

การถ่ายทอด พลังงานความร้อนและมวล

ในอุปกรณ์ด้านความร้อนและกระบวนการ

(ครั้งที่ 15)

ระหว่างวันที่ 30-31 มีนาคม 2559

ณ โรงแรม แอล รีสอร์ท สมุย

จังหวัดสุราษฎร์ธานี



การวิเคราะห์สมรรถนะการทำงานของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ ร่วมกับระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน

PERFORMANCE ANALYSIS OF AN ORGANIC RANKINE CYCLE COMBINED WITH AN ABSORPTION CHILLER

Xangpheuak Inthavideth

นัฐพร ไชยญาติ

วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ โดยการลดอุณหภูมิสารทำงานที่เครื่องควบแน่นร่วมกับระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน เพื่อระบายความร้อนร่วมกับหอระบายความร้อนโดยการนำความร้อนทิ้งจากวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ที่หม้อต้มมาป้อนให้แก่ระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน ซึ่งในงานวิจัยนี้จำลองวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ที่ใช้สารทำงาน คือ R-245fa และระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนที่ใช้คู่สารทำงานคือน้ำ-ลิเทียมโบรไมด์ ผลการศึกษาพบว่าประสิทธิภาพของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ก่อนการปรับปรุงมีค่าประมาณ 8% ที่อุณหภูมิน้ำร้อนเข้าหม้อต้มในช่วง 90-120 °C สำหรับระบบร่วมของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์และระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน พบว่า ระบบร่วมต้องการน้ำร้อนอุณหภูมิสูงกว่า 105 °C เพื่อให้ความร้อนทิ้งที่ออกจากวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ สามารถขับเคลื่อนระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทั้งนี้ระบบร่วมสามารถลดอุณหภูมิน้ำหล่อเย็นที่เข้าเครื่องควบแน่นได้ประมาณ 13 °C ส่งผลให้ประสิทธิภาพการทำงานของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์หลังการปรับปรุงมีค่าประมาณ 12% หรือเพิ่มขึ้นประมาณ 50% เทียบกับวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ก่อนการปรับปรุง

คำสำคัญ: วัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

Abstract

This research studies enhancement efficiency of an organic Rankine cycle (ORC) by reducing a working fluid temperature at a condenser. An absorption chiller is presented to combine with the ORC system, which the rejected heat at a boiler of the ORC system is recovered and supplied back to the absorption chiller. In simulation process, R-245fa is selected as the ORC working fluid, while the absorption cycle is obtained a water-lithium bromide solution as the working pair. From the study results, it could be found that the normal ORC efficiency is around 8% at hot water temperature entering a boiler between 90-120 °C. In case of the ORC system combined with the absorption chiller, it could be found that the minimum hot water temperature entering the modified system is around 105 °C for operating the ORC and absorption systems. The modified system could reduce the cooling water temperature to be around 13 °C and the ORC efficiency could be increased at around 12%, which increases approximately 50% compared with the normal ORC system.

