

Mitigasi *Total Harmonic Distortion* Pada Beban Residensial Menggunakan *Active Low Pass Filter* Berbasis Multisim

Eva Magdalena Silalahi^{1*}, Maria Fatima Wowo², Antonius D. Tyas Prasetyo³, Judo Ignatius Nempung⁴, Robinson Purba⁵

^{1,2,3,4,5}Program Studi Teknik Elektro; Fakultas Teknik; Universitas Kristen Indonesia (UKI); Jl. Mayjen Sutoyo No.2, Cawang, Jakarta Timur, DKI Jakarta 13630
e-mail: eva.silalahi@uki.ac.id

Abstrak—Beban listrik nonlinier menyebabkan timbulnya distorsi harmonik, faktor daya rendah, dan harmonik arus dan tegangan pada beban listrik residensial. Studi ini meneliti kualitas daya listrik residensial. Studi ini mencakup faktor daya, THD arus dan tegangan. Berdasarkan hasil pengukuran, diperoleh THD_v 1,97% dan total THD_i 9,57%. Setelah simulasi filter arus harmonik, diperoleh hasil yaitu: THD_i turun dari 9,57% menjadi 4,843% atau turun 49,39%. Harmonik ganjil turun cukup besar karena jenis harmonik ini paling dominan muncul dari beban nonlinier. Harmonik genap tidak banyak berkurang karena dari awal nilainya memang sudah kecil. Selain itu, frekuensinya berada dekat batas kerja filter, sehingga lebih mudah terganggu oleh ‘gangguan kecil’ atau noise dari sistem filter, yang membuat penurunannya tidak terlalu terlihat. Filter bekerja sangat baik pada harmonik orde tinggi, dengan kemampuan meredam lebih dari 85% untuk harmonik orde 15 dan seterusnya. Total THD_i berhasil turun hingga 49,39%, dan faktor daya meningkat 12,879%, menunjukkan bahwa filter aktif benar-benar efektif dalam memperbaiki kualitas daya.

Kata kunci: active low pass filter, beban residensial, kualitas daya, mitigasi harmonik, THD

Abstract—Nonlinear electrical loads cause harmonic distortion, low power factor, and current and voltage harmonics in residential electrical loads. This study examines residential electrical power quality. This study includes power factor, current and voltage THD. Based on the measurement results, the THD_v was 1.97% and the total THD_i was 9.57%. After the harmonic current filter simulation, the results obtained were: THD_i decreased from 9.57% to 4.843% or a decrease of 49.39%. Odd harmonics decreased significantly because this type of harmonic is the most dominant harmonic that arises from nonlinear loads. Even harmonics were not reduced much because their values were already small from the start. In addition, their frequencies are close to the filter's operating limit, so they are more easily disturbed by 'small disturbances' or noise from the filter system, which makes the decrease less noticeable. The filter performs very well on high-order harmonics, with a damping capacity of more than 85% for 15th-order harmonics and above. The total THD_i was successfully reduced by 49.39%, and the power factor increased by 12.879%, indicating that the active filter is truly effective in improving power quality.

Keywords: active low pass filter, residential load, power quality, harmonic mitigation, THD

I. PENDAHULUAN

Meningkatnya konsumsi energi listrik di sektor domestik diikuti dengan pergeseran profil beban dari linier ke nonlinier. Perangkat elektronik modern seperti lampu LED, komputer, dan pengisi daya kendaraan listrik menghasilkan arus non-sinusoidal yang memicu munculnya harmonisa [1]. Fenomena ini menyebabkan distorsi bentuk gelombang arus dan tegangan yang diukur melalui *Total Harmonic Distortion* (THD), yang secara langsung menurunkan faktor daya dalam sistem kelistrikan rumah tangga.

Penelitian menunjukkan bahwa pelanggan listrik residensial dengan daya 450VA dan 900VA memiliki faktor daya antara 0,59 hingga 0,92. Banyak di antaranya belum

memenuhi standar SPLN 70-1:1985 (minimal 0,85). Beban rumah tangga menyumbang distorsi harmonik sebesar 18,3% hingga 53,77%, nilai yang jauh melampaui ambang batas standar IEEE-519 [2]. Secara spesifik, penggunaan kolektif 60 lampu hemat energi (Lampu Hemat Energi, LHE) dan LED ditemukan mendistorsi gelombang arus hingga 63,97%, dengan dominasi harmonisa orde ke-3 dan ke-5. Hal ini menyebabkan penurunan PF aktual menjadi 0,608, jauh di bawah standar PLN [3].

Penelitian menunjukkan bahwa lampu LED memiliki efikasi dan efisiensi daya yang jauh lebih baik dibandingkan CFL dan lampu pijar, menjadikannya pilihan paling hemat energi untuk penerangan kantor. Analisis terhadap kualitas

daya menunjukkan bahwa nilai *Total Demand Distortion* (TDD) pada lampu LED adalah sebesar 1,73%, sedangkan pada lampu pijar nilai harmonisnya sangat kecil sehingga dapat diabaikan [4].

Untuk mengatasi penurunan kualitas daya, berbagai metode mitigasi harmonisa telah dikembangkan. Penggunaan instalasi filter pasif tunggal (resistor, induktor, kapasitor) pada beban 450VA hingga 2200VA terbukti mampu menurunkan THD arus secara signifikan. Meskipun demikian, pada beberapa kasus, harmonisa tegangan masih ditemukan melebihi batas 5% yang diizinkan oleh IEEE-519 1992 [5]. Teknologi *Shunt Active Power Filter* (SAPF) memberikan hasil yang lebih efektif. Simulasi menunjukkan bahwa penggunaan SAPF mampu mereduksi THD arus dari 32,63% menjadi hanya 4,47%, memenuhi kriteria keamanan standar internasional [6].

Pemasangan bank kapasitor menjadi solusi umum untuk memperbaiki faktor daya dan menekan rugi daya. Di sektor industri/komersial, contoh kasus di PT. Medco E&P, kombinasi bank kapasitor dan filter berhasil meningkatkan faktor daya menjadi 0,961 serta mereduksi harmonisa tegangan sebesar 12,2% [7]. Sementara itu, di CV Praya Karya, pemasangan kapasitor berdasarkan metode *Newton-Raphson* berhasil menurunkan rugi daya rata-rata dari 28,3 kW menjadi 24,9 kW, sesuai dengan standar SPLN 72:1987[8].

Pada sektor UMKM, dengan kasus pada usaha bengkel las, penggunaan *switching* kapasitor *Zero Crossing Detector* untuk meningkatkan efisiensi faktor daya hingga 56% pada peralatan motor listrik seperti bor tangan. Namun, perbaikan tidak signifikan pada alat yang sudah memiliki faktor daya di atas 0,85 [9].

