

การวิเคราะห์สมรรถนะทางความร้อนของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ที่ทำงานร่วมกับ ระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน

Thermal Performance Analysis of an Organic Rankine Cycle with an Absorption Chiller

ข้างเฟือก อินทะวิเดค และ นัฐพร ไชยญาติ*

Xangpheuk Inthavideth and Nattaporn Chaiyat*

วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ 63 ถ.เชียงใหม่-พร้าว ต.หนองหาร อ.สันทราย จ.เชียงใหม่ 50290

*Email: benz178titi@hotmail.com, +66(0)882523088

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาการวิเคราะห์หัตถ์แปรที่มีผลต่อสมรรถนะทางความร้อนการทำงานของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ที่ทำงานร่วมกันกับระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน ซึ่งในงานวิจัยนี้จำลองวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ขนาดประมาณ 20 kW_e ที่ใช้สารทำงาน คือ R-245fa และระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนขนาดความสามารถทำความเย็นประมาณ 160 kW ที่ใช้คู่สารทำงาน คือ น้ำ-ลิเทียมโบรไมด์ โดยการนำความร้อนทิ้งจากวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ มาป้อนให้แก่ระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน สำหรับผลิตน้ำเย็นช่วยในการลดอุณหภูมิ สารทำงานที่เครื่องควบแน่นของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ เพื่อหาสมการสมรรถนะการทำงานของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์และระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนกับอุณหภูมิสารทำงานที่จุดต่างๆ ผลการศึกษาพบว่า ประสิทธิภาพของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ก่อนการปรับปรุงมีค่าประมาณ 8% จากสมการสมรรถนะ 5 รูปแบบ ผลที่ได้พบว่า ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์กับผลต่างอุณหภูมิสารทำงานด้านความดันสูงและต่ำสามารถทำนายพฤติกรรมการทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยมีค่า $R^2 = 0.9945$ และ $P\text{-value} = 5.2678 \times 10^{-06}$ ในรูปแบบ $\eta_{\text{ORC}} = 0.1285(T_{\text{Ref,B}} - T_{\text{Ref,C}}) - 1.8222$ และสมการสมรรถนะระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนวิเคราะห์ทั้งหมด 3 รูปแบบ ผลการศึกษาพบว่า ความสัมพันธ์ในรูปแบบ $\text{COP} = -0.0394[(T_G - T_C) / (T_A - T_E)] + 0.8759$ โดยมีค่า $R^2 = 0.9993$ และ $P\text{-value} = 5.7061 \times 10^{-19}$ ทั้งนี้ระบบรวมสามารถเพิ่มประสิทธิภาพได้ประมาณ 12%

Abstract

This research studies the parameters analysis of an R-245fa organic Rankine cycle (ORC) at capacity around 20 kW_e combined with a Water-LiBr absorption chiller at cooling capacity around 160 kW to find out thermal performance of the both systems. Waste heat from the ORC system is recovered to supply the absorption chiller for cooling refrigerant temperature of the ORC condenser. From the study results, it could be found that the ORC efficiency is around 8% from 5 correlations, which $\eta_{\text{ORC}} = 0.1285(T_{\text{Ref,B}} - T_{\text{Ref,C}}) - 1.8222$ at $R^2 = 0.9945$ and $P\text{-value} = 5.2678 \times 10^{-06}$ is the best correlation performance of the ORC system. While, the best correlation performance of the absorption chiller is $\text{COP} = -0.0394[(T_G - T_C) / (T_A - T_E)] + 0.8759$ at $R^2 = 0.9993$ and $P\text{-value} = 5.7061 \times 10^{-19}$ compared with 3 correlations. For the modified system, it could be seen that the efficiency of modified system is around 12%.

คำสำคัญ: วัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ ระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน สมการสมรรถนะแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

Keywords: Organic Rankine cycle, Absorption chiller, Performance curve, Mathematical model

1. บทนำ

พลังงานเป็นปัจจัยพื้นฐานที่สำคัญอย่างยิ่งต่อการพัฒนาประเทศ ทั้งทางด้านเศรษฐกิจ และสังคมเพราะ

จำเป็นต้องใช้พลังงานในทุกขั้นตอนของการดำเนินงาน ทั้งทางด้านอุตสาหกรรม คมนาคม เกษตรกรรมและอื่น ๆ ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่า ปัจจัยที่ส่งผลต่อปริมาณการใช้

