



ITS

Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

TUGAS AKHIR - TE 141599

**RANCANG BANGUN FILTER HARMONIK RLC UNTUK
PROTEKSI KAPASITOR BANK DI CCAI SURABAYA PLANT**

**Bravel Henri Almawijaya Sigalingging
NRP 2212106050**

**Dosen Pembimbing
Dr. Ardyono Priyadi, ST., M.Eng.
Dr. Ir. Soedibyo, M.MT.**

**JURUSAN TEKNIK ELEKTRO
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2015**



ITS

Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

FINAL PROJECT - TE 141599

**DESIGN OF RCL FILTER HARMONIC FOR CAPACITOR
BANK PROTECTION AT CCAI SURABAYA PLANT**

Bravel Henri Almawijaya Sigalingging
NRP 2212106050

Advisor Lecturer
Dr. Ardyono Priyadi, ST., M.Eng.
Dr. Ir. Soedibyo, M.MT.

ELECTRICAL ENGINEERING DEPARTEMENT
Faculty of Industrial Technology
Sepuluh Nopember Institute of Technology
Surabaya 2015

**RANCANG FILTER HARMONIK RLC UNTUK
PROTEKSI KAPASITOR BANK DI CCAI
SURABAYA PLANT**

TUGAS AKHIR

Diajukan untuk Memenuhi Sebagian Persyaratan
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik

Pada

Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga
Jurusan Teknik Elektro

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Menyetujui :

Dosen Pembimbing I

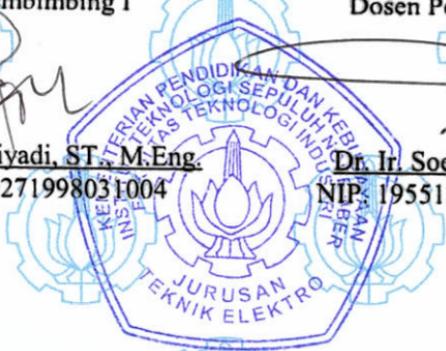
Dosen Pembimbing II


Dr. Ardyono Priyadi, ST., M.Eng.

NIP. 197309271998031004


Dr. Ir. Soedibyo, M.MT.

NIP. 195512071980031004


SURABAYA
JANUARI, 2015

RANCANG BANGUN FILTER HARMONIK RLC UNTUK PROTEKSI KAPASITOR BANK DI CCAI SURABAYA PLANT

Nama Mahasiswa : Bravel Henri Almawijaya Sigalingging
NRP : 2212 106 050
Dosen Pembimbing : 1. Dr. Ardyono Priyadi, ST., M.Eng.
2. Dr. Ir. Soedibyo, M.MT.

ABSTRAK

Penggunaan driver motor dalam jumlah besar yang tidak dilengkapi peredam harmonisa internal dapat menghasilkan harmonisa dalam sistem kelistrikan. Driver motor di CCAI Surabaya Plant dalam jumlah yang besar telah menghasilkan harmonisa yang mendistorsi sinyal tegangannya dan mengakibatkan kerusakan peralatan listrik dalam jumlah yang besar. Selain itu besar frekuensi yang dihasilkan juga sangat besar sehingga merusak kapasitor bank yang menimbulkan kerugian yang besar.

Filter RCL dapat mengatasi harmonisa pada sistem kelistrikan. Filter RCL adalah filter pasif seperti *lowpass filter*, *single tuned filter*, dan *high pass filter*. Pemasangan filter tersebut dapat bermanfaat untuk meredam harmonisa yang dapat mencegah kerusakan kapasitor bank dan peralatan listrik lainnya karena distorsi sinyal listrik jauh berkurang. Selain meredam harmonisa, filter RCL dapat memperbaiki faktor daya karena memberikan daya reaktif (kVAr) pada sistem kelistrikan. Karena dapat menjadi sumber daya reaktif pembatasan filter juga harus diperhitungkan agar tidak menimbulkan *over voltage* pada bus di sistem kelistrikan. Diharapkan dengan pemasangan filter RCL di sistem kelistrikan CCAI Surabaya Plant dapat memperbaiki sistem secara keseluruhan dan mengurangi kerusakan peralatan listrik yang sering terjadi.

Indeks – harmonisa, filter RCL, faktor daya

DESIGN OF RCL FILTER HARMONIC FOR CAPACITOR BANK PROTECTION AT CCAI SURABAYA PLANT

Student's Name : Bravel Henri Almawijaya Sigalingging
NRP : 2212 106 050
Advisor Lecturer : 1. Dr. Ardyono Priyadi, ST., M.Eng.
2. Dr. Ir. Soedibyo, M.MT.

ABSTRACT

The use of motor drives is in great numbers must be accompanied internal silencer harmonisa can produce harmonisa in electric system. Motor drives at CCAI Surabaya Plant in great numbers has produced harmonisa that distort the signals of voltages and result in damage to electrical equipment in large quantities. Furthermore, great frequency produced too large and highly damaging capacitor bank to a great disadvantage.

A filter RCL can overcome harmonisa on electric system, A filter RCL is a filter passive lowpass filter , single tuned filter , and the high pass filter. The installation of filters can be beneficial to quell harmonisa that can prevent damage to banks of capacitors and other electrical equipment because of distortion of an electrical signal much reduced. In addition to dampen harmonisa, filter RCL can fix the resources for giving a reactive power (kVAR) on electric system. RCL filter can be reactive power source. The filters also be taken into account in order not to over voltage on a bus in electric system. It is expected with the installation of RCL filters ccai electric system in surabaya plant can improve the whole system and reduce damage to electrical equipment often happens.

Indeks – harmonisa, filter RCL, power factor

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur atas anugerah dan kemurahan Tuhan Yesus yang telah menolong sehingga terselesaikannya tugas akhir ini. Terselesaikannya buku ini juga melalui bimbingan Bapak Dr. Ardyono Priyadi, S.T., M.Eng dan Dr. Ir. Soediby, M.MT. dalam menyusun sistem dalam program simulasi. Program simulasi ini juga dalam berjalan berkat kesediaan dari CCAI Surabaya Plant yang bersedia memberikan setiap data yang diperlukan.

Secara umum melalui buku ini diharapkan dapat membawa manfaat dalam mempelajari efek harmonisa pada sistem kelistrikan dan bagaimana cara mengatasinya. Dan secara khusus dapat membawa manfaat untuk CCAI Surabaya Plant dalam memperbaiki sistem kelistrikan akibat distorsi harmonisa yang telah banyak merugikan perusahaan.

Akhirnya penulis sadar isi dari buku ini masih jauh sempurna, kritik dan saran membangun sangat penulis harapkan.

Surabaya, Januari 2015

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	
PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR	
LEMBAR PENGESAHAN	
ABSTRAK.....	i
<i>ABSTRACT</i>	iii
DAFTAR ISI.....	vii
DAFTAR GAMBAR.....	xi
DAFTAR TABEL	xiii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Tujuan Tugas Akhir	1
1.3 Ruang Lingkup	2
1.4 Batasan Masalah.....	2
1.5 Metodologi.....	2
BAB II HARMONISA DAN FILTER RCL	5
2.1 Harmonisa	5
2.2 Sumber-Sumber Harmonisa	7
2.3 Perhitungan Harmonisa.....	7
2.4 Batasan Harmonisa	9
2.5 Penyearah Terkendali.....	13
2.5.1 Penyearah Terkendali satu fasa <i>full converter</i>	13
2.6 Filter Harmonisa.....	16
2.7 Filter Pasif.....	17
2.8 Komponen Filter.....	19
2.9 Perhitungan Filter	21

BAB III SISTEM KELISTRIKAN PT. COCA COLA AMATIL SURABAYA PLANT	27
3.1 Sistem Kelistrikan PT. Coca Cola Amatil Surabaya Plant	27
3.2 Data Kelistrikan PT. Coca Cola Amatil Surabaya Plant	28
3.2.1 Kapasitas Pembangkit.....	28
3.2.2 Sistem Distribusi di PT. Coca Cola Amatil Surabaya Plant	28
3.2.4 Data Beban di PT. Coca Cola Amatil Surabaya Plant.....	30
3.3 Pemodelan Sistem.....	37
3.3.1 Model Generator.....	37
3.4 Data Power Quality LVMDP	38
3.4.1 Data Harmonisa.....	38
3.4.2 Data Keseluruhan dari Monitoring	43
BAB IV ANALISA HARMONISA DAN PERENCANAAN FILTER RCL PEREDAM HARMONISA	45
4.1 Simulasi Data Pada ETAP 11.0	47
4.1.1 LVMDP 1.....	47
4.1.2 LVMDP 2.....	51
4.1.3 LVMDP 3.....	55
4.2 Hasil dan Analisa.....	60
4.3 Rancangan Filter RCL	65
4.3.1 Perhitungan Spesifikasi Filter pada SDP NH3	66
4.3.2 Perhitungan Spesifikasi Filter pada SDP Hotfill.....	67
4.3.3 Perhitungan Spesifikasi Filter pada LVMDP Line 2.....	69
4.4 Hasil Pemasangan Filter.....	70
BAB V PENUTUP	81
5.1 Kesimpulan	81
5.2 Saran.....	82

DAFTAR PUSTAKA.....	83
RIWAYAT HIDUP	85

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Batasan arus harmonisa untuk peralatan kelas A	10
Tabel 2.2	Batasan arus harmonisa untuk peralatan kelas B	10
Tabel 2.3	Batasan arus harmonisa untuk peralatan kelas C	11
Tabel 2.4	Batasan arus harmonisa untuk peralatan kelas D	11
Tabel 2.5	Batasan arus harmonisa untuk peralatan kelas D	12
Tabel 2.6	Distorsi tegangan sesuai IEEE Std.519-1992.....	12
Tabel 2.7	Distrsi arus (%TDD) sesuai standar IEEE 519-.....	12
Tabel 3.1	Data kapasitas pembangkit di CCA Surabaya	28
Tabel 3.2	Data Transformator utama	29
Tabel 3.3	Data Bus dan rating tegangan	29
Tabel 3.4	Data beban panel no.158 LVMDP Line 2.....	30
Tabel 3.5	Data beban Panel no.111 SDP-CSD Kron	30
Tabel 3.6	Data beban panel no.31 LP Compressor	31
Tabel 3.7	Data beban panel SDB5 (Bus SDB5)	31
Tabel 3.8	Data beban HP-Compressor.....	31
Tabel 3.9	Data beban panel XX MDP L3 (bus MDP-L3)	32
Tabel 3.10	Data beban panel XX SDP L3 (bus SDP-L3)	32
Tabel 3.11	Data beban panel XX Krones L3 (bus B-	32
Tabel 3.12	Data beban panel no.110 SDP Hot fill	33
Tabel 3.13	Data beban reserve osmosis (bus B-SDB4)	34
Tabel 3.14	Data beban AC dan Boiler	34
Tabel 3.15	Data beban panel no,10 SDB3-Evacond.....	34
Tabel 3.16	Data beban panel no.196 lighting PET line	35
Tabel 3.17	Data beban panel no.162 Main Utility	35
Tabel 3.18	Data beban panel no.159 Main Lighting.....	36
Tabel 3.19	Data beban softener (bus B-Softner).....	36
Tabel 3.20	Data beban WWTP (bus B-MDP-WWTP).....	36
Tabel 3.21	Data beban panel no.111 SDP-CSD Krones	36
Tabel 3.22	Data beban NH3-Compressor (Bus B-NH3-.....	37
Tabel 3.23	Data beban panel no.105 SDP-2 (bus B-SDP2).....	37
Tabel 3.24	Data impedansi PLTMG (GGCP-1 dan	38
Tabel 3.25	Time constant.....	38
Tabel 3.26	Data harmonisa tegangan fasa ke netral.....	39
Tabel 3.27	Data harmonisa tegangan fasa ke fasa	40
Tabel 3.28	Data harmonisa arus di masing-masing fasa.....	41
Tabel 3.29	Data power quality LVMDP	43

Tabel 4.2	Simulasi harmonic di feeder 1(tegangan)	49
Tabel 4.3	Simulasi harmonic di feeder 2(tegangan)	53
Tabel 4.4	Simulasi harmonic di feeder 3(tegangan)	57
Tabel 4.5	Simulasi harmonic load flow keseluruhan.....	61
Tabel 4.6	Profil kapasitor Bank pada system CCAI	65
Tabel 4.7	Spesifikasi filter harmonisa	70
Tabel 4.8	Hasil pemasangan filter harmonisa pada setiap bus ..	75

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Bentuk gelombang arus dan tegangan [6].....	6
Gambar 2.2	Full Converter satu phase.....	14
Gambar 2.3	(a) Filer Pasif Single Tuned (b) tahanan filter single tuned vs frekuensi.....	17
Gambar 2.4	(a) Filter pasif single order (b) tahanan filter second tuned vs frekuensi	18
Gambar 2.5	Low Pass filter harmonic	19
Gambar 4.1	Harmonis LVMDP 1 (a) orde harmonisa (b) gelombang harmonisa	46
Gambar 4.2	Harmonis LVMDP 2 (a) orde harmonisa (b) gelombang harmonisa	46
Gambar 4.3	Harmonis LVMDP 3 (a) orde harmonisa (b) gelombang harmonisa	47
Gambar 4.4	Pembagian beban pada bus LVMDP 1	48
Gambar 4.5	Rating FVD (Frequency Variable Drive) pada beban conveyer	49
Gambar 4.6	Masukan harmonisa pada VFD pada beban conveyer	50
Gambar 4.7	Orde harmionisa pada LVMDP 1	51
Gambar 4.8	Distorsi sinyal pada LVMDP 1	51
Gambar 4.9	Pembagian beban pada bus LVMDP 2	52
Gambar 4.10	Rating FVD (Frequency Variable Drive) pada beban conveyer	53
Gambar 4.11	Masukan harmonisa pada FVD pada beban blowmould	54
Gambar 4.12	Orde harmionisa pada LVMDP 2	55
Gambar 4.13	Distorsi sinyal pada LVMDP 2.....	55
Gambar 4.14	Pembagian beban pada bus LVMDP 3	56
Gambar 4.15	Rating FVD (Frequency Variable Drive) pada beban driver motor NH3 Comp	58
Gambar 4.16	Masukan harmonisa pada FVD pada beban beban blowmould.....	59
Gambar 4.17	Orde harmionisa pada LVMDP 3	60
Gambar 4.18	Distorsi sinyal pada LVMDP 3.....	60
Gambar 4.19	Besar THD pada bus LVMDP utama dan Kapasitor bank	64

Gambar 4.20	Pengisian parameter single tuned	71
Gambar 4.21	Pemasangan filter single tuned pada bus penghasil harmonisa	74
Gambar 4.22	bentuk grafik IHDV% B-LVMDP 1, B-LVMDP 2, B-LVMDP 3	77
Gamabr 4.23	Signal B-LVMDP 1, B-LVMDP 2, B_LVMDP 3 sebelum dan sesudah filter	78
Gambar 4.24	Benntuk grafik dan sinyal CAP-LVMDP setelah pemasangan single tuned filter	79

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Sering terjadinya kerusakan kapasitor pada kapasitor bank dan kerusakan kerja PLC untuk beberapa control Motor dan system mekanik lainnya ditimbulkan oleh harmonik pada system kelistrikan. Harmonik yang ditimbulkan oleh beberapa perangkat listrik di CCAI Surabaya Plant seperti motor drive (VLT), converter, motor, trafo, sl, computer, elektronik ballast, dll. Hal ini harus segera diatasi dengan pemasangan filter harmonik atau reaktor.

Secara konvensional untuk memfilter harmonisa pada penyearah dilakukan dengan filter pasif karena harganya lebih murah. Filter pasif terdiri dari sebuah bank filter LC yang digunakan untuk menekan harmonisa. Akan tetapi sebuah link filter hanya dapat memfilter satu frekuensi harmonisa, sehingga dibutuhkan sejumlah n link filter pasif untuk meminimalis sejumlah n harmonisa.

Alternatif lain untuk filter harmonisa adalah menggunakan filter RCL. Filter RCL dapat digunakan pada sumber tegangan baik satu fasa maupun tiga fasa. Filter RCL merupakan filter yang terdiri dari komponen pasif berupa sebuah induktor, sebuah resistor dan sebuah kapasitor. Filter RCL lebih efektif dibandingkan filter L yang biasa, hal ini disebabkan karena induktor digunakan lebih kecil untuk mereduksi harmonisa [1]. Di CCAI Surabaya Plant penggunaan Inverter dan Converter sudah banyak digunakan, sehingga besar harmonik yang ditimbulkan juga besar. Penggunaan filter RCL pada penyearah terkendali satu fasa full converter, sementara penelitian yang sudah dilakukan penggunaan filter RCL pada Voltage Source Converter (VSC) tiga fasa.

Penggunaan filter RCL pada sisi input penyearah terkendali satu fasa full converter dapat mengurangi THDi yang dihasilkan kedua penyearah tersebut dimana analisisnya dilakukan dengan program simulasi yang menggunakan software etap 11.0

1.2 Tujuan Tugas Akhir

Tujuan dilaksanakannya tugas akhir ini adalah:

1. Mencari sumber harmonik dominan pada plant
2. Mendapatkan besaran harmonic dominan dari salah satu bus
3. Merancang filter harmonic pada bus dominan
4. Merancang filter harmonic ideal guna mencegah timbulnya kerusakan pada beberapa alat elektronik (Kapasitor atau PLC).

1.3 Ruang Lingkup

Ruang lingkup pada tugas akhir ini meliputi:

1. Pengambilan data sistem kelistrikan dan besar harmonik di setiap orde voltage (fasa-fasa dan fasa-netral) dan arus
2. Permodelan sistem yang ada
3. Simulasi menggunakan software ETAP 11.0
4. Perencanaan filter harmonik

1.4 Batasan Masalah

Adapun permasalahan dan batasan masalah yang akan dibahas pada tugas akhir kali ini adalah:

1. Analisa sistem kelistrikan di CCAI Surabaya Plant dan mendapatkan data harmonic Arus dan Tegangannya serta total distorsinya.
2. Merancang Filter untuk mengatasi harmonik yang menimbulkan masalah kontrol dan kerusakan kapasitor bank
3. Merancang filter RCL yang dapat digunakan untuk mengatasi harmonisa ke III, V dan VII

1.5 Metodologi

Metode penyelesaian masalah dalam pembuatan tugas akhir adalah:

1. Studi Literatur

Mengumpulkan buku dan referensi mengenai Analisis sistem Tenaga yang khusus membahas Analisis Stabilitas Transien (Transient Stability Analysis) dan pelepasan beban.

2. Pengumpulan Data

Data yang dibutuhkan untuk simulasi ini adalah data diagram satu garis (Single Line Diagram) serta data peralatan-peralatan listrik yang ada pada CCAI Surabaya Plant Untuk data yang tidak tersedia akan dilakukan survei lapangan

3. Pengolahan Data dan Pemodelan sistem.

Menginterpretasikan dan menganalisis data yang diperoleh untuk disesuaikan dengan jenis dan format yang dibutuhkan untuk simulasi sistem dengan komputer. Setelah itu dilakukan pemodelan sistem sesuai dengan data yang diperoleh dengan menggunakan software ETAP.

4. Simulasi dan Analisis Data

Dalam tahap ini dilakukan simulasi dengan komputer dengan menggunakan software ETAP. Setelah dilakukan simulasi, kemudian dilakukan pengamatan dan analisis data. Data yang akan dianalisis adalah data respon generator serta respon bus utama, yang meliputi respon sudut rotor, respon kecepatan putar generator, frekuensi dan tegangan bus akibat kasus (case) gangguan yang telah dibuat.

5. Penulisan Buku Tugas Akhir.

Penulisan buku dilakukan sebagai penggambaran kesimpulan dari tugas akhir ini. Kesimpulan tersebut merupakan solusi dari permasalahan yang ada. Selain itu akan diberikan saran dan rekomendasi terhadap sistem kelistrikan CCBI Surabaya Plant agar didapatkan stabilitas dan keandalan sistem yang lebih baik.

[Halaman ini sengaja dikosongkan]

BAB II

HARMONISA DAN FILTER RCL

2.1 Harmonisa

Harmonisa adalah distorsi periodik dari gelombang sinus tegangan, arus atau daya dengan bentuk gelombang yang frekuensinya merupakan kelipatan di luar bilangan satu terhadap frekuensi fundamental (frekuensi 50 Hz atau 60 Hz). Nilai frekuensi dari gelombang harmonisa yang terbentuk merupakan hasil kali antara frekuensi fundamental dengan bilangan harmonisanya (f , $2f$, $3f$, dst). Bentuk gelombang yang terdistorsi merupakan penjumlahan dari gelombang fundamental dan gelombang harmonisa (h_1 , h_2 , dan seterusnya) pada frekuensi kelipatannya. Semakin banyak gelombang harmonisa yang diikutsertakan pada gelombang fundamentalnya, maka gelombang akan semakin mendekati gelombang persegi atau gelombang akan berbentuk non sinusoidal [5].

