

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Perkembangan sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) sebagai sumber energi terbarukan mengalami peningkatan signifikan dalam beberapa tahun terakhir, baik pada sistem *grid-connected* maupun *Off-grid*. Pada sistem PLTS *Off-grid*, Inverter berfungsi sebagai sumber utama tegangan AC yang sepenuhnya menggantikan peran jaringan utilitas. Secara ideal, Inverter diharapkan menghasilkan gelombang tegangan sinusoidal dengan distorsi minimum sehingga kualitas daya tetap terjaga dan peralatan listrik dapat beroperasi secara aman serta efisien.

Namun dalam praktiknya, proses switching pada Inverter berbasis elektronika daya serta interaksi dengan beban *nonlinier* seperti lampu LED, kipas elektronik, dan motor kompresor dapat menghasilkan komponen harmonisa pada arus dan tegangan. Distorsi ini diukur menggunakan parameter *Total Harmonic Distortion* tegangan (THDv) dan arus (THDi). Menurut IEEE Std 519-2022 dengan buku 'IEEE Power & Energy Society, *IEEE Std 519-2022*' [1], batas maksimum distorsi harmonisa tegangan untuk sistem tegangan rendah pada titik *Point of Common Coupling* (PCC) adalah 5%. Standar ini menjadi acuan utama dalam evaluasi kualitas daya sistem tenaga berbasis Inverter. Meskipun IEEE Standar 519-2022 secara umum diterapkan pada sistem tenaga yang terhubung ke jaringan utilitas dan didefinisikan pada titik *Point of Common Coupling* (PCC), dalam konteks sistem PLTS *Off-grid* satu fasa, sisi keluaran Inverter dapat diperlakukan sebagai titik ekuivalen PCC karena seluruh beban terhubung langsung pada terminal tersebut. Oleh karena itu, standar IEEE 519-2022 dalam penelitian ini digunakan sebagai benchmark teknis untuk mengevaluasi kualitas tegangan dan arus pada sisi keluaran Inverter, meskipun sistem tidak terinterkoneksi dengan jaringan utilitas.

Secara teoritis, meningkatnya penetrasi sumber berbasis Inverter dalam sistem tenaga listrik modern akan meningkatkan kompleksitas fenomena kualitas

daya. Hal ini ditegaskan oleh Math H. J. Bollen dengan judul ***“Power Quality Issues and Solutions in Modern Electrical Networks: Challenges and Innovations (2022)”*** [2], yang menyatakan bahwa sistem tenaga masa depan dengan dominasi konverter daya akan menghadapi tantangan harmonisa yang lebih signifikan dibandingkan sistem konvensional berbasis generator sinkron. Selain itu, Penelitian yang dilakukan oleh Mohammad Taufik, Emilliano, Septian Ari Kurniawan, Darmawan Hidayat, Agus Trisanto, Dessy Novita, dan Taufik **pada tahun 2024**, berjudul ***“Single Phase Power Quality Analysis of Solar Cell Power System in Harmonics Measurement”*** [3]. Penelitian tersebut bertujuan untuk menganalisis kualitas daya pada sistem PLTS satu fasa melalui pengukuran harmonisa arus dan tegangan pada berbagai konfigurasi beban linier dan nonlinier. Metode yang digunakan berupa simulasi *MATLAB/Simulink* pada sistem PLTS standalone dengan variasi konfigurasi pembebanan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa beban nonlinier menghasilkan nilai THDi yang sangat tinggi, yaitu melebihi 62%, sedangkan kombinasi beban linier dan nonlinier mampu menurunkan THDi hingga 0,25% dan THDv hingga 0,09%, sehingga memenuhi standar IEEE 519. Namun demikian, penelitian ini hanya berfokus pada analisis karakteristik harmonisa akibat variasi pembebanan dan belum mengimplementasikan metode mitigasi harmonisa menggunakan *Filter Pasif*, *Filter aktif*, maupun *hybrid Filter*. Oleh karena itu, efektivitas teknik reduksi harmonisa pada sistem PLTS satu fasa masih perlu dikaji lebih lanjut melalui penerapan metode mitigasi yang lebih komprehensif.

