

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

PT Semen Tonasa merupakan salah satu produsen semen terbesar di Kawasan Timur Indonesia dengan kapasitas terpasang mencapai 5.98 jt ton semen per tahun. Untuk mendukung proses produksi yang berskala besar dan beroperasi secara kontinu, sistem kelistrikan memiliki peranan yang sangat penting dalam menjaga keandalan dan efisiensi operasional pabrik, khususnya pada Unit IV yang memiliki kapasitas produksi ke-2 terbesar di antara unit lainnya.

Seiring dengan perkembangan teknologi industri, penerapan sistem otomasi dan pengendalian berbasis elektronika daya menjadi semakin luas. Peralatan seperti *Variable Frequency Drive* (VFD), inverter, dan sistem kontrol berbasis semikonduktor digunakan untuk mengatur kecepatan dan torsi motor sesuai kebutuhan proses produksi. Penggunaan peralatan tersebut memang memberikan keuntungan dari sisi efisiensi energi dan fleksibilitas operasi, namun di sisi lain menimbulkan permasalahan kualitas daya listrik, salah satunya berupa gangguan harmonisa.

Harmonisa pada sistem tenaga listrik menyebabkan distorsi bentuk gelombang arus dan tegangan, yang dapat berdampak pada meningkatnya rugi-rugi daya, pemanasan berlebih pada transformator dan motor listrik, penurunan umur peralatan, serta potensi gangguan pada sistem proteksi dan peralatan sensitif. Jika tidak ditangani dengan baik, kondisi ini dapat menurunkan keandalan sistem kelistrikan dan mengganggu kontinuitas proses produksi.

Salah satu metode yang umum digunakan untuk menanggulangi gangguan harmonisa adalah pemasangan filter pasif. Filter pasif dirancang menggunakan kombinasi induktor (L) dan kapasitor (C) untuk menyerap harmonisa pada frekuensi tertentu sehingga dapat menurunkan nilai *Total Harmonic Distortion* (THD) hingga memenuhi batas yang ditetapkan oleh standar, seperti *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (IEEE) 519-2022.

Berdasarkan kondisi tersebut, diperlukan suatu studi yang mampu menganalisis tingkat harmonisa pada sistem kelistrikan PT Semen Tonasa Unit IV serta mengevaluasi efektivitas penerapan filter pasif sebagai solusi mitigasi harmonisa. Dengan memanfaatkan perangkat lunak simulasi *Electrical Transient Analyzer Program* (ETAP), penelitian ini diharapkan dapat memberikan gambaran kuantitatif mengenai dampak harmonisa dan kontribusi filter pasif dalam meningkatkan kualitas daya serta mendukung keandalan operasi sistem kelistrikan pabrik.

1.2 Kualitas Sistem Tenaga Listrik

Definisi kualitas daya dapat sangat berbeda, tergantung pada kerangka acuan masing-masing. Misalnya, sebuah perusahaan utilitas dapat mendefinisikan kualitas daya sebagai keandalan dan menunjukkan statistik yang menunjukkan bahwa sistemnya 99,98 persen andal. Kriteria yang ditetapkan oleh badan pengatur biasanya sejalan dengan hal ini. Produsen peralatan beban dapat mendefinisikan kualitas daya sebagai karakteristik catu daya yang memungkinkan peralatan tersebut

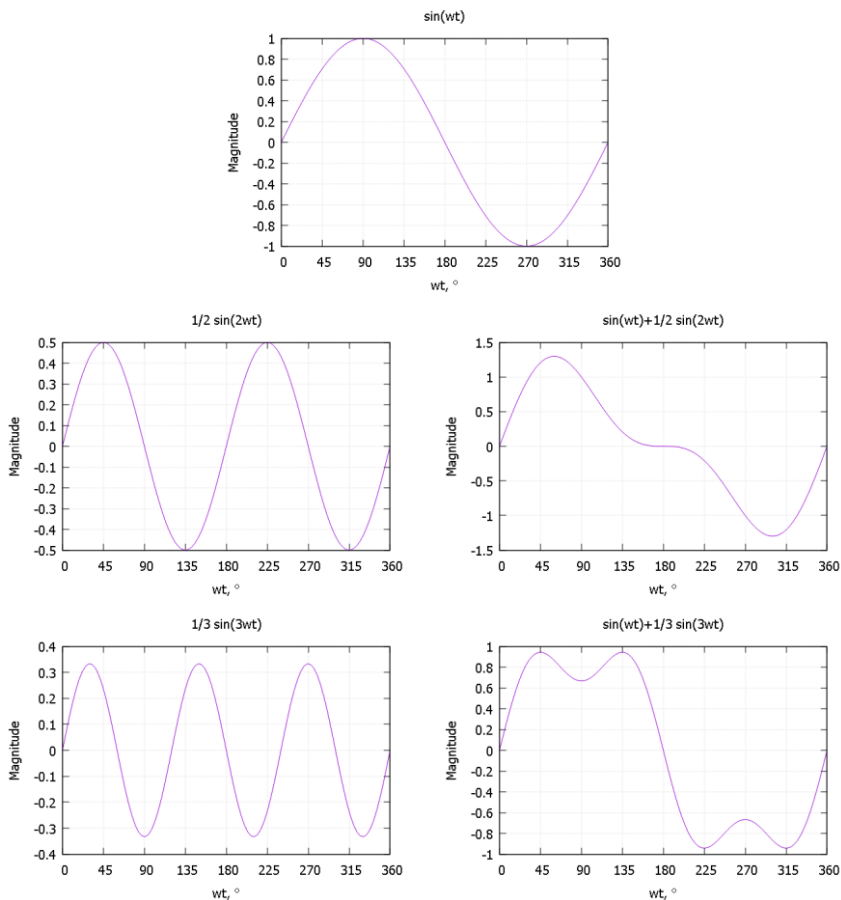
berfungsi dengan baik. Karakteristik ini dapat sangat berbeda untuk kriteria yang berbeda. (Dugan, McGranaghan, Santoso, & Beaty, 2003)

