

# การประเมินด้านพลังงาน วัฏจักรชีวิต และต้นทุนพลังงานจากการนำความร้อนทิ้งกลับคืนของหลุมเจาะน้ำมันดิบโดยวัฏจักรแรงดันอินทรีย์ Energy, Life Cycle, and Energy Cost Analysis from Waste Heat Recovery of Crude Oil Wells using Organic Rankine Cycle (ORC)

ภูชิสส์ เพ็งศิริ<sup>1</sup> และนัฐพร ไชยญาติ<sup>2\*</sup>

Puchit Pengsiri<sup>1</sup> and Nattaporn Chaiyat<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้

<sup>2\*</sup> ห้องวิจัยการออกแบบและเทคโนโลยีด้านอุณหภาพ

<sup>1</sup>School of Renewable Energy, Maejo University, Chiang Mai, Thailand

<sup>2\*</sup>Thermal Design and Technology Laboratory (TDeT Lab), Thailand

E-mail: benz178tii@hotmail.com

วันที่รับบทความ 23 พฤศจิกายน 2567

Received: Nov. 23, 2024

วันที่รับแก้ไขบทความ 12 กุมภาพันธ์ 2568

Revised: Feb. 12, 2025

วันที่ตอบรับบทความ 14 มีนาคม 2568

Accepted: Apr. 14, 2025

## บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอระบบผลิตไฟฟ้าสำหรับการนำความร้อนทิ้งกลับคืนของหลุมเจาะน้ำมันดิบโดยวัฏจักรแรงดันอินทรีย์ขนาด 10 kW<sub>e</sub> ที่ใช้สารทำงาน R-245fa และระบายความร้อนด้วยอากาศ ของไหลร้อนได้พิภพอุณหภูมิในช่วง 84.00 - 101.50 °C และอัตราการไหลเชิงมวล 2.91 L/s ถูกใช้ในการผลิตไฟฟ้า จากผลการทดสอบ พบว่า ระบบผลิตไฟฟ้าจากความร้อนสามารถผลิตไฟฟ้าสุทธิได้ 4.95 kW<sub>e</sub> ที่ประสิทธิภาพของระบบร้อยละ 3.20 ผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมจากการประเมินวัฏจักรชีวิต พบว่า ผลกระทบชั้นกลางที่มีค่าผลกระทบสูงสุดคือ การเกิดความเป็นพิษต่อมนุษย์ 9.06E+04 kg 1,4-DB eq และรองลงมา คือ การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ 2.49E+04 kg CO<sub>2</sub> eq และส่งผลกระทบต่อชั้นปลายด้านสุขภาพของมนุษย์ 8.35E-02 DALY ด้านสิ่งแวดล้อม 2.27E-02 Species-y และด้านทรัพยากร 1.71E+03 USD รวมทั้งทำการวิเคราะห์คะแนนเชิงเดียวจากการประเมินวัฏจักรชีวิตได้เท่ากับ 0.00047 Pt โดยผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมเกิดจากการใช้ทองแดงและเหล็ก ผลการวิเคราะห์ทางเศรษฐกิจ พบว่า ต้นทุนพลังงานต่อหน่วยเท่ากับ 2.26 Baht/kWh ภายใต้มูลค่าเงินลงทุน 1,100,000 บาท

**คำสำคัญ:** ระบบผลิตไฟฟ้า, การนำความร้อนทิ้งกลับคืน, วัฏจักรแรงดันอินทรีย์, การประเมินวัฏจักรชีวิต, หลุมเจาะน้ำมันดิบ

## Abstract

This research presents a power generation system for waste heat recovery from crude oil wells. The system employed a 10-kW<sub>e</sub> organic Rankine cycle (ORC) with an R-245fa refrigerant as the working fluid and an air-cooled system. A geofluid temperature range of 84.00 – 101.50 °C and a mass flow rate of 2.91 L/s were used to generate power from the ORC system. Test results revealed a net power output of 4.95 kW<sub>e</sub> and a system efficiency of 3.20% from the heat-to-power system. The life

cycle assessment (LCA) revealed highly significant midpoint effects under human toxicity of  $9.06\text{E}+04$  kg 1,4-DB eq and climate change of  $2.49\text{E}+05$  kg  $\text{CO}_2$  eq. The endpoint impact values encompassed a human health of  $8.35\text{E}-02$  DALY, an ecosystem quality of  $2.27\text{E}-02$  Species-y, and natural resources of  $1.71\text{E}+03$  USD. The LCA single score was approximately 0.00047 Pt. All of these impacts were associated with the use of copper and steel. The economic analysis indicates a levelized energy cost of 0.064 USD/kWh under an investment cost of 1,100,000 Baht.

**Keywords:** Power generation system, Waste heat recovery, Organic Rankine cycle (ORC), Life cycle assessment (LCA), Crude oil wells

## 1. บทนำ

ปิโตรเลียมเป็นหนึ่งในพลังงานฟอสซิลที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน และในกระบวนการผลิตปิโตรเลียมก่อให้เกิดความร้อนทิ้งจำนวนมาก จากรายงานศักยภาพความร้อนทิ้งทั่วโลกตามภาคส่วน (McKinsey's sustainability practice, 2023) พบว่า ภาคส่วนอุตสาหกรรมน้ำมันและก๊าซได้สร้างความร้อนทิ้งมากกว่า 1,300 TWh (ตั้งแต่ต้นน้ำถึงปลายน้ำ) คิดเป็นร้อยละ 42 ของภาคส่วนทั้งหมด ดังนั้นการนำความร้อนทิ้งกลับคืนจึงเป็นการอนุรักษ์พลังงาน และเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตพลังงานโดยการผลิตร่วมพลังงานไฟฟ้าและปิโตรเลียม (Combined petroleum and power generation process) รวมทั้งตอบสนองนโยบายของรัฐบาลในด้านเศรษฐกิจสีเขียว (Green economy) รวมทั้งพัฒนาตลาดซื้อขายไฟฟ้าเสรี ส่งเสริมความเป็นกลางทางคาร์บอน (Carbon neutrality) และสนับสนุนการซื้อขายคาร์บอนเครดิต (Carbon credit) (Ministry of Energy, 2025)

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการผันความร้อนเป็นไฟฟ้าถูกนำเสนอโดย Zheng et al. (2022) ศึกษาการนำความร้อนทิ้งกลับคืนมาใช้ในระบบผลิตไฟฟ้าวัฏจักรแรงดันอินทรีย์ ซึ่งเหมาะสำหรับการเปลี่ยนความร้อนที่อุณหภูมิ 80 - 150 °C ให้เป็นพลังงานไฟฟ้า นอกจากนี้ Zhar et al. (2021) และ Díaz-Secades et al. (2024) ได้ศึกษาความสามารถใช้ความร้อนทิ้งที่อุณหภูมิต่ำได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยการเลือกใช้สารทำงานที่เหมาะสม เช่น R-245fa R-123 และ R-152a สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าได้ 10-20% Rijpkema et al. (2022) และ Ravindran et al. (2024) ประยุกต์ใช้วัฏจักรแรงดันอินทรีย์กับแหล่งความร้อนทิ้งหลายประเภท ทั้งจากระบบการผลิตในอุตสาหกรรมและไอเสีย สำหรับการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานทดแทนด้านความร้อนนำเสนอโดย Djemaa et al. (2022) ทดสอบโรงไฟฟ้าไฮบริดจากพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมพลังงานความร้อนได้พิกขพบว่ามีประสิทธิภาพความร้อนประมาณ 3,823 kW และร้อยละ 16.10 ตามลำดับ Chaiyat et al. (2020) พัฒนาระบบผลิตไฟฟ้าร่วมกับการทำความเย็นและความร้อน (Combined cooling, heating, power, CCHP) พบว่า พลังงานสุทธิที่ระบบผลิตได้เท่ากับ 32.62 kWh ที่ประสิทธิภาพร้อยละ 11.60 และทำการประเมินวัฏจักรชีวิต (Life cycle assessment, LCA) โดยพิจารณาผลกระทบตลอดวัฏจักรชีวิตของระบบด้วยระเบียบวิธี Recipe เพื่อนำข้อมูลที่ได้มาพัฒนาให้มีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น ในรูปแบบค่าคะแนนเชิงเดี่ยวเท่ากับ 0.026 Pt นอกจากนี้ยังทำการวิเคราะห์ผลด้านเศรษฐศาสตร์ โดยดัชนีต้นทุนพลังงานต่อหน่วย (Levelized

energy costing, LEnC) เท่ากับ 0.069 USD/kWh จากงานวิจัยข้างต้น พบว่า การนำความร้อนทิ้งจากกระบวนการผลิตปิโตรเลียมมาผลิตไฟฟ้า ยังไม่มีงานวิจัยใดที่ทำการศึกษความเป็นไปได้จากการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และผลประโยชน์ด้านพลังงาน เศรษฐศาสตร์ และสิ่งแวดล้อมจากการพัฒนาต้นแบบการผลิตร่วมพลังงานไฟฟ้าและปิโตรเลียมอีกด้วย

