

การวิเคราะห์เศรษฐศาสตร์พลังงานและเอ็กเซอร์จีของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ร่วมกับ
ระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

Energy and Exergy Costings of an Organic Rankine Cycle Combined with
an Absorption Chiller by Mathematical Model

บุญคำข่ง นวงไข¹ นัฐพร ไชยญาติ^{1*} ชวโรจน์ ใจสิน¹ และ จักรพันธ์ ถาวรงามยิ่งสกุล²
Bounkhamxiong Navongxay¹, Nattaporn chaiyat^{1*}, Chawaroj Jaisin¹
and Chakkrapan Thawongamyingsakul²

¹ วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้

² คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ตาก

¹School of Renewable Energy, Maejo University

²Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Lanna Tak

* Corresponding author: benz178tii@hotmail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาต้นทุนการผลิตไฟฟ้าต่อหน่วยด้านพลังงานและเอ็กเซอร์จีของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ร่วมกับระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน โดยระบบการทำงานร่วมดังกล่าวประกอบด้วย 3 รูปแบบ คือ รูปแบบที่ 1 ใช้ระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนมาระบายความร้อนแทนเครื่องควบแน่นในวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ รูปแบบที่ 2 ใช้ระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนมาลดอุณหภูมิสารทำงานบริเวณทางออกของกังหัน และรูปแบบที่ 3 ใช้ระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนมาลดอุณหภูมิสารทำงานก่อนเข้าเครื่องควบแน่น และใช้น้ำเย็นระบายความร้อนร่วมกับหอระบายความร้อนที่เครื่องควบแน่น ซึ่งสารทำงานที่ใช้ในวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ คือ R-245fa และคู่สารทำงานที่ใช้ในระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน คือ สารละลายแอมโมเนีย-น้ำ จากผลการศึกษาพบว่า รูปแบบการทำงานร่วมที่เหมาะสมที่สุด คือ รูปแบบที่ 1 โดยมีค่าต้นทุนการผลิตพลังงานต่อหน่วยและเอ็กเซอร์จีเท่ากับ 3.48 16.08 Bath/kWh ตามลำดับ ในขณะที่รูปแบบที่ 2 มีค่าเท่ากับ 4.06 18.55 Bath/kWh ตามลำดับ และรูปแบบที่ 3 มีค่าเท่ากับ 4.93 22.09 Bath/kWh ตามลำดับ

คำสำคัญ: วัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ ระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน ต้นทุนการผลิตพลังงานต่อหน่วยและเอ็กเซอร์จีแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

Abstract

In this study, energy and exergy costings of an organic Rankine cycle (ORC) combined with an absorption chiller are presented. The combined units have been presented 3 models to compare the thermal performance. The first model presents the absorption system as the ORC condenser, the second model represents technique for reducing working fluid temperature leaving the ORC expander and the third model shows the absorption system combined with the cooling tower to reducing temperature working fluid at the ORC condenser. R-245fa is selected as working fluid of the ORC system, while the absorption system uses an ammonia-water (NH₃-H₂O) solution. From the study results, the optimal combined system was model number 1. Levelized energy and

exergy costs of the model 1 were 3.48 and 16.08 Bath/kWh, while the model 2 were 4.06 and 18.55 Bath/kWh in addition to the model 3 illustrated 4.93 and 22.09 Bath/kWh, respectively.

Keywords: Organic Rankine cycle, Absorption chiller, Energy costing, Exergy costing, Mathematical model

บทนำ

พลังงานเป็นปัจจัยที่สำคัญอย่างยิ่งต่อการพัฒนาประเทศทางด้านเศรษฐกิจ และสังคม ดังนั้นจึงได้หาแนวทางแก้ไขเพื่อให้การใช้พลังงานมีความยั่งยืนมากขึ้น โดยระบบการทำงานร่วมของพลังงานความร้อน ความเย็น และการผลิตไฟฟ้า (Combined cooling heating and power generation, CCHP) เป็นระบบที่มีความน่าสนใจของตลาดพลังงานในปัจจุบัน เนื่องจากมีประสิทธิภาพสูง และการลงทุนเริ่มต้นค่อนข้างถูก ซึ่งวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ (Organic Rankine cycle, ORC) และระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน (Absorption chiller) เป็นหนึ่งในเทคโนโลยีที่ถูกพัฒนาเพื่อใช้พลังงานทดแทนมาผลิตไฟฟ้าและความเย็น โดยแหล่งความร้อนที่มีศักยภาพและเหมาะสมให้แก่ระบบ อาทิเช่น ความร้อนเหลือทิ้ง พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานความร้อนใต้พิภพ พลังงานชีวมวล และเชื้อเพลิงขยะ เป็นต้น

โดยงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับระบบผลิตพลังงานร่วม อาทิเช่น Hamdullahpur et al. (2011); F.A.Al-Sulaiman et al. (2012) นำเสนอการเพิ่มประสิทธิภาพด้านพลังงานและเอ็กเซอร์จี (Exergy) ของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ โดยลดอุณหภูมิสารทำงานบริเวณทางออกของกังหันก่อนเข้าสู่เครื่องควบแน่น ด้วยระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน ผลที่ได้พบว่า สามารถเพิ่มประสิทธิภาพด้านพลังงานและเอ็กเซอร์จีได้ประมาณ 28% ในขณะที่ Dincer et al. (2012) ประเมินสมรรถนะของระบบทำความเย็น ความร้อน และไฟฟ้าร่วมกับตัวเก็บพลังงานแสงอาทิตย์แบบพาราโบลิก (Solar parabolic) ผลที่ได้พบว่า ประสิทธิภาพด้านพลังงานและเอ็กเซอร์จีของระบบรวมเท่ากับ 46% และ 88% ตามลำดับ Chaiyat and Kiatsirirot (2015) นำเสนอการเพิ่มประสิทธิภาพของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ร่วมกับระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนสอดคล้องกับงานวิจัยของ Xangpheuak and Nattaporn (2016) เพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ร่วมกับระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน ซึ่งทั้ง 2 งานวิจัยดังกล่าว สามารถเพิ่มประสิทธิภาพของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ได้ประมาณ 50% Bicer and Dincer (2016) วิเคราะห์ประสิทธิภาพด้านพลังงานและเอ็กเซอร์จีของระบบการผลิตร่วมแบบหลากหลาย (Multi-generation) โดยใช้ความร้อนจากพลังงานใต้พิภพและพลังงานแสงอาทิตย์ สอดคล้องกับงานวิจัยของ Bellos and Tzivanidis (2017) นำเสนอการเพิ่มประสิทธิภาพของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ ร่วมกับการทำความเย็นและความร้อน (Tri-generation) โดยใช้สารทำงาน 8 ชนิด ในการทดสอบหาจุดการทำงานร่วมที่เหมาะสม Mohammadi et al. (2017) นำเสนอการวิเคราะห์สมรรถนะระบบทำความเย็น ความร้อน และไฟฟ้าร่วมกับกังหันลมและระบบทำความเย็นแบบอัดไอ Bounkhamxiong et al. (2017) วิเคราะห์ประสิทธิภาพด้านพลังงานและเอ็กเซอร์จีของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ร่วมกับระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน Chaiyat et al. (2017) นำเสนอรูปแบบการเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ ด้วยระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน โดยการลดอุณหภูมิสารทำงานของเครื่องควบแน่น ผลที่ได้พบว่า สามารถเพิ่มประสิทธิภาพของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ได้ประมาณ 7.22% และต้นทุนการผลิตไฟฟ้าต่อหน่วยเท่ากับ 0.1088 USD/kWh