Pada penerapan energi terbarukan, misalnya energi surya, harmonik pada keluaran inverter Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) *on-grid* dapat direduksi dengan mendisain *low pass active filter* (filter aktif lolos rendah) [10]. Analisis perbandingan kualitas daya menunjukkan bahwa nilai *Total Harmonic Distortion* tegangan (THDv) pada motor listrik satu fasa, baik yang bersumber dari PLN maupun PLTS *off-grid*, berada di angka 2,3%, yang mana nilai tersebut masih memenuhi standar IEEE 519: 2014 [11].

Penggunaan beban non-linier seperti *converter* pada sistem KRL Yogyakarta-Solo diketahui memicu distorsi harmonisa yang berisiko merusak peralatan akibat panas berlebih. Guna mengatasi hal ini, pemasangan *single tuned filter* pada bus *converter*, transformator, dan bus beban motor terbukti efektif mereduksi harmonik orde ke-5 serta memperbaiki kualitas daya sistem [12].

Penelitian masalah harmonisa pada sistem KRL, mencatat bahwa intensitas harmonisa individu (IHD-i) pada orde ke-5, ke-7, dan ke-11 pada sistem elektrifikasi KRL telah melampaui batas standar yang ditetapkan oleh IEEE. Karena itu dilakukan perancangan filter harmonisa sebagai solusi optimum untuk mengatasi masalah tersebut [13].

Sebuah penelitian simulasi di PT. Texmaco Perkasa Engineering menunjukkan perbaikan kualitas daya listrik yang signifikan setelah penambahan *Filter Active Hybrid* dan *Power Factor Correction*, di mana distorsi harmonisa arus berkurang drastis dari 30,7% menjadi 0,03% [14].

Selain itu, penggunaan filter aktif pada mesin *extruder* di PT Delta Jaya Mas terbukti sangat efektif

karena mampu mereduksi THD hingga mencapai angka 1,57% [15].

Integrasi perangkat elektronik seperti LED, komputer, dan pengisi daya kendaraan listrik di lingkungan perumahan telah mengubah profil beban dari linier menjadi non-linier. Beban-beban ini menghasilkan arus yang tidak sinusoidal, yang mengandung komponen harmonisa frekuensi tinggi [1]. Harmonisa dapat menyebabkan panas berlebih pada transformator, kegagalan peralatan sensitif, dan penurunan efisiensi energi secara keseluruhan [16]. Meskipun filter pasif sering digunakan, filter aktif menawarkan keunggulan dalam hal fleksibilitas dan kemampuan kompensasi terhadap beban yang bervariasi. Dalam upaya memitigasi dampak harmonisa pada jaringan listrik, penggunaan *low pass filter* aktif maupun pasif menjadi solusi utama untuk memisahkan sinyal fundamental dari gangguan frekuensi tinggi yang merusak kualitas daya [17].

Penelitian ini mensimulasikan penerapan *Filter Aktif Low Pass* berbasis Multisim sebagai strategi mitigasi yang efektif untuk beban listrik residensial. Adapun tujuan yang ingin dicapai dalam pelaksanaan penelitian ini adalah:

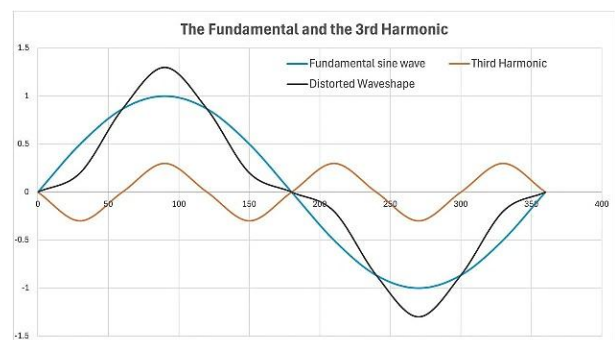
1. Mengetahui besarnya THD pada beban listrik residensial melalui pengukuran dengan *Power Quality Analyze* (PQA).
2. Merancang dan menganalisis hasil simulasi rangkaian filter aktif *low-pass* berdasarkan THD beban listrik residensial.

II. STUDI PUSTAKA

Penelitian terbaru menunjukkan bahwa distorsi harmonisa pada beban rumah tangga sangat dipengaruhi oleh penggunaan penyearah yang masif [1]. Standar IEEE-519 2022 menetapkan batas THD tegangan maksimal sebesar 8% untuk sistem di bawah 1,0 kV guna mencegah gangguan operasional [18], [19]. Penggunaan filter aktif terbukti lebih efektif daripada filter pasif karena tidak menimbulkan risiko resonansi dengan impedansi sistem. Simulasi menggunakan perangkat lunak Multisim sangat membantu dalam tahap perancangan awal untuk memprediksi penurunan THD.

A Harmonisa

Harmonisa pada sinyal listrik merujuk pada gelombang sinyal listrik dengan frekuensi kelipatan bulat dari frekuensi dasar sistem.



Gambar 1. Ilustrasi gelombang sinus fundamental, gelombang terdistorsi dan harmonik ke-3 [20].

Grafik pada Gambar 1 mengilustrasikan gelombang sinus fundamental dan harmonik ke-3. Distorsi yang disebabkan

oleh harmonik ke-3 mengakibatkan bentuk gelombang secara keseluruhan menyimpang dari gelombang sinus ideal. Gambar tersebut memberikan visualisasi teknis tentang distorsi bentuk gelombang yang dihasilkan dari interaksi antara frekuensi fundamental dan harmonik. Representasi visual ini menggambarkan bagaimana harmonik menimbulkan penyimpangan dari bentuk gelombang sinusoidal ideal dalam sistem kelistrikan [20].

B Total Harmonic Distortion (THD)

Distorsi harmonik total merupakan indeks penting, untuk memperlihatkan pengaruh harmonik pada komponen sistem tenaga ketika menganalisis harmonik (THD). THD adalah perbandingan (rasio) antara nilai rms (*root mean square*) dengan rms frekuensi dasar.

Bentuk gelombang periodik dengan harmonic, akan dibandingkan dengan bentuk gelombang sinusoidal, menggunakan nilai THD ini. THD adalah 0% untuk gelombang sinusoidal murni, sedangkan untuk mengetahui THD arus dan tegangan, dapat menggunakan rumus berikut.

