Evaluasi Kandungan Harmonisa Arus dan Tegangan Pada Plts Rooftop Kapasitas 49.500 WP

Heri Budi Utomo[1], Toto Tohir[2], Edlyna Syahda Nabila[3]

[1,2,3]Jurusan Teknik Elektro, Politeknik Negeri Bandung, Bandung 40012
[1]E-mail : hbu@polban.ac.id
[2]E-mail : toto.tohir@polban.ac.id
[3]E-mail : edlynnabila@gmail.com

ABSTRAK

Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) merupakan solusi energi terbarukan untuk mendukung program green energy. Sebuah perusahaan kimia telah mengimplementasikan sistem PLTS On Grid di Gedung Admin 1 hingga Gedung Publik 1 dengan kapasitas 49.500 Watt Peak. Namun, penggunaan inverter dalam sistem PLTS dapat menimbulkan harmonisa. Penelitian ini bertujuan menganalisis kandungan harmonisa arus dan tegangan dengan membandingkan data saat PLTS dalam kondisi ON dan OFF, serta merancang filter untuk mereduksi harmonisa pada panel SDP Gedung Publik 1. Pengukuran dilakukan menggunakan power quality analyzer. Saat PLTS OFF, nilai THDi pada fasa R, S, dan T berturut-turut sebesar 18,3%, 24,4%, dan 25%. Saat PLTS ON, nilai meningkat menjadi 26,7%, 37,6%, dan 27,7%. Nilai tersebut melebihi batas maksimal TDD 15% sesuai standar IEEE 519-2014. Oleh karena itu, dilakukan perencanaan filter pasif single tuned berbasis ETAP 19. Spesifikasi filter untuk fasa R yaitu kapasitor 354,4 µF, induktor 1,14 mH, dan resistansi 1,7 Ω; fasa S: 388,2 µF, 1,05 mH, 1,65 Ω; fasa T: 328,6 µF, 1,23 mH, 3,8 Ω. Hasil simulasi menunjukkan penurunan THDi di semua fasa hingga di bawah ambang batas. Filter pasif terbukti efektif mengurangi kandungan harmonisa.

Kata Kunci
Harmonisa, ETAP19, Inverter, PLTS, Filter Pasif

Solar Power Plants (PLTS) are a renewable energy solution that supports green energy initiatives. A chemical company has implemented an On-Grid PLTS system across several operational buildings, from Admin Building 1 to Public Building 1, with a total capacity of 49,500 Watt Peak. However, the use of inverters in PLTS systems can generate harmonics. This study aims to analyze the harmonic content of current and voltage by comparing data when the PLTS is in ON and OFF conditions, and to design a filter to reduce harmonics at the Sub Distribution Panel (SDP) of Public Building 1. Measurements were carried out using a power quality analyzer. When the PLTS was OFF, the THDi values for phases R, S, and T were 18.3%, 24.4%, and 25%, respectively. When the PLTS was ON, the values increased to 26.7%, 37.6%, and 27.7%. These values exceed the maximum Total Demand Distortion (TDD) limit of 15%, as specified by IEEE 519-2014 standards. Therefore, a single-tuned passive filter was designed using ETAP 19 software. The filter specifications for phase R consist of a 354.4 µF capacitor, 1.14 mH inductor, and 1.7 Ω resistor; for phase S: 388.2 µF, 1.05 mH, 1.65 Ω; and for phase T: 328.6 µF, 1.23 mH, 3.8 Ω. Simulation results showed a significant reduction in THDi for all phases to below the permissible limit. The passive filter proved effective in mitigating harmonic distortion.

Keywords
Harmonics, ETAP, Inverter, PLTS, Passive Filter

1. PENDAHULUAN

Energi listrik merupakan kebutuhan fundamental dalam menunjang aktivitas manusia. Letak geografis Indonesia yang berada di garis khatulistiwa dengan intensitas sinar matahari tinggi sepanjang tahun menjadikan Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) sebagai salah satu solusi potensial dalam pengembangan energi terbarukan. PLTS mengonversi energi matahari menjadi energi listrik menggunakan panel surya, yang selanjutnya diubah oleh inverter menjadi arus bolak-balik (AC) untuk kebutuhan operasional peralatan listrik.

