



วารสารวิศวกรรมศาสตร์และนวัตกรรม Journal of Engineering and Innovation

บทความวิจัย

การศึกษาแบบผลิตไฟฟ้าและน้ำเย็นด้วยวัฏจักรแรงดันอินทรีย์และระบบทำความเย็นแบบดูดซึมจากความร้อนทิ้งในโรงไฟฟ้าถ่านหิน

Combine cooling heating and power generation using Organic Rankin Cycle and absorption chiller from coal-fired power plant waste heat

ณพล ไชยมงคล^{1,3} ธรรณิศจ์ ดีทยาต^{2*} ทนงเกียรติ เกียรติศิริโรจน์²

¹ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ เลขที่ 239 ตำบลสุเทพ อำเภอเมือง จังหวัดเชียงใหม่ 50200

² ห้องปฏิบัติการวิจัยระบบทางอุณหภาพ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ เลขที่ 239 ตำบลสุเทพ อำเภอเมือง จังหวัดเชียงใหม่ 50200

³ ฝ่ายการผลิตโรงไฟฟ้าแม่เมาะ การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย เลขที่ 800 ตำบลแม่เมาะ อำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง 52220

Na Pon Chaimongkol^{1,3} Thoranis Deethayat^{2*} Tanongkiat Kiatsiriroat²

¹ Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering and Graduate School, Chiang Mai University, 239 Huay Keaw Road, Muang District, Chiang Mai, 50200

² Thermal System Research Laboratory, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Chiang Mai University, 239 Huay Keaw Road, Muang District, Chiang Mai, 50200

³ Mae Moh Power Plant Production Division, Mae Moh Power Plant, 800, Mae Moh District, Lampang, 52220

* Corresponding author.

E-mail: thoranisdee@gmail.com; Telephone: 0 4535 3319

วันที่รับบทความ 19 ตุลาคม 2565; วันที่แก้ไขบทความ ครั้งที่ 1 11 มกราคม 2567; วันที่ตอบรับบทความ 28 มกราคม 2567

บทคัดย่อ

โรงไฟฟ้าพลังความร้อนขนาดกำลังการผลิต 300 MW ของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย มีความร้อนทิ้งที่จำเป็นต้องระบายออกสำหรับระบบผลิต ด้วยน้ำร้อนอุณหภูมิ 354.67 °C และอัตราการไหล 1.3 kg/s ของ Boiler Continuous Blowdown เป็นแหล่งความร้อนที่มีศักยภาพในการนำมาผลิตไฟฟ้าด้วยวัฏจักรแรงดันอินทรีย์ได้ แต่ด้วยประสิทธิภาพที่ต่ำและต้นทุนที่สูงของวัฏจักรฯ งานวิจัยนี้จึงต้องการศึกษาแนวทางในการเพิ่มประสิทธิภาพของระบบ โดยศึกษาการใช้ตัวแปรไร้หน่วย “Figure of Merit” (FOM) ในการเลือกสารทำงาน การประเมินประสิทธิภาพของวัฏจักรฯ การออกแบบ และการจัดวางวัฏจักรฯ ในรูปแบบต่างๆ นอกจากนี้ยังศึกษาการนำความร้อนทิ้งที่เหลือจากการใช้งานจากวัฏจักรฯ มาใช้ในการทำความเย็นด้วยระบบทำความเย็นแบบดูดซึม เพื่อทดแทนระบบปรับอากาศแบบแยกส่วนในสำนักงาน โดยวิเคราะห์ประสิทธิภาพตามกฎข้อที่สองทางอุณหพลศาสตร์ และในเชิงเศรษฐศาสตร์ของระบบ

ผลการศึกษาพบว่า R245fa เป็นสารทำงานสำหรับวัฏจักรแรงดันอินทรีย์ที่เหมาะสมกับ Boiler Continuous Blowdown ด้วยการจัดวางวัฏจักรฯ แบบขนาน ส่งผลให้สามารถผลิตไฟฟ้าจากความร้อนทิ้งได้สูงถึง 220 kW ในขณะที่การใช้วัฏจักรฯ ขนาด 200 kW เพียงตัวเดียวเป็นกรณีที่มีต้นทุนในการผลิตไฟฟ้าต่อหน่วยในรูปของ Levelized Electricity Cost (LEC) ต่ำที่สุดที่ 1.39 บาท/kWh ส่วนการนำความร้อนทิ้งที่เหลือจากวัฏจักรฯ มาทำความเย็นเพื่อทดแทนระบบปรับอากาศแบบแยกส่วนในสำนักงานนั้น นอกจากจะทำให้โรงไฟฟ้าขายไฟฟ้าเข้าสู่ระบบผลิตได้มากขึ้นแล้ว ยังส่งผลให้ระบบมีต้นทุนในการผลิตไฟฟ้าลดลงเป็น 1.30 บาท/kWh

คำสำคัญ

การจัดวางวัฏจักรแรงดันอินทรีย์ การผลิตไฟฟ้า ต้นทุนในการผลิตไฟฟ้าต่อหน่วย ระบบทำความเย็นแบบดูดซึม ความร้อนทิ้ง

Abstract

The waste heat, hot water boiler continuous blowdown with the temperature of 354.67 °C and 1.3 kg/s, from the 300-MW coal-fired thermal power plant of the Electricity Generating Authority of Thailand, has the potential to be used to generate electricity through the organic Rankin cycle (ORC). Although the cycle has low efficiency and high investing cost, this research aims to find the size, number, and cycle arrangement of ORC to increase the thermodynamics second law efficiency of the system. The dimensionless number in terms of "Figure of Merit" (FOM) was proposed for working fluids selection, cycle thermal efficiency evaluation, and cycle arrangement in various forms. In addition, the waste heat from the cycle was also studied to replace the split type of air conditioning system in the office by using an absorption chiller. The thermodynamics second law efficiency and the economic analysis of the system were studied.

The results showed that R245fa was a functional refrigerant for ORC and suitable for boiler continuous blowdown. The ORC with a parallel connection arrangement can produce electricity from waste heat up to 220 kW, while the use of a single 200 kW ORC is a case of the low cost of generating electricity per unit in the form of Levelized Electricity Cost (LEC) at 1.39 THB/kWh. However, the waste heat leftover from the cycle is used to generate coolness by absorption chiller to replace the split type of air conditioning system in the office and the system's cost of generating electricity is decreased to only 1.30 baht/kWh.

Keywords

organic rankine cycle network; power generation; levelized electricity cost; absorption chiller; waste heat recovery

1. บทนำ

โรงไฟฟ้าพลังความร้อนที่ใช้ถ่านหินลิกไนต์เป็นเชื้อเพลิงของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (กฟผ.) ที่อำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง ปัจจุบันประกอบไปด้วย โรงไฟฟ้าขนาดกำลังการผลิต 300 MW จำนวน 6 เครื่อง และโรงไฟฟ้าขนาดกำลังการผลิต 655 MW จำนวน 1 เครื่อง ซึ่งในกระบวนการผลิตไฟฟ้า มีความจำเป็นจะต้องระบายพลังงานความร้อนทิ้งจำนวนหนึ่ง อาทิเช่น ก๊าซไอเสียร้อน (Flue Gas) ไอน้ำ (Steam) และคอนเดนเสท (Condensate) เพื่อรักษาสภาวะต่าง ๆ ของการเดินเครื่องโรงไฟฟ้าให้เป็นไปตามคำแนะนำของผู้ผลิต ซึ่งความร้อนทิ้งบางส่วนถูกนำกลับมาใช้ในกระบวนการผลิตแล้ว เช่น การนำความร้อนทิ้งจากก๊าซไอเสียมาอุ่นอากาศผ่านอุปกรณ์ Air Preheater หรือนำมาอุ่นน้ำป้อนผ่านอุปกรณ์ Economizer อย่างไรก็ตามยังมีความร้อนทิ้งบางส่วนที่โรงไฟฟ้าแม่เมาะยังไม่ได้มีการนำกลับมาใช้ประโยชน์ ซึ่งในกรณีของโรงไฟฟ้าขนาดกำลังการผลิต 300 MW มีความร้อนทิ้งจาก Boiler Continuous Blowdown 1.3 kg/s ที่อุณหภูมิ 354.67 °C ซึ่งสามารถนำความร้อนทิ้งส่วนนี้กลับมาใช้ประโยชน์ในการผลิตไฟฟ้าเพื่อใช้ภายในโรงไฟฟ้าได้

