Lektrokom: Jurnal Ilmiah Program Studi Teknik Elektro
Volume 9 No. 2, September 2026, E-ISSN:2686-1534

ANALISIS DAN MITIGASI HARMONISA DENGAN *HYBRID FILTER* PADA PLTS *OFF-GRID* 1 kWp BERBASIS *MATLAB/SIMULINK* DI *GREEN HOUSE* POKTAN MUSTIKA, KRAMAT JATI, JAKARTA TIMUR

[1]*Nicolaus Sugianto Zamili**, [2]*Eva Magdalena Silalahi*, [3]*Judo Ignatius Nempung*, [4]*Antonius D. Tyas Prashetyo*
[1,2,3] *Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Kristen Indonesia*
Jl. Mayjen Sutoyo No.2 Cawang, Jakarta Timur 13630, DKI Jakarta
[2]eva.silalahi@uki.ac.id, [3]judo.nempung@uki.ac.id, [4] antonius.prashetyo@uki.ac.id,
**Corresponding author*: [1]nicolauszamili@gmail.com

Abstrak

Peningkatan pemanfaatan sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) *off-grid* berbasis inverter skala kecil berpotensi menurunkan kualitas daya akibat distorsi harmonisa. Fenomena ini dipicu oleh proses *switching* inverter serta penggunaan beban nonlinier, yang diperparah tinggi nilai impedansi sistem kelistrikan tersebut. Penelitian ini bertujuan menganalisis karakteristik harmonisa PLTS *off-grid* 1 kWp di Green House Poktan Mustika, Kramat Jati, Jakarta Timur. Selain itu, dilakukan evaluasi komparatif mengenai efektivitas filter pasif LCL, *Hysteresis Current Controller* (HCC), dan sistem konfigurasi *hybrid filter* untuk mereduksi distorsi. Metodologi riset melibatkan pengukuran lapangan guna memperoleh data aktual, yang kemudian disimulasikan menggunakan MATLAB/Simulink melalui pendekatan kalibrasi blok *From Workspace*. Evaluasi performa menerapkan analisis *Fast Fourier Transform* (FFT) serta *Total Harmonic Distortion* arus (THDi) berdasarkan standar referensi IEEE 519-2022. Hasil eksperimen menunjukkan THDi awal sistem mencapai 27,13%. Penerapan Filter LCL mereduksi THDi menjadi 0,29% (efisiensi 98,93%), sedangkan metode HCC menghasilkan THDi 2,33% (efisiensi 91,41%). Kombinasi *hybrid filter* integrasi LCL dan HCC memberikan kinerja optimal dengan capaian THDi akhir sebesar 0,14% (efisiensi 99,48%). Dapat disimpulkan bahwa konfigurasi gabungan *hybrid filter* aktif HCC dan pasif LCL terbukti paling efektif meningkatkan kualitas daya.

Kata Kunci: PLTS *off-grid*, *hybrid filter*, *Hysteresis Current Controller*, filter LCL, THDi.

Abstract

The expansion of small-scale inverter-based off-grid Solar Power Plants (PLTS) potentially degrades power quality through harmonic distortion. This phenomenon is driven by inverter switching characteristics and non-linear loads, aggravated by high system impedance. This study aims to analyze harmonic characteristics of a 1 kWp off-grid PLTS at Green House Poktan Mustika, Kramat Jati, East Jakarta. Furthermore, a comparative evaluation is conducted on the effectiveness of LCL Passive Filters, Hysteresis Current Controller (HCC), and hybrid filter configurations in mitigating distortion. The methodology involves field measurements for actual data collection, followed by MATLAB/Simulink simulation utilizing field data calibration via From Workspace blocks. Performance evaluation applies Fast Fourier Transform (FFT) analysis and current Total Harmonic Distortion (THDi) based on IEEE 519-2022 standards. Results show the initial system THDi reaches 27.13%. Implementing the LCL Filter reduces THDi to 0.29% (98.93% reduction), while the HCC method yields 2.33% THDi (91.41% reduction). Integrating both into a hybrid configuration delivers optimal performance, achieving a final THDi of 0.14% (99.48% reduction). Consequently, combined active HCC and passive LCL hybrid filters prove most effective in significantly enhancing power quality.

Keywords: *off-grid photovoltaic system, hybrid filter, Hysteresis Current Controller, LCL filter, THDi.*

PENDAHULUAN

Pemanfaatan energi baru terbarukan (EBT) mengalami pertumbuhan yang sangat masif di seluruh dunia sebagai solusi utama untuk mengatasi krisis energi global dan menekan emisi gas rumah kaca. Di antara berbagai teknologi EBT, Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) merupakan salah satu opsi yang paling menjanjikan dan adaptif karena potensi energinya yang melimpah dan kemudahan dalam instalasinya. Salah satu penerapan yang kini mulai berkembang pesat di area perkotaan dan sektor pertanian modern (*urban farming*) adalah penggunaan PLTS sistem *off-grid* (mandiri). Sistem *off-grid* sangat diandalkan untuk menyuplai beban listrik secara mandiri tanpa tergantung pada jaringan utilitas utama. Implementasi nyata dari sistem mandiri ini dapat diterapkan pada fasilitas pertanian perkotaan seperti di *Green House* Kelompok Tani (Poktan) Mustika yang terletak di Kramat Jati, Jakarta Timur. PLTS *off-grid* berkapasitas 1 kWp di lokasi ini diproyeksikan mampu mendukung otomatisasi komponen pertanian modern, seperti pompa irigasi, sensor nutrisi hidropodik, hingga sistem pencahayaan buatan.

