



TUGAS AKHIR - EE 184801

**DESAIN DAN IMPLEMENTASI FILTER PASIF LC PENALAN
TUNGGAL UNTUK APLIKASI DI TEGANGAN RENDAH**

**Ni Putu Devi Ariana Swadaya
NRP 0711154000012**

**Dosen Pembimbing
Dedet Candra Riawan, S.T., M.Eng., Ph.D.
Dr. Ir. Soedibyo, M.MT.**

**DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO
Falkutas Teknologi Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2019**



TUGAS AKHIR - EE 184801

**DESAIN DAN IMPLEMENTASI FILTER PASIF LC
PENALAN TUNGGAL UNTUK APLIKASI DI TEGANGAN
RENDAH**

Ni Putu Devi Ariana Swadaya
NRP 0711154000012

Dosen Pembimbing
Dedet Candra Riawan, S.T., M.Eng., Ph.D.
Dr. Ir. Soedibyo, M.MT.

DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO
Fakultas Teknologi Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2019



FINAL PROJECT - EE 184801

**DESIGN AND IMPLEMENTATION OF SINGLE TUNED LC
PASSIVE FILTER FOR LOW VOLTAGE APPLICATIONS**

Ni Putu Devi Ariana Swadaya
NRP 0711154000012

Advisor

Dedet Candra Riawan, S.T., M.Eng., Ph.D.
Dr. Ir. Soedibyo, M.MT.

DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING
Faculty of Electrical Technology
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2019

PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR

Dengan ini saya menyatakan bahwa isi keseluruhan Tugas akhir saya dengan judul "**DESAIN DAN IMPLEMENTASI FILTER PASIF LC PENALAAAN TUNGGAL UNTUK APLIKASI DI TEGANGAN RENDAH**" adalah benar-benar hasil karya intelektual mandiri, diselesaikan tanpa menggunakan bahan-bahan yang tidak diijinkan dan bukan merupakan karya pihak lain yang saya akui sebagai karya sendiri.

Semua referensi yang dikutip maupun dirujuk telah ditulis secara lengkap pada daftar pustaka.

Apabila ternyata pernyataan ini tidak benar, saya bersedia menerima sanksi sesuai peraturan yang berlaku.

Surabaya, Juli 2019



Ni Putu Devi Ariana Swadaya
0711154000012

Halaman ini sengaja dikosongkan

**DESAIN DAN IMPLEMENTASI FILTER PASIF LC
PENALAN TUNGGAL UNTUK APLIKASI DI
TEGANGAN RENDAH**

TUGAS AKHIR

**Diajukan Guna Memenuhi Sebagian Persyaratan Untuk Memperoleh
Gelara Sarjana Teknik
Pada Bidang Studi Sistem Tenaga
Departemen Teknik Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember**

Menyetujui :

Dosen Pembimbing I

Dosen Pembimbing II



Dedet C. Riawan, S.T., M.Eng., Ph.D.
NIP. 19731119 200003 1 001

Dr. Ir. Soedibyo, M.MT.
NIP. 19551207 198003 1 004



Halaman ini sengaja dikosongkan

DESAIN DAN IMPLEMENTASI FILTER PASIF LC PENALAAAN TUNGGAL UNTUK APLIKASI DI TEGANGAN RENDAH

Nama : Ni Putu Devi Ariana Swadaya
Pembimbing I : Dedet Candra Riawan, ST. M.Eng. Ph.D.
Pembimbing II : Dr. Ir. Soedibyo, M.MT.

ABSTRAK

Hampir semua beban yang terpasang di sistem kelistrikan berada pada level tegangan rendah. Penggunaan elektronika daya mengakibatkan memburuknya bentuk gelombang tegangan dan arus di sistem. Hingga saat ini, jumlah beban non linier yang terpasang semakin meningkat, dan beban non linier umumnya menghasilkan harmonisa, dimana bentuk gelombang tegangan dan arus mengalami distorsi dan menghasilkan resonansi. Hingga saat ini, solusi yang paling efektif dalam mengatasi masalah harmonisa adalah dengan memasang filter pasif LC. Memasang filter pasif dekat dengan beban diyakini dapat mengurangi harmonisa yang ditimbulkan oleh beban non linier. Hal ini perlu adanya penelitian terkait implementasi dari filter pasif penalaan tunggal itu sendiri. Pada penelitian kali ini, akan dirancang desain dari filter pasif LC penalaan tunggal yang sesuai dengan kondisi gangguan harmonisa yang paling umum ditemukan di sistem kelistrikan, serta mempertimbangkan parameter penggunaan kapasitor dan konduktor terhadap banyaknya produk kapasitor dan konduktor yang banyak tersebar di pasaran. Dari hasil penelitian implementasi filter pasif LC penalaan tunggal, filter pasif dapat mereduksi harmonisa sesuai dengan desain orde harmonisa masing-masing filter pasif tersebut.

Kata kunci: Filter pasif, gangguan harmonisa, tegangan rendah

Halaman ini sengaja dikosongkan

DESIGN AND IMPLEMENTATION OF SINGLE TUNED LC PASSIVE FILTER FOR LOW VOLTAGE APPLICATIONS

Name : Ni Putu Devi Ariana Swadaya
1st Advisor : Dedet Candra Riawan, ST. M.Eng. Ph.D.
2nd Advisor : Dr. Ir. Soedibyo, M.MT.

ABSTRACT

Almost all loads installed in the electrical system are at low voltage levels. The use of power electronics results in deteriorating voltage and current waveforms in the system. Until now, the number of non-linear loads installed is increasing, and non-linear loads generally produce harmonics, where voltage and current waveforms are distorted and produce resonance. Until now, the most effective solution to overcome harmonic problems is to install a passive LC filter. Installing passive filters close to the load is believed to reduce harmonics caused by non-linear loads. This is necessary for research related to the implementation of the single-tuning passive filter itself. In this study, the design of a single-tuned LC passive filter that is in accordance with the most common harmonic interference conditions found in electrical systems will be designed, and considers the parameters of the use of capacitors and conductors on the many products of capacitors and conductors that are widely spread on the market. From the results of research on the implementation of a single tuning LC passive filter, a passive filter can reduce harmonics according to the harmonic order design of each of the passive filters.

Keywords: Passive filter, harmonic interference, low voltage

Halaman ini sengaja dikosongkan

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kehadiran Tuhan Yang Maha Esa atas segala rahmat karunia, petunjuk, serta kelancaran yang telah dilimpahkan-Nya sehingga penulis mampu menyelesaikan tugas akhir dengan judul “**DESAIN DAN IMPLEMENTASI FILTER PASIF LC PENALAN TUNGGAL UNTUK APLIKASI DI TEGANGAN RENDAH**”.

Tugas Akhir ini disusun sebagai salah satu persyaratan untuk menyelesaikan jenjang pendidikan S1 pada Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga, Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember. Atas selesainya penyusunan tugas akhir ini, penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Tuhan Yang Maha Esa atas limpahan rahmat karunia, petunjuk dan kelancaran selama pengerjaan buku tugas akhir ini.
2. Ayah, Ibu dan Adik penulis atas doa dan cinta yang tidak henti pada penulis dalam kondisi dan keadaan apapun. Semoga Tuhan Yang Maha Esa melindungi dan melancarkan selalu jalan mereka.
3. Bapak Dedet C. Riawan, ST. M.Eng. Ph.D. dan Bapak Dr. Ir. Soedibyo, M.MT. selaku dosen pembimbing yang telah memberikan arahan, bimbingan dan perhatiannya selama proses pengerjaan tugas akhir ini.
4. Bapak Bimo selaku direktur PT Trimitra Buana Engineering selaku pihak yang bekerja sama selama proses pengerjaan tugas akhir ini.
5. Seluruh dosen dan karyawan Departemen Teknik Elektro ITS yang telah memberkan banyak ilmu dan menciptakan suasana belajar yang luar biasa.
6. Teman-teman keluarga Laboratorium Konversi Energi Listrik 2015 yang telah memberi dukungan dan banyak membantu dalam proses pengerjaan tugas akhir.
7. Teman-teman keluarga Departemen Lingkar Kampus HIMATEKTRO ITS yang senantiasa membantu dan memberi dukungan moral selama proses pengerjaan tugas akhir.
8. Teman-teman saya Kiki, Divyah, dan masih banyak lagi yang tidak bisa saya sebutkan yang sudah membantu saya dalam bentuk dukungan moral selama proses pengerjaan tugas akhir.

9. Teman-teman seperjuangan e55 yang telah menemani dan memberikan dukungan selama masa kuliah sampai penyusunan tugas akhir ini.

Penulis telah berusaha maksimal dalam penyusunan tugas akhir ini. Namun tetap besar harapan penulis untuk menerima saran dan kritik untuk perbaikan dan pengembangan tugas akhir ini. Semoga tugas akhir ini dapat memberikan manfaat yang luas.

Surabaya, Juli 2019

Penulis

DAFTAR ISI

PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR	i
LEMBAR PENGESAHAN	iii
ABSTRAK	v
ABSTRACT	vii
KATA PENGANTAR	ix
DAFTAR ISI	xi
DAFTAR GAMBAR	xiv
DAFTAR TABEL	xix
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Perumusan Masalah.....	2
1.3. Batasan Masalah.....	2
1.4. Tujuan.....	3
1.5. Metodologi.....	3
1.6. Sistematika.....	5
1.7. Relevansi.....	6
BAB 2 HARMONISA DAN FILTER PASIF LC PENALAAAN TUNGGAL	7
2.1. Harmonisa	7
2.1.1. Pengertian Harmonisa	7
2.1.2. Analisis Harmonisa dengan Metode Fourier	13
2.1.3. Sumber Harmonisa	15
2.1.3.1. Konverter.....	16
2.1.3.2. Mesin-mesin berputar.....	16
2.1.3.3. Lampu Flourescent.....	17
2.1.4. Indeks Harmonisa.....	17
2.1.4.1. Individual Harmonic Distortion (IHD)	17
2.1.4.2. Total Harmonic Distortion (THD)	18
2.1.4.3. TDD (Total Demand Distortion)	18
2.1.5. Batas Distorsi Harmonisa	18
2.1.6. Pengaruh dari Harmonisa	20
2.1.6.1. Resonansi.....	20
2.1.6.2. Pengaruh pada mesin-mesin berputar	21
2.1.6.3. Pengaruh pada Transformator.....	21
2.1.6.4. Pengaruh pada relay pengaman	21
2.2. Filter Pasif Harmonisa	22

2.2.1.	Macam-Macam Topologi dari Filter Pasif Harmonisa ...	23
2.2.2.	Filter Pasif Penalaan Tunggal (<i>Single Tuned Passive Filter</i>)	24
2.2.3.	Batas Komponen Filter	29

BAB 3 DESAIN, SIMULASI DAN IMPLEMENTASI FILTER

PASIF LC PENALAAN TUNGGAL.....31

3.1.	Diagram Blok Sistem	31
3.2.	Studi Kasus Hasil Pengukuran Harmonisa suatu sistem kelistrikan	32
3.3.	Desain Filter Pasif LC Penalaan Tunggal	34
3.3.1.	Penentuan Nilai <i>Capacitor Bank</i>	34
3.3.2.	Penentuan Nilai Induktor.....	36
3.4.	Simulasi Kerja Filter Pasif.....	39
3.4.1.	Simulasi Kerja Sistem Sebelum Penggunaan Filter Pasif Pada Sistem Tiga Fasa	40
3.4.2.	Simulasi Kerja Sistem Sesudah Penggunaan Filter Pasif Pada Sistem Tiga Fasa	42
3.4.3.	Simulasi Karakteristik Kerja Filter Pasif	47
3.5.	Implementasi Filter Pasif LC Penalaan Tunggal	50
3.5.1.	Nilai R_{DC} Induktor Aktual	50
3.5.2.	Besar Arus yang Melewati Filter Pasif	52
3.5.3.	Rugi-rugi Daya Terserap oleh Filter Pasif	54
3.5.4.	Perbandingan Antara Kondisi Aktual dan Kondisi Simulasi Kurva Karakteristik Kerja Filter.....	54

BAB 4 PENGUJIAN DAN ANALISIS59

4.1.	Pengujian tanpa Filter Pasif	60
4.2.	Pengujian dengan Filter Pasif Orde Harmonisa ke lima	62
4.3.	Pengujian dengan Filter Pasif Orde Harmonisa ke tujuh	65
4.4.	Pengujian dengan Filter Pasif Orde Harmonisa ke sebelas	67
4.5.	Pengujian Rugi-Rugi Daya yang Terserap Filter.....	70
4.5.1.	Filter Pasif Orde Harmonisa ke lima.....	71
4.5.2.	Filter Pasif Orde Harmonisa ke tujuh	73
4.5.3.	Filter Pasif Orde Harmonisa ke sebelas	75
4.5.4.	Analisis Perbedaan antara Daya Aktif Hasil Perhitungan dengan Hasil Pengukuran.....	78

BAB 5 KESIMPULAN	83
5.1. Kesimpulan	83
5.2. Saran	83
DAFTAR PUSTAKA	85
LAMPIRAN	87
BIODATA PENULIS	95

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Proses Terbentuknya Gelombang yang terdistorsi.....	8
Gambar 2.2	Rangkaian Sederhana Pengganti Jaringan Sistem Tenaga Listrik	8
Gambar 2.3	Rangkaian Pengganti Jaringan Sistem Tenaga Listrik Saat Proses Analisis Gangguan Harmonisa	9
Gambar 2.4	Komponen Urutan Positif	11
Gambar 2.5	Komponen Urutan Negatif.....	12
Gambar 2.6	Komponen Urutan Nol	12
Gambar 2.7	Distorsi gelombang yang direpresentasikan oleh persamaan Fourier	14
Gambar 2.8.	Topologi dari tuned filter	23
Gambar 2.9.	Topologi dari high pass filter	23
Gambar 2.10.	(a) Rangkaian Filter Pasif Penalaan Tunggal, (b) Grafik karakteristik impedansi terhadap frekuensi penalaan	24
Gambar 2.11.	Ilustrasi dari persamaan Wheeler (1928)	28
Gambar 3.1.	Diagram Blok Terbentuknya Harmonisa dalam Sistem	31
Gambar 3.2	Pengukuran Daya	32
Gambar 3.3	Pengukuran Harmonisa Arus	33
Gambar 3.4	Pengukuran Harmonisa Tegangan	33
Gambar 3.5	Spesifikasi dari <i>capacitor bank</i> (a) 77 μ F (b) 62 μ F	34
Gambar 3.6	Gambaran Dimensi dari Induktor.....	38
Gambar 3.7	Rangkaian simulasi gangguan harmonisa suatu sistem kelistrikan.....	41
Gambar 3.8.	Simulasi sistem tanpa filter pasif (a) Bentuk Gelombang Arus, (b) Spektrum Harmonisa Arus	42
Gambar 3.9	Simulasi sistem tanpa filter pasif (a) Bentuk GelombangTegangan, (b) Spektrum Harmonisa Tegangan.....	43
Gambar 3.10.	Simulasi sistem dengan pemasangan filter pasif orde kelima (a) Bentuk Gelombang Arus, (b) Spektrum Harmonisa Arus	44

Gambar 3.11.	Simulasi sistem dengan pemasangan filter pasif orde ketujuh (a) Bentuk Gelombang Arus, (b) Spektrum Harmonisa Arus	45
Gambar 3.12.	Simulasi sistem dengan pemasangan filter pasif orde kelima (a) Bentuk Gelombang Arus, (b) Spektrum Harmonisa Arus	46
Gambar 3.13.	Simulasi sistem dengan pemasangan filter pasif orde kelima (a) Bentuk Gelombang Arus, (b) Spektrum Harmonisa Arus	47
Gambar 3.14	Kurva Karakteristik Kerja Filter Pasif Orde Harmonisa ke lima	49
Gambar 3.15	Kurva Karakteristik Kerja Filter Pasif Orde Harmonisa ke tujuh	49
Gambar 3.16	Kurva Karakteristik Kerja Filter Pasif Orde Harmonisa ke sebelas	50
Gambar 3.17	Kurva Karakteristik Kerja Filter Pasif Orde Harmonisa ke lima, tujuh dan sebelas secara bersamaan	50
Gambar 3.18	Rangkaian Filter Pasif LC Penalaan Tunggal	50
Gambar 3.19	Proses pengujian untuk mendapatkan nilai R_{DC} induktor	51
Gambar 3.20	Kurva perbedaan karakteristik kerja Filter Pasif Orde Harmonisa ke lima antara kondisi simulasi dan Aktual	55
Gambar 3.21	Kurva perbedaan karakteristik kerja Filter Pasif Orde Harmonisa ke tujuh antara kondisi simulasi dan aktual	56
Gambar 3.22	Kurva perbedaan karakteristik kerja Filter Pasif Orde Harmonisa ke sebelas antara kondisi simulasi dan aktual	56
Gambar.3.23	Kurva perbedaan karakteristik kerja Filter Pasif secara keseluruhan antara kondisi simulasi dan aktual.....	57
Gambar 3.24	Rangkaian Implementasi Filter Pasif LC Penalaan Tunggal.....	58
Gambar 4.1.	Pengujian Alat Tugas Akhir	59
Gambar 4.2.	Skema pengujian filter pasif LC penalaan tunggal	60

Gambar 4.3.	Hasil Pengukuran Arus dan Tegangan untuk Pengujian Sistem Tanpa Filter Pasif.....	61
Gambar 4.4.	Hasil Pengukuran Daya untuk Pengujian Sistem Tanpa Filter Pasif.....	61
Gambar 4.5.	Spektrum Harmonisa Hasil Pengujian Sistem Tanpa Filter Pasif.....	62
Gambar 4.6.	Hasil Pengukuran Arus dan Tegangan untuk Pengujian Sistem dengan Filter Pasif Orde Harmonisa ke lima	63
Gambar 4.7.	Hasil Pengukuran Daya untuk Pengujian Sistem dengan Filter Pasif Orde Harmonisa ke lima	63
Gambar 4.8.	Spektrum Harmonisa Filter Pasif Orde Harmonisa ke lima	64
Gambar 4.9.	Hasil Pengukuran Arus dan Tegangan untuk Pengujian Sistem dengan Filter Pasif Orde Harmonisa ke tujuh ...	65
Gambar 4.10.	Hasil Pengukuran Daya untuk Pengujian Sistem dengan Filter Pasif Orde Harmonisa ke tujuh.....	66
Gambar 4.11.	Spektrum Harmonisa Filter Pasif Orde Harmonisa ke tujuh.....	67
Gambar 4.12.	Hasil Pengukuran Arus dan Tegangan untuk Pengujian Sistem dengan Filter Pasif Orde Harmonisa ke sebelas	68
Gambar 4.13.	Hasil Pengukuran Daya untuk Pengujian Sistem dengan Filter Pasif Orde Harmonisa ke sebelas.....	68
Gambar 4.14.	Spektrum Harmonisa Filter Pasif Orde Harmonisa ke sebelas.....	69
Gambar 4.15.	Hasil Pengukuran Daya untuk Pengujian Rugi-rugi daya yang terserap filter untuk filter orde harmonisa ke lima	71
Gambar 4.16.	Hasil Pengukuran Arus dan Tegangan untuk Pengujian Rugi-rugi daya yang terserap filter untuk filter orde harmonisa ke lima	72
Gambar 4.17.	Spektrum Harmonisa Filter Pasif Orde Harmonisa ke lima	72
Gambar 4.18.	Hasil Pengukuran Daya Pengujian Rugi-rugi daya yang terserap filter untuk filter orde harmonisa ke tujuh.....	73

Gambar 4.19.	Hasil Pengukuran Arus dan Tegangan Pengujian Rugi-rugi daya yang terserap filter untuk filter orde harmonisa ke tujuh.....	74
Gambar 4.20.	Spektrum Harmonisa Filter Pasif Orde Harmonisa ke lima.....	74
Gambar 4.21.	Hasil Pengukuran Daya untuk Pengujian Rugi-rugi daya yang terserap filter untuk filter orde harmonisa ke sebelas.....	75
Gambar 4.22.	Hasil Pengukuran Arus dan Tegangan untuk Pengujian Rugi-rugi daya yang terserap filter untuk filter orde harmonisa ke sebelas.....	76
Gambar 4.23.	Spektrum Harmonisa Filter Pasif Orde Harmonisa ke sebelas	76

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Urutan fasa harmonisa	12
Tabel 2.2	Batas distorsi tegangan menurut standar IEEE 519-2014	18
Tabel 2.3	Maksimum distorsi arus berdasarkan IEEE Std 519-2014 untuk sistem 120 V sampai 69 kV	19
Tabel 2.4	Maksimum distorsi arus berdasarkan IEEE Std 519-2014 untuk sistem 69 kV sampai 161 kV	19
Tabel 2.5	Maksimum distorsi arus berdasarkan IEEE Std 519-1992 untuk sistem diatas 161 kV.....	20
Tabel 3.1.	Spesifikasi dari <i>Capacitor Bank</i>	31
Tabel 3.2	Rincian Dimensi dari Induktor untuk orde harmonisa ke tujuh.....	36
Tabel 3.3.	Nilai Resistansi DC hasil simulasi, banyaknya belitan gulungan kawat, dan banyaknya <i>layer</i> untuk satu induktor	37
Tabel 3.4.	Hasil pengukuran pengujian dengan sumber DC	51
Tabel 3.5.	Perbandingan Nilai resistansi antara simulasi dan hasil pengukuran	51
Tabel 3.6	Perbedaan nilai induktansi dan kapasitansi kondisi aktual terhadap kondisi simulasi	55
Tabel 3.7	Perbandingan Faktor Kualitas	57
Tabel 4.1.	Perbandingan hasil pengukuran sebelum dan setelah penggunaan filter pasif.....	70
Tabel 4.2.	Perbandingan hasil perhitungan dan pengukuran daya aktif yang terserap filter serta daya reaktif yang terukur di sistem	77
Tabel 4.3.	Hasil Pengukuran Filter Pasif Penalaan Tunggal	79
Tabel 4.4	Perbandingan hasil rugi-rugi daya perhitungan dan pengukuran	81

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1.Latar Belakang

Hampir semua beban yang terpasang di sistem kelistrikan berada pada level tegangan rendah. Beban yang dimaksud adalah beban yang biasa dipasang oleh pelanggan rumah tangga, seperti kulkas, mesin cuci, dan pendingin ruangan. Selain beban yang disebutkan, elektronika daya mulai digunakan oleh pelanggan rumah tangga. Semakin meningkatnya penggunaan peralatan elektronika daya seperti konverter, tidak hanya di industri, tetapi juga di pelanggan. Penggunaan elektronika daya mengakibatkan memburuknya bentuk gelombang tegangan dan arus di sistem. Permasalahan tersebut dipengaruhi oleh banyak faktor, salah satunya adalah peningkatan jumlah beban non linier yang terpasang.[1] Hingga saat ini, jumlah beban non linier yang terpasang semakin meningkat, dan beban non linier umumnya menghasilkan harmonisa, dimana bentuk gelombang tegangan dan arus mengalami distorsi dan menghasilkan resonansi. Dampak yang ditimbulkan dari harmonisa adalah rugi-rugi pada sistem semakin meningkat, memperpendek umur penggunaan dari peralatan tersebut, serta berdampak pada kinerja motor induksi, transformator, dan kabel.[2]

Hingga saat ini, solusi yang paling efektif dalam mengatasi masalah harmonisa adalah dengan memasang filter pasif LC. Memasang filter pasif dekat dengan beban diyakini dapat mengurangi harmonisa yang ditimbulkan oleh beban non linier. Apabila filter pasif dipasang langsung dekat dengan beban non linier dapat mengurangi arus yang terdistorsi akibat beban non linier, menjaga agar arus yang dialirkan dari sumber tetap berbentuk sinusoidal murni, serta dapat melindungi peralatan listrik lainnya yang membutuhkan sumber arus dan tegangan dengan gelombang sinusoidal murni.[1] Namun, setiap beban non linier memiliki karakteristik harmonisanya masing-masing, sehingga filter pasif yang akan dipakai akan berbeda sesuai dengan beban non liniernya. Dengan perbedaan karakteristik harmonisa, tentu tingkat ketelitian dari nilai L dan C yang digunakan pada filter pasif akan sangat diperhatikan, dikarenakan tingkat ketelitian dari nilai L dan C sangat mempengaruhi filter pasif dalam memotong frekuensi resonansi yang diinginkan secara akurat.

Oleh karena itu, diperlukan adanya implementasi filter pasif dengan tingkat keakuratan dalam meyaring frekuensi resonansi sesuai dengan kebutuhan. Pada penelitian ini, filter pasif yang akan didesain dan diimplementasikan adalah filter pasif dengan bentuk topologi tipe penalaan tunggal, dan pengaruh keakuratan nilai L dan C terhadap pemotongan frekuensi resonansi serta pengaruh besar kompensasi daya reaktif terhadap tingkat keakuratan filter pasif bekerja akan diteliti lebih lanjut pada penelitian ini.

1.2.Perumusan Masalah

Beban non-linier mengakibatkan adanya harmonisa, dimana harmonisa mengakibatkan bentuk gelombang arus dan tegangan yang terdistorsi, menghasilkan resonansi, baik resonansi seri maupun paralel. Pengaruh dari harmonisa sangat berdampak pada kerja dari peralatan listrik, salah satunya motor induksi. Banyaknya motor induksi yang terpasang di level tegangan rendah akan mengganggu kinerja dari motor induksi dan dapat memperpendek umur pemakaian dari motor induksi itu sendiri apabila disuplai arus dan tegangan yang mengalami harmonisa.

Selain permasalahan harmonisa, tingkat keakuratan filter pasif dalam memotong frekuensi resonansi yang dibutuhkan menjadi permasalahan yang masih dikaji hingga saat ini. Kekurangan dari penggunaan filter pasif dengan nilai L dan C yang tidak sesuai akan mengakibatkan pemotongan frekuensi resonansi yang tidak sesuai dengan yang diinginkan, melainkan terjadi pergeseran pemotongan frekuensi resonansi. Penggunaan nilai L dan C yang perlu mempertimbangkan komponen yang tersebar umum di pasaran juga masih menjadi masalah, dikarenakan beberapa komponen seperti kapasitor tidak tersedia banyak di pasaran, sehingga selama proses desain dan implementasi perlu mempertimbangkan ketersediaan komponen di pasar.

