

# การวิเคราะห์สมรรถนะและเลือกสารทำงานสำหรับโรงไฟฟ้าไออาร์ซี



นางสาวชिरาภรณ์ รักษาอินทร์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกลและระบบกระบวนการ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ปีการศึกษา 2562

**PERFORMANCE ANALYSIS AND WORKING FLUID  
SELECTION FOR ORC POWER PLANT**



**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirement for the  
Degree of Master of Engineering in Mechanical  
and Process System Engineering  
Suranaree University of Technology  
Academic Year 2019**

## การวิเคราะห์โรงไฟฟ้าวัฏจักรกลินา

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของ  
การศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทฉบับนี้

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



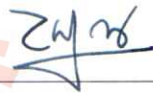
(ผศ. ดร.กระวี ตรีอำรรค)

ประธานกรรมการ



(ผศ. ดร.อาทิตย์ คุณศรีสุข)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)



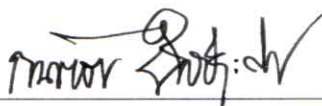
(รศ. ดร.บัณฑิต กฤตาคม)

กรรมการ



(ผศ. ดร.พรรษา ลิปลับ)

กรรมการ



(รศ. ร.อ. ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและพัฒนาความเป็นสากล



(รศ. ดร.พรศิริ จงกล)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

วชิราภรณ์ รักษาอินทร์ : การวิเคราะห์สมรรถนะและเลือกสารทำงานสำหรับโรงไฟฟ้าโออาร์ซี (PERFORMANCE ANALYSIS AND WORKING FLUID SELECTION FOR ORC POWER PLANT) อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อาทิตย์ คุ้มศรีสุข, 94 หน้า

โรงไฟฟ้าโออาร์ซีเป็นเทคโนโลยีหนึ่งที่สามารถนำความร้อนทิ้งที่มีอุณหภูมิต่ำมาใช้ให้เกิดประโยชน์ โดยนำมาผลิตไฟฟ้าและใช้สารทำความเย็นซึ่งเป็นสารอินทรีย์ทำงานในระบบ จากที่อุณหภูมิสภาพแวดล้อมมีการเปลี่ยนแปลงตลอดปี การเลือกสารทำงานให้เหมาะสมกับการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอากาศของพื้นที่ติดตั้งน่าจะช่วยเพิ่มสมรรถนะของโรงไฟฟ้าโออาร์ซีได้ งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อเลือกสารทำงานและทำการวิเคราะห์สมรรถนะของโรงไฟฟ้าสำหรับโรงไฟฟ้าโออาร์ซีให้สอดคล้องกับอุณหภูมิอากาศที่เปลี่ยนแปลง โดยทำการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับโรงไฟฟ้า แล้วใช้แบบจำลองเพื่อศึกษาสมรรถนะของโรงไฟฟ้าโออาร์ซีเมื่ออุณหภูมิอากาศของจังหวัดนครราชสีมาในปี พ.ศ. 2562 เปลี่ยนแปลง ภายใต้การใช้แหล่งความร้อนทิ้งอุณหภูมิ  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$  โดยการจำลองได้เปรียบเทียบการใช้งานสารทำงานที่เป็นสารอินทรีย์บริสุทธิ์กับสารซีโพรอปิก และใช้กำลังไฟฟ้าสูงสุดที่โรงไฟฟ้าผลิตได้เป็นเกณฑ์ในการตัดสินใจเลือกระบบ สารทำงานซีโพรอปิกที่นำมาจำลองได้แก่ isobutane/isopentane R227ea/R245fa R227ea/RC318 R1234yf/RC318 และ 1234yf/R227ea จากผลการจำลองพบว่า สารทำงาน isobutane/isopentane สามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้มากกว่าโรงไฟฟ้าที่ใช้สารทำงานเป็นสารบริสุทธิ์คือ RC318 อยู่ประมาณ 29 – 35.7% จากนั้นได้ทำการจำลองภายใต้เงื่อนไขของอุณหภูมิอากาศวันที่ร้อนที่สุดคือ เวลา 13.00 น. ของเดือนเมษายน ปี พ.ศ. 2562 ซึ่งมีอุณหภูมิ  $37.68\text{ }^{\circ}\text{C}$  พบว่า สารทำงาน isobutane/isopentane (0.4/06) สามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้สูงสุดเมื่อเทียบกับสารซีโพรอปิกคู่อื่น โดยผลิตได้  $4.123\text{ kW}$  และ R1234yf/R227ea (0.91/0.09) ผลิตกำลังไฟฟ้าได้น้อยที่สุดคือ  $1.73\text{ kW}$  จากผลดังกล่าว จึงได้นำสารทำงาน isobutane/isopentane (0.4/06) มาทำการจำลองผลภายใต้อุณหภูมิอากาศที่เปลี่ยนแปลงตลอดปี เทียบกับการจำลองเมื่อให้อุณหภูมิอากาศคงที่ไว้ที่  $37.68\text{ }^{\circ}\text{C}$  เมื่อกำหนดให้ อัตราส่วนความเข้มข้นสารทำงาน อัตราการไหลเชิงมวลของสารทำงาน และความดันในการระเหยให้คงที่ พบว่า isobutane/isopentane สามารถเพิ่มกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ตลอดปีถึง 30.21%

สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล

ปีการศึกษา 2562

ลายมือชื่อนักศึกษา วชิราภรณ์

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา อาทิตย์

WACHIRAPORN RAKSA-IN : PERFORMANCE ANALYSIS AND  
WORKING FLUID SELECTION FOR ORC POWER PLANT. THESIS  
ADVISOR : ASST. PROF. ATIT KOONSRIK, Ph.D., 94 PP.

ORGANIC RANKINE CYCLE/ ZEOTROPIC MIXTURE/ WASTE HEAT  
RECOVERY/ WORKING FLUID SELECTION

In this study, thermodynamic performance of an ORC power plant with heat source temperature of 100 °C was investigated. It aimed to investigate the performance of a plant using zeotropic mixtures as its working fluid and compared with a plant using pure working fluids. First, the mathematical model of the cycle was developed using MATLAB. The modeling uses the golden-section search to determine the mass flow rate of the working, composition of the mixture, evaporation pressure, and condensation pressure that provide the highest net power output for the specified heat source and heat sink conditions. NIST REFPROP was linked with MATLAB to determine the flow properties. Second, validation of the modeling was conducted by comparing its predictions to existing literature. Third, the simulations of an ORC plant using various different zeotropic mixtures as its working fluid were conducted and compared with the performance of an ORC using RC318 as its working fluid. The mixtures tested in this study were isobutane/isopentane, R227ea/R245fa, R227ea/RC318, R1234yf/RC318, and 1234yf/R227ea. Fourth, an ORC power plant, that has a capacity of adjusting its condensation pressure to correspond to the ambient temperature variation across a year, was simulated, so that a highest net power output is achieved across the year. The results show that a plant using a mixture of a 40/60 mass ratio of isobutane/isopentane as its working fluid provides a highest net power output. Its output is 29.0 – 35.7% higher

than that provided by a plant using pure RC318 as its working fluid. For the design condition, the plant using isobutane/isopentane (0.4/0.6) as its working fluid provides a net power output of 4.1 kW. It was found that the net power output of a plant with the capacity of condensation pressure adjustment is 30.2% higher than that of the conventional ORC plant



School of Mechanical Engineering

Academic Year 2019

Student's Signature กฤษกร กิ่ง

Advisor's Signature อานันท์

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับความช่วยเหลืออย่างดี ทั้งด้านวิชาการ และการดำเนินการวิจัย จากบุคคลและกลุ่มบุคคลต่าง ๆ ได้แก่

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อาทิตย์ คุณศรีสุข อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่กรุณาให้คำปรึกษา คำแนะนำ ช่วยแก้ปัญหา และชี้แนะแนวทางในการทำวิทยานิพนธ์เล่มนี้จนสำเร็จสมบูรณ์

ทุนการศึกษา “กิตติบัณฑิต” มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ได้มอบทุนในการศึกษาระดับบัณฑิตศึกษาให้กับผู้ทำวิทยานิพนธ์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กระวี ตรีอำนาจ (ประธานกรรมการ) รองศาสตราจารย์ ดร. บัณฑิต กฤดาคม และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พรรษา ลิบลับ (กรรมการ) ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการแนะนำแนวความคิดในการทำวิทยานิพนธ์ รวมถึงชี้แนะการแก้ไขวิทยานิพนธ์ เพื่อให้วิทยานิพนธ์สำเร็จลุล่วง

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ และเจ้าหน้าที่ในสาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่คอยให้ความช่วยเหลือทั้งด้านเอกสารที่สำคัญ รวมถึงชี้แนะแนวทางในการวางแผนงานเพื่อให้วิทยานิพนธ์สำเร็จได้ด้วยดี

คณาจารย์จากหลากหลายมหาวิทยาลัย จากงานประชุมวิชาการที่ได้เข้าร่วมนำเสนอ ที่ได้ให้คำแนะนำ และคำถามเพื่อจุดประกายแนวคิดในการค้นคว้า และมุมมองในการวิเคราะห์ที่กว้างขึ้น เพื่อศึกษาวิทยานิพนธ์เพิ่มเติม

สุดท้ายนี้ ขอขอบคุณพี่น้องบัณฑิตศึกษาในกลุ่มวิจัยทุกท่าน ที่ได้มีส่วนร่วมในการให้คำปรึกษา ให้กำลังใจ ชี้แนะแนวทางในการค้นคว้า รวมถึงวางแผนงาน เพื่อให้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี

วชิราภรณ์ รักษาอินทร์

# สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย)	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ)	ข
กิตติกรรมประกาศ	ง
สารบัญ	จ
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญรูป	ฉ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	ฒ
<b>บทที่</b>	
<b>1 บทนำ</b>	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
<b>2 ปรัชญ่วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง</b>	4
2.1 บทนำ	4
2.2 โรงไฟฟ้าไออาร์ซี	4
2.3 สารทำงานแบบผสม	6
2.4 สารซีโอทรอปปีก (zeotropic mixture)	8
2.5 การเปรียบเทียบโรงไฟฟ้าไออาร์ซีแบบใช้สารอินทรีย์บริสุทธิ์และสารผสม	10
2.6 การเลือกสารทำงาน	11
2.6.1 ชนิดของสารทำงาน	11
2.6.2 ความปลอดภัยของสารทำงานต่อสิ่งแวดล้อม	14
2.6.3 อุณหภูมิวิกฤตของสารทำงาน	16
<b>3 วิธีการดำเนินการวิจัย</b>	18



## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.1 บทนำ.....	18
3.2 แหล่งความร้อนทิ้ง .....	18
3.3 แหล่งรับความร้อน.....	18
3.4 เครื่องมือในการจำลองโรงไฟฟ้าไออาร์ซี.....	19
3.4.1 เครื่องคอมพิวเตอร์สำหรับการออกแบบและจำลองทางคณิตศาสตร์.....	19
3.4.2 สมการที่ใช้ในการจำลอง.....	21
3.5 ขั้นตอนการจำลองโรงไฟฟ้าไออาร์ซี.....	27
3.5.1 การตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรมที่ใช้ในการจำลอง.....	27
3.5.2 กระบวนการจำลองโรงไฟฟ้าในสถานะออกแบบ.....	28
<b>4 ผลการดำเนินการวิจัย.....</b>	<b>34</b>
4.1 บทนำ.....	34
4.2 การเปรียบเทียบการจำลองเชิงตัวเลขของโรงไฟฟ้าไออาร์ซีแบบใช้สาร ทำงานเป็นสารอินทรีย์บริสุทธ์ และสารซีไอทรอปปีก เมื่ออุณหภูมิ แหล่งความร้อนทิ้งเปลี่ยนแปลง.....	34
4.2.1 การเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าสุทธิที่โรงไฟฟ้าไออาร์ซีผลิตได้เมื่อ ใช้สารทำงานเป็นสารอินทรีย์บริสุทธ์ และสารซีไอทรอปปีก.....	34
4.2.2 การเปรียบเทียบความดันในการระเหยและความแน่นของโรงไฟฟ้า ไออาร์ซีเมื่อใช้สารทำงานเป็นสารอินทรีย์บริสุทธ์ และสารซีไอทรอปปีก.....	37
4.2.3 การเปรียบเทียบอัตราการไหลเชิงมวลของสารทำงานเมื่อใช้สาร ทำงานเป็นสารอินทรีย์บริสุทธ์ และสารซีไอทรอปปีก.....	38
4.2.4 การเปรียบเทียบขนาดของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนเมื่อใช้สาร ทำงานเป็นสารอินทรีย์บริสุทธ์ และสารซีไอทรอปปีก.....	39
4.2.5 การเปรียบเทียบอัตราการเพิ่มความดันในปั้มเมื่อใช้สารทำงาน เป็นสารอินทรีย์บริสุทธ์ และสารซีไอทรอปปีก.....	41

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.2.6	การเปรียบเทียบอัตราการขยายตัวของไอในอิเล็กทรอนิกส์	
	เมื่อใช้สารทำงานเป็นสารอินทรีย์บริสุทธิ์ และสารซีโอทรอปิก	42
4.3	ผลการจำลองเชิงตัวเลขของโรงไฟฟ้าไออาร์ซีแบบใช้สารทำงาน	
	เป็นสารซีโอทรอปิก เมื่ออุณหภูมิแหล่งรับความร้อนเปลี่ยนแปลง	44
4.3.1	ผลของกำลังไฟฟ้าสุทธิที่โรงไฟฟ้าไออาร์ซีผลิตได้	
	เมื่อใช้สารทำงานเป็นซีโอทรอปิก	44
4.3.2	ผลของประสิทธิภาพเชิงความร้อนของโรงไฟฟ้าไออาร์ซี	
	เมื่อใช้สารทำงานเป็นซีโอทรอปิก	45
4.3.3	ผลของความดันที่ใช้ในการระเหย และความดันในการควบแน่น	
	ของโรงไฟฟ้าไออาร์ซีเมื่อใช้สารทำงานเป็นซีโอทรอปิก	46
4.3.4	ผลของขนาดของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่ใช้ในโรงไฟฟ้า	
	ไออาร์ซีเมื่อใช้สารทำงานเป็นซีโอทรอปิก	47
4.3.5	ผลของอัตราการขยายตัวของไอในโรงไฟฟ้าไออาร์ซีเมื่อ	
	ใช้สารทำงานเป็นซีโอทรอปิก	48
4.3.6	ผลของอัตราการเพิ่มความดันของบีมในโรงไฟฟ้าไออาร์ซีเมื่อ	
	ใช้สารทำงานเป็นซีโอทรอปิก	49
4.3.7	ผลของอัตราการไหลเชิงมวลของสารทำงานที่ใช้ในโรงไฟฟ้า	
	ไออาร์ซีเมื่อใช้สารทำงานเป็นซีโอทรอปิก	50
4.4	ผลการจำลองเชิงตัวเลขของโรงไฟฟ้าไออาร์ซีแบบใช้สารทำงาน	
	เป็น isobutane/isopentane ตามกระบวนการจำลองที่ 1 และ 2	52
4.4.1	ผลของกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ผลิตได้ในโรงไฟฟ้าไออาร์ซีเมื่อ	
	เปรียบเทียบการจำลองที่ 1 และ 2	52
4.4.2	ผลของความดันในการควบแน่นในโรงไฟฟ้าไออาร์ซีเมื่อ	
	เปรียบเทียบการจำลองที่ 1 และ 2	54
4.4.3	ผลของขนาดของอีแวปโปเรเตอร์และคอนเดนเซอร์ในโรงไฟฟ้า	
	ไออาร์ซีเมื่อเปรียบเทียบการจำลองที่ 1 และ 2	56

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.4.4	ผลของอัตราการขยายตัวของไอในโรงไฟฟ้าโออาร์ซีเมื่อเปรียบเทียบการจำลองที่ 1 และ 2.....	58
4.4.5	ผลของอัตราการไหลเชิงมวลของสารทำงานในโรงไฟฟ้าโออาร์ซีเมื่อเปรียบเทียบการจำลองที่ 1 และ 2.....	59
4.5	ผลการจำลองเชิงตัวเลขของโรงไฟฟ้าโออาร์ซีแบบใช้สารทำงานเป็นสารซีโอทรอปิก ของจังหวัดนครราชสีมา ในปี พ.ศ. 2562.....	61
4.5.1	กำลังไฟฟ้าสูงสุดที่โรงไฟฟ้าผลิตได้ เมื่ออุณหภูมิอากาศเปลี่ยนแปลง.....	61
4.5.2	ความดันที่ใช้ในการควบแน่นในคอนเดนเซอร์ของโรงไฟฟ้าเมื่ออุณหภูมิอากาศเปลี่ยนแปลง.....	62
4.5.3	ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของโรงไฟฟ้าเมื่ออุณหภูมิอากาศเปลี่ยนแปลง.....	63
4.5.4	ขนาดของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนของโรงไฟฟ้าเมื่ออุณหภูมิอากาศเปลี่ยนแปลง.....	64
4.5.5	อัตราการขยายตัวของไอในโรงไฟฟ้า เมื่ออุณหภูมิอากาศเปลี่ยนแปลง.....	66
5	บทสรุปและข้อเสนอแนะ.....	67
5.1	บทนำ.....	67
5.2	สรุปผลการจำลองโรงไฟฟ้าโออาร์ซี.....	67
5.2.1	การเปรียบเทียบการจำลองเชิงตัวเลขของโรงไฟฟ้าโออาร์ซีแบบใช้สารทำงานเป็นสารอินทรีย์บริสุทธิ์ และสารซีโอทรอปิกเมื่ออุณหภูมิแหล่งความร้อนที่เปลี่ยนแปลง.....	67
5.2.2	การจำลองเชิงตัวเลขของโรงไฟฟ้าโออาร์ซีแบบใช้สารทำงานเป็นสารซีโอทรอปิก เมื่ออุณหภูมิแหล่งรับความร้อนเปลี่ยนแปลง.....	67
5.2.3	ผลการจำลองเชิงตัวเลขของโรงไฟฟ้าโออาร์ซีแบบใช้สารทำงานเป็น isobutane/isopentane ตามกระบวนการจำลองที่ 1 และ 2.....	68
5.2.4	ผลการจำลองเชิงตัวเลขของโรงไฟฟ้าโออาร์ซีแบบใช้สารทำงานเป็นสารซีโอทรอปิก ของจังหวัดนครราชสีมา ในปี พ.ศ. 2562.....	68

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5.3 ข้อเสนอแนะ.....	70
รายการอ้างอิง.....	71
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก. ข้อมูลการจำลองไฟฟ้าไออาร์ซีแบบใช้สารทำงานเป็นสารอินทรีย์บริสุทธิ์ และสารซีไอทรอปิก.....	76
ภาคผนวก ข. ผลจำลองโรงไฟฟ้าไออาร์ซีแบบใช้สารทำงานเป็นสารซีไอทรอปิก.....	81
ภาคผนวก ค. ผลการจำลองของโรงไฟฟ้าไออาร์ซีแบบใช้สาร isobutane/isopentane ของจังหวัดนครราชสีมา ในปี พ.ศ. 2562.....	85
ภาคผนวก ง. บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา.....	88
ประวัติผู้เขียน.....	94



## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1	อุณหภูมิอากาศของจังหวัดนครราชสีมาในปี 2562 ณ ช่วงเวลาที่ทำการจำลอง..... 19
3.2	ผลการตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรม..... 28
3.3	เงื่อนไขเบื้องต้นในการจำลองโรงไฟฟ้าไออาร์ซีในสภาวะออกแบบ..... 29
3.4	สารซีไอทรอปิกที่ใช้ในการจำลอง..... 33
4.1	สารทำงานที่ผลิตกำลังไฟฟ้าได้สูงสุดที่อุณหภูมิแหล่งความร้อนที่ต่าง ๆ..... 35
4.2	คุณสมบัติของสารซีไอทรอปิกที่จำลองในสภาวะออกแบบ..... 45
ก.1	ข้อมูลกำลังไฟฟ้าสุทธิของการจำลองไฟฟ้าไออาร์ซีแบบใช้สารทำงานเป็นสารอินทรีย์บริสุทธ์ และสารซีไอทรอปิก..... 77
ก.2	ข้อมูลอัตราการขยายตัวของไอในการจำลองไฟฟ้าไออาร์ซีแบบใช้สารทำงานเป็นสารอินทรีย์บริสุทธ์ และสารซีไอทรอปิก..... 77
ก.3	ข้อมูลความดันในการระเหยในการจำลองไฟฟ้าไออาร์ซีแบบใช้สารทำงานเป็นสารอินทรีย์บริสุทธ์ และสารซีไอทรอปิก..... 78
ก.4	ข้อมูลความดันในการควบแน่นในการจำลองไฟฟ้าไออาร์ซีแบบใช้สารทำงานเป็นสารอินทรีย์บริสุทธ์ และสารซีไอทรอปิก..... 78
ก.5	ข้อมูลอัตราการไหลเชิงมวลในการจำลองไฟฟ้าไออาร์ซีแบบใช้สารทำงานเป็นสารอินทรีย์บริสุทธ์ และสารซีไอทรอปิก..... 79
ก.6	ข้อมูลขนาดของอีแวปโปเรเตอร์ในการจำลองไฟฟ้าไออาร์ซีแบบใช้สารทำงานเป็นสารอินทรีย์บริสุทธ์ และสารซีไอทรอปิก..... 79
ก.7	ข้อมูลขนาดของคอนเดนเซอร์ในการจำลองไฟฟ้าไออาร์ซีแบบใช้สารทำงานเป็นสารอินทรีย์บริสุทธ์ และสารซีไอทรอปิก..... 80
ข.1	ข้อมูลการจำลองเมื่อใช้สารซีไอทรอปิกต่าง ๆ..... 82
ค.1	ข้อมูลการจำลองโรงไฟฟ้าไออาร์ซีของจังหวัดนครราชสีมาในปี 2562 ของ isobutane/isopentane..... 86

## สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	(ก) อุปกรณ์ในวัฏจักร โออาร์ซีแบบทั่วไป (ข) T-s diagram ของวัฏจักร โออาร์ซีแบบทั่วไป	5
2.2	อุณหภูมิจุดเดือดของสารผสมแบบอะซีโอทรอปิกที่ความดันคงที่	7
2.3	อุณหภูมิจุดเดือดของสารผสมแบบซีโอทรอปิกที่ความดันคงที่	7
2.4	การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจุดเดือดและจุดหลอมเหลวของ R245fa เมื่อความเข้มข้นสารทำงานเปลี่ยนแปลง ที่ความดัน 187 kPa	8
2.5	กระบวนการระเหยภายในอีแวโปเรเตอร์ของสารซีโอทรอปิก และสารอินทรีย์บริสุทธิ์	9
2.6	T-s diagram ของสารทำงาน (ก) สารทำงาน R134a 100% (ข) สารทำงาน R245fa และ R134a อัตราส่วน 50%:50% (ค) สารทำงาน R245fa 100%	10
2.7	การเปรียบเทียบประสิทธิภาพเชิงความร้อนของวัฏจักร โออาร์ซีแบบสารอินทรีย์บริสุทธิ์และสารซีโอทรอปิกของกรุงปักกิ่ง ประเทศจีน	11
2.8	T-s diagram ของสารทำงานชนิด (ก) isentropic fluid (ข) wet fluid (ค) dry fluid	12
2.9	T-s diagram ของสารทำงาน (ก) R1234yf (ข) RC318 (ค) R1234yf/RC318 (50/50)	14
2.10	ระดับความปลอดภัยของสารทำงานตาม ASHRAE Standard 34	15
2.11	ค่า ODP และ GWP ของสารทำงานตัวอย่าง	16
3.1	หน้าต่างโปรแกรม MATLAB ที่ใช้ในการจำลองโรงไฟฟ้าโออาร์ซี	20
3.2	หน้าต่างฐานข้อมูล NIST REFPROP version 10.0	20
3.3	โรงไฟฟ้าโออาร์ซีที่ใช้ในการจำลอง	21
3.4	ลักษณะการไหลแบบ counter flow	25
3.5	การกระจายตัวของอุณหภูมิภายในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบสวนทางกัน	25
3.6	การเกิด Pinch point temperature (PP) ในวัฏจักร โออาร์ซี	27
3.7	แผนผังกระบวนการจำลองในโปรแกรม MATLAB ในสภาวะออกแบบ	29

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
3.8	แผนผังกระบวนการจำลองในโปรแกรม MATLAB ในการจำลองที่ 1.....	31
3.9	แผนผังกระบวนการจำลองในโปรแกรม MATLAB ในการจำลองที่ 2.....	32
4.1	ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิแหล่งความร้อนทิ้งและกำลังไฟฟ้าสุทธิ ของโรงไฟฟ้าไออาร์ซีแบบใช้สารอินทรีย์บริสุทธิ์เป็นสารทำงาน.....	35
4.2	ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิแหล่งความร้อนทิ้งและกำลังไฟฟ้าสุทธิ ของโรงไฟฟ้าไออาร์ซีแบบใช้สารอินทรีย์บริสุทธิ์และแบบใช้ สารชีโอทรอปิกเป็นสารทำงาน.....	36
4.3	ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิแหล่งความร้อนทิ้งและความดันในการระเหย ของสารทำงานแบบใช้สารอินทรีย์บริสุทธิ์และแบบใช้สารชีโอทรอปิกใน โรงไฟฟ้าไออาร์ซี.....	37
4.4	ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิแหล่งความร้อนทิ้งและความดันในการควบแน่น ของสารทำงานแบบใช้สารอินทรีย์บริสุทธิ์และแบบใช้สารชีโอทรอปิกใน โรงไฟฟ้าไออาร์ซี.....	38
4.5	ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิแหล่งความร้อนทิ้งและอัตราการไหลเชิงมวลของ สารทำงานแบบใช้สารอินทรีย์บริสุทธิ์และแบบใช้สารชีโอทรอปิก ในโรงไฟฟ้าไออาร์ซี.....	39
4.6	ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิแหล่งความร้อนทิ้งและขนาดของอีแวปโปเรเตอร์ แบบใช้สารอินทรีย์บริสุทธิ์และแบบใช้สารชีโอทรอปิกในโรงไฟฟ้าไออาร์ซี.....	40
4.7	ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิแหล่งความร้อนทิ้งและขนาดของคอนเดนเซอร์ แบบใช้สารอินทรีย์บริสุทธิ์และแบบใช้สารชีโอทรอปิกในโรงไฟฟ้าไออาร์ซี.....	41
4.8	ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิแหล่งความร้อนทิ้งและอัตราการเพิ่มความดัน ของปั๊มแบบใช้สารอินทรีย์บริสุทธิ์และแบบใช้สารชีโอทรอปิกในโรงไฟฟ้า ไออาร์ซี.....	42
4.9	ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิแหล่งความร้อนทิ้งและอัตราการขยายตัวของไอ แบบใช้สารอินทรีย์บริสุทธิ์และแบบใช้สารชีโอทรอปิกในโรงไฟฟ้าไออาร์ซี.....	43

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างสารซีไอทรอปิกและกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ภายใต้สภาวะ ออกแบบ.....	45
4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างสารซีไอทรอปิกและประสิทธิภาพเชิงความร้อนของ โรงไฟฟ้าไออาร์ซีภายใต้สภาวะออกแบบ.....	46
4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างสารซีไอทรอปิกและความดันที่ใช้เพื่อระเหยและ ควบแน่นของโรงไฟฟ้าไออาร์ซีภายใต้สภาวะออกแบบ.....	47
4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างสารซีไอทรอปิกและขนาดอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน ของโรงไฟฟ้าไออาร์ซีภายใต้สภาวะออกแบบ.....	48
4.14 อัตราการขยายตัวของไอของสารซีไอทรอปิกต่าง ๆ ในโรงไฟฟ้าไออาร์ซี ภายใต้สภาวะออกแบบ.....	49
4.15 อัตราการเพิ่มความดันของปั๊มที่สารซีไอทรอปิกต่าง ๆ ในโรงไฟฟ้าไออาร์ซี ภายใต้สภาวะออกแบบ.....	50
4.16 อัตราการไหลเชิงมวลของสารซีไอทรอปิกในโรงไฟฟ้าไออาร์ซีภายใต้สภาวะ ออกแบบ.....	51
4.17 กำลังไฟฟ้าสุทธิที่ผลิตได้ในโรงไฟฟ้าไออาร์ซีเมื่อใช้สาร isobutane/isopentane ในกระบวนการจำลองที่ 1 ณ เวลาต่าง ๆ ของเดือนธันวาคม.....	53
4.18 กำลังไฟฟ้าสุทธิที่ผลิตได้ในโรงไฟฟ้าไออาร์ซีเมื่อใช้สาร isobutane/isopentane ในกระบวนการจำลองที่ 2 ณ เวลาต่าง ๆ ของเดือนธันวาคม.....	54
4.19 ความดันในการควบแน่นของโรงไฟฟ้าไออาร์ซีเมื่อใช้สาร isobutane/isopentane ในกระบวนการจำลองที่ 1 ณ เวลาต่าง ๆ ของเดือนธันวาคม.....	55
4.20 ความดันในการควบแน่นของโรงไฟฟ้าไออาร์ซีเมื่อใช้สาร isobutane/isopentane ในกระบวนการจำลองที่ 2 ณ เวลาต่าง ๆ ของเดือนธันวาคม.....	55
4.21 ขนาดของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนของโรงไฟฟ้าไออาร์ซีเมื่อใช้สาร isobutane/isopentane ในกระบวนการจำลองที่ 1 ณ เวลาต่าง ๆ ของเดือนธันวาคม.....	56
4.22 ขนาดของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนของโรงไฟฟ้าไออาร์ซีเมื่อใช้สาร isobutane/isopentane ในกระบวนการจำลองที่ 2 ณ เวลาต่าง ๆ ของเดือนธันวาคม.....	57



## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.23	อัตราขยายตัวของไอในโรงไฟฟ้าไออาร์ซีเมื่อใช้สาร isobutane/isopentane ในกระบวนการจำลองที่ 1 ณ เวลาต่าง ๆ ของเดือนธันวาคม.....58
4.24	อัตราขยายตัวของไอในโรงไฟฟ้าไออาร์ซีเมื่อใช้สาร isobutane/isopentane ในกระบวนการจำลองที่ 2 ณ เวลาต่าง ๆ ของเดือนธันวาคม.....58
4.25	อัตราการไหลเชิงมวลของสารทำงานในโรงไฟฟ้าไออาร์ซีเมื่อใช้สาร isobutane/isopentane ในกระบวนการจำลองที่ 1 ณ เวลาต่าง ๆ ของเดือนธันวาคม.....59
4.26	อัตราการไหลเชิงมวลของสารทำงานในโรงไฟฟ้าไออาร์ซีเมื่อใช้สาร isobutane/isopentane ในกระบวนการจำลองที่ 2 ณ เวลาต่าง ๆ ของเดือนธันวาคม.....60
4.27	กำลังไฟฟ้าสุทธิที่โรงไฟฟ้าไออาร์ซีผลิตได้ของจังหวัดนครราชสีมา ปี พ.ศ. 2562.....61
4.28	ความดันที่ใช้ควบแน่นในโรงไฟฟ้าไออาร์ซี ของจังหวัดนครราชสีมา ปี พ.ศ. 2562.....62
4.29	ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของโรงไฟฟ้าไออาร์ซี ของจังหวัดนครราชสีมา ปี พ.ศ. 2562.....63
4.30	ขนาดของอีแวปโปเรเตอร์ในโรงไฟฟ้าไออาร์ซี ของจังหวัดนครราชสีมา ปี พ.ศ. 2562.....64
4.31	ขนาดของคอนเดนเซอร์ในโรงไฟฟ้าไออาร์ซี ของจังหวัดนครราชสีมา ปี พ.ศ. 2562.....65
4.32	อัตราขยายตัวของไอในโรงไฟฟ้าไออาร์ซี ของจังหวัดนครราชสีมา ปี พ.ศ. 2562.....66
ข.1	T-s diagram ของ isopentane/isobutane (0.6/0.4).....82
ข.2	T-s diagram ของ R227ea/R245fa (0.24/0.76).....83
ข.3	T-s diagram ของ RC318/R227ea (0.86/0.14).....83
ข.4	T-s diagram ของ R1234yf/RC318 (0.3/0.7).....84
ข.5	T-s diagram ของ R1234yf/R227ea (0.91/0.09).....84

## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

$A$	=	พื้นที่ในการแลกเปลี่ยนความร้อน, $m^2$
$h_1$	=	ค่าเอนทาลปีของสารทำงานที่ทางเข้าปั๊ม, J/kg
$h_2$	=	ค่าเอนทาลปีของสารทำงานที่ทางเข้าไอเวปโปเรเตอร์, J/kg
$h_{2s}$	=	ค่าเอนทาลปีของสารทำงานที่ทางเข้าไอเวปโปเรเตอร์ เมื่อ isentropic efficiency ของปั๊มเป็น 100%, J/kg
$h_3$	=	ค่าเอนทาลปีของสารทำงานที่ทางเข้าเอ็กซ์แพนเดอร์, J/kg
$h_4$	=	ค่าเอนทาลปีของสารทำงานที่ทางเข้าคอนเดนเซอร์, J/kg
$h_{4s}$	=	ค่าเอนทาลปีของสารทำงานที่ทางเข้าคอนเดนเซอร์ เมื่อ isentropic efficiency ของเอ็กซ์แพนเดอร์เป็น 100%, J/kg
$m_{wf}$	=	อัตราการไหลเชิงมวลของสารชีโธรอปิก, kg/s
$P_{evap}$	=	ความดันในการระเหยภายในไอเวปโปเรเตอร์, MPa
$P_{cond}$	=	ความดันในการควบแน่นภายในคอนเดนเซอร์, MPa
$Q_{cond}$	=	ค่าความร้อนที่ถ่ายเทในคอนเดนเซอร์, W
$Q_{evap}$	=	ค่าความร้อนที่ถ่ายเทในไอเวปโปเรเตอร์, W
$U$	=	ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม (Overall heat transfer coefficient), $W/m^2K$
$V_3$	=	อัตราการไหลเชิงปริมาตรของสารทำงานที่ทางเข้าเอ็กซ์แพนเดอร์, $m^3/s$
$V_4$	=	อัตราการไหลเชิงปริมาตรของสารทำงานที่ทางออกเอ็กซ์แพนเดอร์, $m^3/s$
$W_{exp}$	=	งานที่เอ็กซ์แพนเดอร์ผลิตได้, W
$W_{net}$	=	กำลังไฟฟ้าสุทธิที่โรงไฟฟ้าผลิตได้, W
$W_{pump}$	=	งานที่จ่ายให้กับปั๊ม, W
$\eta_{isen,pump}$	=	Isentropic efficiency ของปั๊ม
$\eta_{isen,exp}$	=	Isentropic efficiency ของเอ็กซ์แพนเดอร์
$\eta_{th}$	=	ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของโรงไฟฟ้า
$\Delta T_{lm}$	=	ค่าเฉลี่ยความแตกต่างของอุณหภูมิ (Log mean temperature difference), $^{\circ}C$

### คำอธิบายสัญลักษณ์และค่าย่อ (ต่อ)

- $\rho_3$  = ความหนาแน่นของสารทำงานที่ทางเข้าเอ็กซ์แพนเดอร์,  $\text{kg/m}^3$
- $\rho_4$  = ความหนาแน่นของสารทำงานที่ทางออกเอ็กซ์แพนเดอร์,  $\text{kg/m}^3$



# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

ในปัจจุบันประเทศไทยมีแนวโน้มการใช้พลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือกเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ซึ่งหนึ่งในพลังงานเหล่านั้นคือ พลังงานความร้อนที่มาจากแหล่งความร้อนอุณหภูมิต่ำ ซึ่งจากรายงานสถานการณ์พลังงานของกรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน (2562) พบว่า มีการใช้พลังงานความร้อน 59% เมื่อเทียบกับพลังงานทดแทนรูปแบบอื่น โดยส่วนใหญ่สามารถพบได้จากการปล่อยความร้อนทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมต่าง ๆ เพื่อนำความร้อนทิ้งเหล่านั้นมาใช้ประโยชน์ จึงนำมาสู่แนวคิดในการนำพลังงานความร้อนทิ้งมาผลิตไฟฟ้า

เทคโนโลยีที่ถูกนำมาใช้ในการผลิตไฟฟ้าจากความร้อนทิ้งเรียกว่า โรงไฟฟ้าโออาร์ซี (Organic Rankine cycle, ORC) ซึ่งเป็นโรงไฟฟ้าที่มีหลักการทำงานและวัฏจักรของโรงไฟฟ้าคล้ายคลึงกับโรงไฟฟ้าแรงดัน (Rankine cycle) แต่มีการใช้สารทำความเย็นหรือสารออร์แกนิกเป็นสารทำงานแทนน้ำในวัฏจักรแรงดัน เนื่องจากสารทำความเย็นมีจุดเดือดที่ต่ำซึ่งรองรับกับการทำงานที่แหล่งความร้อนอุณหภูมิต่ำ

จากงานวิจัยที่ทำการศึกษเกี่ยวกับโรงไฟฟ้าโออาร์ซีพบว่า โรงไฟฟ้าโออาร์ซีนิยมใช้สารทำงานที่เป็นสารบริสุทธิ์ (pure fluid) ในการดำเนินงาน เช่น Holik et al. (2019) มีการนำสารทำงาน ethanol toluene และ hexamethyldisiloxane มาดำเนินการในระบบพบว่า ethanol สามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้สูงสุดคือ 17.6 กิโลวัตต์ เมื่อเทียบกับสารทำงานชนิดอื่น เช่นเดียวกับ Navongxay et al. (2019) ที่นำ R245fa มาดำเนินการพบว่าระบบมีประสิทธิภาพทางพลังงานและประสิทธิภาพตามกฎข้อที่สองของเทอร์โมไดนามิกส์เป็น 6.98% และ 11.51% ตามลำดับ

ตามคุณสมบัติของสารทำงานจะมีจุดเดือดและจุดกลั่นตัวคงที่ จึงทำให้มีข้อจำกัดในการผลิตไฟฟ้าเมื่ออุณหภูมิแหล่งความร้อน และอุณหภูมิอากาศเปลี่ยนแปลง ดังนั้นการออกแบบโรงไฟฟ้าโออาร์ซีโดยทั่วไปจึงมักออกแบบโดยอ้างอิงอุณหภูมิอากาศสูงสุดในฤดูร้อน เพื่อผลิตกำลังไฟฟ้าตลอดทั้งปี ทำให้ความสามารถในการผลิตกำลังไฟฟ้าเมื่ออุณหภูมิอากาศเปลี่ยนแปลงไม่สามารถผลิตได้อย่างเต็มที่ จึงได้มีแนวคิดที่จะนำสารทำงานที่เป็นสารผสม หรือที่เรียกว่า “สารซี

ไอทรอปิก (zeotropic mixture)” มาใช้ในระบบแทน สารซีไอทรอปิกเป็นการผสมกันของสารทำงานบริสุทธิ์สองชนิดโดยใช้อัตราส่วนความเข้มข้นของสารที่แตกต่างกัน ส่งผลให้จุดเดือดของสารทำงานมีการเปลี่ยนแปลง จึงทำให้สารผสมเหมาะสำหรับการดำเนินงานเมื่อต้องการให้วัฏจักรผลิตกำลังไฟฟ้าได้ตามอุณหภูมิอากาศที่เปลี่ยนแปลง

นอกจากนี้ Fang et al. (2019) ได้ทำการจำลองโรงไฟฟ้าไออาร์ซีสำหรับความร้อนทิ้งจากเครื่องยนต์ดีเซล โดยเปรียบเทียบกรณีที่ใช้สารบริสุทธิ์และสารผสม และให้สารทำงานเป็น tulene และ decane พบว่า เมื่อใช้สารผสมโดยใช้อัตราส่วน tulene:decane เป็น 0.9:0.1 สามารถลดพื้นที่ในการถ่ายเทความร้อนภายในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนได้อย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งส่งผลต่อการประเมินความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของระบบ ทำให้โรงไฟฟ้าที่ใช้สารทำงานแบบสารผสมมีความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์มากกว่าโรงไฟฟ้าที่ใช้สารทำงานเป็นสารบริสุทธิ์

งานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดที่จะทำการวิเคราะห์สมรรถนะของโรงไฟฟ้าไออาร์ซีเมื่ออุณหภูมิอากาศเปลี่ยนแปลง โดยจะทำการจำลองเชิงตัวเลขภายใต้ภาวะที่อุณหภูมิอากาศเปลี่ยนแปลง และทำการเปรียบเทียบสมรรถนะของโรงไฟฟ้า รวมถึงพิจารณาการผลิตกำลังไฟฟ้าของโรงไฟฟ้าไออาร์ซีเมื่อใช้สารซีไอทรอปิก เพื่อให้สามารถปรับปรุงสมรรถนะโรงไฟฟ้าไออาร์ซีได้สอดคล้องกับอุณหภูมิอากาศของจังหวัดนครราชสีมา

## 1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย

1.2.1 เพื่อประเมินและวิเคราะห์สมรรถนะของโรงไฟฟ้า และเลือกสารทำงานสำหรับโรงไฟฟ้าไออาร์ซีให้สอดคล้องกับอุณหภูมิอากาศที่เปลี่ยนแปลงตลอดปี

1.2.2 เพื่อพัฒนาโปรแกรมที่สามารถวิเคราะห์โรงไฟฟ้าไออาร์ซีเมื่ออุณหภูมิอากาศเปลี่ยนแปลงตลอดปี

1.2.3 เพื่อเปรียบเทียบผลที่ได้ และเลือกสารทำงานที่สามารถวิเคราะห์โรงไฟฟ้าไออาร์ซีเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงตลอดปี

## 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1.3.1 เป็นการศึกษาโดยใช้วิธีเชิงตัวเลขโดยใช้โปรแกรม MATLAB ร่วมกับ NIST REFPROP

1.3.2 เป็นการจำลองอุณหภูมิอากาศที่เปลี่ยนแปลงของจังหวัดนครราชสีมาเป็นเวลา 12 เดือน ของปี พ.ศ. 2562

1.3.3 ใช้การผลิตกำลังไฟฟ้าสูงสุดของโรงไฟฟ้าไออาร์ซีเป็นเกณฑ์ในการตัดสินใจ

1.3.4 เป็นการศึกษาเพื่อประเมินความเป็นไปได้ของการผลิตไฟฟ้าจากแหล่งความร้อน  
อุณหภูมิต่ำที่อุณหภูมิ 100 °C

1.3.5 เป็นการศึกษาเชิงเปรียบเทียบสมรรถนะของโรงไฟฟ้าเมื่อใช้สารทำงาน RC318  
กับ isopentane/isobutane

#### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ได้แนวทางในการเลือกสารทำงานสำหรับโรงไฟฟ้าไออาร์ซีที่สอดคล้องกับอุณหภูมิ  
อากาศของจังหวัดนครราชสีมา และเป็นทางเลือกในการปรับปรุงสมรรถนะสำหรับโรงไฟฟ้าไอ  
อาร์ซี



## บทที่ 2

### ปรีทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 บทนำ

ในปัจจุบันประเทศไทยให้ความสำคัญกับปัญหาทางด้านพลังงานอย่างเห็นได้ชัด จากแผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือกปี พ.ศ. 2558 - 2579 ของกระทรวงพลังงาน (2558) พบว่ามีการสนับสนุนการนำพลังงานความร้อนที่เหลือจากกระบวนการผลิตไปใช้ในการผลิตไฟฟ้าเพื่อขายเข้าระบบสายส่ง เป็นการส่งเสริมการผลิตไฟฟ้าอย่างมีประสิทธิภาพและช่วยแบ่งเบาภาระการลงทุนของภาครัฐในระบบการผลิตและจำหน่ายไฟฟ้า

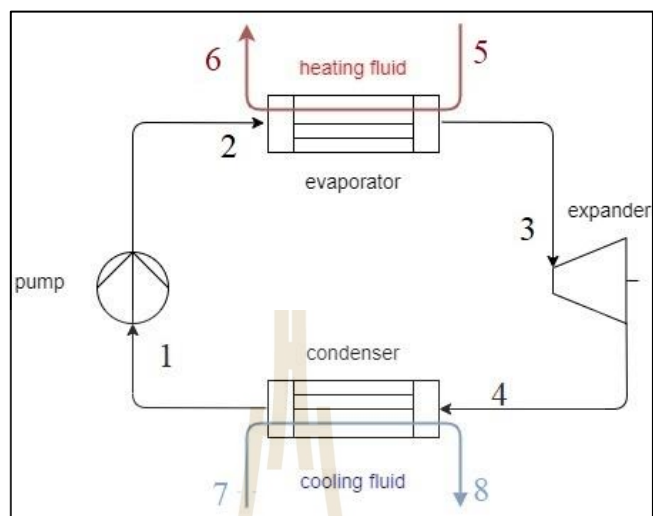
จากมาตรการจูงใจดังกล่าว ทำให้การผลิตไฟฟ้าจากพลังงานทดแทนมีสัดส่วนเพิ่มสูงขึ้นทุกปี โดยในปี 2550 มีสัดส่วนปริมาณไฟฟ้าจากพลังงานทดแทนที่ผลิตได้รวมการผลิตไฟฟ้านอกระบบ (off grid power generation) ทั้งประเทศร้อยละ 4.3 และเพิ่มเป็นร้อยละ 9.87 ในปี 2557 (ไม่รวมพลังน้ำขนาดใหญ่)

จากแผนพัฒนาพลังงานดังกล่าว ได้มีการเสนอแนวคิดในการนำเทคโนโลยีมาประยุกต์ใช้เพื่อผลิตพลังงานไฟฟ้าจากพลังงานความร้อนทิ้ง โดยหนึ่งในเทคโนโลยีดังกล่าวเรียกว่า โรงไฟฟ้าโออาร์ซี ซึ่งเป็นวัฏจักรที่นิยมนำแหล่งความร้อนทิ้งมาเป็นแหล่งความร้อน

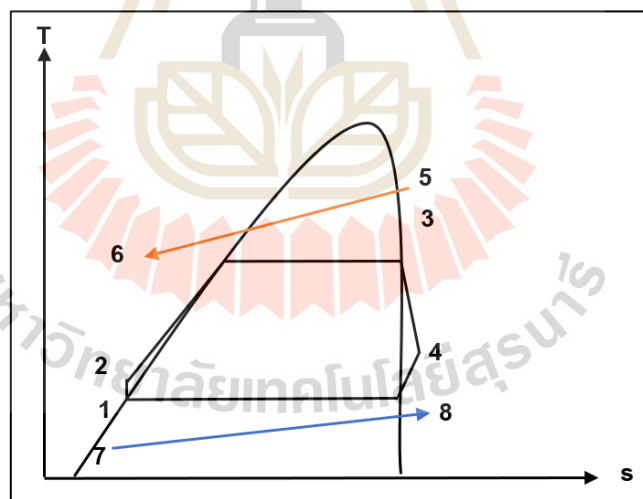
#### 2.2 โรงไฟฟ้าโออาร์ซี

วัฏจักรโออาร์ซีมีวัฏจักรคล้ายคลึงกับวัฏจักรแรงคิน แต่ใช้สารอินทรีย์เป็นสารทำงาน (working fluid) ในระบบ ซึ่งมีอุปกรณ์ที่สำคัญ 4 อุปกรณ์ คือ ปั๊ม (pump) อีแวปโปเรเตอร์ (evaporator) เทอร์ไบน์ (turbine) หรือ เอ็กซ์แพนเดอร์ (expander) และ คอนเดนเซอร์ (condenser) โดยปั๊มทำหน้าที่ในการเพิ่มความดันให้กับสารทำงาน ทำให้สารทำงานดำเนินได้ในระบบ และมีอีแวปโปเรเตอร์ ที่เป็นอุปกรณ์ในการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างแหล่งความร้อนทิ้ง (heating fluid) กับสารทำงาน เพื่อทำให้สารทำงานเปลี่ยนสถานะจากของเหลวเป็นไอก่อนที่จะเข้าเอ็กซ์แพนเดอร์เพื่อนำไปผลิตไฟฟ้า เมื่อสารทำงานออกจากเอ็กซ์แพนเดอร์จะถูกทำการควบแน่นที่คอนเดนเซอร์ โดยใช้สารหล่อเย็น (cooling fluid) เป็นสารแลกเปลี่ยนความร้อนภายในคอนเดนเซอร์ เพื่อเปลี่ยนสถานะสารทำงานจากไอเป็นของเหลวอีกครั้งก่อนเข้าสู่ปั๊มและทำงานวน

เป็นวัฏจักรซึ่งแผนภาพวัฏจักรการทำงานเป็นดังรูปที่ 2.1



(ก)



(ข)

รูปที่ 2.1 (ก) อุปกรณ์ในวัฏจักร โออาร์ซีแบบทั่วไป (ข) T-s diagram ของวัฏจักร โออาร์ซีแบบ  
ทั่วไป

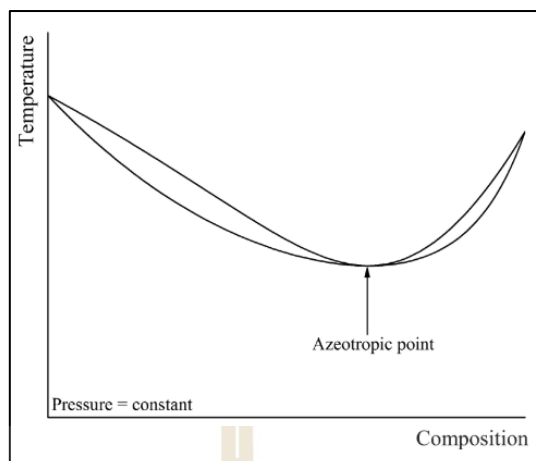


จากการศึกษาเกี่ยวกับโรงไฟฟ้าโออาร์ซีพบว่า โรงไฟฟ้าโออาร์ซีนิยมใช้สารทำงานเป็น สารอินทรีย์บริสุทธิ์ (pure fluid) เช่น บทความของ Fischer (2011) ที่มีการใช้สารทำงานเป็น propane เพื่อศึกษาการผลิตกำลังไฟฟ้าของโรงไฟฟ้าโออาร์ซี และ Hettiarachchi et al. (2007) ได้นำเอาแหล่งความร้อนจากใต้พิภพมาผลิตไฟฟ้าด้วยวัฏจักรโออาร์ซีโดยใช้สารทำงานเป็น PF 5050, HCFC 123, ammonia, และ n-Pentane เช่นกัน เนื่องจากสารอินทรีย์เป็นสารที่มีจุดเดือดที่ต่ำ จึงรองรับการผลิตกำลังไฟฟ้าที่แหล่งความร้อนอุณหภูมิต่ำ ส่งผลให้โรงไฟฟ้าโออาร์ซีเป็นที่นิยมใช้ อย่างไรก็ตาม การใช้สารทำงานบริสุทธิ์เป็นสารดำเนินงานในระบบนั้น ทำให้โรงไฟฟ้าไม่สามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้สูงสุดเมื่ออุณหภูมิบรรยากาศเปลี่ยนแปลง ส่งผลให้ในการออกแบบจำเป็นต้องออกแบบโดยกำหนดอุณหภูมิอากาศเป็นอุณหภูมิที่สูงที่สุดในช่วงฤดูร้อน ทำให้เกิดแนวคิดในการนำสารทำงานมาผสมกัน หรือเรียกว่า zeotropic mixture

### 2.3 สารทำงานแบบผสม

สารทำงานแบบผสมเป็นสารทำงานที่เกิดจากการจับคู่สารอินทรีย์บริสุทธิ์อย่างน้อย 2 สารทำงานเพื่อทำงานร่วมกัน โดยอาศัยการปรับความเข้มข้นของกลุ่มสารให้เหมาะสมกับการใช้งาน ทำให้คุณสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์ของสารมีการเปลี่ยนแปลง โดยสารทำงานแบบผสมสามารถแบ่งได้ 2 ประเภท คือ

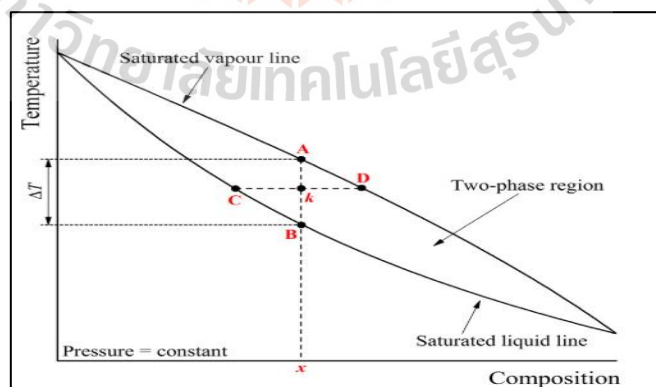
- 1) สารผสมแบบอะซีโอโทรอปิก (azeotropic mixture) เป็นสารทำงานที่มีการผสมกันระหว่างสาร 2 ชนิด โดยการผสมกันจะทำให้สารมีลักษณะคล้ายกับสารบริสุทธิ์ และคุณสมบัติของสารจะมีจุดเดือดที่ใกล้เคียงกัน ส่งผลให้การแยกสารผสมเป็นส่วนทำได้ยาก เช่น เอทานอลกับน้ำ และ ไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์กับน้ำ เป็นต้น ซึ่งลักษณะอุณหภูมิจุดเดือดของสารผสมแบบอะซีโอโทรอปิกที่ความดันคงที่ สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 อุณหภูมิจุดเดือดของสารผสมแบบอะซีโอโทรอปิกที่ความดันคงที่

(Modi and Haglind, 2017)

2) สารผสมแบบซีโอโทรอปิก (zeotropic mixture) เป็นสารทำงานที่มีการผสมกันระหว่างสาร 2 ชนิด โดยการผสมกันของสารจะมีสัดส่วนสารที่แยกกันอย่างชัดเจน และคุณสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์ของสารผสมจะต่างกัน ทำให้สารผสมประเภทนี้มีอุณหภูมิจุดเดือดและจุดหลอมเหลวที่เปลี่ยนแปลงตามอัตราส่วนความเข้มข้นของสารผสม เช่น R227ea กับ R245fa และ R600/R601 เป็นต้นซึ่งลักษณะอุณหภูมิจุดเดือดของสารผสมแบบซีโอโทรอปิกที่ความดันคงที่ สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.3



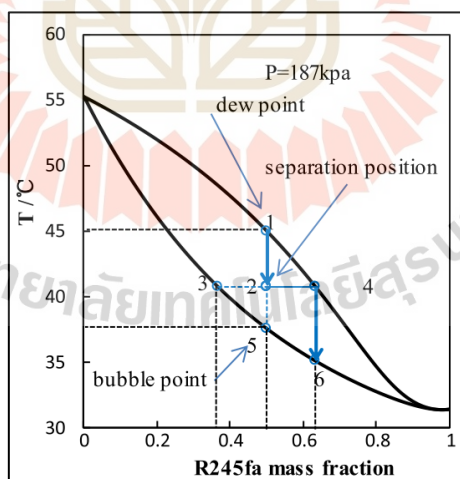
รูปที่ 2.3 อุณหภูมิจุดเดือดของสารผสมแบบซีโอโทรอปิกที่ความดันคงที่

(Modi and Haglind, 2017)

## 2.4 สารซีโอทรอปิก (zeotropic mixture)

จากการศึกษาเพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพโรงไฟฟ้าไออาร์ซีของ Luo et al. (2017) พบว่าการใช้สารทำงานแบบสารอินทรีย์บริสุทธิ์จะมีข้อจำกัดในการปรับปรุง เนื่องจากคุณสมบัติของสารที่มีจุดเดือดและจุดหลอมเหลวที่คงที่ (isothermal behavior of the evaporation and condensation) จึงทำให้เกิดความสูญเสียของพลังงานเนื่องจากกระบวนการย้อนกลับไม่ได้ (irreversible loss) ดังนั้นสารซีโอทรอปิกจึงเป็นหนึ่งตัวเลือกที่ถูกนำมาใช้เป็นสารทำงานแทน ด้วยคุณสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์ของสาร ที่มีการเกิดกระบวนการย้อนกลับได้ (reversible process) ที่จุดเดือดและจุดหลอมเหลว ทำให้อุณหภูมิจุดเดือดและจุดหลอมเหลวของสารทำงานสามารถเปลี่ยนแปลงได้ ภายใต้ความดันคงที่ (non-isothermal behavior of the evaporation and condensation) ซึ่งเรียกพฤติกรรมของสารที่มีจุดเดือดและจุดหลอมเหลวเปลี่ยนแปลงว่า temperature glide โดยแสดงตัวอย่างการเกิด temperature glide ใน R245fa/pentane ได้ดังรูปที่ 2.4

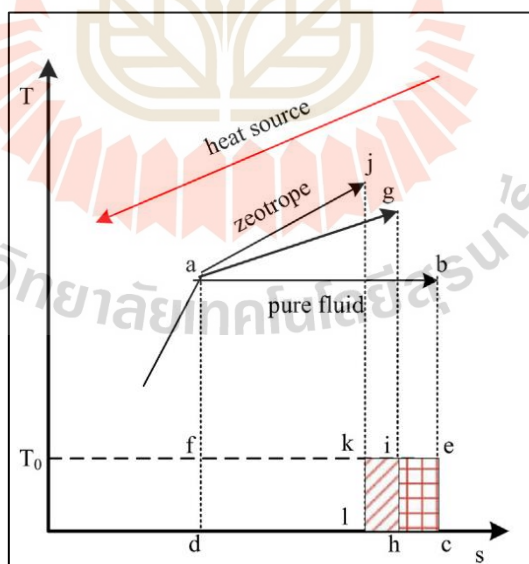
พฤติกรรมการเกิด temperature glide ของสารซีโอทรอปิกมักเกิดภายในที่อุปกรณ์ที่มีการแลกเปลี่ยนความร้อน ซึ่งเมื่อพิจารณาตามอุปกรณ์ในโรงไฟฟ้า ไออาร์ซี พบว่า การเกิด temperature glide จะเกิดภายในอีแวโปเรเตอร์ที่มีการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างสารทำงานกับแหล่งความร้อนทิ้ง และคอนเดนเซอร์ที่มีการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างสารทำงานกับแหล่งรับความร้อน



รูปที่ 2.4 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจุดเดือดและจุดหลอมเหลวของ R245fa เมื่อความเข้มข้นสารทำงานเปลี่ยนแปลงที่ความดัน 187 kPa (Luo et al., 2017)

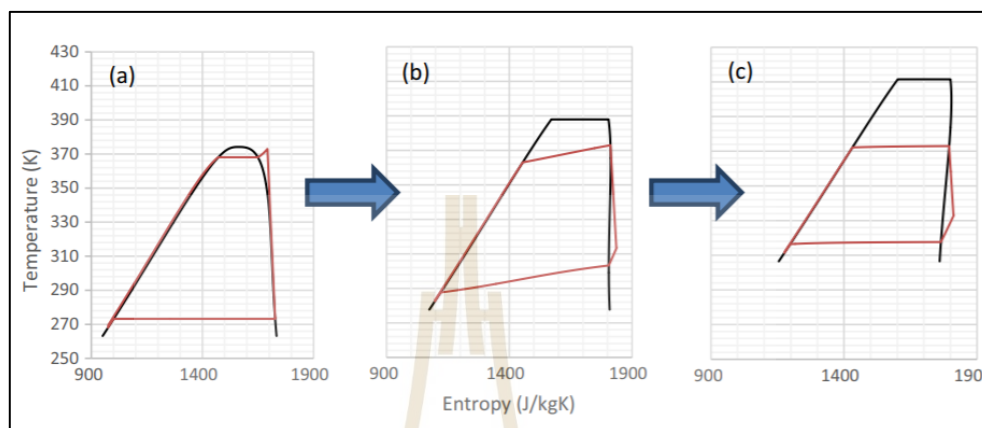
จากรูปที่ 2.4 พบว่า ที่ความดันคงที่ อุณหภูมิจุดเดือดและจุดหลอมเหลวของสารทำงานลดลง เมื่อความเข้มข้นของ R245fa เพิ่มขึ้น โดยการเกิด temperature glide จะเพิ่มขึ้น เมื่ออัตราส่วน R245fa เพิ่มขึ้นจนถึง 0.5 หลังจากนั้น การเกิด temperature glide จะลดลง ซึ่งหมายเลข 1 ภายในรูปที่ 2.4 เป็นการเกิด temperature glide ในคอนเดนเซอร์ เมื่อความเข้มข้น R245fa เป็น 0.5 โดยอุณหภูมิของสารทำงานที่ถูกควบคุมจนถึงอุณหภูมิจุดน้ำค้าง (dew point temperature) หลังจากนั้น สารทำงานจะถูกลดอุณหภูมิจนถึงจุดที่ 5 คือ จุดของเหลวอิ่มตัวของสารทำงาน (bubble point temperature) โดยระหว่างกระบวนการจาก 1 ไป 5 สารทำงานจะมีสถานะเป็นของผสม (จุดที่ 2) ซึ่งบางส่วนที่กลั่นตัวก่อนจะกลายเป็นของเหลวก่อน (จุดที่ 3) ส่วนสารที่เป็นไอบางส่วนจะอยู่ที่จุด 4 ก่อนจะถูกลดอุณหภูมิจนถึงจุดของเหลวอิ่มตัวเช่นเดียวกัน (จุดที่ 6)

นอกจากนี้ การเกิด temperature glide ภายในอีแวปโปเรเตอร์ยังสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.5 ซึ่งพบว่า กระบวนการระเหยภายในอีแวปโปเรเตอร์จะมีความแตกต่างกันบริเวณที่เกิดการเปลี่ยนเฟส (a-j, a-g และ a-b) เมื่อสารทำงานแตกต่างกัน โดยการแลกเปลี่ยนความร้อนของสารซีโอทรอปิกจะมีอุณหภูมิของแหล่งความร้อนและสารทำงานที่ใกล้เคียงกันตลอดช่วงของการแลกเปลี่ยนความร้อน ทำให้สามารถลดความสูญเสียจากกระบวนการย้อนกลับไม่ได้มากกว่าการใช้สารอินทรีย์บริสุทธิ์



รูปที่ 2.5 กระบวนการระเหยภายในอีแวปโปเรเตอร์ของสารซีโอทรอปิก และสารอินทรีย์บริสุทธิ์ (Luo et al., 2017)

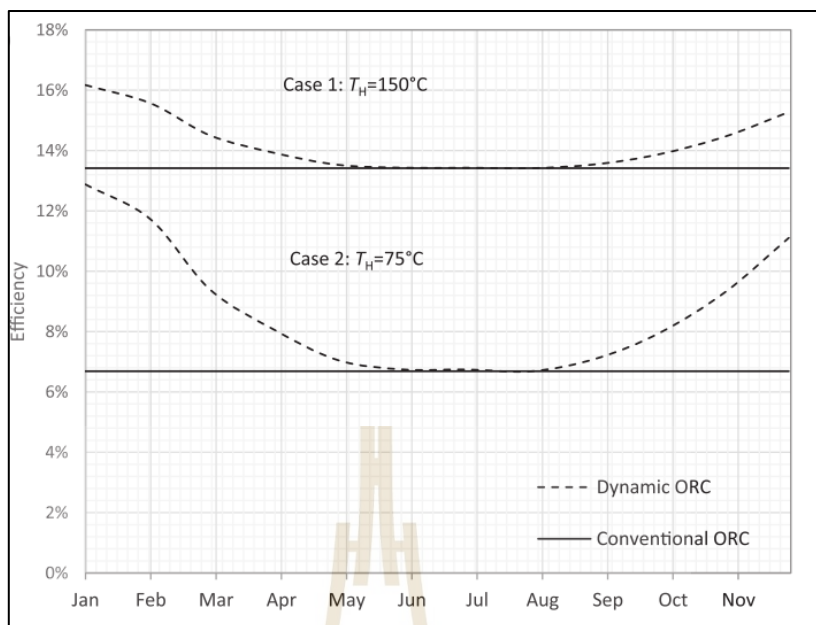
จากพฤติกรรมการเกิด temperature glide ของสารซีไอทรอปิกภายในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนทั้งสองอุปกรณ์ในวัฏจักรโออาร์ซี สามารถแสดงการทำงานในวัฏจักรโออาร์ซีเมื่อเทียบกับสารอินทรีย์บริสุทธิ์ได้ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 T-s diagram ของสารทำงาน (a) สารทำงาน R134a 100% (b) สารทำงาน R245fa และ R134a อัตราส่วน 50%:50% (c) สารทำงาน R245fa 100% (Collings et al., 2016)

## 2.5 การเปรียบเทียบโรงไฟฟ้าโออาร์ซีแบบใช้สารอินทรีย์บริสุทธิ์และสารผสม

Collings et al. (2016) กล่าวว่า โรงไฟฟ้าโออาร์ซีโดยทั่วไป มักออกแบบขนาดของอุปกรณ์โดยอ้างอิงตามอุณหภูมิอากาศวันที่ร้อนที่สุดของปี เนื่องจากโรงไฟฟ้าจะออกแบบให้อากาศสิ่งแวดล้อมทำหน้าที่ในการเป็นแหล่งรับความร้อน เพื่อให้อุปกรณ์สามารถทำงานได้เมื่ออุณหภูมิอากาศลดลง ส่งผลให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของโรงไฟฟ้าอาจถูกจำกัด ด้วยเหตุนี้ จึงเกิดแนวคิดที่จะยังคงขนาดของอุปกรณ์ของโรงไฟฟ้าไว้ แต่ทำการเปลี่ยนสารทำงานภายในโรงไฟฟ้าแทน โดยทำการเปลี่ยนสารทำงานจากสารอินทรีย์บริสุทธิ์เป็นสารซีไอทรอปิก ทำให้โรงไฟฟ้ามีประสิทธิภาพเชิงความร้อนมากขึ้น เมื่ออุณหภูมิอากาศลดลง โดยเฉพาะในฤดูหนาว ซึ่งทำการจำลองวัฏจักรแบบเชิงตัวเลข โดยใช้ข้อมูลอากาศในกรุงปักกิ่ง ประเทศจีน พบว่า ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของระบบเพิ่มขึ้นจากเดิม 23% และสามารถลดราคาการติดตั้งของโรงไฟฟ้าลงได้มากกว่า 7% โดยสามารถแสดงผลได้ดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพเชิงความร้อนของวัฏจักร โออาร์ซีแบบสารอินทรีย์บริสุทธิ์ และสารซีโอทรอปิกของกรุงปักกิ่ง ประเทศจีน (Collings et al., 2016)

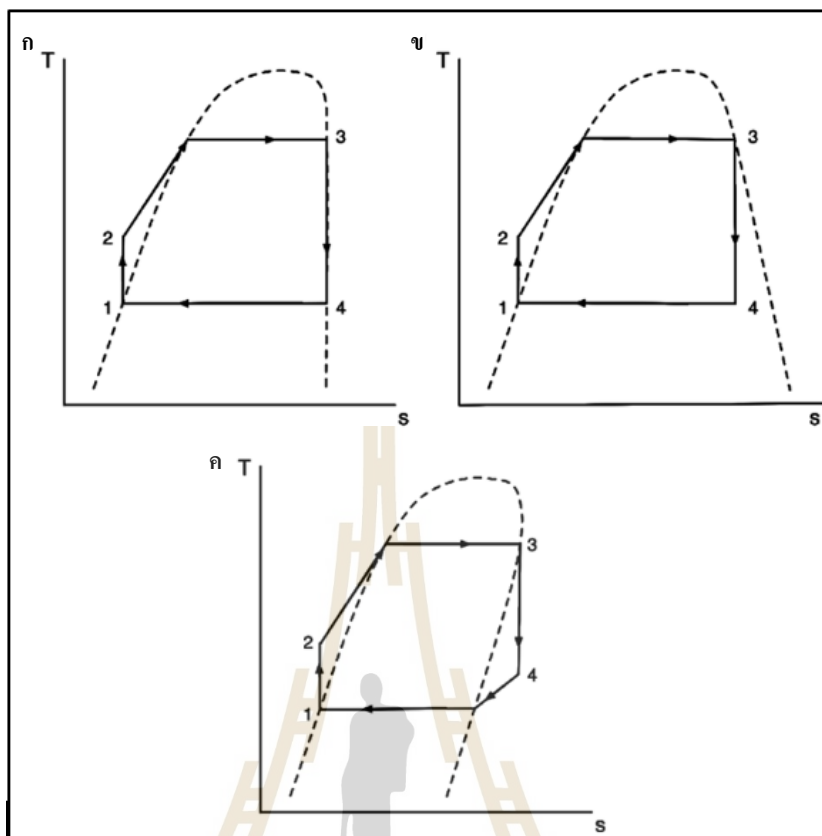
สอดคล้องกับ Su et al. (2018) และ Mondejar et al. (2017) ที่มีการศึกษาเปรียบเทียบ ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของวัฏจักร รวมถึงการพิจารณาปัจจัยที่ส่งผลต่อการผลิตกำลังไฟฟ้าของ โรงไฟฟ้าโออาร์ซี เมื่ออุณหภูมิแหล่งความร้อนเปลี่ยนแปลง ของโรงไฟฟ้าโออาร์ซีแบบใช้ สารอินทรีย์บริสุทธิ์และสารซีโอทรอปิก

นอกจากนี้ Feng et al. (2015), Kheiri et al. (2014) และ Li et al. (2015) ยังได้ทำการพิจารณา เปรียบเทียบความเป็นไปได้ทางเศรษฐศาสตร์ของโรงไฟฟ้าโออาร์ซีแบบสารอินทรีย์บริสุทธิ์และ แบบใช้สารซีโอทรอปิกเป็นสารทำงาน เพื่อเป็นอีกหนึ่งตัวเลือกในการพิจารณาสำหรับโรงไฟฟ้า อีกด้วย

## 2.6 การเลือกสารทำงาน

### 2.6.1 ชนิดของสารทำงาน

สารทำงานที่ใช้ดำเนินการในโรงไฟฟ้าสามารถแบ่งตามคุณสมบัติทางเทอร์โม ไดนามิกส์ได้ 3 ชนิด คือ dry fluid, isentropic fluid และ wet fluid โดยสารทำงานจะมีลักษณะของ เส้นจุดอิ่มตัวใน T-s diagram (saturation line) ที่แตกต่างกัน ซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 T-s diagram ของสารทำงานชนิด (ก) isentropic fluid (ข) wet fluid (ค) dry fluid

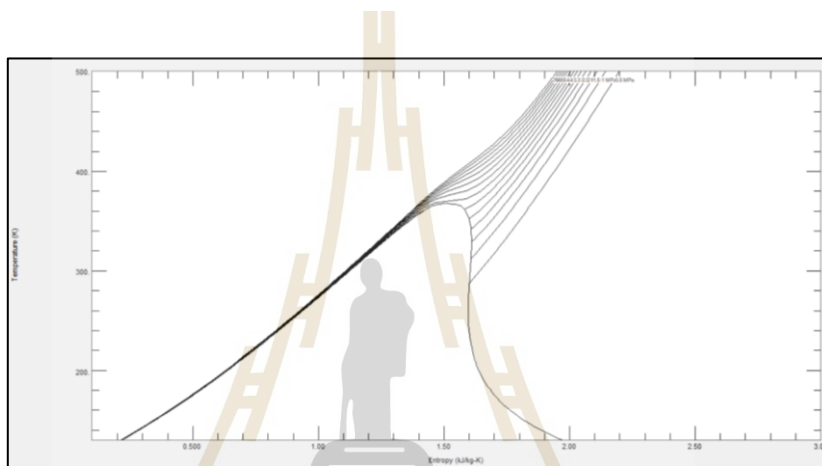
(Mago et al., 2008)

จากรูปที่ 2.8 พบว่า T-s diagram ของสารทำงานชนิดต่าง ๆ จะมีเส้นของจุดอิ่มตัวของการกลายเป็นไอ (saturated vapor line) ที่แตกต่างกันอย่างชัดเจน (จุดที่ 3 - 4) ส่งผลให้การทำงานของสารทำงานภายในเอ็กซ์แพนเดอร์ และสถานะของสารทำงานเมื่อออกจากเอ็กซ์แพนเดอร์ (จุดที่ 4) แตกต่างกัน

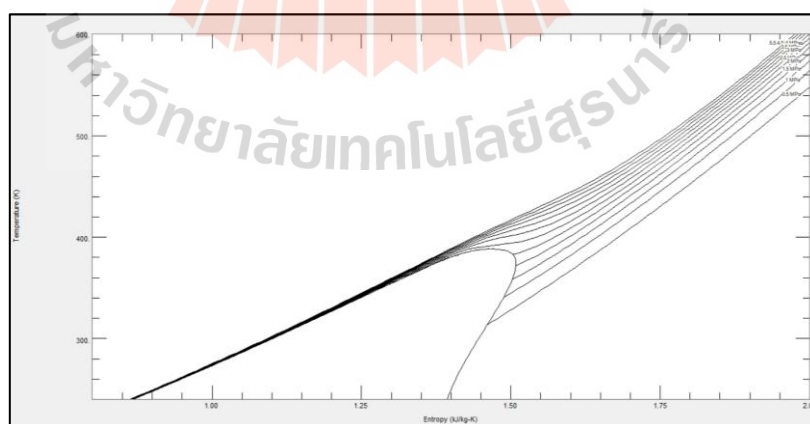
ซึ่งวิธีการจำแนกชนิดของสารทำงานให้พิจารณาที่ความชันของเส้นจุดอิ่มตัวในการกลายเป็นไอใน T-s diagram โดย dry fluid จะมีค่าความชันเป็นบวก เช่น R113, isobutane และ R245ca เป็นต้น wet fluid จะมีค่าความชันเป็นลบ เช่น ammonia, ethanol และ R143a เป็นต้น และ isentropic fluid มีค่าความชันเป็นศูนย์ เช่น RC318, R11 และ R22 เป็นต้น จากพฤติกรรมดังกล่าวพบว่า dry fluid และ isentropic fluid จะมีค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนที่ดีกว่า wet fluid เนื่องจากสารทำงานเมื่อออกจากเอ็กซ์แพนเดอร์จะไม่มีสถานะเป็นของผสม (saturated liquid - vapor mixture) เหมือนกับ wet fluid ทำให้เอ็กซ์แพนเดอร์สามารถทำงานมีประสิทธิภาพมากกว่าการใช้

wet fluid รวมถึงยังช่วยรักษาสภาพการทำงานและอายุการใช้งานของเอ็กซ์แพนเดอร์ให้ทำงานได้ระยะเวลานานขึ้นด้วย (Mago et al., 2008)

อย่างไรก็ตาม เมื่อสารอินทรีย์บริสุทธิ์ผสมกันจนเกิดเป็นสารซีโอทรอปิก เนื่องจากคุณสมบัติของสารเกิดการเปลี่ยนแปลง ทำให้เส้นของจุดอิ่มตัวในการกลายเป็นไอของสารก็เปลี่ยนแปลงเช่นเดียวกัน เช่น สาร R1234yf/RC318 (0.5/0.5) ซึ่งแสดงตัวอย่างของ T-s diagram จากโปรแกรม NIST REFPROP 10.0 ได้ดังรูปที่ 2.9 โดยโปรแกรม NIST REFPROP 10.0 เป็นโปรแกรมที่เป็นฐานข้อมูลคุณสมบัติของสารทำงาน

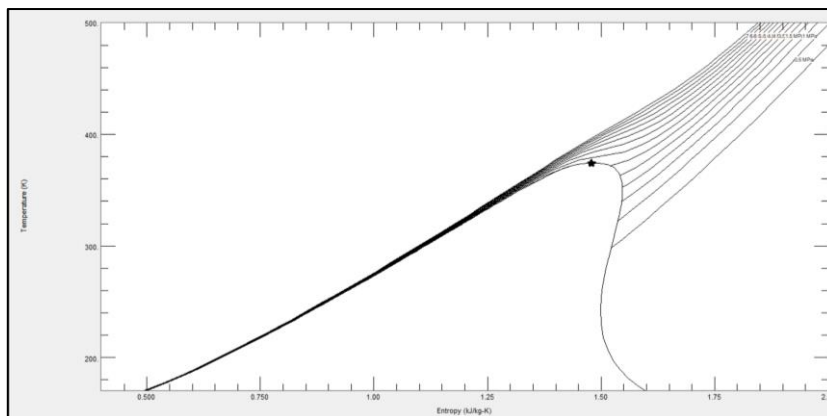


(ก)



(ข)





(ค)

รูปที่ 2.9 T-s diagram ของสารทำงาน (ก) R1234yf (ข) RC318 (ค) R1234yf/RC318 (50/50)

ดังนั้น จึงกล่าวได้ว่า ชนิดของสารทำงานจะส่งผลต่ออายุการใช้งานของเอ็กซ์แพนเดอร์ในโรงไฟฟ้าไออาร์ซีโดยตรง ด้วยสาเหตุที่กล่าวมาข้างต้น ในวิทยานิพนธ์เล่มนี้จึงเลือกสารทำงานซีโอทรอปิกชนิด dry fluid และ isentropic fluid ในการจำลอง

### 2.6.2 ความปลอดภัยของสารทำงานต่อสิ่งแวดล้อม

นอกจากชนิดของสารทำงานที่ถูกพิจารณาแล้ว ยังต้องคำนึงถึงความปลอดภัยของสารทำงานที่ใช้อีกด้วย ซึ่งเป็นประเด็นสำคัญที่อาจส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม โดยค่าที่ใช้ในการประเมินความปลอดภัยของสารทำงานประกอบด้วย ค่าศักยภาพในการทำลายโอโซน (Ozone Depletion Potential, ODP) ค่าศักยภาพในการทำให้เกิดภาวะโลกร้อน (Global Warming Potential, GWP) และ การคงสภาพของสารทำความเย็นในบรรยากาศ (Atmospheric Lifetime)

1) ค่าศักยภาพในการทำลายชั้น โอโซน (Ozone Depletion Potential, ODP) เป็นค่าที่แสดงถึงระดับในการทำลายโอโซนในชั้นสตราโตสเฟียร์ (Stratosphere) ของชั้นบรรยากาศของสารทำงาน โดยใช้ค่าของน้ำยาแอร์ R11 เป็นมาตรฐาน สารเคมีสังเคราะห์กลุ่มฮาโลคาร์บอนที่มีคลอรีน หรือโบรมีนเป็นองค์ประกอบ ที่เมื่อแตกตัวแล้วจะมีศักยภาพในการทำลายโอโซนได้ ซึ่งสารทำงานที่ดีควรมีค่าศักยภาพในการทำลายชั้น โอโซนเป็นศูนย์ (Harn engineering Solution, 2020)

2) ค่าศักยภาพในการทำให้เกิดภาวะโลกร้อน (Global Warming Potential, GWP) เป็นค่าของก๊าซเรือนกระจกที่ถูกปล่อยจากการดำเนินกิจกรรมของมนุษย์ตามที่ถูกควบคุมภายใต้พิธีสารเกียวโต (Kyoto Protocol) มีทั้งหมด 7 ชนิด ซึ่งก๊าซแต่ละชนิดมีความสามารถในการทำให้เกิดภาวะโลกร้อนที่แตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพในการแผ่รังสีความร้อนของโมเลกุลแต่ละประเภท โดยค่าศักยภาพในการทำให้เกิดภาวะโลกร้อน (Global Warming Potential: GWP) ในช่วงระยะเวลา 100 ปี (องค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก (องค์การมหาชน), 2557) ซึ่งสารทำงานที่ดีควรมีค่าศักยภาพในการทำให้เกิดภาวะโลกร้อนที่ต่ำ

