BAB I
PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Untuk menunjang kebutuhan energi dalam kegiatan minyak dan gas saat ini, anjungan lepas pantai masih bergantung pada bahan bakar fosil seperti minyak diesel dan gas alam, secara signifikan ketergantungan ini berkontribusi terhadap meningkatnya emisi gas rumah kaca (Chudy-Laskowska & Pisula, 2022). Walaupun sistem energi konvensional ini dapat diandalkan untuk mendukung operasi, ketergantungan pada bahan bakar fosil tidak akan menjadi solusi yang berkelanjutan dalam jangka panjang. Pemanfaatan bahan bakar fosil konvensional yang berlebihan untuk pembangkitan energi adalah penyebab utama pemanasan global dan menipisnya sumber daya alam (Khurshid et al., 2024). Sampai saat ini pembangkit listrik yang masih digunakan pada anjungan minyak dan gas lepas pantai *(oil and gas offshore platform)* adalah Closed Cycle Vapor Turbogenerator (CCVT), seperti yang ditunjukkan pada gambar 1.1, pembangkit listrik ini menggunakan gas alam *(Natural Gas)* sebagai bahan bakarnya, dengan konsumsi gas alam 8.8 m3/jam dan beroperasi secara kontiniu selama 24 jam perhari. Sedangkan sebagai pembangkit listrik cadangannya *(backup power)* saat ini menggunakan Diesel Engine Generator (DEG) seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1.2, pembangkit listrik ini sesuai namanya menggunakan minyak diesel sebagai bahan bakarnya, dengan konsumsi minyak diesel 3.8 Liter/jam, ke-dua pembangkit listrik tersebut diatas menyediakan daya untuk beban instrumentasi, telekomunikasi, penerangan darurat, serta sistem alat bantu navigasi pada anjungan minyak dan gas lepas pantai tanpa awak *(un-man)*.



Gambar 1.1. *Closed Cycle Vapor Turbogenerator (CCVT)*
Source: https://www.bpe.com.my/products/ccvt/

Selain dari tingginya biaya operasional dan perawatan *(maintenance),* biaya transportasi laut atau logistik *(sea transportation or logistic)* dari *Jetty onshore* menuju *offshore platform* dapat ditempuh dalam kurun waktu 2-3 jam, jika cuaca dalam keadaan baik (tidak terjadi badai di laut). Meminimalkan kunjungan dan pekerjaan di platform setiap hari sangat membantu dalam pengurangan biaya operasional, hal ini dapat diwujudkan dengan pemilihan dan penggunaan teknologi pembangkit listrik sistem hybrid yang andal pada offshore platform minyak dan gas, sehingga pemantauan dan pengendalian *(monitor & remote)* sistem pembangkit listrik hybrid masih dapat dilakukan dari ruang kontrol *(control room)* yang berada di darat *(onshore)* sehingga dapat mengurangi perjalanan dan kunjungan ke platform.

