

การศึกษามาตรฐานและสมรรถนะของเครื่องจำลองแสงอาทิตย์ ชนิดไดโอดเปล่งแสง

Study of standards and performance of light-emitting diodes based solar simulators

นภัทร วัจนเทพินทร์¹ ขนิษฐา วรรณคำ^{1*} ไชยยันต์ บุญมี¹
และ ไพบุลย์ เกียรติสุขคนธา¹

Napat Watjanatepin¹, Khanittha Wannakam^{1*}, Chaiyant Boonmee¹
and Paiboon Kiatsookkanatorn¹

บทคัดย่อ

เครื่องจำลองแสงอาทิตย์เป็นอุปกรณ์ที่มีความสำคัญสำหรับการวิจัยพัฒนา ทดสอบ และประเมินประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ บทความนี้เป็นการทบทวนเอกสารที่เกี่ยวข้องกับเครื่องจำลองแสงอาทิตย์ชนิดไดโอดเปล่งแสงและนำผลการสังเคราะห์เอกสารมาสรุปเป็นองค์ความรู้ใหม่ และให้ข้อสังเกตทางวิชาการที่อาจนำไปสู่ปัญหาการวิจัยใหม่ ๆ ต่อไป ผู้เขียนศึกษาบทความทางวิชาการที่เกี่ยวข้องจากวารสารวิชาการนานาชาติ ผลการศึกษพบว่าเครื่องจำลองแสงอาทิตย์ชนิดไดโอดเปล่งแสงแบ่งเป็น 2 กลุ่ม คือ เครื่องจำลองแสงอาทิตย์ที่ใช้ไดโอดเปล่งแสง และใช้ไดโอดเปล่งแสงผสมผลสารผลอดทั้งสเต็มฮาโลเจน เครื่องจำลองแสงอาทิตย์ชนิดไดโอดเปล่งแสง 6 ชนิดใช้ทดสอบเซลล์แสงอาทิตย์ในสภาวะมาตรฐานได้ แต่พบว่ามีสเปกตรัมแสงที่เบี่ยงเบนไปจากสเปกตรัม AM 1.5G ค่อนข้างมาก การใช้เทคนิคการผสมสีไดโอดเปล่งแสง 10-23 ชนิด ได้คุณภาพแสงที่ดีกว่าทำให้ความเบี่ยงเบนไปจากสเปกตรัมมาตรฐานลดลง และใช้ทดสอบเซลล์แสงอาทิตย์ได้ในช่วงความยาวคลื่น 350-1100 นาโนเมตร ไดโอดเปล่งแสงที่ใช้ส่วนมากเป็นชนิดกำลังไฟฟ้าสูงใช้กับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 12-36 โวลต์ ใช้วิธีควบคุมแบบอิสระด้วยแหล่งจ่ายกระแสและแรงดันคงที่ และการควบคุมสเปกตรัมของแสงจากคอมพิวเตอร์ แนวโน้มการสร้างเครื่องจำลองแสงอาทิตย์คือการออกแบบและสร้างโมดูลไดโอดเปล่งแสงที่สามารถต่อเพิ่มจำนวนโมดูลเพื่อเพิ่มพื้นที่ทดสอบแสง ปรับความเข้มแสงและสเปกตรัมแสงที่จำลองขึ้นให้เปลี่ยนแปลงไปตามเวลาแบบอัตโนมัติ และศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิต่อสมรรถนะของเครื่องจำลองแสงอาทิตย์เทียม รวมถึงแนวทางใหม่ ๆ ในการพัฒนาสมรรถนะของเครื่องจำลองแสงอาทิตย์ชนิดไดโอดเปล่งแสงเข้าสู่คลาสสูงสุดตามมาตรฐาน IEC 60904-9: 2020

คำสำคัญ: ไดโอดเปล่งแสง เครื่องจำลองแสงอาทิตย์ ไอซี 60904-9: 2020 โมดูลไดโอดเปล่งแสง เซลล์แสงอาทิตย์

¹ คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ

¹ Faculty of Engineering and Architecture, Rajamangala University of Technology Suvarnabhumi

* Corresponding author. E-mail: khanittha.w@rmutsb.ac.th

Abstract

Solar simulators are critical tools for solar cell research, development, testing, and evaluation. This study examines research on a photovoltaic device's LED (light-emitting diode) solar simulator and incorporates the synthesis's findings into a new body of knowledge. We also makes scholarly observations that could inspire new research questions in the future. The authors examined relevant scholarly articles from international databases. The results revealed that the LED-based solar simulators were classified into two groups: LED solar simulators and halogen-LED solar simulators. A solar simulator with six different LEDs can be used to test solar cells in standard test conditions. However, it was discovered that the light spectrum deviated significantly from the AM 1.5G spectrum. The enhanced light quality is accomplished by limiting the divergence from the standard spectrum using 10-23 emitting diode color mixing techniques, and it may be used to evaluate solar cells in the 350–1100 nm wavelength range. Most of the light-emitting diodes used are high-power type, operating with a voltage of 12-36 V DC, using independent control methods with constant current and voltage sources and controlling the light spectrum from a computer. Designing and building light-emitting diode modules that can be expanded to increase the light test area, automatically adjusting the simulated light intensity and spectrum to change over time, and studying the impact of temperature on the performance of artificial solar simulators are all trends in the construction of solar simulators. This includes researching new techniques to improve the performance of light-emitting diode solar simulators to the highest class in accordance with IEC 60904-9: 202 are all in line with these trends.

Keywords: light-emitting diodes, solar simulator, IEC 60904-9: 2020, LED modular system, solar cells

บทนำ

เครื่องจำลองแสงอาทิตย์ (solar simulator) เป็นอุปกรณ์ที่มีความสำคัญในการพัฒนา ทดสอบ และประเมินประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ ตัวเก็บพลังงานแสงอาทิตย์ และอุปกรณ์อื่น ๆ ที่ทำงานด้วยการแผ่รังสีของดวงอาทิตย์ (da Rosa, & Ordóñez, 2022) เครื่องจำลองแสงอาทิตย์สำหรับงานทดสอบเซลล์แสงอาทิตย์ในสภาวะมาตรฐานจะต้องมีสเปกตรัมแสงสอดคล้องกับสเปกตรัมมาตรฐาน AM 1.5G และมีความรับรังสี 1000 วัตต์ต่อตารางเมตร และมีสมรรถนะเป็นไปตามมาตรฐานที่เกี่ยวข้อง (Laaber, 2022) คุณภาพของแสงประดิษฐ์จากเครื่องจำลองแสงอาทิตย์ขึ้นอยู่กับชนิดของ

หลอดไฟที่ใช้เป็นแหล่งกำเนิดแสง บทความนี้มุ่งศึกษาเกี่ยวกับเครื่องจำลองแสงอาทิตย์สำหรับการทดสอบเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ไดโอดเปล่งแสงเป็นแหล่งกำเนิดแสง (LED solar simulator) เท่านั้น อย่างไรก็ตามพื้นฐานสำคัญที่ควรศึกษาเพื่อให้เกิดความเข้าใจเกี่ยวกับการพัฒนาเครื่องจำลองแสงอาทิตย์อันประกอบไปด้วยสเปกตรัมของดวงอาทิตย์และมวลอากาศ (air mass) ส่วนประกอบหลักของเครื่องจำลองแสงอาทิตย์และมาตรฐานของเครื่องจำลองแสงอาทิตย์ เครื่องจำลองแสงอาทิตย์ชนิดไดโอดเปล่งแสงมีการพัฒนามาตั้งแต่ปี ค.ศ. 2003 (Esen, Sağlam, & Oral, 2017) และพัฒนาอย่างต่อเนื่องจนถึงปัจจุบัน นอกจากนี้ยังพบว่า

เทคนิคการใช้ไดโอดเปล่งแสงผสมกันหลายสเปกตรัมสามารถกำเนิดสเปกตรัมของแสงเลียนแบบกับสเปกตรัมมาตรฐาน AM 1.5G ได้จริง (da Rosa, & Ordóñez, 2022; G2V Optics, 2022) ซึ่งให้ผลการทดสอบเซลล์แสงอาทิตย์ที่ไม่แตกต่างจากเครื่องจำลองแสงอาทิตย์มาตรฐานชนิดหลอดซีนอน (xenon arc lamp) (Leary, Switzer, Kuntz, & Kaiser, 2016) อย่างไรก็ตามไดโอดเปล่งแสงมีข้อได้เปรียบกว่าหลอดซีนอนและหลอดไฟชนิดอื่น ๆ กล่าวคือไดโอดเปล่งแสงให้แสงที่มีความเสถียรที่ดีกว่า ความเข้มของแสงสามารถปรับได้ง่าย รวดเร็ว และประหยัดพลังงาน (Nakajima, Shinoda, & Tsuchiya, 2014) เครื่องจำลองแสงอาทิตย์ชนิดไดโอดเปล่งแสงไม่จำเป็นต้องใช้อุปกรณ์ทัศนศาสตร์ และประหยัดค่าใช้จ่ายในการซ่อมบำรุงรักษา เป็นต้น (Tawfik, Tonnellier, & Sansom, 2018)

บทความนี้ผู้เขียนมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาเอกสารที่เกี่ยวข้องกับเครื่องจำลองแสงอาทิตย์ชนิดไดโอดเปล่งแสง มุ่งเน้นที่การออกแบบแหล่งกำเนิดแสง เทคนิคการควบคุม การประเมินสมรรถนะในด้านความไม่สอดคล้องทางสเปกตรัม (spectrum mismatch, SM) ความไม่สม่ำเสมอของแสงบนพื้นที่ทดสอบ (spatial non-uniformity of irradiance, S_{NE}) และความไม่เสถียรของแสง (temporal instability of irradiance, T_{IE}) ภายใต้มาตรฐานที่เกี่ยวข้องและ

ข้อจำกัดต่าง ๆ แล้วจึงนำผลการสังเคราะห์เอกสารมาสรุปเป็นองค์ความรู้ใหม่เพื่อประโยชน์ทางวิชาการและนำเสนอช่องว่างทางวิชาการที่อาจนำไปสู่ปัญหาการวิจัยใหม่ ๆ ที่เกี่ยวข้อง รวมทั้งสามารถต่อยอดในเชิงการพัฒนาด้านอุตสาหกรรมในการเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องจำลองแสงอาทิตย์เทียมเพื่อผลักดันให้เกิดการนำไปใช้ประโยชน์ในเชิงพาณิชย์ในโอกาสต่อไป

1. มวลอากาศและสเปกตรัมของดวงอาทิตย์

1.1 มวลอากาศ

เมื่อแสงอาทิตย์เดินทางผ่านชั้นบรรยากาศมายังโลก ความเข้มของแสงจะลดลงเนื่องจากมีมวลอากาศอยู่ในชั้นบรรยากาศ มวลอากาศคือเศษส่วนของก๊าซและอนุภาคที่มีอุณหภูมิ องค์ประกอบทางเคมี และความดัน ซึ่งส่งผลให้เกิดคุณสมบัติทางกายภาพเฉพาะขึ้นในอากาศที่ลดความเข้มแสงจากการเดินทางของแสงจากดวงอาทิตย์ (Kabir, Kumar, Kumar, Adelodun, & Kim, 2018) สเปกตรัมของดวงอาทิตย์เมื่อมองจากอวกาศจะเทียบเท่ากับรังสีแม่เหล็กไฟฟ้าที่ปล่อยออกมาจากวัตถุดำที่อุณหภูมิประมาณ 5778 เคลวิน เมื่อสเปกตรัมของดวงอาทิตย์เดินทางผ่านอวกาศ สเปกตรัมของมันไม่เปลี่ยนแปลงเนื่องจากไม่มีมวลอากาศในอวกาศ จึงเรียกว่ามวลอากาศศูนย์ (AM 0) (MKS Newport, 2022)

