



UNIVERSITAS INDONESIA

**ANALISIS PENGARUH HARMONISA TERHADAP UNJUK
KERJA MINIATURE CIRCUIT BREAKER (MCB) 2A DAN 4A**

SKRIPSI

**Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar
Sarjana Teknik**

IRFA HAMBALI

0806365961

**FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO
DEPOK
JULI 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 : Irfa Hambali

NPM : 0806365961

Tanda Tangan :



Tanggal : 02 Juli 2010

LEMBAR PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan :
Nama : Irfa Hambali
NPM : 0806365961
Program Studi : Teknik Elektro
Judul Skripsi : Analisis Pengaruh Harmonisa Terhadap Unjuk Kerja
Miniature Circuit Breaker (MCB) 2A Dan 4A

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 : Budi Sudiarto, ST., MT. (.....)
Penguji 1 : Ir. Agus R. Utomo, MT. (.....)
Penguji 2 : Aji Nur Widyanto ST., MT (.....)

Ditetapkan di : Depok
Tanggal : 02 Juli 2010

KATA PENGANTAR

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

- (1) Budi Sudiarto, ST., MT. selaku dosen pembimbing yang telah menyediakan waktu, tenaga, dan pikiran untuk mengarahkan saya dalam penyusunan skripsi ini;
- (2) Orang tua tercinta, adik-adiku, serta saudara-saudaraku yang telah memberikan bantuan dukungan material dan moral;
- (3) Teman-teman yang telah banyak membantu saya dalam menyelesaikan skripsi ini Dono, Pak Suwanto, Junedi Ramdoner, Wawan, Wahyu dan yang lainnya tidak bisa saya sebutkan satu per satu.

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

Depok, 02 Juli 2010

Penulis

**HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI
SKRIPSI UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS**

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

Nama : Irfa Hambali
NPM : 0806365961
Program Studi : Teknik Elektro
Departemen : Teknik Elektro
Fakultas : Teknik
Jenis karya : Skripsi

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

**ANALISIS PENGARUH HARMONISA TERHADAP UNJUK KERJA
MINIATURE CIRCUIT BREAKER (MCB) 2A DAN 4A**

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

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok

Pada tanggal : 02 Juli 2010

Yang menyatakan

(Irfa Hambali)

ABSTRAK

Nama : Irfa Hambali
Program Studi : Teknik Elektro
Judul : Analisis Pengaruh Harmonisa Terhadap Unjuk Kerja *Miniature Circuit Breaker* (MCB) 2A dan 4A

Pada perkembangan teknologi saat ini, banyak mempergunakan beban-beban nonlinier seperti komputer, printer, juga motor-motor listrik yang menyebabkan timbulnya harmonik. Harmonik dapat mempengaruhi sistem tenaga listrik yang dirancang untuk beroperasi pada frekuensi 50 Hz, sehingga mengakibatkan munculnya arus / tegangan yang frekuensinya menjadi perkalian bulat dari 50 Hz. Frekuensi 50 Hz merupakan frekuensi fundamental sedangkan jika terjadi perkalian bulat dari frekuensi 50 Hz disebut harmonik.

Harmonik dapat mempengaruhi mekanisme kerja pada *Circuit Breaker* seperti abnormalnya proses pemutusan rangkaian sehingga fungsinya sebagai alat proteksi menjadi kurang sempurna untuk memproteksi instalasi tenaga listrik dan peralatan listrik lainnya.

Pada penelitian ini, dilakukan pengujian mengenai pengaruh harmonik terhadap *Miniature Circuit Breaker* (MCB) dengan menggunakan beban non linier berupa kombinasi antara lampu pijar dan lampu *fluorescent ballast* elektronik untuk mendapatkan variasi nilai THD (*Total Harmonic Distortion*). Arus yang dialirkan sebesar $1,5 \times I_n$ pada MCB. Dari pengujian yang telah dilakukan, ternyata distorsi harmonik (THD) yang dihasilkan dapat mempengaruhi mekanisme kerja pada MCB dimana semakin besar nilai distorsi harmoniknya (THD) mengakibatkan waktu pemutusan MCB menjadi lebih cepat dalam melakukan pemutusan rangkaian.

Kata kunci: THD (*Total Harmonic Distortion*), *Miniature Circuit Breaker* (MCB), beban nonlinier

ABSTRACT

Name : Irfa Hambali
Study Program: Teknik Elektro
Title : Analysis of Influence Harmonics on Performance Miniature
Circuit Breaker (MCB) 2A and 4A

Currently, technology development used to nonlinear loads such as computers, printers, electric motors which affected to emerge harmonic. Harmonics could affect the electrical power system designed to operate at a frequency of 50 Hz, that resulted in the emergence of the current / voltage to frequency with multiple of 50 Hz. Frequency of 50 Hz is the fundamental frequency multiplication whereas in case of a round of 50 Hz frequency called harmonics.

Harmonic frequency could affect the working mechanism of the Circuit Breaker like abnormal tripping process so that its function as a protection device become imperfect to protect the installation of electricity power and other electrical equipments.

In this study, there was done a test about the effect of harmonics on Miniature Circuit Breaker (MCB), used by nonlinear load such as a combination of incandescent and fluorescent lamp ballast electronic to gain variation value of THD (Total Harmonic Distortion) with given operating current as $1.5 \times I_n$ on the MCB. From the testing that has been done, apparently, the result of THD could affect the working mechanism of the MCB when the value THD increased the tripping process of MCB would be faster.

Key words: THD (*Total Harmonic Distortion*), *Miniature Circuit Breaker* (MCB), nonlinear load

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN PERNYATAAN KEASLIAN	ii
LEMBAR PERSETUJUAN	iii
KATA PENGANTAR	iv
HALAMAN PERSETUJUAN PUBLIKASI	v
ABSTRAK	vi
DAFTAR ISI	viii
DAFTAR GAMBAR.....	x
DAFTAR TABEL	xi
DAFTAR LAMPIRAN	xii
BAB I. PENDAHULUAN.....	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Tujuan Seminar	2
1.3. Batasan Masalah	2
1.4. Metode Pengujian	3
1.5. Sistematika Penulisan	3
BAB II. LANDASAN TEORI	5
2.1. Harmonik	5
2.1.1 Definisi Harmonik.....	5
2.1.2 Distorsi Harmonik.....	6
2.1.3 Distorsi Tegangan dan Distorsi Arus	7
2.1.4 THD (<i>Total Harmonic Distortion</i>).....	8
2.1.5 Sumber-sumber Harmonik.....	9
2.1.5.1 Lampu <i>Fluorescent</i> dengan <i>Ballast</i> Elektronik.....	10
2.1.5.2 Mesin Listrik	10
2.1.5.3 <i>Electric Drive</i>	11
2.1.5.4 <i>Transformator</i>	11
2.1.6 Efek Harmonik	11
2.1.6.1 Efek Harmonik Pada Sistem Telekomunikasi.....	11
2.1.6.2 Efek Harmonik Pada Alat Metering.....	11
2.1.6.3 Efek Harmonik Pada Transformator	12
2.1.6.4 Efek Harmonik Pada Kapasitor Bank	12
2.1.6.5 Efek Harmonik Pada Mesin Listrik	13
2.1.6.6 Efek Harmonik Pada Konduktor.....	13
2.1.6.7 Efek Harmonik Pada Peralatan Proteksi	13
2.1.7 Cara Pengurangan Harmonik	14
2.2 <i>Miniature Circuit Breaker</i> (MCB).....	16
2.2.1 Definisi.....	16
2.2.2 Bagian-bagian MCB.....	17
2.2.3 Tipe-tipe MCB	17
2.2.4 Prinsip Kerja <i>Miniature Circuit Breaker</i> (MCB).....	18
2.2.4.1 Prinsip Kerja MCB Saat Beban Lebih	18
2.2.4.2 Prinsip Kerja MCB Saat Hubung Singkat.....	19

2.2.5 Karakteristik MCB	19
BAB III. Metode Penelitian.....	23
3.1. Rangkaian Pengujian	23
3.2. Spesifikasi Peralatan	24
3.2.1 <i>Miniature Circuit Breaker</i> (MCB)	24
3.2.2 Timer Waktu Digital	25
3.2.3 Saklar	25
3.2.4 <i>Power Quality Analyzer</i>	26
3.2.5 Beban-beban.....	26
3.3. Prosedur Pengujian	26
3.4. Rancangan Beban	28
3.4.1. Beban Non Harmonik Pada MCB 2A	28
3.4.2. Beban Non Harmonik Pada MCB 4A	28
3.4.3. Beban Harmonik Pada MCB 2A	29
3.4.4. Beban Harmonik Pada MCB 4A	29
BAB IV. DATA HASIL PENGUJIAN DAN ANALISIS DATA.....	31
4.1. Data Hasil Pengujian	31
4.1.1.1 Pengujian Beban Tanpa Harmonik Pada MCB 2A Standarisasi SNI... 31	31
4.1.1.2 Pengujian Beban Tanpa Harmonik Pada MCB 4A Standarisasi SNI .. 33	33
4.1.2.1 Pengujian Beban Harmonik Pada MCB 2A Standarisasi SNI	35
4.1.2.2 Pengujian Beban Harmonik Pada MCB 4A Standarisasi SNI	36
4.2. Analisa Efek Harmonik Pada <i>Miniature Circuit Breaker</i> (MCB)	38
4.2.1. Pengujian Beban Tanpa Harmonik Pada MCB 2A dan 4A Standarisasi SNI	39
4.2.2. Pengujian Beban Harmonik Pada MCB 2A Standarisasi SNI.....	39
4.2.3. Pengujian Beban Harmonik Pada MCB 4A Standarisasi SNI.....	41
BAB V. KESIMPULAN	44
DAFTAR ACUAN	45
DAFTAR REFERENSI	46
LAMPIRAN.....	47

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Beban nonlinier	6
Gambar 2.2 Arus harmonik dan tegangan harmonik.....	7
Gambar 2.3 <i>Switch-mode power supply</i>	10
Gambar 2.4 <i>Single-tuned</i> dan <i>double-tuned filter</i>	14
Gambar 2.5 <i>High-pass filter</i> dan <i>C-type high-pass filter</i>	15
Gambar 2.6 Bagian-bagian MCB	17
Gambar 2.7 Karakteristik MCB	20
Gambar 2.8 Grafik Karakteristik Tipe MCB	21
Gambar 3.1 Skema rangkaian pengujian.....	23
Gambar 3.2 Rangkaian pengujian	23
Gambar 3.3 Rangkaian paralel lampu pijar.....	23
Gambar 3.4 Rangkaian paralel lampu <i>fluorescent ballast</i> elektronik.....	24
Gambar 3.5 Rangkaian paralel kombinasi antara lampu pijar dengan lampu <i>FBE</i>	24
Gambar 4.1 Tabel nilai arus harmonik pada tiap orde MCB 2A SNI	32
Gambar 4.2 Spektrum harmonik arus beban tanpa harmonik MCB 2A SNI	32
Gambar 4.3 Gelombang tegangan dan arus beban tanpa harmonik MCB 2A SNI	32
Gambar 4.4 Tabel nilai arus harmonik pada tiap orde MCB 4A SNI	33
Gambar 4.5 Spektrum harmonik arus beban tanpa harmonik MCB 4A SNI	34
Gambar 4.6 Gelombang tegangan dan arus beban tanpa harmonik MCB 4A SNI	34
Gambar 4.7 Tabel nilai arus harmonik pada tiap orde MCB 2A SNI	35
Gambar 4.8 Spektrum harmonik arus beban harmonik MCB 2A SNI.....	36
Gambar 4.9 Gelombang tegangan dan arus beban harmonik MCB 2A SNI.....	36
Gambar 4.10 Tabel nilai arus harmonik pada tiap orde MCB 4A SNI	37
Gambar 4.11 Spektrum harmonik arus beban harmonik MCB 4A SNI.....	38
Gambar 4.12 Gelombang tegangan dan arus beban harmonik MCB 4A SNI.....	38
Gambar 4.13 Gelombang tegangan dan arus beban harmonik pada THD 33.5%	40
Gambar 4.14 Gelombang tegangan dan arus beban harmonik pada THD 24.5%	40
Gambar 4.15 Grafik hubungan THD dengan waktu pemutusan MCB 2A SNI	41
Gambar 4.16 Gelombang tegangan dan arus beban harmonik pada THD 22.9%	42
Gambar 4.17 Grafik hubungan THD dengan waktu pemutusan MCB 4A SNI	43

DAFTAR TABEL

Tabel 4. 1 Hasil pengujian untuk beban tanpa harmonik pada MCB 2A SNI.....	31
Tabel 4. 2 Hasil pengujian untuk beban tanpa harmonik pada MCB 4A SNI.....	33
Tabel 4. 3 Hasil pengujian untuk beban harmonik pada MCB 2A SNI	35
Tabel 4. 4 Hasil pengujian untuk beban harmonik pada MCB 4A SNI	37

DAFTAR LAMPIRAN

1. Harmonik <i>List</i> dengan nilai THD 63.5 % pada MCB 2A standarisasi SNI.....	47
2. Gelombang tegangan dan arus dengan THD 63.5 % pada MCB 2A SNI.....	47
3. Harmonik <i>List</i> dengan nilai THD 53.76 % pada MCB 2A standarisasi SNI.....	48
4. Gelombang tegangan dan arus dengan 53.76 % pada MCB 2A SNI.....	48
5. Harmonik <i>List</i> dengan nilai THD 43.6 % pada MCB 2A standarisasi SNI.....	49
6. Gelombang tegangan dan arus dengan 43.6 % pada MCB 2A SNI.....	49
7. Harmonik <i>List</i> dengan nilai THD 33.5 % pada MCB 2A standarisasi SNI.....	50
8. Gelombang tegangan dan arus dengan 33.5 % pada MCB 2A SNI.....	50
9. Harmonik <i>List</i> dengan nilai THD 24.48 % pada MCB 2A standarisasi SNI.....	51
10. Gelombang tegangan dan arus dengan 24.48 % pada MCB 2A SNI.....	51
11. Harmonik <i>List</i> dengan nilai THD 14.09 % pada MCB 2A standarisasi SNI.....	52
12. Gelombang tegangan dan arus dengan 14.09 % pada MCB 2A SNI.....	52
13. Harmonik <i>List</i> dengan nilai THD 22.89 % pada MCB 4A standarisasi SNI.....	53
14. Gelombang tegangan dan arus dengan 22.89 % pada MCB 4A SNI.....	53
15. Harmonik <i>List</i> dengan nilai THD 17.8 % pada MCB 4A standarisasi SNI.....	54
16. Gelombang tegangan dan arus dengan 17.8 % pada MCB 4A SNI.....	54
17. Harmonik <i>List</i> dengan nilai THD 13.38 % pada MCB 4A standarisasi SNI.....	55
18. Gelombang tegangan dan arus dengan 13.38 % pada MCB 4A SNI.....	55
19. Harmonik <i>List</i> dengan nilai THD 7.5 % pada MCB 4A standarisasi SNI.....	56
20. Gelombang tegangan dan arus dengan 7.5 % pada MCB 4A SNI.....	56
21. Harmonik <i>List</i> dengan nilai THD 3.56 % pada MCB 4A standarisasi SNI.....	57
22. Gelombang tegangan dan arus dengan 3.56 % pada MCB 4A SNI.....	57

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Kebutuhan dalam pemanfaatan tenaga listrik dari tahun ke tahun terus mengalami perkembangan seiring dengan kemajuan teknologi terutama perkembangan dalam pemakaian bahan semikonduktor atau peralatan elektronika modern seperti komputer, printer, maupun lampu *fluorescent ballast* elektronik. Perkembangan dari teknologi tersebut tentu saja merupakan hal yang bernilai positif dari segi efisiensi waktu dan biaya. Akan tetapi perkembangan tersebut ternyata menimbulkan dampak merugikan yaitu munculnya harmonik yang dapat mempengaruhi sistem tenaga listrik.

Dalam sistem tenaga listrik dikenal dua jenis beban, yaitu beban linier dan beban nonlinier. Beban linier adalah beban yang memberikan bentuk gelombang keluaran yang linier dalam arti arus yang mengalir sebanding dengan impedansi dan perubahan tegangan. Sedangkan beban nonlinier adalah beban yang memberikan bentuk gelombang keluaran yang tidak sebanding dengan tegangan dalam tiap setengah siklus, sehingga bentuk gelombang arus maupun tegangan keluarannya tidak sama dengan gelombang masukannya (mengalami distorsi). Sisi negatif yang timbul dari perkembangan teknologi bahan semikonduktor tersebut disebabkan oleh jenis beban nonlinier yang menyebabkan timbulnya harmonik sehingga gelombang arus dan tegangan menjadi cacat dan tidak sinusoidal lagi akibat interaksi antara bentuk gelombang sinus sistem dengan gelombang lain yang mempunyai frekuensi kelipatan bilangan bulat dari frekuensi *fundamental*-nya yaitu untuk di Indonesia frekuensi *fundamental*-nya 50 Hz.

Harmonik dapat berpengaruh baik pada kapasitor bank, motor bahkan pada komponen listrik seperti pada bahan konduktor yang menyebabkan terjadinya panas karena rugi-rugi kawat penghantar. Pengaruh lainnya misalnya pada transformator, dimana transformator mengalami panas yang melebihi batas toleransi panas yang diijinkan akibat mengalami rugi-rugi pada tembaga dan inti besinya. Komponen listrik lainnya yang juga dapat dipengaruhi oleh harmonik

yaitu *Circuit Breaker* (CB). Pada pengujian untuk skripsi ini, *Circuit Breaker* yang digunakan untuk pengujian adalah *Miniature Circuit Breaker* (MCB). MCB merupakan peralatan proteksi berfungsi untuk pemutus sekaligus sebagai pengaman dari arus hubung singkat dan beban lebih. *Miniature Circuit breaker* (MCB) merupakan komponen penting dalam suatu instalasi listrik karena dapat mengisolir akibat-akibat yang ditimbulkan dengan secepat mungkin dan membatasi kerusakan yang terjadi, sehingga MCB berfungsi sebagai proteksi bagi peralatan. Akibat dari efek harmonik menyebabkan *Miniature Circuit Breaker* (MCB) tidak beroperasi secara benar, hal ini tentunya membahayakan bagi instalasi maupun pada peralatan listrik karena kegagalan suatu MCB untuk melakukan proses *tripping* atau pemutusan daya listrik. Faktor penyebabnya karena MCB tidak dapat merespon secara benar akibat adanya harmonik pada sistem tenaga listrik.

Atas dasar hal tersebut, maka dalam skripsi ini penulis mengambil judul: **“Analisis Pengaruh Harmonisa Terhadap Unjuk Kerja *Miniature Circuit Breaker* (MCB) 2A Dan 4A”**. Adapun beban non linier yang digunakan untuk pengujian MCB tersebut adalah lampu pijar dan lampu *fluorescent* yang dipasang paralel dan dikombinasikan dalam perangkaiannya untuk mendapatkan variasi nilai distorsi harmonik. Untuk MCB yang digunakan dalam pengujian ini adalah MCB dengan rating arus nominal 2A dan 4A dengan standarisasi SNI.

1.2 Tujuan Skripsi

Tujuan dari skripsi ini adalah untuk mengetahui bagaimana cara mekanisme kerja dari *Miniature Circuit Breaker* (MCB) terhadap pengaruh adanya distorsi harmonik dari beban nonlinier berupa lampu pijar dan lampu *fluorescent ballast* elektronik yang dikombinasikan maupun tidak dengan diberikan arus sebesar 1,5 x arus nominal (I_n) pada MCB yang berasal dari jumlah pemakaian beban itu sendiri.

1.3 Batasan Masalah

Pada skripsi ini masalah yang diangkat adalah menganalisis mekanisme kerja dari *Miniature Circuit Breaker* (MCB) 2A dan 4A mengenai bagaimana

lamanya waktu yang diperlukan oleh MCB untuk melakukan pemutusan rangkaian terhadap adanya arus lebih yang diberikan yaitu sebesar $1,5 \times$ arus nominal (I_n) dengan diberi beban tanpa harmonik berupa lampu pijar dan beban yang menimbulkan harmonik yaitu lampu *fluorescent ballast* elektronik.