C THDi

Persamaan THDi untuk arus adalah[4]:

$$THD_i = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I_1} \times 100\%. \quad (1)$$

dimana:

- I_1 = nilai arus pada frekuensi dasar (*Ampere*, A)
- THD_i = *Total Harmonic Distortion* pada arus (%)
- I_n = nilai arus harmonisa orde ke-n (*Ampere*, A)

D THDv

Persamaan THDv untuk tegangan adalah [4]:

$$THD_v = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} V_n^2}}{V_1} \times 100\%. \quad (2)$$

dimana,

- V_1 = nilai tegangan frekuensi dasar (*Volt*, V)
- THD_v = *Total Harmonic Distortion* pada tegangan (%)
- V_n = nilai tegangan harmonisa orde ke-n (*Volt*, V)

E TDD

Total Demand Distortion (TDD) adalah total distorsi arus harmonisa yang dapat dinyatakan dengan rumus berikut ini [4]:

$$TDD = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I_L} \times 100\%. \quad (3)$$

dimana:

- I_L = nilai arus beban maksimum (*Ampere*, A)
- TDD = *Total Demand Distortion* (%)
- I_n = nilai arus harmonisa orde ke-n (*Ampere*, A)

THDi menggunakan arus fundamental sesaat sebagai referensi. TDD menggunakan arus permintaan maksimum (arus maksimum) sebagai referensi. Ini berarti, pada beban 100%, THDi = TDD [21].

F Standar IEEE-519 2022

Tabel 1 ini mendefinisikan tingkat target yang harus dicapai tergantung pada rasio hubung singkat I_{SC}/I_L . I_{SC}

adalah arus hubung singkat terukur di PCC, dan I_L adalah arus beban permintaan maksimum di PCC.

Tabel 1. Batas THD Arus IEEE-519 2022 [21].

Distorsi arus harmonik maksimum I_L (%)						
Orde harmonik individu						
I_{SC}/I_L	$2 \leq h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h < 50$	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

Tabel 2 menyajikan batas distorsi tegangan standar IEEE-519 2022.

Tabel 2. Batas THD Tegangan Standar IEEE-519 2022 [21].

Tegangan bus pada PCC, V_{PCC} (V)	Harmonik individu (%)	THD (%)
$V_{PCC} \leq 1,0$ kV	5,0	8,0
$1 \text{ kV} < V_{PCC} \leq 69$ kV	3,0	5,0
$69 \text{ kV} < V_{PCC} \leq 161$ kV	1,5	2,5
$161 \text{ kV} < V_{PCC}$	1,0	1,5

G Faktor Daya

Faktor daya (*Power Factor*, PF) dihitung dengan menggunakan rumus:

$$PF = \cos \theta = \frac{P}{S}. \quad (4)$$

dimana:

- PF = faktor daya
- θ = beda fasa antara tegangan dan arus ($^\circ$)
- P = daya aktif (*Watt*, W)
- S = daya semu (*Volt-Ampere*, VA)

Untuk menghitung *True Power Factor* (TPF) atau faktor daya sebenarnya dapat menggunakan persamaan berikut [22]:

$$TPF = PF \times DPF. \quad (5)$$

dengan

$$DPF = \frac{1}{\left(\sqrt{1+THD_v^2}\right)\left(\sqrt{1+THD_i^2}\right)}. \quad (6)$$

dimana:

- TPF = faktor daya yang sebenarnya (*True Power Factor*)
- DPF (*Distortion Power Factor*) = faktor daya distorsi.

Parameter Filter Aktif Low Pass

Untuk menentukan besarnya kapasitas kapasitor yang diperlukan untuk mereduksi daya reaktif dari $\cos \theta_1$ menjadi $\cos \theta_2$ (faktor daya yang diinginkan). Maka, dapat ditentukan besar nilai kapasitor C yang dibutuhkan dengan menggunakan persamaan berikut:

$$Q_c = P \times (\tan \theta_1 - \tan \theta_2). \quad (7)$$

Selanjutnya untuk mencari nilai kapasitansi C dengan rumus berikut ini:

$$C = \frac{Q_c}{V^2 (2\pi f)}. \quad (8)$$

dimana:

- Q_c = kapasitor (VAR).
- C = kapasitansi kapasitor (*Farad*, F).
- V = tegangan sistem (*Volt*, V).
- P = daya rata-rata (*Watt*, W).
- $\cos \theta$ = faktor daya.

f = frekuensi (*Hertz*, Hz).

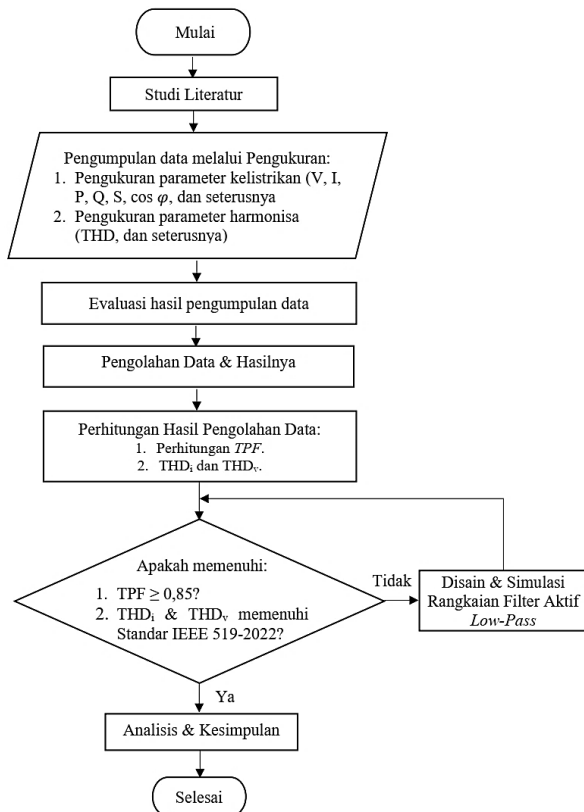
Perhitungan nilai R_f pada filter aktif *low-pass*, dengan menggunakan persamaan berikut:

$$R_f = \frac{I}{2\pi f C_f} \quad (9)$$

dimana R_f dan C_f adalah komponen dari filter aktif *low-pass*.

III. METODE

Tahapan penelitian ini didasarkan pada bagan alir penelitian seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Bagan alir penelitian.

A. Prosedur observasi dan pengumpulan data

- Observasi beban listrik residensial dan pengumpulan data dari pengukuran menggunakan PQA Kyoritsu KEW 6315.
- Selanjutnya mengolah dan menganalisis data hasil pengukuran dan hasil pengukuran.

B. Perancangan rangkaian filter aktif *low-pass*.

Digunakan filter aktif orde kedua berbasis *Operational Amplifier (Op-Amp)* dengan konfigurasi *Low Pass Filter*. Frekuensi *cut-off (c)* ditetapkan di sekitar 100 Hz untuk memastikan hanya frekuensi fundamental 50 Hz yang dialirkan ke sumber, sementara harmonisa orde tinggi diredam [16]. Dimulai dengan perhitungan nilai komponen C dan nilai parameter rangkaian filter aktif *low-pass* R_f , C_f dan R.

C. Tahapan Implementasi Simulasi

Langkah-langkah yang akan dilakukan dalam proses simulasi rangkaian menggunakan Multisim yaitu:

- Simulasi rangkaian filter aktif *low-pass* yang telah dirancang.
- Selanjutnya, dilakukan analisis tingkat harmonisa berdasarkan hasil pengukuran dan hasil simulasi.