1.3.Batasan Masalah

Batasan masalah yang akan dibahas pada penelitian ini yaitu:

1. Menentukan besar nilai kapasitansi berdasarkan nilai kapasitor yang umum tersebar di pasaran.

2. Mendesain filter pasif berdasarkan nilai kapasitor satu fasa yang tersebar di pasaran dan penggunaan kawat tembaga yang banyak tersebar di pasaran.
3. Penelitian ini menggunakan aplikasi sistem tegangan rendah (220-380 V).
4. Pengujian hasil implementasi dilakukan pada tegangan 20-30 V.
5. Implementasi dilakukan dalam sistem satu fasa.
6. Dalam penelitian ini, tidak dilakukan identifikasi karakteristik harmonisa yang dibangkitkan.
7. Menentukan besar dimensi induktansi dari filter pasif yang sesuai dengan dimensi LV panel yang umum dipakai di industri.
8. Verifikasi rancangan filter pasif harmonisa dengan *software* ETAP 12.6

1.4.Tujuan

Tujuan dari penelitian ini adalah:

1. Dapat menghasilkan Filter Pasif *Single Tuned* dengan akurasi nilai LC yang presisi dengan menggunakan komponen yang tersebar luas di pasaran.
2. Dapat menghasilkan filter pasif LC penalaan tunggal dengan nilai kompensasi daya reaktif yang telah ditetapkan.
3. Mendapatkan nilai L dan C yang presisi bagi Filter Pasif *Single Tuned* agar dapat bekerja secara optimal.

1.5.Metodologi

Metodologi yang digunakan pada penelitian ini adalah:

1. Studi Literatur
Pada tahap ini, akan dipelajari materi yang berkaitan dengan harmonisa, indeks harmonisa (THD_v, THD_i), harmonisa yang disebabkan oleh beban non linier dan mempelajari prinsip kerja dari filter pasif dan filter pasif tipe Penalaan Tunggal (Single Tuned Filter).
2. Pembuatan Simulasi dan Desain Alat
Pada tahap ini dilakukan perhitungan harmonisa, perhitungan nilai kapasitor dan induktor yang dibutuhkan sesuai dengan teori.

Setelah mendapatkan nilai kapasitor dan induktor yang dibutuhkan, maka dapat melakukan perancangan filter pasif. Dilakukan analisa perhitungan pengaruh pemasangan filter pasif pada sistem. Setelah dilakukan perhitungan dan perancangan filter pasif, dilakukan simulasi sebelum dan sesudah diberi filter pasif. Perancangan dari filter pasif menggunakan metode *multilayer coil*, dengan menggunakan *software* ETAP untuk mensimulasikan keadaan sistem sebelum dan sesudah dipasangkan filter.

3. Pengimplementasian Alat

Pada tahap ini dilakukan pembuatan Filter pasif Penalaan Tunggal berdasarkan desain yang telah dibuat. Pembuatan terdiri dari dua tahap, yaitu pencarian nilai kapasitor dan induktor yang akurat untuk memotong harmonisa. Kedua, setelah nilai kapasitor dan induktor yang dibutuhkan telah didapatkan, maka akan dibuat induktor dengan nilai induktansi yang sesuai dengan menggunakan metode *one layer coil with close winding*. Akurasi nilai dari kapasitor dan induktor sangat dibutuhkan agar dapat memotong orde harmonisa yang sesuai dengan yang diinginkan.

4. Pengujian Alat

Proses pengujian alat dilakukan untuk mengukur kinerja alat yang telah dibuat. Akan diuji alat Single Tuned Filter dengan tegangan dan frekuensi langsung dari jala-jala PLN. Parameter yang diukur adalah arus dan tegangan yang keluar dari filter serta gelombang penalaan filter. Hasil yang didapatkan dari pengujian alat akan dibandingkan dengan hasil simulasi.

5. Analisa Data

Setelah pengujian telah selesai dilakukan maka akan dilakukan analisa terhadap data data yang telah didapat. Akan dianalisa pengaruh dari akurasi nilai induktor dan kapasitor terhadap pemotongan orde harmonisa, serta akan dianalisa pengaruh sebelum dan setelah filter diberikan terhadap kinerja beban.

6. Penulisan Buku Tugas Akhir

Penulisan buku dilakukan sebagai penggambaran kesimpulan dari tugas akhir ini. Kesimpulan tersebut membahas tentang harmonisa akibat beban non linier yang terpasang di level tegangan rendah, serta pengaruh dari filter pasif baik dari simulasi maupun dari implementasi alat

1.6.Sistematika

Sistematika penulisan dalam penelitian ini terdiri dari lima bab yang berisi tentang:

BAB I : PENDAHULUAN

Pada bab I ini merupakan bagian pendahuluan dari Tugas Akhir. Pada bagian ini akan dijelaskan mengenai latar belakang, perumusan masalah, tujuan, metodologi, sistematika, serta relevansi atau manfaat dari penulisan tugas akhir.

BAB II : DASAR TEORI

Pada bab II akan membahas tentang definisi dari harmonisa, pengaruh harmonisa terhadap peralatan listrik, sumber harmonisa, dan desain dari filter pasif penalaan tunggal.

BAB III : RANCANGAN PEMODELAN DAN SIMULASI FILTER PASIF PENALAN TUNGGAL

Pada bab III akan membahas tentang pemodelan secara matematis, simulasi sistem di software (ETAP dan implementasi rangkaian filter pasif penalaan tunggal.

BAB IV : PENGUJIAN ALAT DAN ANALISA DATA

Pada bab IV akan membahas hasil pengujian dan analisa data pada sistem rangkaian filter pasif penalaan tunggal untuk suplai beban rectifier 3 fasa tersambung dengan beban RLC. Suplai sistem berasal dari tegangan AC jala-jala PLN 220V.

BAB V : PENUTUP

Pada bab V akan membahas mengenai kesimpulan dari analisis data yang telah dilakukan pada bab sebelumnya serta berisi saran untuk penelitian selanjutnya.

1.7.Relevansi

Penelitian tugas Akhir ini diharapkan dapat memberikan manfaat sebagai berikut:

1. Dapat digunakan sebagai referensi untuk penelitian dan pengembangan dalam penggunaan filter pasif penalaan tunggal untuk sistem kelistrikan tegangan rendah.
2. Dapat menjadi referensi implementasi model sistem serta analisis secara matematis harmonisa pada sistem kelistrikan, baik di sistem tegangan rendah maupun tegangan tinggi untuk penelitian selanjutnya.

BAB 2

HARMONISA DAN FILTER PASIF LC PENALAAAN TUNGGAL

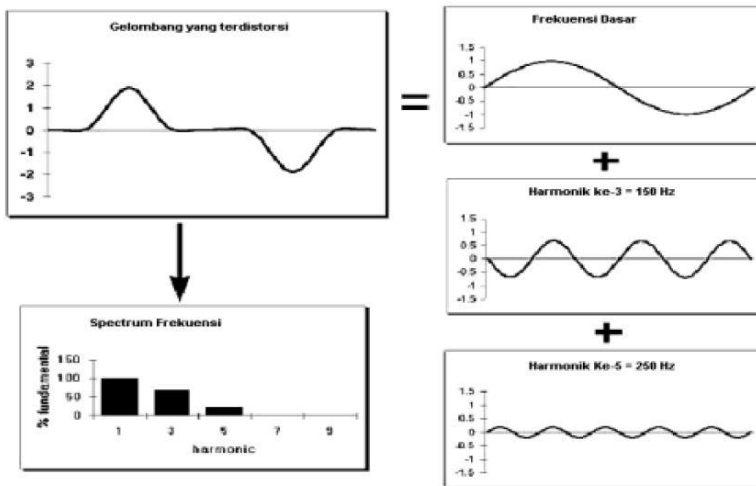
2.1.Harmonisa

Sistem kelistrikan didesain mampu bekerja tidak hanya pada sistem yang menggunakan arus dan tegangan dengan bentuk sinusoidal murni, melainkan juga dengan beban nonlinear dan beban dengan penggunaan perangkat elektronik untuk proses penyetelannya. Namun, dalam proses pendistribusian tenaga listrik, terjadi berbagai gangguan sehingga bentuk gelombang yang didistribusikan tidak lagi berbentuk sinusoidal, dan hal ini umum terjadi pada sistem kelistrikan dengan penggunaan peralatan elektronika daya. Terjadinya peningkatan dalam penggunaan beban jenis elektronik tersebut selama beberapa waktu dan hal ini dapat menimbulkan polusi harmonisa, bentuk gelombang arus dan tegangan yang terdistorsi, menimbulkan resonansi, peningkatan di rugi-rugi sistem, dan menurunkan jangka pemakaian dari peralatan tertentu. [2] Hal ini merupakan salah satu permasalahan yang perlu dipahami, dikarenakan permasalahan harmonisa dalam sistem tenaga listrik berdampak pada kualitas daya dari suatu sistem.

2.1.1.Pengertian Harmonisa

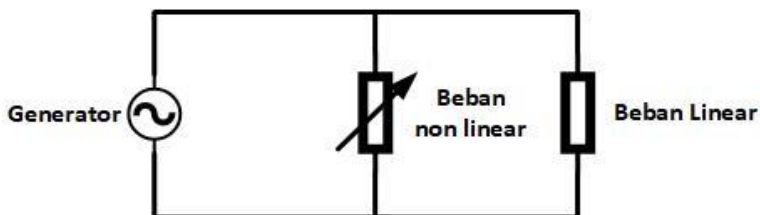
Semakin meningkatnya penggunaan beban nonlinear, maka semakin meningkat permasalahan mengenai harmonisa. Salah satu permasalahan yang paling umum ditemui pada sistem kelistrikan adalah permasalahan mengenai kualitas daya, dimana harmonisa berperan penting dalam permasalahan kualitas daya.[2]

Harmonisa merupakan sebuah fenomena terbentuknya gelombang sinusoidal tidak murni yang merupakan hasil perkalian dari bilangan bulat dengan frekuensi dasarnya. Apabila terjadi superposisi antar gelombang frekuensi dasar dengan gelombang frekuensi orde harmonisanya, maka proses tersebut akan membentuk gelombang yang terdistorsi, sehingga bentuk dari gelombang tidak lagi berbentuk sinusoidal murni.[3]



Gambar 2.1 Proses Terbentuknya Gelombang yang Terdistorsi [4]

Gambar 2.1 menunjukkan proses terbentuknya gelombang yang terdistorsi. Harmonisa yang timbul dalam sistem tenaga listrik dapat ditunjukkan dengan ilustrasi rangkaian listrik sederhana pada gambar 2.2. Rangkaian sederhana merupakan rangkaian Thevenin pengganti jaringan sistem tenaga listrik arus bolak balik (AC), dimana generator yang disimbolkan sebagai sumber tegangan AC sinusoidal, disimbolkan dengan E_S , Z_L merupakan impedansi dari beban linier dan Z_{NL} merupakan impedansi dari beban non linier.



Gambar 2.2 Rangkaian Sederhana Pengganti Jaringan Sistem Tenaga Listrik[5]

Dengan asumsi sumber tegangan AC sinusoidal atau generator pada gambar 2.2. sebagai E_s , proses terbentuk harmonisa dijelaskan dalam persamaan berikut:

$$E_s = E_m \sin n(\omega t) \quad (2.1)$$

Arus yang mengalir dalam sistem tenaga listrik yang diakibatkan oleh beban nonlinear ($i(t)$) merupakan penjumlahan dari arus frekuensi dasar dengan arus harmonisa yang ditunjukkan dalam persamaan berikut.

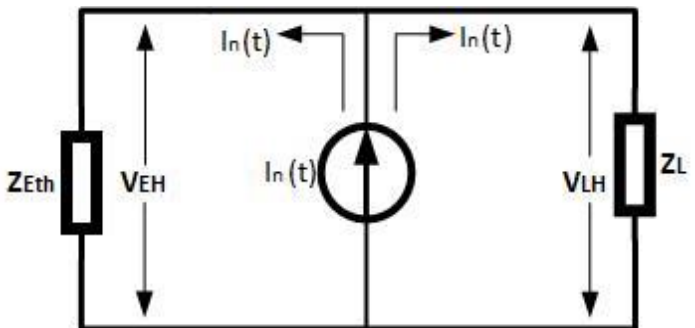
$$i(t) = \sum_{n=1}^{\infty} I_n \sin(\omega_n t + \phi_n) \quad (2.2)$$

Dengan keterangan sebagai berikut:

- n = orde harmonisa
- I_n = arus maksimum orde harmonisa ke- n
- ω_n = frekuensi sudut orde harmonisa ke- n
- t = waktu
- ϕ_n = pergeseran sudut fasa

Dengan asumsi bahwa E_s merupakan sumber tegangan AC yang belum terdapat gangguan harmonisa sehingga masih berbentuk gelombang sinusoidal murni, maka nilai E_s dalam analisis harmonisa bernilai sama dengan nol. Maka dari itu, arus harmonisa yang mengalir ($i_h(t)$) ditunjukkan pada persamaan berikut:

$$i_h(t) = \sum_{n=2}^{\infty} I_n \sin(\omega_n t + \phi_n) \quad (2.3)$$



Gambar 2.3 Rangkaian Pengganti Jaringan Sistem Tenaga Listrik Saat Proses Analisis Gangguan Harmonisa[6]

Dengan menggunakan hukum Kirchoff I untuk menganalisis gangguan harmonisa. Dengan asumsi arah aliran arus ($i_n(t)$) searah jarum jam, maka analisis dapat ditunjukkan dalam persamaan berikut.

Karena $i_n(t) = -i_h(t)$ maka

$$i_n(t) = -i_h(t) = -\sum_{n=2}^{\infty} I_n \sin(\omega_n t + \phi_n) \quad (2.4)$$

Sehingga untuk menganalisis tiap ordenya, nilai arus ditunjukkan dalam persamaan berikut.

$$i_n(t) = -I_n \sin(\omega_n t + \phi_n) \quad (2.5)$$

$$i_n(t) = I_n \sin(\omega_n t - (\phi_n + \pi)) \quad (2.6)$$

Dengan asumsi $\theta_n = \phi_n + \pi$ maka:

$$i_n(t) = I_n \sin(\omega_n t - \theta_n) \quad (2.7)$$

Dengan rangkaian pengganti tergambar seperti pada gambar (2.3) berikut.

Dalam proses terbentuknya harmonisa, arus yang terdistorsi akibat komponen harmonisa dari beban non linear akan berdampak pada tegangan, terutama pada tegangan sumber. Berdasarkan hukum Ohm, dapat dijelaskan efek dari arus harmonisa terhadap tegangan sumber maupun beban dalam persamaan berikut.

Harmonisa tegangan yang terjadi di sumber dijelaskan dalam persamaan (2.8) berikut.

$$V_{Eh} = I_n(t) \times Z_{Eth} \quad (2.8)$$

Dengan V_{Eh} sebagai tegangan sumber yang terdampak harmonisa, I_n merupakan arus harmonisa orde ke n dan Z_{Eth} merupakan impedansi pengganti dari sumber.

Harmonisa tegangan yang terjadi di beban dijelaskan dalam persamaan (2.9) berikut.

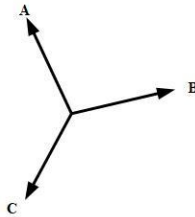
$$V_{Lh} = I_n(t) \times Z_L \quad (2.9)$$

Dengan V_{Lh} sebagai tegangan di sisi beban yang terdampak harmonisa, In merupakan arus harmonisa orde ke n dan Z_L merupakan impedansi dari beban.

Dalam sistem tiga fasa, harmonisa yang dihasilkan memiliki perbedaan dengan harmonisa yang dihasilkan dalam sistem satu fasa. Hal ini dikarenakan dalam sistem tiga fasa, beban non linear dalam sistem tiga fasa tidak menghasilkan komponen harmonisa orde ke tiga, dimana komponen harmonisa orde ke tiga merupakan komponen harmonisa dengan nilai terbesar dalam sistem [7]. Dalam analisis harmonisa sistem tiga fasa, proses analisis harmonisa ditinjau berdasarkan konsep komponen simetris. Pada sistem tiga fasa seimbang, arus dari sumber harmonisa pada sistem tiga fasa seimbang dapat dikelompokkan menurut arah putaran fasanya. Apabila urutan fasa diasumsikan dengan asumsi fasa A, B, dan C, dimana fasa A diasumsikan mendahului fasa B, dan fasa B diasumsikan mendahului fasa C. Dalam sistem asimetri, terdapat tiga jenis urutan fasa, yaitu:

1. Komponen urutan positif (positive sequence component)

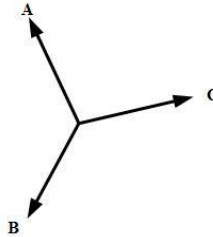
Komponen urutan positif merupakan komponen asimetri, dimana memiliki tiga fasor yang sama besarnya dan terpisah sejauh 120° , dan mempunyai urutan fasa yang sama dengan fasor aslinya.



Gambar 2.4 Komponen Urutan Positif

2. Komponen urutan negatif (negative sequence component)

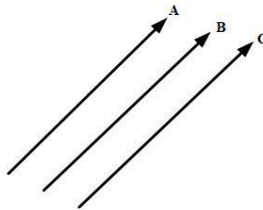
Komponen urutan negatif merupakan komponen asimetri, dimana memiliki tiga fasor yang sama besarnya dan terpisah sejauh 120° , namun memiliki urutan fasa yang berlawanan dengan fasor aslinya.



Gambar 2.5 Komponen Urutan Negatif

3. Komponen urutan nol (zero sequence component)

Komponen urutan nol merupakan komponen asimetri yang mempunyai tiga fasor dengan besar fasor sama besarnya, namun antara satu fasor dengan lainnya memiliki pergeseran fasa sebesar nol derajat.



Gambar 2.6 Komponen Urutan Nol

Komponen asimetri ini dapat terjadi pada tegangan dan arus. Apabila fasor dari komponen asimetri dianggap sebagai arus maka arus tersebut dapat dinyatakan I_A , I_B , dan I_C dengan label 1 untuk komponen urutan positif (I_{A1} , I_{B1} dan I_{C1}), label 2 untuk komponen urutan negatif (I_{A2} , I_{B2} , dan I_{C2}), dan label 0 untuk komponen urutan nol (I_{A0} , I_{B0} , dan I_{C0}).

Harmonisa juga memiliki urutan positif, urutan negatif dan nol. Urutan harmonisa tersebut dapat ditentukan dari hubungan fasor harmonisa, yang dimana hubungan fasor harmonisa dapat diekspresikan dalam persamaan berikut[5]:

$$i_{a(h)} = I_{a(h)} \times \sin(h)(\omega t) \quad (2.10)$$

$$i_{b(h)} = I_{b(h)} \times \sin(h)(\omega t - 120^\circ) \quad (2.11)$$

$$i_{c(h)} = I_{c(h)} \times \sin(h)(\omega t - 240^\circ) \quad (2.12)$$

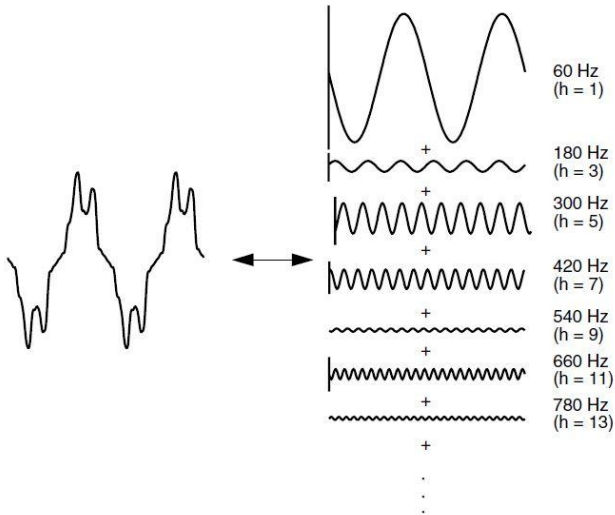
Dapat dilihat dari persamaan 2.10 hingga 2.12, arus maupun tegangan harmonisa berjarak 120° antar tiap fasanya. Urutan fasa tegangan maupun arus harmonisa dijelaskan dalam tabel 2.1. berikut. Komponen urutan nol dalam harmonisa dapat disebut sebagai orde triplen, komponen urutan positif dalam harmonisa dapat disebut sebagai orde ganjil dan komponen urutan negatif dalam harmonisa dapat disebut sebagai orde genap.

Tabel 2.1 Urutan fasa harmonisa [5]

Orde Harmonisa	Frekuensi (Hz)	Urutan
1	50	Positif
2	100	Negatif
3	150	Nol
4	200	Positif
5	250	Negatif
6	300	Nol
7	350	Positif
8	400	Negatif
9	450	Nol
10	500	Positif
11	550	Negatif

2.1.2. Analisis Harmonisa dengan Metode Fourier

Dalam menyelesaikan permasalahan harmonisa hingga saat ini transformasi Fourier masih banyak digunakan. Transformasi Fourier pertama kali diperkenalkan oleh ahli matematika dari Prancis, J. B. J. Fourier. Fourier menunjukkan dalam teorinya bahwa fungsi periodik dapat ditunjukkan sebagai frekuensi yang berkaitan secara selaras dan digambarkan dalam bentuk gelombang sinusoidal yang tidak terbatas. [2] Dalam teorinya, ditunjukkan sebagai penjumlahan dari komponen DC, komponen sinusoidal fundamentalnya, dan komponen sinusoidal tingkat tinggi—disebut harmonisa—yang merupakan kelipatan bilangan bulat dari frekuensi dasarnya mewakili fungsi kontinu yang berulang dalam interval T. [8] Gambar 2.7 menunjukkan gelombang yang terdistorsi yang direpresentasikan oleh persamaan Fourier. [9]



Gambar 2.7 Distorsi gelombang yang direpresentasikan oleh persamaan Fourier [9]

Menurut analisis Fourier, suatu fungsi periodik $x(t)$ dapat diuraikan menjadi fungsi sinusoidal dengan frekuensi, amplitudo, dan sudut fasa tertentu apabila memenuhi syarat berikut:

1. $x(t) = x(t + T)$, dimana T adalah periode
2. Pada selang periode tertentu, fungsi harus mempunyai harga rata-rata tertentu.
3. Jika k adalah bilangan integer, maka $x(t + kT) = x(t)$ untuk semua nilai t .
4. Jika dua fungsi $x_1(t)$ dan $x_2(t)$ mempunyai periode sama maka $x_3(t) = ax_1(t) + bx_2(t)$, dimana a dan b merupakan konstanta.
5. Dalam satu periode T , fungsi harus mempunyai harga maksimum atau minimum yang jumlahnya tertentu.

Persamaan Transformasi Fourier direpresentasikan sebagai $f(\omega t)$. Apabila syarat diatas telah terpenuhi, maka Persamaan Transformasi Fourier direpresentasikan dalam persamaan berikut. [10]

$$f(\omega t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos n\omega t + b_n \sin n\omega t) \quad (2.13)$$

Dengan keterangan:

$$a_0 = \frac{2}{T} \int_0^T f(\omega t) d(\omega t) \quad (2.14)$$

$$a_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(\omega t) \cos n\omega t d(\omega t) \quad (2.15)$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(\omega t) \sin n\omega t d(\omega t) \quad (2.16)$$

Dalam proses penyederhanaan analisis Fourier, dapat digunakan sifat-sifat khusus dari gelombang sebagai berikut: [10]

- a. Apabila dalam satu periode, luas siklus positif dan negatif sama, maka $a_0 = 0$
- b. Apabila fungsi mempunyai simetri pada setengah gelombang positif dan negatif, atau $f(\omega t) = -f(\omega t + T/2)$, maka dihasilkan harmonik orde ganjil.
- c. Apabila fungsi simetri terhadap sumbu y atau $f(\omega t) = -f(\omega t)$, maka $b_n = 0$
- d. Apabila fungsi simetri terhadap titik pusat O atau $-f(\omega t) = -f(\omega t)$, maka $a_n = 0$

Dengan menggunakan analisis fourier pada gelombang arus yang diserap oleh beban yang menimbulkan harmonisa, maka komponen harmonisa yang dibangkitkan dapat ditentukan.

2.1.3.Sumber Harmonisa

Harmonisa ditimbulkan akibat adanya penggunaan beban nonlinear, dimana karakteristik dari beban non linear adalah penerapan tegangan sinusoidal tidak menghasilkan aliran arus yang sinusoidal. Karakteristik lain dari beban non linear adalah beban non linear tidak menunjukkan impedansi yang konstan dalam selama siklus tegangan sinusoidal yang diterapkan. Beban non linear juga memiliki karakteristik yaitu penggunaan arus yang tidak konstan, aliran arus yang dibagi dalam pulsa dalam satu siklus tegangan sinusoidal.

Sumber harmonisa paling umum ditemukan dalam sistem tenaga listrik berupa peralatan elektronika daya dengan pensaklaran (switching), seperti konverter, mesin-mesin berputar seperti generator dan motor

induksi, *variable frequency drive* (VFD), penggunaan lampu *flourescent* dalam beban komersil.

2.1.3.1. Konverter

Meningkatnya penggunaan peralatan pengatur daya dimana parameter seperti tegangan dan frekuensi bervariasi yang dapat disesuaikan dengan kebutuhan industri dan komersil tentu menjadikan konverter daya sebagai sumber harmonik yang paling sering ditemukan dalam sistem distribusi. Proses switching dalam konverter dapat mengubah daya arus bolak balik (AC) 50/60 Hz menjadi daya arus sarak (DC). Pada dasarnya, dalam proses peralihan, arus yang melewati perangkat semikonduktor diatur sedemikian rupa sehingga hanya sebagian kecil dari satu siklus dalam kondisi frekuensi fundamentalnya, sehingga konverter daya sering dianggap sebagai perangkat hemat energi. Apabila dalam aplikasinya, diinginkan keluaran dari konverter daya berupa daya dengan arus AC namun pada frekuensi yang berbeda, output DC dari konverter dilewatkan melalui inverter yang membawa daya dari arus DC kembali ke daya dengan arus AC [5]. Berdasarkan bentuk gelombang dari sisi arus AC didapatkan tiga hal penting berupa:

1. Tidak ada harmonisa urutan 0
2. Orde harmonisa yang dapat dibangkitkan oleh konverter dapat ditentukan dengan persamaan:

$$h = px \pm 1 \quad (2.17)$$

dengan keterangan:

h = orde harmonisa yang mungkin dibangkitkan

p = jumlah pulsa, dan x adalah bilangan asli (1, 2, 3,...).

Untuk penyearah enam pulsa, $h = 6x \pm 1$, untuk penyearah dua belas pulsa, $h = 12x \pm 1$

3. Pada harmonisa urutan positif maka harmonisa terjadi pada orde $px+1$, sedangkan urutan negatif terjadi pada harmonisa orde $px-1$.

