

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

การศึกษาเชิงเปรียบเทียบระหว่างโรงไฟฟ้าไออาร์ซีแบบซับคริติคัล โรงไฟฟ้าไออาร์ซีแบบซูเปอร์คริติคัล และโรงไฟฟ้าแรงดันไอเซลล์ แบบไตรแลทเทอร์รัลสำหรับแหล่งความร้อนที่อุณหภูมิ 210-250 องศาเซลเซียส

ธงชัย เทียมทัต และ อาทิตย์ คุณศรีสุข*

สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
111 ถนนมหาวิทยาลัย ตำบลสุรนารี อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000

รับบทความ 21 มิถุนายน 2562 แก้ไขบทความ 28 เมษายน 2563 ตอรับบทความ 5 พฤษภาคม 2563

บทคัดย่อ

การศึกษาประสิทธิภาพของระบบวัฏจักรไออาร์ซีแบบซับคริติคัล วัฏจักรไออาร์ซีแบบซูเปอร์คริติคัล และวัฏจักรไออาร์ซีแบบไตรแลทเทอร์รัล ของอุณหภูมิแหล่งความร้อนระหว่าง 210–250 องศาเซลเซียส โดยทำการศึกษาและเปรียบเทียบ ด้วยการใช้สารทำงานที่แตกต่างกันออกไป โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป MATLAB และใช้ฐานข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณจาก NIST REFPROP และทำการเปรียบเทียบผลการจำลองกับงานวิจัยอื่นเพื่อทำการเปรียบเทียบ โดยการหาจุดที่ได้งานสูงที่สุดจะทำการจำลองที่กระบวนการ Golden-section search โดยทำการศึกษาผลของงานสุทธิสูงสุดของระบบ ขนาดของอุปกรณ์ ความดันที่ Condenser และ อัตราการขยายตัวของสารทำงานที่ Expander ผลการจำลองพบว่างานสุทธิสูงสุดเท่ากับ 141.72 กิโลวัตต์ จะเป็นการจำลองที่ใช้เป็นวัฏจักรไออาร์ซีแบบซูเปอร์คริติคัล ใช้สารทำงานเป็น R141b โดยมีอุณหภูมิแหล่งความร้อนเท่ากับ 250 องศาเซลเซียส โดยมีประสิทธิภาพเท่ากับร้อยละ 16.25 และเมื่อทำการจำลองวัฏจักรไออาร์ซีแบบซับคริติคัล โดยใช้แหล่งความร้อนเดียวกัน พบว่าเมื่อใช้ Pentane เป็นสารทำงานนั้นจะสามารถให้งานได้สูงสุดที่ 133.40 กิโลวัตต์ และประสิทธิภาพเท่ากับร้อยละ 15.70 นอกจากนี้งานสุทธิสูงสุดได้เท่ากับ 133.82 กิโลวัตต์ ประสิทธิภาพเท่ากับร้อยละ 14.90 ใช้สารทำงานเป็น R141b เป็นจำลองวัฏจักรไออาร์ซีแบบไตรแลทเทอร์รัล จากการจำลอง Off-design การปรับอัตราการไหลสารทำงานที่เหมาะสม สามารถช่วยชดเชยงานสุทธิให้เพิ่มมากขึ้นได้

คำสำคัญ : วัฏจักรไออาร์ซีแบบซับคริติคัล; วัฏจักรไออาร์ซีแบบซูเปอร์คริติคัล; วัฏจักรแรงดันแบบไตรแลทเทอร์รัล; การจำลองเมื่อสภาวะเปลี่ยนแปลง; การเลือกสารทำงาน

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทร: +66 4422 4410, ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์: atit@sut.ac.th

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

Comparative Investigation of a Subcritical ORC, Supercritical ORC, and Trilateral Rankine Cycle Power Plant for a Heat Source Temperature of 210-250°C

Thongchai Taemtat and Atit Koonsrisuk*

Institute of engineering School of mechanical engineering Suranaree university
111 University Rd., Suranari Subdistrict, Mueang Nakhon Ratchasima District, Nakhon Ratchasima
30000 Thailand

Received 21 June 2019; Revised 28 April 2020; Accepted 5 May 2020

Abstract

The performance investigations of subcritical ORC, supercritical ORC, and trilateral Rankine cycle (TLC) power plants with the heat source temperatures of 210-250°C were conducted and compared in this study. Several working fluids were evaluated. A MATLAB code was developed and used in this study. The thermodynamic properties of the working fluids were calculated by using NIST REFPROP program. The justification of the code was validated with a result taken from the literature. The optimal operating conditions were searched using the golden-section technique. The maximum net output power of 141.72 kW was obtained when using the supercritical ORC plant with R141b as its working fluid and the heat source temperature was at 250°C. The corresponding cycle efficiency was 16.25%. When using the subcritical plant at the same heat source temperature, the maximum net output power of 133.40 kW and cycle efficiency of 15.70% are obtained when pentane is used as the working fluid. Furthermore, the net output power of 133.82 kW and cycle efficiency of 14.90% are obtained when using R141b as the working fluid in the TLC power plant. According to the off-design simulations, an appropriate adjustment of the working fluid flow rate can mitigate the variation of the net output power.

Keywords : Subcritical ORC; Supercritical ORC; Trilateral Rankine Cycle; Off-design Simulation; Working Fluid Selection

* Corresponding Author. Tel.: +66 4422 4410, E-mail Address: atit@sut.ac.th

1. บทนำ

โดยทั่วไปการผลิตไฟฟ้าจะผลิตจากการใช้พลังงานฟอสซิล อาทิ น้ำมัน ถ่านหิน และก๊าซธรรมชาติ เป็นพลังงานแหล่งความร้อนที่ใช้ในการผลิตไฟฟ้า [1] ซึ่งในประเทศไทยมีการผลิตไฟฟ้าโดยใช้ถ่านหินมากถึงร้อยละ 19 จากจำนวนการผลิตทั้งหมดในปี พ.ศ. 2556 ซึ่งการทำการผลิตไฟฟ้าโดยใช้ถ่านหินนั้นจะทำให้เกิดมลพิษทางอากาศสูงไม่ว่าจะเป็น Sulfur Dioxide ที่ทำลายชั้นบรรยากาศหรือการเกิดฝนกรด [2] ซึ่งเป็นอันตรายต่อสภาพแวดล้อมและมนุษย์ [3]

ปัจจุบันมีการนำวัฏจักรหนึ่งมาใช้ในการผลิตไฟฟ้าโดยใช้แหล่งความร้อนจากความร้อนทิ้งกลับมาใช้ประโยชน์ (Waste Heat Recovery) เป็นแหล่งความร้อนที่ให้พลังงานในวัฏจักร คือวัฏจักรโออาร์ซี (Organic Rankine Cycle) มักจะใช้สารทำงานที่เป็นสารทำความเย็นที่มีจุดเดือดไม่สูง อาทิ R410a และ R407c เป็นต้น [4] ซึ่งเป็นการผลิตกระแสไฟฟ้าโดยไม่สร้างมลพิษมากนัก [5]

ทั้งนี้ประเทศไทยเป็นประเทศที่มีพลังงานความร้อนทิ้งคิดเป็นร้อยละ 65.3 โดยข้อมูลรายงานพลังงานทดแทนของประเทศไทยปี พ.ศ. 2558 จากพลังงานทิ้งทั้งหมดที่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ โดยเป็นพลังงานจากพลังงานแสงอาทิตย์ ชีวมวล ก๊าซชีวภาพ และขยะ [6] โดยพลังงานดังกล่าวสามารถนำมาใช้เป็นพลังงานทดแทนเพื่อให้พลังงานความร้อนกับวัฏจักรโออาร์ซีเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า

ปัจจุบันได้มีการศึกษาวัฏจักรโออาร์ซีแบบ Supercritical อาทิ ผลการศึกษาของวัฏจักรโออาร์ซี [7] ได้ทำการจำลองโดยใช้พลังงานความร้อนจากแหล่งความร้อนทิ้งที่มาจาก Rankine Cycle ที่ช่วงอุณหภูมิ 350–500 เคลวิน ในการจำลอง ผลที่ได้คือได้รับพลังงานสูงสุดที่ 220 กิโลวัตต์ และการศึกษาของ H. Yağlı et al. [8] ได้ทำการศึกษาวัฏจักรโออาร์ซีแบบ Supercritical ที่ใช้ก๊าซชีวภาพให้เป็นพลังงานความร้อนกับระบบโดยผลที่ได้คือได้พลังงาน