Namun demikian, integrasi sistem PLTS komunal berskala kecil ini memicu tantangan baru yang signifikan dari aspek kualitas daya listrik (*power quality*). Pada dasarnya, panel surya menghasilkan arus searah (DC) yang harus dikonversi menjadi arus bolak-balik (AC) menggunakan perangkat elektronika daya berupa *inverter* sebelum disalurkan ke beban domestik maupun pertanian (Waruwu, Silalahi, & Widodo, 2025). Penggunaan konverter DC-to-DC seperti *boost converter* dan *inverter* yang berbasis pensaklaran dinamis frekuensi tinggi memicu timbulnya distorsi gelombang arus dan tegangan. Gejala distorsi periodik ini dikenal sebagai harmonisa, yang secara teoritis merusak kemurnian gelombang sinusoida pada frekuensi dasar sistem (Ewald F. Fuchs & Mohammad A.S. Masoum, 2023; Wakileh, 2001). Fenomena penurunan kualitas daya akibat harmonisa ini diperparah oleh karakteristik beban pada jaringan distribusi tegangan rendah modern. Sebagian besar peralatan yang digunakan saat ini, baik di sektor domestik maupun pertanian, dikategorikan sebagai beban non-linier. Karakteristik ini meliputi pemakaian Lampu Hemat Energi (LHE), *Light Emitting Diode* (LED), motor listrik dengan *Variable Speed Drive* (VSD), hingga perangkat kontrol otomatis berbasis mikroprosesor (Alfronso Sinurat, Antonius Doddy Tyas Prasetyo, Silalahi, Widodo, & Purba, 2021; Silalahi, 2024).

Beban non-linier ini menarik arus dalam bentuk pulsa yang terputus-putus, bukan gelombang sinus murni, sehingga memicu tingginya nilai *Total Harmonic Distortion* (THD) di dalam sistem (Sivaraman & Sharmeela, 2021). Berdasarkan penelitian empiris terdahru, pengoperasian PLTS *off-grid* dengan kapasitas kecil yang dikombinasikan dengan campuran beban linier dan non-linier terbukti menghasilkan distorsi harmonisa yang signifikan dan berpotensi melampaui batas aman yang diizinkan oleh standar internasional seperti IEEE 519 (Openg EFE, Widodo B, & Purba R., 2024). Di lingkungan jaringan distribusi lokal dengan penetrasi PLTS yang masif, keberadaan beban non-linier dari sektor residensial maupun fasilitas kelompok tani berisiko tinggi mengganggu stabilitas tegangan lokal (Ahsan, Khan, Hussain, Tariq, & Zaffar, 2021). Efek buruk dari tingginya kadar harmonisa ini meliputi terjadinya *overheating* (pemanasan berlebih) pada kabel dan transformator, kegagalan fungsi pada alat ukur elektrik,

kerusakan dini pada peralatan pertanian elektronik sensitif, hingga penurunan efisiensi konversi energi total pada PLTS (Das, 2015; Ewald F. Fuchs & Mohammad A.S. Masoum, 2023). Oleh karena itu, analisis mendalam mengenai profil distorsi gelombang ini sangat krusial dilakukan agar kinerja PLTS 1 kWp di *Green House* Poktan Mustika tetap berjalan optimal dan tidak merusak fasilitas penunjang pertanian yang ada.

Untuk mengatasi permasalahan kualitas daya tersebut, rekayasa teknik mitigasi harmonisa mutlak diperlukan. Secara konvensional, penekanan harmonisa sering kali mengandalkan topologi filter pasif, seperti konfigurasi LC (*Inductor-Capacitor*) maupun LCL. Filter pasif banyak dipilih karena biaya investasinya yang murah, strukturnya yang sederhana, serta efektivitasnya yang tinggi dalam mereduksi harmonisa pada ordo-ordo tertentu yang spesifik (Adak, 2021; Dlamini, Davidson, & Adebiyi, 2023).

Meskipun demikian, filter pasif memiliki kelemahan inheren yang sulit dihindari. Strukturnya yang kaku membuat performa penyaringan sangat tergantung pada impedansi sistem, rentan terhadap fenomena resonansi paralel dengan jaringan luar, serta tidak adaptif terhadap fluktuasi beban yang dinamis (Anuar et al., 2025; Ibrahim Mehrez, Sobhy Sabik, Wadie, & A. Nassar, 2026). Di sisi lain, perkembangan teknologi elektronika daya memunculkan opsi filter aktif atau *Active Power Filter* (APF) yang mampu menginjeksikan arus kompensasi secara dinamis untuk membatalkan harmonisa yang dihasilkan beban secara *real-time* (Tyas Prasetyo, Dery Elfando, & Silalahi, 2025). Penggunaan filter aktif terbukti andal dalam menekan nilai THD pada beban-beban domestik dan industri (Silalahi, Wowo, Prasetyo, Nempung, & Purba, 2026). Bahkan, implementasi kontrol canggih berbasis kendali PI (*Proportional-Integral*) pada filter aktif mampu meredam harmonisa secara signifikan pada pembangkit berbasis sel surya (Diki, Winarno, & Dewantara, 2021). Namun, penggunaan filter aktif secara mandiri terkendala oleh tingginya biaya fabrikasi komponen, rumitnya algoritma kendali saklar, serta kapasitas *rating* daya *inverter* filter yang besar sehingga kurang ekonomis untuk skala PLTS kecil.

Guna menjembatani keterbatasan dari kedua metode konvensional tersebut, konsep *hybrid filter* (filter hibrida) diusulkan sebagai solusi jalan tengah yang sangat menjanjikan. *Hybrid filter* menggabungkan keunggulan struktural filter pasif dan fleksibilitas dinamis filter aktif dalam satu kesatuan sistem terintegrasi. Kombinasi ini memungkinkan filter pasif untuk menangani porsi harmonisa berdaya besar pada frekuensi rendah, sementara filter aktif bertugas menyempurnakan kualitas daya dan melakukan redaman dinamis pada spektrum sisa tanpa memerlukan kapasitas rating daya yang besar (Esha, Reza, & Jyoti, 2025). Penerapan teknik hibrida atau kendali terintegrasi lainnya seperti kombinasi kontroler tegangan, *Active Damping*, maupun perangkat penstabil tegangan seperti DSTATCOM terbukti mampu meningkatkan kualitas daya secara drastis pada sistem mikrogrid maupun sistem PLTS mandiri yang menyuplai beban tidak seimbang dan non-linier (Dos Santos Serra, Antonio de Souza Ribeiro, & Savaghebi, 2024; Govil et al., 2026).

Selain itu, inovasi pada topologi kontrol dan desain inverter—seperti pemanfaatan *semi-quasi-Z-source inverter* maupun pengujian dengan metode *Control Hardware-in-the-loop* menunjukkan

bahwa penanganan parameter kualitas daya pada kondisi operasi *off-grid* terisolasi membutuhkan pendekatan mitigasi yang komprehensif agar stabilitas tegangan lokal tetap terjaga (Akdogan & Ahmed, 2020; Noroozi, Haghjoo, Javadi, & Reza Zolghadri, 2023).