วัฏจักรแรงดันอินทรีย์ (Organic Rankine Cycle; ORC) เป็นเทคโนโลยีที่ใช้ในการผลิตไฟฟ้าจากความร้อนทิ้ง

เช่น ความร้อนทิ้งจากอุตสาหกรรม ไอเสียของเครื่องยนต์ [1], [2-3] โรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์ [4] เป็นเทคโนโลยีที่ระบบไม่ซับซ้อน อุปกรณ์ขนาดไม่ใหญ่มาก ทำให้การบำรุงรักษาสามารถทำได้ง่าย [5] โดยทั่วไปแล้ว ORC มีประสิทธิภาพเชิงความร้อนประมาณ 8%-12% [6] ด้วยประสิทธิภาพของ ORC ที่ไม่สูงมากนัก จึงมีการศึกษาวิจัยเพื่อพัฒนาระบบ ORC ให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น อาทิเช่น การเลือกสารทำงานที่เหมาะสม การใช้สารผสม (Zeotropic) เป็นสารทำงานเพื่อลดค่าสภาพย้อนกลับไม่ได้ (Irreversibility) ของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนของ ORC [7] การจัดวาง ORC ในรูปแบบต่างๆ ได้แก่ Double-Stage ORC [8], Multistage ORC [9] และ Dual-Loop ORC [10]

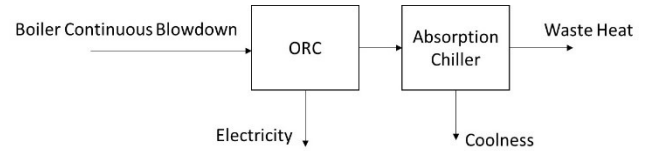
โดยวิธีการเลือกสารทำงานที่เหมาะสมอย่างรวดเร็วนั้น Kuo et al. [11] ได้เสนอตัวแปรไร้หน่วย "Figure of Merit" ร่วมกับ Jakob Number ซึ่งพิจารณาอุณหภูมิการควบแน่น (Condensing Temperature) และอุณหภูมิการระเหย (Evaporation Temperature) เพื่อกรองสารทำงาน ซึ่งจะส่งผลต่อประสิทธิภาพเชิงความร้อนของ ORC โดยปกติประสิทธิภาพเชิงความร้อนจะลดลงตามการเพิ่มขึ้นของ "Figure of Merit" นอกจากนี้ Javanshir and Sarunac [12] พบว่าความสัมพันธ์ระหว่าง FOM และ ประสิทธิภาพเชิงความ

ร้อนของ ORC มีความสัมพันธ์กันในลักษณะเชิงเส้นอีกด้วย โดย Deethayat et al. [6] ได้ใช้ FOM ในการคำนวณประสิทธิภาพเชิงความร้อนของ ORC อย่างง่ายกับสารทำงานชนิดต่างๆ พบว่าผลการคำนวณใกล้เคียงกับการคำนวณด้วยวิธี Enthalpy และสามารถใช้ Turbine Isentropic Efficiency คู่กับประสิทธิภาพเชิงความร้อนของ ORC อย่างง่ายเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนที่แท้จริงของ ORC ได้

นอกจากนี้ยังมีแนวทางในการเพิ่มประสิทธิภาพของระบบ ORC อีกโดย Chaiyat and Kiatsiriroat [13] ศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพของ ORC ด้วยประยุกต์ระบบ CCHP (Combined Cooling Heating and Power) เข้าใช้งานร่วมกับ ORC ซึ่งเป็นการลดอุณหภูมิเครื่องควบแน่น (Condenser) ด้วยการใช้น้ำเย็นแบบดูดซึม (Absorption System) โดยใช้ความร้อนทิ้งที่ออกจากเครื่องระเหย (Evaporator) ของ ORC โดยจากผลการศึกษาพบว่าสามารถลดอุณหภูมิน้ำเย็นจาก 28 °C เหลือเพียง 15 °C ซึ่งส่งผลให้ประสิทธิภาพของ ORC เพิ่มขึ้นประมาณ 7% ส่วนผลการพิจารณาต้นทุนการผลิตไฟฟ้าต่อหน่วยของระบบประยุกต์พบว่ายังสูงกว่าระบบ ORC แบบเดิมโดยมีต้นทุนการผลิตไฟฟ้าต่อหน่วย ของระบบประยุกต์และระบบเดิมเป็น 0.0891 USD/kWh และ 0.0669 USD/kWh ตามลำดับ นอกจากนี้ Chaiyat et al. (2017) [14] ยังได้ทำการศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพของ ORC โดยการใช้ Sorption System (Absorption และ Adsorption) เพื่อลดอุณหภูมิเครื่องควบแน่น โดยทำการศึกษากับ ORC ขนาด 25 kW และใช้ R-245fa เป็นสารทำงาน ส่วนระบบทำน้ำเย็นแบบ Absorption และ Adsorption เป็น Water-LiBr และ Water-Silica gel ตามลำดับ โดยผลการศึกษาพบว่าประสิทธิภาพของ ORC-Absorption และ ORC-Adsorption เมื่อเปรียบเทียบกับ ORC พบว่าสูงขึ้น 7.22 และ 12.46 % ตามลำดับ ในขณะที่ต้นทุนการผลิตไฟฟ้าต่อหน่วยของระบบ ORC, ORC-Absorption และ ORC-Adsorption เป็น 0.1145 USD/kWh, 0.1088 USD/kWh และ 0.1043 USD/kWh ตามลำดับ

งานวิจัยนี้ศึกษาการนำความร้อนทิ้งจาก Boiler Continuous Blowdown ของโรงไฟฟ้าขนาด 300 MW มาผลิตไฟฟ้า โดยเลือกสารทำงานที่เหมาะสมกับความร้อนทิ้งเพื่อให้มีประสิทธิภาพสูงสุด รวมถึงเลือกลักษณะการเชื่อมต่อ

ORC เหมาะสม และนำความร้อนทิ้งที่เหลือจากระบบ ORC มาประเมินศักยภาพ และนำไปทำความเย็นด้วย Absorption Chiller เพื่อใช้ประโยชน์ในโรงไฟฟ้าต่อไปดังรูปที่ 1

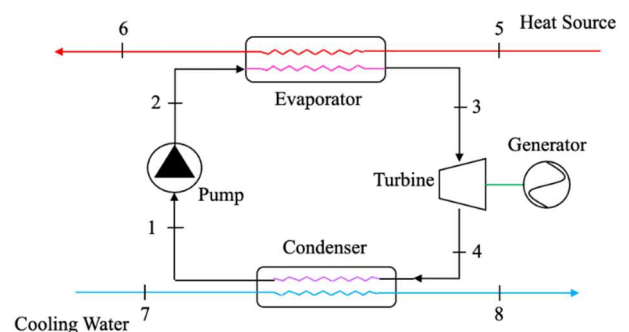


รูปที่ 1 ไดอะแกรมอย่างง่ายของระบบที่ทำการศึกษา

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 วัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์

