

<http://journal.rmutp.ac.th/>

การศึกษาสมรรถนะของโรงไฟฟ้าไทรแลทเทอร์รัล ซับคริติคัล โออาร์ซี และซูเปอร์คริติคัล โออาร์ซี โดยใช้แหล่งความร้อนใต้พิภพ เป็นแหล่งพลังงาน

อนุกุล โมงปราณีต* และ อาทิตย์ คุณศรีสุข

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
111 ถ.มหาวิทยาลัย ต.สุรนารี อ.เมือง นครราชสีมา 30000

รับบทความ 5 กรกฎาคม 2562 แก้ไขบทความ 12 พฤษภาคม 2563 ตอรับบทความ 18 พฤษภาคม 2563

บทคัดย่อ

การศึกษานี้ได้จำลองกระบวนการทำงานของโรงไฟฟ้าที่แตกต่างกัน 3 แบบ คือ ไทรแลทเทอร์รัล (TLC) โออาร์ซี ต่ำกว่าจุดวิกฤต (Subcritical Organic Rankine Cycle, ORC) และ โออาร์ซี สูงกว่าจุดวิกฤต (Supercritical ORC) โดยใช้แหล่งความร้อนใต้พิภพเป็นแหล่งพลังงาน มีอัตราการไหล 1 กิโลกรัมต่อวินาที และมีอุณหภูมิเท่ากับ 100, 110 และ 120 องศาเซลเซียส โดยใช้สารทำงานในการจำลองทั้งหมด 27 สารทำงาน พบว่า โรงไฟฟ้า Subcritical ORC ให้งานสุทธิสูงสุดเท่ากับ 4.78 และ 7.74 กิโลวัตต์ จากสารทำงาน RC318 ที่แหล่งความร้อนอุณหภูมิ 100 และ 110 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ในขณะที่สาร R227ea ให้งานสุทธิสูงสุดเท่ากับ 11.85 กิโลวัตต์ ที่แหล่งความร้อนอุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส งานสุทธิสูงสุดของโรงไฟฟ้า Supercritical ORC เท่ากับ 5.64 และ 9.16 กิโลวัตต์ จากสารทำงาน R218 ที่แหล่งความร้อนอุณหภูมิ 100 และ 110 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ในขณะเดียวกัน ที่แหล่งความร้อนอุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส ได้งานสุทธิเท่ากับ 12.88 กิโลวัตต์ จากสารทำงาน R143a นอกจากนี้ งานสุทธิสูงสุดที่ได้จากโรงไฟฟ้า TLC จากการใช้สารทำงานเอเพน มีค่าเท่ากับ 7.96, 12.27 และ 17.38 กิโลวัตต์ ที่แหล่งความร้อนอุณหภูมิ 100, 110 และ 120 องศาเซลเซียส ตามลำดับ

คำสำคัญ : โรงไฟฟ้าโออาร์ซี; ความร้อนใต้พิภพ; ซับคริติคัล; ซูเปอร์คริติคัล; ไทรแลทเทอร์รัล

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทร: +668 5996 9714, ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์: mongpraneet38@gmail.com

<http://journal.rmutp.ac.th/>

Performance Investigate of Trilateral, Subcritical and Supercritical Organic Rankine Cycle Driven by Geothermal Heat Source

Anugul Mongpraneet* and Atit Koonsrisuk

School of Mechanical Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology
111 University Road, Muang, Nakhon Ratchasima 30000

Received 5 July 2019; Revised 12 May 2020; Accepted 18 May 2020

Abstract

This study investigates three different types of power plant include a trilateral cycle (TLC), subcritical organic Rankine cycle (ORC), and supercritical ORC power plant driven by geothermal heat source with mass flow rate 1 kg/s and temperature of 100°C, 110°C and 120°C. with 27 substances were examined as the working fluid of the power plant. While the net power output of 4.78 kW and 7.74 kW is obtained from the subcritical ORC with RC318 as its working fluid when the heat source temperature are at 100°C and 110°C, respectively. Meanwhile, the net power output of 11.85 kW is obtained from the subcritical ORC with R227ea as its working fluid when the heat source temperature is at 120°C. The net power output of 5.64 kW and 9.16 kW are obtained from the supercritical ORC with R218 as its working fluid when the heat source temperature are at 100°C and 110°C, respectively. Meanwhile, the net power output of 12.88 kW is obtained from the supercritical ORC with R143a as its working fluid when the heat source temperature is at 120°C. Furthermore, the net power output of 7.96 kW, 12.27 kW, and 17.38 kW are obtained from the TLC plant with heptane as its working fluid when the heat source temperature are at 100°C, 110°C, and 120°C, respectively.

Keywords : Organic Rankine Cycle; Geothermal; Subcritical; Supercritical; Trilateral

* Corresponding Author. Tel.: +668 5996 9714, E-mail Address: mongpraneet38@gmail.com

1. บทนำ

สถานการณ์ความต้องการของพลังงานของโลกในปัจจุบันมีความต้องการมากขึ้น รวมทั้งการคำนึงถึงผลกระทบต่อสภาพแวดล้อมของโลกและต้นทุนของราคาพลังงาน โดยเฉพาะอย่างยิ่งพลังงานที่เป็นเชื้อเพลิงฟอสซิล ผลกระทบของการใช้เชื้อเพลิงดังกล่าวจึงมีการกระตุ้นให้มีการค้นคว้าเทคโนโลยีที่สามารถใช้พลังงานทางเลือกเป็นแหล่งพลังงาน แทนการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิล หนึ่งในเทคโนโลยีที่น่าสนใจ และเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมคือ Organic Rankine Cycle (ORC) ที่สามารถใช้แหล่งความร้อนที่มีอุณหภูมิต่ำมาใช้ผลิตไฟฟ้าได้ เช่น ความร้อนใต้พิภพ แสงแดด เชื้อเพลิงชีวมวล และ ความร้อนเหลือทิ้ง เป็นต้น [1], [2] อีกทั้งเป็นเทคโนโลยีที่มีการใช้งานจริงและมีจำหน่ายในต่างประเทศ เช่น ประเทศสหรัฐอเมริกา มีบริษัท Ormat, Pratt & Whitney ในประเทศอิตาลี มีบริษัท Turboden, Exergy เป็นต้น นอกจากนี้ยังมีนักวิจัยจำนวนมากที่ได้ศึกษาวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีโรงไฟฟ้า ORC ที่ใช้แหล่งความร้อนใต้พิภพเป็นแหล่งพลังงาน Z. Guzovic et al. [3], [4] ได้พิจารณาหาความเป็นไปได้ในการใช้พลังงานความร้อนใต้พิภพในประเทศโครเอเชียเพื่อนำมาใช้ในการผลิตไฟฟ้า จากการศึกษา ได้มีการเสนอโรงไฟฟ้า ORC และ Kalina Cycle เปรียบเทียบสมรรถนะ ของโรงไฟฟ้าทั้งสองแบบพบว่า โรงไฟฟ้า ORC กับโรงไฟฟ้า Kalina Cycle มีประสิทธิภาพตามกฎข้อที่หนึ่งของเทอร์โมไดนามิกส์ เท่ากับร้อยละ 13.5 และ 12.8 มีกำลังงานสุทธิ 2,225.5 และ 2,101.4 กิโลวัตต์ ตามลำดับ และโรงไฟฟ้า ORC กับโรงไฟฟ้า Kalina Cycle มีประสิทธิภาพตามกฎข้อที่หนึ่งของเทอร์โมไดนามิกส์มากกว่า โรงไฟฟ้า Kalina Cycle เท่ากับร้อยละ 14.1 และ 10.6 มีประสิทธิภาพตามกฎข้อที่สอง เท่ากับร้อยละ 52 และ 44 กำลังงานสุทธิ 5,270 และ 3,949 กิโลวัตต์ ตามลำดับ M. Yari. [5], [6] ได้ศึกษาทั้งสมรรถนะตามกฎข้อที่ 1 และ 2 ทางเทอร์โมไดนามิกส์ของ

โรงไฟฟ้า ORC โดยใช้แหล่งความร้อนใต้พิภพเป็นแหล่งพลังงานและใช้สารทำงานประเภทแห้ง (Dry Fluid) ผลที่ได้พบว่าสารทำงาน R123 จะให้ประสิทธิภาพสูง

