

# Analisa Power *Quality Auxiliary* Trafo Daya di PLTU Paiton Menggunakan Algoritma FFT (*Fast Fourier Transform*) Berbasis MATLAB – Simulink

Tyto Nugraha S<sup>1</sup>, Royb Fatkhur Rizal, M.Eng<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup>Universitas Negeri Malang

Jalan Semarang No. 5, Malang, Indonesia

tyto.nugraha.2205317@students.um.ac.id, fatkhurrizal.fv@um.ac.id

---

## Abstrak

Penelitian ini menganalisis karakteristik harmonisa pada sistem auxiliary transformator daya PLTU Paiton Unit 6 menggunakan algoritma Fast Fourier Transform (FFT) berbasis MATLAB-Simulink. Metode penelitian meliputi pemodelan sistem kelistrikan auxiliary dengan Single Line Diagram (SLD) pada Simulink, validasi model dengan data operasional dari Central Control Room (CCR), dan implementasi algoritma FFT untuk analisis spektral sinyal. Data sistem berupa spesifikasi generator, transformator, konfigurasi busbar 10 kV, dan 22 beban motor bantu dengan parameter frekuensi sampling 10 kHz menghasilkan 20.000 sampel untuk deteksi harmonisa hingga orde 100. Analisis FFT mengungkapkan bahwa sistem auxiliary PLTU Paiton mengalami distorsi harmonisa dengan THD pada Bus 4 sebesar 6,37% dan Bus 5 sebesar 6,15%, keduanya melampaui batas IEEE 519-2014 sebesar 5,0%. Implementasi filter pasif LC tuned dengan kapasitas 6.00 MVar. Setelah pemasangan filter, THD berhasil diturunkan menjadi 3,20% pada Bus 4 dan 3,22% pada Bus 5, dengan efisiensi reduksi mencapai 49,6% dan 49,5%. Hasil ini menunjukkan bahwa sistem telah memenuhi standar IEEE 519-2014. Penelitian ini memberikan solusi terkait analisis harmonisa dan rekomendasi filter yang sebaiknya dipakai.

**Kata kunci:** Power Quality, Harmonisa, FFT, Filter Harmonisa, THD

## Abstract

*This study analyzes the harmonics characteristics in the auxiliary power transformer system of the Paiton Unit 6 coal-fired power plant using the MATLAB-Simulink-based Fast Fourier Transform (FFT) algorithm. The research method includes modeling the auxiliary electrical system with a Single Line Diagram (SLD) in Simulink, validating the model with operational data from the Central Control Room (CCR), and implementing the FFT algorithm for spectral signal analysis. The system data, consisting of generator specifications, transformers, 10 kV busbar configuration, and 22 auxiliary motor loads with a sampling frequency parameter of 10 kHz, produced 20,000 samples for harmonic detection up to the 100th order. FFT analysis revealed that the Paiton PLTU auxiliary system experienced harmonic distortion with THD on Bus 4 of 6.37% and Bus 5 of 6.15%, both exceeding the IEEE 519-2014 limit of 5.0%. Implementation of a tuned LC passive filter with a capacity of 6.00 MVar. After installing the filter, THD was successfully reduced to 3.20% on Bus 4 and 3.22% on Bus 5, with a reduction efficiency of 49.6% and 49.5%. These results show that the system has met the IEEE 519-2014 standard. This study provides solutions related to harmonic analysis and recommendations for filters that should be used.*

**Keywords:** Power quality, harmonisa, FFT, filter harmonisa, THD

---

## I. PENDAHULUAN

Perkembangan teknologi dan industrialisasi yang pesat meningkatkan ketergantungan masyarakat

terhadap sistem kelistrikan yang handal dan berkualitas tinggi. Kualitas daya listrik (*power quality*) menjadi parameter kritis yang menentukan kinerja optimal peralatan elektronik dan sistem

industri modern [1]. Gangguan kualitas daya seperti harmonisa, voltage sag, voltage swell, dan transient dapat menyebabkan kerusakan peralatan, penurunan efisiensi sistem, dan kerugian ekonomi yang signifikan. *Auxiliary system* pada Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) merupakan subsistem kelistrikan yang bertugas menyediakan daya untuk pemakaian sendiri dan sangat rentan terhadap gangguan harmonisa yang dihasilkan oleh beban-beban non-linear seperti *Variable Frequency Drive* (VFD), *Uninterruptible Power Supply* (UPS), dan konverter elektronik daya lainnya [2]. Distorsi harmonisa pada sistem *auxiliary* dapat menyebabkan malfungsi pada peralatan kontrol kritis, kesalahan pembacaan instrumen, *overheating* pada transformator dan motor, serta gangguan komunikasi data yang dapat mengancam keselamatan dan kontinuitas operasi. Data operasional PLTU Paiton Unit 6 menunjukkan adanya indikasi distorsi harmonisa pada Bus 10 kV *auxiliary system* yang berpotensi melampaui standar IEEE 519-2014 dengan batas *Total Harmonic Distortion* (THD) maksimal 5.0% untuk sistem tegangan menengah. Beban non-linear seperti *Induced Draft Fan* (IDF), *Forced Draft Fan* (FDF), dan *Primary Air Fan* (PAF) yang dikontrol menggunakan VFD menjadi sumber utama harmonisa pada sistem kelistrikan PLTU dengan kontribusi harmonisa orde ketiga, kelima, dan ketujuh yang dominan [3].

