



พฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนของสารเปลี่ยนสถานะ ในการควบคุมอุณหภูมิโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ Heat Transfer Behavior of Phase Change Material for Controlling Solar Cell Module Temperature

วาท ชุน¹, อรรถกร อาสนคำ^{1*}, ธรณิศว์ ดีทยา¹, วรศิษฐ์ ทรุทัศน์วินท์² และ ทนงเกียรติ เกียรติศิริโรจน์¹
Vat Sun¹, Attakorn Asanakham^{1*}, Thoranis Deethayat¹, Warasid Trutassanawint² and
Tanongkiat Kiatsirirot¹

¹ห้องปฏิบัติการวิจัยระบบทางอุณหภาพ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
239 ถนนห้วยแก้ว อำเภอเมือง เชียงใหม่ 50200

²ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล กรุงเทพฯ 10400

¹Thermal System Research Laboratory, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Chiang Mai University
239 Huaykaew Road, Muang District, Chiang Mai 50200

²Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Mahidol University, Bangkok 10400
*E-mail: attakorn_asanakham@hotmail.com

บทคัดย่อ

สารเปลี่ยนสถานะเชิงพาณิชย์ RT42 ถูกบรรจุด้านหลังโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ เพื่อใช้ในการควบคุมอุณหภูมิของโมดูล โดยสารเปลี่ยนสถานะมีอุณหภูมิจุดหลอมตัวประมาณ 42°C จะช่วยลดอุณหภูมิโมดูลเมื่อรับรังสีอาทิตย์ ไม่ให้มีค่าสูงมาก ทำให้ผลิตกำลังไฟฟ้าได้มากกว่าโมดูลปกติ โมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ที่ศึกษาทดสอบจะเป็นชนิดโพลีคริสตัลไลน์ ขนาด 195.6 cm x 99.2 cm กำลังการผลิตไฟฟ้าสูงสุด 250 Wp เอียงทำมุม 10° จากแนวระดับ หันหน้าทางทิศใต้ และสารเปลี่ยนสถานะมีความหนา 5 cm เมื่ออุณหภูมิในชั้นสารเปลี่ยนสถานะถึงจุดหลอมตัว สารเปลี่ยนสถานะจะอยู่ในสภาพของเหลวและรอยต่อระหว่างเฟสจะเลื่อนลงมาเรื่อย ๆ ซึ่งวิธีการดังกล่าวสามารถลดอุณหภูมิโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ในช่วงที่มีความเข้มรังสีอาทิตย์สูง จากการทดสอบในวันที่ท้องฟ้าแจ่มใส อุณหภูมิโมดูลจากประมาณ 57°C จะลดลงเหลือประมาณ 49.8°C อุณหภูมิในชั้นสารเปลี่ยนสถานะจะถูกคำนวณโดยวิธีการคำนวณเอนทัลปีในรูปแบบไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์เชิงเลข แบบหนึ่งมิติ เมื่อเทียบกับผลการทดสอบจริง ภายใต้สภาพอากาศจังหวัดเชียงใหม่ ซึ่งพบว่าสามารถทำนายอุณหภูมิสารเปลี่ยนสถานะที่บริเวณผิวโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ได้ค่อนข้างดี แต่จะต้องมีการปรับค่าสภาพการนำความร้อน ในบริเวณที่สารเปลี่ยนสถานะเริ่มอยู่ในรูปของเหลวเนื่องจากผลของการพาความร้อน จากการทดสอบในวันที่อากาศมีอุณหภูมิสูงและท้องฟ้าแจ่มใส พบว่าสารเปลี่ยนสถานะที่ใช้ทดสอบ ควรมีความหนาน้อยกว่า 5 cm ซึ่งสารจะไม่หลอมตัวหมด

คำสำคัญ: โมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ สารเปลี่ยนสถานะ การควบคุมอุณหภูมิ วิธีเอนทัลปี การคำนวณเชิงตัวเลข

ABSTRACT

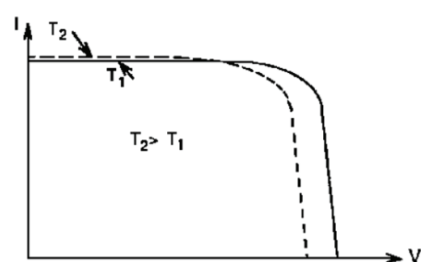
A commercial RT42 phase change material (PCM) contained at the back of a solar cell module for controlling the module temperature. The PCM melting point was around 42°C which could reduce the module temperature to be lower than that of the normal solar cell module thus more power generation could be obtained. The studied module was polycrystalline type of which the dimensions

were 1956 mm x 992 mm and the peak power was 250 Wp. The module was facing south with 10° inclination. The PCM thickness was 5 cm. As the PCM temperature reached the melting point the PCM was in liquid phase and the phase boundary was moving into the neighbor solid region thus the solar cell module temperature could be reduced, especially the unit operating under high solar radiation level which was around 57°C to be 49.8°C . The PCM temperature was predicted by one-dimensional finite difference enthalpy method. The simulated results were quite close to those of the experimental data but the thermal conductivity should be modified in the PCM liquid region due to the convection effect. The PCM thickness should be over 5 cm to prevent melting throughout the whole body.

Keywords: Solar cell module, Phase change material, Enthalpy method, Numerical calculation