จากการศึกษางานวิจัยข้างต้น พบว่า ยังไม่มีงานวิจัยใดนำเสนอการหารูปแบบการทำงานที่เหมาะสมในด้านเศรษฐศาสตร์พลังงานและเอ็กเซอร์จี ของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ร่วมกับระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน โดยสาร

ทำงานที่ใช้ในวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ คือ R-245fa และระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน คือ คู่สารละลายแอมโมเนีย-น้ำ (Ammonia-water solution, NH₃-H₂O)

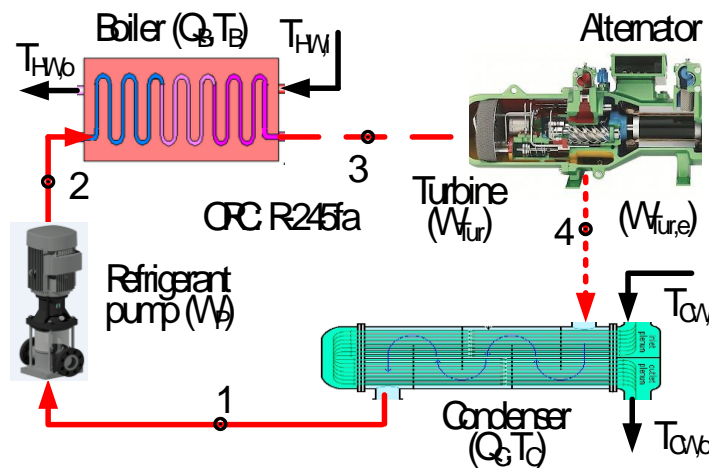
ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

1. วัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์

วัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ประกอบไปด้วย 5 อุปกรณ์หลัก คือ ปั๊มสารทำงาน (Refrigerant pump) ทำหน้าที่หมุนเวียนสารทำงานและเพิ่มความดันให้แก่ระบบ หม้อต้ม (Boiler) ทำหน้าที่ถ่ายเทความร้อนให้แก่สารทำงานในระบบ กังหัน (Turbine) ทำหน้าที่ขับเคลื่อนที่ต่อกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเพื่อผลิตไฟฟ้า เครื่องกำเนิดไฟฟ้าทำหน้าที่ผลิตไฟฟ้า และเครื่องควบแน่น (Condenser) ทำหน้าที่ระบายความร้อนออกสู่สภาวะภายนอก ดังแสดงในรูปที่ 1 ซึ่งสามารถวิเคราะห์หาประสิทธิภาพด้านพลังงานและเอ็กเซอร์จิชของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ดังแสดงในสมการที่ 1 และ สมการที่ 2

$$\eta = \frac{W_{Turb} - W_P}{Q_B} \quad (1)$$

$$\psi = \frac{\dot{E}_{Turb} - \dot{E}_P}{\dot{E}_B} \quad (2)$$

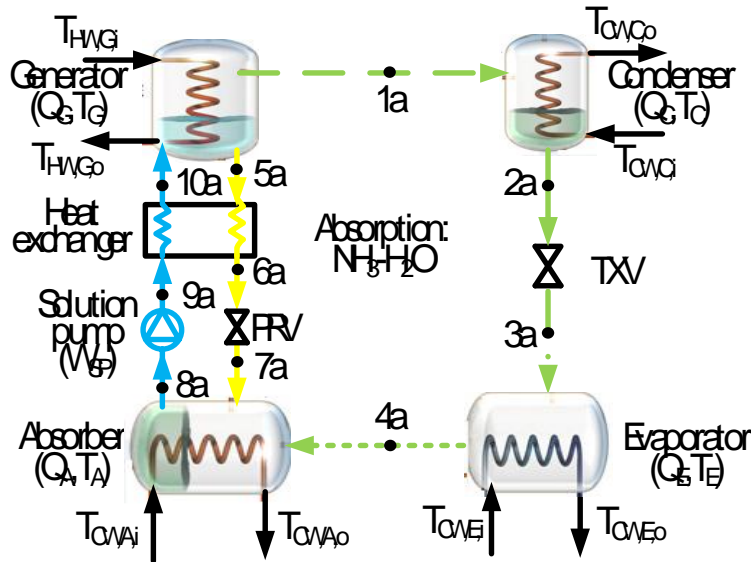


รูปที่ 1 แผนภาพการทำงานของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์

2. ระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน

ระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนประกอบไปด้วย 7 อุปกรณ์หลัก คือ เจนเนอเรเตอร์ (Generator) ทำหน้าที่รับความร้อนจากแหล่งพลังงานความร้อนและถ่ายเทความร้อนที่ได้รับเข้าสู่ระบบ เครื่องควบแน่น (Condenser) ทำหน้าที่ระบายความร้อนออกสู่สภาวะภายนอก วาล์วลดความดัน (Expansion valve) ทำหน้าที่ลดระดับความดันของสารทำงานให้แก่ระบบ เครื่องระเหย (Evaporator) ทำหน้าที่รับความร้อนจากภายนอกเข้าสู่ระบบ แอบซอร์เบอร์ (Absorber) ทำหน้าที่ดูดกลืนสารทำงานในสถานะไอที่ไหลออกมาจากเครื่องระเหยได้ กลายเป็นของเหลวในรูปของสารละลาย ปั๊มสารละลาย (Solution pump) ทำหน้าที่หมุนเวียนสารทำงานและเพิ่มความดันให้แก่ระบบ และ

อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน (Heat exchanger) ทำหน้าที่ถ่ายเทความร้อนจากของไหลอุณหภูมิสูงไปยังของไหลอุณหภูมิต่ำ ดังแสดงในรูปที่ 2 ซึ่งสามารถวิเคราะห์หาสัมประสิทธิ์สมรรถนะด้านพลังงานและเอ็กเซอร์จีของระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน ดังแสดงในสมการที่ 3 และสมการที่ 4