Sebagai perusahaan kimia yang berkomitmen terhadap prinsip energi keberlanjutan, perusahaan ini telah menerapkan sistem PLTS On Grid sebagai bentuk komitmen terhadap program *go green*. Sistem ini dipasang di area pedestrian dari Gedung Admin 1 hingga Gedung Publik 1 dengan kapasitas 49.500 WP menggunakan 90 unit panel surya tipe MonoCrystalline Halfcut Technology 550 WP. Selain mendukung penghematan energi, implementasi sistem ini juga memberikan manfaat cadangan daya. Namun, penggunaan inverter berbasis semikonduktor dalam sistem PLTS berpotensi menimbulkan gangguan harmonisa dalam sistem kelistrikan.

Harmonisa merupakan distorsi gelombang arus dan tegangan akibat keterlibatan gelombang dengan frekuensi kelipatan dari frekuensi dasar (50 Hz). Distorsi ini umumnya dihasilkan oleh beban non-linear seperti inverter dan lampu LED, yang menyebabkan penurunan kualitas daya listrik. Berdasarkan hasil pengukuran, nilai Total Harmonic Distortion arus (THDi) tercatat melebihi ambang batas standar IEEE 519-2014, yakni sebesar 26,7% pada fasa R, 37,6% pada fasa S, dan 27,7% pada fasa T. Sementara itu, nilai THDv masih berada dalam batas wajar. Melihat kondisi tersebut, diperlukan kajian lebih lanjut untuk menganalisis kandungan harmonisa pada sistem PLTS yang diterapkan di lingkungan perusahaan kimia tersebut, serta mengevaluasi solusi mitigasinya, seperti penggunaan filter pasif. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis kandungan harmonisa arus dan tegangan serta merancang filter yang sesuai guna menurunkan distorsi harmonisa.

2. METODELOGI PENELETIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif melalui metode observasi langsung, wawancara teknisi, serta pengukuran kualitas daya listrik secara real-time menggunakan Power Quality Meter (PQM). Tujuan utama dari penelitian adalah menganalisis kandungan harmonisa arus dan tegangan pada sistem PLTS On Grid yang terpasang pada panel Sub Distribution Panel (SDP) Gedung Publik 1.

2.1 Lokasi dan Waktu Penelitian

Pengukuran dilakukan di panel SDP Gedung Publik 1, yang terletak di salah satu kawasan industri kimia di Kota Bandung. Proses pengukuran dilakukan dalam dua periode, masing-masing selama 48 jam, yaitu pada tanggal 24–26 April 2025 dan 26–28 April 2025. Pengambilan data dilakukan dalam dua kondisi sistem: saat PLTS ON dan OFF, guna membandingkan pengaruh sistem PLTS terhadap kandungan harmonisa.

2.1.1 Alat dan Bahan

Penelitian ini menggunakan beberapa alat dan perlengkapan berikut:

A. Fluke 1777 Power Quality Analyzer:

Digunakan untuk merekam data arus, tegangan, dan THD secara simultan dan real-time. Perangkat ini mendukung koneksi ke perangkat lunak Energy Analyze untuk analisis data lebih lanjut.

B. Laptop:

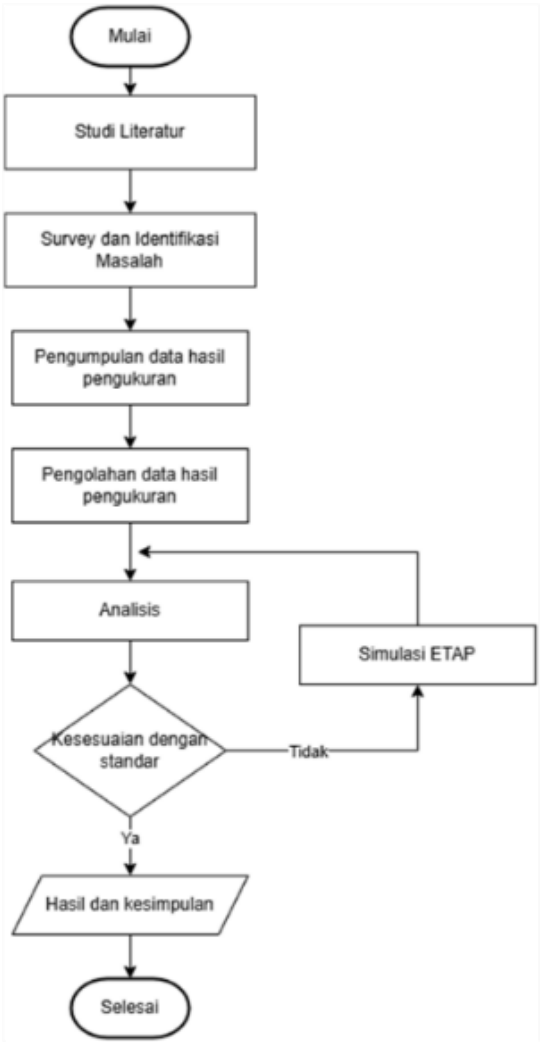
Berfungsi untuk membaca, mengunduh, dan mengolah data dari alat PQM.