1.4 Metode Pengujian

Untuk memperoleh informasi dan berbagai data yang diperlukan dalam penulisan skripsi ini, penulis menggunakan metode sebagai berikut :

1. Studi Pustaka, yaitu mengumpulkan data dan informasi dengan cara mencari referensi dan literatur-literatur yang berhubungan dengan penulisan skripsi ini, seperti buku-buku panduan, website, jurnal dan data sheet tentang komponen yang digunakan.
2. Metode Eksperimen yang digunakan untuk mencoba dan membuktikan rangkaian pengujian harmonik yang dibuat.

1.5 Sistematika Penulisan

Penulisan skripsi ini disusun secara sistematis yang terdiri atas bagian-bagian yang saling berhubungan sehingga diharapkan sudah dipahami dan dapat diambil manfaatnya. Adapun uraian singkat tentang hal ini adalah sebagai berikut.

- **BAB 1 PENDAHULUAN**

Merupakan pendahuluan yang berisi latar belakang, tujuan penelitian, batasan masalah, metode penelitian, serta sistematika penulisan.

- **BAB 2 LANDASAN TEORI**

Dalam bab ini mengenai konsep dasar teori dari analisis pengaruh harmonik pada *circuit breaker* yang mencakup tentang definisi harmonik, distorsi harmonik, distorsi tegangan dengan distorsi arus, *Total Harmonic Distortion* (THD), sumber harmonik, efek harmonik, cara pengurangan harmonik, definisi *Miniature Circuit Breaker* (MCB), bagian MCB, tipe-tipe MCB, karakteristik dan mekanisme kerja dari MCB.

- **BAB 3 METODE PENGUJIAN**

Pada bab 3 ini berisi mengenai metode pengujian terhadap *Circuit Breaker* yaitu menggunakan *Miniature Circuit Breaker* (MCB) untuk dianalisis pengaruhnya apabila terdapat harmonik pada instalasi listrik, yang berisi mengenai rangkaian pengujian, peralatan yang digunakan, prosedur pengujian, dan rancangan beban harmonik

- **BAB 4 ANALISIS DATA**

Pada bab 4 ini berisi mengenai hasil data yang diperoleh dari pengujian yang dilakukan di laboratorium tegangan tinggi dan melakukan analisa data dari hasil yang telah diperoleh sebagai pembuktian mengenai pengaruh adanya harmonik pada *Miniature Circuit Breaker*.

- **BAB 5 KESIMPULAN**

Pada bab 5 ini berisi mengenai kesimpulan dari skripsi ini.

BAB II LANDASAN TEORI

2.1 Harmonik

2.1.1 Definisi Harmonik

Pada sistem tenaga listrik umumnya menggunakan arus bolak-balik atau AC (*Alternating Current*), yang lebih idealnya menyuplai tegangan dan arus ke peralatan-peralatan konsumen dengan bentuk gelombang sinusoidal murni. Permasalahannya adalah sulit untuk mendapatkan gelombang sinusoidal murni yang disebabkan karena pemasangan pada beban-beban itu sendiri yaitu pemasangan secara paralel atau secara seri. Harmonik dapat diartikan sebagai tegangan maupun arus dengan frekuensi diatas frekuensi dasar dari sistem.

Harmonik merupakan hasil produk elektronika modern yang disebabkan karena penggunaan jenis beban yang non linier. Beban nonlinier umumnya digunakan untuk komponen *switching*, sebagai contoh penggunaan kapasitor sebagai filter pada rangkaian penyearah yang ditujukan untuk memperoleh tegangan DC (*Direct Current*) murni. Akan tetapi, arus pada sumber bolak-baliknya hanya akan mengalir pada saat terjadinya pengisian muatan pada kapasitor, sehingga bentuk gelombang arus sumber bolak-balik tidak proporsional dengan tegangannya dan mengalami distorsi[1].

Komponen-komponen arus yang mengalir ke dalam sistem adalah sebagai berikut :

$$I_s(t) = \sqrt{2}I_{s1} \sin(\omega t - \phi) + \sum_{h \neq 1}^{\infty} \sqrt{2}I_{sh} \sin(h\omega t - \phi h) \dots\dots\dots(2.1)$$

Keterangan :

- I_s = arus yang mengalir pada sistem (peralatan)
- I_{s1} = nilai rms dari komponen fundamental
- I_{sh} = nilai rms dari komponen arus harmonik orde ke h
- h = orde harmonik (h = 2, 3, 4, 5,)

Hal ini berarti, arus yang mengalir pada sistem terdiri dari komponen arus fundamental dan juga komponen arus harmoniknya. Dapat juga dianalisis dengan menggunakan konsep deret fourier yang didefinisikan sebagai berikut[2] :

$$Y(t) = Y_o + \sum_{n \neq 1}^{\infty} Y_n \sqrt{2} I_{sh} \sin(n\omega t - \phi_n) \dots\dots\dots(2.2)$$

Keterangan :

Y_o = amplitudo dari komponen DC dimana biasanya dalam jaringan distribusi bernilai nol

Y_n = nilai rms dari komponen harmonik ke-n

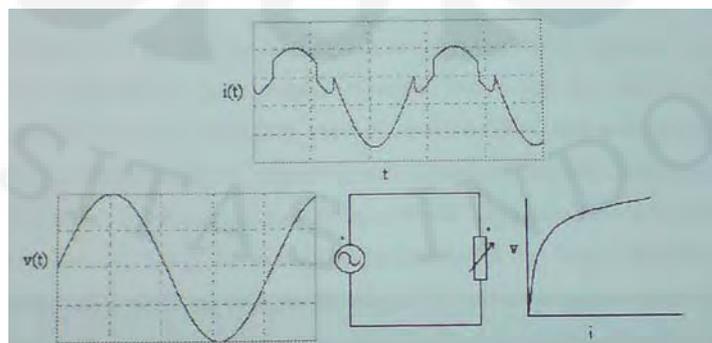
f = frekuensi dasar (50 Hz)

ϕ_n = sudut fasa dari komponen harmonik ke-n

Komponen arus harmonik yang dibangkitkan hanya orde ganjil karena bentuk gelombang arus dasarnya yang simetrik. Dengan demikian, frekuensi dari arus maupun tegangan harmonik yang dihasilkan adalah kelipatan ganjil dari frekuensi dasar sistem. Misalnya di Indonesia menggunakan frekuensi sistemnya adalah 50 Hz, maka frekuensi harmonik yang terjadi adalah 150 Hz pada harmonik orde ke-3, 250 Hz pada orde ke- 5, 350 Hz pada orde ke-7, dan seterusnya.

2.1.2 Distorsi Harmonik

Cacat atau distorsi harmonik disebabkan oleh penggunaan peralatan yang nonlinier pada sistem tenaga listrik. Ketidaklinieran ini yaitu arusnya tidak sebanding dengan tegangan yang diberikan. Gambar 2.1 dibawah ini menunjukkan sebuah tegangan sinusoidal pada sebuah beban nonlinier.



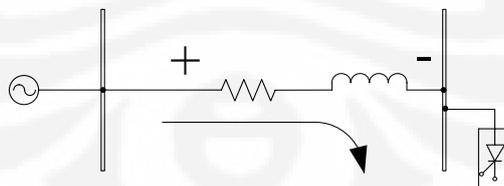
Gambar 2.1 Beban nonlinier[2]

Apabila sistem tenaga listrik dibagi menjadi elemen seri dan paralel, maka ketidaklinieran pada sistem umumnya ditemukan pada elemen-elemen yang dipasang secara paralel. Sebagai contoh misalnya pada trafo dimana sumbernya harmoniknya adalah akibat impedansi magnetisasi paralel sedangkan impedansi bocor serinya memiliki sifat linier.

Perkembangan teknologi saat ini dapat berpengaruh besar terhadap sistem tenaga listrik. Hal ini dapat dilihat disekitar kita, dimana semakin banyaknya pemakaian jenis beban nonlinier pada instalasi tenaga listrik yang ternyata menyebabkan terjadinya harmonik pada gelombang arus listrik maupun tegangannya. Adanya harmonik dapat mempengaruhi kinerja dari peralatan-peralatan listrik yang terpasang dan juga terhadap *circuit breaker* sebagai proteksi dari peralatan pada instalasi tenaga listrik. Harmonik dapat mempengaruhi mekanisme kerja pada *circuit breaker* seperti abnormalnya proses *tripping* sehingga fungsinya sebagai alat proteksi menjadi kurang sempurna untuk memproteksi instalasi tenaga listrik dan peralatan listrik lainnya.

2.1.3 Distorsi Tegangan dan Distorsi Arus

Harmonik terdiri dari arus harmonik dan tegangan harmonik, dimana arus harmonik dihasilkan dari arus yang terpasang secara paralel sedangkan untuk tegangan harmonik dihasilkan dari cacatnya gelombang arus (terdistorsi) yang mengalir melalui impedansi seri linier pada sisi penerima.



Gambar 2.2 Arus harmonik dan tegangan harmonik[2]

Berdasarkan gambar 2.2 diatas, sebuah sumber dapat kita asumsikan mengandung tegangan frekuensi dasar. Arus harmonik mengalir melalui impedansi sistem dan menyebabkan terjadi drop tegangan untuk tiap harmonik dan menyebabkan terjadinya tegangan harmonik pada beban. Besarnya nilai

distorsi tegangan tergantung dari impedansi dan arus. Besarnya arus harmonik yang dihasilkan oleh beban akan mendekati konstan untuk tiap tingkat pembebanan apabila batas distorsi bebannya lebih kecil dari 5%. Arus beban nonlinier mengalir karena banyaknya penggunaan elektronika modern yang menggunakan sumber arus searah (DC) untuk operasinya. Hal ini disebabkan karena tegangan yang dikonsumsi oleh pengguna listrik adalah arus bolak-balik (AC) sehingga dibutuhkan sebuah peralatan yang berfungsi untuk mengubah arus dari arus AC menjadi arus DC yang disebut inverter.

Jadi, distorsi tegangan terjadi akibat adanya harmonik pada arus beban dimana jenis beban yang sama dengan tempat yang berbeda pada sistem tenaga listrik akan menghasilkan nilai distorsi tegangan yang berbeda juga. Distorsi yang terdapat pada sistem tenaga listrik yang padat dengan impedansi yang kecil umumnya distorsinya kecil. Akan tetapi jika impedansinya tinggi walaupun sistemnya kecil, distorsi tegangan bisa menjadi tinggi dan mengakibatkan masalah[3].

2.1.4 THD (*Total Harmonic Distortion*)[2]

THD (*Total Harmonic Distortion*) merupakan perbandingan nilai rms (*root mean square*) komponen harmonik dari sebuah besaran (arus atau tegangan) terhadap nilai rms besaran (arus atau tegangan) tersebut pada frekuensi dasarnya dan biasanya dihitung dalam persen. THD digunakan untuk mengukur besarnya nilai efektif komponen-komponen harmonik dari gelombang cacat (terdistorsi) yang dirumuskan sebagai berikut :

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h=\max} M_h^2}}{M_1} \dots\dots\dots (2.3)$$

dimana M_h adalah nilai rms komponen harmonik (arus atau tegangan harmonik) ke-h dan M_1 adalah nilai rms arus atau tegangan pada frekuensi dasar. Nilai rmsnya sendiri dapat diperoleh jika diketahui nilai rms komponen harmonik pertama dan nilai THD nya yaitu :

$$rms = \sqrt{\sum_{h=1}^{h=\max} M_h^2} = M_1 \cdot \sqrt{1 + THD^2} \dots\dots\dots (2.4)$$

Untuk arus harmonik nilai THD nya :

$$THD = \frac{\sqrt{I_2^2 + I_3^2 + \dots + I_n^2}}{I_1} \dots\dots\dots (2.5)$$

dengan I_n adalah nilai arus rms harmonik ke-n. Sedangkan untuk tegangan harmonik nilai THD nya adalah:

$$THD = \frac{\sqrt{V_2^2 + V_3^2 + \dots + V_n^2}}{V_1} \dots\dots\dots (2.6)$$

dengan V_n adalah nilai tegangan rms harmonik ke-n.

Untuk *Total Harmonic Distortion* arus nilainya bervariasi dari beberapa persen sampai dengan lebih dari 100%, sedangkan untuk THD tegangan biasanya nilainya kurang dari 5%. Untuk nilai THD yang nilainya dibawah 5% masih dapat ditoleransi, sedangkan jika nilai THD nya lebih dari 10% sudah tidak dapat diterima karena dapat mengakibatkan masalah untuk beban-beban dan peralatan yang sensitif[3].

THD dapat bertindak sebagai indikator untuk mengetahui seberapa panas yang dihasilkan ketika tegangan terdistorsi dikenakan pada beban resistif. Selain itu, THD dapat mengindikasikan seberapa banyak penambahan rugi sistem akibat adanya arus yang mengalir pada sebuah konduktor. Kelemahan dari THD ini adalah tidak dapat mengindikasikan stress tegangan pada sebuah kapasitor karena stress tegangan berhubungan dengan nilai puncak tegangan bukan nilai rms (*root mean square*) nya[2].

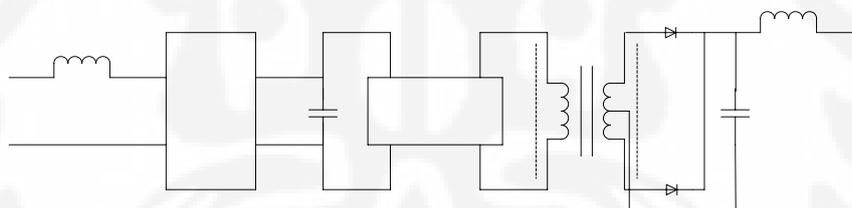
2.1.5 Sumber-Sumber Harmonik

Sumber-sumber yang dapat menimbulkan harmonik adalah berbagai macam beban-beban nonlinier antara lain komputer, printer, lampu *flurorescent* yang menggunakan *ballast* elektronik, aneka jenis peralatan elektronika daya, pengendali kecepatan motor, penggunaan motor induksi, pengisi baterai, dan sebagainya yang sebagian besar bekerja dengan prinsip *switching* frekuensi tinggi.

2.1.5.1 Lampu *Fluorescent* Dengan *Ballast* Elektronik

Sebagian besar beban-beban yang digunakan dalam suatu bangunan umumnya adalah lampu untuk pencahayaan. Lampu *fluorescent* merupakan jenis lampu yang banyak menjadi pilihan untuk penghematan energi. Lampu jenis ini membutuhkan *ballast* sebagai penyedia tegangan awal yang tinggi untuk mengawali aliran arus diantara dua elektroda pada tabung. Selain itu, *ballast* berfungsi juga untuk membatasi arus yang mengalir pada lampu.

Ballast yang umumnya digunakan pada lampu *fluorescent* terdiri dari dua jenis yaitu *ballast magnetic* dan *ballast* elektronik. Kedua jenis *ballast* tersebut menghasilkan harmonik terutama harmonik arus. Akan tetapi, *ballast* elektronik yang memberikan kontribusi harmonik yang lebih besar dibandingkan dengan *ballast magnetic*[4]. Komponen arus harmonik yang dominan pada lampu ini adalah harmonik ke-3. *Ballast* elektronik pada dasarnya menggunakan prinsip teknik konversi DC / AC yaitu *switch-mode power supply* seperti pada gambar 2.3 dibawah ini[5].



Gambar 2.3 *switch-mode power supply*[4]

2.1.5.2 Mesin Listrik

Harmonik dapat ditimbulkan oleh mesin-mesin listrik yang berputar baik motor maupun pada generator. Harmonik yang terjadi pada mesin-mesin listrik terjadi karena adanya stator maupun slot rotor yang bentuknya tidak simetris atau karena ketidakseimbangan pada kumparan tiga fasanya. Akibatnya, harmonik menginduksikan gaya gerak listrik (ggl) pada kumparan stator dengan frekuensi yang sama dengan perbandingan antara kecepatan dengan panjang gelombangnya. Resultan dari Gaya Gerak Magnet (ggm) yang terjadi pada mesin akan memproduksi besarnya harmonik yang bergantung pada fungsi kecepatan. Harmonik tambahan dapat terjadi apabila inti magnet yang mengalami saturasi[6].

2.1.5.3 Electric Drive

Penggunaan *electric drive* dapat menyebabkan timbulnya harmonik karena adanya rangkaian inverter maupun *rectifier* yang pada dasarnya merupakan proses pensaklaran. Umumnya, aplikasi *electric drive* ini ditujukan mendapatkan variasi tegangan maupun frekuensi pada sumber tenaga yang disuplai pada motor.

2.1.5.4 Transformator

Transformator merupakan sumber harmonik yaitu pada saat terjadinya saturasi sehingga arus primer yang mengalir tidak proporsional dengan tegangan primernya.

2.1.6 Efek Harmonik

Setiap peralatan yang terhubung dengan sistem tenaga dan mengandung harmonik akan memiliki efek yang berbeda-beda, dimana peralatan-peralatan tersebut dapat mengalami penurunan kinerja atau bahkan dapat mengalami kerusakan yang pada akhirnya dapat berpengaruh terhadap kualitas daya dari sistem tenaga listrik tersebut.

2.1.6.1 Efek Harmonik Pada Sistem Telekomunikasi

Saluran komunikasi apabila ditempatkan berdekatan dengan konduktor sistem tenaga listrik dapat menyebabkan interferensi pada saluran komunikasi baik interferensi induktif, kapasitif, maupun konduktif[6].

2.1.6.2 Efek Harmonik Pada Alat Metering

Harmonik yang terjadi dalam sistem tenaga listrik dapat menimbulkan kesalahan pembacaan pada peralatan metering seperti kWh meter. Harmonik dapat menimbulkan tambahan torsi pada kWh meter jenis elektromekanis yang menggunakan piringan induksi berputar. Akibatnya, putaran piringan akan lebih cepat atau terjadi kesalahan ukur kWh meter karena piringan induksi tersebut dirancang hanya untuk beroperasi pada frekuensi dasar (50 Hz, frekuensi dasar di Indonesia). Dengan kesalahan sedikit saja dalam pembacaan dapat menyebabkan biaya listrik yang harus dibayar menjadi lebih besar[5].

2.1.6.3 Efek Harmonik Pada Transformator

Efek harmonik yang dapat terjadi pada sistem tenaga pada transformator adalah panas lebih yang disebabkan oleh rugi-rugi arus beban yang mengandung harmonik, dimana hal ini kemungkinan disebabkan adanya harmonik antara induktansi transformator, kapasitansi sistem, tekanan-tekanan mekanis isolasi belitan dan laminasi serta getaran. Harmonik dapat mempengaruhi kerja transformator dengan dua cara yaitu karena harmonik tegangan dan harmonik arus. Harmonik tegangan menyebabkan terjadinya rugi-rugi tambahan pada inti besi dari transformator karena frekuensi harmonik yang tinggi. Hal ini disebabkan karena transformator memerlukan daya magnetisasi yang besar. Harmonik arus terpengaruh oleh kumparan transformator. Harmonik arus menghasilkan nilai rms arus yang mengalir pada transformator menjadi lebih besar sehingga rugi-rugi tembaga (I^2R) yang dihasilkan juga bertambah besar. Rugi-rugi arus eddy pada komponen juga meningkat sebanding dengan kuadrat arus harmonik dan kuadrat dari orde frekuensi arus tersebut[7].

2.1.6.4 Efek Harmonik Pada Kapasitor Bank

Kapasitor *Bank* umumnya digunakan secara luas pada perindustrian, khususnya pada instalasi tenaga listrik yang memiliki faktor daya yang rendah. Reaktansi kapasitor berbanding terbalik dengan frekuensi menyebabkan harmonik arus menjadi lebih mudah mengalir pada kapasitor akibatnya terjadi beban lebih dan dapat merusak kapasitor *bank*.

Efek lain yang terjadi pada kapasitor *bank* akibat harmonik adalah terjadinya peristiwa resonansi harmonik. Peristiwa resonansi harmonik terjadi karena reaktansi kapasitif dan reaktansi induktif besarnya sama dengan salah satu frekuensi harmonik yang terjadi sehingga mengakibatkan penguatan harmonik yang terjadi. Tipe dari resonansi harmonik ini terdiri dari dua jenis, yaitu resonansi seri dan resonansi paralel. Pada umumnya resonansi seri mengakibatkan penguatan tegangan, sedangkan resonansi paralel mengakibatkan penguatan arus. Akibatnya dengan adanya resonansi paralel menyebabkan terjadinya pemanasan pada kapasitor bank karena bertambahnya rugi-rugi pada besi, isolasi dan

konduktor disertai dengan kenaikan temperatur. Jika arus harmonik yang tinggi dibiarkan, maka akan memperpendek umur dan merusak peralatan[8].