Sistem PLTS mandiri skala kecil seperti yang direncanakan di Green House Poktan Mustika membutuhkan efisiensi konversi yang tinggi dan level THD yang rendah. Salah satu pendekatan kontrol untuk mencapai hal tersebut adalah dengan memanfaatkan metode kontrol histeresis pada topologi *transformerless inverter* karena algoritmanya yang sederhana namun sangat andal dalam mereduksi kebocoran arus dan harmonisa jaringan (Mohd Azhar et al., 2025).

Berdasarkan kondisi riil di lapangan, sistem kelistrikan di *Green House* Poktan Mustika, Kramat Jati, memiliki karakteristik beban yang sangat dinamis akibat siklus operasional alat pertanian yang berubah-ubah antara siang dan malam hari. Mengingat kapasitas PLTS yang dirancang relatif kecil, yaitu sebesar 1 kWp, fluktuasi beban non-linier dapat secara instan merusak profil tegangan *inverter off-grid*. Sebelum melakukan implementasi fisik alat yang membutuhkan biaya tinggi, diperlukan sebuah studi kelayakan operasional dan simulasi validasi menggunakan perangkat lunak komputasi yang andal. Penggunaan Matlab/Simulink merupakan metode standar industri yang sangat efektif untuk memodelkan karakteristik transien, menganalisis spektrum frekuensi THD melalui *Fast Fourier Transform* (FFT), serta menguji keandalan performa *hybrid filter* sebelum diterapkan di lokasi nyata. Melalui pendekatan berbasis simulasi ini, respon dinamis sistem terhadap kombinasi beban linier dan non-linier di *Green House* dapat dipetakan secara akurat.

Penelitian ini bertujuan untuk melakukan analisis komprehensif mengenai tingkat distorsi harmonisa yang terjadi pada PLTS *off-grid* 1 kWp di Green House Poktan Mustika dan merancang model mitigasi optimal menggunakan *hybrid filter* berbasis Matlab/Simulink. Hasil dari penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi ilmiah serta rekomendasi teknis yang aplikatif dalam menjaga kualitas daya listrik pada sistem *urban farming* berbasis energi terbarukan mandiri. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk: 1) Mengukur dan menganalisis nilai THDv, THDi, serta spektrum harmonisa dominan pada keluaran inverter sistem PLTS *Off-grid* 1 kWp di *Green House* Poktan Mustika; Kramat Jati, Jakarta Timur, berdasarkan kondisi beban aktual; 2) merancang dan memodelkan *hybrid filter* (kombinasi filter pasif LCL dan filter aktif HCC) yang disesuaikan dengan karakteristik harmonisa hasil pengukuran lapangan melalui simulasi MATLAB/Simulink; dan 3) mengevaluasi efektivitas *hybrid filter* yang dirancang dalam mereduksi harmonisa arus (THDi) melalui analisis komparatif sebelum dan sesudah mitigasi, serta menilai kesesuaiannya terhadap standar IEEE 519-2022.

KERANGKA TEORI

A. Harmonisa dan Standar IEEE 519-2022

Harmonisa merupakan komponen gelombang tegangan dan arus dengan frekuensi kelipatan bulat dari frekuensi dasar sistem (50 Hz), yang muncul akibat karakteristik non-linear dari perangkat elektronik seperti inverter, *rectifier*, dan *switching power supply*. Distorsi ini dinyatakan melalui parameter *Total Harmonic Distortion* tegangan (THDv) dan arus (THDi), yang dirumuskan

sebagai berikut (Ewald F. Fuchs & Mohammad A.S. Masoum, 2023; Wakileh, 2001):

$$THD_V = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} V_n^{\,2}}}{V_1} \times 100\% \quad (1)$$

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

dengan V1 dan I1 masing-masing adalah nilai tegangan dan arus pada frekuensi fundamental, sedangkan Vh dan Ih adalah nilai tegangan dan arus harmonisa pada orde ke-h.

Standar IEEE 519-2022 menetapkan batas maksimum distorsi harmonisa tegangan dan arus berdasarkan level tegangan sistem serta rasio arus hubung singkat terhadap arus beban maksimum (Isc/IL) pada titik sambungan bersama (PCC) (IEEE Standards Association, 2022). Tabel 1 dan Tabel 2 berturut-turut menyajikan batas distorsi arus dan tegangan yang berlaku untuk sistem tegangan rendah.

Tabel 1. Batas Distorsi Arus Harmonik Individu dan TDD Berdasarkan IEEE 519-2022 (%) (IEEE Standards Association, 2022).

I_{sc}/I_L	2≤h<11	11≤h<17	17≤h<23	23≤h<35	35≤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. Batas THD Tegangan Berdasarkan IEEE 519-2022 (IEEE Standards Association, 2022).

Tegangan bus PCC, V_{PCC}	Harmonik individu (%)	THD (%)
Vpcc ≤ 1,0 kV	5,0	8,0
1 kV < Vpcc ≤ 69 kV	3,0	5,0
69 kV < Vpcc ≤ 161 kV	1,5	2,5
161 kV < Vpcc	1,0	1,5

B. Filter Pasif LCL

Filter pasif LCL merupakan konfigurasi filter orde ketiga yang tersusun dari induktor sisi inverter (L_1), kapasitor filter (C_f), dan induktor sisi jaringan/beban (L_2), yang dirancang untuk meredam riak arus frekuensi tinggi akibat proses *switching* inverter (Dlamini et al., 2023; Sivaraman & Sharmeela, 2021). Nilai parameter dasar filter ditentukan melalui impedansi dasar sistem (Z_B) berdasarkan tegangan fundamental dan daya aktif nominal:

$$Z_B = \frac{V_{rms}^2}{P_n} \quad (3)$$

Kapasitor filter (C_f) umumnya dibatasi maksimum 5% dari kapasitansi dasar sistem (C_b) agar tidak menurunkan faktor daya secara berlebihan (Dlamini et al., 2023):

$$Cf = 0,05 \times Cb \quad (4)$$

Induktor sisi inverter (L_1) ditentukan berdasarkan riak arus maksimum yang diizinkan pada *duty cycle* 50%, sedangkan induktor sisi jaringan (L_2) umumnya ditetapkan sebesar 20% dari L_1 untuk meningkatkan kelandaian redaman filter (Dlamini et al., 2023):

$$L_1 = \frac{V_{dc}}{6 \cdot f_{sw} \cdot \Delta I_{max}} \quad (5)$$

$$L_2 = 0,2\, L_1 \quad (6)$$

Frekuensi resonansi alami filter (f_r) yang terbentuk dari interaksi L_1, L_2, dan C_f harus divalidasi berada pada rentang aman $10 f_g \le f_r \le f_s/2$ untuk mencegah amplifikasi harmonisa destruktif (Dos Santos Serra et al., 2024):

$$f_{res} = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{L_1+L_2}{L_1 L_2 C_f}} \quad (7)$$

