

การผลิตไฟฟ้าจากพลังงานความร้อนแสงอาทิตย์โดยวัฏจักรแรงดันขนาดเล็ก

SMALL-SCALE SOLAR ORGANIC RANKINE CYCLE

POWER GENERATION

สรวิศ สอนสารี^{1*}, เอกภูมิ บุญธรรม¹ และ เอกกฤษ แก้วเจริญ¹

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

¹คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม อ.เมือง จ.พิษณุโลก ประเทศไทย 65000

^{1*}Faculty of Industrial Technology, Pibulsongkram Rajabhat University, Muang, Phitsanulok, Thailand, 65000

*Corresponding author E-mail: sorawitsonsaree@gmail.com

วันที่เข้ารับ 22 มกราคม 2562

วันที่แก้ไขบทความ 25 กุมภาพันธ์ 2562

วันที่ตอบรับบทความ 19 เมษายน 2562

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์ในรูปแบบอุณหภูมิต่ำโดยวัฏจักรแรงดันขนาดเล็ก การศึกษาได้สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อหาจำนวนตัวเก็บรังสีอาทิตย์ และขนาดถังน้ำร้อนที่มีความเหมาะสมที่ทำให้ระบบมีค่าพลังงานไฟฟ้าต่อหน่วยต่ำสุด และสามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้สูงสุด ณ กรุงเทพฯ โดยในการศึกษาตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นเรียบตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบท่อสุญญากาศ และตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบรูปประกอบพาราโบลา ขนาด 2.08, 2.37, 2.16 m² ต่อแผง, ที่มีประสิทธิภาพเชิงแสง ($F_R(\tau\alpha)_e$) และสัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อน (F_RU_L) เท่ากับ 0.74, 0.57, 0.72 และ 3.62, 0.75, 0.97 W/m²-K ตามลำดับ ต่อแบบขนานจำนวน 100 ถึง 1,200 แผง ร่วมกับถังน้ำร้อนที่มีขนาด 2,500 ถึง 50,000 ลิตร จะถูกนำมาเปรียบเทียบเพื่อผลิตความร้อนป้อนให้กับวัฏจักรแรงดันขนาด 20, 40, และ 60 kW_e ที่ใช้ R-245fa เป็นสารทำงานในระบบ ผลการศึกษาที่ได้จากการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ พบว่า ปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ระบบผลิตได้จะขึ้นอยู่กับจำนวนตัวเก็บรังสีอาทิตย์ที่ได้รับการติดตั้ง และขนาดของถังน้ำร้อนที่มีความเหมาะสม โดยระบบเมื่อใช้ตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นเรียบจำนวน 2000 แผง ผลิตน้ำร้อนร่วมกับถังน้ำร้อนที่มีขนาดรวม 42500 ลิตร ป้อนให้กับระบบผลิตไฟฟ้าด้วยวัฏจักรแรงดันขนาดกำลังการผลิต 60 kW_e จำนวน 1 เครื่อง ค่าพลังงานไฟฟ้าต่อหน่วยของระบบจะมีค่าต่ำสุดเท่ากับ 0.999 USD/kWh สามารถผลิตไฟฟ้าได้สูงสุด 97.02 MWh/Year และระบบสามารถลดการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ได้เท่ากับ 53.17 Ton CO₂ eq./Year, 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 and size of the thermal energy storage (TES) 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. The system is analyzed by using three different capacities (20, 40, and 60 kWe) of the ORC system with R-245fa in combination with solar water heating system (SWHS), using four different models. Flat-plate, evacuated-tube, and compound parabolic concentrator (CPC) solar collectors were used to generate heat with optical efficiency of 0.74, 0.57, 0.72, overall heat transfer coefficient of 3.62, 0.75, 0.97 W/m²-K, and collector area of 2.08, 2.37, 2.61 m² per unit, respectively. Each type of the collectors was connected in parallel between 100 and 1200 units, and size of the TES between 2500 and 50000 litres. The results of the evaluation showed that the greater number of solar collectors are the more electricity of the systems can generate. It can generate the highest electricity of 97.02 MWh/Year, with the lowest of the LCOE of 0.999 USD/kWh when a 60 kWe of ORC power generation combined with 2000 units of solar collectors and the TES of 42500 litres with initial investment of the collectors and the TES taken into consideration. Moreover, in terms of the environment impact, as the same number of solar collectors the system can reduce CO₂ emission of 67.06 Ton CO₂ eq./Year.

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

1. บทนำ

พลังงานแสงอาทิตย์ (Solar energy) ถือว่าเป็นพลังงานทดแทน (Renewable) อีกประเภทหนึ่งที่มีความนิยมเป็นอย่างมากในประเทศไทย ไม่ว่าจะเป็นการประยุกต์ใช้พลังงานแสงอาทิตย์ในรูปของความร้อน (Thermal energy) หรือการประยุกต์ใช้พลังงานแสงอาทิตย์ในรูปของไฟฟ้า (Electrical energy) เนื่องจากพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานที่ไม่มีวันหมดสิ้น และเป็นพลังงานที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม ประเทศไทยเป็นประเทศที่มีศักยภาพรังสีอาทิตย์ชนิดรังสีรวม (Total solar Radiation) ค่อนข้างสูงประมาณ 18 MJ/m²-day (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน, 2560) (Department of Alternative Energy Development and Efficiency

of Ministry of Energy, 2017) แต่อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาศักยภาพรังสีอาทิตย์ชนิดรังสีตรง (Direct or beam solar radiation) พบว่า ประเทศไทยมีศักยภาพรังสีอาทิตย์ชนิดรังสีตรงค่อนข้างต่ำประมาณ $1350 - 1400 \text{ kWh/m}^2\text{-year}$ (Sonsaree *et al.*, 2018) ซึ่งไม่เหมาะกับการประยุกต์ใช้ในการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์แบบรวมแสง (Concentrating solar power (CSP) technology) เนื่องจากเทคโนโลยีดังกล่าวจะเกิดความคุ้มค่าหรือมีความคุ้มค่าทางด้านเศรษฐศาสตร์เมื่อศักยภาพรังสีอาทิตย์ชนิดรังสีตรงมีความเข้มรังสีอาทิตย์สูงกว่า $1500 \text{ kWh/m}^2\text{-year}$ แต่อย่างไรก็ตามสามารถประยุกต์ใช้พลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์ในรูปของน้ำร้อนอุณหภูมิต่ำถึงอุณหภูมิปานกลางที่ผลิตได้จากตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบไม่รวมแสง (Non-concentrating solar collectors) เช่น ตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นเรียบ (Flat-plate (FP) solar collectors), ตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบท่อสุญญากาศ (Evacuated-tube (ET) solar collectors), ตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบท่อความร้อนชนิดท่อสุญญากาศ (Heat pipe evacuated-tube (HPE) solar collectors), และตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบรูปประกอบพาราโบลา (Compound parabolic concentrating (CPC)s collectors) เช่น การผลิตน้ำร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์เพื่อใช้งานในที่พักอาศัย อาคาร หรือแม้กระทั่งโรงงานอุตสาหกรรม เป็นต้น ในส่วนของการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์ (Solar Thermal Energy) เทคโนโลยีการผลิตไฟฟ้าจากวัฏจักรแรงคิน (Organic Rankine cycle (ORC)) นับว่าเป็นอีกหนึ่งเทคโนโลยีที่กำลังได้รับความนิยมเนื่องจากเป็นเทคโนโลยีที่สามารถประยุกต์ใช้งานร่วมกับแหล่งความร้อนที่มีอุณหภูมิต่ำ (Low-temperature heat source) ได้ นอกจากนี้เทคโนโลยีดังกล่าวส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อย และที่สำคัญกำลังการผลิตของระบบผลิตไฟฟ้าจากวัฏจักรแรงคินจะมีตั้งแต่ขนาดเล็กไปจนถึงขนาดใหญ่ จึงง่ายที่จะเลือกขนาดให้มีความเหมาะสมกับแหล่งความร้อน

การศึกษางานวิจัยต่างๆ ที่ผ่านมา Sonsaree *et al.*, 2017 และ Sonsaree *et al.*, 2016 ได้ศึกษาการใช้เทคนิคของปั๊มความร้อน (Heat pump) ในการเพิ่มคุณภาพความร้อนที่ได้รับจากความร้อนเหลือทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม และเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ (Solar hot water system, SHWS) จากแหล่งความร้อนอุณหภูมิต่ำให้เป็นแหล่งความร้อนที่มีอุณหภูมิที่ค่อนข้างร้อนป้อนให้กับวัฏจักรแรงคินเพื่อผลิตไฟฟ้า ผลการศึกษาพบว่า ระบบดังกล่าวเหมาะสมที่จะประยุกต์ใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมที่มีแหล่งความร้อนเหลือทิ้งในปริมาณสูง และระบบจะมีความน่าสนใจเมื่อโรงงานอุตสาหกรรมได้ดำเนินการติดตั้งหรือได้รับการสนับสนุนค่าดำเนินการติดตั้งตัวเก็บรังสีอาทิตย์เป็นที่เรียบร้อยแล้ว นอกจากนี้ Sonsaree *et al.*, 2018 ยังได้ศึกษาการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานความร้อนแสงอาทิตย์อุณหภูมิต่ำด้วยวัฏจักรแรงคิน โดยในการศึกษาได้ทำการเปรียบเทียบตัวเก็บรังสีอาทิตย์ 3 แบบ ได้แก่ ตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นเรียบ, ตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบสุญญากาศ, และตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบรูปประกอบพาราโบลา เพื่อผลิตน้ำร้อนที่มีอุณหภูมิในช่วง $70 - 95 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ป้อน

ให้กับวัฏจักรแรงคินเพื่อผลิตไฟฟ้า ผลการศึกษาพบว่า ระบบดังกล่าวเหมาะที่จะนำมาประยุกต์ใช้ผลิตพลังงานไฟฟ้าในประเทศไทย โดยระบบจะมีความน่าสนใจในเชิงเศรษฐศาสตร์เมื่อภาครัฐให้การสนับสนุนค่าใช้จ่ายในส่วนของตัวเองเก็บรังสีอาทิตย์ และระบบผลิตไฟฟ้าด้วยวัฏจักรแรงคิน

