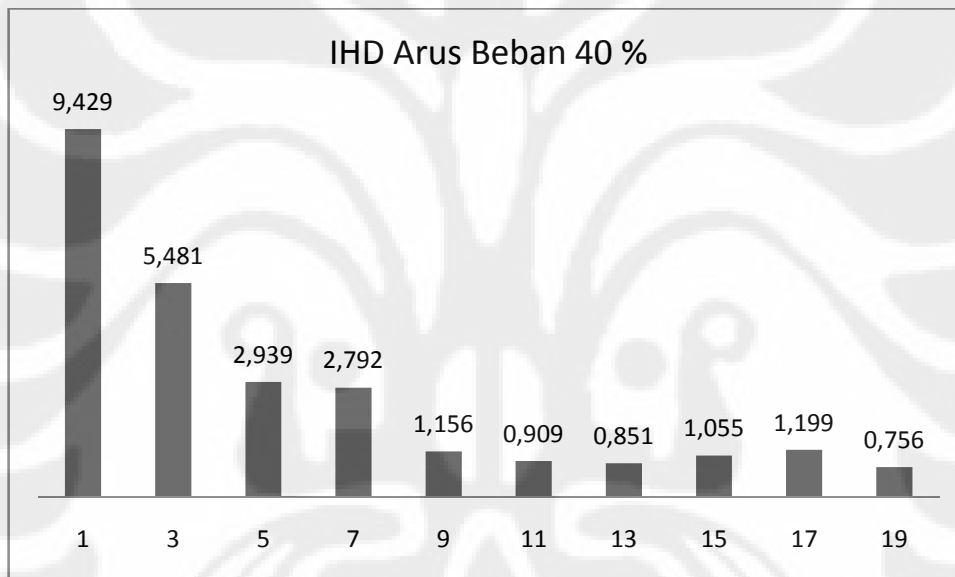
$I_{RMS} = 11,94 \text{ A}$

$V_{RMS} = 212,2 \text{ V}$

$I_{THD} = 77,3 \%$

$V_{THD} = 2,6 \%$

H	F (Hz)	I (A)	IHD _I (%)	V (V)	IHD _V (%)
1	50	9,429	100	212,1	100
3	150	5,481	58,1	3,245	1,5
5	250	2,939	31,1	3,097	1,5
7	350	2,792	29,6	1,833	0,8
9	450	1,156	12,2	1,650	0,7
11	550	0,909	9,6	0,177	0
13	650	0,851	9,0	0,664	0,3
15	750	1,055	11,1	0,380	0,1
17	850	1,199	12,7	0,931	0,4
19	950	0,756	8,0	0,398	0,1



➤ **Beban 45 % = 270 Lampu**

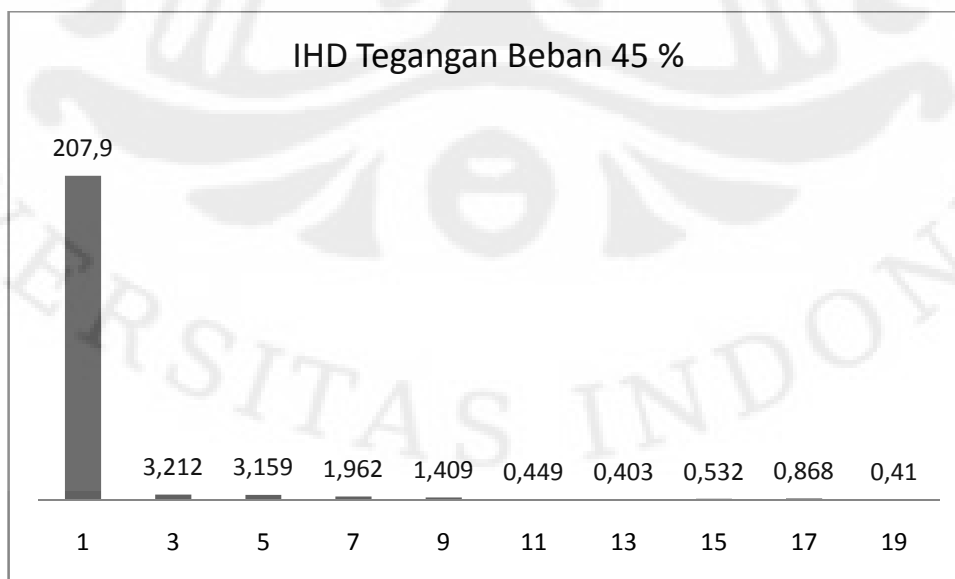
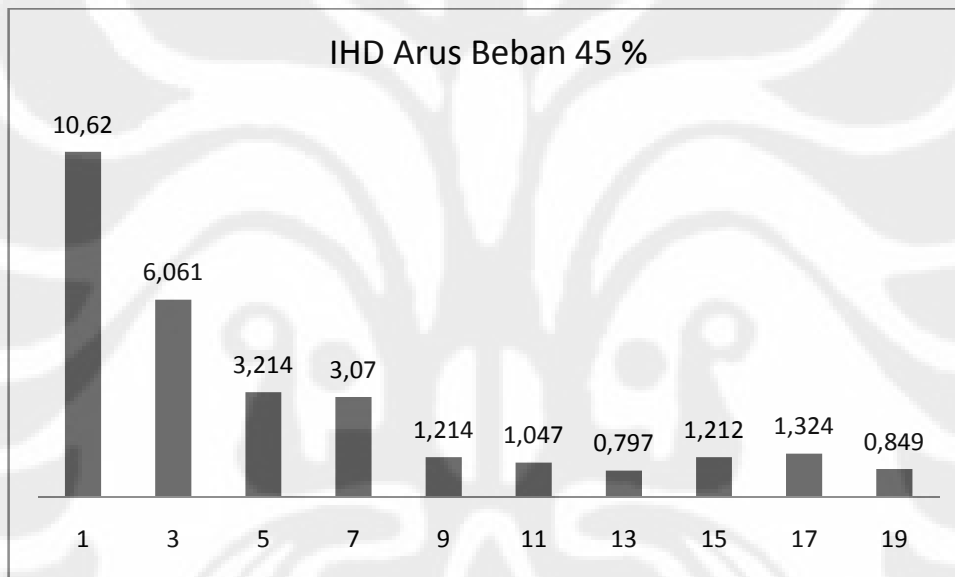
$I_{RMS} = 13,29 \text{ A}$

$V_{RMS} = 208 \text{ V}$

$I_{THD} = 75,7\%$

$V_{THD} = 2,3 \%$

H	F (Hz)	I (A)	IHD _I (%)	V (V)	IHD _V (%)
1	50	10,62	100	207,9	100
3	150	6,061	57,0	3,212	1,5
5	250	3,214	30,2	3,159	1,5
7	350	3,070	28,9	1,962	0,9
9	450	1,214	11,4	1,409	0,6
11	550	1,047	9,8	0,449	0,2
13	650	0,797	7,5	0,403	0,1
15	750	1,212	11,4	0,532	0,2
17	850	1,324	12,4	0,868	0,4
19	950	0,849	7,9	0,410	0,1



➤ **Beban 50 % = 300 Lampu**

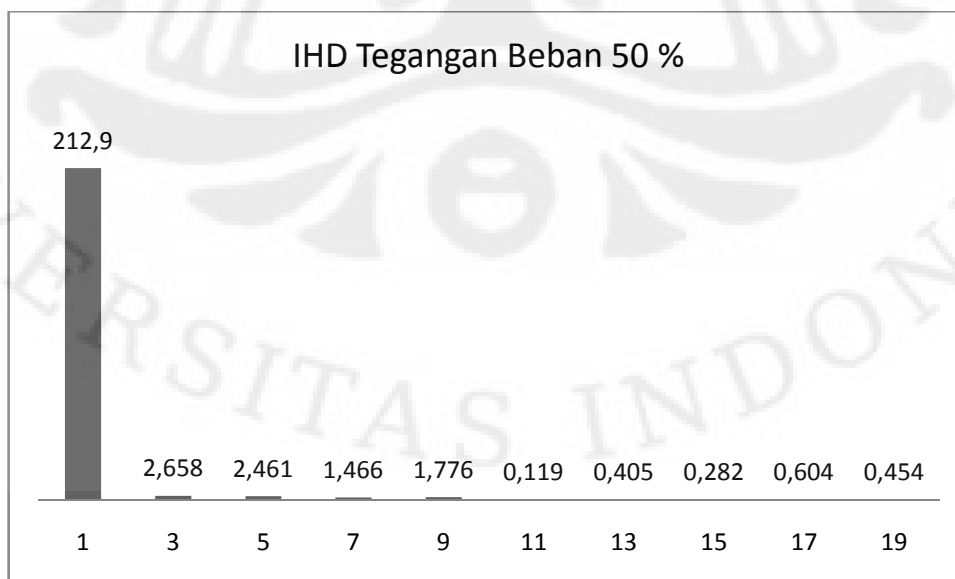
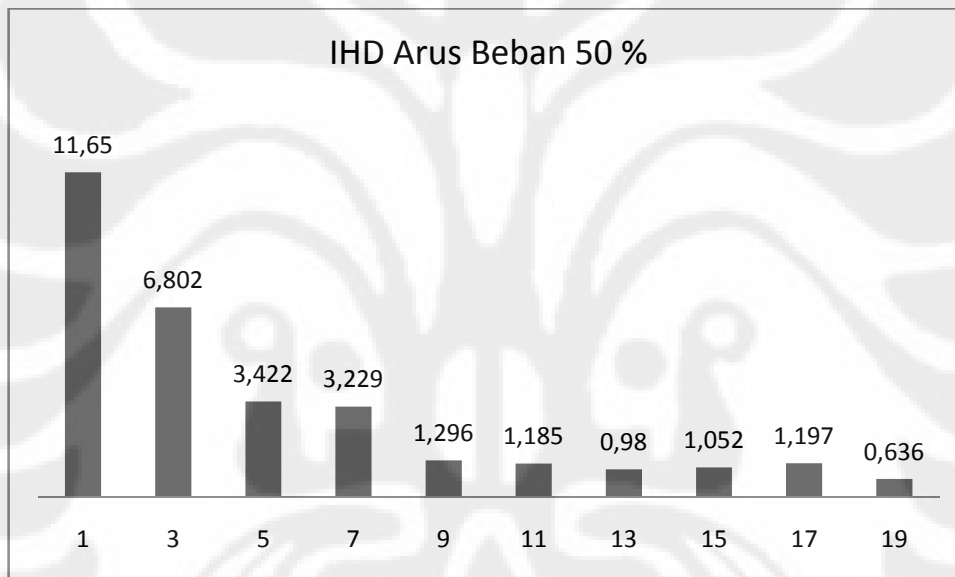
$I_{RMS} = 14,57 \text{ A}$