2.1.3.2. Mesin-mesin berputar

Generator sinkron dan motor induksi menghasilkan sejumlah harmonisa. Arus harmonisa dapat muncul dikarenakan adanya sedikit penyimpangan dalam pola belitan dari belitan tiga fasa mesin-mesin berputar. Harmonisa ini akan menginduksi gaya gerak listrik (emf) di

belitan stator. Distribusi gaya gerak magnet (mmfs) yang dihasilkan dalam mesin berputar menghasilkan harmonisa yang merupakan fungsi dari kecepatan. Arus harmonik tambahan dapat terbentuk pada kondisi inti magnetic yang bersaturasi. Namun, arus harmonik ini biasanya lebih kecil daripada arus harmonik yang terbentuk ketika motor terpasang dengan *variable frequency drive* (VFDs) [5].

2.1.3.3. Lampu Flourescent

Lampu *flourescent*, atau yang umum biasa disebut dengan lampu hemat energi merupakan salah satu jenis lampu yang paling banyak ditemukan di sekitar. Cara kerja dari lampu *flourescent* adalah dengan menggunakan *ballast* untuk memberikan tegangan awal yang cukup tinggi untuk memulai proses pelepasan arus listrik yang akan mengalir di antara dua elektroda di dalam tabung *flourescent*. Terjadi hubungan arus pendek antara kedua elektroda, dan *ballast* dengan cepat mengurangi arus ke level untuk mempertahankan output cahaya yang ditentukan. Dengan demikian, *ballast* merupakan alat pengatur arus dalam aplikasi penerangan. Sumber dari harmonisa pada lampu *flourescent* berada pada *ballast* yang menggunakan komponen elektronika. *Ballast* dengan penggunaan komponen elektronika menggunakan catu daya mode saklar untuk mengubah tegangan frekuensi dasar menjadi frekuensi yang jauh lebih tinggi. [7]

2.1.4. Indeks Harmonisa

2.1.4.1. Individual Harmonic Distortion (IHD)

Individual Harmonic Distortion (IHD) menunjukkan perbandingan antara nilai rms tiap orde dengan nilai rms dari frekuensi dasarnya. IHD direpresentasikan dalam persen (%) dan direpresentasikan dalam persamaan berikut: [11]

$$\text{IHD}_H = \frac{M_H}{M_1} \times 100\% \quad (2.18)$$

Keterangan:

THD = Total Harmonic Distortion

M_n = nilai rms arus atau tegangan harmonisa orde ke-n

M_1 = nilai rms arus atau tegangan pada frekuensi dasar

2.1.4.2. Total Harmonic Distortion (THD)

Total Harmonic Distortion (THD) menunjukkan besarnya distorsi yang ditimbulkan oleh semua komponen harmonisa, dan THD dinyatakan dalam persen (%). THD terbagi menjadi dua, yaitu THD tegangan (THD_V) dan THD arus (THD_I). THD direpresentasikan pada persamaan berikut: [3]

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} M_n^2}}{M_1} \times 100\% \quad (2.19)$$

Keterangan:

THD = Total Harmonic Distortion

M_n = nilai rms arus atau tegangan harmonisa orde ke-n

M_1 = nilai rms arus atau tegangan pada frekuensi dasar

2.1.4.3. TDD (Total Demand Distortion)

TDD didefinisikan sebagai nilai rata-rata akar kuadrat dari arus harmonisa terhadap arus fundamentalnya.[9] TDD dinyatakan dalam persamaan berikut:[3]

$$TDD = \sqrt{\frac{\sum_{n=2}^{hmax} I_n^2}{I_L}} \quad (2.20)$$

Keterangan:

TDD= Total Demand Distortion

I_n = arus harmonik orde ke-n

I_L = arus beban puncak pada frekuensi dasar yang diukur pada titik PCC

2.1.5. Batas Distorsi Harmonisa

Standar yang umum digunakan untuk menentukan batas aman distorsi harmonisa dalam satu sistem tenaga listrik adalah standar IEEE 519-2014, *IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems*. Standar distorsi harmonisa dapat dilihat pada tabel berikut.

Tabel 2.2 Batas distorsi tegangan menurut standar IEEE 519-2014

Tegangan Bus (V) pada titik PCC	Individual Harmonic (%)	THD (%)
$V \leq 1.0 \text{ kV}$	5,0	8,0
$1 \text{ kV} \leq V \leq 69 \text{ kV}$	3,0	5,0
$69 \text{ kV} \leq V \leq 161 \text{ kV}$	1,5	2,5
$161 \text{ kV} < V$	1,0	1,5*

*Dalam sistem tegangan tinggi, nilai THD dapat mencapai 2,0%, dimana hal ini disebabkan oleh terminal HVDC yang efeknya akan melemah disetiap tempat terhubungnya jaringan tersebut.

Tabel 2.3 Maksimum distorsi arus berdasarkan IEEE Std 519-2014 untuk sistem 120 V sampai 69 kV [5].

Maksimum Distorsi Arus Harmonik dalam Persentase I_L						
Individual Harmonic Order (ODD) ^{a, b}						
I_{sc}/I_L	<11	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h$	TDD
<20 ^c	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

Tabel 2.4 Maksimum distorsi arus berdasarkan IEEE Std 519-2014 untuk sistem 69 kV sampai 161 kV [5].

Maksimum Distorsi Arus Harmonik dalam Persentase I_L						
Individual Harmonic Order (ODD) ^{a, b}						
I_{sc}/I_L	<11	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h$	TDD
<20 ^c	2.0	1.0	0.75	0.3	0.15	2.5
20<50	3.5	1.75	1.25	0.5	0.25	4.0
50<100	5.0	2.25	2.0	0.75	0.35	6.0
100<1000	6.0	2.75	2.5	1.0	0.5	7.5
>1000	7.5	3.5	3.0	1.25	0.7	10.0

Tabel 2.5 Maksimum distorsi arus berdasarkan IEEE Std 519-1992 untuk sistem diatas 161 kV [5].

Maksimum Distorsi Arus Harmonik dalam Persentase I_L						
Individual Harmonic Order (ODD) ^{a, b}						
I_{sc}/I_L	<11	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h$	TDD
<25 ^c	1.0	0.5	0.38	0.15	0.1	1.5
25<50	2.0	1.0	0.75	0.3	0.15	2.5
≥ 50	3.0	1.5	1.15	0.45	0.22	3.75

Dengan keterangan sebagai berikut:

^a Harmonisa orde genap dibatasi hingga 25% dari nilai harmonisa orde ganjil yang ditunjukkan pada tabel diatas.

^b Distorsi arus yang dihasilkan oleh peralatan DC, contohnya half-wave converters, tidak diperbolehkan.

^c Distorsi arus dari semua peralatan pembangkit tenaga listrik dibatasi tanpa perlu memperhatikan nilai actual dari I_{sc}/I_L , dimana:

I_{sc} = Nilai arus hubung singkat maksimum pada PCC

I_L = Nilai arus beban maksimum (frekuensi fundamental) pada PCC

2.1.6. Pengaruh dari Harmonisa

Terbentuknya harmonisa dalam sistem tenaga listrik berdampak buruk pada peralatan listrik, berikut beberapa efek yang ditimbulkan dari harmonisa bagi peralatan listrik.

2.1.6.1. Resonansi

Resonansi terjadi pada saat nilai reaktansi dari capacitor bank pada suatu frekuensi tertentu akan bernilai sama dengan nilai reaktansi induktansi dari sistem tenaga listrik. Reaktansi induktansi ini memiliki polaritas yang berbanding terbalik dengan reaktansi dari capacitor bank. Resonansi dibagi menjadi dua, resonansi seri dan resonansi paralel. Pada saat terjadinya resonansi seri, total impedansi yang terbentuk pada frekuensi resonan akan berkurang hingga semata-mata hanya resistansi yang ada. Apabila nilai dari kedua komponen tersebut bernilai kecil, maka akan terbentuk arus yang besar pada frekuensi tersebut. Pada saat resonansi paralel terjadi, total impedansi yang terbentuk pada frekuensi resonan akan bernilai sangat besar hingga mendekati tak hingga. Kondisi

ini dapat menyebabkan tegangan berlebih di peralatan yang terpasang paralel dengan sumber resonan, bahkan ketuka arus harmonisa yang terbentuk kecil. Apabila frekuensi resonan yang terbentuk berada dalam satu sistem yang memiliki harmonisa, maka arus harmonisa akan cenderung mengalir ke sumber resonansi dan distorsi tegangan harmonisa akan semakin meningkat. Kondisi resonansi ini sangat membahayakan bagi isolasi kabel dan juga isolasi belitan trafo, dapat menyebabkan kegagalan pada capacitor bank itu sendiri dan peralatan pengaman yang terpasang di sistem [5].

2.1.6.2. Pengaruh pada mesin-mesin berputar

Pada mesin-mesin berputar, seperti generator sinkron dan motor induksi, harmonisa akan berdampak pada meningkatnya panas berlebih pada mesin, yang dimana panas berlebih secara terus menerus dapat menurunkan usia pemakaian mesin-mesin itu sendiri. Selain itu, harmonisa juga menyebabkan terhambatnya putaran rotor pada generator sinkron, yang diakibatkan timbulnya komponen urutan negative, dan hal ini dapat membahayakan rotor [2].

2.1.6.3. Pengaruh pada Transformator

Pada transformator, harmonisa dapat menyebabkan terbentuknya fluks harmonisa dan meningkatkan kepadatan fluks, pemanasan lebih akibat *eddy current* berlebih, dan penurunan usia pemakaian trafo. Pemanasan lebih timbul akibat meningkatnya disipasi suhu di belitan trafo, serta dari *eddy current* dan rugi-rugi inti dari transformator itu sendiri. Suhu berlebih yang dihasilkan akan semakin mengurangi umur dari isolasi transformator itu sendiri [5].

2.1.6.4. Pengaruh pada relay pengaman

Harmonisa dapat mempengaruhi rele pengaman dengan karakteristik operasi tertentu. Rele pengaman yang bergantung pada tegangan atau arus puncak atau *voltage zeros* dapat terpengaruh oleh harmonisa yang ada di sistem [2].

Selain keempat dampak dari harmonisa yang dijelaskan diatas, ada dampak lain yang ditimbulkan oleh harmonisa, yaitu [2]:

1. Pada kabel, harmonisa mengakibatkan pemanasan akibat *eddy current* berlebih, rugi-rugi *skin effect* dan penurunan usia pemakaian.

2. Pada pembangkit tenaga listrik, harmonisa menyebabkan gangguan dengan kontroler motor-motor besar dan sistem eksitasi.
3. Terganggunya peralatan sistem pengaturan yang berdampak pada kesalahan operasi pada sistem, seperti proses switching peralatan remote, alat pengontrol beban dan peralatan metering.
4. Gangguan sinyal pada sistem yang menggunakan peralatan mikrokontroler.

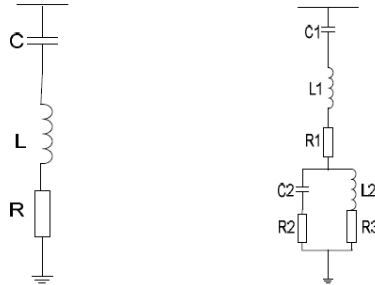
2.2.Filter Pasif Harmonisa

Filter pasif masih menjadi salah satu alternatif dalam mengurangi harmonisa. Filter pasif merupakan sebuah rangkaian elektronika yang terstruktur dalam berbagai konfigurasi, dirancang pada frekuensi operasinya masing-masing, yang disesuaikan dengan harmonisa yang dihasilkan oleh rangkaian itu sendiri.[12] Filter Pasif Harmonisa merupakan salah satu cara konvensional dan paling umum ditemukan sebagai cara untuk memitigasi harmonisa yang terjadi. Filter Pasif, yang terdiri dari reaktor dan kapasitor memberikan jalur alternatif dengan bagi arus harmonisa yang dihasilkan dari beban nonlinear, sehingga arus harmonisa dapat tereduksi. [13] Dengan menggunakan induktor dan kapasitor yang dipasang secara seri sehingga menghasilkan nilai impedansi yang kecil, maka Filter Pasif memberikan jalur alternative bagi arus harmonisa untuk mengalir menuju filter dan bukan menuju sistem listrik. Umumnya, dapat mereduksi hingga 50% dari distorsi harmonisa pada THD arusnya. [12]

Filter pada sistem tenaga listrik memiliki fungsi sebagai alat yang dapat mengurangi baik tegangan maupun arus harmonik dalam suatu level tegangan bolak-balik kembali pada level yang diterima sesuai dengan standar dan sebagai alat yang dapat menyediakan sebagian atau semua kebutuhan daya reaktif yang diakibatkan oleh penggunaan daya reaktif baik dari sumber harmonik maupun dari beban lainnya. [3]

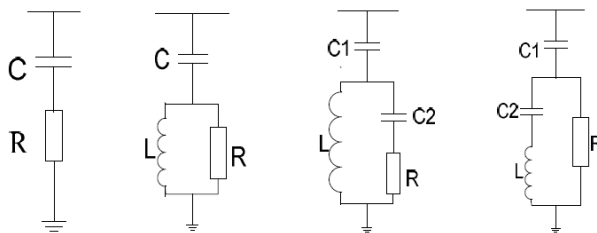
2.2.1. Macam-Macam Topologi dari Filter Pasif Harmonisa

Ada beberapa macam topologi dari Filter Pasif Harmonisa, topologi tersebut dapat dilihat dalam gambar berikut.



Gambar 2.8. Topologi dari tuned filter [14]

Gambar diatas menggambarkan topologi dari filter pasif dari kategori tuned filters. *Single Tuned Filters*, digambarkan pada gambar 2.8 (a) merupakan filter pasif yang terdiri dari kapasitor dan induktor yang dipasang secara seri. Filter jenis ini menghasilkan nilai impedansi yang rendah pada nilai frekuensi tuning tertentu, sehingga harmonisa dapat terpotong pada frekuensi tuning tersebut. *Double Tuned Filters*, digambarkan pada gambar 2.8 (b), merupakan filter pasif yang terdiri dari komponen yang sama dengan single tuned filter, yaitu kapasitor dan induktor yang terpasang secara seri. Filter jenis ini menghasilkan nilai impedansi yang rendah pada dua frekuensi tuning, sehingga dapat memotong harmonik di dua frekuensi tuning. [14] Dikarenakan adanya penggunaan kapasitor dalam topologi tipe tuned filters, kapasitor tersebut juga berperan dalam kompensasi daya reaktif bagi sistem.



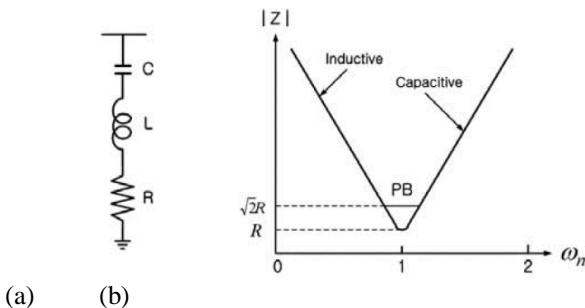
Gambar 2.9. Topologi dari high pass filter [14]

Gambar 2.9 menunjukkan topologi dari high pass filters. Cara kerja dari keempat topologi dari high pass filter ini adalah dapat memotong harmonisa dalam jangkauan yang cukup luas dikarenakan penggunaan kapasitor dan resistor yang terpasang dapat menghasilkan nilai impedansi yang sangat kecil.

Beberapa macam topologi ini memberikan nilai respons terhadap frekuensi yang berbeda-beda. Filter pasif yang paling umum digunakan dalam sistem kelistrikan adalah filter pasif penalaan tunggal (*single tuned passive filter*) dan *high pass filter*. Filter pasif penalaan tunggal didesain untuk mereduksi satu orde harmonisa melainkan high pass filter didesain untuk mereduksi harmonisa pada harmonisa yang berada diatas jangkauan frekuensi tertentu. [15]

2.2.2. Filter Pasif Penalaan Tunggal (*Single Tuned Passive Filter*)

Filter Pasif Penalaan Tunggal (*Single Tuned Passive Filters*) merupakan salah satu filter pasif harmonisa yang paling umum digunakan dalam sistem tenaga listrik. Filter pasif penalaan tunggal ini terdiri dari nilai R (resistansi), L (Induktansi) dan C (Kapasitansi) yang disusun secara seri, dimana filter pasif ini bekerja dengan memotong harmonic tertentu dengan menala salah satu orde harmonik. Dikarenakan penyusunan kapasitansi dan induktansi dilakukan secara seri, maka dari itu nilai impedansi dari filter tersebut akan sangat kecil pada frekuensi harmonisa tertentu, sehingga harmonisa dapat terpotong dengan filter pasif tipe ini. [14] Filter Pasif penalaan tunggal dikatakan ideal apabila dapat melakukan penalaan pada frekuensi dimana nilai induktansi dan nilai kapasitansi dapat bernilai sama, atau dikatakan pada saat resonan.



Gambar 2.10. (a) Rangkaian Filter Pasif Penalaan Tunggal, (b) Grafik karakteristik impedansi terhadap frekuensi penalaan [3]

Dengan menggunakan komponen R, L, C, maka nilai impedansi yang dihasilkan akan rendah. Nilai dari kapasitor dan induktor akan diatur sehingga total nilai impedansi bernilai nol di frekuensi harmonisanya, sehingga dapat memotong harmonisa tersebut, serta kapasitor pada filter pasif dapat berfungsi sebagai kompensasi daya reaktif bagi sistem.[15] Nilai total impedansi ditunjukkan pada persamaan: [16]

$$Z_n = R_n + j \left(\omega L_n - \frac{1}{\omega C_n} \right) \quad (2.21)$$

Dimana pada saat frekuensi resonansi ω ,

$$Z_n = R_n \quad (2.22)$$

$$\omega L_n = \frac{1}{\omega C_n} \quad (2.23)$$

Filter pasif penalaan tunggal dikatakan ideal apabila penalaannya pada frekuensi dimana nilai reaktansi induktif dan reaktansi kapasitifnya bernilai sama. Frekuensi penalaan dapat ditentukan dari persamaan: [17]

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (2.24)$$

Berdasarkan gambar 2.10(b), frekuensi *band pass* akan dibatasi pada frekuensi dimana reaktansi filter akan bernilai sama dengan nilai resistansi filter tersebut.[16]

Sebelum menentukan nilai R, L dan C yang akan digunakan, terlebih dahulu menentukan beberapa parameter dalam menentukan desain dari filter. Parameter yang dimaksud adalah faktor penalaan / *tuning factor* (δ) dan faktor kualitas / *quality factor* (Q). Korelasi yang menggambarkan faktor penalaan / *tuning factor* (δ) dan faktor kualitas / *quality factor* (Q) dapat dilihat pada persamaan: [16]

$$\omega = \omega_n(1 + \delta) \quad (2.25)$$

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (2.26)$$

Dimana ω_n merupakan frekuensi sudut penalaan pada orde harmonisa n (rad/s). Nilai n dapat ditentukan dari persamaan:[2]

$$n = \frac{f_n}{f} \quad (2.27)$$

Dimana f_n merupakan frekuensi penalaan dari filter pasif dan f merupakan frekuensi sumber.

Nilai reaktansi dari kapasitor maupun induktor pada frekuensi penalaan dapat ditentukan dari persamaan berikut: [16]

$$X_0 = \omega_n L = \frac{1}{\omega_n C} = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (2.28)$$

Faktor kualitas / *quality factor* (Q) dari sebuah filter menentukan ketajaman dari penalaan filter. Faktor kualitas diartikan sebagai perbandingan antara induktansi atau kapasitansi dengan resistansi pada saat kondisi resonan. Filter dengan nilai Q yang rendah dapat menala dengan tajam di frekuensi harmonisa yang rendah, dan nilai tipikal faktor kualitas berada pada jangkauan 30 sampai dengan 60. Faktor kualitas dari filter pasif penalaan tunggal dapat ditentukan dari persamaan berikut: [16]

$$Q = \frac{X_0}{R} \quad (2.29)$$

Sementara itu, faktor penalaan, atau dengan *tuning factor* (δ) merupakan perubahan nilai frekuensi dari frekuensi penalaannya. Faktor penalaan dapat dinyatakan dalam persamaan berikut: [3]

$$\delta = \frac{\omega - \omega_n}{\omega} \quad (2.30)$$

Faktor yang mempengaruhi perubahan nilai δ adalah: [3]

- Nilai frekuensi dasar yang bervariasi.
- Nilai kapasitansi dan induktansi yang bervariasi akibat dari pengaruh suhu dan penuaan.
- Nilai batas ukuran untuk penalaan dan nilai initial off-tuning yang berbeda-beda tergantung dari toleransi pabrik.

Selain itu, perubahan dari nilai L dan C dapat mempengaruhi frekuensi, sehingga faktor *de-tuning* dapat dinyatakan dengan: [3]

$$\delta = \frac{\Delta f}{f_n} + \left(\frac{\Delta L}{L_n} + \frac{\Delta C}{C_n} \right) \quad (2.31)$$

Setelah didapatkan nilai dari faktor penalaan dan faktor kualitas, maka dapat ditentukan nilai R, L dan C yang akan dipakai. Nilai dari C (kapasitansi) yang akan digunakan didapat dari persamaan: [18]

$$X_c = \frac{V^2}{Q_c} \quad (2.32)$$

$$C = \frac{Q_c}{2\pi f V^2} \quad (2.33)$$

Setelah didapatkan nilai C, maka didapatkan nilai L dari persamaan berikut:

$$X_L = X_C \quad (2.34)$$

$$X_L = \frac{X_C}{n^2} \quad (2.35)$$

$$X_L = 2\pi f L \quad (2.36)$$

$$L = \frac{X_C}{(2\pi f)^2} \quad (2.37)$$

Dengan nilai n merupakan orde harmonisa yang diinginkan.

Arus fundamental yang melewati filter dapat ditunjukkan pada persamaan berikut:

$$I_{fund} = \frac{V_{sumber}}{\sqrt{R_n^2 + (X_L - X_C)^2}} \quad (2.38)$$

Dalam proses pembuatan induktor, induktor akan memiliki resistansi sendiri. Hal ini dikarenakan kawat tembaga yang digunakan memiliki nilai resistansi DC tersendiri. Untuk menentukan nilai resistansi DC dari suatu kawat tembaga didapatkan dalam persamaan berikut:

$$R_{DC} = \frac{\rho \times L}{A} \quad (2.39)$$

Dengan penjelasan sebagai berikut:

ρ = resistivitas kawat tembaga (Ω/m)

L = Panjang kawat yang digunakan(m)

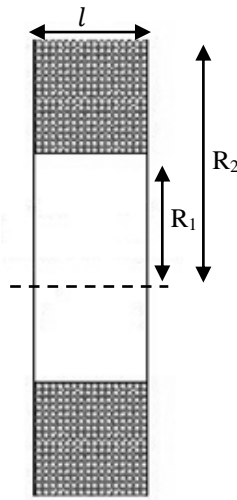
A = Luas penampang kawat tembaga (m^2)

Selain untuk mereduksi harmonisa, filter pasif juga bekerja untuk memberikan daya reaktif yang dibutuhkan oleh sistem kelistrikan. Oleh karena itu, dalam pemilihan nilai kapasitor untuk desain filter pasif harus mempertimbangkan besarnya kompensasi daya reaktif yang dibutuhkan oleh sistem tenaga listrik. Setelah dilakukan kompensasi, faktor daya akan bernilai pada rentang 0,9 hingga 1, namun harus diperhatikan juga apabila nilai kompensasi daya reaktif terlalu besar dari yang dibutuhkan oleh sistem akan terjadi over kompensasi daya reaktif, dan menyebabkan sistem cenderung bersifat kapasitif. Jumlah dari daya reaktif yang akan masuk harus sesuai dengan besar nilai kapasitor dari filter. Hal ini dapat dijelaskan dalam rumus:

$$Q = P[\tan(\text{arc cos } Pf_1) - \tan(\text{arc cos } Pf_2)] \quad (2.40)$$

Dimana Pf_1 adalah faktor daya sebelum terpasang filter dan Pf_2 adalah faktor daya setelah terpasang filter pasif.

Dalam implementasi induktor, ada beberapa parameter yang perlu diperhatikan. Wheeler (1928) menemukan persamaan nilai induktansi dengan topologi induktor berupa *multilayer coil* induktor. Untuk menjelaskan bagaimana nilai induktansi dari multilayer coil induktor didapatkan, dijelaskan dalam persamaan Wheeler berikut. [19]



Gambar 2.11. Ilustrasi dari persamaan Wheeler (1928)

$$L = 0,02 \times \frac{R_1^2 \times N^2}{6R_1 + 9l + 10(R_2 - R_1)} \quad (2.41)$$

Dengan keterangan sebagai berikut:

R1 = Jari-jari inti induktor

R2 = Jari-jari keseluruhan induktor, dihitung dari inti hingga sisi terluar

N = Banyaknya *turn* kawat konduktor

l = Panjang induktor

2.2.3. Batas Komponen Filter

Standar yang mengatur batas nilai komponen yang digunakan untuk filter diatur dalam standar IEEE 1531-2003 *IEEE Guide for Application and Specification of Harmonic Filters*. Standar ini mengatur nilai standar kapasitor dan reactor yang digunakan serta aplikasinya dalam sistem tenaga listrik.

Standar IEEE 18-2002 menyatakan kapasitor diharuskan untuk beroperasi dibawah nilai tegangan pengenalnya. Kapasitor harus bisa bekerja secara kontinyu di sistem dan kondisi kapasitor harus dalam batas, dan tidak melebihi batas sebagai berikut:

- a. 110% dari nilai tegangan rms (*root mean square*) pengenalnya.
- b. 120% dari nilai tegangan puncak pengenalnya, tidak mempertimbangkan tegangan transien.
- c. 135% dari nilai arus rms nominal berdasarkan nilai kvar dan tegangan pengenalnya.
- d. 135% dari nilai kvar pengenalnya.

Induktor yang umum digunakan untuk aplikasi filter umumnya menggunakan tipe inti udara. Berikut merupakan spesifikasi yang dibutuhkan untuk mempertimbangkan dalam desain induktor filter.

- a. Nilai tegangan line-to-line operasi maksimum.
- b. Frekuensi fundamental sistem.
- c. BIL (*Basic Insulation System*) sistem.
- d. Frekuensi penalaan dari filter (hertz)
- e. Induktansi reaktor dan toleransi induktansi serta pertimbangan diperlukannya *tapping*.
- f. Nilai faktor kualitas (Q) pada frekuensi penalaan.