3) การคงสภาพของสารทำความเย็นในบรรยากาศ (Atmospheric Lifetime) เป็นค่าที่บ่งบอกระยะเวลาในการคงอยู่ในบรรยากาศของสารทำงานที่ถูกปล่อยออกจากระบบ ซึ่งหน่วยที่ถูกรายงานจะเป็นจำนวนปีของการคงอยู่ในบรรยากาศ ดังนั้น หากค่านี้มีค่ามาก จึงอาจมีโอกาที่สารทำงานจะหมุนเวียนทำลายโอโซนหรือสะสมทำให้เกิดภาวะเรือนกระจก และ เกิดปัญหากับสิ่งแวดล้อมของโลกอย่างมาก (หจก. เซียงใหม่แอร์แอนด์แอร์เอ็นจิเนียริง, 2563)

นอกจากนี้ยังมีระดับความปลอดภัย (Safety Classification) ที่ถูกประเมินบนพื้นฐานของ ASHRAE Standard 34 ซึ่งเป็นการพิจารณาและแบ่งเกณฑ์ความไวการติดไฟของสารทำงานดังรูปที่ 2.10 (Carrier Corporation, 2015)

<b>Flammability</b>	Higher Flammability	<b>A3</b> R-290 Propane R-600a Isobutane	<b>B3</b>
	Lower Flammability	<b>A2</b> R-152a	<b>B2</b>
		<b>A2L*</b> R-32 R-1234yf R-1234ze(E)	<b>B2L*</b> R-717 Ammonia
	No Flame Propagation	<b>A1</b> R-22 R-134a R-410A R-1233zd(E) R-404A R-407C R-507A R-744 Carbon Dioxide	<b>B1</b> R-123
		Lower Toxicity	Higher Toxicity
		<b>Toxicity</b>	

รูปที่ 2.10 ระดับความปลอดภัยของสารทำงานตาม ASHRAE Standard 34  
(Carrier Corporation, 2015)

โดยตัวอย่างของค่าความปลอดภัยของสารทำงานสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.11

Refrigerant	Group	Atmospheric Life	ODP	GWP	Safety Classification
R11	CFC	130	1	4000	A1
R12	CFC	130	1	8500	A1
R22	HCFC	15	0.05	1500	A1
R134a	HFC	16	0	1300	A1
R404a	HFC	16	0	3260	A1
R410a	HFC	16	0	1720	A1
R507	HFC	130	1	3300	A1
R717	NH3	-	0	0	B1
R744	CO2	-	0	1	A1
R290	HC	< 1	0	8	A3
R600a	HC	< 1	0	8	A3

รูปที่ 2.11 ค่า ODP และ GWP ของสารทำงานตัวอย่าง (Harn engineering Solution, 2020)

จากรูปที่ 2.11 พบว่า สารทำงานประเภท CFC และ HCFC เป็นสารทำงานที่ควรหลีกเลี่ยง เนื่องจากมีค่าศักยภาพในการทำลายโอโซน และ ค่าศักยภาพในการทำให้เกิดภาวะโลกร้อนที่ค่อนข้างสูงเมื่อเทียบกับสารทำงานที่แสดง และสารประเภท HC เป็นสารที่มีค่าศักยภาพในการทำลายโอโซน และ ค่าศักยภาพในการทำให้เกิดภาวะโลกร้อนที่ค่อนข้างต่ำ จึงเป็นสารอีกประเภทที่น่าสนใจ แต่สารประเภทนี้ยังมีความปลอดภัย (safety classification) ที่อาจต่ำกว่าสาร CFC และ HCFC จึงต้องพิจารณาจุดประสงค์ของการใช้งานและอุปกรณ์ที่รองรับการทำงานที่เหมาะสม

### 2.6.3 อุณหภูมิวิกฤตของสารทำงาน

นอกจากการพิจารณาชนิดของสารทำงานและความปลอดภัยของสารทำงานแล้ว จุดอุณหภูมิวิกฤตของสารทำงาน (critical temperature point) ยังเป็นอีกหนึ่งคุณสมบัติที่ถูกพิจารณาด้วย โดย Hærvig et al. (2016) ได้เสนอหลักการเลือกสารทำงานเพื่อจำลองภายในโรงไฟฟ้าไออาร์ซี พบว่า สารทำงานที่ถูกเลือกใช้เพื่อให้โรงไฟฟ้าสามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้สูงสุด ควรจะมีจุดอุณหภูมิวิกฤตของสารทำงานมากกว่าอุณหภูมิของแหล่งความร้อนซึ่งประมาณ 30 – 50 °C

อย่างไรก็ตาม จากการศึกษาเกี่ยวกับ โรงไฟฟ้าภายในกลุ่มวิจัย (ชนาภา เทพเสนา และอาทิตย์ คุณศรีสุข, 2562; ชงชัย เทียมทัต และอาทิตย์ คุณศรีสุข, 2562; วชิราภรณ์ รักษาอินทร์ และอาทิตย์ คุณศรีสุข, 2562; สิริชัย ดวงเดือน และอาทิตย์ คุณศรีสุข, 2562; อนุกุล โมงปราณีต และอาทิตย์ คุณศรีสุข, 2562) พบว่าสารทำงานที่ทำให้โรงไฟฟ้าไออาร์ซีผลิตกำลังไฟฟ้าได้สูงสุด จะมีจุดอุณหภูมิวิกฤตของสารทำงานใกล้เคียงกับอุณหภูมิแหล่งความร้อนที่  $\pm 5 - 50^{\circ}\text{C}$

ดังนั้น ในวิทยานิพนธ์เล่มนี้จะทำการเลือกสารซีโอทรอปิกเพื่อทำการจำลองที่มีจุดอุณหภูมิวิกฤตของสารทำงานอยู่ในช่วงต่ำกว่าอุณหภูมิแหล่งความร้อนที่ประมาณ  $5 - 50^{\circ}\text{C}$  และมากกว่า อุณหภูมิแหล่งความร้อนที่ประมาณ  $5 - 50^{\circ}\text{C}$

จากงานวิจัยที่ได้ทำการศึกษา จึงเกิดแนวคิดในการนำเอาโรงไฟฟ้าไออาร์ซีแบบใช้สารทำงานซีโอทรอปิกมาทำการจำลองเชิงตัวเลข โดยใช้เป็นตัวกลางในการรับแหล่งความร้อนที่มีอุณหภูมิ  $100^{\circ}\text{C}$  เพื่อวิเคราะห์สมรรถนะและการผลิตกำลังไฟฟ้าของโรงไฟฟ้า รวมถึงเลือกสารทำงานสำหรับโรงไฟฟ้าไออาร์ซีสำหรับแหล่งความร้อนที่ให้สอดคล้องกับอุณหภูมิอากาศที่เปลี่ยนแปลงของจังหวัดนครราชสีมาเป็นระยะเวลา 12 เดือน



## บทที่ 3

### วิธีการดำเนินการวิจัย

#### 3.1 บทนำ

วิทยานิพนธ์นี้ทำการวิเคราะห์สมรรถนะของโรงไฟฟ้าโออาร์ซีและเลือกสารทำงานให้สอดคล้องกับอุณหภูมิอากาศที่เปลี่ยนแปลง โดยใช้กำลังไฟฟ้าที่โรงไฟฟ้าผลิตได้เป็นตัวตัดสิน ซึ่งทำการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับโรงไฟฟ้าเพื่อทำการตรวจสอบความถูกต้อง และจำลองโรงไฟฟ้าโออาร์ซีเมื่ออุณหภูมิแหล่งความร้อนและอุณหภูมิอากาศเปลี่ยนแปลง โดยใช้โปรแกรม MATLAB ร่วมกับ NIST REFPROP เพื่อการวิเคราะห์สมรรถนะและการเลือกสารทำงานของโรงไฟฟ้า

#### 3.2 แหล่งความร้อนทิ้ง

วิทยานิพนธ์นี้ใช้แหล่งความร้อนทิ้งโดยใช้น้ำเป็นตัวกลางในการรับความร้อน เพื่อนำมาใช้เป็นแหล่งความร้อนทิ้งให้โรงไฟฟ้าโออาร์ซี ซึ่งมีอุณหภูมิที่ใช้จำลองเป็น  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$

#### 3.3 แหล่งรับความร้อน

วิทยานิพนธ์นี้ใช้แหล่งรับความร้อนในการจำลองเป็นน้ำ โดยน้ำจะเป็นตัวกลางในการรับความร้อนในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนจากอุณหภูมิอากาศ ซึ่งข้อมูลอุณหภูมิอากาศที่ใช้เป็นของจังหวัดนครราชสีมา เป็นระยะเวลา 12 เดือน ของปี 2562 (ศูนย์ภูมิอากาศ กรมอุตุนิยมวิทยา, 2562) โดยจำลองอุณหภูมิเฉลี่ยของอากาศ ณ เวลา 10.00 น. 13.00 น. และ 16.00 น. เป็นเวลาดำเนินการของโรงไฟฟ้า ดังแสดงข้อมูลได้ในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 อุณหภูมิอากาศของจังหวัดนครราชสีมาในปี 2562 ณ ช่วงเวลาที่ทำการจำลอง

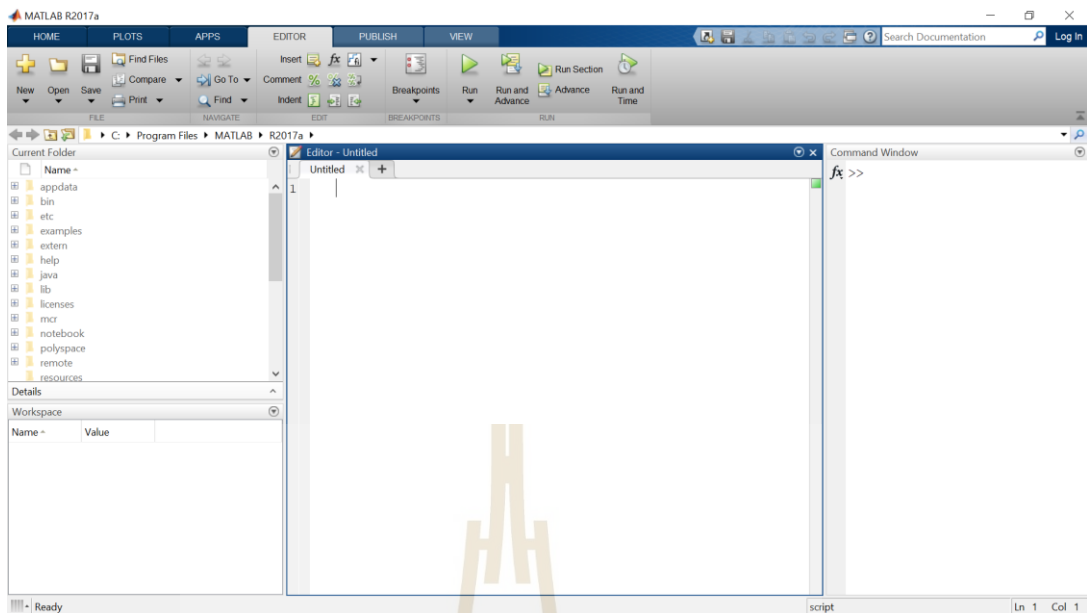
เดือน	อุณหภูมิอากาศ ณ เวลา (°C)			เดือน	อุณหภูมิอากาศ ณ เวลา (°C)		
	10.00 น.	13.00 น.	16.00 น.		10.00 น.	13.00 น.	16.00 น.
มกราคม	25	30	32	กรกฎาคม	31	34	34
กุมภาพันธ์	30	35	36	สิงหาคม	27	29	28
มีนาคม	32	36	37	กันยายน	29	31	31
เมษายน	33	38	36	ตุลาคม	30	32	32
พฤษภาคม	33	36	32	พฤศจิกายน	27	31	31
มิถุนายน	33	34	35	ธันวาคม	25	30	31

### 3.4 เครื่องมือในการจำลองโรงไฟฟ้าไออาร์ซี

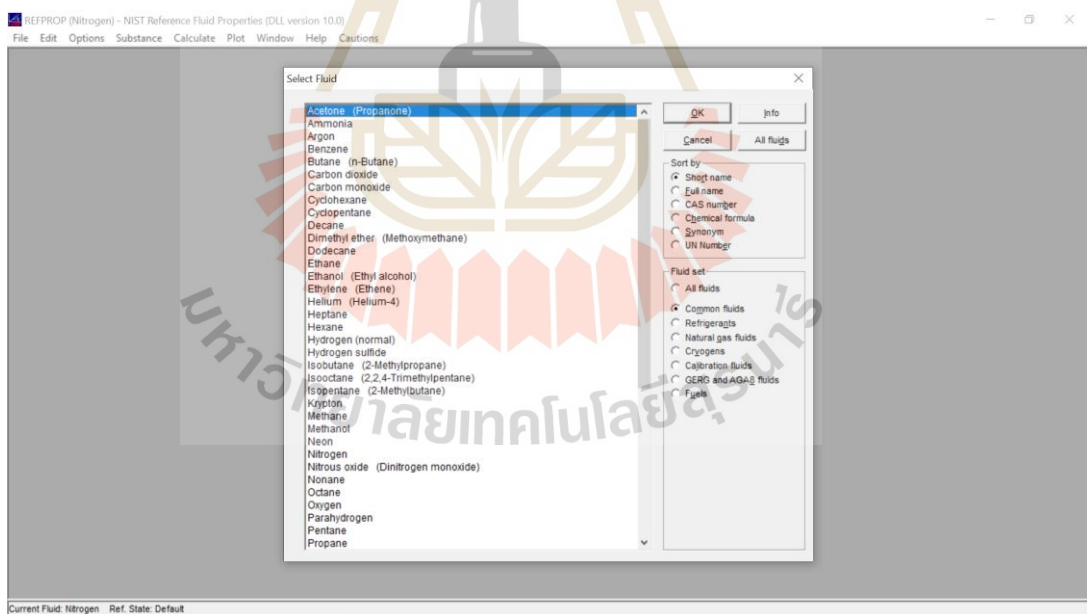
#### 3.4.1 เครื่องคอมพิวเตอร์สำหรับการออกแบบและจำลองทางคณิตศาสตร์

เนื่องจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้เป็นการจำลองเชิงคณิตศาสตร์ ดังนั้นเครื่องมือที่ใช้ในการจำลองโรงไฟฟ้าไออาร์ซีจะใช้โปรแกรม MATLAB R2017a โดยมีหน้าต่างของโปรแกรมดังรูปที่ 3.1

นอกจากนี้ ยังมีการใช้ฐานข้อมูลจาก NIST REFPROP version 10.0 เพื่อให้ข้อมูลเกี่ยวกับคุณสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์ของสารทำงานที่ใช้ในการจำลอง เพื่อทำงานร่วมกับโปรแกรม MATLAB อีกด้วย ซึ่งหน้าต่างของฐานข้อมูลแสดงดังรูปที่ 3.2



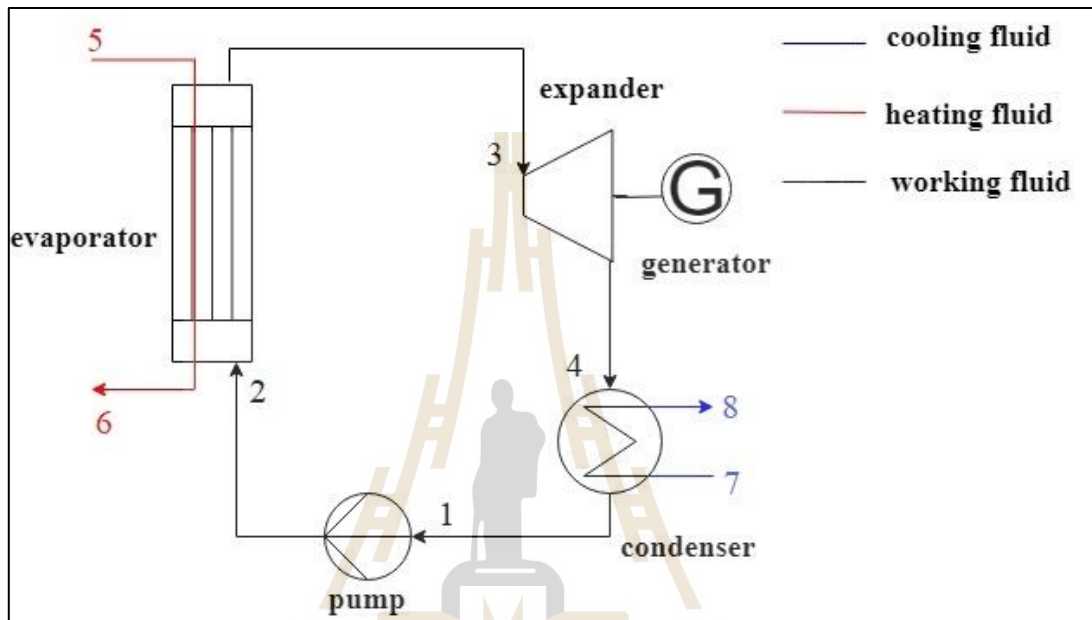
รูปที่ 3.1 หน้าต่างโปรแกรม MATLAB ที่ใช้ในการจำลองโรงไฟฟ้าไออาร์ซี



รูปที่ 3.2 หน้าต่างฐานข้อมูล NIST REFPROP version 10.0

### 3.4.2 สมการที่ใช้ในการจำลอง

ในการจำลองเชิงตัวเลขของโรงไฟฟ้าโออาร์ซีในวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ใช้การคำนวณตามสมการสมดุลพลังงาน โดยสมการที่ใช้ในการคำนวณภายในโรงไฟฟ้าเมื่อพิจารณาตามอุปกรณ์และอ้างอิงหมายเลขตำแหน่งของอุปกรณ์ตามรูปที่ 3.3 เป็นดังนี้



รูปที่ 3.3 โรงไฟฟ้าโออาร์ซีที่ใช้ในการจำลอง

จากวัฏจักรของโรงไฟฟ้าโออาร์ซีตามรูปที่ 3.3 วัฏจักรจะเริ่มทำงานจากการจ่ายงานให้กับปั๊ม ณ จุดที่ 1 เพื่อให้เกิดความดันที่เพิ่มขึ้นของสารทำงาน จึงกำหนดให้สถานะของสารทำงาน ณ ตำแหน่งที่ 1 มีสถานะเป็นของเหลวอิ่มตัว (saturated liquid) และขับเคลื่อนสารทำงานให้เข้าสู่ฮีตเอ็กซ์เชนเจอร์ โดยงานที่จ่ายให้กับปั๊มจะทำการคำนวณดังสมการที่ 3.1 และปั๊มที่ใช้ในการจำลองจะมีการพิจารณาค่า Isentropic efficiency ของปั๊มร่วมด้วย ซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ 3.2

$$W_{\text{pump}} = m_{\text{wf}} (h_2 - h_1) \quad (3.1)$$

$$\eta_{\text{isen,pump}} = \frac{h_{2s} - h_1}{h_2 - h_1} \quad (3.2)$$



เมื่อ	$W_{\text{pump}}$	คือ งานที่จ่ายให้กับปั๊ม, W
	$m_{\text{wf}}$	คือ อัตราการไหลเชิงมวลของสารซีไอทรอปปีก, kg/s
	$h_1, h_2, h_{2s}$	คือ ค่าเอนทาลปีของสารทำงาน ณ ตำแหน่งที่ 1, 2 และตำแหน่งที่ 2 เมื่อ Isentropic efficiency ของปั๊มเป็น 100% ตามลำดับ, J/kg
	$\eta_{\text{isen,pump}}$	คือ Isentropic efficiency ของปั๊ม

เมื่อสารทำงานเคลื่อนที่ออกจากปั๊ม (จุดที่ 2) จะเคลื่อนที่เข้าสู่อีแวปโปเรเตอร์เพื่อแลกเปลี่ยนความร้อนกับแหล่งความร้อนทิ้ง ขณะที่ความดันคงที่ โดยการจำลองจะกำหนดให้สถานะของสารทำงานเมื่อเคลื่อนที่ออกจากอีแวปโปเรเตอร์ (จุดที่ 3) เป็นไออิ่มตัว (saturated vapor) ซึ่งสามารถคำนวณค่าความร้อนที่ถ่ายเทภายในอุปกรณ์ได้ดังสมการที่ 3.3

$$Q_{\text{evap}} = m_{\text{wf}} (h_3 - h_2) \quad (3.3)$$

เมื่อ	$Q_{\text{evap}}$	คือ ค่าความร้อนที่ถ่ายเทในอีแวปโปเรเตอร์, W
	$m_{\text{wf}}$	คือ อัตราการไหลเชิงมวลของสารซีไอทรอปปีก, kg/s
	$h_2, h_3$	คือ ค่าเอนทาลปีของสารทำงาน ณ ตำแหน่งที่ 2 และตำแหน่งที่ 3 ตามลำดับ, J/kg

สารทำงานที่มีสถานะเป็นไออิ่มตัวเมื่อเคลื่อนที่ออกจากอีแวปโปเรเตอร์จะเข้าสู่เอ็กซ์แพนเดอร์เพื่อผลิตงาน (จุดที่ 3) ซึ่งสามารถคำนวณงานที่เอ็กซ์แพนเดอร์ผลิตได้ดังสมการที่ 3.4 ทั้งนี้ เอ็กซ์แพนเดอร์ที่ใช้ในการจำลองจะมีการพิจารณา Isentropic efficiency ของเอ็กซ์แพนเดอร์ได้จากสมการที่ 3.5

$$W_{\text{exp}} = m_{\text{wf}} (h_3 - h_4) \quad (3.4)$$

$$\eta_{\text{isen,exp}} = \frac{h_3 - h_4}{h_3 - h_{4s}} \quad (3.5)$$

เมื่อ	$W_{\text{exp}}$	คือ งานที่เอ็กซ์แพนเดอร์ผลิตได้, W
	$m_{\text{wf}}$	คือ อัตราการไหลเชิงมวลของสารซีไอทรอปปีก, kg/s

$h_3, h_4, h_{4s}$  คือ ค่าเอนทาลปีของสารทำงาน ณ ตำแหน่งที่ 3, 4 และตำแหน่งที่ 4 เมื่อ Isentropic efficiency ของเอ็กซ์แพนเดอร์เป็น 100% ตามลำดับ, J/kg  
 $\eta_{isen,exp}$  คือ Isentropic efficiency ของเอ็กซ์แพนเดอร์

เมื่อสารทำงานเคลื่อนที่ออกจากเอ็กซ์แพนเดอร์ จะมีความดันที่ลดลงและเข้าสู่คอนเดนเซอร์ (จุดที่ 4) เพื่อควบแน่นสารทำงานจากสถานะไอให้กลายเป็นของเหลว โดยใช้การแลกเปลี่ยนความร้อนกับแหล่งรับความร้อน ซึ่งค่าความร้อนที่ถ่ายเทภายในคอนเดนเซอร์สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 3.6 หลังจากนั้น สารทำงานจะเคลื่อนที่กลับเข้าสู่ปั๊มวนเป็นวัฏจักรต่อไป

$$Q_{cond} = m_{wf} (h_4 - h_1) \quad (3.6)$$

เมื่อ  $Q_{cond}$  คือ ค่าความร้อนที่ถ่ายเทในคอนเดนเซอร์, W  
 $m_{wf}$  คือ อัตราการไหลเชิงมวลของสารชีโอรอบปีปก, kg/s  
 $h_1, h_4$  คือ ค่าเอนทาลปีของสารทำงาน ณ ตำแหน่งที่ 1 และตำแหน่งที่ 4 ตามลำดับ, J/kg

เมื่อทำการคำนวณงานที่ต้องจ่ายให้ปั๊ม ค่าความร้อนที่ถ่ายเทในอีแวปโปเรเตอร์งานที่เอ็กซ์แพนเดอร์ผลิตได้ และค่าความร้อนที่ถ่ายเทในคอนเดนเซอร์แล้ว จะสามารถคำนวณกำลังไฟฟ้าสุทธิที่โรงไฟฟ้าไออาร์ซีสามารถผลิตได้ และคำนวณประสิทธิภาพเชิงความร้อนของโรงไฟฟ้าตามกฎข้อที่ 1 ของเทอร์โมไดนามิกส์ (Thermal efficiency,  $\eta_{th}$ ) ได้ดังสมการที่ 3.7 และ 3.8 ตามลำดับ

$$W_{net} = W_{pump} - W_{exp} \quad (3.7)$$

$$\eta_{th} = \frac{W_{net}}{Q_{evap}} \quad (3.8)$$

เมื่อ  $W_{net}$  คือ กำลังไฟฟ้าสุทธิที่โรงไฟฟ้าผลิตได้, W  
 $W_{pump}$  คือ งานที่จ่ายให้กับปั๊ม, W  
 $W_{exp}$  คือ งานที่เอ็กซ์แพนเดอร์ผลิตได้, W

$Q_{\text{evap}}$	คือ ค่าความร้อนที่ถ่ายเทในอีแวปโปเรเตอร์, W
$\eta_{\text{th}}$	คือ ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของโรงไฟฟ้า

นอกจากนี้ ยังได้ทำการคำนวณเพื่อหาขนาดของอีแวปโปเรเตอร์ คอนเดนเซอร์ และอัตราส่วนการขยายตัวของไอ (Expansion ratio) ภายในเอ็กซ์แพนเดอร์เพื่อทำนายขนาดของเอ็กซ์แพนเดอร์ด้วย ซึ่งขนาดของอีแวปโปเรเตอร์และคอนเดนเซอร์จะถูกแสดงในรูปของ UA จากสมการ 3.9 – 3.10 และ 3.11 – 3.12 ตามลำดับ

เนื่องจากการจำลองกำหนดให้ลักษณะการไหลของการแลกเปลี่ยนความร้อนที่เกิดขึ้นภายในอีแวปโปเรเตอร์และคอนเดนเซอร์เป็นการไหลแบบสวนทาง (counter flow) ซึ่งมีลักษณะการไหลดังรูปที่ 3.4 และสามารถแสดงการกระจายตัวของอุณหภูมิที่เกิดขึ้นภายในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน เมื่อการไหลเป็นแบบสวนทาง ได้ดังรูปที่ 3.5 จึงคำนวณขนาดของอีแวปโปเรเตอร์และคอนเดนเซอร์เป็นดังสมการที่สมการ 3.9 – 3.10 และ 3.11 – 3.12 ตามลำดับ

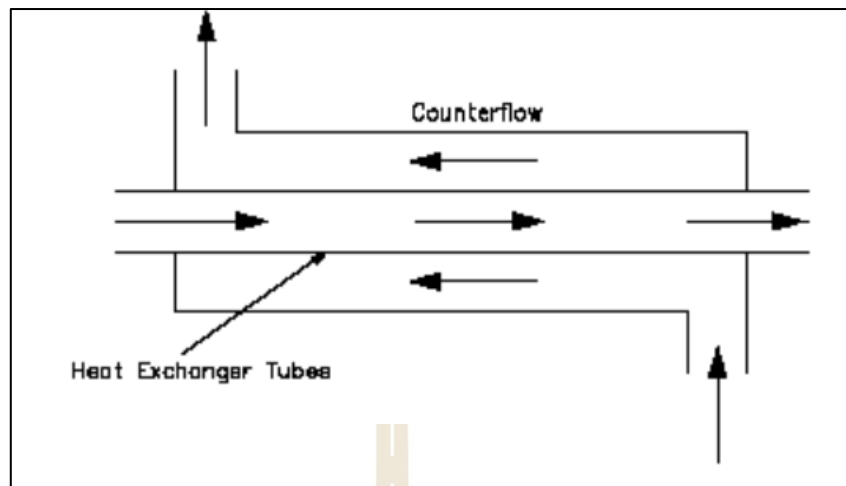
$$Q_{\text{evap}} = (UA)_{\text{evap}} \Delta T_{\text{lm, evap}} \quad (3.9)$$

และ 
$$\Delta T_{\text{lm, evap}} = \frac{(T_5 - T_3) - (T_6 - T_2)}{\ln \left( \frac{T_5 - T_3}{T_6 - T_2} \right)} \quad (3.10)$$

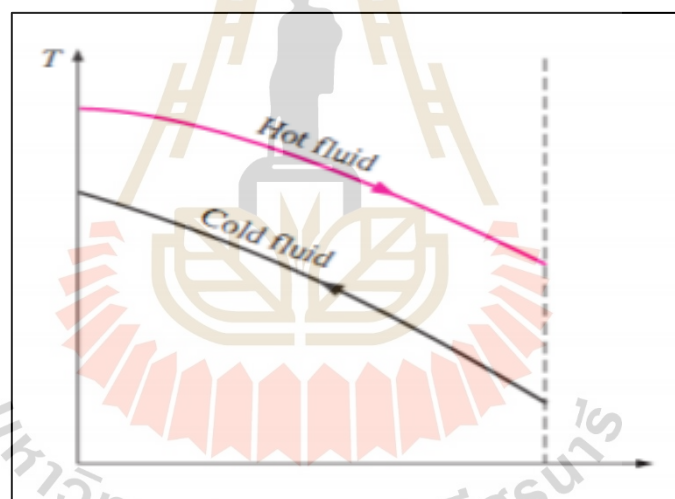
$$Q_{\text{cond}} = (UA)_{\text{cond}} \Delta T_{\text{lm, cond}} \quad (3.11)$$

และ 
$$\Delta T_{\text{lm, cond}} = \frac{(T_4 - T_8) - (T_1 - T_7)}{\ln \left( \frac{T_4 - T_8}{T_1 - T_7} \right)} \quad (3.12)$$

เมื่อ	$U$	คือ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม (Overall heat transfer coefficient), $\text{W/m}^2\text{K}$
	$A$	คือ พื้นที่ในการแลกเปลี่ยนความร้อน, $\text{m}^2$
	$\Delta T_{\text{lm}}$	คือ ค่าเฉลี่ยความแตกต่างของอุณหภูมิ (Log mean temperature difference), $^{\circ}\text{C}$



รูปที่ 3.4 ลักษณะการไหลแบบ counter flow (Engineers Edge, 2020)



รูปที่ 3.5 การกระจายตัวของอุณหภูมิภายในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบสวนทางกัน (Cengel, 2007)

และอัตราส่วนการขยายตัวของไอของสารทำงาน (Expansion ratio) ถูกคำนวณจากสมการที่ 3.13 – 3.15

$$V_3 = \frac{m_{wf}}{\rho_3} \quad (3.13)$$

$$V_4 = \frac{m_{wf}}{\rho_4} \quad (3.14)$$

$$\text{Expansion ratio} = \frac{V_4}{V_3} \quad (3.15)$$

เมื่อ  $V_3, V_4$  คือ อัตราการไหลเชิงปริมาตรของสารทำงาน ณ ตำแหน่งที่ 3 และ 4 ตามลำดับ,  $m^3/s$

$\rho_3, \rho_4$  คือ ความหนาแน่นของสารทำงาน ณ ตำแหน่งที่ 3 และ 4 ตามลำดับ,  $kg/m^3$

Expansion ratio คือ อัตราส่วนการขยายตัวของไอของสารทำงานในเอ็กซ์แพนเดอร์

นอกจากนี้ ยังสามารถคำนวณอัตราส่วนของความดันในโรงไฟฟ้า (Pressure ratio) ซึ่งส่งผลต่อภาระการเพิ่มความดันของปั๊มได้ตามสมการที่ 3.16

$$\text{Pressure ratio} = \frac{P_{\text{evap}}}{P_{\text{cond}}} \quad (3.16)$$

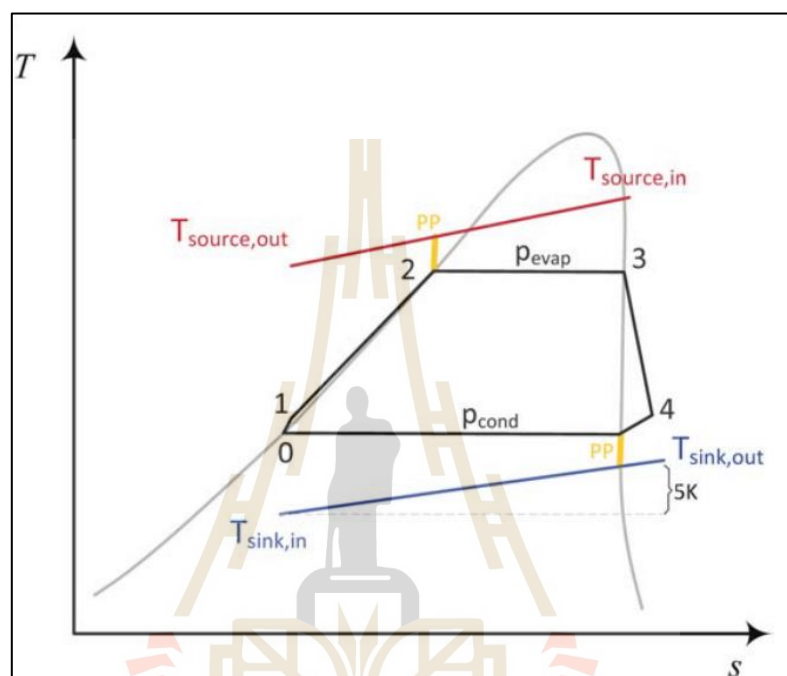
เมื่อ  $P_{\text{evap}}$  คือ ความดันในการระเหยภายในอีแวปโปเรเตอร์, MPa

$P_{\text{cond}}$  คือ ความดันในการควบแน่นภายในคอนเดนเซอร์, MPa

Pressure ratio คือ อัตราส่วนความดันในโรงไฟฟ้า

การคำนวณด้วยสมการทั้งหมดจะถูกเขียนอยู่ในโปรแกรม MATLAB เพื่อจำลองโรงไฟฟ้า โดยมีการคำนวณการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในอีแวปโปเรเตอร์ และคอนเดนเซอร์ด้วยวิธีการ Golden section search method เพื่อหาตำแหน่งของการเกิด Pinch point temperature ซึ่ง Pinch point temperature คือ จุดที่มีความแตกต่างของอุณหภูมิที่เกิดขึ้นภายในอุปกรณ์แลกเปลี่ยน

ความร้อนน้อยที่สุด โดยหากพิจารณาในอีแวปโปเรเตอร์จะเป็นความแตกต่างที่น้อยที่สุดของ อุณหภูมิแหล่งความร้อนทิ้งและสารทำงาน ส่วนในคอนเดนเซอร์จะเป็นความแตกต่างที่น้อยที่สุด ของอุณหภูมิแหล่งรับความร้อนและสารทำงาน ซึ่งแสดงตัวอย่างของการเกิด Pinch point temperature ในวัฏจักรได้ดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 การเกิด Pinch point temperature (PP) ในวัฏจักร ไออาร์ซี (Mondejar et al., 2017)

### 3.5 ขั้นตอนการจำลองโรงไฟฟ้าไออาร์ซี

#### 3.5.1 การตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรมที่ใช้ในการจำลอง

เพื่อตรวจสอบความแม่นยำของ โปรแกรมที่ถูกพัฒนาเพื่อจำลองโรงไฟฟ้าไออาร์ซี แบบใช้สารซีโอทรอปิก จึงได้ทำการตรวจสอบความแม่นยำเทียบกับบทความของ Wang et al. (2017) ซึ่งเป็นการทดสอบโรงไฟฟ้าไออาร์ซีโดยใช้ R600a/R601a (0.4/0.6) เป็นสารทำงาน โดย กำหนดความดันที่อีแวปโปเรเตอร์ ความดันคอนเดนเซอร์ และอุณหภูมิของแหล่งความร้อนทิ้ง เช่นเดียวกับบทความ เพื่อหาค่าอุณหภูมิสารทำงานเมื่อออกจากอีแวปโปเรเตอร์ อุณหภูมิแหล่ง ความร้อนทิ้งเมื่อออกจากอีแวปโปเรเตอร์ ค่าความร้อนที่ถ่ายเทในอีแวปโปเรเตอร์ กำลังไฟฟ้าสุทธิ ของโรงไฟฟ้า และประสิทธิภาพเชิงความร้อนของ โรงไฟฟ้า สามารถแสดงผลได้ดังตารางที่ 3.2

จากการตรวจสอบความถูกต้องในตารางที่ 3.2 พบว่า โปรแกรมที่ถูกพัฒนาเพื่อจำลองมีความแม่นยำเมื่อเทียบกับบทความ เนื่องจาก ให้ค่าความคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วง 0.040 - 4.686% ดังนั้น จึงนำมาสู่การจำลองเชิงตัวเลขของโรงไฟฟ้าโออาร์ซีในวิทยานิพนธ์เล่มนี้

ตารางที่ 3.2 ผลการตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรม

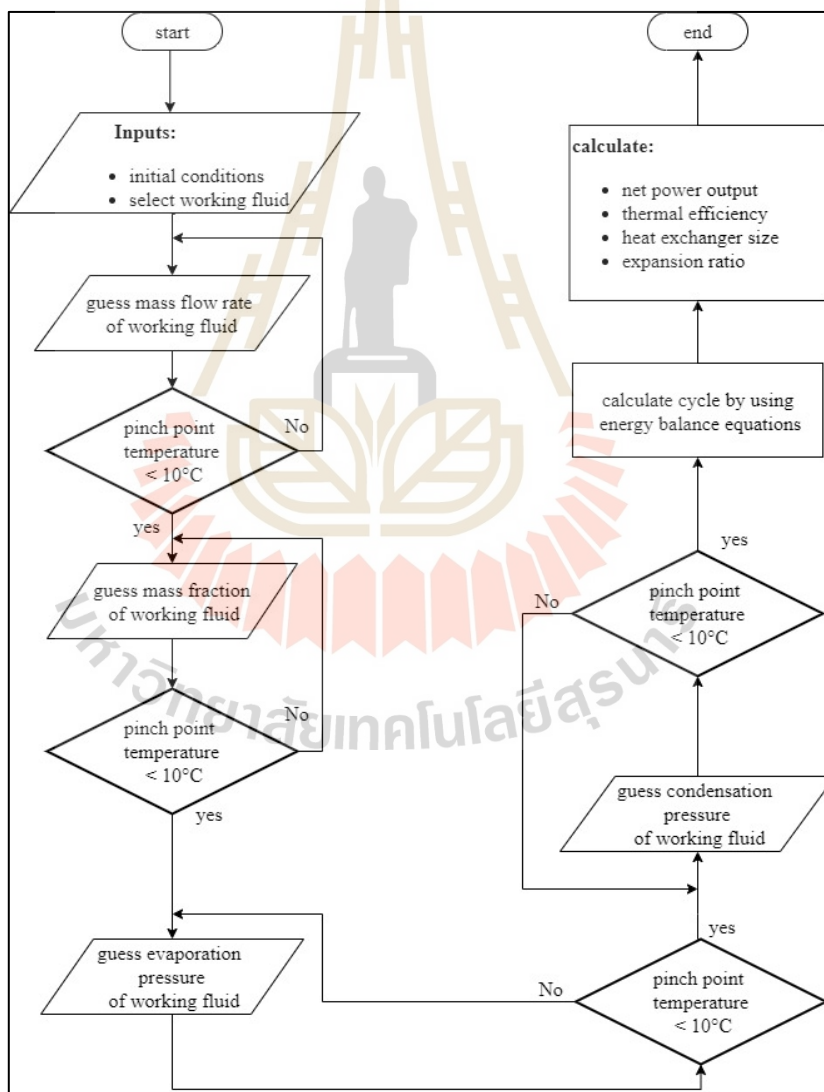
พารามิเตอร์	Wang et al. (2017)	ผลจากโปรแกรม	ความคลาดเคลื่อน (%)
อุณหภูมิสารทำงานเมื่อออกจากอีแวปโปเรเตอร์ (°C)	87.30	87.86	0.65
อุณหภูมิแหล่งความร้อนทิ้งเมื่อออกจากอีแวปโปเรเตอร์ (°C)	88.40	88.30	0.11
ค่าความร้อนที่ถ่ายเทในอีแวปโปเรเตอร์ (W/m <sup>2</sup> )	435.00	435.17	0.04
กำลังไฟฟ้าสุทธิของโรงไฟฟ้า (W/m <sup>2</sup> )	17.50	18.32	4.69
ประสิทธิภาพเชิงความร้อน (%)	4.10	4.21	2.68

