



การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนายสารทำงานที่มี
ความเหมาะสมสำหรับระบบผลิตไฟฟ้าด้วย
วัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ขนาดเล็ก
DEVELOPMENT OF MATHEMATICAL MODELLING TO PREDICTION
OF AN APPROPRIATE WORKING FLUID FOR SMALL-SCALE
ORGANIC RANKINE CYCLE (ORC) POWER GENERATION

สมชาย เจียจิตต์สวัสดิ์¹ และ สรวิศ สอนสารี^{2*}

Somchai Jiajitsawat¹ and Sorawit Sonsaree^{2*}

¹หน่วยวิจัยพลังงานสะอาด คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร อ.เมือง จ.พิษณุโลก ประเทศไทย 65000

²สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม

อ.เมือง จ.พิษณุโลก ประเทศไทย 65000

¹Energy Research and Promotion Center, Faculty of Science, Naresuan University,

Muang, Phitsanulok, Thailand, 65000

²Major of Mechanical Engineering, Faculty of Industrial Technology, Pibulsongkram Rajabhat University,

Muang, Phitsanulok, Thailand, 65000

*Corresponding author E-mail: sorawitsonsaree@gmail.com

วันที่ได้รับ 29 พฤษภาคม 2563

วันที่แก้ไขบทความ 14 สิงหาคม 2563

วันที่ตอบรับบทความ 29 สิงหาคม 2563

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบผลิตไฟฟ้าด้วยวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์เพื่อใช้ในการทำนายความเหมาะสมของสารทำงานที่ใช้ในระบบ ในการศึกษาสารทำงานจำนวน 15 ชนิด ได้นำมาเปรียบเทียบสภาวะการทำงานภายใต้ตัวแปร คือ ประสิทธิภาพเชิงความร้อน ความดันสูงสุดในระบบ คุณภาพไอ อัตราการไหลเชิงมวล ปริมาณอัตราการถ่ายเทความร้อนเข้าสู่ระบบ ความเป็นพิษ การติดไฟ และศักยภาพในการทำให้เกิดภาวะโลกร้อน ผลการศึกษาพบว่าแบบจำลองที่ได้ถูกพัฒนาสามารถนำมาใช้ในการทำนายการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าด้วยวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ได้ เนื่องจากผลที่ได้จากการคำนวณด้วยแบบจำลองที่ได้ถูกพัฒนามีค่าใกล้เคียงกับผลที่ได้จากบทความวิจัยที่ได้เคยถูกตีพิมพ์ โดยในส่วนของสารทำงานในระบบที่มีความเหมาะสมนั้นเมื่อพิจารณาในเรื่องของศักยภาพในการทำให้เกิดภาวะโลกร้อน ความเป็นพิษ และการติดไฟ พบว่า R245ca, R365mfc, R245fa และ R1234ze เป็นสารทำงานที่มีความเหมาะสม เนื่องจากเมื่อเลือกใช้สารทำงานดังกล่าวจะช่วยให้อัตราการไหลเชิงมวล และความดันด้านเครื่องทำระเหยของระบบมีค่าต่ำ รวมถึงประสิทธิภาพเชิงความร้อนของระบบมีค่าสูง

คำสำคัญ: แบบจำลองทางคณิตศาสตร์, วัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์, สารทำงาน

Abstract

This research is the development of a mathematical model to predict an appropriate working fluid for small-scale Organic Rankine Cycle (ORC) power generation. In this study, 15 working fluids were compared. The indicators considered in this study consisted of thermal efficiency, the maximum pressure in the cycle, steam quality, mass flow rate, heat input to the system, toxicity, flammability, and Global Warming Potential (GWP). The results showed that the mathematical modeling of the ORC power generation developed in this study can be applied to estimate the power output of the system. This was because the variable value of mathematical modeling was not significantly different in comparison to the published data. As considered in terms of low-GWP, low-toxicity, and non-flammable; R245ca, R365mfc, R245fa, and R1234ze were suitable because they gave a low mass flow rate, low evaporating pressure, and high thermal efficiency.

Keywords: Mathematical modeling, Organic Rankine Cycle (ORC), Working fluids

1. บทนำ

วิกฤตการณ์พลังงานที่เกิดขึ้นในปัจจุบันทำให้ทุกประเทศหันมาให้ความสนใจพลังงานทดแทนที่ซึ่งถือว่าเป็นพลังงานพื้นฐานที่แต่ละประเทศสามารถใช้พึ่งพาตนเองได้ ประกอบกับการตระหนักในเรื่องของสภาวะโลกร้อน (Global warming) การเปลี่ยนแปลงของสภาพภูมิอากาศ (Climate change) และรวมถึงปัญหาหรือผลกระทบต่อการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิลในการผลิตพลังงานในรูปแบบต่างๆ ไม่ว่าจะเป็น พลังงานความร้อน และ/หรือ พลังงานไฟฟ้า ประกอบกับการเปลี่ยนรูปพลังงานความร้อนที่อยู่ในรูปของอุณหภูมิต่ำ (Low-temperature) และอุณหภูมิปานกลาง (Medium-temperature) จะมีความสำคัญเป็นอย่างมากในการแก้ปัญหาทางด้านพลังงาน (Bao & Zhao, 2013) ที่ซึ่งจะทำให้การประยุกต์ใช้พลังงานในรูปแบบต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นพลังงานความร้อนเหลือทิ้ง (Waste heat) ในรูปของอุณหภูมิสูง (High-temperature) หรือแม้กระทั่งพลังงานความร้อนอุณหภูมิต่ำที่เคยถูกปล่อยทิ้งสู่สิ่งแวดล้อม หรือไม่เคยถูกนำมาใช้งาน จะถูกนำกลับมาใช้อีกครั้ง ทั้งนี้ก็เพื่อเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพโดยรวมของระบบ และช่วยลดรายจ่ายที่เกิดขึ้นในกระบวนการต่างๆ

ระบบผลิตไฟฟ้าด้วยวัฏจักรแรงดันอินทรีย์ขนาดเล็ก (Small-scale organic rankine cycle (ORC) power generation) เป็นเทคโนโลยีที่เหมาะสมแก่การนำมาประยุกต์ใช้งานร่วมกับแหล่งความร้อนจากพลังงานทดแทน และ/หรือ แหล่งความร้อนเหลือทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม (Dai *et al.*, 2019; Thuraija *et al.*, 2019) เป็นวัฏจักรที่อาศัยของไหลทำงานเพื่อช่วยในการถ่ายโอน