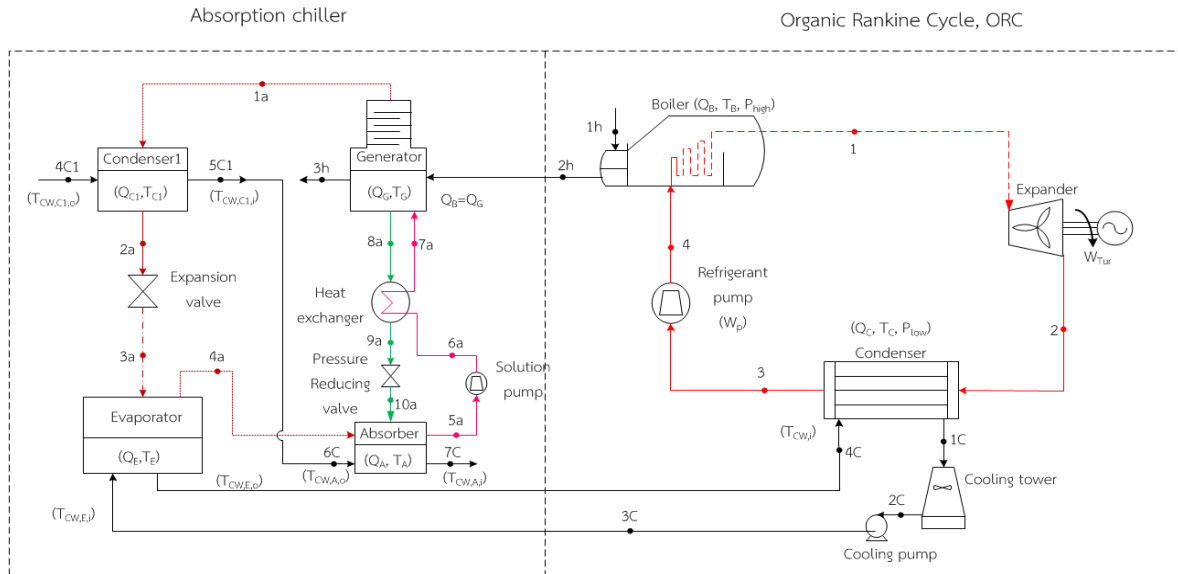
พลังงานที่เห็นได้อย่างชัดเจน คือ จำนวนประชากร อัตราการเพิ่มของประชากร และระดับของการพัฒนา โดยแหล่งพลังงานพื้นฐานที่สำคัญที่ใช้กันมากในชีวิตประจำวันทั่วไป คือ น้ำมัน ถ่านหินและก๊าซธรรมชาติ ซึ่งเป็นต้นเหตุของการทำลายสิ่งแวดล้อม ดังนั้นรัฐบาลไทยเห็นความสำคัญของปัญหาดังกล่าว โดยได้กำหนดกรอบและทิศทางนโยบายพลังงานของประเทศ ซึ่งมุ่งเน้นไปที่ความมั่นคงด้านพลังงาน เพื่อให้มั่นใจว่ามีเสถียรภาพด้านพลังงานสำหรับประเทศไทย โดยการส่งเสริมและพัฒนาพลังงานทดแทนให้เป็น 25% ของการใช้พลังงานทั้งหมดของประเทศในปี ค.ศ. 2021 ซึ่งวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ (Organic Rankine Cycle, ORC) และระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน (Absorption chiller) เป็นเทคโนโลยีที่ถูกพัฒนาเพื่อใช้พลังงานทดแทนการใช้พลังงานฟอสซิลในการผลิตไฟฟ้าและการทำความเย็น

วัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์เป็นวัฏจักรที่ใช้สารอินทรีย์เป็นสารทำงานแทนน้ำ จุดเดือดของสารอินทรีย์ต่ำกว่าน้ำ การใช้แหล่งความร้อนคุณภาพต่ำมาขับเคลื่อนวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ [1-3] การนำวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์มาใช้ร่วมกับพลังงานทดแทน อาทิเช่นความร้อนเหลือทิ้ง [4-6] พลังงานความร้อนใต้พิภพ [7-9] พลังงานความร้อนแสงอาทิตย์ [10-12] พลังงานความร้อนชีวมวล [13-15] และ พลังงานความร้อนมหาสมุทร [16-18]

สำหรับการปรับปรุงประสิทธิภาพของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ Chaiyat and Kiatsiriroat [19]

นำเสนอการเพิ่มประสิทธิภาพของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ร่วมกับระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน (Absorption chiller) โดยใช้สมการสมรรถนะ (Performance curve) ของระบบทั้งสองที่ได้จากผลการทดสอบ ผลที่ได้พบว่า ประสิทธิภาพของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์เพิ่มขึ้นประมาณ 7% เทียบกับระบบก่อนการปรับปรุง สอดคล้องกับ Inthavideth and Chaiyat [20] ที่นำเสนอการวิเคราะห์สมรรถนะการทำงานของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ร่วมกับระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน โดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ผลที่ได้พบว่า ประสิทธิภาพการทำงานของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์หลังการปรับปรุงมีค่าประมาณ 12% หรือเพิ่มขึ้นประมาณ 50% เทียบกับวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ก่อนการปรับปรุง สาเหตุเนื่องมาจากระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน ช่วยลดอุณหภูมิสารทำงานที่เครื่องควบแน่นของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

