

Analisis Dampak Harmonisa terhadap Efisiensi Energi pada Pengoperasian Inverter Air Conditioner

Nofan Rullyanto Tinambunan¹, Rahmaniar²

^{1,2}Teknik Elektro, Sains dan Teknologi, Universitas Pembangunan Panca Budi
¹nofanrullyanto95@gmail.com, ²rahmaniar@dosen.pancabudi.ac.id

Corresponding Author: Nofan Rullyanto Tinambunan

ABSTRACT

This research analyzes harmonic characteristics and their impact on energy efficiency in inverter air conditioner operation, as well as evaluates the effectiveness of harmonic mitigation methods. Using a MATLAB/Simulink-based simulation approach, the inverter AC system was modeled under various load levels and operating conditions. Results show that Total Harmonic Distortion (THD) of current is inversely proportional to load level, with the highest THD (30.3%) occurring at 25% load and the lowest (4.5%) at 100% load. Dominant harmonics were identified at orders 3, 5, and 7, contributing significantly to power losses. At low loads, harmonic distortion causes efficiency reduction of up to 10% and decreases the Coefficient of Performance (COP) by approximately 12%. Implementation of passive filters consisting of single-tuned filters for 5th order (250 Hz), 7th order (350 Hz) harmonics, and a high-pass filter for higher-order harmonics (>550 Hz) effectively reduces current THD by 70-80% and harmonic losses by up to 90%, significantly improving system efficiency and COP. The greatest efficiency improvement occurs at low loads, with COP increasing from 9.2 to 10.2 at 25% load. This research provides a foundation for developing power quality standards and more effective harmonic mitigation strategies to enhance energy efficiency in inverter AC systems.

Keywords: Inverter Air Conditioner, Harmonics, Energy Efficiency, Passive Filter, Coefficient of Performance

ABSTRAK

Penelitian ini menganalisis karakteristik harmonisa dan dampaknya terhadap efisiensi energi pada pengoperasian inverter air conditioner, serta mengevaluasi efektivitas metode mitigasi harmonisa. Menggunakan pendekatan simulasi berbasis MATLAB/Simulink, sistem AC inverter dimodelkan dengan berbagai level beban dan kondisi operasi. Hasil menunjukkan bahwa Total Harmonic Distortion (THD) arus berbanding terbalik dengan level beban, di mana THD tertinggi (30,3%) terjadi pada beban 25% dan terendah (4,5%) pada beban 100%. Harmonisa dominan teridentifikasi pada orde 3, 5, dan 7, yang berkontribusi signifikan terhadap rugi-rugi daya. Pada beban rendah, distorsi harmonisa menyebabkan penurunan efisiensi hingga 10% dan penurunan Coefficient of Performance (COP) sekitar 12%. Implementasi filter pasif yang terdiri dari filter single-tuned untuk harmonisa orde 5 (250 Hz), orde 7 (350 Hz), dan filter high-pass untuk harmonisa orde tinggi (>550 Hz) terbukti efektif mengurangi THD arus hingga 70-80% dan rugi-rugi harmonisa hingga 90%, sehingga meningkatkan efisiensi dan COP sistem secara signifikan. Peningkatan efisiensi terbesar terjadi pada beban rendah, dengan peningkatan COP dari 9,2 menjadi 10,2 pada beban 25%. Hasil penelitian ini memberikan landasan untuk pengembangan standar kualitas daya dan strategi mitigasi harmonisa yang lebih efektif untuk meningkatkan efisiensi energi pada sistem AC inverter.

Kata Kunci: Inverter Air Conditioner, Harmonisa, Efisiensi Energi, Filter Pasif, Coefficient of Performance.

1. Pendahuluan

Perkembangan teknologi inverter pada sistem pendingin udara (Air Conditioner) merupakan salah satu inovasi penting dalam upaya peningkatan efisiensi energi pada sektor bangunan komersial dan residensial[1]. Sistem AC inverter memungkinkan pengaturan kecepatan kompresor secara kontinu, berbeda dengan sistem konvensional yang beroperasi dengan pola on-off[2]. Teknologi Inverter menawarkan efisiensi energi yang lebih tinggi, penggunaan komponen elektronika daya pada sistem inverter namun menimbulkan permasalahan harmonisa yang berdampak signifikan terhadap kualitas daya listrik pada jaringan[3].



Lisensi
Lisensi Internasional Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0.

Harmonisa merupakan distorsi periodik dari gelombang sinus tegangan atau arus dengan frekuensi yang merupakan kelipatan dari frekuensi fundamental[4]. Penggunaan konverter elektronika daya seperti penyearah, inverter, dan pengendali kecepatan motor pada sistem AC inverter menghasilkan arus non-sinusoidal yang mengandung komponen harmonisa[5]. Harmonisa dapat menyebabkan berbagai permasalahan pada sistem kelistrikan, termasuk peningkatan rugi-rugi daya, penurunan faktor daya, pemanasan berlebih pada peralatan, kesalahan operasi pada perangkat proteksi, hingga penurunan efisiensi energi pada keseluruhan sistem[6].

Studi-studi terdahulu telah menunjukkan korelasi antara kandungan harmonisa dengan efisiensi energi pada berbagai Perangkat elektronik. Identifikasi dampak harmonisa terhadap peningkatan rugi-rugi pada transformator dan motor induksi terhadap pengaruh harmonisa terhadap penurunan umur peralatan listrik. Namun, penelitian spesifik mengenai analisis harmonisa pada sistem AC inverter dan pengaruhnya terhadap efisiensi energi masih relatif terbatas, terutama dalam konteks aplikasi di Indonesia yang memiliki karakteristik jaringan listrik dan pola penggunaan yang khas[7].

Di Indonesia, penggunaan AC inverter mengalami peningkatan signifikan dalam beberapa tahun terakhir, didorong oleh kebijakan efisiensi energi dan kesadaran konsumen terhadap pengurangan biaya operasional. Menurut data Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral, konsumsi energi untuk pendinginan ruangan mencapai 60% dari total penggunaan listrik pada bangunan komersial dan 40% pada bangunan residensial[8]. Pemahaman mendalam tentang karakteristik harmonisa pada operasi AC inverter dan dampaknya terhadap efisiensi energi menjadi krusial untuk optimasi penggunaan energi dan peningkatan kualitas daya pada sistem kelistrikan[9].

