

**ANALISIS HARMONISA TEGANGAN DAN ARUS LISTRIK
DI GEDUNG SMP NEGRI 12 MAKASSAR**



**PROGRAM STUDI D4 TEKNIK LISTRIK
JURUSAN TEKNIK ELEKTRO
POLITEKNIK NEGERI UJUNG PANDANG
MAKASSAR
2021**

HALAMAN PERSETUJUAN

Skripsi ini dengan judul ANALISIS HARMONISA TEGANGAN DAN ARUS LISTRIK DI GEDUNG SMP NEGRI 12 MAKASSAR oleh MUHAMMAD MUJADDID NIM 421 20 062 dinyatakan layak untuk di sidangkan.

Makassar, Juli 2021

Menyetujui,

Dosen Pengarah I,



Ir. Talib Bini, M.T.

NIP. 19560701 198803 1 001

Dosen Pengarah II,



Ashar, AR., S.T., M.T.

NIP. 19791209 200812 1 001

Mengetahui,

Ketua Program Studi



Ahmad Kosyid Idris, S.T., M.T.

NIP. 19860404 201504 1 001

HALAMAN PENERIMAAN

Pada hari ini, Senin tanggal 30 Agustus 2021 tim penguji ujian sidang skripsi telah menerima skripsi mahasiswa:

Nama : Muhammad Mujaddid

NIM : 42120062

Jurusan : Teknik Elektro

dengan judul skripsi:

ANALISIS HARMONISA TEGANGAN DAN ARUS LISTRIK DI GEDUNG SMP NEGRI 12 MAKASSAR

Makassar, September 2021

Tim Penguji Ujian Sidang Skripsi:

1. Marwan,ST.,M.Eng.Sc.,Ph.D.

Ketua (.....)

2. Hamdani,S.T.,M.T

Sekretaris (.....)

3. Kurniawati Naim,S.T.,M.T.

Anggota (.....)

4. Kazman Riyadi,S.T.,M.T.

Anggota (.....)

5. Ir.H.Thalib Bini,M.T.

Anggota (.....)

6. Ashar AR. S.T.,M,T

Anggota (.....)

KATA PENGANTAR

Assalamualikum Warahmatullahi Wabarakatuh,

Puji syukur penulis panjatkan kehadirat Allah SWT atas segala berkat, rahmat dan hidayah Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini dengan judul “Analisis Harmonisa Tegangan Dan Arus Listrik Di Gedung SMP Negeri 12 Makassar”.

Skripsi ini disusun sebagai salah satu syarat untuk menyelesaikan program pendidikan Diploma IV di Politeknik Negeri Ujung Pandang. Proses penyelesaian skripsi ini tidak lepas dari banyak pihak. Oleh karena itu melalui kesempatan ini penulis menyampaikan rasa syukur dan berterima kasih sebesar-besarnya kepada:

1. Kedua orang tua serta keluarga atas segala dukungan baik berupa moril, materil, motivasi serta doa yang telah diberikan.
2. Prof Ir. Muhammad Anshar, M.si., Ph.D., selaku Direktur Politeknik Negeri Ujung Pandang.
3. Ahmad Rizal Sultan, S.T., M.T., Ph.D., selaku Ketua Jurusan Teknik Eketro Politeknik Negeri Ujung Pandang.
4. Ahmad Rosyid Idris, ST., MT., selaku Ketua Program Studi Diploma IV Teknik Listrik Jurusan Teknik Elektro Politeknik Negeri Ujung Pandang.
5. Kedua Dosen Pengarah yang mencurahkan waktu dan kesempatannya untuk mengarahkan penulis dalam menyelesaikan skripsi ini.

6. Seluruh dosen dan staf Jurusan Teknik Elektro Politeknik Negeri Ujung Pandang, khususnya Program Studi Diploma IV Teknik Listrik.
7. Seluruh teman-teman seperjuangan D4 Listrik kelas 4C angkatan 2020 yang telah ikut memberikan dukungan serta semangat.

Tak lupa penulis menyampaikan permohonan maaf apabila selama penyusunan skripsi ini terdapat kesalahan, baik yang disengaja maupun tidak disengaja. Penulis menyadari bahwa skripsi ini masih jauh dari sempurna. Sehingga dengan rendah hati mengharapkan kritik dan saran yang sifatnya membangun untuk perbaikan di penyusunan skripsi. Semoga tulisan ini bermanfaat.

Makassar, Agustus 2021

Penulis

DAFTAR ISI

Hal

HALAMAN SAMPUL.....	i
HALAMAN PERSETUJUAN.....	ii
HALAMAN PENERIMAAN.....	iii
KATA PENGANTAR.....	iv
DAFTAR ISI.....	vi
DAFTAR GAMBAR.....	vii
DAFTAR TABEL.....	viii
DAFTAR LAMPIRAN.....	ix
SURAT PERNYATAAN.....	x
ABSTRAK.....	xi
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	2
BAB II TINJUAN PUSTAKA.....	4
2.1 Kualitas Daya listrik.....	4
2.2 Pengertian Harmonisa.....	6
2.3 Macam-Macam Harmonisa.....	8
2.4 Sumber Harmonisa.....	9
2.5 Efek Harmonisa.....	11
2.5.1 Pengaruh Penggunaan Peralatan Elektronika Daya Terhadap Harmonisa.....	12
2.5.2 Pengaruh Harmonisa Pada Efisiensi Tegangan.....	13
2.5.3 Dampak Harmonisa Pada Peralatan.....	14

vi

2.5.4	Pengaruh Harmonisa pada Faktor Daya.....	16
2.6	Faktor Harmonisa Atau Persentase Total Harmonic Distortion (%Thd)	17
2.7	Standar Distorsi Harmonisa IEC	21
2.8	Filter Pasif	24
2.9	Perencanaan Filter Pasif	27
2.9.2	Perhitungan Filter Pasif.....	29
2.9.3	Perhitungan Kapasitor	30
2.9.4	Perhitungan Induktor (Reaktor)	32
2.10	Metode Pemasangan Filter	34
2.11	Power Quality Analyzer	35
BAB III METODE PENELITIAN		45
3.1	Waktu dan Lokasi Penelitian	45
3.2	Teknik Pengumpulan Data.....	45
3.3	Teknik Analisis Data.....	47
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN		45
4.1	Pengumpulan Data	45
4.2	Pengolahan Data.....	45
4.3	Analisa Data	45
4.4	Pemodelan Pada Etap	45
4.5	Pemasagan Filter Pasif Single Tuned Pada LVMDDB.....	45
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN		45
DAFTAR PUSTAKA		
LAMPIRAN		

DAFTAR GAMBAR

	Hal
Gambar 2.1 Gelombang Perpaduan Antara Gelombang Harmonisa	7
Gambar 2.2 Spektrum Urutan Orde Harmonisa[1],[2]	8
Gambar 2.3 Rangkaian Filter Pasif Dalam Sistem	25
Gambar 2.4 Configurasi Umum Filter Pasif	28
Gambar 2.5 Filter Harmonisa Sambungan Delta	30
Gambar 2.6 Resonansi seri (Sumber: Dugan,R.C.2004)	31
Gambar 2.7 Pemasangan Filter Terpusat	35
Gambar 2.8 Pemasangan Filter Individu.....	36
Gambar 2.9 Power Quality Analyzer	36
Gambar 3.1 Flowchart Rancangan Penelitian.....	40
Gambar 3.2 Simulasi Single Line Diagram(Simulasi ETAP 12.6.0).....	41
Gambar 4.1 Grafik Nilai THD Tegangan , 3 Maret 2021.....	45
Gambar 4.2 IHD Tegangan maksimum 3 Maret Pukul 09:00.....	46
Gambar 4.3 Grafik Nilai THD Tegangan , 4 Maret 2021	48
Gambar 4.4 IHD Tegangan Maksimum , 4 Maret Pukul 13:00.....	49
Gambar 4.5 Grafik Nilai THD Tegangan , 5 Maret 2021.....	51
Gambar 4.6 Grafik Nilai IHD Tegangan, 5 Maret 2021.....	52
Gambar 4.7 Grafik Nilai THD Arus , 3 Maret 2021.....	54
Gambar 4.8 Grafik Nilai IHD Arus , 3 Maret 2021.....	55
Gambar 4.9 Grafik Nilai THD Arus , 4 Maret 2021.....	58
Gambar 4.10 Grafik Nilai IHD Arus , 4 Maret 2021.....	59
Gambar 4.11 Grafik Nilai THD Arus , 4 Maret 2021.....	62

Gambar 4.12 Grafik Nilai IHD Arus , 4 Maret 2021.....	63
Gambar 4.13 Gambar Resonansi Seri	63
Gambar 4.14 Simulasi Single Line Diagram.....	71
Gambar 4.15 Parameter pemodelan salah satu beban pada etap 12.6.0.....	72
Gambar 4.16 Pemodelan Harmonisa pada Salah satu Beban	73
Gambar 4.17 Langkah – langkah Penambahan Kandungan Harmonic	74
Gambar 4.18 Tampilan Pada Harmonic Library Editor.....	74
Gambar 4.19 Simulasi LVMDb Sebelum Dipasang Filter Pasif.....	75
Gambar 4.20 Grafik <i>Harmonic Voltage Order</i>	76
Gambar 4.21 Gelombang Sinusoidal Sebelum Dipasang Filter.....	76
Gambar 4.22 Parameter Filter Mereduksi Harmonisa Orde 5	79
Gambar 4.23 Parameter Filter Mereduksi Harmonisa Orde 7.....	79
Gambar 4.24 Simulasi LVMDb Sesudah Dipasang Filter Pasif	80
Gambar 4.25 Grafik <i>Harmonic Voltage Order</i> Sesudah.....	81
Gambar 4.26 Gelombang Sinusoidal Sesudah Dipasang Filter.....	81
Gambar 4.27 Single Line Diagram LVMDb Gedung	84
Gambar 4.28 Single Line Diagram LVMDb Gedung	85
Gambar 4.29 Filter Pasif <i>Single Tuned</i>	86
Gambar 4.30 Bentuk Rill <i>Filter Pasif Single Tuned</i>	87
Gambar 4.31 Catalog Detuned Reaktor untuk Mereduksi Harmonisa.....	88

DAFTAR TABEL

	Hal
Tabel 2.1 Polaritas Orde Harmonisa	9
Tabel 2.2 Standar Batas Harmonisa Arus	18
Tabel 2.3 Standar Batas Harmonisa Tegangan	18
Tabel 2.4 Batasan Arus Harmonisa Untuk Peralatan Kelas A	22
Tabel 2.5 Batasan Arus Harmonisa Untuk Peralatan Kelas B	23
Tabel 2.6 Batasan Arus Harmonisa Untuk Peralatan Kelas C	24
Tabel 2.7 Batasan Arus Harmonisa Untuk Peralatan Kelas D	24
Tabel 4.1 THD Tegangan Maksimum Senin, 3 Agustus 2021.....	44
Tabel 4.2 IHD Tegangan Maksimum Senin, 3 Agustus 2020 Pukul 09:00	46
Tabel 4.3 THD Tegangan Maksimum Selasa, 4 Agustus 2021.....	47
Tabel 4.4 IHD Tegangan Maksimum Selasa, 4 Agustus 2021 Pukul 13:00	49
Tabel 4.5 THD Tegangan Maksimum Rabu, 5 Agustus 2021	50
Tabel 4.6 IHD Tegangan Maksimum Rabu, 5 Agustus 2021 Pukul 13:00.....	52
Tabel 4.7 THD Arus Maksimum Senin, 3 Agustus 2021.....	53
Tabel 4.8 IHD Arus Maksimum Senin, 3 Agustus 2021 Pukul 09:00.....	55
Tabel 4.9 THD Arus Maksimum Selasa, 4 Agustus 2021	57
Tabel 4.10 IHD Arus Maksimum Selasa, 4 Agustus 2021 Pukul 09:00.....	59
Tabel 4.11 THD Arus Maksimum Rabu, 4 Agustus 2021.....	61
Tabel 4.12 IHD Arus Maksimum Rabu, 5 Agustus 2021 Pukul 13:00.....	62
Tabel 4.13 Perbandingan Orde Harmonisa Tegangan Terhadap Standar.....	65
Tabel 4.14 Perbandingan Orde Harmonisa Tegangan Terhadap Standar	65

Tabel 4.15 Perbandingan Orde Harmonisa Tegangan Terhadap Standar	66
Tabel 4.16 Perbandingan Orde Harmonisa Arus Terhadap Standar	67
Tabel 4.17 Perbandingan Orde Harmonisa Arus Terhadap Standar	68
Tabel 4.18 Perbandingan Orde Harmonisa Arus Terhadap Standar.....	69
Tabel 4.19 Data komponen-Komponen Filter Hasil Perhitungan.....	77
Tabel 4.20 Data Total Harmonisa Distorsi Tegangan Sebelum Dipasang	77
Tabel 4.21 Data Total Harmonisa Distorsi Arus Sebelum Dipasang Filter	78
Tabel 4.22 Data Total Harmonisa Distorsi Tegangan Sesudah Dipasang Filter..	82
Tabel 4.23 Data Total Harmonisa Distorsi Arus Sesudah Dipasang Filter.....	82



DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1 Dokumentasi Pengukuran LVMDb di Gedung68
Lampiran 2 Lampiran Peralatan Listrik Beban Linier Dan Non Linier.....69



SURAT PERNYATAAN

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Muhammad Mujaddid

NIM : 4220062

menyatakan dengan sebenar-benarnya bahwa segala pernyataan dalam skripsi ini yang berjudul **“Analisis Harmonisa Tegangan Dan Arus Listrik Di Gedung Smp Negri 12 Makassar”** merupakan gagasan dan hasil karya saya sendiri dengan arahan komisi pembimbing dan belum pernah diajukan dalam bentuk apa pun pada perguruan tinggi dan instansi mana pun. Semua data dan informasi yang digunakan telah dinyatakan secara jelas dan dapat diperiksa kebenarannya. Sumber informasi yang berasal atau dikutip dari karya penulis lain telah disebutkan dalam naskah dan dicantumkan dalam skripsi ini. Jika pernyataan saya tersebut di atas tidak benar, saya siap menanggung risiko yang ditetapkan oleh Politeknik Negeri Ujung Pandang.


Muhammad Mujaddid
NIM. 42120062

Analisis Harmonisa Dan Tegangan Arus Di Gedung Smp Negri 12 Makassar

ABSTRAK

Kualitas daya pada suatu industri maupun instansi adalah suatu permasalahan yang rumit. Dengan besarnya permintaan daya listrik untuk memenuhi kebutuhan sehari-hari yang melibatkan berbagai peralatan listrik yang canggih dan modern. Peralatan listrik tersebut dapat mempengaruhi kualitas daya. Terutama beban-beban non linear seperti (komputer, peralatan elektronik, lampu hemat energi dan peralatan- peralatan yang memiliki frekuensi tinggi), beban non linier sangat mempengaruhi baik atau buruknya kualitas daya. Gedung Smp Negri 12 Makassar merupakan salah satu gedung Yang didalamnya terdapat banyak peralatan-peralatan modern dan canggih untuk digunakan sebagai kebutuhan sehari-hari. Akan tetapi efek dari peralatan tersebut dapat menimbulkan gelombang harmonisa yang dapat merusak kualitas daya. Perlu dilakukan penelitian untuk mengetahui harmonisa di Gedung SMP Negri 12 Makassar. Dengan melakukan pengukuran langsung pada panel pusat di gedung SMP 12 saat gedung sedang beroperasi. Dalam penelitian ini penulis melakukan pengukuran pada *Low Voltage Main Distribution Board (LVMDB)* di gedung SMP Negri 12 Makassar. Dalam pengukuran ini digunakan alat ukur *Power Quality Analyzer* Pengukuran dilakukan selama sepuluh jam pada waktu perkuliahan berlangsung yaitu dari pukul 09:00 WIB - 18:00 WIB pada 03 Maret 2021 – 05 Maret 2021. Data pengukuran harmonisa tertinggi yaitu tanggal , 03 Maret 2021 dengan nilai THD arus fasa R 67,98 %, S 29,73%, dan T 87,13 %. Dengan melihat hasil perhitungan pada bab 4 hal ini menunjukkan kualitas daya yang ditinjau dari harmonisa kurang baik nilai harmonisa melebihi standart yang ditentukan IEEE 519-1992. Dari hasil simulasi pemasangan filter pasif Tuned menggunakan ETAP 12.6.0 nilai harmonic dapat di reduksi. Sebelum dipasang filter Passive Single Tuned nilai harmonic pada bus 5 sebesar 58,11 %. Setelah dipasang Filter nilai harmonic pada bus 5 dapat direduksi menjadi 12,58%.

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Kualitas daya pada suatu industri maupun instansi adalah suatu permasalahan yang rumit. Dengan besarnya permintaan daya listrik untuk memenuhi kebutuhan sehari-hari yang melibatkan berbagai peralatan listrik yang canggih dan modern. Peralatan listrik tersebut dapat mempengaruhi kualitas daya. Terutama beban-beban non linear seperti (komputer, peralatan elektronik, lampu hemat energi dan peralatan-peralatan yang memiliki frekuensi tinggi), beban non linier sangat mempengaruhi baik atau buruknya kualitas daya. Gedung SMP Negeri 12 Makassar. Yang didalamnya terdapat banyak peralatan-peralatan modern dan canggih untuk digunakan sebagai kebutuhan sehari-hari. Akan tetapi efek dari peralatan tersebut dapat menimbulkan gelombang harmonisa yang dapat merusak kualitas daya.

Harmonisa adalah sebuah gangguan berupa gelombang cacat yang terjadi dalam sistem jaringan tenaga listrik yang disebabkan adanya distorsi gelombang arus maupun tegangan. Harmonisa adalah sebuah gelombang sinusoidal yang memiliki frekuensi kelipatan dari frekuensi fundamentalnya (frekuensi dasar). Perlu dilakukan penelitian untuk mengetahui harmonisa di gedung SMP Negeri 12 Makassar. Dengan adanya penelitian harmonisa di gedung SMP Negeri 12 Makassar diharapkan Dapat Memberikan Informasi Mengenai Harmonisa Di Gedung SMP Negeri 12 Makassar.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan uraian latar belakang, maka dapat diidentifikasi permasalahan sebagai berikut:

1. Bagaimana Mengidentifikasi Beban yang potensial Menjadi Penyumbang Harmonik Di gedung ?
2. Bagaimana Nilai THDV Dan THDI Pada Sistem Kelistrikan Di gedung?
3. Bagaimana Perancangan Filter Pasif untuk mereduksi harmonisa akibat beban listrik ?