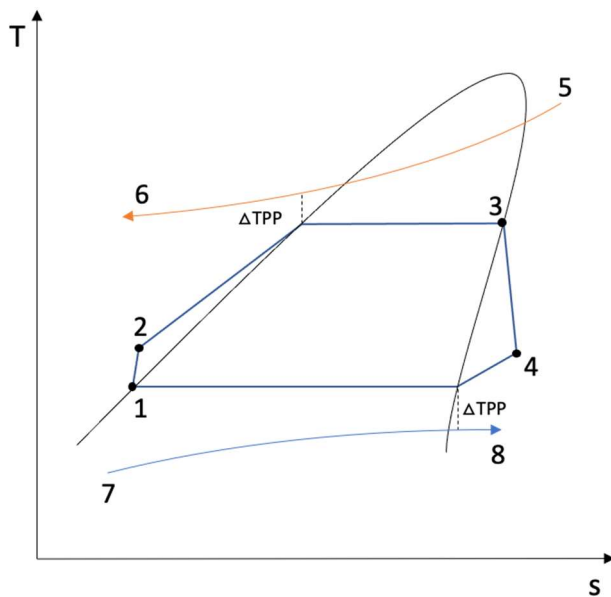
วัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ มีระบบโครงสร้างเหมือนวัฏจักรแรงคิน (Rankine Cycle) มีลักษณะโครงสร้างที่ไม่ซับซ้อน แต่ใช้สารอินทรีย์ที่มีจุดเดือดต่ำเป็นของไหลทำงาน ซึ่งสามารถเปลี่ยนสถานะเป็นไออิ่มตัว (Saturated Vapor) หรือไอร้อนยวดยิ่ง (Superheated) เมื่อได้รับความร้อนจากแหล่งความร้อนอุณหภูมิต่ำเช่น พลังงานจากแสงอาทิตย์ และพลังงานจากชีวมวล โดยวัฏจักรพื้นฐานประกอบไปด้วยอุปกรณ์ 4 ตัว ได้แก่ ปั๊ม (Pump) เครื่องระเหย (Evaporator) กังหัน (Turbine) และเครื่องควบแน่น (Condenser) ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 ไดอะแกรมอุปกรณ์ของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์

การทำงานเริ่มจากสารทำงานจะถูกป้อนในสถานะของเหลวอิ่มตัวที่สภาวะที่ 1 แล้วถูกอัดจนกระทั่งมีความดันเท่ากับความดันชุดเครื่องทำระเหย ซึ่งเป็นความดันสูงสุดของวัฏจักร โดยสารทำงานที่ได้ จะมีสถานะของเหลวอัดตัวที่

สภาวะที่ 2 จากนั้นสารทำงานจะรับความร้อนที่ชุดเครื่องทำระเหยที่ความดันคงที่ และไหลออกมาในสถานะไออิ่มตัว (Saturated Vapor) ที่สภาวะที่ 3 ต่อจากนั้นสารทำงานจะเข้ากังหันและเกิดการขยายตัวให้งานออกมา ซึ่งกระบวนการนี้ ความดันและอุณหภูมิของสารทำงานจะลดลง หลังจากนั้นสารทำงานไหลเข้าเครื่องควบแน่นเพื่อเปลี่ยนสถานะเป็นของเหลว โดยคายความร้อนออกมาที่ความดันคงที่ซึ่งเป็นความดันต่ำสุดของวัฏจักร จากนั้นสารทำงานจะถูกอัดตัว ดำเนินตามวัฏจักรต่อไป ซึ่งสภาวะและสถานะต่าง ๆ สามารถเขียนแผนภาพอุณหภูมิ-เอนโทรปี ดังรูปที่ 3 ทั้งนี้ สารทำงานที่ใช้จะเป็นสารชนิดของไหลแห้ง (Dry fluid) ซึ่งความชันของเส้นไออิ่มตัวเป็นบวก ส่งผลให้สภาวะที่ 4 มีสถานะเป็นไอร้อนยวดยิ่ง (Superheated Steam) และไม่ส่งผลกระทบต่อกังหันเนื่องจากไม่ใช่สถานะของผสม (Mixture) เมื่อพิจารณาสภาวะต่าง ๆ จากแผนภาพอุณหภูมิ-เอนโทรปี ตามรูปที่ 3 จะสามารถคำนวณกำลังงานและอัตราความร้อนที่อุปกรณ์ต่าง ๆ ดังต่อไปนี้



รูปที่ 3 แผนภาพอุณหภูมิ-เอนโทรปีของ ORC กรณีสารทำงานเป็นของไหลแห้ง

ปั๊ม

$$\dot{W}_p = \dot{m}_R(h_2 - h_1) \quad (1)$$

เครื่องระเหย

$$\dot{Q}_E = \dot{m}_R(h_3 - h_2) = \dot{m}_{hw}(h_5 - h_6) \quad (2)$$

กังหัน

$$\dot{W}_T = \dot{m}_R(h_3 - h_4) \quad (3)$$

เครื่องควบแน่น

$$\dot{Q}_C = \dot{m}_R(h_4 - h_1) = \dot{m}_{CW}c_p(T_8 - T_7) \quad (4)$$

ประสิทธิภาพเชิงความร้อน

$$\eta_{th} = \frac{\dot{W}_T - \dot{W}_p}{\dot{Q}_E} \quad (5)$$

โดยที่ $\dot{W}_p$ คืองานของปั๊ม $\dot{Q}_E$ คืออัตราการถ่ายเทความร้อนที่เครื่องระเหย $\dot{W}_T$ คืองานของกังหัน $\dot{Q}_C$ คืออัตราการถ่ายเทความร้อนที่เครื่องควบแน่น $\dot{m}_R$ คืออัตราการไหลเชิงมวลของสารทำงาน $\dot{m}_{hw}$ คืออัตราการไหลเชิงมวลของน้ำร้อน $\dot{m}_{CW}$ คืออัตราไหลเชิงมวลของน้ำหล่อเย็น c_p คือค่าความจุความร้อนจำเพาะของน้ำ h_1 คือเอนทัลปีของสารทำงาน ณ ขาเข้าของปั๊ม h_2 คือเอนทัลปีของสารทำงาน ณ ขาออกของปั๊ม h_3 คือเอนทัลปีของสารทำงาน ณ ขาออกของเครื่องระเหย h_4 คือเอนทัลปีของสารทำงาน ณ ขาออกของกังหัน h_5 คือเอนทัลปีของน้ำร้อน ณ ขาเข้าของเครื่องระเหย h_6 คือเอนทัลปีของน้ำร้อน ณ ขาออกของเครื่องระเหย และ η_{th} คือประสิทธิภาพเชิงความร้อนของ ORC

ประสิทธิภาพตามกฎข้อที่สองทางอุณหพลศาสตร์สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 6

$$\eta_s = \frac{\dot{W}_T - \dot{W}_p}{\dot{E}_x} \quad (6)$$

ในการประเมินศักยภาพความร้อนที่พิจารณาจากเอ็กซ์เชอร์จี ของความร้อนที่ได้ตั้งสมการที่ 7

$$\dot{E}x = \dot{m}_{hw} \{ (h_5 - h_0) - T_0 (s_5 - s_0) \} \quad (7)$$

โดยที่ η_s คือประสิทธิภาพตามกฎข้อที่สองทางอุณหพลศาสตร์ $\dot{E}x$ คือเอ็กซ์เชอร์จี h_0 คือเอนทัลปี ณ Dead State T_0 คืออุณหภูมิ ณ Dead State s_5 คือเอนโทรปีของน้ำร้อน ณ ขาเข้าของเครื่องระเหย และ s_0 คือเอนโทรปี ณ Dead State

2.2 การวิเคราะห์เชิงเศรษฐศาสตร์

การวิเคราะห์ต้นทุนการผลิตไฟฟ้าต่อหน่วยในรูปแบบ “Levelized Electricity Cost” (LEC) โดยคิดที่การผลิตไฟฟ้าจากระบบวัฏจักรแรงดันอินทรีย์เมื่อทราบอายุโครงการและชั่วโมงการทำงาน จากสมการ Pitz-Paal (2020) [15]

$$LEC = \frac{(CRF \times C_{invest}) + \dot{C}_{o\&m} + \dot{C}_{fuel}}{E_{Net}} \quad (8)$$

$$CRF = \frac{i_d (1 + i_d)^n}{(1 + i_d)^n - 1} \quad (9)$$

$$E_{Net} = H \times \dot{P} \quad (10)$$

โดยที่ LEC คือต้นทุนการผลิตไฟฟ้าต่อหน่วย CRF คือ Capital Recovery Factor C_{invest} คือค่าลงทุน $\dot{C}_{o\&m}$ คือค่าใช้จ่ายในการเดินเครื่องและบำรุงรักษาต่อปี $\dot{C}_{fuel}$ คือค่าใช้จ่ายสำหรับเชื้อเพลิงต่อปี E_{Net} คือปริมาณไฟฟ้าที่ผลิตได้ H คือจำนวนชั่วโมงการเดินเครื่องต่อปี และ $\dot{P}$ กำลังไฟฟ้าที่ระบบ ORC ผลิตได้

ซึ่งต้นทุนการผลิตไฟฟ้าในรูปแบบ LEC เป็นราคาต้นทุนไฟฟ้าที่ปรับค่าแล้ว ซึ่งจะคิดค่าใช้จ่ายทั้งหมดตลอดอายุการใช้งานของวัฏจักรแรงดันอินทรีย์ โดยราคาต้นทุนการผลิตแบบ LEC จะอยู่ในรูป บาท/kWh ซึ่งสามารถนำไปเปรียบเทียบกับเทคโนโลยีการผลิตไฟฟ้าแบบอื่น ๆ ได้ ทั้งนี้ราคาต้นทุนการ

ผลิตไฟฟ้าของการศึกษานี้จะขึ้นอยู่กับค่าลงทุนเบื้องต้นและปริมาณไฟฟ้าจากวัฏจักรแรงดันอินทรีย์

2.3 สมรรถนะระบบทำความเย็นแบบดูดซึมและระบบปรับอากาศแบบแยกส่วน

ระบบทำความเย็นแบบดูดซึม

$$COP = \frac{\dot{Q}_{Abs,E}}{\dot{Q}_{Abs,G}} \quad (11)$$

ระบบปรับอากาศแบบแยกส่วน

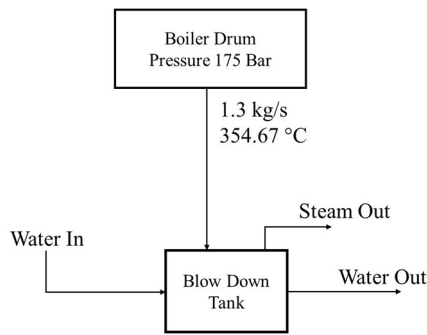
$$EER = \frac{Q}{W} \quad (12)$$

โดยที่ COP คือสัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำความเย็น $\dot{Q}_{Abs,E}$ คืออัตราการการทำความเย็นของระบบทำความเย็นแบบดูดซึม $\dot{Q}_{Abs,G}$ คืออัตราความร้อนที่ใช้กับระบบทำความเย็นแบบดูดซึม EER คือประสิทธิภาพพลังงานของระบบปรับอากาศ Q คือขีดความสามารถทำความเย็นรวมสุทธิ และ W คือกำลังไฟฟ้าที่เครื่องปรับอากาศใช้ในการทำความเย็น

3. การออกแบบระบบ ORC

3.1 การประเมินศักยภาพความร้อนที่จากโรงไฟฟ้า

กระบวนการผลิตไฟฟ้าของโรงไฟฟ้าแม่เมาะซึ่งใช้น้ำเป็นสารทำงาน จะต้องมีการปล่อยน้ำทิ้งจาก Boiler Drum อย่างต่อเนื่องเพื่อลดปริมาณสิ่งเจือปน เช่นซิลิกา (Silica) ในหม้อน้ำที่มีความดันสูง เพื่อป้องกันการสะสมจนอาจเจือปนไปกับไอน้ำเข้าสู่กังหัน (Turbine) จนก่อให้เกิดความเสียหายได้ โดยน้ำที่ปล่อยทิ้งขณะเดินเครื่องเติมกำลังการผลิต (300 MW) มีปริมาณ 1.3 kg/s ผ่านทาง Boiler Continuous Blowdown ที่ความดันใน Drum 175 bar ซึ่งมีอุณหภูมิอิ่มตัว (Saturated Temperature) 354.67 °C ดังรูปที่ 4 ถ้ากำหนดให้อุณหภูมิสุดท้าย (Dead State) มีค่าเท่ากับ 30 °C จะสามารถประเมินศักยภาพอัตราความร้อนที่เกิดจากความร้อนที่จากสมการที่ 7 ได้ 719.31 kW



รูปที่ 4 ไดอะแกรมแสดงแหล่งความร้อนทั้งจาก Boiler Continuous Blowdown

3.2 การเลือกสารทำงานสำหรับ ORC

งานวิจัยของ Kuo et al. (2011) [11] มีการเสนอตัวแปรไร้หน่วย "Figure of Merit" ร่วมกับ Jakob Number ซึ่งจะส่งผลต่อประสิทธิภาพเชิงความร้อนของ ORC ซึ่ง Figure of Merit (FOM) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 13 และ Jakob Number (Ja) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 14

$$FOM = Ja^{0.1} \left(\frac{T_{cond}}{T_{evap}} \right)^{0.8} \quad (13)$$

$$Ja = \frac{c_p \Delta T}{h_{fg}} \quad (14)$$

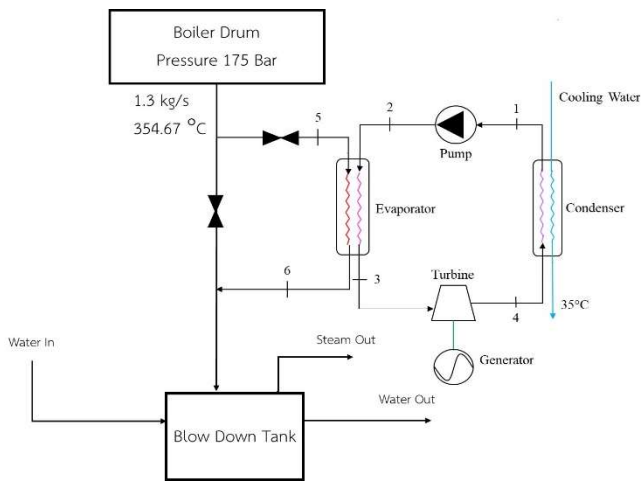
เมื่อ T_{cond} คืออุณหภูมิของเครื่องควบแน่น T_{evap} คืออุณหภูมิของเครื่องระเหย c_p คือค่าความจุความร้อนจำเพาะของน้ำเฉลี่ยที่อุณหภูมิเครื่องควบแน่นและเครื่องระเหย ΔT คือความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิของเครื่องควบแน่นและเครื่องระเหย และ h_{fg} คือค่าความต่างระหว่างเอนทัลปีของไออิ่มตัวและของเหลวอิ่มตัวที่อุณหภูมิของเครื่องระเหย

โดยจากการศึกษาวรรณกรรม [5,16-17] พบว่าสารที่เหมาะสมสำหรับความร้อนทั้งจาก Boiler Continuous Blowdown ของโรงไฟฟ้า ทั้งในมิติของประสิทธิภาพเชิงความร้อนของ ORC ความปลอดภัย และผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ได้แก่ R114, R236ea, R236fa และ R245fa ซึ่งจากการคำนวณประสิทธิภาพเชิงความร้อนทางอุณหพลศาสตร์ของ ORC ตามสมการที่ 5 ของสารทำงานทั้งสี่ชนิด ในช่วงอุณหภูมิ