พลังงาน ระบบนี้จะเปลี่ยนพลังงานความร้อนที่ได้รับให้เป็นพลังงานกลโดยอาศัยความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างแหล่งให้ความร้อน (Heat source) และแหล่งระบายความร้อน (Heat sink) โดยที่ความร้อนจะถูกถ่ายเทจากแหล่งให้ความร้อนที่มีอุณหภูมิสูงไปยังแหล่งรับความร้อนที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า และความร้อนบางส่วนจะถูกเปลี่ยนไปเป็นงาน โดยสิ่งสำคัญที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพโดยรวมของระบบผลิตไฟฟ้าด้วยวัฏจักรแรงดันอินทรีย์ คือ คุณภาพของแหล่งความร้อน ทั้งที่เป็นในส่วนของคุณภูมิของแหล่งความร้อน และปริมาณของแหล่งความร้อน นอกจากนี้ปัจจัยสำคัญอีกอย่างหนึ่งที่จะต้องพิจารณา คือ สารทำงานที่จะต้องมีความเหมาะสมทั้งในแง่ของประสิทธิภาพ และในเรื่องของสิ่งแวดล้อม (Kolasiński, 2020; Liang & Yu, 2019) ดังจะเห็นได้จากงานวิจัยต่างๆ ที่ผ่านมามี อภิวัฒน์ ยิ้มประเสริฐ และนัฐพร ไชยญาติ (อภิวัฒน์ ยิ้มประเสริฐ และนัฐพร ไชยญาติ, 2558) ประเมินประสิทธิภาพวัฏจักรแรงดันอินทรีย์ในการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานทางเลือกในประเทศไทย ได้แก่ พลังงานความร้อนใต้พิภพ พลังงานแสงอาทิตย์ และพลังงานขยะ โดยในงานวิจัยได้ดำเนินการทดสอบวัฏจักรแรงดันอินทรีย์ขนาด 20 kW_e ที่ใช้ R245fa เป็นสารทำงานในระบบ ผลการศึกษาพบว่า ประสิทธิภาพของวัฏจักรแรงดันอินทรีย์จะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของแหล่งให้ความร้อนที่ป้อนให้กับระบบ โดยระบบจะมีประสิทธิภาพประมาณร้อยละ 8 เมื่อแหล่งความร้อน (น้ำร้อน) มีอุณหภูมิประมาณ 100°C (Gao *et al.*, 2015) ศึกษาวิธีการเลือกสารทำงานที่มีความเหมาะสมสำหรับระบบผลิตไฟฟ้าด้วยวัฏจักรแรงดันอินทรีย์จากพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์ โดยในการศึกษาสารทำงาน 9 ชนิด ได้ถูกนำมาใช้เปรียบเทียบภายใต้อุณหภูมิและความดันที่เข้ากักกัน ผลการศึกษาพบว่า ค่าความร้อนแฝง (Latent heat) อุณหภูมิวิกฤต (Critical temperature) ค่าความจุความร้อนจำเพาะของของเหลว (Liquid heat capacity) และค่าความจุความร้อนจำเพาะของแก๊ส (Gas heat capacity) ส่งผลต่อประสิทธิภาพของระบบ (Guo *et al.*, 2010) ได้ดำเนินการวิเคราะห์พลังงาน (Energy) และเอ็กเซอร์จี (Exergy) ของระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานความร้อนใต้พิภพ (Geothermal energy) ในรูปของอุณหภูมิต่ำด้วยวัฏจักรแรงดันอินทรีย์ โดยในการศึกษาสารทำงานจำนวน 26 ชนิด ได้ถูกนำมาเปรียบเทียบ ผลการศึกษาพบว่า R245fa เป็นสารทำงานที่เหมาะสมที่สุด รองลงมา คือ R134a, R142b, R600a และ R236fa ตามลำดับ (He *et al.*, 2014) ได้ศึกษาสารทำงานที่เหมาะสมกับระบบผลิตไฟฟ้าด้วยวัฏจักรแรงดันอินทรีย์แบบอุณหภูมิวิกฤต พบว่าในการเลือกสารทำงานจะต้องเลือกสารทำงานที่มีค่าความร้อนจำเพาะในสถานะของเหลวสูง และค่าความร้อนแฝงต่ำ (Tchanche *et al.*, 2009) สารทำงานจำนวน 20 ชนิด ได้ถูกเปรียบเทียบภายใต้ตัวแปรต่างๆ ดังนี้ ประสิทธิภาพ (Efficiencies) อัตราการไหลเชิงปริมาตร (Volume flow rate) อัตราการไหลเชิงมวล (Mass flow rate) อัตราส่วนความดัน (Pressure ratio) ความเป็นพิษ (Toxicity) การติดไฟ (Flammability) ระดับการทำลายโอโซน (Ozone depletion potential – ODP) และศักยภาพในการทำให้เกิดภาวะโลกร้อน (Global warming potential – GWP) ผลการศึกษาพบว่า

R134a เป็นสารทำงานที่เหมาะสมกับระบบผลิตไฟฟ้าด้วยวัฏจักรแรงดันอินทรีย์ขนาดเล็กมากที่สุด นอกจากนี้ผลที่ได้จากการศึกษายังพบว่า สารทำงานที่มีความเหมาะสม แต่จะต้องระมัดระวังเรื่องของความปลอดภัยและการติดไฟประกอบไปด้วย R152a, R600a, R600 และ R290 (Long *et al.*, 2014) การพิจารณาสารทำงานที่เหมาะสมกับระบบผลิตไฟฟ้าด้วยวัฏจักรแรงดันอินทรีย์ที่ผลิตไฟฟ้าจากการนำความร้อนเหลือทิ้งกลับมาใช้นั้น จะต้องพิจารณาจากอุณหภูมิของแหล่งความร้อนที่ป้อนเข้าสู่เครื่องทำระเหย (Evaporation) โดยสารทำงานที่มีความเหมาะสมจะต้องมีค่าอุณหภูมิจุดวิกฤตที่ต่ำ แต่จะต้องสูงกว่าอุณหภูมิของแหล่งความร้อนที่ป้อนเข้าสู่เครื่องทำระเหย (Evaporator) (Yadav & Sircar, 2019) ได้พิจารณาสารทำงานที่เหมาะสมกับระบบผลิตไฟฟ้าด้วยวัฏจักรแรงดันอินทรีย์ที่เหมาะสมกับแหล่งความร้อนอุณหภูมิประมาณ 75 – 80 °C โดยสารทำงานประกอบไปด้วย R600, R600a, R134a และ R245fa ได้ถูกนำมาเปรียบเทียบ ผลการศึกษาพบว่า R245fa เป็นสารทำงานที่มีความเหมาะสมที่สุด

จากงานวิจัยข้างต้นจะเห็นได้ว่าปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าด้วยวัฏจักรแรงดันอินทรีย์ คือ สารทำงานในระบบ ทั้งนี้ถึงแม้ว่าจะมีงานวิจัยจำนวนมากที่ได้ดำเนินการศึกษาสารทำงานที่มีความเหมาะสมสำหรับระบบผลิตไฟฟ้าด้วยวัฏจักรแรงดันอินทรีย์ แต่อย่างไรก็ตามงานวิจัยที่เลือกสารทำงานสำหรับระบบผลิตไฟฟ้าด้วยวัฏจักรแรงดันอินทรีย์ขนาดเล็กจากแหล่งความร้อนอุณหภูมิต่ำนั้นยังคงมีไม่มาก ดังนั้นจึงเป็นที่มาของงานวิจัยนี้

2. วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 2.1 เพื่อพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบผลิตไฟฟ้าด้วยวัฏจักรแรงดันอินทรีย์
- 2.2 เพื่อเลือกสารทำงานที่มีความเหมาะสมสำหรับระบบผลิตไฟฟ้าด้วยวัฏจักรแรงดันอินทรีย์

3. วิธีดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบผลิตไฟฟ้าด้วยวัฏจักรแรงดันอินทรีย์ เพื่อใช้ในการเลือกสารทำงานภายในระบบที่มีความเหมาะสมสำหรับระบบผลิตไฟฟ้าด้วยวัฏจักรแรงดันอินทรีย์ขนาดเล็ก โดยส่วนประกอบต่างๆ ของระบบ รวมถึงข้อมูลที่เกี่ยวข้องในการดำเนินการวิจัยสามารถแสดงได้ดังนี้