## 2. วัตถุประสงค์ในการวิจัย

2.1 เพื่อพัฒนาต้นแบบระบบผลิตไฟฟ้าจากโรงจักรแรงดันอินทรีย์ สำหรับความร้อนทิ้งกลับคืนของหลุมเจาะน้ำมันดิบ

2.2 เพื่อวิเคราะห์ผลด้านพลังงาน เศรษฐศาสตร์ และสิ่งแวดล้อมของการผลิตไฟฟ้าจากความร้อนทิ้งกลับคืนของหลุมเจาะน้ำมันดิบ

## 3. วิธีดำเนินการวิจัย

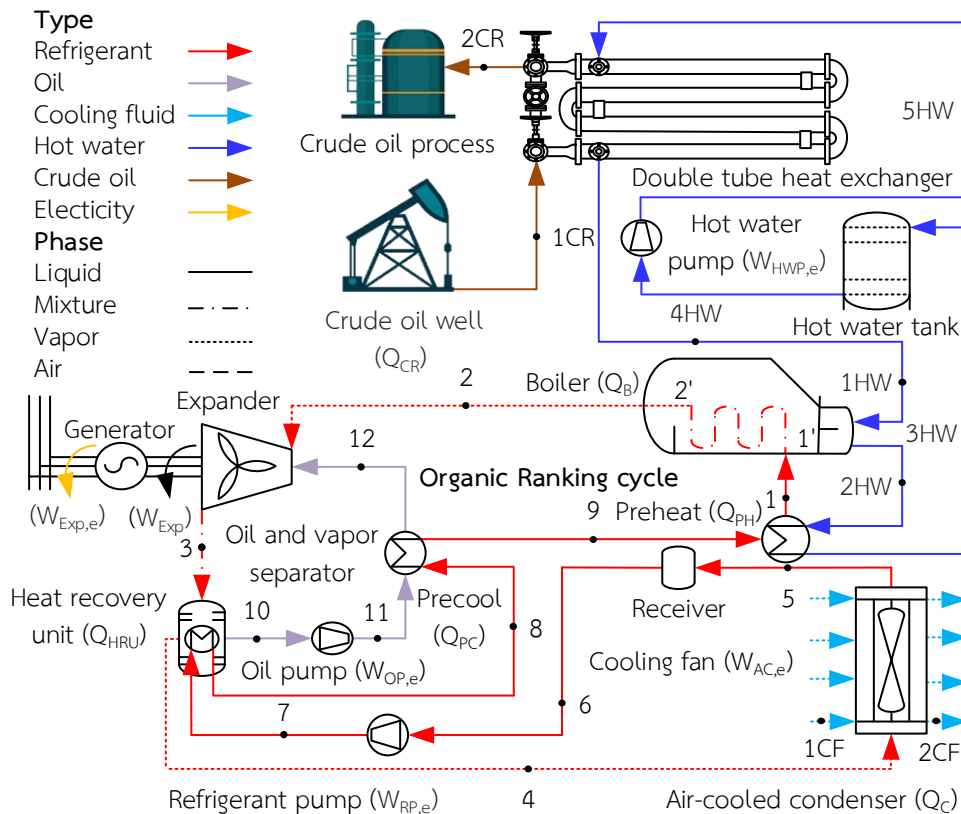
### 3.1 วิเคราะห์สมบัติทางความร้อนและกายภาพของของไหลร้อนจากหลุมเจาะน้ำมันดิบ

ดำเนินการสำรวจและรวบรวมข้อมูลของหลุมเจาะน้ำมันดิบในจังหวัดกำแพงเพชร เพื่อนำตัวอย่างของไหลร้อนจากหลุมเจาะน้ำมันดิบ มาทำการวิเคราะห์สมบัติด้านความร้อนและกายภาพอันประกอบไปด้วย ค่าความจุความร้อนจำเพาะ (Specific heat capacity,  $C_p$ ) ค่าความหนาแน่น (Density,  $\rho$ ) อุณหภูมิ และอัตราการไหลเชิงปริมาตร ( $\dot{V}$ )

### 3.2 พัฒนาต้นแบบระบบผลิตไฟฟ้า สำหรับการนำความร้อนทิ้งกลับคืนของหลุมเจาะน้ำมันดิบ

พัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยใช้ข้อมูลทางกายภาพและสมบัติทางความร้อนของของไหลร้อนได้พิภพ ร่วมกับเงื่อนไขเริ่มต้นการทำงาน (Initial conditions) จากงานวิจัยของ Chaiyat et al. (2020) เพื่อออกแบบระบบผลิตไฟฟ้าจากโรงจักรแรงดันอินทรีย์ขนาด 10 kW<sub>e</sub> สำหรับการนำความร้อนทิ้งกลับคืนของหลุมเจาะน้ำมันดิบ (Crude oil well,  $Q_{CR}$ ) ดังแสดงกระบวนการทำงานในภาพที่ 1 เริ่มจากของไหลร้อนได้พิภพจากหลุมเจาะน้ำมันดิบจุดที่ 1CR-2CR ถ่ายเทความร้อนให้แก่ น้ำสะอาดในจุดที่ 1HW-5HW ที่อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อซ้อนท่อ (Double tube heat exchanger) จากนั้นปั๊มน้ำร้อน (Hot water pump,  $Q_{HW}$ ) จ่ายน้ำร้อนสะอาดจากถังเก็บน้ำร้อน (Hot water tank) ถ่ายเทความร้อนให้แก่สารทำงานในระบบผลิตไฟฟ้าจากโรงจักรแรงดันอินทรีย์จุดที่ 1 - 9 ที่หม้อต้ม (Boiler,  $Q_B$ ) ทำให้สารทำงานเปลี่ยนสถานะเป็นไอร้อนยวดยิ่ง และถูกผสมด้วยน้ำมันหล่อลื่นซึ่งไหลเวียนในระบบโดยปั๊มน้ำมันหล่อลื่น (Oil pump,  $W_{OP,e}$ ) ในจุดที่ 10-12 ป้อนเข้าสู่เครื่องขยายตัว (Expander,  $W_{Exp}$ ) ที่ต่อร่วมกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Generator,  $W_{Exp,e}$ ) เพื่อผลิตพลังงานไฟฟ้าทำให้สารทำงานมีความดันและอุณหภูมิลดลง และไหลไปยังเครื่องควบแน่นแบบระบายความร้อนด้วยอากาศ (Air-cooled condenser,  $Q_C$ ) ซึ่งสาเหตุสำคัญที่เลือกใช้ระบบระบายความร้อนด้วยอากาศทดแทนระบบระบายความร้อนด้วยน้ำ เพราะพื้นที่โดยรอบหลุมเจาะน้ำมันดิบ ไม่มีแหล่งน้ำสะอาด (น้ำบาดาลและระบบประปา) สำหรับใช้ในระบบระบายความร้อนด้วยน้ำ จากนั้นสารทำงานจะควบแน่นเป็นของเหลวอิ่มตัวและถูกอัดตัวที่ปั๊มสารทำงาน (Refrigerant pump,  $W_{RP,e}$ ) ผ่านตัวนำความร้อนกลับคืน (Heat recovery unit,  $Q_{HRU}$ ) เครื่องระบายความร้อน (Precool,  $Q_{PC}$ ) และเครื่องอุ่นความร้อน (Preheat,  $Q_{PH}$ ) เพื่อนำความร้อน

