

การถ่ายทอด พลังงานความร้อนและมวล

ในอุปกรณ์ด้านความร้อนและกระบวนการ

(ครั้งที่ 15)

ระหว่างวันที่ 30-31 มีนาคม 2559

ณ โรงแรม แอล รีสอร์ท สมุย

จังหวัดสุราษฎร์ธานี



การเพิ่มประสิทธิภาพของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์โดยใช้ระบบทำความเย็นแบบดูดซับ

ENHANCEMENT EFFICIENCY OF AN ORGANIC RANKINE CYCLES BY USING AN ADSORPTION REFRIGERATION

Yiayang Wakaiyang

Nattaporn Chaiyat

วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์โดยระบบทำความเย็นแบบดูดซับ เพื่อลดอุณหภูมิสารทำงานที่เครื่องควบแน่นของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ ร่วมกับการเลือกคู่สารทำงานที่เหมาะสมสำหรับระบบทำความเย็นแบบดูดซับ โดยงานวิจัยนี้ นำผลการทดสอบวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ขนาด 20 kW_e ที่ใช้ R-245fa เป็นสารทำงาน มาวิเคราะห์ร่วมกับพฤติกรรมด้านความร้อนของระบบทำความเย็นแบบดูดซับที่ใช้คู่สาร 4 ชนิด อันประกอบไปด้วย ซิลิกาเจล-น้ำ ซีโอไลท์-น้ำ คาร์บอน-เมทานอล และคาร์บอน-แอมโมเนีย ตามลำดับ ผลการศึกษาพบว่า วัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์มีประสิทธิภาพก่อนการปรับปรุงประมาณ 6.81% ที่อุณหภูมิน้ำร้อนเข้าสู่ระบบประมาณ 100 °C และระบบหลังการปรับปรุงมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นโดยเฉลี่ยประมาณ 4.64% และยิ่งพบอีกว่า ระบบทำความเย็นแบบดูดซับที่ใช้คู่สารทำงานซิลิกาเจล-น้ำ มีประสิทธิภาพของระบบหลังการปรับปรุงสูงที่สุด คือ 11.45% ที่ค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะของระบบทำความเย็นเท่ากับ 0.53 และอุณหภูมิสารทำงานที่เครื่องควบแน่นของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ประมาณ 19.88 °C

คำสำคัญ: วัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ระบบทำความเย็นแบบดูดซับ คู่สารทำงาน

Abstract

This research studies enhancement efficiency of an organic Rankine cycle (ORC) by using an adsorption refrigeration for reducing the refrigerant temperature of the ORC condenser. Selection working pairs of the adsorption refrigeration is used to evaluate the suitable working fluids. In this study, the testing results of a 20 kW_e ORC system with using R-245fa as refrigerant is used to consider with thermal performance of the adsorption system at 4 working pairs, which are silica gel-water, zeolite-water, carbon-methanol and carbon-ammonia, respectively. From the simulation results, it could be found that the normal ORC efficiency is 6.81% at the hot water entering the ORC system around 100 °C. In case of the modified systems, the average efficiency could be enhanced at around 4.64%. In addition, the adsorption refrigeration taken silica gel-water as working pair shows the highest ORC efficiency at around 11.45%, which the COP of the adsorption system and the ORC condenser temperature are 0.53 and 19.88 °C, respectively.

Keywords: Organic Rankine Cycle, Adsorption Refrigeration Cycle, Working Pairs

1. บทนำ

ในปัจจุบันมีการใช้พลังงานในอัตราเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ เนื่องจากมีการขยายตัวทางด้านอุตสาหกรรม ที่อยู่อาศัยและการเพิ่มขึ้นของกิจกรรมด้านต่างๆ โดยพลังงานส่วนใหญ่ได้มาจากเชื้อเพลิงฟอสซิล ซึ่งเป็นแหล่งพลังงานที่ใช้แล้วหมดไป ทำให้ปริมาณลดน้อยลงอย่างต่อเนื่อง ในเขตอุตสาหกรรมหลายประเภทมีความร้อนทั้งอยู่ในปริมาณสูงและยังไม่มีเทคโนโลยีนำมาใช้ให้เกิดประโยชน์ซึ่งวัฏจักรแรงคิน

