

**ANALISA *TOTAL HARMONIC DISTORTION* PADA
SISTEM TENAGA LISTRIK MENGGUNAKAN
ALIRAN DAYA HARMONIK**

(Skripsi)

Oleh

FEBRIAN ADAM

NPM 1915031044



**FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDARLAMPUNG
2023**

ABSTRAK

ANALISA *TOTAL HARMONIC DISTORTION* PADA SISTEM TENAGA LISTRIK MENGGUNAKAN ALIRAN DAYA HARMONIK

Oleh

FEBRIAN ADAM

Sistem tenaga listrik harus memiliki keandalan yang baik karena sistem tenaga listrik berperan untuk menyalurkan listrik dari sumber daya ke konsumen. Salah satu *Low Voltage Main Distribution Board* (LVMDDB) pada Pabrik *spare-part* mobil sering mengalami *trip*. Terdapat beberapa mesin mekanis yang terhubung ke LVMDDB tersebut. Terdapat *power factor meter* menunjukkan nilai *Total Harmonic Distortion* (THD) arus sebesar 32,1%. Tujuan dari penelitian ini untuk mengidentifikasi beban penyebab harmonisa dan mereduksi nilai harmonisa pada sistem tenaga listrik pabrik. Hipotesis dari penelitian ini adalah beban *non-linier* merupakan penyebab harmonisa. Metode analisa pada penelitian ini menggunakan aliran daya harmonik. Pengukuran pada LVMDDB menggunakan *power quality analyzer* menunjukkan nilai THD tegangan pada fasa a 2.47%, fasa b 2.43%, dan fasa c 2.40%. THD arus pada fasa a 25.08%, fasa b 25.38%, dan fasa c 24.74%. Berdasarkan IEEE STD 519-2014, nilai THD tegangan maksimum yaitu 8% dan THD arus maksimum yaitu 15%. Berdasarkan standar tersebut, nilai THD arus pada sistem tenaga listrik melewati batas yang ditentukan. Simulasi sistem tenaga listrik menunjukkan nilai THD arus sebesar 22,07%. Orde harmonisa dominan adalah orde ke-11 dan ke-13. Pemasangan *single-tuned filter* pada simulasi dapat mereduksi nilai THD arus. Nilai THD arus setelah pemasangan *single-tuned filter* menjadi 3,74% dimana nilai THD tersebut lebih baik dari sebelum pemasangan filter dan sudah memenuhi standar IEEE 519-2014.

Kata kunci: THD, aliran daya harmonik, beban non-linier, *single-tuned filter*, kualitas daya

ABSTRACT

ANALYSIS OF TOTAL HARMONIC DISTORTION ON ELECTRICAL POWER SYSTEM USING HARMONIC POWER FLOW

By

FEBRIAN ADAM

The electrical power system must have good reliability because the electrical power system plays a role in delivering electricity from power sources to consumers. One of the Low Voltage Main Distribution Boards (LVMDDB) at car spare parts factories often experiences trips. There are several mechanical machines connected to the LVMDDB. There is a power factor meter showing a Total Harmonic Distortion (THD) current value of 32.1%. The purpose of this study is to identify the load that causes harmonics and reduce the value of harmonics in the factory's electrical power system. The hypothesis of this study is that non-linear loads are the cause of harmonics. The analysis method in this study uses harmonic power flow. Measurements on LVMDDB using a power quality analyzer show THD voltage values in phase a 2.47%, phase b 2.43%, and phase c 2.40%. THD current in phase a 25.08%, phase b 25.38%, and phase c 24.74%. Based on IEEE STD 519-2014, the maximum voltage THD value is 8% and the maximum current THD is 15%. Based on these standards, the current THD value in the electrical power system exceeds the specified limit. Electrical power system simulations show a current THD value of 22.07%. The dominant harmonic orders are the 11th and 13th orders. The installation of a single-tuned filter in the simulation can reduce the current THD value. The current THD value after single-tuned filter installation becomes 3.74% where the THD value is better than before filter installation and meets IEEE 519-2014 standards.

Keywords: THD, harmonic load flow, non-linear load, single-tuned filter, power quality

**ANALISA *TOTAL HARMONIC DISTORTION* PADA
SISTEM TENAGA LISTRIK MENGGUNAKAN
ALIRAN DAYA HARMONIK**

Oleh

FEBRIAN ADAM

Skripsi

**Sebagai Salah Satu Syarat untuk Mencapai Gelar
SARJANA TEKNIK**

Pada

**Jurusan Teknik Elektro
Fakultas Teknik Universitas Lampung**



**FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDARLAMPUNG
2023**

Judul Skripsi : *Analisa Total Harmonic Distortion* pada Sistem Tenaga Listrik Menggunakan Aliran Daya Harmonik

Nama Mahasiswa : *Febrian Adam*

Nomor Pokok Mahasiswa : 1915031044

Program Studi : Teknik Elektro

Fakultas : Teknik

MENYETUJUI

1. *Komisi Pembimbing*

Dr. Eng. Ir. Dikpride Despa, S.T.,
M.T., IPM., ASEAN Eng.
NIP 197204281998032001

Ir. Herri Gusmedi, S.T., M.T.
NIP 197108131999031003

2. Mengetahui

Ketua Jurusan Teknik Elektro

Herlinawati, S.T., M.T.
NIP 197103141999032001

Ketua Program Studi Teknik Elektro

Dr. Eng. Nining Purwasih, S.T., M.T.
NIP 197404222000122001

MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

Ketua : Dr. Eng. Ir. Dikpride Despa, S.T.,
M.T., IPM., ASEAN Eng.



Sekretaris : Ir. Herri Gusmedi, S.T., M.T.



Penguji

Bukan Pembimbing : Osca Zebua, S.T., M.T.



Dekan Fakultas Teknik



Dr. Eng. Ir. Helmy Fitriawan, S.T., M.Sc.
NIP 197509282001121002

Tanggal Lulus Ujian Skripsi: 04 Agustus 2023

SURAT PERNYATAAN

Dengan ini saya menyatakan bahwa dalam skripsi ini tidak terdapat karya yang pernah dilakukan orang lain dan sepanjang sepengetahuan saya tidak terdapat atau diterbitkan oleh orang lain, kecuali secara tertulis diacu dalam naskah ini sebagaimana yang disebutkan dalam daftar pustaka. Selain itu, saya menyatakan pula bahwa skripsi ini dibuat oleh saya sendiri.

Apabila pernyataan saya tidak benar, maka saya bersedia dikenai sanksi sesuai dengan hukum yang berlaku.

Bandarlampung, 04 Agustus 2023



Febrian Adam
NPM 1915031044

RIWAYAT HIDUP



Penulis dilahirkan di Jakarta pada tanggal 17 Februari 2000, sebagai anak pertama dari dua bersaudara, dari Bapak Syawaludin dan Ibu Suci Sulistiowati.

Pendidikan Taman Kanak-kanak (TK) Ar-Rahman Cikarang diselesaikan tahun 2006, Sekolah Dasar (SD) diselesaikan di SDIT Annida Cikarang pada tahun 2012, Sekolah Menengah Pertama (SMP) di SMPN 1 Cikarang Utara pada tahun 2015, dan Sekolah Menengah Atas (SMA) di SMAN 1 Cikarang Pusat pada tahun 2018.

Tahun 2019, penulis terdaftar sebagai mahasiswa Jurusan Teknik Elektro FT UNILA melalui jalur SBMPTN. Selama menjadi mahasiswa penulis aktif di Organisasi Himpunan Mahasiswa Teknik Elektro (HIMATRO) FT UNILA. Pada tahun 2022, penulis melakukan Kerja Praktek dan Magang di PT Takenaka Indonesia, Karawang.

SKRIPSI INI DIPERSEMBAHKAN UNTUK

PAPA DAN MAMA:

SYAWALUDIN DAN SUCI SULISTIOWATI

DARI PENULIS:

FEBRIAN ADAM

MOTTO

**AKU MENCINTAI PERMASALAHANKU,
KARENA KUTAHU YANG MEMBERI
PERMASALAHAN JUGA MENCINTAIKU**

(JALALUDDIN RUMI)

**UNTUK MENDAPATKAN APA YANG
KAMU SUKA, PERTAMA KAMU HARUS
SABAR DENGAN APA YANG KAMU
BENCI**

(IMAM AL GHAZALI)

SANWACANA

Puji syukur Penulis ucapkan kehadiran Tuhan Yang Maha Esa, karena atas rahmat dan hidayah-Nya skripsi ini dapat diselesaikan.