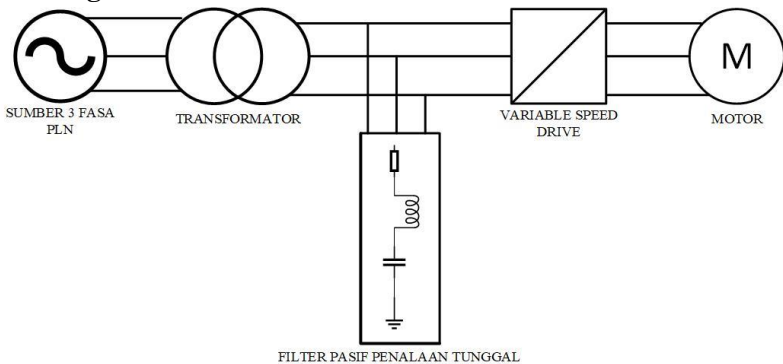
Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 3

DESAIN, SIMULASI DAN IMPLEMENTASI FILTER PASIF LC PENALAAAN TUNGGAL

Pada bab 3 akan dibahas mengenai desain rangkaian dan implementasi filter pasif LC penalaan tunggal (*single tuned LC filter*). Terdapat dua bagian yang akan dibahas, yaitu simulasi dan perencanaan implementasi. Pada simulasi digunakan *software ETAP 12.6* untuk memahami konsep penalaan harmonisa di orde yang diinginkan. Langkah-langkah yang dilakukan dapat diketahui lewat simulasi ini. Pada perencanaan implementasi, terdapat beberapa bagian yang akan dibahas yaitu meliputi perencanaan penggunaan nilai kapasitor, perencanaan penggunaan nilai induktansi, desain dari dimensi dari induktansi, dan perencanaan rangkaian filter pasif penalaan tunggal serta perencanaan rangkaian sistem uji.

3.1. Diagram Blok Sistem



Gambar 3.1. Diagram Blok Terbentuknya Harmonisa dalam Sistem

Gambar 3.1 menggambarkan proses terbentuknya harmonisa suatu sistem kelistrikan sederhana dari suatu industri. Kelistrikan suatu industri disuplai dari sumber PLN dalam sistem 3 fasa sesuai dengan kebutuhan. Lalu, tegangan dari sumber PLN diturunkan melalui transformator sesuai dengan kebutuhan suatu industri, umumnya diturunkan dari sistem 20kV menuju 400 V atau 380 V sesuai dengan kebutuhan beban. Tegangan keluaran dari transformator merupakan tegangan AC sinusoidal.

Tegangan AC sinusoidal yang keluar dari transformator masuk ke beban non linier, namun arus yang dialirkan dari transformator menuju beban non linier tidak berbentuk gelombang arus AC sinusoidal murni. Akibat dari pemakaian beban non linier, terbentuk harmonisa. Pemasangan Filter Pasif Penalaan Tunggal (*Single Tuned Passive Filter*) yang dipasang secara paralel dengan beban non linier diharapkan dapat memberikan jalur bagi arus harmonisa agar arus harmonisa tidak masuk ke sistem.

3.2.Studi Kasus Hasil Pengukuran Harmonisa suatu sistem kelistrikan

Dalam proses desain dan simulasi filter pasif penalaan tunggal serta proses implementasi yang akan dilakukan didasarkan pada salah satu kasus harmonisa yang terjadi. Dalam suatu sistem kelistrikan suatu pabrik industri ditemukan beberapa kerusakan peralatan, baik secara langsung maupun tidak langsung merusak peralatan itu sendiri. Terjadinya gangguan sistem dan komponen peralatan listrik yang rusak dalam interval waktu 2014 hingga 2017, menyebabkan dilakukannya pengukuran di beberapa *sample* titik percabangan untuk melihat apakah harmonisa menjadi salah satu sumber kerusakan peralatan tersebut. Gambar menunjukkan hasil pengukuran harmonisa di salah satu sample titik percabangan tersebut.

Power & Energy				
	FULL	0:00:25		
	L1	L2	L3	Total
kW	6.3	13.4	7.6	27.3
kVA	8.0	14.7	8.8	32.8
kVAR	4.9	6.2	4.4	3.0
PF	0.79	0.91	0.87	0.83
Cosφ	0.90	0.99	0.97	
Arms	34	64	38	
	L1	L2	L3	
Vrms	232.0	230.5	231.5	
08/28/17 10:20:40 400V 50Hz 3Ø WVE EN50160				
PREV BACK NEXT PRINT USE				

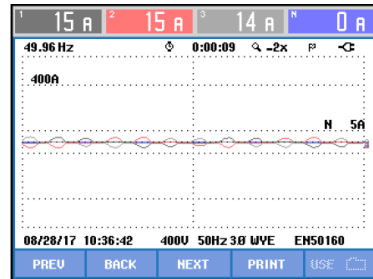
Gambar 3.2 Pengukuran Daya

Gambar 3.2 menjelaskan pengukuran daya pada sistem kelistrikan suatu sistem kelistrikan pabrik. Data diatas digunakan sebagai asumsi nilai dari parameter beban pada proses simulasi dan penentuan nilai kapasitansi.

HARMONICS TABLE				
Amp	L1	L2	L3	N
THD%f	88.9	86.5	90.8	466.7
H3%f	7.5	5.4	8.3	75.0
H5%f	64.4	64.4	69.0	83.7
H7%f	53.2	50.7	49.4	72.0
H9%f	4.6	2.6	4.8	79.4
H11%f	19.3	17.9	22.9	76.1
H13%f	11.1	8.2	8.1	72.9
H15%f	2.5	1.8	2.6	75.3

08/28/17 10:35:47 400V 50Hz 3Ø WYE ENS0160

(a)



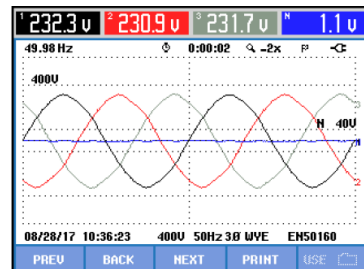
(b)

Gambar 3.3 Pengukuran Harmonisa Arus

HARMONICS TABLE				
Volt	L1	L2	L3	N
THD%f	1.8	2.3	2.5	127.1
H3%f	0.2	0.2	0.1	29.1
H5%f	1.3	1.9	1.8	95.4
H7%f	0.9	1.1	1.5	61.9
H9%f	0.2	0.1	0.3	33.5
H11%f	0.3	0.2	0.4	20.3
H13%f	0.2	0.2	0.4	13.8
H15%f	0.1	0.1	0.1	14.8

08/28/17 10:36:05 400V 50Hz 3Ø WYE ENS0160

(a)



(b)

Gambar 3.4 Pengukuran Harmonisa Tegangan

Gambar 3.3 menjelaskan tentang pengukuran harmonisa arus salah satu titik pengukuran. Dapat dilihat bahwa harmonisa arus paling besar terjadi pada orde harmonisa ke lima, ke tujuh, ke sebelas dan ke tigabelas. Hasil pengukuran gelombang arus juga menunjukkan bentuk gelombang arus yang tidak lagi berbentuk sinusoidal. Gambar 3.4 menjelaskan tentang pengukuran harmonisa tegangan salah satu titik pengukuran. Sama dengan harmonisa arus, harmonisa tegangan paling besar terjadi pada keempat orde yang sama dengan harmonisa arus, namun harmonisa tegangan tidak terlalu besar sehingga pengukuran gelombang tegangan masih menunjukkan bentuk gelombang sinusoidal. Hal ini yang mendasari pemilihan orde harmonisa untuk proses desain, simulasi dan implementasi yang akan dilakukann dengan pemilihan parameter induktansi dan kapasitansi disesuaikan dengan produk yang umum tersebar di pasaran.

3.3.Desain Filter Pasif LC Penalaan Tunggal

Pada sub bab ini, akan dijelaskan proses penentuan nilai kapasitansi dan capacitor bank yang akan digunakan, penentuan nilai induktansi dan desain dimensi induktor yang akan digunakan serta rangkaian filter pasif secara keseluruhan.

3.3.1.Penentuan Nilai *Capacitor Bank*

Pemilihan nilai kapasitor yang digunakan ditentukan berdasarkan besar daya reaktif yang dibutuhkan oleh sistem. Namun, pemilihan nilai kapasitansi dalam desain kali ini ditentukan berdasarkan hasil studi kasus hasil pengukuran harmonisa suatu sistem kelistrikan salah satu pabrik industri, dan berdasarkan nilai kapasitor satu fasa yang tersebar luas di pasaran. Capacitor bank satu fasa yang dapat ditemukan merupakan capacitor bank merk GAE, dengan spesifikasi yang dijelaskan dalam tabel 3.1. berikut.



(a)



(b)

Gambar 3.5 Spesifikasi dari *capacitor bank* (a) 77uF (b) 62uF

Tabel 3.1. Spesifikasi dari *Capacitor Bank*

Spesifikasi Kapasitor		
Merk	GAE	GAE
Type	MKP CAPACITOR	MKP CAPACITOR
Standard	IEC 60831	IEC 60831
Rated Capacitance	62 uF	77 uF
Rated Kvar/ Rated Voltage	3,33 kVAR / 415 V	4,17 kVAR / 415 V
	3,94 kVAR / 450 V	4,90 kVAR / 450 V
Frequency	50Hz	50Hz
Tolerance Of Capacitance	-5...+10%,	-5...+10%,

Besar daya reaktif *capacitor bank* yang ditentukan berkisar antara 2 kVAR hingga 5 kVAR. Namun, dikarenakan tidak adanya capacitor bank satu fasa dengan kapasitas besar, maka untuk memenuhi besar daya reaktif yang ditentukan, maka paralel *capacitor bank* dilakukan. Dengan menggunakan persamaan 2.33, didapatkan besar daya reaktif capacitor bank sebagai berikut.

Untuk Orde lima, digunakan:

$$C = 4 \times 77\mu F = 308 \mu F$$

$$Q_c = C \times 2\pi f \times V^2$$

$$Q_c = 308 \times 10^{-6} \times 2\pi \times 50 \times 220^2$$

$$Q_c = 4,638 \text{ kVAR}$$

Untuk orde ke tujuh, digunakan:

$$C = 3 \times 77\mu F = 231 \mu F$$

$$Q_c = C \times 2\pi f \times V^2$$

$$Q_c = 231 \times 10^{-6} \times 2\pi \times 50 \times 220^2$$

$$Q_c = 3,512 \text{ kVAR}$$

Untuk orde ke sebelas, digunakan:

$$C = 2 \times 62 \mu F = 124 \mu F$$

$$Q_c = C \times 2\pi f \times V^2$$

$$Q_c = 124 \times 10^{-6} \times 2\pi \times 50 \times 220^2$$

$$Q_c = 1,965 \text{ kVAR}$$

3.3.2. Penentuan Nilai Induktor

Setelah ditentukannya nilai kapasitor yang akan digunakan, selanjutnya dilakukan penentuan nilai induktor. Induktor didesain dengan menggunakan *software Coil32*, dengan dasar desain induktor yang digunakan adalah *multilayer coil*. Metode desain *multilayer coil* dinilai paling efektif dalam segi dimensi, dikarenakan tinggi induktor dapat diatur sesuai dengan kebutuhan dan dimensi induktor yang relatif lebih kecil. Perhitungan nilai induktor didapatkan berdasarkan persamaan 2.24 berikut.

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

Untuk induktansi pada saat orde harmonisa ke lima, digunakan nilai kapasitansi sebesar 308 μF . Besar nilai induktansi didapatkan dalam persamaan berikut.

$$f_n = n \times f_0$$

$$f_n = 5 \times 50 = 250 \text{ Hz}$$

$$f_n = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

$$L = \frac{1}{(2\pi f_n)^2 C}$$

$$L = \frac{1}{(2\pi \cdot 250)^2 (308 \cdot 10^{-6})}$$

$$L = 1315,86 \mu H$$

Untuk induktansi pada saat orde harmonisa ke tujuh, digunakan nilai kapasitansi sebesar 231 μ F. Besar nilai induktansi didapatkan dalam persamaan berikut

$$f_n = n \times f_0$$

$$f_n = 7 \times 50 = 350 \text{ Hz}$$

$$f_n = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

$$L = \frac{1}{(2\pi f_n)^2 C}$$

$$L = \frac{1}{(2\pi \cdot 350)^2 (231 \cdot 10^{-6})}$$

$$L = 895,143 \mu H$$

Untuk induktansi pada saat orde harmonisa ke sebelas, digunakan nilai kapasitansi sebesar 124 μ F. Besar nilai induktansi didapatkan dalam persamaan berikut

$$f_n = n \times f_0$$

$$f_n = 11 \times 50 = 550 \text{ Hz}$$

$$f_n = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

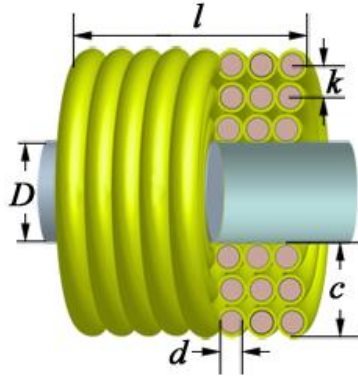
$$L = \frac{1}{(2\pi f_n)^2 C}$$

$$L = \frac{1}{(2\pi \cdot 450)^2 (114 \cdot 10^{-6})}$$

$$L = 675,294 \mu H$$

Dalam pemilihan besar dimensi, ditentukan besar dimensi yang disesuaikan dengan besar panel MCC. Spesifikasi umum dimensi dari panel MCC sebesar 800 mm \times 600 mm \times 200 mm (panjang \times lebar \times tinggi). Berdasarkan spesifikasi dimensi dari panel MCC, ditentukan

bahwa besar inti induktor paling optimal sebesar 50 mm dan tinggi dari induktor sebesar 100 mm. Dengan menentukan nilai diameter inti induktor, panjang gulungan induktor, serta diameter inti kawat yang akan digunakan, didapatkan besar desain induktor sebagai berikut:



Gambar 3.6 Gambaran Dimensi dari Induktor

Tabel 3.2 Rincian Dimensi dari Induktor untuk orde harmonisa ke tujuh

Keterangan	Induktor Orde ke lima	Induktor Orde ke tujuh	Induktor Orde ke sebelas
Frekuensi kerja	250 Hz	350 Hz	550 Hz
Nilai Induktansi	1315,86 μ H	895,143 μ H	675,294 μ H
Diameter Inti Induktor (D)	50 mm	50 mm	50 mm
Panjang Gulungan Induktor (l)	100 mm	100 mm	100 mm
Tebal Induktor dari sisi luar hingga inti (c)	39,33 mm	34,96 mm	30,59 mm
Diameter inti kawat (d)	4,36 mm	4,36 mm	4,36 mm
Diameter inti kawat dengan isolasi (k)	4,37 mm	4,36 mm	4,36 mm

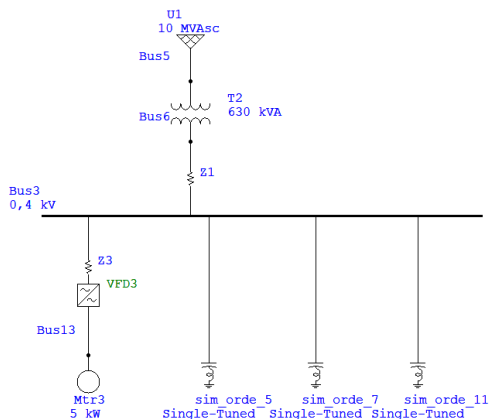
Dari penentuan rincian dimensi dari induktor, didapatkan nilai resistansi DC, banyaknya belitan gulungan kawat, dan banyaknya *layer* dalam satu induktor. Dalam perhitungan nilai resistansi DC suatu induktor, berdasarkan persamaan 2.39, diasumsikan nilai resistivitas kawat tembaga (ρ) murni sebesar $1,68 \times 10^{-8} \Omega/\text{m}$. Nilai-nilai tersebut dijelaskan pada tabel 3.3 berikut.

Tabel 3.3. Nilai Resistansi DC hasil simulasi, banyaknya belitan gulungan kawat, dan banyaknya *layer* untuk satu induktor

	Induktor Orde Harmonisa 5	Induktor Orde Harmonisa 7	Induktor Orde Harmonisa 11
Frekuensi Kerja	250 Hz	350 Hz	550 Hz
Resistansi DC	0,063 Ω	0,052 Ω	0,042 Ω
Banyaknya layer	9 layer	8 layer	7 layer
Banyaknya turn	194 turns	168 turns	144 turns

3.4. Simulasi Kerja Filter Pasif

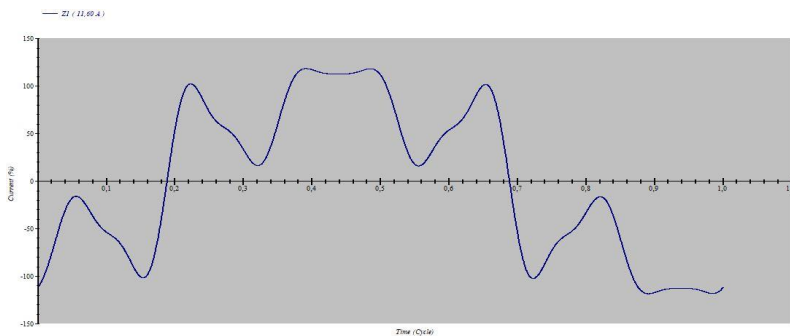
Tahap simulasi dilakukan dengan tujuan agar dapat mengetahui gambaran respon dari sistem dan apakah desain dari filter pasif dapat bekerja sesuai dengan rencana desain. Simulasi yang penulis lakukan menggunakan *software* ETAP 12.6 untuk proses simulasi kerja pasif filter dan *software* Matlab 2015b untuk proses simulasi karakteristik kerja dari filter pasif. Simulasi kerja sistem didesain pada kondisi typical, dengan variable frequency drive sebagai sumber harmonisa dari sistem. Adapun parameter yang digunakan pada simulasi ini mengacu pada data yang diperoleh pada studi kasus kondisi harmonisa sistem kelistrikan salah satu pabrik industri. Adapun rangkaian simulasi ditunjukkan pada gambar 3.7 berikut.



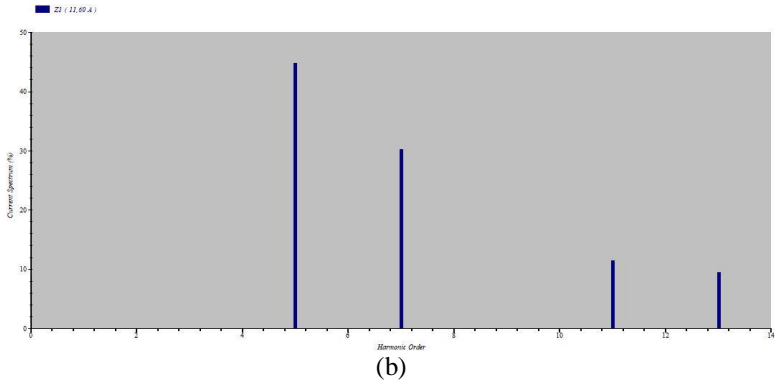
Gambar 3.7 Rangkaian simulasi gangguan harmonisa suatu sistem kelistrikan dengan *software* ETAP 12.6

3.4.1. Simulasi Kerja Sistem Sebelum Penggunaan Filter Pasif Pada Sistem Tiga Fasa

Pada gambar 3.7, dapat dilihat bahwa sumber harmonisa dari sistem berasal dari variable frequency drive (VFD) yang tersambung dengan motor induksi dengan asumsi sebesar 5 kW. Akan disimulasikan hasil spektrum gelombang dan bentuk gelombang pada bus 3 yang terdampak gangguan harmonisa. Tegangan pada bus 3 merupakan tegangan dalam sistem tiga fasa.

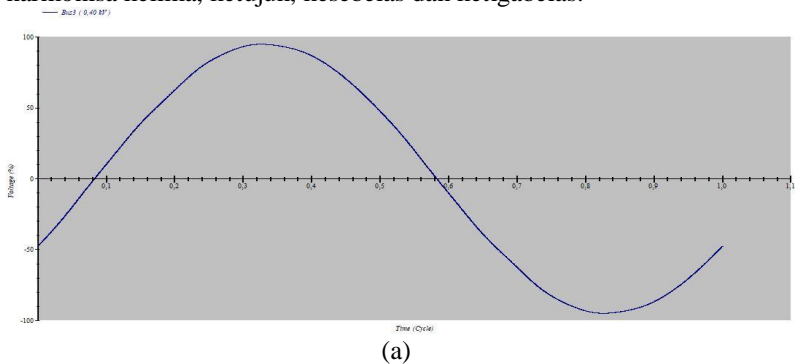


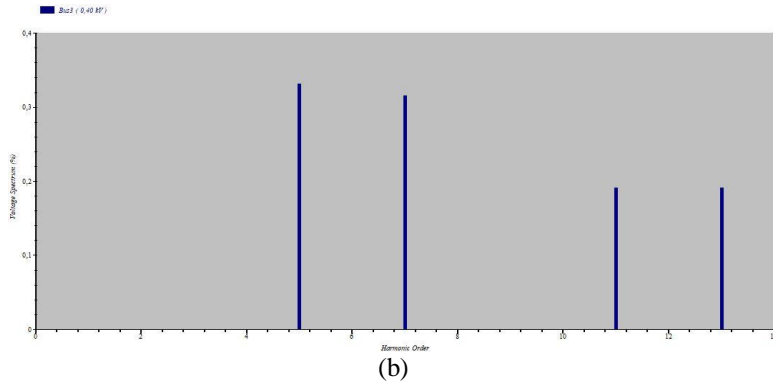
(a)



Gambar 3.8. Simulasi sistem tanpa filter pasif
 (a) Bentuk Gelombang Arus, (b) Spektrum Harmonisa Arus

Dari hasil simulasi yang ditunjukkan pada gambar 3.8, dapat dilihat bentuk gelombang arus serta spektrum harmonisa yang terukur di titik PCC sistem simulasi, dalam hal ini terukur di Z1. Gelombang arus yang masuk ke bus 3 tidak lagi berbentuk gelombang sinusoidal. Dari gambar 3.8 (b) ditunjukkan bahwa harmonisa terbesar terjadi pada orde harmonisa kelima, ketujuh, kesebelas dan ketigabelas.



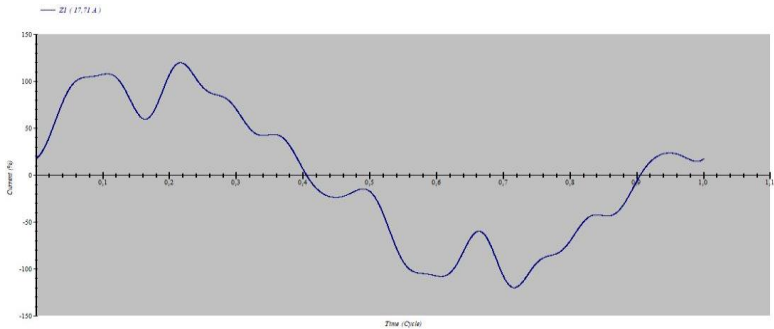


Gambar 3.9 Simulasi sistem tanpa filter pasif
 (a) Bentuk Gelombang Tegangan, (b) Spektrum Harmonisa Tegangan

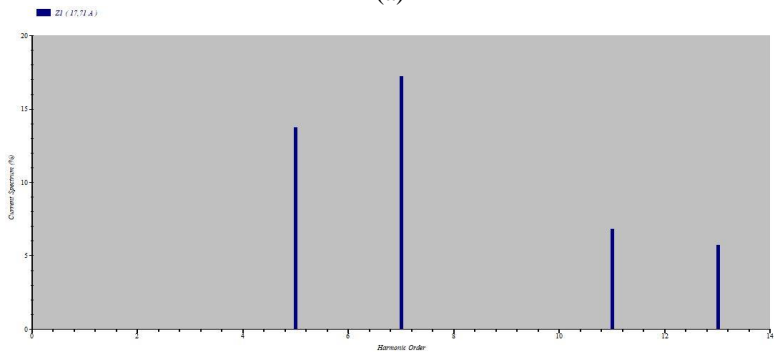
Gambar 3.9 (a) menunjukkan bentuk gelombang tegangan terukur di bus 3 pada saat simulasi sistem tanpa filter pasif. Dapat dilihat bahwa bentuk gelombang tegangan tidak terlalu terdistorsi, tidak seperti bentuk gelombang arus yang ditunjukkan pada gambar 3.8 (a).

3.4.2. Simulasi Kerja Sistem Sesudah Penggunaan Filter Pasif Pada Sistem Tiga Fasa

Setelah melakukan proses desain filter pasif yang telah dijelaskan sebelumnya, hasil proses desain filter kemudian digunakan untuk parameter nilai yang dibutuhkan untuk menjalankan simulasi. Proses simulasi akan dilakukan pada empat tahap untuk melihat respons kerja dari tiap filter pasif itu sendiri. Tahap pertama merupakan simulasi sistem setelah filter pasif orde ke lima masuk ke sistem, lalu tahap kedua diikuti dengan filter pasif orde ke tujuh masuk ke sistem, lalu tahap ketiga diikuti dengan filter pasif orde ke sebelas masuk ke sistem, dan tahap keempat ketika semua orde filter pasif masuk ke sistem.



(a)

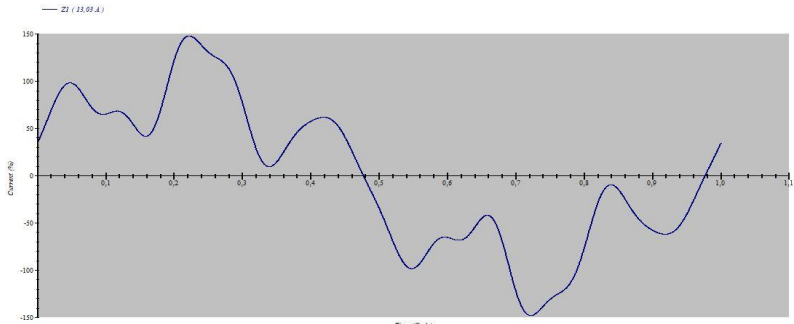


(b)

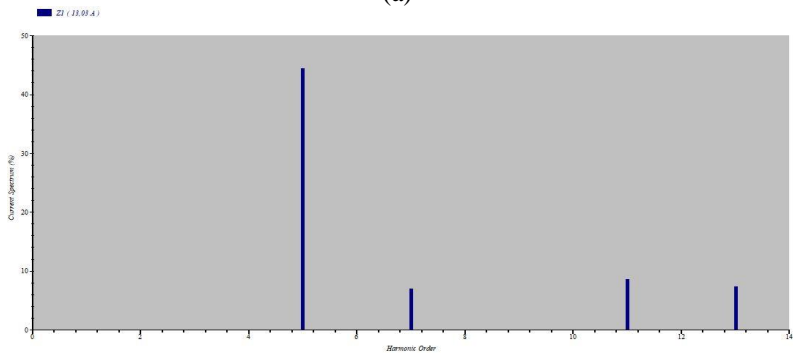
Gambar 3.10. Simulasi sistem dengan pemasangan filter pasif orde kelima

(a) Bentuk Gelombang Arus, (b) Spektrum Harmonisa Arus

Gambar 3.10 menunjukkan respons sistem terhadap pemasangan filter pasif orde ke lima. Dapat dilihat bahwa pada bentuk gelombang arus pada gambar 3.10 (a), bentuk gelombang sudah mulai membentuk gelombang sinusoidal, namun masih banyak distorsi yang disebabkan oleh orde harmonisa lainnya. Apabila spektrum harmonisa arus dibandingkan dengan sebelum pemasangan filter, terjadi penurunan besar persen spektrum dari 48% menjadi 14% pada spektrum orde harmonisa ke lima.