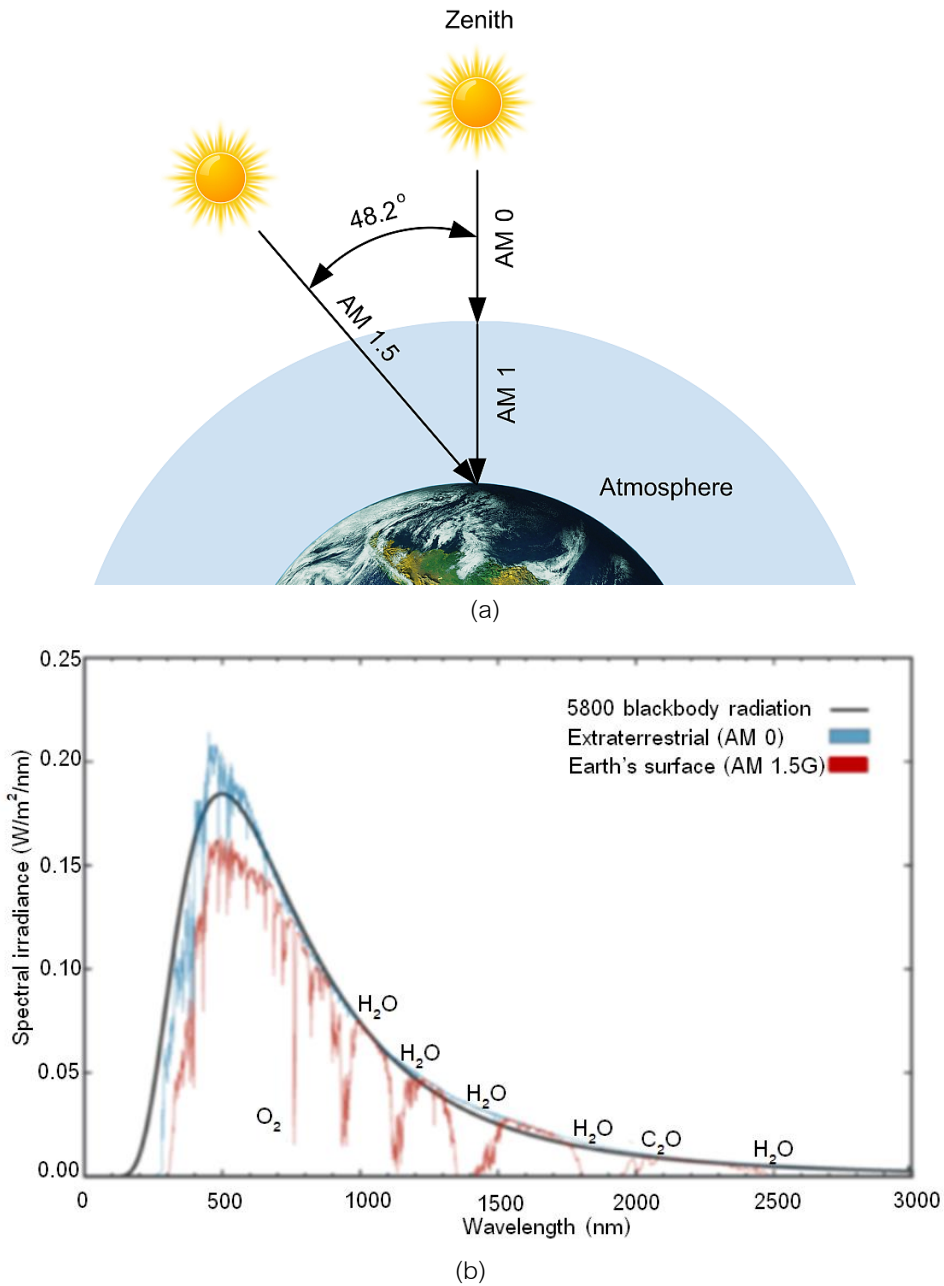


Figure 1 The solar radiation range at Air Mass 0, 1, 1.5

(a) Air Mass 0, 1, 1.5. Re-drawn by Watjanatepin (2022).

(b) The spectral irradiance at AM 0 compared to AM 1.5G and 5800 K blackbody radiation (Laaber, 2022).

เมื่อสเปกตรัมของดวงอาทิตย์ผ่านชั้นบรรยากาศตรงมายังพื้นโลกที่มุมซีกินิธ (Zenith) “ซีกินิธคือจุดในจินตนาการที่อยู่เหนือตำแหน่งใดตำแหน่งหนึ่งโดยตรง” (G2V Optics, 2022) มวลอากาศของบรรยากาศที่มุมสุดยอดเท่ากับ 1 เราเรียกว่า AM 1 (มวลอากาศ 1) ดังนั้น ที่ AM 1 เป็นช่วงการแผ่รังสีของดวงอาทิตย์มายังโลกที่สั้นที่สุด ดัง (Figure 1a) สเปกตรัมพลังงานแสงอาทิตย์ที่ AM 1 เป็นที่รู้จักกันโดยทั่วไปว่า “Air Mass 1 Global” (AM 1G) หรือสเปกตรัมของดวงอาทิตย์ที่ 0° จากจุดสูงสุด ความหมายอื่นของ AM 1 คือบรรยากาศชั้นหนึ่งอันเดียวกัน มวลอากาศ 1.5 คือมวลอากาศที่เลือกเป็นสเปกตรัมมาตรฐานเพื่อเป็นตัวแทนของแสงอาทิตย์ที่มวลอากาศ 1.5 (AM 1.5) ความหนาของบรรยากาศแสดงที่มุมสุดยอดที่ 48.2° (Laaber, 2022)

1.2 สเปกตรัมของดวงอาทิตย์

สเปกตรัมของดวงอาทิตย์ คือ พลังงานแสงที่ปล่อยออกมาจากดวงอาทิตย์ในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากรังสีเอกซ์ไปถึงคลื่นวิทยุ โดยทั่วไปมีความยาวคลื่นตั้งแต่ 200 นาโนเมตร ถึง 3000 นาโนเมตร (Watjanatepin, Wannakam, Sinpaitoon, & Somboonkit, 2022) สเปกตรัมของดวงอาทิตย์จากพื้นผิวดวงอาทิตย์มีอุณหภูมิประมาณ 5800 เคลวิน (da Rosa, & Ordóñez, 2022) ดัง (Figure 1b) สเปกตรัมของแสงอาทิตย์ที่พื้นผิวโลกประกอบด้วยส่วนของสเปกตรัมอัลตราไวโอเล็ต สเปกตรัมของแสงที่ตามองเห็น และสเปกตรัมอินฟราเรด (Buntoung, Pattarapanitchai, Laiwarin, Boontaveeyuwat, & Janjai, 2022) การกระจายพลังงานภายในสเปกตรัมของแสงอาทิตย์นั้น เป็นรังสีอัลตราไวโอเล็ตประมาณ

5 เปอร์เซ็นต์ เป็นแสงที่มองเห็นได้ 43 เปอร์เซ็นต์ และอีก 52 เปอร์เซ็นต์ เป็นแสงอินฟราเรด ASTM (American Society for Testing and Materials) กำหนดมาตรฐานของสเปกตรัมพลังงานแสงอาทิตย์รวมถึง AM 0, AM 1.5G และ AM 1.5D เป็นต้น มาตรฐานของสเปกตรัมแสงอาทิตย์ที่ใช้ทดสอบเซลล์แสงอาทิตย์ คือจะต้องมีความเข้มรังสี 1000 วัตต์ต่อตารางเมตร ที่มีสเปกตรัมสอดคล้องกับสเปกตรัมมาตรฐานที่ AM 1.5G ลักษณะของสเปกตรัมการแผ่รังสีของแสงอาทิตย์สำหรับเครื่องจำลองแสงอาทิตย์ AM 1.5G คือเส้นสีแดง ดัง (Figure 1b) ซึ่งพบว่าสเปกตรัม AM 1.5G ถูกลดทอนโดยกระบวนการในชั้นบรรยากาศที่ซับซ้อน ตัวอย่างเช่น ปริมาณของก๊าซ H_2O และ CO_2 ที่ดูดซับรังสีอินฟราเรดจากดวงอาทิตย์ ปริมาณน้ำฝน เมฆ และพายุทรายจะลดความเข้มของรังสีในช่วงที่มองเห็นได้ และสเปกตรัม UV ส่วนใหญ่จะถูกดูดกลืนจากสเปกตรัมของแสงอาทิตย์ ดังนั้นจึงมีไม่มากนักที่พื้นผิวโลก (Kambeizidis, 2022)

2. พื้นฐานเครื่องจำลองแสงอาทิตย์

2.1 ความสำคัญของเครื่องจำลองแสงอาทิตย์

เครื่องจำลองแสงอาทิตย์เป็นอุปกรณ์กำเนิดแสงประดิษฐ์ที่มีคุณสมบัติด้านความเข้มของแสงและสเปกตรัมแสงที่ใกล้เคียงกับแสงแดดธรรมชาติมากที่สุด (solar spectral at AM 1.5G) (Namin, Somrak, Kartwibul, & Thongpron, 2013) เครื่องจำลองแสงอาทิตย์เป็นเครื่องมือที่จำเป็นสำหรับการวิจัยและการประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรม เพื่อใช้ในการทดสอบวัสดุ อุปกรณ์ หรือกระบวนการใด ๆ ที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของแสงอาทิตย์เช่น เซลล์

แสงอาทิตย์ ตัวสะสมแสงอาทิตย์ เคมีไฟฟ้า
เชิงแสง ชีววิทยาเชิงแสง และวัสดุไวแสงอื่น ๆ
(Watjanatepin, & Sritanauthaikorn, 2022) การใช้
เครื่องจำลองแสงอาทิตย์มีข้อดีหลายประการ
เมื่อเทียบกับแสงธรรมชาติ กล่าวคือ 1) เครื่องจำลอง
แสงอาทิตย์สามารถปรับความเข้มของแสงให้คงที่ได้
ในขณะที่แสงแดดธรรมชาติเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา
2) สามารถใช้ในห้องปฏิบัติการ โดยผู้ใช้สามารถ
ควบคุมหรือเลือกปัจจัยแวดล้อมที่ใช้ในการศึกษา
หรือทดสอบ และ 3) ไม่จำกัดเวลาการใช้งานเหมือน
แสงแดดธรรมชาติ

2.2 ส่วนประกอบหลักของเครื่องจำลอง แสงอาทิตย์

เครื่องจำลองแสงอาทิตย์ประกอบด้วย 3
องค์ประกอบหลักดังนี้ แหล่งจ่ายกำลัง แหล่งกำเนิดแสง
และอุปกรณ์ทัศนศาสตร์

2.2.1 แหล่งจ่ายกำลัง

หลอดไฟแต่ละประเภทอาจใช้แหล่งจ่าย
กำลังไฟฟ้าที่แตกต่างกัน เช่น หลอดไฟซีนอนต้องใช้
แหล่งจ่ายไฟพิเศษที่สามารถสร้างไฟฟ้าแรงสูงเพื่อจุด
ไฟที่ไส้หลอดให้เกิดอาร์ค จึงทำให้แสงที่ออกมาไม่เสถียร
สำหรับหลอดควอตซ์ทังสเตนฮาโลเจน (QTH) ควรใช้
แหล่งจ่ายไฟกระแสตรงที่มีค่าระลอกต่ำ (low ripple)
เพื่อประสิทธิภาพที่ดีกว่า แน่นอนว่าไดโอดเปล่งแสง
ต้องใช้แหล่งจ่ายไฟกระแสตรงแบบแรงดันและกระแสคงที่
(CVCC) (Watjanatepin, & Sritanauthaikorn, 2022)
จึงจะให้แสงที่มีความเสถียรดีที่สุด การเลือก
แหล่งจ่ายกำลังที่เหมาะสมจะช่วยให้เครื่องจำลอง
แสงอาทิตย์มีประสิทธิภาพในการฉายรังสีที่ดี (G2V
Optics, 2022)

2.2.2 แหล่งกำเนิดแสง

แหล่งกำเนิดแสงเป็นส่วนประกอบหลัก
ของเครื่องจำลองแสงอาทิตย์ มีการใช้หลอดไฟหลาย
ประเภท เช่น หลอดซีนอน (Xe), เมทัลฮาไลด์ (MH),
ควอตซ์-ทังสเตนฮาโลเจน (QTH) เรียกรวมน่าว่า “ระบบที่ใช้
หลอดไฟ” หลอดไฟซีนอนเป็นที่นิยมใช้มากที่สุด
เนื่องจากให้สเปกตรัมแสงที่มีช่วงความยาวคลื่นกว้าง
กว่า อย่างไรก็ตามหลอดไฟซีนอนจะปล่อยยอของ
สเปกตรัมแสงที่สูงมากในช่วงอินฟราเรด ดังนั้นจึง
จำเป็นต้องมีเลนส์กรองที่กำจัดค่ายอดสเปกตรัม
ดังกล่าว นอกจากนี้สเปกตรัมความรับรังสีจะไม่เสถียร
ถ้าแหล่งจ่ายไฟฟ้าไม่มีความเสถียร (Watjanatepin,
& Sritanauthaikorn, 2022) ข้อเสียของระบบที่ใช้
หลอดไฟคือให้แสงที่มีความเสถียรของแสงต่ำกว่า
อายุใช้งานสั้นกว่า และต้นทุนการดำเนินงานสูงกว่า
(Kambezidis, 2022) ปัจจุบันมีการใช้แสงจากอุปกรณ์
ซิลิคอน สเตท เช่น ไดโอดเปล่งแสงแทนหลอดไฟฟ้า
เพราะมีข้อได้เปรียบมากกว่า กล่าวคือประหยัดพลังงาน
มีอายุการใช้งานที่ยาวนานกว่า แสงมีความเสถียรที่
ดีกว่า ความเข้มของแสงสามารถปรับได้อย่างรวดเร็ว
ภายในช่วงวินาทีและเอาต์พุตแสงสามารถควบคุม
ความละเอียดได้ตั้งแต่ 30 นาโนเมตรถึง 50 นาโนเมตร
ปัจจุบันการใช้ไดโอดเปล่งแสงผสมกันหลายสเปกตรัม
สามารถปล่อยสเปกตรัมรวมทั้งหมดที่สอดคล้องกับ
แสงอาทิตย์ได้ในช่วงความยาวคลื่นที่มากกว่า 300-
1850 นาโนเมตร (G2V Optics, 2022) เมื่อเปรียบเทียบ
คุณสมบัติของระบบที่ใช้หลอดไฟกับแหล่งกำเนิดแสง
ของระบบที่ใช้ไดโอดเปล่งแสง ดัง (Table 1) เทคโนโลยี
ไดโอดเปล่งแสงนั้นมียุทธการใช้งานที่ยาวนานกว่า
และมีความเสถียรของความรับรังสีดีที่สุด