Skripsi dengan judul “*Analisa Total Harmonic Distortion pada Sistem Tenaga Listrik Menggunakan Aliran Daya Harmonik*” adalah salah satu syarat untuk memperoleh gelar sarjana Teknik Elektro di Universitas Lampung.

Dalam kesempatan ini penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Ibu Prof. Dr. Ir. Lusmeilia Afriani, D.E.A., IPM., selaku Rektor Universitas Lampung;
2. Bapak Dr. Eng. Ir. Helmy Fitriawan, S.T., M.Sc., selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Lampung;
3. Ibu Herlinawati, S.T., M.T., selaku Ketua Jurusan Teknik Elektro Universitas Lampung;
4. Ibu Dr. Eng. Nining Purwasih, S.T., M.T., selaku Ketua Program Studi Teknik Elektro Universitas Lampung;
5. Ibu Dr. Eng. Ir. Dikpride Despa, S.T., M.T., IPM., ASEAN Eng., selaku Dosen Pembimbing Utama atas kesediannya untuk memberikan bimbingan, saran, dan kritik dalam proses penyelesaian skripsi ini;
6. Bapak Ir. Herri Gusmedi, S.T., M.T., selaku Dosen Pembimbing Pendamping atas kesediannya untuk memberikan bimbingan, saran, dan kritik dalam proses penyelesaian skripsi ini;
7. Bapak Osea Zebua, S.T., M.T., selaku Dosen Penguji Skripsi. Terimakasih untuk masukan dan saran-saran dalam proses penyelesaian skripsi ini;
8. Bapak Sumadi, S.T., M.T., selaku Dosen Pembimbing Akademik atas bimbingan dan saran yang diberikan kepada penulis selama perkuliahan;
9. Keluarga penulis yang telah memberikan segalanya untuk penulis;

10. Bapak Syawaludin selaku *Manager* Departemen Administrasi PT Takenaka Indonesia *District 3*;
11. Bapak Budi Afriansyah selaku *Manager* Departemen M/E (*Mechanical/Electrical*) PT Takenaka Indonesia *District 3*;
12. Bapak Baihaki sebagai M/E *Chief Engineer* wilayah KIIC PT Takenaka Indonesia *District 3*;
13. Teman-teman jurusan Teknik Elektro Angkatan 2019 (ETERNITY 19) Universitas Lampung;
14. Semua pihak yang telah membantu penulis dalam menyelesaikan skripsi.

Penulis menyadari bahwa laporan skripsi ini masih memiliki kekurangan dari segi penyusunan maupun pemilihan kata. Oleh karena itu penulis memohon saran dan kritik membangun sebagai evaluasi laporan skripsi ini. Terima kasih.

Bandarlampung, 04 Agustus 2023



Febrian Adam

DAFTAR ISI

	Halaman
DAFTAR GAMBAR	xv
DAFTAR TABEL	xvi
BAB I. PENDAHULUAN	
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Rumusan Masalah.....	2
1.3. Tujuan Penelitian	2
1.4. Batasan Masalah	2
1.5. Sistematika Penulisan	2
1.6. Hipotesis	3
BAB II. TINJAUAN PUSTAKA	
2.1. Penelitian Terkait.....	4
2.2. Beban Linier dan Non-Linier.....	6
2.3. Harmonisa.....	7
2.4. <i>Total Harmonic Distortion</i> (THD)	7
2.5. Deret <i>Fourier</i>	8
2.6 Superposisi Gelombang	9
BAB III. METODOLOGI PENELITIAN	
3.1. Waktu dan Tempat Penelitian.....	11
3.2. Alat dan Bahan.....	11
3.3. Tahapan Penelitian.....	11
3.4. Diagram Alir Penelitian	13
3.5. Algoritma Analisa dan Simulasi pada Penelitian	14
3.5.1. IEEE STD 519-2014	14

3.5.2.	Menghitung Nilai SC_{ratio}	15
3.5.3.	Membuat Simulasi Sistem Tenaga Listrik	16
3.5.4.	Mengidentifikasi Beban Penyebab Harmonisa	18
3.5.5.	Menambahkan <i>Single-tuned Filter</i> pada Simulasi	18

BAB IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1.	Studi Kasus	21
4.2.	Data Hasil Pengukuran	21
4.3.	Penentuan Nilai Batas THD Tegangan dan THD Arus	25
4.4.	Simulasi Sistem Tenaga Listrik	26
4.5.	Hasil Simulasi	27
4.5.1.	Simulasi Tanpa Injeksi Nilai Harmonisa.....	27
4.5.2.	Simulasi dengan Injeksi Harmonisa	29
4.5.3.	Simulasi Beban Penyebab Harmonisa.....	32
4.5.4.	Simulasi Penambahan Filter	33

BAB V. KESIMPULAN DAN SARAN

5.1.	Kesimpulan	36
5.2.	Saran	36

DAFTAR PUSTAKA

LAMPIRAN

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 2.1. Gelombang Tegangan dan Arus Beban Linier	6
Gambar 2.2. Gelombang Tegangan dan Arus Beban Non-Linier.....	6
Gambar 2.3. Gelombang Harmonisa.....	7
Gambar 2.4. Gelombang Persegi Deret <i>Fourier</i>	9
Gambar 2.5. Gelombang Superposisi	10
Gambar 3.1. Diagram Alir Penelitian	13
Gambar 3.2. SLD Sistem Tenaga Listrik	16
Gambar 3.3. Diagram Alir Simulasi	17
Gambar 4.1. Data Hasil Pengukuran Nilai Harmonisa Arus	25
Gambar 4.2. <i>Single Line Diagram</i> Sistem Tenaga Listrik.....	27
Gambar 4.3. Hasil Simulasi Sistem Tenaga Listrik Tanpa Injeksi Harmonisa.....	28
Gambar 4.4. Gelombang Keluaran Simulasi Tanpa Injeksi Harmonisa	28
Gambar 4.5. Spektrum Simulasi Tanpa Injeksi Harmonisa.....	29
Gambar 4.6. Hasil Simulasi Sistem Tenaga Listrik dengan Injeksi Harmonisa ...	30
Gambar 4.7. Gelombang Keluaran Simulasi dengan Injeksi Harmonisa.....	30
Gambar 4.8. Spektrum Simulasi dengan Injeksi Harmonisa	31
Gambar 4.9. Spektrum Harmonisa Ketika <i>Bus 7</i> Dilepas	32
Gambar 4.10. (a) Gelombang Keluaran Sebelum Pemasangan <i>Filter</i> , (b) Gelombang Keluaran Setelah Pemasangan <i>Filter</i>	34
Gambar 4.11. <i>Harmonic Filter Sizing</i> Menggunakan Nilai Arus Harmonisa Simulasi.....	35
Gambar 4.12. <i>Harmonic Filter Editor</i> Setelah Pengaturan pada <i>Harmonic Filter Sizing</i>	35

DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 2.1. Batas Emisi Arus pada Sistem Tenaga Listrik.....	14
Tabel 4.1. Data Hasil Pengukuran Fasa A	22
Tabel 4.2. Data Hasil Pengukuran Fasa B	22
Tabel 4.3. Data Hasil Pengukuran Fasa C	23
Tabel 4.4. Data Hasil Pengukuran Nilai Harmonisa Arus	23
Tabel 4.5. Nilai Tegangan dan THD pada Simulasi dengan Injeksi Harmonisa ..	31
Tabel 4.6. Hasil Simulasi Beban Penyebab Harmonisa.....	32
Tabel 4.7. Simulasi Harmonisa Penempatan <i>Filter</i> pada <i>Bus</i> 6.....	33

BAB I. PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Energi listrik merupakan penggerak utama produksi pada industri modern. Mesin-mesin industri sangat bergantung pada ketersediaan energi listrik ^[1]. Sistem tenaga listrik yang tidak dikelola dengan baik akan meningkatkan nilai rugi-rugi daya dan memperburuk profil tegangan sehingga mempengaruhi keandalan sistem kelistrikan. Hal tersebut dapat mengakibatkan desain konfigurasi yang semula baik menjadi tidak sesuai dengan sistem pembebanan ^[2]. Beban-beban non-linier juga menjadi salah satu faktor penting yang mempengaruhi kualitas daya listrik. Beban tersebut merupakan sumber harmonisa yang dapat menurunkan kualitas daya listrik ^[3].