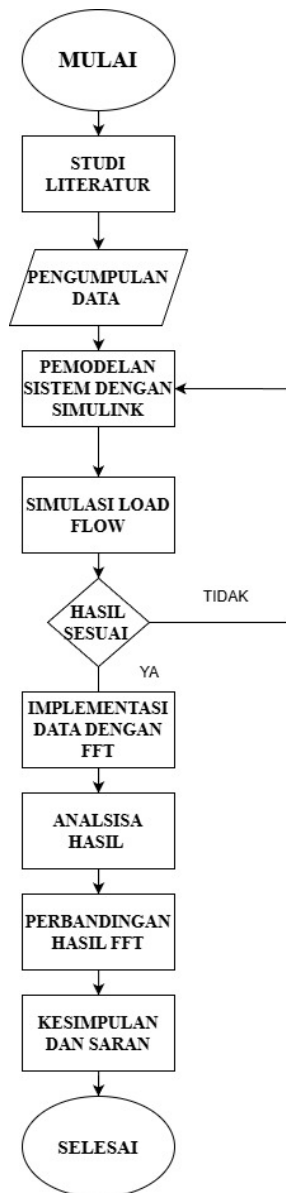
Analisis harmonisa pada sistem kelistrikan memerlukan metode yang akurat dan efisien untuk mengidentifikasi komponen frekuensi yang terdistorsi. *Fast Fourier Transform* (FFT) telah banyak digunakan sebagai algoritma yang efektif untuk analisis spektral sinyal dalam domain frekuensi, memungkinkan identifikasi dan kuantifikasi komponen harmonisa dengan presisi tinggi [4][5]. FFT telah diimplementasikan untuk analisis harmonisa pada sistem distribusi tenaga listrik dan berhasil mengidentifikasi harmonisa hingga orde ke-50 dengan akurasi 98% [6]. Implementasi FFT dalam lingkungan MATLAB-Simulink memberikan fleksibilitas dalam pemodelan sistem yang kompleks dan analisis real-time, serta menyediakan visualisasi yang komprehensif untuk interpretasi hasil analisis harmonisa [7]. Studi sebelumnya menunjukkan bahwa FFT lebih efisien dibandingkan Wavelet Transform menggunakan MATLAB-Simulink untuk simulasi harmonisa pada sistem industrial dan menunjukkan bahwa metode FFT lebih efisien dibandingkan metode Wavelet Transform dalam komputasi waktu nyata [8]. Beberapa penelitian juga telah mengeksplorasi strategi mitigasi harmonisa menggunakan filter pasif, filter aktif, dan filter hybrid, dengan hasil yang menunjukkan bahwa filter hybrid memberikan

performa terbaik dalam mereduksi THD hingga di bawah 3% [9][10]. Namun, sebagian besar penelitian sebelumnya fokus pada sistem distribusi utama atau beban industrial besar, sementara karakteristik unik *auxiliary system* pada pembangkit listrik yang memiliki beban sensitif, pola konsumsi daya yang dinamis, dan tingkat kritikalitas tinggi terhadap kontinuitas operasi masih belum banyak dieksplorasi secara mendalam [11].

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis karakteristik harmonisa yang terjadi pada *auxiliary system* transformator daya PLTU Paiton Unit 6 menggunakan algoritma Fast Fourier Transform (FFT) berbasis MATLAB-Simulink dan mengevaluasi pengaruhnya terhadap kinerja peralatan bantu. Gap penelitian yang diidentifikasi adalah masih terbatasnya studi komprehensif tentang power quality pada *auxiliary system* pembangkit listrik yang mengintegrasikan analisis FFT dengan validasi data operasional riil dari Central Control Room (CCR), serta belum adanya rekomendasi strategi mitigasi harmonisa yang spesifik untuk konfigurasi *auxiliary system* PLTU skala besar. Perbedaan penelitian ini dengan penelitian sebelumnya terletak pada penggunaan data operasional riil PLTU Paiton Unit 6, pemodelan sistem *auxiliary* yang komprehensif mencakup 22 beban motor bantu dengan parameter aktual, dan implementasi frekuensi sampling tinggi yang memberikan resolusi analisis lebih detail.

## II. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan berbasis software MATLAB dengan pemodelan pada SLD (Single Line Diagram) pada Simulink. Data sistem kelistrikan *auxiliary* PLTU Paiton Unit 6 dikumpulkan meliputi spesifikasi generator, transformator, konfigurasi busbar, dan karakteristik beban motor-motor bantu. Pemodelan sistem dilakukan dengan merepresentasikan komponen-komponen kelistrikan menggunakan blok-blok Simulink dari Simscape Electrical toolbox, termasuk synchronous generator, transformator step-down, busbar 10 kV, dan beban-beban non-linear seperti VFD yang menggerakkan Induced Draft Fan (IDF), Forced Draft Fan (FDF), dan Primary Air Fan (PAF). Berikut merupakan flow chart dari penelitian yang dilakukan di jelaskan pada gambar 1. Dari gambar 1. Terlihat bahwa penelitian ini dimulai dengan studi literatur terkait power quality dan analisis harmonisa menggunakan FFT. Tahap selanjutnya adalah pengumpulan data spesifikasi sistem kelistrikan *auxiliary* PLTU Paiton Unit 6 yang meliputi parameter generator, transformator, busbar, dan beban-beban motor bantu.