Resistor redaman pasif (R_f) dipasang seri dengan C_f untuk meredam lonjakan resonansi pada model simulasi. Nilai resistansi resistor peredam pasif sirkuit (R_f) dihitung kembali melalui persamaan:

$$R_f = \frac{1}{3 \cdot \omega_{res} \cdot C_f} \quad (8)$$

C. Filter Aktif dan *Hysteresis Current Control* (HCC)

Filter aktif (*Active Power Filter*/APF) menginjeksikan arus kompensasi secara *real-time* pada titik sambungan bersama untuk menghilangkan komponen harmonisa arus beban, dengan magnitudo yang sama namun berlawanan fasa 180° terhadap arus distorsi. Salah satu metode kendali arus yang umum digunakan pada APF adalah *Hysteresis Current Control* (HCC), yang bekerja dengan membandingkan arus aktual keluaran inverter terhadap arus referensi sinusoidal melalui sinyal kesalahan (*error current*) (Mohd Azhar et al., 2025):

$$e(t) = i_{ref}(t) - i_{actual}(t) \quad (9)$$

Sinyal *error* dijaga berada dalam batas pita histeresis untuk menentukan kondisi *switching* sakelar inverter, sedangkan lebar pita histeresis (HB) ditentukan oleh tegangan *DC-link*, frekuensi *switching* target, dan induktansi filter acuan:

$$HB = \frac{V_{dc}}{4 f_{sw} L} \quad (10)$$

Apabila arus aktual melampaui batas atas pita, sakelar inverter dinonaktifkan, sedangkan apabila arus berada di bawah batas bawah, sakelar diaktifkan kembali, sehingga inverter menghasilkan arus kompensasi yang secara adaptif mengikuti arus referensi.

D. Hybrid Filter

Hybrid filter menggabungkan filter pasif dan filter aktif untuk memanfaatkan keunggulan masing-masing metode: filter pasif LCL berperan meredam harmonisa dominan pada frekuensi tinggi akibat *switching* inverter, sedangkan filter aktif berbasis HCC mengompensasi harmonisa residual secara adaptif berdasarkan *error* arus. Pendekatan ini memungkinkan pengurangan kapasitas konverter aktif sehingga biaya implementasi dapat ditekan tanpa mengorbankan efektivitas mitigasi harmonisa.

METODE PENELITIAN

A. Desain Penelitian

Penelitian ini merupakan penelitian kuantitatif dengan pendekatan *simulation-based research* dan *applied research*. Seluruh proses penelitian didasarkan pada data numerik hasil pengukuran lapangan (tegangan, arus, THDv, THDi) yang selanjutnya digunakan untuk membangun model sistem PLTS *off-grid* pada MATLAB/Simulink. Empat skenario disimulasikan, yaitu kondisi tanpa filter, filter pasif LCL, filter aktif APF-HCC, dan filter *hybrid* (LCL+HCC), untuk mengevaluasi efektivitas masing-masing metode.

B. Lokasi dan Objek Penelitian

Penelitian dilakukan pada sistem PLTS *off-grid* 1 kWp satu fasa dengan inverter berkapasitas 2000 VA yang menyuplai beban operasional *Green House* Poktan Mustika, Kramat Jati, Jakarta Timur. Objek penelitian difokuskan pada sisi keluaran inverter sebagai titik pengukuran kualitas daya, karena pada sistem *off-grid* inverter berfungsi sebagai satu-satunya sumber pembentuk tegangan AC sistem.

C. Tahapan Penelitian

Tahapan penelitian dilakukan secara sistematis meliputi: (1) studi literatur

terkait PLTS, kualitas daya, filter LCL, HCC, dan standar IEEE 519-2022; (2) pengukuran harmonisa lapangan menggunakan *Power Quality Analyzer* (PQA); (3) analisis karakteristik harmonisa dan identifikasi orde dominan; (4) pemodelan filter pada MATLAB/Simulink untuk keempat skenario; (5) simulasi dan analisis spektrum harmonisa menggunakan *Fast Fourier Transform* (FFT); (6) evaluasi hasil terhadap standar IEEE 519-2022; serta (7) penarikan kesimpulan berdasarkan perbandingan performa antar metode.

D. Instrumen dan Parameter Pengukuran

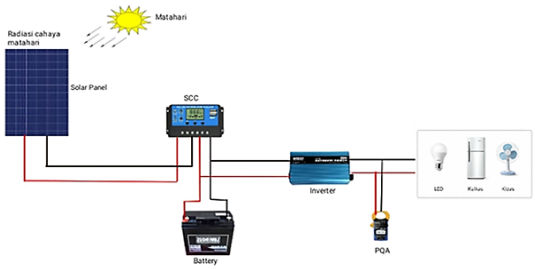
Pengukuran kualitas daya lapangan dilakukan menggunakan *Power Quality Analyzer* Kyoritsu KEW 6315, *clamp meter*, dan multimeter digital, dengan titik ukur pada keluaran inverter (setara PCC). Tabel 3 menyajikan parameter pengukuran yang digunakan dalam penelitian ini.

Tabel 3. Parameter Pengukuran Lapangan.