Pabrik penghasil *spare-part* mobil memiliki beberapa mesin mekanis yang merupakan beban non-linier. Beban non-linier menggunakan banyak penyearah. Penggunaan penyearah pada beban non-linier menyebabkan harmonisa. Mesin-mesin mekanis pada pabrik tersebut yaitu *furnace*, *die-cast*, M-20iD/25, M-710iC/50, dan α -d14mib. Mesin-mesin mekanis tersebut terhubung ke *Low Voltage Main Distribution Board* (LVMDB). LVMDB sering mengalami *trip*. *Display* pada LVMDB menunjukkan nilai THD arus sebesar 32.1%. Pengukuran harmonisa pada LVMDB menggunakan *power quality analyzer* menunjukkan nilai *Total Harmonic Distortion* (THD) tegangan pada fasa a 2.47%, fasa b 2.43%, dan fasa c 2.40%. THD arus pada fasa a 25.08%, fasa b 25.38%, dan fasa c 24.74%. Berdasarkan IEEE STD 519-2014, nilai THD tegangan maksimum yaitu 8% dan THD arus maksimum 15%. Berdasarkan standar tersebut, nilai THD arus pada sistem tenaga listrik pabrik melewati batas yang ditentukan.

1.2. Rumusan Masalah

Rumusan masalah pada penelitian ini adalah LVMDB pada pabrik sering mengalami *trip. Display* pada LVMDB menunjukkan nilai THD arus sebesar 32.1%. Berdasarkan IEEE STD 519-2014, batas nilai THD tegangan maksimum yaitu 8% dan THD arus maksimum 15%. Berdasarkan standar tersebut, nilai THD arus pada sistem tenaga listrik melewati batas yang ditentukan.

1.3. Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah:

1. Mengidentifikasi beban penyebab harmonisa pada sistem tenaga listrik;
2. Mereduksi nilai harmonisa pada sistem tenaga listrik pabrik.

1.4. Batasan Masalah

Batasan masalah pada penelitian ini adalah:

1. Penelitian dilakukan berdasarkan studi kasus di PT Toyota Gosei;
2. Pengukuran dilakukan pada sistem tenaga listrik dalam kondisi *steady-state*;
3. Injeksi harmonisa pada setiap beban menggunakan data pengukuran harmonisa yang sama.

1.5. Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan pada laporan skripsi ini adalah:

BAB I. PENDAHULUAN

Bab ini berisi tentang latar belakang, tujuan penelitian, rumusan masalah, batasan masalah, sistematika penulisan laporan skripsi, dan hipotesis penelitian.

BAB II. TINJAUAN PUSTAKA

Bab ini berisi teori singkat yang berhubungan dengan penelitian.

BAB III. METODOLOGI PENELITIAN

Bab ini berisi metode dan tahapan yang diterapkan pada penelitian.

BAB IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab ini membahas tentang hasil dan analisa dari penelitian yang dilakukan.

BAB V. KESIMPULAN

Bab ini berisi kesimpulan yang didapat dari hasil penelitian.

DAFTAR PUSTAKA

Bab ini berisi referensi yang digunakan pada penelitian.

1.6. Hipotesis

Hipotesis pada penelitian ini adalah beban *non*-linier pada sistem tenaga listrik merupakan penyebab harmonisa.

BAB II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Penelitian Terkait

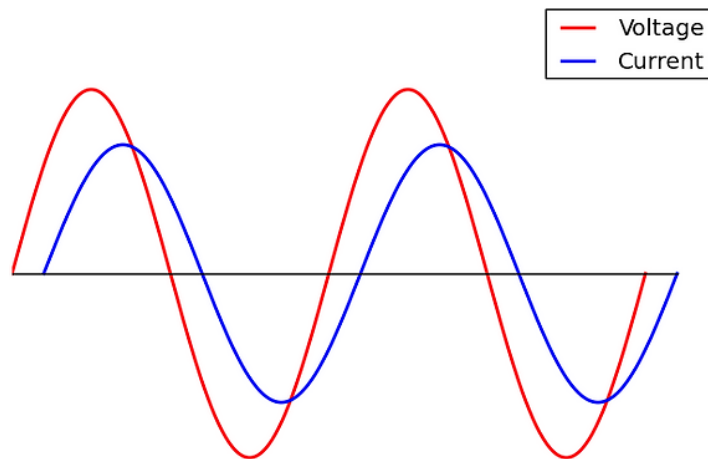
Jurnal berjudul “Studi Analisa Pengaruh *Total Harmonic Distortion* (THD) terhadap Rugi-Rugi, Efisiensi, dan Kapasitas Kerja Transformator pada Penyulang Kerobokan”. Penyulang Kerobokan menyuplai energi listrik didaerah Kerobokan. Penyulang ini menyuplai 67 transformator distribusi yang melayani berbagai macam pelanggan dengan beban listrik nonlinier. Beban listrik non-linier menimbulkan harmonisa yang berpengaruh buruk terhadap pelanggan dan peralatan sistem tenaga listrik terutama transformator distribusi. Pada Penyulang Kerobokan hanya 3 (4,5%) dari total 67 transformator yang memiliki kandungan THDi (*Total Harmonic Distortion Arus*) memenuhi standar IEEE 519-2014 dan 64 (95,5%) dari total 67 transformator memiliki kandungan THDi yang tinggi dan melebihi standar IEEE 519- 2014. Untuk itu dilakukan analisis rugi-rugi daya, efisiensi, dan kapasitas kerja transformator akibat pengaruh THDi. Penelitian ini menggunakan metode pengukuran langsung pada seluruh transformator di Penyulang Kerobokan dan simulasi pada program ETAP Powerstation. Hasil analisis menunjukkan rugi-rugi daya total tanpa pengaruh THDi pada seluruh transformator sebesar 49,4 kW dan setelah terpengaruh THDi menjadi sebesar 591,71 kW. Kandungan THDi terbesar terdapat pada transformator KA 0992 yaitu 24,8% yang mengakibatkan peningkatan rugi-rugi daya sebesar 12,02 kW atau 12,02% dari kapasitasnya dan mengalami penurunan efisiensi yaitu 12,66% serta penurunan kapasitas kerja sebesar 19,9%. Sedangkan kandungan THDi terkecil terdapat pada transformator DB 449 yaitu 6,8% yang mengakibatkan peningkatan rugi-rugi daya sebesar 2,2 kW atau 0,88% dari kapasitasnya dan mengalami penurunan efisiensi yaitu 1,01% serta penurunan kapasitas kerja sebesar 2,7% ^[4].

Jurnal berjudul "Analisa Total Distorsi Harmonik Arus Terhadap Pengaruh Beban pada Sistem 3 Fasa dengan Menggunakan Simulink Matlab". Harmonisa merupakan distorsi arus dan tegangan karena adanya gelombang lain dengan frekuensi kelipatan integer dari frekuensi fundamental. Pada penelitian ini dilakukan simulasi pengaruh beban pada sistem 3 fasa sehingga dapat dilihat perubahan nilai THDi yang dihasilkan. Hasil penelitian diperoleh bahwa, pada sistem 3 fasa, harmonik dominan terjadi pada orde harmonisa ke 5, 7, 11 dan 13. Jika dilihat dari fasanya, THDi tertinggi terdapat pada fasa R sedangkan terendah terdapat pada fasa S. Semakin besar beban (RL) maka THDi semakin kecil karena semakin besar beban (RL) maka arus sumber (I_{abc}) semakin kecil. Dapat dilihat pada hasil simulasi, ketika beban (RL) nya 10 ohm besar THDi pada fasa R adalah 30,27%, fasa S adalah 30,13% dan fasa T adalah 30,28%. Sedangkan, ketika digunakan beban (RL) nya 100 Ω besar THDi pada fasa R adalah 30,32%, fasa S adalah 30,08 dan fasa T adalah 30,26%. Sedangkan ketika digunakan beban (RL) nya 1000 Ω besar THDI pada fasa R adalah 29,87%, fasa S adalah 29,65% dan fasa T adalah 29,82%. Selain itu, dari penelitian ini dapat disimpulkan juga bahwa penyearah 3 fasa dapat menimbulkan harmonisa yang cukup besar yaitu melebihi standart IEEE 519-2014 ^[5].