1. บทนำ

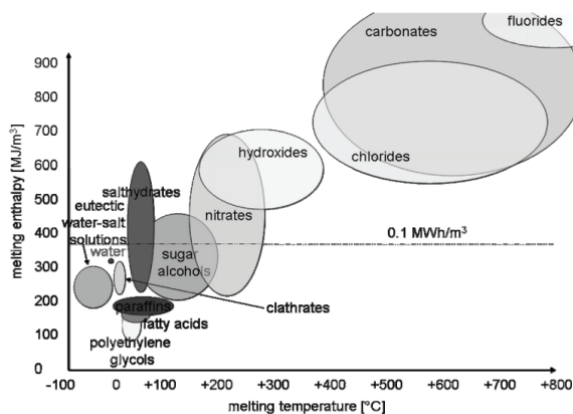
เซลล์แสงอาทิตย์ชนิด โพลีคริสตัลไลน์ (Polycrystalline solar cell) นิยมนำมาใช้ในโซลาร์ฟาร์ม (Solar farm) และโซลาร์รูฟท็อป (Solar rooftop) เพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า เนื่องจากมีอายุการทำงานที่ยาวนาน ราคาไม่แพงและประสิทธิภาพค่อนข้างสูง ค่ากำลังไฟฟ้าที่ระบุที่โมดูลเซลล์แสงอาทิตย์จะเป็นค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุด (Peak power output) ซึ่งจะได้จากการทดสอบภายใต้เงื่อนไขมาตรฐานที่ ความเข้มรังสีอาทิตย์ $1,000 \text{ W/m}^2$ และอุณหภูมิโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์เท่ากับ 25°C ซึ่งในความเป็นจริง ค่าความเข้มรังสีส่วนใหญ่จะต่ำกว่า และอุณหภูมิโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์จะสูงกว่าเงื่อนไข การทดสอบที่มาตรฐาน ซึ่งจะทำให้กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ต่ำกว่าค่าที่ได้จากการทดสอบมาตรฐาน ทั้งนี้ประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้าจะลดลง 0.4% ถึง 0.5% ในทุกๆ 1°C ที่เพิ่มขึ้น [1-3] รูปที่ 1 แสดง I-V curve ของโมดูล [4] จากรูปจะเห็นได้ว่าเมื่ออุณหภูมิเซลล์หรือโมดูลเพิ่มขึ้น จะให้กำลังไฟฟ้าที่ลดลง โดยค่าแรงดันไฟฟ้าวงจรเปิด (Open circuit voltage) จะมีค่าลดลงชัดเจน ขณะที่ค่ากระแสลัดวงจร (Short circuit current) มีค่าเปลี่ยนแปลงไม่มาก ดังนั้นการระบายความร้อนจากโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์จึงมีความจำเป็นในการลดอุณหภูมิโมดูล เพื่อผลิตพลังงานไฟฟ้าให้มีค่าสูงขึ้น



รูปที่ 1 โค้ดแกรม I-V ของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ เมื่อทำงานที่อุณหภูมิแตกต่างกัน [4]

การระบายความร้อนมีหลายรูปแบบส่วนใหญ่เป็นการระบายความร้อนแบบแอคทีฟ (Active cooling) เช่น การระบายความร้อนของ Abdozadeh and Ameri [5] โดยสเปรย์น้ำลงบนหน้าโมดูลทำให้อุณหภูมิโมดูลมีค่าใกล้เคียงกับอากาศโดยรอบ นอกจากนี้มีการใช้น้ำมาระบายความร้อนที่ได้โมดูล ซึ่งจะได้น้ำร้อนมาใช้ประโยชน์ด้วย นอกเหนือจากการผลิตไฟฟ้า [6] Teo et al. [7] อรรถกร อาสนคำและคณะ [8] ได้ทำการทดสอบการระบายความร้อน โดยมีการเป่าระบายลมด้านหลังโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งช่วยลดอุณหภูมิโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ได้ระดับหนึ่ง ธนัญฐ์ ลังกาดี และอรรถกร อาสนคำ [9] ยังได้ใช้เทคนิคข้างต้น ช่วยในการควบคุมอุณหภูมิโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ ที่มีการติดตั้งบนหลังคา ซึ่งช่วยให้ประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้าในช่วงที่ความเข้มรังสีอาทิตย์มีค่าสูงเพิ่มจากเดิมประมาณ 10% อย่างไรก็ตาม การระบายความร้อนแบบแอคทีฟมีการใช้พลังงานจากภายนอก ทำให้กำลังไฟฟ้าจากโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ไม่ได้เพิ่มขึ้นมาก และกำลังไฟฟ้าสุทธิอาจต่ำกว่าค่าที่ได้จากโมดูลปกติ

การใช้สารเปลี่ยนสถานะ เพื่อลดอุณหภูมิโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์นิยมใช้สารเปลี่ยนสถานะในรูปของแข็ง-ของเหลว (Solid-liquid phase change material, PCM) ซึ่งจะเป็วิธีแบบพาสซีฟ (Passive technique) โดยที่ไม่มีการใช้พลังงานจากภายนอก ความร้อนจากโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์จะทำให้สารเปลี่ยนสถานะหลอมตัวเป็นของเหลว ทำให้อุณหภูมิโมดูลลดลงเข้าสู่สภาวะหลอมเหลวของสารเปลี่ยนสถานะ และสารทำงานที่อยู่ในสภาพของเหลวจะคืนตัวกลับเป็นของแข็งในเวลากลางคืน ทำให้สามารถนำกลับมาใช้ได้ในตอนกลางวัน



รูปที่ 2 ค่าเอนทัลปีในการหลอมเหลวและอุณหภูมิในการหลอมเหลวของสารเปลี่ยนสถานะชนิดต่างๆ [10]

รูปที่ 2 แสดงความสัมพันธ์ของค่าเอนทัลปีในการเปลี่ยนสถานะ (Melting enthalpy) และอุณหภูมิหลอมเหลวของสารเปลี่ยนสถานะชนิดต่าง ๆ [10] สารประเภทพาราฟิน กรดไขมัน ซึ่งเป็นสารอินทรีย์จะมีจุดหลอมตัว ระหว่าง 0-130 °C ซึ่งในงานวิจัยนี้จะใช้สาร RT42 ที่มีจุดหลอมตัวประมาณ 42°C ซึ่งสูงกว่าอุณหภูมิอากาศแวดล้อมพอสมควร ซึ่งจะคงสภาพเป็นของแข็งอยู่ได้ก่อนนำมาใช้งาน รวมถึงมีค่าความร้อนแฝงในการหลอมเหลวค่อนข้างสูง

งานวิจัยจำนวนมากที่เกี่ยวกับการใช้สารเปลี่ยนสถานะ มาใช้ในรูปแบบตัวเก็บสะสมพลังงานความร้อน Charvát et al. [11] ได้ใช้สารเปลี่ยนสถานะเป็นระบบเก็บรักษาพลังงานความร้อนในช่วงการทำงานอุณหภูมิ

แคบๆ ของระบบผลิตอากาศร้อน Kosny [12] Mehling et al. [13] ใช้สารเปลี่ยนสถานะในการควบคุมอุณหภูมิอากาศภายในอาคาร ช่วยลดการใช้พลังงานในอาคาร Alawadhi [14] ใช้สารเปลี่ยนสถานะร่วมกับกำแพงอิฐ ช่วยลดความร้อนเข้าในตัวอาคารในช่วงอากาศร้อน นอกจากนี้มีการนำสารเปลี่ยนสถานะ RT25 ไว้ด้านหลังโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ที่เป็นส่วนหนึ่งของอาคาร (Building integrated PV, BiPV) เพื่อช่วยควบคุมอุณหภูมิโมดูล [15] ซึ่งพบว่าอุณหภูมิโมดูลสามารถควบคุมให้ต่ำกว่า 29°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ที่ความเข้มรังสีอาทิตย์ 750 W/m² และอุณหภูมิอากาศโดยรอบ 23°C