Parameter Pengukuran	Keterangan
Alat ukur	PQA Kyoritsu KEW 6315; Clamp meter; Multimeter digital
Titik ukur	Keluaran inverter (setara PCC)
Parameter	Tegangan (V), Arus (I), THDv, THDi, spektrum FFT
Durasi	17,09 detik, interval sampling 1 detik
Frekuensi sistem	50 Hz

HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Gambaran Umum Sistem dan Karakteristik Beban



Gambar 1. Konfigurasi Sistem PLTS *Off-grid* di *Green House* Poktan Mustika.

Sistem PLTS *off-grid* yang diteliti terdiri dari modul fotovoltaik, *solar charge controller*, baterai, inverter 2000 VA, serta beban AC pada sisi keluaran inverter (Gambar 1). Beban penelitian merupakan kombinasi beban linier dan non-linier, sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 4.

Tabel 4. Karakteristik Beban Sistem PLTS *Off-Grid*.

Beban	Jumlah	Daya (W)	Jenis Beban	Karak-teristik
Lampu LED	7 x 7 W	49	Non-linier	*Switching*
Kipas angin	1	145	Induktif	Motor
Lemari pendingin	1	115	Non-linier	Kompresor

Beban non-linier seperti lampu LED dan lemari pendingin berkontribusi signifikan terhadap potensi distorsi harmonisa arus karena karakteristik *switching* dan operasi kompresornya, sedangkan kipas angin sebagai beban induktif turut memengaruhi profil arus sistem terutama saat *starting* motor.

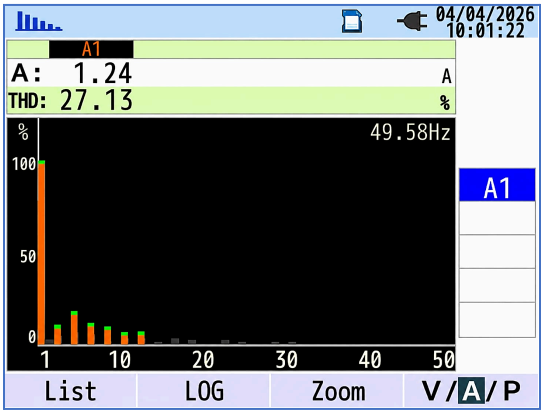
B. Hasil Pengukuran Parameter Operasional

Tabel 5. Parameter Operasional Sistem.

Parameter	Nilai
Tegangan	229,1 V
Arus	1,24 A
Daya aktif (P)	0,27 kW
Daya reaktif (Q)	−0,18 kVAR
Daya semu (S)	0,32 kVA
Faktor daya	0,839
Frekuensi	49,59 Hz

Hasil pengukuran menunjukkan sistem beroperasi pada tegangan 229,1 V dan arus 1,24 A, dengan daya aktif 0,27 kW serta faktor daya 0,839, mengindikasikan adanya pengaruh komponen non-linier dan reaktif pada sistem meskipun beban bekerja jauh di bawah kapasitas nominal inverter 2000 VA.

C. Analisis THDi Kondisi Aktual



Gambar 2. Hasil Pengukuran THDi Aktual Menggunakan PQA.

Hasil pengukuran PQA memperlihatkan arus fundamental sebesar 1,24 A dengan THDi sebesar 27,13% pada frekuensi sistem 49,58 Hz (Gambar 2). Distribusi harmonisa dominan disajikan pada Tabel 6.

Tabel 6. Harmonisa Arus Dominan Kondisi Aktual Dibandingkan Batas IEEE 519-2022.

Orde	Hasil Pengukuran (%)	Batas IEEE 519-2022 (%)	Status
h3	9,68	4,0	Tidak memenuhi
h5	19,35	4,0	Tidak memenuhi
h7	11,29	4,0	Tidak memenuhi
h9	9,68	4,0	Tidak memenuhi
h11	4,84	4,0	Tidak memenuhi
h13	4,84	2,0	Tidak memenuhi

Berdasarkan Tabel 6, seluruh harmonisa dominan (orde ke-3, 5, 7, 9, 11, dan 13) telah melampaui batas individu IEEE 519-2022 untuk kategori $I_{sc}/I_L<20$. Harmonisa orde ke-5 tercatat sebagai kontributor terbesar sebesar 19,35%, atau sekitar 4,8 kali dari batas 4% yang diizinkan, menunjukkan bahwa kualitas arus sistem belum memenuhi standar dan memerlukan mitigasi.

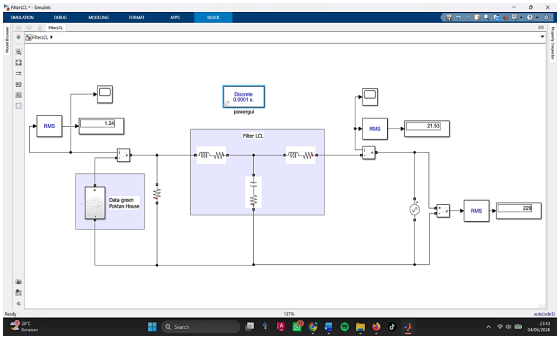
D. Analisis THDv Kondisi Aktual

Hasil pengukuran menunjukkan THDv sistem sebesar 1,60% dengan tegangan fundamental 229,1 V, jauh di bawah batas 8% yang diizinkan IEEE 519-2022 untuk sistem tegangan ≤ 1,0 kV. Hal ini mengindikasikan bahwa permasalahan kualitas daya pada sistem penelitian lebih dominan berasal dari distorsi harmonisa arus dibandingkan tegangan, sehingga mitigasi pada penelitian ini difokuskan pada penurunan THDi.

E. Implementasi Metode Mitigasi Harmonisa

Berdasarkan karakteristik harmonisa hasil pengukuran, dirancang tiga skenario mitigasi menggunakan

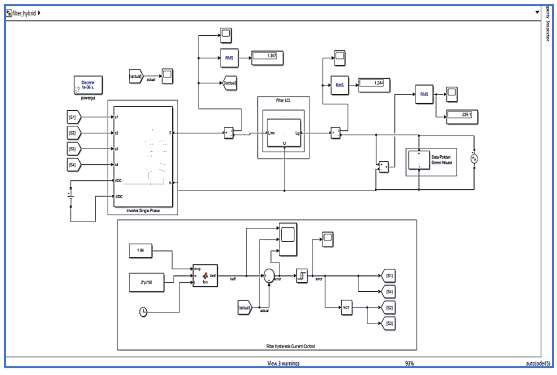
MATLAB/Simulink: filter pasif LCL, filter aktif APF berbasis HCC, dan filter *hybrid* (kombinasi LCL dan HCC).