1.3 Ruang Lingkup Penelitian

Karena keterbatasan waktu dan pengetahuan maka penulis membatasi masalah yaitu membahas harmonisa tegangan listrik yang di hasilkan oleh beban di gedung SMP Negeri 12 Makassar di ketahui gedung SMP Negeri 12 Makassar terdapat banyak peralatan listrik seperti komputer, printer, lampu, pompa air kulkas, televisi, ac dan dispenser.

1.4 Tujuan dan Manfaat Penelitian

1.4.1. Tujuan penelitian

1. Mengetahui Beban potensial Penyumbang Harmonik Pada gedung SMP Negeri 12 Makassar
2. Mengetahui Nilai THDV Dan THDI Pada Sistem Kelistrikan Pada gedung SMP Negeri 12 Makassar
3. Mengetahui filter pasif sehingga dapat mereduksi tingkat harmonisa yang diakibatkan beban listrik.

1.4.2. Manfaat penelitian

Kegunaan ilmiah dari penelitian ini adalah memberi sumbangan pemikiran atau memberikan informasi dalam melakukan analisis pengukuran harmonisa dan perencanaan filter pasif dalam mereduksi harmonisa. Kegunaan praktis dari penelitian ini adalah berguna untuk memahami bagaimana hasil pengukuran yang diperoleh dari beberapa beban listrik sehingga menghasilkan batas-batas harmonisa yang diperbolehkan dalam suatu sistem. Selain itu kita juga dapat melihat bagaimana kinerja filter pasif apabila terjadi perubahan beban.



BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Kualitas Daya listrik

Kualitas Daya listrik (Power Quality) adalah persoalan bentuk tegangan, arus atau frekuensi yang biasa menyebabkan kegagalan atau misoperation peralatan, baik peralatan milik PLN maupun milik konsumen

Faktor Eksternal dan Internal Kualitas Daya Listrik.

Kualitas daya listrik pada sektor industri yang mendapatkan pasokan listrik dari PLN akan dipengaruhi oleh beberapa faktor antara lain:

1. Kualitas daya listrik dari pembangkit listrik (PLN).
2. Kualitas daya listrik pada bagian transmisi dan distribusi (PLN).
3. Kualitas daya listrik pada industri tersebut (faktor internal).

Kualitas daya listrik dari pembangkit listrik, transmisi dan distribusi (PLN) dituntut dapat memenuhi syarat dasar kebutuhan layanan (service requirement) kepada konsumennya yaitu:

1. Dapat memenuhi beban puncak.
2. Mempunyai deviasi tegangan dan frekuensi yang minimum.
3. Distorsi gelombang tegangan dan harmonik yang minimum
4. Terbebas dari surja tegangan
5. Terbebas dari surja tegangan Suplai sistem tegangan dalam keadaan

setimbang.

6. Urutan phase terjamin dengan benar
7. Memberikan suplai daya dan waktu layanan dengan keandalan tinggi dimana sistem dapat melayani beban secara kontinyu.

Selain faktor eksternal yang penyebab datangnya dari PLN, kualitas daya listrik suatu industri juga dipengaruhi oleh faktor internal pada industri tersebut diantaranya:

1. Konsumen belum memiliki dan mendapat informasi yang cukup menyangkut masalah kualitas daya listrik (power quality).
2. Besarnya kapasitas beban terpasang dengan kapasitas beban pemakaian.
3. Penggunaan dan pemasangan kapasitor bank.
4. Beban-beban non linier seperti peralatan-peralatan elektronik, AC drives, DC drives dan sebagainya yang berpengaruh terhadap tingkat harmonisa.

Beban linear adalah beban suatu alat yang memberikan bentuk gelombang keluaran yang linear. Atau dengan kata lain arus yang mengalir sebanding dengan impedansi dan perubahan tegangan. Contoh dari beban ini adalah resistor.

Beban non-linear adalah beban suatu alat yang bentuk gelombang keluarannya tidak sebanding dengan tegangan dalam setiap setengah siklus sehingga bentuk gelombang arus maupun tegangan keluarannya tidak sama dengan gelombang masuknya. Contoh dari alat dengan beban non-linear adalah televisi, komputer, mesin las, dll.

Penggunaan beban non-linearlah yang menyebabkan terjadinya harmonisa pada sistem pelistrikan. Parameter – parameter kualitas daya listrik.

Secara umum kualitas daya listrik pada kondisi steady state atau ajeak ditentukan oleh parameter – parameter sebagai berikut:

1. Tegangan (Volt)
2. Frekuensi (Hz)
3. Faktor daya ($\cos \phi$)
4. Harmonisa

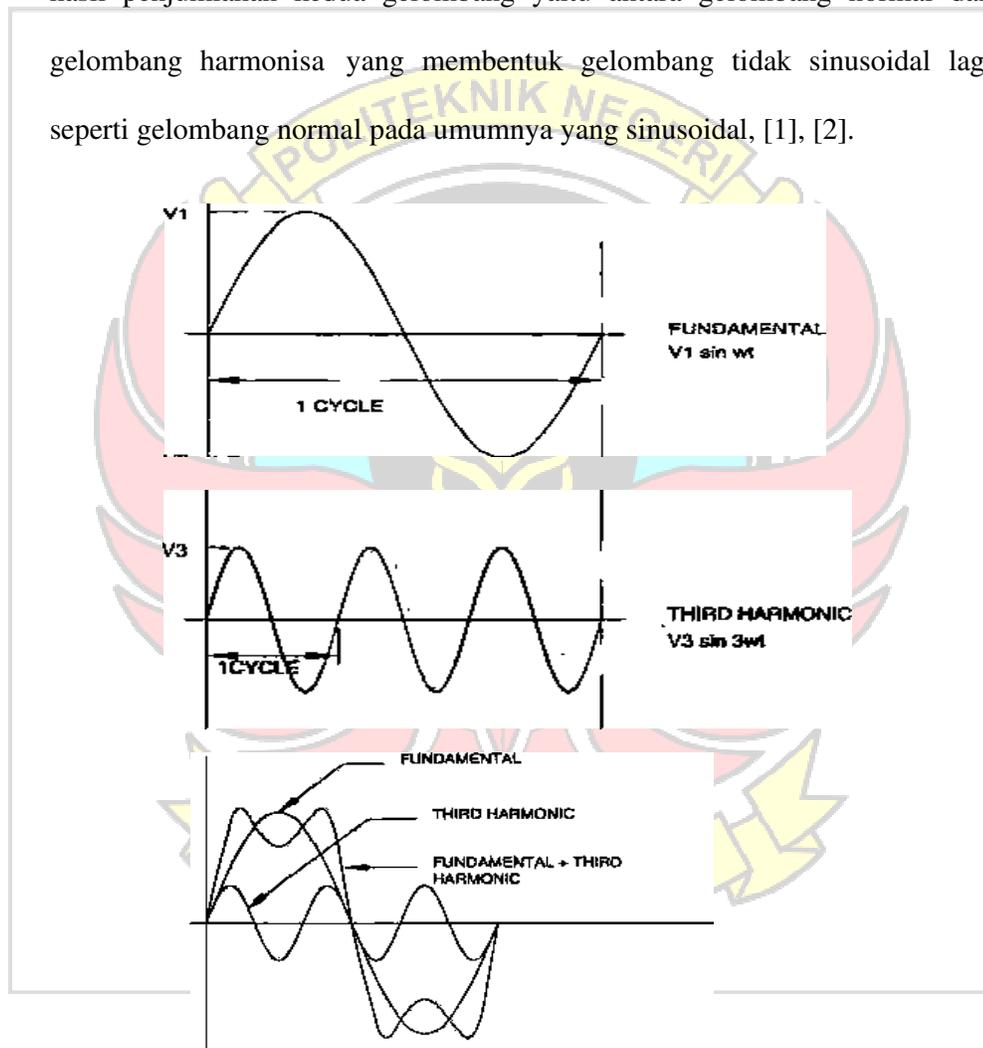
2.2 Pengertian Harmonisa

Harmonisa merupakan gangguan yang dalam distribusi tenaga listrik yang disebabkan oleh adanya distorsi gelombang arus dan tegangan yang menyebabkan adanya pembentukan gelombang-gelombang yang tidak sinusoidal atau dengan frekuensi kelipatan bulat dari frekuensi fundamentalnya. Sehingga harmonisa dapat menyebabkan cacat gelombang atau cacat Harmonisa adalah perubahan bentuk gelombang akibat adanya komponen frekuensi tambahan. Pada sistem tenaga listrik frekuensi kerja normal adalah 50 Hz atau 60 Hz tetapi, dalam aplikasi pemakaiannya berdasarkan beban yang digunakan frekuensi arus dan tegangan dapat menjadi tidak normal atau menjadi kelipatan dari frekuensi normal 50/60 Hz, hal inilah yang disebut dengan harmonisasi.

Jika frekuensi (f) adalah frekuensi normal dari suatu sistem, maka frekuensi orde n (1,2,3... n) adalah nf atau factor kelipatan dari frekuensi normal, sehingga frekuensi dapat berubah menjadi 100 Hz, 150 Hz dan seterusnya. Gelombang inilah yang kemudian menumpang pada gelombang normal sehingga terbentuklah gelombang tidak sinusoidal yang merupakan

hasil dari penjumlahan antara gelombang normal sesaat dengan gelombang harmonisanya.

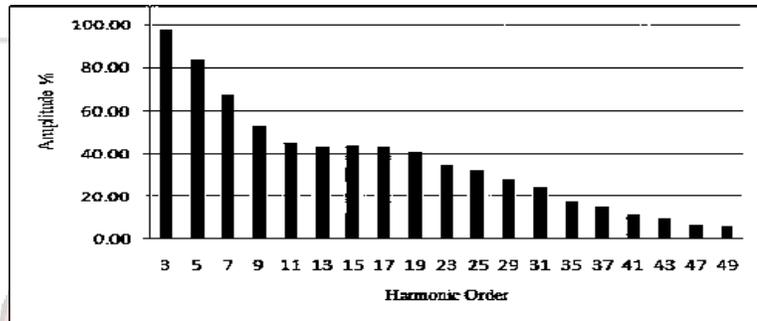
Berikut merupakan Gambar yang menunjukkan bentuk gelombang normal dan gelombang yang terkena distorsi harmonisa dan gabungan dari hasil penjumlahan kedua gelombang yaitu antara gelombang normal dan gelombang harmonisa yang membentuk gelombang tidak sinusoidal lagi seperti gelombang normal pada umumnya yang sinusoidal, [1], [2].



Gambar 2.1. Gelombang Perpaduan Antara Gelombang Harmonisa Dengan Gelombang Normal (Ideal) [1], [2]

Harmonisa berdasarkan dari urutan ordenya dapat dibedakan menjadi

harmonisa ganjil dan harmonisa genap, sesuai dengan namanya, harmonisa ganjil adalah harmonisa ke 1,3,5,7,9,11 dan seterusnya, harmonisa ganjil yang paling merugikan adalah harmonisa ke 3,9,15 dan seterusnya seperti pada Gambar 2.2.



Gambar.2.2. Spektrum Urutan Orde Harmonisa [1],[2]

Teori yang dipakai untuk memahami gelombang harmonisa adalah deret fourier, dimana deret fourier dapat menunjukkan komponen genap dan komponen ganjil, dan persamaan umum dari deret fourier dapat ditulis dengan sistematis menggunakan persamaan berikut [1],[2] :

Banyaknya aplikasi beban non linier pada sistem tenaga listrik telah membuat arus menjadi sangat terdistorsi dengan persentase harmonisa arus, Tingginya persentase kandungan harmonisa arus *Total Harmonic Distortion* atau disingkat dengan THD pada suatu sistem tenaga listrik dapat menyebabkan timbulnya beberapa persoalan harmonisa yang serius pada sistem kelistrikan, menimbulkan berbagai macam kerusakan pada peralatan listrik yang *sensitive* dan menyebabkan penggunaan energi listrik tidak teratur [9], [10], [11].

2.3 Macam-Macam Harmonisa

Berdasarkan sumber gelombangnya, kita ketahui ada harmonisa arus dan harmonisa tegangan. Harmonisa berdasarkan urutan ordenya dibedakan menjadi harmonisa urutan ganjil dan harmonisa urutan genap. Harmonisa urutan ganjil yaitu harmonisa ke 3, 5, 7, 9, 11 dan seterusnya. Urutan gelombang ke 1 adalah gelombang aslinya pada frekuensi dasar 50 Hz.

Harmonisa Genap yaitu harmonisa ke 2, 4, 6, 8, 10 dan seterusnya.

Harmonisa berdasarkan urutan fasanya dibedakan menjadi 3 macam yaitu harmonisa urutan positif, harmonisa urutan nol dan harmonisa urutan negative. Harmonisa urutan positif (*positive sequence*) mempunyai fasa yang sama dengan gelombang murni frekuensi dasarnya 50 Hz. Harmonisa urutan nol (*zero sequence*) tidak berpengaruh pada putaran medan., tapi menghasilkan panas pada komponen dan sistem. Harmonisa urutan nol sering disebut juga dengan *triplens harmonics* yaitu harmonisa ke 3, 9, 15 dan seterusnya. Harmonisa urutan negative (*negative sequence*) mempunyai fasa yang berlawanan dengan gelombang murni frekuensi dasarnya 50 Hz.

Tabel 2.1 Polaritas Orde Harmonisa

(Sumber : IEEE 519-1992 Polaritas Orde Harmonisa)

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

2.4 Sumber Harmonisa

Harmonisa dihasilkan karena berbagai jenis penggunaan peralatan yang memiliki kondisi saturasi, peralatan elektronika daya dan beban non-linier, yaitu sebagai berikut [9]:

1. Peralatan yang memiliki kondisi saturasi biasanya memiliki komponen yang bersifat magnetik seperti transformator, mesin-mesin listrik, tanur busur listrik, peralatan yang menggunakan *power supply* dan *magnetic ballast*.
2. Peralatan elektronika daya biasanya menggunakan komponen-komponen elektronika seperti *thyristor*, *dioda*, dan lain-lain. Contoh peralatan yang menggunakan komponen elektronika daya adalah konverter PWM, *Inverter*, pengendali motor listrik, *electronic ballast*, dan sebagainya.
3. Pada rumah tangga, beban non-linier terdapat pada peralatan seperti Lampu Hemat Energi, Televisi, *Video player*, AC, Komputer dan lainnya

Harmonisa disebabkan oleh adanya beban nonlinear yang digunakan dalam sistem tenaga listrik. Peralatan seperti converter, penyearah, adjustable speed drive untuk mengendalikan motor-motor industri, thyristor controlled reactor, serta berbagai peralatan yang didasarkan pada proses pensaklaran dapat menimbulkan terjadinya harmonisa. Sedangkan untuk beban, yang dapat menimbulkan harmonisa antara lain electric arc furnace, induction furnace,

mesin las, dimana beban tersebut berubah-ubah dari waktu ke waktu dengan cepat secara nonlinier. Adanya harmonisa akan berpengaruh pada :

1. Meningkatnya resonansi sistem penyaluran ketenagalistrikan.
2. Mengurangi efisiensi sistem penyaluran ketenagalistrikan serta utilitasnya.

3. Mengurangi umur isolasi dai peralatan penyaluran ketenagalistrikan.
4. Interferensi pada sistem proteksi dan peralatan konsumen

Penyebab terjadinya gelombang harmonisa ini adalah penggunaan beban-beban non linier pada sistem tenaga yang menimbulkan distorsi pada bentuk gelombang sinus. Beban non-linier ini dimodelkan sebagai sumber arus yang menginjeksikan arus harmonisa ke dalam sistem tenaga.

Semakin banyak peralatan elektronika yang digunakan seperti: tv, komputer, dan alat penghemat daya akan semakin menambah harmonisa pada arus listrik, sehingga THD yang dihasilkan akan semakin besar.

2.5 Efek Harmonisa

Secara umum, efek harmonisa yang timbul pada jala-jala listrik tergantung pada sumber harmonisa dan letak harmonisa. Harmonisa pada jala-jala listrik dapat menimbulkan pengaruh yang tidak diinginkan, seperti peralatan menjadi panas, *life time* peralatan jadi berkurang, bahkan peralatan menjadi rusak, interferensi sinyal (seperti noise pada saluran telepon).

Akibat yang ditimbulkan pada peralatan jika terdapat arus atau tegangan harmonisa antara lain:

1. Rusaknya peralatan listrik
2. Terbakarnya kabel / konduktor penghantar
3. Pada transformator daya menurun, bertambahnya losses
4. Pada motor listrik terjadi overheat
5. Pada alat ukur kWh meter elektromekanis terjadi kesalahan pengukuran.

6. Kegagalan fungsi relay

Harmonisa urutan positif mempunyai urutan fasa yang sama dengan harmonisa dasarnya dan menyebabkan penambahan panas di konduktor, *circuit breaker*. Harmonisa urutan negatif mempunyai urutan fasa yang berlawanan dengan harmonisa dasarnya dan menyebabkan penambahan panas di berbagai peralatan. Selain itu, urutan negatif juga menyebabkan masalah di motor induksi karena urutan negatif berputar berlawanan arah. Perputaran ini tidak dapat membuat motor berputar melawan arah yang dikehendaki, namun dapat mengurangi laju kecepatan motor dan menyebabkan motor lebih panas dari semestinya. Harmonisa urutan kosong tidak memproduksi suatu perputaran medan di kedua arah, tapi menghasilkan panas lebih tinggi dibandingkan urutan positif dan urutan negatif.