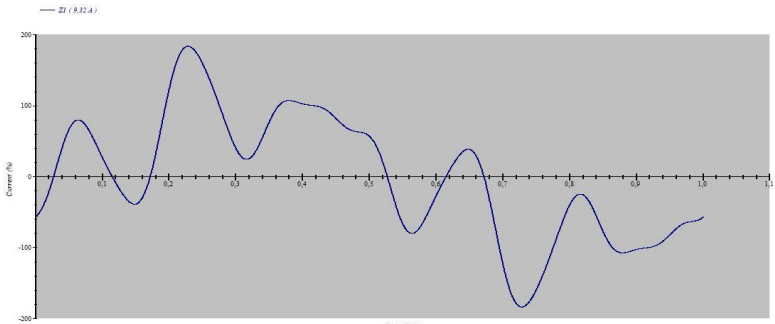
(a)



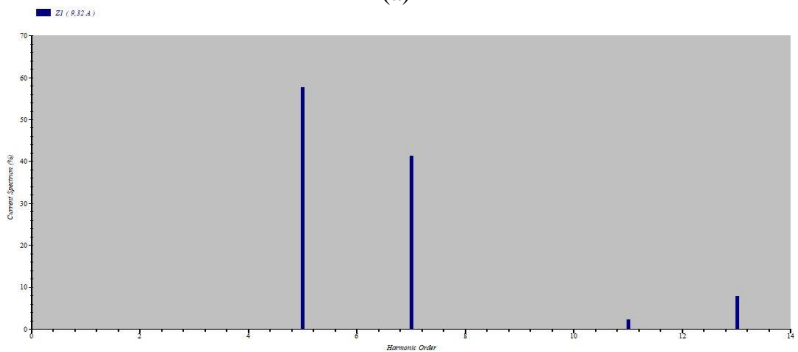
(b)

Gambar 3.11. Simulasi sistem dengan pemasangan filter pasif orde ketujuh
 (a) Bentuk Gelombang Arus, (b) Spektrum Harmonisa Arus

Gambar 3.11 menunjukkan respons sistem terhadap pemasangan filter pasif orde ke tujuh. Dapat dilihat bahwa pada bentuk gelombang arus pada gambar 3.11 (a), jika dibandingkan dengan sebelum pemasangan filter, bentuk gelombang pada saat pemasangan filter pasif orde ke tujuh mulai membentuk gelombang sinusoidal, namun masih banyak distorsi yang disebabkan oleh orde harmonisa lainnya. Apabila spektrum harmonisa arus dibandingkan dengan sebelum pemasangan filter, terjadi penurunan besar persen spektrum dari 32% menjadi 9% pada spektrum orde harmonisa ke tujuh.



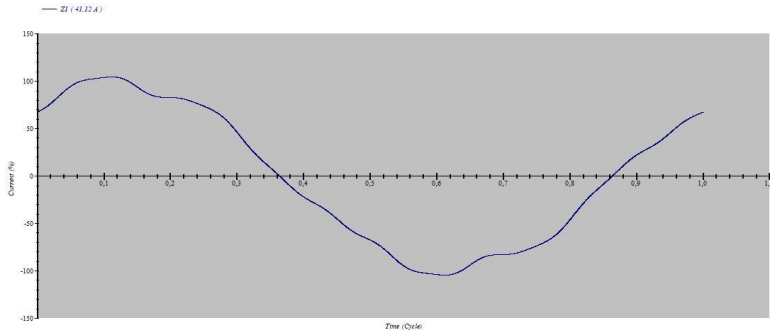
(a)



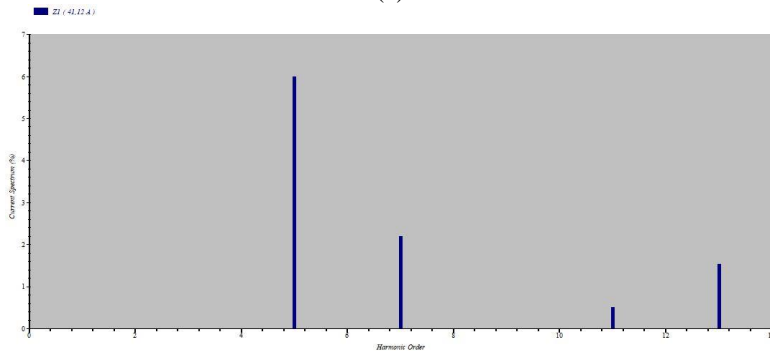
(b)

Gambar 3.12. Simulasi sistem dengan pemasangan filter pasif orde kelima
 (a) Bentuk Gelombang Arus, (b) Spektrum Harmonisa Arus

Gambar 3.12 menunjukkan respons sistem terhadap pemasangan filter pasif orde ke sebelas. Dapat dilihat bahwa pada bentuk gelombang arus pada gambar 3.12 (a), apabila dibandingkan dengan kondisi sebelum pemasangan filter, bentuk gelombang mulai terlihat sinusoidal walaupun masih banyak distorsi yang diakibatkan orde harmonisa lainnya. Dan apabila spektrum harmonisa arus dibandingkan dengan sebelum pemasangan filter, terjadi penurunan besar persen spektrum dari 14% menjadi 2% pada spektrum orde harmonisa ke sebelas.



(a)



(b)

Gambar 3.13. Simulasi sistem dengan pemasangan filter pasif orde kelima
 (a) Bentuk Gelombang Arus, (b) Spektrum Harmonisa Arus

Gambar 3.13 menunjukkan respon sistem terhadap pemasangan ketiga filter pasif. Dapat dilihat pada gambar 3.13 (a), bentuk gelombang yang terukur pada titik PCC sistem, yaitu pada Z1, sudah berbentuk gelombang sinusoidal, dengan masih adanya distorsi harmonisa yang belum ter-*filter*. Apabila dibandingkan dengan gambar 3.8 (a), yaitu pada saat kondisi sistem tanpa adanya pemasangan filter, terjadi proses reduksi harmonisa yang cukup signifikan. Hal ini ditunjukkan pada spektrum harmonisa arus yang ditunjukkan pada gambar 3.13 (b). Spektrum orde harmonisa ke lima yang semula sebesar 48% turun hingga 6%, spektrum orde harmonisa ke tujuh yang semula sebesar 32% turun hingga 2%, dan

spektrum orde harmonisa ke sebelas yang semula sebesar 11% turun hingga 0,4%.

3.4.3. Simulasi Karakteristik Kerja Filter Pasif

Karakteristik dari kerja filter pasif penalaan tunggal adalah dengan menala komponen harmonisa, pada orde harmonisa spesifik sesuai dengan desain nilai kapasitansi dan induktansi filter pasif itu sendiri. Karakteristik kerja filter pasif dipengaruhi oleh faktor kualitas (Q) dari filter pasif itu sendiri. Faktor kualitas suatu filter ditentukan berdasarkan persamaan berikut.

Untuk filter pasif orde harmonisa ke lima, dengan nilai resistansi sebesar 0,063 Ω , didapatkan nilai faktor kualitas sebesar:

$$X_o = \sqrt{\frac{L}{C}} = \sqrt{\frac{1315,86\mu\text{H}}{308\ \mu\text{F}}} = 2,06\ \Omega$$

$$Q = \frac{X_o}{R} = \frac{2,06}{0,063} = 32,7$$

Untuk filter pasif orde harmonisa ke tujuh, dengan nilai resistansi sebesar 0,052 Ω , didapatkan nilai faktor kualitas sebesar:

$$X_o = \sqrt{\frac{L}{C}} = \sqrt{\frac{895,143\mu\text{H}}{231\ \mu\text{F}}} = 1,96\ \Omega$$

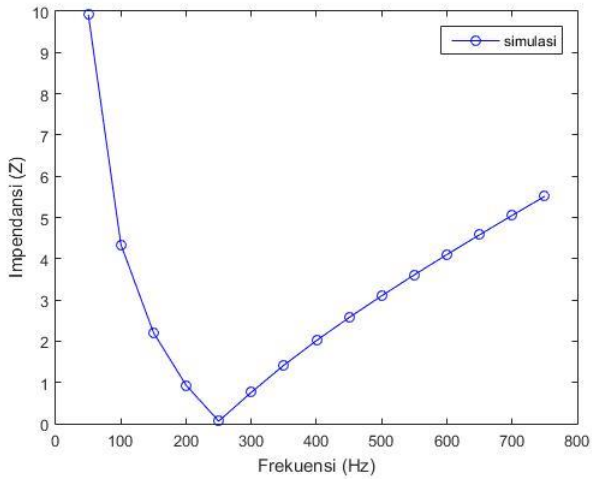
$$Q = \frac{X_o}{R} = \frac{1,96}{0,052} = 37,7$$

Untuk filter pasif orde harmonisa ke sebelas, dengan nilai resistansi sebesar 0,042 Ω , didapatkan nilai faktor kualitas sebesar:

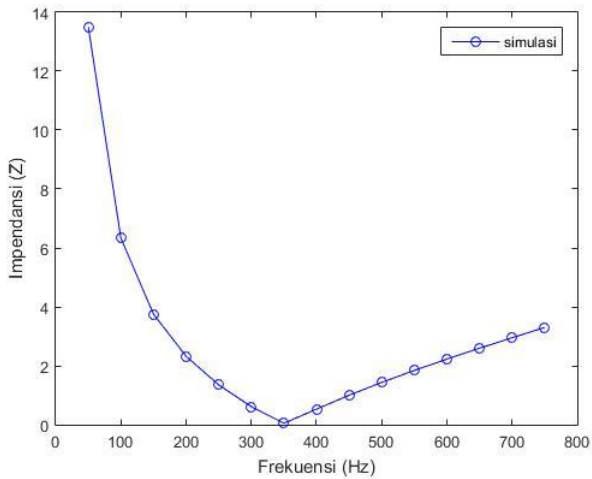
$$X_o = \sqrt{\frac{L}{C}} = \sqrt{\frac{675,294\mu\text{H}}{124\ \mu\text{F}}} = 2,33\ \Omega$$

$$Q = \frac{X_o}{R} = \frac{2,33}{0,042} = 55,5$$

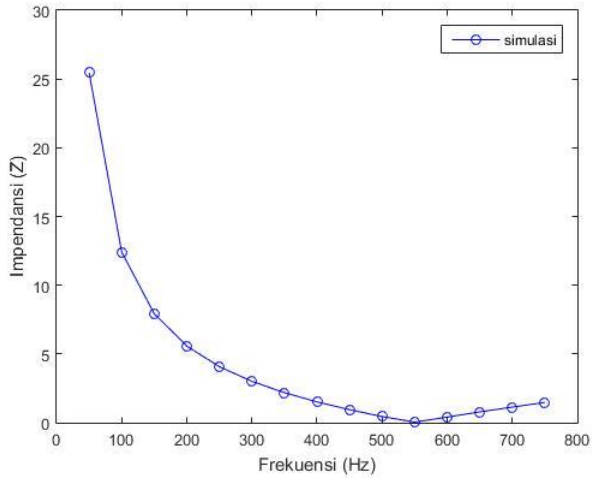
Berdasarkan hasil simulasi yang telah dijelaskan sebelumnya, berikut merupakan kurva karakteristik impedansi terhadap frekuensi untuk setiap orde filter pasif. Grafik dari karakteristik kerja filter ini akan ditampilkan dengan menggunakan bantuan software Matlab 2015a.



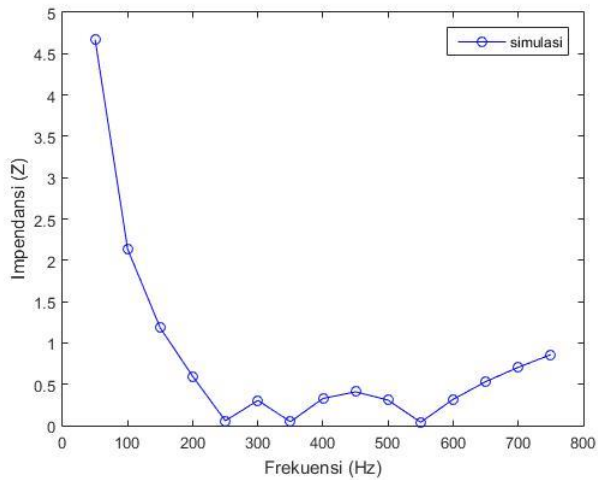
Gambar 3.14 Kurva Karakteristik Kerja Filter Pasif Orde Harmonisa ke lima



Gambar 3.15 Kurva Karakteristik Kerja Filter Pasif Orde Harmonisa ke tujuh



Gambar 3.16 Kurva Karakteristik Kerja Filter Pasif Orde Harmonisa ke sebelas

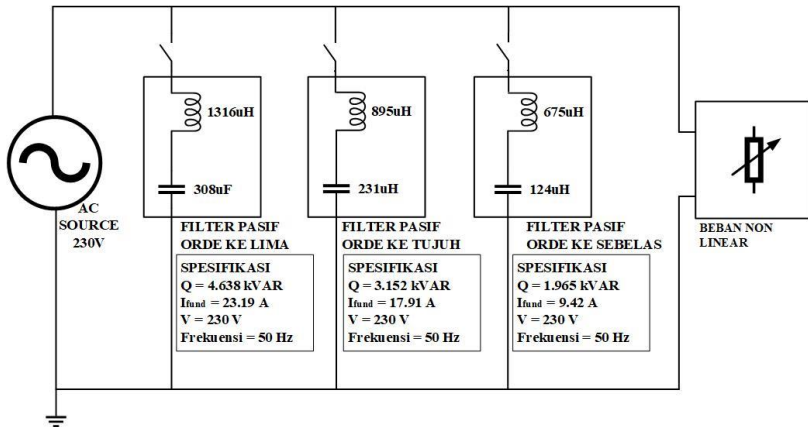


Gambar 3.17 Kurva Karakteristik Kerja Filter Pasif Orde Harmonisa ke lima, tujuh dan sebelas secara bersamaan

Gambar 3.14 hingga gambar 3.16 menunjukkan kurva karakteristik kerja filter pasif untuk tiap orde harmonisa. Dapat dilihat bahwa berdasarkan penentuan nilai induktansi dan kapasitansi yang telah dilakukan sebelumnya, filter pasif akan menala orde harmonisa secara akurat dan sesuai dengan masing-masing orde harmonisa yang akan dilakukan penalaan. Gambar 3.17 menunjukkan respon keseluruhan apabila ketiga filter bekerja secara bersamaan.

3.5. Implementasi Filter Pasif LC Penalaan Tunggal

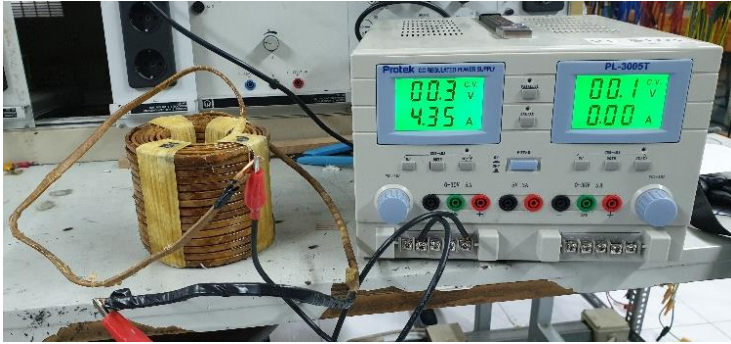
Tahap implementasi merupakan tahap pembuatan alat dengan menggunakan acuan dari proses desain yang telah dilakukan. Proses implementasi ini dilakukan agar dapat mengetahui kinerja dari sistem dan filter pasif secara riil.



Gambar 3.18 Rangkaian Filter Pasif LC Penalaan Tunggal

3.5.1. Nilai R_{DC} Induktor Aktual

Pada proses implementasi induktor, induktor selalu memiliki resistansi yang disebabkan oleh resistansi yang dibawa oleh kawat tembaga yang digunakan. Dalam proses pengujian kali ini, untuk mengetahui nilai resistansi yang ada pada induktor, dilakukan pengujian dengan menggunakan tegangan DC sebagai sumber. Tegangan diatur sampai arus DC yang mengalir pada induktor bernilai mendekati nilai arus maksimal dari sumber DC itu sendiri, yaitu sebesar 5 A. Gambar 3.19 menunjukkan proses pengujian nilai R_{DC} induktor.



Gambar 3.19 Proses pengujian untuk mendapatkan nilai R_{DC} induktor

Dari proses pengujian yang dilakukan, didapatkan hasil pengukuran sebagai berikut:

Tabel 3.4. Hasil pengukuran pengujian dengan sumber DC

Induktor	Arus	Tegangan	Resistansi
1432 μH	4,59 A	0,6 V	0,14 Ω
998 μH	4,72 A	0,6 V	0,127 Ω
698 μH	4,84 A	0,6 V	0,1 Ω

Tabel 3.5. Perbandingan Nilai resistansi antara simulasi dan hasil pengukuran

Induktor	Nilai Resistansi	
	Hasil Simulasi	Hasil Pengukuran
1432 μH	0,063 Ω	0,14 Ω
998 μH	0,052 Ω	0,127 Ω
698 μH	0,042 Ω	0,1 Ω

Dari hasil pengukuran yang ditunjukkan pada tabel 3.4 dan 3.5, nilai resistansi DC yang didapatkan tidak sesuai dengan hasil perhitungan dan simulasi.

Berdasarkan persamaan 2.37, maka nilai resistivitas tembaga dari kawat tembaga yang dipakai, dengan nilai diameter kawat dan jari-jari kawat sama dengan simulasi, serta panjang kawat yang digunakan sama, maka didapatkan nilai resistivitas kawat tembaga bernilai sekitar $3,902 \times 10^{-8} \Omega/\text{m}$. Nilai resistivitas berbeda jauh dengan resistivitas murni tembaga sebesar $1,68 \times 10^{-8} \Omega/\text{m}$.

3.5.2. Besar Arus yang Melewati Filter Pasif

Setelah diperoleh nilai induktansi dan nilai kapasitansi hasil pengukuran, maka dapat ditentukan besar arus yang melewati filter pasif. Besar arus yang melewati filter pasif ditentukan berdasarkan persamaan 2.38 berikut.

$$I_{fund} = \frac{V_{sumber}}{\sqrt{R_n^2 + (X_l - X_c)^2}}$$

Untuk filter pasif orde harmonisa ke lima, didapatkan nilai perhitungan sebagai berikut.

$$X_l = 2\pi f_o \times L$$

$$X_l = 2\pi \times 50 \times 1432\mu\text{H} = 0,41339 \Omega$$

$$X_c = \frac{1}{2\pi f_o \times C}$$

$$X_c = \frac{1}{2\pi \times 50 \times 321 \mu\text{F}} = 10,334 \Omega$$

Dengan nilai $R_n = 0,14 \Omega$, didapatkan,

$$I_{fund} = \frac{V_{sumber}}{\sqrt{R_n^2 + (X_l - X_c)^2}}$$

$$I_{fund} = \frac{230 \text{ V}}{\sqrt{0,14\Omega^2 + (0,41339 \Omega - 10,334 \Omega)^2}} = 23,19 \text{ A}$$

Untuk filter pasif orde harmonisa ketujuh, didapatkan nilai perhitungan sebagai berikut.

$$X_l = 2\pi f_o \times L$$

$$X_l = 2\pi \times 50 \times 998 \mu\text{H} = 0,31 \Omega$$

$$X_c = \frac{1}{2\pi f_o \times C}$$

$$X_c = \frac{1}{2\pi \times 50 \times 242 \mu\text{F}} = 13,15 \Omega$$

Dengan nilai $R_n = 0,127 \Omega$, didapatkan,

$$I_{fund} = \frac{V_{sumber}}{\sqrt{R_n^2 + (X_l - X_c)^2}}$$
$$I_{fund} = \frac{230 V}{\sqrt{0,127\Omega^2 + (0,31 \Omega - 13,15 \Omega)^2}} = 17.91 A$$

Untuk filter pasif orde harmonisa ke sebelas, didapatkan nilai perhitungan sebagai berikut.

$$X_l = 2\pi f_o \times L$$

$$X_l = 2\pi \times 50 \times 698 \mu H = 0,219 \Omega$$

$$X_c = \frac{1}{2\pi f_o \times C}$$

$$X_c = \frac{1}{2\pi \times 50 \times 129 \mu F} = 24.63 \Omega$$

Dengan nilai $R_n = 0,1 \Omega$, didapatkan,

$$I_{fund} = \frac{V_{sumber}}{\sqrt{R_n^2 + (X_l - X_c)^2}}$$
$$I_{fund} = \frac{230 V}{\sqrt{0,1\Omega^2 + (0,219 \Omega - 24.63 \Omega)^2}} = 9.42 A$$

3.5.3. Rugi-rugi Daya Terserap oleh Filter Pasif

Berdasarkan hasil pengukuran nilai R_{DC} induktor, nilai resistansi yang dibawa oleh induktor itu sendiri meningkat dibandingkan dengan hasil simulasi dan desain. Oleh karena itu, rugi-rugi daya yang terserap oleh filter tersebut akan semakin besar. Perhitungan rugi-rugi daya yang terserap oleh filter didapatkan dari persamaan berikut.

$$P_{loss} = I_f^2 \times R$$

Untuk filter pasif orde harmonisa ke lima, nilai arus fundamental yang melewati filter sebesar 23.19 A dan besar nilai resistansi sebesar 0,14 Ω , maka didapatkan besar rugi-rugi daya:

$$P_{loss} = I_f^2 \times R$$
$$P_{loss} = 23.19^2 \times 0,14 = 75.28 \text{ W}$$

Untuk filter pasif orde harmonisa ke tujuh, nilai arus fundamental yang melewati filter sebesar 17.91 A dan besar nilai resistansi sebesar 0,127 Ω , maka didapatkan besar rugi-rugi daya:

$$P_{loss} = I_f^2 \times R$$
$$P_{loss} = 17.91^2 \times 0,127 = 40.74 \text{ W}$$

Untuk filter pasif orde harmonisa ke sebelas, nilai arus fundamental yang melewati filter sebesar 9.42 A dan besar nilai resistansi sebesar 0,1 Ω , maka didapatkan besar rugi-rugi daya:

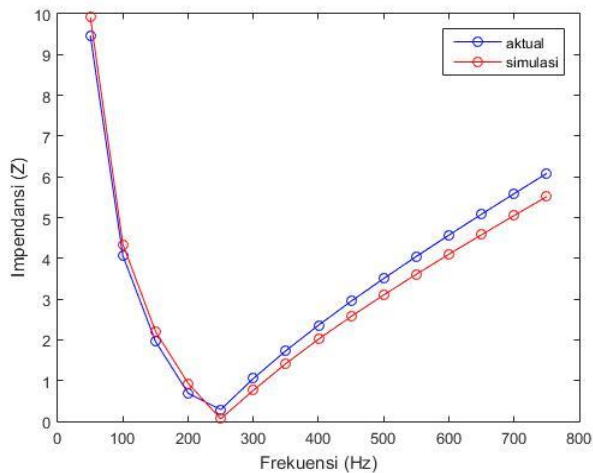
$$P_{loss} = I_f^2 \times R$$
$$P_{loss} = 9.42^2 \times 0,1 = 8.87 \text{ W}$$

3.5.4. Perbandingan Antara Kondisi Aktual dan Kondisi Simulasi Kurva Karakteristik Kerja Filter

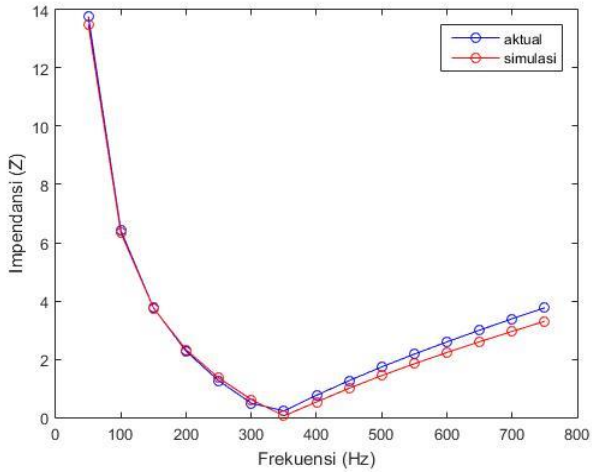
Dalam proses implementasi filter pasif penalaan tunggal ini, terdapat beberapa perubahan nilai induktansi dan kapasitansi yang terukur terhadap nilai induktansi dan kapasitansi simulasi. Perbedaan nilai induktansi dan kapasitansi kondisi aktual terhadap kondisi simulasi dijelaskan dalam tabel berikut.