Salah satu penyebab harmonisa adalah beban linier dan beban non linier. Beban linier adalah beban yang memberikan bentuk gelombang keluaran yang linier artinya arus yang mengalir sebanding dengan impedansi dan perubahan tegangan. Beban linier ini tidak memberikan dampak yang buruk pada perubahan gelombang arus maupun tegangan. Resistor (R) merupakan beban linier tersebut. Beban non linier adalah bentuk gelombang keluarannya tidak sebanding dengan tegangan dalam setiap setengan siklus sehingga bentuk gelombang arus maupun tegangan keluarannya tidak sama dengan gelombang masukannya (mengalami distorsi). Gangguan yang terjadi akibat distorsi gelombang arus dan tegangan disebut dengan harmonik. Contoh dari beban-beban non-linear ini seperti[2]:

- Tungku api busur (pengecoran logam)
- Las
- Inti magnet pada trafo dan mesin-mesin berputar
- Mesin-mesin sinkron
- Adjustable speed drives
- Solid state switch
- High voltage DC transmisi
- Photovoltaik invertors

Total Harmonic Distortion (THD) merupakan nilai prosentase antara total komponen harmonisa dengan komponen fundamentalnya. Semakin besar prosentase THD ini menyebabkan semakin besarnya resiko

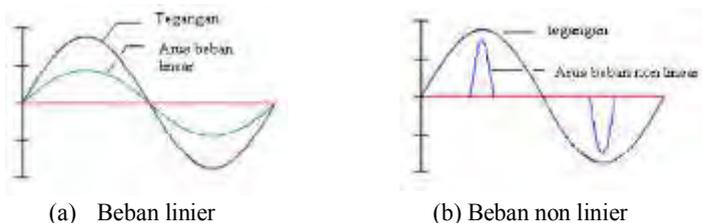
kerusakan peralatan akibat harmonisa yang terjadi pada arus maupun tegangan. Nilai THD yang diijinkan secara internasional maksimal berkisar 5% dari tegangan atau arus frekuensi fundamentalnya.

Untuk mencari nilai THD dari tegangan dapat digunakan persamaan 2.6

Sedangkan untuk mencari nilai THD dari arus dapat digunakan persamaan 2.7

Alat yang bisa digunakan untuk memantau gelombang harmonisa antara lain Osiloskop dan Spektrum analyzer. Oscilloscope memantau adanya arus maupun tegangan harmonisa secara menyamping, sedangkan spektrum analyzer memantau arus maupun tegangan harmonisa dari depan sehingga gelombang dengan frekuensi yang lebih tinggi dari gelombang fundamental bisa dipantau.

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. Perbedaan bentuk gelombang yang dihasilkan oleh beban linier dan beban nonlinier dapat dilihat pada Gambar 2.1



Gambar 2. 1 Bentuk gelombang arus dan tegangan [6]

Bentuk gelombang yang tidak sinusoidal ini merupakan gabungan dari bentuk gelombang fundamental dan gelombang yang mengandung sejumlah komponen harmonisa.

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.

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

- Rusaknya peralatan listrik
- Terbakarnya kabel / konduktor penghantar
- Pada transformator daya menurun, bertambahnya losses
- Pada motor listrik terjadi overhear
- Pada alat ukur kWH meter elektromekanis terjadi kesalahan pengukuran
- Kegagalan fungsi relay

2.2 Sumber-Sumber Harmonisa

Dalam system tegangan listrik dikenal dua jenis beban yaitu beban linier dan non-linier. Saat ini elektronika daya sebagai converter banyak digunakan pada sistem penyearah atau inverter untuk penyedia energy listrik sesuai kebutuhan [7]. IEEE 519-1992 yaitu standar internasional harmonisa mengidentifikasi sumber utama dari harmonisa pada sistem tenaga adalah meliputi converter daya, busur peleburan, static VAR kompensator, inverter, kendali fasa elektronika daya, cycloconverters, power supply DC dan PWM [4].

Beban tidak linier umumnya merupakan peralatan elektronik yang di dalamnya banyak terdapat komponen semikonduktor seperti switching power supplies, UPS, computer, printer, LHE, DC drive, AC drive, welding arc, battery charger, dan lain-lain. Proses kerja peralatan atau beban tidak linier ini akan menghasilkan gangguan atau distorsi gelombang arus yang tidak sinusoidal.

2.3 Perhitungan Harmonisa

Harmonisa diproduksi oleh beberapa beban tidak linier atau alat yang mengakibatkan arus tidak sinusoidal. Untuk menentukan besar Total Harmonic Distortion (THD) dari perumusan analisa deret Fourier untuk tegangan dan arus dalam fungsi waktu yaitu [5]:

$$v(t)=v_0 + \sum_{n=1}^{\infty} V_n \cos(n\omega t + \theta_n) \dots\dots\dots(2.1)$$

Dimana: V_0 = Komponen dc dari gelombang tegangan (V)

$$i(t)=I_0 + \sum_{n=1}^{\infty} I_n \cos(n\omega t + \phi_n) \dots\dots\dots(2.2)$$

Dimana: I_0 = Arus dc (A)

Tegangan dan arus rms dari gelombang sinusoidal yaitu nilai puncak gelombang dibagi $\sqrt{2}$ dan secara deret Fourier untuk tegangan dan arus yaitu:

$$I_{\text{rms}} = I_0 + \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{I_n}{\sqrt{2}} \right)^2} \dots\dots\dots(2.3)$$

$$V_{\text{rms}} = V_0 + \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{V_n}{\sqrt{2}} \right)^2} \dots\dots\dots(2.4)$$

THD tegangan dan arus didefinisikan sebagai nilai rms harmonisa di atas frekuensi fundamental dibagi dengan nilai rms fundamentalnya, dengan tegangan *dc*-nya diabaikan. *THD* tegangan sebagai berikut:

$$\text{THD}_v = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} (V_{\text{rms}})^2}}{V_{\text{rms}}} \dots\dots\dots(2.5)$$

Dengan mengabaikan tegangan *dc* (V_0) dan nilai V_{rms} digantikan dengan $V_n / \sqrt{2}$ pada persamaan (2.5), sehingga *THD* dapat dituliskan dalam persamaan berikut:

$$\text{THD}_v = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} \left(\frac{V_n}{\sqrt{2}} \right)^2}}{\frac{V_1}{\sqrt{2}}} \dots\dots\dots(2.6)$$

THD arus sebagai berikut:

$$\text{THD}_i = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} (I_{\text{rms}})^2}}{I_{\text{rms}}} \dots\dots\dots(2.7)$$

Dengan mengabaikan arus dc (I_0) dan nilai I_{rms} digantikan dengan $I_n / \sqrt{2}$ pada persamaan (2.7), sehingga THD dapat dituliskan dalam persamaan berikut:

$$THD_i = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} \left(\frac{I_n}{\sqrt{2}} \right)^2}}{\frac{I_1}{\sqrt{2}}} = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} (I_n)^2}}{I_1} \dots\dots\dots(2.8)$$

2.4 Batasan Harmonisa

Untuk mengurangi harmonisa pada suatu sistem secara umum tidak harus mengeliminasi semua harmonisa yang ada, tetapi cukup dengan mereduksi sebagian harmonisa tersebut sehingga diperoleh nilai di bawah standar yang diizinkan. Hal ini berkaitan dengan analisa secara teknis dan ekonomis, dimana dalam mereduksi harmonisa secara teknis di bawah standar yang diizinkan sementara dari sisi ekonomis tidak membutuhkan biaya yang besar dan menguntungkan pada akhirnya. Standar yang digunakan sebagai batasan harmonisa adalah yang dikeluarkan oleh *International Electrotechnical Commision (IEC)* yang mengatur batasan harmonisa pada beban kecil satu fasa ataupun tiga fasa. Untuk beban tersebut umumnya digunakan standar *IEC 61000-3-2*. Hal ini disebabkan karena belum adanya standar baku yang dihasilkan *IEEE*.

Pada standar *IEC 61000-3-2*, beban-beban kecil tersebut diklasifikasikan dalam kelas A, B, C, dan D. Dimana masing-masing kelas mempunyai batasan harmonisa yang berbeda-beda yang dijelaskan sebagai berikut [4]:

a. Kelas A

Kelas ini merupakan semua kategori beban termasuk didalamnya peralatan penggerak motor dan semua peralatan 3 fasayang arusnya tidal lebih dari 16 amper perfasanya. Semua peralatan yang tidak termasuk dalam 3 kelas yang lain dimasukkan dlam kategori kelas A. Batasan harmonisanya hanya didefinisikan untuk peralatan satu fasa (tegangan kerja 230V) dan tiga fasa (400v) dimana batasan arus harmonisanya seperti terdapat pada tabel 2.1.

Tabel 2. 1 Batasan arus harmonisa untuk peralatan kelas A

Harmonisa ke-n	Arus harmonisa maksimum (A)
3	2,30
5	1,14
7	0,77
9	0,40
11	0,33
13	0,21
Ganjil ($13 < n < 41$)	$2,25/n$
2	1,08
4	0,43
6	0,30
Genap ($13 < n < 41$)	$1,84/n$

Sumber : IEC 61000-3-2

b. Kelas B

Kelas ini meliputi semua peralatan *portable* yang batasan arus harmonisanya merupakan harga absolut maksimum dengan waktu kerja yang singkat. Batasan arus harmonisanya diperlihatkan pada tabel 2.2

Tabel 2. 2 Batasan arus harmonisa untuk peralatan kelas B

Harmonisa ke-n	Arus harmonisa maksimum (A)
3	3,45
5	1,71
7	1,155
9	0,60
11	0,495
13	0,315
Ganjil ($13 < n < 41$)	$3,375/n$
2	1,62
4	0,645
6	0,45
Genap ($13 < n < 41$)	$2,76/n$

Sumber : IEC 61000-3-2

c. Kelas C

Kelas C termasuk didalamnya semua peralatan penerangan dengan daya input aktifnya lebih besar dari 25 Watt. Batasan arus diekspresikan dalam bentuk presentase arus fundamental.

Persentase arus maksimum yang diperbolehkan untuk masing-masing harmonisa diperlihatkan Tabel 2.3

Tabel 2. 3 Batasan arus harmonisa untuk peralatan kelas C

Harmonisa ke-n	Arus harmonisa maksimum (% fundamental)
2	2
3	30 x PF rangkaian
5	10
7	7
9	5
Ganjil ($9 < n < 41$)	3

d. Kelas D

Termasuk semua jenis peralatan yang dayanya di bawah 600 Watt khususnya yaitu:

- a. PC (*Personal Computer*)
- b. Monitor
- c. TV

Batasan arusnya diekspresikan dalam bentuk mA/W dan dibatasi pada harga absolut yang nilainya diperlihatkan Tabel 2.4.

Tabel 2. 4 Batasan arus harmonisa untuk peralatan kelas D[10]

Harmonisa ke-n	Arus harmonisa maksimum (mA/W) $75 < P < 600$ W	Arus harmonisa maksimum (mA/W) $P > 600$ W
3	3,4	2,30
5	1,9	1,14
7	1,0	0,77
9	0,5	0,40
11	0,35	0,33
13	0,296	0,21
Ganjil ($13 < n < 41$)	3,85/n	2,25/n

Sumber : IEC 61000-3-2

Seperti diketahui bahwa hamper semua peralatan elektronik bekerja dengan sumber arus searah sehingga dalam operasinya dibutuhkan peralatan penyearah dan dihubung langsung ke sumber tegangan bolak-balik.

Untuk penyearah yang terdistorsi gelombang arusnya cukup tinggi dan banyak dipakai secara bersamaan dimasukkan dalam kategori kelas D. Sementara untuk penyearah dengan arus yang terdistorsi dapat dimasukkan ke dalam kategori kelas A.

Tabel 2.5 memperlihatkan batas harmonisa untuk kelas A dan kelas D dan penyearah dengan daya 100 Watt

Tabel 2. 5 Batasan arus harmonisa untuk peralatan kelas D[11]

Harmonisa ke-n	Arus harmonisa maksimum (mA/W) 75<P<600 W	Arus harmonisa maksimum (mA/W) P>600 W	Batas kelas D (input 100W) – A
3	2,30	3,4	0,34
5	1,14	1,9	0,19
7	0,77	1,0	0,10
9	0,40	0,5	0,05
11	0,33	0,35	0,035
(11<n<41)	0,15x0,15/n	3,85/n	0,386/n

Selain IEC 61000-3-2 batasan harmonisa yang diakui oleh internasional adalah IEEE std.519-1992. Tabel 2.6 menunjukkan standard THD V terhadap rating tegangannya [5].

Tabel 2. 6 Distorsi tegangan sesuai standar IEEE std 519-1992

Tegangan Bus	Harmonik perorde (%)	THD (%)
69 kV kebawah	3	5
69,001kV – 161kV	1,5	2,5
161,001kV keatas	1	1,5

Standar untuk harmonisa arus menurut standar IEEE std 519-1992 ditunjukkan pada tabel 2.7.

Tabel 2. 7 Distorsi arus (%TDD) sesuai standar IEEE std 519-1992

I _{sc} /I _L	Harmonik perorde (%)					TDD
	< 11	11≤h≤17	11≤h≤17	11≤h≤17	35≤h	
< 20*	4	2	1,5	0,6	0,3	5
20-50	7	3,5	2,5	1	0,5	8

50-100	10	4,5	4	1,5	0,7	12
100-1000	12	5,5	5	2	1	15
>1000	15	7	6	2,5	1,4	20

Dimana: I_{SC} = Arus *Short Circuit* maksimum

I_L = Arus beban maksimum pada dasar frekuensi di bus

2.5 Penyearah Terkendali

Penyearah terkendali merupakan beban tidak linier yang banyak menyumbang harmonisa pada saluran tegangan listrik. Penyearah terkendali dapat diatur tegangan keluarannya dengan merubah sudut penyalan atau trigger pada thyristor. Penyearah terkendali dapat dibedakan dalam enam jenis, yaitu [9]:

- a. Penyearah terkendali satu fasa semikonverter
- b. Penyearah terkendali satu fasa *full converter*
- c. Penyearah terkendali satu fasa *dual converter*
- d. Penyearah terkendali tiga fasa semikonverter
- e. Penyearah terkendali tiga fasa *full converter*
- f. Penyearah terkendali tiga fasa *dual converter*

Banyaknya urutan harmonisa yang dibangkitkan (n) oleh beban penyearah tergantung pada kelipatan dari frekuensi dasar dengan jumlah pulsa dari penyearah, dapat dihitung dengan menggunakan persamaan 2.9.

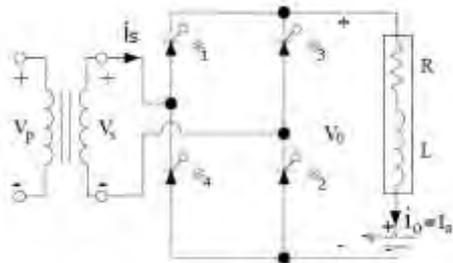
$$n = f_n / f_1 = k.p \pm 1 \dots \dots \dots (2.9)$$

Dimana:

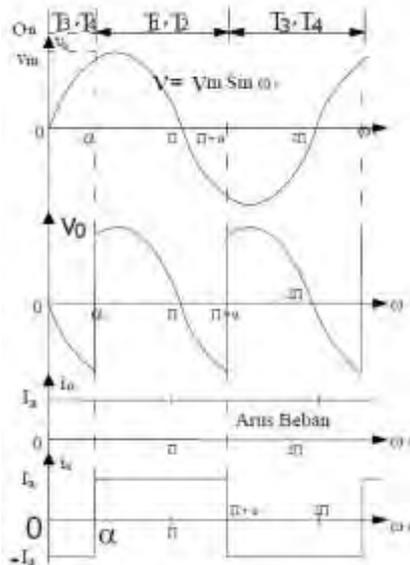
- n = urutan harmonisa yang dibangkitkan.
- k = kelipatan dari frekuensi dasar
- p = jumlah pulsa dari penyearah

2.5.1 Penyearah Terkendali satu fasa *full converter*

Penyearah terkendali satu fasa *full converter* tersusun dari 4 buah thyristor seperti pada Gambar 2.2 digunakan untuk mensuplai daya listrik pada lilitan jangkar dimana tegangan lilitan jangkar untuk mengatur kecepatan putar motor arus searah baik untuk *starting* maupun *running* saat kerja pada rangkaian terbuka [8].



(a) Rangkaian



(b) Bentuk Gelombang

Gambar 2.2 Full Converter satu fasa

Rangkaian *full converter* satu fasa tampak seperti Gambar 2.2 dengan beban induktif yang tinggi sehingga arus beban kontinu bebas dari *ripple*. Tegangan output dapat ditentukan dari persamaan berikut ini [8].

$$V_{dc} = \frac{2}{2\pi} \int_{\alpha}^{\pi+\alpha} V_m \sin(\omega t) d(\omega t) = \frac{2V_m}{2\pi} [-\cos(\pi+\alpha) + \cos\alpha]$$

$$V_{dc} = \frac{V_m}{\pi} [\cos\alpha + \cos\alpha] = \frac{2V_m}{\pi} [\cos\alpha] \dots \dots \dots (2.10)$$

Arus input sesaat dapat dinyatakan dalam bentuk deret *Fourier* seperti:

$$i_s(s) = a_0 + \sum_{n=1,2,\dots}^{\infty} (A_n \cos n\omega t + B_n \sin n\omega t)$$

Dimana:

$$a_0 = \frac{1}{2\pi} \int_{\alpha}^{2\pi+\alpha} i(t) d(\omega t) = \frac{1}{2\pi} \left[\int_{\alpha}^{\pi+\alpha} I_a d(\omega t) - \int_{\pi+\alpha}^{2\pi+\alpha} I_a d(\omega t) \right]$$

$$a_n = \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{2\pi+\alpha} i(t) \cos n\omega t d(\omega t)$$

$$= \frac{1}{\pi} \left[\int_{\alpha}^{\pi+\alpha} I_a \cos n\omega t d(\omega t) - \int_{\pi+\alpha}^{2\pi+\alpha} I_a \cos n\omega t d(\omega t) \right]$$

$$= -\frac{4I_a}{n\pi} (\sin n\alpha) \text{ untuk } n = 1, 3, 5, \dots$$

$$= 0 \text{ untuk } n = 2, 4, 6, \dots$$

$$b_n = \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{2\pi+\alpha} i(t) \sin n\omega t d(\omega t)$$

$$= \frac{1}{\pi} \left[\int_{\alpha}^{\pi+\alpha} I_a \sin n\omega t d(\omega t) - \int_{\pi+\alpha}^{2\pi+\alpha} I_a \sin n\omega t d(\omega t) \right]$$

$$= -\frac{4I_a}{n\pi} (\sin n\alpha) \text{ untuk } n = 1, 3, 5, \dots$$

$$= 0 \text{ untuk } n = 2, 4, 6, \dots$$

Karena $a_0 = 0$, arus input dapat dituliskan sebagai berikut:

$$i(t) = \sum_{n=1,3,5}^{\infty} \sqrt{2} I_{sn} \sin(n\omega t + f_n)$$

Dimana:

$$f_n = \tan^{-1} \frac{a_n}{b_n} = -n\alpha$$

α_n adalah perubahan sudut dari harmonisa n arus. Nilai rms harmonisa n arus input diberikan oleh persamaan:

$$I_{sn} = \frac{1}{\sqrt{2}} (a_n^2 + b_n^2)^{1/2} = \frac{4I_a}{\sqrt{2}n\pi} = \frac{2\sqrt{2}I_a}{n\pi} \dots\dots\dots(2.11)$$

Nilai rms arus input dapat dihitung dari persamaan (2.11) sebagai berikut

$$I_s = \left(\sum_{n=1,2,\dots}^{\infty} I_{sn}^2 \right)^{1/2} \dots\dots\dots(2.12)$$

I_s juga dapat dihitung secara langsung dari:

$$I_s = \left[\frac{2}{2\pi} \int_{\alpha}^{\pi+\alpha} I_a^2 d(\omega t) \right]^{1/2} = I_a$$

Total *harmonic Distortion* :

$$THD = \left[\left(\frac{I_s}{I_{s1}} \right)^2 - 1 \right]^{1/2} \dots\dots\dots(2.13)$$

2.6 Filter Harmonisa

Tujuan utama dari filter harmonisa adalah untuk mengurangi amplitude satu frekuensi tertentu dari sebuah tegangan atau arus. Dengan penambahan filter harmonisa pada suatu system tenaga listrik yang mengandung sumber-sumber harmonisa, maka penyebaran arus harmonisa keseluruh jaringan dapat ditekan sekecil mungkin. Selain itu filter harmonisa pada frekuensi fundamental dapat mengkompensasi daya reaktif dan dipergunakan untuk memperbaiki faktor daya sistem. Banyak sekali cara yang digunakan untuk memperbaiki sistem khususnya meredam harmonisa yang sudah dikembangkan saat ini. Secara garis besar ada beberapa cara untuk meredam harmonisa yang ditimbulkan oleh beban nonlinier yaitu diantaranya:

- a. Penggunaan filter pasif pada tempat yang tepat, terutama pada daerah yang dekat dengan sumber pembangkit harmonisa sehingga arus harmonisa terjerat di sumber dan mengurangi penyebaran arusnya.
- b. Penggunaan filter aktif

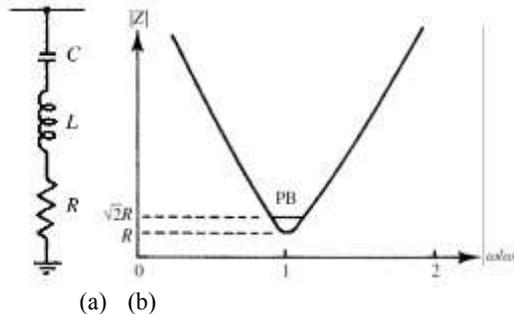
- c. Kombinasi filter aktif dan pasif
- d. Konverter dengan reaktor antar fasa, dan lain-lain.