Table 1 The comparison of characteristics of lamp-based system and LED-based system.

lamp technology	wavelength (nm)	temporal instability	maximum sun	lamp lifetime	initial cost	operating cost
Xenon	180-2600	high	10000	2000	medium	medium
MH	320-1200	medium	1000	6000	medium	medium
QTH	4000-2500	low	25	2000	low	medium
LED	350-1850	very low	1.1	10000+	high	low

2.2.3 อุปกรณ์ทัศนศาสตร์

อุปกรณ์ทัศนศาสตร์ (optical devices) เช่น เลนส์และตัวกรองเพื่อปรับให้แสงเป่าตรัมและความเข้มของแสงประดิษฐ์ใกล้เคียงกับสเปกตรัมของแสงอาทิตย์ หลอดไฟบางประเภทต้องการอุปกรณ์ทัศนศาสตร์ เช่น หลอดซีนอนที่ให้สเปกตรัมแสงที่หลากหลาย ดังนั้นตัวกรอง AM 1.5 จึงใช้เพื่อกรองสเปกตรัมที่ไม่ต้องการออกไป (Esen, Sağlam, & Oral, 2017) แต่สำหรับไดโอดเปล่งแสงอุปกรณ์เหล่านี้ไม่จำเป็นเพราะแอมพลิจูดของแสงแต่ละสเปกตรัมนั้นควบคุมได้ง่ายกว่า (Linden, Neal, & Serreze, 2014) แต่อุปกรณ์ทัศนศาสตร์ เช่น collimator และ diffuser นั้นอาจนำมาใช้เพื่อให้ได้การกระจายลำแสงที่ดีและมีความสม่ำเสมอบนระนาบทดสอบที่ดีขึ้น นอกจากนี้ยังใช้กระจกเงาหรือแผ่นสะท้อนแสงเพื่อควบคุมทิศทางของสเปกตรัมของลำแสงและเพิ่มความเข้มของแสงประดิษฐ์

2.3 มาตรฐานของเครื่องจำลองแสงอาทิตย์

2.3.1 มาตรฐานเครื่องจำลองแสงอาทิตย์

มาตรฐานสากลที่ใช้ในการประเมินสมรรถนะในระดับมาตรฐานสากลที่เกี่ยวข้องกับเครื่องจำลองแสงอาทิตย์สำหรับกรณีวิเคราะห์ลักษณะของเซลล์แสงอาทิตย์ มีรายละเอียดดังนี้ 1) ข้อกำหนดสมรรถนะ

เครื่องจำลองแสงอาทิตย์ IEC 60904-9 (IEC Standards, 2007) 2) ข้อกำหนดมาตรฐาน ASTM E927-10 สำหรับการจำลองพลังงานแสงอาทิตย์สำหรับการทดสอบเซลล์แสงอาทิตย์ (ASTM International, 2015) และ 3) JIS C 8912 เครื่องจำลองพลังงานแสงอาทิตย์สำหรับเซลล์แสงอาทิตย์และโมดูลผลึก (JIS, 2011)

2.3.2 ตัวบ่งชี้สมรรถนะ

เครื่องจำลองแสงอาทิตย์เครื่องแรกสร้างขึ้นเมื่อปี ค.ศ.1960 ในโครงการอวกาศของสหรัฐอเมริกา เพื่อจำลองสเปกตรัมของดวงอาทิตย์ในห้องปฏิบัติการสำหรับทดสอบเซลล์แสงอาทิตย์ในอวกาศ และดำเนินการพัฒนาร่วมกับ European Space Agency (ESA) หลังจากปี ค.ศ. 1970 อุตสาหกรรมเซลล์แสงอาทิตย์ทั่วโลกเติบโตขึ้นอย่างรวดเร็ว มีการพัฒนาเครื่องจำลองแสงอาทิตย์อย่างต่อเนื่อง พร้อมกันนี้ได้มีการกำหนดมาตรฐานสำหรับการทดสอบเซลล์แสงอาทิตย์และเครื่องจำลองแสงอาทิตย์ในด้านความเข้มแสง อุณหภูมิ ตลอดจนขั้นตอนการทดสอบ จุดสำคัญในการพัฒนาเครื่องจำลองแสงอาทิตย์สำหรับการทดสอบเซลล์แสงอาทิตย์คือการพัฒนาแหล่งกำเนิดแสงที่สังเคราะห์สเปกตรัมแสงประดิษฐ์เพื่อเลียนแบบแสงอาทิตย์ตามธรรมชาติให้ได้มากที่สุด แหล่งกำเนิดแสงจะต้องสร้างสเปกตรัมของแสงที่สอดคล้องกับ

สเปกตรัมของแสงอาทิตย์อ้างอิง คือ AM 1.5G ตามที่ระบุไว้ใน IEC 60904-3 (IEC Standards, 2007) และ ASTM G 173-03 (ASTM International, 2015) สเปกตรัมต้องมีความเข้มของแสงเท่ากับ 1 ดวงอาทิตย์ (1 sun) หรือ 1000 วัตต์ต่อตารางเมตร และทดสอบภายใต้อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส (Watjanatepin, 2017)

ปัจจุบันมาตรฐานที่ใช้ในการกำหนดคุณภาพของเครื่องจำลองแสงอาทิตย์สำหรับการวิเคราะห์ลักษณะเซลล์แสงอาทิตย์ มีดังนี้ ASTM-E927-10, JIS-C8912 และ IEC 60904-9 ดัง (Table 2) ตัวบ่งชี้สมรรถนะสูงสุดของเครื่องจำลองแสงอาทิตย์เทียม

ทั้งสามมาตรฐานกำหนดในรูปแบบเดียวกัน ซึ่งระบุว่าเป็นระดับคลาส AAA ตัวอักษร AAA หมายความว่า เครื่องจำลองแสงอาทิตย์มีความไม่สอดคล้องของสเปกตรัม (SM) ที่คลาส A และความไม่สม่ำเสมอของแสงเชิงพื้นที่ (S_{NE}) ที่คลาส A และมีเสถียรภาพของแสง (T_{IE}) ที่คลาส A ซึ่ง SM และความไม่เสถียรระยะยาว (LTI) ของมาตรฐานเป็นเลขเดียวกันทั้งหมด S_{NE} ของ JIS C 8904-9 ในคลาส B จะอยู่ที่ 3 เปอร์เซ็นต์ซึ่งต่ำกว่ามาตรฐานอื่น ประการสุดท้ายใน ASTM E 927-10 ไม่มีการประเมินความไม่เสถียรในระยะสั้น (STI) ดัง (Table 2)

Table 2 Standard and performance specifications defined by ASTM E 927-10 (2010), IEC 60904-9 (2007) and JIS C 8904-9 (2017) classification for standard wavelength range of 400 nm to 1100 nm.

class	organization standard	spectral match	irradiance	temporal stability	
			non-uniformity	STI	LTI
A	IEC 60904-9-2007	0.75-1.25	2%	0.50%	2%
	ASTM E927-10	0.75-1.25	2%	-	2%
	JIS C 8904-9	0.75-1.25	±2%	0.50%	2%
B	IEC 60904-9-2007	0.60-1.40	5%	2%	5%
	ASTM E92-05	0.60-1.40	5%	-	5%
	JIS C 8904-9	0.60-1.40	±3%	2%	5%
C	IEC 60904-9-2007	0.40-2.00	10%	10%	10%
	ASTM E927-10	0.40-2.00	10%	-	10%
	JIS C 8904-9	0.40-2.00	±10%	10%	10%

LTI: long term instability, STI: short term instability.

ในบทความนี้จะใช้มาตรฐาน IEC 60904-9 (2007) อ้างอิงเพื่ออธิบายวิธีการทดสอบมาตรฐานและเกณฑ์ต่าง ๆ เนื่องจากเป็นมาตรฐานที่ใช้อ้างอิงโดยสำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (สมอ.) กระทรวงอุตสาหกรรมแห่งประเทศไทย

2.3.3 IEC 60904-9 (2007)

IEC 60904-9 (2007) เป็นมาตรฐานที่ออกโดย “International Electro technical Commission-IEC” (IEC Standards, 2007) เพื่อกำหนดสมรรถนะที่ต้องการของเครื่องจำลองพลังงานแสงอาทิตย์เทียมที่ใช้สำหรับ

การวัดลักษณะทางกระแส และแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์โดยมีรายละเอียดที่สำคัญดังนี้

1. ช่วงความยาวคลื่น สเปกตรัมของแสงแดดประดิษฐ์จะต้องเป็นสเปกตรัมอ้างอิง AM 1.5G ที่กำหนดโดยมาตรฐาน IEC 60904-3 (IEC Standards, 2016) และมีช่วงความยาวคลื่นระหว่าง 400 นาโนเมตร ถึง 1100 นาโนเมตร แบ่งเป็น 6 ช่วง คือ 400-500, 500-600, 600-700, 700-800, 800-900 และ 900-1100 นาโนเมตร ในแต่ละช่วงความยาวคลื่นมีปริมาณความรับรังสีเท่ากับร้อยละ 18.4, 19.9, 18.4, 14.9, 12.5 และ 15.9 ตามลำดับ

2. ความไม่สอดคล้องทางสเปกตรัม ความไม่สอดคล้องทางสเปกตรัม กำหนดโดย IEC 60904-3 (IEC Standards, 2016) สำหรับแต่ละช่วงของความยาวคลื่นแสง ดัง (Table 3) คอลัมน์ 3 โดยกำหนดเป็นร้อยละของปริมาณรังสีทั้งหมดระหว่าง 400-1100 นาโนเมตร การคำนวณความไม่สอดคล้องทางสเปกตรัมของเครื่องจำลองแสงอาทิตย์เทียบกับสเปกตรัม AM 1.5G ระหว่างความยาวคลื่น 400-1100 นาโนเมตร แบ่งออกเป็น 6 แถบความยาวคลื่น แต่ละแถบต้องมีร้อยละความรับรังสีเฉพาะ ตัวอย่างเช่น ที่ความยาวคลื่น 400-500 นาโนเมตร ร้อยละความ

รับรังสีเท่ากับ 18.4 และที่ช่วงความยาวคลื่น 900-1100 นาโนเมตร ร้อยละความรับรังสีเท่ากับร้อยละ 15.9 ของทั้งหมด ค่าดังกล่าวคำนวณจากอัตราส่วนของร้อยละการฉายรังสีที่เกิดขึ้นจริงในช่วงระยะเวลาที่วัดได้และร้อยละของการฉายรังสี อ้างอิงตาม da Rosa, & Ordóñez (2022) หากผลการคำนวณอยู่ระหว่าง 0.75-1.25 แสดงว่าความไม่สอดคล้องทางสเปกตรัมที่แถบความยาวคลื่นคือคลาส A ดัง (Table 2) ในการประเมินว่าเครื่องจำลองแสงอาทิตย์มีความไม่สอดคล้องทางสเปกตรัมตรงกับคลาส A หรือไม่ ผลการประเมินความไม่สอดคล้องทางสเปกตรัมของความยาวคลื่นทั้งหมดในหกช่วงจะต้องเป็นคลาส A หากไม่ใช่ความไม่สอดคล้องทางสเปกตรัมจะขึ้นอยู่กับค่าต่ำสุด อาจเป็น B หรือ C ก็ได้

