

**KAJIAN EKSPERIMENTAL PENGARUH RAGAM BEBAN TIGA-FASE
SIMETRIS TERHADAP MAGNITUDO ARUS NETRAL**



FIRMAN SALIM

10582 00 795 11

DEDI EVENDI

10582 00 798 11

**PROGRAM STUDI TEKNIK LISTRIK
JURUSAN ELEKTRO FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS MUHAMMADIYAH MAKASSAR**

2016

KAJIAN EKSPERIMENTAL PENGARUH RAGAM BEBAN TIGA-FASE

SIMETRIS TERHADAP MAGNITUDO ARUS NETRAL

SKRIPSI

*Diajukan Sebagai Salah Satu Syarat
Guna Memperoleh Gelar Sarjana
Program Studi Teknik Listrik
Jurusan Elektro Fakultas Teknik*

Disusun Dan Diajukan Oleh

FIRMAN SALIM

10582 00 795 11

DEDI EVENDI

10582 00 798 11

PADA

UNIVERSITAS MUHAMMADIYAH MAKASSAR

MAKASSAR

2016



UNIVERSITAS MUHAMMADIYAH MAKASSAR

FAKULTAS TEKNIK

Jl. Sultan Alauddin No. 259 Telp. (0411) 866 972 Fax (0411) 865 588 Makassar 90221

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

HALAMAN PENGESAHAN

Tugas Akhir ini diajukan untuk memenuhi syarat ujian guna memperoleh gelar Sarjana Teknik (ST) Program Studi Teknik Elektro Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Makassar.

Judul Skripsi : **KAJIAN EKSPERIMENTAL PENGARUH RAGAM BEBAN TIGA-FASA SIMETRIS TERHADAP MAGNITUDO ARUS NETRAL.**

Nama : 1. Firman Salim
2. Dedi Efendi

Stambuk : 1. 105 82 0795 11
2. 105 82 0798 11

Makassar, 14 Maret 2016

Telah Diperiksa dan Disetujui
Oleh Dosen Pembimbing;

Pembimbing I

Pembimbing II

Dr. Ir. Zahir Zainuddin, M.Sc

Andi Faharuddin, S.T.,M.T

Mengetahui,

Ketua Jurusan Elektro



Ir. Idris Khatu, S.T., M.T.

ISN : 990 410



بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

PENGESAHAN

Skripsi atas nama Firman Salim dengan nomor induk Mahasiswa 105 82 0795 11 dan Dedi Efendi dengan nomor induk Mahasiswa 105 82 0798 11, dinyatakan diterima dan disahkan oleh Panitia Ujian Tugas Akhir/Skripsi sesuai dengan Surat Keputusan Dekan Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Makassar Nomor : 043/05/A.5-II/1/37/2016, sebagai salah satu syarat guna memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Elektro Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Makassar pada hari Jum`at tanggal 22 Januari 2016

Panitia Ujian : Makassar, 04 Jumadil Akhir 1437 H
14 Maret 2016 M

1. Pengawas Umum

a. Rektor Universitas Muhammadiyah Makassar

Dr. H. Irwan Akib, M.Pd.

b. Dekan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin

Dr. -Ing. Ir. Wahyu H. Piarah, MSME.

2. Penguji

a. Ketua : Dr. Ir. Hj. Hafsah Nirwana, M.T.

b. Sekertaris : Andi Abd Halik Lateko Tj, S.T., M.T.

3. Anggota : 1. Dr. Eng. Ir. H. Zulfajri Basri Hasanuddin, M.Eng

2. Ir. Abd Hafid, M.T

3. Umar Katu, S.T., M.T

Mengetahui :

Pembimbing I

Dr. Ir. Zahir Zainuddin, M.Sc

Pembimbing II

Andi Faharuddin, S.T., M.T

Ketua Program Studi
Teknik Elektro



Umar Katu, S.T., M.T.

NBM : 990 410

KATA PENGANTAR

Syukur Alhamdulillah penulis panjatkan ke hadirat Allah SWT, karena rahmat dan hidayahNyalah sehingga penulis dapat menyusun skripsi ini, dan dapat diselesaikan dengan baik.

Tugas akhir ini disusun sebagai salah persyaratan akademik yang harus ditempuh dalam rangka penyelesaian program studi pada Jurusan Elektro Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Makassar. Adapun judul tugas akhir adalah :

“Kajian Eksperimental Pengaruh Ragam Beban Tiga-Fase Simetris Terhadap Magnitudo Arus Netral”

Penulis menyadari sepenuhnya bahwa dalam penulisan skripsi ini masih terdapat kekurangan-kekurangan, hal ini disebabkan penulis sebagai manusia biasa tidak lepas dari kesalahan dan kekurangan baik itu ditinjau dari segi teknis penulis maupun dari perhitungan-perhitungan. Oleh karena itu penulis menerima dengan ikhlas dan senang hati segala koreksi serta perbaikan guna penyempurnaan tulisan ini agar kelak dapat bermanfaat.

Skripsi ini dapat terwujud berkat adanya bantuan, arahan, dan bimbingan dari berbagai pihak. Oleh karena itu dengan segala ketulusan dan kerendahan hati, kami mengucapkan terima kasih dan penghargaan yang setinggi-tingginya kepada:

1. Bapak Hamzah Al Imran, S.T.,M.T. sebagai Dekan Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Makassar.
2. Bapak Umar Katu, S.T.,M.T. sebagai Ketua Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Makassar.
3. Bapak. Dr. Ir. Zahir Zainuddin, M.Sc, selaku Pembimbing I dan Bapak Andi Faharuddin, S.T.,M.T. selaku Pembimbing II, yang telah banyak meluangkan waktunya dalam membimbing kami.
4. Bapak dan ibu dosen serta staf pegawai pada fakultas teknik atas segala waktunya telah mendidik dan melayani penulis selama mengikuti proses belajar mengajar di Universitas Muhammadiyah Makassar.
5. Ayahanda dan Ibunda yang tercinta, penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya atas segala limpahan kasih sayang, doa dan pengorbanan terutama dalam bentuk materi dalam menyelesaikan kuliah.
6. Saudara-saudaraku serta rekan-rekan mahasiswa fakultas teknik terkhusus angkatan 2011 yang dengan keakraban dan persaudaraan banyak membantu dalam menyelesaikan tugas akhir ini.

Semoga semua pihak tersebut di atas mendapat pahala yang berlipat ganda di sisi Allah SWT dan skripsi yang sederhana ini dapat bermanfaat bagi penulis, rekan-rekan, masyarakat serta bangsa dan negara. Amin.

Makassar, Desember 2015

Penulis

ABSTRAK

Sistem tiga-fase seimbang merupakan sebuah keadaan dimana tiap fase memiliki magnitudo tegangan yang identik dan antara satu fase dengan fase lainnya mempunyai beda fase sebesar 120° listrik. Keadaan seimbang juga dapat diartikan sebagai kondisi dimana terdapat beban-beban yang simetris pada tiap fase. Arus netral pada sistem tiga-fase hubung *way* (Y) merupakan hasil penjumlahan vektor dari ketiga arus fasenya yang dalam keadaan seimbang akan bernilai nol. Kehadiran fenomena harmonik orde ke-3 pada sistem tiga-fase empat kawat simetris akan memicu timbulnya arus netral. Fenomena harmonik ini umumnya disebabkan oleh penggunaan beban-beban listrik nonlinier. Pada penelitian ini, beban yang digunakan adalah beban penerangan satu-fase berupa lampu pijar, lampu TL, LHE dan LED dengan daya masing-masing sebesar 10, 20 dan 30 Watt. Selanjutnya masing-masing tipe lampu dihubungkan *way* (Y) dan dihubungkan dengan sumber tegangan tiga-fase empat kawat simetris pada *Workshop* P.T. Makassar Terminal Services untuk dilakukan pengukuran arus fase dan arus netral pada setiap tipe dan ukuran daya. Hasil pengukuran menunjukkan arus netral hanya muncul pada tipe lampu TL, LHE dan LED. Lampu TL menghasilkan arus netral yang lebih kecil dari arus fasenya, sedangkan lampu LHE dan LED menghasilkan arus netral yang bahkan lebih besar dari arus fasenya. Hasil yang signifikan terjadi pada pengujian lampu LED 10 Watt dengan arus fase sebesar 70 mA dan arus netral yang muncul sebesar 145 mA. Hal ini menunjukkan nilai arus netral yang mencapai 207,14 % lebih besar dari arus fasenya.

Kata kunci : Sistem tiga-fase seimbang, beban linier, beban nonlinier, harmonik, arus netral.

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR	i
ABSTRAK	iii
DAFTAR ISI	iv
DAFTAR GAMBAR	viii
DAFTAR TABEL	xii
BAB I. PENDAHULUAN	1
A. Latar Belakang.....	1
B. Rumusan Masalah	3
C. Tujuan Penelitian.....	4
D. Batasan Masalah.....	4
E. Manfaat Penelitian.....	5
F. Sistematika Penulisan.....	6
BAB II. TINJAUAN PUSTAKA	7
A. Sistem Tiga-Fase	7
1. Hubungan pada Sistem Tiga-Fase.....	8
2. Sistem Tiga-Fase Seimbang	9
B. Beban Linier dan Nonlinier	12
1. Beban Linier	12
2. Beban Nonlinier	13

C. Harmonik.....	13
D. Jenis-Jenis Harmonik.....	16
1. Harmonik Urutan Positif	16
2. Harmonik Urutan Negatif.....	17
3. Harmonik Urutan Nol.....	18
E. Sumber Harmonik	19
F. <i>Triple-n</i> Harmonik.....	19
G. Indeks Harmonik	20
1. <i>Individual Harmonic Distortion (IHD)</i>	20
2. <i>Total Harmonic Distortion (THD)</i>	21
H. Standar Harmonik.....	22
I. Dampak Harmonik pada Peralatan.....	23
1. Rugi-Rugi pada Kabel Konduktor dan Kawat Transmisi	23
2. Generator Sinkron	24
3. Sistem Proteksi.....	24
4. Motor Listrik	25
5. Transformator.....	27
J. Karakteristik Beban Penerangan	28
1. Lampu Pijar	28
2. Lampu TL.....	30
3. Lampu LHE.....	33
4. Lampu LED	36

BAB III. METODE PENELITIAN	39
A. Waktu dan Tempat Penelitian	39
B. Peralatan dan Bahan	39
1. Peralatan	39
2. Bahan	40
C. Skema Penelitian	41
D. Langkah Penelitian	42
E. Jadwal Penelitian	43
BAB IV. HASIL DAN PEMBAHASAN.....	44
A. Rangkaian Modul Penelitian dan Tegangan Sumber	44
B. Konfigurasi Beban Uji	48
C. Karakter Arus Netral Untuk Setiap Ragam Beban	49
1. Lampu Pijar	49
2. Lampu TL	53
3. Lampu LHE	58
4. Lampu LED	62
D. Perbandingan Arus Fase pada Ragam Beban Uji	67
1. Arus Fase pada Beban 10 Watt	67
2. Arus Fase pada Beban 20 Watt	69
3. Arus Fase pada Beban 30 Watt	72
E. Perbandingan Arus Netral pada Ragam Beban Uji	74

1. Arus Netral pada Beban 10 Watt.....	74
2. Arus Netral pada Beban 20 Watt	75
3. Arus Netral pada Beban 30 Watt	76
BAB V. PENUTUP.....	77
A. Kesimpulan.....	77
B. Saran.....	78
DAFTAR PUSTAKA.....	79
LAMPIRAN.....	81



DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1.	Sistem tiga-fase	7
Gambar 2.2.	Hubungan bintang dan hubungan segitiga	8
Gambar 2.3.	Vektor arus tiga-fase seimbang.....	10
Gambar 2.4.	Hasil penjumlahan vektor I_R dan I_T	10
Gambar 2.5.	Penjumlahan vektor I_S dan I_{RT}	10
Gambar 2.6.	Vektor arus sistem tiga-fase kondisi tidak seimbang.....	11
Gambar 2.7.	Bentuk gelombang arus dan tegangan dengan beban linier.....	12
Gambar 2.8.	Gelombang tegangan dan arus beban nonlinier	13
Gambar 2.9.	Gelombang fundamental, harmonik ketiga dan harmonik kelima.....	15
Gambar 2.10.	Gelombang hasil penjumlahan gelombang fundamental dan gelombang harmonik ke-3.....	15
Gambar 2.11.	Fasor harmonik ke-1, urutan positif.....	17
Gambar 2.12.	Fasor harmonik ke-5, urutan negatif.....	17
Gambar 2.13.	Fasor harmonik ke-3, urutan nol.....	18
Gambar 2.14.	Arus netral pada <i>grounding wye system</i> akibat <i>triple-n</i> harmonik.....	20
Gambar 2.15.	Komponen lampu pijar.....	28
Gambar 2.16.	Gelombang arus dan tegangan beban resistif.....	29

Gambar 2.17.	Tampilan grafik hasil pengukuran beban lampu pijar 100 W 220 V	30
Gambar 2.18.	Blok diagram rangkaian lampu TL standar.....	31
Gambar 2.19.	Hasil pengukuran THD arus pada lampu TL standar	33
Gambar 2.20.	Konstruksi lampu LHE.....	34
Gambar 2.21.	Komponen elektronika daya lampu LHE.....	34
Gambar 2.22.	Skema rangkaian lampu LHE	35
Gambar 2.23.	Gelombang arus dan tegangan pada lampu LHE.....	35
Gambar 2.24.	Komponen penyusun lampu LED merk Philips	37
Gambar 2.25.	Distorsi gelombang arus pada lampu LED 9 Watt	37
Gambar 2.26.	Komponen harmonik lampu LED 9 Watt.....	38
Gambar 3.1.	Diagram balok skema penelitian.....	41
Gambar 3.2.	Bagan alir proses penelitian	42
Gambar 4.1.	Rangkaian kelistrikan modul penelitian.....	44
Gambar 4.2.	<i>Lay out</i> komponen modul penelitian.....	46
Gambar 4.3.	<i>Lay out</i> AM 1, AM 2 dan AM 3	47
Gambar 4.4.	Grafik tegangan fase di P.T. MTS	48
Gambar 4.5.	Grafik arus fase dan arus netral dari lampu pijar 10 Watt	49
Gambar 4.6.	Grafik arus fase dan arus netral dari lampu pijar 20 Watt	50
Gambar 4.7.	Grafik arus fase dan arus netral dari lampu pijar 30 Watt	50
Gambar 4.8.	Grafik arus fase dan arus netral lampu pijar simetris 10, 20 dan 30 Watt.....	51

Gambar 4.9.	Grafik arus fase dan arus netral dari lampu TL 10 Watt.....	53
Gambar 4.10.	Grafik arus fase dan arus netral dari lampu TL 20 Watt.....	53
Gambar 4.11.	Grafik arus fase dan arus netral dari lampu TL 30 Watt.....	54
Gambar 4.12.	Grafik arus fase dan arus netral lampu TL simetris 10, 20 dan 30 Watt.....	55
Gambar 4.13.	Grafik arus fase dan arus netral dari lampu LHE 10 Watt.....	58
Gambar 4.14.	Grafik arus fase dan arus netral dari lampu LHE 20 Watt.....	58
Gambar 4.15.	Grafik arus fase dan arus netral dari lampu LHE 30 Watt.....	59
Gambar 4.16.	Grafik arus fase dan arus netral lampu LHE simetris 10, 20 dan 30 Watt.....	60
Gambar 4.17.	Grafik arus fase dan arus netral dari lampu LED 10 Watt.....	62
Gambar 4.18.	Grafik arus fase dan arus netral dari lampu LED 20 Watt.....	63
Gambar 4.19.	Grafik arus fase dan arus netral dari lampu LED 30 Watt.....	63
Gambar 4.20.	Grafik arus fase dan arus netral lampu LED simetris 10, 20 dan 30 Watt.....	64
Gambar 4.21.	Grafik arus fase ragam tipe beban dengan daya masing-masing 10 Watt.....	67
Gambar 4.22.	Grafik arus fase ragam tipe beban dengan daya masing-masing 20 Watt.....	69
Gambar 4.23.	Grafik arus fase ragam tipe beban dengan daya masing-masing 30 Watt.....	72

Gambar 4.24.	Grafik arus netral ragam tipe beban dengan daya masing-masing 10 Watt.....	74
Gambar 4.25.	Grafik arus netral ragam tipe beban dengan daya masing-masing 20 Watt.....	75
Gambar 4.26.	Grafik arus netral ragam tipe beban dengan daya masing-masing 30 Watt.....	76



DAFTAR TABEL

Tabel 2.1. Harmonik berdasarkan orde dan polaritasnya pada sistem tiga-fase	18
Tabel 2.2. Batas distorsi arus yang diakibatkan harmonik menurut IEEE 519-1992	22
Tabel 2.3. Batas distorsi tegangan yang diakibatkan harmonik menurut IEEE 519-1992	23
Tabel 2.4. Data hasil pengukuran THD total dan THD orde ke-3, ke-5 dan ke-7 harmonik arus pada lampu hemat energi	36
Tabel 3.1. Jadwal penelitian	43
Tabel 4.1. Konfigurasi beban uji	49

BAB I

PENDAHULUAN

A. Latar Belakang

Setiono (2011), menyatakan bahwa lampu merupakan peralatan penting yang sangat dibutuhkan pada berbagai sektor kehidupan dan semua orang membutuhkannya. Lampu sebagai salah sumber cahaya merupakan komponen penting agar aktifitas kehidupan dapat berjalan dengan baik terutama pada malam hari. Menurut Suropto (2007), jumlah kebutuhan energi untuk kepentingan penerangan terutama di kota besar ternyata cukup banyak, baik untuk penerangan fasilitas umum, industri maupun penerangan rumah tinggal.

Jenis lampu yang umum digunakan untuk penerangan rumah tinggal adalah lampu pijar, lampu *tube lamp* (TL), lampu hemat energi (LHE) dan jenis terbaru yaitu *light emitting diode* (LED). Menurut Suropto (2007), bila dibandingkan dengan lampu pijar, penggunaan lampu TL, LHE dan LED merupakan upaya penghematan energi yang tepat dalam penerangan rumah tinggal untuk ruangan yang memerlukan kuat penerangan yang cukup tinggi.

Lampu TL, LHE dan LED memiliki tingkat efisiensi energi listrik yang lebih tinggi bila dibandingkan dengan lampu pijar. Akan tetapi menurut Alamsyah (2010), lampu TL dan LHE menghasilkan distorsi harmonik yang cukup besar yang disebabkan oleh karakteristik kerja *ballast* elektronik. Sedangkan pada lampu LED distorsi harmonik dihasilkan akibat karakteristik kerja komponen LED sebagai sebuah diode semikonduktor.

Beban-beban listrik seperti alat penerangan atau lampu, alat pendingin dan sebagainya, pada umumnya mendapatkan energi listrik melalui jaringan tiga-fase. Arus netral pada jaringan tiga-fase empat kawat merupakan jumlah vektor dari tiga arus fasenya. Menurut Setiadji dkk (2006), saat keadaan seimbang, penjumlahan arus linier tiga-fase yang terdiri dari gelombang sinus yang tergeser 120^0 akan bernilai nol, dengan demikian tidak ada arus pada penghantar netral.

Menurut Desmet dan Baggini (2003), dasar penentuan ukuran penghantar netral dapat dilihat di *International Electrotechnical Commission (IEC) 60364-5-524*. Ayat 524.2 menunjukkan bahwa penghantar netral sekurang-kurangnya harus memiliki ukuran yang sama dengan penghantar fasenya :

- a) Fase tunggal, sirkit dua-kawat untuk semua luas penampang,
- b) Fase banyak dan fase tunggal, sirkit tiga-kawat, bila ukuran kawat fase lebih kecil atau sama dengan 16 mm^2 untuk tembaga atau 25 mm^2 untuk aluminium.

Ayat 524.3 menyatakan bahwa, untuk sirkit fase banyak, kawat netral boleh memiliki luas penampang lebih kecil dari kawat fase bila kondisi di bawah ini terpenuhi :

- a) Arus maksimum termasuk harmoniknya, selama layanan normal kawat netral dengan luas penampang yang telah dikurangi masih mampu mengalirkan arus secara normal.
- b) Penghantar netral terlindung dari arus lebih.
- c) Kawat fase memiliki luas penampang lebih besar 16 mm^2 untuk tembaga atau 25 mm^2 untuk aluminium.

Menurut Ginting dkk (2013), timbulnya fenomena harmonik, utamanya *triple-n* harmonik atau kelipatan ganjil dari harmonik orde ke-3 ($h = 3, 9, 15, 21,$ dan seterusnya) pada sistem tenaga listrik tiga-fase empat kawat akan mengakibatkan timbulnya arus pada penghantar netral . Menurut *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (2003), besar arus yang timbul pada penghantar netral akibat fenomena *triple-n* harmonik dapat lebih besar dari arus pada masing-masing fasenya, bahkan dapat mencapai 170% dari besar arus fasenya . Timbulnya arus pada penghantar netral yang nilainya bahkan dapat lebih besar daripada arus fasenya ini akan mengakibatkan pembebanan berlebih terhadap penghantar netral karena arus yang mengalir pada penghantar netral tidak sesuai dengan nilai kuat hantar arus (KHA) penghantar yang terpasang. Berdasarkan fenomena harmonik dan timbulnya arus netral tersebut maka dipandang perlu untuk meneliti “*Kajian Eksperimental Pengaruh Ragam Beban Tiga-Fase Simetris Terhadap Magnitudo Arus Netral*”.

B. Rumusan Masalah

Atas dasar penjelasan di atas maka dapat dirumuskan beberapa permasalahan sebagai berikut :

1. Adakah pengaruh ragam tipe beban tiga-fase simetris terhadap timbulnya arus pada penghantar netral?
2. Jika ada, berapa besarkah arus yang timbul pada penghantar netral akibat pengaruh ragam tipe beban tiga-fase simetris tersebut?

3. Adakah pengaruh ragam ukuran daya beban tiga-fase simetris terhadap timbulnya arus pada penghantar netral?
4. Jika ada, berapa besarkah arus yang timbul pada penghantar netral akibat pengaruh ragam ukuran daya beban tiga-fase simetris tersebut?

C. Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini yaitu:

1. Untuk mendapatkan konfirmasi tentang ada atau tidaknya pengaruh ragam tipe beban tiga-fase simetris terhadap timbulnya arus pada penghantar netral.
2. Untuk mendapatkan besar nilai arus yang timbul pada penghantar netral akibat pengaruh ragam tipe beban tiga-fase simetris.
3. Untuk mendapatkan konfirmasi tentang ada atau tidaknya pengaruh ragam ukuran daya beban tiga-fase simetris terhadap timbulnya arus pada penghantar netral.
4. Untuk mendapatkan besar nilai arus yang timbul pada penghantar netral akibat pengaruh ragam ukuran daya beban tiga-fase simetris.

D. Batasan Masalah

1. Penelitian ini dibatasi hanya untuk mengukur besar arus pada masing-masing fase dan besar arus pada penghantar netral yang mungkin timbul akibat penggunaan tipe ataupun ukuran daya tertentu dari ragam beban tiga-fase simetris yang diuji.

2. Jenis beban yang digunakan untuk merepresentasikan beban tiga-fase pada penelitian ini adalah beban penerangan satu-fase berupa lampu pijar, lampu TL, LHE dan LED.
3. Ukuran daya yang digunakan pada masing-masing tipe beban adalah 10 Watt, 20 Watt dan 30 Watt.
4. Masing-masing tipe dan ukuran daya beban dihubungkan bintang dan disuplai dengan sumber tegangan tiga-fase empat kawat, serta diuji secara bergantian dengan ukuran daya beban yang simetris pada tiap fasenya.
5. Penelitian ini menggunakan sumber tegangan tiga-fase empat kawat di P.T. Makassar Terminal Services yang bersumber dari jaringan PLN.

E. Manfaat Penelitian

Manfaat yang akan diperoleh dari penelitian ini yaitu:

1. Pengembangan pengetahuan penulis terkait pengaruh yang ditimbulkan oleh ragam tipe beban dan ragam ukuran daya beban penerangan tiga-fase simetris terhadap timbulnya arus pada penghantar netral.
2. Dapat menjadi referensi tambahan dalam penentuan ukuran penghantar netral pada sistem tenaga listrik untuk instansi terkait maupun pihak-pihak yang membutuhkan.

F. Sistematika Penulisan

Bab Pertama, Bab ini menjelaskan tentang latar belakang, rumusan masalah, batasan masalah, serta tujuan dan manfaat dari penelitian yang dilakukan serta sistematika penulisan dari laporan hasil penelitian.

Bab Kedua, bab ini menjelaskan tentang teori-teori pendukung yang berkaitan dengan judul penelitian.

Bab Ketiga, Bab ini menjelaskan tentang waktu dan tempat penelitian, alat dan bahan yang digunakan, diagram balok dan gambar rangkaian penelitian, serta metode penelitian yang berisi langkah-langkah dalam proses melakukan penelitian.

Bab Keempat, Bab ini menjelaskan tentang hasil dari penelitian, alat dan perhitungan serta pembahasan terkait judul penelitian.

Bab Kelima, Bab ini merupakan penutup yang berisi tentang kesimpulan dan saran terkait judul penelitian.

Daftar Pustaka, Berisi tentang daftar sumber referensi penulis dalam memilih teori yang relevan dengan judul penelitian.

Lampiran, Berisi tentang dokumentasi hasil penelitian serta alat dan bahan yang digunakan dalam penelitian.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

A. Sistem Tiga-Fase

Menurut *U.S. Department of Energy* (1992), idealnya daya listrik pada sistem tenaga listrik tiga-fase yang dibangkitkan, disalurkan dan diserap oleh beban adalah seimbang, serta pada tegangan dan arus yang seimbang. Tegangan dan arus yang seimbang terdiri dari tegangan dan arus satu-fase yang mempunyai magnitudo dan frekuensi yang sama tetapi antara satu fase dengan fase lainnya mempunyai beda fase sebesar 120° listrik.



Gambar 2.1. Sistem tiga-fase.

Sumber : *U.S. Department of Energy* (1992)

Gambar 2.1 menunjukkan fasor diagram dari tegangan fase. Bila fasor-fasor tegangan tersebut berputar dengan kecepatan sudut dan dengan arah berlawanan jarum jam atau arah positif, maka nilai maksimum positif dari fase

terjadi berturut-turut untuk fase V_1 , V_2 dan V_3 . Sistem tiga-fase ini dikenal sebagai sistem yang mempunyai urutan fase a – b – c .

1. Hubungan Pada Sistem Tiga-Fase

Menurut *U.S. Department of Energy* (1992), secara garis besar sistem tiga-fase dapat dihubungkan dengan menggunakan dua jenis hubungan yaitu dengan hubung bintang atau hubung segitiga.



Gambar 2.2. Hubungan bintang dan hubungan segitiga
Sumber : *U.S. Department of Energy* (1992)

Hubungan bintang diperoleh dengan menghubungkan ujung-ujung tiap fase menjadi satu dan menjadi titik netral atau titik bintang. Tegangan antara dua terminal dari tiga terminal a – b – c mempunyai besar magnitudo dan beda fase yang berbeda dengan tegangan tiap terminal terhadap titik netral. Tegangan V_a , V_b dan V_c disebut tegangan fase atau V_f . Dengan adanya titik netral maka besaran tegangan fase dihitung terhadap titik netralnya, dimana besar magnitudo tegangan dalam kondisi seimbang dapat dihitung.

$$V_{\text{line}} = \sqrt{3} V_{\text{fase}} = 1,73 \times V_{\text{fase}} \quad (2.1)$$

Sedangkan untuk arus yang mengalir pada semua fase mempunyai nilai yang sama.

$$I_{\text{Line}} = I_{\text{fase}} = I_a = I_b = I_c \quad (2.2)$$

Hubungan segitiga adalah hubungan dimana ketiga fase saling dihubungkan sehingga membentuk hubungan segitiga tiga-fase. Dengan tidak adanya titik netral, maka besarnya tegangan saluran dihitung antar fase, karena tegangan saluran dan tegangan fasa mempunyai besar magnitudo yang sama, maka:

$$V_{\text{line}} = V_{\text{fase}} \quad (2.3)$$

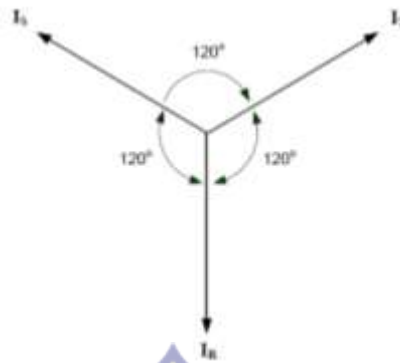
Tetapi arus saluran dan arus fase tidak sama dan hubungan antara kedua arus tersebut dapat diperoleh dengan menggunakan hukum kirchoff, sehingga:

$$I_{\text{line}} = \sqrt{3} I_{\text{fase}} = 1,73 \times I_{\text{fase}} \quad (2.4)$$

2. Sistem Tiga-Fase Seimbang

Menurut *U.S. Department of Energy* (1992), sistem tenaga listrik biasanya disuplai oleh generator berfase-tiga. Biasanya generator-generator mensuplai beban-beban berfase-tiga yang seimbang, yang berarti bahwa pada ketiga fase tersebut terdapat beban-beban yang identik. Setiadji dkk (2006), menyatakan bahwa keadaan seimbang pada sistem tiga-fase merupakan suatu keadaan :

- a. Ketiga vektor arus atau tegangan sama besar.
- b. Ketiga vektor saling membentuk sudut 120° satu sama lain



Gambar 2.3. Vektor arus tiga-fase seimbang
Sumber: Setiadji dkk (2006)



Gambar 2.4. Hasil penjumlahan vektor I_R dan I_T

Gambar 2.5. Penjumlahan vektor I_s dan I_{RT}

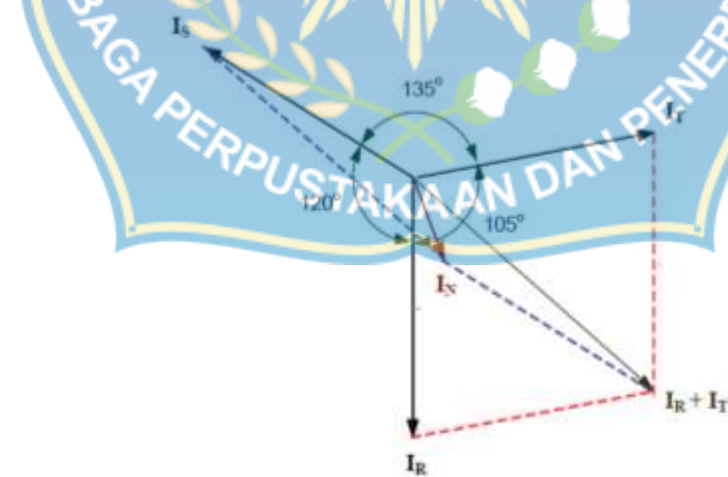
Gambar 2.3 menunjukkan vektor diagram arus dalam keadaan seimbang. Gambar 2.4 menunjukkan hasil penjumlahan vektor arus I_R dan I_T sehingga menghasilkan vektor I_{RT} . Kemudian Gambar 2.5 menunjukkan vektor I_{RT} dan vektor arus I_s yang memiliki besar vektor yang sama namun dengan arah yang

saling berlawanan. Dengan demikian jika kedua vektor arus tersebut akan saling mengurangi satu sama lain. Oleh karena besar vektor arus I_S dan I_{RT} adalah sama maka hasil pengurangan kedua vektor tersebut sama dengan nol yang artinya tidak ada arus netral yang mengalir ($I_N = 0$).

$$I_{\text{Netral}} = (I_R < 0^\circ) + (I_S < 240^\circ) + (I_T < 120^\circ) \quad (2.5)$$

Sedangkan yang dimaksud dengan keadaan tidak seimbang adalah keadaan dimana salah satu atau kedua syarat keadaan seimbang tidak terpenuhi. Menurut Setiadji dkk (2006), keadaan tidak seimbang pada sistem tiga-fase dapat terjadi pada tiga kondisi, yaitu:

- Ketiga vektor sama besar tetapi tidak membentuk sudut 120° satu sama lain.
- Ketiga vektor tidak sama besar tetapi membentuk sudut 120° satu sama lain.
- Ketiga vektor tidak sama besar dan tidak membentuk sudut 120° satu sama lain.



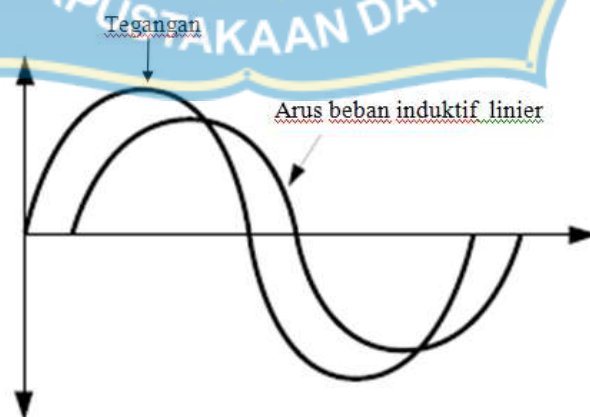
Gambar 2.6. Vektor arus sistem tiga-fase kondisi tidak seimbang
Sumber: Setiadji dkk (2006)

Gambar 2.6 menunjukkan vektor diagram arus yang tidak seimbang. Di sini terlihat bahwa penjumlahan ketiga vektor arus I_R , I_S , dan I_T tidak sama dengan nol sehingga muncul sebuah besaran yaitu arus netral (I_N) yang besarnya bergantung dari seberapa besar faktor ketidakseimbangannya.

B. Beban Linier dan Nonlinier

1. Beban Linier

Menurut Amalia dan Nazir (2015), beban linier adalah beban yang impedansinya selalu konstan sehingga arus selalu berbanding lurus dengan tegangan setiap waktu. De la Rosa (2006), menyatakan bahwa beban linier ini mematuhi hukum ohm yang menyatakan bahwa arus berbanding lurus dengan tegangan. Apabila diberi tegangan sinusoidal, maka arus yang mengalir ke beban linier juga berbentuk gelombang sinusoidal sehingga tidak terjadi distorsi Gambar 2.7 berikut adalah contoh bentuk gelombang arus dan tegangan dengan beban linier.



Gambar 2.7. Bentuk gelombang arus dan tegangan dengan beban linier
Sumber: Square D (1994)

2. Beban Nonlinier

Menurut De La Rosa (2006), beban nonlinier adalah beban yang memiliki sifat menarik arus dengan bentuk nonsinusoidal walaupun disuplai oleh tegangan sinusoidal. Beban nonlinier tidak mematuhi hukum ohm yang menyatakan bahwa arus berbanding lurus dengan tegangan. Menurut Amalia dan Nazir (2015), gelombang arus yang dihasilkan oleh beban nonlinier tidak sama dengan bentuk gelombang tegangan sehingga terjadi cacat atau distorsi.

Gambar 2.8 berikut adalah contoh bentuk gelombang tegangan dan arus pada beban nonlinier.



Gambar 2.8. Gelombang tegangan dan arus beban nonlinier
Sumber: Square D (1994)

C. Harmonik

Menurut Rodrigues dan Saldhana (2010), harmonik merupakan gejala terdistorsinya gelombang arus listrik fundamental yang disebabkan oleh beban nonlinier. Menurut Square D (1994), harmonik merupakan komponen

gelombang periodik yang memiliki nilai frekuensi yang merupakan kelipatan dari frekuensi dasarnya.

Setiawan (2007), menyatakan bahwa frekuensi harmonik adalah suatu frekuensi yang menyebabkan cacatnya gelombang amplitudo dalam suatu sistem tenaga listrik. Menurut De La Rosa (2006), frekuensi harmonik yang terbentuk merupakan hasil kali antara frekuensi fundamental (f) dengan bilangan harmoniknya. Menurut Sankaran (2002), harmonik ke-1 merupakan nilai frekuensi fundamental, harmonik ke-2 memiliki nilai frekuensi dua kali lebih besar dari frekuensi fundamentalnya, harmonik ke-3 memiliki nilai frekuensi tiga kali lebih besar dari frekuensi fundamentalnya, harmonik ke- n memiliki nilai frekuensi n kali lebih besar dari frekuensi fundamentalnya.

Menurut De La Rosa (2006), harmonik ke-3 artinya harmonik yang mempunyai frekuensi tiga kali dari frekuensi fundamentalnya. Jadi, bila frekuensi fundamental 50 Hz, maka harmonik ke-3 mempunyai frekuensi 150 Hz atau dapat dituliskan dengan persamaan:

$$f_h = (h) \times f \quad (2.6)$$

Dimana :

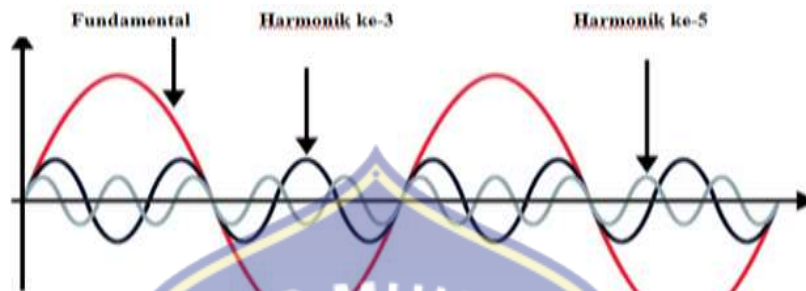
f_h : Frekuensi harmonik ke- h

h : Bilangan bulat positif (integer)

f : Frekuensi fundamental

Menurut Setiawan (2007), gelombang harmonik menumpang pada gelombang fundamentalnya sehingga berbentuk gelombang cacat. Gelombang cacat tersebut merupakan penjumlahan antara gelombang fundamental sesaat

dengan gelombang harmoniknya. Gambar 2.9 menunjukkan bentuk gelombang tegangan fundamental, harmonik ketiga dan harmonik kelima.



Gambar 2.9. Gelombang fundamental, harmonik ke-3 dan harmonik ke-5
Sumber: *KeySight Technologies* (2014)

Jika gelombang tegangan fundamental dijumlahkan dengan harmonik ke-3 akan diperoleh bentuk gelombang tegangan yang nonsinusoidal, seperti ditunjukkan pada Gambar 2.10.



Gambar 2.10. Gelombang hasil penjumlahan gelombang fundamental dan gelombang harmonik ke-3
Sumber: *KeySight Technologies* (2014)

D. Jenis-Jenis Harmonik

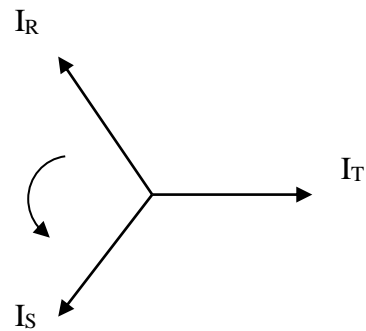
Menurut Sankaran (2002), berdasarkan ordenya harmonik dapat dibedakan menjadi harmonik ganjil dan genap. Harmonik genap terdiri dari harmonik ke- 2, - 4, -6, -8, dan seterusnya. Sedangkan harmonik ganjil terdiri dari harmonik ke-3, - 5, -7, -9, dan seterusnya. Adapun harmonik pertama tidak masuk kedalam harmonik ganjil karena merupakan frekuensi fundamental (dasar). Sedangkan harmonik orde 0 menunjukkan konstanta atau komponen DC dari suatu gelombang .

Menurut Setiawan (2007), berdasarkan urutan fasenya harmonik dapat dibedakan atas tiga yaitu harmonik urutan positif, harmonik urutan negatif dan harmonik urutan nol.

1. Harmonik Urutan Positif

Harmonik urutan positif merupakan harmonik yang mempunyai urutan fasa yang sama dengan fasor aslinya yang terdiri dari tiga fasor yang sama besarnya dan beda fasanya masing-masing 120^0 dengan urutan fasa R-S-T. Harmonik urutan positif ini terdiri atas harmonik ke-1, -7, -13, dan seterusnya.

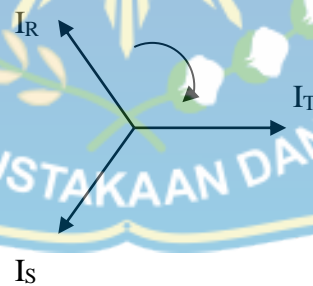
Gambar 2.11 menunjukkan fasor dari harmonik urutan positif.



Gambar 2.11. Fasor harmonik ke-1, urutan positif
Sumber: Sankaran (2002)

2. Harmonik Urutan Negatif

Harmonik urutan negatif merupakan harmonik yang mempunyai urutan fase yang berlawanan dengan fasor aslinya yang terdiri dari tiga fasor yang sama besar dan mempunyai beda fase masing-masing 120^0 dengan urutan fase R-T-S. Harmonik urutan negatif ini terdiri dari harmonik ke-5, -11, -17 dan seterusnya. Gambar 2.12 menunjukkan fasor dari harmonik ke-5.



Gambar 2.12. Fasor harmonik ke-5, urutan negatif
Sumber: Sankaran (2002)

3. Harmonik Urutan Nol

Harmonik urutan nol merupakan harmonik yang memiliki fasor yang sama besarnya dan mempunyai beda fase 0^0 . Harmonik urutan nol ini terdiri dari harmonik ke-3, -9, -15 dan seterusnya. Gambar 2.13 menunjukkan fasor dari harmonik ke-3.



Gambar 2.13. Fasor harmonik ke-3, urutan nol
Sumber: Sankaran (2002)

Dari jenis-jenis harmonik berdasarkan urutan fasa diatas maka dapat disimpulkan beberapa komponen harmonik ke dalam Tabel 2.1.

Tabel 2.1 Harmonik berdasarkan orde dan polaritasnya pada sistem tiga-fase

Harmonik Ke-	Frekuensi(Hz)	Urutan
1	50	Positif
2	100	Negatif
3	150	Nol
4	200	Positif
5	250	Negatif
6	300	Nol

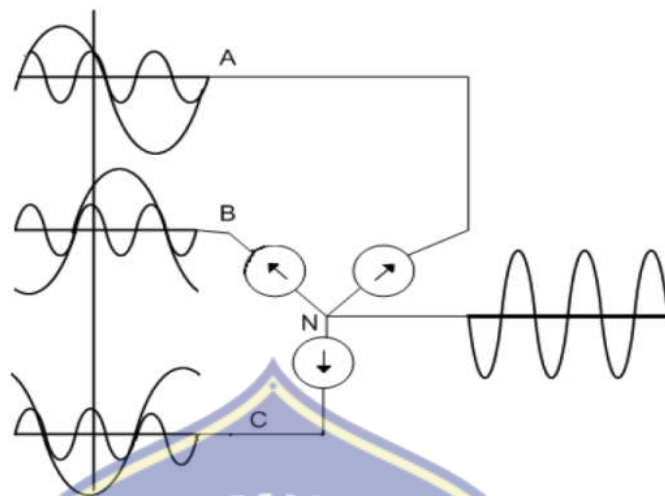
E. Sumber Harmonik

Setiawan (2007), menyatakan bahwa secara garis besar kebanyakan harmonik berasal dari penggunaan energi listrik di industri, komersial maupun perumahan. Saat ini sebagian besar dari beban-beban listrik yang digunakan merupakan jenis beban penghasil harmonik. Menurut Sankaran (2002), peralatan-peralatan yang dapat menghasilkan harmonik antara lain :

1. Lampu TL dan lampu hemat energi (*fluorescent lighting*).
2. Rangkaian pengendali kecepatan motor (*adjustable speed drive*).
3. Komputer pribadi (*personal computer*).
4. Rangkaian penyearah gelombang listrik.
5. Beban-beban listrik nonlinier.

F. Triple-n Harmonik

Triple-n harmonik adalah kelipatan ganjil dari harmonik ketiga ($h= 3, 9, 15, 21, 27, \dots$). Hal ini penting diperhatikan khususnya pada sistem bintang yang ditanahkan (*grounding wye system*) karena adanya arus yang mengalir pada kawat netral. Gambar 2.14 menunjukkan suatu sistem yang seimbang dan diasumsikan komponen fundamental dan komponen harmonik ketiga hadir dalam sistem tersebut.