C. Alat Pelindung Diri (APD):

a) Safety Gloves: Melindungi tangan saat pemasangan sensor arus pada kabel bertegangan.
b) Safety Helmet: Melindungi kepala dari potensi benturan.
c) Safety Shoes: Menjaga keselamatan kaki dari sengatan listrik atau benturan benda keras.

2.2 Tahapan Penelitian

Tahapan pelaksanaan penelitian disusun secara sistematis dan divisualisasikan melalui diagram alir seperti ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Diagram Alir

Alur kegiatan dapat dijelaskan sebagai berikut:

D. Studi Literatur:

Kajian terhadap literatur dan jurnal terkait harmonisa pada sistem kelistrikan dan PLTS serta standar kualitas daya seperti IEEE 519-2014.

E. Survei dan Identifikasi Masalah:

Observasi lapangan untuk menentukan lokasi, jenis beban, dan potensi sumber harmonisa pada sistem PLTS.

F. Pengumpulan Data:

Pengukuran harmonisa dilakukan menggunakan PQM Fluke 1777 untuk memperoleh data arus, tegangan, dan parameter THD.

G. Pengolahan Data:

Data dianalisis untuk menghitung nilai maksimum THD, rasio Isc/IL, serta kesesuaian terhadap standar IEEE 519-2014.

H. Analisis:
Evaluasi dampak harmonisa pada kualitas daya dan perbandingan antara kondisi PLTS ON dan OFF.

I. Simulasi ETAP:
Jika hasil pengukuran menunjukkan ketidaksesuaian dengan standar, dilakukan simulasi sistem kelistrikan menggunakan perangkat lunak ETAP untuk mengevaluasi solusi mitigasi.

J. Evaluasi:
Menentukan apakah hasil simulasi dan pengukuran sudah sesuai dengan standar. Jika belum, dilakukan iterasi kembali ke tahap simulasi.

K. Kesimpulan:
Penyusunan hasil akhir dan rekomendasi teknis berdasarkan seluruh tahapan di atas.

3. ANALISIS

Dalam menganalisis kualitas daya listrik, standar IEEE 519-2014 memberikan batas maksimum distorsi arus harmonisa yang diperbolehkan untuk sistem dengan tegangan antara 120 V hingga 69 kV.
Batasan ini disajikan dalam bentuk persentase dari arus beban dasar (IL) terhadap beberapa rentang orde harmonisa dan rasio arus hubung singkat terhadap arus beban (Isc/IL).

Tabel 1. Batasan distorsi arus untuk sistem dengan rating 120 V hingga 69 kV

Maximum harmonic current distortion in percent of I_L Individual harmonic order[b]						
I_{sc}/I_L	2≤h<11[a]	11≤h<17	17≤h<23	23≤h<35	35≤h<50	TDD
<20[c]	4.0	2.0	1.5	0.6	0.3	5.0
20<50	7.0	3.5	2.5	1.0	0.5	8.0
50<100	10.0	4.5	4.0	1.5	0.7	12.0
100<1000	12.0	5.5	5.0	2.0	1.0	15.0
>1000	15.0	7.0	6.0	2.5	1.4	20.0

a. Untuk orde harmonisa h ≤ 6, harmonisa genap dibatasi hingga 50% dari batas harmonisa yang tercantum dalam tabel.
b. Distorsi arus yang menyebabkan offset DC, misalnya pada konverter setengah gelombang, tidak diperbolehkan.
c. Fasilitas pembangkit listrik dibatasi pada nilai distorsi arus ini, terlepas dari nilai aktual Isc/IL, kecuali jika diatur oleh standar lain yang berlaku.