รูปที่ 2 แผนภาพการทำงานของระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน

$$COP_{AB} = \frac{Q_E}{Q_G + W_{SP}} \quad (3)$$

$$COP_{E*AB} = \frac{E_E}{E_G + E_{SP}} \quad (4)$$

3. การวิเคราะห์เชิงเศรษฐศาสตร์

การวิเคราะห์ต้นทุนการผลิตไฟฟ้าต่อหน่วยด้านพลังงาน (Levelized energy cost; LEC) และต้นทุนการผลิตไฟฟ้าต่อหน่วยด้านเอ็กเซอร์จี (Levelized exergy cost; LExC) สามารถประเมินได้จากปัจจัยต่าง ๆ เช่น ค่าอัตราส่วนลด ค่าดอกเบี้ยของธนาคาร ค่าเงินเฟ้อ และค่าเสียโอกาส เป็นต้น ซึ่งสามารถวิเคราะห์ต้นทุนการผลิตไฟฟ้าต่อหน่วยดังแสดงสมการที่ 5 และสมการที่ 6 ต่อไปนี้

$$LEC = \frac{Inv + \sum_{t=1}^n \frac{PEC}{(1+r)^t}}{\sum_{t=1}^n \frac{(W_{ORSystem} + Q_{ECWOP})t}{(1+r)^t}} \quad (5)$$

$$LExC = \frac{\sum_{t=1}^n Inv \left[\frac{r(1+r)^t}{(1+r)^t - 1} \right] + \sum_{t=1}^n PEC \left[\frac{r(1+r)^t}{(1+r)^t - 1} \right]}{\sum_{t=1}^n W_{ORSystemOP} t \left[\frac{r(1+r)^t}{(1+r)^t - 1} \right] + \sum_{t=1}^n Q_{ECWOP} t \left[\frac{r(1+r)^t}{(1+r)^t - 1} \right]} \quad (6)$$

วิธีการศึกษา

งานวิจัยนี้ได้ทำการวิเคราะห์หาต้นทุนการผลิตไฟฟ้าต่อหน่วยด้านพลังงานและเอ็กเซอร์จี ของวัฏจักรแรงคิน สารอินทรีย์ร่วมกับระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน โดยมีขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยดังต่อไปนี้

1. สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ โดยเงื่อนไขเริ่มต้นที่ใช้ในการวิเคราะห์มีดังต่อไปนี้

- 1) สารทำงาน คือ R-245fa
- 2) ปริมาณความร้อนที่หม้อต้ม (Q_B) เท่ากับ 180 kW
- 3) อุณหภูมิน้ำร้อนที่ป้อนเข้าวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ ($T_{HW,i}$) เท่ากับ 80-120 °C
- 4) อุณหภูมิน้ำระบายความร้อนเข้าเครื่องควบแน่น ($T_{CW,i}$) เท่ากับ 32 °C
- 5) อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม (T_{Amb}) เท่ากับ 28 °C
- 6) ชั่วโมงการทำงานของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ต่อปี (t_{OP}) เท่ากับ 8,400 h/y (Chaiyat et al., 2017)
- 7) สมบัติของสารทำงานที่สภาวะต่าง ๆ อ้างอิงจากโปรแกรม Refprop (NIST, 2018)

2. สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน โดยเงื่อนไขเริ่มต้นที่ใช้ในการวิเคราะห์มีดังต่อไปนี้

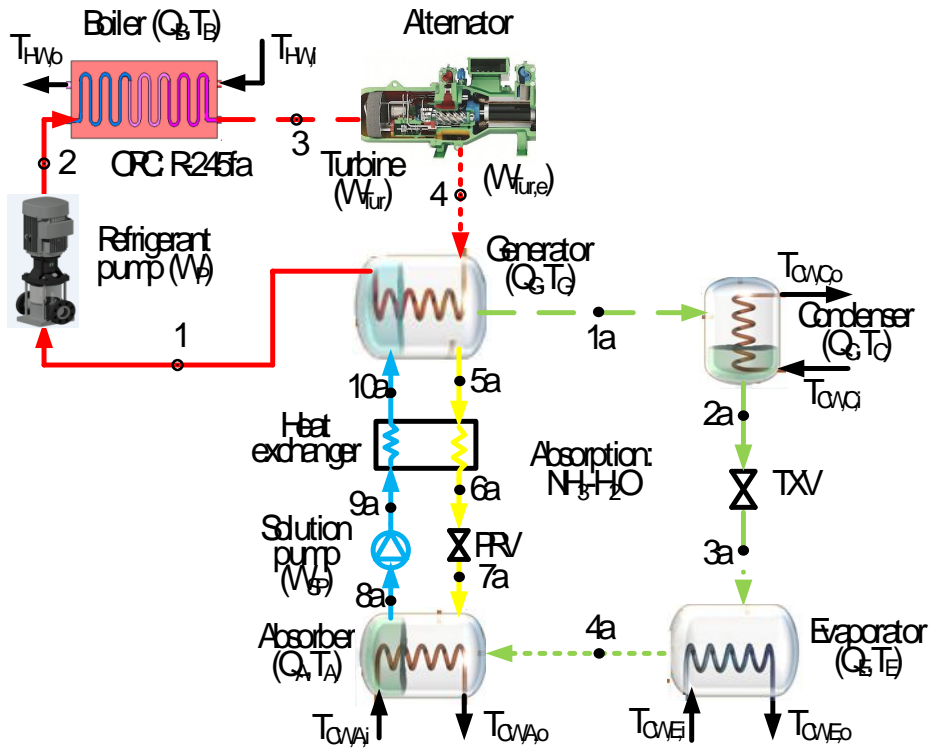
- คู่สารทำงาน คือ สารละลายแอมโมเนีย-น้ำ
- ชั่วโมงการทำงานของระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนต่อปี เท่ากับ 8,400 h/y (Chaiyat et al. 2017)
- อัตราส่วนการไหล (Flow ratio, FR) ไม่เกิน 20 (Chaiyat and Kiatsiriroat. 2011)

3. วิเคราะห์ต้นทุนการผลิตไฟฟ้าต่อหน่วยด้านพลังงานและเอ็กเซอร์จี ของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ร่วมกับระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนแบบที่ 1 ดังแสดงในรูปที่ 3