Disamping sistem di atas dapat bertindak sebagai peredam harmonisa, tetapi juga dapat memperbaiki faktor daya yang rendah pada system. Jika perbaikan factor daya langsung dipasang kapasitor terhadap sistem yang mengandung harmonisa, maka akan menyebabkan amplitude pada harmonisa tertentu dan membesar

2.7 Filter Pasif

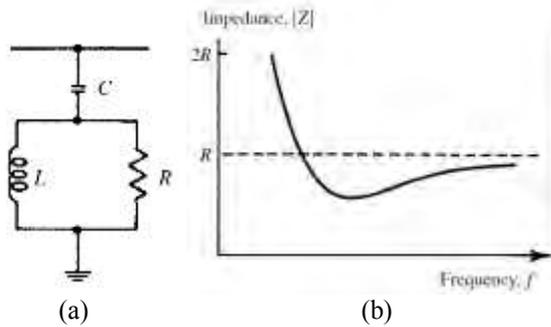
Filter pasif dipasang pada sistem dengan tujuan untuk meredam harmonisa dan tujuan lain yaitu untuk memperbaiki factor daya, berupa komponen L, C yang dapat ditala untuk satu atau dua frekuensi. Filter dengan penalaan tunggal ditala pada salah satu orde harmonisa (biasanya pada orde harmonisa rendah).

Dalam beberapa kasus, reaktor sajatidak akan mampu mengurangi distorsi harmonisa arus ke tingkat yang diinginkan. Dalam kasus ini sangat diperlukan filter yang lebih baik [10].



Gambar 2. 3 (a) Filter pasif *single tuned* (b) tahanan filter *single tuned* vs frekuensi

Filter pasif terdiri dari kapasitor, inductor dan resistor seperti pada Gambar 2.3 (a) yang *ditunning* pada frekuensi harmonisa tunggal dan mempunyai impedansi yang sangat rendah. Jika filter harmonisa *ditunning* sebagai teknik peredaman harmonisa, maka perlu memberikan filter ganda untuk memenuhi batas distorsi yang ditentukan. Saat filter harmonisa jenis *shunt* dihubungkan dengan sistem daya, mereka akan menyebabkan pergeseran frekuensi resonansi alami pada system tenaga.



Gambar 2. 4 (a) Filter pasif *second-order* (b) tahanan filter *second order* vs frekuensi

Rendahnya Q filter, biasanya dalam wilayah 0,5 sampai 5 , yang memiliki impedansi rendah berbagai frekuensi. Ketika digunakan untuk menghilangkan orde harmonisa lebih tinggi (misalnya 17 ke atas) itu juga disebut sebagai high-pass filter. Contoh yang khas dari tinggi dan rendah Q rangkaian filter dan impedansi rangkaian variasi frekuensi akan tergambar dalam Gambar 2.3 dan 2.4

Dalam kasus tuned filter Q didefinisikan sebagai rasio dari induktansi atau kapasitansi untuk resistansi di frekuensi resonansi, yaitu [10]:

$$Q = X_o / R \dots\dots\dots (2.14)$$

Seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.3 (b), filter pass band (PB) dibatasi oleh frekuensi di mana filter reaktansi yang sama dengan resistansinya, yakni impedansi sudut adalah 45 dan impedansi modul $\sqrt{2}R$. Kualitas faktor dan Pass Band yang terkait dengan persamaan[10]:

$$Q = \omega_n / PB \dots\dots\dots (2.15)$$

Dimana ω_n adalah pengatur sudut frekuensi di lingkaran setiap detik. Kejelasan dari pengaturan di *high-pass* filter adalah bolak-balik dari *tuned filters* yakni $Q = R/X$ [10]

Lebih dari filter detuning dari frekuensi nominal *tuned* diwakilkan dengan faktor δ . Faktor ini meliputi berbagai efek: (i) variasi di frekuensi dasar; (ii) variasi di kapasitor dan inductor filter menurut usia dan

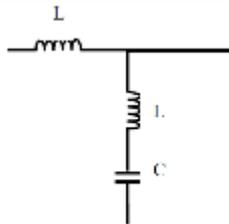
temperature; dan (iii) awal tuning sesuai toleransi pabrik dan ukuran terbatas dari step tuning [10].

Keseluruhan *detuning*, untuk setiap unit dari frekuensi adalah:

$$\delta = (\omega - \omega_n) / \omega_n \dots\dots\dots(2.16)$$

Selain itu, untuk perubahan dari L atau C sebesar 2% pada detuning yang sama akan merubah frekuensi system 1%. Sehingga δ dapat dinyatakan dalam persamaan [10]:

$$\delta = \frac{\Delta f}{f_n} = \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta L}{L_n} + \frac{\Delta C}{C_n} \right) \dots\dots\dots(2.17)$$



Gambar 2.5 *Low pass filter harmonic*

Low Pass Filter harmonisa pada Gambar 2.5 sebagai penekan luas harmonisa, menawarkan pendekatan untuk meredam harmonisa. Filter *dituning* untuk harmonisatertentu, filter tersebut menyaring semua frekuensi harmonisa, termasuk harmonisa ketiga. Filter tersebut terhubung secara seri dengan beban tidak linier dengan impedansi seri besartersambung. Tidak perlu dilakukan *tuning* terhadap *low pass filter*. Karena ada impedansi seri yang besar. Sebaliknya mereka dipasang ke *drive* melalui kapasitor filter. Untuk alasan ini, sangat mudah untuk memprediksi tingkat distorsi yang akan dicapai dan untukmenjamin hasilnya. Sebuah *low pass filter* dapat dengan mudah menawarkan tingkat harmonisa arus serendah 8% sampai 12% [9].

2.8 Komponen Filter

Dengan mengetahui dasar dan tegangan harmonisa yang sesuai dengan rating arus pada busbar dan rating tegangan pada kapasitor,

inductor dan resistor dapat diperhitungkan dan dengan semua itu dapat diketahui daya aktif dan reaktifnya serta rugi-ruginya.

Untuk mengantisipasi bahaya dari komponen-komponen tersebut sangat diperlukan rating pada saat kondisi-kondisi khusus. Ini berarti kita perlu memasukkan dasar tegangan tertinggi, nilai tertinggi dari deviasi frekuensi efektif, dan nilai harmonik arus dari sumber lain yang memungkinkan timbulnya resonansi antara filter dan sistem.

2.8.1 Kapasitor

Kapasitor merupakan bagian standard yang terhubung dalam rangkaian seri dan/atau paralel untuk mencapai kebutuhan dari keseluruhan tegangan dan rating KVA. Faktor utama yang terlibat di suatu rancangan adalah: koefisien temperature dari kapasitor, besar daya reaktif perunit, rugi daya, keandalan dan biaya.

Koefisien temperature yang sangat rendah dari kapasitor diharapkan agar *tuned filter* dapat menghindari *detuning* karena dengan perubahan kapasitas berdasar temperature ruangan atau kapasitor *self-heating* patut diperhitungkan. Ada kalanya ini tidak begitu penting untuk *damped filter* atau Kapasitor daya.

Kapasitor menghasilkan daya reaktif dengan losses yang kecil dan dapat dioperasikan pada tegangan stress yang tinggi. Karena alasan ini, pengoperasian panjang pada *over voltage* yang tidak wajar harus dihindari untuk menghindari panas yang menghancurkan dielektrik; pada tegangan tinggi ketika periode yang singkat akan menghasilkan kerusakan ionisasi dari dielektrik.

Syarat daya reaktif pada kapasitor adalah total dari daya reaktif dari tiap subjek yang berfrekuensi [10].

2.8.2 Induktor

Induktor digunakan pada rangkaian filter untuk menangkap frekuensi tinggi, yaitu rugi-rugi *skin effect* dan histerisis yang masuk dalam perhitungan rugi daya. Level flux pada lempeng besi juga harus diperhitungkan, yaitu *detuning* karena magnetisasi pada beban nonlinier. Ini akan menuntun dalam menggunakan inti besi dengan kerapatan flux yang rendah. Hal lain adalah filter induktor lebih baik dirancang dengan inti yang tak bermagnet.

Q di sebagian besar frekuensi harmonisa dipilih pada level rendah dan seringnya bernilai antara 50 sampai 150. Biarpun demikian,

penurunan nilai Q adalah hal yang umum dan ini berasal dari penggunaan seri resistor [10].

Rating induktor sangat bergantung pada arus rms maksimum dan level isolasi. Hal tersebut merupakan syarat untuk menahan sentakan *switching*. Umumnya R dan L yang dibumikan adalah *tuned filter*.

2.9 Perhitungan Filter

Filter yang cukup efektif dapat menekan harmonisa dengan sedikit perhitungan dan memasok daya reaktif, tapi bukan selalu menjadi syarat. Perhitungan rugi pada filter mungkin terjadi dengan membebani *power supply reactive* dan memfilter beberapa bagian, walaupun tidak mengganggu dasar logikanya [10].

Lakukan beberapa asumsi untuk melakukan perhitungan analisis dari komponen filter, yaitu:

- a. Analisa pada instalasi tertentu, kapasitor bank dengan matiks satuan. Setiap unit memiliki rating nominal pada pengoperasian tegangan dan pengaman dengan fuse eksternal. Kapasitor bank dianggap konstan pada pada rating minimum matriks yang terisi penuh. Untuk rating yang tinggi, satu atau lebih unit ditambahkan ke masing-masing grup secara seri sesuai dengan syarat dan akurasi perhitungan MVAR atau ukuran yang layak sehingga tercapai. Situasi dapat menjadi kompleks kedepannya dengan tersedianya beberapa unit standard dengan nominal rating yang berbeda yaitu 50, 100, 150 kVAr dan seterusnya. Dan perhitungan tambahan yang lain untuk perbedaan nilai dari ukuran kapasitor bank.
- b. Meskipun perhitungan induktor bergantung besar pada metode penmbangunan (misalnya isolasi minyak/unit pendinginan, pendinginan reaktor alami dari konstruksi terbuka, dan lain sebagainya). Perhitungan tersebut tidak begitu besar untuk setiap unit pada rating yang berbeda.
- c. Rating Daya dari kebutuhan resistor untuk mengatur Q pada percabangan filter akan menimbulkan efek perhitungan yang panjang. Bagaimanapun, resistor pada setiap unit sulit untuk diprediksi dalam analisa yang umum, karena sangat bergantung pada factor Q pada induktor. Untuk alasan ini mengapa

perhitungan pendinginan pun menjadi sulit karena nilai resistor akan mempengaruhi panas yang dihasilkan.

- d. Akhirnya, dapat diasumsikan nilai resistor terhadap kapasitor berdasarkan estimasi rugi daya adalah konstan pada semua nilai frekuensi

2.9.1 Single Tuned Filter

Pada rangkaian Q tertinggi dapat diasumsikan:

$$V_C = V_L + V_S \dots\dots\dots (2.18)$$

Dimana V_C , V_L , dan V_S mencerminkan tegangan kapasitor, induktor dan sumber tegangan.

Ukuran filter dapat dihitung sebagai berikut:

$$S = \frac{V_s^2}{X_C - X_L} \dots\dots\dots (2.19)$$

Dimana X_C dan X_L dihitung berdasarkan nilai dasar frekuensi yang digunakan. Sedangkan untuk nilai harmonik pada orde ke-n menggunakan rumus sebagai berikut:

$$X_o = nX_L = X_C / n$$

Dimana,

$$X_L = X_C / n^2 \text{ dan } V_L = V_C / n^2$$

Sehingga,

$$S = V_S^2 / [X_C(1-1/n^2)] = (V_S^2 / X_C)[n^2/(n^2-1)] \text{ MVA} \dots\dots(2.20)$$

Juga,

$$V_C - V_L = V_C(1 - 1/n^2) = V_S$$

Yaitu,

$$V_C = [n^2 / (n^2 - 1)] V_S \text{ kV} \dots\dots\dots (2.21)$$

Pembebanan pada masing-masing komponen filter adalah turunan dari perhitungan sebagai berikut:

Kapasitor:

Dengan pembebanan pada dasar frekuensi:

$$\begin{aligned} V_c^2 / X_c &= (V_s^2 / X_c)[n^2/(n^2-1)] \text{ MVA} \\ &= S[n^2/(n^2-1)] \text{ MVA} \dots\dots\dots(2.21) \end{aligned}$$

Dengan pembebanan pada saat harmonisa:

$$I_n^2(X_c/n) = [(I_n^2 \cdot V_s^2)/(S \cdot n)] [n^2/(n^2-1)] \text{ MVA} \dots\dots\dots (2.22)$$

Rugi daya:

$$K_{CL}(\text{total beban}) = K_{CL} [S + (I_n^2 \cdot V_s^2)/(S \cdot n)] [n^2/(n^2-1)] \text{ kW} \dots(2.23)$$

Dimana K_{CL} adalah factor rugi pada kapasitor (kW/MVA).

Induktor:

Dengan pembebanan pada dasar frekuensi:

$$\begin{aligned} V_L^2 / X_L &= (V_c^2 / n^2)^2 \cdot (n^2/X_c) = V_c^2/n^2 X_c \text{ MVA} \\ &= (S/n^2)[n^2/(n^2-1)] \text{ MVA} \dots\dots\dots(2.21) \end{aligned}$$

Pembebanan harmonik sama dengan kapasitor karena reaktansi merupakan sama di harmonisa frekuensi.

Sebuah *single tuned filter* merupakan rangkaian seri RCL (Gambar 2.5) penyetelan untuk frekuensi dari salah satu harmonisa (umumnya menurunkan karakteristik harmonisa). Impedansinya dapat dirumuskan sebagai berikut [10]:

$$Z_1 = R + j(\omega L - 1/\omega C) \dots\dots\dots (2.22)$$

Dimana frekuensi resonan (f_n) diturunkan oleh R. Ada dua dasar parameter dalam perencanaan dalam mempertimbangkan pemilihan R, C dan L, yaitu kualitas faktor (Q) dan deviasi frekuensi relative (δ) yang harus didefinisikan [10].

Agar memahami impedansi filter yang berhubungan dengan Q dan δ , berikut adalah hubungannya:

$$\omega = \omega_n(1 + \delta) \dots \dots \dots (2.23)$$

dimana

$$\omega = 1 / \sqrt{LC} \dots \dots \dots (2.24)$$

Reaktansi dari Kapasitor dan induktor dalam ohm di frekuensi *tuned* adalah [10]

$$X_0 = \omega_n L = \frac{1}{\omega_n C} = \sqrt{\frac{L}{C}} \dots \dots \dots (2.25)$$

$$Q = \frac{X_0}{R} \dots \dots \dots (2.26)$$

$$C = \frac{1}{\omega_n X_0} = \frac{1}{\omega_n R Q} \dots \dots \dots (2.27)$$

$$L = \frac{X_0}{\omega_n} = \frac{R Q}{\omega_n} \dots \dots \dots (2.28)$$

Substitusi persamaan (2.23), (2.27) dan (2.28) pada (2.22) sehingga didapatkan [10]:

$$Z_f = R \left(1 + j Q \delta \left(\frac{2 + \delta}{1 + \delta} \right) \right) \dots \dots \dots (2.23)$$

Atau pertimbangkan nilai δ sebagai nilai relatif yang kecil bila dibandingkan dengan keseluruhannya,

$$|Z_f| \approx R(1 + j2\delta Q) = X_0(Q^{-1} + j2\delta) \dots \dots \dots (2.24)$$

Dan

$$|Z_f| \approx R(1 + 4\delta^2 Q^2)^{1/2} \dots \dots \dots (2.25)$$

Umumnya lebih baik untuk memasukkan nilai admitansi dibandingkan resistansi dalam merancang filter, yaitu:

$$Y_f \approx \frac{1}{R(1 + j2\delta Q)} = G_f + jB_f \dots \dots \dots (2.26)$$

Dimana

$$G_f = \frac{Q}{X_0(1+4\delta^2Q^2)} \dots\dots\dots (2.27)$$

$$B_f = \frac{2\delta Q^2}{X_0(1+4\delta^2Q^2)} \dots\dots\dots (2.28)$$

Tegangan haarmomisa di busbar filter adalah

$$Y_n = \frac{I_n}{Y_{nr} + Y_{sn}} = \frac{I_n}{Y_n} \dots\dots\dots (2.29)$$

Oleh karena itu untuk meminimalkan distorsi tegangan diperlukan peningkatan kesuluruhan admitansi dari filter dengan dipararelkan pada sistem.

Dalam memprediksi besarnya nilai V_n , nilai variabel yang tidak akurat dapat menentukan pilihan yang diharapkan melalui deviasi frekuensi δ dan masukan *network* Y_{sn} . Karena peningkatan tegangan harmonisa dengan δ , besar harpan deviasi δ_m harus menggunakan analisa. Lagi, kondisi terburuk (admitansi paling rendah) harus diperhitungkan.

Memang melalui pendekatan pada perencanaan dapat menentukan nilai Q dan ukuran filter (rating VA pada frekuensi dasar). Hubungan antara Q dan δ , pada persamaan (2.29) dapat dituliskan sebagai berikut:

$$|V_n| = I_n \left\{ \left[G_{sn} + \frac{1}{R(1+4Q^2\delta^2)} \right]^2 + \left[B_{sn} + \frac{2Q\delta}{R(1+4Q^2\delta^2)} \right]^2 \right\}^{-1/2}$$

[Halaman ini sengaja dikosongkan]

BAB III

SISTEM KELISTRIKAN PT. COCA COLA AMATIL SURABAYA PLANT

3.1 Sistem Kelistrikan PT. Coca Cola Amatil Surabaya Plant

PT. Coca Cola Amatil Surabaya Plant adalah salah satu dari perusahaan minuman ringan yang ada di Indonesia yang bertempat di Pandaan, Jawa Timur. Ada beberapa produk minuman yang di produksi di PT. Coca Cola Amatil Surabaya Plant, antara lain seperti coca cola coke, coke zero, sprite, fanta strawberry, fanta soda water, frestea jasmine dan frestea green. Untuk menunjang proses produksi bermacam produk tersebut kebutuhan listrik sangat berperan besar dalam proses produksi di PT. Coca Cola Amatil Surabaya Plant maupun sampai dengan proses pengemasan produk. Untuk memenuhi supli listrik, PT. Coca Cola Amatil Surabaya Plant mendapat pasokan dari PLN sebesar 3500 KVA, 3 fasa, 20 KV atau dari generator yang dimiliki oleh PT. Coca Cola Amatil Surabaya Plant sendiri yaitu pembangkit listrik dengan menggunakan tenaga mesin gas. PT. Coca Cola Amatil Surabaya Plant memiliki 2 generator yang masing-masing kapasitasnya 2280 KW. Dalam operasinya 2 generator dioperasikan sesuai dengan kebutuhan dari beban, jika setiap kali beban akan naik maka generator akan di set secara manual untuk dinaikkan dayanya guna memenuhi beban, namun tidak lebih dari 80% kapasitasnya. Sebagian besar beban di supli dari 2 generator yang terhubung paralel dan sisanya di supli oleh PLN. PT. Coca Cola Amatil Surabaya Plant hanya memiliki dua level tegangan yaitu pada tegangan 20 kV dan 0,4 kV. Dengan proses operasi seperti itu, dibutuhkan keandalan sistem yang baik di PT. Coca Cola Amatil Surabaya Plant.

Gangguan merupakan salah satu factor yang mempengaruhi ketidakstabilan pada system tenaga listrik. Pada tugas akhir ini akan dilakukan simulasi kestabilan transien pada kelistrikan PT. Coca Cola Amatil Surabaya Plant akibat lepas pembangkit, gangguan hubung singkat dan *motor starting*. Sehingga dapat diketahui respon dari sistem jika terjadi gangguan tersebut sistem masih dianggap stabil atau tidak.

3.2 Data Kelistrikan PT. Coca Cola Amatil Surabaya Plant

3.2.1 Kapasitas Pembangkit

Untuk melayani beban PT. Coca Cola Amatil Surabaya Plant memiliki 2 unit pembangkit bertenaga mesin gas dengan kapasitas masing-masing 2280 kW. Selain itu mendapat supli dari PLN melalui trafo berkapasitas 3500 kVA.

Tabel 3. 1 Data Kapasitas Pembangkit di PT. Coca Cola Amatil Surabaya Plant

Nama Generator	Kapasitas Daya	Keterangan
GGCP-1	2280 kW	0,4 kV; 2850 kVA; pf 80%; 4 pole; MVAR Control; Operating 1824 kW
GGCP-2	2280 kW	0,4 kV; 2850 kVA; pf 80%; 4 pole; MVAR Control; Operating 1824 kW

Dua generator berkapasitas 2280 kW tersebut di operasikan sebagai Mvar *control*. Dan supli dari PLN dioperasikan sebagai swing.