Ada beberapa dampak yang dapat ditimbulkan harmonisa terhadap sistem kelistrikan, antara lain :

2.5.1 Pengaruh Penggunaan Peralatan Elektronika Daya Terhadap Harmonisa

Rangkaian elektronika daya merupakan suatu rangkaian listrik yang dapat mengubah sumber daya listrik dari bentuk gelombang tertentu (seperti bentuk gelombang *sinusoidal*) menjadi sumber daya listrik dengan bentuk gelombang lain (seperti gelombang *non-sinusoidal*) dengan menggunakan piranti semi-konduktor daya. Semi-konduktor daya memiliki peran penting dalam rangkaian elektronika daya. Semi-konduktor daya dalam rangkaian

elektronika daya umumnya dioperasikan sebagai pensakelar (*switching*), pengubah (*converting*), dan pengatur (*controlling*) sesuai dengan unjuk kerja rangkaian elektronika daya yang diinginkan. Penggunaan peralatan elektronika daya juga dapat merusak kualitas tegangan dan arus sistem pada titik-titik tertentu di jaringan sistem tenaga. Pada titik-titik tersebut

ditemukan komponen tegangan dan arus dengan frekuensi-frekuensi kelipatan dari frekuensi fundamental, sehingga menimbulkan harmonisa [1], [12],[13].

2.5.2 Pengaruh Harmonisa Pada Efisiensi Tegangan

Harmonisa adalah tegangan (V_{ac}) dan arus dengan frekuensi yang merupakan kelipatan bilangan bulat dari frekuensi dasar. Pada tahun-tahun sebelumnya harmonik tidak lazim di sebagian besar industri akibat beban linier yang seimbang menggunakan motor induksi tiga fasa bersama dengan lampu pijar, *resistivitas* dll. Dalam analisis harmonik, beberapa *indeks* penting berikut yang digunakan untuk melukiskan pengaruh harmonisa pada komponen sistem tenaga listrik [14].

komponen harmonik terhadap komponen dasar dalam (%). *Indeks* ini digunakan untuk mengukur penyimpangan (*deviation*) dari bentuk gelombang satu periode yang mengandung harmonik pada satu gelombang

sinus sempurna. Untuk satu gelombang sinus sempurna pada frekuensi dasar *Total Harmonic Distortions* (THD) adalah nol. Demikian pula pengukuran distorsi harmonik individual untuk tegangan dan arus pada *orde* ke h didefinisikan sebagai V_h/V_1 dan I_h/I_1 [15].

Harmonik yang dihasilkan untuk meningkatkan jumlah beban non linier seperti yang dijelaskan dibawah ini:

- 1) Ketika tegangan sistem linier tetapi beban *non linier*, saat akan terdistorsi dan menjadi *non sinusoidal*. Arus yang sebenarnya akan menjadi lebih tinggi dari arus yang akan diukur oleh amper meter atau alat ukur lainnya pada frekuensi dasar.

- 2) Ketika sistem suplai itu sendiri mengandung harmonisa dan tegangan sudah terdistorsi, beban *linier* akan menghadapi beban harmonik tegangan tersebut dan menarik arus harmonik terhadap sistem dan menghasilkan urutan harmonisa arus yang sama
- 3) Bila tegangan sistem dan beban keduanya *non linier* (suatu kondisi yang lebih umum) tegangan harmonik akan memperbesar dan harmonik tambahan akan dihasilkan, sesuai dengan *linieritas non-of* beban dan karenanya akan lebih mindistorsi bentuk gelombang tegangan

2.5.3 Dampak Harmonisa Pada Peralatan

- 1) Pengaruh Pada Mesin-Mesin Berputar

Harmonisa arus atau tegangan akan menimbulkan penambahan rugi-rugi pada belitan stator dan rangkaian rotor, dan laminasi pada rotor dan stator. Kerugian ini lebih besar dari pada kerugian akibat resistansi DC karena arus Eddy dan skin effect.

Arus harmonisa timbul pada stator mesin AC menghasilkan aksi motor (slip harmonisa positif, S_n). Aksi ini akan menghasilkan torsi shaft pada arah yang sama dengan kecepatan medan harmonisa sehingga semua

harmonisa urutan positif membantu putaran torsi shaft sedangkan harmonisa urutan negatif berlaku sebaliknya.

2) Pengaruh Pada Peralatan Pemutus

Harmonisa dapat Meningkatkan Arus Sesaat Pada saat gelombang Mencapai Nol, Akibatnya Lanju Kenaikan Transient recovery Voltage (TRV) Pada saat pemutusan lebih Tinggi dibanding dengan sistem dengan keadaan normal, bila pengaruh distorsi harmonisa ini di biarkan maka dapat menimbulkan kegagalan pemutusan.

Pengaruh harmonisa pada pemutus beban lainnya, harmonisa dapat menimbulkan bergesernya titik perpotongan gelombang arus dengan sumbu. Saat perpotongan tersebut akan mempengaruhi nilai puncak dari TRV.

3) Pengaruh Pada Relay Pengaman

Harmonisa dapat mempengaruhi kerja relay pengaman yang cara kerjanya tergantung pada nilai puncak tegangan atau arus, atau *zero crossing point*, selain itu juga tergantung dari konstruksi dan prinsip kerja dari relay pengaman tersebut. Relay- relay elektromagnetik dapat terganggu karakteristik penundaan waktu (*Time Delay Characteristic*) akibat adanya komponen- komponen torsi harmonik. Sedangkan relay

arus tanah (*ground fault relay*) pada umumnya tidak bisa membedakan antara arus gangguan tanah dengan komponen harmonisa urutan nol (kelipatan tiga).

Relay digital yang berkerja dengan micro prosesor mempunyai filter dan tidak di pengaruhi oleh kesalahan frekuensi, karena peralatan tersebut mengambil dan menggunakan gelombang dasar dari gelombang yang terdistorsi.

4) Pengaruh Harmonisa pada Transformator

Salah satu dampak umum dari gangguan transformator adalah panas lebih pada kawat netral dan transformator. Sehingga terjadi penurunan kapasitas transformator. Frekuensi harmonisa yang lebih tinggi dari frekuensi kerjanya akan mengakibatkan penurunan efisiensi atau terjadi kerugian daya.

5) Pengaruh Pada Sistem Tenaga Yang Lain

Beberapa pengaruh harmonisa pada sistem tenaga listrikan selain yang tidak boleh diabaikan yaitu frekuensi harmonisa berinterferensi dengan *ripple control* sistem PLC (Power Line carrier), dan ini bisa menyebabkan kesalahan operasi dalam melakukan *remote switching* pengaturan beban, dan metering. Kesalahan dalam induksi kWh.

2.5.4 Pengaruh Harmonisa pada Faktor Daya

Pada umumnya beban-beban listrik dari suatu sistem tenaga listrik mempunyai faktor kerja lagging atau bersifat induktif. Beban-beban tersebut antara lain motor-motor induksi, trafo daya.

Beban konverter dan lain-lain yang menarik arus magnetisasi dari jaringan sehingga beban-beban tersebut membutuhkan daya reaktif dari jaringan sistem tenaga listrik. Bila kebutuhan daya reaktif sangat besar, maka dapat mengakibatkan faktor daya mejadi makin kecil. Jika faktor daya tidak memenuhi standar yang sudah ditentukan oleh PLN maka

dapat menimbulkan kerugian baik dipihak pembangkit maupun konsumen. Adapun kerugian dipihak konsumen antara lain:

- 1) Perbedaan tegangan listrik pada kondisi beban ringan dan beban penuh relatif besar. Hal ini berarti pengaturan tegangan menjadi buruk.
- 2) Instalasi listrik dengann pembatas arus tertentu (kW) akan memerlukan kapasitas yang lebih besar.

Sedangkan kerugian dipihak pembangkit antara lain :

- 1) Menurunkan efisiensi peralatan, seperti transformator daya dan jaringan penghantar. Dalam hal ini untuk daya aktif yang sama, penurunan faktor daya akan memepbesar arus yang melalui peralatan tersebut, sehingga rugi-rugi daya yang timbul semakin besar. Dengan demikian efesiensi peralatan akan semakin menurun.
- 2) Drop tegangan akan semakin besar.

2.6 Faktor Harmonisa Atau Persentase Total Harmonic Distorti

Individual Harmonic Distortion (IHD) adalah rasio antara nilai RMS dari harmonisa individual dan nilai RMS dari fundamental. Total Harmonic Distortion (THD) adalah rasio antara nilai RMS dari komponen

harmonisa dan nilai RMS dari fundamental.

Tabel 2.2 Standar Batas Harmonisa Arus

(Sumber : IEEE 519-1992 Batas Harmonisa A)

Distorsi Maksimum Harmonisa Arus dalam Persen dari I_L						
Urutan Harmonisa Individu (Harmonisa Ganjil)						
I_{sc}/I_L	<11	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h$	TDD
<20*	4.0	2.0	1.5	0.6	0.3	5.0
20<50	7.0	3.5	2.5	1.0	0.5	8.0
50<100	10.0	4.5	4.0	1.5	0.7	12.0
100<1000	12.0	5.5	5.0	2.0	1.0	15.0
>1000	15.0	7.0	6.0	2.5	1.4	20.0

Berdasarkan standar IEEE 519. 1992 Ada dua kriteria yang digunakan untuk mengevaluasi distorsi harmonisa, Yaitu batasan untuk harmonisa arus dan batasan harmonisa tegangan

Tabel 2.3 Standar Batas Harmonisa Tegangan

(Sumber : IEEE 519-1992 Batas Harmonisa Tegangan)

Sistem voltage Bus Voltage At PCC	IHDv %	THDv %
< 69 kV	3.0	5.0
69 – 161 kV	1.5	2.0
> 161	1.0	1.5

Dimana :

I_{sc} = Arus short circuit maksimal pada PCC (Point of Common Couple)

I_L = Arus permintaan beban maksimum (Frekuensi dasar) pada PCC

Untuk menentukan I_{sc} dapat menggunakan persamaan dibawah ini :

$$I_{sc} = \frac{1000 \times MVA}{\sqrt{3} \times kV} \text{ A}$$

Untuk menentukan I_L dapat menggunakan persamaan dibawah ini

$$I_L = \frac{kW}{PF \times \sqrt{3} \times kV} \text{ A}$$

Sehingga dengan ke 2 persamaan diatas maka dapat menentukan batas standar harmonisa yang terdapat pada tabel 2.2. Untuk menentukan arus I_{sc}/I_L dapat menggunakan persamaan dibawah ini :

Mentukan rating arus untuk mencari standar harmonisa = $\frac{I_{sc}}{I_L} \text{ A}$

(Dugan, R. C. 2004)

Perbedaan THDV Dan THDI THDV menyatakan THD tegangan listrik dan THDI menyatakan THD arus listrik. Indeks ini didefinisikan sebagai perbandingan nilai rms komponen harmonik terhadap komponen dasar dan biasanya dinyatakan dalam persen.

Kualitas tegangan ditentukan oleh sumber sedangkan kualitas arus ditentukan oleh beban. Sumber biasanya telah dirancang supaya tegangannya mendekati sinusoidal murni sehingga nilai THD tegangan yang diijinkan jauh lebih kecil dibanding THD arusnya. Berbicara mengenai bahaya yang akan timbul, yang menentukan pemanasan lebih pada peralatan adalah harmonisa arus. Tetapi harmonisa tegangan yang besar juga merupakan indikasi harmonisa arus yang terlalu besar, karena sumber tegangan yang biasanya dirancang sinusoidal ini.

THD tegangan :

$$THD_V = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} V_h^2}}{V_1} \cdot 100$$

THD arus :

$$THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_1} \cdot 100$$

Peran harmonisa pada sistem tenaga listrik cukup besar, terutama pada alat-alat yang terdapat pada sistem tenaga. Harmonisa akan menimbulkan beberapa dampak seperti panas berlebih pada beberapa alat seperti generator dan transformator karena kecenderungan harmonisa mengalir ke tempat dengan impedansi yang lebih rendah. Beberapa dampak lain akan dijelaskan pada artikel ini.

Parameter besarnya harmonisa dinyatakan dalam *Total Harmonic*

Distortion (THD) yang dapat ditulis sebagai:

Untuk tegangan,

$$THD_V = \frac{\sqrt{V_2^2 + V_3^2 + V_4^2 + \dots + V_n^2}}{V_1} \dots$$

Untuk arus,

$$THD_I = \frac{\sqrt{I_2^2 + I_3^2 + I_4^2 + \dots + I_n^2}}{I_1} \dots$$

Berdasarkan kesepakatan yang disepakati dunia internasional, THD yang diterima adalah apabila bernilai dibawah 5% dari tegangan atau arus fundamentalnya. Apabila diatas batas tersebut maka alat elektronik tersebut tidak boleh digunakan.

2.7 Standar Distorsi Harmonisa IEC

Dalam hal ini standar yang digunakan sebagai batasan harmonisa adalah yang dikeluarkan oleh *International Electrotechnical Commission (IEC)* yang mengatur batasan harmonisa pada beban beban kecil satu fasa ataupun tiga fasa yang nilai arusnya lebih kecil dari 16 amper perfasa [1]. Untuk beban beban tersebut umumnya digunakan standar IEC 61000-3-2. Hal ini disebabkan karena belum adanya standar baku yang dihasilkan oleh IEEE. Pada standar IEC 61000-3-2, beban beban kecil tersebut diklasifikasikan dalam kelas A, B, C, dan D.

Masing-masing kelas mempunyai batasan harmonisa yang berbeda beda yang dijelaskan sebagai berikut [1], [2] :

- 1). *Kelas A* menyangkut semua kategori beban termasuk didalamnya peralatan penggerak motor dan semua peralatan 3 fasa yang arusnya tidak lebih dari 16 amper perfasanya. Semua peralatan yang tidak termasuk

dalam 3 kelas yang lain dimasukkan dalam kategori kelas A.

Batasan harmonisanya hanya didefinisikan untuk peralatan satu fasa (tegangan kerja 230V) dan tiga fasa (230/400V) dimana batasan arus harmonisanya seperti yang diperlihatkan Tabel 2.4

Tabel 2.4. Batasan Arus Harmonisa Untuk Peralatan Kelas A

Harmonis a ke (n)		Arus harmonisa maksimum yang diizinkan (A)	
3	Harmonisa Ganjil	2.3	
5		1.14	
7		0.77	
9		0.4	
11		0.33	
13		0.21	
$15 \leq n \leq 39$		$2,25/n$	
2	Harmonisa Genap	1.08	
4		0.43	
6		0.3	
$8 \leq n \leq 40$			$1,84/n$

- 2). Kelas B meliputi semua peralatan *tool portable* dimana batasan arus harmonisanya merupakan harga absolut maksimum dengan waktu kerja yang singkat dimana batasan arus harmonisanya diperlihatkan Tabel 2.5.

Tabel 2.5. Batasan Arus Harmonisa Untuk Peralatan Kelas B

Harmonisa ke (n)	Harmonisa Ganjil	Arus harmonisa maksimum yang diizinkan (A)
3	Harmonisa Ganjil	3,45
5		1,71
7		1,155
9		0,6
11		0,495
13		0,315
$15 \leq n \leq 39$		
2	Harmonisa Genap	1,62
4		0,645
6		0,45
$8 \leq n \leq 40$		

3). *Kelas C* termasuk didalamnya semua peralatan penerangan dengan daya *input* aktifnya lebih besar 25 Watt. Batasan arusnya diekspresikan dalam bentuk persentase arus fundamental. Persentase arus maksimum yang diperbolehkan untuk masing masing harmonisa diperlihatkan Tabel

Tabel 2.6. Batasan Arus Harmonisa Untuk Peralatan Kelas C

Harmonisa ke (n)	Arus harmonisa maksimum yang diizinkan (% fundamental)
2	2
3	30 x pf
5	10
7	7
9	5
11 ≤ n ≤ 39	3

3) *Kelas D* termasuk semua jenis peralatan yang dayanya dibawah 600 Watt khusus-nya personal komputer, monitor, TV. Batasan arusnya diekspresikan dalam bentuk mA/W dan dibatasi pada harga absolut yang nilainya diperlihatkan oleh Tabel 2.7.

Tabel 2.7. Batasan Arus Harmonisa Untuk Peralatan Kelas D

Harmonisa ke (n)	Arus harmonisa maksimum yang diizinkan (mA/W)	Arus harmonisa maksimum yang diizinkan (A)
	75 < P < 600W	P > 600W
3	3,4	2,3
5	1,9	1,14
7	1	0,77
9	0,5	0,4
11	0,35	0,33
13	0,296	0,21
15 ≤ n ≤ 39	3,85/n	2,25/n

2.8 Filter Pasif

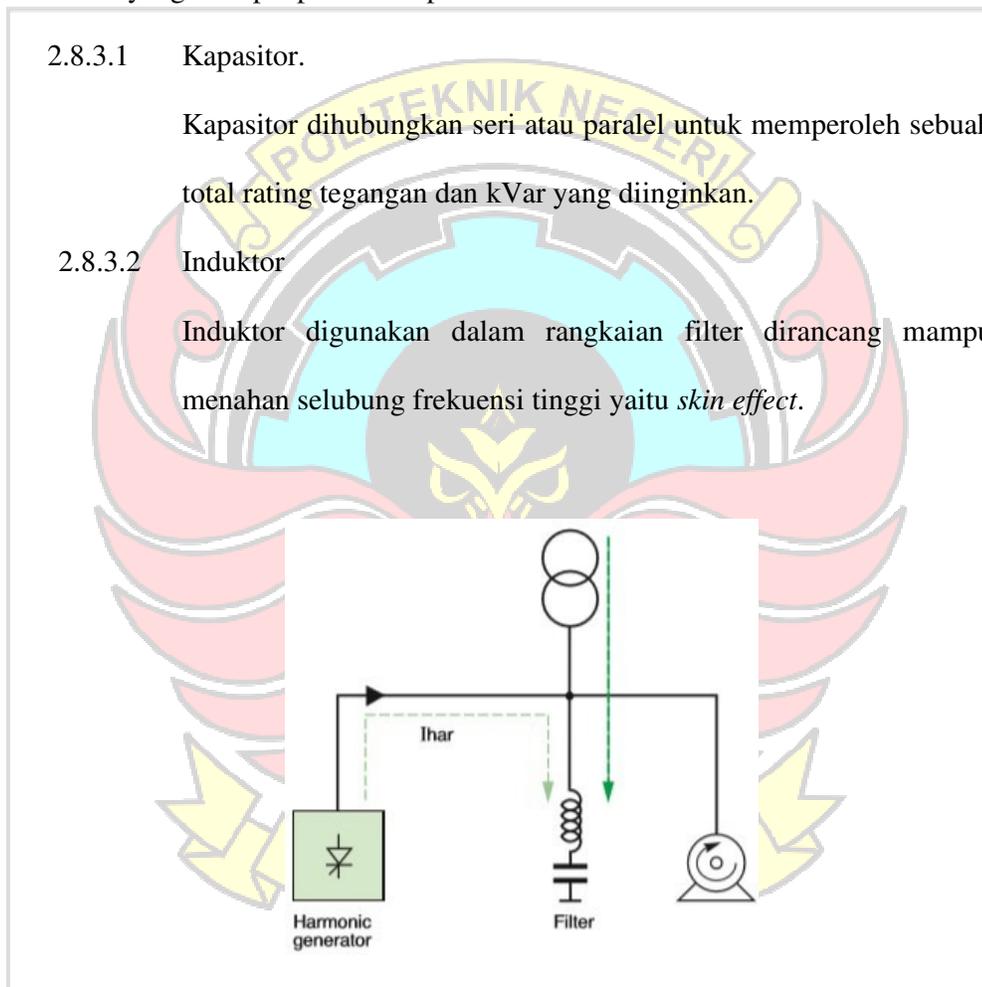
Filter pasif banyak digunakan untuk mengkompensasi kerugian daya reaktif akibat adanya harmonisa pada sistem instalasi. Rangkaian filter pasif terdiri dari komponen R, L, dan C yang dipasang secara seri. Komponen utama yang terdapat pada filter pasif adalah :

2.8.3.1 Kapasitor.

Kapasitor dihubungkan seri atau paralel untuk memperoleh sebuah total rating tegangan dan kVar yang diinginkan.