จากงานวิจัยที่ผ่านมาข้างต้นเห็นได้ว่าการใช้สารเปลี่ยนสถานะติดตั้งด้านหลังโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์จะช่วยดึงความร้อนจากโมดูล โดยใช้ความร้อนแฝงในการเปลี่ยนสถานะซึ่งจะช่วยลดอุณหภูมิโมดูล โดยไม่ต้องใช้พลังงานจากภายนอก ในงานวิจัยนี้จะพัฒนาโมเดลเพื่อใช้ทำนายอุณหภูมิในชั้นสารเปลี่ยนสถานะ และพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนในชั้นสารเปลี่ยนสถานะ โดยใช้วิธีการวิเคราะห์เอนทัลปี และเทคนิคที่ใช้ในการคำนวณ คือ วิธีไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์แบบเอ็กซ์พลิซิ (Explicit finite difference) แบบหนึ่งมิติ เนื่องจากมุมเอียงของโมดูลไม่สูงมากประมาณ 10° จากแนวระดับ โดยโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ที่พิจารณาจะเป็นโมดูลชนิดโพลีคริสตัลไลน์ กำลังผลิตสูงสุดที่มาตรฐาน 250 W_p โดยมีสารเปลี่ยนสถานะ RT42 แนบติดอยู่ด้านหลังโมดูล

2. การวิเคราะห์เอนทัลปี

การวิเคราะห์สมบัติสารเปลี่ยนสถานะในรูปเอนทัลปีสามารถวิเคราะห์พลังงานที่เกิดขึ้นในช่วงการรับความร้อนที่ไม่มีการเปลี่ยนสถานะ และช่วงที่สารเปลี่ยนสถานะหลอมตัว สมการการนำความร้อนสามารถเขียนในรูป

$$\rho \frac{\partial h}{\partial t} = \nabla \cdot (k \nabla T). \quad (1)$$

h คือเอนทัลปีจำเพาะ ρ คือความหนาแน่น k คือสภาพการนำความร้อน และ T คืออุณหภูมิสารเปลี่ยนสถานะ

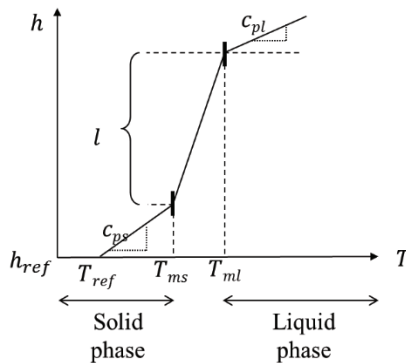
รูปที่ 3 แสดงรูปแบบของเอนทัลปีจำเพาะที่อุณหภูมิต่างๆ โดยขณะที่มีการเปลี่ยนสถานะเนื่องจากสารทำงานส่วนใหญ่เป็นพวกพาราฟิน อุณหภูมิสารทำงานขณะที่เปลี่ยนสถานะจะมีค่าไม่คงที่

ขณะเปลี่ยนสถานะ:

$$\begin{aligned} h &= c_{ps}(T - T_{ref}), T < T_{ms} \\ &= c_{ps}(T_{ms} - T_{ref}) + \frac{T - T_{ms}}{T_{ml} - T_{ms}} l, \\ &\quad T_{ms} \leq T \leq T_{ml} \\ &= c_{ps}(T_{ms} - T_{ref}) + l + c_{pl}(T - T_{ml}), \\ &\quad T > T_{ml} \end{aligned} \quad (2)$$

ดังนั้นค่าอุณหภูมิสามารถจัดได้ในรูป

$$\begin{aligned} T &= T_{ref} + \frac{h}{c_{ps}}, h < c_{ps}(T_{ms} - T_{ref}) \\ &= T_{ms} + \frac{[h - c_{ps}(T_{ms} - T_{ref})](T_{ml} - T_{ref})}{l}, \\ c_{ps}(T_{ms} - T_{ref}) &\leq h \leq c_{ps}(T_{ms} - T_{ref}) + l \\ &= T_{ml} + \frac{h - l}{c_{pl}} - \frac{c_{ps}}{c_{pl}(T_{ms} - T_{ref})}, \\ h &> c_{ps}(T_{ms} - T_{ref}) + l \end{aligned} \quad (3)$$



รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างเอนทัลปีจำเพาะและอุณหภูมิ

ในระหว่างที่มีการหลอมตัว สมบัติทางความร้อนต่างๆ จะพิจารณาจากสัดส่วนเชิงมวลในการผสมของแต่ละเฟส (Phase) โดยความหนาแน่นของสาร 2 สถานะ:

$$\rho = (1 - g)\rho_s + g\rho_l. \quad (4)$$

สภาพการนำความร้อนของสาร 2 สถานะ:

$$k = (1 - g)k_s + gk_l. \quad (5)$$

ตัวห้อย s และ l แสดงสถานะของแข็งและของเหลวตามลำดับ g คือสัดส่วนของเหลวเชิงมวลซึ่งสามารถคำนวณจาก

$$g = \begin{cases} 0, & T < T_m \\ \frac{h - c_{ps}(T_m - T_0)}{l}, & T = T_m \\ 1, & T > T_m \end{cases} \quad (6)$$

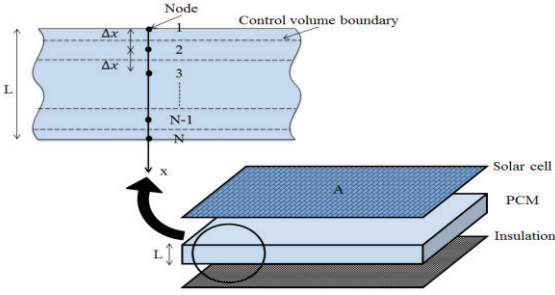
3. การคำนวณเชิงเลข

สารเปลี่ยนสถานะที่อยู่ด้านหลังโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ จะรับความร้อนจากโมดูล และถ้าอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิหลอมตัว บางส่วนของสารเปลี่ยนสถานะจะเปลี่ยนจากของแข็งเป็นของเหลว ทำให้อุณหภูมิโมดูลลดต่ำลง โดยพยายามเข้าใกล้อุณหภูมิจุดหลอมเหลวของสารเปลี่ยนสถานะ