Gambar 2.14. Arus netral pada *grounding wye system* akibat *triple-n* harmonik
 Sumber: Desmet & Baggini (2003)

Hasil penjumlahan vektor dari ketiga arus fase A, B, dan C diasumsikan bernilai nol, sehingga tidak ada arus yang mengalir pada penghantar netral. Akan tetapi pada konduktor netral mengalir arus *triple-n* harmonik dari ketiga fase yang saling menjumlahkan yang besarnya tiga kali dari arus *triple-n* harmonik dari masing-masing fasenya.

G. Indeks Harmonik

Dalam menganalisis harmonik terdapat beberapa indeks yang penting untuk mengetahui efek dari harmonik tersebut pada sistem tenaga, yaitu *Individual Harmonic Distortion* (IHD) dan *Total Harmonic Distortion* (THD).

1. *Individual Harmonic Distortion*

Menurut Sankaran (2002), IHD adalah perbandingan antara nilai *Root Mean Square* (RMS) dari harmonik individual dengan nilai RMS fundamental.

IHD ini berlaku untuk tegangan dan arus. Adapun rumus untuk menghitung IHD pada harmonik ke-n adalah sebagai berikut:

$$IHD_n = \frac{I_n}{I_1} \quad (2.7)$$

Misalnya, asumsikan bahwa nilai rms harmonik ke-3 pada beban nonlinier adalah 30 A, nilai harmonik ke-5 adalah 15 A dan nilai fundamentalnya adalah 60 A, maka nilai distorsi arus individual pada harmonik ke-3 adalah:

$$IHD_3 = \frac{30}{60} = 0,5 = 50\%$$

Dan nilai distorsi arus individual pada harmonik ke-5 adalah:

$$IHD_5 = \frac{15}{60} = 0,25 = 25\%$$

Berdasarkan pengertian di atas, nilai IHD_1 adalah selalu 100%. Metode perhitungan harmonik ini dikenal sebagai distorsi harmonik yang berdasarkan pada nilai fundamentalnya. Perhitungan ini digunakan oleh *Institute of Electrical and Electronic Engineers* (IEEE).

2. Total Harmonic Distortion

Menurut Sankaran (2002), THD adalah perbandingan nilai RMS total komponen harmonik dengan nilai RMS komponen fundamentalnya. Sebagai contoh, jika sebuah arus fundamental nonlinier adalah I_1 dan komponen harmoniknya adalah $I_2, I_3, I_4, I_5, \dots, I_n$, maka nilai RMS total dari komponen harmoniknya adalah :

$$I_H = \sqrt{I_2^2 + I_3^2 + I_4^2 + I_5^2 + \dots + I_n^2} \quad (2.8)$$

Sehingga nilai THD adalah :

$$THD = \frac{I_H}{I_1} \times 100\% \quad (2.9)$$

H. Standar Harmonik

Menurut Blooming dan Carnovale (2006) dalam *Application Of IEEE Std 519-1992 Harmonic Limits*, harmonik yang dihasilkan harus dibatasi karena dalam jumlah yang besar harmonik tersebut dapat merusak peralatan listrik yang terdapat dalam sistem tenaga listrik. Batas untuk harmonik arus ditentukan oleh perbandingan $\frac{I_{SC}}{I_L}$. I_{SC} adalah arus hubung singkat yang ada pada PCC (*Point of Common Coupling = titik sambung bersama*), sedangkan I_L adalah arus beban fundamental. Batas distorsi arus yang diakibatkan harmonik yang diizinkan oleh IEEE 519-1992 ditunjukkan pada Tabel 2.2.

Tabel 2.2. Batas distorsi arus yang diakibatkan harmonik menurut IEEE 519-1992

I_{SC}/I_L	$n < 11$	$11 \leq n < 17$	$17 \leq n < 23$	$23 \leq n < 35$	$n \geq 35$	THD
<20	4,0%	2,0%	1,5%	0,6%	0,3%	5,0%
20-50	7,0%	3,5%	2,5%	1,0%	0,5%	8,0%
50-100	10,0%	4,5%	4,0%	1,5%	0,7%	12,0%
100-1000	12,0%	5,5%	5,0%	2,0%	1,0%	15,0%
>1000	15,0%	7,0%	6,0%	2,5%	1,4%	20,0%

Sementara itu, batas harmonik tegangan ditentukan dari besarnya tegangan sistem yang terpasang atau dipakai. Batas distorsi tegangan yang diakibatkan harmonik yang diizinkan oleh IEEE 519-1992 ditunjukkan pada Tabel 2.3.

Tabel 2.3. Batas distorsi tegangan yang diakibatkan harmonik menurut IEEE 519-1992

Tegangan Bus Pada PCC	Individual Harmonik	THD
69 kV dan di bawah	3,0%	5,0%
69.001 kV-161 kV	1,5%	2,5%
Di atas 161 kV	1,0%	1,5%

I. Dampak Harmonik pada Peralatan

Menurut Setiawan (2007), kehadiran harmonik dalam sistem tenaga listrik banyak membawa dampak buruk bagi peralatan-peralatan di dalamnya. Peralatan-peralatan yang merasakan dampak buruk dari harmonik yaitu kabel atau konduktor, generator sinkron, peralatan sistem proteksi, motor listrik dan transformator.

1. Rugi-Rugi pada Kabel Konduktor dan Kawat Transmisi

Apabila sistem mengalami resonansi akibat harmonik, tegangan pada sistem dapat mengalami peningkatan. Akibatnya kabel dan isolator lainnya akan mengalami stress tegangan berlebih dan korona, yang dapat menyebabkan kegagalan di isolasi atau mempercepat penuaan.

Dari segi pengukuran harmonik mengakibatkan kesalahan pengukuran dari alat-alat ukur tergantung pada konstruksi dari alat ukur tersebut. Alat ukur yang bekerja berdasarkan induksi, seperti *watt-hour meters*, dirancang dan dikalibrasi untuk gelombang sinus. Harmonik membangkitkan tambahan kopel atau *torque electromagnetic* pada *disk*, sehingga hasil pengukurannya lebih tinggi.

2. Generator Sinkron

Dampak arus harmonik pada generator sinkron yang disebabkan oleh penggunaan beban-beban nonlinier adalah sebagai berikut:

- a. Beban nonlinier akan menyebabkan rugi-rugi tambahan pada generator sinkron.
- b. Rugi-rugi tambahan akan beban nonlinier disebabkan oleh rugi-rugi arus urutan nol dan rugi-rugi arus urutan negatif.
- c. Dalam sistem pembangkitan energi listrik sendiri yang umumnya menggunakan konfigurasi tiga-fase empat kawat, kontribusi rugi-rugi tambahan akibat arus urutan nol lebih besar dibandingkan rugi-rugi tambahan akibat oleh arus urutan negatif.

3. Sistem Proteksi

Dampak harmonik pada peralatan sistem proteksi yaitu :

- a. Menyebabkan penurunan rating akibat pemanasan yang terjadi.

- b. Menyebabkan peningkatan pemanasan dan rugi-rugi pada *switchgear*, sehingga kemampuan mengalirkan arus dan mempersingkat umur beberapa komponen isolatornya.
- c. Timbulnya getaran mekanis pada panel listrik yang merupakan getaran resonansi mekanis akibat harmonik atau frekuensi tinggi.
- d. Harmonik dapat menimbulkan tambahan torsi pada KWHmeter jenis elektromekanis yang menggunakan piringan induksi berputar, akibatnya putaran piringan akan lebih cepat atau terjadi kesalahan ukur pada KWHmeter karena piringan induksi tersebut dirancang hanya untuk beroperasi pada frekuensi dasar.
- e. *Triple-n* harmonik pada kawat netral akan dapat memberikan dampak induksi harmonik yang mengganggu sistem telekomunikasi.
- f. Pemutus beban dapat bekerja di bawah arus pengenalnya atau mungkin tidak bekerja pada arus pengenal.
- g. Untuk sistem tenaga, arus pada kawat netral membesar terutama akibat munculnya kelipatan harmonik ke-3, serta tegangan sentuh peralatan membesar dan berbahaya bagi operator.

4. Motor Listrik

Harmonik arus atau tegangan menyebabkan peningkatan rugi-rugi pada belitan stator, rangkaian rotor, serta laminasi stator dan rotor sehingga efisiensi menurun. Akibat efek kulit dan arus eddy, rugi-rugi ini lebih besar dibandingkan

rugi-rugi yang disebabkan arus DC. Medan bocor pada stator dan rotor juga menyebabkan rugi-rugi tambahan.

Rugi-rugi panas tambahan pada mesin induksi dan mesin sinkron paling banyak dibangkitkan pada rotor dikarenakan urutan polaritas harmonik yang dihasilkan oleh motor khususnya motor induksi, polaritasnya dapat bernilai positif atau negatif. Sedangkan harmonik ke-7 urutan polaritasnya positif, akan memiliki dampak sendiri-sendiri. Apabila motor menghasilkan harmonik dengan urutan polaritas positif, maka pada sistem distribusi akan menimbulkan medan magnet putar dengan arah maju. Sedangkan untuk polaritas harmonik negatif akan menimbulkan medan magnet putar dengan arah mundur.

Urutan polaritas positif dan negatif harmonik inilah yang menyebabkan motor induksi menjadi panas. Sehingga kemampuan mesin akan menurun akibat pemanasan berlebih karena harmonik. Selain itu umur mesin akan menurun. Sedangkan pada arus harmonik urutan polaritas nol tidak akan menimbulkan masalah pada motor itu sendiri, melainkan akan menimbulkan masalah pada sistem tiga-fase empat kawat yaitu akan menimbulkan perubahan arus pada kawat netral. Penambahan arus pada kawat netral ini akan menyebabkan kawat netral menjadi panas, karena kawat netral tidak memiliki pengaman seperti pemutus arus untuk proteksi tegangan atau arus lebih. Selain itu polaritas harmonik urutan nol ini menyebabkan terjadinya interferensi pada kabel saluran telekomunikasi. Frekuensi harmonik yang lebih tinggi dari frekuensi kerjanya akan mengakibatkan penurunan efisiensi atau terjadi kerugian daya.

5. Transformator

Arus urutan nol yang bersirkulasi pada belitan delta dapat menyebabkan arus yang besar dan pemanasan berlebih pada transformator daya. Sehingga untuk mengatasi pemanasan berlebih akibat harmonik, seringkali kapasitas daya transformator diperbesar untuk memperbesar kapasitas pendinginan. Tetapi konduktor yang lebih besar menyebabkan pemanasan yang lebih besar pula, yang diakibatkan harmonik frekuensi tinggi. Selain itu, memperbesar kapasitas transformator berarti memperbesar arus harmonik yang mungkin mengalir dalam sistem.

Penurunan efisiensi transformator akibat harmonik dapat mencapai sekitar 6%. Dampak pada transformator akibat fenomena harmonik yang paling terasa adalah transformator mengalami kenaikan suhu. Naiknya suhu transformator akan menyebabkan beberapa hal berikut.

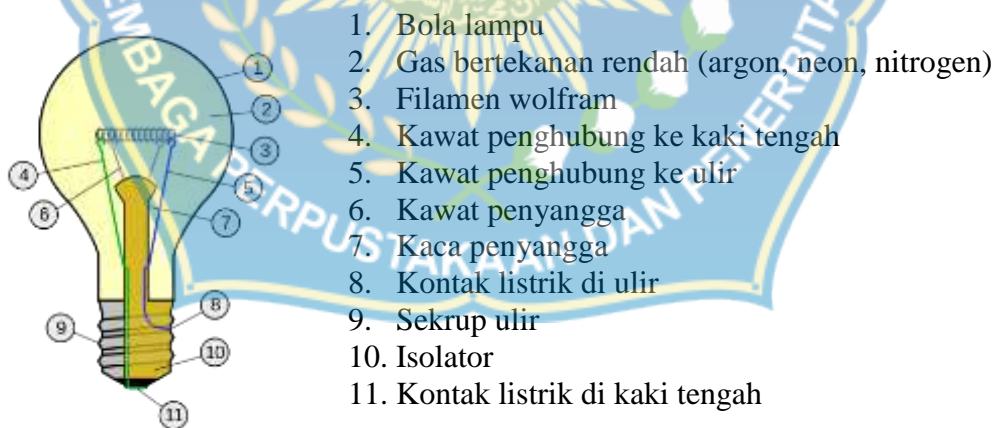
- a. Penambahan rugi-rugi daya akan mengurangi kapasitas pembebanan transformator. Misal: pada transformator 750 kVA, dengan 10% rugi arus edy dan rugi arus harmonik akan bekerja hanya pada 77,5%-nya atau menjadi 578 kVA.
- b. Mengurangi kemampuan arus maksimum dan usia pakai transformator.

J. Karakteristik Beban Penerangan

1. Lampu Pijar

Menurut Wikipedia. org (2015), lampu pijar adalah sumber cahaya buatan yang dihasilkan melalui penyaluran arus listrik melalui filamen yang kemudian memanaskan dan menghasilkan cahaya. Kaca yang menyelubungi filamen panas tersebut berfungsi menghalangi udara sehingga filamen tidak akan langsung rusak akibat teroksidasi.

Mulanya bagian dalam bola lampu pijar dibuat hampa udara namun sekarang berkembang jenis lampu pijar yang diisi dengan gas mulia bertekanan rendah seperti argon, neon, kripton, dan xenon atau gas yang bersifat tidak reaktif seperti nitrogen sehingga filamen tidak teroksidasi.



Gambar 2.15. Komponen lampu pijar
Sumber: Wikipedia.org (2015)

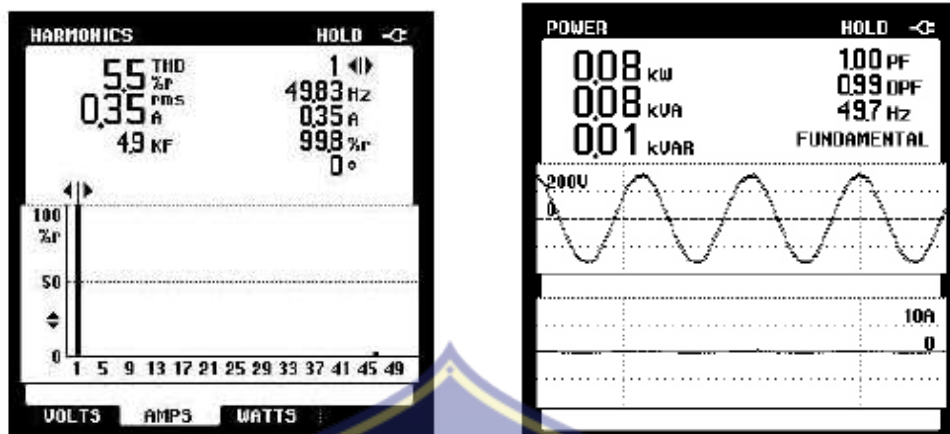
Pada dasarnya filamen pada sebuah lampu pijar adalah sebuah resistor. Saat dialiri arus listrik, filamen tersebut menjadi sangat panas, berkisar antara

2800° Kelvin hingga maksimum 3700° Kelvin. Ini menyebabkan warna cahaya yang dipancarkan oleh lampu pijar biasanya berwarna kuning kemerahan. Saat temperatur yang sangat tinggi itulah filamen mulai menghasilkan cahaya pada panjang gelombang yang kasat mata.

Menurut Legendpower.com (2015), lampu pijar merupakan tipe beban linier yang memiliki karakteristik sebagai beban resistif. Beban resistif merupakan tipe beban yang umumnya memiliki sifat mengkonversi energi listrik menjadi energi panas. Karakter arus dan tegangan pada beban resistif adalah sefase dan tidak terjadi lonjakan arus awal yang besar ketika beban resistif dihubungkan dengan sumber tegangan.



Gambar 2.16. Gelombang arus dan tegangan beban resistif
Sumber: Kharagpurr, Version 2 EE IIT



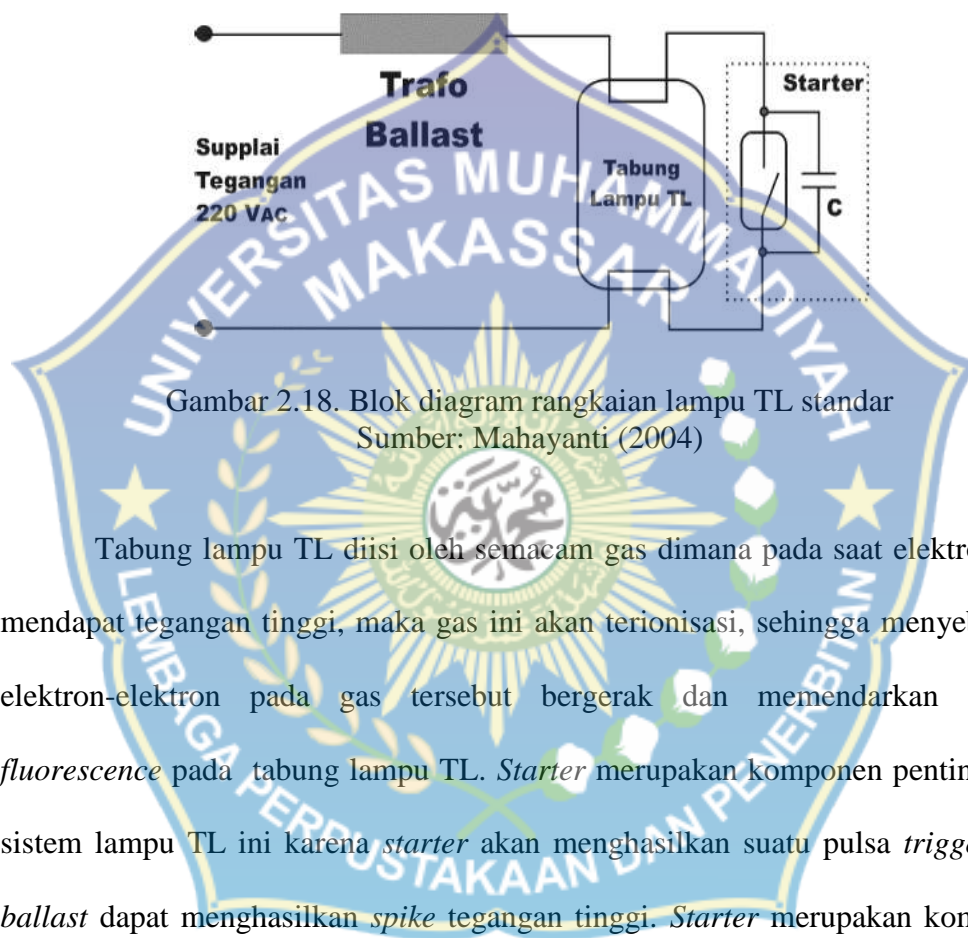
(a) Spektrum harmonik arus (b) Gelombang tegangan dan arus
 Gambar 2.17. Tampilan grafik hasil pengukuran beban lampu pijar 100 W 220 V
 Sumber: Faharuddin dan Wibisana (2012)

Hasil pengukuran karakteristik distorsi harmonik pada lampu pijar 100 W 220 V ditunjukkan oleh Gambar 2.17. Menurut Faharuddin dan Wibisana (2012), THD arus yang ditimbulkan oleh lampu pijar tersebut adalah 5,5%. Nilai distorsi total ini sesuai dengan batasan yang ditetapkan oleh *IEEE 519-1992*. Hal tersebut konsisten dengan sifat harmonik beban linier yang pada prinsipnya tidak menghasilkan harmonik atau THD mendekati nol.

2. Lampu TL

Lampu TL atau yang lebih umum dikenal dengan nama lampu neon merupakan jenis lampu yang banyak digunakan. Penggunaan lampu TL ini sudah sangat luas dan sangat umum baik untuk penerangan rumah, perkantoran, ataupun penerangan pada industri-industri. Mahayanti (2004) menyatakan bahwa keuntungan dari lampu TL ini adalah menghasilkan cahaya *output* per watt daya yang digunakan lebih tinggi daripada lampu pijar biasa.

Operasi lampu TL standar hanya membutuhkan komponen yang sangat sedikit, yaitu *ballast* yang berupa induktor, *starter*, sebuah tabung lampu TL, dan sebuah kapasitor yang pada umumnya jarang digunakan. Konstruksi ini dapat dilihat pada gambar 2.18.



Gambar 2.18. Blok diagram rangkaian lampu TL standar
Sumber: Mahayanti (2004)

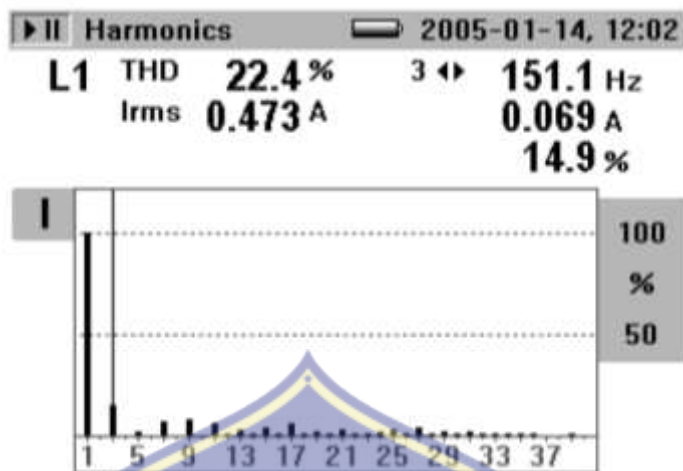
Tabung lampu TL diisi oleh semacam gas dimana pada saat elektrodanya mendapat tegangan tinggi, maka gas ini akan terionisasi, sehingga menyebabkan elektron-elektron pada gas tersebut bergerak dan memancarkan lapisan *fluorescence* pada tabung lampu TL. *Starter* merupakan komponen penting pada sistem lampu TL ini karena *starter* akan menghasilkan suatu pulsa *trigger* agar *ballast* dapat menghasilkan *spike* tegangan tinggi. *Starter* merupakan komponen bimetal yang dibangun di dalam sebuah tabung hampa udara yang biasanya diisi dengan gas neon.

Mahayanti (2004) menyatakan bahwa prinsip kerja lampu TL standar adalah ketika tegangan AC 220 Volt di hubungkan ke satu set lampu TL maka tegangan diujung-ujung *starter* sudah cukup untuk menyebabkan gas neon didalam tabung *starter* untuk memanaskan atau terionisasi, sehingga menyebabkan *starter*

yang pada kondisi normal adalah *normally open* ini akan *closed*. Hal ini menyebabkan gas neon di dalamnya dingin atau mengalami deionisasi, dan dalam kondisi *starter closed* ini terdapat aliran arus yang memanaskan filamen tabung lampu TL sehingga gas yang terdapat di dalam tabung lampu TL ini terionisasi atau memanaskan.