2.8.3.2 Induktor

Induktor digunakan dalam rangkaian filter dirancang mampu menahan selubung frekuensi tinggi yaitu *skin effect*.



Gambar 2.3 Rangkaian Filter Pasif dalam Sistem (Yerry. 2018)

Filter Pasif tersusun dari kapasitor dan induktor dengan satu frekuensi yang disetting pada frekuensi tegangan harmonisa yang akan dihilangkan. Menerapkan filter harmonik membutuhkan pertimbangan yang cermat. Filter yang disetel seri tampaknya memiliki impedansi rendah terhadap arus harmonic tetapi juga membentuk rangkaian resonansi paralel dengan impedansi sumber. Dalam beberapa kasus, situasi dapat dibuat lebih buruk dari pada kondisi yang dikoreksi. Sangat penting bahwa simulasi pada komputer dari seluruh sistem daya dilakukan sebelum menerapkan filter harmonik. Ketika menerapkan filter harmonik, unit hampir tidak pernah disetel ke frekuensi harmonik yang tepat. Sebagai contoh, frekuensi harmonik ke-5 dapat dirancang untuk resonansi pada frekuensi harmonik 4,7 (Sankaran. C. 2002).

Filter Pasif adalah suatu rangkaian yang dipergunakan untuk membuang ut pada frekuensi tertentu. Untuk merancang filter pasif dapat digunakan komponen pasif (R,L,C) dan komponen aktif (*op-amp*, *transistor*). Dengan demikian filter dapat dikelompokkan menjadi filter pasif dan filter aktif.

Pada dasarnya filter dapat dikelompokkan berdasarkan *response* (tanggapan) menjadi 4 jenis, yaitu:

1. Filter lolos rendah/ *Low Pass Filter (LPF)*,
2. Filter lolos tinggi/ *High Pass Filter (HPF)*,
3. Filter lolos rentang/ *Band Pass Filter (BPF)*,
4. Filter tolak rentang/ *Band Stop Filter* atau *Notch Filter*

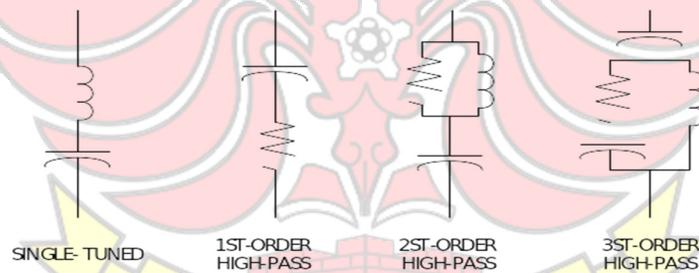
5. Untuk membuat filter sering kali dihindari penggunaan induktor, terutama karena ukurannya yang besar. Sehingga umumnya filter pasif hanya memanfaatkan komponen R dan C saja. Salah satu metode yang paling umum untuk mengendalikan distorsi harmonik dalam adalah penggunaan teknik *filtering* pasif yang menggunakan filter *single-tuned* atau *band-pass*.

Filter harmonik pasif dapat dirancang sebagai *single-tuned elemen* yang menyediakan jalur impedansi rendah untuk arus harmonik pada frekuensi yang tepat atau sebagai *band-pass* perangkat yang dapat memfilter harmonik pada *bandwidth* frekuensi tertentu.

Prinsip kerja dari filter adalah mengalirkan arus orde tertentu dari sumber harmonisa (beban non linier) melalui jaringan filter. Untuk mamaksa arus orde tertentu mengalir ke jaringan filter, besar kapasitor harus diatur agar terjadi resonansi pada jaringan, sehingga harga impedansi saluran akan minimum karena hanya tinggal komponen resistansi saja, disamping dapat mengurangi harmonisa, *Single-Tuned Passive Filter* juga dapat memperbaiki power factor [1].

2.9 Perencanaan Filter Pasif

Untuk mendapatkan kualitas tegangan yang lebih baik maka filter penalaan tunggal pada bus mainsub akan dimodifikasi menjadi filter harmonisa karena terjadi resonansi pada bus-bus tersebut dan distorsi tegangan yang melebihi standar. Jenis filter yang digunakan adalah high pass filter. Sebuah high pass filter adalah rangkaian resistor dan induktansi yang diparalel dan diseri dengan kapasitor. Pada frekuensi penalaan yang telah ditetapkan, rangkaian ini menghasilkan impedansi minimal sehingga menjadi jalan bagi arus-arus harmonisa pada frekuensi penalaan dan arus-arus harmonisa pada frekuensi diatas frekuensi penalaan yang ada di jaringan. Sehingga akan memperbaiki plot impedansi jaringan dan menurunkan tingkat distorsi harmonisa dibawah standar IEEE 519-1992 ($VTHD < 5\%$).



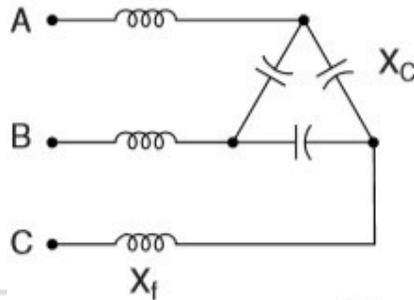
Gambar 2.4 Configurası Umum Filter Pasif (Dugan, R. C 2004).

Merancang *Single-Tuned Passive Filter* adalah kombinasi seri induktansi dan kapasitansi. Pada kenyataannya tidak adanya resisitor secara fisik dirancang, akan ada selalu menjadi hambatan seri, yang merupakan resistansi intrinsik dari reaktor seri.

kadang-kadang digunakan sebagai sarana untuk menghindari *overheating filter*. Semua frekuensi harmonik arus yang bertepatan dengan *Single-Tuned Passive Filter* akan menemukan jalur impedansi rendah melalui filter [1].

2.9.1 Sambungan Filter

Filter biasanya disetel sedikit lebih rendah dari harmonik yang akan difilter untuk memberikan margin keselamatan jika ada beberapa perubahan dalam parameter sistem yang akan meningkatkan frekuensi takik. Jika mereka disetel tepat ke harmonik, baik perubahan kapasitansi atau induktansi dengan suhu atau kegagalan mungkin menggeser resonansi paralel lebih tinggi ke harmonik yang sedang disaring. Ini bisa menghadirkan situasi yang lebih buruk daripada yang tanpa filter karena resonansi umumnya sangat tajam. Untuk menghindari masalah dengan resonansi ini, filter ditambahkan ke sistem dimulai dengan harmonik signifikan terendah yang ditemukan dalam sistem. Misalnya, memasang filter harmonik ketujuh biasanya mensyaratkan filter harmonik kelima juga dipasang. Resonansi paralel baru dengan filter harmonik ketujuh saja seringkali sangat dekat dengan yang kelima, yang pada umumnya membawa bencana. Konfigurasi filter dari Gambar. 2.4 tidak menerima arus urutan-nol karena kapasitor terhubung ke delta, yang membuatnya tidak efektif untuk menyaring urutan-nol harmonik triplen.



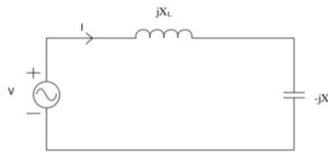
Gambar 2.5 Filter Harmonisa Sambungan Delta

(Yeri, S. 2018)

Karena 380 Volt Kapasitor biasanya disambung Delta. Solusi lain harus harus digunakan ketika perlu untuk mengontrol arus urutan nol ketiga harmonik dibanyak fasilitas bangunan industri dan komersial. Sebaliknya, kapasitor pada sistem distribusi utilitas lebih sering terhubung bintang (wye). Ini memberikan pilihan untuk mengendalikan harmonisa urutan nol (Triplens) hanya dengan mengubah koneksi netral. Menempatkan reaktor di netral dari sebuah kapasitor adalah cara umum untuk memaksa bank untuk menyaring hanya harmonik urutan-nol. Teknik ini sering digunakan untuk menghilangkan gangguan telepon. Reaktor yang terendam dipasang di netral dan keran disesuaikan untuk meminimalkan telepon.

2.9.2 Perhitungan Filter Pasif

Mendesain filter *passive single tuned* yang terdiri dari komponen- komponen pasif induktor, kapasitor, dan tahanan seperti gambar dibawah ini :



Gambar 2.6 Gambar Resonansi Seri (Sumber : Dugan, R. C. 2004).

Langkah-langkah untuk merancang filter *passive single tuned* adalah :

1. Menentukan ukuran Kapasitor Q_c berdasarkan kebutuhan daya Reaktif untuk perbaikan faktor daya.
2. Tentukan Reaktansi Kapasitor (X_c)
3. Tentukan Kapasitansi dari Kapasitor (C)
4. Tentukan Reaktansi Induktif dari Induktor (X_L)
5. Tentukan Induktansi dari Induktor (L)

2.9.3 Perhitungan Kapasitor

Dengan diketahui data sebagai berikut : $P_1 = 13,12 \text{ kW}$

$$Q_1 = -1,52 \text{ kVAR} \quad S_1 = 16,06 \text{ kVA}$$

Dengan data-data di atas maka didapatkan nilai $\cos \phi$ sebesar :

$$\cos \phi = \frac{13,12 \text{ kW}}{16,06 \text{ kVA}} = 0,81$$

Dengan perhitungan diatas telah didapatkan nilai $\cos \phi$ yaitu 0,81.

Menurut Peraturan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia No 19 Tahun 2014, batas faktor daya yang diperbolehkan adalah tidak kurang dari 0,85 atau dikenakan biaya kelebihan daya reaktif oleh PLN. Tetapi jika $\cos \phi$ di perbaiki menjadi 0,99 maka daya reaktif yang dikonsumsi akan menjadi lebih kecil. Serta dapat memperbaiki drop tegangan dan rugi-rugi daya.

$$\begin{aligned} \cos \phi &= S_2 = \frac{13,12}{0,99} \\ &= 13,25 \text{ kVA} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Q_2 &= \sqrt{(13,25)^2 - (13,12)^2} \\ &= 1,43 \text{ kVAR} \end{aligned}$$

Dengan perhitungan diatas dapat dibuktikan. Jika cos phi dapat diperbaiki menjadi 0,99 maka dapat mengurangi rugi-rugi daya pada sistem.

Untuk mendapatkan nilai cos phi 0,99. Maka perlu menambah beban yang bersifat kapasitif. Untuk menentukan beban yang bersifat kapasitif, maka perlu menghitung daya reaktif pengurangnya. Dimana daya reaktif yang berfungsi sebagai pengurang sama dengan daya reaktif kapasitif yang dibutuhkan. Dengan perhitungan untuk menentukan nilai kapasitif dapat menggunakan persamaan 2.4 :

Menentukan nilai kapasitif (C)

$$\begin{aligned} Q_{VAR} &= \sqrt{\frac{(13,12)^2}{0,81} - 13,12^2} - \sqrt{\frac{(13,12)^2}{0,99} - 13,12^2} \\ &= 9,62 - 1,87 \\ Q_{VAR} &= 7,75 \text{ kVAR} \end{aligned}$$

Dari hasil perhitungan diatas maka kita dapat menentukan reaktansi filter.

Pada tegangan nominal 0,4 kV dengan persamaan 2.5.

$$\begin{aligned} X_c &= \frac{(0,4)^2 \times 1000}{7,75} \\ &= 20,6 \Omega \end{aligned}$$

Dengan tegangan nominal sebesar 0,4 kV. Dan rating capacitor sebesar 7,75 kVAR. Maka didapatkan nilai reaktansi kapasitif sebesar 20,6 Ω. Dengan demikian nilai kapasitor dapat dihitung dengan persamaan 2.6 :

$$C = \frac{1}{2 \times 3,14 \times 50 \times 20,6}$$

$$C = 154,59 \mu\text{F}$$

Dengan perhitungan diatas maka didapatkan nilai kapasitansi kapasitor sebesar 154,59 μF

2.9.4 Perhitungan Induktor (Reaktor)

Untuk menentukan nilai impedansi reaktor filter dapat menggunakan persamaan

Dengan

X_c = Reaktansi kapasitif

N^2 = Orde Harmonic yang ditekan/difilter

$$X_L = \frac{X_c}{n^2}$$

Dari hasil pengukuran nilai harmonisa terbesar jatuh pada H_3 . Akan tetapi menurut teori H_3 tidak bisa dihilangkan karena H_3 merupakan fenomena Triplen Harmonic atau harmonisa urutan nol. Sehingga dari hasil pengukuran H_5 dan H_7 harus dituning. Untuk menghindari arus resonansi maka nilai orde harus di set lebih rendah dari yang akan dituning. Maka nilai yang akan di tuning 4,6 pada orde 5 dan 6,6 pada orde 7. Dari nilai tersebut akan digunakan sebagai nilai pada

komponen filter. Untuk menentukan nilai impedansi reaktor dapat menggunakan persamaan 2.7 :

- a. Perhitungan impedansi orde 5

$$X_{L1} = \frac{20,6}{4,6^2}$$

$$= 0,973 \Omega$$

b. Perhitungan Impedansi orde 7

$$X_{L2} = \frac{20,6}{6,6^2}$$
$$= 0,472 \Omega$$

Dari hasil perhitungan diatas maka nilai impedansi reaktansi filter sebesar 0,973 Ω pada tuning 4,6 dan 0,472 pada tuning 6,6. Dilihat dari nilai impedansi reaktansi filter maka besar nilai induktor dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan 2.8:

$$L = \frac{X_L}{2.\pi.f}$$

Dengan f menggunakan frekuensi fundamental (50Hz)

a. Perhitungan induktor untuk orde 5

$$L1 = \frac{0,973}{2 \times 3,14 \times 50}$$
$$= 3,09 \text{ mH}$$

b. Perhitungan induktor untuk orde 7

$$L2 = \frac{0,472}{2 \times 3,14 \times 50}$$
$$= 1,50 \text{ mH}$$

Hasil dari perhitungan diatas didapatkan nilai induktor orde 5 sebesar L 3,09 mH dan induktor orde 7 L 1,50 mH.

Jika langkah-langkah perhitungan untuk menentukan komponen-komponen filter pasif selesai maka perlu dilakukan simulasi bagaimana kondisi sebelum dan sesudah dipasang filter

2.10 Metode Pemasangan Filter

1. Pemasangan Filter Terpusat

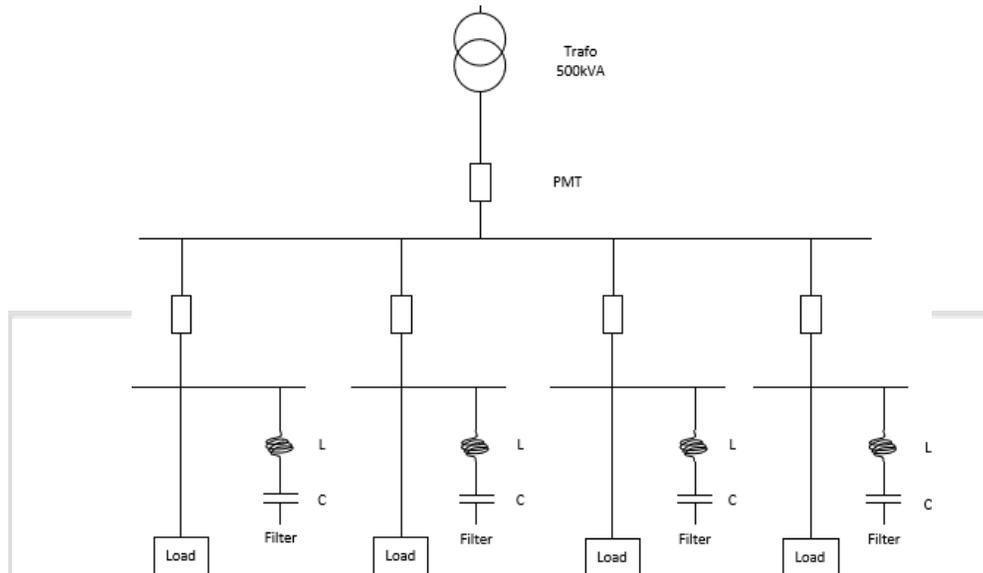
Pemasangan filter secara terpusat adalah dimana filter diletakan pada Bus utama atau bus LVMDP.



Gambar 2.7 Pemasangan Filter Terpusat (Yeri,S. 2018).

2. Pemasangan Filter Individu

Pemasangan filter secara terpusat adalah dimana filter diletakan pada per SDP utama atau perbeban.



Gambar 2.8 Pemasangan Filter Individu (Yeri, S. 2018).

2.11 Power Quality Analyzer

Power Quality Analyzer adalah suatu peralatan ukur yang digunakan untuk mengetahui kualitas daya dari tenaga listrik. Alat ini sangat kompleks, karena dapat mengukur tegangan, arus listrik, frekuensi, daya kompleks, daya aktif, daya reaktif dan factor daya. Pada penelitian ini, parameter yang diukur menggunakan peralatan ini adalah besaran listrik dasar, yaitu tegangan, arus dan frekuensi listrik.



