



การผลิตไฟฟ้าและความร้อนจากโมดูลโฟโตวอลเทอิก/ความร้อน และการประยุกต์ใช้

Electricity and Heat Generation from Photovoltaic/Thermal Module and Its Applications

ทนงเกียรติ เกียรติศิริโรจน์^{1,2,3*} วาสนา คำโสภาส^{2,3} อรรถกร อาสนคำ^{1,2,3} ธรรณิศจ์ ดีทายาท^{1,2,3}

Tanongkiat Kiatsiriroat^{1,2,3*}, Wassana Kamopas^{2,3}, Attakorn Asanakham^{1,2,3}

and Thoranis Deethayat^{1,2,3}

¹ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

²หน่วยวิจัยระบบทางอุณหภาพ สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

³กลุ่มวิจัยด้านพลังงานหมุนเวียน คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

239 ถนนห้วยแก้ว ตำบลสุเทพ อำเภอเมือง จังหวัดเชียงใหม่ 50200

¹Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Chiang Mai University,

²Thermal System Research Unit, Science and Technology Research Institute, Chiang Mai University,

³Research Group for Renewable Energy, Faculty of Engineering, Chiang Mai University,

239 Huay Kaew Road, Muang District, Chiang Mai 50200, Thailand.

*E-mail: tanongkiat_k@yahoo.com, Tel.: 053-94-4146, Fax.: 053-94-4145

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอรูปแบบและหลักการทำงานในการผลิตไฟฟ้าและความร้อนของโมดูลโฟโตวอลเทอิก/ความร้อน (PV/T) รวมถึงสมการที่ใช้ในการคำนวณอุณหภูมิโมดูล กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ และประสิทธิภาพรวมตามกฎข้อที่หนึ่งและกฎข้อที่สอง ในบทความยังได้นำเสนอแนวทางการเพิ่มสมรรถนะด้วยวิธีต่างๆ ได้แก่ การติดตั้งเพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวในการแลกเปลี่ยนความร้อนและการปรับรูปแบบการไหล กรณีของไหลระบายความร้อนเป็นอากาศ การติดตั้งระเหยน้ำที่ด้านหลังโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ในกรณีโมดูลเซลล์อาทิตย์แบบลอยน้ำเพื่อลดอุณหภูมิโมดูลโดยการระเหยของน้ำ การทำงานร่วมกับปั๊มความร้อนเพื่อดึงความร้อนจากโมดูล และนำไปผลิต ไฟฟ้า ความเย็น และความร้อนที่มีอุณหภูมิสูงขึ้น เป็นต้น โมดูลโฟโตวอลเทอิก/ความร้อน สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในกิจกรรมต่างๆที่มีความต้องการไฟฟ้า และความร้อน พร้อมกัน เช่น การนำมาเป็นส่วนหนึ่งของอาคาร เพื่อผลิตไฟฟ้า ผลิตอากาศร้อนเพื่อสร้างความอบอุ่นในอาคาร การอบแห้งในโรงเรือนผลผลิตทางการเกษตร การผลิตน้ำร้อนเพื่อใช้ในที่อยู่อาศัย หรือผลิตน้ำร้อนอุณหภูมิสูง ในโรงแรม โรงพยาบาล หรือภาคอุตสาหกรรม โดยทำงานร่วมกับปั๊มความร้อนแบบคาสเคด ซึ่งจะมีการทำความเย็นร่วมด้วย จะทำให้สมรรถนะในภาพรวมมีค่าสูงมาก สามารถนำมา ลดการใช้พลังงานในแบบได้เป็นอย่างดี

คำสำคัญ: การผลิตไฟฟ้าและความร้อน; โมดูลโฟโตวอลเทอิก/ความร้อน; การเพิ่มสมรรถนะ; การประยุกต์ใช้งาน

ABSTRACT

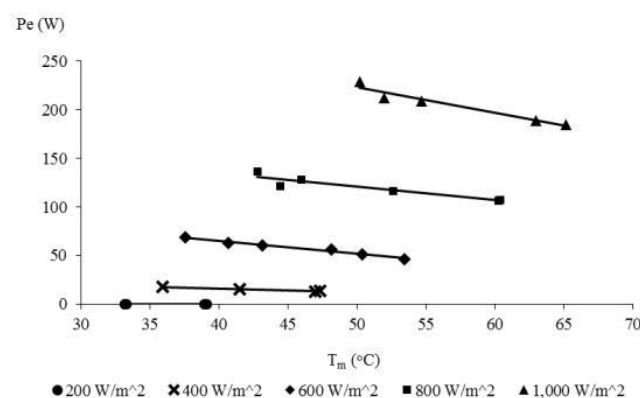
This paper presented a concept on electrical power and heat rate generation of photovoltaic/thermal (PV/T) module. A set of equations for calculating the module temperature, the generated electrical power and the total first law and second law efficiencies was also given. Moreover, some techniques on the unit performance enhancement were described such as installing fins and adjusting flow direction in case of air flow or attachment of water evaporating surface at the back of the PV module in case of floating PV module to reduce the module temperature by water evaporation, and coupling with heat pump to extract heat from the module for generating electricity, coolness and upgraded thermal energy, etc. The PV/T could be utilized in many applications those needed simultaneous electrical power and heat rate. The unit could be integrated as a part of building to generate electricity and warm air for building heating or drying of agricultural produce in greenhouse. With heat pump, the unit could generate hot water for residential use or high temperature hot water used in hotels, hospitals and industrial sectors in case of cascade heat pump and normally cool water is generated for cooling application thus the overall performance is very high and high potential on reduction of conventional could be obtained.

Keywords: Electricity and heat generation; Photovoltaic/thermal module; Performance enhancement; Applications

1. บทนำ

โมดูลเซลล์แสงอาทิตย์เป็นอุปกรณ์ที่ทำการเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์มาเป็นไฟฟ้าด้วยกระบวนการโฟโตวอลเทอิกส์ (Photovoltaics) และเนื่องด้วยราคาอุปกรณ์ในปัจจุบันค่อนข้างถูก ทำให้มีความต้องการและการใช้โมดูลเซลล์แสงอาทิตย์เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว โดยกำลังการผลิตของระบบที่ติดตั้งรวม 400 GW ในปี ค.ศ. 2018 เพิ่มขึ้นเป็น 700 GW ในปี ค.ศ. 2021 สำหรับประเทศไทยในปี ค.ศ. 2015 มีกำลังการผลิตของระบบที่ติดตั้งประมาณ 1400 MW ซึ่งมีการตั้งเป้าให้มียกกำลังการผลิต 6000 MW ในปี ค.ศ. 2036

สมรรถนะในการผลิตไฟฟ้าของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์จะขึ้นกับระดับความเข้มรังสีอาทิตย์ที่ตกบนระนาบของโมดูล และอุณหภูมิโมดูล โดยกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ จะแปรผันตามระดับความเข้มของรังสีอาทิตย์ และแปรผกผันกับอุณหภูมิของโมดูล ธนัญญ์ สังกาดี และอรุณกร อาสนคำ [1] ได้ทดสอบและแสดงสมรรถนะโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดโพลีคริสตัลไลน์ยี่ห้อหนึ่ง พบว่ากำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จะเพิ่มขึ้นตามความเข้มรังสีอาทิตย์และสมรรถนะจะลดลงตามอุณหภูมิโมดูลที่เพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ ที่ค่าต่างๆ ของระดับความเข้มรังสีอาทิตย์และอุณหภูมิโมดูล [1]