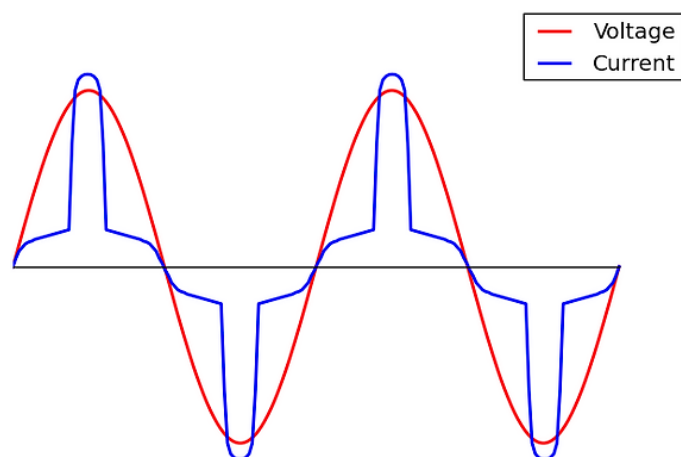
Jurnal berjudul "Analisa Pemasangan Filter Pasif Sebagai Peredam Harmonisa Akibat Beban Non-Linier". Studi ini bertujuan menganalisa dampak pemasangan *filter* pasif pada beban listrik yaitu salah satu konsumen 3 *phase* PT. PLN. Variabel yang diamati adalah *Total Harmonic Distortion* (THD) arus, THD tegangan, faktor daya dan putaran kwh meter elektromekanik. Metode yang digunakan adalah pengukuran THD pada beban listrik 3 *phase* dilakukan menggunakan *spectrum analyzer*, perancangan *filter* pasif *single tuned* untuk THD arus tertinggi, simulasi menggunakan aplikasi Matlab dan Analisa. Data yang diperoleh arus orde 3 memiliki distorsi paling tinggi, yaitu THD arus total sebesar 15,05% dan THD tegangan total sebesar 9,39%. Hasil pemasangan *filter* pasif orde 3 yang dilakukan secara simulasi menurunkan THD arus total menjadi 10,40%, THD tegangan total menjadi 6,61%, peningkatan faktor daya dari 0,971 menjadi 0,985 serta penurunan putaran kwh meter elektromekanik sebesar 36 putaran per jam ^[6].

2.2. Beban Linier dan Non-Linier

Sistem tenaga listrik mengenal dua jenis beban yaitu beban linier dan beban non-linier^[7]. Beban linier adalah beban yang memberikan bentuk gelombang keluaran linier, artinya arus yang mengalir sebanding dengan impedansi dan perubahan tegangan. Pada beban yang linier, bentuk gelombang arus akan mengikuti bentuk gelombang tegangannya^[7]. Beban non-linier adalah beban yang bentuk gelombang keluarannya tidak sebanding dengan tegangan dalam setengah siklus sehingga bentuk gelombang arus maupun tegangan keluarannya tidak sama dengan gelombang masukannya (mengalami distorsi)^[7]. Bentuk gelombang tegangan dan arus pada beban linier dan non-linier dapat dilihat pada gambar 2.1 dan 2.2.



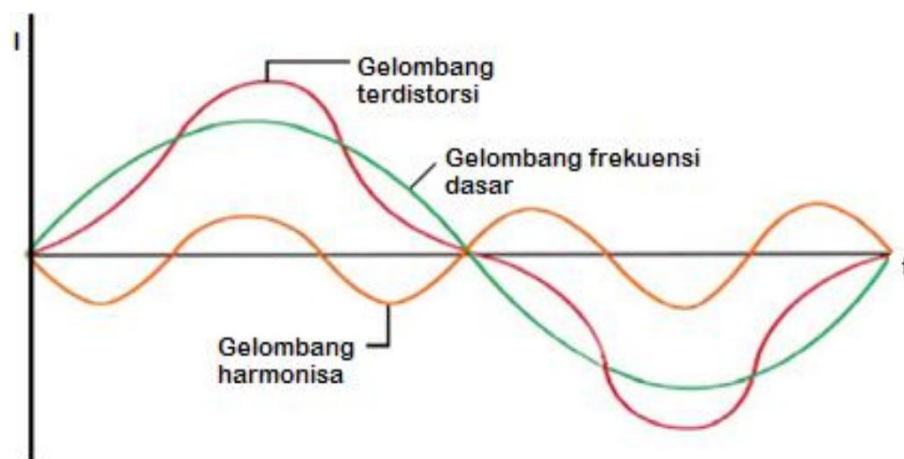
Gambar 2.1. Gelombang Tegangan dan Arus Beban Linier



Gambar 2.2. Gelombang Tegangan dan Arus Beban Non-Linier

2.3. Harmonisa

Harmonisa adalah cacat gelombang yang disebabkan oleh interaksi antara gelombang sinusoidal sistem dengan komponen gelombang lain yang mempunyai frekuensi kelipatan integer dari komponen fundamentalnya [8]. Peran harmonisa pada sistem tenaga listrik cukup besar, terutama pada alat-alat yang terdapat pada sistem tenaga. Harmonisa akan menimbulkan beberapa dampak seperti panas berlebih pada beberapa alat seperti *generator* dan transformator karena kecenderungan harmonisa mengalir ke tempat dengan impedansi yang lebih rendah [8]. Bentuk gelombang harmonisa dapat dilihat pada gambar 2.3.



Gambar 2.3. Gelombang Harmonisa

2.4. Total Harmonic Distortion (THD)

Total Harmonic Distortion (THD) adalah istilah yang digunakan untuk menggambarkan deviasi bersih dari bentuk gelombang non-linier, baik itu arus maupun tegangan dari bentuk gelombang sinus ideal [9]. Distorsi arus harmonisa total adalah kontribusi terhadap dasar semua pengukuran frekuensi harmonisa. Harmonisa saat ini menjadi masalah karena menyebabkan rugi-rugi tambahan di bagian pelanggan dan utilitas [10].

$$\text{THD}_i = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^{\infty} I_h^2}}{I_1} \quad (1)$$

$$\text{THD}_V = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^{\infty} V_h^2}}{V_1} \quad (2)$$

Keterangan:

V_1 = Tegangan fundamental (Volt)

V_h = Tegangan harmonisa (Volt)

I_1 = Arus fundamental (Ampere)

I_h = Arus harmonisa (Ampere)

2.5. Deret *Fourier*

Setiap fungsi yang berulang mempunyai persamaan $f(t) = f(t+T)$ dan dapat dinyatakan dengan deret *Fourier* bila memenuhi persyaratan *Dirichlet* sebagai berikut ^[11]:

1. Bila gelombang tidak bersinambungan, dengan jumlah ketaksinambungan yang terbatas dalam satu periode T;
2. Gelombang memiliki nilai rata-rata yang terbatas serta memiliki nilai maksimum dan minimum dalam periode T.

Bila syarat-syarat di atas terpenuhi, deret *Fourier* dapat dinyatakan dengan persamaan (3) ^[12]:

$$f(t) = \frac{1}{2}a_0 + \sum_{n=1}^{\infty}(a_n \cos n\omega_0 t + b_n \sin n\omega_0 t) \quad (3)$$

Suatu besaran tegangan maupun arus yang terdapat komponen harmonisanya dapat diuraikan dalam deret *Fourier* sebagai berikut ^[12]:

$$v(t) = \sum_{h=1}^{\infty} a_h \cos (n\omega_0 + \phi_h) \quad (4)$$

$$i(t) = \sum_{h=1}^{\infty} b_h \cos (n\omega_0 + \theta_h) \quad (5)$$

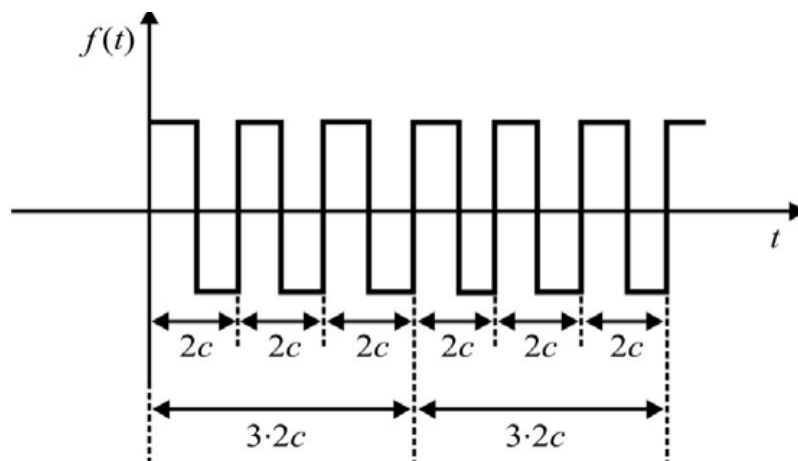
Dimana,

$$a_0 = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) dt \quad (6)$$

$$a_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cos n\omega t dt \quad (7)$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \sin n\omega t dt \quad (8)$$

Deret *Fourier* memiliki kemungkinan untuk memuat harmonisa dengan jumlah tak terhingga. Hasil penjumlahan bagian harmonisa dari deretan tersebut tidak selalu menghasilkan nilai pendekatan terhadap fungsi tersebut. Penggunaan beberapa harmonisa awal dari deret *Fourier* terhadap gelombang persegi akan menghasilkan nilai pendekatan dari gelombang persegi. Bentuk gelombang persegi pada deret *Fourier* dapat dilihat pada gambar 2.4.