ในการประเมินหาอุณหภูมิที่เกิดขึ้นในชั้นของสารเปลี่ยนสถานะจะใช้วิธีการเชิงเลข โดยแบ่งชั้นสารเปลี่ยนสถานะ ออกเป็นชั้นย่อยๆ หนา Δx ดังแสดงในรูปที่ 4 และกำหนด Node ตามจำนวนชั้น ทั้งนี้การคำนวณจะพิจารณาการแปรเปลี่ยนอุณหภูมิเพียง 1 มิติ โดยสมมุติการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นในแต่ละชั้นถ่ายเทตามทิศทางความหนาของสารเปลี่ยนสถานะเท่านั้น ค่าความหนาของชั้นย่อย Δx จะคำนวณได้จาก

$$\Delta x = \frac{L}{N - 1}. \quad (7)$$

L คือความหนาของสารเปลี่ยนสถานะ และ N คือจำนวน Nodes



รูปที่ 4 การแบ่งชั้นการคำนวณในชั้นของสารเปลี่ยนสถานะ

ที่ Node ใดๆ โดย $i=2, 3, \dots, N-1$ สมดุลพลังงานที่ Node นั้น จะพิจารณาจากอัตราความร้อนที่เกิดจากการนำความร้อน และพลังงานสะสมใน Node นั้น แต่ละ Node มีความหนา Δx ซึ่งสามารถเขียนในรูป

$$\dot{Q}_{i-1 \rightarrow i} + \dot{Q}_{i+1} = \rho(A\Delta x) \frac{dh}{dt},$$

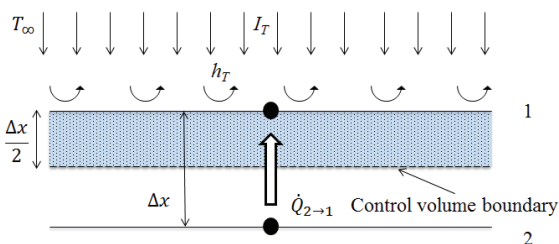
$$\frac{kA}{\Delta x}(T_{i+1}^t - T_i^t) + \frac{kA}{\Delta x}(T_{i-1}^t - T_i^t) = \rho(A\Delta x) \frac{h_i^{t+\Delta t} - h_i^t}{\Delta t},$$

นั่นคือ

$$h_i^{t+\Delta t} = h_i^t + \frac{k}{\rho \Delta x^2} (T_{i+1}^t + T_{i-1}^t - 2T_i^t) \Delta t. \quad (8)$$

สารเปลี่ยนสถานะที่ Node 1 จะมีความหนา $\Delta x/2$ อุณหภูมิที่ Node 1 จะถือว่าเท่ากับอุณหภูมิโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ ที่สมมติว่าบางมาก อุณหภูมิโมดูลจะมีค่าเท่ากันทั้งหมด สมดุลพลังงานที่ Node 1 ในรูปที่ 5 สามารถเขียนได้ดังนี้

$$\dot{Q}_{sr} + \dot{Q}_r + \dot{Q}_{cv} + \dot{Q}_{2 \rightarrow 1} = \rho \left(A \frac{\Delta x}{2} \right) \frac{\partial h_1}{\partial t},$$



รูปที่ 5 การถ่ายเทความร้อนที่ Node 1

จากรูปที่ 5 จะได้

$$(\tau\alpha)I_r A + h_r A(T_\infty - T_1) + \varepsilon\sigma A(T_1^4 - T_{sky}^4) + \frac{kA}{\Delta x}(T_2^t - T_1^t) = \rho \left(A \frac{\Delta x}{2} \right) \frac{h_1^{t+\Delta t} - h_1^t}{\Delta t},$$

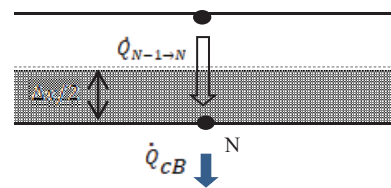
$$h_1^{t+\Delta t} = h_1^t + 2 \frac{k}{\rho \Delta x^2} (T_2^t - T_1^t) + 2 \frac{\Delta t}{\rho \Delta x} [h_r(T_\infty - T_1^t) + I_r(\tau\alpha) + \varepsilon\sigma(T_1^4 - T_{sky}^4)]. \quad (9)$$

I_r คือค่าความเข้มรังสีอาทิตย์บนระนาบโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ ($\tau\alpha$) คือผลคูณการส่องผ่านและดูดกลืนรังสีของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ A คือพื้นที่รับรังสี T_∞ คืออุณหภูมิอากาศโดยรอบ T_{module} คืออุณหภูมิโมดูล h_r คือค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน ซึ่งสามารถคำนวณจาก [18]

$$h_r = 3.0 w + 2.8. \quad (10)$$

w คือความเร็วลมในหน่วย m/s ซึ่งในงานนี้ใช้ที่ค่า 1.4 m/s ซึ่งเป็นค่าความเร็วลมเฉลี่ยของจังหวัดเชียงใหม่ [15] ε คือค่าสภาพการเปล่งรังสีความร้อน (Thermal emissivity) ของผิวโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์มีค่า 0.91 [HYPERLINK \l "Arm101" 14]. σ คือค่าคงที่ Stefan-Boltzmann constant มีค่าเท่ากับ $5.6697 \times 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$ T_{sky} และ T_∞ คืออุณหภูมิท้องฟ้าและอุณหภูมิอากาศในหน่วย K คำนวณจาก [16]

$$T_{sky} = 0.0552 \cdot T_\infty^{1.5}. \quad (11)$$



รูปที่ 6 ทิศทางการถ่ายเทความร้อนที่ Node N

รูปที่ 6 แสดงทิศทางการถ่ายเทความร้อนที่ Node N และสมดุลพลังงานที่ Node N จะอยู่ในรูป

$$\dot{Q}_{N-1 \rightarrow N} + \dot{Q}_{CB} = \rho \left(A \frac{\Delta x}{2} \right) \frac{\partial h_N}{\partial t},$$

$$\frac{kA}{\Delta x}(T_{N-1}^t - T_N^t) + h_B \cdot A \cdot (T_\infty - T_N^t) = \rho \left(A \frac{\Delta x}{2} \right) \frac{h_N^{t+\Delta t} - h_N^t}{\Delta t},$$

จะได้

$$h_N^{t+\Delta t} = h_N^t + 2 \frac{k}{\rho \Delta x^2} (T_{N-1}^t - T_N^t) + 2 \frac{k}{\rho \Delta x^2} h_B (T_\infty^t - T_N^t). \quad (12)$$