Berdasarkan hasil analisis tersebut, selanjutnya dibuat kesimpulan dan saran.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Dalam penelitian ini, *Kyoritsu Kew 6315 Power Quality Analyzer (PQA)* digunakan untuk menilai beban listrik residensial pada tegangan 220 volt, satu fasa, dan daya 2200 VA dalam kondisi menyala simultan. Beban listrik nonlinier yang digunakan dalam pengukuran ini adalah: pompa air, pendingin ruangan (AC), komputer/laptop, televisi, lampu LED, kipas angin, *rice cooker*, dan kulkas dalam kondisi beban penuh.

Pengukuran langsung pada panel utama listrik rumah tangga di mana *clamp current* 8128 secara langsung mengukur arus pada kabel fasa keluar dari panel utama, yaitu mengukur tegangan, arus, daya, faktor daya, THDv dan THDi rasio tegangan/arus harmonik, amplitudo dan sudut fasa untuk arus dan tegangan harmonik dari orde 1-25, serta amplitudo dan sudut fasa.

A. Pengolahan Data Hasil Pengukuran

Data hasil pengukuran PQA Kyoritsu KEW 6315 disajikan pada Tabel 3 dibawah ini yaitu: nilai tegangan harmonik orde 1 hingga 25.

Tabel 3. Data Hasil Pengukuran THDv orde 1-25.

Orde n	Tegangan harmonik orde n (V)	THDv ke-n (%)
1	223.96 $\angle 0.00^\circ$	100.00
2	0.14 $\angle 14.91^\circ$	0.061
3	0.87 $\angle 3.24^\circ$	0.389
4	0.01 $\angle 13.44^\circ$	0.005
5	4.27 $\angle -6.48^\circ$	1.905
6	0.00 $\angle 13.12^\circ$	0.001
7	0.38 $\angle 0.42^\circ$	0.168
8	0.00 $\angle 10.81^\circ$	0.000
9	0.32 $\angle -6.97^\circ$	0.145
10	0.00 $\angle 10.31^\circ$	0.000
11	0.38 $\angle 5.74^\circ$	0.171
12	0.00 $\angle 10.10^\circ$	0.000
13	0.01 $\angle 10.12^\circ$	0.002
14	0.00 $\angle 9.60^\circ$	0.000
15	0.02 $\angle 7.71^\circ$	0.011
16	0.00 $\angle 8.42^\circ$	0.000
17	0.00 $\angle 8.18^\circ$	0.000
18	0.00 $\angle 6.83^\circ$	0.000
19	0.00 $\angle 6.72^\circ$	0.000
20	0.00 $\angle 6.06^\circ$	0.000
21	0.00 $\angle 5.54^\circ$	0.000
22	0.00 $\angle 5.16^\circ$	0.000
23	0.00 $\angle 3.95^\circ$	0.000
24	0.00 $\angle 4.11^\circ$	0.000
25	0.01 $\angle 4.66^\circ$	0.005

Berdasarkan data Tabel 3 diatas, dan menggunakan (2), maka diperoleh nilai THDv = 1,97% untuk seluruh orde 1 hingga 25. Dan nilai THDv ini masih memenuhi syarat batas 8% standar IEEE-519 2022 untuk sistem tegangan $\leq 1,0$ kV.

Tabel 4 berikut ini memperlihatkan data hasil pengukuran arus harmonik THDi orde 1 hingga 25.

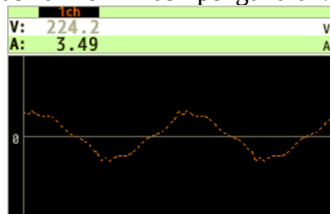
Tabel 4. Data Hasil Pengukuran THDi orde 1-25.

Orde n	Arus harmonik orde n (A)	THDi ke-n (%)
1	3.563 $\angle 4.66^\circ$	100.00
2	0.002 $\angle 12.65^\circ$	0.048
3	0.223 $\angle 2.84^\circ$	6.270
4	0.000 $\angle 13.02^\circ$	0.011
5	0.237 $\angle 1.06^\circ$	6.651
6	0.000 $\angle 13.33^\circ$	0.006
7	0.056 $\angle 0.70^\circ$	1.578
8	0.000 $\angle 10.87^\circ$	0.005
9	0.044 $\angle 3.89^\circ$	1.243
10	0.000 $\angle 10.28^\circ$	0.003
11	0.038 $\angle 6.47^\circ$	1.074
12	0.000 $\angle 10.23^\circ$	0.003
13	0.027 $\angle -1.33^\circ$	0.764
14	0.000 $\angle 9.95^\circ$	0.002
15	0.027 $\angle -0.69^\circ$	0.772
16	0.000 $\angle 8.68^\circ$	0.003
17	0.021 $\angle 1.94^\circ$	0.586
18	0.000 $\angle 7.07^\circ$	0.002
19	0.028 $\angle 4.38^\circ$	0.772
20	0.000 $\angle 5.98^\circ$	0.001
21	0.023 $\angle 1.56^\circ$	0.651
22	0.000 $\angle 5.28^\circ$	0.001
23	0.016 $\angle -1.03^\circ$	0.448
24	0.000 $\angle 4.22^\circ$	0.000
25	0.008 $\angle 2.28^\circ$	0.227

Dari data Tabel 4 di atas dan dengan menggunakan (1), maka dapat diperoleh: nilai THDi = 9,57% untuk seluruh orde 1 hingga 25. Juga dari Tabel 4 tersebut, arus harmonik dominan pada orde ganjil yaitu: orde 3, 5, 7, 9, 11, dan seterusnya. Sedangkan arus harmonik orde genap nilainya mendekati nol.

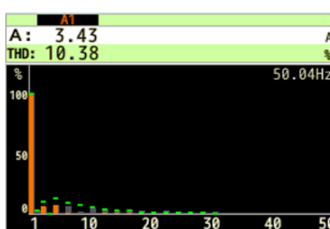
Untuk daya 2200 VA pada 220V, arus kerja I_L adalah 10A. Dengan menggunakan MCB satu fasa 10A dengan *Breaking Capacity* 4,5kA pada *main panel*, maka dapat diambil nilai $I_{sc} = 4,5$ kA. Karena nilai rasio I_{sc}/I_L sebesar 450, maka nilai THDi orde ganjil masih memenuhi standar IEEE-519 2022.

Gambar 3 menunjukkan contoh sampel bentuk gelombang arus harmonik hasil pengukuran.



Gambar 3. Sampel Pengukuran Arus dengan PQA.

Gambar 4 memperlihatkan sampel spektrum arus harmonik hasil pengukuran.



Gambar 4. Sampel Spektrum Harmonik Hasil Pengukuran.

B. Disain Rangkaian dan Simulasi

Berdasarkan data hasil pengukuran, faktor daya yang diperoleh 0,827. Dengan memperhitungkan pengaruh THDv 1,97% dan total THDi 9,57%, dengan menggunakan (6) diperoleh nilai $DPF \approx 0,9952$. Selanjutnya, dengan menggunakan (5), diperoleh nilai $TPF = 0,823$ yang belum memenuhi standar faktor daya $\geq 0,85$.

C. Perhitungan Kapasitas Kapasitor

Untuk menentukan besarnya kapasitas kapasitor yang diperlukan untuk mereduksi daya reaktif dari $\cos \theta_1 = TPF = 0,823$ menjadi $\cos \theta_2 = 0,99$, maka diperoleh $\theta_1 = 34,61375^\circ$ dan $\theta_2 = 8,10961^\circ$.

Besar nilai kapasitor Q_c yang dibutuhkan dengan menggunakan data hasil pengukuran $P = 788,29$ Watt, dan $V = 224,15$ V, dan dengan menggunakan (7), maka diperoleh $Q_c = 431,760$ VAR.

Untuk menghitung nilai C, dengan menggunakan (8) dengan nilai $f_{cut-off} = 100$ Hz, maka dapat diperoleh besar $C = 14,0$ μ F. Disini diasumsikan $C = C_f = 14,0$ μ F.

D. Perhitungan Parameter R_f , C_f dan R pada Filter Aktif Low-Pass

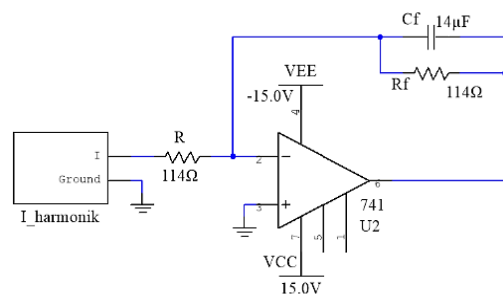
Dengan diperoleh nilai $C_f = 14,0$ μ F pada frekuensi *cut-off* 100 Hz, maka dapat dihitung R_f menggunakan (9), sehingga diperoleh $R_f = 114$ Ω (pembulatan). Nilai R diasumsikan sama dengan nilai R_f dalam Tabel 5 sebagai nilai parameter rangkaian filter aktif *low-pass*.

Tabel 5. Parameter filter aktif *low-pass*.

Parameter	Nilai Parameter
C_f	14,0 μ F
R_f	114 Ω

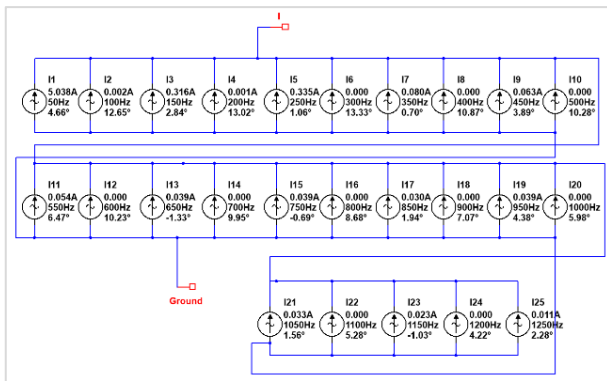
E. Pemodelan Rangkaian Filter Aktif Low-Pass

Pemodelan rangkaian filter aktif *low pass* menggunakan Multisim ini dirancang untuk menurunkan THDi orde 1 hingga 25. Hasil pemodelan rangkaian ini ditampilkan pada Gambar, dengan input arus harmonik dari orde 1-25, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 6.



Gambar 5. Konfigurasi rangkaian filter aktif *low-pass*.

Blok arus pada Gambar 6 menggunakan nilai arus harmonik puncak (*peak*) orde 1 hingga orde 25 sesuai *setting default* dengan nilainya berdasarkan data Tabel 4, dimana nilai arus puncak adalah nilai arus rms dikalikan dengan $\sqrt{2}$.



Gambar 6. Subblok arus harmonik dengan nilai arus puncak (I_{peak}) orde 1-25.

F. Hasil Simulasi

Setelah pemodelan rangkaian filter, maka selanjutnya dilakukan simulasi Multisim dengan mode *Fourier Analysis* untuk 25 orde arus harmonik.

Dan hasil simulasi Multisim rangkaian tersebut disajikan pada Tabel 6 berikut ini.

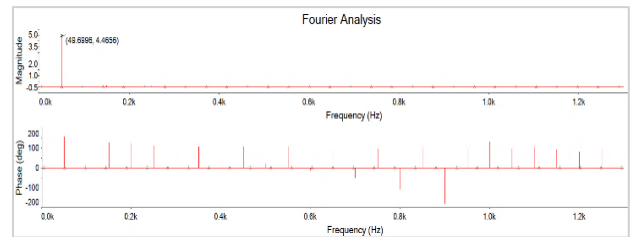
Tabel 6. Hasil simulasi Multisim.

Orde n	Magnitude Peak (A)	Phase (°)	I_{rms} (A)	TDHi ke-n (%)
1	4.466	158.27	3.15763	100.00
2	0.0146	178.3910	0.0103	0.328
3	0.1743	126.6440	0.1232	3.903
4	0.0025	122.5840	0.0018	0.057
5	0.1238	112.9510	0.0875	2.772
6	0.0009	88.4688	0.0006	0.020
7	0.0218	106.6210	0.0154	0.488
8	0.0004	51.3961	0.0003	0.008
9	0.0135	106.5220	0.0096	0.303
10	0.0002	19.6605	0.0001	0.004
11	0.0096	107.0130	0.0068	0.214
12	0.0001	-11.8120	0.0001	0.002
13	0.0059	97.7338	0.0042	0.132
14	0.0000	-50.0180	0.0000	0.001
15	0.0051	97.2042	0.0036	0.115
16	0.0000	-107.5800	0.0000	0.000
17	0.0035	98.9056	0.0025	0.078
18	0.0000	-177.9900	0.0000	0.000
19	0.0041	100.4810	0.0029	0.091
20	0.0000	132.9160	0.0000	0.000
21	0.0031	96.9940	0.0022	0.070
22	0.0000	103.8150	0.0000	0.000
23	0.0020	93.8385	0.0014	0.044
24	0.0000	80.8768	0.0000	0.000
25	0.0009	96.6696	0.0006	0.019

Untuk menghitung total THDi, berdasarkan data Tabel 6 dan dengan menggunakan (1), maka dapat diperoleh: nilai total THDi = 4,843%.

Dari Tabel 6, juga diperoleh faktor daya simulasi sebesar $|\cos(158,266^\circ)| = 0,9289 = 0,929$.

Gambar 7 dibawah ini menampilkan hasil simulasi berupa analisis Fourier dan spektrum frekuensi.