$V_{RMS} = 213 \text{ V}$

$I_{THD} = 74,9 \%$

$V_{THD} = 2,2 \%$

H	F (Hz)	I (A)	IHD _I (%)	V (V)	IHD _V (%)
1	50	11,65	100	212,9	100
3	150	6,802	58,3	2,658	1,2
5	250	3,422	29,3	2,461	1,1
7	350	3,229	27,7	1,466	0,6
9	450	1,296	11,1	1,776	0,8
11	550	1,185	10,1	0,119	0
13	650	0,980	8,4	0,405	0,1
15	750	1,052	9,0	0,282	0,1
17	850	1,197	10,2	0,604	0,2
19	950	0,636	5,4	0,454	0,2



➤ **Beban 55 % = 330 Lampu**

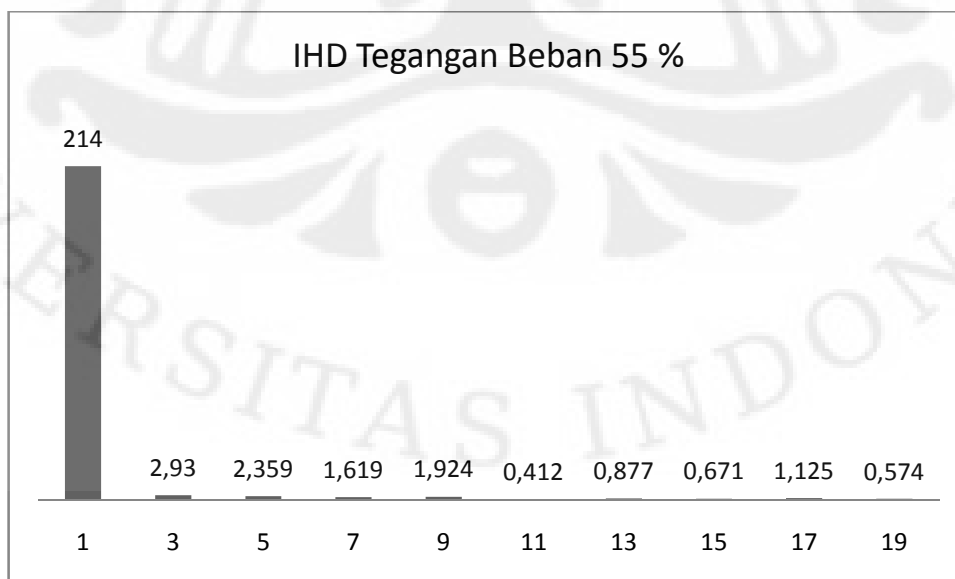
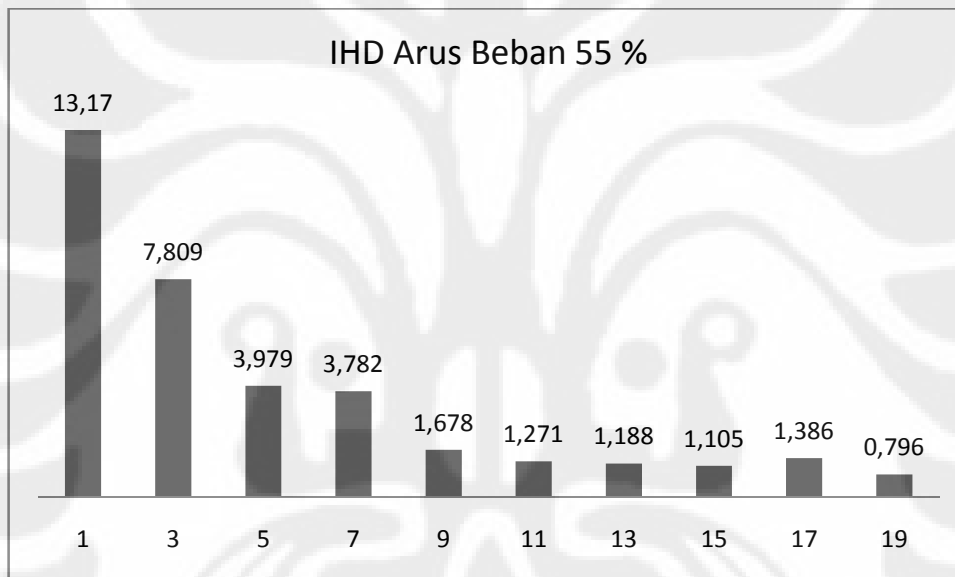
$I_{RMS} = 16,57 \text{ A}$

$V_{RMS} = 214,1 \text{ V}$

$I_{THD} = 76,3 \%$

$V_{THD} = 2,3\%$

H	F (Hz)	I (A)	IHD _I (%)	V (V)	IHD _V (%)
1	50	13,17	100	214	100
3	150	7,809	59,2	2,930	1,3
5	250	3,979	30,2	2,359	1,1
7	350	3,782	28,7	1,619	0,7
9	450	1,678	12,7	1,924	0,8
11	550	1,271	9,6	0,412	0,1
13	650	1,188	9,0	0,877	0,4
15	750	1,105	8,3	0,671	0,3
17	850	1,386	10,5	1,125	0,5
19	950	0,796	6,0	0,574	0,2



➤ **Beban 60 % = 360 Lampu**

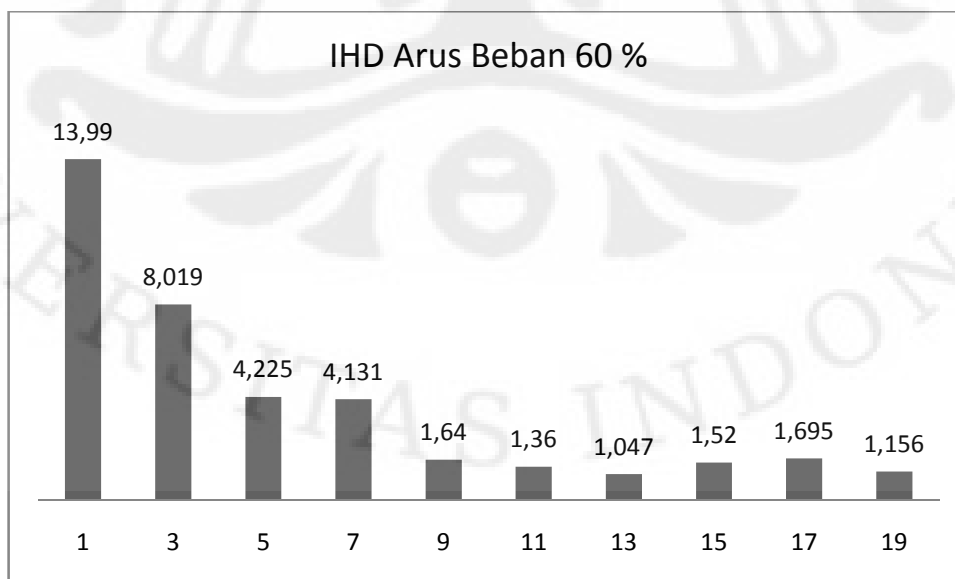
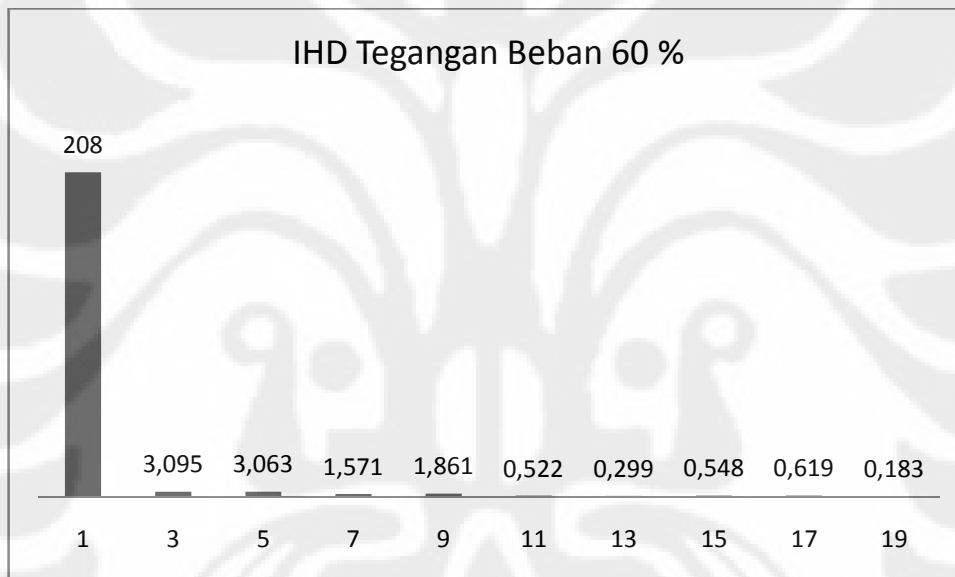
$I_{RMS} = 17,6 \text{ A}$