กำลังไฟฟ้าที่ผลิตจากโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ยังสามารถประเมินได้จาก [2]

$$P_{max} = P_{max, stc} (1 - \gamma(T_{PV} - 25)) \frac{I_T}{1000} \cdot W \quad (1)$$

P_{max} คือกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ระดับความเข้มรังสีอาทิตย์และอุณหภูมิโมดูลใดๆ ค่า γ คือค่าสัมประสิทธิ์ของอุณหภูมิ ซึ่งในกรณีโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดโพลีคริสตัลไลน์ $\gamma = 0.0047/^{\circ}\text{C}$ และ $P_{max, stc}$ คือกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่สภาวะมาตรฐานที่มีความเข้มรังสีอาทิตย์ ที่ตกบนระนาบโมดูลมีค่า $1,000 \text{ W/m}^2$ และอุณหภูมิโมดูลอยู่ที่ 25°C แต่ในทางปฏิบัติ อุณหภูมิโมดูล, T_{PV} , จะสูงกว่าค่าที่สภาวะมาตรฐานมาก โดยเฉพาะในเขตร้อนเช่น ประเทศไทย ซึ่งอุณหภูมิอาจขึ้นถึง 70°C ทำให้โมดูลผลิตไฟฟ้าในอัตราที่ต่ำกว่าสภาวะมาตรฐาน ดังนั้นจะต้องมีมาตรการต่างๆ ในการระบายความร้อน เพื่อลดอุณหภูมิลงเพื่อให้สามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าให้มีค่าสูง

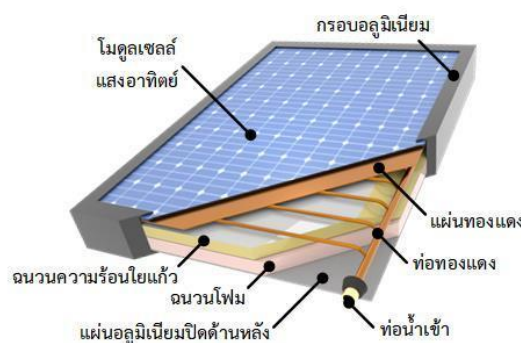
เทคนิคในการถ่ายเทความร้อนจากโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ มีทั้งในรูปแบบกัมมันต์ (Active) และแบบกสาคณะ (Passive) สำหรับแบบกัมมันต์จะมีหลายวิธีได้แก่ การใช้พัดลมเป่าอากาศระบายความร้อนที่ด้านหลังโมดูล [1, 3] การระบายความร้อนด้วยน้ำ โดยการฝังท่อน้ำที่ด้านหลังโมดูล [4] ซึ่งวิธีข้างต้นพบว่ามีการใช้พลังงานไฟฟ้า สำหรับพัดลมหรือปั๊มในการขับเคลื่อนอากาศหรือน้ำในการระบายความร้อน ทำให้กำลังไฟฟ้าสุทธิที่จ่ายจากโมดูล อาจไม่แตกต่างจากโมดูลปกติ นอกจากนี้ยังมีการพ่นน้ำบนผิวหน้าโมดูลเป็นจังหวะ [5] แต่วิธีการดังกล่าวยังคงมีการใช้พลังงานไฟฟ้าสำหรับปั๊มเพื่อพ่นน้ำ และกระบวนการดังกล่าวค่อนข้างสิ้นเปลืองน้ำ รวมถึงการเกิดคราบสิ่งสกปรกบนผิวหน้าโมดูลเมื่อน้ำแห้ง สำหรับระบบระบายความร้อนแบบกสาคณะ จะมีการใช้ท่อความร้อนติดตั้งที่ด้านหลังของโมดูล และมีบางส่วนยื่นออกมาจากโมดูล ซึ่งจะทำหน้าที่เป็นตัวระบายความร้อนสู่อากาศรอบๆ [6] แต่วิธีการดังกล่าวไม่เป็นที่ยอมรับ เนื่องจากมีต้นทุนที่เพิ่มขึ้น นอกจากนี้มีการติดตั้งสารเปลี่ยนสถานะประเภทพาราฟิน

(Paraffin) ที่มีจุดหลอมเหลวที่อุณหภูมิต่างๆ ติดตั้งด้านหลังโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ ความร้อนจากโมดูลจะทำให้สารพาราฟินหลอมละลาย ทำให้อุณหภูมิโมดูลพยายามลดลง เข้าหาอุณหภูมิจุดหลอมเหลวของสารเปลี่ยนสถานะ Sun, V. et al [7]–[8] ได้ทดลองและพัฒนาโมเดลเพื่อทำนายพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนในสารพาราฟินที่มีจุดหลอมเหลวต่างๆ พบว่าสารเปลี่ยนสถานะที่เหมาะสมสำหรับสภาพอากาศของจังหวัดเชียงใหม่ ควรเป็นสาร RT42 ซึ่งมีจุดหลอมเหลวราว 42°C โดยมีความหนาประมาณ 40 mm อย่างไรก็ตามพบว่าวิธีการดังกล่าว จะทำให้โมดูลมีน้ำหนักเพิ่มขึ้น กอปรกับสารเปลี่ยนสถานะมีราคาค่อนข้างแพง ทำให้ไม่เป็นที่นิยม

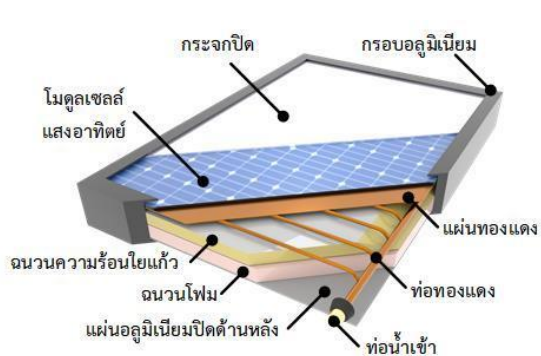
การระบายความร้อนจากโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ จะคุ้มค่าเมื่อมีการนำความร้อนที่ถูกระบายโดยของไหลที่นำความร้อน ถูกนำไปใช้ประโยชน์ด้วย ซึ่งในกรณีเช่นนี้ โมดูลเซลล์แสงอาทิตย์จะถูกเรียกเป็นโมดูลโฟโตวอลเทอิก/ความร้อน (Photovoltaic/Thermal Module) ซึ่งทำหน้าที่ผลิตไฟฟ้าและความร้อนพร้อมกัน ทำให้ประสิทธิภาพโดยรวมมีค่าสูงขึ้น Wajs, J. et al [9] ใช้อากาศไหลผ่านช่องที่ติดด้านหลังโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งบนหลังคา อากาศที่ไหลผ่านจะถูกทำให้มีอุณหภูมิสูงขึ้น และถูกนำไปใช้ประโยชน์ และอุณหภูมิโมดูลลดลง จากการทดสอบพบว่าที่ความเข้มรังสีอาทิตย์ 900 W/m^2 อัตราการไหลอากาศ $4 \text{ m}^3/\text{h}$ ประสิทธิภาพรวมในการผลิตไฟฟ้าสูงสุดและความร้อน 32 % Ibrahim, A. et al [10] ได้ทดสอบสมรรถนะโมดูลโฟโตวอลเทอิก/ความร้อน เพื่อผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนใช้ในอาคาร พบว่าช่วยลดภาระการใช้ไฟฟ้าและน้ำร้อนได้เป็นอย่างดี และเนื่องจากโมดูลโฟโตวอลเทอิก/ความร้อนสามารถผลิตไฟฟ้าและความร้อนมาใช้ประโยชน์ร่วมกัน จึงมักทำมาให้เป็นส่วนประกอบหนึ่งของอาคาร เพื่อลดการใช้ไฟฟ้าจากสายส่ง และสามารถผลิตอากาศร้อนหรือน้ำร้อนเพื่อสร้างความอบอุ่นภายในอาคาร สำหรับพื้นที่ที่มีอากาศหนาวเย็น