Gambar 1. Diagram Flowchart Penelitian

### A. Algoritma Fast Fourier Transform (FFT)

Fast Fourier Transform (FFT) adalah algoritma efisien untuk menghitung Discrete Fourier Transform (DFT) yang mengubah sinyal dari domain waktu ke domain frekuensi. FFT mengurangi kompleksitas komputasi dari  $O(N^2)$  pada DFT konvensional menjadi  $O(N \log N)$ , sehingga sangat efisien untuk analisis sinyal real-time.

Pada sistem tenaga listrik, FFT digunakan untuk:

- Menghitung amplitudo harmonik
- Menganalisis THD (Total Harmonic Distortion)
- Menilai kualitas daya
- Membandingkan hasil simulasi dengan standar IEEE/IEC

Persamaan DFT adalah sebagai berikut

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) \cdot e^{-j2\pi kn/n}, k = 0, 1, \dots, N-1 \quad (1)$$

dimana:

- $X(k)$  = komponen frekuensi ke- $k$
- $x(n)$  = sampel sinyal pada waktu ke- $n$
- $N$  = jumlah total sampel
- $j$  = bilangan imajiner ( $\sqrt{-1}$ )

Komponen frekuensi dari setiap bin FFT dihitung sebagai persamaan (2) berikut

$$f(k) = \frac{k \cdot f_s}{N_{FFT}}, k = 0, 1, \dots, N_{FFT}/2 \quad (2)$$

dimana  $f_s$  adalah frekuensi sampling dan  $N_{FFT}$  adalah panjang FFT.

### B. Total Harmonic Distortion (THD)

Total Harmonic Distortion (THD) merupakan parameter kritis dalam evaluasi kualitas daya listrik yang mengukur tingkat distorsi gelombang sinusoidal akibat keberadaan komponen harmonisa. THD didefinisikan sebagai rasio akar kuadrat jumlah kuadrat seluruh komponen harmonisa terhadap komponen fundamental, dinyatakan dalam persentase. Secara matematis, THD dihitung menggunakan persamaan (3):

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_h^H = 2 V_h^2}}{V_1} \times 100\% \quad (3)$$

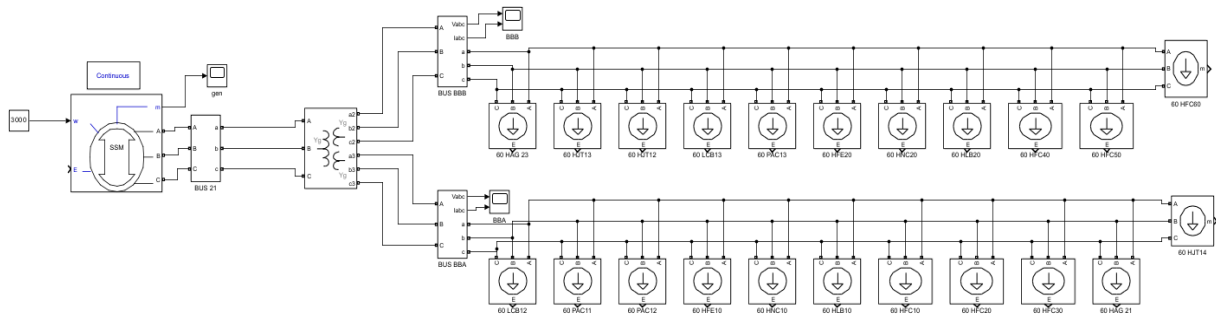
dimana:

- $V_h$  = nilai RMS tegangan harmonisa orde ke- $h$
- $V_1$  = nilai RMS tegangan fundamental (50 Hz)
- $H$  = orde harmonisa tertinggi yang dipertimbangkan (biasanya 50)

Pada sistem auxiliary PLTU, sumber utama harmonisa berasal dari penggunaan peralatan elektronik daya berbasis konverter seperti Variable Frequency Drive (VFD) yang mengontrol motor-motor bantu (Induced Draft Fan, Forced Draft Fan, Primary Air Fan), Uninterruptible Power Supply (UPS) untuk sistem kontrol dan instrumentasi, serta battery charger dan inverter sistem DC. Distorsi harmonisa yang berlebihan dapat menyebabkan berbagai dampak merugikan terhadap sistem kelistrikan, antara lain: pemanasan berlebih pada transformator dan kabel akibat rugi-rugi tambahan.

### C. Pemodelan Simulasi

Pemodelan sistem kelistrikan auxiliary PLTU Paiton Unit 6 dilakukan menggunakan MATLAB-Simulink dengan library Simscape Electrical untuk merepresentasikan komponen-komponen sistem daya



**Gambar 2. Single Line Diagram Pada Simulasi Simulink**

secara akurat. Model dikembangkan berdasarkan Single Line Diagram (SLD) aktual dari sistem auxiliary yang mencakup generator utama, transformator step-up, transformator auxiliary, busbar distribusi 10 kV, dan beban-beban motor bantu. Gambar 2 menunjukkan konfigurasi lengkap sistem auxiliary dalam bentuk Single Line Diagram yang diimplementasikan dalam Simulink.

