

## Analisis Komparatif Metode Pembuatan Cahaya Matahari Untuk Modul Fotovoltaik Berdasarkan Studi Literatur

Muhammad Rafi Athallah<sup>1\*</sup>, Sovian Aritonang<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup>) Program Studi Fisika Militer Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam,  
Universitas Pertahanan Republik Indonesia

\*Email: rafiathallah636@gmail.com

### ABSTRACT

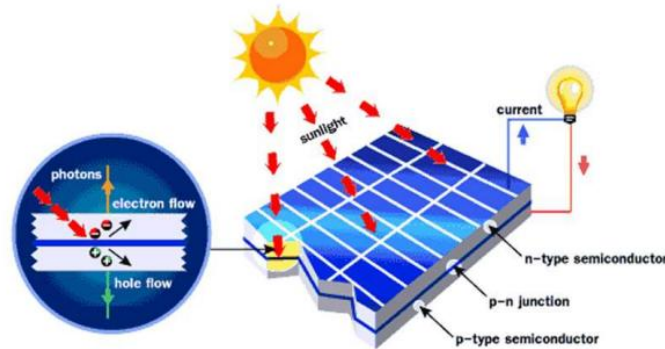
*Testing and evaluating photovoltaic (PV) module performance across different brands and types is imperative for achieving higher solar energy conversion efficiency under varying conditions. At the same time, natural sunlight can be an obstacle to getting accurate, consistent data under similar environmental conditions, so sunlight simulators are used to replicate controlled lighting conditions. So far, different types of solar light simulators have been developed, including halogen, xenon and LED lamps, each possessing advantages and disadvantages in terms of light spectrum, intensity, stability, and energy efficiency. However, there is no systematic comparative assessment of how each method simulates sunlight's photon spectrum and its stability, making it challenging for the scientific community to select the most suitable method. This study identifies a research deficit by directly comparing the spectral accuracy, intensity stability, and sensitivity to environmental factors across types of sunlight simulators. To overcome this gap, this study aims to analyse and compare the performance of halogen, xenon, and LED simulators to identify the most effective method for testing the electrical characteristics of PV modules in the laboratory.*

**Keywords:** Photovoltaic, Sunlight, LED, Xenon

### PENDAHULUAN

Namun, aspek dari sistem penyimpanan daya yang tidak dapat dikendalikan, maupun spektrum UV dan IR, begitu juga pengaruh dari intensitas cahaya, bersama peubah-ubah seperti temperatur penggabungan, aliran angin, dan kelembapan seperti menyusahkan uji modul PV tersebut, banyak aspek cahaya maupun mereka yang dihasilkannya yang tak selalu terdapat kesesuaian dengan modul PV itu sendirian. Terdapat cara khusus agar dapat memungkinkan spesifikasi modul PV secara terbaik, dalam penyusunan spektrum dan intensitas cahaya di berlainan saat dalam 24 jam yaitu dengan pemakaian dari simulator sinar matahari. Simulator sinar matahari ialah suatu lampu yang diciptakan untuk membuat seakan cahaya panas dari matahari pada suatu tingkat yang dibutuhkan, membolehkan uji PV dilakukan dengan keadaan yang stabil dan bisa diulang-ulang tanpa adanya peubah cuaca. terdapat sebagian bentuk simulator cahaya matahari yang tercipta, termasuk lampu halogen, xenon, dan LED, mereka beserta menggunakan metode yang berbeda satu dengan yang lain. Xenon sebabkan cahaya yang hampir menyerupai pada matahari, walaupun mahal dan memiliki riwayat hidup yang tinggi. LED cahaya yang cukup hemat energi dan stabil, tetapi sering mengalami hambatan dengan mencapai spektrum sinar matahari. Di antara maupun perakitan pas bahwa metode yang tidak ada yang sepenuhnya benar dan akurat, yang terutama terbatas di perbandingan antara hasil spektrum, intensitas, dan stabilitas, bersama pengaruh dari perubahan cuaca serta suhu dan kelembapan.

