

BAB I

PENDAHULUAN

A. Latar Belakang

Kebutuhan energi listrik di dunia terus mengalami peningkatan seiring dengan pertumbuhan populasi dan perkembangan teknologi. Ketergantungan manusia terhadap sumber energi fosil seperti minyak bumi dan batu bara telah menimbulkan berbagai permasalahan global, seperti peningkatan emisi gas rumah kaca, pencemaran udara, serta pemanasan global yang berdampak pada perubahan iklim. Oleh karena itu, pengembangan dan pemanfaatan sumber energi terbarukan yang ramah lingkungan menjadi langkah strategis untuk menjaga keberlanjutan energi dan kelestarian lingkungan. Salah satu sumber energi terbarukan yang sangat potensial adalah energi surya, karena ketersediaannya yang melimpah, bebas polusi, dan dapat langsung dikonversi menjadi energi listrik melalui sistem *Photovoltaic* (PV).

Namun demikian, sistem PV memiliki kelemahan utama, yaitu penurunan efisiensi akibat peningkatan suhu pada permukaan panel saat menerima intensitas radiasi matahari yang tinggi. Marques et al. (2021) menyatakan bahwa efisiensi modul PV dapat menurun sebesar 0,45-0,5% untuk setiap kenaikan suhu sebesar 1°C. Penurunan efisiensi panel surya ini umumnya terjadi pada kondisi lingkungan beriklim tropis, di mana suhu udara siang hari dapat mencapai 32-35°C, bahkan suhu permukaan panel surya dapat meningkat hingga 50-65°C akibat akumulasi panas radiasi matahari. Ketika suhu permukaan modul PV meningkat jauh di atas suhu standar (25°C), efisiensi konversi listriknya menurun secara signifikan. Selain itu, peningkatan suhu yang terus-menerus juga dapat mempercepat degradasi sel surya dan memperpendek umur pakainya. Dengan demikian, diperlukan inovasi dalam mengelola panas yang dihasilkan oleh panel surya agar performa sistem tetap optimal.

Salah satu inovasi yang banyak dikembangkan untuk mengatasi masalah tersebut adalah integrasi sistem *Photovoltaic–Thermoelectric Generator* (PV-TEG). Sistem *hybrid* ini bekerja dengan memanfaatkan dua mekanisme konversi

energi sekaligus, yaitu energi cahaya matahari yang dikonversi menjadi listrik oleh PV, dan energi panas berlebih dari panel yang dikonversi menjadi listrik tambahan oleh TEG. Dengan demikian, selain meningkatkan efisiensi total sistem, integrasi PV-TEG juga membantu menurunkan suhu kerja panel surya melalui proses penyerapan panas oleh modul termoelektrik. Alobaid et al. (2021) melaporkan bahwa sistem *hybrid* PV-TEG yang diuji di lingkungan luar ruangan (outdoor) mampu meningkatkan efisiensi daya total hingga 6,5% dibandingkan PV tunggal, dengan perbedaan suhu optimum antara sisi panas dan dingin TEG berkisar antara 18°C hingga 22°C. Hal ini menunjukkan bahwa pengelolaan panas menjadi faktor penting dalam peningkatan efisiensi sistem PV-TEG.

Kinerja sistem PV-TEG sangat dipengaruhi oleh kemampuan pendinginan pada sisi belakang panel surya. Jika panas tidak dilepaskan dengan efektif, maka suhu PV akan meningkat, mengurangi tegangan keluaran, dan pada akhirnya menurunkan efisiensi konversi energi. Fitriana et al. (2024) dalam penelitiannya membuktikan bahwa jenis material pendingin atau *heatsink* memiliki pengaruh signifikan terhadap kinerja sistem *hybrid*. Berdasarkan hasil pengujian, sistem *hybrid* menggunakan *heatsink* berbahan tembaga menghasilkan efisiensi 1,70%, sedangkan *heatsink* berbahan aluminium hanya menghasilkan efisiensi 0,47%. Hal ini disebabkan oleh perbedaan konduktivitas termal kedua bahan, di mana tembaga memiliki kemampuan penghantaran panas yang lebih baik dibandingkan aluminium. Dengan demikian, pemilihan material *heatsink* yang tepat sangat penting untuk menjaga perbedaan suhu (ΔT) antara sisi panas dan dingin TEG agar sistem dapat beroperasi lebih efisien.

Selain optimasi sistem pendinginan, pemantauan performa sistem secara kontinu dan terintegrasi juga menjadi aspek penting dalam pengembangan teknologi energi surya berbasis sistem *hybrid* PV-TEG. Pengamatan manual terhadap parameter seperti suhu, tegangan, dan arus sering kali kurang efektif karena kondisi lingkungan yang bersifat dinamis dan berubah dengan cepat. Oleh karena itu, diperlukan sistem monitoring yang mampu merekam dan menampilkan data secara *real-time* serta tersimpan secara sistematis untuk keperluan analisis performa jangka panjang. Rahman et al. (2024) mengembangkan sistem monitoring

berbasis *Internet of Things* (IoT) pada sistem *hybrid* PV-TEG menggunakan *platform Google App Script* dan *Spreadsheet Excel* yang mampu menampilkan data suhu, kelembapan, serta intensitas cahaya secara real-time melalui jaringan *Wi-Fi*. Hasil penelitiannya menunjukkan bahwa penerapan sistem IoT mampu meningkatkan efisiensi pemantauan, menghemat waktu pengukuran, serta memperbaiki akurasi data di lapangan.

Dari tinjauan literatur yang dilakukan oleh Saleh et al. (2021), peningkatan efisiensi sistem PV-TEG sangat bergantung pada desain integrasi, jenis material TEG, dan sistem pendinginan yang digunakan. Penelitian tersebut menyebutkan bahwa efisiensi total sistem dapat meningkat antara 2–10% apabila pendinginan dioptimalkan dengan kombinasi heat sink, heat pipe, fluida pendingin, atau material pendingin. Namun, sebagian besar penelitian tersebut belum menekankan aspek sistem monitoring berbasis IoT sebagai alat utama dalam pengambilan dan pengelolaan data performa secara kontinu di lingkungan nyata.

Penelitian Alobaid et al. (2021) menunjukkan pentingnya pengujian sistem PV-TEG di kondisi lingkungan *outdoor*, karena sistem yang diuji secara langsung di bawah paparan sinar matahari alami menunjukkan respons termal dan performa yang lebih realistis dibandingkan pengujian laboratorium. Sementara itu, Marques et al. (2021) menyatakan bahwa sebagian besar studi sebelumnya masih dilakukan menggunakan sumber radiasi buatan dengan durasi pengujian yang relatif singkat. Pengujian dengan durasi terbatas tersebut belum mampu merepresentasikan fluktuasi suhu, intensitas cahaya, dan kondisi lingkungan secara menyeluruh dalam satu siklus harian. Oleh karena itu, pengujian dengan durasi panjang, seperti 24 jam, diperlukan untuk mengamati karakteristik sistem pada kondisi siang dan malam secara berkesinambungan.

Berdasarkan uraian tersebut, dapat disimpulkan bahwa integrasi sistem *hybrid* PV-TEG dengan pendingin heatsink yang efektif serta didukung oleh sistem monitoring berbasis IoT memiliki potensi besar dalam meningkatkan efisiensi dan kestabilan termal panel surya di lingkungan *outdoor*. Namun, penelitian yang secara khusus mengembangkan sistem monitoring IoT untuk menganalisis kinerja PV-TEG berpendingin *heatsink* pada kondisi iklim tropis dengan pengujian durasi

panjang masih relatif terbatas. Padahal, kondisi iklim tropis seperti di Indonesia memiliki karakteristik suhu dan intensitas radiasi yang tinggi, sehingga membutuhkan sistem pemantauan yang andal dan berkelanjutan.

Oleh karena itu, penelitian ini berjudul “Pengembangan Sistem Monitoring IoT pada *Hybrid Photovoltaic–Thermoelectric Generator* (PV-TEG) dengan Pendingin Heatsink di Lingkungan Outdoor.” Penelitian ini berfokus pada pengembangan dan implementasi sistem monitoring berbasis IoT untuk memantau parameter suhu, tegangan, arus, kelembapan dan intensitas cahaya sebagai parameter pendukung secara real-time. Sistem PV-TEG berpendingin heatsink digunakan sebagai objek pengujian untuk menganalisis pengaruh pengelolaan panas terhadap performa panel surya berdasarkan data hasil monitoring IoT. Dengan demikian, penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi dalam pengembangan sistem energi surya cerdas (*smart renewable energy system*) yang adaptif terhadap kondisi lingkungan nyata.

B. Perumusan Masalah

Berdasarkan uraian latar belakang tersebut, permasalahan utama dalam penelitian ini adalah belum optimalnya sistem monitoring performa pada sistem hybrid Photovoltaic–Thermoelectric Generator (PV–TEG) berpendingin heatsink yang beroperasi di lingkungan outdoor, serta terjadinya penurunan efisiensi panel surya akibat peningkatan suhu permukaan. Kondisi lingkungan yang dinamis menuntut adanya sistem monitoring yang mampu bekerja secara real-time, kontinu, dan terintegrasi. Oleh karena itu, rumusan masalah dalam penelitian ini dirumuskan sebagai berikut:

1. Bagaimana merancang dan mengembangkan sistem *hybrid Photovoltaic–Thermoelectric Generator* (PV-TEG) dengan pendingin heatsink untuk membantu menjaga kestabilan suhu panel surya saat beroperasi di lingkungan *outdoor*?
2. Bagaimana mengimplementasikan sistem monitoring berbasis *Internet of Things (IoT)* yang mampu memantau parameter utama seperti suhu, tegangan,

arus, kelembapan dan intensitas cahaya secara *real-time* dan kontinu pada sistem PV-TEG berpendingin *heatsink*?

3. Bagaimana analisis performa sistem PV-TEG berpendingin *heatsink* ketika diuji dalam durasi panjang (24 jam) terhadap perubahan kondisi lingkungan seperti suhu, intensitas cahaya, dan kelembapan untuk memperoleh data efisiensi dan kestabilan termal secara menyeluruh?

C. Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian ini disusun berdasarkan permasalahan yang telah diidentifikasi, dengan fokus pada pemantauan performa dan efektivitas sistem hybrid Photovoltaic–Thermoelectric Generator (PV–TEG) di lingkungan outdoor menggunakan sistem monitoring berbasis Internet of Things (IoT). Adapun tujuan penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Merancang dan merealisasikan sistem hybrid Photovoltaic–Thermoelectric Generator (PV-TEG) dengan pendingin *heatsink* yang berfungsi untuk membantu mengurangi suhu berlebih pada permukaan panel surya serta menjaga perbedaan suhu (ΔT) pada modul termoelektrik.
2. Mengembangkan sistem monitoring berbasis *Internet of Things* (IoT) menggunakan mikrokontroler (ESP32 atau sejenisnya) yang mampu memantau dan merekam parameter suhu, tegangan, arus, kelembapan dan intensitas cahaya secara *real-time* dan kontinu di lingkungan outdoor.
3. Melakukan pengujian dan analisis performa sistem PV-TEG berpendingin *heatsink* berdasarkan data hasil monitoring IoT selama pengujian berdurasi panjang (24 jam) untuk mengevaluasi kestabilan termal dan karakteristik kinerja sistem pada kondisi lingkungan nyata.

D. Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan manfaat yang nyata, baik secara akademik maupun praktis, sebagai berikut:

1. Memberikan kontribusi ilmiah dalam bidang energi terbarukan, khususnya terkait pemantauan performa, efektivitas dan kestabilan termal sistem hybrid Photovoltaic–Thermoelectric Generator (PV–TEG) berpendingin heatsink di lingkungan outdoor.
2. Menjadi referensi dalam pengembangan dan implementasi sistem monitoring berbasis Internet of Things (IoT) untuk sistem energi surya, khususnya dalam pemantauan parameter suhu dan performa listrik secara real-time dan berkelanjutan.
3. Menyediakan data empiris hasil pengujian sistem PV–TEG di kondisi lingkungan nyata yang dapat digunakan sebagai dasar pengembangan sistem energi surya cerdas (smart renewable energy system) pada skala kecil maupun penelitian lanjutan.