Selanjutnya penelitian yang dilakukan oleh Amiron Wolff dos Santos Serra, Luiz Antonio de Souza Ribeiro, dan Mehdi Savaghebi pada tahun 2025 dengan judul ***“Current Controller for LCL-Type Grid-Following Inverter with Active Damping and Capacitor Voltage Decoupling”*** [4], membahas strategi pengendalian inverter grid-following yang menggunakan *Filter LCL* dengan metode *active damping* berbasis umpan balik arus kapasitor (*capacitor current feedback*) serta *capacitor voltage decoupling* untuk meningkatkan stabilitas sistem dan kemampuan penolakan gangguan (*disturbance rejection*). Hasil penelitian menunjukkan bahwa metode yang diusulkan mampu meredam resonansi inheren

pada *Filter* LCL, menjaga kestabilan inverter terhadap perubahan impedansi jaringan, serta menurunkan nilai THD arus dari 6,31% menjadi 5,11% pada kondisi gangguan harmonisa tegangan jaringan. Namun demikian, penelitian tersebut difokuskan pada sistem inverter grid-following yang terhubung ke jaringan listrik (grid-connected) dan menggunakan metode *active damping* yang relatif kompleks dengan tambahan pengendali *Proportional Resonant* (PR), *capacitor voltage decoupling*, serta analisis kestabilan berbasis domain frekuensi.

Penelitian nasional juga menunjukkan fenomena serupa. S. Andika, dkk. dengan judul **“Penggunaan Filter Aktif dengan *PI Controller* untuk Meredam Harmonisa pada Pembangkit Listrik Tenaga Solar Cell (2021)”** [5], Penelitian ini bertujuan untuk merancang dan menganalisis performa sistem filter aktif dalam meredam polusi distorsi arus ganjil tingkat rendah yang muncul pada pembangkit listrik tenaga solar cell akibat pembebanan non-linier. Hasil penelitian menunjukkan bahwa implementasi filter aktif dengan kendali *Proportional-Integral* (PI) mampu memperkecil sinyal kesalahan (*error*) pada sirkuit daya serta efektif dalam memperbaiki profil gelombang arus jala-jala. Namun, penelitian ini menerapkan algoritma kontrol PI konvensional sehingga karakteristik respon transien dan kecepatan pelacakan arus acuan dinamisnya berbeda dengan sistem kontrol berbasis *Hysteresis Current Control* (HCC). Selain itu, penelitian ini belum mengintegrasikan unit kontrol aktif tersebut dengan arsitektur filter pasif LCL tipe simetris untuk membentuk sebuah konfigurasi *Hybrid Filter* yang dapat mengoptimalkan peredaman riak pensakelaran frekuensi tinggi.

Kemudian penelitian yang dilakukan oleh Elisabeth Faustina Ene Openg, Bambang Widodo, dan Robinson Purba, pada tahun 2024, berjudul, **“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”** [6]. Dengan tujuan mereduksi nilai THD, mereka menggunakan metode *Filter Pasif single-tuned LC*. Mereka menemukan, bahwa sebelum pemasangan *Filter*, beban lampu LED memicu distorsi arus THDi sebesar 16,42%, dan setelah *Filter* diaplikasikan, nilai THDi tersebut berhasil ditekan turun secara signifikan menjadi sebesar 1,32% . Namun,

kelemahan dari penelitian ini adalah sistem *Filter Pasif* yang dirancang bersifat statis, tidak adaptif terhadap fluktuasi perubahan konfigurasi beban harian, serta memiliki dimensi fisik komponen yang besar.

Rudi Siregar, M. Nasution, dan Andi Putra dengan judul “**Analisis Kualitas Daya pada Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya Off-grid Menggunakan Inverter Satu Fasa (2022)**” [7] menganalisis kualitas daya pada sistem PLTS *Off-grid* melalui pendekatan pengukuran langsung dan melaporkan adanya kandungan harmonisa pada kondisi beban tertentu. Namun penelitian tersebut belum mengusulkan metode mitigasi sebagai solusi teknis.

Selanjutnya penelitian yang dilakukan oleh Alfronso Sinurat, Antonius Doddy Tyas Prasetyo, Eva Magdalena Silalahi, Bambang Widodo, dan Robinson Purba, pada tahun 2021, berjudul, “**Rancang Bangun Filter Pasif Untuk Mereduksi Total Harmonic Distortion (THD) Akibat Pemakaian Lampu Hemat Energi (LHE) Dan Light Emitting Diode (LED)**” [8]. Dengan tujuan menurunkan intervensi harmonisa arus, mereka menerapkan metode rancang bangun *Filter Pasif single-tune LC* berbasis MATLAB/Simulink. Mereka menemukan, bahwa setelah pemasangan *Filter Pasif*, nilai THDi pada rangkaian lampu LED berhasil direduksi menjadi sebesar 49,12% dan pada rangkaian Lampu Hemat Energi (LHE) menjadi sebesar 42,21% . Namun, kelemahan dari penelitian ini adalah pengujiannya hanya terbatas pada variasi beban penerangan lokal serta memiliki risiko laten memicu fenomena resonansi sirkuit baru yang justru dapat mengamplifikasi distorsi orde rendah lainnya.