จากการศึกษาข้างต้น พบว่า ยังไม่มีงานวิจัยใดนำเสนอความรูปแบบสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆ ที่เหมาะสมต่อการทำนายประสิทธิภาพการทำงาน ในรูปแบบสมรรถนะของการทำงานร่วมวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์และระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ โดยลดอุณหภูมิไ้ระบายความร้อนของหอผึ่งความร้อน จากน้ำเย็นที่ผลิตได้จากระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน ดังแสดงในรูปที่ 1 ซึ่งเป็นที่มาของงานวิจัยนี้



รูปที่ 1 แผนภาพการทำงานร่วมของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์และระบบทำความเย็นดูดกลืน

2. วัตถุประสงค์

เพื่อวิเคราะห์ตัวแปรที่มีผลต่อการทำงานของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์และระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนในรูปแบบความสัมพันธ์สมการสมรรถนะการทำงาน (Performance curve)

3. แนวคิด ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

3.1 วัฏจักรคาร์โนต์

ประสิทธิภาพทางความร้อนสูงสุดของระบบด้านความร้อน สามารถอธิบายได้ด้วยประสิทธิภาพคาร์โนต์ (η_{Carnot}) ซึ่งเป็นประสิทธิภาพทางอุณหพลศาสตร์ที่ไม่สามารถทำได้จริง โดยวัฏจักรคาร์โนต์สามารถย้อนกลับได้ ประสิทธิภาพคาร์โนต์สามารถคำนวณได้จากสมการดังต่อไปนี้ [22]

$$\eta_{\text{Carnot}} = (T_H - T_L) / T_H = 1 - (T_L / T_H) \quad (1)$$

3.2 วัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์

วัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์เป็นระบบการทำงานที่ใช้หลักการของวัฏจักรแรงคิน (Rankine cycle) แต่ใช้สารทำงานในกลุ่มสารอินทรีย์ (Organic) ที่มีมวลโมเลกุลสูงสามารถเปลี่ยนสถานะจากของเหลวเป็นไอที่อุณหภูมิต่ำหรือมีจุดเดือดต่ำ (Boiling point) เมื่อ

เปรียบเทียบกับจุดเดือดของน้ำที่ใช้เป็นสารทำงานในวัฏจักรแรงคินทั่วไป ทำให้วัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์สามารถผลิตกระแสไฟฟ้าได้โดยใช้ความร้อนอุณหภูมิต่ำ (น้อยกว่า 100 °C) [22]

วัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ดังแสดงในรูปที่ 1 มีหลักการการทำงาน คือ ของไหลที่ผ่านกระบวนการควบแน่นจนสมบูรณ์ในเครื่องควบแน่น จะควบแน่นเป็นของเหลวอิมตัว (จุดที่ 3) และของไหลจะถูกอัดตัวโดยปั๊ม (Pump) ภายใต้กระบวนการไอเซนทรอปิกจนกระทั่งมีความดันสูงขึ้น (P_H) (จุดที่ 4) ภายในหม้อต้ม (Boiler) จากนั้นของเหลวจะถูกให้ความร้อนภายใต้ความดันคงที่ และกลายเป็นไอร้อนยวดยิ่ง (จุดที่ 1) ในที่สุดไอร้อนยวดยิ่งจะเข้าสู่กังหัน (Turbine) ขยายตัวแบบไอเซนทรอปิก และผลิตงานโดยการจับเพลลาที่ต่อเข้ากับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Generator) ทำให้ความดันและอุณหภูมิของไอสารทำงานลดลง (P_L) (จุดที่ 2) ที่ทางออกของกังหันซึ่งอยู่ในสถานะของผสม (ไอและของเหลว) จากนั้นจะไหลไปควบแน่นยังเครื่องควบแน่นภายใต้ความดันคงที่ กลายเป็นของเหลวอิมตัวที่สถานะ (3) อีกครั้ง [22]

จากรูปที่ 1 สมการทางคณิตศาสตร์ของวัฏจักร
แรงจลนศาสตร์อินทรีย์ พิจารณาที่สภาวะคงตัว (Steady state
steady flow, SSSF) สามารถแสดงได้ดังสมการต่อไปนี้