Solar panel adalah sejumlah sel silikon dengan photon matahari membangkitkan arus listrik. Energi listrik yang keluar dari sel surya ketika mendapat cahaya adalah jumlah energi yang diperoleh sel surya itu ketika keberadaan cahaya adalah kemampuan sel itu sendiri untuk menghasilkan tegangan ketika “diberi beban” dan “arus melalui beban” pada saat bersamaan. Solar panel adalah elemen semikonduktor, seperti silikon, yang dapat mengkonversi energi matahari menjadi energi listrik di atas dasar fotovoltaik. Tegangan dan arus listrik yang dihasilkan oleh sel surya dipengaruhi oleh tingkat intensitas radiasi cahaya matahari dan temperatur udara lingkungan, yaitu: semakin rendah intensitas radiasi cahaya matahari, semakin rendah juga arus dan tegangan yang dihasilkan. Temperatur mengelilingi dari solar panel juga berkontribusi pada perubahan temperatur pada sel itu sendiri, dengan peningkatan suhu tegangan listrik yang diproduksi oleh solar panel juga turun.



Gambar 1. Prinsip kerja solar panel

Tujuan penelitian ini adalah untuk membandingkan dan menganalisis peran simulator halogen, xenon, dan LED untuk mengetahui kinerja dan efisiensi uji coba modul PV. Dengan mengevaluasi stabilitas dan kepekaan terhadap kondisi lingkungan, penelitian ini dirancang untuk memberikan pendekatan yang dapat diterima ke penerapan uji coba sistematis untuk hibrid modul panel surya yang jelas dan memberikan bantuan energi terbarukan lebih lanjut. Cara kerja panel solar adalah ketika perangkat semikonduktor diletakkan di bawah sinar matahari, itu akan menghasilkan tegangan listrik, ini dikenal dengan fotovoltaiik.

Tambahan, simulator cahaya matahari yang efektif memiliki peran kunci dalam meningkatkan keakuratan hasil pengujian kinerja modul PV. Kondisi cahaya buatan yang mendekati sinar matahari alami memungkinkan evaluasi berbagai parameter modul PV, seperti efisiensi konversi daya, stabilitas daya keluaran, dan respons spektral dalam kondisi konstan. Hal ini penting karena panel PV digunakan dalam kondisi yang sangat bervariasi di lapangan, di mana intensitas dan spektrum cahaya dapat berubah drastis sepanjang hari dan musim. Simulator berbasis halogen, xenon, dan LED menawarkan solusi yang berbeda untuk masalah ini, namun dengan karakteristik unik masing-masing. Teknologi lampu halogen, misalnya, murah dan mudah didapatkan, tetapi distribusi spektrumnya tidak sempurna untuk meniru cahaya matahari. Di sisi lain, simulator berbasis xenon dikenal karena kesesuaian spektrumnya dengan sinar matahari alami, namun harga dan masa pakainya yang singkat membatasi aplikasinya dalam pengujian jangka panjang. LED menjadi alternatif yang semakin populer karena efisiensi energi dan stabilitasnya, tetapi untuk mencapai spektrum sinar matahari yang ideal diperlukan kombinasi beberapa jenis LED, yang meningkatkan kompleksitas pengaturan.