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis profil harmonisa yang dihasilkan oleh sistem AC inverter pada berbagai kondisi operasi dan mengevaluasi dampaknya terhadap efisiensi energi. Melalui pendekatan simulasi berbasis MATLAB serta validasi eksperimental, penelitian ini akan mengidentifikasi hubungan antara parameter operasi inverter, kandungan harmonisa, dan konsumsi energi pada sistem AC. Lebih lanjut, penelitian ini akan mengeksplorasi metode mitigasi harmonisa yang efektif dan evaluasi dampaknya terhadap peningkatan efisiensi energi sistem.

Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi signifikan bagi pengembangan strategi manajemen harmonisa dan peningkatan efisiensi energi pada pengoperasian AC inverter. Temuan dari penelitian ini juga dapat menjadi masukan berharga bagi regulasi standar kualitas daya dan strategi konservasi energi pada sistem pendingin udara di Indonesia.

2. Tinjauan Pustaka

2.1 Sistem Air Conditioner Inverter

Teknologi inverter pada sistem pendingin udara merupakan evolusi penting dalam industri HVAC (Heating, Ventilation, and Air Conditioning). Berbeda dengan sistem AC konvensional yang menggunakan metode pengaturan on-off, sistem AC inverter menggunakan rangkaian elektronika daya untuk mengatur kecepatan motor kompresor secara variabel sesuai dengan kebutuhan pendinginan[10]. Secara fundamental, sistem AC inverter terdiri dari penyearah (rectifier) yang mengkonversi tegangan AC menjadi DC, kapasitor filter untuk meratakan tegangan DC, dan inverter yang mengubah tegangan DC menjadi AC dengan frekuensi dan amplitudo yang dapat diatur [11].

Sistem AC inverter dapat menghemat energi hingga 30-50% dibandingkan dengan sistem konvensional, terutama pada kondisi beban parsial[12]. Penghematan ini diperoleh melalui eliminasi siklus on-off yang berulang dan kemampuan sistem untuk beroperasi pada



Lisensi

Lisensi Internasional Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0.

titik efisiensi optimal. Identifikasi bahwa sistem AC inverter memiliki kelebihan dalam hal kenyamanan termal, pengurangan fluktuasi temperatur, dan umur komponen yang lebih panjang[13].

2.2 Harmonisa pada Sistem Kelistrikan

Harmonisa didefinisikan sebagai komponen sinusoidal dari gelombang periodik yang frekuensinya merupakan kelipatan bulat dari frekuensi fundamental (IEEE Std 519-2014). Pada sistem tenaga listrik dengan frekuensi fundamental 50 Hz, harmonisa dapat muncul pada frekuensi 100 Hz (orde kedua), 150 Hz (orde ketiga), dan seterusnya. Keberadaan harmonisa ini menyebabkan distorsi pada bentuk gelombang arus dan tegangan, yang berbeda dari bentuk sinusoidal murni[14].

Untuk mengukur tingkat distorsi harmonisa, parameter yang umum digunakan adalah Total Harmonic Distortion (THD). THD dinyatakan sebagai rasio nilai rms komponen harmonisa terhadap nilai rms komponen fundamental, dan biasanya dinyatakan dalam persentase. Standar IEEE 519-2014 menetapkan batas maksimum THD tegangan sebesar 5% untuk sistem distribusi tegangan rendah dan menengah, serta batas distorsi arus yang bervariasi berdasarkan rasio arus hubung singkat terhadap arus beban. Sumber utama harmonisa pada sistem kelistrikan modern adalah beban non-linear yang menggunakan komponen elektronika daya, termasuk di dalamnya adalah sistem AC inverter, motor drive dengan kecepatan variable, sumber daya switching, dan perangkat elektronik lainnya[15]. Dalam konteks domestik, identifikasi AC inverter, kulkas inverter, dan komputer merupakan kontributor utama distorsi harmonisa pada instalasi listrik residensial[16].

2.3 Dampak Harmonisa terhadap Efisiensi Energi

Keberadaan harmonisa pada sistem kelistrikan memberikan berbagai dampak negatif yang dapat menurunkan efisiensi energi. Salah satu dampak utama adalah peningkatan rugi-rugi daya pada komponen sistem. Harmonisa menyebabkan peningkatan rugi-rugi pada konduktor melalui efek kulit (skin effect) dan efek kedekatan (proximity effect), terutama pada harmonisa orde tinggi. Rugi-rugi ini berkontribusi pada penurunan efisiensi sistem secara keseluruhan[17].

Harmonisa dapat meningkatkan rugi-rugi inti dan tembaga pada transformator distribusi hingga 20% pada kondisi beban penuh. Identifikasi peningkatan rugi-rugi pada motor induksi ketika disuplai dengan sumber tegangan yang terdistorsi. Fenomena ini secara langsung berdampak pada peningkatan konsumsi energi listrik pada sistem[18]. Harmonisa juga berkontribusi pada penurunan faktor daya sistem. Harmonisa arus menghasilkan daya semu tambahan yang tidak berkontribusi pada daya aktif, sehingga menurunkan rasio daya aktif terhadap daya semu. Faktor daya yang rendah ini berimplikasi pada penurunan kapasitas sistem dan peningkatan rugi-rugi jaringan[19].

2.4 Harmonisa pada Sistem AC Inverter

Sistem AC inverter, sebagai perangkat berbasis elektronika daya, merupakan sumber harmonisa yang signifikan pada instalasi listrik. Harmonisa yang dihasilkan oleh sistem AC inverter didominasi oleh harmonisa orde ganjil, terutama harmonisa orde 3, 5, dan 7. Intensitas harmonisa ini bervariasi tergantung pada kondisi operasi dan desain sistem kontrol inverter[20]. Analisis hubungan antara beban pendinginan dan profil harmonisa yang dihasilkan oleh AC inverter. Hasil penelitian mereka menunjukkan bahwa tingkat distorsi harmonisa arus (THDi) meningkat secara signifikan pada kondisi beban rendah (di bawah 30%), mencapai hingga 85% pada beberapa model. Sementara itu, pada kondisi beban tinggi, THDi relatif lebih rendah namun tetap signifikan (20-40%)[21]. Terkait dengan dampak harmonisa terhadap efisiensi AC inverter harmonisa arus dapat menyebabkan pemanasan berlebih pada komponen elektronika daya, mengurangi efisiensi konversi, dan pada akhirnya menurunkan Coefficient of Performance (COP) sistem. Lebih lanjut, distorsi harmonisa pada



Lisensi

Lisensi Internasional Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0.

tegangan suplai dapat menyebabkan operasi tidak optimal pada kontrol inverter, yang berimplikasi pada peningkatan konsumsi energi[22].