Ketika gas neon di dalam tabung *starter* sudah cukup dingin maka bimetal di dalam tabung *starter* tersebut akan *open* kembali sehingga ballast akan menghasilkan *spike* tegangan tinggi yang menyebabkan terdapat lompatan elektron dari kedua elektroda dan memendarkan lapisan *fluorescent* pada tabung lampu TL tersebut. Peristiwa ini akan berulang, dan ketika gas di dalam tabung lampu TL tidak terionisasi penuh sehingga tidak terdapat cukup arus yang melewati filamen lampu neon tersebut, maka lampu neon akan tampak berkedip. Selain itu, jika tegangan induksi dari *ballast* tidak cukup besar, maka walaupun tabung neon TL tersebut sudah terionisasi penuh tetap tidak akan menyebabkan lompatan elektron dari salah satu elektroda tersebut.

Lampu TL merupakan jenis beban penerangan yang tergolong dalam tipe beban nonlinier sehingga lampu TL memiliki potensi menghasilkan harmonik di dalam pengoperasiannya. Karakteristik dari nilai THD arus pada lampu TL standar di tunjukkan oleh Gambar 2.19.



Gambar 2.19. Hasil pengukuran THD arus pada lampu TL standar
Sumber: Bien dan Sudarno (2004)

Bien dan Sudarno (2004), menyatakan bahwa berdasarkan hasil pengukuran THD arus lampu TL standar terlihat bahwa harmonik arus yang dihasilkan oleh lampu TL standar umumnya adalah harmonik ganjil dan yang paling dominan adalah harmonik orde ke-3 dengan nilai IHD arus sebesar 14,9% dan nilai THD arus sebesar 22,4%.

3. Lampu LHE

Menurut Assaffat (2010), lampu LHE merupakan hasil inovasi teknologi yang berkembang terhadap lampu TL. Jika dibandingkan dengan lampu TL, LHE ini mempunyai banyak kelebihan, antara lain bentuk yang relatif kecil dan memiliki tingkat kenyamanan yang lebih baik untuk pencahayaannya. Selain itu untuk ukuran pencahayaan yang sama LHE menyerap daya yang lebih kecil, sehingga lampu LHE disebut sebagai lampu hemat energi.

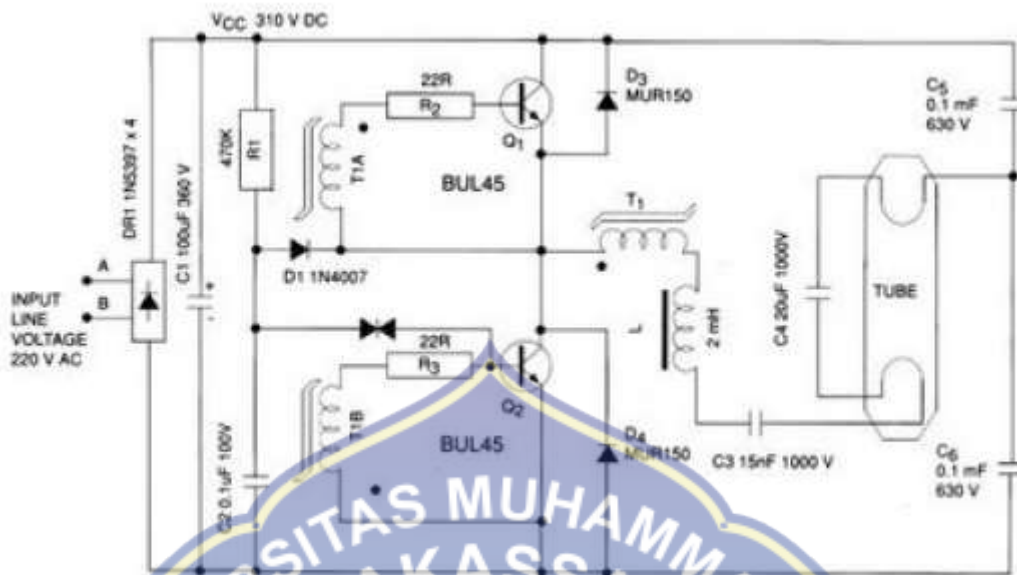


Gambar 2.20. Konstruksi lampu LHE
Sumber: Assaffat (2010)

Prinsip kerja dari lampu LHE adalah sama dengan lampu neon di mana cahaya yang dihasilkan oleh lampu berdasarkan lucutan elektron yang terjadi melalui uap merkuri yang akan membangkitkan radiasi ultraviolet. Ballast pada lampu LHE berfungsi sebagai pembatas arus saat lampu bekerja dan untuk membangkitkan tegangan kejut saat awal penyalaan lampu. Balast yang digunakan pada lampu LHE adalah ballast elektronik yang terdiri dari rangkaian penyearah, induktor, kapasitor serta rangkaian inverter.



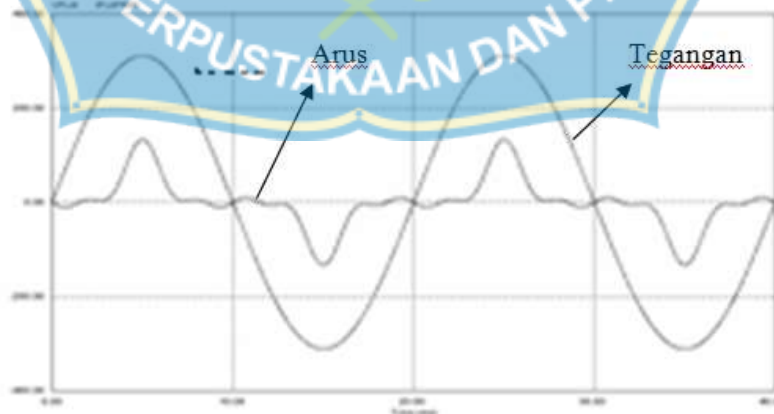
Gambar 2.21. Komponen elektronika daya lampu LHE



Gambar 2.22. Skema rangkaian lampu LHE
 Sumber : Assaffat (2010)

Menurut Assaffat (2010), sumber harmonik yang dihasilkan oleh lampu LHE adalah berasal dari dua faktor, yaitu:

1. Proses lucutan elektron yang menghasilkan busur api.
2. Rangkaian elektronika daya yang terdiri dari penyearah dan inverter



Gambar 2.23. Gelombang arus dan tegangan pada lampu LHE
 Sumber : Assaffat (2010)

Karakteristik THD harmonik arus berdasarkan hasil pengujian beberapa ukuran daya lampu LHE ditunjukkan oleh Tabel 2.4.

Tabel 2.4. Data hasil pengukuran THD total dan THD orde ke-3, ke-5 dan ke-7 harmonik arus pada lampu hemat energi (Bien dan Sudarno, 2004)

No.	Merk	Watt	THD _{tot} (%)	THD (%)		
				Ke-3	Ke-5	Ke-7
1	A	9	97,1	71,4	40,4	31,2
2	B	14	97,5	68,6	40,5	37,2
3	C	20	98,2	84,7	60,9	42,8
4	D	26	98,4	82,1	56,5	40,2

Berdasarkan pada Tabel 2.4 dapat diketahui bahwa lampu LHE menghasilkan harmonik arus dengan THD yang sangat besar. Harmonik arus yang timbul merupakan harmonik ganjil dengan orde harmonik ke-3 yang paling dominan.

4. Lampu LED

Menurut Rizkiawan dan Setiabudy (2013), lampu LED merupakan jenis lampu yang termasuk beban nonlinier yang menginjeksi distorsi harmonik pada sistem tenaga listrik. Komponen penyusun rangkaian elektronika daya pada lampu LED terdiri atas rangkaian penyearah dan LED yang merupakan jenis diode khusus yang dapat memancarkan cahaya ketika dihubungkan dengan sumber tegangan listrik.



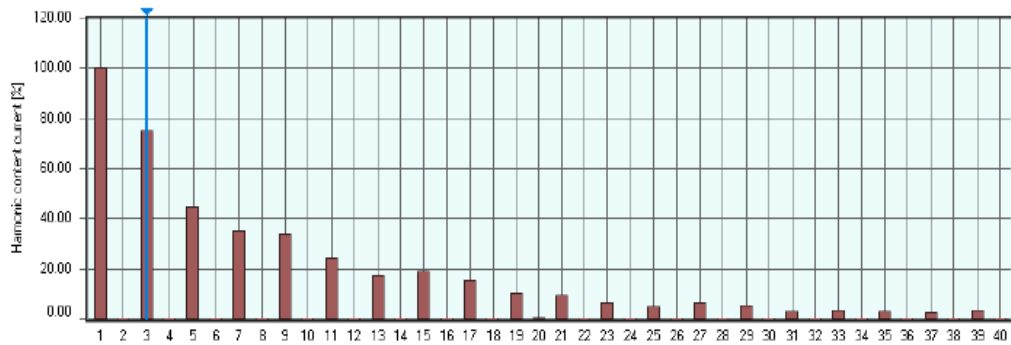
Gambar 2.24. Komponen penyusun lampu LED merk Philips

Karakteristik dari distorsi harmonik yang diakibatkan oleh lampu LED ditunjukkan oleh Gambar 2.25.



Gambar 2.25. Distorsi gelombang arus pada lampu LED 9 Watt
Sumber: Rizkiawan dan Setiabudy (2013)

Gambar 2.26 menunjukkan hasil pengukuran distorsi harmonik pada lampu LED.



Gambar 2.26. Komponen harmonik lampu LED 9 Watt
Sumber: Rizkiawan dan Setiabudy (2013)

Berdasarkan data hasil pengukuran terlihat bahwa harmonik arus yang timbul pada lampu LED dominan merupakan harmonik orde ganjil dengan nilai harmonik tertinggi pada harmonik ke-3.



BAB III

METODE PENELITIAN

Penelitian ini dilakukan dengan menggunakan metode eksperimen menggunakan beban uji dengan jenis beban penerangan satu-fase berupa lampu pijar, lampu TL (*tube lamp*), lampu hemat energi (LHE) dan lampu LED sebagai representasi dari beban-beban tiga-fase untuk mengukur seberapa besar pengaruh penggunaan ragam beban uji yang dimaksud terhadap perubahan magnitudo arus netral pada sistem tiga-fase empat kawat simetris.

A. Waktu dan Tempat Penelitian

Waktu : Juli 2015 hingga Desember 2015

Tempat : 1. Universitas Muhammadiyah Makassar
Jalan Sultan Alauddin No.259 Makassar
2. *Workshop* P.T. Makassar Terminal Services
Jalan Hatta, Terminal Peti Kemas Pelabuhan Makassar

B. Peralatan dan Bahan

1. Peralatan

Beberapa peralatan yang digunakan dalam penelitian ini adalah :

- | | |
|------------------------------|--------|
| a. Amperemeter analog 300 mA | 2 buah |
| b. Amperemeter analog 500 mA | 1 buah |
| c. Multimeter digital | 1 buah |

- d. Obeng
- e. Tang Kombinasi
- f. Cutter
- g. Gergaji

2. Bahan

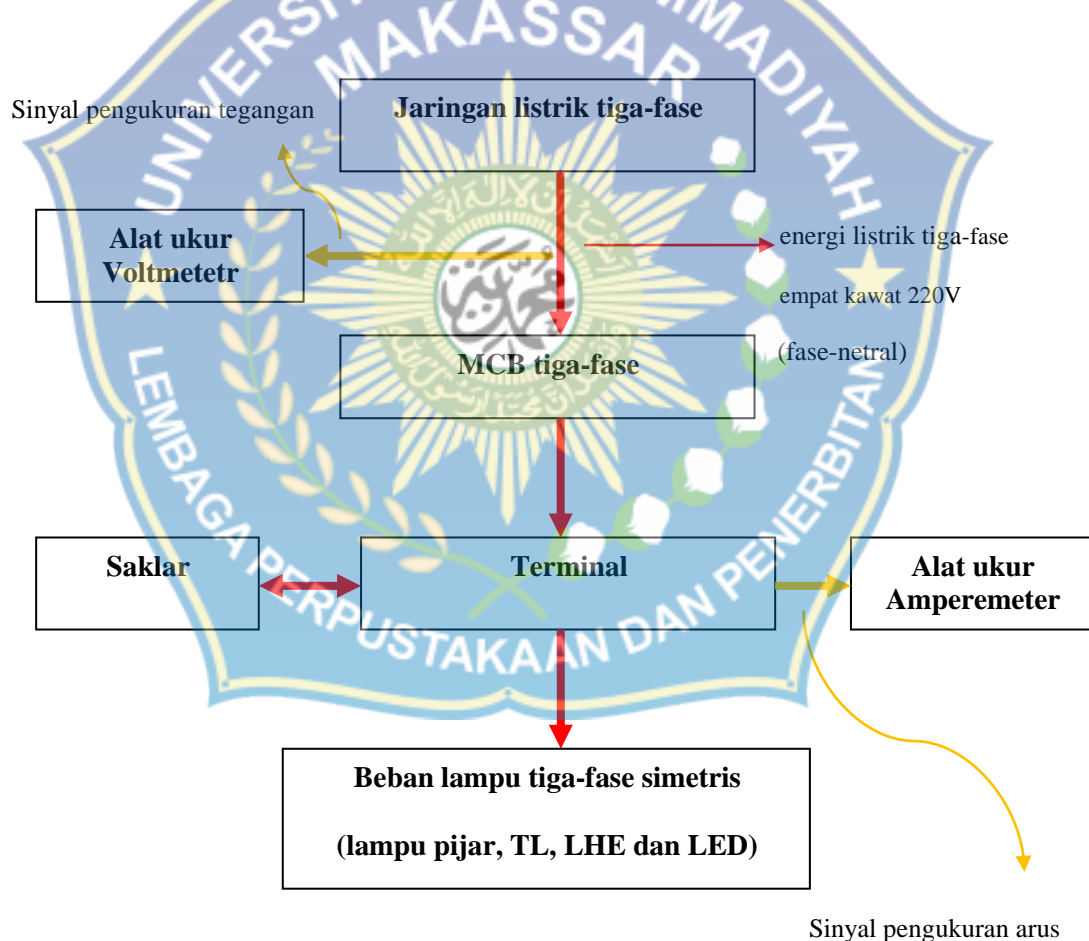
Beberapa bahan yang digunakan dalam penelitian ini antara lain :

- | | |
|-------------------------------------|----------|
| a. Lampu pijar 10 Watt | 9 buah |
| b. Lampu LED 10 Watt | 9 buah |
| c. Lampu TL 10 Watt | 3 buah |
| d. Lampu TL 20 Watt | 3 buah |
| e. Lampu hemat energi 5 Watt | 6 buah |
| f. Lampu hemat energi 20 Watt | 3 buah |
| g. Fitting lampu | 9 buah |
| h. Kanal kabel | 3 batang |
| i. Saklar seri | 3 buah |
| j. Selector switch 4 step | 1 buah |
| k. Toggle switch | 5 buah |
| l. MCB 2 ampere | 3 buah |
| m. Kabel NYAF 1,5 mm ² | 15 meter |
| n. Kabel NYM 2 x1,5 mm ² | 4 meter |
| o. Terminal block 4 slot | 1 buah |
| p. Terminal block 12 slot | 2 buah |

- | | |
|---------------------------------|------------|
| q. <i>Junction box</i> | 7 buah |
| r. Multiplex ukuran 97 x 120 cm | 1 lembar |
| s. Sekrup | secukupnya |
| t. Schoen kabel | secukupnya |

C. Skema Penelitian

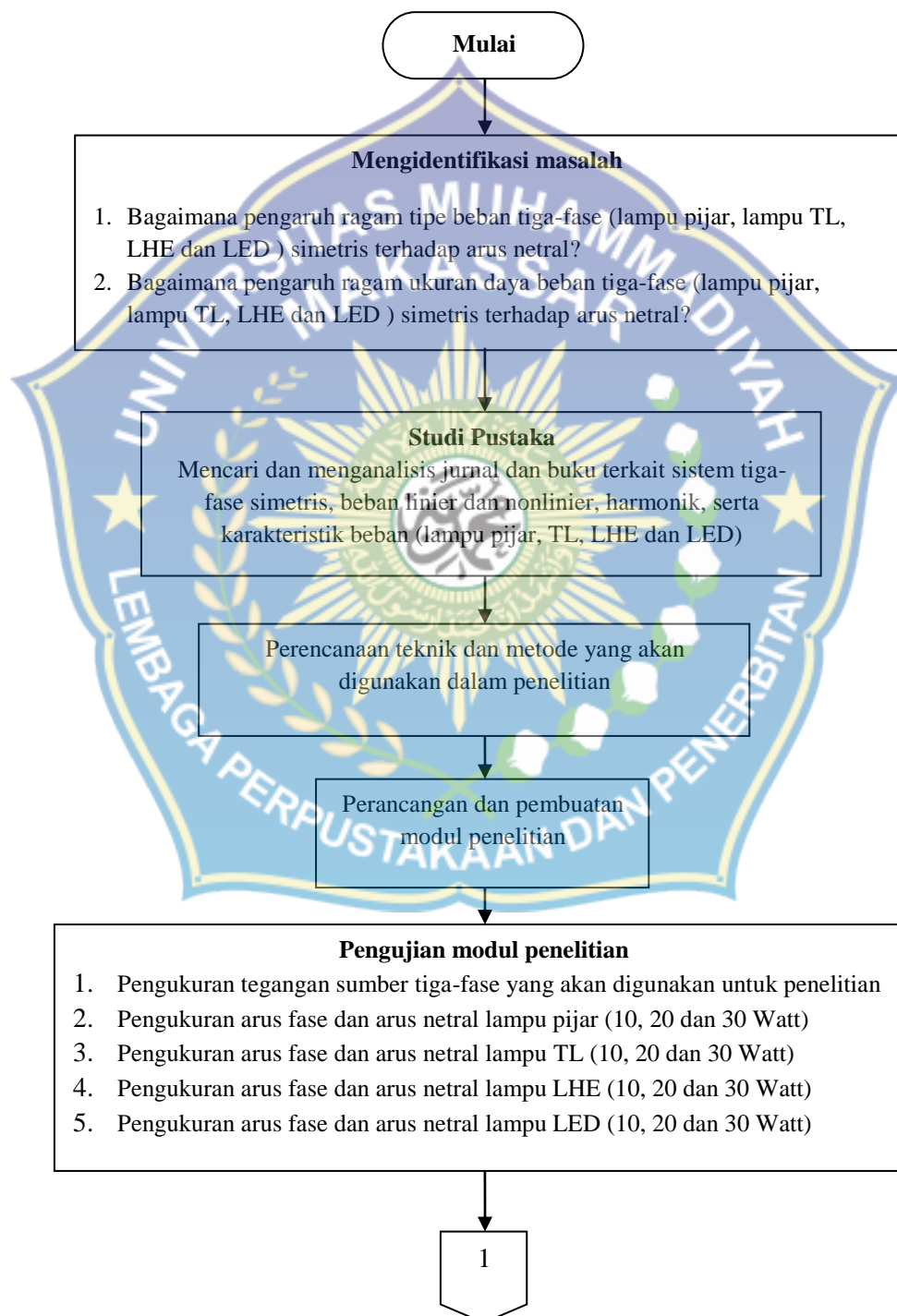
Adapun garis besar dari rangkaian kelistrikan pada modul yang digunakan dalam penelitian ini ditunjukkan pada Gambar 3.1 berikut.

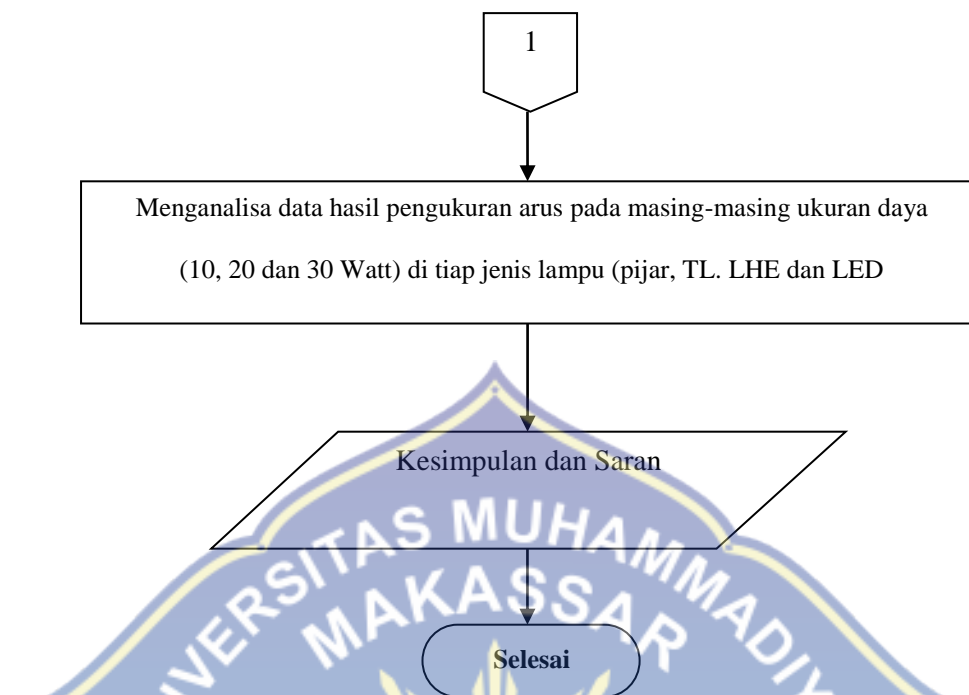


Gambar 3.1. Diagram blok skema penelitian

D. Langkah Penelitian

Secara garis besar tahapan yang dilakukan dalam penelitian ini di tunjukkan pada bagan alir berikut.