Dimana:
Isc = arus hubung singkat maksimum di PCC (Point of Common Coupling)
IL = arus beban maksimum di PCC dalam kondisi operasi beban normal.
Berdasarkan Standar SPLN D5.004-1: 2012, Nilai arus hubung singkat (Isc) dapat dihitung dengan menggunakan persamaan berikut [11] :

$$Isc = \frac{kVA_{TF}}{(Zpu \times \sqrt{3} \times kV_{\emptyset-\emptyset})} \quad (1)$$

Dimana :
kVATF = kapasitas daya transformator dalam kVA.
Zpu = Impedansi Trafo per unit
kV = Tegangan phase to phase

Tabel 2. Batasan Distorsi Tegangan

Bus Voltage at PCC	Individual Harmonic (%) h≤50	Total Harmonic Distortion THD (%)
V≤1.0 kV	5.0	8.0
1 kV < V ≤ 69 kV	3.0	5.0
69 kV < V ≤ 161 kV	1.5	2.5
161 kV < V	1.0	1.5[a]

Berikut Data Data yang terkumpul dan Data Hasil Pengukuran :

Tabel 3. Data Nameplate Trafo

Description	Value
Phase	3
Frequency	50 Hz
Power Rating	2000 kVA
Voltage (HV/LV)	20.000 V/ 400 V
Current (HV/LV)	57.73A/2886.75A
Impedance	6%
Vector Group	Dyn5
Cooling Type	ONAN
Insulation Class	A
Temp. Rise Winding	55/65°C
Standard	IEC-76

Tabel 4. Data Hasil Pengukuran

Fasa	Tegangan	Arus	Faktor Daya	IL Max
R	229.9	66.8	0.92	218.4
S	228.1	52.5	0.87	178.2
T	228.2	55.9	0.92	218.7

Berdasarkan data hasil pengukuran pada tabel 4, dan data nameplate trafo pada tabel 3, dari persamaan 1 diperoleh hasil sebagai berikut :

$$Isc = \frac{kVA_{TF}}{(Zpu \times \sqrt{3} \times kV_{\emptyset-\emptyset})}$$
$$Isc = \frac{2000}{(6 \times \sqrt{3} \times 0{,}4)}$$
$$Isc = 48112{,}5\ A$$

Maka dari itu, diperoleh nilai PCC sebesar :

$$PCC = \frac{Isc}{IL}$$
$$PCC = \frac{48112{,}5}{218{,}7}$$
$$PCC = 219{,}9\ A$$

Dengan diketahui besar PCC sebesar 219,9 A,
maka nilai Isc/IL pada tabel 1 diambil dengan batasan 100 < 1000 dengan TDD sebesar 15%.

Tabel 5. Presentase THD

Kondisi PLTS	Total Harmonic Distortion (THD) Tegangan R	S	T	Arus R	S	T
ON	2.7	2.8	3.4	26.7	37.6	27.7
OFF	2	2.4	3.3	18.3	24.4	25

A. THDi dan THDv saat kondisi PLTS ON

Berdasarkan hasil pengukuran menggunakan alat ukur Power Quality Meter Fluke 1777, alat ini secara otomatis menghitung nilai Total Harmonic Distortion (THD) untuk arus (THDi) dan tegangan (THDv), mulai dari orde ke-1 hingga orde ke-50.

Nilai THD telah dikalkulasikan secara otomatis oleh sistem pada alat ukur. Dari tabel 5, pada tanggal 24 April 2025 terjadi puncak distorsi harmonik arus (THDi), terutama pada fasa S sebesar 37.6%.

Nilai THDi pada fasa (R, S, dan T) melebihi batas ambang yang ditetapkan berdasarkan standar IEEE 519-2014, yaitu harus dibawah 15%. Oleh karena itu, perlu dilakukan perencanaan single tuned passive filter untuk mereduksi / menurunkan kandungan harmonisa arus dan menjaga kinerja sistem kelistrikan tetap stabil.

B. THDi dan THDv saat kondisi PLTS OFF

Nilai THD pada saat kondisi PLTS OFF telah dikalkulasikan secara otomatis oleh sistem pada alat ukur PQM. Pada tanggal 28 April 2025 diperoleh hasil pengukuran THD seperti pada tabel 5. Nilai THDi pada fasa (R, S, dan T) juga melebihi batas ambang yang ditetapkan berdasarkan standar IEEE 519-2014, yaitu harus dibawah 15%.