นอกจากนี้มีการศึกษาเปรียบเทียบโรงไฟฟ้า ORC ที่มีกระบวนการในระบบต่างกันที่เรียกว่า Subcritical ORC, Transcritical หรือ Supercritical ORC และ Trilateral K. Braimakis et al. [7] ได้ศึกษาการจำลองระบบ Subcritical ORC กับ Supercritical ORC โดยใช้ความร้อนทิ้งที่มีอุณหภูมิ 150–300 องศาเซลเซียส เป็นแหล่งพลังงาน และเปรียบเทียบการใช้สารทำงานที่เป็นแบบผสมและไม่ผสม จากผลการศึกษาพบว่า การใช้สารของผสมช่วยให้สมรรถนะของระบบเพิ่มขึ้น ทั้งใน Subcritical ORC และ Supercritical ORC เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพตามกฎข้อที่สองของเทอร์โมไดนามิกส์พบว่า สารผสมให้ประสิทธิภาพสูงกว่าสารที่ไม่ผสม และการใช้สารผสมระหว่าง Pentane กับ Propane ในระบบ Supercritical ORC ให้ประสิทธิภาพตามกฎข้อที่สองสูงเกินกว่า ร้อยละ 60 C. Vetter et al. [8] ได้ศึกษาการจำลองเปรียบเทียบระบบ Subcritical ORC กับ Supercritical ORC โดยใช้แหล่งความร้อนใต้พิภพเป็นแหล่งพลังงาน ซึ่งมีอุณหภูมิประมาณ 150 องศาเซลเซียส เพื่อหาทางสุทธิและประสิทธิภาพสูงสุด โดยใช้สารทำงาน Propane และ CO₂ เปรียบเทียบกับโรงไฟฟ้าที่ใช้สารทำงาน Isopentane จากผลการศึกษาพบว่า สารทำงาน Propane ที่ใช้ในระบบ Supercritical ORC ให้สมรรถนะงานสุทธิสูงสุดเท่ากับ 36.8 กิโลจูลต่อกิโลกรัม และมีประสิทธิภาพทางความร้อนเท่ากับ ร้อยละ 10.1 ซึ่งได้งานสูงกว่าระบบ Subcritical ORC ที่ใช้สารทำงาน Isopentane ประมาณร้อยละ 30 ในขณะที่ระบบ Supercritical ORC ที่ใช้สารทำงาน CO₂ ให้สมรรถนะงานสุทธิสูงสุดเท่ากับ 25.6 กิโลจูลต่อกิโลกรัม และมีประสิทธิภาพทางความร้อนเท่ากับ ร้อยละ 8 นอกจากนี้ยังมีการเปรียบเทียบ ระบบ ORC กับ Trilateral

D. Tiwari et al. [9] ได้ศึกษาระบบการวิเคราะห์ทางด้าน Energy และ Exergy ของโรงไฟฟ้า ORC และมีการเปรียบเทียบกับระบบ Trilateral ซึ่งใช้สารทำงานทั้งหมด 5 ชนิดได้แก่ R1234yf, R134a, R245fa, Ethanol และ Isopentane โดยใช้สารทำงาน R1234yf เป็นสารทำงานหลัก ซึ่งเป็นสารที่ N. Yamada et al. [10] ได้ทำการศึกษาแล้วพบว่าให้สมรรถนะสูงเมื่อใช้แหล่งความร้อนที่มีอุณหภูมิต่ำและปานกลาง D. Tiwari et al. [9] จึงใช้ R1234yf เปรียบเทียบกับสารข้างต้น จากผลการศึกษาพบว่า ประสิทธิภาพ Exergetic ของสารทำงาน R1234yf เท่ากับร้อยละ 9 ใกล้เคียงกับสาร R134a ซึ่งมีค่าเท่ากับร้อยละ 10 ในระบบ ORC และเมื่อจำลองในระบบ trilateral พบว่า ประสิทธิภาพ Exergetic ของสารทำงาน R1234yf เท่ากับร้อยละ 40

สำหรับประเทศไทยมีแหล่งความร้อนใต้พิภพเป็นจำนวนมากโดยเฉพาะทางภาคเหนือ ซึ่งมีการขุดเจาะสำรวจแหล่งความร้อนใต้พิภพเพื่อนำมาใช้ผลิตไฟฟ้าซึ่งมีอุณหภูมิความร้อนในช่วง 100–120 องศาเซลเซียส [11] ในงานวิจัยนี้จึงพิจารณาใช้ช่วงอุณหภูมิดังกล่าวในการจำลองโรงไฟฟ้าทั้ง 3 ประเภท ประกอบด้วย Subcritical ORC, Supercritical ORC และ TLC เพื่อเปรียบเทียบงานสุทธิสูงสุดของแต่ละระบบที่จะผลิตได้ พร้อมทั้งค่าสมรรถนะอื่นๆ และศึกษาสารทำงานที่จะให้งานสุทธิสูงสุดในช่วงแหล่งความร้อนดังกล่าว

2. รายละเอียดของระบบที่ทำการศึกษา

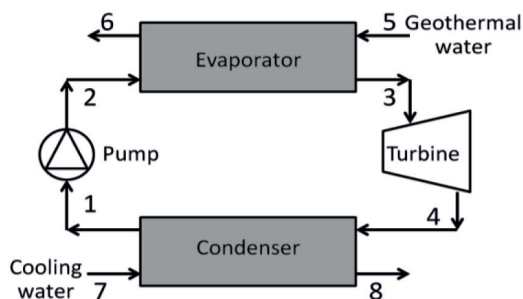
ในการศึกษานี้จำลองระบบทั้งหมด 3 แบบ ได้แก่ Subcritical ORC, Supercritical ORC และ TLC และใช้แหล่งความร้อนใต้พิภพเป็นแหล่งพลังงานซึ่งอยู่ในรูปของน้ำร้อน ในระบบมีส่วนประกอบดังแสดงในรูปที่ 1 ของโรงไฟฟ้าทั้ง 3 แบบ ประกอบไปด้วยอุปกรณ์หลัก 4 ส่วนคือ Pump Evaporator Condenser และ Turbine ในแต่ละระบบมีกระบวนการทำงานดังแสดงในรูปที่ 2

1-2 กระบวนการเพิ่มความดันและสูบน้ำสารทำงานเข้าไปยังเครื่องระเหยโดยปั๊ม (Pump)

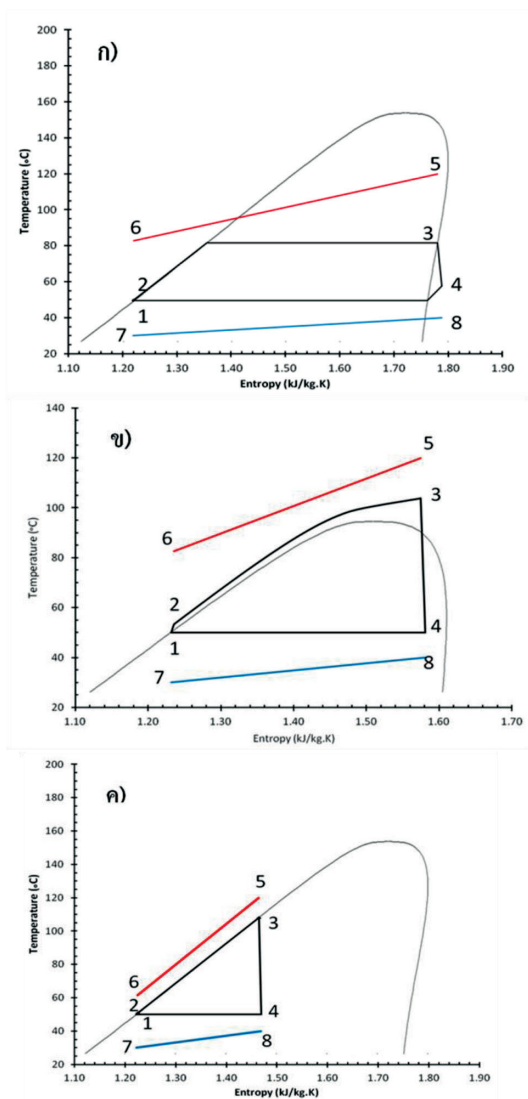
2-3 กระบวนการให้ความร้อนกับสารทำงานในเครื่องระเหย (Evaporator) โดยน้ำร้อน

3-4 กระบวนการสารทำงานขยายตัวในกังหัน (Turbine) จะทำงาน

4-1 กระบวนการดูดซับความร้อนสารทำงานให้เกิดการกลั่นตัวในเครื่องควบแน่น (Condenser) โดยน้ำหล่อเย็น