Gambar 2.4. Gelombang Persegi Deret *Fourier*

2.6 Superposisi Gelombang

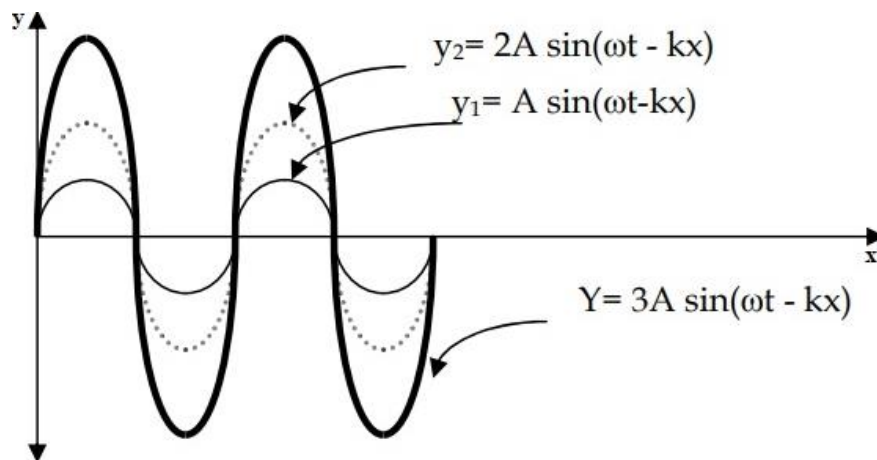
Gelombang suara juga memiliki sifat seperti gelombang pada umumnya yakni dapat dipantulkan, dibelokkan, dipadukan atau interferensi. Pada proses interferensi tersebut terdapat proses yakni superposisi gelombang ^[13]. Superposisi gelombang terdiri dari beberapa fenomena yakni superposisi gelombang dengan frekuensi sama

dan frekuensi berbeda. Pada saat superposisi gelombang akan terdapat hasil gelombang gabungan yang memiliki sifat konstruktif dan destruktif. Sifat konstruktif jika gelombang paduan saling menguatkan dan bersifat destruktif jika gelombang paduan saling meniadakan ^[14]. Superposisi gelombang dengan amplitudo, frekuensi, dan fasa sama maka dapat dihitung secara matematis menggunakan persamaan (9). Sedangkan untuk superposisi gelombang dengan amplitudo dan fasa sama namun frekuensi berbeda dapat dihitung secara matematis menggunakan persamaan (10) ^{[15], [16]}:

$$y = 2A \sin(\omega t - \phi) \quad (9)$$

$$y = A [\sin(\omega_1 t + \phi) + \sin(\omega_2 t + \phi)] \quad (10)$$

Penjumlahan beberapa gelombang menghasilkan gelombang baru. Bentuk gelombang superposisi dapat dilihat pada gambar 2.5.



Gambar 2.5. Gelombang Superposisi

BAB III. METODOLOGI PENELITIAN

3.1. Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan dalam kurun waktu 7 bulan dari bulan Januari – Agustus 2023. Pengumpulan data dilaksanakan pada 12–13 Oktober 2022. Penelitian dilakukan di Laboratorium Sistem Tenaga Listrik Universitas Lampung.

3.2. Alat dan Bahan

Alat dan bahan yang digunakan pada penelitian ini adalah:

1. Sebuah laptop;
2. Microsoft Office;
3. *Power Quality Analyzer*.

3.3. Tahapan Penelitian

Tahapan-tahapan pada penelitian ini adalah:

1. Identifikasi Masalah
Penulis mengidentifikasi permasalahan yang terdapat pada pabrik *spare-part* mobil. Permasalahan yang ditemukan adalah nilai *Total Harmonic Distortion* (THD) arus yang cukup besar pada sistem tenaga listrik pabrik tersebut;
2. Studi Literatur
Penulis mencari referensi-referensi yang dapat menunjang pelaksanaan penelitian terkait THD. Studi literatur dapat diperoleh melalui buku, skripsi terdahulu, dan jurnal yang berkaitan;

3. Studi Terbimbing

Penulis melakukan diskusi dengan dosen pembimbing terkait langkah-langkah dan permasalahan-permasalahan yang akan dihadapi selama proses pengerjaan penelitian;

4. Pengumpulan Data Penelitian

Penulis melakukan pengukuran pada *Low Voltage Main Distribution Board* (LVMDB) pabrik menggunakan *power quality analyzer*. Data-data yang didapatkan dari pengukuran adalah tegangan, arus, daya aktif, daya pasif, daya reaktif, faktor daya, THD tegangan, dan THD arus. Penulis mendapatkan gambar *Single Line Diagram* (SLD) sistem tenaga listrik pabrik yang dapat dijadikan acuan dalam simulasi sistem tenaga listrik. SLD memiliki data-data berupa gambar sistem tenaga listrik, komponen listrik yang digunakan, dan spesifikasi komponen listrik;

5. Simulasi dan Analisa

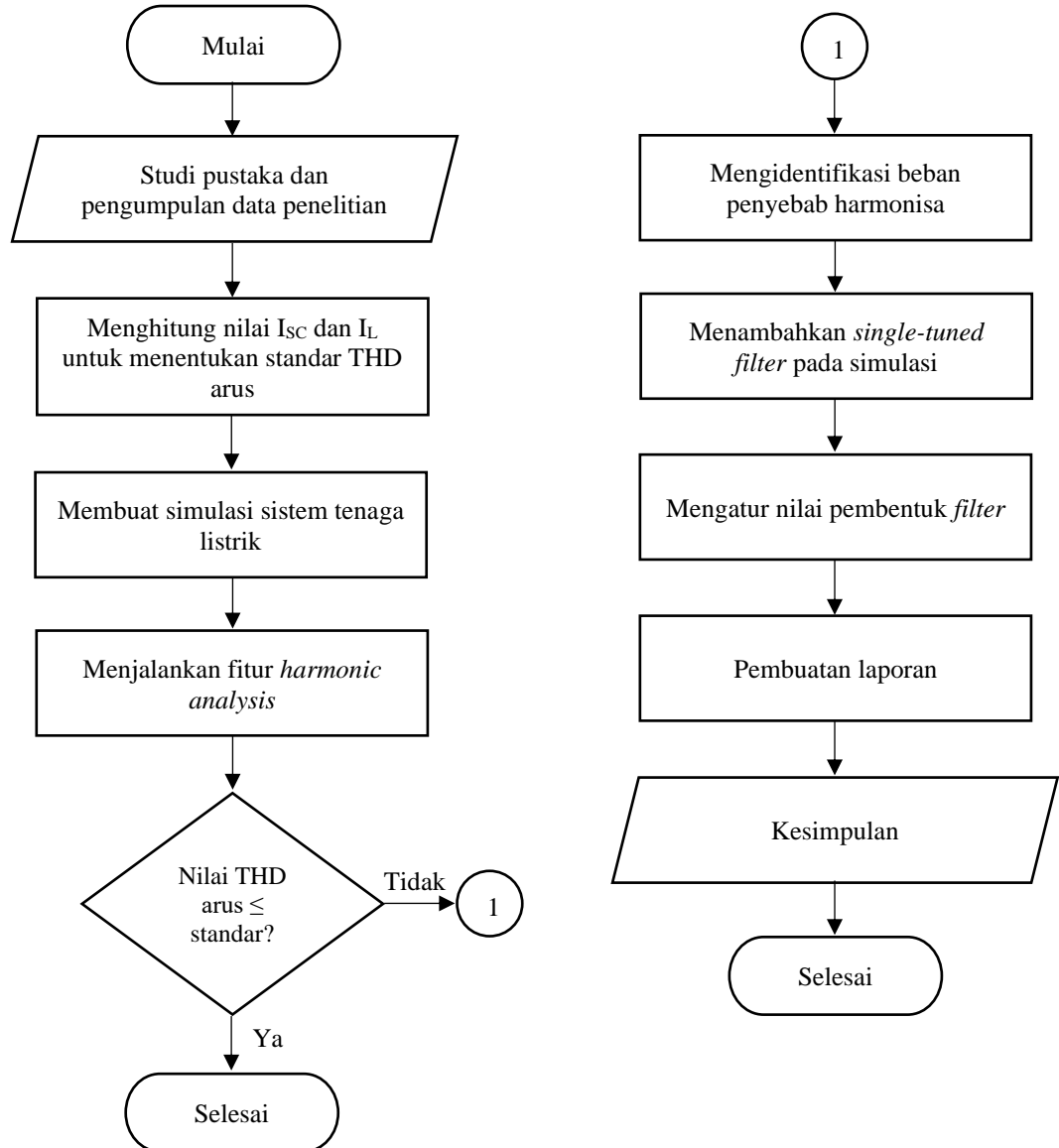
Penulis melakukan simulasi sistem tenaga listrik pada suatu *software*. Simulasi dirancang berdasarkan data SLD yang tersedia. Penulis melakukan analisa dengan menggunakan fitur *harmonic analysis* pada *software* serta melakukan beberapa perhitungan yang menunjang proses analisa;

6. Penulisan Laporan

Penulis menulis laporan terkait hasil penelitian yang telah dilakukan. Laporan digunakan sebagai sarana pertanggungjawaban terhadap penelitian. Laporan penelitian dibagi menjadi dua tahap, yaitu laporan awal yang digunakan untuk seminar proposal dan laporan hasil yang digunakan untuk seminar hasil.