- 3.1 ระบบผลิตไฟฟ้าด้วยวัฏจักรแรงดันอินทรีย์ขนาดเล็ก (Small-scale organic rankine cycle (SORC) power plant) แสดงดังภาพที่ 1 และแผนภูมิอุณหภูมิและเอนโทรปีของวัฏจักรแรงดันอินทรีย์แสดงดังภาพที่ 2 โดยมีหลักการทำงานดังนี้ สารทำงานที่อุณหภูมิต่ำที่สถานะที่ 2 ถูกเพิ่มอุณหภูมิจากแหล่งความร้อนที่มีอุณหภูมิสูงผ่านอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน จากนั้นสาร

ทำงานจะเปลี่ยนสถานะจากของเหลวไปเป็นไอที่ความดันสูงที่สภาวะ 3 สารทำงานที่มีสถานะเป็นไอจะผ่านเข้ากังหันเพื่อหมุนกังหันผลิตไฟฟ้า จากนั้นสารทำงานอุณหภูมิต่ำที่สภาวะ 4 จะถูกถ่ายเทความร้อนทิ้งผ่านอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนโดยหอผึ่งเย็นก่อนจะเริ่มกระบวนการใหม่ต่อไป โดยสมการที่ใช้ในการคำนวณหาประสิทธิภาพของระบบฯ (Thawonngamyingsakul & Kiatsirirot, 2012) แสดงได้ดังนี้

งานที่เกิดจากปั๊ม (Pump) ($\dot{W}_{Pump,ORC}$)

$$\dot{W}_{Pump,ORC} = \frac{\dot{m}_{r,ORC} v_1 (P_2 - P_1)}{\eta_{Pump,ORC}} \quad (1)$$

$$\dot{W}_{Pump,ORC} = \dot{m}_{r,ORC} v_1 (h_{2a} - h_1) \quad (2)$$

$$h_{2a} = \frac{v_1 (P_2 - P_1)}{\eta_{Pump,ORC}} + h_1 \quad (3)$$

ประสิทธิภาพปั๊ม (Pump efficiency)

$$\eta_{Pump,ORC} = \frac{P_2 - P_1}{h_{2a} - h_1} \quad (4)$$

อัตราการถ่ายเทความร้อนผ่านเครื่องทำระเหย (Evaporator) ($\dot{Q}_{Evap,ORC}$)

$$\dot{Q}_{Evap,ORC} = \dot{m}_{r,ORC} (h_3 - h_{2,a}) \quad (5)$$

งานที่เกิดจากกังหัน (Turbine) ($\dot{W}_{Tur}$)

$$\dot{W}_{Tur} = \dot{m}_{r,ORC} (h_3 - h_4) \eta_{Tur} \quad (6)$$

ประสิทธิภาพของกังหัน (Turbine efficiency)

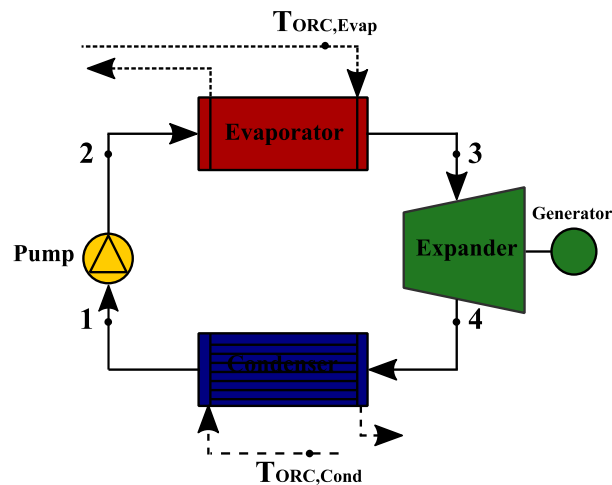
$$\eta_{Tur} = \frac{h_3 - h_{4a}}{h_3 - h_4} \quad (7)$$

อัตราการถ่ายเทความร้อนผ่านเครื่องควบแน่น (Condenser) ($\dot{Q}_{Cond,ORC}$)

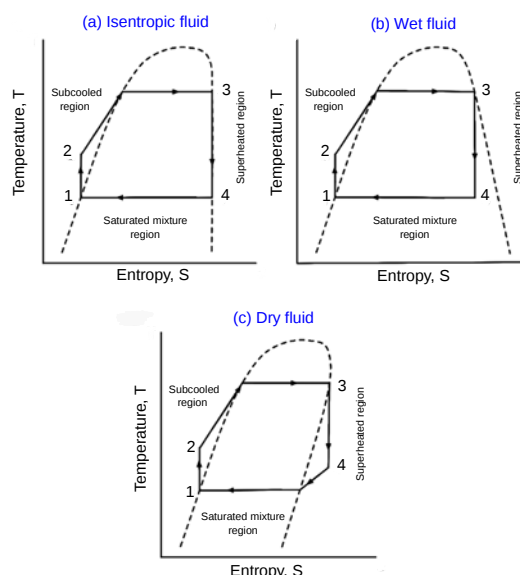
$$\dot{Q}_{Cond,ORC} = \dot{m}_{r,ORC} (h_{4a} - h_1) \quad (8)$$

ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของระบบฯ (Thermal efficiency) ($\eta_{th,ORC}$)

$$\eta_{th,ORC} = \frac{\dot{W}_{Tur} - \dot{W}_{Pump,ORC}}{\dot{Q}_{Evap,ORC}} \quad (9)$$



ภาพที่ 1 รูปร่างง่ายของระบบผลิตไฟฟ้าด้วยวัฏจักรแรงดันอินทรีย์ (ORC)



ภาพที่ 2 แผนภาพอุณหภูมิและเอนโทรปีของวัฏจักรแรงดันอินทรีย์ (T-s diagram)

(Mago *et al.*, 2008; Pei *et al.*, 2010)

3.2 ตัวแปรที่ใช้ในการเปรียบเทียบการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าด้วยวัฏจักรแรงดันอินทรีย์ ประกอบไปด้วย ประสิทธิภาพเชิงความร้อน (Thermal efficiency) ความดันสูงสุดในระบบ (Maximum pressure in the cycle) คุณภาพไอน้ำ (Steam quality) อัตราการไหลเชิงมวล (Mass flow rate) และปริมาณของอัตราความร้อนที่ถ่ายเทเข้าสู่ระบบ (Heat input)