ดังที่ได้กล่าวไปแล้วข้างต้นจะเห็นได้ว่ามีงานวิจัยจำนวนมากที่ได้ดำเนินการศึกษาและวิจัยเกี่ยวกับการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์ แต่การศึกษาส่วนใหญ่จะเป็นการศึกษา ระบบผลิตไฟฟ้าจากแหล่งความร้อนที่มีอุณหภูมิสูง ประกอบกับกำลังการผลิตไฟฟ้าของวัฏจักรแรงคินที่มีกำลังการผลิตขนาดเล็กยังมีน้อย ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้พัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อเปรียบเทียบพลังงานไฟฟ้าของระบบผลิตไฟฟ้าจากวัฏจักรแรงคินขนาดเล็กที่มีกำลังการผลิตแตกต่างกัน โดยในการศึกษาจะเป็นการหาจำนวนของตัวเองเก็บรังสีอาทิตย์ ขนาดของถังน้ำร้อนที่มีความเหมาะสม ที่ทำให้ค่าพลังงานไฟฟ้าต่อหน่วย (Levelized cost of electricity, LCOE) ของระบบมีค่าต่ำที่สุด นอกจากนี้ยังได้รวมถึงการพิจารณาผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในเทอมของการลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) อีกด้วย

2. วัตถุประสงค์ของการวิจัย

2.1 พัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อเปรียบเทียบพลังงานไฟฟ้าของระบบผลิตไฟฟ้าจากวัฏจักรแรงคินขนาดเล็กจากพลังงานความร้อนแสงอาทิตย์ในรูปของอุณหภูมิต่ำ (<100 °C) ที่มีกำลังการผลิตไฟฟ้าแตกต่างกัน

2.2 เพื่อหาจำนวนของตัวเองเก็บรังสีอาทิตย์ และขนาดของถังน้ำร้อนที่มีความเหมาะสมที่จะทำ ให้ระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าได้สูงสุด

2.3 เพื่อหาปริมาณการลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และค่าพลังงานไฟฟ้าต่อหน่วยของระบบ

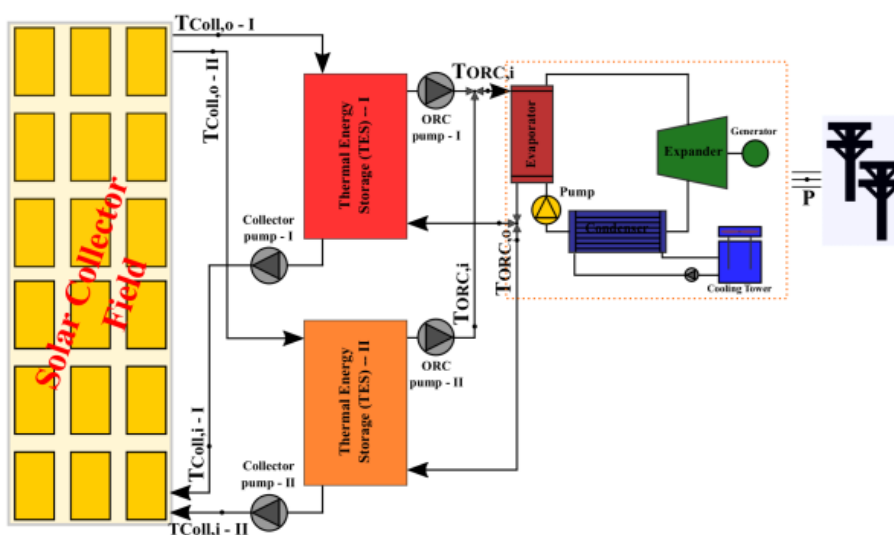
3. วิธีดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อเปรียบเทียบพลังงานไฟฟ้าของระบบผลิตไฟฟ้าจากวัฏจักรแรงคินขนาดเล็กด้วยพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์ในรูปของอุณหภูมิต่ำ (<100 °C) โดยส่วนประกอบต่างๆ ของระบบ รวมถึงข้อมูลที่เกี่ยวข้องในการดำเนินการศึกษาสามารถแสดงได้ดังนี้

3.1 ระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์ด้วยวัฏจักรแรงคินขนาดเล็ก (Small-scale organic Rankine cycle (SORC) power plant) (แสดงดังภาพที่ 1)

1. ส่วนประกอบของระบบ: ตัวเก็บรังสีอาทิตย์ (Solar collectors), ถังเก็บสะสมความร้อน (Storage tank), วัฏจักรแรงคิน (ORC), หอผึ่งเย็น (Cooling tower), และปั๊มน้ำ (Water pump)

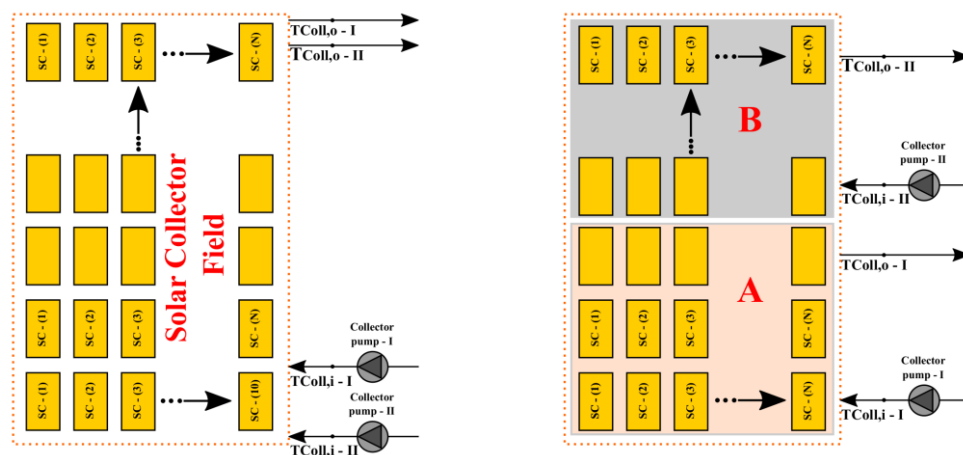
2. หลักการทำงานของระบบ: น้ำร้อนอุณหภูมิต่ำจากถังน้ำร้อนถังที่ 1 จะถูกปั๊มด้วยปั๊มน้ำไปยังตัวเก็บรังสีอาทิตย์เพื่อผลิตน้ำร้อนอุณหภูมิสูงก่อนที่จะนำไปเก็บไว้ในถังเก็บน้ำร้อนถังที่ 1 น้ำร้อนที่มีอุณหภูมิสูงจากถังน้ำร้อนถังที่ 1 จะถูกป้อนให้กับวัฏจักรแรงคินเพื่อผลิตไฟฟ้า โดยตัวเก็บรังสีอาทิตย์ที่ไม่ได้ถูกใช้ในกระบวนการผลิตไฟฟ้าในช่วงเวลากลางวัน (จำนวนตัวเก็บรังสีอาทิตย์ที่ติดตั้งทั้งหมดแสดงดังภาพที่ 2 (ก), ภาพที่ 2 (ข) ส่วน A คือ จำนวนตัวเก็บรังสีอาทิตย์ที่เหมาะสมในแต่ละวันที่เป็นตัวแทนเดือน โดยน้ำร้อนที่ผลิตได้ในส่วนนี้จะถูกนำไปเก็บไว้ในถังน้ำร้อนถังที่ 1 และภาพที่ 2 (ข) ส่วน B คือ จำนวนตัวเก็บรังสีอาทิตย์ส่วนเกินที่ได้ดำเนินการติดตั้งไปแล้ว โดยน้ำร้อนที่ผลิตได้ในส่วนนี้จะถูกนำไปเก็บไว้ในถังน้ำร้อนถังที่ 2) น้ำร้อนที่ผลิตได้จะถูกนำมาป้อนให้กับระบบผลิตไฟฟ้าเพื่อผลิตไฟฟ้าในช่วงที่ไม่มีแสงแดด



ภาพที่ 1 ระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานความร้อนแสงอาทิตย์โดยวัฏจักรแรงคินขนาดเล็ก

3.2 ตัวเก็บรังสีอาทิตย์: ตัวเก็บรังสีอาทิตย์ 3 ชนิด ได้แก่ ตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นเรียบ, ตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบท่อสุญญากาศ และตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบรูปประกอบพาราโบลา ที่มีประสิทธิภาพเชิงแสง (Optical efficiency $F_R(\tau\alpha)_e$) 0.74, 0.57, 0.72 ค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อน (Overall heat transfer coefficient $F_R U_L$) 3.62, 0.75, 0.97 W/m²-K และพื้นที่ตัวเก็บรังสีอาทิตย์รวม (Gross area) 2.08, 2.37, 2.16 m² ต่อแผง ตามลำดับ ต่อแบบขนานจำนวน 100 ถึง 1,200 แผง (เพิ่มขึ้นครั้งละ 50 แผง) ได้ถูกนำมาเปรียบเทียบเพื่อผลิตน้ำร้อนที่มีอุณหภูมิ 70 ถึง 95 °C (ซึ่งเป็นช่วงอุณหภูมิที่วัฏจักรแรงคินในงานวิจัยนี้สามารถผลิตไฟฟ้าได้)

3.3 ถังน้ำร้อน: ถังน้ำร้อนที่มีขนาดตั้งแต่ 2,500 ถึง 50,000 ลิตร (เพิ่มขึ้นครั้งละ 2,500 ลิตร)



(ก) กรณีใช้ตัวเก็บรังสีอาทิตย์ที่ติดตั้งทั้งหมดผลิตไฟฟ้า

(ข) กรณีใช้ตัวเก็บรังสีอาทิตย์ผลิตน้ำร้อนในช่วงเวลากลางวัน (A) และตัวเก็บรังสีอาทิตย์ส่วนเกินที่ใช้ผลิตน้ำร้อนในช่วงเวลากลางคืน (B)

ภาพที่ 2 การใช้งานของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ที่ได้รับการติดตั้ง

3.4 ระบบผลิตไฟฟ้าด้วยวัฏจักรแรงดัน: ระบบผลิตไฟฟ้าด้วยวัฏจักรแรงดันที่มีกำลังการผลิต

(1) ขนาด 20 kW_e จำนวน 1 เครื่อง (SORC-I), (2) ขนาด 20 kW_e จำนวน 2 เครื่อง (SORC-II), (3) ขนาด 20 kW_e จำนวน 3 เครื่อง (SORC-III), และ (4) ขนาด 60 kW_e จำนวน 1 เครื่อง (SORC-IV) ที่ซึ่งหาได้จากประสิทธิภาพการทำงาน (Performance characteristic) ซึ่งประกอบไปด้วย อัตราการไหลของน้ำร้อน, อุณหภูมิน้ำร้อน, อุณหภูมิแวดล้อม และพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ ของระบบผลิตไฟฟ้าด้วยวัฏจักรแรงดันของบริษัท IHI company (IHI Rotating Machinery Engineering, 2017) ขนาด 20 kW_e แสดงดังภาพที่ 3 (ก) และของบริษัท KOBELCO company (KOBELCO, 2017) ขนาด 60 kW_e แสดงดังภาพที่ 3 (ข) ที่ใช้ R-245fa เป็นสารทำงานในระบบ



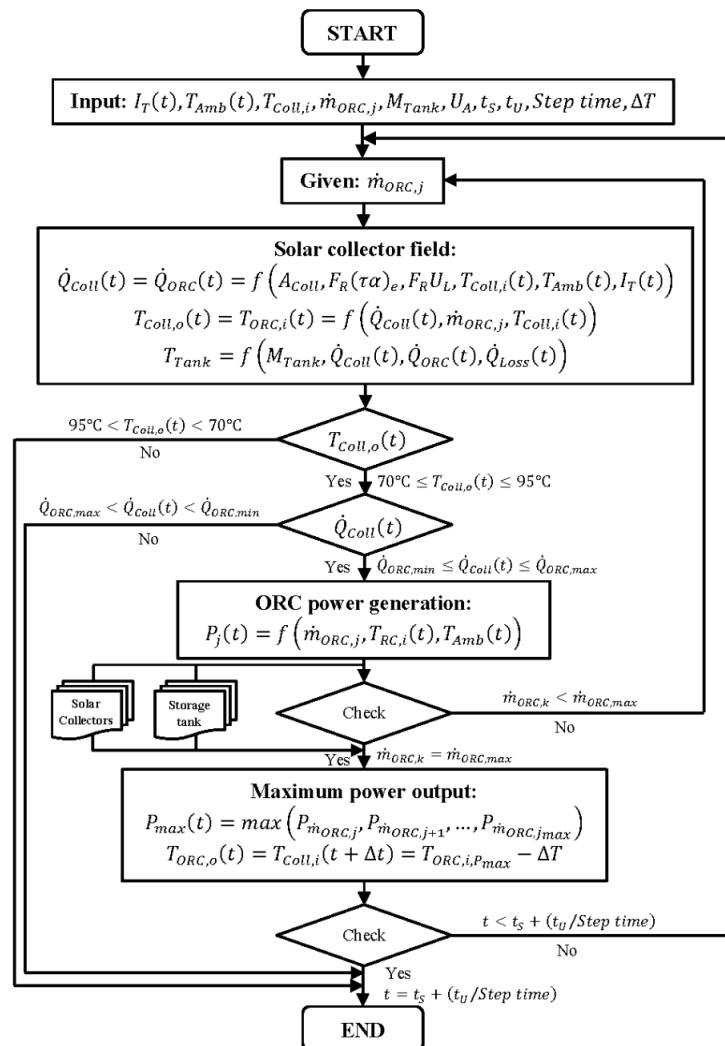
- (ก) Model: HR20W ขนาด 20 kW_e ของ บริษัท IHI (IHI Rotating Machinery Engineering, 2017)
- (ข) Model: MB-70H ขนาด 60 kW_e ของ บริษัท KOBELCO (KOBELCO, 2017)

ภาพที่ 3 ระบบผลิตไฟฟ้าด้วยวัฏจักรแรงคิน

3.5 ปริมาณรังสีอาทิตย์ และอุณหภูมิแวดล้อม: กรุงเทพฯ

3.6 โปรแกรมที่ใช้สำหรับการคำนวณแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ คือ โปรแกรม MATLAB

3.7 ขั้นตอนการคำนวณของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบผลิตไฟฟ้าด้วยวัฏจักรแรงคินขนาดเล็กแสดงดังภาพที่ 4 ข้อมูลปริมาณรังสีอาทิตย์ (I_T) อุณหภูมิแวดล้อม (T_{Amb}) ขนาดถึงน้ำร้อน (M_{Tank}) และคุณลักษณะของระบบผลิตไฟฟ้าด้วยวัฏจักรแรงคิน จะถูกป้อนให้กับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อใช้คำนวณหาอัตราความร้อนที่ผลิตได้จากตัวเก็บรังสีอาทิตย์ ($\dot{Q}_{Coll}$) อุณหภูมิน้ำร้อนในถังน้ำร้อน (T_{Tank}) และพลังงานไฟฟ้าที่วัฏจักรแรงคินผลิตได้ (P) โดยในขั้นตอนดังกล่าว ข้อมูลต่างๆ เช่น จำนวนตัวเก็บรังสีอาทิตย์ พลังงานไฟฟ้า และขนาดถึงน้ำร้อน จะถูกบันทึก ก่อนที่จะนำมาประมวลผลเพื่อหาค่าที่ดีที่สุดที่สามารถทำให้ระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าได้สูงสุด