2.1.6.5 Efek Harmonik Pada Mesin Listrik

Adanya harmonik tegangan pada motor akan mengakibatkan rugi-rugi tambahan pada inti magnet dari rotor. Rugi histerisis dan arus eddy menjadi meningkat karena frekuensi dari tegangan harmonik tersebut pada kumparan. Rugi histerisis akan mengalami kenaikan karena kenaikan frekuensi, sedangkan rugi-rugi arus eddy meningkat seiring kuadrat frekuensi tersebut. Selain itu, harmonik arus menyebabkan kenaikan rugi-rugi tembaga (I^2R). Hal ini dapat menyebabkan terjadinya peningkatan suhu dari kumparan yang dapat merusak isolasi sehingga dapat mengurangi umur dari motor tersebut[8].

2.1.6.6 Efek Harmonik Pada Konduktor

Konduktor merupakan media yang dipakai untuk mentransferkan energi listrik. Arus yang mengalir pada konduktor dapat menyebabkan terjadinya rugi-rugi konduktor (I^2R). Apabila arus yang mengalir merupakan arus harmonik menyebabkan kenaikan pada rugi-rugi tersebut karena kenaikan arus rms tersebut dan menyebabkan panas pada konduktor tersebut. Panas tersebut semakin lama akan mengurangi daya hantarnya yang pada akhirnya meningkatkan rugi-rugi daya dan menurunkan efisiensi pada konduktor.

Apabila sistem tidak seimbang yang biasanya terjadi pada sistem tiga fasa empat kawat menyebabkan arus akan dialirkan menuju konduktor kawat netral, dampaknya adalah kawat konduktor netral menjadi panas. Pada umumnya ukuran konduktor netral sama dengan konduktor fasa sehingga akan terjadi beban berlebih yang dapat merusak konduktor kawat netral tersebut[8].

2.1.6.7 Efek Harmonik Pada Peralatan Proteksi

Peralatan proteksi seperti *Circuit Breaker* (CB) lebih mudah mengalami gangguan apabila arus harmonik mengalir. Sistem kerja pada *Circuit Breaker* (CB) menggunakan panas untuk men-*trip*-kan bimetal yang terdapat dalam CB tersebut. Jika arus yang lewat melebihi ratingnya atau arusnya tidak normal, maka

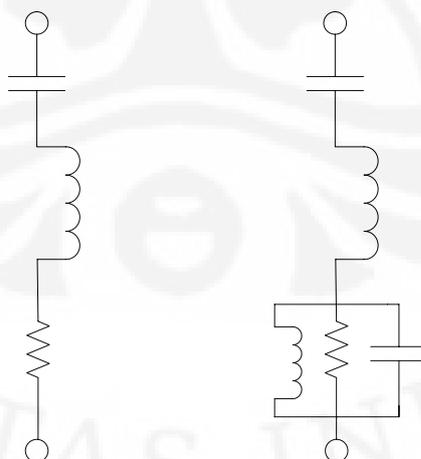
CB akan menganggap arus yang melewatinya tinggi sehingga CB akan melakukan proses *tripping* karena CB langsung mendapatkan arus *peak*-nya. Rele elektromagnetik dapat beroperasi lebih cepat atau lebih lambat dari yang diharapkan akibat arus yang mengandung harmonik[8].

2.1.7 Cara Pengurangan Harmonik

Gangguan harmonik yang cukup besar dapat mengakibatkan kualitas listrik menjadi kurang baik. Untuk itu dibutuhkan cara untuk meredam gangguan harmonik tersebut dengan cara memasang filter harmonik. Filter harmonik adalah rangkaian yang digunakan pada sistem tenaga listrik untuk mengurangi distorsi tegangan dan sebagai koreksi faktor. Filter harmonik dirancang untuk bersifat kapasitif pada frekuensi dasar sehingga menghasilkan daya reaktif yang dibutuhkan oleh konverter juga dapat berfungsi sebagai pengoreksi faktor daya. Beberapa jenis filter yang umumnya digunakan untuk mengatasi gangguan harmonik adalah sebagai berikut :

a. *Band-pass filter*

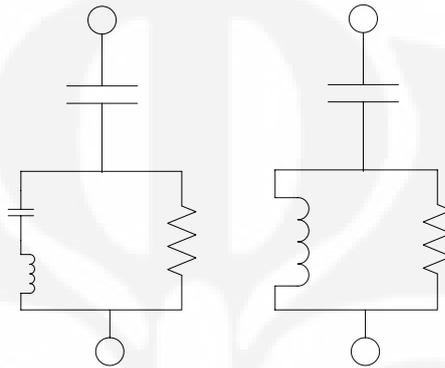
Band-pass filter merupakan jenis filter yang digunakan untuk mengatasi harmonik pada orde rendah misalnya harmonik pada orde 5, 7, 11, 13, dan sebagainya. Jenis filter ini dapat ditala pada satu frekuensi (*single-tuned filter*) maupun untuk dua frekuensi (*double-tuned filter*)



Gambar 2.4 *Single-tuned* dan *Double-tuned filter*[11]

b. *High-pass filter*

High-pass filter digunakan untuk mengatasi harmonik pada orde yang lebih tinggi. Pada jenis filter ini mempunyai tipe khusus yaitu *C-type high-pass filter* yang digunakan untuk menyediakan daya reaktif dan mengatasi resonansi paralel.



Gambar 2.5 *High-pass filter* dan *C-type high-pass filter*[11]

Selain penggunaan filter harmonik, ada cara lain yang digunakan untuk mengurangi efek harmonik yaitu :

a. Memperbesar kawat netral

Pada sistem instalasi tenaga yang menggunakan sistem tiga fasa empat kawat, terdapat tiga kawat fasa dan satu kawat netral. Apabila beban yang terdapat pada sistem tersebut lebih banyak penggunaan beban nonlinier, akibatnya terjadi pengaruh harmonik yang menyebabkan kawat netral mengalami panas yang berlebih. Untuk mengatasi kawat netral dari pengaruh harmonik yang menyebabkan panas pada kawat tersebut, maka cara yang dapat dilakukan adalah memperbesar ukuran diameter kawat netral dari ukuran standarnya. Sebaiknya pada panel-panel listrik menggunakan kawat netral untuk sistem pentanahan yang ukurannya lebih besar dari ukuran standarnya.

b. Menurunkan kapasitas Transformator

Mengurangi kapasitas suplai daya transformator merupakan salah satu cara yang efektif untuk mengurangi pengaruh harmonik pada sistem tenaga listrik.

2.2 *Miniature Circuit Breaker* (MCB)

2.2.1 Definisi

Pada sistem tenaga listrik perlu diberikan suatu sistem proteksi untuk melindungi peralatan listrik dari kerusakan akibat adanya beban lebih atau terjadi hubung singkat juga untuk melokalisir luas daerah yang terganggu menjadi sekecil mungkin. Peralatan proteksi tersebut banyak jenisnya tergantung dengan kebutuhan yang biasa digunakan baik pada perindustrian maupun pada perumahan, misalnya sekering maupun *Miniature Circuit Breaker* (MCB). *Miniature Circuit Breaker* (MCB) merupakan jenis peralatan proteksi berfungsi sebagai memproteksi arus lebih untuk melindungi peralatan listrik dari arus lebih yang disebabkan terjadinya beban lebih dan arus lebih karena adanya hubungan pendek (*short circuit*).

Prinsip dasar bekerjanya suatu MCB yaitu untuk pemutusan rangkaian jika terjadi beban lebih pada rele termis akibat arus yang mengalir pada MCB melebihi arus nominal secara terus-menerus, maka sistem pemutusannya dilakukan oleh logam bimetal. Untuk pemutusan yang terjadi apabila terjadi hubung singkat yang menimbulkan arus yang sangat besar, maka digunakan elektromagnet. Pemutusan hubungan kontak yang terletak pada pemadam busur dan terjadi pembukaan saklar pada MCB disebabkan karena bimetal ataupun elektromagnet bekerja. Gawai proteksi digunakan pada instalasi listrik umumnya digunakan untuk :

- Mengamankan hantaran, peranti, pemanfaat dan motor listrik terhadap beban lebih.
- Mengamankan terhadap *hubung pendek* antar fase atau antar fase dengan netral/bumi, dan terhadap *hubung pendek* dalam aparatus.
- Pengaman terhadap *hubung pendek* dengan badan mesin atau aparatus.

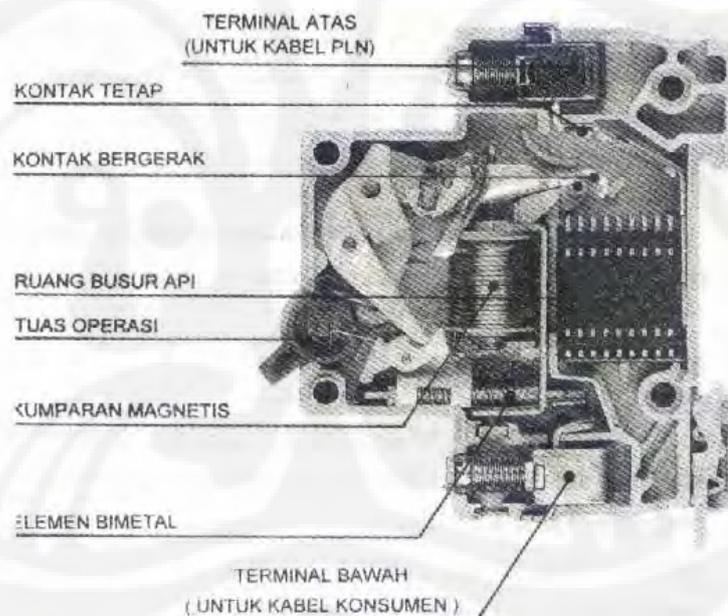
Pada umumnya MCB yang digunakan pada rumah tinggal seperti *pengaman lebur* diutamakan untuk proteksi *hubung pendek*, oleh karena itu dalam pemakaiannya diutamakan untuk mengamankan instalasi atau konduktornya. Sedangkan untuk penggunaan MCB produksi PT Schneider Electric dengan merek Merlin Gerlin diutamakan sebagai pembatas arus dengan karakteristik

current limiter dan juga sebagai gawai pengaman dari arus hubung pendek yang bekerja seketika.

Menurut peraturan IEC 898-85 terdapat tiga macam karakteristik pada MCB, yaitu tipe B, C, dan D. Untuk arus nominal yang digunakan untuk rumah hunian berdasarkan peraturan tersebut dengan pengenal tegangan 230/400 V ialah 6, 8, 10, 13, 16, 20, 25, 32, 40, 50, dan 63 A dengan kemampuan membuka (*breaking capacity*) jika terjadi hubung pendek 3 kA, 6 kA, atau sampai 10 kA[9].

2.2.2 Bagian-Bagian MCB

MCB memiliki bagian-bagian penting yang menunjang fungsi MCB sebagai alat sistem proteksi. Adapun bagian-bagian tersebut dapat dilihat pada gambar dibawah ini.



Gambar 2.6 Bagian-bagian MCB[9]

2.2.3 Tipe-tipe MCB[10]

MCB yang ada di Indonesia yang di produksi oleh PT. Schneider Indonesia terdiri dari dua jenis, yaitu :

1 MCB PLN

Untuk tipe MCB ini umumnya digunakan oleh PLN yang diproduksi dengan tipe C32N.

2 MCB *Private*

MCB *private* biasanya digunakan untuk proteksi pada kegiatan di perindustrian atau kegiatan umum lainnya. MCB *private* diproduksi dengan tipe :

- NC45a
MCB untuk tipe ini digunakan sebagai proteksi untuk instalasi pada perumahan baik untuk pasar lokal maupun *export* dengan berlogo SNI.
- NC45aD
MCB tipe NC45aD hanya diproduksi untuk pasar lokal yang digunakan sebagai proteksi pada motor listrik dan trafo.
- NC45N
Untuk MCB tipe ini sama dengan MCB tipe NC45a, perbedaannya MCB ini hanya digunakan khusus untuk panel atau kegiatan industri.
- NC45H
MCB NC45H juga sama tipenya dengan NC45a, perbedaannya hanya untuk *toggle* lokal I-O dan biasanya digunakan pada panel atau kegiatan industri.
- Domae
MCB Domae diproduksi untuk pasar lokal dan *export*. MCB Domae dengan kurva B hanya diproduksi untuk keperluan *export* tanpa menggunakan *print* SNI. MCB jenis ini digunakan khusus untuk perumahan (4,5 kA dan 6 kA).

2.2.4 Prinsip Kerja *Miniature Circuit Breaker* (MCB)

Berdasarkan dari konstruksinya, maka untuk prinsip kerja pemutusannya pada MCB memiliki dua cara pemutusan yaitu, pemutusan secara thermal karena adanya beban lebih, dan pemutusan secara elektomaknit karena hubung singkat.

2.2.4.1 Prinsip Kerja MCB Saat Beban Lebih

Arus listrik dapat menyebabkan panas pada suatu tahanan, meskipun arus listrik tersebut nilainya kecil. Hal ini berarti arus yang mengalir pada sebuah *bimetal* yang terdapat pada MCB dapat menimbulkan panas. Apabila arus yang melewati *bimetal* melebihi dari arus nominal MCB atau melebihi *rating*

amperenya tersebut menyebabkan *bimetal* akan menjadi melengkung karena dua logam tersebut mempunyai koefisien muai yang berbeda. Apabila arus semakin melebihi arus nominalnya, maka yang terjadi *bimetal* akan semakin melengkung menyebabkan *bimetal* tersebut menyentuh pemacu dan menarik komponen trip agar tidak kontak dengan terminal atas dan bersamaan dengan itu tuas operasi/*toggle* menjadi *off*.

2.2.4.2 Prinsip Kerja MCB Saat Hubung Singkat

Pemutusan ini terjadi apabila terjadi hubung singkat yang menimbulkan arus yang sangat besar sehingga membutuhkan waktu yang relatif cepat untuk melindungi peralatan listrik dengan melakukan pemutusan rangkaian (*trip*). Karena membutuhkan waktu pemutusan yang relatif cepat, maka pemutusan rangkaian tidak dilakukan oleh bimetal melainkan dilakukan dengan cara sistem induksi elektromagnetik. Untuk cara kerjanya hampir sama dengan prinsip induktor. Apabila suatu induktor dialiri arus listrik yang besar menyebabkan inti induktor dalam MCB akan bergerak karena timbulnya induksi magnet. Arus listrik yang besar mengalir pada *coil* dalam waktu yang singkat akan menghasilkan induksi magnet pada *coil*. Akibatnya induksi magnetik menggerakkan inti pada MCB untuk mendorong komponen trip sehingga kontak antara terminal atas dengan terminal bawah akan terputus yang menyebabkan *Miniature Circuit Breaker* menjadi *off*.

2.2.5 Karakteristik MCB[9]

Karakteristik MCB terbagi dalam empat jenis yaitu, jenis B, C, D dan CL yang dinyatakan dalam I_n dengan lamanya waktu untuk tidak terjadinya trip dan harus trip berdasarkan pada ketentuan pengujian gambar 2.7 dibawah ini.

Karakteristik MCB

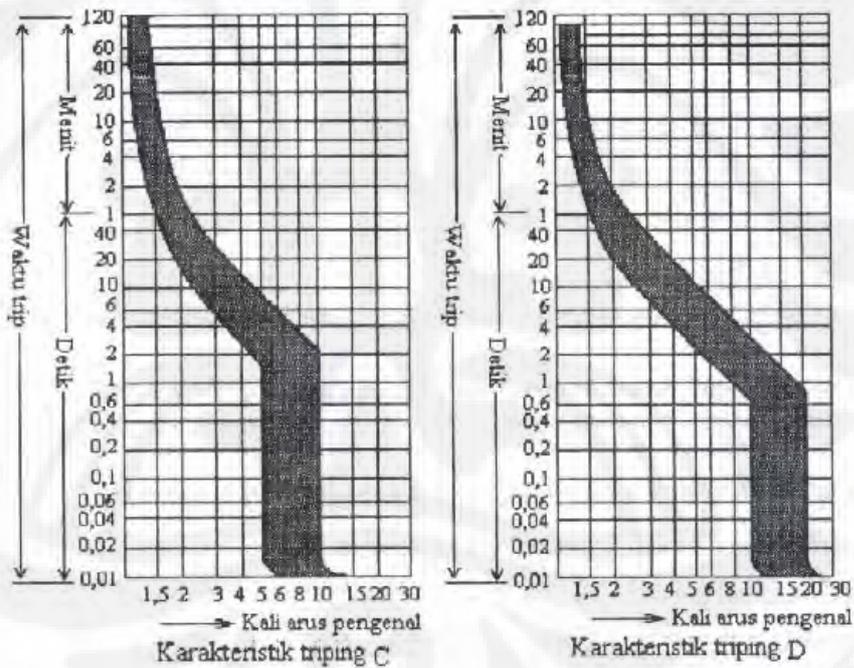
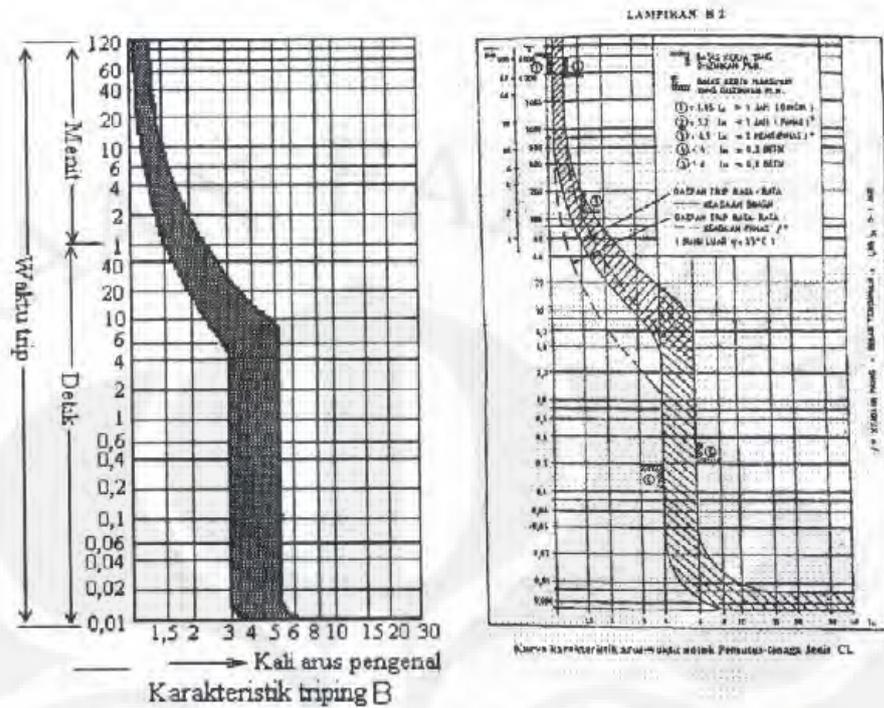
Pengujian	Jenis	Arus Uji	Kondisi	Batas waktu tidak trip atau trip	Hasilyang diperoleh
a	B, C, D	$1,13 I_n$	Dingin	$t \geq 1$ jam (untuk $I_n < 63$ A) $t \geq 2$ jam (untuk $I_n > 63$ A)	tidak trip
	CL	$1,05 I_n$		$t \geq 1$ jam	
b	B, C, D	$1,45 I_n$	Segera setelah pengujian	$t \geq 1$ jam ($I_n < 63$ A) $t \geq 2$ jam ($I_n > 63$ A)	trip
	CL	$1,2 I_n$		$t \geq 1$ jam	
c	B, C, D	$2,55 I_n$	Dingin	$1 \text{ detik} < t < 60 \text{ detik}$ ($I_n < 32$ A)	trip
	CL	$1,2 I_n$	Panas*)	$1 \text{ detik} < t \geq 120 \text{ detik}$ ($I_n > 32$ A) $t \geq 120 \text{ detik}$	
d	B	$3 I_n$	Dingin*)	$t > 0,1 \text{ detik}$	trip
	C	$5 I_n$			
	D	$10 I_n$			
	CL	$4 I_n$		$t > 0,2 \text{ detik}$	
e	B	$5 I_n$	Dingin	$t < 0,1 \text{ detik}$	trip
	C	$10 I_n$			
	C	$50 I_n$			
	CL	$6 I_n$		$t < 0,2 \text{ detik}$	

SPLN 3 – 1978, *Pentanahan jaringan tegangan rendah PLN dan Pentanahan Instalasi.*

Catatan: Istilah "dingin" maksudnya pada pembebanan awal, pada suhu kalibrasi acuan
Istilah "panas" maksudnya pada pembebanan awal, seperti pengujian b

Gambar 2.7 Karakteristik MCB[9]

Karakteristik MCB menurut IEC yang mendekati karakteristik CL yang digunakan oleh PT. PLN (Persero) ialah tipe B. Selain berdasarkan dari tabel pengujian, ada hal lain yang harus diperhatikan dalam pemilihan penggunaan MCB agar sesuai dengan tujuan dalam penggunaannya yaitu melihat karakteristik arus dan waktu terjadinya trip pada masing-masing tipe pada MCB. Adapun karakteristik arus dan waktu trip dapat dilihat dalam grafik untuk tipe B, C, D, dan CL seperti pada gambar 2.8 dibawah ini.