3. ความไม่สม่ำเสมอของแสง ความไม่สม่ำเสมอของแสงหรือ S_{NE} วัดบนระนาบทดสอบโดยวัดปริมาณความรับรังสีสูงสุดและต่ำสุดและคำนวณความไม่สม่ำเสมอของรังสี ดังสมการ (1) IEC 60904-9 (Linden, Neal, & Serreze, 2014) กำหนดว่า S_{NE} จะเป็นคลาส A, B หรือ C จะต้องมีการคำนวณ S_{NE} น้อยกว่าหรือเท่ากับ 2, 5 และ 10 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ ดัง (Table 2)

$$S_{NE} \text{ and } T_{IE} = \text{Non-uniformity}(\%) = 100\% \times \left[\frac{\text{max.irradiance} - \text{min.irradiance}}{\text{max.irradiance} + \text{min.irradiance}} \right] \quad (1)$$

4. ความไม่เสถียรของแสง ความไม่เสถียรของแสง (T_{IE}) ตามมาตรฐาน IEC 60904-9 (Linden, Neal, & Serreze, 2014) กำหนดให้มีการประเมินความไม่เสถียรของแสง 2 ลักษณะ คือ

ก) ความไม่เสถียรในระยะสั้น (STI) คือ ความเสถียรของความรับรังสีที่วัดได้ในช่วงระยะเวลาการสุ่มตัวอย่างชุดข้อมูลสำหรับการวัดเส้นโค้งแรงดันกระแสไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ เครื่องจำลองแสงอาทิตย์

แบบวาบ (flash/pulse) เพื่อให้ช่วงเวลาวาบสั้น ๆ จะต้องวัดค่าสูงสุดและต่ำสุดของการเปิดรับรังสีที่ศูนย์กลางของแหล่งกำเนิดแสง และคำนวณความเสถียรของความรับรังสีตามสมการ (1)

ข) ความไม่เสถียรในระยะยาว (LTI) คือ การวัดค่าสูงสุดและต่ำสุดของความรับรังสีในช่วงระยะเวลาหนึ่งที่ใช้ในการศึกษาเส้นโค้งแรงดันกระแสไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ โดย LTI ใช้สำหรับประเมินเครื่องจำลองแสงอาทิตย์ในสถานะคงที่ซึ่งให้แสงสว่างอย่างต่อเนื่อง จากนั้นจึงคำนวณความไม่เสถียรตามสมการ (1)

2.3.4 IEC 60904-9 (2020)

ในปี ค.ศ. 2020 IEC ได้ปรับปรุงมาตรฐานข้อกำหนดสมรรถนะเครื่องจำลองแสงอาทิตย์เป็น IEC 60904-9 (2020) (Slovenski Standard, 2020) เพื่อให้ทันกับการเปลี่ยนแปลงของเทคโนโลยีไดโอดเปล่งแสงและเทคโนโลยีวัสดุใหม่ๆ ที่ใช้ผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ เนื่องจากในปัจจุบันมีเซลล์แสงอาทิตย์ประเภทใหม่ ๆ

เกิดขึ้นมากมาย เช่น เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอรอฟสไกต์ (Perovskite-Si solar cells) ซึ่งตอบสนองต่อช่วงความยาวคลื่นที่กว้างกว่าที่มาตรฐานเดิมกำหนดสิ่งที่ IEC 60904-9 (2020) ปรับปรุงจากเวอร์ชัน 2007 มีดังนี้ 1) แสดงคลาส A+ 2) ขยายความยาวคลื่นเป็น 300 นาโนเมตร ถึง 1200 นาโนเมตร สำหรับคลาส A+ 3) ประเมินการครอบคลุมสเปกตรัม และการเบี่ยงเบนสเปกตรัม

1. ช่วงความยาวคลื่นของคลาส A+

การเปลี่ยนแปลงที่สำคัญที่สุดในมาตรฐาน IEC 60904-9 (2020) คือการเปิดตัวคลาส A+ ซึ่งเป็นการจัดประเภทคุณภาพสูงสุดที่ได้จากเครื่องจำลองแสงอาทิตย์ เกณฑ์การปฏิบัติงานมีสามเกณฑ์ เช่นเดียวกับ IEC 60904-9 (2007) ช่วงความยาวคลื่นของ IEC 60904-9 (2020) ครอบคลุมตั้งแต่ 300 นาโนเมตร ถึง 1200 นาโนเมตร รายละเอียดต่าง ๆ ของมาตรฐานนี้ ดัง (Table 3)

Table 3 Performance parameters of solar simulator in class A+, A, B and C under IEC 60904-9 (2020).

class	wavelength range (nm)	spectral match	irradiance non-uniformity	temporal stability	
				STI	LTI
A+	300-1200	0.875-1.125	1%	0.25%	1%
A	400-1100	0.75-1.25	2%	0.50%	2%
B	400-1100	0.60-1.40	5%	2%	5%
C	400-1100	0.40-2.00	10%	10%	10%

2. ความรับรังสีใหม่ของคลาส A+

สำหรับคลาส A+ ของเครื่องจำลองแสงอาทิตย์นั้น SM จะต้องได้รับการประเมินในช่วงความยาวคลื่นที่ขยายจาก 400 ถึง 1100 นาโนเมตร เป็น 300-1200

นาโนเมตร แบ่งเป็น 6 ช่วงตั้งแต่ 300-470, 470-561, 561-657, 657-772, 772-919 และ 919-1200 นาโนเมตร ในแต่ละช่วงความยาวคลื่นมีค่าเท่ากับร้อยละ 16.61, 16.74, 16.67, 16.63, 16.66 และ 16.69 ตามลำดับ

จะสังเกตว่าการแบ่งความยาวคลื่นใหม่ทำในลักษณะที่ร้อยละความรับรังสีแต่ละช่วงความยาวคลื่นใกล้เคียงกันคือประมาณร้อยละ 16.60-16.70 ดังนั้นการกำหนดคลาส A+ เป็นการเปลี่ยนแปลงครั้งสำคัญใน IEC 60904-9: 2020 (Slovenski Standard, 2020) ซึ่งมีข้อกำหนดที่เข้มงวด มีการเปลี่ยนแปลงรูปแบบการรายงานเพิ่มเติม ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อปรับปรุงคุณภาพของเครื่องจำลองแสงอาทิตย์ในอนาคต

วิธีการศึกษา

ผู้เขียนและคณะดำเนินการทบทวนบทความทางวิชาการที่เกี่ยวข้อง โดยใช้คำสำคัญในการค้นหาคือ “solar simulator” และ “light emitting diode” แล้วดำเนินการสืบค้นข้อมูลจากวารสารวิชาการนานาชาติ ในฐานข้อมูล IEEE Explore และ Science Direct ระหว่างปี ค.ศ. 2000 ถึง 2022 ผู้เขียนและคณะประชุมร่วมกันเพื่อวิเคราะห์บทคัดย่อ ความเป็นมาของการวิจัย วิธีการวิจัย ผลการวิจัย และสรุป แล้วเลือกเฉพาะบทความที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบแหล่งกำเนิดแสงจากไดโอดเปล่งแสง เทคนิคการควบคุมความเข้มแสงสเปกตรัมแสง และผลการประเมินสมรรถนะภายใต้มาตรฐานใดมาตรฐานหนึ่งดังต่อไปนี้ ASTM E 927-10 เป็นข้อกำหนดมาตรฐานสำหรับการจำลองพลังงานแสงอาทิตย์สำหรับการทดสอบเซลล์แสงอาทิตย์ภาคพื้นดิน หรือ IEC 60904-9 เป็นข้อกำหนดมาตรฐานที่ใช้ได้กับเครื่องจำลองพลังงานแสงอาทิตย์ที่ใช้ในห้องปฏิบัติการทดสอบและสอบเทียบ PV และในสายการผลิตของเซลล์แสงอาทิตย์และโมดูล PV หรือ JIS C 8904-9 เป็นข้อกำหนดมาตรฐานการจำแนกลักษณะเครื่องจำลองแสงอาทิตย์ ผู้เขียนและคณะ

พิจารณาคัดเลือกบทความดังกล่าวได้จำนวน 24 บทความ แล้วนำบทความเหล่านั้นมาสังเคราะห์ข้อมูลที่เกี่ยวข้องตามวัตถุประสงค์ของการวิจัยต่อไป

ผลการศึกษา

ผลการศึกษาพบว่าเครื่องจำลองแสงอาทิตย์ชนิดไดโอดเปล่งแสงสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ แบ่งออกได้ 2 กลุ่มคือ 1) เครื่องจำลองแสงอาทิตย์ชนิดไดโอดเปล่งแสงผสมหลอดฮาโลเจน (LED-halogen solar simulator) และ 2) เครื่องจำลองแสงอาทิตย์ชนิดไดโอดเปล่งแสง

4.1 เครื่องจำลองแสงอาทิตย์ชนิดไดโอดเปล่งแสงผสมหลอดฮาโลเจน

ผลการศึกษาพบว่าผู้เขียน Namin, Jivacate, Chenvidhya, Kirtikara, & Thongpron (2012) รายงานการสร้างและทดสอบเครื่องจำลองแสงอาทิตย์ที่ใช้ไดโอดเปล่งแสงสีน้ำเงิน T-type จำนวน 1024 ดวงผสมแสงกับหลอดฮาโลเจนจำนวน 6 หลอด ผลการทดสอบตาม IEC 60904-9 ได้คลาส บีบีเอ บนพื้นที่ทดสอบ 200×200 มิลลิเมตร เมื่อนำไปทดสอบเซลล์แสงอาทิตย์ภายใต้สภาวะนอกมาตรฐาน (non-STC) จะต้องใช้วิธีแก้ไขเส้นโค้ง I-V ด้วยสมการที่กำหนดไว้ใน IEC 60891 จะทำให้ผลการสร้างเส้นโค้ง I-V สอดคล้องกับการทดสอบจากเครื่องจำลองแสงอาทิตย์ระดับ AAA ผู้เขียน Bliss, Plyta, Betts, & Gottschalg (2014) นำเสนอเครื่องจำลองแสงอาทิตย์ที่ใช้ไดโอดเปล่งแสง 8 ชนิดผสมกับแสงจากหลอดฮาโลเจน ทดสอบตามมาตรฐาน IEC 60904-9 ได้คลาส บีเอเอ บนพื้นที่ทดสอบ 4.50×4.50 เซนติเมตร เขาพบว่าสเปกตรัมแสงในช่วง 800-900 นาโนเมตรไม่เข้าสู่คลาส เอ ในปีเดียวกันผู้เขียน

Grandi, lenina, & Bardhi (2014) พัฒนาตัวนำแสงอะลูมิเนียมสี่เหลี่ยมแบบเรียบง่ายและราคาถูกเพื่อให้ได้ระดับความสม่ำเสมอที่ยอมรับได้ เขาใช้ไดโอดเปล่งแสงสีน้ำเงิน สีเขียว สีขาว สีน้ำเงิน สีเขียว และสีเหลืองอำพันร่วมกับหลอดฮาโลเจนแรงดันต่ำเพื่อสร้างเครื่องจำลองแสงอาทิตย์อยู่ในคลาส บีเอปี ภายใต้มาตรฐาน IEC 60904-9 บนพื้นที่ทดสอบขนาด 100×100 มิลลิเมตร แล้วพบว่าสเปกตรัมแสงในช่วง 900-1100 นาโนเมตรไม่เข้าสู่คลาส เอ เขารายงานว่าผลงานของเขาสามารถปรับสเปกตรัมแสงให้เป็นคลาส A ได้โดยการเพิ่มเติมไดโอดเปล่งแสงที่มีความยาวคลื่น 440 นาโนเมตร และ 850 นาโนเมตร

ข้อจำกัดของเครื่องจำลองแสงอาทิตย์ชนิดไดโอดเปล่งแสงผสมหลอดฮาโลเจน คือ ความไม่สอดคล้องของสเปกตรัมไม่สามารถพัฒนาให้อยู่ในคลาส เอ ได้โดยเฉพาะในช่วงอินฟราเรด (Namin, Jivacate, Chenvidhya, Kirtikara, & Thongpron, 2012;

Bliss, Plyta, Betts, & Gottschalg, 2014; Grandi, lenina, & Bardhi, 2014) เนื่องจากหลอดฮาโลเจนให้สเปกตรัมแสงในช่วงอินฟราเรดที่อาจเปลี่ยนแปลงเมื่อแรงดันไฟฟ้าควบคุมหลอดไม่คงที่ เมื่อความร้อนของหลอดเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้การกระจายของสเปกตรัมและความเข้มของรังสีมีความเสถียรต่ำ (Bliss, Plyta, Betts, & Gottschalg, 2014) การปรับแรงดันควบคุมที่เหมาะสมจะให้ความเสถียรของแสงที่ดีทำได้โดยการใช้แหล่งจ่ายไฟ ดี.ซี.ชนิดแรงดันคงที่ (Namin, Jivacate, Chenvidhya, Kirtikara, & Thongpron, 2012)

4.2 เครื่องจำลองแสงอาทิตย์ชนิดไดโอดเปล่งแสง

จากการวิเคราะห์เอกสารที่เกี่ยวข้องทั้งหมดพบว่า มีจำนวน 21 บทความจาก 24 บทความที่เกี่ยวข้องกับเครื่องจำลองแสงอาทิตย์ชนิดไดโอดเปล่งแสงสำหรับงานโฟโตโวลตาอิก ผลการวิเคราะห์ข้อมูลทั้งหมดได้ ดัง (Table 4)

Table 4 The main discovery of LED solar simulator for PV devices, suggestion, and enhancement.

reference & year	research goal	materials & methods	results	suggestion & developments
Kohraku, & Kurokawa (2003)	To present the findings of an investigation into the capability of evaluation methods for the LED solar simulator for solar cell measurement.	● A square arrangement of 4 colored LEDs ● Ahexagonal arrangement of 6 colored LEDs. ● Evaluate unevenness of both arrangements.	● Non-uniformity using 4 and 6 LEDs is around 3% on the 100 mm × 100 mm of test plans.	The optimal test area and distance from the light source have an impact on the unevenness. "In the illuminant area as widens, the evenness is reduced."