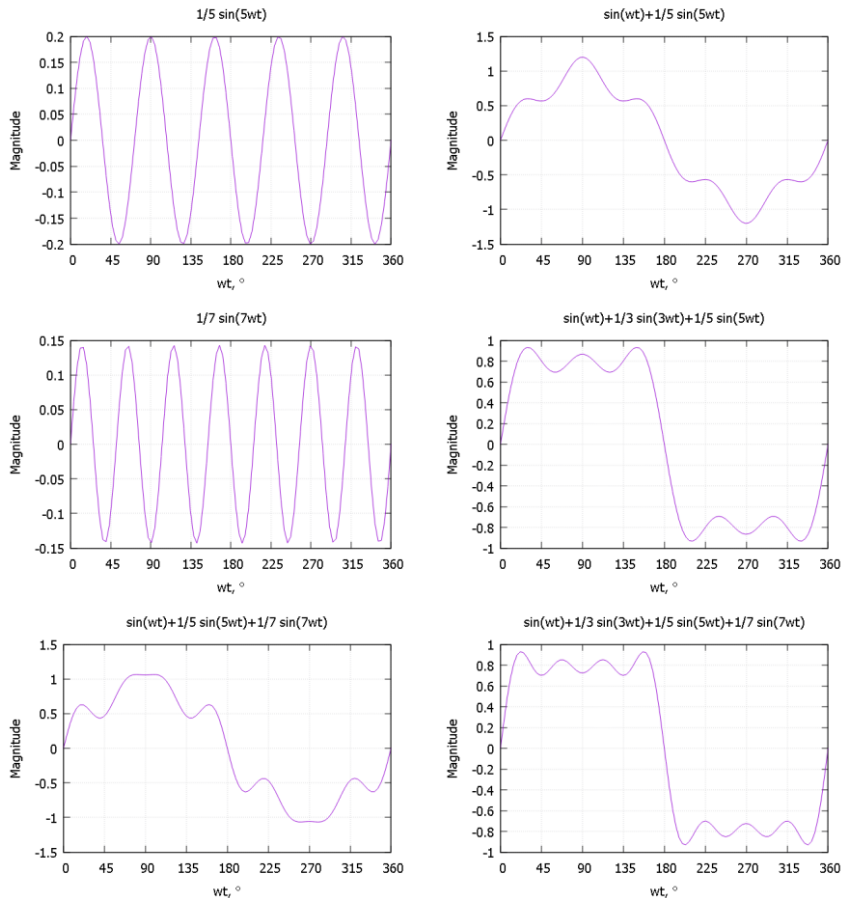
Kualitas daya pada akhirnya merupakan masalah yang berpusat pada konsumen, dan sudut pandang pengguna akhirnya yang diutamakan. Oleh karena itu, definisi masalah kualitas daya berikut digunakan dalam kalimat ini:

“Masalah daya apa pun yang terwujud dalam penyimpangan tegangan, arus, atau frekuensi yang mengakibatkan kegagalan atau kesalahan pengoperasian peralatan pelanggan.”

1.3 Harmonisa Listrik

Harmonisa listrik adalah komponen bentuk gelombang terdistorsi yang frekuensinya merupakan kelipatan bilangan bulat dari frekuensi fundamental. Dengan kata lain, setiap bentuk gelombang terdistorsi periodik terdiri dari gelombang sinusoidal dengan frekuensi yang berbeda; sebuah bentuk gelombang dasar pada frekuensi fundamental dan sejumlah komponen sinusoidal atau harmonisa dengan frekuensi yang merupakan kelipatan bilangan bulat dari frekuensi fundamental (Wakileh, 2001).





Gambar 1 Gelombang Fundamental dan Beberapa Gelombang Terdistorsi

Karakteristik harmonisa pada suatu rangkaian penyearah dipengaruhi oleh jumlah pulsa (*pulse number*) yang digunakan. Secara teoritis, orde harmonisa yang dihasilkan oleh penyearah dapat ditentukan berdasarkan hubungan matematis antara jumlah pulsa dan kelipatan frekuensi dasar, sebagaimana dinyatakan pada persamaan (1).

$$n = (n \times p) \pm 1 \quad (1)$$

Dimana n merupakan bilangan bulat sama atau lebih dari 1 dan p merupakan jumlah pulsa (De La Rosa, 2017).

1.4 Analisis Fourier

Deret Fourier merupakan metode yang efektif untuk mempelajari dan menganalisis distorsi harmonisa pada sistem tenaga listrik. Melalui deret Fourier, suatu bentuk gelombang yang terdistorsi dapat didekomposisi menjadi komponen-komponen sinusoidal pada frekuensi dasar dan kelipatannya, sehingga kontribusi masing-masing harmonisa dapat dianalisis secara terpisah (Wakileh, 2001).

Secara umum, setiap bentuk gelombang periodik dapat dinyatakan sebagai penjumlahan komponen gelombang Fourier. Berdasarkan hasil penurunan dari

persamaan dasar, bentuk persamaan akhir yang digunakan untuk analisis harmonisa dinyatakan pada persamaan (3).

$$f(t) = A_0 + \sum_{h=1}^{\infty} [A_h \cos(h\omega_0 t) + B_h \sin(h\omega_0 t)] \quad (2)$$

$$= A_0 + \sum_{h=1}^{\infty} C_h \sin(h\omega_0 t + \phi_h) \quad (3)$$

Dimana

$f(t)$	adalah fungsi periodik frekuensi f_0 , kecepatan sudut $\omega_0 = 2\pi f_0$ dan periode $T = 1/f_0 = 2\pi/\omega_0$
$C_1 \sin(\omega_0 t + \phi_1)$	mewakili komponen fundamental
$C_h \sin(h\omega_0 t + \phi_h)$	mewakili harmonisa ke-h dari amplitudo C_h , frekuensi hf_0 dan fasa ϕ_h .

1.5 Karakteristik Harmonisa Dalam Sistem Tenaga Listrik

Berdasarkan ordonya, harmonisa dapat diklasifikasikan menjadi harmonisa ganjil dan harmonisa genap. Harmonisa ganjil terdiri atas komponen dengan orde bilangan ganjil, seperti orde ke-3, ke-5, ke-7, ke-9, ke-11, dan seterusnya, sedangkan harmonisa genap terdiri atas komponen dengan orde bilangan genap, seperti orde ke-2, ke-4, ke-6, ke-8, ke-10, dan seterusnya.