$V_{RMS} = 208,1 \text{ V}$

$I_{THD} = 76,1 \%$

$V_{THD} = 2,6 \%$

H	F (Hz)	I (A)	IHD _I (%)	V (V)	IHD _V (%)
1	50	13,99	100	208,0	100
3	150	8,019	57,3	3,095	1,4
5	250	4,225	30,2	3,063	1,4
7	350	4,131	29,5	1,571	0,7
9	450	1,640	11,7	1,861	0,8
11	550	1,360	3,7	0,522	0,2
13	650	1,047	7,4	0,299	0,1
15	750	1,520	10,8	0,548	0,2
17	850	1,695	12,1	0,619	0,2
19	950	1,156	8,2	0,183	0



➤ **Beban 65 % = 390 Lampu**

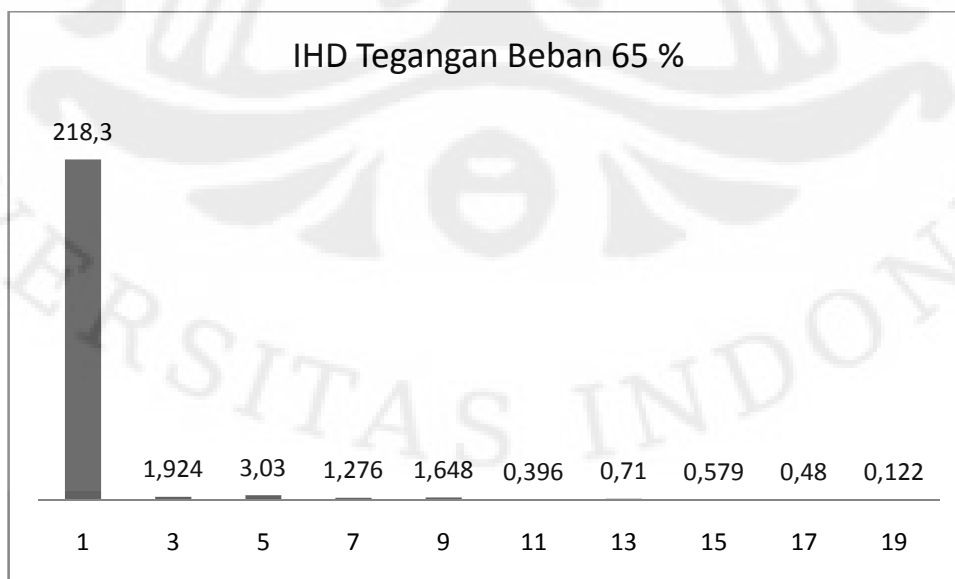
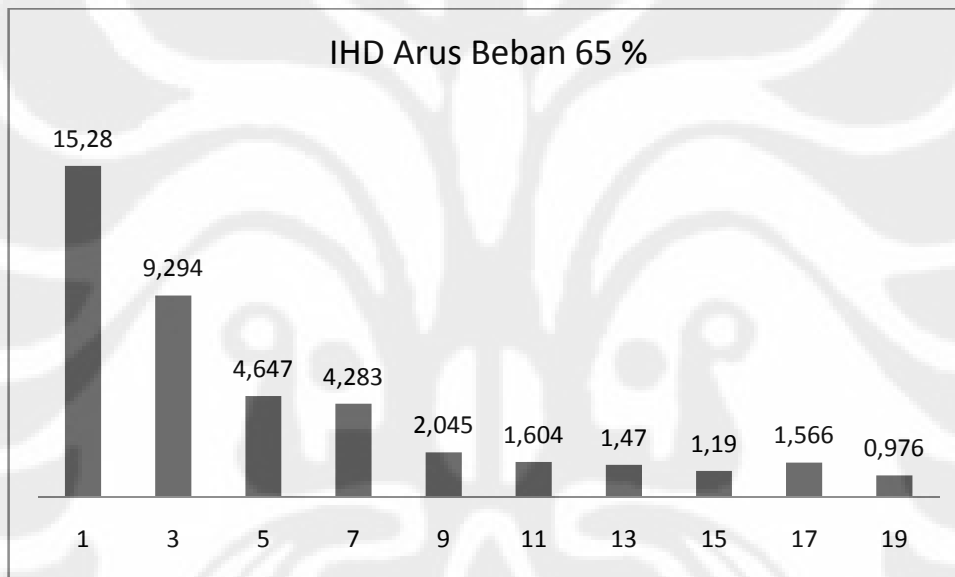
$I_{RMS} = 19,45 \text{ A}$

$V_{RMS} = 218,4 \text{ V}$

$I_{THD} = 78 \%$

$V_{THD} = 2 \%$

H	F (Hz)	I (A)	IHD _I (%)	V (V)	IHD _V (%)
1	50	15,28	100	218,3	100
3	150	9,294	60,8	1,924	0,8
5	250	4,647	30,4	3,030	1,3
7	350	4,283	28,0	1,276	0,5
9	450	2,045	13,3	1,648	0,7
11	550	1,604	10,4	0,396	0,1
13	650	1,470	9,6	0,710	0,3
15	750	1,190	7,7	0,579	0,2
17	850	1,566	10,2	0,480	0,2
19	950	0,976	6,3	0,122	0



➤ **Beban 70% = 420 Lampu**

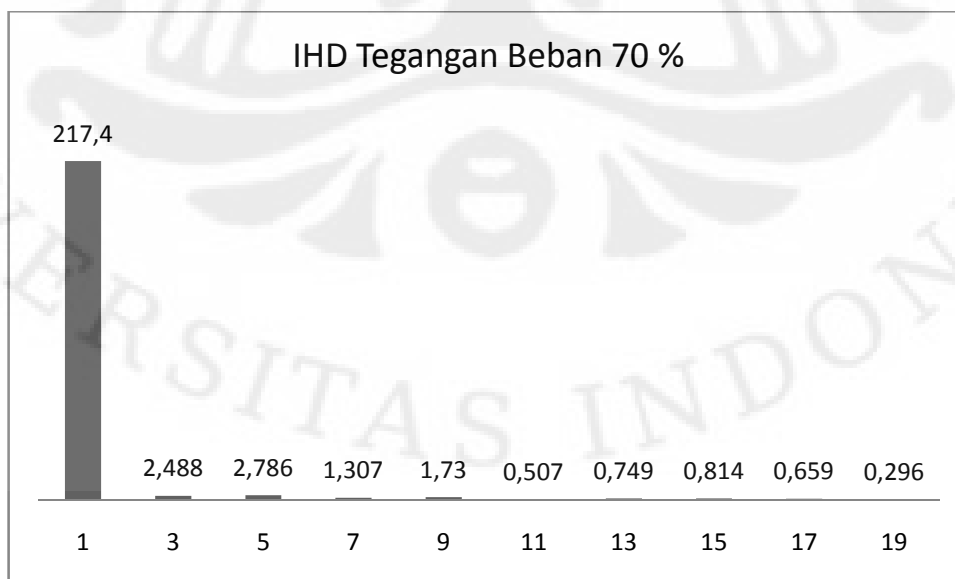
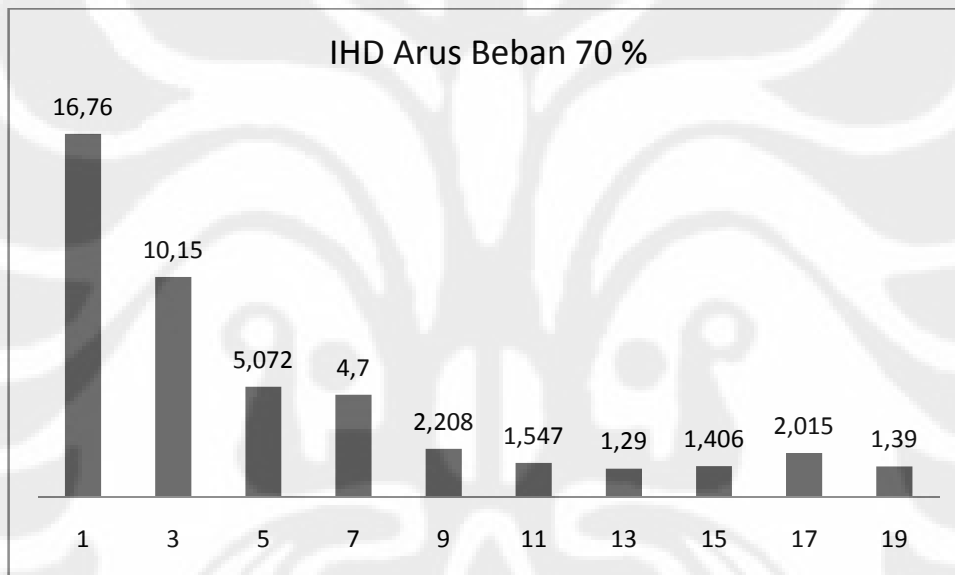
$I_{RMS} = 21,25 \text{ A}$

