



ตัวเก็บรังสีอาทิตย์ที่มีความเหมาะสมสำหรับการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานความร้อน แสงอาทิตย์ในรูปของอุณหภูมิต่ำโดยใช้วัฏจักรแรงดัน

สรวิศ สอนสารี^{1*}, สมชาย เจียจิตต์สวัสดิ์², เอกภูมิ บุญธรรม¹ และเอกกฤษ แก้วเจริญ¹

An appropriate of the solar collectors for a small-scale solar Organic Rankine Cycle power generation from low-temperature heat source

Sorawit Sonsaree^{1*}, Somchai Jiajitsawat², Eakpoom Boonthum¹ and Eakrit Kaewcharoen¹

¹คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม จังหวัดพิษณุโลก 65000

²หน่วยวิจัยพลังงานสะอาด คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร จังหวัดพิษณุโลก 65000

¹Faculty of Industrial Technology, Pibulsongkram Rajabhat University, Phitsanulok, 65000

²Energy Research and Promotion Center, Faculty of Science, Naresuan University, Phitsanulok, 65000

*Corresponding author. E-mail: sorawitsonsaree@gmail.com, sorawitsonsaree@psru.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์ในรูปแบบอุณหภูมิต่ำโดยวัฏจักรแรงดันขนาดเล็ก การศึกษาได้สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อหาตัวเก็บรังสีอาทิตย์ที่มีความเหมาะสมที่ทำให้ระบบมีค่าพลังงานไฟฟ้าต่อหน่วยต่ำสุด และสามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้สูงสุด ณ กรุงเทพมหานคร โดยในการศึกษาตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นเรียบ ตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบท่อสุญญากาศ และตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบรูปประกอบพาราโบลา ที่มีขนาด 2.08, 2.37, 2.16 m² ต่อแผง, และมีประสิทธิภาพเชิงแสง ($F_R(\tau\alpha)_e$) และสัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อน ($F_R U_L$) เท่ากับ 0.74, 0.57, 0.72 และ 3.62, 0.75, 0.97 W/m²-K, ตามลำดับ ต่อแบบขนานจำนวน 100 ถึง 1200 แผง ได้ถูกนำมาเปรียบเทียบเพื่อผลิตความร้อนป้อนให้กับวัฏจักรแรงดันขนาด 20 kWe ที่ใช้ R-245fa เป็นสารทำงานในระบบ ผลการศึกษาพบว่า ปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ระบบผลิตได้จะขึ้นอยู่กับจำนวนตัวเก็บรังสีอาทิตย์ที่ได้รับการติดตั้ง โดยระบบเมื่อใช้ตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบท่อสุญญากาศจำนวน 300 แผง จะสามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้สูงสุด 31.16 MWh/Year ระบบจะสามารถลดการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ได้เท่ากับ 15.49 Ton CO₂ eq./Year โดยค่าพลังงานไฟฟ้าต่อหน่วยกรณีไม่คิดค่าใช้จ่ายและคิดค่าใช้จ่ายตัวเก็บรังสีอาทิตย์จะมีค่าต่ำสุด 0.7882 และ 0.2467 USD/kWh, ตามลำดับ

คำสำคัญ: การผลิตไฟฟ้า ตัวเก็บรังสีอาทิตย์ วัฏจักรแรงดัน

Abstract

In this study, the concept of utilizing the low-temperature heat from solar energy for power generation by a small-scale Organic Rankine Cycle system is proposed. The system is mathematically modeled and simulated to evaluate an appropriate of solar collectors to produce the highest electricity, and the lowest levelized cost of electricity (LCOE) of the power system. The weather condition of Bangkok was taken as the input data of the simulation. Three types of solar collectors consisting of flat-plate, evacuated-tube, and compound parabolic concentrator (CPC) solar collectors were used for hot water production. A number of the collectors between 100 and 1200 units (in 50 units increment) were connected in parallel with $F_R(\tau\alpha)_e$ and $F_R U_L$ of 0.74, 0.57, 0.72, and 3.62, 0.75, 0.97 W/m²-K, and 2.08, 2.37, 2.16 m² per unit, respectively. A 20 kWe ORC system with R-245fa is used for power generation. The results of the evaluation showed that the more number of solar collectors are the more electricity of the system can generate. It can generate the highest electricity of 31.16 MWh/Year, with the lowest of the LCOE of 0.7882 USD/kWh if coupled with 300 units of solar collectors with initial investment of the collectors taken into consideration. If investment cost is not taken into account, a LCOE of 0.2467 USD/kWh can be achieved by same number of solar collectors. Moreover, in terms of the environment impact, as the same number of solar collectors the system can reduce CO₂ emission of 15.49 Ton CO₂ eq./Year.

Keywords: Power generation, Solar collectors, Organic Rankine Cycle (ORC)