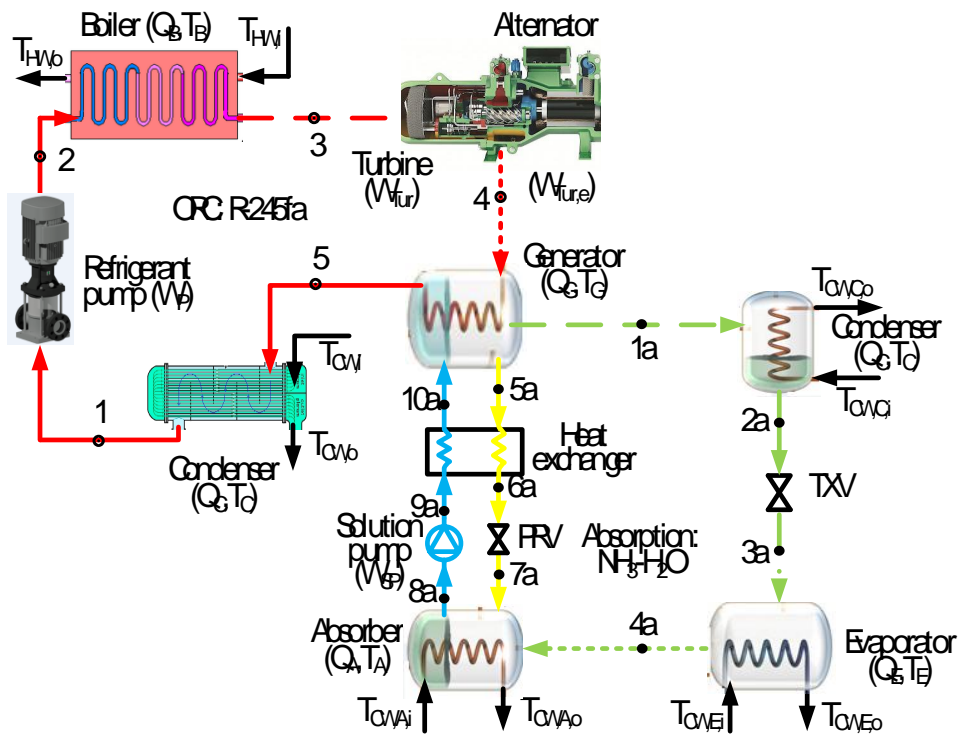
4. วิเคราะห์ต้นทุนการผลิตไฟฟ้าต่อหน่วยด้านพลังงานและเอ็กเซอร์จี ของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ร่วมกับระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนแบบที่ 2 ดังแสดงในรูปที่ 4

5. วิเคราะห์ต้นทุนการผลิตไฟฟ้าต่อหน่วยด้านพลังงานและเอ็กเซอร์จี ของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ร่วมกับระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนแบบที่ 3 ดังแสดงในรูปที่ 5

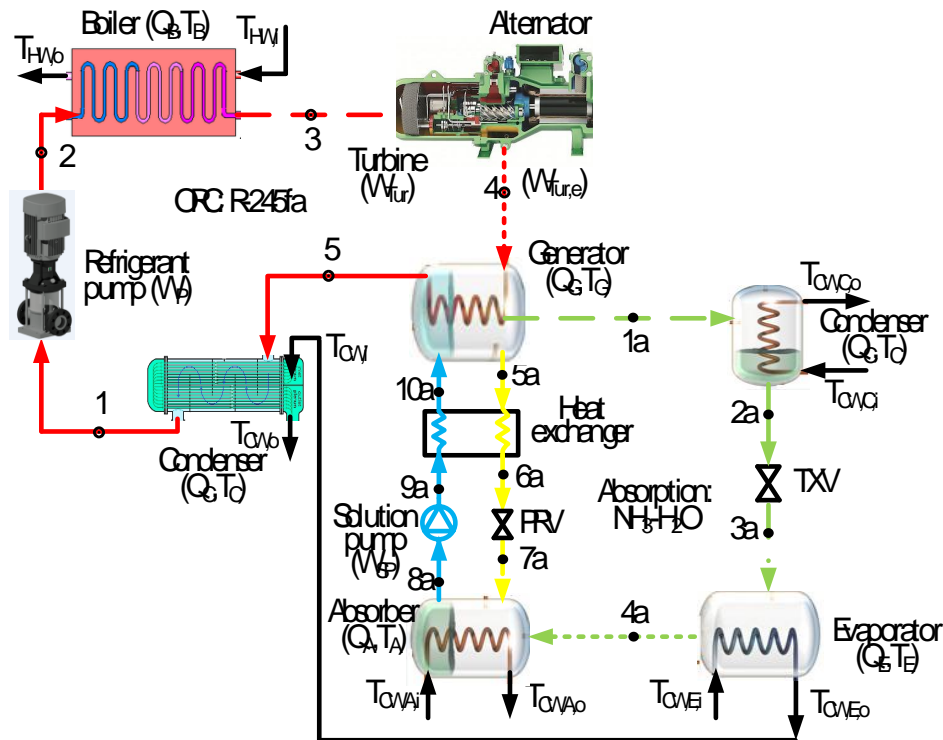
6. เปรียบเทียบต้นทุนการผลิตไฟฟ้าต่อหน่วยด้านพลังงานและเอ็กเซอร์จี ของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ร่วมกับระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนของแต่ละรูปแบบ เพื่อนำมาพิจารณาหารูปแบบการทำงานงานร่วมที่เหมาะสมที่สุด



รูปที่ 3 แผนภาพการทำงานของวัฏจักรแรงดันอินทรีย์ร่วมกับระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนแบบที่ 1



รูปที่ 4 แผนภาพการทำงานของวัฏจักรแรงดันอินทรีย์ร่วมกับระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนแบบที่ 2

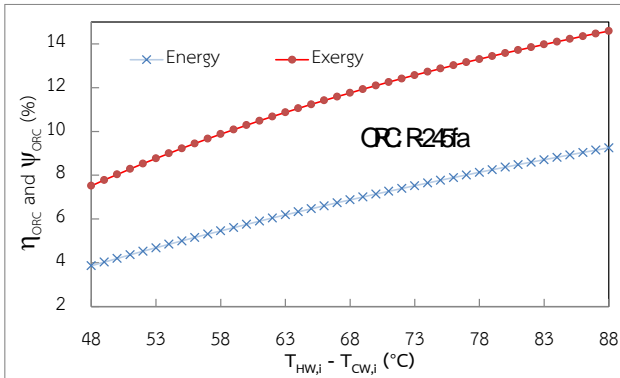


รูปที่ 5 แผนภาพการทำงานของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ร่วมกับระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนแบบที่ 3

