

# การวิเคราะห์โรงไฟฟ้าวัฏจักรคาลินา



นายสิริชัย ดวงเดือน

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกลและระบบกระบวนการ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ปีการศึกษา 2562

# **ANALYSIS OF A KALINA CYCLE POWER PLANT**



**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements 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



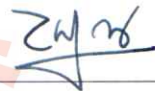
(ผศ. ดร.กระวี ตรีอำนรรค)

ประธานกรรมการ



(ผศ. ดร.อาทิตย์ คุณศรีสุข)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)



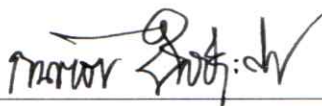
(รศ. ดร.บัณฑิต กฤตาคม)

กรรมการ



(ผศ. ดร.พรรษา ลิปลับ)

กรรมการ



(รศ. ร.อ. ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและพัฒนาความเป็นสากล



(รศ. ดร.พรศิริ จงกล)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

สิริชัย ดวงเดือน : การวิเคราะห์โรงไฟฟ้าวัฏจักรคาลินา (ANALYSIS OF A KALINA CYCLE POWER PLANT) อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อาทิตย์ คุณศรีสุข, 120 หน้า.

โรงไฟฟ้าวัฏจักรคาลินา ถูกนำเสนอว่าสามารถนำความร้อนทิ้งมาเปลี่ยนเป็นพลังงานไฟฟ้า โดยได้รับการพัฒนามาจากโรงไฟฟ้าโออาร์ซีและมีข้อแตกต่างกับโรงไฟฟ้าโออาร์ซีแบบทั่วไป คือ สารทำงานของโรงไฟฟ้าคาลินาใช้สารผสมระหว่างแอมโมเนียกับน้ำ ในขณะที่โรงไฟฟ้าโออาร์ซีใช้สารทำงานชนิดเดียว โดยวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ทำการเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากโรงไฟฟ้าคาลินากับโรงไฟฟ้าโออาร์ซีที่อุณหภูมิแหล่งความร้อนทิ้งในช่วง 100 - 300°C และนำเสนอการปรับปรุงโรงไฟฟ้าคาลินาให้สามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้สูงสุดที่อุณหภูมิลำดับต่ำกว่า ๆ ที่เปลี่ยนแปลงไปสำหรับสภาพอากาศที่นำมาพิจารณาอ้างอิงมาจากจ.นครราชสีมาในปีพ.ศ. 2560 โดยเป็นการจำลองเชิงตัวเลขที่ใช้โปรแกรม MATLAB มาจำลองกระบวนการภายในโรงไฟฟ้ากับโปรแกรม NIST REFPROP ซึ่งเป็นโปรแกรมคำนวณคุณสมบัติของสารทำงานสำหรับการจำลองจะหาเงื่อนไขในการทำงาน โดยสำหรับโรงไฟฟ้าคาลินาได้แก่ อัตราการไหลเชิงมวล ความดันในการควบแน่น ความดันในการระเหย ความเข้มข้นของแอมโมเนียที่บริเวณปั๊ม อุณหภูมิที่เข้าสู่รีคูปเพอร์เรเตอร์อุณหภูมิสูง และอุณหภูมิที่เข้าสู่เซพาราเรเตอร์ และสำหรับโรงไฟฟ้าโออาร์ซีได้แก่ อัตราการไหลเชิงมวล ความดันในการควบแน่น และความดันในการระเหยที่ทำให้ผลิตกำลังไฟฟ้าได้สูงสุด นอกจากนี้ได้ทำการปรับปรุงโรงไฟฟ้าคาลินาโดยใช้วิธีการปรับความดันในการควบแน่นให้สอดคล้องกับอุณหภูมิลำดับที่เปลี่ยนไป ซึ่งได้เปรียบเทียบกับโรงไฟฟ้าคาลินาที่มีการออกแบบในกรณีทั่วไปที่ออกแบบโดยใช้อุณหภูมิสูงสุดในปีที่ทำการออกแบบมาเป็นอุณหภูมิมูลค่าเฉลี่ย จากผลการจำลองพบว่า เมื่อเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าสุทธิระหว่างโรงไฟฟ้าวัฏจักรคาลินาโออาร์ซีกับโรงไฟฟ้าคาลินาพบว่า โรงไฟฟ้าคาลินาผลิตกำลังไฟฟ้าได้มากกว่าโรงไฟฟ้าวัฏจักรคาลินาโออาร์ซีเมื่ออุณหภูมิแหล่งความร้อนอยู่ในช่วง 100 - 200°C ซึ่งผลิตได้เท่ากับ 4.6 ถึง 70 kW ในขณะที่โรงไฟฟ้าวัฏจักรคาลินาโออาร์ซีผลิตได้ 4.7 ถึง 61.59 kW แต่เมื่ออุณหภูมิของแหล่งความร้อนเพิ่มมาอยู่ในช่วง 200 - 300°C โรงไฟฟ้าวัฏจักรคาลินาโออาร์ซีผลิตกำลังไฟฟ้าได้มากกว่าโรงไฟฟ้าคาลินา โดยโรงไฟฟ้าวัฏจักรคาลินาโออาร์ซีผลิตได้ 89 ถึง 260 kW ในขณะที่โรงไฟฟ้าคาลินาผลิตได้เพียง 77.87 ถึง 170.9 kW อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาถึงต้นทุนเฉลี่ยในการผลิตไฟฟ้าพบว่า โรงไฟฟ้าคาลินามีต้นทุนที่ใช้ในการผลิตไฟฟ้าที่น้อยกว่าโรงไฟฟ้าวัฏจักรคาลินาโออาร์ซี เช่น เมื่ออุณหภูมิแหล่งความร้อนเป็น 180°C โรงไฟฟ้าคาลินามีต้นทุนในการผลิตไฟฟ้าเท่ากับ 7 baht/kW.h แต่โรงไฟฟ้าวัฏจักรคาลินาโออาร์ซีมีต้นทุนในการผลิตไฟฟ้าเท่ากับ

10 baht/kW.h ลำดับถัดมานำเสนอการปรับปรุงโรงไฟฟ้าคาถินาให้สามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้สูงสุดเมื่ออุณหภูมิสิ่งแวดล้อมเปลี่ยนแปลง โดยเป็นการปรับความดันในการควบแน่นพบว่า การปรับความดันในการควบแน่นสามารถเพิ่มกำลังไฟฟ้าสุทธิที่ผลิตได้เมื่อเทียบกับการออกแบบในกรณีทั่วไป ซึ่งการออกแบบในกรณีทั่วไปผลิตได้เท่ากับ 4.18 kW ในขณะที่วิธีการปรับความดันในการควบแน่นผลิตกำลังไฟฟ้าอยู่ในช่วง 4.18 ถึง 6.87 kW นอกจากนี้ต้นทุนในการผลิตไฟฟ้าของการปรับความดันในการควบแน่นน้อยกว่าการออกแบบในกรณีทั่วไป เมื่อการออกแบบในกรณีทั่วไปมีต้นทุนการผลิตไฟฟ้าเท่ากับ 85 Baht/kW.h ในขณะที่การปรับความดันในการควบแน่นมีต้นทุนเพียง 71 Baht/kW.h



สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

ปีการศึกษา 2562

ลายมือชื่อนักศึกษา

สิริชัย

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา

อ.ทศนั

SIRICAH I DUANGDUEAN : ANALYSIS OF A KALINA CYCLE POWER  
PLANT THESIS ADVISOR : ASST. PROF. ATIT KOONSRI SUK, Ph.D.,  
120 PP.

KALINA CYCLE/ ORGANIC RANKINE CYCLE/ WASTE HEAT RECOVERY/  
AMMONIA WATER/ AMBIENT TEMPERATURE

The Kalina cycle power plant has been proposed as a promising mean for waste heat recovery. This study aimed to investigate the thermodynamic performance of the Kalina cycle and to improve its performance. 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 fluid, ammonia mass fraction in the working fluid, 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 a Kalina power plant with heat source temperature in the range of 100 – 300 °C were conducted and compared with the performance of a subcritical ORC. Fourth, a Kalina 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, with heat source temperature in the range of 100 – 200 °C, a Kalina power plant provides 4.6 – 70.0 kW while an ORC power plant provides 4.7 – 61.6 kW. On the other hand, with heat source temperature in the range of 200 – 300 °C, the Kalina plant provides 77.9 – 170.9 kW while the ORC plant provides 89.0 – 260.0 kW. It was found that the Kalina

plant with a capacity of condensation pressure adjustment provides 4.18 – 6.87 kW when the heat source temperature is 100 °C. Meanwhile a conventional Kalina plant provides 4.18 kW constantly across the year. It was also found that the levelized cost of energy (LCOE) of the plant with the pressure adjustment capacity is 71 Baht/kW.h while the LCOE of the conventional plant is 85 Baht/kW.h.



School of Mechanical Engineering

Academic Year 2019

Student's Signature สิริชัย

Advisor's Signature อาทิตย์



## กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบุคคลและกลุ่มบุคคลต่อไปนี้ เนื่องจากได้รับความกรุณาในการให้คำปรึกษา แนะนำ และให้ความช่วยเหลือทั้งทางด้านวิชาการ ด้านการวิจัย รวมไปถึงแนวทางในการศึกษาวิทยานิพนธ์ ส่งผลให้วิทยานิพนธ์สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อาทิตย์ คุณศรีสุข อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการให้ความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับการทำหัวข้อวิทยานิพนธ์ รวมไปถึงให้คำปรึกษาชี้แนะแนวทางในการวิจัย รวมไปถึงการแนะนำในการเขียนวิทยานิพนธ์จนวิทยานิพนธ์เล่มนี้เสร็จสมบูรณ์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กระวี ตรีอำรรค (ประธานกรรมการ) รองศาสตราจารย์ ดร.บัณฑิต กฤตาคม และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พรธนา ลิบลับ (กรรมการ) ที่ให้ความกรุณาในการแนะนำแนวทางในการวิจัย ชี้แนะแนวทางการเขียน และช่วยตรวจทานเนื้อหาวิทยานิพนธ์จนเสร็จสมบูรณ์

คณะอาจารย์จากหลากหลายมหาวิทยาลัยที่ได้แนะนำแนวทางในการศึกษาที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย จากการนำเสนอบทความทางวิชาการ ณ ที่ประชุมต่าง ๆ จนทำให้เนื้อหาในวิทยานิพนธ์ครบถ้วนและเสร็จสมบูรณ์

พี่น้องบัณฑิตศึกษาทุกท่านที่มีส่วนร่วมในการศึกษางานวิจัย โดยให้คำปรึกษา คำแนะนำ และเสนอแนวทางในการศึกษางานวิจัยส่งผลให้เนื้อหาในวิทยานิพนธ์เสร็จสมบูรณ์

สุดท้ายนี้ผู้วิจัยขอกราบพระคุณบิดา มารดา และครอบครัวของผู้วิจัยที่ให้ความสนับสนุน ความรู้ และทักษะที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์ รวมไปถึงให้คำปรึกษาและให้กำลังใจในการดำเนินการวิจัย ส่งผลให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ศิริชัย ดวงเดือน



# สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ค
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูปภาพ.....	ฐ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	ต
<b>บทที่</b>	
<b>1 บทนำ.....</b>	<b>1</b>
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
<b>2 ปรัชญ่วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....</b>	<b>5</b>
2.1 บทนำ.....	5
2.2 โรงไฟฟ้าโออาร์ซี (Organic Rankine cycle, ORC).....	6
2.3 โรงไฟฟ้าวัฏจักรคาลินา (Kalina cycle power plant).....	8
2.4 เปรียบเทียบโรงไฟฟ้าโออาร์ซีกับโรงไฟฟ้าคาลินา.....	12
2.5 Sliding condensation pressure.....	16
<b>3 วิธีการดำเนินการวิจัย.....</b>	<b>21</b>
3.1 บทนำ.....	21
3.2 แหล่งความร้อน.....	21

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.3	สารทำงาน..... 21
3.4	แหล่งรับความร้อน..... 22
3.5	แบบจำลอง..... 22
3.5.1	เครื่องมือในการจำลอง..... 23
3.5.2	ขั้นตอนการจำลองเชิงตัวเลขโรงไฟฟ้าคาไลนา..... 24
	1. การออกแบบโรงไฟฟ้าในชั้นเบื้องต้น..... 34
	2. การออกแบบโรงไฟฟ้าโดยใช้วิธีการ sliding pressure..... 37
	3. การเปรียบเทียบทางเศรษฐศาสตร์ระหว่างการออกแบบ โดยปรับความดันในการควบแน่นกับการออกแบบ โดยวิธีการทั่วไป..... 41
3.5.3	ขั้นตอนการจำลองเชิงตัวเลขเพื่อเปรียบเทียบระหว่าง โรงไฟฟ้าคาไลนากับโรงไฟฟ้าซับคริติคอลโออาร์ซี ซูเปอร์คริติคอลโออาร์ซีและไตรเลทเทอร์รอดโออาร์ซี..... 44
4	ผลการดำเนินการวิจัย..... 50
4.1	บทนำ..... 50
4.2	การเปรียบเทียบระหว่างโรงไฟฟ้าคาไลนากับโรงไฟฟ้าโออาร์ซี ทั้ง 3 ประเภทที่แหล่งความร้อนในช่วง 100 - 300°C..... 50
4.2.1	เปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าสุทธิของโรงไฟฟ้าทั้ง 4 ประเภท..... 50
4.2.2	เปรียบเทียบความดันในการระเหยของโรงไฟฟ้าทั้ง 4 ประเภท..... 53
4.2.3	เปรียบเทียบความดันในการควบแน่นโรงไฟฟ้าทั้ง 4 ประเภท..... 55
4.2.4	เปรียบเทียบอัตราการขยายตัวของไอของโรงไฟฟ้าทั้ง 4 ประเภท..... 58
4.2.5	เปรียบเทียบอัตราการไหลเชิงมวลของโรงไฟฟ้าทั้ง 4 ประเภท..... 60
4.2.6	เปรียบเทียบขนาดของคอนเดนเซอร์ของโรงไฟฟ้าทั้ง 4 ประเภท..... 62
4.2.7	เปรียบเทียบขนาดของอีแวปโปเรเตอร์ของโรงไฟฟ้าทั้ง 4 ประเภท..... 65
4.2.8	พิจารณาตัวแปรที่ส่งผลต่อกำลังไฟฟ้าของโรงไฟฟ้าคาไลนา..... 67

## สารบัญ (ต่อ)

### หน้า

4.3	การเปรียบเทียบระหว่างวิธีการออกแบบในกรณีทั่วไปกับแบบปรับ ความดันในการควบคุมของโรงไฟฟ้าคาถินา.....	71
4.3.1	การออกแบบโรงไฟฟ้าแบบกรณีทั่วไป.....	71
4.3.2	การออกแบบโรงไฟฟ้าแบบการปรับเงื่อนไขในการทำงาน.....	71
4.3.3	การออกแบบโรงไฟฟ้าแบบการปรับเงื่อนไขในการทำงาน เฉพาะความเข้มข้นในสารทำงานและความดันในการควบคุม.....	71
4.3.4	การออกแบบโรงไฟฟ้าแบบปรับความดันในการควบคุม.....	71
4.3.5	การเปรียบเทียบการออกแบบโรงไฟฟ้าแบบกรณีทั่วไป แบบ ปรับความดันในการควบคุม และแบบการปรับเงื่อนไขใน การทำงานให้สอดคล้องกับอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม.....	71
4.4	การเปรียบเทียบการใช้วิธีการปรับความดันในการควบคุมมาปรับปรุง ให้สอดคล้องกับอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมของโรงไฟฟ้าคาถินา.....	78
4.4.1	อิทธิพลของอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมที่ส่งผลต่อความดัน ในการควบคุม.....	78
4.4.2	อิทธิพลของอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมที่ส่งผลต่ออุณหภูมิ ที่เข้าสู่คอนเดนเซอร์.....	79
4.4.3	อิทธิพลของอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมที่ส่งผลต่ออัตราการไหล เชิงมวลของสารหล่อเย็น.....	80
4.4.4	อิทธิพลของอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมที่ส่งผลต่อกำลังไฟฟ้า สุทธิของโรงไฟฟ้า.....	81
4.4.5	อิทธิพลของอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมที่ส่งผลต่อขนาดของ รีคูปเพอร์เรเตอร์อุณหภูมิต่ำ.....	82
4.4.6	อิทธิพลของอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมที่ส่งผลต่อขนาดของ คอนเดนเซอร์.....	83
4.4.7	การเปรียบเทียบเชิงเศรษฐศาสตร์ระหว่างวิธีการปรับ ความดันในการควบคุมกับการออกแบบในกรณีทั่วไป.....	86

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

5. บทสรุปและข้อเสนอแนะ.....	88
5.1 สรุปผลการเปรียบเทียบโรงไฟฟ้ากาลินา โรงไฟฟ้าชัษครติคคอด โรงไฟฟ้าซูปเปอร์ครติคคอด และโรงไฟฟ้าไตรเลทเทอร์รอล โออาร์ซี.....	88
5.2 สรุปผลการเปรียบเทียบวิธีการปรับความดันในการควบแน่น กับการออกแบบในกรณีทั่วไป.....	89
5.2.1 สรุปผลการเปรียบเทียบวิธีการปรับความดันในการควบแน่น ปรับความดันในการควบแน่นกับความเข้มข้นของแอม โมเนีย และปรับเงื่อนไขในการทำงานทุกชนิดกับการออกแบบ ในกรณีทั่วไป.....	90
5.2.2 สรุปผลการเปรียบเทียบวิธีการปรับความดันในการควบแน่นกับ การออกแบบในกรณีทั่วไปเมื่ออุณหภูมิสิ่งแวดล้อมเปลี่ยนแปลง.....	90
5.2.3 สรุปผลการเปรียบเทียบเชิงเศรษฐศาสตร์ของวิธีการปรับ ความดันในการควบแน่นกับการออกแบบในกรณีทั่วไป เมื่ออุณหภูมิสิ่งแวดล้อมเปลี่ยนแปลง.....	91
5.3 ข้อเสนอแนะ.....	91
รายการอ้างอิง.....	92
ภาคผนวก.....	96
ภาคผนวก ก. ข้อมูลผลการจำลองการเปรียบเทียบระหว่าง โรงไฟฟ้ากาลินา โรงไฟฟ้าชัษครติคคอด โออาร์ซี ซูปเปอร์ครติคคอด โออาร์ซี และ ไตรเลทเทอร์รอล โออาร์ซี.....	96
ภาคผนวก ข. ข้อมูลผลการจำลองของการใช้วิธีการปรับความดันในการ ควบแน่นกับวิธีการออกแบบโดยทั่วไปเมื่ออุณหภูมิสิ่งแวดล้อม เป็นของจ. นครราชสีมาในปีพ.ศ.2560.....	108
ภาคผนวก ค. บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา.....	114
ประวัติผู้เขียน.....	120

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	ผลการจำลองของโรงไฟฟ้าโออาร์ซีเมื่อออกแบบให้ผลิตกำลังไฟฟ้าสุทธิสูงสุด.....14
2.2	ผลการจำลองของโรงไฟฟ้าคาไลนาเมื่อออกแบบให้ผลิตกำลังไฟฟ้าสุทธิสูงสุด .....14
3.1	ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน แต่ละชนิด.....32
3.2	เงื่อนไขในการจำลองในกรณีการสอบเทียบกับ Ogriseck (2009).....33
3.3	ผลลัพธ์การตรวจสอบความถูกต้อง โดยเทียบกับ Ogriseck (2009).....34
3.4	เงื่อนไขในการจำลองของโรงไฟฟ้าคาไลนาในการออกแบบเบื้องต้น.....35
3.5	อุณหภูมิเฉลี่ยของจ.นครราชสีมา ณ ช่วงเวลาที่ศึกษาในปี 2562.....38
3.6	เงื่อนไขในการจำลองกรณีเปรียบเทียบระหว่างโรงไฟฟ้าคาไลนา กับโรงไฟฟ้าโออาร์ซี.....48
ก.1	ข้อมูลผลการเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าสุทธิของโรงไฟฟ้าซับคริตคอลล โออาร์ซี ซูเปอร์คริตคอลล โออาร์ซี ไตรเลทเทอร์รอล โออาร์ซี และ โรงไฟฟ้าคาไลนา.....97
ก.2	ข้อมูลผลการเปรียบเทียบอัตราการขยายตัวของไอของโรงไฟฟ้าซับคริตคอลล โออาร์ซี ซูเปอร์คริตคอลล โออาร์ซี ไตรเลทเทอร์รอล โออาร์ซี และโรงไฟฟ้าคาไลนา.....98
ก.3	ข้อมูลผลการเปรียบเทียบอัตราการไหลเชิงมวลของโรงไฟฟ้าซับคริตคอลล โออาร์ซี ซูเปอร์คริตคอลล โออาร์ซี ไตรเลทเทอร์รอล โออาร์ซี และโรงไฟฟ้าคาไลนา.....99
ก.4	ข้อมูลผลการเปรียบเทียบความดันในการควบแน่นของโรงไฟฟ้า ซับคริตคอลล โออาร์ซี ซูเปอร์คริตคอลล โออาร์ซี ไตรเลทเทอร์รอล โออาร์ซี และโรงไฟฟ้าคาไลนา.....100

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ก.5 ข้อมูลผลการเปรียบเทียบความดันในการระเหยของโรงไฟฟ้า ชั้นคริติคอลโออาร์ซี ซุปเปอร์คริติคอลโออาร์ซี ไตรเลทเทอร์รอล โออาร์ซี และ โรงไฟฟ้ากาลินา.....	101
ก.6 ข้อมูลผลการเปรียบเทียบขนาดของคอนเดนเซอร์ของโรงไฟฟ้า ชั้นคริติคอลโออาร์ซี ซุปเปอร์คริติคอลโออาร์ซี ไตรเลทเทอร์รอล โออาร์ซี และ โรงไฟฟ้ากาลินา.....	102
ก.7 ข้อมูลผลการเปรียบเทียบขนาดของอีแวปโปเรเตอร์ของโรงไฟฟ้า ชั้นคริติคอลโออาร์ซี ซุปเปอร์คริติคอลโออาร์ซี ไตรเลทเทอร์รอล โออาร์ซี และ โรงไฟฟ้ากาลินา.....	103
ก.8 ข้อมูลผลการเปรียบเทียบต้นทุนในการผลิตไฟฟ้าของโรงไฟฟ้า ชั้นคริติคอลโออาร์ซี กับ โรงไฟฟ้ากาลินาเมื่อแหล่งความร้อนเป็น 100 - 130°C.....	104
ก.9 ข้อมูลผลการเปรียบเทียบต้นทุนในการผลิตไฟฟ้าของโรงไฟฟ้า ชั้นคริติคอลโออาร์ซี กับ โรงไฟฟ้ากาลินาเมื่อแหล่งความร้อนเป็น 140 - 180°C.....	105
ก.10 ข้อมูลผลการเปรียบเทียบต้นทุนในการผลิตไฟฟ้าของโรงไฟฟ้า ชั้นคริติคอลโออาร์ซี กับ โรงไฟฟ้ากาลินาเมื่อแหล่งความร้อนเป็น 200 - 250°C.....	106
ก.11 ข้อมูลผลการเปรียบเทียบต้นทุนในการผลิตไฟฟ้าของโรงไฟฟ้า ชั้นคริติคอลโออาร์ซี กับ โรงไฟฟ้ากาลินาเมื่อแหล่งความร้อนเป็น 260 - 300°C.....	107
ข.1 ข้อมูลผลการเปรียบเทียบตัวแปรต่าง ๆ ระหว่างวิธีการปรับความดัน ในการควบแน่น (Sliding) กับวิธีการออกแบบในกรณีทั่วไป (Opt) ณ เวลา 10.00น. ในปีพ.ศ. 2560.....	109

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ข.2 ข้อมูลผลการเปรียบเทียบตัวแปรต่าง ๆ ระหว่างวิธีการปรับความดัน ในการควบแน่น (Sliding) กับวิธีการออกแบบในกรณีทั่วไป (Opt) ณ เวลา 13.00น. ในปีพ.ศ. 2560.....	110
ข.3 ข้อมูลผลการเปรียบเทียบตัวแปรต่าง ๆ ระหว่างวิธีการปรับความดัน ในการควบแน่น (Sliding) กับวิธีการออกแบบในกรณีทั่วไป (Opt) ณ เวลา 16.00น. ในปีพ.ศ. 2560.....	111
ข.4 ข้อมูลผลการเปรียบเทียบอัตราการไหลของสารหล่อเย็นระหว่าง วิธีการปรับความดันในการควบแน่น (Sliding) กับวิธีการออกแบบ ในกรณีทั่วไป (Opt) ในปีพ.ศ. 2560.....	112
ข.5 ข้อมูลผลการเปรียบเทียบต้นทุนในการผลิตไฟฟ้าระหว่างวิธีการ ปรับความดันในการควบแน่น (Sliding) กับวิธีการออกแบบ ในกรณีทั่วไป (Opt) ในปีพ.ศ. 2560.....	113



## สารบัญรูปภาพ

รูปที่	หน้า
1.1	อุปกรณ์พื้นฐานของโรงไฟฟ้าโออาร์ซี (Fischer, 2011).....2
1.2	อุปกรณ์ของโรงไฟฟ้าวัฏจักรคาลินา (Wang et al., 2017).....3
2.1	สัดส่วนการผลิตกำลังไฟฟ้าของกฟผ.จากเชื้อเพลิงต่าง ๆ ของประเทศไทย ในปี พ.ศ.2561 (การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (กฟผ.), 2562).....6
2.2	ลักษณะการจัดเรียงอุปกรณ์ของโรงไฟฟ้าโออาร์ซี.....7
2.3	T – s diagram ของโรงไฟฟ้าโออาร์ซี.....7
2.4	อุปกรณ์ของโรงไฟฟ้าคาลินา (Wang & Yu, 2017).....9
2.5	T-s diagram ของโรงไฟฟ้าคาลินา (Wang & Yu, 2017).....9
2.6	อุปกรณ์ของโรงไฟฟ้าคาลินา (Júnior et al., 2019).....10
2.7	การเปรียบเทียบความเข้มข้นสารทำงานที่แหล่งความร้อนทั้ง 3 ช่วง กับประสิทธิภาพเชิงความร้อน (Saffari et al., 2016).....12
2.8	การเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าสุทธิ (ซ้าย) และขนาดของอุปกรณ์ (ขวา) กับแหล่งความร้อนทั้ง (Eller et al., 2017).....13
2.9	การเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าสุทธิของโรงไฟฟ้าคาลินา (ซ้าย) กับ อุณหภูมิทางเข้าเทอร์ไบน์และกำลังไฟฟ้าสุทธิของโรงไฟฟ้า โออาร์ซี (ขวา)กับความดันในระบบ (Pan et al., 2017).....16
2.10	การเปรียบเทียบประสิทธิภาพเชิงความร้อนของโรงไฟฟ้าคาลินา (ซ้าย) กับอุณหภูมิทางเข้าเทอร์ไบน์และกำลังไฟฟ้าสุทธิของ โรงไฟฟ้าโออาร์ซี (ขวา) ความดันในระบบ (Pan et al., 2017).....16
2.11	อิทธิพลของอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมต่อกำลังไฟฟ้าสุทธิ (Wang & Yu, 2017).....17
2.12	อิทธิพลของอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมต่อความดันในการควบแน่น (Wang & Yu, 2017).....17

## สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.13 การเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าสุทธิเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนไป (Wang & Yu, 2017).....	18
2.14 การเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าสุทธิ ความดันในการควบแน่น ความดัน ในการระเหย อัตราการไหลของสารทำงาน (Li et al., 2016).....	19
3.1 ลักษณะการเกิด temperature guide เมื่อเปลี่ยนความเข้มข้นของสารทำงาน (Ogriseck,2009).....	22
3.2 หน้าต่างของโปรแกรม MATLAB.....	23
3.3 หน้าต่างของโปรแกรม NIST REFPROP.....	23
3.4 การเกิด pinch point temperature ในอีแวปโปเรเตอร์ (Milani et al.,2019).....	24
3.5 อุปกรณ์ของโรงไฟฟ้าคาลินา.....	25
3.6 T-s diagram ของโรงไฟฟ้าคาลินา.....	26
3.7 ขั้นตอนการจำลองของโรงไฟฟ้าคาลินาในกรณีการออกแบบเบื้องต้น.....	36
3.8 ขั้นตอนการจำลองในกรณีการออกแบบการใช้ sliding pressure.....	39
3.9 ขั้นตอนการจำลองในกรณีการออกแบบการปรับความดันในการควบแน่น และความเข้มข้นของแอมโมเนีย.....	40
3.10 อุปกรณ์ในโรงไฟฟ้าโออาร์ซี.....	45
3.11 T-s diagram ของโรงไฟฟ้าโออาร์ซีแบบซับคริติคอลล.....	45
3.12 T-s diagram ของโรงไฟฟ้าโออาร์ซีแบบซูเปอร์คริติคอลล.....	46
3.13 T-s diagram ของโรงไฟฟ้าโออาร์ซีแบบไตรเรทเทอร์คอลล.....	46
3.14 แผนผังการจำลองของโรงไฟฟ้าโออาร์ซี.....	49
4.1 การเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าสุทธิของโรงไฟฟ้าทั้ง 4 ประเภท ที่แหล่งความร้อนในช่วง 100 - 200°C.....	51
4.2 การเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าสุทธิของโรงไฟฟ้าทั้ง 4 ประเภท ที่แหล่งความร้อนในช่วง 200 - 300°C.....	51

## สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.3 การเปรียบเทียบความดันในการระเหยของโรงไฟฟ้าทั้ง 4 ประเภท ที่แหล่งความร้อนในช่วง 100 - 200°C.....	54
4.4 การเปรียบเทียบความดันในการระเหยของโรงไฟฟ้าทั้ง 4 ประเภท ที่แหล่งความร้อนในช่วง 200 - 300°C.....	54
4.5 การเปรียบเทียบความดันในการควบแน่นของโรงไฟฟ้าทั้ง 4 ประเภท ที่แหล่งความร้อนในช่วง 100 - 200°C.....	56
4.6 การเปรียบเทียบความดันในการควบแน่นของโรงไฟฟ้าทั้ง 4 ประเภท ที่แหล่งความร้อนในช่วง 200 - 300°C.....	57
4.7 การเปรียบเทียบอัตราการขยายตัวของไอของโรงไฟฟ้าทั้ง 4 ประเภท ที่แหล่งความร้อนในช่วง 100 - 200°C.....	59
4.8 การเปรียบเทียบอัตราการขยายตัวของไอของโรงไฟฟ้าทั้ง 4 ประเภท ที่แหล่งความร้อนในช่วง 200 - 300°C.....	60
4.9 การเปรียบเทียบอัตราการไหลเชิงมวลของโรงไฟฟ้าทั้ง 4 ประเภท ที่แหล่งความร้อนในช่วง 100 - 300°C.....	61
4.10 การเปรียบเทียบอัตราการไหลเชิงมวลของโรงไฟฟ้าทั้ง 4 ประเภท ที่แหล่งความร้อนในช่วง 200 - 300°C.....	62
4.11 การเปรียบเทียบขนาดของคอนเดนเซอร์ของโรงไฟฟ้าทั้ง 4 ประเภท ที่แหล่งความร้อนในช่วง 100 - 200°C.....	63
4.12 การเปรียบเทียบขนาดของคอนเดนเซอร์ของโรงไฟฟ้าทั้ง 4 ประเภท ที่แหล่งความร้อนในช่วง 200 - 300°C.....	64
4.13 การเปรียบเทียบขนาดฮีวเปปเรเตอร์ของโรงไฟฟ้าทั้ง 4 ประเภท ที่แหล่งความร้อนในช่วง 100 - 200°C.....	65
4.14 การเปรียบเทียบขนาดฮีวเปปเรเตอร์ของโรงไฟฟ้าทั้ง 4 ประเภท ที่แหล่งความร้อนในช่วง 100 - 200°C.....	66

## สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.15 การเปรียบเทียบขนาดอีแวปโปเรเตอร์ของโรงไฟฟ้าทั้ง 4 ประเภท ที่แหล่งความร้อนในช่วง 100 - 200°C.....	68
4.16 การเปรียบเทียบต้นทุนเฉลี่ยตลอดอายุโครงการของโรงไฟฟ้า ชั้นคริติคอลโออาร์ซีกับโรงไฟฟ้าคาลินาที่แหล่งความร้อน ในช่วง 100 - 300°C.....	70
4.17 การเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าสุทธิที่ผลิตได้ในเดือนธันวาคม ของวิธีการทั้ง 4 แบบ.....	72
4.18 การเปรียบเทียบความดันในการควบแน่นของโรงไฟฟ้าในเดือนธันวาคม ของวิธีการทั้ง 4 แบบ.....	74
4.19 การเปรียบเทียบอัตราการไหลเชิงมวลของสารทำงานของโรงไฟฟ้า ในเดือนธันวาคมของวิธีการทั้ง 4 แบบ.....	75
4.20 การเปรียบเทียบความเข้มข้นของแอม โมเนียของโรงไฟฟ้า ในเดือนธันวาคมของวิธีการทั้ง 4 แบบ.....	75
4.21 การเปรียบเทียบความดันในการระเหยของโรงไฟฟ้า ในเดือนธันวาคมของวิธีการทั้ง 4 แบบ.....	76
4.22 การเปรียบเทียบอิทธิพลของอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมต่อความดัน ในการควบแน่นระหว่างวิธีการเปลี่ยนความดันในการควบแน่น กับวิธีการแบบทั่วไป.....	79
4.23 การเปรียบเทียบอิทธิพลของอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมต่ออุณหภูมิ ที่เข้าคอนเดนเซอร์ระหว่างวิธีการเปลี่ยนความดันในการควบแน่น กับวิธีการแบบทั่วไป.....	80
4.24 การเปรียบเทียบอิทธิพลของอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมต่ออัตราการไหล เชิงมวลของสารหล่อเย็นระหว่างวิธีการเปลี่ยนความดัน ในการควบแน่นกับวิธีการแบบทั่วไป.....	81

## สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.25	การเปรียบเทียบอิทธิพลของอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมต่อกำลังไฟฟ้าสุทธิ ระหว่างวิธีการเปลี่ยนความดันในการควบแน่นกับวิธีการแบบทั่วไป.....82
4.26	การเปรียบเทียบอิทธิพลของอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมต่อขนาดของ รีคูเปอร์เรเตอร์อุณหภูมิต่ำระหว่างวิธีการเปลี่ยนความดัน ในการควบแน่นกับวิธีการแบบทั่วไป.....83
4.27	การเปรียบเทียบอิทธิพลของอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมต่อขนาดของ คอนเดนเซอร์ระหว่างวิธีการเปลี่ยนความดันในการควบแน่น กับวิธีการแบบทั่วไป.....84
4.28	การเปรียบเทียบต้นทุนเฉลี่ยตลอดอายุโครงการระหว่าง วิธีการเปลี่ยนความดันในการควบแน่นกับวิธีการแบบทั่วไป.....86

## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

$A$	=	พื้นที่การแลกเปลี่ยนความร้อนของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน, $m^2$
$A_{cond}$	=	พื้นที่การแลกเปลี่ยนความร้อนของคอนเดนเซอร์, $m^2$
$A_{evap}$	=	พื้นที่การแลกเปลี่ยนความร้อนของอีแวปโปเรเตอร์, $m^2$
$A_{HT}$	=	พื้นที่การแลกเปลี่ยนความร้อนของรีคูปเพอร์เรเตอร์อุณหภูมิสูง, $m^2$
$A_{LT}$	=	พื้นที่การแลกเปลี่ยนความร้อนของรีคูปเพอร์เรเตอร์อุณหภูมิต่ำ, $m^2$
$C_{cond}$	=	ราคาของคอนเดนเซอร์, USD
$C_{el}$	=	ราคาของอุปกรณ์ทางไฟฟ้า, USD
$C_{evap}$	=	ราคาของอีแวปโปเรเตอร์, USD
$C_{gen}$	=	ราคาของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า, USD
$C_{hx}$	=	ราคาของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน, USD
$C_{inv}$	=	งบประมาณการลงทุนเบื้องต้นของโรงไฟฟ้า, USD
$C_{invc}$	=	ราคาของระบบควบคุมในโรงไฟฟ้า, USD
$C_{inst}$	=	ราคาสำหรับการติดตั้ง, USD
$C_{misc}$	=	ราคาของอุปกรณ์เบ็ดเตล็ดในโรงไฟฟ้า, USD
$C_{o\&m}$	=	ราคาค่าเดินการและซ่อมบำรุงโรงไฟฟ้า, USD
$C_{pec}$	=	ราคาของอุปกรณ์ในโรงไฟฟ้า, USD
$C_{pip}$	=	ราคาของท่อ, USD
$C_{pump}$	=	ราคาของปั๊ม, USD
$C_{rec}$	=	ราคาของรีคูปเพอร์เรเตอร์, USD
$C_{sep}$	=	ราคาของเทอร์ไบน์, USD
$C_{tur}$	=	ราคาของเทอร์ไบน์, USD
$C_{0,hx}$	=	ราคาเริ่มต้นของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนต่อพื้นที่เท่ากับ 588, USD/A <sup>2</sup>

### คำอธิบายสัญลักษณ์และค่าย่อ (ต่อ)

$C_{0,pump}$	=	ราคาเริ่มต้นของปั๊มต่อพลังงานที่ปั๊มใช้เท่ากับ 1120, USD/kW
$C_{0,tur}$	=	ราคาเริ่มต้นของเทอร์ไบน์ต่อกำลังไฟฟ้าที่เทอร์ไบน์ผลิตเท่ากับ 4405 , USD/kW
CRF	=	capital recovery factor เท่ากับ 0.87
$E_{y,conv}$	=	ปริมาณไฟฟ้าที่ผลิตได้ในกรณีทั่วไปใน 1 ปี, USD/kWh
$E_{y,slid}$	=	ปริมาณไฟฟ้าที่ผลิตได้เมื่อใช้วิธี sliding pressure ใน 1 ปี, USD/kWh
$Ex_r$	=	อัตราการขยายตัวของสารทำงานในเทอร์ไบน์ (Expansion ration)
$h_1$	=	เอนทาลปีของสารทำงานที่ตำแหน่งที่ 1, J/kg
$h_2$	=	เอนทาลปีของสารทำงานที่ตำแหน่งที่ 2, J/kg
$h_{2s}$	=	เอนทาลปีของสารทำงานที่ตำแหน่งที่ 2 กรณีที่ isentropic efficiency ของปั๊มเท่ากับ 100%, J/kg
$h_3$	=	เอนทาลปีของสารทำงานที่ตำแหน่งที่ 3, J/kg
$h_4$	=	เอนทาลปีของสารทำงานที่ตำแหน่งที่ 4, J/kg
$h_5$	=	เอนทาลปีของสารทำงานที่ตำแหน่งที่ 5, J/kg
$h_6$	=	เอนทาลปีของสารทำงานที่ตำแหน่งที่ 6, J/kg
$h_9$	=	เอนทาลปีของสารทำงานที่ตำแหน่งที่ 9, J/kg
$h_{9s}$	=	เอนทาลปีของสารทำงานที่ตำแหน่งที่ 9 โดยเป็นกรณี isentropic efficiency ของเทอร์ไบน์เท่ากับ 100%, J/kg
$h_{10}$	=	เอนทาลปีของสารทำงานที่ตำแหน่งที่ 10, J/kg
$h_{11}$	=	เอนทาลปีของสารทำงานที่ตำแหน่งที่ 11, J/kg
$hr_{conv}$ , $hr_{slid}$	=	ชั่วโมงในการผลิตไฟฟ้า, hr
$i$	=	อัตราดอกเบี้ยการลงทุน, %
$LCOE_{conv}$	=	ต้นทุนเฉลี่ยในการผลิตไฟฟ้าเมื่อใช้วิธีการออกแบบทั่วไป, USD/kWh
$LCOE_{slid}$	=	ต้นทุนเฉลี่ยในการผลิตไฟฟ้าเมื่อใช้วิธีการ sliding pressure, USD/kWh
$m_{hf}$	=	อัตราการไหลเชิงมวลของแหล่งความร้อน, kg/s
$m_{wf}$	=	อัตราการไหลเชิงมวลของสารทำงาน, kg/s



## คำอธิบายสัญลักษณ์และค่าย่อ (ต่อ)

$m_{wf,liquid}$	=	อัตราการไหลเชิงมวลของสารทำงานที่เป็นสถานะของเหลวที่แยกจากเซพพารเตอร์, kg/s
$m_{wf,vapor}$	=	อัตราการไหลเชิงมวลของสารทำงานที่เป็นสถานะแก๊สที่แยกจากเซพพารเตอร์, kg/s
$N$	=	อายุการใช้งานของโรงไฟฟ้า, ปี
$P_{cf}$	=	ความดันของแหล่งรับความร้อน, Pa
$P_{cond}$	=	ความดันของสารทำงานที่ทางเข้าปั๊ม, Pa
$P_{evap}$	=	ความดันของสารทำงานที่ทางออกปั๊ม, Pa
$P_{hf}$	=	ความดันของแหล่งความร้อนทิ้ง, Pa
$Q_{cond}$	=	อัตราการถ่ายเทความร้อนที่อุปกรณ์คอนเดนเซอร์, W
$Q_{evap}$	=	อัตราการถ่ายเทความร้อนที่อุปกรณ์อีแวโปเรเตอร์, W
$Q_{HT}$	=	อัตราการถ่ายเทความร้อนที่อุปกรณ์รีคูปเพอร์เรเตอร์อุณหภูมิสูง, W
$Q_{LT}$	=	อัตราการถ่ายเทความร้อนที่อุปกรณ์รีคูปเพอร์เรเตอร์อุณหภูมิต่ำ, W
$T_1$	=	อุณหภูมิของสารทำงานที่ตำแหน่งทางเข้าปั๊ม, K
$T_2$	=	อุณหภูมิของสารทำงานที่ตำแหน่งทางเข้ารีคูปเพอร์เรเตอร์อุณหภูมิต่ำ, K
$T_3$	=	อุณหภูมิของสารทำงานที่ตำแหน่งทางเข้ารีคูปเพอร์เรเตอร์อุณหภูมิต่ำ, K
$T_4$	=	อุณหภูมิของสารทำงานที่ตำแหน่งทางเข้ารีคูปเพอร์เรเตอร์อุณหภูมิสูง, K
$T_5$	=	อุณหภูมิของสารทำงานที่ตำแหน่งทางเข้าเซพพารเตอร์, K
$T_6$	=	อุณหภูมิของสารทำงานที่ตำแหน่งทางเข้าเทอร์ไบน์, K
$T_7$	=	อุณหภูมิของสารทำงานที่ตำแหน่งออกจากเซพพารเตอร์และทางเข้ารีคูปเพอร์เรเตอร์อุณหภูมิสูง, K
$T_8$	=	อุณหภูมิของสารทำงานที่ตำแหน่งออกจากรีคูปเพอร์เรเตอร์อุณหภูมิสูง, K
$T_9$	=	อุณหภูมิของสารทำงานที่ตำแหน่งออกจากเทอร์ไบน์, K
$T_{10}$	=	อุณหภูมิของสารทำงานที่ออกจากเทอร์ไบน์กับรีคูปเพอร์เรเตอร์อุณหภูมิสูงและเข้าสู่รีคูปเพอร์เรเตอร์อุณหภูมิต่ำ, K
$T_{11}$	=	อุณหภูมิของสารทำงานที่ตำแหน่งทางเข้าคอนเดนเซอร์, K

### คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

$T_{cf,in}$	=	อุณหภูมิของแหล่งรับความร้อนที่ทางเข้าคอนเดนเซอร์, K
$T_{cf,out}$	=	อุณหภูมิของแหล่งรับความร้อนที่ทางออกคอนเดนเซอร์, K
$T_{hf,in}$	=	อุณหภูมิของแหล่งทิ้งความร้อนที่ทางเข้าอีแวปโปเรเตอร์, K
$T_{pp,cond}$	=	Pinch point temperature ที่บริเวณคอนเดนเซอร์, K
$T_{pp,evap}$	=	Pinch point temperature ที่บริเวณอีแวปโปเรเตอร์, K
$T_{pp,HT}$	=	Pinch point temperature ที่บริเวณรีคูปเพอร์เรเตอร์อุณหภูมิสูง, K
$T_{pp,LT}$	=	Pinch point temperature ที่บริเวณรีคูปเพอร์เรเตอร์อุณหภูมิต่ำ, K
$U$	=	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม (overall heat transfer coefficient), $W/m^2 \cdot K$
$U_{cond}$	=	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมที่คอนเดนเซอร์ (overall heat transfer coefficient), $W/m^2 \cdot K$
$U_{evap}$	=	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมที่อีแวปโปเรเตอร์ (overall heat transfer coefficient), $W/m^2 \cdot K$
$U_{HT}$	=	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมที่รีคูปเพอร์เรเตอร์อุณหภูมิสูง (overall heat transfer coefficient), $W/m^2 \cdot K$
$U_{LT}$	=	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมที่รีคูปเพอร์เรเตอร์อุณหภูมิต่ำ (overall heat transfer coefficient), $W/m^2 \cdot K$
$W_{net}$	=	พลังงานไฟฟ้าสุทธิที่โรงไฟฟ้าผลิตได้, W
$W_p$	=	พลังงานไฟฟ้าที่จ่ายให้ปั๊ม, W
$W_t$	=	งานที่เทอร์ไบน์ผลิตได้, W
$V_6$	=	อัตราการไหลของสารทำงานที่ตำแหน่ง 6, $m^3/s$
$V_9$	=	อัตราการไหลของสารทำงานที่ตำแหน่ง 9, $m^3/s$
$X$	=	ความเข้มข้นของแอมโมเนียต่อน้ำ, %
$X_{liquid}$	=	ความเข้มข้นของแอมโมเนียต่อน้ำที่เป็นสถานะของเหลวที่แยกจากเซพาราเตอร์, %
$X_{vapor}$	=	ความเข้มข้นของแอมโมเนียต่อน้ำที่เป็นสถานะแก๊สที่แยกจากเซพาราเตอร์, %

### คำอธิบายสัญลักษณ์และค่าย่อ (ต่อ)

$\Delta T_{LM}$	=	ค่าเฉลี่ยของความแตกต่างอุณหภูมิ (log mean temperature difference), K
$\Delta T_{LM, cond}$	=	ค่าเฉลี่ยของความแตกต่างอุณหภูมิที่คอนเดนเซอร์ (log mean temperature difference), K
$\Delta T_{LM, evap}$	=	ค่าเฉลี่ยของความแตกต่างอุณหภูมิที่อีแวปโปเรเตอร์ (log mean temperature difference), K
$\Delta T_{LM, HT}$	=	ค่าเฉลี่ยของความแตกต่างอุณหภูมิที่รีคูปเพอร์เรเตอร์อุณหภูมิสูง (log mean temperature difference), K
$\Delta T_{LM, LT}$	=	ค่าเฉลี่ยของความแตกต่างอุณหภูมิที่รีคูปเพอร์เรเตอร์อุณหภูมิต่ำ (log mean temperature difference), K
$\Delta T_{pp, cond}$	=	Pinch point temperature difference ที่คอนเดนเซอร์, K
$\Delta T_{pp, evap}$	=	Pinch point temperature difference ที่อีแวปโปเรเตอร์, K
$\rho_6$	=	ความหนาแน่นของสารทำงานที่ตำแหน่ง 6, kg/m <sup>3</sup>
$\rho_9$	=	ความหนาแน่นของสารทำงานที่ตำแหน่ง 9, kg/m <sup>3</sup>
$\eta_{isen, p}$	=	isentropic efficiency ของปั๊มที่ให้เท่ากับ 0.65
$\eta_{isen, t}$	=	isentropic efficiency ของเทอร์ไบน์ที่ให้เท่ากับ 0.8

# บทที่ 1

## บทนำ

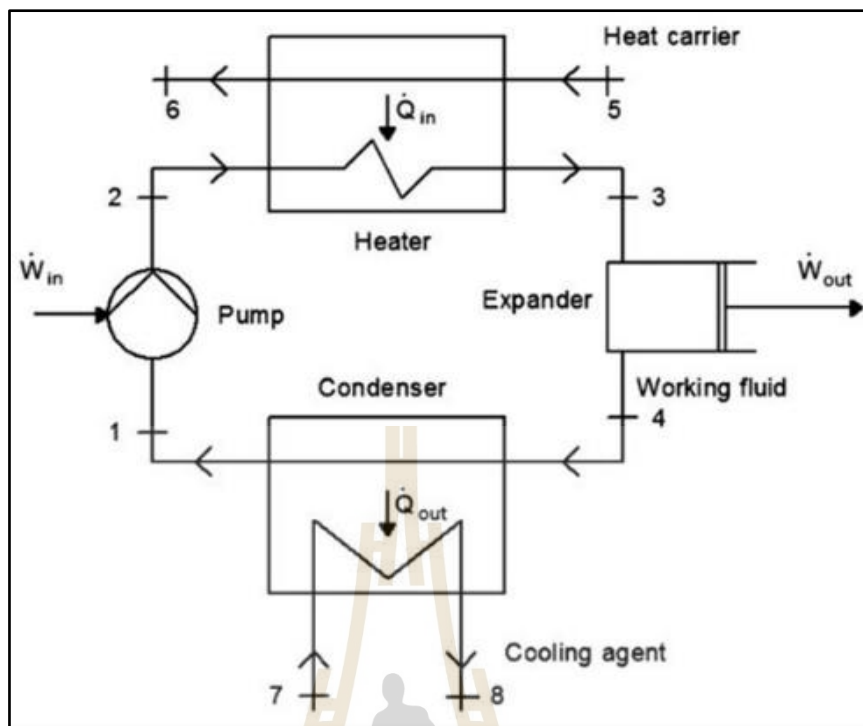
### 1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

เชื้อเพลิงฟอสซิลในประเทศไทย มีการใช้สำหรับการผลิตไฟฟ้ามากถึงร้อยละ 98 (การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (ก) , 2562) ซึ่งพลังงานฟอสซิล เป็นพลังงานประเภทที่ใช้แล้วหมดไป ส่งผลให้ไม่มีความมั่นคงในทางด้านพลังงาน จึงจำเป็นต้องการผลิตไฟฟ้าที่มีความมั่นคง นอกจากนี้ จากนโยบายของกระทรวงพลังงาน (2562) ที่ได้ส่งเสริมถึงการศึกษา พัฒนาเกี่ยวกับด้านพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก จึงเกิดแรงผลักดันในการศึกษาเกี่ยวกับการนำพลังงานทดแทนมาผลิตไฟฟ้า

พลังงานทดแทนมีอยู่หลายประเภท ได้แก่ พลังงานแสงอาทิตย์, พลังงานลม, พลังงานน้ำ, และ พลังงานความร้อนซึ่งสำหรับพลังงานแสงอาทิตย์, พลังงานลม, และพลังงานน้ำ เป็นพลังงานจากแหล่งธรรมชาติ เป็นแหล่งพลังงานที่ได้รับความสนใจ และมีการใช้งานอย่างแพร่หลาย อย่างไรก็ตาม พลังงานทั้ง 3 ชนิด ขึ้นอยู่กับด้านสภาพอากาศของสิ่งแวดล้อม และความไม่สม่ำเสมอในการผลิตพลังงาน นักวิจัยจึงให้ความสนใจพลังงานทางเลือกชนิดอื่น คือ พลังงานความร้อนซึ่ง

โรงไฟฟ้าโออาร์ซี (Organic Rankine cycle, ORC) เป็นเทคโนโลยีที่เปลี่ยนพลังงานความร้อนซึ่งเป็นพลังงานไฟฟ้า โดยโรงไฟฟ้าโออาร์ซีมีลักษณะการทำงานคล้ายคลึงกับโรงไฟฟ้าไอน้ำ อุปกรณ์พื้นฐานของโรงไฟฟ้าโออาร์ซี มี 4 ชนิด ได้แก่ ปั๊ม, อีแวปโปเรเตอร์, คอนเดนเซอร์, และเอ็กซ์แพนเดอร์ โดยสำหรับแผนภาพของอุปกรณ์ของโรงไฟฟ้าโออาร์ซี แสดงดังรูปที่ 1.1

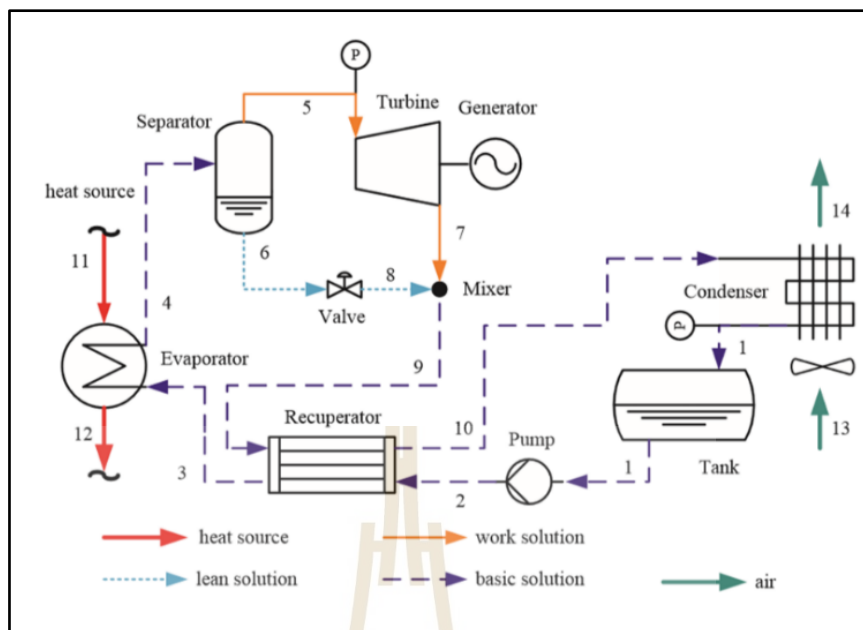
โรงไฟฟ้าโออาร์ซี มีการศึกษาและพัฒนาเป็นจำนวนมากเพื่อให้สามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้สูงสุด สามารถทำงานได้ที่สภาพแวดล้อมต่าง ๆ รวมถึงทำงานที่หลากหลายแหล่งความร้อนซึ่งที่หลากหลายช่วง โดยการศึกษาของ Muhammad et al. (2015) ทำการสร้างแบบจำลองโรงไฟฟ้าโออาร์ซี ออกแบบให้ระบบทำงานช่วงความดัน 1 – 3 bar ซึ่งเป็นการทำงานที่ความร้อนระดับต่ำ และออกแบบให้ผลิตไฟฟ้าได้ 1 kW โดยจากการทดลอง พบว่า กำลังไฟฟ้าสุทธิที่สามารถผลิตได้เท่ากับ 0.838 kW เนื่องจาก อุปกรณ์มีการสูญเสียประสิทธิภาพในการทำงาน



รูปที่ 1.1 อุปกรณ์พื้นฐานของโรงไฟฟ้าไออาร์ซี (Fischer, 2011)

Fiaschi et al. (2017) ศึกษาข้อมูลเกี่ยวกับวัฏจักรคาลินา ซึ่งถูกนำเสนอโดย Alexander I โดยวัฏจักรคาลินามีวัฏจักร ไออาร์ซีเป็นพื้นฐานซึ่งใช้สารทำงานเป็นแอมโมเนียผสมกับน้ำ และได้รับการพัฒนาทำให้ทำงานได้ที่อุณหภูมิแหล่งความร้อนที่หลากหลาย รวมถึงมีประสิทธิภาพที่มากกว่า โดย Fiaschi et al. ทำการศึกษาและเปรียบเทียบระหว่างโรงไฟฟ้าวัฏจักรคาลินากับโรงไฟฟ้าไออาร์ซี พบว่าโรงไฟฟ้าคาลินาผลิตกำลังไฟฟ้าสุทธิได้มากกว่าโรงไฟฟ้าไออาร์ซีถึง 22%

Wang & Yu (2016) รายงานว่า โรงไฟฟ้าวัฏจักรคาลินาเป็นเทคโนโลยีที่มีความซับซ้อนเมื่อเทียบกับโรงไฟฟ้าไออาร์ซี อย่างไรก็ตามโรงไฟฟ้าวัฏจักรคาลินามีประสิทธิภาพเชิงความร้อนที่มากกว่าโรงไฟฟ้าไออาร์ซี เนื่องจากโรงไฟฟ้าวัฏจักรคาลินามีอุปกรณ์เพิ่มมาในระบบ ส่งผลให้ประสิทธิภาพการทำงานเพิ่มขึ้น โดยมีอุปกรณ์เพิ่ม 2 ชนิด คือ เซพพารเตอร์ กับรีคูลเพอร์เรเตอร์ โดยอุปกรณ์อีก 4 ชนิด เหมือนกับโรงไฟฟ้าไออาร์ซีโดยสาเหตุที่ทำให้ประสิทธิภาพในระบบสามารถเพิ่ม เนื่องจากระบบสามารถทำงานได้ที่อุณหภูมิของแหล่งความร้อนที่ต่ำกว่า และสามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้สูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับโรงไฟฟ้าไออาร์ซี โดยลักษณะของอุปกรณ์ในวัฏจักรคาลินา แสดงดังรูปที่ 1.2



รูปที่ 1.2 อุปกรณ์ของโรงไฟฟ้าวัฏจักรคาลินา (Wang et al., 2017)

สำหรับงานวิจัยนี้ ทำการศึกษาเกี่ยวกับการนำโรงไฟฟ้าวัฏจักรคาลินามาปรับปรุง พัฒนา และนำมาประยุกต์ใช้ในจังหวัดนครราชสีมา สำหรับการศึกษาจะเป็นการจำลองผ่าน โปรแกรมการคำนวณ โดยเป็นการจำลองภายใต้เงื่อนไขที่ให้โรงไฟฟ้าวัฏจักรคาลินาสามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้ สูงสุดที่แหล่งความร้อนทิ้งที่ทำการศึกษาในช่วง 100 – 300 °C จากนั้นได้ทำการเปรียบเทียบกับ โรงไฟฟ้าไออาร์ซี จากนั้นทำการปรับปรุงโรงไฟฟ้าวัฏจักรคาลินาให้สามารถทำงานได้ที่สภาวะ อุณหภูมิของบรรยากาศที่มีการเปลี่ยนแปลง

## 1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย

เพื่อศึกษาการจำลองและวิเคราะห์โรงไฟฟ้าวัฏจักรคาลินา ให้สามารถทำงานได้ที่สภาวะ อุณหภูมิของสภาพแวดล้อมที่เปลี่ยนแปลง

## 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1.3.1 เป็นการศึกษาโรงไฟฟ้าวัฏจักรคาลินา โดยผ่านวิธีการวิเคราะห์เชิงตัวเลข และใช้ การทำงานระหว่างโปรแกรม MATLAB ร่วมกับ NIST REFPROP

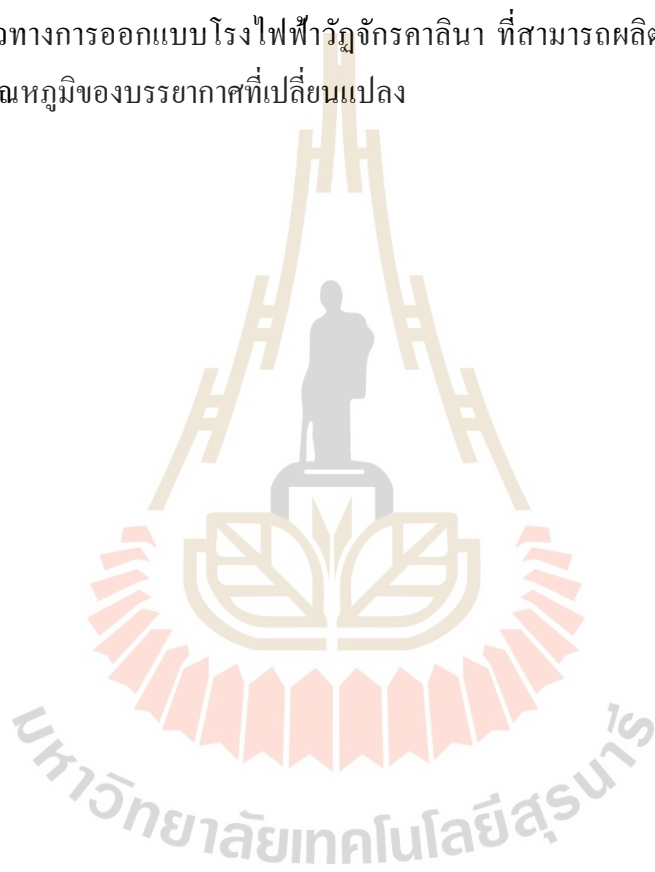
1.3.2 เป็นการศึกษาที่สภาพอากาศของจังหวัดนครราชสีมา โดยพิจารณาอุณหภูมิของ อากาศที่เปลี่ยนแปลงภายในระยะเวลา 1 ปี

1.3.3 เป็นการศึกษาเพื่อประเมิน ความเป็นไปได้ของการผลิตไฟฟ้าจากแหล่งความร้อนต่ำ โดยคาดว่าจะใช้แหล่งความร้อนทิ้งจากเตาเผาขยะติดเชื้อของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีเป็นแหล่งความร้อนทิ้ง

1.3.4 ปริมาณของกำลังไฟฟ้าสุทธิที่ผลิตได้ของโรงไฟฟ้าวัฏจักรคาลินา เป็นเกณฑ์ในการพิจารณาถึงสมรรถนะของโรงไฟฟ้า

#### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ได้แนวทางการออกแบบโรงไฟฟ้าวัฏจักรคาลินา ที่สามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้สูงสุดให้สอดคล้องกับอุณหภูมิของบรรยากาศที่เปลี่ยนแปลง





## บทที่ 2

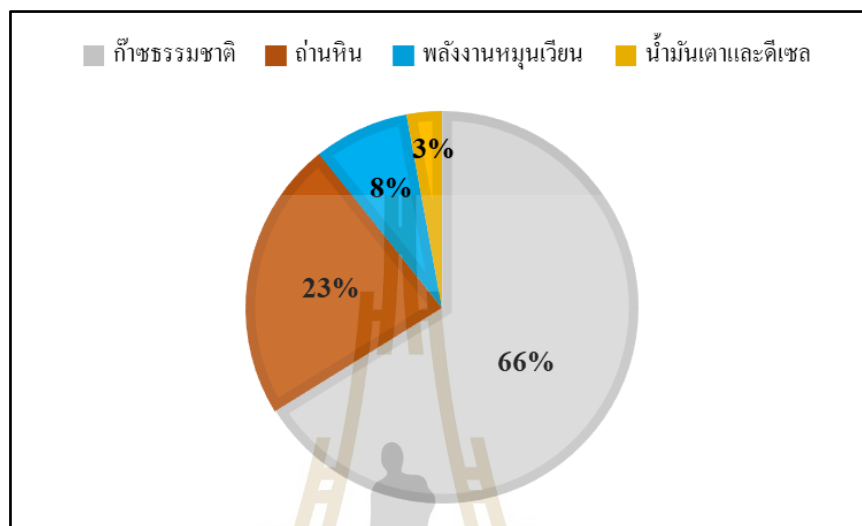
### ปรัทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 บทนำ

พลังงานไฟฟ้า เป็นพลังงานสำคัญในยุคปัจจุบันทั้งทางด้านการเติบโตของเทคโนโลยีที่รวมไปถึงด้านการศึกษา การแพทย์ และสิ่งอำนวยความสะดวกต่าง ๆ ภายในชีวิตประจำวัน สำหรับประเทศไทยมีความต้องการด้านพลังงานไฟฟ้าที่สูงมาก ดังนั้นเพื่อตอบสนองในการใช้ปริมาณไฟฟ้า จึงส่งผลให้กระบวนการผลิตไฟฟ้าของประเทศไทยมีการใช้รูปแบบที่หลากหลาย เพื่อตอบสนองต่อความต้องการการใช้พลังงาน ซึ่งสำหรับวิธีการผลิตไฟฟ้ามีหลายวิธีการด้วยกัน เช่น จากพลังงานฟอสซิล พลังงานทดแทนต่าง ๆ เป็นต้น ซึ่งจากวิธีการผลิตไฟฟ้าวิธีการต่าง ๆ พบว่าพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตโดยพลังงานฟอสซิล มีมากกว่าร้อยละ 98 (ก๊าซธรรมชาติ ถ่านหิน และน้ำมัน) (การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (ก), 2562) ซึ่งพลังงานฟอสซิลเป็นพลังงานประเภทใช้แล้วหมดไป ส่งผลให้เชื้อเพลิงที่ใช้ผลิตไฟฟ้าอาจไม่เพียงพอและอาจหมดไป ทำให้ไม่มีความมั่นคงในทางด้านพลังงาน (เนื่องจากไม่สามารถผลิตไฟฟ้าได้เท่าเดิมตลอดไป) ดังนั้นเพื่อเพิ่มปริมาณการผลิตไฟฟ้าให้สอดคล้องต่อการใช้งาน จึงเพิ่มการผลิตไฟฟ้าจากกระบวนการอื่น ได้แก่ พลังงานทดแทน (พลังงานลม พลังงานน้ำ พลังงานแสงแดด เป็นต้น) นอกจากนี้จากนโยบายของกระทรวงพลังงานที่ต้องการเพิ่มการใช้พลังงานทดแทน หรือพลังงานหมุนเวียนมาใช้แทนพลังงานที่เป็นมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม (กระทรวงพลังงาน, 2562) จึงได้ทำการเลือกใช้พลังงานทดแทนมาทำการผลิตไฟฟ้า อย่างไรก็ตามวิธีการดังกล่าวมีการผลิตไฟฟ้าที่น้อยมากซึ่งสังเกตจากปี 2561 ที่มีเพียงร้อยละ 8 เมื่อเทียบกับกำลังไฟฟ้าที่ กฟผ. ผลิตขึ้น (การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (ข), 2562)

พลังงานทดแทนมีหลายประเภท ได้แก่ พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานลม พลังงานน้ำ พลังงานความร้อนทิ้ง และพลังงานขยะ ซึ่งสำหรับพลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานลม และพลังงานน้ำเป็นพลังงานจากแหล่งธรรมชาติ ซึ่งมีข้อดีคือ เป็นพลังงานที่ไม่เป็นมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม ส่งผลให้เป็นพลังงานที่นิยมนำมาใช้ ซึ่งแตกต่างกับพลังงานขยะที่จะสร้างมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม อย่างไรก็ตามพลังงานทั้ง 3 ประเภท ขึ้นกับสภาพภูมิประเทศรวมไปถึงมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง ซึ่งแตกต่างกับการนำพลังงานความร้อนมาใช้ประโยชน์ ซึ่งแหล่งพลังงานดังกล่าวมีหลากหลายแห่ง ได้แก่ แหล่งความร้อนใต้พิภพ แหล่งความร้อนจากโรงงานต่าง ๆ ดังนั้นจึงนำแหล่งความร้อนทิ้งมา

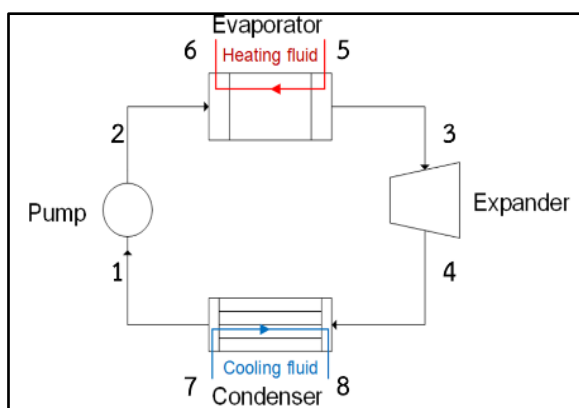
พิจารณาในการผลิตไฟฟ้า โดยได้มีนักวิจัยทำการศึกษารวบรวมแหล่งความร้อนทิ้งมาผลิตไฟฟ้าและ ออกแบบโรงไฟฟ้าไว้หลากหลายประเภท สำหรับโรงไฟฟ้าที่ทำการพิจารณาและเปรียบเทียบมี 2 รูปแบบ คือ โรงไฟฟ้าโออาร์ซีกับโรงไฟฟ้าคาลินา



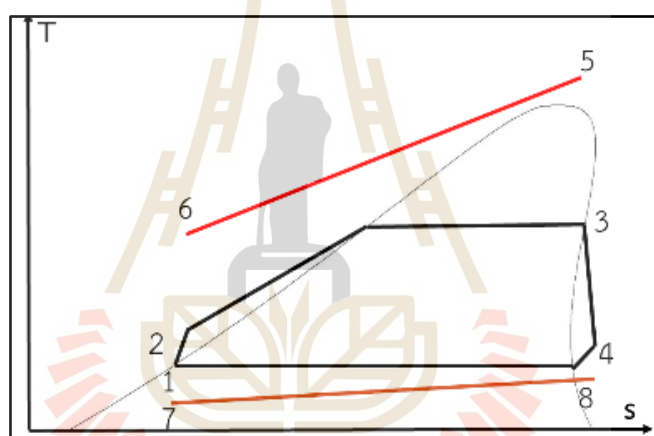
รูปที่ 2.1 สัดส่วนการผลิตกำลังไฟฟ้าของกฟผ.จากเชื้อเพลิงต่าง ๆ ของประเทศไทยในปี พ.ศ.2561 (การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (กฟผ.), 2562)

## 2.2 โรงไฟฟ้าโออาร์ซี (Organic Rankine cycle, ORC)

โรงไฟฟ้าโออาร์ซี เป็นโรงไฟฟ้าที่ได้รับการพัฒนามาจากโรงไฟฟ้าไอน้ำ (steam Rankine cycle) ทำให้มีอุปกรณ์และลักษณะการทำงานที่ใกล้เคียงกัน อย่างไรก็ตามสำหรับความแตกต่างของโรงไฟฟ้าทั้ง 2 ชนิด คือ การใช้สารทำงานที่แตกต่างกัน เมื่อโรงไฟฟ้าโออาร์ซีใช้สารทำงานเป็น สารออร์แกนิกหรือสารทำความเย็น เช่น R245fa R32 R1234ze เป็นต้น แต่โรงไฟฟ้า ไอน้ำใช้สารทำงานเป็น น้ำ โดยสาเหตุที่โรงไฟฟ้าโออาร์ซีต้องใช้สารทำงานชนิดดังกล่าว เนื่องจากต้องการนำมาประยุกต์ใช้กับแหล่งความร้อนที่อุณหภูมิต่ำ ซึ่งสารทำงานของโรงไฟฟ้าโออาร์ซีที่เลือกใช้ งานมีจุดเดือดของสารทำงานที่ต่ำ ดังนั้นจึงได้มีการใช้สารทำงานประเภทดังกล่าว เพื่อให้สามารถใช้งานได้ที่แหล่งความร้อนที่อุณหภูมิต่ำ นอกจากนี้ จากการใช้สารทำงานที่หลายชนิดจึงทำให้โรงไฟฟ้าโออาร์ซีสามารถใช้งานได้หลากหลาย คือ อุณหภูมิของแหล่งความร้อนมีความหลากหลายกว่าโรงไฟฟ้าไอน้ำ โดยลักษณะของโรงไฟฟ้าโออาร์ซีที่สนใจมีลักษณะการจัดเรียงของ อุปกรณ์และลักษณะของ T-s diagram ดังรูปที่ 2.2 และ 2.3 นอกจากนี้ตำแหน่งที่อยู่บนรูปที่ 4 และ 5 เป็นตำแหน่งเดียวกัน



รูปที่ 2.2 ลักษณะการจัดเรียงอุปกรณ์ของโรงไฟฟ้าไออาร์ซี



รูปที่ 2.3 T – s diagram ของโรงไฟฟ้าไออาร์ซี

จากข้อได้เปรียบดังกล่าว จึงทำให้นักวิจัยเกิดความสนใจที่ในการศึกษาโรงไฟฟ้าไออาร์ซี เช่น Maraver et al. (2014) ศึกษาโรงไฟฟ้าไออาร์ซี พบว่าเป็นเทคโนโลยีที่ได้รับการศึกษาและปรับปรุงอย่างต่อเนื่อง เนื่องจากเป็นเทคโนโลยีที่เปลี่ยนพลังงานความร้อนทิ้งเป็นพลังงานไฟฟ้า โดยแหล่งความร้อนทิ้ง มีหลายประเภท เช่น แหล่งความร้อนทิ้งได้พิภพ แหล่งความร้อนทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม เป็นต้น

นอกจากนี้ ยังได้ทำการศึกษาค้นหาจุดทำงานที่เหมาะสมที่สุด ภายใต้การวิเคราะห์หลักทางเทอร์โมไดนามิกส์ คือ หาสารทำงานที่มีค่า exergy efficiency มากที่สุด โดยสารที่นำมาพิจารณา เป็นสารที่นิยมใช้ ได้แก่ R134a, R245fa, Solkatherm, n-Pentane, Octamethyltrisiloxane และ Toluene และพิจารณาในช่วงอุณหภูมิแหล่งความร้อนเป็น 170°C กับ 300°C

โดยอุณหภูมิทางออกของแหล่งความร้อนแบ่งเป็นแบบไม่กำหนด (ไม่นำอุณหภูมิแหล่งความร้อนใช้งานต่อ) กับแบบกำหนด (นำแหล่งความร้อนทางออกไปใช้งานต่อ) ซึ่งจากงานวิจัยดังกล่าวเป็นการนำสารที่นิยมใช้มาทำการพิจารณา ดังนั้นอาจไม่สรุปเงื่อนไขการเลือกสารทำงานให้มีค่าของ exergy efficiency สูงสุดที่แหล่งความร้อนต่าง ๆ ได้

Pei et al. (2011) ได้ทำการสร้างต้นแบบการทำงานของโรงไฟฟ้าโออาร์ซี เมื่อใช้สารทำงานเป็น R123 ซึ่งจากการทดลอง พบว่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงสุดของแบบจำลองโรงไฟฟ้าโออาร์ซีมีค่าเท่ากับ 7% ในขณะที่ประสิทธิภาพของเทอร์โบอินมีค่า 65% และสามารถผลิตกำลังไฟฟ้าสุทธิได้ 1 kW ซึ่งสำหรับกรณีนี้ เป็นการสร้างโรงไฟฟ้าต้นแบบในห้องปฏิบัติการทดลอง ซึ่งทำให้สามารถควบคุมตัวแปรที่กระทบกับโรงไฟฟ้าได้อย่างแม่นยำ ดังนั้นเมื่อนำไปสร้างจริงผลการจำลองอาจคลาดเคลื่อนได้

Nemati et al. (2017) ได้ศึกษาค้นคว้าเกี่ยวกับโรงไฟฟ้าโออาร์ซี ใช้แหล่งความร้อนเป็นแหล่งความร้อนร่วมในการผลิตไฟฟ้าจากระบบอื่น พบว่าการเพิ่มของความดันในระบบ จาก 7 – 12 bar กำลังไฟฟ้าที่ผลิตจะเพิ่มขึ้นจาก 1.1 MW ถึง 1.2 MW อย่างไรก็ตาม หลังจากความดัน 12 - 18 bar กำลังไฟฟ้าลดลงจาก 1.2 MW เป็น 1.1 MW ซึ่งการศึกษานี้ พบว่า ประสิทธิภาพทางเทอร์โมไดนามิกส์ทั้งข้อที่ 1 และ 2 มีค่าสูงสุดเท่ากับ 83.90% และ 54.74% เมื่อกำลังไฟฟ้าสุทธิที่ผลิตได้ มีค่า 1.24 MW

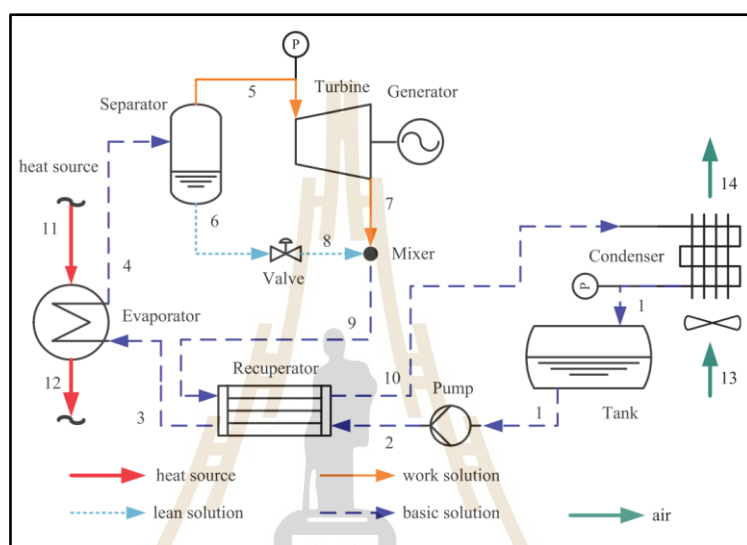
อย่างไรก็ตาม สำหรับโรงไฟฟ้าโออาร์ซียังมีข้อจำกัดในการใช้งานอีกหลากหลายด้าน เช่น ต้นทุนในการผลิตไฟฟ้าที่สูง ปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้น้อยกว่า ข้อจำกัดในการเลือกสารทำงานที่สารทำงานบางชนิดหากมีการรั่วไหลอาจส่งผลเสียต่อสิ่งแวดล้อม จึงส่งผลให้มีการศึกษาและทำการค้นคว้าอย่างต่อเนื่อง เพื่อเพิ่มความสามารถของโรงไฟฟ้าโออาร์ซีให้ทำงานได้ที่หลากหลายสภาวะการทำงาน เช่น สามารถทำงานได้ที่หลากหลายภูมิประเทศ ทำงานได้ที่อุณหภูมิแหล่งความร้อนที่ต่ำ รวมถึงสามารถปรับตัวให้ได้หลากหลายสภาพอากาศ ส่งผลให้ โรงไฟฟ้าโออาร์ซีมีรูปแบบของโรงไฟฟ้าที่หลากหลายชนิด โดยสำหรับชนิดของโรงไฟฟ้าโออาร์ซีที่ทำการศึกษา ได้แก่ โรงไฟฟ้าวัฏจักรคาลินา

### 2.3 โรงไฟฟ้าวัฏจักรคาลินา (Kalina cycle power plant)

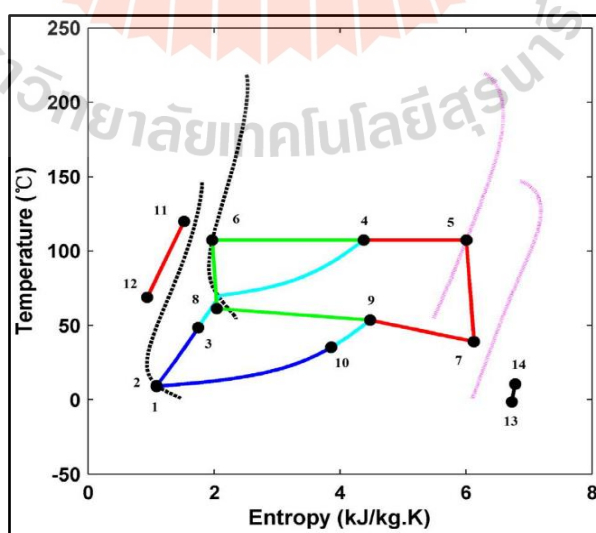
สำหรับโรงไฟฟ้าวัฏจักรคาลินา เป็นเทคโนโลยีที่ได้รับการพัฒนามาจากโรงไฟฟ้าโออาร์ซี โดยโรงไฟฟ้าคาลินาใช้สารทำงานที่เป็นสารผสมระหว่างแอมโมเนียกับน้ำ ซึ่งเป็นสารผสมประเภทซีโอโทรอปิกโดยการใช้สารผสมดังกล่าวจะเป็นการปรับปรุงการแลกเปลี่ยนความร้อนให้ดีขึ้น เนื่องจากการใช้สารผสมประเภทซีโอโทรอปิกทำให้เกิดคุณสมบัติอุณหภูมิในการเปลี่ยนเฟส

ไม่คงที่ ส่งผลให้อุณหภูมิของแหล่งความร้อนกับสารทำงานมีความใกล้เคียงกัน จึงเป็นการลดกระบวนการย้อนกลับไม่ได้ที่เกิดขึ้นในระบบ (Zare et al. 2015)

จากเหตุผลดังกล่าว ส่งผลให้โรงไฟฟ้าวัฏจักรคาลินามีความซับซ้อนกว่าทั้งกระบวนการทำงานภายในวัฏจักรและการจัดเรียงของอุปกรณ์ เมื่อเปรียบเทียบกับโรงไฟฟ้าไออาร์ซี โดยการจัดเรียงอุปกรณ์และลักษณะการทำงานของระบบแสดงผ่าน T-s diagram แสดงดังรูป 2.4 และ 2.5

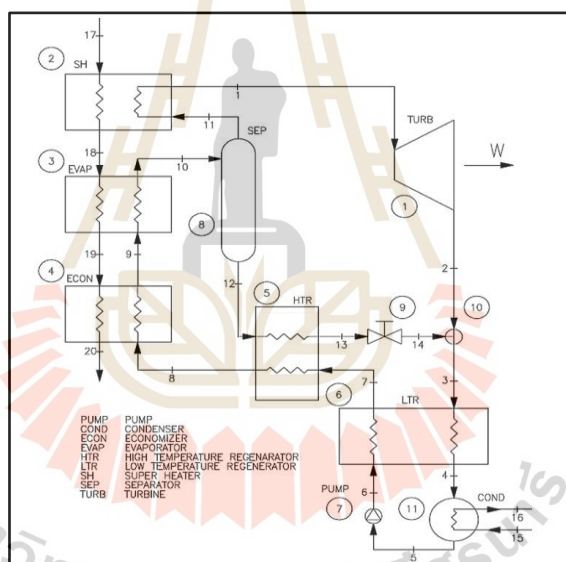


รูปที่ 2.4 อุปกรณ์ของโรงไฟฟ้าคาลินา (Wang & Yu, 2017)



รูปที่ 2.5 T-s diagram ของโรงไฟฟ้าคาลินา (Wang & Yu, 2017)

Júnior et al. (2019) ได้ทำการศึกษาเพื่อนำความร้อนทิ้งจากโรงงานซีเมนต์นำมาใช้ประโยชน์ โดยเลือกใช้โรงไฟฟ้าวัฏจักรคาลินา เนื่องจากได้ทำการศึกษาและพบว่า กรณีของโรงไฟฟ้าวัฏจักรคาลินาจะมีประสิทธิภาพที่ดีกว่าโรงไฟฟ้าไออาร์ซี เมื่ออุณหภูมิของแหล่งความร้อนทิ้งมากกว่า  $180^{\circ}\text{C}$  รวมถึงมีงานวิจัยหลายงานยืนยันว่า โรงไฟฟ้าวัฏจักรคาลินามีประสิทธิภาพที่มากกว่า สำหรับงานวิจัยนี้จะศึกษาเพื่อหาประสิทธิภาพที่มากที่สุดเพื่อลดค่าใช้จ่ายในการผลิตไฟฟ้า โดยจากการศึกษาพบว่า การเพิ่มความเข้มข้นของสารทำงานให้สอดคล้องกับอุณหภูมิของแหล่งความร้อนทิ้งที่เพิ่มสูงขึ้นจะทำให้ความดันในระบบเพิ่มสูงขึ้น ทำให้ค่าใช้จ่ายในการผลิตไฟฟ้าลดลง และกำลังไฟฟ้าสุทธิจะเพิ่มขึ้น คือ เมื่อความดันเพิ่มจาก  $5900\text{ kPa}$  เป็น  $7750\text{ kPa}$  จะทำให้ค่าใช้จ่ายในการผลิตลดลงจาก  $9.1\text{ Baht/kW.h}$  เหลือ  $9\text{ Baht/kW.h}$  และทำให้กำลังไฟฟ้าผลิตเพิ่มจาก  $2.2\text{ kW}$  เป็น  $2.4\text{ kW}$  สำหรับลักษณะของโรงไฟฟ้าที่ศึกษาแสดงดังรูป 8



รูปที่ 2.6 อุปกรณ์ของโรงไฟฟ้าคาลินา (Júnior et al., 2019)

Modi et al. (2015) ได้ศึกษาโรงไฟฟ้าคาลินาภายใต้เงื่อนไขที่ออกแบบเพื่อหากำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้สูงสุด โดยได้ทำการเปรียบเทียบความเข้มข้นของสารทำงานที่ค่าต่าง ๆ ได้แก่ 50%, 60%, 70%, และ 80% นอกจากนี้ ได้ศึกษาการหาจุดทำงานให้สอดคล้องกับสภาวะทำงาน โดยนิยามสภาวะทำงานได้แก่ ปริมาณของแหล่งความร้อน ปริมาณของไฟฟ้าที่ผลิตได้ โดยจะศึกษาถึงผลลัพธ์ที่เกิดขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงตัวแปรดังกล่าว โดยผลลัพธ์จากการจำลองได้ว่า การเพิ่มความ



เข้มข้น ทำให้ประสิทธิภาพของระบบเพิ่มขึ้น แต่เป็น การเพิ่มขึ้นเล็กน้อย คือ จาก 29.5% เป็น 30.5%

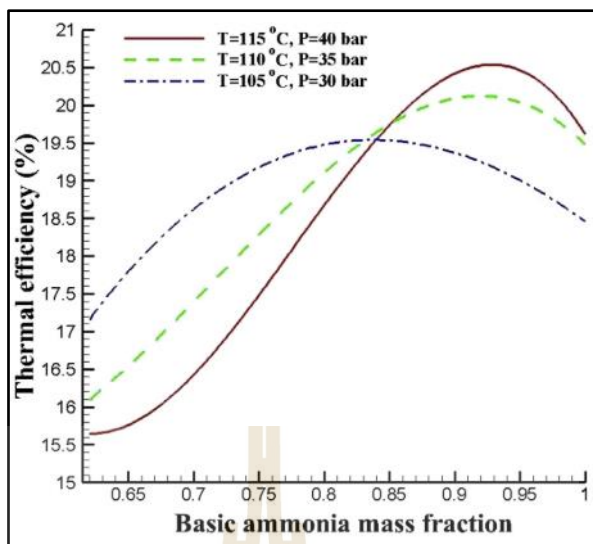
Bahrampoury และ Behbahaninia (2017) ได้เปรียบเทียบโรงไฟฟ้าคาถินาทั้ง 4 รูปแบบ ซึ่งมีความแตกต่างกัน คือ การจัดเรียงตัวของอุปกรณ์ โดยที่อุณหภูมิแหล่งความร้อนที่นำมาพิจารณามีค่าเท่ากับ 110, 140, และ 170°C แต่มีการจัดเรียงอุปกรณ์ที่แตกต่างกัน จากการจำลองพบว่า กรณีแหล่งความร้อนที่เท่ากับ 110°C ผลิตไฟฟ้าได้ในช่วง 8.3 – 9.7 kW เมื่อเปลี่ยนอุณหภูมิแหล่งความร้อนเป็น 140°C กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ มีค่าในช่วง 17.5 – 21.7 kW และเมื่อแหล่งความร้อนมีค่า 170°C สามารถผลิตกำลังไฟฟ้ามีค่า 29.7 – 32.8 kW

