

การประเมินศักยภาพการผลิตไฟฟ้าจากความร้อนทิ้งของไอเสียผ่านวัฏจักรแรงดันอินทรีย์ด้วยแบบจำลองทาง
คณิตศาสตร์: กรณีใช้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบขดท่อหมุนเวียน

Mathematical Modeling for Evaluating the Electricity Generation Potential from Exhaust Waste
Heat via an Organic Rankine Cycle: A Case Study Using a Run-Around Coil Heat Exchanger

ธณิศวรรค์ ดีทยา¹, เหนือพล ดวงเปีย^{1,2}, วาสนา คำโสภาส^{1,3}, อรรถกร อาสนคำ¹และทนงเกียรติ เกียรติศิริโรจน์¹

¹ ห้องปฏิบัติการวิจัยระบบทางอุณหภาพ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ เชียงใหม่ 50200

² สำนักงานบริหารงานวิจัย มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ เชียงใหม่ 50200

³ สถาบันวิจัยพหุศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ เชียงใหม่ 50200

ABSTRACT

This study investigated the potential for electricity generation from exhaust waste heat at various temperatures and flow conditions using an Organic Rankine Cycle (ORC) with R245fa as the working fluid. A mathematical model was developed for a system incorporating a run-around coil heat exchanger to transfer heat from the exhaust gas to a hot-water loop, which subsequently supplied heat to the ORC evaporator. The minimum exhaust gas temperature after heat recovery was maintained at 120°C to prevent water vapor condensation, while a pinch temperature difference of 10°C was imposed for the heat exchange processes. The analysis considered exhaust gas temperatures ranging from 150 to 300°C and hot-water-to-exhaust-gas heat capacity rate ratios ranging from 2 to 5. The results showed that increasing the exhaust gas temperature increased both the produced hot-water temperature and the ORC evaporator temperature, resulting in higher thermal efficiency and greater power output. For an exhaust-gas heat capacity rate of 1.2 kW/K, the model predicted ORC thermal efficiencies of approximately 14.1–17.2% and power outputs of approximately 5.08–37.08 kW. The highest evaluated thermal efficiency and power output were 17.17% and 37.08 kW, respectively, at an exhaust gas temperature of 300°C and a hot-water-to-exhaust-gas heat capacity rate ratio of 3. However, excessively reducing the heat capacity rate ratio could increase the evaporator temperature beyond the suitable operating range. For an ORC using R245fa, the evaporator temperature was therefore recommended to be maintained below approximately 150°C. These findings demonstrated that the proposed mathematical model could be used to estimate the electricity generation potential of exhaust waste heat and to identify appropriate operating conditions for an ORC integrated with a run-around coil heat exchanger.

Keywords: Organic Rankine cycle; exhaust gas; electricity generation; run-around coil heat exchanger

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาศักยภาพในการผลิตไฟฟ้าจากความร้อนทิ้งของไอเสียที่อุณหภูมิและอัตราการไหลต่าง ๆ ผ่านวัฏจักรแรงดันอินทรีย์ (Organic Rankine Cycle; ORC) ที่ใช้ R245fa เป็นสารทำงาน โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ร่วมกับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบขดท่อหมุนเวียน สำหรับถ่ายเทความร้อนจากไอเสียสู่น้ำร้อนก่อนนำไปให้ความร้อนแก่อิวาपोเรเตอร์ของวัฏจักร กำหนดให้อุณหภูมิไอเสียหลังการแลกเปลี่ยนความร้อนมีค่าต่ำสุด 120°C เพื่อป้องกันการควบแน่นของไอน้ำในไอเสีย และกำหนดความแตกต่างของอุณหภูมิพินช์ในการแลกเปลี่ยนความร้อนเท่ากับ 10°C การศึกษาพิจารณาอุณหภูมิไอเสียในช่วง 150–300°C และอัตราส่วนความจุความร้อนรวมของน้ำร้อนต่อไอเสียในช่วง 2–5

ผลการศึกษาพบว่า เมื่ออุณหภูมิไอเสียเพิ่มขึ้น อุณหภูมิน้ำร้อนที่ผลิตได้และอุณหภูมิไอวาปอเรเตอร์ของวัฏจักรเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ประสิทธิภาพทางความร้อนและกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้เพิ่มขึ้น สำหรับกรณีที่อัตราความจุความร้อนรวมของไอเสียเท่ากับ 1.2 kW/K แบบจำลองให้ค่าประสิทธิภาพทางความร้อนของ ORC ประมาณ 14.1–17.2% และกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ประมาณ 5.08–37.08 kW โดยค่าประสิทธิภาพและกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่พิจารณาได้เท่ากับ 17.17% และ 37.08 kW ตามลำดับ ที่อุณหภูมิไอเสีย 300°C และอัตราส่วนความจุความร้อนรวมของน้ำต่อไอเสียเท่ากับ 3 อย่างไรก็ตาม เมื่ออัตราส่วนความจุความร้อนรวมของน้ำต่อไอเสียลดลงมากเกินไป อุณหภูมิไอวาปอเรเตอร์อาจสูงเกินช่วงการทำงานที่เหมาะสม โดยสำหรับ R245fa ควรควบคุมอุณหภูมิไอวาปอเรเตอร์ไม่ให้เกินประมาณ 150°C ผลการศึกษานี้แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สามารถใช้ประเมินศักยภาพการผลิตไฟฟ้าจากความร้อนทิ้งของไอเสีย และช่วยกำหนดเงื่อนไขการทำงานที่เหมาะสมของระบบ ORC ร่วมกับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบขดท่อหมุนเวียนได้

