



การลดอุณหภูมิของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยวัสดุเปลี่ยนสถานะคอมโพสิตแคลเซียมคลอไรด์ เฮกซะไฮเดรต/แกรไฟต์ขยายตัว

Temperature Reduction of Solar Panel by Composite Phase Change Material – Calcium Chloride Hexahydrate / Expanded Graphite

พีรกานต์ มงคลสินธุ์¹, กานต์ เสรีวัลย์สถิตย์¹, นพรุจ เคียงกิตติวรรณ³, ธนากร วาสนาเพียรพงศ์^{1, 2*}

¹ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรุงเทพมหานคร 10330

²ศูนย์ความเป็นเลิศด้านเทคโนโลยีปิโตรเคมีและวัสดุ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรุงเทพมหานคร 10330

³บริษัท เอ็นเซิร์ฟ พาวเวอร์ จำกัด กรุงเทพมหานคร 10500

Peerakarn Mongkolsin¹, Karn Serivalsatit¹, Nopparut Kiangkitiwan³, Thanakorn Wasanapiarnpong^{1, 2*}

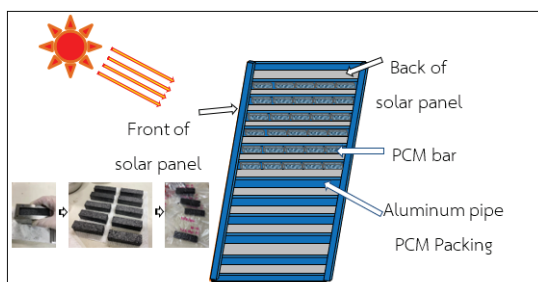
¹Department of Materials Science, Faculty of Science, Chulalongkorn University, Bangkok 10330

²Center of Excellence on Petrochemical and Materials Technology, Bangkok 10330

³Enserv Power Company Limited, Bangkok 10500

Received 5 September 2024; Received in revised 30 January 2025; Accepted 28 February 2025

GRAPHICAL ABSTRACT



ABSTRACT

This research developed a device to reduce the temperature of solar panels to enhance electricity generation efficiency. The selected material was calcium chloride hexahydrate ($\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$), which was fabricated into a composite with expanded graphite. The resulting composite, in the form of a fine solid powder, helps retain the molten calcium chloride hexahydrate's shape and improves the thermal conductivity of the material. The composite was prepared using a mixture of 80% by weight calcium chloride hexahydrate and 20% by weight expanded graphite powder. The mixture was compressed into rectangular blocks measuring approximately 20 x 20 x 80 mm and weighing about

45 grams each. These blocks were sealed in plastic bags using a vacuum heat sealer and then placed inside aluminum rectangular pipes measuring 25 mm in width and 1 meter in length, with approximately 360 grams of composite per pipe. The aluminum pipes served to dissipate heat into the atmosphere beneath the photovoltaic panels, where the temperature was lower. A total of 20 pipes were installed on the back of solar panels. The results showed that this setup reduced the panel temperature by approximately 10 °C, leading to about a 5% improvement in electricity generation efficiency. The stability of the composite phase change material was tested by simulating temperature cycles in an oven ranging from 25 to 65 °C for 5,000 cycles. Each cycle represents a daily temperature increase and decrease, equivalent to approximately 13.5 years of usage. The tests demonstrated that the composite phase change material maintained its performance and did not undergo any significant changes in properties throughout the testing period.

*ผู้รับผิดชอบบทความ: thanakorn.w@chula.ac.th

DOI: 10.14456/tstj.2025.26

คำสำคัญ	บทคัดย่อ
อุปกรณ์ช่วยลดอุณหภูมิ; แผงเซลล์แสงอาทิตย์; วัสดุเปลี่ยนสถานะคอมโพสิต; แคลเซียมคลอไรด์เฮกซะไฮเดรต; แกรไฟต์ขยายตัว Keywords Temperature reducing device; Solar panel; Composite phase change material; Calcium chloride hexahydrate; Expanded graphite	งานวิจัยนี้ได้พัฒนาอุปกรณ์ช่วยลดอุณหภูมิแผงเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตกระแสไฟฟ้าวัสดุที่เลือกใช้คือแคลเซียมคลอไรด์เฮกซะไฮเดรต ว่าเป็นวัสดุคอมโพสิตกับแกรไฟต์ขยายตัว ที่มีลักษณะเป็นของแข็ง เป็นผงละเอียด ช่วยพยุงของเหลวแคลเซียมคลอไรด์เฮกซะไฮเดรตขณะหลอมเหลวให้คงรูปทรงอยู่ได้ และช่วยเพิ่มค่าการนำความร้อนให้กับวัสดุคอมโพสิต โดยใช้สัดส่วนของผสมแคลเซียมคลอไรด์เฮกซะไฮเดรตปริมาณร้อยละ 80 โดยมวล ผสมกับผงแกรไฟต์ขยายตัวปริมาณร้อยละ 20 โดยมวล นำมาอัดขึ้นรูปเป็นแท่งสี่เหลี่ยมขนาดประมาณ 20x20x80 มิลลิเมตร มีน้ำหนักแท่งละประมาณ 45 กรัม บรรจุลงในถุงพลาสติกซิปลิด ปิดผนึกถุงพลาสติกด้วยเครื่องซีลความร้อนดูดสุญญากาศ บรรจุใส่ท่ออะลูมิเนียมสี่เหลี่ยมขนาด 25 มิลลิเมตร ยาว 1 เมตร ท่อละประมาณ 360 กรัม ซึ่งท่ออะลูมิเนียมสี่เหลี่ยมจะทำหน้าที่ช่วยกระจายความร้อนสู่บรรยากาศได้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า แล้วนำไปติดตั้งให้แนบติดด้านหลังของแผงเซลล์แสงอาทิตย์เป็นจำนวน 20 ท่อ ผลปรากฏว่า ช่วยลดอุณหภูมิของแผงได้ประมาณ 10 องศาเซลเซียส และช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าได้ประมาณ 5 เปอร์เซ็นต์ เมื่อทดสอบความเสถียรของวัสดุเปลี่ยนสถานะคอมโพสิตด้วยการจำลองความผันผวนของอุณหภูมิในตู้อบช่วง 25-65 องศาเซลเซียส เป็นจำนวน 5,000 รอบ แต่รอบเทียบเท่ากับอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นและลดลงในแต่ละรอบของวันหรือเทียบเท่าประมาณ 13.5 ปี พบว่าวัสดุเปลี่ยนสถานะคอมโพสิตยังมีสมบัติที่ไม่เปลี่ยนแปลงทำหน้าที่ลดอุณหภูมิได้ตามปกติ