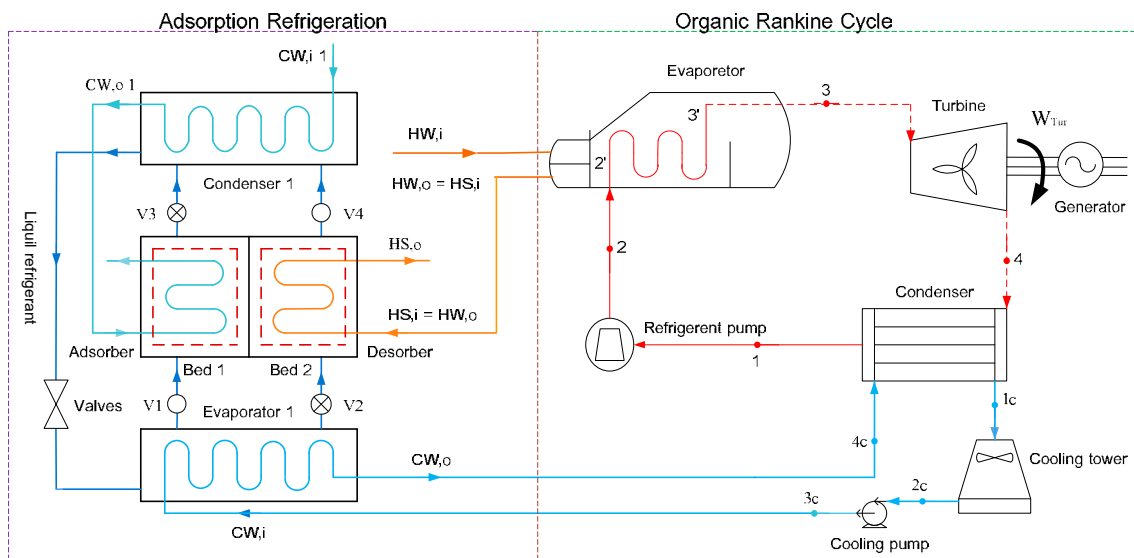
สารอินทรีย์ (Organic Rankine Cycle, ORC) เป็นเทคโนโลยีที่เหมาะสมสำหรับการใช้ความร้อนที่มีอุณหภูมิต่ำมาผลิตพลังงานไฟฟ้า

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับร่วมกับวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์มีดังต่อไปนี้ Chaiyat [1] ศึกษาประเมินความเป็นไปได้การผลิตกระแสไฟฟ้าของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์โดยใช้พลังงานทางเลือกคือพลังงานความร้อนใต้พิภพ พลังงานแสงอาทิตย์และขยะ ซึ่งผลการศึกษาพบว่า วัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ที่ใช้พลังงานความร้อนใต้

พิภพ มีต้นทุนการผลิตต่อหน่วยพลังงานไฟฟ้าที่ได้ต่ำที่สุดสอดคล้องกับ Liuet al. [2] และKang et al. [3] ที่นำพลังงานทดแทนจากความร้อนเหลือทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม มาป้อนให้แก่วัฏจักรแรงดันอินทรีย์ที่ใช้สารทำงานR-245faนอกจากนั้นFu et al.[4]ศึกษาการออกแบบและสร้างโรงไฟฟ้าวัฏจักรแรงดันอินทรีย์ที่ใช้สารทำงาน R-245fa ผลการศึกษาพบว่า ระบบรับพลังงานความร้อน 225 kW และมีประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้า7.94% ที่ประสิทธิภาพของกังหันเท่ากับ63.7%Wang et al. [5] และWei et al. [6] ศึกษาผลของอุณหภูมิแหล่งความร้อนที่มีผลต่อประสิทธิภาพของวัฏจักรแรงดัน ผลการศึกษาพบว่า อุณหภูมิของแหล่งความร้อนมีผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพการผลิตพลังงานไฟฟ้าLiet al.[7] ประเมินผลการป้อนความร้อนเข้าวัฏจักรแรงดันอินทรีย์ในช่วงอุณหภูมิ90-120 °Cและอัตราส่วนของผลผลิตพลังงานสุทธิที่ผลิตกระแสไฟฟ้าผลพบว่ามีประสิทธิภาพวัฏจักรแรงดันอินทรีย์มีค่าประมาณ8.13%Jiang [8]

ศึกษาการทำงานของวัฏจักรแรงดันอินทรีย์ร่วมกับระบบทำความเย็นแบบดูดซับแบบสองขั้นที่ใช้คู่สารทำงานคือ CaCl₂-BaCl₂ ผลการศึกษาพบว่า ประสิทธิภาพด้านความร้อนและประสิทธิภาพรวมเอ็กซ์เชนเจอร์ของระบบรวมเพิ่มขึ้นเป็น10.1-13.1%และ18.5-20.3%ตามลำดับ

จากงานวิจัยต่างๆที่กล่าวมาข้างต้นพบว่า ยังไม่มีงานวิจัยใดศึกษาระบบทำความเย็นแบบดูดซับ(Adsorption refrigeration)มาประยุกต์ใช้ผลิตน้ำเย็นร่วมกับวัฏจักรแรงดันอินทรีย์เพื่อลดอุณหภูมิสารทำงานที่เครื่องควบแน่นวัฏจักรแรงดันอินทรีย์ดังนั้นจึงเป็นที่มาของงานวิจัยนี้ที่ต้องการศึกษาการนำระบบทำความเย็นแบบดูดซับมาทำงานร่วมกับวัฏจักรแรงดันอินทรีย์และศึกษาเงื่อนไขการทำงานที่เหมาะสมของระบบรวมดังกล่าว รวมทั้งการใช้คู่สารทำงานที่เหมาะสมของระบบทำความเย็นแบบดูดซับ ในการปรับปรุงประสิทธิภาพของวัฏจักรแรงดันอินทรีย์ดังแสดงในรูปที่ 1

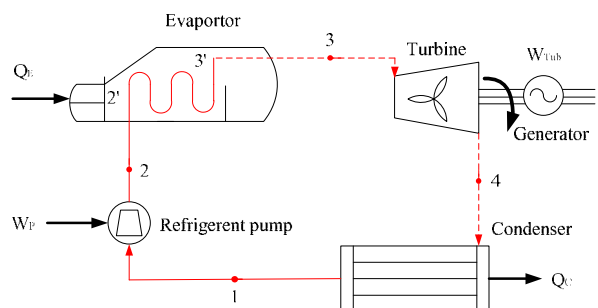


รูปที่1แผนภาพการทำงานของวัฏจักรแรงดันอินทรีย์ร่วมกับระบบทำความเย็นแบบดูดซับ

2. หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ก. วัฏจักรแรงดันอินทรีย์ (Organic Rankine Cycle)