คำสำคัญ: วัฏจักรแรงดันอินทรีย์; แก๊สไอเสีย; การผลิตไฟฟ้า; ขดท่อหมุนเวียน

บทนำ

วัฏจักรแรงดันอินทรีย์สามารถนำมาใช้ประโยชน์ในการผลิตไฟฟ้าจากความร้อนทิ้งจากแหล่งต่างๆ เช่น ไอเสียจากเครื่องปั่นไฟฟ้าที่ใช้น้ำมันดีเซลหรือแก๊สชีวภาพ ไอเสียจากเตาเผาหรือหม้อไอน้ำ หรือน้ำร้อนทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม ทำให้ประสิทธิภาพรวมในการผลิตพลังงานของหน่วยงานมีค่าสูงขึ้น Jian sing et. al., 2015 [1] นำความร้อนทิ้งจากน้ำร้อนที่ระบายความร้อนในเครื่องยนต์เรือ และแก๊สไอเสียของเครื่องยนต์มาผลิตไฟฟ้าผ่านวัฏจักรแรงดันอินทรีย์ ทำให้ประสิทธิภาพระบบเพิ่มขึ้น 10.2% ธรณิศวร และ ทนงเกียรติ 2557 [2] พบว่า การเพิ่มอัตราการไหลและอุณหภูมิน้ำร้อนเข้าเครื่องทำระเหยของวัฏจักรแรงดันอินทรีย์ ทำให้ประสิทธิภาพวัฏจักรเพิ่มขึ้น โดยต้นทุนการผลิตไฟฟ้าต่อหน่วยจะลดลง โคติษฐ์ ธรณ และคณะ, 2559 [3] ได้ศึกษาศักยภาพการนำแก๊สไอเสีย ของเครื่องยนต์แก๊สชีวภาพของโรงไฟฟ้าจากหลุมฝังกลบขยะ มาผลิตน้ำร้อนเพื่อป้อนให้แก่วัฏจักรแรงดันอินทรีย์ ที่ใช้ R245fa เป็นสารทำงาน สามารถผลิตไฟฟ้าเพิ่มขึ้นจากเดิม 3.4% โดยมีต้นทุนในการผลิตไฟฟ้า 2.38 บาท/kWh ณพล ไชยมงคล และคณะ [4] ได้ใช้ วัฏจักรแรงดันอินทรีย์ ผลิตไฟฟ้าจากน้ำร้อนทิ้งอุณหภูมิสูง ในโรงไฟฟ้าถ่านหินแห่งหนึ่ง โดยพบว่าต้นทุนในการผลิตไฟฟ้าเพียง 1.39 บาท/kWh และความร้อนที่เหลือสามารถนำมาใช้ทำความเย็นผ่านระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน สำหรับการปรับอากาศในอาคารได้อีกทางหนึ่ง ในช่วงที่ผ่านมา ORC ได้รับความสนใจอย่างต่อเนื่องสำหรับการนำความร้อนทิ้งจากเครื่องยนต์และกระบวนการอุตสาหกรรมกลับมาใช้ผลิตไฟฟ้า โดยการศึกษาครอบคลุมตั้งแต่วัฏจักรพื้นฐานไปจนถึงวัฏจักรแบบ regenerative, supercritical และ multi-loop รวมถึงการเลือกใช้สารทำงานรุ่นใหม่เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม [5] นอกจากการออกแบบวัฏจักรและการเลือกสารทำงานแล้ว สมรรถนะของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนยังเป็นปัจจัยสำคัญต่อประสิทธิภาพและต้นทุนของระบบ ORC เนื่องจากเป็นองค์ประกอบหลักในการถ่ายเทพลังงานระหว่างแหล่งความร้อนกับสารทำงาน [6] โดยเฉพาะในระบบนำความร้อนจากไอเสียกลับมาใช้ประโยชน์ การออกแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนจำเป็นต้องพิจารณาทั้งความสามารถในการรับความร้อนและความดันตกคร่อมด้านไอเสีย เนื่องจากความดันตกคร่อมที่สูงอาจส่งผลต่อสมรรถนะโดยรวมของระบบต้นกำเนิดไอเสีย [7] งานวิจัยล่าสุดยังแสดงให้เห็นถึงการพัฒนา ORC สำหรับการนำความร้อนทิ้งกลับมาใช้ในหลายระดับ ตั้งแต่การวิเคราะห์รูปแบบวัฏจักรและเงื่อนไขการทำงานเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ [8] ไปจนถึงการพัฒนาและทดสอบระบบ ORC ระดับ 50 kWe สำหรับความร้อนทิ้งในอุตสาหกรรม [9]