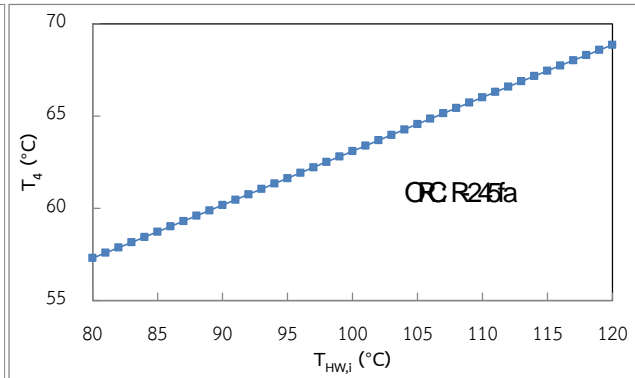
ผลการศึกษาและวิจารณ์

ผลการจำลองทางคณิตศาสตร์ของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์

รูปที่ 6 (a) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างผลต่างของอุณหภูมิน้ำร้อนเข้าหม้อต้ม และน้ำระบายความร้อนเข้าเครื่องควบแน่นกับประสิทธิภาพด้านพลังงานและเอ็กเซอร์จี้ของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ โดยผลการจำลองพบว่าเมื่อผลต่างของอุณหภูมิน้ำร้อนมีค่าเพิ่มสูงขึ้น จะทำให้ประสิทธิภาพด้านพลังงานและเอ็กเซอร์จี้ของระบบเพิ่มสูงขึ้นตามไปด้วย เนื่องจากอุณหภูมิสารทำงานก่อนเข้ากังหันสูงมีผลทำให้ค่าเอนทัลปีทางเข้ากังหันสูงสูงกว่าเอนทัลปีทางออก ซึ่งทำให้งานที่ผลิตได้จากกังหันเพิ่มขึ้น ดังนั้นประสิทธิภาพด้านพลังงานและเอ็กเซอร์จี้ของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ จึงมีค่าเพิ่มขึ้นตามไปด้วย โดยประสิทธิภาพด้านพลังงานและเอ็กเซอร์จี้มีค่าสูงสุดเท่ากับ 9.25 และ 14.58% ตามลำดับ เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับจะเห็นว่าประสิทธิภาพเอ็กเซอร์จี้มีค่าสูงกว่าประสิทธิภาพด้านพลังงานประมาณ 57% ในทุกเงื่อนไขการคำนวณ ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับผลการทดลองของงานวิจัย Chaiyat and Kiatsirirot (2015) โดยประสิทธิภาพเท่ากับ 8.73% และอุณหภูมิสารทำงานบริเวณทางออกของกังหัน (T_d) มีค่าอยู่ในช่วง 57-69°C เมื่อป้อนอุณหภูมิน้ำร้อนให้แก่ระบบอยู่ในช่วง 80-120°C ดังแสดงในรูปที่ 6 (b) โดยในงานวิจัยนี้ได้ใช้อุณหภูมิสารทำงานดังกล่าวเป็นแหล่งความร้อนที่ป้อนให้แก่ระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน



(a) ประสิทธิภาพของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์



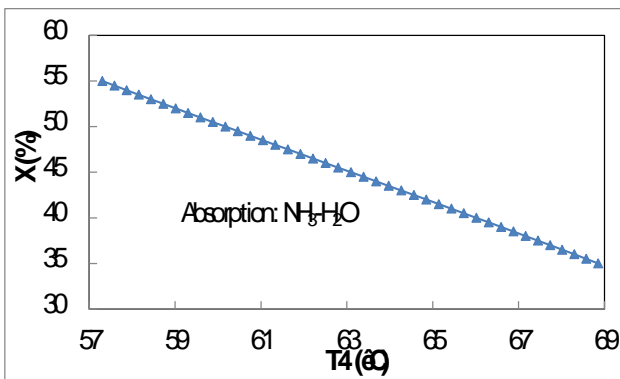
(b) อุณหภูมิสารทำงานบริเวณทางออกของกังหัน

รูปที่ 6 ผลการจำลองทางคณิตศาสตร์ของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์

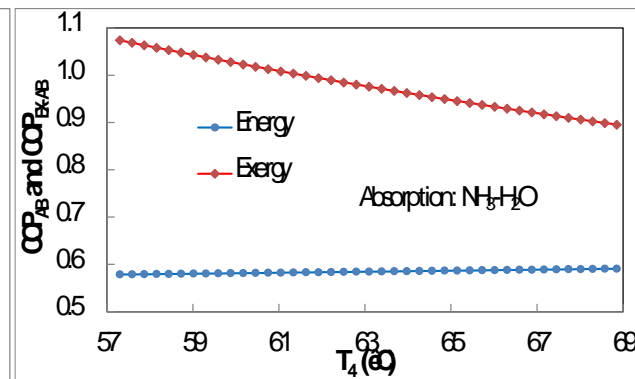
ผลการจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน

เมื่อนำอุณหภูมิสารทำงานบริเวณทางออกของกังหันดังแสดงในรูปที่ 6 (b) มาทำการวิเคราะห์ร่วมกับระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน ได้ทำการวิเคราะห์หาค่าความเข้มข้นที่เหมาะสมกับแหล่งความร้อนดังกล่าว จากผลการจำลองพบว่า ค่าความเข้มข้นที่เหมาะสมของสารละลายแอมโมเนีย-น้ำที่เจนนอเตอร์เตอร์ $X_G = X_5$ อยู่ในช่วง 35-55 %NH₃ ดังแสดงในรูปที่ 7 (a) ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้ค่าความเข้มข้นสูงที่สุดเท่ากับ 55 %NH₃ เพื่อให้ระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนสามารถเริ่มต้นทำงานได้ในแหล่งความร้อนต่ำที่ป้อนให้แก่ระบบ

รูปที่ 7 (b) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิสารทำงานบริเวณทางออกของกังหันอยู่ในช่วง 57-69 °C กับสัมประสิทธิ์สมรรถนะของระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน โดยมีค่าความเข้มข้นสารละลายแอมโมเนีย-น้ำที่เจนนอเตอร์เตอร์ $X_G = X_5 = 55$ %NH₃ และอัตราส่วนการไหลน้อยกว่า 20 จากผลการวิเคราะห์พบว่า อุณหภูมิสารทำงานมีผลต่อสัมประสิทธิ์สมรรถนะของระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน เมื่ออุณหภูมิสารทำงานเพิ่มขึ้นมีผลทำให้สัมประสิทธิ์สมรรถนะด้านพลังงานมีค่าเพิ่มขึ้นตามไปด้วย แต่ในทางตรงกันข้ามด้านเอ็กเซอร์จีมีค่าลดลง เนื่องจากการถ่ายเทความร้อนของอุปกรณ์หลักในระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนค่อนข้างสูง จึงทำให้ค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะด้านพลังงานเพิ่มขึ้นและเอ็กเซอร์จีลดลง