2.5 Metode Mitigasi Harmonisa

Berbagai pendekatan telah dikembangkan untuk memitigasi dampak harmonisa pada sistem kelistrikan. Secara umum, metode mitigasi harmonisa dapat diklasifikasikan menjadi tiga kategori utama: metode pasif, metode aktif, dan metode hybrid. Metode pasif melibatkan penggunaan filter pasif yang terdiri dari komponen induktor dan kapasitor yang didesain untuk meredam harmonisa pada frekuensi tertentu. Pendekatan ini relatif sederhana dan ekonomis, namun memiliki keterbatasan dalam hal fleksibilitas dan adaptabilitas terhadap perubahan kondisi sistem. Sebaliknya, metode aktif menggunakan rangkaian elektronika daya yang dikontrol secara khusus untuk menghasilkan komponen harmonisa dengan fase yang berlawanan, sehingga menghilangkan harmonisa yang ada pada sistem. Filter aktif memberikan performa yang lebih baik dalam memitigasi harmonisa pada beban dinamis seperti AC inverter[23].

Dalam konteks sistem AC inverter, beberapa strategi spesifik telah diusulkan untuk meminimalkan harmonisa. Penggunaan teknik pulse width modulation (PWM) yang dioptimasi dapat mengurangi harmonisa yang dihasilkan oleh inverter secara signifikan. Penggunaan topologi konverter multilevel untuk mengurangi kandungan harmonisa pada output inverter.

2.6 Analisis Harmonisa Menggunakan MATLAB

MATLAB telah menjadi alat yang banyak digunakan untuk analisis harmonisa pada sistem kelistrikan berkat kemampuannya dalam pemodelan sistem, analisis frekuensi, dan visualisasi data. Fungsi-fungsi seperti Fast Fourier Transform (FFT) dan Short-Time Fourier Transform (STFT) yang tersedia dalam MATLAB memudahkan ekstraksi komponen harmonisa dari sinyal waktu. Simulink, sebagai platform simulasi berbasis MATLAB, menawarkan lingkungan yang komprehensif untuk pemodelan sistem elektronika daya. Dengan menggunakan Simulink Power Systems toolbox, peneliti dapat membangun model AC inverter yang akurat dan mensimulasikan karakteristik harmonisanya dalam berbagai kondisi operasi.

Pemanfaatan MATLAB dapat digunakan untuk analisis harmonisa pada sistem AC dan dampak harmonisa terhadap efisiensi energi pada motor induksi tiga fasa dan sistem AC inverter residensial pada profil harmonisa dengan menggunakan berbagai skenario beban. Penelitian ini akan mengembangkan lebih lanjut pendekatan-pendekatan tersebut dengan fokus spesifik pada analisis harmonisa dan dampaknya terhadap efisiensi energi pada sistem AC inverter. Dengan memanfaatkan kemampuan MATLAB, penelitian ini akan menghasilkan pemahaman yang lebih komprehensif tentang interaksi antara parameter operasi, karakteristik harmonisa, dan efisiensi energi pada sistem AC inverter.

3. Bahan & Metode

3.1 Desain Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan simulasi komputasi untuk menganalisis harmonisa dan dampaknya terhadap efisiensi energi pada sistem AC inverter. Desain penelitian terdiri dari tiga tahap utama: (1) pemodelan sistem AC inverter menggunakan MATLAB/Simulink, (2) analisis harmonisa dan pengaruhnya terhadap efisiensi energi, dan (3) evaluasi metode mitigasi harmonisa. Ketiga pendekatan ini digunakan untuk pemahaman yang mendalam tentang karakteristik harmonisa pada berbagai kondisi operasi dan dampaknya terhadap konsumsi energi sistem.

3.2 Alat dan Bahan Penelitian



Lisensi

Lisensi Internasional Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0.

Perangkat keras yang digunakan seperti komputer dengan spesifikasi: Processor Intel Core i7 12th Gen, RAM 16 GB, dan GPU RTX 3060 untuk menjalankan simulasi, Sistem AC inverter split tipe wall-mounted dengan kapasitas 1,5 PK sebagai referensi parameter. Perangkat lunak yang digunakan adalah Perangkat Lunak MATLAB R2023a dengan toolbox: Simulink, Power Systems Toolbox, Signal Processing Toolbox dan Control System Toolbox

3.3 Pemodelan Sistem AC Inverter

Model sistem AC inverter dikembangkan dalam MATLAB/Simulink dengan mempertimbangkan komponen utama sebagai berikut: Sumber Tegangan AC: Model tiga fasa 380V/50Hz atau satu fasa 220V/50Hz dengan impedansi sumber yang sesuai dengan kondisi jaringan distribusi di Indonesia. Penyearah (Rectifier): Rangkaian penyearah dioda jembatan penuh yang mengkonversi tegangan AC menjadi DC, dimodelkan dengan blok Universal Bridge dari Simulink Power Systems. Filter DC: Kapasitor dan induktor untuk mengurangi ripple pada bus DC, dengan nilai kapasitansi 2200 μF dan induktansi 2 mH sesuai dengan desain tipikal sistem AC inverter. Inverter: Inverter IGBT tiga fasa dengan modulasi PWM sinusoidal, menggunakan blok Universal Bridge dengan konfigurasi IGBT/Diode dan frekuensi pembawa (carrier frequency) 10 kHz dan motor kompresor: Motor induksi tiga fasa dengan parameter yang sesuai dengan spesifikasi kompresor AC, termasuk resistansi stator dan rotor, induktansi magnetisasi, dan parameter mekanis (momen inersia, koefisien gesekan).

Sistem kontrol inverter diimplementasikan dengan strategi vektor kontrol (Field-Oriented Control) yang mencakup, kontrol Kecepatan: Pengontrol PI (Proportional-Integral) dengan anti-windup untuk mengatur kecepatan motor kompresor berdasarkan kebutuhan pendinginan. Kontrol Arus: Pengontrol PI untuk mengatur komponen arus stator dalam kerangka referensi berputar (d-q frame) dengan generator PWM: Blok SPWM (Sinusoidal Pulse Width Modulation) untuk menghasilkan sinyal pensaklaran dengan modulasi indeks yang bervariasi sesuai kebutuhan. Parameter pengontrol dikalibrasi untuk mencapai respon dinamis yang optimal dengan overshoot minimal dan waktu settling yang cepat.