Table 4 The main discovery of LED solar simulator for PV devices, suggestion, and enhancement (continue).

reference & year	research goal	materials & methods	results	suggestion & developments
Kohraku, & Kurokawa (2006)	To propose the LED solar simulator for obtaining the solar cell's I-V curve and spectral response.	● 4 LEDs color (blue red, infrared and white) ● 205 mm × 205 mm light source. ● Measurement I-V curve at 1 sun.	● The intensity and wavelength have no effect on I-V and SR characteristics of mono-crystalline cell. ● Test measurement result less than calculated results.	"It is notable that the low intensity like LED can estimate the I-V characteristic under AM 1.5G".
Tsuno, Kamisako, & Kurokawa (2008)	To present a new method for calculating I-V characteristics using an LED solar simulator.	● 3 color LEDs (blue, red and infrared) as a light source, there are a total of 2304 units. ● Light source area of 335 mm × 335 mm. ● Evaluate I-V characteristic under non-STC and correction by SR.	● 100 mm × 100 mm test area. ● I-V curve of solar cell under non-STC with correction by SR is much closed to I-V curve under STC.	The peak SPD over the AM 1.5G and average irradiance < 1 kW/m ² . "If 6 LED types allocation pattern is adopted, SR fitting formula will be very much improved"
Krebs, Sylvester-Hvid, & Jørgensen (2010)	Create a compact LED solar simulator platform for testing a polymer solar cell.	● 18 LEDs types were applied. ● Self-calibrating solar test platform control by computer. ● IPCE technique applies for IV- characterization.	● 9 mm × 27 mm test plane ● Irradiance 743 W/m² approximate to AM 1.5G coverage 350-1000 nm. ● $S_{NE} < 2\%$ on xy-plane of ± 12 mm. (variation in $I_{SC} < 2\%$).	This platform can be used for any solar cell characterization that responds in the 390-950 nm range over mm ² test plane.
Kolberg, Schubert, Lontke, Zwigart, & Spinner (2011)	To construct a spectral tunable LED solar simulator that covers the entire spectral range of Si-cells.	● 22 LEDs types ranging from 350 to 1100 nm. ● LED driver linear current regulator. ● Computer software-assisted control. ● Passive air cooling for thermal control.	● 1 sun coverage spectrum AM 1.5G over 350 to 1100 nm in class AAA of (IEC 60904-9). ● 200 mm × 200 mm of test plane.	Cooling technology may be able to support full intensity and full spectrum. To create a new light source with unique properties for PV research.

Table 4 The main discovery of LED solar simulator for PV devices, suggestion, and enhancement (continue).

reference & year	research goal	materials & methods	results	suggestion & developments
Namin, Jivacate, Chenvidhya, Kirtikara, & Thongpron (2013)	At 1000 W/m ² , implement LED solar simulator as a single-color of red, green, blue, and white. Characterization of I-V under each LEDs. To calculate the internal dynamic resistance of a solar cell.	● LED array of 227.5 mm × 227.5, test area of 150 mm × 150 mm. ● LED array consist of 1024 LEDs. ● Non –STC of I-V characterization and correction by IEC 60891.	● Blue or red LED solar simulator could be used to determine the Dynamic resistance. ● Irradiance uniformity and instability achieved class B. ● I-V characterizing under non-STC and correction method by IEC 60891 is realization.	The SPD uncovered to AM 1.5G of 400 to 1100 nm.
Bazzi et al. (2012)	To create an LED solar simulator spectral and power converter for LED drive and control.	● 6 LEDs (UV, blue, green, cyan, natural white, warm white). ● Feedback control current mode. ● Natural air convection. Cooling.	● ASTM E927, SM class A coverage 400-1100 nm on 150 mm×150 mm. ● Graphical user interface used for flexible control. ● S_{NE} Class C over 100 mm×50 mm of test area.	When compared to commercial types, LED could help to reduce the size of the simulator. The user-friendly interface is a good match for active spectrum control.
Stuckelberger et al. (2014)	Design and build a complete LED solar simulator for light soaking and V-I measurement of a-Si solar cells under IEC60904-9.	● 11 LEDs (399, 417, 457, 470, 500, 441 & 585, 596, 624, 658, 685, 728 nm). ● Computer control by I²C bus with MOSFET drive (LabVIEW based). ● Calibrate LED SPD by controlling the current to adjust the intensity. ● Water cooling.	● SM class A+ coverage AM 1.5G over 400-700 nm. S_{NE} Class A over 18 cm×18 cm test plane. ● T_{IE} class A++++. ● Irradiance 487 W/m² over 400-750 nm. ● Modular based of LED array.	"The modular design and low-cost component of this solar simulator allow for easy up-scalability" Water-cooled Al blocks exhibit excellent light stability.

Table 4 The main discovery of LED solar simulator for PV devices, suggestion, and enhancement (continue).

reference & year	research goal	materials & methods	results	suggestion & developments
Linden, Neal, & Serreze (2014)	To discuss about software-driven GUIs, electrical optical design, and the creation of LED solar simulator with configurable spectrum. To describe the I-V cure of a typical solar cell.	● 23 LEDs types covered 350 to 1100 nm. ● Design of modular building blocks. ● Computer control via graphical user interface software. ● Pulse control LED solar simulator.	● Class AAA of IEC 60904-9 and ASTM E927-10. ● SPD over 350 to 1,100 nm of AM 1.5 G. ● 20 cm×20 cm test plane. ● I-V cure of Si solar cell 156 mm×156 mm with a 100 ms pulse control. ● Each LED's spectrum can be adjustable using a computer.	The LED array is built with 10 cm × 10 cm building blocks, making it simple to assemble the large area solar simulator.
Vicente, Reis, & Vicente (2015)	LED solar simulator development in PV module parameterization.	● A total of 53 LEDs (blue, red, green, infrared and white) are used. ● Test I-V of solar cell 1 W, V_{oc} 6 V and I_{sc} 250 mA.	● Low irradiance of 200 W/m². ● SPD range 400 to 800 nm but uncoverage AM 1.5G of 400 to 1100 nm. ● The I-V curve was a good approximation.	To construct a new LED solar simulator with a large irradiance area. Increase in irradiance to 1000 W/m ² .
Novičkovas, Baguckis, Mekys, & Tamošiūnas (2015)	Design and built a compact array LED solar simulator.	● 19 of high-power LEDs of 6 colors (450, 660, 740, 850, 940 nm and white).	● IEC 60904-9 class AAA. ● Test plane 5 cm². ● 96 mm × 104 mm LED array. ● SPD uncoverage AM 1.5G of 400 to 1100 nm.	"Significant photo current distribution non-uniformity change is predicted only for amorphous -Si-cell due to a much narrower efficient absorption spectrum"

Table 4 The main discovery of LED solar simulator for PV devices, suggestion, and enhancement (continue).

reference & year	research goal	materials & methods	results	suggestion & developments
Al-Ahmad et al. (2018)	"The optical design, construction and measurement of a novel LED based large area solar simulator Class AAA to replicate the solar spectrum are the aim."	● 10 LEDs to achieve a class A of SM. ● Modular of LED array on PCB of 32 cm × 9 cm. ● IEC, ASTM, and JIS standards performance testing.	● Over 760 cm² of test area, Class AAA meets ASTM, IEC, and JIS standards. ● SPD coverage AM 1.5G on 350 to 1100 nm. ● Low-cost of around \$200 AUD per 10 cm².	Appropriate for scaling up the test plane with a modular LED array from a few cm ² to m ² .
López-Fraguas, Sánchez-Pena, & Vergaz (2019)	Design and build a low-cost AAA-class LED solar simulator without any optical devices.	● 14 LEDs color on PCB 5 cm × 5 cm, 34 LEDs in total. ● Irradiance control by LabVIEW. ● MATLAB to design and simulation. ● Calibrated by Si-solar cell by Newport (91150 – V).	● S_{NE} class A on 1 cm² test area. ● SM, LTI and STI meet class A of IEC 60904-9. ● 1.04 sun compact small LED solar simulator for small solar cell in research lab.	To achieve a perfect match with the AM 1.5G, improve the emission SPD by changing the electrics control.
Al-Ahmad et al. (2019)	To create a low-cost LED solar simulator for testing large-area printed organic solar cells. To reduce the number of LEDs with different wavelengths.	● 6 LEDs (warm white, cool white and 478, 735, 887, 1008 nm). ● Use Trace Pro software to simulate spectrum. ● Hexagonal model of LED array with the mirror reflector and diffuser.	● Class AAA meet ASTM, E927-10 over 1 sun on test plane 20 cm². ● SPD coverage AM 1.5G over 400 to 1100 nm.	Multiple modules will be used in this design to create a large area solar simulator at a low cost.
Esen, Saglam, Oral, & Esen (2020)	To fabricate a low-cost class A LED solar simulator with six different LEDs in accordance with ASTM E937-05 and IEC 60904-9.	● 6 LEDs (470, 740, 850, 940 nm, 4000 K, 5500 K). ● LED drivers with Arduino Mega 2560 current control. ● SM test under ASTM and IEC 60904-4. ● Irradiance not achieved 1000 W/m².	● SM class A over 400 to 1100 nm. ● AM1.5G SPD uncoverage and lack of SPD on 600-700 nm.	S _{NE} and T _{IE} must be evaluated if the irradiation intensity is increased to 1000 W/m ² .

Table 4 The main discovery of LED solar simulator for PV devices, suggestion, and enhancement (continue).

reference & year	research goal	materials & methods	results	suggestion & developments
Tavakoli, Jahantigh, & Zarookian (2021)	To create a tunable, versatile LED solar simulator, 19 different wavelengths of high-power LEDs covering 250 to 1000 nm of AM 1.5 G were used.	● 19 difference LEDs types applied for a light source. ● MCPCB assembly with a hexagonal LED array. ● ASTM and IEC 60904-9.	● Class AAA at distance 8.7 cm from LED array over 2.3 cm × 2.3 cm test area. ● SPD uncoverage AM 1.5G and lack of SPD in 700 nm. ● SPD range of 250 nm to 1000 nm.	Suitable for assessing the UV range of a solar cell's spectral responsibility. Extending the LED's IR range may help to increase the LSS spectrum.
Esen, Saglam, Oral, & Esen (2022)	Create a one-of-a-kind LED board modular structure for LED solar simulator. To assess performance in accordance with ASTM 927E-10 and IEC 60904-9.	● 6 LEDs array (470, 730, 850, 940 nm, 2700 K, 5300 K) ● 52 cm × 52 cm large LED array. ● Individual PWM control of LED power, Arduino based control.	● Class AAA over 52 cm × 52 cm. ● SPD range of 400 to 1100 nm of AM 1.5G at 1031 W/m². ● SPD uncovered in 800-1100 nm wavelength range.	"Use LEDs with faster response times instead of COB LEDs to develop LED solar simulator that can be flash tested in PV module test." Increase the number of LEDs on the board to create more powerful modules.
Watjanatepin, & Sritanauthaikorn (2022)	To approach the design of a large-scale solar simulator's rectangular LED module. Show the performance of LED solar simulator in accordance with IEC 60904-9.	● 6 LEDs color (450, 525, 625, 730, 850, 940 nm) of 15 COB on PCB 30 cm × 40 cm. ● LED forward voltage of 12-36 V. ● Symmetrical LED positioning method. ● IEC 60904-9. ● Active air cooled with Al heat sink.	● Class AAA on area 416 cm². Irradiance 1004 W/m². ● SPD uncoverage in 600 to 1100 nm. ● I-V curve of solar cell close match to I-V curve from standard solar simulator.	Using numerous rectangular modules, a large area LED solar simulator will be created, and the effect of irradiance on the overlap light area will be researched.