Saffari et al. (2016) ได้ศึกษาการนำแหล่งความร้อนใต้พิภพมาใช้งาน โดยศึกษาที่ประเทศไอร์แลนด์ โดยได้เลือกโรงไฟฟ้าคาถินามาใช้และจำลองภายใต้เงื่อนไขในการหาค่าจุดที่เหมาะสมในการทำงานเพื่อให้มีประสิทธิภาพเชิงความร้อนที่สูงสุด ซึ่งตัวแปรที่สนใจได้แก่ อัตราส่วนความเข้มข้นของสารทำงาน ความดันในการระเหย อุณหภูมิที่เข้าสู่เทอร์ไบน์ โดยพฤติกรรมตัวอย่างของ 3 ตัวแปรที่มีผลต่อประสิทธิภาพเชิงความร้อนแสดงคังรูปที่ 2.7 ซึ่งพบว่าจุดที่ทำให้ได้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงสุดจะอยู่ตำแหน่งที่แตกต่างกัน ซึ่งพบว่าขึ้นกันอุณหภูมิที่เข้าเทอร์ไบน์เป็นหลัก หรือก็คือ ค่าของอุณหภูมิแหล่งความร้อน โดยระบบต้องปรับความดันในการระเหยกับความเข้มข้นของสาร ให้สอดคล้องกับแหล่งความร้อนดังกล่าว

จากการจำลองพบว่า โรงไฟฟ้าคาถินาที่นำแหล่งความร้อนใต้พิภพมาใช้งาน ทำให้อุณหภูมิที่เข้าเทอร์ไบน์มีค่าสูงสุดเท่ากับ 117°C ซึ่งสามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้สูงสุดเท่ากับ 2.2 MW โดยใช้ อัตราส่วนความเข้มข้นของสารทำงานเท่ากับ 90.25% และมีอัตราการไหลเท่ากับ 18.56 kg/s อย่างไรก็ตามเมื่ออุณหภูมิของแหล่งความร้อนลดลง จนทำให้อุณหภูมิเข้าเทอร์ไบน์ลดลงเหลือ 112°C ส่งผลให้กำลังไฟฟ้าลดลงไปเหลือเพียง 2 MW และอัตราการไหลลดลงเหลือ 15.52 kg/s แต่ความเข้มข้นของสารทำงานกลับเพิ่มมาเป็น 95%

นอกจากนี้ ได้มีนักวิจัยได้ทำการเปรียบเทียบระหว่างโรงไฟฟ้าคาถินากับโรงไฟฟ้าโออาร์ซี เพื่อหาว่าโรงไฟฟ้าทั้ง 2 ประเภทมีจุดเด่น จุดด้อย กว่าโรงไฟฟ้าอีกประเภทอย่างไร



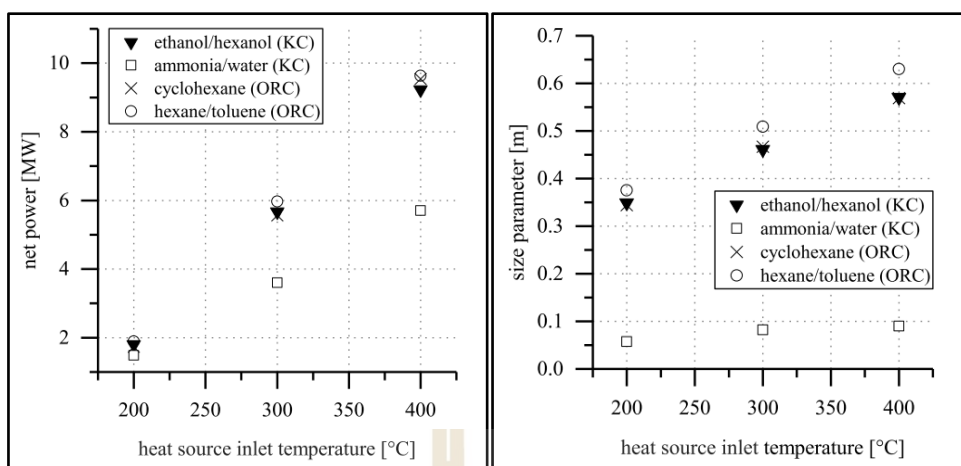


รูปที่ 2.7 การเปรียบเทียบความเข้มข้นสารทำงานที่แหล่งความร้อนทั้ง 3 ช่วง กับ ประสิทธิภาพเชิงความร้อน (Saffari et al., 2016)

## 2.4 เปรียบเทียบโรงไฟฟ้าโออาร์ซีกับโรงไฟฟ้าคาลินา

เนื่องจากโรงไฟฟ้าคาลินามีพื้นฐานมาจากโรงไฟฟ้าโออาร์ซี จึงทำให้นักวิจัยหลาย ๆ ท่านได้ทำการเปรียบเทียบระหว่างโรงไฟฟ้าโออาร์ซีกับโรงไฟฟ้าคาลินา โดยจำลองที่สภาวะต่าง ๆ เช่น แหล่งความร้อน อุณหภูมิของสิ่งแวดล้อม เป็นต้น เพื่อเป็นการพิจารณาเงื่อนไขในการเลือกใช้ชนิดโรงไฟฟ้าให้มีความเหมาะสม กับสภาพแวดล้อมที่ทำการพิจารณา

Eller et al. (2017) ได้ทำการจำลองเปรียบเทียบโรงไฟฟ้าคาลินาเปรียบเทียบกับโรงไฟฟ้าโออาร์ซี โดยทำการจำลองที่แหล่งความร้อนทั้ง 3 ค่า คือ 200, 300, และ 400°C โดยโรงไฟฟ้าคาลินาใช้สารทำงาน คือ ethanol ผสมกับ hexanol และ แอมโมเนียผสมกับน้ำ สำหรับโรงไฟฟ้าโออาร์ซีใช้สารทำงานเป็น cyclohexane และ hexane ผสมกับ toluene จากผลการจำลอง แสดงดังรูปที่ 2.8 เมื่อพิจารณาที่แหล่งความร้อน 200°C พบว่าการจำลองทั้ง 4 รูปแบบมีการผลิตกำลังไฟฟ้าที่ใกล้เคียงกัน อย่างไรก็ตาม โรงไฟฟ้าคาลินาที่ใช้สารทำงานเป็นแอมโมเนียผสมกับน้ำมีขนาดของอุปกรณ์เล็กกว่าถึง 7 เท่า นอกจากนี้เมื่ออุณหภูมิแหล่งความร้อนเพิ่มขึ้น กำลังไฟฟ้าสุทธิเพิ่มขึ้นแต่โรงไฟฟ้าคาลินาชนิดดังกล่าวมีการเพิ่มขึ้นน้อยกว่า ทำให้โรงไฟฟ้าคาลินาชนิดนี้ให้กำลังไฟฟ้าสุทธิน้อยสุด แต่ขนาดอุปกรณ์เล็กสุดที่แหล่งความร้อนมากที่สุด โดยได้ทำการเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าสุทธิที่ผลิตได้เมื่อแหล่งความร้อนเปลี่ยนแปลงไปแสดงดังรูปที่ 2.8a และขนาดของอุปกรณ์เมื่อแหล่งความร้อนเปลี่ยนแปลงดังรูปที่ 2.8b



รูปที่ 2.8 การเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าสุทธิ (ซ้าย) และขนาดของอุปกรณ์ (ขวา) กับแหล่งความร้อนทิ้ง (Eller et al., 2017)

Meng et al. (2019) เปรียบเทียบ โรงไฟฟ้าไออาร์ซีกับคาลินา โดยจำลองผ่านการคำนวณเชิงตัวเลข ซึ่งเป็นการพิจารณาแหล่งความร้อนอุณหภูมิต่ำกว่า  $120^{\circ}\text{C}$  พบว่าเมื่อเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าสุทธิที่ผลิตได้ ระหว่างโรงไฟฟ้าคาลินากับโรงไฟฟ้าไออาร์ซี มีค่า 2.69 MW และ 1.50 MW ตามลำดับ ซึ่งโรงไฟฟ้าคาลินายังมีค่าของ exergy efficiency ที่สูงกว่า โรงไฟฟ้าไออาร์ซีคือ 0.47 และ 0.41 อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาค่าของ thermal efficiency โรงไฟฟ้าไออาร์ซี จะมีค่าที่มากกว่าโรงไฟฟ้าคาลินา คือ 0.12 และ 0.09

Bombarda et al. (2010) ทำการศึกษาแหล่งความร้อนทิ้งที่มาจากเครื่องยนต์ดีเซล และทำการเปรียบเทียบโรงไฟฟ้าคาลินากับโรงไฟฟ้าไออาร์ซี โดยเป็นการจำลองผ่านโปรแกรมการคำนวณ จากผลการจำลองเป็นการพิจารณาเมื่อประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนที่แตกต่างกัน ผ่านการเปรียบเทียบค่าของ log mean temperature โดยการเพิ่มขึ้นของค่าดังกล่าวจาก  $50 - 75^{\circ}\text{C}$  ทำให้กำลังไฟฟ้าสุทธิลดลงจาก 1.62 MW เป็น 1.38 MW ซึ่งเป็นจากกรณีของโรงไฟฟ้าคาลินา และสำหรับโรงไฟฟ้าไออาร์ซีกำลังไฟฟ้าสุทธิลดลงจาก 1.6 MW เป็น 1.4 MW ซึ่งกำลังไฟฟ้าสุทธิของโรงไฟฟ้าทั้งโรงไฟฟ้าคาลินาและไออาร์ซีมีค่าใกล้เคียงกัน อย่างไรก็ตามพบว่าความดันในระบบของโรงไฟฟ้าคาลินามากกว่าไออาร์ซีถึง 10 เท่า

Yari et al. (2015) ทำการเปรียบเทียบระหว่างโรงไฟฟ้าไออาร์ซีกับโรงไฟฟ้าคาลินา โดยพิจารณาที่แหล่งความร้อนระดับต่ำอุณหภูมิต่ำกว่า  $120^{\circ}\text{C}$  และทำการเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าสุทธิที่ผลิตได้ เมื่อโรงไฟฟ้าไออาร์ซีใช้สารทำงานทั้งหมด 5 ชนิด และโรงไฟฟ้าไออาร์ซีพิจารณาการเปรียบเทียบสารทำงานที่มีความเข้มข้นที่ 3 ค่า ซึ่งสำหรับผลจากการทดสอบของโรงไฟฟ้าไออาร์ซี

แสดงดังตารางที่ 2.1 โรงไฟฟ้ากาลินา แสดงดังตารางที่ 2.2 เมื่อเปรียบเทียบตารางที่ 2.1 และ 2.2 พบว่า โรงไฟฟ้ากาลินามีกำลังไฟฟ้าสุทธิกับประสิทธิภาพเชิงความร้อนที่น้อยกว่าโรงไฟฟ้าไออาร์ซี

จากการศึกษาของ Rodriguez et al. (2013) ได้ศึกษาเปรียบเทียบระหว่าง โรงไฟฟ้าไออาร์ซี กับโรงไฟฟ้ากาลินา โดยพบว่ากำลังไฟฟ้าสุทธิที่ผลิตได้ของโรงไฟฟ้าวัฏจักรกาลินามากกว่าโรงไฟฟ้าไออาร์ซีถึง 18% นอกจากนี้อัตราการไหลของสารทำงานของโรงไฟฟ้าวัฏจักรกาลินามีค่าน้อยกว่าโรงไฟฟ้าไออาร์ซีถึง 37% ซึ่งส่งผลถึงการเลือกอุปกรณ์ในระบบที่ขนาดเล็กลง รวมถึงค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาอุปกรณ์ของโรงไฟฟ้าวัฏจักรกาลินาน้อยกว่าโรงไฟฟ้าไออาร์ซีถึง 18%

ตารางที่ 2.1 ผลการจำลองของโรงไฟฟ้าไออาร์ซีเมื่อออกแบบให้ผลิตกำลังไฟฟ้าสุทธิสูงสุด

Working fluid	$T_3$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	$\dot{W}_{net}$ (kW)	$\eta_{th}$ (%)	$\eta_{ex}$ (%)
R1234yf	84	1816	7.787	34.37
n-butane	76.32	1450	7.72	27.44
Isobutene	77.33	1479	7.715	28
Propane	86.9	1635	8.318	30.95
R134a	94.9	1448	9.19	27.4
R152a	77.77	1476	7.806	27.94
Ammonia	75.53	1377	7.883	26.07

ตารางที่ 2.2 ผลการจำลองของโรงไฟฟ้ากาลินาเมื่อออกแบบให้ผลิตกำลังไฟฟ้าสุทธิสูงสุด

Ammonia concentration	$T_5$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	$P_5$ (bar)	$\dot{W}_{net}$ (kW)	$\eta_{th}$ (%)	$\eta_{ex}$ (%)
60%	109	18.14	1046	6.243	19.79
75%	109	26.47	1165	6.885	22.06
90%	109	32.34	1321	7.549	25

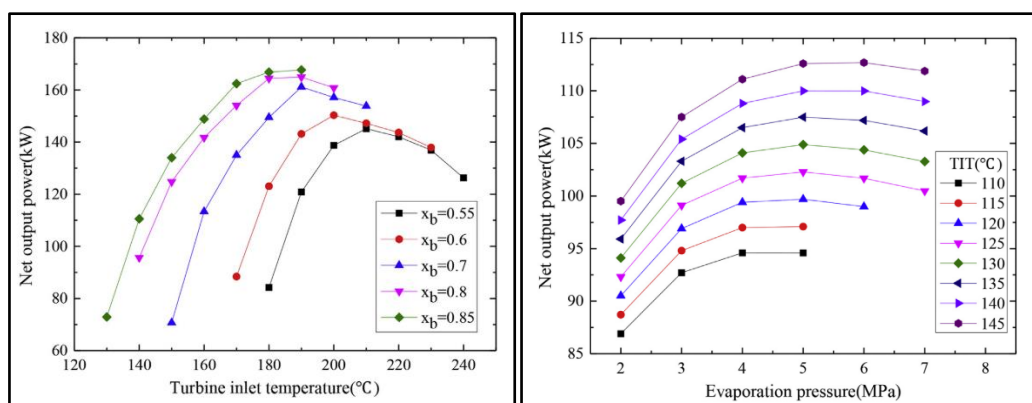
Pan et al. (2017) ทำการจำลองโรงไฟฟ้ากาลินาและโรงไฟฟ้าไออาร์ซีโดยพิจารณาที่แหล่งความร้อนที่ระดับกลาง โดยจากการค้นคว้า พบว่าโรงไฟฟ้ากาลินามีประสิทธิภาพเชิงความร้อนที่มากกว่าโรงไฟฟ้าไออาร์ซี เมื่อใช้อุณหภูมิแหล่งความร้อนที่ระดับสูง และโรงไฟฟ้าไออาร์ซีจะมีประสิทธิภาพเชิงความร้อนที่มากกว่า จึงได้ทำการจำลองที่แหล่งความร้อนระดับต่ำ ซึ่งเป็นการจำลองผ่านโปรแกรมการคำนวณ จากการจำลองพบว่าเมื่อทำการเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าสุทธิที่ผลิตได้ของโรงไฟฟ้าทั้ง 2 ประเภท สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.9 ซึ่งโรงไฟฟ้ากาลินา สามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้เท่ากับ 170 kW โดยมากกว่าโรงไฟฟ้าไออาร์ซีที่ผลิตได้เพียง 110 kW และการ

เปรียบเทียบประสิทธิภาพเชิงความร้อน แสดงดังรูปที่ 2.10 ซึ่งโรงไฟฟ้าโออาร์ซีมีค่ามากกว่าโรงไฟฟ้าคาลินา เมื่อโรงไฟฟ้าทั้ง 2 ประเภทมีค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อน เท่ากับ 31% และ 22% ตามลำดับ

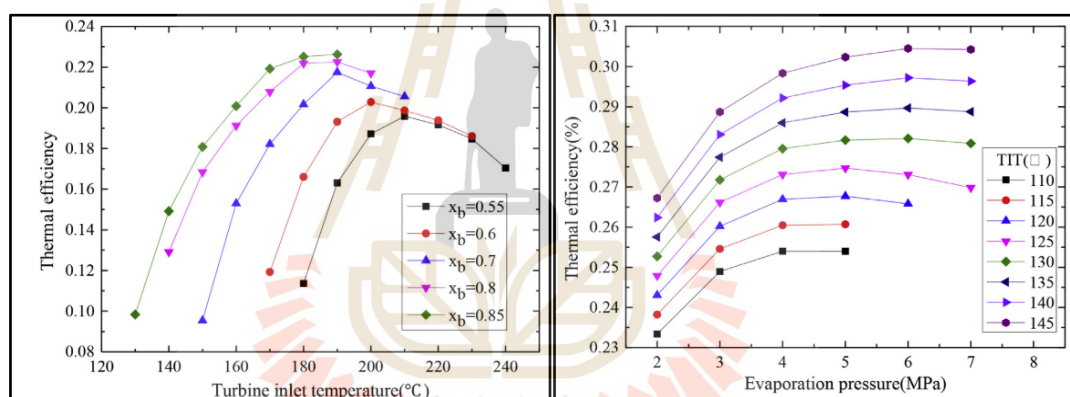
Walraven et al. (2013) ทำการเปรียบเทียบระหว่างโรงไฟฟ้าคาลินากับโรงไฟฟ้าโออาร์ซี ศึกษาที่แหล่งความร้อนใต้พิภพอุณหภูมิระดับต่ำ (100 – 150°C) พบว่าโรงไฟฟ้าคาลินามีประสิทธิภาพที่มากกว่าโรงไฟฟ้าโออาร์ซีทั้งแบบขับเคลื่อนและแบบเทอร์โมไดนามิกส์ เมื่อเป็นกรณีที่ออกแบบให้อุณหภูมิทางออกของแหล่งความร้อนเท่ากัน นอกจากนี้ ได้ทำการศึกษาที่แหล่งความร้อน 70°C พบว่า โรงไฟฟ้าทั้ง 3 ประเภทมีประสิทธิภาพของโรงไฟฟ้าที่ใกล้เคียงกัน

การศึกษาของ Fiaschi et al. (2017) ศึกษาและเปรียบเทียบระหว่างโรงไฟฟ้าโออาร์ซีกับโรงไฟฟ้าวัฏจักรคาลินา โดยแหล่งความร้อนที่ทำการศึกษาและพิจารณา คือ แหล่งความร้อนใต้พิภพ โดยศึกษาที่แหล่งความร้อนที่ระดับต่ำที่อุณหภูมิ 120°C กับแหล่งความร้อนระดับกลางที่อุณหภูมิ 212°C พบว่า กำลังไฟฟ้าสุทธิที่ผลิตได้ของโรงไฟฟ้าคาลินามีค่า 645 kW ในขณะที่โรงไฟฟ้าโออาร์ซีมีค่าเพียง 483 kW จึงส่งผลให้ค่าประสิทธิภาพตามกฎของเทอร์โมไดนามิกส์ทั้งข้อที่ 1 และ 2 ของโรงไฟฟ้าวัฏจักรคาลินามากกว่าโดยมีค่าเท่ากับ 12.89% และ 57.09% โดยประสิทธิภาพตามกฎของเทอร์โมไดนามิกส์ทั้งข้อที่ 1 และ 2 ของโรงไฟฟ้าโออาร์ซีมีค่าเพียง 9.66% และ 42.76% ซึ่งน้อยกว่าโรงไฟฟ้าวัฏจักรคาลินา อย่างไรก็ตามที่อุณหภูมิแหล่งความร้อนที่ระดับกลาง ผลลัพธ์กลับตรงกันข้าม คือ โรงไฟฟ้าคาลินามีกำลังไฟฟ้าสุทธิเพียง 5.9 MW ซึ่งน้อยกว่าของโรงไฟฟ้าโออาร์ซีที่มีค่าถึง 6.24 MW ส่งผลให้ค่าของประสิทธิภาพตามกฎของเทอร์โมไดนามิกส์ทั้งข้อที่ 1 และ 2 น้อยกว่าโรงไฟฟ้าโออาร์ซี เมื่อประสิทธิภาพตามกฎของเทอร์โมไดนามิกส์ทั้งข้อที่ 1 และ 2 ของโรงไฟฟ้าวัฏจักรคาลินาเท่ากับ 16.84% และ 57.31% ตามลำดับ โดยประสิทธิภาพตามกฎของเทอร์โมไดนามิกส์ ทั้งข้อที่ 1 และ 2 ของโรงไฟฟ้าโออาร์ซี มีค่าถึง 17.55% และ 59.43% ตามลำดับ

นอกจากนี้ ได้มีนักวิจัยได้ศึกษาวิธีการปรับปรุงโรงไฟฟ้าคาลินาให้ผลิตไฟฟ้าได้มากขึ้น โดยเป็นการปรับความดันที่คอนเดนเซอร์ให้สอดคล้องกับอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อม โดยเรียกวิธีการนี้ว่า sliding condensation pressure



รูปที่ 2.9 การเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าสุทธิของโรงไฟฟ้าถ่านหิน (ซ้าย) กับอุณหภูมิทางเข้าเทอร์ไบน์ และกำลังไฟฟ้าสุทธิของโรงไฟฟ้าไออาร์ซี (ขวา) กับความดันในระบบ (Pan et al., 2017)



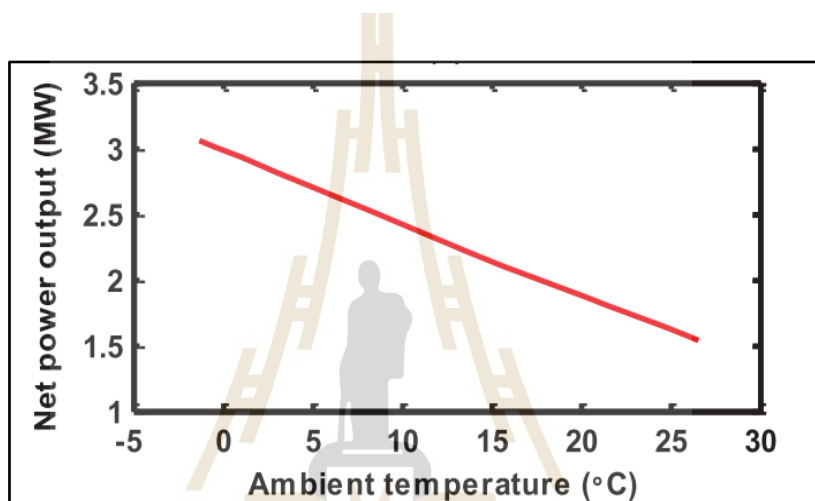
รูปที่ 2.10 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพเชิงความร้อนของโรงไฟฟ้าถ่านหิน (a) กับอุณหภูมิทางเข้าเทอร์ไบน์และกำลังไฟฟ้าสุทธิของโรงไฟฟ้าไออาร์ซี (b) กับความดันในระบบ (Pan et al., 2017)

## 2.5 Sliding condensation pressure

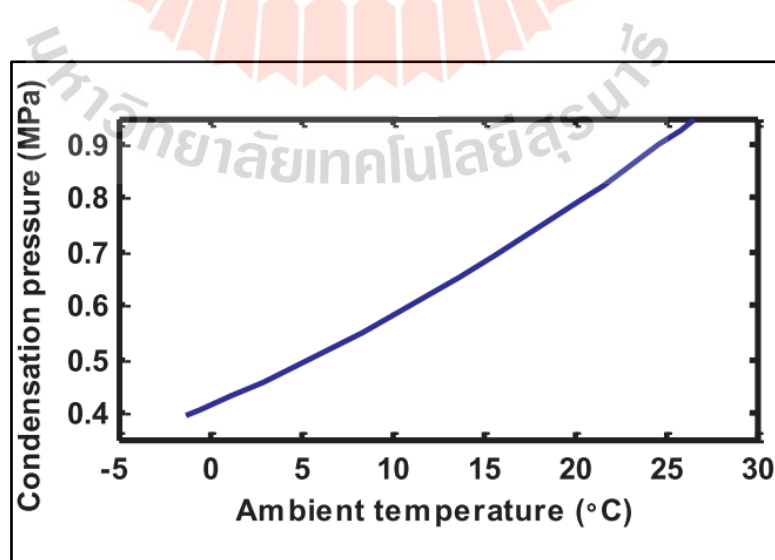
สำหรับวิธีการดังกล่าว เป็นการเพิ่มกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ให้มากขึ้น โดยการปรับความดันที่บริเวณคอนเดนเซอร์ให้อุณหภูมิสำหรับการควบแน่นของสารทำงาน สอดคล้องกับอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อม ซึ่งจากวิธีการดังกล่าวมีนักวิจัยหลายท่านได้ทำการศึกษา เช่น

Wang & Yu (2017) ได้ศึกษาการจำลองและปรับปรุงโรงไฟฟ้าถ่านหินโดยนำเสนอว่า ใน การออกแบบเพื่อจำลองการสร้างโรงไฟฟ้า ส่วนใหญ่เลือกที่จะใช้อากาศของสิ่งแวดล้อมมาระบาย

ความร้อนที่เกิดขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับอุณหภูมิบรรยากาศ นอกจากนี้ อุณหภูมิของสภาพแวดล้อมที่มีการเปลี่ยนแปลง ส่งผลกระทบต่อกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้สังเกตจากรูปที่ 2.11 เนื่องจากการเพิ่มของอุณหภูมิสภาพแวดล้อม จะทำให้ความดันในการควบแน่นของระบบเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย โดยมีลักษณะความสัมพันธ์เป็นแบบแปรผกผันตรงกันแสดงดังรูปที่ 2.12 โดยพบว่าการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิของสภาพแวดล้อมจาก 5 – 25°C ทำให้กำลังไฟฟ้าผลิตได้ลดลงจาก 2.7 MW เหลือ 1.5 MW ซึ่งในการออกแบบโรงไฟฟ้าจะใช้อุณหภูมิที่สูงสุดภายในปีนั้นมาออกแบบการวางสร้างซึ่งจะทำให้ปริมาณไฟฟ้าที่ผลิตได้น้อยกว่าสภาวะความเป็นจริง



รูปที่ 2.11 อิทธิพลของอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมต่อกำลังไฟฟ้าสุทธิ (Wang & Yu, 2017)



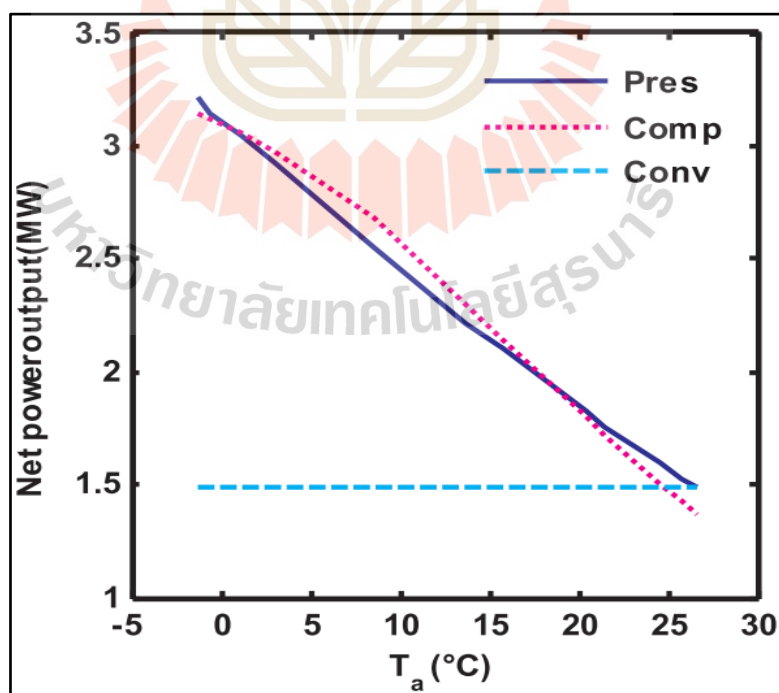
รูปที่ 2.12 อิทธิพลของอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมต่อความดันในการควบแน่น (Wang & Yu, 2017)



จากกรณีดังกล่าว จึงได้ทำการสร้างแบบจำลองเพื่อให้ระบบสามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้สูงสุด ตามอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมที่เปลี่ยนไป โดยเป็นการจำลองดังกล่าวเป็นการทำให้โรงไฟฟ้าสามารถปรับเปลี่ยนความดันในการควบแน่น ให้สอดคล้องกับอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อมซึ่งผลจากการจำลองแสดงดังรูปที่ 2.13

จากรูปที่ 2.13 เป็นการพิจารณาถึงกำลังไฟฟ้าสุทธิเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อมที่เปลี่ยนแปลงไป โดยเป็นการเปรียบเทียบ 3 กรณี คือ 1. การออกแบบโรงไฟฟ้าคาถินาแบบทั่วไปแสดงดั่งเส้นประสีฟ้า 2. การออกแบบโรงไฟฟ้าให้สอดคล้องกับอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมแสดงดั่งเส้นประสีชมพู 3. การออกแบบโรงไฟฟ้าโดยใช้วิธีการปรับความดันในการควบแน่นแสดงดั่งเส้นทึบสีน้ำเงิน ซึ่งพบว่าวิธีการปรับความดันในการควบแน่น ระบบดังกล่าวสามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้ใกล้เคียงกับระบบที่ออกแบบให้สอดคล้องกับอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม ดังนั้นอาจเพียงพอในการปรับความดันในการควบแน่นเพียงอย่างเดียว เพื่อให้ระบบยังคงผลิตกำลังไฟฟ้าได้สูงสุด

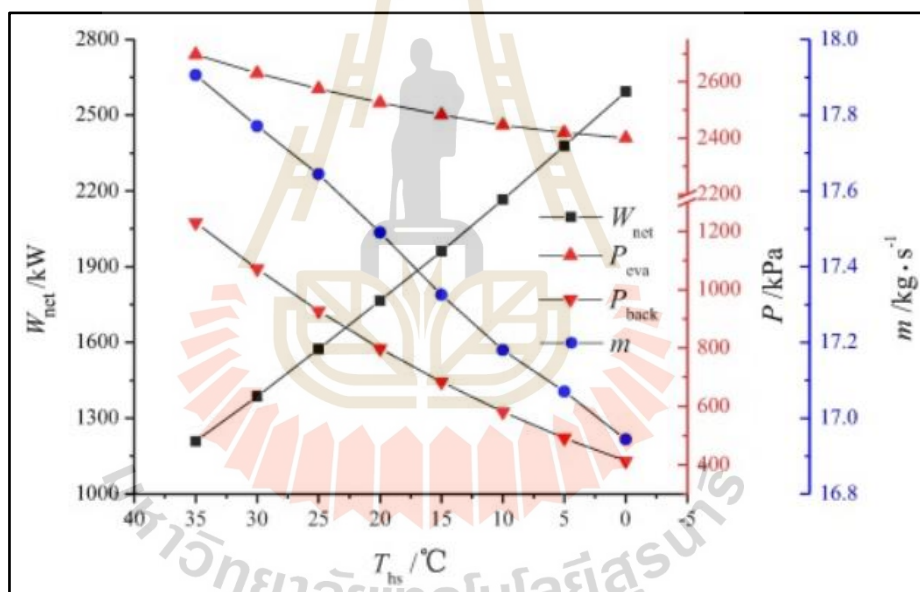
อย่างไรก็ตาม จากภูมิประเทศดังกล่าวเป็นได้หวนซึ่งมีค่าของช่วงอุณหภูมิสูงสุดกับต่ำสุดที่มีความแตกต่างอย่างมาก เมื่อเทียบกับความแตกต่างของอุณหภูมิสูงสุดกับต่ำสุดของบางพื้นที่ ดังนั้นวิธีการนี้อาจไม่เหมาะสมกับทุกภูมิประเทศที่ไม่ได้ทำการศึกษา



รูปที่ 2.13 การเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าสุทธิเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนไป (Wang & Yu, 2017)

สำหรับการศึกษาของ Li et al.(2016) ได้ศึกษาวิธีการ sliding condensation pressure โดยศึกษาภายใต้เงื่อนไขที่อนุญาตให้ค่าของอัตราการไหลของสารทำงาน ( $m$ ) ความดันที่เข้าเทอร์ไบน์ ( $P_{\text{evap}}$ ) และความดันในการควบแน่น ( $P_{\text{back}}$ ) สามารถปรับเปลี่ยนได้ โดยอุณหภูมิของแหล่งความร้อนที่ทำการศึกษาในกรณีนี้มีค่าเท่ากับ  $120^{\circ}\text{C}$  ซึ่งจากผลการจำลองแสดงได้ดังรูปที่ 2.14

จากรูปที่ 2.14 พบว่า เมื่ออุณหภูมิของสิ่งแวดล้อมลดลงจาก  $35$  เป็น  $0^{\circ}\text{C}$  ส่งผลให้ความดันในการระเหยลดลงจาก  $1,200$  เป็น  $400$  kPa อัตราการไหลของสารทำงานลดลงจาก  $17.9$  เป็น  $16.9$  kg/s และความดันในการระเหยลดลงจาก  $2,700$  เป็น  $2,400$  kPa ส่งผลให้กำลังไฟฟ้าเพิ่มจาก  $1.2$  เป็น  $2.6$  MW โดยพบว่า ตัวแปรที่มีผลต่อการปรับการทำงานให้สอดคล้องกับอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมได้แก่ ความดันในการควบแน่น เนื่องจากตัวแปรต่าง ๆ มีการเปลี่ยนแปลงที่น้อย เมื่อเทียบกับการเปลี่ยนของความดันในการควบแน่น



รูปที่ 2.14 การเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าสุทธิ ความดันในการควบแน่น ความดันในการระเหย อัตราการไหลของสารทำงาน (Li et al., 2016)

จากรายงานวิจัยที่กล่าวมา โรงไฟฟ้าโออาร์ซีและโรงไฟฟ้าคาลินา มีความสามารถในการทำงานที่ใกล้เคียงกัน และ โรงไฟฟ้าทั้ง 2 ชนิดมีความเหมาะสมกับแหล่งความร้อนที่แตกต่างกัน อย่างไรก็ตาม ความแตกต่างระหว่างงานวิจัยกับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้คือ พื้นที่ที่ทำการศึกษาซึ่งส่งผลต่ออุณหภูมิสิ่งแวดล้อมแตกต่างกัน โดยวิทยานิพนธ์นี้ใช้อุณหภูมิของสิ่งแวดล้อมของประเทศไทย และทำการจำลองออกแบบโรงไฟฟ้าคาลินา โดยได้เปรียบเทียบกับโรงไฟฟ้าโออาร์ซีที่กลุ่มวิจัยได้



ทำการศึกษามาก่อนหน้านี้ และออกแบบให้สามารถผลิตกำลังไฟฟ้าสุทธิได้สูงสุด โดยทำการเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าสุทธิของโรงไฟฟ้าคาลินากับโรงไฟฟ้าโออาร์ซี โดยพิจารณาที่อุณหภูมิแหล่งความร้อนอยู่ในช่วง 100 - 300°C และใช้อุณหภูมิสภาพแวดล้อมของ จ.นครราชสีมาเป็นข้อมูลอ้างอิงในการจำลอง ลำดับถัดไปนำเสนอ โรงไฟฟ้าคาลินาจำลองที่อุณหภูมิแหล่งความร้อนเท่ากับ 100 °C ซึ่งอ้างอิงจากอุณหภูมิของน้ำร้อนที่ใช้ทำความสะอาดของโรงเผาขยะติดเชื้อของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี และจำลองเพื่อหาเงื่อนไขในการทำงานของโรงไฟฟ้าคาลินาในเบื้องต้น ต่อมาวิเคราะห์การทำงานของโรงไฟฟ้าคาลินาเมื่อ อุณหภูมิสิ่งแวดล้อมของจ.นครราชสีมา มีการเปลี่ยนแปลงภายในระยะเวลา 1 ปี ของปี พ.ศ.2562 และทำการปรับปรุงกำลังไฟฟ้าให้ผลิตได้สูงสุดในแต่ละอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อมที่เปลี่ยนแปลง รวมถึงพิจารณาถึงเงื่อนไขในการทำงานที่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อม



## บทที่ 3

### วิธีการดำเนินการวิจัย

#### 3.1 บทนำ

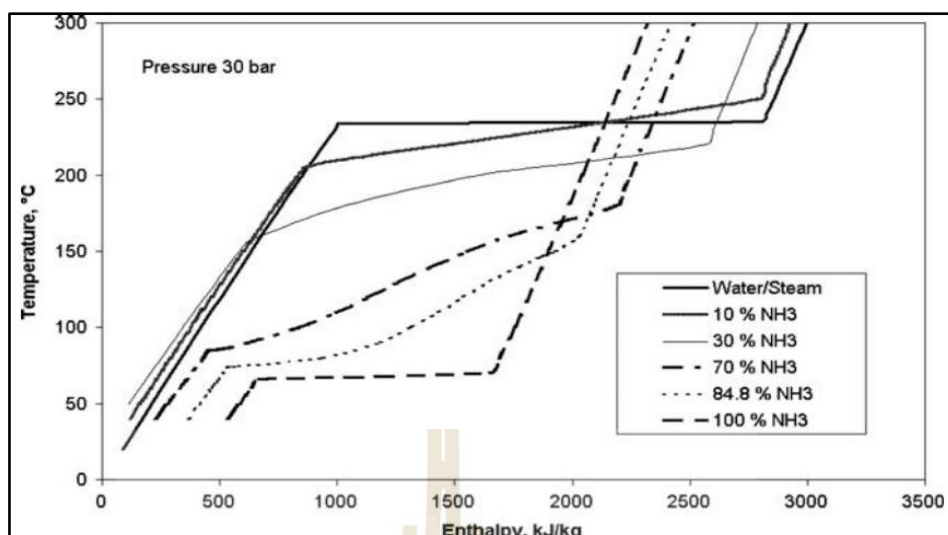
วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ทำการศึกษาและวิเคราะห์การออกแบบโรงไฟฟ้าวัฏจักรคาลินาเพื่อหากลยุทธ์ที่เหมาะสม คือ สามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้สูงสุดที่อุณหภูมิสภาพแวดล้อมต่าง ๆ โดยทำการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ร่วมกับโปรแกรม MATLAB และ NIST REFPROP จากนั้นตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรมแบบจำลองดังกล่าว ผ่านการสอบเทียบกับแหล่งข้อมูลที่นำเชื่อถือ และนำโปรแกรมการจำลองที่ผ่านการสอบเทียบมาทำการจำลองเพื่อหาเงื่อนไขในการทำงานของโรงไฟฟ้าคาลินาที่จ.นครราชสีมา โดยใช้อุณหภูมิสูงสุดในปีพ.ศ. 2562 มาออกแบบ และทำการศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมที่เปลี่ยนแปลงเพื่อหาเงื่อนไขการทำงานของโรงไฟฟ้าคาลินาให้ผลิตกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่อุณหภูมิสิ่งแวดล้อมต่าง ๆ ของจ. นครราชสีมา

#### 3.2 แหล่งความร้อน

สำหรับแหล่งความร้อนที่ทำการศึกษาเป็นแหล่งความร้อนจากน้ำร้อนของโรงเผาขยะติดเชื้อ โดยน้ำร้อนนี้ใช้มาเชื้อโรคซึ่งมีอุณหภูมิ 100 °C

#### 3.3 สารทำงาน

Zhang et al. ได้ศึกษาเกี่ยวกับลักษณะการทำงานของโรงไฟฟ้าคาลินา โดยพบว่าโรงไฟฟ้าคาลินา ถูกออกแบบมาให้ใช้สารทำงานที่เป็นสารผสมระหว่างแอมโมเนียผสมน้ำ เนื่องจากเป็นสารที่ปลอดภัยต่อสิ่งแวดล้อม นอกจากนี้คุณสมบัติของสารผสมของสารดังกล่าวจะมีคุณสมบัติที่เรียกว่า temperature guide ซึ่งจะเพิ่มประสิทธิภาพทางเทอร์โมไดนามิกส์ ซึ่งการปรับเปลี่ยนความเข้มข้นของสารทำงาน จะทำให้ลักษณะของ temperature guide เปลี่ยนตามไปด้วย หรือก็คือ การเปลี่ยนความเข้มข้นของสารทำงานจะเปลี่ยนอุณหภูมิกับความดันที่ทำให้สารทำงานเกิดการกลั่นตัวหรือระเหยตัว ซึ่งลักษณะของการเกิด temperature guide แสดงดังรูปที่ 3.1 จากคุณสมบัติดังกล่าวทำให้สารทำงานสามารถเปลี่ยนคุณสมบัติให้สอดคล้องกับอุณหภูมิของแหล่งความร้อนหรืออุณหภูมิสภาพแวดล้อมดังนั้น สำหรับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการเลือกสารทำงานในระบบเป็นแอมโมเนียผสมน้ำ



รูปที่ 3.1 ลักษณะการเกิด temperature guide เมื่อเปลี่ยนความเข้มข้นของสารทำงาน (Ogriseck,2009)

### 3.4 แหล่งรับความร้อน

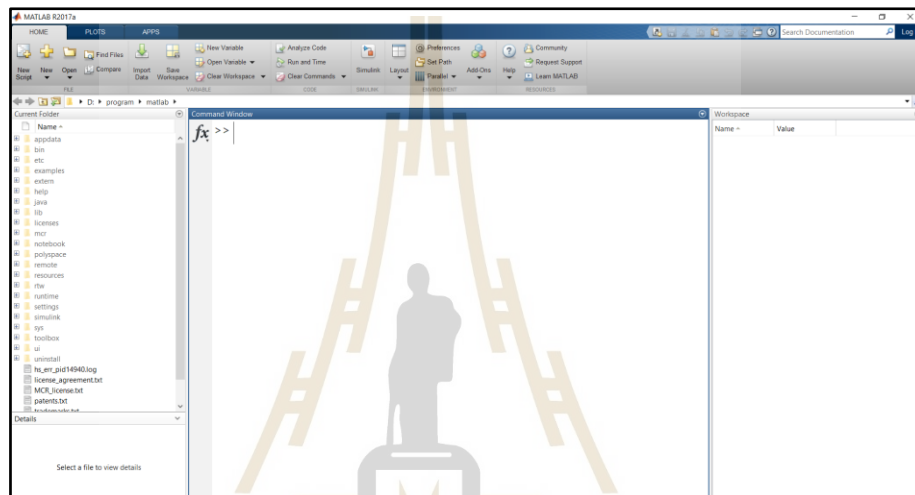
สำหรับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เลือกแหล่งรับความร้อนเป็นน้ำ โดยอุณหภูมิของน้ำนั้นได้มีการตั้งสมมติฐานว่าเท่ากับอุณหภูมิของสภาพแวดล้อม ซึ่งสอดคล้องกับนักวิจัยหลายท่าน เช่น Saffari et al. (2016), Nemati et al. (2017) ทั้งนี้สำหรับพื้นที่การจำลองใช้จังหวัดนครราชสีมา จึงได้นำข้อมูลอุณหภูมิของจังหวัดนครราชสีมาเป็นตัวแทนของอุณหภูมิน้ำ โดยข้อมูลอุณหภูมิเป็นข้อมูลจากกรมอุตุนิยมวิทยาตั้งแต่วันที่ 1 มกราคม – 31 ธันวาคม 2562 โดยนำข้อมูลอุณหภูมิในเวลา 10.00น. 13.00น. 16.00น. มาทำการวิเคราะห์ โดยช่วงเวลาดังกล่าวเป็นตัวแทนเวลาในการทำงานสำหรับการผลิตไฟฟ้า