1. บทนำ

พลังงานหมุนเวียนกำลังเป็นเรื่องสำคัญในปัจจุบันและเป็นที่ทราบกันดีว่าแผงเซลล์แสงอาทิตย์นั้นจะเก็บเกี่ยวพลังงานแสงอาทิตย์ในการทำให้เกิดกระแสไฟฟ้า และภายใน 1 วันนั้นเราจะสามารถใช้แสงอาทิตย์เพื่อที่จะนำมาเปลี่ยนเป็นกระแสไฟฟ้าได้ 8 ถึง 10 ชั่วโมงในตอนกลางวัน และแสงอาทิตย์จะมีให้เราใช้งานทุกวัน ยกเว้นในช่วงที่มีพายุเข้าหรือท้องฟ้าปิดเท่านั้น ซึ่งถือว่าไม่น้อยเมื่อเปรียบเทียบกับวันที่มีแสงแดด นั่นจึงทำให้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ โดยเฉพาะในประเทศไทยนั้นมีความเหมาะสมที่จะนำมาใช้งานมาก แต่เมื่อแผงเซลล์แสงอาทิตย์ทำงานก็จะเกิดความร้อนขึ้น ทั้งจากรังสีอินฟราเรดในแสงอาทิตย์และความร้อนจากกระแสไฟฟ้าภายในเซลล์แสงอาทิตย์เองด้วย [1] ทำให้ประสิทธิภาพการแปลงพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้าลดลงประมาณ 0.5 เปอร์เซ็นต์ ทุก ๆ 1 องศาเซลเซียสที่ร้อนขึ้น [2] จากการเก็บข้อมูลของผู้วิจัยเองก็พบว่าบางวันอุณหภูมิของแผงเซลล์แสงอาทิตย์สูงขึ้นถึง 65 องศาเซลเซียส ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของงานวิจัยดังกล่าว [2] จึงมีแนวคิดที่จะลดอุณหภูมิของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยวิธีต่าง ๆ ได้แก่ การหล่อเย็นด้วยน้ำ ใช้ปั๊มน้ำไฟฟ้าช่วยให้น้ำไหลเวียนผ่านด้านหลังของแผงเซลล์แสงอาทิตย์นำพาความร้อนออกไป การเป่าด้วยพัดลมให้ลมเย็นช่วยพาความร้อนออกไป [1] หรือการใช้แผงช่วยกระจายความร้อน (Heatsink) ทำจากโลหะอะลูมิเนียม [3] แต่ด้วยเทคนิคเหล่านี้ จะต้องใช้ต้นทุนและค่าใช้จ่ายสูงจนไม่คุ้มค่ากับค่าพลังงานไฟฟ้าที่ได้เพิ่มขึ้นมา

วัสดุเปลี่ยนสถานะ (Phase change material, PCM) ที่มีสมบัติด้านการกักเก็บความร้อนในรูปของความร้อนแฝงของการหลอมละลาย ทำหน้าที่รักษาอุณหภูมิให้แก่ระบบ [4] เมื่อสิ่งแวดล้อมมีอุณหภูมิสูงขึ้นวัสดุเปลี่ยนสถานะจะดูดซับความร้อนจากระบบไว้ในตัววัสดุในช่วงของการหลอมละลายจากของแข็งไปเป็นของเหลวเพื่อทำให้อุณหภูมิของระบบคงที่หรือเปลี่ยนแปลงไปเพียงเล็กน้อย ในทางกลับกันเมื่อสิ่งแวดล้อมเย็นลง วัสดุ

เปลี่ยนสถานะจะถ่ายเทพลังงานสู่สิ่งแวดล้อมเพื่อเปลี่ยนสถานะจากของเหลวเป็นของแข็ง ช่วยรักษาอุณหภูมิให้คงที่ ปรากฏการณ์นี้เองทำให้เกิดกระบวนการดูด-คายความร้อน ซึ่งเป็นผลจากอุณหภูมิภายนอกของสิ่งแวดล้อม สำหรับการใช้งานกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ มีแนวความคิดว่า เมื่อแผงเซลล์แสงอาทิตย์มีอุณหภูมิสูงขึ้น วัสดุเปลี่ยนสถานะจะดูดซับความร้อนไว้ในตัววัสดุในช่วงของการหลอมละลายจากของแข็งไปเป็นของเหลว [1] ทำให้อุณหภูมิของแผงเซลล์แสงอาทิตย์คงที่หรือเพิ่มขึ้นช้าลง ในทางกลับกันเมื่อสภาพแวดล้อมเย็นลงในเวลากลางคืน วัสดุเปลี่ยนสถานะจะถ่ายเทพลังงานความร้อนสู่สิ่งแวดล้อม แล้วเปลี่ยนสถานะจากของเหลวกลับไปเป็นของแข็ง การใช้วัสดุเปลี่ยนสถานะในการควบคุมอุณหภูมิมีประโยชน์มาก เนื่องจากสามารถช่วยลดการใช้พลังงานในการทำความเย็นหรือทำความร้อนได้ โดยวัสดุเปลี่ยนสถานะจะดูดความร้อนเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นและปล่อยความร้อนเมื่ออุณหภูมิต่ำลง ซึ่งช่วยให้สามารถรักษาอุณหภูมิในระดับที่ต้องการได้อย่างมีประสิทธิภาพและมีความเสถียรมากในระยะเวลาที่ยาวนาน [4, 5]

วัสดุเปลี่ยนสถานะที่มีการวิจัยทดลองใช้งานกันในการควบคุมอุณหภูมิของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ได้แก่ ไชพาราฟิน (Paraffin wax) ซึ่งเป็นสารประกอบอินทรีย์ที่มีจุดหลอมเหลวให้เลือกใช้ได้หลากหลาย ขึ้นอยู่กับมวลโมเลกุล [6, 7] แต่เนื่องจากวัสดุเปลี่ยนสถานะชนิด ไชพาราฟินมีราคาที่สูง จึงไม่สามารถนำมาใช้งานได้อย่างคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ แม้จะมีรายงานวิจัยในประเทศไทยที่ใช้ไชจากธรรมชาติ เช่น ไชจากต้นอ้อยที่ได้ผลดี ช่วยลดอุณหภูมิของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ได้ดี [8] แต่ก็ยังมีต้นทุนที่สูงเช่นกัน โครงการวิจัยนี้จึงให้ความสนใจเลือกใช้วัสดุเปลี่ยนสถานะชนิดเกลืออนินทรีย์เนื่องจากมีจุดหลอมเหลวให้เลือกใช้อย่างเหมาะสม [9] โดยเฉพาะแคลเซียมคลอไรด์เฮกซะไฮเดรต มีจุดหลอมเหลวประมาณ 30 องศาเซลเซียส มีราคาที่ย่อมเยาและมีการรายงานผลการวิจัยที่ใช้วัสดุเปลี่ยนสถานะเกลืออนินทรีย์แคลเซียมคลอไรด์เฮกซะไฮเดรต

อยู่บ้าง [5] แต่ผลิตภัณฑ์เกรดอุตสาหกรรมที่มีจำหน่ายในท้องตลาดจะเป็นแคลเซียมคลอไรด์ไดไฮเดรตซึ่งมีจุดหลอมเหลวที่สูงกว่า 176 องศาเซลเซียส สะดวกต่อการขนส่งและเก็บรักษามากกว่าแคลเซียมคลอไรด์เฮกซะไฮเดรตที่มักจะหลอมตัวได้ที่อุณหภูมิบรรยากาศของประเทศเมืองร้อน