Table 4 The main discovery of LED solar simulator for PV devices, suggestion, and enhancement (continue).

reference & year	research goal	materials & methods	results	suggestion & developments
Vosylius, NoviČkovas, LaurinaviČius, & Tamošiūnas (2022)	To present a new rational scalable LED solar simulator and double reflector design.	● 6 LEDs (warm white, cool white, 660, 740, 850, 940 nm) on LED array size of 16 cm × 16 cm. ● Evaluate the performance of LSS under IEC 60904-9 ed2. ● Forced air cooling the thermal control. ● Ray tracing simulation software was proposed.	● Class AAA over test plane 14 cm × 16 cm. ● SM on AM 1.5G of 400-1100 nm. ● The wavelength 700-800 nm and 1000-1100 nm for SPD uncoverage. ● Double reflectors technique allowed this solar simulator to reach AAA class.	"The combination of individual reflectors with a common homogenizing mirror system processor further advantages due to lower losses."
Al-Ahmad et al. (2022)	A low-cost LED solar simulator is now being optically designed, constructed, and evaluated for use in testing PV devices.	● 10 LEDs (3200K, 4200K, 385, 410, 470, 505, 655, 740, 850, 940 nm) total of 71 LEDs. ● A hexagonal unit LED cell with a 50 mm-long edge. ● Optical model develops by TracePro. ● Forced air cooling the thermal control.	● Class AAA conforms to over 70 cm² of test plane ASTM, IEC, and JIS requirements. ● SPD coverage AM 1.5G of 350 to 1100 nm. ● Irradiance of 1000 W/m². ● I-V curve from this solar simulator not significant different from the standard solar simulator.	The test plane's size can be readily increased by connecting the hexagonal modular LED unit to other modules.
Sun et al. (2022)	For LED solar simulator, it is necessary to design the LED light source, optical system, light collecting, and light collimating.	● 15 types of LEDs (415, 447, 468, 488, 514, 567, 598, 659, 679, 708, 741, 783, 826, 856, 950 nm.) total of 19 LED's unit. ● Hyper-hemispherical aplanatic lens has been proposed. ● Cu-heat pipe for cooling water. ● LabVIEW real time active control.	● Class AAA of IEC 60904-9. ● T_{IE} < 0.3%. ● Irradiance of 1036 W/m². SPD coverage AM 1.5G over 400 to 1100 nm over 50 mm × 50 mm of test plane.	The LED solar simulator is widely used in the PV industry, photobiology, photochemistry, and other fields.

อภิปรายผล

ยุคต้นของการพัฒนาเครื่องจำลองแสงอาทิตย์โดยใช้ไดโอดเปล่งแสงอยู่ระหว่าง ปี ค.ศ. 2003-2008 ผู้เขียน Kohraku, & Kurokawa (2003); Kohraku, & Kurokawa (2006); Tsuno, Kamisako, & Kurokawa (2008) นำเสนอการสร้างแหล่งกำเนิดแสงด้วยไดโอดเปล่งแสง 3 ถึง 6 ชนิดที่มีสเปกตรัมในช่วงแสงสว่างแต่พวกเขา (Kohraku, & Kurokawa, 2003; Kohraku, & Kurokawa, 2006) ไม่สามารถสร้างความบริสุทธิ์ของแสงให้เท่ากับ 1000 วัตต์ต่อตารางเมตรได้อย่างไรก็ตามสามารถพัฒนาพื้นงานทดสอบสูงสุดขนาด 100x100 มิลลิเมตร เครื่องจำลองแสงอาทิตย์เหล่านี้สามารถใช้ในการทดสอบคุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ได้ในสภาวะนอกมาตรฐาน (non-STC) และใช้เทคนิค spectral response fitting formula (Tsuno, Kamisako, & Kurokawa, 2008) ช่วยปรับแก้เส้นโค้ง I-V ของเซลล์ทดสอบให้เข้าสู่สภาวะมาตรฐานได้

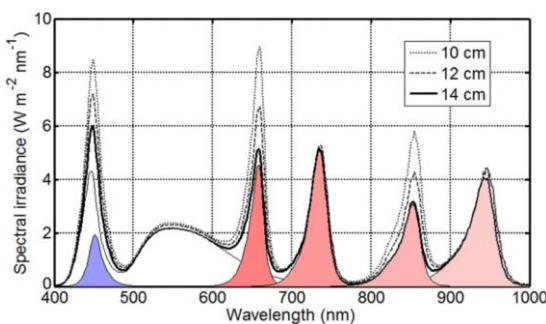
หลังจากปี ค.ศ. 2010 นักวิจัยส่วนมากทำการพัฒนาแหล่งกำเนิดแสงด้วยวิธีการผสมสี (color mixed method) จากหลอดไดโอดเปล่งแสง ผู้เขียน Bazzi et al. (2012); Vicente, Reis, & Vicente (2015); Novičkovas, Baguckis, Mekys & Tamošiūnas (2015) นำเสนอวิธีผสมสีไดโอดเปล่งแสง 6 ชนิด คือแสงสีน้ำเงิน เขียว แดง ขาว และกลุ่มอินฟราเรดเพื่อสร้างสเปกตรัมแสงของเครื่องจำลองแสงอาทิตย์ มีเพียงผลงานของผู้เขียน Novičkovas, Baguckis, Mekys & Tamošiūnas (2015) เท่านั้นที่มีสมรรถนะอยู่ในคลาส เอเอเอ ตามมาตรฐาน IEC 60904-9 แต่ได้ขนาดพื้นที่ทดสอบแสงเพียง 5 ตารางเซนติเมตร ซึ่งค่อนข้างเล็กเมื่อเปรียบเทียบกับขนาดของแหล่งกำเนิดแสงที่สร้างขึ้น นอกจากนี้

ผู้เขียน Al-Ahmad et al. (2019); Esen, Saglam, Oral, & Esen (2020); Esen, Saglam, Oral, & Esen (2022); Vosylius, Novičkovas, Laurinavičius, & Tamošiūnas (2022) นำไดโอดเปล่งแสงชนิดอินฟราเรดไวท์และคูบลไวท์ผสมกับสีน้ำเงิน (หรือแดง) และไดโอดเปล่งแสงกลุ่มอินฟราเรด ดัง (Table 4) เพื่อให้ได้สเปกตรัมแสงครอบคลุมความยาวคลื่น 400-1100 นาโนเมตร ทั้งนี้ผู้เขียน Al-Ahmad et al. (2019) นำเสนอแหล่งกำเนิดแสงรูปหกเหลี่ยมมีพื้นงานทดสอบขนาด 20 ตารางเซนติเมตร ที่ออกแบบและจำลองด้วยโปรแกรม TracePro เครื่องจำลองแสงอาทิตย์ของเขามีสมรรถนะตามมาตรฐาน ASTM E927-10 อยู่ในคลาส เอเอเอ และที่น่าสนใจคือผลงานของผู้เขียน Esen, Saglam, Oral, & Esen (2022) ซึ่งออกแบบให้แหล่งกำเนิดแสงมีขนาดเท่ากับพื้นงานทดสอบที่มีขนาดใหญ่มาก คือ 52x52 เซนติเมตร และมีสมรรถนะในคลาส เอเอเอ เช่นกัน ผลงานนี้สามารถควบคุมไดโอดเปล่งแสงได้อย่างอิสระได้ด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ นอกจากนี้ยังพบว่าผู้เขียน Watjanatepin, & Sritanauthaikorn (2022) ใช้ไดโอดเปล่งแสงสีน้ำเงิน เขียว แดง และกลุ่มอินฟราเรด (740, 850 และ 940 นาโนเมตร) เพื่อสร้างแหล่งกำเนิดแสงชนิดโมดูลสี่เหลี่ยมขนาด 30x40 เซนติเมตร และมีสมรรถนะในคลาส เอเอเอ เช่นเดียวกัน แนวคิดของ Al-Ahmad et al. (2019); Esen, Saglam, Oral, & Esen (2022) พวกเขาสร้างแหล่งกำเนิดแสงเป็นแบบโมดูล ซึ่งสามารถนำมาต่อกันจำนวนมากขึ้นเพื่อเพิ่มขนาดของพื้นงานทดสอบได้

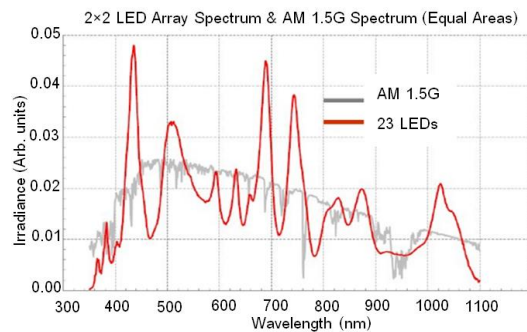
อย่างไรก็ตามสเปกตรัมแสงของเครื่องจำลองแสงอาทิตย์ที่พัฒนาด้วยไดโอดเปล่งแสง 6 ชนิด

แม้ผลการทดสอบความสอดคล้องทางสเปกตรัมตามมาตรฐานจะได้คลาส เอ แต่กลับพบว่ารูปร่างของสเปกตรัมคล้ายนิ้วมือ มียอดแหลมจำนวน 5-6 ยอดดัง (Figure 2a) และค่ายอดของสเปกตรัมแตกต่างจากสเปกตรัมแสงอ้างอิง (AM 1.5G) ค่อนข้างมาก สเปกตรัมแสงที่มีลักษณะนี้อาจส่งผลกระทบต่อ

ผลตอบสนองของค่า spectral response (SR) ของเซลล์แสงอาทิตย์ระหว่างการทดสอบ ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อ photo current ที่อาจจะคลาดเคลื่อนไปจากผลการทดสอบจากเครื่องจำลองแสงอาทิตย์มาตรฐาน ตัวอย่างสเปกตรัมของเครื่องจำลองแสงอาทิตย์กลุ่มที่พัฒนาด้วยไดโอดเปล่งแสง 6 ชนิด ดัง (Figure 2a)



(a)



(b)

Figure 2 Sample of LED solar simulator spectrum examples that created with difference irradiance spectral.

(a) 6-colors LED spectral distribution of Novičkovas, Baguckis, Mekys, & Tamošiūnas (2015)

(b) 23-colors LED spectral distribution of Linden, Neal, & Serreze (2014)

จากข้อจำกัดของเครื่องจำลองแสงอาทิตย์กลุ่มที่พัฒนาด้วยไดโอดเปล่งแสง 6 ชนิดดังที่กล่าวมาข้างต้นนักวิจัยพยายามปรับปรุงได้โดยการวิเคราะห์ว่าสเปกตรัมแสงที่ความยาวคลื่นแสงในช่วงใดยังไม่มีความต่อเนื่องแล้วเพิ่มไดโอดเปล่งแสงในช่วงสเปกตรัมเหล่านั้นเข้าไป แน่นอนว่าจะต้องใช้ไดโอดเปล่งแสงมากกว่า 6 ชนิดจึงจะได้สเปกตรัมของแสงประดิษฐ์ที่ดีกว่าวิธีเดิมโดยมีลักษณะที่สอดคล้องกับสเปกตรัมมาตรฐาน (AM 1.5G) จาก (Table 4) พบว่ามีผู้เขียน Krebs, Sylvester-Hvid, & Jørgensen (2010); Kolberg, Schubert, Lontke,

Zwigart, & Spinner (2011); Linden, Neal, & Serreze (2014); Stuckelberger et al. (2014); Al-Ahmad et al. (2018); López-Fraguas, Sánchez-Pena, & Vergaz (2019); Tavakoli, Jahantigh, & Zarookian (2021) นำเสนอผลการพัฒนาเครื่องจำลองแสงอาทิตย์ที่มีสเปกตรัมแสงที่มีความสอดคล้องตามมาตรฐานที่เกี่ยวข้องโดยใช้ไดโอดเปล่งแสงระหว่าง 10 ชนิดถึง 23 ชนิด ดังรายงานต่อไปนี้

ผู้เขียน Al-Ahmad et al. (2018); Al-Ahmad et al. (2022) พัฒนาสเปกตรัมแสงของเครื่องจำลองแสงอาทิตย์ด้วยไดโอดเปล่งแสง 10 ชนิด ประกอบด้วย