Keywords: Organic Rankine Cycle, Absorption chiller, Mathematical model

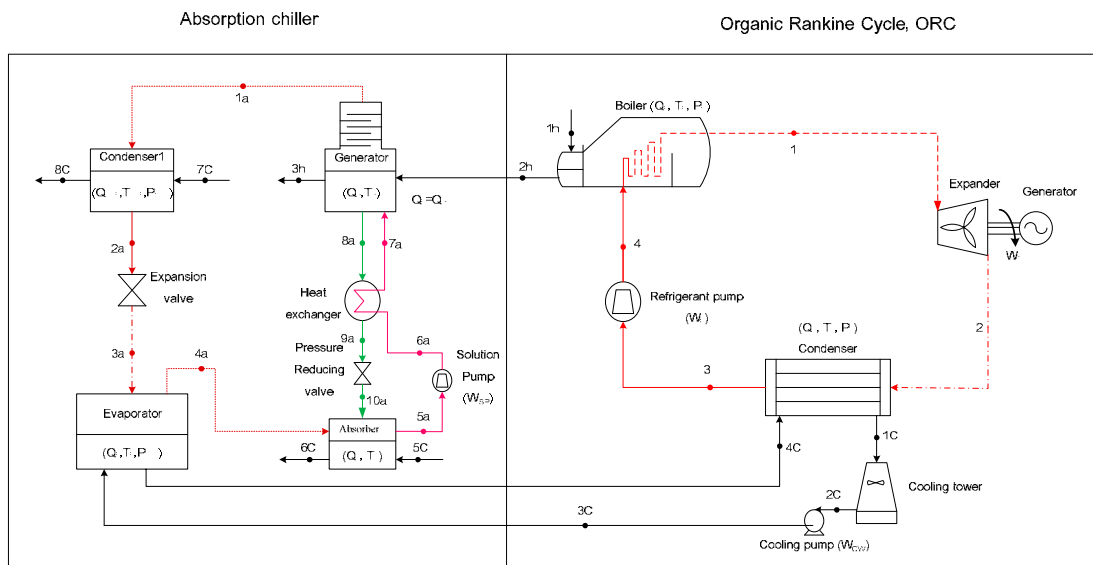
บทนำ

ประเทศไทยนำเข้าพลังงานในปริมาณที่เพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง ในปี ค.ศ.2011 นำเข้าพลังงานเพิ่มขึ้น 30.2%เมื่อเปรียบเทียบกับปี ค.ศ.2010 [1] ดังนั้นรัฐบาลได้กำหนดกรอบและทิศทางนโยบายพลังงานของประเทศซึ่งมุ่งเน้นไปที่ความมั่นคงด้านพลังงานเพื่อให้มั่นใจว่ามีเสถียรภาพด้านพลังงานสำหรับประเทศไทยโดยการส่งเสริมและพัฒนาพลังงานทดแทนให้เป็น 25%ของการใช้พลังงานทั้งหมดของประเทศในปี ค.ศ. 2021ซึ่งวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์(Organic Rankine Cycle; ORC) เป็นหนึ่งในเทคโนโลยีที่ถูกพัฒนาเพื่อใช้พลังงานทดแทนผลิตพลังงานไฟฟ้า

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์มีดังต่อไปนี้การใช้แหล่งความร้อนคุณภาพต่ำมาขับเคลื่อนวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ [2-4] การนำวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์มาใช้ร่วมกับพลังงานทดแทน อาทิเช่น พลังงานแสงอาทิตย์ [5] พลังงานความร้อนใต้พิภพ [6] พลังงานชีวมวล [7]นอกจากนี้ยังมีการนำความร้อนทิ้งกลับมาใช้งานโดยวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ของระบบผลิตพลังงานร่วม (Combine heating and power, CHP) อีกด้วย[8-10] Brophy [12]Kose[13] และ Dagdas[14] วิเคราะห์ผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมจากการผลิตพลังงาน

ไฟฟ้าด้วยวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ นอกจากนี้การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เป็นอีกหนึ่งแนวทางที่ได้รับความสนใจกันอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน อาทิเช่น การเลือกสารทำงานที่เหมาะสมสำหรับวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์โดยผลการศึกษาล้วนพบว่ามีสารทำงานที่เหมาะสมที่สุดของการศึกษาเหล่านี้คือ R-134a และ R-245fa[15-22] สำหรับการปรับปรุงประสิทธิภาพของสำหรับวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ Chaiyat and Kiatsirirot [23] นำเสนอการเพิ่มประสิทธิภาพของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ร่วมกับระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน (Absorption chiller) โดยใช้สมรรถนะของระบบทั้งสองที่ได้จากผลการทดสอบ ผลที่ได้พบว่า ประสิทธิภาพของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์เพิ่มขึ้นประมาณ 7%

จากการศึกษาข้างต้น พบว่ายังไม่มีความวิจัยใดนำเสนอสมรรถนะการทำงานร่วมของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์และระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน เพื่อลดอุณหภูมิสารทำงานที่เครื่องควบแน่น(Condenser) ของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์ที่มุ่งศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ โดยการลดอุณหภูมิสารทำงานที่เครื่องควบแน่นร่วมกับระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน ดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 แผนภาพการทำงานร่วมของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์และระบบการทำความเย็นดูดกลืน

ทฤษฎี

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยประกอบไปด้วย 3ทฤษฎีคือวัฏจักรคาร์โนต์ (Carnot cycle)วัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ และระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน โดยรายละเอียดของหัวข้อต่างๆ ดังกล่าวมีดังต่อไปนี้

ก. วัฏจักรคาร์โนต์

ประสิทธิภาพทางความร้อนสูงสุดของระบบด้านความร้อนสามารถอธิบายได้ด้วยประสิทธิภาพคาร์โนต์ (η_{Carnot}) ซึ่งเป็นประสิทธิภาพทางอุณหพลศาสตร์ที่ไม่สามารถทำได้จริง โดยวัฏจักรคาร์โนต์

สามารถย้อนกลับได้ ประสิทธิภาพคาร์โนต์สามารถคำนวณได้จากสมการดังต่อไปนี้[24]

$$\eta_{Carnot} = \frac{T_H - T_L}{T_H} = 1 - \frac{T_L}{T_H} \quad \text{สมการที่ 1}$$

ข. วัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์

วัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์เป็นระบบการทำงานที่ใช้หลักการของระบบแรงคิน (Rankine cycle) แต่ใช้สารทำงานในกลุ่มสารอินทรีย์ (Organic) ที่มีมวลโมเลกุลสูงสามารถเปลี่ยนสถานะจากของเหลวเป็นไอที่อุณหภูมิต่ำหรือมีจุดเดือดต่ำ (Boiling point) เมื่อเปรียบเทียบกับจุดเดือดของน้ำที่ใช้เป็นสารทำงานในระบบแรงคินทั่วไปทำให้วัฏจักร