SPLN 3 - 1978, Pentanahan jaringan tegangan rendah PLN dan Pentanahan Instalasi.

Gambar 2.8 Grafik Karakteristik Tipe MCB[9]

Karena karakteristik arus dan waktu trip pada tipe-tipe MCB berbeda, maka penggunaannya pada instalasi listrik juga berbeda. Adapun penggunaan dari tipe-tipe tersebut antara lain :

- Tipe B

MCB untuk tipe ini digunakan untuk kontrol dan proteksi pada pengaman kabel atau penghantar terutama untuk instalasi baik pada industri maupun distribusi-distribusi untuk perumahan.

- Tipe C

MCB pada tipe ini digunakan untuk pengaman kabel dan lebih menguntungkan apabila inrush tinggi seperti pada penginstalasian terdapat lampu mercury, motor.

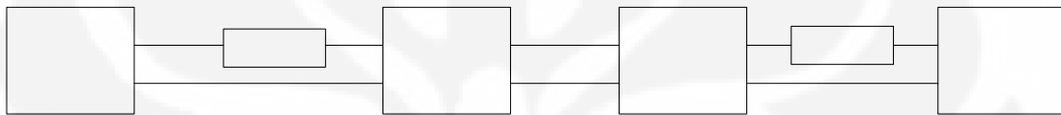
- Tipe D

Pada *Miniature Circuit Breaker* tipe D ini dikhususkan untuk dipakai pada instalasi dengan arus masuk yang tinggi seperti untuk *low Voltage (LV)/ LV* transformer, katup selenoid, dan kapasitor.

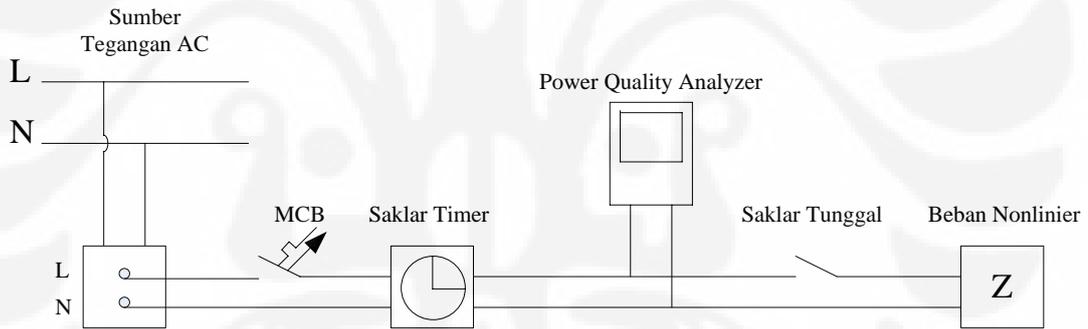
BAB III METODE PENGUJIAN

3.1 Rangkaian Pengujian

Untuk pengujian harmonik pada *Miniature Circuit Breaker* (MCB) dilakukan di Laboratorium Tegangan Tinggi Dan Pengukuran Listrik Departemen Elektro Fakultas Teknik (DTE-2007) Universitas Indonesia. Secara umum bentuk rangkaian pengujian adalah sebagai berikut :

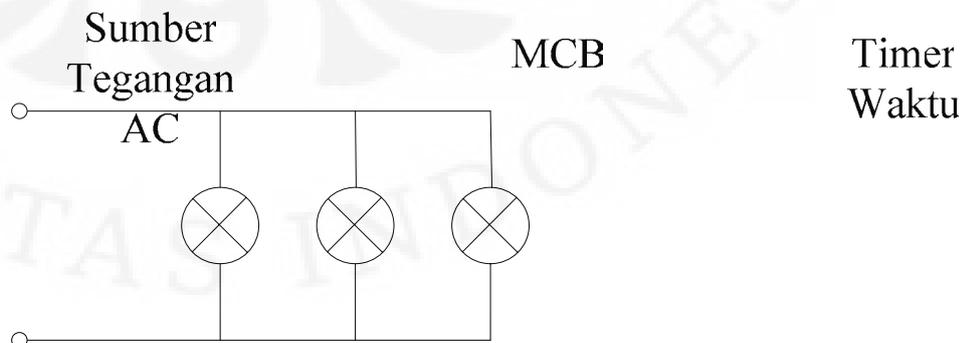


Gambar 3.1 Skema rangkaian pengujian

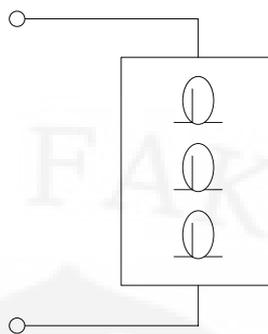


Gambar 3.2 Rangkaian pengujian

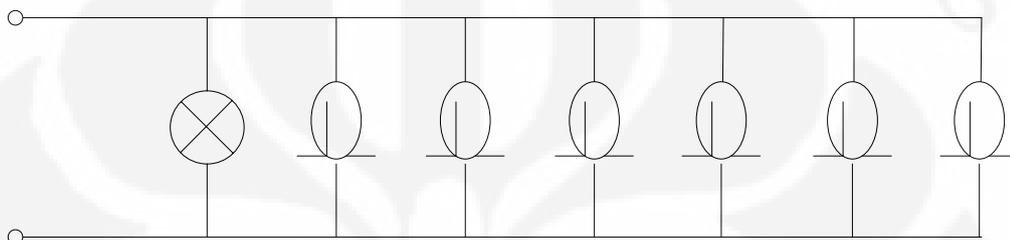
Untuk beban non liniernya yang digunakan adalah lampu pijar dan lampu *fluorescent ballast* elektronik (lampu FBE) yang terlihat pada gambar 3.3 dan gambar 3.4 dibawah ini.



Gambar 3.3 Rangkaian paralel lampu pijar



Gambar 3.4 Rangkaian paralel lampu *fluorescent ballast* elektronik



Gambar 3.5 Rangkaian paralel kombinasi antara lampu pijar dengan lampu *FBE*

Berdasarkan gambar rangkaian pengujian 3.2 diatas, dilakukan untuk mengetahui bagaimana karakteristik waktu pemutusan MCB terhadap adanya harmonik karena penggunaan beban yang bersifat nonlinier yaitu lampu *fluorescent ballast* elektronik. Untuk mengetahui berapa lama waktu yang diperlukan oleh MCB dari awal sampai terjadinya *tripping* dengan menggunakan timer waktu, sedangkan untuk mengetahui adanya suatu harmonik dan besarnya nilai harmonik dapat diketahui dengan menggunakan *Power Quality Analyzer*.

3.2 Spesifikasi Peralatan

3.2.1 *Miniature Circuit Breaker* (MCB)

Miniature Circuit Breaker (MCB) merupakan komponen utama yang akan diuji dan dianalisis bagaimana pengaruhnya untuk melakukan pemutusan rangkaian sebagai alat proteksi peralatan listrik terhadap adanya arus lebih dan hubung singkat. Untuk pengujian pada MCB ini diberikan arus nominal sebesar $1,5 \times I_n$ yang berasal dari banyaknya beban yang digunakan pada rangkaian pengujian dengan menggunakan amperemeter untuk mengetahui besar arusnya agar sebesar $1,5 \times I_n$ dengan rating arus nominal yang digunakan adalah 2A dan 4A. Untuk spesifikasi MCB yang digunakan adalah sebagai berikut:

MCB dengan standarisasi SNI

Rating arus 2A

- Tipe : C2
- Jenis : Domae
- Tegangan nominal : 230 V
- Merek : A
- Standarisasi : 12251 SNI

Rating arus 4A

- Jenis : Domae
- Tegangan nominal : 230 V
- Merek : B
- Standarisasi : 122525 SNI

3.2.2 Timer Waktu Digital

Timer waktu digital atau penggunaan *stopwatch* digital merupakan komponen yang sangat penting dalam pengujian ini karena berfungsi untuk mengetahui lamanya waktu MCB bekerja dari awal pengoperasian sampai terjadinya *tripping*. Prinsip kerja timer ini adalah ketika diberikan tegangan sumber, timer bekerja dengan mulai menghitung dan berhenti apabila sumber hilang. Akan tetapi ketika sumber hilang data yang ada tidak ikut hilang sehingga dapat mengetahui berapa lama waktunya pemutusan MCB. Spesifikasi timer waktu yang digunakan adalah :

- Merek : C
- Model : LE8N-BF
- Tegangan : 24-240 VAC dengan *power nya built-in battery*
- Frekuensi : 50/60 Hz

3.2.3 Saklar

Saklar digunakan hanya berfungsi sebagai *switching*. Saklar yang digunakan adalah saklar tunggal dengan spesifikasi merek D dengan rating tegangan 250 V.

3.2.4 Power Quality Analyzer

Power Quality Analyzer dengan merek HIOKI 3169-20 adalah peralatan yang digunakan untuk mengetahui adanya harmonik dan besarnya nilai harmonik atau THD yang terdapat pada rangkaian pengujian.

3.2.5 Beban-beban

Untuk proses pengujian ini, beban yang digunakan adalah rangkaian variasi beban antara lampu pijar 100W dengan lampu *fluorescent ballast* elektronik 20W dengan spesifikasi lampu yang digunakan adalah sebagai berikut :

- Lampu pijar (13 buah)
E clear compact size 100W E27 220-240V A55CL
- Lampu *fluorescent ballast* elektronik
F 20W 170-240V/50-60Hz

3.3 Prosedur Pengujian

Dalam pengujian MCB ini dilakukan dengan memberikan arus $1,5 \times$ arus nominal (I_n) yang berasal dari jumlah pemakaian beban dengan cara memberikan beban melebihi kapasitas jumlah normalnya. Tujuan dari pengujian ini untuk mengetahui bagaimana karakteristik waktu pemutusan MCB apabila diberikan arus demikian dengan beban yang digunakan dapat menimbulkan harmonik karena penggunaan *ballast* elektronik pada lampu *fluorescent ballast* elektronik. Rating arus MCB yang digunakan adalah 2A dan 4A dengan menggunakan jenis MCB standarisasi SNI dan arus kerja yang diberikan adalah $1,5 \times$ arus nominal (I_n) dengan menggunakan beban nonlinier. Untuk rangkaian beban pengujiannya dilakukan dalam tiga bentuk perangkaian yaitu :

- Lampu pijar yang dipasang paralel
- Lampu *fluorescent ballast* elektronik yang dipasang paralel
- Kombinasi antara lampu pijar dengan lampu *fluorescent ballast* elektronik yang dipasang secara paralel

Untuk mendapatkan nilai arusnya sebesar $1,5 \times I_n$ baik pada MCB dengan rating arus nominalnya 2A maupun 4A adalah dengan memberikan banyaknya

jumlah beban lampu pada rangkaian sampai arusnya mencapai $1,5 \times I_n$ yang diketahui nilainya arus dengan menggunakan amperemeter atau pada HIOKI.

Adapun langkah-langkah yang dilakukan dalam pengujian ini adalah sebagai berikut :

1. Membuat rangkaian pengujian seperti gambar 3.2. sebelumnya periksa terlebih dahulu letak fasa dan netralnya sumber tegangan AC pada kotak kontak yang digunakan agar rangkaian pengujian bekerja dengan baik dan terhindar dari bahaya tersentuh listrik.
2. Memasang MCB yang berstandarisasi SNI pada rangkaian sebagai komponen yang akan diuji dengan rating arus MCB yang digunakan pertama kali pengujian adalah 2A.
3. Memberikan beban lampu pijar dengan daya 100W yang dipasang secara paralel seperti gambar 3.3 untuk beban tanpa harmonik dimana banyaknya jumlah lampu yang diperlukan tergantung sampai arusnya mencapai $1,5 \times I_n$.
4. Menekan saklar menjadi ON yang berfungsi sebagai *switching* antara MCB dengan beban.
5. Menghidupkan MCB dengan menarik tuasnya sehingga MCB menjadi tersambung dengan rangkaian pengujian. Pastikan timer digital dimulai dari angka nol sebelum MCB dihidupkan.
6. Melakukan pencatatan berapa lama waktu yang diperlukan oleh MCB yang diberikan beban nonlinier dengan arusnya $1,5 \times I_n$ dari awal pengoperasian sampai MCB *tripping* kemudian bandingkan dengan karakteristik MCB dengan beban normal berdasarkan pada tabel 2.1 mengenai karakteristik MCB.
7. Mencatat berapa besarnya nilai *Total Harmonic Distortion* (THD) yang terdapat pada rangkaian pengujian yang diketahui dengan menggunakan HIOKI *Power Quality Analyzer*.
8. Setelah selesai, langkah berikutnya adalah mengganti bebannya dengan lampu hemat energi atau lampu TL *ballast* elektronik 20W yang dipasang paralel seperti gambar 3.4 untuk beban harmonik. Dalam penggantian beban ini, sumber tegangan sudah tidak ada karena MCB sebelumnya sudah *trip* akibat beban lebih. Langkah prosedur pengujian sama berdasarkan dari point satu (1) sampai point tujuh (7).

9. Langkah selanjutnya adalah mengganti beban dengan mengkombinasikan antara lampu pijar dengan lampu hemat energi yang dipasang paralel seperti gambar 3.5 diatas untuk mendapatkan nilai variasi besarnya *Total Harmonic Distortion* (THD) dengan langkah prosedur pengujian berdasarkan dari point satu sampai point tujuh.
10. Setelah selesai semua melakukan pengujian pada MCB 2A, langkah pengujian berikutnya adalah mengganti rating arus MCB tersebut dengan menggunakan MCB dengan rating arusnya 4A. Untuk melakukan pengujian pada MCB 4A ini, langkah prosedur pengujiannya berdasarkan dari point satu sampai point sembilan.

3.4 Rancangan Beban

Rancangan beban dalam pengujian ini, dibuat dalam dua bentuk jenis beban yaitu beban non harmonik atau beban linier dan beban harmonik atau non linier. Beban linier merupakan beban yang memberikan bentuk gelombang keluaran yang linier artinya besarnya arus mengalir sebanding dengan perubahan tegangan. Untuk beban harmonik atau non linier memberikan bentuk gelombang keluaran arus tidak sebanding dengan tegangan dasar sehingga gelombang arus maupun tegangannya tidak sama dengan tegangan masukannya.

3.4.1 Beban Tanpa Harmonik Pada MCB 2A

Untuk pengujian beban non harmonik pada MCB dengan rating arus nominal 2A, diberikan arus pengujian sebesar $1,5 \times I_n$ dengan beban yang diberikan berupa lampu pijar berdaya 100 watt sebanyak 7 buah yang disusun secara paralel.

3.4.2 Beban Tanpa Harmonik Pada MCB 4A

Untuk pengujian beban non harmonik pada MCB dengan rating arus nominalnya 4A, diberikan arus pengujian pada MCB sebesar $1,5 \times I_n$ dengan beban yang diberikan berupa lampu pijar berdaya 100 watt sebanyak 15 buah yang disusun secara paralel.

3.4.3 Beban Harmonik Pada MCB 2A

Untuk pengujian beban harmonik pada MCB dengan rating arus nominalnya 2A, diberikan arus pengujian pada MCB sebesar $1,5 \times I_n$ dengan jenis beban yang diberikan berupa lampu *fluorescent* dengan *ballast* elektronik berdaya 20 watt yang disusun secara paralel yang dapat menimbulkan harmonik pada rangkaian pengujian. Kombinasi antara lampu pijar dengan lampu hemat energi dilakukan untuk mendapatkan variasi nilai besarnya THD (*Total Harmonic Distortion*) pada rangkaian pengujian.

Adapun banyaknya jumlah lampu yang diperlukan agar arusnya mencapai $1,5 \times I_n$ untuk rancangan beban harmoniknya adalah sebagai berikut :

1. 67 buah lampu *fluorescent ballast* elektronik dengan daya 20W yang dipasang secara paralel.
2. Kombinasi lampu antara 1 buah lampu pijar 100W dengan 60 buah lampu *fluorescent ballast* elektronik 20W yang dipasang secara paralel.
3. Kombinasi lampu antara 2 buah lampu pijar 100W dengan 53 buah lampu *fluorescent ballast* elektronik 20W yang dipasang secara paralel.
4. Kombinasi lampu antara 3 buah lampu pijar 100W dengan 45 buah lampu *fluorescent ballast* elektronik 20W yang dipasang secara paralel.
5. Kombinasi lampu antara 4 buah lampu pijar 100W dengan 37 buah lampu *fluorescent ballast* elektronik 20W yang dipasang secara paralel.
6. Kombinasi lampu antara 5 buah lampu pijar 100W dengan 27 buah lampu *fluorescent ballast* elektronik 20W yang dipasang secara paralel.
7. Kombinasi lampu antara 6 buah lampu pijar 100W dengan 16 buah lampu *fluorescent ballast* elektronik 20W yang dipasang secara paralel.

3.4.4 Beban Harmonik Pada MCB 4A

Untuk pengujian beban harmonik pada MCB dengan rating arus nominalnya 4A, diberikan arus pengujian pada MCB sebesar $1,5 \times I_n$ dengan jenis beban yang diberikan berupa lampu *fluorescent* dengan *ballast* elektronik berdaya 20 watt disusun secara paralel yang dapat menimbulkan harmonik pada rangkaian pengujian. Kombinasi antara lampu pijar dengan lampu *fluorescent ballast* elektronik dilakukan untuk mendapatkan variasi nilai besarnya THD (*Total*

Harmonic Distortion) pada rangkaian pengujian. Pada pengujian beban harmonik pada MCB 4A, penggunaan kombinasi dengan lampu pijar dimulai dari sembilan buah karena keterbatasan jumlah fitting lampu dan kondisi tempat yang kurang memadai untuk memerlukan lebih dari tujuh puluh (70) buah *fitting* lampu.

Adapun banyaknya jumlah lampu yang diperlukan agar arusnya mencapai $1,5 \times I_n$ untuk rancangan beban harmoniknya adalah sebagai berikut :

1. Kombinasi lampu antara 9 buah lampu pijar 100W dengan 60 buah lampu *fluorescent ballast* elektronik 20W yang dipasang secara paralel.
2. Kombinasi lampu antara 10 buah lampu pijar 100W dengan 50 buah lampu *fluorescent ballast* elektronik 20W yang dipasang secara paralel.
3. Kombinasi lampu antara 11 buah lampu pijar 100W dengan 40 buah lampu *fluorescent ballast* elektronik 20W yang dipasang secara paralel.
4. Kombinasi lampu antara 12 buah lampu pijar 100W dengan 30 buah lampu *fluorescent ballast* elektronik 20W yang dipasang secara paralel.
5. Kombinasi lampu antara 13 buah lampu pijar 100W dengan 17 buah lampu *fluorescent ballast* elektronik 20W yang dipasang secara paralel.
6. Kombinasi lampu antara 14 buah lampu pijar 100W dengan 7 buah lampu *fluorescent ballast* elektronik 20W yang dipasang secara paralel.