3.1 Perhitungan *Filter Pasif Single Tuned*

Berikut contoh perhitungan perencanaan *single tuned passive filter* pada Fasa R :

A. Menentukan faktor daya awal dan faktor daya yang diinginkan

Faktor daya = 0,92 (Hasil Pengukuran)

Faktor daya kejaran = 0,99 (Yang diinginkan)

B. Besar daya reaktif yang akan di kompensasi ke sistem

$$QC = P\ (tan\varphi\ awal - tan\varphi\ kejaran)$$

A. $P = V.I.Cos\ phi$

$$P = 220\ x\ 66{,}8\ x\ 0{,}92 = 14.128{,}8\ Watt$$

B. QC = 14.128,8 (Tan23,07°- Tan2,56°)

QC = 5386 VAR

C. Besar Kapasitor yang dipakai

$$C = \frac{QC}{2\pi f.V^2}$$

$$C = \frac{5386}{2\ .3{,}14\ .50\ .220^2}$$

$$C = 0{,}0003544\ F$$

$$C = 354{,}4\ \mu F$$

D. Nilai Induktor

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

$$L = \frac{1}{(2.3{,}14.50.5)^2\ 0{,}0003544}$$

$$L = 1{,}14\ \text{mH}$$

E. Reaktansi Induktif

$$XL = 2.\pi.fn.L$$

$$XL = 2\ .3{,}14\ .50\ .5\ .0{,}00114$$

$$XL = 1{,}79\ \Omega$$

F. Faktor Kualitas Filter (Q)

$$Q = \frac{n\ .XL}{R}$$

$$R = \frac{n\ .XL}{Q}$$

$$R = \frac{5\ .1{,}79}{5}$$

$$R = 1{,}7\ \Omega$$

Perhitungan serupa juga dilakukan untuk fasa S dan T

3.2 Spesifikasi *Filter Pasif Single Tuned*

3.2.1 Single Tuned Passive Filter Fasa R

Tabel 6. Spesifikasi Single Tuned Passive Filter Fasa R Orde 5

Spesifikasi	Rating
Kapasitor	354,4 µF
Induktor	1,14 mH
Resistansi	1,7 Ω
Tegangan	220

3.2.2 Single Tuned Passive Filter Fasa S

Tabel 7. Spesifikasi Single Tuned Passive Filter Fasa S Orde 5

Spesifikasi	Rating
Kapasitor	388,2 µF
Induktor	1,05 mH
Resistansi	1,65 Ω
Tegangan	220

3.2.3 Single Tuned Passive Filter Fasa T

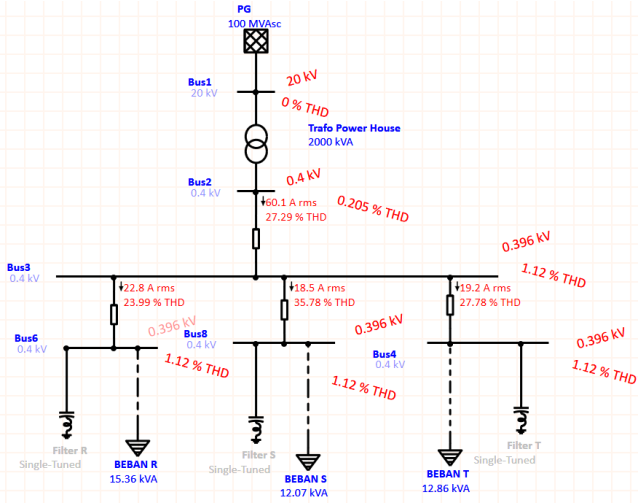
Tabel 8. Spesifikasi Single Tuned Passive Filter Fasa T Orde 5

Spesifikasi	Rating
Kapasitor	328,6 µF
Induktor	1,23 mH
Resistansi	3,8 Ω
Tegangan	220 V