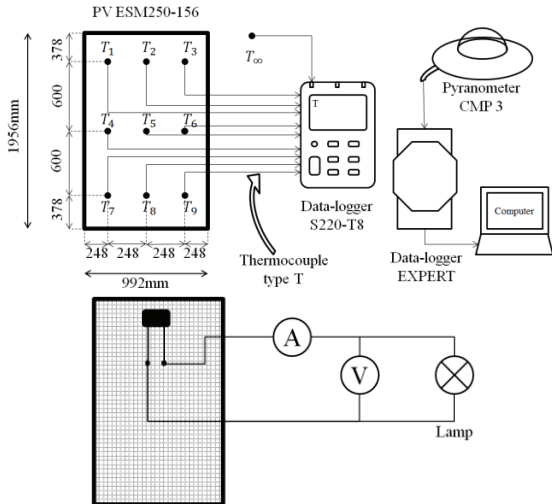
h_B ใช้ค่าในสมการ (10) เช่นเดียวกัน แต่กำหนดให้ความเร็วเข้าใกล้ศูนย์ และในการจำลองการทำงาน Δx และ Δt ใช้ค่า 1 mm และ 1 s ตามลำดับ

4. การทดสอบ

ในการทดสอบจะใช้โมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดโพลีคริสตัลไลน์ (EVEREXCEED EMS250-156) ขนาด 195.6 cm x 99.2 cm ซึ่งให้กำลังไฟฟ้าสูงสุด 250W_p ที่ สภาวะทดสอบมาตรฐาน (1,000 W/m² irradiance, Air mass AM1.5, Cell temperature 25°C) ด้าน หลังโมดูลบรรจุสารเปลี่ยนสถานะ RUBITHERM RT42 หนา 5 cm สมบัติของสารเปลี่ยนสถานะแสดงในตารางที่ 1 ขณะเดียวกัน จะมีโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ ที่มีลักษณะและสมรรถนะเช่นเดียวกัน แต่ไม่มีสารเปลี่ยนสถานะร่วมในการทดสอบ เพื่อเปรียบเทียบสมรรถนะ สำหรับสาร RT42 สำหรับอุณหภูมิที่มีการเปลี่ยนสถานะของสารดังกล่าวอยู่ที่ 38-43°C [17]

ตารางที่ 1 สมบัติสารเปลี่ยนสถานะ [17]

Model	RT35	RT42	RT47	RT55
Melting point [°C]	35	42	47	55
Latent heat [kJ/kg]	160	174	170	172
Specific heat [kJ/kg-K]	2			
Density [kg/m ³]	(s) 860 (l) 770	880 760	880 770	880 770
Thermal conductivity [W/m-K]	0.2			



รูปที่ 7 ลักษณะชุดทดสอบ และตำแหน่งในการวัดพารามิเตอร์ต่างๆ

โมดูลเซลล์แสงอาทิตย์จะถูกนำมาทดสอบกลางแจ้ง โดยหันหน้าไปทางทิศใต้และเอียงทำมุม 10° จากแนวระดับ เทอร์โมคัปเปิลชนิด T จะถูกวัดที่ผิวของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งสัมผัสกับสารเปลี่ยนสถานะ 9 จุด ตามตำแหน่งแสดงในรูปที่ 7 นอกจากนี้ยังมีการวัดอุณหภูมิในชั้นความหนาของสารเปลี่ยนสถานะอีก 9 จุด ในลักษณะเดียวกันที่ความหนาถึงกลาง และที่ความหนา 5 cm นอกจากนี้ยังมีการวัดอุณหภูมิอากาศรอบๆ โดยความละเอียดของเครื่องมือวัด $\pm 0.2^\circ\text{C}$ ค่ารังสีอาทิตย์บนระนาบโมดูลจะวัดด้วย CMP3 Pyranometer ความละเอียดในการวัด $\pm 10\%$ กำลังไฟฟ้าที่ได้จากโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์จะวัดจาก Multi-meter UNI-T UT20 โดยมีภาระทางไฟฟ้าที่เป็นหลอดแสงสว่างขนาด 150 W (13117 150W GX5.3 17V 1CT) 2 ดวง กำลังไฟฟ้าที่ได้จากโมดูล จะคำนวณจาก

$$P_g = V \times I. \quad (13)$$

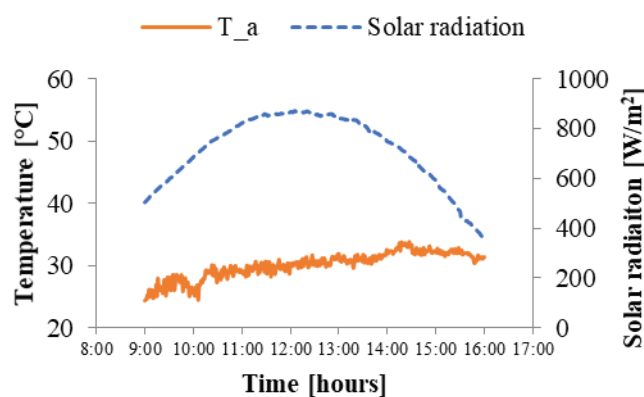
5. ผลการศึกษา

ในการศึกษาจะเลือกวันที่มีท้องฟ้าแจ่มใส ได้แก่ วันที่ 2 ธันวาคม 2558 การทดสอบใช้ข้อมูลสภาพ

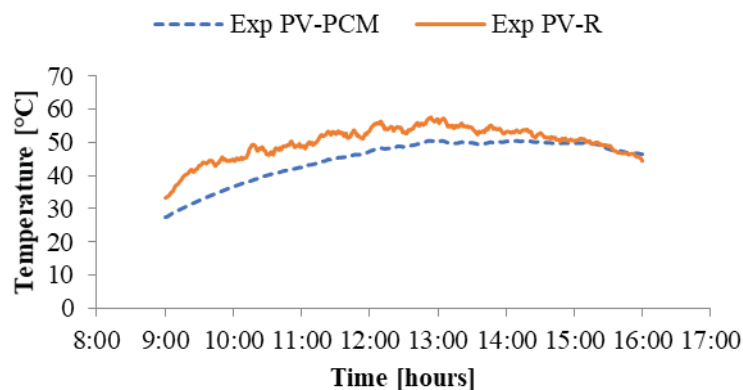
ภูมิอากาศของอำเภอเมือง จังหวัดเชียงใหม่ รูปที่ 8 แสดงข้อมูลรังสีอาทิตย์ที่ตกบนระนาบโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ และอุณหภูมิอากาศโดยรอบ จากการทดสอบพบว่า อุณหภูมิโมดูลก่อนข้างสม่ำเสมอตลอดทั้งแผ่น โดยอุณหภูมิแตกต่างกันสูงสุดไม่เกิน 1.5°C อุณหภูมิผิวด้านหน้าและด้านหลังของโมดูลพบว่ามีค่าใกล้เคียงกัน โดยมีค่าแตกต่างกันไม่เกิน 1°C