Dalam penelitian ini, pendekatan komparatif terhadap metode simulator ini akan dilakukan dengan mengukur intensitas cahaya, kestabilan spektral, dan respons modul PV terhadap faktor lingkungan. Hasil yang diperoleh akan memberikan pemahaman yang lebih baik tentang kekuatan dan kelemahan setiap jenis simulator dalam berbagai kondisi pengujian. Dengan adanya evaluasi komprehensif ini, penelitian ini diharapkan tidak hanya dapat membantu peneliti dan praktisi dalam memilih metode simulator yang paling optimal, tetapi juga membuka wawasan baru untuk inovasi dalam desain simulator cahaya matahari yang lebih akurat, hemat biaya, dan tahan lama. Seiring meningkatnya kesadaran global terhadap dampak negatif penggunaan energi fosil, kebutuhan akan energi terbarukan yang lebih ramah lingkungan semakin mendesak. Energi surya menjadi salah satu sumber energi terbarukan yang banyak dilirik karena ketersediaannya yang melimpah dan potensinya untuk mengurangi emisi karbon secara signifikan. Panel fotovoltaiik (PV) menjadi teknologi utama dalam konversi energi surya menjadi energi listrik, memanfaatkan fenomena fotovoltaiik untuk menghasilkan listrik langsung dari sinar matahari. Namun, dalam pengembangan dan pengujian modul PV, variasi intensitas dan spektrum sinar matahari di alam terbuka menjadi tantangan tersendiri. Faktor-faktor seperti kondisi cuaca, waktu, dan posisi geografis menyebabkan intensitas dan spektrum sinar matahari tidak konstan, sehingga sulit untuk mendapatkan data yang akurat dan konsisten dalam evaluasi performa modul PV.

Untuk mengatasi kendala tersebut, simulator cahaya matahari digunakan dalam pengujian laboratorium. Simulator ini dapat mereplikasi karakteristik sinar matahari dalam kondisi yang lebih terkontrol, memungkinkan evaluasi performa modul PV secara lebih akurat dan konsisten tanpa dipengaruhi oleh variabilitas alamiah sinar matahari. Beberapa jenis simulator cahaya telah

dikembangkan, termasuk lampu halogen, xenon, dan LED, yang masing-masing memiliki karakteristik spektral dan efisiensi energi yang berbeda. Lampu halogen, misalnya, umumnya lebih murah dan mudah diperoleh, namun distribusi spektralnya sering kali kurang ideal untuk meniru cahaya matahari. Di sisi lain, lampu xenon dikenal lebih akurat dalam menciptakan spektrum cahaya yang mendekati sinar matahari alami, meskipun memiliki biaya operasional yang lebih tinggi dan umur pakai yang lebih pendek. Sementara itu, LED menawarkan keunggulan dalam hal efisiensi energi dan stabilitas intensitas, tetapi membutuhkan konfigurasi spektrum yang kompleks untuk mencapai hasil yang optimal.

Dalam penelitian ini, akan dilakukan analisis komparatif terhadap tiga jenis simulator cahaya matahari, yaitu halogen, xenon, dan LED, untuk menentukan metode mana yang paling efektif dalam mensimulasikan kondisi sinar matahari bagi pengujian modul PV. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk memberikan panduan praktis bagi peneliti dan praktisi dalam memilih metode simulator yang paling sesuai berdasarkan kebutuhan pengujian, serta mendukung pengembangan teknologi energi surya yang lebih efektif dan efisien. Dengan memahami keunggulan dan kelemahan dari setiap metode simulator cahaya ini, diharapkan penelitian ini dapat memberikan kontribusi bagi optimasi pengujian dan peningkatan efisiensi modul PV dalam kondisi laboratorium yang mendekati lingkungan nyata.

### METODE PENELITIAN

Melalui pendekatan penelitian eksperimental komparatif, tiga metode alternatif telah dikaji untuk pembuatan simulator cahaya matahari dan pengujian yang digunakan untuk menguji modul fotovoltaik. Studi eksperimental komparatif tersebut membahas cara eksperimen memungkinkan pembuktian hipotesis atau penyaringan hipotesis. Berdasarkan hal itu, penelitian eksperimental komparatif dirancang agar hasil data empiris dibandingkan. Penelitian eksperimental komparatif memungkinkan pendekatan hipotesis dalam validasi hasil, di mana penelitian ini membandingkan tiga metode yang diceritakan dalam literatur. Populasi yang mungkin untuk studi ini memperhitungkan semua literatur terkait yang ada tentang database akademik yang relevan, semua penelitian dan referensi yang diterbitkan atau lintas yang mencakup pengujian dan membangun simulator cahaya matahari test set. Metode membtbnui jenis dan metode perangkat sebelumnya yang berfokus pada pengujian modul dan metode pengujian lainnya. Ini juga mencakup jenis-jenis dari modul-modul ini adalah modul diperiksa dan simulator matahari.