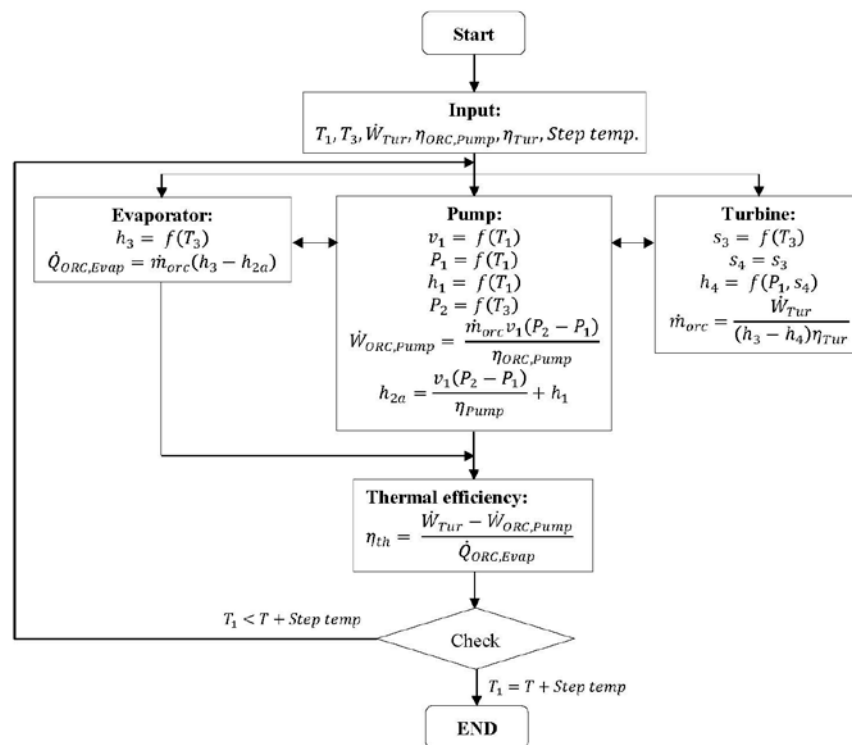
3.3 สถานะการทำงานของระบบฯ จะให้ความสนใจไปที่แหล่งความร้อนอุณหภูมิต่ำที่สามารถนำระบบดังกล่าวมาประยุกต์ใช้ในการผลิตไฟฟ้าชุมชนที่มีขนาดเล็กได้ นอกจากนี้ในการคำนวณของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะไม่คิดความดันลดของอุปกรณ์ต่างๆ ในระบบฯ เช่น เครื่อง

ทำระเหย (Evaporator) เครื่องควบแน่น (Condenser) อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนภายใน (IHE) และท่อ ยกเว้น ปั๊ม (Pump) และกังหัน (Turbine) โดยกำหนดสภาวะที่ใช้ในการคำนวณของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ซึ่งพัฒนามาจากสมการที่ใช้ในการคำนวณหาประสิทธิภาพของระบบฯ (หัวข้อที่ 3.1) แสดงดังภาพที่ 3 และภาพที่ 4 ดังนี้

- (1) อุณหภูมิเครื่องควบแน่น ($T_{ORC,Cond}$) เท่ากับ $35\text{ }^{\circ}\text{C}$
- (2) อุณหภูมิเครื่องทำระเหย ($T_{ORC,Evap}$) เท่ากับ $60\text{ ถึง }100\text{ }^{\circ}\text{C}$
- (3) ประสิทธิภาพไอเซนทรอปิกของปั๊ม ($\eta_{Pump,isen}$) และกังหัน ($\eta_{Tur,isen}$) เท่ากับ 80 และ 85% ตามลำดับ
- (4) งานที่ผลิตได้จากกังหัน ($\dot{W}_{Tur}$) เท่ากับ 60 kW_{th}
- (5) สารทำงานจำนวน 15 ชนิด แสดงดังตารางที่ 1
- (6) คุณสมบัติของสารทำงานในระบบอ้างอิงจาก REFPROP NIST7.0 (NIST, 2000)

ตารางที่ 1 คุณสมบัติของสารทำงาน (Brown *et al.*, 2009; Fukuda, Kondou *et al.*, 2014; Li *et al.*, 2016; Nasir and Kim, 2016)

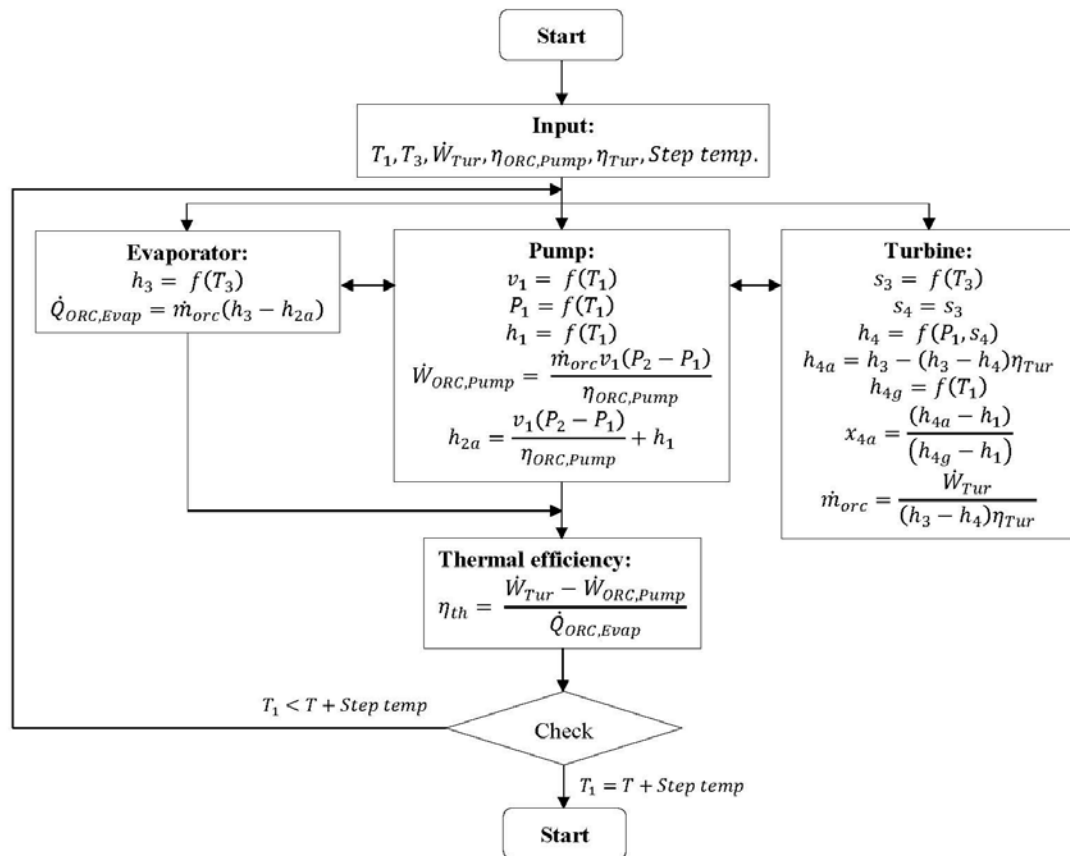
Working fluid	Chemical formula	Molar mass	Critical temperature ($^{\circ}\text{C}$)	Critical pressure (MPa)	ODP	GWP	Toxicity	Flammability
Ammonia	NH_3	17.03	132.25	11.33	0.00	0.0	High	High
R22	CHClF_2	86.84	96.14	4.99	0.03	1780.0	Non	Non
R113	$\text{C}_2\text{F}_3\text{Cl}_3$	187.40	214.06	3.39	1.00	6130.0	Low	Non
R123	CHCl_2CF_3	152.93	183.68	3.66	0.02	77.0	High	Non
R134a	CH_2FCF_3	102.03	101.06	4.06	0.00	1430.0	Non	Non
R227ea	C_3HF_7	170.03	101.75	2.93	0.00	3220.0	Low	Non
R236fa	$\text{C}_3\text{H}_2\text{F}_6$	152.04	124.92	3.20	0.00	9810.0	Low	Non
R245ca	$\text{C}_3\text{F}_5\text{H}_3$	134.05	174.42	3.93	0.00	693.0	-	-
R245fa	$\text{C}_3\text{F}_3\text{H}_5$	134.05	154.01	3.65	0.00	820.0	Low	Non
R365mfc	$\text{C}_4\text{F}_5\text{H}_5$	148.08	186.85	3.27	0.00	890.0	Non	Non
R1234yf	$\text{C}_3\text{F}_4\text{H}_2$	114.04	94.70	3.38	0.00	4.0	Non	Mildly
R1234ze	$\text{C}_3\text{F}_4\text{H}_2$	114.04	109.37	3.64	0.00	<1.0	Non	Non
R1234zez	$\text{C}_3\text{F}_4\text{H}_2$	114.04	150.12	3.53	0.00	<10.0	-	-
RC318	C_4F_8	200.03	115.23	2.78	0.00	10300.0	Low	Non
Trans-butene	C_4H_8	56.11	101.75	2.93	-	-	-	Extremely