Gambar 3.2. Bagan alir proses penelitian

E. Jadwal Penelitian

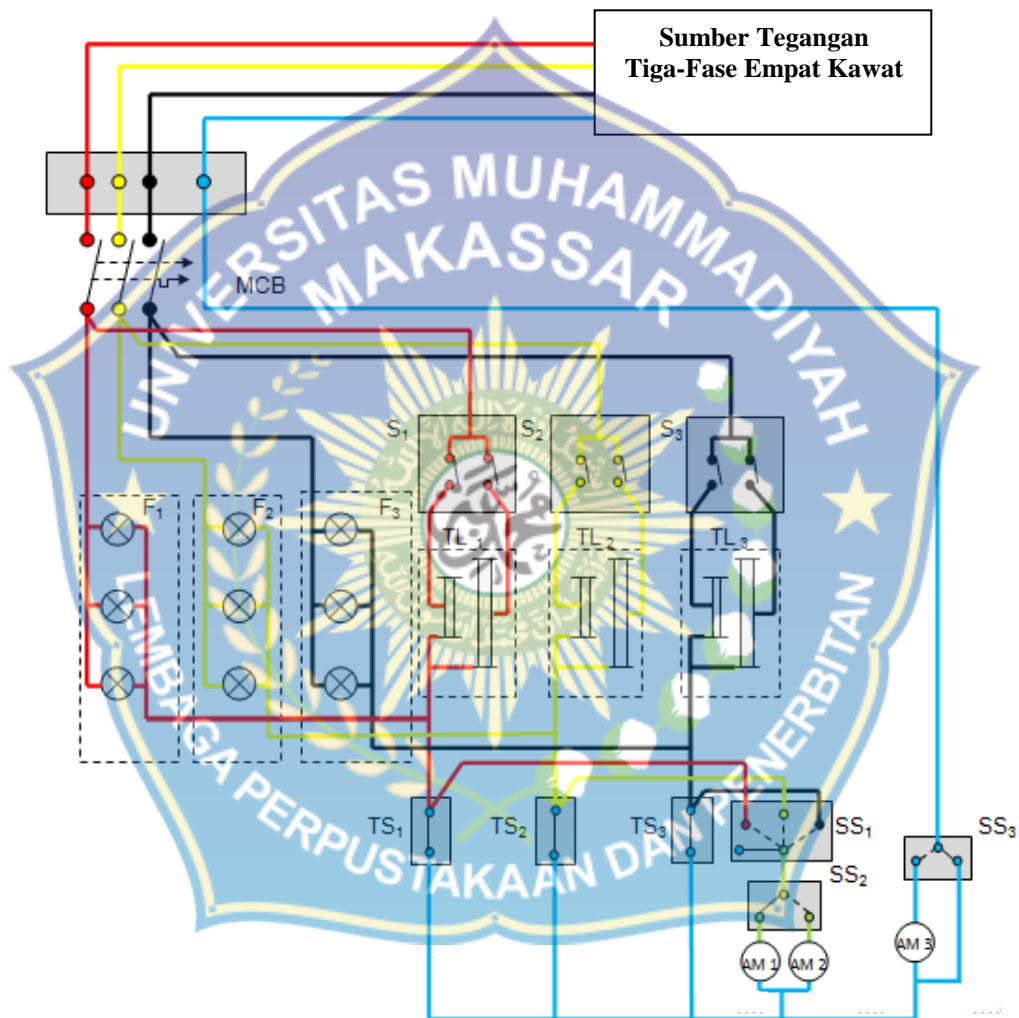
Tabel 3.1. Jadwal penelitian

No.	Kegiatan	Bulan					
		Juli	Ags	Sept	Okt	Nov	Des
1	Membuat desain rangkaian modul penelitian						
2	Membuat daftar alat dan bahan yang akan digunakan dalam penelitian						
3	Pengadaan alat dan bahan yang akan digunakan dalam penelitian						
4	Perakitan rangkaian modul penelitian sesuai perencanaan						
5	Uji coba rangkaian eksperimen						
6	Analisa data hasil pengujian						
7	Pembuatan laporan						

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Rangkaian Modul Penelitian dan Tegangan Sumber



Gambar 4.1. Rangkaian kelistrikan modul penelitian

Keterangan gambar:

1. MCB (*Magnetik circuit breaker*) berfungsi sebagai pengaman rangkaian dari arus lebih akibat hubung singkat maupun beban berlebih.

2. AM 1 merupakan amperemeter dengan batas ukur maksimum 300 mA yang digunakan untuk mengukur arus pada fase 1, fase 2, dan fase 3 secara bergantian.
3. AM 2 merupakan amperemeter dengan batas ukur maksimum 500 mA yang digunakan untuk mengukur arus pada fase 1, fase 2, dan fase 3 secara bergantian.
4. AM 3 merupakan amperemeter dengan batas maksimum 300 mA yang digunakan untuk mengukur arus pada titik netral.
5. F1, F2 dan F3 merupakan fitting lampu yang digunakan untuk pengujian lampu pijar, LHE dan LED. Tiga buah fitting yang dihubungkan parallel dipasang pada masing-masing fase.
6. TL1, TL2 dan TL3 merupakan lampu TL 10 Watt dan 20 Watt yang terpasang pada masing-masing fase.
7. S1, S2, dan S3 merupakan saklar seri yang masing-masing dipasang di tiap fase yang berfungsi untuk menyalakan dan mematikan lampu TL ukuran 10 Watt dan 20 Watt secara bergantian maupun bersamaan.
8. SS1 merupakan *selector switch* atau saklar pilih yang berfungsi menghubungkan amperemeter arus fase dengan salah satu fase sehingga amperemeter dapat bekerja menunjukkan nilai arus dari fase yang dipilih.
9. SS2 juga merupakan *selector switch* atau saklar pilih yang berfungsi untuk memilih amperemeter arus fase yang akan digunakan.
10. TS1, TS2, dan TS3 merupakan saklar *normally closed* (NC) yang digunakan untuk memutuskan dan mengalihkan aliran arus listrik dari salah satu fase

menuju amperemeter arus fase. Sehingga kuat arus listrik dari fase tersebut dapat terbaca di amperemeter.

11. SS3 merupakan *selector switch* atau saklar pilih yang berfungsi untuk mengaktifkan amperemeter arus netral.



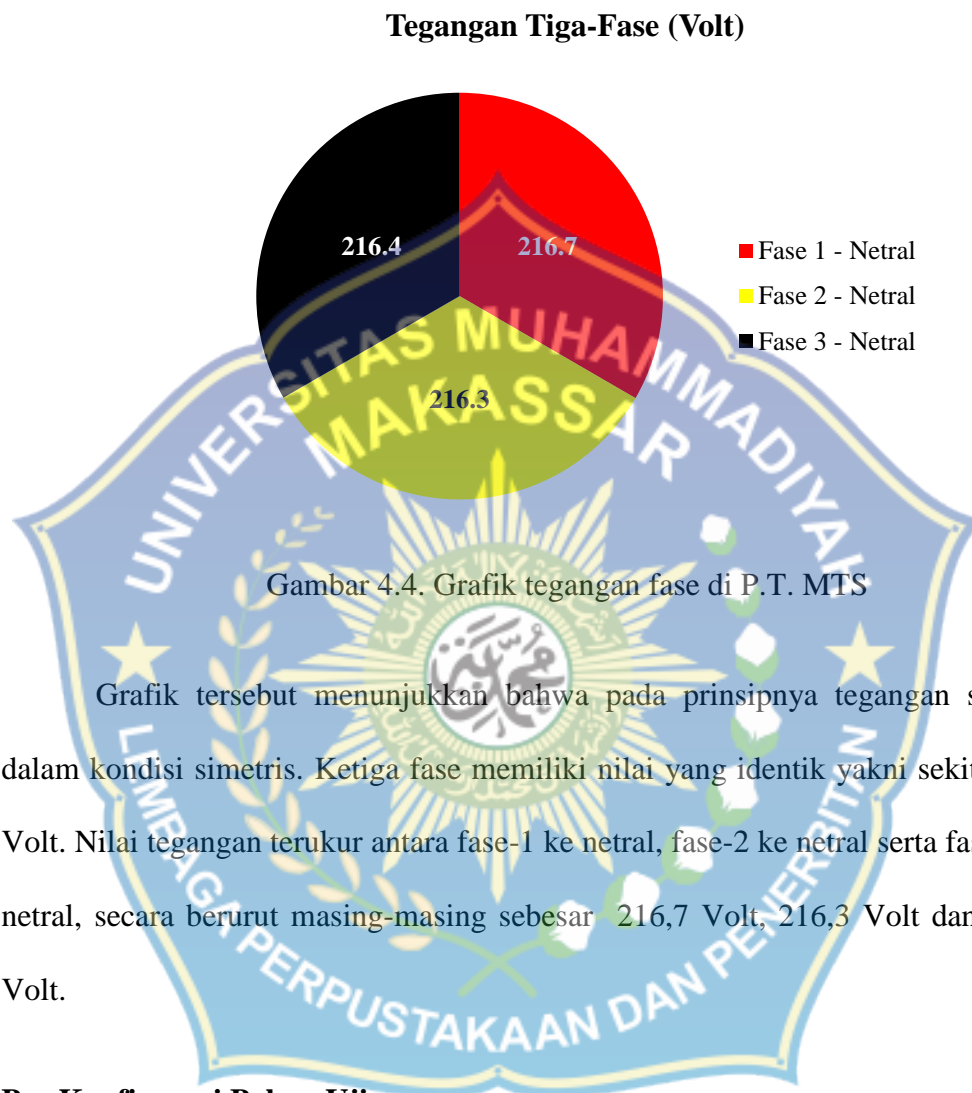
Gambar 4.2. *Lay out* komponen modul penelitian



Gambar 4.3. Lay out AM 1, AM 2 dan AM 3

Sumber tegangan yang digunakan dalam penelitian ini adalah sumber tegangan tiga-fase di *Workshop* P.T. Makassar Terminal Services (P.T. MTS) yang berasal dari jaringan PLN (Perusahaan Listrik Negara). Pengambilan data dilakukan pada tanggal 23 Oktober 2015, pukul 21.30 WITA hingga pukul 22.30 WITA.

Grafik tegangan sumber tiga-fase pada *Workshop* P.T. MTS ditunjukkan pada Gambar 4.4.



Grafik tersebut menunjukkan bahwa pada prinsipnya tegangan sumber dalam kondisi simetris. Ketiga fase memiliki nilai yang identik yakni sekitar 216 Volt. Nilai tegangan terukur antara fase-1 ke netral, fase-2 ke netral serta fase-3 ke netral, secara berurut masing-masing sebesar 216,7 Volt, 216,3 Volt dan 216,4 Volt.

B. Konfigurasi Beban Uji

Tabel 4.1 berikut menunjukkan konfigurasi pada tiap jenis beban yang diuji untuk mendapatkan gradasi ukuran daya beban yang sama yaitu sebesar 10 Watt, 20 Watt dan 30 Watt. Adapun pemilihan tipe dan ukuran daya beban disesuaikan dengan ketersediaannya di pasaran.

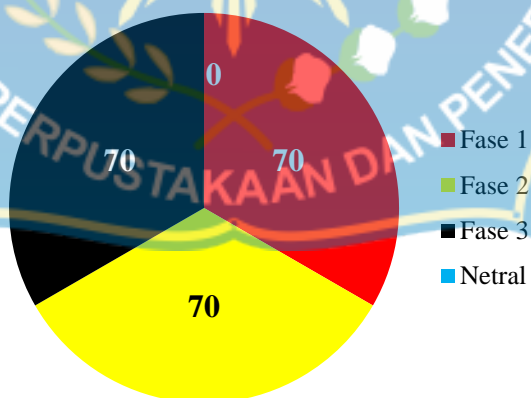
Tabel 4.1. Konfigurasi beban uji

No.	Jenis Beban	Merek	Ukuran Daya		
			10 Watt	20 Watt	30 Watt
1	Lampu Pijar	Chiyoda	1 x 10 Watt	2 x 10 Watt	3 x 10 Watt
2	Lampu TL	Phillips	1 x 10 Watt	1 x 20 Watt	10 Watt + 20 Watt
3	LHE	Phillips	2 x 5 Watt	1 x 20 Watt	(2 x 5 Watt) + 20 Watt
4	Lampu LED	Phillips	1 x 10 Watt	2 x 10 Watt	3 x 10 Watt

C. Karakter Arus Netral Untuk Setiap Ragam Beban

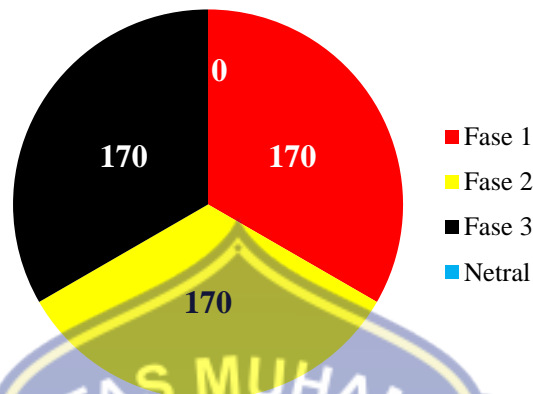
1. Lampu Pijar

Data Arus Lampu Pijar 10 Watt
(mA)



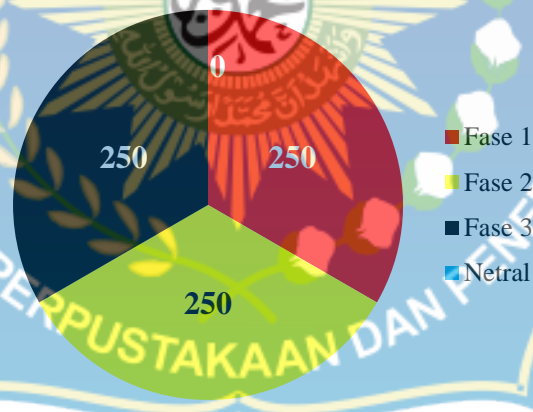
Gambar 4.5. Grafik arus fase dan arus netral dari lampu pijar 10 Watt

**Data Arus Lampu Pijar 20 Watt
(mA)**



Gambar 4.6. Grafik arus fase dan arus netral dari lampu pijar 20 Watt

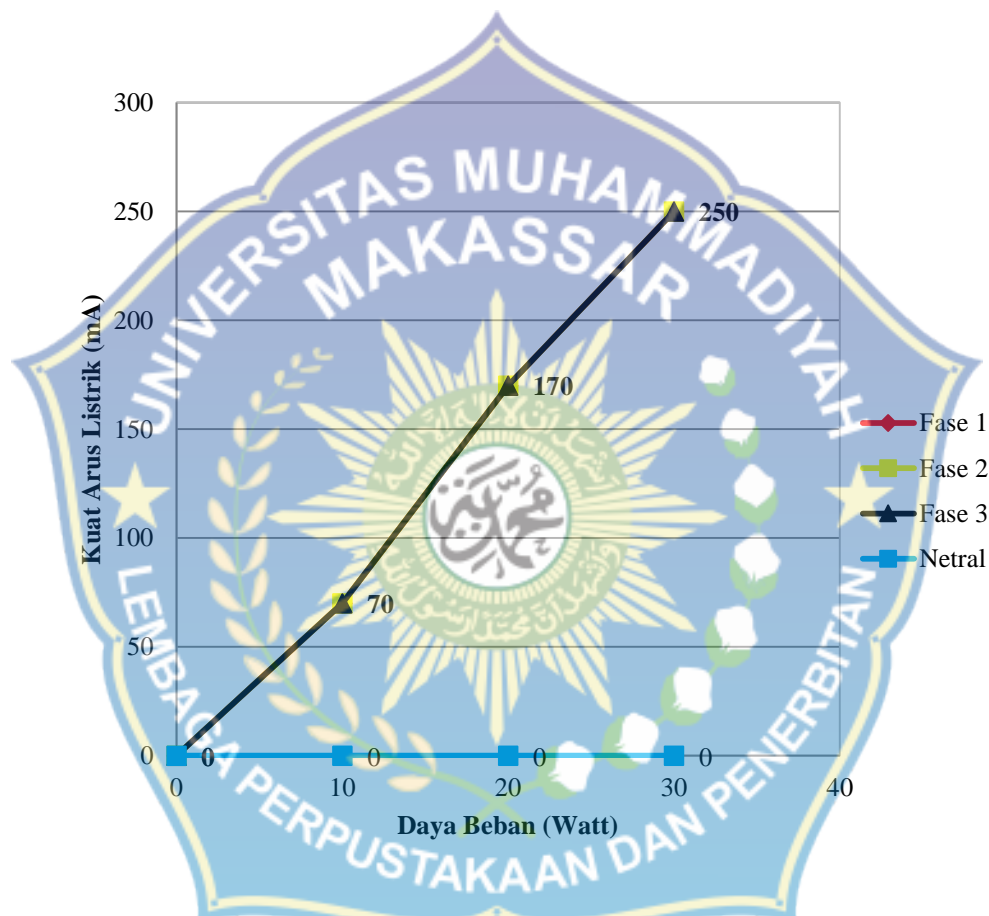
**Data Arus Lampu Pijar 30 Watt
(mA)**



Gambar 4.7. Grafik Arus fase dan arus netral dari lampu pijar 30 Watt

Gambar 4.5-4.7 memperlihatkan grafik arus fase dan arus netral akibat beban lampu pijar tiga-fase simetris dengan daya 10, 20 dan 30 Watt. Gambar-gambar tersebut memperlihatkan besar arus fase yang identik pada setiap besar daya dan pada saat yang sama, arus netral di ketiga besar daya bernilai nol.

Gambar 4.5 memperlihatkan data arus fase-1, fase-2 dan fase-3 pada daya 10 Watt sebesar 70 mA dan arus netral yang bernilai 0. Gambar 4.6 memperlihatkan data arus fase-1, fase-2 dan fase-3 pada daya 20 Watt sebesar 170 mA dan arus netral yang tetap bernilai 0. Gambar 4.7 memperlihatkan data arus fase-1, fase-2 dan fase-3 pada daya 30 Watt sebesar 250 mA dan arus netral yang tetap bernilai 0.



Gambar 4.8. Grafik arus fase dan arus netral lampu pijar simetris 10, 20 dan 30 Watt

Gambar 4.8 memperlihatkan grafik relasi arus fase dan arus netral untuk lampu pijar simetris dengan ragam ukuran daya. Grafik tersebut memperlihatkan nilai arus fase yang identik di masing-masing fase-1, fase-2 dan fase-3, serta perubahan besar arus fase yang semakin meningkat seiring dengan perubahan

ukuran daya lampu pijar. Grafik tersebut juga memperlihatkan bahwa tidak ada arus netral yang timbul pada semua ukuran daya lampu pijar yang diuji.

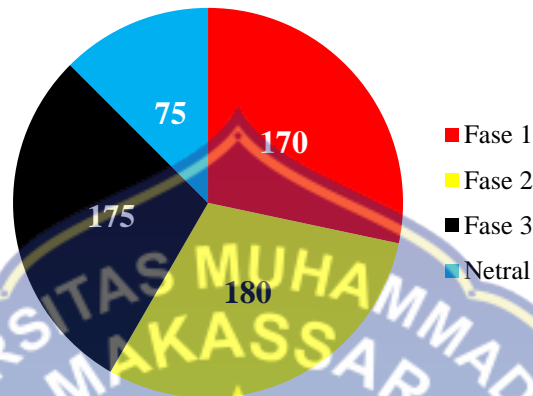
Nilai arus pada tiap-tiap fase untuk pengujian beban lampu pijar dengan daya 10 Watt adalah sebesar 70 mA. Setelah daya lampu dinaikkan menjadi 20 Watt arus fase mengalami kenaikan hingga mencapai nilai 170 mA. Begitupun pada saat daya lampu dinaikkan kembali menjadi 30 Watt juga terjadi kenaikan arus fase menjadi 250 mA.

Arus netral pada sistem tiga-fase empat kawat simetris merupakan akumulasi dari arus harmonik orde ke-3 di tiap-tiap fasenya. Sehingga dengan demikian besar magnitudo arus netral merupakan kelipatan tiga dari besar magnitudo arus harmonisa orde ke-3 yang ada di tiap-tiap fasenya (IEEE, 2003).

Arus netral pada pengujian lampu pijar 10 Watt, 20 Watt dan 30 Watt tetap bernilai nol. Hal tersebut konsisten dengan hasil penelitian Faharuddin dan Wibisana (2012) dalam jurnal penelitian yang berjudul "*Simulasi Kualitas Daya Saluran Distribusi Sekunder Perumahan*". Pada halaman 45, jurnal tersebut memperlihatkan hasil pengukuran arus harmonik orde ke-3 dari lampu pijar 100 Watt yang bernilai nol. Sehingga dapat disimpulkan bahwa sistem tiga-fase empat kawat simetris dengan beban lampu pijar tidak menghasilkan arus netral atau arus netral bernilai nol.