### III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Validasi model simulasi dilakukan dengan membandingkan parameter kelistrikan hasil simulasi MATLAB-Simulink dengan data aktual dari Central Control Room (CCR) PLTU Paiton Unit 6. Parameter yang dibandingkan meliputi tegangan bus, power factor, dan arus beban pada busbar 10 kV auxiliary system yang terdiri dari Bus 4 (BBA 60) dan Bus 5 (BBB 60). Hasil perbandingan disajikan pada Tabel 1.

**Tabel 1. Perbandingan Hasil Simulasi Dan Data Lapangan**

Jenis Data	CCR	Simulasi	Error (%)
Tegangan Bus 60 BBA (BUS 4)	10,36 kV	10.6 kV	2,32%
Tegangan Bus 60 BBB (BUS 5)	10,32 kV	10.7 kV	3,68%
Arus Bus 60 BBA (BUS 4)	1248A	1258 A	0,80%
Arus Bus 60 BBB (BUS 5)	1038A	1029 A	0,87%

Validasi model menunjukkan kesesuaian yang sangat baik antara hasil simulasi MATLAB-Simulink dengan data operasi aktual dari CCR PLTU Paiton Unit 6. Dengan error rata-rata di bawah 5% untuk seluruh parameter yang divalidasi, model simulasi dianggap valid dan dapat digunakan untuk analisis, khususnya analisis harmonisa pada sistem auxiliary. Model ini digunakan untuk ekstraksi data sinyal tegangan dan arus dalam domain waktu yang

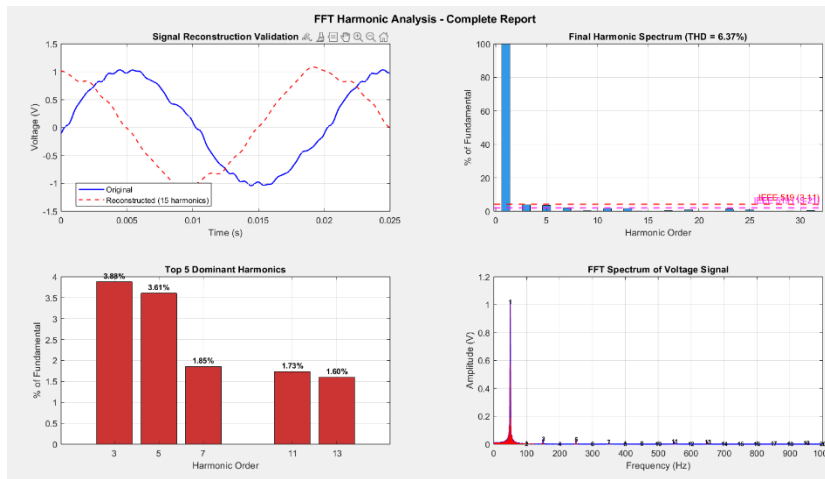
akan dianalisis menggunakan algoritma FFT untuk identifikasi komponen harmonisa dan perhitungan (THD).

#### A. Hasil Algoritma FFT

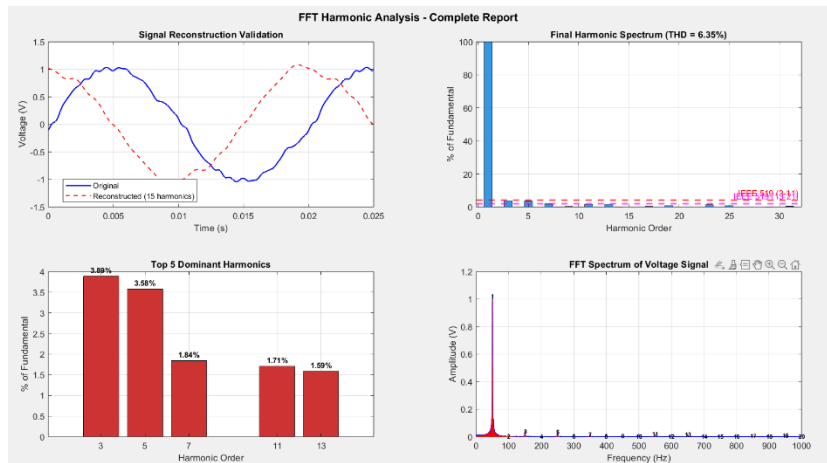
Analisis FFT mengungkapkan bahwa sistem auxiliary PLTU Paiton mengalami distorsi harmonisa dengan THD pada Bus 4 sebesar 6,37% dan Bus 5 sebesar 6,15%, yang melampaui batas IEEE 519-2014 sebesar 5,0%. Spektrum frekuensi menunjukkan dominasi harmonik ganjil, dengan orde ke-3 menjadi komponen terbesar mencapai 3,99% dari tegangan fundamental. Harmonik orde ke-5 dan ke-7 juga signifikan dengan masing-masing 3,00% dan 2,00%, sedangkan harmonik orde tinggi (16 dan 19) berkontribusi sangat kecil (<0,1%). Rekonstruksi sinyal dari 15 harmonik pertama menunjukkan keselarasan baik dengan sinyal asli, memvalidasi akurasi ekstraksi komponen frekuensi menggunakan FFT. Harmonik ganjil orde rendah (3, 5, 7) merupakan karakteristik tipikal beban non-linear seperti VFD yang digunakan pada sistem auxiliary. Temuan ini mengindikasikan perlunya implementasi filter harmonisa untuk memenuhi standar IEEE 519-2014 dan melindungi peralatan sensitive terhadap distorsi.