(a) ความเข้มข้นของสารละลายแอมโมเนีย-น้ำ



(b) สัมประสิทธิ์สมรรถนะของระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน

รูปที่ 7 ผลการจำลองทางจำลองทางคณิตศาสตร์ระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน

ผลการเปรียบเทียบระบบการทำงานรวมทั้ง 3 รูปแบบ

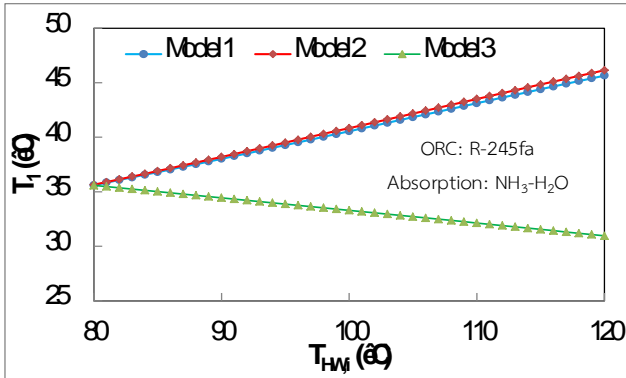
รูปที่ 8 (a) แสดงผลการเปรียบเทียบอุณหภูมิสารทำงานบริเวณทางออกของเครื่องควบแน่น หรือ อุณหภูมิจุดที่ 1 (T_1) ของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ร่วมกับระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนทั้ง 3 รูปแบบ โดยอุณหภูมิน้ำร้อนที่ป้อนให้แก่ระบบอยู่ในช่วง 80-120°C ผลที่ได้พบว่า ทั้ง 3 รูปแบบมีอุณหภูมิสารทำงานเริ่มต้นที่ 35°C เท่ากัน เมื่ออุณหภูมิน้ำร้อนที่ป้อนให้แก่ระบบเพิ่มขึ้นส่งผลให้อุณหภูมิสารทำงานของรูปแบบที่ 1 และ 2 มีค่าเพิ่มขึ้นตามไปด้วยมีค่าสูงสุดประมาณ 45.66°C และ 46.14°C ตามลำดับ แต่ในทางกลับกันอุณหภูมิสารทำงานของรูปแบบที่ 3 ลดลงเนื่องจากใช้น้ำเย็นที่ผลิตได้จากระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนมาช่วยในการระบายความร้อนที่เครื่องควบแน่นของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ จึงมีผลทำให้อุณหภูมิสารทำงานของรูปแบบที่ 3 ลดลงโดยมีค่าต่ำสุดประมาณ 30.96°C

รูปที่ 8 (b) แสดงผลการเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากกังหันของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ ร่วมกับระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนทั้ง 3 รูปแบบ ผลที่ได้พบว่า เมื่ออุณหภูมิน้ำร้อนที่ป้อนให้แก่ระบบเพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าเอนทัลปีทางเข้ากังหันสูงกว่าเอนทัลปีทางออกและอุณหภูมิน้ำเย็นที่ป้อนให้แก่เครื่องควบแน่นมีค่าต่ำ จึงทำให้งานที่ได้จากระบบมีค่ามากขึ้นตามไปด้วย แต่กำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้แก่ปั๊มมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากน้ำระบายความร้อนมีค่าต่ำทำให้อุณหภูมิสารทำงานและความดันที่ออกจากเครื่องควบแน่นลดลง ส่งผลให้กำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้แก่ปั๊มมีค่ามากขึ้นดังแสดงในรูปที่ 8 (c) เพื่อเพิ่มความดันจากความดันต่ำให้เพิ่มขึ้นเท่ากับความดันในหม้อต้มของระบบ

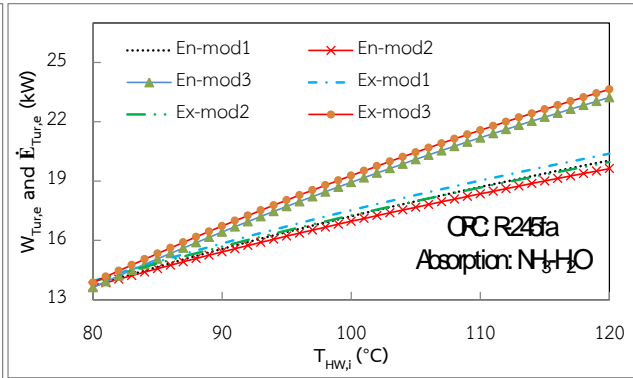
รูปที่ 8 (d) แสดงผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพด้านพลังงานและเอ็กเซอร์จี ของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ร่วมกับระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน ผลที่ได้พบว่า รูปแบบที่ 3 สามารถเพิ่มประสิทธิภาพด้านพลังงานและเอ็กเซอร์จีของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์โดยมีค่าเฉลี่ยประมาณ 10.46% และ 18.01% ตามลำดับ ในขณะที่รูปแบบที่ 2 มีค่าเฉลี่ยประมาณ 9.38% และ 16.17% ตามลำดับ และรูปแบบที่ 1 มีค่าเฉลี่ยประมาณ 9.52% และ 16.41% ตามลำดับ และยังพบว่า รูปแบบที่ 1 และ 2 เป็นระบบการทำงานร่วมแบบการผลิตไฟฟ้าและความเย็น (Combined cooling and power, CCP) ดังแสดงในรูปที่ 8 (e) เมื่อทำการวิเคราะห์ประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าร่วมความเย็นพบว่า รูปแบบที่ 1 มีประสิทธิภาพด้านพลังงานและเอ็กเซอร์จีเพิ่มขึ้นเป็น 25.84% และ 50.45% ตามลำดับ ในขณะที่รูปแบบที่ 2 มีค่าเท่ากับ 19.76% และ 42.60% ตามลำดับ