Gambar 2.9 *Power Quality Analyzer*

BAB III METODE PENELITIAN

3.1 Waktu dan Lokasi Penelitian

Kegiatan Ini dilaksanakan di SMP Negeri 12 Makassar yang Berlangsung Pada Semester Genap Tahun Ajaran 2020/2021 Tepatnya di Lakukan Selama Bulan Desember Sampai January .

3.2 Teknik Pengumpulan Data

Dalam rangka pembuatan tugas akhir ini penulis menggunakan teknik pengumpulan data sebagai berikut :

3.2.1. Melakukan pengukuran

Metode pengukuran yang digunakan yaitu metode pengukuran *real time*. Dengan melakukan pengukuran langsung pada panel pusat di gedung SMP 12 saat gedung sedang beroperasi. Dalam penelitian ini penulis melakukan pengukuran pada *Low Voltage Main Distribution Board (LVMDB)* di gedung SMP Negri 12 Makassar. Dalam pengukuran ini digunakan alat ukur *Power Quality Analyzer (PQA) 434*. Dalam pengukuran ini dibutuhkan data pengukuran sebagai berikut:

1. THD Arus.
2. THD Tegangan.
3. Daya Aktif, Daya Semu Dan Daya Reaktif.
4. Power Faktor.
5. Arus dan Tegangan antar fasa maupun fasa-netral.

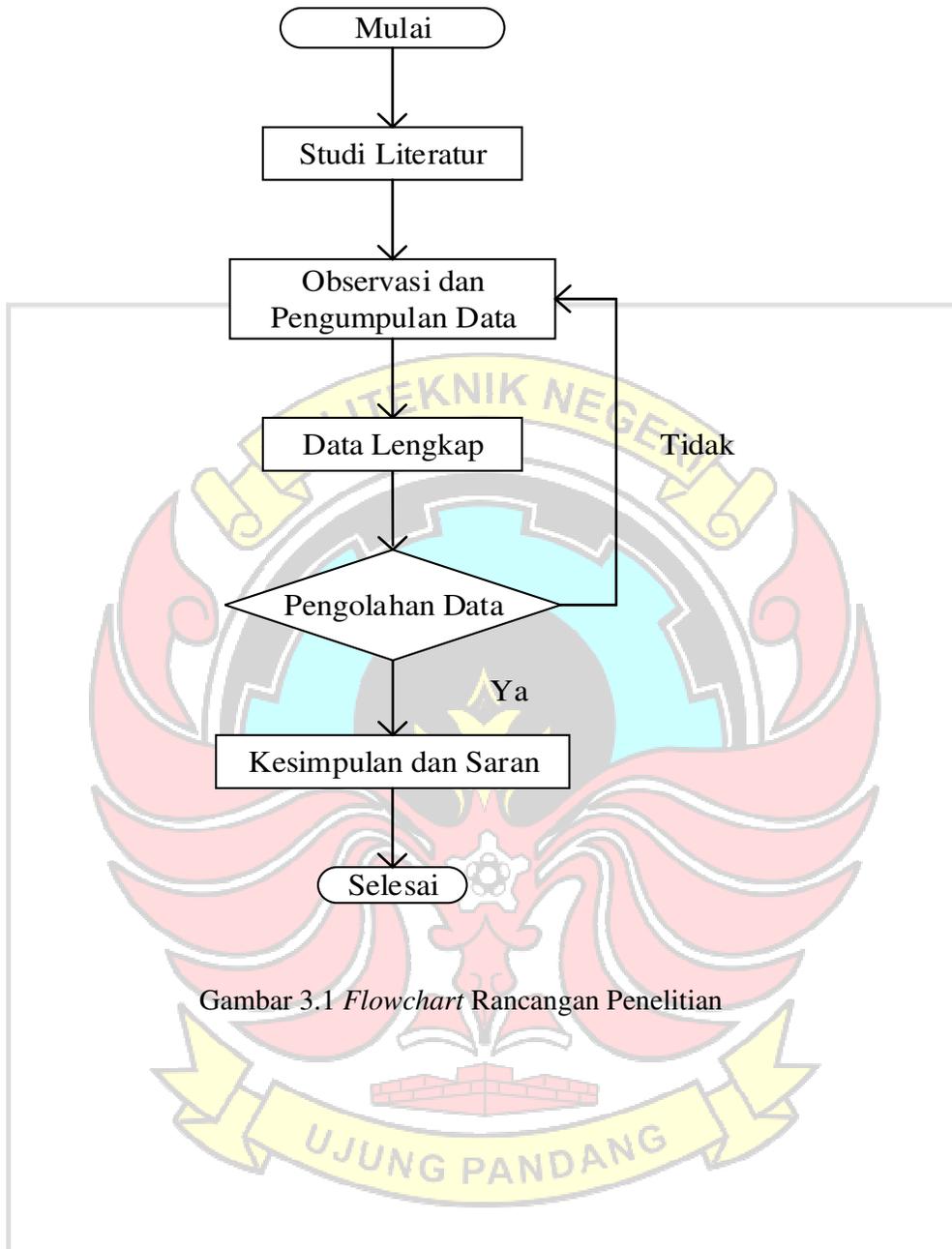
Data parameter yang dibutuhkan bisa didapatkan dengan cara sebagai berikut :

1. Menghidupkan Power Quality Analyzer Sebagai alat ukur yang digunakan.
2. Menghubungkan clamp i430TF pada masing-masing fasa R, S, T panel dengan pola warna yang sesuai.
3. Menghubungkan jumper tegangan R, S, T serta grounding pada panel sesuai warna masing-masing kemudian dikoneksikan pada alat ukur Power Quality and Energy Analyzer Fluke series-435.
4. Menentukan jenis sambungan yang digunakan pada motor induksi 3-fasa RAW MILL SS E3.
5. Menentukan frekuensi yang digunakan pada motor induksi 3- fasa RAW MILL SS E3.
6. Menentukan tegangan nominal yang digunakan pada motor induksi 3-fasa
7. Menentukan seri pengukuran yang digunakan pada motor induksi 3-fasa
8. Menentukan skala arus yang digunakan pada motor induksi 3-fasa.
9. Menentukan skala tegangan yang digunakan motor induksi 3- fasa.
10. Setelah itu masuk ke menu logger untuk memilih parameter yang akan diukur, menentukan interval,dan durasi.
11. Selanjutnya mulai recording atau perekaman dan simpan hasil pengukuran.
12. Setelah data selesai direkam langkah selanjutnya adalah transfer data hasil rekaman dari alat ukur Power Quality dan *Energy Analyzer Fluke series-435* ke komputer.

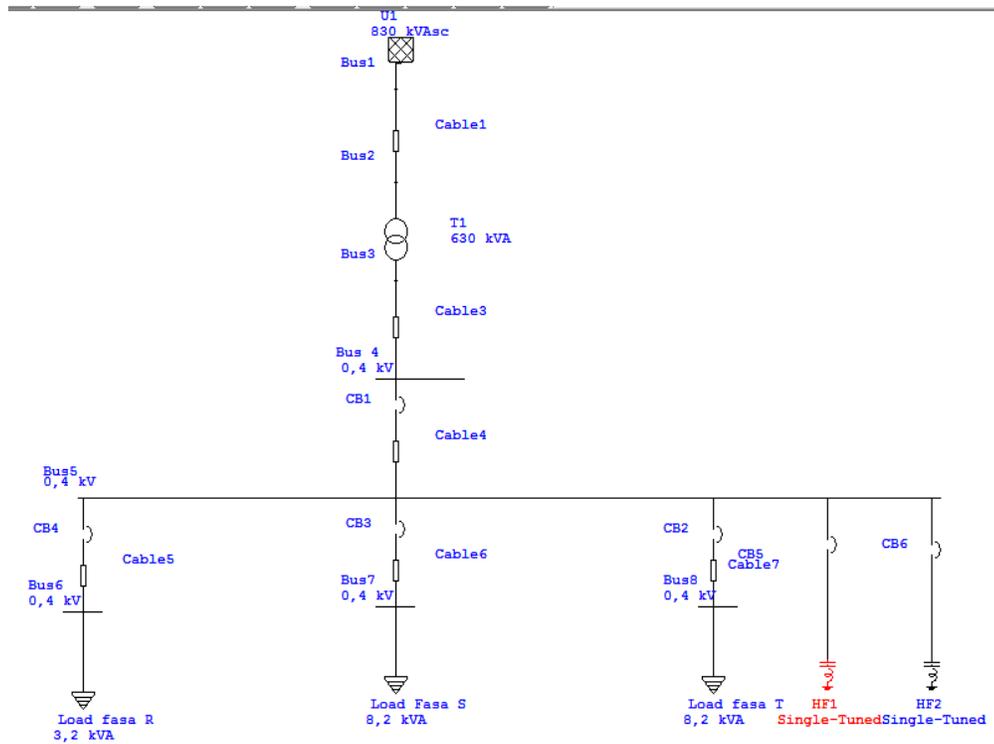
3.3 Teknik Analisis Data

Setelah data hasil pengukuran terkumpul maka akan dilakukan pengolahan data. Dilakukan pengolahan data hasil pengukuran dibuatkan tabel untuk nilai maksimal THD arus dan THD tegangan.

Setelah itu THD arus dan THD tegangan hasil pengukuran selama tiga hari dicari nilai tertinggi maksimalnya. Untuk THD arus setelah ditemukan nilai tertinggi maksimalnya dilakukan penghitungan i_{sc}/i_l untuk mengetahui standar THD arus dan IHD arusnya setelah itu lihat IEEE 519-1992 Batas Harmonisa arus. Untuk THD tegangan setelah dinilai maksimal ditabelkan bisa langsung meninjau nilai standar yang ada ditabel IEEE 519-1992 Batas Harmonisa Tegangan. Jika hasil pengukuran sesuai dengan nilai standar acuan maka nilai THD arus dan THD tegangan gedung SMP Negeri 12 Makassar sudah dalam kondisi baik dan tidak perlu dilakukan mitigasi segera. Namun jika nilai THD arus dan THD tegangan tidak sesuai standar yang diacu, akan diberikan solusi agar nantinya solusi tersebut dapat dijadikan sebuah tindakan untuk dapat dilakukan perbaikan serta meningkatkan kualitas daya listrik gedung.



Gambar 3.1 *Flowchart* Rancangan Penelitian



Gambar 3.2 Simulasi Single Line Diagram (Simulasi ETAP 12.6.0)

SMP Negeri 12 Makassar yang meliputi, laboratorium, ruang kelas, perpustakaan, ruang prodi dan ruangan penunjang lainnya yang dilengkapi dengan berbagai macam peralatan listrik. Peralatan listrik seperti komputer, pompa air, AC (air conditioner), printer, scanner, lampu TL LED, televisi, peralatan praktek dilaboratorium dan lain sebagainya. Tentunya peralatan-peralatan tersebut memerlukan kualitas daya listrik yang baik untuk menunjang bekerjanya peralatan

Diketahui bahwa di gedung SMP Negeri 12 Makassar terdapat berbagai macam peralatan listrik yang mana terdapat banyak beban non linier. Beban-beban non-linier juga menjadi salah satu faktor penting yang mempengaruhi kualitas daya listrik. Beban tersebut merupakan sumber harmonisa yang dapat menurunkan kualitas daya listrik.

Oleh karena itu, peneliti akan melakukan pengukuran pada panel LVMDB yang erada di gedung SMP Negeri 12 Makassar untuk mengetahui harmonisa tegangan dan arus di gedung SMP Negeri 12 Makassar.

Agar penulisan dapat dilakukan secara terstruktur dan sistematis maka dibutuhkan tahapan-tahapan proses. Berikut merupakan acuan penulis dalam proses penulisan tugas akhir ini.



BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Pengumpulan Data

Pada bab ini dijelaskan hasil parameter yang didapatkan dari hasil pengukuran yaitu harmonisa tegangan dan arus, hasil pengukuran parameter tersebut kemudiandilakukan analisis dan juga dibandingkan dengan standar acuan yang ada apakah nilainya sesuai standar atau tidak. Melalui evaluasi ini juga akan diberikan rekomendasi terkait hasil analisis parameter dan hal-hal yang dapat dilakukan untuk menunjang kualitas daya gedung. Pengukuran dilakukan selama sepuluh jam pada waktu kegiatan berlangsung yaitu dari tanggal 03-05 pukul 09:00 WIB - 18:00 WIB pada Bulan Maret 2021.

4.2 Pengolahan Data

Data hasil pengukuran seperti yang telah dijelaskan pada sub-bab a selanjutnya akan diolah dengan cara mencari nilai maksimum dari THD tegangan dan THD arus. Setelah itu dipilih nilai THD tegangan dan THD arus maksimum yang paling tinggi untuk dilakukan penghitungan standar harmonisa.

1.Total Harmonic Distorion Tegangan (THD V)

Berdasarkan hasil pengukuran didapatkan data mengenai THD tegangan maksimum pada Bulan Maret 2021 untuk setiap fasanya sebagai berikut :

Tabel 4.1 THD Tegangan Maksimum 03 Maret 2021 Fasa R,S,dan T

Jam	Parameter	R	S	T
09:00	THD V	1,34 %	1,26 %	1,34 %
10:00	THD V	1,27 %	1,08 %	1,37 %
11:00	THD V	1,27%	1,15%	1,31%
12:00	THD V	1,27%	1,14%	1,32%
13:00	THDV	1,3%	1,19%	1,37%
14:00	THDV	1,27%	1,16%	1,34%
15:00	THDV	1,23%	1,13%	1,37%
16:00	THD V	1%	1,11%	1,17%
17:00	THD V	0,96%	1,19%	1,11%
18:00	THD V	1,05%	1,16%	1,08%

Tabel 4.2 THD Tegangan Maksimum 04 Maret 2021 Fasa R,S,dan T

Jam	Parameter	R	S	T
09:00	THD V	1,19 %	1,12 %	1,26 %
10:00	THD V	1,15 %	1,04 %	1,3 %
11:00	THD V	1,32%	1,22%	1,48%
12:00	THD V	1,36%	1,24%	1,5%
13:00	THDV	1,42%	1,3%	1,64%
14:00	THDV	1,26%	1,17%	1,46%
15:00	THDV	1,26%	1,11%	1,38%
16:00	THD V	1,23%	1,12%	1,3%
17:00	THD V	1,22%	1,17%	1,3%
18:00	THD V	1,18%	1,12%	1,22%

Tabel 4.3 THD Tegangan Maksimum 05 Maret 2021 Fasa R,S,dan T

Jam	Parameter	R	S	T
09:00	THD V	1,28 %	1,11%	1,32%
10:00	THD V	1,29%	1,11%	1,32%
11:00	THD V	1,29%	1,13%	1,32%
12:00	THD V	1,29%	1,13%	1,42%
13:00	THDV	1,37%	1,17%	1,46%
14:00	THDV	1,24%	1,04%	1,33%
15:00	THDV	1,22%	1%	1,21%
16:00	THD V	1,27%	1,08%	1,26%
17:00	THD V	1,21%	1,11%	1,14%
18:00	THD V	1,19%	1,02%	1,11%

Tabel 4.4 THD Tegangan Maksimum 06 Maret 2021 Fasa R,S,dan T

Jam	Parameter	R	S	T
09:00	THD V	1,15 %	1,11 %	1,22 %
10:00	THD V	1,14 %	1,02 %	1,31%
11:00	THD V	1,40%	1,12%	1,42%
12:00	THD V	1,22%	1,12%	1,3%
13:00	THDV	1,44%	1,2%	1,22%
14:00	THDV	1,23%	1,15%	1,55%
15:00	THDV	1,21%	1,12%	1,31%
16:00	THD V	1,13%	1,18%	1,2%
17:00	THD V	1,16%	1,14%	1,1%
18:00	THD V	1,12%	1,15%	1,14%

Tabel 4.5 THD Tegangan Maksimum 07 Maret 2021 Fasa R,S,dan T

Jam	Parameter	R	S	T
09:00	THD V	1,11 %	1,14 %	1,20 %
10:00	THD V	1,13 %	1,02 %	1,2 %
11:00	THD V	1,20%	1,23%	1,41%
12:00	THD V	1,31%	1,21%	1,2%
13:00	THDV	1,41%	1,2%	1,61%
14:00	THDV	1,23%	1,11%	1,42%
15:00	THDV	1,22%	1,13%	1,31%
16:00	THD V	1,21%	1,10%	1,2%
17:00	THD V	1,14%	1,15%	1,1%
18:00	THD V	1,12%	1,13%	1,21%

Tabel 4.6 THD Tegangan Maksimum 08 Maret 2021 Fasa R,S,dan T

Jam	Parameter	R	S	T
09:00	THD V	1,12 %	1,11 %	1,23 %
10:00	THD V	1,11 %	1,02 %	1,2 %
11:00	THD V	1,31%	1,21%	1,33%
12:00	THD V	1,33%	1,22%	1,4%
13:00	THDV	1,41%	1,1%	1,62%
14:00	THDV	1,20%	1,14%	1,41%
15:00	THDV	1,21%	1,11%	1,32%
16:00	THD V	1,23%	1,12%	1,2%
17:00	THD V	1,21%	1,13%	1,1%
18:00	THD V	1,13%	1,11%	1,20%

Tabel 4.7 THD Tegangan Maksimum 09 Maret 2021 Fasa R,S,dan T

Jam	Parameter	R	S	T
09:00	THD V	1,18 %	1,10 %	1,20 %
10:00	THD V	1,16 %	1,03 %	1,2 %
11:00	THD V	1,30%	1,19%	1,38%
12:00	THD V	1,31%	1,22%	1,5%
13:00	THDV	1,41%	1,2%	1,14%
14:00	THDV	1,20%	1,11%	1,26%
15:00	THDV	1,22%	1,10%	1,28%
16:00	THD V	1,21%	1,13%	1,1%
17:00	THD V	1,22%	1,12%	1,2%
18:00	THD V	1,12%	1,11%	1,21%