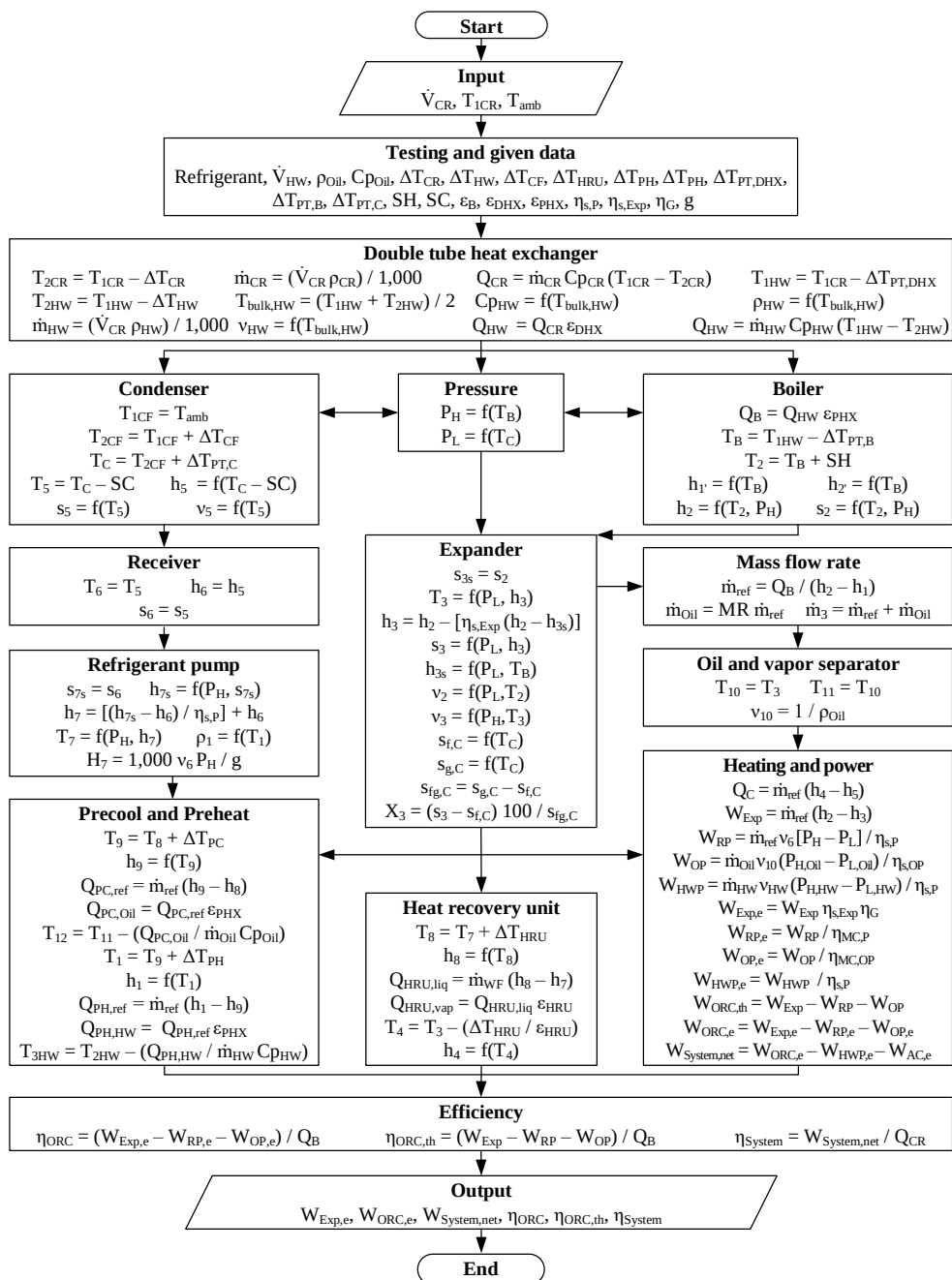
ทั้งจากอุปกรณ์ต่าง ๆ กลับมาใช้ประโยชน์ รวมทั้งเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าจากความร้อน พัฒนาระบายความร้อน (Cooling fan,  $W_{AC,e}$ ) ถูกออกแบบเพื่อใช้ร่วมกับเครื่องควบแน่น สำหรับระบายความร้อน ออกจากสารทำงานออกสู่สิ่งแวดล้อม (Meteorological department, 2023) โดยประสิทธิภาพการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าด้วยวัฏจักรแรงดันอินทรีย์ ( $\eta_{System}$ ) ซึ่งมีรายละเอียด สมการทางคณิตศาสตร์และความสัมพันธ์ของตัวแปรต่าง ๆ ดังแสดงในภาพที่ 1



ภาพที่ 1 แผนภาพการทำงานอย่างง่ายของระบบผลิตไฟฟ้าสำหรับการนำความร้อนทิ้งกลับคืนของหลุมเจาะน้ำมันดิบ

### 3.3 ทดสอบและวิเคราะห์ด้านพลังงาน

นำผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการและข้อมูลสมบัติทางความร้อนของน้ำมันดิบ ไปวิเคราะห์หาสมการสมรรถนะของการผลิตไฟฟ้าด้วยวัฏจักรแรงดันอินทรีย์ จากนั้นทำการวิเคราะห์ประสิทธิภาพการใช้พลังงานของระบบ โดยใช้วิธีการถดถอยเชิงเส้น (Linear regression) เพื่อหาสมการสมรรถนะ รวมทั้งทำการเปรียบเทียบผลการออกแบบจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และผลการทดสอบ เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพของแบบจำลอง สำหรับการออกแบบระบบผลิตไฟฟ้าสำหรับการนำความร้อนทิ้งกลับคืนของหลุมเจาะน้ำมันดิบต่อไปในอนาคต

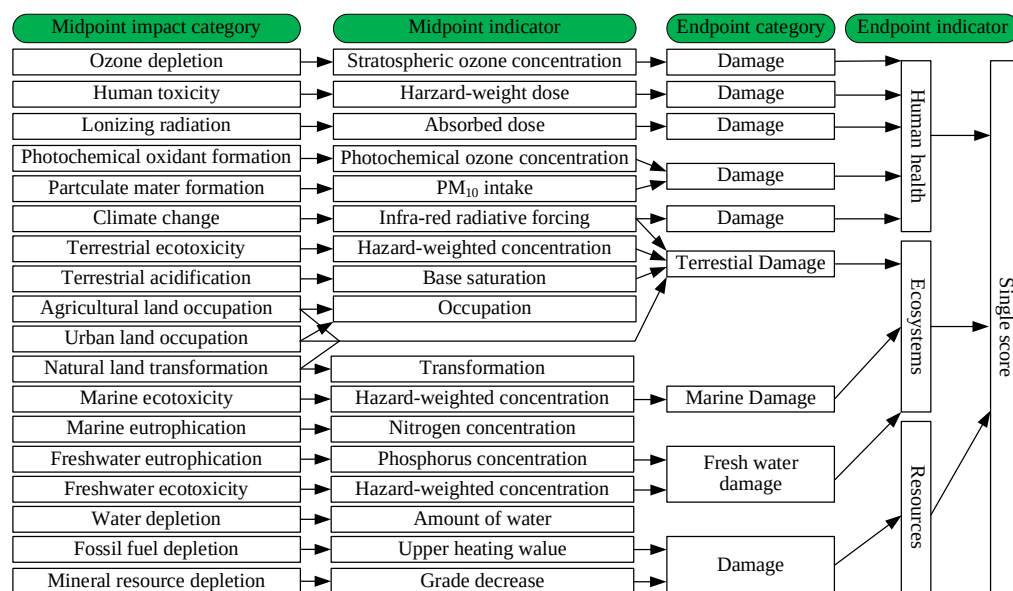


ภาพที่ 2 การประเมินด้านพลังงานของการนำความร้อนทิ้งกลับคืนของหลุมเจาะน้ำมันดิบ

### 3.4 วิเคราะห์ผลด้านสิ่งแวดล้อม

การประเมินวัฏจักรชีวิตมีการพิจารณาประกอบไปด้วย ระบบวัฏจักรแรงดัน สารอินทรีย์ ระบบน้ำร้อน ระบบระบายความร้อนด้วยอากาศ อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน และระบบท่อ มีขอบเขตการศึกษาแบบแครดิล-ทู-เกรฟ (Cradle-to-Grave) พิจารณาสารขาเข้า และสารขาออกครอบคลุมทุกขั้นตอน ตั้งแต่การได้มาซึ่งวัตถุดิบ การขนส่ง การก่อสร้าง การดำเนินงาน การปล่อยมลพิษ และการรีไซเคิล (การรีไซเคิลและการฝังกลบ) หน่วยการทำงาน (Function unit, FU) ที่ใช้ในการประเมิน คือ 1 kWh ของพลังงานไฟฟ้าสุทธิที่ผลิตได้ มีอายุการทำงาน