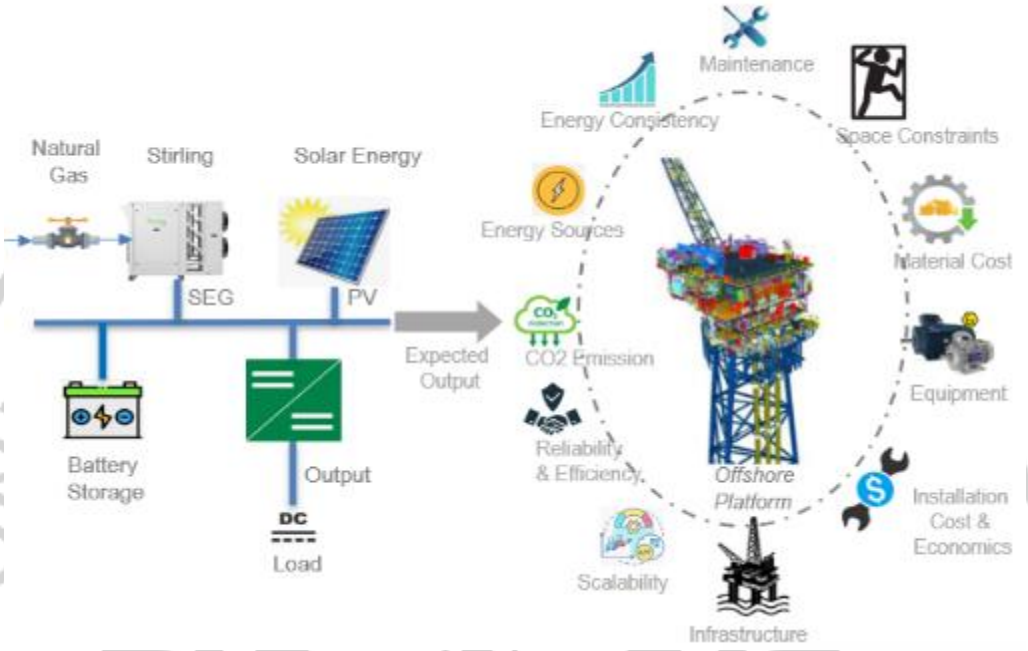


Gambar 1.2. *Diesel Engine Generator (DEG)*
(Source: https://www.denyo.co.jp/english/dl/support/pdf/global-dca-three.pdf 1 May 2026)

Transisi energi fosil ke sumber energi terbarukan sebagai sumber energi berkelanjutan menjadi penting untuk mengatasi dampak negatif ter hadap lingkungan dan perubahan iklim serta memenuhi tujuan 1.5 °C (Halkos & Gkampoura, 2020). Sumber daya energi terbarukan, merupakan pembawa energi penting bagi keberlanjutan energi dimasa depan (Oyekale et al., 2020). Pada penelitian lain, Osayi mengusulkan integrasi sistem energi terbarukan pada operasi minyak dan gas lepas pantai sangat penting untuk menurunkan dampak terhadap lingkungan, meningkatkan efisiensi energi, serta memastikan keberlanjutan energi jangka panjang (Igbinenikaro et al., 2024).

Beberapa pendekatan yang telah diusulkan, termasuk penggunaan energi terbarukan di lepas pantai dengan menggunakan infrasrtuktur yang ada, sehingga dapat secara signifikan

mengurangi biaya produksi berbasis minyak (Solomin et al., 2019), seperti penggabungan panel surya (PV) dengan turbin angin pada anjungan minyak dan gas lepas pantai, dengan mempertimbangkan perkembangan teknologi dan konsekuensinya (Zereshkian & Mansoury, 2023).



Gambar 1.3. Titik penilaian dan evaluasi
(Hilmi et al., 2024)

Konfigurasi pembangkit listrik sistem hibrida seperti di tunjukkan pada Gambar 1.3, menggunakan energi terbarukan yang berkelanjutan seperti PV, turbin angin, generator (Bošnjaković et al., 2023), (Kiamansouri & Branch, 2025) dan batterai pada platform lepas pantai secara signifikan dapat mengurangi emisi karbon dioksida (CO2) dan pemanasan global serta meningkatkan efisiensi energi (Razmjoo et al., 2021). Meskipun energi terbarukan adalah metode yang paling andal untuk menghasilkan listrik, keterbatasan lahan dapat menghalangi pemasangan panel surya (PV) (He et al., 2023), sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 1.4.



Gambar 1.4. Panel Surya
Source: https://www.automaticpower.com/pharos-solutions/remote-power

Mesin stirling yang diciptakan oleh Robert Stirling pada tahun 1816, muncul sebagai solusi yang menjanjikan untuk masalah energi masa kini, prinsip dasar mesin pembakaran eksternal ini adalah memanfaatkan kerja perpindahan panas bersama dengan ekspansi dan kontraksi gas, sangat fleksibel karena dapat mengubah berbagai sumber energi alam, seperti gas dan radiasi matahari, menjadi energi mekanik dan listrik, teknologi ini masih belum banyak dibahas (Luo, 2024). Pada Gambar 1.5 menunjukkan wujud dari Stirling Engine Generator, di produksi oleh *qnergy*, yang memiliki kelebihan irit bahan bakar dan menghasilkan emisi yang sangat rendah.