$V_{RMS} = 217,5 \text{ V}$

$I_{THD} = 77,9 \%$

$V_{THD} = 2,1 \%$

H	F (Hz)	I (A)	IHD _I (%)	V (V)	IHD _V (%)
1	50	16,76	100	217,4	100
3	150	10,15	60,5	2,488	1,1
5	250	5,072	30,2	2,786	1,2
7	350	4,700	28,0	1,307	0,6
9	450	2,208	13,1	1,730	0,7
11	550	1,547	9,2	0,507	0,2
13	650	1,290	7,6	0,749	0,3
15	750	1,406	8,3	0,814	0,3
17	850	2,015	12,0	0,659	0,3
19	950	1,390	8,2	0,296	0,1



➤ **Beban 75 % = 450 Lampu**

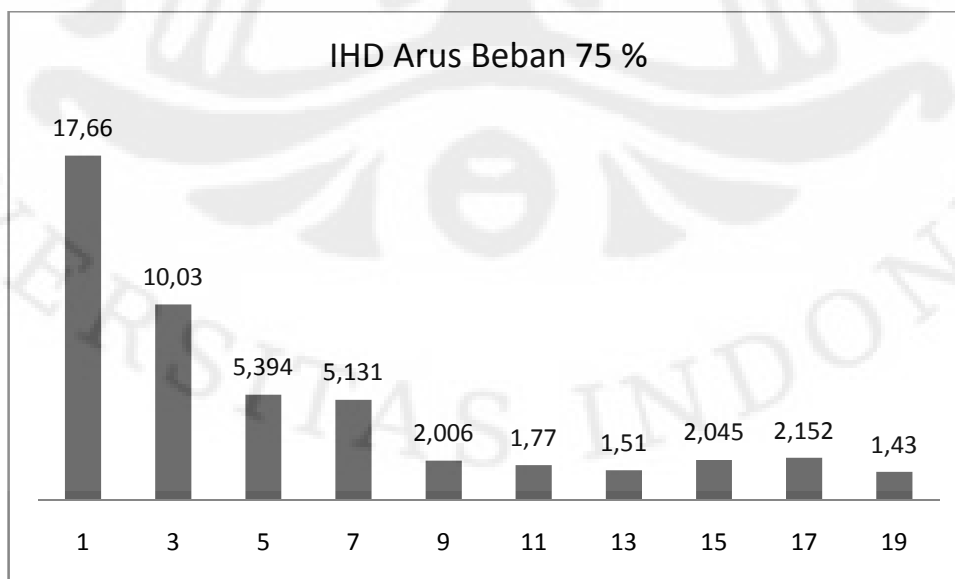
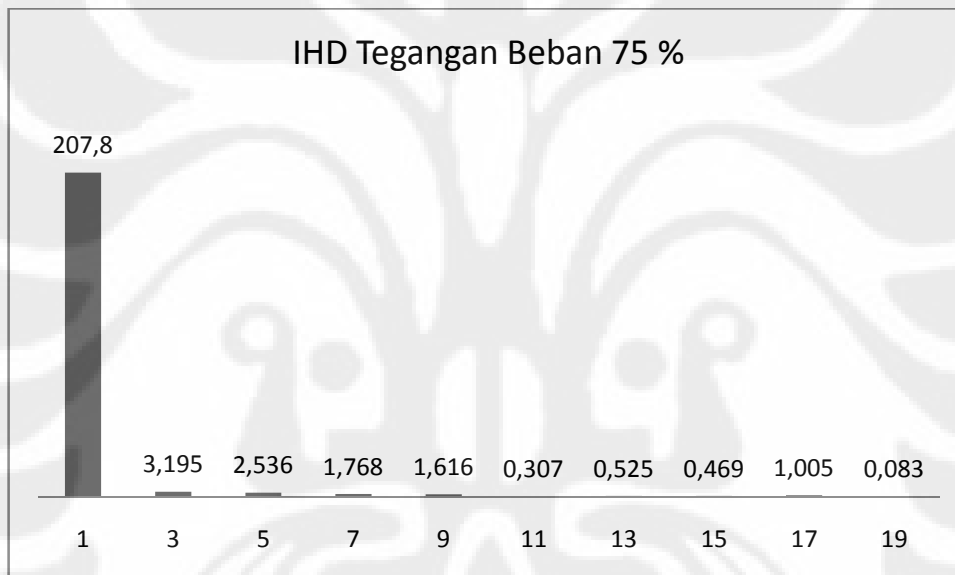
$I_{RMS} = 22,21 \text{ A}$

$V_{RMS} = 207,9 \text{ V}$

$I_{THD} = 75,8 \%$

$V_{THD} = 2,5 \%$

H	F (Hz)	I (A)	IHD _I (%)	V (V)	IHD _V (%)
1	50	17,66	100	207,8	100
3	150	10,03	56,8	3,195	1,5
5	250	5,394	30,5	2,536	1,2
7	350	5,131	29,0	1,768	0,8
9	450	2,006	11,3	1,616	0,7
11	550	1,770	10,0	0,307	0,1
13	650	1,510	8,5	0,525	0,2
15	750	2,045	11,5	0,469	0,2
17	850	2,152	12,1	1,005	0,4
19	950	1,430	8,0	0,083	0



➤ **Beban 80 % = 480 Lampu**

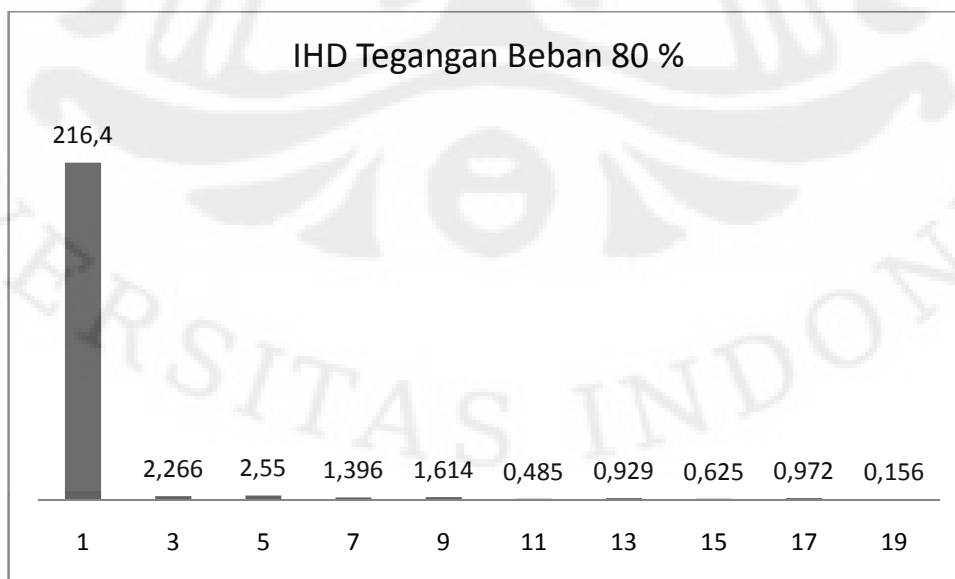
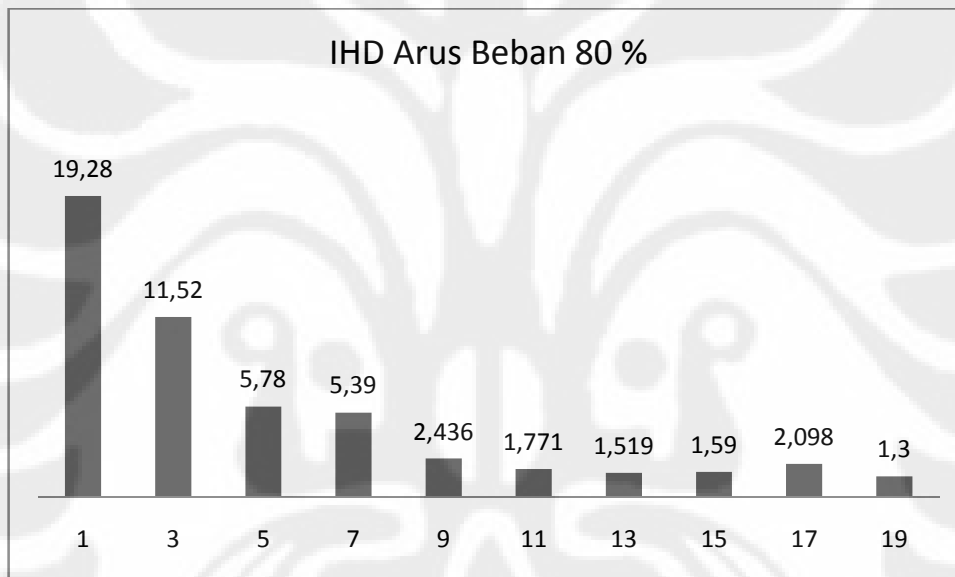
$I_{RMS} = 24,29 \text{ A}$