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

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

$$W_{Tur} = \dot{m}_{ref}(h_1 - h_2) \quad (4)$$

$$W_P = \dot{m}_{ref} V_3 (P_H - P_L) / \eta_{s,P} \quad (5)$$

$$\eta_{ORC} = (W_{Tur} - W_P) / Q_B \quad (6)$$

3.3 ระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน

ระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนดังแสดงในรูปที่ 1
มีหลักการทำงานดังนี้ คือ ความร้อนอุณหภูมิต่ำเข้าสู่เจเน
เนอเรเตอร์ (Generator) เพื่อถ่ายเทความร้อนให้แก่
สารละลาย จากนั้นสารทำงาน (Absorbate) ที่มีจุดเดือด
ต่ำกว่าสารดูดกลืน (Absorbent) จะระเหยกลายเป็นไอ
และไหลออกจากเจเนอเรเตอร์ที่ความดันสูง ไอสาร
ทำงานที่ออกจากเจเนอเรเตอร์ (จุดที่ 1a) ไหลไปยัง
เครื่องควบแน่น (Condenser1) แล้วควบแน่นกลายเป็น
สารทำงานสถานะของเหลว (จุดที่ 2a) ที่ความดันสูง
จากนั้นจะไหลผ่านวาล์วลดความดัน (Expansion valve)
เพื่อลดความดัน (จุดที่ 3a) เข้าไปในเครื่องระเหย
(Evaporator) ซึ่งสารทำงานจะรับความร้อนจากของไหล
ซึ่งมากพอที่จะทำให้สารทำงานสถานะของเหลวระเหย
กลายเป็นไอ (จุดที่ 4a) ที่ความดันต่ำ แล้วไหลเข้าไปยัง
แอบซอร์บเบอร์ (Absorber) สารทำงานสถานะไอ
ดังกล่าวจะถูกดูดกลืนร่วมกับสารละลายความเข้มข้นต่ำ
(ความเข้มข้นสารทำงาน) ที่กลับมาจากอุปกรณ์
แลกเปลี่ยนความร้อน (Heat exchanger) ทำให้กลายเป็น
สารละลายความเข้มข้นสูง (จุดที่ 5a) สารละลายดังกล่าว
จะถูกส่งไปยังเจเนอเรเตอร์ด้วยปั๊มสารละลาย
(Solution pump) ผ่านอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน (จุด
ที่ 6a) และภายในเจเนอเรเตอร์เนื่องจากสารทำงานใน
สารละลายระเหยกลายเป็นไอ ทำให้เหลือสารละลาย
ความเข้มข้นต่ำ ซึ่งสารละลายดังกล่าวจะถูกส่งกลับมายัง
แอบซอร์บเบอร์ (จุดที่ 8a) โดยถ่ายเทความร้อนให้กับ
สารละลายความเข้มข้นสูงในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความ
ร้อน (จุดที่ 9a) จากนั้นจะผ่านวาล์วลดความดัน

(Pressure reducing valve) (จุดที่ 10a) แล้วไหลเข้าไปยัง
แอบซอร์บเบอร์เพื่อดูดกลืนไอสารทำงานต่อไป [22]

จากรูปที่ 1 สมการทางคณิตศาสตร์ของระบบทำ
ความเย็นแบบดูดกลืน สามารถแสดงได้ดังต่อไปนี้

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

$$Q_{C,AB} = \dot{m}_{1a} h_{1a} - \dot{m}_{2a} h_{2a} \quad (8)$$

$$Q_E = \dot{m}_{4a} h_{4a} - \dot{m}_{3a} h_{3a} \quad (9)$$

$$Q_A = \dot{m}_{4a} h_{4a} + \dot{m}_{10a} h_{10a} - \dot{m}_{5a} h_{5a} \quad (10)$$

$$W_{SP} = [(P_{H,AB} - P_{L,AB})(V_{5a} \dot{m}_{5a})] / \eta_{s,SP} \quad (11)$$

$$Q_{HX} = \dot{m}_{8a} C_{p,8a} (T_{8a} - T_{9a}) = \dot{m}_{6a} C_{p,6a} (T_{7a} - T_{6a}) \quad (12)$$