เนื่องจากในขณะที่สุดเปลี่ยนสถานะได้รับความร้อนเกิดการหลอมละลายเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นเหนือจุดหลอมเหลว จะทำให้วัสดุเปลี่ยนสถานะไม่คงรูป เกิดการไหลไปตามแรงโน้มถ่วงของโลก หากเกิดการรั่วไหลก็จะทำให้เกิดการสูญเสียเนื้อของวัสดุ หรือทำให้ระบบเสียหายได้ จึงจำเป็นต้องมีการทำวัสดุคอมโพสิต โดยการผสมวัสดุที่เป็นของแข็งที่มีลักษณะเป็นผงค่อนข้างละเอียด มีพื้นที่ผิวสูง ให้ของเหลวกระจายตัวอยู่ เพิ่มความหนืดให้กับตัววัสดุ วัสดุที่นิยมนำมาผสมคือแกรไฟต์ขยายตัว (Expanded graphite) โดยการนำผงแกรไฟต์ไปเผาในอากาศที่อุณหภูมิประมาณ 500-900 องศาเซลเซียส ซึ่งจะมีพื้นที่ผิวสูง แต่ก็ยังมีค่าการนำความร้อนที่ค่อนข้างสูงด้วย จึงเป็นที่สนใจที่จะนำมาใช้ทั้งนี้การผสมแกรไฟต์ในวัสดุเปลี่ยนสถานะแคลเซียมคลอไรด์เฮกซะไฮเดรต จะช่วยให้มีประสิทธิภาพดีขึ้น และมีความคงรูปมากขึ้นด้วย [10]

ภาชนะที่ใช้ในการบรรจุวัสดุเปลี่ยนสถานะแคลเซียมคลอไรด์เฮกซะไฮเดรตแล้วนำไปติดตั้งให้แนบสัมผัสกับพื้นผิวของแผงเซลล์แสงอาทิตย์สำหรับการถ่ายเทความร้อน มักใช้ภาชนะที่เป็นโลหะอะลูมิเนียม เพราะนำความร้อนได้ดี [11] แต่มักจะเกิดการกัดกร่อนของภาชนะโลหะอะลูมิเนียมได้ อีกทั้งแคลเซียมคลอไรด์เฮกซะไฮเดรตมีความสามารถในการดูดซับความชื้นจากบรรยากาศได้เป็นอย่างดี จนกระทั่งกลายเป็นของเหลวสารละลาย จึงจำเป็นมีการบรรจุอยู่ในถุงพลาสติกก่อนที่จะใส่ลงไปในภาชนะโลหะอะลูมิเนียมอีกที

งานวิจัยนี้จึงเลือกที่จะใช้วัสดุเปลี่ยนสถานะแคลเซียมคลอไรด์เฮกซะไฮเดรต ผสมกับแกรไฟต์ขยายตัว บรรจุลงในถุงพลาสติกปิดผนึกกันอากาศและ

ความชื้น แล้วนำไปสอดบรรจุอยู่ในท่ออะลูมิเนียมก่อนนำไปติดตั้งที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อทดสอบการลดอุณหภูมิและประสิทธิภาพพลังงานไฟฟ้า

2. อุปกรณ์และวิธีการ

2.1 การจัดเตรียมสารเคมีและอุปกรณ์

เตรียมชิ้นงานตัวอย่างที่ใช้ในการทดลอง คือ แคลเซียมคลอไรด์ไดไฮเดรต ($\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, Calcium chloride dihydrate, 99.5%, Shanghai T&W Pharmaceutical Co., Ltd.) แกรไฟต์ขยายตัว (Expanded graphite, EG, 99.53% carbon, -50 mesh, Shanghai T&W Pharmaceutical Co., Ltd.) โดยมีการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเฟสด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ X-ray diffraction (XRD) รุ่น D8-Advance ผลิตโดยบริษัท Bruker ใช้ Cu-K_α radiation ที่ Scanning speed 2.4 องศาต่อนาที ในช่วงมุม 2-theta ตั้งแต่ 10 ถึง 80 องศาเซลเซียส เตรียมท่ออะลูมิเนียมหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส (6063-Aluminium hollow pipe-square) ขนาด 1 นิ้ว ความหนาของอะลูมิเนียม 1.2 มิลลิเมตร ตัดให้มีความยาวประมาณ 100 เซนติเมตร สำหรับติดตั้งไว้ใต้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ ขนาด 320 วัตต์ (ขนาดกว้าง 1 เมตร ยาว 2 เมตร น้ำหนัก 27 กิโลกรัม) ยี่ห้อ ReneSola : Poly-A-320

2.2 การทดสอบความคงตัวของรูปทรง

เนื่องจากวัสดุเปลี่ยนสถานะจะเกิดการหลอมตัวเป็นของเหลว ทำให้เนื้อวัสดุมีการไหลตัวไม่คงรูปทรงเมื่อมีการใช้งานเป็นเวลานานหากเกิดการรั่วไหลจะทำให้เกิดความเสียหายได้ จึงจำเป็นต้องมีการผสมวัสดุของแข็งที่มีขนาดอนุภาคละเอียด มีพื้นที่ผิวมากพอที่จะให้เป็นตัวยึดเกาะของวัสดุเปลี่ยนสถานะเมื่อหลอมเหลว ให้มีความคงตัวคงรูปทรงอยู่ได้ [10] การทดสอบหาส่วนผสมที่เหมาะสมระหว่างแคลเซียมคลอไรด์เฮกซะไฮเดรตกับแกรไฟต์ขยายตัว เตรียมโดยผสมแคลเซียมคลอไรด์ไดไฮเดรตกับน้ำกลั่นให้ได้เป็นแคลเซียมคลอไรด์

เฮกซ์ไฮเดรต โดยการต้มและปั่นจนส่วนผสมด้วยใบพัดสแตนเลสในภาชนะสแตนเลสตั้งอยู่บนแท่นทำความร้อนให้ได้อุณหภูมิ 80-90 องศาเซลเซียส ปั่นผสมแคลเซียมคลอไรด์เฮกซ์ไฮเดรตที่เตรียมได้กับผงแกรไฟต์ขยายตัวด้วยเครื่องผสมแป้งขนมปัง ด้วยอัตราส่วนโดยมวล 95:5, 90:10, 85:15, 80:20, 75:25 แล้วนำไปอัดขึ้นรูปขณะยังอุ่น เป็นแท่งเหรียญขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 มิลลิเมตร หนา 3 มิลลิเมตร ในแม่พิมพ์โลหะสแตนเลสอัดด้วยความดัน 5 เมกะปาสคาล นำมาวางลงบนกระดาษกรอง Whatman No. 42 ในกล่องพลาสติก (Super lock) ที่ปิดฝาได้สนิท รองพื้นกล่องด้วยเม็ดดูดความชื้นซิลิกาเจล แล้วนำไปอบในเตาอบ 30 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เพื่อเลือกสูตรที่ยังคงรูปทรงอยู่ได้ไม่ไหลเยิ้มบนกระดาษกรอง แล้วทดสอบซ้ำโดยเลือกเฉพาะตัวอย่าง 85:15, 80:20, 75:25 นำเข้าเตาอบตั้งค่าอุณหภูมิที่ 65 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ดังแสดงใน Figure 1.