Harmonisa orde ke-1 merepresentasikan frekuensi dasar (fundamental) dari sistem tenaga listrik. Sementara itu, harmonisa orde ke-0 merepresentasikan komponen arus searah *Direct Current* (DC) yang terkandung dalam bentuk gelombang. Komponen DC tersebut merupakan selisih bersih antara bagian positif dan negatif dari satu siklus gelombang penuh (Sankaran, 2002).

Menurut (Aini & Mar'i, 2021), pada sistem kelistrikan tiga fasa seimbang dengan urutan fasa R–S–T, ketiga tegangan fasa memiliki besar yang sama dan saling berjarak 120° secara listrik, demikian pula dengan arus fasanya. Berdasarkan karakteristik urutan fasanya, komponen harmonisa pada sistem tiga fasa tersebut dapat diklasifikasikan menjadi tiga jenis, yaitu:

- **Harmonisa Urutan Positif**
Harmonisa urutan positif memiliki urutan fasa yang sama dengan fasor fundamental, yaitu terdiri dari tiga fasor dengan besar yang sama dan saling berbeda sudut fasa sebesar 120° dengan urutan R–S–T. Jenis harmonisa ini mencakup harmonisa orde ke-1, ke-4, ke-7, ke-10, dan seterusnya.
- **Harmonisa Urutan Negatif**
Harmonisa urutan negatif memiliki urutan fasa yang berlawanan dengan fasor fundamental, yaitu terdiri dari tiga fasor dengan besar yang sama dan saling berbeda sudut fasa sebesar 120° , dengan urutan fasa R–T–S. Jenis harmonisa ini mencakup harmonisa orde ke-2, ke-5, ke-8, dan seterusnya.
- **Harmonisa Urutan Nol**

Harmonisa urutan nol terdiri dari fasor-fasor yang memiliki besar yang sama dan tidak memiliki perbedaan sudut fasa (0°), sehingga seluruh fasor berada dalam kondisi sefasa satu sama lain. Jenis harmonisa ini mencakup harmonisa orde ke-3, ke-6, ke-9, dan seterusnya.

1.6 Indeks Harmonisa

1.6.1 Individual Harmonic Distortion

Menurut (Arrillaga & Watson, 2003), *Individual Harmonic Distortion* (IHD) didefinisikan sebagai rasio antara nilai *root mean square* (rms) dari komponen harmonisa pada orde tertentu terhadap nilai rms frekuensi dasar. Secara matematis, sebagaimana dinyatakan pada persamaan (4)

$$IHD_H = \frac{M_H}{M_1} \times 100\% \quad (4)$$

Dimana

IHD_H *Individual Harmonic Distortion* (pada orde ke-H)

M_H nilai rms tegangan atau arus harmonisa (pada orde ke-H)

M_1 nilai rms tegangan atau arus pada frekuensi dasar

1.6.2 Total Harmonic Distortion

THD merupakan salah satu indeks utama dalam penilaian kualitas daya listrik pada sistem transmisi dan distribusi. THD dinyatakan dalam satuan persen (%) dan digunakan untuk menunjukkan tingkat distorsi yang diakibatkan oleh seluruh komponen harmonisa terhadap gelombang dasar. Secara umum, THD dibedakan menjadi THD tegangan (THD_V) dan THD arus (THD_I). Nilai THD secara matematis dapat dinyatakan sebagaimana ditunjukkan pada persamaan (5)

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{H=2}^{\infty} IHD_H^2}}{M_1} \times 100\% \quad (5)$$

Dimana

IHD_H *Individual Harmonic Distortion* (pada orde ke-H)

M_1 Nilai rms tegangan atau arus pada frekuensi dasar

1.6.3 Total Demand Distortion

Tingkat distorsi arus pada suatu sistem umumnya dicirikan menggunakan nilai THD. Namun demikian, penggunaan THD arus saja dalam beberapa kondisi dapat memberikan gambaran yang kurang representatif. Arus dengan magnitudo kecil dapat memiliki nilai THD yang tinggi, tetapi belum tentu menimbulkan dampak yang signifikan terhadap sistem tenaga listrik. Sebagai contoh, VFD sering menunjukkan nilai THD arus yang tinggi ketika beroperasi pada kondisi beban ringan. Meskipun demikian, kondisi tersebut tidak selalu menjadi permasalahan serius karena besarnya arus harmonisa yang mengalir relatif kecil, walaupun tingkat distorsi relatifnya tinggi.

Oleh karena itu, untuk mengevaluasi dampak harmonisa arus secara lebih akurat terhadap sistem tenaga listrik, digunakan parameter *Total*

Demand Distortion (TDD). Parameter ini mempertimbangkan besarnya arus harmonisa terhadap arus beban pada kondisi permintaan maksimum. Secara umum, nilai TDD dapat dirumuskan sebagaimana ditunjukkan pada persamaan (6).

$$TDD = \frac{\sqrt{\sum_{H=2}^{\infty} IHD_H^2}}{I_L} \times 100\% \quad (6)$$

Pada persamaan tersebut, I_L merupakan arus beban permintaan puncak (maksimum) pada komponen frekuensi dasar yang diukur di Point of Common Coupling (PCC). Nilai I_L dapat ditentukan dengan dua pendekatan. Untuk sistem atau fasilitas yang telah beroperasi, I_L dihitung sebagai rata-rata arus permintaan maksimum selama 12 bulan sebelumnya, yang diperoleh dari data pembacaan beban puncak bulanan. Sementara itu, untuk fasilitas baru, nilai I_L harus diperkirakan berdasarkan profil beban yang direncanakan atau diprediksi (Dugan, McGranaghan, Santoso, & Beaty, 2003).

1.6.4 Batas Distorsi Harmonisa

Standar yang biasa digunakan untuk menentukan batas distorsi harmonisa pada suatu perusahaan adalah standar IEEE 519-2022. Standar tersebut dibagi atas 2 kondisi yaitu untuk tegangan dan arus (Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2022)

Tabel 1 Standar IEEE 519-2022 untuk IHD dan THD tegangan

Tegangan bus pada PCC	IHD _V (%)	THD _V (%)
$V \leq 1,0$ kV	5,0	8,0
$1 \text{ kV} < V \leq 69$ kV	3,0	5,0
$69 \text{ kV} < V \leq 161$ kV	1,5	2,5
$161 \text{ kV} < V$	1,0	1,5*
*Sistem Tegangan Tinggi bisa mencapai THD 2,0% dimana penyebabnya adalah terminal HVDC yang efeknya akan melemah di jaringan tempat pengguna selanjutnya terhubung.		