Pada gambar 3 yang menampilkan hasil analisis harmonisa Bus 4, terlihat bahwa sistem memiliki Total Harmonic Distortion (THD) sebesar 6.35%. Pada grafik Signal Reconstruction Validation di gambar pertama, garis biru solid menunjukkan sinyal asli sedangkan garis merah putus-putus menunjukkan sinyal yang direkonstruksi menggunakan 15 harmonisa, dan keduanya menunjukkan kesesuaian yang baik dengan pola gelombang yang terdistorsi dari bentuk sinusoidal murni. Pada grafik Final Harmonic Spectrum di sisi kanan atas gambar pertama, terlihat distribusi harmonisa dengan harmonisa-harmonisa ganjil yang signifikan terutama pada order 3, 5, 7, 11, dan 13, sementara harmonisa genap memiliki nilai yang sangat kecil atau mendekati nol.

Grafik Top 5 Dominant Harmonics di bagian bawah kiri gambar pertama menunjukkan bahwa harmonisa ke-3 merupakan yang paling dominan dengan nilai 3,89% dari fundamental, diikuti oleh



Gambar 3. Hasil FFT Harmonic Bus 4



Gambar 4. Hasil FFT Harmonic Bus 5

harmonisa ke-5 sebesar 3,58%, harmonisa ke-7 sebesar 1,84%, harmonisa ke-11 sebesar 1,71%, dan harmonisa ke-13 sebesar 1,50%.

Pada grafik FFT Spectrum of Voltage Signal di bagian bawah kanan gambar pertama, terlihat spektrum frekuensi dengan puncak pada frekuensi fundamental dan komponen-komponen harmonisa pada kelipatan frekuensi tersebut hingga rentang 1000 Hz.

Pada gambar 4 yang menampilkan hasil analisis harmonisa Bus 5, sistem menunjukkan Total Harmonic Distortion (THD) sebesar 6,37%, yang sangat mirip dengan Bus 4. Grafik Signal Reconstruction Validation di gambar kedua juga memperlihatkan sinyal asli (garis biru) dan sinyal rekonstruksi (garis merah putus-putus) dengan 15 harmonisa yang saling overlap dengan baik, menunjukkan pola distorsi yang hampir identik dengan gambar pertama.

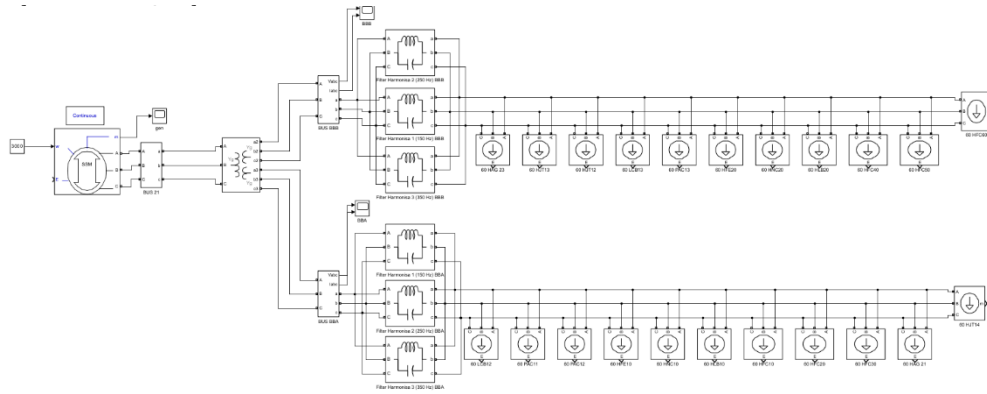
Pada grafik Final Harmonic Spectrum di sisi kanan atas gambar kedua, spektrum harmonisa menunjukkan pola yang sangat serupa dengan gambar pertama, dimana harmonisa ganjil memiliki kontribusi yang signifikan terutama pada order rendah, sementara harmonisa genap bernilai sangat kecil. Grafik Top 5 Dominant Harmonics di bagian

bawah kiri gambar kedua menampilkan distribusi yang hampir sama dengan gambar pertama, yaitu harmonisa ke-3 dengan nilai 3,88% (hampir identik dengan Bus 4), harmonisa ke-5 sebesar 3,61% (sedikit lebih tinggi dari Bus 4), harmonisa ke-7 sebesar 1,85%, harmonisa ke-11 sebesar 1,73%, dan harmonisa ke-13 sebesar 1,60% (sedikit lebih tinggi dari Bus 4).

Pada grafik FFT Spectrum of Voltage Signal di bagian bawah kanan gambar kedua, spektrum frekuensi menunjukkan karakteristik yang serupa dengan gambar pertama, dengan puncak fundamental yang dominan pada frekuensi dasar dan komponen harmonisa yang terdistribusi hingga 1000 Hz.

## B. Desain Filter Harmonisa

Berdasarkan hasil analisis FFT yang menunjukkan bahwa sistem auxiliary PLTU Paiton Unit 6 mengalami distorsi harmonisa dengan THD Bus 4 sebesar 6,35% dan Bus 5 sebesar 6,37%, keduanya melampaui batas standar IEEE 519-2014 yang mensyaratkan THD maksimal 5,0%, maka diperlukan implementasi solusi mitigasi harmonisa untuk memenuhi standar kualitas daya.