$V_{RMS} = 216,5 \text{ V}$

$I_{THD} = 76,5 \%$

$V_{THD} = 2 \%$

H	F (Hz)	I (A)	IHD _I (%)	V (V)	IHD _V (%)
1	50	19,28	100	216,4	100
3	150	11,52	59,7	2,266	1,1
5	250	5,78	29,9	2,550	1,2
7	350	5,39	27,9	1,396	0,6
9	450	2,436	12,6	1,614	0,7
11	550	1,771	9,1	0,485	0,2
13	650	1,519	7,8	0,929	0,3
15	750	1,590	8,2	0,625	0,3
17	850	2,098	10,8	0,972	0,3
19	950	1,300	6,7	0,156	0,1



➤ **Beban 85 % = 510 Lampu**

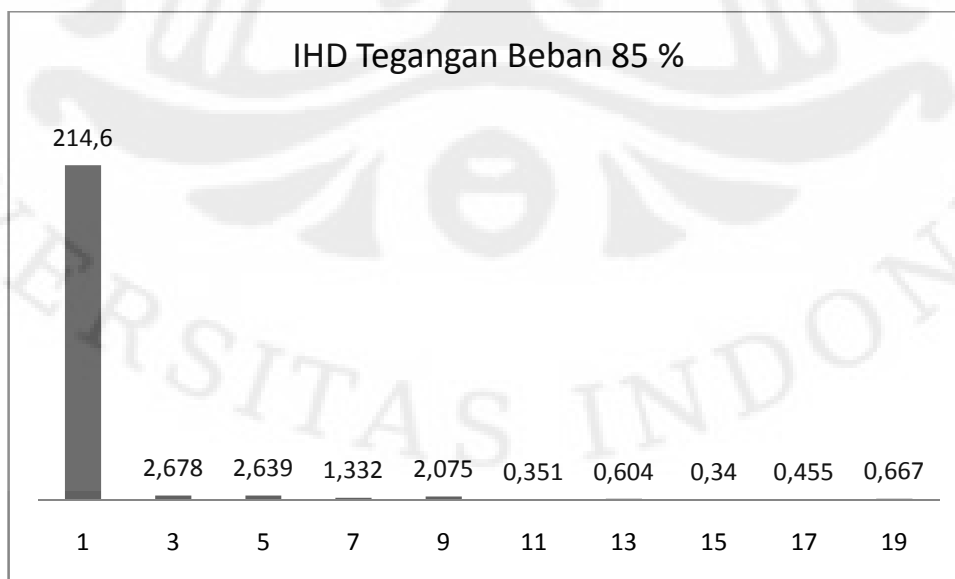
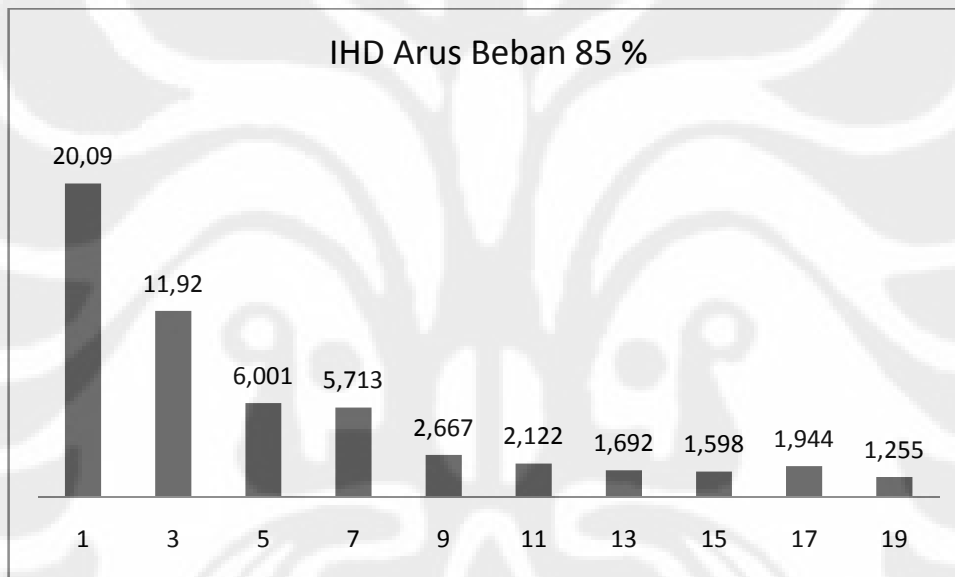
$I_{RMS} = 25,49 \text{ A}$

$V_{RMS} = 214,8 \text{ V}$

$I_{THD} = 76,4 \%$

$V_{THD} = 2,3 \%$

H	F (Hz)	I (A)	IHD _I (%)	V (V)	IHD _V (%)
1	50	20,09	100	214,6	100
3	150	11,92	59,3	2,678	1,2
5	250	6,001	29,8	2,639	1,2
7	350	5,713	28,4	1,332	0,6
9	450	2,667	13,2	2,075	0,9
11	550	2,122	10,5	0,351	0,1
13	650	1,692	8,4	0,604	0,2
15	750	1,598	7,9	0,340	0,1
17	850	1,944	9,6	0,455	0,2
19	950	1,255	6,2	0,667	0,3



➤ **Beban 90 % = 540 Lampu**

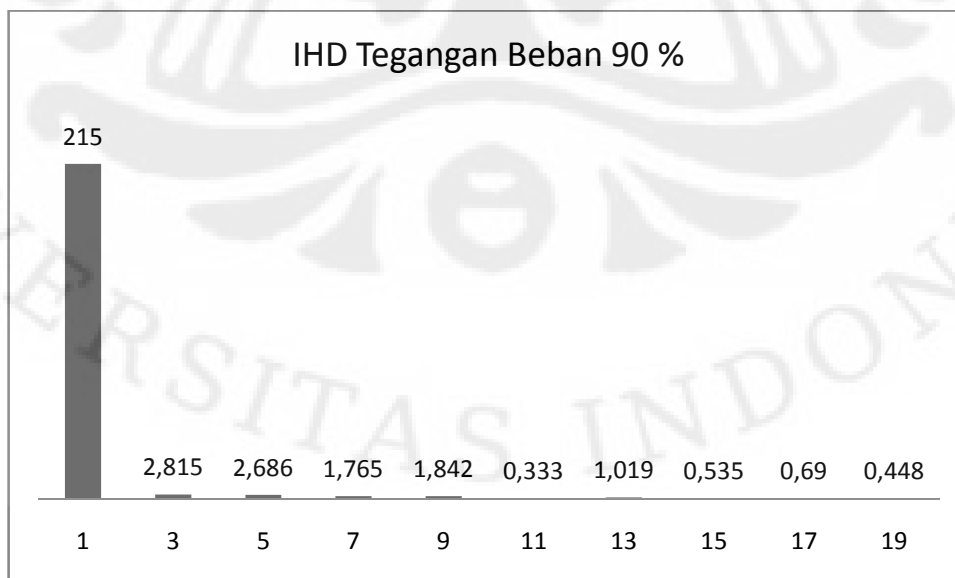
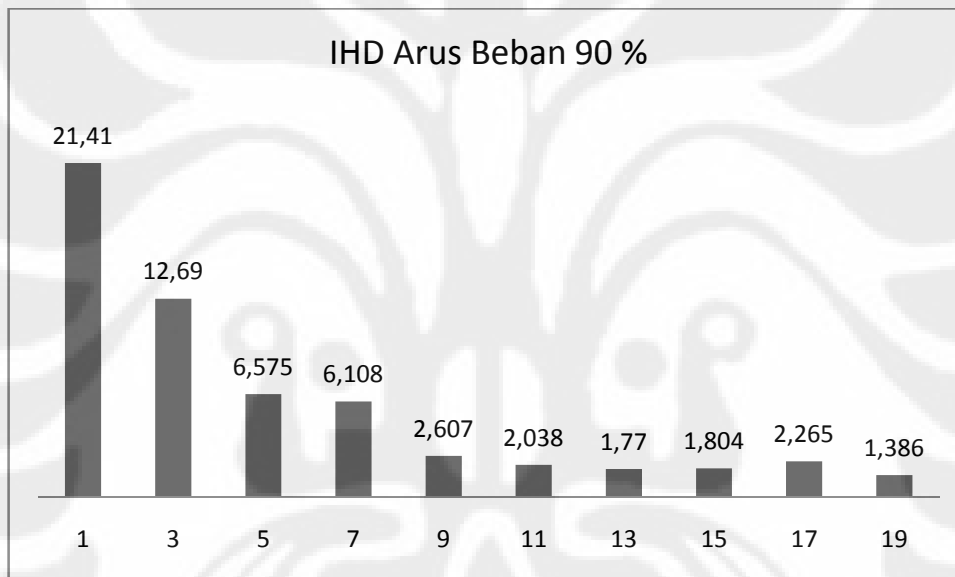
$I_{RMS} = 26,93 \text{ A}$