BAB IV
DATA HASIL PENGUJIAN DAN ANALISA DATA

4.1 Data Hasil Pengujian

4.1.1.1 Pengujian Beban Tanpa Harmonik Pada MCB 2A Standarisasi SNI

Tabel 4.1. Hasil pengujian untuk beban tanpa harmonik pada MCB 2A SNI

Jumlah Beban (buah)		THD (%)	Arus Total (A)	Arus Harmonik (A)					Waktu Pemutusan MCB (detik)
LP	Lfbe			Orde 1	Orde 3	Orde 5	Orde 7	Orde 9	
7	-	1.85	3.0370	3.0364	0.0249	0.0406	0.0179	0.0168	245

Keterangan :

* LP : Lampu Pijar

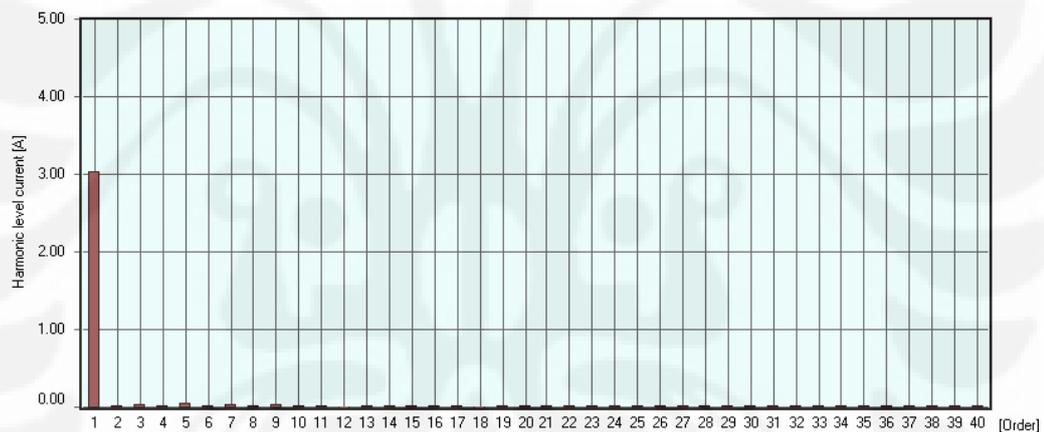
* Lfbe : Lampu *fluorescent ballast* elektronik

Adapun untuk data yang akan dijadikan sebagai referensi ini yaitu pengujian dengan menggunakan lampu pijar yang dipasang secara paralel yang berfungsi sebagai beban tanpa harmonik atau beban linier. Data beban tanpa harmonik ini ditampilkan secara lengkap berupa *harmonic list* atau nilai arus harmonik pada tiap orde, bentuk spektrum harmonik, dan bentuk gelombang tegangan serta arusnya.

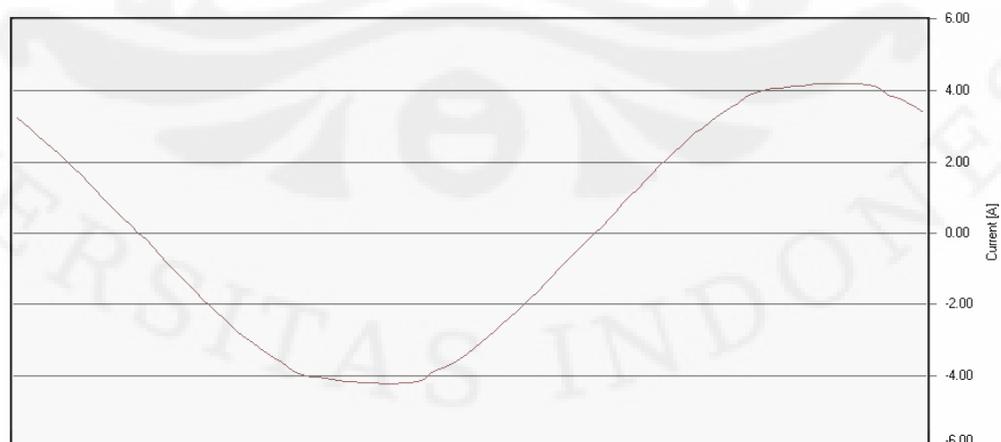
Untuk nilai arus harmonik tiap orde pada THD 1,85 % beserta bentuk spektrum harmonik arus, dan bentuk gelombang arusnya untuk beban tanpa harmonik pada MCB 2A berstandarisasi SNI ditunjukkan pada gambar berikut:

Order	[A]	[%]	[°]	Order	[A]	[%]	[°]
1	3.0364	100.00	-178.86	21	0.0058	0.19	112.79
2	0.0047	0.15	-101.77	22	0.0006	0.02	170.97
3	0.0249	0.82	-159.44	23	0.0034	0.11	-67.01
4	0.0005	0.02	9.73	24	0.0006	0.02	-55.39
5	0.0406	1.34	24.22	25	0.0028	0.09	87.04
6	0.0014	0.04	137.44	26	0.0004	0.01	28.98
7	0.0179	0.59	-157.15	27	0.0019	0.06	171.02
8	0.0007	0.02	-23.98	28	0.0007	0.02	-176.01
9	0.0168	0.55	51.62	29	0.0033	0.11	-52.54
10	0.0008	0.03	-25.71	30	0.0004	0.01	-3.91
11	0.0048	0.16	-104.54	31	0.0033	0.11	144.68
12	0.0001	0.00	-63.84	32	0.0006	0.02	54.95
13	0.0024	0.08	73.70	33	0.0022	0.07	169.21
14	0.0005	0.02	-23.48	34	0.0005	0.01	-135.09
15	0.0091	0.30	82.23	35	0.0027	0.09	-4.66
16	0.0004	0.01	-179.10	36	0.0004	0.01	-22.35
17	0.0068	0.22	-108.23	37	0.0016	0.05	-163.86
18	0.0002	0.01	-107.78	38	0.0005	0.02	157.19
19	0.0037	0.12	91.30	39	0.0022	0.07	-129.83
20	0.0006	0.02	20.73	40	0.0004	0.01	-177.44
TOTAL	3.0370						
THD-F		1.85					

Gambar 4.1 Tabel nilai arus harmonik pada tiap orde MCB 2A SNI



Gambar 4.2 Spektrum harmonik arus beban tanpa harmonik MCB 2A SNI



Gambar 4.3 Gelombang tegangan dan arus beban tanpa harmonik MCB 2A SNI

4.1.1.2 Pengujian Beban Tanpa Harmonik Pada MCB 4A Standarisasi SNI

Tabel 4.2 Hasil pengujian untuk beban tanpa harmonik pada MCB 4A SNI

Jumlah Beban (buah)		THD (%)	Arus Total (A)	Arus Harmonik (A)					Waktu Pemutusan MCB (detik)
LP	Lfbe			Orde 1	Orde 3	Orde 5	Orde 7	Orde 9	
15	-	1.85	6.0561	6.0551	0.0534	0.0779	0.0339	0.0344	242

Keterangan :

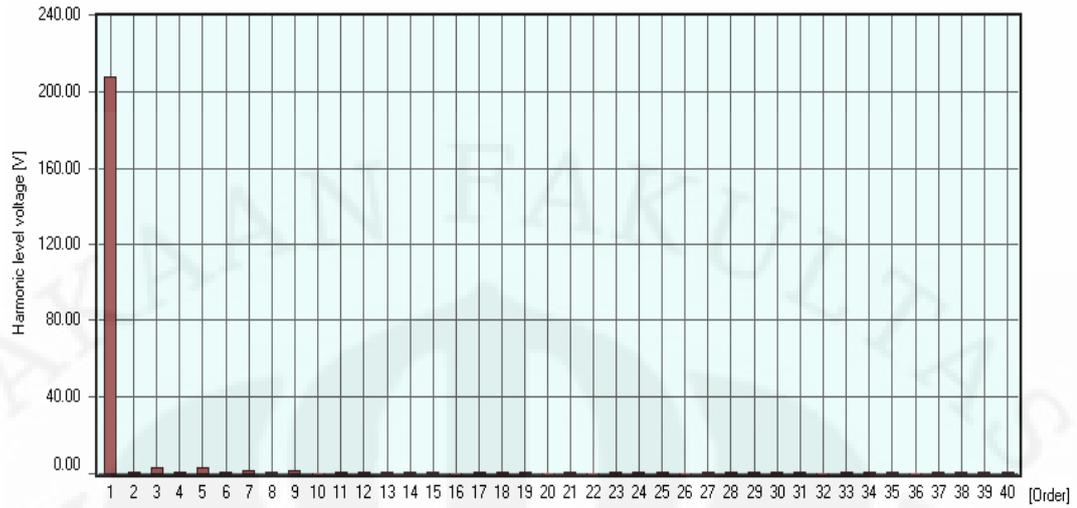
* LP : Lampu Pijar

* Lfbe : lampu *fluorescent ballast* elektronik

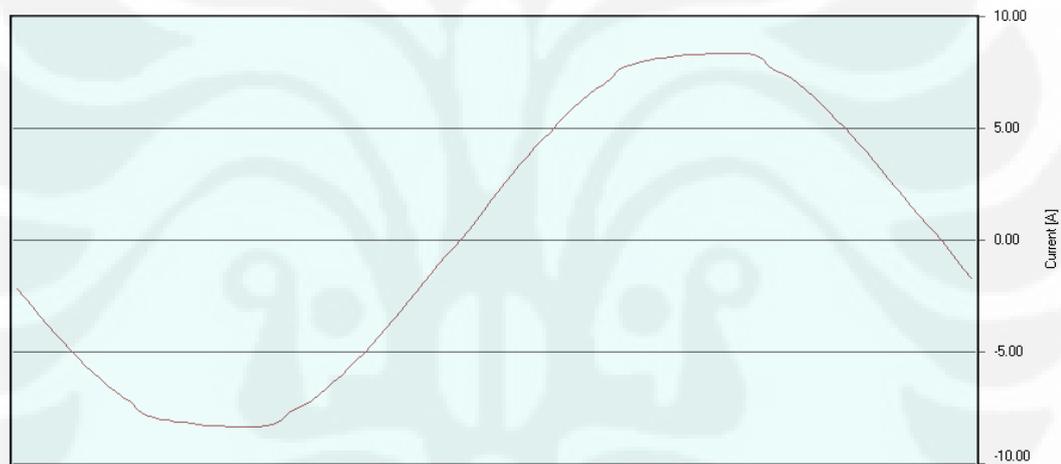
Adapun data untuk nilai arus harmonik tiap orde pada THD 1,85 % secara lengkap beserta bentuk spektrum harmonik arusnya, dan bentuk gelombang arusnya untuk beban tanpa harmonik pada MCB 4A berstandarisasi SNI ditunjukkan pada gambar berikut:

Order	[A]	[%]	[°]	Order	[A]	[%]	[°]
1	6.0551	100.00	-178.97	21	0.0124	0.20	116.39
2	0.0069	0.11	107.63	22	0.0006	0.01	-87.82
3	0.0534	0.88	-154.42	23	0.0068	0.11	-66.20
4	0.0006	0.01	64.54	24	0.0006	0.01	154.96
5	0.0779	1.29	26.37	25	0.0065	0.11	97.42
6	0.0014	0.02	94.87	26	0.0003	0.01	-9.07
7	0.0339	0.56	-155.88	27	0.0052	0.09	170.55
8	0.0025	0.04	-178.17	28	0.0009	0.02	-76.92
9	0.0344	0.57	50.62	29	0.0064	0.11	-59.65
10	0.0002	0.00	-120.82	30	0.0005	0.01	-153.56
11	0.0098	0.16	-119.67	31	0.0081	0.13	145.87
12	0.0012	0.02	111.34	32	0.0004	0.01	131.41
13	0.0053	0.09	67.43	33	0.0040	0.07	162.09
14	0.0007	0.01	106.25	34	0.0008	0.01	-86.56
15	0.0186	0.31	86.56	35	0.0054	0.09	-0.53
16	0.0006	0.01	-37.26	36	0.0003	0.00	171.16
17	0.0129	0.21	-105.77	37	0.0051	0.08	-169.90
18	0.0006	0.01	152.60	38	0.0006	0.01	52.43
19	0.0080	0.13	83.90	39	0.0051	0.08	-141.80
20	0.0001	0.00	-98.84	40	0.0011	0.02	-75.46
TOTAL	6.0561						
THD-F		1.85					

Gambar 4.4 Tabel nilai arus harmonik pada tiap orde MCB 4A SNI



Gambar 4.5 Spektrum harmonik arus beban tanpa harmonik MCB 4A SNI



Gambar 4.6 Gelombang tegangan dan arus beban tanpa harmonik MCB 4A SNI

4.1.2.1 Pengujian Beban Harmonik Pada MCB 2A Standarisasi SNI

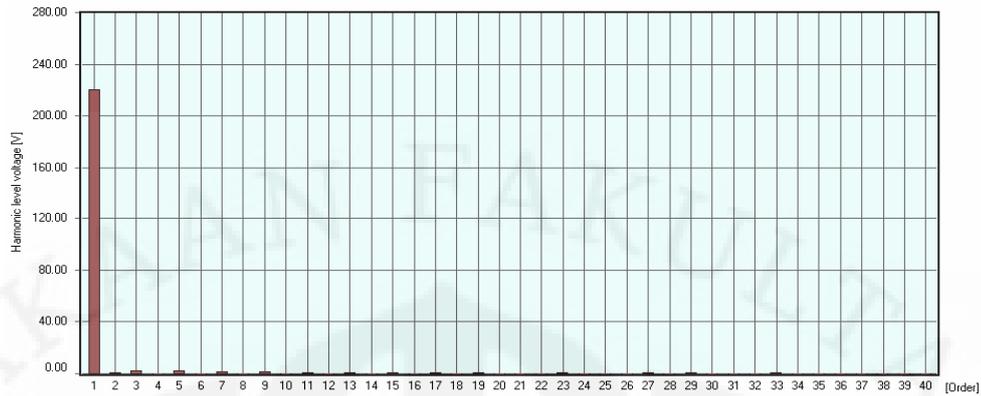
Tabel 4.3 Hasil pengujian untuk beban harmonik pada MCB 2A SNI

Jumlah Beban (buah)		THD (%)	Arus Total (A)	Arus Harmonik (A)					Waktu Pemutusan MCB (detik)
LP	Lfbe			Orde 1	Orde 3	Orde 5	Orde 7	Orde 9	
-	67	78.1	3.0550	2.4077	1.5422	0.7283	0.5929	0.3311	152
1	60	63.5	3.0585	2.5820	1.2974	0.6368	0.5971	0.2618	165
2	53	53.8	3.0547	2.6905	1.1128	0.5800	0.5490	0.2372	168
3	45	43.6	3.0321	2.7794	0.9223	0.4880	0.4626	0.2015	184
4	37	33.5	3.0321	2.8751	0.7391	0.3974	0.3556	0.1464	193
5	27	24.5	3.0317	2.9448	0.5336	0.3156	0.2732	0.1013	197
6	16	14.1	3.0357	3.0060	0.3206	0.1878	0.1474	0.0684	202

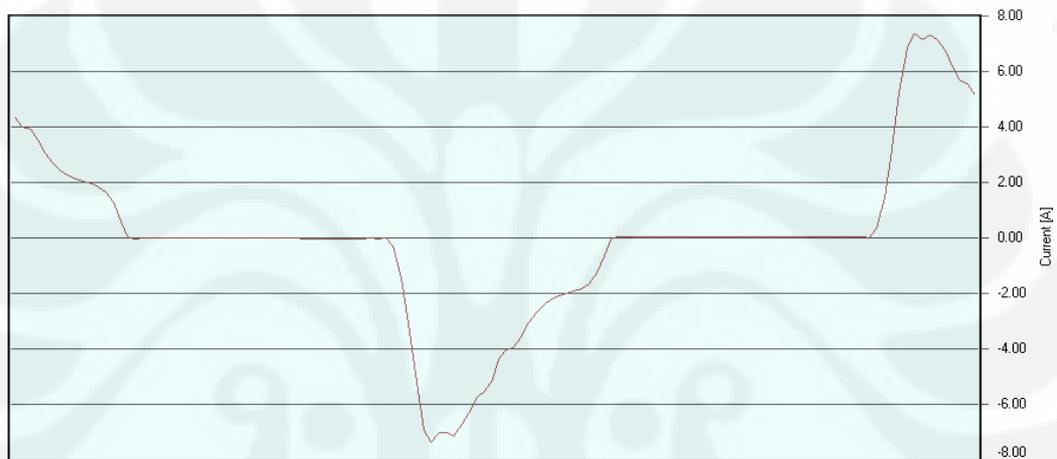
Untuk daftar harmonik pada THD 78.1 % beserta spektrum harmonik arus dan bentuk gelombang tegangan dan arusnya untuk semua beban lampu *fluorescent ballast* elektronik yang dipasang paralel dengan besar nilai distorsi harmoniknya (THD) adalah 78.1% ditunjukkan pada gambar berikut:

Order	[A]	[%]	[°]	Order	[A]	[%]	[°]
1	2.4077	100.00	29.83	21	0.0671	2.79	-9.91
2	0.0035	0.15	166.82	22	0.0046	0.19	-169.73
3	1.5422	64.06	-86.86	23	0.0636	2.64	-100.29
4	0.0023	0.09	101.82	24	0.0021	0.09	78.94
5	0.7283	30.25	-172.08	25	0.0272	1.13	-132.36
6	0.0033	0.14	14.81	26	0.0014	0.06	47.72
7	0.5929	24.62	114.50	27	0.0612	2.54	144.33
8	0.0028	0.12	-111.02	28	0.0015	0.06	-66.69
9	0.3311	13.75	23.21	29	0.0450	1.87	24.81
10	0.0013	0.05	103.41	30	0.0003	0.01	-89.13
11	0.2254	9.36	-15.57	31	0.0227	0.94	-68.53
12	0.0010	0.04	2.67	32	0.0013	0.05	151.33
13	0.2363	9.82	-106.79	33	0.0241	1.00	169.71
14	0.0029	0.12	-104.44	34	0.0013	0.05	-43.04
15	0.0956	3.97	-171.13	35	0.0234	0.97	11.75
16	0.0043	0.18	133.19	36	0.0019	0.08	127.89
17	0.1486	6.17	136.53	37	0.0116	0.48	-142.57
18	0.0038	0.16	31.66	38	0.0018	0.08	-30.39
19	0.1048	4.35	37.16	39	0.0028	0.12	-57.55
20	0.0046	0.19	-55.50	40	0.0010	0.04	-151.27
TOTAL	3.0550						
THD-F		78.10					

Gambar 4.7 Tabel nilai arus harmonik pada tiap orde MCB 2A SNI



Gambar 4.8 Spektrum harmonik arus beban harmonik MCB 2A SNI



Gambar 4.9 Gelombang tegangan dan arus beban harmonik MCB 2A SNI

4.1.2.2 Pengujian Beban Harmonik Pada MCB 4A Standarisasi SNI

Untuk pengujian beban harmonik pada MCB 4A standarisasi SNI, dimulai dari pengkombinasian dengan 9 buah lampu pijar karena keterbatasan dana, dan banyaknya penggunaan jumlah lampu baik lampu pijar maupun lampu *fluorescent ballast* elektronik juga fitting lampu. Adapun untuk tabel hasil pengujian beban harmonik pada MCB 4A berstandarisasi SNI terlihat dibawah ini:

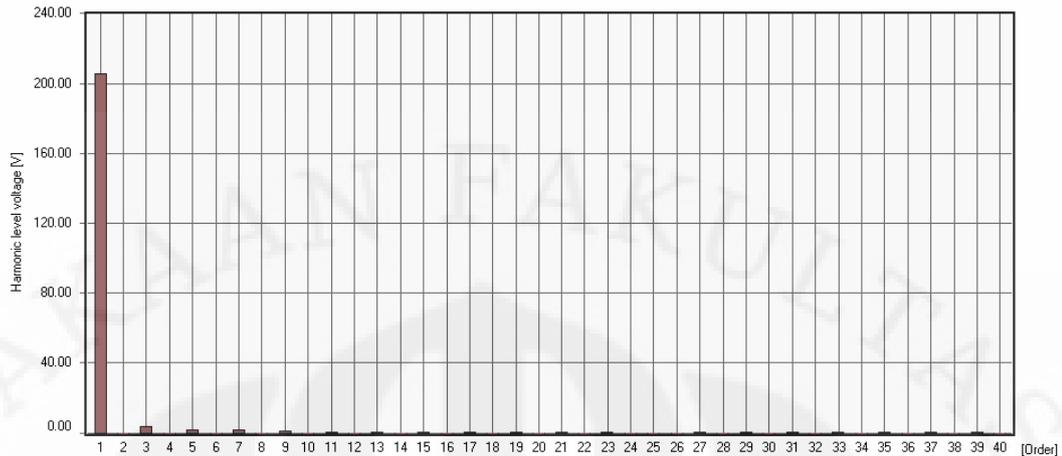
Tabel 4.4 Hasil pengujian untuk beban harmonik pada MCB 4A SNI