2. โมดูลโฟโตวอลเทจ/ความร้อน และแนวทางการเพิ่มสมรรถนะ

โมดูลโฟโตวอลเทจ/ความร้อน จะใช้โมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ประกบติดกับแผ่นโลหะ เช่น ทองแดง หรือ อลูมิเนียม ที่มีการฝังท่อให้ของเหลวไหลผ่าน หรืออาจทำเป็นช่องอากาศ ของไหลที่ไหลผ่านจะดึงความร้อนจากโมดูล

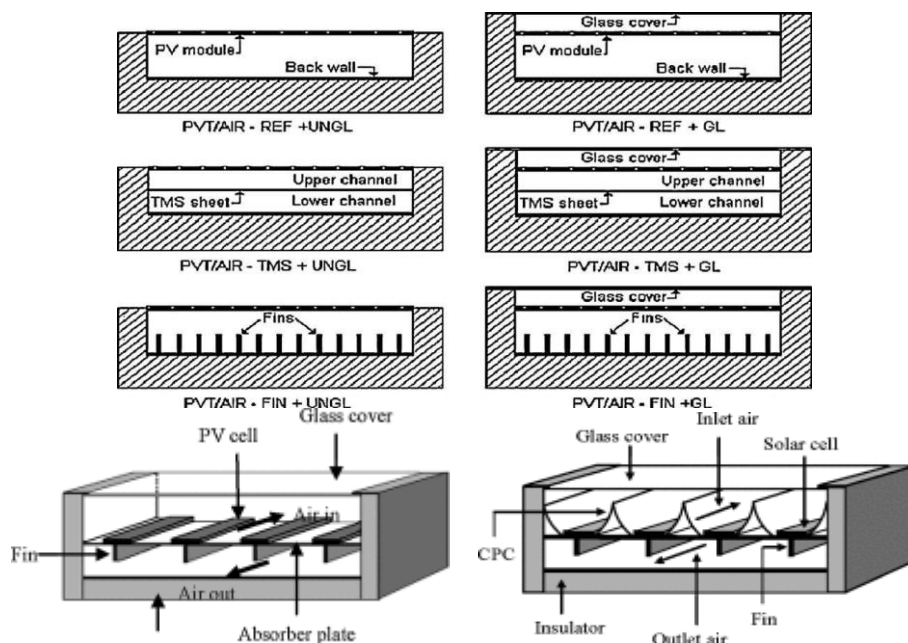


แบบไม่มีกระจกปิดทับด้านบน



แบบมีกระจกปิดทับด้านบน

ก. โมดูลโฟโตวอลเทจ/ความร้อน ที่มีของเหลวในการทำความร้อน [11]

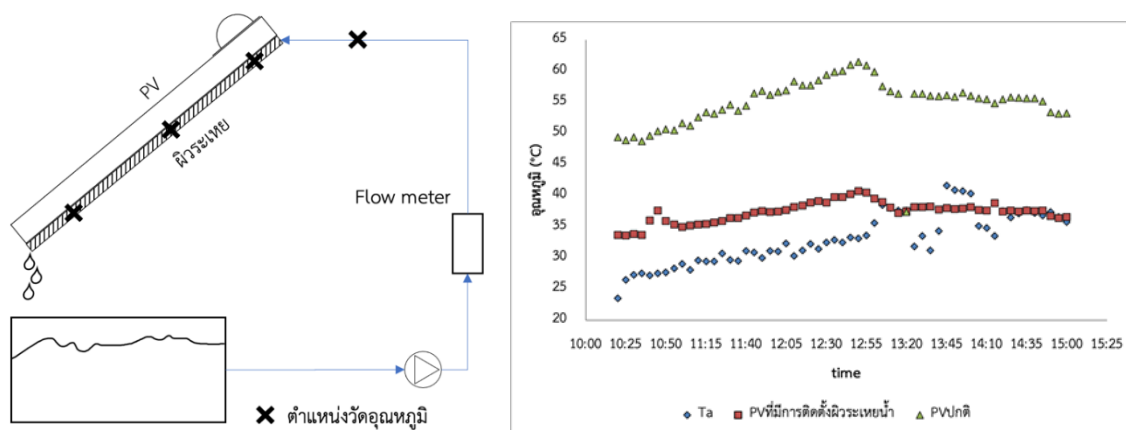


ข. โมดูลโฟโตวอลเทจ/ความร้อน ที่มีอากาศในการทำความร้อน [12-14]

รูปที่ 2 โมดูลโฟโตวอลเทจ/ความร้อน ในการผลิตไฟฟ้า และความร้อนในรูปของเหลวร้อนและอากาศร้อน

รูป 2 ก. แสดงโมดูลโฟโตวอลเทจ/ความร้อน [11] ที่ด้านหลังของแผ่นเซลล์แสงอาทิตย์ จะประกอบด้วยแผ่นโลหะ เช่น ทองแดงหรืออลูมิเนียมที่มีท่อที่มีของเหลวไหลผ่าน เชื่อมติดอยู่ เซลล์แสงอาทิตย์จะทำหน้าที่ผลิตไฟฟ้า ขณะเดียวกัน ของเหลวที่ไหลผ่านโมดูลจะดึงความร้อนส่วนหนึ่งออกจากโมดูล ช่วยลดอุณหภูมิโมดูลลง ทำให้สามารถผลิตกระแสไฟฟ้าได้มากขึ้น และของเหลวที่ไหลออกมาจะมีอุณหภูมิสูงขึ้น สามารถนำไปใช้ประโยชน์ในการทำ ความร้อน โมดูลอาจจะมีกระจก (Glazed PV/T) หรือไม่มีกระจก (Unglazed PV/T) ปิดด้านหน้า ซึ่งในกรณีแบบแรก โมดูลจะผลิตของเหลว ที่อุณหภูมิสูง แต่ประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้าจะลดลง ในขณะที่แบบหลัง สมรรถนะในการผลิตไฟฟ้าจะสูงขึ้น แต่อุณหภูมิของเหลวที่ได้จะไม่สูงมาก สำหรับรูป 2 ข. จะเป็นโมดูลโฟโตวอลเทจ/ความร้อน ที่มีอากาศระบายความร้อนที่ช่องด้านหลังของโมดูล ได้อากาศร้อนมารวมใช้ประโยชน์ เช่นเดียวกัน โมดูลอาจจะเป็นแบบมีและไม่มีกระจกปิดด้านหน้าของโมดูล และแผ่นโลหะที่ประกบกับเซลล์แสงอาทิตย์อาจมีการติดครีช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสกับอากาศ และจัดทิศทาง การไหลของอากาศ [12] บางครั้ง ลักษณะการไหลของอากาศจะเป็นการไหล 2 กลีบ (Double-Flow) โดยอากาศจะไหลผ่านช่องด้านหน้าและไปรับความร้อนอีกครั้งโดยไหลผ่านในช่องอากาศด้านหลังของโมดูล [13] ทั้งนี้ที่เซลล์แสงอาทิตย์ อาจมีการรวมแสงเพิ่มความเข้มรังสีอาทิตย์ โดยใช้ผิวรวมแสงแบบพาราโบลิคผสม หรือเรียกว่าแบบซีพีซี (Compound Parabolic Concentrator, CPC) [14] ซึ่งจะได้อากาศร้อนอุณหภูมิสูง