ทดสอบค่าการนำความร้อนด้วยเครื่องทดสอบการนำความร้อน ยี่ห้อ Linseis ประเทศเยอรมนี รุ่น THB-1 โดยการอัดขึ้นรูปชิ้นงานวัสดุด้วยแม่พิมพ์อัดสแตนเลส ด้วยความดันในการอัด 20 เมกะปาสคาล ให้มีรูปทรงเป็นแผ่นสี่เหลี่ยม ขนาดกว้าง 5 เซนติเมตร ยาว 5 เซนติเมตร และมีความหนาประมาณ 1 เซนติเมตร จำนวน 2 แผ่น ประกบกันให้เซ็นเซอร์อยู่ตรงกลางแนบสนิท ทดสอบที่อุณหภูมิห้องโดยควบคุมให้มีอุณหภูมิ 23-25 องศาเซลเซียส

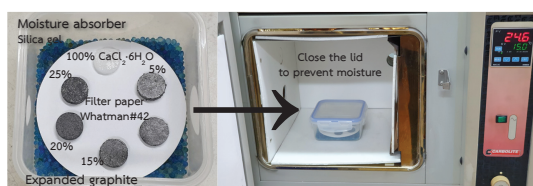


Figure 1 Photograph showing the shape stability test of a phase change material

2.3 ทดสอบความคงประสิทธิภาพ

นำสูตรส่วนผสมที่อัตราส่วน 80:20 และ 100:0 มาทดสอบความคงประสิทธิภาพเมื่อจำลองการใช้งานเป็นเวลานาน นำตัวอย่าง จำนวน 5 กรัม โดยการอัดเป็นเม็ดกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 มิลลิเมตร บรรจุในถุงพลาสติกดูดอากาศปิดผนึกความร้อนปากถุง นำเข้าเตาอบที่สามารถปรับอุณหภูมิให้เพิ่มขึ้นและลดลงได้ 25-65 องศาเซลเซียส ดังแสดงใน Figure 2. ให้คงอุณหภูมิไว้ที่จุดต่ำสุดนาน 5 นาที จุดสูงสุด 5 นาที แต่ละรอบใช้เวลาประมาณ 30 นาที โดยแต่ละรอบจะหมายถึงการใช้งาน 1 รอบวันที่มีอุณหภูมิสูงขึ้นและลดลง [11] แล้วนำตัวอย่างประมาณ 5 มิลลิกรัมออกมาทดสอบการเปลี่ยนแปลงทางความร้อนด้วยเทคนิค Differential scanning calorimetry (DSC) ด้วยเครื่องมือ STARe SW V15.00 ยี่ห้อ Mettler Toledo ด้วยอัตราการเพิ่มอุณหภูมิและการลดอุณหภูมิ 10 องศาต่อนาที เพื่อหาค่าความจุความร้อน อุณหภูมิหลอมเหลวและอุณหภูมิเยือกแข็งที่อาจเปลี่ยนแปลงไป เมื่อเวลาผ่านไปจำนวนทุก 1,000 รอบ (0, 1,000, ... 5,000 รอบ) จนได้ครอบคลุมการจำลองวงรอบสภาพอุณหภูมิ 5,000 รอบ หรือประมาณสิบสามปีครึ่ง



Figure 2 The photo shows a daily temperature cycle simulation test

2.4 การเตรียมอุปกรณ์ลดอุณหภูมิและทดสอบประสิทธิภาพแผงเซลล์แสงอาทิตย์

เตรียมส่วนผสมวัสดุเปลี่ยนสถานะคอมโพสิตโดยผสมแคลเซียมคลอไรด์เฮกซะไฮเดรตกับแกรไฟต์ขยายตัวที่อัตราส่วน 80:20 อัดเป็นแท่งสี่เหลี่ยมด้วยแม่พิมพ์สแตนเลสขนาด 20x80 มิลลิเมตร ให้มีความหนาประมาณ 20 มิลลิเมตร มีน้ำหนักประมาณแท่งละ 45 กรัม บรรจุใส่ถุงพลาสติกซีล แล้วปิดผนึกถุงพลาสติกด้วยเครื่องซีลความร้อนอุตสาหกรรม ดังแสดงใน Figure 3. จำนวน 8 แท่ง นำไปบรรจุใส่ในท่อนอะลูมิเนียมหน้าตัดสี่เหลี่ยมขนาด 1 นิ้ว ยาว 100 เซนติเมตร ปิดหัวท้ายด้วยโฟมพอลิยูรีเทนให้สนิท แล้วนำไปติดไว้ที่ด้านใต้ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ขนาด 320 วัตต์ (ขนาดกว้าง 1 เมตร ยาว 2 เมตร น้ำหนัก 27 กิโลกรัม) วางกลางแจ้งให้รับแสงแดดเต็มที่ตลอดทั้งวัน (บนดาดฟ้าชั้น 8 ของอาคารวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เขตปทุมวัน กรุงเทพมหานคร) วางเอียงไปทางทิศใต้ทำมุม 15 องศา กับพื้น มีการปูรองพื้นด้วยผืนหญ้าเทียมพลาสติกเพื่อลดความร้อนจากพื้นอาคารคอนกรีต

ดังแสดงใน Figure 4. เป็นการจำลองสภาพให้ใกล้เคียงกับสภาพของการติดตั้งในโซลาร์ฟาร์มที่ติดตั้งบนพื้นดิน และมีหญ้าขึ้นตามธรรมชาติ ทดลองติดตั้งท่อนอะลูมิเนียมบรรจุวัสดุเปลี่ยนสถานะคอมโพสิต จำนวน 10 15 และ 20 ท่อ กระจายทั่วตลอดความยาวของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ เพื่อทดสอบและเปรียบเทียบประสิทธิภาพการลดอุณหภูมิของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ วัสดุอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆ คือ ผิวน้ำ ผิวด้านหลัง และผิวของท่อนอะลูมิเนียมที่บรรจุวัสดุเปลี่ยนสถานะคอมโพสิต วางกลางแจ้งให้รับแสงแดดเต็มที่ตลอดทั้งวันแล้วเก็บข้อมูลการผลิตไฟฟ้าของแผงทดสอบทุก ๆ 1 นาที ตลอด 24 ชั่วโมง เปรียบเทียบระหว่างการติดตั้งอุปกรณ์ช่วยปรับปรุงการระบายความร้อนลดอุณหภูมิกับแผงเปล่าที่ไม่ได้ติดตั้ง คำนวณค่าพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้แต่ละวันจากแต่ละแผงมาเปรียบเทียบกันจำนวน 10 วัน แล้วใช้โปรแกรม SPSS (Statistical package for social sciences, เวอร์ชัน 29.0; USA) เพื่อวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว One-way ANOVA ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 เพื่อคำนวณค่าความเชื่อมั่น

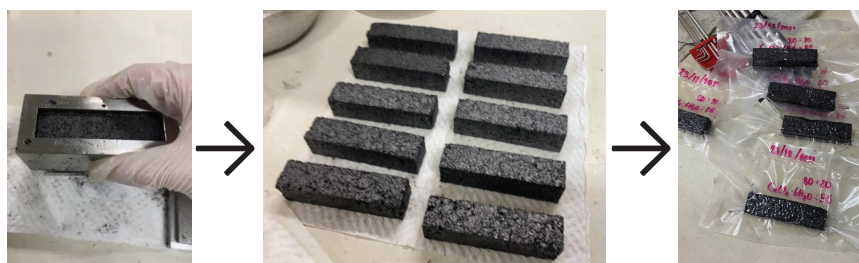


Figure 3 The process of pressing PCM bars into vacuum-sealed plastic bags



Figure 4 Solar panels for performance testing

3. ผลการวิจัย

3.1 การตรวจสอบคุณลักษณะของวัตถุดิบ

วัตถุดิบสารเคมีแคลเซียมคลอไรด์และแกรไฟต์ ขยายตัว เมื่อนำไปวิเคราะห์องค์ประกอบทางผลด้วย เทคนิคเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกชัน (XRD) พบผลของแกรไฟต์ (Graphite : JCPDS No. 75-2078) ในวัตถุดิบแกรไฟต์ ขยายตัว พบผลแคลเซียมคลอไรด์ไดไฮเดรต (Calcium chloride dihydrate : JCPDS No. 70-0385) ใน

ตัวอย่างวัตถุดิบแคลเซียมคลอไรด์ไดไฮเดรต โดยพบว่ามี เฟสแคลเซียมคลอไรด์เตตระไฮเดรต (Calcium chloride tetrahydrate : JCPDS No. 25-1035) เล็กน้อยเป็น เฟสเจือปน เมื่อนำวัตถุดิบแคลเซียมคลอไรด์ไดไฮเดรต มาต้ม 80-90 องศาเซลเซียส ผสมน้ำกลั่นตามสัดส่วนที่ คำนวณไว้ เมื่อปล่อยให้เย็นตัวลง ก็พบว่าได้เฟสแคลเซียม คลอไรด์เฮกซะไฮเดรต (Calcium chloride hexahydrate : JCPDS No. 26-1053) เพียงเฟสเดียว ดังแสดงใน Figure 5.

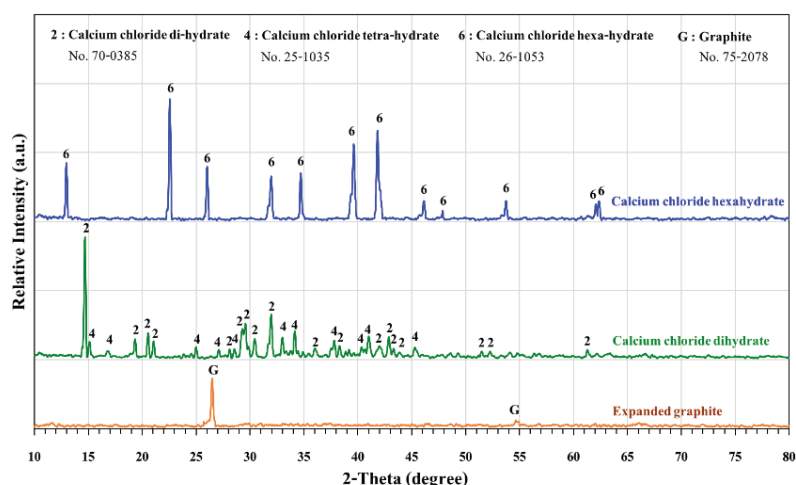


Figure 5 XRD patterns of calcium chloride raw materials and substances

3.2 ผลการทดสอบความคงตัวของรูปทรง

จากผลการทดสอบความคงตัวของส่วนผสม แคลเซียมคลอไรด์เฮกซะไฮเดรตกับแกรไฟต์ขยายตัวที่ อัตราส่วนต่าง ๆ พบว่า หากปริมาณของแกรไฟต์ขยาย ตัวน้อยกว่า 20 % จะเกิดการเยิ้มตัวไหลออกมาทำให้เสีย รูปทรงได้ และเมื่อเพิ่มปริมาณเป็นตั้งแต่ 20 % ขึ้นไป จะได้ลักษณะของของผสมที่คงรูปทรงได้ไม่มีการไหลเยิ้ม จึงเลือกปริมาณการเติมแกรไฟต์ขยายตัวที่ 20 % สำหรับ การทดลองในลำดับต่อไป

ในการทดสอบค่าการนำความร้อนของวัสดุ เปลี่ยนสถานะชนิดแคลเซียมคลอไรด์เฮกซะไฮเดรต เมื่อผสมกับแกรไฟต์ขยายตัวลงไปปริมาณ 20% จะให้ ค่าการนำความร้อนที่เพิ่มขึ้นจาก 0.5678 วัตต์ต่อเมตร-เคลวิน เป็น 1.1423 วัตต์ต่อเมตร-เคลวิน ดังแสดงใน Table 1. ซึ่งการเพิ่มขึ้นของค่าการนำความร้อน จะมีผล ช่วยให้วัสดุเปลี่ยนสถานะสามารถถ่ายเทพลังงาน ความร้อนได้ดีมากยิ่งขึ้น

Table 1 Test results for the thermal conductivity of PCM materials

Properties	Bulk density (g/cm ³)	Heat capacity (J/g·°C)	Thermal diffusivity (mm ² /s)	Thermal conductivity (W/m·K)
Expanded graphite (Powder)	0.21	0.5232	0.3850	0.0423
CaCl ₂ ·6H ₂ O	1.59	1.4049	0.2542	0.5678
CaCl ₂ ·6H ₂ O + 20%EG	1.46	1.2197	0.6414	1.1423

3.3 ผลการทดสอบความคงประสิทธิภาพ

การทดสอบความคงประสิทธิภาพของวัสดุเปลี่ยนสถานะคอมโพสิตซึ่งเป็นของผสมระหว่างแคลเซียมคลอไรด์เฮกซะไฮเดรตกับแกรไฟต์ขยายตัว เมื่อทดสอบการจำลองวงจรสภาพอุณหภูมิในแต่ละวัน จาก 25 องศาเซลเซียส เป็น 65 องศาเซลเซียส เป็นจำนวน 1,000 รอบ จนถึง 5,000 รอบ (หรือเทียบเท่าการใช้งานจริงเป็นเวลา 13.5 ปี) แล้วนำไปทดสอบค่าทางความร้อนด้วยเทคนิค DSC พบว่า จุดหลอมเหลวของแคลเซียมคลอไรด์เฮกซะไฮเดรตที่เตรียมได้มีค่าประมาณ 29.30 องศาเซลเซียส จุดเยือกแข็งมีค่าประมาณ 20.10 องศาเซลเซียส เมื่อผสมกับแกรไฟต์ขยายตัว ก็พบว่าจุดหลอมเหลวและจุดเยือกแข็งแทบจะไม่มีเปลี่ยนแปลงไปจากเดิม แต่จะมีค่าความร้อนแฝงของการ