แม้ว่างานวิจัยที่ผ่านมาได้แสดงให้เห็นถึงศักยภาพของ ORC ในการนำความร้อนทิ้งจากแหล่งต่าง ๆ กลับมาใช้ผลิตไฟฟ้า แต่การศึกษาส่วนใหญ่มุ่งเน้นการวิเคราะห์ระบบภายใต้เงื่อนไขของแหล่งความร้อนหรือระบบเฉพาะกรณี จึงยังขาดแนวทางอย่างง่ายสำหรับการประเมินศักยภาพการผลิตไฟฟ้าจากไอเสียเมื่อทราบเพียงอุณหภูมิและอัตราความจุความร้อนรวมของแหล่งความร้อน งานวิจัยนี้จึงนำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับประเมินสมรรถนะ ORC ที่ใช้

R245fa เป็นสารทำงาน โดยพิจารณาผลของอุณหภูมิไอเสีย อัตราส่วนความจุความร้อนรวมของน้ำต่อไอเสีย และข้อจำกัดด้านอุณหภูมิในการแลกเปลี่ยนความร้อนร่วมกัน

ในระบบที่นำเสนอ เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบขดท่อหมุนเวียน (run-around coil heat exchanger) ถูกใช้เป็นตัวกลางในการถ่ายเทความร้อนจากไอเสียไปยัง ORC ผ่านวงจรน้ำร้อน การจัดระบบในลักษณะนี้มีข้อดีด้านความยืดหยุ่นในการติดตั้งและการบำรุงรักษา นอกจากนี้การใช้ขดท่อแลกเปลี่ยนความร้อนในทางเดินไอเสียยังสามารถออกแบบให้มีความดันตกคร่อมต่ำ เพื่อลดผลกระทบต่อการทำงานของระบบต้นกำเนิดไอเสีย ดังนั้น แนวทางที่นำเสนอจึงเหมาะสำหรับใช้ประเมินเบื้องต้นทั้งศักยภาพการผลิตไฟฟ้าและเงื่อนไขการทำงานที่เหมาะสมของระบบ ORC สำหรับแหล่งความร้อนทั้งที่มีอุณหภูมิและอัตราความจุความร้อนรวมแตกต่างกัน

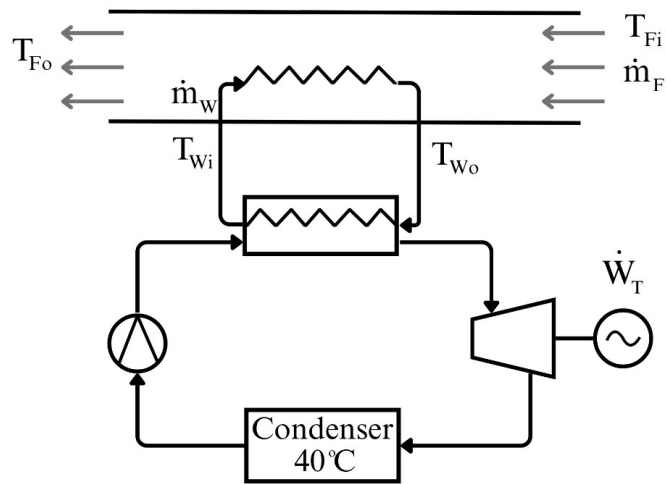
ทฤษฎี

รูปที่ 1 แสดงการนำความร้อนทั้งจากไอเสีย อัตราการไหล $\dot{m}_F$ อุณหภูมิไอเสีย T_{Fi} มาแลกเปลี่ยนความร้อนกับชุดแลกเปลี่ยนความร้อนแบบ Run-around coil ที่มีน้ำอัตราการไหล $\dot{m}_W$ เป็นสารทำงาน น้ำร้อนที่ได้จะถูกนำให้ความร้อนแก่อีวาปอเรเตอร์ ของวัฏจักรแรงดันอินทรีย์ ในงานนี้จะกำหนดให้อุณหภูมิไอเสียหลังจากแลกเปลี่ยนความร้อนมีค่าต่ำสุดที่ 120°C เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการควบแน่นของไอน้ำในไอเสีย ซึ่งมักจะกำหนดให้สูงกว่า 100°C [4] กำหนด c_p ของไอเสียมีค่า 1.2 kJ/kgK อัตราความร้อนที่จ่ายในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน และอีวาปอเรเตอร์ของวัฏจักรแรงดันอินทรีย์ สามารถคำนวณจาก

$$\dot{Q}_F = \dot{Q}_G = (\dot{m}c_p)_F (T_{Fi} - T_{Fo}) = (\dot{m}c_p)_W (T_{Wi} - T_{Wo}) \quad (1)$$

$$\text{จะได้} \quad T_{Wo} = \frac{(\dot{m}c_p)_F}{(\dot{m}c_p)_W} (T_{Fi} - T_{Fo}) + T_{Wi} \quad (2)$$