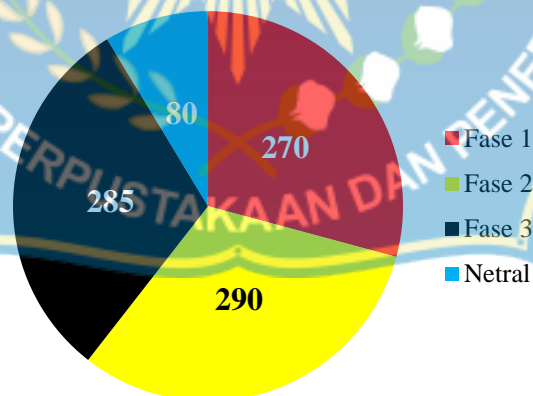
2. Lampu TL

**Data Arus Lampu TL 10 Watt
(mA)**



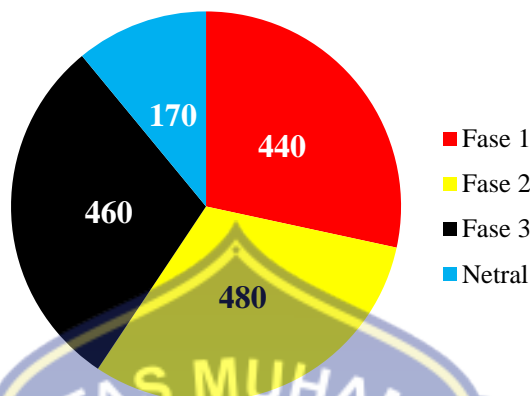
Gambar 4.9. Grafik arus fase dan arus netral dari lampu TL 10 Watt

**Data Arus Lampu TL 20 Watt
(mA)**



Gambar 4.10. Grafik arus fase dan arus netral dari lampu TL 20 Watt

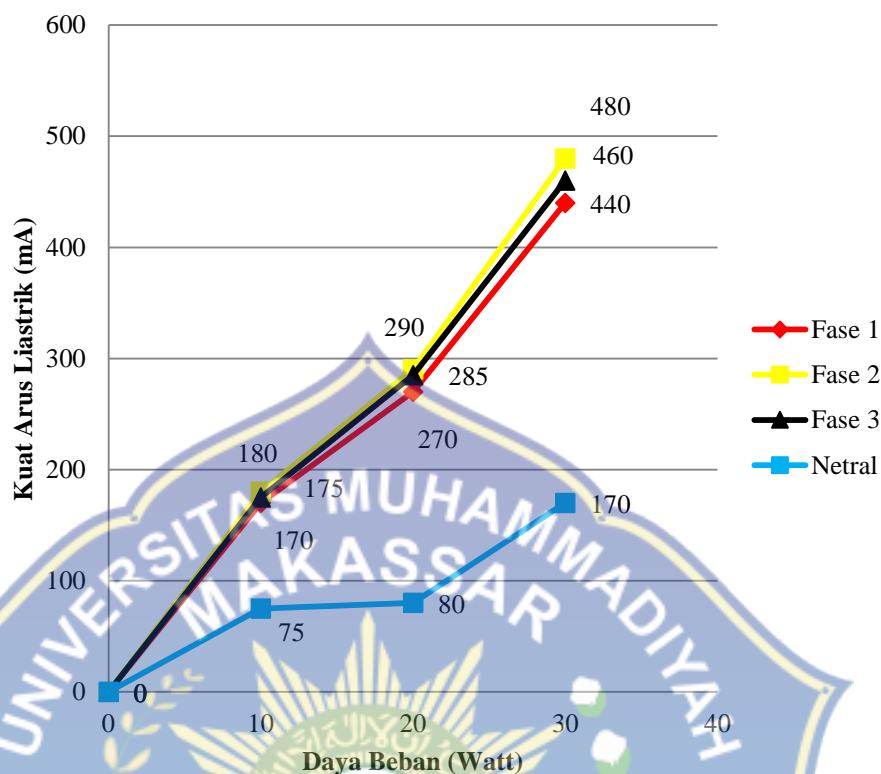
**Data Arus Lampu TL 30 Watt
(mA)**



Gambar 4.11. Grafik arus fase dan arus netral dari lampu TL 30 Watt

Gambar 4.9-4.11 memperlihatkan grafik arus fase dan arus netral akibat beban lampu TL tiga-fase simetris dengan daya 10, 20 dan 30 Watt. Grafik tersebut memperlihatkan bahwa arus fase pada tiap ukuran daya lampu TL memiliki nilai yang berbeda antara satu fase dengan fase lainnya. Selain itu juga terlihat munculnya arus netral pada tiap ukuran daya lampu TL yang diuji.

Gambar 4.9 memperlihatkan data arus fase-1 lampu TL 10 Watt sebesar 170 mA, fase-2 sebesar 180 mA, fase-3 sebesar 175 mA dan arus netral sebesar 75 mA. Gambar 4.10 memperlihatkan data arus fase-1 lampu TL 20 Watt sebesar 270 mA, fase-2 sebesar 290 mA, fase-3 sebesar 285 mA dan arus netral sebesar 80 mA. Gambar 4.11 memperlihatkan data arus fase-1 lampu TL 30 Watt sebesar 440 mA, fase-2 sebesar 480 mA, fase-3 sebesar 460 mA dan arus netral sebesar 170 mA.



Gambar 4.12. Grafik arus fase dan arus netral lampu TL simetris 10, 20 dan 30 Watt

Gambar 4.12 memperlihatkan grafik relasi arus fase dan arus netral untuk lampu TL simetris dengan ragam ukuran daya. Grafik tersebut memperlihatkan nilai arus fase yang berbeda antara satu fase dengan fase lainnya. Hal ini dapat disebabkan oleh beberapa faktor. Salah satu faktor penyebabnya adalah nilai impedansi saluran yang berbeda akibat adanya perbedaan panjang penghantar di tiap salurannya.

Penghantar pada saluran fase-2 merupakan yang terpendek, sehingga saluran pada fase-2 memiliki nilai impedansi yang paling kecil bila dibandingkan dengan nilai impedansi di saluran fase-1 dan fase-3. Besar impedansi saluran pada prinsipnya berbanding terbalik dengan besar arus yang mengalir pada saluran

tersebut. Hal inilah yang menyebabkan nilai arus pada saluran fase-2 akan selalu lebih besar bila dibandingkan dengan arus pada saluran fase lainnya di tiap ukuran daya beban yang simetris.

Grafik tersebut juga memperlihatkan timbulnya arus netral pada semua ukuran daya lampu TL yang diuji. Nilai arus netral yang timbul sebanding dengan besar arus fasenya sesuai dengan ukuran daya lampu TL yang diuji.

Nilai arus masing-masing fase-1, fase-2 dan fase-3 pada pengujian beban lampu TL dengan daya 10 Watt adalah sebesar 170 mA, 180 mA dan 175 mA. Setelah daya lampu dinaikkan menjadi 20 Watt arus masing-masing fase mengalami kenaikan hingga mencapai nilai 270 mA, 290 mA, dan 285 mA. Begitupun pada saat daya lampu dinaikkan kembali menjadi 30 Watt juga terjadi kenaikan arus fase masing-masing menjadi 440 mA, 480 mA dan 460 mA.

Nilai arus netral pada pengujian lampu TL 10 Watt adalah sebesar 75 mA. Pada pengujian lampu TL 20 Watt arus netral meningkat hingga mencapai 80 mA. Kemudian arus netral kembali meningkat pada pengujian lampu TL dengan daya 30 Watt sehingga menjadi 170 mA. Hal ini menunjukkan bahwa lampu TL dengan daya 10 Watt, 20 Watt dan 30 Watt dapat memicu timbulnya arus netral pada sistem tiga-fase empat kawat simetris, namun dengan nilai yang lebih kecil bila dibandingkan dengan arus fasenya.

Besarnya persentase nilai arus netral yang timbul pada masing-masing ukuran daya lampu TL dapat dihitung sebagai berikut.

$$\begin{aligned} \text{Persentase arus netral beban 10 Watt} &= \frac{75 \text{ mA}}{(170 \text{ mA} + 175 \text{ mA} + 180 \text{ mA})/3} \times 100 \% \\ &= 42,85 \% \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Persentase arus netral beban 20 Watt} &= \frac{80 \text{ mA}}{(270 \text{ mA} + 285 \text{ mA} + 290 \text{ mA})/3} \times 100 \% \\ &= 28,40 \% \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Persentase arus netral beban 30 Watt} &= \frac{170 \text{ mA}}{(440 \text{ mA} + 460 \text{ mA} + 480 \text{ mA})/3} \times 100 \% \\ &= 36,95 \% \end{aligned}$$

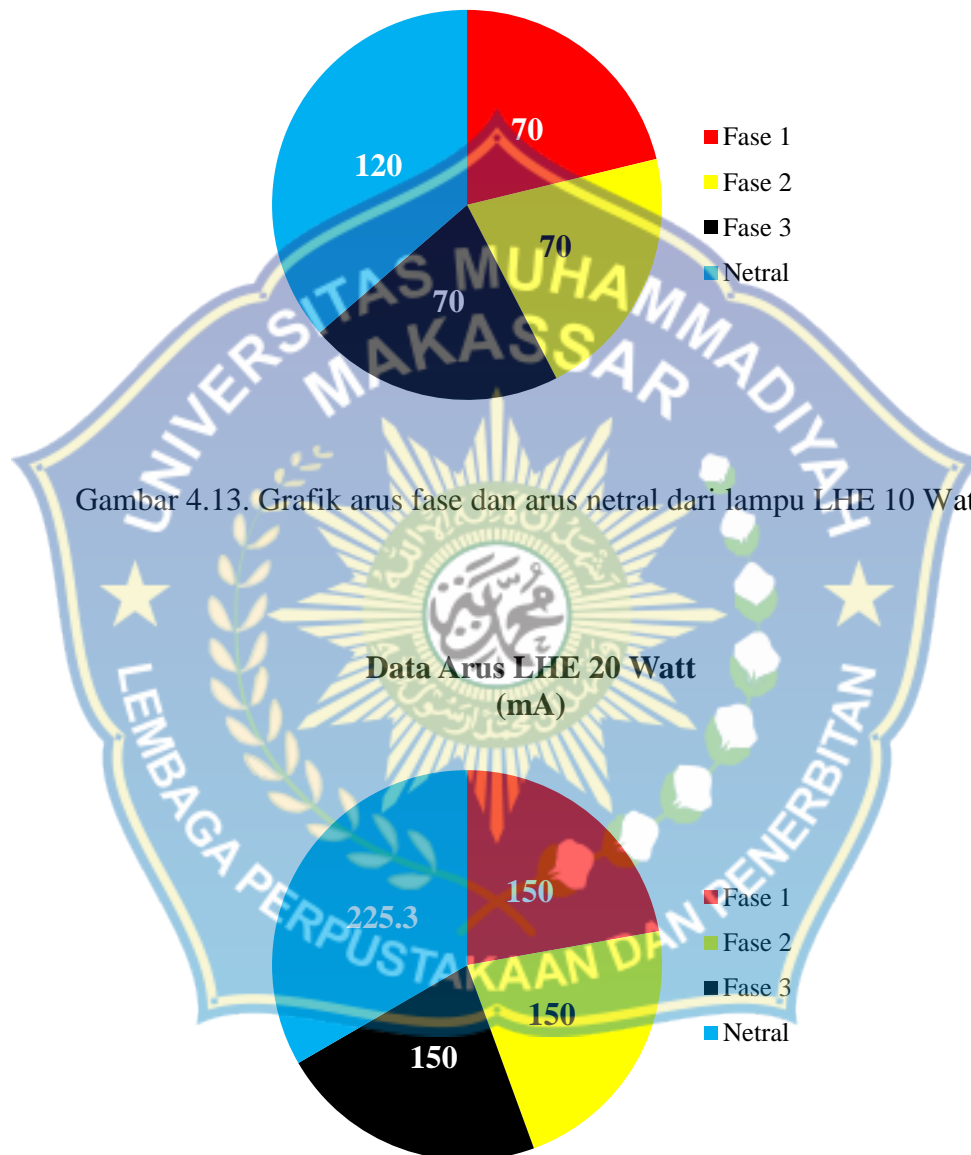
Hal ini menunjukkan bahwa penggunaan lampu TL pada sistem tiga-fase empat kawat simetris dengan ukuran daya 10, 20 dan 30 Watt dapat menimbulkan arus netral yang nilainya lebih kecil dari arus fasenya. Arus netral dengan nilai tertinggi terjadi pada lampu TL dengan ukuran daya 10 Watt yaitu mencapai nilai 42,85 % dari arus fase.

Hasil yang diperoleh dari penelitian ini pada prinsipnya sejalan dengan hasil penelitian Bien dan Sudarno (2004) dalam jurnal penelitian yang berjudul “*Pengujian Harmonisa Dan Upaya Pengurangan Gangguan Harmonisa Pada Lampu Hemat Energi*”. Pada halaman 62, jurnal tersebut memperlihatkan hasil pengukuran arus harmonisa orde ke-3 dari lampu TL dengan ballast konvensional.

Hasil pengukuran tersebut menunjukkan bahwa lampu TL menghasilkan arus harmonik orde ke-3 sebesar 0,069 A dengan besar arus fase 0,473 A. Timbulnya arus harmonik tersebut pada sistem tiga-fase empat kawat akan menghasilkan arus netral yang nilainya tiga kali lipat dari arus harmonik orde ke-3 tersebut yaitu sebesar 0,207 A. Hal ini kembali menunjukkan bahwa pada sistem tiga-fase empat kawat simetris dengan beban lampu TL ballast konvensional dapat memicu timbulnya arus netral namun dengan nilai yang lebih kecil bila dibandingkan dengan arus di masing-masing fasenya.

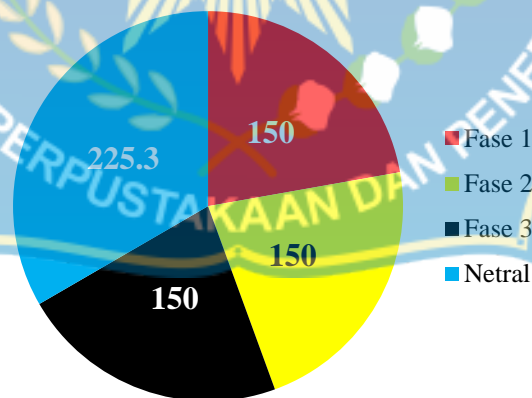
3. Lampu LHE

**Data Arus LHE 10 Watt
(mA)**



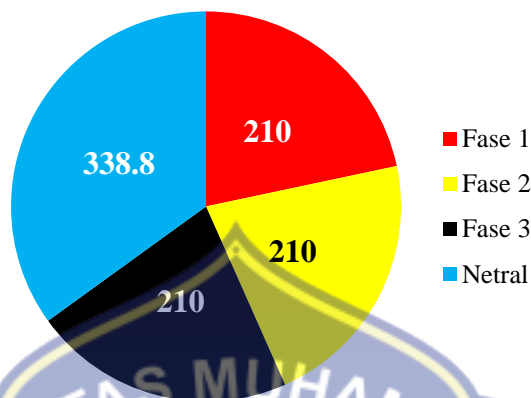
Gambar 4.13. Grafik arus fase dan arus netral dari lampu LHE 10 Watt

**Data Arus LHE 20 Watt
(mA)**



Gambar 4.14. Grafik arus fase dan arus netral dari lampu LHE 20 Watt

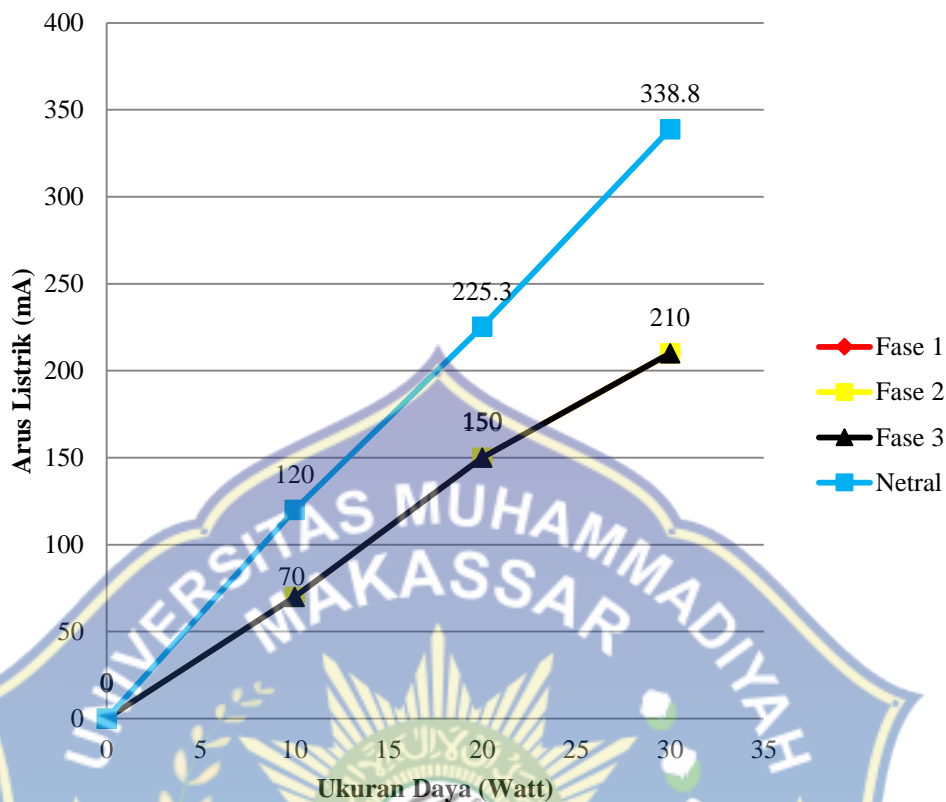
**Data Arus LHE 30 Watt
(mA)**



Gambar 4.15. Grafik arus fase dan arus netral dari lampu LHE 30 Watt

Gambar 4.13-4.15 memperlihatkan grafik arus fase dan arus netral akibat beban lampu LHE tiga-fase simetris dengan daya 10, 20 dan 30 Watt. Grafik tersebut memperlihatkan besar arus fase yang identik pada masing-masing fase-1, fase-2 dan fase-3 untuk setiap ukuran daya lampu LHE. Selain itu juga terlihat munculnya arus netral pada tiap ukuran daya lampu LHE yang diuji.

Gambar 4.13 memperlihatkan nilai arus tiap-tiap fase dari lampu LHE 10 Watt sebesar 70 mA dan arus netral sebesar 120 mA. Gambar 4.14 memperlihatkan nilai arus tiap-tiap fase dari lampu LHE 20 Watt sebesar 150 mA dan arus netral sebesar 225,3 mA. Gambar 4.15 memperlihatkan nilai arus tiap-tiap fase dari lampu LHE 30 Watt sebesar 210 mA dan arus netral sebesar 338,8 mA.



Gambar 4.16. Grafik arus fase dan arus netral lampu LHE simetris 10, 20 dan 30 Watt

Gambar 4.16 memperlihatkan grafik relasi arus fase dan arus netral lampu LHE simetris dengan ragam ukuran daya. Grafik tersebut memperlihatkan nilai arus fase yang sebanding dengan ukuran daya lampu LHE. Gambar tersebut juga memperlihatkan timbulnya arus netral serta terjadinya perubahan nilai arus netral yang sebanding dengan nilai arus fase sesuai ukuran daya lampu LHE yang diuji.

Nilai arus di tiap-tiap fase pada pengujian beban lampu LHE dengan daya 10 Watt adalah sebesar 70 mA sedangkan arus netral yang timbul adalah sebesar 120 mA. Setelah daya lampu dinaikkan menjadi 20 Watt arus di tiap-tiap fase mengalami kenaikan hingga mencapai nilai 150 mA. Hal ini menyebabkan terjadinya peningkatan arus netral menjadi 225,3 mA. Begitupun pada saat daya

lampu dinaikkan menjadi 30 Watt juga terjadi kenaikan arus di tiap-tiap fase menjadi 210 mA dan arus netral menjadi 338,8 mA.

Besarnya persentase nilai arus netral yang timbul pada masing-masing ukuran daya lampu LHE dapat dihitung sebagai berikut.

$$\begin{aligned} \text{Persentase arus netral beban 10 Watt} &= \frac{120 \text{ mA}}{(70 \text{ mA} + 70 \text{ mA} + 70 \text{ mA})/3} \times 100 \% \\ &= 171,42 \% \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Persentase arus netral beban 20 Watt} &= \frac{225,3 \text{ mA}}{(165 \text{ mA} + 165 \text{ mA} + 165 \text{ mA})/3} \times 100 \% \\ &= 136,54\% \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Persentase arus netral beban 30 Watt} &= \frac{338,8 \text{ mA}}{(230 \text{ mA} + 230 \text{ mA} + 230 \text{ mA})/3} \times 100 \% \\ &= 147,30 \% \end{aligned}$$

Hal ini menunjukkan bahwa penggunaan LHE pada sistem tiga-fase empat kawat simetris dengan ukuran daya 10, 20 dan 30 Watt dapat menimbulkan arus netral yang nilainya bahkan lebih besar dari arus fasenya. Arus netral dengan nilai tertinggi terjadi pada LHE dengan ukuran daya 10 Watt yaitu mencapai nilai 171,42 % lebih besar dari arus fase.

Hasil yang di peroleh dari penelitian ini pada prinsipnya sejalan dengan hasil penelitian Bien dan Sudarno (2004) dalam jurnal penelitian yang berjudul “*Pengujian Harmonisa Dan Upaya Pengurangan Gangguan Harmonisa Pada Lampu Hemat Energi*”. Pada Halaman 61, jurnal tersebut memperlihatkan hasil pengukuran arus harmonik orde ke-3 dari LHE 9 Watt.

Hasil pengukuran tersebut menunjukkan timbulnya arus harmonik orde ke-3 pada LHE 9 Watt sebesar 0,029 A dengan besar arus fase 0,057 A. Timbulnya

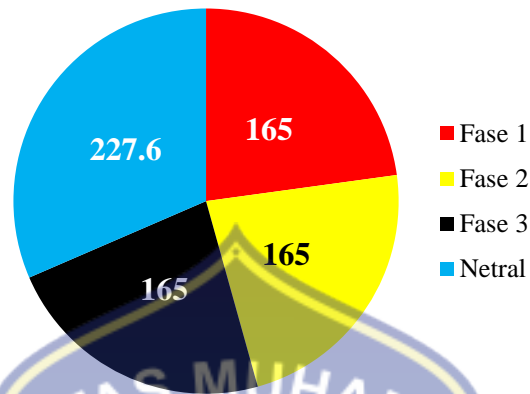
arus harmonik tersebut pada sistem tiga-fase empat kawat akan memicu timbulnya arus netral yang nilainya tiga kali lipat dari arus harmonik orde ke-3 tersebut yaitu sebesar 0,087 A. Hal ini kembali menunjukkan bahwa pada sistem tiga-fase empat kawat simetris dengan beban LHE dapat memicu timbulnya arus netral yang nilainya dapat lebih besar dari arus fasenya.