2 Total Harmonic Distortion Arus (THD I)

Berdasarkan hasil pengukuran didapatkan data mengenai THD arus

Tabel 4.8 THD Arus Maksimum 03 Maret 2021 Fasa R,S,dan T

Jam	Parameter	R	S	T
09:00	THD I	67,98 %	29,73%	87,13 %
10:00	THD I	24,54%	12,73%	89,14 %
11:00	THD I	25,96%	13,27%	49,98%
12:00	THD I	24,65%	14,67%	29,38%
13:00	THD I	20,99%	14,28%	35,76%
14:00	TDH I	13,9%	13,92%	30,29%
15:00	TDH I	16,72%	13,81%	31,98%
16:00	THD I	16,72%	20,45%	39,35%
17:00	TDH I	26,17%	38,98%	50,82%
18:00	TDHI	13,08%	17,25%	31,52%

Tabel 4.9 THD Arus Maksimum 04 Maret 2021 Fasa R,S,dan T

Jam	Parameter	R	S	T
09:00	THD I	24,82 %	16,03 %	94,33 %
10:00	THD I	17,17%	13,4%	92,59
11:00	THD I	17,37%	13,42%	121,1%
12:00	THD I	17,07%	14,65%	97,32%
13:00	THD I	18%	13,49%	161,19%
14:00	TDH I	16,05%	13,56%	112,81%
15:00	TDH I	16,88%	12,25%	96,4%
16:00	THD I	16,05%	12,95%	97,18%
17:00	TDH I	17,6%	15,7%	104,09%
18:00	TDHI	13,02%	12,9%	78,37%

Tabel 4.10 THD Arus Maksimum 05 Maret 2021 Fasa R,S,dan T

Jam	Parameter	R	S	T
09:00	THD I	23,41%	13,65%	27,85%
10:00	THD I	20,72%	12,89%	31,3%
11:00	THD I	22,03%	11,86%	30,65%
12:00	THD I	22,01%	12,84%	34,4%
13:00	THD I	21,77%	13,3%	36,57%
14:00	TDH I	18,83%	12,79%	33,7%
15:00	TDH I	17,66%	12,65%	30,15%
16:00	THD I	16,02%	12,13%	28,14%
17:00	TDH I	22,87%	15,88%	29,67%
18:00	TDHI	19,4%	13,19%	28,74%

Tabel 4.11 THD Arus Maksimum 06 Maret 2021 Fasa R,S,dan T

Jam	Parameter	R	S	T
09:00	THD I	21,32 %	13,03 %	45,23 %
10:00	THD I	17,12%	11,4%	13,29
11:00	THD I	17,31%	12,42%	80,1%
12:00	THD I	12,07%	14,25%	80,32%
13:00	THD I	15%	13,19%	91,19%
14:00	TDH I	11,05%	10,56%	91,81%
15:00	TDH I	13,88%	11,25%	88,4%
16:00	THD I	12,05%	11,45%	79,18%
17:00	TDH I	13,6%	12,3%	91,09%
18:00	TDHI	10,02%	11,1%	67,47%

Tabel 4.12 THD Arus Maksimum 07 Maret 2021 Fasa R,S,dan T

Jam	Parameter	R	S	T
09:00	THD I	14,32 %	11,01 %	84,33 %
10:00	THD I	11,17%	12,4%	82,59
11:00	THD I	13,37%	10,42%	90,1%
12:00	THD I	15,07%	12,65%	70,32%
13:00	THD I	17%	13,42%	90,19%
14:00	TDH I	12,05%	13,22%	92,81%
15:00	TDH I	11,88%	12,20%	98,4%
16:00	THD I	11,05%	12,75%	92,18%
17:00	TDH I	12,6%	15,2%	97,09%
18:00	TDHI	13,01%	10,9%	50,27%

Tabel 4.13 THD Arus Maksimum 08 Maret 2021 Fasa R,S,dan T

Jam	Parameter	R	S	T
09:00	THD I	14,42 %	13,03 %	84,23 %
10:00	THD I	19,18%	12,4%	90,59
11:00	THD I	17,30%	13,22%	120,2%
12:00	THD I	17,03%	14,45%	90,32%
13:00	THD I	10%	13,29%	122,19%
14:00	TDH I	12,05%	13,36%	92,81%
15:00	TDH I	11,88%	11,25%	96,2%
16:00	THD I	12,05%	12,85%	91,18%
17:00	TDH I	17,2%	15,4%	99,09%
18:00	TDHI	11,02%	12,3%	88,37%

Tabel 4.14 THD Arus Maksimum 09 Maret 2021 Fasa R,S,dan T

Jam	Parameter	R	S	T
09:00	THD I	21,32 %	14,03 %	90,33 %
10:00	THD I	15,17%	11,4%	72,59
11:00	THD I	11,31%	11,42%	111,1%
12:00	THD I	17,02%	12,55%	77,32%
13:00	THD I	12%	12,49%	121,19%
14:00	TDH I	16,03%	13,52%	110,81%
15:00	TDH I	16,81%	12,21%	91,4%
16:00	THD I	12,05%	12,75%	92,18%
17:00	TDH I	15,6%	13,7%	99,09%
18:00	TDHI	11,02%	10,1%	60,17%

4.3 Analisa Data

1. Total Harmonic Distortion Tegangan (THD V)

Ditinjau Dari Pengukuran Pada tabel 4.1 terlihat bahwa nilai fasa tertinggi THD tegangan pada pukul 09:00 WIB, dengan nilai fasanya R sebesar 1,34 %, S sebesar 1,26 %, dan T sebesar 1,34 %. Pada tabel 4.2 terlihat nilai tertinggi harmonisa pada orde ke-lima dengan nilai IHD tegangan fasa R sebesar 1,18 %, S sebesar 1,1 % dan T sebesar 1,34 %. Mengacu pada standar ditorsi harmonisa pada IEEE 519.1992 standar THD tegangan dan IHD tegangan yang diperbolehkan adalah 5% dan 3% karena nominal tegangan sistem kurang dari 69 kV.

Tabel 4.13 Perbandingan Orde Harmonisa Tegangan Terhadap Standar Pada 03 Maret 2021

Waktu Terjadi Maksimum	IHD V %			Orde	Standar %	Keterangan
	R	S	T			
09:00	0,53	0,14	0,33	3	3	sesuai
	1,18	1,1	1,15	5	3	sesuai
	0,41	0,52	0,43	7	3	sesuai
	0,3	0,19	0,21	9	3	sesuai
	0,43	0,45	0,52	11	3	sesuai

Tabel 4.14 Perbandingan Orde Harmonisa Tegangan terhadap Standar Pada , 4Maret2021

Waktu Terjadi Maksimum	IHD V %			Orde	Standar %	Keterangan
	R	S	T			
13:00	6,68	0,31	0,49	3	3	sesuai
	1,02	0,89	1,33	5	3	sesuai
	0,78	0,89	0,93	7	3	sesuai
	0,37	0,31	0,36	9	3	sesuai
	0,36	0,41	0,37	11	3	sesuai

Tabel 4.14 Perbandingan Orde Harmonisa Tegangan terhadap Standar Pada , 4Maret2021

Waktu Terjadi Maksimum	IHD V %			Orde	Standar %	Keterangan
	R	S	T			
13:00	0,78%	0,39%	0,57%	3	3	sesuai
	0,71%	0,66%	1,04%	5	3	sesuai
	0,68%	0,78%	0,84%	7	3	sesuai
	0,52%	0,41%	0,46%	9	3	sesuai
	0,45%	0,42%	0,42%	11	3	sesuai

Mengacu pada standar ditorsi pada IEEE 512-1992 standar THDV dan IHDV yang diperbolehkan adalah 5 % dan 3 % karena nominal tegangan sistem kurang dari 69 kV. Dapat diketahui bahwa harmonisa tingkat tegangan pada tabel diatas masih memenuhi standar. hasil pengukuran di LVMDB pada Bulan dan masih dalam batas standar harmonisa yang diizinkan dan orde-orde harmonisa masih dalam batas yang ditentukan.

2. Total Harmonic Distortion Arus (THD I)

Pada tabel 4.7 terlihat bahwa nilai fasa tertinggi THD arus pada pukul 09:00 WIB, dengan nilai R sebesar 67,98 %, S sebesar 29,73%, dan T sebesar 87,13 %. Nilai arus harmonisa terjadi cukup tinggi pada masing – masing fasanya. Tingginya harmonisa arus disebabkan oleh, pada waktu tersebut merupakan waktu dimana beban – beban seperti lampu, komputer, dan AC (*air conditioner*) mulai dinyalakan.

Tabel 4.17 Perbandingan Orde Harmonisa Arus Terhadap Standar 03 Maret 2021

Waktu Terjadi Maksimum	IHD I %			Orde	Standar %
	R	S	T		
09:00	21,05	10,01	36,24	3	4
	21,05	10,01	36,24	5	4
	17,05	3,93	16,92	7	4
	13,02	2,99	14,89	9	4
	8,64	2,62	17,57	11	4
Keterangan	Merah : Nilai lebih besar dari standar				
	Hitam : Nilai sama dengan Standar atau lebih kecil				

Tabel 4.17 Perbandingan Orde Harmonisa Arus Terhadap Standar 04 Maret 2021

Waktu Terjadi Maksimum	IHD I %			Orde	Standar %
	R	S	T		
09:00	15,67	7,77	68,7	3	4
	13,76	7,18	41,4	5	4
	4,23	1,61	21,15	7	4
	4,35	1,37	21,53	9	4
	4,63	1,62	21,11	11	4
Keterangan	Merah : Nilai lebih besar dari standar				
	Hitam : Nilai sama dengan Standar ataulebih kecil				

Tabel 4.17 Perbandingan Orde Harmonisa Arus Terhadap Standar 05 Maret 2021

Waktu Terjadi Maksimum	IHD I %			Orde	Standar %
	R	S	T		
09:00	13,66	7,57	26,17	3	4
	13,5	8,5	18,11	5	4
	4,28	2,17	7,31	7	4
	3,57	1,31	7,36	9	4
	4	1,68	7,89	11	4
Keterangan	Merah : Nilai lebih besar dari standar				
	Hitam : Nilai sama dengan Standar ataulebih kecil				

Pada tabel 4.14, tabel 4.15, dan tabel 4.16 terlihat bahwa nilai IHDarus pada orde – orde mayoritas melewati batas standar. Yang seharusnya nilai pada orde <11 harus di bawah 4 %.

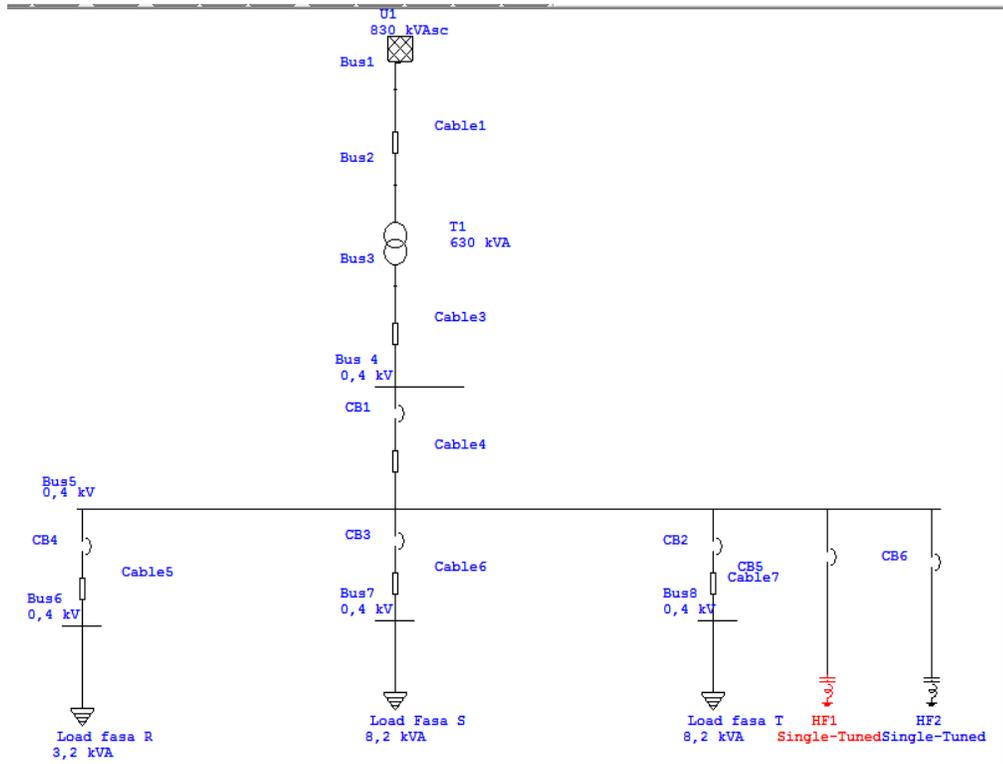
Telah diketahui hasil dari pengukuran harmonisa pada LVMDB di gedung SMP 12 Makassar sangat tinggi. Untuk mengurangi nilai harmonisa perlu dipasang filter pasif *single tuned*. Untuk pemasangan filter diperlukan penghitungan. Hasil dari penghitungan komponen filter pasif *single tuned* akan disimulasikan menggunakan software ETAP

12.6.0 simulasi ETAP 12.6.0 hanya digunakan penulis untuk membandingkan kondisi sebelum dan sesudah di pasang filter pasif *single tuned* apakah ada perubahan pada nilai harmonisa ketika sudah di pasang. Penulis menggunakan data IHD arus dan IHD tegangan pada Bulan, 3 Maret 2021 untuk penghitungan filter pasif *single tuned*.

4.4 Pemodelan Pada ETAP

Analisa selanjutnya akan dikerjakan dengan menggunakan software ETAP 12.6.0. agar mempermudah penulis untuk menganalisa perbandingan kondisi antara sebelum dan sesudah dipasang filter. Nilai parameter yang dibutuhkan untuk pemodelan antara lain,

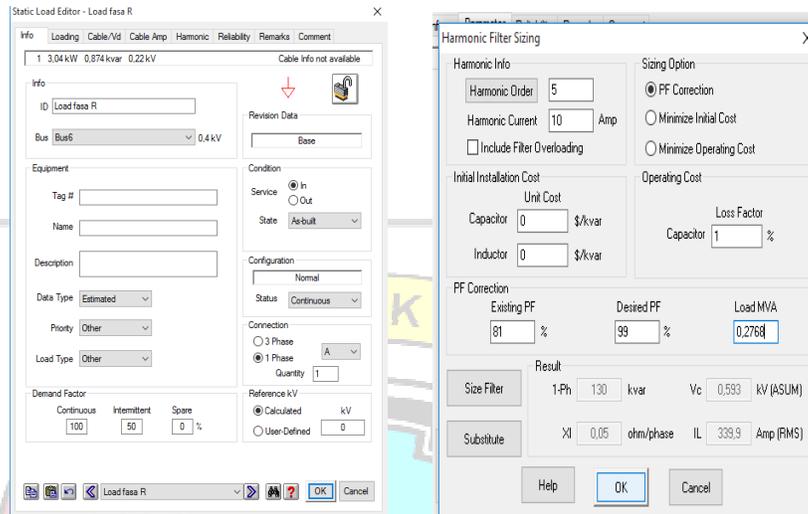
- Data pengukuran
- Nilai komponen filter (sesuai perhitungan)
 - Dengan kelengkapan data tersebut maka pemodelan dengan etap dapat dilakukan. Disimulasi kali ini penulis menggunakan data pengukuran beban per fasa sebagai pengganti beban pada tiap – tiap lantai gedung. Penulis menggunakan beban static load pada ETAP .



Gambar 4.14 Simulasi Single Line Diagram Simulasi Etap 12.6.0)



4.5 Pemodelan Parameter Beban



Gambar 4.15 Parameter pemodelan salah satu beban pada Etap

Gambar dibawah adalah salah satu hasil dari penambahan harmonisa secara manual. Yang berisi nilai parameter hasil pengukuran langsung pada LVMDB di gedung Smp Negri 12 Makassar

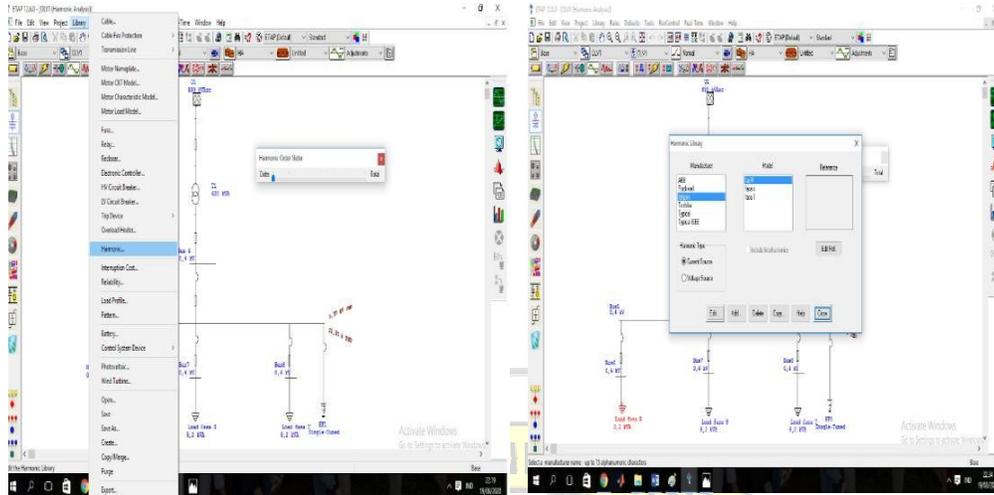
Penulis menambah kandungan harmonisa secara manual yang sesuai dengan data pengukuran langsung. Dengan langkah – langkah sebagai berikut :