Selanjutnya penelitian yang dilakukan oleh S. Liasi, R. Hadidi, dan N. Ghiasi pada tahun 2021, berjudul “**Current Harmonic Compensation by Active Power Filter Using Neural Network-Based Recognition and Controller**” [9]. Penelitian ini bertujuan untuk meningkatkan kualitas daya melalui kompensasi harmonisa arus menggunakan *Active Power Filter* yang dikendalikan dengan metode *Hysteresis Current Control*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa metode HCC mampu memberikan respon yang cepat terhadap perubahan harmonisa dan menghasilkan kualitas arus yang lebih baik dibandingkan metode kontrol konvensional. Namun, penelitian ini masih difokuskan pada sistem tenaga umum

dan belum diterapkan pada sistem PLTS *Off-Grid*. Selain itu, penelitian ini belum mempertimbangkan penggunaan *Filter Pasif* sebagai pendukung untuk meningkatkan efektivitas reduksi harmonisa.

Sementara itu, penelitian skala yang dilakukan oleh G. Ganesan @ Subramanian, Dr. M.K. Mishra, K. Jayaprakash, dan P.J. Sureshababu, pada tahun 2018, berjudul, “***Simulation Study of Hysteresis Current Controlled Single Phase Inverters for Photo Voltaic Systems with Reduced Harmonics Level***” [10]. Dengan tujuan menekan tingkat THD pada sistem fotovoltaiik, mereka menggunakan metode kendali aktif *Hysteresis Current Controlling* (HCC) pada inverter fasa tunggal. Mereka menemukan, bahwa algoritma HCC sangat responsif dan adaptif dalam melacak arus referensi secara *real-time* untuk mengeliminasi distorsi transien sehingga menghasilkan bentuk gelombang sinusoidal murni dengan level harmonisa rendah. Namun, kelemahan dari penelitian ini adalah penerapan sistem penapisan aktif murni memberikan beban kerja pensaklaran frekuensi tinggi yang sangat berat pada sakelar daya IGBT sehingga memicu tingginya rugi-rugi daya (*switching losses*). Di sisi lain, pendekatan mitigasi harmonisa telah berkembang melalui penggunaan *Filter Pasif*, *Filter* aktif, dan kombinasi keduanya yang dikenal sebagai *Hybrid Filter*. *Filter Pasif* sederhana relatif ekonomis tetapi kurang adaptif terhadap variasi beban dan berpotensi menimbulkan resonansi. *Filter* aktif memiliki kemampuan kompensasi dinamis namun kompleksitas kontrol dan biaya relatif lebih tinggi. Oleh karena itu, pendekatan *Hybrid Filter* dipilih untuk menggabungkan kemampuan selektif *Filter Pasif* terhadap harmonisa dominan dan kemampuan adaptif *Filter* aktif dalam mereduksi harmonisa residu. Meskipun demikian, implementasi dan evaluasi *Hybrid Filter* pada sistem PLTS *Off-grid* satu fasa skala kecil masih terbatas dalam literatur nasional.

Selanjutnya penelitian yang dilakukan oleh Meraj Noroozi, Farhad Haghjoo, Hamid Javadi, dan Mohammad Reza Zolghadri pada tahun 2023, berjudul “***Power Quality Improvement in Single-Phase Transformerless Semi-Quasi-Z-Source Inverters for Off-grid Photovoltaic Systems***” [11]. Penelitian ini bertujuan untuk meningkatkan kualitas daya pada sistem PLTS *off-grid* satu fasa melalui

pengembangan metode kompensasi harmonisa berbasis pengendali PI dan PR pada inverter *Semi-Quasi-Z-Source* (SqZSI). Hasil penelitian menunjukkan bahwa metode yang diusulkan mampu menekan komponen DC, mereduksi harmonisa orde kedua, serta menurunkan nilai THDv hingga sekitar 1,27%, sehingga memenuhi persyaratan standar IEEE 519. Namun demikian, penelitian ini lebih berfokus pada optimasi strategi pengendalian inverter tanpa menggunakan *Filter Pasif* maupun *Filter* aktif sebagai media mitigasi harmonisa. Selain itu, penelitian tersebut belum memanfaatkan data pengukuran lapangan sebagai dasar pemodelan sistem sehingga performa metode yang diusulkan belum divalidasi terhadap kondisi operasi PLTS *off-grid* yang sebenarnya.

Penelitian berikutnya dilakukan oleh Mehmet Emin Akdogan, Mohammad Khatibi, dan Sara Ahmed pada tahun 2020, berjudul ***“Control Hardware-in-the-loop for Voltage Controlled Inverters with Unbalanced and Non-linear Loads in Stand-alone Photovoltaic (PV) Islanded Microgrids”*** [12]. Penelitian ini bertujuan untuk meningkatkan kualitas daya pada sistem PLTS *islanded (off-grid)* yang melayani beban tidak seimbang dan beban nonlinier melalui penerapan skema pengendalian hierarkis pada inverter. Hasil penelitian menunjukkan bahwa metode yang diusulkan mampu menurunkan distorsi tegangan di titik PCC dari 6,38% menjadi 1,91% serta meningkatkan kestabilan sistem melalui pengaturan pembagian daya aktif dan reaktif. Meskipun demikian, penelitian ini lebih difokuskan pada strategi pengendalian inverter dan kompensasi tegangan, sehingga belum membahas mitigasi harmonisa arus menggunakan *Filter Pasif* LCL maupun *Active Power Filter* berbasis *Hysteresis Current Control* (HCC). Penelitian tersebut juga belum mengevaluasi penerapan *Filter* hybrid sebagai metode untuk meningkatkan efektivitas reduksi harmonisa pada sistem PLTS *off-grid*.

Penelitian yang dilakukan oleh S. K. Chauhan dan V. S. Chauhan, pada tahun 2024, berjudul ***“A Comprehensive Review on Power Quality Issues and Disturbances Mitigation Through Shunt Active Power Filters”*** [13], Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji berbagai metode mitigasi harmonisa menggunakan *Active Power Filter* (APF) pada sistem tenaga listrik modern. Hasil kajian menunjukkan bahwa APF mampu melakukan kompensasi harmonisa secara

dinamis dan efektif terhadap perubahan beban nonlinier. Selain itu, metode kontrol seperti *Hysteresis Current Control* (HCC) memiliki respon cepat dan akurasi yang baik dalam proses kompensasi harmonisa. Namun, penelitian ini hanya bersifat studi literatur sehingga belum melakukan implementasi langsung pada sistem PLTS maupun pengujian menggunakan data lapangan aktual. Penelitian ini juga belum mengevaluasi kombinasi APF dengan *Filter Pasif* untuk memperoleh performa mitigasi harmonisa yang lebih optimal.

Berdasarkan kajian tersebut, dapat diidentifikasi beberapa kesenjangan penelitian. Pertama, sebagian besar penelitian harmonisa difokuskan pada sistem *grid-connected*, sedangkan sistem *Off-grid* dengan karakteristik impedansi berbeda masih relatif terbatas dikaji. Kedua, penelitian berbasis simulasi belum banyak divalidasi menggunakan data pengukuran lapangan. Ketiga, penelitian berbasis pengukuran umumnya berhenti pada tahap evaluasi tanpa merancang solusi mitigasi teknis.

Dalam konteks penelitian ini, sistem PLTS *Off-grid* yang menjadi objek studi merupakan sistem satu fasa dengan Inverter berkapasitas 2000 VA yang digunakan untuk menyuplai beban hortikultura berupa lampu LED, kipas angin, lemari pendingin dan mesin cup sealler. Karakteristik beban tersebut bersifat kombinasi linier dan *nonlinier*, sehingga berpotensi menghasilkan distorsi harmonisa pada sisi keluaran Inverter. Sebagai sistem mandiri tanpa dukungan impedansi jaringan utilitas, seluruh kualitas tegangan dan arus bergantung pada performa Inverter dan karakteristik interaksi beban. Kondisi ini menjadikan sistem tersebut representatif sebagai model kasus untuk menganalisis fenomena harmonisa sekaligus menguji pendekatan mitigasi melalui *Hybrid Filter* berbasis simulasi