Jumlah Beban (buah)		THD (%)	Arus Total (A)	Arus Harmonik (A)					Waktu Pemutusan MCB (detik)
LP	Lfbe			Orde 1	Orde 3	Orde 5	Orde 7	Orde 9	
9	60	27.1	6.0534	5.8427	1.2289	0.6638	0.5835	0.2303	153
10	50	22.9	6.0536	5.9010	1.0249	0.5678	0.5020	0.2002	161
11	40	17.8	6.0339	5.9405	0.7974	0.4727	0.3859	0.1438	176
12	30	13.4	6.0317	5.9784	0.5900	0.3685	0.2889	0.0938	192
13	17	7.5	6.0356	6.0187	0.3338	0.2375	0.1436	0.043	200
14	7	3.6	6.0295	6.0257	0.1390	0.1366	0.0558	0.0067	225

Untuk daftar harmonik pada THD 27.1 % beserta spektrum harmonik arus dan bentuk gelombang tegangan serta arus pada MCB 4A dengan kombinasi 9 buah lampu pijar dan 60 buah lampu *fluorescent ballast* elektronik yang dipasang secara paralel dengan besarnya distorsi harmoniknya (THD) adalah 27.1% ditunjukkan pada gambar berikut ini:

Order	[A]	[%]	[°]	Order	[A]	[%]	[°]
1	5.8427	100.00	11.35	21	0.1232	2.11	-20.43
2	0.0021	0.04	-0.62	22	0.0047	0.08	-2.50
3	1.2289	21.03	-83.99	23	0.0555	0.95	-139.78
4	0.0029	0.05	-43.53	24	0.0038	0.07	-101.06
5	0.6638	11.36	-153.66	25	0.0089	0.15	-141.24
6	0.0036	0.06	-127.01	26	0.0020	0.03	-169.85
7	0.5835	9.99	119.83	27	0.0097	0.17	-43.31
8	0.0007	0.01	116.21	28	0.0016	0.03	168.96
9	0.2303	3.94	28.92	29	0.0487	0.83	152.96
10	0.0024	0.04	71.74	30	0.0036	0.06	109.07
11	0.1859	3.18	2.12	31	0.0546	0.93	24.32
12	0.0015	0.03	5.73	32	0.0055	0.09	15.62
13	0.1278	2.19	-74.03	33	0.0449	0.77	-61.06
14	0.0022	0.04	-91.08	34	0.0046	0.08	-74.93
15	0.1787	3.06	-110.26	35	0.0582	1.00	-164.62
16	0.0012	0.02	-144.34	36	0.0038	0.07	-156.89
17	0.1848	3.16	145.60	37	0.0483	0.83	77.02
18	0.0026	0.04	-178.71	38	0.0027	0.05	134.92
19	0.1127	1.93	69.37	39	0.0328	0.56	-10.32
20	0.0039	0.07	87.14	40	0.0028	0.05	87.70
TOTAL	6.0534						
THD-F		27.10					

Gambar 4.10 Tabel nilai arus harmonik pada tiap orde MCB 4A SNI



Gambar 4.11 Spektrum harmonik arus beban harmonik MCB 4A SNI



Gambar 4.12 Gelombang tegangan dan arus beban harmonik MCB 4A SNI

4.2 Analisa Efek Harmonik Pada *Miniature Circuit Breaker* (MCB)

Berdasarkan teori yang dinyatakan oleh Frank D. Petruzella, menyatakan bahwa suatu harmonik dapat mempengaruhi *Circuit Breaker* atau pemutus rangkaian. Harmonik dapat menyebabkan pemutus rangkaian tidak dapat beroperasi secara benar yang disebabkan karena sensor puncak elektronik melepaskan kaitan pemutus rangkaian saat merespon pada puncak bentuk gelombang arus. Akibatnya pemutus rangkaian tidak akan selalu merespon dengan benar pada arus harmonik sebab puncak arus harmonik biasanya lebih tinggi dibanding normal sehingga pemutus rangkaian ini dapat memutus kaitan lebih awal pada arus rendah dan sebaliknya jika puncak itu lebih rendah dari normal, pemutus rangkaian tidak bisa bekerja ketika seharusnya memutus[11].

Pada analisa ini menguji kebenaran berdasarkan dari teori diatas mengenai pengaruh harmonik pada pemutus rangkaian dengan beban yang digunakan pada pengujian adalah lampu pijar dan lampu *fluorescent ballast* elektronik.

4.2.1 Pengujian Beban Tanpa Harmonik Pada MCB 2A dan 4A Standarisasi SNI

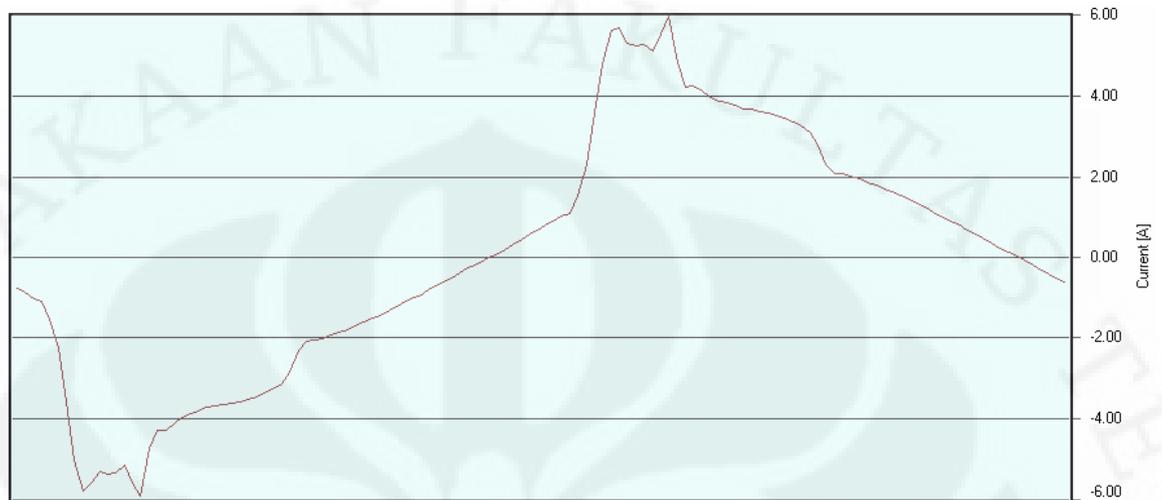
Pada pengujian beban tanpa harmonik ini dengan beban lampu pijar yang dipasang secara paralel baik pada MCB dengan rating arus 2A maupun 4A berstandarisasi SNI dengan diberikan arus kerja sebesar $1.5 \times I_n$, ternyata masih menimbulkan harmonik dengan besarnya nilai THD (*Total Harmonic Distortion*) yaitu 1.85% akibatnya terdapat selisih besarnya nilai arus antara arus sumber total dengan arus fundamentalnya sedangkan untuk waktu pemutusannya pada MCB adalah 4 menit 5 detik. Hal ini berarti pada lampu pijar tidak sepenuhnya bersifat resistif murni, melainkan masih mengandung sifat induktor walaupun kecil yang menyebabkan timbulnya harmonik pada pengujian beban tanpa harmonik. Besarnya nilai THD yang ditimbulkan masih kecil, sehingga masih dapat dijadikan sebagai referensi pada pengujian untuk beban tanpa harmonik.

4.2.2 Pengujian Beban Harmonik Pada MCB 2A Standarisasi SNI

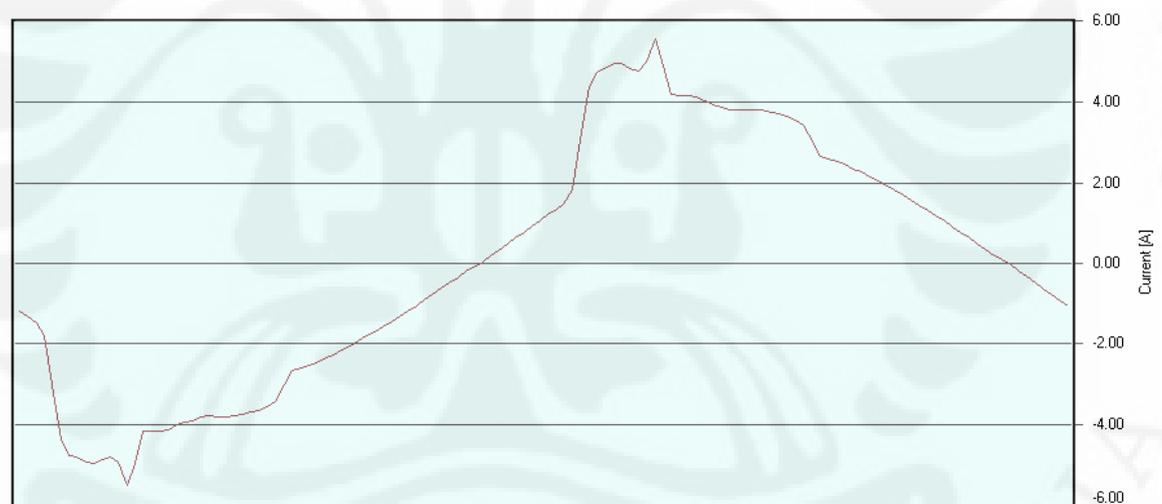
Berdasarkan pengujian yang dilakukan pada MCB ini dengan beban semuanya adalah lampu *fluorescent ballast* elektronik sebanyak enam puluh tujuh (67) buah yang dipasang secara paralel, dihasilkan besarnya nilai THD harmoniknya adalah 78.1 % dengan waktu pemutusan pada MCB adalah 2 menit 32 detik.

Berdasarkan pengujian untuk beban harmonik, ternyata pada MCB tersebut terjadi pemutusan yang lebih cepat dibandingkan dengan beban tanpa harmonik yaitu 4 menit 5 detik, sehingga teori tersebut dapat dikatakan benar bahwa suatu sistem kerja pemutus rangkaian dapat dipengaruhi oleh adanya harmonik karena adanya rugi-rugi penghantar (I^2R) yang terjadi pada bimetal sehingga bimetal menjadi lebih cepat panas. Secara teori dikatakan bahwa pemutusan dapat terjadi lebih awal dari normalnya karena puncak arus harmonik biasanya lebih tinggi dibandingkan dengan normal. Hal ini dapat dilihat pada

gambar 4.3 dan 4.9 diatas, atau dari gambar 4.13 dan 4.14 bentuk gelombang arus beban harmonik dibawah ini:



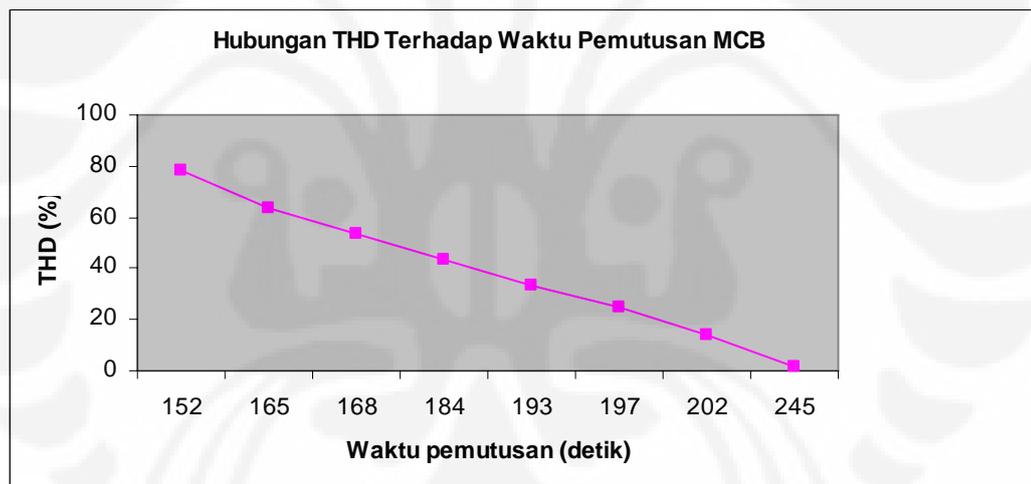
Gambar 4.13 Gelombang tegangan dan arus beban harmonik pada THD 33.5%



Gambar 4.14 Gelombang tegangan dan arus beban harmonik pada THD 24.5%

Dari gambar diatas terlihat terjadi kenaikan pada puncak gelombang arus akibat kenaikan nilai THD nya. Sedangkan untuk gambar 4.3 dan 4.9 antara beban tanpa harmonik dengan beban harmonik terlihat perbedaan yang cukup besar dimana besarnya nilai puncak gelombang arus pada beban harmonik dari gambar diatas adalah lebih dari 7A sedangkan pada puncak gelombang arus dengan beban tanpa harmonik nilainya hanya sebesar lebih sedikit dari 4A.

Dengan demikian, dari pengujian yang telah dilakukan dapat dikatakan bahwa semakin banyak jumlah penggunaan lampu *fluorescent ballast* elektronik yang diparalel dapat menyebabkan nilai THD nya akan menjadi semakin besar yang mengakibatkan kenaikan pada puncak gelombang arus sehingga waktu pemutusan pada MCB dapat terpengaruh menjadi lebih cepat melakukan pemutusan dibandingkan dengan keadaan normalnya (tanpa harmonik) karena timbulnya rugi-rugi pada bimetal MCB (I^2R) yang berupa panas akibat kenaikan pada arus rms dan nilai puncak (*peak value*) pada gelombang arusnya. Sedangkan dengan penggunaan jumlah lampu pijar dapat memperkecil besarnya nilai THD nya. Hal ini dapat dilihat pada tabel 4.3 diatas atau dari persamaan grafik hubungan antara THD terhadap waktu pemutusan untuk MCB 2A pada gambar 4.15 dibawah ini:



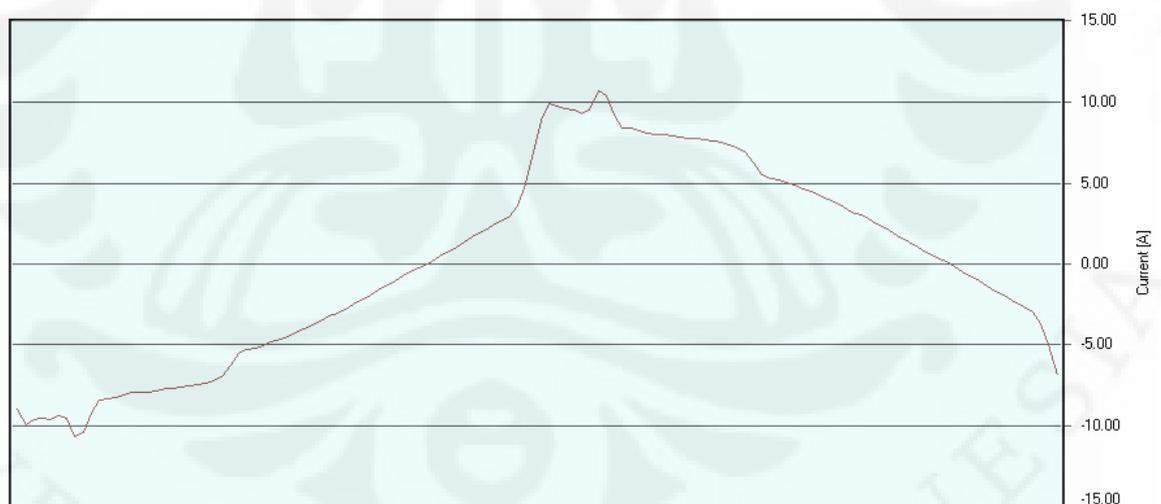
Gambar 4.15 Grafik hubungan THD dengan waktu pemutusan MCB 2A SNI

4.2.3 Pengujian Beban Harmonik Pada MCB 4A Standarisasi SNI

Untuk pengujian yang dilakukan pada MCB ini, tidak sepenuhnya menggunakan lampu *fluorescent ballast* elektronik dalam pengujiannya karena keterbatasan penggunaan jumlah lampu dan *fitting* lampu yang dibutuhkan sangat banyak sehingga dalam pengujian ini dimulai dari penggunaan 9 buah lampu pijar dengan 60 buah lampu *fluorescent ballast* elektronik yang dipasang secara paralel berdasarkan data yang diperoleh besarnya nilai THD adalah sebesar 27.1% dengan waktu pemutusan pada MCB adalah 2 menit 33 detik. Besarnya nilai THD

nya, ternyata lebih kecil dibandingkan dengan MCB 2A walaupun jumlah lampu *fluorescent ballast* elektronik yang digunakan adalah sama-sama sebanyak 60 buah. Hal ini disebabkan karena jumlah penggunaan lampu pijar pada MCB 4A sebanyak 9 buah sedangkan pada MCB 2A hanya menggunakan 1 buah lampu pijar. Dengan demikian pemberian lampu pijar pada rangkaian pengujian bertujuan untuk menurunkan besarnya nilai THD nya.

Berdasarkan pengujian untuk beban harmonik, ternyata pada MCB tersebut terjadi pemutusan yang lebih cepat dibandingkan dengan beban tanpa harmonik yaitu 4 menit 2 detik karena timbulnya rugi-rugi pada bimetal MCB (I^2R) yang berupa panas akibat kenaikan pada arus rms dan nilai puncak (*peak value*) pada gelombang arusnya. Secara teori dikatakan bahwa pemutusan dapat terjadi lebih awal dari normalnya karena puncak arus harmonik biasanya lebih tinggi dibandingkan dengan normal. Hal ini dapat dilihat pada gambar 4.6 diatas yang merupakan gambar bentuk gelombang arus pada kondisi tanpa harmonik dan gambar 4.16 dibawah ini yang merupakan bentuk gelombang arus pada kondisi beban harmonik dengan THD 22.9%:

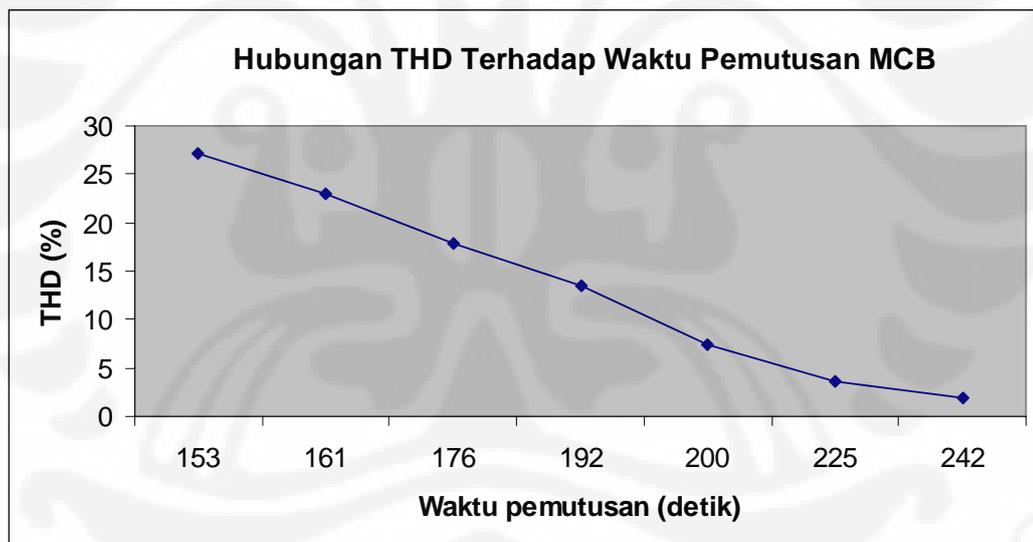


Gambar 4.16 Gelombang tegangan dan arus beban harmonik pada THD 22.9%

Dari gambar diatas terlihat kenaikan puncak gelombang arus akibat adanya harmonik antara beban tanpa harmonik dengan beban harmonik, dimana besarnya nilai puncak gelombang arus pada beban tanpa harmonik dari gambar diatas adalah kurang dari 10A pada besar nilai THD nya adalah 1.85% sedangkan

pada beban yang mengandung harmonik nilainya lebih dari 10A dengan nilai THD nya adalah sebesar 22.9%.