### 3.5.2 กระบวนการจำลองโรงไฟฟ้าในสถานะออกแบบ

การพัฒนาโปรแกรมเพื่อจำลองโรงไฟฟ้าโออาร์ซีในโปรแกรม MATLAB เริ่มจากการกำหนดเงื่อนไขของโรงไฟฟ้าในการจำลอง โดยวัตถุประสงค์ของการจำลองจะใช้วิธีการ Golden section search method ในการหาพารามิเตอร์ 4 พารามิเตอร์ คือ ความดันของสารทำงานในอีแวปโปเรเตอร์ ( $P_{\text{evap}}$ ) ความดันของสารทำงานในคอนเดนเซอร์ ( $P_{\text{cond}}$ ) อัตราการไหลเชิงมวลของสารทำงาน (mass flow rate of working fluid) และความอัตรารส่วนความเข้มข้นของสารทำงาน (mass fraction) ที่ทำให้โรงไฟฟ้าสามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้สูงสุด ซึ่งเงื่อนไขการจำลองเป็นดังตารางที่ 3.3 และแผนผังกระบวนการจำลองในโปรแกรมเป็นดังรูปที่ 3.7

ตารางที่ 3.3 เงื่อนไขเบื้องต้นในการจำลองโรงไฟฟ้าไออาร์ซีในสภาวะออกแบบ

พารามิเตอร์	ขนาด	หน่วย
Isentropic efficiency ของปั๊ม	0.75	-
Isentropic efficiency ของเอ็กซ์แพนเดอร์	0.80	-
อัตราการไหลเชิงมวลของแหล่งความร้อนทิ้ง	1	kg/s
อุณหภูมิของแหล่งความร้อนทิ้ง	100	°C
pinch point temperature	10	°C



รูปที่ 3.7 แผนผังกระบวนการจำลองในโปรแกรม MATLAB ในสภาวะออกแบบ



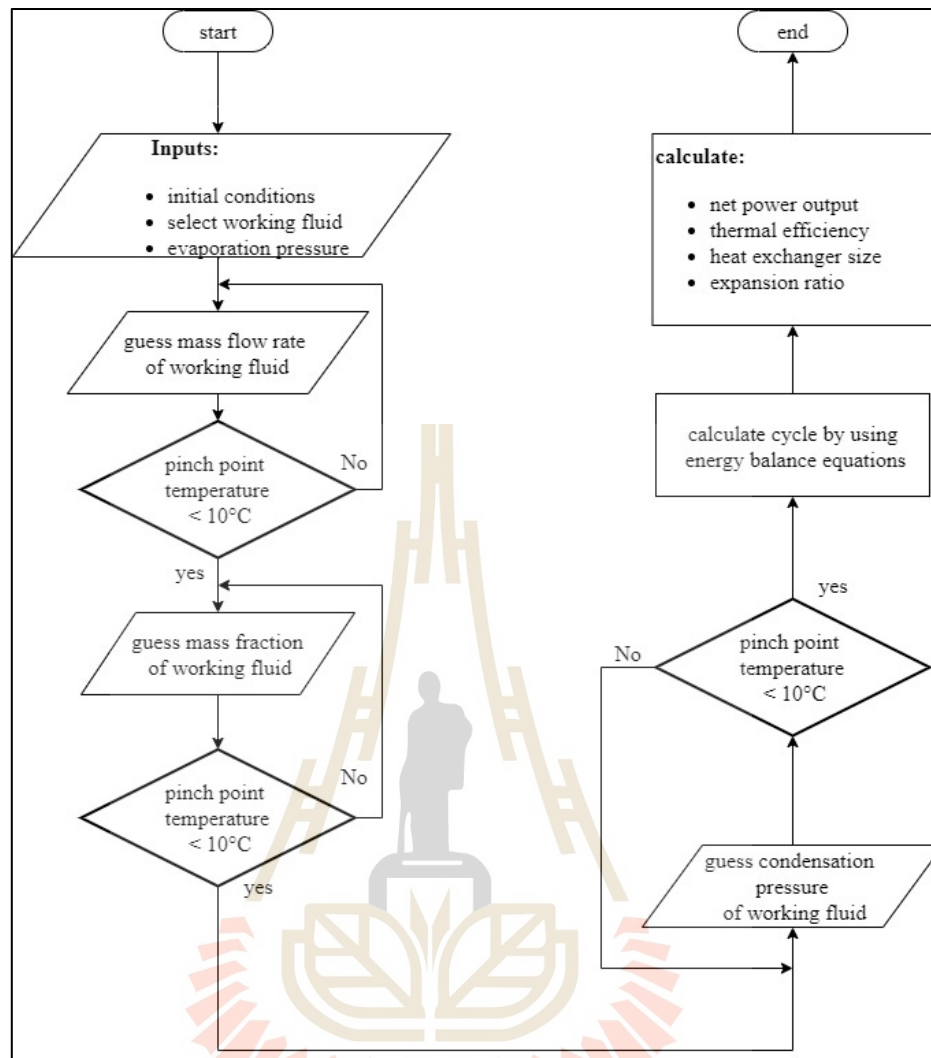
การออกแบบโรงไฟฟ้าไออาร์ซีในสภาวะออกแบบ (Design condition) จะเริ่มจากการหาพารามิเตอร์ภายใต้อุณหภูมิอากาศเฉลี่ยที่ร้อนที่สุดในปี 2562 ของจังหวัดนครราชสีมา โดยใช้สารซีโอทรอปิกเพื่อจำลองในสภาวะออกแบบตามตารางที่ 3.4

ทั้งนี้ เนื่องจากอุณหภูมิของแหล่งความร้อนที่ใช้ในการจำลองถูกกำหนดให้คงที่ จึงอนุมานได้ว่า ความดันที่ใช้ในการระเหยของสารทำงานในอีแวปโปเรเตอร์เมื่ออุณหภูมิอากาศเปลี่ยนแปลงในช่วงเวลาที่เหลืออาจคงที่เช่นเดียวกัน ดังนั้น เพื่อศึกษาพารามิเตอร์ที่ส่งผลกระทบต่อการผลิตกำลังไฟฟ้า จึงแบ่งการออกแบบในช่วงเวลาที่เหลือออกเป็น 2 การจำลอง ดังนี้

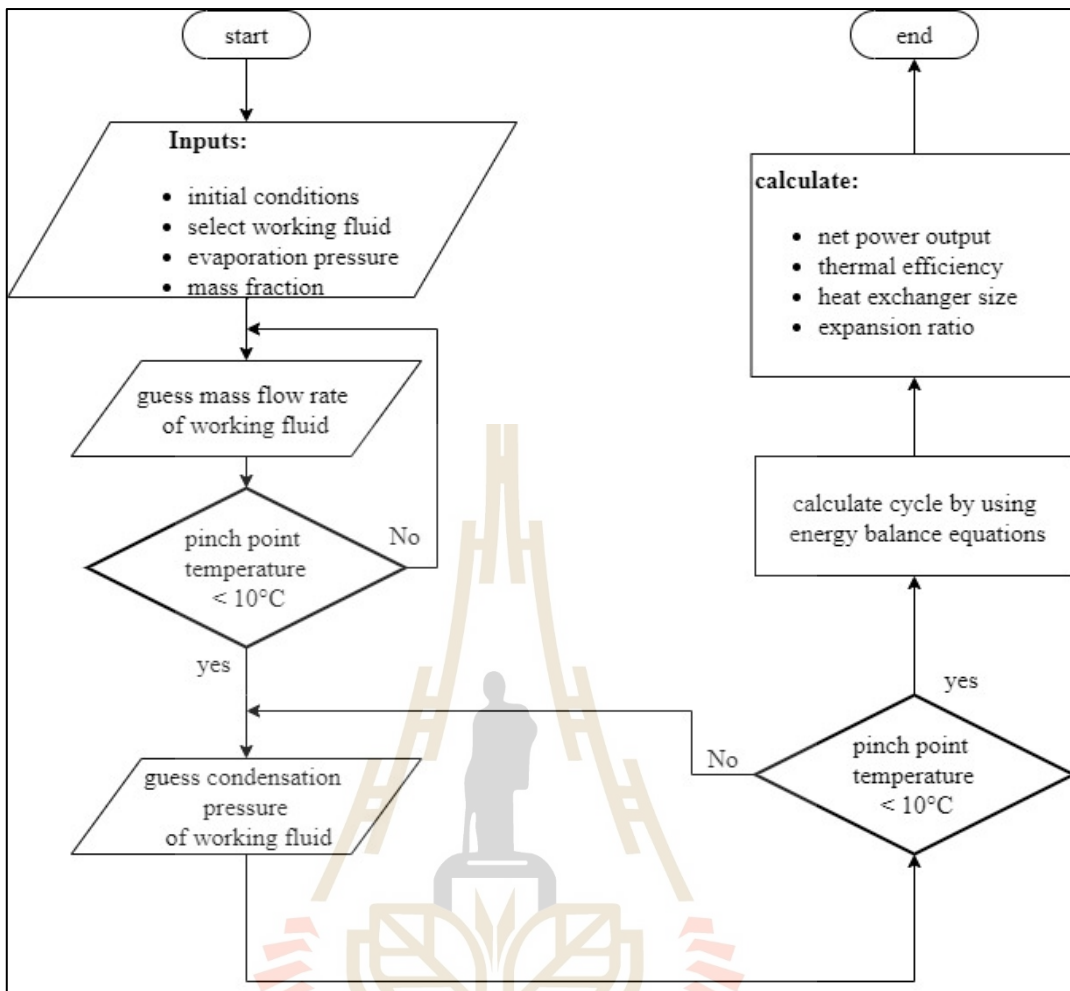
1) ความดันระเหยในอีแวปโปเรเตอร์คงที่ และหาความดันของการควบแน่นในคอนเดนเซอร์ อัตราการไหลเชิงมวลของสารทำงาน รวมถึงอัตราส่วนความเข้มข้นของสารทำงานที่ทำให้ผลิตกำลังไฟฟ้าได้สูงสุด เมื่ออุณหภูมิอากาศเปลี่ยนแปลง ซึ่งแสดงกระบวนการทำงานได้ดังรูปที่ 3.8

2) ความดันระเหยในอีแวปโปเรเตอร์ และอัตราส่วนความเข้มข้นของสารทำงานคงที่ เพื่อหาความดันของการควบแน่นในคอนเดนเซอร์ และอัตราการไหลเชิงมวลของสารทำงานที่ทำให้ผลิตกำลังไฟฟ้าได้สูงสุด เมื่ออุณหภูมิอากาศเปลี่ยนแปลง ซึ่งแสดงกระบวนการทำงานได้ดังรูปที่ 3.9

การเลือกใช้สารทำงานในตารางที่ 3.4 เป็นการเลือกใช้คู่สารทำงานจากการรวบรวมบทความที่เกี่ยวข้อง พบว่า สารทำงานที่นิยมใช้เพื่อศึกษาการทำงานของโรงไฟฟ้าไออาร์ซีแบบใช้สารซีโอทรอปิก คือ isobutane/isopentane (Lecompte et al., 2014; Liu et al., 2014; Liu et al., 2015) และ R227ea/R245fa (Wu et al., 2016; Zhao et al., 2014; PreiBinger et al., 2013) ส่วนสารทำงาน RC318 เป็นการเลือกใช้สารตาม อนุกุล โม่งปรานิต และอาทิตย์ คุ้มศรีสุข. (2562). ซึ่งเป็นสารทำงานที่ผลิตกำลังไฟฟ้าสุทธิได้สูงสุดที่แหล่งความร้อน 100 °C โดยสารทำงานที่ทำการจับคู่เพื่อจำลองคือ R1234yf และ R227ea ที่มีจุดอุณหภูมิวิกฤตใกล้เคียงกับอุณหภูมิแหล่งความร้อน



รูปที่ 3.8 แผนผังกระบวนการจำลองในโปรแกรม MATLAB ในการจำลองที่ 1



รูปที่ 3.9 แผนผังกระบวนการจำลองใน โปรแกรม MATLAB ในการจำลองที่ 2

ตารางที่ 3.4 สารซีโอทรอปโปกที่ใช้ในการจำลอง

สารทำงาน	ประเภทของ สารทำงาน (US EPA, 2007)	จุดอุณหภูมิวิกฤต ของสารทำงาน (°C)	ODP	GWP	Safety classification
isobutane	HC	134.66	0	3	A3
isopentane	HC	187.2	0	4 ± 2	A3
RC318	PFC	115.23	0	10,300	A1
R1234yf	HFO	94.7	0	4	A2L
R227ea	HFC	101.8	0	3,350	A1
R245fa	HFC	154.01	0	858	B1

## บทที่ 4

### ผลการดำเนินการวิจัย

#### 4.1 บทนำ

ในบทนี้ เป็นการรายงานผลและวิเคราะห์ผลจากการจำลองโรงไฟฟ้าไออาร์ซี โดยจะเริ่มจากการเปรียบเทียบการจำลองเชิงตัวเลขของโรงไฟฟ้าไออาร์ซีเมื่อใช้สารทำงานแบบสารอินทรีย์บริสุทธิ์ และสารซีโอทรอปิก เมื่ออุณหภูมิแหล่งความร้อนที่มีการเปลี่ยนแปลง หลังจากนั้น จะทำการจำลองเชิงเปรียบเทียบเมื่อใช้สารซีโอทรอปิก เมื่ออุณหภูมิของแหล่งรับความร้อนมีการเปลี่ยนแปลง เพื่อศึกษาอิทธิพลที่ส่งผลต่อการผลิตกำลังไฟฟ้าที่สูงสุดของโรงไฟฟ้าไออาร์ซี

#### 4.2 การเปรียบเทียบการจำลองเชิงตัวเลขของโรงไฟฟ้าไออาร์ซีแบบใช้สารทำงานเป็นสารอินทรีย์บริสุทธิ์ และสารซีโอทรอปิก เมื่ออุณหภูมิแหล่งความร้อนที่เปลี่ยนแปลง

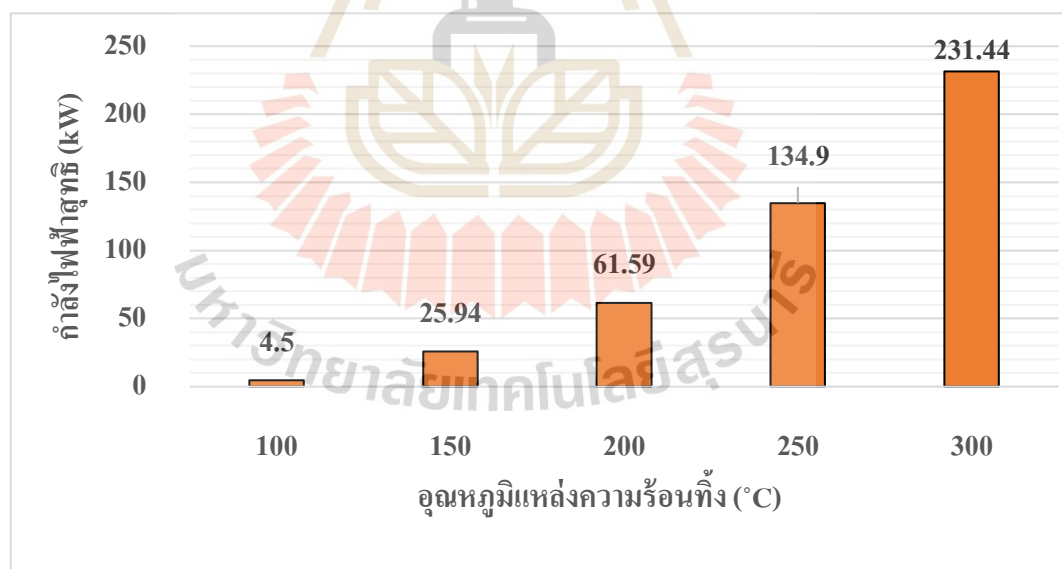
##### 4.2.1 การเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าสุทธิที่โรงไฟฟ้าไออาร์ซีผลิตได้เมื่อใช้สารทำงานเป็นสารอินทรีย์บริสุทธิ์ และสารซีโอทรอปิก

การจำลองเชิงตัวเลขของโรงไฟฟ้าไออาร์ซีเมื่อใช้สารอินทรีย์บริสุทธิ์เป็นสารทำงาน เพื่อหาสารทำงานที่ทำให้ผลิตกำลังไฟฟ้าได้สูงสุด โดยผลการจำลองเป็นผลจากบทความของกลุ่มวิจัย (ชนาภา เทพเสนา และอาทิตย์ คุณศรีสุข, 2562; ชงชัย เทียมทัต และอาทิตย์ คุณศรีสุข, 2562; วชิราภรณ์ รักษาอินทร์ และอาทิตย์ คุณศรีสุข, 2562; สิริชัย ควงเดือน และอาทิตย์ คุณศรีสุข, 2562; อนุกุล โมงปราณีต และอาทิตย์ คุณศรีสุข, 2562) ที่อุณหภูมิแหล่งความร้อนที่ 100 – 300 °C ซึ่งสารทำงานที่ผลิตกำลังไฟฟ้าได้สูงสุดแสดงได้ดังตารางที่ 4.1 และสามารถแสดงผลการจำลองได้ดังรูปที่ 4.1 โดยอุณหภูมิของแหล่งรับความร้อนที่ใช้จำลองในกรณีนี้กำหนดให้ใช้น้ำที่อุณหภูมิ 30 °C

จากรูปที่ 4.1 พบว่า เมื่ออุณหภูมิแหล่งความร้อนเพิ่มขึ้น จะมีกำลังไฟฟ้าที่สามารถผลิตได้เพิ่มขึ้น และเมื่อทำการออกแบบการจำลองเพื่อเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าที่โรงไฟฟ้าผลิตได้เทียบกับแบบใช้สารซีไอทรอปิก เป็นดังรูปที่ 4.2

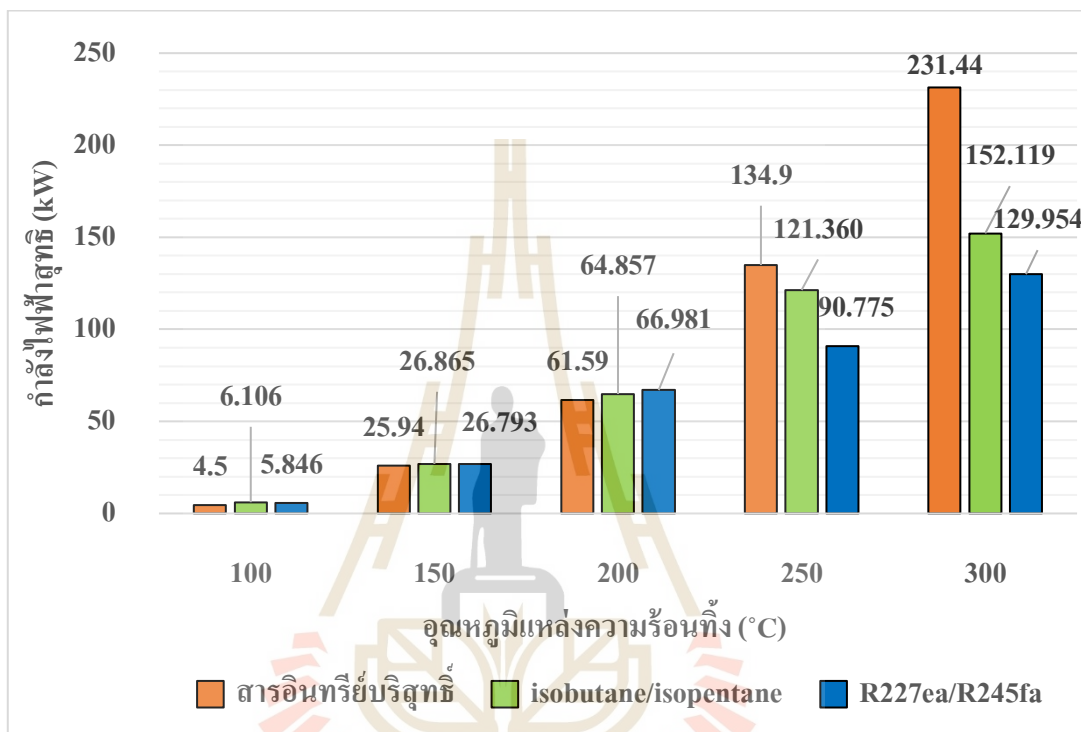
ตารางที่ 4.1 สารทำงานที่ผลิตกำลังไฟฟ้าได้สูงสุดที่อุณหภูมิแหล่งความร้อนต่าง ๆ

อุณหภูมิแหล่งความร้อนทิ้ง (°C)	สารอินทรีย์บริสุทธ์
100	RC318
150	perfluoropentane
200	isopentane
250	pentane
300	methylcyclohexane



รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิแหล่งความร้อนทิ้งและกำลังไฟฟ้าสุทธิของโรงไฟฟ้าไออาร์ซีแบบใช้สารอินทรีย์บริสุทธ์เป็นสารทำงาน

จากรูปที่ 4.2 จะเห็นว่า โรงไฟฟ้าโออาร์ซีแบบใช้สารทำงานเป็นสารอินทรีย์บริสุทธิ์จะสามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้น้อยกว่าแบบใช้สาร isobutane/isopentane ประมาณ 35.69%, 3.57% และ 5.30% และสามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้น้อยกว่าแบบใช้สาร R227ea/R245fa ประมาณ 29.92%, 3.29% และ 8.75% ในช่วงอุณหภูมิแหล่งความร้อนที่ 100, 150 และ 200 °C ตามลำดับ

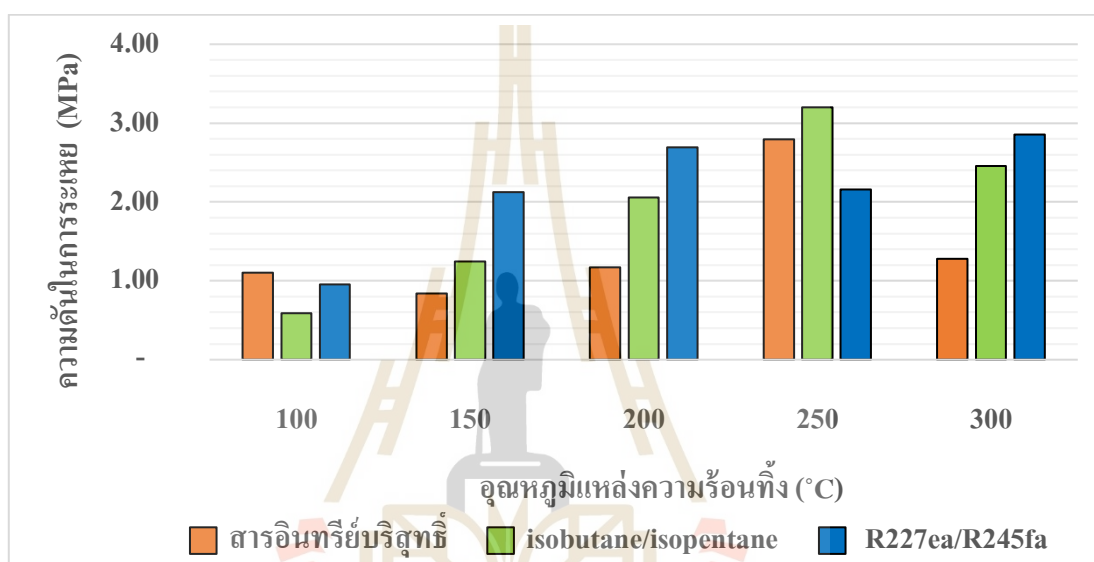


รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิแหล่งความร้อนและกำลังไฟฟ้าสุทธิของโรงไฟฟ้าโออาร์ซีแบบใช้สารอินทรีย์บริสุทธิ์และแบบใช้สารซีโอทรอปิกเป็นสารทำงาน

อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาในช่วงอุณหภูมิแหล่งความร้อนที่ 250 และ 300 °C พบว่า โรงไฟฟ้าโออาร์ซีแบบใช้สารอินทรีย์บริสุทธิ์เป็นสารทำงานจะสามารถผลิตกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้มากกว่าแบบใช้สารซีโอทรอปิกประมาณ 10 – 43% เนื่องจาก จุดอุณหภูมิวิกฤตของสารทำงานซีโอทรอปิกอยู่ในช่วงไม่เกิน 200 °C จึงอาจทำให้ความสามารถในการผลิตกำลังไฟฟ้าภายใต้เงื่อนไขการจำลองไม่สามารถทำได้

#### 4.2.2 การเปรียบเทียบความดันในการระเหยและความแน่นของโรงไฟฟ้าไออาร์ซีเมื่อใช้สารทำงานเป็นสารอินทรีย์บริสุทธิ์และสารซีโอทรอปิก

จากการจำลองที่มีการใช้วิธีการ Golden section search method เพื่อให้ได้ความดันในการระเหยในอีแวปโปเรเตอร์ และความดันในการควบแน่นในคอนเดนเซอร์ของสารทำงานภายใต้เงื่อนไขที่กำหนด สามารถแสดงผลการจำลองเปรียบเทียบกันระหว่างโรงไฟฟ้าไออาร์ซีเมื่อใช้สารทำงานต่างกันที่อุณหภูมิแหล่งความร้อนต่าง ๆ ได้ดังรูปที่ 4.3 และ 4.4 ตามลำดับ

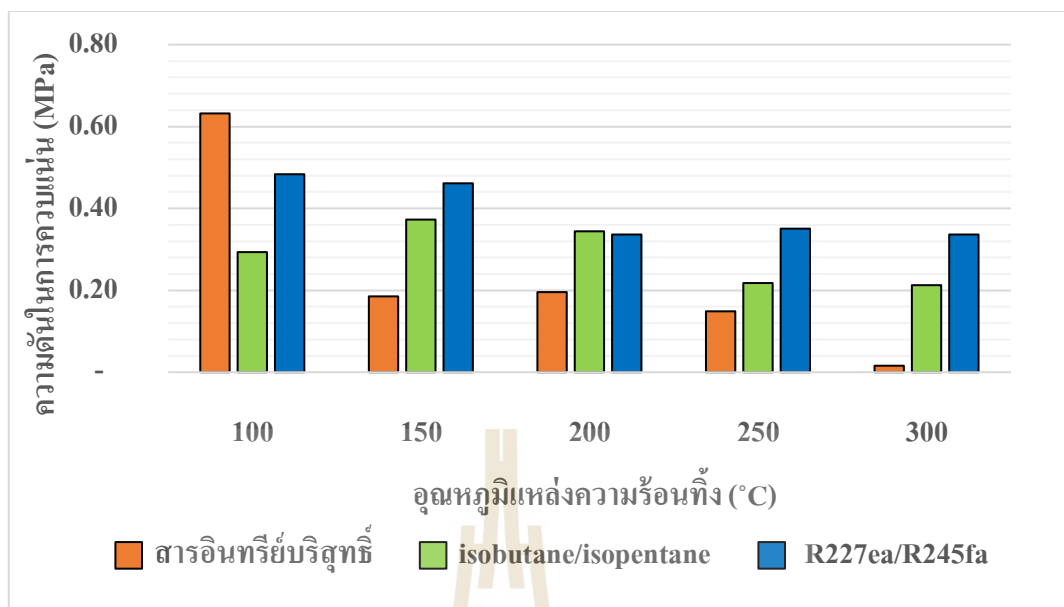


รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิแหล่งความร้อนและความดันในการระเหยของสารทำงานแบบใช้สารอินทรีย์บริสุทธิ์และแบบใช้สารซีโอทรอปิกในโรงไฟฟ้าไออาร์ซี

จากรูปที่ 4.3 และ 4.4 พบว่า ค่าความดันที่ใช้เพื่อทำการควบแน่นและระเหยของสารทำงานล้วนต้องใช้ความดันที่มากกว่าความดันบรรยากาศ (101.325 kPa) ดังนั้น วัสดุที่ใช้ในการผลิตอีแวปโปเรเตอร์และคอนเดนเซอร์จึงเป็นไปได้ว่า จะต้องเป็นวัสดุที่มีความทนทานและหนา เพื่อป้องกันการรั่วที่อาจเกิดขึ้นภายในอุปกรณ์ ซึ่งจะส่งผลต่อค่าความดันที่ต้องควบคุม

โดยเมื่อเปรียบเทียบความดันในการระเหยจากรูปที่ 4.3 พบว่า โรงไฟฟ้าไออาร์ซีแบบใช้สารอินทรีย์บริสุทธิ์เป็นสารทำงานที่อุณหภูมิแหล่งความร้อน 100 °C จะมีความดันที่ต้องใช้เพื่อทำการระเหยสารทำงานที่มากกว่าแบบใช้สารซีโอทรอปิก จึงอาจทำให้ราคาต้นทุนในการผลิตอีแวปโปเรเตอร์อาจสูงกว่าโรงไฟฟ้าไออาร์ซีแบบใช้สารซีโอทรอปิกตามไปด้วย





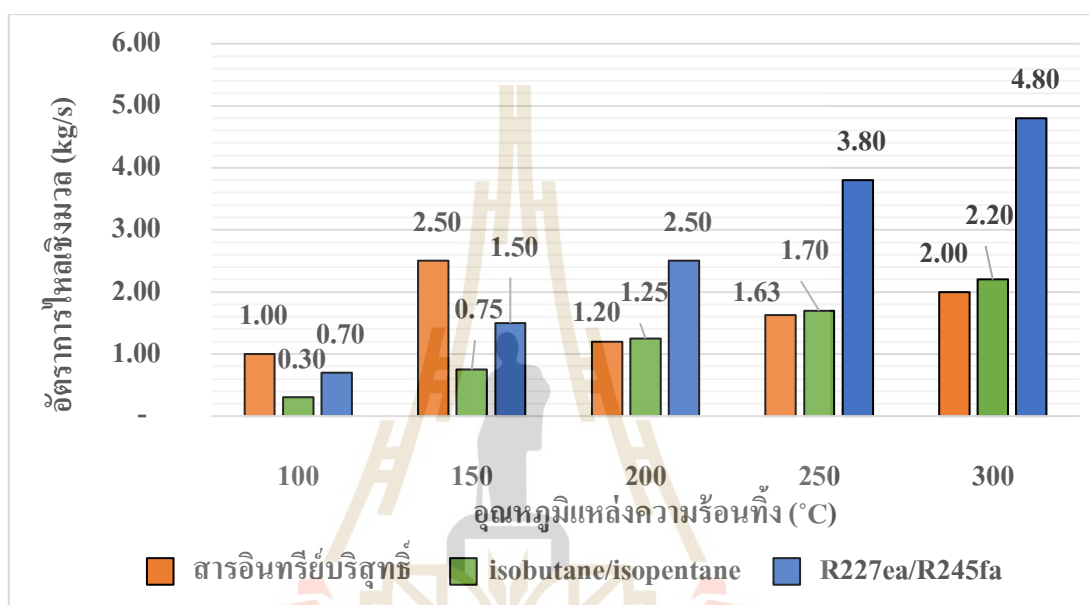
รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิแหล่งความร้อนทิ้งและความดันในการควบแน่นของสารทำงานแบบใช้สารอินทรีย์บริสุทธิ์และแบบใช้สารซีโอทรอปิกในโรงไฟฟ้าไออาร์ซี

นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาความดันที่ใช้เพื่อควบแน่นสารทำงานในรูปที่ 4.4 พบว่า ที่อุณหภูมิแหล่งความร้อนทิ้ง 100 °C สารทำงานแบบสารอินทรีย์บริสุทธิ์จะใช้ความดันในการควบแน่นที่มากกว่าสารซีโอทรอปิกเช่นเดียวกัน จึงอาจทำให้ราคาต้นทุนในการผลิตคอนเดนเซอร์ที่แหล่งความร้อนดังกล่าว อาจสูงกว่าโรงไฟฟ้าไออาร์ซีแบบใช้สารซีโอทรอปิกตามไปด้วย

#### 4.2.3 การเปรียบเทียบอัตราการไหลเชิงมวลของสารทำงานเมื่อใช้สารทำงานเป็นสารอินทรีย์บริสุทธิ์ และสารซีโอทรอปิก

อัตราการไหลเชิงมวลของสารทำงานนับเป็นอีกพารามิเตอร์ที่สำคัญในการพิจารณา เนื่องจากเกี่ยวข้องกับงานที่จ่ายเข้าปั๊ม และงานที่ผลิตได้ที่เอ็กซ์แพนเดอร์ รวมถึงอาจส่งผลกระทบต่อราคาของสารทำงานที่ต้องลงทุนที่เพิ่มขึ้น โดยผลการจำลองเปรียบเทียบของโรงไฟฟ้าไออาร์ซีเมื่อใช้สารทำงานเป็นสารอินทรีย์บริสุทธิ์ และสารซีโอทรอปิกเมื่ออุณหภูมิแหล่งความร้อนเปลี่ยนแปลง สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.5

จากรูปที่ 4.5 พบว่า โรงไฟฟ้าไออาร์ซีแบบใช้สารอินทรีย์บริสุทธิ์ต้องใช้อัตราการไหลเชิงมวลของสารทำงานมากกว่าสารซีโอทรอปิกในช่วงแหล่งความร้อนที่อุณหภูมิ 100 °C และ 150 °C และเมื่ออุณหภูมิแหล่งความร้อนมากกว่า 150 °C สารซีโอทรอปิกจะต้องใช้อัตราการไหลเชิงมวลที่มากกว่าสารอินทรีย์บริสุทธิ์ เพื่อพยายามเพิ่มความสามารถในการผลิตกำลังไฟฟ้าให้สูงสุดภายใต้เงื่อนไขการจำลอง



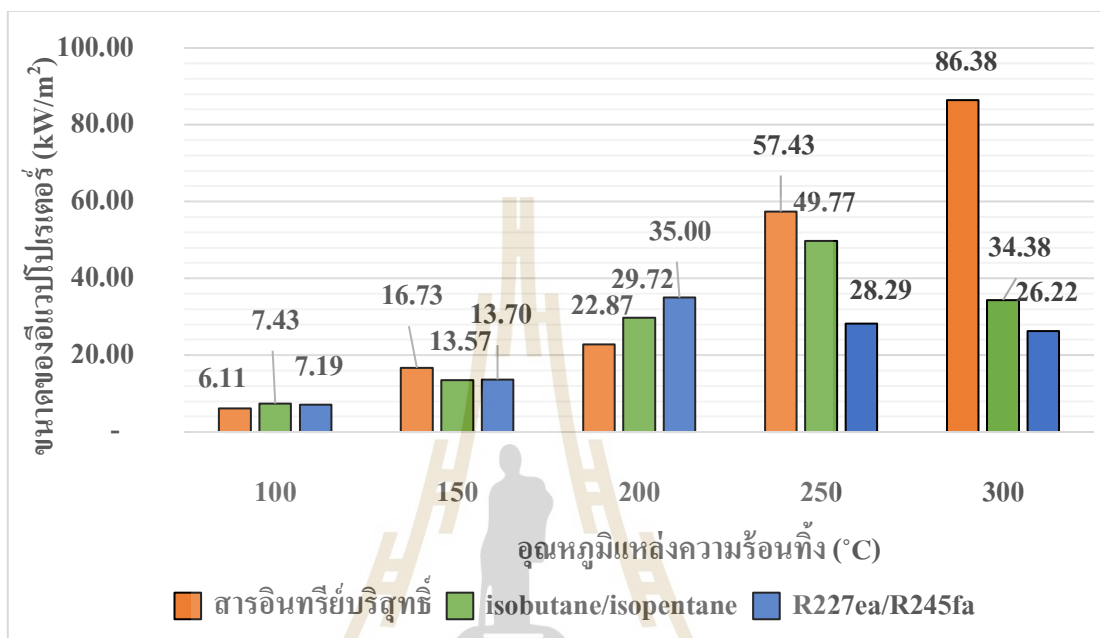
รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิแหล่งความร้อนและอัตราการไหลเชิงมวลของสารทำงานแบบใช้สารอินทรีย์บริสุทธิ์และแบบใช้สารซีโอทรอปิกในโรงไฟฟ้าไออาร์ซี

#### 4.2.4 การเปรียบเทียบขนาดของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนเมื่อใช้สารทำงานเป็นสารอินทรีย์บริสุทธิ์ และสารซีโอทรอปิก

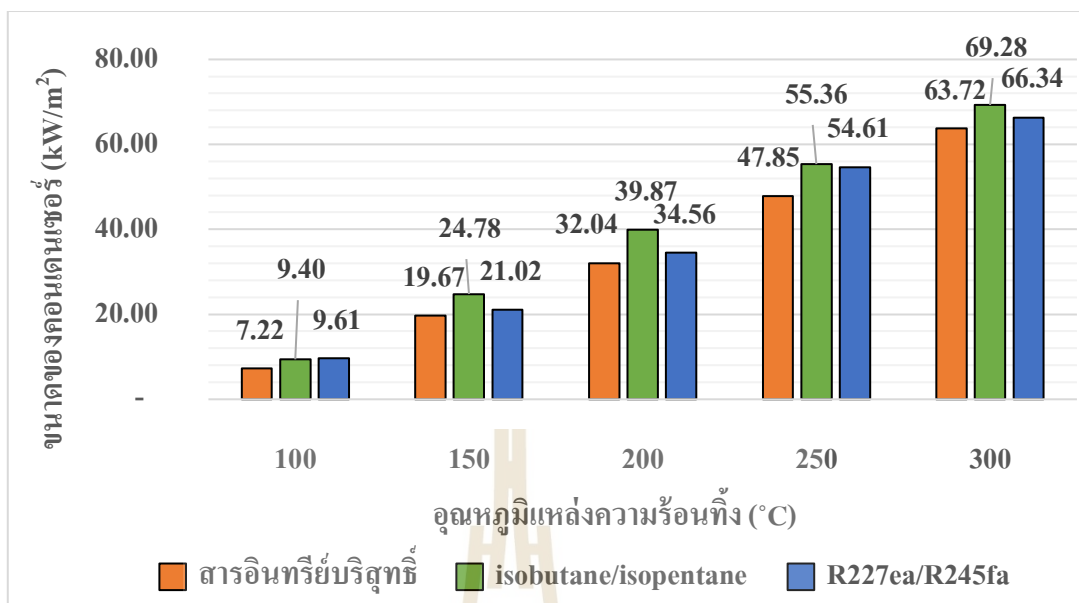
นอกจากการพิจารณาความดันที่ใช้ภายในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแล้ว ขนาดของอุปกรณ์ยังเป็นอีกหนึ่งพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อการพิจารณาขนาดของอุปกรณ์ โดยผลการจำลองขนาดของอีแวปโปเรเตอร์และคอนเดนเซอร์ที่ใช้ ณ อุณหภูมิแหล่งความร้อนต่าง ๆ แสดงได้ดังรูปที่ 4.6 และ 4.7 ตามลำดับ

จากรูปที่ 4.6 พบว่า ขนาดของอีแวปโปเรเตอร์ที่อุณหภูมิแหล่งความร้อนที่ 100°C มีขนาดที่ใกล้เคียงกัน ประมาณ 6.11 – 7.43 kW/m<sup>2</sup> แต่เมื่ออุณหภูมิแหล่งความร้อนเพิ่มขึ้นมากกว่า 250°C พบว่า โรงไฟฟ้าไออาร์ซีที่ใช้สารทำงานเป็นสารอินทรีย์บริสุทธิ์ จะต้องใช้ขนาดของอีแวป