ภาพที่ 3 แผนผังขั้นตอนการคำนวณของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์
(กรณีสารทำงานแบบแห้ง)

4. ผลการวิจัย

4.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้ถูกพัฒนา แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบผลิตไฟฟ้าด้วยวัฏจักรแรงดันอินทรีย์ที่ได้ถูกพัฒนาในการศึกษาในงานวิจัยนี้ได้ถูกนำมาเปรียบเทียบกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Saleh *et al.* (2007) ที่ซึ่งเป็นบทความวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์ในวารสารที่ได้รับการยอมรับ หรืออาจกล่าวได้ว่าสามารถใช้ข้อมูลหรือผลการวิจัยมาอ้างอิงได้เนื่องจากมีความน่าเชื่อถือ โดยข้อมูลสภาวะการทำงานแสดงดังตารางที่ 2 และผลเปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนของแบบจำลองที่ได้ถูกพัฒนาแสดงดังตารางที่ 3 ผลการศึกษาพบว่า แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้ถูกพัฒนาสามารถคำนวณประสิทธิภาพเชิงความร้อนของระบบผลิตไฟฟ้าด้วยวัฏจักรแรงดันอินทรีย์ภายใต้สภาวะการทำงานเดียวกันได้เท่ากับ 13.06% ในขณะที่งานวิจัยของ Saleh *et al.* (2007) ได้เท่ากับ 13.07% หรือคิดเป็นร้อยละความแตกต่างได้ประมาณ 0.08 ดังจะเห็นได้ว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้ถูกพัฒนาสามารถนำมาใช้ในการทำนายการทำงานจากระบบผลิตไฟฟ้าด้วยวัฏจักรแรงดันอินทรีย์ที่สภาวะการทำงานต่างๆ ได้



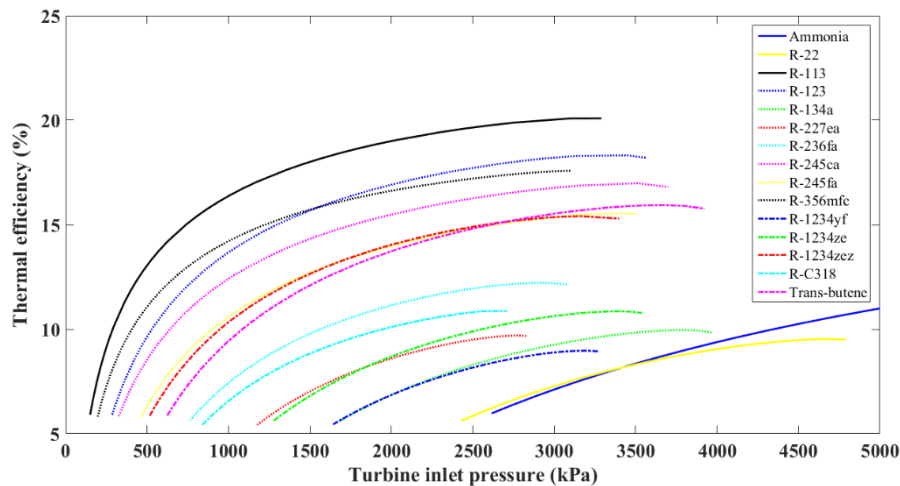
ภาพที่ 4 แผนผังขั้นตอนการคำนวณของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์
(กรณีสารทำงานแบบเปียกและแบบไอเซนโทรปิก)

ตารางที่ 2 สภาวะการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าด้วยวัฏจักรแรงดันอินทรีย์ที่ใช้ในการสอบเทียบกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้ถูกพัฒนา

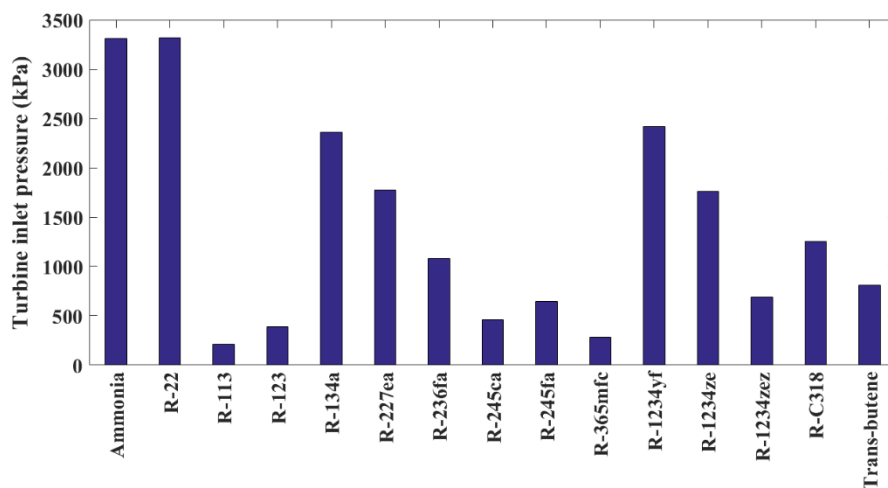
งานวิจัย	สารทำงาน	η_{Pump} (%)	$\eta_{Tur,th}$ (%)	$T_{Tur,i}$ (°C)	T_{Amb} (°C)
Saleh และคณะ	R245fa	65.0	85.0	68.0 – 100.0	30.0

ตารางที่ 3 ผลเปรียบเทียบประสิทธิภาพเชิงความร้อนของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบผลิตไฟฟ้าด้วยวัฏจักรแรงดันอินทรีย์ (ORC) ที่ได้ถูกพัฒนาและผลงานวิจัยของ Saleh *et al.* (2007) ที่ได้ถูกตีพิมพ์

สารทำงาน	งานวิจัย	งานที่ศึกษา	ร้อยละความแตกต่าง (%)
R245fa	13.07	13.06	0.08



ภาพที่ 5 ประสิทธิภาพเชิงความร้อน (%) ของระบบฯ เมื่อความดันของสารทำงานด้านขาเข้ากังหันเพิ่มสูงขึ้น