กำหนด Pinch temperature ระหว่างไอเสียและน้ำที่ท่อไอเสีย 10°C [11] นั่นคือ $T_{Wi} = 120 - 10 = 110^{\circ}\text{C}$ ซึ่งเมื่อกำหนดอุณหภูมิไอเสีย, T_{Fi} , อัตราความจุความร้อนรวมของไอเสีย, $(\dot{m}c_p)_F$ และอัตราความจุความร้อนรวมของน้ำ $(\dot{m}c_p)_W$ จะสามารถคำนวณอุณหภูมิน้ำร้อนที่ออกจากอุปกรณ์, T_{Wo} , จากสมการ (2) เพื่อมาจ่ายความร้อนที่อีวาปอเรเตอร์ของวัฏจักรแรงดันอินทรีย์



รูปที่ 1 การดึงความร้อนจากไอเสีย เพื่อผลิตไฟฟ้าผ่านวัฏจักรแรงดันอินทรีย์

วัฏจักรแรงดันอินทรีย์ จะถูกสมมติให้ทำงานแบบวัฏจักรมาตรฐาน ซึ่งในที่นี้กำหนดอุณหภูมิคอนเดนเซอร์ 40°C และเมื่อกำหนด pinch temperature ในการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างอุณหภูมิไอวาโปรเตอร์ T_G และอุณหภูมิ น้ำร้อน 10°C ดังนั้นสามารถกำหนดค่า อุณหภูมิไอวาโปรเตอร์, T_G , จากไดอะแกรม T-s ของวัฏจักรได้

เมื่ออุณหภูมิไอวาโปรเตอร์, T_G , และอุณหภูมิคอนเดนเซอร์, T_C , ถูกกำหนดค่าประสิทธิภาพของวัฏจักรแรงดันอินทรีย์, η_{th} , ของสารทำงาน R245fa สามารถคำนวณได้จาก [11]

$$\eta_{th} = 85.75^5 FOM^2 - 140.16 FOM + 59.55 \quad (3)$$

FOM เป็นกลุ่มตัวแปรไร้มิติ เรียกว่า ฟิกเกอร์ออฟเมอริต (Figure of Merit) โดยคำนวณจาก [12]

$$FOM = \left(\frac{c_p \Delta T}{h_{fg}} \right)^{0.1} \left(\frac{T_C}{T_G} \right)^{0.8} \quad (4)$$

C_p คือความจุความร้อนของสารทำงานที่อุณหภูมิเฉลี่ย T_G และ T_C , $\Delta T = T_G - T_C$, h_{fg} คือค่าความร้อนแฝงที่อุณหภูมิ T_G ข้อมูลต่างๆในการคำนวณของ R245fa สามารถหาได้จาก REFPROP [13]

กำลังงานที่ผลิตได้จากวัฏจักร $\dot{W}_T$ สามารถคำนวณจาก

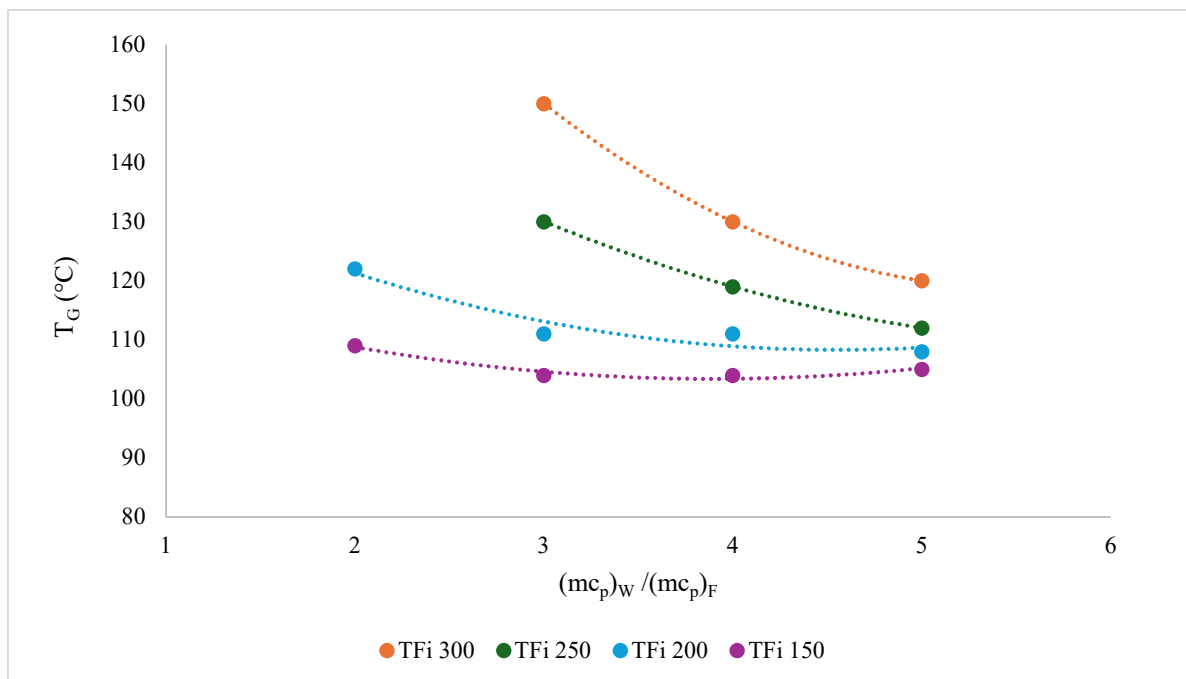
$$\dot{W}_T = \eta_{th} \dot{Q}_G \quad (5)$$