(Life span) 20 ปี การวิเคราะห์ใช้ข้อมูลจากฐานข้อมูล SimaPro และใช้วิธีการ Recipe เพื่อประเมินผลกระทบชั้นกลาง 18 ผลกระทบ ชั้นปลาย 3 ผลกระทบ และผลกระทบเชิงเดี่ยว (Single score) ดังแสดงกรอบการประเมินในภาพที่ 3



ภาพที่ 3 การประเมินด้านสิ่งแวดล้อมของการนำความร้อนทิ้งกลับคืนของหลุมเจาะน้ำมันดิบ

### 3.5 วิเคราะห์ผลด้านเศรษฐศาสตร์

ต้นทุนพลังงานต่อหน่วย (Levelized cost of energy, LEC) คือ ดัชนีการวิเคราะห์ทางเศรษฐกิจของงานวิจัยนี้ ดังแสดงในสมการ 2 และ 3 พิจารณาต้นทุนไฟฟ้าเฉลี่ยตลอดอายุโครงการจากปัจจัยได้แก่ มูลค่าเงินลงทุน (Investment cost, Inv) ต้นทุนพลังงานในการผลิตต่อปี (Production energy cost, PEC) พลังงานไฟฟ้าสุทธิต่อปี ( $W_{ORC,net\ tOP}$ ) อายุการใช้งานของระบบ (N) อัตราส่วนลด (Discount rate, r) และปัจจัยการเสื่อมสภาพ (Deterioration factor, DF) ผลลัพธ์ของอัตราดอกเบี้ยจริงของธนาคาร (Real interest rate,  $i_{Real}$ ) และอัตราเงินเฟ้อ (Inflation rate,  $i_{Inflation}$ ) ร่วมกับเงื่อนไขการวิเคราะห์ดังแสดงในตารางที่ 1

$$LEC = \left( Inv + \sum_{t=1}^n \frac{PEC}{(1+r)^t} \right) / \left( \sum_{t=1}^n \frac{W_{net\ tOP}}{(1+DF)^{(t-1)}} \right) \quad (2)$$

$$R = [(1 + i_{Real}) / (1 + i_{Inflation})] - 1 \quad (3)$$

ตารางที่ 1 เงื่อนไขการวิเคราะห์ด้านเศรษฐศาสตร์

| รายละเอียด                                                          | ปริมาณ |
|---------------------------------------------------------------------|--------|
| อัตราดอกเบี้ยแท้จริง ( $i_{Real}$ , %) (The World Bank Group, 2024) | 1.50   |
| อัตราเงินเฟ้อ ( $i_{Inflation}$ , %) (The World Bank Group, 2024)   | 1.00   |
| ปัจจัยการเสื่อมสภาพ (DF, %) (Chaiyat et al., 2020)                  | 2.00   |
| อายุของโครงการ (n, y)                                               | 20     |
| เวลาการทำงานต่อปี ( $t_{OP}$ , h/y) <sup>1</sup>                    | 8,400  |

## 4. ผลและวิเคราะห์ผลการวิจัย

### 4.1 ผลการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนและกายภาพของของไหลร้อน

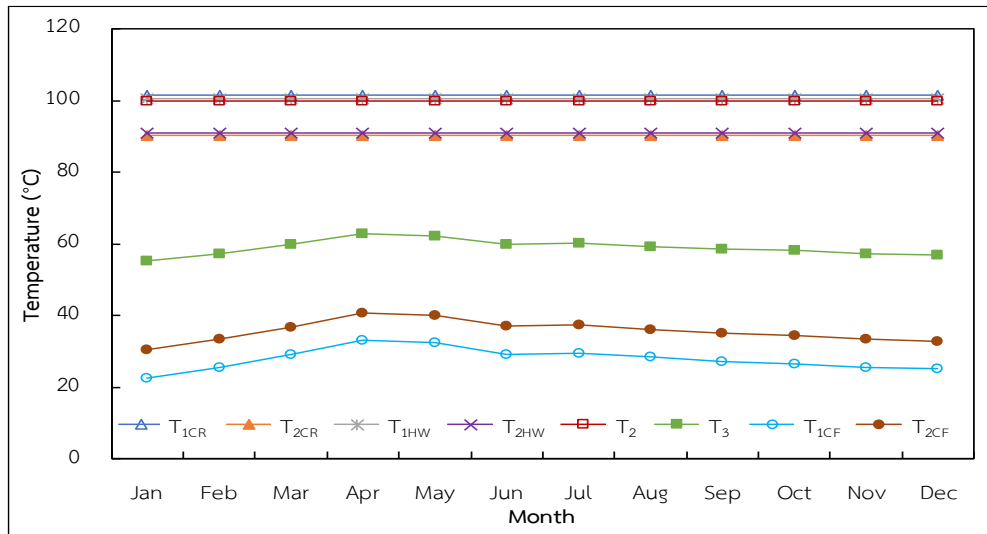
ของไหลที่ได้จากหลุมเจาะน้ำมันดิบในจังหวัดกำแพงเพชร มีลักษณะทางกายภาพดังแสดงในภาพที่ 4 คือ เป็นของผสมระหว่างน้ำมันดิบและน้ำใต้ดินในสัดส่วนประมาณ 70:30 ซึ่งแต่ละหลุมเจาะน้ำมันดิบจะมีสัดส่วนน้ำมันดิบและน้ำใต้ดินแตกต่างกันไป เมื่อนำของเหลวดังกล่าวไปทำการทดสอบหาสมบัติทางความร้อน พบว่า ความจุความร้อนจำเพาะ ( $C_p$ ) มีค่าเท่ากับ  $4.59 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K}$  โดยใช้อุปกรณ์ DCS-Analyzer และความหนาแน่น ( $\rho$ ) มีค่าเท่ากับ  $987.30 \text{ kg/m}^3$  ด้วยมาตรฐาน ASTM D4052-18a (AmSpec (Thailand) Limited, 2022) ในขณะที่สมบัติด้านกายภาพ พบว่า ของไหลร้อนจากหลุมเจาะน้ำมันมีอุณหภูมิไม่แน่นอน แต่โดยรวมจะสูงกว่า  $55^\circ\text{C}$  รวมทั้งมีอัตราการไหลไม่แน่นอนแต่จะมากกว่า  $1.5 \text{ L/s}$  ซึ่งเป็นผลมาจากการใช้ปั๊มแรงเหวี่ยง (Crank balanced pumping unit) ในการสูบของไหลร้อนออกจากหลุมเจาะน้ำมันดิบ



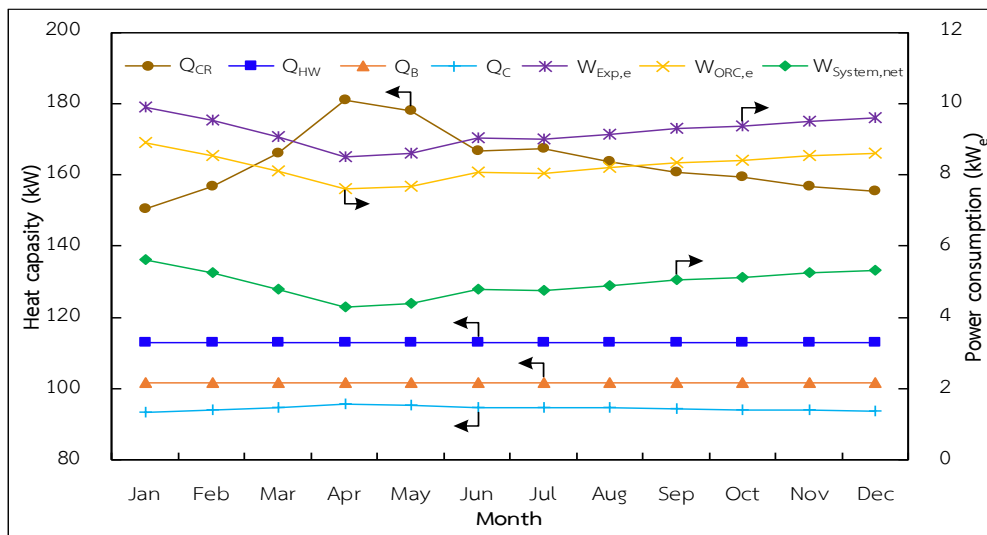
ภาพที่ 4 ลักษณะทางกายภาพของหลุมเจาะน้ำมันดิบ