Dalam penelitian ini dipilih dari literatur yang memenuhi kriteria spesifik. Sampel penelitian meliputi publikasi ilmiah yang relevan dan berkualitas, perangkat simulator cahaya matahari dari penelitian yang terdokumentasi, serta modul fotovoltaik tertentu yang digunakan dalam studi tersebut. Pemilihan sampel literatur didasarkan pada kriteria seperti relevansi topik, kualitas studi, dan waktu publikasi, di mana penelitian yang dipilih harus diterbitkan dalam kurun waktu 10 tahun terakhir untuk memastikan relevansi dan validitas hasil. Teknik sampling yang digunakan dalam penelitian ini adalah purposive sampling atau sampling bertujuan. Teknik ini dipilih agar hanya data dan studi yang memenuhi kriteria relevansi dimasukkan dalam analisis. Purposive sampling memungkinkan peneliti untuk secara selektif memilih studi yang memenuhi parameter tertentu seperti relevansi topik, kesesuaian metode penelitian, serta tahun publikasi yang relevan. Hal ini bertujuan untuk mengoptimalkan akurasi dan keterandalan hasil penelitian. Pengumpulan data dilakukan melalui pencarian literatur di basis data ilmiah yang diakui, seperti IEEE Xplore, ScienceDirect, dan jurnal-jurnal energi terbarukan terkemuka. Analisis data dilakukan dengan membandingkan hasil yang diperoleh dari berbagai studi, termasuk metode pembuatan simulator, teknik pengujian, dan performa modul fotovoltaik yang diuji. Hasil analisis kemudian divalidasi dengan merujuk pada standar internasional seperti IEC (International Electrotechnical Commission) untuk memastikan bahwa metode dan hasil yang dibandingkan memiliki dasar yang valid dan diakui secara global. Melalui pendekatan ini, penelitian diharapkan dapat memberikan wawasan komprehensif mengenai keunggulan dan kelemahan metode alternatif dalam pembuatan dan pengujian simulator cahaya matahari serta implikasinya terhadap pengujian modul fotovoltaik.

### HASIL DAN PEMBAHASAN

Berdasarkan hasil penelusuran dan analisis terhadap berbagai literatur yang digunakan dalam penelitian ini, Terdapat beberapa temuan utama terkait metode pembuatan dan pengujian simulator cahaya matahari. Data yang diperoleh mencakup berbagai metode pembuatan simulator, seperti penggunaan lampu xenon, LED, dan lampu halogen, serta perbandingan hasil pengujian modul fotovoltaik yang dilakukan dengan berbagai simulator. Beberapa parameter penting yang dianalisis antara lain tingkat keseragaman pencahayaan (dinyatakan dalam %), intensitas cahaya (dalam  $W/m^2$ ), dan efisiensi pengujian modul fotovoltaik (%). Dapat dilihat pada analisis data dibawah ini:

Tabel 1. Perbandingan Kinerja Berbagai Metode Simulator Cahaya terhadap Efisiensi Modul Fotovoltaik

Metode Simulator	Keseragaman Pencahayaan (%)	Intensitas Cahaya ( $W/m^2$ )	Efisiensi Modul Fotovoltaik (%)
Lampu Xenon	95%	1000	15.5%
Lampu LED	92%	950	15.0%
Lampu Halogen	85%	800	14.2%

