

การวิเคราะห์ประสิทธิภาพด้านพลังงานและเอ็กเซอร์จีของวัฏจักรแรงดันอินทรีย์ ร่วมกับระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน

ASSESSMENT OF ENERGY AND EXERGY EFFICIENCIES OF AN ORGANIC RANKINE CYCLE COMBINED WITH AN ABSORPTION REFRIGERATION

Bounkhamxiong Navongxay¹,

หัฐพร ไชยญาติ¹

จักรพันธ์ ถาวรงามยิ่งสกุล²

ชวโรจน์ ใจสิน¹

¹ วิทยาลัยพลังงานทดแทน

มหาวิทยาลัยแม่โจ้

² คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัย

เทคโนโลยีราชมงคลล้านนา

วิทยาเขตตาก

*Email: benz178tii@hotmail.com,

+66(0) 882523088

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพด้านพลังงานและเอ็กเซอร์จีของวัฏจักรแรงดันอินทรีย์ โดยการลดอุณหภูมิสารทำงานที่เครื่องควบแน่น ร่วมกับระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนใน 2 รูปแบบการต่อรวม คือ รูปแบบที่ 1 นำระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนมาลดอุณหภูมิสารทำงานบริเวณทางออกของเครื่องขยายก่อนเข้าสู่เครื่องควบแน่น และรูปแบบที่ 2 นำระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนมาใช้เป็นเครื่องควบแน่นในวัฏจักรแรงดันอินทรีย์ โดยสารทำงานที่ใช้ในวัฏจักรแรงดันอินทรีย์ คือ R-245fa และคู่สารทำงานที่ใช้ในระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน คือ สารละลายน้ำ-ลิเทียมโบรไมด์ ผลการศึกษาพบว่า ประสิทธิภาพด้านพลังงานและเอ็กเซอร์จีของวัฏจักรแรงดันอินทรีย์ก่อนการปรับปรุงมีค่าประมาณ 7.01% และ 11.66% ตามลำดับ ที่อุณหภูมิน้ำร้อนเข้าหอต้มในช่วง 80-120 °C และอุณหภูมิสารทำงานที่ออกจากเครื่องขยายของวัฏจักรแรงดันอินทรีย์มีค่ามากกว่า 57 °C เมื่อมีการต่อระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนร่วมแบบที่ 1 พบว่า มีประสิทธิภาพด้านพลังงานและเอ็กเซอร์จีประมาณ 10.39% และ 18.25% ตามลำดับ ในขณะที่รูปแบบที่ 2 มีค่าประมาณ 3.03% และ 4.07% ตามลำดับ แต่ในรูปแบบที่ 2 จะมีประสิทธิภาพรวมในการผลิตไฟฟ้ารวมกับการทำความเย็นด้านพลังงานและเอ็กเซอร์จีประมาณ 22.47% และ 48.25% ตามลำดับ

คำสำคัญ: วัฏจักรแรงดันอินทรีย์ การทำความเย็นแบบดูดกลืน ประสิทธิภาพพลังงาน ประสิทธิภาพเอ็กเซอร์จี แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

Abstract

This research studies enhancement of energy and exergy efficiencies of an organic Rankine cycle (ORC) by reducing the working fluid temperature at the ORC condenser combined with an absorption refrigeration. Two ORC-absorption models have been presented for comparing with the normal ORC model. The first model presents the technique for reducing working fluid temperature leaving the ORC expander before entering the ORC condenser, while the second model presents the absorption system as the ORC condenser. Working fluid of the ORC and absorption systems is R-245fa and water-lithium bromide solution (H₂O-LiBr), respectively. From the study results, it could be found that the energy and exergy efficiencies of the normal ORC system are 7.01% and 11.66% at hot water temperatures entering the ORC boiler between 80-90 °C and the refrigerant temperature leaving the ORC expander is higher than 70 °C. When the ORC-absorption model 1 is focused, the energy and exergy efficiencies are 10.39% and 18.25%, while the ORC-absorption model 2 illustrates 3.03% and 4.07%, respectively. But in the last model, it could be presented the overall energy and exergy efficiencies of combined cooling and power are 22.47% and 48.25%.

Keywords: organic Rankine cycle, absorption refrigeration, energy efficiency, exergy efficiency, mathematical model

1. บทนำ

ปัจจุบันมีการส่งเสริมการนำพลังงานทดแทนมาใช้ลดเชื้อเพลิงฟอสซิลให้เกิดความยั่งยืน คุ่มค่าในด้านเศรษฐศาสตร์เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม และมีความหลากหลายมากขึ้น [1] ซึ่งวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ (Organic Rankine cycle, ORC) และระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน (Absorption refrigeration) เป็นหนึ่งในเทคโนโลยีพลังงานทดแทนที่ถูกพัฒนาเพื่อนำมาใช้ผลิตกระแสไฟฟ้าและทำความเย็นที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม สามารถทดแทนการผลิตพลังงานไฟฟ้าและทำความเย็นจากเชื้อเพลิงฟอสซิลได้ โดยทั้งสองระบบเป็นเทคโนโลยีที่สามารถใช้แหล่งความร้อนคุณภาพต่ำมาขับเคลื่อนการทำงานได้ เช่น แหล่งความร้อนจากพลังงานความร้อนใต้พิภพ [2] พลังงานแสงอาทิตย์ [3,4] ความร้อนเหลือทิ้ง [5,6] เชื้อเพลิงขยะ [7] และพลังงานชีวมวล [8] เป็นต้น

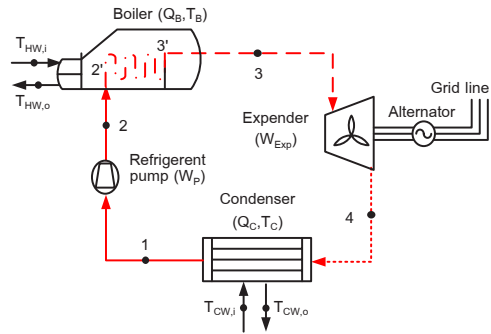
Inthavideth and Chaiyat [9,10] นำเสนอรูปแบบการเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ร่วมกับระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน สอดคล้องกับงานวิจัยของ Chaiyat and Kiatsiriroat [11] ที่นำเสนอการเพิ่มประสิทธิภาพของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ร่วมกับระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน ซึ่งทั้ง 3 งานวิจัยดังกล่าว สามารถเพิ่มประสิทธิภาพของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ได้ประมาณ 7% ในขณะที่ Bellos and Tzivanidis [12,13] นำเสนอการเพิ่มประสิทธิภาพของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ ร่วมกับการทำความเย็นและความร้อน (Tri-generation) โดยใช้สารทำงาน 8 ชนิด ในการทดสอบหาจุดการทำงานร่วมที่เหมาะสม Bicer and Dincer [14,15] นำเสนอการประเมินประสิทธิภาพด้านพลังงานและเอ็กเซอร์จี (Exergy) ของระบบการผลิตร่วมแบบหลากหลาย (Multi-generation) โดยใช้ความร้อนจากพลังงานใต้พิภพและพลังงานแสงอาทิตย์

จากการศึกษางานวิจัยข้างต้น พบว่า ยังไม่มีงานวิจัยใดนำเสนอการหารูปแบบการทำงานร่วมที่เหมาะสมที่สุด ด้านประสิทธิภาพด้านพลังงานและเอ็กเซอร์จี ของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์กับระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน โดยการลดอุณหภูมิสารทำงานบริเวณทางออกของเครื่องขยายก่อนเข้าสู่เครื่องควบแน่น เพื่อเพิ่มการระบายความร้อนและลดอุณหภูมิของสารทำงานที่เครื่องควบแน่นในวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ ซึ่งเป็นวัตถุประสงค์หลักสำคัญของงานวิจัยนี้

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 วัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์

วัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์มีอุปกรณ์ต่าง ๆ ภายในระบบ ดังแสดงในรูปที่ 1 ซึ่งสมการทางคณิตศาสตร์ทางด้านพลังงานของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ พิจารณาได้ดังสมการต่อไปนี้ [16]



รูปที่ 1 แผนภาพการทำงานของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์

- หม้อต้ม (Boiler)

$$Q_B = \dot{m}_{ref} (h_3 - h_2) \quad (1)$$
- เครื่องขยาย (Expander)

$$W_{Exp} = \dot{m}_{ref} (h_3 - h_1) \quad (2)$$
- เครื่องควบแน่น (Condenser)

$$Q_C = \dot{m}_{ref} (h_4 - h_1) \quad (3)$$
- ปั๊มสารทำงาน (Solution pump)

$$W_P = \frac{\dot{m}_{ref} V_1 (P_H - P_L)}{\eta_{S,P}} \quad (4)$$
- ประสิทธิภาพด้านพลังงาน (Energy efficiency)

$$\eta_{ORC} = \frac{W_{Exp} - W_P}{Q_B} \quad (5)$$

สมการทางคณิตศาสตร์ด้านเอ็กเซอร์จีของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ แสดงดังต่อไปนี้

- หม้อต้ม

$$\dot{E}_B = Q_B \left(1 - \frac{T_0}{T_{HW,i}} \right) \quad (6)$$
- เครื่องขยาย

$$\dot{E}_{Exp} = \dot{m}_{ref} (h_3 - h_4 - T_0 [S_3 - S_4]) \quad (7)$$
- เครื่องควบแน่น

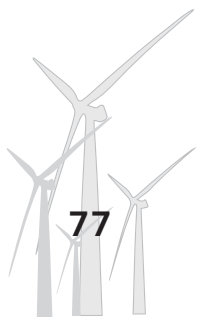
$$\dot{E}_C = \dot{m}_{ref} (h_4 - h_1 - T_0 [S_4 - S_1]) \quad (8)$$
- ปั๊มสารละลาย

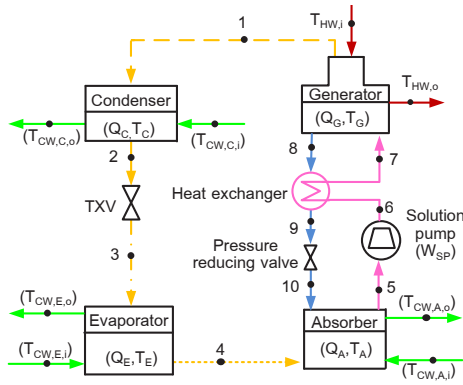
$$\dot{E}_P = \dot{m}_{ref} (h_2 - h_1 - T_0 [S_2 - S_1]) \quad (9)$$
- ประสิทธิภาพด้านเอ็กเซอร์จี (Exergy efficiency)

$$\Psi_{ORC} = \frac{\dot{E}_{Exp} - \dot{E}_P}{\dot{E}_B} \quad (10)$$

2.2 ระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน

ระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนมีอุปกรณ์ต่าง ๆ ภายในระบบ ดังแสดงในรูปที่ 2 ซึ่งสมการทางคณิตศาสตร์ด้านพลังงานของระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนแสดงได้ดังต่อไปนี้ [16]





รูปที่ 2 แผนภาพการทำงานของระบบทำความเย็นดูดกลืน

- เจนเนอเรเตอร์ (Generator)

$$Q_G = \dot{m}_1 h_1 + \dot{m}_8 h_8 - \dot{m}_7 h_7 \quad (11)$$

- เครื่องควบแน่น (Condenser)

$$Q_{C,AB} = \dot{m}_1 h_1 - \dot{m}_2 h_2 \quad (12)$$

- เครื่องระเหย (Evaporator)

$$Q_E = \dot{m}_4 h_4 - \dot{m}_3 h_3 \quad (13)$$

- แอ็บซอร์บเนอร์ (Absorber)

$$Q_A = \dot{m}_4 h_4 + \dot{m}_{10} h_{10} - \dot{m}_5 h_5 \quad (14)$$

- ปั๊มสารละลาย (Solution pump)

$$W_{SP} = \frac{\dot{m}_5 V_5 (P_{H,AB} - P_{L,AB})}{\eta_{SP}} \quad (15)$$

- อัตราส่วนการไหล (Flow ratio, FR)

$$FR = \frac{\dot{m}_5}{\dot{m}_{ref}} \quad (16)$$

- ค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะด้านพลังงาน

$$COP_{AB} = \frac{Q_{Exp}}{Q_G + W_{SP}} \quad (17)$$

สมการทางคณิตศาสตร์ด้านเอ็กเซอร์จี้ของระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน แสดงได้ดังต่อไปนี้

- เจนเนอเรเตอร์

$$\dot{E}_G = \dot{m}_7 (h_7 - T_0 S_7) - \dot{m}_8 (h_8 - T_0 S_8) - \dot{m}_1 (h_1 - T_0 S_1) + Q_G \left(1 - \frac{T_0}{T_G}\right) \quad (18)$$

- เครื่องควบแน่น

$$\dot{E}_{C,AB} = \dot{m}_{ref} (h_1 - h_2 - T_0 (S_1 - S_2)) \quad (19)$$

- เครื่องระเหย

$$\dot{E}_E = \dot{m}_{ref} (h_4 - h_3 - T_0 [S_4 - S_3]) + Q_E \left(1 - \frac{T_0}{T_E}\right) \quad (20)$$

- แอ็บซอร์บเนอร์

$$\dot{E}_A = \dot{m}_4 (h_4 - T_0 S_4) + \dot{m}_{10} (h_{10} - T_0 S_{10}) - \dot{m}_5 (h_5 - T_0 S_5) \quad (21)$$

- ปั๊มสารละลาย

$$\dot{E}_P = \dot{m}_{ref} (h_6 - h_5 - T_0 [S_6 - S_5]) \quad (22)$$

- ค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะด้านเอ็กเซอร์จี้

$$COP_{ex,AB} = \frac{\dot{E}_{Exp}}{\dot{E}_G + \dot{E}_{SP}} \quad (23)$$

3. วิธีการดำเนินงานวิจัย

วิธีการดำเนินงานวิจัยครั้งนี้ มีขั้นตอนดังต่อไปนี้

3.1 สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ โดยมีเงื่อนไขเริ่มต้นดังต่อไปนี้

- สารทำงาน คือ R-245fa
- ปริมาณความร้อนที่หม้อต้ม (Q_B) เท่ากับ 180 kW
- อุณหภูมิน้ำร้อนที่ป้อนเข้าวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ ($T_{HW,i}$) เท่ากับ 80-120 °C
- อุณหภูมิน้ำระบายความร้อนเข้าเครื่องควบแน่น ($T_{CW,i}$) เท่ากับ 32 °C
- อุณหภูมิน้ำร้อนที่เข้าและออกจากหม้อต้ม ($T_{HW,i} - T_{HW,o}$) เท่ากับ 15 °C
- อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม (T_{Amb}) เท่ากับ 28 °C
- สมบัติของสารทำงานที่สภาวะต่าง ๆ อ้างอิงจากโปรแกรม Refprop [17]

3.2 สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน โดยมีเงื่อนไขเริ่มต้นดังต่อไปนี้

- คู่สารทำงาน คือ สารละลายน้ำ-ลิเทียมโบรมाइด์
- อัตราส่วนการไหล (Flow ratio, FR) ไม่เกิน 20 [18]
- อุณหภูมิ R-245fa ของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ลดลงที่เจเนอเรเตอร์ของระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน ($\Delta T_{R-245fa,G}$) เท่ากับ 5 °C

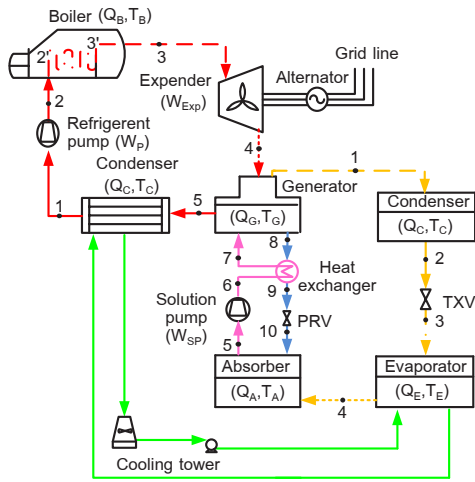
3.3 วิเคราะห์ประสิทธิภาพด้านพลังงานและเอ็กเซอร์จี้ของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ร่วมกับระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนแบบที่ 1 ดังแสดงในรูปที่ 3 และสมการต่อไปนี้

ประสิทธิภาพด้านพลังงานของระบบร่วมแบบที่ 1

$$\eta_{ORC-AB} = \frac{W_{Exp}}{Q_B + W_P + W_{SP}} \quad (24)$$

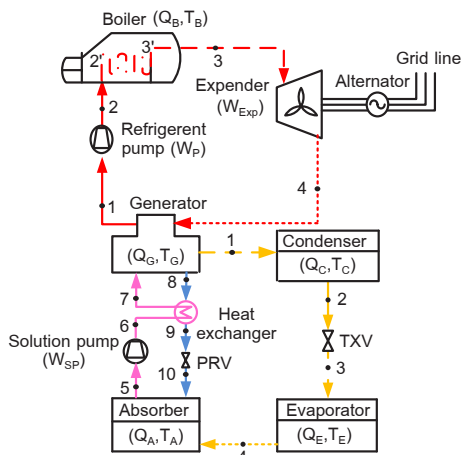
ประสิทธิภาพด้านเอ็กเซอร์จี้ของระบบร่วมแบบที่ 1

$$\Psi_{ORC-AB} = \frac{\dot{E}_{Exp}}{\dot{E}_B + \dot{E}_P + \dot{E}_{SP}} \quad (25)$$



รูปที่ 3 วัฏจักรแรงจลนศาสตร์อินทรีย์ร่วมกับระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนแบบที่ 1

3.4 วิเคราะห์ประสิทธิภาพด้านพลังงานและเอ็กเซอร์จี้ของวัฏจักรแรงจลนศาสตร์อินทรีย์ร่วมกับระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนแบบที่ 2 ดังแสดงในรูปที่ 4 และสมการต่อไปนี้



รูปที่ 4 วัฏจักรแรงจลนศาสตร์อินทรีย์ร่วมกับระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนแบบที่ 2

ประสิทธิภาพด้านพลังงานของระบบรวมแบบที่ 2

$$\eta_{ORC-AB} = \frac{W_{Exp} + Q_E}{Q_B + W_p + W_{SP}} \quad (26)$$

ประสิทธิภาพด้านเอ็กเซอร์จี้ของระบบรวมแบบที่ 2

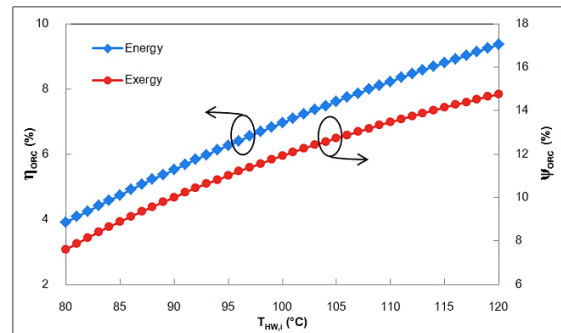
$$\Psi_{ORC-AB} = \frac{\dot{E}_{Exp} + \dot{E}_E}{\dot{E}_B + \dot{E}_p + \dot{E}_{SP}} \quad (27)$$

3.5 เปรียบเทียบประสิทธิภาพวัฏจักรแรงจลนศาสตร์อินทรีย์ก่อนการปรับปรุง และระบบรวมแบบที่ 1 และ 2

4. ผลและอภิปรายผลการศึกษา

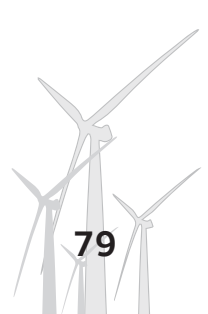
4.1 ผลการจำลองทางคณิตศาสตร์ของวัฏจักรแรงจลนศาสตร์อินทรีย์

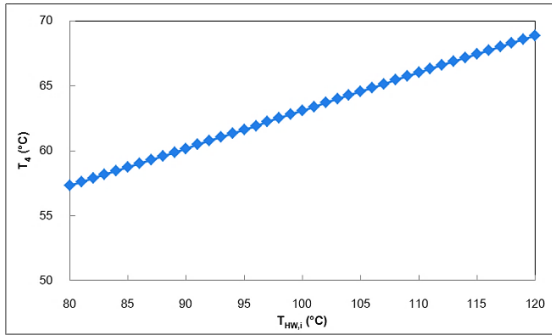
รูปที่ 5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพด้านพลังงานและเอ็กเซอร์จี้ของวัฏจักรแรงจลนศาสตร์อินทรีย์กับอุณหภูมิน้ำร้อนที่ป้อนเข้าหม้อต้มในช่วง 80-120 °C โดยมีอุณหภูมิระบายความร้อน 32 °C โดยผลการคำนวณพบว่า เมื่ออุณหภูมิน้ำร้อนที่ป้อนเข้าหม้อต้มมีค่าเพิ่มสูงขึ้น จะทำให้ประสิทธิภาพของระบบทั้งด้านพลังงานและด้านเอ็กเซอร์จี้เพิ่มสูงขึ้นตามไปด้วย เนื่องจากสารทำงานบริเวณทางเข้าของเครื่องขยายมีอุณหภูมิสูงขึ้น จึงส่งผลให้งานที่ผลิตได้จากเครื่องขยายเพิ่มขึ้น ดังนั้นประสิทธิภาพด้านพลังงานและเอ็กเซอร์จี้ของวัฏจักรแรงจลนศาสตร์อินทรีย์ จึงมีค่าเพิ่มขึ้นตามไปด้วย มีค่าประมาณ 7.01% และ 11.66% ตามลำดับ และค่าประสิทธิภาพด้านเอ็กเซอร์จี้มีค่าสูงกว่าประสิทธิภาพด้านพลังงานประมาณ 7% ในทุกเงื่อนไขการคำนวณ



รูปที่ 5 ประสิทธิภาพด้านพลังงานและเอ็กเซอร์จี้ของวัฏจักรแรงจลนศาสตร์อินทรีย์ต่ออุณหภูมิน้ำร้อนที่ป้อนให้แก่หม้อต้มในช่วง 80-120 °C

นอกจากนั้นยังพบอีกว่า อุณหภูมิ R-245fa บริเวณทางออกของเครื่องขยายตัวก่อนเข้าเครื่องควบแน่น (T₄) ของวัฏจักรแรงจลนศาสตร์อินทรีย์มีค่าอยู่ในช่วง 57-68 °C เมื่อป้อนอุณหภูมิน้ำร้อนที่หม้อต้ม 80-120 °C ดังแสดงในรูปที่ 6 ซึ่งอุณหภูมิสารทำงานดังกล่าวมีผลโดยตรงต่อการทำงานของระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน เนื่องจากอุณหภูมิสารทำงานที่ออกจากเครื่องขยายตัว จะเป็นแหล่งพลังงานความร้อนให้แก่ระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนต่อไป

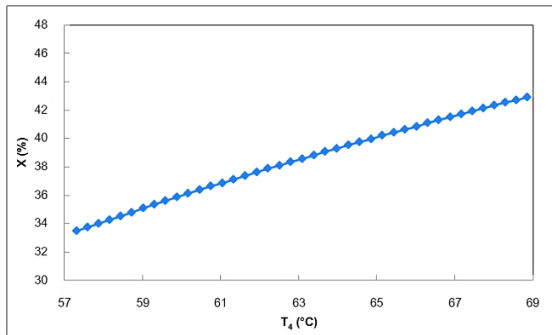




รูปที่ 6 อุณหภูมิสารทำงานที่ออกของเครื่องขยายตัวต่ออุณหภูมิ น้ำร้อนที่ป้อนเข้าหม้อต้มในช่วง 80-120 °C

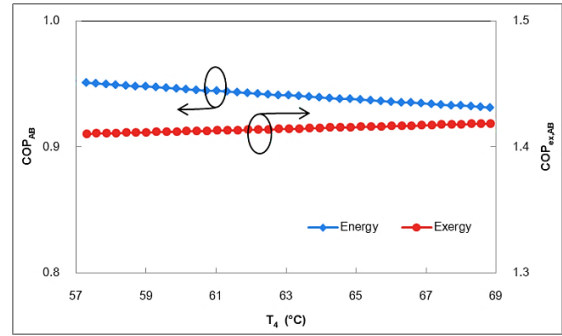
4.2 ผลการจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบการทำความเย็นแบบดูดกลืน

เมื่อนำผลการศึกษาในรูปที่ 6 มาวิเคราะห์ร่วมกับการทำงานของระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน พบว่า ความเข้มข้นสารละลายน้ำ-ลิเทียมโบรไมด์ที่เจเนอเรเตอร์ ($X_G = X_8$) ที่น้อยที่สุด ที่สามารถทำให้ระบบทำความเย็นเริ่มต้นทำงานได้ที่ค่าสัดส่วนการไหล (FR) มากกว่า 20 คือ ค่าความเข้มข้น 34-43 %Libr ดังแสดงในรูปที่ 7 ดังนั้นในงานวิจัยนี้จะเลือกใช้ค่าความเข้มข้นที่เจเนอเรเตอร์เท่ากับ 34 %Libr



รูปที่ 7 ความสัมพันธ์อุณหภูมิสารทำงานที่ออกจากเครื่องขยายตัวกับความเข้มข้นของสารละลายน้ำ-ลิเทียมโบรไมด์ที่เจเนอเรเตอร์

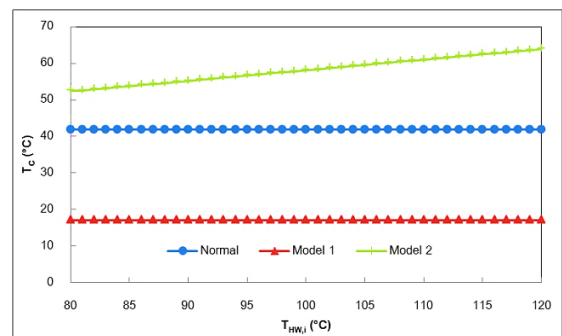
โดยผลการวิเคราะห์ระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน พบว่า ที่อุณหภูมิสารทำงาน R-245fa ในช่วง 57-68 °C ที่ค่าความเข้มข้นสารละลายน้ำ-ลิเทียมโบรไมด์ที่เจเนอเรเตอร์ 34 %Libr สามารถใช้เป็นแหล่งพลังงานความร้อนให้แก่ระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนได้ โดยมีค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะด้านพลังงานและเอ็กเซอร์จีที่เกือบคงที่ประมาณ 0.95 และ 1.41 ตามลำดับ ซึ่งการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิแหล่งความร้อนดังกล่าว มีผลต่อการถ่ายเทความร้อนของอุปกรณ์หลักในระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนค่อนข้างน้อย จึงทำให้ค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะด้านพลังงานลดลงและเอ็กเซอร์จีค่อนข้างคงที่



รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์สมรรถนะของระบบการทำความเย็นแบบดูดกลืนต่ออุณหภูมิแหล่งความร้อน

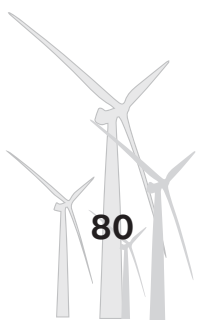
4.3 ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ก่อนและหลังการปรับปรุง

ผลการเปรียบเทียบอุณหภูมิสารทำงานที่เครื่องควบแน่นของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ก่อนและหลังการปรับปรุง ที่อุณหภูมิ น้ำร้อนป้อนให้แก่หม้อต้มในช่วง 80-120 °C พบว่า เมื่ออุณหภูมิ น้ำร้อนที่ป้อนให้วัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์มีค่าเพิ่มขึ้น จะส่งผลให้อุณหภูมิสารทำงานที่เครื่องควบแน่น (T_c) ของระบบก่อนการปรับปรุงและระบบหลังการปรับปรุงแบบที่ 1 มีค่าค่อนข้างคงที่ที่ประมาณ 42 °C และ 17 °C ตามลำดับ กรณีการทำงานร่วมของรูปแบบที่ 1 สามารถลดอุณหภูมิสารทำงานที่เครื่องควบแน่นได้ดีกว่าแบบปกติ เนื่องจากมีการนำน้ำเย็นที่ผลิตได้จากระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน มาช่วยในการระบายความร้อนของเครื่องควบแน่นวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ ในขณะที่ระบบหลังการปรับปรุงแบบที่ 2 อุณหภูมิสารทำงานมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากความสามารถถ่ายเทความร้อนของเจเนอเรเตอร์มีค่าคงที่ ดังแสดงในรูปที่ 9



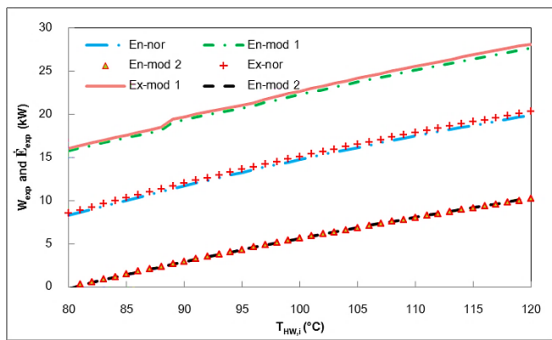
รูปที่ 9 ผลการเปรียบเทียบอุณหภูมิสารทำงานที่เครื่องควบแน่นก่อนและหลังการปรับปรุง

รูปที่ 10 และ 11 แสดงผลการเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าที่ได้จากเครื่องขยายและที่ต้งป้อนให้แก่ปั๊มสารทำงานของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ก่อนและหลังการปรับปรุง ผลที่ได้พบว่า เมื่อ

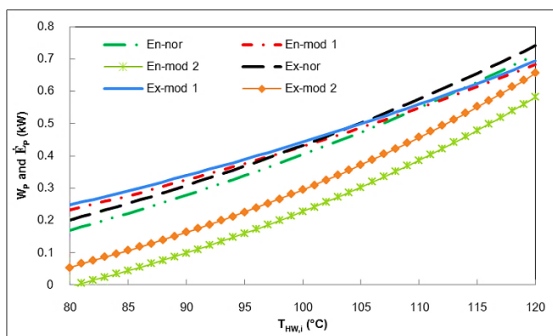


อุณหภูมิน้ำร้อนที่ป้อนให้วัฏจักรแรงคินสาร์อินทรีย์มีค่าเพิ่มสูงขึ้น ส่งผลให้กำลังไฟฟ้าด้านพลังงานและเอ็กเซอร์จีของทั้ง 2 อุปกรณ์ มีค่าเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งแปรผกผันกับอุณหภูมิสารทำงานที่เครื่องควบแน่น อนึ่งผลดังกล่าวสอดคล้องกับกฎของวัฏจักรคาร์โน (Carnot cycle) ที่นิยามไว้ว่า เมื่อผลต่างของอุณหภูมิแหล่งความร้อน (Heat source) และอุณหภูมิแหล่งระบายความร้อน (Heat sink) มีค่ามาก จะทำให้พลังงานที่ได้รับและพลังงานที่ป้อนเข้ามีค่ามากตามไปด้วย

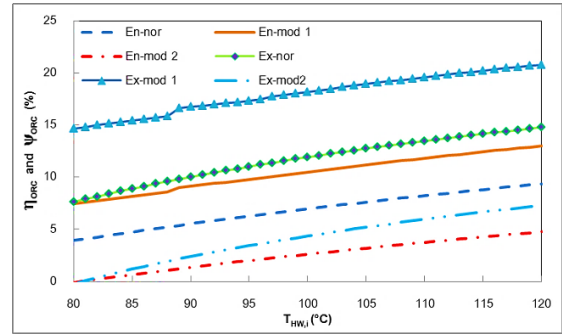
รูปที่ 12 แสดงผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพด้านพลังงานและด้านเอ็กเซอร์จีก่อนและหลังการปรับปรุง โดยผลที่ได้พบว่า ประสิทธิภาพด้านพลังงานของของวัฏจักรแรงคินสาร์อินทรีย์ก่อนการปรับปรุง หลังการปรับปรุงแบบที่ 1 และ 2 มีค่าเฉลี่ยประมาณ 7.01% 10.39% และ 3.03% ตามลำดับ ในขณะที่ ประสิทธิภาพด้านเอ็กเซอร์จีมีค่าเฉลี่ยประมาณ 11.66% 18.25% และ 4.07% ตามลำดับ จากผลที่ได้ข้างต้น สามารถสรุปได้ว่า ระบบร่วมหลังการปรับปรุงแบบที่ 1 สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของวัฏจักรแรงคินสาร์อินทรีย์ได้ดีกว่าแบบที่ 2 ทั้งในด้านพลังงานและเอ็กเซอร์จี



รูปที่ 10 ผลการเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าจากเครื่องขยายตัวของวัฏจักรแรงคินสาร์อินทรีย์ก่อนและหลังการปรับปรุง

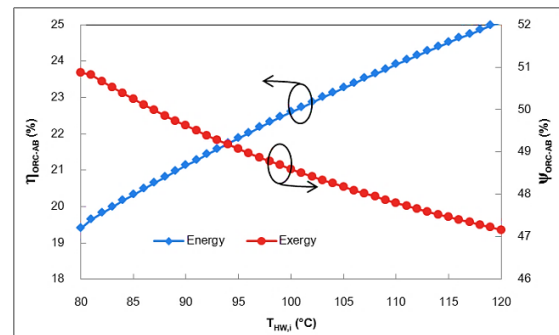


รูปที่ 11 ผลการเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าของปั๊มสารทำงานของวัฏจักรแรงคินสาร์อินทรีย์ก่อนและหลังการปรับปรุง



รูปที่ 12 ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพด้านพลังงานก่อนและหลังการปรับปรุง

ทั้งนี้ในระบบร่วมแบบที่ 2 ยังพบอีกว่า การทำงานร่วมระหว่างวัฏจักรแรงคินสาร์อินทรีย์และระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน เป็นการทำงานในรูปแบบระบบผลิตไฟฟ้าร่วมความเย็น (Combine cooling and power, CCP) มีการผลิตผลลัพธ์ที่ได้จากระบบร่วม คือ ไฟฟ้าและความเย็น ดังนั้นเมื่อทำการวิเคราะห์ประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าร่วมความเย็น พบว่า ประสิทธิภาพด้านพลังงานและเอ็กเซอร์จีเพิ่มขึ้นเป็น 22.47% และ 48.25% ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 16



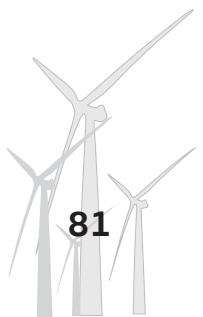
รูปที่ 16 ประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าร่วมความเย็นของระบบร่วมแบบที่ 2

จากผลการศึกษางานวิจัยนี้ ที่ต้องการหาการทำงานร่วมที่เหมาะสมมากที่สุด ของวัฏจักรแรงคินสาร์อินทรีย์และระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน สามารถสรุปได้ว่า การนำระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนมาใช้ระบายความร้อนแทนเครื่องควบแน่น มีประสิทธิภาพรวมด้านพลังงานและเอ็กเซอร์จีที่ดีที่สุด

5. สรุปผลการศึกษา

จากผลการศึกษางานวิจัยนี้ สามารถสรุปได้ว่า

1. ประสิทธิภาพด้านพลังงานและเอ็กเซอร์จีของวัฏจักรแรงคินสาร์อินทรีย์มีค่าประมาณ 7.01% และ 11.66% ตามลำดับ



2. ค่าความเข้มข้นสารละลายน้ำ-ลิเทียมโบรไมด์ของระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนต่ำที่สุด ที่สามารถนำมาใช้ร่วมวัฏจักรแรงดันอินทรีย์ คือ 34 %LiBr
3. ประสิทธิภาพด้านพลังงานและเอ็กเซอร์จีของวัฏจักรแรงดันอินทรีย์ ที่ใช้ระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนลดอุณหภูมิการทำงานก่อนเข้าเครื่องควบแน่น มีค่าประมาณ 10.39% และ 18.25% ตามลำดับ
4. ประสิทธิภาพด้านพลังงานและเอ็กเซอร์จีของวัฏจักรแรงดันอินทรีย์ ที่ใช้ระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนระบายความร้อนแทนเครื่องควบแน่น มีค่าประมาณ 22.47% และ 48.25% ตามลำดับ ซึ่งเป็นรูปแบบการทำงานร่วมที่เหมาะสมที่สุด

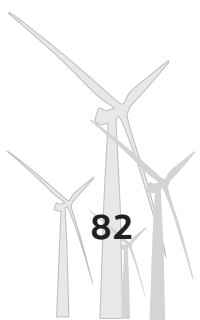
6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ภายใต้ “โครงการผลิตและพัฒนาศักยภาพบัณฑิตทางด้านพลังงานทดแทน ในกลุ่มประเทศอาเซียนสำหรับนักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา” และสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ภายใต้ “แผนงานพลังงานทดแทนภายใต้โครงการความร่วมมือระหว่างไทย-จีน 2561” ที่ให้ทุนสนับสนุนงบประมาณในการวิจัย