Dengan demikian, dari pengujian yang telah dilakukan dapat dikatakan bahwa semakin banyak jumlah penggunaan lampu *fluorescent ballast* elektronik yang diparalel dapat menyebabkan nilai THD nya akan menjadi semakin besar yang mengakibatkan kenaikan pada puncak gelombang arus sehingga waktu pemutusan pada MCB dapat terpengaruh menjadi lebih cepat melakukan pemutusan dibandingkan dengan keadaan normalnya (tanpa harmonik) karena timbulnya rugi-rugi pada bimetal MCB (I^2R) yang berupa panas akibat kenaikan pada arus rms dan nilai puncak (*peak value*) pada gelombang arusnya. Sedangkan dengan penggunaan jumlah lampu pijar dapat memperkecil besarnya nilai THD nya. Hal ini dapat dilihat pada tabel 4.4 diatas atau dari grafik hubungan antara THD dengan waktu pemutusan untuk MCB 4A pada gambar 4.17 dibawah ini:



Gambar 4.17 Grafik hubungan THD dengan waktu pemutusan MCB 4A SNI

BAB V

KESIMPULAN

1. Berdasarkan pengujian diperoleh semakin banyak penggunaan beban berupa lampu *fluorescent ballast* elektronik sebanyak 67 buah lampu akan meningkatkan nilai THD arusnya yaitu sebesar 78.1 % pada MCB dengan rating arus 2A berstandarisasi SNI. Untuk MCB dengan rating arus nominal 4A diperoleh nilai terbesar THD arusnya sebesar 27.1 % pada penggunaan jumlah beban berupa 60 buah lampu *fluorescent ballast* elektronik dikombinasikan dengan 9 buah lampu pijar.
2. Dari persamaan grafik hubungan antara besarnya nilai THD terhadap waktu pemutusan MCB terlihat semakin besar nilai THD yaitu 78.1 %, waktu pemutusan MCB menjadi semakin cepat melakukan pemutusan rangkaian menjadi 152 detik dibandingkan dengan keadaan beban tanpa harmonik yaitu 245 detik.
3. Dari persamaan grafik hubungan antara besarnya nilai THD terhadap waktu pemutusan MCB terlihat tingginya nilai THD yaitu 27.1 %, mengakibatkan waktu pemutusan MCB akan semakin cepat melakukan pemutusan rangkaian menjadi 153 detik dibandingkan dengan keadaan beban tanpa harmonik yaitu 242 detik.

DAFTAR ACUAN

- [1] Masri, Syafrudin. (2004). *Analisis Kualitas Daya Sistem Distribusi Perumahan Modern*. Volume 3 No.2.
- [2] Dugan, Roger C., McGranaghan, Mark F., Santoso, Surya, Beaty, H. Wayne. *Electrical Power Sytem Quality, Second Edition*. McGraw-Hill.
- [3] W. Mack Grady, Surya Santoso.(2001). *Understanding Power System Harmonics*. IEEE Power Engineering Sytem.
- [4] Vedam, R. Sastry, Salma, Mulukutla S... (2009). *Power Quality – VAR Compensation in Power System*. CRC Press.
- [5] Saskatchewan Energy Management Task Force. Flourescent lamp ballast. *Technology Information Sheet*, hal 1.
- [6] De La Rosa, Francisco C... (2006). *Harmonik And Power System*. CRC Press.
- [7] Hardi, Surya, Ir. MSc., *Harmonisa Dan Pengaruhnya Pada Peralatan Sistem Distribusi*. SAINTEK ITM NO. 10 Tahun VI.
- [8] Sankaran, C .. (2002). *Power Quality*. CRC Press LLC.
- [9] Sugandi, Imam, Ir., Budiman, Masgunarto, Ir. MSc., Djoekardi, Djuhana, Ir., Soekarto, J.,Ir., Sukarno, Ir. (2001), *Panduan instalasi listrik untuk rumah berdasarkan PUIL 2000*. Jakarta : Yayasan Usaha Penunjang Tenaga listrik.
- [10]“Tipe-tipe MCB”. http://digilib.petra.ac.id/viewer.php?page=3&qual=high&submitval=next&fname=%2Fjiunkpe%2Fs1%2Felkt%2F2008%2Fjiunkpe-ns-s1-2008-23404052-10295-pemutusan_mcb-chapter2.pdf. (3 Maret 2010)
- [11] Petruzella, Frank D.. (2001). *Elektronika Industri*. Yogyakarta: Andi.

DAFTAR REFERENSI

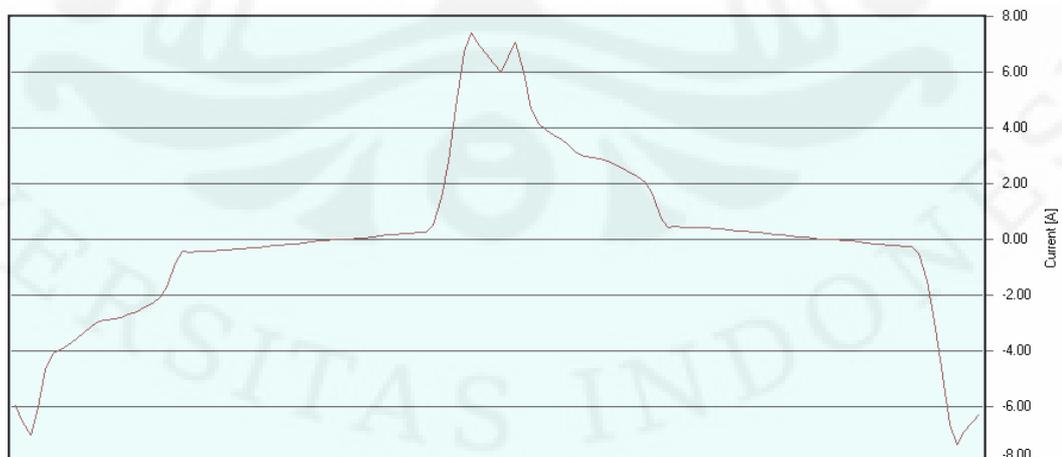
- Masri, Syafrudin. (2004). *Analisis Kualitas Daya Sistem Distribusi Perumahan Moderen*. Volume 3 No.2.
- Dugan, Roger C.. McGranaghan, Mark F., Santoso, Surya, Beaty, H. Wayne. *Electrical Power Sytem Quality, Second Edition*. McGraw-Hill.
- W. Mack Grady, Surya Santoso. (2001). *Understanding Power System Harmonics*. IEEE Power Engineering Sytem.
- Vedam, R. Sastry, Salma, Mulukutla S.. (2009). *Power Quality – VAR Compensation in Power System*. CRC Press.
- Saskatchewan Energy Management Task Force. Flourescent lamp ballast. *Technology Information Sheet*, hal 1.
- De La Rosa, Francisco C.. (2006). *Harmonik And Power System*. CRC Press.
- Hardi, Surya, Ir. MSc., *Harmonisa Dan Pengaruhnya Pada Peralatan Sistem Distribusi*. SAINTEK ITM NO. 10 Tahun VI.
- Sankaran, C .. (2002). *Power Quality*. CRC Press LLC.
- Sugandi, Imam, Ir., Budiman, Masgunarto, Ir. MSc., Djoekardi, Djuhana, Ir., Soekarto, J.,Ir., Sukarno, Ir. (2001), *Panduan instalasi listrik untuk rumah berdasarkan PUIL 2000*. Jakarta : Yayasan Usaha Penunjang Tenaga listrik.
- “Tipe-tipe MCB”. http://digilib.petra.ac.id/viewer.php?page=3&qual=high&submitval=next&fname=%2Fjiunkpe%2Fs1%2Felkt%2F2008%2Fjiunkpe-ns-s1-2008-23404052-10295-pemutusan_mcb-chapter2.pdf. (3 Maret 2010)
- Petruzella, Frank D.. (2001). *Elektronika Industri*. Yogyakarta: Andi.

LAMPIRAN

1. Harmonik *List* dengan nilai THD 63.5 % pada MCB 2A standarisasi SNI

Order	[A]	[%]	[°]	Order	[A]	[%]	[°]
1	2.5820	100.00	-155.12	21	0.1396	5.41	147.06
2	0.0049	0.19	26.33	22	0.0036	0.14	-32.13
3	1.2974	50.25	93.79	23	0.0968	3.75	21.65
4	0.0060	0.23	-133.59	24	0.0032	0.12	-147.78
5	0.6368	24.66	21.66	25	0.0286	1.11	-104.88
6	0.0007	0.03	176.86	26	0.0023	0.09	-168.31
7	0.5971	23.13	-61.38	27	0.0206	0.80	172.60
8	0.0075	0.29	99.35	28	0.0033	0.13	89.58
9	0.2618	10.14	-157.55	29	0.0334	1.29	4.18
10	0.0071	0.28	-35.41	30	0.0013	0.05	27.84
11	0.1853	7.18	178.76	31	0.0352	1.36	-159.88
12	0.0017	0.06	-88.90	32	0.0026	0.10	-18.14
13	0.1508	5.84	94.88	33	0.0221	0.86	79.05
14	0.0048	0.19	-151.87	34	0.0024	0.09	-85.78
15	0.1535	5.95	59.76	35	0.0371	1.44	-1.64
16	0.0026	0.10	117.68	36	0.0045	0.17	-167.89
17	0.1937	7.50	-38.13	37	0.0492	1.91	-124.94
18	0.0032	0.12	64.39	38	0.0040	0.15	76.86
19	0.1340	5.19	-124.26	39	0.0318	1.23	129.89
20	0.0013	0.05	-15.02	40	0.0019	0.08	4.26
TOTAL	3.0585						
THD-F		63.50					

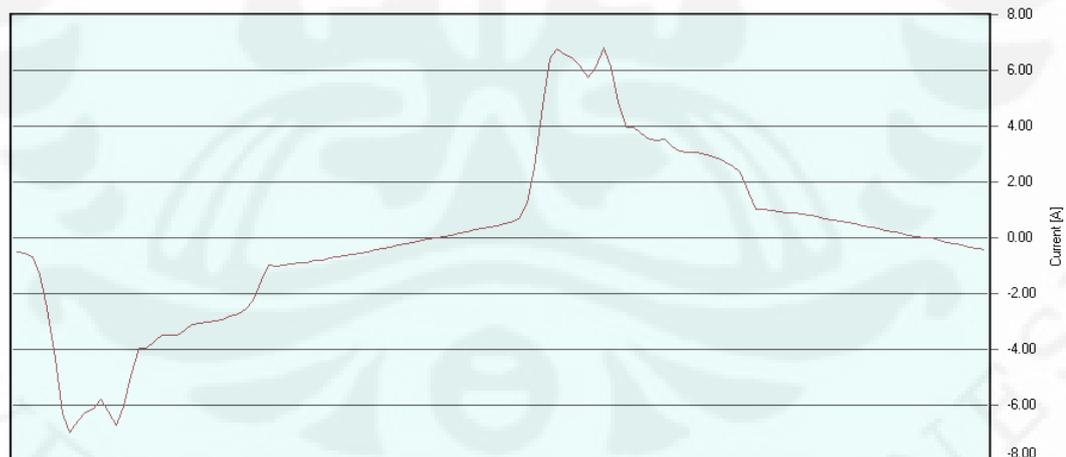
2. Gelombang tegangan dan arus dengan THD 63.5 % pada MCB 2A SNI



3. Harmonik *List* dengan nilai THD 53.76 % pada MCB 2A standarisasi SNI

Order	[A]	[%]	[°]	Order	[A]	[%]	[°]
1	2.6905	100.00	-159.43	21	0.1251	4.65	141.97
2	0.0039	0.15	-56.11	22	0.0021	0.08	68.07
3	1.1128	41.36	93.87	23	0.0668	2.48	24.25
4	0.0035	0.13	-24.01	24	0.0065	0.24	-13.15
5	0.5800	21.56	23.00	25	0.0080	0.30	-0.28
6	0.0045	0.17	-155.53	26	0.0084	0.31	-94.64
7	0.5490	20.40	-63.89	27	0.0063	0.23	-152.93
8	0.0012	0.05	155.12	28	0.0120	0.45	178.41
9	0.2372	8.82	-160.27	29	0.0421	1.57	-28.62
10	0.0044	0.16	90.18	30	0.0121	0.45	83.81
11	0.1699	6.32	172.50	31	0.0563	2.09	-163.58
12	0.0034	0.12	-6.24	32	0.0117	0.44	2.40
13	0.1242	4.62	92.76	33	0.0413	1.54	93.97
14	0.0033	0.12	-67.64	34	0.0108	0.40	-91.01
15	0.1619	6.02	60.23	35	0.0469	1.74	-4.82
16	0.0021	0.08	-127.90	36	0.0062	0.23	-173.88
17	0.2000	7.43	-42.78	37	0.0379	1.41	-134.66
18	0.0050	0.19	179.75	38	0.0055	0.20	131.61
19	0.1341	4.98	-131.28	39	0.0110	0.41	121.51
20	0.0049	0.18	67.42	40	0.0042	0.16	59.33
TOTAL	3.0547						
THD-F		53.76					

4. Gelombang tegangan dan arus dengan THD 53.76 % pada MCB 2A SNI



5. Harmonik *List* dengan nilai THD 43.6 % pada MCB 2A standarisasi SNI

Order	[A]	[%]	[°]	Order	[A]	[%]	[°]
1	2.7794	100.00	-163.46	21	0.1147	4.13	132.90
2	0.0034	0.12	-51.19	22	0.0021	0.07	-64.62
3	0.9223	33.18	93.18	23	0.0642	2.31	10.62
4	0.0021	0.07	-140.79	24	0.0020	0.07	167.00
5	0.4880	17.56	22.31	25	0.0066	0.24	-121.82
6	0.0020	0.07	179.89	26	0.0021	0.07	6.64
7	0.4626	16.65	-65.89	27	0.0115	0.41	77.83
8	0.0037	0.13	75.14	28	0.0021	0.08	-123.57
9	0.2015	7.25	-163.66	29	0.0444	1.60	-50.01
10	0.0042	0.15	-48.98	30	0.0029	0.10	131.18
11	0.1365	4.91	169.49	31	0.0536	1.93	-174.26
12	0.0024	0.09	-177.25	32	0.0020	0.07	45.99
13	0.1092	3.93	94.87	33	0.0408	1.47	86.93
14	0.0012	0.04	69.22	34	0.0025	0.09	-35.01
15	0.1474	5.30	52.51	35	0.0495	1.78	-9.53
16	0.0013	0.05	-33.63	36	0.0024	0.09	-107.62
17	0.1729	6.22	-49.91	37	0.0443	1.59	-133.71
18	0.0022	0.08	-167.51	38	0.0030	0.11	133.62
19	0.1176	4.23	-137.92	39	0.0266	0.96	129.41
20	0.0030	0.11	57.88	40	0.0002	0.01	123.16
TOTAL	3.0321						
THD-F		43.60					

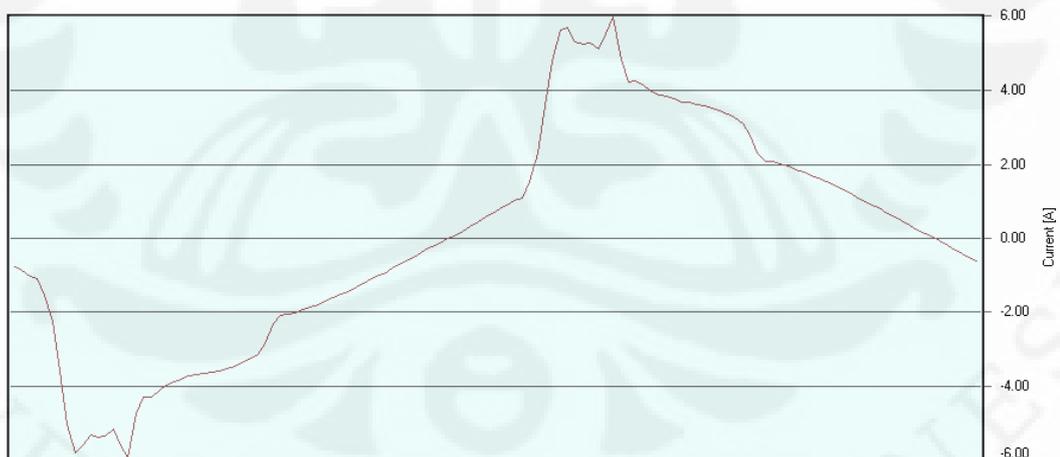
6. Gelombang tegangan dan arus dengan THD 43.6 % pada MCB 2A SNI



7. Harmonik List dengan nilai THD 33.5 % pada MCB 2A standarisasi SNI

Order	[A]	[%]	[°]	Order	[A]	[%]	[°]
1	2.8751	100.00	-166.47	21	0.0882	3.07	159.98
2	0.0060	0.21	153.58	22	0.0047	0.16	176.52
3	0.7391	25.71	96.84	23	0.0448	1.56	43.81
4	0.0062	0.22	108.43	24	0.0065	0.23	99.51
5	0.3974	13.82	27.36	25	0.0069	0.24	-20.59
6	0.0063	0.22	-7.20	26	0.0051	0.18	-4.01
7	0.3556	12.37	-58.31	27	0.0049	0.17	151.61
8	0.0024	0.08	-97.90	28	0.0046	0.16	-80.61
9	0.1464	5.09	-148.77	29	0.0307	1.07	-20.58
10	0.0033	0.12	-136.36	30	0.0036	0.12	-144.00
11	0.1219	4.24	-175.25	31	0.0365	1.27	-154.39
12	0.0030	0.11	121.39	32	0.0023	0.08	155.78
13	0.0907	3.16	108.03	33	0.0310	1.08	106.92
14	0.0013	0.04	85.02	34	0.0064	0.22	86.99
15	0.1148	3.99	66.52	35	0.0379	1.32	-0.23
16	0.0009	0.03	-65.09	36	0.0067	0.23	1.66
17	0.1234	4.29	-31.87	37	0.0390	1.36	-126.00
18	0.0031	0.11	26.35	38	0.0078	0.27	-100.82
19	0.0833	2.90	-110.35	39	0.0257	0.89	123.53
20	0.0049	0.17	-88.27	40	0.0083	0.29	167.36
TOTAL	3.0321						
THD-F		33.50					

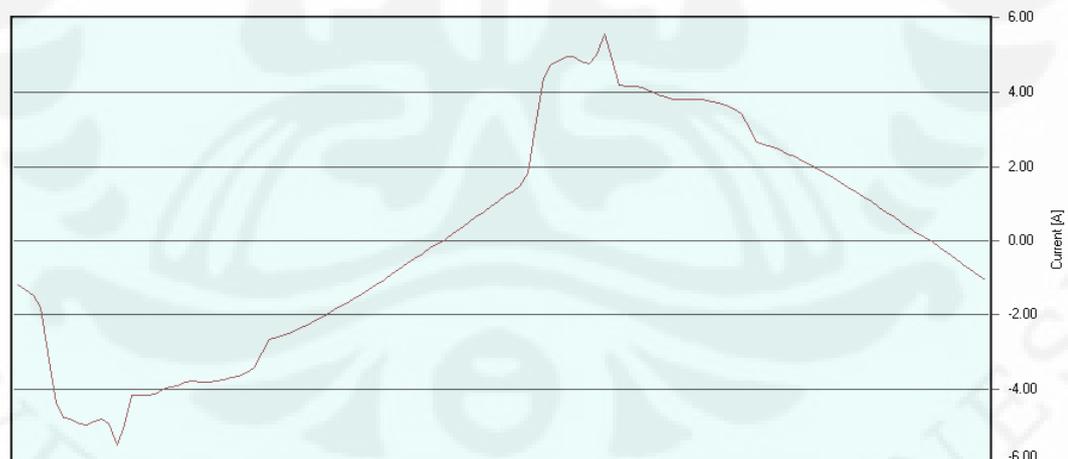
8. Gelombang tegangan dan arus dengan THD 33.5 % pada MCB 2A SNI