ภาพที่ 4 ขั้นตอนการคำนวณในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบผลิตไฟฟ้าด้วยวัฏจักรแรงคิน

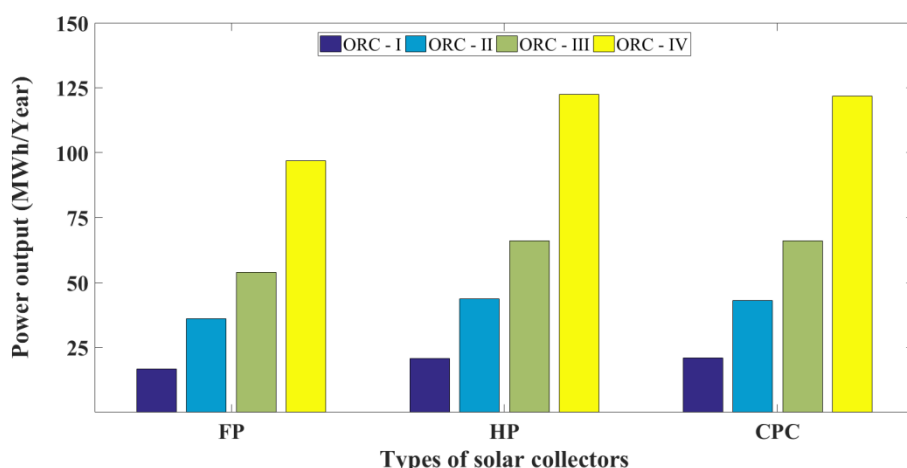
4. ผลการวิจัย

4.1 พลังงานไฟฟ้าที่ระบบผลิตได้

พลังงานไฟฟ้าที่ระบบผลิตได้จะขึ้นอยู่กับชนิดของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ จำนวนตัวเก็บรังสีอาทิตย์ ขนาดของถังเก็บสะสมความร้อน และอัตราการไหลของน้ำร้อนที่เหมาะสม โดยปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ระบบผลิตได้จะเพิ่มสูงขึ้นเมื่อจำนวนตัวเก็บรังสีอาทิตย์เพิ่มสูงขึ้น นอกจากนี้เมื่อกำลังการผลิตของระบบผลิตไฟฟ้าด้วยวัฏจักรแรงคินสูงขึ้น ระบบก็จะสามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้มากขึ้น โดยพลังงานไฟฟ้าที่ระบบผลิตได้สูงสุด จำนวนตัวเก็บรังสีอาทิตย์ และขนาดของถังเก็บสะสมความร้อนที่มีความเหมาะสม แสดงดังตารางที่ 1 ผลที่ได้จากการศึกษาพบว่า ที่ขนาดกำลังการผลิตของระบบผลิตไฟฟ้าด้วยวัฏจักรแรงคินเท่ากัน ระบบผลิตไฟฟ้าจะผลิตไฟฟ้าได้สูงสุดเมื่อระบบใช้ตัวเก็บ

รังสีอาทิตย์แบบทอสุญญากาศ โดยระบบจะสามารถผลิตไฟฟ้าได้เพิ่มสูงขึ้นเมื่อกำลังการผลิตไฟฟ้าของวัฏจักรแรงคินมีขนาดกำลังการผลิตเพิ่มสูงขึ้น

จากตารางที่ 1 เมื่อตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นเรียบ, ตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบทอสุญญากาศ, และตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบรูปประกอบพาราโบลา ตัวเก็บรังสีอาทิตย์มีจำนวน 1,150 930 และ 830 แผง และถังเก็บสะสมความร้อนมีขนาด 7,500 2,500, และ 2,500 ลิตร ตามลำดับ ถูกนำมาผลิตน้ำร้อนป้อนให้กับระบบผลิตไฟฟ้าด้วยวัฏจักรแรงคินที่มีกำลังการผลิต 40 kW_e (ขนาด 20 kW_e จำนวน 2 เครื่อง) ระบบจะสามารถผลิตไฟฟ้าได้เท่ากับ 35.98, 43.68, และ 43.01 MWh/Year ตามลำดับ กรณีพิจารณาตัวเก็บรังสีอาทิตย์ชนิดเดียวกัน เมื่อตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบทอสุญญากาศผลิตน้ำร้อนป้อนให้กับระบบผลิตไฟฟ้าด้วยวัฏจักรแรงคินที่มีกำลังการผลิต 20 kW_e (ขนาด 20 kW_e จำนวน 1 เครื่อง), 40 kW_e (ขนาด 20 kW_e จำนวน 2 เครื่อง), 60 kW_e (ขนาด 20 kW_e จำนวน 3 เครื่อง), และ 60 kW_e (ขนาด 60 kW_e จำนวน 1 เครื่อง) พบว่า ระบบจะสามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้เพิ่มสูงขึ้นเท่ากับ 20.78, 43.68, 66.09, และ 122.38 MWh/Year ตามลำดับ ภาพที่ 5 แสดงการเปรียบเทียบพลังงานไฟฟ้าสูงสุดของแต่ละระบบผลิตได้ จากรูปแสดงให้เห็นว่าเมื่อขนาดกำลังการผลิตติดตั้งของระบบผลิตไฟฟ้าด้วยวัฏจักรแรงคินมีขนาดกำลังการผลิตที่สูงขึ้นระบบจะสามารถผลิตไฟฟ้าได้สูงขึ้น