ผลการวิเคราะห์ด้านเศรษฐศาสตร์

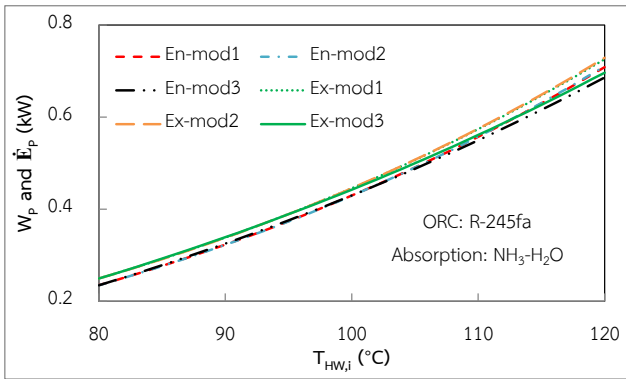
ในการวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางด้านเศรษฐศาสตร์ของการผลิตไฟฟ้าจากวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ร่วมกับระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน โดยรายละเอียดของแต่ละรูปแบบดังแสดงในตารางที่ 1 และรูปที่ 10 แสดงผลการเปรียบเทียบต้นทุนการผลิตไฟฟ้าต่อหน่วยด้านพลังงานและเอ็กเซอร์จี ของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ร่วมกับระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน พบว่า รูปแบบการทำงานร่วมที่เหมาะสมที่สุด คือ รูปแบบที่ 1 โดยมีค่าต้นทุนการผลิตไฟฟ้าต่อหน่วยด้านพลังงานและเอ็กเซอร์จีเท่ากับ 3.48 และ 16.08 Bath/kWh ตามลำดับ ในขณะที่รูปแบบที่ 2 มีค่าเท่ากับ 4.06 และ 18.55 Bath/kWh ตามลำดับ และรูปแบบที่ 3 มีค่าเท่ากับ 4.93 และ 22.09 Bath/kWh ตามลำดับ



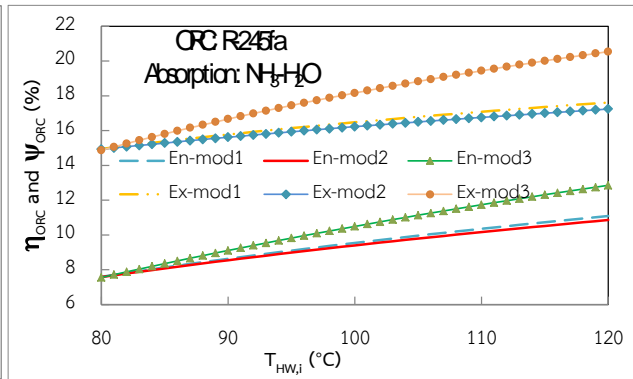
(a) อุณหภูมิสารทำงานบริเวณทางออกของกังหัน



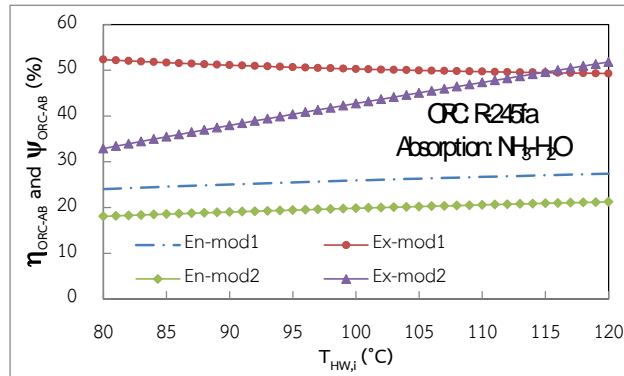
(b) กำลังไฟฟ้าจากกังหันของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์



(c) กำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้แก่ปั๊มสารทำงาน



(d) ประสิทธิภาพของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์



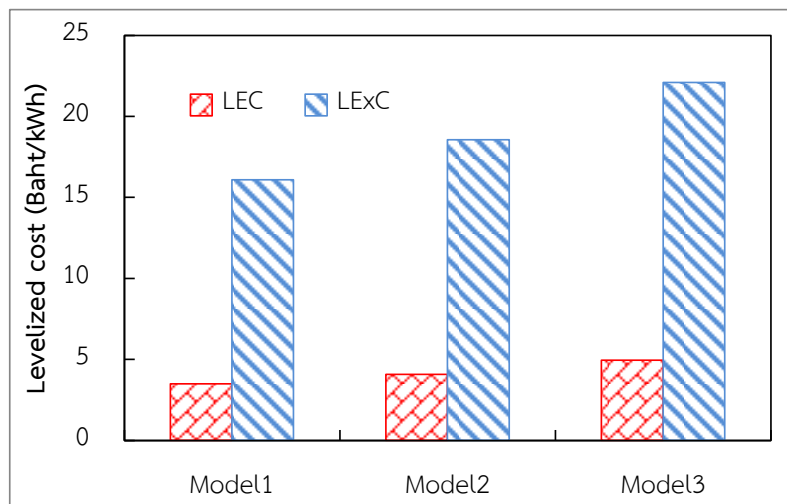
(e) ประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าร่วมความเย็น

รูปที่ 8 ผลการเปรียบเทียบการทำงานร่วมของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์กับระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน

ตารางที่ 1 แสดงผลรายละเอียดด้านต้นทุนการผลิตไฟฟ้าต่อหน่วยของแต่ละรูปแบบ

Descriptions	Model 1	Model 2	Model 3
Power production ($W_{ORC,system} + Q_{E,CW}$) [kW]	41.01	32.05	18.75
Power production [kWh/y]	344,484	269,220	157,500
Cost of the ORC unit ¹ [Baht]	1,712,686	1,705,609	1,765,109
Cost of the absorption system ² [Baht]	504,954	453,524	200,000
Operating time (t_{OP}) ³ [h/y]	8,400	8,400	8,400
Cost of piping and housing [Baht]	1,000,000	1,000,000	1,000,000
Operating and maintenance cost ⁴ [Baht/y]	85,634	85,280	88,256
Discount rate ⁵ (r) [%]	7.12	7.12	7.12
Life time (n) [y]	20	20	20

Remark : ¹ Referred cost of the ORC from Nattaporn, (2560), ² Referred cost of the Absorption chiller from Chaiyat et al. (2017)
³ Referred the operating time from Chaiyat et al. (2017), ⁴ Calculated at 5% of the ORC cost,
⁵ Referred the discount rate from Krungthai Bank online (accessed 05 March 2018)



รูปที่ 10 ผลการเปรียบเทียบต้นทุนการผลิตไฟฟ้าต่อหน่วยด้านพลังงานและเอ็กเซอร์จีของผลิตพลังงานร่วม

สรุป

จากผลการจำลองทางคณิตศาสตร์ของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ที่ใช้สารทำงาน คือ R-245fa ร่วมกับระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนที่ใช้คู่สารละลายแอมโมเนีย-น้ำ สามารถสรุปได้ว่า