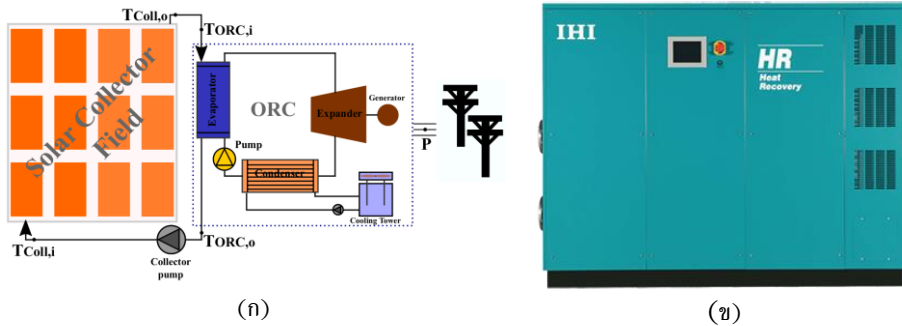
บทนำ

ในปัจจุบันการประยุกต์ใช้พลังงานทดแทน โดยเฉพาะอย่างยิ่งพลังงานแสงอาทิตย์ ไม่ว่าจะเป็นพลังงานในรูปของความร้อน (Thermal Energy) หรือพลังงานในรูปของไฟฟ้า (Electrical Energy) กำลังได้รับความนิยมเป็นอย่างมาก เนื่องจากเป็นพลังงานที่ไม่มีวันหมดสิ้น เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม และที่สำคัญเป็นพลังงานที่ไม่มีค่าใช้จ่าย สำหรับประเทศไทยเป็นอีกประเทศหนึ่งที่มีศักยภาพรังสีอาทิตย์ชนิดรังสีรวม (Total solar radiation) ค่อนข้างสูงประมาณ $18 \text{ MJ/m}^2\text{-day}$ (คู่มือการพัฒนาและการลงทุนผลิตพลังงานทดแทน ชุดที่ 2: พลังงานแสงอาทิตย์) แต่อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาในส่วนของรังสีตรง (Direct or beam solar radiation) จะพบว่า ประเทศไทยมีศักยภาพรังสีอาทิตย์ชนิดรังสีตรงค่อนข้างต่ำประมาณ $1350 - 1400 \text{ kWh/m}^2\text{-year}$ (Janjai, Laksanaboonsong & Seesaard, 2011) ซึ่งไม่เหมาะกับการประยุกต์ใช้ในการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์แบบรวมแสง (Concentrating Solar Power (CSP) technology) เนื่องจากเทคโนโลยีดังกล่าวมีความต้องการศักยภาพรังสีอาทิตย์ชนิดรังสีตรงขั้นต่ำประมาณ $1500 \text{ kWh/m}^2\text{-year}$ (Thawongamyingsakul & Kiatsiriroat, 2012) แต่อย่างไรก็ตามยังคงสามารถประยุกต์ใช้พลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์ในรูปแบบอื่น ๆ ได้ ไม่ว่าจะเป็นการผลิตน้ำร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์ในรูปแบบของน้ำร้อนอุณหภูมิต่ำ (Low-temperature hot water) โดยใช้เทคโนโลยีแบบไม่รวมแสงอาทิตย์ (Non-concentrating solar collectors) เช่น ตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นเรียบ (Flat-plate (FP) solar collectors), ตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบท่อสุญญากาศชนิดท่อความร้อน (Heat pipe evacuated-tube (HPE) solar collectors) และตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบรูปประกอบพาราโบลา (Compound parabolic concentrator (CPC) solar collectors) ในส่วนของการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานความร้อนในรูปของอุณหภูมิต่ำ การผลิตไฟฟ้าจากวัฏจักรแรงดัน (Organic Rankine Cycle (ORC)) เป็นอีกหนึ่งเทคโนโลยีที่ได้รับความนิยมเป็นอย่างสูงในปัจจุบัน เนื่องจากระบบสามารถทำงานได้แม้แหล่งความร้อนมีอุณหภูมิต่ำ อีกทั้งยังส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อย (Wang, Yan, Zhao & Dai, 2014) ง่ายต่อการบำรุงรักษา และเป็นระบบที่มีประสิทธิภาพในการเปลี่ยนรูปพลังงานสูง นอกจากนี้ระบบผลิตไฟฟ้าด้วยวัฏจักรแรงดัน (ORC) ยังเหมาะกับการประยุกต์ใช้งานร่วมกับพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์ (Mavrou, et al., 2015) รวมถึงสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในพื้นที่ห่างไกลที่สายส่งไฟฟ้าไม่สามารถเข้าถึงได้อีกด้วย (Wang, et al., 2014)

ในส่วนของงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์ Baral S. และ Kim K. (Baral & Kim, 2014) นำเสนอการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์ภายใต้สภาวะภูมิอากาศของประเทศเกาหลี (Korea) โดยในการศึกษาได้กำหนดให้อุณหภูมิน้ำร้อนที่ผลิตได้จากตัวเก็บรังสีอาทิตย์มีอุณหภูมิแตกต่างกัน 2 อุณหภูมิ คือ (1) อุณหภูมิประมาณ $90 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ผลิตได้จากตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นเรียบ (FP solar collectors) และ (2) อุณหภูมิประมาณ $125 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ผลิตได้จากตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบท่อสุญญากาศ (Evacuated-tube (ET) solar collectors) Sorawit S. (Sonsaree, et al, 2017; Sonsaree, et al, 2016) และคณะ ได้ศึกษาการใช้เทคนิคปั๊มความร้อน (Heat pump) เพิ่มคุณภาพความร้อนจากแหล่งความร้อนอุณหภูมิต่ำที่ได้จากความร้อนเหลือทิ้งของโรงงานอุตสาหกรรม และ/หรือพลังงานความร้อนที่ได้รับจากตัวเก็บรังสีอาทิตย์ (Solar collectors) ไปเป็นแหล่งความร้อนที่มีอุณหภูมิสูงเพื่อป้อนให้กับวัฏจักรแรงดัน (ORC) ผลการศึกษาพบว่า สามารถประยุกต์ใช้ระบบดังกล่าวในโรงงานอุตสาหกรรมที่มีแหล่งความร้อนเหลือทิ้งจำนวนมากได้ โดยปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ระบบผลิตได้จะขึ้นอยู่กับปริมาณของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ที่ได้รับการติดตั้ง Chakkraphan T. และ Tanongkiat K. (2012) เสนอการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์ โดยใช้ตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบท่อสุญญากาศชนิดท่อความร้อน (HPE solar collectors) ร่วมกับวัฏจักรแรงดัน (ORC) ที่มีขนาดกำลังการผลิต 280 kWe

ผลการศึกษาวิจัยข้างต้น และงานวิจัยต่างๆ ที่ผ่านมา พบว่า มีผู้วิจัยจำนวนมากที่ได้ดำเนินการศึกษาและวิจัยการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์ แต่อย่างไรก็ตามการศึกษาส่วนใหญ่จะเป็นการศึกษาการผลิตไฟฟ้าจากแหล่งความร้อนที่มีอุณหภูมิสูงกว่า $100 \text{ }^{\circ}\text{C}$ และกำลังการผลิตโดยใหญ่จะมีขนาดกำลังการผลิตที่ต่ำกว่า 20 kWe และสูงกว่า 250 kWe ดังนั้นสำหรับงานวิจัยนี้จะให้ความสนใจไปที่การศึกษาการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์ที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า $100 \text{ }^{\circ}\text{C}$ โดยในการศึกษาตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นเรียบ (FP solar collectors)

ตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบท่อสุญญากาศ (ET solar collectors) และตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบรูปประกอบพาราโบลา (CPC solar collectors) ได้ถูกนำมาเปรียบเทียบการผลิตน้ำร้อนป้อนให้กับวัฏจักรแรงดัน (ORC) ในการผลิตไฟฟ้า การศึกษาจะเป็นการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อหาอัตราการไหลของน้ำร้อนที่มีความเหมาะสมในแต่ละช่วงเวลาระหว่างวันที่จะทำให้ระบบสามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้สูงที่สุด นอกจากนี้ผลที่ได้จะถูกนำมาวิเคราะห์การลดการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) รวมถึงการวิเคราะห์ผลทางด้านเศรษฐศาสตร์เพื่อหาค่าพลังงานไฟฟ้าต่อหน่วย (Levelized cost of electricity (LCOE)) ของระบบ



รูปที่ 1 (ก) A small-scale SORC power generation, (ข) A 20 kW_e ORC power generation with R-245fa: IHI Company (IHI, 2017).

วิธีดำเนินการวิจัย และทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ด้วยวัฏจักรแรงดันขนาดเล็ก (Small-scale solar Organic Rankine Cycle (SORC) power generation) แสดงดังรูปที่ 1 ระบบประกอบไปด้วย ตัวเก็บรังสีอาทิตย์ (Solar collectors) วัฏจักรแรงดัน (ORC) หอผึ่งเย็น (Cooling tower) และปั๊มน้ำ (Collector pump) โดยมีหลักการทำงาน คือ น้ำร้อนอุณหภูมิต่ำจากวัฏจักรแรงดัน (T_{ORC,o}) จะถูกปั๊มด้วยปั๊มน้ำไปยังตัวเก็บรังสีอาทิตย์ (T_{Coll,i}) เพื่อผลิตน้ำร้อนอุณหภูมิสูง (T_{Coll,o}) ก่อนที่จะถูกป้อนให้กับวัฏจักรแรงดัน (ORC) (T_{ORC,i}) เพื่อผลิตไฟฟ้า โดยในขั้นตอนนี้อัตราการไหลของน้ำร้อนจะถูกควบคุมอัตราการไหลเพื่อให้ น้ำร้อนที่ผลิตได้มีอุณหภูมิอยู่ในช่วงที่เหมาะสม (70 – 95 °C) ที่สามารถทำให้วัฏจักรแรงดัน (ORC) ผลิตไฟฟ้าได้สูงสุด และสามารถทำงานได้ตลอดระยะเวลาในช่วงระหว่างวัน

ตัวเก็บรังสีอาทิตย์ (Solar Collectors): จากรูปที่ 1 ตัวเก็บรังสีอาทิตย์ทำหน้าที่ในการถ่ายเทความร้อนที่ได้รับจากพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์ให้กับตัวกลาง (ในงานวิจัยนี้ใช้น้ำเป็นตัวกลาง) เพื่อให้มีอุณหภูมิสูงขึ้นก่อนนำไปใช้งาน โดยน้ำร้อนที่มีอุณหภูมิสูงที่ผลิตได้จากตัวเก็บรังสีอาทิตย์จะถูกป้อนให้กับวัฏจักรแรงดัน (ORC) เพื่อผลิตไฟฟ้าต่อไป ประสิทธิภาพ (Solar collector efficiency (η_{coll})) และอัตราการถ่ายเทความร้อนของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ (Solar collector heat transfer rate (\dot{Q}_{coll})) หาได้จากสมการที่ (1) และ (2) ตามลำดับ

$$\eta_{coll} = F_R(\tau\alpha)_e - \frac{F_R U_L (T_{Coll,i} - T_{Amb})}{I_T} \quad (1)$$

$$\dot{Q}_{coll} = A_{coll} [F_R(\tau\alpha)_e I_T - F_R U_L (T_{Coll,i} - T_{Amb})] \quad (2)$$