Berdasarkan kajian literatur tersebut, belum ditemukan penelitian yang secara simultan mengintegrasikan pengukuran harmonisa lapangan, kalibrasi model simulasi berbasis data aktual, serta perancangan *Hybrid Filter* pada sistem PLTS *Off-grid* satu fasa skala kecil. Sebagian penelitian berhenti pada tahap evaluasi harmonisa tanpa merancang solusi mitigasi teknis, sementara penelitian lain terbatas pada simulasi numerik tanpa validasi empiris terhadap sistem nyata. Kesenjangan ini menunjukkan perlunya pendekatan integratif yang mampu

menjembatani eksperimen lapangan dan desain mitigasi berbasis simulasi untuk menghasilkan solusi yang lebih representatif dan aplikatif.

Selain melakukan analisis terhadap karakteristik harmonisa pada sistem PLTS *Off-Grid*, penelitian ini juga mempertimbangkan pendekatan mitigasi yang sesuai dengan karakteristik sistem berbasis Inverter skala kecil. Pada sistem PLTS *Off-grid* satu fasa, distorsi harmonisa umumnya muncul akibat proses switching Inverter serta interaksi dengan beban *nonlinier* seperti lampu LED, kipas elektronik, dan peralatan berbasis *switching power supply*. Oleh karena itu, diperlukan metode mitigasi yang mampu mereduksi harmonisa secara efektif tanpa menambah kompleksitas sistem yang lebih baik dalam mereduksi komponen harmonisa frekuensi tinggi dibandingkan *Filter LC* konvensional karena adanya tambahan induktor pada sisi jaringan yang berfungsi meningkatkan karakteristik peredaman pada frekuensi switching Inverter. Selain itu, *LCL Filter* juga memungkinkan penggunaan nilai induktansi yang lebih kecil sehingga dapat mengurangi ukuran dan rugi-rugi daya pada sistem. Beberapa penelitian menunjukkan bahwa *LCL Filter* efektif digunakan pada sistem konverter berbasis Inverter untuk mereduksi harmonisa switching serta meningkatkan kualitas gelombang tegangan dan arus pada titik keluaran sistem tenaga [14] .

Meskipun demikian, penggunaan *Filter Pasif* saja sering kali tidak mampu mereduksi seluruh komponen harmonisa secara optimal, terutama pada kondisi beban yang berubah-ubah. *Filter Pasif* juga berpotensi menimbulkan fenomena resonansi apabila karakteristik impedansi sistem berubah. Oleh karena itu, diperlukan pendekatan tambahan yang mampu beradaptasi terhadap variasi kondisi operasi sistem. Dalam konteks ini, *Active Power Filter (APF)* menjadi solusi yang banyak digunakan karena mampu menghasilkan arus kompensasi secara dinamis untuk menghilangkan komponen harmonisa pada sistem tenaga listrik.

Untuk mengendalikan operasi APF, berbagai metode kontrol telah dikembangkan, seperti metode teori daya instan (*p-q theory*), *synchronous reference frame* (SRF), serta metode HCC. Di antara berbagai metode tersebut, *Hysteresis Current Control* dipilih dalam penelitian ini karena memiliki beberapa keunggulan utama, yaitu struktur kontrol yang relatif sederhana, respon dinamis

yang cepat, serta kemampuan mempertahankan arus kompensasi agar tetap mengikuti arus referensi dalam batas pita histeresis yang telah ditentukan. Karakteristik ini membuat metode HCC sangat sesuai untuk aplikasi mitigasi harmonisa pada sistem tenaga skala kecil berbasis Inverter, termasuk pada sistem PLTS *Off-grid* satu fasa [15].

Dengan demikian, penelitian ini penting untuk dilakukan karena mengintegrasikan pengukuran harmonisa lapangan dengan perancangan mitigasi melalui simulasi *Hybrid Filter* menggunakan *MATLAB/Simulink*. Dengan mengombinasikan LCL *Filter* sebagai *Filter Pasif* dan *Active Power Filter* dengan kontrol *Hysteresis Current Control*, diharapkan sistem *Hybrid Filter* yang dirancang mampu mereduksi harmonisa secara lebih efektif dibandingkan penggunaan satu metode *Filter* saja. LCL *Filter* berfungsi mereduksi komponen harmonisa frekuensi tinggi yang dihasilkan oleh *switching inverter*, sedangkan APF dengan kontrol HCC berperan dalam mengkompensasi komponen harmonisa yang berasal dari beban *nonlinier* maupun residu harmonisa yang tidak dapat disaring secara optimal oleh *Filter Pasif*. Pendekatan kombinasi ini diharapkan mampu meningkatkan kualitas daya pada sistem PLTS *Off-grid* sehingga nilai distorsi harmonisa tegangan dan arus dapat ditekan hingga memenuhi batas standar yang direkomendasikan oleh IEEE 519-2022.