รูปที่ 9 แสดงอุณหภูมิเฉลี่ยของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ กรณีที่มีและไม่มีแผ่น PCM ที่ด้านหลังของโมดูล จะพบว่าความร้อนที่ดูดกลืนโดยโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์จะถูกถ่ายเทให้กับสารเปลี่ยนสถานะ ทำให้อุณหภูมิโมดูลลดลงตั้งแต่เช้าถึงช่วงบ่าย ที่เวลาประมาณ 13:00 น. โมดูลที่ไม่มีสารเปลี่ยนสถานะจะมีอุณหภูมิประมาณ 57°C โดยโมดูลที่มีสารเปลี่ยนสถานะมีอุณหภูมิเพียง 49.8°C อย่างไรก็ตามในเวลาประมาณ ตั้งแต่ 15:00 น. เป็นต้นไป ความเข้มรังสีอาทิตย์ตกลงมาก อุณหภูมิโมดูลที่ไม่มีสารเปลี่ยนสถานะจะลดลงอย่างรวดเร็ว ตามค่ารังสีอาทิตย์ที่ลดลงอย่างรวดเร็ว ในขณะที่โมดูลที่มีสารเปลี่ยนสถานะ อุณหภูมิจะค่อนข้างคงที่ เนื่องจากการสะสมความร้อนในสารเปลี่ยนสถานะ ทำให้อุณหภูมิโมดูลในกรณีที่ไม่มีสารเปลี่ยนสถานะ มีแนวโน้มที่จะลดต่ำกว่าโมดูลที่มีสารเปลี่ยนสถานะ

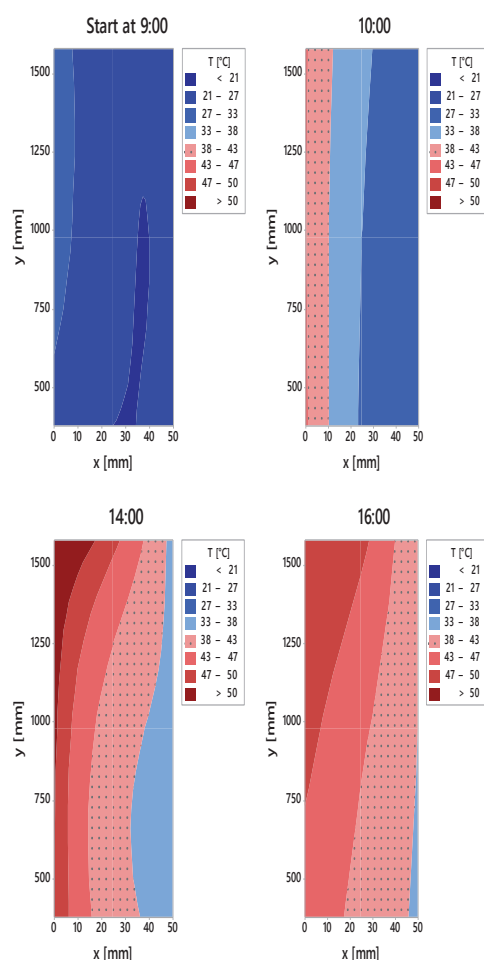
รูปที่ 10 แสดงลักษณะการกระจายอุณหภูมิในสารเปลี่ยนสถานะ บริเวณแกนกลางของโมดูล (T2, T5, T8) จากข้อมูลการวัดอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆ Y คือระยะตามความยาวของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ และ X คือระยะจากผิวโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ จากรูปในตอนเริ่มต้น อุณหภูมิสารเปลี่ยนสถานะจะมีค่าต่ำและค่อนข้างสม่ำเสมอในรูปของแข็ง ที่เวลาประมาณ 11:00 น. เมื่ออุณหภูมิผิวโมดูลสูงมากพอ จะทำให้ชั้นสารเปลี่ยนสถานะบางส่วนละลาย และมีความร้อนถูกถ่ายเทมายังชั้นถัดไป ซึ่งลักษณะการแบ่งชั้นอุณหภูมิของสารเปลี่ยนสถานะจะมีลักษณะเป็นชั้น ๆ ที่มีความหนาแต่ละชั้นค่อนข้างสม่ำเสมอ แต่เมื่ออุณหภูมิโมดูลมีค่าสูงขึ้น ทำให้มีการหลอมตัวละลายเป็นของเหลวมากขึ้น จะมีผลของการพาความร้อนในชั้นของเหลว ดังเช่นที่เวลาประมาณ 14:00 น. สารเปลี่ยนสถานะบริเวณด้านบน (Y มีค่าสูง) ดูเหมือนจะมีอุณหภูมิสูงกว่าบริเวณส่วนล่าง ทำให้มีของเหลวที่มีอุณหภูมิสูง อยู่ในปริมาณที่มาก ซึ่งจะถ่ายเทความร้อนไปยังชั้นอื่นๆ ได้ดีกว่าบริเวณส่วนล่าง ทำให้ขอบเขตการเปลี่ยนสถานะลงมาถึงกว่าบริเวณส่วนของโมดูล (Y มีค่าต่ำ) และเมื่อเวลาประมาณ 16:00 น. สารเกือบทั้งหมดหลอมละลาย



รูปที่ 8 ข้อมูลความเข้มรังสีอาทิตย์บนระนาบ โมดูลเซลล์แสงอาทิตย์และอุณหภูมิอากาศโดยรอบ ในวันที่ท้องฟ้าแจ่มใส 2 ธันวาคม 2558



รูปที่ 9 ผลการทดสอบอุณหภูมิโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์กรณีมีและไม่มีติดตั้งสาร RT42 หนา 5 cm ช่วยในการระบายความร้อน การทดสอบวันที่ 2 ธันวาคม 2558 (PV-PCM คือโมดูลที่มี PCM PV-R คือโมดูลที่ไม่มี PCM)