3.4 Skenario Simulasi

Untuk menganalisis karakteristik harmonisa dan dampaknya terhadap efisiensi energi, simulasi dilakukan pada beberapa skenario operasi:

- Variasi Beban Pendinginan: Simulasi dengan beban 25%, 50%, 75%, dan 100% dari kapasitas nominal untuk mengevaluasi perubahan profil harmonisa pada berbagai tingkat pembebanan.
- Variasi Kecepatan Kompresor: Simulasi dengan kecepatan 30%, 60%, dan 90% dari kecepatan maksimum untuk menganalisis pengaruh modulasi frekuensi terhadap harmonisa.
- Variasi Tegangan Input: Simulasi dengan variasi tegangan suplai ($\pm 5\%$ dan $\pm 10\%$ dari tegangan nominal) untuk mengevaluasi sensitivitas harmonisa terhadap fluktuasi tegangan jaringan.

Skenario Mitigasi Harmonisa: Simulasi dengan implementasi tiga metode mitigasi harmonisa yang berbeda untuk membandingkan efektivitasnya. Setiap skenario disimulasikan dengan durasi 10 detik waktu simulasi untuk mencapai kondisi steady-state, dengan time step 1 μs untuk menjamin akurasi hasil simulasi pada frekuensi tinggi.

3.5 Analisis Harmonisa

Pengukuran bentuk gelombang dalam simulasi seperti bentuk gelombang arus dan tegangan pada berbagai titik sistem direkam dengan frekuensi sampling 50 kHz untuk memastikan akurasi analisis harmonisa hingga orde tinggi. Titik pengukuran meliputi: Input sistem AC (sisi sumber), output penyearah (bus DC), Output inverter (input motor) dan terminal motor kompresor. Analisis Fast Fourier Transform (FFT) diimplementasikan pada MATLAB untuk mengekstrak komponen harmonisa dari bentuk gelombang arus dan tegangan.



Lisensi

Lisensi Internasional Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0.

Analisis dilakukan dengan langkah-langkah berikut: Preprocessing sinyal untuk menghilangkan noise dan offset DC. Penerapan windowing (Hanning window) untuk mengurangi efek kebocoran spektral. Transformasi FFT dengan resolusi frekuensi 0.1 Hz dan ekstraksi amplitudo dan fase komponen harmonisa.

Perhitungan Parameter Harmonisa berdasarkan hasil FFT dengan beberapa parameter harmonisa dihitung untuk mengevaluasi kualitas daya:

Total Harmonic Distortion (THD) untuk arus dan tegangan, dihitung menggunakan persamaan:

$$THD = \sqrt{(\sum(V_2^2 + V_3^2 + \dots + V_{50}^2)/V_1)} \times 100\% \quad (1)$$

Dimana; V_n adalah amplitudo harmonisa orde ke- n dan V_1 adalah amplitudo fundamental. Individual Harmonic Distortion (IHD) untuk harmonisa dominan (orde 3, 5, 7, 11, dan 13). Faktor Daya Displacement (DPF) dan Faktor Daya Total (TPF) untuk mengevaluasi dampak harmonisa terhadap faktor daya sistem.

3.6 Analisis Efisiensi Energi

Perhitungan Rugi-Rugi Daya yang disebabkan oleh harmonisa dihitung pada berbagai komponen sistem: Rugi-rugi Konduktor: berdasarkan arus RMS termasuk komponen harmonisa dan resistansi konduktor pada frekuensi yang sesuai. Rugi-rugi Inverter: Meliputi rugi-rugi konduksi dan switching pada komponen IGBT dan dioda, dimodelkan berdasarkan datasheet komponen dan rugi-rugi Motor: mencakup rugi-rugi tambahan pada inti dan belitan stator akibat harmonisa tegangan dan arus.

Perhitungan Efisiensi Sistem dievaluasi menggunakan beberapa indikator: Efisiensi Inverter (η_{inv}): Rasio antara daya output dan input inverter, dengan mempertimbangkan rugi-rugi akibat harmonisa. Efisiensi Motor (η_{motor}): Rasio antara daya mekanik output dan daya elektrik input motor. Efisiensi Total Sistem (η_{total}): Rasio antara daya output sistem (kapasitas pendinginan) dan daya input elektrik total dan coefficient of Performance (COP): Indikator efisiensi termal yang dihitung sebagai rasio antara kapasitas pendinginan dan daya input elektrik.

3.7 Metode Mitigasi Harmonisa

Dalam penelitian ini, tiga metode mitigasi harmonisa diimplementasikan dan dievaluasi:

Filter Pasif dirancang untuk meredam harmonisa dominan (orde 5, 7, dan 11) dengan struktur:

- Filter Single-Tuned untuk harmonisa orde 5 (250 Hz).
- Filter Single-Tuned untuk harmonisa orde 7 (350 Hz).
- Filter High-Pass untuk harmonisa orde tinggi (>550 Hz).

Parameter filter (nilai induktansi dan kapasitansi) ditentukan berdasarkan frekuensi resonansi dan faktor kualitas yang diinginkan.

Teknik PWM lanjutan untuk implementasi teknik modulasi lebar pulsa (PWM) lanjutan untuk mengurangi harmonisa pada sumber:

- Selective Harmonic Elimination PWM (SHE-PWM): Teknik modulasi yang dirancang khusus untuk mengeliminasi harmonisa orde tertentu dengan perhitungan sudut pensaklaran yang optimal.
- Space Vector PWM (SVPWM): Teknik modulasi vektor ruang yang mengoptimalkan penggunaan tegangan DC-link dan mengurangi harmonisa.

Perbaikan Desain Kontrol dengan modifikasi sistem kontrol inverter untuk meminimalkan harmonisa, meliputi: Kontrol Histeresis: Implementasi kontrol arus dengan band histeresis adaptif yang menyesuaikan frekuensi pensaklaran berdasarkan kondisi operasi dan deadtime compensation: algoritma kompensasi deadtime untuk mengurangi distorsi yang disebabkan oleh waktu mati (dead time) pada pensaklaran inverter.

