ความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้ผ้าฝ้ายดูดซับน้ำเพื่อระบายความร้อนเซลล์แสงอาทิตย์

The Investigation of the probability of applying cloth for water absorption to enhance heat transfer for the solar cell.

ชลธิชา แกล้วทนงค์[1], สรัล ศาลากิจ[1*] และ สุรัฐ ขวัญเมือง[1]

[1] ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย 254 ถนนพญาไท แขวงวังใหม่ เขตปทุมวัน กรุงเทพฯ 10330
*ติดต่อ: E-mail saran.s@chula.ac.th, เบอร์โทรศัพท์ 02-218-6622, เบอร์โทรสาร 02-252-2889

บทคัดย่อ

ในทางวิศวกรรมความร้อนถือเป็นตัวการสำคัญที่ส่งผลให้ประสิทธิภาพของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ลดลง รวมถึงการเสื่อมคุณภาพของอุปกรณ์ก่อนถึงเวลาอันสมควร ดังนั้นการระบายความร้อนจึงถือว่าเป็นสิ่งจำเป็นอย่างมาก งานวิจัยนี้ศึกษาความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้ผ้าฝ้ายดูดซับน้ำเพื่อระบายความร้อนของเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งการระบายความร้อนนี้เป็นการระบายความร้อนแบบ passive โดยจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยแผงอะลูมิเนียมประกบกับ heater ไว้ด้านหน้าแผงอะลูมิเนียมเพื่อให้ความร้อนแทนการรับความร้อนจากแสงอาทิตย์ และอุปกรณ์ระบายความร้อนคือผ้าฝ้ายดูดซับน้ำจะถูกติดตั้งบริเวณด้านหลังแผงอะลูมิเนียม ถูกทดสอบในห้องปิดที่ควบคุมอุณหภูมิ ในงานวิจัยนี้แสดงให้เห็นถึงความสามารถระบายความร้อน โดยสามารถลดอุณหภูมิได้มากที่สุดคือ 11.6°C ซึ่งเทียบเท่าการเพิ่มประสิทธิภาพแผงได้ 4.64% อีกทั้งอุปกรณ์ระบายความร้อนนี้มีต้นทุนการผลิตต่ำ ไม่ต้องอาศัยพลังงานภายนอก บำรุงรักษาง่าย

คำหลัก: การระบายความร้อนแบบพาสซีฟ, การระเหย, การแลกเปลี่ยนความร้อน, โครงสร้างผ้าฝ้าย

Abstract

In engineering applications, the performance of electronic device and lifetime is highly dependent on the capacity of the device to transfer heat. This research studies the possibility of using cotton wick in water absorption for passive cooling application. In particular, the absorption capacity of cotton wick operated in close environmental room. The study shows that cotton wick results in the best rates of absorption and evaporation. Cooling system increase in temperature of 11.6°C and increase in efficiency 4.64%. This passive cooling technique has low cost of production and requires minimum maintenance.

Keywords: Passive cooling, Evaporation, Heat exchanger, Cotton wick

1. บทนำ

เซลล์แสงอาทิตย์เป็นอุปกรณ์ที่เปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้า โดยอาศัยรังสีจากดวงอาทิตย์ และสิ่งที่ควบคู่มากับรังสีก็คือความร้อน ซึ่งทำให้เซลล์แสงอาทิตย์มีอุณหภูมิสูงขึ้น เป็นเหตุให้เซลล์แสงอาทิตย์มีประสิทธิภาพลดลง และยังส่งผลต่ออายุการ

ใช้งานของเซลล์แสงอาทิตย์อีกด้วย จากการรวบรวมงานวิจัยเกี่ยวข้องกับเทคโนโลยีเซลล์แสงอาทิตย์แบบผสมผสาน ได้กล่าวไว้ว่า เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นในทุกๆ 1°C จะส่งผลให้ประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ลดลง 0.4% [1] ดังนั้นการระบายความร้อนจึงมีบทบาทสำคัญอย่างมากต่อการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์