แรงดันสารอินทรีย์สามารถผลิตกระแสไฟฟ้าได้โดยใช้ความร้อนอุณหภูมิต่ำ (น้อยกว่า 100 °C)[24]

วัฏจักรแรงดันอินทรีย์ดังแสดงในรูปที่ 1 มีหลักการการทำงาน คือของไหลที่ผ่านกระบวนการควบแน่นจนสมบูรณ์ในเครื่องควบแน่น จะควบแน่นเป็นของเหลวอิ่มตัว (จุดที่ 3) และของไหลจะถูกอัดตัวโดยปั๊ม (Pump) ภายใต้กระบวนการไอเซนทรอปิก จนกระทั่งมีความดันสูงขึ้น ($P_{H,AB}$) (จุดที่ 4) ภายในหม้อต้ม (Boiler) จากนั้นของเหลวจะถูกให้ความร้อนภายใต้ความดันคงที่ และกลายเป็นไอร้อนยวดยิ่ง (จุดที่ 1) ในที่สุด ไอร้อนยวดยิ่งจะเข้าสู่กังหัน (Turbine) ขยายตัวแบบไอเซนทรอปิก และผลิตงานโดยการขับเพลลาที่ต่อเข้ากับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Generator) ทำให้ความดันและอุณหภูมิของไอสารทำงานลดลง ($P_{L,AB}$) (จุดที่ 2) ที่ทางออกของกังหันซึ่งอยู่ในสถานะของผสม (ไอและของเหลว) จากนั้นจะไหลไปควบแน่นยังเครื่องควบแน่นภายใต้ความดันคงที่ กลายเป็นของเหลวอิ่มตัวที่สภาวะ (3) อีกครั้ง

จากรูปที่ 1 สมการทางคณิตศาสตร์ของวัฏจักรแรงดันอินทรีย์พิจารณาที่สภาวะคงตัว (Steady state steady flow, SSSF) สามารถแสดงได้ดังสมการต่อไปนี้

$$Q_B = \dot{m}_{ref} (h_1 - h_4) \quad \text{สมการที่ 2}$$

$$Q_C = \dot{m}_{ref} (h_2 - h_3) \quad \text{สมการที่ 3}$$

$$W_P = \dot{m}_{ref} (h_4 - h_3) \quad \text{สมการที่ 4}$$

$$W_{Tur} = \dot{m}_{ref} (h_1 - h_2) \quad \text{สมการที่ 5}$$

$$\eta_{ORC} = \frac{W_{net}}{Q_B} \quad \text{สมการที่ 6}$$

$$W_{net} = W_{Tur} - W_P - W_{CW} \quad \text{สมการที่ 7}$$

ค. ระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน

ระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนดังแสดงในรูปที่ 1 มีหลักการการทำงาน ดังนี้ คือ ความร้อนอุณหภูมิต่ำเข้าสู่เจนเนอเรเตอร์ (Generator) เพื่อถ่ายเทความร้อนให้แก่สารละลาย จากนั้นสารทำงาน (Absorbate) ที่มีจุดเดือดต่ำกว่าสารดูดกลืน (Absorbent) จะระเหยกลายเป็นไอและไหลออกจากเจนเนอเรเตอร์ที่ความดันสูง ไอสารทำงานที่ออกจากเจนเนอเรเตอร์ (จุดที่ 1a) ไหลไปยังเครื่องควบแน่น (Condenser1) แล้วควบแน่นกลายเป็นสารทำงานสถานะของเหลว (จุดที่ 2a) ที่ความดันสูง จากนั้นจะไหลผ่านวาล์วลดความดัน (Expansion valve) เพื่อลดความดัน (จุดที่ 3a) เข้าไปในเครื่องระเหย (Evaporator) ซึ่งสารทำงานจะรับความร้อนจากของไหล ซึ่งมากพอที่จะทำให้สารทำงานสถานะของเหลวระเหยกลายเป็นไอ (จุดที่ 4a) ที่ความดันต่ำ แล้วไหลเข้าไปยังแอบซอร์บเบอร์ (Absorber) สารทำงานสถานะไอดังกล่าวจะถูกดูดกลืนร่วมกับสารละลายความเข้มข้นต่ำ (ความเข้มข้นสารทำงาน) ที่กลับมาจากอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน (Heat exchanger) ทำให้กลายเป็นสารละลายความเข้มข้นสูง (จุดที่ 5a) สารละลายดังกล่าวจะถูกส่งไปยังเจนเนอเรเตอร์ด้วยปั๊มสารละลาย (Solution pump) ผ่านอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน (จุดที่ 6a) และภายในเจนเนอเรเตอร์เนื่องจากสารทำงานในสารละลายระเหยกลายเป็นไอทำให้เหลือสารละลายความเข้มข้นต่ำ ซึ่งสารละลายดังกล่าวจะถูกส่งกลับมายังแอบซอร์บเบอร์ (จุดที่ 8a) โดยถ่ายเทความร้อนให้กับสารละลายความเข้มข้นสูงในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน (จุดที่ 9a) จากนั้นจะ

