

BAB I

PENDAHULUAN

A. Latar Belakang

Ketersediaan energi menjadi pilar penting untuk menopang keberlangsungan hidup manusia dan pembangunan nasional. Di Indonesia, penggunaan energi fosil seperti batu bara, minyak bumi, dan gas alam masih sangat dominan. Namun, ketergantungan jangka panjang pada energi fosil ini menimbulkan berbagai masalah serius, termasuk pencemaran udara, pemanasan global akibat emisi gas rumah kaca, serta risiko krisis energi karena keterbatasan sumber daya yang tidak dapat diperbarui (Harimbawa, 2023). Selain itu, tantangan penyediaan energi yang andal dan berkelanjutan juga dirasakan di wilayah terpencil yang belum terjangkau jaringan listrik konvensional, sehingga pengembangan energi baru terbarukan dan infrastruktur yang memadai menjadi sangat penting untuk pemerataan akses energi dan keberlanjutan pembangunan (Setyono & Kiono, 2021).

Pengembangan energi baru dan terbarukan (EBT) menjadi solusi strategis untuk mengatasi berbagai masalah yang timbul akibat ketergantungan pada energi fosil. Energi terbarukan berasal dari sumber daya alam yang dapat diperbaharui secara alami, seperti energi surya, angin, air, biomassa, dan panas bumi (Suryadi et al., 2020). Di Indonesia, teknologi panel surya dan turbin angin menjadi dua teknologi utama yang banyak dikembangkan karena potensi sumber daya alamnya yang melimpah. Indonesia yang terletak di garis khatulistiwa memiliki potensi energi surya yang besar sepanjang tahun, sedangkan potensi energi angin cukup signifikan terutama di wilayah pesisir dan dataran tinggi (Pambudi et al., 2025). Pengembangan kedua teknologi ini penting untuk mendukung diversifikasi energi nasional dan mempercepat transisi menuju energi bersih yang berkelanjutan (Mudhoffar & Magriasti, 2024).

Konsep sistem hybrid *solar wind* menggabungkan energi surya dan angin sebagai dua sumber daya utama yang bekerja sama untuk memenuhi kebutuhan energi. Energi surya memanfaatkan sinar matahari melalui panel surya, sementara energi angin memanfaatkan kecepatan angin melalui turbin angin. Penggabungan

kedua sumber energi ini memiliki keuntungan yang signifikan, antara lain mengurangi ketergantungan pada satu sumber daya saja, mengurangi dampak fluktuasi yang biasanya dialami oleh masing-masing sumber energi, serta mendukung keberlanjutan energi yang ramah lingkungan. Oleh karena itu, analisis performa dan simulasi diperlukan untuk memahami potensi efisiensi dari penerapan sistem ini di berbagai lokasi yang memiliki karakteristik lingkungan yang berbeda (Belva & Raspati, 2024).

Panel Surya (Pembangkit Listrik Tenaga Surya/PLTS) merupakan teknologi energi terbarukan yang sangat potensial di Indonesia karena melimpahnya sinar matahari sepanjang tahun. PLTS mengkonversi energi radiasi matahari menjadi listrik melalui efek fotovoltaik pada material semikonduktor, biasanya silikon. Teknologi ini memiliki keunggulan ramah lingkungan, tanpa emisi gas rumah kaca, mudah dipasang, dan perawatan yang relatif rendah. Selain itu, listrik yang dihasilkan sering disimpan dalam baterai untuk digunakan saat malam hari atau kondisi cahaya rendah, sehingga sangat cocok untuk daerah terpencil dan sistem *off grid* (Asmara et al., 2023). Pengembangan PLTS juga didukung oleh kebijakan dan regulasi pemerintah yang mendorong pemasangan sistem rooftop PV sebagai bagian dari upaya transisi energi nasional (Tarigan, 2024).

Turbin angin (PLTB) berfungsi mengonversi energi kinetik dari angin menjadi energi listrik melalui putaran rotor yang memutar generator. Berdasarkan konfigurasi porosnya, terdapat dua jenis Utama yaitu poros horizontal (HAWT) dan poros vertikal (VAWT). Penelitian di Indonesia menunjukkan bahwa VAWT lebih efektif pada kecepatan angin rendah (3-6 m/s), seperti kondisi di wilayah pesisir dan perkotaan, karena tidak memerlukan sistem *yaw* dan mampu menangkap angin dari berbagai arah (Herrapstanti et al., 2023). Salah satu varian inovatif dari VAWT adalah turbin Archimedes, yang memiliki bilah berbentuk spiral tiga dimensi. Desain ini memungkinkan putaran awal pada kecepatan angin rendah (sekitar 3,4 m/s), menghasilkan putaran hingga 129 RPM, dan mampu menghasilkan daya hingga 4 W pada kecepatan tersebut, sehingga menunjukkan potensinya untuk aplikasi skala kecil (Harun et al., 2018).

Turbin Angin Archimedes adalah varian turbin vertikal yang menggunakan bilah melingkar spiral yang diadopsi dari prinsip sekrup Archimedes untuk menangkap energi angin. Berbeda dengan turbin tradisional, desain spiralnya mampu memaksimalkan penangkapan angin dari berbagai arah secara otomatis, tanpa memerlukan sistem orientasi aktif (*yaw*). Struktur bilah spiral ini juga memberikan torsi awal yang tinggi, sehingga turbin dapat mulai beroperasi pada kecepatan angin rendah dan menunjukkan stabilitas operasional yang lebih baik. Karakteristik utama dari turbin Archimedes, seperti kemampuan putaran awal pada kecepatan angin rendah dan peningkatan efisiensi melalui optimasi profil *aerofoil*, membuatnya sangat sesuai untuk diterapkan pada sistem hybrid skala kecil, seperti pengisian baterai di daerah urban atau remote (Kamal et al., 2023). Turbin ini memiliki fleksibilitas aplikasi dalam berbagai kondisi lingkungan karena kemampuannya untuk beroperasi pada kecepatan angin rendah. Sistemnya dirancang agar dapat secara otomatis menyesuaikan arah datangnya angin melalui mekanisme bantalan pada titik tumpu di bagian pondasi. Di Indonesia, pengembangan jenis turbin angin ini masih tergolong baru dan terus mengalami peningkatan dari segi penelitian maupun penerapannya (Sidiq & Trianiza, 2023).

Berdasarkan penelitian Alnaimi et al. (2024) yang merancang dan menguji sistem hybrid yang mengintegrasikan panel surya 10 W dengan turbin angin Darrieus poros vertikal, dilengkapi airfoil SG6043 serta sistem kontrol berbasis IoT untuk pemantauan *real time*. Hasil CFD dan eksperimen menunjukkan koefisien daya (C_p) mencapai 0,2366, dengan output energi antara 60 hingga 880 Wh per hari tergantung pada intensitas matahari dan kecepatan angin; ini menegaskan bahwa modulasi airfoil dan kontrol otomatis dapat meningkatkan kontinuitas dan efisiensi suplai energi.

Al-Ajmi et al. (2020) telah melakukan penelitian untuk mengembangkan konsep True Hybrid Wind-Solar (THWS), di mana panel surya dan VAWT saling digerakkan secara mekanis melalui coupling khusus sehingga keduanya berputar bersama memaksimalkan penggunaan ruang. Dilengkapi juga modul listrik hybrid yang secara otomatis melepas sumber tak aktif untuk menghindari arus balik. Studi ini menekankan efisiensi ruang dan stabilitas daya dari integrasi kedua sumber

dalam satu unit sistem hybrid, serta menjelaskan mekanisme *switching* yang berfungsi mencegah umpan balik negatif (*negative feed in*) saat salah satu sumber tidak aktif (*idle*).

Sebelumnya, Nawafilah et al. (2022) telah melaksanakan studi penerapan sistem pembangkit listrik hybrid yang menggabungkan panel surya berkapasitas 300 Wp dan turbin angin 800 W untuk memenuhi kebutuhan energi di Desa Pataan, Kecamatan Sambeng, Kabupaten Lamongan. Sistem ini dirancang untuk menyuplai energi listrik bagi penerangan taman dan mendukung kegiatan usaha mikro, kecil, dan menengah (UMKM) masyarakat sekitar. Berdasarkan hasil pengujian lapangan, sistem hybrid tersebut mampu mengoperasikan sekitar 50 unit lampu LED berdaya 3-6 watt secara terus menerus selama enam jam, dengan total kapasitas penyimpanan baterai sebesar 150 Ah pada tegangan 12 volt. Energi harian yang dihasilkan dari sistem ini mencapai lebih dari 1.800 Wh, membuktikan efektivitas integrasi dua sumber energi terbarukan dalam menciptakan pasokan listrik yang andal untuk daerah dengan kondisi geografis dan meteorologis yang tidak menentu.

Berbagai penelitian sebelumnya mengenai sistem hybrid tenaga surya dan angin menunjukkan efektivitasnya dalam menyediakan energi alternatif yang stabil, khususnya untuk wilayah terpencil dan sistem berskala kecil. Namun, sebagian besar studi tersebut masih terbatas pada penggunaan turbin angin konvensional serta pendekatan berbasis simulasi atau rancangan tanpa pengujian eksperimental secara langsung. Selain itu, belum banyak penelitian yang mengkaji performa sistem hybrid secara *real time* menggunakan jenis turbin yang dirancang khusus untuk beroperasi optimal pada kecepatan angin rendah serta menganalisis efisiensi sistem dan kemungkinan terjadinya rugi energi dalam proses konversinya.

Penelitian ini hadir sebagai upaya pengembangan dengan merancang dan menguji secara eksperimental sistem hybrid panel surya dan turbin angin Archimedes, yaitu jenis turbin dengan poros vertikal yang memiliki desain spiral khas dan kemampuan untuk bekerja secara efektif dalam kondisi angin rendah. Sistem dirancang dengan menggabungkan panel surya berkapasitas 50 Wp dan turbin Archimedes berdiameter 30 cm, yang keduanya disusun untuk mengisi daya baterai VRLA 12 volt melalui pengendali daya (SCC PWM). Selain fokus pada

perancangan sistem secara aktual, penelitian ini juga menganalisis output energi (tegangan, arus, daya, dan energi) dari masing-masing sumber dan sistem hybrid secara *real time*, sekaligus mengevaluasi efisiensi sistem dan besarnya rugi energi yang terjadi selama proses pengisian baterai.

Melalui pendekatan ini, penelitian diharapkan mampu memberikan kontribusi baru dalam pengembangan sistem pembangkit listrik tenaga hybrid skala kecil yang efisien dan adaptif terhadap kondisi lingkungan lokal. Pemanfaatan turbin Archimedes sebagai komponen utama pada sistem hybrid merupakan bentuk inovasi yang belum banyak dikaji dalam penelitian eksperimental di Indonesia. Dengan menyertakan analisis terhadap efisiensi konversi energi dan estimasi rugi daya, penelitian ini menjadi penting dalam mendukung penerapan teknologi energi terbarukan yang tidak hanya efektif dan aplikatif, tetapi juga terukur secara teknis. Hasil dari penelitian ini diharapkan menjadi dasar dalam penerapan sistem energi terbarukan yang efisien pada skala rumah tangga dan membantu mengurangi ketergantungan terhadap energi konvensional.

B. Perumusan Masalah

Penelitian ini dilakukan untuk merancang dan menganalisis sistem hybrid pembangkit listrik tenaga surya dan angin yang ditujukan untuk pengisian baterai 12 volt secara optimal. Berdasarkan latar belakang dan fokus kajian yang telah dijelaskan, maka rumusan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana perancangan sistem hybrid antara panel surya dan turbin angin Archimedes yang dapat digunakan untuk pengisian baterai 12 volt?
2. Bagaimana karakteristik kondisi lingkungan selama sistem dioperasikan, khususnya intensitas cahaya dan kecepatan angin, serta bagaimana pengaruhnya terhadap performa masing-masing sumber energi?
3. Bagaimana output energi yang dihasilkan oleh panel surya, turbin angin Archimedes, dan sistem hybrid berdasarkan pengukuran tegangan, arus, daya, dan energi listrik yang dilakukan secara berkala selama tiga hari pengujian?

4. Bagaimana kontribusi masing-masing sumber energi terhadap total output sistem hybrid dan bagaimana identifikasi potensi rugi energi yang terjadi dalam sistem?
5. Bagaimana efektivitas sistem hybrid dalam mengisi baterai VRLA 12 volt berdasarkan pengamatan terhadap perubahan tegangan baterai selama proses pengujian?

C. Tujuan Penelitian

Berdasarkan latar belakang dan perumusan masalah yang telah diuraikan, maka tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Merancang sistem hybrid antara panel surya dan turbin angin Archimedes yang dapat digunakan untuk pengisian baterai 12 volt secara langsung.
2. Menganalisis pengaruh kondisi lingkungan seperti intensitas cahaya dan kecepatan angin terhadap performa masing-masing sumber energi.
3. Mengukur dan membandingkan output energi dari panel surya, turbin angin Archimedes, dan sistem hybrid berdasarkan data arus, tegangan, daya, dan energi listrik selama tiga hari pengujian.
4. Menganalisis kontribusi masing-masing sumber energi terhadap total output sistem hybrid dan mengidentifikasi potensi rugi energi yang terjadi dalam sistem hybrid.
5. Mengevaluasi efektivitas sistem hybrid dalam mengisi baterai berdasarkan perubahan tegangan baterai selama pengambilan data.

D. Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi yang signifikan dalam pengembangan ilmu pengetahuan dan teknologi di bidang energi terbarukan, khususnya dalam implementasi sistem pembangkit listrik hybrid berbasis panel surya dan turbin angin Archimedes. Secara akademis, penelitian ini dapat memperkaya literatur mengenai sistem energi hybrid skala kecil, serta menjadi referensi dalam penerapan metode eksperimen langsung untuk menganalisis performa sistem terhadap variabel lingkungan seperti intensitas cahaya dan

kecepatan angin. Selain itu, dengan adanya identifikasi potensi rugi energi dalam sistem, penelitian ini juga memberikan pemahaman yang lebih komprehensif terhadap kinerja aktual sistem hybrid dalam kondisi lingkungan nyata. Dari sisi praktis, hasil penelitian ini bermanfaat sebagai acuan teknis dalam merancang sistem hybrid sederhana yang efisien dan aplikatif untuk pengisian baterai 12 volt, khususnya di wilayah yang belum terjangkau jaringan listrik atau membutuhkan sumber energi alternatif. Inovasi pada penggunaan turbin angin Archimedes yang memiliki karakteristik mampu beroperasi pada kecepatan angin rendah juga diharapkan dapat menjadi solusi baru yang relevan dengan kondisi geografis Indonesia. Dengan demikian, penelitian ini tidak hanya memperkuat pemahaman teoritis, tetapi juga memberikan gambaran nyata mengenai integrasi dua sumber energi terbarukan dalam satu sistem yang dapat mendukung upaya transisi menuju pemanfaatan energi bersih dan berkelanjutan.