รูปที่ 1 ส่วนประกอบของ Subcritical ORC, Supercritical ORC และ TLC



รูปที่ 2 แผนภาพ อุณหภูมิ-เอนโทรปี

ก) Subcritical ORC

ข) Supercritical ORC และ ค) TLC

3. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ในการศึกษานี้ได้มีการจำลองระบบ ORC 3 แบบได้แก่ Subcritical ORC, Supercritical ORC และ TLC ซึ่งมีกระบวนการในวัฏจักรดังแสดงในรูปที่ 1 - 2 ตามลำดับ และมีสมการที่ใช้ในการคำนวณค่าต่าง ๆ ดังนี้

เมื่อพิจารณาพลังงานความร้อนในเครื่องระเหย และเครื่องควบแน่นของแหล่งความร้อนและแหล่งที่ ความร้อน สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 1 และ 2 ของโรงไฟฟ้าทั้ง 3 แบบ

$$\dot{Q}_{hs} = \dot{m}_{hf} C_{p_{hf}} (T_5 - T_6) \quad (1)$$

$$\dot{Q}_{cf} = \dot{m}_{cf} C_{p_{cf}} (T_8 - T_7) \quad (2)$$

โดยที่

$\dot{Q}$ = พลังงานความร้อน (วัตต์)

$\dot{m}$ = อัตราการไหล (กิโลกรัมต่อวินาที)

C_p = ความร้อนจำเพาะ (กิโลจูลต่อกิโลกรัม องศาเซลเซียส)

T = อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)

hf = น้ำร้อน (Hot Water)

cf = น้ำหล่อเย็น (Cooling Water Fluid)

สำหรับพลังงานความร้อนที่สารทำงานได้รับ สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3 และ 4

$$\dot{Q}_{evap} = \dot{m}_{wf} (h_3 - h_2) \quad (3)$$

$$\dot{Q}_{cond} = \dot{m}_{wf} (h_4 - h_1) \quad (4)$$

โดยที่

h = เอนทาลปี (กิโลจูลต่อกิโลกรัม)

$evap$ = เครื่องระเหย (Evaporator)

$cond$ = เครื่องควบแน่น (Condenser)

wf = สารทำงาน (Working Fluid)

พลังงานที่ให้แก่ปั๊ม และงานที่ได้จาก กังหัน ของ โรงไฟฟ้าทั้ง 3 แบบ สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 7 และ 8

$$\eta_{i,pump} = (h_{2s} - h_1) / (h_2 - h_1) \quad (5)$$

$$\eta_{i,turb} = (h_3 - h_4) / (h_3 - h_{4s}) \quad (6)$$

$$\dot{W}_{pump} = \dot{m}_{wf}(h_2 - h_1) \quad (7)$$

$$\dot{W}_{turb} = \dot{m}_{wf}(h_3 - h_4) \quad (8)$$

โดยที่

$\eta_{i,pump}$ = ประสิทธิภาพไอเซนโทรปิกของปั๊ม

$\eta_{i,turb}$ = ประสิทธิภาพไอเซนโทรปิกของกังหัน

$\dot{W}_{pump}$ = งานของปั๊ม (วัตต์)

$\dot{W}_{turb}$ = งานของกังหัน (วัตต์)

งานสุทธิที่ระบบจะผลิตได้ สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 9 และประสิทธิภาพทางความร้อนคำนวณได้จากสมการที่ 10

$$\dot{W}_{net} = \dot{W}_{turb} - \dot{W}_{pump} \quad (9)$$

$$\eta_{th} = \dot{W}_{net} / \dot{Q}_{in} \quad (10)$$

โดยที่

$\dot{W}_{net}$ = งานสุทธิ (วัตต์)

η_{th} = ประสิทธิภาพทางความร้อน

อัตราส่วนการไหลเชิงปริมาตร (VFR) คำนวณได้จากสมการที่ 13

$$\dot{V}_3 = \dot{m}_{wf} \times 10^3 / \rho_3 \quad (11)$$

$$\dot{V}_4 = \dot{m}_{wf} \times 10^3 / \rho_4 \quad (12)$$

$$VFR = \dot{V}_4 / \dot{V}_3 \quad (13)$$

โดยที่

$\dot{V}_3$ = อัตราการไหลเชิงปริมาตร (ลิตรต่อวินาที)

$\dot{V}_4$ = ความหนาแน่น (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)

VFR = อัตราส่วนการไหลเชิงปริมาตร

ขนาดของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนสามารถคำนวณได้จากสมการ 14

$$\dot{Q} = UA\Delta T_{LM} \quad (14)$$

$$\Delta T_{LM} = \frac{(T_{hot,in} - T_{cold,out}) - (T_{hot,out} - T_{cold,in})}{\log((T_{hot,in} - T_{cold,out}) / (T_{hot,out} - T_{cold,in}))} \quad (15)$$

โดยที่

U = สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม (วัตต์ต่อตารางเมตรองศาเซลเซียส)

A = พื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อน (ตารางเมตร)

ΔT_{LM} = ความแตกต่างอุณหภูมิเฉลี่ยแบบล็อก (องศาเซลเซียส)

ในการศึกษานี้ได้ใช้ตัวแปร UA เป็นตัวแทนขนาดอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน และ VFR เป็นตัวแทนขนาดของกังหัน (Turbine)

4. การเลือกสารทำงาน

ในการเลือกสารทำงาน จะพิจารณาจากอุณหภูมิวิกฤตของสารทำงาน อุณหภูมิของแหล่งความร้อน และกระบวนการของโรงไฟฟ้าที่ได้ทำการศึกษา ซึ่งแบ่งเป็น 3 ระบบได้แก่ Subcritical ORC, Supercritical ORC และ TLC แต่ละระบบจะมีกระบวนการภายในแตกต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 2 สำหรับการเลือกสารทำงานที่ใช้จำลองในระบบ Subcritical ORC จะพิจารณาเลือกสารทำงานที่มีอุณหภูมิวิกฤตสูงกว่าแหล่งความร้อน และต่ำกว่าแหล่งความร้อนประมาณ 15 องศาเซลเซียส นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยที่ได้ศึกษาการเลือกสารทำงานเพื่อให้ได้งานสุทธิสูงสุด โดยการจำลองสารทำงานหลายชนิด เช่น C. He et al. [12] ศึกษาสารทำงานที่ใช้สำหรับ Subcritical ORC ซึ่งมีแหล่งความร้อนที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส โดยเลือกสารทำงานกว่า 20 ชนิดมาจำลองและเปรียบเทียบผลพบว่า สารทำงานที่มีอุณหภูมิวิกฤตใกล้เคียงกับอุณหภูมิแหล่งความร้อนโดยส่วนใหญ่จะให้งานสุทธิสูง ซึ่งในงานวิจัยที่นำเสนอนี้ ได้เลือกสารทำงานที่มีอุณหภูมิวิกฤตใกล้กับอุณหภูมิแหล่งความร้อนด้วย

เช่น R134a, R227ea ไกล่แหล่งความร้อน 100 องศาเซลเซียส R12, R1234ze ไกล่แหล่งความร้อน 115 องศาเซลเซียส R124 ไกล่แหล่งความร้อน 120 องศาเซลเซียส และสารทำงานอื่นๆ ดังแสดงในตารางที่ 1

ในส่วนของการเลือกสารทำงานที่ใช้กับระบบ Supercritical ORC จะเลือกสารทำงานที่มีอุณหภูมิวิกฤตต่ำกว่าอุณหภูมิแหล่งความร้อนเพื่อให้มั่นใจว่าอุณหภูมิและความดันของสารทำงานที่ออกจากเครื่องระเหย ณ จุดที่ 3 ในรูปที่ 2 ข) จะสูงกว่าอุณหภูมิวิกฤตของสารทำงาน นอกจากนี้ยังมีผลการศึกษาของ J. Haervig et al. [13] ได้ศึกษาสารทำงานที่ใช้ในระบบพบว่าสารทำงานที่ให้งานสุทธิสูงจะต้องมีอุณหภูมิวิกฤตน้อยกว่าอุณหภูมิของแหล่งความร้อนในช่วง 30–50 องศาเซลเซียส สารทำงานที่ใช้สำหรับการศึกษานี้ได้เลือกสารทำงานที่มีอุณหภูมิทั้งในช่วงและนอกช่วงอุณหภูมิดังกล่าว