วัฏจักรแรงดันอินทรีย์มีหลักการเหมือนวัฏจักรแรงดัน (Rankine cycle) ที่ใช้น้ำเป็นสารทำงาน แต่วัฏจักรแรงดันอินทรีย์ใช้สารอินทรีย์ที่มีจุดเดือดต่ำเป็นสารทำงาน ซึ่งสามารถเปลี่ยนสถานะจากของเหลวเป็นไอได้ง่ายกว่า สารทำงาน (น้ำ) ในวัฏจักรแรงดันวัฏจักรแรงดันอินทรีย์ประกอบไปด้วย 4อุปกรณ์หลัก คือ ปั๊มสารทำงาน (Refrigerant pump) เครื่องระเหย (Evaporator) กังหัน (Turbine) และเครื่องควบแน่น (Condenser) ดังแสดงกระบวนการทำงานในรูปที่ 2



รูปที่2 แผนภาพอุปกรณ์ทำงานของวัฏจักรแรงดันอินทรีย์

จากรูปที่ 2 วัฏจักรแรงดันอินทรีย์มีหลักการทำงานดังนี้ คือ สารทำงานในสถานะของเหลว (จุดที่ 1) ถูกส่งมารับความร้อนที่เครื่องระเหย (จุดที่ 2) โดยปั๊มสารทำงาน จากนั้นสารทำงานจะรับความร้อนจากน้ำร้อนภายใต้ความดันคงที่ ($P_2=P_1$) จนกระทั่งเข้าสู่สถานะของเหลวอิ่มตัวที่สภาวะ (จุดที่ 2') กลายเป็นไออิ่มตัวที่สภาวะ (จุดที่ 3') และเป็นไอร้อนยวดยิ่งที่สภาวะไอร้อนยวดยิ่ง(จุดที่ 3) เข้าสู่กังหัน



ขยายตัวและขับเพลลาที่ต่อกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า จากนั้นความดันและอุณหภูมิของไอของสารทำงานที่ทางออกของกังหันจะลดลง (จุดที่ 4) จะไหลเข้าสู่เครื่องควบแน่นภายใต้ความดันคงที่ ($P_4=P_1$) กลายเป็นของเหลวอิ่มตัว (จุดที่ 1)[1]ในระบบผลิตกระแสไฟฟ้าของวัฏจักรแรงจลนศาสตร์อินทรีย์มีการระบายความร้อนด้วยน้ำที่เครื่องควบแน่นโดยใช้หอผึ่งระบายความร้อน (Cooling tower) ทั้งนี้สมการทางคณิตศาสตร์ของอุปกรณ์ต่างๆ ในรูปที่ 2 มีดังต่อไปนี้

ปั๊มสารทำงาน

$$W_P = \dot{m}_{ref} (h_2 - h_1) \quad (1)$$

เครื่องระเหย

$$Q_E = \dot{m}_{ref} (h_3 - h_2) \quad (2)$$

กังหัน

$$W_{Tur} = \dot{m}_{ref} (h_3 - h_4) \quad (3)$$

เครื่องควบแน่น

$$Q_C = \dot{m}_{ref} (h_4 - h_1) \quad (4)$$

ดังนั้น ประสิทธิภาพทางความร้อนของวัฏจักรแรงจลนศาสตร์อินทรีย์สามารถแสดงได้ดังสมการต่อไปนี้

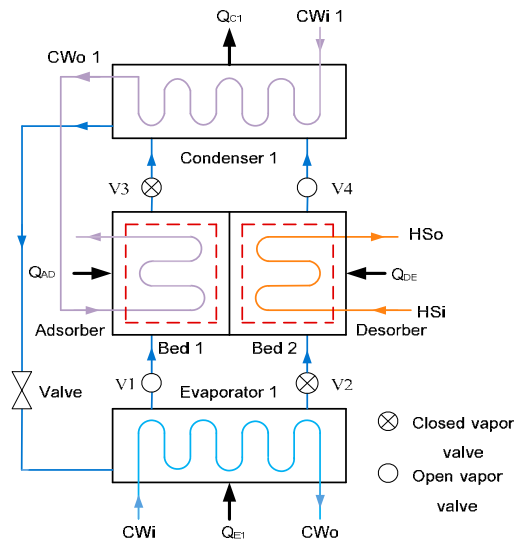
$$\eta_{ORC} = W_{net} / Q_E \quad (5)$$

$$W_{net} = W_{Tur} - W_P - W_{CW} \quad (6)$$

ข. ระบบทำความเย็นแบบดูดซับ (Adsorption Refrigeration)