4. Hasil dan Pembahasan

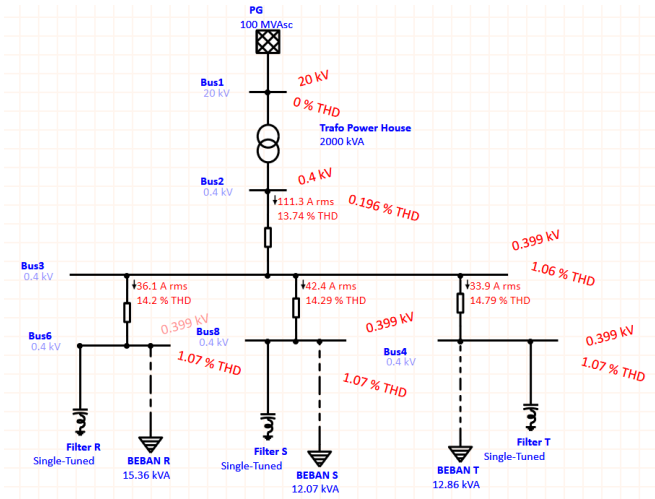
Melihat hasil pengukuran yang menunjukkan nilai THDi melebihi batas standar, diperlukan solusi teknis untuk mengatasi tingginya distorsi harmonik yang terjadi. Oleh karena itu, perlu dilakukan simulasi single tuned passive filter untuk mereduksi atau menurunkan kandungan harmonisa menggunakan perangkat lunak ETAP 19.

Simulasi ini dilakukan dengan software ETAP 19 yang mana saat simulasi hanya menggunakan 1 sumber yaitu elemen Power Grid sebagai representasi sumber PLN dan PLTS. Daya pada elemen tersebut mencakup akumulasi kapasitas daya dari PLN dan PLTS, begitu pula dengan data harmonisa yang digunakan, merupakan hasil pengukuran aktual dari kondisi sistem saat kedua sumber tersebut beroperasi secara paralel.



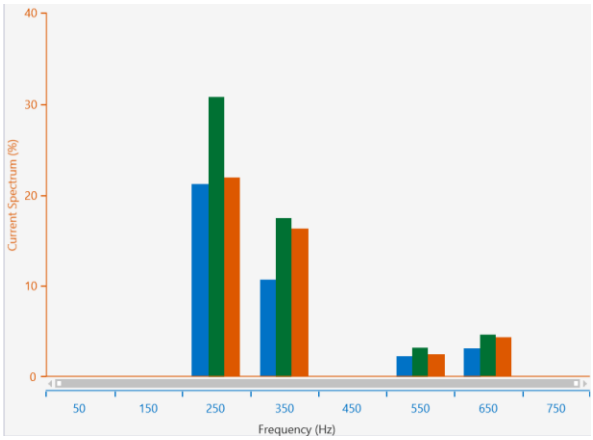
Gambar 2. Simulasi Perangkat Lunak Tanpa Filter

Gambar 2, menunjukkan hasil simulasi sistem instalasi listrik di Gedung Publik 1 milik perusahaan kimia. Dalam gambar terlihat setiap fasa (R, S, dan T) memiliki beban tersendiri yang menghasilkan distorsi harmonisa arus (THDi) yang cukup tinggi. Nilai THDi masing-masing fasa adalah : fasa R sebesar 23,99%, fasa S sebesar 35,78%, dan fasa T sebesar 27,78%.

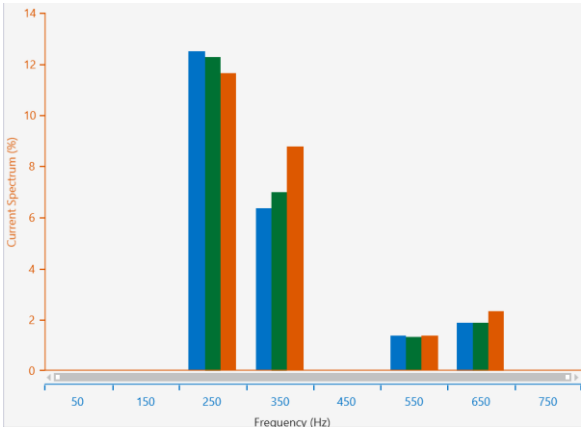


Gambar 3. Simulasi Perangkat Lunak dengan Single Tuned Pasif Filter

Gambar 3, menunjukkan hasil simulasi sistem kelistrikan Gedung Publik 1 di perusahaan kimia tersebut setelah pemasangan filter pasif single-tuned pada masing-masing fasa. Filter ini dirangkai secara paralel dengan beban. Berdasarkan hasil simulasi, terjadi penurunan signifikan pada nilai Total Harmonic Distortion (THDi) dibandingkan kondisi sebelum pemasangan filter. THDi pada fasa R menurun menjadi 14,2%, fasa S menjadi 14,29%, dan fasa T menjadi 14,79%, yang menunjukkan bahwa filter berhasil mereduksi distorsi tegangan hingga mendekati batas standar yang diperbolehkan.