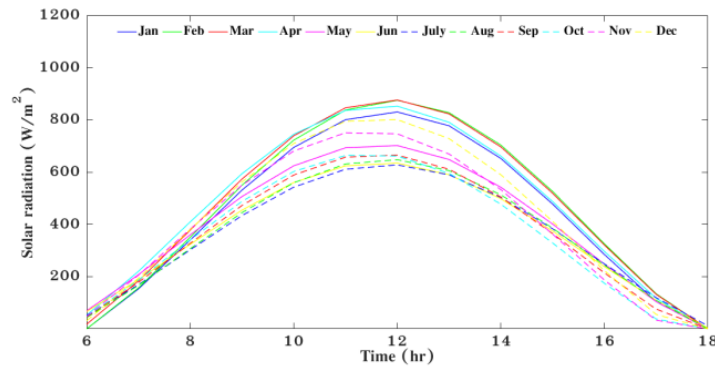
เมื่อ I_T และ T_{Amb} คือ ปริมาณรังสีอาทิตย์ที่ตกกระทบบนระนาบตัวเก็บรังสีอาทิตย์ (W/m²) และอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม (°C) ตามลำดับ โดยปริมาณรังสีอาทิตย์ที่ตกกระทบบนระนาบตัวเก็บรังสีอาทิตย์ และอุณหภูมิแวดล้อมของจังหวัดกรุงเทพมหานครฯ (Atmospheric Science Data Center) แสดงดังตารางที่ 1 และรูปที่ 2, ตามลำดับ เมื่ออุณหภูมิแวดล้อมคำนวณได้จาก (Chaichana, Kiatsiriroat & Nuntaphan, 2010)



$$T_{Amb} = \frac{1}{2} \left[(T_{max} + T_{min}) + (T_{max} - T_{min}) \sin \left(\frac{2\pi}{24} (t - 9) \right) \right] \quad (3)$$

ตารางที่ 1 อุณหภูมิสิ่งแวดล้อมสูงสุด (T_{max}) และต่ำสุด (T_{min}) ของกรุงเทพมหานครฯ (Atmospheric Science Data Center)

Temperature	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
T_{max} (°C)	36.8	39.4	39.1	37.3	34.6	32.3	32.3	32.0	32.6	32.1	31.3	33.2
T_{min} (°C)	20.5	21.8	23.2	24.3	24.7	24.3	24.0	23.8	23.6	22.7	20.7	19.4



รูปที่ 2 Solar radiation at Bangkok, Thailand.

สำหรับงานวิจัยนี้ตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นเรียบ (FP solar collectors), ตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบท่อสุญญากาศ (ET solar collectors) และตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบรูปประกอบพาราโบลา (CPC solar collectors) ที่มีประสิทธิภาพเชิงแสง (Optical efficiency ($F_R(\tau\alpha)_e$)) 0.74, 0.57, 0.72 สัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อน (Overall heat transfer coefficient ($F_R U_L$)) 3.62, 0.75, 0.97 W/m^2-K และพื้นที่ตัวเก็บรังสีอาทิตย์รวม (Gross area) 2.08, 2.37, 2.16 m^2 ต่อแผง, ตามลำดับ ต่อแบบขนานจำนวน 100 ถึง 1200 แผง (เพิ่มขึ้นครั้งละ 50 แผง) ถูกนำมาเปรียบเทียบในการผลิตน้ำร้อนป้อนให้กับวัฏจักรแรงคิน (ORC) เพื่อผลิตไฟฟ้า

วัฏจักรแรงคิน (Organic Rankine Cycle): วัฏจักรแรงคิน (ORC) เป็นเทคโนโลยีที่เหมาะสมสำหรับใช้ผลิตไฟฟ้าที่มีกำลังการผลิตขนาดเล็ก (kWe ถึง MWe) ระบบสามารถใช้พลังงานความร้อนที่มีอุณหภูมิต่ำเป็นแหล่งพลังงานเพื่อเปลี่ยนรูปจากพลังงานความร้อนเป็นพลังงานไฟฟ้าได้ โดยการทำงานของระบบจะเหมือนกับวัฏจักรไอน้ำ (Steam Rankine Cycle) เพียงแต่สารทำงานในระบบจะเปลี่ยนจากไอน้ำเป็นสารออร์แกนิก (Organic substance) สำหรับงานวิจัยนี้ประสิทธิภาพการทำงาน (Performance characteristics) ของระบบผลิตไฟฟ้าด้วยวัฏจักรแรงคิน (ORC) ของ IHI Company (IHI, 2017) ที่มีขนาดกำลังการผลิตไฟฟ้า 20 kWe ที่ใช้ R-245fa เป็นสารทำงานในระบบ ได้ถูกนำมาใช้ในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อหาพลังงานไฟฟ้าที่ระบบสามารถผลิตได้แสดงดังตารางที่ 2



ตารางที่ 2 ประสิทธิภาพการทำงาน (Performance characteristic) ของระบบผลิตไฟฟ้าด้วยวัฏจักรแรงดันของ บริษัท IHI Company ขนาด 20 kWe ที่ใช้ R-245fa เป็นสารทำงานในระบบ (IHI, 2017)

Hot water flow rate (Ton/h)	Cooling water temperature (°C)	Cooling water flow rate (40 Ton/h)			
		Hot water temperature (°C)			
		95	85	75	70
28	20	20	18	12	9
	25	20	16	10	7
	30	20	13	8	6
20	20	20	16	10	8
	25	20	14	9	7
	30	17	12	7	5
12	20	17	12	8	6
	25	15	10	6	5
	30	13	9	5	4

การวิเคราะห์ทางด้านเศรษฐศาสตร์: ตัวบ่งชี้ที่จะนำมาใช้ในการวิเคราะห์ทางด้านเศรษฐศาสตร์ คือ ค่าพลังงานไฟฟ้าต่อหน่วย (Levelized Cost Of Electricity (LCOE), USD/kWh) ซึ่งเป็นตัวบ่งชี้ที่ได้รับความนิยมเนื่องจากง่ายต่อการนำค่าพลังงานไฟฟ้าต่อหน่วยที่คำนวณได้ไปเปรียบเทียบกับค่าพลังงานไฟฟ้าต่อหน่วยของระบบผลิตไฟฟ้าทางด้านพลังงานทดแทนชนิดอื่น ๆ เช่น การผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ (Solar photovoltaic) และการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์แบบรวมแสง (CSP technology) โดยค่าพลังงานไฟฟ้าต่อหน่วยคำนวณได้จากสมการที่ (4) และตารางที่ 3, ตามลำดับ

$$LCOE = \frac{c \times (C_{Invest} - \dot{C}_{O\&M})}{Power}, \text{ where } c = \frac{i_d(1 + i_d)^n}{(1 + i_d)^n - 1} + k_{insurance} \quad (4)$$

เมื่อ C_{Invest} คือ เงินลงทุน (USD), $\dot{C}_{O\&M}$ คือ ค่าบำรุงรักษารายปี (USD/Year) และ $Power$ คือ พลังงานไฟฟ้าสุทธิ (kWh/Year)

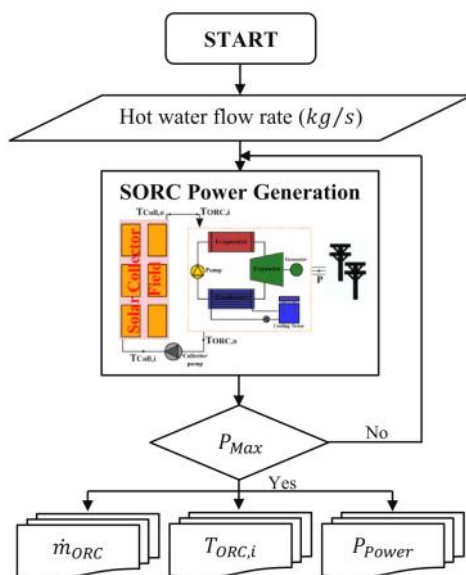
ตารางที่ 3 ข้อมูลสำหรับการวิเคราะห์ทางด้านเศรษฐศาสตร์

Descriptions	Data
Operation time (6.00 hs. to 18.00 hs.), (hour/day)	12
Operation day, (day/year)	353
Cost of the ORC system (USD/kW _e)	2500
Cost of CPC solar collectors (USD/m ²)	196
Construction and engineering, (%)	10
O&M cost (percent of investment cost per year)	5
Insurance rate, $k_{insurance}$ (%/year)	0.6
Real debt interest rate, i_d (%)	7.325
Depreciation period, n (year)	25

การจำลองสภาพการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์: ในงานวิจัยนี้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ได้ถูกพัฒนาเพื่อหาอัตราการไหลของน้ำร้อนที่มีความเหมาะสมที่สุดในแต่ละช่วงเวลาระหว่างวันที่สามารถทำให้ระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าได้สูงที่สุด โดยมีขั้นตอนการคำนวณ (รูปที่ 3) ดังนี้ อัตราการไหลของน้ำร้อน (แสดงดังตารางที่ 2) จะถูกนำมาหาอัตราการไหลของน้ำร้อนที่มีความเหมาะสมที่ซึ่งอัตราการไหลของน้ำร้อนจะ



เปลี่ยนแปลงระหว่างอัตราการไหลต่ำสุดจนถึงอัตราการไหลสูงสุด (12 ถึง 28 Ton/hr โดยในงานวิจัยนี้กำหนดอัตราการไหลของน้ำร้อนเพิ่มครั้งละ 1 Ton/hr) ขั้นตอนดังกล่าวจะทำให้สามารถคำนวณหาอุณหภูมิของน้ำร้อน ($T_{Coll,o}$) และอัตราการถ่ายความร้อน (Q_{coll}) ที่ผลิตได้จากตัวเก็บรังสีอาทิตย์ จากนั้นนำค่าที่คำนวณได้ไปหาพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากวัฏจักรแรงดัน (ORC) แสดงดังตารางที่ 2 โดยวิธีการประเมินค่าช่วง (Interpolation) ซึ่งขั้นตอนที่ได้กล่าวไปแล้วข้างต้นจะทำให้สามารถหาอัตราการไหลของน้ำร้อนที่เหมาะสมที่สุดที่ทำให้ระบบสามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้สูงที่สุด โดยในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ได้สมมติให้ไม่มีการสูญเสียความร้อนระหว่างท่อสู่อากาศ ไม่คิดพลังงานไฟฟ้าที่จ่ายให้กับปั๊มน้ำที่สูบน้ำง่ายให้กับตัวเก็บรังสีอาทิตย์ และกำหนดให้ค่าประสิทธิภาพของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน (ϵ) เท่ากับ 90%



รูปที่ 3 ขั้นตอนการคำนวณของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

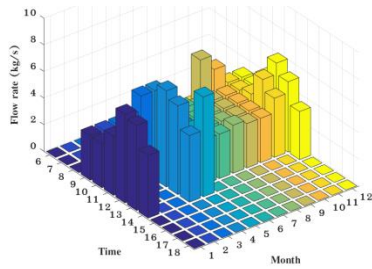
ตารางที่ 4 ปริมาณพลังงานไฟฟ้าต่ำสุดและสูงสุด (MWh/Year) และปริมาณการลดการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) (Ton CO_2 eq./Year) ของระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานความร้อนแสงอาทิตย์อุณหภูมิต่ำด้วยวัฏจักรแรงดัน (ORC)

Number of solar collectors (Units)	Power output (MWh/Year)			CO ₂ Emission (Ton CO ₂ eq./Year)		
	Solar collectors					
	FP	ET	CPC	FP	ET	CPC
200	5.14	10.13	6.80	2.55	5.03	3.38
250	5.14	10.13	6.80	2.55	5.03	3.38
300	17.75	31.16	26.08	8.82	15.49	12.96
350	17.75	31.16	26.08	8.82	15.49	12.96
400	22.63	27.26	29.80	11.25	13.55	14.81
450	22.63	27.26	29.80	11.25	13.55	14.81
500	20.47	19.79	22.96	10.17	9.84	11.41
550	20.47	19.79	22.96	10.17	9.84	11.41
600	20.40	9.00	11.77	10.14	4.47	5.85