ปัจจุบันมีเทคนิคการระบายความร้อนได้ถูกพัฒนาขึ้นมากมาย ซึ่งสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทหลักๆ ได้แก่ การระบายความร้อนแบบ active และ การระบายความร้อนแบบ passive จาการศึกษาการระบายความร้อนแบบ active Nizetic [2] ได้ศึกษาเทคนิคระบายความร้อนด้วยการพ่นน้ำบนเซลล์แสงอาทิตย์สามารถลดอุณหภูมิแผงได้ 30°C Boloch และคณะ [3] ได้วิเคราะห์ประสิทธิภาพการทดลองเชิงตัวเลขของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนของเซลล์แสงอาทิตย์ สามารถลดอุณหภูมิได้ 21.1°C Rahimi และคณะ [4] ศึกษาการเปรียบเทียบการใช้ micriochanels แบบหัวเดี่ยวและหลายหัว เพื่อใช้ระบายความร้อนเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งแบบหลายหัวสามารถลดอุณหภูมิได้ดีกว่า 3°C Rahimi และคณะ [5] ศึกษาการออกแบบระบบปรับแรงกระแทกเจ็ตเพื่อระบายความร้อนเซลล์แสงอาทิตย์สามารถลดอุณหภูมิได้ 15-26°C Bahidarah และคณะ[6] ได้ประเมินประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ โดยการระบายความร้อนด้วยน้ำจากด้านหลังแผง Moharram และคณะ [7] ได้เพิ่มประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์โดยการใช้น้ำระบายความร้อน สามารถลดอุณหภูมิได้ 10°C และในส่วนของการระบายความร้อนแบบ passive ก็ได้มีงานวิจัยอย่าง Ebrahimi และคณะ [8] ได้ศึกษาการใช้ไอระเหยตามธรรมชาติเพื่อการระบายความร้อนเซลล์แสงอาทิตย์ สามารถลดอุณหภูมิได้ถึง 7-16°C Chadrasekar และ Senthilkumar [9] สาธิตการทดลองเกี่ยวกับการระบายความร้อนเซลล์แสงอาทิตย์ โดยใช้ตะเกียงฝ้ายร่วมกับตัวกระจายความร้อน ซึ่งสามารถลดอุณหภูมิได้ถึง 5.9°C Alami [10] ศึกษาผลการทำความเย็นแบบระเหยต่อประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ สามารถลดอุณหภูมิได้ 15°C Drabiniok และ Neyer [11] ได้ศึกษาการระเหยแบบรูพรุนขนาดเล็ก สำหรับระบายความร้อนเซลล์แสงอาทิตย์ สามารถลดอุณหภูมิได้ 11.7°C และ Chandrasekar และคณะ [12] ได้ทดสอบการระบายความร้อนเซลล์แสงอาทิตย์แบบพึ่งพาธรรมชาติด้วยไส้ตะเกียงฝ้าย การระบายความร้อนแบบ active สามารถระบายความร้อนได้ดี แต่มีข้อเสียคือ ต้องอาศัยพลังงานจากภายนอก มีค่าใช้จ่ายสูงทั้งในการทำงานของระบบและบำรุงรักษา ส่วนระบายความร้อนแบบ passive อาจจะระบายความร้อนได้ไม่ดีเท่าแบบ active แต่การระบายความร้อนแบบ passive ไม่ต้องอาศัยพลังงานจากภายนอก ค่าใช้จ่ายระหว่างระบบทำงาน และค่าบำรุงรักษาต่ำ การระบายความร้อนแบบ passive จึงเป็นทางเลือกที่น่าสนใจที่จะนำมาพัฒนา จึงเกิดการประยุกต์ใช้ผ้าฝ้ายดูดซับน้ำเพื่อระบายความร้อนเซลล์แสงอาทิตย์ขึ้น

การประยุกต์ใช้ผ้าฝ้ายดูดซับน้ำเพื่อระบายความร้อนเซลล์แสงอาทิตย์ ด้วยวิธีการระบายความร้อนแบบ passive โดยจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยแผงอะลูมิเนียมประกบกับ heater ไว้ด้านหน้าแผงอะลูมิเนียมเพื่อให้ความร้อนแทนการรับความร้อนจากแสงอาทิตย์ และระบายความร้อนด้วยผ้าฝ้ายดูดซับน้ำ ซึ่งจะถูกติดตั้งบริเวณด้านหลังแผงอะลูมิเนียม ผ้าฝ้ายจะดูดซับน้ำจากแหล่งน้ำบริเวณท้ายแผงเข้ามาใต้แผงเพื่อระบายความร้อน อุปกรณ์ระบายความร้อนนี้มีข้อดี คือผ้าฝ้ายมีความสามารถในการดูดซับน้ำได้ดี มีความบางจึงสามารถแลกเปลี่ยนความร้อนได้ดี น้ำหนักเบา เป็นวัสดุหาง่ายราคาถูก แต่มีข้อจำกัดคืออุปกรณ์ระบายความร้อนสามารถติดตั้งได้บริเวณหลังแผงเซลล์แสงอาทิตย์เท่านั้น ซึ่งอาจเป็นการเพิ่มความต้านทานเชิงความร้อนของแผง มีความเป็นไปได้ที่ทำให้การระบายความร้อนแย่ลง ซึ่งก็เป็นสิ่งที่น่าทดสอบเพื่อดูว่าอุปกรณ์ระบบความร้อนนี้มี