$V_{RMS} = 215,1 \text{ V}$

$I_{THD} = 76,5 \%$

$V_{THD} = 2,3 \%$

H	F (Hz)	I (A)	IHD _I (%)	V (V)	IHD _V (%)
1	50	21,41	100	215	100
3	150	12,69	59,2	2,815	1,3
5	250	6,575	30,7	2,686	1,2
7	350	6,108	28,6	1,765	0,8
9	450	2,607	12,1	1,842	0,8
11	550	2,038	9,5	0,333	0,1
13	650	1,770	8,2	1,019	0,4
15	750	1,804	8,4	0,535	0,2
17	850	2,265	10,5	0,69	0,4
19	950	1,386	6,4	0,448	0,2





HASIL PERCOBAAN

VARIASI NILAI THD

➤ **BEBAN 15%**

➤ **Beban 90 Lampu hemat energi**

$I_{RMS} = 4,48 \text{ A}$

$V_{RMS} = 209,5 \text{ V}$

$I_{THD} = 76,2 \%$

$V_{THD} = 2,1 \%$

H	F (Hz)	I (A)	IHD _I (%)	V (V)	IHD _V (%)
1	50	3,568	100	209,5	100
3	150	2,12	59,4	2,666	1,2
5	250	1,068	29,9	2,279	1,0
7	350	0,975	27,3	1,837	0,8
9	450	0,399	11,2	1,544	0,7
11	550	0,362	10,1	0,345	0,1
13	650	0,350	9,8	0,292	0,1
15	750	0,346	9,6	0,285	0,1
17	850	0,372	10,4	0,520	0,2
19	950	0,214	6,0	0,367	0,1

➤ **Beban 83 Lampu hemat energi dan 1 lampu pijar**

$I_{RMS} = 4,435 \text{ A}$

$V_{RMS} = 212,8 \text{ V}$

$I_{THD} = 70,2 \%$

$V_{THD} = 2,1 \%$

H	F (Hz)	I (A)	IHD _I (%)	V (V)	IHD _V (%)
1	50	3,624	100	212,8	100
3	150	1,949	53,7	2,629	1,2
5	250	1,001	27,6	2,569	1,2
7	350	0,932	25,7	1,537	0,7
9	450	0,472	13,0	1,611	0,7
11	550	0,351	9,6	0,137	0
13	650	0,327	9,0	0,448	0,2
15	750	0,250	6,9	0,325	0,1
17	850	0,337	9,3	0,595	0,2
19	950	0,246	6,8	0,379	0,1

➤ **Beban 76 Lampu hemat energi dan 2 lampu pijar**

$I_{RMS} = 4,489 \text{ A}$

$V_{RMS} = 213,7 \text{ V}$

$I_{THD} = 64,3 \%$

$V_{THD} = 2 \%$

H	F (Hz)	I (A)	IHD _I (%)	V (V)	IHD _V (%)
1	50	3,770	100	213,6	100
3	150	1,847	48,9	2,027	0,9
5	250	0,960	25,4	2,693	1,2
7	350	0,875	23,2	1,056	0,4
9	450	0,450	11,9	1,436	0,6
11	550	0,316	8,3	0,294	0,1
13	650	0,333	8,8	0,738	0,3
15	750	0,268	7,1	0,267	0,1
17	850	0,338	8,9	0,384	0,1
19	950	0,232	6,1	0,595	0,2

➤ **Beban 69 Lampu hemat energi dan 3 lampu pijar**

$$I_{RMS} = 4,615 \text{ A}$$

$$V_{RMS} = 212,1 \text{ V}$$

$$I_{THD} = 55,5 \%$$

$$V_{THD} = 1,9 \%$$

H	F (Hz)	I (A)	IHD _I (%)	V (V)	IHD _V (%)
1	50	4,035	100	211,9	100
3	150	1,728	42,8	2,156	1,0
5	250	0,891	22,0	2,479	1,1
7	350	0,810	20,0	1,278	0,6
9	450	0,366	9,0	1,593	0,7
11	550	0,290	7,1	0,060	0
13	650	0,275	6,8	0,650	0,3
15	750	0,263	6,5	0,325	0,1
17	850	0,320	7,9	0,621	0,2
19	950	0,199	4,9	0,443	0,2

➤ **Beban 62 Lampu hemat energi dan 4 lampu pijar**

$$I_{RMS} = 4,64 \text{ A}$$

$$V_{RMS} = 210,6 \text{ V}$$

$$I_{THD} = 48,5 \%$$

$$V_{THD} = 1,9 \%$$

H	F (Hz)	I (A)	IHD _I (%)	V (V)	IHD _V (%)
1	50	4,176	100	210,4	100
3	150	1,567	37,5	1,989	0,9
5	250	0,800	19,1	2,482	1,1
7	350	0,719	17,2	0,615	0,2
9	450	0,331	7,9	1,758	0,8
11	550	0,276	6,6	0,089	0
13	650	0,273	6,5	0,789	0,3
15	750	0,239	5,7	0,123	0
17	850	0,278	6,6	0,451	0,2
19	950	0,180	4,3	0,426	0,2

➤ **Beban 55 Lampu hemat energi dan 5 lampu pijar**

$$I_{RMS} = 4,652 \text{ A}$$

$$V_{RMS} = 211,7 \text{ V}$$

$$I_{THD} = 42,6 \%$$

$$V_{THD} = 1,9 \%$$

H	F (Hz)	I (A)	IHD _I (%)	V (V)	IHD _V (%)
1	50	4,338	100	211,6	100
3	150	1,436	33,1	1,759	0,8
5	250	0,731	10,8	2,480	1,1
7	350	0,623	14,3	0,744	0,3
9	450	0,305	7,0	1,657	0,7
11	550	0,255	5,9	0,272	0,1
13	650	0,269	6,2	0,708	0,3
15	750	0,201	4,6	0,115	0
17	850	0,240	5,5	0,500	0,2
19	950	0,181	4,1	0,452	0,2

➤ **Beban 48 Lampu hemat energi dan 6 lampu pijar**

$$I_{RMS} = 4,667 \text{ A}$$

$$V_{RMS} = 213,1 \text{ V}$$

$$I_{THD} = 35,6 \%$$

$$V_{THD} = 1,9 \%$$

H	F (Hz)	I (A)	IHD _I (%)	V (V)	IHD _V (%)
1	50	4,402	100	212,9	100
3	150	1,232	28,0	1,457	0,6
5	250	0,631	14,3	2,590	1,2
7	350	0,536	12,1	0,925	0,4
9	450	0,279	6,3	1,312	0,6
11	550	0,201	4,5	0,441	0,2
13	650	0,219	4,9	0,620	0,2
15	750	0,139	3,1	0,626	0,2
17	850	0,164	3,7	0,060	0
19	950	0,124	2,8	0,439	0,2

➤ **Beban 41 Lampu hemat energi dan 7 lampu pijar**

$$I_{RMS} = 4,747 \text{ A}$$

$$V_{RMS} = 215,1 \text{ V}$$

$$I_{THD} = 29,8 \%$$

$$V_{THD} = 1,6 \%$$

H	F (Hz)	I (A)	IHD _I (%)	V (V)	IHD _V (%)
1	50	4,543	100	215,1	100
3	150	1,063	23,4	1,151	0,5
5	250	0,562	12,3	2,575	1,1
7	350	0,454	9,9	0,969	0,4
9	450	0,256	5,6	1,343	0,6
11	550	0,180	3,9	0,656	0,3
13	650	0,191	4,2	0,888	0,4
15	750	0,101	2,2	0,518	0,2
17	850	0,111	2,4	0,252	0,1
19	950	0,073	1,6	0,349	0,1