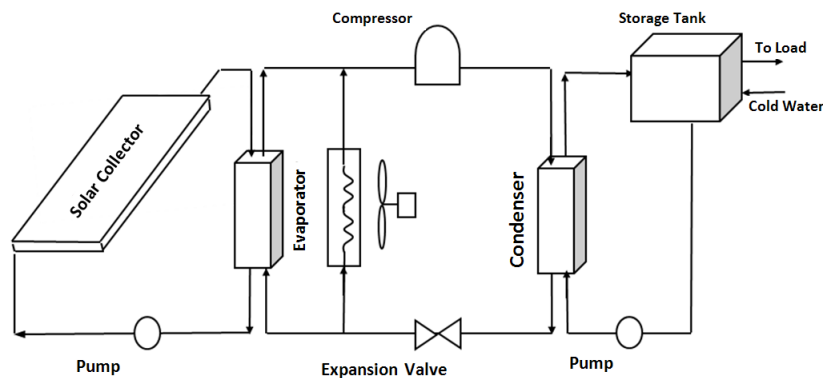
ธรณิศวรร ดีทหายาทและคณะ [15] ได้เสนอแนวทางการลดอุณหภูมิโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์แบบลอยน้ำ (Floating PV Module) เพื่อให้สามารถผลิตไฟฟ้าได้สูงขึ้น โดยการติดแผ่นที่สามารถซึมซับน้ำได้ดี (Hydrophilic Pad) ที่หลังแผ่นโมดูล แผ่นดังกล่าวเมื่อจุ่มในแหล่งน้ำที่ติดตั้งโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ จะซึมซับน้ำมาทำให้เปียกทั่วทั้งผิวที่ติดตั้ง หรืออาจมีการใช้ปั้มน้ำขนาดเล็กดึงน้ำมาป้อนยังแผ่นดังกล่าว ความร้อนจากผิวโมดูลจะทำให้เกิดการระเหยของน้ำที่ผิว ช่วยลดอุณหภูมิของโมดูลทำให้สามารถผลิตไฟฟ้าได้มากขึ้น รูปที่ 3 แสดงการใช้ผิวระเหยในการลดอุณหภูมิโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์แบบโพลีคริสตัลไลน์เทียบกับโมดูลที่ทำงานปกติ โดยการป้อนน้ำจากถังน้ำ ทำให้ผิวระเหยเปียก สามารถลดอุณหภูมิสูงสุดของโมดูล ในวันทดสอบจากประมาณ 60°C ลดลงเหลือเพียง 40°C ซึ่งทำให้ได้กำลังไฟฟ้าสูงสุดเพิ่มจาก 256.8 Wp ไปเป็น 282.85 Wp เทคนิคดังกล่าวจะมีประโยชน์มากเมื่อนำไปติดตั้งโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์แบบลอยน้ำในแหล่งน้ำขนาดใหญ่ เช่น บริเวณชายฝั่งทะเล ซึ่งน้ำที่ระเหยสามารถนำมาควบแน่นผลิตเป็นน้ำกลั่นได้ เป็นการผลิตน้ำจืดจากทะเลได้อีกทางหนึ่ง สำหรับแผ่นที่ใช้ในการซึมซับน้ำ มีการพัฒนาวัสดุให้สามารถซึมน้ำได้ดีด้วยแรงรูซึม (Capillary Force) ทนต่อรังสีอาทิตย์ และมีการนำมาใช้ในพื้นที่น้ำทะเล หรือแหล่งน้ำที่ไม่สะอาด สามารถเหนี่ยวนำน้ำขึ้นมาบนแผ่นดังกล่าว ทำการระเหยน้ำ ด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ และนำน้ำที่ระเหยมาควบแน่นเพื่อให้ได้น้ำสะอาด [16]–[17]



รูปที่ 3 การลดอุณหภูมิโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ โดยการติดตั้งผิวระเหย และมีการป้อนน้ำให้แก่ผิวระเหย [15]

อีกแนวทางหนึ่งในการลดอุณหภูมิโมดูลโฟโตวอลเทจ/ความร้อน คือการใช้ปั๊มความร้อนมาดึงความร้อนจากโมดูล ดังแสดงในรูปที่ 4 ซึ่งจะมีลักษณะเช่นเดียวกับเทคนิคการดึงความร้อนจากตัวเก็บรังสีอาทิตย์เพื่อผลิตน้ำร้อน อีวaporเตอร์ของปั๊มความร้อนจะดึงความร้อนจากถังเก็บน้ำร้อนที่มีตัวเก็บรังสีอาทิตย์ [18] – [19] หรือโมดูลโฟโตวอลเทจ/ความร้อน [20] เป็นอุปกรณ์ผลิตน้ำร้อน ทำให้อุณหภูมิในถัง รวมถึงอุณหภูมิตัวเก็บรังสีอาทิตย์หรือโมดูลโฟโตวอลเทจ/ความร้อน ลดต่ำลง ซึ่งในกรณีหลังจะช่วยให้เพิ่มความสามารถในการผลิตไฟฟ้า ขณะเดียวกัน

ปั๊มความร้อนจะทำหน้าที่ผลิตความร้อนที่อุณหภูมิสูงขึ้น ระบบดังกล่าวจะเหมาะกับกิจกรรม ที่มีความต้องการไฟฟ้าและความร้อนพร้อมๆ กัน ซึ่งจะให้ประสิทธิภาพรวมในการผลิตไฟฟ้าและความร้อนพร้อมกันมีค่าสูง และเนื่องจากอุณหภูมิทำงานของตัวเก็บรังสีอาทิตย์หรือโมดูลโฟโตวอลเทจ/ความร้อน จะใกล้เคียงกับอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม ทำให้อัตราการสูญเสียความร้อนสู่สิ่งแวดล้อมต่ำ อุปกรณ์อาจไม่ต้องหุ้มฉนวน [21]–[22] ทำให้สามารถลดต้นทุนอุปกรณ์ และการติดตั้งสะดวกขึ้น



รูปที่ 4 การใช้ปั๊มความร้อนดึงความร้อนจากตัวเก็บรังสีอาทิตย์ และผลิตความร้อน [18]–[19]

3. การคำนวณสมรรถนะในการผลิตไฟฟ้าและความร้อน

ประสิทธิภาพในการผลิตกำลังไฟฟ้าจากโมดูลโฟโตวอลเทจ/ความร้อน, η_E มักจะคำนวณจากค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุด เช่นเดียวกับโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ทั่วไป โดย

$$\eta_E = \frac{P_{max}}{I_T A_c} = P_{max, stc} \left[\frac{1 - \gamma(T_{PV} - 25)}{1000 A_c} \right] \quad (2)$$

ในกรณีโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ทั่วไป อุณหภูมิโมดูล, T_{PV} , สามารถคำนวณได้จาก [23]

$$T_{PV} = T_a + (NOCT - 20) \frac{I_T}{800} \quad (3)$$

$NOCT$ คืออุณหภูมิทำงานปกติของเซลล์ (Nominal Operating Cell Temperature) ซึ่งโดยปกติผู้ผลิตจะให้ค่าดังกล่าว และจะมีค่าคงที่ สำหรับโมดูลชนิดโมโนคริสตัลไลน์

หรือ โพลีคริสตัลไลน์ จะมีค่า $45 \pm 2^\circ\text{C}$ ดังนั้นจากสมการ (3) ที่ค่าความเข้มรังสีอาทิตย์, I_T , และอุณหภูมิอากาศโดยรอบ, T_a จะสามารถคำนวณอุณหภูมิโมดูล ซึ่งจะนำไปคำนวณกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ผลิตได้ และประสิทธิภาพในการผลิตกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้ในสมการที่ (1, 2)

สำหรับโมดูลโฟโตวอลเทจ/ความร้อน Sun, V. et al [23] พบว่า $NOCT$ มีค่าไม่คงที่และขึ้นกับอุณหภูมิและอัตราการไหลของของไหลที่ไหลเข้าโมดูล ซึ่งรายละเอียดในการหาค่า $NOCT$ ของโมดูลแบบแผ่นราบที่ไม่มี และมีกระจกปิดด้านหน้าสามารถหาได้จาก Sun et al [23] และ Sun V. et al [24] ตามลำดับ ซึ่งแนวการวิเคราะห์จะมีลักษณะใกล้เคียงกับการวิเคราะห์สมรรถนะเชิงความร้อนของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ ในการผลิตน้ำร้อนหรืออากาศร้อน [25]

อัตราความร้อนที่ผลิตได้จากโมดูลโฟโตวอลเทจ/ความร้อน สามารถคำนวณได้จาก

$$\begin{aligned}
 (\dot{m}Cp)_f(T_{fo} - T_{fi}) &= (\tau\alpha)_e I_T A_c - U_L A_c (T_{PV} - T_a) \\
 &= F'(\tau\alpha)_e I_T A_c - F' U_L A_c (\bar{T}_f - T_a) \\
 &= F_R(\tau\alpha)_e I_T A_c - F_R U_L A_c (T_{fi} - T_a)
 \end{aligned} \quad (4)$$

$(\tau\alpha)$ คือผลคูณประสิทธิภาพของการส่องผ่านดูดกลืนรังสีอาทิตย์ $(\dot{m}Cp)_f$ คือผลคูณอัตราการไหลและความจุความร้อนจำเพาะของของไหล T_{fi} และ T_{fo} คืออุณหภูมิของของไหลที่เข้าและออกโมดูล $\bar{T}_f$ คืออุณหภูมิของไหลเฉลี่ย โดย $\bar{T}_f =$ ประสิทธิภาพเชิงความร้อนสามารถคำนวณจาก

$$\begin{aligned}
 \eta_{th} &= \frac{(\dot{m}Cp)_f(T_{fo} - T_{fi})}{I_T A_c} = (\tau\alpha)_e - U_L \left(\frac{T_{PV} - T_a}{I_T} \right) \\
 &= F'(\tau\alpha)_e - (F' U_L) \frac{\bar{T}_f - T_a}{I_T} \\
 &= F_R(\tau\alpha)_e - F_R U_L \left(\frac{T_{fi} - T_a}{I_T} \right)
 \end{aligned} \quad (5)$$

จากสมการ (5) ถ้าพล็อตความสัมพันธ์ระหว่าง η_{th} และ $\left(\frac{\bar{T}_f - T_a}{I_T} \right)$ จะได้ความสัมพันธ์ในรูปสมการเส้นตรง โดย $-F' U_L$ คือความชันของเส้นกราฟแสดงความสัมพันธ์ และ $F'(\tau\alpha)_e$ จะเป็นค่าที่เส้นดังกล่าวตัดกับแกน η_{th} (intercept) เช่นเดียวกับเส้นแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง η_{th} กับ $\left(\frac{T_{fi} - T_a}{I_T} \right)$ ซึ่ง $-F_R U_L$ คือค่าความชันของเส้นกราฟที่แสดงความสัมพันธ์ และ $F_R(\tau\alpha)_e$ จะเป็นค่าที่เส้นดังกล่าวตัดกับแกน η_{th} (intercept)

ในกรณีที่ทราบรูปแบบของผิวโลหะที่ดึงความร้อนจากโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์มาถ่ายเทให้กับของไหลที่ไหลในท่อที่ด้านหลังโมดูล ตัวอย่างเช่น แบบท่อและครีป (Tube-and-Fin) F' สามารถคำนวณจาก [25]

$$F' U_L = \frac{1}{W \left[\frac{1}{U_L(D+(W-D)F)} + \frac{1}{C_b} + \frac{1}{\pi D h_{fi}} \right]} \quad (6)$$

W คือระยะห่างระหว่างท่อ D คือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อของไหล F คือประสิทธิภาพครีป (Fin Efficiency) C_b คือสภาพการนำความร้อนของรอยต่อระหว่างแผ่นโลหะกับผิวท่อ h_{fi} คือค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนในของไหลที่ไหลในท่อ

ความสัมพันธ์ระหว่าง F_R และ F' ยังสามารถหาได้จาก [5]

$\frac{(T_{fi} + T_{fo})}{2}$, F' เรียกว่าแฟกเตอร์ประสิทธิภาพตัวเก็บรังสี (Collector Efficiency Factor) และ F_R คือ แฟกเตอร์การดึงความร้อนออก (Heat Removal Factor)

$$F_R U_L = \frac{(\dot{m}Cp)_f}{A_c} \left[1 - \exp \left(\frac{-F' U_L A_c}{(\dot{m}Cp)_f} \right) \right] \quad (7)$$

ค่า $F' U_L$ จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง η_{th} และ $\left(\frac{\bar{T}_f - T_a}{I_T} \right)$ รวมถึงค่า h_{fi} ซึ่งสามารถหาได้จากค่าอัตราการไหลและอุณหภูมิของของไหล จะทำให้หาค่า U_L ในสมการ (6) นำไปสู่ค่า F' และ $(\tau\alpha)_e$ จาก $F'(\tau\alpha)_e$ และในกรณีที่ทราบค่า $F_R U_L$ ก็สามารถหาค่า $F' U_L$ จากสมการ (7) จากนั้นจะสามารถหาค่าเทอมอื่นๆได้

เมื่อได้ค่า $(\tau\alpha)_e$ และ U_L จะสามารถนำไปหาอุณหภูมิโมดูลจาก สมการ (4) โดย

$$T_{PV} = T_a + \frac{(\tau\alpha)_e I_T A_c - (\dot{m}Cp)_f(T_{fo} - T_{fi})}{U_L A_c} \quad (8)$$

และจากอุณหภูมิโมดูล จะสามารถคำนวณ P_{max} และ η_E จากสมการ (1) และ (2) ตามลำดับ

สำหรับประสิทธิภาพรวมในการผลิตกำลังไฟฟ้าสูงสุด และอัตราความร้อน, η_{Total} จะคำนวณได้จาก

$$\eta_{Total} = \frac{P_{max} + (\dot{m}Cp)_f(T_{fo} - T_{fi})}{I_T A_c} \quad (9)$$