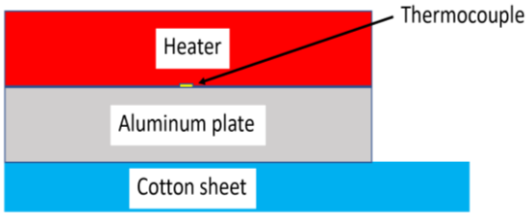
ศักยภาพเพียงพอต่อการใช้งานหรือไม่ และการระบายความร้อนนี้เป็นการระบายความร้อนแบบ passive

2. วิธีการทดลอง

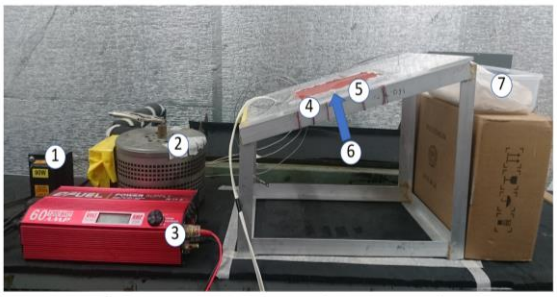
การศึกษาความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้ผ้าฝ้ายดูดซับน้ำเพื่อระบายความร้อนเซลล์แสงอาทิตย์นี้ ไม่ได้ทดสอบโดยใช้แสงอาทิตย์ธรรมชาติ และไม่ได้ทดสอบด้วยเซลล์แสงอาทิตย์จริง เนื่องจากอยู่ในสภาวะที่ควบคุมไม่ได้ทำให้ไม่สามารถทดลองซ้ำได้ งานวิจัยนี้จำลองการได้รับความร้อนจากแสงอาทิตย์ขึ้น โดยใช้ heater และทดสอบในห้องปิดที่ควบคุมอุณหภูมิ โดยมีอุณหภูมิกระเปาะแห้งในช่วง 27-30°C และอุณหภูมิกระเปาะเปียกในช่วง 19-24°C

2.1 การจำลองเซลล์แสงอาทิตย์

การใช้ heater จำลองการได้รับความร้อนจากแสงอาทิตย์ขึ้น โดย heater ประกบกับแผ่นอะลูมิเนียมเพื่อแทนการได้รับความร้อนจากแสงอาทิตย์ และแทนเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยแผ่นอะลูมิเนียม การทดลองนี้ให้สนใจในกระบวนการการระบายความร้อนเท่านั้น ไม่เกี่ยวกับเรื่องของความสามารถในการผลิตกระแสไฟฟ้าแต่อย่างใด ดังนั้นในการทดลองนี้จึงจำลองการรับความร้อนจากแสงอาทิตย์โดยใช้แผ่น heater ประกบไว้ด้านบนแผ่นอะลูมิเนียมดังรูปที่ 1 ทำให้แผ่นอะลูมิเนียมได้รับความร้อนโดยตรง เพื่อตัดประเด็นเรื่องประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แต่ละชนิดที่ไม่เหมือนกัน