ของเครื่องระเหยตั้งแต่ 70 °C ถึง 110 °C โดยในการศึกษานี้กำหนดอุณหภูมิเครื่องควบแน่นไว้ที่ 40 °C เนื่องจากในการออกแบบใช้น้ำหล่อเย็นของโรงไฟฟ้าซึ่งมีอุณหภูมิน้ำเย็น 31 °C และนำผลการคำนวณประสิทธิภาพเชิงความร้อนที่ได้มาพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพเชิงความร้อนและ FOM จะได้ความสัมพันธ์เชิงเส้น ซึ่งสามารถนำความสัมพันธ์เชิงเส้นนี้ไปใช้ในการหาประสิทธิภาพเชิงความร้อนของสารทำงานทั้งสี่ชนิดเพื่อเปรียบเทียบสารที่ให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงสุด จากวิธีการดังกล่าวพบว่าในช่วงอุณหภูมิของเครื่องระเหยตั้งแต่ 70 °C ถึง 110 °C R245fa เป็นสารทำงานที่เหมาะสมที่สุด และในช่วงอุณหภูมิของเครื่องระเหยที่สูงกว่า 110 °C จำเป็นต้องใช้ R114 และ R245fa เท่านั้น เนื่องจากข้อจำกัดของอุณหภูมิวิกฤตของสารทำงาน (Critical Temperature) แต่ R245fa เป็นสารทำงานที่ส่งผลให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงที่สุด ดังนั้นในการศึกษานี้จะใช้สารทำงาน R245fa ตลอดทุกช่วงอุณหภูมิของเครื่องควบแน่น

3.3 การจัดวาง ORC

ในงานวิจัยนี้ จะเชื่อมต่อระบบ ORC เข้ากับความร้อนทั้งจากกระบวนการผลิตไฟฟ้า โดยพิจารณาอุณหภูมิน้ำร้อนขาออกจากเครื่องระเหย (Evaporator) ของ ORC (T_6) แต่ละวัฏจักรดังรูปที่ 5 ซึ่งจากการจัดรูปสมการที่ 2 และ 5 จะสามารถคำนวณ Enthalpy ของน้ำร้อน ณ ขาออกเครื่องทำระเหย (Evaporator) ได้ดังสมการที่ 15 และหาค่าอุณหภูมิน้ำร้อนขาออกจากเครื่องระเหยของ ORC (T_6) ได้จากตารางคุณสมบัติของน้ำ-ไอน้ำ (Water Steam Table) เมื่อกำหนดอุณหภูมิของสารทำงานที่ออกจากเครื่องระเหยและเครื่องควบแน่นให้คงที่ โดยใช้สภาวะในการออกแบบดังตารางที่ 1 หากยังมีศักยภาพเพียงพอ จะดำเนินการเชื่อมต่อ ORC เพิ่ม โดยกำหนดอุณหภูมิพินช์ไว้ที่ 5 °C ทั้งแบบอนุกรม และแบบขนาน ซึ่งสำหรับการจัดวางแบบขนานนั้นกำหนดให้แบ่งอัตราการไหลเท่าๆกัน



รูปที่ 5 แผนภาพแสดงการเชื่อมต่อระบบ ORC กับความร้อนทิ้ง

ตารางที่ 1 สภาวะที่ใช้สำหรับการออกแบบระบบ ORC

พารามิเตอร์	ค่าที่ใช้ออกแบบ
Hot water flow (kg/s)	1.3
Hot water temperature (°C)	354.67
Hot water pressure (bar)	175
Condenser temperature (°C)	40
Pinch point temperature at evaporator and condenser (°C)	5
Isentropic efficiency of the turbine (%)	80
Refrigerant	R245fa

ในการเลือกขนาดและอุณหภูมิของเครื่องระเหยของ ORC พิจารณาอุณหภูมิเครื่องระเหยตั้งแต่ 70 – 140 °C (คำนวณทุกๆ 1 °C) และกำลังการผลิต (Power Generation) ตั้งแต่ 5 – 200 kW (คำนวณทุกๆ 5 kW) โดยพิจารณาเพื่อหากำลังการผลิตและอุณหภูมิของเครื่องระเหยสูงสุดที่สามารถทำได้ในแต่ละลำดับ (Stage) ของ ORC

$$h_6 = h_5 - \frac{\dot{W}_T - \dot{W}_P}{\dot{m}_{hw} \eta_{th}} \quad (15)$$

สำหรับการประเมินประสิทธิภาพเชิงความร้อนของ ORC ร้อนเพื่อใช้ในสมการที่ 15 จะใช้วิธีการประเมินจาก FOM โดยพบว่าเมื่อนำผลการคำนวณประสิทธิภาพเชิงความร้อน โดยโปรแกรม REFPROP เพื่อหาค่าคุณสมบัติของสารทำงานนำมาพล็อตกราฟหาความสัมพันธ์กับ FOM จะได้สมการ

ความสัมพันธ์เพื่อใช้ประเมินประสิทธิภาพเชิงความร้อนดังสมการที่ 16 และ 17

$$\eta_{th, std} = 85.76 FOM^2 - 140.16 FOM + 59.52 \quad (16)$$

$$\eta_{th} = \eta_{th, std} \times \eta_{T, isentropic} \quad (17)$$

เมื่อ $\eta_{th, std}$ คือประสิทธิภาพเชิงความร้อนมาตรฐาน และ

$\eta_{T, isentropic}$ คือประสิทธิภาพ Isentropic ของกังหัน

สำหรับสมการที่ 16 และ 17 ซึ่งใช้สำหรับการประเมินประสิทธิภาพเชิงความร้อนของ ORC ด้วย FOM นั้น ได้ตรวจสอบความถูกต้องกับโมเดลของ Deethayat et al. (2016) [6] พบความแตกต่างสูงสุด 4.20% ซึ่งเกิดจากโมเดลที่นำมาเปรียบเทียบกับเป็นโมเดลที่ใช้สำหรับสารทำงาน R123, R236ea, R245fa และ R245ca ในขณะที่โมเดลของการศึกษานี้เป็นโมเดลสำหรับสารทำงาน R245fa เท่านั้น

4. ผลการศึกษาและวิเคราะห์ผล

ผลจากการวิเคราะห์ทางอุณหพลศาสตร์ และเทคนิคการใช้ Figure of Merit ทำให้สามารถออกแบบ และจัดวางวัฏจักรแรงดันอินทรีย์ได้อย่างเหมาะสม โดยมีการพิจารณา กำลังการผลิต (Power Generation) และ ประสิทธิภาพตามกฎข้อที่สองทางอุณหพลศาสตร์ (Second Law Efficiency) ตามสมการที่ 6 และราคาต้นทุนการผลิตไฟฟ้าต่อหน่วยในรูปของ LEC ตามสมการที่ 8