$$COP_{AB} = Q_E / (Q_G + W_{SP}) \quad (13)$$

4. วิธีการดำเนินงานวิจัย

วิธีการดำเนินงานวิจัยมีรายละเอียดในแต่ละ
ขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวัฏจักร
แรงจลนศาสตร์อินทรีย์และระบบทำความเย็นแบบ
ดูดกลืน
2. วิเคราะห์การทำงานของวัฏจักรแรงจลนศาสตร์อินทรีย์
โดยมีเงื่อนไขเริ่มต้นการทำงานจากการจำลอง
ระบบดังต่อไปนี้ [19-20]
 - สารทำงานที่ใช้กับระบบ คือ R-245fa
 - ปริมาณความร้อนที่หม้อต้ม (Q_B) เท่ากับ 200
kW
 - อุณหภูมิ น้ำร้อน ที่เข้าวัฏจักรแรงจลน
ศาสตร์อินทรีย์ (T_{1h}) เท่ากับ 90-120 °C
 - ผลต่างอุณหภูมิ น้ำร้อน ที่ให้ความร้อนกับสาร
ทำงานที่หม้อต้ม ($T_{2h} - T_B$) เท่ากับ 3 °C
 - ผลต่างอุณหภูมิ น้ำร้อน ที่เข้าและออกหม้อต้ม
($T_{1h} - T_{2h}$) เท่ากับ 15 °C
 - อุณหภูมิ น้ำระบายความร้อนเข้าเครื่อง
ควบแน่น ($T_{3c} = T_{4c}$) เท่ากับ 30 °C
 - ผลต่างอุณหภูมิ น้ำระบายความร้อนเข้าและ
ออกเครื่องควบแน่น ($T_{1c} - T_{4c}$) เท่ากับ 5 °C

- ผลต่างอุณหภูมิที่ระบายความร้อนกับสารทำงานที่เครื่องควบแน่น ($T_C - T_{1C}$) เท่ากับ 3 °C
3. วิเคราะห์การทำงานของระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน ดังแสดง มีรายละเอียดของเงื่อนไขเริ่มต้นการจำลองระบบดังต่อไปนี้ [20]
- คู่สารทำงานที่ใช้กับระบบ คือ $H_2O-LiBr$
 - ปริมาณความร้อนที่เครื่องเจ็นเนอเรเตอร์ ($Q_G = Q_B$) เท่ากับ 200 kW
 - อุณหภูมิน้ำร้อนที่เข้าระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน (T_{2h}) เท่ากับ 75-105 °C
 - ผลต่างอุณหภูมิที่ระบายความร้อนกับสารทำงานที่เจ็นเนอเรเตอร์ ($T_{3h} - T_G$) เท่ากับ 3 °C
 - ผลต่างอุณหภูมิที่ระบายความร้อนกับสารทำงานที่เครื่องควบแน่น ($T_{C,AB} - T_{5C}$) เท่ากับ 3 °C
 - ผลต่างอุณหภูมิที่ระบายความร้อนกับสารทำงานที่แอบซอร์เบอร์ ($T_A - T_{7C}$) เท่ากับ 3 °C
 - อุณหภูมิที่ระบายความร้อนที่ออกจากเครื่องควบแน่นเท่ากับอุณหภูมิที่ระบายความร้อนที่เข้าแอบซอร์เบอร์ ($T_{5C} = T_{6C}$)
 - ผลต่างอุณหภูมิที่เข้าและออกที่เครื่องควบแน่น แอบซอร์เบอร์ เครื่องระเหย และเจ็นเนอเรเตอร์ เท่ากับ 5 °C
4. วิเคราะห์และสรุปผลการจำลองการทำงานของวัฏจักรแรงจลนศาสตร์อินทรีย์และระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนเพื่อหาความสัมพันธ์ต่างๆ เพื่อวิเคราะห์หาความสัมพันธ์กับอุณหภูมิที่จุดต่างๆ
5. วิเคราะห์และสรุปผลการจำลองการทำงานร่วมของวัฏจักรแรงจลนศาสตร์อินทรีย์ก่อนและหลังการปรับปรุง

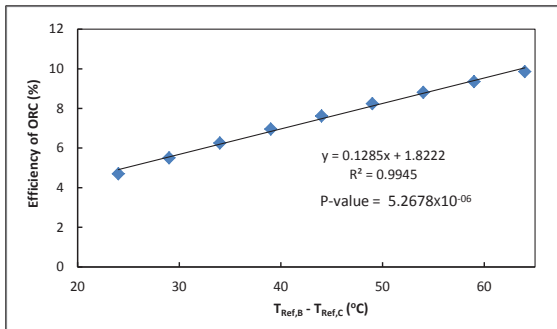
5. ผลและอภิปรายผลการศึกษา

5.1 วัฏจักรแรงจลนศาสตร์อินทรีย์

การศึกษาสมการสมรรถนะความสัมพันธ์ของประสิทธิภาพวัฏจักรแรงจลนศาสตร์อินทรีย์กับอุณหภูมิของไหลที่อุปกรณ์ในระบบในรูปแบบต่างๆ มีดังต่อไปนี้