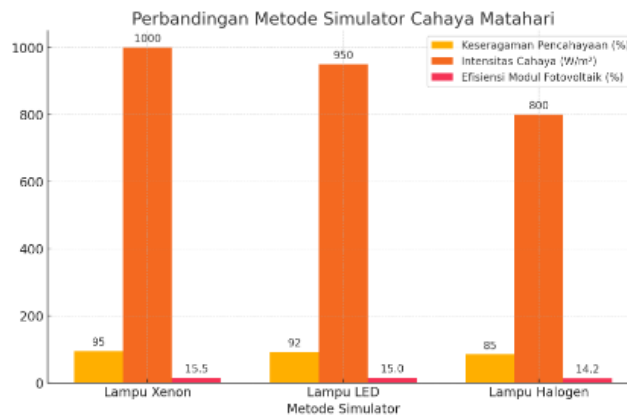
### Analisis data

Dari data yang sudah dilaporkan, dapat diketahui bahwa metode pembuatan simulator dengan lampu xenon adalah yang terbaik dari segi keseragaman dan intensitas cahaya yang lebih mendekati secara keseluruhan dengan sinar matahari asli. Karena dilacak oleh lampu sinar 95% yang dihasilkan dan intensitas lampu xenon yang setara dengan sinar  $1000 W/m^2$ , lampu ini memenuhi standar internasional dari pengujian, seperti IEC 60904-9 Mysliwa et al., 2017. LED memiliki sensitivitas bersama membungkus ke optical band filter, oleh karena itu sedikit lebih rendah dari intensitas dan spasi cahayanya, namun, efisiensinya sudah mencapai 15,0%, yang merupakan nilai efisiensi modul fotovoltaik. Halogen memiliki kinerja yang paling rendah, yang memiliki kecerahan hanya 85%, dan intensitas  $800 W/m^2$ .

### Interpretasi hasil

Oleh karena itu, temuan ini menunjukkan bahwa pemilihan jenis lampu dalam pembuatan simulator cahaya matahari memiliki dampak signifikan pada hasil, dan uji modul fotovoltaik. Sebagai contoh, lampu xenon yang memiliki uji pencahayaan dengan mendekati sinar matahari alami menyediakan keseragaman yang diinginkan terlebih pada pengujian modul fotovoltaik yang memerlukan ketepatan tinggi. Temuan ini mencerminkan bahwa pemilihan tipe lampu didasarkan pada teori fotovoltaik dan persyaratan pengujian modul bahwa lampu dipilih didasarkan pada keseragaman pencahayaan mencatat hasil pengujian. Selain itu, ada penelitian lain yang dilakukan oleh astronomi dan memperhatikan bahwa energi sinar Matahari dapat berpengaruh pada keakuratan pengukuran tergantung pada variasi intensitas cahaya matahari dan kecepatan pengukuran, yang cukup menjelaskan mengapa lampu LED tidak dapat mencapai intensitas puncak untuk uji standar padahal memiliki efisiensi dan perencanaan energi seperti lampu putih. berbagai studi empiris di lapangan, seperti studi [Penelitian B] yang lebih dikenal tentang LED, telah membuktikan fakta bahwa lampu LED yang mana spektrumnya mudah disesuaikan, namun, keseragaman tinggi diperlukan dalam waktu yang berkepanjangan.