ผ่านวาล์วลดความดัน (Pressure reducing valve) (จุดที่ 10a) แล้วไหลเข้าไปยังแอบซอร์บเบอร์เพื่อดูดกลืนไอสารทำงานต่อไป[24]

จากรูปที่ 1 สมการทางคณิตศาสตร์ของระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน สามารถแสดงได้ดังต่อไปนี้

$$Q_G = \dot{m}_{1a} h_{1a} + \dot{m}_{8a} h_{8a} - \dot{m}_{7a} h_{7a} \quad \text{สมการที่ 8}$$

$$Q_{C,AB} = \dot{m}_{1a} h_{1a} - \dot{m}_{2a} h_{2a} \quad \text{สมการที่ 9}$$

$$Q_E = \dot{m}_{4a} h_{4a} - \dot{m}_{3a} h_{3a} \quad \text{สมการที่ 10}$$

$$Q_A = \dot{m}_{4a} h_{4a} + \dot{m}_{10a} h_{10a} - \dot{m}_{5a} h_{5a} \quad \text{สมการที่ 11}$$

$$W_{SP} = (P_{H,AB} - P_{L,AB}) \frac{V_{5a} \dot{m}_{5a}}{\eta_{SP}} \quad \text{สมการที่ 12}$$

$$Q_{HX} = \dot{m}_{8a} C_{p,8a} (T_{8a} - T_{9a}) = \dot{m}_{6a} C_{p,6a} (T_{7a} - T_{6a}) \quad \text{สมการที่ 13}$$

$$COP_{AB} = \frac{Q_E}{Q_G + W_{SP}} \quad \text{สมการที่ 14}$$

ดังนั้นการทำงานร่วมของวัฏจักรแรงดันอินทรีย์และระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน สามารถประเมินประสิทธิภาพการทำงานของระบบร่วม ได้ดังต่อไปนี้

$$\eta_{ORC-AB} = \frac{W_{net}}{Q_B} \quad \text{สมการที่ 15}$$

$$W_{net} = W_{Tur} - W_P - W_{SP} - W_{CW} \quad \text{สมการที่ 16}$$

วิธีการดำเนินงาน

วิธีการดำเนินงานวิจัยมีรายละเอียดในแต่ละขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. ศึกษางานวิจัยต่างๆที่เกี่ยวข้องกับวัฏจักรแรงดันอินทรีย์และระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน
2. สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวัฏจักรแรงดันอินทรีย์และระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน
3. วิเคราะห์การทำงานของวัฏจักรแรงดันอินทรีย์ โดยมีเงื่อนไขเริ่มต้นการทำงานจากการจำลองระบบดังต่อไปนี้
 - สารทำงานที่ใช้กับระบบคือ R-245fa
 - ปริมาณความร้อนที่หม้อต้ม (Q_B) คือ 200kW
 - อุณหภูมิน้ำร้อนที่เข้าวัฏจักรแรงดันอินทรีย์ (T_{1h}) คือ 90-120 °C
 - ผลต่างอุณหภูมิน้ำร้อนที่ให้ความร้อนกับสารทำงานที่หม้อต้ม ($T_{2h} - T_B$) เท่ากับ 3 °C
 - ผลต่างอุณหภูมิน้ำร้อนที่เข้าและออกหม้อต้ม ($T_{1h} - T_{2h}$) เท่ากับ 15 °C
 - อุณหภูมิน้ำหล่อเย็นเข้าเครื่องควบแน่น ($T_{3c} = T_{4c}$) เท่ากับ 32 °C
 - ผลต่างอุณหภูมิน้ำหล่อเย็นเข้าและออกเครื่องควบแน่น ($T_{1c} - T_{4c}$) เท่ากับ 5 °C
 - ผลต่างอุณหภูมิน้ำระบายความร้อนกับสารทำงานที่เครื่องควบแน่น ($T_C - T_{1c}$) เท่ากับ 3 °C
4. วิเคราะห์การทำงานของระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนมีรายละเอียดของเงื่อนไขเริ่มต้นการจำลองระบบดังต่อไปนี้
 - คู่สารทำงานที่ใช้กับระบบ คือ H₂O-Libr