ค่าประสิทธิภาพรวมจะมีค่าสูงกว่าประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้าอย่างเดียว ค่อนข้างมาก

เนื่องจากพลังงานที่ผลิตได้อยู่ในรูปไฟฟ้าและความร้อน จึงนิยมพิจารณาในเทอมเอ็กเซอร์จี (Exergy) ดังนั้นประสิทธิภาพตามกฎข้อที่สองของเทอร์โมไดนามิกส์ จะอยู่ในรูป

$$\eta_{Total}^{2nd} = \frac{P_{max} + (\dot{m}Cp)_f \left[(T_{fo} - T_{fi}) - T_0 \ln \frac{T_{fo} + 273.15}{T_{fi} + 273.15} \right]}{Ex^{I,T}} \quad (10)$$

T_0 คืออุณหภูมิที่สภาวะตาย (Dead State) $Ex^{I,T}$ คืออัตราเอ็กเซอร์จี (Exergy rate) ที่ได้จากรังสีอาทิตย์ โดยคำนวณจาก [25]

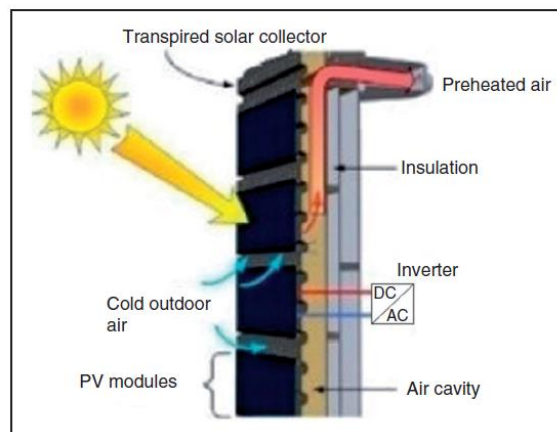
$$Ex^{I,T} = I_T A_c \left[1 - \left(\frac{4}{3} \right) \left(\frac{T_0}{T_{sun}} \right) + \left(\frac{1}{3} \right) \left(\frac{T_0^4}{T_{sun}^4} \right) \right] \quad (11)$$

T_{sun} คืออุณหภูมิประสิทธิภาพของดวงอาทิตย์ $T_{sun} = 5,762$ K

4. การประยุกต์ใช้ประโยชน์

โมดูลโฟโตวอลเทอิก/ความร้อน เหมาะสำหรับกิจกรรมที่มีความต้องการไฟฟ้า และความร้อนนำไปใช้ประโยชน์ พร้อมๆ กัน ลมร้อนหรือน้ำร้อนที่ผลิตได้ สามารถ

นำไปใช้ในการอุ่นอากาศเพื่อให้ความร้อนภายในอาคาร กระบวนการอบแห้ง หรือการผลิตน้ำร้อนเพื่อให้อาบน้ำ หรือน้ำร้อนอุณหภูมิสูงเพื่อใช้ในอุตสาหกรรม Athienitis, A. K. et al [26] – [27] ได้ออกแบบโมดูลโฟโตวอลเทอิก/ความร้อน ติดตั้งที่ส่วนหน้าของอาคาร เพื่อผลิตไฟฟ้า และอุ่นอากาศภายในอาคารสำนักงานแห่งหนึ่งในมอนทรีล ประเทศแคนาดา ดังแสดงในรูปที่ 5 เช่นเดียวกับ Yun, G. Y. et al [28] ที่ออกแบบอุปกรณ์ในลักษณะคล้ายคลึงกัน เพื่ออุ่นอากาศให้ร้อนใช้ในอาคารในฤดูหนาว และช่วยระบายความร้อนเพื่อลดอุณหภูมิของโมดูลโฟโตวอลเทอิกในฤดูร้อน ซึ่งเทคนิคดังกล่าวช่วยในการลดการใช้ไฟฟ้าจากไฟฟ้าสายส่ง เพื่อผลิตแสงสว่าง และการทำความร้อน/ความเย็นภายในอาคาร ทั้งอาคารที่อยู่อาศัย อาคารพาณิชย์ หรืออาคารในโรงงาน



รูปที่ 5 การใช้โมดูลโฟโตวอลเทอิก/ความร้อนติดตั้งบนกรอบอาคารเพื่อผลิตไฟฟ้าและอุ่นอากาศ [27]

รูปที่ 6 เป็นการประยุกต์ใช้ โมดูลโฟโตวอลเทอิก/ความร้อน ในห้องอบแห้งแบบเรือนกระจก [29] ไฟฟ้าที่ผลิตได้ใช้ในการขับเคลื่อนพัดลม เพื่อให้เกิดการหมุนเวียนของอากาศ และดึงความชื้นออกจากเรือนกระจก ความร้อนที่ได้จากโมดูลช่วยในการเพิ่มอุณหภูมิของอากาศภายในเรือนกระจกช่วยในการอบแห้งผลิตภัณฑ์ Tiwari, S. et al [30] ได้ทดสอบโมดูลโฟโตวอลเทอิก/ความร้อน ที่มีลักษณะเป็นเครื่องทำอากาศร้อนใช้ในเรือนกระจก พบว่าประสิทธิภาพในการทำอากาศร้อน และประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้ามีค่า 26.68 และ 11.26% ตามลำดับที่อัตราการไหลของอากาศ 0.01 kg/s

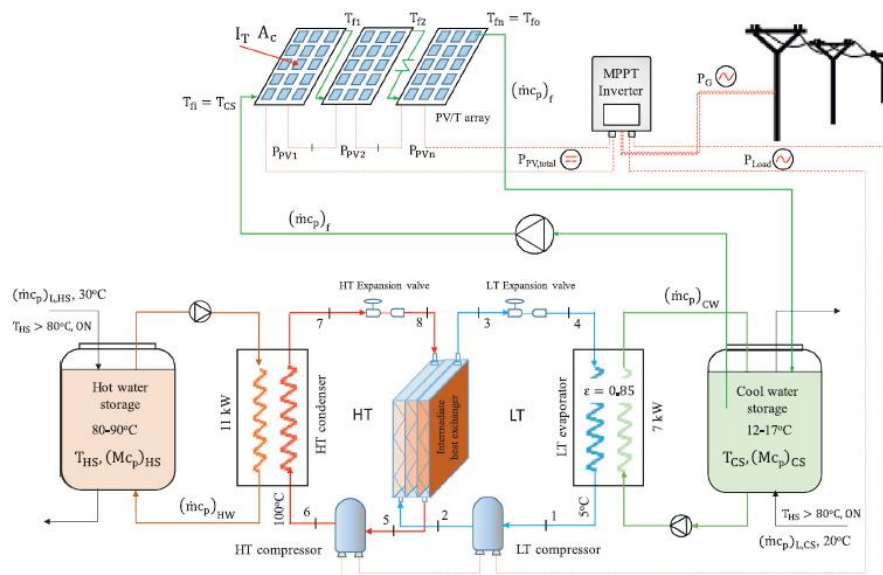


รูปที่ 6 การใช้โมดูลโฟโตวอลเทอิก/ความร้อนในห้องอบแห้งแบบเรือนกระจก [29]



รูปที่ 7 การใช้โมดูลโฟโตวอลเทอิก/ความร้อนแบบมีกระจก ในการผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อน (ได้รับความอนุเคราะห์จากห้องปฏิบัติการวิจัยทางอุณหพลศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่)