1.2 Rumusan masalah

1. Berapa nilai THD_v, THD_i serta spektrum harmonisa dominan pada keluaran Inverter PLTS *Off-grid* berdasarkan beban aktual di lokasi penelitian?
2. Bagaimana merancang dan memodelkan *Hybrid Filter* (kombinasi *Filter Pasif* dan aktif) yang sesuai dengan karakteristik harmonisa hasil pengukuran lapangan melalui simulasi *MATLAB/Simulink*
3. Seberapa efektif *Hybrid Filter* yang dirancang dalam mereduksi harmonisa arus (THD_i) berdasarkan simulasi, serta apakah hasil reduksi memenuhi standar IEEE 519-2022?

1.3 Tujuan penelitian

1. Mengukur dan menganalisis nilai *Total Harmonic Distortion* tegangan (THDv), *Total Harmonic Distortion* arus (THDi), serta mengidentifikasi spektrum dan orde harmonisa dominan pada keluaran Inverter sistem PLTS *off-grid* berdasarkan kondisi beban aktual di lokasi penelitian.
2. Merancang dan memodelkan *Hybrid Filter* (kombinasi *Filter Pasif* dan aktif) yang disesuaikan dengan karakteristik harmonisa hasil pengukuran lapangan melalui simulasi menggunakan *MATLAB/Simulink*.
3. Mengevaluasi efektivitas *Hybrid Filter* yang dirancang dalam mengevaluasi efektivitas *Hybrid Filter* dalam mereduksi harmonisa arus (THDi) melalui analisis komparatif sebelum dan sesudah mitigasi, serta menilai kesesuaiannya terhadap batas standar IEEE 519-2022.

1.4 Batasan masalah

1. Sistem yang dianalisis adalah sistem PLTS *Off-grid* 1 kWp satu fasa dengan Inverter berkapasitas 2000 VA yang digunakan untuk menyuplai beban kombinasi linier dan *nonlinier*.
2. *Filter Hybrid* terdiri dari *Filter Pasif* yang digunakan adalah LCL *Filter*, dan *Filter* aktif yang digunakan *hysteresis controller*.
3. Parameter kualitas daya yang dianalisis terbatas yaitu *Total Harmonic Distortion* tegangan (THDv) dan *Total Harmonic Distortion* arus (THDi), serta spektrum harmonisa sebagai dasar identifikasi orde dominan.
4. Pengukuran Total Harmonic Distortion (THD) dilakukan pada sisi keluaran inverter (*output AC*) secara keseluruhan untuk merepresentasikan kondisi sistem secara operasional. Analisis tidak dilakukan secara terpisah pada masing-masing beban, sehingga hasil yang diperoleh mencerminkan kontribusi gabungan dari seluruh beban yang terhubung.
5. Perancangan mitigasi dilakukan melalui pendekatan simulasi menggunakan *MATLAB/Simulink*, tanpa implementasi fisik *Hybrid Filter* pada sistem nyata.
6. Model simulasi *Hybrid Filter* dikembangkan berdasarkan parameter hasil

pengukuran lapangan, namun tidak mencakup pengembangan algoritma kontrol tingkat lanjut seperti teori daya instan ($p-q$ theory) atau kontrol berbasis referensi sinkron secara kompleks.

7. Evaluasi efektivitas mitigasi dilakukan dengan membandingkan nilai THD_v dan THD_i sebelum dan sesudah penerapan *Hybrid Filter* dalam simulasi, serta dibandingkan terhadap batas standar IEEE 519-2022.
8. Model *MATLAB/Simulink* dikembangkan menggunakan pendekatan injeksi data lapangan melalui *block From Workspace* sehingga tidak merepresentasikan keseluruhan model fisik sistem PLTS aktual.
9. Tidak membahas faktor daya, fluktuasi tegangan, variasi beban, rugi-rugi tegangan dan daya pada sistem, stabilitas tegangan dan keandalan, serta aspek ekonomi dan teknis.