Tabel 3.6 Perbedaan nilai induktansi dan kapasitansi kondisi aktual terhadap kondisi simulasi

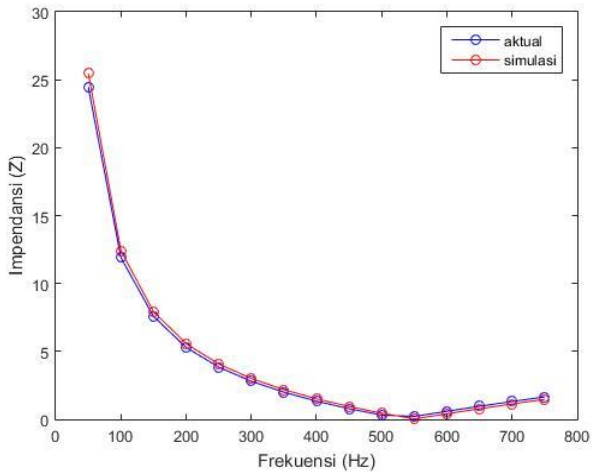
Filter Pasif orde harmonisa ke lima		
	Hasil simulasi	Hasil pengukuran
Induktansi	1316 μH	1432 μH
Kapasitansi	308 μF	321 μF
Filter Pasif Orde Harmonisa ke tujuh		
	Hasil simulasi	Hasil pengukuran
Induktansi	895 μH	998 μH
Kapasitansi	231 μF	242 μF
Filter Pasif Orde Harmonisa ke sebelas		
	Hasil Simulasi	Hasil pengukuran
Induktansi	675 μH	698 μH
Kapasitansi	124 μF	129 μF



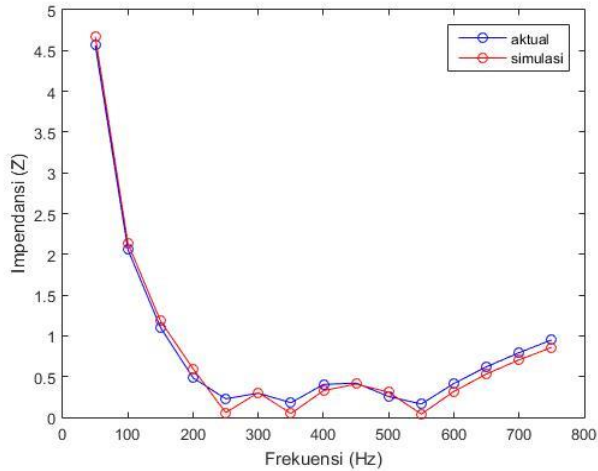
Gambar 3.20 Kurva perbedaan karakteristik kerja Filter Pasif Orde Harmonisa ke lima antara kondisi simulasi dan aktual



Gambar 3.21 Kurva perbedaan karakteristik kerja Filter Pasif Orde Harmonisa ke tujuh antara kondisi simulasi dan aktual



Gambar 3.22 Kurva perbedaan karakteristik kerja Filter Pasif Orde Harmonisa ke sebelas antara kondisi simulasi dan aktual

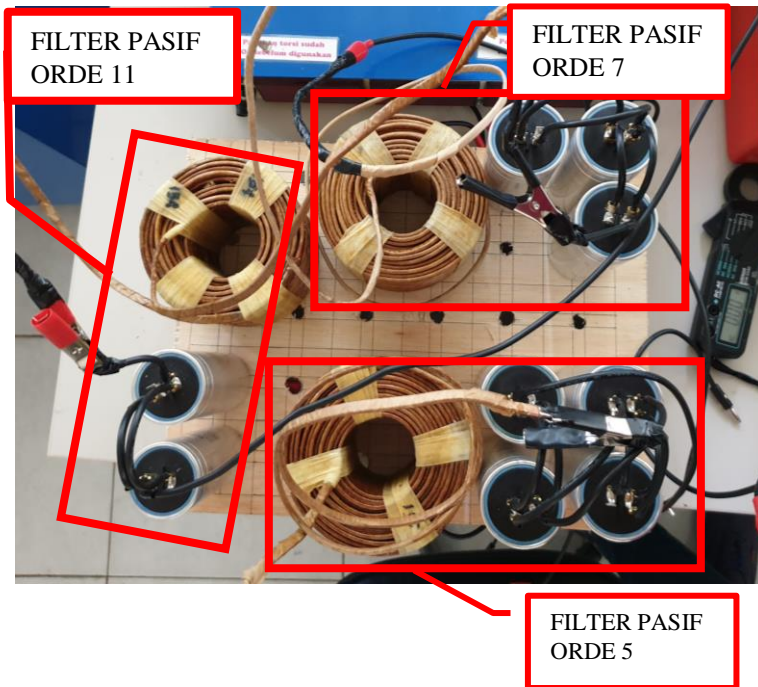


Gambar.3.23 Kurva perbedaan karakteristik kerja Filter Pasif secara keseluruhan antara kondisi simulasi dan aktual

Gambar 3.20 hingga gambar 3.22 menunjukkan kurva perbedaan karakteristik kerja filter pasif untuk tiap orde harmonisa. Dapat terlihat terjadi perbedaan pada kondisi penalaan tiap orde harmonisa, yang dikarenakan bergesernya nilai faktor kualitas tiap filter pasif. Tabel 3.7 menunjukkan perbandingan faktor kualitas dari kondisi simulasi dan kondisi aktual filter pasif.

Tabel 3.7 Perbandingan Faktor Kualitas

Filter Pasif	Kondisi Simulasi	Kondisi Aktual
Orde 5	32,7	15,08
Orde 7	37,7	16,54
Orde 11	55,55	23,24

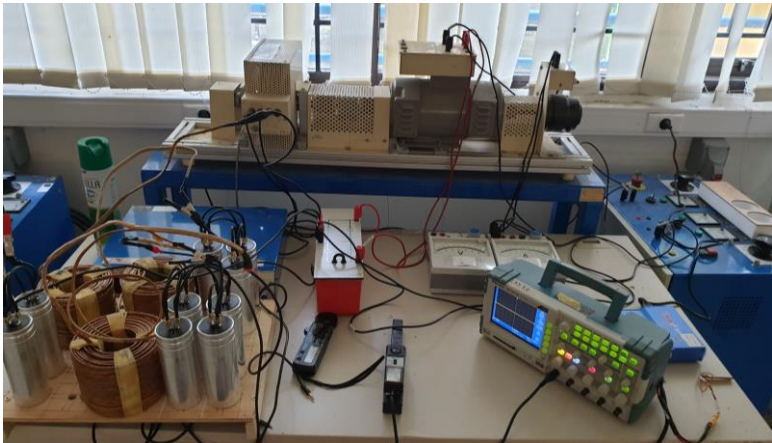


Gambar 3.24 Rangkaian Implementasi Filter Pasif LC Penalaan Tunggal

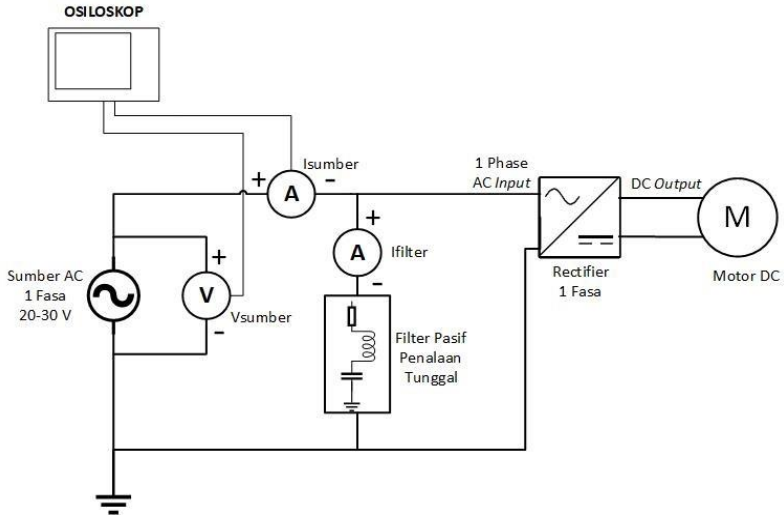
Berdasarkan data pada tabel 3.7, terjadi pergeseran faktor kualitas yang cukup jauh. Dikarenakan nilai resistansi yang semakin besar, serta ada sedikit perubahan nilai kapasitansi dan induktansi menyebabkan faktor kualitas dari filter pasif berubah. Pergeseran faktor kualitas ini berdampak pada karakteristik kerja filter apabila bekerja secara keseluruhan. Frekuensi penalaan pada kondisi aktual tiap orde filter harmonisa tidak menala tepat di frekuensi penalaannya, yaitu 250 Hz, 350 Hz dan 550 Hz. Terjadi pergeseran pada frekuensi penalaan, namun tidak terlalu signifikan. Hal ini disebabkan terjadi perubahan nilai induktansi dan kapasitansi filter pasif pada saat kondisi aktual. Gambar 3.24 menunjukkan rangkaian implementasi dari filter pasif LC penalaan tunggal.

BAB 4 PENGUJIAN DAN ANALISIS

Pada bab 4 akan dibahas mengenai pengujian dan analisis data hasil implementasi filter pasif LC penalaan tunggal. Pada pengujian kerja filter pasif, akan dibagi menjadi beberapa pengujian, yaitu pengujian sistem pada saat tanpa ada filter terpasang, pengujian sistem pada saat filter pasif orde ke lima terpasang, pengujian sistem pada saat filter pasif orde ke tujuh terpasang dan pengujian sistem pada saat filter pasif orde ke sebelas terpasang. Selain beberapa pengujian diatas, dilakukan juga pengujian filter pasif itu sendiri untuk mengetahui besar daya yang terserap pada filter. Pengujian dilakukan dengan menggunakan peralatan yang tersedia di Laboratorium Konversi Energi Listrik. Peralatan yang digunakan adalah sumber AC variabel, *rectifier* dioda satu fasa sebagai sumber harmonisa, dan beban berupa motor DC. Sumber AC yang digunakan adalah sumber AC variabel satu fasa. Untuk mengamati bentuk gelombang tegangan dan arus digunakan osiloskop Tektronix beserta probe tegangan Tektronik standar CAT II beserta probe arus Tektronik A622. Gambar 4.1 menunjukkan proses pengujian alat tugas akhir, dengan gambar 4.2 menunjukkan diagram blok skema pengujian alat tugas akhir.



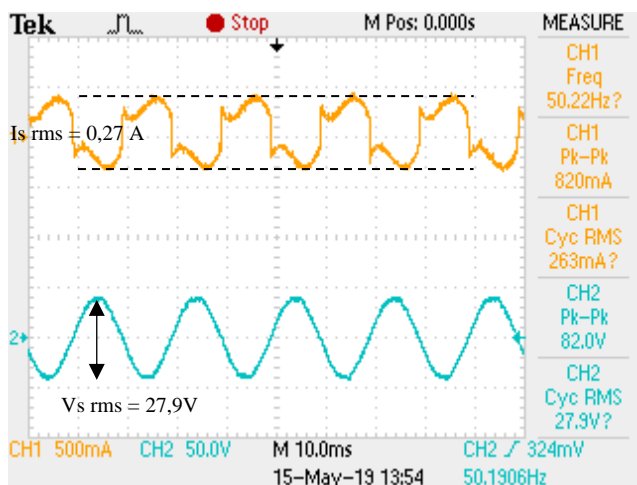
Gambar 4.1. Pengujian Alat Tugas Akhir



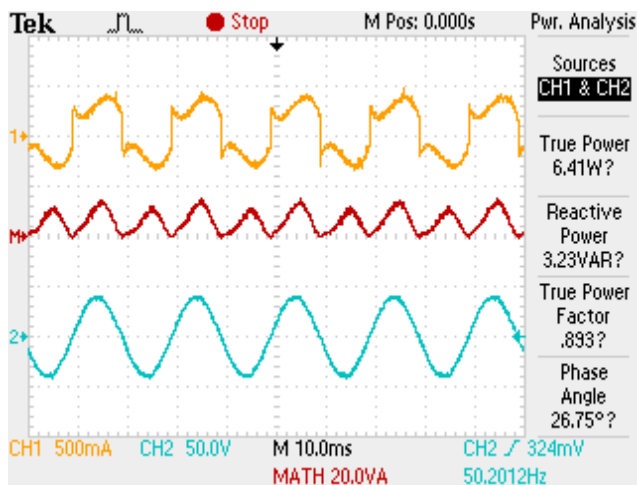
Gambar 4.2. Skema pengujian filter pasif LC penalaan tunggal

4.1. Pengujian tanpa Filter Pasif

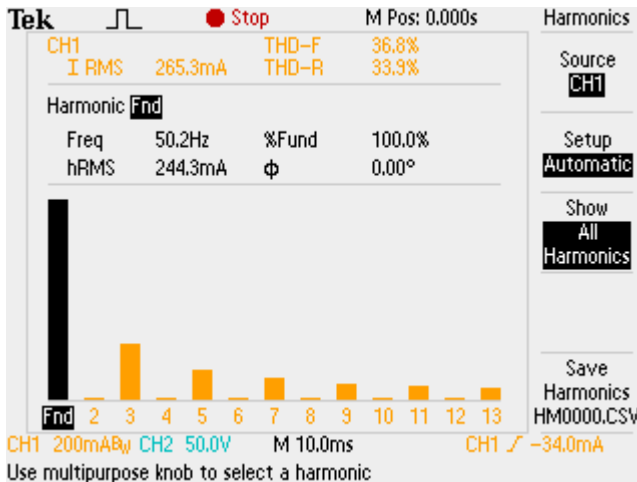
Pada pengujian sistem tanpa filter pasif, digunakan *full wave rectifier* dioda satu fasa sebagai sumber harmonisa, dan motor DC sebagai beban. Sumber tegangan yang digunakan merupakan sumber tegangan AC 25-30 V untuk menghindari terjadinya arus balik yang melebihi batas maksimum arus yang diterima oleh sumber. Dalam proses pengukuran tegangan, digunakan *digital multimeter Sanwa CD800a*, dan pengukuran arus digunakan *clamp meter Sanwa DCM-22AD*. Untuk mengamati bentuk gelombang arus harmonisa digunakan osiloskop Tektronik, dengan menggunakan probe arus Tektronik A622 dan probe tegangan Tektronik standar CAT II. Pada gambar 4.2 hingga 4.4 merupakan hasil pengujian sistem tanpa ada filter pasif yang terpasang.



Gambar 4.3. Hasil Pengukuran Arus dan Tegangan untuk Pengujian Sistem Tanpa Filter Pasif



Gambar 4.4. Hasil Pengukuran Daya untuk Pengujian Sistem Tanpa Filter Pasif

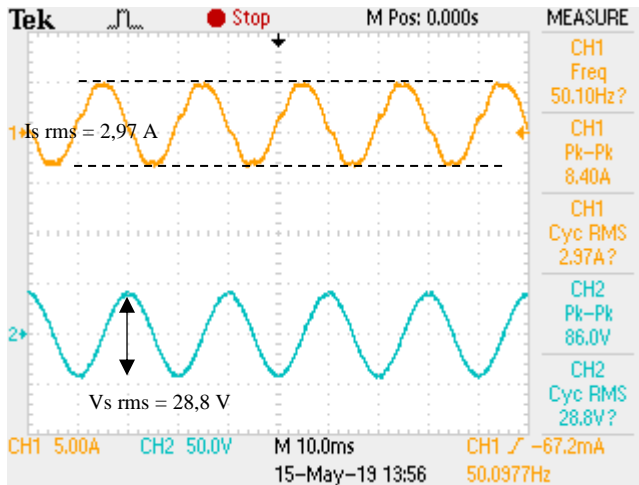


Gambar 4.5. Spektrum Harmonisa Hasil Pengujian Sistem Tanpa Filter Pasif

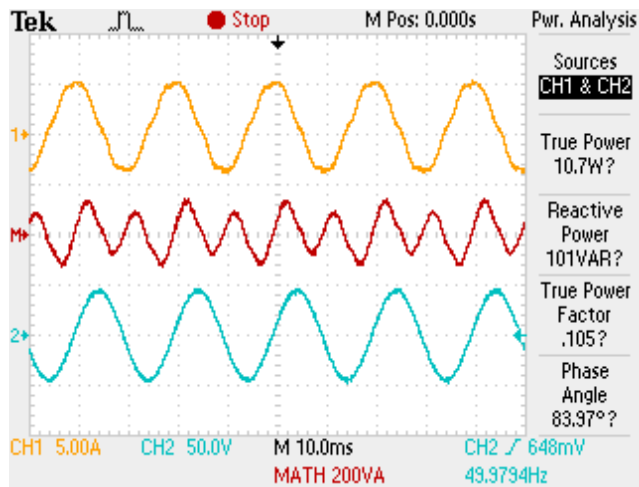
Gambar 4.3 dan 4.4 menunjukkan data hasil pengukuran nilai arus dan tegangan sistem, dan menunjukkan daya aktif dan reaktif terukur di sistem yang diserap oleh beban, yaitu beban motor DC dan *rectifier*. Dari kedua data diatas, dapat dianalisis bahwa bentuk gelombang arus tidak berbentuk sinusoidal murni, sedangkan untuk gelombang tegangan berbentuk sinusoidal murni. Gambar 4.4 menunjukkan data spektrum harmonisa arus hasil pengujian sistem tanpa filter pasif. Dari data diatas, dapat ditunjukkan bahwa orde harmonisa terbesar yang ditimbulkan oleh sumber harmonisa adalah orde harmonisa ketiga, ke lima, ketujuh, kesembilan, kesebelas dan ketigabelas.

4.2. Pengujian dengan Filter Pasif Orde Harmonisa ke lima

Pada pengujian sistem dengan penggunaan filter pasif orde harmonisa ke lima, akan dibuktikan bahwa ketika sistem yang memiliki arus harmonisa yang disebabkan oleh sumber harmonisa, filter pasif akan bekerja dengan memberikan jalur bagi arus harmonisa untuk orde harmonisa ke lima, sehingga gelombang arus sistem kembali memiliki bentuk sinusoidal murni. Gambar 4.5 hingga 4.7 merupakan hasil pengujian filter pasif dengan penggunaan filter pasif orde harmonisa ke lima.

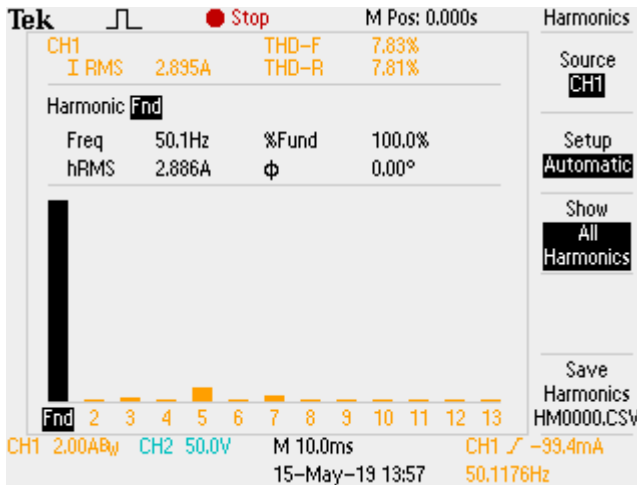


Gambar 4.6. Hasil Pengukuran Arus dan Tegangan untuk Pengujian Sistem dengan Filter Pasif Orde Harmonisa ke lima



Gambar 4.7. Hasil Pengukuran Daya untuk Pengujian Sistem dengan Filter Pasif Orde Harmonisa ke lima

Pada gambar 4.5. menunjukkan bentuk gelombang arus dan tegangan dari sistem. Dapat dilihat dari gambar tersebut, gelombang arus sistem telah menjadi gelombang sinusoidal, namun masih ada sedikit distorsi. Jika dibandingkan dengan pada saat sistem tanpa ada pemasangan filter pasif, terjadi perubahan yang cukup signifikan dari bentuk gelombang arus yang tidak berbentuk sinusoidal menjadi gelombang sinusoidal setelah terpasang filter pasif untuk orde harmonisa ke lima. Gambar 4.6 menunjukkan daya aktif dan daya reaktif yang terukur di sumber. Dapat terlihat terjadi peningkatan daya reaktif yang cukup signifikan dari 3,23 VAR menjadi 101 VAR setelah pemasangan filter pasif orde harmonisa ke lima. Hal ini dikarenakan daya reaktif yang dialirkan oleh kapasitor filter, dimana besar daya reaktif kapasitor sebesar 4,8 kVAR, lebih besar daripada kebutuhan daya reaktif sistem, sehingga kapasitor filter juga berfungsi sebagai kompensasi daya reaktif pada sistem. Berdasarkan hasil pengukuran dengan menggunakan clamp meter, arus yang melewati filter pasif sebesar 2,9 A.



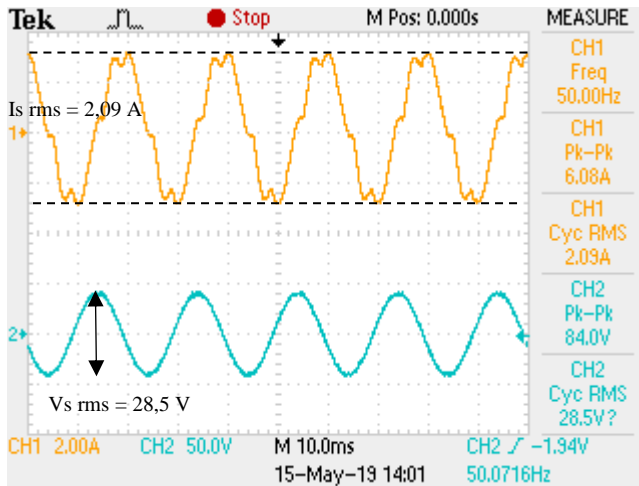
Gambar 4.8. Spektrum Harmonisa Filter Pasif Orde Harmonisa ke lima

Gambar 4.7. menunjukkan data spektrum harmonisa arus pada saat pemasangan filter pasif orde harmonisa ke lima. Jika dibandingkan dengan sebelum pemasangan filter pasif, terjadi penurunan spektrum harmonisa yang cukup signifikan di semua orde harmonisa, terutama pada

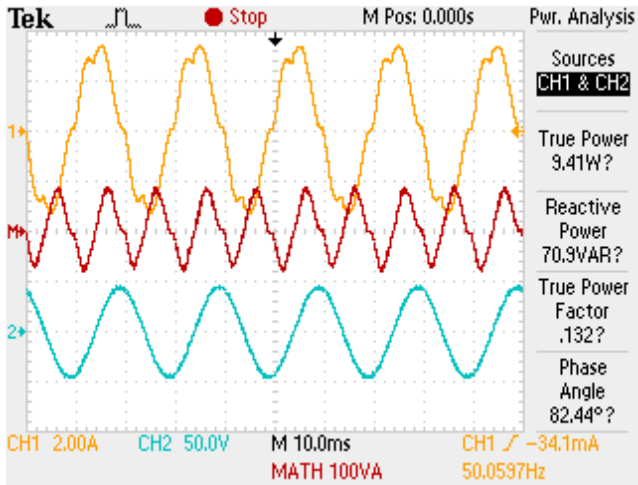
orde harmonisa ke lima. Hal ini dikarenakan filter pasif dikhususkan untuk menala harmonisa pada orde yang spesifik.

4.3. Pengujian dengan Filter Pasif Orde Harmonisa ke tujuh

Pada pengujian sistem dengan penggunaan filter pasif orde harmonisa ke tujuh, akan dibuktikan bahwa ketika sistem yang memiliki arus harmonisa yang disebabkan oleh sumber harmonisa, filter pasif akan bekerja dengan memberikan jalur bagi arus harmonisa untuk orde harmonisa ke tujuh, sehingga gelombang arus sistem kembali memiliki bentuk sinusoidal. Gambar 4.8 hingga 4.10 merupakan hasil pengujian filter pasif dengan penggunaan filter pasif orde harmonisa ke tujuh.

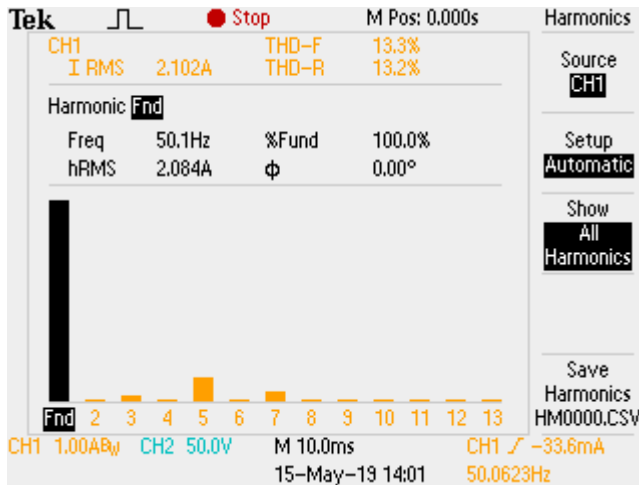


Gambar 4.9. Hasil Pengukuran Arus dan Tegangan untuk Pengujian Sistem dengan Filter Pasif Orde Harmonisa ke tujuh



Gambar 4.10. Hasil Pengukuran Daya untuk Pengujian Sistem dengan Filter Pasif Orde Harmonisa ke tujuh

Gambar 4.8 menunjukkan bentuk gelombang arus dan tegangan sistem. Dapat dilihat dari gambar tersebut, gelombang arus sistem sudah mulai terbentuk gelombang sinusoidal, namun masih terdapat distorsi. Jika dibandingkan dengan pada saat sistem tanpa pemasangan filter pasif, terjadi perubahan yang cukup signifikan dari bentuk gelombang arus yang semula tidak berbentuk sinusoidal menjadi gelombang sinusoidal setelah terpasang filter pasif untuk orde harmonisa ke tujuh, namun masih ada distorsi pada bentuk gelombang. Hal ini dikarenakan masih terdapat komponen harmonisa pada orde ke lima, seperti yang ditunjukkan pada gambar 4.10. Selanjutnya, gambar 4.9 menunjukkan daya aktif dan daya reaktif terukur di sumber. Dapat terlihat terjadi peningkatan yang signifikan dari 3,23 VAR menjadi 70,9 VAR setelah pemasangan filter pasif orde harmonisa ke tujuh. Hal ini dikarenakan kapasitas kapasitor yang sebesar 3,4 kVAR, sehingga daya reaktif dari kapasitor melebihi kebutuhan daya reaktif sistem. Sehingga, kapasitor filter dapat berfungsi sebagai kompensasi daya reaktif sistem. Berdasarkan hasil pengukuran dengan clamp meter, arus yang melewati filter terukur sebesar 2,02 A.