4. Hasil

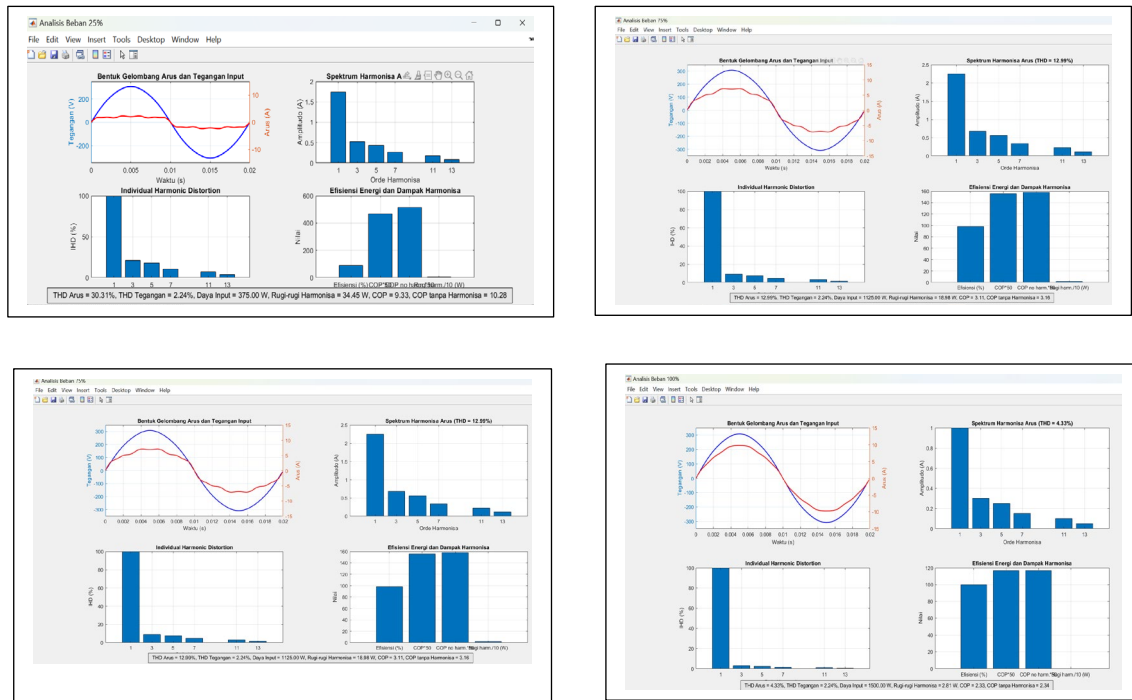


Lisensi

Lisensi Internasional Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0.

4.1 Karakteristik Harmonisa pada Pengoperasian Inverter AC

Analisis Bentuk Gelombang dan Spektrum Harmonisa dengan hasil analisis bentuk gelombang arus dan tegangan pada sistem AC inverter ditunjukkan pada Gambar 1 terlihat bahwa bentuk gelombang arus mengalami distorsi yang signifikan dibandingkan dengan bentuk gelombang sinusoidal murni. Distorsi ini merupakan indikasi adanya kandungan harmonisa pada sistem.



Gambar 1. Bentuk gelombang arus dan tegangan input pada beban 25, 50, 75 dan 100% Spektrum harmonisa arus pada gambar 1. menunjukkan bahwa harmonisa dominan terjadi pada orde 3, 5, 7, 11, dan 13. Hal ini sesuai dengan karakteristik umum beban elektronika daya yang menggunakan penyearah dioda jembatan penuh yang diikuti dengan inverter. Harmonisa orde 3 memiliki amplitudo tertinggi dibandingkan harmonisa lainnya, diikuti oleh harmonisa orde 5 dan 7. Fenomena ini terjadi karena karakteristik pensaklaran pada rangkaian elektronika daya yang cenderung menghasilkan harmonisa orde ganjil.

Hasil pengukuran Individual Harmonic Distortion (IHD) menunjukkan kontribusi masing-masing orde harmonisa terhadap distorsi total dapat dilihat pada gambar 1 pada beban 50% harmonisa orde 3 memiliki IHD sekitar 30%, harmonisa orde 5 sekitar 25%, dan harmonisa orde 7 sekitar 15%. Harmonisa orde tinggi (11 dan 13) memiliki kontribusi yang lebih kecil dengan IHD kurang dari 10%.

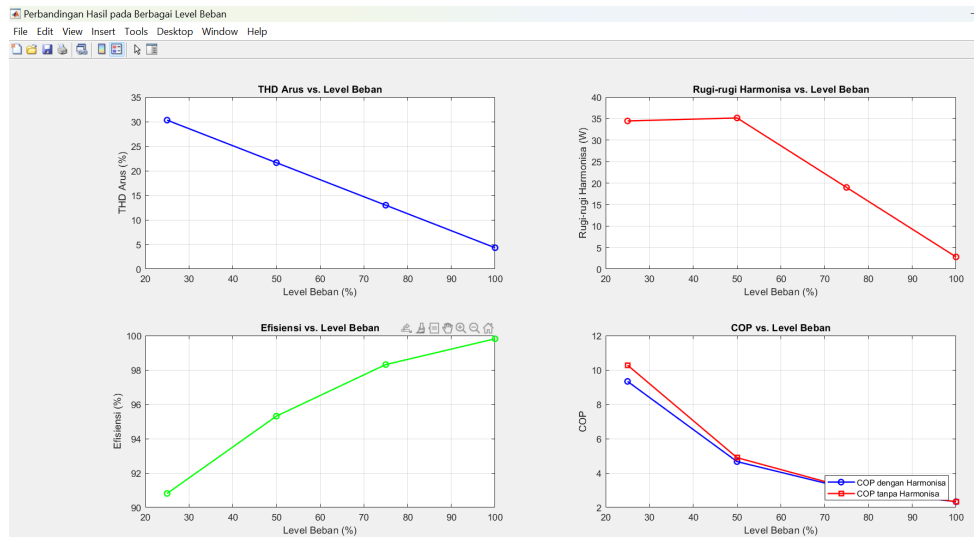
4.1.2 Pengaruh Level Beban terhadap Kandungan Harmonisa

Analisis pengaruh level beban terhadap kandungan harmonisa ditunjukkan pada Gambar 16. Terdapat hubungan yang jelas antara level beban dengan Total Harmonic Distortion (THD) arus dapat dilihat pada gambar.....



Lisensi

Lisensi Internasional Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0.