Tabel 2 Standar IEEE 519-2022 untuk IHD dan THD arus

Distorsi harmonisa pada arus maksimum dalam persen terhadap I_L						
I_{sc}/I_L	Orde Individu dari Harmonisa (Orde Ganjil)					TDD%
	$h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h$	
< 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

Untuk harmonisa genap dengan urutan ≤ 6 : batasnya menjadi 50% dari batas harmonisa ganjil.
Untuk harmonisa genap dengan urutan > 6 : batasnya sama dengan harmonisa ganjil.
Tidak diperbolehkan distorsi arus yang dihasilkan dari peralatan DC seperti <i>halfwave converter</i>
Seluruh peralatan pembangkit listrik dibatasi pada nilai – nilai arus tanpa perlu memperhatikan nilai aktual dari I_{SC}/I_L
dimana:
I_{SC} = Nilai arus hubung singkat maksimum pada PCC
I_L = Nilai arus beban maksimum (komponen frekuensi fundamental) pada PCC

Untuk standar harmonisa arus ditentukan oleh SC_{ratio} (hasil bagi antara arus hubung singkat (I_{SC}) dan arus beban maksimum (I_L), sedangkan untuk standar harmonisa tegangan ditentukan oleh rating tegangan sistem yang dipakai (Dugan, McGranaghan, Santoso, & Beaty, 2003). SC_{ratio} dapat dirumuskan dengan persamaan (7) sebagai berikut:

$$SC_{ratio} = \frac{I_{SC}}{I_L} \quad (7)$$

1.7 Sumber Harmonisa

Dikutip dari (De La Rosa, 2017). Beban non-linear adalah beban dimana bentuk gelombang arus tidak menyerupai bentuk gelombang tegangan yang diberikan karena sejumlah alasan, misalnya, penggunaan sakelar elektronik yang hanya mengalirkan arus beban selama sebagian kecil periode frekuensi daya. Oleh karena itu, kita dapat menganggap beban non-linear sebagai beban dimana hukum Ohm tidak dapat menggambarkan hubungan antara V dan I. Di antara yang paling umum digunakan sebagai berikut:

- Tipe Tradisional (Klasik)
 - Transformator
 - Mesin putar
 - Tungku busur
- Tipe Modern (Elektronik Daya)
 - Lampu fluoresen
 - Kontrol elektronik dan catu daya mode sakelar yang banyak digunakan saat ini dalam industri dan peralatan elektronik kantor modern
 - Perangkat yang dikendalikan thyristor yang meliputi:
 - Penyearah
 - Inverter
 - Kompensator VAR statis
 - Siklokonverter
 - Transmisi HVDC
- Keluarga thyristor meliputi

- *riode thyristor* pemblokiran terbalik atau *silicon controlled rectifiers* (SCR)
- *Triode thyristor* dua arah, yang dikenal sebagai triac
- *Bidirectional diode thyristors or diacs*
- *Reverse conducting triode thyristors*
- *Reverse blocking diode thyristors*
- *Static inductive thyristors*
- *Gate turn-off thyristors "GTO's"*
- Penyearah AC/DC digunakan pada:
 - Penggerak motor DC
 - Catu daya yang diatur
 - Pengisi daya baterai
 - Transmisi HVDC

1.8 Pengaruh Harmonisa Pada Perangkat Sistem Tenaga Listrik

Berdasarkan tabel yang disajikan dalam buku *Electrical Power Quality* karya (Dixit & Yadav, 2010), harmonisa listrik memiliki dampak yang luas dan berpotensi merugikan terhadap berbagai peralatan dalam sistem tenaga listrik. *Circuit breaker* dapat mengalami malfungsi akibat distorsi harmonisa, sedangkan bank kapasitor sangat rentan terhadap pemanasan berlebih, kerusakan isolasi, serta kegagalan sekering internal. Peralatan proteksi juga dapat terpengaruh secara negatif, yang menyebabkan pengoperasian tidak semestinya, seperti false trip atau kegagalan trip pada kondisi gangguan.

Selain itu, perangkat pengukuran dapat memberikan hasil pembacaan yang tidak akurat akibat distorsi bentuk gelombang arus dan tegangan. Transformator dan reaktor mengalami peningkatan pemanasan karena bertambahnya rugi-rugi yang ditimbulkan oleh arus harmonisa, sementara motor listrik dapat mengalami panas berlebih, peningkatan tingkat kebisingan, serta getaran mekanis. Pada sistem komunikasi, harmonisa dapat menimbulkan gangguan berupa kebisingan pada frekuensi tertentu, sedangkan saluran listrik berpotensi mengalami pemanasan berlebih ketika dibebani arus harmonisa.

Peralatan elektronik juga terdampak melalui kesalahan pulsa data, kondisi tegangan lebih atau kurang, serta kedipan tampilan layar. Bahkan peralatan penerangan, seperti lampu pijar, dapat mengalami penurunan umur pakai dan kedipan yang terlihat. Secara keseluruhan, berbagai dampak tersebut menunjukkan bahwa harmonisa listrik dapat menurunkan kinerja peralatan, mengurangi keandalan sistem, dan meningkatkan risiko kegagalan pada sistem kelistrikan.

1.9 ETAP (*Electrical Transient Analyzer Program*)

ETAP merupakan perangkat lunak analisis yang komprehensif untuk perancangan, analisis, dan pengujian sistem tenaga listrik. Melalui modul simulasi offline yang dimilikinya, ETAP mampu memanfaatkan data operasi sistem untuk keperluan pemantauan tingkat lanjut, simulasi, optimasi sistem, manajemen energi, serta pengurangan beban secara cerdas dan berkecepatan tinggi.