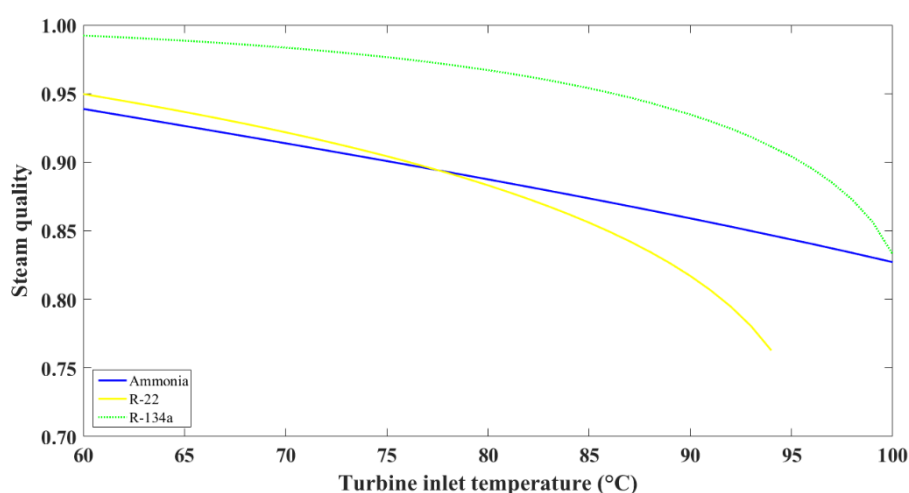


ภาพที่ 6 ความดันของสารทำงานด้านเครื่องทำระเหย (kPa) เมื่อประสิทธิภาพเชิงความร้อนของระบบฯ มีค่าเท่ากับ 8%

4.2 ความดันสูงสุดในระบบ (Maximum cycle pressure) ความดันที่เกิดขึ้นในเครื่องทำระเหยถือเป็นความดันที่สูงที่สุดของสารทำงานที่เกิดขึ้น กล่าวคือ ถ้าความดันที่เกิดขึ้นในเครื่องทำระเหยมีค่าสูงนั้นหมายถึงคอยล์ (Coil) ของเครื่องทำระเหยจะต้องมีขนาดใหญ่ ประกอบกับค่าใช้จ่ายที่ใช้ในการสร้างเครื่องทำระเหยนั้นต้องมีค่าสูงขึ้นตามไปด้วย ผลการศึกษาแสดงดังภาพที่ 5 และภาพที่ 6 พบว่า ระบบผลิตไฟฟ้าด้วยวัฏจักรแรงดันอินทรีย์จะมีประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงสุด และความดันสูงสุดในระบบต่ำสุด เมื่อระบบใช้สารทำงาน R113 รองลงมาคือ R365mfc, R123, R245ca,

R245fa, R1234zez, Trans-butene, R-236fa, RC318, R1234ze, R227ea, R134a, R1234yf, Ammonia (R717) และ R22 ตามลำดับ

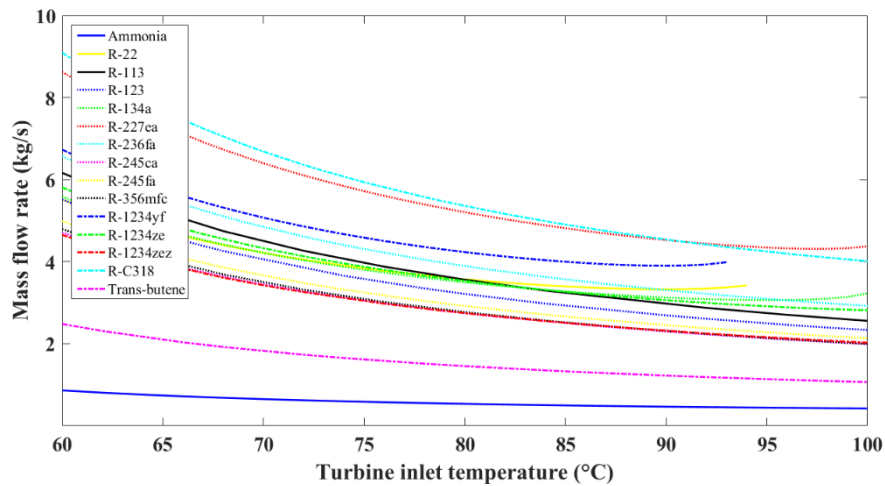
4.3 คุณภาพไอ (Steam quality) เมื่อคุณภาพไอของสารทำงานที่ออกจากกังหันมีคุณภาพต่ำ (สัดส่วนของของเหลวมีค่ามากกว่าสัดส่วนของไอ) จะส่งผลให้กังหันเกิดความเสียหาย คือ ใบของกังหันจะเกิดการกัดกร่อน ส่งผลให้มีค่าใช้จ่ายที่เกิดจากการซ่อมบำรุงเพิ่มสูงขึ้นซึ่งเป็นเรื่องที่ไม่ต้องการ ดังนั้นในกระบวนการทำงานหากสารทำงานใดมีคุณภาพไอสูงนั้นหมายถึงสารทำงานนั้นๆ เป็นสารทำงานที่มีความเหมาะสม คุณภาพไอของสารทำงานบางส่วนแสดงดังภาพที่ 7 พบว่า คุณภาพไอของสารทำงานมีแนวโน้มลดลงเมื่ออุณหภูมิของสารทำงานที่เข้ากังหันเพิ่มสูงขึ้น ทั้งนี้เมื่อให้ความสนใจไปที่อุณหภูมิของสารทำงานที่เข้ากังหัน 95 °C คุณภาพไอของสารทำงาน R22 จะมีค่าต่ำที่สุด รองลงมาคือ Ammonia (R717) และ R134a ตามลำดับ



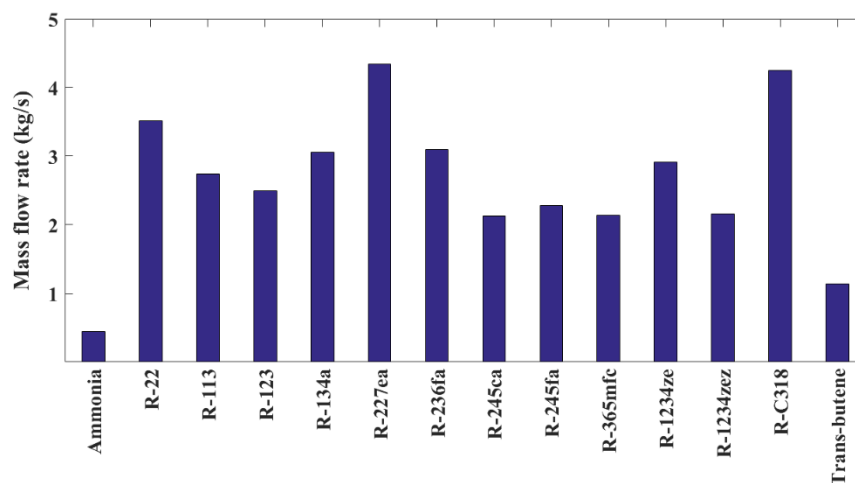
ภาพที่ 7 คุณภาพไอของสารทำงานแบบเปียก (Wet) และไอเซนโทรปิก (Isentropic) เมื่ออุณหภูมิของสารทำงานที่เข้ากังหันเปลี่ยนแปลงจาก 60 ถึง 100 °C