### 3.5 แบบจำลอง

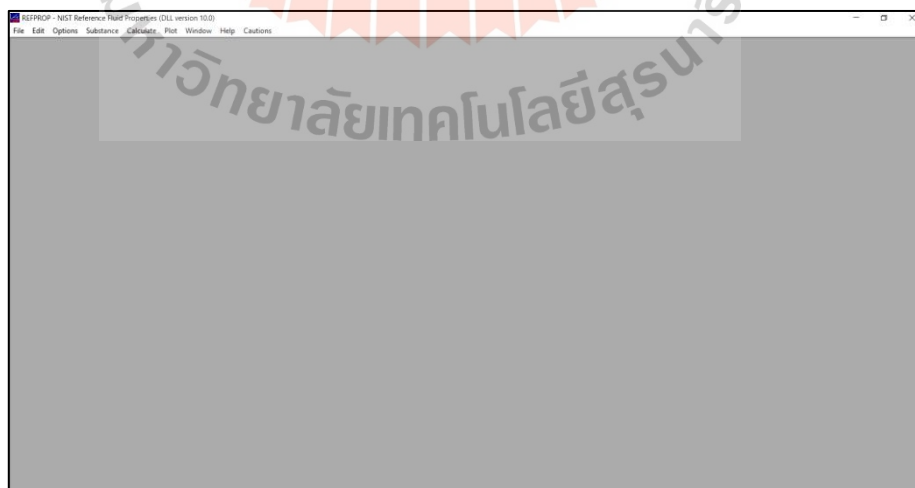
วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการศึกษางานของโรงไฟฟ้าคาถา โดยออกแบบให้โรงไฟฟ้าผลิตกำลังไฟฟ้าได้สูงสุดเมื่ออุณหภูมิของสภาพแวดล้อมเปลี่ยนแปลง ซึ่งการศึกษาดังกล่าว เป็นการศึกษาผ่านการจำลอง โดยโปรแกรมที่ใช้ในการจำลอง เ็นโปรแกรมที่ใช้ในการจำลอง แสดงดังต่อไปนี้

### 3.5.1 เครื่องมือในการจำลอง

สำหรับในการใช้จำลองโรงไฟฟ้าคาถินาทำการใช้โปรแกรม Matrix laboratory (MATLAB) R2017a เป็น โปรแกรมที่ใช้ในการคำนวณและจำลองการทำงานของระบบ ทำงานร่วมกับโปรแกรม NIST REFPROP version 10.0 เป็น โปรแกรมสำหรับการคำนวณคุณสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์ของสารทำงานในระบบ โดยลักษณะของหน้าต่างการทำงานทั้ง 2 โปรแกรมแสดงดังรูปที่ 3.2 และ 3.3



รูปที่ 3.2 หน้าต่างของโปรแกรม MATLAB



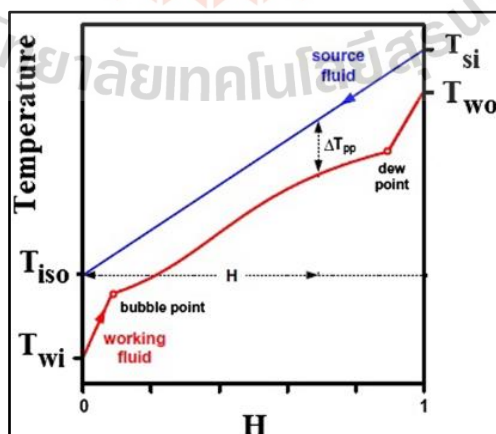
รูปที่ 3.3 หน้าต่างของโปรแกรม NIST REFPROP

### 3.5.2 ขั้นตอนการจำลองเชิงตัวเลขโรงไฟฟ้าคาลินา

สำหรับวิทยานิพนธ์นี้เป็นการจำลองการทำงานของโรงไฟฟ้าคาลินา เพื่อหาจุดที่ผลิตกำลังไฟฟ้าได้มากที่สุด ที่อุณหภูมิของสิ่งแวดล้อมนั้น ๆ โดยตั้งสมมติฐานให้อุณหภูมิของแหล่งรับความร้อนมีอุณหภูมิเท่ากับสิ่งแวดล้อม เนื่องจากมีนักวิจัยหลายท่านได้ทำการสมมุติให้อุณหภูมิของน้ำเท่ากับสิ่งแวดล้อมเพราะ เมื่อน้ำถูกเข้ามาใช้งานในระบบซึ่งก่อนเข้าระบบจะผ่านสิ่งแวดล้อมก่อน ทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนและทำให้อุณหภูมิของน้ำกับสิ่งแวดล้อมใกล้เคียงกัน

ในการจำลองนี้ เป็นการหาเงื่อนไขในการทำงานเพื่อให้ผลิตกำลังไฟฟ้าได้สูงสุด ที่อุณหภูมิที่สูงที่สุดในปีพ.ศ. 2562 ทำการออกแบบโรงไฟฟ้าคาลินา โดยโปรแกรมการจำลองจะหา ค่าของ ความดันในการระเหย (evaporation pressure,  $P_{\text{evap}}$ ) ความดันในการควบแน่น (condensation pressure,  $P_{\text{cond}}$ ) อัตราการไหลของสารทำงาน อัตราส่วนความเข้มข้นของสารทำงาน อุณหภูมิที่เข้าสู่เทอร์ไบน์ และ อุณหภูมิที่เข้าสู่รีคิพเพอร์เรเตอร์อุณหภูมิสูง

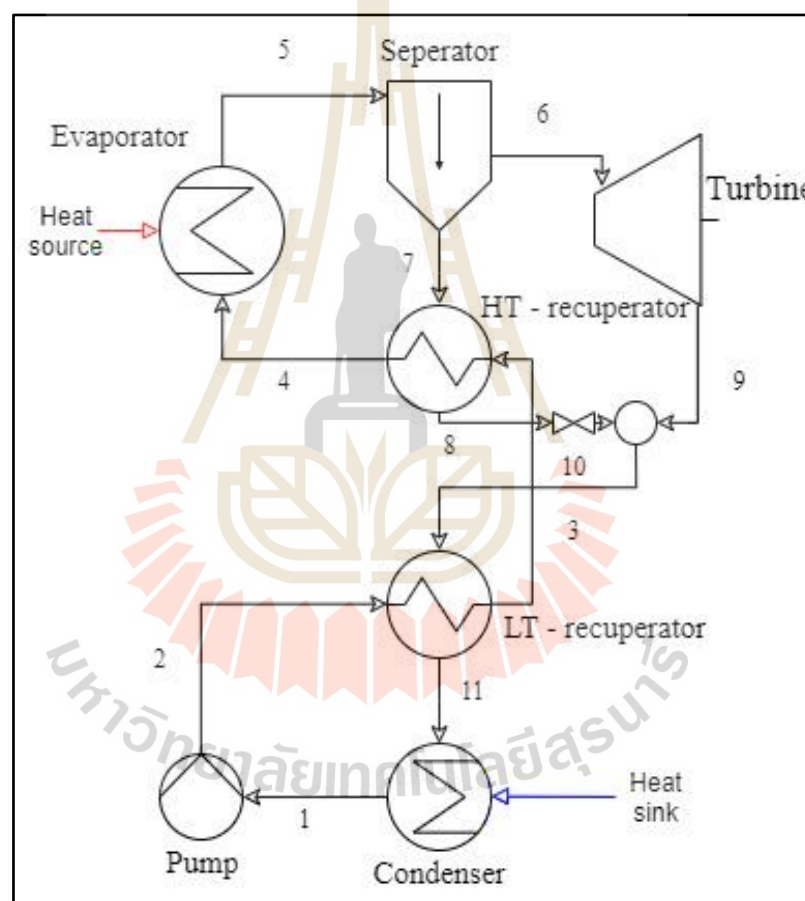
นอกจากให้เงื่อนไขในการจำลองคือ การผลิตกำลังไฟฟ้าได้สูงสุดแล้ว ยังเป็นการกำหนดให้ความแตกต่างของอุณหภูมิ (pinch point temperature) ของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนให้มีค่าเท่ากับ 10 ซึ่งค่าดังกล่าวเป็นการกำหนดขนาดของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนให้มีขนาดทั่วไป โดยมีวิธีการคือ แบ่งส่วนของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนเป็นหลายส่วน และพิจารณาความแตกต่างของอุณหภูมิต่ำสุดระหว่างสาร 2 ชนิดให้เท่ากับ 10 เช่น ในอิวเอปไอเรเตอร์เป็นการพิจารณาความแตกต่างระหว่าง น้ำร้อนกับแอมโมเนียที่ผสมกับน้ำ โดยลักษณะของการเกิด pinch point temperature ในอิวเอปไอเรเตอร์แสดงได้ดังรูป 3.4



รูปที่ 3.4 การเกิด pinch point temperature ในอิวเอปไอเรเตอร์ (Milani et al.,2019)

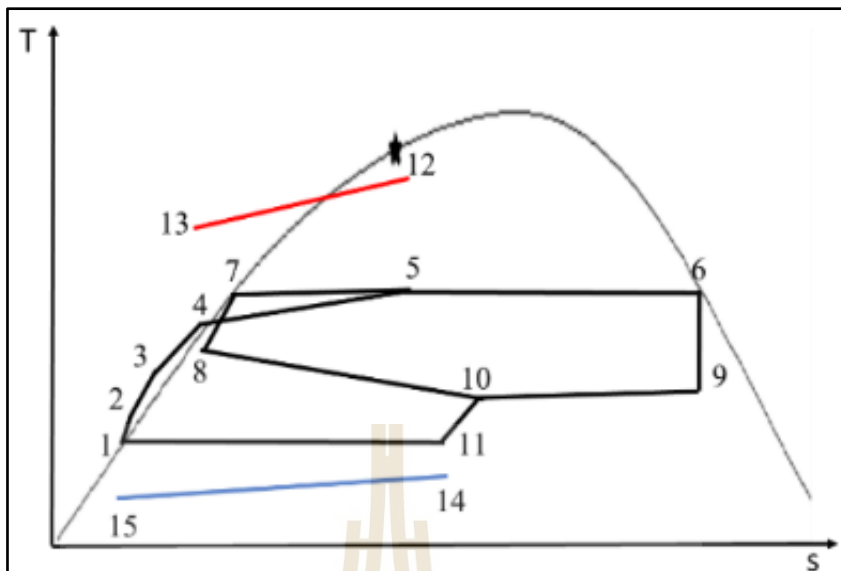
จากนั้นใช้วิธีการ sliding condensation pressure ปรับค่าความดันในการควบแน่นให้สอดคล้องกับอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมที่เปลี่ยนไป โดยค่าที่ได้รับผลกระทบจากการที่อุณหภูมิสิ่งแวดล้อมเปลี่ยนไป ได้แก่ ความดันในการควบแน่น อุณหภูมิที่เข้าสู่รีคูปเพอเรเตอร์อุณหภูมิสูง และค่าของอุณหภูมิของน้ำหล่อเย็นที่จะเปลี่ยนตามอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม นอกเหนือจากค่าที่กล่าวมา ให้เท่ากับค่าที่ได้จากการออกแบบที่อุณหภูมิที่ร้อนที่สุดในปีพ.ศ. 2562

สำหรับอุปกรณ์และลักษณะของ t-s diagram ของโรงไฟฟ้าคาลินาที่ทำการพิจารณา แสดงดังรูปที่ 3.5 และ 3.6 ตามลำดับ



รูปที่ 3.5 อุปกรณ์ของโรงไฟฟ้าคาลินา

จากรูปที่ 3.6 ซึ่งเป็นลักษณะการทำงานของโรงไฟฟ้าคาลินา โดยกระบวนการแรก สารทำงานจะเข้าสู่ปั๊มซึ่งแสดงยังหมายเลข 1 ทำให้ความดันของสารทำงานเพิ่มขึ้น และออกจากปั๊มดังตำแหน่งที่ 2



รูปที่ 3.6 T-s diagram ของโรงไฟฟ้าคาลินา

สำหรับการคำนวณพลังงานที่สารทำงานได้รับจากปั๊ม เป็นการคำนวณผ่านเอนทาลปีที่เปลี่ยนแปลงไปโดยค่าของเอนทาลปีตำแหน่งทางเข้าหาได้โดยใช้โปรแกรม NIST REFPROP สำหรับเอนทาลปีทางออกของปั๊มคำนวณผ่านค่าของ isentropic efficiency ของปั๊มที่ให้เท่ากับ 0.65 โดยเอนทาลปีที่ออกจากปั๊มคำนวณได้ดังสมการที่ 3.1 และพลังงานของปั๊มที่ให้สารทำงานแสดงดังสมการที่ 3.2

$$\eta_{isen,p} = \frac{(h_{2s} - h_1)}{(h_2 - h_1)} \tag{3.1}$$

$$W_p = m_{wf} (h_2 - h_1) \tag{3.2}$$

- |       |                    |  |
|-------|--------------------|--|
| เมื่อ | $\eta_{isen,p}$    | คือ isentropic efficiency ของปั๊มที่ให้เท่ากับ 0.65  |
|       | $h_1, h_2, h_{2s}$ | คือ เอนทาลปีของสารทำงานที่ตำแหน่ง 1, 2 และตำแหน่ง 2s เป็นกรณีที่มี isentropic efficiency ของปั๊มเท่ากับ 100%, J/kg |
|       | $W_p$              | คือ พลังงานไฟฟ้าที่จ่ายให้ปั๊ม, W  |
|       | $m_{wf}$           | คือ อัตราการไหลเชิงมวลของสารทำงาน, kg/s  |



เมื่อสารทำงานออกจากปั๊มจะเข้าสู่อุปกรณ์รีคูเพอเรเตอร์อุณหภูมิต่ำ แสดงดัง หมายเลข 2 และออกจากรีคูเพอเรเตอร์อุณหภูมิต่ำโดยสารทำงานจะมีอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากเกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนของสารทำงานที่ร่วมกันระหว่างสารทำงานที่ออกจากเทอร์ไบน์กับรีคูเพอเรเตอร์อุณหภูมิสูงดังหมายเลข 10 กับสารทำงานที่ออกจากปั๊ม (หมายเลขที่ 2) โดยพลังงานความร้อนที่เกิดขึ้นเกิดจากความแตกต่างของเอนทาลปีทางออกกับทางเข้า โดยคำนวณได้ดังสมการที่ 3.3 และ 3.4

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

$$Q_{LT} = m_{wf} (h_{10} - h_{11}) \quad (3.4)$$

เมื่อ  $Q_{LT}$  คือ อัตราการถ่ายเทความร้อนที่อุปกรณ์รีคูเพอเรเตอร์อุณหภูมิต่ำ, W

$h_2, h_3, h_{10}, h_{11}$  คือ เอนทาลปีของสารทำงานที่ตำแหน่ง 2, 3, 10, และ 11, J/kg

$m_{wf}$  คือ อัตราการไหลเชิงมวลของสารทำงาน, kg/s

หลังจากสารทำงานออกจากรีคูเพอเรเตอร์อุณหภูมิต่ำสารทำงานจะเข้าไปยังอุปกรณ์รีคูเพอเรเตอร์อุณหภูมิสูงดังหมายเลข 3 โดยแลกเปลี่ยนความร้อนกับสารทำงานที่ออกจากเซพารเตออร์ดังตำแหน่งที่ 7 โดยสารทำงานที่ออกจากอุปกรณ์รีคูเพอเรเตอร์อุณหภูมิสูงอุณหภูมิจะเพิ่มขึ้น และอัตราการแลกเปลี่ยนความร้อน คำนวณได้ดังสมการที่ 3.5 และ 3.6

$$Q_{HT} = m_{wf} (h_4 - h_3) \quad (3.5)$$

$$Q_{HT} = m_{wf,liquid} (h_7 - h_8) \quad (3.6)$$

เมื่อ  $Q_{HT}$  คือ อัตราการถ่ายเทความร้อนที่อุปกรณ์รีคูเพอเรเตอร์อุณหภูมิสูง, W

$h_3, h_4, h_7, h_8$  คือ เอนทาลปีของสารทำงานที่ตำแหน่ง 2, 3, 7, และ 8, J/kg



$m_{wf}$  คือ อัตราการไหลเชิงมวลของสารทำงาน, kg/s

$m_{wf,liquid}$  คือ อัตราการไหลเชิงมวลของสารทำงานที่เป็นสถานะของเหลว  
ที่แยกจากเซพพารเตอร์, kg/s

ลำดับถัดไป สารทำงานจะเข้าสู่อีแวปโปเรเตอร์ดังตำแหน่งที่ 4 เพื่อแลกเปลี่ยนความร้อนกับแหล่งความร้อนและออกจากอีแวปโปเรเตอร์เข้าสู่เซพพารเตอร์ เพื่อแยกสถานะของสารทำงานที่เป็นสารผสม (ระหว่างของเหลวกับแก๊ส) โดยสารที่มีสถานะแก๊สจะเข้าสู่เทอร์ไบน์ดังตำแหน่งที่ 6 และสารที่มีสถานะของเหลวจะเข้าสู่รีคิพเพอร์เรเตอร์อุณหภูมิสูง ดังตำแหน่งที่ 7 โดยอัตราการแลกเปลี่ยนความร้อนที่อีแวปโปเรเตอร์กับอัตราการไหลที่แยกออกจากเซพพารเตอร์คำนวณได้ดังสมการที่ 3.7 กับ 3.8

$$Q_{evap} = m_{wf} (h_5 - h_4) \quad (3.7)$$

$$m_{wf} X = m_{wf,liquid} X_{liquid} + m_{wf,vapor} X_{vapor} \quad (3.8)$$

เมื่อ  $Q_{evap}$  คือ อัตราการถ่ายเทความร้อนที่อุปกรณ์อีแวปโปเรเตอร์, W

$h_4, h_5$  คือ เอนทาลปีของสารทำงานที่ตำแหน่ง 4, และ 5, J/kg

$m_{wf}$  คือ อัตราการไหลเชิงมวลของสารทำงาน, kg/s

$m_{wf,liquid}$  คือ อัตราการไหลเชิงมวลของสารทำงานที่เป็นสถานะของเหลว  
ที่แยกจากเซพพารเตอร์, kg/s

$m_{wf,vapor}$  คือ อัตราการไหลเชิงมวลของสารทำงานที่เป็นสถานะแก๊สที่แยก  
จากเซพพารเตอร์, kg/s

$X$  คือ ความเข้มข้นของแอมโมเนียต่อน้ำ, %

$X_{liquid}$  คือ ความเข้มข้นของแอมโมเนียต่อน้ำที่เป็นสถานะของเหลวที่  
แยกจากเซพพารเตอร์, %

$X_{vapor}$  คือ ความเข้มข้นของแอมโมเนียต่อน้ำที่เป็นสถานะแก๊สที่แยก  
จากเซพพารเตอร์, %

สำหรับปริมาณไฟฟ้าที่เทอร์ไบน์ผลิตได้ คำนวณจากความแตกต่างของเอนทาลปีของจากสารทำงานที่เข้าเทอร์ไบน์กับออกจากเทอร์ไบน์ โดยเอนทาลปีที่ออกจากเทอร์ไบน์ คำนวณผ่านค่าของ isentropic efficiency ของเทอร์ไบน์ให้เท่ากับ 0.8 โดยเอนทาลปีที่ออกจากเทอร์ไบน์ คำนวณได้ดังสมการที่ 3.9 และพลังงานของเทอร์ไบน์ที่ผลิตได้แสดงดังสมการที่ 3.10

$$\eta_{isen,t} = \frac{(h_6 - h_9)}{(h_6 - h_{9s})} \quad (3.9)$$

$$W_t = m_{wf,liquid} (h_6 - h_9) \quad (3.10)$$

เมื่อ	$\eta_{isen,t}$	คือ isentropic efficiency ของเทอร์ไบน์ที่ให้เท่ากับ 0.8
	$h_6, h_9, h_{9s}$	คือ เอนทาลปีของสารทำงานที่ตำแหน่ง 6, 9 และตำแหน่ง 9s เป็น กรณี isentropic efficiency ของเทอร์ไบน์เท่ากับ 100%, J/kg
	$W_t$	คือ งานที่เทอร์ไบน์ผลิตได้, W
	$m_{wf,liquid}$	คือ อัตราการไหลเชิงมวลของสารทำงานที่เป็นสถานะแก๊สที่แยก จากเซฟพารเตอร์, kg/s

เพื่อให้สารทำงานทำงานเป็นระบบได้ สารทำงานที่ออกจากเทอร์ไบน์ต้องทิ้งความร้อนบางส่วน เพื่อทำให้สถานะของสารทำงานใกล้เคียงกับสถานะก่อนเข้าปั๊ม โดยได้ทิ้งความร้อนผ่านอุปกรณ์รีคูปเพอเรเตอร์อุณหภูมิต่ำ, รีคูปเพอเรเตอร์อุณหภูมิสูง ซึ่งความร้อนทิ้งจากทั้ง 2 อุปกรณ์คำนวณได้ดังสมการที่ 3.3 กับ 3.4 และอุปกรณ์สุดท้ายคือคอนเดนเซอร์โดยอัตราการถ่ายเทความร้อน สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 3.11

$$Q_{cond} = m_{wf} (h_{11} - h_1) \quad (3.11)$$

เมื่อ	$Q_{cond}$	คือ อัตราการถ่ายเทความร้อนที่อุปกรณ์คอนเดนเซอร์, W
	$h_1, h_{11}$	คือ เอนทาลปีของสารทำงานที่ตำแหน่ง 1, และ 11, J/kg
	$m_{wf}$	คือ อัตราการไหลเชิงมวลของสารทำงาน, kg/s

โดยสำหรับงานสุทธิที่ผลิตได้ของโรงไฟฟ้าคาถินา เป็นผลต่างระหว่างกำลังไฟฟ้าที่เทอร์ไบน์ผลิตได้กับกำลังไฟฟ้าที่ต้องจ่ายให้ปั๊ม โดยสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 3.12

$$W_{net} = W_t - W_p \quad (3.12)$$

เมื่อ	$W_{net}$	คือ พลังงานไฟฟ้าสุทธิที่โรงไฟฟ้าผลิตได้, W
	$W_t$	คือ พลังงานไฟฟ้าที่เทอร์ไบน์สร้าง, W
	$W_p$	คือ พลังงานไฟฟ้าที่จ่ายให้กับปั๊ม, W

นอกจากนี้ ประสิทธิภาพของโรงไฟฟ้าตามกฎข้อที่ 1 ทางเทอร์โมไดนามิกส์ได้ถูกพิจารณาดังสมการที่ 3.13

$$\eta_{th} = \frac{W_{net}}{Q_{evap}} \quad (3.13)$$

เมื่อ	$\eta_{th}$	คือ ประสิทธิภาพตามกฎข้อที่ 1 ทางเทอร์โมไดนามิกส์, %
	$W_{net}$	คือ พลังงานสุทธิที่โรงไฟฟ้าผลิตได้, W
	$Q_{evap}$	คือ อัตราการถ่ายเทความร้อนที่อุปกรณ์ฮีทเอ็กซ์เชนเจอร์, W

สำหรับการพิจารณาโรงไฟฟ้าลำดับถัดไป นำเสนอการพิจารณาการหาขนาดของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน (ฮีทเอ็กซ์เชนเจอร์, คอนเดนเซอร์, รีคูปเพอเรเตอร์อุณหภูมิต่ำ, และ รีคูปเพอเรเตอร์อุณหภูมิสูง) เพื่อความแม่นยำในการจำลองได้ทำการแบ่งการหาขนาดของอุปกรณ์เป็นส่วน ๆ และนำมารวมกัน โดยสมการที่เกี่ยวข้องในการหาขนาดของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแสดงดัง 3.14 – 3.21 ตามลำดับ

$$Q_{LT} = (UA)_{LT} \Delta T_{LM,LT} \quad (3.14)$$

$$\Delta T_{LM,LT} = \frac{(T_{11} - T_2) - (T_{10} - T_3)}{\log\left(\frac{(T_{11} - T_2)}{(T_{10} - T_3)}\right)} \quad (3.15)$$

$$Q_{HT} = (UA)_{HT} \Delta T_{LM,HT} \quad (3.16)$$

$$\Delta T_{LM,HT} = \frac{(T_7 - T_4) - (T_8 - T_3)}{\log\left(\frac{(T_7 - T_4)}{(T_8 - T_3)}\right)} \quad (3.17)$$

$$Q_{evap} = (UA)_{evap} \Delta T_{LM,evap} \quad (3.18)$$

$$\Delta T_{LM,evap} = \frac{(T_{h,out} - T_4) - (T_{h,in} - T_5)}{\log\left(\frac{(T_{h,out} - T_4)}{(T_{h,in} - T_5)}\right)} \quad (3.19)$$

$$Q_{cond} = (UA)_{cond} \Delta T_{LM,cond} \quad (3.20)$$

$$\Delta T_{LM,cond} = \frac{(T_{c,out} - T_{11}) - (T_{c,in} - T_1)}{\log\left(\frac{(T_{c,out} - T_{11})}{(T_{c,in} - T_1)}\right)} \quad (3.21)$$

- เมื่อ  $U$  คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม (overall heat transfer coefficient),  $W/m^2 \cdot K$
- $A$  คือ พื้นที่การแลกเปลี่ยนความร้อนของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน,  $m^2$
- $\Delta T_{LM}$  คือ ค่าเฉลี่ยของความแตกต่างอุณหภูมิ (log mean temperature difference),  $K$

โดยสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม Júnior et al. (2019) ได้เสนอค่าของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมของอุปกรณ์แต่ละชนิด ซึ่งเมื่อทราบค่าของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมส่งผลให้ทราบค่าของพื้นที่ในการแลกเปลี่ยนความร้อนหรือขนาดของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน สำหรับค่าของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมแสดงดังตารางที่ 3.1

นอกจากนี้ ได้ทำการพิจารณาขนาดของเทอร์ไบน์ผ่านการพิจารณาค่าของ อัตราการขยายของไอ (expansion ratio) โดยเป็นการนำอัตราการไหลที่ทางออกเทียบกับอัตราการไหลทางเข้า ซึ่งสมการที่ใช้ในการพิจารณากรณีดังกล่าว แสดงดังสมการที่ 3.22 - 3.24

ตารางที่ 3.1 ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแต่ละชนิด

อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม ( $W/m^2 \cdot K$ )
อีแวโปเรเตอร์	39.7
รีคูเปอร์เรเตอร์อุณหภูมิสูง	638.4
รีคูเปอร์เรเตอร์อุณหภูมิต่ำ, คอนเดนเซอร์	709.3

$$V_6 = \frac{m_{wf,liquid}}{\rho_6} \quad (3.22)$$

$$V_9 = \frac{m_{wf,liquid}}{\rho_9} \quad (3.23)$$

$$Ex_r = \frac{V_9}{V_6} \quad (3.24)$$

เมื่อ  $V_6, V_9$  คือ อัตราการไหลของสารทำงานที่ตำแหน่ง 6 และ 9,  $m^3/s$

$\rho_6, \rho_9$  คือ ความหนาแน่นของสารทำงานที่ตำแหน่ง 6 และ 9,  $kg/m^3$

$Ex_r$  คือ อัตราการขยายตัวของสารทำงานในเทอร์ไบน์ (Expansion ration)

สำหรับวิธีการคำนวณตัวแปรต่าง ๆ ในข้างต้น จะทำการตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรมการจำลอง โดยได้ทำการเทียบกับ Ogriseck (2009) และใช้เงื่อนไขจำลองที่เหมือนกัน ซึ่งแสดงดังตารางที่ 3.2 โดยได้เปรียบเทียบตัวแปรต่าง ๆ ที่เกิดจากการคำนวณ ได้แก่ พลังงานไฟฟ้าที่จ่ายให้กับปั๊ม, พลังงานไฟฟ้าที่เทอร์โบไบน์ผลิตได้, อุณหภูมิก่อนเข้าอีแวปโปเรเตอร์, อุณหภูมิที่ออกจากเทอร์โบไบน์, อุณหภูมิก่อนเข้าคอนเดนเซอร์, ความเข้มข้นของสารทำงานในสถานะแก๊สที่ออกจากเซพพารเตอร์, ความเข้มข้นของสารทำงานในสถานะของเหลวที่ออกจากเซพพารเตอร์, อัตราการไหลเชิงมวลที่เป็นสถานะแก๊สที่ออกจากเซพพารเตอร์, และอัตราการไหลเชิงมวลสถานะของเหลวที่ออกจากเซพพารเตอร์ โดยผลลัพธ์การตรวจสอบความถูกต้องแสดงดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.2 เงื่อนไขในการจำลองในกรณีการสอบเทียบกับ Ogriseck (2009)

Parameter	Value
อุณหภูมิของแหล่งความร้อนขาเข้า (°C)	124
อุณหภูมิของแหล่งความร้อนขาออก (°C)	80
อัตราการไหลเชิงมวลของแหล่งความร้อน (kg/s)	89
อัตราการไหลเชิงมวลของแอมโมเนียกับน้ำ (kg/s)	16.8
ความเข้มข้นของแอมโมเนีย (%)	82
ความดันที่เข้าเทอร์โบไบน์ (bar)	32.3
ความดันที่ออกเทอร์โบไบน์ (bar)	6.6
อุณหภูมิของแหล่งทิ้งความร้อนขาเข้า (°C)	5
อุณหภูมิของแหล่งทิ้งความร้อนขาออก (°C)	22
Isentropic efficiency ของเทอร์โบไบน์ (%)	87
Isentropic efficiency ของปั๊ม (%)	98
ประสิทธิภาพของเครื่องจักร (%)	98
ประสิทธิภาพของเครื่องผลิตไฟฟ้า (%)	96
ความดันที่สูญเสียระหว่างอุปกรณ์ (bar)	1
Pinch point temperature ของอีแวปโปเรเตอร์	6
Pinch point temperature ของคอนเดนเซอร์	5
Pinch point temperature ของรีคูปเพอเรเตอร์	3

เมื่อทำการตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรม ต่อมาทำการจำลองการออกแบบสร้างโรงไฟฟ้าคาถินาโดยใช้อุณหภูมิสูงสุดมาออกแบบ เพื่อหาเงื่อนไขในการทำงานเบื้องต้นรวมถึงขนาดของอุปกรณ์ต่าง ๆ จากนั้นใช้วิธีการ sliding pressure มาทำการปรับปรุงเงื่อนไขการทำงานของโรงไฟฟ้าคาถินาให้สามารถผลิตไฟฟ้าเพิ่มขึ้น โดยเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าสุทธิกับวิธีการสร้างโรงไฟฟ้าแบบเดิมโดยลำดับการจำลองมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

ตารางที่ 3.3 ผลลัพธ์การตรวจสอบความถูกต้องโดยเทียบกับ Ogriseck (2009)

Parameter	Case study	Ogriseck	ความคลาดเคลื่อน
พลังงานไฟฟ้าที่จ่ายให้กับปั๊ม (kW)	75.47	96.1	21.46
พลังงานไฟฟ้าที่เทอร์ไบน์ผลิต (kW)	2,234.4	2,194.8	1.8
อุณหภูมิก่อนเข้าฮีทเอ็กซ์เชนเจอร์ (°C)	60	63	4.76
อุณหภูมิที่ออกจากเทอร์ไบน์ (°C)	44	43	2.30
อุณหภูมิก่อนเข้าคอนเดนเซอร์ (°C)	34	30	13.33
ความเข้มข้นของสารทำงานในสถานะแก๊สที่ออกจากเซพารเตอร์ (%)	96.8	97.0	0.21
ความเข้มข้นของสารทำงานในสถานะของเหลวที่ออกจากเซพารเตอร์ (%)	52.6	50	5.2
อัตราการไหลเชิงมวลที่เป็นสถานะแก๊สที่ออกจากเซพารเตอร์ (kg/s)	11.5	11.4	0.88
อัตราการไหลเชิงมวลที่เป็นสถานะของเหลวที่ออกจากเซพารเตอร์ (kg/s)	5.3	5.4	1.85

### 1. การออกแบบโรงไฟฟ้าในขั้นเบื้องต้น

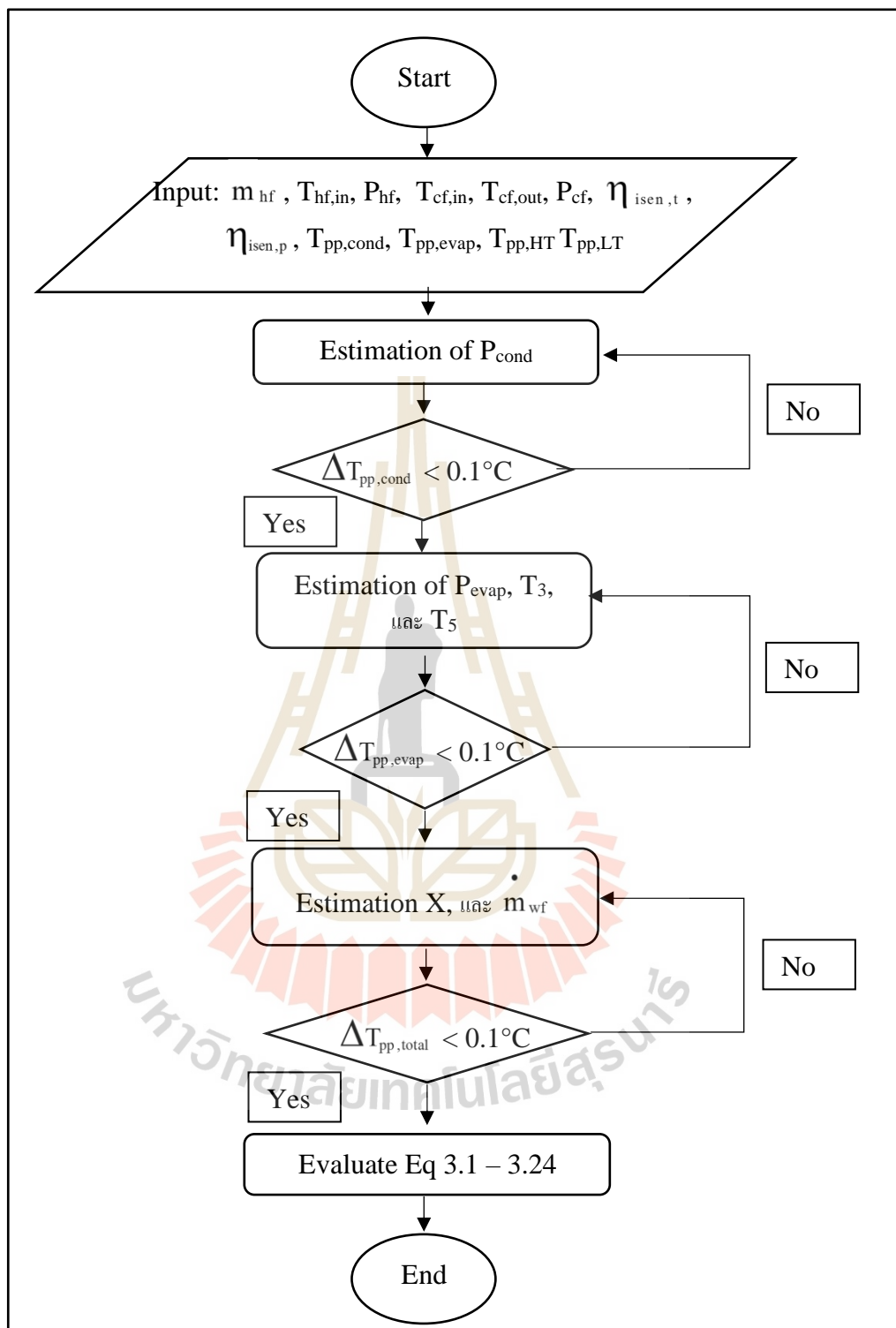
การออกแบบในกรณีดังกล่าว ทำการออกแบบให้โรงไฟฟ้าคาถินาทำงานอุณหภูมิที่สูงสุดของจ.นครราชสีมา โดยกระบวนการจำลองได้ใช้วิธีการ golden section ในการหาคำตอบของเงื่อนไขในการทำงาน ได้แก่ ความดันในการระเหย, ความดันในการควบแน่น, อุณหภูมิที่ออกจากเซพารเตอร์, อุณหภูมิที่เข้ารีคิเพอร์เรเตอร์อุณหภูมิสูง, ความเข้มข้นของสารทำงานในระบบ, และ อัตราการไหลเชิงมวลของระบบ โดยใช้โปรแกรม NIST REFPROP ในการคำนวณ

คุณสมบัติของสารทำงาน ซึ่งขั้นตอนการจำลองเงื่อนไขต่าง ๆ แสดงดังรูปที่ 3.7 และเงื่อนไขจำลองแสดงดังตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 เงื่อนไขในการจำลองของโรงไฟฟ้าคาลินาในการออกแบบเบื้องต้น

Parameter	Value
อุณหภูมิของแหล่งความร้อนขาเข้า (°C)	100
อัตราการไหลเชิงมวลของแหล่งความร้อน (kg/s)	1
ความดันของแหล่งความร้อน (bar)	2
อุณหภูมิของแหล่งทิ้งความร้อนขาเข้า (°C)	41
อุณหภูมิของแหล่งทิ้งความร้อนขาออก (°C)	51
Isentropic efficiency ของเทอร์ไบน์ (%)	80
Isentropic efficiency ของปั๊ม (%)	75
Pinch point temperature ของแต่ละอุปกรณ์	
อีแวนโปเรเตอร์	10
คอนเดนเซอร์	10
รีคูเปอร์เรเตอร์	10





รูปที่ 3.7 ขั้นตอนการจำลองของโรงไฟฟ้ากังหันไอน้ำในกรณีการออกแบบเบื้องต้น

เมื่อระบบจำลองได้ประเมินค่าของเงื่อนไขในการทำงานทุกค่าที่ได้กล่าวมาขึ้นต้น ลำดับถัดไปเป็นการตรวจสอบเงื่อนไขในการทำงานที่ระบบจำลองที่ได้ ว่าสามารถทำให้ค่าของ pinch point temperature difference ไม่เกินค่าของความคลาดเคลื่อนที่กำหนดหรือไม่ โดยค่าของความดันในการระเหย, อุณหภูมิที่ออกจากเซพาราเรเตอร์, อุณหภูมิที่เข้ารีคิฟเพอร์เรเตอร์, อุณหภูมิสูง, พิจารณา ค่าของ pinch point temperature difference ที่อีเวปโปเรเตอร์สำหรับความดันในการควบแน่นใช้ pinch point temperature difference ที่คอนเดนเซอร์ในการพิจารณา และอัตราการไหลเชิงมวลกับความเข้มข้นของสารทำงาน พิจารณา ค่าของ pinch point temperature difference ทั้ง 2 อุปกรณ์ในการพิจารณา หากเงื่อนไขดังกล่าวไม่สามารถทำให้ความคลาดเคลื่อนของ pinch point temperature difference ได้ตามกำหนด ระบบจำลองจะทำการประเมินเงื่อนไขในการทำงานใหม่อีกครั้ง จนกว่าจะได้ค่าความคลาดเคลื่อนที่กำหนดไว้

เมื่อระบบสามารถหาเงื่อนไขในการทำงาน และทำให้ความคลาดเคลื่อนของค่า pinch point temperature difference ได้ตามที่กำหนด ระบบจำลองทำการคำนวณค่าสมรรถนะของโรงไฟฟ้า เช่น กำลังไฟฟ้าสุทธิของระบบ, ประสิทธิภาพตามกฎข้อที่ 1 ของเทอร์โมไดนามิกส์, ขนาดของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน, ขนาดของเทอร์ไบน์ เป็นต้น

## 2. การออกแบบโรงไฟฟ้าโดยใช้วิธีการ sliding pressure

จากผลลัพธ์ของการออกแบบโรงไฟฟ้าเบื้องต้น ทำให้ทราบขนาดของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน นอกจากนี้จากการทดสอบของ Wang & Yu (2017) ที่ได้ศึกษาและได้ใช้วิธีการ sliding pressure โดยเป็นวิธีการปรับความดันในการควบแน่นให้สอดคล้องกับอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม จากวิธีการดังกล่าว จึงได้กำหนดให้ค่าของ อุณหภูมิที่เข้าเทอร์ไบน์ ความดันในการระเหย อัตราการไหลเชิงมวลของสารทำงาน และความเข้มข้นของสารทำงานเป็นค่าคงที่ ซึ่งค่าดังกล่าวเป็นผลลัพธ์จากการออกแบบเบื้องต้นที่ใช้อุณหภูมิสูงสุดในปีนั้นมาทำการออกแบบ

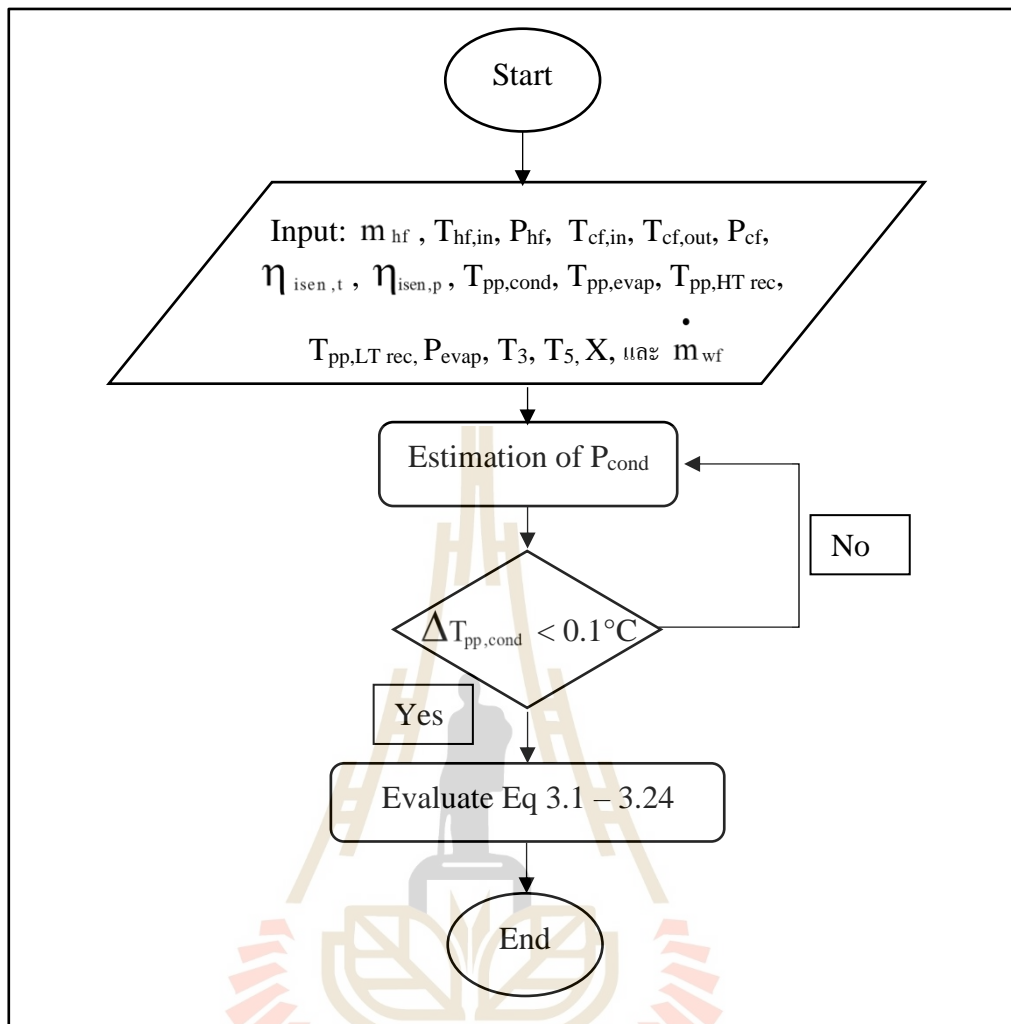
สำหรับการจำลองเพื่อปรับปรุงโรงไฟฟ้าคาถาที่ได้ออกแบบใช้วิธีการ sliding pressure จึงได้นำแนวคิดดังกล่าวมาประยุกต์ใช้ โดยให้ระบบจำลองทำการปรับความดันในการควบแน่นให้สอดคล้องกับอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม ซึ่งอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมมีผลทำให้อุณหภูมิของแหล่งความร้อนที่เปลี่ยนแปลง โดยได้กำหนดให้ค่าของอุณหภูมิที่เข้าเทอร์ไบน์, ความเข้มข้นของสารทำงาน, อัตราการไหลเชิงมวลของสารทำงาน, ความดันในการระเหย, ขนาดของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนของอุปกรณ์ทั้ง 4 ชนิดให้มีขนาดคงที่ โดยให้แบบจำลองคำนวณขนาดของอุปกรณ์และเปรียบเทียบกับขนาดของอุปกรณ์ที่ได้ออกแบบไว้ขึ้นต้น สำหรับขั้นตอนการจำลองในกรณีดังกล่าว แสดงดังรูปที่ 3.8