**Gambar 5. Singel Line Rangkaian Setelah Ditambah Filter parallel tuned LC**

Filter pasif yang dirancang menggunakan konfigurasi parallel tuned LC filter dengan topologi single-tuned untuk setiap orde harmonisa dominan. Filter ini ditargetkan untuk meredam harmonisa pada tiga orde utama yang teridentifikasi dari analisis FFT, yaitu orde ke-3 (150 Hz), orde ke-5 (250 Hz), dan orde ke-7 (350 Hz). Total kapasitas filter yang dibutuhkan adalah 6.00 MVar.

Untuk spesifikasi detail desain filter untuk masing-masing orde harmonisa adalah sebagai berikut:

1. Filter untuk  $h=3$  ( $f=150$  Hz):

Kapasitor : 21.221  $\mu$ F (2.00 MVar)

Induktor : 53.052 mH

Z karakteristik: 50  $\Omega$

Q Factor : 5.00

Resonansi : 150Hz

2. Filter untuk  $h=5$  ( $f=250$  Hz):

Kapasitor : 12.732  $\mu$ F (2.00 MVar)

Induktor : 31.831 mH

Z karakteristik: 50 $\Omega$

Q Factor : 5.00

Resonansi : 250Hz

3. Filter untuk  $h=7$  ( $f=350$  Hz):

Kapasitor : 9.095  $\mu$ F (2.00 MVar)

Induktor : 22.736 mH

Z karakteristik: 50 $\Omega$

Q Factor : 5.00

Resonansi : 350 Hz

Quality factor (Q) sebesar 5.00 dipilih untuk memberikan *bandwidth filtering* yang optimal, tidak terlalu sempit yang dapat menyebabkan detuning akibat variasi.

Hasil yang ada diatas didapat dengan memasukkan data dari hasil FFT lalu dimasukkan untuk bagaimana filter yang cocok untuk harmonisa yang ada untuk perhitungan sesuai dengan rumus untuk filter harmonisa serta, pada gambar 5 dapat dilihat bahwa untuk setiap filter dipasang secara paralel yang berjumlah 3 filter hal ini karena setiap filter hanya bisa menyerap satu frekuensi spesifik saja. Dengan dipasang paralel, ketiganya bekerja bersamaan menyerap harmonisa di frekuensi masing-masing tanpa saling mengganggu. dan untuk nilai kapasitansi dan induktansi sesuai nilai yang telah kita

hitung diatas, untuk hasil dari filter yang dipasang akan dijelaskan pada bagian selanjutnya.

### C. Perbandingan Sebelum Dan Sesudah Filter

Evaluasi efektivitas passive LC filter dalam mereduksi distorsi harmonisa dilakukan dengan membandingkan kondisi sebelum dan sesudah pemasangan filter pada Bus 4 dan Bus 5. Gambar 6 dan Gambar 7 menyajikan hasil analisis untuk kedua bus tersebut.

Analisis Bus 4 pada gambar 6. menampilkan enam panel visualisasi yang membandingkan kondisi sebelum dan sesudah pemasangan filter. Sebelum pemasangan filter, spektrum harmonisa menunjukkan THD sebesar 6,35% dengan komponen harmonisa dominan pada orde ke-3 (150 Hz), ke-5 (250 Hz), dan ke-7 (350 Hz). Harmonisa ini merupakan karakteristik tipikal dari beban non-linear seperti *Variable Frequency Drive* (VFD) yang digunakan pada motor-motor auxiliary. Bentuk gelombang tegangan pada kondisi ini menunjukkan distorsi yang cukup jelas pada puncak dan lembah gelombang sinusoidal.

Setelah implementasi passive LC filter, THD berhasil diturunkan menjadi 3,20%, yang berarti terjadi reduksi harmonisa sebesar 49,6%. Komponen harmonisa pada orde ke-3, ke-5, dan ke-7 telah diredam secara signifikan dengan magnitudo yang turun drastis. Filter pasif bekerja dengan menciptakan jalur impedansi rendah pada frekuensi resonansi target, sehingga arus harmonisa diserap oleh filter dan tidak mengalir ke sistem utama. Bentuk gelombang tegangan setelah filter terlihat jauh lebih halus dan mendekati bentuk sinusoidal sempurna, yang sangat penting untuk melindungi peralatan sensitif dari stress harmonik.

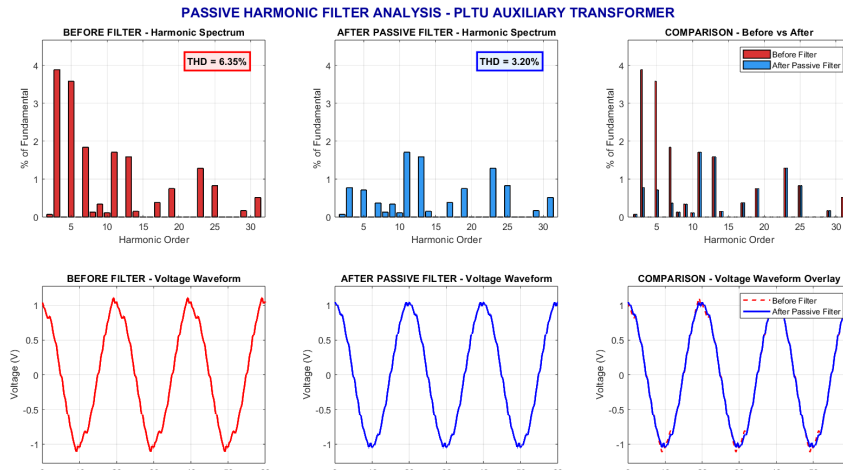
Bus 5 pada gambar 7 menyajikan analisis serupa untuk Bus 5 dengan hasil yang konsisten dengan Bus 4. Sebelum pemasangan filter, spektrum harmonisa menunjukkan THD sebesar 6,37%, sedikit lebih tinggi dibandingkan Bus 4, dengan distribusi harmonisa dominan pada orde yang sama. Perbedaan kecil ini kemungkinan disebabkan oleh variasi

karakteristik beban yang terhubung pada masing-masing bus.