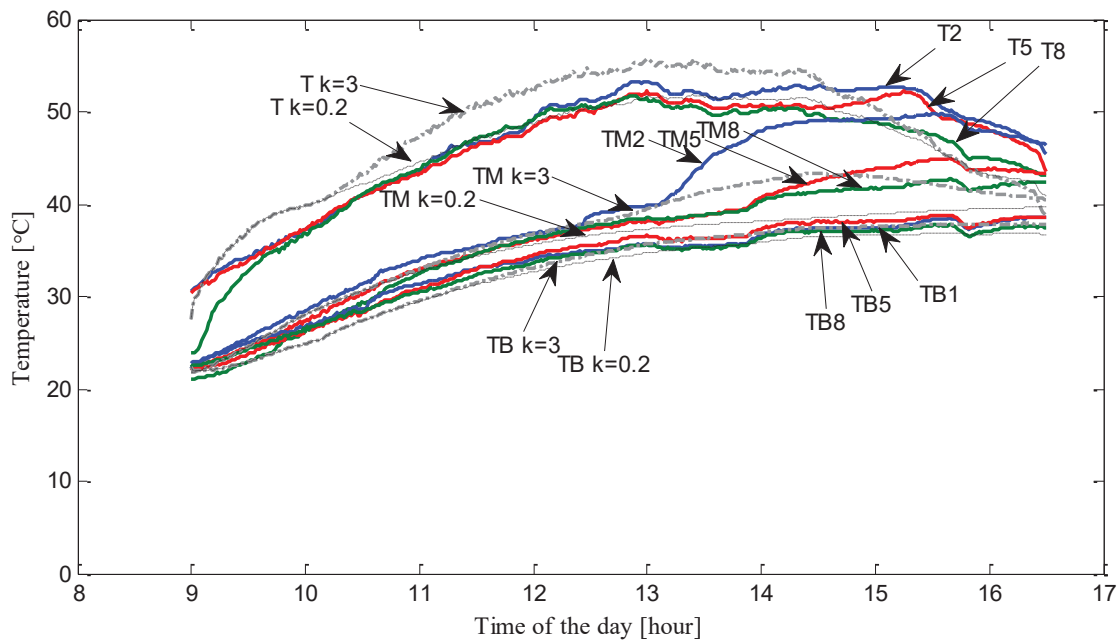


รูปที่ 10 ลักษณะการกระจายอุณหภูมิในสารเปลี่ยนสถานะตรงกับตำแหน่งที่ผิวบน ความลึกตรงกลาง และผิวล่างสุด การทดสอบ วันที่ 2 ธันวาคม 2558

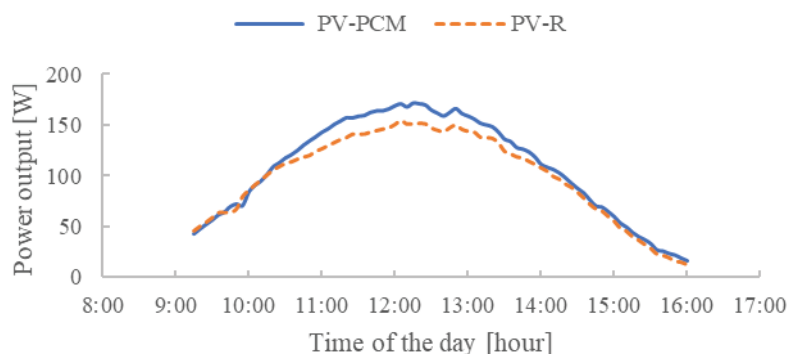
รูปที่ 11 แสดงผลการเปรียบเทียบอุณหภูมิโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์และอุณหภูมิสารเปลี่ยนสถานะที่ระดับความลึกต่างๆ จากการคำนวณด้วยวิธีอนาลิติก และผลการทดสอบ จะเห็นได้ว่าในช่วงเช้า อุณหภูมิสารทำงานยังไม่สูงมาก ผลการคำนวณยังสอดคล้องอย่างดีกับผลการทดลอง แต่ในช่วงบ่ายเช่น เวลาประมาณ 14:00 น. มีการหลอมละลายเป็นของเหลวมากขึ้น โดยเฉพาะบริเวณตอนบนของสาร ซึ่งมีความหนาของของเหลวมากกว่าบริเวณตอนล่าง ในกรณีที่ใช้สมการคำนวณในลักษณะการนำความร้อนอย่างเดียว (Pure conduction) พบว่า การกระจายอุณหภูมิโดยเฉพาะที่บริเวณชั้นกลางของสาร ซึ่งอยู่ในสภาพ 2 สถานะ อุณหภูมิที่ได้จากการคำนวณจะมีค่าต่ำกว่าค่าที่ได้จากการทดลองมาก อาจเกิน 20 % โดยเฉพาะในชั้นกลาง ซึ่งบางส่วนมีสถานะเป็นของเหลวทั้งหมด และบางส่วนยังเป็นของแข็ง แต่เมื่อมีการปรับค่าสภาพการนำความร้อน k จาก $0.2 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ ไปเป็นค่าในรูปแบบสภาพการนำความร้อนประสิทธิผล (Effective thermal conductivity) โดยรวมผลของการพาความร้อนด้วย โดยให้ k มีค่าสูงขึ้น เป็น $3 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ ในบริเวณที่อุณหภูมิสูงกว่า 38°C ซึ่งพบว่า ค่าความแม่นยำในการทำนายจากสมการที่เสนอไว้ ให้ผลใกล้เคียงกับการทดลองมากขึ้น สำหรับการทำนายอุณหภูมิในชั้นล่างสุดให้ผลใกล้เคียงกับค่าจากการทดลอง เนื่องจากอุณหภูมิสารไม่สูง

มาก จึงอาจสรุปได้ว่าการใช้โมเดลการคำนวณเอนทัลปีแบบ 1 มิติ ให้ผลความแม่นยำในการทำนายอุณหภูมิได้ดีพอสมควรโดยมีค่าความแตกต่างสูงสุดของอุณหภูมิ ไม่เกิน 15 % อย่างไรก็ตาม การคำนวณด้วยวิธีเอนทัลปีในกรณีที่มีการหลอมเหลว ในชั้นสารเปลี่ยนสถานะ ควรจะมีการนำเทอมการพาความร้อนเข้ามารวมด้วย ซึ่งจะต้องมี

การพัฒนาโมเดลการคำนวณเพิ่มเติม เพื่อให้ผลการคำนวณแม่นยำมากขึ้น จากรูปจะเห็นได้ว่า ความหนาของสารเปลี่ยนสถานะไม่ควรต่ำกว่า 5 cm โดยที่สารเปลี่ยนสถานะบางส่วนยังอยู่ในสภาพของแข็ง เพื่อให้สารเปลี่ยนสถานะยังสามารถรับความร้อนโดยใช้ผลของความร้อนแฝงอยู่ได้