Dengan memanfaatkan simulasi berbasis komputer, fenomena harmonisa pada sistem tenaga listrik dapat dimodelkan dan dianalisis secara sistematis. Modul

analisis harmonisa ETAP menyediakan fasilitas yang andal untuk memodelkan berbagai komponen dan peralatan sistem tenaga secara akurat, termasuk pengaruh ketergantungan frekuensi, sifat non-linear, serta karakteristik lain di bawah pengaruh sumber harmonisa. Modul ini menggunakan dua metode analisis utama, yaitu metode aliran beban harmonisa (*harmonic load flow*) dan metode pemindaian frekuensi harmonisa (*harmonic frequency scan*).

Melalui kombinasi ke-2 metode tersebut, berbagai indeks harmonisa dapat dihitung dan dibandingkan dengan batasan yang ditetapkan oleh standar industri. Dengan demikian, permasalahan kualitas daya yang telah terjadi maupun yang berpotensi muncul, serta isu keselamatan yang berkaitan dengan harmonisa, dapat diidentifikasi secara jelas. Selain itu, penyebab permasalahan harmonisa dapat dianalisis, dan berbagai skema mitigasi serta perbaikan dapat diuji dan diverifikasi secara menyeluruh (Electrical Transient and Analysis Program, 2019).

1.10 Evaluasi Batas Distorsi Tegangan dan Arus

Peringatan batas distorsi arus listrik direkomendasikan untuk dievaluasi hanya pada *point of interconnection* (POI) atau pada titik PCC antara dua sistem. Hal ini dilakukan untuk mengevaluasi jumlah distorsi harmonisa yang ditransfer dari satu sistem ke sistem lainnya. Dalam sebagian besar kasus, sistem tersebut adalah sambungan utilitas dan titik beban industri (Electrical Transient and Analysis Program, 2019).

1. Identifikasi cabang yang akan digunakan sebagai titik interkoneksi.
2. Identifikasi "dari bus" sebagai "PCC/POI". Hanya bus "Dari" yang dapat digunakan untuk menentukan titik PCC/POI.
3. Jalankan simulasi hubung singkat menggunakan modul hubung singkat STAR untuk menentukan arus hubung singkat yang tersedia di bus PCC/POI. Hanya arus hubung singkat tiga fase yang perlu dipertimbangkan.
4. Tentukan apakah arus hubung singkat akan digunakan seperti yang dihitung atau jika perlu disesuaikan secara manual untuk konservatisme (yaitu atur arus hubung singkat seperti yang ditentukan pengguna).
5. Aktifkan evaluasi distorsi saat ini di halaman Peringatan kasus studi Harmonisa Analisis. Pastikan cabang yang ditunjuk sebagai titik pertukaran untuk PCC/POI diplot.

Untuk mengevaluasi distorsi tegangan pada suatu sistem, semua yang dibutuhkan tercantum di bawah ini:

1. Pilih buku aturan kepatuhan global atau individual. Jika global, pemilihan buku aturan dengan batasan distorsi tegangan pada halaman peringatan studi kasus sudah cukup. Jika aturan kepatuhan lokal atau individual perlu dipertimbangkan, maka aturan tersebut harus ditentukan pada lokasi masing-masing dan opsi "Kecuali jika Aturan Lokal Dipilih di Editor Bus" diaktifkan (halaman peringatan studi kasus).
2. Tentukan faktor pengali Persen ke-95 Mingguan (100%), Persen ke-99 Mingguan (150%) atau Persen ke-99 Harian (200%). Untuk sebagian besar kasus, nilai 100% sudah cukup.

3. Jalankan simulasi analisis harmonisa.

1.11 Mengatur Parameter Filter

Rangkaian kapasitor yang dipasang paralel dengan beban induktif memasok daya reaktif ke beban tersebut sehingga mengurangi daya reaktif dan daya semu sistem, dan dengan demikian meningkatkan faktor dayanya. Selain itu, arus kapasitor menyebabkan kenaikan tegangan yang mengakibatkan kerugian saluran dan penurunan tegangan yang lebih rendah, sehingga meningkatkan efisiensi dan pengaturan tegangan (Tabatabaei, Aghbolaghi, Bizon, & Blaabjerg, 2017)

$$Q_c = Q_1 - Q_2 \quad (8)$$

$$= P(\tan \varphi_1 - \tan \varphi_2) \quad (9)$$

$$= P(\tan(\cos^{-1} \varphi_1) - \tan(\cos^{-1} \varphi_2)) \quad (10)$$

Dimana $Q_2 = p \times \tan \varphi_2$ mewakili daya reaktif yang diterima dari jaringan setelah memasukkan bank kapasitor, daya aktif P tetap konstan, dan $\cos \varphi_2$ adalah faktor daya baru yang harus direalisasikan. Akibatnya, nilai kapasitas untuk satu kapasitor dari bank segitiga akan menjadi

$$C = \frac{Q_c}{3V_L^2 \times \omega_0} \quad (11)$$

Menurut (Arrillaga & Watson, 2003), filter pasif pengaturan tunggal adalah rangkaian RLC seri yang diatur ke frekuensi salah satu harmonisa (umumnya harmonisa karakteristik yang lebih rendah). Impedansinya diberikan oleh

$$Z_1 = R + j\left(\omega L - \frac{1}{C}\right) \quad (12)$$

yang pada frekuensi resonansi (f_n) berkurang menjadi R . Ada parameter desain dasar yang perlu dipertimbangkan sebelum pemilihan R , L , dan C . Parameter tersebut adalah faktor kualitas (Q). Reaktansi induktor atau kapasitor dalam ohm pada frekuensi yang disetel adalah

$$X_0 = X_L = X_C \quad (13)$$

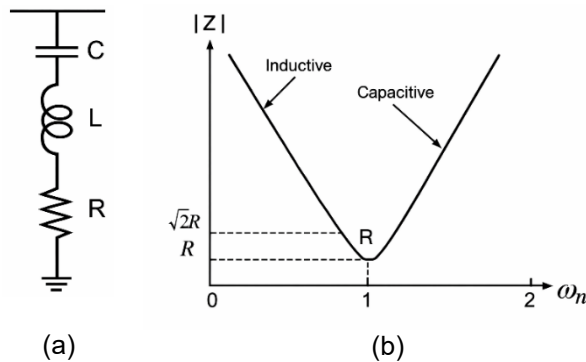
$$X_0 = \omega_n L = \frac{1}{\omega_n C} \quad (14)$$