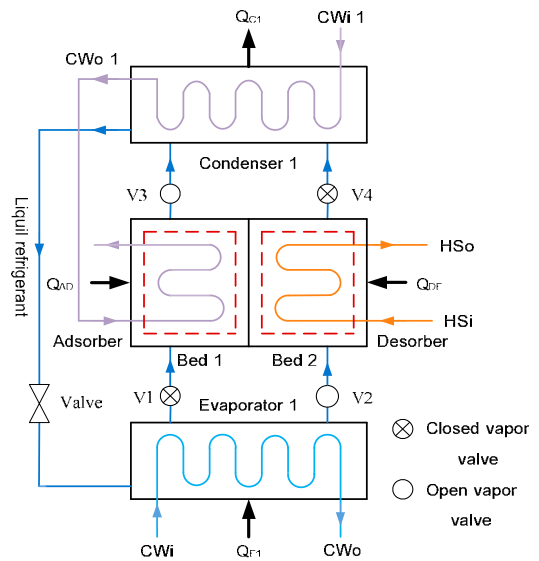
ระบบทำความเย็นแบบดูดซับใช้สารทำงานที่มีตัวดูดซับ (Adsorbent) ในสถานะของแข็ง และสารทำงานที่ของไหลสามารถเปลี่ยนสถานะเป็นของเหลวและไอได้ เรียกว่า สารถูกดูดซับ (Adsorbate) ระบบทำความเย็นแบบดูดซับต้องการแหล่งความร้อนอุณหภูมิปานกลางประมาณ 70-95 °C ระบบทำความเย็นแบบดูดซับอุปกรณ์หลัก คือเครื่องดูดซับ (Adsorber) เครื่องระเหย (Evaporator) เครื่องควบแน่น (Condenser) และเครื่องคายสารดูดซับ (Desorber) โดยระบบดังกล่าวมีหลักการการทำงานดังแสดงในรูปที่ 3 และ 4

จากรูปที่ 3 แสดงการทำงานของเครื่องคายสารดูดซับ Bed 2 ที่มีการเชื่อมต่อกับเครื่องระเหย เพื่อใช้ระเหยสารทำความเย็นผ่านวาล์ว 2 และคายสารดูดซับผ่านวาล์ว 4 หลักการทำงาน Bed 2 เป็นกระบวนการให้ความร้อนที่ (Isosteric heating) จากแหล่งความร้อน และเป็นกระบวนการคายสารดูดซับที่ความดันคงที่ (Isobaric desorption) จากนั้นสารทำงานจะไหลไปยังเครื่องควบแน่นเพื่อระบายความร้อนที่มีปริมาณสารถูกดูดซับคงที่ (Isosteric cooling) ในขณะเดียวกันเครื่องดูดซับ Bed 1 จะทำงานในกระบวนการดูดซับที่ความดันคงที่ (Isobaric adsorption) ที่มาจากเครื่องระเหย



รูปที่ 3 แผนภาพการทำงานของคายสารดูดซับของเครื่องคายสารดูดซับ

จากรูปที่ 4 แสดงการทำงานของเครื่องดูดซับ Bed 1 ที่เชื่อมต่อกับเครื่องระเหยที่ดูดซับสารผ่านทางวาล์ว 1 และคายสารทำงานให้แก่เครื่องควบแน่นผ่านทางวาล์ว 3 ในขณะเดียวกันเครื่องคายสารดูดซับ Bed 2 สารถูกดูดซับจากเครื่องระเหย วิ่งเข้าสู่เครื่องคายสารดูดซับ



รูปที่ 4 แผนภาพการทำงานของคายสารดูดซับของเครื่องดูดซับ

จากการทำงานของระบบทำความเย็นแบบดูดซับ พิจารณาพลังงานความร้อนป้อนเข้า (Bed) ของหนึ่งรอบการทำงาน คือผลรวมของความร้อนที่ได้รับในกระบวนการที่เครื่องดูดซับและเครื่องคายสารดูดซับ ดังแสดงในสมการต่อไปนี้

$$Q_{H(Bed)} = Q_{DE} + Q_{AD} \quad (7)$$

ค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะ (Coefficient of Performance, COP) ของการทำความเย็น หาได้จากอัตราส่วนของอัตราการทำความเย็นที่เครื่องระเหย (Q_E) กับเครื่องทำความร้อนที่ $Q_{H(Bed)}$ ดังสมการต่อไปนี้

$$COP = Q_{E1} / Q_{H(Bed)} \quad (8)$$

ดังนั้น ประสิทธิภาพรวมของวัฏจักรแรงดันอินทรีย์ที่ทำงานร่วมกับระบบทำความเย็นแบบดูดซับ เพื่อผลิตพลังงานไฟฟ้าร่วมกับการทำความเย็น สามารถหาได้จากสมการ

$$\eta_{\text{ORC-AD}} = W_{\text{net}} / Q_E \quad (9)$$

$$W_{\text{net}} = W_{\text{TUR}} - W_P - W_{\text{CW}} \quad (10)$$

3. ขั้นตอนการวิจัย

ขั้นตอนการดำเนินศึกษาของงานวิจัยนี้ มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