Gambar 7. Hasil Simulasi dan Spektrum harmonisa arus.

G. Analisis Hasil Pengukuran dan Simulasi

Berikut ditampilkan Tabel 7 yang menunjukkan perbandingan nilai THDi orde 1-25 dari hasil pengukuran sebelum difilter (*pre-filter*) dan setelah difilter (*post-filter*) hasil simulasi Multisim.

Tabel 7. Perbandingan THDi Orde 1-25 *Pre-Filter* dan *Post-Filter*.

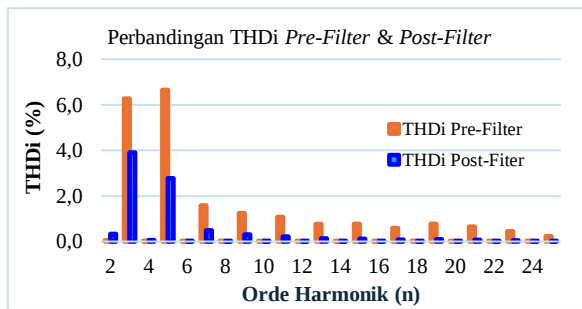
Orde n	THDi ke-n (%)		Keterangan
	<i>Pre-Filter</i>	<i>Post-Filter</i>	
1	100.00	100.00	tetap
2	0.048	0.328	naik 85.485 %
3	6.270	3.903	turun 37.761 %
4	0.011	0.057	naik 79.838 %
5	6.651	2.772	turun 58.319 %
6	0.006	0.020	naik 68.438 %
7	1.578	0.488	turun 69.088 %
8	0.005	0.008	naik 39.334 %
9	1.243	0.303	turun 75.612 %
10	0.003	0.004	naik 19.966 %
11	1.074	0.214	turun 80.044 %
12	0.003	0.002	turun 31.971 %
13	0.764	0.132	turun 82.769 %
14	0.002	0.001	turun 58.750 %
15	0.772	0.115	turun 85.119 %
16	0.003	0.000	turun 86.491 %
17	0.586	0.078	turun 86.646 %
18	0.002	0.000	turun 81.190 %
19	0.772	0.091	turun 88.185 %
20	0.001	0.000	turun 71.419 %
21	0.651	0.070	turun 89.276 %
22	0.001	0.000	turun 65.232 %
23	0.448	0.044	turun 90.080 %
24	0.000	0.000	turun 26.336 %
25	0.227	0.019	turun 91.459 %

Tabel 8 menunjukkan perbandingan persentase peningkatan faktor daya dan tingkat penurunan total THDi sistem sebelum dan setelah difilter aktif *low-pass*.

Tabel 8. Perbandingan Persentase Sebelum dan Setelah Difilter.

Parameter	<i>Pre-Filter</i>	<i>Post-Filter</i>
Nilai THDi	9,57%	4,843%
Faktor daya sebenarnya	0,823	0,929

Gambar 8 menunjukkan nilai THD-i sebelum difilter dan setelah difilter menggunakan rangkaian filter aktif *low pass*.



Gambar 8. Grafik THDi orde 2-25 sebelum dan setelah difilter.

G.1 Harmonik orde ganjil (3, 5, 7, ...) turun signifikan sementara orde lain tetap ada

Berdasarkan Tabel 7 dan Tabel 8, terlihat bahwa harmonik orde ganjil mengalami penurunan sangat signifikan, bahkan mencapai >85% untuk orde tinggi seperti 19, 21, 23, dan 25. Fenomena ini dapat dijelaskan melalui tiga mekanisme utama:

1) Karakteristik Sumber Beban Nonlinier (Dominasi Harmonik Ganjil)

Karena mayoritas beban residensial menghasilkan harmonik ganjil secara alami, filter aktif bekerja paling efektif meredam harmonik dominan ini, menghasilkan penurunan terbesar pada orde ganjil (3, 5, 7, dst.).

2) Filter yang digunakan adalah Filter Aktif Low-Pass

Filter yang digunakan adalah *active low-pass filter* dengan batas frekuensi (*cut-off*) di 100 Hz. Dengan frekuensi *cut-off* 100 Hz, filter hanya meloloskan gelombang utama 50 Hz dan meredam semua harmonik di atasnya. Hasilnya, peredaman pada orde tinggi (21–25) sangat optimal mencapai lebih dari 85% karena frekuensinya berada jauh di dalam area redam.

3) Filter aktif bekerja paling efektif pada komponen dominan

Dalam filter aktif, sinyal kompensasi dihasilkan berdasarkan besarnya arus harmonik, frekuensi harmonik dan kontrol arus. Harmonik dengan amplitudo lebih besar (harmonik ganjil) lebih mudah dideteksi dan dikompensasi, sehingga reduksinya lebih konsisten dibanding harmonik kecil (orde genap).

G.2 Analisis Mekanisme Peredaman Filter terhadap Masing-Masing Orde dan Perbandingan dengan Filter Ideal

Berikut adalah analisis per orde berdasarkan data *post-filter*:

1) Harmonik Ganjil Orde Rendah (3, 5, 7)

Terjadi penurunan harmonik sebesar 37,76% pada orde ke-3, 58,31% pada orde ke-5, dan 69,09% pada orde ke-7. Peredaman harmonik orde rendah (3, 5, dan 7) berkisar antara 37% hingga 69% karena frekuensinya yang dekat dengan batas *cutoff* filter. Kinerja ini dipengaruhi oleh toleransi komponen dan batas kemampuan *bandwidth control* yang menghambat fungsi ideal *low pass filter* untuk menghilangkan semua harmonik sejak orde ke-3.

2) Harmonik Ganjil Orde Menengah (9, 11, 13, 15)

Peredaman harmonik orde 9–15 mencapai 75,61%–85,12%, menandakan sinyal telah berada di area stopband. Meski secara ideal filter meredam 100%, capaian ini menunjukkan kinerja filter *low pass* yang

sangat efektif.

3) Harmonik Ganjil Orde Tinggi (17, 19, 21, 23, 25)

Reduksi harmonik orde tinggi (17–25) sangat efektif, mencapai 86,64% hingga 91,46%. Penurunan drastis ini menunjukkan filter bekerja mendekati karakteristik filter *low pass* ideal karena frekuensinya yang tinggi.

4) Harmonik genap naik (orde 2, 4, 6, 8...)

Peningkatan harmonik genap (orde ke-2 sebesar 85% dan ke-4 sebesar 79%) dianggap normal karena nilai amplitudonya yang sangat kecil sejak awal. Hal ini terjadi akibat sensitivitas filter terhadap *noise* sistem serta prioritas filter aktif yang lebih fokus mereduksi harmonik dengan amplitudo besar.

G.3 Validasi Hasil Simulasi terhadap Penelitian Serupa

Berikut tabel perbandingan antara hasil penelitian ini terhadap hasil dari penelitian-penelitian sebelumnya sesuai bidang penelitian ini.

Tabel 9. Perbandingan Hasil Penelitian.

Judul Penelitian	Hasil Penelitian
<i>Shunt Hybrid Power Filter for Harmonic Reduction to Improve Power Quality using PI and Hysteresis Controller</i> [23]	THD sebelum filter 17,37% dan Setelah filter 2,90% (turun sebesar 83.30%)
<i>Performance of Single Phase Shunt Active Filter Based On P-Q Technique Using Matlab/Simulink</i> [24]	THD arus turun dari 44,72% menjadi 1,85%. (turun 95.86%)
<i>Critical Analysis of Active Filter for Harmonic Reduction under Varying Load</i> [16]	THDi beban 13.78% turun menjadi 3.66% (turun 73.44%)
<i>Analysis of the effectiveness of using active filters and passive filters in reducing harmonics using a Power Simulator (PSIM) at PT. Delta Jaya Mas</i> [15]	Penurunan THD dari 57,07% menjadi 1,57% (turun 97.25%) Harmonik dominan orde ganjil 3,5,7,9,..., dst-nya.
Disain <i>Low Pass Active Filter</i> Untuk Mereduksi Harmonik Pada Keluaran Inverter PLTS <i>On-Grid</i> Menggunakan Multisim Di Laboratorium Teknik Mesin Universitas Kristen Indonesia [10]	THDi turun dari 5,38% menjadi 2,063% (turun 61.65%) Faktor daya naik dari 0,83 menjadi 0,94 (naik 11.70%) Harmonik dominan orde ganjil 3,5,7,9,..., dst-nya.
Mitigasi <i>Total Harmonic Distortion</i> Pada Beban Residensial Menggunakan <i>Active Low Pass Filter</i> Berbasis Multisim	THDi turun dari 9,57% menjadi 4,843% atau turun 49,39%. Faktor daya naik 12.879% (dari 0,823 naik menjadi 0,929). Harmonik dominan orde ganjil 3,5,7,9,..., dst-nya.

Tren simulasi ini sejalan dengan penelitian sebelumnya yang menunjukkan bahwa filter aktif efektif mereduksi harmonik ganjil dan orde tinggi secara signifikan.

V. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis berdasarkan data hasil pengukuran dan hasil simulasi pada rangkaian filter, maka dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut:

1. Total THDi berhasil turun hingga 49,39%, dan faktor daya meningkat 12,879%, menunjukkan bahwa filter aktif benar-benar efektif dalam memperbaiki kualitas daya.

2. Filter bekerja sangat baik pada harmonik orde tinggi, dengan kemampuan meredam lebih dari 85% untuk harmonik orde 15 dan seterusnya.
3. Filter aktif low-pass bekerja optimal mereduksi harmonik ganjil karena sifatnya yang dominan pada beban nonlinier, sedangkan reduksi harmonik genap tidak signifikan karena nilai awalnya yang kecil serta sensitivitasnya terhadap noise di dekat frekuensi batas kerja filter.