สูงสุดที่ 81.52 กิโลวัตต์ อีกทั้งจากการศึกษาได้ทำการศึกษาวัฏจักรโออาร์ซีแบบ Supercritical โดยใช้แหล่งความร้อนจาก Linear Fresnel Reflector Solar Concentrator เพื่อให้พลังงานความร้อนที่อุณหภูมิระหว่าง 150–350 องศาเซลเซียส กับระบบ โดยผลการศึกษาพบว่าได้พลังงานสูงสุดที่ 190.5 กิโลวัตต์ [9]

นอกจากวัฏจักรโออาร์ซีแบบ Supercritical แล้วยังมีแบบ Subcritical อีกด้วย อาทิ การศึกษาการใช้สารทำงาน R1234ze ที่อุณหภูมิแหล่งความร้อน 100–200 องศาเซลเซียส โดยผลการทดลอง พลังงานไฟฟ้าสูงสุดเท่ากับ 85 กิโลวัตต์ [10] มีการศึกษาการนำความร้อนทิ้งจากการคั่วกาแฟโดยความร้อนทิ้งมีอุณหภูมิเท่ากับ 120 องศาเซลเซียส ผลการศึกษาพบว่าพลังงานที่ได้เท่ากับ 26.6 กิโลวัตต์ โดยใช้สารทำงาน R227ea [11] และการศึกษาการนำความร้อนทิ้งจากเครื่องยนต์มาใช้ในการผลิตไฟฟ้าโดยผลของการศึกษาแสดงว่าสามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้สูงสุดเท่ากับ 2.56 กิโลวัตต์ สำหรับเครื่องยนต์ที่มีกำลังเบรคเท่ากับ 93 กิโลวัตต์ [12]

นอกจากนี้ยังมีอีกแบบที่เรียกว่า Trilateral ORC ซึ่งในการศึกษาของ [13] ได้ทำการจำลองการใช้ Trilateral ORC ที่แหล่งความร้อนเท่ากับ 120 องศาเซลเซียส ได้งานสุทธิสูงสุดเท่ากับ 2.3 เมกกะวัตต์ โดยใช้ Isobutane เป็นสารทำงาน ประสิทธิภาพเชิงความร้อนเท่ากับร้อยละ 8.16

ในสภาพการทำงานจริงนั้นไม่สามารถบังคับให้สภาพแวดล้อม และแหล่งความร้อนคงที่ตามที่ได้ออกแบบไว้ได้ เนื่องจากสภาพแหล่งความร้อน และสภาพแวดล้อมสามารถเปลี่ยนแปลงได้ ซึ่งเป็นผลให้ระบบไม่สามารถทำงานได้ดังเดิม ดังนั้น ระบบควรจะสามารถปรับได้ตามสภาพแหล่งทิ้งความร้อน และแหล่งความร้อนเพื่อรักษาให้งานที่ระบบเท่าเดิม โดยจะเรียกกระบวนการดังกล่าวว่า Off-design โดยการออกแบบดังกล่าวมีการศึกษา เช่น A. Benato et al.

[14] ได้แสดงว่าการเปลี่ยนแปลงของแหล่งความร้อน แปรผันตรงต่อพลังงานที่วัฏจักรสามารถทำได้ โดย ถ้าพลังงานความร้อนของแหล่งความร้อนเพิ่มขึ้น จะทำให้พลังงานที่ได้จากวัฏจักรเพิ่มสูงขึ้น และ การศึกษาของ Y. Cao และ Y. Dai [15] ได้แสดงว่า การที่พลังงานแหล่งความร้อนสูงขึ้นรวมถึงอุณหภูมิ สภาพแวดล้อมสูงขึ้นจะทำให้ได้งานเพิ่มมากขึ้น

จากที่ได้กล่าวมาจะเห็นได้ว่า การนำความร้อน ที่ยังมีอยู่แล้วสามารถนำมาใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้า ได้ ซึ่งเป็นการใช้พลังงานที่มีอยู่อย่างจำกัด ให้เกิดความคุ้มค่า และเพื่อให้เกิดประสิทธิผลสูงสุดต่อการนำไป สร้างระบบจริง จึงทำให้การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อ ศึกษาความเป็นไปได้ของการนำพลังงานความร้อน ที่อุณหภูมิช่วง 210–250 องศาเซลเซียส กลับมาใช้ ในการผลิตกระแสไฟฟ้าเพื่อให้เกิดประโยชน์สูงสุด ของการใช้พลังงานและการปรับแปลงค่าในระบบ วัฏจักรโออาร์ซีและเมื่อเกิดการการแปรผันของความร้อนที่ให้กับระบบและสภาพอากาศเพื่อให้ได้พลังงาน สุทธิใกล้เคียงกับค่าที่ได้ออกแบบไว้

2. ระเบียบวิธีวิจัย

2.1 รายการสัญลักษณ์

\dot{W}	= อัตรางานในระบบ (kW)
Q	= อัตราถ่ายเทความร้อนในระบบ (kW)
h	= ค่า Enthalpy ของสารทำงาน (kJ/kg)
\dot{m}	= อัตราการไหล (kg/s)
T	= อุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$, K)
UA	= อัตราที่บ่งบอกถึงขนาดของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน (kW/K)
C_{min}	= ผลคูณที่น้อยที่สุดของ \dot{m} และ C_p ใน อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน (kW/K)

ΔT_{pp} = ผลต่างของอุณหภูมิที่น้อยที่สุดระหว่างสารทำงานกับแหล่งความร้อน หรือแหล่งที่ทำความร้อน ของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน ($^{\circ}\text{C}$, K)

η_{isen} = ประสิทธิภาพไอเซนโทรปิก

η_{th} = ประสิทธิภาพเชิงความร้อน

hs = แหล่งความร้อน

cf = แหล่งที่ทำความร้อน

wf = สารทำงานของระบบ

cond. = Condenser ของระบบ

evap. = Evaporator ของระบบ

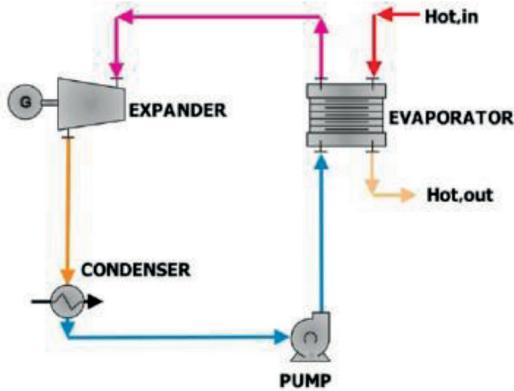
tur. = Turbine หรือ Expander ของระบบ

2.2 การเลือกสารทำงาน

ในการจำลองระบบจะมีการใช้หลักการเลือกสารทำงานที่เหมาะสมกับอุณหภูมิที่ 210, 230 และ 250 องศาเซลเซียส ในการเลือกสารทำงานของวัฏจักรโออาร์ซีแบบ Subcritical โดยหลักการเลือกสารทำงานที่ใช้จะเลือกโดยให้มีอุณหภูมิวิกฤตเท่ากับอุณหภูมิแหล่งความร้อน [16] และโดยหลักการเลือกสารทำงานที่ใช้กับระบบแบบวัฏจักรโออาร์ซีแบบ Supercritical จะเลือกให้สารทำงานมีอุณหภูมิวิกฤตต่ำกว่าอุณหภูมิแหล่งความร้อน 30–50 องศาเซลเซียส ตามการแนะนำของการศึกษาของ J. Hærvig et al. [17] และในส่วนของการศึกษาของ Trilateral ORC ยังไม่มีเกณฑ์ในการเลือกสารทำงาน โดยจะทำการหาเกณฑ์การเลือกสารทำงานจากการจำลอง

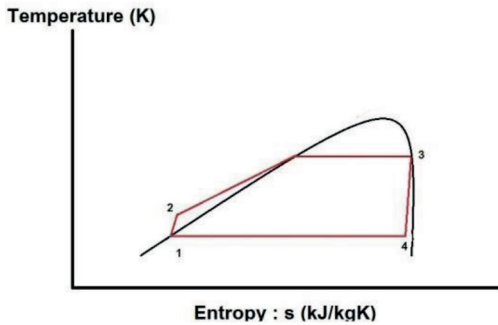
2.3 การจำลองระบบ

การจำลองระบบประกอบไปด้วย 3 ระบบ คือระบบของวัฏจักรโออาร์ซีแบบ Subcritical, Supercritical และ Trilateral โดยอุปกรณ์ทางความร้อนที่ใช้ในวัฏจักรเป็นดังรูปที่ 1