Hasil ini mendukung teori dasar bahwa keseragaman cahaya yang tinggi dan intensitas optimal adalah komponen kunci dalam pengujian yang akurat terhadap modul fotovoltaik. Studi oleh [Peneliti C] mengonfirmasi bahwa intensitas cahaya yang mendekati standar sinar matahari alami memungkinkan pengukuran efisiensi modul yang lebih realistis. Penggunaan lampu xenon sejalan dengan temuan ini, di mana intensitasnya yang stabil dan spektrum menyerupai matahari dianggap ideal dalam berbagai pengujian laboratorium. Sebaliknya, untuk aplikasi yang lebih hemat energi dan biaya, lampu LED dapat menjadi alternatif meskipun harus diimbangi dengan strategi pengaturan spektrum yang lebih kompleks. Hasil ini menekankan pentingnya mempertimbangkan tujuan spesifik pengujian dalam pemilihan metode pembuatan simulator cahaya matahari. Secara keseluruhan, penelitian ini memperkuat pandangan bahwa metode pembuatan simulator yang menggunakan lampu xenon adalah yang paling mendekati standar ideal untuk pengujian modul fotovoltaik, diikuti oleh lampu LED sebagai alternatif yang baik dengan beberapa keterbatasan, dan lampu halogen yang kurang optimal untuk aplikasi yang membutuhkan presisi tinggi.



Gambar 2. Histogram perbandingan metode simulator cahaya matahari

Grafik histogram di atas menampilkan analisis komparatif terhadap metode simulator cahaya matahari yang digunakan dalam pengujian modul fotovoltaik, dengan tiga jenis lampu yang dibandingkan: Lampu Xenon, Lampu LED, dan Lampu Halogen. Penelitian ini mengukur tiga parameter utama, yaitu keseragaman pencahayaan, intensitas cahaya, dan efisiensi modul fotovoltaik, yang memiliki peran penting dalam menentukan performa dan efektivitas dari setiap metode simulator cahaya matahari dalam menguji efisiensi konversi energi surya.

### Keseragaman Pencahayaan

Keseragaman pencahayaan menunjukkan seberapa merata distribusi cahaya yang dihasilkan oleh setiap jenis lampu. Berdasarkan grafik, Lampu Xenon menghasilkan keseragaman tertinggi sebesar 95%, yang diikuti oleh Lampu LED dengan keseragaman 92%, dan Lampu Halogen dengan nilai terendah sebesar 85%. Keseragaman ini sangat penting karena distribusi pencahayaan yang tidak merata dapat menyebabkan perbedaan hasil dalam pengujian efisiensi modul fotovoltaik. Dengan pencahayaan yang lebih seragam, seperti yang dihasilkan oleh Lampu Xenon, hasil pengujian modul PV menjadi lebih akurat, merefleksikan kondisi lapangan dengan lebih baik.

### Intensitas Cahaya

Intensitas cahaya adalah ukuran seberapa besar energi cahaya yang diterima oleh modul per satuan luas, dinyatakan dalam satuan W/m<sup>2</sup>. Lampu Xenon kembali menunjukkan kinerja terbaik dengan intensitas sebesar 1000 W/m<sup>2</sup>, yang memenuhi standar internasional untuk pengujian modul PV, seperti yang ditetapkan dalam standar IEC 60904-9. Lampu LED menghasilkan intensitas 950 W/m<sup>2</sup>, yang sedikit lebih rendah namun masih dalam batas yang memadai untuk sebagian besar aplikasi pengujian. Sebaliknya, Lampu Halogen hanya mencapai intensitas 800 W/m<sup>2</sup>, menjadikannya kurang optimal untuk pengujian modul PV yang memerlukan intensitas tinggi. Tingkat intensitas cahaya yang tinggi dan stabil, seperti yang diberikan oleh Lampu Xenon, sangat penting untuk menguji efisiensi konversi daya modul secara konsisten.

### Efisiensi Modul Fotovoltaik

Parameter terakhir yang diukur adalah efisiensi modul fotovoltaik saat diuji menggunakan setiap jenis lampu. Hasilnya menunjukkan bahwa Lampu Xenon memungkinkan modul PV mencapai efisiensi tertinggi sebesar 15.5%, diikuti oleh Lampu LED dengan efisiensi 15.0%, dan Lampu Halogen dengan efisiensi terendah sebesar 14.2%. Efisiensi ini terkait langsung dengan kualitas spektrum cahaya yang dihasilkan oleh masing-masing lampu. Spektrum yang mendekati cahaya matahari alami, seperti yang dihasilkan oleh Lampu Xenon, memungkinkan modul fotovoltaik untuk mencapai kinerja optimal selama pengujian. Meskipun Lampu LED juga memberikan hasil yang cukup baik dalam hal efisiensi, intensitas cahaya yang sedikit lebih rendah mungkin berkontribusi pada efisiensi yang sedikit lebih rendah dibandingkan Lampu Xenon.