4.4 อัตราการไหลเชิงมวลของสารทำงาน (Mass flow rate of working fluid) ปริมาณของอัตราการไหลเชิงมวลของสารทำงานจะส่งผลต่ออุปกรณ์ของระบบ กล่าวคือ ถ้าปริมาณของอัตราการไหลเชิงมวลมีปริมาณมาก อุปกรณ์ต่างๆ ที่ถูกใช้ในระบบจะต้องมีขนาดใหญ่ตามไปด้วย หรืออาจกล่าวได้ว่าค่าใช้จ่ายเริ่มต้นในการสร้างระบบก็จะสูงขึ้น ผลการศึกษาแสดงดังภาพที่ 8 พบว่า อัตราการไหลเชิงมวลของสารทำงานมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อยเมื่ออุณหภูมิของสารทำงานที่เข้ากังหันมีอุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น ทั้งนี้เมื่อกำหนดให้อุณหภูมิของสารทำงานที่เข้ากังหันมีอุณหภูมิ 95 °C สารทำงานที่มีอัตราการไหลเชิงมวลของสารทำงานต่ำที่สุด คือ Ammonia (R717) รองลงมาคือ Trans-butene, R245ca, R365mfc, R1234zez, R245fa, R123, R1234ze, R236fa, R22, RC318 และ R227ea

(แสดงดังภาพที่ 9) นอกจากนี้ในการศึกษายังพบว่า ที่อุณหภูมิของสารทำงานอุณหภูมิเดียวกัน R1234yf เป็นสารทำงานที่ไม่มีความเหมาะสมเนื่องจากที่อุณหภูมิดังกล่าวระบบไม่สามารถทำงานได้



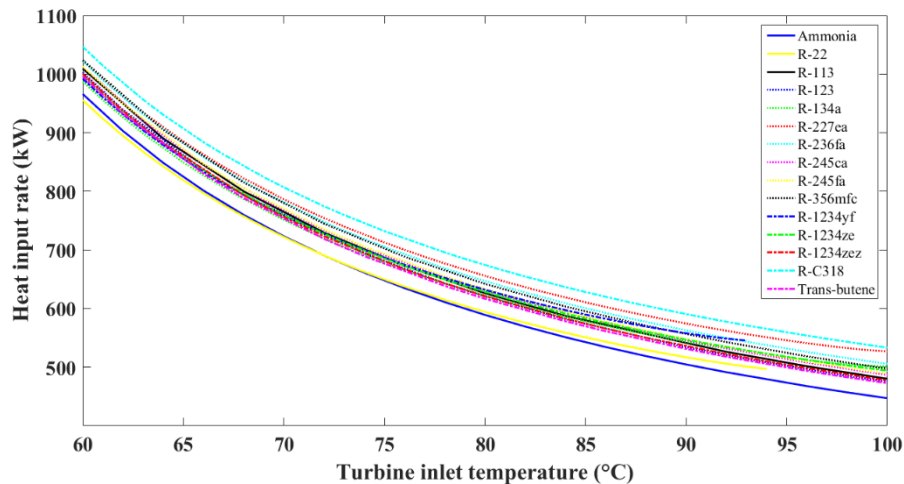
ภาพที่ 8 อัตราการไหลเชิงมวลของสารทำงาน (kg/s) ของระบบฯ
เมื่ออุณหภูมิของสารทำงานที่เข้ากังหันเปลี่ยนแปลงจาก 60 ถึง 100 °C



ภาพที่ 9 อัตราการไหลเชิงมวลของสารทำงาน (kg/s) ของระบบฯ
เมื่ออุณหภูมิของสารทำงานที่เข้ากังหันเท่ากับ 95 °C

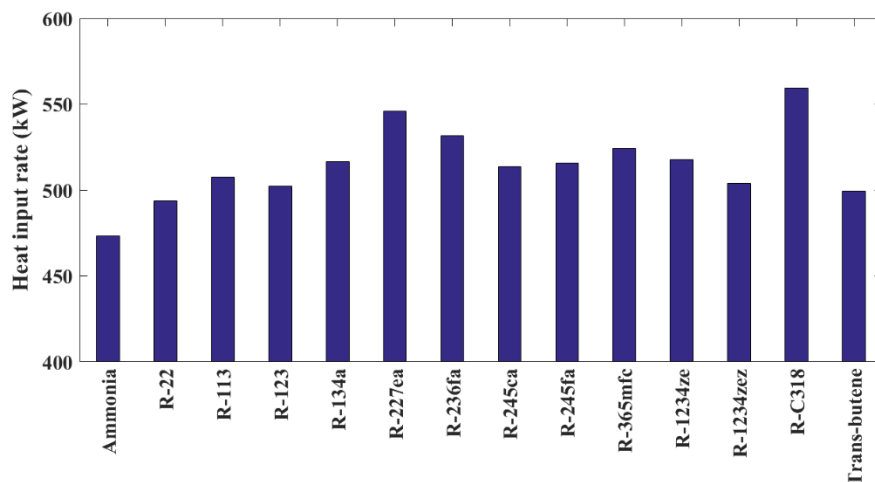
4.5 อัตราการถ่ายเทความร้อนผ่านเครื่องทำระเหย (Heat input rate to the evaporator)
ผลการศึกษาดังภาพที่ 10 พบว่า อัตราการถ่ายเทความร้อนผ่านเครื่องทำระเหยจะมีแนวโน้มลดลงเมื่ออุณหภูมิของสารทำงานที่เข้ากังหันเพิ่มสูงขึ้น ทั้งนี้เมื่อกำหนดให้อุณหภูมิของสารทำงานที่เข้ากังหันมีอุณหภูมิ 95 °C สารทำงานที่มีอัตราการไหลเชิงมวลของสารทำงานต่ำที่สุด คือ Ammonia

(R717) รองลงมาคือ R22, Trans-butene, R123, R1234zez, R113, R245ca, R245fa, R134a, R1234ze, R365mfc, R236fa, R227ea และ RC318 ตามลำดับ แสดงดังภาพที่ 11



ภาพที่ 10 อัตราการถ่ายเทความร้อนผ่านเครื่องทำระเหย

เมื่ออุณหภูมิของสารทำงานที่เข้ากังหันเปลี่ยนแปลงจาก 60 ถึง 100 °C



ภาพที่ 11 อัตราการไหลเชิงมวลของสารทำงาน (kg/s) ของระบบฯ

เมื่ออุณหภูมิของสารทำงานที่เข้ากังหันเท่ากับ 95 °C

5. สรุปผลและการอภิปรายผล

งานวิจัยนี้เป็นการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบผลิตไฟฟ้าด้วยวัฏจักรแรงดันต่ำ เพื่อใช้ในการทำนายความเหมาะสมของสารทำงานที่ใช้ในระบบ โดยในการศึกษาสารทำงาน 15 ชนิด ที่เป็นสารบริสุทธิ์ และสารผสมได้ถูกนำมาเปรียบเทียบภายใต้ตัวแปรต่างๆ คือ ประสิทธิภาพเชิงความ

ร้อน, ความดันสูงสุดในระบบ, คุณภาพไอ, อัตราการไหลเชิงมวล และปริมาณของอัตราการถ่ายเทความร้อนเข้าสู่ระบบ ผลการศึกษาสามารถสรุปและอภิปรายผลได้ดังนี้

5.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบที่ได้ดำเนินการพัฒนา พบว่า แบบจำลองที่ได้ถูกพัฒนาสามารถนำมาใช้ในการทำนายการทำงานของระบบได้ กล่าวคือ ค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนของระบบที่ได้จากแบบจำลองที่ได้ถูกพัฒนาจะมีค่าเท่ากับ 13.06% ในขณะที่ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของระบบที่ได้จากงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์มีค่าเท่ากับ 13.07% หรือคิดเป็นร้อยละของความแตกต่างของผลที่ได้เท่ากับร้อยละ 0.08