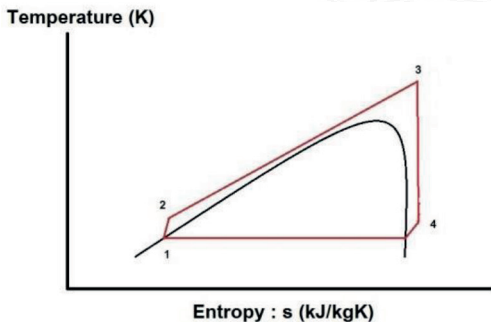


รูปที่ 1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการจำลองวัฏจักรโออาร์ซี Subcritical, Supercritical และ Trilateral [14]

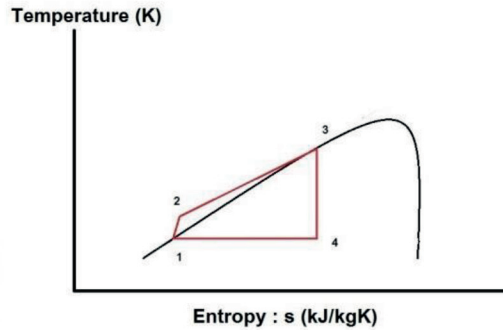
โดยลักษณะของ T-s Diagram ของระบบ Subcritical, Supercritical และ Trilateral เป็นดังรูปที่ 2, 3 และ 4



รูปที่ 2 T-s Diagram การจำลองวัฏจักรโออาร์ซี Subcritical



รูปที่ 3 T-s Diagram การจำลองวัฏจักรโออาร์ซี Supercritical



รูปที่ 4 T-s Diagram การจำลองวัฏจักรโออาร์ซี Trilateral ORC

ระบบวัฏจักรโออาร์ซี T-s Diagram จากรูปที่ 2, 3, 4 และอุปกรณ์ทางความร้อนดังรูปที่ 1

กระบวนการ 1 ถึง 2 เป็นกระบวนการที่ Pump เพิ่มแรงดันให้กับสารทำงาน

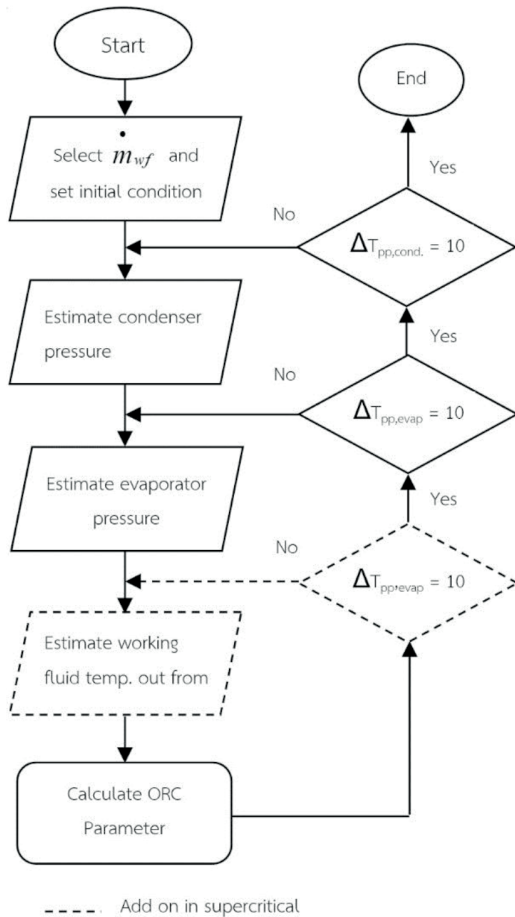
กระบวนการ 2 ถึง 3 เป็นกระบวนการที่สารทำงานได้รับ พลังงานความร้อนจากแหล่งความร้อนที่ Evaporator

กระบวนการ 3 ถึง 4 เป็นกระบวนการที่ Expander ลดความดันและนำงานออกมาจากสารทำงาน

กระบวนการ 4 ถึง 1 เป็นกระบวนการที่สารทำงานนำความร้อนทิ้งที่ Condenser

การจำลองวัฏจักรโออาร์ซีซึ่งจะทำการกำหนดแหล่งความร้อนที่เป็นน้ำมีอุณหภูมิเท่ากับ 210, 230 และ 250 องศาเซลเซียส ที่อัตราการไหลเท่ากับ 1 กิโลกรัมต่อวินาที และให้อุณหภูมิของน้ำหล่อเย็นเท่ากับ 30 องศาเซลเซียส และเมื่อทำการหล่อเย็นแล้วมีอุณหภูมิเท่ากับ 40 องศาเซลเซียส โดยจะทำการหาจุดสูงสุดที่ Pinch Point Temperature, ΔT_{pp} เท่ากับ 10 องศาเซลเซียส, $\eta_{isen, pump} = 0.75$ และ $\eta_{isen, tur} = 0.80$ ดังที่ J. Radulovic และ N. I. B. Castaneda [18] ได้แนะนำ โดยกระบวนการจำลองออกแบบระบบวัฏจักรโออาร์ซีซึ่งจะใช้การพัฒนาโปรแกรม MATLAB ในการจำลอง กระบวนการจำลองแสดงด้วยผังงาน ดังรูปที่ 5

จากรูปที่ 5 จะเป็นการจำลองวัฏจักรโออาร์ซี โดยการจำลองนั้นจะต้องทำการกำหนดค่าขอบเขตของคำตอบไม่ว่าจะเป็นความดันที่ Condenser และ Evaporator รวมถึงอุณหภูมิของสารทำงานที่ออกจาก Evaporator ด้วย แล้วใช้กระบวนการ Golden Section Search Method ในการหาคำตอบแล้วตรวจสอบว่า ΔT_{pp} ของแต่ละอุปกรณ์นั้นมีค่าใกล้เคียง 10 องศาเซลเซียส หรือไม่ ถ้าใกล้แล้วก็คือคำตอบในแต่ละอัตราการไหลของสารทำงานมาเพื่อหาทางสูงสุดที่ได้ในแต่ละสารทำงาน และเป็นอุปกรณ์แลกเปลี่ยนชนิด Counter Flow



รูปที่ 5 ผังงานการจำลอง Design

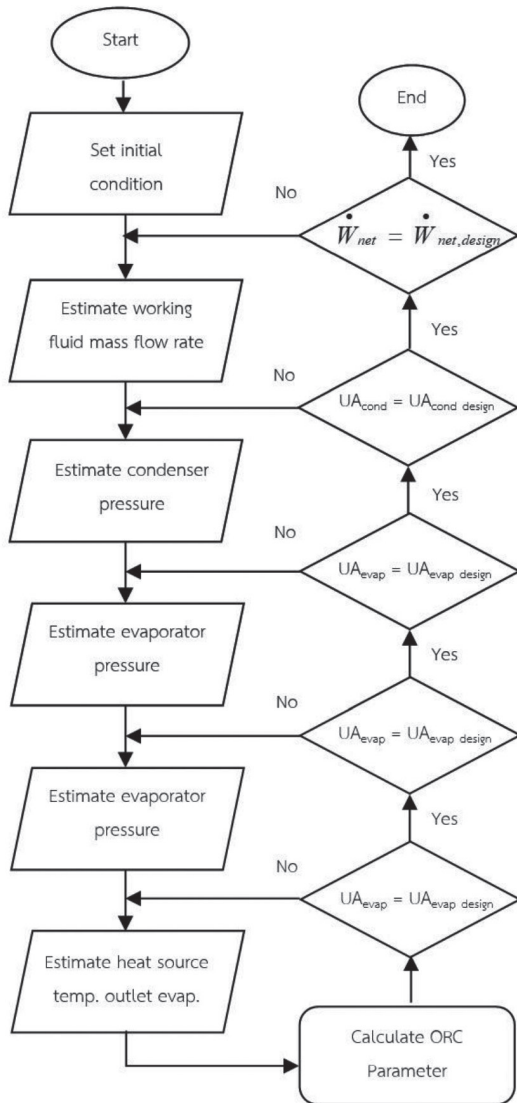
การออกแบบจะเป็นการออกแบบเพื่อนำแหล่งความร้อนที่ 210, 230 และ 250 องศาเซลเซียส ไปใช้ในการผลิตพลังงานโดยทำการกำหนดค่า Pinch Point Temperature ในแต่ละอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนเท่ากับ 10 องศาเซลเซียส และกำหนดให้อุณหภูมิสารหล่อเย็นเพิ่มขึ้นเท่ากับ 10 องศาเซลเซียส หลังจากได้รับความร้อน โดยกำหนดให้แหล่งความร้อนเป็นน้ำที่มีความดันเท่ากับ 10 เมกกะปาสคาล และอัตราการไหลเท่ากับ 1 กิโลกรัมต่อวินาที