Gambar 1.5. *Stirling Engine Generator*
Source: www.qnergy.com

Studi ini menunjukkan bahwa kombinasi teknologi fotovoltaik (PV) dan stirling engine generator (SEG) memiliki potensi yang signifikan untuk meningkatkan efisiensi energi dan mengurangi jejak karbon, juga memberikan solusi energi yang lebih berkelanjutan dalam konteks operasi lepas pantai, sebab energi yang andal dan efisien sangat penting untuk menjaga kelancaran proses produksi (Hilmi et al., 2024). Analisis harus dilakukan mengenai

teknologi dan material yang lebih ramah lingkungan, serta estimasi penggunaan area berdasarkan data kapasitas pembangkit listrik yang akan dipasang pada platform lepas pantai (Bošnjaković et al., 2023), produksi energi dari sumber terbarukan berdampak ekonomi positif dalam jangka panjang, dengan kontribusi yang besarnya bervariasi (Candra et al., 2023).

Meskipun prospeknya menjanjikan, integrasi PV dan SEG kemungkinan akan menghadapi masalah teknis dilingkungan lepas pantai dengan kondisi cuaca yang tidak stabil. Untuk mencapai produksi dan distribusi listrik yang optimal, perlu dipastikan sistem kinerja yang efisien, andal dan efektivitas biaya dalam berbagai tantangan operasi dan sistem pemeliharaannya (Uhanto et al., 2024).

Penelitian ini bertujuan untuk memperkenalkan sekaligus menguji sistem pembangkit listrik *hybrid* yang mengintegrasikan PV dan SEG. Sistem tersebut diharapkan mampu meningkatkan efisiensi dan keandalan serta menurunkan biaya operasional karena permintaan bahan bakar fosil berkurang dan perawatan yang lebih sedikit dibandingkan dengan sistem konvensional (Uhanto et al., 2024). Gambar 1.3 menunjukkan secara ilustrasi rencana kombinasi teknologi yang diharapkan mampu meningkatkan efisiensi energi dan menurunkan jejak karbon dari operasi minyak dan gas lepas pantai (Yasemi et al., 2023).

Sistem energi terbarukan hybrid yang berdiri sendiri untuk menyediakan listrik keberlanjutan di area platform lepas pantai sebagai cara yang tepat untuk memasok listrik di daerah-daerah terpencil diluar jaringan listrik konvensional (Yimen et al., 2020). Pembangkit sistem *hybrid* ini memungkinkan integrasi PV dan SEG sebagai solusi strategis untuk keberlanjutan energi di sektor minyak dan gas, mengatasi tantangan ekonomi dan lingkungan saat ini (Adami & Schiavon, 2021). Sistem hybrid yang menggabungkan generator stirling (SEG) dan fotovoltaik (PV) menawarkan solusi yang efisien dan berkelanjutan untuk memenuhi peraturan emisi. Sistem ini memiliki kemampuan untuk mengurangi jumlah gas alam yang dikonsumsi dan menurunkan biaya perawatan, membuatnya pilihan yang lebih hemat biaya dibandingkan dengan metode konvensional (Jiménez-García et al., 2023).

Sebaliknya, terdapat kelemahan dalam penelitian ini berkaitan dengan penerapan teknologi hybrid ini di lingkungan operasi minyak dan gas lepas pantai, khususnya dalam hal evaluasi

kinerja jangka panjangnya. Penelitian ini bertujuan untuk memahami bagaimana sistem hybrid SEG dan PV dapat mengurangi konsumsi energi dan emisi karbon, dan juga untuk menemukan keuntungan teknis dan ekonomi dari penerapan sistem ini (Madaleno & Nogueira, 2023). Penelitian ini unik karena memanfaatkan pendekatan integratif yang belum banyak digunakan di industri minyak dan gas, yang fokus pada energi keberlanjutan dan penghematan biaya, mengurangi ketergantungan pada penggunaan energi fosil dan memanfaatkan energi terbarukan yang dapat menjadikan solusi jangka panjang serta ramah lingkungan (Faturachman et al., 2021).

1.2. Rumusan Masalah

Operasi platform lepas pantai yang masih memiliki ketergantungan pada bahan bakar fosil, seperti minyak diesel dan gas alam, untuk menunjang operasinya, dampaknya sangat signifikan terhadap gas rumah kaca dan masalah lingkungan global.