4.1 ผลการจัดวาง ORC

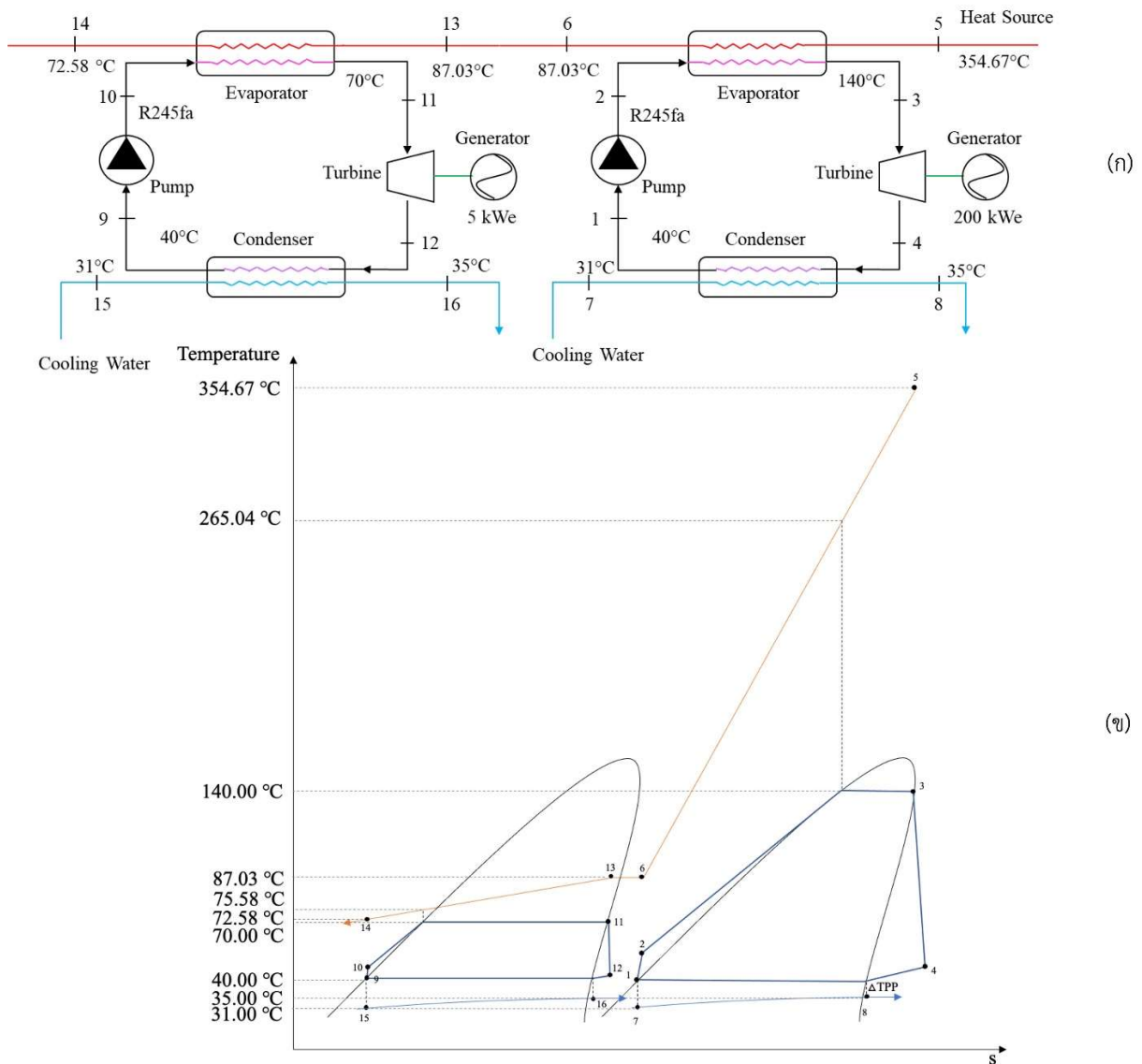
จากการทดลองจัดวาง ORC โดยใช้วิธีการหัวข้อ 3.3 สามารถจัดวาง ORC ได้ออกมาเป็น 3 รูปแบบ ได้แก่ การใช้ ORC ตัวเดียว การต่อ ORC แบบอนุกรมจำนวน 2 ตัว และการต่อ ORC แบบขนานจำนวน 2 ตัว ดังรูปที่ 6 และ 7 สำหรับการต่อ ORC แบบอนุกรมจำนวน 2 ตัวนั้นใช้ ORC 2 ชุดที่มีอุณหภูมิเครื่องระเหยแตกต่างกัน โดยรายละเอียดผลการทดลองดังตารางที่ 2

สำหรับการใช้ ORC เพียงตัวเดียว สามารถผลิตไฟฟ้าได้สูงสุด 200 kW โดยที่อุณหภูมิเครื่องระเหยเป็น 140 °C

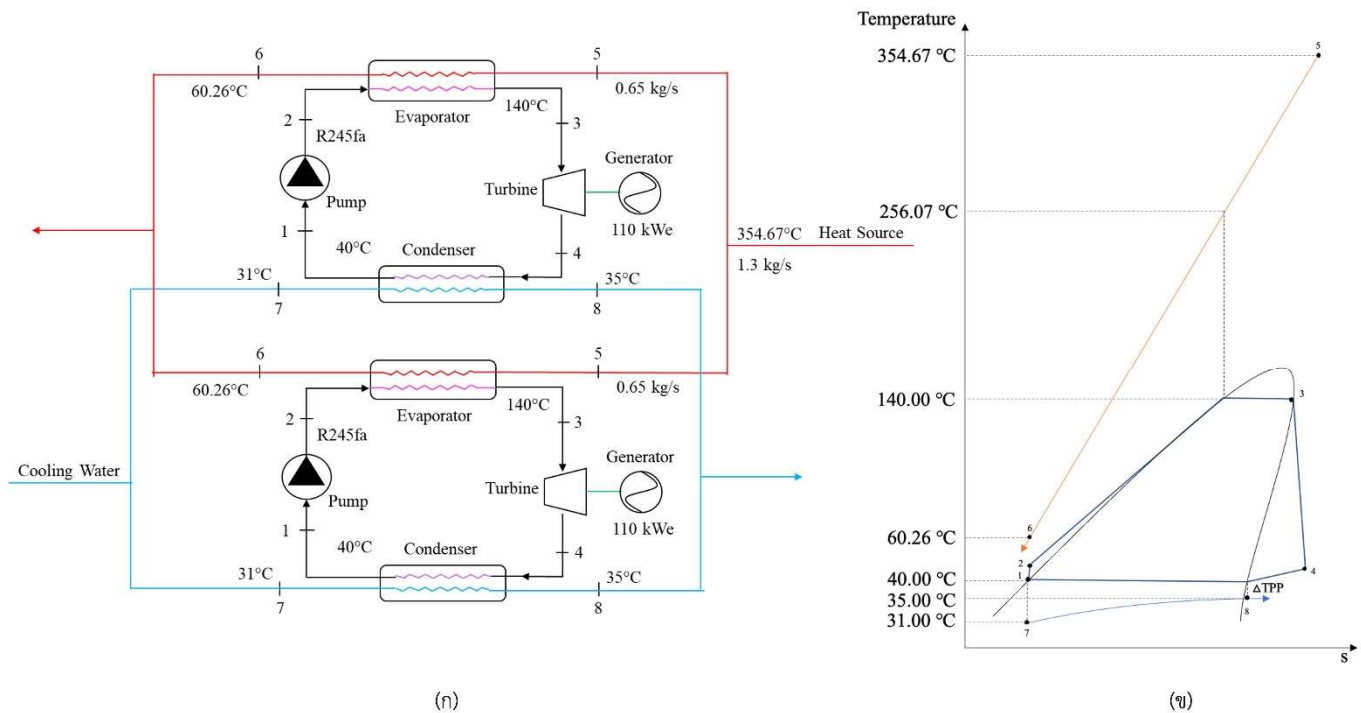
อุณหภูมิน้ำร้อน ณ ขาออกของเครื่องระเหยเป็น 87.03°C มีประสิทธิภาพตามกฎข้อที่สองทางอุณหพลศาสตร์เท่ากับ 27.80%

สำหรับการต่อ ORC แบบอนุกรม 2 ตัว สามารถผลิตไฟฟ้าได้สูงสุด 205 kW โดยใช้ ORC ลำดับที่ 1 ขนาด 200 kW และลำดับที่ 2 ขนาด 5 kW โดยที่อุณหภูมิเครื่องระเหยของ ORC ลำดับที่ 1 และ 2 เป็น 140°C และ 70°C ตามลำดับ อุณหภูมิ น้ำร้อน ณ ขาออกของเครื่องระเหยของ ORC ลำดับที่ 2 เป็น 72.58°C มีประสิทธิภาพตามกฎข้อที่สองทางอุณหพลศาสตร์ เท่ากับ 28.50% โดยมีไดอะแกรมและแผนภูมิอุณหภูมิ-เอนโทรปี ดังรูปที่ 6

สำหรับการต่อ ORC แบบขนาน สามารถผลิตไฟฟ้าได้สูงสุด 220 kW โดยจากการแบ่งแหล่งความร้อนทั้งเป็น 2 เส้นทาง โดยมีอัตราการไหลเท่ากัน จะใช้ ORC ขนาด 110 kW จำนวน 2 ชุด โดยที่อุณหภูมิเครื่องระเหยของ ORC เป็น 140°C อุณหภูมิ น้ำร้อน ณ ขาออกของเครื่องระเหยของ ORC เป็น 60.26°C มีประสิทธิภาพตามกฎข้อที่สองทางอุณหพลศาสตร์ เท่ากับ 30.58% โดยมีไดอะแกรมและแผนภูมิอุณหภูมิ-เอนโทรปี ดังรูปที่ 7