➤ **Beban 34 Lampu hemat energi dan 8 lampu pijar**

$$I_{RMS} = 4,804 \text{ A}$$

$$V_{RMS} = 216,1 \text{ V}$$

$$I_{THD} = 23,6 \%$$

$$V_{THD} = 1,7 \%$$

H	F (Hz)	I (A)	IHD _I (%)	V (V)	IHD _V (%)
1	50	4,677	100	216,1	100
3	150	0,857	18,3	1,058	0,4
5	250	0,472	10,0	2,902	1,3
7	350	0,366	7,8	0,838	0,3
9	450	0,195	4,1	0,188	0,5
11	550	0,146	3,1	0,442	0,2
13	650	0,158	3,3	0,693	0,3
15	750	0,089	1,9	0,483	0,2
17	850	0,092	1,9	0,204	0
19	950	0,062	1,3	0,272	0,1

➤ **BEBAN 70%**

➤ **Beban 105 Lampu hemat energi**

$$I_{RMS} = 21,09 \text{ A} \qquad V_{RMS} = 209,6 \text{ V}$$

$$I_{THD} = 75,4 \% \qquad V_{THD} = 2,1 \%$$

H	F (Hz)	I (A)	IHD _I (%)	V (V)	IHD _V (%)
1	50	16,84	100	209,4	100
3	150	10,18	60,4	2,867	1,3
5	250	4,847	28,7	1,692	0,8
7	350	4,471	26,5	1,844	0,8
9	450	2,089	12,4	1,513	0,7
11	550	1,546	9,1	0,156	0
13	650	1,528	9,0	0,235	0,1
15	750	1,076	6,3	0,252	0,1
17	850	1,417	8,4	0,442	0,2
19	950	0,836	4,9	0,559	0,2

➤ **Beban 100 Lampu hemat energi dan 1 lampu pijar**

$$I_{RMS} = 20,97 \text{ A} \qquad V_{RMS} = 212,4 \text{ V}$$

$$I_{THD} = 71,9 \% \qquad V_{THD} = 1,9 \%$$

H	F (Hz)	I (A)	IHD _I (%)	V (V)	IHD _V (%)
1	50	17,03	100	212,4	100
3	150	9,57	56,1	2,820	1,3
5	250	4,862	28,5	1,729	0,8
7	350	4,410	28,8	1,449	0,7
9	450	2,303	13,5	1,553	0,7
11	550	1,227	7,2	0,291	0,1
13	650	1,513	8,8	0,271	0,1
15	750	1,086	6,3	0,251	0,1
17	850	1,531	8,9	0,391	0,1
19	950	1,064	6,2	0,485	0,2

➤ **Beban 95 Lampu hemat energi dan 2 lampu pijar**

$$I_{RMS} = 21,03 \text{ A} \qquad V_{RMS} = 214,5 \text{ V}$$

$$I_{THD} = 66,4 \% \qquad V_{THD} = 1,9 \%$$

H	F (Hz)	I (A)	IHD _I (%)	V (V)	IHD _V (%)
1	50	17,51	100	214,5	100
3	150	9,046	51,6	2,390	1,1
5	250	4,561	26,0	2,241	1,0
7	350	4,214	24,0	1,253	0,5
9	450	2,272	12,9	1,641	0,7
11	550	1,289	7,3	0,506	0,2
13	650	1,427	8,1	0,415	0,1
15	750	1,222	6,9	0,162	0
17	850	1,452	8,2	0,306	0,1
19	950	1,091	6,2	0,876	0,4

➤ **Beban 88 Lampu hemat energi dan 3 lampu pijar**

$I_{RMS} = 20,98 \text{ A}$

$V_{RMS} = 216,3 \text{ V}$

$I_{THD} = 58,8 \%$

$V_{THD} = 1,9 \%$

H	F (Hz)	I (A)	IHD _I (%)	V (V)	IHD _V (%)
1	50	18,09	100	216,3	100
3	150	8,447	46,6	2,245	1,0
5	250	4,226	23,3	2,257	1,0
7	350	3,636	20	1,388	0,6
9	450	1,977	10,9	1,306	0,6
11	550	1,242	6,8	0,203	0
13	650	1,361	7,5	0,338	0,1
15	750	0,952	5,0	0,472	0,2
17	850	1,168	6,4	0,516	0,2
19	950	0,809	4,4	0,485	0,2

➤ **Beban 81 Lampu hemat energi dan 4 lampu pijar**

$I_{RMS} = 21,03 \text{ A}$

$V_{RMS} = 217,3 \text{ V}$

$I_{THD} = 52,8 \%$

$V_{THD} = 1,7 \%$

H	F (Hz)	I (A)	IHD _I (%)	V (V)	IHD _V (%)
1	50	18,54	100	217,2	100
3	150	7,709	41,5	1,765	0,8
5	250	3,854	20,7	1,994	0,9
7	350	3,362	18,1	1,292	0,5
9	450	1,896	10,2	1,447	0,6
11	550	1,145	6,6	0,306	0,1
13	650	1,311	7	0,251	0,1
15	750	0,911	4,9	0,683	0,3
17	850	1,226	6,6	0,512	0,2
19	950	0,836	4,5	0,548	0,2

➤ **Beban 73 Lampu hemat energi dan 5 lampu pijar**

$I_{RMS} = 21,08 \text{ A}$

$V_{RMS} = 215,6 \text{ V}$

$I_{THD} = 46,6 \%$

$V_{THD} = 1,8 \%$

H	F (Hz)	I (A)	IHD _I (%)	V (V)	IHD _V (%)
1	50	19,13	100	215,6	100
3	150	7,101	37,1	1,484	0,6
5	250	3,532	18,4	2,441	1,1
7	350	2,947	15,4	1,079	0,5
9	450	1,577	8,2	1,588	0,7
11	550	1,137	5,9	0,227	0,1
13	650	1,282	6,6	0,874	0,4
15	750	0,911	4,7	0,303	0,1
17	850	0,931	4,8	0,540	0,2
19	950	0,607	3,1	0,401	0,1

➤ **Beban 65 Lampu hemat energi dan 6 lampu pijar**

$$I_{RMS} = 21,04 \text{ A}$$

$$V_{RMS} = 218,9 \text{ V}$$

$$I_{THD} = 40,4 \%$$

$$V_{THD} = 1,7 \%$$

H	F (Hz)	I (A)	IHD _I (%)	V (V)	IHD _V (%)
1	50	19,49	100	218,9	100
3	150	6,240	32,0	1,391	0,6
5	250	3,217	16,5	2,570	1,1
7	350	2,596	13,3	1,000	0,4
9	450	1,327	6,8	1,487	0,6
11	550	0,988	5,0	0,573	0,2
13	650	1,027	5,2	0,721	0,3
15	750	0,652	3,3	0,353	0,1
17	850	0,800	4,1	0,071	0
19	950	0,554	2,8	0,207	0

➤ **Beban 58 Lampu hemat energi dan 7 lampu pijar**

$$I_{RMS} = 21,0 \text{ A}$$

$$V_{RMS} = 209,7 \text{ V}$$

$$I_{THD} = 34,4 \%$$

$$V_{THD} = 1,6 \%$$

H	F (Hz)	I (A)	IHD _I (%)	V (V)	IHD _V (%)
1	50	19,88	100	209,7	100
3	150	5,179	26,0	2,657	1,2
5	250	2,823	14,1	2,637	1,2
7	350	2,519	12,6	1,295	0,6
9	450	1,059	5,3	1,509	0,7
11	550	0,784	3,9	0,164	0,6
13	650	0,740	3,7	0,221	0,1
15	750	0,963	4,8	0,186	0
17	850	1,058	5,3	0,520	0,2
19	950	0,748	3,7	0,270	0,1

➤ **Beban 49 Lampu hemat energi dan 8 lampu pijar**

$$I_{RMS} = 21,04 \text{ A}$$

$$V_{RMS} = 208,6 \text{ V}$$

$$I_{THD} = 28,7 \%$$

$$V_{THD} = 1,7 \%$$

H	F (Hz)	I (A)	IHD _I (%)	V (V)	IHD _V (%)
1	50	20,24	100	208,5	100
3	150	4,369	21,5	2,359	1,1
5	250	2,449	12,1	2,894	1,3
7	350	2,191	10,8	1,380	0,6
9	450	0,970	4,7	1,572	0,7
11	550	0,714	3,5	0,268	0,1
13	650	0,651	3,2	0,478	0,2
15	750	0,676	3,3	0,493	0,2
17	850	0,787	3,8	0,626	0,3
19	950	0,588	2,9	0,045	0