Gambar 3. Implementasi Filter LCL pada Model Simulasi.

Filter LCL dirancang dengan parameter L1 = L2 = 12,5 mH dan Cf = 2,5 µF, disertai resistor redaman 19,25 Ω pada cabang kapasitor untuk mencegah osilasi akibat resonansi alami pada frekuensi 1.273,24 Hz (Gambar 3).

Pada skema APF-HCC, arus referensi dibangkitkan berdasarkan arus efektif target sistem, dengan lebar pita histeresis dikonfigurasi melalui batas *relay* sebesar ±0,38 A untuk mengunci target frekuensi *switching* rata-rata 10 kHz.



Gambar 4. Konfigurasi Simulasi Filter *Hybrid* (LCL + HCC).

Pada skema *hybrid*, filter LCL ditempatkan di sisi keluaran inverter, sedangkan HCC digunakan sebagai metode pengendalian *switching* inverter berbasis *error* arus (Gambar 4). Parameter filter *hybrid* yang digunakan ditunjukkan pada Tabel 7.

Tabel 7. Parameter Filter *Hybrid* (LCL + HCC).

Parameter	Nilai
Induktor sisi inverter (L_{inv})	12,5 mH
Induktor sisi grid (L_g)	12,5 mH
Kapasitor filter (Cf)	2,5 µF
Resistor redaman induktor	0,1 Ω
Resistor redaman kapasitor	19,25 Ω
Frekuensi *switching*	10 kHz
Tegangan *DC-link*	345 V

F. Perbandingan Kinerja Antar Metode

Tabel 8. Perbandingan Performa Sistem pada Setiap Skenario.

Kondisi Sistem	THDv (%)	THDi (%)	Reduksi THDi (%)	Status IEEE 519-2022
Aktual lapangan	1,60	27,13	–	Tidak memenuhi
Filter LCL	1,60	0,29	98,93	Memenuhi
APF–HCC	1,60	2,33	91,41	Memenuhi
Hybrid (LCL–HCC)	1,60	0,14	99,48	Memenuhi

Tabel 8 menunjukkan bahwa filter LCL menurunkan THDi dari 27,13% menjadi 0,29% (reduksi 98,93%), APF-HCC menurunkan THDi menjadi 2,33% (reduksi 91,41%), sedangkan filter *hybrid* memberikan performa terbaik dengan THDi 0,14% (reduksi 99,48%). Filter LCL unggul dalam meredam harmonisa frekuensi tinggi akibat karakteristik impedansinya yang bergantung pada

frekuensi, sedangkan APF-HCC unggul dalam adaptabilitas terhadap perubahan beban meskipun redamannya sedikit lebih rendah. Kombinasi keduanya pada skema *hybrid* menghasilkan kompromi terbaik antara efektivitas *filtering* pasif dan adaptabilitas kendali aktif.

G. Evaluasi Terhadap Standar IEEE 519-2022

Tabel 9. Harmonisa Dominan per Skenario Dibandingkan Batas IEEE 519-2022.

Orde	IEEE 519-2022 (%)	Aktual (%)	LCL (%)	HCC (%)	Hybrid (%)
h3	4,0	9,68	0,17	0,80	0,03
h5	4,0	19,35	0,21	0,66	0,02
h7	4,0	11,29	0,09	0,76	0,10
h9	4,0	9,68	0,06	1,10	0,01
h11	4,0	4,84	0,03	0,30	0,02
h13	2,0	4,84	0,03	0,74	0,04

Tabel 9 memperlihatkan bahwa pada kondisi aktual seluruh orde harmonisa dominan melampaui batas individu IEEE 519-2022, sedangkan setelah penerapan filter LCL, HCC, maupun *hybrid*, seluruh orde berhasil ditekan hingga berada di bawah batas standar. Filter *hybrid* memberikan margin kepatuhan terbesar dengan seluruh harmonisa dominan tertekan hingga di bawah 0,10%.

H. Validasi Terhadap Penelitian Terdahulu

Tabel 10. Perbandingan Hasil Penelitian dengan Penelitian Terdahulu.

Penelitian	Metode Mitigasi	Hasil
"Rancang Bangun Filter Pasif Untuk Mereduksi *Total Harmonic Distortion* (THD) Akibat Pemakaian Lampu Hemat Energi (LHE) dan *Light Emitting Diode* (LED)," (Alfronso Sinurat et al., 2021)	Filter pasif LC	THDi beban LED turun menjadi 49,12%; beban LHE turun menjadi 42,21%
"Penggunaan Filter Aktif Dengan *PI Controller* Untuk Meredam Harmonisa Pada Pembangkit Listrik Tenaga *Solar Cell*," (Diki et al., 2021)	Filter aktif *PI controller*	Filter aktif efektif meredam harmonisa keluaran PLTS (nilai akhir tidak dilaporkan spesifik)
"Analisa Harmonisa Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) *Off-Grid* 290 Wp dengan Kombinasi Beban Linier dan Non-Linier di Gedung Fakultas Teknik UKI-Jakarta Menggunakan Matlab Simulink," (Openg EFE et al., 2024)	Filter pasif *single-tuned LC*	THDi beban LED turun dari 16,42% menjadi 1,32%; namun filter bersifat statis, kurang adaptif terhadap perubahan konfigurasi beban harian, dan berdimensi fisik besar
"*Power quality improvement in single-phase transformerless semi-quasi-Z-source inverters for off-grid photovoltaic systems*," (Noroozi et al., 2023)	Kendali PI-PR pada inverter *Semi-Quasi-Z-Source* (tanpa filter pasif / aktif)	THDv ditekan hingga ≈ 1,27%, memenuhi IEEE 519; namun belum menggunakan filter pasif/aktif dan belum divalidasi

Penelitian	Metode Mitigasi	Hasil
		terhadap data lapangan aktual
"*Control Hardware-in-the-loop for Voltage Controlled Inverters with Unbalanced and Non-linear Loads in Stand-alone Photovoltaic (PV) Islanded Microgrids*," (Akdogan & Ahmed, 2020)	Kendali hierarkis tegangan inverter (tanpa filter pasif / aktif)	THD tegangan di PCC turun dari 6,38% menjadi 1,91%; namun belum membahas mitigasi harmonisa arus dengan filter LCL/HCC maupun hybrid filter
Penelitian ini – *Hybrid Filter*	LCL + HCC	THDi turun dari 27,13% menjadi 0,14% (reduksi 99,48%)

Pada penelitian ini, *Filter* LCL mampu menurunkan THDi dari 27,13% menjadi 0,29% dengan reduksi sebesar 98,93%, sedangkan APF-HCC menurunkan THDi menjadi 2,33% dengan reduksi sebesar 91,41%. Performa terbaik diperoleh pada *Filter hybrid* LCL-HCC yang mampu menurunkan THDi hingga 0,14% atau setara dengan reduksi harmonisa sebesar 99,48%.