4. Lampu LED



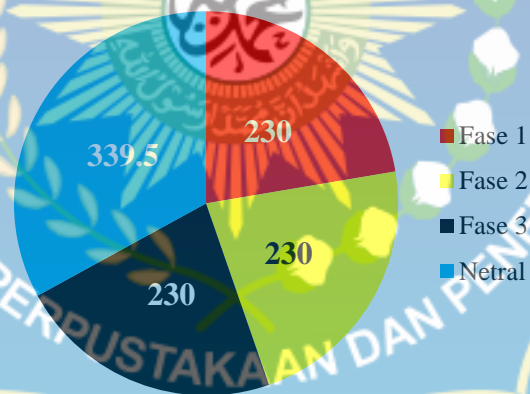
Gambar 4.17. Grafik arus fase dan arus netral dari lampu LED 10 Watt

**Data Arus LED 20 Watt
(mA)**



Gambar 4.18. Grafik arus fase dan arus netral dari lampu LED 20 Watt

**Data Arus LED 30 Watt
(mA)**

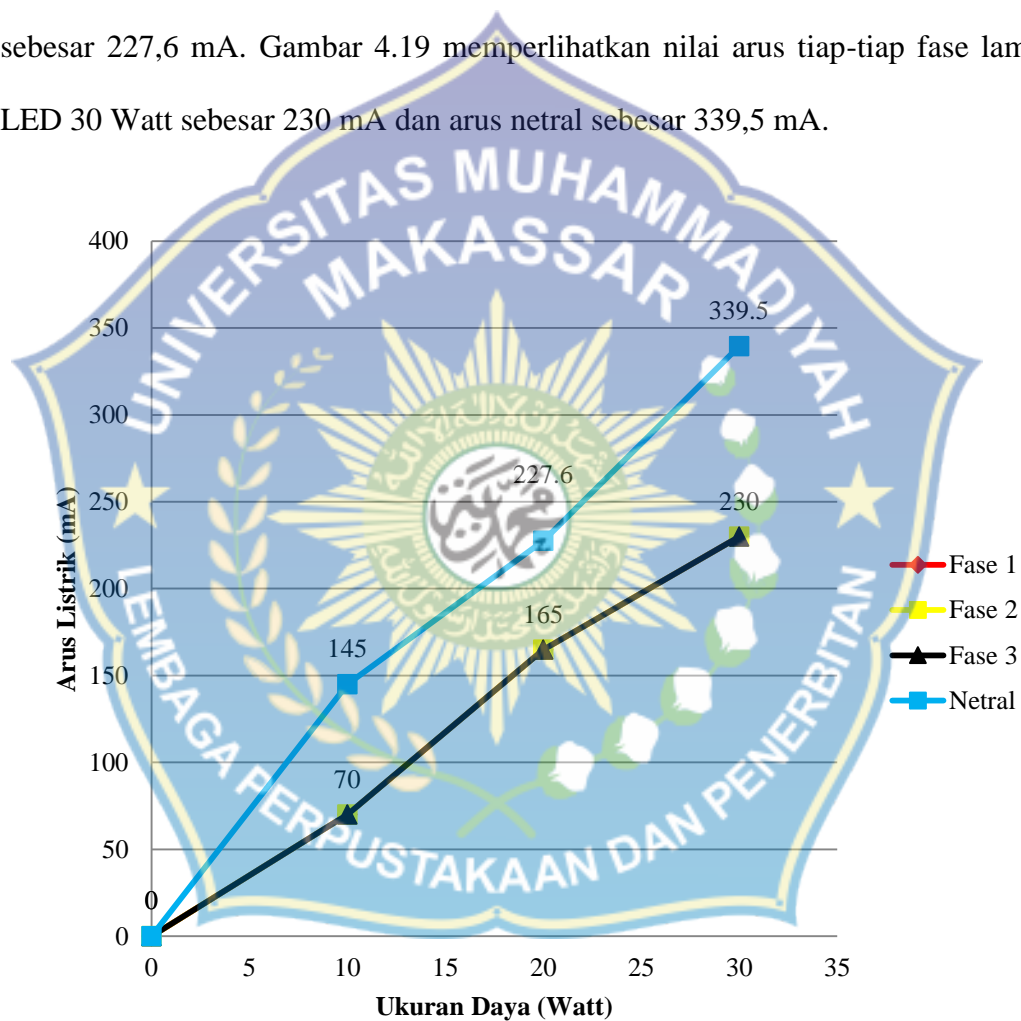


Gambar 4.19. Grafik arus fase dan arus netral dari lampu LED 30 Watt

Gambar 4.17-4.19 memperlihatkan grafik arus fase dan arus netral akibat beban lampu LED tiga-fase simetris dengan daya 10, 20 dan 30 Watt. Grafik tersebut memperlihatkan besar arus fase-1, fase-2 dan fase-3 yang identik untuk

setiap ukuran daya lampu LED. Selain itu juga terlihat munculnya arus netral pada tiap ukuran daya lampu LED yang diuji.

Gambar 4.17 memperlihatkan nilai arus tiap-tiap fase lampu LED 10 Watt sebesar 70 mA dan arus netral sebesar 145 mA. Gambar 4.18 memperlihatkan nilai arus tiap-tiap fase lampu LED 20 Watt sebesar 165 mA dan arus netral sebesar 227,6 mA. Gambar 4.19 memperlihatkan nilai arus tiap-tiap fase lampu LED 30 Watt sebesar 230 mA dan arus netral sebesar 339,5 mA.



Gambar 4.20. Grafik arus fase dan arus netral lampu LED simetris 10, 20 dan 30 Watt

Gambar 4.20 memperlihatkan grafik relasi arus fase dan arus netral lampu LED simetris dengan ragam ukuran daya. Grafik tersebut memperlihatkan nilai

arus fase yang sebanding dengan ukuran daya lampu LED. Gambar tersebut juga memperlihatkan timbulnya arus netral serta terjadinya perubahan nilai arus netral yang sebanding dengan nilai arus fase sesuai ukuran daya lampu LED yang diuji.

Nilai arus tiap-tiap fase pada pengujian beban lampu LED dengan daya 10 Watt adalah sebesar 70 mA sedangkan arus netral yang timbul adalah sebesar 145 mA. Setelah daya lampu dinaikkan menjadi 20 Watt arus tiap-tiap fase mengalami kenaikan hingga mencapai nilai 165 mA. Hal ini menyebabkan terjadinya peningkatan arus netral menjadi 227,6 mA. Begitupun pada saat daya lampu dinaikkan menjadi 30 Watt juga terjadi kenaikan arus tiap-tiap fase menjadi 230 mA dan arus netral menjadi 339,5 mA.

Besarnya persentase nilai arus netral yang timbul pada masing-masing ukuran daya lampu LED dapat dihitung sebagai berikut.

$$\begin{aligned} \text{Persentase arus netral beban 10 Watt} &= \frac{145 \text{ mA}}{(70 \text{ mA} + 70 \text{ mA} + 70 \text{ mA})/3} \times 100 \% \\ &= 207,14 \% \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Persentase arus netral beban 20 Watt} &= \frac{227,6 \text{ mA}}{(150 \text{ mA} + 150 \text{ mA} + 150 \text{ mA})/3} \times 100 \% \\ &= 151,73 \% \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Persentase arus netral beban 30 Watt} &= \frac{339,5 \text{ mA}}{(210 \text{ mA} + 210 \text{ mA} + 210 \text{ mA})/3} \times 100 \% \\ &= 161,66 \% \end{aligned}$$

Hal ini menunjukkan bahwa penggunaan LED pada sistem tiga-fase empat kawat simetris dengan ukuran daya 10, 20 dan 30 Watt dapat menimbulkan arus netral yang bahkan lebih besar dari arus fasenya. Arus netral dengan nilai tertinggi

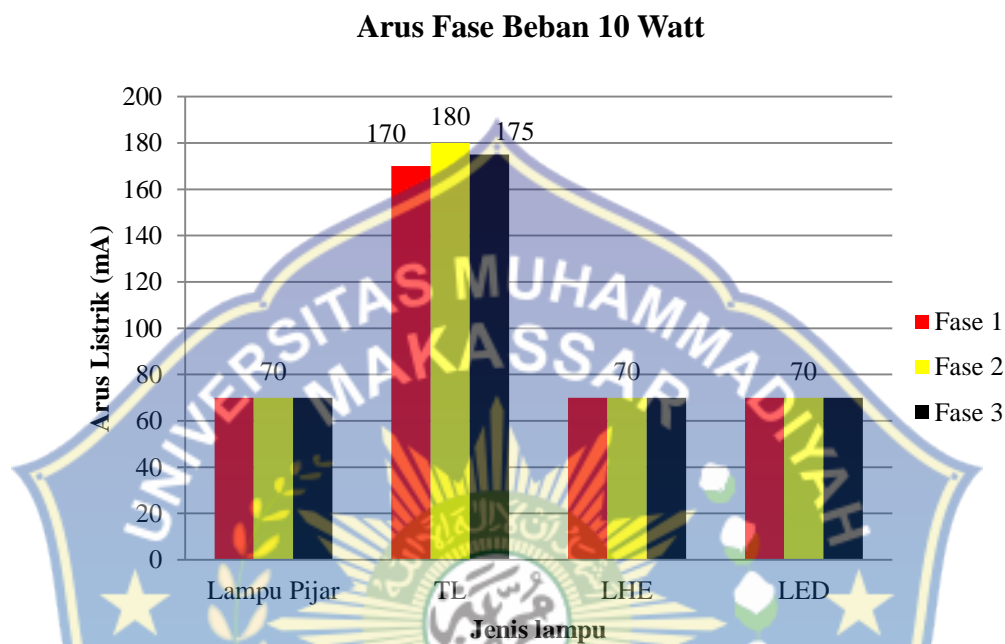
terjadi pada lampu LED dengan ukuran daya 10 Watt yaitu mencapai nilai 207,14 % lebih besar dari arus fase.

Hasil yang di peroleh dari penelitian ini pada prinsipnya sejalan dengan hasil penelitian Rizkiawan dan Setiabudy (2013) dalam jurnal penelitian yang berjudul "*Analisis Harmonik pada Lampu Light Emitting Diode*". Pada Halaman 13, jurnal tersebut memperlihatkan hasil pengukuran arus harmonik orde ke-3 dari lampu LED 9 Watt.

Hasil pengukuran LED 9 Watt menunjukkan timbulnya arus harmonik orde ke-3 sebesar 0,307 A atau 87,88% dari nilai arus puncak fasenya, dengan besar arus puncak fasenya 0,35 A. Dengan demikian pada sistem tiga-fase empat kawat, arus harmonik orde ke-3 tersebut dapat memicu timbulnya arus netral yang besarnya tiga kali lipat dari arus harmonik yang timbul yaitu sebesar 0,921 A. Hal ini kembali menunjukkan bahwa pada sistem tiga-fase empat kawat simetris dengan beban lampu LED dapat memicu timbulnya arus netral yang nilainya bahkan jauh lebih besar dari arus fasenya.

D. Perbandingan Arus Fase pada Ragam Beban Uji

1. Arus Fase pada Beban 10 Watt



Gambar 4.21. Grafik arus fase ragam tipe beban dengan daya masing-masing 10 Watt

Gambar 4.21 memperlihatkan grafik perbandingan arus fase pada lampu pijar, TL, LHE dan LED dengan ukuran daya yang sama pada masing-masing lampu sebesar 10 Watt. Grafik tersebut menunjukkan nilai arus tiap fase yang identik pada lampu pijar, LHE dan LED. Sedangkan arus fase pada lampu TL memiliki nilai yang jauh lebih tinggi dari ketiga lampu lainnya.

Arus fase-1, fase-2 dan fase-3 pada tipe lampu pijar, LHE dan lampu LED dengan daya 10 Watt adalah sebesar 70 mA. Sedangkan arus fase pada lampu TL 10 Watt adalah sebesar 170 mA untuk fase-1, 180 mA untuk fase-2 dan 175 mA untuk fase-3.

Besar arus fase pada lampu pijar, LHE dan LED pada ukuran daya 10 Watt adalah identik. Hal ini dapat terjadi akibat nilai impedansi saluran yang juga identik pada tiap-tiap tipe lampu tersebut. Besar impedansi saluran dengan beban lampu pijar, LHE dan LED pada ukuran daya 10 Watt dapat dihitung sebagai berikut.

$$Z_{Fase-1} = \frac{V_{Fase-1}}{I} = \frac{216,7 V}{70 mA} = 3095,71 \Omega$$

Arus fase pada lampu TL 10 Watt memiliki nilai yang jauh lebih besar bila dibandingkan dengan arus fase pada tipe lampu lainnya. Hal ini dapat disebabkan oleh penggunaan ballast konvensional dan jenis tabung lampu yang memiliki impedansi yang sangat rendah sehingga mengakibatkan nilai impedansi total pada saluran dengan beban lampu TL akan jauh lebih rendah bila dibandingkan dengan impedansi total pada saluran dengan beban lampu pijar, LHE dan LED.

Selain itu pada pengujian lampu TL 10 Watt juga terjadi perbedaan nilai arus di tiap-tiap fasenya. Hal ini juga dapat dipicu oleh nilai impedansi masing-masing saluran yang berbeda yang disebabkan oleh panjang penghantar masing-masing saluran yang juga berbeda. Besar impedansi saluran tiap fase dengan beban lampu TL 10 Watt dapat dihitung sebagai berikut.

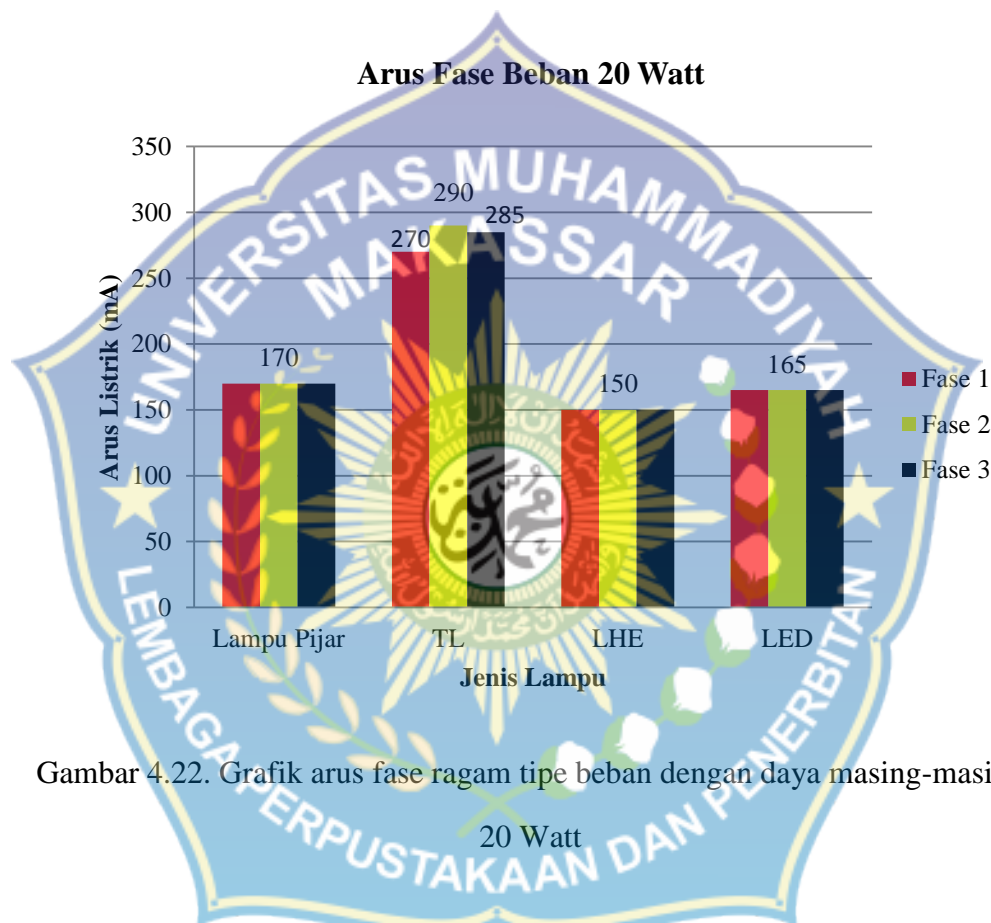
$$Z_{Fase-1} = \frac{V_{Fase-1}}{I_{Fase-1}} = \frac{216,7 V}{170 mA} = 1274,70 \Omega$$

$$Z_{Fase-2} = \frac{V_{Fase-2}}{I_{Fase-2}} = \frac{216,4 V}{175 mA} = 1236,57 \Omega$$

$$Z_{Fase-3} = \frac{V_{Fase-3}}{I_{Fase-3}} = \frac{216,3 V}{180 mA} = 1201,67 \Omega$$

Berdasarkan perhitungan di atas terlihat bahwa impedansi total tiap fase dengan beban lampu TL 10 Watt memiliki nilai yang lebih kecil bila dibandingkan dengan impedansi pada lampu pijar, LHE dan LED.

2. Arus Fase pada Beban 20 Watt



Gambar 4.22. Grafik arus fase ragam tipe beban dengan daya masing-masing 20 Watt

Gambar 4.22 memperlihatkan grafik perbandingan arus fase pada lampu pijar, TL, LHE dan LED dengan ukuran daya yang sama pada masing-masing lampu sebesar 20 Watt. Grafik tersebut menunjukkan nilai arus fase yang berbeda di masing-masing lampu. Lampu TL memiliki nilai arus fase terbesar. Sedangkan lampu LHE memiliki nilai arus fase terkecil diikuti oleh lampu LED dan lampu pijar.

Arus fase pada lampu TL memiliki nilai yang berbeda di masing-masing fasenya. Arus fase 1 sebesar 270 mA, arus fase 2 sebesar 280 mA dan arus fase 3 sebesar 275 mA. Sedangkan arus fase pada lampu LHE, LED dan lampu pijar memiliki nilai yang identik di masing-masing fasenya. Arus fase pada lampu LHE sebesar 150 mA, arus fase pada lampu LED sebesar 165 mA dan arus fase pada lampu pijar sebesar 170 mA.

Pengujian dengan ukuran daya 20 Watt pada masing-masing tipe lampu memperlihatkan adanya perbedaan besar arus fase di masing-masing tipe lampu. Perbedaan besar arus yang terjadi tentunya disebabkan oleh perbedaan nilai impedansi saluran dengan tipe lampu yang berbeda. Besar impedansi tiap saluran pada masing-masing tipe lampu dapat dihitung sebagai berikut.

$$Z_{\text{Pijar (rata-rata)}} = \frac{V}{I} = \frac{(216,7 \text{ V} + 216,4 \text{ V} + 216,3 \text{ V})/3}{170 \text{ mA}} = 1273,32 \Omega$$

$$Z_{\text{TL (rata-rata)}} = \frac{V}{I} = \frac{(216,7 \text{ V} + 216,4 \text{ V} + 216,3 \text{ V})/3}{(270 \text{ mA} + 290 \text{ mA} + 285 \text{ mA})/3} = 768,51 \Omega$$

$$Z_{\text{LHE (rata-rata)}} = \frac{V}{I} = \frac{(216,7 \text{ V} + 216,4 \text{ V} + 216,3 \text{ V})/3}{150 \text{ mA}} = 1443,10 \Omega$$

$$Z_{\text{LED (rata-rata)}} = \frac{V}{I} = \frac{(216,7 \text{ V} + 216,4 \text{ V} + 216,3 \text{ V})/3}{165 \text{ mA}} = 1311,915 \Omega$$

Berdasarkan pada hasil perhitungan terlihat bahwa pada ukuran daya 20 Watt, saluran dengan beban lampu LHE memiliki nilai impedansi yang paling besar. Hal ini disebabkan oleh komponen-komponen penyusun rangkaian elektronika daya yang ada di dalam lampu LHE yang terdiri dari rangkaian penyearah dan inverter. Rangkaian penyearah dan inverter ini terdiri dari

komponen-komponen berupa diode, resistor, kapasitor, induktor serta transistor yang dihubungkan sedemikian rupa sehingga menghasilkan nilai impedansi yang lebih besar bila dibandingkan dengan tipe lampu lainnya dengan ukuran daya yang sama.

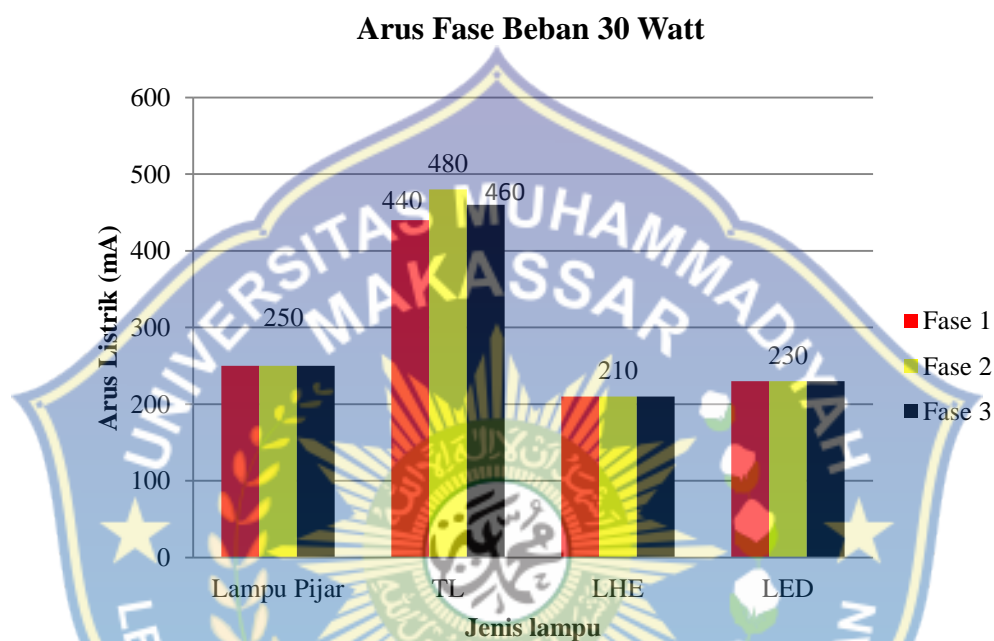
Lampu LED memiliki nilai impedansi yang lebih kecil bila dibandingkan dengan impedansi pada lampu LHE. Hal ini disebabkan oleh rangkaian elektronika daya di dalam lampu LED lebih sederhana karena hanya berupa rangkaian penyearah yang terdiri dari diode, resistor dan kapasitor serta LED yang berfungsi memancarkan cahaya.

Lampu pijar memiliki nilai impedansi yang lebih kecil bila dibandingkan dengan lampu LHE dan LED pada daya 20 Watt. Hal ini dapat disebabkan karena karakteristik lampu pijar yang merupakan beban resistif murni sehingga nilai impedansi pada lampu pijar semata-mata tergantung pada nilai resistansi dari kawat wolfram di dalam lampu pijar tersebut. Sedangkan pada lampu LHE dan LED, nilai impedansi merupakan nilai total dari resistansi, reaktansi kapasitif dan reaktansi induktif dari komponen-komponen penyusun rangkaian elektronika daya.