รูปที่ 11 การเปรียบเทียบอุณหภูมิสารเปลี่ยนสถานะที่ระดับความลึกต่างๆ จากการคำนวณด้วยวิธีเอนทัลปี เทียบกับค่าจากการทดลอง วันที่ 2 ธันวาคม 2558 ชุด TM, TB คือค่าอุณหภูมิ T2, T5 และ T8 ของสารเปลี่ยนสถานะ ที่ความลึกตรงกลางและด้านล่างสุดของชั้นสารเปลี่ยนสถานะ



รูปที่ 12 กำลังไฟฟ้าที่จ่ายจากโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ ในวันที่ทดสอบ 2 ธันวาคม 2558 (PV-R คือโมดูลปกติ PV-PCM คือ โมดูลที่มีสาร PCM)

รูปที่ 12 แสดงกำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้ภาระที่เป็นหลอดไฟ พลังแสงสว่าง จากรูปจะเห็นว่า กำลังไฟฟ้าที่ได้จากโมดูลสูงสุดที่เวลาประมาณ 12:20 น. มีค่าเท่ากับ 170.5 และ 151.84 W สำหรับ โมดูลที่มีและไม่มีสารเปลี่ยนสถานะ ตามลำดับ โดยมีกำลังไฟฟ้าเพิ่มขึ้นประมาณ 12.3%

6. สรุป

ผลการศึกษาในงานวิจัยนี้อาจสรุปได้ว่า

1. สารเปลี่ยนสถานะ RT42 ช่วยลดอุณหภูมิโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ ทำให้สามารถผลิตไฟฟ้ามาใช้ประโยชน์ได้มากขึ้น
2. เมื่ออุณหภูมิของสารเปลี่ยนสถานะถึงจุดหลอมเหลว สารจะเปลี่ยนเป็นของเหลว และรอยต่อระหว่างชั้นของเหลว-ของแข็งจะเลื่อนตัวลงมาตามลำดับ ซึ่งพบว่าพฤติกรรมในการถ่ายเทความร้อนแต่ละชั้นความลึกมีผลของการพาความร้อนเกิดขึ้นในบริเวณที่เป็นของเหลวด้วย และบริเวณด้านบนของสารเปลี่ยนสถานะ

รอยต่อระหว่างสถานะของเหลว-ของแข็งจะลงมาลึกกว่าบริเวณด้านล่าง เนื่องจากผลการพาความร้อน

3. วิธีคำนวณเอนทัลปี สามารถทำนายอุณหภูมิของสารเปลี่ยนสถานะได้ดีในระดับหนึ่ง ซึ่งจะต้องมีการปรับค่าสภาพการนำความร้อนให้สูงขึ้น เมื่อสารหลอมตัวเป็นของเหลว
4. ในการทดสอบพบว่า ความหนาของสาร RT42 ไม่ควรต่ำกว่า 50 mm เพื่อสามารถทำงานตลอดวัน โดยไม่ละลายหมดสำหรับในวันที่ท้องฟ้าแจ่มใส

7. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ภายใต้อุปกรณ์สนับสนุนการวิจัย ที่สนับสนุนทุนวิจัย และขอขอบคุณศูนย์ความเป็นเลิศด้านพลังงานหมุนเวียน มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ในการสนับสนุนอุปกรณ์การทดสอบ

เอกสารอ้างอิง

- [1] Skoplaki, E. and J. A. Palyvos. On the temperature dependence of photovoltaic module electrical performance: A review of efficiency/power correlations. *Solar energy*, 2009; 614-624.
- [2] Huang, M.J., Eames, P.C. and Norton, B. Phase change materials for limiting temperature rise in building integrated photovoltaics. *Solar Energy*, 2006; 6: 1121-1130.
- [3] Huang, M. J., Eames, P. C. and Norton, B. Thermal regulation of building-integrated photovoltaics using phase change materials. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2004; 2715-2733.
- [4] Jumrusprasert, P., Smith, G., and Kirkup, L. Comparing the Efficiency of Fixed Solar Cell Panels in a Tropical Location. *Proceedings of ISES World Congress 2007 (Vol. I–Vol. V)*, Heidelberg, 2009; 1478-1483.
- [5] Abdolzadeh, M. and Ameri, M. Improving the effectiveness of a photovoltaic water pumping system by spraying water over the front of photovoltaic cells. *Renewable Energy*, 2009; 34: 91-96.
- [6] ณัฐนิช วรยศ วิภาวดี วงษ์สุวรรณ และ ทนงเกียรติ เกียรติศิริโรจน์. การพัฒนาระบบทำน้ำร้อนแสงอาทิตย์ในประเทศไทย. *วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่*. 2552; 16 (2): 55-69.
- [7] Teo, H. G., Lee, P. S. and Hawlader, M. N. A. An active cooling system for photovoltaic modules. *Applied Energy*, 2012; 90: 309-315.

- [8] อรรถกร อาสนคำ อีระพงษ์ กันธิยะ และ ทนงเกียรติ เกียรติศิริโรจน์. การทำนายสมรรถนะ โมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดโพลีคริสตัลไลน์ภายใต้การทำงานจริง. *วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่*. 2558; 22 (3): 88-94.
- [9] ธนัญญ์ ลังกาดี และ อรรถกร อาสนคำ. การประเมินสมรรถนะ โมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งบนหลังคา ในกรณีที่มีและไม่มีการระบายความร้อนด้วยอากาศ. *วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่*. 2559; 23 (3): 130-141.
- [10] Mehling, H. and Cabeza, L. F. Heat and Cold Storage with PCM-An Up to Date Introduction into Basis and Applications. Springer, 2008.
- [11] Charvát, P., Klimeš, L. and Ostrý, M. Numerical and experimental investigation of a PCM-based thermal storage unit for solar air systems. *Energy and Building*. 2014; 68: 488-497.
- [12] Kośny, J. PCM-Enhanced Building Components. Springer, 2015.
- [13] Al-Saadi, S. N. and Zhai, Z. Modeling phase change materials embedded in building enclosure: A review. *Renewable and Sustainable Energy Review*. 2013; 21: 659-673.
- [14] Biwole, P., Eclache, P. and Kuznik, F. Phase-change materials to improve solar panel's performance. *Energy and Building*. 2013; 62: 59-67.
- [15] เสริม จันท์ฉาย. Solar Radiation Data in Thailand, Laos, Cambodia and Myanmar (CD). บริษัทเพชรเกษมพรินต์ติ้ง กรุ๊ป จำกัด, 2557.
- [16] Janna, W. S. Engineering Heat Transfer. CRC Press, 2009.
- [17] Duffie, J. A. and Beckman, W. A. Solar Engineering of Thermal Processes. Wiley, 2013.
- [18] [Online] Available: <https://www.econologie.info/share/partager/1239222906x5EDv2.pdf> (June 30, 2017).