3.4. Diagram Alir Penelitian

Diagram alir pada penelitian ini adalah:



Gambar 3.1. Diagram Alir Penelitian

3.5. Algoritma Analisa dan Simulasi pada Penelitian

Penulis melaksanakan penelitian dengan mengimplementasikan algoritma pada diagram alir penelitian. Algoritma penelitian adalah sebagai berikut:

3.5.1. IEEE STD 519-2014

Terdapat dua metode berbeda untuk membatasi jumlah harmonisa yang ada pada sistem energi listrik. Metode pertama diterapkan oleh IEEE STD 519-2014 pada titik di mana setiap beban non-linier terhubung. Metode kedua diterapkan pada satu atau lebih titik pusat di mana lebih dari satu beban non-linier diumpungkan. Dalam logika pembatasan yang ditentukan oleh IEEE STD 519-2014, terdapat batasan harmonisa yang disebabkan oleh setiap beban. Efek total harmonisa diasumsikan akan terbatas. Nilai-nilai yang ditentukan oleh IEEE STD 519-2014 tampaknya lebih efektif dan membatasi dalam hal membawa batas harmonik arus dan tegangan ^[17].

Batas emisi IEEE STD 519-2014 dirancang untuk membatasi harmonisa tegangan frekuensi individu maksimum hingga 3% dari fundamental dan THD hingga 5% untuk sistem tanpa resonansi paralel utama pada salah satu frekuensi harmonisa yang diinjeksikan. Tabel 3.1 menunjukkan bahwa batas emisi dapat dievaluasi dengan mempertimbangkan rasio hubung singkat (I_{sc}/I_L) tanpa mempertimbangkan tiga ketidakpastian ^[18].

Tabel 2.1. Batas Emisi Arus pada Sistem Tenaga Listrik

Distorsi Harmonisa Arus Maksimal pada I_L (%)						
Orde Harmonisa (Harmonisa Ganjil)						
I_{sc}/I_L	<11	$11 \leq h \leq 17$	$17 \leq h \leq 23$	$23 \leq h \leq 35$	$35 \leq h$	TDD
<20	4,0	2,0	1,5	0,6	0,3	5,0
20<50	7,0	3,5	2,5	1,0	0,5	8,0
50<100	10,0	4,5	4,0	1,5	0,7	12,0
100<1000	12,0	5,5	5,0	2,0	1,0	15,0
>1000	15,0	7,0	6,0	2,5	1,4	20,0

3.5.2. Menghitung Nilai SC_{ratio}

Short Circuit Ratio (SC_{ratio}) adalah hasil bagi antara arus hubung singkat (I_{SC}) dan arus beban (I_L) ^[19]. Persamaan dari SC_{ratio} adalah:

$$SC_{ratio} = \frac{I_{SC}}{I_L} \quad (11)$$

Keterangan:

SC_{ratio} : Rasio hubung singkat

I_{SC} : Arus hubung singkat

I_L : Arus beban penuh

Persamaan arus hubung singkat (I_{SC}) adalah:

$$I_{SC} = \frac{S \times 100}{\sqrt{3} \times V \times Z} \quad (12)$$

Keterangan:

S : Daya pasif transformator (kVA)

V : Tegangan sekunder transformator (kV)

Z : Impedansi transformator (%)

Persamaan arus beban penuh (I_L) adalah:

$$I_L = \frac{P}{PF \times \sqrt{3} \times V} \quad (13)$$

Keterangan:

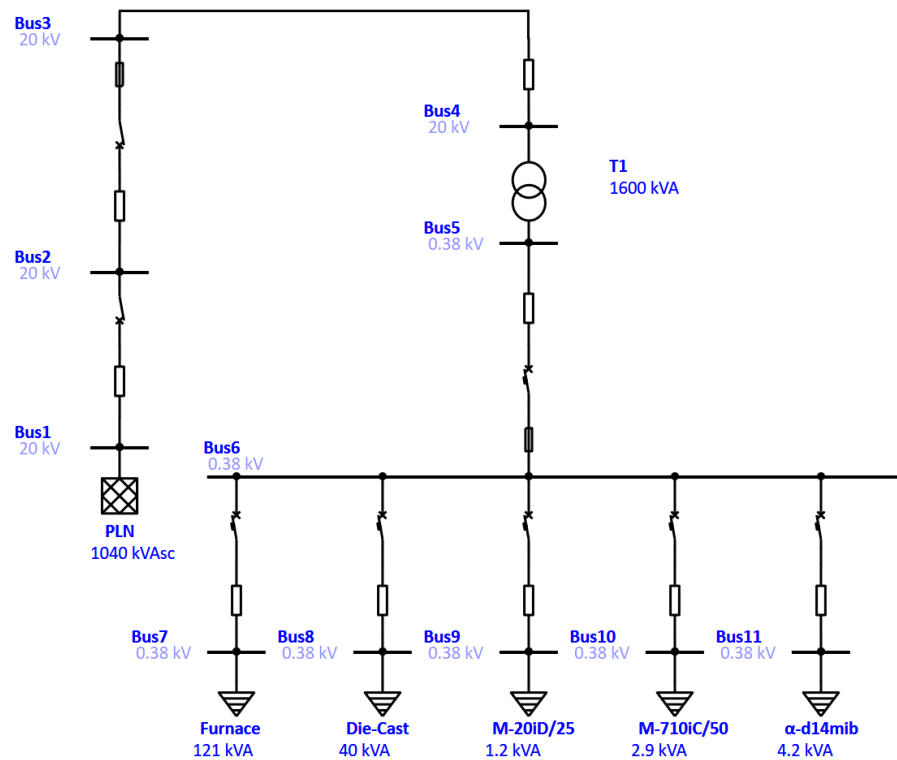
P : Daya aktif (kW)

PF: Faktor daya

Nilai SC_{ratio} disesuaikan dengan tabel 3.1 bagian I_{SC}/I_L untuk menentukan batas *Total Demand Distortion* (TDD) yang sesuai digunakan sebagai acuan batas maksimal nilai THD arus pada sistem tenaga listrik di penelitian ini.