Perjanjian Paris *(Paris Agreement)* 2015 dan Protokol Kyoto *(Kyoto Protocol)* 2019 sebagai kebijakan internasional agar negara-negara didunia ini mematuhi aturan untuk menurunkan emisi gas rumah kaca dan meningkatkan energi efisiensi pada sektor industrinya, sebagai solusi energi berkelanjutan yang dapat memenuhi kebutuhan operasional. Berdasarkan aturan tersebut kita membutuhkan solusi energi berkelanjutan agar dapat memenuhi kebutuhan operasiaonal yang andal dan efisien.

Mengintegrasikan teknologi fotovoltaik (PV) dan Striling Engine Generator (SEG) adalah suatu potensi teknologi baru untuk menggantikan DEG dengan PV, dan CCVT yang sudah usang *(obsolete)* dengan SEG, untuk meningkatkani efisiensi energi dan dapat mengurangi jejak karbon, tetapi sistem pembangkit ini juga akan memiliki tantangan teknis dilingkungan operasi minyak dan gas lepas pantai.

Berikut adalah perumusan masalah yang akan menjadi tantangan dalam penelitian ini:

1. Bagaimana menemukan cara untuk mengurangi ketergantungan bahan bakar fosil pada operasi lepas pantai yang memberikan konstribusi terhadap emisi gas rumah kaca serta berdampak pada lingkungan global?
2. Apa saja hal-hal yang menjadi tantangan teknis dalam integrasi sistem PV-Stirling untuk mendapatkan keandalan dan efisiensi operasional area lepas pantai?

3. Sejauh mana sistem hybrid PV-Stirling dapat menurunkan konsumsi bahan bakar fosil serta biaya operasional dan perawatan *(maintenance)*, agar dapat menjadi alternatif solusi teknologi yang menjajikan untuk keberlanjutan energi di sektor minyak dan gas?

1.3. Tujuan Penelitian

Penelitian ini bertujuan sebagai berikut:

1. Mengkaji tantangan teknis dalam mendesain sistem hybrid PV-Stirling dilingkungan lepas pantai.
2. Menganalisa potensi sistem hybrid tersebut:
    a. Meningkatkan efisiensi energi.
    b. Mengurangi emisi karbon.
3. Menilai manfaat ekonomi dari sistem hybrid PV-Stirling, meliputi:
    c. Pengurangan biaya operasional.
    d. Penurunan penggunaan bahan bakar

1.4. Batasan Masalah

Penelitian ini selain melakukan perhitungan manual juga akan menggunakan prangkat lunak PVsyst untuk melakukan simulasi dan perhitungan sistem hybrid yang mengintegrasikan teknologi fotovoltaik (PV) dan Stirling Engine Generator (SEG) dalam konteks operasi minyak dan gas lepas pantai.

Fokus penelitian ini adalah pada analisis desain pembangkit listrik hybrid tenaga surya dan stirling pada operasi minyak dan gas lepas pantai, termasuk perbandingan output energi dan pengurangan emisi karbon dengan sistem konvensional yang bergantung pada bahan bakar fosil. Selain itu, penelitian ini akan mencakup pemetaan kinerja sistem PV dan SEG berdasarkan data simulasi dari PVsyst dan sedikit menyinggung masalah ke-ekonomian tanpa mempertimbangkan faktor eksternal seperti dampak sosial yang lebih luas.

Rinciannya adalah sebagai berikut:

1. Penelitian ini hanya menganalisis desain pembangkit listrik system Hybrid PV-Stirling dengan baterai (system penyimpanan energi).

2. Lokasi penelitian dibatasi di offshore platform XXX-X, PT. XXX Kalimantan Timur, dengan koordinat dan kondisi iklim mengacu pada data NASA dan dipilih hanya 1 lokasi.
3. Kapasitas sistem PV dibatasi hanya 5x350 Wp dan kapasitas SEG 5.6 kVA.
4. Jenis sistem off grid, dan profil beban hanya 590 W / 24 VDC.
5. Perangkat yang di analisis modul PV, Stirling, dan baterai, tidak membahas detail structure, proteksi, kabel, control system dan telekomunikasi.
6. Bagian yang di kaji hanya teknis saja, atau teknis dan ekonomi, tanpa analisis lingkungan, sosial dan kebijakan.
7. Metode perhitungan/simulasi hanya menggunakan software PVsyst. Tidak membandingkan banyak software.
8. Analisis yang dilakukan difokuskan pada aspek teknis dan energi, yang meliputi potensi energi Listrik yang dihasilkan , sesuai dengan profil beban platform.
9. Analisis ekonomi hanya sebatas indicator sederhana (Material Take Off, ROI, BEP) dan tidak membahas aspek pembiayaan detail maupun skema bisnis.

1.5. Manfaat Penelitian

1.5.1. Manfaat Akademik

a. Meningkatkan keberadaan literatur ilmiah dalam bidang energi terbarukan, khususnya integrasi pembangkit listrik sistem hybrid fotovoltaik (PV) dan Stirling Engine Generator (SEG) untuk diaplikasikan di platform minyak dan gas lepas pantai.
b. Menjadikan dasar pengembangan studi lebih lanjut terkait pemanfaatan sistem hybrid PV-SEG di area terpencil (remote area) dan ekstrim.

1.5.2. Manfaat Akademik Praktis

a. Menyediakan solusi teknis yang bersifat aplikatif dalam rencana penggantian pembangkit listrik Close Cycle Vapor Turbo-generator (CCVT) yang sudah usang (obsolete) dengan Stirling Engine Generator (SEG), yang memiliki rendah emisi dan hemat konsumsi gas alam di platform lepas pantai.
b. Memberikan solusi potensial dalam mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil, dengan penggantian pembangkit listrik Diesel Engine Generator (DEG) dengan solar panel (PV) di platform minyak dan gas lepas pantai.

c. Menawarkan pembangkit listrik alternatif sistem hybrid SEG-PV yang lebih efisien, bersih dan keberlanjutan untuk mendukung operasi industri migas.

1.5.3. Manfaat Lingkungan

a. Mendukung upaya dekarbonisasi pada sektor energi dengan menurunkan gas emisi rumah kaca dari sumber energi fosil.
b. Meningkatkan pemanfaatan energi terbarukan disektor industri strategis nasional.

1.6. *Research Gap* dan *Novelty*

Research Gap (masalah yang belum terjawab): Penelitian sebelumnya membahas pembangkit listrik sistem hybrid yang mengintegrasikan panel surya dengan *diesel engine generator*, panel surya dengan *wind turbine*, panel surya dengan thermoelectric generator dan panel surya dengan biomass, tetapi belum banyak yang mengkaji sistem *hybrid* panel surya dengan *stirling engine generator* dan belum fokus pada aplikasi *offshore oil and gas platform*. *Novelty* (solusi atau kebaruan yang ditawarkan): Penelitian ini mengkaji Analisis Desain Pembangkit Listrik Hybrid Tenaga Surya Dan Stirling Pada Anjungan Minyak Dan Gas Lepas Pantai, menggunakan pendekatan yang belum pernah digunakan sebelumnya.

Tabel 1.1 Riset-riset sebelumnya

No.	Peneliti & Tahun	Judul Penelitian	Hasil Penelitian	Gap Penelitian
1	(Al Badwawi et al., 2015)	Review sistem hybrid PV dan Angin	PV monocrystalline memiliki efisiensi yang tinggi dan berumur panjang	Memerlukan optimasi biaya produksi dan pengembangan material PV yang baru
2	(Khurshid et al., 2024)	Hybrid renewable offshore (surya, angin, gelom-bang)	Sistem hybrid offshore hemat biaya dan ramah lingkungan	Implementasi praktis offshore dan maintenance masih terbatas

3	(Dong et al., 2021)	Hybrid solar thermal-Stirling-TEG	Sistem dapat menghasilkan efisiensi listrik 43,6 %.	Belum membahas integrasi dengan sistem offshore dan energi hybrid
4	(Hilmi et al., 2024)	Energy hybrid offshore berbasis TEG, PV, dan Angin	Meningkatkan reliability dan efisiensi energy	TEG masih meng-konsumsi natural gas secara kontiniu sehingga emisi masih tinggi
5	(León Gómez et al., 2023)	Review of Hybrid Renewable Energy Systems (HRES) dan Battery optimization	Battery efektif menjaga keseimb-angan energy sistem hybrid	Belum fokus pada aplikasi offshore oil and gas platform
6	(Sabat et al., 2015)	Hybrid Solar- Wind dengan MPPT optimization	Output dan efisiensi meningkat	Tidak membahas aspek ekonomi dan offshore environment
7	(Emam et al., 2025)	Hybrid PV-biomass-battery off-grid	Menurunkan biaya energi dari 0.154 menjadi 0.142 USD/kWh	Skalabilitas untuk sistem hybrid kompleks masih terbatas