3.2.2 Sistem Distribusi di PT. Coca Cola Amatil Surabaya Plant

Pada operasi normal sistem kelistrikan PT. Coca Cola Amatil Surabaya Plant menggunakan sistem kelistrikan tipe radial. Dengan menggunakan sistem radial investasi cenderung lebih murah dan instalasi yang lebih mudah. Namun kekurangan dari sistem ini cenderung pada masalah keandalan.

Tegangan supli dari PLN adalah 20 kV kemudian diturunkan menggunakan transformator daya menjadi 0,4 kV yang terintegrasi dengan parallel 2 generator, yang selanjutnya di distribusikan ke bus pabrik meliputi bus B-LVMDB-1, B-LVMDB-2 dan B-LVMDB-3. Adapun data transformator daya yang digunakan untuk mensupli daya ke beban dapat dilihat di tabel 3.2.

Tabel 3. 2 Data Transformator Utama

No	ID Trafo	Primer (kV)	Sekunder (kV)	Daya (kVA)	Z (%)	Status
1	TR-1	20	0,4	630	4	OFF
2	TR-2	20	0,4	800	4,5	OFF
3	TR-3	20	0,4	3500	7,5	ON

3.2.3 Tegangan Bus

Terdapat dua raing tegangan pada system kelistrikan PT. Coca Cola Amatil Surabaya Plant, yaitu tegangan 20 kV dan tegangan 0,4 kV. Pada Tabel 3.3 merupakan daftar tegangan pada ID bus :

Tabel 3. 3 Data Bus dan Rating Tegangan

No	ID Bus	Tegangan (kV)
1	MV-01-GRID	20
2	B-COUPLER	0,4
3	B-LVMDB-1	0,4
4	B-LVMDB-2	0,4
5	B-LVMDB-3	0,4
6	B-MDP-EXT-L1	0,4
7	B-MAIN UTILITY	0,4
8	B-MAIN LIGHTING	0,4
9	B-SOFTENER	0,4
10	B-MDP-WWTP	0,4
11	B-CSD-KRONES	0,4
12	B-NH3 COMPRESSOR	0,4
13	B-SDB2	0,4
14	B-MDP-L3	0,4
15	B-SDP-L3	0,4
16	B-SDP-HOTFILL	0,4
17	B-SDB4	0,4
18	B-SDB3-EVACOND	0,4
19	B-SDB6-LPET	0,4
20	B-LVMDB-L2	0,4
21	B-SDP-CSD-KRONES	0,4
22	B-LP-COMPRESSOR	0,4
23	B-SDB5	0,4

24	B-HP-COMP1	0,4
25	B-HP-COMP2	0,4
26	B-HP-COMP3	0,4

3.2.4 Data Beban di PT. Coca Cola Amatil Surabaya Plant

Dalam system kelistrikan PT. Coca Cola Amatil Surabaya Plant terdapat tiga panel utama yaitu bus B-LVMDB-1, B-LVMDB-2 dan B-LVMDB-3. Setiap panel ini memiliki beban statis dan dinamis. Berikut ini adalah beban-beban yang terdapat pada masing-masing panel.

1. Panel Bus B-LVMDB-1

Panel ini terbagi menjadi beberapa sub panel, yaitu panel LVMDP Line 2 dengan data pada Tabel 3.4, panel SDP CSD Krones dengan data pada Tabel 3.5, panel LP Compressor dengan data pada Tabel 3.6, panel SDP 5 dengan data pada Tabel 3.7, panel HP Compressor dengan data pada Tabel 3.8 :

Tabel 3. 4 Data Beban Panel No. 158 LVMDP Line 2 (bus LVMDP-L2)

No	Deskripsi	Kapasitas	kV	Keterangan
1	NH3 COMPRESSOR	150 kW	0,4	aktif

Tabel 3. 5 Data Beban Panel No. 111 SDP CSD Krones (bus B-SDP-CSD Krones)

No	Deskripsi	Kapasitas	kV	Keterangan
1	Sugar Storage Panel	10.1 kVA	0,4	aktif
2	UHT	10.1 kVA	0,4	aktif
3	Mixer	10.1 kVA	0,4	aktif
4	Case Washer	10.1 kVA	0,4	aktif
5	Case Conveyor	10.1 kVA	0,4	aktif
6	Bottle Washer	93.6 kVA	0,4	aktif
7	Bottle Washer	32 kVA	0,4	aktif
8	Case Packer	6.4 kVA	0,4	aktif
9	Filler	6.4 kVA	0,4	aktif
10	Uncaser	6.4 kVA	0,4	aktif
11	AC Manager Room	10.1 kVA	0,4	aktif
12	UPS	10.1 kVA	0,4	aktif

Tabel 3. 6 Data Beban Panel No. 31 LP Compressor (Bus B-LP-COMPRESSOR)

No	Deskripsi	Kapasitas	kV	Keterangan
1	AQ 45 Panel	30.1 kW	0,4	aktif
2	DSD 141	100 kW	0,4	aktif
3	GA 808	75 kW	0,4	aktif
4	AQ 55	30.1 kW	0,4	aktif
5	AQ 37	30.1 kW	0,4	spare
6	AQ 37 VSD	30.1 kW	0,4	aktif

Tabel 3. 7 Data Beban Panel SDB 5 (Bus B-SDB5)

No	Deskripsi	Kapasitas	kV	Keterangan
1	AC SDP 5 Room	2.56 kVA	0,4	aktif
2	Pneumatic (Sugar Room)	25.6 kVA	0,4	aktif
3	SDP 1	40 kVA	0,4	aktif
4	CIP & SS	40 kVA	0,4	aktif

Tabel 3. 8 Data Beban HP-COMPRESSOR

No	Deskripsi	Kapasitas	kV	Keterangan
1	Motor Driver HP COMP-1	550 kW	0,4	aktif
2	Motor Driver HP COMP-2	550 kW	0,4	aktif
3	Motor Driver HP COMP-3	550 kW	0,4	spare
4	Air Dryer 1	9,9 kW	0,4	aktif
5	Air Dryer 2	9,9 kW	0,4	aktif
6	Air Dryer 3	9,9 kW	0,4	spare
7	Water Cooling Pump 1	13 kW	0,4	aktif
8	Water Cooling Pump 2	13 kW	0,4	aktif
9	Water Cooling Pump 3	13 kW	0,4	spare

2. Panel Bus B-LVMDB-2

Panel ini terbagi menjadi beberapa sub panel, yaitu panel MDP L3 dengan data pada Tabel 3.9, panel SDP Line 3 dengan data pada Tabel 3.10, panel Krones Line 3 dengan data pada Tabel 3.11, panel SDP Hotfill dengan data pada Tabel 3.12, panel Reverse Osmosis dengan data pada Tabel 3.13, panel AC dan Boiler pada tabel 3.14, panel SDB 3 Evacond dengan data pada tabel 3.15 dan panel Lighting PET Line dengan data pada Tabel 3.16 :

Tabel 3. 9 Data Beban Panel No. XX MDP L3 (Bus MDP-L3)

No	Deskripsi	Kapasitas	kV	Keterangan
1	Workshop	40 kVA	0,4	Aktif

Tabel 3. 10 Data Beban Panel No. XX SDP Line 3 (Bus SDP-L3)

No	Deskripsi	Kapasitas	kV	Keterangan
1	Chiller	160 kVA	0,4	aktif
2	SDP Lighting	12,8 kVA	0,4	aktif
3	SDP Proses	20 kVA	0,4	aktif
4	HVAC System	25,6 kVA	0,4	aktif
5	SDP Pump	6,4 kVA	0,4	aktif

Tabel 3. 11 Data Beban Panel No. XX Krones Line 3 (Bus B-SDP-KRONES-L3)

No	Deskripsi	Kapasitas	kV	Keterangan
1	Blowmould	101 kVA	0,4	aktif
2	Heating Tunel	101 kVA	0,4	aktif
3	Modul PAL	40 kVA	0,4	aktif
4	Contiflow	40 kVA	0,4	aktif
5	Cooling System	40 kVA	0,4	aktif
6	Modul Fill	5,1 kVA	0,4	aktif
7	Formatic Dusen Sys	5,1 kVA	0,4	aktif
8	Control HS	10,1 kVA	0,4	aktif
9	Linadry	10,1 kVA	0,4	aktif
10	Stretch Wrapper	10,1 kVA	0,4	aktif
11	Linatherm	10,1 kVA	0,4	aktif

12	Synco	16 kVA	0,4	aktif
13	Conveyor Lubricaion	4 kVA	0,4	aktif
14	Pack Conveyor	5,1 kVA	0,4	aktif
15	Network Technology	5,1 kVA	0,4	aktif
16	Packer	40 kVA	0,4	aktif
17	UPS 1	10,1 kVA	0,4	aktif
18	Closure Supply Video	5,1 kVA	0,4	aktif
19	UPS 2	10,1 kVA	0,4	aktif

Tabel 3. 12 Data Beban Panel No. 110 SDP Hotfill (Bus B-SDP-HOTFILL)

No	Deskripsi	Kapasitas	kV	Keterangan
1	Filler and Capper 1	2,9 kVA	0,4	aktif
2	Kaskaden Forderer	2,6 kVA	0,4	aktif
3	Ambar Cooling Unit	16 kVA	0,4	aktif
4	Sleeve Labeller	20 kVA	0,4	aktif
5	Polletizer 1	35,8 kVA	0,4	aktif
6	Stretch Blow Mould MAC	369 kVA	0,4	aktif
7	Tempering Unit Floor	58 kVA	0,4	aktif
8	Cooling System	79,6 kVA	0,4	aktif
9	Tempering Unit	16 kVA	0,4	aktif
10	Warming Unit	32 kVA	0,4	aktif
11	Shrink Wrapper	38,3 kVA	0,4	aktif
12	Thermal Product Treatment	8 kVA	0,4	Tidak aktif
13	Beverage Treatment Tech	61 kVA	0,4	aktif
14	Sleeve Labeller 2	19,8 kVA	0,4	aktif
15	CIP Line II 1	3,8 kVA	0,4	aktif
16	Container Conveyor 1	45 kVA	0,4	aktif
17	Container Conveyor 1	2 kVA	0,4	aktif
18	Drying System OEM4	8 kVA	0,4	aktif

19	Drying System OEM5	8 kVA	0,4	aktif
20	Drying System OEM6	2,6 kVA	0,4	aktif
21	Drying System OEM7	2,6 kVA	0,4	aktif
22	Pack Conveyor 1	15,2 kVA	0,4	aktif
23	Pallet Conveyor 1	11 kVA	0,4	aktif

Tabel 3. 13 Data Beban Reverse Osmosis (Bus B-SDB4)

No	Deskripsi	Kapasitas	kV	Keterangan
1	Reverse Osmosis	181 kVA	0,4	Aktif

Tabel 3. 14 Data Beban AC dan Boiler

No	Deskripsi	Kapasitas	kV	Keterangan
1	AC LV MDB	16 kVA	0,4	Aktif
2	Boiler 10 Ton	25,6 kVA	0,4	Aktif

Tabel 3. 15 Data Beban Panel No. 10 SDB 3 Evacond

No	Deskripsi	Kapasitas	kV	Keterangan
1	Panel DB LL1	6,4 kVA	0,4	Aktif
2	Blower	20 kVA	0,4	Aktif
3	Cooling Tower	32 kVA	0,4	Aktif

Tabel 3. 16 Data Beban Panel No. 196 6 Lightning PET Line

No	Deskripsi	Kapasitas	kV	Keterangan
1	Power Outlet Filling Room	3,2 kVA	0,4	Aktif
2	DB LL1	12,8 kVA	0,4	Aktif
3	DB LL2	12,8 kVA	0,4	Aktif
4	DB LL3	12,8 kVA		
5	DB LL4	12,8 kVA		

3. Panel Bus B-LVMDB-3

Panel ini terbagi menjadi beberapa sub panel, yaitu panel Main Utility dengan data pada Tabel 3.17, panel Main Lighting dengan data pada Tabel 3.18, panel Softener dengan data pada Tabel 3.19, panel WWTP dengan data pada Tabel 3.20, panel SDP SCD Krone dengan data pada Tabel 3.21, panel NH3 Compressor dengan data pada Tabel 3.22 dan panel SDB-2 dengan data pada tabel Tabel 3.23.

Tabel 3. 17 Data Beban Panel No. 162 Main Utility (Bus B-MAIN-UTILITY)

No	Deskripsi	Kapasitas	kV	Keterangan
1	Spare part	40 kVA	0,4	Aktif
2	Cool room	1,6 kVA	0,4	Aktif
3	Boiler 2	16 kVA	0,4	Aktif
4	Main Office	8 kVA	0,4	Aktif
5	Exhaust LP	16 kVA	0,4	Aktif
6	Syrup Making	40 kVA	0,4	Aktif
7	Belt Press	64 kVA	0,4	Aktif

Tabel 3. 18 Data Beban Panel No. 159 Main Lightning (Bus B-MAIN-LIGHTING)

No	Deskripsi	Kapasitas	kV	Keterangan
1	Social facility	16 kVA	0,4	aktif
2	Loading WH2	36 kVA	0,4	aktif
3	Main Security	6.4 kVA	0,4	aktif
4	PAC Supply	6.4 kVA	0,4	aktif
5	PO Locker	6.4 kVA	0,4	aktif
6	LP3	6.4 kVA	0,4	aktif
7	SDP LINE 3	6.4 kVA	0,4	aktif
8	Warehouse 2	6.4 kVA	0,4	aktif
9	Warehouse 1	6.4 kVA	0,4	aktif
10	LP4	10.1 kVA	0,4	aktif
11	LP2	10.1 kVA	0,4	aktif
12	LP1	10.1 kVA	0,4	aktif

Tabel 3. 19 Data Beban Softener (Bus B-SOFTENER)

No	Deskripsi	Kapasitas	kV	Keterangan
1	Water Softener	64 KVA	0,4	Aktif

Tabel 3. 20 Data Beban WWTP (Bus B-MDP-WWTP)

No	Deskripsi	Kapasitas	kV	Keterangan
1	Aerator Equalizatic 1	4 kW	0,4	aktif
2	Aerator Equalizatic 2	4 kW	0,4	aktif
3	Aerator Oxidation 1	15 kW	0,4	aktif
4	Aerator Oxidation 2	15 kW	0,4	aktif
5	Pompa PT1	11 kW	0,4	aktif
6	Pompa PT2	11 kW	0,4	aktif
7	PT2 1	7,5 kW	0,4	aktif
8	PT2 1	7,5 kW	0,4	aktif
9	PT3 1	7,5 kW	0,4	aktif
10	PT3 1	7,5 kW	0,4	aktif
11	Pompa Sludge 1	2,2 kW	0,4	aktif
12	Pompa Sludge 2	2,2 kW	0,4	aktif
13	Pompa Filtrate	3,7 kW	0,4	aktif
14	Pompa Dosing 1	0,36 kW	0,4	aktif
15	Pompa Dosing 1	0,36 kW	0,4	aktif
16	Mixer WWTP	1,5 kW	0,4	aktif
17	Motor Scrapper	3,7 kW	0,4	aktif
18	Lampu Penerangan	5,2 KVA	0,4	aktif

Tabel 3. 21 Data Beban Panel No. 111 SDP CSD Krones (Bus B-CSD-KRONES)

No	Deskripsi	Kapasitas	kV	Keterangan
1	To Filler and Capper 1	2,9 kVA	0,4	aktif
2	To Kaskaden Forderer	2,6 kVA	0,4	aktif
3	To Ambar Cooling Unit	16 kVA	0,4	aktif
4	To Polletizer 1	35,8 kVA	0,4	aktif
5	To Blow Mould	369 kVA	0,4	aktif
6	To tempering Unit Floor	58 kVA	0,4	aktif

7	To Cooling System	79,6 kVA	0,4	aktif
8	Tempering Unit	16 kVA	0,4	aktif
9	To Warming Unit	16 kVA	0,4	aktif
10	To Mixer	40 kVA	0,4	aktif
11	To Tray Packer 1	38,3 kVA	0,4	aktif
12	To Labeller	30,7 kVA	0,4	aktif
13	To Container Conveyor 1	54,7 kVA	0,4	aktif
14	To Drying System	8 kVA	0,4	aktif
15	To Pack Conveyor 1	18,7 kVA	0,4	aktif
16	To Interpid	12,8 kVA	0,4	aktif
17	To New Packer	25,6 kVA	0,4	aktif

Tabel 3. 22 Data Beban NH3-Compressor (Bus B-NH3-COMPRESSOR)

No	Deskripsi	Kapasitas	kV	Keterangan
1	Motor Driver NH-3 1	225 kW	0,4	aktif
2	Motor Driver NH-3 2	225 kW	0,4	aktif
3	Motor Driver NH-3 3	225 kW	0,4	spare
4	Circulating Pump 1	55 kW	0,4	aktif
5	Circulating Pump 2	55 kW	0,4	aktif
6	Circulating Pump 3	55 kW	0,4	spare
7	Pump 1	55 kW	0,4	aktif
8	Pump 2	55 kW	0,4	aktif
9	Pump 3	55 kW	0,4	spare

Tabel 3. 23 Data Beban Panel No. 105 SDB-2 (Bus B-SDB2)

No	Deskripsi	Kapasitas	kV	Keterangan
1	SDB-2	223 KVA	0,4	Aktif

3.3 Pemodelan Sistem

3.3.1 Model Generator

Pada simulasi kestabilan transien dibutuhkan data reaktansi dan time constant yang didapatkan dari datasheet generator. Tabel 3.24 dan

Tabel 3.25 adalah data reaktansi dan time constant dari *Diesel Generator* pada plant PT. Coca Cola Amatil Surabaya Plant.

Tabel 3. 24 Data Impedansi PLTMG (GGCP-1 dan GGCP-2)

Keterangan	Simbol	Impedansi (%)
Direct axis synchronous	X_d	319
Direct axis transient	X_d'	33,0
Direct axis subtransient	X_d''	15,9
Quadrature axis synchronous	X_q	179
Quadrature axis subtransient	X_q''	15,9
Negative sequences	X_2	15,7
Zero sequences	X_0	5,1

Tabel 3. 25 *Time Constant*

Keterangan	Simbol	Time Constant
Transien	T_d'	0,5
Subtransient	T_d''	0,025
Open circuit	T_{d0}'	4,8
Armature	T_a	0,06

3.4 Data Power Quality LVMDP

Pengambilan data dari panel LVMDP yang menyangkut tegangan *supply*, frekuensi, THD-V adalah sebagai berikut

3.4.1 Data Harmonisa

Pengambilan data harmonisa pada system kelistrikan di CCAI Surabaya Plant dilakukan pada bus dominan yang memiliki nilai harmonisa yang besar. Pengambilan data ini dilakukan dengan menggunakan alat monitoring Siemens PAC 4200 yang dapat menampilkan nilai harmonisa pada tiap orde. Siemens PAC 4200 digunakan pada beberapa panel, seperti panel LVMDP L2, Panel SDP Hotfill, Panel SDP NH3, panel LVMDP 1, LVMDP 2, dan LVMDP 3. Sedangkan beberapa panel lainnya menggunakan Siemens PAC 3200 yang hanya menampilkan THD tegangan dan THD arus saja untuk harmonisa.

Data harmonisa yang diambil panel LVMDP 1, LVMDP 2, dan LVMDP 3 ditunjukkan pada Tabel 3.26 untuk harmonisa tegangan fasa ke netralnya, Tabel 3.27 untuk harmonisa tegangan fasa ke fasa dan Tabel 3.28 untuk harmonisa arus *linenya*. Data yang di-*block* merah merupakan nilai IHD yang berada diatas batas toleransi.

Tabel 3. 26 Data harmonisa tegangan fasa ke netral

Orde Harmonisa	LVMDP 1	LVMDP 2	LVMDP 3
3 a-n	4.59	4.68	43.1
3 b-n	5.14	4.34	24.4
3 c-n	4.56	4.85	46.2
5 a-n	9.38	8.33	35.6
5 b-n	8.21	6.89	40.8
5 c-n	9.79	7.72	54.3
7 a-n	4.42	3.67	12.4
7 b-n	4.56	3.48	10.7
7 c-n	5.07	3.98	11.3
9 a-n	1.35	1.40	13.7
9 b-n	1.53	1.31	19.0
9 c-n	2.02	2.24	12.7
11 a-n	2.21	2.93	5.5
11 b-n	2.27	2.50	6.5
11 c-n	1.89	2.16	5.8
13 a-n	1.09	1.28	4.6
13 b-n	1.60	1.74	5.1
13 c-n	1.19	1.28	4.7
15 a-n	0.85	0.88	4.5
15 b-n	1.00	0.86	4.4
15 c-n	0.81	0.91	4.9
17 a-n	1.23	0.77	3.8
17 b-n	0.86	0.70	3.8
17 c-n	1.36	0.79	3.7
19 a-n	0.68	0.68	3.2
19 b-n	1.08	0.84	3.6
19 c-n	0.91	0.71	3.2
21 a-n	0.62	0.65	2.8
21 b-n	0.67	0.59	3.2
21 c-n	0.61	0.65	3.0

23 a-n	0.70	0.56	2.8
23 b-n	0.60	0.52	2.9
23 c-n	0.75	0.58	2.7
25 a-n	0.50	0.53	2.5
25 b-n	1.14	0.49	3.5
25 c-n	0.64	0.53	3.6
27 a-n	0.62	0.43	3.8
27 b-n	0.71	0.45	2.4
27 c-n	0.89	0.43	3.0
29 a-n	0.49	0.46	2.2
29 b-n	0.47	0.39	2.3
29 c-n	0.43	0.49	2.3
31 a-n	0.44	0.44	3.1
31 b-n	0.50	0.39	2.7
31 c-n	0.40	0.44	3.5

Tabel 3. 27 Data harmonisa tegangan fasa ke fasa

Orde Harmonisa	LVMDP 1	LVMDP 2	LVMDP 3
3 a-b	4.7	4.44	22.1
3 b-c	4.5	4.98	28.1
3 c-a	4.4	4.56	53.3
5 a-b	8.8	7.48	38.0
5 b-c	8.5	7.21	54.9
5 c-a	10.0	8.26	39.3
7 a-b	4.2	3.15	11.4
7 b-c	5.0	4.06	11.7
7 c-a	4.7	3.83	12.5
9 a-b	1.4	1.35	18.1
9 b-c	1.3	1.62	16.1
9 c-a	1.2	1.40	11.2
11 a-b	2.5	3.03	5.6
11 b-c	1.8	2.06	6.6
11 c-a	2.0	2.20	5.11
13 a-b	1.4	1.56	4.6
13 b-c	1.5	1.64	5.2
13 c-a	1.0	1.07	4.4
15 a-b	0.9	0.88	4.0

15 b-c	0.8	0.93	4.5
15 c-a	0.8	0.83	4.0
17 a-b	1.1	0.73	3.6
17 b-c	0.7	0.79	4.0
17 c-a	0.5	0.75	4.0
19 a-b	0.8	0.65	3.1
19 b-c	1.0	0.72	3.6
19 c-a	0.9	0.67	3.0
21 a-b	0.6	0.59	2.9
21 b-c	0.6	0.66	3.6
21 c-a	0.6	0.62	3.0
23 a-b	0.6	0.54	2.6
23 b-c	0.5	0.58	3.0
23 c-a	0.6	0.54	2.5
25 a-b	0.8	0.50	2.5
25 b-c	1.0	0.55	3.0
25 c-a	0.5	0.52	2.5
27 a-b	0.7	0.48	2.7
27 b-c	0.6	0.50	4.0
27 c-a	0.9	0.42	2.5
29 a-b	0.4	0.41	2.1
29 b-c	0.4	0.49	2.4
29 c-a	0.5	0.47	2.1
31 a-b	0.4	0.40	2.6
31 b-c	0.5	0.45	2.3
31 c-a	0.4	0.42	2.8

Tabel 3. 28 Data harmonisa arus di masing-masing fasa

Orde Harmonisa	LVMDP 1	LVMDP 2	LVMDP 3
3 a	0.08	0.06	0.06
3 b	0.11	0.05	0.05
3 c	0.14	0.06	0.06
5 a	0.85	0.17	0.66
5 b	0.84	0.16	0.46
5 c	0.65	0.15	0.49
7 a	0.21	0.8	0.18
7 b	0.21	0.10	0.26

7 c	0.24	0.10	0.29
9 a	0.02	0.02	0.03
9 b	0.03	0.02	0.04
9 c	0.02	0.03	0.03
11 a	0.15	0.11	0.10
11 b	0.11	0.10	0.10
11 c	0.11	0.08	0.07
13 a	0.06	0.06	0.06
13 b	0.08	0.08	0.08
13 c	0.11	0.09	0.09
15 a	0.04	0.03	0.03
15 b	0.03	0.02	0.03
15 c	0.04	0.03	0.03
17 a	0.11	0.07	0.09
17 b	0.08	0.06	0.07
17 c	0.07	0.05	0.07
19 a	0.05	0.03	0.04
19 b	0.11	0.06	0.09
19 c	0.07	0.05	0.07
21 a	0.02	0.01	0.03
21 b	0.01	0.01	0.02
21 c	0.01	0.01	0.03
23 a	0.04	0.02	0.04
23 b	0.03	0.01	0.05
23 c	0.03	0.01	0.03
25 a	0.07	0.02	0.03
25 b	0.03	0.03	0.06
25 c	0.01	0.02	0.04
27 a	0.03	0.01	0.02
27 b	0.02	0.01	0.02
27 c	0.02	0.02	0.01
29 a	0.01	0.01	0.03
29 b	0.01	0.01	0.03
29 c	0.01	0.01	0.03
31 a	0.02	0.01	0.02
31 b	0.01	0.01	0.04
31 c	0.01	0.01	0.02

3.4.2 Data Keseluruhan dari Monitoring

Data keseluruhan *power quality* merupakan data yang diambil dari monitoring pada panel LVMDP 1, LVMDP 2, dan LVMDP 3 menggunakan PAC 4200 yang terlihat pada Tabel 3.29.

Tabel 3. 29 Data *power quality* LVMDP

Deskripsi	LVMDP 1	LVMDP 2	LVMDP 3
Tegangan minimum a-b	349 V	339 V	353 V
Tegangan minimum b-c	350 V	340 V	349 V
Tegangan minimum c-a	340 V	350 V	344 V
Tegangan maksimum a-b	434 V	418 V	477 V
Tegangan maksimum b-c	435 V	418 V	478 V
Tegangan maksimum c-a	435 V	416 V	474 V
Frekuensi line minimum	49.12 Hz	45.61 Hz	39.05 Hz
Frekuensi line maksimum	55 Hz	55 Hz	53.09 Hz
THD-V a-b	12	7.7	23
THD-V b-c	10.5	7.6	23.5
THD-V c-a	6.4	9.3	21.9
THD-V a-n	6.9	8	22.2
THD-V b-n	19.8	7.7	23.9
THD-V c-n	14.9	8.8	22.3
Arus RMS maksimum a	2780 A	2000 A	3510 A
Arus RMS maksimum b	3090 A	2170 A	3720 A
Arus RMS maksimum c	3000 A	1980 A	3270 A
Daya (S) maksimum a	624 KVA	449 KVA	784 KVA
Daya (S) maksimum b	679 KVA	488 KVA	822 KVA
Daya (S) maksimum c	649 KVA	450 KVA	724 KVA
Daya (P) maksimum a	554 kW	448 kW	622 kW
Daya (P) maksimum b	603 kW	486 kW	570 kW
Daya (P) maksimum c	562 kW	447 kW	512 kW
Daya (Q) maksimum a	488 kVAr	144 kVAr	580 kVAr
Daya (Q) maksimum b	505 kVAr	130 kVAr	638 kVAr
Daya (Q) maksimum c	477 kVAr	131 kVAr	579 kVAr
Total daya (S) maksimum	1952 kVA	1384 kVA	2330 kVA
Total daya (P) maksimum	1714 kW	1387 kW	1680 kW
Total daya (Q) maksimum	1469 kVAr	875 kVAr	1797 kVAr

[Halaman ini sengaja dikosongkan]

BAB IV

ANALISA HARMONISA DAN PERENCANAAN FILTER RCL PEREDAM HARMONISA

Sumber utama harmonisa di CCAI Surabaya Plant berasal dari beberapa equipment seperti line 2, line 5, dan NH3 Compressor. Data yang didapatkan dari PAC 4200 pada panel SDP Panel Krones Line 2, SDP Panel Krones Line 5 dan Panel NH3 Compressor pada tabel 3.27 merupakan data yang digunakan sebagai referensi dalam analisa harmonisa pada sistem kelistrikan di CCAI Surabaya Plant. Pemilihan data ini memiliki alasan yaitu pada tabel 3.26 merupakan data harmonisa perorde dari fasa ke netral. Data ini tidak terlalu dipergunakan karena nilai distorsi antara tegangan fasa ke netral tidak banyak digunakan dalam operasi pabrik yang umumnya menggunakan driver dan peralatan kontrol pada sistem tiga fasa. sedangkan nilai tegangan yang umum digunakan diperusahaan adalah antar fasa sehingga nilai ini yang digunakan. Pada tabel 3.28 data harmonisa arus ini tidak dipergunakan karena berada dalam angka yang direkomendasikan seperti pada tabel 2.8 yaitu harmonisa perorde dibawah orde ke-11 adalah lebih kecil 4% dan total THD adalah dibawah 5%. Sehingga data tersebut tidak dipermasalahan dalam bagian ini.

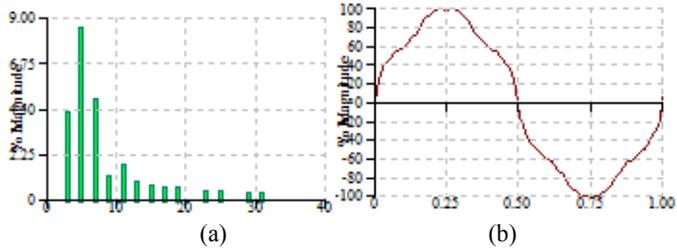
Data tersebut dimasukkan kedalam sistem melalui simulasi pada ETAP 11.0 dan diletakkan pada beban-beban yang didukung peralatan pembangkit harmonisa. Nilai-nilai tersebut akan diredam menggunakan filter RLC pada bus dimana beban ditempatkan.

Filter RLC yang digunakan adalah filter RLC *single tuned* seperti pada gambar 2.5.

Berikut adalah data harmonisa fasa ke fasa:

1. LVMDP 1

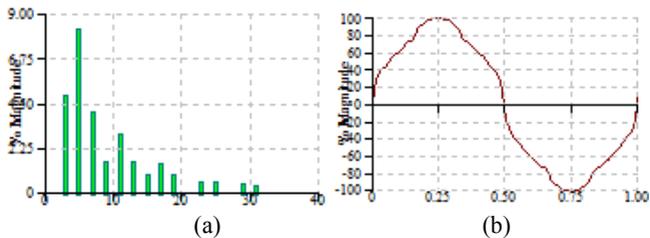
Data pada tabel 3.26 dimasukkan dalam *library harmonic* pada ETAP 11.0 untuk mendapatkan model gelombang harmonisa pada LVMDP 1 seperti yang terlihat pada Gambar 4.1



Gambar 4. 1 Harmonisa pada LVMDP 1 (a) orde harmonisa (b) gelombang harmonisa

2. LVMDP 2

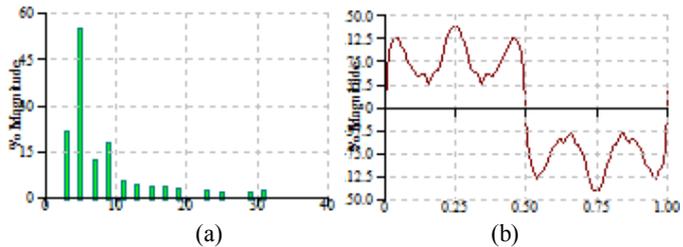
Data pada tabel 3.27 dimasukkan dalam *library harmonic* pada ETAP 11.0 untuk mendapatkan model gelombang harmonisa pada LVMDP 2 seperti yang terlihat pada Gambar 4.2.



Gambar 4. 2 Harmonisa pada LVMDP 2 (a) orde harmonisa (b) gelombang harmonisa

3. LVMDP 3

Data pada tabel 3.27 dimasukkan dalam *library harmonic* pada ETAP 11.0 untuk mendapatkan model gelombang harmonisa pada LVMDP 3 seperti yang terlihat pada Gambar 4.3.



Gambar 4. 3 Harmonisa pada LVMDP 3 (a) orde harmonisa (b) gelombang harmonisa

4.1 Simulasi Data Pada ETAP 11.0

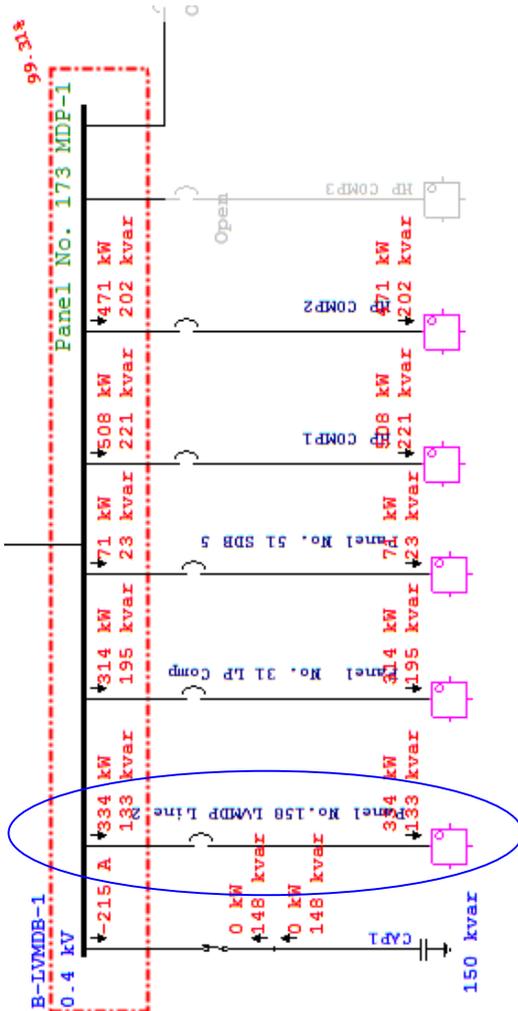
Data yang sudah tersedia pada *library* ETAP dimasukkan pada setiap bagian pada sistem berdasarkan data yang diperoleh. Sistem kelistrikan di CCAI Surabaya Plant diintegrasikan berdasarkan operasi kerja yang selama ini berlangsung. Dimana sumber kelistrikan dari GGCP 1 dan GGCP 2 yang masing-masing berkapasitas 2280 kW dalam mode operasi 80% dan juga *grid* PLN dengan kapasitas 3450 KVA.

Nilai harmonisa tersebut diwakilkan ke salah satu bus yang mewakili bus utama atau *feeder* sistem. Untuk nilai harmonisa pada LVMDP 1 diwakilkan oleh LVMDP Line 2. Pada LVMDP Line 2 paling banyak terdapat driver motor dengan menggunakan VLT 2800. Untuk nilai harmonisa pada LVMDP 2 diwakilkan oleh SDP Hotfill Line 5. Pada SDP Hotfill Line 5 lebih banyak terdapat drive motor dibandingkan SDP CSD (*carbonate soft drink*) hal ini disebabkan proses *hotfill* lebih panjang dibandingkan dengan CSD pada Line 3 dan 4. Untuk LVMDP 3 diwakilkan oleh SDP NH3 Compressor. Beban besar dan sistem pengoperasian yang menggunakan VSD terdapat pada ketiga *NH3 compressor* pada bus ini.

4.1.1 LVMDP 1

Nilai harmonisa pada LVMDP 1 diwakilkan dari bus yang berbeban dominan dalam menghasilkan harmonisa yaitu LVMDP Line 2 seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.4 dibawah. Meskipun bukan yang memiliki beban paling besar namun *driver* yang sangat banyak terdapat pada bus LVMDP Line 2 diantaranya *driver conveyor*, *driver equipment bottle inspection (EBI)*, *driver bottle washer* sebagai yang

dominan dengan beban besar. Sedangkan yang lainnya tidak menggunakan banyak *driver*.



Gambar 4. 4 Pembagian beban pada bus LVMDP 1

Pada bus LVMDP Line 2, pusat harmonisa terletak pada *bottle conveyor*. Sehingga pada beban ini diberi VFD (*variable frequency drive*)

dengan rating 100 kW yaitu nilai diatas beban conveyor yang sebesar 93,6 kVA. Gambar 4.5 adalah pengisian data rating pada ETAP 11.0. Pada Gambar 4.6 menunjukkan besar nilai dari VFD tersebut dan besar harmonisa yang dimasukkan ke dalamnya dari *library* yang sudah dibuat sebelumnya. Setelah data tersebut dimasukkan maka diperoleh data simulasi pada Tabel 4.1.

Tabel 4. 1 Simulasi *Harmonic Load Flow di feeder 1 (tegangan)*

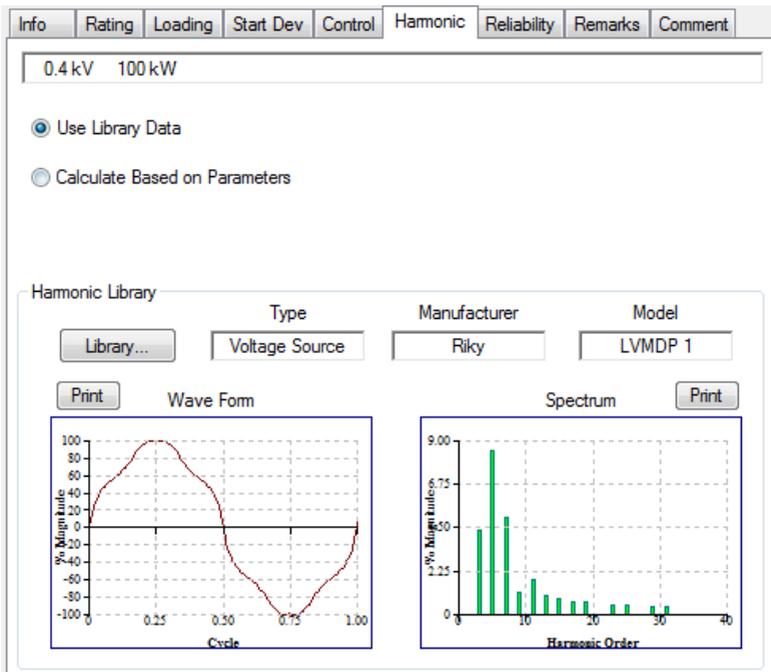
Bus	Tegangan (kV)		
	Rating	RMS	THD (%)
LVMDP 1	0,4	0,4	11,91
LVMDP L2	0,4	0,4	11,91
LP Comp	0,4	0,4	11,66
SDP 5	0,4	0,4	11,88
HP Comp 1	0,4	0,4	11,67
HP Comp 2	0,4	0,4	11,67

Dari data diatas diketahui bahwa pemasangan sumber harmonisa pada beban *conveyor* dapat mewakili besar harmonisa yang timbul pada LVMDP 1. Data tersebut tidak jauh berbeda dari data harmonisa tertinggi yang pernah tercatat pada PAC 4200 pada LVMDP 1 pada Tabel 3.28 yaitu 12 %.



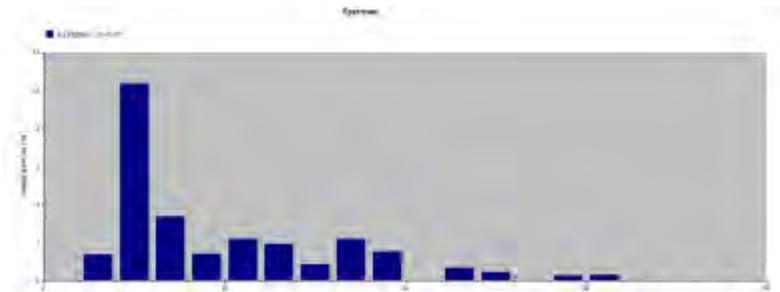
Gambar 4. 5 Rating VFD (*Variabel Frequency Drive*) pada beban *Conveyor*

Dari data simulasi pada Tabel 4.1 besar harmonisa tegangan berada diluar batas toleransi sesuai standard IEEE Std.519-1995 dimana nilai THD (%) pada tegangan bus dibawah 69 kV harus berada dibawah 5% dengan distorsi harmonisa perorde dibawah 3%. Keadaan ini berbahaya dan dapat mengakibatkan kerusakan pada peralatan listrik dan timbulnya kerusakan pada kapasitor bank.



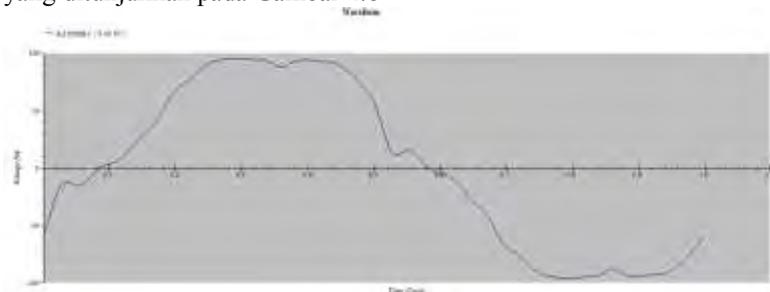
Gambar 4. 6 Masukan harmonisa pada VFD pada beban *conveyor*

Dari masukan harmonisa pada Gambar 4.6 dapat terlihat efek yang dihasilkan pada Gambar 4.7 dimana besar harmonisa pada orde ke-5 meningkat sedangkan orde ke-3 mengalami penurunan. Sedangkan untuk orde yang lain sesuai dengan nilai masukannya.