Library> Harmonic >add

Beri nama Manufacture dan model yang kita inginkan. Contoh

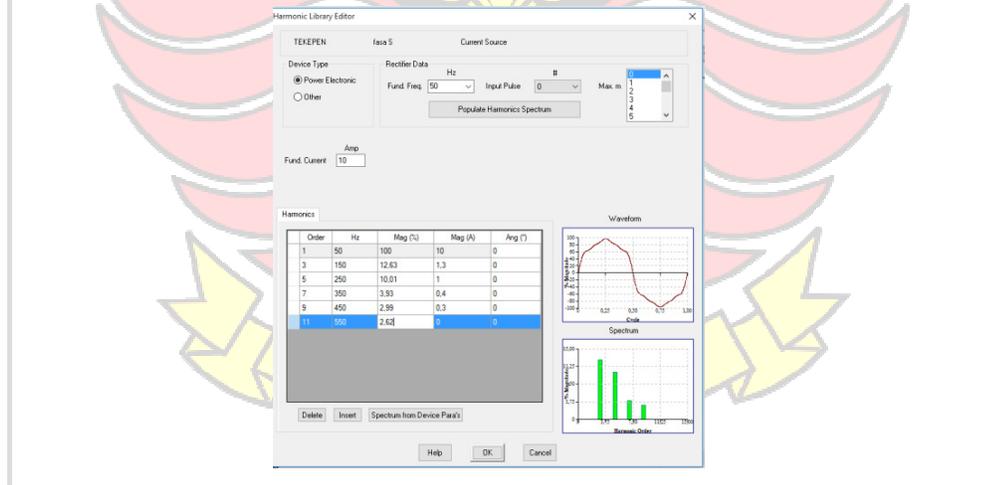
:Manufacture = Tekpen

Model = Fasa R

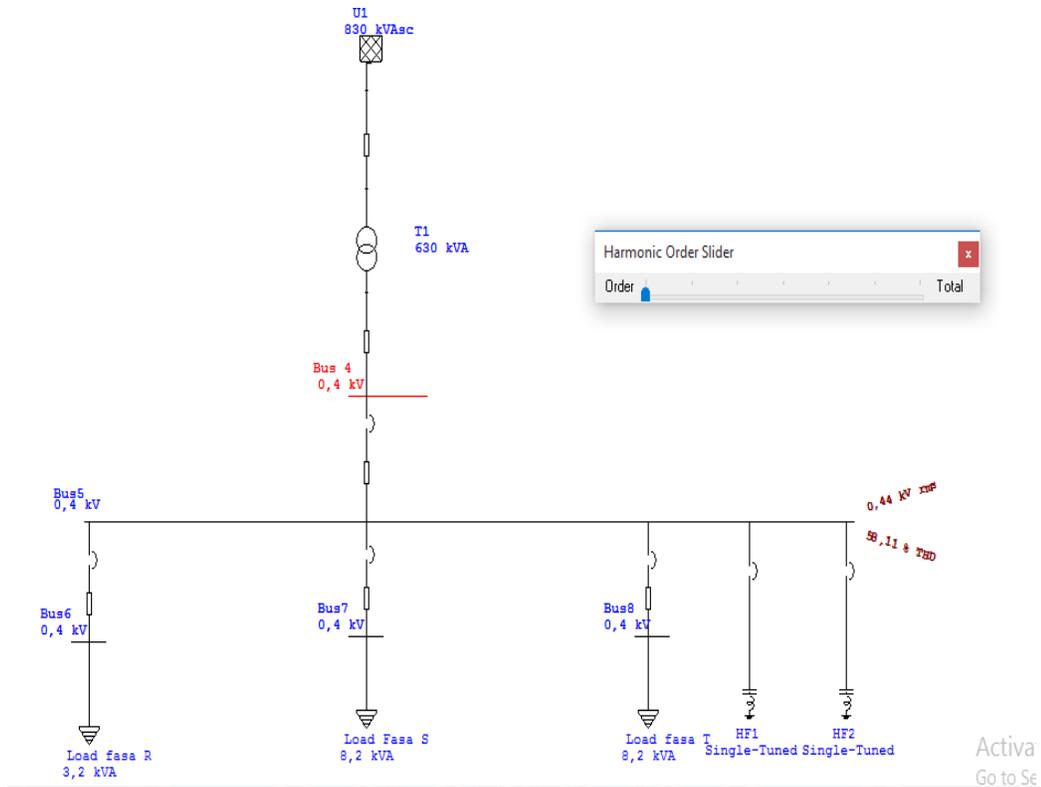


Gambar 4.17 Langkah – langkah Penambahan Kandungan Harmonic Pada Harmonic Library (ETAP 12.6.0)

Setelah step diatas selesai selanjutnya pilih edit. Maka akan muncul tampilan seperti dibawah. Insert colom dan isi parameter sesuai yang diinginkan. Untuk frekuensi menggunakan fundamental dan harmonisa diisi sesuai data pengukuran.

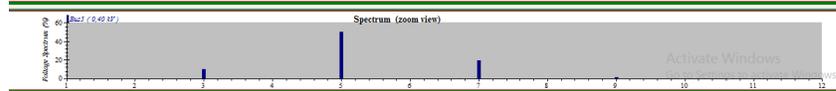
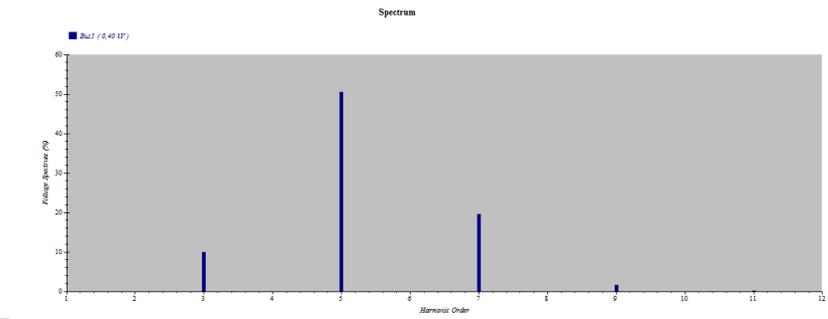


Gambar 4.18 Tampilan Pada Harmonic Library Editor (Etap 12.6.0)



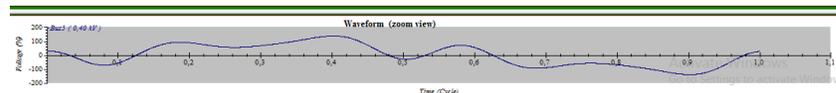
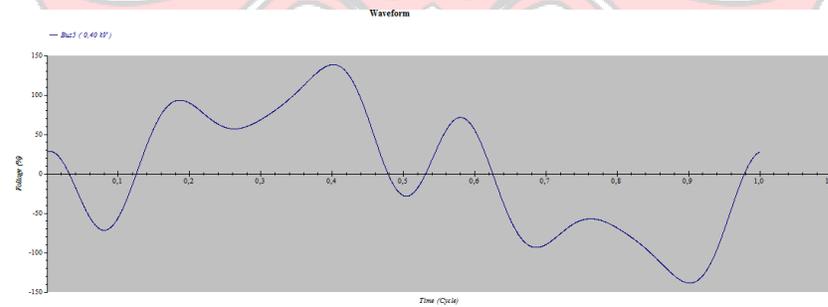
Gambar 4.19 Simulasi LVMDB Sebelum Dipasang Filter Pasif (Simulasi ETAP 12.6.0)

Dari hasil simulasi diatas terlihat nilai THD pada bus 5 sebesar 58.11 %. Sehingga dapat kita perjelas dengan menampilkan spectrum harmonisa seperti gambar dibawah :



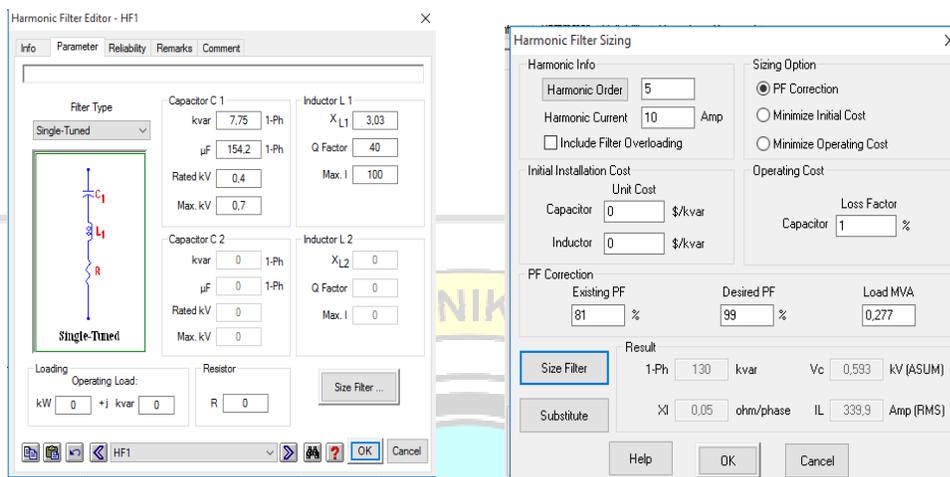
Gambar 4.20 Grafik *Harmonic Voltage Order* (Hasil Simulasi ETAP 12.6.0)

Dari grafik diatas dapat kita lihat, bahwa harmonisa tertinggi sesuai dengan hasil pengukuran pada orde 5 dan 7.

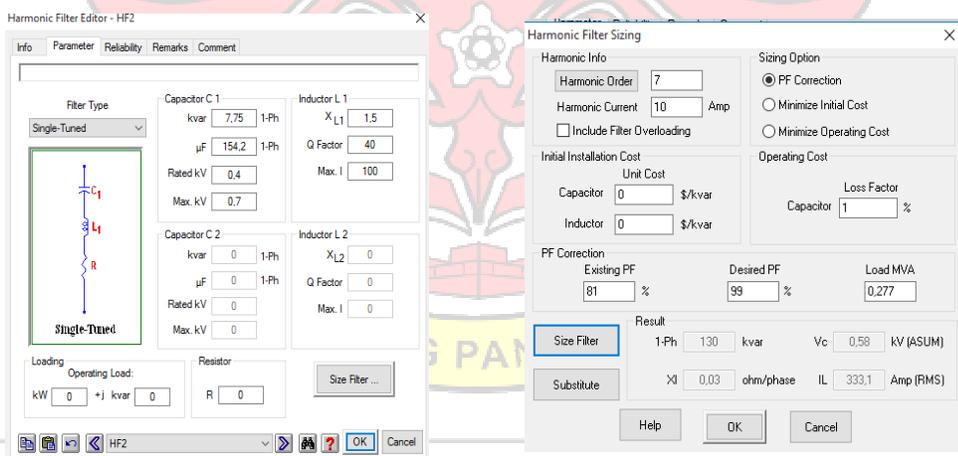


Gambar 4.21 Gelombang Sinusoidal Sebelum Dipasang Filter (Hasil Simulasi ETAP 12.6.0)

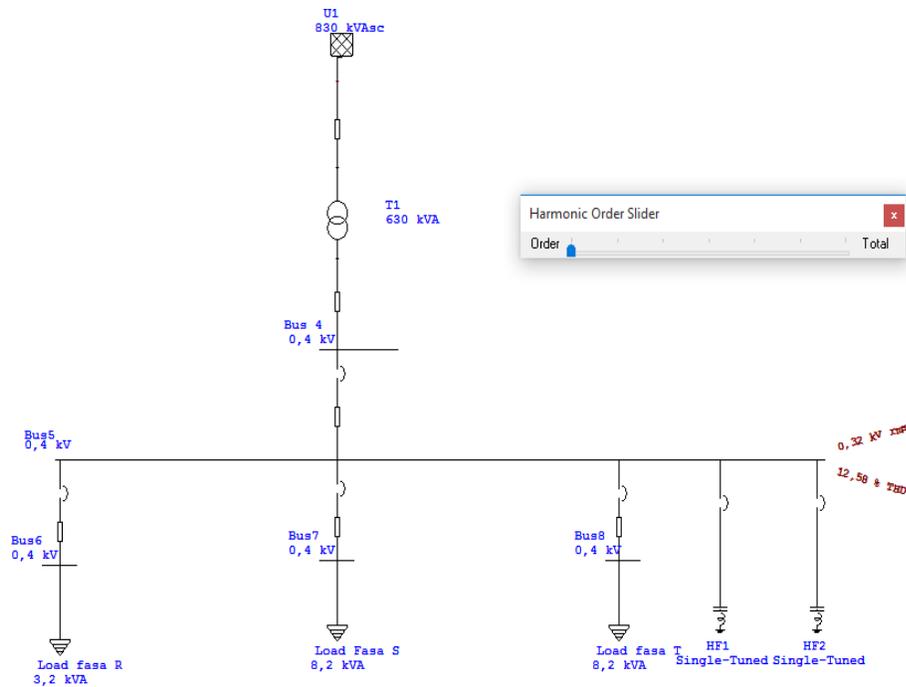
Dengan hasil dari simulasi diatas maka penulis akan mensimulasikan pemasangan filter pasif dengan nilai tuning 4,6 untuk orde 5 dan 6,6 untukorde 7.



Gambar 4.22 Parameter Filter Mereduksi Harmonisa Orde 5 Sambungan Wye
(Hasil Simulasi ETAP 12.6.0)

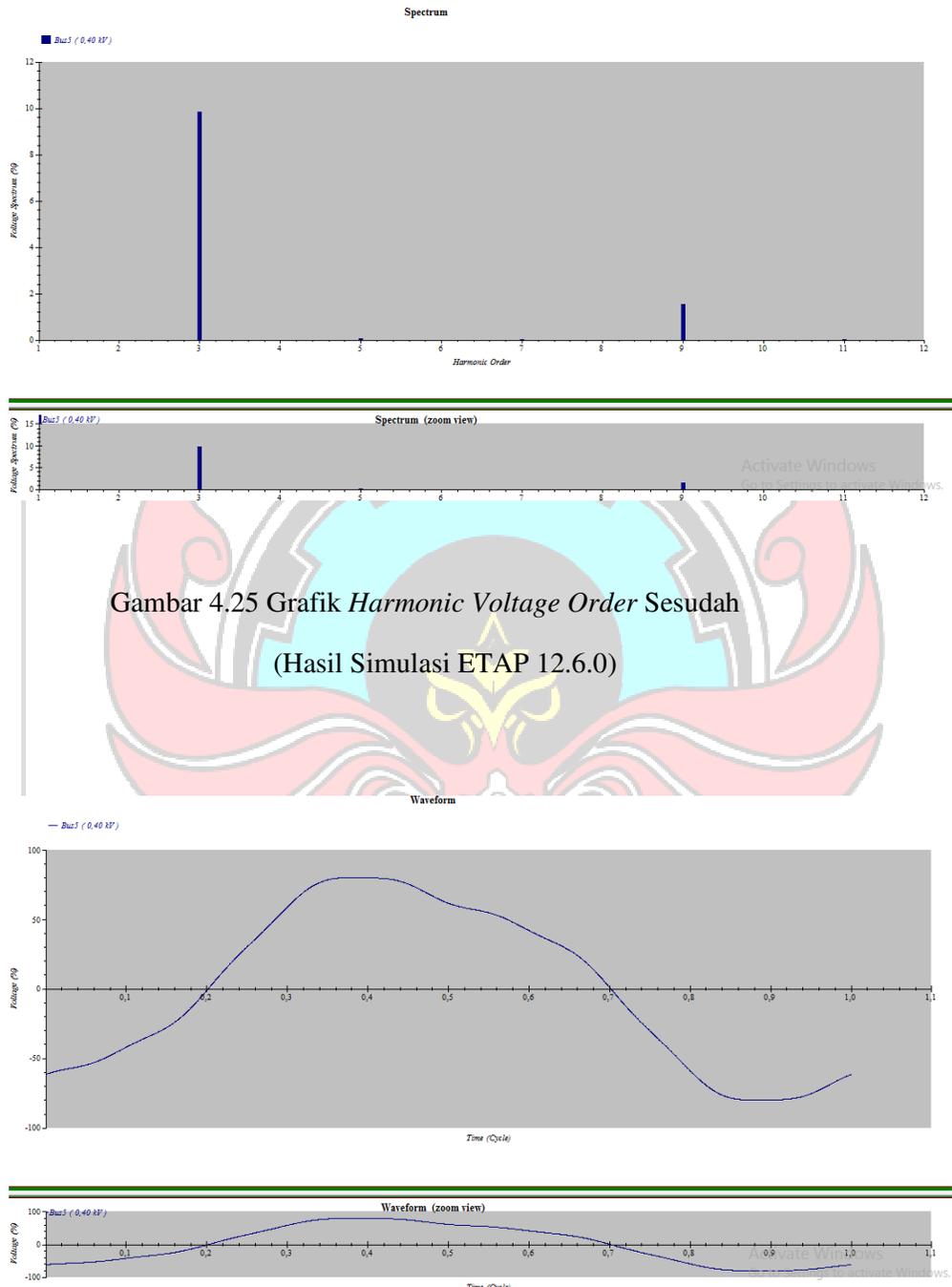


Gambar 4.23 Parameter Filter Mereduksi Harmonisa Orde 7 Sambungan Wye
(Hasil Simulasi ETAP 12.6.0)



Gambar 4.24 Simulasi LVMDB Sesudah Dipasang Filter Pasif (Terpusat)
(Simulasi ETAP 12.6.0)

Dari hasil simulasi diatas dengan menggunakan nilai tuning 4,6 untuk orde 5 dan 6,6 untuk ore 7 didapatkan nilai THD turun, yaitu dari 58,11 menjadi 12,58



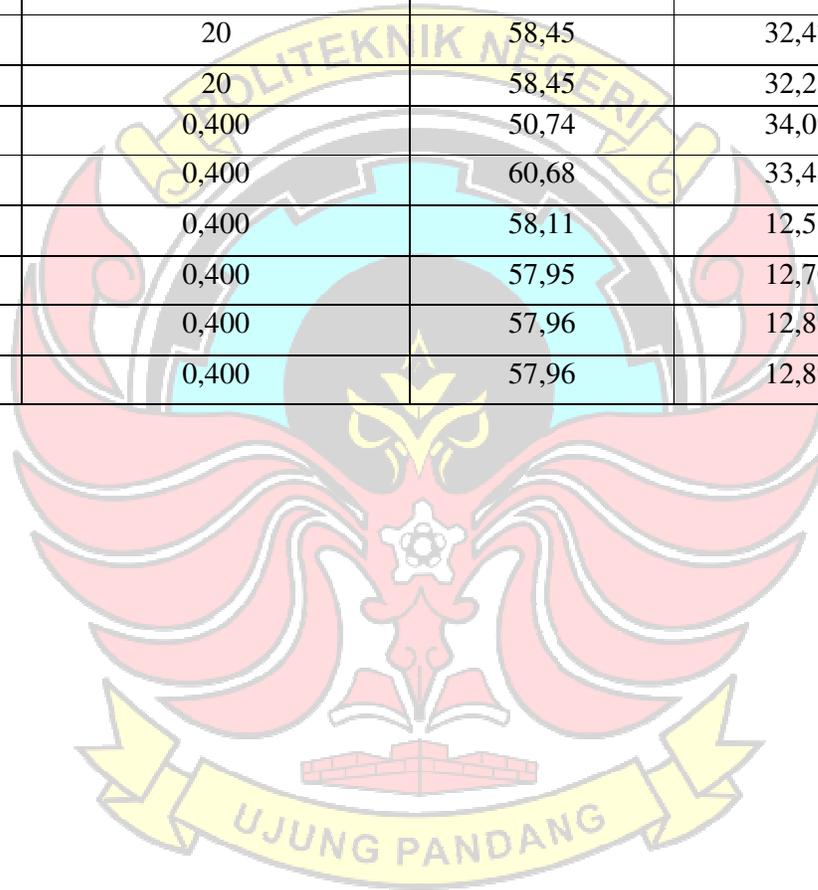
Gambar 4.25 Grafik *Harmonic Voltage Order* Sesudah
(Hasil Simulasi ETAP 12.6.0)

Gambar 4.26 Gelombang Sinusoidal Sesudah Dipasang Filter
(Hasil Simulasi ETAP 12.6.0)

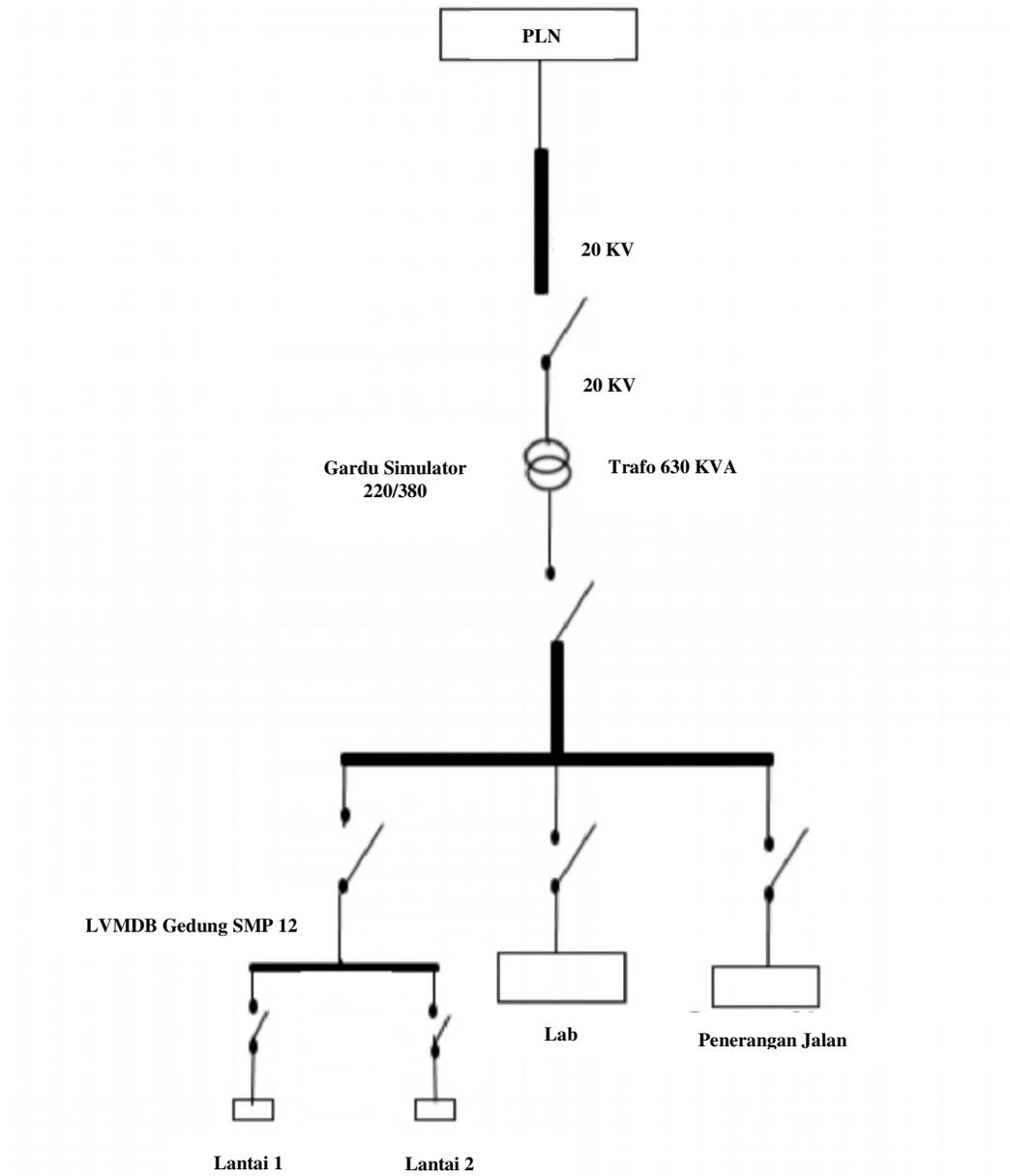
Dari hasil simulasi dengan ditambahkan komponen filter pasif single tuned dengan nilai tuning sebesar 4,6 untuk orde 5 dan tuning 6,6 untuk orde 7 dapat mereduksi harmonisa dari 58,11 menjadi 12,58.

Tabel 4.22 Data Total Harmonisa Distorsi Tegangan Sesudah Dipasang Filter

Bus		THD Sebelum	THD Sesudah
ID	kV	%	%
Bus 1	20	58,45	32,47
Bus 2	20	58,45	32,21
Bus 3	0,400	50,74	34,09
Bus 4	0,400	60,68	33,45
Bus 5	0,400	58,11	12,58
Bus 6	0,400	57,95	12,70
Bus 7	0,400	57,96	12,89
Bus 8	0,400	57,96	12,89

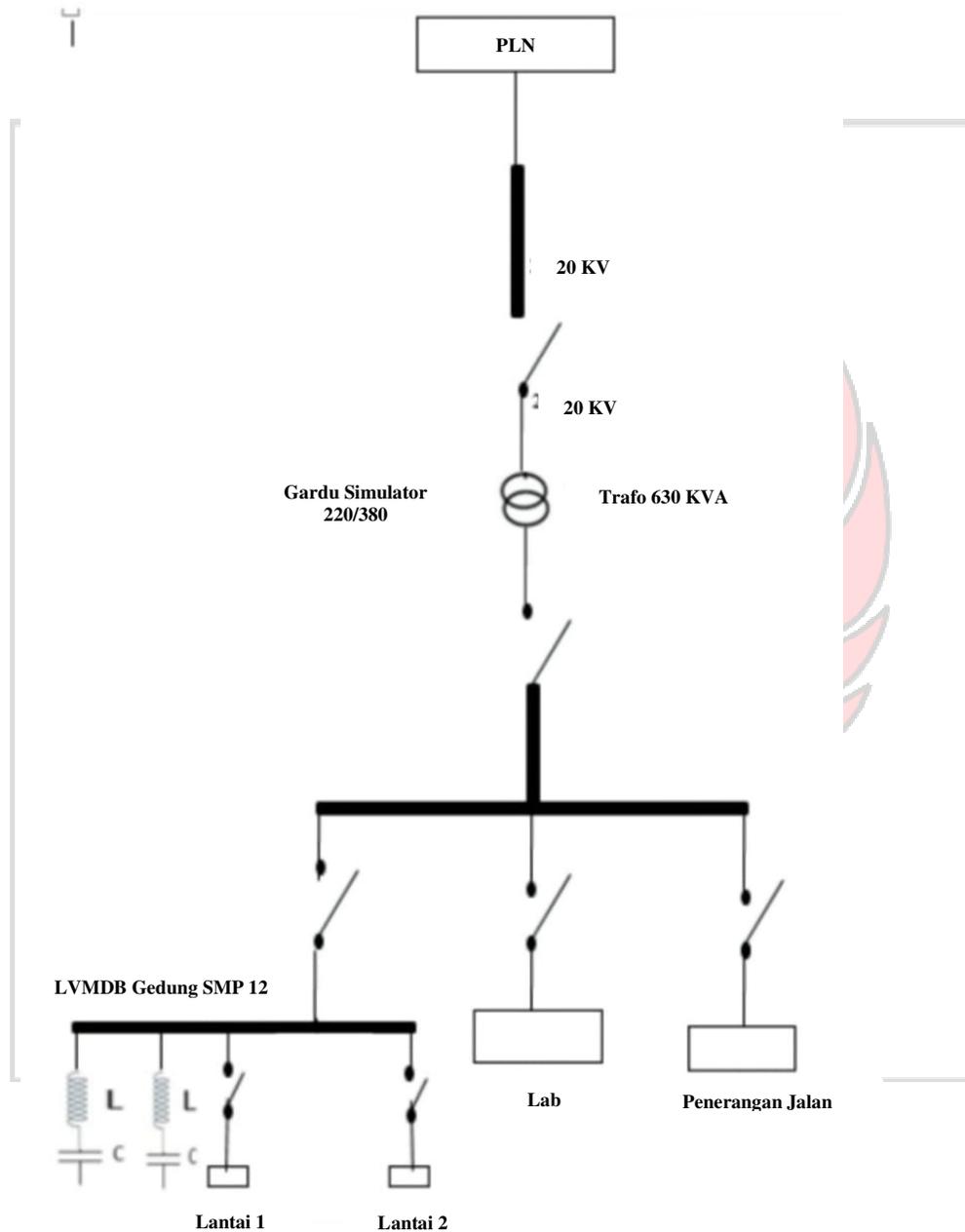


4.5 Pemasangan Filter Pasif *S.single Tuned* Pada LVMDB Di Gedung SMP 12



Gambar 4.27 Single Line Diagram LVMDB Gedung SMP 12 Makassar Sebelum Dipasang Filter Pasif *Single Tuned*

Metode pemasangan filter yang digunakan yaitu metode pemasangan filter secara terpusat. Metode pemasangan filter secara terpusat adalah dimana filter diletakan pada Bus utama atau bus LVMDB.



Gambar 4.28 Single Line Diagram LVMDB Gedung SMP 12MakassarSesudah Dipasang Filter Pasif *Single Tuned*

Gambar dibawah ini ada jenis filter yang akan dipilih oleh penulis untuk pemasangan filter pasif *single tuned* pada LVMDB di gedung Smp Negri 12 Makassar

High safety in extreme applications

Filter reactors in reactive-power compensation systems are connected to the network in combination with capacitors. Depending on the level of choking, capacitors and filters form a series resonant circuit with a defined resonant frequency:
 $p = 5.67\%$ with $f_{res} = 210 \text{ Hz}/p = 7\%$ with $f_{res} = 189 \text{ Hz}/p = 14\%$ with $f_{res} = 134 \text{ Hz}$.

A high harmonic load has already been taken into account for the rated current. In addition, SIDAC filter reactors permit continuous overloading, which may be 5 % above the harmonic level. This ensures the safety for applications under extreme conditions. An integrated temperature monitoring system reliably signals any overload. In addition, the high linearity of the inductance provides precise tuning of the filter circuit even when short-time surge loads are applied, during start-up.

Constant inductance under any condition

Filter reactors are interconnected with capacitors to form filter banks with a defined reactive power in kvar. SIDAC filter reactors are available in the customary sizes of 5 to 100 kvar. They are characterised by a high degree of overloading capability, which increases the operational safety of the network under conditions of varying harmonic contents. Depending on the level of choking, the linearity of the inductance remains constant up to 1.8 times the nominal current. This ensures that the filter circuit remains tuned to the resonant frequency even when excessive currents are applied. Not even high in-rush currents can saturate SIDAC filter reactors. The inductance remains constant and undefined detuning of the filter circuit is prevented.

Power system
Medium voltage

Low voltage

Load
— power converters
— drives

Choked reactive-power compensation system

Gambar 4.30 Bentuk Rill *Filter Pasif Single Tuned* (Catalog ICAR Teknologi Looking Ahead).



↓ TECHNICAL CHARACTERISTICS

DETUNED THREE-PHASE REACTORS 400V, 50 Hz					
Tuning frequency 189Hz (p%=7 – n= 3.78) Standard Class designed for harmonic level 25% < SH/ST < 35%					
Q (kVAr)	Capacitor part number	Ln (mH)	I _{rms} (A)	Part Number	Ptot (W)
12.5	VH12.540	2.85	21	SAH-2.85-21	100
25	VH2540	1.45	42	SAH-1.45-42	160
50	VH5040	0.72	83	SAH-0.72-83	230
75	VH7540	0.48	123	SAH-0.48-123	320
Tuning frequency 189Hz (p%=7 – n=3.78) Reinforced Class designed for harmonic level 35% < SH/ST < 50%					
Q (kVAr)	Capacitor part number	Ln (mH)	I _{rms} (A)	Part Number	Ptot (W)
20	VH2040	1.78	38	SAH-1.78-38	200
40	VH4040	0.9	75	SAH-0.9-75	280
80	VH8040	0.45	150	SAH-0.45-150	380

Nota: If the ratio SH/ST is between the 2 values given in the table then you must select the most restricting alternative.

p% : blocking factor, it is expressed by the percentage ratio between inductive reactance and capacitive reactance ($p = X_L / X_C \times 100$)

It is related to the resonance frequency (fris) of the system by the formula:
$$fris = 50 \times \sqrt{\frac{100}{p\%}}$$

Gambar 4.31 Catalog Detuned Reaktor untuk Mereduksi Harmonisa (Catalog Legrand).

Dari hasil perhitungan didapatkan hasil nilai kapasitif 7,75 kVAR. Dari hasil perhitungan ini dapat diketahui filter pasif *single tuned* yang akan digunakan dengan melihat pada gambar 4.31. Dengan melihat gambar 4.31 maka digunakan kapasitor part number VH12540 karena, nilai yang paling mendekati 7,75 kVAR adalah 12,5 kVAR.

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

A. Kesimpulan

Setelah melakukan pengambilan data, pengolahan data, serta analisis data pada bab sebelumnya, maka selanjutnya pada hasil penelitian ini akan disampaikan beberapa kesimpulan sebagai berikut :

1. Dari hasil pengukuran selama tiga hari di gedung SMP 12 Makassar. Data pengukuran harmonisa tertinggi yaitu, 3 Maret 2021 dengan nilai THD arus fasa R yaitu 67,98 %, S yaitu 29,73%, dan T yaitu 87,13 %. Dengan melihat hasil perhitungan pada bab 4 hal ini menunjukkan kualitas daya yang ditinjau dari harmonisa kurang baik nilai harmonisa melebihi standar yang ditentukan IEEE 519-1992. Yaitu telah menerbitkan standar tentang batas batas total distorsi harmonik tegangan (voltage total harmonic distortion) pada titik sambung bersama adalah 5% dan 7% untuk total distorsi harmonik arus (current total harmonic distortion).
2. Dari hasil simulasi pemasangan filter pasif *Tuned* menggunakan ETAP 12.6.0 nilai harmonic dapat di reduksi. Sebelum dipasang filter *Passive Single Tuned* nilai harmonic pada bus 5 sebesar 58,11 %. Setelah dipasang Filter nilai harmonic pada bus 5 dapat direduksi menjadi 12,58%. Di harapkan apabila di panel LVMDB dipasang filter pasif *single tuned* nilai harmonisa dapat di reduksi seperti hasil simulasi pada ETAP 12.6.0.

B. Saran

Dalam penelitian yang dilakukan pada LVMDDB di gedung Teknik Penerbangan Politeknik Penerbangan Indonesia penulis akan menyampaikan beberapa saran yaitu sebagai berikut :

1. Berdasarkan hasil pengambilan data, pengolahan data, dan analisis data maka penulis menyadari bahwa masih terdapat banyak kekurangan dalam tugas akhir ini, dan juga waktu yang digunakan untuk pengambilan data pun sangat singkat yaitu hanya berkisar tiga Bulan mulai Bulan ,3 Maret 2021 sampai dengan , 05 Maret 2021. Sebaiknya untuk hasil pengukuran yang lebih akurat maka dibutuhkan waktu pengambilan data yang lebih lama, yaitu minimal satu bulan. Untuk mengantisipasi adanya kegiatan tambahan yang membutuhkan n suplai tenaga listrik yang besar.
2. Hasil simulasi dapat digunakan sebagai acuan untuk merencanakan pemasangan Filter *passive single tuned* pada LVMDP di gedung Smp Negeri 12 Makassar Walaupun hasil simulasi dengan kondisi real tidak bisa sama persis 100%.

DAFTAR PUSTAKA

BSN. Badan Standarisasi Nasional. 2000. SNI 04-0225-2000. *PUIL 2000*. Jakarta

: Badan Standarisasi Nasional.

Dugan, Roger. C. 2004. *Electrical Power Systems Quality Second Edition*. USA : McGraw-Hill Professional.

ICAR, Technology Looking Ahead. 2017. *Product Catalogue Power Factor Correction*. Italy : ICAR.

IEEE Std 519-1992, *IEEE Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems*. AS : Institute of Electrical and Electronics Engineers.

Ngakil, Ibnu, 2010. *Audit Kualitas Daya Listrik Khususnya Harmonisa Pada Industri Paper*. Depok : Jurnal Universitas Indonesia.

Sankaran, C. 2002. *Power Quality*. USA : CRC Press LLC.

Salsabila, K, 2019. *Analisis Pembebanan Transformator Tenaga Pada Gardu Listrik Di Sekolah Tinggi Penerbangan Indonesia*. Tangerang : Langit Biru

Sukmana, Yeri, 2018. *Kajian Perencanaan Pemasangan Filter Pasif Single Tuned Pada Trafo 1 Kapasitas 500 kVA Politeknik Negeri Malang*. Malang : Jurnal Politeknik Negeri Malang.

Lampiran 1

Dokumentasi pengukuran LVMDb di Gedung SMP 12 Makassar



Lampiran 2

Lampiran Peralatan Listrik Beban Linier di gedung Smp Negeri 12 Makassar

NO	Nama Beban
1	Lampu Pijar
2	Pompa Air
3	Rice Cooker

Lampiran Peralatan Listrik Beban Non Linier di gedung Smp Negeri 12 Makassar

NO	Nama Beban
1	Komputer
2	AC
3	Printer
4	TV
5	Leptop
6	Kipas Angin
7	Lampu Hemat
8	Kulkas