Tabel 1.1 Riset-riset sebelumnya (lanjutan)

No.	**Peneliti & Tahun**	**Judul Penelitian**	**Hasil Penelitian**	**Gap Penelitian**
8	(Yimen et al., 2020)	Hybrid Renewable Energy Systems PV/WT/Battery/ Diesel	Sistem ini berhasil memasok listrik ke area terpencil dan terisolasi (darat)	Sistem hybrid ini masih mengkonsum si minyak diesel untuk generator

Penelitian (Al Badwawi et al., 2015) ini menyoroti kemajuan signifikan teknologi fotovoltaik surya (PV) jenis Silikon Monokristal (Mono-Si), sel-sel ini terbuat dari satu kristal silikon dan telah mencapai efisiensi 16% hingga 19.8%, dengan beberpa sel monokristalin mencapai 24.4%, mereka dikenal karena umur panjang dan biaya pemasangan yang rendah, sedangkan jenis polikristalin efisiensi produksinya 14% hingga 17%.

Sementara efisiensi silikon multikristalin telah meningkat secara signifikan, ada kebutuhan untuk lebih mengoptimal kan Penelitian sebelumnya dilakukan oleh (Khurshid et al., 2024) membuktikan sistem energi hibrida surya-angin dan gelombang di lepas pantai menawarkan solusi hemat biaya dan ramah lingkungan untuk pasokan listrik berkelanjutan di daerah terpencil. Kurangnya pengembangan dalam aplikasi praktis, estimasi biaya yang sebenarnya, dan studi instalasi dan pemeliharaan untuk sistem energi terbarukan hibrida lepas pantai, menjadikan pekerjaan ini sering berfokus pada potensi energi terbarukan daripada estimasi biaya, terutama mengenai implementasi praktis dan kombinasi hibrida yang kurang dieksplorasi.

Penelitian (Dong et al., 2021) menganalisa tentang sistem energi hibrida baru yang mengintegrasikan kolektor termal surya, mesin Stirling, dan generator termoelektrik, kinerja sistem keseluruhan, sitem hibrida menghasilkan listrik 43,6%, kontribusi komponen mesin stirling menyumbang 75,6% dari energi listrik, energi thermal menghasilkan 2,96 kW energi panas / jam. Sistem dengan efisiensi yang lebih tinggi sering menggabungkan sel bahan bakar. Oleh karena itu, mengintegrasikan sel bahan bakar ke dalam sistem energi yang diusulkan disarankan sebagai topik yang menarik untuk studi masa depan.

Penelitian (Hilmi et al., 2024) menganalisa sistem hibrida Thermoelectric Generator (TEG), photovoltaic (PV) panels, and wind turbines untuk meningkatkan keandalan dan efisiensi sistem energi terbarukan serta mengoptimal kan sistem pemeliharaan dan mengurangi biaya operasional. Di sisi lain TEG yang di operasikan secara kontiniu masih mengkonsumsi bahan bakar fosil, gas alam (*natural gas*) 8.8 m3/day/unit atau total 44 m3/day untuk 5 (lima) units THEG.

Penelitian (León Gómez et al., 2023) menganalisis 38 artikel yang diterbitkan antara 2018 dan 2023 secara mendalam menginvestigasi Hybrid Renewable Energy Sustainability (HRES) merupakan alternatif yang layak untuk catu daya, dan pengoptimalannya membutuhkan kombinasi biaya dan efisiensi yang seimbang. Teknologi Battery Energy System Storage (BESS) sangat bermanfaat untuk mengelola keseimbangan energi dalam jaringan mikro, meskipun

mengembangkan BESS yang efisien untuk aplikasi microgrid tetap menjadi tantangan, penelitian ini memberikan tinjauan literatur yang komprehensif dan analisis statistik sistem energi terbarukan hibrida (HRES), dengan fokus pada arsitektur, sistem baterai, dan teknik pengoptimalannya.

Penelitian (Sabat et al., 2015) ini berfokus pada desain dan simulasi sistem tenaga surya angin hibrida, menekankan penggunaan algoritma Pelacakan titik daya maksimum (MPPT) Perturb and Observe (P&O) yang telah ditingkatkan. Studi ini menyajikan beberapa temuan utama dan mengatasi tantangan yang ada di lapangan, evaluasi analitik mengkonfirmasi bahwa metode IP&O memberikan ketersediaan daya yang lebih tinggi pada berbagai tingkat dan suhu radiasi dibandingkan dengan metode P&O konvensional. Misalnya, pada radiasi 1000 W/Cm², efisiensi meningkat dari 89,84% dengan P&O menjadi 94,32% dengan IP&O. Algoritma P&O konvensional berjuang untuk dengan cepat memperoleh titik daya maksimum (MPP) dan kurang akurasi dalam kondisi cuaca yang berubah, mereka berkinerja buruk di bawah perubahan kecepatan angin yang tiba-tiba, terutama selama perlambatan, karena waktu respons yang lambat.

Penelitian (Emam et al., 2025) ini menyajikan desain dan integrasi yang dioptimalkan dari sistem energi hibrida baterai PV-biomassa surya off-grid, yang berhasil mengurangi biaya Total Biaya Energi (TEC) untuk sistem hibrida secara signifikan dari 0,154 $/kWh menjadi 0,142 $/kWh. biaya. Terlepas dari kemajuan yang signifikan, penelitian ini mengakui keterbatasan tertentu dan mengusulkan arah penelitian di masa depan untuk lebih memperkuat pendekatan pola pembangkit energi terbarukan yang stabil, skalabilitas metode ke sistem hibrida yang lebih besar dan lebih kompleks, biaya produksi dan menerapkan bahan silikon baru untuk memastikan dampak besar di sektor tenaga.

Penelitian oleh (Yimen et al., 2020) menyoroti sistem energi hibrida PV/angin/baterai/ diesel, yang menyediakan solusi berbiaya rendah dan ramah lingkungan untuk pasokan listrik berkelanjutan di pedesaan Afrika sub-Sahara, berfungsi sebagai alternatif yang layak untuk metode elektrifikasi, serta dapat mengurangi CO2 85 ton/tahun dari 102 ton/tahun dibanding diesel generator. Di sisi lain, penggunaan diesel generator masih membutuhkan biaya O&M dan fuel cost 7,077 dan 77,574 USD/year.

(Muller et al., 2023) dalam penelitiannya menggunakan perangkat lunak Optimasi Hibrida Sumber Daya Energi Ganda (HOMER) menggunakan perangkat lunak Hybrid Optimization

of Multiple Energy Resources (HOMER) mengidentifikasi konfigurasi sistem yang paling hemat biaya untuk array fotovoltaik (PV) 3007 kW, dua turbin angin 1,5 MW, dan konverter 1927 kW. Kombinasi panel surya dan turbin angin menjadi pilihan yang paling ekonomis untuk pembangkit listrik, total produksi listrik per tahun 41,5% dari sumber terbarukan (terdiri dari energi matahari 19% dan angin 22,5%), serta pengurangan emisi CO2 42.4% atau 3,686.4 ton/tahun. Kesenjangan penelitian yang diidentifikasi menekankan perlunya studi yang lebih spesifik dan disesuaikan secara geografis dan validasi temuan yang ada untuk lebih mempercepat adopsi solusi energi terbarukan.

Berdasarkan penelitian-penelitian di atas, maka dapat dipilih jenis desain pembangkit listrik sistem hibrida yang baik dengan menggunakan fotovoltaik (PV) jenis monokristalin yang memiliki efisiensi mencapai 24.4% serta memiliki umur panjang dan diintegrasikan dengan stirling engine generator (SEG) yang berkontribusi dan dapat menyumbang 75,6% energi listrik, walaupun masih menggunakan *fossil fuel* (*natural gas*/gas alam) tetapi menghasilkan residu pembakaran yang lebih bersih dibandingkn dengan *diesel fuel* (minyak diesel), dan gas alam ini sudah tersedia dan siap untuk dipergunakan di setiap *oil and gas offshore platform*, sedangkan sebagai *back-up power* (daya cadangan) nya menggunakan baterai yang akan di desain dan dapat bertahan selama 4 hari, ini adalah sebuah sistem konfigurasi, lingkup, dan pendekatan optimasi yang belum dieksplorasi terutama pada industri minyak dan gas.