Hasil tersebut menunjukkan bahwa kombinasi *Filter Pasif* LCL dan *Filter* aktif HCC memberikan kinerja yang lebih baik dibandingkan penggunaan masing-masing metode secara terpisah. *Filter* LCL efektif meredam harmonisa frekuensi tinggi, sedangkan HCC melakukan kompensasi harmonisa secara aktif melalui pengendalian arus referensi. Dengan demikian, penelitian ini tidak hanya sejalan dengan penelitian sebelumnya, tetapi juga menunjukkan peningkatan performa mitigasi harmonisa pada sistem PLTS *off-grid* berbasis data lapangan *Green House* Poktan Mustika.

KESIMPULAN DAN SARAN

A. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis data pengukuran lapangan, perhitungan parameter matematis, serta hasil pengujian pemodelan sistem *Hybrid Filter* pada PLTS *Off-grid* 1 kWp di *Green House* Poktan Mustika Kramat Jati, Jakarta Timur, maka diperoleh beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Sistem jaringan listrik PLTS *Off-grid 1 kWp* di *Green House* Poktan Mustika mengalami penurunan kualitas daya akibat penggunaan beban *non-linier*. Hasil analisis menunjukkan adanya cacat gelombang arus yang kasar dengan nilai THDi awal mencapai 27,13% melanggar ambang batas aman standar internasional maksimum 5% dan harmonisa tegangan THDv = 1,6% masih dalam batas standar maksimum 8% dari standar *IEEE 519-2022*. Juda dari hasil pengukuran, diperoleh harmonisa arus dominan THDi pada orde: n=3 (9,68%), n=5 (19,35%), n=7 (11,29%), n=9 (9,68%), n=11 (4,84%), dan n=13 (4,84%), semuanya melebihi standar harmonik inidividu dari standar IEEE 519-2022.
2. Telah berhasil dirancang dan disimulasikan model mitigasi harmonisa berupa Sistem *Hybrid Filter* (kombinasi kontrol aktif HCC dan *Filter Pasif* LCL simetris) berbasis *MATLAB/Simulink*. Parameter kontrol aktif HCC dikonfigurasi menggunakan batas blok *relay* sebesar $\pm 0,38$ untuk mengunci target frekuensi pensakelaran rata-rata 10 kHz. Parameter ini dipadukan dengan filter

pasif LCL tipe simetris dengan nilai komponen $L_{inv} = L_{grid} = 12,5\ mH\ dan\ C_f =$ Untuk mengeliminasi risiko osilasi liar akibat efek resonansi alami L dan C pada frekuensi $1.273,24\ Hz$, pemasangan resistor *passive damping* sebesar 19,25 Ω terbukti valid secara matematis untuk menjaga stabilitas pembacaan numerik sirkuit.

3. Efektivitas *Hybrid* Filter yang dirancang dalam mengevaluasi efektivitas *Hybrid* Filter dalam mereduksi harmonisa arus (THDi) yaitu: filter LCL dengan THDi = 0,294% berhasil mereduksi arus harmonik sebesar 98,13%; filter *Hysteresis Current Controller* (HCC) dengan THDi = 2,33% berhasil reduksi harmonisa mencapai 91,41%, dan filter *Hybrid* (LCL + HCC) dengan THDi = 0,14% berhasil reduksi harmonisa sebesar 99,48%, yang menunjukkan bahwa filter hybrid aktif HCC dan pasif LCL terbukti efektif mereduksi THDi hingga 99,48%.

B. SARAN

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, beberapa saran untuk pengembangan penelitian selanjutnya adalah sebagai berikut:

1. Penelitian selanjutnya disarankan melakukan implementasi langsung pada perangkat keras (*hardware implementation*) untuk memvalidasi hasil simulasi terhadap kondisi operasi nyata sehingga akurasi model dapat dievaluasi lebih lanjut.
2. Analisis lanjutan terhadap rugi-rugi *switching* inverter, efisiensi energi, serta pengaruh temperatur komponen perlu dilakukan untuk memperoleh evaluasi sistem yang lebih komprehensif.
3. Pengujian sistem sebaiknya diperluas pada variasi jenis beban, khususnya beban nonlinier dinamis dan perubahan profil beban harian, untuk mengetahui tingkat robustnes *hybrid Filter* terhadap kondisi operasi yang berubah.

DAFTAR PUSTAKA

lak, S. (2021). Harmonics Mitigation of Stand-Alone Photovoltaic System Using LC Passive Filter. *Journal of Electrical Engineering & Technology*, *16*(5), 2389–2396. doi:10.1007/s42835-021-00777-7

san, S. M., Khan, H. A., Hussain, A., Tariq, S., & Zaffar, N. A. (2021). Harmonic Analysis of Grid-Connected Solar PV Systems with Nonlinear Household Loads in Low-Voltage Distribution Networks. *Sustainability*, *13*(7), 3709. doi:10.3390/su13073709

dogan, M. E., & Ahmed, S. (2020). *Control Hardware-in-the-loop for Voltage Controlled Inverters with Unbalanced and Non-linear Loads in Stand-alone Photovoltaic (PV) Islanded Microgrids*. In *2020 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)* (pp. 2431–2438). IEEE. doi:10.1109/ECCE44975.2020.9235913

fronso Sinurat, Antonius Doddy Tyas Prasetyo, Silalahi, E. M., Widodo, B., & Purba, R. (2021). RANCANG BANGUN FILTER PASIF UNTUK MEREDUKSI TOTAL HARMONIC DISTORTION (THD) AKIBAT PEMAKAIAN LAMPU HEMAT ENERGI (LHE) DAN LIGHT EMITTING DIODE (LED). *Lektrokom : Jurnal Ilmiah Teknik Elektro*, *4*(1), 7. doi:10.33541/lektrokom.v4i1.3318

uar, M. N., Mat Said, D., Mohammad Yusri Hassan, Nordin, N. D., Mohd Noh Sarip, Mohd Shukri Dolah, & Mohd Fatihi Mustafar. (2025). Analyzing Harmonic Reduction in Grid-Connected PV Systems

through LCL Filtering Techniques. *ELEKTRIKA- Journal of Electrical Engineering*, *24*(2), 125–133. doi:10.11113/elektrika.v24n2.637