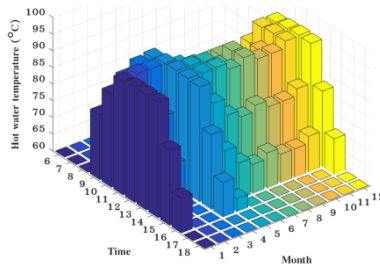


ผลการศึกษา

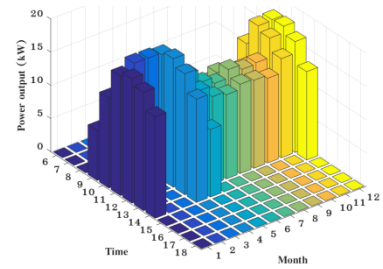
งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อจำลองการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์เมื่ออุณหภูมิของแหล่งความร้อนมีอุณหภูมิต่ำกว่า 100 °C ผลการศึกษาสามารถแสดงได้ดังนี้



(i) Hot water flow rate (kg/s)

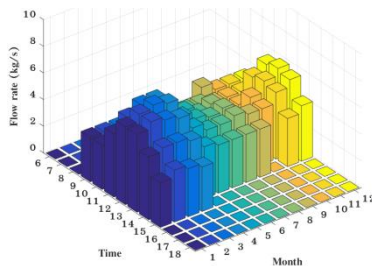


(ii) Inlet hot water temperature (°C)

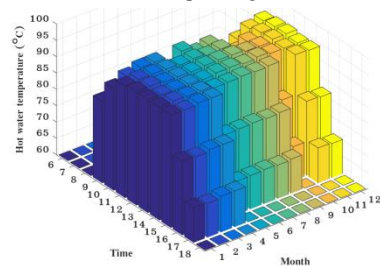


(iii) Power output (kWe)

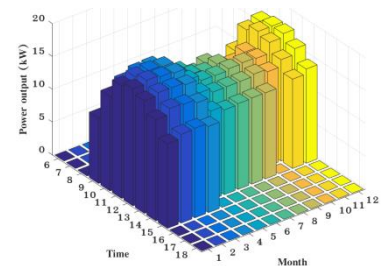
(I) FP-SORC power generation



(i) Hot water flow rate (kg/s)

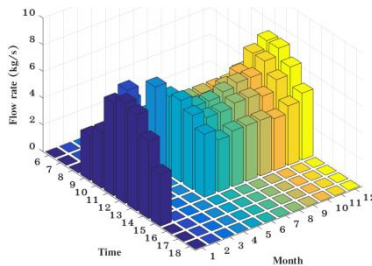


(ii) Inlet hot water temperature (°C)

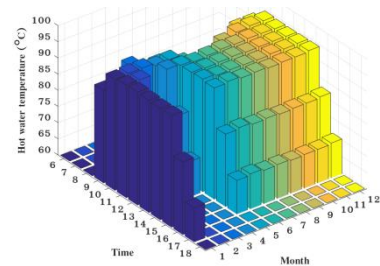


(iii) Power output (kWe)

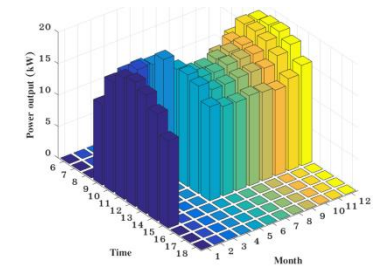
(II) ET-SORC power generation



(i) Hot water flow rate (kg/s)



(ii) Inlet hot water temperature (°C)



(iii) Power output (kWe)

(III) CPC-SORC power generation

รูปที่ 4 Hot water flow rate (kg/s), Inlet hot water temperature, and Power output (kWe) of the FP-SORC, the ET-SORC, and the CPC-SORC power generation.

พลังงานไฟฟ้าที่ระบบผลิตได้ จะขึ้นอยู่กับชนิดของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ และจำนวนตัวเก็บรังสีอาทิตย์ที่ได้รับการติดตั้ง โดยปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ระบบผลิตได้จะเพิ่มสูงขึ้นเมื่อจำนวนตัวเก็บรังสีอาทิตย์เพิ่มสูงขึ้น แต่อย่างไรก็ตามเมื่อจำนวนตัวเก็บรังสีอาทิตย์สูงเกินความต้องการของระบบผลิตไฟฟ้าด้วยวัฏจักรแรงดัน (ORC) ปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ของระบบจะมีแนวโน้มลดต่ำลง ผลการศึกษาแสดงดังตารางที่ 4 พบว่า เมื่อตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบท่อความร้อน (ET solar collectors) ผลิตน้ำร้อนป้อนให้กับระบบผลิตไฟฟ้าด้วยวัฏจักรแรงดัน (ORC) ระบบจะสามารถผลิตไฟฟ้าได้สูงที่สุด รองลงมา คือ ตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบรูปประกอบพาราโบล (CPC solar collectors) และตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นเรียบ (FP solar collectors) โดยระบบจะสามารถผลิตไฟฟ้าได้เท่ากับ 31.16, 29.80, และ 22.63 MWh/Year เมื่อจำนวนตัวเก็บรังสีอาทิตย์มีจำนวน 300, 400, และ 400 แผง, ตามลำดับ