โปรเตอร์ที่มากกว่าสารซีโอทรอปิก ซึ่งมากที่สุดที่อุณหภูมิแหล่งความร้อนที่  $300^{\circ}\text{C}$  โดยมากกว่าอยู่ประมาณ 23 – 60% ซึ่งสอดคล้องกับอัตราการไหลเชิงมวลของสารทำงานในรูปที่ 4.5 กล่าวคือ เมื่ออัตราการไหลเชิงมวลของสารเพิ่มขึ้น จะทำให้ขนาดของอีแวปโปรเตอร์ลดลง



รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิแหล่งความร้อนที่และขนาดของอีแวปโปรเตอร์แบบใช้สารอินทรีย์บริสุทธิ์และแบบใช้สารซีโอทรอปิกในโรงไฟฟ้าไออาร์ซี

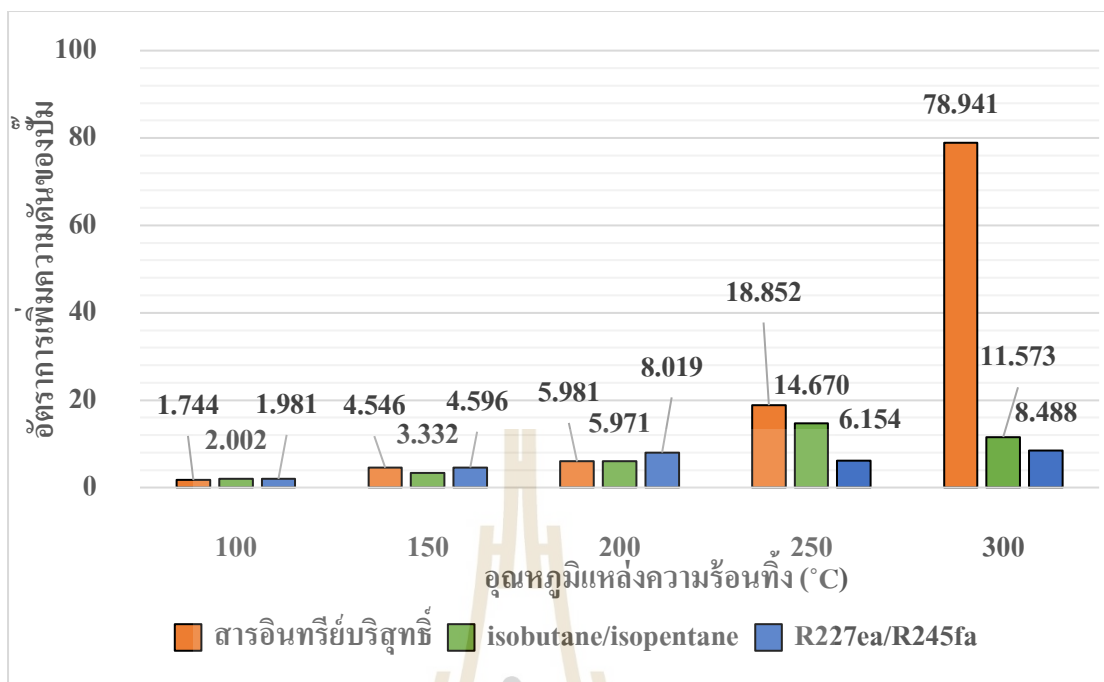


รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิแหล่งความร้อนทิ้งและขนาดของคอนเดนเซอร์แบบใช้สารอินทรีย์บริสุทธิ์และแบบใช้สารซีโอทรอปิกในโรงไฟฟ้าไออาร์ซี

อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาขนาดของคอนเดนเซอร์จากรูปที่ 4.7 พบว่า โรงไฟฟ้าไออาร์ซีแบบใช้สารซีโอทรอปิกจะมีขนาดของอุปกรณ์ที่มากกว่าโรงไฟฟ้าไออาร์ซีแบบใช้สารอินทรีย์บริสุทธิ์ที่ทุกอุณหภูมิแหล่งความร้อน อาจเพราะภายในคอนเดนเซอร์จำเป็นต้องใช้พื้นที่ในการควบแน่นของสารทำงาน และเนื่องด้วยจุดหลอมเหลวของสารทำงานทั้งสองชนิดมีค่าแตกต่างกัน จึงอาจต้องใช้พื้นที่คอนเดนเซอร์ที่มากเพื่อให้สารทำงานเมื่อออกจากคอนเดนเซอร์มีสถานะเป็นของเหลวอิ่มตัว 100%

#### 4.2.5 การเปรียบเทียบอัตราการเพิ่มความดันในปั๊มเมื่อใช้สารทำงานเป็นสารอินทรีย์บริสุทธิ์ และสารซีโอทรอปิก

การพิจารณาอัตราการเพิ่มขึ้นของความดันในปั๊มที่ต้องใช้ในโรงไฟฟ้า สามารถบ่งบอกได้ถึงขนาดของปั๊มหรือความเร็วรอบของปั๊มที่เพิ่มขึ้นเพื่อสูบน้ำทำงานให้มีความดันเท่ากับความดันระเหยในอีแวโปเรเตอร์ โดยสามารถแสดงผลการจำลองได้ดังรูปที่ 4.8

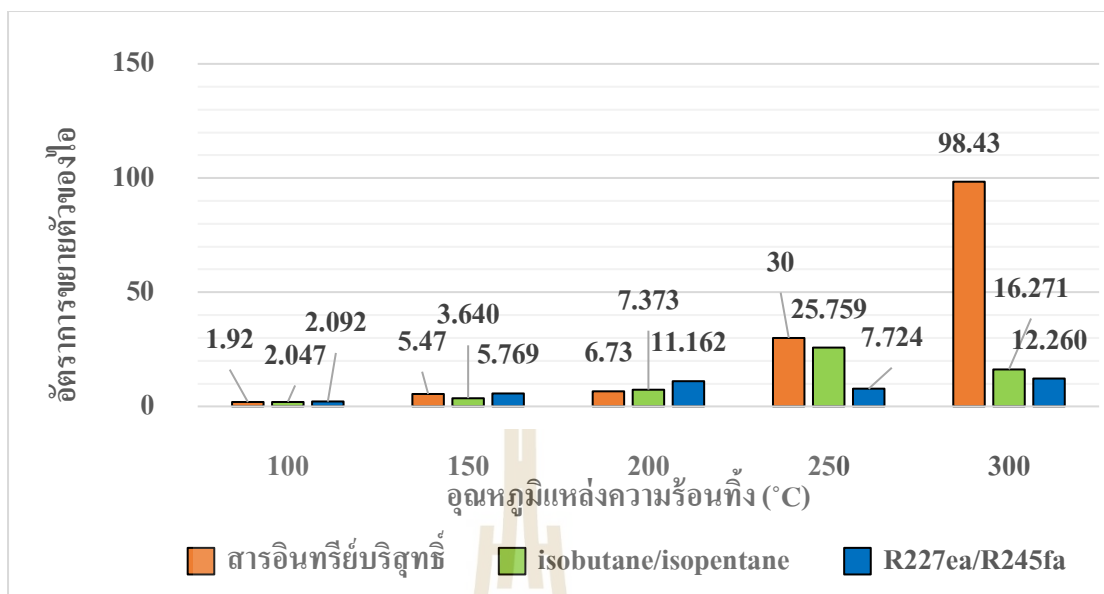


รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิแหล่งความร้อนทิ้งและอัตราการเพิ่มความดันของปั๊มแบบใช้สารอินทรีย์บริสุทธิ์และแบบใช้สารซีโอทรอปิกในโรงไฟฟ้าไออาร์ซี

จากรูปที่ 4.8 พบว่า ที่อุณหภูมิแหล่งความร้อนทิ้ง 100 °C มีอัตราการเพิ่มความดันของปั๊มที่ใกล้เคียงกันอยู่ประมาณ 2 ทำให้อาจพิจารณาได้ว่าหากเปลี่ยนแปลงสารทำงานของโรงไฟฟ้าไออาร์ซีที่อุณหภูมิแหล่งความร้อนทิ้งดังกล่าว สามารถใช้ปั๊มเป็นตัวเดียวกันได้ ซึ่งแตกต่างจากอุณหภูมิแหล่งความร้อนทิ้ง 300 °C ที่มีอัตราการเพิ่มความดันของปั๊มมากกว่าแบบใช้สารซีโอทรอปิกมากที่สุด 9 เท่า ทำให้การทำงานของปั๊มหากมีการเปลี่ยนแปลงสารทำงานที่อุณหภูมิแหล่งความร้อนดังกล่าว อาจต้องมีการปรับความเร็วรอบ หรือเปลี่ยนขนาดของปั๊มในโรงไฟฟ้า

#### 4.2.6 การเปรียบเทียบอัตราการขยายตัวของไอในเอ็กซ์แพนเดอร์เมื่อใช้สารทำงานเป็นสารอินทรีย์บริสุทธิ์ และสารซีโอทรอปิก

ในส่วนของอัตราการขยายตัวของไอ เป็นพารามิเตอร์ที่สามารถบ่งบอกได้ถึงขนาดของเอ็กซ์แพนเดอร์ในโรงไฟฟ้าได้อย่างมีนัยสำคัญ โดยผลการจำลองแสดงได้ดังรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิแหล่งความร้อนทิ้งและอัตราการขยายตัวของไอแบบใช้สารอินทรีย์บริสุทธิ์และแบบใช้สารซีโอทรอปปีกในโรงไฟฟ้าไออาร์ซี

จากผลการจำลองในรูปที่ 4.9 เห็นว่า ขนาดของเอ็กซ์แพนเดอร์มีแนวโน้มคล้ายคลึงกับอัตราการเพิ่มความดันของปั๊มในรูปที่ 4.8 ดังนั้น หากพิจารณาที่แหล่งความร้อนทิ้งอุณหภูมิ 100 °C อัตราการขยายตัวของไอจะมีค่าใกล้เคียงกันประมาณ 2 ทำให้สามารถใช้เอ็กซ์แพนเดอร์ตัวเดียวกันได้ แม้สารทำงานที่ใช้จะเปลี่ยนแปลง แต่เมื่อพิจารณาที่อุณหภูมิแหล่งความร้อนทิ้ง 300 °C จะพบว่า อัตราการขยายตัวของไอในโรงไฟฟ้าไออาร์ซีแบบใช้สารอินทรีย์บริสุทธิ์มีค่ามากกว่าแบบซีโอทรอปปีกประมาณ 6 – 8 เท่า จึงอาจส่งผลต่อต้นทุนในการสร้างอุปกรณ์ที่มากกว่า แม้จะสามารถผลิตกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้มากกว่าโรงไฟฟ้าซีโออาร์ซีแบบใช้สารซีโอทรอปปีกก็ตาม

จากผลการจำลองเปรียบเทียบพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่กล่าวมา เมื่อพิจารณาตามเงื่อนไขการจำลองที่ใช้อุณหภูมิแหล่งความร้อนทิ้งเป็น 100 °C พบว่าสารทำงานแบบสารซีโอทรอปปีกจะสามารถผลิตกำลังไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้าไออาร์ซีได้มากกว่าสารทำงานแบบสารอินทรีย์บริสุทธิ์อยู่ประมาณ 29 - 35.69% รวมถึงความดันที่ใช้ในการควบแน่นภายในคอนเดนเซอร์และความดันที่ใช้ในการระเหยภายในอีแวโปเรเตอร์ยังมีความดันที่ต่ำกว่า โรงไฟฟ้าไออาร์ซีแบบใช้สารอินทรีย์บริสุทธิ์ประมาณ 0.1 – 0.3 MPa และ 0.1 – 0.5 MPa ตามลำดับ ซึ่งทำให้สามารถลดราคาต้นทุนของวัสดุที่ใช้ผลิตอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน เพื่อป้องกันการรั่วของความดันในอุปกรณ์

อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาขนาดของอีแวปโปเรเตอร์และคอนเดนเซอร์ พบว่าขนาดของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนทั้งสองอุปกรณ์เมื่อใช้สารซีโอทรอปิกเป็นสารทำงาน จะมีขนาดที่ใหญ่กว่าเมื่อใช้สารอินทรีย์บริสุทธิ์

นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาขนาดของปั๊มและขนาดของเอ็กซ์แพนเดอร์ พบว่า มีขนาดใกล้เคียงกันเมื่อเปลี่ยนสารทำงานในโรงไฟฟ้า ดังนั้น จึงสามารถใช้ปั๊มและเอ็กซ์แพนเดอร์ขนาดเดียวกันได้

#### 4.3 ผลการจำลองเชิงตัวเลขของโรงไฟฟ้าไออาร์ซีแบบใช้สารทำงานเป็นสารซีโอทรอปิกเมื่ออุณหภูมิแหล่งรับความร้อนเปลี่ยนแปลง

สำหรับการจำลองโรงไฟฟ้าไออาร์ซีแบบใช้สารซีโอทรอปิกเป็นสารทำงาน เริ่มต้นจากการจำลองภายใต้เงื่อนไขของเดือนและช่วงเวลาที่มียุณหภูมิสูงสุดของจังหวัดนครราชสีมา คือเดือนเมษายน เวลา 13.00 น. โดยมีอุณหภูมิ 38 °C โดยใช้สารทำงานซีโอทรอปิกที่มีคุณสมบัติดังตารางที่ 4.2 โดยผลการจำลองเพื่อให้โรงไฟฟ้าสามารถผลิตกำลังไฟฟ้าสูงสุดของสารทำงานซีโอทรอปิกคู่ต่าง ๆ แสดงได้ดังรูปที่ 4.10

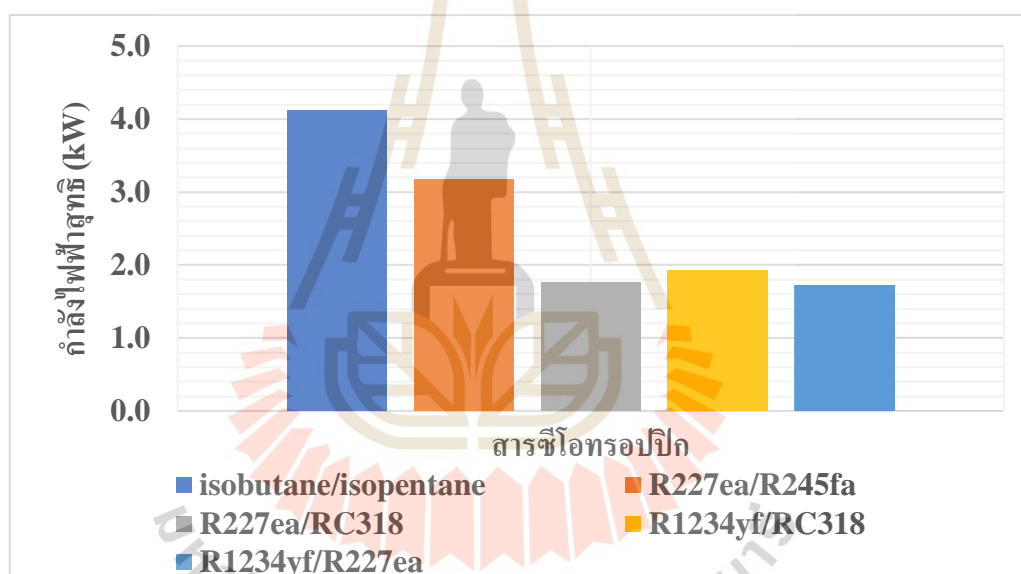
##### 4.3.1 ผลของกำลังไฟฟ้ายุติที่โรงไฟฟ้าไออาร์ซีผลิตได้เมื่อใช้สารทำงานเป็นซีโอทรอปิก

จากรูปที่ 4.10 พบว่า สาร isobutane/isopentane สามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้สูงสุดประมาณ 4.1 kW ซึ่งเป็นคู่สารชนิดไฮโดรคาร์บอน (Hydrocarbon, HC) โดยสารซีโอทรอปิกที่สามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้น้อยที่สุดคือ R1234yf/R227ea ซึ่งผลิตได้ประมาณ 1.76 kW และมีอัตราส่วนของสารซีโอทรอปิกแต่ละคู่เป็นดังนี้

- isobutane/isopentane เป็น 0.4/0.6
- R227ea/R245fa เป็น 0.24/0.76
- R227ea/RC318 เป็น 0.14/0.86
- R1234yf/RC318 เป็น 0.3/0.7
- R1234yf/R227ea เป็น 0.91/0.09

ตารางที่ 4.2 คุณสมบัติของสารซีโอทรอปปีกที่จำลองในสภาวะออกแบบ

สารซีโอทรอปปีก	จุดอุณหภูมิวิกฤตของสารทำงาน (°C)	จุดความดันวิกฤตของสารทำงาน (MPa)
Isobutane/isopentane	134.66 – 187.20	3.38 – 3.62
R227ea/R245fa	101.80 – 154.01	2.93 – 3.65
R227ea/RC318	101.80 – 115.23	2.78 – 2.93
R1234yf/RC318	94.70 – 115.23	2.78 – 3.38
R1234yf/R227ea	94.70 – 101.80	2.93 – 3.38

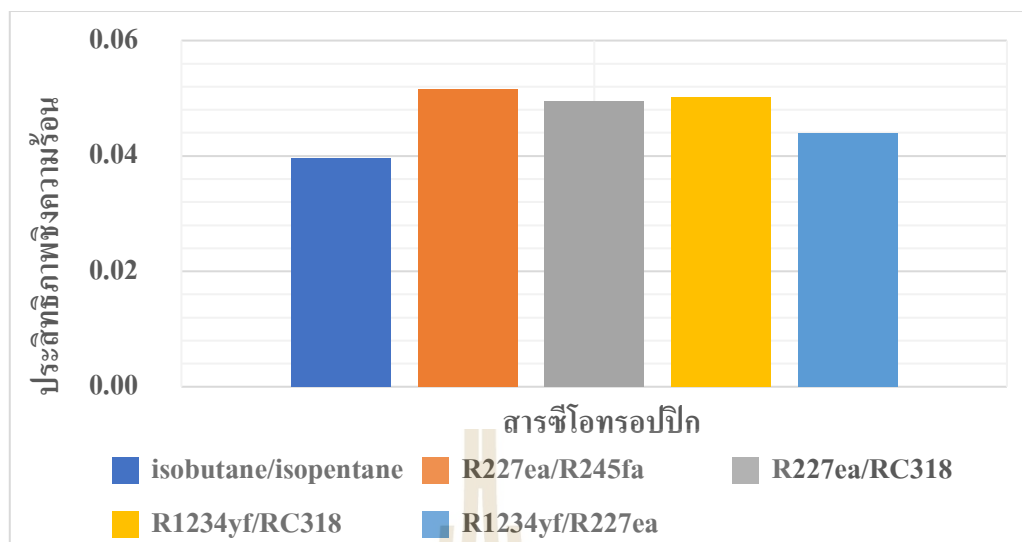


รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างสารซีโอทรอปปีกและกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ภายใต้สภาวะออกแบบ

#### 4.3.2 ผลของประสิทธิภาพเชิงความร้อนของโรงไฟฟ้าไออาร์ซีเมื่อใช้สารทำงานเป็นซีโอทรอปปีก

เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพเชิงความร้อนของโรงไฟฟ้าจากรูปที่ 4.11 พบว่า สาร isobutane/isopentane ที่ผลิตกำลังไฟฟ้าได้สูงสุดกลับมีประสิทธิภาพเชิงความร้อนที่ต่ำที่สุด สืบเนื่องมาจากค่าความร้อนที่ถ่ายเทในอีแวปโปเรเตอร์มีค่ามากกว่ากำลังไฟฟ้าที่โรงไฟฟ้าผลิตได้ จึงทำให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของโรงไฟฟ้ามีประสิทธิภาพที่น้อยที่สุด โดยอยู่ประมาณ 4%



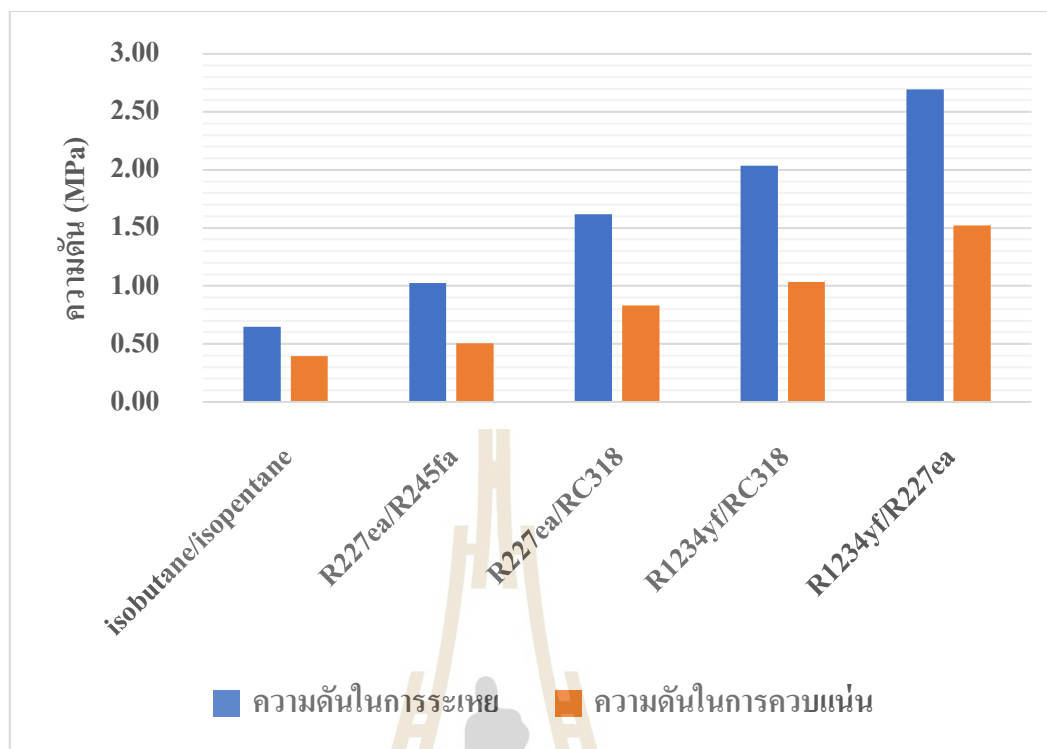


รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างสารซีโอทรอปปีกและประสิทธิภาพเชิงความร้อนของโรงไฟฟ้า  
โออาร์ซีภายใต้สภาวะออกแบบ

#### 4.3.3 ผลของความดันที่ใช้ในการระเหย และความดันในการควบแน่นของโรงไฟฟ้า

##### โออาร์ซีเมื่อใช้สารทำงานเป็นซีโอทรอปปีก

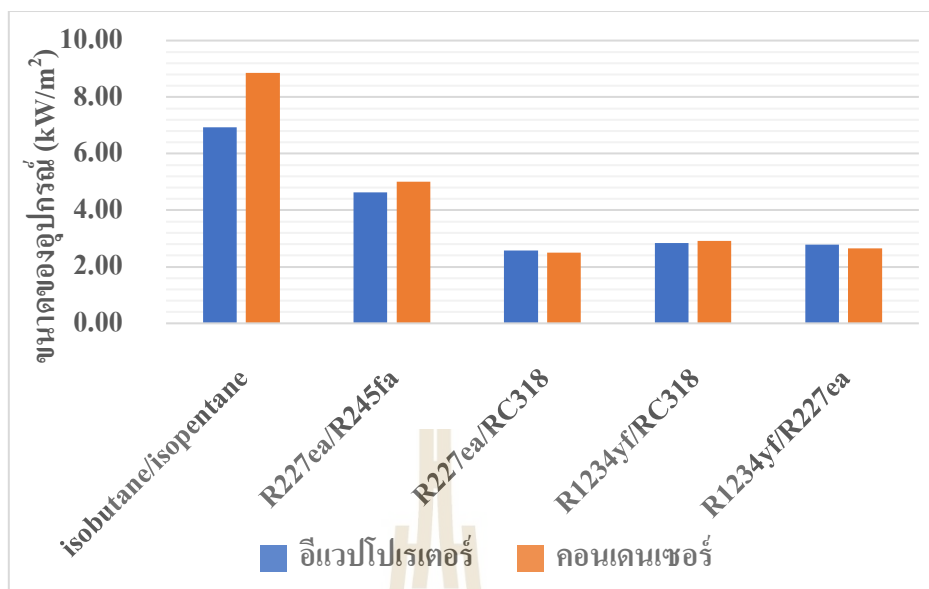
จากผลการจำลองของความดันที่ใช้เพื่อให้ได้กำลังไฟฟ้าสูงสุดภายใต้สภาวะออกแบบ สามารถแสดงผลการจำลองได้ดังรูปที่ 4.12 พบว่า เมื่อเปรียบเทียบระหว่างสารซีโอทรอปปีกที่ใช้จำลอง isobutane/isopentane มีค่าความดันในการระเหยในอีแวโปเรเตอร์ และความดันในการควบแน่นในคอนเดนเซอร์ที่น้อยที่สุด โดยความดันในการระเหยที่ใช้ไม่เกิน 1 MPa และความดันในการควบแน่นไม่เกิน 0.5 MPa ในขณะที่สารซีโอทรอปปีกอื่นที่ใช้จำลองเปรียบเทียบมีค่าความดันในการระเหยและควบแน่นมากกว่า 1 MPa และ 0.5 MPa ตามลำดับ จึงอาจทำให้พิจารณาได้ว่า วัสดุที่ใช้ในการผลิตอีแวโปเรเตอร์และคอนเดนเซอร์เมื่อใช้สารทำงานเป็น isobutane/isopentane มีต้นทุนที่ต่ำกว่า เนื่องจากค่าความดันที่ใช้เพื่อทำการระเหยและควบแน่นที่น้อย และมีค่าต่างจากความดันบรรยากาศน้อยที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับสารซีโอทรอปปีกคู่อื่น ๆ จึงอาจไม่จำเป็นต้องใช้วัสดุที่มีความแข็งแรง และหนาเท่าสภาวะที่ใช้สารทำงานคู่อื่นที่จำลองเปรียบเทียบ โดยสารซีโอทรอปปีกที่มีการใช้ความดันเพื่อทำการระเหยและควบแน่นสารทำงานที่มากที่สุดคือ R1234yf/R227ea ซึ่งใช้ความดันประมาณ 2.7 MPa และ 1.5 MPa ตามลำดับ



รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างสารซีโอทรอปิกและความดันที่ใช้เพื่อระเหยและควบแน่นของโรงไฟฟ้าไออาร์ซีภายใต้สภาวะออกแบบ

#### 4.3.4 ผลของขนาดของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่ใช้ในโรงไฟฟ้าไออาร์ซีเมื่อใช้สารทำงานเป็นซีโอทรอปิก

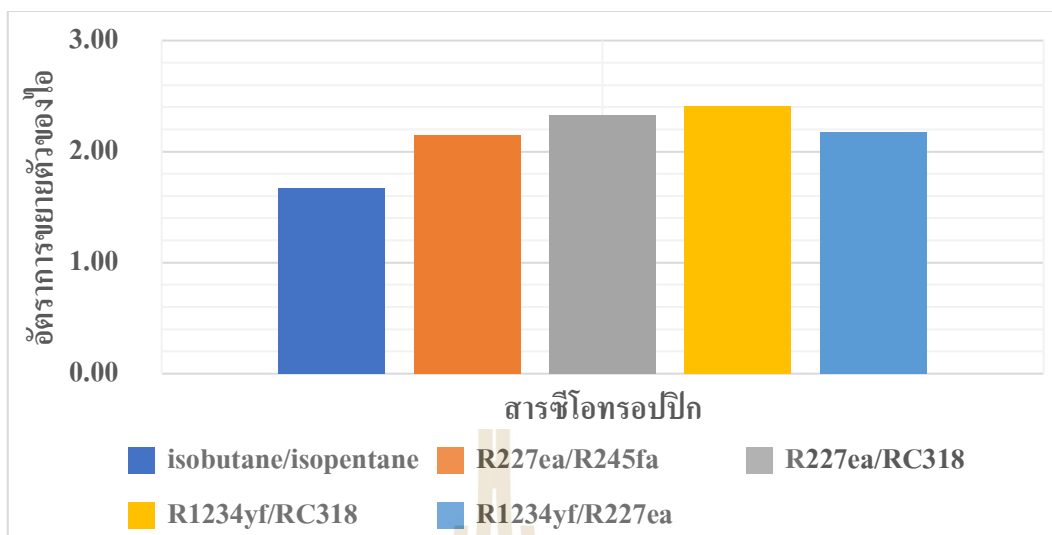
จากผลของความดันที่ใช้ในการระเหยและควบแน่นของสารซีโอทรอปิก เห็นว่า isobutane/isopentane มีการใช้ค่าความดันที่น้อยที่สุดเมื่อเทียบกับสารทำงานคู่อื่นที่ใช้จำลอง แต่เมื่อพิจารณาขนาดของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนทั้งอีแวโปเรเตอร์และคอนเดนเซอร์ในรูปที่ 4.13 พบว่า สาร isobutane/isopentane กลับมีขนาดของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนทั้ง 2 อุปกรณ์ที่มากกว่าสารทำงานคู่อื่นอย่างเห็นได้ชัด จึงอาจพิจารณาได้ว่า หากเลือกใช้สารซีโอทรอปิกที่ใช้ค่าความดันต่ำเพื่อระเหยและควบแน่น อาจต้องมีการพิจารณาถึงขนาดและพื้นที่ในการแลกเปลี่ยนความร้อนที่มากขึ้นร่วมด้วย เพื่อประกอบการตัดสินใจในการลงทุนสำหรับโรงไฟฟ้าไออาร์ซี



รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างสารซีโอทรอปิกและขนาดอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนของ โรงไฟฟ้าไออาร์ซีภายใต้สภาวะออกแบบ

#### 4.3.5 ผลของอัตราการขยายตัวของไอในโรงไฟฟ้าไออาร์ซีเมื่อใช้สารทำงานเป็น ซีโอทรอปิก

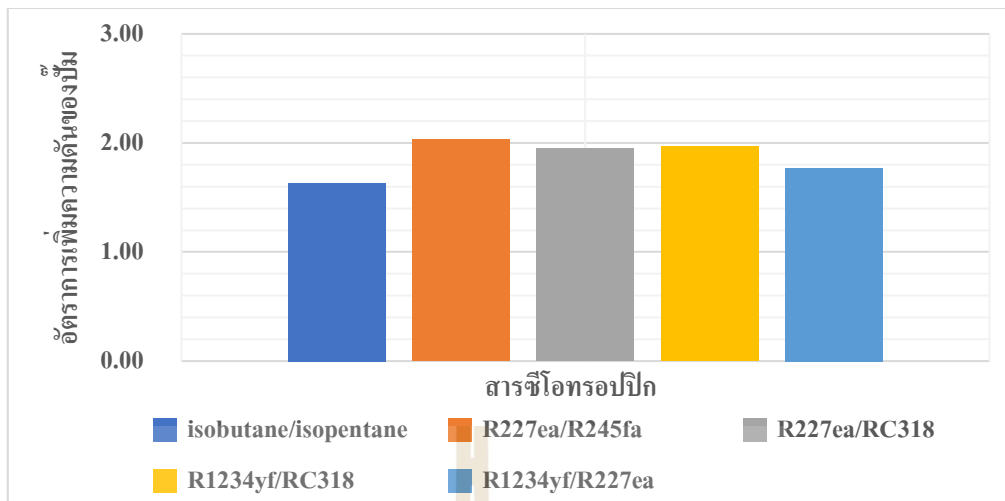
สำหรับผลของอัตราการขยายตัวของไอภายในเอ็กซ์แพนเดอร์ของโรงไฟฟ้าเมื่อใช้สารซีโอทรอปิกต่าง ๆ สามารถแสดงผลได้ดังรูปที่ 4.14 ซึ่งอัตราการขยายตัวของไอจะส่งผลกระทบต่อการศึกษาขนาดของเอ็กซ์แพนเดอร์ที่อาจมีขนาดใหญ่ขึ้น รวมถึงต้นทุนในการสร้างหรือเลือกใช้อเอ็กซ์แพนเดอร์ที่อาจมากขึ้นตามไปด้วย ดังนั้น จากรูปที่ 4.14 จึงแสดงได้ว่า สาร R1234yf/R318 จะมีขนาดของเอ็กซ์แพนเดอร์ที่ใหญ่ที่สุด โดยมีอัตราการขยายตัวของไอประมาณ 2.4 และสาร isobutane/isopentane มีอัตราการขยายตัวของไอที่น้อยที่สุดประมาณ 1.7



รูปที่ 4.14 อัตราการขยายตัวของไอของสารซีโอทรอปิกต่าง ๆ ในโรงไฟฟ้าไออาร์ซีภายใต้สภาวะออกแบบ

#### 4.3.6 ผลของอัตราเพิ่มความดันของปั๊มในโรงไฟฟ้าไออาร์ซีเมื่อใช้สารทำงานเป็นซีโอทรอปิก

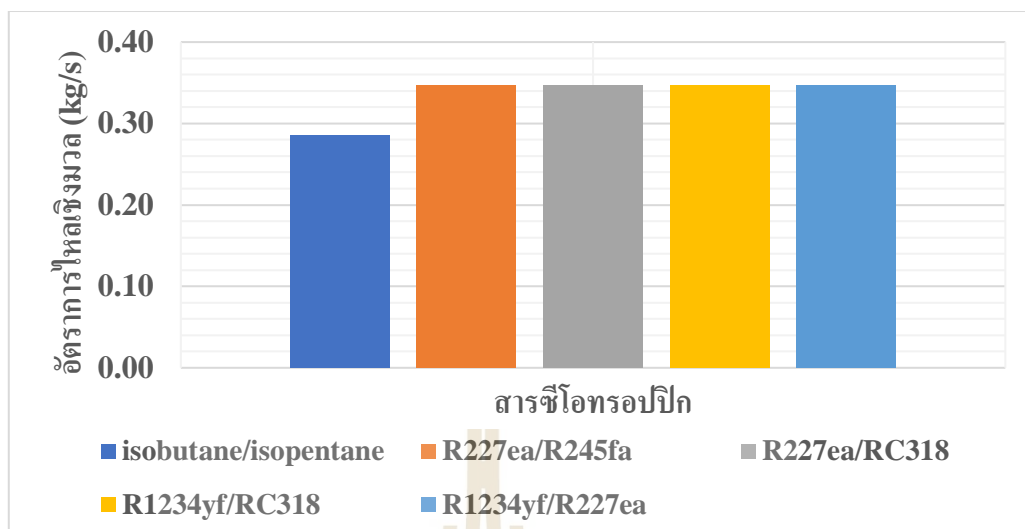
จากผลของอัตราส่วนความดันที่โรงไฟฟ้าทำได้ภายใต้เงื่อนไขจำลอง ซึ่งส่งผลกระทบต่อภาระการทำงานของปั๊มที่ต้องเพิ่มความดันให้ระบบ สามารถแสดงผลได้ดังรูปที่ 4.15 พบว่า ภาระการเพิ่มความดันของปั๊มเมื่อใช้สารทำงานเป็น R227ea/R245fa R227ea/RC318 และ R1234yf/RC318 มีค่าใกล้เคียงกัน ประมาณ 1.9 – 2 ซึ่งเป็นอัตราการเพิ่มความดันที่มากที่สุดเมื่อเทียบกับสารซีโอทรอปิกกลุ่มอื่น และสาร isobutane/isopentane มีอัตราการเพิ่มความดันที่น้อยที่สุด ประมาณ 1.6 แสดงว่า ขนาดของปั๊ม หรือความเร็วรอบของปั๊มที่ต้องใช้ในโรงไฟฟ้าไออาร์ซี เมื่อใช้สาร isobutane/isopentane จะใช้ขนาดที่เล็กกว่าสารซีโอทรอปิกกลุ่มอื่นได้ ส่งผลต่อราคาต้นทุนของปั๊มที่ลดลงได้อีกด้วย



รูปที่ 4.15 อัตราการเพิ่มความดันของปัมที่สารซีโอทรอปิกต่าง ๆ ในโรงไฟฟ้าไออาร์ซีภายใต้สภาวะออกแบบ

#### 4.3.7 ผลของอัตราการไหลเชิงมวลของสารทำงานที่ใช้ในโรงไฟฟ้าไออาร์ซีเมื่อใช้สารทำงานเป็นซีโอทรอปิก

จากผลการจำลองเพื่อให้โรงไฟฟ้าผลิตกำลังไฟฟ้าได้สูงสุด พบว่า มีการใช้อัตราการไหลเชิงมวลของสารทำงานของสารซีโอทรอปิกอยู่ประมาณ 0.35 kg/s ยกเว้นสาร isobutane/isopentane ที่ใช้อัตราการไหลเชิงมวลของสารทำงานน้อยที่สุด ซึ่งอยู่ประมาณ 0.29 kg/s โดยแสดงผลการจำลองได้ดังรูปที่ 4.16 ซึ่งอาจเกิดจากจุดอุณหภูมิวิกฤตของ isobutane/isopentane ที่มากที่สุด จึงทำให้สารทำงานไม่จำเป็นต้องใช้อัตราการไหลเชิงมวลที่มาก เพื่อให้สามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้ภายใต้เงื่อนไขของการเกิด Pinch point temperature ในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนเป็น  $10^{\circ}\text{C}$



รูปที่ 4.16 อัตราการไหลเชิงมวลของสารสีไอทรอปิกในโรงไฟฟ้าไออาร์ซีภายใต้สภาวะ  
ออกแบบ

จากการผลการจำลองเพื่อศึกษาพารามิเตอร์ที่สำคัญต่าง ๆ สามารถสรุปได้ดังนี้

1) สารสีไอทรอปิกที่ผลิตกำลังไฟฟ้าได้สูงสุดคือ isobutane/isopentane (0.4/0.6) ซึ่งผลิตได้ 4.123 kW และสารสีไอทรอปิกที่ผลิตกำลังไฟฟ้าได้ต่ำที่สุดคือ R1234yf/R227ea (0.91/0.09) ซึ่งผลิตได้ 1.73 kW

2) ความดันที่ใช้ในการระเหยและควบแน่นในอีแวปโปเรเตอร์และคอนเดนเซอร์ที่น้อยที่สุดคือ isobutane/isopentane และสารสีไอทรอปิกที่ใช้ความดันในการระเหยและควบแน่นที่มากที่สุดคือ R1234yf/R227ea

3) ขนาดของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่ใช้เพื่อแลกเปลี่ยนความร้อนของสารทำงานจะมากที่สุดเมื่อใช้สารทำงานเป็น isobutane/isopentane

4) ขนาดของเอ็กซ์แพนเดอร์ ภาระการเพิ่มความดันของปั๊ม และอัตราการไหลเชิงมวลของสารสีไอทรอปิก จะมีค่าน้อยที่สุดเมื่อใช้สารทำงานเป็น isobutane/isopentane

จากการสรุปดังกล่าว จึงได้เลือกสาร isobutane/isopentane มาทำการจำลองต่อในเงื่อนไขที่มีการกำหนดให้

5) ความดันระเหยในอีแวปโปเรเตอร์คงที่ และหาความดันของการควบแน่นในคอนเดนเซอร์ รวมถึงอัตราส่วนความเข้มข้นของสารทำงาน เมื่ออุณหภูมิอากาศเปลี่ยนแปลง

6) ความดันระเหยในอีแวปโปเรเตอร์ และอัตราส่วนความเข้มข้นของสารทำงานคงที่ และหาความดันของการควบแน่นในคอนเดนเซอร์ เมื่ออุณหภูมิอากาศเปลี่ยนแปลง