2.4 การจำลองระบบ Off-design

กระบวนการทำ Off-design ทำการเลือกสารทำงานที่น่าสนใจจากการใช้งานจริงแล้วทำการจำลองให้สภาพแวดล้อมและอุณหภูมิของแหล่งความร้อนเปลี่ยนแปลงไปที่อุณหภูมิของแหล่งความร้อนเปลี่ยนแปลง ± 5 องศาเซลเซียส และให้อุณหภูมิของน้ำหล่อเย็น ± 3 องศาเซลเซียส โดยให้ค่าที่ได้จากวัฏจักรมีค่าเท่าเดิมจากค่าที่ได้ออกแบบไว้คือ UA ของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน แล้วให้ค่าความดันที่ Condenser, ความดันที่ Evaporator, อุณหภูมิของสารทำงานที่ออกจาก Evaporator, Pinch Point Temperature และค่าอื่นๆปรับเปลี่ยนไป โดยกระบวนการจำลอง Off-design ระบบวัฏจักรโออาร์ซีจะใช้โปรแกรม MATLAB ในการจำลอง กระบวนการจำลองจะเป็นไปดังผังงาน ดังรูปที่ 6

จากรูปที่ 6 จะเป็นการจำลองวัฏจักรโออาร์ซี โดยต้องการให้ใช้ค่าตัวแปรที่ UA ของระบบเหมือนกับที่ทำการออกแบบไว้โดยจะทำการเปลี่ยนแปลงค่าอุณหภูมิของสภาพแวดล้อม เช่น อุณหภูมิแหล่งความร้อน และอุณหภูมิแหล่งทิ้งความร้อนเปลี่ยนแปลงไป โดยให้ระบบทำการปรับตัวเองเพื่อให้ได้งานที่เท่าเดิม โดยเริ่มต้นจะทำการจำลองระบบว่าเมื่อเกิดสภาวะ Off-design จะส่งผลอย่างไรต่อระบบโดยกำหนดค่าเริ่มต้น เช่น ค่า UA ของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน อัตราการไหลของสารทำงาน และสารหล่อเย็น

เป็นต้นแล้วทำการหาค่างานที่ได้จากระบบแล้วศึกษาผลกระทบ ต่อมาจะทำการเปลี่ยนแปลงอัตราการใช้ของระบบเพื่อให้ได้งานเท่ากับค่างานที่ได้ออกแบบ



รูปที่ 6 ผังงานการจำลอง Off-design

2.5 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

สมการทางเทอร์โมไดนามิกส์ที่ใช้ในการจำลองแสดงดังสมการที่ (1)-(10)

2.5.1 สมการที่ใช้ในการจำลอง

ORC cycle

กระบวนการที่เกิดที่ Pump

$$\dot{W}_{in} = \dot{m}_{wf}(h_2 - h_1) \quad (kW) \quad (1)$$

กระบวนการที่เกิดที่ Evaporator

$$\dot{Q}_{in} = \dot{m}_{wf}(h_3 - h_2) \quad (kW) \quad (2)$$

กระบวนการที่เกิดที่ Expander

$$\dot{W}_{out} = \dot{m}_{wf}(h_3 - h_4) \quad (kW) \quad (3)$$

กระบวนการที่เกิดที่ Condenser

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

งานสุทธิของระบบ

$$\dot{W}_{net} = \dot{W}_{out} - \dot{W}_{in} \quad (kW) \quad (5)$$

Heat exchanger UA

Log mean temperature difference method

$$UA = \frac{\dot{Q}}{\Delta T_{lm}} \quad \left(\frac{kW}{K} \right) \quad (6)$$

$$\Delta T_{lm} = \frac{(T_{h,in} - T_{c,out}) - (T_{h,out} - T_{c,in})}{\log \frac{(T_{h,in} - T_{c,out})}{(T_{h,out} - T_{c,in})}} \quad (K) \quad (7)$$

Thermal efficiency

$$\eta_{th} = \frac{\dot{W}_{net}}{\dot{Q}_{in}} \times 100\% \quad (8)$$

Isentropic efficiency

$$\eta_{isen,pump} = \frac{h_2 - h_1}{h_{2s} - h_1} \quad (9)$$

$$\eta_{isen,tur} = \frac{h_3 - h_4}{h_3 - h_{4s}} \quad (10)$$

2.5.2 สารทำงานที่ใช้ในการจำลองของวัฏจักรโออาร์ซี

ค่าของอุณหภูมิและความดันจุดวิกฤตของสารทำงานที่ใช้ในการจำลองระบบวัฏจักรโออาร์ซีแสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 อุณหภูมิและความดันจุดวิกฤตของสารทำงานจากโปรแกรม NIST REFPROP [19]

Name	T _{critical} (°C)	P _{critical} (MPa)
Octane	296.17	2.50
Benzene	288.87	4.91
Cyclohexane	280.45	4.08
Heptane	266.98	2.74
Cyclopentane	238.57	4.57
Isohexane	224.55	3.04
R113	214.06	3.39
R141b	204.35	4.21
Pentane	196.55	3.37
Isopentane	187.20	3.38
R245ca	174.35	3.94
RE245fa2	171.63	3.43
R245fa	154.00	3.65
Isobutane	134.66	3.63

3. ผลการศึกษาและอภิปรายผล

3.1 Validation

จากการจำลองการทำงานของวัฏจักรโออาร์ซี จะทำการจำลองเปรียบเทียบกับงานวิจัยอื่นโดยเปรียบเทียบด้วยวัฏจักรโออาร์ซีที่มีขนาด 1 เมกกะวัตต์ [20] ผลจำลองระบบของ ORC ในส่วนของแบบ Supercritical Subcritical และ Trilateral โดยทำการเปรียบเทียบกับค่าที่นำมาเปรียบเทียบ ได้ผลดังตารางที่ 2, 3 และ 4

ตารางที่ 2 ผลการเปรียบเทียบ Supercritical ORC

Parameter	[20]	Result value	Error (%)
Supercritical ORC			
T ₄ (°C)	127.85	133.61	1.44
T ₆ (°C)	121.14	125.07	1.00
T ₈ (°C)	75.79	75.50	0.08
η _{th} (%)	18.63	18.96	1.77

ตารางที่ 3 ผลการเปรียบเทียบ Subcritical ORC

Parameter	[20]	Result value	Error (%)
Subcritical ORC			
T ₄ (°C)	123.26	122.88	0.10
T ₆ (°C)	135.55	133.97	0.39
T ₈ (°C)	75.2	75.88	0.05
η _{th} (%)	17.27	17.06	1.22

ตารางที่ 4 ผลการเปรียบเทียบ Trilateral ORC

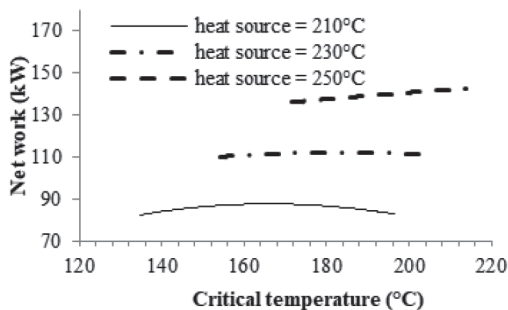
Parameter	[20]	Result value	Error (%)
Trilateral ORC			
T_4 (°C)	85.00	85.00	0.00
T_6 (°C)	97.38	97.32	0.02
T_8 (°C)	75.00	75.00	0.00
η_{th} (%)	19.79	19.79	0.01