➤ **Beban 40 Lampu hemat energi dan 9 lampu pijar**

$$I_{RMS} = 21,06 \text{ A}$$

$$V_{RMS} = 207,7 \text{ V}$$

$$I_{THD} = 23,2 \%$$

$$V_{THD} = 1,7 \%$$

H	F (Hz)	I (A)	IHD _I (%)	V (V)	IHD _V (%)
1	50	20,53	100	207,6	100
3	150	3,518	17,1	2,546	1,2
5	250	2,081	10,1	2,686	1,2
7	350	1,817	8,8	1,368	0,6
9	450	0,775	3,7	1,562	0,7
11	550	0,579	2,8	0,028	0
13	650	0,466	2,2	0,230	0,1
15	750	0,541	2,6	0,571	0,2
17	850	0,576	2,8	0,667	0,3
19	950	0,438	2,1	0,260	0,1

➤ **Beban 30 Lampu hemat energi dan 10 lampu pijar**

$$I_{RMS} = 21,02 \text{ A}$$

$$V_{RMS} = 208,3 \text{ V}$$

$$I_{THD} = 17,4 \%$$

$$V_{THD} = 1,7 \%$$

H	F (Hz)	I (A)	IHD _I (%)	V (V)	IHD _V (%)
1	50	20,74	100	208,2	100
3	150	2,641	12,7	2,615	1,2
5	250	1,643	7,9	0,795	1,3
7	350	1,348	6,5	1,546	0,7
9	450	0,577	2,7	1,254	0,6
11	550	0,434	2,0	0,188	0
13	650	0,306	1,4	0,169	0
15	750	0,312	1,5	0,546	0,2
17	850	0,389	1,8	0,896	0,4
19	950	0,391	1,8	0,248	0,1

➤ **Beban 34 Lampu hemat energi dan 11 lampu pijar**

$$I_{RMS} = 21,09 \text{ A}$$

$$V_{RMS} = 210,1 \text{ V}$$

$$I_{THD} = 10,7 \%$$

$$V_{THD} = 1,7 \%$$

H	F (Hz)	I (A)	IHD _I (%)	V (V)	IHD _V (%)
1	50	20,97	100	210,0	100
3	150	1,616	7,7	1,906	0,9
5	250	1,106	5,2	3,222	1,5
7	350	0,800	3,8	1,150	0,5
9	450	0,303	1,4	1,330	0,6
11	550	0,351	1,6	0,082	0
13	650	0,268	1,2	0,137	0
15	750	0,274	1,3	0,708	0,3
17	850	0,281	1,3	0,237	0,1
19	950	0,188	0,8	0,221	0,1

➤ **HARMONIK PADA SEKUNDER TRAF0 ARUS BEBAN 70 %**

➤ **Beban 105 Lampu hemat energi**

$I_{RMS} = 2,561 \text{ A}$

$I_{THD} = 90,2 \%$

H	F (Hz)	I (A)	IHD _I (%)
1	50	1,894	100
3	150	1,378	72,7
5	250	0,670	35,3
7	350	0,552	29,1
9	450	0,291	15,4
11	550	0,141	7,4
13	650	0,202	10,7
15	750	0,163	8,6
17	850	0,199	10,5
19	950	0,144	7,6

➤ **Beban 100 Lampu hemat energi dan 1 lampu pijar**

$I_{RMS} = 2,644 \text{ A}$

$I_{THD} = 78,7 \%$

H	F (Hz)	I (A)	IHD _I (%)
1	50	2,075	100
3	150	1,291	62,2
5	250	0,638	30,7
7	350	0,572	27,6
9	450	0,321	15,4
11	550	0,153	7,3
13	650	0,181	8,7
15	750	0,146	7,0
17	850	0,201	9,7
19	950	0,133	6,4

➤ **Beban 95 Lampu hemat energi dan 2 lampu pijar**

$I_{RMS} = 2,672 \text{ A}$

$I_{THD} = 73,2 \%$

H	F (Hz)	I (A)	IHD _I (%)
1	50	2,155	100
3	150	1,245	57,7
5	250	0,615	28,5
7	350	0,549	25,4
9	450	0,306	14,2
11	550	0,148	6,8
13	650	0,190	8,8
15	750	0,149	6,9
17	850	0,203	9,4
19	950	0,149	6,9

➤ **Beban 88 Lampu hemat energi dan 3 lampu pijar**

$$I_{RMS} = 2,704 \text{ A}$$

$$I_{THD} = 66,2 \%$$

H	F (Hz)	I (A)	IHD _I (%)
1	50	2,190	100
3	150	1,162	53,0
5	250	0,562	25,6
7	350	0,479	21,9
9	450	0,275	12,5
11	550	0,145	6,6
13	650	0,174	7,9
15	750	0,130	5,9
17	850	0,170	7,7
19	950	0,120	5,4

➤ **Beban 81 Lampu hemat energi dan 4 lampu pijar**

$$I_{RMS} = 2,738 \text{ A}$$

$$I_{THD} = 60,2 \%$$

H	F (Hz)	I (A)	IHD _I (%)
1	50	2,237	100
3	150	1,079	48,2
5	250	0,522	23,3
7	350	0,440	19,6
9	450	0,246	11,0
11	550	0,145	6,4
13	650	0,173	7,7
15	750	0,127	5,6
17	850	0,152	6,8
19	950	0,116	5,2

➤ **Beban 73 Lampu hemat energi dan 5 lampu pijar**

$$I_{RMS} = 2,776 \text{ A}$$

$$I_{THD} = 52,9 \%$$

H	F (Hz)	I (A)	IHD _I (%)
1	50	2,307	100
3	150	0,980	42,5
5	250	0,473	20,5
7	350	0,387	16,7
9	450	0,217	9,4
11	550	0,141	6,1
13	650	0,167	7,2
15	750	0,110	4,8
17	850	0,131	5,7
19	950	0,095	4,1

➤ **Beban 65 Lampu hemat energi dan 6 lampu pijar**

$$I_{RMS} = 2,814 \text{ A}$$

$$I_{THD} = 46,5 \%$$

H	F (Hz)	I (A)	IHD _I (%)
1	50	2,298	100
3	150	0,869	37,8
5	250	0,413	17,9
7	350	0,336	14,6
9	450	0,183	7,9
11	550	0,115	5,0
13	650	0,137	5,9
15	750	0,085	3,7
17	850	0,113	4,9
19	950	0,069	3,0

➤ **Beban 58 Lampu hemat energi dan 7 lampu pijar**

$$I_{RMS} = 2,833 \text{ A}$$

$$I_{THD} = 35,6 \%$$

H	F (Hz)	I (A)	IHD _I (%)
1	50	2,674	100
3	150	0,707	26,4
5	250	0,392	14,6
7	350	0,361	13,5
9	450	0,165	6,1
11	550	0,100	3,7
13	650	0,100	3,7
15	750	0,113	4,2
17	850	0,152	5,6
19	950	0,105	3,9

➤ **Beban 49 Lampu hemat energi dan 8 lampu pijar**

$$I_{RMS} = 2,840 \text{ A}$$

$$I_{THD} = 29,4 \%$$

H	F (Hz)	I (A)	IHD _I (%)
1	50	2,725	100
3	150	0,588	21,5
5	250	0,339	12,4
7	350	0,302	11,0
9	450	0,134	4,9
11	550	0,092	3,3
13	650	0,088	3,2
15	750	0,103	3,8
17	850	0,117	4,3
19	950	0,089	3,2

➤ **Beban 40 Lampu hemat energi dan 9 lampu pijar**

$$I_{RMS} = 2,845 \text{ A}$$

$$I_{THD} = 23,3 \%$$

H	F (Hz)	I (A)	IHD _I (%)
1	50	2,756	100
3	150	0,461	16,7
5	250	0,267	9,7
7	350	0,232	8,4
9	450	0,094	3,4
11	550	0,079	2,8
13	650	0,080	2,9
15	750	0,100	3,6
17	850	0,117	4,2
19	950	0,090	3,2

➤ **Beban 30 Lampu hemat energi dan 10 lampu pijar**

$$I_{RMS} = 2,852 \text{ A}$$

$$I_{THD} = 17,7 \%$$

H	F (Hz)	I (A)	IHD _I (%)
1	50	2,797	100
3	150	0,356	12,7
5	250	0,228	8,1
7	350	0,188	6,7
9	450	0,090	3,2
11	550	0,062	2,2
13	650	0,049	1,7
15	750	0,047	1,6
17	850	0,054	1,9
19	950	0,040	1,4

➤ **Beban 34 Lampu hemat energi dan 11 lampu pijar**

$$I_{RMS} = 2,857 \text{ A}$$

$$I_{THD} = 10,8 \%$$

H	F (Hz)	I (A)	IHD _I (%)
1	50	2,828	100
3	150	0,214	7,5
5	250	0,155	5,5
7	350	0,114	4,0
9	450	0,043	1,5
11	550	0,038	1,3
13	650	0,032	1,1
15	750	0,037	1,3
17	850	0,039	1,3
19	950	0,025	0,9