- ปริมาณความร้อนที่เครื่องเจเนอเรเตอร์ ($Q_G = Q_B$) คือ 200 kW
 - อุณหภูมิน้ำร้อนที่เข้าระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน (T_{2h}) คือ 75-105 °C
 - ผลต่างอุณหภูมิน้ำร้อนกับสารทำงานที่เจเนอเรเตอร์ ($T_{3h} - T_G$) เท่ากับ 3 °C
 - ผลต่างอุณหภูมิน้ำหล่อเย็นระบายความร้อนกับสารทำงานที่เครื่องควบแน่น ($T_{C,AB} - T_{8c}$) เท่ากับ 3 °C
 - ผลต่างอุณหภูมิน้ำหล่อเย็นระบายความร้อนกับสารทำงานที่แอบซอร์พเบอร์ ($T_A - T_{6c}$) เท่ากับ 3 °C
 - ผลต่างอุณหภูมิน้ำเย็นกับสารทำงานที่เครื่องระเหย ($T_{4c} - T_E$) เท่ากับ 3 °C
 - อุณหภูมิน้ำเย็นที่ออกจากเครื่องระเหย (T_{4c}) เท่ากับ 2-32 °C
 - ผลต่างอุณหภูมิน้ำเข้าและออกที่เครื่องควบแน่นแอบซอร์พเบอร์ เครื่องระเหยและเจเนอเรเตอร์เท่ากับ 5 °C
5. วิเคราะห์และสรุปผลการจำลองการทำงานของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ก่อนและหลังการปรับปรุง

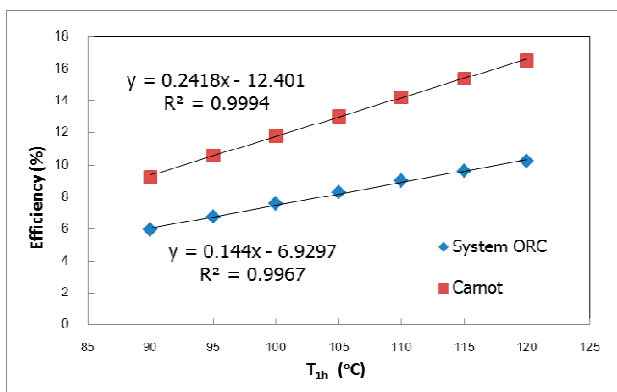
ผลและการอภิปรายผล

ก. สมรรถนะการทำงานของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์

รูปที่ 2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์กับอุณหภูมิน้ำร้อนที่เข้าหม้อต้ม (T_{1h}) ในช่วง 90-120 °C ผลที่ได้พบว่าเมื่ออุณหภูมิน้ำร้อนเข้าที่หม้อต้มเพิ่มขึ้นทำให้ประสิทธิภาพการทำงานของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์เพิ่มขึ้นตามไปด้วยซึ่งสอดคล้องกับวัฏจักรคาร์โนต์ที่กล่าวว่าประสิทธิภาพของระบบการทำงานจะเพิ่มขึ้นเมื่อผลต่างอุณหภูมิของแหล่งความร้อน (Heat source) และแหล่งระบายความร้อน (Heat sink) เพิ่มขึ้นและเมื่อนำประสิทธิภาพของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์เปรียบเทียบกับประสิทธิภาพของวัฏจักรคาร์โนต์ พบว่า วัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์มีค่าต่ำกว่าประสิทธิภาพคาร์โนต์ประมาณ 3%

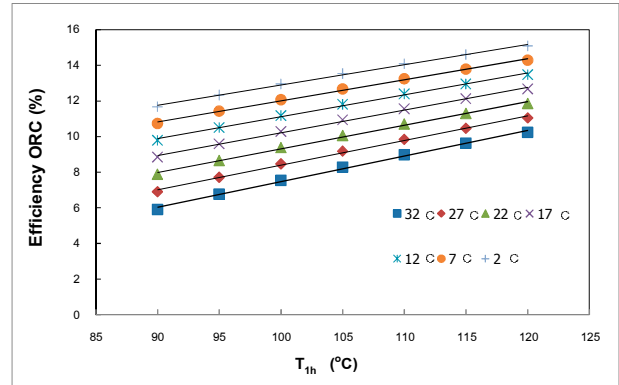
รูปที่ 2 ยังพบอีกว่าอุณหภูมิน้ำร้อนที่เข้าหม้อต้ม (T_{1h}) มีความสัมพันธ์กับประสิทธิภาพการทำงานของระบบ ในรูปแบบสมการเส้นตรง ดังแสดงในสมการต่อไปนี้

$$\eta_{ORC} = 0.144(T_{1h}) - 6.9297 \quad \text{สมการที่ 17}$$



รูปที่ 2 แบบจำลองอย่างง่ายของระบบ ORC

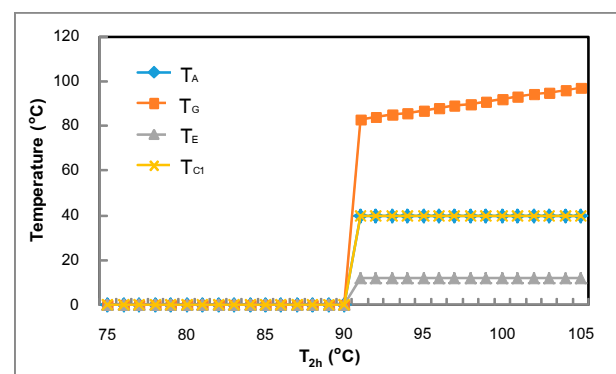
รูปที่ 3 แสดงการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิน้ำหล่อเย็นในช่วง 2-32 °C ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ และกำหนดให้อุณหภูมิน้ำร้อนเข้าหม้อต้มอยู่ในช่วง 90-120 °C ผลที่ได้พบว่าอุณหภูมิน้ำหล่อเย็นเข้าเครื่องควบแน่นลดลง มีผลทำให้ประสิทธิภาพการทำงานของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์สูงขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับหลักการโนต์ที่ว่าประสิทธิภาพการทำงานของระบบจะเพิ่มขึ้นเมื่อผลต่างอุณหภูมิของแหล่งความร้อนและแหล่งระบายความร้อนเพิ่มขึ้น



รูปที่ 3 ประสิทธิภาพของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ที่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิน้ำ

ข. สมรรถนะการทำงานของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ร่วมกับระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน

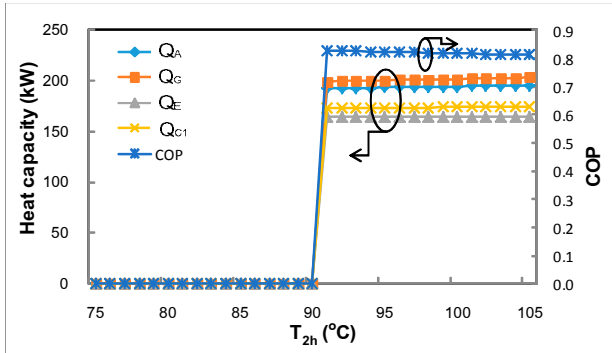
รูปที่ 4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิน้ำร้อนเข้าเจเนอเรเตอร์ (T_{2h}) กับอุณหภูมิสารทำงานของระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน โดยผลที่ได้พบว่า อุณหภูมิน้ำร้อนมีผลโดยตรงต่ออุณหภูมิสารทำงานที่เจเนอเรเตอร์ (T_G) ในขณะที่อุณหภูมิสารทำงานที่แอบซอร์พเบอร์ เครื่องระเหย และเครื่องควบแน่นมีค่าคงที่ นอกจากนี้ยังพบอีกว่าระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนสามารถเริ่มทำงานได้ที่อุณหภูมิน้ำร้อนประมาณ 91 °C หรือน้ำร้อนเข้าสู่วัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ประมาณ 105 °C จึงทำให้ระบบทั้งสองสามารถทำงานร่วมกันได้อย่างมีประสิทธิภาพทั้งนี้ระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนทำงานภายใต้เงื่อนไขคือ ความเข้มข้นด้านสูงและต่ำของสารละลาย H_2O -Libr คือ 53.6 และ 58.6 %Libr ตามลำดับ



รูปที่ 4 อุณหภูมิสารทำงานของระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน

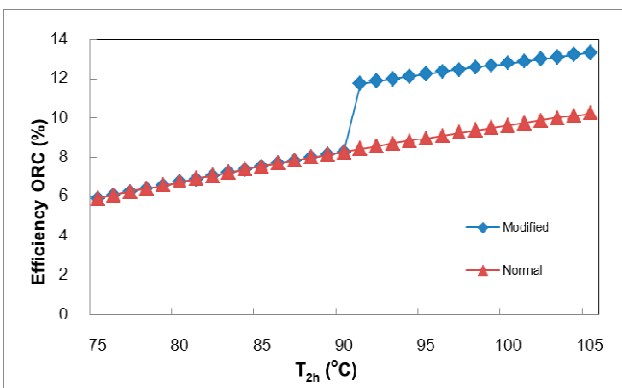


รูปที่ 5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิน้ำร้อนเข้าระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนที่มีผลต่ออัตราการถ่ายเทความร้อนและค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะของระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน ผลการศึกษาพบว่า อุณหภูมิน้ำร้อนมีผลโดยตรงต่ออัตราการถ่ายเทความร้อนของอุปกรณ์ในระบบค่อนข้างน้อย ซึ่งอัตราการถ่ายเทความร้อนมีค่าค่อนข้างคงที่ และส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะของระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนมีค่าเกือบคงที่ประมาณ 0.8 ตามไปด้วย



รูปที่ 5 อัตราความร้อนของระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน

รูปที่ 6 แสดงถึงการเปรียบเทียบระหว่างประสิทธิภาพการทำงานของวัฏจักรแรงดันอินทรีย์ก่อนและหลังการปรับปรุง ผลการคำนวณพบว่า ระบบร่วมของวัฏจักรแรงดันอินทรีย์และระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนมีประสิทธิภาพการทำงานประมาณ 12% สูงกว่าระบบก่อนปรับปรุงที่มีค่าประมาณ 8% หรือเพิ่มขึ้นประมาณ 50% เมื่อเทียบกับระบบก่อนการปรับปรุง โดยอุณหภูมิน้ำระบายความร้อนเข้าเครื่องควบแน่นของวัฏจักรแรงดันอินทรีย์หลังการปรับปรุงมีค่าประมาณ 13 °C ในขณะที่ระบบก่อนการปรับปรุงมีอุณหภูมิน้ำระบายความร้อนที่ประมาณ 32 °C



รูปที่ 6 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของวัฏจักรแรงดันอินทรีย์ก่อนและหลังการปรับปรุง

สรุปผลการศึกษา

จากการจำลองวัฏจักรแรงดันอินทรีย์ขนาด 20 kW_e ที่ใช้สารทำงาน คือ R-245fa ทำงานร่วมกับระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนที่ใช้คู่สารทำงาน คือ H₂O-LiBr สามารถสรุปผลได้ดังต่อไปนี้

- ประสิทธิภาพการทำงานของวัฏจักรแรงดันอินทรีย์ก่อนการปรับปรุงเท่ากับ 8% ที่น้ำร้อนเข้าหม้อต้มในช่วง 90-120 °C

- ประสิทธิภาพการทำงานของวัฏจักรแรงดันอินทรีย์หลังการปรับปรุง โดยทำงานร่วมกับระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน มีค่าประมาณ 12%
- ประสิทธิภาพการทำงานของระบบหลังการปรับปรุงเพิ่มขึ้นประมาณ 50% เมื่อเทียบกับระบบก่อนการปรับปรุง
- ระบบร่วมต้องป้อนน้ำร้อนอุณหภูมิสูงกว่า 105 °C เพื่อให้ น้ำร้อนที่ป้อนให้แก่ระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนสูงกว่า 91 °C และสามารถทำงานได้ภายใต้เงื่อนไข ความเข้มข้นด้านสูงและต่ำของสารละลาย H₂O-LiBr ในระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน คือ 53.6 และ 58.6 %LiBr ตามลำดับ
- ระบบร่วมมีอุณหภูมิน้ำหล่อเย็นที่เข้าเครื่องควบแน่นของวัฏจักรแรงดันอินทรีย์ที่ประมาณ 13 °C

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ภายใต้ “โครงการผลิตและพัฒนาศักราชบัณฑิตทางด้านพลังงานทดแทน ในกลุ่มประเทศอาเซียนสำหรับนักศึกษาในระดับบัณฑิตศึกษา” และสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ภายใต้ แผนงานพลังงานทดแทนภายใต้โครงการความร่วมมือระหว่างไทย-จีน ๒๕๕๘ ที่ให้ทุนสนับสนุนการวิจัย

อ้างอิง

- [1] Energy Policy and Planning Office (EPPO), “Annual year final report”, 2010.
- [2] Yamada N, Tominaga Y, Yoshiba T, Demonstration of 10-W_p micro organic Rankine cycle generator for low-grade heat recovery. *Energy*, 2014, 78, 806 – 13.
- [3] Li J, Pei G, Li Y, Wang D, Ji J. Energetic and exergetic investigation of an organic Rankine cycle at different heat source temperature. *Energy*, 2012, 38, 85 – 95.
- [4] Tchanche BF, Lambrinos Gr, Frangoudakis A, Papadakis G. Low grade heat conversion into power using organic Rankine cycle – a review of various applications. *Renew Sustain Energy Rev*, 2011, 15, 3963 – 79.
- [5] Wang M, Wang J, Zhao Y, Zhao P, Dai Y. Thermodynamic analysis and optimization of a solar-driven regenerative organic Rankine cycle (ORC) based on flat-plate solar collector. *Appl Therm Eng*, 2013, 50, 816 – 25.
- [6] Franco A. Power production from a moderate temperature geothermal resource with regenerative organic Rankine cycle. *Energy Sustain Dev*. 2011, 15, 411 – 9.
- [7] Al-Sulaiman F, Dincer I, Humdullahpur F. Energy and exergy analysis of a biomass trigeneration system using an organic Rankine cycle. *Energy*, 2012, 45, 411 – 85
- [8] Tempesti D, Fiaschi D. Thermo-economic assessment of a micro CHP system fuelled by geothermal and solar energy. *Energy*, 2013, 58, 45 – 51