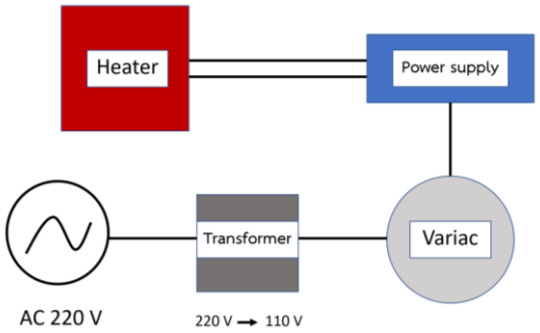


รูปที่ 1 การจำลองเซลล์แสงอาทิตย์



1. Transformer
2. Variac transformer
3. Power supply
4. Heater
5. Thermocouple type K
6. Aluminum plate
7. Tank

(ก) ภาพถ่ายชุดการทดลอง



(ข) แผนภาพแสดงชุดการทดลอง

รูปที่ 2 รายละเอียดชุดการทดลอง

2.2 การเตรียมการทดลอง

ชุดการทดลองประกอบด้วยแผ่นอะลูมิเนียมขนาด 0.16x0.17 m^2. โดยด้านบนของแผ่นอะลูมิเนียมจะถูกประกบด้วยแผ่น heater ขนาด 150W 24 V ตั้งอยู่บนโครงอะลูมิเนียมเอียง 14.5° ซึ่งเป็นมุมที่ใช้ติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์ส่วนใหญ่ในประเทศไทย และด้านหลังแผ่นอะลูมิเนียมมีลวดตรึงไว้เพื่อรองรับ heater และผ้าฝ้าย โดยผ้าฝ้ายจะจุ่มอยู่ในแหล่งน้ำจากด้านท้ายแผงเพื่อดูดซับน้ำมาด้านหลังเซลล์แสงอาทิตย์จำลอง เพื่อระบายความร้อน โดยตำแหน่งของแหล่งน้ำนั้นถูกติดตั้งโดยไม่ให้บดบังแสง เพื่อลดการเกิดปัญหาการเกิดเงากระทบหน้าแผง ในส่วนของ heater ถูกต่อเข้ากับ power supply ขนาด 60 A ด้วยกระแสตรง และต่อเข้ากับตัว variac transformer เพื่อลดกระแสป้อนเข้า จากนั้นต่อเข้ากับ

ตัว transformer เพื่อลดกระแสจากแหล่งไฟฟ้า 220 V เป็น 110 V ที่ต่อเข้ากับกระแสไฟฟ้า 1 เฟส ดังรูปที่ 2

ในการวัดอุณหภูมิมีการวัด 3 จุดด้วยกัน จุดแรกวัดอุณหภูมิห้องด้วย thermometer กระเปาะแก้ว จุดที่สองวัดอุณหภูมิกระเปาะเปียกด้วย thermometer กระเปาะแก้ว และการวัดอุณหภูมิจุดที่สามคือบริเวณระหว่าง heater และแผ่นอะลูมิเนียม โดยติด thermocouple type K ไว้ตรงกลางแผ่นอะลูมิเนียม เพื่อวัดอุณหภูมิแผงเซลล์แสงอาทิตย์จำลองด้วยดังรูปที่ 1

2.3 รูปแบบการทดลอง

การทดสอบมีการเปรียบเทียบกันใน 3 รูปแบบ ได้แก่ ทดสอบแผงจำลองเซลล์แสงอาทิตย์เปล่าโดยไม่ได้ติดตั้งอุปกรณ์ระบายความร้อนดังรูปที่ 3 (ก) ทดสอบแผงจำลองเซลล์แสงอาทิตย์โดยติดตั้งผ้าแห้งไว้ด้านหลังแผงดังรูปที่ 3 (ข) และทดสอบแผงจำลองเซลล์แสงอาทิตย์โดยติดตั้งอุปกรณ์ระบายความร้อนคือผ้าฝ้ายดูดซับน้ำดังรูปที่ 3 (ค) จุดประสงค์ในการทดสอบผ้าแห้งด้วยนั้นเพื่อต้องการทดสอบว่าในกรณีที่ผ้าดูดซับน้ำไม่ทันต่อการระเหยจะมีผลกระทบต่อการระบายความร้อนของแผงเซลล์แสงอาทิตย์หรือไม่ โดยการทดสอบใน 3 รูปแบบนี้จะถูกให้ความร้อนผ่าน heater 3 ขนาดที่ต่างกัน คือ 410W/m^2, 610 W/m^2 และ 730W/m^2 ดังแสดงในตารางที่ 1 ซึ่งคำนวณจาก

$$q" = \frac{P}{A} \qquad (1)$$

ในการกำหนดค่า Heat flux ที่ใช้ป้อนเข้าสู่ระบบนั้น เกิดจากผลลัพธ์ของค่าดังกล่าวเมื่อเข้าสู่สภาวะคงตัวมีความใกล้เคียงกับอุณหภูมิแผงเซลล์แสงอาทิตย์ของประเทศไทย โดยบันทึกค่าแผงเซลล์แสงอาทิตย์จำลองที่ได้จาก thermocouple ทุก 1 นาที จนครบเวลา 15 นาที