$$L = \frac{1}{\omega_n^2 \times C} \quad (15)$$

$$Q = \frac{X_0}{R} \quad (16)$$

Faktor kualitas (Q) filter menentukan ketajaman penyetelan, dan dalam hal ini filter dapat berupa tipe Q tinggi atau Q rendah. Filter dengan Q rendah disetel tajam ke salah satu frekuensi harmonisa yang lebih rendah, dan nilai tipikalnya berada di antara rentang 30 dan 60. Filter dengan Q tinggi, biasanya di kisaran 0,5 sampai 5,5, memiliki impedansi rendah pada rentang frekuensi yang luas. Ketika digunakan untuk menghilangkan harmonisa orde tinggi, filter ini juga disebut sebagai filter high-pass. Dalam kasus filter yang disetel, Q didefinisikan sebagai rasio induktansi (atau

kapasitansi) terhadap resistansi pada frekuensi resonansi. Gambar 2 menunjukkan rangkaian filter tunggal dan kurva karakteristiknya (Cho & Cha, 2011).



Gambar 2 (a) Single-tuned shunt filter circuit
(b) single-tuned shunt filter impedance versus frequency

Seringkali menguntungkan untuk menyeting filter harmonisa sekitar 3% hingga 15% di bawah frekuensi yang diinginkan. Penyetelan ini akan memberikan penyaringan harmonisa yang memadai, namun juga memberikan ruang untuk penyimpangan frekuensi filter harmonisa (Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2020).

1.12 Rumusan Masalah

Adapun rumusan masalah yang berusaha untuk diselesaikan pada penelitian kali ini adalah

1. Seberapa besar tingkat harmonisa arus dan tegangan yang terjadi pada sistem tenaga listrik PT Semen Tonasa Unit IV akibat penggunaan beban non-linear?
2. Bagaimana perancangan dan konfigurasi filter pasif harmonisa yang efektif untuk mereduksi gangguan harmonisa pada sistem tersebut?
3. Bagaimana pengaruh penerapan filter pasif terhadap peningkatan kualitas daya, khususnya dalam penurunan nilai THD dan perbaikan faktor daya, serta bagaimana perbandingan kinerja sistem sebelum dan sesudah pemasangan filter?

1.13 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan yang berusaha untuk dicapai pada penelitian kali ini adalah

1. Menganalisis tingkat distorsi harmonisa yang terjadi pada sistem tenaga listrik PT Semen Tonasa Unit IV akibat penggunaan beban non-linear, dengan fokus pada parameter arus dan tegangan harmonisa.
2. Merancang konfigurasi filter pasif harmonisa yang sesuai untuk mereduksi distorsi harmonisa berdasarkan karakteristik beban dan kondisi sistem kelistrikan yang ada.
3. Mengevaluasi pengaruh pemasangan filter pasif terhadap kualitas daya listrik pada sistem, terutama dalam hal: Penurunan nilai THD,

Peningkatan faktor daya (*power factor*), Perbandingan kondisi sistem sebelum dan sesudah penerapan filter pasif harmonisa.

1.14 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat yang akan diperoleh pada penelitian kali ini adalah

1. Memberikan kontribusi terhadap pengembangan ilmu pengetahuan di bidang teknik elektro, khususnya dalam studi mengenai analisis harmonisa dan perancangan filter pasif pada sistem tenaga listrik.
2. Menjadi referensi ilmiah bagi mahasiswa, akademisi, dan peneliti yang tertarik dalam studi kualitas daya listrik (*power quality*) dan mitigasi gangguan harmonisa.
3. Memberikan rekomendasi teknis kepada PT. Semen Tonasa terkait upaya perbaikan kualitas daya dengan cara penerapan filter pasif harmonisa.

BAB II

METODE PENELITIAN

2.1 Waktu dan Lokasi Penelitian

Pelaksanaan penelitian dari tugas akhir ini dimulai pada 3 Juni 2025 sampai dengan 26 November 2025. Penelitian ini dilakukan di PT. Semen Tonasa Unit IV dan di Laboratorium Tegangan Tinggi dan Isolasi, Departemen Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.

2.2 Alat dan Bahan

Pemodelan sistem kelistrikan serta pemodelan filter pereduksi harmonisa digunakan *software* ETAP dengan data sekunder berupa spesifikasi dari peralatan dan mesin listrik yang ada pada Unit IV.