3.5.3. Membuat Simulasi Sistem Tenaga Listrik

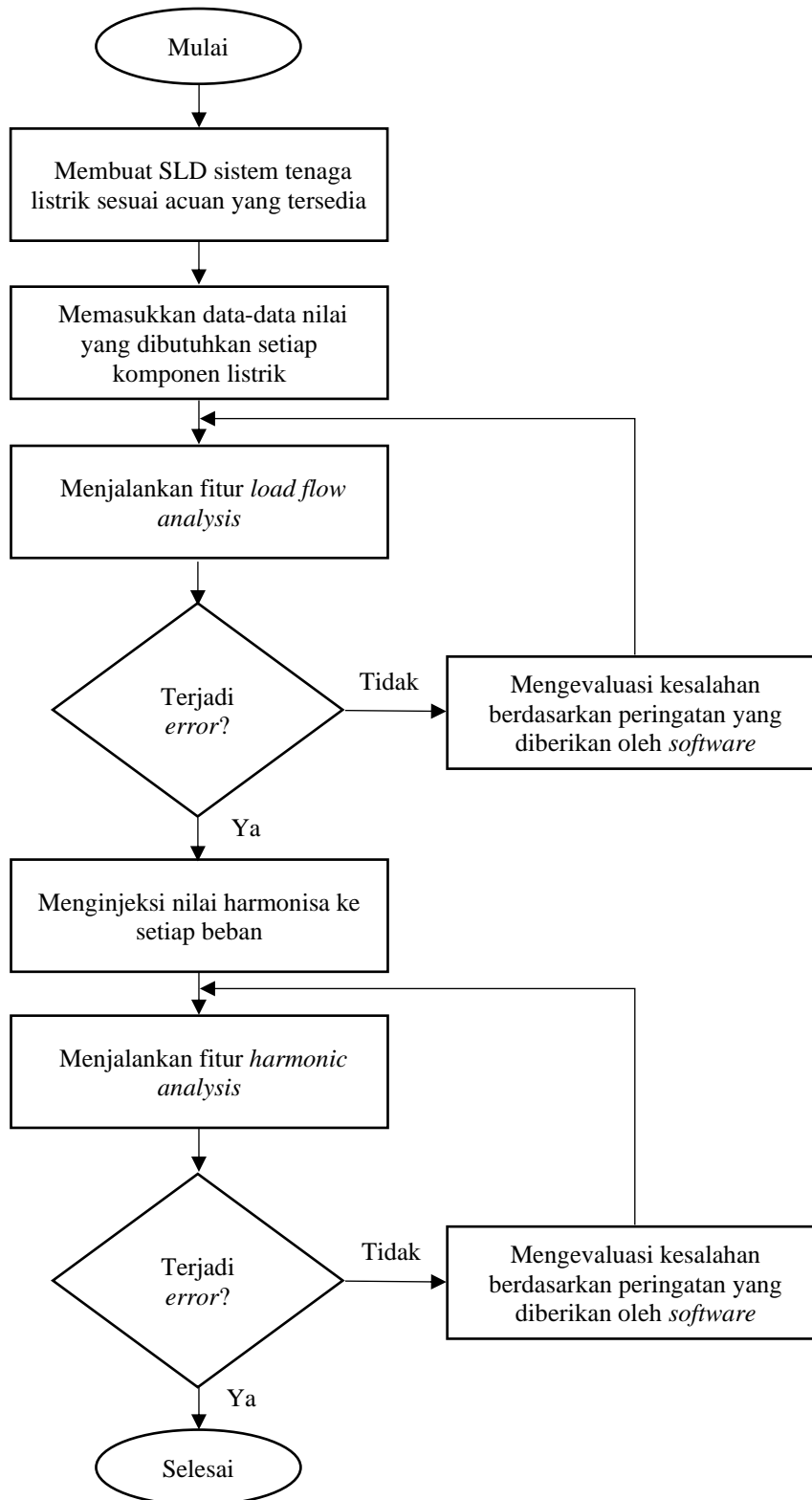
Simulasi menggunakan data SLD pabrik *spare-part* mobil. SLD simulasi dapat dilihat pada gambar 3.2.



Gambar 3.2. SLD Sistem Tenaga Listrik

Power grid diasumsikan sebagai sumber tegangan dari Perusahaan Listrik Negara (PLN) dengan kapasitas 1040 kVA yang terhubung dengan transformator berkapasitas 1600 kVA. Terdapat 5 beban mekanis dengan total daya pasif 169.3 kVA terhubung dengan transformator. Simulasi dilakukan dengan dua kondisi. Simulasi dilakukan tanpa injeksi harmonisa pada kondisi pertama dengan tujuan untuk mengetahui pengaruh harmonisa selain injeksi harmonisa. Simulasi dilakukan dengan injeksi harmonisa pada kondisi kedua.

Diagram alir pembuatan simulasi sistem tenaga listrik untuk menganalisa harmonisa dapat dilihat pada gambar 3.3.



Gambar 3.3. Diagram Alir Simulasi

3.5.4. Mengidentifikasi Beban Penyebab Harmonisa

Mengidentifikasi beban penyebab harmonisa menggunakan fitur *harmonic analysis*. Simulasi kondisi pertama dilakukan untuk mengetahui penyebab harmonisa selain injeksi harmonisa. Simulasi kondisi kedua dilakukan untuk mengetahui nilai harmonisa pada sistem tenaga listrik dengan injeksi harmonisa. Simulasi selanjutnya dilakukan dengan melepas salah satu beban N-1 secara bergantian. Simulasi tersebut digunakan untuk mengetahui pengaruh salah satu beban terhadap harmonisa sistem tenaga listrik.

3.5.5. Menambahkan *Single-tuned Filter* pada Simulasi

Ada beberapa teknik mitigasi harmonisa untuk mengurangi atau menghilangkan efek harmonisa seperti *K-factor transformer* ^[20], *tuned harmonic filter* ^[21], *active filter* ^[22], dan *shifting transformer* ^[23]. *Single-tuned filter* adalah *filter* pasif yang paling umum digunakan karena kesederhanaan dan biayanya. *Filter* ini direkomendasikan untuk beban non-linier karena tujuan gandanya untuk mengurangi harmonisa dan meningkatkan faktor daya. Kerugian dari *filter* ini adalah terdapat resonansi seri atau paralel yang menginjeksi kedalam sistem ^[24].

Single-tuned filter yang ideal adalah ketika induktor dan kapasitor *filter* memiliki reaktansi setara dan resistansi murni pada harmonisa yang disetel. Impedansi *filter* total terdapat pada persamaan (14) dimana X_C dan X_L terdapat pada persamaan (15) dan (17) secara berturut-turut ^[25].

$$Z_f = R + j(X_L - X_C) \quad (14)$$

Keterangan:

Z_f : Impedansi *filter*

R : Resistansi

j : Imajiner

X_L : Reaktansi induktif

X_C : Reaktansi kapasitif

Menentukan nilai L dan C sebagai desain pembentuk *single-tuned filter* dengan menggunakan persamaan (15-18) [26]:

$$X_C = \frac{V_L^2}{Q_C} \quad (15)$$

$$C = \frac{1}{2\pi f X_C} \quad (16)$$

$$X_L = \frac{X_C}{t_f^2} \quad (17)$$

$$L = \frac{X_L}{2\pi f} \quad (18)$$

Keterangan:

V_L : Tegangan *line-line* (kV)

Q_C : Daya reaktif (kVAR)

f : Frekuensi fundamental (50 Hz)

t_f : *Tuned harmonic order*

Menentukan nilai R menggunakan persamaan (19) dan (20)

$$X_n = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (19)$$

$$R = \frac{X_n}{Q_f} \quad (20)$$

Keterangan:

X_n : Reaktansi pada frekuensi disetel

Q_f : *Quality factor*

Desain *filter* skala industri memiliki nilai Q_f sebesar 20-100. Filter yang memiliki nilai Q_f kecil disetel dengan tajam ke frekuensi yang lebih rendah, sementara nilai

Q_f yang tinggi menghasilkan biaya reaktor yang mahal. Oleh karena itu, ada batasan standar untuk membatasi Q_f untuk reaktor ^[25].

BAB V. KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. Kesimpulan

Kesimpulan pada penelitian ini adalah:

1. Penyebab harmonisa pada sistem tenaga listrik adalah beban-beban non-linier;
2. Penambahan *filter single-tuned* dapat mereduksi nilai THD dari 22.07% menjadi 3.74%.

5.2. Saran

Penelitian ini menggunakan metode aliran daya harmonik. Terdapat beberapa metode untuk mendesain *filter* yang optimal sebagai upaya mitigasi harmonisa. Metode-metode tersebut antara lain *Adaptive Carrier Frequency Optimization* ^[24], *Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm (NSGA-II)* ^[27], *Artificial Bee Colony* ^[28], *Adaptive Bacterial Foraging Optimization* ^[29], *Differential Evolution* ^[30], *Cuckoo Search Algorithm* ^[31], *Crow Search Algorithm* ^[32], dan *Bat Algorithm* ^[33].