ผลการศึกษา

สมรรถนะวัฏจักรแรงดันอินทรีย์

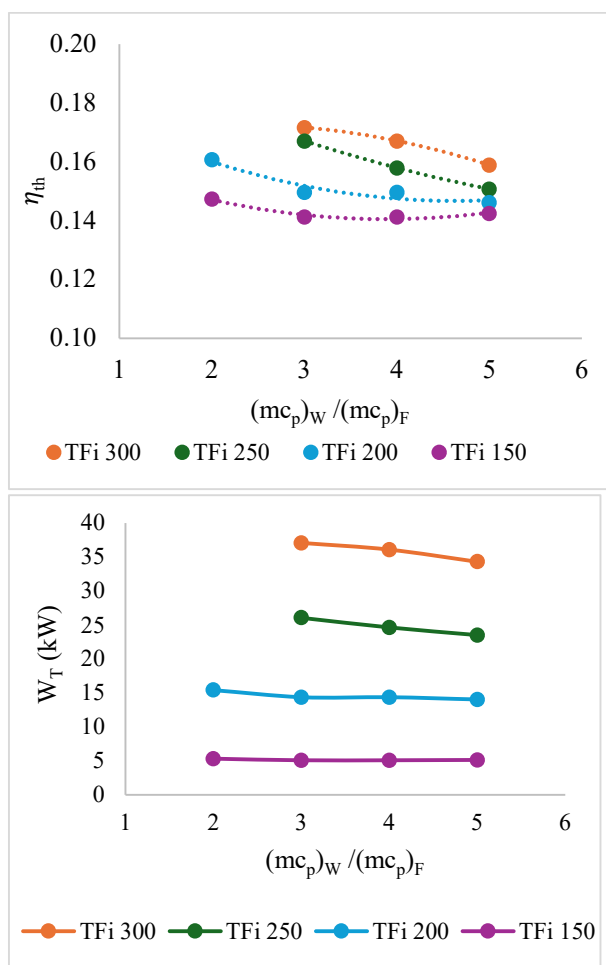
รูปที่ 2 แสดงอุณหภูมิไอวาปอเรเตอร์, T_G , ของวัฏจักรแรงดันอินทรีย์ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของอัตราความจุความร้อนรวมของน้ำต่ออัตราความจุความร้อนรวมของไอเสีย $(\dot{m}c_p)_W/(\dot{m}c_p)_F$ ในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน โดยกำหนด อุณหภูมิไอเสียหลังจากแลกเปลี่ยนความร้อนแล้วอยู่ที่ 120°C และ pinch temperature ในการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างไอเสียและน้ำอยู่ที่ 10°C ($T_{Wi}=110^\circ\text{C}$) เมื่ออุณหภูมิไอเสีย, T_{Fi} , มีค่าเพิ่มขึ้น อุณหภูมิน้ำร้อนที่ผลิตได้, T_{Wo} , และอุณหภูมิไอวาปอเรเตอร์ของวัฏจักร, T_G , จะเพิ่มขึ้นด้วย