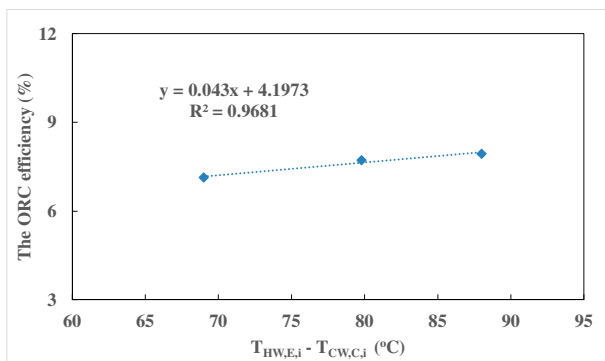
1. ศึกษาวิจัยที่เกี่ยวข้องของวัฏจักรแรงดันอินทรีย์และระบบทำความเย็นแบบดูดซับ
2. นำผลการศึกษาของคณะวิจัยร่วม [1] ของวัฏจักรแรงดันอินทรีย์ขนาด 20 kW_e มาใช้ในการวิเคราะห์พฤติกรรมการทำงานของระบบ
3. สรุปและรวบรวมข้อมูลพฤติกรรมด้านความร้อน (Thermal performance) ของระบบทำความเย็นแบบดูดซับ ที่ใช้คู่สารทำงานชนิดต่าง ๆ
4. วิเคราะห์ประสิทธิภาพการทำงานร่วมของวัฏจักรแรงดันอินทรีย์และระบบทำความเย็นแบบดูดซับ เพื่อเลือกคู่สารทำงานที่เหมาะสมสำหรับระบบต่อไป
5. สรุปและวิเคราะห์ผลของงานวิจัย

4. ผลและการอภิปรายผล

ก. วัฏจักรแรงดันอินทรีย์

จากผลการทดสอบวัฏจักรแรงดันอินทรีย์ขนาด 20kW_e ที่ใช้สารทำงาน R-245fa โดยการป้อนน้ำร้อนอุณหภูมิระหว่าง 90-120 °C ให้แก่ระบบที่เครื่องระเหยผลการศึกษาดังกล่าวพบว่า ประสิทธิภาพของระบบมีค่าเฉลี่ยประมาณ 6-8% และความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิแตกต่างของน้ำร้อนเข้าเครื่องระเหยและน้ำหล่อเย็นที่ไหลเข้าเครื่องควบแน่น (T_{HW,i}-T_{CW,i}) กับประสิทธิภาพทางความร้อนของวัฏจักรแรงดันอินทรีย์ (η_{ORC}) ใช้ในสมการที่ 9 และ 10) มีรูปแบบเป็นสมการเส้นตรง ซึ่งเรียกว่า สมการสมรรถนะ (Performance curve) ดังแสดงในรูปที่ 5 และสมการต่อไปนี้

$$\eta_{\text{ORC}} = 0.043 (T_{\text{HW},i} - T_{\text{CW},i}) + 4.1973 \quad (11)$$



รูปที่ 5 สมการสมรรถนะของวัฏจักรแรงดันอินทรีย์

ในงานวิจัยนี้ กำหนดให้อุณหภูมิน้ำร้อนเข้าจักรแรงดันอินทรีย์มีอุณหภูมิ 100 °C ดังนั้นจากสมการสมรรถนะได้ว่า วัฏจักรแรงดันอินทรีย์ก่อนการปรับปรุงมีประสิทธิภาพประมาณ 6.81% ดังแสดงรายละเอียดการประเมินในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 การประเมินประสิทธิภาพของวัฏจักรแรงดันอินทรีย์ก่อนการปรับปรุง

คุณสมบัติทำงาน	ข้อมูล
อุณหภูมิน้ำร้อนเข้า (T _{HW,i} , °C)	100
อุณหภูมิน้ำร้อนออก (T _{HW,o} , °C)	85
อุณหภูมิน้ำหล่อเย็นเข้า (T _{CW,i} , °C)	32
อุณหภูมิน้ำหล่อเย็นออก (T _{CW,o} , °C)	37
สมการการคำนวณ	สมการที่ 11
ประสิทธิภาพ (η_{ORC} , %)	6.81

ข. ระบบทำความเย็นแบบดูดซับ

จากผลการศึกษาและรวบรวมข้อมูลจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับคู่สารทำงานในระบบทำความเย็นแบบดูดซับ พบว่า คู่สารทำงานที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน และสามารถทำงานได้ในช่วงอุณหภูมิที่ 70-100 °C ซึ่งเป็นช่วงอุณหภูมิของระบบทำความเย็นแบบดูดซับในงานวิจัยนี้ มีทั้งหมด 4 คู่สารทำงานคือ ซิลิกาเจล-น้ำ (Silica gel-Water) ซีโอไลต์-น้ำ (Zeolite-Water) คาร์บอน-เมทานอล (Carbon-Methanol) และคาร์บอน-แอมโมเนีย (Carbon-Ammonia) ซึ่งคุณสมบัติเฉพาะการทำงานของคู่สารทำงานชนิดต่าง ๆ แสดงรายละเอียดในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ผลการศึกษารวบรวมคุณสมบัติทำงานของคู่สารทำงานชนิดต่าง ๆ

คู่สารทำงาน	คุณสมบัติการทำงาน				อ้างอิง
	T _{HS} (°C)	T _c (°C)	T _E (°C)	COP	
ซิลิกาเจล-น้ำ (SGW)	75-95	30	9.42	0.55	Nunez [9]
	65-95	30	9.42	0.50	Freni [10]
ซีโอไลต์-น้ำ (ZLW)	65-90	27	12	0.44	Li [11]
	60-85	29	12	0.48	Myat [12]
คาร์บอน-เมทานอล (CM)	85	30	14	0.42	Habib [13]
	80-85	30	14	0.43	Habib [14]
คาร์บอน-แอมโมเนีย (CA)	85	35	10	0.45	Tamainot [15]