(ก) แผงจำลองเซลล์แสงอาทิตย์เปล่า

(ข) แผงจำลองโดยมีผ้าฝ้ายแห้งติดหลังแผงจำลองเซลล์แสงอาทิตย์

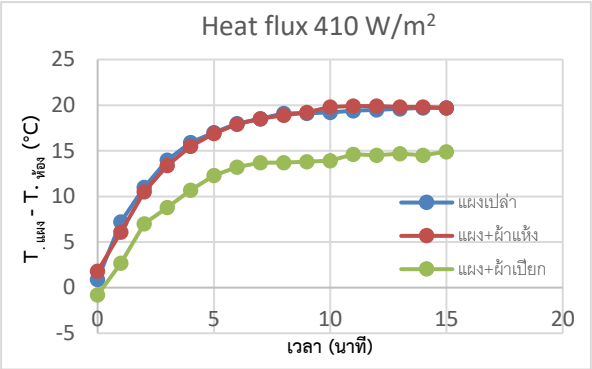
ต

(ค) แผงจำลองโดยติดผ้าฝ้ายดูดซับน้ำด้านหลังแผงจำลองเซลล์แสงอาทิตย์

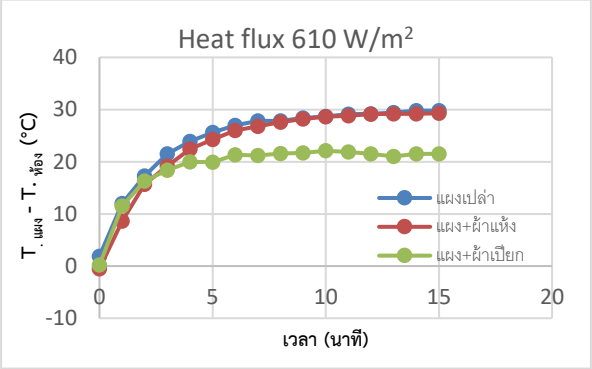
รูปที่ 3 รูปแบบการติดตั้งแผงจำลองเพื่อการทดสอบ

ตารางที่1 รายละเอียดการป้อนกำลังไฟฟ้า

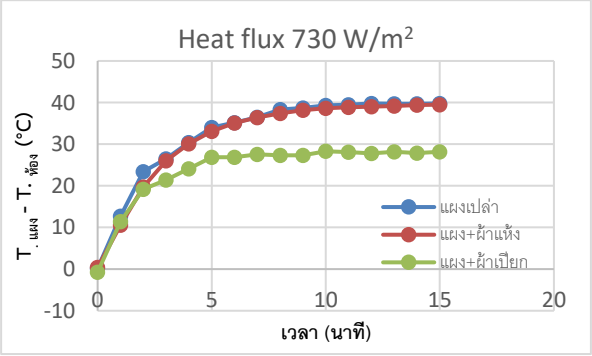
รูปแบบ	Heat flux ที่ป้อนเข้า (W/m^2)		
	กรณีที่1	กรณีที่2	กรณีที่3
แผงเปล่า	410	610	730
แผง+ผ้าแห้ง	410	610	730
แผง+ผ้าซับน้ำ	410	610	730



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 4 ผลต่างระหว่างอุณหภูมิแผงเทียบอุณหภูมิห้องเมื่อป้อน Heat flux เท่ากับ (ก) 410W/m^2 (ข) 610 W/m^2 (ค) 730W/m^2

3. ผลการทดลอง

เพื่อลดปัญหาอุณหภูมิห้องที่ต่างกัน จึงแสดงผลด้วยผลต่างของอุณหภูมิแผงเทียบกับอุณหภูมิห้อง ณ ขณะนั้น (ΔT) โดยผลการทดสอบแสดงในรูปที่ 4 จะเห็นได้ว่าเมื่ออุณหภูมิเข้าสู่สภาวะคงตัวใช้เวลาค่อนข้างใกล้เคียงกัน แต่โดยรวมแล้วอุณหภูมิในสภาวะคงตัวมีความแตกต่างกันในตารางที่ 2 นั้นแสดงถึงอุณหภูมิของแผงเมื่อเข้าสู่สภาวะคงตัว โดยคิดร้อยละผลต่างของอุณหภูมิแผงในสภาวะคงตัวที่ลดลงได้ เมื่อเทียบกับผลต่างอุณหภูมิในสภาวะคงตัวของแผงเปล่า ดังสมการที่ 2

$$\%\text{diff}_x = \frac{\Delta T_{\text{แผงเปล่า,คงตัว}} - \Delta T_{x,\text{คงตัว}}}{\Delta T_{\text{แผงเปล่า,คงตัว}}} \qquad (2)$$