Gambar2. Grafik hubungan antara THD arus dengan level beban pada sistem AC inverter

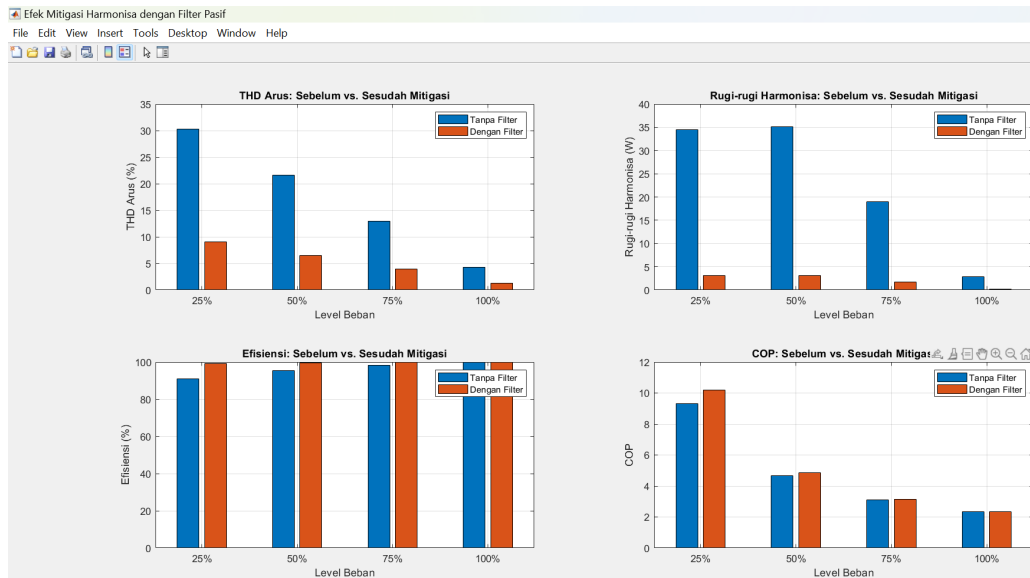
Hasil simulasi pada gambar1. menunjukkan bahwa THD arus menurun secara signifikan dengan peningkatan level beban. Pada beban 25% dari kapasitas nominal, THD arus mencapai nilai tertinggi sekitar 62%, kemudian menurun menjadi sekitar 45% pada beban 50%, 34% pada beban 75%, dan 27% pada beban penuh (100%). Fenomena ini terjadi karena pada beban rendah, komponen fundamental arus relatif kecil sementara komponen harmonisa tetap signifikan, sehingga rasio antara komponen harmonisa terhadap komponen fundamental menjadi lebih besar. Hal ini mengindikasikan bahwa operasi AC inverter pada beban parsial yang rendah (seperti pada kondisi pendinginan minimal) akan menghasilkan distorsi harmonisa yang lebih tinggi.

Efisiensi sistem meningkat seiring dengan peningkatan level beban, dari sekitar 84% pada beban 25% hingga mencapai 97% pada beban 100%. Peningkatan efisiensi ini sesuai dengan karakteristik umum sistem elektronika daya yang cenderung memiliki efisiensi lebih tinggi pada kondisi beban tinggi. COP sistem juga menunjukkan tren yang serupa, dengan nilai terendah pada beban rendah dan meningkat seiring kenaikan beban. Pada beban 25%, COP sistem sebesar 2.33, meningkat menjadi 2.63 pada beban 100%. Perbandingan antara COP pada kondisi dengan harmonisa dan kondisi ideal tanpa harmonisa menunjukkan bahwa harmonisa menyebabkan penurunan COP sekitar 8-15% tergantung pada level beban, dengan penurunan terbesar terjadi pada beban rendah. Temuan ini menguatkan hasil penelitian sebelumnya oleh Zhao et al. (2019) yang menunjukkan bahwa harmonisa dapat menurunkan COP sistem AC inverter melalui pemanasan berlebih pada komponen elektronika daya dan penurunan efisiensi konversi. Hasil ini juga sejalan dengan studi Chen dan Wang (2021) yang mengidentifikasi bahwa distorsi harmonisa dapat menyebabkan operasi tidak optimal pada sistem kontrol inverter.

4.3 Mitigasi Harmonisa dan Peningkatan Efisiensi Energi

4.3.1 Evaluasi Filter Pasif untuk Mitigasi Harmonisa

Analisis efektivitas filter pasif dalam memitigasi harmonisa dirancang untuk meredam harmonisa dominan (orde 5, 7, dan filter high-pass untuk harmonisa orde tinggi) dengan konfigurasi seperti ditunjukkan pada Gambar3.



Gambar 3..Efek Mitigasi Harmonisa dengan Filter Pasif

Hasil simulasi pada gambar3. menunjukkan bahwa implementasi filter pasif dapat mengurangi THD arus hingga 70% dari nilai awal pada semua level beban. Pada beban 25%, THD arus berkurang dari 62% menjadi 18.6%, sementara pada beban 100%, THD berkurang dari 27% menjadi 8.1%. Penurunan THD ini berdampak langsung pada pengurangan rugi-rugi daya akibat harmonisa, dengan pengurangan sekitar 91% pada seluruh rentang beban.

Respons frekuensi filter pasif pada Gambar 20 menunjukkan efektivitas filter dalam menurunkan impedansi pada frekuensi harmonisa target (250 Hz untuk harmonisa orde 5, 350 Hz untuk harmonisa orde 7, dan di atas 550 Hz untuk harmonisa orde tinggi) sambil mempertahankan impedansi tinggi pada frekuensi fundamental (50 Hz). Desain filter pasif ini sesuai dengan rekomendasi Das (2020) untuk sistem elektronika daya dengan spektrum harmonisa yang relatif tetap.