จากตารางที่ 2, 3 และ 4 พบว่าการจำลอง Supercritical ORC มีค่าคลาดเคลื่อนสูงที่สุดร้อยละ 1.77 ต่ำสุดที่ร้อยละ 0.08 ในส่วนของ Subcritical ORC มีค่าคลาดเคลื่อนสูงที่สุดร้อยละ 1.22 ต่ำสุดที่ร้อยละ 0.05 และ Trilateral ORC มีค่าคลาดเคลื่อนสูงที่สุดร้อยละ 0.02 ต่ำสุดที่ร้อยละ 0.00

3.2 Design

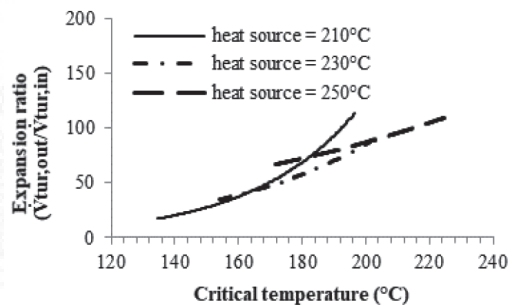
3.2.1 การจำลอง Supercritical ORC

ผลของการจำลอง Supercritical ORC ที่อุณหภูมิเท่ากันได้ผลดังรูปที่ 7, 8 และ 9

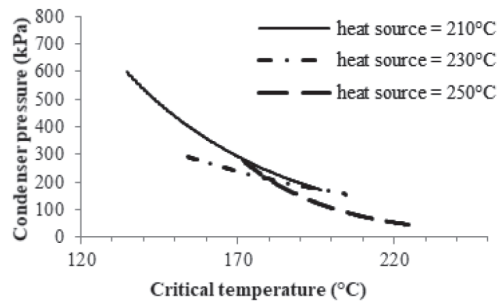


รูปที่ 7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างงานสุทธิและอุณหภูมิวิกฤตของสารทำงาน Supercritical ORC

จากผลการจำลองพบว่าสารทำงานที่มีอุณหภูมิวิกฤตต่ำกว่าแหล่งความร้อนเท่ากับ 40-50 องศาเซลเซียส จะสามารถให้งานสุทธิสูงที่สุดในช่วงอุณหภูมิแหล่งความร้อนระหว่าง 210-250 องศาเซลเซียส และเมื่อทำการเปรียบเทียบกับกรวิจัยของ J. Haervig et al. [17] เห็นได้ว่ามีความใกล้เคียงกันโดยจะได้อยู่ในช่วง 30 องศาเซลเซียส ถึง 50 องศาเซลเซียส ดังรูปที่ 7



รูปที่ 8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการขยายตัวของสารทำงานใน Expander และอุณหภูมิวิกฤตของสารทำงาน Supercritical ORC



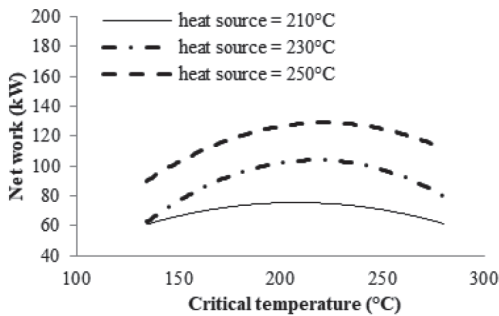
รูปที่ 9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันที่ Condenser และอุณหภูมิวิกฤตของสารทำงาน Supercritical ORC

โดยเมื่อพิจารณาการขยายตัวดังรูปที่ 8 จะเห็นได้ว่าเมื่อใช้สารทำงานที่มีอุณหภูมิวิกฤตสูงขึ้นจะทำให้ อัตราการขยายตัวของสารทำงานหลังออกจาก Expander นั้นมีค่าเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย ซึ่งส่งผลให้ขนาดของ Expander มีขนาดใหญ่ตามไปด้วยและเมื่อพิจารณาความดันที่ Condenser นั้น จากรูปที่

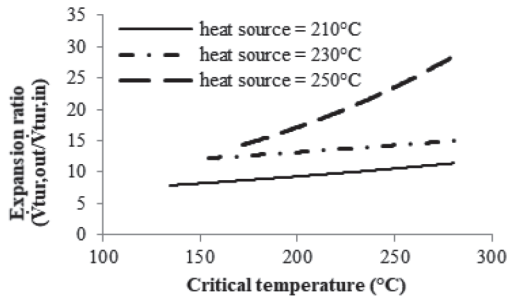
9 จะเห็นได้ว่าไม่ควรใช้สารทำงานที่ทำให้อุณหภูมิวิกฤตที่ทำให้ค่าความดัน Condenser ต่ำกว่าความดันบรรยากาศเพราะอาจจะมีโอกาสที่อากาศรั่วเข้าไปผสมกับสารทำงานได้

3.2.2 การจำลอง Subcritical ORC

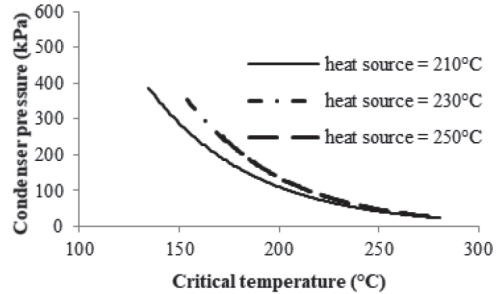
ผลของการจำลอง Supercritical ORC ได้ผลดังรูปที่ 10, 11 และ 12



รูปที่ 10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างงานสุทธิและอุณหภูมิวิกฤตของสารทำงานที่ใช้ในการจำลอง Supercritical ORC



รูปที่ 11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราขยายตัวของสารทำงานใน Expander และอุณหภูมิวิกฤตของสารทำงานที่ใช้ในการจำลอง Supercritical ORC

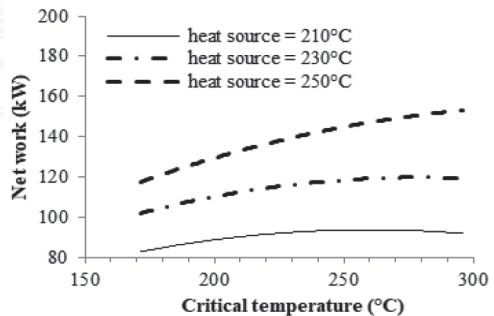


รูปที่ 12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันที่ Condenser และอุณหภูมิวิกฤตของสารทำงานที่ใช้ในการจำลอง Supercritical ORC

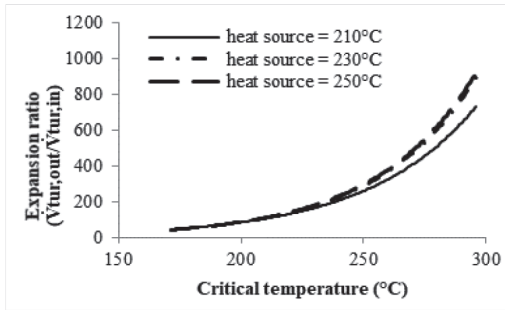
จากผลการจำลองวัฏจักรโออาร์ซีแบบ Subcritical ดังรูปที่ 10, 11 และ 12 จากแนวโน้มของงานสุทธิต่ออุณหภูมิวิกฤตจะเห็นว่าทางเลือกสารทำงานโดยให้อุณหภูมิวิกฤตมีค่าประมาณอุณหภูมิแหล่งความร้อน ถึงน้อยกว่าอุณหภูมิแหล่งความร้อน 40 องศาเซลเซียส จะได้งานสุทธิสูงที่สุด และเมื่อพิจารณาถึงอัตราการขยายตัวและความดันของ Condenser จะมีแนวโน้มเช่นเดียวกันจำลองวัฏจักรโออาร์ซีแบบ Supercritical

4.2.3 การจำลอง Trilateral ORC

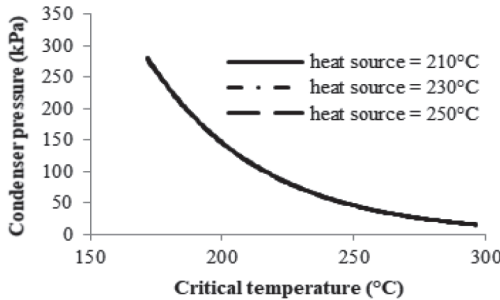
ผลของการจำลอง Trilateral ORC ได้ผลดังรูปที่ 13, 14 และ 15