จะเห็นได้ว่า ถ้าอัตราส่วนของอัตราความจุความร้อนรวมของน้ำต่ออัตราความจุความร้อนรวมของไอเสีย $(\dot{m}c_p)_W/(\dot{m}c_p)_F$ ลดลง อุณหภูมิไอวาปอเรเตอร์, T_G , อาจสูงเกินกว่าที่วัฏจักรจะทำงานได้ ดังนั้นในกรณี ที่อุณหภูมิไอเสีย, T_{Fi} , มีค่าสูง ควรให้อัตราส่วนของอัตราความจุความร้อนรวมมีค่าสูง เพื่อควบคุมอุณหภูมิไอวาปอเรเตอร์, T_G , ไม่ให้สูงเกินไป สำหรับวัฏจักรที่ใช้สารทำงาน R245fa อุณหภูมิดังกล่าว ไม่ควรเกิน 150°C ซึ่งใกล้กับจุดวิกฤติมากเกินไป



รูปที่ 2 อุณหภูมิไอวาปอเรเตอร์, T_G , จากวัฏจักร ที่อุณหภูมิไอเสีย T_{Fi} และอัตราส่วนความจุความร้อนรวม $(\dot{m}c_p)_W/(\dot{m}c_p)_F$ ค่าต่างๆ

อุณหภูมิไอวาปอเรเตอร์, T_G , ที่เพิ่มขึ้น จะเป็นปัจจัยที่ทำให้ประสิทธิภาพวัฏจักร, η_{th} , และกำลังงานที่ได้จากวัฏจักรสูงขึ้น, W_T , รูปที่ 3 แสดงประสิทธิภาพวัฏจักรและกำลังงานที่ผลิตได้ที่อุณหภูมิ T_{Fi} และอัตราส่วน $(\dot{m}c_p)_W/(\dot{m}c_p)_F$ ค่าต่างๆกัน



รูปที่ 3 ประสิทธิภาพและกำลังงานที่ผลิตได้จากวัฏจักร ที่อุณหภูมิไอเสีย T_{Fi} และอัตราส่วนความจุความร้อนรวม $(\dot{m}c_p)_W/(\dot{m}c_p)_F$ ค่าต่างๆ

จะเห็นว่าประสิทธิภาพรวมและกำลังงานที่ได้จากวัฏจักร จะมีค่าสูงตามอุณหภูมิไอเสียที่เพิ่มขึ้น และขณะเดียวกันจะต้องลดอัตราส่วน $(\dot{m}c_p)_W/(\dot{m}c_p)_F$ ซึ่งในกรณีหลัง จะต้องเลือกค่าอัตราส่วนให้เหมาะสม มิเช่นนั้นการลดค่าอัตราส่วนดังกล่าวจะทำอุณหภูมิ T_G มีค่าสูงเกินไปจนระบบไม่สามารถทำงานได้

กรณีศึกษา

สำหรับแก๊สร้อนอุณหภูมิและอัตราส่วนความจุความร้อนรวมต่างๆ การศึกษานี้ได้ทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพทางความร้อนของ ORC จากงานวิจัยที่ผ่านมาและจากการศึกษานี้ พบว่ามีค่าใกล้เคียงกันดังตารางที่ 1 ดังนั้นการศึกษานี้สามารถช่วยประเมินศักยภาพของ ORC เบื้องต้นได้ เมื่อทราบอุณหภูมิไอเสียและอัตราความจุความร้อนในช่วงดังกล่าว

ตารางที่ 1 ประสิทธิภาพ ORC เปรียบเทียบระหว่างงานวิจัยอื่นๆและการศึกษานี้

อุณหภูมิแก๊สร้อน	อัตราส่วนความจุ	n_{th} จากงานวิจัย	n_{th} จากการศึกษา	% ความแตกต่าง
------------------	-----------------	----------------------	----------------------	---------------

(°C)	ความร้อนรวม			จากงานวิจัย
175	3	15.34 [14]	14.50	5.78
290	4	16.70 [15]	16.58	0.72

สรุป

งานวิจัยนี้ได้พัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อประเมินศักยภาพในการผลิตไฟฟ้าจากความร้อนทิ้งของไอเสียผ่านวัฏจักรแรงดันสารอินทรีย์ที่ใช้ R245fa เป็นสารทำงาน โดยใช้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบขดท่อหมุนเวียนเป็นตัวกลางในการถ่ายเทความร้อนจากไอเสียสู่วงจรน้ำร้อน ภายใต้เงื่อนไขอุณหภูมิไอเสียหลังการแลกเปลี่ยนความร้อนไม่ต่ำกว่า 120°C ความแตกต่างของอุณหภูมิพินช์เท่ากับ 10°C และอุณหภูมิคอนเดนเซอร์เท่ากับ 40°C ผลการศึกษาสามารถสรุปได้ดังนี้