นอกจากนี้สารทำงานที่เลือกใช้ในระบบ TLC ได้พิจารณาเลือกสารทำงานที่มีอุณหภูมิวิกฤตสูงกว่าอุณหภูมิแหล่งความร้อนเพื่อหลีกเลี่ยงโอกาสที่จะเกิดกระบวนการที่เป็น Supercritical ORC ซึ่งสารทำงานที่เลือกใช้ของทั้ง 3 ระบบแสดงในตารางที่ 1 ทั้งนี้สารทำงานที่เลือกใช้จำลองในการศึกษานี้ไม่ได้พิจารณาถึงความเป็นอันตรายและความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม หากแต่พิจารณาถึงสมรรถนะของระบบที่ได้จากการจำลองจากสารแต่ละชนิด

5. การตรวจสอบความถูกต้อง

ในการศึกษานี้เป็นการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อหางานสุทธิสูงสุดและค่าสมรรถนะของโรงไฟฟ้า ดังนั้นเพื่อให้แบบจำลองที่สร้างขึ้นมีความน่าเชื่อถือจึงมีการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง โดยใช้ข้อมูลและผลการจำลองของโรงไฟฟ้า ORC ของ J. Fischer [14] ซึ่งได้ทำการจำลอง ORC ที่เป็น Subcritical ORC และ Supercritical ORC และ TLC โดยใช้สารทำงานในระบบ คือ Cyclopentane

ตารางที่ 1 สารทำงานที่ใช้ในการจำลอง

	Substance	P _{critical} (kPa)	T _{critical} (°C)	Type
subcritical ORC	R1216	3149.5	85.75	Dry
	R1234yf	3382.2	94.7	Isentropic
	R22	4990	96.15	Wet
	Propane	4251.2	96.74	Isentropic
	R134a	4059.3	101.06	Wet
	R227ea	2925	101.75	Dry
	R1234ze	3634.9	109.36	Isentropic
	R12	4136.1	111.97	Isentropic
	R152a	4516.8	113.26	Wet
	RC318	2777.5	115.23	Dry
	R124	3624.3	122.28	Isentropic
	R236fa	3200	124.92	Dry
	RE245cb2	2886.4	133.66	Dry
	Isobutane	3629	134.66	Dry
supercritical ORC	R142b	4055	137.11	Isentropic
	R236ea	3420	139.29	Dry
	R114	3257	145.68	Isentropic
	R245fa	3651	154.01	Dry
	R125	3617.7	66.18	Isentropic
	R218	2640	71.87	Isentropic
	R143a	3761	72.71	Wet
	R32	5782	78	Wet
	R1216	3149.5	85.78	Dry
	R1234yf	3382.2	95	Isentropic
trilateral cycle (TLC)	R1234ze	3634.9	109.36	Isentropic
	R236fa	3200	124.92	Dry
	R245fa	3651	154.01	Dry
	Isopentane	3378	187.2	Dry
	R141b	4212	204.35	Isentropic
	Cyclopentane	4571.2	238.12	Dry
	Heptane	2736	266.98	Dry

สำหรับระบบ Subcritical และ Supercritical ORC ส่วน TLC ใช้สารทำงานเป็นน้ำ ได้ผลดังตารางที่ 2 จะเห็นว่าโรงไฟฟ้าที่มีค่าความคลาดเคลื่อนมากที่สุดคือ Subcritical ORC มีค่า Volume Flow Rate (V_3) คลาดเคลื่อนร้อยละ 4.19 ซึ่งเกิดจากการใช้โปรแกรมคำนวณคุณสมบัติของสารทำงานต่างกัน จึงทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนดังกล่าว ทั้งนี้ความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นมีค่าไม่เกินร้อยละ 5 ซึ่งสามารถยอมรับได้ จึงนำแบบจำลองที่สร้างขึ้นไปใช้งานต่อเพื่อจำลองเปรียบเทียบสมรรถนะของโรงไฟฟ้าทั้งสามแบบ ดังที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น

6. หลักการและวิธีการวิจัย

ในการศึกษานี้ได้พิจารณาแหล่งความร้อนคือ ความร้อนใต้พิภพ ที่อยู่ในรูปของน้ำร้อน โดยแหล่งความร้อนจะใช้อุณหภูมิ 100, 110 และ 120 องศาเซลเซียส มีอัตราการไหล 1 กิโลกรัมต่อวินาที และข้อมูลที่จำเป็นในการจำลองของโรงไฟฟ้าทั้ง 3 แบบ แสดงในตารางที่ 3

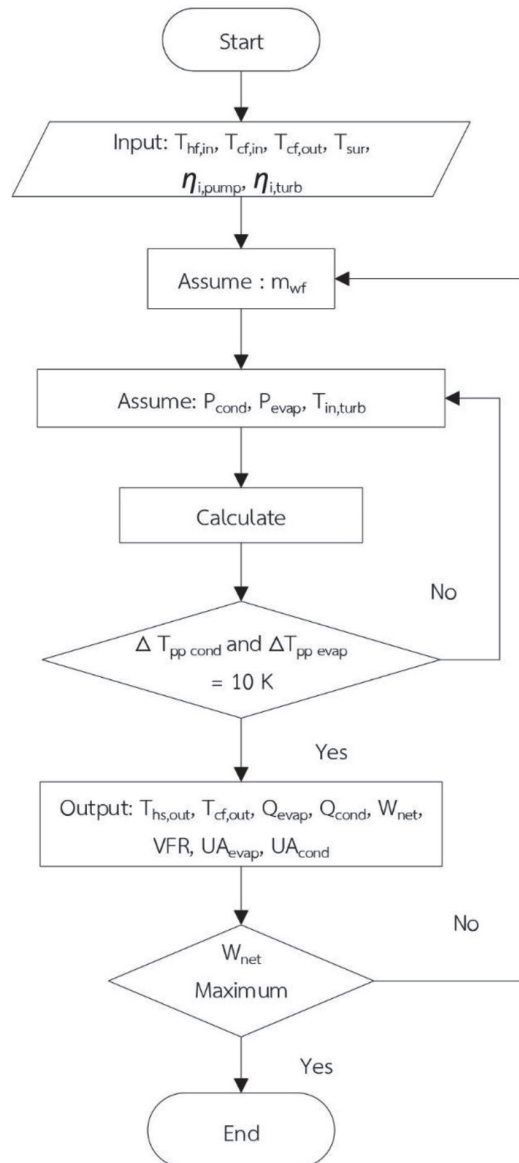
ในการจำลองได้ใช้โปรแกรม MATLAB และใช้ระเบียบวิธีการ Golden Section Search Method เพื่อหาค่างานสุทธิสูงสุดในระบบ ORC และ TLC ทั้ง 3 แบบ ร่วมกับโปรแกรม NIST REFPROP เพื่อคำนวณหาคุณสมบัติของสารทำงานที่จำเป็นต่อการคำนวณค่าสมรรถนะของระบบ ซึ่งกระบวนการจำลองแสดงในรูปที่ 3

ตารางที่ 2 ผลการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองเปรียบเทียบกับผลจำลองของ J. Fischer [14]

Parameters	Subcritical ORC			Supercritical ORC			TLC		
	J. Fischer [14]	present study	% difference	J. Fischer [14]	present study	% difference	J. Fischer [14]	present study	% difference
T_1 (K)	358.15	358.35	0.06	358.15	358.35	0.06	358.15	358.15	0.00
T_{2s} (K)	380.27	379.98	0.08	384.29	386.64	0.61	-	-	-
T_3 (K)	489.00	489.19	0.04	529.00	529.00	0.00	590	589.99	0.00
T_4 (K)	396.41	396.03	0.10	401.00	404.04	0.76	358.15	358.15	0.00
T_{4s} (K)	370.63	370.75	0.03	372.88	372.35	0.14	-	-	-
V_3 (l/s)	121.00	115.93	4.19	51.00	51.33	0.65	7	7	0.00
V_4 (l/s)	1937.00	1967.10	1.55	1778.00	1799.60	1.21	4993	4993.4	0.01
T_6 (K)	408.70	407.12	0.39	394.29	394.35	0.02	370.53	370.47	0.02
T_8 (K)	348.15	349.03	0.25	348.94	348.94	0.00	348.15	348.15	0.00
η_{th}	0.1727	0.1709	1.04	0.1863	0.1864	0.05	0.1979	0.1979	0.00
ξ	0.8895	0.8725	1.91	0.844	0.8432	0.09	0.8732	0.8733	0.01
ξ_p	0.3316	0.3237	2.38	0.3782	0.3782	0.00	0.4435	0.4435	0.00