### 4.2 ผลการออกแบบด้านพลังงาน

ผลการออกแบบจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ พบว่า ระบบผลิตไฟฟ้าวัฏจักรแรงดันสารอินทรีย์ที่ได้รับความร้อนจากน้ำมันดิบขาเข้า ( $T_{1CR}$ ) ที่อุณหภูมิ  $101.50^\circ\text{C}$  อัตราการไหลเชิงมวล ( $\dot{m}_{CR}$ )  $2.91 \text{ kg/s}$  ต้องการปริมาณความร้อนทั้งจากน้ำมันดิบ ( $Q_{CR}$ )  $163.48 \text{ kW}$  เพื่อใช้ในแลกเปลี่ยนความร้อนกับน้ำสะอาด ผ่านอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อซ้อนท่อ โดยใช้ปั๊มน้ำร้อนที่มีกำลังไฟฟ้า  $0.70 \text{ kW}_e$  เพิ่มเพิ่มอุณหภูมิให้แก่ น้ำสะอาด ( $T_{1HW}$ )  $100.50^\circ\text{C}$  และจะลดลงเมื่อป้อนให้แก่ระบบผลิตไฟฟ้า ( $T_{2HW}$ )  $91.06^\circ\text{C}$  โดยมีปริมาณความร้อนของน้ำสะอาด ( $Q_{HW}$ )  $112.79 \text{ kW}$  ป้อนเข้าสู่วัฏจักรแรงดันสารอินทรีย์ ความร้อนที่หม้อต้ม ( $Q_B$ )  $101.51 \text{ kW}$  ถ่ายเทให้แก่สารทำงาน R-245fa ที่อัตราการไหลเชิงมวล ( $\dot{m}_{ref}$ )  $0.52 \text{ kg/s}$  ในจุดที่ 1 ( $T_1$ ) มีอุณหภูมิ  $59.63^\circ\text{C}$  สารทำงานจะแลกเปลี่ยนความร้อนที่หม้อต้มและกลายเป็นไอร้อนยวดยิ่งในจุดที่ 2 ( $T_2$ ) มีอุณหภูมิ  $99.80^\circ\text{C}$  หลังจากนั้นสารทำงานจะขับเคลื่อนเครื่องขยายและเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ( $W_{Exp,e}$ ) เพื่อผลิตไฟฟ้า  $9.21 \text{ kW}_e$  ในกระบวนการระบายความร้อนด้วยเครื่องควบแน่น ( $Q_C$ ) ปริมาณ  $94.41 \text{ kW}$  มีการใช้กำลังไฟฟ้าจากพัดลมระบายความร้อน ( $W_{AC,e}$ )  $2.60 \text{ kW}_e$  อุณหภูมิอากาศสิ่งแวดล้อมเข้าและออกเฉลี่ยเท่ากับ  $27.90^\circ\text{C}$  และ  $35.70^\circ\text{C}$  ดังแสดงในภาพที่ 5 ประสิทธิภาพทางความร้อนของวัฏจักรแรงดันสารอินทรีย์ ( $\eta_{th,ORC}$ ) และประสิทธิภาพการผันความร้อนเป็นไฟฟ้าของวัฏจักรแรงดันสารอินทรีย์ ( $\eta_{ORC}$ ) เท่ากับร้อยละ 11.56 และร้อยละ 8.13 ระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าสุทธิ ( $W_{System,net}$ ) ได้  $4.96 \text{ kW}_e$  โดยมีประสิทธิภาพรวม ( $\eta_{System}$ ) ที่ร้อยละ 3.05 ดังแสดงในภาพที่ 6



ภาพที่ 5 อุณหภูมิ ณ จุดต่าง ๆ ภายในระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานความร้อนใต้พิภพ



ภาพที่ 6 อัตราการถ่ายเทความร้อนและการใช้พลังงาน

#### 4.3 ผลการพัฒนาระบบผลิตไฟฟ้าสำหรับการนำความร้อนทิ้งกลับคืนจากหลุมน้ำมัน

ต้นแบบระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานความร้อนใต้พิภพขนาด 10 kW<sub>e</sub> ดังแสดงในภาพที่ 7 อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อซ้อนท่อขนาด 240 kW (ความดันและอุณหภูมิสูงสุด 16 bar gauges และ 160 °C) ถูกใช้ในการนำความร้อนทิ้งกลับคืนจากหลุมเจาะน้ำมันดิบ เพื่อแลกเปลี่ยนความร้อนกับน้ำสะอาด และจ่ายให้แก่ระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานความร้อนใต้พิภพที่หม้อต้ม (อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่น 150 kW ผลิตจากสแตนเลส SUS-304) มีการออกแบบการนำความร้อนทิ้งกลับคืนจากสารทำงานภายในระบบผลิตไฟฟ้า R-245fa โดยใช้เครื่องระบายความร้อนและเครื่องอุ่นความร้อนขนาดตัวละ 15 kW เพื่อเพิ่มความสามารถในการผลิตไฟฟ้าให้แก่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบเหนี่ยวนำ (Induction generator) ขนาด 11 kW<sub>e</sub> แบบ 3 phase ต่อกับเครื่องขยายตัวที่พัฒนามาจากเครื่องอัดไอแบบสกรู (Screw compressor) ขนาด 15 kW ที่มีความเร็วรอบ 1,450 – 4,500 rpm และปริมาตรการกระจัด (Displacement volume) 250–302 m<sup>3</sup>/h ติดตั้ง

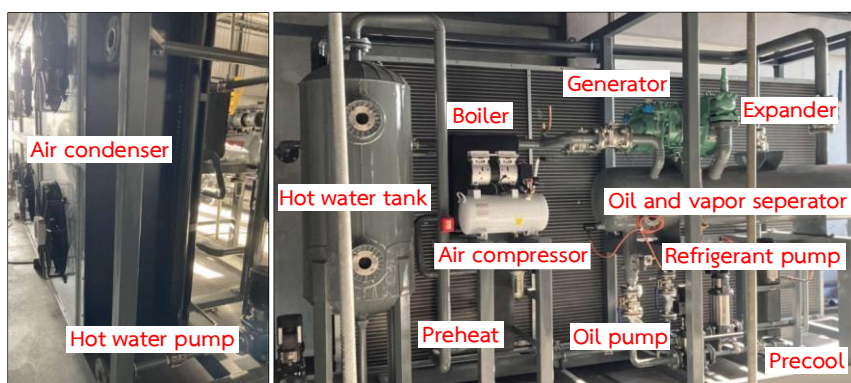


ระบบระบายความร้อนด้วยอากาศขนาด 130 kW และใช้พัดลม 6 ตัว แบบ 3 phase ที่มีปริมาตร การไหลของอากาศ 8,830 m<sup>3</sup>/h ความเร็วรอบ 1,320 rpm ขนาดกำลังไฟฟ้าตัวละ 0.55 kW<sub>e</sub> สำหรับการขับเคลื่อนอากาศถ่ายเทความร้อนออกจากสารทำงาน R-245fa โดยสารทำงาน เมื่อควบแน่นจะถูกกักเก็บไว้ในตัวแยกสารทำงานและน้ำมันแบบแนวนอน (Horizontal type) ขนาด 60 L ซึ่งถูกออกแบบ พิเศษให้มีการติดตั้งตัวนำความร้อนทั้งกลับคืน (Inner heat recovery unit) ขนาด 10 kW ภายในตัวแยกสารทำงานและน้ำมัน ป้อนแบบหลายใบพัดแนวตั้ง (Vertical multistage pump) ขนาดกำลังไฟฟ้า 0.37 kW<sub>e</sub> และ 0.75 kW<sub>e</sub> ถูกใช้สำหรับขับเคลื่อนสารทำงานและน้ำมันตามลำดับ

#### 4.4 ผลการทดสอบและวิเคราะห์ประสิทธิภาพด้านพลังงาน

จากข้อมูลการทดสอบในห้องปฏิบัติการ พบว่า อุณหภูมิของไหลขาเข้า ( $T_{1CR}$ ) ในช่วง อุณหภูมิ 84.00 - 101.50 °C ถูกป้อนเข้าไปในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อซ้อนท่อ ด้วยความร้อนปริมาณ ( $Q_{CR}$ ) 154.84 kW ที่อัตราการไหลเชิงมวล ( $\dot{m}_{CR}$ ) 2.91 kg/s ของไหลร้อน อุณหภูมิ ( $T_{1HW}$ ) 100.50 °C จะถ่ายเทความร้อนไปยังน้ำร้อนและลดอุณหภูมิ ( $T_{2HW}$ ) เหลือประมาณ 91.10 °C น้ำร้อนถูกป้อนเข้าที่หม้อต้มของวัฏจักรแรงดันอินทรีย์ ( $Q_{HW}$ ) 112.26 kW แลกเปลี่ยน ความร้อนกับสารทำงานที่หม้อต้ม ( $Q_B$ ) 101.03 kW สารทำงานถูกต้มให้เดือดที่อุณหภูมิ ( $T_2$ ) 87.70 และมีความดันด้านสูง ( $P_H$ ) 908.89 kPa gauge จนกลายเป็นไอร้อนยวดยิ่งเข้าสู่เครื่องขยายตัว เพื่อผลิตงาน มีการเชื่อมต่อเครื่องขยายตัวและเครื่องกำเนิดไฟฟ้าโดยตรงเพื่อผลิตไฟฟ้า ( $W_{Exp,e}$ ) 9.21 kW<sub>e</sub> การใช้พลังงานจากอุปกรณ์ต่าง ๆ ภายในระบบ ประกอบไปด้วย ปั๊มสารทำงาน ( $W_{RP,e}$ ) 0.67 kW<sub>e</sub> ปั๊มน้ำมัน ( $W_{OP,e}$ ) 0.29 kW<sub>e</sub> ปั๊มน้ำร้อน ( $W_{HWP,e}$ ) 0.70 kW<sub>e</sub> และพัดลมระบายความร้อน ( $W_{AC,e}$ ) 2.60 kW<sub>e</sub> ส่งผลให้มีการผลิตไฟฟ้าสุทธิได้ ( $W_{System,net}$ ) เท่ากับ 4.95 kW<sub>e</sub> ที่ประสิทธิภาพ ด้านพลังงานของระบบผลิตไฟฟ้าวัฏจักรแรงดันอินทรีย์ ( $\eta_{ORC}$ ) เท่ากับร้อยละ 8.17 และมีประสิทธิภาพ ของระบบ ( $\eta_{System}$ ) เท่ากับร้อยละ 3.20

โดยประสิทธิภาพด้านพลังงานของวัฏจักรแรงดันอินทรีย์ของงานวิจัยนี้ มีค่าใกล้เคียงกับงานของ Chaayat et al. (2020) ที่ทำการทดสอบระบบผลิตไฟฟ้าวัฏจักรแรงดัน อินทรีย์ขนาด 10 kW<sub>e</sub> พบว่า ประสิทธิภาพด้านพลังงานมีค่าร้อยละ 8.42 แต่ในงานวิจัยดังกล่าว มีการใช้แหล่งความร้อนที่อุณหภูมิ 113 °C จึงทำให้ประสิทธิภาพด้านพลังงานมีค่ามากกว่า

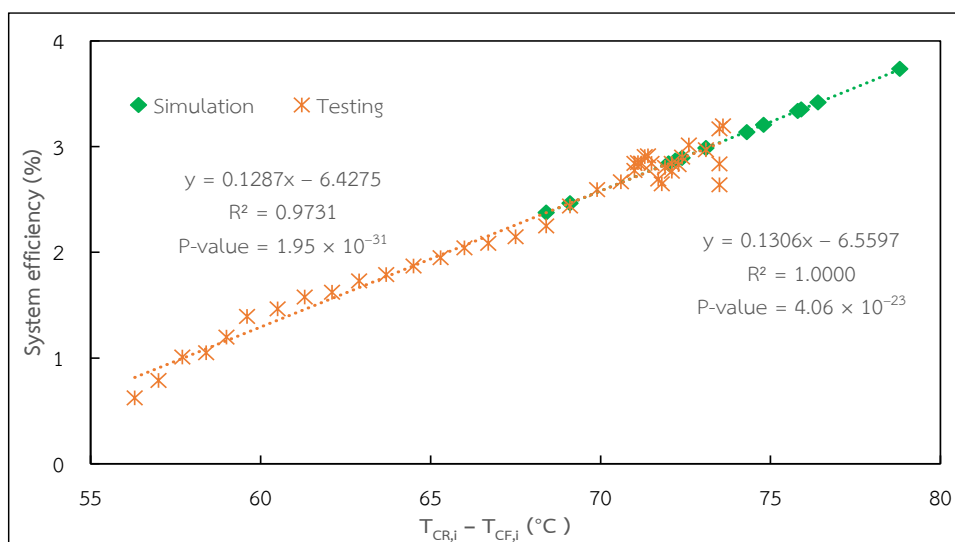


ภาพที่ 7 ต้นแบบระบบผลิตไฟฟ้าวัฏจักรแรงดันอินทรีย์สำหรับการนำความร้อนทิ้งกลับคืน

การประเมินประสิทธิภาพของระบบผลิตไฟฟ้าสำหรับการนำความร้อนทิ้งกลับคืนจากหลุมเจาะน้ำมันดิบ โดยใช้การวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นเพื่ออธิบายพฤติกรรมการทำงาน โดยใช้ความสัมพันธ์ระหว่างความแตกต่างของอุณหภูมิของไหลร้อนขาเข้าและอุณหภูมิอากาศขาเข้า ( $T_{CR,i} - T_{CF,i}$ ) เป็นตัวแปรต้นบนแกน X ในอุณหภูมิช่วง 55.00-80.00 °C และกำหนดประสิทธิภาพการทำงานของระบบ ( $\eta_{System}$ ) เป็นตัวแปรตามบนแกน Y รวมทั้งทำการเปรียบเทียบผลการจำลอง (Simulation) และการทดสอบ (Testing) ดังแสดงในภาพที่ 8 พบว่า สมการสมรรถนะของระบบผลิตไฟฟ้าจากแบบจำลอง ดังแสดงในสมการที่ 4 มีค่า  $R^2$  เท่ากับ 1.00 และค่า P-value เท่ากับ  $4.83 \times 10^{-23}$  ในขณะที่สมการสมรรถนะของระบบผลิตไฟฟ้าจากผลการทดสอบ ดังแสดงในสมการที่ 5 พบว่าค่า  $R^2$  เท่ากับ 0.9665 และค่า P-value เท่ากับ  $1.21 \times 10^{-29}$  จากการเปรียบเทียบผลการจำลองและผลการทดสอบ พบว่า แนวโน้มของข้อมูลใกล้เคียงกันค่อนข้างมาก แสดงถึงความถูกต้องและความน่าเชื่อถือของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของงานวิจัยที่ได้พัฒนาขึ้น มีประสิทธิผลสำหรับใช้ในการประเมินศักยภาพการนำความร้อนทิ้งกลับคืนมาผลิตไฟฟ้า สำหรับการออกแบบที่มีเงื่อนไขเริ่มต้นเปลี่ยนแปลงไปในอนาคตได้อย่างมีประสิทธิภาพ

$$\eta_{System,Simulation} = 0.1306(T_{CR,i} - T_{CF,i}) - 6.5597 \quad (4)$$

$$\eta_{System,Testing} = 0.1287(T_{CR,i} - T_{CF,i}) - 6.4275 \quad (5)$$



ภาพที่ 8 สมการสมรรถนะระบบผลิตไฟฟ้าวัฏจักรแรงดันอินทรีย์จากแบบจำลองและการทดสอบ

#### 4.5 ผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อม

การประเมินวัฏจักรชีวิตจะทำการประเมินบัญชีรายการอันประกอบไปด้วย วัตถุดิบและการใช้พลังงานตลอดอายุการใช้งาน เพื่อประเมินผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมที่จะเกิดขึ้น พบว่ามีการใช้เหล็ก 2,276 kg ทองแดง 575.30 kg และพลาสติก 246.50 kg ในช่วงการก่อสร้าง น้ำมันดิบปริมาณ 1,784,160 m³ ถ่ายเทความร้อนไปยังน้ำสะอาดในช่วงดำเนินงาน มีการรั่วไหลของสารทำงานและน้ำมันหล่อลื่นประมาณ 1 kg/y และผลิตไฟฟ้าได้ประมาณ 831,600 kWh สำหรับขั้นตอน

การรีไซเคิลสามารถนำเหล็ก 2,276 kg และทองแดง 575.30 kg กลับมาใช้ใหม่ ในขณะที่พลาสติก 246.50 kg ถูกการกำจัดโดยการฝังกลบ