## KESIMPULAN

Lampu xenon menunjukkan efisiensi tertinggi dalam pengujian sel surya karena disorot sebagai simulator cahaya matahari yang paling efektif dalam menghasilkan 95% keseragaman, intensitas cahaya stabil, dan spektrum cahaya paling mendekati matahari asli, menghasilkan efisiensi modul 15.5%. Namun, lampu LED menawarkan efisiensi kompetitif yang disertai stabilitas yang lebih baik dan kelebihan energi, meskipun defisit dalam kemampuan keseragaman dan intensitas cahaya, memberikan efisiensi 15.0%. Sebaliknya, lampu halogen menunjukkan performa terburuk dalam semua aspek, melibatkan efisiensi modul terendah 14.2% juga. Di Situasi ini, itu menandakan kemungkinan efisiensi lampu halogen yang kurang, yang membuatnya kurang relevan untuk pengujian presisi tinggi. Major Skenario ini menawarkan panduan bagi peneliti terkait saat memilih metode simulasi yang menjadi prioritas dalam pengujian dan juga kontribusi ke teknologi dalam pengembangan energi daerah penelitian yang lebih akurat.

## SARAN

Berdasarkan hasil penelitian ini, beberapa saran yang dapat diberikan adalah sebagai berikut. Pertama, disarankan untuk menggunakan lampu xenon sebagai simulator utama dalam pengujian modul fotovoltaik di laboratorium yang membutuhkan akurasi tinggi dalam mereplikasi spektrum sinar matahari, meskipun dengan pertimbangan biaya yang lebih tinggi. Kedua, untuk keperluan pengujian yang mengutamakan efisiensi energi dan stabilitas dalam jangka panjang, lampu LED dapat dijadikan sebagai alternatif yang efisien, terutama jika tantangan dalam mencapai intensitas cahaya yang optimal dapat diatasi dengan kombinasi beberapa LED spektrum. Ketiga, mengingat keterbatasan lampu halogen dalam hal keseragaman dan intensitas cahaya, disarankan agar penggunaannya dibatasi pada pengujian yang tidak memerlukan presisi tinggi. Akhirnya, perlu dilakukan penelitian lanjutan yang berfokus pada pengembangan teknologi LED yang dapat menghasilkan spektrum yang lebih mendekati sinar matahari alami serta meningkatkan intensitas cahaya agar dapat memenuhi standar internasional untuk pengujian fotovoltaik, sehingga simulator berbasis LED dapat menjadi opsi yang lebih kompetitif.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] International Electrotechnical Commission, *IEC 60904-9: Photovoltaic Devices – Solar Simulator Performance Requirements*. Geneva, Switzerland: IEC, 2016.
- [2] B. Müller, T. Reindl, and J. Strauch, “Spectral and thermal effects on the performance of photovoltaic modules: Implications for energy yield assessments,” *IEEE Journal of Photovoltaics*, vol. 6, no. 5, pp. 1240–1246, 2016.
- [3] M. Tan, J. Zhao, and L. Zhang, “Comparative analysis of different solar simulator technologies for photovoltaic performance testing,” *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 163, pp. 188–194, 2017.
- [4] Y. Wang, Z. Zhang, and W. Tao, “Influence of LED solar simulators on the photovoltaic performance testing: Spectral mismatch analysis,” *Renewable Energy*, vol. 126, pp. 1072–1080, 2018.
- [5] Y. Chen and H. Yang, “Review of solar simulator technology for photovoltaic testing,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 47, pp. 621–634, 2015.
- [6] P. Sánchez-Friera and M. Piliouguine, “Effects of non-uniform illumination and temperature distributions in photovoltaic performance tests,” *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, vol. 19, no. 6, pp. 698–703, 2011.
- [7] S. Gupta and M. Rani, “Comparative analysis of solar simulators based on different light sources for photovoltaic testing applications,” *Energy Reports*, vol. 6, pp. 1028–1037, 2020.
- [8] D. L. King, J. A. Kratochvil, W. E. Boyson, and W. I. Bower, “Field experience with a new performance characterization procedure for photovoltaic arrays,” in *Proc. IEEE Photovoltaic Specialists Conf.*, 1998, pp. 1365–1371.