ตารางที่ 3 เงื่อนไขควบคุมสำหรับค่าในการจำลอง

Parameter	Symbol	Value
Hot water inlet temperature (°C)	T_5	100-120
Hot water mass flow rate (kg/s)	$\dot{m}_{hf}$	1
Hot water pressure (kPa)	P_5	300
Cooling water inlet temperature (°C)	T_7	30
Cooling water outlet temperature (°C)	T_8	$T_7 + 10$
Cooling water pressure (kPa)	P_7	300
Pinch point temperature difference (K)	ΔT_{pp}	10
Isentropic efficiency of pump	$\eta_{i,pump}$	0.65
Isentropic efficiency of turbine	$\eta_{i,turb}$	0.85



รูปที่ 3 แผนผังกระบวนการคำนวณคณิตศาสตร์

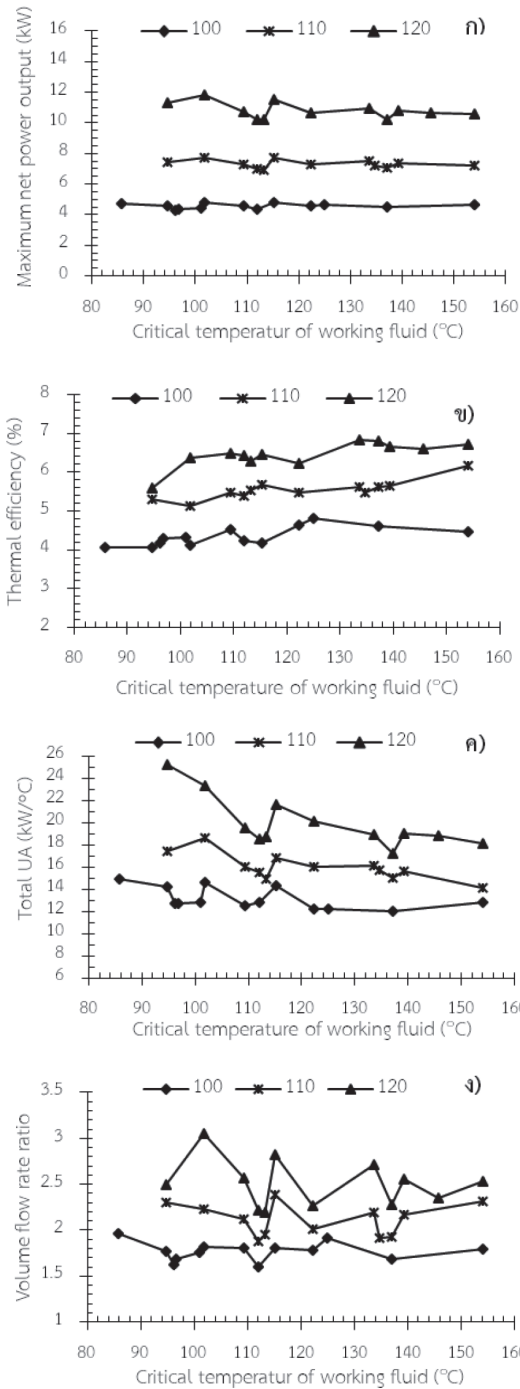
7. ผลการศึกษาและอภิปรายผล

7.1 ผลการจำลอง Subcritical ORC

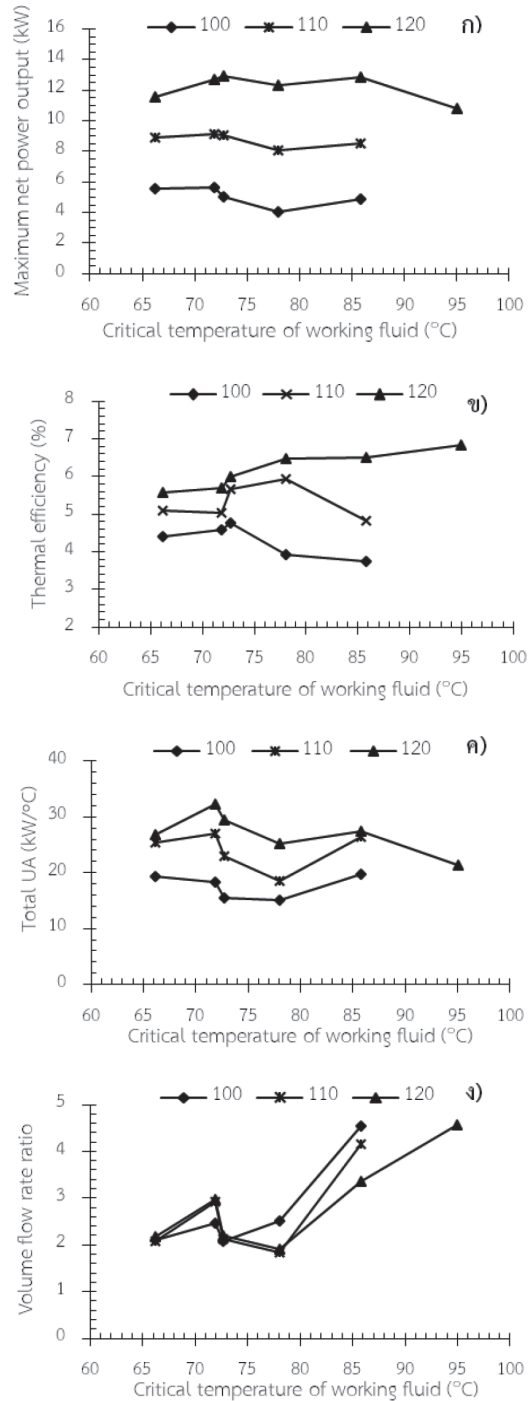
จากการจำลองของระบบ Subcritical ORC ซึ่งได้พิจารณาเลือกสารทำงานที่มีอุณหภูมิวิกฤตใกล้เคียงและไม่ใกล้เคียงกับอุณหภูมิแหล่งความร้อนซึ่งมีอุณหภูมิในช่วง 85–154 องศาเซลเซียส มี 18 สารทำงาน ดังแสดงในตารางที่ 1 จากผลการจำลองพบว่า อุณหภูมิวิกฤตของสารทำงานมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของงานสุทธิน้อย พิจารณาผลได้จากรูปที่ 4 ก) โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่แหล่งความร้อนอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ค่างานสุทธิสูงสุดของแต่ละสารทำงาน ค่อนข้างคงที่ และจะเห็นได้ว่า เมื่อแหล่งความร้อนมีอุณหภูมิสูงขึ้นการเปลี่ยนแปลงของงานสุทธิจะเห็นได้ชัดเจนขึ้น ซึ่งพบว่า สารทำงานที่ให้งานสูงสุดที่แหล่งความร้อนอุณหภูมิ 100–110 องศาเซลเซียส คือ RC318 และที่ 120 องศาเซลเซียส คือ R227ea งานสุทธิสูงสุดที่ได้คือ 4.78, 7.74 และ 11.85 กิโลวัตต์ตามลำดับ ทั้งนี้ค่าเฉลี่ยงานสุทธิของแต่ละอุณหภูมิแหล่งความร้อนมีค่าเท่ากับ 4.56, 7.32 และ 10.81 กิโลวัตต์ ตามลำดับ

นอกจากนี้ยังพบว่าสารทำงานที่มีอุณหภูมิวิกฤตสูงประสิทธิภาพทางความร้อนจะสูงตาม และยังพบว่า สารทำงานที่ให้งานสุทธิสูง จะส่งผลให้ค่า UA ในรูปที่ 4 ค) สูงตาม ส่วนค่า VFR ในรูปที่ 4 ง) ค่ามีการกระจาย