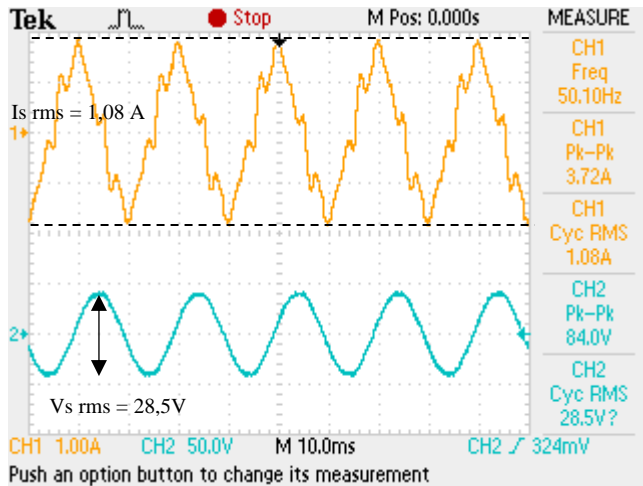


Gambar 4.11. Spektrum Harmonisa Filter Pasif Orde Harmonisa ke tujuh

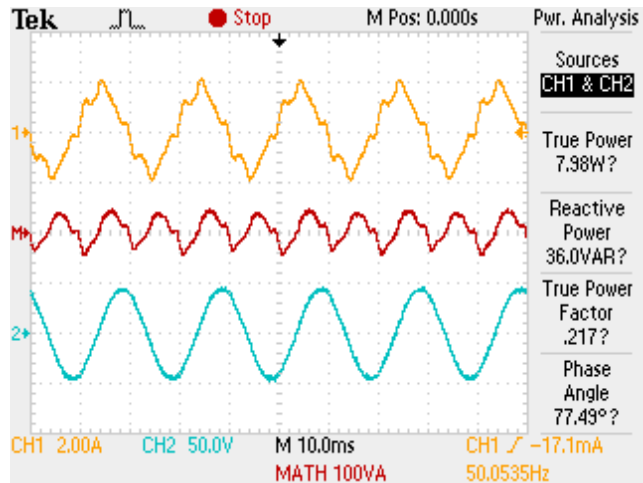
Gambar 4.10 menunjukkan spektrum harmonisa sistem pada kondisi filter pasif orde harmonisa ke tujuh terpasang. Apabila dibandingkan dengan pada saat kondisi belum terpasang filter pasif, terjadi penurunan cukup signifikan di semua orde harmonisa, terutama di orde harmonisa ke tujuh. Hal ini dikarenakan filter pasif ini didesain khusus untuk menala orde harmonisa ke tujuh. Namun, hanya dengan filter pasif orde tujuh saja belum bisa mengurangi distorsi gelombang arus dikarenakan masih adanya komponen harmonisa orde ke lima dalam sistem.

4.4. Pengujian dengan Filter Pasif Orde Harmonisa ke sebelas

Pada pengujian sistem dengan penggunaan filter pasif orde harmonisa ke sebelas, akan dibuktikan bahwa ketika sistem yang memiliki arus harmonisa yang disebabkan oleh sumber harmonisa, filter pasif akan bekerja dengan memberikan jalur bagi arus harmonisa untuk orde harmonisa ke sebelas, sehingga gelombang arus sistem kembali memiliki bentuk sinusoidal. Gambar 4.11 hingga 4.13 merupakan hasil pengujian filter pasif dengan penggunaan filter pasif orde harmonisa ke sebelas.

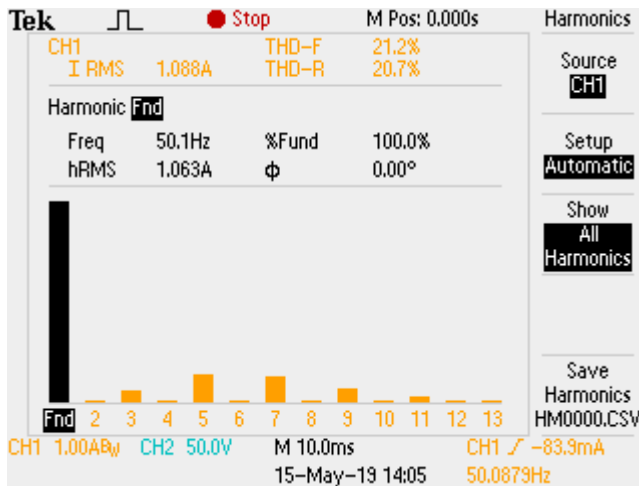


Gambar 4.12. Hasil Pengukuran Arus dan Tegangan untuk Pengujian Sistem dengan Filter Pasif Orde Harmonisa ke sebelas



Gambar 4.13. Hasil Pengukuran Daya untuk Pengujian Sistem dengan Filter Pasif Orde Harmonisa ke sebelas

Gambar 4.11 menunjukkan bentuk gelombang arus dan tegangan sistem. Dapat terlihat dari gambar tersebut, gelombang arus sistem sudah mulai terbentuk gelombang sinusoidal, namun masih terdapat distorsi. Hal ini dikarenakan masih terdapat komponen orde harmonisa ke lima dan tujuh yang cukup tinggi pada sistem, seperti yang ditunjukkan pada gambar 4.13. Apabila dibandingkan dengan pada saat sistem tanpa pemasangan filter pasif, terjadi perubahan yang cukup signifikan dari bentuk gelombang arus yang semula tidak berbentuk sinusoidal menjadi gelombang sinusoidal setelah terpasang filter pasif untuk orde harmonisa ke sebelas. Gambar 4.12 menunjukkan daya aktif dan daya reaktif terukur di sistem. Dapat terlihat terjadi peningkatan daya reaktif yang signifikan dari 3,23 VAR menjadi 36 VAR setelah pemasangan filter pasif orde harmonisa ke sebelas. Hal ini dikarenakan kapasitas daya reaktif kapasitor yang sebesar 1,9 kVAR melebihi kebutuhan daya reaktif sistem. Sehingga, kapasitor filter bekerja juga sebagai kompensasi daya reaktif di sistem. Berdasarkan pengukuran menggunakan clamp meter, arus yang mengalir pada filter terukur sebesar 1,04 A.



Gambar 4.14. Spektrum Harmonisa Filter Pasif Orde Harmonisa ke sebelas

Gambar 4.13. menunjukkan spektrum harmonisa sistem pada kondisi filter pasif orde harmonisa ke sebelas terpasang. Apabila dibandingkan dengan pada saat kondisi belum terpasang filter pasif, terjadi penurunan di orde harmonisa ke sebelas. Hal ini dikarenakan filter pasif ini didesain khusus untuk menala orde harmonisa ke sebelas. Namun, dikarenakan hanya menala orde harmonisa ke sebelas, masih terdapat komponen orde harmonisa lainnya yang ada dalam sistem, seperti spektrum komponen harmonisa orde lima dan tujuh.

Untuk menggambarkan perbedaan antara sebelum dan setelah pemasangan tiap filter pasif, tabel 4.1 menjelaskan perbandingan hasil pengukuran sebelum dan sesudah pemasangan filter pasif. Dapat dilihat, terjadi perubahan signifikan pada nilai THD sistem sebelum dan setelah pemasangan filter. Terjadi penurunan nilai THD yang signifikan antara sebelum dan setelah pemasangan tiap filter pasif. Terjadi penurunan sebesar 28,97% setelah pemasangan filter orde ke lima, penurunan sebesar 23,5% setelah pemasangan filter orde ke tujuh, dan penurunan sebesar 15,6% setelah pemasangan filter orde ke sebelas. Selain itu, terjadi peningkatan nilai daya reaktif yang terukur di sistem, dimana terjadi peningkatan sebesar 97,77 VAR setelah pemasangan filter orde ke lima, peningkatan sebesar 67,67 VAR setelah pemasangan filter orde ke tujuh, dan peningkatan sebesar 32,77 VAR setelah pemasangan filter orde ke sebelas.

Tabel 4.1. Perbandingan hasil pengukuran sebelum dan setelah penggunaan filter pasif

	THDf (%)	Daya Aktif terukur	Daya Reaktif terukur
Sebelum Filter	36,8%	6,41 W	3,23, VAR
Filter Orde 5	7,83%	10,7 W	101 VAR
Filter Orde 7	13,3%	9,41 W	70,9 VAR
Filter Orde 11	21,2%	7,98 W	36 VAR

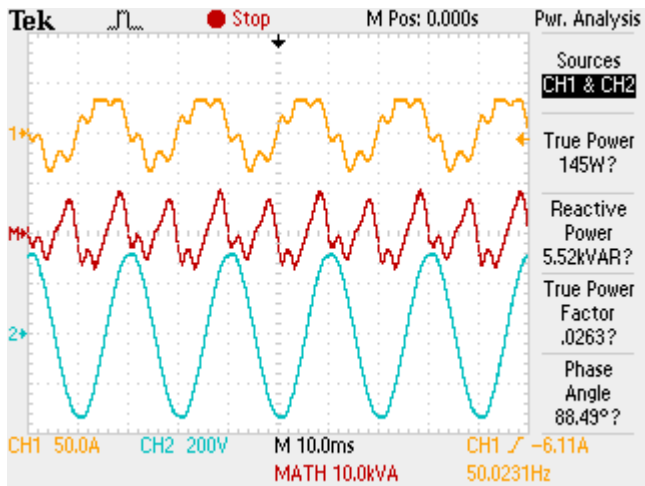
4.5. Pengujian Rugi-Rugi Daya yang Terserap Filter

Dalam proses implementasi filter pasif penalaan tunggal, kedua komponen, baik induktor dan kapasitor sangat mungkin memiliki nilai resistansi. Dengan adanya nilai resistansi, dalam proses penggunaan filter pasif, akan ada rugi-rugi daya yang diserap filter yang diakibatkan adanya nilai resistansi dalam komponen. Seperti yang dijelaskan pada poin 3.5.1

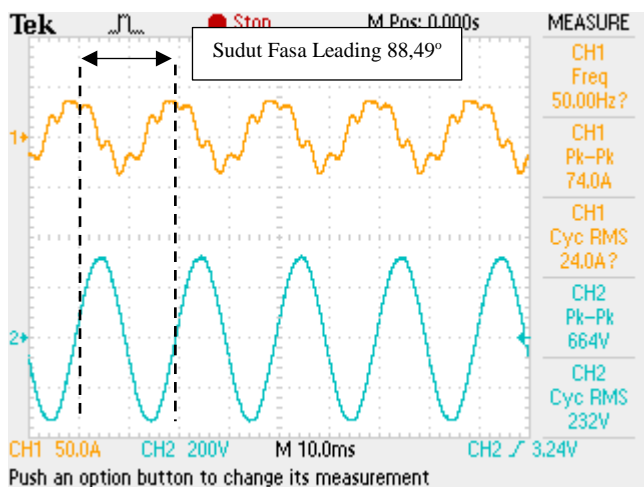
mengenai nilai R_{DC} induktor, induktor memiliki nilai resistansi, dan resistansi yang dihasilkan cukup tinggi. Dan seperti yang telah dijelaskan pada poin 3.5.2. mengenai nilai rugi-rugi daya yang terserap oleh filter yang didapatkan dengan perhitungan. Dengan memberikan sumber tegangan jala-jala 220V langsung menuju filter pasif, tanpa adanya beban terpasang pada sistem, dapat diketahui besar nilai rugi-rugi daya sesungguhnya apabila dioperasikan dalam tegangan jala-jala 220 V.

4.5.1. Filter Pasif Orde Harmonisa ke lima

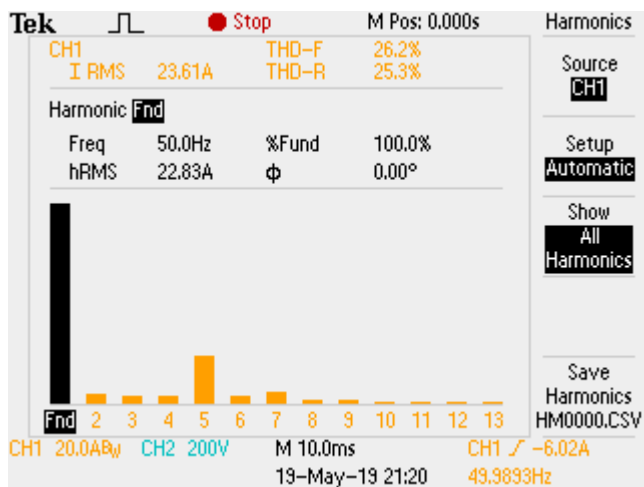
Pada pengujian filter pasif orde harmonisa ke lima ini, akan dibuktikan besar rugi-rugi daya aktif yang diserap oleh filter pasif itu sendiri. Setelah dilakukan perhitungan rugi-rugi daya aktif yang diserap, akan dibandingkan antara hasil perhitungan dengan hasil pengujian.



Gambar 4.15. Hasil Pengukuran Daya untuk Pengujian Rugi-rugi daya yang terserap filter untuk filter orde harmonisa ke lima



Gambar 4.16. Hasil Pengukuran Arus dan Tegangan untuk Pengujian Rugi-rugi daya yang terserap filter untuk filter orde harmonisa ke lima



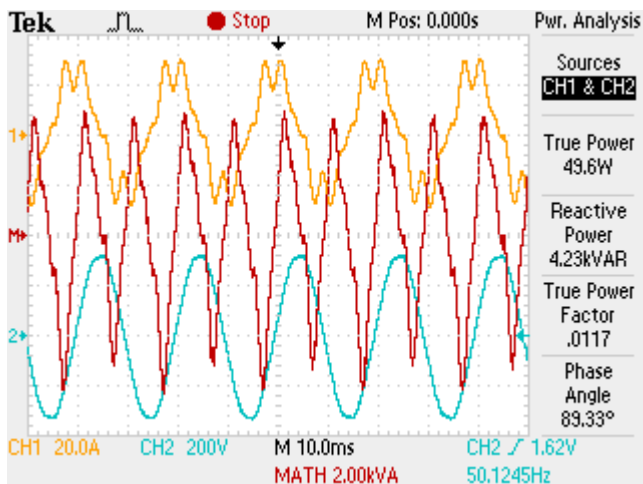
Gambar 4.17. Spektrum Harmonisa Filter Pasif Orde Harmonisa ke lima

Berdasarkan hasil pengukuran yang ditunjukkan pada gambar 4.15, besar daya aktif yang terukur di sisi input sistem sebesar 145 W. Besar daya aktif ini timbul sebagai akibat dari pemasangan filter saja, dan tidak ada beban lain yang terpasang pada sistem. Jika dibandingkan dengan hasil perhitungan yang menunjukkan besar daya aktif yang terserap filter sebesar 68,83 W, terjadi perbedaan yang signifikan. Berdasarkan pengukuran, daya yang diserap sangat tinggi. Hal ini dikarenakan resistansi lainnya yang tidak diketahui, seperti resistansi yang terdapat pada kapasitor, dan daya dari jaringan yang terserap.

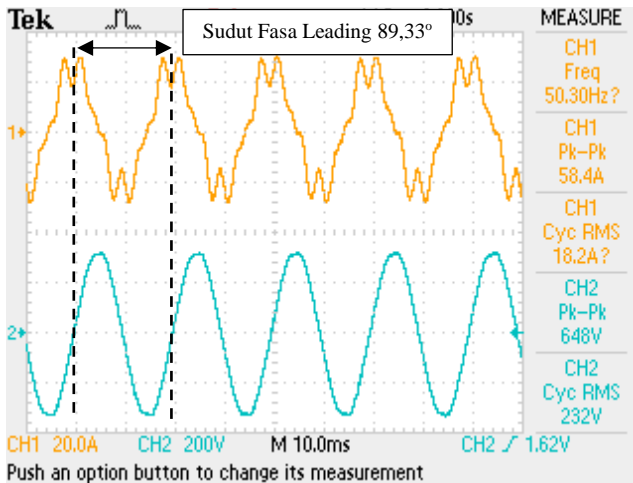
Besar daya reaktif yang dialirkan oleh kapasitor ke sistem sebesar 5,52 kVAR, menyebabkan sistem menjadi kapasitif. Hal ini ditunjukkan pada gambar 4.16 dimana gelombang arus mendahului dari gelombang tegangan, sehingga sistem mengalami *leading phase angle* sebesar 88,49°.

4.5.2. Filter Pasif Orde Harmonisa ke tujuh

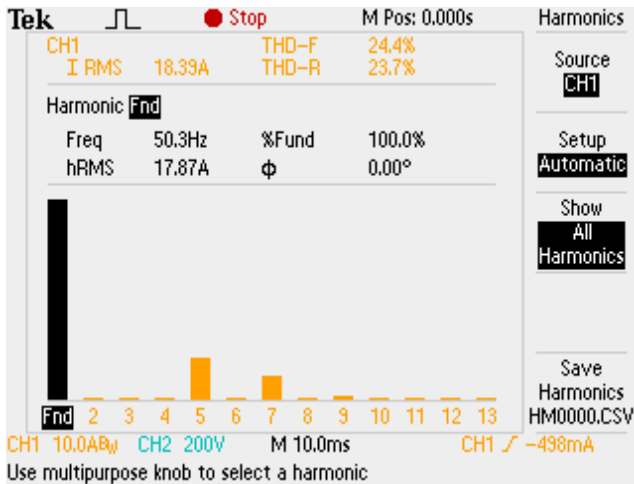
Pada pengujian filter pasif orde harmonisa ke tujuh ini, akan dibuktikan besar rugi-rugi daya aktif yang diserap oleh filter pasif itu sendiri. Setelah dilakukan perhitungan rugi-rugi daya aktif yang diserap, akan dibandingkan antara hasil perhitungan dengan hasil pengujian.



Gambar 4.18. Hasil Pengukuran Daya Pengujian Rugi-rugi daya yang terserap filter untuk filter orde harmonisa ke tujuh



Gambar 4.19. Hasil Pengukuran Arus dan Tegangan Pengujian Rugi-rugi daya yang terserap filter untuk filter orde harmonisa ke tujuh



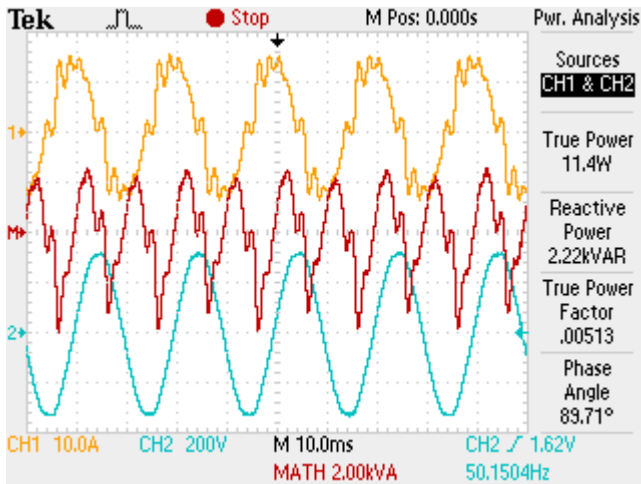
Gambar 4.20. Spektrum Harmonisa Filter Pasif Orde Harmonisa ke lima

Dari hasil pengukuran yang ditunjukkan pada gambar 4.18, besar daya aktif yang terukur di sisi input sistem sebesar 49,6 W. Besar daya aktif ini timbul sebagai akibat dari pemasangan filter saja, dan tidak ada beban lain yang terpasang pada sistem. Jika dibandingkan dengan hasil perhitungan yang menunjukkan besar daya aktif yang terserap filter sebesar 33,7 W, terjadi perbedaan yang tidak terlalu jauh. Hal ini dikarenakan resistansi lainnya yang tidak diketahui, seperti resistansi yang terdapat pada kapasitor, dan daya dari jaringan yang terserap.

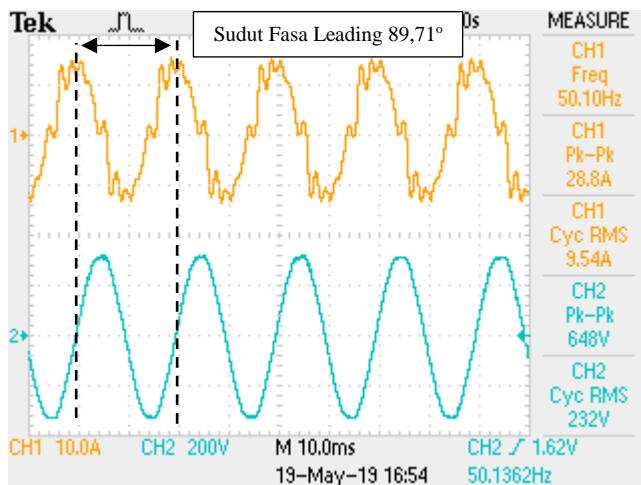
Besar daya reaktif yang dialirkan oleh kapasitor ke sistem sebesar 4,23 kVAR, menyebabkan sistem menjadi kapasitif. Hal ini ditunjukkan pada gambar 4.19, dimana gelombang arus mendahului dari gelombang tegangan, sehingga sistem mengalami *leading phase angle* sebesar 89,33°.

4.5.3. Filter Pasif Orde Harmonisa ke sebelas

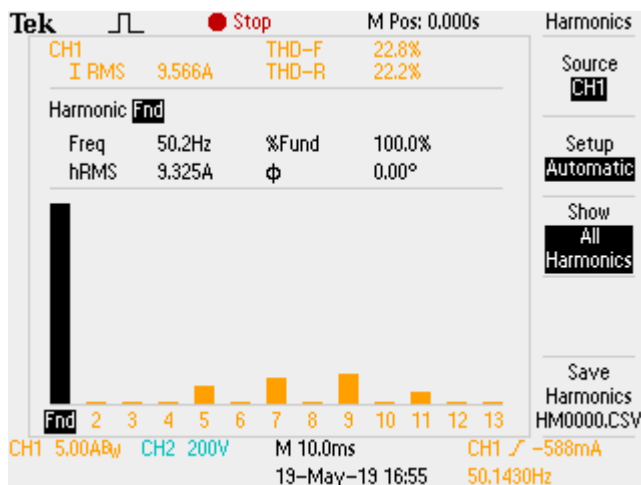
Pada pengujian filter pasif orde harmonisa ke sebelas ini, akan dibuktikan besar rugi-rugi daya aktif yang diserap oleh filter pasif itu sendiri. Setelah dilakukan perhitungan rugi-rugi daya aktif yang diserap, akan dibandingkan antara hasil perhitungan dengan hasil pengujian.



Gambar 4.21. Hasil Pengukuran Daya untuk Pengujian Rugi-rugi daya yang terserap filter untuk filter orde harmonisa ke sebelas



Gambar 4.22. Hasil Pengukuran Arus dan Tegangan untuk Pengujian Rugi-rugi daya yang terserap filter untuk filter orde harmonisa ke sebelas



Gambar 4.23. Spektrum Harmonisa Filter Pasif Orde Harmonisa ke sebelas

Dari hasil pengukuran yang ditunjukkan pada gambar 4.21, besar daya aktif yang terukur di sisi input sistem sebesar 11,4 W. Besar daya aktif ini timbul sebagai akibat dari pemasangan filter saja, dan tidak ada beban lain yang terpasang pada sistem. Jika dibandingkan dengan hasil perhitungan yang menunjukkan besar daya aktif yang terserap filter sebesar 7,46 W, terjadi perbedaan tidak terlalu jauh antara perhitungan dan pengukuran. Hal ini dikarenakan resistansi lainnya yang tidak diketahui, seperti resistansi yang terdapat pada kapasitor, dan daya dari jaringan yang terserap.

Besar daya reaktif yang dialirkan oleh kapasitor ke sistem sebesar 2,22 kVAR, menyebabkan sistem menjadi kapasitif. Hal ini ditunjukkan pada gambar 4.22, dimana gelombang arus mendahului dari gelombang tegangan, sehingga sistem mengalami *leading phase angle* sebesar 89,71°.

Tabel 4.2. menunjukkan perbedaan antara hasil perhitungan terhadap hasil pengukuran daya aktif yang terserap filter. Dapat dilihat terjadi perbedaan signifikan antara hasil perhitungan dan pengukuran. Tabel 4.2. juga menunjukkan besar daya reaktif yang terukur di sistem untuk tiap orde harmonisa dari filter pasif. Nilai kVAR yang terukur di sistem berasal dari besar daya reaktif dari capacitor bank yang dipakai di tiap filter pasif orde harmonisa itu sendiri.

Tabel 4.2. Perbandingan hasil perhitungan dan pengukuran daya aktif yang terserap filter serta daya reaktif yang terukur di sistem.

	Daya aktif terserap filter (perhitungan)	Daya aktif terserap filter (pengukuran)	Daya Reaktif Capacitor Bank	Daya Reaktif Terukur di sistem
Filter Orde 5	75,28 W	145 W	4,63 kVAR	5,52 kVAR
Filter Orde 7	40,74 W	49,6 W	3,51 kVAR	4,32 kVAR
Filter Orde 11	8,87 W	11,4 W	1,9 kVAR	2,22 kVAR

4.5.4. Analisis Perbedaan antara Daya Aktif Hasil Perhitungan dengan Hasil Pengukuran

Dari hasil pengujian rugi-rugi daya filter pasif penalaan tunggal, didapatkan bahwa nilai hasil perhitungan dan hasil pengukuran dengan menggunakan osiloskop terjadi perbedaan yang cukup signifikan. Hal ini ditunjukkan pada tabel 4.2. Terjadi perbedaan yang signifikan yang disebabkan terukurnya arus secara total termasuk dengan arus harmonisa yang ditunjukkan dengan masih adanya nilai THD yang terukur. Hasil pengukuran spektrum harmonisa, daya aktif dan reaktif terukur ditunjukkan pada tabel 4.3 berikut.