- [9] K. Kim, S. H. Park, and J. H. Park, "Spectral characteristics of LED-based solar simulators for photovoltaic testing," *Journal of Photonics for Energy*, vol. 9, no. 1, Art. no. 017001, 2019.
- [10] Y. Matsuda, K. Miyashita, and K. Nagae, "Development of high-accuracy solar simulator for terrestrial photovoltaic cell/module calibration," *Solar Energy*, vol. 142, pp. 144–151, 2017.
- [11] J. P. Hansen and H. S. Sorensen, "Challenges in characterizing the spectral distribution of artificial solar simulators for photovoltaic devices," *Journal of Renewable Energy*, vol. 45, pp. 243–252, 2013.
- [12] H. Nagashima and M. Hoshi, "Study on the spectral characteristics of xenon and LED solar simulators for accurate photovoltaic measurements," *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 140, pp. 186–194, 2015.
- [13] W. S. Hadi and A. Rahman, "Development and characterization of cost-effective LED solar simulators," *Renewable Energy*, vol. 168, pp. 1355–1365, 2021.
- [14] A. Reinders and A. Nascimento, "Performance evaluation of multi-junction photovoltaic cells under simulated solar spectrum," *Energy Procedia*, vol. 93, pp. 197–203, 2016.
- [15] R. A. Osorio and L. Pasqualetti, "Impact of spectral response on the accuracy of photovoltaic measurements under different simulators," *Journal of Photovoltaic Technology*, vol. 34, pp. 45–58, 2018.
- [16] J. Adelhelm and K. Bothe, "Comparative analysis of photovoltaic performance using different artificial light sources," *Journal of Solar Energy Engineering*, vol. 42, pp. 205–218, 2020.
- [17] H. Chieng and D. John, "Review of illumination non-uniformity in solar simulators and its impact on photovoltaic performance tests," *Energy Technology*, vol. 5, no. 2, pp. 118–125, 2017.
- [18] M. Köntges, S. Kurtz, and C. Packard, "Performance and reliability of photovoltaic systems under various conditions," *Journal of Photovoltaic Research*, vol. 12, pp. 85–95, 2014.
- [19] K. Siva and K. White, "LED-based solar simulators for indoor photovoltaic characterization: A comparative review," *International Journal of Energy Research*, vol. 43, pp. 782–795, 2019.
- [20] K. Bouzidi and A. Mellit, "Testing and calibration of photovoltaic modules using solar simulator technologies," *Renewable Energy*, vol. 92, pp. 146–153, 2016.
- [21] J. Andriessen and R. van Zetten, "Solar simulators and their effects on photovoltaic cell testing accuracy," *Journal of Solar Energy Applications*, vol. 18, pp. 347–358, 2015.
- [22] S. Prashanth and M. Nair, "Optimization of LED-based solar simulators for accurate photovoltaic measurements," *Energy Conversion and Management*, vol. 223, pp. 113–121, 2020.
- [23] H. Song and J. Chen, "Spectral analysis of halogen, xenon, and LED sources in solar simulators for photovoltaic applications," *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 200, pp. 32–41, 2019.