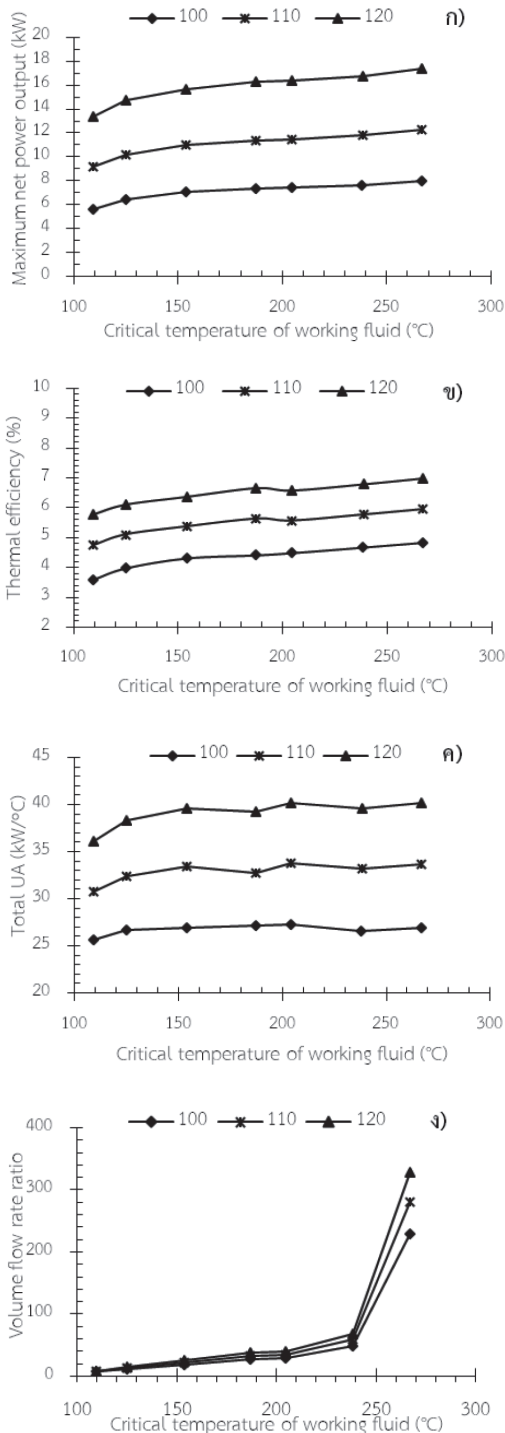
ไม่มีแนวโน้ม ซึ่งหากพิจารณา ที่แหล่งความร้อนอุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เนื่องจากเห็นได้ชัด จะเห็นว่าสารทำงานที่มี Critical Temperature 101.75 องศาเซลเซียส (R227ea), 115.23 องศาเซลเซียส (RC318), 139.29 องศาเซลเซียส (R236ea), 133.66 องศาเซลเซียส (RE245cb2) และ 154.01 องศาเซลเซียส (R245fa) ซึ่งล้วนเป็นสารทำงานประเภท Dry Fluid (จากตารางที่ 1) จะมีค่า VFR สูง เมื่อสารทำงานที่ออกจากเครื่องกังหัน สารทำงานจะยังมีสถานะเป็นไอร้อนยิ่งยวด (Superheated Vapor) ความหนาแน่นสารทำงานจะมีค่าน้อย จึงทำให้ปริมาตรจำเพาะ (Specific Volume) มีค่ามาก ส่งผลให้เมื่อนำไปพิจารณาตามสมการที่ (13) ทำให้อัตราส่วนการไหลเชิงปริมาตร (VFR) มีค่าสูงตาม ในขณะที่เดียวกัน จุดที่มี VFR น้อย เช่น ที่อุณหภูมิวิกฤตของสารทำงานเท่ากับ 111.97 องศาเซลเซียส (R12), 113.26 องศาเซลเซียส (R152a), 122.28 องศาเซลเซียส (R124), 137.11 องศาเซลเซียส (R142b), 145.68 องศาเซลเซียส (R114), ซึ่งเป็นสารทำงานประเภท Wet และ Isentropic Fluid ซึ่งสารทำงาน 2 ประเภทนี้ เมื่อสารทำงานออกจากกังหัน มีโอกาสที่จะเกิดการกลั่นตัว หรือเป็นของผสมระหว่างไอกับของเหลว ทำให้มีความหนาแน่นสารทำงานสูงกว่า สารที่มีสถานะไอร้อนยิ่งยวด จึงส่งผลให้ VFR มีค่าน้อยกว่าสารทำงานประเภท Dry Fluid



รูปที่ 4 สมรรถนะของ subcritical ORC
เทียบกับอุณหภูมิวิกฤตการทำงาน ก) net power
ข) efficiency ค) total UA และ ง) VFR



รูปที่ 5 สมรรถนะของ supercritical ORC
เทียบกับอุณหภูมิวิกฤตการทำงาน ก) net power
ข) efficiency ค) total UA และ ง) VFR



รูปที่ 6 สมรรถนะของ TLC เทียบกับอุณหภูมิวิกฤติ
 สารทำงาน ก) net power ข) efficiency
 ค) total UA และ ง) VFR

ทั้งนี้ จะเห็นว่า จุดที่มีอุณหภูมิวิกฤติสูงสุด 154.01 องศาเซลเซียส คือสาร R245fa มีค่างานสุทธิใกล้เคียงกับค่าเฉลี่ยเท่ากับ 4.62, 7.21 และ 10.58 กิโลวัตต์ ที่แหล่งความร้อนอุณหภูมิ 100, 110 และ 120 องศาเซลเซียส ตามลำดับ อีกทั้งประสิทธิภาพสูงเมื่อเทียบกับสารอื่นๆ ดังแสดงในรูปที่ 4 ข) และที่น่าสนใจคือค่า UA และ VFR ไม่สูงเมื่อเทียบกับสารอื่น ซึ่งเป็นสารทำงานที่น่าสนใจ

7.2 ผลการจำลอง Supercritical ORC

สารทำงานที่ใช้ในการจำลองมี 6 ชนิดมีอุณหภูมิวิกฤติของสารอยู่ในช่วง 66–95 องศาเซลเซียส จากผลการศึกษาแสดงในรูปที่ 5 ก) พบว่าสารทำงาน ที่ให้งานสุทธิสูงสุด คือ R218 มีอุณหภูมิวิกฤติเท่ากับ 71.87 องศาเซลเซียส ที่แหล่งความร้อนอุณหภูมิ 100–110 องศาเซลเซียส ผลิตงานสุทธิได้สูงสุดเท่ากับ 5.64 และ 9.16 กิโลวัตต์ ตามลำดับ ส่วนที่แหล่งความร้อน 120 องศาเซลเซียส คือ R143a มีอุณหภูมิวิกฤติเท่ากับ 72.7 องศาเซลเซียส ได้งานสุทธิสูงสุดเท่ากับ 12.88 กิโลวัตต์ ที่แหล่งความร้อน 100, 110 และ 120 องศาเซลเซียส มีค่างานสุทธิเฉลี่ยเท่ากับ 5.03 8.74 และ 12.32 กิโลวัตต์ ตามลำดับ และพบว่างานสุทธิจะมีค่าสูงเมื่ออุณหภูมิวิกฤติของสารทำงานต่ำกว่าอุณหภูมิของแหล่งความร้อนในช่วง 30–50 องศาเซลเซียส เมื่อพิจารณาที่แหล่งความร้อนอุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส จะพบว่าที่อุณหภูมิวิกฤติสารทำงาน 66.18 องศาเซลเซียส (R125) และ 95 องศาเซลเซียส (R1234yf) ซึ่งต่ำกว่าอุณหภูมิแหล่งความร้อน 53.82 และ 25 องศาเซลเซียส ตามลำดับ จะพบว่า งานสุทธิที่ได้จะมีค่าน้อยเมื่อเทียบกับสารทำงานอื่น และในรูป 5 ข) พบว่าสารทำงานที่ให้งานสุทธิสูงส่วนใหญ่จะมีประสิทธิภาพสูง นอกจากนี้ค่า UA และ VFR ที่แสดงในรูปที่ 5 ค) และ 5 ง) อุณหภูมิวิกฤติเท่ากับ 78 องศาเซลเซียส คือ R32 เป็นสารทำงานที่น่าสนใจ เนื่องจาก มีค่า UA และ VFR ต่ำอาจจะทำให้ต้นทุนหรือราคาอุปกรณ์ต่ำเมื่อใช้กับแหล่ง

ความร้อน 110 องศาเซลเซียส ขึ้นไป แต่ให้ผลลัพธ์ไม่ดี ทั้งในส่วนของการสูญเสียและประสิทธิภาพ เมื่อใช้ที่แหล่งความร้อนอุณหภูมิต่ำกว่า 110 องศาเซลเซียส

7.3 ผลการจำลอง Trilateral Cycle (TLC)