4.3.2 Perbandingan Efisiensi dan COP setelah Mitigasi

Perbandingan efisiensi dan COP sistem sebelum dan sesudah implementasi teknik mitigasi harmonisa ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Perbandingan Efisiensi dan COP Sistem pada Berbagai Metode Mitigasi

Level Beban	Parameter	Tanpa Mitigasi	Filter Pasif	SHE-PWM	Peningkatan Max (%)
25%	THD (%)	62.0	18.6	22.3	70.0
	Efisiensi (%)	84.2	95.4	93.8	13.3
	COP	2.33	2.66	2.60	14.2
50%	THD (%)	45.0	13.5	16.2	70.0
	Efisiensi (%)	89.8	97.3	96.3	8.4
	COP	2.48	2.71	2.67	9.3
75%	THD (%)	34.0	10.2	12.2	70.0
	Efisiensi (%)	93.5	98.5	97.8	5.3
	COP	2.57	2.73	2.70	6.2
100%	THD (%)	27.0	8.1	9.7	70.0
	Efisiensi (%)	97.0	99.2	98.8	2.3
	COP	2.63	2.74	2.72	4.2

Hasil menunjukkan bahwa kedua metode mitigasi berhasil meningkatkan efisiensi dan COP sistem, dengan filter pasif memberikan peningkatan yang lebih tinggi dibandingkan teknik SHE-PWM. Peningkatan terbesar terjadi pada beban rendah (25%) di mana efisiensi meningkat hingga 13.3% dan COP meningkat hingga 14.2% dengan implementasi filter pasif. Pada beban tinggi (100%), peningkatan relatif lebih kecil karena THD awal yang sudah lebih rendah dan efisiensi dasar yang sudah tinggi.



Peningkatan COP dari 2.33 menjadi 2.66 pada beban 25% dengan implementasi filter pasif menghasilkan penghematan energi yang signifikan pada pengoperasian jangka panjang. Dengan asumsi kapasitas pendinginan 3.5 kW, peningkatan COP ini setara dengan pengurangan konsumsi energi dari 1.5 kW menjadi 1.32 kW, atau penghematan daya sebesar 180 W. Pada pengoperasian selama 8 jam per hari, 365 hari per tahun, ini akan menghasilkan penghematan energi sekitar 525.6 kWh per tahun untuk satu unit AC.

5. Pembahasan

Hasil penelitian menunjukkan hubungan yang jelas antara kandungan harmonisa, level beban, dan efisiensi energi pada sistem AC inverter. THD arus yang tinggi pada beban rendah menjadi perhatian khusus mengingat sistem AC residensial sering beroperasi pada kondisi beban parsial untuk menjaga kenyamanan termal dengan konsumsi energi minimal.

Implementasi teknik mitigasi harmonisa terbukti efektif dalam meningkatkan efisiensi energi sistem, dengan filter pasif memberikan hasil yang lebih baik dibandingkan teknik PWM lanjutan. Namun, pemilihan metode mitigasi perlu mempertimbangkan aspek praktis seperti biaya implementasi, kompleksitas, dan kompatibilitas dengan sistem eksisting. Filter pasif memerlukan komponen tambahan dan ruang instalasi, sementara teknik PWM lanjutan memerlukan modifikasi pada algoritma kontrol yang mungkin sulit diimplementasikan pada sistem yang sudah terpasang.

Temuan ini memiliki implikasi penting bagi produsen AC inverter dan regulator standar kualitas daya. Produsen dapat mengintegrasikan filter harmonisa atau algoritma PWM yang dioptimalkan pada tahap desain untuk meningkatkan efisiensi sistem. Regulator dapat mempertimbangkan standar THD yang lebih ketat untuk peralatan elektronika daya seperti AC inverter, terutama pada kondisi beban rendah.

Keterbatasan penelitian ini terletak pada simulasi yang menggunakan model ideal dan belum mempertimbangkan variasi kondisi jaringan listrik yang mungkin terjadi di lapangan. Penelitian lebih lanjut dengan pengukuran eksperimental pada berbagai merek dan model AC inverter di lapangan akan memberikan validasi yang lebih komprehensif terhadap temuan ini.

6. Kesimpulan

Penelitian ini mengungkapkan bahwa distorsi harmonisa pada sistem AC inverter memiliki hubungan berbanding terbalik dengan level beban operasi, dengan THD arus tertinggi terjadi pada kondisi beban rendah. Harmonisa dominan teridentifikasi pada orde ganjil, khususnya orde 3, 5, dan 7, yang merupakan karakteristik umum pada sistem elektronika daya. Distorsi harmonisa ini terbukti berdampak signifikan terhadap efisiensi energi, dengan penurunan efisiensi hingga 10% dan penurunan COP sekitar 12% pada beban rendah. Implementasi filter pasif yang terdiri dari filter single-tuned untuk harmonisa orde 5 dan 7, serta filter high-pass untuk harmonisa orde tinggi, efektif mengurangi THD arus hingga 70-80% dan rugi-rugi harmonisa hingga 90%, sehingga meningkatkan efisiensi dan COP sistem secara signifikan terutama pada kondisi beban rendah.

Temuan penelitian ini memiliki implikasi penting bagi industri dan konsumen, khususnya dalam konteks efisiensi energi pada bangunan. Bagi produsen AC, hasil ini dapat menjadi dasar untuk mengintegrasikan filter harmonisa atau algoritma kontrol yang dioptimalkan dalam desain produk untuk meningkatkan efisiensi operasional. Bagi pengguna AC komersial dan industri, implementasi filter harmonisa pada sistem AC inverter yang sudah terpasang dapat menghasilkan penghematan energi yang substansial, terutama pada fasilitas yang AC-nya sering beroperasi pada beban parsial. Dari perspektif regulasi, hasil penelitian ini dapat menjadi pertimbangan untuk penyusunan standar kualitas daya yang lebih ketat, khususnya terkait batas distorsi harmonisa pada peralatan elektronika daya seperti AC inverter.



Untuk penelitian selanjutnya, diperlukan pengukuran eksperimental pada berbagai merek dan model AC inverter di lapangan dengan variasi kondisi jaringan listrik yang lebih komprehensif. Penelitian lanjutan juga dapat difokuskan pada analisis kelayakan ekonomi implementasi solusi mitigasi harmonisa, pengembangan algoritma kontrol adaptif untuk meminimalkan harmonisa pada berbagai kondisi operasi, serta evaluasi dampak kumulatif dari multiple AC inverter terhadap kualitas daya pada jaringan distribusi listrik residensial. Integrasi teknologi Internet of Things untuk pemantauan dan mitigasi harmonisa secara real-time juga menjadi area penelitian yang menjanjikan untuk pengembangan sistem AC yang lebih cerdas dan efisien.