ตารางที่ 2 ผลต่างระหว่างอุณหภูมิแผงเทียบกับอุณหภูมิห้องเมื่อเข้าสู่สภาวะคงตัว

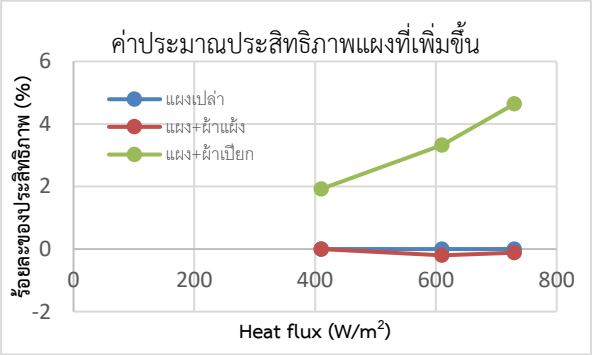
Heat flux (W/m^2)	แผงเปล่า	แผง+ผ้าแห้ง		แผง+ผ้าซับน้ำ	
	ΔT (°C)	ΔT (°C)	%diff	ΔT (°C)	%diff
410	19.7	19.7	0.00%	14.9	24.40%
610	29.3	29.8	-1.70%	21.5	26.60%
730	39.5	39.5	0.00%	28.2	28.60%

สำหรับแผงที่ติดผ้าดูดซับน้ำลดอุณหภูมิได้มากทุกช่วงเวลา และสามารถลดอุณหภูมิได้มากที่สุดเมื่อเข้าสู่สภาวะคงตัว โดยร้อยละผลต่างของอุณหภูมิแผงในสภาวะคงตัวที่ลดลงได้จะเพิ่มขึ้นตามค่า heat flux ที่เพิ่มขึ้น โดยที่สามารถลดอุณหภูมิแผงได้สูงสุดถึง 11.6°C ถือเป็นร้อยละผลต่างของแผงที่ลดลง 28.60% ที่ heat flux 610W/m^2

มีข้อสังเกตว่าอุณหภูมิตั้งต้นของแผงที่ประกบด้วยผ้าซับน้ำมีอุณหภูมิต่ำกว่าแผงเปล่าและแผงที่ติดผ้าแห้งในช่วงเริ่มต้นการทดสอบแม้ว่าจะไม่ได้ป้อนกระแสไฟฟ้าเพื่อให้ความร้อน ซึ่งเกิดขึ้นเนื่องจากผ้าเปียกดูดซับน้ำที่ติดไว้ด้านหลังแผงมีการระเหยอยู่ตลอดเวลาทำให้อุณหภูมิลดลง ซึ่งอุณหภูมิลดลงตั้งแต่เริ่มจึงเป็นตัวช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของแผงตั้งแต่เริ่ม

ในส่วนแผงเปล่าและแผงที่ติดผ้าฝ้ายแห้งไว้ อุณหภูมิไม่ค่อยแตกต่างกันมากนัก แสดงว่าผลเสียที่เกิดจากการแปะผ้าไว้ด้านหลังแผงนั้นไม่ค่อยเห็นผลนัก ซึ่งอุณหภูมิสุดท้ายของสภาวะคงตัวจะแสดงอยู่ในตารางที่ 2

จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมาในทุก 1°C ที่ลดลงได้ของแผงผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์สามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพแผงได้ 0.4% [1] ซึ่งสามารถอนุมานได้ว่าการใช้ผ้าฝ้ายดูดซับน้ำเพื่อระบายความร้อนสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของแผงผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ได้ โดยที่การเพิ่มประสิทธิภาพของแผงผลิตกระแสไฟฟ้าจากการระบายความร้อนด้วยวิธีนี้จะดีขึ้นตามความร้อนที่เพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 5 สำหรับการทดสอบนี้อนุมานได้ว่าการระบายความร้อนด้วยวิธีนี้สามารถเพิ่มประสิทธิภาพแผงได้สูงสุดถึง 4.64% ดังแสดงในรูปที่ 5