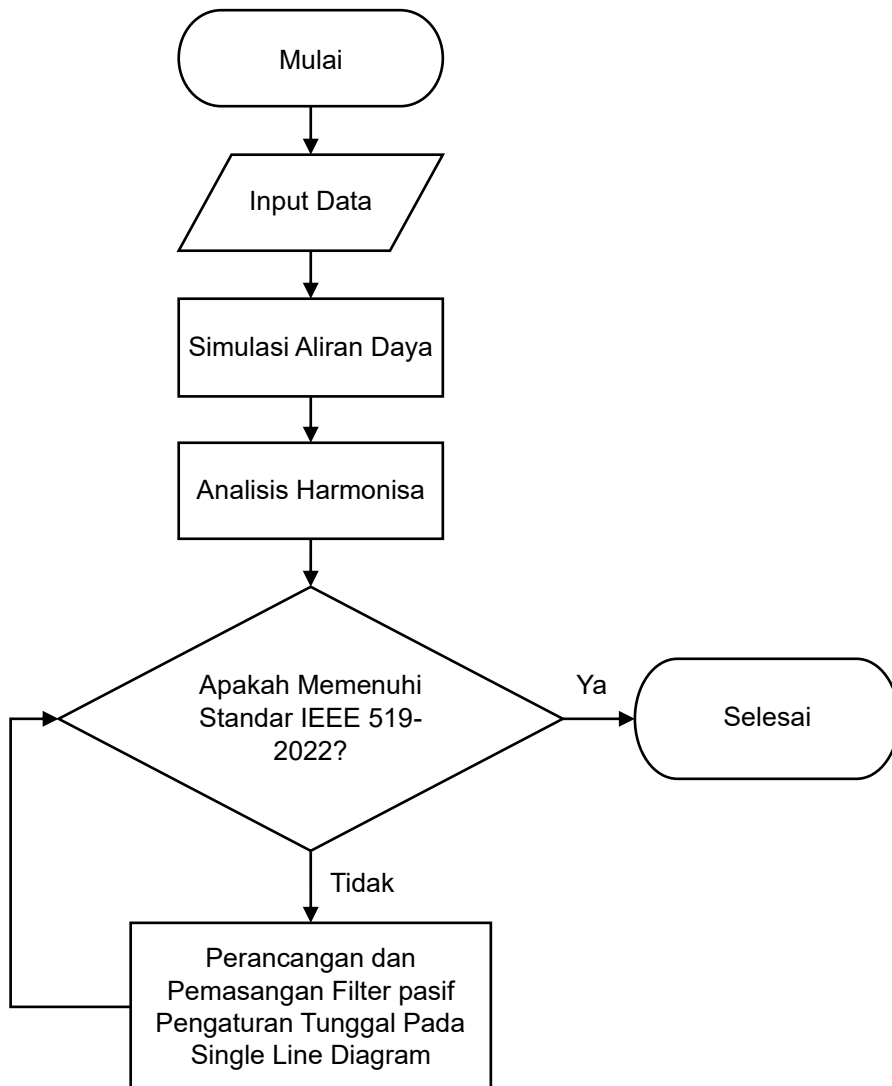
2.3 Teknik Pengumpulan Data

Pengumpulan data dilakukan untuk memperoleh data-data yang diperlukan dalam menyelesaikan penelitian. Data-data yang dikumpulkan berupa data sekunder. Data sekunder merupakan data yang diperoleh dari buku referensi dan dari nameplate peralatan di lokasi penelitian yang menunjang penyusunan penelitian. Adapun data sekunder meliputi:

1. Spesifikasi peralatan berupa data sumber kelistrikan, transformator, motor induksi tiga fasa, dan VFD.
2. Batasan harmonisa berdasarkan standar IEEE 519-2022.

2.4 Diagram Alir Koreksi Harmonisa

Dalam perhitungan harmonisa, adapun algoritma simulasi pada software ETAP dapat dilihat pada Gambar 3.



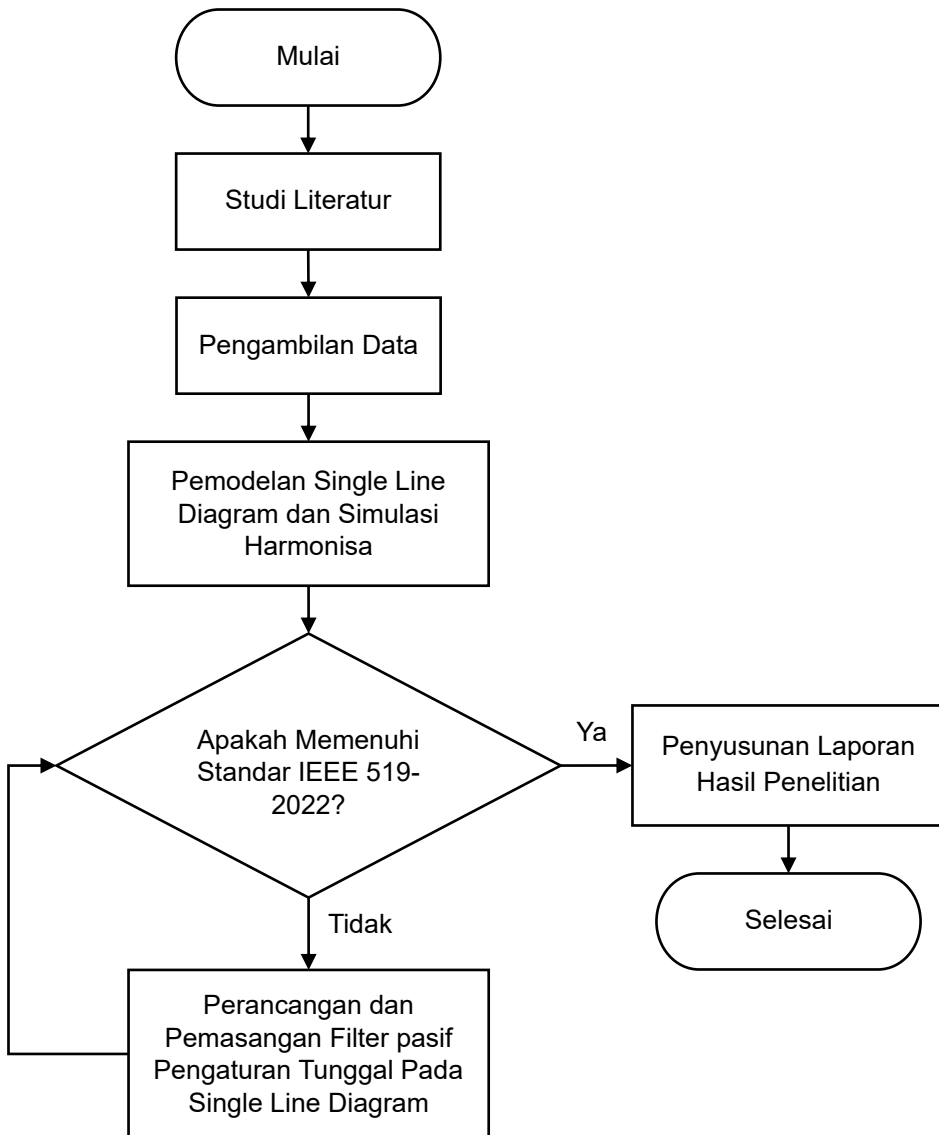
Gambar 3 Diagram alir perancangan filter pasif pengaturan tunggal

Berikut merupakan penjelasan sekaligus tahapan dari algoritma simulasi harmonisa pada software ETAP:

1. Membuat pemodelan sistem yang lengkap beserta data-data sistem sesuai dengan single line diagram dari lokasi yang akan dilakukan analisis harmonisa.
2. Menginput data sekunder berupa spesifikasi dari peralatan dan mesin listrik yang ada pada Unit IV.
3. Simulasi aliran daya dilakukan untuk perhitungan aliran daya pada frekuensi fundamental. Hasil dari analisis aliran daya tersebut ditetapkan sebagai dasar tegangan untuk fundamental bus dan arus fundamental cabang yang selanjutnya digunakan untuk menghitung indikasi terjadinya harmonisa.
4. Simulasi harmonisa untuk setiap frekuensi harmonisa yang muncul dilakukan dengan metode injeksi arus. Arus yang diinjeksikan merupakan arus fundamental yang dikalkulasikan dengan karakteristik harmonisa hasil simulasi. Frekuensi harmonisa yang dipertimbangkan merupakan seluruh frekuensi mulai dari orde 1 hingga orde ke 49.
5. Nilai THD dan IHD yang telah didapatkan dibandingkan dengan standar yang digunakan sebagai acuan, jika kondisi abnormal, maka akan muncul report dari analisis harmonisa.
6. Jika hasil simulasi menunjukkan nilai harmonisa melebihi standar maka diperlukan pemasangan filter dengan spesifikasi nilai dari komponen komponen R, L, dan C dihitung dengan persamaan (8), (11), (13), dan (16).
7. Kemudian dilakukan kembali simulasi aliran daya, simulasi analisis harmonisa, perhitungan indeks harmonisa, serta proses perbandingan hasil harmonisa dengan standar yang digunakan.

2.5 Diagram Alir Penelitian

Diagram alur penelitian secara umum yang akan dilakukan dapat dilihat pada Gambar 4.



Gambar 4 Diagram Alir Penelitian

Berikut merupakan penjelasan dari diagram alir penelitian yang akan dilakukan:

1. Penelitian diawali dengan studi literatur untuk mencari literatur serta mempelajari mengenai materi-materi yang berhubungan dengan analisis harmonisa yang disebabkan oleh beban non-linier dan digunakan sebagai acuan untuk merancang filter. Materi tersebut didapatkan dari buku, jurnal, artikel dan referensi dari website. Diharapkan dengan literatur yang telah diperoleh dapat memberikan petunjuk untuk mengurangi kesalahan dalam penelitian.
2. Pengambilan data sekunder pada PT. Semen Tonasa Unit IV. Hasil pada tahap ini diperoleh data berupa spesifikasi dari peralatan dan mesin listrik pada saat beroperasi pada beban maksimum.
3. Data-data yang telah diperoleh dimasukkan ke dalam simulasi sistem kelistrikan yang dibuat dalam keadaan beban maksimum dengan bantuan software ETAP. Kemudian hasil simulasi yang berupa harmonisa arus dan tegangan di analisis kemudian membandingkan apakah THD telah memenuhi standar atau tidak. Jika tidak memenuhi standar maka harmonisa tersebut akan direduksi dengan pemasangan filter pasif .
4. Sebelum pemasangan filter, perlu dilakukan perancangan untuk komponen-komponen yang ada pada filter seperti kapasitas daya reaktif, nilai kapasitansi, nilai induktansi, dan nilai resistansi. Setelah itu dilakukan simulasi untuk melihat apakah filter dapat bekerja dengan baik sesuai yang diharapkan dengan melihat perubahan nilai harmonisa pada sistem setelah pemasangan filter dan sebelum pemasangan filter. Setelah harmonisa sistem sudah turun penelitian telah selesai dan apabila harmonisa masih melewati standar maka akan dilakukan analisis dan simulasi ulang hingga didapatkan hasil yang sesuai.
5. Hasil penelitian disajikan dalam bentuk laporan akhir. Laporan ini diharapkan akan menjadi sebuah pemahaman mengenai harmonisa dan cara untuk mengurangi harmonisa sehingga ke depannya dapat menjadi acuan apabila terdapat permasalahan-permasalahan yang serupa.

2.6 Pengamatan dan Pengukuran

Ada pun beberapa hal yang menjadi poin penting untuk di amati atau yang ingin diukur lalu dibandingkan guna mengetahui keberhasilan serta keefektifan dari penelitian ini antara lain sebagai berikut.

2.6.1 Analisis Harmonisa Listrik

Analisis harmonisa rangkaian listrik adalah studi untuk mengidentifikasi dan mengukur tingkat gangguan harmonisa, yaitu gelombang tegangan atau arus yang frekuensinya merupakan kelipatan bilangan bulat dari frekuensi fundamental sistem listrik, akibat beban non-linier seperti komputer dan inverter. Analisis ini bertujuan untuk mengevaluasi kualitas daya listrik, menentukan dampak harmonisa terhadap peralatan, dan merancang solusi seperti filter untuk mengurangi distorsi. Pada penelitian ini, kita juga akan membandingkan nilai harmonisa pada sistem Unit IV sebelum dan setelah pemasangan pasif ilter harmonisa listrik.

2.6.2 Analisis Aliran Daya

Analisis aliran daya (*load flow analysis*) adalah studi untuk memetakan dan memahami pergerakan daya listrik (daya aktif, reaktif, dan semu) serta besaran tegangan pada setiap titik bus dalam suatu jaringan listrik. Tujuan utamanya adalah untuk mendapatkan informasi tentang kinerja sistem tenaga listrik, yang esensial dalam perencanaan, pengoperasian, dan ekspansi jaringan guna memastikan keandalan dan efisiensi. Dan pada penelitian kali ini, kita akan membandingkan bagaimana hasil dari analisis aliran daya pada PT. Semen Tonasa Unit IV sebelum dan sesudah pemasangan filter pasif harmonisa listrik.

2.6.3 Perancangan Filter

Perancangan filter pasif adalah proses merancang dan membuat filter elektronik yang hanya menggunakan komponen pasif seperti resistor, induktor, dan kapasitor untuk menyaring sinyal berdasarkan frekuensinya tanpa memerlukan daya eksternal untuk beroperasi. Tujuannya adalah untuk melewatkan frekuensi yang diinginkan sambil menolak atau mengurangi frekuensi yang tidak diinginkan, seperti dalam sistem audio atau untuk meredam harmonisa dalam sistem tenaga listrik. Dan selama proses perancangan tersebut, kita akan memperhatikan apa saja yang menjadi factor-faktor penting dalam membuat filter harmonisa listrik.