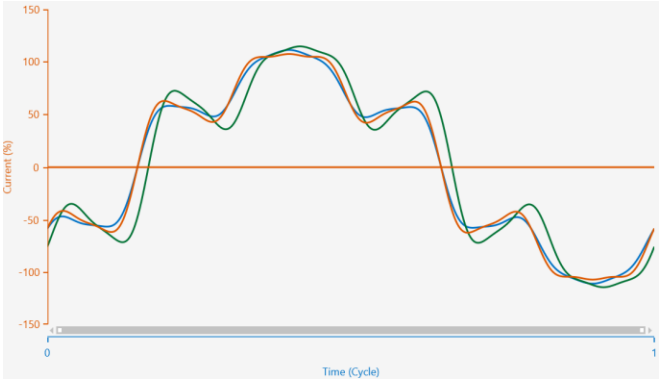


Gambar 4. Spektrum Harmonisa Sebelum dipasang Filter

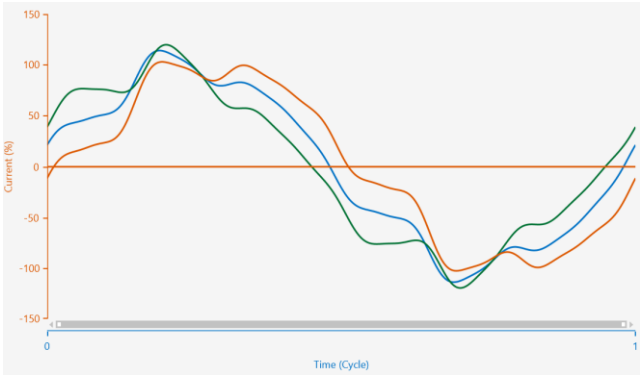


Gambar 5. Spektrum Harmonisa Sesudah dipasang Filter

Gambar 5, menunjukkan Spektrum hasil simulasi setelah pemasangan filter pasif single-tuned pada masing-masing fasa. Terjadi penurunan kandungan harmonisa arus menjadi dibawah 15% pada nilai Total Harmonic Distortion (THDi) dibandingkan kondisi sebelum pemasangan filter.



Gambar 6. Gelombang Harmonisa Arus sebelum pemasangan filter



Gambar 7. Gelombang Harmonisa Arus sesudah pemasangan filter

Gambar 6 dan 7, menunjukkan bentuk gelombang arus pada masing-masing fasa setelah pemasangan filter pasif single-tuned. Warna biru mewakili fasa R, hijau untuk fasa S, dan oranye untuk fasa T. Dibandingkan dengan kondisi sebelumnya, bentuk gelombang arus pada gambar ini terlihat lebih mendekati bentuk sinusoidal, menandakan bahwa distorsi harmonisa telah berhasil direduksi.

Meskipun masih terdapat sedikit ketidaksimetrian, perubahan ini menunjukkan bahwa pemasangan filter pasif secara paralel dengan beban mampu mengurangi komponen harmonik yang mengganggu, sehingga kualitas daya dalam sistem distribusi menjadi lebih baik dan stabil.

5. KESIMPULAN

Berdasarkan analisis, maka diperoleh kesimpulan sebagai berikut :

1. Pada hasil pengukuran kandungan harmonisa pada Panel SDP Gedung Publik 1 terdapat :

- THDi saat kondisi PLTS tidak aktif : Fasa R 18.3%, Fasa S 24.4%, dan Fasa T 25%

- THDi saat kondisi PLTS aktif : Fasa R 26.7%, Fasa S 37.6%, dan Fasa T 27.7%

Besar Kandungan Harmonisa melebihi ambang batas standar IEEE 519-2014, yang menetapkan batas maksimal Total Demand Distortion (TDD) sebesar 15%.

2. Untuk mereduksi/mengurangi kandungan harmonisa pada sistem kelistrikan Gedung Publik 1 di perusahaan kimia tersebut, dilakukan perencanaan spesifikasi filter p.asif single-tuned orde ke-5 yang dipasang secara paralel pada masing-masing fasa: R, S, dan T

Berdasarkan hasil simulasi menggunakan perangkat lunak ETAP, terjadi penurunan pada nilai Total Harmonic Distortion arus (THDi) setelah pemasangan filter pasif :

- Fasa R: dari 23,99% menjadi 14,2%

- Fasa S: dari 35,78% menjadi 14,29%

- Fasa T: dari 27,78% menjadi 14,79%

3. Hasil dari simulasi pada perangkat lunak ETAP menunjukkan bahwa filter pasif single-tuned terbukti mampu menurunkan kandungan harmonisa setiap fasanya.