ตารางที่ 2 แสดงการประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อมชั้นกลาง 18 ผลกระทบ พบว่า ขั้นตอนการก่อสร้างมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมสูงสุดคิดเป็น  $2.47\text{E}+05$  kg eq คิดเป็นร้อยละ 69.17 ขั้นตอนการดำเนินการส่งผลกระทบ  $2.07\text{E}+05$  kg eq คิดเป็นร้อยละ 5.80 และการฝังกลบส่งผลกระทบ  $1.35\text{E}+02$  kg eq คิดเป็นร้อยละ 0.04 ผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมชั้นกลางที่มากที่สุด คือ การเกิดความเป็นพิษต่อมนุษย์  $9.06\text{E}+04$  kg 1,4-DB eq และการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ  $2.49\text{E}+04$  kg CO<sub>2</sub> eq ตามลำดับ

การสูญเสียทรัพยากรสิ่งแวดล้อมอย่างมีนัยสำคัญเกิดจาก การเลือกใช้วัสดุ การขนส่ง ระยะไกล และการใช้พลังงาน ซึ่งล้วนส่งผลกระทบอย่างมากต่อวงจรชีวิตของมนุษย์และความยั่งยืนของระบบนิเวศ เมื่อสิ้นสุดอายุการใช้งานของระบบวัสดุต่าง ๆ เช่น เหล็ก ทองแดง และทองเหลือง ที่ใช้ในกระบวนการก่อสร้างจะถูกการรีไซเคิล สามารถลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมประมาณ  $8.93\text{E}+04$  kg eq คิดเป็นร้อยละ 24.99

การวิเคราะห์ผลกระทบชั้นปลาย พบว่า การปล่อยมลพิษตลอดอายุการใช้งานส่งผลกระทบต่อด้านสุขภาพของมนุษย์เท่ากับ  $8.35\text{E}-02$  DALY หรือ  $1.00\text{E}-07$  DALY/kWh ด้านสิ่งแวดล้อมเท่ากับ  $2.27\text{E}-02$  Species-y หรือ  $2.73\text{E}-08$  (Species-y)/kWh และด้านทรัพยากรเท่ากับ  $1.71\text{E}+03$  USD หรือ  $2.06\text{E}-03$  USD/kWh

ระบบผลิตไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้าถ่านหินอินทรีสำหรับการนำความร้อนทิ้งกลับคืน มีการปล่อยมลพิษตลอดอายุการใช้งานรวมเท่ากับ  $1.79\text{E}+05$  kg eq และมีผลกระทบต่อหน่วยการทำงานเท่ากับ  $2.15\text{E}-01$  kg eq/kWh รวมทั้งมีคะแนนเชิงเดี่ยวด้านสิ่งแวดล้อมเท่ากับ 0.00047 Pt ซึ่งมีความน้อยกว่าระบบผลิตไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้าถ่านหินอินทรีจากน้ำพุร้อนของ Chaiyat et al. (2020) ที่มีคะแนนเชิงเดี่ยวเท่ากับ 0.026 Pt โดยงานวิจัยนี้มีการประเมินวัสดุจากการก่อสร้างโรงเรือนร่วมด้วย จึงทำให้มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมสูงมากกว่า

ตารางที่ 2 ผลกระทบสิ่งแวดล้อมชั้นกลาง

| ผลกระทบสิ่งแวดล้อม                                  | มลพิษทั้งหมด |          |          |
|-----------------------------------------------------|--------------|----------|----------|
|                                                     | ตลอดอายุ     | 1 kWh    | Pt       |
| การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ (kg CO <sub>2</sub> eq) | 2.49E+04     | 3.00E-02 | 4.60E-07 |
| การลดลงของชั้นโอโซน (kg CFC-11 eq)                  | 8.92E-04     | 1.07E-09 | 2.54E-08 |
| การเกิดภาวะหมอกควัน (kg PM <sub>10</sub> eq)        | 8.64E+01     | 1.04E-04 | 7.65E-06 |
| การเกิดภาวะฝนกรด (kg SO <sub>2</sub> eq)            | 2.62E+02     | 3.15E-04 | 2.68E-04 |
| การเจริญเติบโตผิดปกติของพืชในแหล่งน้ำจืด (kg P eq)  | 3.81E+01     | 4.58E-05 | 5.92E-07 |
| การเจริญเติบโตผิดปกติของพืชในแหล่งน้ำทะเล (kg N eq) | 8.62E+00     | 1.04E-05 | 1.14E-04 |
| การเกิดความเป็นพิษต่อมนุษย์ (kg 1,4-DB eq)          | 9.06E+04     | 1.09E-01 | 3.71E-07 |
| การเกิดภาวะที่เป็นพิษต่อที่ดิน (kg 1,4-DB eq)       | 1.20E+01     | 1.44E-05 | 2.29E-07 |
| การเกิดภาวะที่เป็นพิษต่อแหล่งน้ำจืด (kg 1,4-DB eq)  | 1.94E+04     | 2.34E-02 | 7.90E-08 |
| การเกิดภาวะที่เป็นพิษต่อแหล่งน้ำทะเล (kg 1,4-DB eq) | 1.72E+04     | 2.07E-02 | 2.63E-05 |
| การลดลงของแร่ธาตุ (kg Fe eq)                        | 1.94E+04     | 2.34E-02 | 5.23E-09 |
| การลดลงของเชื้อเพลิงฟอสซิล (kg oil eq)              | 1.86E+03     | 2.24E-03 | 1.04E-06 |
| การเกิดปฏิกิริยาเคมีแสงในชั้นโอโซน (kg NMVOC)       | 6.87E+01     | 8.27E-05 | 2.27E-08 |

ตารางที่ 2 ผลกระทบสิ่งแวดล้อมชั้นกลาง (ต่อ)

| ผลกระทบสิ่งแวดล้อม                                        | มลพิษทั้งหมด |          |          |
|-----------------------------------------------------------|--------------|----------|----------|
|                                                           | ตลอดอายุ     | 1 kWh    | Pt       |
| การเกิดรังสีชนิดก่อกัมมันตรังสี (kBq U <sub>235</sub> eq) | 1.16E+03     | 1.39E-03 | 5.14E-08 |
| การลดลงของที่ดินทางการเกษตร (m <sup>2</sup> a)            | 1.12E+03     | 1.35E-03 | 6.48E-11 |
| การลดลงของที่ดินเพื่ออยู่อาศัย (m <sup>2</sup> a)         | 4.49E+02     | 5.40E-04 | 7.61E-07 |
| การลดลงของที่ดินธรรมชาติ (m <sup>2</sup> )                | 2.60E+00     | 3.13E-06 | 4.85E-05 |
| การลดลงของทรัพยากรทางน้ำ (m <sup>3</sup> )                | 2.00E+03     | 2.40E-03 | 1.50E-07 |
| ทั้งหมด                                                   | 1.79E+05     | 2.15E-01 | 0.00047  |

#### 4.6 ผลด้านเศรษฐศาสตร์

ผลการวิเคราะห์ด้านเศรษฐศาสตร์ ดังแสดงรายละเอียดในตารางที่ 3 พบว่า ต้นทุนเกิดจากระบบผลิตไฟฟ้าวัฏจักรแรงดันอินทรีย์ 1,000,000 Baht อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อซ้อนท่อ 50,000 Baht และระบบท่อน้ำร้อน 50,000 Baht ส่งผลให้มีมูลค่าการลงทุนทั้งหมด 1,100,000 บาท มีค่าใช้จ่ายในการผลิตไฟฟ้าต่อปี 30,000 Baht/y โดยระบบผลิตไฟฟ้าทำงาน 24 h/d และ 350 d/y สามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าสุทธิต่อปี 41,580 kWh/y ทำให้มีต้นทุนในการผลิตพลังงาน (ไฟฟ้า) ต่อหน่วย 2.26 Baht/kWh ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับระบบผลิตพลังงานร่วม Chaiyat et al. (2020) ที่มีค่าต้นทุนในการผลิตพลังงานต่อหน่วย 2.18 Baht/kWh