รูปที่ 7 แสดงตัวอย่างการต่อเชื่อมโมดูลโฟโตวอลเทอิก/ความร้อน แบบมีกระจก ร่วมกับถังเก็บน้ำร้อนในการผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อน ระบบจะผลิตไฟฟ้ามาใช้ประโยชน์ในอาคาร และส่วนที่ผลิตเกินจะถูกเก็บไว้ในแบตเตอรี่ ขณะเดียวกันน้ำร้อนที่ผลิตได้อาจสูงกว่า 60°C จะถูกกักเก็บในถัง เพื่อใช้ในตอนกลางคืน อย่างไรก็ตาม ระบบแบบนี้ ประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้าจะลดลงเมื่ออุณหภูมิมีค่าสูง แต่ในภาพรวมระบบจะมีประสิทธิภาพสูงขึ้น เทียบกับการผลิตไฟฟ้าเพียงอย่างเดียว ในกรณีที่มีความต้องการไฟฟ้า ความร้อนอุณหภูมิสูงและการทำความเย็นพร้อมกัน Kong, R. et al [31] ได้เสนอ การใช้โมดูลโฟโตวอลเทอิก/ความร้อน ทำงานร่วมกับปั๊มความร้อนแบบคาสเคด ดังรูปที่ 8



รูปที่ 8 การใช้โมดูลโฟโตวอลเทอิก/ความร้อนทำงานร่วมกับปั๊มความร้อนแบบคาสเคดในการผลิตไฟฟ้า น้ำร้อนและน้ำเย็น [31]

ปั๊มความร้อนจะดึงความร้อนจากถังเก็บน้ำเย็นซึ่งมีอุณหภูมิ $12-17^{\circ}\text{C}$ จะช่วยผลิตน้ำเย็นเก็บในถังน้ำเย็น ไปใช้ประโยชน์ในกระบวนการทำความเย็น เช่นห้องกักเก็บสมุนไพร การทำความเย็นในอาคาร และส่วนหนึ่งจะถูกนำไปใช้ลดอุณหภูมิโมดูลเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้า ขณะเดียวกันจะมีการผลิตน้ำร้อนที่อุณหภูมิสูง $80-90^{\circ}\text{C}$ เพื่อใช้ในการอบแห้งสมุนไพร การผลิตน้ำร้อนในโรงแรม โรงพยาบาล หรือ ภาคอุตสาหกรรม สำหรับไฟฟ้าที่ผลิตได้

จากโมดูลจะถูกนำมาขับเคลื่อนเพอร์เซอร์ของปั๊มความร้อน ทำให้ระบบสามารถผลิตไฟฟ้า ความร้อนและความเย็นพร้อมๆ กัน ทำให้สมรรถนะในภาพรวมมีค่าสูงมาก

5. สรุป

โมดูลโฟโตวอลเทอิก/ความร้อน เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการผลิตไฟฟ้า และความร้อนในรูปอากาศร้อน หรือน้ำร้อน ไปใช้ประโยชน์พร้อมกัน ทำให้ประสิทธิภาพรวม มีค่าสูงกว่า

โมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการผลิตไฟฟ้าเพียงอย่างเดียว นอกจากนี้การที่มีการนำอากาศร้อนหรือน้ำร้อนไปใช้ประโยชน์ จะช่วยลดอุณหภูมิโมดูล ทำให้ประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้าเพิ่มขึ้นด้วย ในบทความได้แสดงวิธีการคำนวณอุณหภูมิโมดูล เพื่อนำไปใช้คำนวณกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ รวมถึงประสิทธิภาพรวมในการผลิตไฟฟ้าและความร้อน รวมถึงแนวทางการลดอุณหภูมิโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ เช่น การเพิ่มครีบบและปรับรูปแบบการไหลของอากาศในการระบายความร้อน การติดตั้งระเหยน้ำที่ด้านหลังโมดูล โดยเฉพาะโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์แบบลอยน้ำ ความร้อนที่โมดูลได้รับจะนำไปใช้ในการระเหยน้ำ สามารถนำไปประยุกต์ในการผลิตน้ำกลั่นจากน้ำทะเล หรือจากแหล่งน้ำสกปรกที่โมดูลติดตั้งอยู่ นอกจากนี้มีการใช้ปั๊มความร้อนดึงความร้อน

จากโมดูล และนำความร้อนมาผลิตน้ำร้อนที่อุณหภูมิสูง ทำให้สมรรถนะในการผลิตไฟฟ้า และประสิทธิภาพรวมมีค่าสูงขึ้น โมดูลโฟโตโวลเทอิก/ความร้อนสามารถนำไปใช้ผลิตไฟฟ้า การอุ่นอากาศ หรือน้ำร้อน เพื่อใช้ในอาคารประเภทต่างๆ ทั้งอาคารที่อยู่อาศัย อาคารสำนักงาน หรือโรงงาน รวมถึงการประยุกต์ใช้ในโรงเรือนที่มีการอบแห้งผลผลิตทางเกษตร ในกรณีที่ต้องการการทำความร้อนและการทำความเย็นที่อุณหภูมิแตกต่างกันมากๆ เช่นในโรงแรม โรงพยาบาล หรือภาคอุตสาหกรรม การใช้ปั๊มความร้อนแบบคาสเคดร่วมกับ โมดูลโฟโตโวลเทอิก/ความร้อน จะทำให้สมรรถนะในภาพรวมมีค่าสูงมาก และเทคนิคที่กล่าวถึงพบว่าสามารถลดการใช้พลังงานในแบบได้เป็นอย่างดี

เอกสารอ้างอิง

- [1] ชนัญญ์ ลังกาดี และ อรรถกร อาสนคำ, “การประเมินสมรรถนะโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งบนหลังคาในกรณีที่มีและไม่มี การระบายความร้อนด้วยอากาศ,” วารสารคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, ปีที่ 23, ฉบับที่ 3, หน้า 130-141, 2559.
- [2] L. S. Pantic, T. M. Pavlovic, D. D. Milosavljevic, I. D. Radonjic, M. K. Radovic, and G. Sazhko, “The assessment of different models to predict solar module temperature,” output power and efficiency of Nis.,” Energy, vol. 109, pp. 38-48, 2016.
- [3] K. G. Teo, P. S. Lee, and M. N. A. Hawlader, “An active cooling system for photovoltaic modules,” Applied Energy, vol. 90, pp. 309-315, 2012.
- [4] E. Wilson, “Theoretical and operational thermal performance of a wet crystalline silicon PV module under Jamaican conditions,” Renewable Energy, vol. 34, pp. 1655-1660, 2009.
- [5] M. Abdolzadeh and M. Ameri, “Improving the effectiveness of a photovoltaic water pumping system by spraying water over the front of photovoltaic cells,” Renewable Energy. Vol. 34, no.1, pp. 91-96, 2009.
- [6] อนุรัตน์ เทวตา และ ยุธนา ศรีอุดม, “การศึกษาเชิงทดลองการเพิ่มประสิทธิภาพแผงเซลล์แสงอาทิตย์โดยใช้ท่อความร้อนแบบแบน,” วารสารวิชาการและวิจัย มทร. พระนคร, ปีที่ 12, ฉบับที่ 2, หน้า 83-94, 2561.
- [7] V. Sun, A. Asanakham, T. Deethayat, and T. Kiatsiriroat, “Study on phase change material and its appropriate thickness for controlling solar cell module temperature,” International Journal of Ambient Energy, vol.41, no.1, pp. 64-73, 2020.
- [8] V. Sun, A. Asanakham, T. Deethayat, and T. Kiatsiriroat, “Increase of power generation from solar cell module by controlling its module temperature with phase change material,” Journal of Mechanical Science and Technology, vol.34, no.6, pp. 2609-2618, 2020.