- เมื่ออุณหภูมิไอเสียเพิ่มขึ้น อุณหภูมิน้ำร้อนที่ผลิตได้และอุณหภูมิไอวาปอเรเตอร์ของ ORC เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ประสิทธิภาพทางความร้อนและกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้เพิ่มขึ้น
- สำหรับกรณีที่อัตราความจุความร้อนรวมของไอเสียเท่ากับ 1.2 kW/K และอุณหภูมิไอเสียอยู่ในช่วง 150–300°C แบบจำลองให้ค่าประสิทธิภาพทางความร้อนของ ORC ประมาณ 14.1–17.2% และกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ประมาณ 5.08–37.08 kW
- ค่าประสิทธิภาพทางความร้อนและกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่พิจารณาได้เท่ากับ 17.17% และ 37.08 kW ตามลำดับ ที่อุณหภูมิไอเสีย 300°C และอัตราส่วนความจุความร้อนรวมของน้ำต่อไอเสียเท่ากับ 3
- อัตราส่วนความจุความร้อนรวมของน้ำต่อไอเสียมีผลโดยตรงต่ออุณหภูมิไอวาปอเรเตอร์ โดยเมื่ออัตราส่วนดังกล่าวลดลง อุณหภูมิไอวาปอเรเตอร์จะเพิ่มขึ้น และอาจสูงเกินช่วงการทำงานที่เหมาะสมของวัฏจักร
- สำหรับ ORC ที่ใช้ R245fa เป็นสารทำงาน ควรควบคุมอุณหภูมิไอวาปอเรเตอร์ไม่ให้เกินประมาณ 150°C ดังนั้น ในกรณีที่อุณหภูมิไอเสียสูง ควรเลือกใช้อัตราส่วนความจุความร้อนรวมของน้ำต่อไอเสียที่สูงขึ้น เพื่อควบคุมอุณหภูมิไอวาปอเรเตอร์ให้อยู่ในช่วงการทำงานที่เหมาะสม
- ผลการศึกษานี้สามารถใช้เป็นแนวทางเบื้องต้นในการประเมินศักยภาพการผลิตไฟฟ้าและเลือกเงื่อนไขการทำงาน of ระบบ ORC สำหรับการนำความร้อนทิ้งจากไอเสียกลับมาใช้ประโยชน์ในงานวิศวกรรมได้

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณหน่วยวิจัยระบบทางอุณหภาพ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ที่เอื้อเฟื้อสถานที่ในการทำวิจัย

เอกสารอ้างอิง

[1] J. Song, Y. Song and C. Gu, “Thermodynamic analysis and performance optimization of an Organic Rankine Cycle (ORC) waste heat recovery system for marine diesel engines,” *Energy*, vol. 82, pp. 976–985, 2015.

- [2] ธรรณิศร์ ดีทายาท และ ทนงเกียรติ เกียรติศิริโรจน์, “การวิเคราะห์ต้นทุนการผลิตไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้าวัฏจักรแรงดันสารอินทรีย์ขนาดโมดูลาร์ที่ใช้ชีวมวลเป็นเชื้อเพลิง,” *วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่*, ปีที่ 21, ฉบับที่ 3, หน้า 84–93, 2557.
- [3] โสภิษฐ์ ธรรม, ธรรณิศร์ ดีทายาท และ ทนงเกียรติ เกียรติศิริโรจน์, “การใช้ไอเสียจากเครื่องยนต์ก๊าซชีวภาพเป็นแหล่งความร้อนให้กับวัฏจักรแรงดันสารอินทรีย์เพื่อผลิตไฟฟ้า,” ใน *การประชุมสัมมนาเชิงวิชาการ การถ่ายทอดผลงานความก้าวหน้าและมวลในอุปกรณ์ด้านความร้อนและกระบวนการ ครั้งที่ 15*, สุราษฎร์ธานี, 29–30 มีนาคม 2559.
- [4] ณพล ไชยมงคล, ธรรณิศร์ ดีทายาท และ ทนงเกียรติ เกียรติศิริโรจน์, “การศึกษากระบวนการผลิตไฟฟ้าและน้ำเย็นด้วยวัฏจักรแรงดันสารอินทรีย์และระบบทำความเย็นแบบดูดซึมจากความร้อนทิ้งในโรงไฟฟ้าถ่านหิน,” *วารสารวิศวกรรมศาสตร์ และนวัตกรรม*, ปีที่ 18, ฉบับที่ 2, หน้า 80–91, 2568.
- [5] C. E. Sprouse III, “Review of Organic Rankine Cycles for Internal Combustion Engine Waste Heat Recovery: Latest Decade in Review,” *Sustainability*, vol. 16, no. 5, 1924, 2024. <https://doi.org/10.3390/su16051924>.
- [6] P. Lu, Z. Liang, X. Luo, Y. Xia, J. Wang, K. Chen, Y. Liang, J. Chen, Z. Yang, J. He, and Y. Chen, “Design and optimization of Organic Rankine Cycle based on heat transfer enhancement and novel heat exchanger: A review,” *Energies*, vol. 16, no. 3, 1380, 2023. <https://doi.org/10.3390/en16031380>.
- [7] X. Li, J. Song, G. Yu, Y. Liang, H. Tian, G. Shu and C. N. Markides, “Organic Rankine cycle systems for engine waste-heat recovery: Heat exchanger design in space-constrained applications,” *Energy Conversion and Management*, vol. 199, 111968, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.111968>.
- [8] T. Klamrassamee, T. Kittijungjit, Y. Sukjai and Y. Laoonual, “Thermodynamic, economic, and carbon emission evaluation of various Organic Rankine cycle configurations for maximizing waste heat recovery potential,” *Energy Conversion and Management: X*, vol. 26, 100943, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2025.100943>.
- [9] J. H. Park, J. Kim and J. G. Kwon, “50 kWe R1336mzz(Z) ORC power generation system for industrial waste heat recovery: System design and commissioning test results,” *Energy*, vol. 323, 135698, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2025.13569>
- [10] G. Gonzalez, R. Baar, J. Drueckhammer and C. Kaepfner, “The thermodynamics of exhaust gas condensation,” *SAE International Journal of Engines*, vol. 10, no. 4, pp. 1411–1421, 2017.
- [11] N. P. Chaimongkol, T. Deethayat, D. Wang and T. Kiatsiriroat, “Waste heat harvesting from continuous blowdown for power generation via organic Rankine cycle network: Case study of a coal-fired power plant,” *Results in Engineering*, vol. 20, 2023.
- [12] C. R. Kuo, S. W. Hsu, K. H. Chang and C. C. Wang, “Analysis of a 50 kW organic Rankine cycle system,” *Energy*, vol. 36, pp. 5877–5885, 2011.
- [13] T. Deethayat, A. Asanakham and T. Kiatsiriroat, “Performance analysis of low temperature organic Rankine cycle with zeotropic refrigerant by Figure of Merit (FOM),” *Energy*, vol. 96, pp. 96–102, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.12.047>.