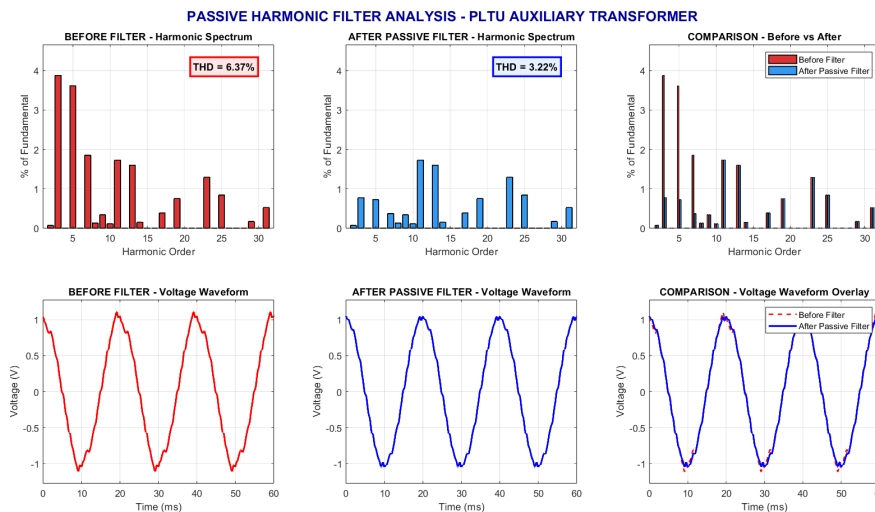
Setelah implementasi passive LC filter yang identik, THD pada Bus 5 berhasil diturunkan menjadi 3,22% dengan efisiensi reduksi 49,5%. Konsistensi performa filter pada kedua bus memvalidasi desain filter yang telah dilakukan dan menunjukkan bahwa solusi ini dapat diterapkan secara universal pada sistem auxiliary.

Tabel 2 menunjukkan perbandingan nilai Total Harmonic Distortion (THD) pada Bus 4 dan Bus 5 sebelum dan sesudah pemasangan filter harmonisa.

Pada Bus 4, nilai THD sebelum filter adalah 6,35% dan setelah pemasangan filter turun menjadi 3,20%, yang berarti terjadi penurunan THD sebesar 3,15% atau berkurang hampir 50% dari kondisi awal. sesudah dengan standart.



Gambar 6. Hasil Filter Sebelum dan Sesudah Bus 4



Gambar 7. Hasil Filter Sebelum dan Sesudah Bus 5

Dengan karakteristik beban yang serupa. Bentuk gelombang tegangan setelah filter menjadi jauh lebih sinusoidal dengan distorsi yang minimal, mengindikasikan bahwa passive LC filter memberikan performa yang konsisten dan reliable pada kedua bus auxiliary. Untuk lebih jelas sebelum dan sesudah dapat terlihat pada tabel 2.

Tabel 2. Perbandingan Perbandingan THD sebelum dan sesudah filter

Bus	THD Sebelum	THD Sesudah
Bus 4	6,35%	3,20%
Bus 5	6,37%	3,22%

Pada Bus 5, nilai THD sebelum filter adalah 6,37% dan setelah pemasangan filter turun menjadi 3,22%, yang menunjukkan penurunan THD sebesar 3,15%, juga berkurang hampir 50% dari kondisi awal.

Kedua bus menunjukkan kinerja filter yang sangat baik dan konsisten, dengan penurunan THD yang hampir identik. Setelah pemasangan filter, nilai THD pada kedua bus berada di bawah 5% yang sudah dibawah standar IEEE 519-2014.

Dengan demikian, implementasi filter pasif *single-tuned* tidak hanya berhasil memenuhi standar IEEE 519-2014, tetapi juga memberikan perlindungan

yang lebih baik bagi peralatan yang dapat menyebabkan *overheating* dan rugi-rugi daya.

#### IV. KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil membuktikan bahwa sistem auxiliary transformator daya PLTU Paiton Unit 6 mengalami distorsi harmonisa yang melebihi batas standar IEEE 519-2014. Komponen harmonisa dominan yang teridentifikasi merupakan karakteristik tipikal dari beban-beban non-linear berbasis Variable Frequency Drive (VFD) yang beroperasi pada sistem tersebut. Model simulasi MATLAB-Simulink yang dikembangkan berdasarkan data operasional nyata dari Central Control Room (CCR) terbukti valid dan mampu merepresentasikan kondisi sistem kelistrikan auxiliary secara akurat.