- ผลต่างอุณหภูมิของแหล่งความร้อน (Heat source) และแหล่งระบายความร้อน (Heat sink) ($T_{HW,i,B} - T_{CW,i,C}$)
- สัดส่วนอุณหภูมิที่ร้อนเข้าหม้อต้มและน้ำระบายความร้อนเข้าเครื่องควบแน่น ($T_{HW,i,B} / T_{CW,i,C}$)
- ผลต่างอุณหภูมิสารทำงานที่เครื่องระเหยและเครื่องควบแน่น ($T_{Ref,B} - T_{Ref,C}$)
- สัดส่วนอุณหภูมิสารทำงานที่เครื่องระเหยและเครื่องควบแน่น ($T_{Ref,B} / T_{Ref,C}$)
- สัดส่วนของผลต่างอุณหภูมิสารทำงานที่อุปกรณ์ด้านความดันสูงและต่ำ [$(T_{Ref,Tur} - T_{Ref,B}) / (T_{Ref,C} - T_{Ref,Pump})$]

โดยผลจากการศึกษา พบว่า ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพของวัฏจักรแรงจลนศาสตร์อินทรีย์กับผลต่างอุณหภูมิสารทำงานที่เครื่องระเหยและเครื่องควบแน่นในรูปแบบ $\eta_{ORC} = 0.1285(T_{Ref,B} - T_{Ref,C}) - 1.8222$ โดยมีค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ (Coefficient of determination) หรือบางครั้งเรียกว่า สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) เท่ากับ 0.9945 เมื่อเทียบกับความสัมพันธ์ในรูปแบบอื่นๆ ถือว่ามีค่าใกล้เคียงกัน แต่มีค่าความน่าจะเป็น (Probability value, P-value) ที่ความสัมพันธ์ของกลุ่มตัวแปรแกน x มีผลต่อค่าในแนวแกน y เท่ากับ 5.2678×10^{-06} ซึ่งมีค่าต่ำที่สุด ดังแสดงในรูปที่ 2 ถือว่าเหมาะสม เพราะทำให้การทำนายการทำงานของวัฏจักรแรงจลนศาสตร์อินทรีย์ได้อย่างสะดวกและมีประสิทธิภาพ ซึ่งสอดคล้องกับวัฏจักรคาร์โนต์ที่กล่าวว่า ประสิทธิภาพของระบบการทำงานจะเพิ่มขึ้นเมื่อผลต่างอุณหภูมิของแหล่งความร้อน และแหล่งระบายความร้อนเพิ่มขึ้น



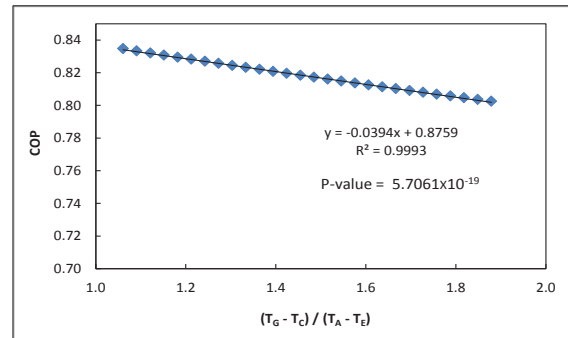
รูปที่ 2 ประสิทธิภาพของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์กับผลต่างอุณหภูมิสารทำงานด้านความดันสูงและต่ำ

5.2 ระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน

การศึกษาสมการสมรรถนะความสัมพันธ์ของสัมประสิทธิ์สมรรถนะ (Coefficient of performance, COP) กับอุณหภูมิของไหลที่อุปกรณ์ในระบบในรูปแบบต่างๆ มีดังต่อไปนี้

- ผลต่างอุณหภูมิน้ำร้อนเข้าเจนเนอเรเตอร์และน้ำระบายความร้อนเข้าเครื่องควบแน่น ($T_{HW,i,G} - T_{CW,i,C,AB}$)
- สัดส่วนอุณหภูมิน้ำร้อนเข้าเจนเนอเรเตอร์และน้ำระบายความร้อนเข้าเครื่องควบแน่น ($T_{HW,i,G} / T_{CW,i,C,AB}$)
- สัดส่วนผลต่างอุณหภูมิในรูปแบบ $(T_G - T_C) / (T_A - T_E)$