#### 4.4 ผลการจำลองเชิงตัวเลขของโรงไฟฟ้าไออาร์ซีแบบใช้สารทำงานเป็น

##### isobutane/isopentane ตามกระบวนการจำลองที่ 1 และ 2

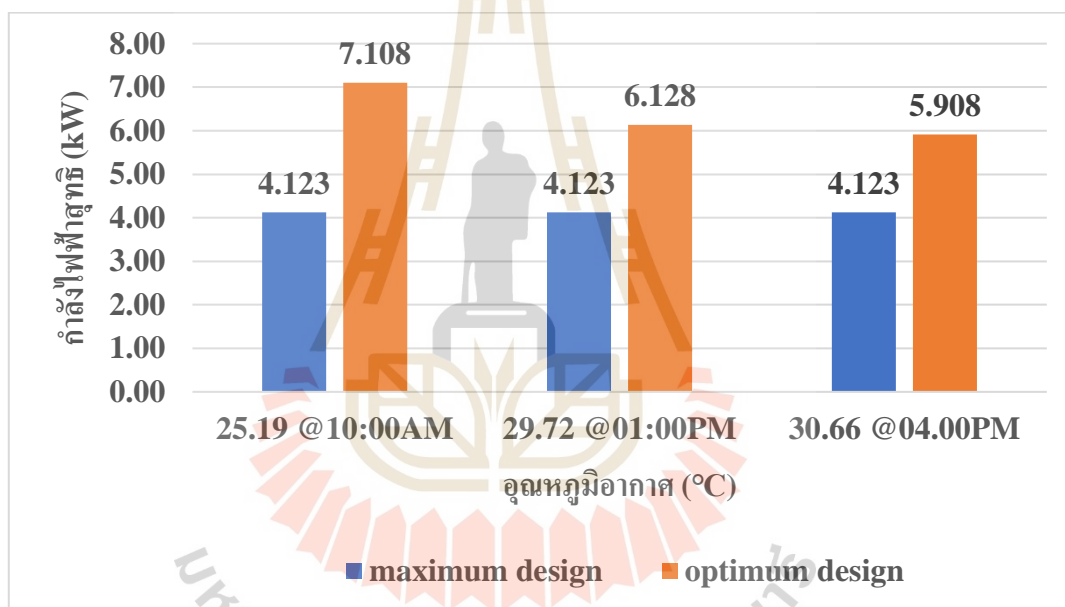
จากแผนผังกระบวนการจำลองที่ 3.12 จะทำการจำลองโดยใช้สารทำงาน isobutane/isopentane เป็นสารทำงานภายในโรงไฟฟ้า ซึ่งการจำลองจะทำการเปรียบเทียบการหาพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้อง 2 การจำลอง โดยเปรียบเทียบที่อุณหภูมิอากาศเฉลี่ยของจังหวัดนครราชสีมาในวันที่อุณหภูมิสูงที่สุด คือ เวลา 13.00 น. ของเดือนเมษายน และอุณหภูมิอากาศเฉลี่ยของจังหวัดนครราชสีมาในวันที่อุณหภูมิต่ำที่สุด คือ เวลา 10.00 น. ของเดือนธันวาคม โดยแสดงผลการจำลองได้ดังนี้

##### 4.4.1 ผลของกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ผลิตได้ในโรงไฟฟ้าไออาร์ซีเมื่อเปรียบเทียบการจำลองที่ 1 และ 2

จากการจำลองโรงไฟฟ้าไออาร์ซีของสารทำงาน isobutane/isopentane ภายใต้อัตราส่วนการจำลองที่ 1 และ 2 สามารถแสดงผลได้ดังรูปที่ 4.17 และ 4.18 ตามลำดับ โดยแกนสีฟ้าเป็นผลของการจำลองจากวันที่อุณหภูมิอากาศเฉลี่ยตลอดปีสูงสุด และแกนสีส้มเป็นผลการจำลองของวันที่อุณหภูมิอากาศเฉลี่ยตลอดปีต่ำที่สุด

จากรูปที่ 4.17 พบว่า ความสามารถในการผลิตกำลังไฟฟ้าได้สูงสุดเมื่ออุณหภูมิเฉลี่ยของอากาศลดลง สามารถผลิตได้มากขึ้นที่ทุกช่วงเวลาตลอดเดือนธันวาคม โดยผลิตได้สูงสุดประมาณ 7 kW ที่เวลา 10.00 น.ของเดือนธันวาคม โดยความสามารถของการผลิตไฟฟ้าที่เพิ่มสูงขึ้นอาจเนื่องมาจาก การปรับอัตราส่วนความเข้มข้นของสารที่มีการเปลี่ยนแปลง รวมถึงความดันในการควบแน่นภายในคอนเดนเซอร์ที่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิอากาศ ณ เวลาต่าง ๆ จึงทำให้โรงไฟฟ้าสามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้สูงสุดนั่นเอง และอัตราส่วนความเข้มข้นของสาร isobutane/isopentane ที่ใช้ ณ เวลาต่าง ๆ ในเดือนธันวาคมเป็นดังนี้

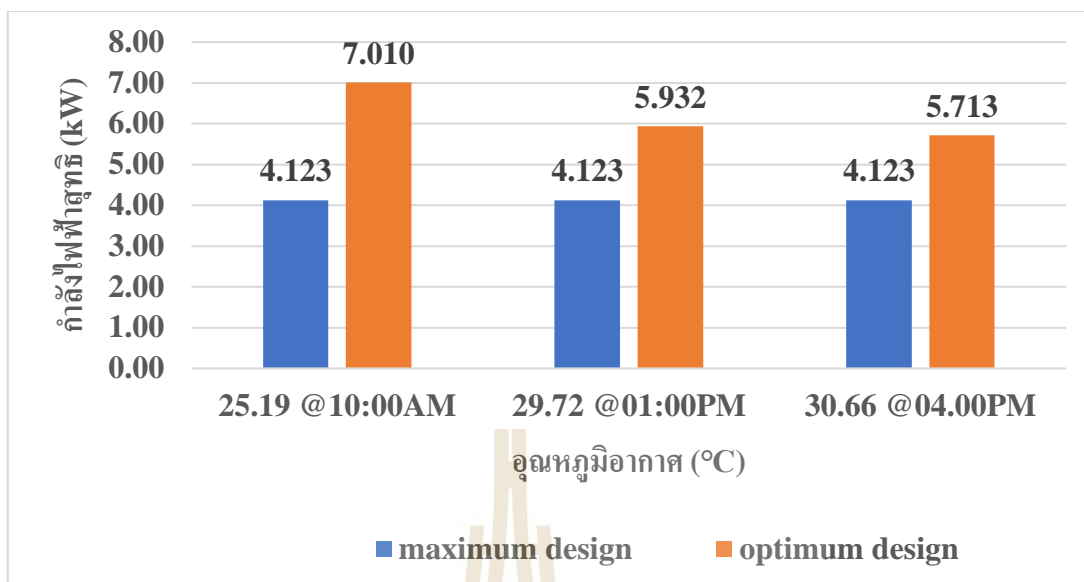
- อัตราส่วนของสารทำงานในสภาวะออกแบบเป็น isobutane/isopentane (0.4/0.6)
- อัตราส่วนของสารทำงานที่เวลา 10.00 น. เป็น isobutane/isopentane (0.39/0.61)
- อัตราส่วนของสารทำงานที่เวลา 13.00 น. เป็น isobutane/isopentane (0.38/0.62)
- อัตราส่วนของสารทำงานที่เวลา 16.00 น. เป็น isobutane/isopentane (0.38/0.62)



รูปที่ 4.17 กำลังไฟฟ้าสุทธิที่ผลิตได้ในโรงไฟฟ้าโออาร์ซีเมื่อใช้สาร isobutane/isopentane ในกระบวนการจำลองที่ 1 ณ เวลาต่างๆ ของเดือนธันวาคม

นอกจากนี้ ยังได้ทำการจำลองตามกระบวนการจำลองที่ 2 โดยสามารถแสดงผลของกำลังไฟฟ้าที่โรงไฟฟ้าผลิตได้ดังรูปที่ 4.18





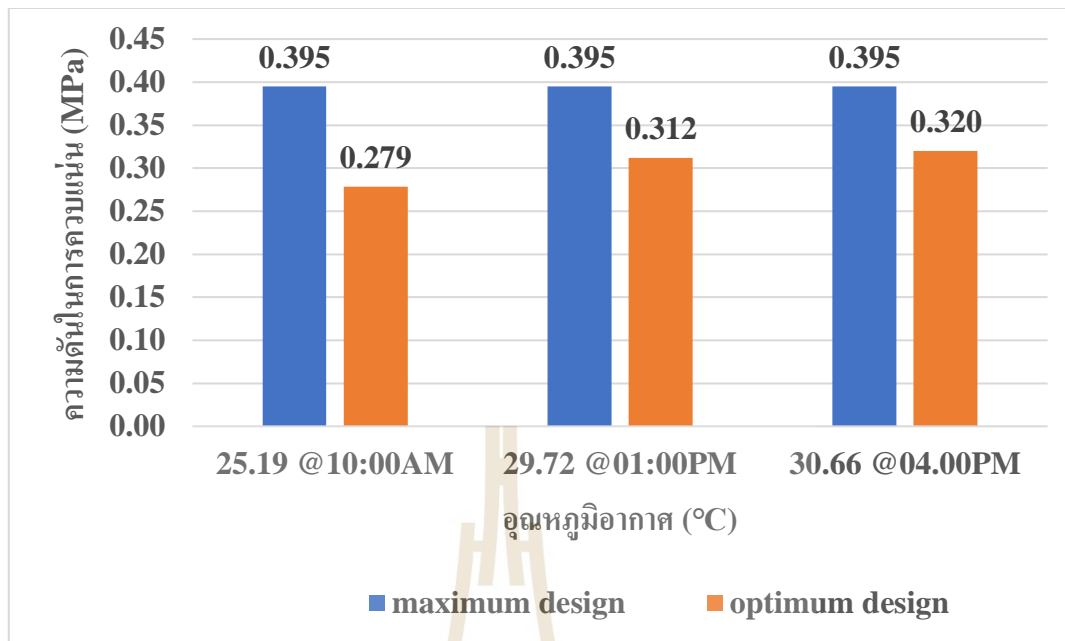
รูปที่ 4.18 กำลังไฟฟ้าสุทธิที่ผลิตได้ในโรงไฟฟ้าไออาร์ซีเมื่อใช้สาร isobutane/isopentane ในกระบวนการจำลองที่ 2 ณ เวลาต่าง ๆ ของเดือนธันวาคม

จากรูปที่ 4.18 พบว่า ภายใต้การจำลองของกระบวนการจำลองที่ 2 กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้สูงสุดคือช่วงเวลา 10.00 น. ผลิตได้ 7.01 kW ซึ่งได้กำลังไฟฟ้ามากกว่าการจำลองภายใต้ภาวะออกแบบประมาณ 3 kW รวมถึงที่เวลาอื่น ๆ โรงไฟฟ้ายังสามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้มากกว่าเช่นกัน

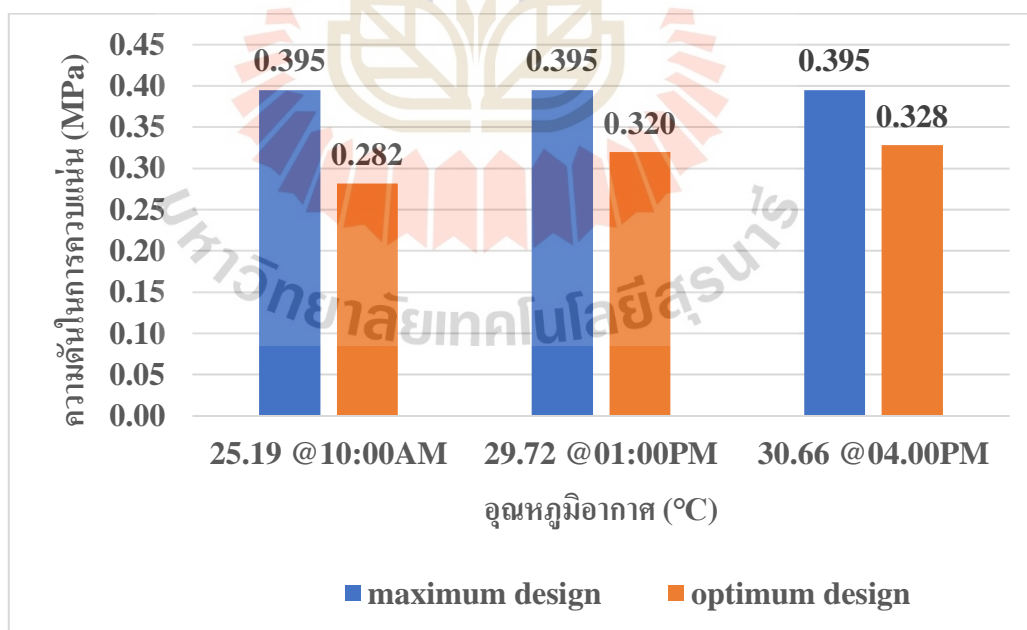
เมื่อเปรียบเทียบระหว่างกระบวนการจำลองที่ 1 และ 2 จากรูปที่ 4.17 และ 4.18 ตามลำดับ พบว่า กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้สูงสุดอยู่ที่กระบวนการจำลองที่ 1 ซึ่งผลิตได้มากกว่ากระบวนการจำลองที่ 2 ประมาณ 0.09 – 0.1 kW ซึ่งมีความแตกต่างที่ค่อนข้างน้อย

#### 4.4.2 ผลของความดันในการควบแน่นในโรงไฟฟ้าไออาร์ซีเมื่อเปรียบเทียบการจำลองที่ 1 และ 2

เนื่องจากการจำลองในกระบวนการจำลองที่ 1 และ 2 มีการหาความดันที่ควบแน่นจากโปรแกรมจำลอง ซึ่งแสดงผลของความดันที่ใช้ควบแน่นได้ตามรูปที่ 4.19 และ 4.20



รูปที่ 4.19 ความดันในการควบแน่นของโรงไฟฟ้าไออาร์ซีเมื่อใช้สาร isobutane/isopentane ในกระบวนการจำลองที่ 1 ณ เวลาต่าง ๆ ของเดือนธันวาคม

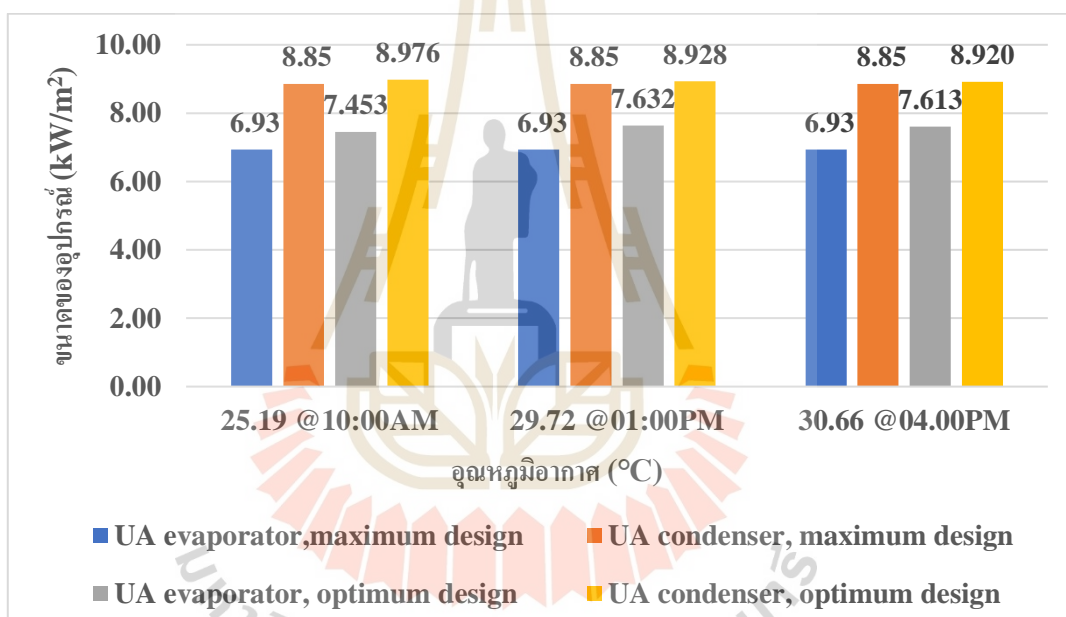


รูปที่ 4.20 ความดันในการควบแน่นของโรงไฟฟ้าไออาร์ซีเมื่อใช้สาร isobutane/isopentane ในกระบวนการจำลองที่ 2 ณ เวลาต่าง ๆ ของเดือนธันวาคม

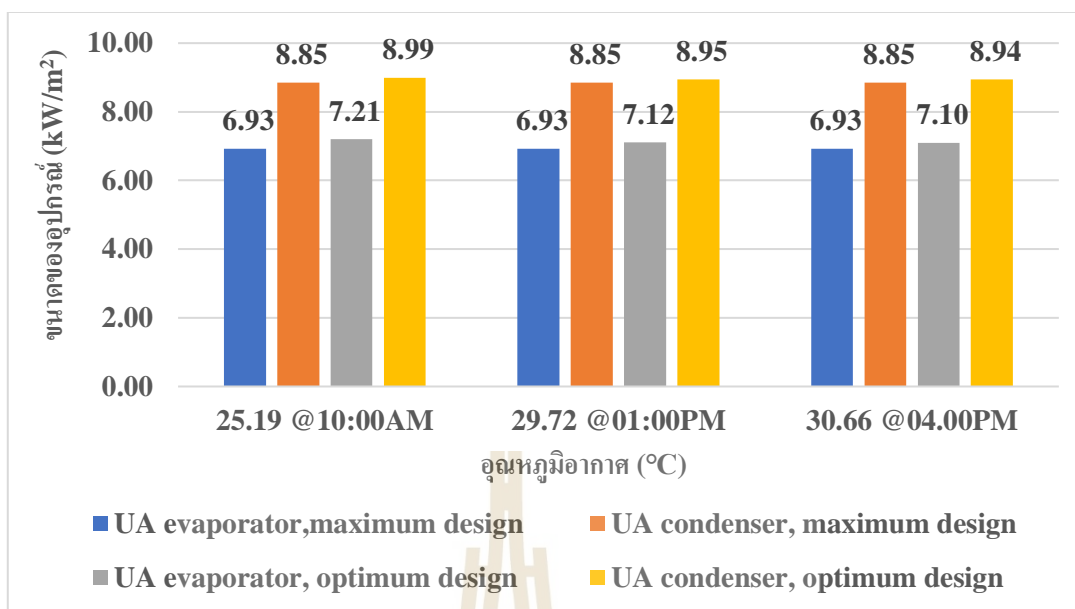
จากผลการจำลองจากระบวนการจำลองที่ 1 และ 2 ในรูปที่ 4.19 และ 4.20 ตามลำดับ พบว่า เมื่ออุณหภูมิอากาศลดลง ส่งผลให้ความดันที่ใช้ในการควบแน่นลดลงตามไปด้วย โดยเมื่อเปรียบเทียบกระบวนการจำลองที่ 1 กับ 2 แล้ว พบว่าความดันในการควบแน่นในคอนเดนเซอร์ มีความใกล้เคียงกัน โดยมีความแตกต่างกันของความดันอยู่ประมาณ 0.01 MPa

**4.4.3 ผลของขนาดของอีแวโปเรเตอร์และคอนเดนเซอร์ในโรงไฟฟ้าไออาร์ซีเมื่อเปรียบเทียบการจำลองที่ 1 และ 2**

จากการออกแบบในกระบวนการจำลองที่ 1 และ 2 สามารถแสดงผลการจำลองได้ดังรูปที่ 4.21 และ 4.22 ตามลำดับ



รูปที่ 4.21 ขนาดของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนของโรงไฟฟ้าไออาร์ซีเมื่อใช้สาร isobutane/isopentane ในกระบวนการจำลองที่ 1 ณ เวลาต่างๆ ของเดือนธันวาคม



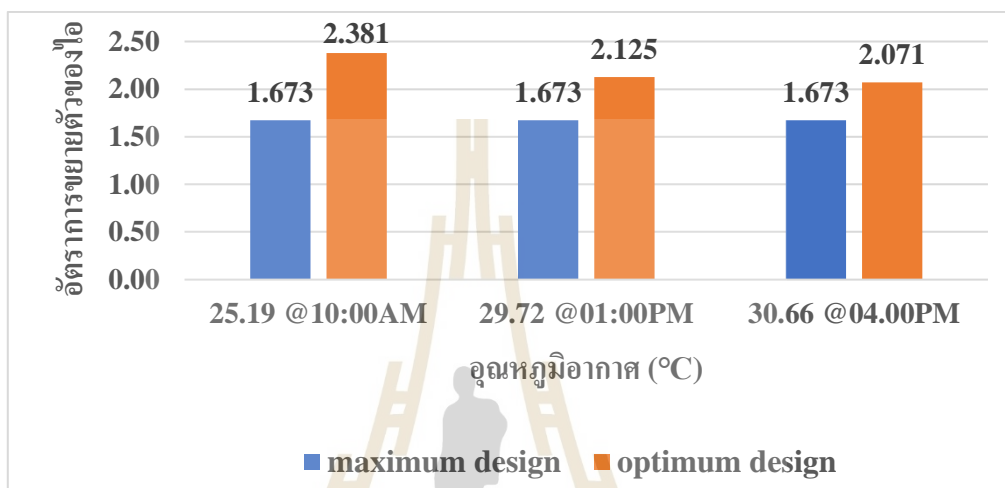
รูปที่ 4.22 ขนาดของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนของโรงไฟฟ้าไออาร์ซีเมื่อใช้สาร isobutane/isopentane ในกระบวนการจำลองที่ 2 ณ เวลาต่าง ๆ ของเดือน ธันวาคม

จากรูปที่ 4.21 และ 4.22 พบว่า ขนาดของอีแวปโปเรเตอร์มีขนาดที่เพิ่มขึ้นเมื่อ อุณหภูมิอากาศลดลง เนื่องจาก ค่าการถ่ายเทความร้อนภายในอีแวปโปเรเตอร์มีค่าเพิ่มขึ้น จึงทำให้ ขนาดของอีแวปโปเรเตอร์มีขนาดที่มากขึ้นเพื่อรองรับการแลกเปลี่ยนความร้อนภายในอุปกรณ์ เช่นเดียวกับขนาดของคอนเดนเซอร์ พบว่า เมื่ออุณหภูมิอากาศลดลง ขนาดของคอนเดนเซอร์จะมี ขนาดเพิ่มขึ้นประมาณ  $0.1 \text{ kW/m}^2$  ซึ่งเปลี่ยนแปลงค่อนข้างน้อย เนื่องจากอุณหภูมิอากาศที่เข้า คอนเดนเซอร์มีอุณหภูมิต่ำลง จึงทำให้การถ่ายเทความร้อนสามารถทำได้เพิ่มขึ้นเพื่อระบายความร้อนของสารทำงาน

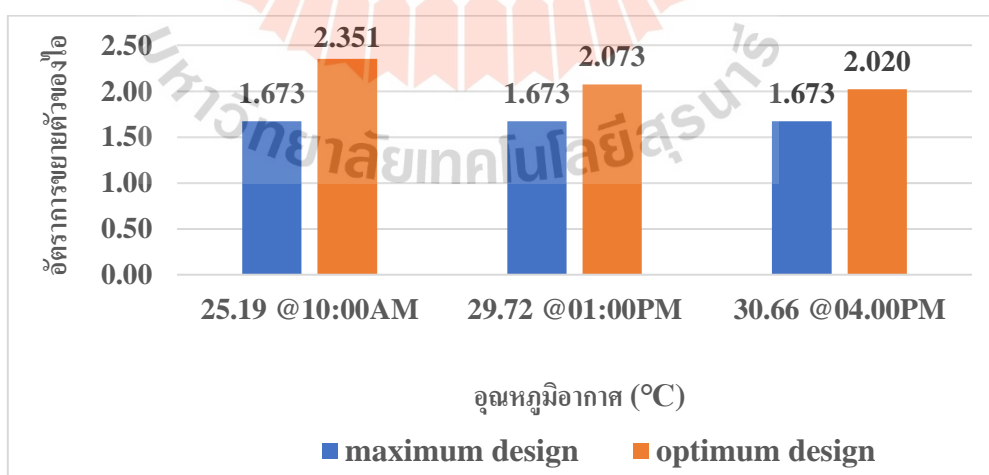
นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบกระบวนการจำลองที่ 1 และ 2 พบว่า มีการเปลี่ยนแปลง ของขนาดอีแวปโปเรเตอร์และคอนเดนเซอร์สูงที่สุดประมาณ  $0.5 \text{ kW/m}^2$  ซึ่งมีความแตกต่าง ค่อนข้างน้อย

#### 4.4.4 ผลของอัตราการขยายตัวของไอในโรงไฟฟ้าไออาร์ซีเมื่อเปรียบเทียบการจำลองที่ 1 และ 2

สำหรับผลการจำลองอัตราการขยายตัวของไอภายในเอ็กซ์แพนเดอร์ในกระบวนการจำลองที่ 1 และ 2 สามารถแสดงผลได้ดังรูปที่ 4.23 และ 4.24 ตามลำดับ



รูปที่ 4.23 อัตราการขยายตัวของไอในโรงไฟฟ้าไออาร์ซีเมื่อใช้สาร isobutane/isopentane ในกระบวนการจำลองที่ 1 ณ เวลาต่าง ๆ ของเดือนธันวาคม

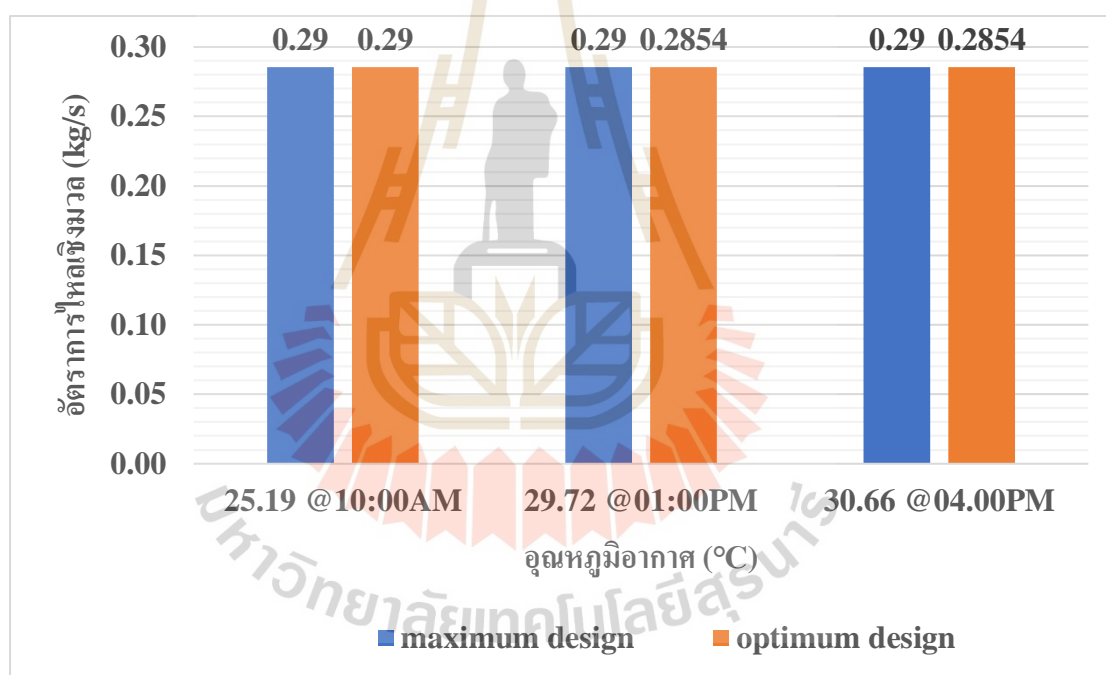


รูปที่ 4.24 อัตราการขยายตัวของไอในโรงไฟฟ้าไออาร์ซีเมื่อใช้สาร isobutane/isopentane ในกระบวนการจำลองที่ 2 ณ เวลาต่าง ๆ ของเดือนธันวาคม

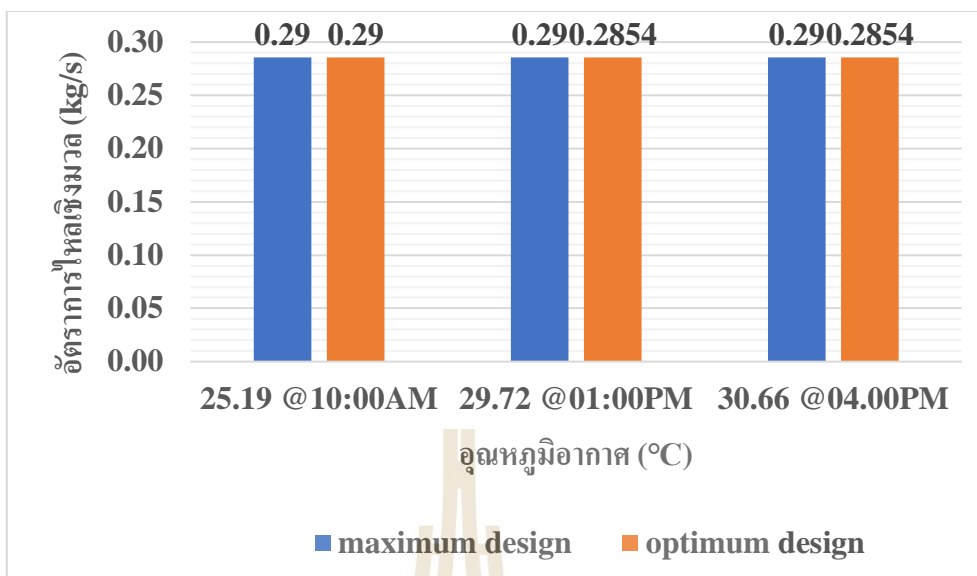
จากผลของอัตราการขยายตัวของไอจากการจำลองทั้ง 2 การจำลอง พบว่า เมื่ออุณหภูมิอากาศลดลง อัตราการขยายตัวของไอจะมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากเมื่อเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิระบบจะมีการลดความดันในการควบแน่นลง จึงส่งผลให้การขยายตัวของไอมีค่าที่เพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิอากาศลดลง และเมื่อเปรียบเทียบการจำลองทั้ง 2 การจำลอง พบว่าค่าอัตราการขยายตัวของไอมีค่าแตกต่างกันค่อนข้างน้อย โดยจะมีความแตกต่างอยู่ประมาณ 0.02 – 0.05

#### 4.4.5 ผลของอัตราการไหลเชิงมวลของสารทำงานในโรงไฟฟ้าไออาร์ซีเมื่อเปรียบเทียบการจำลองที่ 1 และ 2

จากการจำลองตามกระบวนการจำลองโรงไฟฟ้าที่ 1 และ 2 สามารถแสดงผลของอัตราการไหลเชิงมวลที่ใช้ในการดำเนินการในโรงไฟฟ้าได้ดังรูปที่ 4.25 และ 4.26



รูปที่ 4.25 อัตราการไหลเชิงมวลของสารทำงานในโรงไฟฟ้าไออาร์ซีเมื่อใช้สาร isobutane/isopentane ในกระบวนการจำลองที่ 1 ณ เวลาต่าง ๆ ของเดือน ธันวาคม



รูปที่ 4.26 อัตราการใช้พลังงานของสารทำงานในโรงไฟฟ้าไออาร์ซีเมื่อใช้สาร isobutane/isopentane ในกระบวนการจำลองที่ 2 ณ เวลาต่าง ๆ ของเดือน ธันวาคม

จากผลของอัตราการใช้พลังงานของการจำลองจากกระบวนการจำลองทั้ง 2 การจำลอง พบว่า อัตราการใช้พลังงานที่ใช้ในการดำเนินงานในระบบมีค่าใกล้เคียงกันที่ทุกอุณหภูมิอากาศ ดังนั้น จึงอาจกล่าวได้ว่า เมื่อทำการดำเนินการโรงไฟฟ้าเมื่ออุณหภูมิอากาศมีการเปลี่ยนแปลง สามารถใช้อัตราการใช้พลังงานของสารที่คงที่ตามอัตราการใช้พลังงานในสถานะออกแบบได้

จากการศึกษาพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องทั้งหมด เมื่อทำการจำลองเปรียบเทียบกันระหว่างการจำลองทั้ง 2 รูปแบบ พบว่า พารามิเตอร์ต่าง ๆ มีการเปลี่ยนแปลงน้อยกว่า 10% ซึ่งเป็นเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงที่ยอมรับได้ ดังนั้น ในการดำเนินการจำลองโรงไฟฟ้าในช่วงอุณหภูมิอากาศตลอดทั้งปี จะทำการจำลองภายใต้เงื่อนไขของการใช้ค่าความดันในการระเหย และอัตราส่วนความเข้มข้นของสารทำงาน ตามความดันที่ถูกจำลองในสถานะออกแบบ และ ใช้วิธีการของ Golden section search method เพื่อหาความดันในการควบแน่นที่ทำให้โรงไฟฟ้าไออาร์ซีผลิตกำลังไฟฟ้าได้สูงสุด

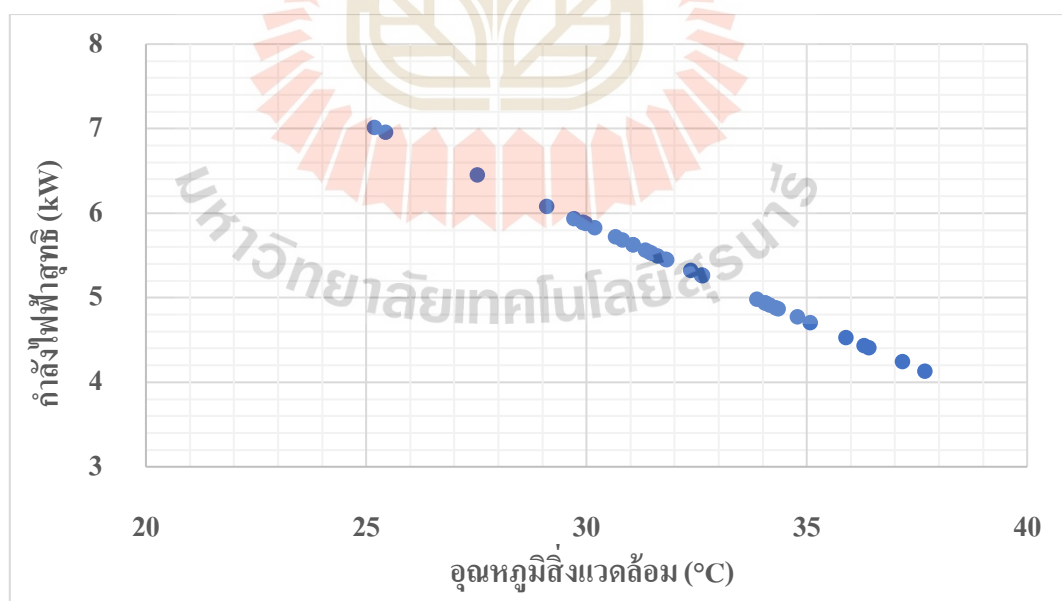
อย่างไรก็ตาม สารทำงานที่ถูกเลือกใช้เพื่อจำลองภายใต้อุณหภูมิอากาศที่เปลี่ยนแปลงตลอดปีของจังหวัดนครราชสีมา จะใช้สารทำงาน isobutane/isopentane ในการจำลอง เนื่องจากเป็นสารทำงานที่สามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้สูงสุด จากสารทำงานทั้งหมด 5 คู่สารทำงาน (ผลดังรูปที่ 4.10) แม้จะเป็นการจำลองภายใต้ภาวะที่อุณหภูมิอากาศที่สูงสุดก็ตาม

#### 4.5 ผลการจำลองเชิงตัวเลขของโรงไฟฟ้าไออาร์ซีแบบใช้สารทำงานเป็นสารซีโอทรอปิก ของจังหวัดนครราชสีมา ในปี พ.ศ. 2562

สำหรับผลการจำลองในขั้นตอนนี้ จะเป็นการจำลองภายใต้อุณหภูมิอากาศที่เปลี่ยนแปลงของจังหวัดนครราชสีมา ในปี พ.ศ. 2562 โดยใช้สารทำงานเป็น isobutane/isopentane โดยใช้เงื่อนไขการจำลองตามการจำลองโรงไฟฟ้าในกระบวนการจำลองที่ 2 เพื่อวิเคราะห์สมรรถนะของโรงไฟฟ้าจากพารามิเตอร์ต่าง ๆ ดังนี้

##### 4.5.1 กำลังไฟฟ้าสูงสุดที่โรงไฟฟ้าผลิตได้ เมื่ออุณหภูมิอากาศเปลี่ยนแปลง

จากการจำลองด้วยวิธีการเชิงตัวเลข โดยใช้อุณหภูมิอากาศตลอดปีเป็นอุณหภูมิแหล่งรับความร้อน สามารถแสดงผลได้ดังรูปที่ 4.27



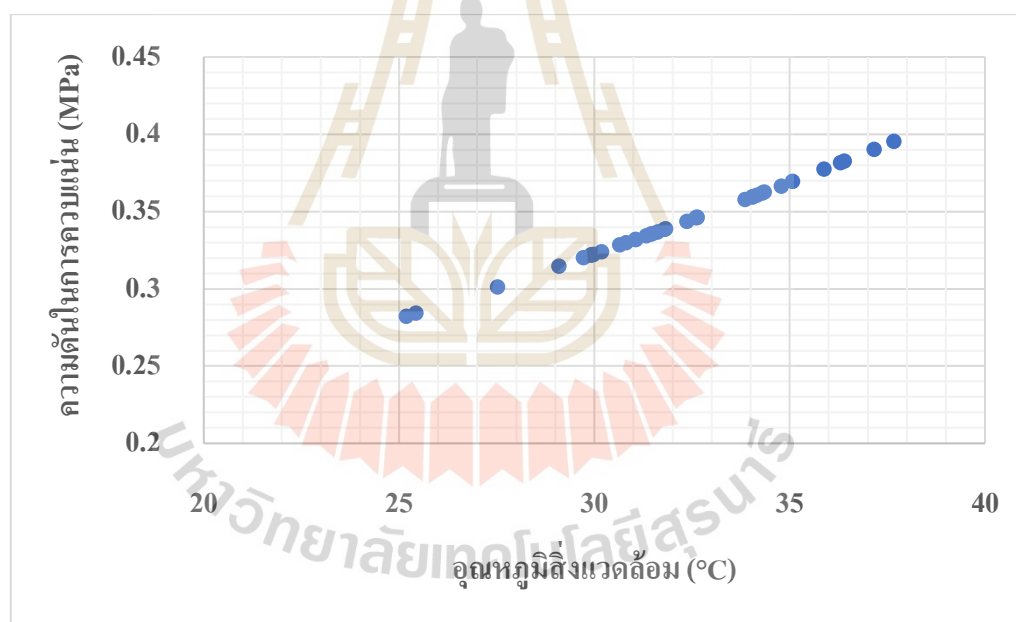
รูปที่ 4.27 กำลังไฟฟ้าสูงสุดที่โรงไฟฟ้าไออาร์ซีผลิตได้ของจังหวัดนครราชสีมา ปี พ.ศ. 2562



จากรูป 4.27 พบว่า เมื่ออุณหภูมิอากาศลดลง กำลังไฟฟ้าที่โรงไฟฟ้าโออาร์ซีผลิตได้จะมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจาก ความสามารถในการเกิด temperature glide ของสารซีโอทรอปิก ทำให้เมื่ออุณหภูมิมมีการเปลี่ยนแปลง สารทำงานมีความพยายามในการจับคู่อุณหภูมิภายในคอนเดนเซอร์ ดังนั้น โรงไฟฟ้าจึงสามารถลดความดันที่ใช้ในการควบแน่นลงได้มาก และมีความสามารถในการผลิตกำลังไฟฟ้าได้เพิ่มขึ้น โดย สามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้เพิ่มขึ้นจากสภาวะออกแบบสูงสุด 70%

#### 4.5.2 ความดันที่ใช้ในการควบแน่นในคอนเดนเซอร์ของโรงไฟฟ้า เมื่ออุณหภูมิอากาศเปลี่ยนแปลง

สำหรับผลของความดันที่ใช้ในการควบแน่นภายในคอนเดนเซอร์ เมื่ออุณหภูมิอากาศเปลี่ยนแปลง สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.28