Implementasi passive LC filter yang dirancang berdasarkan hasil analisis FFT terbukti efektif dalam mereduksi distorsi harmonisa pada kedua busbar auxiliary sehingga nilai THD berhasil diturunkan hingga memenuhi standar IEEE 519-2014. Hal ini menunjukkan bahwa pendekatan kombinasi analisis FFT berbasis MATLAB-Simulink dengan perancangan filter pasif merupakan solusi yang valid dan dapat diandalkan untuk penanganan masalah harmonisa pada sistem auxiliary pembangkit listrik. Untuk penelitian selanjutnya, disarankan mengeksplorasi penggunaan filter aktif atau filter hybrid guna membandingkan efektivitasnya dengan filter pasif, serta melakukan pengujian pada kondisi beban yang bervariasi dan sistem auxiliary pembangkit dengan konfigurasi yang berbeda untuk memperluas generalisasi temuan ini.

#### REFERENSI

- [1] Tan, L. and Jiang, J. (2026). Discrete fourier transform and signal spectrum. <https://doi.org/10.1016/b978-0-443-27335-3.00005-3>
- [2] Nejadian, A. (2026). Spice implementation of multiconductor transmission line model of transformer winding for very fast transient analysis. *Electric Power Systems Research*, 251, 112207. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2025.112207>
- [3] Tan, L. and Jiang, J. (2026). Discrete fourier transform and signal spectrum. <https://doi.org/10.1016/b978-0-443-27335-3.00005-3>
- [4] Liu, Y., Xue, Y., Yu, L., & Liang, D. (2025). Simplified dynamic models and harmonics relationships of hybrid distribution transformer. *Electric Power Systems Research*, 249, 112001. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2025.112001>
- [5] Fan, L., Qi, G., Xing, J., Jin, J., Liu, J., & Wang, Z. (2020). Accurate frequency estimator of sinusoid based on interpolation of fft and dtft. *IEEE Access*, 8, 44373-44380. <https://doi.org/10.1109/access.2020.2977978>
- [6] Zhang, S., Tian, B., Liang, J., & Cheng, Y. (2022). Detection of Harmonic Components using the FFT and Instantaneous Reactive Power Theory. *Journal of Physics: Conference Series*, 2242(1). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2242/1/012034>
- [7] Maw, S. S. (2023). Analysis and Comparison of Active and Hybrid Harmonic Filter in Photovoltaic Water Pumping System. *Journal of Engineering Technology and Applied Physics*, 5(2), 58-63. <https://doi.org/10.33093/jetap.2023.5.2>
- [8] Alotaibi, M., Manoj, B., & Patel, N. (2024). Recent Trends in Power quality Monitoring and Harmonics Mitigation in Smart Grids. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 187, 113048. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.113048>
- [9] Dugan, R. C., McGranaghan, M. F., Santoso, S., & Beaty, H. W. (2023). *Electrical Power Systems Quality* (4th ed.). McGraw-Hill.
- [10] Smith, S. W. (2024). *The Scientist and Engineer's Guide to Digital Signal Processing*. California Technical Publishing.
- [11] Luo, A., Xu, Q., Ma, F., & Chen, Y. (2016). Overview of power quality analysis and control technology for the smart grid. *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, 4(1), 1-9. <https://doi.org/10.1007/s40565-016-0185-8>
- [12] Liu, Y., Feng, D., Lin, C., & Zhang, Y. (2020). Current status and development trend of power quality comprehensive assessment. *Power System Protection and Control*, 48(4), 167-176
- [13] Su, T., Yang, M., Jin, T., & Flesch, R. C. (2018). Power harmonic and interharmonic detection method in renewable power based on Nuttall double-window all-phase FFT algorithm. *IET Renewable Power Generation*, 12(8), 953-961. <https://doi.org/10.1049/iet-rpg.2017.0115>
- [14] Chang, G. W., Chen, C. I., & Teng, Y. F. (2008). Measuring power system harmonics and interharmonics by an improved fast Fourier transform-based algorithm. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 2(2), 192-201. <https://doi.org/10.1049/iet-gtd:20070205>
- [15] Wen, H., Guo, S., Teng, Z., Li, F., & Yang, Y. (2014). Frequency estimation of distorted and noisy signals in power systems by FFT-based approach. *IEEE Transactions on Power Systems*, 29(2), 765-774. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2013.2285451>
- [16] Paruch, L. (2024). Power quality, harmonics: How to select a variable frequency drive (VFD). *Control Engineering*. Retrieved from <https://www.controleng.com>
- [17] Yaskawa Electric Corporation. (2024). Variable frequency drives and harmonic mitigation solutions. Technical Documentation.
- [18] Park, B., Lee, J., Yoo, H., & Jang, G. (2021). Harmonic mitigation using passive harmonic filters:

- Case study in a steel mill power system. *Energies*, 14(8), 2278. <https://doi.org/10.3390/en14082278>
- [19] Azis, H. I., Amrillah, T., & Yusuf, S. (2021). Harmonics mitigation of stand-alone photovoltaic system using LC passive filter. *Journal of Electrical Engineering & Technology*, 16, 2389-2396. <https://doi.org/10.1007/s42835-021-00777-7>
- [20] Shakeri, S., Esmaili, S., & Koochi, M. H. R. (2021). Passive harmonic filter design considering voltage sag performance-applicable to large industries. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 37(3), 1714-1722. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2021.3103447>