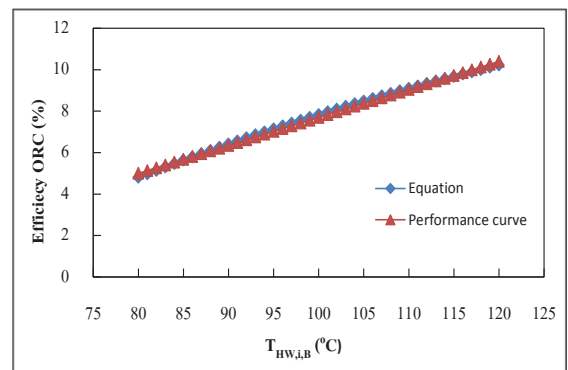
โดยผลจากการศึกษา พบว่า ความสัมพันธ์สัมประสิทธิ์สมรรถนะของระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนกับสัดส่วนของผลต่างอุณหภูมิสารทำงานที่อุปกรณ์ความดันสูงและความดันต่ำในรูปแบบของ $COP_{AB} = -0.0394[(T_G - T_C) / (T_A - T_E)] + 0.8759$ โดยมีค่า $R^2 = 0.9993$ และ $P\text{-value} = 5.7061 \times 10^{-19}$ ดังแสดงในรูปที่ 3 ถือว่าเหมาะสม เนื่องจากเป็นความสัมพันธ์ของอุปกรณ์หลักในระบบ ซึ่งทำให้ทำนายการทำงานของระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนได้ถูกต้อง ควบคุม ใช้ทำนายการทำงานของระบบได้อย่างสะดวกและมีประสิทธิภาพ



รูปที่ 3 สัมประสิทธิ์สมรรถนะของระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนกับสัดส่วนของผลต่างอุณหภูมิสารทำงานที่อุปกรณ์ความดันสูงและต่ำ

5.3 ประสิทธิภาพวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ร่วมกับระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน

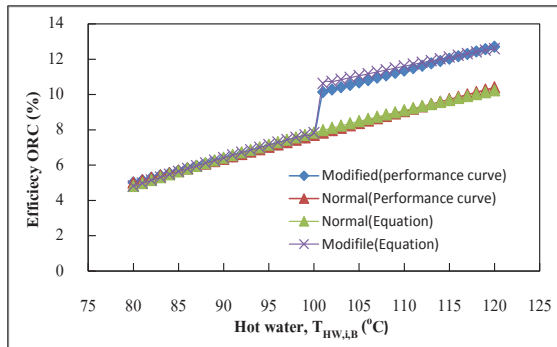
การเปรียบเทียบความถูกต้องของสมการสมรรถนะการทำงานของระบบ กับผลการคำนวณของสมการทางเทอร์โมไดนามิกส์ (สมดุลพลังงาน) ของ Xangpueak and Nattaporn [20] ซึ่งผลที่ได้ พบว่า ผลการเปรียบเทียบมีความใกล้เคียงกัน แต่การใช้สมการสมรรถนะมีความสะดวกในการใช้งานมากกว่าแต่ยังคงทำนายพฤติกรรมการทำงานของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ได้อย่างถูกต้อง และมีประสิทธิภาพดังแสดงในรูปที่ 4



รูปที่ 4 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ที่ได้จากสมการทางเทอร์โมไดนามิกส์และได้จากสมการสมรรถนะ

รูปที่ 5 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ก่อนและหลังการปรับปรุง ซึ่งประสิทธิภาพการทำงานหลังการปรับปรุงมีค่าประมาณ 12% สูงกว่าระบบก่อนปรับปรุงที่มีค่าประมาณ 8% หรือ

ประสิทธิภาพการทำงานเพิ่มขึ้นประมาณ 50% เมื่อเทียบกับระบบก่อนการปรับปรุง แต่ระบบรวมจะเริ่มทำงานได้อุณหภูมิความร้อนประมาณ 101°C จึงทำให้ระบบทั้งสองสามารถทำงานร่วมกันได้อย่างมีประสิทธิภาพ



รูปที่ 5 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ก่อนและหลังการปรับปรุง

โดยการศึกษาในงานวิจัยครั้งนี้เป็นการจำลองการทำงานของระบบทั้งสองจากการคำนวณ ยังไม่ได้ทำการพิสูจน์ผลการวิเคราะห์ดังกล่าว โดยผลการทดสอบซึ่งคณะผู้วิจัยจะทำการทดสอบวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์และระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนในขั้นตอนต่อไป ดังแสดงภาพถ่ายของต้นแบบระบบทั้งสองที่จะทำการทดสอบต่อไป ในรูปที่ 6 และ 7 ตามลำดับ



รูปที่ 6 วัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ขนาด 20 kW_e



รูปที่ 7 ระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนขนาดประมาณ 1 TR

6. สรุปผลการศึกษา

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

- สมการสมรรถนะของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์คือ $R^2 = 0.9945$ และ $P\text{-value} = 5.2678 \times 10^{-06}$ $\eta_{\text{ORC}} = 0.1285(T_{\text{Ref,B}} - T_{\text{Ref,C}}) - 1.8222$
- สมการสมรรถนะของระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน คือ $R^2 = 0.9993$ และ $P\text{-value} = 5.7061 \times 10^{-19}$ $\text{COP} = -0.0394[(T_G - T_C) / (T_A - T_E)] + 0.8759$
- ประสิทธิภาพการทำงานของระบบหลังการปรับปรุงเพิ่มขึ้นประมาณ 50% เมื่อเทียบกับระบบก่อนการปรับปรุง

7. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ภายใต้อำเภอโครงการผลิตและพัฒนาศักยภาพบัณฑิตทางด้านพลังงานทดแทน ในกลุ่มประเทศอาเซียน สำหรับนักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา” และสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ภายใต้อำเภอแผนงานพลังงานทดแทนภายใต้อำเภอโครงการความร่วมมือระหว่างไทย-จีน 2559 ที่ให้ทุนสนับสนุนการวิจัย

8. เอกสารอ้างอิง

- [1] Yamada N, Tominaga Y, Yoshida T. Demonstration of 10-WP micro organic Rankine cycle generator for low-grade heat recovery. *Energy*, 2014, 78, 806 – 813.
- [2] 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.
- [3] 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 – 3979.
- [4] Roy JP, Mishra MK, Misra A. Parametric optimization and performance analysis of a waste heat recovery system using organic Rankine cycle. *Energy*, 2010;35(12):5049-5062.
- [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] 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.
- [8] Hu DS, Li SL, Zheng Y, Wang JF, Dai YP. Preliminary design and off-design performance analysis of an organic Rankine cycle for geothermal sources. *Energy Conversion Management*, 2015;96:175-187.
- [9] Liu Q, Duan YY, Yang Z. Performance analyses of geothermal organic Rankine cycles with selected hydrocarbon working fluids. *Energy*, 2013;63:123-132.
- [10] Marion M, Voicu I, Tiffonnet AL. Wind effect on the performance of a solar organic Rankine cycle. *Renewable Energy*, 2014;68:651-661.
- [11] Wang JF, Yan ZQ, Zhao P, Dai YP. Off-design performance analysis of a solar powered organic Rankine cycle. *Energy Conversion Management*, 2014;80:150-157.
- [12] Rayegan R, Tao YX. A procedure to select working fluids for solar organic Rankine cycles (ORCs). *Renewable Energy*, 2011;36(2):659-670.
- [13] Jradi M, Riffat S. Experimental investigation of a biomass-fuelled micro-scale tri-generation system with an organic Rankine cycle and liquid desiccant cooling unit. *Energy*, 2014;71:80-93.
- [14] Uris M, Linares JI, Arenas E. Techno-economic feasibility assessment of a biomass cogeneration plant based on an organic Rankine cycle. *Renewable Energy*, 2014;66:707-713.
- [15] Drescher U, Brueggemann D. Fluid selection for the organic Rankine cycle (ORC) in biomass power

and heat plants. *Applied Thermal Engineering*, 2007;27(1):223-228.

- [16] Jung H, Hwang JH. Feasibility study of a combined ocean thermal energy conversion method in South Korea. *Energy*, 2014;75:443-452.
- [17] Sun FM, Ikegami Y, Jia BJ, Arima H. Optimization design and exergy analysis of organic rankine cycle in ocean thermal energy conversion. *Applied Ocean Research*, 2012;35:38-46.
- [18] Hung TC, Wang SK, Kuo CH, Pei BS, Tsai KF. A study of organic working fluid system efficiency of an ORC using low-grade energy sources. *Energy*, 2010;35:1403-1411.
- [19] 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.
- [20] XangpheukInthavideth and NattapornChaiyat. การวิเคราะห์สมรรถนะการทำงานของวัฏจักรแรงจลนสารอินทรีย์ร่วมกับระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน, เรื่องการถ่ายเทพลังงานความร้อนและมวลในอุปกรณ์ด้านความร้อนและกระบวนการ (ครั้งที่ 15), 2016, 88-93.
- [21] นัฐพร ไชยญาติ. การออกแบบระบบพลังงานทดแทน (Renewable energy system design). วิทยาลัยพลังงานทดแทน, มหาวิทยาลัยแม่โจ้, สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยแม่โจ้, พิมพ์ครั้งที่ 2 สิงหาคม พ.ศ. 2559, 291 หน้า.
- [22] นัฐพร ไชยญาติ. การนำความร้อนทิ้งกลับคืน (Waste heat recovery). วิทยาลัยพลังงานทดแทน, มหาวิทยาลัยแม่โจ้, สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยแม่โจ้, พิมพ์ครั้งที่ 1 มกราคม พ.ศ. 2558, 324 หน้า.

รายการสัญลักษณ์

สัญลักษณ์

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

ตัวกรีก

η	ประสิทธิภาพ (%)
V	ปริมาณจำเพาะ (m ³ /kg)

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	วัฏจักรแรงจลนสารอินทรีย์
P	ปั๊มสารทำงาน
ref	สารทำงาน
SP	ปั๊มสารละลาย
Tur	กังหัน