รูปที่ 5 ค่าประมาณประสิทธิภาพที่เพิ่มขึ้นของแผงจำลองเซลล์แสงอาทิตย์

4. สรุปผลการวิจัย

แผงจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ถูกสร้างขึ้นโดยใช้แผ่น heater ประกบกับแผ่นอะลูมิเนียม เพื่อแทนการได้รับความร้อนจากแสงอาทิตย์ และแผ่นอะลูมิเนียมแทนเซลล์แสงอาทิตย์ การทดสอบนี้มีการเปรียบเทียบกันใน 3 รูปแบบ ได้แก่ ทดสอบแผงจำลองเซลล์แสงอาทิตย์เปล่าไม่ได้ติดตั้งอุปกรณ์ระบายความร้อน ทดสอบแผงจำลองเซลล์แสงอาทิตย์โดยผ้าแห้งไว้ด้านหลังแผง และทดสอบแผงจำลองเซลล์แสงอาทิตย์โดยติดตั้งอุปกรณ์ระบายความร้อนคือผ้าฝ้ายดูดซับน้ำ การทดสอบนี้ทดสอบในห้องปิดที่ควบคุมอุณหภูมิ โดยห้องทดสอบมีอุณหภูมิกระเปาะแห้งในช่วง 27-30°C และอุณหภูมิกระเปาะเปียกในช่วง 19-24°C ซึ่งงานวิจัยนี้แสดงให้เห็นถึงความเป็นไปได้ของการระบายความร้อนด้วยผ้าฝ้ายดูดซับน้ำโดยไม่ต้องอาศัยพลังงานภายนอกในการลดอุณหภูมิของแผง จากการทดสอบในครั้งนี้สามารถลดอุณหภูมิของแผงได้มากที่สุดคือ 11.6°C ซึ่งเทียบเท่าการเพิ่มประสิทธิภาพแผงได้ 4.64%

5. เอกสารอ้างอิง

[1] T.T. Chow, " A review on photovoltaic/ thermal hybrid solar technology," Applied Energy, vol. 87, no. 2, pp. 365-379, 2010.

[2] K.A. Moharram, "Enhancing the performance of photovoltaic panels by water cooling," Ain Shams Engineering Journal, vol. 4, no. 4, pp. 869-877, 2013.

[3] Ahmer A.B. Baloch, "Experimental and numerical performance analysis of a converging channel heat exchanger for PV cooling," Energy Conversion and Management, vol. 103, pp. 14-27, 2015

[4] Masoud Rahimi, "A comparative study on using single and multi header microchannels in a hybrid PV cell cooling," Energy Conversion and Management, vol. 101, pp. 1-8, 2015.

[5] Masoud Rahimi, " Design of a self-adjusted jet impingement system for cooling of photovoltaic cells," Energy Conversion and Management, vol. 83, pp. 48-57, 2014.

[6] H. Bahaidarah, "Performance evaluation of a PV (photovoltaic) module by back surface water cooling for hot climatic conditions," Energy, vol. 59, pp. 445-453, 2013.

[7] K.A. Moharram, "Enhancing the performance of photovoltaic panels by water cooling," Ain Shams Engineering Journal, vol. 4, no. 4, pp. 869-877, 2013.

[8] Morteza Ebrahimi, "An experimental study on using natural vaporization for cooling of a PV solar cell," International Communications in Heat and Mass Transfer, vol. 65, pp. 22-30, 2015.

[9] M.Chandrasekar and T.Senthilkumar, "Experimental demonstration of enhanced solar energy utilization in flat PV (photovoltaic) modules cooled by heat spreaders in conjunction with cotton wick structures," Energy, vol. 90, pp. 1401-1410, 2015.

[10] Abdul Hai Alami, "Effects of evaporative cooling on efficiency of photovoltaic modules," nergy Conversion and Management, vol. 77, pp. 668-679, 2014.

[11] Evelyn Drabiniok, "Bionic micro porous evaporation foil for photovoltaic cell cooling," Microelectronic Engineering, vol. 119, pp. 65-69, 2014.

[12] M. Chandrasekar, S.Suresh, T.Senthilkumar and M.Ganesh karthikeyan, "Passive cooling of standalone flat PV module with cotton wick structures," Energy Conversion and Management, vol. 71, pp. 43-50, 2013.