9. Harmonik List dengan nilai THD 24.48 % pada MCB 2A standarisasi SNI

Order	[A]	[%]	[°]	Order	[A]	[%]	[°]
1	2.9448	100.00	-170.08	21	0.0731	2.48	162.15
2	0.0005	0.02	35.86	22	0.0006	0.02	-82.62
3	0.5336	18.12	97.27	23	0.0237	0.80	46.85
4	0.0014	0.05	-32.92	24	0.0017	0.06	153.83
5	0.3156	10.72	28.52	25	0.0134	0.46	107.97
6	0.0013	0.04	-136.93	26	0.0026	0.09	28.77
7	0.2732	9.28	-62.68	27	0.0232	0.79	73.09
8	0.0012	0.04	-75.28	28	0.0024	0.08	-83.41
9	0.1013	3.44	-151.24	29	0.0523	1.78	-27.95
10	0.0020	0.07	149.31	30	0.0020	0.07	-166.78
11	0.0991	3.37	-179.54	31	0.0493	1.67	-135.64
12	0.0016	0.05	52.24	32	0.0025	0.08	95.82
13	0.0662	2.25	99.65	33	0.0414	1.41	140.81
14	0.0012	0.04	-29.82	34	0.0019	0.07	-4.33
15	0.0879	2.98	69.04	35	0.0341	1.16	35.42
16	0.0009	0.03	-99.33	36	0.0020	0.07	-102.84
17	0.0927	3.15	-28.52	37	0.0119	0.40	-96.24
18	0.0013	0.04	179.66	38	0.0019	0.07	131.58
19	0.0712	2.42	-100.48	39	0.0018	0.06	37.61
20	0.0010	0.03	52.72	40	0.0015	0.05	-13.25
TOTAL	3.0317						
THD-F		24.48					

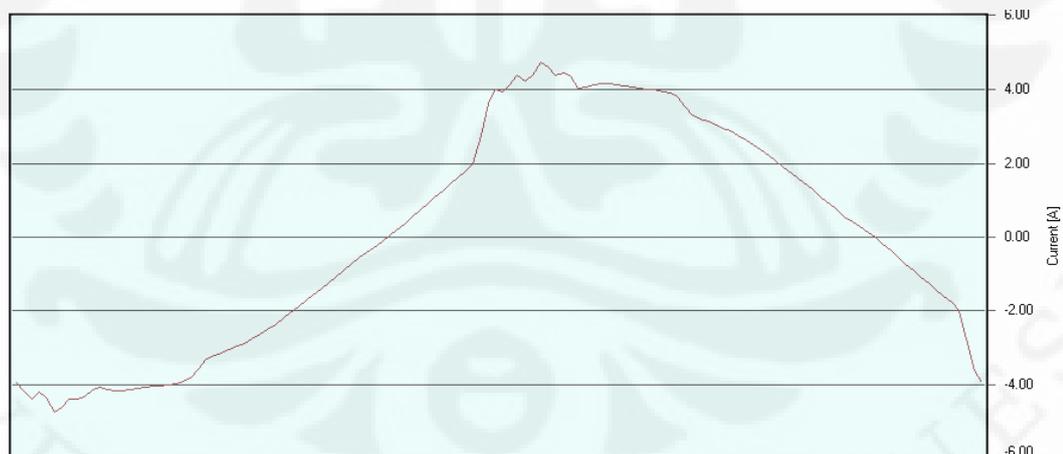
10. Gelombang tegangan dan arus dengan THD 24.48 % pada MCB 2A SNI



11. Harmonik List dengan nilai THD 14.09 % pada MCB 2A standarisasi SNI

Order	[A]	[%]	[°]	Order	[A]	[%]	[°]
1	3.0060	100.00	-173.99	21	0.0335	1.12	-174.91
2	0.0052	0.17	-117.85	22	0.0042	0.14	-127.66
3	0.3206	10.66	94.41	23	0.0217	0.72	95.54
4	0.0016	0.05	162.13	24	0.0038	0.13	115.12
5	0.1878	6.25	21.38	25	0.0168	0.56	57.12
6	0.0009	0.03	-131.78	26	0.0045	0.15	6.75
7	0.1474	4.90	-60.64	27	0.0153	0.51	-45.94
8	0.0007	0.02	15.05	28	0.0050	0.17	-114.48
9	0.0684	2.27	-168.44	29	0.0077	0.26	-31.70
10	0.0015	0.05	19.44	30	0.0044	0.15	122.30
11	0.0438	1.46	176.97	31	0.0221	0.73	-114.66
12	0.0021	0.07	-126.01	32	0.0030	0.10	8.37
13	0.0396	1.32	91.22	33	0.0228	0.76	164.79
14	0.0015	0.05	76.07	34	0.0021	0.07	-109.34
15	0.0472	1.57	66.35	35	0.0292	0.97	73.13
16	0.0012	0.04	-82.49	36	0.0014	0.05	105.18
17	0.0554	1.84	-35.15	37	0.0275	0.91	-37.08
18	0.0016	0.05	144.64	38	0.0015	0.05	-84.35
19	0.0290	0.96	-121.45	39	0.0167	0.56	-131.39
20	0.0032	0.11	11.36	40	0.0017	0.06	140.43
TOTAL	3.0357						
THD-F		14.09					

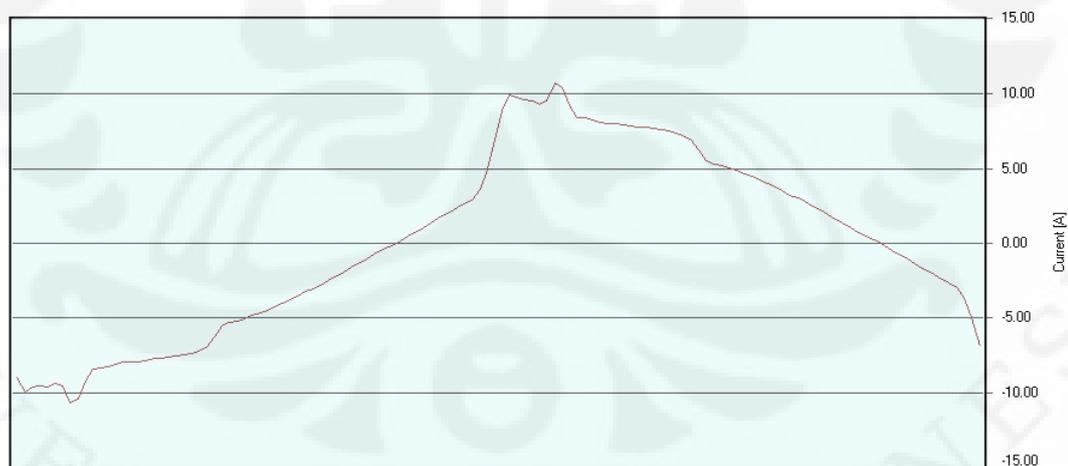
12. Gelombang tegangan dan arus dengan THD 14.09 % pada MCB 2A SNI



13. Harmonik *List* dengan nilai THD 22.89 % pada MCB 4A standarisasi SNI

Order	[A]	[%]	[°]	Order	[A]	[%]	[°]
1	5.9010	100.00	-170.66	21	0.1248	2.12	139.20
2	0.0067	0.11	-103.58	22	0.0053	0.09	-167.03
3	1.0249	17.37	94.66	23	0.0732	1.24	18.14
4	0.0036	0.06	82.62	24	0.0038	0.06	110.38
5	0.5678	9.62	23.25	25	0.0072	0.12	-90.60
6	0.0014	0.02	-131.09	26	0.0042	0.07	27.41
7	0.5020	8.51	-65.79	27	0.0146	0.25	127.36
8	0.0018	0.03	29.76	28	0.0054	0.09	-70.85
9	0.2002	3.39	-161.65	29	0.0480	0.81	-41.45
10	0.0017	0.03	-58.63	30	0.0049	0.08	-154.66
11	0.1626	2.76	176.57	31	0.0593	1.00	-171.98
12	0.0011	0.02	-127.07	32	0.0054	0.09	92.42
13	0.1293	2.19	96.31	33	0.0431	0.73	80.96
14	0.0014	0.02	-131.33	34	0.0021	0.04	-8.50
15	0.1728	2.93	56.99	35	0.0487	0.83	-16.05
16	0.0025	0.04	97.60	36	0.0009	0.02	-41.42
17	0.1894	3.21	-47.02	37	0.0448	0.76	-144.87
18	0.0007	0.01	-0.30	38	0.0018	0.03	-112.46
19	0.1255	2.13	-133.72	39	0.0264	0.45	124.75
20	0.0037	0.06	-40.28	40	0.0008	0.01	-126.08
TOTAL	6.0536						
THD-F		22.89					

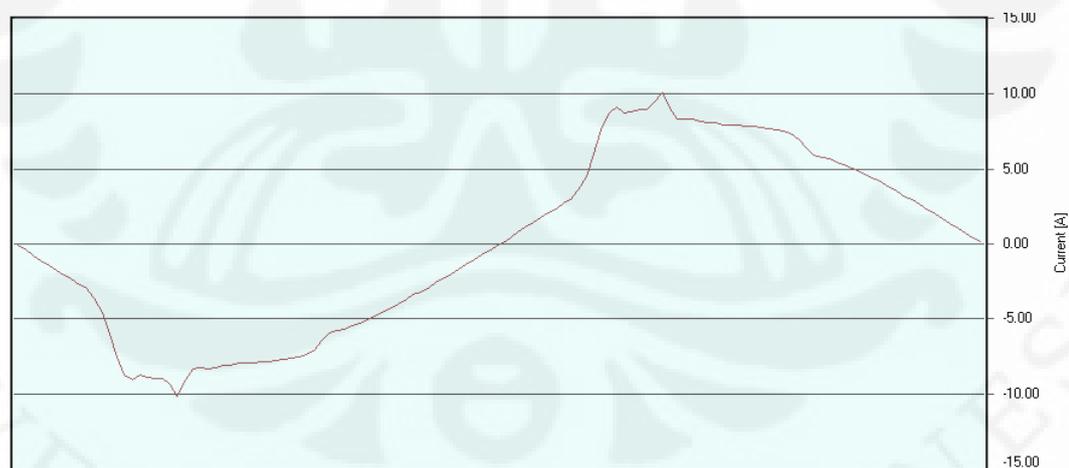
14. Gelombang tegangan dan arus dengan THD 22.89 % pada MCB 4A SNI



15. Harmonik *List* dengan nilai THD 17.8 % pada MCB 4A standarisasi SNI

Order	[A]	[%]	[°]	Order	[A]	[%]	[°]
1	5.9405	100.00	-172.35	21	0.0986	1.66	153.75
2	0.0084	0.14	147.61	22	0.0043	0.07	153.47
3	0.7974	13.42	98.15	23	0.0467	0.79	25.88
4	0.0060	0.10	115.57	24	0.0030	0.05	91.57
5	0.4727	7.96	27.24	25	0.0089	0.15	-85.44
6	0.0045	0.08	26.02	26	0.0042	0.07	-50.65
7	0.3859	6.50	-62.13	27	0.0186	0.31	127.17
8	0.0050	0.08	-117.71	28	0.0030	0.05	-125.94
9	0.1438	2.42	-152.86	29	0.0404	0.68	-14.51
10	0.0040	0.07	134.94	30	0.0036	0.06	55.49
11	0.1310	2.21	-174.62	31	0.0402	0.68	-154.80
12	0.0034	0.06	-29.94	32	0.0006	0.01	-19.61
13	0.0925	1.56	108.83	33	0.0304	0.51	110.54
14	0.0048	0.08	-155.24	34	0.0049	0.08	134.09
15	0.1325	2.23	67.86	35	0.0417	0.70	-17.79
16	0.0036	0.06	79.81	36	0.0024	0.04	-31.00
17	0.1297	2.18	-33.71	37	0.0428	0.72	-143.52
18	0.0043	0.07	-9.24	38	0.0074	0.13	-113.14
19	0.0880	1.48	-113.41	39	0.0321	0.54	97.75
20	0.0026	0.04	-116.04	40	0.0020	0.03	131.07
TOTAL	6.0339						
THD-F		17.80					

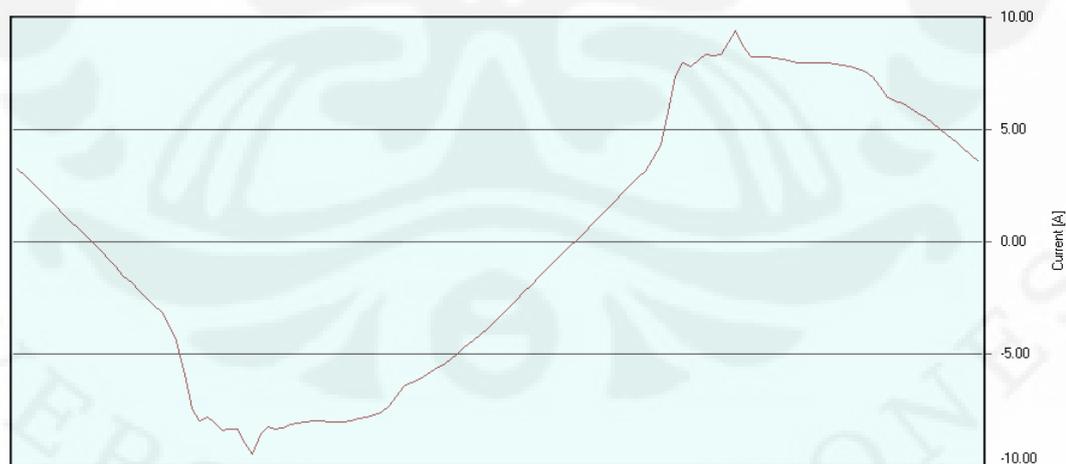
16. Gelombang tegangan dan arus dengan THD 17.8 % pada MCB 4A SNI



17. Harmonik *List* dengan nilai THD 13.38 % pada MCB 4A standarisasi SNI

Order	[A]	[%]	[°]	Order	[A]	[%]	[°]
1	5.9784	100.00	-173.93	21	0.0786	1.31	179.27
2	0.0099	0.16	168.67	22	0.0045	0.07	-128.92
3	0.5900	9.87	102.06	23	0.0278	0.47	79.47
4	0.0060	0.10	160.93	24	0.0022	0.04	125.86
5	0.3685	6.16	30.72	25	0.0167	0.28	92.20
6	0.0047	0.08	54.51	26	0.0009	0.01	-55.65
7	0.2889	4.83	-58.82	27	0.0183	0.31	71.46
8	0.0015	0.03	-109.70	28	0.0027	0.05	136.19
9	0.0938	1.57	-140.79	29	0.0484	0.81	-20.28
10	0.0032	0.05	15.63	30	0.0038	0.06	-0.52
11	0.1076	1.80	-164.89	31	0.0486	0.81	-124.49
12	0.0044	0.07	-98.75	32	0.0037	0.06	-97.64
13	0.0785	1.31	119.95	33	0.0502	0.84	153.97
14	0.0030	0.05	-164.38	34	0.0040	0.07	157.68
15	0.1075	1.80	79.14	35	0.0496	0.83	48.63
16	0.0024	0.04	159.25	36	0.0038	0.06	22.10
17	0.0979	1.64	-16.65	37	0.0308	0.52	-59.94
18	0.0046	0.08	92.10	38	0.0037	0.06	-92.36
19	0.0750	1.25	-82.22	39	0.0213	0.36	-151.15
20	0.0059	0.10	-23.60	40	0.0033	0.06	150.34
TOTAL	6.0317						
THD-F		13.38					

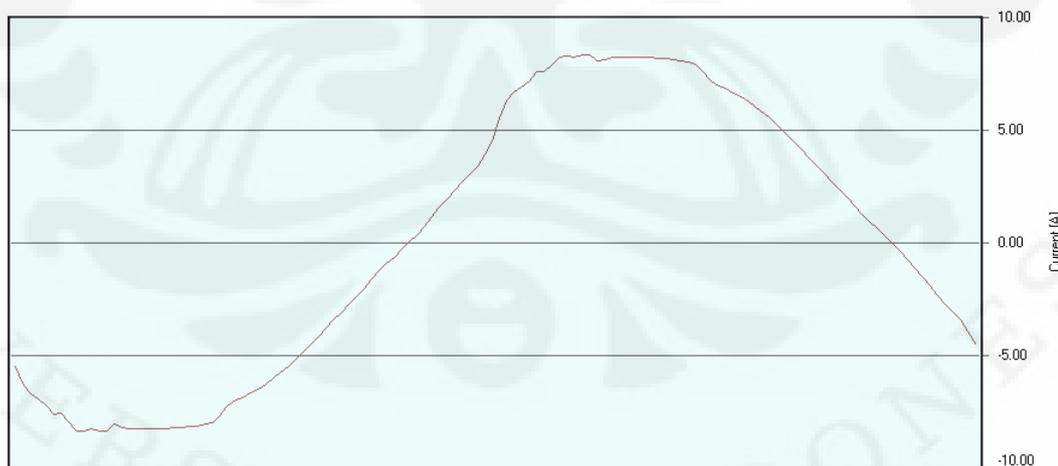
18. Gelombang tegangan dan arus dengan THD 13.38 % pada MCB 4A SNI



19. Harmonik *List* dengan nilai THD 7.5 % pada MCB 4A standarisasi SNI

Order	[A]	[%]	[°]	Order	[A]	[%]	[°]
1	6.0187	100.00	-176.25	21	0.0285	0.47	-156.99
2	0.0053	0.09	85.65	22	0.0027	0.05	49.83
3	0.3338	5.55	97.10	23	0.0070	0.12	156.85
4	0.0008	0.01	64.19	24	0.0025	0.04	-73.44
5	0.2375	3.95	27.14	25	0.0207	0.34	105.36
6	0.0024	0.04	2.29	26	0.0021	0.04	-161.71
7	0.1436	2.39	-56.19	27	0.0098	0.16	-38.50
8	0.0015	0.02	-173.23	28	0.0026	0.04	95.52
9	0.0430	0.71	-177.49	29	0.0083	0.14	2.16
10	0.0018	0.03	176.33	30	0.0020	0.03	-30.26
11	0.0523	0.87	-155.75	31	0.0136	0.23	-98.67
12	0.0011	0.02	0.27	32	0.0016	0.03	-79.73
13	0.0341	0.57	103.56	33	0.0169	0.28	-146.97
14	0.0007	0.01	175.36	34	0.0025	0.04	168.36
15	0.0622	1.03	84.18	35	0.0232	0.39	96.75
16	0.0016	0.03	64.49	36	0.0021	0.04	62.65
17	0.0508	0.84	-25.78	37	0.0193	0.32	-28.46
18	0.0014	0.02	-73.35	38	0.0027	0.04	-36.86
19	0.0145	0.24	-93.35	39	0.0137	0.23	-114.01
20	0.0019	0.03	166.52	40	0.0028	0.05	-154.21
TOTAL	6.0356						
THD-F		7.50					

20. Gelombang tegangan dan arus dengan THD 7.5 % pada MCB 4A SNI



21. Harmonik *List* dengan nilai THD 3.56 % pada MCB 4A standarisasi SNI

Order	[A]	[%]	[°]	Order	[A]	[%]	[°]
1	6.0257	100.00	-177.74	21	0.0168	0.28	152.27
2	0.0012	0.02	-158.38	22	0.0007	0.01	-84.36
3	0.1390	2.31	118.04	23	0.0051	0.09	-16.77
4	0.0010	0.02	-62.16	24	0.0014	0.02	-156.14
5	0.1366	2.27	29.41	25	0.0088	0.15	123.20
6	0.0010	0.02	-81.35	26	0.0018	0.03	107.97
7	0.0558	0.93	-71.93	27	0.0047	0.08	73.01
8	0.0014	0.02	-60.17	28	0.0012	0.02	-14.21
9	0.0067	0.11	107.51	29	0.0152	0.25	-29.34
10	0.0005	0.01	33.27	30	0.0017	0.03	-114.29
11	0.0254	0.42	-131.32	31	0.0164	0.27	-134.05
12	0.0009	0.02	165.56	32	0.0017	0.03	126.88
13	0.0171	0.28	131.97	33	0.0159	0.26	156.16
14	0.0003	0.01	-4.47	34	0.0018	0.03	10.15
15	0.0410	0.68	95.55	35	0.0127	0.21	56.64
16	0.0004	0.01	-29.83	36	0.0012	0.02	-118.85
17	0.0283	0.47	-29.61	37	0.0061	0.10	-52.23
18	0.0005	0.01	-173.87	38	0.0013	0.02	125.23
19	0.0088	0.15	-117.38	39	0.0038	0.06	-110.37
20	0.0009	0.01	79.83	40	0.0017	0.03	-1.53
TOTAL	6.0295						
THD-F		3.56					

22. Gelombang tegangan dan arus dengan THD 3.56 % pada MCB 4A SNI