ภาพที่ 5 ผลเปรียบเทียบพลังงานไฟฟ้าสูงสุดของแต่ละระบบที่ผลิตได้ (MWh/Year)

4.2 การลดการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂ emission)

สำหรับงานวิจัยนี้ตัวประกอบค่าคงที่ของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีค่าเท่ากับ 0.497 kg CO₂ eq./kWh (สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน กระทรวงพลังงาน, 2560) (Energy Policy and Planning office of Ministry of Energy, 2017) ได้ถูกนำมาใช้ในการคำนวณหาปริมาณการลดการ

ปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของระบบ ในการคำนวณสามารถนำค่าดังกล่าวคูณกับปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่แต่ละระบบผลิตได้ (MWh/Year) ผลการศึกษาแสดงดังตารางที่ 1 พบว่า การลดการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จะเพิ่มขึ้นตามปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ โดยเมื่อตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบท่อความร้อนผลิตน้ำร้อนป้อนให้กับระบบผลิตไฟฟ้าด้วยวัฏจักรแรงดัน ระบบจะสามารถช่วยลดการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้มากที่สุด รองลงมา คือ ตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบรูปประกอบพาราโบลา และตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นเรียบ จากตารางที่ 1 เมื่อตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบท่อสุญญากาศผลิตน้ำร้อนป้อนให้กับระบบผลิตไฟฟ้าด้วยวัฏจักรแรงดันทั้ง 4 ระบบ (SORC-I, SORC-II, SORC-III, และ SORC-IV) ที่มีกำลังการผลิต 20, 40, 60, และ 60 kW_e พบว่า ระบบจะสามารถลดการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้เท่ากับ 11.39, 23.94, 36.22, และ 67.06 Ton CO₂ eq./Year ตามลำดับ

4.3 ค่าพลังงานไฟฟ้าต่อหน่วย (LCOE)

ผลที่ได้จากการศึกษา พบว่า ค่าพลังงานไฟฟ้าต่อหน่วยของระบบมีแนวโน้มลดลงเมื่อจำนวนตัวเก็บรังสีอาทิตย์มีจำนวนเพิ่มมากขึ้น โดยค่าพลังงานไฟฟ้าต่อหน่วยของระบบจะลดลงไปจนถึงค่าที่มีความเหมาะสมก่อนที่จะเพิ่มสูงขึ้นตามจำนวนตัวเก็บรังสีอาทิตย์ที่เพิ่มสูงขึ้น จากตารางที่ 1 ผลการศึกษาพบว่า ระบบเมื่อใช้ตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นเรียบผลิตความร้อนป้อนให้กับระบบผลิตไฟฟ้าด้วยวัฏจักรแรงดันที่มีขนาดกำลังการผลิต 60 kW_e จำนวน 1 เครื่อง ระบบจะมีค่าพลังงานไฟฟ้าต่อหน่วยต่ำที่สุด โดยจะมีค่าพลังงานไฟฟ้าต่อหน่วยเท่ากับ 0.999 USD/kWh ทั้งนี้ก็เนื่องมาจากค่าใช้จ่ายต่อตารางเมตรของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นเรียบมีค่าใช้จ่ายที่ถูกลงนั่นเอง

ตารางที่ 1 แสดงพลังงานไฟฟ้า (MWh/Year), การลดการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (Ton CO₂ eq./Year), พลังงานไฟฟ้าต่อหน่วย (USD/kWh) ที่จำนวนตัวเก็บรังสีอาทิตย์ (แผง) และขนาดถังน้ำร้อน (ลิตร) ที่มีความเหมาะสมของระบบผลิตไฟฟ้า

	FP-SORC			
	I	II	III	IV
Power (MWh/Year)	16.79	35.98	53.96	97.02
Solar collectors (Units)	570	1150	1740	2000
Size of the TES--1	5000	7500	10000	42500
CO ₂ Emission	9.20	19.72	29.57	53.17
LCOE	1.493	1.208	1.346	0.999
	ET-SORC			
	I	II	III	IV
Power (MWh/Year)	20.78	43.68	66.09	122.38
Solar collectors (Units)	470	930	1410	1930
Size of the TES--1	2500	2500	7500	50000
CO ₂ Emission	11.39	23.94	36.22	67.06
LCOE	1.531	1.321	1.361	1.059
	CPC-SORC			
	I	II	III	IV
Power (MWh/Year)	20.95	43.01	66.09	121.72
Solar collectors (Units)	420	830	1410	1700
Size of the TES--1	2500	2500	7500	50000
CO ₂ Emission	11.48	23.57	36.22	66.70
LCOE	1.566	1.366	1.509	1.074