สีขาว 3200 เคลวิน และ 4200 เคลวิน, สีน้ำเงิน 385, 410 นาโนเมตร สีเขียว 505 นาโนเมตร สีแดง 655 นาโนเมตร ผสมกับอินฟราเรด 3 ชนิดคือ 740, 850 และ 940 นาโนเมตร สร้างเป็นโมดูลไดโอดเปล่งแสงที่ต่อขยายพื้นที่ทดสอบได้ 70 ตารางเซนติเมตร คุณภาพอยู่ในคลาส เอเอเอ ตามมาตรฐาน IEC, ASTM และ JIS แล้วยังพบว่าผู้เขียน Stuckelberger et al. (2014) สร้างเครื่องจำลองแสงอาทิตย์ด้วยไดโอดเปล่งแสง 11 ชนิด กระแสของไดโอดเปล่งแสงควบคุมด้วยมอสเฟต (MOSFET) ผ่านระบบคอมพิวเตอร์ ผลการทดสอบพบว่าเครื่องจำลองแสงอาทิตย์ของเขาแสดงให้เห็นสมรรถนะสูงสุดดีกว่าคลาส เอเอเอ บนพื้นที่ทดสอบ 18×18 เซนติเมตร ต่อมาผู้เขียน López-Fraguas, Sánchez-Pena, & Vergaz (2019) ใช้ไดโอดเปล่งแสง 14 ชนิด ที่มีต้นทุนต่ำสำหรับการวิจัยเครื่องจำลองแสงอาทิตย์ผลการทดสอบที่คลาส เอเอเอ ความรับรู้สีควบคุมผ่านการอินเทอร์เฟซกับ LabVIEW นอกจากนี้ผู้เขียน Sun et al. (2022) เสนอโมดูลไดโอดเปล่งแสงรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า ใช้ไดโอดเปล่งแสงกำลังสูง 16 สเปกตรัม และใช้เลนส์ hyper-hemispherical aplanatic สเปกตรัมแสงที่ได้จึงมีความสอดคล้องทางสเปกตรัมที่คลาส เอเอเอ

ผู้เขียน Krebs, Sylvester-Hvid, & Jørgensen (2010); Kolberg, Schubert, Lontke, Zwigart, & Spinner (2011); Linden, Neal, & Serreze (2014); Tavakoli, Jahantigh, & Zarookian (2021) ใช้ไดโอดเปล่งแสง 19-23 ชนิดจำนวนมากเพื่อสร้างสเปกตรัมแสงที่คลาส เอ และมีการกระจายสเปกตรัมอย่างต่อเนื่องในช่วงความยาวคลื่นที่กำหนดโดย IEC และ ASTM เนื่องจากมีไดโอดเปล่งแสงจำนวนหลายชนิดการ

ควบคุมความเข้มแสง แต่ละสเปกตรัมต้องเป็นอิสระพวกเขาจึงใช้วิธีการควบคุมกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับไดโอดเปล่งแสงแต่ละชนิดด้วยคอมพิวเตอร์ (Krebs, Sylvester-Hvid, & Jørgensen, 2010; Kolberg, Schubert, Lontke, Zwigart, & Spinner, 2011) และสื่อสารกับผู้ใช้งานด้วยโปรแกรมจียูไอ (graphical user interface, GUI) (Linden, Neal, & Serreze, 2014) ทำให้สามารถควบคุมสเปกตรัมแสงให้มีความสอดคล้องของสเปกตรัมที่คลาส เอ เครื่องจำลองแสงอาทิตย์ที่พัฒนาด้วยไดโอดเปล่งแสง 23 ชนิดแสดงสเปกตรัมแสงเปรียบเทียบกับ AM 1.5G ดัง (Figure 2b)

หลังจากปี ค.ศ. 2014 นักวิจัยจำนวนหนึ่งพัฒนาแหล่งกำเนิดแสงไดโอดเปล่งแสงชนิดโมดูลขึ้นมา มีเป้าหมายเพื่อการนำแต่ละโมดูลมาต่อขยายเพื่อเพิ่มพื้นที่งานทดสอบแสงของเครื่องจำลองแสงอาทิตย์ให้ใหญ่พอที่จะนำไปทดสอบโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ได้ (PV module) เริ่มจากผู้เขียน Linden, Neal, & Serreze (2014) สร้างโมดูลแบบบิลด์ดิ้งบล็อกซ์ (building blocks) ขนาด 10×10 เซนติเมตร ด้วยไดโอดเปล่งแสง 23 ชนิดขึ้นในปี ค.ศ. 2014 ต่อมาผู้เขียน Namin, Jivacate, Chenvidhya, Kirtikara, & Thongpron (2013) พัฒนาโมดูลไดโอดเปล่งแสงขนาดใหญ่ขึ้นอีกคือขนาด 32×9 เซนติเมตร ด้วยการผสมสีไดโอดเปล่งแสง 10 ชนิดในปี ค.ศ. 2022 ผู้เขียน Watjanatepin, & Sritanauthaikom (2022) รายงานการสร้างโมดูลไดโอดเปล่งแสงขนาดใหญ่ 40×30 เซนติเมตร ดัง (Figure 3a) ด้วยไดโอดเปล่งแสง 6 ชนิด และนำ COB-LED เข้ามาใช้งานร่วมกับ high power LEDs ในปีเดียวกันผู้เขียน Esen, Saglam, Oral, & Esen (2022) รายงานการสร้างโมดูลไดโอดเปล่งแสงขนาดใหญ่ที่สุดคือ 52×52 เซนติเมตร ด้วยเทคนิค

เดียวกันกับผู้เขียน Watjanatepin, & Sritanauthaikorn (2022)

โมดูลไดโอดเปล่งแสงรูปสี่เหลี่ยม (Namin, Jivacate, Chenvidhya, Kirtikara, & Thongpron, 2013; Linden, Neal, & Serreze, 2014; Esen, Saglam, Oral, & Esen, 2022; Watjanatepin, & Sritanauthaikorn, 2022) เป็นการออกแบบที่ได้รับความนิยมมากที่สุดสำหรับแหล่งกำเนิดแสงระบบโมดูล ในขณะที่นักวิจัยบางรายนำเสนอการพัฒนาโมดูลไดโอดเปล่งแสงรูปหกเหลี่ยม (Tavakoli, Jahantigh, & Zarookian, 2021; Al-Ahmad et al., 2022) เมื่อพิจารณาการ

ขยายพื้นที่ทดสอบด้วยการต่อเพิ่มจำนวนโมดูลรูปสี่เหลี่ยมมีความสมเหตุสมผลมากกว่าการขยายโมดูลโดยการเพิ่มขนาดของแหล่งกำเนิดแสงรูปหกเหลี่ยม โมดูลไดโอดเปล่งแสงสี่เหลี่ยมที่ใหญ่ที่สุดสำหรับเครื่องจำลองแสงอาทิตย์ที่มีความสอดคล้องของสเปกตรัมอยู่ในคลาส เอ คือโมดูลของผู้เขียน Esen, Saglam, Oral, & Esen (2022) ดัง (Figure 3b) เนื่องจากคุณสมบัติเหล่านี้เหมาะสมที่จะพัฒนาไปสู่การทดสอบทดสอบโฟโตโวลตาอิกโมดูลขนาดใหญ่ได้ในโอกาสต่อไป

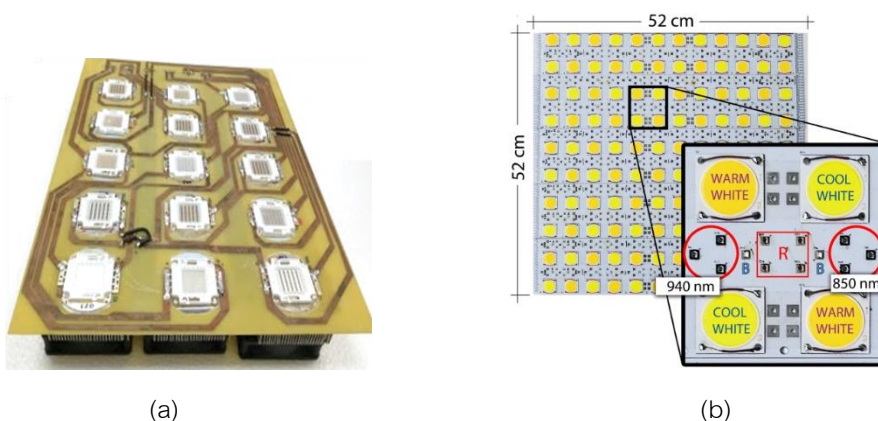


Figure 3 Sample of LED modular system of the solar simulator in difference sizes.

(a) 40 cm x 30 cm rectangular LEDs module of Watjanatepin, & Sritanauthaikorn (2022)

(b) The largest of rectangular LEDs module of Esen, Saglam, Oral, & Esen (2022)

อุณหภูมิส่งผลต่อสมรรถนะของเครื่องจำลองแสงอาทิตย์ กล่าวคือเมื่ออุณหภูมิของไดโอดเปล่งแสงเพิ่มขึ้น ความสว่างจะลดลง และสเปกตรัมของมันจะเปลี่ยนแปลงไปด้วย (Watjanatepin, 2022) การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของไดโอดเปล่งแสงอาจส่งผลต่อความไม่สอดคล้องทางสเปกตรัม

ความไม่สม่ำเสมอของแสง และความไม่เสถียรของความเข้มแสงของเครื่องจำลองแสงอาทิตย์ชนิดไดโอดเปล่งแสง ดังนั้นระบบควบคุมความร้อนสำหรับไดโอดเปล่งแสงจึงมีความสำคัญมากเพราะเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้เครื่องจำลองแสงอาทิตย์มีสมรรถนะที่คลาสเดิมไม่เปลี่ยนแปลง

อย่างไรก็ตามจากการทบทวนเอกสารที่เกี่ยวข้องกับการจัดการระบายความร้อนสำหรับโมดูลไดโอดเปล่งแสง ผู้เขียนและคณะพบว่านักวิจัยส่วนใหญ่ (Bazzi et al., 2012; Al-Ahmad et al., 2022; Vosylius, Novičkovas, Laurinavičius, & Tamošiūnas, 2022; Watjanatepin, & Sritanauthaikorn, 2022) เลือกใช้ฮีตซิงก์อะลูมิเนียม (aluminum heat sink) ร่วมกับการระบายความร้อนด้วยพัดลมระบายอากาศ (force air cooled) หรือฮีตไปป์ทองแดงร่วมกับการระบายความร้อนด้วยน้ำ (Cu heat pipe with water cooling) (Sun et al., 2022) ส่งผลให้ความไม่สม่ำเสมอของแสงจากเครื่องจำลองแสงอาทิตย์ของพวกเขาอยู่ในคลาส เอ ระบบระบายความร้อนอีกระบบหนึ่งที่มีความเหมาะสมของไดโอดเปล่งแสงได้ดีมากกว่าคือการใช้บล็อกอะลูมิเนียมระบายความร้อนด้วยน้ำ (Aluminum block with water cooling) ที่นำเสนอโดยผู้เขียน Stuckelberger et al. (2014) ผลคือเขาสามารถควบคุมให้ไดโอดเปล่งแสงทำงานในอุณหภูมิเฉลี่ย 25 องศาเซลเซียส จึงส่งผลให้ความเสถียรของแสงสูงกว่าคลาส เอ ข้อมูลเหล่านี้ยืนยันได้ว่าการระบายความร้อนส่งผลต่อคุณภาพของแสงของเครื่องจำลองแสงอาทิตย์เทียมชนิดไดโอดเปล่งแสง โดยเฉพาะความเสถียรของแสง

สรุป

มาตรฐานนานาชาติสำหรับเครื่องจำลองแสงอาทิตย์คือ IEC 60904-9, ASTM E927-10 และ JIS C 8912 โดยมาตรฐาน IEC 60904-9 มีการเปลี่ยนแปลงที่สำคัญในปี ค.ศ. 2020 คือการกำหนดคลาส เอบวก (A+) ซึ่งมีข้อกำหนดที่เข้มงวดมากขึ้น

อันจะส่งผลต่อการปรับปรุงคุณภาพของเครื่องจำลองแสงอาทิตย์ในอนาคต ไดโอดเปล่งแสงประยุกต์ใช้เป็นแหล่งกำเนิดแสงสำหรับเครื่องจำลองแสงอาทิตย์ได้ 2 ลักษณะคือ แหล่งกำเนิดแสงที่ใช้เพียงไดโอดเปล่งแสง และแหล่งกำเนิดแสงที่ใช้ไดโอดเปล่งแสงผสมผสานกับหลอดทังสเตนฮาโลเจน ผลการศึกษายืนยันว่าเครื่องจำลองแสงอาทิตย์ที่ใช้ไดโอดเปล่งแสงผสมหลอดฮาโลเจนไม่สามารถพัฒนาความสอดคล้องทางสเปกตรัมของแสงเข้าสู่คลาส เอ ได้