ซึ่งการจำลองดังกล่าวนี้ เป็นการจำลองที่ใช้อุณหภูมิของจ.นครราชสีมาในปี 2562 โดยเลือกอุณหภูมิเฉลี่ยของแต่ละเดือน ที่อยู่ในเวลา 10.00, 13.00, และ 16.00 มาทำการจำลอง โดยข้อมูลของอุณหภูมิที่ทำการจำลองแสดงดังตารางที่ 3.5

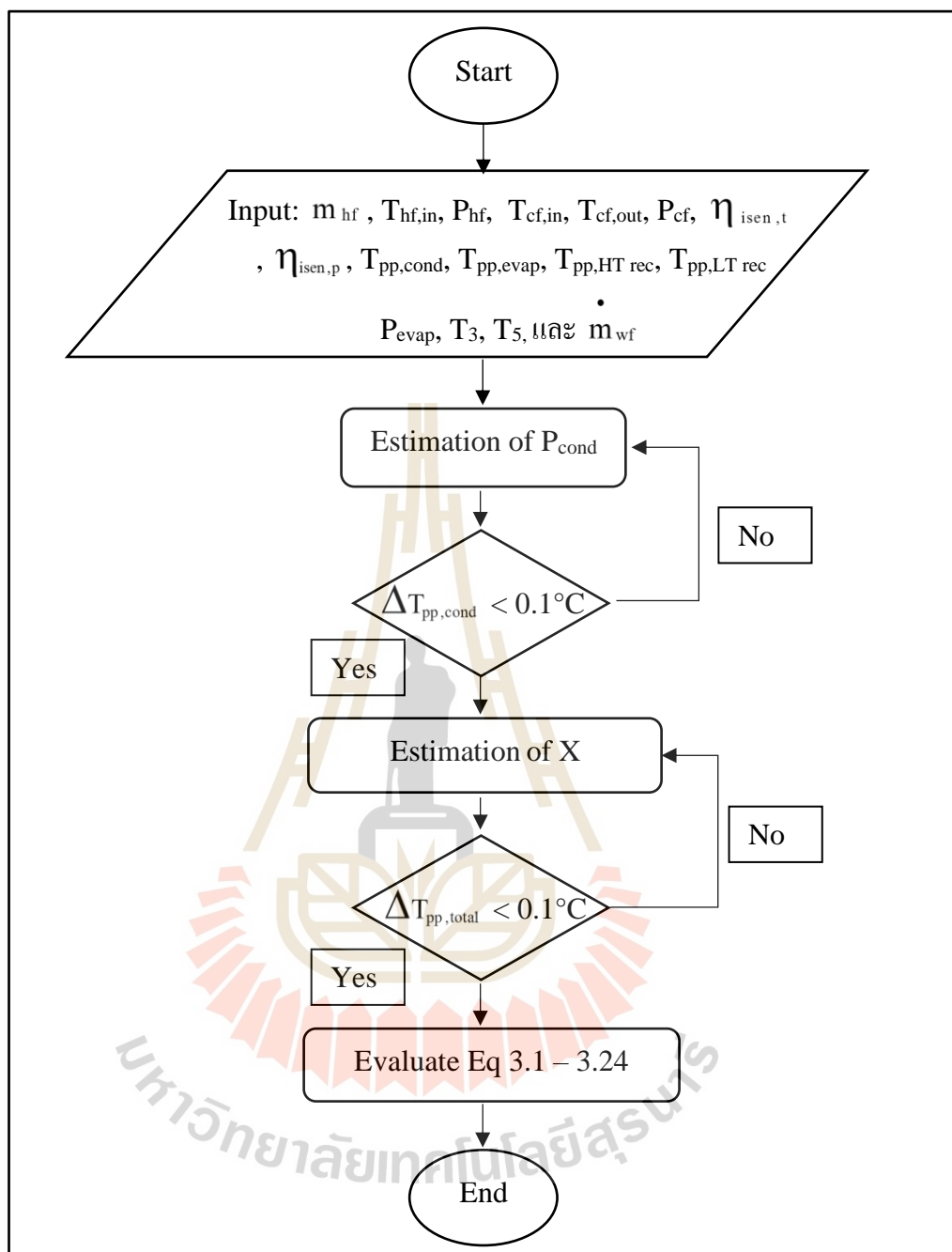
ตารางที่ 3.5 อุณหภูมิเฉลี่ยของจ.นครราชสีมา ณ ช่วงเวลาที่ศึกษาในปี 2562

เดือน	อุณหภูมิ ณ เวลา			เดือน	อุณหภูมิ ณ เวลา		
	10.00	13.00	16.00		10.00	13.00	16.00
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

นอกจากนี้ได้ทำการเปรียบเทียบวิธีการปรับปรุงการทำงานของโรงไฟฟ้าให้สอดคล้องกับอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมที่เปลี่ยนแปลงโดยใช้วิธีการ sliding pressure ว่ามีความแตกต่างอย่างไรกับวิธีการอื่น ได้แก่ การปรับปรุงความดันในการควบแน่นกับการปรับเปลี่ยนความเข้มข้นของสารทำงาน กับวิธีการปรับปรุงเงื่อนไขในการทำงานทุกค่า เพื่อให้ทำงานได้เมื่ออุณหภูมิสิ่งแวดล้อมเปลี่ยนไป โดยรายละเอียดของวิธีการทั้ง 2 ประเภทได้แก่ กรณีปรับปรุงความดันในการควบแน่นกับการปรับเปลี่ยนความเข้มข้นของสารทำงาน เงื่อนไขในการทำงานค่าต่าง ๆ ได้มาจากการออกแบบในขั้นต้นที่อุณหภูมิสูงสุดในปีนั้น และสำหรับวิธีปรับปรุงทุกค่า จะทำการจำลองและหาเงื่อนไขในการทำงานใหม่ สำหรับแผนผังการจำลองของวิธีการปรับความดันในการควบแน่นกับการปรับเปลี่ยนความเข้มข้นของสารทำงานแสดงดังรูปที่ 3.9 สำหรับวิธีการปรับปรุงเงื่อนไขในการทำงานแสดงแผนผังการจำลองดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.8 ขั้นตอนการจำลองในกรณีการออกแบบการใช้ sliding pressure



รูปที่ 3.9 ขั้นตอนการจำลองในกรณีการออกแบบการปรับความดันในการควบแน่นและความเข้มข้นของแอมโมเนีย

### 3. การเปรียบเทียบทางเศรษฐศาสตร์ระหว่างการออกแบบโดยปรับความดันในการควบแน่นกับการออกแบบโดยวิธีการทั่วไป

สำหรับหัวข้อดังกล่าว เป็นการพิจารณาถึงความคุ้มค่าในการใช้วิธีการปรับปรุงโรงไฟฟ้าให้ผลิตกำลังไฟฟ้าให้มากขึ้น ผ่านวิธีการปรับความดันในการควบแน่นให้สอดคล้องกับอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมที่เปลี่ยนไป โดยใช้การคำนวณต้นทุนเฉลี่ยตลอดอายุโครงการ (Levelized cost of electricity, LCOE) ซึ่งได้มีนักวิจัยหลายท่าน ใช้สมการในการจำลองเพื่อประเมินต้นทุนเฉลี่ยในการผลิตไฟฟ้าตลอดอายุการใช้งาน ผ่านการประเมินราคาของอุปกรณ์ตามการศึกษาของ Dorj (2005) และสำหรับ Bahrampoury, R., & Behbahaninia, A. (2017) เป็นการใช้สมการในการประเมินต้นทุนเฉลี่ย โดยสำหรับสมการที่ใช้ในการประเมินต้นทุนเฉลี่ยในการผลิตไฟฟ้าในกรณีการออกแบบแบบทั่วไปแสดงดังสมการที่ 3.25 และกรณีการออกแบบให้ปรับความดันในการควบแน่นแสดงดังสมการที่ 3.26

$$LCOE_{conv} = \frac{CRF \times C_{inv} + C_{o\&m}}{E_{y,conv}} \quad (3.25)$$

$$LCOE_{slid} = \frac{CRF \times C_{inv} + C_{o\&m}}{E_{y,slid}} \quad (3.26)$$

เมื่อ	$LCOE_{conv}$ , $LCOE_{slid}$	คือ ต้นทุนเฉลี่ยในการผลิตไฟฟ้า, USD/kWh
	CRF	คือ capital recovery factor เท่ากับ 0.87
	$C_{inv}$	คือ งบประมาณการลงทุนเบื้องต้นของโรงไฟฟ้า, USD
	$C_{o\&m}$	คือ ราคาดำเนินการและซ่อมบำรุงโรงไฟฟ้า, USD
	$E_{y,conv}$ , $E_{y,slid}$	คือ ปริมาณ ไฟฟ้าที่ผลิตได้ใน 1 ปี, USD/kWh

โดยสำหรับ capital recovery factor สามารถคำนวณได้ดังสมการ 3.27 และค่าปริมาณไฟฟ้าที่ผลิตได้ใน 1 ปีในกรณีออกแบบแบบทั่วไปคำนวณดังสมการที่ 3.28 สำหรับกรณีออกแบบให้ปรับความดันในการควบแน่นคำนวณดังสมการที่ 3.29

$$CRF = \frac{i(1+i)^N}{(1+i)^N - 1} \quad (3.27)$$

$$E_{y,conv} = W_{net} \times hr_{conv} \quad (3.28)$$

$$E_{y,slid} = \left( \sum_{i=1}^n \left( \dot{W}_{net,i} \times hr_{slid} \right) + \sum_{j=1}^m \left( W_{net,j} \times hr_{slid} \right) + \sum_{k=1}^o \left( W_{net,k} \times hr_{slid} \right) \right) \quad (3.29)$$

เมื่อ	N	คือ อายุการใช้งานของโรงไฟฟ้า, ปี
	i	คือ อัตราดอกเบี้ยการลงทุน, %
	$hr_{conv}$ , $hr_{slid}$	คือ ชั่วโมงในการผลิตไฟฟ้า, hr

สำหรับงบประมาณในการลงทุนเบื้องต้นคำนวณดังสมการที่ 3.30

$$C_{inv} = C_{pec} + C_{misc} \quad (3.30)$$

เมื่อ	$C_{pec}$	คือ ราคาของอุปกรณ์ในโรงไฟฟ้า, USD
	$C_{misc}$	คือ ราคาของอุปกรณ์เบ็ดเตล็ดในโรงไฟฟ้า, USD

สำหรับราคาของอุปกรณ์ภายในโรงไฟฟ้าและราคาของอุปกรณ์เบ็ดเตล็ดที่ใช้ในงานในโรงไฟฟ้าแสดงดังสมการที่ 3.31 และ 3.32

$$C_{pec} = C_{tur} + C_{gen} + C_{cond} + C_{pump} + C_{sep} + C_{rec} + C_{evap} \quad (3.31)$$

$$C_{misc} = C_{pip} + C_{insc} + C_{el} + C_{inst} \quad (3.32)$$

เมื่อ	$C_{tur}$	คือ ราคาของเทอร์ไบน์, USD
	$C_{gen}$	คือ ราคาของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า, USD
	$C_{cond}$	คือ ราคาของคอนเดนเซอร์, USD
	$C_{pump}$	คือ ราคาของปั๊ม, USD
	$C_{sep}$	คือ ราคาของเทอร์ไบน์, USD



$C_{rec}$	คือ ราคาของรีคูเปอร์เรเตอร์, USD
$C_{evap}$	คือ ราคาของอีแวปโปเรเตอร์, USD
$C_{pip}$	คือ ราคาของท่อ, USD
$C_{insc}$	คือ ราคาของระบบควบคุมในโรงไฟฟ้า, USD
$C_{el}$	คือ ราคาของอุปกรณ์ทางไฟฟ้า, USD
$C_{inst}$	คือ ราคาสำหรับการติดตั้ง, USD

ในการคำนวณหาราคาของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแต่ละชนิดคำนวณได้ดังสมการที่ 3.33 และสำหรับอุปกรณ์อื่น ๆ ที่ใช้ในโรงไฟฟ้า ดังสมการที่ 3.34 ถึง 3.36 สำหรับราคาท่อ ราคาของระบบควบคุม ราคาของอุปกรณ์ไฟฟ้า ราคาของกระบวนการติดตั้ง ซึ่ง Modi et al.(2016) ได้ทำการศึกษาและค้นคว้าในการคำนวณราคาเบื้องต้นของส่วนประกอบดังกล่าวสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 3.37 ถึง 3.4

$$C_{hx} = C_{0,hx} \times (A_{hx})^{0.8} \quad (3.33)$$

$$C_{tur} = C_{0,tur} \times (W_t)^{0.7} \quad (3.34)$$

$$C_{pump} = C_{0,pump} \times (W_p)^{0.8} \quad (3.35)$$

$$C_{gen} = 10 \times 10^6 \times \left( \frac{W_{gen}}{160 \times 10^3} \right)^{0.7} \quad (3.36)$$

$$C_{pip} = 0.66 \times C_{pec} \quad (3.37)$$

$$C_{insc} = 0.1 \times C_{pec} \quad (3.38)$$

$$C_{el} = 0.1 \times C_{pec} \quad (3.39)$$

$$C_{inst} = 0.45 \times C_{pec} \quad (3.40)$$

เมื่อ	$C_{hx}$	คือ ราคาของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน, USD
	$C_{0,hx}$	คือ ราคาเริ่มต้นของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนต่อพื้นที่เท่ากับ 588, USD/A <sup>2</sup>
	$C_{0,tur}$	คือ ราคาเริ่มต้นของเทอร์ไบน์ต่อกำลังไฟฟ้าที่เทอร์ไบน์ผลิตเท่ากับ 4405 , USD/kW
	$C_{0,pump}$	คือ ราคาเริ่มต้นของปั๊มต่อพลังงานที่ปั๊มใช้เท่ากับ 1120 , USD/kW

จากสมการที่กล่าวพบว่าไม่มีการคำนวณราคาของเซพพารเตอร์ เนื่องจากในการศึกษาของ Modi et al.(2016) พบว่าค่าใช้จ่ายในการซื้อเซพพารเตอร์มีแค่ 1% เมื่อเทียบกับค่าใช้จ่ายทั้งหมดดังนั้นจึงไม่ได้นำสมการในการคำนวณหาราคาของเซพพารเตอร์มาแสดงในการสมการการคำนวณ

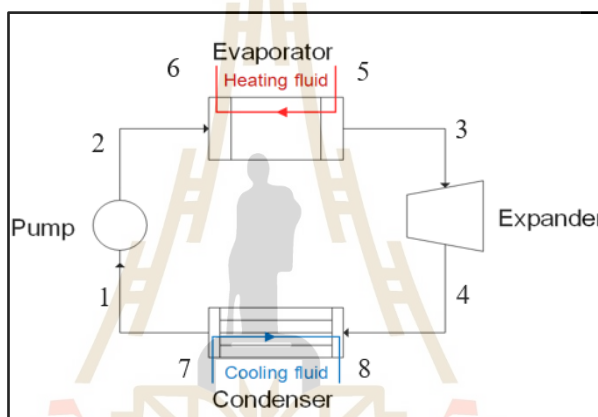
### 3.5.3 ขั้นตอนการจำลองเชิงตัวเลขเพื่อเปรียบเทียบระหว่างโรงไฟฟ้าคาลินากับ

#### โรงไฟฟ้าซับคริติคอลโออาร์ซี ซูเปอร์คริติคอลโออาร์ซี และไตรเลทเทอร์รอลโออาร์ซี

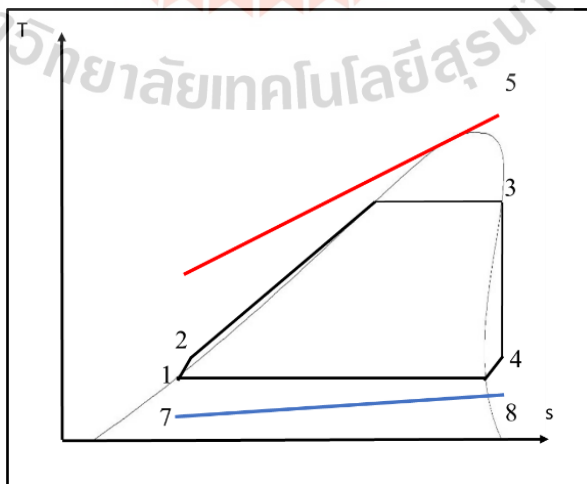
สำหรับการจำลองในขั้นตอนดังกล่าว ทำการเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าสุทธิที่ผลิตได้ของโรงไฟฟ้าทั้ง 4 ประเภท โดยเปรียบเทียบอุณหภูมิแหล่งความร้อนในช่วง 100 - 300°C และเปรียบเทียบเงื่อนไขในการทำงานของโรงไฟฟ้าทั้ง 4 ประเภท เนื่องจากในการศึกษางานวิจัยต่าง ๆ ได้เปรียบเทียบโรงไฟฟ้าคาลินากับโรงไฟฟ้าประเภทต่าง ๆ เพื่อเป็นเกณฑ์ในการตัดสินใจเลือกโรงไฟฟ้าที่เหมาะสมกับแหล่งความร้อนต่าง ๆ โดยผลการจำลองโรงไฟฟ้าซับคริติคอล ซูเปอร์คริติคอล และไตรเลทเทอร์รอลโออาร์ซีเป็นผลการจำลองจากภายในกลุ่มวิจัย โดยเป็นการนำผลการจำลองจาก อนุกุล โมงปราณีต และอาทิตย์ คุณศรีสุข. (2562); วัชรภรณ์ รักษาอินทร์ และอาทิตย์ คุณศรีสุข. (2562); สิริชัย ดวงเดือน และอาทิตย์ คุณศรีสุข. (2562); ชงชัย เทียมทัต และอาทิตย์ คุณศรีสุข. (2562); ชนาภา เทพเสนา และอาทิตย์ คุณศรีสุข. (2562)

สารทำงานที่ใช้ในโรงไฟฟ้าไออาร์ซีนั้น จะเป็นการเลือกสารทำงานที่มี critical temperature ใกล้เคียงกับอุณหภูมิของแหล่งความร้อน โดยเลือกสารทำงานมาหลายชนิดและทำการเปรียบเทียบเพื่อหาสารทำงานที่สามารถผลิตกำลังไฟฟ้ามากที่สุด และได้นำมาเปรียบเทียบกับโรงไฟฟ้าคาลินา โดยเปรียบเทียบค่าของกำลังไฟฟ้าสุทธิ อัตราการไหลของสารทำงาน อัตราการขยายตัวของสารทำงานในเทอร์ไบน์ ความดันในการระเหย และความดันในการควบแน่น

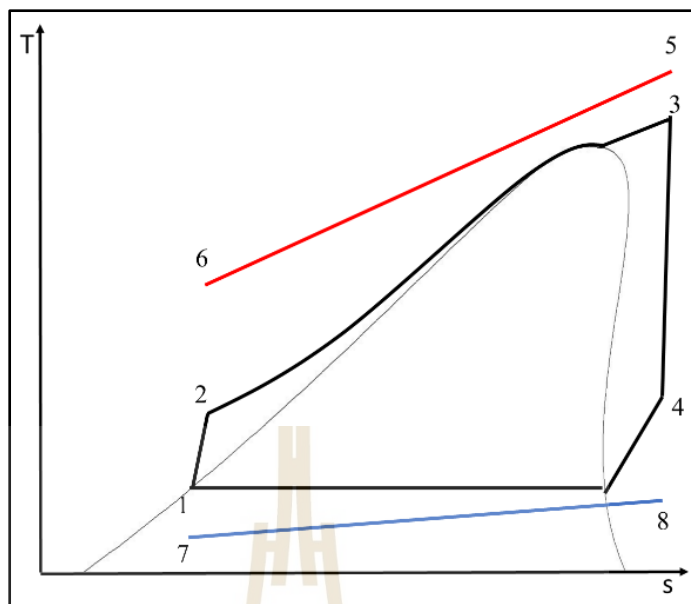
สำหรับลักษณะของอุปกรณ์ในโรงไฟฟ้าไออาร์ซีทั้ง 3 ประเภทแสดงดังรูปที่ 3.10 และลักษณะของ T-s diagram ของโรงไฟฟ้าไออาร์ซีแบบซับคริติคอลล ชุปเปอร์คริติคอลล และไทรเรน เทอรอล แสดงดังรูปที่ 3.11 3.12 และ 3.13



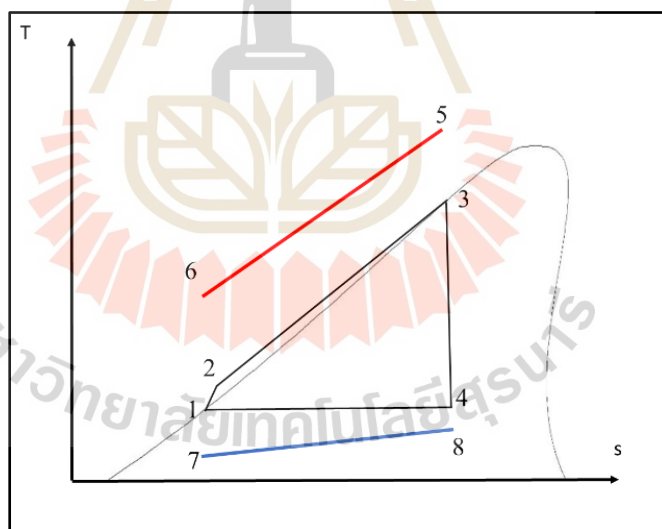
รูปที่ 3.10 อุปกรณ์ในโรงไฟฟ้าไออาร์ซี



รูปที่ 3.11 T-s diagram ของโรงไฟฟ้าไออาร์ซีแบบซับคริติคอลล



รูปที่ 3.12 T-s diagram ของโรงไฟฟ้าไออาร์ซีแบบซูเปอร์คริติคอลล



รูปที่ 3.13 T-s diagram ของโรงไฟฟ้าไออาร์ซีแบบไตรเรทเทอร์อล

สำหรับการคำนวณหาพลังงานที่เกิดขึ้นในโรงไฟฟ้าทั้ง 3 ประเภท จะใช้สมการในการคำนวณที่เหมือนกัน ลำดับแรกสารทำงานจะเคลื่อนที่เข้าปั๊มในตำแหน่งที่ 1 และออกจากปั๊มในตำแหน่งที่ 2 โดยกำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้ปั๊มเป็นการคำนวณหาความแตกต่างของเอนทาลปี เอนทาลปีทางออกคำนวณดังสมการที่ 3.1 และกำลังไฟฟ้าของปั๊มคำนวณดังสมการที่ 3.2

ลำดับถัดมา สารทำงานเข้าสู่อีแวนโปเรเตอร์ โดยเข้าที่ตำแหน่งที่ 2 ออกที่ตำแหน่งที่ 3 ซึ่งทำการแลกเปลี่ยนความร้อนกับแหล่งความร้อนที่เข้าตำแหน่งที่ 5 ออกที่ตำแหน่งที่ 6 สำหรับการคำนวณหาอัตราการแลกเปลี่ยนความร้อนที่เกิดขึ้นคำนวณดังสมการที่ 3.42

$$Q_{\text{evap}} = m_{\text{wf}} (h_3 - h_2) \quad (3.42)$$

เมื่อสารทำงานออกจากอีแวนโปเรเตอร์และเข้าสู่เทอร์ไบน์ดังตำแหน่งที่ 3 จากนั้นออกจากเทอร์ไบน์ดังตำแหน่งที่ 4 ซึ่งการคำนวณกำลังไฟฟ้าที่เทอร์ไบน์สร้างหาจากความแตกต่างระหว่างเอนทาลปีทางเข้ากับทางออก โดยทางออกขึ้นกับประสิทธิภาพของเทอร์ไบน์ สมการใช้คำนวณหาเอนทาลปีที่ทางออกคำนวณดังสมการที่ 3.43 และสำหรับสมการที่ใช้ในการคำนวณหา กำลังไฟฟ้าที่เทอร์ไบน์สร้างคำนวณดังสมการที่ 3.44

$$\eta_{\text{isen,t}} = \frac{(h_3 - h_4)}{(h_3 - h_{4s})} \quad (3.43)$$

$$W_T = m_{\text{wf}} (h_4 - h_3) \quad (3.44)$$

เมื่อสารทำงานออกจากเทอร์ไบน์ สารทำงานจะเข้าไปยังคอนเดนเซอร์ดังตำแหน่งที่ 4 และออกตำแหน่งที่ 1 ซึ่งจะครบวัฏจักรการทำงาน สำหรับการคำนวณอัตราการถ่ายเทความร้อนที่บริเวณคอนเดนเซอร์คำนวณดังสมการที่ 3.45

$$Q_{\text{cond}} = m_{\text{wf}} (h_4 - h_1) \quad (3.45)$$

นอกจากนี้ ได้ทำการพิจารณาขนาดของเทอร์ไบน์ผ่านการพิจารณาค่าของ อัตราการขยายของไอ (expansion ratio) โดยเป็นการนำอัตราการไหลที่ทางออกเทียบกับอัตราการไหลทางเข้า ซึ่งสมการที่ใช้ในการพิจารณากรณีดังกล่าว แสดงดังสมการที่ 3.46 - 3.48

$$V_3 = \frac{m_{\text{wf}}}{\rho_3} \quad (3.46)$$

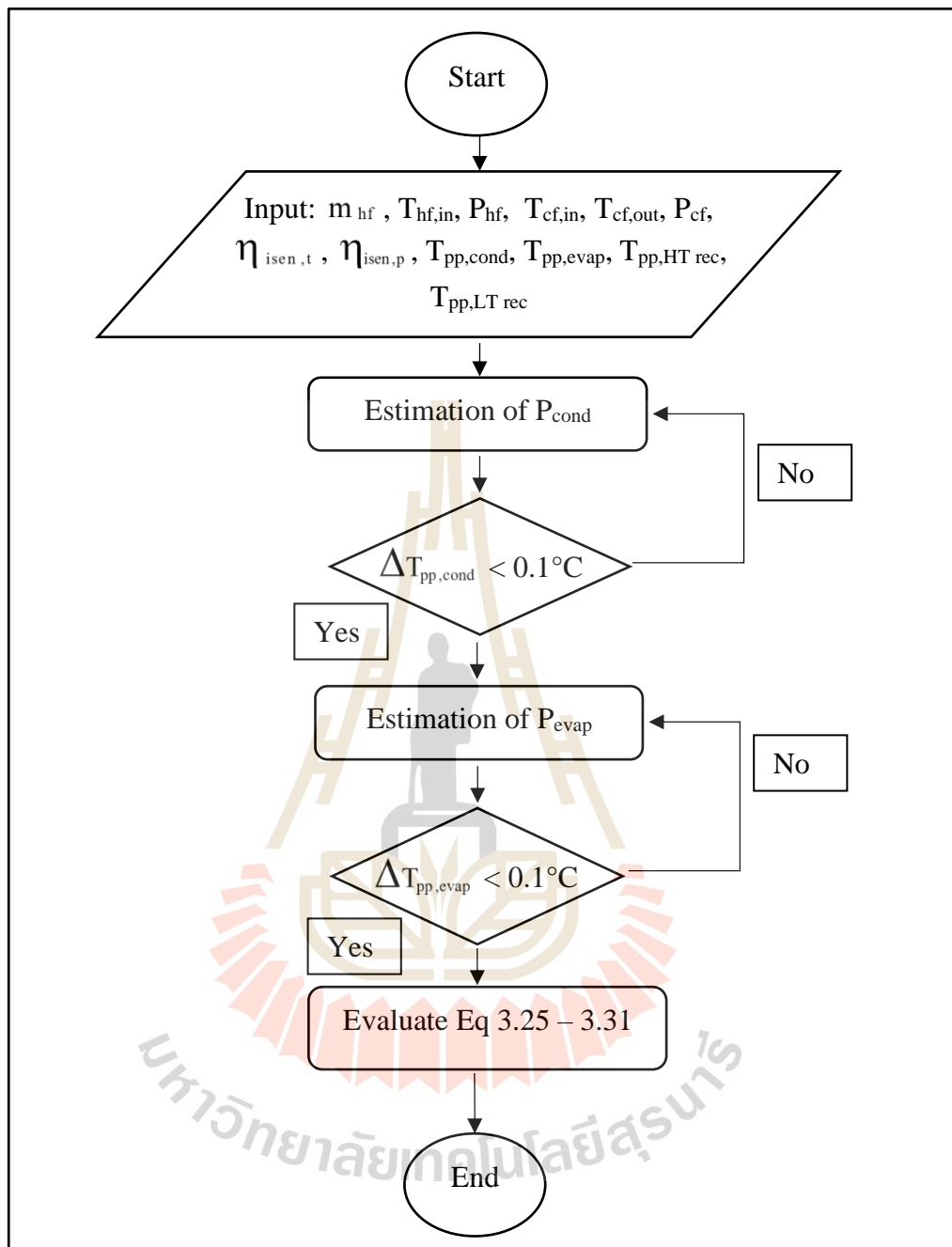
$$V_4 = \frac{m_{wf}}{\rho_4} \quad (3.47)$$

$$Ex_r = \frac{V_4}{V_3} \quad (3.48)$$

สำหรับการเปรียบเทียบระหว่างโรงไฟฟ้าคาลินากับโรงไฟฟ้าโออาร์ซีใช้เงื่อนไขในการจำลองเหมือนกันดังตารางที่ 3.6 และแผนผังการจำลองของโรงไฟฟ้าคาลินาแสดงดังรูปที่ 3.7 และโรงไฟฟ้าโออาร์ซีแสดงดังรูปที่ 3.14

ตารางที่ 3.6 เงื่อนไขในการจำลองกรณีเปรียบเทียบระหว่างโรงไฟฟ้าคาลินากับโรงไฟฟ้าโออาร์ซี

Parameter	Value
อุณหภูมิของแหล่งความร้อนขาเข้า (°C)	100 - 300
อัตราการไหลเชิงมวลของแหล่งความร้อน (kg/s)	1
ความดันของแหล่งความร้อน (bar)	2
อุณหภูมิของแหล่งทิ้งความร้อนขาเข้า (°C)	30
อุณหภูมิของแหล่งทิ้งความร้อนขาออก (°C)	40
Isentropic efficiency ของเทอร์ไบน์ (%)	80
Isentropic efficiency ของปั๊ม (%)	75
Pinch point temperature ของแต่ละอุปกรณ์	
อีแวปโปเรเตอร์	10
คอนเดนเซอร์	10
รีคูปเพอร์เรเตอร์	10



รูปที่ 3.14 แผนผังการจำลองของโรงไฟฟ้าโออาร์ซี



## บทที่ 4

### ผลการดำเนินการวิจัย

#### 4.1 บทนำ

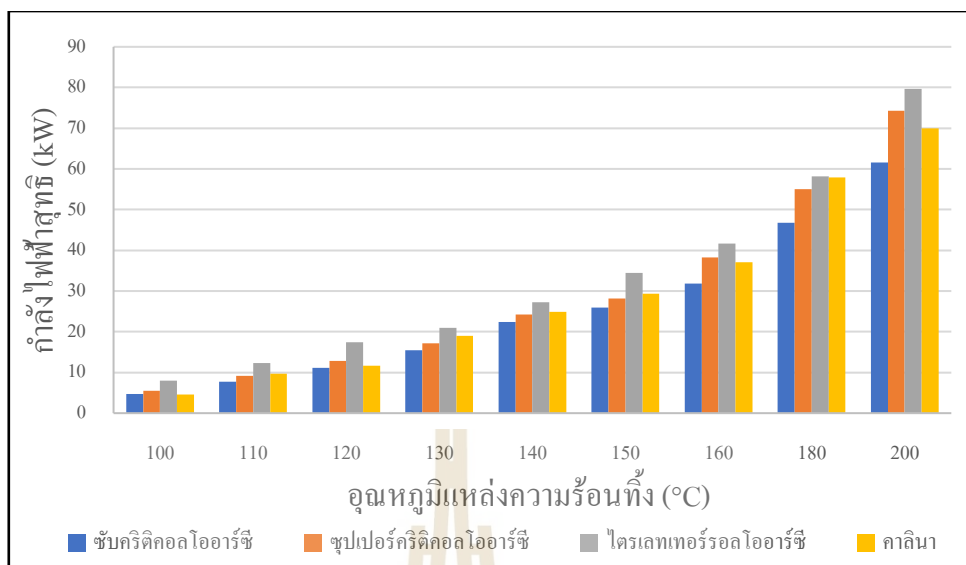
สำหรับบทนี้ เป็นการนำเสนอการเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ระหว่าง โรงไฟฟ้า คาลินากับโรงไฟฟ้าโออาร์ซีทั้ง 3 ประเภท และนำเสนอการปรับปรุงการทำงานของโรงไฟฟ้าคาลินา ให้สามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้สูงสุด เมื่ออุณหภูมิของสิ่งแวดล้อมที่ส่งผลกระทบต่ออุณหภูมิของน้ำหล่อเย็นเปลี่ยนแปลง และได้นำเสนอการพิจารณาทางเศรษฐศาสตร์ของโรงไฟฟ้าทั้ง 4 ประเภท และเปรียบเทียบทางเศรษฐศาสตร์ระหว่างวิธีการปรับปรุงโรงไฟฟ้าคาลินากับไม่ได้ปรับปรุง

#### 4.2 การเปรียบเทียบระหว่างโรงไฟฟ้าคาลินากับโรงไฟฟ้าโออาร์ซีทั้ง 3 ประเภทที่ แหล่งความร้อนในช่วง 100 - 300°C

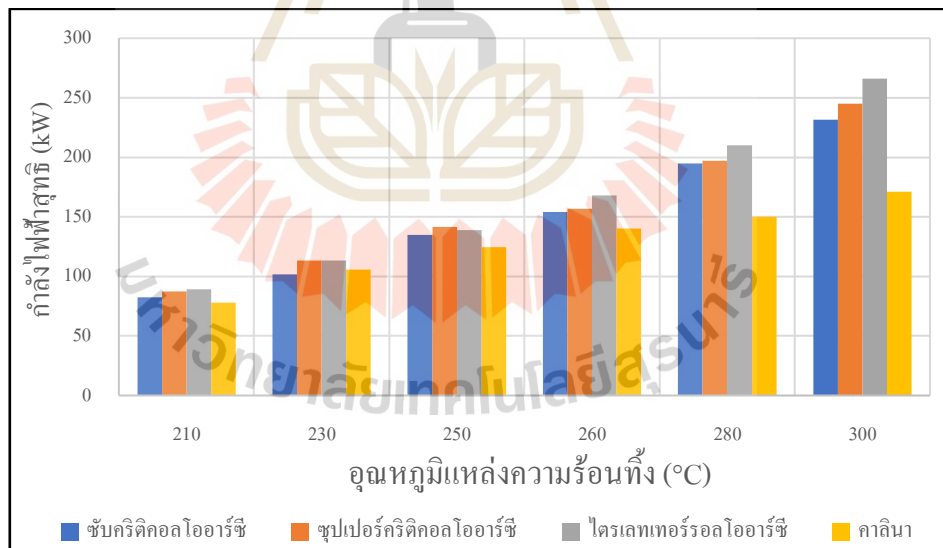
สำหรับการศึกษาคกรณีดังกล่าว เป็นการเปรียบเทียบโรงไฟฟ้าทั้ง 4 ประเภท ซึ่งเป็นการเปรียบเทียบที่อุณหภูมิแหล่งความร้อนในช่วง 100 - 300°C เพื่อพิจารณาถึงความเหมาะสมในการใช้งานโรงไฟฟ้าแต่ละประเภทที่แหล่งความร้อนแต่ละชนิด โดยผลลัพธ์การเปรียบเทียบระหว่างโรงไฟฟ้าแต่ละประเภทแสดงถึงเงื่อนไขในการทำงาน ได้แก่ ความดันในการควบแน่น ความดันในการระเหย อัตราการไหลเชิงมวลของสารทำงาน ซึ่งสำหรับผลการจำลองของโรงไฟฟ้าซับคริติคัลโออาร์ซี โรงไฟฟ้าซูเปอร์คริติคัลโออาร์ซี และโรงไฟฟ้าไตรเลทเทอร์รอลโออาร์ซี เป็นการอ้างอิงมาจากการศึกษาภายในกลุ่มวิจัย โดยที่แหล่งความร้อน และแสดงถึงผลลัพธ์ในการจำลองดังผลดังต่อไปนี้

##### 4.2.1 เปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าสุทธิของโรงไฟฟ้าทั้ง 4 ประเภท

การศึกษาในกรณีนี้ได้แบ่งช่วงของการเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าของโรงไฟฟ้าทั้ง 4 ประเภทเป็น 2 ช่วง คือ 1. อุณหภูมิของแหล่งความร้อนอยู่ในช่วง 100 - 200°C 2. อุณหภูมิของแหล่งความร้อนอยู่ในช่วง 200 - 300°C สำหรับผลการเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าทั้ง 2 ช่วงแสดงดังรูปที่ 4.1 และ 4.2



รูปที่ 4.1 การเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าสุทธิของโรงไฟฟ้าทั้ง 4 ประเภทที่แหล่งความร้อนในช่วง 100 - 200°C



รูปที่ 4.2 การเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าสุทธิของโรงไฟฟ้าทั้ง 4 ประเภทที่แหล่งความร้อนในช่วง 200 - 300°C

รูปที่ 4.1 และ 4.2 แสดงถึงกำลังไฟฟ้าสุทธิที่ผลิตได้ของโรงไฟฟ้าทั้ง 4 ประเภท กราฟแท่งสีฟ้าแสดงถึงโรงไฟฟ้าแบบซับคริติคอลลีโออาร์ซี กราฟแท่งสีส้มแสดงถึงโรงไฟฟ้าแบบซูเปอร์คริติคอลลีโออาร์ซี กราฟแท่งสีเทาแสดงถึงโรงไฟฟ้าไตรเลทเทอร์รอลโออาร์ซี และกราฟแท่งสีเหลืองได้แสดงถึงกำลังไฟฟ้าสุทธิที่ผลิตได้ของโรงไฟฟ้าคาไลนา ทั้งนี้สำหรับสีของกราฟแท่งใช้เป็นตัวแทนของโรงไฟฟ้าแต่ละชนิดทุกกรณีเมื่อมีการเปรียบเทียบระหว่างโรงไฟฟ้าทั้ง 4 ประเภท

จากรูปที่ 4.1 ซึ่งพิจารณาที่อุณหภูมิแหล่งความร้อนในช่วง 100 - 200°C พบว่าโรงไฟฟ้าไตรเลทเทอร์รอลโออาร์ซีผลิตกำลังไฟฟ้าได้มากสุดในช่วงอุณหภูมิดังกล่าว โดยสามารถผลิตกำลังไฟฟ้าอยู่ในช่วง 7.96 ถึง 79.65 kW แต่สำหรับโรงไฟฟ้าโออาร์ซีในรูปแบบของซับคริติคอลลกลับผลิตกำลังไฟฟ้าได้น้อยที่สุดโดยผลิตได้อยู่ในช่วง 4.7 ถึง 61.59 kW สำหรับโรงไฟฟ้าโออาร์ซีแบบซูเปอร์คริติคอลลกับโรงไฟฟ้าคาไลนากำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ใกล้เคียงกันทำให้บางช่วงอุณหภูมิ โรงไฟฟ้าคาไลนาผลิตกำลังไฟฟ้าได้มากกว่าโรงไฟฟ้าโออาร์ซีแบบซูเปอร์คริติคอลล เช่น เมื่ออุณหภูมิแหล่งความร้อนเท่ากับ 130°C โรงไฟฟ้าคาไลนาผลิตกำลังไฟฟ้าเท่ากับ 19 kW ขณะที่โรงไฟฟ้าซูเปอร์คริติคอลลโออาร์ซีผลิตได้ 17 kW แต่เมื่ออุณหภูมิแหล่งความร้อนเป็น 160°C โรงไฟฟ้าคาไลนาผลิตกำลังไฟฟ้าได้เพียง 37 kW ขณะที่โรงไฟฟ้าซูเปอร์คริติคอลลโออาร์ซีผลิตได้ถึง 38 kW อย่างไรก็ตามพบว่า กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ของโรงไฟฟ้าทั้ง 2 ประเภทผลิตไม่แตกต่างกันมากนัก โดยโรงไฟฟ้าคาไลนาผลิตกำลังไฟฟ้าอยู่ในช่วง 4.6 ถึง 70 kW และโรงไฟฟ้าโออาร์ซีแบบซูเปอร์คริติคอลลผลิตกำลังไฟฟ้าได้ 5.5 ถึง 74.3 kW

อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาที่รูป 4.2 ซึ่งเปรียบเทียบที่อุณหภูมิแหล่งความร้อนในช่วง 200 - 300°C พบว่าโรงไฟฟ้าคาไลนากลับผลิตกำลังไฟฟ้าน้อยสุดเมื่อเทียบกับโรงไฟฟ้าชนิดอื่น ๆ โดยกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้มีค่าในช่วง 77.87 ถึง 170.9 kW โรงไฟฟ้าไตรเลทเทอร์รอลโออาร์ซียังคงผลิตกำลังไฟฟ้าสุทธิได้มากที่สุดเมื่อเทียบกับโรงไฟฟ้าชนิดอื่นซึ่งผลิตกำลังไฟฟ้าได้ในช่วง 89 ถึง 260 kW ในขณะที่โรงไฟฟ้าโออาร์ซีแบบซับคริติคอลลและแบบซูเปอร์คริติคอลลมีกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ใกล้เคียงกัน แต่โรงไฟฟ้าโออาร์ซีแบบซูเปอร์คริติคอลลมีกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้มากกว่าเท่ากับ 87.16 ถึง 245 kW ในขณะที่โรงไฟฟ้าโออาร์ซีแบบซับคริติคอลลสามารถผลิตได้ในช่วง 89 ถึง 260 kW

เมื่อพิจารณารูปที่ 4.1 และ 4.2 ร่วมกันพบว่า โรงไฟฟ้าไตรเลทเทอร์รอลโออาร์ซีผลิตกำลังไฟฟ้าได้มากที่สุดเมื่อเทียบกับโรงไฟฟ้าชนิดต่าง ๆ โดยลำดับถัดมาเป็นโรงไฟฟ้าซูเปอร์คริติคอลลโออาร์ซี และสำหรับโรงไฟฟ้าคาไลนาผลิตกำลังไฟฟ้าได้มากที่สุดเป็นลำดับรองจากโรงไฟฟ้าซูเปอร์คริติคอลลโออาร์ซี ซึ่งมากกว่าโรงไฟฟ้าซับคริติคอลลโออาร์ซีแต่จะมากกว่าต่อเมื่อ