- [9] Zhang YQ, Wu YT, Xia GD, Ma CF, Ji WN, Liu SW, Yang K, Yang FB. Development and experimental study on organic Rankine cycle system with single-screw expander for waste heat recovery from exhaust of diesel engine. *Energy*, 2014, 77, 499 – 508.
- [10] Khatita MA, Ahmed TS, Ashour FH, Ismail IM. Power generation using waste heat recovery by organic Rankine cycle in oil and gas sector in Egypt: a case study. *Energy*, 2014, 64, 462 – 72.
- [11] Campana F, Bianchi M, Branchini L, Pascale AD, Peretto A, Baresi M, Fermi A, Rossetti N, Vescovo R. ORC waste heat recovery in European energy intensive industries: energy and GHG savings. *Energy Convers Manag*, 2013, 76, 244 – 52.
- [12] Brophy P. Environmental advantages to the utilization of geothermal energy. *Renewable Energy*, 1997, 10, 367- 377,
- [13] Kose R. Research on the generation of electricity from the geothermal resources in Simav region Turkey. *Renewable Energy*, 2005,30, 67-79.
- [14] Dagdas A. Heat exchanger optimization for geothermal district heating systems: A fuel saving approach. *Renewable Energy*, 2007, 32,1020-1032.
- [15] Hettiarachchi H.D.M, Golubovica M, Worek W.M, Ikegamib Y. Optimum design criteria for an Organic Rankine Cycle using low-temperature geothermal heat sources, *Energy*, 2007, 32, 1698-1706.
- [16] Schuster A, Karellas S, Karl J. Simulation of an innovative stand-alone solar desalination system with an Organic Rankine Cycle In: the 46th Conference on Simulation and Modeling. *Trondheim, Norway, October*, 2005, 13-14.
- [17] Guo T, Wang H.X, Zhang S.J. Fluids and parameters optimization for a novel cogeneration system driven by low-temperature geothermal sources. *Energy*, 2011, 36, 2639-2649.
- [18] Sauret E, Rowlands A.S. Candidate radial-inflow turbines and high-density working fluids for geothermal power systems, *Energy*, 2011, 36, 4460-4467.
- [19] Liu B, Riviere P, Coquelet C, Gicquel G, David F. Investigation of a two stage Rankine cycle for electric power plants. *Applied Energy*, 2012, 100,285-294.
- [20] Edrisi B.H, Michaelides E.E. Effect of the working fluid on the optimum work of binary-flashing geothermal power plants, *Energy*, 50, 389-394.
- [21] Li T, Zhu J, Zhang W. Comparative analysis of series and parallel geothermal systems combined power, heat and oil recovery in oilfield, *Applied Thermal Engineering*, 2013, 50, 1132-1141.
- [22] Rodriguez C.E.C, Palacio J.E.C, Venturini O.J, Silva L.E.E, Cobas V.M.D, Santos D.M, Dotto F.R.L, Gialluca V, Exergetic and economic comparison of ORC and Kalina cycle for low temperature Antonio Yock,. In: *Proceeding of Seminar on Short Course on Surface Exploration for Geothermal Resources, El Salvador, October 2009*, 17-30.
- [23] Chaayat N, Kiatsiriroat T. Analysis of combined cooling heating and power generation from organic Rankine cycle and absorption system, *Energy*, 2015, Vol.91, 363-370.
- [24] นัฐพร ไชยญาติ. การนำความร้อนทิ้งกลับคืน (Waste heat recovery). วิทยาลัยพลังงานทดแทน, มหาวิทยาลัยแม่โจ้, สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยแม่โจ้, พิมพ์ครั้งที่ 1 มกราคม พ.ศ. 2558, 324 หน้า.

รายการสัญลักษณ์

สัญลักษณ์

COP	สัมประสิทธิ์สมรรถนะ
Cp	ความจุความร้อน (kJ/kg·K)
h	เอนทัลปี (kJ/kg)
\dot{m}	อัตราการไหล (kg/s)
P	ความดัน (kPa)
Q	อัตราความร้อน (kW)
T	อุณหภูมิ (°C)
v	ปริมาณจำเพาะ (m ³ /kg)
W	กำลังงาน (kW)

ตัวกรีก

η	ประสิทธิภาพ (%)
--------	-----------------

ตัวห้อย

A	การดูดกลืน
AB	ระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน
B	หม้อไอน้ำ
C	คอนเดนเซอร์
CW	น้ำหล่อเย็น
e	ไฟฟ้า
E	เครื่องระเหย
G	เจนเนอเรเตอร์
HW	น้ำร้อน
HX	อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน
H	สูง
i	ทางเข้า
L	ต่ำ
o	ทางออก
ORC	วัฏจักรแรงดันอินทรีย์
P	ปั๊มสารทำงาน
ref	สารทำงาน
SP	ปั๊มสารละลาย
Tur	กังหัน