ตารางที่ 3 การวิเคราะห์ด้านเศรษฐศาสตร์ของการผลิตไฟฟ้าจากความร้อนทิ้งของหลุมเจาะน้ำมัน

| รายละเอียด                                                                                         | ปริมาณ    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 1. พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้สุทธิ ( $W_{System,net}$ , kWh)                                           | 4.95      |
| 2. พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้สุทธิต่อปี ( $W_{System,net\ TOP}$ , kWh/y)                               | 41,580    |
| 3. มูลค่าเงินลงทุนระบบผลิตไฟฟ้าวัฏจักรแรงดันอินทรีย์ ( $Inv_{ORC}$ , Baht/y)                       | 1,000,000 |
| 4. มูลค่าเงินลงทุนอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อซ้อนท่อ ( $Inv_{DHX}$ , Baht/y)                   | 50,000    |
| 5. มูลค่าเงินลงทุนระบบท่อน้ำร้อน คิดที่ 5% ของราคาวัฏจักรแรงดันอินทรีย์ ( $Inv_{Piping}$ , Baht/y) | 50,000    |
| 6. มูลค่าเงินลงทุนทั้งหมด ( $Inv$ , Baht)                                                          | 1,100,000 |
| 7. ค่าใช้จ่ายในการผลิตพลังงานต่อปี คิดที่ 3% ของราคาวัฏจักรแรงดันอินทรีย์ ( $PEC$ , Baht/y)        | 30,000    |
| 8. ต้นทุนพลังงานต่อหน่วย ( $LEC$ , Baht/kWh)                                                       | 2.26      |

การวิเคราะห์ความอ่อนไหว (Sensitivity analysis) พบว่า ราคาของต้นทุนเกิดจากระบบผลิตไฟฟ้าวัฏจักรแรงดันอินทรีย์ (ORC) และค่าใช้จ่ายในการผลิตพลังงานต่อปี (PEC) มีผลต่อค่าต้นทุนพลังงานต่อหน่วยค่อนข้างสูง ในขณะที่มูลค่าเงินลงทุนระบบท่อน้ำร้อน (Piping) และมูลค่าเงินลงทุนอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อซ้อนท่อ (DHX) มีผลต่อค่าต้นทุนพลังงานต่อหน่วยค่อนข้างน้อย ดังแสดงผลการวิเคราะห์ในตารางที่ 4

**ตารางที่ 4** การวิเคราะห์ความอ่อนไหวของการผลิตไฟฟ้าจากความร้อนทิ้งของหลุมเจ้าน้ำมัน

| ORC    | 1,000,000 | 1,100,000 | 1,200,000 | 1,300,000 | 1,400,000 | 1,500,000 |
|--------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| LEC    | 2.260     | 2.478     | 2.697     | 2.916     | 3.135     | 3.353     |
| Piping | 3%        | 4%        | 5%        | 6%        | 7%        | 8%        |
| LEC    | 2.231     | 2.245     | 2.260     | 2.274     | 2.288     | 2.303     |
| DHX    | 15,000    | 30,000    | 50,000    | 70,000    | 85,000    | 100,000   |
| LEC    | 2.209     | 2.231     | 2.260     | 2.288     | 2.310     | 2.332     |
| PEC    | 3%        | 4%        | 5%        | 6%        | 7%        | 8%        |
| LEC    | 2.260     | 2.484     | 2.709     | 2.933     | 3.158     | 3.382     |

## 5. สรุปผลและการอภิปรายผล

ต้นแบบระบบผลิตไฟฟ้าวัฏจักรแรงดันอินทรีย์ขนาด 10 kW<sub>e</sub> สำหรับการนำความร้อนทิ้งกลับคืนของหลุมเจ้าน้ำมันดิบ มีผลการทดสอบด้านพลังงาน พบว่า ความร้อนทิ้งจากของไหลร้อนจากหลุมเจ้าน้ำมันดิบ 154.84 kW ที่อุณหภูมิ 84.00 - 101.50 °C สามารถผลิตไฟฟ้าสุทธิ 4.95 kW<sub>e</sub> ที่ประสิทธิภาพของระบบร้อยละ 3.20 ผลด้านสิ่งแวดล้อม พบว่า ผลการประเมินวัฏจักรชีวิตชั้นกลางที่มากที่สุด คือ การเกิดความเป็นพิษต่อมนุษย์ 9.06E+04 kg 1,4-DB eq และการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ 2.49E+04 kg CO<sub>2</sub> eq ค่าผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมชั้นปลายมีผลกระทบด้านสุขภาพของมนุษย์เท่ากับ 8.35E-02 DALY ด้านสิ่งแวดล้อมเท่ากับ 2.27E-02 Species-y และด้านทรัพยากรเท่ากับ 1.71E+03 USD ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมเกิดจากการใช้ทองแดงและเหล็กในขั้นตอนการก่อสร้างเป็นหลัก สำหรับผลคะแนนเชิงเดียวของการประเมินวัฏจักรชีวิตเท่ากับ 0.00047 Pt ผลด้านเศรษฐศาสตร์ พบว่า ต้นทุนพลังงานต่อหน่วยอยู่ที่ 2.26 Baht/kWh โดยมีมูลค่าเงินลงทุนทั้งหมด 1,100,000 Baht และต้นทุนการผลิตพลังงานต่อปี 30,000 Baht/y

สำหรับแนวทางการวิจัยในอนาคต ควรทำการเลือกแหล่งความร้อนจากหลุมเจ้าน้ำมันดิบที่มีอุณหภูมิมากกว่า 100 °C ในการติดตั้งต้นแบบระบบผลิตไฟฟ้าวัฏจักรแรงดันอินทรีย์สำหรับความร้อนทิ้งกลับคืนของหลุมเจ้าน้ำมันดิบ

## 6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ที่ให้ทุนโครงการผลิตและพัฒนาบัณฑิตพลังงานทดแทนในกลุ่มประเทศอาเซียน สำหรับบัณฑิตศึกษา ประจำปีการศึกษา 2566

## 7. เอกสารอ้างอิง

- AmSpec (Thailand) Limited. (2022). *Test Report Number AmSL-505-22-3389*.
- Chaiyat, N., Chaongew, S., Ondokmai, P., & Makarkard, P. (2020). Levelized energy and exergy costings per life cycle assessment of a combined cooling, heating, power and tourism system of the San Kamphaeng hot spring, Thailand. *Renewable Energy*, 146, 828-842. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.07.028>.

- Díaz-Secades, L. A., González, R., Rivera, N., Quevedo, J. R., & Montañés, E. (2024). Parametric study of organic Rankine working fluids via Bayesian optimization of a preference learning ranking for a waste heat recovery system applied to a case study marine engine. *Ocean Engineering*, 306, 118124. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.118124>.
- Djemaa, A., Merabet, A., Rebhi, R., Lorenzini, G., Bessaih, R., & Menni, Y. (2022). Simulations and optimizations for a low-temperature hybrid geothermal-solar power plant. *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences*, 90(2), 109-123. <https://doi.org/10.37934/arfmts.90.2.109123>.
- McKinsey's sustainability practice. (2023, n.d.). *Waste not: Unlocking the potential of waste heat recovery*. [www.mckinsey.com/capabilities/sustainability/our-insights/waste-not-unlocking-the-potential-of-waste-heat-recovery](http://www.mckinsey.com/capabilities/sustainability/our-insights/waste-not-unlocking-the-potential-of-waste-heat-recovery).
- Meteorological department. (2023, n.d.). *The air temperature of Kampaeng Phet province*. [www.aws-observation.tmd.go.th](http://www.aws-observation.tmd.go.th).
- Ministry of Energy. (2025, n.d.). *Government energy policy*. [www.energy.go.th/th/government-energy-policy/30252](http://www.energy.go.th/th/government-energy-policy/30252).
- Ravindran, R. V., Cotter, D., Wilson, C., Huang, M. J., & Hewitt, N. J. (2024). Experimental investigation of a small-scale reversible high-temperature heat pump – organic Rankine cycle system for industrial waste heat recovery. *Applied Thermal Engineering*, 257, 124237-124237. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2024.124237>.
- Rijpkema, J., Erlandsson, O., Andersson, S. B., & Munch, K. (2022). Exhaust waste heat recovery from a heavy-duty truck engine: Experiments and simulations. *Energy*, 238, 121698. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.121698>.
- The World Bank Group. (2024, August 30). *Real interest rate and Inflation rate*. <https://data.worldbank.org/indicator/FR.INR.RINR?locations=TH>.
- Zhar, R., Allouhi, A., Jamil, A., & Lahrech, K. (2021). A comparative study and sensitivity analysis of different ORC configurations for waste heat recovery. *Case Studies in Thermal Engineering*, 28, 101608. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2021.101608>.
- Zheng, Z., Cao, J., Wu, W., & Leung, M. K. H. (2022). Parallel and in-series arrangements of zeotropic dual-pressure Organic Rankine Cycle (ORC) for low-grade waste heat recovery. *Energy Reports*, 8, 2630-2645. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.01.057>.