Tabel 4.3. Hasil Pengukuran Filter Pasif Penalaan Tunggal

	Filter Pasif Orde 5	Filter Pasif Orde 7	Filter Pasif Orde 11
Tegangan (V)	232 V	232 V	232 V
THD _f (%)	26.2%	24.4%	22.8%
THD _R (%)	25.3%	23.7%	22.2%
I _{rms} (A)	23.61 A	18.39 A	9.568 A
Daya Aktif (W)	145 W	49.6 W	11.4 W
Daya Reaktif (VAR)	5.52 kVAR	4.23 kVAR	2.22 kVAR
Faktor Daya	0.0263	0.0117	0.00513

Dari hasil pengukuran yang ditunjukkan pada tabel 3.1, ditunjukkan bahwa masih adanya kontribusi dari arus harmonisa yang masih terukur, hal ini ditunjukkan pada nilai THD_f dan THD_R yang terukur. Untuk mendapatkan nilai rugi-rugi daya yang sesuai, dibutuhkan nilai arus fundamental dari filter pasif itu sendiri. Nilai arus fundamental dari filter pasif dapat ditentukan dari persamaan berikut.

$$THD_f = \frac{\sqrt{I_{rms}^2 - I_{f1}^2}}{I_{f1}} \times 100\%$$

$$THD_r = \frac{\sqrt{I_{rms}^2 - I_{f1}^2}}{I_{rms}} \times 100\%$$

Dengan keterangan sebagai berikut:

I_{rms} = arus terukur di sistem

I_{f1} = arus fundamental

Nilai arus fundamental yang terukur untuk filter pasif orde harmonisa ke lima dengan nilai I_{rms} sebesar 23.61 A, THD_F sebesar 26.2%, dan THD_R sebesar 25.3%, didapatkan nilai arus fundamental sebagai berikut.

$$THD_r = \frac{\sqrt{I_{rms}^2 - I_{f1}^2}}{I_{rms}} \times 100\%$$
$$I_{f1} = \sqrt{\left(\frac{THD_r}{100} \times I_{rms}\right)^2 - I_{rms}^2}$$
$$I_{f1} = \sqrt{\left(\frac{25.3}{100} \times 23.61\right)^2 - 23.61^2} = 22.84 \text{ A}$$

Dengan menggunakan persamaan rugi-rugi daya, dengan besar R_{DC} sebesar 0.14, didapatkan besar rugi-rugi daya sebagai berikut.

$$P = I_{f1}^2 \times R_{DC}$$
$$P = 22.84^2 \times 0.14 = 73.03 \text{ W}$$

Nilai arus fundamental yang terukur untuk filter pasif orde harmonisa ke tujuh dengan nilai I_{rms} sebesar 18.39 A, THD_F sebesar 24.4%, dan THD_R sebesar 23.7%, didapatkan nilai arus fundamental sebagai berikut.

$$THD_r = \frac{\sqrt{I_{rms}^2 - I_{f1}^2}}{I_{rms}} \times 100\%$$
$$I_{f1} = \sqrt{\left(\frac{THD_r}{100} \times I_{rms}\right)^2 - I_{rms}^2}$$
$$I_{f1} = \sqrt{\left(\frac{23.7}{100} \times 18.39\right)^2 - 18.39^2} = 17.866 \text{ A}$$

Dengan menggunakan persamaan rugi-rugi daya, dengan besar R_{DC} sebesar 0.127, didapatkan besar rugi-rugi daya sebagai berikut.

$$P = I_{f1}^2 \times R_{DC}$$

$$P = 17.866^2 \times 0.127 = 40.53 \text{ W}$$

Nilai arus fundamental yang terukur untuk filter pasif orde harmonisa ke sebelas dengan nilai Irms sebesar 9.56 A, THD_F sebesar 22.8%, dan THD_R sebesar 22.2%, didapatkan nilai arus fundamental sebagai berikut.

$$THD_r = \frac{\sqrt{I_{rms}^2 - I_{f1}^2}}{I_{rms}} \times 100\%$$

$$I_{f1} = \sqrt{\left(\frac{THD_r}{100} \times I_{rms}\right)^2 - I_{rms}^2}$$

$$I_{f1} = \sqrt{\left(\frac{22.2}{100} \times 9.56\right)^2 - 9.56^2} = 9.321 \text{ A}$$

Dengan menggunakan persamaan rugi-rugi daya, dengan besar R_{DC} sebesar 0.127, didapatkan besar rugi-rugi daya sebagai berikut

$$P = I_{f1}^2 \times R_{DC}$$

$$P = 9.321^2 \times 0.1 = 8.68 \text{ W}$$

Tabel 4.4 Perbandingan hasil rugi-rugi daya perhitungan dan pengukuran

	Daya Total Terukur (W)	Rugi-Rugi Daya Terukur (W)	Rugi-Rugi Daya Perhitungan (W)
Filter Pasif Orde 5	145 W	73.03 W	75.28 W
Filter Pasif Orde 7	49.6 W	40.53 W	40.74 W
Filter Pasif Orde 11	11.4 W	8.68 W	8.87 W

Tabel 4.4. merupakan penjabaran hasil rugi-rugi daya perhitungan terhadap hasil pengukudan dan daya total yang terukur. Dapat dilihat bahwa rugi-rugi daya yang terukur terhadap perhitungan bernilai mendekati sama antara satu sama lain. Hal ini dapat menunjukkan bahwa besar rugi-rugi daya terukur sesuai dengan rugi-rugi daya perhitungan. Besar daya total terukur dari sistem menunjukkan nilai yang berbeda dengan rugi-rugi daya terukur. Hal ini dikarenakan daya total terukur

merupakan daya total yang diukur dari penjumlahan daya terhadap arus fundamental dan daya terhadap arus harmonisa yang ditunjukkan dalam persamaan berikut.

$$P_{total} = P_{fund} + P_{harmonics}$$

Dari persamaan diatas, didapatkan bahwa untuk filter pasif orde harmonisa ke lima, besar daya yang diserap arus harmonisa sebesar 70.97 W, untuk orde harmonisa ke tujuh, besar daya yang diserap arus harmonisa sebesar 9.37 W dan untuk orde harmonisa ke sebelas, besar daya yang diserap arus harmonisa sebesar 2.69 W.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 5

KESIMPULAN

Pada bab 5 akan dijelaskan mengenai kesimpulan yang bisa ditarik dari penelitian ini, serta saran untuk penelitian ini kedepannya. Dari hasil penelitian yang telah dilakukan, dapat ditarik kesimpulan dan saran sebagai berikut.

5.1. Kesimpulan

Dari hasil penelitian ini, dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut:

1. Filter pasif LC penalaan tunggal dapat mereduksi harmonisa dengan optimal pada orde harmonisanya masing-masing, hal ini ditunjukkan pada penurunan THD yang sebelumnya sebesar 36,8% menjadi 7,83% untuk filter orde harmonisa ke 5, 13,3% untuk filter orde harmonisa ke 7, dan 21,2% untuk orde harmonisa ke 11.
2. Terjadi penurunan faktor kualitas dari filter pasif tersebut, dimana untuk filter pasif orde harmonisa ke 5 terjadi penurunan dari 32,7 menjadi 15,08, filter pasif orde harmonisa ke 7 terjadi penurunan dari 37,7 menjadi 16,54, dan untuk filter pasif orde harmonisa ke 11 terjadi penurunan dari 55,5 menjadi 23,24.
3. Rugi-rugi daya yang diserap filter pasif lebih besar dibandingkan hasil perhitungan, untuk filter pasif orde ke 5 dari 68,83 W terukur 145 W, filter pasif orde ke 7 dari 33,7 W terukur 49,6 W, dan untuk filter pasif orde ke 11 dari 7,46 W terukur 11,4 W.

5.2. Saran

Dalam mengembangkan penelitian ini, ada beberapa saran yang dapat diberikan, yaitu:

1. Agar dapat dilakukan pengujian filter pasif pada tegangan optimal sesuai dengan desain dari komponen filter pasif.
2. Penggunaan kawat tembaga dengan luas penampang yang lebih besar atau dengan kualitas tembaga yang lebih baik dapat meningkatkan besar faktor kualitas dari filter pasif itu sendiri.

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR PUSTAKA

- [1] A. F. Antunes, J. R. Baptista, A. M. Moura, and J. A. Pomilio, "Study of harmonic distortion in a residential and commercial LV power system," in *2011 11th International Conference on Electrical Power Quality and Utilisation - (EPQU)*, Lisbon, Portugal, pp. 1–7, 2011.
- [2] J. C. Das, *Power system harmonics and passive filter designs*. Hoboken, New Jersey: IEEE Press/Wiley, 2015.
- [3] A. PRAMNAMTO, "ANALISIS PENGGUNAAN SINGLE TUNNED FILTER SEBAGAI SALAH SATU SOLUSI MASALAH HARMONIK PADA BEBAN RUMAH TANGGA," *Skripsi Universitas Indonesia*, Depok, Indonesia, 2008.
- [4] R. Setiabudy and A. N. Widyanto, "THE DESIGN OF PASSIVE FILTER TO OVERCOME HARMONIC DISTORTION," *Proceedings The 2nd Indonesia Japan Joint Scientific Symposium 2006*, September 2006, p. 5.
- [5] F. De La rosa, *Harmonics and Power Systems*, vol. 13. CRC Press, 2006.
- [6] J. Arrillaga, Ed., *Power system harmonic analysis*. Chichester ; New York: Wiley, 1997.
- [7] M. K. Soni and N. Soni, "Review of Causes and Effect of Harmonics on Power System," *International Journal of Science, Engineering and Technology Research (IJSETR)*, vol. 3, no. 2, p. 7, 2014.
- [8] J. Arrillaga and N. R. Watson, *Power system harmonics*, 2nd ed. West Sussex, England ; Hoboken, NJ: J. Wiley & Sons, 2003.
- [9] R. Dugan, "Electrical Power Systems Quality, Second Edition," McGraw-Hill, 2004.
- [10] M. ASHARI, *DESAIN KONVERTER ELEKTRONIKA DAYA*. BANDUNG: PENERBIT INFORMATIKA, 2017.
- [11] S. Chaladying, A. Charlangsut, and N. Rugthaichareoncheep, "Parallel resonance impact on power factor improvement in power system with harmonic distortion," in *TENCON 2015 - 2015 IEEE Region 10 Conference*, Macao, 2015, pp. 1–5.
- [12] L. Ciufu, C.-L. Popescu, and M.-O. Popescu, "Experimental mitigation techniques to reduce the Total Harmonic Distortion of low voltage non-linear power sources," *THE 10th*

INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ADVANCED TOPICS IN ELECTRICAL ENGINEERING, Bucharest, Romania, 2017, pp. 138–141.

- [13] Y.-S. Cho and H. Cha, “Single-tuned Passive Harmonic Filter Design Considering Variances of Tuning and Quality Factor,” *J. Int. Counc. Electr. Eng.*, vol. 1, no. 1, pp. 7–13, Jan. 2011.
- [14] Junpeng Ji, Guang Zeng, Haiwa Liu, Lei Luo, and Jinggang Zhang, “Research on selection method of Passive Power Filter topologies,” in *Proceedings of The 7th International Power Electronics and Motion Control Conference*, Harbin, China, 2012, pp. 2844–2848.
- [15] A. B. Nassif, Wilsun Xu, and W. Freitas, “An Investigation on the Selection of Filter Topologies for Passive Filter Applications,” *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 24, no. 3, pp. 1710–1718, Jul. 2009.
- [16] Y.-S. Cho and H. Cha, “Single-tuned Passive Harmonic Filter Design Considering Variances of Tuning and Quality Factor,” *J. Int. Counc. Electr. Eng.*, vol. 1, no. 1, pp. 7–13, Jan. 2011.
- [17] J. Tupsa-ard, C. Chamchoy, and T. Tayjasant, “High voltage passive harmonic filter design,” in *The 8th Electrical Engineering/ Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI) Association of Thailand - Conference 2011*, Khon Kaen, Thailand, 2011, pp. 804–807.
- [18] H. Prasetijo, “ANALYZE OF PASSIVE FILTER DESIGN TO REDUCE HARMONIC AT NON-LINIER LOADS INSTALATION,” *Techno, ISSN 1410 - 8607 Volume 13 No. 1*, , no. 1, pp. 57–67, April 2012.
- [19] H. A. Wheeler, “Simple Inductance Formulas for Radio Coils,” *Proc. IRE*, vol. 16, no. 10, pp. 1398–1400, Oct. 1928.
- [20] *Multilayer Coil*, diakses pada 1 Maret 2019 [daring] <url <https://coil32.net/multi-layer-coil.html>>

LAMPIRAN

1. Tabel American Wire Gauge (AWG) Conductor Size

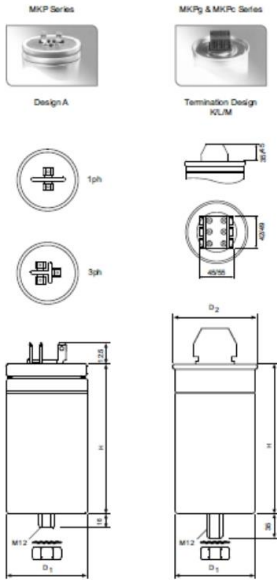
AWG gauge	Diameter [mm]	Cross section [mm ²]	Ohms per km [Ω /km]	Max amps for chassis wiring [A]	Max amps for power transmission [A]	Max Freq. for 100% skin depth
0000	11.684	107	0.16072	380	302	125 Hz
000	10.40384	84.9	0.202704	328	239	160 Hz
00	9.26592	67.4	0.255512	283	190	200 Hz
0	8.25246	53.5	0.322424	245	150	250 Hz
1	7.34822	42.4	0.406392	211	119	325 Hz
2	6.54304	33.6	0.512664	181	94	410 Hz
3	5.82676	26.7	0.64616	158	75	500 Hz
4	5.18922	21.1	0.81508	135	60	650 Hz
5	4.62026	16.8	1.027624	118	47	810 Hz
6	4.1148	13.3	1.295928	101	37	1100 Hz
7	3.66522	10.6	1.634096	89	30	1300 Hz
8	3.2639	8.37	2.060496	73	24	1650 Hz
9	2.90576	6.63	2.598088	64	19	2050 Hz

10	2.5882 6	5.26	3.2763 92	55	15	2600 Hz
11	2.3037 8	4.17	4.1328	47	12	3200 Hz
12	2.0523 2	3.31	5.2086 4	41	9.3	4150 Hz
13	1.8288	2.63	6.5698 4	35	7.4	5300 Hz
14	1.6281 4	2.08	8.282	32	5.9	6700 Hz
15	1.4503 4	1.65	10.443 52	28	4.7	8250 Hz
16	1.2903 2	1.31	13.172 48	22	3.7	11 k Hz
17	1.1506 2	1.04	16.609 92	19	2.9	13 k Hz
18	1.0236 2	0.823	20.942 8	16	2.3	17 kHz
19	0.9118 6	0.653	26.407 28	14	1.8	21 kHz
20	0.8128	0.519	33.292	11	1.5	27 kHz
21	0.7239	0.412	41.984	9	1.2	33 kHz
22	0.6451 6	0.327	52.939 2	7	0.92	42 kHz
23	0.5740 4	0.259	66.780 8	4.7	0.729	53 kHz
24	0.5105 4	0.205	84.197 6	3.5	0.577	68 kHz
25	0.4546 6	0.162	106.17 36	2.7	0.457	85 kHz
26	0.4038 6	0.128	133.85 68	2.2	0.361	107 kHz
27	0.3606 8	0.102	168.82 16	1.7	0.288	130 kHz
28	0.3200 4	0.080	212.87 2	1.4	0.226	170 kHz

29	0.2870 2	0.0647	268.40 24	1.2	0.182	210 kHz
30	0.254	0.0507	338.49 6	0.86	0.142	270 kHz
31	0.2260 6	0.0401	426.72 8	0.7	0.113	340 kHz
32	0.2032	0.0324	538.24 8	0.53	0.091	430 kHz
Metric 2.0	0.200	0.0314	555.61	0.51	0.088	440 kHz
33	0.1803 4	0.0255	678.63 2	0.43	0.072	540 kHz
Metric 1.8	0.180	0.0254	680.55	0.43	0.072	540 kHz
34	0.1600 2	0.0201	855.75 2	0.33	0.056	690 kHz
Metric 1.6	0.1600 2	0.0201	855.75 2	0.33	0.056	690 kHz
35	0.1422 4	0.0159	1079.1 2	0.27	0.044	870 kHz
Metric 1.4	.140	0.0154	1114	0.26	0.043	900 kHz
36	0.127	0.0127	1360	0.21	0.035	1100 kHz
Metric 1.25	0.125	0.0123	1404	0.20	0.034	1150 kHz
37	0.1143	0.0103	1715	0.17	0.0289	1350 kHz
Metric 1.12	0.112	0.0098 5	1750	0.163	0.0277	1400 kHz
38	0.1016	0.0081 1	2163	0.13	0.0228	1750 kHz
Metric 1	0.1000	0.0078 5	2198	0.126	0.0225	1750 kHz
39	0.0889	0.0062 1	2728	0.11	0.0175	2250 kHz
40	0.0787 4	0.0048 7	3440	0.09	0.0137	2900 kHz

2. Datasheet Capacitor Bank GAE

TYPE MODULE



MKP

Un (V)	Qn (kVAr)	Cap (µF)	In (A)	D ₁ x H (mm)	m (kg)	R (kΩ)
Module 1 Phase						
415	1.67	31.0	4.0	40 x 143	0.2	1x330
415	3.33	62.0	8.0	50 x 148	0.3	1x330
415	4.17	77.1	10.1	55 x 148	0.4	1x330

Module 3 Phase

415	2.5	3 x 15.4	3 x 3.5	50 x 151	0.4	2x330
415	5	3 x 31.0	3 x 7.0	65 x 155	0.6	2x330
415	10	3 x 62.0	3 x 13.9	75 x 215	1.0	2x330

MKPg

Un (V)	Qn (kVAr)	Cap (µF)	In (A)	D ₁ x H (mm)	m (kg)	R (kΩ)
Module 3 Phase						
415	15	3 x 92	3 x 20.9	89.5 x 230	1.3	3x180
415	20	3 x 123	3 x 27.8	99.5 x 230	1.5	3x180
415	25	3 x 154	3 x 34.8	120.5 x 230	2.3	3x120
415	30	3 x 185	3 x 41.7	120.5 x 230	2.3	3x120
415	40	3 x 246	3 x 55.6	142 x 245	3.7	3x62
415	50	3 x 308	3 x 69.6	142 x 295	4.1	3x68

Module 3 Phase

Qn (kVAr)	Cap (µF)	In (A)	D ₁ x H (mm)	m (kg)	R (kΩ)		
400V	415V	525V					
10	10.76	17.23	3 x 68	3 x 14.5	95 x 230	1.5	3x180
12.5	13.45	21.53	3 x 83	3 x 18	116 x 230	2.1	3x180
23.23	25	40	3 x 154	3 x 44.0	136 x 245	3.7	3x120

MKPc

Un (V)	Qn (kVAr)	Cap (µF)	In (A)	D ₁ x H (mm)	m (kg)	R (kΩ)
415	12.5	3 x 77	3 x 19	79.5 x 230	1.0	3x120
415	15	3 x 92.5	3 x 20.9	89.5 x 230	1.3	3x120
415	20	3 x 123	3 x 27.8	99.5 x 230	1.5	3x180
415	25	3 x 154	3 x 34.8	99.5 x 245	1.6	3x120

DATA SHEET

TYPE

Standards

Rated voltages
Permitted operating voltages

Rated frequencies
Maximum permissible current
Tolerance of capacitance
Internal connection

Filling material
MKPg 275
MKPc 275
Dissipation losses
Dielectric
Total capacitor
Limit loss factor
Temperature class
Humidity
Altitude abs. l
Life expectancy
at temperatures acc.
To temperature category C
at temperatures acc.
To temperature category D

MKP

IEC 60831 (2003), VDE 0560-46/47
CSA C22.2 No. 190-M1985
UL Standard No. 810
GOST 1282-88
230.....800V
24h.....Un + 10%
8h/d.....Un + 20%
30min/d.....Un + 25%
5min(200s).....Un + 30%
1min(200s).....Un + 40%

50/60 Hz
1.3 ... 2.0 x In
-5, +10%, ±5%
delta

resin based on vegetable oil

< 0.2 W/kvar
0.25 ... 0.4 W/kvar
5 x 10⁻⁴
-40°C C/D
95%
≤4000m

> 130 000 h
> 100 000 h

MKPg

IEC 60831 (2003), VDE 0560-46/47
CSA C22.2 No. 190-M1985
UL Standard No. 810
GOST 1282-88
230.....800V
24h.....Un + 10%
8h/d.....Un + 20%
30min/d.....Un + 15%
5min(200s).....Un + 30%
1min(200s).....Un + 40%

50/60 Hz
1.3 ... 2.0 x In
-5, +10%, ±5%
delta

inert insulation gas (N₂)

< 0.2 W/kvar
0.25 ... 0.4 W/kvar
5 x 10⁻⁴
-40°C C/D
95%
≤4000m

> 130 000 h
> 100 000 h

MKPc

IEC 60831 (2003), VDE 0560-46/47
CSA C22.2 No. 190-M1985
UL Standard No. 810
GOST 1282-88
230.....800V
24h.....Un + 10%
8h/d.....Un + 10%
30min/d.....Un + 15%
5min.....Un + 20%
1min.....Un + 30%

50/60 Hz
1.3 ... 2.0 x In
-5, -10%, ±5%
delta

inert insulation gas (N₂)

< 0.2 W/kvar
0.25 ... 0.4 W/kvar
5 x 10⁻⁴
-40°C C/D
95%
≤4000m

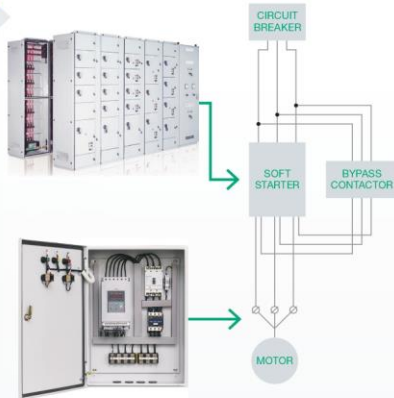
> 100 000 h

3. Contoh Deskripsi Panel MCC

PANEL KONTROL MOTOR

SPESIFIKASI TEKNIS

- Dirancang sesuai standar IEC
- Tipe *wall mounted* atau *floor standing* IP 30 - IP 55
- Banyak digunakan untuk aplikasi pompa, kipas, konveyor, dll.
- Starter menggunakan starter delta, starter *direct on line*, *soft starter* ataupun *inverter*
- Desain dibuat dalam bentuk kompartemen atau kelompok
- Dapat diaplikasikan untuk penggunaan di dalam atau di luar gedung
- *Earthing and neutral busbar*
- Untuk keamanan pengguna, pintu dapat dilengkapi dengan kunci gembok terpisah
- Ketebalan pelat 1,5 atau 2,0mm menggunakan pelat SPCC atau SPHC
- Dimensi maksimum 800 x 600 x 2000mm (panjang, lebar, tinggi) atau sesuai dengan permintaan
- *Finishing* dengan *powder coating*, melalui proses kimia *phosphate treatment* dengan warna RAL 7032 Tekstur atau sesuai dengan permintaan
- Kapasitas: 0,22 hingga 2000kW



PANEL CAPACITOR BANK

SPESIFIKASI TEKNIS

- Dirancang sesuai standar IEC
- Tipe *floor standing* IP 30 - IP 54
- Pemutusan arus dengan *load break switch* atau *circuit breaker*
- Proteksi *capacitor* menggunakan *fuse* atau *circuit breaker*
- Tegangan kerja 400 hingga 525V
- Dapat dilengkapi dengan *detuned reactor*
- Ketebalan pelat 2,0 atau 2,5mm menggunakan pelat SPCC atau SPHC
- Kapasitas hingga 3000kVAr
- *Finishing* dengan *powder coating*, melalui proses kimia *phosphate treatment* dengan warna RAL 7032 Tekstur atau sesuai dengan permintaan
- Kapasitas hingga 3000kVAr



4. Program MATLAB untuk menampilkan grafik kurva karakteristik kerja filter pasif

```
% Inisiasi Frekuensi
f = 50:50:750;
% Data ril
R5 = 0.14;
L5 = 1431e-6;
C5 = 321e-6;

R7 = 0.127;
L7 = 998e-6;
C7 = 242e-6;

R11 = 0.123;
L11 = 689e-6;
C11 = 129e-6;

% Data simulasi
Rs5 = 0.061;
Cs5 = 308e-6;
Ls5 = 1316e-6;

Rs7 = 0.049;
Cs7 = 231e-6;
Ls7 = 895e-6;

Rs11 = 0.041;
Cs11 = 124e-6;
Ls11 = 675e-6;

for h = 1:length(f)
    %Mencari Parameter xl dan xc data simulasi
    xcs7(h) = 1/(2*pi*f(h)*Cs7);
    xls7(h) = 2*pi*f(h)*Ls7;
    xcs5(h) = 1/(2*pi*f(h)*Cs5);
    xls5(h) = 2*pi*f(h)*Ls5;
    xcs11(h) = 1/(2*pi*f(h)*Cs11);
    xls11(h) = 2*pi*f(h)*Ls11;
```

```

    % Cari Z data simulasi
    Zs5(h) = sqrt(Rs5^2 + (abs(xls5(h) -
xcs5(h)))^2);
    Zs7(h) = sqrt(Rs7^2 + (abs(xls7(h) -
xcs7(h)))^2);
    Zs11(h) = sqrt(Rs11^2 + (abs(xls11(h) -
xcs11(h)))^2);
    % Cari Z resultan paralel data simulasi
    Zsres(h) = (1/Zs5(h) + 1/Zs7(h) +
1/Zs11(h))^-1;
end

for h = 1:length(f)
    % Mencari parameter xl dan xc data real
    xc7(h) = 1/(2*pi*f(h)*C7);
    xl7(h) = 2*pi*f(h)*L7;
    xc5(h) = 1/(2*pi*f(h)*C5);
    xl5(h) = 2*pi*f(h)*L5;
    xc11(h) = 1/(2*pi*f(h)*C11);
    xl11(h) = 2*pi*f(h)*L11;
    % Cari Z data real
    Z5(h) = sqrt(R5^2 + (abs(xl5(h) -
xc5(h)))^2);
    Z7(h) = sqrt(R7^2 + (abs(xl7(h) -
xc7(h)))^2);
    Z11(h) = sqrt(R11^2 + (abs(xl11(h) -
xc11(h)))^2);
    % Cari Z resultan data real
    Zres(h) = (1/Z5(h) + 1/Z7(h) + 1/Z11(h))^-1;
end

% Plot grafik
plot(f,Zres,'-bo');
hold on;
plot(f,Zsres,'-ro');
xlabel('Frekuensi (Hz)');
ylabel('Impedansi (Z)');
legend('aktual','simulasi');

```

Halaman ini sengaja dikosongkan

BIODATA PENULIS



Ni Putu Devi Ariana Swadaya, akrab disapa dengan Devi, lahir di Jakarta, pada tanggal 27 September 1997. Penulis merupakan putri pertama dari dua bersaudara. Putri dari pasangan I Made Sumartha Swadaya dan Ni Kadek Astuti ini memulai jenjang pendidikan di TKK IPEKA Kota Legenda, SDK IPEKA Kota Legenda dan lulus jenjang pendidikan sekolah dasar di American School of Doha, Qatar, SMP Marsudirini Bekasi, SMA Labschool Jakarta hingga lulus dari jenjang SMA pada tahun 2015. Pada tahun 2015, penulis melanjutkan jenjang pendidikan di departemen Teknik Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya. Selama masa jenjang perkuliahan, penulis aktif dalam berbagai organisasi dan kepanitian, seperti HIMATEKTRO ITS dan TPKH ITS. Penulis juga aktif sebagai salah satu asisten dari laboratorium Konversi Energi Listrik. Penulis dapat dihubungi melalui email di deviarianas@gmail.com.

Halaman ini sengaja dikosongkan