รูปที่ 4.28 ความดันที่ใช้ควบแน่นในโรงไฟฟ้าโออาร์ซี ของจังหวัดนครราชสีมา ปี พ.ศ. 2562

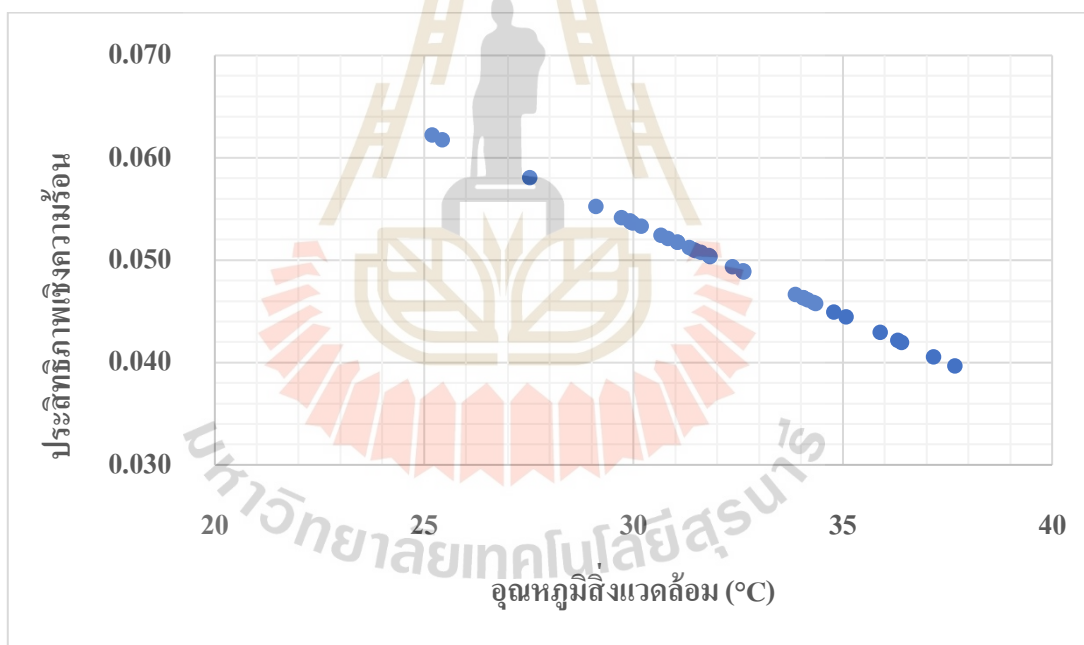
จากรูปที่ 4.28 พบว่า ความดันที่ใช้ในการควบแน่นในคอนเดนเซอร์มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิอากาศมีค่าเพิ่มมากขึ้น เนื่องจาก เมื่ออุณหภูมิอากาศเพิ่มขึ้น จะส่งผลให้ค่าความดันที่ใช้เพื่อการควบแน่นของสารทำงานมีค่าเพิ่มขึ้น เพื่อให้สามารถทำการควบแน่นจนสารทำงานมีสถานะของสารเป็นของเหลวอิ่มตัวเมื่อเคลื่อนที่ออกจากคอนเดนเซอร์ได้ ดังนั้น จึงเป็นไปได้ว่า

เมื่ออุณหภูมิอากาศเพิ่มขึ้น วัสดุที่ใช้เพื่อผลิตคอนเดนเซอร์จะต้องมีความแข็งแรงมากขึ้น เพื่อป้องกันการรั่วของความดันที่ไม่เท่ากัน ระหว่างความดันในคอนเดนเซอร์ และความดันบรรยากาศได้

อย่างไรก็ตาม ยังอาจทำนายได้อีกว่า ขนาดหรือภาระการทำงานของปั๊มในการเพิ่มความดันก่อนเข้าอีแวปโปเรเตอร์อาจลดลง เมื่ออุณหภูมิอากาศเพิ่มขึ้น เนื่องจากการจำลองให้ความดันที่ระเหยในอีแวปโปเรเตอร์คงที่ ทำให้อัตราส่วนของความดันลดลงเมื่ออุณหภูมิอากาศเพิ่มขึ้น

#### 4.5.3 ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของโรงไฟฟ้า เมื่ออุณหภูมิอากาศเปลี่ยนแปลง

นอกจากผลของกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จะถูกรวบรวมแล้ว ยังมีค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนของโรงไฟฟ้า เมื่ออุณหภูมิอากาศเปลี่ยนแปลงที่ถูกรวบรวมด้วย โดยผลของประสิทธิภาพเชิงความร้อนสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.29



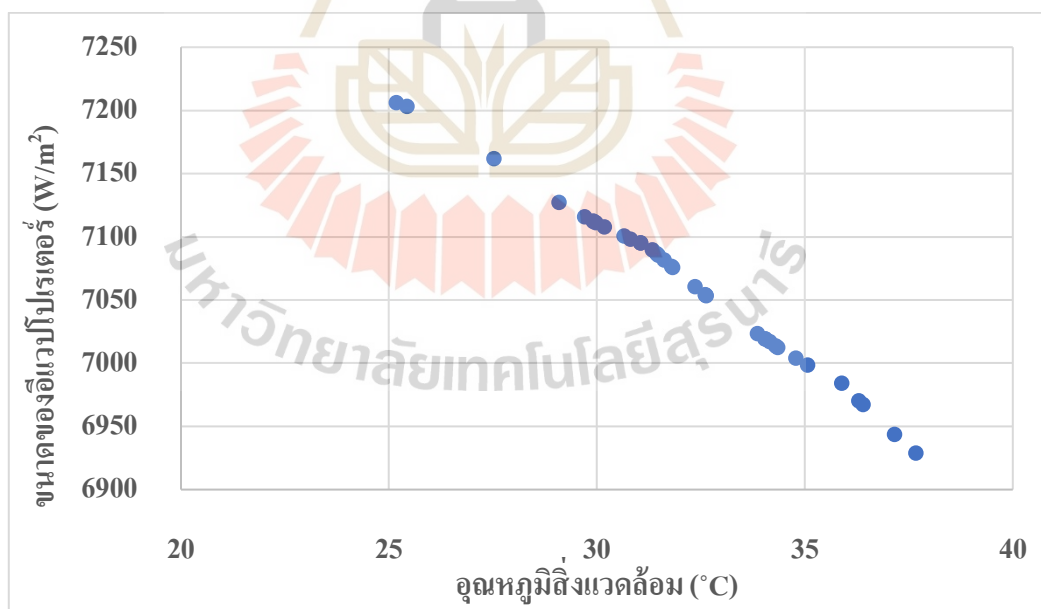
รูปที่ 4.29 ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของโรงไฟฟ้าโออาร์ซี ของจังหวัดนครราชสีมา

ปี พ.ศ. 2562

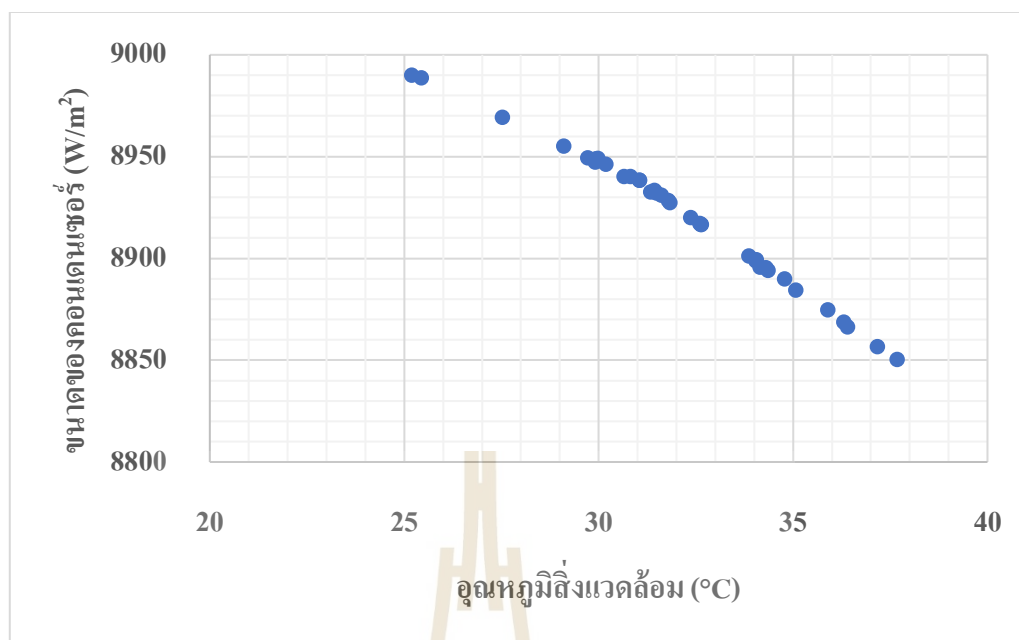
จากรูปที่ 4.29 พบว่า ค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนของโรงไฟฟ้ามีค่าลดลง เมื่ออุณหภูมิอากาศมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากประสิทธิภาพเชิงความร้อนจะแปรผันตามกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ และแปรผกผันกับค่าความร้อนที่ถ่ายเทในอีแวปโปเรเตอร์ แต่เนื่องจาก อุณหภูมิแหล่งความร้อนทิ้งของการจำลอง และความดันในการระเหยของสารทำงานเป็นค่าคงที่ จึงทำให้ค่าความร้อนที่ถ่ายเทในอีแวปโปเรเตอร์ มีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก เมื่ออุณหภูมิอากาศเปลี่ยนแปลง และเมื่อเทียบกับกำลังไฟฟ้าที่โรงไฟฟ้าผลิตได้ จึงทำให้กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ของโรงไฟฟ้ามีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพเชิงความร้อนมากกว่า ส่งผลให้ค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนมีพฤติกรรมเป็นดังผลในรูปที่ 4.29

#### 4.5.4 ขนาดของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนของโรงไฟฟ้า เมื่ออุณหภูมิอากาศเปลี่ยนแปลง

จากการจำลอง สามารถแสดงพื้นที่ที่ใช้ในการแลกเปลี่ยนความร้อนของอีแวปโปเรเตอร์ และคอนเดนเซอร์ ซึ่งส่งผลต่อขนาดของอุปกรณ์ทั้ง 2 อุปกรณ์ เมื่ออุณหภูมิอากาศเปลี่ยนแปลงได้ดังรูปที่ 4.30 และ 4.31 ตามลำดับ



รูปที่ 4.30 ขนาดของอีแวปโปเรเตอร์ในโรงไฟฟ้าโออาร์ซี ของจังหวัดนครราชสีมา ปี พ.ศ. 2562



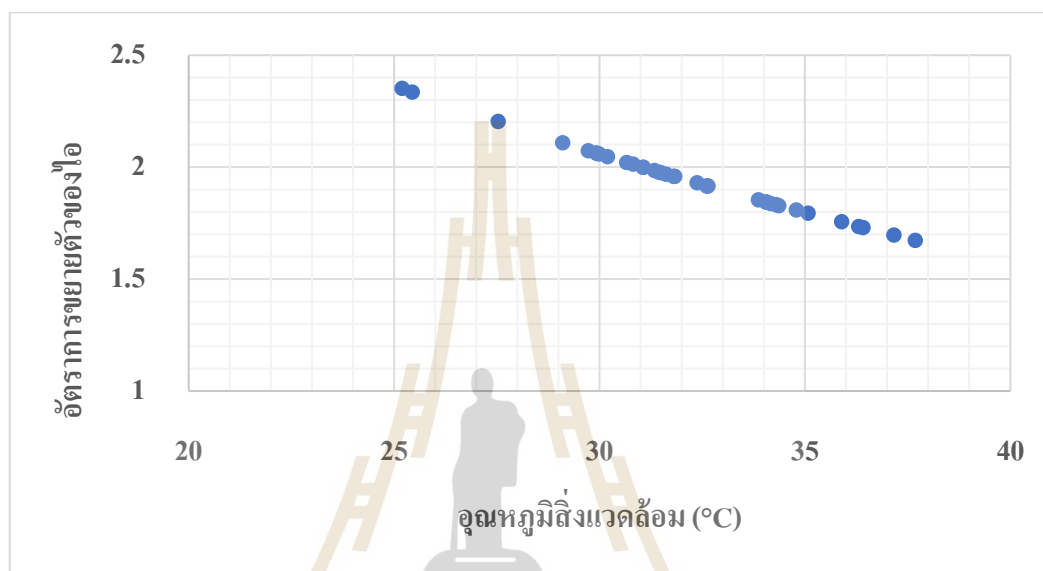
รูปที่ 4.31 ขนาดของคอนเดนเซอร์ในโรงไฟฟ้าไออาร์ซี ของจังหวัดนครราชสีมา ปี พ.ศ. 2562

จากผลการจำลองในรูปที่ 4.30 และ 4.31 พบว่า ขนาดของอีแวปโปเรเตอร์มีการเปลี่ยนแปลงเมื่ออุณหภูมิอากาศเปลี่ยนแปลง อย่างเห็นได้ชัด ขณะที่ ขนาดของคอนเดนเซอร์ค่อนข้างคงที่ตลอดการจำลอง ทั้งนี้ อาจเป็นเพราะ ภายในคอนเดนเซอร์มีการปรับความดันควบแน่นเพื่อให้อุณหภูมิอากาศ และสารทำงานมีการแลกเปลี่ยนความร้อนที่เข้าคู่กัน ได้มากกว่าภายในอีแวปโปเรเตอร์ จึงทำให้ขนาดของคอนเดนเซอร์ค่อนข้างคงที่

เมื่อพิจารณาขนาดของอีแวปโปเรเตอร์ พบว่า ขนาดของอุปกรณ์มีขนาดลดลง เมื่ออุณหภูมิอากาศเพิ่มขึ้น เนื่องจากในอีแวปโปเรเตอร์มีการแลกเปลี่ยนความร้อนทั้งบริเวณที่เป็นการเพิ่มอุณหภูมิของสารทำงาน และการเปลี่ยนเฟสที่ชัดเจน จึงอาจทำให้ ที่อุณหภูมิอากาศต่ำ (ประมาณ 25 °C) มีอุณหภูมิ ณ ตำแหน่งทางเข้าอีแวปโปเรเตอร์มีค่าต่ำ และมีการแลกเปลี่ยนความร้อนที่ไม่เข้าคู่กันเท่ากรณีที่อุณหภูมิอากาศสูงขึ้น

#### 4.5.5 อัตราการขยายตัวของไอในโรงไฟฟ้า เมื่ออุณหภูมิอากาศเปลี่ยนแปลง

สำหรับผลการจำลองที่แสดงถึงขนาดของเอ็กซ์แพนเดอร์ สามารถแสดงได้ในพารามิเตอร์อัตราการขยายตัวของไอของโรงไฟฟ้า ซึ่งสามารถแสดงผลเมื่ออุณหภูมิอากาศเปลี่ยนแปลงได้ดังรูปที่ 4.32



รูปที่ 4.32 อัตราการขยายตัวของไอในโรงไฟฟ้าไออาร์ซี ของจังหวัดนครราชสีมา ปี พ.ศ. 2562

จากผลการจำลองในรูปที่ 4.32 พบว่า เมื่ออุณหภูมิอากาศเพิ่มขึ้น ส่งผลให้อัตราการขยายตัวของไอในเอ็กซ์แพนเดอร์มีค่าลดลง ทั้งนี้ เนื่องจาก เมื่ออุณหภูมิอากาศเพิ่มสูงขึ้น ทำให้โรงไฟฟ้ามีความจำเป็นในการเพิ่มความดันที่ใช้ควบแน่น เพื่อให้โรงไฟฟ้าสามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้สูงสุด จึงทำให้เอ็กซ์แพนเดอร์มีส่วนของการขยายตัวของไอที่ลดลง

นอกจากนี้ อัตราการขยายตัวของไอยังส่งผลต่อขนาดของเอ็กซ์แพนเดอร์อย่างมีนัยสำคัญ จึงอาจพิจารณาได้ว่า เมื่ออุณหภูมิอากาศลดต่ำลง โรงไฟฟ้าไออาร์ซีจำเป็นต้องใช้เอ็กซ์แพนเดอร์ที่มีขนาดใหญ่ขึ้น เพื่อรองรับอัตราการขยายตัวของไอที่เกิดขึ้นภายในอุปกรณ์

## บทที่ 5

### บทสรุปและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 บทนำ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้เป็นการวิเคราะห์สมรรถนะของโรงไฟฟ้าและเลือกสารทำงานสำหรับโรงไฟฟ้าไออาร์ซีให้สอดคล้องกับอุณหภูมิอากาศที่เปลี่ยนแปลงตลอดปี ของจังหวัดนครราชสีมา ในปี พ.ศ. 2562 ด้วยวิธีการเชิงตัวเลข โดยนำจำลองที่แหล่งความร้อนทิ้งอุณหภูมิ  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$

#### 5.2 สรุปผลการจำลองโรงไฟฟ้าไออาร์ซี

##### 5.2.1 การเปรียบเทียบการจำลองเชิงตัวเลขของโรงไฟฟ้าไออาร์ซีแบบใช้สารทำงานเป็นสารอินทรีย์บริสุทธิ์ และสารซีโอทรอปิก เมื่ออุณหภูมิแหล่งความร้อนทิ้งเปลี่ยนแปลง

- เมื่อพิจารณาตามเงื่อนไขการจำลองที่ใช้อุณหภูมิแหล่งความร้อนทิ้งเป็น  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$  พบว่าสารทำงานแบบสารซีโอทรอปิกจะสามารถผลิตกำลังไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้าไออาร์ซีได้มากกว่าสารทำงานแบบสารอินทรีย์บริสุทธิ์ อยู่ประมาณ 29 - 35.69%

- ความดันที่ใช้ในการควบแน่นภายในคอนเดนเซอร์และความดันที่ใช้ในการระเหยภายในอีแวปโปเรเตอร์ยังมีความดันที่ต่ำกว่าโรงไฟฟ้าไออาร์ซีแบบใช้สารอินทรีย์บริสุทธิ์ ประมาณ 0.1 - 0.3 MPa และ 0.1 - 0.5 MPa ตามลำดับ ซึ่งทำให้สามารถลดราคาต้นทุนของวัสดุที่ใช้ผลิตอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน เพื่อป้องกันการรั่วของความดันในอุปกรณ์

- เมื่อพิจารณาขนาดของอีแวปโปเรเตอร์และคอนเดนเซอร์ เมื่อใช้สารซีโอทรอปิกเป็นสารทำงาน จะมีขนาดที่ใหญ่กว่าเมื่อใช้สารอินทรีย์บริสุทธิ์

- ขนาดของปั๊มและขนาดของเอ็กซ์แพนเดอร์ พบว่า มีขนาดใกล้เคียงกันเมื่อเปลี่ยนสารทำงานในโรงไฟฟ้า ดังนั้น จึงสามารถใช้ปั๊มและเอ็กซ์แพนเดอร์ขนาดเดียวกันได้

##### 5.2.2 การจำลองเชิงตัวเลขของโรงไฟฟ้าไออาร์ซีแบบใช้สารทำงานเป็นสารซีโอทรอปิก เมื่ออุณหภูมิแหล่งรับความร้อนเปลี่ยนแปลง

- สารซีโอทรอปปีกที่ผลิตกำลังไฟฟ้าได้สูงสุดคือ isobutane/isopentane (0.4/0.6) ซึ่งผลิตได้ 4.123 kW และสารซีโอทรอปปีกที่ผลิตกำลังไฟฟ้าได้ต่ำที่สุดคือ R1234yf/R227ea (0.91/0.09) ซึ่งผลิตได้ 1.73 kW

- ความดันที่ใช้ในการระเหยและควบแน่นในอีแวโปเรเตอร์และคอนเดนเซอร์ที่น้อยที่สุดคือ isobutane/isopentane และสารซีโอทรอปปีกที่ใช้ความดันในการระเหยและควบแน่นที่มากที่สุดคือ R1234yf/R227ea

- ขนาดของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่ใช้เพื่อแลกเปลี่ยนความร้อนของสารทำงานจะมากที่สุดเมื่อใช้สารทำงานเป็น isobutane/isopentane

- ขนาดของเอ็กซ์แพนเดอร์ ภาระการเพิ่มความดันของปั๊ม และอัตราการไหลเชิงมวลของสารซีโอทรอปปีก จะมีค่าน้อยที่สุดเมื่อใช้สารทำงานเป็น isobutane/isopentane

**5.2.3 ผลการจำลองเชิงตัวเลขของโรงไฟฟ้าโออาร์ซีแบบใช้สารทำงานเป็น isobutane/isopentane ตามกระบวนการจำลองที่ 1 และ 2**

- จากการศึกษาพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องทั้งหมด เมื่อทำการจำลองเปรียบเทียบกันระหว่างการจำลองทั้ง 2 รูปแบบ พบว่า พารามิเตอร์ต่าง ๆ มีการเปลี่ยนแปลงน้อยกว่า 10% ซึ่งเป็นเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงที่ยอมรับได้

- ในการดำเนินการจำลองโรงไฟฟ้าในช่วงอุณหภูมิอากาศตลอดทั้งปี จะทำการจำลองภายใต้เงื่อนไขของการใช้ค่าความดันในการระเหย และอัตราส่วนความเข้มข้นของสารทำงาน ตามความดันที่ถูกจำลองในสภาวะออกแบบ และ ใช้วิธีการของ Golden section search method เพื่อหาความดันในการควบแน่นที่ทำให้โรงไฟฟ้าโออาร์ซีผลิตกำลังไฟฟ้าได้สูงสุด

- สารทำงานที่ถูกเลือกใช้เพื่อจำลองภายใต้อุณหภูมิอากาศที่เปลี่ยนแปลงตลอดปีของจังหวัดนครราชสีมา จะใช้สารทำงาน isobutane/isopentane ในการจำลอง เนื่องจาก เป็นสารทำงานที่สามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้สูงสุด จากสารทำงานทั้งหมด 5 คู่สารทำงาน (ผลดังรูปที่ 4.10) แม้จะเป็นการจำลองภายใต้ภาวะที่อุณหภูมิอากาศที่สูงสุดก็ตาม

**5.2.4 ผลการจำลองเชิงตัวเลขของโรงไฟฟ้าโออาร์ซีแบบใช้สารทำงานเป็นสาร**

**ซีโอทรอปปีก ของจังหวัดนครราชสีมา ในปี พ.ศ. 2562**

- เมื่ออุณหภูมิอากาศลดลง กำลังไฟฟ้าที่โรงไฟฟ้าโออาร์ซีผลิตได้จะมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจาก ความสามารถในการเกิด temperature glide ของสารซีโอทรอปปีก โดยสามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้เพิ่มขึ้นจากสภาวะออกแบบสูงสุด 70%

- ความดันที่ใช้ในการควบคุมในคอนเดนเซอร์มีค่าเพิ่มขึ้น เมื่ออุณหภูมิอากาศมีค่าเพิ่มมากขึ้น เนื่องจาก เมื่ออุณหภูมิอากาศเพิ่มขึ้น จะส่งผลให้ค่าความดันที่ใช้เพื่อการควบคุมของสารทำงานมีค่าเพิ่มขึ้น เพื่อให้สามารถทำการควบคุมจนสารทำงานมีสถานะของสารเป็นของเหลวอิ่มตัวเมื่อเคลื่อนที่ออกจากคอนเดนเซอร์ได้

- เมื่ออุณหภูมิอากาศเพิ่มขึ้น วัสดุที่ใช้เพื่อผลิตคอนเดนเซอร์จะต้องมีความแข็งแรงมากขึ้น เพื่อป้องกันการรั่วของความดันที่ไม่เท่ากัน ระหว่างความดันในคอนเดนเซอร์ และความดันบรรยากาศได้

- ขนาดหรือภาระการทำงานของปั๊มในการเพิ่มความดันก่อนเข้าอีแวปโปเรเตอร์อาจลดลง เมื่ออุณหภูมิอากาศเพิ่มขึ้น เนื่องจากการจำลองให้ความดันที่ระเหยในอีแวปโปเรเตอร์คงที่ ทำให้อัตราส่วนของความดันลดลงเมื่ออุณหภูมิอากาศเพิ่มขึ้น

- ค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนของโรงไฟฟ้ามีค่าลดลง เมื่ออุณหภูมิอากาศมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ของโรงไฟฟ้ามีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพเชิงความร้อนมากกว่าค่าความร้อนที่ถ่ายเทในอีแวปโปเรเตอร์

- ขนาดของคอนเดนเซอร์ ค่อนข้างคงที่ตลอดการจำลอง เนื่องจาก ภายในคอนเดนเซอร์มีการปรับความดันควบคุมเพื่อให้อุณหภูมิอากาศ และสารทำงานมีการแลกเปลี่ยนความร้อนที่เข้าคู่กัน จึงทำให้ขนาดของคอนเดนเซอร์ค่อนข้างคงที่

- ขนาดของอีแวปโปเรเตอร์มีขนาดลดลง เมื่ออุณหภูมิอากาศเพิ่มขึ้น เนื่องจากในอีแวปโปเรเตอร์มีการแลกเปลี่ยนความร้อนทั้งบริเวณที่เป็นการเพิ่มอุณหภูมิของสารทำงาน และการเปลี่ยนเฟสที่ชัดเจน จึงอาจทำให้ ที่อุณหภูมิอากาศต่ำ (ประมาณ  $25^{\circ}\text{C}$ ) มีอุณหภูมิ ณ ตำแหน่งทางเข้าอีแวปโปเรเตอร์มีค่าต่ำ และมีการแลกเปลี่ยนความร้อนที่ไม่เข้าคู่กันเท่ากรณีที่อุณหภูมิอากาศสูงขึ้น

- เมื่ออุณหภูมิอากาศเพิ่มขึ้น ส่งผลให้อัตราการขยายตัวของไอในเอ็กซ์แพนเดอร์มีค่าลดลง เนื่องจาก เมื่ออุณหภูมิอากาศเพิ่มสูงขึ้น ทำให้โรงไฟฟ้ามีความจำเป็นในการเพิ่มความดันที่ใช้ควบคุม เพื่อให้โรงไฟฟ้าสามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้สูงสุด จึงทำให้เอ็กซ์แพนเดอร์มีส่วนของการขยายตัวของไอที่ลดลง

- เมื่ออุณหภูมิอากาศลดลง โรงไฟฟ้า โออาร์จีจำเป็นต้องใช้เอ็กซ์แพนเดอร์ที่มีขนาดใหญ่ขึ้น เพื่อรองรับอัตราการขยายตัวของไอที่เกิดขึ้นภายในอุปกรณ์



### 5.3 ข้อเสนอแนะ

1) โรงไฟฟ้าไออาร์ซีแบบใช้สารซีโอทรอปิกเป็นสารทำงาน อาจมีการใช้คู่สารทำงานที่เพิ่มขึ้น เพื่อศึกษาอิทธิพลของคุณสมบัติของสารทำงานที่ส่งผลต่อแหล่งความร้อนทิ้ง และแหล่งรับความร้อนที่ทำให้สามารถผลิตกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้มากขึ้น โดยเฉพาะสารประเภทไฮโดรคาร์บอน (hydrocarbon) ที่อาจมีอิทธิพลต่อการผลิตกำลังไฟฟ้าได้สูงขึ้น

2) โรงไฟฟ้าที่ใช้ในการจำลองมีการใช้แหล่งความร้อนทิ้งเป็นน้ำ โดยใช้อัตราการไหลเชิงมวลเป็น  $1 \text{ kg/s}$  ซึ่งในสถานะดำเนินการจริง อัตราการไหลเชิงมวลของแหล่งความร้อนทิ้งอาจมีค่ามากกว่า  $1 \text{ kg/s}$  หรือมีการเปลี่ยนชนิดของแหล่งความร้อนทิ้ง จึงอาจมีการจำลองเมื่ออัตราการไหลเชิงมวลและชนิดของแหล่งความร้อนทิ้งเปลี่ยนแปลง

3) ในการพัฒนาการจำลองโรงไฟฟ้าเพื่อให้จำลองได้สมจริงมากขึ้น อาจมีการพิจารณาประสิทธิภาพทางกล (Mechanical efficiency) ของระบบเพิ่มเติม

4) ในการวิเคราะห์พารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อสมรรถนะ อาจมีการพิจารณาประสิทธิภาพตามกฎข้อที่ 2 ทางเทอร์โมไดนามิกส์ (second law efficiency) เพิ่มเติม เพื่อวิเคราะห์ถึงความร้อนที่สูญเสียไปในแต่ละอุปกรณ์ (exergy destruction) และมีการแก้ไขที่ถูกต้อง เพื่อลดการผลิตกำลังไฟฟ้าที่สูญเสียไป

5) ในการหาขนาดของอุปกรณ์จากการจำลอง อาจได้ค่าของพารามิเตอร์ที่ไม่มีขายตามท้องตลาด จึงอาจมีการกำหนดขนาดของอุปกรณ์ในโรงไฟฟ้าไออาร์ซีเบื้องต้น เพื่อให้โรงไฟฟ้ามีความสมจริงมากขึ้น

6) การจำลองตามอุณหภูมิอากาศที่เปลี่ยนแปลง อาจเพิ่มพื้นที่ในการจำลอง โดยเฉพาะในพื้นที่อุตสาหกรรม เนื่องจากมีอุณหภูมิที่ค่อนข้างสูง จึงสามารถนำความร้อนเหล่านั้นมาใช้ประโยชน์เพื่อผลิตไฟฟ้าให้กับภาคอุตสาหกรรมต่อไป

## รายการอ้างอิง

- กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน (2558). แผนพัฒนาพลังงาน  
ทดแทนและพลังงานทางเลือกพ.ศ. 2558 – 2579 (Alternative Energy Development  
Plan: AEDP2015). Retrieved 29 พ.ค. 2562, <http://www.dede.go.th>
- กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน (2562). สถานการณ์พลังงาน  
ของประเทศไทย เดือนมกราคม 2562. Retrieved 16 มิ.ย. 2562, <http://www.dede.go.th>
- ชนาภา เทพเสนา และอาทิตย์ คุณศรีสุข. (2562). การออกแบบและวิเคราะห์โรงไฟฟ้าพลังความร้อน  
ที่แหล่งความร้อนอุณหภูมิตั้งที่ 260°C 280°C และ 300°C. การประชุมวิชาการวิศวกรรมศาสตร์  
วิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี และสถาปัตยกรรมศาสตร์ ครั้งที่ 10 (10<sup>th</sup> Engineering, Science,  
Technology and Architecture Conference), อาคารขวัญแก้ว มหาวิทยาลัยวงษ์ชวลิตกุล  
จังหวัดนครราชสีมา, 30 สิงหาคม 2562
- ธงชัย เทียมทัด และอาทิตย์ คุณศรีสุข. (2562). การศึกษาเชิงเปรียบเทียบระหว่างโรงไฟฟ้าไออาร์ซี  
แบบซับคริติคัล, โรงไฟฟ้าไออาร์ซีแบบซูเปอร์คริติคัล และโรงไฟฟ้าแรงดันไอเคลือบ  
ไตรแลทเตอรอลสำหรับแหล่งความร้อนที่อุณหภูมิ 210 – 250 องศาเซลเซียส. การประชุม  
วิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 15 (15<sup>th</sup> Conference on Energy Network  
of Thailand), เดอะ กรีนเนอร์ รี-สอร์ท เขาใหญ่ จังหวัดนครราชสีมา, 21-24 พฤษภาคม  
2562
- บริษัท เชียงใหม่แอร์แคร์ เอ็นจิเนียริง จำกัด (2563). การคงสภาพของสารทำความเย็นในบรรยากาศ  
(Atmospheric Lifetime). Retrieved 20 มิ.ย. 2563, <http://www.chiangmaiaircare.com>
- วชิราภรณ์ รักษาอินทร์ และอาทิตย์ คุณศรีสุข. (2562). การศึกษาโรงไฟฟ้าไออาร์ซีแบบซับคริติคัล,  
โรงไฟฟ้าไออาร์ซีแบบซูเปอร์คริติคัล และโรงไฟฟ้าแรงดันไอเคลือบไตรแลทเตอรอล  
สำหรับแหล่งความร้อนที่มีอุณหภูมิ 130 - 150 องศาเซลเซียส. การประชุมวิชาการเครือข่าย  
พลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 15 (15<sup>th</sup> Conference on Energy Network of Thailand),  
เดอะ กรีนเนอร์ รี-สอร์ท เขาใหญ่ จังหวัดนครราชสีมา, 21-24 พฤษภาคม 2562
- ศูนย์ภูมิอากาศ กรมอุตุนิยมวิทยา. (2562). สถิติอุณหภูมิของจังหวัดนครราชสีมา ประเทศไทย ปี  
พ.ศ. 2562. Retrieved 26 มี.ค. 2563, <http://www.tmd.go.th>

- สิริชัย ดวงเดือน และอาทิตย์ คุณศรีสุข. (2562). การศึกษาสมรรถนะของโรงไฟฟ้าโออาร์ซีสำหรับ แหล่งความร้อนที่อุณหภูมิตั้งแต่ 160 – 200 องศาเซลเซียส. การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงาน แห่งประเทศไทย ครั้งที่ 15 (15<sup>th</sup> Conference on Energy Network of Thailand), เดอะ กรีนเนอร์ รี-สอร์ท เขาใหญ่ จังหวัดนครราชสีมา, 21-24 พฤษภาคม 2562
- องค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก (องค์การมหาชน) (2557). **ค่าศักยภาพในการทำให้เกิดภาวะ โลกร้อน (Global Warming Potential, GWP)**. Retrieved 20 มิ.ย. 2563, [www.tgo.or.th](http://www.tgo.or.th)
- อนุกุล โม่งปรมานิต และอาทิตย์ คุณศรีสุข. (2562). การผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานใต้พิภพโดยใช้ โรงไฟฟ้าโออาร์ซี. การประชุมวิชาการวิศวกรรมศาสตร์ วิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี และ สถาปัตยกรรมศาสตร์ ครั้งที่ 10 (10<sup>th</sup> Engineering, Science, Technology and Architecture Conference), อาคารขวัญแก้ว มหาวิทยาลัยวงษ์ชวลิตกุล จังหวัดนครราชสีมา, 30 สิงหาคม 2562
- Carrier Corporation (2015). **Safety Classification of Refrigerants**. Retrieved 20 June 2020, <https://dms.hvacpartners.com>
- Cengel, Y. A. **Heat and mass transfer: a practical approach**, 2007. *SI Units*.
- Collings, P., Yu, Z., & Wang, E. (2016). **A dynamic organic Rankine cycle using a zeotropic mixture as the working fluid with composition tuning to match changing ambient conditions**. *Applied energy*, 171, 581-591.
- Engineers Edge. (2020). **Parallel and Counter Flow Designs**. Retrieved 20 June 2020, [www.engineeredge.com](http://www.engineeredge.com)
- Fang, Y., Yang, F., & Zhang, H. (2019). **Comparative analysis and multi-objective optimization of organic Rankine cycle (ORC) using pure working fluids and their zeotropic mixtures for diesel engine waste heat recovery**. *Applied Thermal Engineering*, 157, 113704.
- Feng, Y., Hung, T., Zhang, Y., Li, B., Yang, J., & Shi, Y. (2015). **Performance comparison of low-grade ORCs (organic Rankine cycles) using R245fa, pentane and their mixtures based on the thermoeconomic multi-objective optimization and decision makings**. *Energy*, 93, 2018-2029.
- Fischer, J. (2011). **Comparison of trilateral cycles and organic Rankine cycles**. *Energy*, 36(10), 6208-6219.

- Harn Engineering Solutions. (2020). **ค่าศักยภาพในการทำลายโอโซน (Ozone Depletion Potential, ODP)** Retrieved 20 June 2020, <http://www.dede.go.th>
- Hettiarachchi, H. M., Golubovic, M., Worek, W. M., & Ikegami, Y. (2007). **Optimum design criteria for an organic Rankine cycle using low-temperature geothermal heat sources.** *Energy*, 32(9), 1698-1706.
- Holik, M., Živić, M., Virag, Z., & Barac, A. (2019). **Optimization of an organic Rankine cycle constrained by the application of compact heat exchangers.** *Energy Conversion and Management*, 188, 333-345.
- Hærvig, J., Sørensen, K., & Condra, T. J. (2016). **Guidelines for optimal selection of working fluid for an organic Rankine cycle in relation to waste heat recovery.** *Energy*, 96, 592-602.
- Kheiri, A., Feidt, M., & Pelloux-Prayer, S. (2014). **Thermodynamic and economic optimizations of a waste heat to power plant driven by a subcritical ORC (Organic Rankine Cycle) using pure or zeotropic working fluid.** *Energy*, 78, 622-638.
- Lecompte, S., Ameer, B., Ziviani, D., van den Broek, M., & De Paepe, M. (2014). **Exergy analysis of zeotropic mixtures as working fluids in Organic Rankine Cycles.** *Energy Conversion and Management*, 85, 727-739.
- Li, J., Liu, Q., Duan, Y., & Yang, Z. (2017). **Performance analysis of organic Rankine cycles using R600/R601a mixtures with liquid-separated condensation.** *Applied energy*, 190, 376-389.
- Li, L., Ge, Y. T., Luo, X., & Tassou, S. A. (2018). **Design and dynamic investigation of low-grade power generation systems with CO<sub>2</sub> transcritical power cycles and R245fa organic Rankine cycles.** *Thermal Science and Engineering Progress*, 8, 211-222.
- Li, S., & Dai, Y. (2015). **Thermo-economic analysis of waste heat recovery ORC using zeotropic mixtures.** *Journal of Energy Engineering*, 141(4), 04014050.
- Liu, Q., Duan, Y., & Yang, Z. (2014). **Effect of condensation temperature glide on the performance of organic Rankine cycles with zeotropic mixture working fluids.** *Applied Energy*, 115, 394-404.

- Liu, Q., Shen, A., & Duan, Y. (2015). **Parametric optimization and performance analyses of geothermal organic Rankine cycles using R600a/R601a mixtures as working fluids.** *Applied Energy*, 148, 410-420.
- Luo, X., Liang, Z., Guo, G., Wang, C., Chen, Y., Ponce-Ortega, J. M., & El-Halwagi, M. M. (2017). **Thermo-economic analysis and optimization of a zeotropic fluid organic Rankine cycle with liquid-vapor separation during condensation.** *Energy conversion and management*, 148, 517-53
- Mago, P. J., Chamra, L. M., Srinivasan, K., & Somayaji, C. (2008). **An examination of regenerative organic Rankine cycles using dry fluids.** *Applied thermal engineering*, 28(8-9), 998-1007.
- Mondejar, M. E., & Thern, M. (2017). **Analysis of isentropic mixtures for their use as working fluids in organic Rankine cycles.** *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 36(3), 921-935.
- Modi, A., & Haglind, F. (2017). **A review of recent research on the use of zeotropic mixtures in power generation systems.** *Energy Conversion and Management*, 138, 603-626.
- Navongxay, B., & Chaiyat, N. (2019). **Energy and exergy costings of organic Rankine cycle integrated with absorption system.** *Applied Thermal Engineering*, 152, 67-78.
- Preißinger, M., Heberle, F., & Brüggemann, D. (2013). **Advanced organic rankine cycle for geothermal application.** *International Journal of Low-Carbon Technologies*, 8(suppl\_1), i62-i68
- Su, W., Hwang, Y., Deng, S., Zhao, L., & Zhao, D. (2018). **Thermodynamic performance comparison of Organic Rankine Cycle between zeotropic mixtures and pure fluids under open heat source.** *Energy Conversion and Management*, 165, 720-737.
- United States Environmental Protection Agency. (2007). **Science - Ozone Layer Protection.** Retrieved 21 June 2020. <https://www.epa.gov>
- Wang, Y., Liu, X., Ding, X., & Weng, Y. (2017). **Experimental investigation on the performance of ORC power system using zeotropic mixture R601a/R600a.** *International Journal of Energy Research*, 41(5), 673-688.