หลอมเหลวที่ลดลงจาก 187.90 จูลต่อกรัม เป็น 141.60 จูลต่อกรัม เมื่อเติมแกรไฟต์ขยายตัวปริมาณ 20% และเมื่อทดสอบการจำลองวงจรสภาพอุณหภูมิในแต่ละวันพบว่า จุดหลอมเหลว จุดเยือกแข็ง ค่าความร้อนแฝงของการหลอมเหลว และค่าความร้อนแฝงของการเยือกแข็งมีค่าที่ใกล้เคียงกัน ดังแสดงใน Figure 6. และ Table 2. ทั้งนี้จะเห็นได้ว่าค่าความร้อนแฝงของการหลอมเหลวจะสูงกว่าค่าความร้อนแฝงของการเยือกแข็ง อาจจะเนื่องมาจากการคำนวณพื้นที่ของพีคในช่วงการเย็นตัวที่มีการกำหนดจุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุดการเยือกแข็งที่แคบกว่าที่ควรจะเป็น ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิจัยอื่นๆ [5, 11, 12] หมายความว่า วัสดุเปลี่ยนสถานะคอมโพสิตที่เตรียมได้นี้ สามารถใช้งานได้เป็นระยะเวลายาวนาน

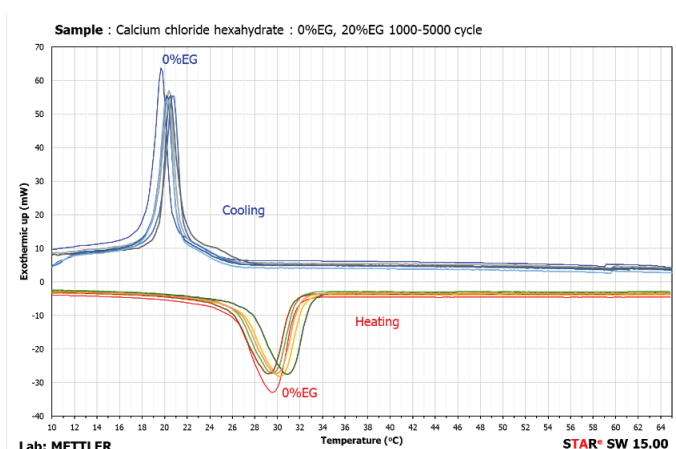


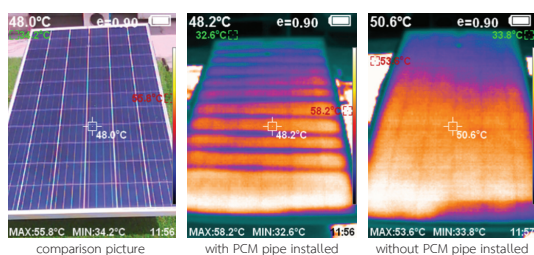
Figure 6 DSC test results of samples of CaCl₂·6H₂O phase change material mixed with EG through temperature simulation

Table 2 Results of thermal analysis using DSC technique of samples that have undergone temperature cycling simulation

Samples	Weight (mg)	Heating				Cooling			
		Onset	T-melt (°C)	Endset	Latent heat of melt (J/g)	Onset	T-freeze (°C)	Endset	Latent heat of freezing (J/g)
CaCl ₂ ·6H ₂ O	5.100	26.13	29.30	32.21	187.90	21.57	20.10	17.52	165.30
CaCl ₂ ·6H ₂ O+20%EG	5.800	26.91	30.10	32.74	141.60	22.32	20.60	18.46	130.40
1,000 cycle	5.200	26.51	29.56	32.44	146.23	23.12	20.92	19.24	128.49
2,000 cycle	5.700	25.87	29.15	32.16	140.87	22.10	20.47	18.29	129.97
3,000 cycle	5.300	27.24	30.76	33.89	141.43	22.74	20.41	18.24	126.11
4,000 cycle	5.500	27.16	31.02	33.41	137.76	22.17	20.50	18.19	122.97
5,000 cycle	5.200	26.89	30.07	32.76	147.76	22.02	20.51	18.03	128.81

3.4 ผลการทดสอบการลดอุณหภูมิแผงเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยวัสดุเปลี่ยนสถานะ

จากการถ่ายภาพความร้อนของแผงเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อมีการติดตั้งวัสดุเปลี่ยนสถานะในลักษณะที่เป็นท่ออะลูมิเนียมติดไว้ได้แผง จะสังเกตเห็นว่าตำแหน่งที่มีการติดตั้งวัสดุเปลี่ยนสถานะจะมีอุณหภูมิที่ต่ำกว่าบริเวณข้างเคียง เนื่องจากการถ่ายเทความร้อนจากแผงไปสู่ท่ออะลูมิเนียมและเก็บสะสมไว้ที่วัสดุเปลี่ยนสถานะ ดังแสดงใน Figure 7. หมายความว่าวัสดุเปลี่ยนสถานะสามารถลดอุณหภูมิของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ได้จริง

**Figure 7** Thermal camera photograph of solar panels

ผลการทดสอบสภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์จำนวน 4 แผง ที่ใช้สำหรับการทดลองในโครงการวิจัย โดยยังไม่ได้มีการติดตั้งอุปกรณ์ลดอุณหภูมิด้วยวัสดุเปลี่ยนสถานะ ทดสอบวัดอุณหภูมิและปริมาณไฟฟ้าที่ผลิตได้จากแผงดังแสดงใน Figure 8. โดยที่แกนนอนคือระยะเวลาตลอด 24 ชั่วโมง แกนตั้งด้านซ้ายมือเป็นแกนของอุณหภูมิ ความต่างศักย์เป็นโวลต์ และกระแสไฟฟ้าเป็นแอมป์ แกนตั้งด้านขวามือเป็นแกนของพลังงานเป็นวัตต์ ภายในกราฟ Photo-volt และ Photo-current หมายถึงค่าความต่างศักย์และกระแสของไฟฟ้าที่ปล่อยออกมาจากแผงเมื่อมีแสงแดด ค่า Power หมายถึงค่ากำลังไฟฟ้าที่ปล่อยออกมาจากแผง คำนวณได้จากโวลต์และแอมป์ และค่า Sun light หมายถึงค่าความเข้มแสงแดดที่ส่องลงมาที่แผง มีหน่วยเป็นวัตต์ต่อตารางเมตร จากการเก็บข้อมูลเบื้องต้นพบว่าแต่ละแผงมีอุณหภูมิที่ใกล้เคียงกันตลอดเวลาในการทดสอบ และเมื่อคำนวณปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ก็มีค่าที่ใกล้เคียงกันทั้ง 4 แผง โดยมีค่าที่แตกต่างกันจากค่าเฉลี่ยของทั้ง 4 แผง ตั้งแต่ -0.15% ถึง +0.19% ดังแสดงใน Figure 8. เป็นการยืนยันว่าทั้ง 4 แผงสามารถใช้เปรียบเทียบในการทดสอบในขั้นตอนต่อไปได้