เครื่องจำลองแสงอาทิตย์ชนิดไดโอดเปล่งแสงในยุคแรกไม่สามารถนำไปทดสอบเซลล์แสงอาทิตย์ในสภาวะมาตรฐานได้ ในยุคที่สองมีการพัฒนาคุณภาพแสงด้วยการผสมสีไดโอดเปล่งแสง 6 ชนิดเพื่อให้ครอบคลุมความยาวคลื่นแสงในช่วง 400-1100 นาโนเมตร และใช้ในการทดสอบเซลล์แสงอาทิตย์ในสภาวะมาตรฐานแต่ก็ได้สเปกตรัมที่มีค่าเบี่ยงเบนไปจากสเปกตรัม AM 1.5G ค่อนข้างมาก ในปัจจุบันใช้เทคนิคการผสมสี 10-23 ชนิดได้คุณภาพแสงที่ดีกว่าเดิม และมีความเบี่ยงเบนไปจากสเปกตรัมมาตรฐานลดลง และใช้ทดสอบเซลล์แสงอาทิตย์ได้ในช่วงความยาวคลื่น 350-1100 นาโนเมตรได้ มีการใช้ไดโอดเปล่งแสงชนิด high-power LED และ COB LEDs ที่ควบคุมด้วยแหล่งจ่ายกระแสคงที่แรงดันคงที่ควบคุมจากคอมพิวเตอร์เพื่อความแม่นยำที่มากขึ้น เพื่อสร้างแหล่งกำเนิดแสง เทคนิคการสร้างแหล่งกำเนิดแสงเป็นโมดูลไดโอดเปล่งแสง ที่สามารถต่อเพิ่มขนาดได้เป็นประเด็นวิจัยที่นักวิจัยกำลังให้ความสนใจและพัฒนาอย่างต่อเนื่อง ซึ่งสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานเพื่อเพิ่มคุณค่าของงานวิจัย สู่การใช้ประโยชน์ในเชิงพาณิชย์ต่อไป

แนวโน้มในการวิจัยและพัฒนา มีหลายประเด็นที่น่าสนใจ เช่น จะทำอย่างไรให้เครื่องจำลองแสงอาทิตย์ชนิดไดโอดเปล่งแสง มีคลาส เอเอเอ บวกภายใต้มาตรฐาน IEC 60904-9: 2020 การวิจัยและพัฒนา ระบบการวัดความไม่สม่ำเสมอของแสงด้วย multi-array detector หรือ scanning array detector ที่ปรับตำแหน่งหรือพื้นที่การวัดได้ เทคนิคการปรับความเข้มแสงและสเปกตรัมแสงที่จำลองขึ้นให้เปลี่ยนแปลงไปตามเวลาแบบอัตโนมัติและศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิต่อสมรรถนะของเครื่องจำลองแสงอาทิตย์เทียม เป็นต้น

เอกสารอ้างอิง

- Al-Ahmad, A. Y., Holdsworth, J., Vaughan, B., Zhou, X., Belcher, W., & Dastoor, P. (2018). LED Configuration for large area solar simulator applications. *International Conference on Nanoscience and Nanotechnology*. Wollongong, NSW, Australia: University of Wollongong.
- Al-Ahmad, A. Y., Holdsworth, J., Vaughan, B., Sharafutdinova, G., Zhou, X., Belcher, W. J., & Dastoor, P. C. (2019). Modular LED arrays for large area solar simulation. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 27(2), 179-189.
- Al-Ahmad, A. Y., Clark, D., Holdsworth, J. L., Vaughan, B., Belcher, W. J., & Dastoor, P. C. (2022). An economic LED solar simulator design. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 12(2), 521-525.
- ASTM International. (2015). *ASTM E927-10. Standard specification for solar simulation for photovoltaic testing*. West Conshohocken, PA: ASTM International.
- Bazzi, A. M., Klein, Z., Sweeney, M., Kroeger, K. P., Shenoy, P. S., & Krein, P. T. (2012). Solid-state solar simulator. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 48(4), 1195-1202.
- Bliss, M., Plyta, F., Betts, T. R., & Gottschalg, R. (2014). LEDs based characterisation of photovoltaic devices. *International Conference on Energy Efficient LED Lighting and Solar Photovoltaic Systems Conference*. Kanpur, India: Indian Institute of Technology.
- Buntoung, S., Pattarapanitchai, S., Laiwarin, P., Boontaveeyuwat, E., & Janjai, S. (2022). Solar ultraviolet radiation for psoriasis treatment at Nakhon Pathom Province. *Journal of Applied Research on Science and Technology (JARST)*, 21(1), 34-43.
- da Rosa, A. V., & Ordóñez, J. C. (2022). Chapter 12 - Solar radiation. In A. V. da Rosa, & J. C. Ordóñez, (Eds.), *Fundamentals of renewable energy processes* (4th ed.) (pp. 519-576). Oxford: Academic Press.
- Esen, V., Sağlam, S., & Oral, B. (2017). Light sources of solar simulators for photovoltaic devices: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 77, 1240-1250.
- Esen, V., Sağlam, S., Oral, B., & Esen, O. C. (2020). Spectrum measurement of variable irradiance controlled LED-based solar simulator. *International Journal of Renewable Energy Research*, 10(1), 109-116.
- Esen, V., Sağlam, S., Oral, B., & Esen, O. C. (2022). Toward class AAA LED large scale solar simulator with active cooling system for PV module tests. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 12(1), 364-371.
- Grandi, G., Ienina, A., & Bardhi, M. (2014). Effective low-cost hybrid LED-halogen solar simulator. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 50(5), 3055-3064.

- G2V Optics. (2022). *Solar simulation technology*. Retrieved 5 October 2022, from <https://g2voptics.com/solar-simulation/>
- IEC Standards. (2007). *IEC 60904-9 Photovoltaic devices—Part 9: Solar simulator performance requirements*. International Electrotechnical Commission.
- IEC Standards. (2016). *IEC 60904-3 Photovoltaic devices - Part 3: Measurement principles for terrestrial photovoltaic (PV) solar devices with reference spectral irradiance data*. Geneva: International Electrotechnical Commission.
- JIS. (2011). *JIS C 8912:1998/AMENDMENT 2:2011 Solar simulators for crystalline solar cells and modules (Amendment 2)*. Japanese Standards Association.
- Kabir, E., Kumar, P., Kumar, S., Adelodun, A. A., & Kim, K.-H. (2018). Solar energy: Potential and future prospects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82, 894-900.
- Kambezidis, H. D. (2022). 3.02 - The solar resource. In T. M. Letcher (Ed.), *Comprehensive renewable energy* (2nd Ed.) (pp. 26-117). Amsterdam: Elsevier.
- Kohraku, S., & Kurokawa, K. (2003). New methods for solar cells measurement by LED solar simulator. *Proceedings of World Conference Photovoltaic Energy Conversion*, vol. 2, (pp. 1977-1980). Osaka, Japan: IEEE.
- Kohraku, S., & Kurokawa, K. (2006). A fundamental experiment for discrete-wavelength LED solar simulator. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 90(18-19), 3364-3370.
- Kolberg, D., Schubert, F., Lontke, N., Zwigart, A., & Spinner, D. M. (2011). Development of tunable close match LED solar simulator with extended spectral range to UV and IR. *Energy Procedia*, 8, 100-105.
- Krebs, F. C., Sylvester-Hvid, K. O., & Jørgensen, M. (2010). A self-calibrating LED-based solar test platform. *Progress in Photovoltaic Research and Application*, 19(1), 97-112.
- Laaber, D. (2022). Solar simulators. In S. Alexopoulos, & S. A. Kalogirou (Eds.), *Solar thermal energy. Encyclopedia of sustainability science and technology series*. New York, NY: Springer.
- Leary, G., Switzer, G., Kuntz, G., & Kaiser, T. (2016). Comparison of xenon lamp-based and LED-based solar simulators. *IEEE 43rd Photovoltaic Specialists Conference (PVSC)* (pp. 3062-3067). Portland, OR: IEEE.
- Linden, K. J., Neal, W. R., & Serreze, H. B. (2014). In K. P. Streubel, H. Jeon, L.-W. Tu, & M. Strassburg (Eds.), *Adjustable spectrum LED solar simulator. Proceedings of SPIE 9003, Light-Emitting Diodes: Materials, Devices, and Applications for Solid State Lighting XVIII. SPIE. 9003* (pp. 109-117). San Francisco, California: SPIE OPTO.
- López-Fraguas, E., Sánchez-Pena, J. M., & Vergaz, R. (2019). A low-cost LED-based solar simulator. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 68(12), 4913-4923.
- MKS Newport. (2022). *Introduction to solar radiation*. Retrieved 5 October 2022, from <https://www.newport.com/t/introduction-to-solar-radiation>
- Nakajima, T., Shinoda, K., & Tsuchiya, T. (2014). Single-LED solar simulator for amorphous Si and dye-sensitized solar cells. *RSC Advances*, 4, 19165-19171.
- Namin, A., Jivacate, C., Chenvidhya, D., Kirtikara, K., & Thongpron, J. (2012). Construction of tungsten halogen, pulsed LED, and combined tungsten halogen-LED solar simulators for solar cell - characterization and electrical parameters

- determination. *International Journal of Photoenergy*, 2012, 527820.
- Namin, A., Somrak, E., Kartwibul, K., & Thongpron, J. (2013). Current-voltage characterization for solar cell at natural sunlight. *RMUTJ journal*, 6(1), 50-65. (in Thai)
- Namin, A., Jivacate, C., Chenvidhya, D., Kirtikara, K., & Thongpron, J. (2013). Determination of solar cell electrical parameters and resistances using color and white LED-based solar simulators with high amplitude pulse input voltages. *Renewable Energy*, 54, 131-137.
- Novičkovas, A., Baguckis, A., Mekys, A., & Tamošiūnas, V. (2015). Compact light-emitting diode-based AAA class solar simulator: Design and application peculiarities. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 5(4), 1137-1142.
- Slovenski Standard. (2020). *IEC 60904-9 Ed. 3.0 b: 2020 Photovoltaic devices - Part 9: Classification of solar simulator characteristics*. Brussels: International Electrotechnical Commission.
- Stuckelberger, M., Perruche, B., Bonnet-Eymard, M., Riesen, Y., Despeisse, M., Haug, F.-J., & Ballif, C. (2014). Class AAA LED-based solar simulator for steady-state measurements and light soaking. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 4(5), 1282-1287.
- Sun, C., Jin, Z., Song, Y., Chen, Y., Xiong, D., Lan, K., Huang, Y., & Zhang, M. (2022). LED-based solar simulator for terrestrial solar spectra and orientations. *Solar Energy*, 233, 96-110.
- Tavakoli, M., Jahantigh, F., & Zarookian, H. (2021). Adjustable high-power-LED solar simulator with extended spectrum in UV region. *Solar Energy*, 220, 1130-1136.
- Tawfik, M., Tonnellier, X., & Sansom, C. (2018). Light source selection for a solar simulator for thermal applications: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 90, 802-813.
- Tsuno, Y., Kamisako, K., & Kurokawa, K. (2008). New generation of PV module rating by LED solar simulator - A novel approach and its capabilities. *IEEE Photovoltaic Specialists Conference* (pp. 1-5). San Diego, CA: IEEE.
- Vicente, P. S., Reis, G. L., & Vicente, E. M. (2015). Development of a solid-state solar simulator to test PV modules. *IEEE 13th Brazilian Power Electronics Conference and 1st Southern Power Electronics Conference (COBEP/SPEC)* (pp. 1-4). Fortaleza, Brazil: IEEE.
- Vosylius, Ž., Novičkovas, A., Laurinavičius, K., & Tamošiūnas, V. (2022). Rational design of scalable solar simulators with arrays of light-emitting diodes and double reflectors. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 12(2), 512-520.
- Watjanatepin, N. (2017). Design construct and evaluation of six-spectral LEDs-based solar simulator based on IEC 60904-9. *International Journal of Engineering and Technology*, 9(2), 923-931.
- Watjanatepin, N. (2022). *Light emitting diode: Technology and applications* (2nd ed.). Pathumthani: Skybooks. (in Thai)
- Watjanatepin, N., & Sritanauthaikorn, P. (2022). Rectangular module for large scale solar simulator based on high-powered LEDs array. *Telkomnika*, 20(2), 462-474.
- Watjanatepin, N., Wannakam, K., Sinpaitoon, P., & Somboonkit, P. (2022). Light emitting diode: Application to modern plant cultivation. *RMUTSB Academic Journal*, 10(2), 216-242. (in Thai)