Wu, Y., Zhu, Y., & Yu, L. (2016). **Thermal and economic performance analysis of zeotropic mixtures for Organic Rankine Cycles**. Applied Thermal Engineering, 96, 57-63.

Zhao, L., & Bao, J. (2014). **Thermodynamic analysis of organic Rankine cycle using zeotropic mixtures**. Applied Energy, 130, 748-756.





ภาคผนวก ก

ข้อมูลการจำลองไฟฟ้าไออาร์ซีแบบใช้สารทำงานเป็นสารอินทรีย์บริสุทธิ์ และ  
สารซีโอทรอปิก

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ ก.1 ข้อมูลกำลังไฟฟ้าสุทธิของการจำลองไฟฟ้าไออาร์ซีแบบใช้สารทำงานเป็นสารอินทรีย์  
บริสุทธ์ และสารซีโอทรอปปีก

อุณหภูมิแหล่งความร้อน ทิ้ง (°C)	$W_{net}$ (kW)		
	สารอินทรีย์บริสุทธ์	สารทำงานแบบใช้สารผสม	
		isobutane/ isopentane	R227ea/ R245fa
100	4.5	6.106	5.846
150	25.94	26.865	26.793
200	61.59	64.857	66.981
250	134.9	121.360	90.775
300	231.44	152.119	129.954

ตารางที่ ก.2 ข้อมูลอัตราขยายตัวของไอในการจำลองไฟฟ้าไออาร์ซีแบบใช้สารทำงานเป็น  
สารอินทรีย์บริสุทธ์ และสารซีโอทรอปปีก

อุณหภูมิแหล่งความร้อน ทิ้ง (°C)	Expansion ratio		
	สารอินทรีย์บริสุทธ์	สารทำงานแบบใช้สารผสม	
		isobutane/ isopentane	R227ea/ R245fa
100	1.92	2.047	2.092
150	5.47	3.640	5.769
200	6.73	7.373	11.162
250	30.00	25.76	7.724
300	98.43	16.27	12.260



ตารางที่ ก.3 ข้อมูลความดันในการระเหยในการจำลองไฟฟ้าโออาร์ซีแบบใช้สารทำงานเป็น สารอินทรีย์บริสุทธิ์ และสารซีไอทรอปิก

อุณหภูมิแหล่งความร้อน ทิ้ง (°C)	Evaporation pressure (MPa)		
	สารอินทรีย์บริสุทธิ์	สารทำงานแบบใช้สารผสม	
		isobutane/ isopentane	R227ea/ R245fa
100	1.10	0.59	0.96
150	0.84	1.24	2.12
200	1.17	2.06	2.70
250	2.80	3.20	2.16
300	1.28	2.46	2.85

ตารางที่ ก.4 ข้อมูลความดันในการควบแน่นในการจำลองไฟฟ้าโออาร์ซีแบบใช้สารทำงานเป็น สารอินทรีย์บริสุทธิ์ และสารซีไอทรอปิก

อุณหภูมิแหล่งความร้อน ทิ้ง (°C)	Condensation pressure (MPa)		
	แบบใช้สารบริสุทธิ์	สารทำงานแบบใช้สารผสม	
		isobutane/ isopentane	R227ea/ R245fa
100	0.63	0.29	0.48
150	0.19	0.37	0.46
200	0.20	0.34	0.34
250	0.15	0.22	0.35
300	0.02	0.21	0.34

ตารางที่ ก.5 ข้อมูลอัตราการไหลเชิงมวลในการจำลองไฟฟ้าโออาร์ซีแบบใช้สารทำงานเป็น สารอินทรีย์บริสุทธิ์ และสารซีโอทรอปิก

อุณหภูมิแหล่งความร้อน ทิ้ง (°C)	อัตราการไหลเชิงมวล (kg/s)		
	แบบใช้สารบริสุทธิ์	สารทำงานแบบใช้สารผสม	
		isobutane/ isopentane	R227ea/ R245fa
100	1.00	0.30	0.70
150	2.50	0.75	1.50
200	1.20	1.25	2.50
250	1.63	1.70	3.80
300	2.00	2.20	4.80

ตารางที่ ก.6 ข้อมูลขนาดของอีแวปอเรเตอร์ในการจำลองไฟฟ้าโออาร์ซีแบบใช้สารทำงานเป็น สารอินทรีย์บริสุทธิ์ และสารซีโอทรอปิก

อุณหภูมิแหล่งความร้อน ทิ้ง (°C)	Evaporator size (kW/m <sup>2</sup> )		
	แบบใช้สารบริสุทธิ์	สารทำงานแบบใช้สารผสม	
		isobutane/ isopentane	R227ea/ R245fa
100	6.11	7.43	7.19
150	16.73	13.57	13.70
200	22.87	29.72	35.00
250	57.43	49.77	28.29
300	86.38	34.38	26.22

ตารางที่ ก.7 ข้อมูลขนาดของคอนเดนเซอร์ในการจำลองไฟฟ้าไออาร์ซีแบบใช้สารทำงานเป็นสารอินทรีย์บริสุทธิ์ และสารซีโพรทอปีก

อุณหภูมิแหล่งความร้อน ทิ้ง (°C)	Condenser size (kW/m <sup>2</sup> )		
	แบบใช้สารบริสุทธิ์	สารทำงานแบบใช้สารผสม	
		isobutane/ isopentane	R227ea/ R245fa
100	7.22	9.40	9.61
150	19.67	24.78	21.02
200	32.04	39.87	34.56
250	47.85	55.36	54.61
300	63.72	69.28	66.34



ภาคผนวก ข

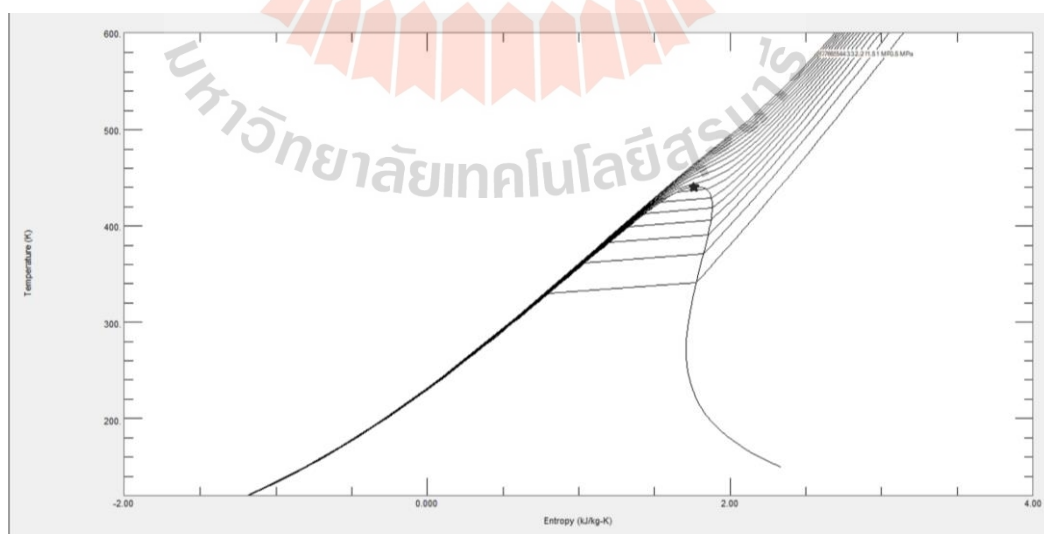
ผลจำลองโรงไฟฟ้าโออาร์ซีแบบใช้สารทำงานเป็นสาร  
ซีโอทรอปิก

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

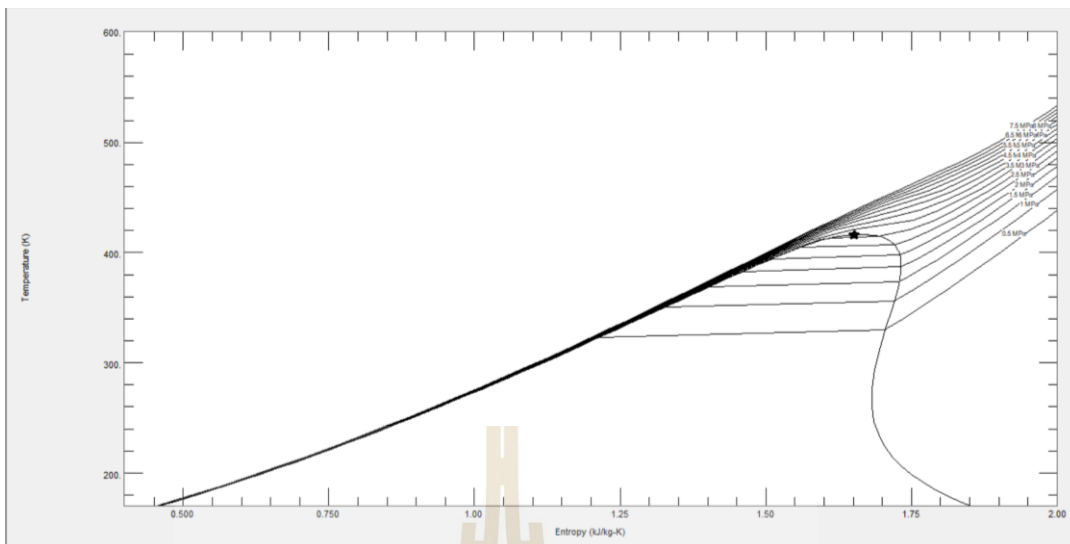
ตารางที่ ข.1 ข้อมูลการจำลองเมื่อใช้สารซีโพรอปปิกต่าง ๆ

working fluid	isopentane/ isobutane	R227ea/ R245fa	RC318/ R227ea	R1234yf/ RC318	R1234yf/ R227ea
$\dot{m}_{wf}$ (kg/s)	0.29	0.35	0.35	0.35	0.35
$P_{evaporator}$ (kPa)	645.977	1024.016	1619.789	2035.464	2692.734
$P_{condenser}$ (kPa)	395.030	504.816	831.182	1033.981	1522.374
$dTs$	1.49E-03	7.03E-04	1.04E-03	6.33E-04	3.08E-04
Expansion ratio	1.673	2.151	2.322	2.411	2.175
$UA_{evap}$ (W/m <sup>2</sup> )	6,929.03	4,637.61	2,578.60	2,835.74	2,790.03
$UA_{cond}$ (W/m <sup>2</sup> )	8,850.15	5,006.43	2,505.56	2,912.32	2,641.80
$\dot{W}_{net}$ (kW)	4.123	3.172	1.762	1.933	1.728
$\eta_{th}$	0.040	0.051	0.049	0.050	0.044
mass fraction z1	0.600	0.240	0.860	0.300	0.910
mass fraction z2	0.400	0.760	0.140	0.700	0.090
$Q_{in}$ (W)	104,111.65	62,091.71	35,935.19	38,760.77	39,668.97
$Q_{out}$ (W)	99,988.65	58,894.01	34,159.53	36,811.93	37,927.42

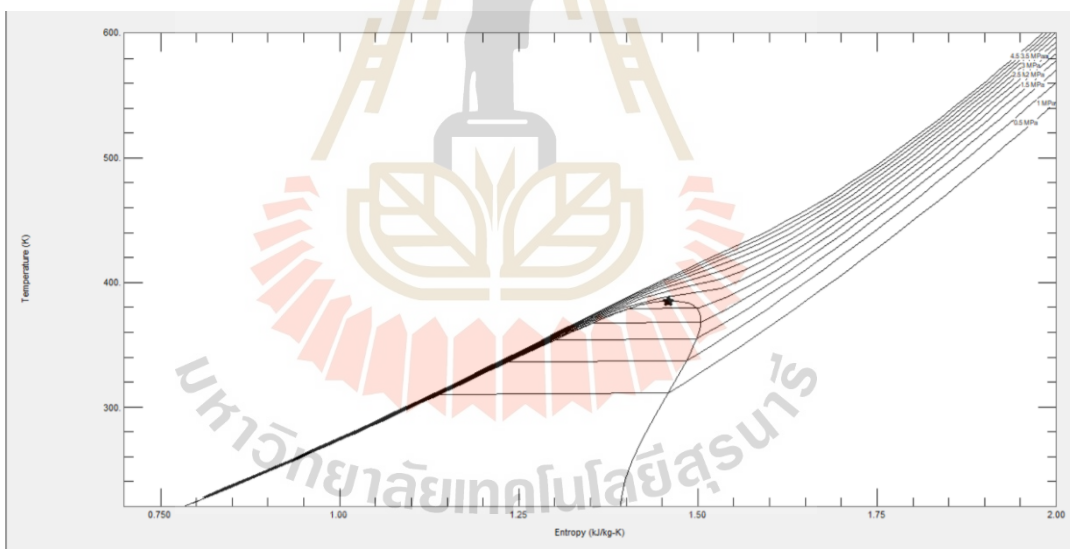
จากตารางที่ ข.1 แสดงการเกิด Temperature glide ของสารทำงาน isopentane/isobutane R227ea/R245fa, RC318/R227ea, R1234yf/RC318 และ R1234yf/R227ea ในอัตราส่วนความเข้มข้นตามตาราง ข.1 ได้ดังรูปที่ ข.1, ข.2, ข.3, ข.4 และ ข.5 ตามลำดับ



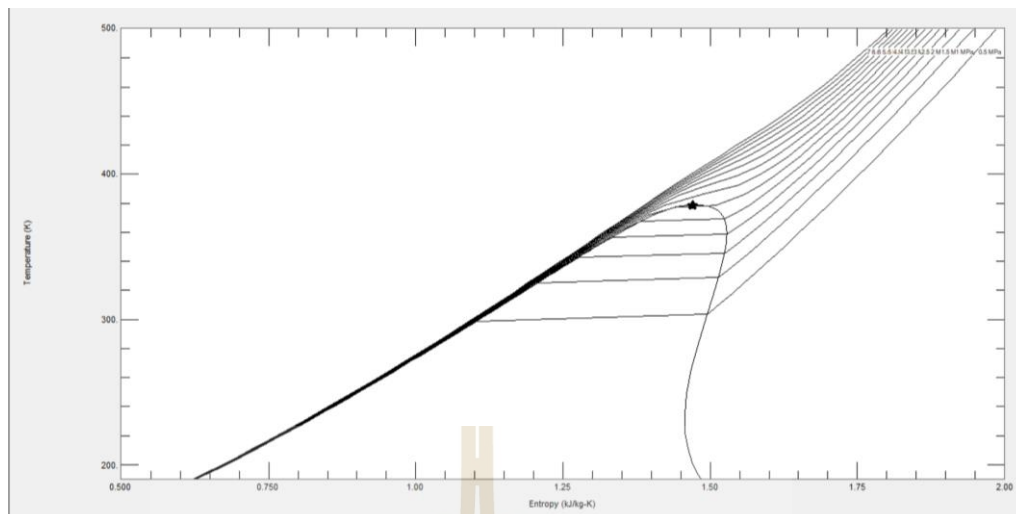
รูปที่ ข.1 T-s diagram ของ isopentane/isobutane (0.6/0.4)



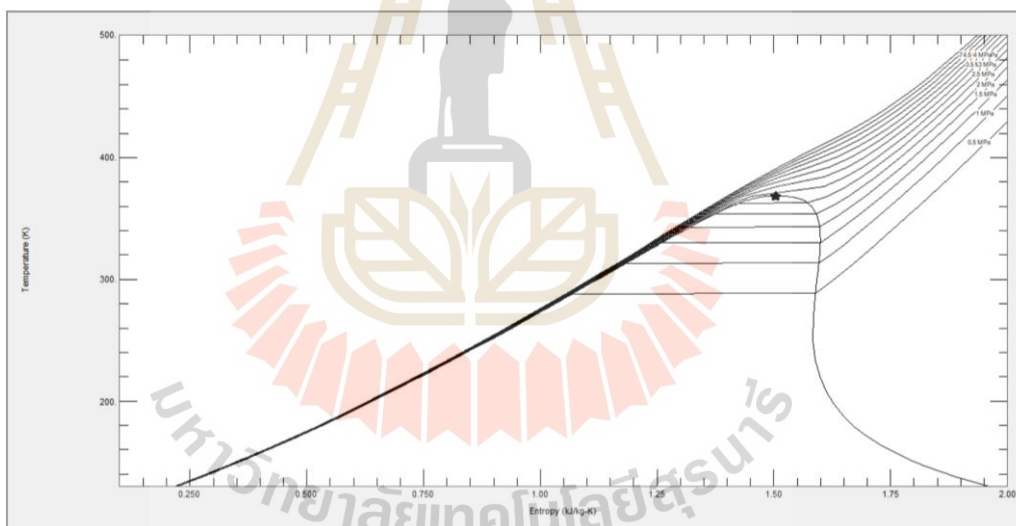
รูปที่ ข.2 T-s diagram ของ R227ea/R245fa (0.24/0.76)



รูปที่ ข.3 T-s diagram ของ RC318/R227ea (0.86/0.14)



รูปที่ ข.4 T-s diagram ของ R1234yf/RC318 (0.3/0.7)



รูปที่ ข.5 T-s diagram ของ R1234yf/R227ea (0.91/0.09)

ภาคผนวก ค

ผลการจำลองของโรงไฟฟ้าไออาร์ซีแบบใช้สาร isobutane/isopentane ของ  
จังหวัดนครราชสีมา ในปี พ.ศ. 2562

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



ตารางที่ ค.1 ข้อมูลการจำลองโรงไฟฟ้าไออาร์ซีของจังหวัดนครราชสีมาในปี 2562 ของ  
isobutane/isopentane

อุณหภูมิ ถึงแวลลุ่ม (°C)	กำลังไฟฟ้า สุทธิ (kW)	ความดันใน การควบแน่น (MPa)	ขนาด อีแวปโปเรเตอร์ (W/m <sup>2</sup> )	ขนาด คอนเดนเซอร์ (W/m <sup>2</sup> )	อัตราการ ขยายตัวของ ไอ	ประสิทธิภาพ เชิงความร้อน
25.19	7.01	0.28	7206.344722	8989.744733	2.3512	0.0622
27.53	6.449	0.30	7161.778719	8969.004302	2.2023	0.058
29.93	5.8833	0.32	7112.138548	8948.670203	2.0611	0.0537
29.1	6.0775	0.31	7127.369987	8954.907208	2.1086	0.0552
30.19	5.8224	0.32	7107.810141	8945.896263	2.0464	0.0533
31.44	5.5325	0.338	7086.924149	8933.20907	1.9777	0.051
32.37	5.3178	0.348	7060.632734	8919.681333	1.9282	0.0493
32.63	5.2581	0.34	7053.703886	8916.314196	1.9148	0.0489
33.87	4.9756	0.35	7023.438932	8900.968996	1.8517	0.0466
31.8	5.4491	0.33	7076.48903	8928.103455	1.9584	0.0504
29.98	5.8718	0.32	7111.306413	8948.985095	2.0583	0.0536
25.44	6.9499	0.28	7203.089811	8988.467917	2.3348	0.0617
29.72	5.9318686	0.31	7115.757886	8949.043376	2.0729	0.0541
30.82	5.6757	0.32	7098.321418	8940.051393	2.0114	0.0521
31.62	5.4909	0.33	7081.672779	8930.835044	1.968	0.0507
31.34	5.5549	0.3341	7089.800204	8932.501116	1.983	0.0512
32.64	5.2561	0.34597	7053.448618	8916.405019	1.9142	0.0488
34.3	4.8783	0.36159	7013.91784	8895.066043	1.8304	0.0458
34.36	4.8644	0.36217	7012.639274	8893.815025	1.8274	0.0457
35.08	4.7021	0.36912	6998.416585	8884.067855	1.7925	0.0444
37.68	4.1231	0.39503	6929.033825	8850.150366	1.6727	0.0396
36.41	4.4043	0.38222	6967.142248	8865.957531	1.73	0.0419
34.79	4.7679	0.36629	7003.961089	8889.551454	1.8066	0.0449

อุณหภูมิ สิ่งแวดล้อม (°C)	กำลังไฟฟ้า สุทธิ (kW)	ความดันใน การควบแน่น (MPa)	ขนาด อีแวปโปเรเตอร์ (W/m <sup>2</sup> )	ขนาด คอนเดนเซอร์ (W/m <sup>2</sup> )	อัตราการ ขยายตัวของ ไอ	ประสิทธิภาพ เชิงความร้อน
29.92	5.8853	0.32147	7112.274687	8947.172394	2.0616	0.0538
30.66	5.7126	0.32801	7100.568844	8940.068582	2.0201	0.0524
31.06	5.6204	0.33156	7095.101863	8938.063209	1.9983	0.0517
31.83	5.4421	0.33853	7075.614049	8927.116756	1.9568	0.0503
31.06	5.6204	0.33156	7095.101863	8938.063209	1.9983	0.0517
32.61	5.2629	0.34569	7054.244654	8916.998823	1.9158	0.0489
34.16	4.9095	0.36027	7016.87943	8895.42489	1.8372	0.0461
34.06	4.9326	0.35929	7019.124196	8898.974606	1.8423	0.0463
34.05	4.9349	0.3592	7019.33234	8898.668855	1.8428	0.0463
36.31	4.4268	0.38121	6970.379243	8868.378235	1.7346	0.0421
37.17	4.2357	0.38985	6943.778468	8856.343566	1.6954	0.0405
35.89	4.5208	0.37704	6984.095736	8874.469691	1.7542	0.0429
31.49	5.5205	0.33544	7085.432451	8931.86283	1.9749	0.0509

ภาคผนวก ง

บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

## รายชื่อบทความที่ได้รับการตีพิมพ์

- วชิราภรณ์ รักษาอินทร์ และ อาทิตย์ คุณศรีสุข. (2562). การออกแบบโรงไฟฟ้าไออาร์ซีเพื่อแหล่งความร้อนที่มีอุณหภูมิ 130 – 150 องศาเซลเซียส. การประชุมวิชาการการถ่ายเทพลังงานความร้อนและมวลในอุปกรณ์ด้านความร้อน และกระบวนการ ครั้งที่ 18, โรงแรมกระบี่ ฟร็อน เบย์ รีสอร์ท จังหวัดกระบี่, 20 – 21 มีนาคม 2562
- วชิราภรณ์ รักษาอินทร์ และ อาทิตย์ คุณศรีสุข. (2562). การศึกษาโรงไฟฟ้าไออาร์ซีแบบซับคริติคัล, โรงไฟฟ้าไออาร์ซีแบบซูเปอร์คริติคัล และ โรงไฟฟ้าแรงดันไวมืดแบบไตรแลทเทอร์รัลสำหรับแหล่งความร้อนที่มีอุณหภูมิ 130 – 150 องศาเซลเซียส. การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 15 (15th Conference on Energy Network of Thailand), เดอะกรีนเนอริ รีสอร์ท เขาใหญ่ จังหวัดนครราชสีมา, 21 - 24 พฤษภาคม 2562
- Wachiraporn Raksa-in and Atit Koonsrisuk. (2019). Waste heat recovery power plant for a heat source temperature of 130 – 150 °C. Journal of Research and Applications in Mechanical Engineering
- วชิราภรณ์ รักษาอินทร์ และ อาทิตย์ คุณศรีสุข. (2563). การวิเคราะห์สมรรถนะของการใช้สารผสมและสารบริสุทธิ์เป็นสารทำงานในโรงไฟฟ้าไออาร์ซีที่แหล่งความร้อนมีอุณหภูมิ 100 – 300 องศาเซลเซียส. การประชุมวิชาการการถ่ายเทพลังงานความร้อนและมวลในอุปกรณ์ด้านความร้อน และกระบวนการ ครั้งที่ 19, โรงแรมเจ้าหลาว คาบาน่า รีสอร์ท จังหวัดจันทบุรี, 12 - 13 มีนาคม 2563

การออกแบบโรงไฟฟ้าโออาร์ซีเพื่อแหล่งความร้อนที่มีอุณหภูมิ 130 - 150 องศาเซลเซียส  
 DESIGN OF AN ORC POWER PLANT FOR A HEAT SOURCE TEMPERATURE OF  
 130 - 150°C

วชิราภรณ์ รักษาอินทร์  
 อาทิตย์ จุณศรีสุข

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล  
 สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์  
 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี  
 ตำบลสุรนารี อำเภอเมือง  
 จังหวัดนครราชสีมา 30000  
 E-mail: wachiraporn.raksain@gmail.com  
 Tel: 061-607-0389

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อทำการออกแบบโรงไฟฟ้า Organic Rankine Cycle ที่จะทำให้ได้กำลังไฟฟ้าสุทธิสูงสุด ที่แหล่งความร้อนอุณหภูมิ 130-150 องศาเซลเซียส โดยแบ่งกรณีในการออกแบบออกเป็นกรณี subcritical และ supercritical โดยทำการเลือกสารทำงานที่เหมาะสม สำหรับการทำงานที่แหล่งความร้อนทั้ง ในกรณี subcritical จะใช้สารทำงาน R124, ammonia, R142b, R114, butane, R245fa, และ R1234ze และกรณี supercritical จะใช้สารทำงาน R134a, R227ea, R152a, propane, และ R1234ze ในการออกแบบ จากการออกแบบพบว่าในกรณี subcritical สารทำงาน R1234ze สามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้สูงที่สุดในทุกช่วงอุณหภูมิของแหล่งความร้อนทั้งที่พิจารณา ในทางกลับกันกรณี supercritical สารทำงาน R227ea สามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้สูงที่สุดในแหล่งความร้อนทั้ง 130 และ 140°C และที่แหล่งความร้อน 150°C สารทำงาน R152a สามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้สูงสุด นอกจากนี้ยังได้ทำการ off-design subcritical อุณหภูมิแหล่งความร้อนเป็นช่วง 125-155°C โดยกำหนดให้กำลังการผลิตไฟฟ้าที่ผลิตได้สูงสุดมีค่าคงที่และปรับเปลี่ยนเงื่อนไขให้เหมาะสม (ความดันการระเหย, ความดันการควบแน่น และอัตราการไหลของสาร)

คำสำคัญ: Organic Rankine cycle, subcritical ORC, supercritical ORC, แหล่งความร้อนทั้ง

Abstract

The objective of this study is to design an ORC power plant that can provides the highest net power output when the heat source temperature is 130 - 150°C. The types of the ORC cycle investigated here are subcritical and supercritical. R124, ammonia, R142b, R114, butane, R245fa, and R1234ze were studied as the working fluid for the subcritical ORC plant. In addition, R134a, R227ea, R152a, propane, and R1234ze were selected for the study of the supercritical ORC plant. The simulations show that the subcritical power plant with R1234ze as its working fluid provides the highest power output over the whole range of the heat source temperature studied. On the other hand, the supercritical power plant with R227ea provides the highest power output for the heat source temperature at 130°C and 140°C, while one with R152a provides the highest at the temperature of 150°C. Additionally, the off-design simulation when the heat source temperatures were varied in the range of 125 - 155°C were conducted and found that the proper adaptation of the operating condition (evaporation and condensation pressures, working fluid flow rate) can maintain a constant power output.

Keywords: Organic Rankine Cycle (ORC), subcritical, supercritical, heat source

การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 15  
21-24 พฤษภาคม 2562 จังหวัดนครราชสีมา



การศึกษาโรงไฟฟ้าโออาร์ซีแบบซับคริติคัล, โรงไฟฟ้าโออาร์ซีแบบซูเปอร์คริติคัล และโรงไฟฟ้าแรงดันไอเคิลแบบ  
ไตรแลทเทอรัลสำหรับแหล่งความร้อนที่มีอุณหภูมิ 130 - 150 องศาเซลเซียส

Investigation of a subcritical ORC, supercritical ORC, and trilateral Rankine cycle power plant for a heat  
source temperature of  
130 - 150°C

วชิราภรณ์ รักษาอินทร์\* และ อาทิตย์ คุณศรีสุข

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 111 ถนนมหาวิทยาลัย ตำบลสุรนารี อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000

\*ติดต่อ: wachiraporn.raksain@gmail.com, 06-1607-0389

**บทคัดย่อ**

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อทำการศึกษาโรงไฟฟ้า Organic Rankine cycle โดยเลือกสารทำงานที่จะทำให้อุณหภูมิสูงที่สุด ที่แหล่งความร้อนอุณหภูมิ 130 - 150 องศาเซลเซียส โดยแบ่งกรณีในการออกแบบออกเป็นกรณี subcritical, supercritical, และ trilateral โดยทำการเลือกสารทำงานที่เหมาะสมสำหรับการทำงานที่แหล่งความร้อนทั้ง ในกรณี subcritical จะใช้สารทำงาน carbonyl sulfide, R1234ze, RC318, R124, R236fa, propyne, isobutane, R236ea, R114, perfluoropentane, R245fa, neopentane, R1233zd, RE245fa2, และ R245ca ในกรณี supercritical จะใช้สารทำงาน R218, R115, R1216, R1234yf, carbonyl sulfide, R1234ze, RC318, R124, R236fa, propyne และสำหรับในกรณีของ trilateral ใช้สารทำงานเป็น carbonyl sulfide, R1234ze, RC318, R236fa, propyne, isobutane, R114, perfluoropentane, R245fa, neopentane, R1233zd, RE245fa2, R245ca, R21, R365mfc, pentane, และ R11 สำหรับผลดีในการออกแบบพบว่าในกรณี subcritical สารทำงาน RC318 สามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้สูงที่สุดเมื่อช่วงอุณหภูมิของแหล่งความร้อนทั้งที่ 130 และ 140°C และเมื่ออุณหภูมิแหล่งความร้อนทั้งเป็น 150°C สารทำงาน perfluoropentane สามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้สูงที่สุด สำหรับกรณี supercritical สารทำงาน R1216 สามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้สูงที่สุดในแหล่งความร้อนทั้ง 130°C และที่แหล่งความร้อน 140°C และ 150°C สารทำงาน R318 สามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้สูงที่สุด และในกรณีแบบ trilateral สารทำงาน perfluoropentane สามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้สูงสุดทุกอุณหภูมิแหล่งความร้อนที่พิจารณา นอกจากนี้ยังได้ทำการ off-design ทั้ง 3 กรณี คือ subcritical, supercritical, และ trilateral อุณหภูมิแหล่งความร้อนเป็นช่วง 125 - 155°C โดยกำหนดขนาดของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนมีค่าคงที่และปรับเปลี่ยนเงื่อนไขให้เหมาะสม (ความดันการระเหย, และความดันการควบแน่น)

**คำหลัก:** โรงจักรโออาร์ซีแบบซับคริติคัล, โรงจักรโออาร์ซีแบบซูเปอร์คริติคัล, โรงจักรแรงดันไอเคิลแบบไตรแลทเทอรัล, แหล่งความร้อนทั้ง

**Abstract**

The objective of this study is to investigate a subcritical ORC, supercritical ORC, and trilateral Rankine cycle (TLC) power plants that can provides the highest net power output when the heat source temperature is 130 - 150°C. Carbonyl sulfide, R1234ze, RC318, R124, R236fa, propyne, isobutane, R236ea, R114, perfluoropentane, R245fa, neopentane, R1233zd, RE245fa2, and R245ca were studied as the working fluid for the subcritical ORC plant. R218, R115, R1216, R1234yf, carbonyl sulfide, R1234ze, RC318, R124, R236fa and propyne were studied as the working fluid for the supercritical ORC plant. In addition, carbonyl sulfide, R1234ze, RC318, R236fa, propyne, isobutane, R114, perfluoropentane, R245fa, neopentane, R1233zd, RE245fa2, R245ca, R21, R365mfc, pentane and R11 were selected for the study of the TLC plant. The simulations show that the subcritical plant with RC318 provides the highest net work when the heat source temperatures are at 130°C and 140°C, while one with perfluoropentane provides the highest net work when the heat source temperatures is at 150°C. The supercritical plant with R1216 provides the highest net work when the heat source temperatures is at 130°C, while ones with RC318 provide the highest net work when the heat source temperatures are at 140°C and 150°C. On the other hand, the TLC power plant with perfluoropentane as its working fluid provides the highest power output over the whole range of the heat source temperature studied. Additionally, the off-design simulations when the heat source temperatures were varied in the range of 125 - 155°C were conducted and it was found that a proper adaptation of the operating conditions (evaporation and condensation pressures, working fluid flow rate) can maintain a constant power output.

**Keywords:** subcritical ORC, supercritical ORC, trilateral Rankine cycle, waste heat



Research Article

## WASTE HEAT RECOVERY POWER PLANT FOR A HEAT SOURCE TEMPERATURE OF 130 - 150°C

W. Raksa-in<sup>1</sup>  
 A. Koonsrisuk<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup> School of Mechanical Engineering,  
 Institute of Engineering, Suranaree  
 University of Technology, Muang  
 District, Nakhon Ratchasima 30000,  
 Thailand

<sup>2</sup> School of Mechanical Engineering,  
 Institute of Engineering, Suranaree  
 University of Technology, Muang  
 District, Nakhon Ratchasima 30000,  
 Thailand

### ABSTRACT:

Organic Rankine cycle (ORC) is a promising technology for power generation that uses low-temperature heat from various sources including renewable energy and waste heat. The objective of this study is to design thermodynamically a subcritical ORC, supercritical ORC, and trilateral Rankine cycle (TLC) power plants that can provide the highest net power output when the heat source temperature is 130 - 150°C. A numerical model was developed using MATLAB. The thermophysical properties of the working fluids studied are calculated by NIST REFPROP program. The simulations show that the subcritical plant with RC318 as its working fluid provides the highest net power when the heat source temperatures are at 130°C and 140°C. The corresponding net powers are 15.6 kW and 23.08 kW, respectively. While one with perfluoropentane as its working fluid provides the highest net power when the heat source temperatures are at 150°C and the net power is 26.3 kW. The supercritical plant with R1216 as its working fluid provides the highest net power of 17.1 kW when the heat source temperatures are at 130°C. Meanwhile the plant with RC318 as its working fluid provides the highest net power of 24.2 and 31.5 kW when the heat source temperatures are at 140°C and 150°C, respectively. On the other hand, the TLC power plant with perfluoropentane as its working fluid provides the highest power output over the whole range of the heat source temperature studied. Its corresponding power output are 21 kW, 27.2 kW, and 34.5 kW, respectively. Additionally, the off-design simulations when the heat source temperatures were varied in the range of 125 - 155°C were conducted and it was found that a proper adaptation of the operating conditions (evaporation and condensation pressures, working fluid flow rate) can maintain a constant power output.

**Keywords:** subcritical ORC, supercritical ORC, trilateral Rankine cycle, waste heat

### 1. INTRODUCTION

The Alternative Energy Development Plan: AEDP2015 [1] reported that heat energy form is the most utilized renewable energy that more than 60 percent for the use of all renewable energy, followed by biofuel and electricity. In 2014, energy consumption was accounted for 64 percent, biofuels and electricity accounted for 19.7 percent and 16.3 percent, respectively.

The Organic Rankine cycle (ORC) is a promising waste heat recovery technology. This cycle used organic working

\* Corresponding author: A. Koonsrisuk  
 E-mail address: atit@sut.ac.th



การวิเคราะห์สมรรถนะของการใช้สารผสมและสารบริสุทธิ์เป็นสารทำงานในโรงไฟฟ้าโออาร์ซี  
ที่แหล่งความร้อนมีอุณหภูมิ 100 - 300 องศาเซลเซียส

PERFORMANCE ANALYSIS OF USING ZEOTROPIC MIXTURES AND PURE WORKING  
FLUIDS IN AN ORC POWER PLANT WITH A HEAT SOURCE TEMPERATURE OF 100 -  
300°C

วชิราภรณ์ วิกษานินทร์

อาทิตย์ กุณฑศรีสุข

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล  
สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี  
ตำบลสุรนารี อำเภอเมือง  
จังหวัดนครราชสีมา 30000  
E-mail: abiti@sut.ac.th  
Tel: 0-4422-4410

บทคัดย่อ

การศึกษานี้ทำการวิเคราะห์สมรรถนะของโรงไฟฟ้าโออาร์ซีโดยใช้สารผสม (R600a/R601a และ R227ea/R245fa) และสารบริสุทธิ์ (RC318, perfluoropentane, isopentane, pentane, and methylcyclohexane) เป็นสารทำงาน ซึ่งถูกพัฒนาโปรแกรม MATLAB เพื่อหาค่ากำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้สูงสุด โดยทำการหาอัตราส่วนความเข้มข้นของสารผสม, อัตราการไหลเชิงมวลของสารทำงาน, ความดันของ evaporator, และความดัน condenser ที่แหล่งความร้อนอุณหภูมิ 100 - 300°C จากการจำลองพบว่า R600a/R601a สามารถผลิตกำลังไฟฟ้าสุทธิได้สูงสุด คือ 6.1 kW และ 26.9 kW ที่แหล่งความร้อน 100°C และ 150°C ตามลำดับ และพบว่า สาร R227ea/R245fa สามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้สูงสุด คือ 66.9 kW ที่แหล่งความร้อนอุณหภูมิ 200°C ในทางกลับกัน การใช้สารบริสุทธิ์เป็นสารทำงาน สามารถผลิตกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้ 134.9 kW ที่แหล่งความร้อนอุณหภูมิ 250°C. ในขณะที่ methylcyclohexane สามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้สูงสุด 231.4 kW ที่ 300°C.

คำสำคัญ: โรงจักรโออาร์ซี, สารบริสุทธิ์, สารผสมแบบซีโอโทรปิก, การหาจุดทำงานที่เหมาะสมที่สุด

Abstract

The use of zeotropic mixtures (R600a/R601a and R227ea/R245fa) and pure fluid (RC318, perfluoropentane, isopentane, pentane, and methylcyclohexane) as the working fluid of an ORC power plant was examined in this study. A MATLAB code was developed to design the operating condition that provide the highest net power output. The program searches for the optimal mass fraction (for the zeotropic mixtures) and mass flow rate of the working fluid, and the evaporation and condensation pressure. The heat source temperature is 100 - 300°C in this study. It was found that using R600a/R601a as the working fluid provides the highest net power outputs of 6.1 kW and 26.9 kW when the heat source temperature is at 100°C and 150°C, respectively. It was also found that using R227ea/R245fa as the working fluid provides the highest net power output of 66.9 kW when the heat source temperature is at 200°C. On the other hand, using pure pentane as the working fluid provides the highest net power output of 134.9 kW when the heat source temperature is at 250°C, while using pure methylcyclohexane provides 231.4 kW at 300°C.

Keywords: ORC, pure fluid, zeotropic mixture, optimization



## ประวัติผู้เขียน

นางสาวชัชวราภรณ์ รักษาอินทร์ เกิดเมื่อวันที่ 10 ตุลาคม พ.ศ. 2538 จังหวัดกรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาระดับประถมศึกษาและมัธยมศึกษา ที่โรงเรียนมาเรียลัย จังหวัดกรุงเทพมหานคร และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี จากสาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา เมื่อปี พ.ศ. 2561 เมื่อสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี ได้เข้าศึกษาต่อปริญญาโท ในหลักสูตรวิศวกรรมเครื่องกลและระบบกระบวนการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา โดยขณะศึกษาได้รับโอกาสในการเป็นผู้สอนปฏิบัติการและผู้ช่วยวิจัย ในสาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี นอกจากนี้ยังได้รับโอกาสในการเข้าร่วมนำเสนอในงานประชุมวิชาการต่าง ๆ ตลอดระยะเวลาในการศึกษาปริญญาโท ซึ่งช่วยให้ผู้วิจัยได้นำประสบการณ์ และความรู้ที่ได้รับมาประยุกต์ใช้ในการทำวิทยานิพนธ์ได้เป็นอย่างดี รวมถึงมีความรู้ ความเข้าใจในการทำงานของโรงไฟฟ้าไออาร์ซีมากยิ่งขึ้น



มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี