

**Proposal Penelitian - Program Penelitian, Pengabdian kepada Masyarakat, dan Inovasi (PPMI) ITB**

Edi Leksono<sup>1</sup>, Putu Handre Kertha Utama<sup>1</sup>, Robi Sobirin<sup>1</sup>, Frans Edison<sup>2</sup>, Angga Indra Putra<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Fakultas Teknologi Industri, Program Studi Teknik Fisika, Institut Teknologi Bandung

<sup>2</sup> Laboratorium Manajemen Energi, Institut Teknologi Bandung

**Abstract**

Kinerja modul panel surya sangat dipengaruhi oleh kondisi termal, terutama ketika terjadi *partial shading* yang dapat memicu *hotspot* dan menurunkan efisiensi daya. Untuk memahami fenomena ini secara lebih mendalam, sistem eksperimen dirancang menggunakan dua panel surya monokristal yang dilengkapi rangkaian akuisisi data *irradiance*, suhu, dan parameter listrik berbasis protokol Modbus. Pengujian dilakukan pada berbagai tingkat *shading*—0%, 25%, 50%, dan 75%—dengan paparan panas terkontrol dari lampu halogen dan pendinginan melalui kipas DC. Data menunjukkan bahwa *shading* menyebabkan perubahan distribusi temperatur yang cukup signifikan, dengan area tertutup mengalami kenaikan suhu yang terlihat jelas pada citra termal. Dampaknya juga terlihat pada penurunan daya *output* yang tidak linear terhadap persentase *shading*. Seluruh parameter *irradiance*, suhu, dan keluaran listrik terekam dan divisualisasikan secara *real-time* melalui *dashboard* TCP/IP, sehingga menghasilkan *dataset* yang stabil untuk kalibrasi dan validasi *Digital Twin* modul PV. Temuan awal ini menegaskan potensi *digital twin* dalam meningkatkan monitoring termal dan mendeteksi anomali pada PLTS.

**Keyword:** Digital Twin, Photovoltaic Module, Partial Shading, PLTS

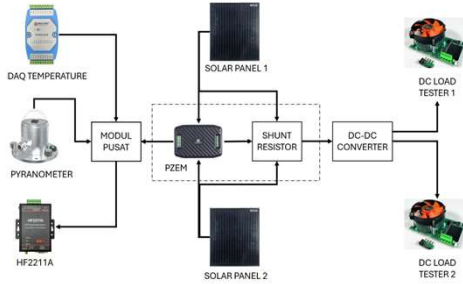
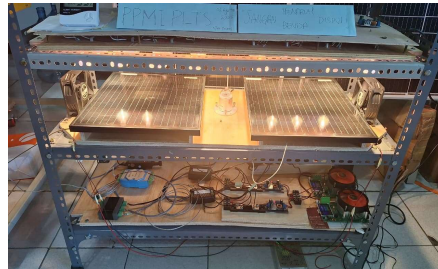
**Introduction**

Modul panel surya mengalami kenaikan temperatur signifikan ketika beroperasi, yang dapat menurunkan efisiensi daya, mempercepat degradasi material, dan menimbulkan risiko *hotspot* terutama pada kondisi *partial shading*. Tantangan ini menjadikan kebutuhan manajemen termal semakin penting, khususnya pada PLTS berskala besar yang beroperasi dalam kondisi lingkungan dinamis. Konsep Digital Twin, yaitu model virtual yang mereplikasi kondisi fisik modul secara *real-time*, menawarkan pendekatan baru untuk meningkatkan monitoring, diagnosis, serta pengambilan keputusan operasional.

Penelitian ini berfokus pada pengembangan *digital twin* modul PV berbasis data eksperimen termal, elektrik, dan *irradiance*. Untuk mendukung pembangunan model, dilakukan serangkaian pengujian laboratorium dengan kontrol terhadap intensitas cahaya, variasi *shading*, serta beban listrik. Data akuisisi diperoleh dari pyranometer PR-300AL-RA-N01, thermocouple Type-K melalui modul WP9065ADAM, dan sensor listrik PZEM-017, seluruhnya diintegrasikan menggunakan konverter Modbus HF2211A untuk pemantauan *real-time*. Studi ini menjadi langkah awal dalam menghasilkan *digital twin* yang akurat dan dapat digunakan untuk memahami perilaku termal modul PV, serta mendeteksi anomali seperti *hotspot* secara lebih dini.