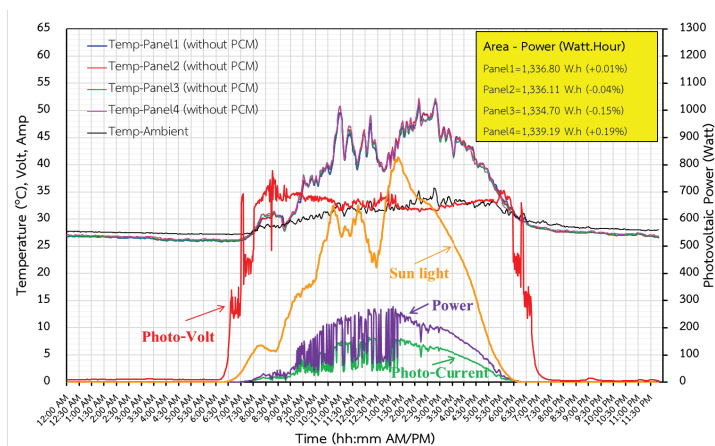


Figure 8 Temperature and electricity produced from 4 solar panels without PCM installed. (Date of data collecting on February 9, 2024)

เมื่อติดตั้งท่ออะลูมิเนียมบรรจุวัสดุเปลี่ยนสถานะคอมโพสิต จำนวน 10 15 และ 20 ท่อ วัดอุณหภูมิเพื่อทดสอบและเปรียบเทียบประสิทธิภาพการลดอุณหภูมิของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ได้ผลการทดลองว่าเมื่อติดตั้งท่ออะลูมิเนียมบรรจุวัสดุเปลี่ยนสถานะ จำนวน 20 ท่อ สามารถลดอุณหภูมิได้ถึง 5-10 องศาเซลเซียสในช่วงเวลากลางวันที่มีความเข้มแสงแดดสูงที่สุดของวัน อุณหภูมิพื้นผิวของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในบางวันอาจสูงถึง 65 องศาเซลเซียส โดยเฉพาะในวันที่อุณหภูมิของบรรยากาศสูงถึง 35 องศาเซลเซียส และในช่วงเวลาที่มีความเข้มแสงแดดสูงที่สุดของวัน

จากการเก็บข้อมูลค่าพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ เมื่อมีการติดตั้งท่ออะลูมิเนียมบรรจุวัสดุเปลี่ยนสถานะคอมโพสิต จำนวน 20 ท่อ พบว่าสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการแปลงพลังงานแสงแดดเป็นพลังงานไฟฟ้าได้เพิ่มมากขึ้นกว่าไม่มีการติดตั้งวัสดุเปลี่ยนสถานะคอมโพสิต สูงถึง 5.29% ดังแสดงใน Figure 9 และเมื่อเก็บข้อมูลในจำนวนวันที่มากขึ้น โดยเลือกข้อมูลเฉพาะวันที่มีแสงแดดค่อนข้างมาก (เนื่องจากบางวันในช่วงที่ทำการทดลองท้องฟ้ามีเมฆมาก บดบังแสงแดด ทำให้ได้ค่าพลังงานไฟฟ้าต่ำ) ก็พบว่า ได้ผลไปในทางเดียวกัน คือ เมื่อติดตั้ง

วัสดุเปลี่ยนสถานะคอมโพสิตเป็นจำนวน 20 ท่อ ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพพลังงานได้ 4.19-5.11% ดังแสดงใน Figure 10. และ Figure 11. ด้วยการทดสอบทางสถิติจากข้อมูลจำนวน 10 วัน เมื่อวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว One-way ANOVA ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 เพื่อคำนวณค่าความเชื่อมั่น แล้วพบว่าติดตั้งวัสดุเปลี่ยนสถานะคอมโพสิตช่วยเพิ่มประสิทธิภาพพลังงานได้อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95 %

เมื่อมีการเก็บข้อมูลตลอด 24 ชั่วโมง เป็นระยะเวลา 1 ปี ก็พบว่าวัสดุเปลี่ยนสถานะที่ห่อหุ้มตัวในเวลากลางวันที่มีแสงแดดและมีความร้อน อุณหภูมิสูงขึ้นจนเกิดการหลอมเหลวและดูดซับความร้อนไปจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์แล้ว เมื่อเวลากลางคืนที่อุณหภูมิของบรรยากาศและอุณหภูมิของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ลดลง มีค่าต่ำกว่า 25 องศาเซลเซียส จนเกิดการแข็งตัวของวัสดุเปลี่ยนสถานะกลับไปใหม่ได้ ซึ่งเป็นกลไกการทำงานของวัสดุชนิดนี้นั่นเอง แต่ก็เป็นที่น่าสังเกตว่า หากอุณหภูมิของบรรยากาศตลอดทั้งวันและกลางคืนมีค่าที่สูงกว่า 30 องศาเซลเซียสในช่วงฤดูร้อนของพื้นที่กรุงเทพมหานคร ก็อาจทำให้วัสดุเปลี่ยนสถานะชนิดนี้ไม่อาจทำหน้าที่ได้ตามที่กำหนดไว้ อาจจะต้องเปลี่ยนชนิดของวัสดุมาใช้แทนในการทดลองต่อไปในอนาคต

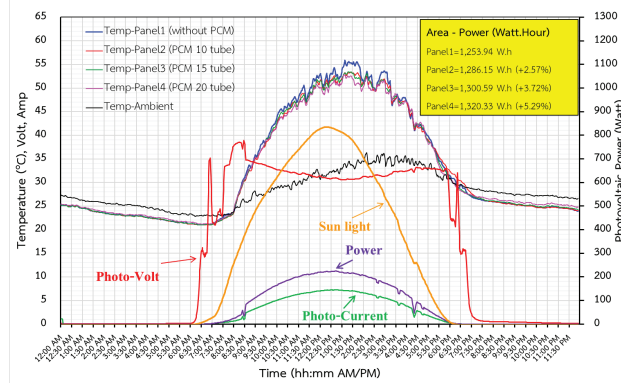


Figure 9 Temperature and electricity produced from 4 solar panels without PCM installed.
(Date of data collecting on February 16, 2024)