รูปที่ 13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างงานสุทธิและอุณหภูมิวิกฤตของสารทำงานที่ใช้ในการจำลอง Trilateral ORC



รูปที่ 14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตรา
การขยายตัวของสารทำงานใน Expander และ
อุณหภูมิวิกฤตของสารทำงานที่ใช้ในการจำลอง
Trilateral ORC



รูปที่ 15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดัน
ที่ Condenser และอุณหภูมิวิกฤตของสารทำงาน
ที่ใช้ในการจำลอง Trilateral ORC

จากผลของการจำลองจำลองวัฏจักรโออาร์ซีแบบ Trilateral จะเห็นได้ว่ายิ่งสารทำงานมีอุณหภูมิวิกฤตสูงจะทำให้งานสุทธิที่ได้มีสูงตามด้วยดังรูปที่ 13 และดังรูปที่ 14 และ 15 แนวโน้มของการขยายตัวของสารทำงานมีแนวโน้มเช่นเดียวกับการจำลองวัฏจักรโออาร์ซีแบบ Supercritical และ Subcritical

โดยเกณฑ์การเลือกสารทำงานโดยใช้อุณหภูมิวิกฤตของสารทำงานโดยพิจารณาอัตราการขยายตัวของสารทำงานที่ Expander และ ความดันที่ Condenser ไม่ต่ำกว่าความดันบรรยากาศจะเห็นได้ว่าควรเลือกสารทำงานที่มีอุณหภูมิวิกฤตระหว่าง 180-210 องศาเซลเซียส สำหรับแหล่งความร้อนที่ 210-250 องศาเซลเซียส

โดยการจำลองเปรียบเทียบโดยใช้น้ำเป็นสารทำงานพบว่าการใช้น้ำเป็นสารทำงานจะทำให้อัตราการขยายตัวใน Expander มีค่าสูงมากเนื่องจากมีอุณหภูมิวิกฤตสูงเมื่อเทียบกับสารทำงานที่เป็นสารทำความเย็นโดยมีค่าเท่ากับ 373.74 องศาเซลเซียส เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 14 จะเห็นได้ว่าอัตราการขยายตัวจะสูงเมื่ออุณหภูมิวิกฤตของสารทำงานสูง

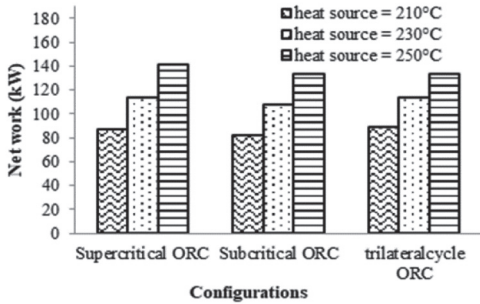
3.3 สารจำลองที่เหมาะสมสำหรับที่อุณหภูมิแหล่งความร้อน 210-250°C

จากผลของการจำลองวัฏจักรโออาร์ซีแบบ Supercritical, Subcritical และ Trilateral เมื่อทำการพิจารณาสารทำงานที่เหมาะสมได้ผลดังตารางที่ 5

ผลของการจำลองเมื่อนำสารทำงานที่เหมาะสมโดยพิจารณาจากงานสุทธิสูงสุด ขนาดของอุปกรณ์ทางความร้อนดังตารางที่ 5 แล้วเมื่อนำมาเปรียบเทียบผลของงานสุทธิที่ได้ในแต่ละอุณหภูมิแหล่งความร้อน UA และอัตราการขยายตัวของสารทำงานใน Expander ได้ผลดังรูปที่ 16, 17, 18 และ 19

ตารางที่ 5 สารที่เหมาะสมในการจำลองวัฏจักรโออาร์ซีที่อุณหภูมิแหล่งความร้อนเท่ากับ 210-250°C

Type	T_{hs} (°C)	(kg/s)	Working fluid	$T_{critical}$ (°C)
Sup.	210	3.00	R245fa	154.00
	230	3.00	R245ca	174.35
	250	3.60	R141b	204.35
Sub.	210	2.60	RE245fa2	171.63
	230	3.00	R245ca	174.35
	250	1.60	Pentane	196.55
TLC.	210	1.60	Isopentane	187.20
	230	1.80	Pentane	196.55
	250	4.20	R141b	204.35

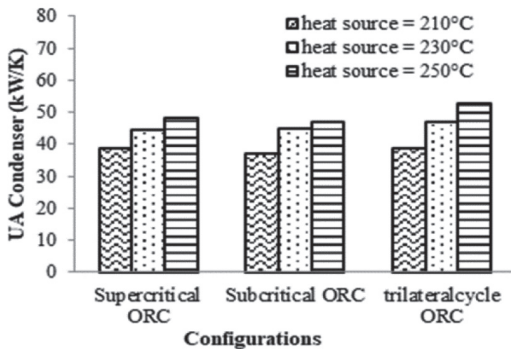


รูปที่ 16 งานสุทธิของการจำลองแต่ละอุณหภูมิ

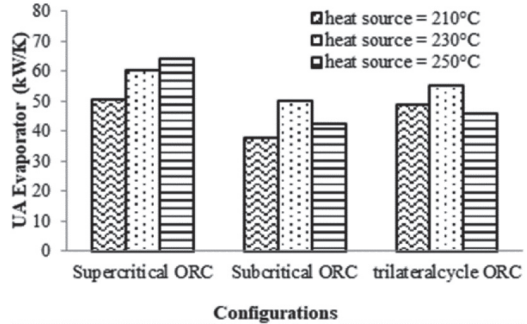
จากผลการจำลองพบว่า การจำลองวัฏจักรโออาร์ซีแบบ Supercritical ได้งานสุทธิสูงสุดเมื่อเทียบกับในช่วงอุณหภูมิเดียวกันดังรูปที่ 16 โดยงานสุทธิที่ได้คือ 141.72 กิโลวัตต์ สารทำงาน R141b ที่อุณหภูมิแหล่งความร้อนเท่ากับ 250 องศาเซลเซียส

นอกจากนี้ในส่วนของการจำลองวัฏจักรโออาร์ซีแบบ Subcritical ได้งานสุทธิสูงสุดดังรูปที่ 16 โดยงานสุทธิที่ได้คือ 133.40 กิโลวัตต์ สารทำงาน Pentane ที่อุณหภูมิแหล่งความร้อนเท่ากับ 250 องศาเซลเซียส

ในส่วนของการจำลองวัฏจักรโออาร์ซีแบบ Trilateral ได้งานสุทธิสูงสุดดังรูปที่ 16 โดยงานสุทธิที่ได้คือ 133.82 กิโลวัตต์ สารทำงาน R141b ที่อุณหภูมิแหล่งความร้อนเท่ากับ 250 องศาเซลเซียส



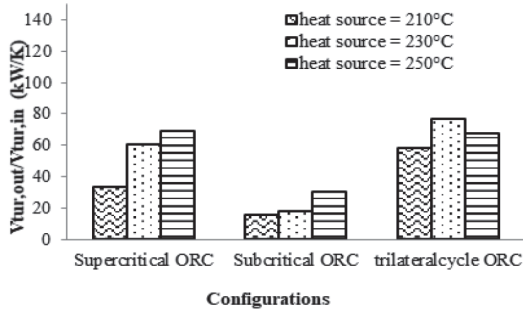
รูปที่ 17 UA_{condenser} ของการจำลองแต่ละอุณหภูมิ



รูปที่ 18 UA_{evaporator} ของการจำลองแต่ละอุณหภูมิ

จากผลของการจำลองเมื่อพิจารณาสารทำงานที่เหมาะสมของอุณหภูมิแหล่งความร้อนในช่วง 210 – 250 องศาเซลเซียส พบว่า ขนาดของ Heat Exchanger Evaporator (UA) นั้นที่การจำลองแบบ Supercritical จะมีขนาดใหญ่ที่สุดและรองลงมาจะเป็น Trilateral และ Subcritical ตามลำดับ เนื่องจากตัว Supercritical จะเป็นการเพิ่มอุณหภูมิซึ่งต้องสูงกว่าจุดวิกฤตของสารทำงาน ทำให้ค่า UA สูง แต่เมื่อเทียบกับ Trilateral แล้วอุณหภูมิสูงสุดของสารทำงานจะต่ำกว่าจุดวิกฤตของสารทำงาน ทำให้ UA จะต่ำกว่า Supercritical และในส่วนของ Subcritical จะเป็นมีส่วนของการเปลี่ยน Phase ไม่เปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ทำให้ค่า UA น้อยที่สุด