5.2 สารทำงานที่มีความเหมาะสมสำหรับระบบผลิตไฟฟ้าด้วยวัฏจักรแรงดันอินทรีย์

(1) เมื่อกำหนดให้อุณหภูมิของสารทำงานเข้ากังหันมีอุณหภูมิประมาณ 95 °C R1234yf เป็นสารทำงานที่ไม่เหมาะสม เนื่องจากสารทำงานไม่สามารถทำงานที่อุณหภูมิดังกล่าวได้

(2) เมื่อพิจารณาคุณภาพไอของสารทำงานในระบบ พบว่า Ammonia (R717), R22 และ R134a เป็นสารทำงานที่ไม่มีความเหมาะสมเนื่องจากที่สภาวะการทำงานต่างๆ สารดังกล่าวมีคุณภาพไอที่ค่อนข้างต่ำ ซึ่งจะส่งผลให้ใบพัดของกังหันเกิดการชำรุดเสียหายได้

(3) จากผลการพิจารณาที่ได้กล่าวไปแล้วข้างต้น เมื่อพิจารณาปริมาณของอัตราการไหลเชิงมวล ความดันที่เครื่องระเหย และประสิทธิภาพเชิงความร้อนของระบบ พบว่า R365mfc, R245cd, Trans-butene, R113, R123, R245fa และ R1234zez เป็นสารทำงานที่มีความเหมาะสมเนื่องจากมีปริมาณของอัตราการไหลเชิงมวล และความดันที่เกิดขึ้นที่เครื่องระเหยต่ำ และมีประสิทธิภาพเชิงความร้อนที่สูง

(4) แต่อย่างไรก็ตามในการเลือกสารทำงานในระบบจำเป็นต้องพิจารณาสารทำงานที่มีระดับความเป็นพิษ ระดับการทำลายโอโซน (ODP) และศักยภาพในการทำให้เกิดภาวะโลกร้อน (GWP) ที่ต่ำ ดังนั้นเมื่อพิจารณาจากปัจจัยที่ได้กล่าวไปแล้วจะพบว่า R245ca, R365mfc, R245fa และ R1234zez เป็นสารทำงานที่มีความเหมาะสมในการนำมาประยุกต์ใช้กับระบบผลิตไฟฟ้าด้วยวัฏจักรแรงดันอินทรีย์ขนาดเล็ก

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณหน่วยวิจัยพลังงานสะอาด คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร และสาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม สำหรับสถานที่ดำเนินงานวิจัย

7. เอกสารอ้างอิง

- อภิวัฒน์ ยิ้มประเสริฐ และณัฐพร ไชยญาติ. (2558). โรงไฟฟ้าพลังงานทดแทนจากวัฏจักรแรงดันอินทรีย์ในประเทศไทย. การถ่ายเทพลังงานความร้อนและมวลในอุปกรณ์ด้านความร้อนและกระบวนการ (ครั้งที่ 14), ฮอไรวันวิลเลจแอนด์รีสอร์ท และสวนพฤกษศาสตร์ทีชิล, เชียงใหม่.
- Bao, J., & Zhao, L. (2013). A review of working fluid and expander selections for organic Rankine cycle. **Renewable and sustainable energy reviews**, 24, 325-342.
- Brown, J. S., Zilio, C., & Cavallini, A. (2009). The fluorinated olefin R-1234ze (Z) as a high-temperature heat pumping refrigerant. **International Journal of Refrigeration**, 32(6), 1412-1422.
- Dai, X., Shi, L., & Qian, W. (2019). Review of the working fluid thermal stability for organic rankine cycles. **Journal of Thermal Science**, 28(4), 597-607.
- Fukuda, S., Kondou, C., Takata, N., & Koyama, S. (2014). Low GWP refrigerants R1234ze (E) and R1234ze (Z) for high temperature heat pumps. **International Journal of Refrigeration**, 40, 161-173.
- Gao, W., Li, H., Xu, G., & Quan, Y. (2015). Working fluid selection and preliminary design of a solar organic Rankine cycle system. **Environmental Progress & Sustainable Energy**, 34(2), 619-626.
- Guo, T., Wang, H., & Zhang, S. (2010). **Fluid selection for a low-temperature geothermal Organic Rankine Cycle by energy and exergy**. Paper presented at the 2010 Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference.
- He, C., Liu, C., Zhou, M., Xie, H., Xu, X., & Wu, S. (2014). A new selection principle of working fluids for subcritical organic Rankine cycle coupling with different heat sources. **Energy**, 68, 283-291.
- Kolasiński, Piotr. (2020). The method of the working fluid selection for Organic Rankine cycle (ORC) systems employing volumetric expanders. **Energies**, 13(3), 573.
- Li, J., Alvi, J. Z., Pei, G., Ji, J., Li, P., & Fu, H. (2016). Effect of working fluids on the performance of a novel direct vapor generation solar organic Rankine cycle system. **Applied Thermal Engineering**, 98, 786-797.
- Liang, Y., & Yu, Z. (2019). Working fluid selection for a combined system based on coupling of organic Rankine cycle and air source heat pump cycle. **Energy Procedia**, 158, 1485-1490.

- Long, R., Bao, Y.J., Huang, X.M., & Liu, W. (2014). Exergy analysis and working fluid selection of organic Rankine cycle for low grade waste heat recovery. **Energy**, 73, 475-483.
- Mago, P. J., Chamra, L. M., Srinivasan, K., & Somayaji, C. (2008). An examination of regenerative organic Rankine cycles using dry fluids. **Applied Thermal Engineering**, 28(8-9), 998-1007.
- Nasir, M. T., & Kim, K.C. (2016). Working fluids selection and parametric optimization of an Organic Rankine Cycle coupled Vapor Compression Cycle (ORC-VCC) for air conditioning using low grade heat. **Energy and Buildings**, 129, 378-395.
- NIST. (2000). REFPROP Version 7.0, **Thermodynamic properties of refrigerants and refrigerant mixtures software**.
- Pei, G., Li, J., & Ji, J. (2010). Analysis of low temperature solar thermal electric generation using regenerative Organic Rankine Cycle. **Applied Thermal Engineering**, 30(8-9), 998-1004.
- Saleh, B., Koglbauer, G., Wendland, M., & Fischer, J. (2007). Working fluids for low-temperature organic Rankine cycles. **Energy**, 32(7), 1210-1221.
- Tchanche, B. F., Papadakis, G., Lambrinos, G., & Frangoudakis, A. (2009). Fluid selection for a low-temperature solar organic Rankine cycle. **Applied Thermal Engineering**, 29(11-12), 2468-2476.
- Thawonngamyingsakul, C., & Kiatsiriroat, T. (2012). Potential of a solar organic rankine cycle with evacuated-tube solar collectors as heat source for power generation in Thailand. **Energy Science and Technology**, 4(2), 25-35.
- Thurairaja, K., Wijewardane, A., Jayasekara, S., & Ranasinghe, C. (2019). Working fluid selection and performance evaluation of ORC. **Energy Procedia**, 156, 244-248.
- Yadav, K., & Sircar, A. (2019). Selection of working fluid for low enthalpy heat source Organic Rankine Cycle in Dholera, Gujarat, India. **Case Studies in Thermal Engineering**, 16, 100553.