1.5 Manfaat penelitian

Penelitian ini diharapkan memberikan manfaat sebagai berikut:

a. Manfaat Teoritis

1. Memberikan kontribusi dalam pengembangan kajian kualitas daya pada sistem PLTS *Off-grid* satu fasa, terkait analisis dan mitigasi distorsi harmonisa
2. Menyediakan pendekatan metodologis integratif antara pengukuran lapangan dan pemodelan simulasi berbasis *MATLAB/Simulink* dalam perancangan *Hybrid Filter*
3. Menjadi referensi akademik bagi penelitian selanjutnya yang mengkaji penerapan *Hybrid Filter* pada sistem energi terbarukan berbasis Inverter

b. Manfaat praktis

1. Memberikan rekomendasi teknis mengenai perancangan *Hybrid Filter* yang dapat digunakan sebagai acuan dalam peningkatan kualitas daya pada sistem PLTS *Off-grid*.
2. Membantu praktisi dan pengelola sistem PLTS dalam memahami karakteristik harmonisa sistem serta potensi solusi mitigasi yang

dapat diterapkan.

3. Menyediakan dasar evaluasi kesesuaian sistem terhadap standar IEEE 519-2022 sebagai pedoman peningkatan keandalan dan keamanan operasional sistem.

1.6 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan dalam tugas akhir ini disusun secara terstruktur untuk memberikan gambaran yang jelas mengenai alur pembahasan penelitian yang dilakukan. Berdasarkan isi proposal yang telah disusun, penulisan tugas akhir ini dibagi ke dalam beberapa bab sebagai berikut:

BAB I PENDAHULUAN

Bab ini berisi latar belakang penelitian yang menjelaskan pentingnya analisis kualitas daya pada sistem PLTS *Off-Grid*, khususnya terkait permasalahan harmonisa akibat penggunaan inverter dan beban non-linear. Selain itu, pada bab ini juga diuraikan rumusan masalah, tujuan penelitian, batasan masalah, manfaat penelitian, serta sistematika penulisan tugas akhir.

BAB II LANDASAN TEORI

Bab ini membahas teori-teori yang mendukung penelitian, meliputi konsep dasar sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS), inverter dalam sistem tenaga, kualitas daya listrik, serta fenomena harmonisa pada sistem tenaga listrik. Selain itu, dibahas pula standar harmonisa berdasarkan IEEE 519-2022, metode mitigasi harmonisa, serta konsep dan karakteristik *Filter Pasif*, *Filter aktif*, dan *hybrid Filter*. Pada bagian akhir bab ini juga dijelaskan penggunaan *MATLAB/Simulink* dalam analisis sistem tenaga dan simulasi harmonisa.

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Bab ini menjelaskan tahapan penelitian yang dilakukan secara sistematis, mulai dari desain penelitian, lokasi dan objek penelitian, hingga peralatan yang digunakan dalam pengukuran. Selanjutnya dijelaskan konfigurasi sistem PLTS *Off-grid* yang

dianalisis, metode pengukuran harmonisa pada titik *Point of Common Coupling* (PCC), serta proses pemodelan sistem menggunakan *MATLAB/Simulink*.

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab ini menyajikan hasil pengukuran dan simulasi yang telah dilakukan, meliputi analisis karakteristik harmonisa pada sistem PLTS *Off-grid* sebelum dan sesudah penerapan metode mitigasi. Pembahasan difokuskan pada nilai *Total Harmonic Distortion* tegangan (THDv) dan arus (THDi), spektrum harmonisa dan orde dominan, perbandingan performa sistem pada beberapa skenario (tanpa *Filter*, dengan LCL *Filter*, dengan APF, dan dengan *hybrid Filter*), evaluasi efektivitas *hybrid Filter* dalam mereduksi harmonisa berdasarkan standar IEEE 519-2022. Analisis dilakukan menggunakan metode *Fast Fourier Transform* (FFT) pada *MATLAB/Simulink*.

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

Bab ini berisi kesimpulan yang diperoleh dari hasil penelitian berdasarkan analisis yang telah dilakukan, serta menjawab rumusan masalah yang telah ditetapkan. Selain itu, disampaikan pula saran yang dapat digunakan sebagai pengembangan penelitian selanjutnya, khususnya dalam bidang mitigasi harmonisa pada sistem PLTS berbasis inverter.