จากผลการจำลองในระบบ TLC ใช้สารทำงาน 7 ชนิดมีอุณหภูมิในช่วง 109–266 องศาเซลเซียส พบว่า ยิ่งใช้สารทำงานที่มีอุณหภูมิวิกฤตสูงจะทำให้ได้งานสุทธิและประสิทธิภาพเพิ่มสูงขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 6 ก) และ 6 ข) ในการจำลองโรงไฟฟ้า TLC สารที่ให้น้ำงานสุทธิสูงสุดคือ Heptane มีอุณหภูมิวิกฤตเท่ากับ 266.98 องศาเซลเซียส ทั้ง 3 แหล่งอุณหภูมิความร้อน ซึ่งมีค่าเท่ากับ 7.96, 12.27 และ 17.38 กิโลวัตต์ ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่าขนาดค่า UA มีค่าค่อนข้างคงที่ เมื่อใช้สารทำงานที่มีอุณหภูมิวิกฤตสูงกว่า 125 องศาเซลเซียส ของทั้ง 3 แหล่งความร้อน ดังแสดงในรูปที่ 6 ค) จากผลการศึกษาพบว่าสารทำงานที่มีอุณหภูมิวิกฤตตั้งแต่ 125 องศาเซลเซียส ขึ้นไปมีศักยภาพในการลดอุณหภูมิของแหล่งความร้อนได้ใกล้เคียงกัน จึงอาจจะเป็นหนึ่งในเหตุผลที่ทำให้ค่า UA ของสารทำงานแต่ละชนิดมีค่าใกล้เคียงกัน

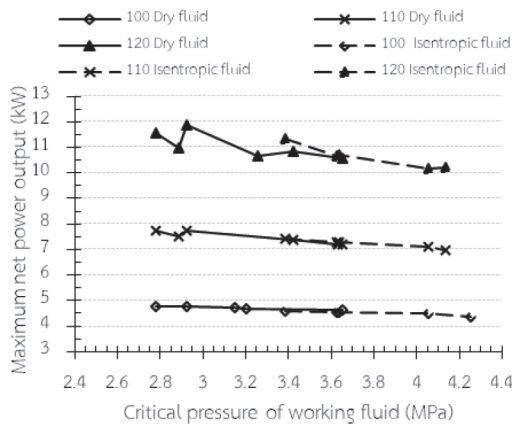
จากผลการศึกษาของตัวแปรที่บ่งบอกถึงขนาดของกังหันคือ VFR พบว่าการใช้สารทำงานจำลองในระบบ TLC ที่แหล่งความร้อน 100, 110 และ 120 องศาเซลเซียส ยิ่งใช้สารทำงานที่มีอุณหภูมิวิกฤตสูงค่า VFR จะเพิ่มสูงขึ้นตามโดยเฉพาะอย่างยิ่ง เมื่อใช้สารทำงานที่มีอุณหภูมิวิกฤตสูงกว่า 200 องศาเซลเซียส จะพบว่ามีค่า VFR เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ดังแสดงในรูปที่ 6 ง) พฤติกรรมดังกล่าวเกิดจากสารทำงานที่นำมาจำลองที่มีอุณหภูมิและความดันวิกฤต 266.98 องศาเซลเซียส 2736 กิโลปาสกาล (Heptane) ซึ่งมีความดันการทำงานที่ทางออกของกังหัน เท่ากับ 18.87 กิโลปาสกาล มีค่าต่ำกว่าความดันบรรยากาศทำให้ค่าปริมาตรจำเพาะของสารทำงานเมื่อออกจากกังหัน จึงมีค่าสูงส่งผลให้ค่า VFR เพิ่มขึ้นอย่างมาก ทั้งนี้เมื่อเปรียบเทียบกับสารที่มีค่า

VFR ต่ำ เช่น R1234ze มีอุณหภูมิและความดันวิกฤต 109.36 องศาเซลเซียส 3634.9 กิโลปาสกาล พบว่ามีความดันที่ทางออกกังหันเท่ากับ 997 กิโลปาสกาล ทำให้มีค่าปริมาตรจำเพาะต่ำกว่าสารทำงาน Heptane ค่า VFR จึงมีค่าน้อยกว่า

การใช้สารทำงาน Heptane นอกจากนี้เมื่อทำการเปรียบเทียบสมรรถนะของแต่ละโรงไฟฟ้าที่ได้ศึกษาจะพบว่า โรงไฟฟ้าที่ให้น้ำงานสุทธิสูงสุด ที่แหล่งความร้อนอุณหภูมิ 100, 110 และ 120 องศาเซลเซียส คือ โรงไฟฟ้า TCL รองลงมาคือ Supercritical ORC และน้อยสุดคือ Subcritical ORC ประสิทธิภาพโดยรวมของ โรงไฟฟ้า Subcritical ORC และ Supercritical ORC มีค่าใกล้เคียงกันเมื่อเทียบที่แหล่งความร้อนอุณหภูมิเท่ากัน ในขณะที่ TLC จะให้ประสิทธิภาพสูงสุด และเมื่อเทียบขนาดของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนหรือค่า UA ของโรงไฟฟ้าแต่ละประเภทพบว่า TLC มีค่ามากที่สุดเมื่อเทียบกับอีกสองโรงไฟฟ้า เนื่องจากกระบวนการภายในของโรงไฟฟ้า TLC จะเกิดปรากฏการณ์หรือพฤติกรรมที่เรียกว่า Thermal Match คือเส้นอุณหภูมิของแหล่งความร้อนอยู่ใกล้กับเส้นอุณหภูมิของสารทำงานตลอดทั้งเส้น ดังแสดงในรูปที่ 2 ค) ทำให้ระบบมีความสามารถในการถ่ายเทความร้อนได้มากขึ้น ซึ่งหมายถึงอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนจะมีขนาดใหญ่ ในขณะที่เดียวกัน Thermal Match เกิดในโรงไฟฟ้า Supercritical ORC ได้น้อยกว่าโรงไฟฟ้า TLC ดังแสดงในรูปที่ 2 ข) และมีค่า UA น้อยกว่าหรืออุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนจะมีขนาดเล็กกว่า TLC และในโรงไฟฟ้า Subcritical ORC จะเกิด Thermal Match น้อยสุดเมื่อเทียบกับ TLC และ Supercritical ORC จึงทำให้ค่า UA ของ Supercritical ORC มีค่าน้อยสุดในจำนวนโรงไฟฟ้าที่ได้ทำการจำลอง

จากที่ได้ทำการศึกษาเปรียบเทียบงานสูงสุดและสมรรถนะของโรงไฟฟ้าแต่ละประเภทที่มีการใช้สารทำงานแต่ละชนิด ในการศึกษาครั้งนี้ยังพบประเด็นเพิ่มเติมของการเลือกสารทำงานที่ใช้ในโรงไฟฟ้า Subcritical

ORC เมื่อใช้แหล่งความร้อนอุณหภูมิ 100, 110 และ 120 องศาเซลเซียส พบว่าสารทำงานประเภท Dry Fluid และ Isentropic Fluid ที่มีความดันวิกฤตของสารต่ำ ส่วนใหญ่จะให้งานสุทธิสูง ดังแสดงในรูปที่ 7 ทั้งนี้ปัจจัยในการเลือกสารทำงานให้ได้งานสุทธิสูงมีหลายปัจจัยสำหรับการใช้ความดันวิกฤตและประเภทของสารทำงานเป็นเพียงปัจจัยหนึ่งที่พบจากการศึกษา ซึ่งยังต้องอาศัยอุณหภูมิวิกฤต และตัวแปรอื่นในการเลือก เพื่อให้ได้สารทำงานที่ให้งานสุทธิสูงและเหมาะสมกับอุณหภูมิของแหล่งความร้อน



รูปที่ 7 กราฟสัมพันธ์งานสุทธิสูงสุดเทียบกับความดันวิกฤตของสารทำงาน

8. สรุปผล

ในการศึกษาครั้งนี้ ได้ศึกษาโรงไฟฟ้า 3 ประเภท ได้แก่ Subcritical ORC, Supercritical ORC และ TLC เพื่อเปรียบเทียบงานสูงสุดและสมรรถนะของโรงไฟฟ้าแต่ละประเภท และมีสารทำงานที่ใช้จำลองในการศึกษานี้ทั้งหมด 27 ชนิด โดยใช้แหล่งความร้อนได้พิภพเป็นแหล่งพลังงาน ที่มีอุณหภูมิ 100, 110 และ 120 องศาเซลเซียส มีอัตราการไหลเท่ากับ 1 กิโลกรัมต่อวินาที จากผลการศึกษสามารถสรุปผลได้ดังนี้