[14] Y. Li and T. Tang, “Performance analysis and optimization of a series heat exchangers organic Rankine cycle utilizing multi-heat sources from a marine diesel engine,” *Entropy*, vol. 23, 906, 2021.

[15] H. A. Al-Rawashdeh, M. R. Gomaa, R. J. Mustafa and A. O. Hasan, “Efficiency and exergy enhancement of ORC powered by recovering flue gases-heat system in cement industrials: A case study,” *International Review of Mechanical Engineering*, vol. 13, pp. 185–197, 2019.

ภาคผนวก

ตารางที่ a.1 ผลการคำนวณที่ $(\dot{m}c_p)_F = 1.2 \text{ kW/K}$ $(\dot{m}c_p)_W/(\dot{m}c_p)_F = 4$

T_{Fi} (C)	T_{Fo} (C)	T_{wi} (C)	T_{wo} (C)	T_G (C)	$\dot{Q}_G$ (kW)	η_{th}	$\dot{W}_T$ (kW)
300	120	110	155.0	130	216	0.1670	36.09
250	120	110	142.5	119	156	0.1579	24.64
200	120	110	130.0	111	96	0.1496	14.36
150	120	110	117.5	104	36	0.1412	5.08

ตารางที่ a.2 ผลการคำนวณที่ $(\dot{m}c_p)_F = 1.2 \text{ kW/K}$ $(\dot{m}c_p)_W/(\dot{m}c_p)_F = 3$

T_{Fi} (C)	T_{Fo} (C)	T_{wi} (C)	T_{wo} (C)	T_G (C)	$\dot{Q}_G$ (kW)	η_{th}	$\dot{W}_T$ (kW)
300	120	110	170.0	150	216	0.1717	37.08
250	120	110	153.3	130	156	0.1671	26.06
200	120	110	136.7	111	96	0.1496	14.36
150	120	110	120.0	104	36	0.1412	5.08

ตารางที่ a.3 ผลการคำนวณที่ $(\dot{m}c_p)_F = 1.2 \text{ kW/K}$ $(\dot{m}c_p)_W/(\dot{m}c_p)_F = 2$

T_{Fi} (C)	T_{Fo} (C)	T_{wi} (C)	T_{wo} (C)	T_G (C)	$\dot{Q}_G$ (kW)	η_{th}	$\dot{W}_T$ (kW)
300	120	110					
250	120	110					
200	120	110	150.0	122	96	0.1607	15.43
150	120	110	125.0	109	36	0.1473	5.30

ตารางที่ a.4 ผลการคำนวณที่ $(\dot{m}c_p)_F = 1.2 \text{ kW/K}$ $(\dot{m}c_p)_W/(\dot{m}c_p)_F = 5$

T_{Fi} (C)	T_{Fo} (C)	T_{wi} (C)	T_{wo} (C)	T_G (C)	$\dot{Q}_G$ (kW)	η_{th}	$\dot{W}_T$ (kW)
300	120	110	146.0	120	216	0.1589	34.32
250	120	110	136.0	112	156	0.1507	23.52
200	120	110	126.0	108	96	0.1462	14.03
150	120	110	116.0	105	36	0.1425	5.13