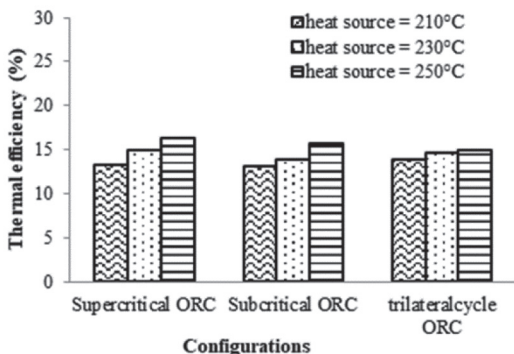
ในส่วนของคุณค่า Heat Exchanger Condenser (UA) นั้นพบว่าในการจำลองสูงที่สุดจะเป็นของ Trilateral รองลงมาจะเป็น Supercritical และ Subcritical ตามลำดับ ดังรูปที่ 17 และ 18 โดยขนาดของ UA ขึ้นอยู่กับชนิดของสารทำงานด้วย



รูปที่ 19 อัตราการขยายตัวของสารทำงาน Expander ของการจำลองแต่ละอุณหภูมิ

จากการจำลองดังรูปที่ 19 พบว่าอัตราการขยายตัวของสารทำงานจากการจำลองวัฏจักรโออาร์ซีแบบ Trilateral จะมีการขยายตัวสูงสุด รองลงมาเป็น Supercritical และ Subcritical ตามลำดับ เพราะว่าการจำลองแบบ Trilateral จะเป็น Phase ภายใน Expander จากจุดที่สารทำงานเป็น Liquid Phase เป็น Mixture Phase ดังรูปที่ 4 ส่วน Subcritical และ Supercritical จะไม่เกิดการเปลี่ยน Phase ใน Expander

โดยรูปที่ 20 พบว่ายิ่งแหล่งความร้อนอุณหภูมิสูงจะทำให้ประสิทธิภาพยิ่งสูงตามไปด้วย และจากผลการจำลองพบว่า การจำลองวัฏจักรโออาร์ซีแบบ Supercritical จะได้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงที่สุดที่ร้อยละ 16.25



รูปที่ 20 Thermal Efficiency ของการจำลองแต่ละอุณหภูมิ

3.4 Off-design

Off-design เป็นการจำลองเพื่อดูการทำงานของระบบเมื่อแหล่งความร้อนและแหล่งทิ้งความร้อนเกิดการเปลี่ยนแปลง โดยทำการจำลองให้แหล่งอุณหภูมิความร้อนสามารถเปลี่ยนแปลงได้ ±5 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิแหล่งทิ้งความร้อนเปลี่ยนแปลงได้ ±3 องศาเซลเซียส โดยกรณีที่เกิดขึ้นแสดงดังตารางที่ 6 และขนาดอุปกรณ์เท่าเดิม

ตารางที่ 6 กรณีที่เกิดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิแหล่งความร้อนและแหล่งทิ้งความร้อน

CASE	T _{hs}	T _{cf}
1		T _{cf} - 3
2	T _{hs} - 5	T _{cf}
3		T _{cf} + 3
4		T _{cf} - 3
5	T _{hs}	T _{cf}
6		T _{cf} + 3
7		T _{cf} - 3
8	T _{hs} + 5	T _{cf}
9		T _{cf} + 3

เมื่อพิจารณาแหล่งความร้อนที่ 250 องศาเซลเซียส พบว่า เมื่ออุณหภูมิแหล่งความร้อนและอุณหภูมิแหล่งทิ้งความร้อนเปลี่ยนแปลงไปโดยผลการจำลองโดยพิจารณาสุทธิได้ดังตารางที่ 7

ตารางที่ 7 ผลของงานสุทธิเมื่อเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ แหล่งความร้อนและแหล่งทิ้งความร้อน เปลี่ยนแปลง

Case	Tri.	Sub.	Sup.
	\dot{w}_{net} (kW)		
1	132.62	132.00	141.68
2	128.01	127.65	136.33
3	123.60	123.46	131.95
4	139.07	135.93	148.86
5	133.80	133.40	141.72
6	128.85	128.02	139.81
7	144.69	143.37	156.67
8	139.78	136.40	152.04
9	135.29	132.33	147.08

ผลการจำลองดังตารางที่ 4 จะได้ว่า กรณีที่ 1, 2, 3 และ 6 ของการจำลองโออาร์ซีแบบ Trilateral ที่อัตราการไหลสารทำงานกับ 4.2 กิโลกรัมต่อวินาที และ Supercritical อัตราการไหลสารทำงานกับ 3.6 กิโลกรัมต่อวินาที จะให้งานสุทธิที่ต่ำกว่าค่าที่ได้ทำการออกแบบ (กรณีที่ 5) แต่การจำลองแบบ Subcritical ที่อัตราการไหลสารทำงานเท่ากับ 1.6 กิโลกรัมต่อวินาที จะมีกรณีที่ 9 ด้วยที่ไม่สามารถให้งานสุทธิได้เท่ากับ ค่าที่ได้ออกแบบไว้ จะเห็นได้ว่าเมื่อความร้อนของแหล่ง ความร้อนลดลงรวมถึงอุณหภูมิแหล่งความร้อนเพิ่มสูงขึ้นจะทำให้ได้งานสุทธิต่ำลง

โดยถ้าต้องการให้กรณีที่ได้นงานที่สุทธิต่ำลงได้ งานกลับมาเท่าเดิม โดยจะทำการปรับค่าอัตราการไหล ของสารทำงาน เช่นของการจำลองแบบโออาร์ซีแบบ Trilateral เพื่อให้ได้ค่างานสุทธิเพิ่มมากขึ้นในส่วนของ กรณีที่ไม่สามารถสร้างงานสุทธิได้เท่าค่าที่ได้ออกแบบไว้ โดยได้ผลดังตารางที่ 8 และ 9

ตารางที่ 8 ผลของความแตกต่างของ Enthalpy ของ สารทำงานที่ผ่าน Evaporator เมื่อปรับ อัตราการไหลของสารทำงานของกรณี การจำลองวัฏจักรโออาร์ซีแบบ Trilateral

CASE	Δh_{23} (kJ/kgK)		
	(kg/s)	Adjust.	At 4.20 kg/s
1	4.09	215.91	210.82
2	3.49	238.87	207.88
3	3.27	245.37	205.05
6	3.81	228.01	212.24

โดยจากผลของการจำลองพบว่าเมื่อทำการลด อัตราการไหลของสารทำงาน ช่วยให้สามารถผลิตงาน สุทธิได้มากยิ่งขึ้น เนื่องจากสารทำงานจะมีโอกาสได้ รับพลังงานมากยิ่งขึ้นเมื่อผ่าน Evaporator เนื่องจาก ไหลช้าลง ทำให้ผลต่างของ Enthalpy เพิ่มมากขึ้น ในส่วนของสารทำงานที่ไหลผ่าน Evaporator จึงทำ ให้ได้งานเพิ่มมากขึ้น ดังตารางที่ 9 ซึ่งการอัตราส่วน ลดลงของอัตราการไหลของสารทำงานน้อยกว่า อัตราส่วนการเพิ่มของ Δh จึงทำให้งานสุทธิเพิ่มสูงขึ้น ดังสมการที่ 3

ตารางที่ 9 ผลของงานสุทธิเมื่อปรับอัตราการไหล ของสารทำงานของกรณีการจำลองวัฏจักร โออาร์ซีแบบ Trilateral

CASE	\dot{W}_{net} (kW)	\dot{m}_{wf} (kg/s)	$\dot{W}_{net, increase}$ (kW)
1	133.85	4.09	1.23
2	133.84	3.49	5.82
3	130.24	3.27	6.65
6	133.84	3.81	4.98

นอกจากนี้พบว่า การปรับอัตราการใช้ของสารทำงานสามารถเพิ่มงานสุทธิได้แต่ยังไม่เพียงพอเพื่อให้งานสุทธิเท่ากับค่าที่ได้ออกแบบไว้ อาจจะต้องทำการปรับค่าอื่น ๆ ที่ส่งผลต่อค่างานสุทธิ ดังตารางที่ 9