8.1 Subcritical ORC

เมื่อพิจารณาถึงงานสุทธิสูงสุดพบว่าสาร RC318 เป็นสารที่น่าสนใจ ซึ่งในช่วงแหล่งความร้อน 100 และ 110 องศาเซลเซียส ให้งานสุทธิสูงสุดเท่ากับ 4.78 กิโลวัตต์ 7.74 กิโลวัตต์ ตามลำดับ และที่ 120 องศาเซลเซียส สารที่ให้งานสูงสุด คือ R227ea เท่ากับ 11.85 กิโลวัตต์ ทั้งนี้การเลือกสารทำงานที่ใช้เกณฑ์ที่ว่าหากต้องการงานสุทธิสูงให้เลือกสารทำงานที่มีอุณหภูมิวิกฤตของสารใกล้เคียงกับอุณหภูมิของแหล่งความร้อน ซึ่งอาจจะไม่ได้ผลต่อช่วงอุณหภูมิแหล่งความร้อนที่ 100–120 องศาเซลเซียส จากผลที่ได้พบว่าในช่วงอุณหภูมิแหล่งความร้อน 100–120 องศาเซลเซียส ไม่ว่าอุณหภูมิวิกฤตของสารทำงานจะมากหรือน้อย งานสุทธิสูงสุดที่ได้ของแต่ละสารต่างกันไม่มาก โดยเฉพาะที่แหล่งความร้อน 100 องศาเซลเซียส นอกจากนี้สารทำงานที่น่าสนใจสำหรับ Subcritical ORC คือ R245fa เนื่องจากมีงานสุทธิสูง มีขนาดของ UA และ VFR อยู่ในระดับกลาง อีกทั้งมีประสิทธิภาพทางความร้อนสูงสำหรับการใช้งานในช่วงแหล่งความร้อนอุณหภูมิ 100–120 องศาเซลเซียส

8.2 Supercritical ORC

จากหลักการเลือกสารทำงานให้มีอุณหภูมิวิกฤตต่ำกว่าแหล่งความร้อนในช่วง 30–50 องศาเซลเซียส ผลการจำลองที่ได้พบว่า สารทำงานให้งานสุทธิสูงในช่วงสารทำงานที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิของแหล่งความร้อนดังที่กล่าวไว้ข้างต้น ซึ่งสารที่ให้งานสูงสุด คือ R218 มีอุณหภูมิวิกฤต 71.87 องศาเซลเซียส ที่แหล่งความร้อนอุณหภูมิ 100–110 องศาเซลเซียส ผลิตรงานได้สูงสุดเท่ากับ 5.64 และ 9.16 กิโลวัตต์ ตามลำดับ ส่วนแหล่งความร้อนที่ 120 องศาเซลเซียส คือ R143a มีอุณหภูมิวิกฤต 72.7 องศาเซลเซียส ให้งานสูงสุดเท่ากับ 12.88 กิโลวัตต์

8.3 Trilateral Cycle (TLC)

จากผลการจำลองพบว่ายิ่งสารทำงานมีอุณหภูมิวิกฤตสูง งานสุทธิจะสูงขึ้นตาม ซึ่งพบว่าสารทำงาน heptane ให้งานสูงสุดทุกแหล่งความร้อน มีค่าเท่ากับ 7.96, 12.27 และ 17.38 กิโลวัตต์ ตามลำดับ ทั้งนี้หากพิจารณาถึงค่าสมรรถนะอื่นๆ จะพบว่าประสิทธิภาพ และ ค่า UA เพิ่มขึ้นตาม โดยเฉพาะอย่างยิ่ง VFR มีค่าสูงมากอาจจะทำให้กังหันมีขนาดใหญ่มากเมื่อเทียบกับการใช้สารทำงานชนิดอื่น

8.4 การเลือกสารทำงาน สำหรับ Subcritical ORC

จากการจำลองสารทำงานหลายชนิดพบว่า สารทำงานประเภท Dry Fluid และ Isentropic Fluid ที่ใช้แหล่งความร้อนอุณหภูมิ 100–120 องศาเซลเซียส สารที่มีความดันวิกฤตต่ำโดยส่วนใหญ่จะให้งานสุทธิมีค่าสูง นอกจากนี้การเลือกงานสุทธิสูงสุดอาจจะไม่ใช่ทางเลือกที่เหมาะสม หากจะต้องพิจารณาเกี่ยวกับค่าอื่นประกอบเช่น ค่า UA ที่บ่งบอกถึงขนาดของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน และ VFR ที่บอกถึงขนาดของกังหัน ซึ่งจะเกี่ยวข้องกับราคาของอุปกรณ์และงบประมาณในการลงทุน ที่จะต้องพิจารณาถึงความคุ้มค่าและระยะเวลาคืนทุน เป็นสิ่งที่ต้องคำนึงถึง ซึ่งในงานวิจัยถัดไปจะได้นำไปศึกษาต่อ

9. เอกสารอ้างอิง

- [1] K. Rahbar, S. Mahmoud, R.K. Al-Dadah, N. Moazami, and S.A. Mirhadizadeh, "Review of organic Rankine cycle for small-scale applications," *Energy Conversion and Management*, vol. 134, pp. 135–155, 2017.
- [2] S. Quoilin, M.V.D. Broek, S. Declaye, P. Dewallef and V. Lemort, "Techno-economic survey of Organic Rankine Cycle (ORC) systems," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 22, pp. 168–186, 2013.
- [3] Z. Guzovic, B. Majcen and S. Cvetkovic, "Possibilities of electricity generation in the Republic of Croatia from medium-temperature- geothermal sources," *Applied Energy*, vol. 98, pp. 404–414, 2010.
- [4] Z. Guzovic, D. Loncar and N. Ferdelji, "Possibilities of electricity generation in the Republic of Croatia by means of geothermal energy," *Energy*, vol. 35, pp. 3429–3440, 2010.
- [5] M. Yari, "Performance analysis of the different organic Rankine cycles (ORCs) using dry fluids," *International Journal of Exergy*, vol. 6, no. 3, pp. 323–342, 2009.
- [6] M. Yari, "Exergetic analysis of various types geothermal power plants," *Renewable Energy*, vol. 35, no. 1, pp. 112–121, 2010.
- [7] K. Braimakis, M. Preißinger, D. Brüggemann, S. Karellas and K. Panopoulos, "Low grade waste heat recovery with subcritical and supercritical Organic Rankine Cycle based on natural refrigerants and their binary mixtures," *Energy*, vol. 88, pp. 80–92, 2015.
- [8] C. Vetter, H. J. Wiemer and D. Kuhn, "Comparison of sub- and supercritical Organic Rankine Cycles for power generation from low-temperature/low-enthalpy geothermal wells considering specific net power output and efficiency,"

- Applied Thermal Engineering*, vol. 51, no. 1-2, pp. 871-879, 2013.
- [9] D. Tiwari, A. Arora, N. A. Ansari and A. F. Sherwani, "Energy and Exergy Analysis of Organic Rankine Cycle Using Alternative Working Fluids," *IOSR - Journal of Mechanical and Civil Engineering*, vol. 12, no. 1, pp. 85-92, 2015.
- [10] N. Yamada, M. N. Mohamad and T. T. Kien, "Study on thermal efficiency of low to medium temperature organic Rankine cycles using HFO - 1234yf," *Renewable Energy*, vol. 41, pp. 368-375, 2012.
- [11] C. Lertsatitthanakorn, "Development of geothermal energy in Thailand," *KKU Engineering Journal*, Vol. 33 no .6, 577 – 586, Nov – Dec 2006.
- [12] C. He, C. Liu, H. Gao, H. Xie, Y. Li, S. Wu and J. Xu, "The optimal evaporation temperature and working fluids for subcritical organic Rankine cycle," *Energy*, vol. 38, no. 1, pp. 136-143, 2012.
- [13] J. Haervig, K. Sorensen and T.J. Condra, "Guidelines for optimal selection of working fluid for an organic Rankine cycle in relation to waste heat recovery," *Energy*, vol. 96, pp. 592-602, 2016.
- [14] J. Fischer, "Comparison of trilateral cycles and organic Rankine cycles," *Energy*, vol. 36, no. 10, pp. 6208-6219, 2011.