จากข้อมูลในตารางที่ 2 พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะของคู่สารทำงานซิลิกาเจล-น้ำมีค่าสูงที่สุดรองลงมา คือ คู่สารทำงานซีโอไลต์-น้ำคาร์บอน-แอมโมเนีย และคาร์บอน-เมทานอล ตามลำดับ โดยค่าเฉลี่ยสัมประสิทธิ์สมรรถนะของคู่สารทำงานทั้ง 4 ชนิดดังกล่าวแสดงในรูปที่ 6





รูปที่ 6 การเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การทำความเย็นของสารทำงานชนิดต่างๆ

ค. ระบบร่วมวัฏจักรแรงดันอินทรีย์และระบบทำความเย็นแบบดูดซับ

การปรับปรุงประสิทธิภาพของวัฏจักรแรงดันอินทรีย์โดยใช้ระบบทำความเย็นแบบดูดซับ ในการผลิตน้ำเย็นในการระบายความร้อนร่วมกับหอผึ่งระบายความร้อน เพื่อลดอุณหภูมิสารทำงานที่เครื่องควบแน่นของวัฏจักรแรงดันอินทรีย์สำหรับระบบทำความเย็นแบบดูดซับพิจารณาการใช้สารทำงานชนิดต่างๆเพื่อเลือกสารทำงานที่เหมาะสมที่สุด สำหรับการทำงานร่วมกันของระบบทั้งสองดังแสดงในรูปที่ 1

ตารางที่ 3 แสดงผลการดำเนินงานร่วมกันของระบบทำความเย็นแบบดูดซับที่ใช้สารทำงานซิลิกาเจล-น้ำโดยน้ำร้อนที่ออกจากวัฏจักรแรงดันอินทรีย์มีอุณหภูมิ 85°C และนำมาใช้ในการขับเคลื่อนระบบทำความเย็นแบบดูดซับ ผลที่ได้พบว่า วัฏจักรแรงดันอินทรีย์มีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นเป็น 11.45% และสามารถลดอุณหภูมิระบายความร้อนได้ประมาณ 14.54°C

ตารางที่ 3 ผลการทำงานร่วมของระบบทำความเย็นแบบดูดซับที่ใช้สารทำงานซิลิกาเจล-น้ำ

คุณสมบัติการทำงาน	ข้อมูล
วัฏจักรแรงดันอินทรีย์	
อุณหภูมิน้ำร้อนเข้า ($T_{HW,i}$, °C)	100
อุณหภูมิน้ำร้อนออก ($T_{HW,o}$, °C)	85
อุณหภูมิน้ำหล่อเย็นเข้า ($T_{CW,i}$, °C)	14.54
อุณหภูมิน้ำหล่อเย็นออก ($T_{CW,o}$, °C)	19.54
ระบบทำความเย็นแบบดูดซับ	
อุณหภูมิแหล่งน้ำร้อนเข้า (T_{HS} , °C)	85
อุณหภูมิเครื่องควบแน่น 2 (T_{C1} , °C)	30
อุณหภูมิเครื่องระเหย 2 (T_{E1} , °C)	9.42
ค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะ (COP)	0.53
ระบบผลิตพลังงานร่วม	
สมการการคำนวณ	สมการที่ 11
ประสิทธิภาพ (η_{ORC-AD} , %)	11.45

ตารางที่ 4 แสดงผลการคำนวณของระบบร่วมที่ใช้สารทำงานซิลิกาเจล-น้ำในระบบทำความเย็นแบบดูดซับผลที่ได้พบว่า วัฏจักรแรงดันอินทรีย์มีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นเป็น 10.79% แต่เมื่อเทียบกับการใช้สารทำงานซิลิกาเจล-น้ำ มีค่าน้อยกว่าเล็กน้อย เนื่องจากจากระบบทำความเย็นแบบดูดซับที่ใช้สารซิลิกาเจล-น้ำ มีค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะน้อยกว่าสารทำงานซิลิกาเจล-น้ำรวมทั้งอุณหภูมิระบายความร้อนของการใช้ซิลิกาเจล-น้ำ ยังมีค่าสูงกว่าอีกด้วยที่ประมาณ 16.99 °C

ตารางที่ 4 ผลการทำงานร่วมของระบบทำความเย็นแบบดูดซับที่ใช้สารทำงานซิลิกาเจล-น้ำ

คุณสมบัติการทำงาน	ข้อมูล
วัฏจักรแรงดันอินทรีย์	
อุณหภูมิน้ำร้อนเข้า ($T_{HW,i}$, °C)	100
อุณหภูมิน้ำร้อนออก ($T_{HW,o}$, °C)	85
อุณหภูมิน้ำหล่อเย็นเข้า ($T_{CW,i}$, °C)	16.99
อุณหภูมิน้ำหล่อเย็นออก ($T_{CW,o}$, °C)	21.69
ระบบทำความเย็นแบบดูดซับ	
อุณหภูมิแหล่งน้ำร้อนเข้า (T_{HS} , °C)	85
อุณหภูมิเครื่องควบแน่น 2 (T_{C1} , °C)	28
อุณหภูมิเครื่องระเหย 2 (T_{E1} , °C)	12
ค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะ (COP)	0.46
ระบบผลิตพลังงานร่วม	
สมการการคำนวณ	สมการที่ 11
ประสิทธิภาพ (η_{ORC-AD} , %)	10.79

ตารางที่ 5 ผลการทำงานร่วมของระบบทำความเย็นแบบดูดซับที่ใช้สารทำงานคาร์บอน-แอมโมเนีย