DAFTAR PUSTAKA

DAFTAR PUSTAKA

- [1] L. Wang, Q. Ren, Y. Ma, dan D. Wu, "Optimal maintenance design-oriented nonprobabilistic reliability methodology for existing structures under static and dynamic mixed uncertainties," *IEEE Trans Reliab*, vol. 68, no. 2, hlm. 496–513, Jun 2019, doi: 10.1109/TR.2018.2868773.
- [2] F. Otniel dan N. Busaeri, "Analisa Aliran Daya Sistem Tenaga Listrik pada Bagian Penyulang 05ee0101a di Area Utilities Ii Pt. Pertamina (Persero) Refinery Unit Ivcilacap Menggunakan Metode Newton-Raphson," *Journal Of Energy And Electrical Engineering (JEEE)*, vol. 1, no. 01, 2019.
- [3] M. Putri dan I. Pasaribu, "Analisis Kualitas Daya Akibat Beban Reaktansi Induktif (XL) di Industri," *Journal of Electrical Technology*, vol. 3, no. 2, 2018.
- [4] I. Putu, A. Wirajaya, W. Rinas, dan W. Sukerayasa, "Studi Analisa Pengaruh Total Harmonic Distortion (THD) Terhadap Rugi-Rugi, Efisiensi, dan Kapasitas Kerja Transformator pada Penyulang Kerobokan," 2019.
- [5] M. Afdal dan R. Lubis, "Analisa Total Distorsi Harmonik Arus Terhadap Pengaruh Beban pada Sistem 3 Fasa dengan Menggunakan Simulink Matlab," *KITEKTRO*, vol. 7, no. 3, hlm. 122–127, 2022.
- [6] H. Prasetijo, P. Priswanto, W. H.P., dan I. Irunowo, "Analisa Pemasangan Filter Pasif Sebagai Peredam Harmonisa Akibat Beban Non Linier," *JRST (Jurnal Riset Sains dan Teknologi)*, vol. 7, no. 1, hlm. 109, Mar 2023, doi: 10.30595/jrst.v7i1.16677.
- [7] T. Ongko dan Fauzan, "Analisa Beban Non-Linier Terhadap Nilai THDi dan THDv di Gedung Equity Tower," *Jurnal Elektro*, vol. 11, hlm. 57–71, 2023.
- [8] J. Sinaga, R. Siburian, dan J. Sirait, "Analisa Pengaruh Harmonisa pada Pengoperasian Beban Listrik," *Jurnal Teknologi Energi UDA*, vol. 9, no. 2, hlm. 88–97, 2020.
- [9] W. Abbas dan M. A. Saqib, "Effect of Nonlinear Load Distributions on Total Harmonic Distortion in a Power System," dalam *IEEE International Conference on Electrical Engineering 2007*, 2007.
- [10] M. Z. Mohd Radzi, M. M. Azizan, dan B. Ismail, "Observatory case study on total harmonic distortion in current at laboratory and office building," *J Phys Conf Ser*, vol. 1432, no. 1, Jan 2020, doi: 10.1088/1742-6596/1432/1/012008.
- [11] A. H. Santoso, R. A. Ananto, dan W. Dali, "Pengaruh Perbedaan Tipe Belitan Terhadap Harmonisa Distribusi MMF Celah Udara Motor Induksi," *Jurnal Teknik Ilmu & Aplikasi*, vol. 3, no. 2, hlm. 60–65, 2022.

- [12] B. Mismail, *Rangkaian Listrik Jilid Kedua*, 2 ed. Bandung: ITB, 1997.
- [13] A. Panteghini, A. Feriani, E. A. Piana, dan N. B. Roozen, "Evaluation of the sound reduction index of flat panels through FE models accounting for fluid-structure interaction: Stochastic versus plane wave superposition methods," *J Sound Vib*, vol. 509, Sep 2021, doi: 10.1016/j.jsv.2021.116133.
- [14] K. Tsutsumi, K. Imaizumi, Y. Haneda, dan H. Takada, "Sound field synthesis based on superposition of multipoles comprising focused monopole sources," *Acoust Sci Technol*, vol. 41, no. 2, hlm. 489–500, 2020, doi: 10.1250/ast.41.489.
- [15] A. Widodo, M. Cholifah Aisyah, I. Eka Ningrum, M. Azwar Annas, dan M. Musfiana, "Analisis Percobaan Superposisi Gelombang Suara Menggunakan Software Audacity," *YASIN Jurnal Pendidikan dan Sosial Budaya*, vol. 2, no. 4, hlm. 459–466, 2022, [Daring]. Tersedia pada: <https://ejournal.yasin-alsys.org/index.php/yasin>
- [16] R. Jaafar, A. Daud, dan M. Yusof, "Physics Education Visualizing the superposition principle of sound waves in both-closed-end resonance tube," *Phyiscs Education*, 2019.
- [17] A. Demirci, O. Akar, Ü. K. Terzi, dan T. Sonmezocak, "Investigation of International Harmonic Standards in Power Systems," dalam *4th international mardin artuklu scientific research congress*, 2020, hlm. 97–110. [Daring]. Tersedia pada: <https://www.researchgate.net/publication/355369245>
- [18] N. Cho, H. Lee, R. Bhat, dan K. Heo, "Analysis of Harmonic Hosting Capacity of IEEE Std. 519 with IEC 61000-3-6 in Distribution Systems," dalam *2019 IEEE PES GTD Grand International Conference and Exposition Asia*, 2019.
- [19] X. Lai *dkk.*, "Mechanism, modeling, detection, and prevention of the internal short circuit in lithium-ion batteries: Recent advances and perspectives," *Energy Storage Mater*, vol. 35, hlm. 470–499, Mar 2021, doi: 10.1016/j.ensm.2020.11.026.
- [20] P. Bagheri dan W. Xu, "A technique to mitigate zero-sequence harmonics in power distribution systems," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 29, no. 1, hlm. 215–223, 2014, doi: 10.1109/TPWRD.2013.2291866.
- [21] A. A. A. El-Ela, S. Allam, dan H. El-Arwash, "An optimal design of single tuned filter in distribution systems," *Electric Power Systems Research*, vol. 78, no. 6, hlm. 967–974, Jun 2008, doi: 10.1016/j.epsr.2007.07.004.
- [22] A. Teke, L. Saribulut, dan M. Tumay, "A novel reference signal generation method for power-quality improvement of unified power-quality conditioner," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 26, no. 4, hlm. 2205–2214, Okt 2011, doi: 10.1109/TPWRD.2011.2141154.

- [23] A. Ghorbani, "An adaptive distance protection scheme in the presence of phase shifting transformer," *Electric Power Systems Research*, vol. 129, hlm. 170–177, Des 2015, doi: 10.1016/j.epsr.2015.08.007.
- [24] Z. Yang, J. Sun, S. Li, M. Huang, X. Zha, dan Y. Tang, "An Adaptive Carrier Frequency Optimization Method for Harmonic Energy Unbalance Minimization in a Cascaded H-Bridge-Based Active Power Filter," *IEEE Trans Power Electron*, vol. 33, no. 2, hlm. 1024–1037, Feb 2018, doi: 10.1109/TPEL.2017.2679028.
- [25] N. H. B. Abdul Kahar dan A. F. Zobaa, "Application of mixed integer distributed ant colony optimization to the design of undamped single-tuned passive filters based harmonics mitigation," *Swarm Evol Comput*, vol. 44, hlm. 187–199, Feb 2019, doi: 10.1016/j.swevo.2018.03.004.
- [26] K. Kritsanasuwan, U. Leeton, dan T. Kulworawanichpong, "Harmonic mitigation of AC electric railway power feeding system by using single-tuned passive filters," *Energy Reports*, vol. 8, hlm. 1116–1124, Nov 2022, doi: 10.1016/j.egyr.2022.05.276.
- [27] J. C. Leite, I. P. Abril, M. E. de L. Tostes, dan R. C. L. de Oliveira, "Multi-objective optimization of passive filters in industrial power systems," *Electrical Engineering*, vol. 99, no. 1, hlm. 387–395, Mar 2017, doi: 10.1007/s00202-016-0420-3.
- [28] N. spencer prathap Singh dan N. K. Nair, "Artificial bee colony algorithm for inverter complex wave reduction under line-load variations," *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, vol. 40, no. 5, hlm. 1593–1607, Mar 2018, doi: 10.1177/0142331216687019.
- [29] M. Mohammadi, A. M. Rozbahani, dan M. Montazeri, "Multi criteria simultaneous planning of passive filters and distributed generation simultaneously in distribution system considering nonlinear loads with adaptive bacterial foraging optimization approach," *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 79, hlm. 253–262, Jul 2016, doi: 10.1016/j.ijepes.2016.01.013.
- [30] P. P. Biswas, P. N. Suganthan, dan G. A. J. Amaratunga, "Minimizing harmonic distortion in power system with optimal design of hybrid active power filter using differential evolution," *Applied Soft Computing Journal*, vol. 61, hlm. 486–496, Des 2017, doi: 10.1016/j.asoc.2017.08.031.
- [31] S. Dhabal dan P. Venkateswaran, "An efficient gbest-guided Cuckoo Search algorithm for higher order two channel filter bank design," *Swarm Evol Comput*, vol. 33, hlm. 68–84, Apr 2017, doi: 10.1016/j.swevo.2016.10.003.
- [32] S. H. E. Abdel Aleem, A. F. Zobaa, dan M. E. Balci, "Optimal resonance-free third-order high-pass filters based on minimization of the total cost of the filters using Crow Search Algorithm," *Electric Power Systems Research*, vol. 151, hlm. 381–394, Okt 2017, doi: 10.1016/j.epsr.2017.06.009.

- [33] N. C. Yang dan M. D. Le, “Multi-objective bat algorithm with time-varying inertia weights for optimal design of passive power filters set,” *IET Generation, Transmission and Distribution*, vol. 9, no. 7, hlm. 644–654, Apr 2015, doi: 10.1049/iet-gtd.2014.0965.