รูปที่ 6 (ก) การจัดวาง (ข) แผนภาพอุณหภูมิ-เอนโทรปี ของ ORC แบบอนุกรม



รูปที่ 7 (ก) การจัดวาง (ข) แผนภาพอุณหภูมิ-เอนโทรปี ของ ORC แบบขนาน

ตารางที่ 2 ประสิทธิภาพตามกฎข้อที่สองทางอุณหพลศาสตร์ของ ORC และระบบ ORC รวมถึงอุณหภูมิน้ำร้อนที่ออกจากระบบ

	ORC ตัวเดียว	ระบบ ORC แบบอนุกรม 2 ตัว	ระบบ ORC แบบขนาน 2 ตัว
Total power generating capacity (kW)	200	205	220
Second law efficiency (%)	27.80	28.50	30.58
Waste heat outlet temperature (°C)	87.03	72.58	60.26
Evaporator temperature (°C)	140	140/70	140

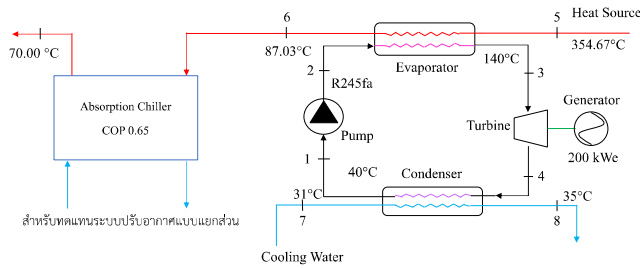
4.2 ศักยภาพของน้ำร้อนทิ้งหลังจากผ่านระบบ ORC

หลังจากนำความร้อนทิ้งจาก Boiler Continuous Blowdown ของโรงไฟฟ้ากลับมาใช้ผลิตไฟฟ้าด้วย ORC แล้ว พบว่าในบางกรณี แหล่งความร้อนทิ้งที่ผ่าน ORC แล้ว ยังมีศักยภาพเหลืออยู่

จากรายงานพลังงานโรงไฟฟ้าแม่เมาะประจำปี พ.ศ. 2564 พบว่ามีการใช้พลังงานไฟฟ้าในระบบปรับอากาศแบบแยกส่วนสูงถึง 12,836,807 kWh/ปี การนำความร้อนทิ้งหลังจาก

ผ่านระบบวัฏจักรแรงดันอินทรีย์ มาผลิตน้ำเย็นด้วยระบบทำความเย็นแบบดูดซึม (Absorption Chiller) เพื่อทดแทนระบบปรับอากาศแบบแยกส่วน ดังรูปที่ 8 จึงเป็นแนวทางหนึ่งในการนำความร้อนทิ้งกลับมาใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุด

สำหรับวิธีการศึกษาจะพิจารณาศักยภาพทางความร้อน ความร้อนทิ้งคงเหลือทั้ง 3 กรณี จากหัวข้อ 4.1 โดยกำหนดอุณหภูมิหลังจากผ่านระบบทำความเย็นแบบดูดซึม เป็น 70 °C [14] เพื่อประเมินศักยภาพการผลิตน้ำเย็นจากระบบทำความเย็นแบบดูดซึมที่มีค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำความเย็น (Coefficient of Performance; COP) 0.65 ตามสมการที่ 11 มาใช้ในการพิจารณา โดยใช้ความเย็นที่ทำได้ของระบบทำความเย็นแบบดูดซึมทดแทนความเย็นสุทธิของระบบปรับอากาศแบบแยกส่วนโดยใช้ค่าประสิทธิภาพพลังงาน (Energy Efficiency Ratio : EER) 3.77 W_{th}/W_e ตามเกณฑ์โครงการประหยัดไฟเบอร์ 5 ของ กฟผ. เพื่อประเมินพลังงานไฟฟ้าที่สามารถประหยัดได้ ตามสมการที่ 12 โดยพบผลการประหยัดพลังงานสูงสุด 16.0 kW สำหรับกรณีที่ใช้ ORC ตัวเดียว โดยมีรายละเอียดผลการประเมินดังตารางที่ 3



รูปที่ 8 ตัวอย่างการติดตั้งระบบทำความเย็นแบบดูดซึม เพื่อนำความร้อนทิ้งจาก ORC มาใช้ผลิตน้ำเย็นทดแทนระบบปรับอากาศแบบแยกส่วน

ตารางที่ 3 ผลการประเมินศักยภาพความร้อนทั้งคงเหลือ และพลังงานไฟฟ้าที่สามารถประหยัดได้จากการติดตั้งระบบทำความเย็นแบบดูดซึม

	ORC ตัวเดียว	ระบบ ORC แบบอนุกรม 2 ตัว	ระบบ ORC แบบขนาน 2 ตัว
อุณหภูมิน้ำร้อนทั้งที่ออกจาก ระบบ ORC ($^{\circ}\text{C}$)	87.03	72.58	60.26
ความร้อนทิ้งคงเหลือ (kW_{th})	92.69	14.04	-
ศักยภาพการผลิตน้ำเย็น (kW_{th})	60.25	9.13	-
ศักยภาพการผลิตน้ำเย็น (BTU/h)	205,571.35	31,143.52	-
พลังงานไฟฟ้าที่ประหยัดได้ (kW_e)	16.00	0.71	-

เนื่องจากอุณหภูมิของน้ำร้อนทิ้งกรณี ORC ตัวเดียวสูงที่สุดส่งผลให้มีศักยภาพในการนำความร้อนทิ้งไปผลิตน้ำเย็นสูงที่สุดถึง 60.25 kW_{th} และนำความเย็นไปใช้ทดแทนระบบปรับอากาศแบบแยกส่วนในสำนักงานได้ 16 kW_e

4.3 การวิเคราะห์เชิงเศรษฐศาสตร์

ในการวิเคราะห์เชิงเศรษฐศาสตร์ ดำเนินการวิเคราะห์ราคาต้นทุนในการผลิตกระแสไฟฟ้าต่อหน่วยในรูปของ LEC ทั้ง 5 กรณี ได้แก่ การใช้ ORC เพียงตัวเดียว การต่ออนุกรม ORC 2 ตัว และการต่อ ORC แบบขนาน รวมถึงการติดตั้งระบบทำความเย็นแบบดูดซึมเพื่อทดแทนระบบปรับอากาศแบบแยกส่วนของ ORC ตัวเดียว และการต่ออนุกรม ORC 2 ตัว โดยใช้สภาวะในการพิจารณาดังตารางที่ 4 ซึ่งเป็นราคา ORC ของผู้ผลิตในประเทศ และใช้ราคาของระบบทำความเย็นแบบดูดซึมด้วยความสัมพันธ์จากสมการที่ 18 [14]

$$y = 6318.8x^{-0.748} \quad (18)$$

เมื่อ y คือราคากระป๋องทำความเย็นแบบดูดซึม และ x
คือขนาดของระบบทำความเย็นแบบดูดซึม

ตารางที่ 4 ข้อมูลสำหรับการวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์

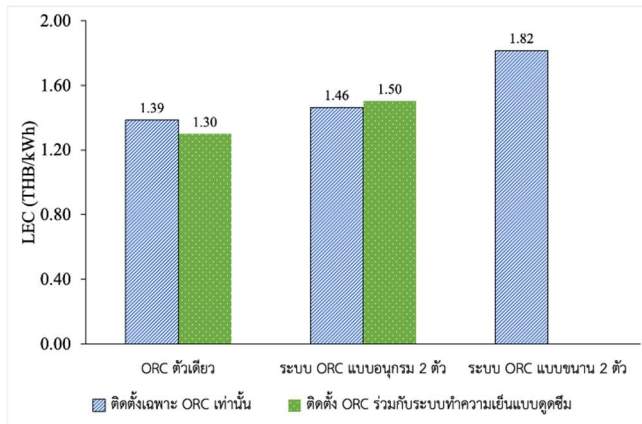
ORC ขนาด 200 kW (บาท/ชุด)	9,000,000
ORC ขนาด 150 kW (บาท/ชุด)	7,800,000
ORC ขนาด 100 kW (บาท/ชุด)	6,500,000
ORC ขนาด 50 kW (บาท/ชุด)	3,000,000
ORC ขนาด 20 kW (บาท/ชุด)	2,200,000
ORC ขนาด 10 kW (บาท/ชุด)	1,620,000
ORC ขนาด 5 kW (บาท/ชุด)	750,000
ระยะเวลาโครงการ (ปี)	10 years
อัตราดอกเบี้ยเงินกู้ (%)	6%
ค่าบำรุงรักษาต่อปี (%)	10% ของเงินลงทุน
Availability Factor (%)	87.45%
ชั่วโมงการเดินเครื่อง (ชั่วโมง/ปี)	7,661