อย่างไรก็ตาม ระบบที่จะสามารถรองรับระบบ Off-design อุปกรณ์ที่สำคัญคือ Variable Speed Pump เพื่อให้สามารถรองรับการปรับอัตราการใช้และความดันในระบบ อีกทั้งการปรับอัตราการใช้ของสารทำงานให้ลดลงเล็กน้อยเพียงใด จะขึ้นอยู่กับชนิดของสารทำงานและสภาวะการทำงานที่แตกต่างกันออกไป

4. สรุป

จากผลของการจำลองวัฏจักรโออาร์ซีผลคือการเลือกสารทำงานของการจำลองที่อุณหภูมิ 210–250 องศาเซลเซียส ถ้าเป็นกรณีของการจำลองวัฏจักรโออาร์ซี Supercritical ควรเลือกสารทำงานที่อุณหภูมิวิกฤตต่ำกว่าแหล่งความร้อนเท่ากับ 40–50 องศาเซลเซียส ในส่วนของการจำลอง Subcritical เลือกสารทำงานโดยให้อุณหภูมิวิกฤตมีค่าประมาณอุณหภูมิแหล่งความร้อน ถึ้นน้อยกว่าอุณหภูมิแหล่งความร้อน 40 องศาเซลเซียส และการจำลองแบบ Trilateral ควรเลือกสารทำงานที่มีอุณหภูมิวิกฤตระหว่าง 180–210 องศาเซลเซียส

ในการจำลองนั้นพบว่า การจำลองที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส ได้งานสุทธิสูงที่สุดในการจำลองแต่ละแบบ โดยการจำลองแบบวัฏจักรโออาร์ซี Supercritical ได้งานสุทธิเท่ากับ 141.72 กิโลวัตต์ จากสารทำงาน R141b มีประสิทธิภาพเชิงความร้อนเท่ากับร้อยละ 16.25 และในส่วนของ การจำลองแบบวัฏจักรโออาร์ซี Subcritical ได้งานสุทธิเท่ากับ 133.40 กิโลวัตต์ จากสารทำงาน Pentane มีประสิทธิภาพเชิงความร้อนเท่ากับร้อยละ 15.70 และ Trilateral ได้งานสุทธิ 133.82 กิโลวัตต์ จากสารทำงาน R141b

เมื่อพิจารณาอุณหภูมิของแหล่งความร้อนรวมถึงแหล่งทิ้งความร้อนเปลี่ยนแปลงไปจะส่งผลต่องาน โดยในกรณีที่อุณหภูมิแหล่งความร้อนลดลงและกรณีที่อุณหภูมิแหล่งทิ้งความร้อนเพิ่มขึ้นจะทำให้ได้งานสุทธิลดลง โดยจากการจำลองเปลี่ยนค่าอัตราการใช้ของสารทำงานเพื่อให้ได้งานสุทธิเพิ่มขึ้นให้ใกล้เคียงค่าที่ได้ออกแบบไว้ พบว่าในการทดลองจำลองในอุณหภูมิแหล่งความร้อนเท่ากับ 250 องศาเซลเซียส สามารถเพิ่มงานได้สูงที่สุดเท่ากับ 6.65 กิโลวัตต์ จำลองเป็นวัฏจักรโออาร์ซีแบบ Trilateral

จากการศึกษาระบบโรงไฟฟ้าสำหรับอุณหภูมิ 210–250 องศาเซลเซียส อาจจะเป็นแนวทางหนึ่งเพื่อนำระบบนี้ไปใช้ในการสร้างโรงไฟฟ้าเพื่อใช้ในการนำความร้อนเหลือทิ้งที่มีอุณหภูมิในช่วงดังกล่าวมาใช้เพื่อให้เกิดประโยชน์ทางพลังงานสูงที่สุด

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ให้ความอนุเคราะห์ทุนในการทำงานวิจัยสำเร็จจุลลงไปด้วยดี

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] D. Neshumayev, L. Rummel, A. Konist, A. Ots and T. Parve, "Power plant fuel consumption rate during load cycling," *Applied Energy*, vol. 224, pp. 124–135, Aug. 2018.
- [2] C. Rewlay-Ngoen, S. Papong and S. Sampattagul, "The NPP and Social Asset Impacts of Acidification from Coal-fired Power Plant in Thailand," *Energy Procedia*, vol. 52, pp. 234–241, 2014.
- [3] S. N. Sinha and P. K. Nag, "Air Pollution from Solid Fuels," in *Encyclopedia of Environmental Health*, Elsevier, 2011,

- pp. 46–52.
- [4] L. Palagi, A. Pesyridis, E. Sciubba and L. Tocci, “Machine Learning for the prediction of the dynamic behavior of a small scale ORC system,” *Energy*, vol. 166, pp. 72–82, Jan. 2019.
- [5] A. T. Hoang, “Waste heat recovery from diesel engines based on Organic Rankine Cycle,” *Applied Energy*, vol. 231, pp. 138–166, Dec. 2018.
- [6] Department of Alternative Energy Development and Efficiency, Ministry of Energy, Renewable Energy Outlook: Thailand, 2017.
- [7] A. Firth, B. Zhang and A. Yang, “Quantification of global waste heat and its environmental effects,” *Applied Energy*, vol. 235, pp. 1314–1334, Feb. 2019
- [8] H. Yağlı, Y. Koç, A. Koç, A. Görgülü and A. Tandiroğlu, “Parametric optimization and exergetic analysis comparison of subcritical and supercritical organic Rankine cycle (ORC) for biogas fuelled combined heat and power (CHP) engine exhaust gas waste heat,” *Energy*, vol. 111, pp. 923–932, Sep. 2016,
- [9] G. Xu, G. Song, X. Zhu, W. Gao, H. Li and Y. Quan, “Performance evaluation of a direct vapor generation supercritical ORC system driven by linear Fresnel reflector solar concentrator,” *Applied Thermal Engineering*, vol. 80, pp. 196–204, 2015.
- [10] J. Li, Q. Liu, Z. Ge, Y. Duan and Z. Yang, “Thermodynamic performance analyses and optimization of subcritical and transcritical organic Rankine cycles using R1234ze(E) for 100–200 °C heat sources,” *Energy Conversion and Management*, vol. 149, pp. 140–154, Oct. 2017.
- [11] A. M. Pantaleo, J. Fordham, O. A. Oyewunmi and C. N. Markides, “Intermittent waste heat recovery via ORC in coffee torrefaction,” *Energy Procedia*, vol. 142, pp. 1714–1720, Dec. 2017
- [12] R. Cipollone, D. D. Battista and F. Bettoja, “Performances of an ORC power unit for Waste Heat Recovery on Heavy Duty Engine,” *Energy Procedia*, vol. 129, pp. 770–777, 2017.
- [13] M. Yari, A. Mehr, V. Zare, S. Mahmoudi and M. Rosen, “Exergoeconomic comparison of TLC (trilateral Rankine cycle), ORC (organic Rankine cycle) and Kalina cycle using a low grade heat source,” *Energy*, vol. 83, pp. 712–722, Apr. 2015.
- [14] A. Benato, A. Stoppato, A. Mirandola and M. D. Medico, “Design and Off-Design Analysis of an ORC Coupled with a Micro-Gas Turbine,” *Energy Procedia*, vol. 129, pp. 551–558, 2017.
- [15] Y. Cao and Y. Dai, “Comparative analysis on off-design performance of a gas turbine and ORC combined cycle under different operation approaches,” *Energy Conversion and Management*, vol. 135, pp. 84–100, 2017.

- [16] 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.
- [17] J. Hærvig, K. Sørensen and T. 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.
- [18] J. Radulovic and N. I. B. Castaneda, "On the potential of zeotropic mixtures in supercritical ORC powered by geothermal energy source," *Energy Conversion and Management*, vol. 88, pp. 365–371, 2014.
- [19] E. W. Lemmon, M. L. Huber and M. O. McLinden, "NIST Standard Reference Database 23: Reference Fluid Thermodynamic and Transport Properties-REFPROP, Version 9.1, National Institute of Standards and Technology, 2013.
- [20] J. Fischer, "Comparison of trilateral cycles and organic Rankine cycles," *Energy*, vol. 36, no. 10, pp. 6208–6219, Oct. 2011.