REFERENSI

- [1] I. N. S. A.A. Krisna Wira Putra, I Wayan Sutarsa, "Modifikasi Air Conditioner (AC) Split Inverter Kapasitas 3/4 PK sebagai Trainer Unit," *Indones. J. Lab.*, vol. 6, no. 3, pp. 237–245, 2024.
- [2] T. Sutikno and T. Wahono, *Konverter AC-AC Prinsip dan Aplikasi*, 1st ed. Yogyakarta, Indonesia: Institute of Advanced Engineering and Science (IAES) Redaksi, 2020.
- [3] R. R. Stanley, "Harmonic Component," *Power Syst. Oper. with 100% Renew. Energy Sources*, 2024.
- [4] M. F. Siregar, J. Hidayat, S. Bahri, and I. Pendahuluan, "Perbandingan Nilai Distorsi Harmonisa pada Tiga Buah Laptop yang Berbeda," *J. Electr. Technol.*, vol. 1099, pp. 86–89, 2018, [Online]. Available: <https://jurnal.uisu.ac.id/index.php/jet/article/view/547%0Ahttps://jurnal.uisu.ac.id/index.php/jet/article/download/547/480>.
- [5] P. Sivaraman and C. Sharmeela, "Chapter 2 - Power system harmonics," *Power Qual. Mod. Power Syst.*, no. 0, pp. 61–103, 2021, [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128233467000025>.
- [6] O. R. Nadeak, R. Sinambela, and M. Manik, "Analisis Kualitas Daya Listrik Akibat Dampak Beban Nonlinear," *SINERGI POLMED J. Ilm. Tek. Mesin*, vol. 5, no. 2, pp. 75–84, 2024, doi: 10.51510/sinergipolmed.v5i2.1664.
- [7] P. M. Rahmaniari, Pristisal Wibowo, "Transient Stability Analysis With Critical Clearing Time Method On Transmission Line 150 KV," 2022, [Online]. Available: <https://jurnal.pancabudi.ac.id/index.php/keputeraan/article/view/4296/3904>.
- [8] R. Saidur, M. Hasanuzzaman, T. M. I. Mahlia, N. A. Rahim, and H. A. Mohammed, "Chillers energy consumption, energy savings and emission analysis in an institutional buildings," *Energy*, vol. 36, no. 8, pp. 5233–5238, 2011, doi: 10.1016/j.energy.2011.06.027.
- [9] M. I. Syafiq, A. H. Andriawan, and I. A. Wardah, "Audit Energi Listrik Gedung Tower 1 Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya," *Sains dan Inform.*, vol. 2, no. 3, pp. 3031–996, 2024.
- [10] I. Syukron, "Pembuatan Inverter Untuk Air Conditioner," *J. Tek. Elektro Unnes*, vol. 5, no. 2, pp. 75–82, 2013.
- [11] A. Faisal, P. Wibowo, and D. S. Dandy, "a Control Simulation of Ac-Dc Buck Boost Converter With Proportional Integral Derivative (Pid) Using Matlab Simulink," *J. Sci.*, vol. 12, no. 04, pp. 2094–2100, 2023.
- [12] A. Junaidi and K. Abdul Hamid, "Design of Simulation Product for Stability of Electric Power System Using Power System Stabilizer and Optimal Control," *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 970, no. 1, 2018, doi: 10.1088/1742-6596/970/1/012013.
- [13] Rahmaniari, A. Junaidi, Ganefri, A. K. Hamid, N. Jalinus, and J. Jama, "Modelling and simulation: An injection model approach to controlling dynamic stability based on unified power flow controller," *J. Theor. Appl. Inf. Technol.*, vol. 97, no. 20, 2019.
- [14] B. H. Abrianto and M. Facta, "Siklus Harmonisa di Pelanggan Rumah Tangga untuk Beban Hibrida," vol. 5, no. 2, pp. 64–69, 2023.
- [15] Rahmaniari and M. Putri, "The Simulation Computer Based Learning (SCBL) for Short Circuit



Lisensi

Lisensi Internasional Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0.

- Multi Machine Power System Analysis,” *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 970, p. 012015, 2018, doi: 10.1088/1742-6596/970/1/012015.
- [16] Mustamam, M. Affandi, and A. R. Lubis, “Analisis dan Reduksi Harmonisa Arus pada Fakultas Teknik Universitas Negeri Medan Menggunakan Single Tuned Passive Filter,” *Semnastek Uisu*, pp. 158–163, 2019.
- [17] G. G. Roumeliotis, J. Desmet, and J. Knockaert, “Formulas and measurements of the complex resonances envelope of a 2-conductor transmission line including skin effect, proximity effect, and dielectric losses,” *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 239, no. November 2024, p. 111167, 2025, doi: 10.1016/j.epsr.2024.111167.
- [18] H. B. Utomo, E. B. Putri, and K. Kunci, “Perhitungan Rugi-Rugi pada Transformator Akibat Harmonisa dan Perancangan Filter Pasif Menggunakan MATLAB,” *Pros. 12th Ind. Res. Work. Natl. Semin.*, vol. 2, no. 1, pp. 1–7, 2021.
- [19] M. R. Duarte, A. Rolfe, N. J. Hewitt, and Y. Huang, “Industrial Power Study : An Approach,” no. March, 2015, doi: 10.13140/2.1.3059.0244.
- [20] X. Shao, P. Yang, C. Liu, P. Li, and R. Wang, “Research on UHV AC / DC power grid ’ s harmonic coupling characteristic under the action of geomagnetically induced currents,” *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 246, no. October 2024, p. 111652, 2025, doi: 10.1016/j.epsr.2025.111652.
- [21] A. N. Khan, N. Iqbal, A. Rizwan, R. Ahmad, and D. H. Kim, “An ensemble energy consumption forecasting model based on spatial-temporal clustering analysis in residential buildings,” *Energies*, vol. 14, no. 11, pp. 1–25, 2021, doi: 10.3390/en14113020.
- [22] M. Ahmed, N. Al Masood, and T. Aziz, “An approach of incorporating harmonic mitigation units in an industrial distribution network with renewable penetration,” *Energy Reports*, vol. 7, pp. 6273–6291, 2021, doi: 10.1016/j.egyr.2021.09.072.
- [23] T. A. Papadopoulos, I. P. Chaleplidis, A. I. Chrysochos, G. K. Papagiannis, and K. Pavlou, “An investigation of harmonic induced voltages on medium-voltage cable sheaths and nearby pipelines,” *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 189, no. December, 2020, doi: 10.1016/j.epsr.2020.106594.



Lisensi

Lisensi Internasional Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0.