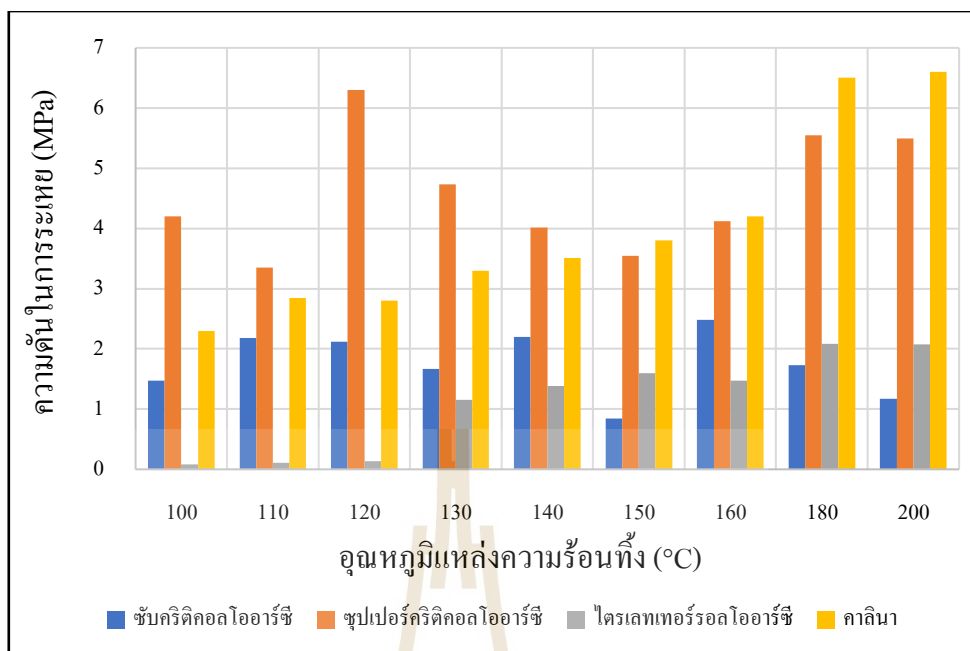
อุณหภูมิแหล่งความร้อนน้อยกว่า  $200^{\circ}\text{C}$  โดยสำหรับสาเหตุที่โรงไฟฟ้าคาตินามีบางช่วงอุณหภูมิที่ผลิตไฟฟ้าได้มากกว่าเนื่องจาก ช่วงอุณหภูมิที่น้อยกว่า  $200^{\circ}\text{C}$  ทำให้สารทำงานที่เป็นสารผสมระหว่างแอมโมเนียกับน้ำมีความสามารถในการผลิตไฟฟ้าที่มากกว่าโรงไฟฟ้าแบบซับคริติคอลลออาร์ซี ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Fiaschi et al. (2017) ที่ให้แนวโน้มผลลัพธ์ที่ใกล้เคียงกัน

#### 4.2.2 เปรียบเทียบความดันในการระเหยของโรงไฟฟ้าทั้ง 4 ประเภท

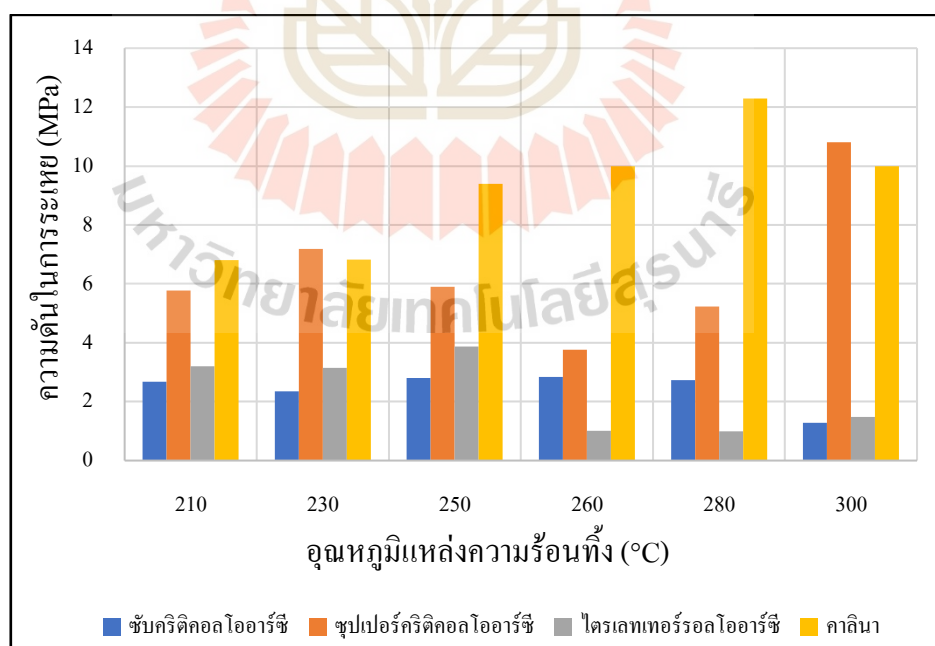
สำหรับการเปรียบเทียบค่าของความดันในการระเหยของโรงไฟฟ้าทั้ง 4 ประเภท ซึ่งตัวแปรดังกล่าวสามารถบ่งบอกถึงขนาดของปั๊ม รวมไปถึงชนิดของวัสดุที่ต้องออกแบบให้สามารถใช้งานที่ความดันที่กำหนดไว้ได้ โดยสำหรับการเปรียบเทียบเป็นการพิจารณาที่อุณหภูมิของแหล่งความร้อน 2 ช่วง คือ 1. อุณหภูมิของแหล่งความร้อนอยู่ในช่วง  $100 - 200^{\circ}\text{C}$  2. อุณหภูมิของแหล่งความร้อนอยู่ในช่วง  $200 - 300^{\circ}\text{C}$  สำหรับผลการเปรียบเทียบความดันในการระเหยแสดงดังรูปที่ 4.3 และ 4.4

จากรูปที่ 4.3 พิจารณาความดันที่ใช้ในการระเหยของสารทำงานที่อุณหภูมิแหล่งความร้อนในช่วง  $100 - 200^{\circ}\text{C}$  พบว่า โรงไฟฟ้าซูเปอร์คริติคอลลออาร์ซีมีภาพรวมการใช้งานความดันในการระเหยที่มากที่สุด สำหรับโรงไฟฟ้าคาตินามีความต้องการความดันในการระเหยที่มากเป็นลำดับถัดมา โรงไฟฟ้าซับคริติคอลลออาร์ซีใช้ความดันในการระเหยเป็นอันดับที่ 3 และโรงไฟฟ้าไตรเลทเทอร์รอลออาร์ซีใช้ความดันในการระเหยน้อยที่สุด ซึ่งการที่ระบบใช้ความดันที่น้อยส่งผลให้ระบบไม่จำเป็นต้องออกแบบให้ระบบแข็งแรงมากเมื่อเทียบกับการใช้ความดันที่สูงกว่า ดังนั้นระบบของไตรเลทเทอร์รอลออาร์ซีสามารถออกแบบให้ระบบรับแรงกระทำจากความดันได้น้อยที่สุด เมื่อเทียบกับระบบอื่น ๆ ทำให้งบประมาณการลงทุนในส่วนนี้น้อยกว่าโรงไฟฟ้าแบบอื่น

อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาค่าของความดันในการระเหยที่อุณหภูมิแหล่งความร้อนเท่ากับ  $100^{\circ}\text{C}$  พบว่า ความดันในการระเหยมีค่าเท่ากับ  $78\text{ kPa}$  ซึ่งสังเกตว่ามีค่าของความดันที่ต่ำกว่าบรรยากาศส่งผลให้การใช้งานโรงไฟฟ้าไตรเลทเทอร์รอลออาร์ซีอาจไม่เหมาะสมที่แหล่งความร้อนดังกล่าว เนื่องจากการออกแบบระบบที่ทำงานที่มีความดันต่ำกว่าบรรยากาศจะมีความซับซ้อนกว่ารวมถึงมีความยุ่งยากในการดูแลและควบคุมการทำงาน เพราะอากาศจากภายนอกจะรั่วเข้าไปในระบบซึ่งทำให้เกิดสนิมขึ้นภายในอุปกรณ์และเปลี่ยนความร้อนขึ้นได้



รูปที่ 4.3 การเปรียบเทียบความดันในการระเหยของโรงไฟฟ้าทั้ง 4 ประเภทที่แหล่งความร้อนในช่วง 100 - 200°C



รูปที่ 4.4 การเปรียบเทียบความดันในการระเหยของโรงไฟฟ้าทั้ง 4 ประเภทที่แหล่งความร้อนในช่วง 200 - 300°C

สำหรับรูปที่ 4.4 เปรียบเทียบความดันในการระเหยของโรงไฟฟ้าทั้ง 4 ประเภท และเป็นการพิจารณาที่อุณหภูมิแหล่งความร้อนเท่ากับ  $200^{\circ}\text{C}$  พบว่าโรงไฟฟ้าคาถินาใช้ความดันในการระเหยที่มากกว่าโรงไฟฟ้าประเภทอื่น โรงไฟฟ้าซูปเปอร์คริติคอลโออาร์ซีใช้ความดันในการระเหยมากเป็นอันดับที่สอง ซึ่งโรงไฟฟ้าทั้ง 2 ประเภทที่กล่าวมามีการใช้ความดันในการระเหยที่มากกว่าอย่างชัดเจน และสำหรับโรงไฟฟ้าซับคริติคอลโออาร์ซีใช้ความดันในการควบแน่นเป็นอันดับสาม และโรงไฟฟ้าที่ใช้ความดันในการระเหยน้อยสุดได้แก่ โรงไฟฟ้าไตรเลทเทอร์รอลโออาร์ซี

เมื่อพิจารณาร่วมกันระหว่างรูปที่ 4.3 และ 4.4 พบว่าโรงไฟฟ้าไตรเลทเทอร์รอลโออาร์ซีมีการใช้ความดันในการระเหยน้อยที่สุดในช่วงแหล่งความร้อนที่ทำการศึกษา แต่มีช่วงอุณหภูมิแหล่งความร้อนเท่ากับ  $100^{\circ}\text{C}$  ที่จากการจำลองไม่แนะนำให้ใช้งาน เนื่องจากความดันมีค่าต่ำกว่าความดันบรรยากาศ โดยสำหรับโรงไฟฟ้าซับคริติคอลเป็นโรงไฟฟ้าที่แนะนำเมื่อพิจารณาเฉพาะความดันในการระเหยที่ไม่ต่ำกว่าบรรยากาศและไม่มากที่สุด

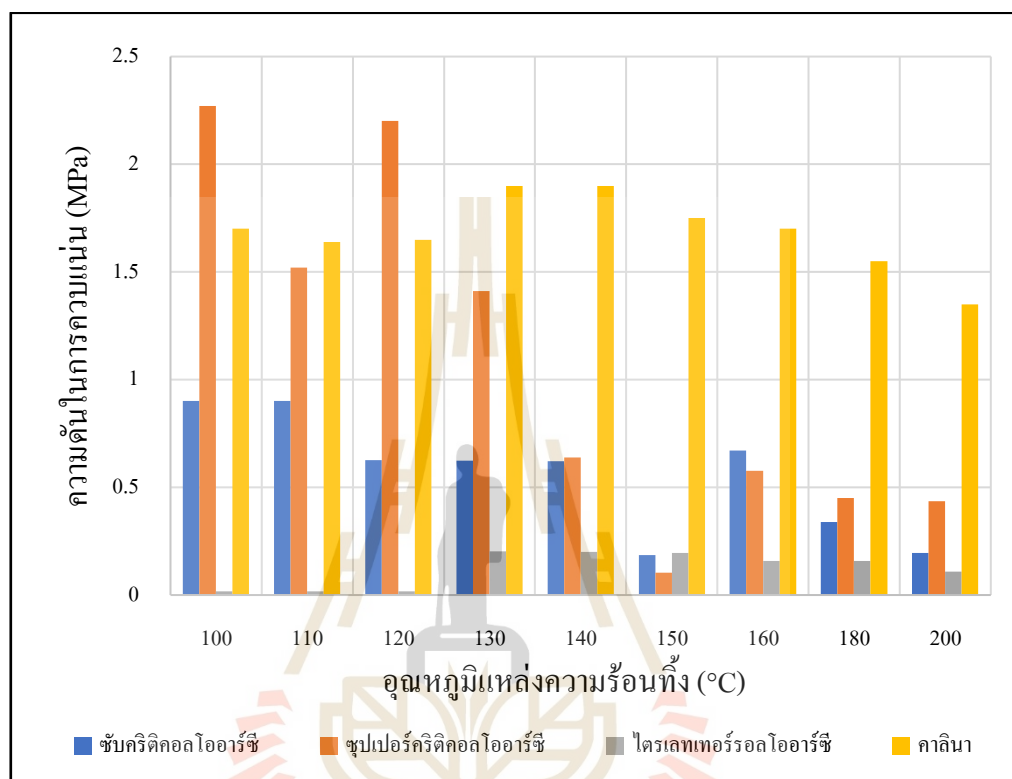
หากพิจารณาถึงแนวโน้มของความดันในการระเหย พบว่ามีเพียงโรงไฟฟ้าคาถินา ที่มีแนวโน้มชัดเจน คือ เมื่ออุณหภูมิของแหล่งความร้อนมีค่าเพิ่มขึ้นความดันในการระเหยมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งแตกต่างกับโรงไฟฟ้าประเภทอื่นที่มีแนวโน้มไม่ชัดเจน เนื่องจากโรงไฟฟ้าคาถินาใช้สารทำความเย็นแบบเดียว คือ แอมโมเนียผสมกับน้ำ ในขณะที่โรงไฟฟ้าประเภทที่เหลือจะใช้สารทำงานชนิดต่างกัน โดยสารทำงานแต่ละชนิดที่ใช้เป็นสารทำงานที่ผลิตกำลังไฟฟ้าได้มากที่สุดเมื่อเทียบกับสารทำงานชนิดอื่น จากการใช้สารทำงานชนิดเดียวของโรงไฟฟ้าคาถินา จึงทำให้เห็นผลกระทบของอุณหภูมิแหล่งความร้อนที่เปลี่ยนแปลงส่งผลอย่างไร

#### 4.2.3 เปรียบเทียบความดันในการควบแน่นโรงไฟฟ้าทั้ง 4 ประเภท

สำหรับการเปรียบเทียบค่าความดันในการควบแน่นของโรงไฟฟ้าทั้ง 4 ประเภท ซึ่งค่าดังกล่าวสามารถบ่งบอกถึงการออกแบบและเลือกใช้วัสดุที่มีความทนทานต่อความดันที่บริเวณทางออกจากเทอร์ไบน์ถึงทางเข้าของปั๊ม ซึ่งการเปรียบเทียบทำการพิจารณาที่อุณหภูมิของแหล่งความร้อน 2 ช่วง คือ 1. อุณหภูมิของแหล่งความร้อนอยู่ในช่วง  $100 - 200^{\circ}\text{C}$  2. อุณหภูมิของแหล่งความร้อนอยู่ในช่วง  $200 - 300^{\circ}\text{C}$  สำหรับผลการเปรียบเทียบความดันในการระเหยแสดงดังรูปที่ 4.5 และ 4.6

จากรูปที่ 4.5 พิจารณาความดันที่ใช้ในการควบแน่นของโรงไฟฟ้าทั้ง 4 ประเภท ในช่วง  $100 - 200^{\circ}\text{C}$  พบว่าโรงไฟฟ้าคาถินาใช้ความดันในการควบแน่นมากที่สุดเมื่อเทียบกับโรงไฟฟ้าแบบอื่น โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่ออุณหภูมิแหล่งความร้อนตั้งแต่  $140 - 200^{\circ}\text{C}$  แต่เมื่ออุณหภูมิแหล่งความร้อนน้อยกว่า  $130^{\circ}\text{C}$  ความดันในการควบแน่นของโรงไฟฟ้าซูปเปอร์คริติคอล

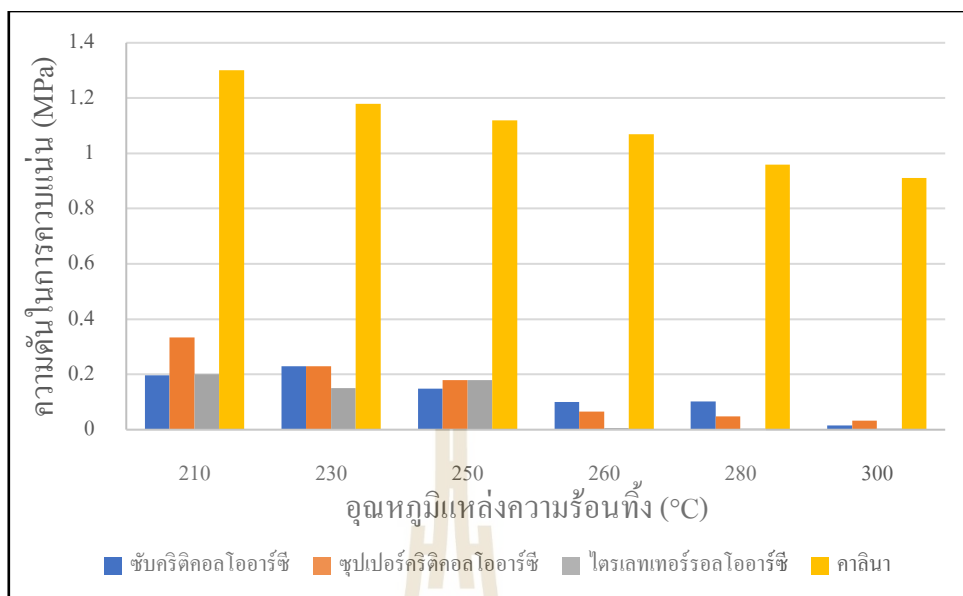
โออาร์ซีใกล้เคียงกับโรงไฟฟ้าคาลินา จากผลการเปรียบเทียบโรงไฟฟ้าซูเปอร์คริติคอลโออาร์ซีใช้ความดันในการควบแน่นรองลงมา สำหรับโรงไฟฟ้าที่ใช้ความดันในการควบแน่นน้อยที่สุด ได้แก่ โรงไฟฟ้าแบบไตรเลทเทอร์รอลโออาร์ซี



รูปที่ 4.5 การเปรียบเทียบความดันในการควบแน่นของโรงไฟฟ้าทั้ง 4 ประเภทที่แหล่งความร้อนในช่วง 100 - 200°C

อย่างไรก็ตาม โรงไฟฟ้าแบบไตรเลทเทอร์รอลโออาร์ซีแม้จะใช้ความดันในการควบแน่นที่น้อยกว่าก็ตาม แต่ความดันค่าดังกล่าวกลับมีค่าที่ต่ำกว่าความดันบรรยากาศ โดยพบที่อุณหภูมิแหล่งความร้อนในช่วง 100 - 120°C ซึ่งมีค่าเท่ากับ 18 kPa ทุกช่วงของอุณหภูมิที่กล่าวมา ทำให้การออกแบบใช้งานโรงไฟฟ้างดังกล่าวเป็นการออกแบบที่ซับซ้อนมากขึ้น เพราะการออกแบบที่ความดันต่ำกว่าบรรยากาศจะทำให้อากาศอาจรั่วเข้ามาภายในระบบ และทำให้อุปกรณ์ภายในระบบต่าง ๆ เกิดความเสียหายขึ้นได้





รูปที่ 4.6 การเปรียบเทียบความดันในการควบแน่นของโรงไฟฟ้าทั้ง 4 ประเภทที่แหล่งความร้อน ในช่วง 200 - 300°C

เมื่อพิจารณารูปที่ 4.6 สังเกตเห็นได้อย่างชัดเจนว่า โรงไฟฟ้ากาลินาใช้ความดันในการควบแน่นที่มากกว่าโรงไฟฟ้าประเภทอื่นเฉลี่ยถึง 6 เท่า ส่งผลให้ในช่วงอุณหภูมิ 200 - 300°C โรงไฟฟ้ากาลินาต้องมีความแข็งแรงของอุปกรณ์ที่บริเวณทางออกจากเทอร์ไบน์จนถึงทางเข้าของปั๊มที่มากกว่าโรงไฟฟ้าแบบอื่นอย่างเห็นได้ชัด ในขณะที่โรงไฟฟ้าทั้ง 3 ประเภทมีความดันในการควบแน่นที่ใกล้เคียงกันเมื่ออุณหภูมิแหล่งความร้อนอยู่ในช่วง 210 - 250°C แต่เมื่ออุณหภูมิแหล่งความร้อนตั้งแต่ 260 - 300°C พบว่าโรงไฟฟ้าทั้ง 3 ประเภทเริ่มมีความแตกต่างของความดันในการควบแน่นอย่างเห็นได้ชัด

นอกจากนี้ในช่วงอุณหภูมิดังกล่าวพบว่า มีความดันในการควบแน่นที่ต่ำกว่าบรรยากาศ เช่น ในกรณีโรงไฟฟ้าซัพคริติคอลลีโออาร์ซีมีค่าความดันในการควบแน่นในช่วง 16 - 101 kPa โรงไฟฟ้าซูเปอร์คริติคอลลีโออาร์ซีมีความดันในการควบแน่นอยู่ในช่วง 33 - 65 kPa ส่งผลให้อุปกรณ์ของโรงไฟฟ้าทั้ง 3 ประเภทหากไม่ได้รับการออกแบบที่ดี อาจส่งผลเสียทำให้อุปกรณ์ภายในวัฏจักรเกิดการกัดกร่อนขึ้นซึ่งทำให้ความแข็งแรงลดลงได้

เมื่อพิจารณารูปที่ 4.5 และ 4.6 ร่วมกันพบว่า โรงไฟฟ้ากาลินามีความต้องการความดันในการควบแน่นที่มากที่สุด ในขณะที่โรงไฟฟ้าแบบไตรเลทเทอร์รอลโออาร์ซีต้องการความดันที่น้อยสุด สำหรับโรงไฟฟ้าซูเปอร์คริติคอลลีโออาร์ซีใช้ความดันในการควบแน่นเป็นอันดับที่สอง และโรงไฟฟ้าซัพคริติคอลลีโออาร์ซีต้องการความดันในการควบแน่นเป็นอันดับสาม

ซึ่งจากแนวโน้มดังกล่าวทำให้โรงไฟฟ้าคาถาต้องการอุปกรณ์ที่บริเวณทางออกจากเทอร์ไบน์สู่ทางเข้าของบีมที่แข็งแรงมากกว่าโรงไฟฟ้าแบบอื่น

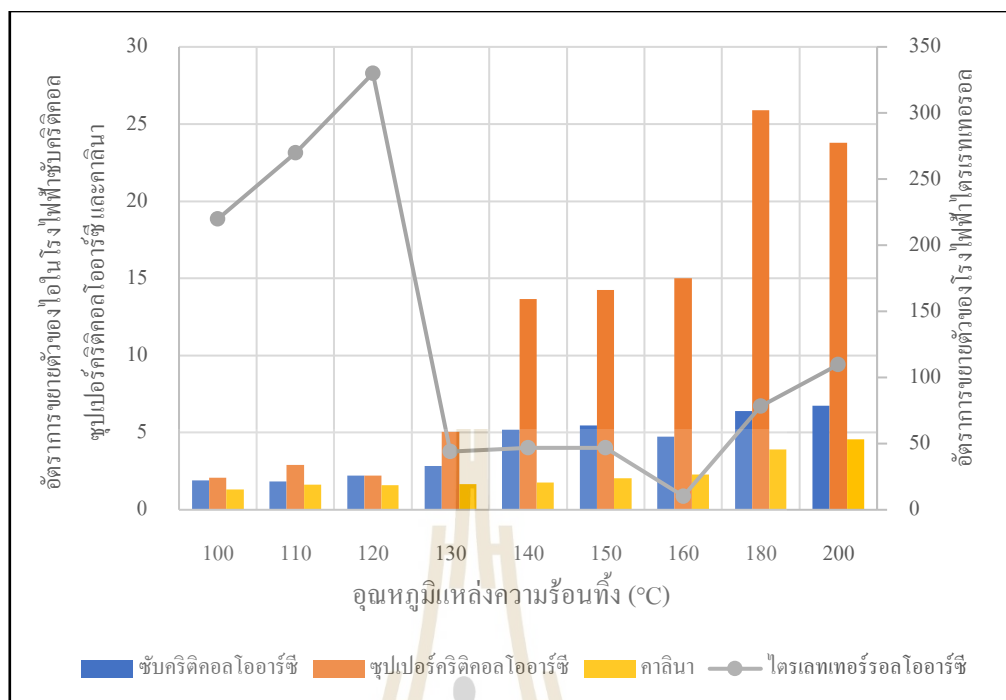
นอกจากนี้พบว่าแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของความดันในการควบแน่นสำหรับโรงไฟฟ้าคาถา คือ เมื่ออุณหภูมิแหล่งความร้อนเพิ่มขึ้นทำให้ความดันในการควบแน่นลดลงซึ่งแนวโน้มนี้คล้ายคลึงกับกรณีการเปลี่ยนแปลงของความดันในการระเหย และเป็นเช่นเดียวกันกับในโรงไฟฟ้าแบบอื่นที่มีแนวโน้มไม่ชัดเจน ซึ่งเหตุผลเป็นเช่นเดียวกับที่ได้อธิบายในกรณีความดันในการระเหยไว้ คือ โรงไฟฟ้าคาถาใช้สารทำงานเพียงชนิดเดียว ให้เห็นแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงได้ชัดเจน ซึ่งแตกต่างกับโรงไฟฟ้าทั้ง 3 ประเภท ที่เป็นการหาสารทำงานที่สามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้มากที่สุด เมื่อเทียบกับสารทำงานชนิดอื่นที่ได้นำมาจำลอง

#### 4.2.4 เปรียบเทียบอัตราการขยายตัวของไอของโรงไฟฟ้าทั้ง 4 ประเภท

กรณีการเปรียบเทียบอัตราการขยายตัวของไอของโรงไฟฟ้าทั้ง 4 ประเภท ซึ่งค่าดังกล่าวบ่งบอกถึงขนาดของเทอร์ไบน์ยังอัตราการขยายตัวของไอที่มากทำให้ขนาดของเทอร์ไบน์ยิ่งใหญ่ โดยการเปรียบเทียบขนาดของเทอร์ไบน์ที่อุณหภูมิของแหล่งความร้อน 2 ช่วง คือ 1. อุณหภูมิของแหล่งความร้อนอยู่ในช่วง 100 - 200°C 2. อุณหภูมิของแหล่งความร้อนอยู่ในช่วง 200 - 300°C สำหรับผลการเปรียบเทียบอัตราการขยายตัวของไอแสดงดังรูปที่ 4.7 และ 4.8 ทั้งนี้สำหรับแกนตั้งด้านซ้ายมือแสดงถึงอัตราการขยายตัวของไอสำหรับโรงไฟฟ้าซับคริติคอล โออาร์ซี ชูปเปอร์คริติคอล โออาร์ซี และโรงไฟฟ้าคาถา ส่วนกราฟแกนตั้งด้านขวามือแสดงถึงอัตราการขยายตัวของไอในกรณีของโรงไฟฟ้าไตรเลทเทอร์รอล โออาร์ซี

สำหรับรูปที่ 4.7 เป็นการพิจารณาถึงขนาดของเทอร์ไบน์ผ่านตัวแปรของอัตราการขยายตัวของไอ โดยพบว่าโรงไฟฟ้าคาถามีอัตราการขยายตัวของไอที่น้อยที่สุด ลำดับถัดมาเป็นโรงไฟฟ้าโออาร์ซีแบบซับคริติคอล สำหรับโรงไฟฟ้าชูปเปอร์คริติคอล โออาร์ซีมีอัตราการขยายตัวของไอน้อยเป็นอันดับ 3 ต่อเมื่ออุณหภูมิของแหล่งความร้อนอยู่ในช่วง 100 - 120°C แต่เมื่ออุณหภูมิแหล่งความร้อนอยู่ในช่วง 130 - 200°C โรงไฟฟ้าชูปเปอร์คริติคอล โออาร์ซีมีอัตราการขยายตัวของไอที่มากที่สุด

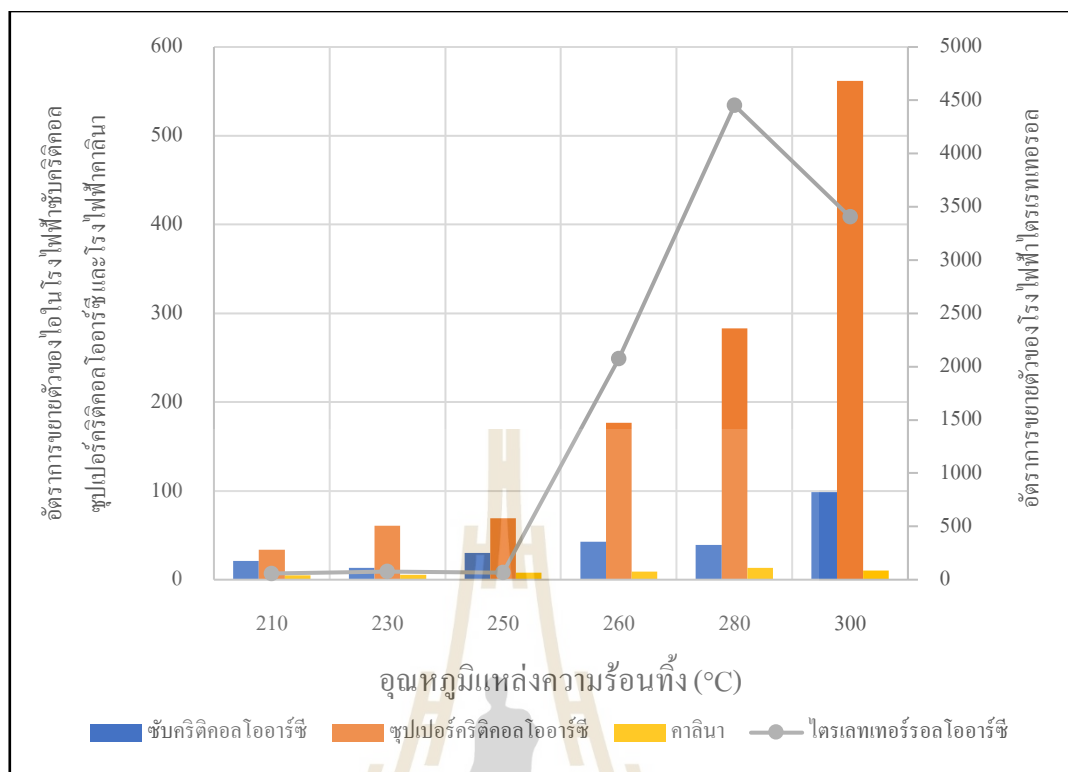
นอกจากนี้พบว่าเมื่ออุณหภูมิแหล่งความร้อนเท่ากับ 120°C อัตราการขยายตัวของไอของโรงไฟฟ้าไตรเลทเทอร์รอล โออาร์ซีมีการลดลงอย่างชัดเจน โดยพบว่าการลดลงถึง 6 เท่า ในขณะที่โรงไฟฟ้าแบบชูปเปอร์คริติคอล โออาร์ซีกลับมีการเพิ่มขึ้นของอัตราการขยายตัวของไอที่เพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนและเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ซึ่งสำหรับเหตุผลกรณีดังกล่าวอาจเกี่ยวข้องกับคุณสมบัติของสารทำงานที่เลือกใช้ในโรงไฟฟ้าแต่ละประเภท



รูปที่ 4.7 การเปรียบเทียบอัตราการขยายตัวของไอของโรงไฟฟ้าทั้ง 4 ประเภทที่แหล่งความร้อนในช่วง 100 - 200°C

รูปที่ 4.8 พบว่าแนวโน้มขนาดของอัตราการขยายตัวของไอ เป็นเช่นเดียวกับการเปรียบเทียบที่อุณหภูมิแหล่งความร้อนในช่วง 200 - 300°C คือ โรงไฟฟ้ากาลินามีค่าของอัตราการขยายตัวของไอที่น้อยที่สุด และโรงไฟฟ้าซูเปอร์คริติคอลไออาร์ซีที่มีค่าของอัตราการขยายตัวของไอที่มากที่สุด เมื่อพิจารณาอัตราการเพิ่มขึ้นของอัตราการขยายตัวของไอพบว่า โรงไฟฟ้ากาลินาและโรงไฟฟ้าซับคริติคอลไออาร์ซีมีการเปลี่ยนแปลงค่าของอัตราการขยายตัวของไอที่น้อยกว่าเมื่อเทียบกับโรงไฟฟ้าซูเปอร์คริติคอลไออาร์ซีและโรงไฟฟ้าไตรเลทเทอร์รอลไออาร์ซี

เมื่อพิจารณาอัตราการขยายตัวของไอของโรงไฟฟ้าทั้ง 4 ประเภททุกช่วงอุณหภูมิ ที่ทำการศึกษพบว่า โรงไฟฟ้ากาลินามีอัตราการขยายตัวของไอที่น้อยที่สุด รวมไปถึงมีอัตราการเพิ่มขึ้นของอัตราการขยายตัวของไอที่น้อยกว่าโรงไฟฟ้าแบบอื่น สำหรับโรงไฟฟ้าซับคริติคอลไออาร์ซีมีการอัตราการขยายตัวของไอ และอัตราการเพิ่มขึ้นของอัตราการขยายตัวของไอที่น้อยกว่าแต่มากกว่าโรงไฟฟ้ากาลินา สำหรับโรงไฟฟ้าซูเปอร์คริติคอลไออาร์ซีกับโรงไฟฟ้าไตรเลทเทอร์รอลไออาร์ซีมีรูปแบบการเปลี่ยนแปลงของอัตราการขยายตัวของไอที่ไม่ชัดเจน



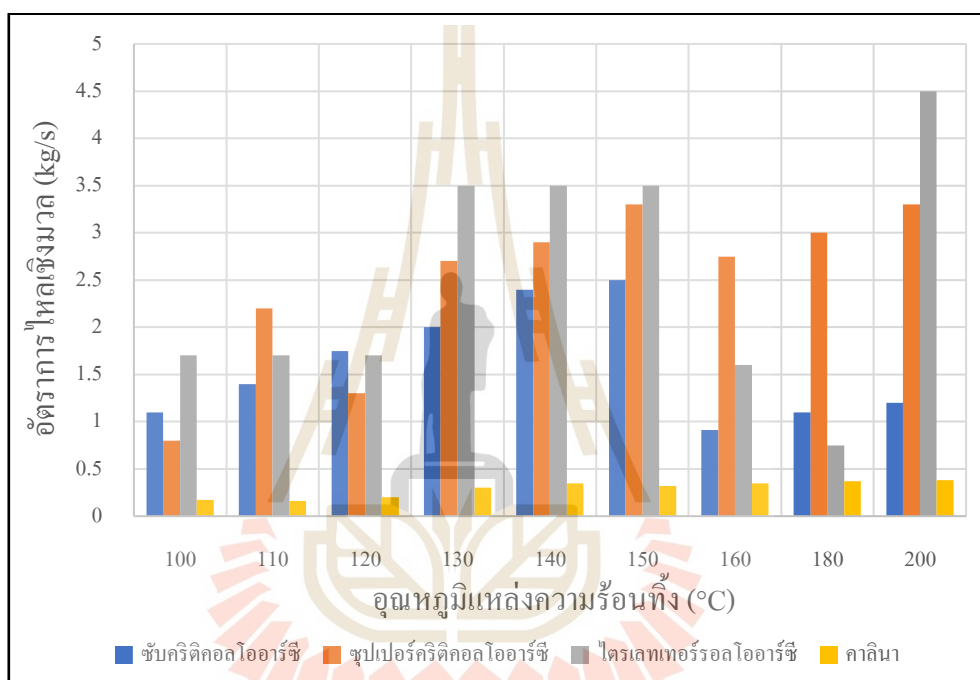
รูปที่ 4.8 การเปรียบเทียบอัตราการขยายตัวของไอของโรงไฟฟ้าทั้ง 4 ประเภทที่แหล่งความร้อนในช่วง 200 - 300°C

สำหรับสาเหตุที่โรงไฟฟ้าคาลินากับซับคริติคัลไออาร์ซีมีอัตราการขยายตัวของไอน้ำน้อยกว่าโรงไฟฟ้าแบบอื่น เนื่องจาก คุณสมบัติของสารทำงานที่เข้าสู่เทอร์ไบน์ของโรงไฟฟ้าทั้ง 2 ประเภทมีสถานะของสารทำงานเป็น saturation vapor ซึ่งแตกต่างกับแบบซูเปอร์คริติคัลไออาร์ซีและแบบไตรเลทเทอร์รอลไออาร์ซีซึ่งมีสถานะเป็น superheated vapor และ saturation liquid ตามลำดับ

#### 4.2.5 เปรียบเทียบอัตราการไหลเชิงมวลของโรงไฟฟ้าทั้ง 4 ประเภท

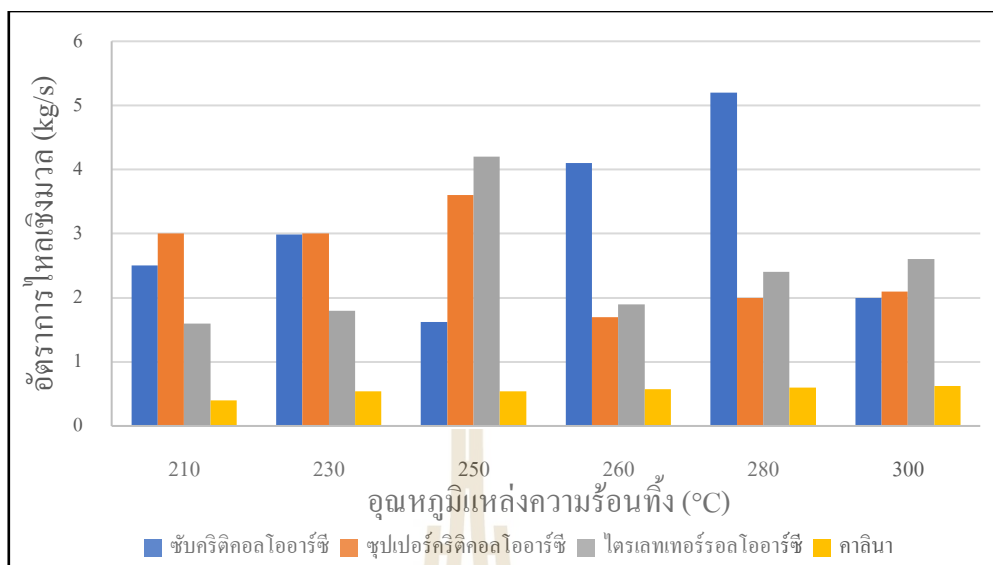
สำหรับการพิจารณาถึงอัตราการไหลเชิงมวลของโรงไฟฟ้าทั้ง 4 ประเภท โดยการเปรียบเทียบในกรณีดังกล่าวบ่งบอกถึงขนาดของปั๊ม โดยอัตราการไหลเชิงมวลที่มากส่งผลให้ขนาดของปั๊มใหญ่ตามไปด้วย ซึ่งผลการเปรียบเทียบขนาดของปั๊มแบ่งช่วงอุณหภูมิของแหล่งความร้อน 2 ช่วง คือ 1. อุณหภูมิของแหล่งความร้อนอยู่ในช่วง 100 - 200°C 2. อุณหภูมิของแหล่งความร้อนอยู่ในช่วง 200 - 300°C สำหรับผลการเปรียบเทียบอัตราการไหลเชิงมวลแสดงดังรูปที่ 4.9 และ 4.10

พิจารณารูปที่ 4.9 เป็นการเปรียบเทียบถึงอัตราการไหลเชิงมวลของโรงไฟฟ้าทั้ง 4 ประเภท ซึ่งพิจารณาในช่วงอุณหภูมิแหล่งความร้อนในช่วง 100 - 200°C สำหรับโรงไฟฟ้าที่ใช้อัตราการไหลเชิงมวลที่น้อยสุด ได้แก่ โรงไฟฟ้าคาลีนา โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่ออุณหภูมิแหล่งความร้อนอยู่ในช่วง 100 - 150°C จะสังเกตเห็นได้อย่างชัดเจนว่า โรงไฟฟ้าคาลีนาใช้อัตราการไหลเชิงมวลที่น้อยกว่าระบบอื่นอย่างชัดเจนซึ่งโดยรวมโรงไฟฟ้าทั้ง 3 ประเภทมีอัตราการไหลเชิงมวลที่มากกว่าถึง 10 เท่า



รูปที่ 4.9 การเปรียบเทียบอัตราการไหลเชิงมวลของโรงไฟฟ้าทั้ง 4 ประเภทที่แหล่งความร้อนในช่วง 100 - 300°C

นอกจากนี้ในช่วงอุณหภูมิ 100 - 150°C อัตราการไหลเชิงมวลของโรงไฟฟ้าซับคริติคัลไออาร์ซี ซูเปอร์คริติคัลไออาร์ซี และไตรเลทเทอร์รอลไออาร์ซีมีอัตราการไหลเชิงมวลที่ใกล้เคียงกัน แต่พบว่าเมื่ออุณหภูมิช่วง 160 - 180°C อัตราการไหลเชิงมวลของซูเปอร์คริติคัลไออาร์ซีมากกว่าอย่างชัดเจน และเมื่ออุณหภูมิเป็น 200°C อัตราการไหลเชิงมวลของไตรเลทเทอร์รอลไออาร์ซีมีอัตราการไหลเชิงมวลที่มากกว่าระบบอื่น ดังนั้นกรณีแหล่งความร้อนในช่วง 100 - 200°C โรงไฟฟ้าคาลีนาต้องการอัตราการไหลเชิงมวลน้อยสุด รองลงมาเป็นโรงไฟฟ้าซับคริติคัลไออาร์ซี ซูเปอร์คริติคัล ไออาร์ซี และไตรเลทเทอร์รอลไออาร์ซีตามลำดับ



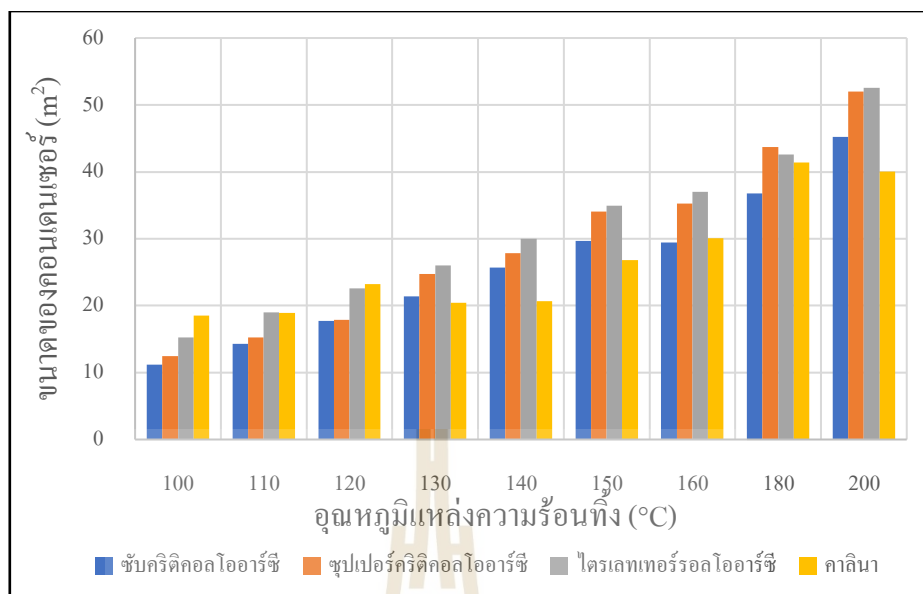
รูปที่ 4.10 การเปรียบเทียบอัตราการไหลเชิงมวลของโรงไฟฟ้าทั้ง 4 ประเภทที่แหล่งความร้อนในช่วง 200 - 300°C

สำหรับรูปที่ 4.10 เปรียบเทียบอัตราการไหลเชิงมวลของโรงไฟฟ้าทั้ง 4 ประเภท ในช่วงอุณหภูมิแหล่งความร้อน 200 - 300°C โรงไฟฟ้าคาลินายังคงใช้อัตราการไหลเชิงมวลน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับโรงไฟฟ้าชนิดอื่น ๆ แต่สำหรับโรงไฟฟ้าแบบอื่นมีการใช้อัตราการไหลเชิงมวลที่ไม่ชัดเจน แต่ภาพรวมแล้วโรงไฟฟ้าซับคริติคอลลออาร์ซีมีการใช้อัตราการไหลเชิงมวลมากที่สุด รองลงมาเป็นโรงไฟฟ้าซูเปอร์คริติคอลลออาร์ซีและ ไตรเลทเทอร์รอลลออาร์ซีตามลำดับ