- [9] J. Wajs, A. Colabek, R. Bochniak, and D. Mikielwicz, "Air-cooled photovoltaic roof tile as an example of the BIPVT system- An experimental study on the energy and exergy performance," *Energy*, 2020; 197, 117255. 2020.
- [10] A. Ibrahim, A. Fudholi, K. Sopian, M. Y. Othma, and M. H. Ruslan, "Efficiencies and improvement potential of building integrated photovoltaic thermal (BIPVT) system," *Energy Conversion and Management*, vol. 77, pp. 527-534, 2014.
- [11] อรรถกร อาสนคำ, วิศวกรรมพลังงานแสงอาทิตย์. เชียงใหม่: มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2563.
- [12] J. K. Tonui and Y. Tripanagnostopoulos, "Air-cooled PV/T solar collectors with low cost performance improvements," *Solar energy*, vol. 81, pp. 498-511, 2007.
- [13] E. M. A. Alfegi, K. Sopian, M. Y. H. Othman, and B. B. Yatim, "The effect of flow rates on the performance of finned single pass, double duct photovoltaic thermal solar air heaters," *European Journal of Scientific Research*, vol. 25, pp. 339-344, 2009.
- [14] Y. Othman, B. Yatim, K. Sopian, and M. N. A. Bakar, "Double-pass photovoltaic-thermal solar air collector with compound parabolic concentrator and fins," *Journal of Energy Engineering*, vol. 132, pp. 116-120, 2006.
- [15] ธณิศวรร ตีทาษาท, อรรถกร อาสนคำ, และ ทนงเกียรติ เกียรติศิริโรจน์, "ศักยภาพในการผลิตไฟฟ้าจากโมดูลโฟโตวอลเตอิกลอยน้ำที่มีผิวระเหยน้ำและการประเมินอัตราการระเหยน้ำ," ในการประชุมวิชาการการถ่ายเทพลังงานความร้อนและมวลในอุปกรณ์ด้านความร้อนและกระบวนการ ครั้งที่ 20, ประเทศไทย, 2564, หน้า 296-299.
- [16] Z. Xu, L. Zhang, L. Zhao, B. Li, B. Bhatia, C. Wang, K. L. Wilke, Y. Song, O. Labban, J. H. Lienhard, R. Wang, and E. N. Wang, "Ultrahigh-efficiency desalination via a thermally-localized multistage solar still," *Energy & Environmental Science*, vol. 13, pp. 830-839, 2020.
- [17] F. Gong, H. Li, W. Wang, J. Huang, D. Xia, J. Liao, M. Wu, and D. V. Papavassiliou, "Scalable eco-friendly and ultrafast solar steam generators based on one-step melamine-derived carbon sponges toward water purification," *Nano Energy*, vol. 58, pp. 322-330, 2019.
- [18] ศรีธร อุปคำ และ ทนงเกียรติ เกียรติศิริโรจน์, "การวิเคราะห์สมรรถนะระบบทำน้ำร้อนแสงอาทิตย์ร่วมกับปั๊มความร้อนสำหรับอาคารที่อยู่อาศัย," *วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่*, ปีที่ 9, ฉบับที่ 1, หน้า 50-56, 2544.
- [19] สรรพวรรธ วิทยาศัย, ทนงเกียรติ เกียรติศิริโรจน์, และ จีวรธรณ เตียรธสุวรรณ, "การกำหนดขนาดระบบผลิตน้ำร้อนแสงอาทิตย์ที่มีปั๊มความร้อนเสริม : กรณีภาระความร้อนคงที่," *วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่*, ปีที่ 9, ฉบับที่ 3, หน้า 86-103, 2544.
- [20] M. Obalanlege, Y. Mahmoudi, R. Douglas, E. Ebrahimnia-Bajestan, J. Davidson, and D. Bailie, "Performance assessment of a hybrid photovoltaic-thermal and heat pump system for solar heating and electricity," *Renewable energy*, vol. 48, pp. 558-572, 2020.
- [21] ชุศักดิ์ ชาญเสนะ, เศรษฐ์ สัมภัตตะกุล, ทนงเกียรติ เกียรติศิริโรจน์, และ อติพงศ์ นันทพันธุ์, "การศึกษาสมรรถนะการผลิตน้ำร้อนแบบปั๊มความร้อนแสงอาทิตย์ที่มีหลังคาอลูมิเนียมเป็นตัวเก็บรังสี," *วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่*, ปีที่ 13, ฉบับที่ 2, หน้า 48-56, 2549.

- [22] วิวัฒน์ มูลอ้าย และ ทนงเกียรติ เกียรติศิริโรจน์, “ศักยภาพการผลิตน้ำร้อนในโรงพยาบาล ด้วยปั๊มความร้อนเสริมแสงอาทิตย์ที่ใช้ตัวเก็บรังสีแบบโพลีพรอพิลีน” วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, ปีที่ 16, ฉบับที่ 3, หน้า 23-33, 2562.
- [23] V. Sun, A. Asanakham, T. Deethayat, and T. Kiatsiriroat, “A new method for evaluating nominal operating cell temperature (NOCT) of unglazed photovoltaic thermal module,” *Energy reports*, vol. 6, pp. 1029-1042, 2020.
- [24] V. Sun, A. Asanakham, T. Deethayat, and T. Kiatsiriroat, “Evaluation of nominal operating cell temperature (NOCT) of glazed photovoltaic thermal module,” *Case Studies of Thermal Engineering*, vol. 28, 101361, 2021.
- [25] J. A. Duffie and W. A. Beckman, “*Solar Engineering of Thermal Processes*,” New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2013.
- [26] A. K. Athienitis, J. Bambara, B. O’neill, and J. Faille, “A Prototype photovoltaic/thermal system integrated with transpired collector,” *Solar Energy*, vol. 85, pp. 139-153, 2011.
- [27] A. Riaz, R. Liang, C. Zhou, and J. Zhang, “A review on the application of photovoltaic thermal systems for building façades,” *Building Service Engineering Research & Technology*, vol. 41, no. 1, pp. 86-107, 2020.
- [28] G. y. Yun, M. McEvoy, and K. Steemers, “Design and overall energy performance of a ventilated photovoltaic façade,” *Solar Energy*, vol. 81, pp. 383-394, 2007.
- [29] G. N. Tiwari and A. Gaur, “Photovoltaic thermal (PVT) systems and its applications,” in *The 2nd International Conference on Green Energy and Technology*, Dhaka, Bangladesh, 2014.
- [30] S. Tiwari, S. Agrawal, and G. N. Tiwari, “PVT air collector integrated greenhouse dryers,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 90, pp. 142-159, 2018.
- [31] R. Kong, T. Deethayat, A. Asanakham, and T. Kiatsiriroat, “Performance and economic evaluation of a photovoltaic/thermal (PV/T)-cascade heat pump for combined cooling, heat and power in tropical climate area,” *Journal of Energy Storage*, vol. 30, 101507, 2020.