7. อ้างอิง

- [1] Sun W, Yue X , Wang Y. Exergy efficiency analysis of ORC (Organic Rankine Cycle) and ORC based combined cycles driven by low-temperature waste heat. *Energy Conversion and Management*, 2017;135:63-73.
- [2] Astolfi M, Romano MC, Bombarda P, Macchi E, Binary ORC. (organic Rankine cycles) power plants for the exploitation of medium-low temperature geothermal sources e part A: thermodynamic optimization. *Energy*, 2014; 66:423-434.
- [3] Marion M, Voicu I, Tiffonnet AL. Wind effect on the performance of a solar organic Rankine cycle. *Renewable Energy*, 2014;68:651-661.
- [4] Wang JF, Yan ZQ, Zhao P, Dai YP. Off-design performance analysis of a solarpowered organic Rankine cycle. *Energy Conversion Management*, 2014;80:150-157.
- [5] Quoilin S, Declaye S, Tchanche BF, Lemort V. Thermo-economic optimization of waste heat recovery organic Rankine cycles. *Applied Thermal Engineering*, 2011;31(14-15):2885-2893.

- [6] Shu GQ, Liu LN, Tian H, Wei HQ, Yu GP. Parametric and working fluid analysis of a dual-loop organic Rankine cycle (DORC) used in engine waste heat recovery. *Applied Energy*, 2014;113:1188-1198.
- [7] Maria FD, Micale C, Sordi A. Electrical energy production from the integrated aerobic-anaerobic treatment of organic waste by ORC. *Renewable Energy*, 2014;66:461-467
- [8] Jradi M, Riffat S. Experimental investigation of a biomass-fueled micro-scale tri-generation system with an organic Rankine cycle and liquid desiccant cooling unit. *Energy*, 2014;71:80-93.
- [9] Xangpheuak Inthavideth and Nattaporn Chaiyat. การวิเคราะห์สมรรถนะการทางานของวัฏจักรแรงดันอินทรีย์ร่วมกับระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน, เรื่องการถ่ายเทพลังงานความร้อนและมวลในอุปกรณ์ด้านความร้อนและกระบวนการ (ครั้งที่ 15), 2016, 88-93.
- [10] Xangpheuak Inthavideth and Nattaporn Chaiyat. การวิเคราะห์สมรรถนะการทางานของวัฏจักรแรงดันอินทรีย์ร่วมกับระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน, เรื่องรูปแบบพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย (ครั้งที่ 9), 2016, 130-138.
- [11] Chaiyat N, Kiatsiriroat T. Analysis of combined cooling heating and power generation from organic Rankine cycle and absorption system, *Energy*, 2015, Vol.91, 363-370.
- [12] Bellos E , Tzivanidis C. Parametric analysis and optimization of a solar driven trigeneration system based on ORC and absorption heat pump. *Journal of Cleaner Production*, 2017;161:493-509.
- [13] Fahad A, Sulaiman A, Hamdullahpur F, Dincer I. Greenhouse gas emission and exergy assessments of an integrated organic Rankine cycle with a biomass combustor for combined cooling, heating and power production. *Applied Thermal Engineering*, 2011;31:439-446.
- [14] Bicer Y, Dincer, I. Analysis and performance evaluation of a renewable energy based multigeneration system. *Energy*, 2016;94:623-632.
- [15] Hassoun A, Dincer I. Analysis and performance assessment of a multigenerational system powered by Organic Rankine Cycle for a net zero energy houses. 2015;76:25-36.



<p>[16] นัฐพร ไชยญาติ. การนำความร้อนทิ้งกลับคืน (Waste heat recovery). วิทยาลัยพลังงานทดแทน, มหาวิทยาลัยแม่โจ้, สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยแม่โจ้, พิมพ์ครั้งที่ 4 มกราคม พ.ศ. 2560.</p> <p>[17] Chaiyat N and Kiatsirirot T. Upgrading of Solar Heat by an Absorption Heat Transformer Assisting with a Vapor Compression Heat Pump. <i>Research grate</i>, 2014;21:10-20.</p> <p>[18] National Institute of Standards and Technology, Inc. (NIST, REFPROP Version 9.1). Thermodynamic Properties of Refrigerants and Refrigerant Mixtures Software. America.</p>	<p>ref SP</p>	<p>สารทำงาน ปั๊มสารละลาย</p>
--	-------------------	----------------------------------

รายการสัญลักษณ์

สัญลักษณ์

COP	สัมประสิทธิ์สมรรถนะ
\dot{E}	อัตราความร้อนด้านเอ็กเซอร์จี (kW)
Q	อัตราความร้อนด้านพลังงาน (kW)
T	อุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$)
W	กำลังงาน (kW)
X	ความเข้มข้น (% Libr)

ตัวกรีก

η	ประสิทธิภาพด้านพลังงาน (%)
ψ	ประสิทธิภาพเอ็กเซอร์จี (%)

ตัวห้อย

A	การดูดกลืน
AB	ระบบทาคาเวียแนแบบดูดกลืน
Amb	สิ่งแวดล้อม
B	หม้อไอน้ำ
C	คอนเดนเซอร์
CW	น้ำหล่อเย็น
Evap	เครื่องระเหย
Exp	เครื่องขยายตัว
e	เอ็กเซอร์จี
G	เจนเนอเรเตอร์
HW	น้ำร้อน
HX	อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน
H	สูง
i	ทางเข้า
L	ต่ำ
o	ทางออก
ORC	วัฏจักรแรงดันอินทรีย์
P	ปั๊มสารทำงาน