คุณสมบัติการทำงาน	ข้อมูล
วัฏจักรแรงดันอินทรีย์	
อุณหภูมิน้ำร้อนเข้า ($T_{HW,i}$, °C)	100
อุณหภูมิน้ำร้อนออก ($T_{HW,o}$, °C)	85
อุณหภูมิน้ำหล่อเย็นเข้า ($T_{CW,i}$, °C)	17.06
อุณหภูมิน้ำหล่อเย็นออก ($T_{CW,o}$, °C)	22.06
ระบบทำความเย็นแบบดูดซับ	
อุณหภูมิแหล่งน้ำร้อนเข้า (T_{HS} , °C)	85
อุณหภูมิเครื่องควบแน่น 2 (T_{C1} , °C)	35
อุณหภูมิเครื่องระเหย 2 (T_{E1} , °C)	10
ค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะ (COP)	0.37
ระบบผลิตพลังงานร่วม	
สมการการคำนวณ	สมการที่ 11
ประสิทธิภาพ (η_{ORC-AD} , %)	10.76

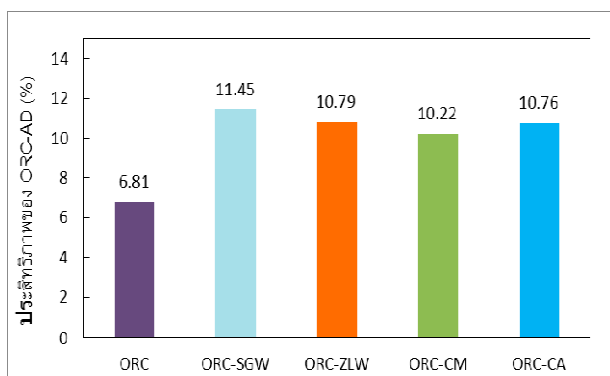
ตารางที่ 5 และ 6 แสดงผลการดำเนินงานร่วมกันของระบบทำความเย็นแบบดูดซับที่ใช้สารทำงานคาร์บอน-แอมโมเนีย และคาร์บอน-เมทานอล ตามลำดับ ผลที่ได้พบว่าสารทำงานทั้งสองสามารถเพิ่ม

ประสิทธิภาพของวัฏจักรแรงดันอินทรีย์ได้้น้อยกว่าซิลิกาเจล-น้ำ และซีโอไลท์-น้ำ ที่ประมาณ 10.76% และ 10.22% ตามลำดับ สาเหตุมาจากระบบทั้งสองมีค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำควมเย็นน้อยกว่า ส่งผลให้อุณหภูมิไ้ระบายความร้อนสูงกว่า และประสิทธิภาพรวมของระบบผลิตพลังงานร่วมไฟฟ้าและความเย็นมีค่าน้อยกว่าตามไปด้วย

ตารางที่ 6 ผลการทำงานร่วมของระบบทำความเย็นแบบดูดซับที่ใช้คู่สารทำงานคาร์บอน-เมทานอล

คุณสมบัติการทำงาน	ข้อมูล
วัฏจักรแรงดันอินทรีย์	
อุณหภูมิน้ำร้อนเข้า ($T_{HW,i}$, °C)	100
อุณหภูมิน้ำร้อนออก ($T_{HW,o}$, °C)	85
อุณหภูมิน้ำหล่อเย็นเข้า ($T_{CW,i}$, °C)	14.27
อุณหภูมิน้ำหล่อเย็นออก ($T_{CW,o}$, °C)	19.27
ระบบทำความเย็นแบบดูดซับ	
อุณหภูมิแหล่งน้ำร้อนทิ้ง (T_{HS} , °C)	95
อุณหภูมิเครื่องควบแน่น 2 (T_{C1} , °C)	30
อุณหภูมิเครื่องระเหย 2 (T_{E1} , °C)	14
ค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะ (COP)	0.43
ระบบผลิตพลังงานร่วม	
สมการการคำนวณ	สมการที่ 11
ประสิทธิภาพ (η_{ORC-AD} , %)	10.22

รูปที่ 7 แสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของของวัฏจักรแรงดันอินทรีย์ก่อนและหลังปรับปรุงโดยใช้คู่สารทำงาน 4 ชนิดในระบบทำความเย็นแบบดูดซับ ผลการเพิ่มประสิทธิภาพพบว่า ระบบทำความเย็นแบบดูดซับสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของของวัฏจักรแรงดันอินทรีย์โดยเฉลี่ยประมาณ 4.69% และคู่สารทำงานซิลิกาเจล-น้ำ ให้ประสิทธิภาพของระบบร่วมได้สูงสุด รองลงมา คือ ซีโอไลท์-น้ำ คาร์บอน-แอมโมเนียและคาร์บอน-เมทานอล ตามลำดับ



รูปที่ 7 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพวัฏจักรแรงดันอินทรีย์

5. สรุปผลการวิจัย

ผลการศึกษาการทำงานร่วมกันของวัฏจักรแรงดันอินทรีย์กับระบบทำความเย็นโดยใช้คู่สารทำงานชนิดต่างๆสามารถสรุปผลดังต่อไปนี้