- 1) ต้นทุนการผลิตไฟฟ้าต่อหน่วยด้านพลังงานและเอ็กเซอร์จี ของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ร่วมกับระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนรูปแบบที่ 1 มีค่าเท่ากับ 3.48 และ 16.08 Bath/kWh ตามลำดับ
- 2) ต้นทุนการผลิตไฟฟ้าต่อหน่วยด้านพลังงานและเอ็กเซอร์จี ของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ร่วมกับระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนรูปแบบที่ 2 มีค่าเท่ากับ 4.06 และ 18.55 Bath/kWh ตามลำดับ
- 3) ต้นทุนการผลิตไฟฟ้าต่อหน่วยด้านพลังงานและเอ็กเซอร์จี ของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ร่วมกับระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนรูปแบบที่ 3 มีค่าเท่ากับ 4.93 และ 22.09 Bath/kWh ตามลำดับ

- 4) รูปแบบการทำงานร่วมที่เหมาะสมที่สุด คือ รูปแบบที่ 1 โดยมีค่าต้นทุนการผลิตไฟฟ้าต่อหน่วยด้านพลังงานและเอ็กเซอร์จีต่ำที่สุด

คำขอบคุณ

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

เอกสารอ้างอิง

- รัฐพร ไชยญาติ. การนำความร้อนทิ้งกลับคืน (Waste heat recovery). วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยแม่โจ้ พิมพ์ครั้งที่ 4 มกราคม พ.ศ. 2560.
- รัฐพร ไชยญาติ. เทคโนโลยีพลังงานความร้อนใต้พิภพ (Geothermal energy technology). วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยแม่โจ้, พิมพ์ครั้งที่ 6 มกราคม พ.ศ. 2560.
- ธนาคารกรุงไทย. อัตราดอกเบี้ยเงินให้สินเชื่อ. ออนไลน์ http://www.ktb.co.th/Download/rateFee/RateFeeDownload_4161loan_16_05_60.pdf, เข้าถึงเมื่อ : 05 มีนาคม 2561.
- Bounkhamxiong Navongxay, รัฐพร ไชยญาติ จักรพันธ์ ถาวรงามยิ่งสกุล และ ชวโรจน์ ใจสิน. 2018. การวิเคราะห์ประสิทธิภาพด้านพลังงานและเอ็กเซอร์จีของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ร่วมกับระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน, เรื่องการถ่ายเทพลังงานความร้อนและมวลในอุปกรณ์ด้านความร้อนและกระบวนการ (ครั้งที่ 17), 76-83.
- Xangpheuak Inthavideth และรัฐพร ไชยญาติ. 2016. การวิเคราะห์สมรรถนะการทำงานของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ร่วมกับระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน, เรื่องการถ่ายเทพลังงานความร้อนและมวลในอุปกรณ์ด้านความร้อนและกระบวนการ (ครั้งที่ 15), 88-93.
- Al-Sulaiman, F.A., Hamdullahpur, F. and Dincer, I. 2011. Greenhouse gas emission and exergy assessments of an integrated organic Rankine cycle with a biomass combustor for combined cooling, heating and power production. J. Appl Therm Eng. 31: 439-446.
- Al-Sulaiman, F.A., Hamdullahpur, F. and Dincer, I. 2012. Energy and exergy analyses of a biomass trigeneration system using an organic Rankine cycle. J. Energy. 45: 975-985.
- Al-Sulaiman, F.A., Hamdullahpur, F. and Dincer, I. 2012. Performance assessment of a novel system using parabolic trough solar collectors for combined cooling, heating, and power production. J. Renew energy 48: 161-172.
- Bicer, Y. and Dincer, I. 2016. Analysis and performance evaluation of a renewable energy based multigeneration system. J. Energy. 94: 623-632.
- Chaiyat, N. and Kiatsiriroat, T. 2014. Upgrading of solar heat by an absorption heat transformer assisting with a vapor compression heat pump. J. Research grate. 21: 10-20.
- Chaiyat, N. and Kiatsiriroat, T. 2015. Analysis of combined cooling heating and power generation from organic Rankine cycle and absorption system. J. Energy. 91:363-370.

- Chaiyat, N., Wakaiyang, Y. and Inthavideth, X. 2017. Enhancement efficiency of organic Rankine cycle by using sorption system. J. Appl Therm Eng. 122: 368-379.
- Mohammadi, A., Ahmadi, M.H, Bidi, M., Joda, F., Valero, A. and Uson, S. 2017. Exergy analysis of a Combined Cooling, Heating and Power system integrated with wind turbine and compressed air energy storage system. J. Energy convers manage. 131: 69-78.
- NIST (National institute of standards and technology), Inc. (Refprop version 10: Customer number 40754). Thermodynamic properties of refrigerants and refrigerant mixtures software, America. 2018.
- Shukla, A., Mishra, A., Shukla D. and Chauhan, K. 2015. COP derivation and thermodynamic calculation of ammonia-water vapor absorption refrigeration system. IJMET. 6: 72-81.
- Sun, W., Yue, X. and Wang, Y. 2017. Exergy efficiency analysis of ORC (Organic Rankine Cycle) and ORC based combined cycles driven by low-temperature waste heat. J. Energy convers manage. 135: 63-73.
- Taboas, F., Bourouis, M. and Valles, M. 2014. Analysis of ammonia-water and ammonia-salt mixture absorption cycles for refrigeration purposes in fishing ships. J. Appl. Therm. Eng. 66: 603-611.

รายการสัญลักษณ์

สัญลักษณ์

\dot{E}	อัตราการความร้อนด้านเอ็กเซอร์จี (kW)
Inv	ค่าใช้จ่ายการลงทุนของโครงการ (Baht)
LEC	ราคาต้นทุนการผลิตพลังงานต่อหน่วย (Baht/kWh)
LExC	ราคาต้นทุนการผลิตเอ็กเซอร์จีต่อหน่วย (Baht/kWh)
n	อายุการใช้งานของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ (y)
PEC	ค่าใช้จ่ายในการผลิตพลังงานไฟฟ้าต่อปี (Baht/y)
Q	อัตราการความร้อนด้านพลังงาน (kW)
r	อัตราส่วนลด (%)
t	เวลาการทำงานต่อปี (h/y)
T	อุณหภูมิ (°C)
W	กำลังงาน (kW)
X	ความเข้มข้น (% Ammonia)
y	ปี

ตัวกรีก

η	ประสิทธิภาพด้านพลังงาน (%)
Ψ	ประสิทธิภาพเอ็กเซอร์จี (%)

ตัวห้อย

A	Absorber
AB	Absorption
Amb	Ambien
B	Boiler
C	Condenser
CW	Cooling water
EX	Exergy
E	Evaporator
Tur	Turbine
e	Electric
G	Generator
HW	Hot water
HX	Heat exchanger
H	Hight
i	Inlet
L	Low
o	Outlet
OP	Operating time
ORC	Organic Rankine cycle
P	Pump
ref	Refrigerant
SP	Solution pump