REFERENSI

- [1] Heri Budi Utomo and Megawati Rafita, "Perancangan Filter Pasif Untuk Mengurangi Kandungan Arus Harmonisa Pada Transformator Daya Berbasis Simulink," in *Prosiding The 12th Industrial Research Workshop and National Seminar Bandung*, Bandung, Aug. 2021, pp. 314–319. Accessed: Dec. 05, 2025. [Online]. Available: <https://jurnal.polban.ac.id/proceeding/article/view/2732>
- [2] Yazid Ikhwan, Sapto Nisworo, and Agung Trihasto, "Audit Harmonisa Dan Faktor Daya Listrik Pada Konsumen Listrik Rumah Tinggal," in *Prosiding Seminar Nasional Riset Teknologi Terapan: 2021*, 2021.
- [3] E. M. Silalahi, B. Widodo, and R. Purba, "Analisis Total Harmonic Distortion (THD) dan Arus Harmonik Akibat Penggunaan Lampu Hemat Energi (LHE) dan Light-Emitting Diode (LED) secara Kolektif Pada Jaringan Tegangan Rendah," *Jurnal Fokus Elektroda: Energi Listrik, Telekomunikasi, Komputer, Elektronika dan Kendali*, vol. 6, no. 1, p. 54, Feb. 2021, doi: 10.33772/jfe.v6i1.16044.
- [4] Faiz Husnayain, Dicky Syachreza Himawan, Agus R Utomo, I Made Ardita, and Budi Sudiarto, "Analisis Perbandingan Kinerja Lampu LED, CFL, dan Pijar pada Sistem Penerangan Kantor," *CYCLOTRON: Jurnal Teknik Elektro*, vol. 6, no. 1, pp. 78–83, Jan. 2023, doi: <https://doi.org/10.30651/cl.v6i1.17165>.
- [5] T. Harianto, Y. Shalahuddin, and D. A. Widining K., "Filter Pasif Single Tuned LC sebagai Kompensator Harmonisa Pada Beban Listrik Rumah Tangga Menggunakan Matlab Simulink," *Setrum: Sistem Kendali-Tenaga-elektronika-telekomunikasi-komputer*, vol. 7, no. 1, p. 127, Jun. 2018, doi: 10.36055/setrum.v7i1.3416.
- [6] Fahmi Naufala Mumtaz, Indhana Sudiharto, and Ony Asrarul Qudsi, "Shunt Active Power Filter untuk Meredam Harmonisa Beban Non-Linear Satu Fasa," *Electrician: Jurnal Rekayasa Dan Teknologi Elektro*, vol. 16, no. 1, pp. 9–19, Jan. 2022, Accessed: Dec. 15, 2025. [Online]. Available: <https://electrician.unila.ac.id/index.php/ojs/article/view/2202>
- [7] Henri Matus Naibaho, Agung Warsito, and Susatyo Handoko, "Peningkatan Kualitas Daya Listrik Dengan Menggunakan Bank Kapasitor Dan Filter Pada Kaji Station PT. Medco E&P," *Jurnal TRANSIENT*, vol. 5, no. 3, pp. 395–402, Mar. 2017, Accessed: Dec. 18, 2025. [Online]. Available: <https://ejournal3.undip.ac.id/index.php/transient/article/view/15893>
- [8] N. R. Yuliansyah, F. Achmad, and S. I. Haryudo, "Analisis Perbaikan Rugi Daya Melalui Pemasangan Kapasitor Bank Dengan Metode Newton Rapshon Simulasi Software Etap 12.6.0 Di CV Praya Karya Lingkar Timur Sidoarjo," *JURNAL TEKNIK ELEKTRO*, vol. 11, no. 1, pp. 23–29, Dec. 2021, doi: 10.26740/jte.v11n1.p23-29.
- [9] Aldhy Rizhaldy S.G, Andriani Parastiwi, and Fathoni, "Perbaikan Nilai Faktor Daya Menggunakan Zero Crossing Detector Untuk Switching Kapasitor Bank Pada Usaha Bengkel Las," *Jurnal Elektronika dan Otomasi Industri*, vol. 8, no. 2, Jul. 2021, Accessed: Dec. 28, 2025. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/357739665_Perbaikan_Nilai_Faktor_Daya_Menggunakan_Zero_Crossing_Detector_Untuk_Switching_Kapasitor_Bank_Pada_Usaha_Bengkel_Las
- [10] Yohannes Prayoga T, Eva Magdalena Silalahi, and Atmonobudi Soebagio, "Disain Low Pass Active Filter Untuk Mereduksi Harmonik Pada Keluaran Inverter PLTS On-Grid Menggunakan Multisim Di Laboratorium Teknik Mesin Universitas Kristen Indonesia," *Jurnal Lektrokom*, vol. 8, no. 2, pp. 1–13, Sep. 2025, Accessed: Dec. 05, 2025. [Online]. Available: <https://ejournal.uki.ac.id/index.php/lektrokom/article/view/7089>
- [11] G. Samiaji, A. Multi, O. A. Rozak, and L. Faturrachman, "Analisis Perbandingan Kualitas Daya Listrik Berdasarkan Harmonisa Pada Motor Listrik dengan Suplai Tenaga Surya dan PLN," *Jurnal Informatika dan Teknik Elektro Terapan*, vol. 12, no. 3, Aug. 2024, doi: 10.23960/jitet.v12i3.4876.
- [12] M Reza Fauzan, Yul Martin, and Abdul Haris, "Analisa Harmonisa Akibat Pengaruh Penggunaan Converter pada Kereta Rel Listrik 1x25 kV Jogjakarta-Solo," *ELECTRICIAN – Jurnal Rekayasa dan Teknologi Elektro*, vol. 9, no. 3, pp. 192–202, Sep. 2015, Accessed: Jan. 04, 2025. [Online]. Available: <https://electrician.unila.ac.id/index.php/ojs/article/view/184>
- [13] A. Zamzami, I. M. Ardita Y, and F. Husnayain, "Studi Harmonisa Akibat Komponen Penyearah Pada Gardu Traksi Kereta Rel Listrik (KRL)," *CYCLOTRON*, vol. 3, no. 2, pp. 1–6, Aug. 2020, doi: 10.30651/cl.v3i2.5570.
- [14] Anggita Chandra Pradita, Muhammad Facta, and Hermawan, "Analisis Upaya Koreksi Faktor Daya pada Inverter untuk Tungku Peleburan Logam," *CYCLOTRON: Jurnal Teknik Elektro*, vol. 6, no. 1, pp. 8–14, Jan. 2023, Accessed: Jan. 07, 2026. [Online]. Available: <https://journal.um-surabaya.ac.id/cyclotron/article/view/14633>
- [15] R. S. , Widagdo, P. , Slamet, and C. Pangestu, "Analysis of the effectiveness of using active filters and passive filters in reducing harmonics using a Power Simulator (PSIM) at PT. Delta Jaya Mas," *Wahana: Tridarma Perguruan Tinggi*, vol. 76, no. 2, pp. 8–28, Dec. 2024, Accessed: Dec. 29, 2025. [Online]. Available: <https://jurnal.unipasby.ac.id/whn/article/view/9283>
- [16] Rituraj Jalan, Chitranjan Gaur, J. P. Pandey, and Shweta Singh, "Critical Analysis of Active Filter for Harmonic Reduction under Varying Load," *Journal of Electrical Systems*, vol. 20, no. 6s, pp. 982–993, Apr. 2024, doi: 10.52783/jes.2801.
- [17] H. Fu, Y. Li, and Q. Zhuo, "Research on the Passive and Active Low Pass Filters," *Highlights in Science, Engineering and Technology*, vol. 46, pp. 260–265, Apr. 2023, doi: 10.54097/hset.v46i.7712.
- [18] Elspec LTD, "Are you compliant with the IEEE-519 2022 Edition?" Accessed: Dec. 30, 2025. [Online]. Available: [https://www.elspec-ltd.com/are-you-compliant-with-the-ieee-519-2022-edition/#:~:text=IEEE-519%202022%20-%20Even%20current,1%20\(IEEE%20519-2014\)](https://www.elspec-ltd.com/are-you-compliant-with-the-ieee-519-2022-edition/#:~:text=IEEE-519%202022%20-%20Even%20current,1%20(IEEE%20519-2014))
- [19] Electrical Trader, "Harmonic Distortion Limits by Voltage Level based on IEEE 519-2022." Accessed: Dec. 30, 2025. [Online]. Available: [https://electricaltrader.com/blogs/news/harmonic-distortion-limits-by-voltage-level#:~:text=1,\)%20is%20capped%20at%205.0%25](https://electricaltrader.com/blogs/news/harmonic-distortion-limits-by-voltage-level#:~:text=1,)%20is%20capped%20at%205.0%25)
- [20] Mission Critical Engineers, "Understanding Harmonics in Electrical Systems," missioncriticalengineers.com. Accessed: Jan. 05, 2026. [Online]. Available: <https://missioncriticalengineers.com/understanding-harmonics/>
- [21] IEEE Standards Association, "IEEE 519-2022 - IEEE Standard for Harmonic Control in Electric Power Systems." Accessed: Dec. 30, 2025. [Online]. Available: https://comsys.se/our-adf-technology/power-quality-ieee-519-2022/#:~:text=You%20are%20here:%20Comsys%20%20AD F,1.5*
- [22] George J. Wakileh., *Power Systems Harmonics: Fundamentals, Analysis dan Filter Design*, 1st ed., vol. 1. New York: Springer Verlag Berlin Heidelberg, 2001. doi: <https://doi.org/10.1007/978-3-662-04343-1>.
- [23] Saduf Shabeer, Ashish Grover, and Abdul Hamid Bhat, "Shunt Hybrid Power Filter for Harmonic Reduction to Improve Power Quality using PI and Hysteresis Controller," *International Journal of Computer Applications (0975 – 8887)*, vol. 147, no. 4, pp. 7–12, Aug. 2016, Accessed: Jan. 16, 2026. [Online]. Available: <https://www.ijcaonline.org/archives/volume147/number4/shabeer-2016-ijca-910968.pdf>
- [24] Himabindu.T, "Performance Of Single Phase Shunt Active Filter Based On P-Q Technique Using Matlab/Simulink," *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, vol. 1, no. 9, Nov. 2012, Accessed: Jan. 17, 2026. [Online]. Available: <https://www.ijert.org/performance-of-single-phase-shunt-active-filter-based-on-p-q-technique-using-matlab-simulink>