UCAPAN TERIMA KASIH

Segala puji dan syukur dipanjatkan ke hadirat Tuhan Yang Maha Esa atas limpahan rahmat dan karunia-Nya sehingga penyusunan jurnal penelitian ini dapat diselesaikan dengan baik.

Ucapan terimakasih disampaikan kepada :

1. Kedua orang tua dan keluarga tercinta atas doa, kasih sayang, dan dukungan yang tak pernah putus. Segala perjuangan dan ketulusan mereka menjadi landasan kuat bagi setiap langkah yang penulis ambil hingga saat ini.
2. Teman-teman yang senantiasa memberikan dukungan, semangat, serta kebersamaan selama proses penyusunan jurnal ini.
3. Seluruh pihak di industri kimia yang berada di Bandung yang telah memberikan kesempatan, dukungan, serta kontribusi data dan pengalaman selama pelaksanaan penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

1. Sinaga J, Siburian R, Sirait J. Analisa pengaruh harmonisa pada pengoperasian beban listrik. Jurnal Teknik Elektro. 2020;9(2).
2. Syibramulis RA, Isdawimah I, Kusnadi K. Penanggulangan arus harmonisa PLTS on grid menggunakan filter pasif single tuned. Jakarta: Politeknik Negeri Jakarta; 2023.
3. Openg EFE, Widodo B, Purba R. Analisa harmonisa pembangkit listrik tenaga surya (PLTS) off-grid 290 Wp dengan kombinasi beban linier dan nonlinier di Gedung Fakultas Teknik UKI–Jakarta menggunakan MATLAB Simulink. 2024.
4. Siregar JS, Eteruddin H, Monice. Analisa kualitas daya listrik pembangkit listrik tenaga surya sistem off-grid pada Gedung Fakultas Teknik Universitas Lancang Kuning. 2022.
5. Ramadhana RR, MIM, Hafid A, Adriani A. Analisis PLTS on grid. Makassar: Universitas Muhammadiyah Makassar; 2022.
6. Von Meier A. Electric power systems: a conceptual introduction. Hoboken: John Wiley & Sons; 2006.
7. Dhavitra R, Firdaus, Feranita. Analisis dampak total harmonic distortion terhadap losses dan derating pada transformator distribusi di Fakultas Teknik Universitas Riau. Pekanbaru: Jurusan Teknik Elektro, Universitas Riau; 2015.
8. Gunawan IGA, Rinas IW, Wijaya IWA. Analisis distorsi harmonisa pada penyulang Abang Karangasem setelah terpasangnya pembangkit listrik tenaga surya (PLTS). 2015.
9. Khamaira MY. Single tuned filter design for mitigating harmonic distortion in (30 KV) ALTAHRER Substation. J Alasmarya Univ Appl Sci. 2023;8(1):1–15.
10. Basir Y, Fitria D, Stardo R. Analisa pengaruh distorsi harmonisa pada air conditioner sistem inverter. Jurnal Desiminasi Teknologi. 2021;9(1):28–35.
11. PT PLN (Persero). SPLN D5.004-1:2012 - Power quality (regulasi harmonisa, flicker dan ketidakseimbangan tegangan). Keputusan Direksi No. 563K/DIR/2012; 2012.

12. Malik MI, Hamdani YM, Yanti. Optimization design of single-tuned passive filter using particle swarm optimization algorithm in industry. J Energy Electr Eng (JEEE). Tasikmalaya: Universitas Mayasari Bakti; 2025 Apr.
13. Institute of Electrical and Electronics Engineers. IEEE standard for harmonic control in electric power systems. IEEE Std 519™-2022 (Rev. IEEE Std 519-2014). IEEE Power & Energy Society; 2022.
14. Samsurizal S, Mauriraya KT, Fikri M, Pasra N, Christiono. Pengendalian pembangkit listrik tenaga surya (PLTS). Jakarta: Institut Teknologi PLN; 2021 Sep.
15. Almanda D, Dermawan E, Ramadhan DE, Diniardi E, Syawaluddin, Ramadhan AI. Analisis perancangan filter untuk beban FL-1 pada PL-LB/1 dengan menggunakan ETAP PowerStation. J Teknologi. 2018;10(1). ISSN: 2085-1669; e-ISSN: 2460-0288