Das, J. C. (2015). *Power System Harmonics and Passive Filter Designs*. Wiley. doi:10.1002/9781118887059

Diki, D. dwi aprisetiawan, Winarno, I., & Dewantara, B. Y. (2021). Penggunaan Filter Aktif dengan PI Controller Untuk Meredam Harmonisa Pada Pembangkit Listrik Tenaga Solar Cell. *KURVATEK*, *6*(1), 69–80. doi:10.33579/krvtk.v6i1.1853

Dlamini, S., Davidson, I. E., & Adebiyi, A. A. (2023). *Design and Application of the Passive Filters for Improved Power Quality in Stand-alone PV Systems*. In *2023 31st Southern African Universities Power Engineering Conference (SAUPEC)* (pp. 1–6). IEEE. doi:10.1109/SAUPEC57889.2023.10057777

Dos Santos Serra, A. W., Antonio de Souza Ribeiro, L., & Savaghebi, M. (2024). *Current Controller for LCL-Type Grid-Following Inverter with Active Damping and Capacitor Voltage Decoupling*. In *IECON 2024 - 50th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society* (pp. 1–6). IEEE. doi:10.1109/IECON55916.2024.10905892

Esha, A. S., Reza, N., & Jyoti, O. (2025). *Hybrid Filtering Techniques for Enhanced Power Quality in Grid-Connected Solar PV Systems*. In *2025 International Conference on Quantum Photonics, Artificial Intelligence, and Networking (QPAIN)* (pp. 1–6). IEEE. doi:10.1109/QPAIN66474.2025.11172217

Ewald F. Fuchs, & Mohammad A.S. Masoum. (2023). *Power Quality in Power Systems, Electrical Machines, and Power-Electronic Drives* (3rd ed.). Elsevier. doi:10.1016/C2018-0-02457-3

ıvil, V. K., Sahay, K., Tripathi, S. M., Sinha, A., Kumar, N., Ibraheem, I. K., & Smerat, A. (2026). Power Quality Control in PV Systems with DSTATCOM: Methods and Performance Evaluation. *Smart Grids and Sustainable Energy*, *11*(1), 28. doi:10.1007/s40866-026-00332-1

ahim Mehrez, S. E., Sobhy Sabik, A., Wadie, F., & A. Nassar, I. (2026). Comparative analysis for different passive filter topologies in grid-tied PV systems. *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, *42*(1), 1. doi:10.11591/ijeecs.v42.i1.pp1-12

EE Standards Association. (2022). IEEE 519-2022 - IEEE Standard for Harmonic Control in Electric Power Systems. Retrieved 30 December 2025, from https://comsys.se/our-adf-technology/power-quality-ieee-519-2022/#:~:text=You%20are%20here:%20Comsys%20»%20ADF, 1.5*

ohd Azhar, A. S., Azri, M., Abd Halim, W., Talib, M. H. N., Rasin, Z., & Mohammed, M. F. (2025). Hysteresis current control for single-phase transformerless inverter. *International Journal of Applied Power Engineering (IJAPE)*, *14*(1), 1. doi:10.11591/ijape.v14.i1.pp1-10

roozi, M., Haghjoo, F., Javadi, H., & Reza Zolghadri, M. (2023). Power quality improvement in single-phase transformerless semi-quasi-Z-source inverters for off-grid photovoltaic systems. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, *145*, 108703. doi:10.1016/j.ijepes.2022.108703

eng EFE, Widodo B, & Purba R. (2024). Analisa Harmonisa Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) Off - Grid 290 Wp Dengan Kombinasi Beban Linier Dan Non Linier Di Gedung Fakultas Teknik UKI - Jakarta Menggunakan Matlab Simulink. *Lektrokom: Jurnal Ilmiah Teknik Elektro*, *7*(1), 1–13. Retrieved from

https://ejournal.uki.ac.id/index.php/lektrokom/article/view/5658

Silalahi, E. M. (2024). Analisa Harmonisa dan Faktor Daya Peralatan Listrik Rumah Tangga Pada Sistem Tegangan Rendah 220 V. *G-Tech: Jurnal Teknologi Terapan*, *8*(4), 2545–2556. doi:10.70609/gtech.v8i4.5352

Silalahi, E. M., Wowo, M. F., Prasetyo, A. D. T., Nempung, J. I., & Purba, R. (2026). Mitigasi Total Harmonic Distortion pada Beban Residensial Menggunakan Active Low Pass Filter Berbasis Multisim. *CYCLOTRON*, *9*(01), 1–8. doi:10.30651/ct.v9i01.30177

Sivaraman, P., & Sharmeela, C. (2021). Power system harmonics. In *Power Quality in Modern Power Systems* (pp. 61–103). Elsevier. doi:10.1016/B978-0-12-823346-7.00002-5

Tyas Prasetyo, A. D., Dery Elfando, & Silalahi, E. M. (2025). Current Controller with FOPI Modification for VSI-based Active Power Filter. *Emitor: Jurnal Teknik Elektro*, 33–38. doi:10.23917/emitor.v25i1.8522

Wakileh, G. J. (2001). *Power Systems Harmonics*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. doi:10.1007/978-3-662-04343-1

Waruwu, B. , Silalahi, E. M. , & Widodo, B. (2025). Analisis energi listrik PLTS on-grid dengan boost converter dan inverter berbasis Matlab/Simulink. *Jurnal Informatika Dan Teknik Elektro Terapan*, *13*(1). doi:10.23960/jitet.v13i1.5959