- 1) วัฏจักรแรงดันอินทรีย์ขนาด 20 kW_e ที่ใช้สารทำงาน R-245fa มีประสิทธิภาพเฉลี่ยประมาณ 6-8% ที่น้ำร้อนอุณหภูมิ 90-120 °C
- 2) การทำงานร่วมกันของวัฏจักรแรงดันอินทรีย์กับระบบทำความเย็นแบบดูดซับ สามารถเพิ่มประสิทธิภาพของวัฏจักรแรงดันอินทรีย์โดยเฉลี่ยประมาณ 4.64%
- 3) ระบบทำความเย็นแบบดูดซับที่ใช้คู่สารทำงานซิลิกาเจล-น้ำเป็นคู่สารทำงานที่เหมาะสมที่สุด เนื่องจากสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของวัฏจักรแรงดันอินทรีย์ได้สูงสุดที่ประมาณ 11.45% ที่อุณหภูมิไ้ระบายความร้อน 14.54 °C

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ภายใต้"โครงการผลิตและพัฒนาศักยภาพบัณฑิตทางด้านพลังงานทดแทน ในประเทศอาเซียนสำหรับนักศึกษาาระดับบัณฑิตศึกษา"และสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ แผนพัฒนาพลังงานทดแทน ภายใต้โครงการความร่วมมือระหว่างไทย-จีน 2558 ที่ให้ทุนสนับสนุนทำการวิจัย

7. อ้างอิง

- [1] Chaiyat N Assessment Alternative Energy for Organic Rankine Cycle Power Plant in Thailand. School of Renewable Energy, Maejo University, Chiang Mai, Thailand Retrieved on: 24 October 2015.
- [2] Liu H, Zhou Q, Zhou H, Wang P (2015) Experiments and thermal modeling on hybrid energy supply system of gas engine heat pumps and organic Rankine cycle, Energy and Buildings, 87, 226-232.
- [3] Kang S.H (2012) Design and experimental study of organic Rankine cycle (ORC) and radial turbine using R245fa working fluid, Energy, 71, 514-524.
- [4] Fu B, Lee Y, Hsieh J (2015) Design construction and preliminary results of a 250 kW organic Rankine cycle system, Applied Thermal Engineering, 80, 339-346.
- [5] Wang D, Ling X, Peng H, Liu L, Tao L.L (2013) Efficiency and optimal performance evaluation of organic Rankine cycle for low, Energy, 50, 343-352.
- [6] Wei D, Lu X, Lu Zh, Gu J (2007) Performance analysis and optimization of organic Rankine cycle (ORC) for waste heat recovery, Energy Conversion and Management, 48, 1113-1119.
- [7] Li T, Zhang Z.H, Lu J, Yang J.L, Hu Y (2015) Two-stage evaporation strategy to improve system performance for Organic Rankine Cycle, Applied Energy, 150, 323-334.
- [8] Jiang L, Wang L, Wang R, Gao P, Song F (2014) Investigation on cascading cogeneration system of ORC



- (organic Rankine cycle) and CaCl₂/BaCl₂ two-stage adsorption freezer, Energy, 71, 377-387.
- [9] Nunez T, Mittelbach W, Henning H.M (2004) Development of an Adsorption chiller and heat pump for domestic heating and air-conditioning applications In: Proceedings of the third international conference on heat powered cycles (HPC2004), Cyprus.
- [10] Freni A, Restuccia G, Vasta S, Aristov Y. (2004) Selective water Sorbent for solid sorption chiller: experimental results and modeling, International Journal Refrigeration, 27, 284–293.
- [11] Li A, Ismail A.B, Thu K, Choon Ng K, Loh W.S (2014) Performance evaluation of a zeolite–water adsorption chiller with entropy analysis of thermodynamic insight, Applied Energy, 130, 702–711.
- [12] Myat A, Choon NG.K, Thu K, Kim Y.D (2013) Experimental investigation on the optimal performance of Zeolite–water adsorption Chiller, Applied Energy, 102, 582–590.
- [13] Habib K.H, Saha B.B, Koyama S.H (2014) Study of various adsorbent-refrigerant pairs for the application of solar had driven adsorption cooling in tropical climates, Applied Thermal Engineering, 72, 266-274.
- [14] Habib KH, Bidyut B.Saha(2013) Performance Evaluation of Solar Driven Activated Carbon Fiber-Ethanol based Adsorption Cooling System in Malaysia, Asian Journal of Scientific Research, 6, 146-156.
- [15] Tamainot-Telto. Z, Metcalf. S.J, Critoph. R.E, Zhong. Y, Thorpe. R (2009) Carbon–ammonia pairs for adsorption refrigeration applications: ice making, air conditioning and heat pumping international journal of refrigeration, 32, 1212–1229.

C	Condenser
DE	Desorption
E	Evaporator
e	Eclectic
HW	Hot water
HS	Heatsource
i	Inlet
o	Outlet
P	Pump
Tur	Turbine
Ref	Refrigerant

อักษรย่อและสัญลักษณ์

อักษรย่อ	ความหมาย
C	ค่าความจุจำเพาะของน้ำ (kJ/kg·K)
COP	Coefficient of performance ()
h	เอนทัลปี (kJ/kg)
ḡ	อัตราการไหลมวล (kg/s)
Q	อัตราความร้อน (kJ/kg)
T	อุณหภูมิ (°C)
W	พลังงาน (kJ/kg)
ตัวกรีก	ความหมาย
η	ประสิทธิภาพ (%)
ตัวห้อย	ความหมาย
AD	Adsorption
CW	Cooling water