เมื่อสังเกตร่วมกันระหว่างรูปที่ 4.9 และ 4.10 ร่วมกันพบว่า โรงไฟฟ้าคาลินาใช้อัตราการไหลเชิงมวลน้อยที่สุด เมื่อเทียบกับโรงไฟฟ้าประเภทอื่นซึ่งปริมาณอัตราการไหลเชิงมวลที่ใช้มีค่าน้อยกว่ามากอย่างเห็นได้ชัด ทำให้โรงไฟฟ้าคาลินามีข้อได้เปรียบคือ ขนาดของบั้งที่มีขนาดเล็กกว่าโรงไฟฟ้าประเภทอื่นอย่างชัดเจน

#### 4.2.6 เปรียบเทียบขนาดของคอนเดนเซอร์ของโรงไฟฟ้าทั้ง 4 ประเภท

สำหรับการพิจารณารณานี้ เป็นการพิจารณาขนาดคอนเดนเซอร์ของโรงไฟฟ้าทั้ง 4 ประเภท โดยเป็นการคำนวณค่าของ UA และจากนั้นแทนค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมเพื่อหาค่าพื้นที่ในการแลกเปลี่ยนความร้อน สำหรับผลการเปรียบเทียบขนาดของคอนเดนเซอร์แสดงดังรูปที่ 4.11 ในช่วงอุณหภูมิ 100 - 200°C และรูปที่ 4.12 แสดงผลเปรียบเทียบในช่วงอุณหภูมิ 200 - 300°C

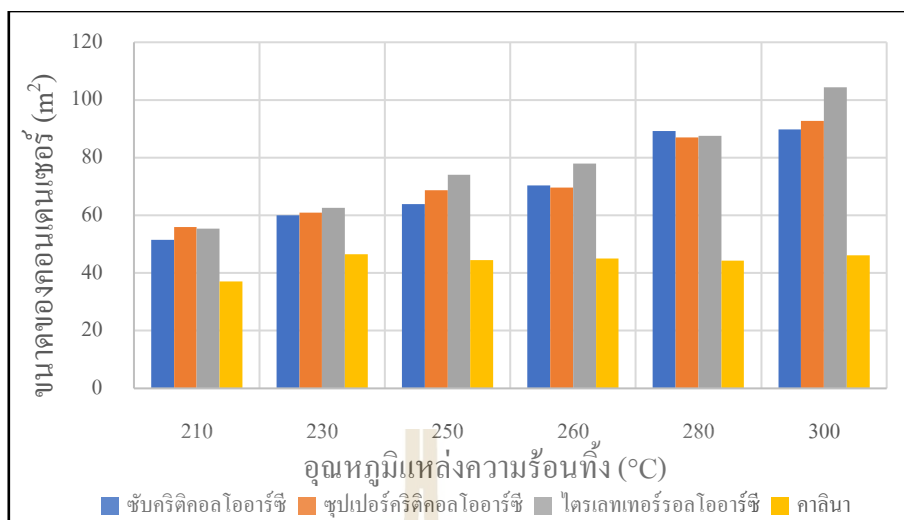


รูปที่ 4.11 การเปรียบเทียบขนาดของคอนเดนเซอร์ของโรงไฟฟ้าทั้ง 4 ประเภทที่แหล่งความร้อนในช่วง 100 - 200°C

จากรูปที่ 4.11 ซึ่งเป็นการศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิของแหล่งความร้อนว่าส่งผลอย่างไรกับขนาดของคอนเดนเซอร์โดยพบว่าเมื่ออุณหภูมิแหล่งความร้อนเพิ่มขึ้น ทำให้ขนาดของคอนเดนเซอร์ของโรงไฟฟ้าทุกประเภทมีขนาดที่ใหญ่ขึ้น เนื่องจากการที่อุณหภูมิแหล่งความร้อนเพิ่มขึ้นทำให้โรงไฟฟ้ามียุทธศาสตร์ความร้อนที่นำเข้ามาเพิ่มขึ้น ซึ่งพลังงานที่ถูกนำเข้ามาส่วนหนึ่งจะถูกนำไปผลิตกำลังไฟฟ้า และจะมีบางส่วนที่ถูกทิ้งไปที่บริเวณคอนเดนเซอร์โดยพลังงานที่ถูกทิ้งจะมีค่าเพิ่มขึ้นเช่นกันจึงทำให้ขนาดของคอนเดนเซอร์เพิ่มขึ้นตามไปด้วย

นอกจากนี้เมื่อพิจารณาขนาดของคอนเดนเซอร์ที่อุณหภูมิแหล่งความร้อนในช่วง 100 - 120°C ขนาดคอนเดนเซอร์ของโรงไฟฟ้ากาลินามีขนาดใหญ่ที่สุดเมื่อเทียบกับโรงไฟฟ้าประเภทอื่น สำหรับโรงไฟฟ้าไตรเลทเทอร์รอลลิวาร์ซีมีขนาดคอนเดนเซอร์ใหญ่รองลงมา และโรงไฟฟ้าซับคริติคอลลิวาร์ซีมีขนาดคอนเดนเซอร์ที่เล็กที่สุดในทางกลับกัน เมื่ออุณหภูมิแหล่งความร้อนตั้งแต่ 130°C ขนาดคอนเดนเซอร์สำหรับโรงไฟฟ้ากาลินากลับมีขนาดเล็กกว่าโรงไฟฟ้าประเภทอื่น โดยโรงไฟฟ้าทั้ง 3 ประเภทในช่วงอุณหภูมิ 100 - 200°C โรงไฟฟ้าไตรเลทเทอร์รอลลิวาร์ซีมีขนาดใหญ่สุด รองลงมาเป็นโรงไฟฟ้าซูเปอร์คริติคอลลิวาร์ซีและซับคริติคอลลิวาร์ซีตามลำดับ





รูปที่ 4.12 การเปรียบเทียบขนาดของคอนเดนเซอร์ของโรงไฟฟ้าทั้ง 4 ประเภทที่แหล่งความร้อนในช่วง 200 - 300°C

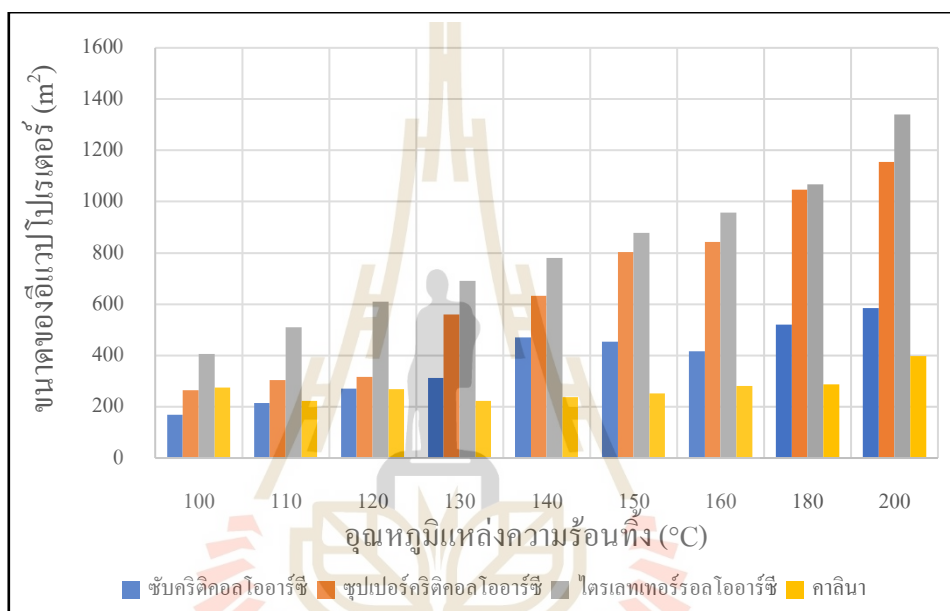
สำหรับรูปที่ 4.12 เป็นการพิจารณาขนาดคอนเดนเซอร์เมื่ออุณหภูมิแหล่งความร้อนในช่วง 200 - 300°C จากผลการจำลองพบว่า โรงไฟฟ้ากาลินามีขนาดของคอนเดนเซอร์เล็กที่สุดเมื่อเทียบกับโรงไฟฟ้าประเภทอื่น โดยโรงไฟฟ้าไตรเลทเทอร์รอลโออาร์ซีมีขนาดใหญ่สุด รองลงมาเป็นโรงไฟฟ้าซุปเปอร์คริติคอลโออาร์ซีและซับคริติคอลโออาร์ซี เช่นเดียวกับอุณหภูมิแหล่งความร้อนในช่วง 100 - 200°C

สำหรับโรงไฟฟ้าไตรเลทเทอร์รอลโออาร์ซี โรงไฟฟ้าซุปเปอร์คริติคอลโออาร์ซี และซับคริติคอลโออาร์ซี มีขนาดคอนเดนเซอร์ที่ใกล้เคียงกัน เช่น เมื่ออุณหภูมิแหล่งความร้อนเท่ากับ 230°C โรงไฟฟ้าซับคริติคอล ซุปเปอร์คริติคอล และไตรเลทเทอร์รอลโออาร์ซีมีขนาดของอุปกรณ์เท่ากับ 59 61 และ 62 m<sup>2</sup> ตามลำดับ

รวมไปถึงโรงไฟฟ้าที่กล่าวมา มีขนาดของอุปกรณ์ที่มากกว่าโรงไฟฟ้ากาลินาอย่างชัดเจนและเมื่ออุณหภูมิของแหล่งความร้อนเพิ่มมากขึ้นความแตกต่างของขนาดอุปกรณ์ยิ่งมากขึ้น เช่น เมื่ออุณหภูมิแหล่งความร้อนเท่ากับ 250°C โรงไฟฟ้าซับคริติคอล ซุปเปอร์คริติคอล ไตรเลทเทอร์รอลโออาร์ซี และโรงไฟฟ้ากาลินามีขนาดของอุปกรณ์เท่ากับ 64 68 74 และ 44 m<sup>2</sup> ตามลำดับ สังเกตได้ว่าโรงไฟฟ้าทั้ง 3 ประเภท มีขนาดใหญ่กว่าโรงไฟฟ้ากาลินาถึง 1.5 เท่า แต่เมื่อแหล่งความร้อนอุณหภูมิเพิ่มเป็น 280°C โรงไฟฟ้าทั้ง 3 ประเภทมีขนาดใหญ่กว่าโรงไฟฟ้ากาลินา 1.9 เท่า ส่งผลให้หากอุณหภูมิของแหล่งความร้อนยิ่งสูง ข้อได้เปรียบของโรงไฟฟ้ากาลินาคือ ขนาดของคอนเดนเซอร์ที่เล็กกว่าอย่างเห็นได้ชัด

#### 4.2.7 เปรียบเทียบขนาดของอีแวปโปเรเตอร์ของโรงไฟฟ้าทั้ง 4 ประเภท

สำหรับการพิจารณากรณีนี้ เป็นการพิจารณาขนาดอีแวปโปเรเตอร์ของโรงไฟฟ้าทั้ง 4 ประเภทโดยทำการคำนวณค่าของ UA และแทนค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมเพื่อหาค่าพื้นที่ในการแลกเปลี่ยนความร้อน สำหรับผลการเปรียบเทียบขนาดอีแวปโปเรเตอร์ของโรงไฟฟ้าทั้ง 4 ประเภทแสดงดังรูปที่ 4.13 ในช่วงอุณหภูมิ 100 - 200°C และรูปที่ 4.14 แสดงผลเปรียบเทียบในช่วงอุณหภูมิ 200 - 300°C



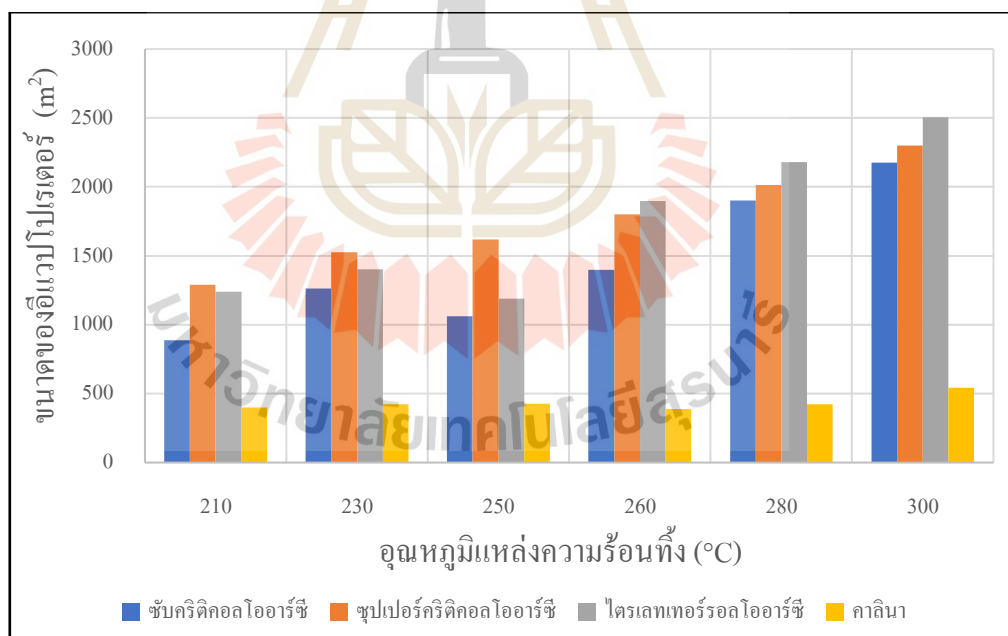
รูปที่ 4.13 การเปรียบเทียบขนาดอีแวปโปเรเตอร์ของโรงไฟฟ้าทั้ง 4 ประเภทที่แหล่งความร้อนในช่วง 100 - 200°C

สำหรับรูปที่ 4.13 เป็นเปรียบเทียบขนาดอีแวปโปเรเตอร์เมื่ออุณหภูมิของแหล่งความร้อนเปลี่ยนแปลง พบว่าเมื่ออุณหภูมิแหล่งความร้อนเพิ่มขึ้นส่งผลให้ขนาดอีแวปโปเรเตอร์เพิ่มขึ้น ซึ่งแนวโน้มดังกล่าวเป็นกับโรงไฟฟ้าทุกประเภทที่ทำการศึกษา โดยสาเหตุสำหรับในกรณีดังกล่าวสมเหตุสมผลตามทฤษฎี เนื่องจากเมื่ออุณหภูมิแหล่งความร้อนเพิ่มขึ้นส่งผลให้พลังงานความร้อนที่ได้รับจากแหล่งความร้อนเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน ส่งผลให้ขนาดอีแวปโปเรเตอร์เพิ่มขึ้นเพื่อให้สามารถถ่ายเทความร้อนจากแหล่งความร้อนมาสู่สารทำงานได้ทั้งหมด

นอกจากนี้พบว่า โรงไฟฟ้กาลินามีแนวโน้มขนาดอีแวปโปเรเตอร์ที่เล็กกว่าโรงไฟฟ้าประเภทอื่น โดยเฉพาะอย่างยิ่ง เมื่ออุณหภูมิแหล่งความร้อนมากกว่า 130°C และเมื่อ

เปรียบเทียบขนาดอีแวปโปเรเตอร์โรงไฟฟ้าที่ต้องการขนาดใหญ่ที่สุดได้แก่ โรงไฟฟ้าไตรเลทเทอร์รอลโออาร์ซี รองลงมาเป็นโรงไฟฟ้าซูปเปอร์คริติคอลโออาร์ซีและซับคริติคอลโออาร์ซี นอกจากนี้สำหรับโรงไฟฟ้าไตรเลทเทอร์รอลโออาร์ซีและซูปเปอร์คริติคอลโออาร์ซีมีความต้องการขนาดอีแวปโปเรเตอร์ที่มากกว่าโรงไฟฟ้าแบบอื่นอย่างชัดเจนเมื่ออุณหภูมิแหล่งความร้อนอยู่ในช่วง 130 - 200°C

เมื่อพิจารณารูปที่ 4.14 พิจารณาอุณหภูมิแหล่งความร้อนในช่วง 200 - 300°C พบว่าขนาดอีแวปโปเรเตอร์ของโรงไฟฟ้าคาลินามีขนาดเล็กกว่าโรงไฟฟ้าประเภทอื่นอย่างเห็นได้ชัด โดยโรงไฟฟ้าไตรเลทเทอร์รอลโออาร์ซีมีขนาดอีแวปโปเรเตอร์ที่ใหญ่ที่สุด รองลงมาเป็นโรงไฟฟ้าซูปเปอร์คริติคอลโออาร์ซีและซับคริติคอลโออาร์ซีตามลำดับ นอกจากนี้พบว่าแนวโน้มขนาดอีแวปโปเรเตอร์สำหรับโรงไฟฟ้าไตรเลทเทอร์รอลและซูปเปอร์คริติคอลโออาร์ซีมีขนาดของอุปกรณ์ใกล้เคียงกันในช่วงอุณหภูมิดังกล่าว และเมื่ออุณหภูมิแหล่งความร้อนตั้งแต่ 280°C พบว่าโรงไฟฟ้าซับคริติคอลโออาร์ซีมีขนาดของอุปกรณ์ที่ใกล้เคียงกันกับโรงไฟฟ้าไตรเลทเทอร์รอลและซูปเปอร์คริติคอลโออาร์ซี



รูปที่ 4.14 การเปรียบเทียบขนาดอีแวปโปเรเตอร์ของโรงไฟฟ้าทั้ง 4 ประเภทที่แหล่งความร้อนในช่วง 200 - 300°C

ดังนั้น เมื่อพิจารณาถึงภาพรวมของขนาดอีแวปโปเรเตอร์ของโรงไฟฟ้าทั้ง 4 ประเภทพบว่า ในช่วงอุณหภูมิของแหล่งความร้อนที่ทำการศึกษาได้แก่ 100 - 300°C โรงไฟฟ้าคาลินาจะมีขนาดอุปกรณ์ที่เล็กที่สุด ส่วนโรงไฟฟ้าไตรเลทเทอร์รอดโออาร์ซีมีขนาดใหญ่ที่สุด รองลงมาคือ โรงไฟฟ้าซูเปอร์คริติคอลลและซับคริติคอลลโออาร์ซี นอกจากนี้โรงไฟฟ้าคาลินามีการเปลี่ยนแปลงของขนาดอุปกรณ์ที่น้อยกว่าโรงไฟฟ้าทั้ง 3 ประเภทอย่างเห็นได้ชัด

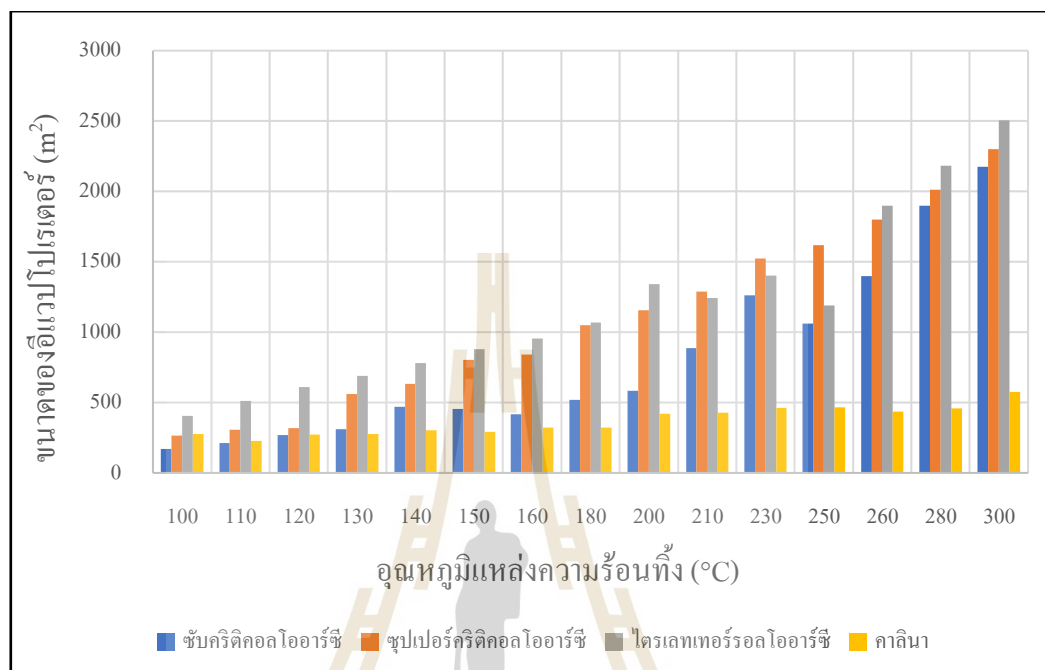
#### 4.2.8 พิจารณาตัวแปรที่ส่งผลต่อกำลังไฟฟ้าของโรงไฟฟ้าคาลินา

เมื่อเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ดังรูปที่ 4.1 และ 4.2 กับขนาดของอุปกรณ์ที่รับความร้อนจากแหล่งความร้อน ได้แก่ อีแวปโปเรเตอร์ดังรูปที่ 4.13 และ 4.14 พบว่า ความแตกต่างของขนาดอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนของโรงไฟฟ้าคาลินาในช่วง 100 - 200°C มีค่าน้อยกว่าช่วง 200 - 300°C ทำให้อัตราการแลกเปลี่ยนความร้อนที่ได้รับจากแหล่งความร้อนหรือพลังงานความร้อนที่นำเข้าสู่โรงไฟฟ้าคาลินาใกล้เคียงกับโรงไฟฟ้าประเภทอื่น รวมไปถึงโรงไฟฟ้าคาลินามีอุปกรณ์ที่นำความร้อนทิ้งภายในระบบมาใช้งานผ่านอุปกรณ์รีคูเพอเรเตอร์อุณหภูมิสูง กับรีคูเพอเรเตอร์อุณหภูมิต่ำ จึงทำให้เมื่อพิจารณาอุปกรณ์ที่เพิ่มความร้อนให้กับสารทำงานในช่วงอุณหภูมิ 100 - 200°C มีขนาดใกล้เคียงกัน แต่จะแตกต่างกันอย่างชัดเจนในช่วง 200 - 300°C แสดงดังรูปที่ 4.15

เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 4.15 พบว่าจากการที่ขนาดของอุปกรณ์รับความร้อนสำหรับโรงไฟฟ้าคาลินามีค่าใกล้เคียงกับโรงไฟฟ้าทุกประเภทในช่วง 100 - 200°C ส่งผลให้กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้นั้นมีค่าที่ใกล้เคียงกันและมากกว่าโรงไฟฟ้าบางประเภท เนื่องจากการที่อุปกรณ์รับความร้อนมีขนาดใกล้เคียงกันทำให้โรงไฟฟ้าสามารถนำพลังงานความร้อนมาผลิตไฟฟ้าได้ใกล้เคียงกัน แต่ในช่วงอุณหภูมิ 200 - 300°C พบว่าโรงไฟฟ้าคาลินามีขนาดของอุปกรณ์รับความร้อนที่น้อยกว่าอย่างเห็นได้ชัด จึงเป็นสาเหตุอีกอย่างที่ทำให้โรงไฟฟ้าคาลินาผลิตกำลังไฟฟ้าได้น้อยกว่าโรงไฟฟ้าประเภทอื่น อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบระหว่างรูปที่ 4.15 กับ 4.1 และ 4.2 พบว่าขนาดของอุปกรณ์รับความร้อนของโรงไฟฟ้าคาลินาจะขึ้นกับขนาดของ มากกว่าซึ่งเมื่อเปรียบเทียบเห็นได้ชัดเจนว่าการเพิ่มขึ้นของขนาดอุปกรณ์รับความร้อนมีค่าน้อยมาก

สำหรับการพิจารณาอุปกรณ์ที่ทิ้งความร้อน ได้แก่ คอนเดนเซอร์ดังรูปที่ 4.11 และ 4.12 ซึ่งอุปกรณ์ดังกล่าวเกี่ยวข้องกับกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ กล่าวคือหากอุปกรณ์มีขนาดใหญ่แสดงว่า จะมีความร้อนที่ถูกทิ้งออกจากระบบมากขึ้น ส่งผลให้ปริมาณกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้นั้นลดน้อยลงตามไปด้วย อย่างไรก็ตามพบว่า ที่ช่วงอุณหภูมิ 100 - 200°C ขนาดคอนเดนเซอร์ของโรงไฟฟ้าคาลินามีขนาดที่ใหญ่กว่าโรงไฟฟ้าโออาร์ซี แสดงว่ากำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ของโรงไฟฟ้าคาลินาควรน้อย

กว่าโรงไฟฟ้าโออาร์ซี แต่ผลลัพธ์กลับตรงกันข้าม ดังนั้นอิทธิพลของขนาดคอนเดนเซอร์หรือพลังงานความร้อนที่ถูกทิ้งมีผลกระทบที่น้อยกว่าขนาดของอุปกรณ์รับความร้อน



รูปที่ 4.15 การเปรียบเทียบขนาดอ่าวไปเรเตอร์ของโรงไฟฟ้าทั้ง 4 ประเภทที่แหล่งความร้อนในช่วง 100 - 300°C

นอกจากนี้ในช่วงอุณหภูมิ 200 - 300°C ขนาดคอนเดนเซอร์ของโรงไฟฟ้าคาลินามีขนาดเล็กกว่าโรงไฟฟ้าทุกประเภท ซึ่งหมายถึงความร้อนที่ถูกทิ้งจากโรงไฟฟ้าคาลินาจะน้อยกว่าโรงไฟฟ้าประเภทอื่นส่งผลให้ปริมาณไฟฟ้าที่ผลิตได้ควรจะมากกว่า แต่กลับพบว่าโรงไฟฟ้าคาลินามีภาพรวมการผลิตกำลังไฟฟ้าได้น้อยสุด และเมื่อพิจารณาถึงขนาดของอ่าวไปเรเตอร์พบว่าโรงไฟฟ้าคาลินามีขนาดเล็กที่สุดซึ่งหมายถึงความร้อนที่นำมาผลิตไฟฟ้าจากแหล่งความร้อนมีค่าน้อยสุดเช่นกัน แสดงว่าในช่วงอุณหภูมิที่ทำการศึกษากำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ขึ้นอยู่กับขนาดของอ่าวไปเรเตอร์หรือปริมาณความร้อนที่นำมาผลิตไฟฟ้ามากกว่าขนาดของคอนเดนเซอร์หรือปริมาณความร้อนที่ทิ้งจากระบบ

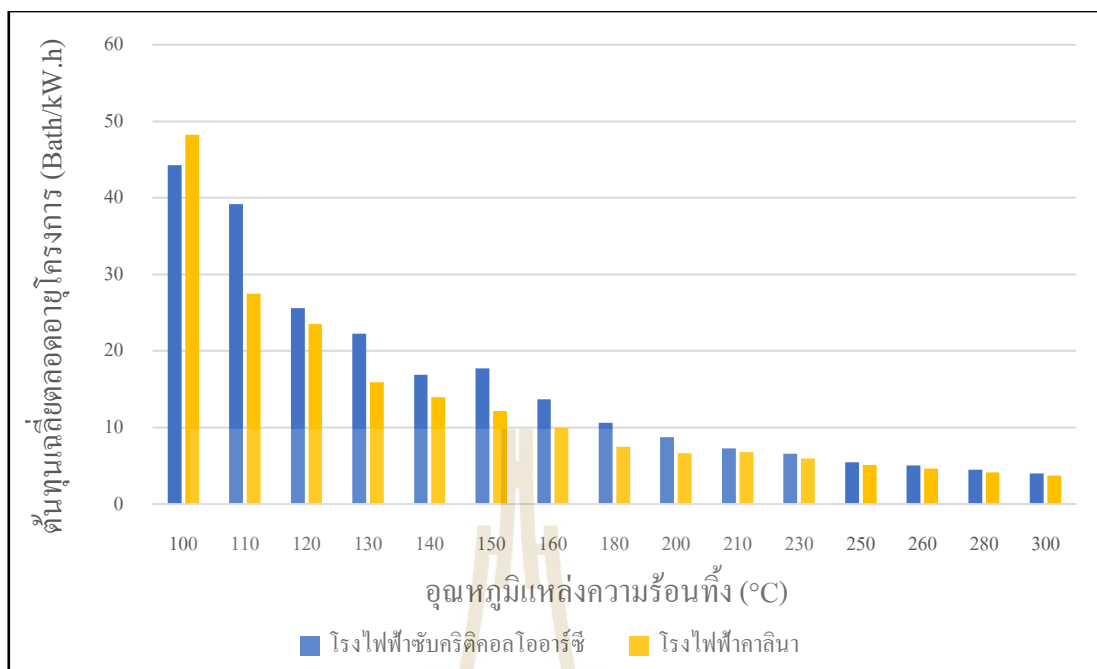
ดังนั้นตัวแปรเพื่อพิจารณาถึงความคุ้มค่าในการลงทุนสร้างโรงไฟฟ้าแต่ละแบบ จึงได้นำเสนอการพิจารณาถึงต้นทุนเฉลี่ยตลอดอายุโครงการ (LCOE) ซึ่งผลการเปรียบเทียบในกรณีดังกล่าว จะพิจารณาเฉพาะโรงไฟฟ้าชับริตติคอลโออาร์ซีกับโรงไฟฟ้าคาลินาเท่านั้น เนื่องจาก

อัตราการขยายตัวของเทอร์ไบน์ในโรงไฟฟ้าแบบซูปเปอร์คริติคอลโออาร์ซีและโรงไฟฟ้าไตรเลทเทอร์รอลโออาร์ซีมีค่ามากกว่าโรงไฟฟ้าประเภทอื่นอย่างชัดเจน รวมไปถึงการศึกษาของ Modi et al.(2016) พบว่าราคาของเทอร์ไบน์มีราคาถึง 47% เมื่อเทียบกับราคาของอุปกรณ์ทั้งหมดของโรงไฟฟ้า โดยผลการเปรียบเทียบของต้นทุนเฉลี่ยตลอดอายุโครงการของโรงไฟฟ้า แสดงดังรูปที่ 4.16

จากรูปที่ 4.16 พบว่าโรงไฟฟ้าคาลินามีต้นทุนเฉลี่ยในการผลิตไฟฟ้าที่น้อยกว่าโรงไฟฟ้าซูปเปอร์คริติคอลโออาร์ซีทุกช่วงอุณหภูมิของแหล่งความร้อนที่ทำการศึกษา โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่ออุณหภูมิอยู่ในช่วง  $100 - 200^{\circ}\text{C}$  ซึ่งเป็นช่วงที่โรงไฟฟ้าคาลินาผลิตกำลังไฟฟ้าได้มากกว่าโรงไฟฟ้าซูปเปอร์คริติคอลโออาร์ซี แต่สำหรับช่วงที่โรงไฟฟ้าซูปเปอร์คริติคอลโออาร์ซีผลิตกำลังไฟฟ้าได้มากกว่าแต่มีต้นทุนในการผลิตไฟฟ้ามากกว่าไปด้วย เนื่องจากปริมาณไฟฟ้าที่ผลิตเพิ่มขึ้นได้น้อยกว่าการเพิ่มขึ้นของราคาในการลงทุน

ดังนั้นสำหรับการเลือกสร้างโรงไฟฟ้าที่แหล่งความร้อนในช่วง  $100 - 300^{\circ}\text{C}$  อาจมีปัจจัยอื่นมาพิจารณาเพิ่มเติมเพื่อประกอบการตัดสินใจ แต่หากต้องการเลือกโรงไฟฟ้าที่ต้นทุนในการผลิตไฟฟ้าที่ต่ำควรเลือกโรงไฟฟ้าคาลินา แต่หากต้องการปริมาณกำลังไฟฟ้าที่สูงควรเลือกโรงไฟฟ้าคาลินา เมื่ออุณหภูมิแหล่งความร้อนอยู่ในช่วง  $100 - 200^{\circ}\text{C}$  และเมื่ออุณหภูมิแหล่งความร้อนอยู่ในช่วง  $200 - 300^{\circ}\text{C}$  ควรเลือกโรงไฟฟ้าซูปเปอร์คริติคอลโออาร์ซีแทน

อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาถึงงบประมาณในการลงทุนยังมีค่าที่สูงมาก เมื่อเทียบกับงานวิจัยอื่น เช่น เมื่อเปรียบเทียบต้นทุนในการผลิตไฟฟ้ากับ Rodriguez et al (2013) พบว่าต้นทุนในการผลิตไฟฟ้าอยู่ที่ 5.34 Baht/kW.h ในขณะที่โรงไฟฟ้าคาลินาจากการจำลอง มีต้นทุนการผลิตไฟฟ้าถึง 48.23 Baht/kW.h โดยการเปรียบเทียบพิจารณาที่แหล่งความร้อนอุณหภูมิเดียวกัน แต่สาเหตุที่มีต้นทุนที่แตกต่างกัน เนื่องจากอัตราการไหลเชิงมวลของแหล่งความร้อนของวิทยานิพนธ์นี้ใช้ค่าน้อยกว่างานวิจัยที่นำมาเปรียบเทียบถึง 200 เท่า



รูปที่ 4.16 การเปรียบเทียบต้นทุนเฉลี่ยตลอดอายุโครงการของโรงไฟฟ้าซับคริติคอลลออาร์ซีกับโรงไฟฟ้าคาลินาที่แหล่งความร้อนทิ้งในช่วง 100 - 300°C

ดังนั้นสำหรับการเลือกสร้างโรงไฟฟ้าที่แหล่งความร้อนทิ้งในช่วง 100 - 300°C อาจมีปัจจัยอื่นมาพิจารณาเพิ่มเติมเพื่อประกอบการตัดสินใจ แต่หากต้องการเลือกโรงไฟฟ้าที่ต้นทุนในการผลิตไฟฟ้าที่ต่ำควรเลือกโรงไฟฟ้าคาลินา แต่หากต้องการปริมาณกำลังไฟฟ้าที่สูงควรเลือกโรงไฟฟ้าคาลินา เมื่ออุณหภูมิแหล่งความร้อนทิ้งอยู่ในช่วง 100 - 200°C และเมื่ออุณหภูมิแหล่งความร้อนทิ้งอยู่ในช่วง 200 - 300°C ควรเลือกโรงไฟฟ้าซับคริติคอลลออาร์ซีแทน

อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาถึงงบประมาณในการลงทุนยังมีค่าที่สูงมาก เมื่อเทียบกับงานวิจัยอื่น เช่น เมื่อเปรียบเทียบต้นทุนในการผลิตไฟฟ้ากับ Rodriguez et al (2013) พบว่าต้นทุนในการผลิตไฟฟ้าอยู่ที่ 5.34 Bath/kW.h ในขณะที่โรงไฟฟ้าคาลินาจากการจำลอง มีต้นทุนการผลิตไฟฟ้าถึง 48.23 Bath/kW.h โดยการเปรียบเทียบพิจารณาที่แหล่งความร้อนอุณหภูมิเดียวกัน แต่สาเหตุที่มีต้นทุนที่แตกต่างกัน เนื่องจากอัตราการไหลเชิงมวลของแหล่งความร้อนของวิทยานิพนธ์นี้ใช้ค่าน้อยกว่างานวิจัยที่นำมาเปรียบเทียบถึง 200 เท่า



#### 4.3 การเปรียบเทียบระหว่างวิธีการออกแบบในกรณีทั่วไปกับแบบปรับความดันในการควบคุมของโรงไฟฟ้าคาถินา

##### 4.3.1 การออกแบบโรงไฟฟ้าแบบกรณีทั่วไป

เป็นการจำลองโดยอ้างอิงอุณหภูมิที่สูงสุดในพื้นที่นั้น โดยพื้นที่ที่ทำการจำลองคือ จ.นครราชสีมา โดยสำหรับเงื่อนไขในการจำลองแสดงดังตารางที่ 3.3 ซึ่งการออกแบบในกรณีนี้ กำหนดให้เงื่อนไขในการทำงานทุกชนิดเป็นค่าคงที่

##### 4.3.2 การออกแบบโรงไฟฟ้าแบบการปรับเงื่อนไขในการทำงาน

สำหรับการจำลองในกรณีดังกล่าว ทำการปรับเงื่อนไขในการทำงานทั้งหมด ได้แก่ อัตราการไหลเชิงมวล ความดันในการควบคุม ความดันในการระเหย ความเข้มข้นของสารทำงาน อุณหภูมิที่เข้าเทอร์ไบน์และอุณหภูมิที่เข้ารีคิพเพอร์เรเตอร์อุณหภูมิสูงให้สอดคล้องกับอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อมที่เปลี่ยนแปลงไป

##### 4.3.3 การออกแบบโรงไฟฟ้าแบบการปรับเงื่อนไขในการทำงานเฉพาะความเข้มข้นในสารทำงานและความดันในการควบคุม

สำหรับการจำลองในกรณีดังกล่าว ทำการปรับเงื่อนไขในการทำงานเฉพาะ ความเข้มข้นของสารทำงาน และความดันในการควบคุมให้สอดคล้องกับอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อมที่เปลี่ยนแปลงไป

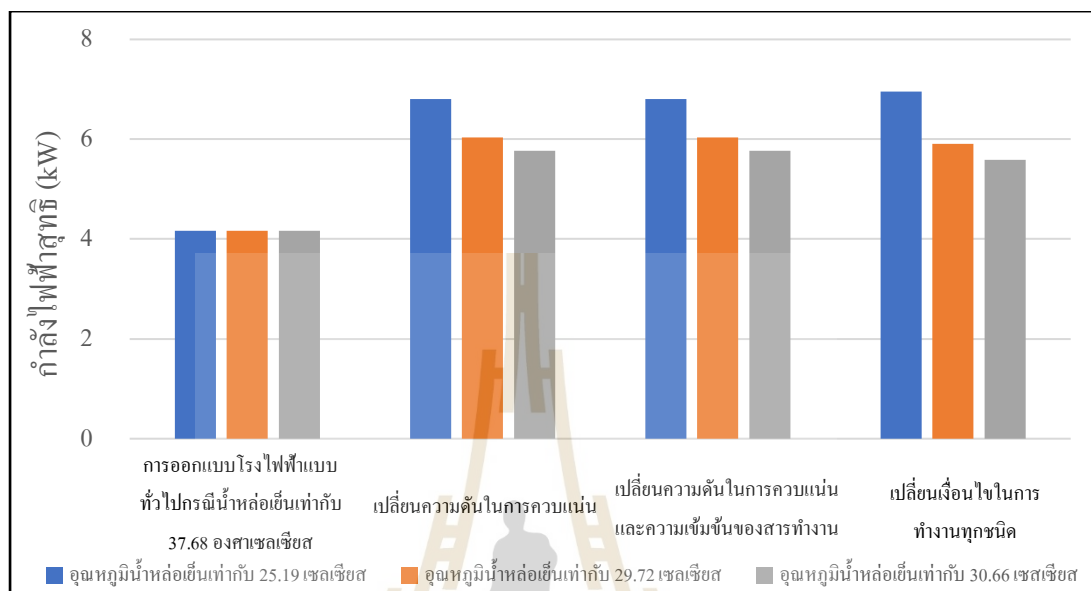
##### 4.3.4 การออกแบบโรงไฟฟ้าแบบปรับความดันในการควบคุม

การออกแบบในกรณีดังกล่าว ทำการปรับเปลี่ยนเฉพาะค่าของ ความดันในการควบคุม ให้สอดคล้องกับอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อมที่เปลี่ยนแปลงไป และจะคงที่ค่าของ ความดันในการระเหย ความเข้มข้นของสารทำงาน อัตราการไหลเชิงมวล อุณหภูมิที่เข้าเทอร์ไบน์และอุณหภูมิที่เข้ารีคิพเพอร์เรเตอร์อุณหภูมิสูง และความเข้มข้นของสารทำงาน

##### 4.3.5 การเปรียบเทียบการออกแบบโรงไฟฟ้าแบบกรณีทั่วไป แบบปรับความดันในการควบคุม และแบบการปรับเงื่อนไขในการทำงานให้สอดคล้องกับอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม

ในกรณีดังกล่าว เป็นการเปรียบเทียบถึง ความแตกต่างของวิธีการทั้ง 4 ประเภท โดยเป็นการพิจารณาถึง ผลลัพธ์ของการทำงานตามเงื่อนไขที่ตั้งไว้ในกรณีต่าง ๆ เช่น กำลังไฟฟ้าสุทธิที่ผลิตได้ รวมถึงคูทธิพลของตัวแปรต่าง ๆ ที่เปลี่ยนแปลงไป โดยอุณหภูมิที่ใช้จำลองที่แสดงถึงผลลัพธ์การปรับปรุงโรงไฟฟ้าคาถินาให้ผลิตกำลังไฟฟ้าได้สูงสุด ใช้ข้อมูลในเดือนธันวาคมซึ่งอุณหภูมิที่ต่ำที่สุดในปีพ.ศ. 2562 โดยสาเหตุที่เลือกเดือนดังกล่าว เนื่องจากการศึกษาของ Wang & Yu (2017) ที่พบว่า ยิ่งอุณหภูมิมบรรยากาศน้อย จะทำให้ระบบผลิตกำลังไฟฟ้าได้มาก

ดังนั้นจึงได้ศึกษาเดือนที่อุณหภูมิต่ำสุด เพื่อเห็นผลลัพธ์ที่แตกต่างกันอย่างชัดเจนของวิธีการทั้ง 4 ประเภท โดยผลการเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้แสดงดังรูปที่ 4.17



รูปที่ 4.17 การเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าสุทธิที่ผลิตได้ในเดือนธันวาคมของวิธีการทั้ง 4 แบบ

จากรูปที่ 4.17 แสดงถึงการเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าสุทธิของโรงไฟฟ้าคาถินาทั้ง 4 แบบ โดยกราฟแท่งสีฟ้าแสดงถึงการออกแบบโรงไฟฟ้าคาถินา ในช่วงเวลา 10.00น. มีอุณหภูมิเท่ากับ 25.19°C กราฟแท่งสีส้มเป็นการออกแบบโรงไฟฟ้าคาถินาในช่วงเวลา 13.00น. มีอุณหภูมิเท่ากับ 29.72°C และกราฟแท่งสีเทาใช้ช่วงเวลา 16.00น. มาจำลองการทำงานของโรงไฟฟ้าคาถินา และมีอุณหภูมิเท่ากับ 30.66°C

สำหรับกลุ่มของกราฟแท่งแรกโดยนับจากทางซ้ายมือ เป็นการออกแบบโรงไฟฟ้าแบบทั่วไปซึ่งเป็นการออกแบบให้นำค่าของอุณหภูมิสูงสุดในปีที่ทำการออกแบบมาใช้จำลอง โดยพบว่าเมื่ออุณหภูมิของสิ่งแวดล้อมเพิ่มขึ้น กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ไม่มีการเปลี่ยนแปลงโดยมีค่าเท่ากับ 4.2 kW เนื่องจากการออกแบบระบบดังกล่าวจะกำหนดให้เงื่อนไขในการทำงานทุกค่าเป็นค่าคงที่

กลุ่มกราฟลำดับที่ 2 นับจากทางซ้ายมือ แสดงถึงการออกแบบโรงไฟฟ้าให้ทำการปรับความดันในการควบแน่นให้สอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม หรือเรียกวิธีนี้ว่า sliding condensation pressure โดยพบว่า เมื่ออุณหภูมิของสิ่งแวดล้อมเพิ่มขึ้นจาก 25.19 เป็น 30.66°C ส่งผลให้กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ลดลงจาก 6.81 เป็น 5.77 kW

กลุ่มกราฟลำดับที่ 3 จากซ้ายมือ เป็นการออกแบบโรงไฟฟ้าให้ปรับค่าความดันในการควบแน่น และความเข้มข้นของสารทำงานให้สอดคล้องกับอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมที่เปลี่ยนแปลง โดยเมื่ออุณหภูมิของสิ่งแวดล้อมเพิ่มขึ้นจาก 25.19 เป็น 30.66°C และพบว่า กำลังไฟฟ้าสุทธิในกรณีดังกล่าว มีค่าลดลงจาก 6.81 เป็น 5.77 kW