Gambar 4. 7 Orde harmonisa pada bus LVMDP 1

Dengan orde harmonisa seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.7 maka terjadi distorsi gelombang sinyal sinusoidal fundamental seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.8

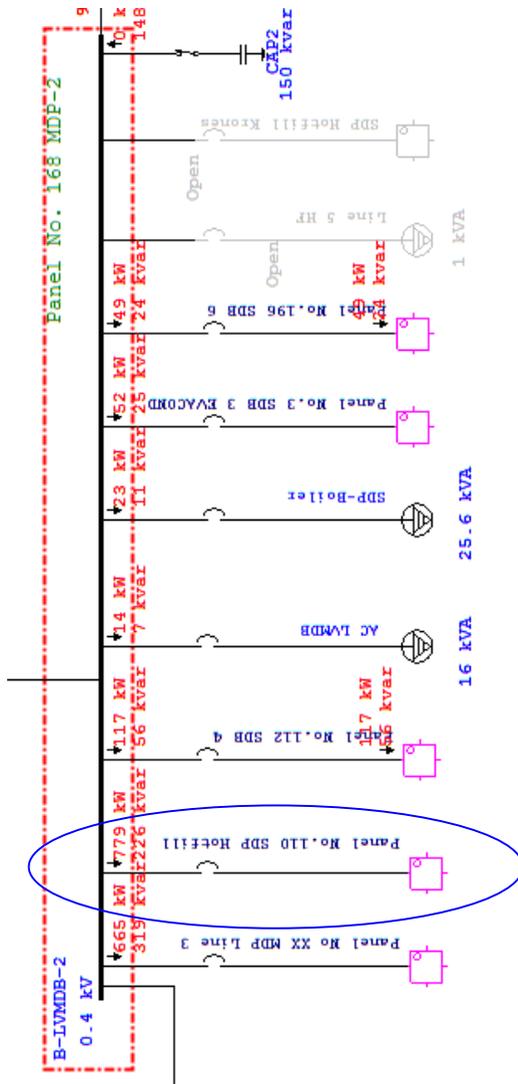


Gambar 4. 8 Distorsi sinyal pada LVMDP 1

Model harmonisa pada Gambar 4.7 dan Gambar 4.8 terimbas pada kapasitor bank 1 yang dapat menimbulkan kerusakan.

4.1.2 LVMDP 2

Nilai harmonisa pada LVMDP 2 diwakilkan dari bus yang berbeban dominan dalam menghasilkan harmonisa yaitu SDP Hotfill seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.9 dibawah. Kecanggihan teknologi yang digunakan dalam pengeoperasian Line 5 memang tinggi. Sistem kontrol yang digunakan semakin banyak dan sensitif. Sehingga bus SDP Hotfill dianggap paling tepat untuk mewakili harmonisa yang terdapat pada LVMDP 2



Gambar 4. 9 Pembagian beban pada bus LVMDP 2

Pada bus SDP Hotfill, pusat harmonisa terletak pada *blowmould*. Sehingga pada beban ini diberi VFD (*variable frequency drive*) dengan rating 369 kVA yaitu nilai diatas atau sama dengan beban *blowmould*

yang sebesar 369 kVA. Gambar 4.10 adalah pengisian data rating pada ETAP 11.0. Pada Gambar 4.11 menunjukkan besar nilai dari VFD tersebut dan besar harmonisa yang dimasukkan ke dalamnya dari *library* yang sudah dibuat sebelumnya. Setelah data tersebut dimasukkan maka diperoleh data simulasi pada Tabel 4.2.

Tabel 4. 2 Simulasi *Harmonic Load Flow* di *feeder 2* (tegangan)

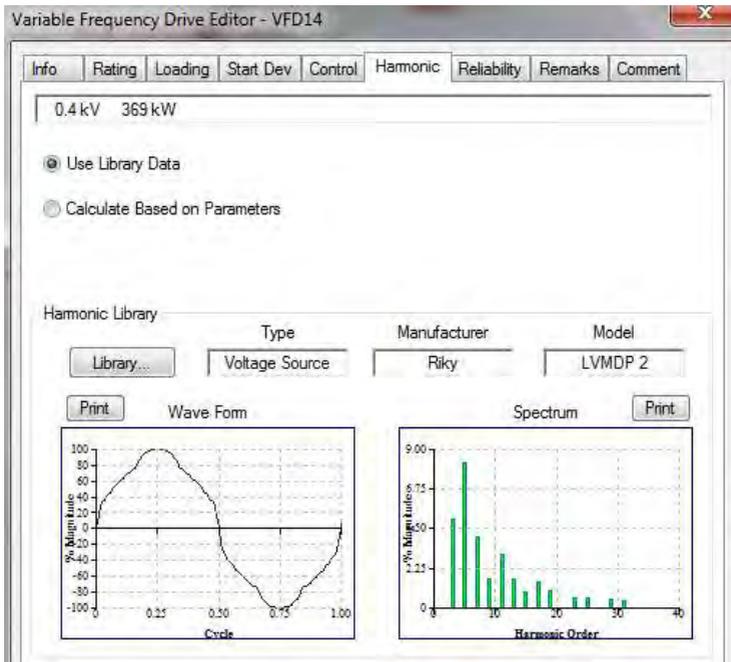
Bus	Tegangan (kV)		
	Rating	RMS	THD (%)
LVMDP 2	0,4	0,4	12,05
SDP L3	0,4	0,4	12,01
SDP Krones L3	0,4	0,4	11,99
SDP Hotfill	0,4	0,4	12,05
SDP 4	0,4	0,4	12,00
SDP-Evacond	0,4	0,4	12,04
SDB 6	0,4	0,4	12,04

Dari data diatas diketahui bahwa pemasangan sumber harmonisa pada beban *blowmould* dapat mewakili besar harmonisa yang timbul pada LVMDP 2. Data tersebut tidak jauh berbeda dari data harmonisa tertinggi yang pernah tercatat pada PAC 4200 pada LVMDP 2 pada Tabel 3.28 yaitu 10 %.



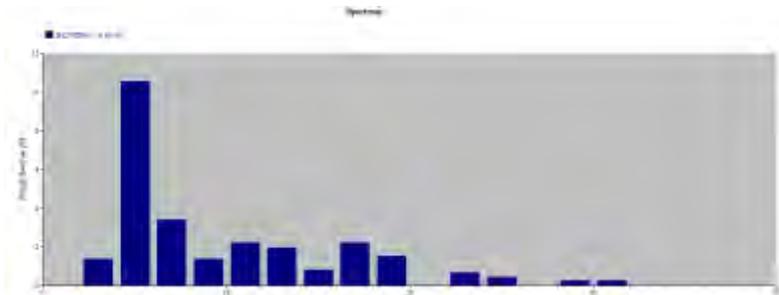
Gambar 4. 10 Rating VFD (*Variabel Frequency Drive*) pada beban *Conveyor*

Dari data simulasi pada Tabel 4.2 besar harmonisa tegangan berada diluar batas toleransi sesuai standard IEEE Std.519-1995 dimana nilai THD (%) pada tegangan bus dibawah 69 kV harus berada dibawah 5% dengan distorsi harmonisa perorde dibawah 3%. Keadaan ini berbahaya dan dapat mengakibatkan kerusakan pada peralatan listrik dan timbulnya kerusakan pada kapasitor bank.



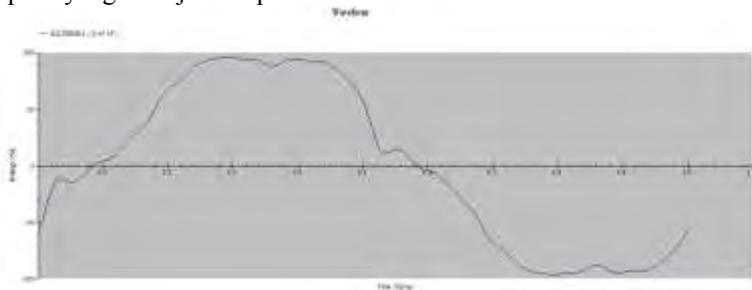
Gambar 4. 11 Masukan harmonisa pada VFD pada beban *blowmould*

Dari masukan harmonisa pada Gambar 4.11 dapat terlihat efek yang dihasilkan pada Gambar 4.12 dimana besar harmonisa pada orde ke-5 meningkat sedangkan orde ke-3 mengalami penurunan. Sedangkan untuk orde yang lain sesuai dengan nilai masukannya.



Gambar 4.12 Orde harmonisa pada bus LVMDP 2

Dengan orde harmonisa seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.12 maka terjadi distorsi gelombang sinyal sinusoidal fundamental seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.13



Gambar 4.13 Distorsi sinyal pada LVMDP 2

4.1.3 LVMDP 3

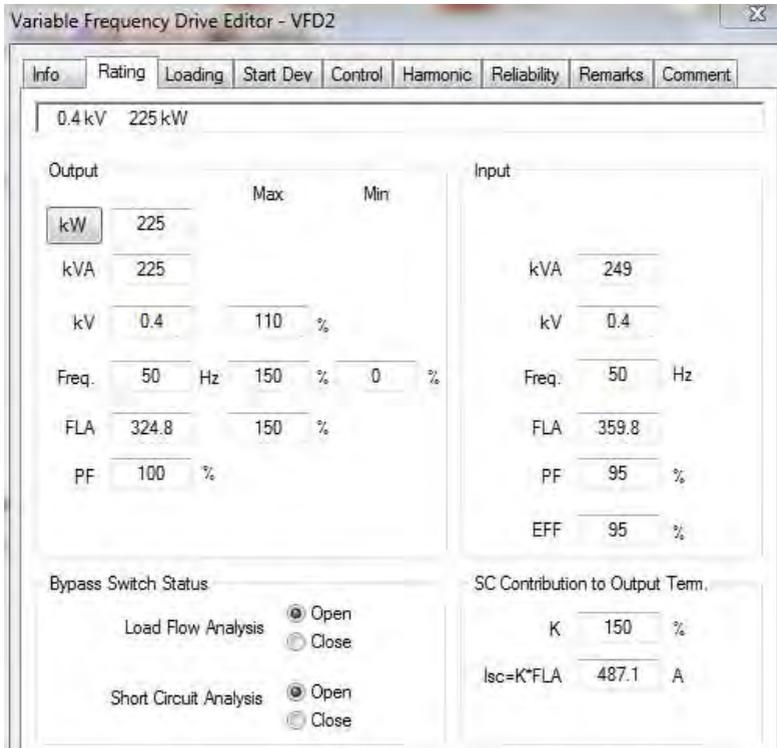
Nilai harmonisa pada LVMDP 3 diwakilkan dari bus yang berbeban dominan dalam menghasilkan harmonisa yaitu SDP NH3 Comp seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.14 dibawah. Tiga buah kompresor pendingin yaitu *NH3 Compressor* menggunakan *drive* dan VSD pada sistem pengoperasiannya. Sehingga bagian ini yang menjadi penyumbang utama harmonisa.

frequency drive) dengan rating 225 kVA yaitu nilai diatas atau sama dengan beban *motor driver NH3 Compressor* yang sebesar 225 kW. Gambar 4.15 adalah pengisian data rating pada ETAP 11.0. Pada Gambar 4.16 menunjukkan besar nilai dari VFD tersebut dan besar harmonisa yang dimasukkan ke dalamnya dari *library* yang sudah dibuat sebelumnya. Setelah data tersebut dimasukkan maka diperoleh data simulasi pada Tabel 4.3.

Tabel 4. 3 Simulasi *Harmonic Load Flow* di *feeder 3* (tegangan)

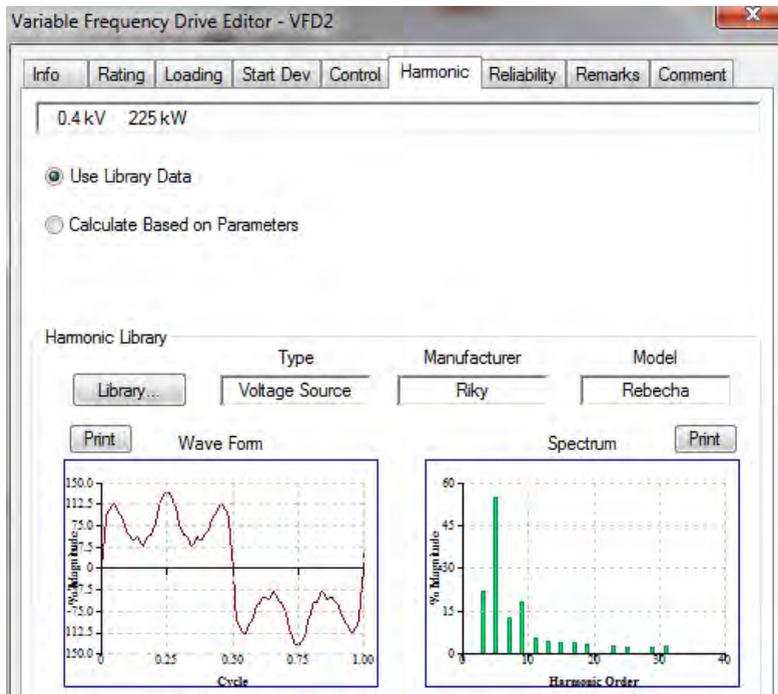
Bus	Tegangan (kV)		
	Rating	RMS	THD (%)
LVMDP 3	0,4	0,4	13,43
B-Main Utility	0,4	0,4	13,34
B-Main Lighting	0,4	0,4	13,34
B-Softener	0,4	0,4	13,34
B-MDP-WWTP	0,4	0,4	13,27
B-MDP-Ex-L1	0,4	0,4	13,35
B-CSD-Krones	0,4	0,4	13,41
SDP-NH3	0,4	0,4	13,43
SDP 2	0,4	0,4	13,43
Cap 3	0,4	0,4	13,43

Dari data diatas diketahui bahwa pemasangan sumber harmonisa pada beban *motor driver NH3 compressor* dapat mewakili besar harmonisa yang timbul pada LVMDP 3. Data tersebut tidak jauh berbeda dari data harmonisa tertinggi yang pernah tercatat pada PAC 4200 pada LVMDP 3 pada Tabel 3.28 yaitu 21,02 %.



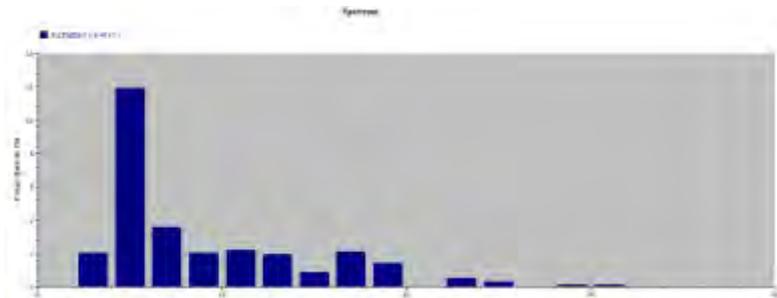
Gambar 4. 15 Rating VFD (*Variabel Frequency Drive*) pada beban *motor driver NH3 compressor*

Dari data simulasi pada Tabel 4.3 besar harmonisa tegangan berada diluar batas toleransi sesuai standard IEEE Std.519-1995 dimana nilai THD (%) pada tegangan bus dibawah 69 kV harus berada dibawah 5% dengan distorsi harmonisa perorde dibawah 3%. Keadaan ini berbahaya dan dapat mengakibatkan kerusakan pada peralatan listrik dan timbulnya kerusakan pada kapasitor bank.



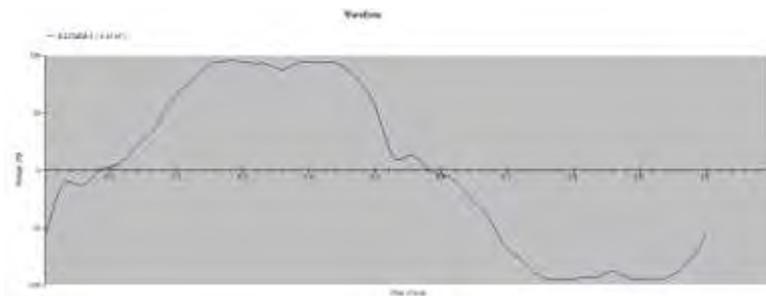
Gambar 4. 16 Masukan harmonisa pada VFD pada beban *blowmould*

Dari masukan harmonisa pada Gambar 4.16 dapat terlihat efek yang dihasilkan pada Gambar 4.17 dimana besar harmonisa pada setiap orde mengalami penurunan dan perubahan. Hal ini disebabkan karena pemasangan kabel pada beban ke bus memiliki nilai induktansi yang bersifat redaman untuk harmonisa. Semakin panjang kabel dari beban ke bus yang membawa harmonisa maka akan semakin besar redaman harmonisanya.



Gambar 4.17 Orde harmonisa pada bus LVMDP 3

Dengan orde harmonisa seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.17 maka terjadi distorsi gelombang sinyal sinusoidal fundamental seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.18



Gambar 4.18 Distorsi sinyal pada LVMDP 3

4.2 Hasil dan Analisa

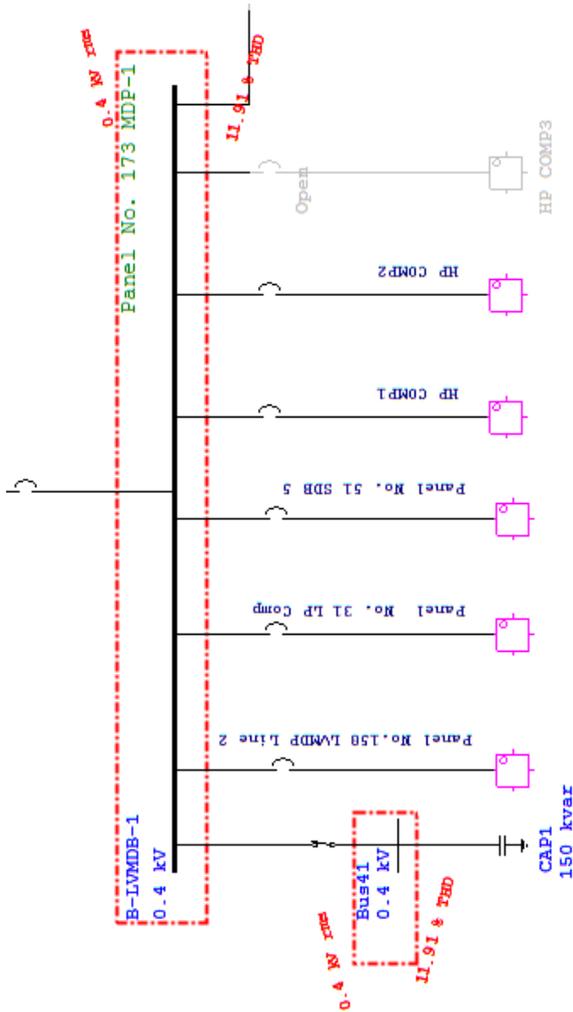
Setelah memasukkan semua parameter pada SLD (*Single Line Diagram*) dan khususnya untuk analisa harmonisa, maka didapatkan data harmonisa dari tiap bus yang ditampilkan pada Tabel 4.4.

Tabel 4. 4 Simulasi *Harmonic Load Flow* keseluruhan (tegangan)

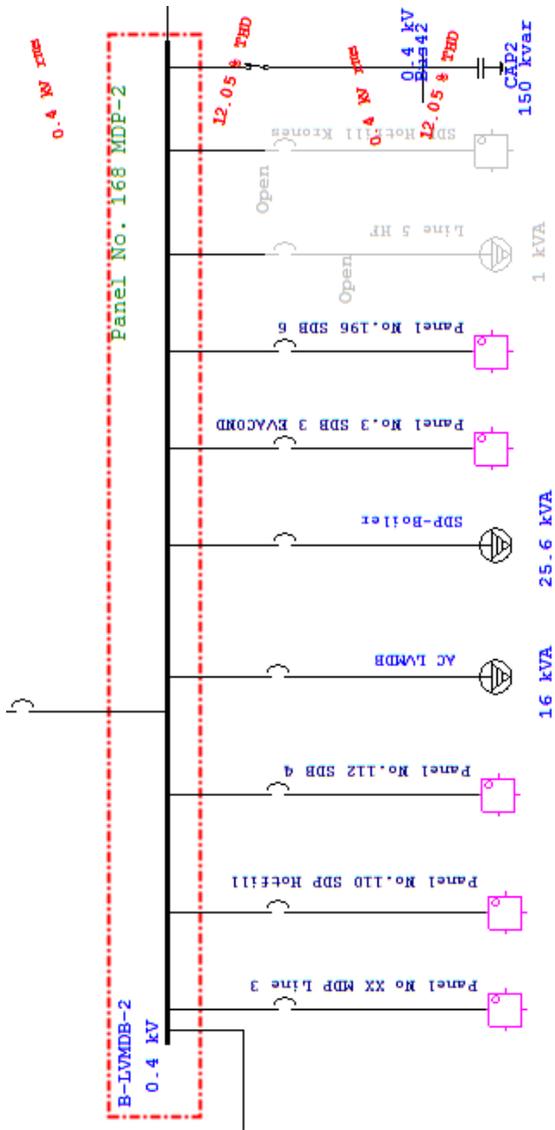
Bus	THD (%)		
	THD (%)	Standart	keterangan
LVMDP 1	11,91	5	Bermasalah
LVMDP L2	11,91	5	Bermasalah
LP Comp	11,66	5	Bermasalah
SDP 5	11,88	5	Bermasalah
HP Comp 1	11,67	5	Bermasalah
HP Comp 2	11,67	5	Bermasalah
LVMDP 2	12,05	5	Bermasalah
SDP L3	12,01	5	Bermasalah
SDP Krones L3	11,99	5	Bermasalah
SDP Hotfill	12,05	5	Bermasalah
SDP 4	12,00	5	Bermasalah
SDP-Evacond	12,04	5	Bermasalah
SDB 6	12,04	5	Bermasalah
LVMDP 3	13,43	5	Bermasalah
B-Main Utility	13,34	5	Bermasalah
B-Main Lighting	13,34	5	Bermasalah
B-Softener	13,34	5	Bermasalah
B-MDP-WWTP	13,27	5	Bermasalah
B-MDP-Ex-L1	13,35	5	Bermasalah
B-CSD-Krones	13,41	5	Bermasalah
SDP-NH3	13,43	5	Bermasalah
SDP 2	13,43	5	Bermasalah
Cap LVMDP1	11,91	5	Bermasalah
Cap LVMDP2	12,05	5	Bermasalah
Cap LVMDP3	13,43	5	Bermasalah

Dari tabel 4.4 diatas diketahui semua bus bermasalah, hal tersebut merupakan imbas dari sumber harmonisa yang berada pada LVMDP Line 2, SDP Hotfill dan SDP NH3. Bus yang memiliki beban-beban penghasil harmonisa ini menimbulkan efek yang besar ke seluruh bus pada sistem kelistrikan di CCAI Surabaya Plant. Khususnya pada LVMDP 1, LVMDP 2 dan LVMDP 3 yang memilki kapasitor bank. Dengan nilai THD pada bus yang tinggi keadaan kapasitor bank berbahaya. Gambar 4.19 menunjukkan besar THD yang terdapat pada LVMDP 1, LVMDP 2, dan LVMDP 3 beserta besar THD pada bus kapasitor .