จากการวิเคราะห์ต้นทุนในการผลิตกระแสไฟฟ้าต่อหน่วย
ในรูปของ LEC และระยะเวลาการคืนทุนของโครงการด้วย
สมการที่ 8 ในกรณีติดตั้งเฉพาะ ORC และหากพิจารณาการ
ติดตั้งร่วมกับระบบทำความเย็นแบบดูดซึมด้วยสมการที่ 19

$$LEC = \frac{(CRF \times C_{invest}) + \dot{C}_{o\&m} + \dot{C}_{fuel} - \dot{C}_{saving}}{E_{Net}} \quad (19)$$

เมื่อ $\dot{C}_{saving}$ คือค่าใช้จ่ายที่ประหยัดได้ต่อปีจากการผลิต
น้ำเย็นด้วยระบบทำความเย็นแบบดูดซึม เพื่อทดแทนระบบ
ปรับอากาศแบบแยกส่วนในสำนักงาน

พบว่าในการติดตั้ง ORC เพียงตัวเดียวร่วมกับระบบทำความเย็นแบบดูดซึมนั้นมีความคุ้มค่า LEC ต่ำที่สุดที่ 1.30 บาท/kWh รายละเอียดดังรูปที่ 9



รูปที่ 9 เปรียบเทียบ LEC ระหว่างการติดตั้ง ORC อย่างเดียว และติดตั้ง ORC ร่วมกับระบบทำความเย็นแบบดูดซึม

5. สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาการวิเคราะห์ศักยภาพการผลิตไฟฟ้าจากความร้อนทิ้ง ในโรงไฟฟ้าถ่านหินโดยใช้วัฏจักรแรงดันสารอินทรีย์ พบว่า R245fa เป็นสารทำงานที่ให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงที่สุดสำหรับความร้อนทิ้งจาก Boiler Continuous Blowdown ของโรงไฟฟ้าแม่เมาะ การจัดวางระบบของวัฏจักรแรงดันสารอินทรีย์ด้วยการเชื่อมต่อแบบขนาน เป็นการจัดวางที่สามารถนำความร้อนทิ้งกลับมาผลิตไฟฟ้าได้สูงที่สุด 220 kW แต่หากพิจารณาในเชิงเศรษฐศาสตร์การใช้ระบบวัฏจักรแรงดันสารอินทรีย์เพียงตัวเดียวส่งผลให้ต้นทุนในการผลิตกระแสไฟฟ้าต่อหน่วยในรูปของ LEC ถูกที่สุด 1.39 บาท/kWh เนื่องจากราคาต่อกำลังผลิตในรูปของ บาท/kW ของ ORC ขนาดใหญ่นั้นสูงกว่า ORC ขนาดเล็ก

การนำระบบทำความเย็นแบบดูดซึม มารับความร้อนทิ้งที่ผ่านวัฏจักรแรงดันสารอินทรีย์ เพื่อนำน้ำเย็นทดแทนระบบปรับอากาศแบบแยกส่วนนั้น ทำให้โรงไฟฟ้าสามารถผลิตไฟฟ้าเพื่อขายได้มากขึ้นสูงสุดถึง 16 kW_e และหากพิจารณาด้านทุนในการผลิตกระแสไฟฟ้าต่อหน่วยในรูปของ LEC ของทั้งระบบนั้นส่งผลให้ LEC ลดลง โดยในกรณีของติดตั้ง ORC ตัวเดียวร่วมกับระบบทำความเย็นแบบดูดซึมนั้นพบว่าทำให้ LEC ลดลงจาก 1.39 บาท/kWh เป็น 1.30 บาท/kWh

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณโครงการความร่วมมือทางวิชาการระหว่าง กฟผ. กับมหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ที่ได้สนับสนุนทุนวิจัย และหน่วยวิจัยระบบทางอุณหภาพ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ที่เอื้อเฟื้อสถานที่ในการทำวิจัยในครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Asadi M, Deymi-Dashtebayaz M, Rad EA. Comparing the profitability of waste heat electricity generation of internal combustion engines: An exergoeconomic analysis through optimization of two different organic Rankine cycle scenarios. *Applied Thermal Engineering*. 2022; 211:118443.
- [2] Srinivasan KK, Mago PJ, Krishnan SR. Analysis of exhaust waste heat recovery from a dual fuel low temperature combustion engine using an Organic Rankine Cycle. *Energy*. 2010;5(6): 2387–99.
- [3] Song J, Song Y, Gu C. Thermodynamic analysis and performance optimization of an Organic Rankine Cycle (ORC) waste heat recovery system for marine diesel engines. *Energy*. 2015;82: 976–85.
- [4] Njock JP, Ngangue MN, Biboum AC, Sosso OT, Nzenzwa R. Investigation of an organic Rankine cycle (ORC) incorporating a heat recovery water-loop: Water consumption assessment. *Thermal Science and Engineering Progress*. 2022;32: 101303.
- [5] Wang S, Liu C, Zhang S, Li Q, Huo E. Multi-objective optimization and fluid selection of organic Rankine cycle (ORC) system based on economic-environmental-sustainable analysis. *Energy Conversion Management*. 2022; 254:115238.
- [6] Deethayat T, Asanakham A, Kiatsiriroat T. Performance analysis of low temperature organic Rankine cycle with zeotropic refrigerant by Figure of Merit (FOM). *Energy*. 2016;96:96–102.

- [7] Zheng Z, Cao J, Wu W, Leung MKH. Parallel and in-series arrangements of zeotropic dual-pressure Organic Rankine Cycle (ORC) for low-grade waste heat recovery. *Energy Reports*. 2022; 8:2630–45.
- [8] Liu X, Niu J, Wang J, Zhang H, Dong L. Coupling mechanism of double-stage ORC based on hot dry rock utilization. *Case Studies in Thermal Engineering*. 202; 28:101619.
- [9] Gnutek Z, Bryszewska-Mazurek A. The thermodynamic analysis of multicycle ORC engine. *Energy*. 2001; 26(12):1075–1082.
- [10] Zhang HG, Wang EH, Fan BY. A performance analysis of a novel system of a dual loop bottoming organic Rankine cycle (ORC) with a light-duty diesel engine. *Applied Energy*. 2013; 102:1504–13.
- [11] Kuo CR, Hsu SW, Chang KH, Wang CC. Analysis of a 50 kW organic Rankine cycle system. *Energy*. 2011;36(10):5877–5885.
- [12] Javanshir A, Sarunac N. Thermodynamic analysis of a simple Organic Rankine Cycle. *Energy*. 2017; 118: 85–96.
- [13] Chaiyat N, Kiatsiriroat T. Analysis of combined cooling heating and power generation from organic Rankine cycle and absorption system. *Energy*. 2015; 91:363–370.
- [14] Chaiyat N, Wakaiyang Y, Inthavideth X. Enhancement efficiency of organic Rankine cycle by using sorption system. *Applied Thermal Engineering*. 2017; 122:368–379.
- [15] Pitz-Paal R. *Concentrating Solar Power*. In: *Future Energy*. Elsevier; 2020. p. 413–30. Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780081028865000190>
- [16] Bao J, Zhao L. A review of working fluid and expander selections for organic Rankine cycle. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2013; 24:325–342.
- [17] Wang X, Levy EK, Pan C, Romero CE, Banerjee A, Rubio-Maya C, et al. Working fluid selection for organic Rankine cycle power generation using hot produced supercritical CO₂ from a geothermal reservoir. *Applied Thermal Engineering*. 2019;149:1287–1304.