รูปที่ 4 แสดงอัตราการไหลของน้ำร้อน (kg/s) อุณหภูมิน้ำร้อน (°C) และพลังงานไฟฟ้าสูงสุดที่ระบบผลิตได้ (kWe) ในแต่ละช่วงเวลาระหว่างวันในแต่ละเดือน (ตัวแทนวันในแต่ละเดือน) ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบท่อสุญญากาศ (ET solar collectors) จะสามารถผลิตน้ำร้อนให้มีอุณหภูมิอยู่ในช่วงประมาณ 95 °C ตลอด

กลุ่มวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี



ช่วงระยะเวลาระหว่างวัน กล่าวคือ เมื่อนำเอาตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบท่อสุญญากาศ (ET solar collector) ผลิตน้ำร้อนป้อนให้กับวัฏจักรแรงดัน (ORC) ของ IHI Company ที่มีขนาดกำลังการผลิตไฟฟ้า 20 kWe จะทำให้ระบบสามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้สูงที่สุด และสามารถผลิตไฟฟ้าได้ตลอดเวลาในช่วงระยะเวลาว่างวัน

การลดการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂ Emission): ตัวประกอบค่าคงที่ของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ที่มีค่าเท่ากับ 0.497 kg CO₂ eq./kWh (Energy Statistics of Thailand 2017, 2017) ได้ถูกนำมาใช้ในการคำนวณหาปริมาณการลดการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ของระบบ โดยการคำนวณสามารถนำค่าดังกล่าวคูณกับปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่แต่ละระบบผลิตได้ (MWh/Year) ผลการศึกษาแสดงดังตารางที่ 4 พบว่า การลดการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) จะเพิ่มขึ้นตามปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ โดยเมื่อตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบท่อความร้อน (ET solar collectors) ผลิตน้ำร้อนป้อนให้กับระบบผลิตไฟฟ้าด้วยวัฏจักรแรงดัน (ORC) ระบบจะสามารถช่วยลดการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ได้มากที่สุด รองลงมา คือ ตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบรูปประกอบพาราโบลา (CPC solar collectors) และตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นเรียบ (FP Solar collectors) โดยระบบจะสามารถลดการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ได้เท่ากับ 15.49, 14.81, และ 11.25 Ton CO₂ eq./Year เมื่อจำนวนตัวเก็บรังสีอาทิตย์มีจำนวน 300, 400, และ 400 แผง, ตามลำดับ

ค่าพลังงานไฟฟ้าต่อหน่วย (LCOE): ผลการศึกษาแสดงดังตารางที่ 5 ผลการศึกษาพบว่า ค่าพลังงานไฟฟ้าต่อหน่วยของระบบมีแนวโน้มลดลงเมื่อจำนวนตัวเก็บรังสีอาทิตย์มีจำนวนเพิ่มมากขึ้น โดยค่าพลังงานไฟฟ้าต่อหน่วยของระบบจะลดไปจนถึงค่าที่มีความเหมาะสมก่อนที่จะเพิ่มสูงขึ้นตามจำนวนตัวเก็บรังสีอาทิตย์ที่เพิ่มสูงขึ้น สำหรับงานวิจัยนี้ได้แบ่งผลการวิเคราะห์ออกเป็น 2 ส่วน คือ (1) ไม่คิดค่าใช้จ่ายของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ (Not-include investment of solar collectors) โดยสมมติว่าตัวเก็บรังสีได้รับการติดตั้งเป็นที่เรียบร้อยแล้ว และ/หรือ ได้รับการสนับสนุนค่าใช้จ่ายสำหรับการติดตั้งจากภาครัฐ และ (2) คิดค่าใช้จ่ายของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ (Include investment of solar collectors) ผลการศึกษาพบว่า กรณีไม่คิดและคิดค่าใช้จ่ายของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ ค่าพลังงานไฟฟ้าต่อหน่วยของระบบ (LCOE) จะมีค่าต่ำสุดเท่ากับ 0.7882 และ 0.2467 USD/kWh, ตามลำดับ เมื่อระบบใช้ตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบท่อสุญญากาศ (ET solar collectors) จำนวน 300 แผง

นอกจากนี้ผลที่ได้จากการศึกษา ยังได้ถูกนำไปเปรียบเทียบกับระบบผลิตไฟฟ้าแบบรวมแสงอาทิตย์ (CSP technology) และระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ (Solar photovoltaic) ที่มีค่าพลังงานไฟฟ้าต่อหน่วยระหว่าง 0.20 ถึง 0.35 USD/kWh (IRENA, 2012a) และ 0.14 ถึง 0.47 USD/kWh (IRENA, 2012b) ตามลำดับ ผลการศึกษาพบว่า ค่าพลังงานไฟฟ้าต่อหน่วยของระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์โดยวัฏจักรแรงดันขนาดเล็ก (Small-scale SORC power generation) จะมีความน่าสนใจเมื่อภาครัฐให้การสนับสนุนค่าใช้จ่ายในการติดตั้งตัวเก็บรังสีอาทิตย์



ตารางที่ 5 ค่าพลังงานไฟฟ้าต่อหน่วย (LCOE) ของระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์อุณหภูมิต่ำ เมื่อคิด และไม่คิด ค่าใช้จ่ายที่เกิดจากตัวเก็บรังสีอาทิตย์ (Solar collectors)

Number of solar collectors (Units)	LCOE (USD/kWh)					
	Include			Not-include		
	FP	ET	CPC	FP	ET	CPC
200	2.8948	1.8686	3.0483	1.4963	0.7587	1.1300
250	3.2444	2.1461	3.5278	1.4963	0.7587	1.1300
300	1.0402	0.7882	1.0457	0.4331	0.2467	0.2949
350	1.1414	0.8784	1.1708	0.4331	0.2467	0.2949
400	0.9748	1.1071	1.1342	0.3398	0.2820	0.2580
450	1.0542	1.2102	1.2437	0.3398	0.2820	0.2580
500	1.2530	1.8097	1.7560	0.3755	0.3886	0.3349
550	1.3408	1.9518	1.8982	0.3755	0.3886	0.3349
600	1.4337	4.6044	3.9812	0.3769	0.8544	0.6534