Selain itu, karena keterbatasan varian ukuran daya di pasaran pada lampu-lampu jenis tertentu sehingga untuk mendapatkan lampu LED dan lampu pijar dengan ukuran daya 20 Watt dilakukan dengan cara memparalelkan masing-masing dua buah lampu 10 Watt. Sehingga nilai impedansi totalnya akan cenderung lebih kecil bila dibandingkan dengan satu buah lampu LHE 20 Watt.

Hal ini yang dapat menyebabkan timbulnya perbedaan besaran arus fase pada tiap-tiap tipe lampu dengan ukuran daya yang sama.

3. Arus Fase pada Beban 30 Watt



Gambar 4.23. Grafik arus fase ragam tipe beban dengan daya masing-masing 30 Watt

Gambar 4.23 memperlihatkan grafik perbandingan arus fase pada lampu pijar, TL, LHE dan LED dengan ukuran daya yang sama pada masing-masing lampu sebesar 30 Watt. Grafik tersebut menunjukkan nilai arus fase yang berbeda di masing-masing lampu. Lampu TL memiliki nilai arus fase terbesar. Sedangkan lampu LHE memiliki nilai arus fase terkecil diikuti oleh lampu LED dan lampu pijar.

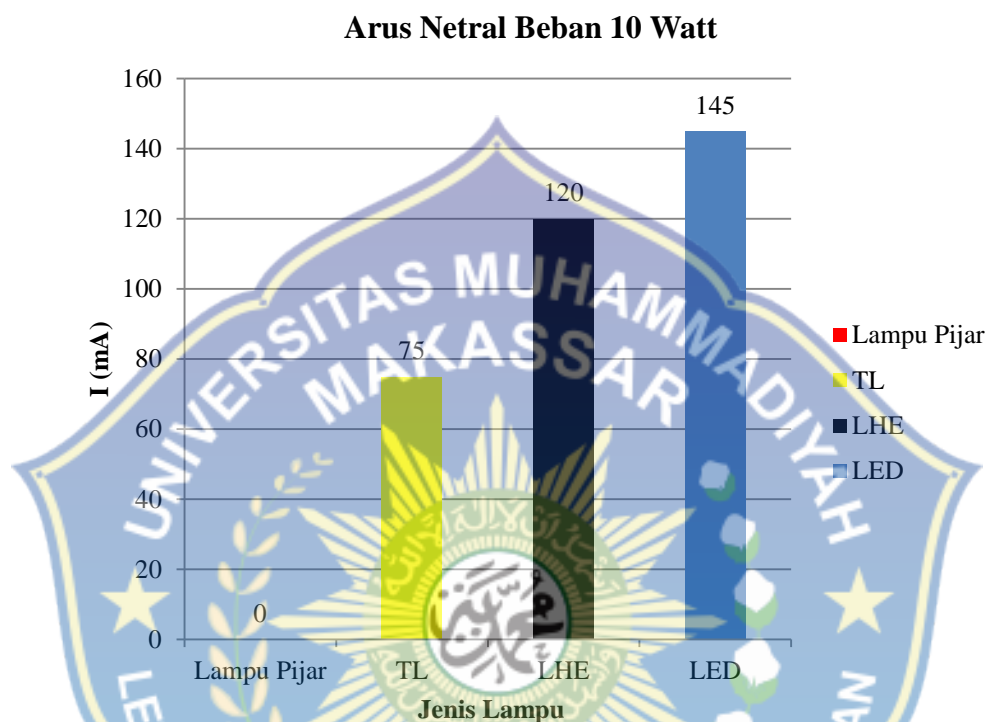
Arus fase pada lampu TL memiliki nilai yang berbeda di masing-masing fasenya. Arus fase 1 sebesar 440 mA, arus fase 2 sebesar 480 mA dan arus fase 3

sebesar 460 mA. Sedangkan arus fase pada lampu LHE, LED dan lampu pijar memiliki nilai yang identik di masing-masing fasenya. Arus fase pada lampu LHE sebesar 210 mA, arus fase pada lampu LED sebesar 230 mA dan arus fase pada lampu pijar sebesar 250 mA.

Hasil yang terlihat pada pengujian lampu pijar, TL, LHE dan LED dengan ukuran daya 30 Watt pada prinsipnya sejalan dengan hasil pengujian dengan ukuran daya 20 Watt. Pengujian lampu dengan ukuran daya masing-masing 30 Watt dilakukan dengan cara memparalelkan beberapa lampu dengan ukuran daya tertentu yang tersedia di pasaran. Lampu pijar 30 Watt diperoleh dengan memparalelkan tiga buah lampu pijar 10 Watt. Lampu TL 30 Watt diperoleh dengan memparalelkan lampu TL 10 Watt dan 20 Watt. Lampu LHE 30 Watt diperoleh dengan memparalelkan lampu LHE 20 Watt dan dua buah lampu LHE 5 Watt. Sedangkan lampu LED 30 Watt diperoleh dengan memparalelkan tiga buah lampu LED 10 Watt. Hal ini tentunya akan mempengaruhi nilai impedansi saluran yang pada prinsipnya berbanding terbalik dengan besar arus listrik yang mengalir pada saluran dengan beban tipe lampu tertentu.

E. Perbandingan Arus Netral pada Ragam Beban Uji

1. Arus Netral pada Beban 10 Watt

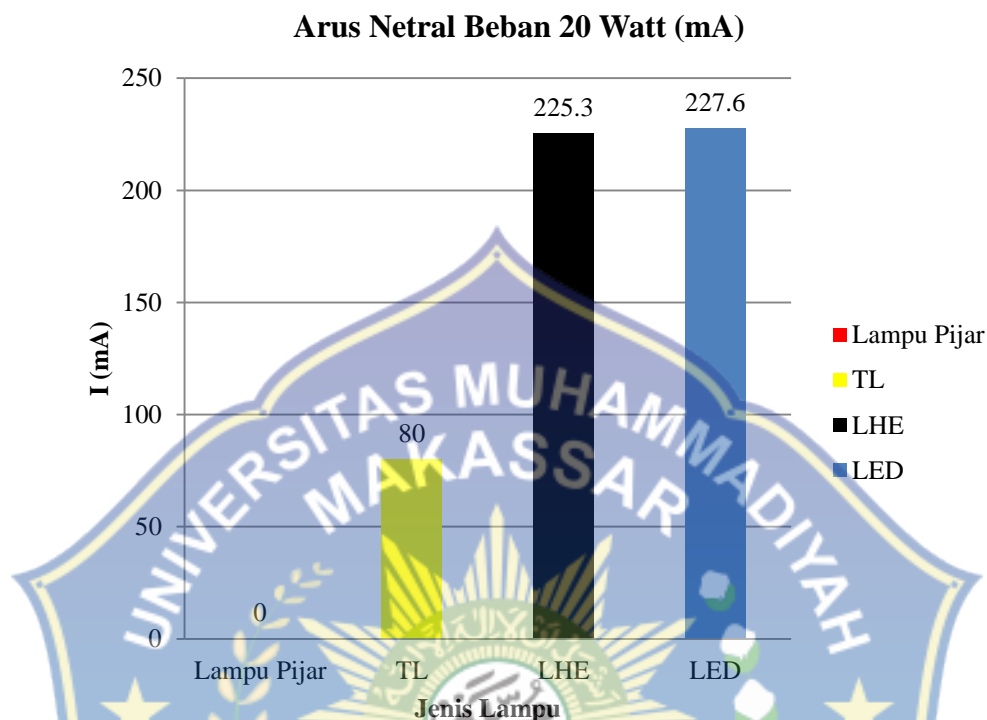


Gambar 4.24. Grafik arus netral ragam tipe beban dengan daya masing-masing 10 Watt

Gambar 4.24 memperlihatkan grafik arus netral ragam tipe beban 10 Watt simetris. Arus netral hanya timbul pada tipe lampu TL, lampu LHE dan LED. Sedangkan lampu pijar tidak menimbulkan arus netral.

Arus netral tertinggi dihasilkan oleh lampu LED dengan nilai arus netral sebesar 145 mA. Lampu LHE menghasilkan arus netral sebesar 120 mA. Sedangkan lampu TL menghasilkan arus netral sebesar 75 mA.

2. Arus Netral pada Beban 20 Watt

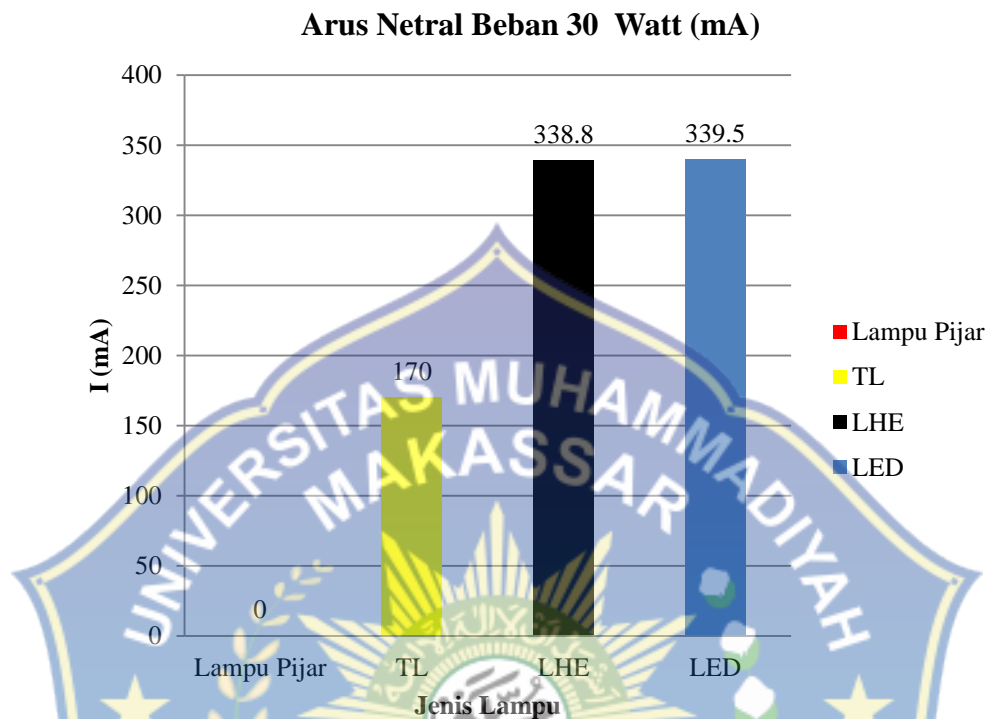


Gambar 4.25. Grafik arus netral ragam tipe beban dengan daya masing-masing 20 Watt

Gambar 4.25 memperlihatkan grafik arus netral ragam tipe beban 20 Watt simetris. Arus netral hanya timbul pada tipe lampu TL, lampu LHE dan LED. Sedangkan lampu pijar tidak menimbulkan arus netral.

Arus netral tertinggi masih dihasilkan oleh lampu LED dengan nilai arus netral sebesar 227,6 mA. Lampu LHE menghasilkan arus netral sebesar 225,3 mA. Sedangkan lampu TL menghasilkan arus netral sebesar 80 mA.

3. Arus Netral pada Beban 30 Watt



Gambar 4.26. Grafik arus netral ragam tipe beban dengan daya masing-masing 30 Watt

Gambar 4.26 memperlihatkan grafik arus netral ragam tipe beban 30 Watt simetris. Arus netral hanya timbul pada tipe lampu TL, lampu LHE dan LED. Sedangkan lampu pijar tidak menimbulkan arus netral.

Arus netral tertinggi tetap dihasilkan oleh lampu LED dengan nilai arus netral sebesar 339,5 mA. Lampu LHE menghasilkan arus netral sebesar 338,8 mA. Sedangkan lampu TL menghasilkan arus netral sebesar 170 mA.

BAB V

PENUTUP

A. Kesimpulan

1. Pengujian terhadap lampu pijar dengan ukuran daya 10 Watt, 20 Watt dan 30 Watt tidak memperlihatkan adanya pengaruh terhadap timbulnya arus netral.
2. Pengujian terhadap lampu TL dengan ukuran daya 10 Watt, 20 Watt dan 30 Watt memperlihatkan timbulnya arus netral yang nilainya lebih kecil dari arus fasenya yaitu masing-masing sebesar 42,8 % untuk lampu TL dengan daya 10 Watt, 28,40 % untuk lampu TL dengan daya 20 Watt dan 36,95 % untuk lampu TL dengan daya 30 Watt. Arus netral yang timbul pada tiap ukuran daya lampu TL yang diuji adalah masing-masing sebesar 75 mA, 80 mA dan 170 mA.
3. Pengujian terhadap lampu LHE memperlihatkan timbulnya arus netral yang nilainya lebih besar dari arus fasenya yaitu masing-masing sebesar 171,42 % untuk lampu LHE dengan daya 10 Watt, 136,54 % untuk lampu LHE dengan daya 20 Watt dan 147,30 % untuk lampu LHE dengan daya 30 Watt. Arus netral yang timbul pada tiap ukuran daya lampu LHE yang diuji adalah masing-masing sebesar 120 mA, 225,3 mA dan 338,8 mA.
4. Pengujian terhadap lampu LED memperlihatkan timbulnya arus netral yang nilainya lebih besar dari arus fasenya yaitu masing-masing sebesar 207,14 % untuk lampu LED dengan daya 10 Watt, 151,73% untuk lampu LED dengan daya 20 Watt dan 161,66 % untuk lampu LED dengan daya 30 Watt. Arus

netral yang timbul pada tiap ukuran daya lampu LED yang diuji adalah masing-masing sebesar 145 mA, 227,6 mA dan 339,5 mA.

B. Saran

Adapun saran-saran yang ingin kami sampaikan berkaitan dengan fakta yang kami temukan dalam penelitian ini adalah :

1. Perlu adanya inovasi dan rekayasa teknologi dari produsen-produsen peralatan listrik agar dapat menghasilkan produk-produk yang tidak hanya memiliki efisiensi energi listrik yang tinggi tapi juga dapat meminimalisir dampak atau efek sampingnya terhadap penurunan kualitas daya listrik.
2. Perlu digunakan peralatan yang dapat berfungsi meredam efek harmonisa yang timbul akibat peralatan-peralatan listrik nonlinier yang digunakan oleh konsumen-konsumen listrik seperti di rumah tinggal, perkantoran dan industri.



Daftar Pustaka

- Alamsyah, Reza Perkasa. 2010. *Analisa Pengaruh Harmonisa (Lampu Hemat Energi) Terhadap Penghantar*.
- Amalia, Rizka dan Refdinal Nazir. 2015. *Pemodelan Dan Simulasi Beban Non-Linier 3-Fasa Dengan Metoda Sumber Arus Harmonik*. Jurnal Nasional Teknik Elektro Vol: 4, No. 2, ISSN: 2302 – 2949.
- Assaffat, Luqman. 2010. *Tingkat Distorsi Harmonisa Pada Lampu Essensial Yang Berbeda Merk*. Media Elektrika Volume 3 nomor 1, ISSN 1979-7451.
- Bien, Liem Ek dan Sudarno. 2004. *Pengujian Harmonisa dan Upaya Pengurangan Gangguan Harmonisa pada Lampu Hemat Energi*. JETri, Volume 4, Nomor 1, Halaman 53-64, ISSN 1412-0372.
- Blooming, Thomas M dan Daniel J. Carnovale. 2006. *Application Of IEEE Std 519-1992 Harmonic Limits*. USA.
- Desmet, Jan dan Angelo Baggini. 2003. *Neutral Sizing In Harmonic Rich Installation*, Copper Development Association.
- De La Rosa, Francisco. C. 2006. *Harmonics and Power Systems*. CRC Press.
- Darma, Edifrizal. *Statika 1*, Pusat Pengembangan Bahan Ajar UMB, http://kk.mercubuana.ac.id/elearning/files_modul/11002-4-447333053182.pdf.
Diakses pada tanggal : 01 Oktober 2015.
- Faharuddin, Andi dan Gunawan Wibisana. 2012. *Simulasi Kualitas Daya Saluran Distribusi Sekunder Perumahan*. Jurnal Nasional Teknik Elektro No.1, Vol : 1, ISSN : 2302-2949.
- Ginting, Frederick Sakaja dkk. 2013. *Pengaruh Harmonisa Terhadap Arus Netral Transformator Distribusi*. SINGUDA ENSIKOM VOL. 1, NO. 1.
IEEE 519-1992, 1992.
Lamps. Version 2 EE IIT, Kharagpur 1.
- Mahayanti. 2004. *Analisis Tingkat Efisiensi Daya Dan Biaya Penggunaan Lampu Neon Sistem Elektronik Terhadap Neon Sistem Trafo Berdasarkan Desain Eksperimen Faktorial*.
- Rodriguez, Jonathan dan Gavin Saldanha. 2010. *Harmonics In Your Electrical System*, EATON.

- Rizkiawan, Adi Jaya dan Rudi Setiabudy. 2013. *Analisis Harmonik Pada lampu Light Emmiting Diode*, Departemen Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia.
- Sankaran, C. 2002. *Power Quality*. CRC Press LLC. USA.
- Setiadji, Julius Sentosa dkk. 2006. *Pengaruh Ketidakseimbangan Beban Terhadap Arus Netral dan Losses pada Trafo Distribusi*. Jurnal Teknik Elektro Vol. 6, No. 1: 68 – 73.
- Suripto, Slamet. 2007. *Analisis Upaya Penurunan Biaya Pemakaian Energi Listrik Pada Lampu Penerangan*. TELKOMNIKA Vol. 5, No. 1: 39 – 44.
- Setiawan, Awan. 2007. *Kajian Pengaruh Harmonisa Terhadap Sistem Tenaga Listrik*. Jurnal ELTEK, Volume 05 Nomor 02, ISSN 1693-4024.
- Setiono, Iman. 2011. *Efisiensi Pemakaian Energi Listrik Pada Lampu Penerangan*. Prosiding Seminar Nasional Sains dan Teknologi ke-2.
- U.S. Department of Energy. 1992. *Electrical Science*. DOE Fundamentals Handbook Volume 3. Washington, D.C.
1994. *Power System Harmonics*, Square D. USA.
2014. *Detecting Harmonics in an AC Signal*. Keysight Technologies. USA.
2015. *Incandescent Light Bulb*.
https://en.wikipedia.org/wiki/Incandescent_light_bulb
 Diakses pada tanggal : 06 November 2015
2015. *Resistive Loads*.
<http://legendpower.com/product-info/terms-and-faq/what-are-resistive-loads/>
 Diakses pada tanggal : 06 November 2015

LAMPIRAN

Tabel L.1. Data arus lampu pijar

Ukuran Daya (Watt)	Kuat Arus Listrik (mA)			
	Fase 1	Fase 2	Fase 3	Arus Netral
10	70	70	70	0
20	170	170	170	0
30	250	250	250	0

Tabel L.2 Data arus lampu TL

Ukuran Daya (Watt)	Kuat Arus Listrik (mA)			
	Fase 1	Fase 2	Fase 3	Arus Netral
10	170	180	175	75
20	270	290	285	80
30	440	480	460	170

Tabel L.3. Data arus lampu hemat energi (LHE)

Ukuran Daya (Watt)	Kuat Arus Listrik (mA)			
	Fase 1	Fase 2	Fase 3	Arus Netral
10	70	70	70	120
20	150	150	150	225,3
30	210	210	210	338,8

Tabel L.4. Data arus lampu LED

Ukuran Daya (Watt)	Kuat Arus Listrik (mA)			
	Fase 1	Fase 2	Fase 3	Arus Netral
10	70	70	70	145
2 x 10	165	165	165	227,6
3 x 10	230	230	230	339,5



Gambar L.1. Tegangan fase 1 – netral



Gambar L.2. Tegangan fase 2 – netral



Gambar L.3. Tegangan fase 3 – netral



Gambar L.4. Pengujian lampu pijar 10 Watt



Gambar L.5. Arus fase lampu pijar 10 Watt



Gambar L.6. Pengujian lampu pijar 20 Watt



Gambar L.7. Arus fase lampu pijar 20 Watt



Gambar L.8. Pengujian lampu pijar 30 Watt



Gambar L.9. Arus fase lampu pijar 30 Watt



Gambar L.10. Arus netral lampu pijar 10, 20 dan 30 Watt



Gambar L.11. Pengujian lampu TL 10 Watt



Gambar L.12. Arus fase 1 lampu TL 10 Watt



Gambar L.13. Arus fase 2 lampu TL 10 Watt



Gambar L.14. Arus fase 3 lampu TL 10 Watt



Gambar L.15. Pengujian lampu TL 20 Watt



Gambar L.16. Arus fase1 lampu TL 20 Watt



Gambar L.17. Arus fase 2 lampu TL 20 Watt



Gambar L.18. Arus fase 3 lampu TL 20 Watt



Gambar L.19. Pengujian lampu TL 30 Watt



Gambar L.20. Arus fase 1 lampu TL 30 Watt



Gambar L.21. Arus fase 2 lampu TL 30 Watt

Gambar L.22. Arus fase 3 lampu TL 30 Watt



Gambar L.23. Arus netral lampu TL 10 Watt



Gambar L.24. Arus netral lampu TL 20 Watt



Gambar L. 25. Arus netral lampu TL 30 Watt



Gambar L.26. Pengujian lampu LHE 10 Watt



Gambar L.27. Arus fase lampu LHE 10 Watt



Gambar L.28. Pengujian LHE 20 Watt



Gambar L.29. Arus fase lampu LHE 20 Watt



Gambar L.30. Pengujian lampu LHE 30 Watt



Gambar L.31. Arus fase lampu LHE 30 Watt



Gambar L.32. Arus netral lampu LHE 10 Watt



Gambar L.33. Arus netral lampu LHE 20 Watt



Gambar L.34. Arus netral lampu LHE 30 Watt



Gambar L.35. Pengujian lampu LED 10 Watt



Gambar L.36. Arus fase lampu LED 10 Watt



Gambar L.37. Pengujian lampu LED 20 Watt



Gambar L.38. Arus fase lampu LED 20 Watt



Gambar L.39. Pengujian lampu LED 30 Watt



Gambarr L.40. Arus fase lampu LED 30 Watt



Gambar L.41. Arus netral lampu LED 10 Watt

Gambar L.42. Arus netral lampu LED 20 Watt



Gambar L.43. Arus netral lampu LED 30 Watt



Gambar L.44. Lampu pijar 10 Watt, LHE 5 dan 20 Watt, LED 10 Watt



Gambar L.45. Lampu TL 10 dan 20 Watt