นอกจากนี้ผลที่ได้จากการศึกษายังได้ถูกนำไปเปรียบเทียบกับระบบผลิตไฟฟ้าแบบรวมแสงอาทิตย์ (CSP technology) และระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ (Solar photovoltaic) ที่มีค่าพลังงานไฟฟ้าต่อหน่วยระหว่าง 0.20 ถึง 0.35 USD/kWh และ 0.14 ถึง 0.47 USD/kWh ตามลำดับ ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าค่าพลังงานไฟฟ้าต่อหน่วยของระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานความร้อนแสงอาทิตย์โดยวัฏจักรแรงดันขนาดเล็กยังไม่ค่อยมีความน่าสนใจ เนื่องจากค่าพลังงาน

ไฟฟ้าต่อหน่วยที่มีค่าค่อนข้างสูง ดังนั้นในอนาคตถ้าราคาของเทคโนโลยีมีแนวโน้มลดลง ประกอบกับภาครัฐได้ให้การสนับสนุนค่าใช้จ่ายในส่วนของตัวเองเก็บรังสีอาทิตย์ หรือแม้กระทั่งระบบผลิตไฟฟ้าด้วยวัฏจักรแรงดัน ระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์ในรูปของอุณหภูมิต่ำก็จะเกิดความน่าสนใจมากยิ่งขึ้น

5. สรุปผลและการอภิปรายผล

5.1 ระบบผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์โดยวัฏจักรแรงดันขนาดเล็ก (Small-scale SORC power plant) สามารถที่จะนำมาประยุกต์เพื่อผลิตพลังงานไฟฟ้าใน กรุงเทพฯ ได้

5.2 ตัวเก็บรังสีอาทิตย์ที่เหมาะสมที่สุดที่ส่งผลให้ค่าพลังงานไฟฟ้าต่อหน่วยต่ำที่สุด คือ ตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นเรียบโดยปริมาณการลดการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์นั้นจะขึ้นอยู่กับปริมาณไฟฟ้าที่ระบบผลิตได้ โดยระบบผลิตไฟฟ้าเมื่อใช้ตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบท่อสุญญากาศผลิตน้ำร้อนป้อนให้กับวัฏจักรแรงดันที่มีกำลังการผลิต 60 kW_e จำนวน 1 เครื่อง จะสามารถช่วยลดการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้สูงที่สุด เนื่องระบบสามารถผลิตไฟฟ้าได้สูงที่สุด

5.3 เมื่อระบบได้รับการสนับสนุนเงินลงทุนไม่ว่าจะเป็น ตัวเก็บรังสีอาทิตย์ และ/หรือ ระบบผลิตไฟฟ้าด้วยวัฏจักรแรงดันจะทำให้ระบบมีความน่าสนใจ และน่าลงทุนมากยิ่งขึ้น

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสาขาเทคโนโลยีอุตสาหกรรม วิชาเอกเทคโนโลยีวิศวกรรมเครื่องกล คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม สำหรับสถานที่ทำงานวิจัย

7. เอกสารอ้างอิง

กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน. (2560). **คู่มือการพัฒนาและการ**

ลงทุนผลิตพลังงานทดแทน ชุดที่ 2: พลังงานแสงอาทิตย์. ค้นจาก http://www.dede.go.th/article_attach/h_solar.pdf

สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน กระทรวงพลังงาน. (2560). **รายงานสถิติพลังงานของประเทศ ไทย 2560.** ค้นจาก

<http://www.eppo.go.th/index.php/en/component/k2/item/12949-energy-statistics-2560>

Department of Alternative Energy Development and Efficiency of Ministry of Energy. (2017). **Guide to the development and investment of renewable energy**

- production, Series 2: Solar Energy**, Retrieved from http://www.dede.go.th/article_attach/h_solar.pdf (in Thai)
- Energy Policy and Planning office of Ministry of Energy. (2017). **Energy statistics of thailand 2017**. Retrieved from <http://www.eppo.go.th/index.php/en/component/k2/item/12949-energy-statistics-2560> (in Thai)
- IHI Rotating Machinery Engineering. (2017). **ORC power generation, model: HR20W**. Retrieved from <http://www.ihi.co.jp/compressor/binary/index.html>
- KOBELCO. (2017). **ORC power generation, model: MB-70H**. Retrieved from http://www.kobelco.co.jp/products/standard_compressors/microbinary/files/microbinary_catalog.pdf
- 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**, doi:10.1080/23311916.2017.1359397
- Sonsaree, S., Asaoka, T., Jiajitsawat, S., Aguirre, H., & Tanaka, K. (2018). A small-scale solar Organic Rankine Cycle power plant in Thailand: Three types of non-concentrating solar collectors. **Solar Energy**, 162, 541-560.
- 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. **International Conference on Cogeneration, Small Power Plants and District Energy (ICUE)**, Bangkok, doi: 10.1109/COGEN.2016.7728939