สรุปผลการศึกษา

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์โดยวัฏจักรแรงดันขนาดเล็ก (Small-scale SORC power generation) โดยในการศึกษาจะเป็นการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อหาตัวเก็บรังสีอาทิตย์ (Solar collectors) และอัตราการไหลของน้ำร้อนที่มีความเหมาะสมที่สุดที่จะทำให้ระบบผลิตไฟฟ้าได้สูงสุด ผลที่ได้จากการศึกษาสามารถสรุปได้ ดังนี้ (1) ระบบผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์โดยวัฏจักรแรงดันขนาดเล็กมีความเหมาะสมที่จะนำมาประยุกต์เพื่อผลิตพลังงานไฟฟ้าใช้ในประเทศไทย (2) โดยตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบท่อสุญญากาศ (ET solar collectors) จะเป็นตัวเก็บรังสีอาทิตย์ที่มีความเหมาะสมที่สุด และ (3) ระบบจะมีค่าพลังงานไฟฟ้าต่อหน่วย (LCOE) ในกรณีที่ไม่คิดค่าใช้จ่ายที่เกิดจากตัวเก็บรังสีอาทิตย์ เท่ากับ 0.7882 และ 0.2467 USD/kWh เมื่อระบบใช้ตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบท่อสุญญากาศ (ET solar collectors) จำนวน 300 แผง โดยระบบสามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้สูงสุด เท่ากับ 31.16 MWh/Year และสามารถลดการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ได้เท่ากับ 15.49 Ton CO₂ eq./Year

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสาขาเทคโนโลยีอุตสาหกรรม วิชาเอกเทคโนโลยีวิศวกรรมเครื่องกล คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม, มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม จังหวัดพิษณุโลก และหน่วยวิจัยพลังงานสะอาด ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์, มหาวิทยาลัยนเรศวร จังหวัดพิษณุโลก สำหรับสถานที่ทำวิจัย

เอกสารอ้างอิง

คู่มือการพัฒนาและการลงทุนผลิตพลังงานทดแทน ชุดที่ 2: พลังงานแสงอาทิตย์. Retrieved from http://www.dede.go.th/article_attach/h_solar.pdf

Atmospheric Science Data Center. "NASA Surface meteorology and Solar Energy – Location". Retrieved from eosweb.larc.nasa.gov/cgi-bin/sse/grid.cgi?email=skip@larc.nasa.gov

Baral, S., & Kim, K. C. (2014). Thermodynamic modeling of the solar organic Rankine cycle with selected organic working fluids for cogeneration. *Distributed Generation & Alternative Energy Journal*, 29(3), 7-34.



- Chaichana, C., Kiatsiroat, T., & Nuntaphan, A. (2010). Comparison of conventional flat-plate solar collector and solar boosted heat pump using unglazed collector for hot water production in small slaughterhouse. *Heat Transfer Engineering*, 31(5), 419–429.
- Energy Statistics of Thailand 2017. (2017).
- IHI. (2017). *ORC power generation, Model: HR20W*. Retrieved from <http://www.ihico.jp/compressor/binary/index.html>
- IRENA. (2012a). *RENEWABLE ENERGY TECHNOLOGIES: COST ANALYSIS SERIES: Concentrating Solar Power*. Retrieved from http://www.irena.org/documentdownloads/publications/re_technologies_cost_analysis-csp.pdf
- IRENA. (2012b). *RENEWABLE ENERGY TECHNOLOGIES: COST ANALYSIS SERIES: Solar Photovoltaics*. Retrieved from
- Janjai, S., Laksanaboonsong, J., & Seesaard, T. (2011). Potential application of concentrating solar power systems for the generation of electricity in Thailand. *Applied Energy*, 88(12), 4960–4967. doi:10.1016/j.apenergy.2011.06.044
- Mavrou, P., Papadopoulos, A. I., Stijepovic, M. Z., Seferlis, P., Linke, P., & Voutetakis, S. (2015). Novel and conventional working fluid mixtures for solar Rankine cycles: Performance assessment and multi-criteria selection. *Applied thermal engineering*, 75, 384–396. doi:10.1016/j.applthermaleng.2014.10.077
- Sonsaree, S., Asaoka, T., Jiajitsawat, S., Aguirre, H., & Tanaka, K. (2017). VCHP-ORC power generation from low-grade industrial waste heat combined with solar water heating system: Power generation and CO2 emission in industrial estate of Thailand. *Cogent Engineering*, 4(1). doi:10.1080/23311916.2017.1359397
- Sonsaree, S., Jiajitsawat, S., Asaoka, T., Aguirre, H., & Tanaka, K. (2016). Organic Rankine Cycle power generation from industrial waste heat recovery integrated with solar hot water system by using vapor compression heat pump as heating booster in Thailand. *Paper presented at the Cogeneration, Small Power Plants and District Energy (ICUE), International Conference*.
- Thawongmyingsakul, C., & Kiatsiroat, T. (2012). Potential of a Solar Organic Rankine Cycle with Evacuated-Tube Solar Collectors as Heat Source for Power Generation in Thailand. *Energy Science and Technology*, 4(2), 25–35. doi:10.3968/j.est.1923847920120402.558
- Wang, J., Yan, Z., Zhao, P., & Dai, Y. (2014). Off-design performance analysis of a solar-powered organic Rankine cycle. *Energy Conversion and Management*, 80, 150–157. doi:10.1016/j.enconman.2014.01.032