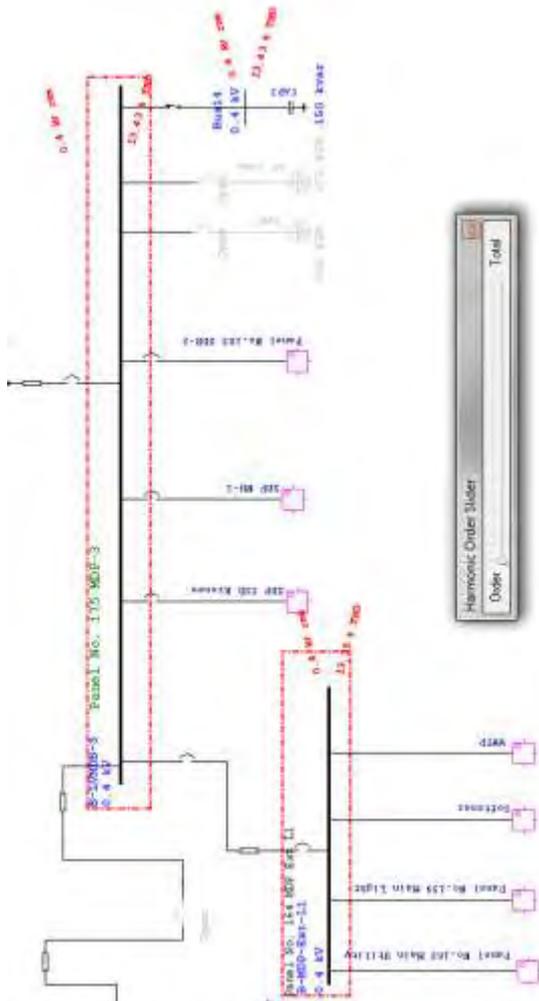
Selain dari besar THD yang tampil pada hasil simulasi, besar tegangan rms pada bus juga ditampilkan, hal ini bermanfaat untuk meninjau bus dalam keadaan aman tidak ada dalam level *over voltage*.



(a) THD pada bus LV-MDP 1 dan kapasitor bank 1



(b) THD pada bus LVMDP 2 dan kapasitor bank 2



(c) THD pada bus LVMDP 3 dan kapasitor bank 3

Gambar 4. 19 Besar THD pada bus LVMDP utama dan kapasitor bank

Disamping itu beban kapasitor di setiap kapasitor bank perlu diperhatikan. Tabel 4.5 menunjukkan beban kapasitor dan tegangan terminal pada masing-masing kapasitor.

Tabel 4. 5 Profil kapasitor bank pada sistem CCAI Surabaya Plant

Bus	Rating	Rated KV	kVAr	Amp	%Loading	V _{terminal}
CAP LVMDP1	-150 kVAr	0,4	-148	215,3	99,47	99,47
CAP LVMDP2	-150 kVAr	0,4	-148	215,6	99,59	99,59
CAP LVMDP 3	-150 kVAr	0,4	-148	215,9	99,71	99,71

Dari tabel 4.5 % tegangan terminal pada masing-masing kapasitor masih berada di bawah batas toleransi, dimana batas toleransi adalah 110% dari tegangan normal.

4.3 Rancangan Filter RCL

Berdasarkan hasil *harmonic load flow* pada bagian sebelumnya. Dibutuhkan filter harmonisa pada sistem untuk mengamankan sistem dari harmonisa. Dari data yang didapatkan semua bus mengalami masalah harmonisa. Namun itu tidak berarti bahwa semua bus perlu filter harmonisa.

Penggunaan filter pasif pada tempat yang tepat, terutama pada daerah yang dekat dengan sumber pembangkit harmonisa sehingga arus harmonisa terjerat di sumber dan mengurangi penyebaran arusnya. Dalam kasus ini penempatan filter untuk meredam harmonisa pada keseluruhan sistem dipasang pada sumber utama harmonisa yaitu LVMDP Line 2, SDP Hotfill dan SDP NH3. LVMDP Line 2 merupakan sumber harmonisa pada satu aliran ke pusat LVMDP 1. Total beban yang terdapat pada LVMDP Line 2 adalah 210 kVA dengan $\cos \emptyset$ sebesar 0,95. Hal ini memang tidak akan membawa perubahan yang besar dibandingkan dengan pemasangan filter pada SDP Hotfill dan yang paling diharapkan adalah redaman pada filter yang akan dipasang pada SDP NH3. Pada SDP Hotfill total beban terpasang adalah sebesar 812 kVA dengan $\cos \emptyset$ sebesar 0,90. Pada SDP NH3 total yang terpasang adalah 886 kVA dengan $\cos \emptyset$ sebesar 0,85.

Dengan pertimbangan diatas maka perancangan filter akan dimulai dari yang memiliki konstribusi yang paling besar yaitu mulai dari pemasangan pada SDP NH3 kemudian SDP hotfill dan yang terakhir adalah pemasangan pada LVMDP Line 2.

4.3.1 Perhitungan Spesifikasi Filter pada SDP NH3

Perencanaan filter R, C dan L atau filter pasif pada bus SDP NH3 adalah filter *single tuned* pada orde ke-5, karena dengan orde ke-5 saja dapat meredam besar orde harmonisa yang tinggi. Untuk menentukan nilai C (kapasitor) pada filter diperlukan pendekatan pada *power factor* dari beban yang menghasilkan harmonisa yaitu 0,85 ke 1. Juga memperhitungkan besar beban penghasil harmonisa, yaitu:

Total daya reaktif 3 fasa:

$$\Delta Q = S(\sin(\cos^{-1}f)) = 2790 \text{ kVA} (\sin(\cos^{-1}0,85))$$

$$\Delta Q = 2790(\sin 31,79) = 1470 \text{ kVAR}$$

Total daya reaktif 1 fasa:

$$\Delta Q = \frac{1470 \text{ kVAR}}{3} = 490 \text{ kVAR}$$

Untuk *Single tuned filter* orde ke-5 cukup menggunakan 268 kVAR sehingga

Nilai Kapasitor (C):

Filter harmonisa terpasang pada 0,4 kV tiga fasa atau 0,23kV satu fasa dengan frekuensi dasar adalah 50 Hz, sehingga:

$$\Delta Q = \frac{V_{1\text{fasa}}^2}{X_C} = V_{1\text{fasa}}^2 \cdot \omega_0 C$$

$$C = \frac{\Delta Q}{\omega_0 \cdot V_{1\text{fasa}}^2} = \frac{268,46 \times 10^{-3}}{(2\pi 50) \times 0,23^2}$$

$$C = \frac{268,46 \times 10^{-3}}{(2 \times 3,14 \times 50) \times 5,29 \times 10^{-2}} = \frac{268,46 \times 10^{-3}}{16,611} \text{ Farad}$$

$$C = 16,17 \text{ mF} = 16173,6 \mu\text{F}$$

Nilai Induktor (L):

Fokus perencanaan filter adalah *single tuned* pada orde ke-5. Sehingga setelan frekuensi dibuat pada nilai $5 \times 50 \text{ Hz} = 250 \text{ Hz}$. Peredaman frekuensi harmonisa harus memenuhi syarat dari penggunaan komponen kapasitor dan induktor. Dibutuhkan juga komponen resistor yang bernilai sangat kecil untuk mengalirkan arus harmonisa ke bumi.

$$X_L = X_C = X_0$$

$$\omega_n L = \frac{1}{\omega_n C}$$

$$L = \frac{1}{(\omega_n)^2 C} = \frac{1}{(2\pi \cdot 250)^2 \times 16173,6 \times 10^{-6}} = 2,51 \times 10^{-5}$$

$$X_L = \omega_0 L = 2\pi \cdot 50 (2,51 \times 10^{-5}) = 0,0078814 \Omega$$

Nilai resistor (R):

Filter quality factor (Q) untuk filter *single tuned* dipilih antara 30 dan 60. Dalam perencanaan filter ini nilai Q dipilih 30, sehingga nilai resistor adalah sebagai berikut:

$$Q = \frac{X_0}{R} = \frac{X_L}{R}$$

$$R = \frac{X}{Q} = \frac{0,0078814}{30} = 0,000263 \Omega$$

4.3.2 Perhitungan Spesifikasi Filter pada SDP Hotfill

Perencanaan filter R, C dan L atau filter pasif pada bus SDP Hotfill adalah filter *single tuned* pada orde ke-5, karena dengan orde ke-5 saja dapat meredam besar orde harmonisa yang tinggi. Untuk menentukan nilai C (kapasitor) pada filter diperlukan pendekatan pada *power factor* dari beban yang menghasilkan harmonisa yaitu 0,90 ke 1. Juga memperhitungkan besar beban penghasil harmonisa, yaitu:

Total daya reaktif 3 fasa:

$$\Delta Q = S (\sin(\cos^{-1}f)) = 1406 \text{ kVA} (\sin(\cos^{-1}0,90))$$

$$\Delta Q = 1406 (\sin 25,84) = 613,05 \text{ kVAR}$$

Total daya reaktif 1 fasa:

$$\Delta Q = \frac{613,05 \text{ kVAR}}{3} = 204,35 \text{ kVAR}$$

Nilai Kapasitor (C):

Filter harmonisa terpasang pada 0,4 kV tiga fasa atau 0,23kV satu fasa dengan frekuensi dasar adalah 50 Hz, sehingga:

$$\Delta Q = \frac{V_{1\text{fasa}}^2}{X_C} = V_{1\text{fasa}}^2 \cdot \omega_0 C$$

$$C = \frac{\Delta Q}{\omega_0 \cdot V_{1\text{fasa}}^2} = \frac{204,35 \times 10^{-3}}{(2\pi 50) \times 0,23^2}$$

$$C = \frac{204,35 \times 10^{-3}}{(2 \times 3,14 \times 50) \times 5,29 \times 10^{-2}} = \frac{204,35 \times 10^{-3}}{16,611} \text{ Farad}$$

$$C = 12,302 \text{ mF} = 12302,8 \mu\text{F}$$

Nilai Induktor (L):

Fokus perencanaan filter adalah *single tuned* pada orde ke-5. Sehingga setelan frekuensi dibuat pada nilai $5 \times 50 \text{ Hz} = 250 \text{ Hz}$. Peredaman frekuensi harmonisa harus memenuhi syarat dari penggunaan komponen kapasitor dan induktor. Dibutuhkan juga komponen resistor yang bernilai sangat kecil untuk mengalirkan arus harmonisa ke bumi.

$$X_L = X_C = X_0$$

$$\omega_n L = \frac{1}{\omega_n C}$$

$$L = \frac{1}{(\omega_n)^2 C} = \frac{1}{(2\pi \cdot 250)^2 \times 12302,8 \times 10^{-6}} = 3,303 \times 10^{-5}$$

$$X_L = \omega_0 L = 2\pi \cdot 50 (3,303 \times 10^{-5}) = 0,01037 \Omega$$

Nilai resistor (R):

Filter quality factor (Q) untuk filter *single tuned* dipilih antara 30 dan 60. Dalam perencanaan filter ini nilai Q dipilih 30, sehingga nilai resistor adalah sebagai berikut:

$$Q = \frac{X_0}{R} = \frac{X_L}{R}$$

$$R = \frac{X}{Q} = \frac{0,01037}{30} = 0,000345 \Omega$$

4.3.3 Perhitungan Spesifikasi Filter pada LVMDP Line 2

Perencanaan filter R, C dan L atau filter pasif pada bus LVMDP Line 2 adalah filter *single tuned* pada orde ke-5, karena dengan orde ke-5 saja dapat meredam besar orde harmonisa yang tinggi. Untuk menentukan nilai C (kapasitor) pada filter diperlukan pendekatan pada *power factor* dari beban yang menghasilkan harmonisa yaitu 0,95 ke 1. Juga memperhitungkan besar beban penghasil harmonisa, yaitu:

Total daya reaktif 3 fasa:

$$\Delta Q = S(\sin(\cos^{-1}f)) = 1345 \text{ kVA} (\sin(\cos^{-1}0,95))$$

$$\Delta Q = 1345(\sin 18,19) = 420 \text{ kVAR}$$

Total daya reaktif 1 fasa:

$$\Delta Q = \frac{420 \text{ kVAR}}{3} = 140 \text{ kVAR}$$

Untuk *single tuned filter 5th orde* cukup menggunakan 37,86 kVAR

Nilai Kapasitor (C):

Filter harmonisa terpasang pada 0,4 kV tiga fasa atau 0,23kV satu fasa dengan frekuensi dasar adalah 50 Hz, sehingga:

$$\Delta Q = \frac{V_{1\text{fasa}}^2}{X_C} = V_{1\text{fasa}}^2 \cdot \omega_0 C$$

$$C = \frac{\Delta Q}{\omega_0 \cdot V_{1\text{fasa}}^2} = \frac{37,86 \times 10^{-3}}{(2\pi 50) \times 0,23^2}$$

$$C = \frac{37,86 \times 10^{-3}}{(2 \times 3,14 \times 50) \times 5,29 \times 10^{-2}} = \frac{37,86 \times 10^{-3}}{16,611} \text{ Farad}$$

$$C = 2,279 \text{ mF} = 2279,10 \mu\text{F}$$

Nilai Induktor (L):

Fokus perencanaan filter adalah *single tuned* pada orde ke-5. Sehingga setelan frekuensi dibuat pada nilai $5 \times 50 \text{ Hz} = 250 \text{ Hz}$. Peredaman frekuensi harmonisa harus memenuhi syarat dari penggunaan komponen kapasitor dan induktor. Dibutuhkan juga koponen resistor yang bernilai sangat kecil untuk mengalirkan arus harmonisa ke bumi.

$$X_L = X_C = X_0$$

$$\omega_n L = \frac{1}{\omega_n C}$$

$$L = \frac{1}{(\omega_n)^2 C} = \frac{1}{(2\pi \cdot 250)^2 \times 2279,10 \times 10^{-6}} = 17,79 \times 10^{-5}$$

$$X_L = \omega_n L = 2\pi \cdot 50 (17,79 \times 10^{-5}) = 0,05589 \Omega$$

Nilai resistor (R):

Filter quality factor (Q) untuk filter *single tuned* dipilih antara 30 dan 60. Dalam perencanaan filter ini nilai Q dipilih 30, sehingga nilai resistor adalah sebagai berikut:

$$Q = \frac{X_0}{R} = \frac{X_L}{R}$$

$$R = \frac{X}{Q} = \frac{0,05589}{30} = 0,00186 \Omega$$

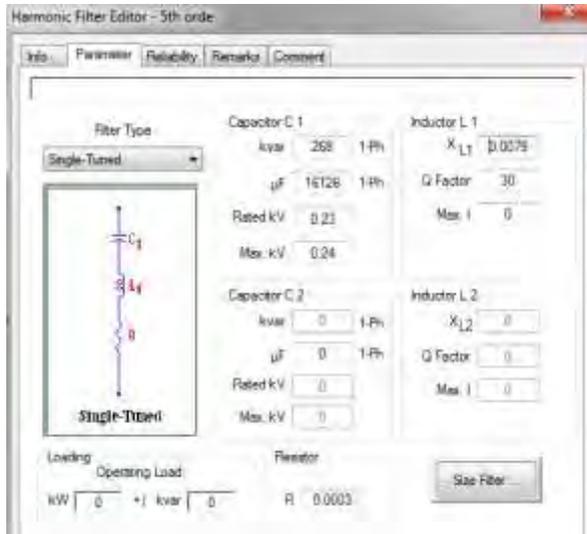
Keseluruhan dari spesifikasi filter yang akan dipasang adalah seperti yang ditunjukkan pada Tabel 4.6 di bawah.

Tabel 4. 6 Spesifikasi filter harmonisa

Bus	Tipe	Orde	V(kV)	C (μF)	X _L (Ω)	R (Ω)
SDP NH3	<i>Single tuned</i>	5 th	0,23	16173,6	0,00788	0,00026
SDP Hotfill	<i>Single tuned</i>	5 th	0,23	12302,8	0,01037	0,00035
LVMDP Line 2	<i>Single tuned</i>	5 th	0,23	2279,10	0,05889	0,00186

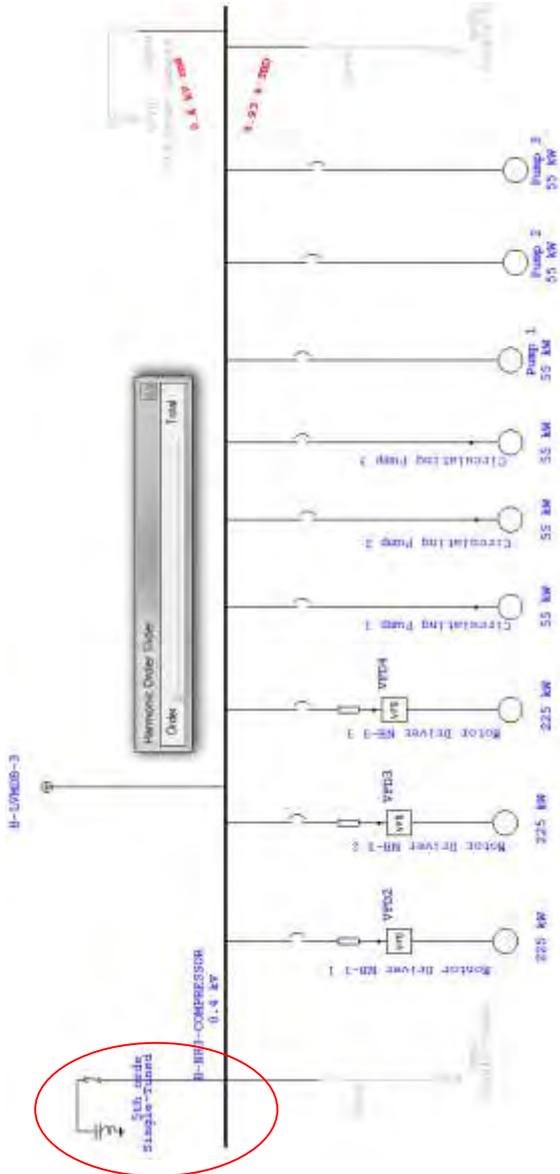
4.4 Hasil Pemasangan Filter

Hasil perhitungan filter pada Tabel 4.6 menentukan komponen R, C dan L yang akan digunakan dalam merancang filter *single tuned*. Untuk menunjukkan hasilnya simulasi menggunakan ETAP 11.0 dapat dilakukan. Gambar 4.20

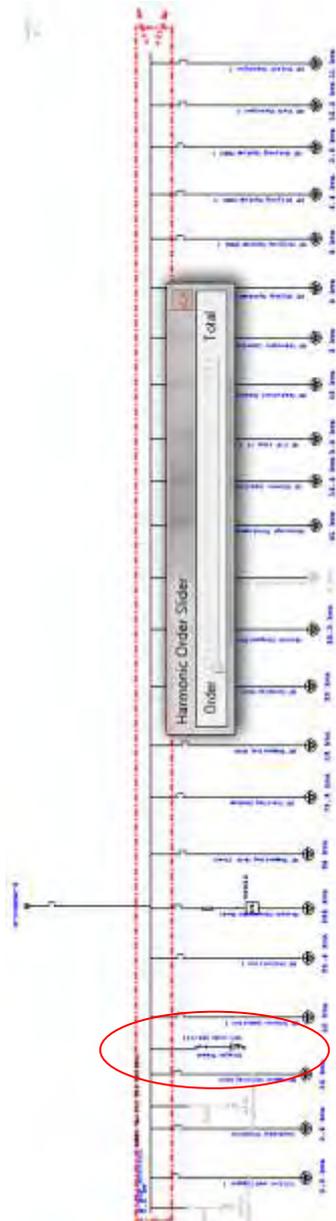


Gambar 4. 20 Pengisian parameter filter *single tuned*

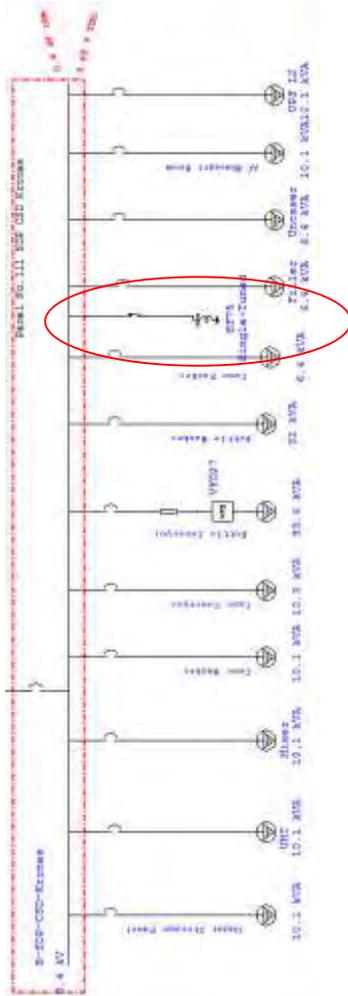
Pengisian parameter filter *single tuned* pada ETAP 11.0 dilakukan setelah memasukkan filter pada area kerja SLD. Gambar 4.20 merupakan parameter yang digunakan oleh filter pada bus SDP NH3 dimana parameter yang diisi adalah nilai satu fasa. Pada perhitungan sebelumnya telah dilakukan perhitungan satu fasa, sehingga hasil perhitungan dapat langsung dimasukkan ke dalam *form* pengisian parameter. Selanjutnya untuk parameter filter pada bus SDP Hotfill dan LVMDP Line 2 juga dilakukan. Pemasangan filter pada area-area dengan masalah harmonisa harus dilakukan agar sistem dapat berjalan baik. Dengan berjalan sistem dengan baik maka peralatan listrik tidak akan mengalami gangguan besar seperti sebelumnya. Selain dari perlindungan agar peralatan tidak rusak, peredaman harmonisa juga dapat melindungi kapasitor bank dari kerusakan. Gambar 4.21 akan menunjukkan dampak yang terjadi setelah pemasangan filter *single tuned* pada SDP NH3, SDP Hotfill dan LVMDP Line 2.



(a) Pemasangan filter *single tuned* pada SDP NH3



(b) Pemasangan filter *single tuned* pada SDP Hoifill



(c) Pemasangan filter *single tuned* pada LVMDP Line 2

Gambar 4. 21 Pemasangan filter *single tuned* pada bus penghasil harmonisa

Setelah pemasangan filter harmonisa *single tuned* 5th orde pada ketiga bus penghasil harmonisa, maka seluruh harmonisa pada seluruh bus teredam seperti yang ditunjukkan pada Tabel 4.7 di bawah.

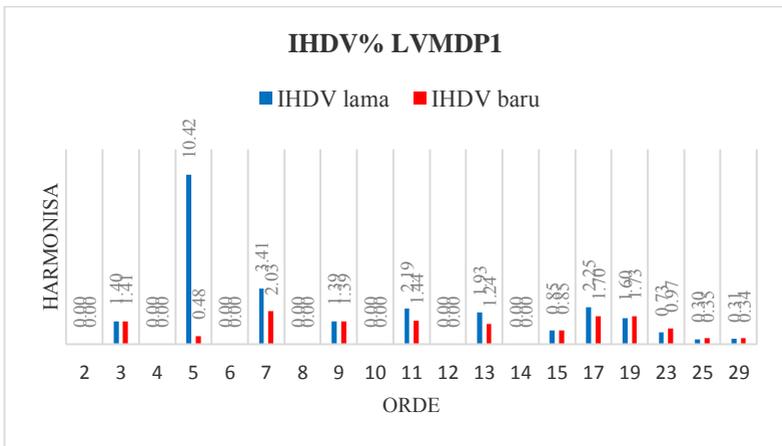
Tabel 4. 7 Hasil pemasangan filter harmonisa pada setiap bus

Bus	Tegangan (kV)		Harmonisa (%)			Ket.
	Rating	%RMS	THDV dengan filter	THDV sebelum filter	IHDV 5 th dengan filter	
B-Coupler	0,4	99,53	4,68	12,91	0,66	Ok
B-CSD Kronos	0,4	98,62	4,90	13,41	0,74	Ok
B-HP-Compressor 1	0,4	98,58	4,41	11,67	0,47	Ok
B-HP-Compressor 2	0,4	98,64	4,41	11,67	0,47	Ok
B-HP-Compressor	0,4	98,17	4,41	11,66	0,47	Ok
B-LV-GGCP	0,4	99,78	4,19	11,92	0,41	Ok
B-LVMDP 1	0,4	99,38	4,48	11,91	0,48	Ok
B-LVMDP 2	0,4	99,61	4,31	12,05	0,19	Ok
B-LVMDP 3	0,4	99,48	4,93	13,43	0,75	Ok
B-LV-T03	0,4	99,28	3,08	9,13	0,47	Ok
B-Main-Lighting	0,4	99,20	4,88	13,34	0,74	Ok
B-Main-Utility	0,4	98,32	4,88	13,34	0,74	Ok
B-MDP-X-L1	0,4	98,67	4,89	13,35	0,74	Ok
B-MDP-WWTP	0,4	97,82	4,89	13,27	0,74	Ok
B-NH3-Compressor	0,4	99,48	4,93	13,43	0,75	Ok
B-SDP 2	0,4	99,32	4,93	13,43	0,75	Ok
B-SDP 3-Evacond	0,4	98,89	4,30	12,04	0,19	Ok
B-SDP4	0,4	97,99	4,23	12,00	0,19	Ok
B-SDP5	0,4	98,33	4,44	11,88	0,48	Ok
B-SDP6	0,4	98,94	4,30	12,04	0,19	Ok
B-SDP-CSD-Kronos	0,4	99,38	4,48	11,91	0,48	Ok
B-SDP Hotfill	0,4	99,61	4,31	12,05	0,19	Ok
B-SDP-Kronos L3	0,4	98,11	4,25	11,99	0,19	Ok
B-Softener	0,4	97,96	4,88	13,34	0,74	Ok
CAP LVMDP1	0,4	99,48	4,48	11,91	0,48	Ok

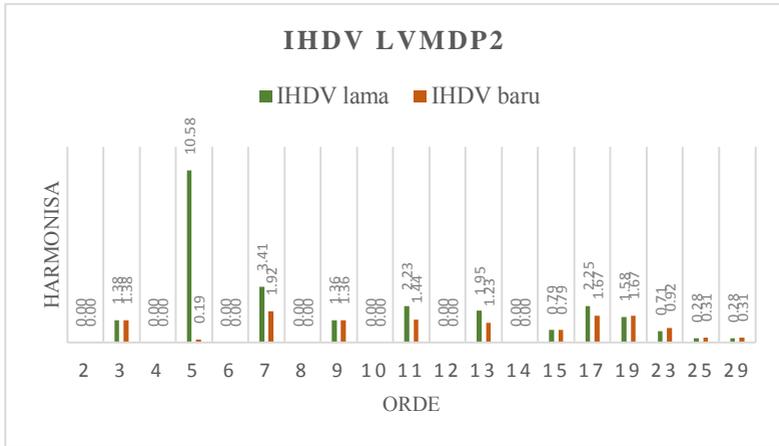
CAP LVMDP2	0,4	99,71	4,31	12,05	0,19	Ok
CAP LVMDP3	0,4	99,60	4,93	13,43	0,75	Ok
LVMDP L2	0,4	99,48	4,48	11,91	0,48	Ok
MDP-L3	0,4	99,71	4,31	12,05	0,19	Ok
SDP L3	0,4	99,05	4,28	12,01	0,19	Ok

Pada Tabel 4.7 diketahui bahwa semua bus sudah berada dalam batas bawah toleransi THD. Meskipun THD mendekati nilai 5 yaitu standar maksimum dari IEEE Std.519-1995 namun filter sudah bekerja optimal dalam meredam orde ke-5 yaitu orde harmonisa terbesar yang diikuti oleh orde lainnya sekalipun tidak maksimal. Dalam simulasi yang dilakukan THD dapat saja lebih berkurang dengan cara meningkatkan besar kapasitor pada filter dan memperkecil induktornya ke batasan tertentu. Atau cara lainnya adalah memasang *3rd order damped filter*. Tapi hal itu tidak dilakukan karena akan meningkatkan titik kritis tegangan pada bus yang disebabkan besar pasokan kVAr ke bus. Hal itu akan menimbulkan *over voltage* dengan beban dalam tingkat kritis.

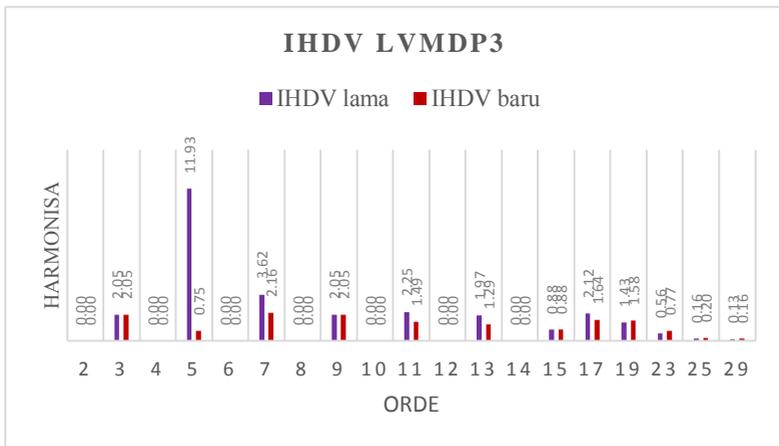
Untuk melihat hasil pemasangan filter *single tuned* dalam mode grafik dan gelombangnya akan ditunjukkan pada Gambar 4.22



(a) Perbandingan IHDV % LVMDP1 sebelum dan sesudah pemasangan *single tuned filter*

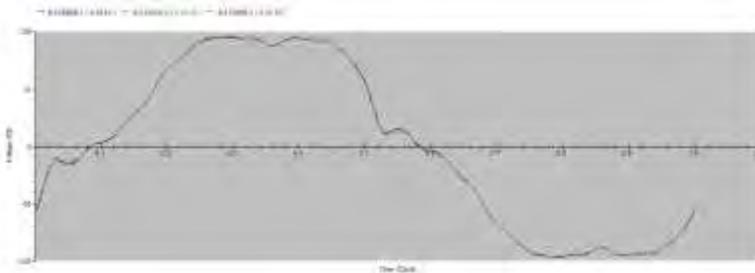


(a) Perbandingan IHDV % LVMDP2 sebelum dan sesudah pemasangan *single tuned filter*

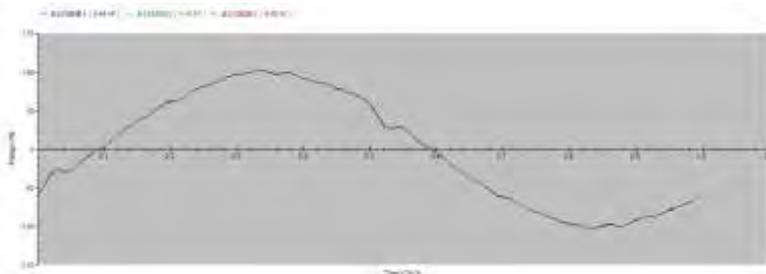


(a) Perbandingan IHDV % LVMD3 sebelum dan sesudah pemasangan *single tuned filter*

Gambar 4. 22 Bentuk Grafik IHDV% B-LVMDP1, B-LVMDP2 dan B-LVMDP3 setelah dan sebelum pemasangan *single tuned filter*



(a) Bentuk sinyal pada B-LVMDP1, B-LVMDP2 dan B-LVMDP3 sebelum pemasangan *single tuned filter*



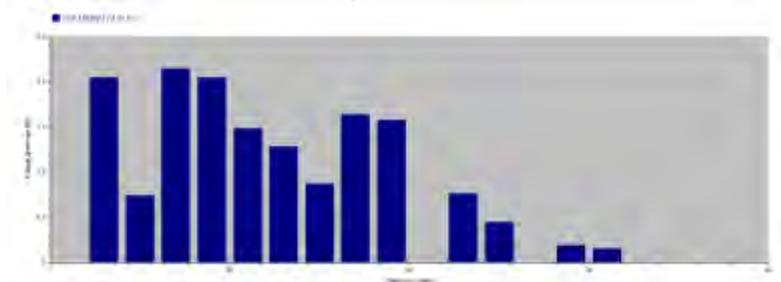
(b) Bentuk sinyal pada B-LVMDP1, B-LVMDP2 dan B-LVMDP3 setelah pemasangan *single tuned filter*

Gambar 4. 23 Sinyal B-LVMDP1, B-LVMDP2 dan B-LVMDP3 sebelum dan setelah pemasangan *single tuned filter*

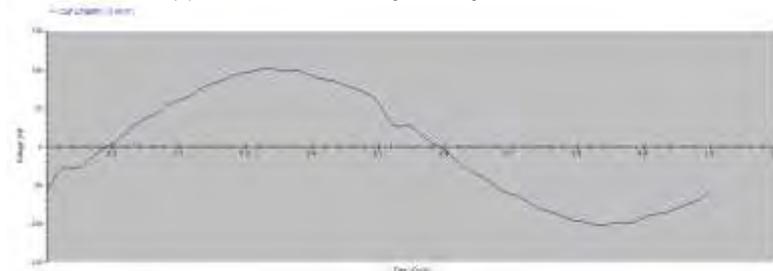
Dari Gambar 4.22 dapat ditampilkan dengan jelas bahwa harmonisa tiap orde (*ITH %*) sudah sesuai standar yaitu lebih kecil atau sama dengan 3. Sedangkan untuk bentuk sinyalnya sudah mendekati sinusoidal. Bentuk sinyal sinus memang tidak begitu sempurna karena masih adanya orde harmonisa yang belum teredam dengan maksimum.

Filter *single tuned* yang dirancang ini memang bertujuan untuk melindungi kapasitor bank yang pernah terbakar pada Juni 2012, April 2013 dan April 2014 khususnya pada kapasitor di LVMDP3 yaitu CAP LVMDP3. Sebelum pemasangan filter seperti yang terlihat pada Tabel 4.4, terlihat jelas bahwa harmonisa menimbulkan kerusakan tersebut. Hal ini disebabkan nilai frekuensi yang masuk ke kapasitor bernilai tinggi dan mengakibatkan timbulnya panas yang berlebihan. Panas pada kapasitor yang *over* akan menimbulkan kerusakan pada kapasitor tersebut.

Pemasangan filter menjadi salah satu solusi untuk mengurangi efek negatif dari harmonisa pada kapasitor. Setelah melakukan pemasangan filter *single tuned* seperti pada tabel 4.6 maka nilai THD dan IHD pada bus kapasitor teredam dan dapat mengurangi efek negatif harmonisa yaitu kerusakan. Gambar 4.24 akan menampilkan bentuk grafik harmonisa dan bentuk sinyal pada CAP LVMDP3.



(a) Grafik harmonisa perorde pada CAP LVMDP3



(b) Bentuk sinyal pada CAP LVMDP3

Gambar 4. 24 Bentuk Grafik dan sinyal CAP LVMDP3 setelah pemasangan *single tuned filter*

Pemasangan filter pada masing-masing bus yang menjadi sumber harmonisa efektif untuk memperbaiki sistem kelistrikan, melindungi kapasitor bank dan perangkat yang berhubungan dengan frekuensi.

[Halaman ini sengaja dikosongkan]

BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Setelah melakukan dan menguji sistem kelistrikan di CCAI Surabaya Plant pada real dan melalui simulasi pada ETAP 11.0 dapat disimpulkan:

1. Kerusakan kapasitor bank

Kerusakan kapasitor bank terjadi karena panas yang disebabkan frekuensi yang tinggi diatas frekuensi dasar. Diketahui bahwa semakin besar frekuensi maka nilai X_c makin kecil. Apabila X_c makin kecil maka I_c makin besar yang membuat kapasitor *over heat* dan akhirnya rusak. Fakta dilapangan temperature normal kapasitor berkisar $40^{\circ}\text{C} - 45^{\circ}\text{C}$, saat nilai THD maksimum yaitu 21,9% yang pernah tercatat pada PAC 4200, temperatur kapasitor bank $93,2^{\circ}\text{C}$

2. Kerusakan peralatan listrik

Sinyal tegangan dan arus yang terdistorsi oleh harmonisa dapat menimbulkan kerusakan pada peralatan listrik.

3. *Single tuned filter* dapat efektif meredam harmonisa pada orde ke-5 sampai ke-11 dengan besar persentasi 67% dari nilai rata-rata THDV% sebelum pemasangan filter yaitu 12,13% dan setelah pemasangan filter 4,45%. Untuk orde ke-3 sebaiknya menggunakan *lowpass filter* dan untuk orde ke-13 keatas menggunakan *high pass filter*.
4. Pemasangan filter harmonisa dapat meningkatkan V_{rms} pada bus. Dari simulasi kisaran kenaikannya 0,4% dari $V_{\text{rms}} = 99,53\%$ sebelum pemasangan filter menjadi $V_{\text{rms}} = 99,85\%$ setelah pemasangan filter
5. Pemasangan filter harmonisa juga dapat memperbaiki faktor daya karena memasok daya reaktif (kVAR)

6. Peredaman harmonisa dapat mencegah kerusakan peralatan listrik

5.2 Saran

Setelah rekonstruksi sistem kelistrikan di CCAI Surabaya plant karena penambahan pabrik dan sarana *utility* sebaiknya kembali melakukan analisa harmonisa sistem kelistrikan. Dan apabila terdapat THD yang lebih besar dari 5% sebaiknya merancang dan merealisasikan filter harmonisa pada bus yang memiliki beban penghasil harmonisa yang besar.

DAFTAR PUSTAKA

- [1]. Xiaoming Yuan, Willi Merk, Herbert Stemmler, and Jost Allmeling “Stationary-Frame Generalized Integrators for Current Control of Active Power Filters With Zero Steady-State Error for Current Harmonics of Concern Under Unbalanced and Distorted Operating Conditions”, IEEE Transactions on Industrial Applications, Vol. 38, No. 2, March/April 2002
- [2]. Roger C. Dugan, Mark F. McGranaghan, H. Wayne Beaty, (1996), Electrical Power System Quality, Mc Graw-Hill
- [3]. IEC 61000-4-7 Harmonic and Interharmonics Measurement
- [4]. IEEE Std.1159-1995 Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality
- [5]. <http://id.wikipedia.org/wiki/Harmonisa> pada 29 April 2014 pukul 16:29
- [6]. J.C. Das, “Passive filters-potential and limitations” IEEE Trans. *Ind. Appl.*, vol.40, no. 1, pp. 232-241, Jan/Feb. 2004.
- [7]. Diwan S. P., Inamdar H. P., “Simulation studies of shunt passive harmonic filters: six pulse rectifier load and power factor improvement and harmonic control” ACEEE Int. J., vol.20, no.02, Feb 2011
- [8]. Muhammad Rashid, 2004, *Power Electronics, Circuit Devices and Application*, Third Edition, Prentice Hall.
- [9]. www.mtecorp.com, *Solution economic for Meet Harmonic Distortion Limit*, [http://electrical17.wordpress.com/2011/01/29/elektronika daya/#more2](http://electrical17.wordpress.com/2011/01/29/elektronika%20daya/#more2) pada 17 November 2014 pukul 15:30
- [10]. J. Arrilaga, D. A., Bradley, and P.S. Bodger, “Power System Harmonics” New York: Marcel Dekker, 2002.

RIWAYAT HIDUP



Bravel Henri Almawijaya Sigalingging dilahirkan di Ujung Pandang, 25 Juni 1989 dari pasangan suami-istri R.Sigalingging dan B. Lumban Toruan. Penulis menjalani pendidikan di SD Katolik Beringin (1995-2001), SLTP Negeri 8 Makassar (2001-2004), SMAN 1 Makassar (2004-2007), D3 PENS-ITS (2008-2012) dan saat ini menyelesaikan pendidikan S1 di ITS jurusan elektronika, teknik sistem tenaga (2012-2015). Penulis juga sedang menempuh pekerjaan industri di Coca Cola Amatil Indonesia (CCAI) Surabaya Plant (2012-2015) sebagai *maintenance*

management system. Selain itu penulis juga aktif berorganisasi di SMA sampai saat ini di Perkantas. Semua yang telah terjadi dan diraih oleh penulis adalah berkat kasih karunia Tuhan Yesus semata.

Email : brave.has@gmail.com

[Halaman ini sengaja dikosongkan]