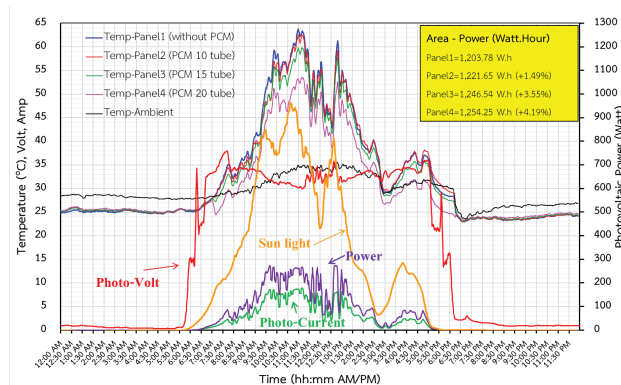


Figure 10 Temperature and electricity produced from 4 solar panels without PCM installed.
(Date of data collecting on February 21, 2024)

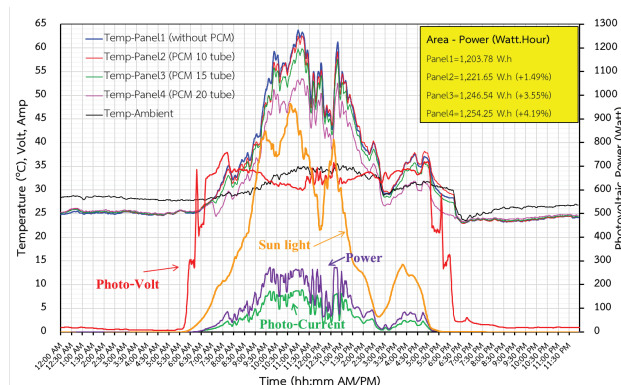


Figure 11 Temperature and electricity produced from 4 solar panels without PCM installed.
(Date of data collecting on February 25, 2024)

4. สรุป

วัสดุเปลี่ยนสถานะชนิดแคลเซียมคลอไรด์ เฮกซะไฮเดรตที่ผสมกับแกรไฟต์ขยายตัว ด้วยอัตราส่วน 80 ต่อ 20 โดยมวล โดยที่แกรไฟต์ขยายตัวที่ผสมลงไป ช่วยให้วัสดุคอมโพสิตมีความคงรูปทรงได้ดี ไม่หลอมตัว จนเหลวเมื่อมีอุณหภูมิสูงกว่าจุดหลอมเหลว มีความคงประสิทธิภาพเป็นระยะเวลายาวนาน โดยพิจารณาได้จากผลการทดสอบการจำลองวงจรอบสภาพอุณหภูมิ ในแต่ละวันเป็นจำนวน 5,000 รอบ แล้วยังคงมีค่าจุดหลอมเหลว จุดเยือกแข็ง และค่าความร้อนแฝงของการหลอมเหลวที่ไม่เปลี่ยนแปลงไป เมื่อบรรจุวัสดุเปลี่ยนสถานะคอมโพสิตในถุงพลาสติกซีลและใส่ไว้ในท่ออะลูมิเนียมแล้วนำไปติดตั้งให้แนบชิดด้านใต้ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ท่ออะลูมิเนียมทำหน้าที่เป็นตัวนำความร้อนจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ไปเก็บไว้ที่วัสดุเปลี่ยนสถานะและความร้อนบางส่วนถูกส่งผ่านไปยังบรรยากาศ โดยรอบที่อยู่ใต้แผง สามารถลดอุณหภูมิของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในช่วงเวลากลางวันได้ถึง 10 องศาเซลเซียส ช่วยปรับปรุงประสิทธิภาพพลังงานไฟฟ้าได้ประมาณ 5% ต้องใช้ปริมาณสูง ถึง 20 ท่อ (ท่ออะลูมิเนียม 20 ท่อ บรรจุวัสดุเปลี่ยนสถานะคอมโพสิต ปริมาณรวม 7.2 กิโลกรัม) มีความคงทนใช้งานได้เป็นระยะเวลายาวนาน เมื่อคำนวณต้นทุนราคาวัสดุและค่าใช้จ่ายแล้ว มีความเป็นไปได้ที่จะคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์เมื่อคำนวณมูลค่าของพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้เพิ่มขึ้นแทนที่การเพิ่มปริมาณแผงเซลล์แสงอาทิตย์ หรือเปรียบเทียบกับวัสดุเปลี่ยนสถานะชนิดอื่นที่มีราคาสูงกว่า

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณบริษัท เอ็นเซฟ พาวเวอร์ จำกัด ที่ให้การสนับสนุนงบประมาณในการทำวิจัย

6. References

- [1] Ghadikolaie, S.S.C., 2021, Solar photovoltaic cells performance improvement by cooling technology: An overall review, *Int. J. Hydrogen Energy*. 46 (18): 10939-10972.
- [2] Radziemska, E., 2003, The effect of temperature on the power drop in crystalline silicon solar cells, *Renew. Energy*. 28 (1): 1-12.
- [3] Yang, X., Ke, Z., Li, Y., Zhao, Z., Wu, J., Ke, H., Liao, M., Huang, C., Chen, K. and Zhou, H., 2020, Transient heat transfer analytical model for low-melting-point-metal phase change material heat sink, *Chem. Eng. Trans.* 81: 1273-1278.
- [4] Browne, M. C., Norton, B. and McCormack, S. J., 2015, Phase change materials for photovoltaic thermal management, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 47: 762-782.
- [5] Fu, L., Wang, Q., Ye, R., Fang, X. and Zhang, Z., 2017, A calcium chloride hexahydrate/expanded perlite composite with good heat storage and insulation properties for building energy conservation, *Renew. Energy*. 114:733-743.
- [6] Sun, V., Asanakham, A., Deethayat, T., Trutassanawint, W. and Kiatsiriroat, T., 2018, Heat transfer behavior of phase change material for controlling solar cell module temperature, *Engng. J. CMU*. 25 (03): 167 - 177 (in Thai).

- [7] Amir Reza, V., 2019, Chapter 5 Paraffin as Phase Change Material, Paraffin, IntechOpen, Rijeka, pp. 1-22.
- [8] Sun, V., Asanakham, A., Deethayat, T. and Kiatsiriroat, T., 2020, Increase of power generation from solar cell module by controlling its module temperature with phase change material, J. Mech. Sci. Technol. 34 (6): 2609-2618.
- [9] Purohit, B. K. and Sistla, V. S., 2021, Inorganic salt hydrate and for thermal energy storage application: A review, J. Energy Storage. 3 (2): e212.
- [10] Zhao, Y., Jin, L., Zou, B., Qiao, G., Zhang, T., Cong, L., Jiang, F., Li, C., Huang, Y. and Ding, Y., 2020, Expanded graphite – Paraffin composite phase change materials: Effect of particle size on the composite structure and properties, Appl. Therm. Eng. 171: 115015.
- [11] Soto, J., Jadal, M., de Guyenro, N. and Delaunay, D., 2021, Thermal cycling aging of encapsulated phase change material – Compressed expanded natural graphite composite, Therm. Sci. Eng. Prog. 22: 100836.
- [12] Tyagi, V. V. and Buddhi, D., 2008, Thermal cycle testing of calcium chloride hexahydrate as a possible PCM for latent heat storage, Sol. Energy Mater. Sol. Cells. 92 (8): 891-899.