**Research Method**

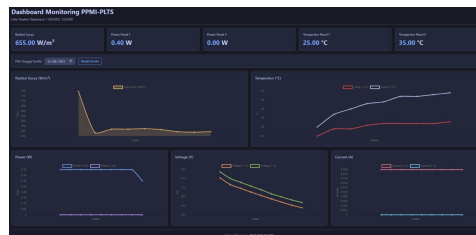
Rangkaian eksperimen dirancang menggunakan dua modul panel surya yang ditempatkan pada rak mekanik berukuran 100 × 103 cm. Sumber panas diberikan melalui 20 lampu pijar halogen untuk mensimulasikan radiasi matahari, sedangkan variasi aliran udara diperoleh dari kipas DC 12 V.



Picture 1. Rak pengujian dan single line diagram

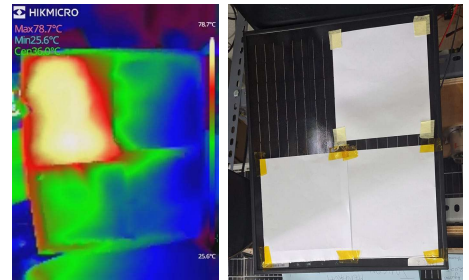
Temperatur panel surya masing-masing diukur menggunakan satu thermocouple Type-K yang terhubung ke modul DAQ WP9065ADAM. Intensitas radiasi dicatat menggunakan pyranometer PR-300, sedangkan parameter listrik (tegangan, arus, daya) dimonitor melalui dua modul PZEM-017 dengan shunt resistor eksternal. Semua perangkat dihubungkan melalui protokol Modbus RS-485 dan dikonversi ke TCP/IP menggunakan HF2211A, kemudian divisualisasikan melalui *dashboard* monitoring berbasis web.

Eksperimen dilakukan untuk lima kondisi *shading*: 0%, 25%, 50%, 75%, dan baseline 0–0%. Setiap pengujian berlangsung 30 jam untuk menangkap dinamika pemanasan, pendinginan, respons transien, dan perbedaan antar panel. Data yang diperoleh digunakan untuk analisis tren performansi termal dan sebagai *dataset* untuk pengembangan serta validasi model digital twin.



Gambar 2. Dashboard monitoring

**Discussion & Result**



Picture 3. Foto melalui thermal camera setelah pengujian 75% shading

Hasil pengujian menunjukkan bahwa variasi *shading* memiliki pengaruh signifikan terhadap distribusi temperatur dan performansi kelistrikan panel surya. Pada kondisi 0% *shading*, kedua panel menunjukkan pola pemanasan stabil dengan gradien suhu yang relatif uniform. Namun, ketika *shading* parsial diterapkan, terutama pada 75%, muncul peningkatan temperatur lokal yang jelas, sebagaimana terlihat pada citra thermal kamera. Fenomena ini mengindikasikan potensi *hotspot*, yang sesuai dengan teori bahwa mismatch cahaya menyebabkan arus balik dan pemanasan resistif lokal. Selain itu, daya *output* panel turun secara nonlinear terhadap persentase *shading*—terlihat pada grafik power, voltage, dan current pada *dashboard* monitoring.

Data *irradiance* dan temperatur menunjukkan hubungan terbalik antara kenaikan suhu dan efisiensi keluaran. Perbandingan multi-*shading* test mengonfirmasi bahwa modul dengan *shading* lebih tinggi menunjukkan kenaikan suhu 5–12°C dibanding baseline. Secara keseluruhan, data eksperimen berhasil memvalidasi bahwa kondisi termal modul dapat direpresentasikan melalui pola karakteristik yang konsisten, dan seluruh parameter yang direkam (*irradiance*, suhu, listrik DC) sangat cocok sebagai basis model digital twin yang akurat.

**Conclusion**

Penelitian ini berhasil membangun sistem eksperimen komprehensif untuk pemodelan termal modul fotovoltaik dan mendukung pengembangan digital twin. Data eksperimen menunjukkan bahwa *shading* parsial secara signifikan mempengaruhi temperatur permukaan dan performansi elektrik panel surya, serta berpotensi menimbulkan *hotspot*. Integrasi pyranometer, thermocouple, PZEM-017, dan sistem Modbus memungkinkan akuisisi data *real-time* yang konsisten untuk memodelkan perilaku termal modul PV.