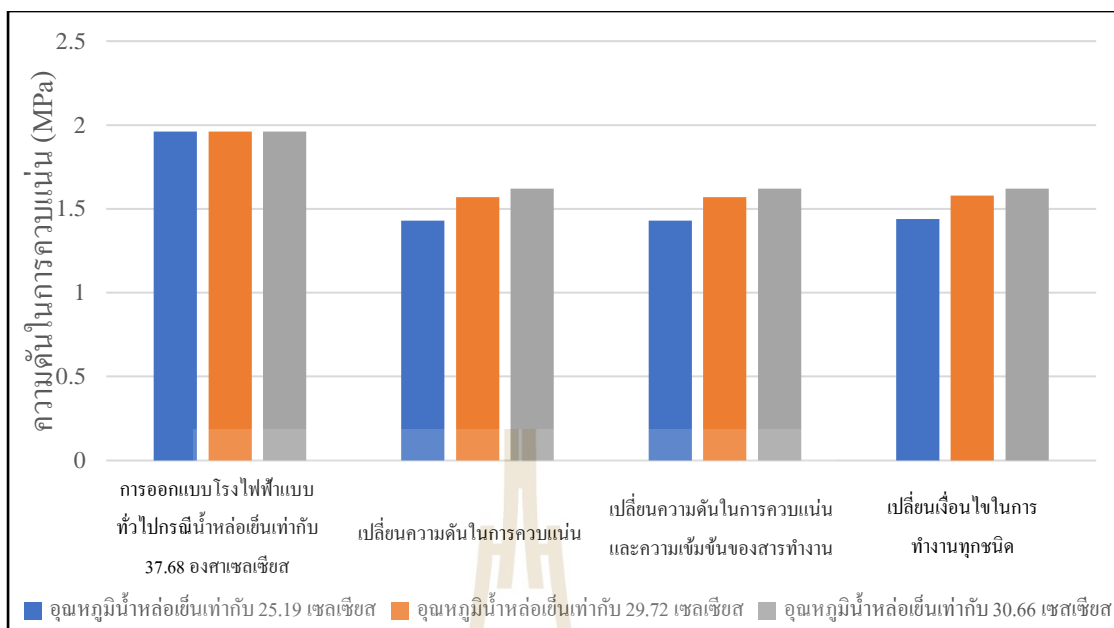
สำหรับกลุ่มกราฟด้านขวามือสุด ซึ่งเป็นการออกแบบให้โรงไฟฟ้าสามารถปรับเงื่อนไขในการทำงานได้ทุกค่า ซึ่งพบว่ากำลังไฟฟ้าสุทธิที่ผลิตได้มีค่าลดลงจาก 6.96 เป็น 5.59 kW ในขณะที่อุณหภูมิของสิ่งแวดล้อมเพิ่มขึ้นจาก 25.19 เป็น 30.66°C

เมื่อเปรียบเทียบการออกแบบโรงไฟฟ้าทั้ง 4 วิธีการ พบว่าการออกแบบโรงไฟฟ้าในกรณีทั่วไปผลิตกำลังไฟฟ้าได้น้อยกว่าทุกกระบวนการ เนื่องจากได้กำหนดเงื่อนไขในการทำงานให้เป็นค่าคงที่ สำหรับวิธีการทั้ง 3 แบบ มีการผลิตกำลังไฟฟ้าสุทธิได้ใกล้เคียงกัน และมีแนวโน้มที่เหมือนกัน คือ เมื่ออุณหภูมิสิ่งแวดล้อมเพิ่มขึ้น ส่งผลให้กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ลดลง

สำหรับวิธีการทั้ง 3 แบบซึ่งมีการปรับจำนวนของเงื่อนไขในการทำงานที่แตกต่างกัน ดังนั้นเพื่อหาเงื่อนไขในการทำงานที่ได้รับอิทธิพลจากอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อมมากที่สุด เพื่อพิจารณาว่า กระบวนการออกแบบประเภทไหนมีความคุ้มค่ามากสุดในแง่ของความสะดวกในการใช้งาน โดยการเปรียบเทียบความดันในการควบแน่นที่เปลี่ยนไป แสดงดังรูปที่ 4.18

จากรูปที่ 4.18 เป็นการเปรียบเทียบความดันในการควบแน่นของกระบวนการทั้ง 4 แบบ สำหรับกลุ่มกราฟแรกจากทางซ้ายมือเป็นการออกแบบในกรณีแบบทั่วไป ซึ่งกำหนดให้ทุกค่าคงที่ส่งผลให้ความดันในการควบแน่นไม่มีการเปลี่ยนแปลง

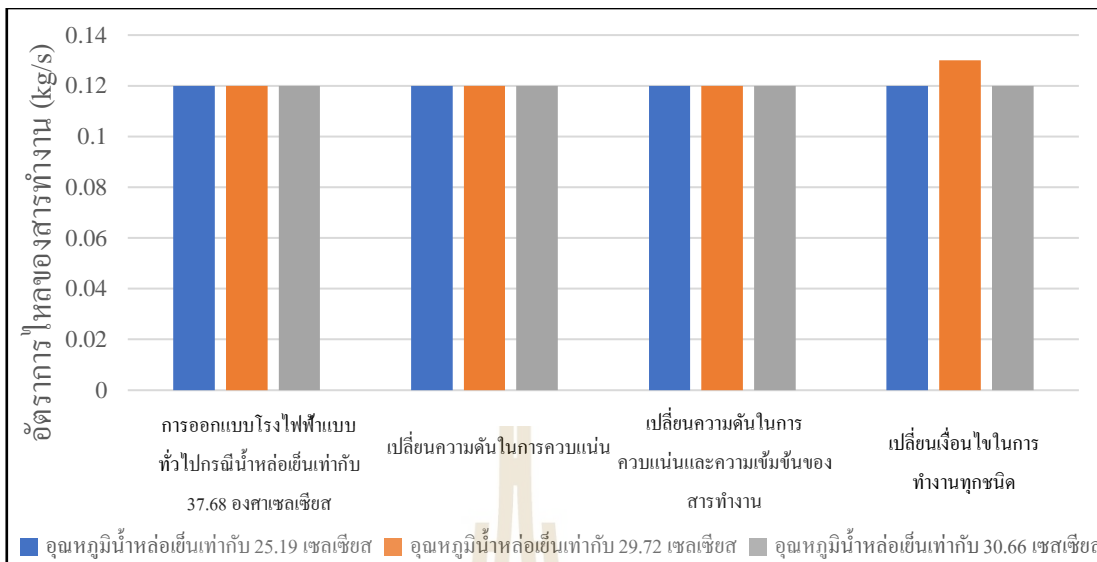
สำหรับกลุ่มกราฟลำดับที่ 2, 3 และ 4 เมื่อนับจากทางซ้ายมือ แสดงถึงการออกแบบโรงไฟฟ้าในกรณีที่เปลี่ยนเฉพาะความดันในการควบแน่น เปลี่ยนความดันในการควบแน่นร่วมกับความเข้มข้นของสารทำงาน และกรณีที่เปลี่ยนเงื่อนไขในการทำงานทุกชนิด ซึ่งจากผลการจำลองมีแนวโน้มที่เหมือนกัน คือเมื่ออุณหภูมิของสภาพแวดล้อมเพิ่มขึ้น ความดันในการควบแน่นเพิ่มขึ้นเช่นกัน โดยผลการจำลองพบว่า เมื่ออุณหภูมิของสิ่งแวดล้อมเพิ่มขึ้นจาก 25.19 เป็น 30.66°C ค่าของความดันในการควบแน่นเพิ่มขึ้นจาก 1.43 เป็น 1.62 MPa โดยพบว่าวิธีการออกแบบทั้ง 3 กรณีมีค่าความดันในการควบแน่นที่เท่ากัน



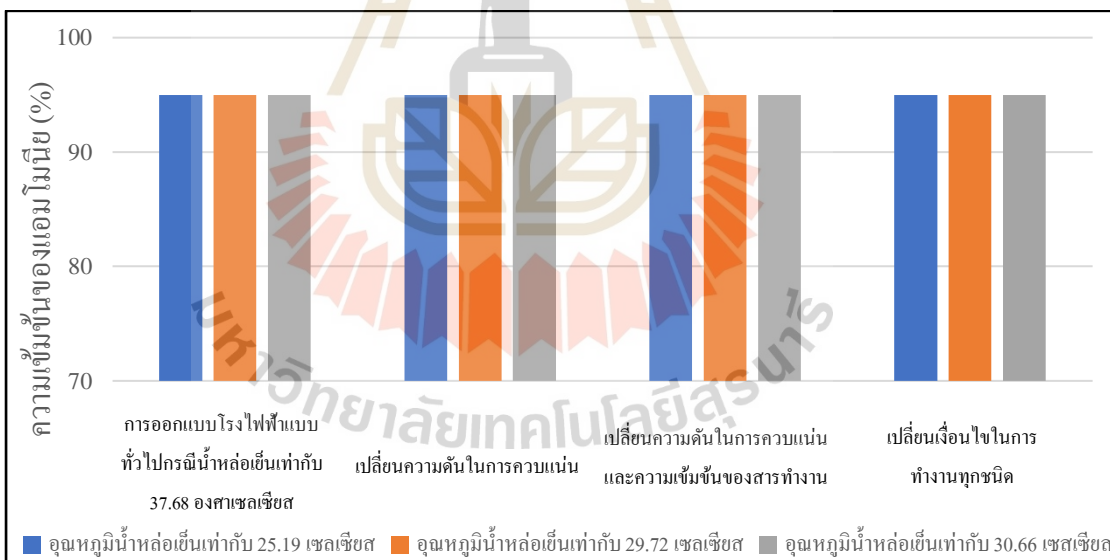
รูปที่ 4.18 การเปรียบเทียบความดันในการควบแน่นของโรงไฟฟ้าในเดือนธันวาคมของวิธีการทั้ง 4 แบบ

ต่อมาเป็นการพิจารณาอิทธิพลอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อมส่งผลกระทบต่ออัตราการไหลเชิงมวลอย่างไร ซึ่งผลการเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลเชิงมวลของวิธีการเปลี่ยนเงื่อนไขในการทำงานทุกชนิดว่ามีความแตกต่างกับวิธีการทั้ง 3 ชนิดหรือไม่ แสดงดังรูปที่ 4.19

จากรูปที่ 4.19 พบว่า การออกแบบให้เปลี่ยนเงื่อนไขในการทำงานทุกชนิด มีการเปลี่ยนอัตราการไหลเชิงมวลที่น้อยมาก จากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ 25.19 เป็น 29.72°C อัตราการไหลเชิงมวลเพิ่มขึ้นเพียง 0.01 kg/s รวมไปถึง อัตราการไหลที่ได้มีค่าแตกต่างกับกรณีอื่น ๆ เล็กน้อย โดยแตกต่างเพียง 0.01 kg/s กล่าวได้ว่าเมื่ออุณหภูมิของสิ่งแวดล้อมเปลี่ยน ไม่ส่งผลต่ออัตราการไหลเชิงมวล ดังนั้นในการออกแบบให้ระบบปรับอัตราการไหลอาจไม่คุ้มค่า เนื่องจากโรงไฟฟ้ามีความซับซ้อนเพิ่มมากขึ้นในการออกแบบให้ปรับอัตราการไหลได้



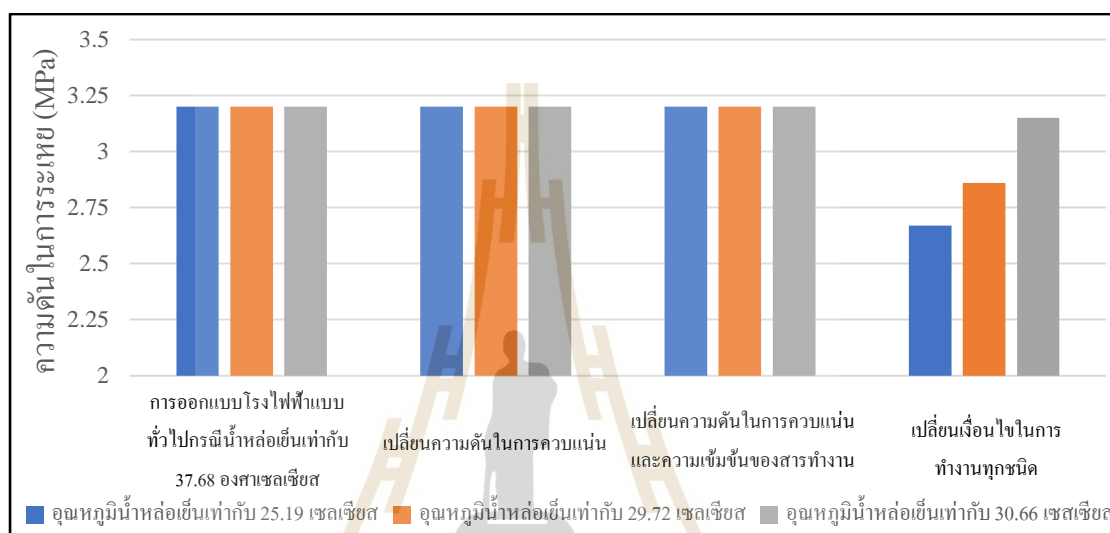
รูปที่ 4.19 การเปรียบเทียบอัตราการผลิตเชิงมวลของสารทำงานของโรงไฟฟ้าในเดือนธันวาคมของวิธีการทั้ง 4 แบบ



รูปที่ 4.20 การเปรียบเทียบความเข้มข้นของแอมโมเนียของโรงไฟฟ้าในเดือนธันวาคมของวิธีการทั้ง 4 แบบ

จากรูปที่ 4.20 เป็นการเปรียบเทียบความเข้มข้นของแอมโมเนียที่บริเวณทางออกจากบ่อบำบัดของการออกแบทั้ง 4 แบบ มี 2 แบบที่ทำการปรับความเข้มข้นของแอมโมเนียได้แก่ กรณีที่

เปลี่ยนความดันในการควบแน่นและความเข้มข้นของสารทำงาน กับกรณีที่ทำกรเปลี่ยนเงื่อนไขในการทำงานทุกชนิด จากรูปพบว่าเมื่ออุณหภูมิของสิ่งแวดล้อมเปลี่ยน ความเข้มข้นของแอม โมเนีย ไม่มีการเปลี่ยนแปลง กล่าวคืออุณหภูมิสิ่งแวดล้อมไม่มีผลต่อความเข้มข้นของสารทำงาน ดังนั้นการออกแบบให้ระบบปรับความเข้มข้นของแอม โมเนียได้ ไม่เหมาะสมกับกรณีที่อุณหภูมิสิ่งแวดล้อมเปลี่ยนแปลง



รูปที่ 4.21 การเปรียบเทียบความดันในการระเหยของโรงไฟฟ้าในเดือนธันวาคมของวิธีการทั้ง 4 แบบ

จากรูปที่ 4.21 เป็นการเปรียบเทียบความดันในการระเหยที่เปลี่ยนตามอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อม ซึ่งจะมีเพียงกรณีเปลี่ยนเงื่อนไขในการทำงานทุกชนิดที่ทำกรเปลี่ยนเท่านั้น โดยจากการจำลองพบว่า เมื่ออุณหภูมิสิ่งแวดล้อมเพิ่มขึ้นจาก 25.19 เป็น 30.66°C ทำให้ความดันในการระเหยเพิ่มขึ้นจาก 2.67 เป็น 3.15 MPa ซึ่งความดันดังกล่าวมีค่าน้อยกว่ากระบวนการทั้ง 3 แบบ ทำให้อุปกรณ์ของระบบนี้สามารถออกแบบให้ความแข็งแรงน้อยกว่าการออกแบบที่เหลือ ส่งผลให้งบลงทุนของการออกแบบดังกล่าว มีค่าน้อยกว่าการออกแบบทั้ง 3 แบบ

อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาเงื่อนไขใช้ในการทำงานและกำลังไฟฟ้าของโรงไฟฟ้าทั้ง 4 แบบ โดยเป็นการอ้างอิงข้อมูลอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมของจ. นครราชสีมา ในช่วงเดือนธันวาคม พ.ศ. 2562 พบว่าโรงไฟฟ้าแบบทั่วไปผลิตกำลังไฟฟ้าได้น้อยที่สุด ในขณะที่การออกแบบโรงไฟฟ้าทั้ง 3 แบบกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ใกล้เคียงกัน ดังนั้นในการออกแบบทั้ง 3 แบบ มีความสามารถในการเพิ่มกำลังไฟฟ้าที่มากกว่าการออกแบบในกรณีทั่วไปอย่างมีนัยสำคัญ และเมื่อสังเกตพฤติกรรมของ



เงื่อนไขในการทำงาน ได้แก่ อัตราการไหลเชิงมวล ความเข้มข้นของสารทำงาน และความดันในการระเหย ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงที่น้อยมาก เมื่อเทียบกับการเปลี่ยนแปลงของความดันในการควบแน่น

เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม ส่งผลกระทบโดยตรงไปสู่อุณหภูมิของน้ำหล่อเย็นที่เข้าไปปรับความร้อนของสารทำงานที่บริเวณคอนเดนเซอร์ โดยอุปกรณ์จะถูกกำหนดค่าของความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างสารทั้ง 2 ชนิด ดังนั้นเมื่ออุณหภูมิสารหล่อเย็นเปลี่ยนจึงส่งผลให้อุณหภูมิของสารทำงานเปลี่ยนตามไปด้วย โดยอุณหภูมิของสารทำงานที่เปลี่ยนไปจะเป็นตัวกำหนดที่ทำให้ความดันในการควบแน่นมีค่าที่ส่งผลให้น้ำเกิดการควบแน่นที่อุณหภูมิของสารทำงาน ณ ขณะนั้น

สำหรับสาเหตุที่อัตราการไหลเชิงมวลของโรงไฟฟ้านั้นมีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย เพราะ ในการออกแบบโรงไฟฟ้าเบื้องต้นเป็นการพิจารณาว่า อัตราการไหลเชิงมวลต้องเป็นเท่าไร จึงทำให้โรงไฟฟ้าสามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้สูงสุด ดังนั้นสำหรับการออกแบบโรงไฟฟ้าที่ให้ค่าอัตราการไหลเชิงมวล เมื่ออุณหภูมิของสิ่งแวดล้อมเปลี่ยนไปภายใต้เงื่อนไขออกแบบให้โรงไฟฟ้าผลิตกำลังไฟฟ้าได้สูงสุด จึงทำให้ผลลัพธ์ของอัตราการไหลเชิงมวลมีค่าเท่าเดิม

เช่นเดียวกันในกรณีของความเข้มข้นของแอมโมเนียที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลง เพราะ ในการจำลองเป็นการหาความเข้มข้นของสารทำงานที่ทำให้กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้มีค่าสูงสุด โดยทำการพิจารณาที่แหล่งความร้อนที่สนใจ ดังนั้นความเข้มข้นของสารทำงานจะเปลี่ยนไปเมื่ออุณหภูมิของแหล่งความร้อนเปลี่ยนไปเท่านั้น จึงส่งผลให้เมื่ออุณหภูมิของสิ่งแวดล้อมเปลี่ยนไปไม่มีผลต่อความเข้มข้นของสารทำงาน

เมื่อพิจารณาถึงความดันในการระเหยที่เพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิของสิ่งแวดล้อมเพิ่มขึ้น ในกรณีการออกแบบโดยเปลี่ยนเงื่อนไขในการทำงาน เนื่องจากโปรแกรมการจำลองจะหาเงื่อนไขในการทำงานเพื่อผลิตกำลังไฟฟ้าได้สูงสุด ซึ่งความดันในการควบแน่นแปรผันตามอุณหภูมิของน้ำหล่อเย็น ส่งผลให้ความดันในการระเหยต้องปรับเพิ่มขึ้นอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมที่เพิ่มขึ้นเพื่อให้ระบบยังคงผลิตกำลังไฟฟ้าสุทธิได้สูงสุดเท่าที่เป็นไปได้

สำหรับการเลือกวิธีในการออกแบบโรงไฟฟ้าต้องทำการพิจารณาถึงความซับซ้อนในการออกแบบของระบบ เพื่อลดความซับซ้อนในการก่อสร้าง การดูแล รวมไปถึงงบประมาณในการก่อสร้างและการบำรุงรักษาอุปกรณ์ วิธีการปรับความดันในการควบแน่นเพียงอย่างเดียวได้ถูกใช้ในการศึกษานี้ เพราะ วิธีการดังกล่าวทำการปรับเปลี่ยนความดันในการควบแน่นเพียงอย่างเดียวกลับส่งผลให้กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้มีปริมาณที่ใกล้เคียงกับการออกแบบในลักษณะอื่น รวมไปถึงการออกแบบในลักษณะอื่นให้ผลลัพธ์เงื่อนไขในการทำงานไม่ต่างจากการเปลี่ยนเพียงความดันในการควบแน่น ลำดับถัดไปจึงนำเสนอวิธีการใช้ sliding condensation pressure หรือเปลี่ยนเฉพาะ



ความดันในการควบแน่นให้สอดคล้องกับอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อมของจ.นครราชสีมา เพื่อปรับปรุงกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ให้มากกว่าการออกแบบโรงไฟฟ้าแบบทั่วไป

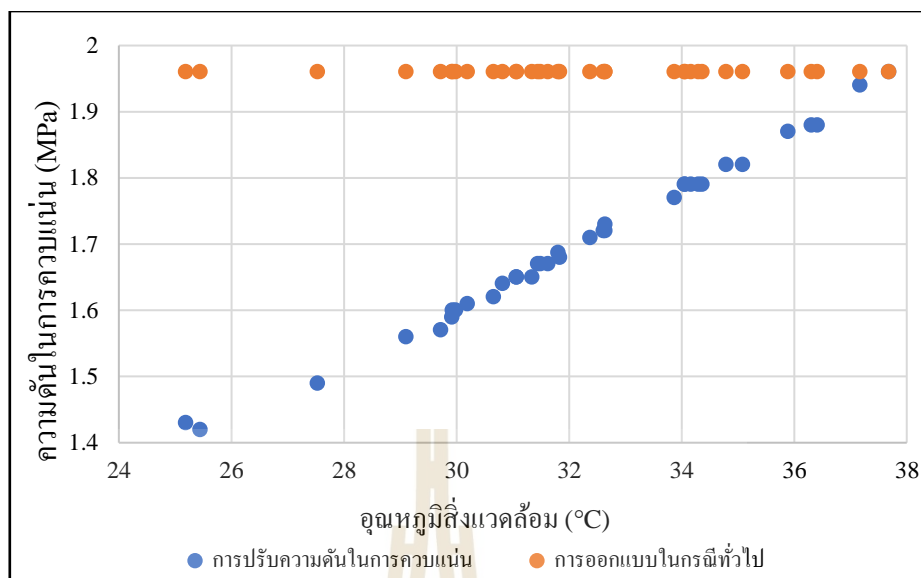
#### 4.4 การเปรียบเทียบการใช้วิธีการปรับความดันในการควบแน่นมาปรับปรุงให้สอดคล้องกับอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมของโรงไฟฟ้าคาถินา

การศึกษาในขั้นตอนนี้ เป็นการพิจารณาถึงการเปลี่ยนค่าของความดันในการควบแน่นให้มีความสอดคล้องกับอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อม โดยอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมส่งผลกระทบต่ออุณหภูมิของน้ำหล่อเย็นที่คอนเดนเซอร์ สำหรับข้อมูลอุณหภูมิที่ทำการจำลองแสดงดังตารางที่ 3.4 นอกจากนี้ได้ทำการเปรียบเทียบกับ การออกแบบโรงไฟฟ้าแบบทั่วไป สำหรับผลลัพธ์การจำลองที่ใช้ในวิธีการดังกล่าวแสดงผลดังต่อไปนี้

##### 4.4.1 อิทธิพลของอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมที่ส่งผลต่อความดันในการควบแน่น

ในการเปรียบเทียบในกรณีดังกล่าว เป็นการหาค่าของความดันในการควบแน่นให้สอดคล้องกับอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมที่เปลี่ยนไป และได้เปรียบเทียบค่าความดันในการควบแน่นของการออกแบบโรงไฟฟ้าแบบทั่วไป สำหรับผลการเปรียบเทียบแสดงผลดังรูปที่ 4.22

จากรูปที่ 4.22 พบว่า กรณีการออกแบบโดยปรับความดันในการควบแน่น (แสดงจุดสีน้ำเงิน) เมื่ออุณหภูมิของสิ่งแวดล้อมเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความดันในการควบแน่นมีค่าเพิ่มขึ้นตามไปด้วย เช่น เมื่ออุณหภูมิของสิ่งแวดล้อมเพิ่มขึ้นจาก 25.19 เป็น 37.68°C ทำให้ความดันในการควบแน่นเพิ่มขึ้นจาก 1.42 เป็น 1.96 MPa นอกจากนี้อุณหภูมิของจ.นครราชสีมาในช่วงเวลา 10.00 – 17.00 น. พบมากอยู่ในช่วง 29 ถึง 36°C ส่งผลให้ ความดันในการควบแน่นของโรงไฟฟ้าคาถินาถูกใช้งานมากในช่วง 1.56 ถึง 1.8 MPa



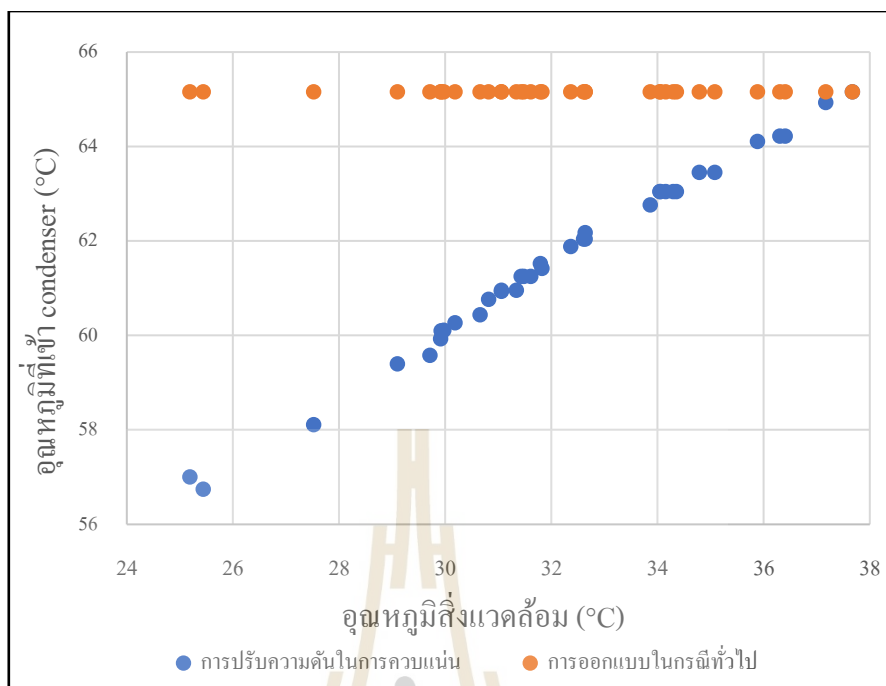
รูปที่ 4.22 การเปรียบเทียบอิทธิพลของอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมต่อความดันในการควบแน่นระหว่างวิธีการเปลี่ยนความดันในการควบแน่นกับวิธีการแบบทั่วไป

นอกจากนี้ เมื่อทำการเปรียบเทียบความดันในการควบแน่นระหว่างการออกแบบกรณีทั่วไป (แสดงดังจุดสีส้ม) กับแบบปรับความดันในการควบแน่น พบว่ามีความแตกต่างกันมากที่สุดที่ 500 kPa และเมื่อเทียบกับช่วงอุณหภูมิ 30 ถึง 34°C พบว่า มีความแตกต่างของความดันในการควบแน่นระหว่าง 200 ถึง 400 kPa โดยบริเวณที่ทางออกจากเทอร์ไบน์ถึงทางเข้าของปั๊มเป็นการออกแบบตามความดันในการควบแน่นที่ได้ออกแบบเอาไว้ตามอุณหภูมิสูงสุด ซึ่งมีค่ามากกว่าความดันที่ได้รับในขณะใช้งานจริง แสดงว่าโรงไฟฟ้าจะได้รับความดันที่น้อยกว่าค่าที่ออกแบบไว้ ส่งผลให้โรงไฟฟ้ามีอายุการใช้งานมากขึ้นรวมถึงลดจำนวนในการซ่อมบำรุงอุปกรณ์ให้น้อยลง

#### 4.4.2 อิทธิพลของอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมที่ส่งผลต่ออุณหภูมิที่เข้าสู่คอนเดนเซอร์

สำหรับหัวข้อดังกล่าว ได้ทำการศึกษาผลลัพธ์ของอุณหภูมิที่เข้าสู่คอนเดนเซอร์ที่ได้รับอิทธิพลจากอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อมที่เปลี่ยนไป โดยผลลัพธ์การเปรียบเทียบในกรณีดังกล่าวแสดงดังรูปที่ 4.23

จากรูปที่ 4.23 พบว่าเมื่ออุณหภูมิสิ่งแวดล้อมเพิ่มขึ้น ในกรณีการออกแบบให้ปรับความดันในการควบแน่นอุณหภูมิทางเข้าคอนเดนเซอร์เพิ่มขึ้น เนื่องจากอุณหภูมิที่เกิดขึ้นภายในคอนเดนเซอร์ถูกกำหนดผ่านค่าของ pinch point temperature กับอุณหภูมิของสารหล่อเย็น ดังนั้นเมื่ออุณหภูมิของสิ่งแวดล้อมเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้อุณหภูมิของสารหล่อเย็นเพิ่มขึ้น และทำให้อุณหภูมิที่ทางเข้าคอนเดนเซอร์เพิ่มขึ้นตามไปด้วย

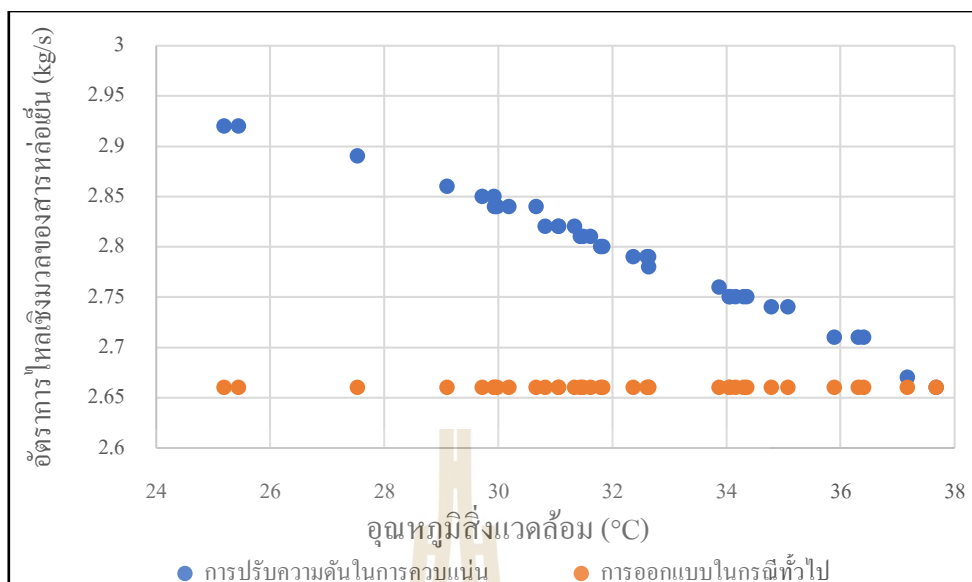


รูปที่ 4.23 การเปรียบเทียบอิทธิพลของอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมต่ออุณหภูมิที่เข้าคอนเดนเซอร์ระหว่างวิธีการเปลี่ยนความดันในการควบแน่นกับวิธีการแบบทั่วไป

นอกจากนี้ เมื่อเทียบกับการออกแบบในกรณีทั่วไป จะมีค่าอุณหภูมิทางเข้าคอนเดนเซอร์ที่สูงกว่าการออกแบบให้ปรับความดันในการควบแน่น จึงคาดการณ์ว่าพลังงานความร้อนที่นำมาจากแหล่งความร้อนในกรณีการออกแบบให้ปรับความดันในการควบแน่น สามารถดึงออกจากแหล่งความร้อนได้มากกว่าการออกแบบในกรณีทั่วไป โดยสังเกตได้จากอุณหภูมิที่ทางเข้าของคอนเดนเซอร์ในกรณีการออกแบบให้ปรับความดันในการควบแน่น มีค่าน้อยกว่าการออกแบบในกรณีทั่วไป

#### 4.4.3 อิทธิพลของอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมต่ออัตราการไหลเชิงมวลของสารหล่อเย็น

สำหรับการศึกษาในกรณีดังกล่าว ทำการจำลองเพื่อหาอัตราการไหลเชิงมวลของสารทำความเย็นที่เปลี่ยนไป เมื่ออุณหภูมิของสารหล่อเย็นเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อม โดยผลการจำลองในกรณีดังกล่าวแสดงดังรูปที่ 4.24



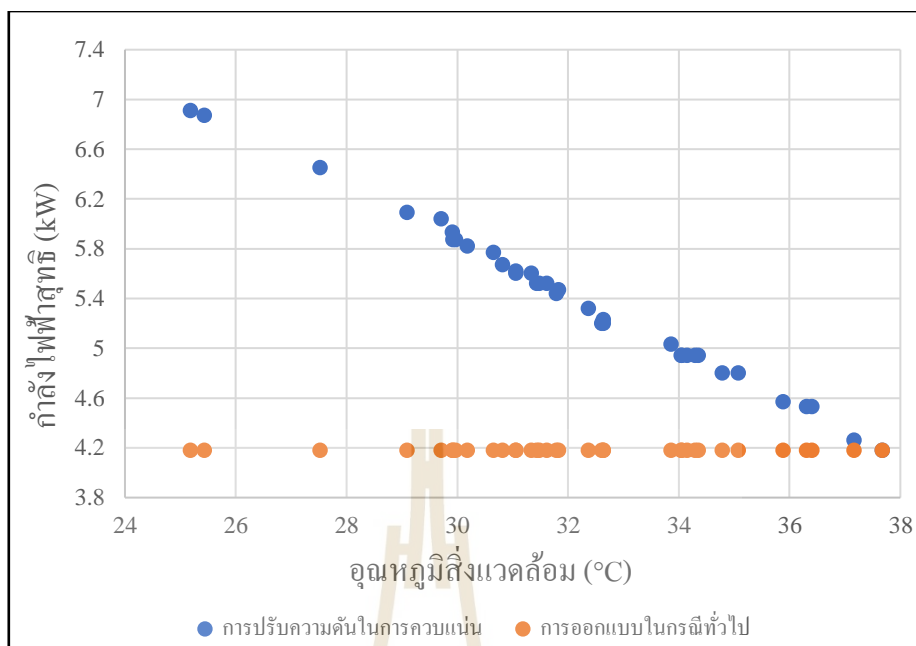
รูปที่ 4.24 การเปรียบเทียบอิทธิพลของอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมต่ออัตราการไหลเชิงมวลของสารหล่อเย็นระหว่างวิธีการเปลี่ยนความดันในการควบแน่นกับวิธีการแบบทั่วไป

จากรูปที่ 4.24 พบว่า เมื่ออุณหภูมิของสิ่งแวดล้อมเพิ่มขึ้นส่งผลให้ อัตราการไหลเชิงมวลของสารหล่อเย็นในกรณีที่ปรับความดันในการควบแน่นมีค่าลดลง เช่น เมื่ออุณหภูมิของสิ่งแวดล้อมเพิ่มขึ้นจาก 25.19 เป็น 37.68°C อัตราการไหลเชิงมวลลดลงจาก 2.9 เป็น 2.67 kg/s โดยสำหรับอุณหภูมิที่พบมากจะอยู่ในช่วง 30 ถึง 34°C และมีอัตราการไหลเชิงมวลระหว่าง 2.78 ถึง 2.86 kg/s

อย่างไรก็ตาม เมื่อได้ทำการเปรียบเทียบกับกรณีการออกแบบในกรณีทั่วไป อัตราการไหลเชิงมวลของสารหล่อเย็นมีค่าน้อยกว่าการออกแบบให้ปรับความดันในการควบแน่น รวมไปถึงในการออกแบบในกรณีทั่วไปไม่ต้องปรับเปลี่ยนค่าของอัตราการไหลเชิงมวล จึงส่งผลให้ปั๊มของระบบหล่อเย็นสำหรับการออกแบบในกรณีทั่วไปมีขนาดเล็กกว่าและจะมีความซับซ้อนที่น้อยกว่า เนื่องจาก ในการออกแบบโดยวิธีการปรับความดันในการควบแน่นจำเป็นต้องใช้ปั๊มที่สามารถปรับความเร็วรอบได้ เพื่อให้ระบบสามารถปรับอัตราการไหลเชิงมวลของสารหล่อเย็นให้สอดคล้องกับอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม

#### 4.4.4 อิทธิพลของอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมต่อกำลังไฟฟ้าสุทธิของโรงไฟฟ้า

ในการเปรียบเทียบกรณีดังกล่าว เป็นการพิจารณาความสามารถของโรงไฟฟ้าว่ามีความแตกต่างอย่างไรเมื่อเทียบกับการออกแบบในกรณีทั่วไป โดยสำหรับผลการเปรียบเทียบกรณีดังกล่าวแสดงผลลัพธ์ดังรูปที่ 4.25



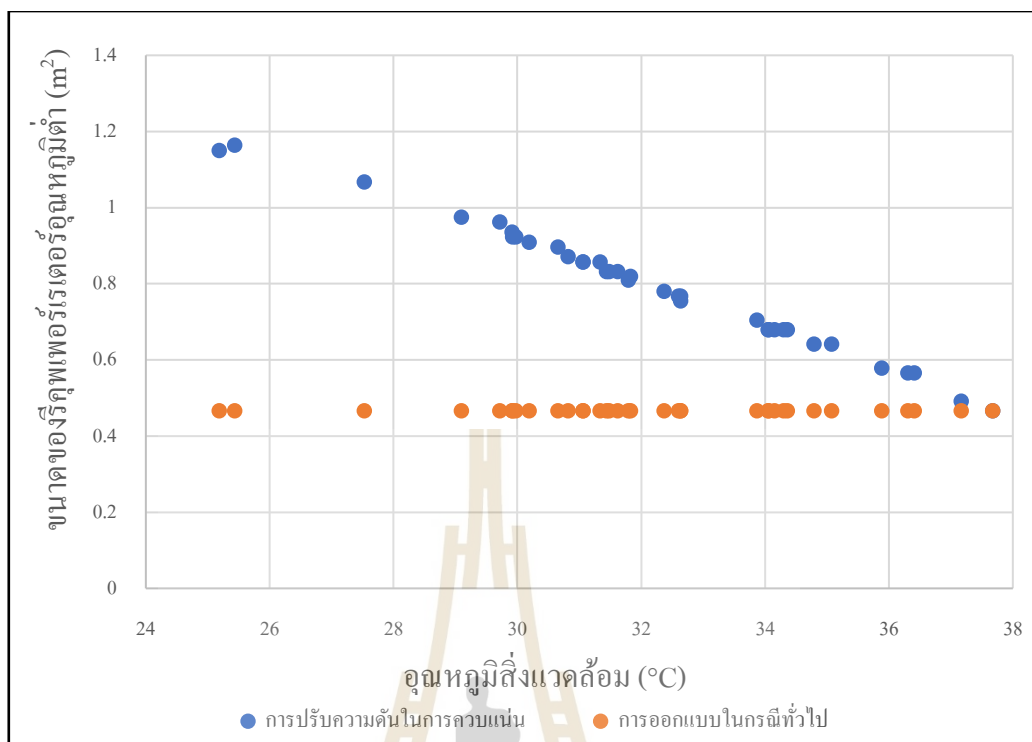
รูปที่ 4.25 การเปรียบเทียบอิทธิพลของอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมต่อกำลังไฟฟ้าสุทธิระหว่างวิธีการเปลี่ยนความดันในการควบแน่นกับวิธีการแบบทั่วไป

จากรูปที่ 4.25 พบว่าเมื่ออุณหภูมิของสิ่งแวดล้อมเพิ่มขึ้น ส่งผลให้กำลังไฟฟ้าที่ผลิตในกรณีเปลี่ยนความดันในการควบแน่นลดลง เช่น เมื่ออุณหภูมิสิ่งแวดล้อมเพิ่มขึ้นจาก 25.19 เป็น 30.66°C ส่งผลให้กำลังไฟฟ้าลดลงจาก 6.87 เหลือ 4.18 kW และกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ส่วนใหญ่มีค่า 4.8 – 6.1 kW เนื่องจากอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมส่วนใหญ่อยู่ในช่วง 29 เป็น 36°C

นอกจากนี้ เมื่อเปรียบเทียบความแตกต่างของกำลังไฟฟ้าสุทธิระหว่างวิธีการทั้ง 2 แบบเมื่อพิจารณาในช่วงอุณหภูมิที่พบมากในจ. นครราชสีมา พบว่าในกรณีการออกแบบทั่วไปมีกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้น้อยกว่าการปรับความดันในการควบแน่นอยู่ในช่วง 0.6 ถึง 2 kW นอกจากนี้ ความแตกต่างของกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้สูงสุดเท่ากับ 2.8 kW แสดงว่าเมื่อใช้วิธีการปรับความดันในการควบแน่นให้สอดคล้องกับอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมผลิตกำลังไฟฟ้าได้มากกว่าการออกแบบในกรณีทั่วไป

#### 4.4.5 อิทธิพลของอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมต่อขนาดของรีคูปเพอร์เรเตอร์อุณหภูมิต่ำ

สำหรับกรณีดังกล่าว เปรียบเทียบขนาดของรีคูปเพอร์เรเตอร์อุณหภูมิต่ำระหว่างวิธีการปรับความดันในการควบแน่นกับการออกแบบในกรณีทั่วไป โดยสำหรับผลการเปรียบเทียบสำหรับกรณีดังกล่าวแสดงผลดังรูปที่ 4.26

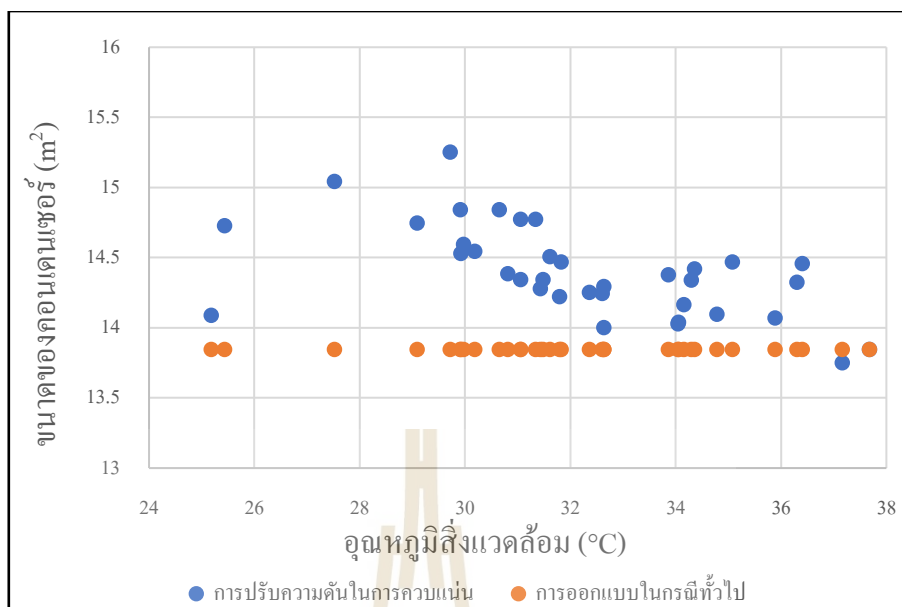


รูปที่ 4.26 การเปรียบเทียบอิทธิพลของอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมต่อขนาดของรีกิวเปอร์เรเตอร์อุณหภูมิต่ำระหว่างวิธีการเปลี่ยนความดันในการควบแน่นกับวิธีการแบบทั่วไป

จากรูปที่ 4.26 พบว่า เมื่ออุณหภูมิสิ่งแวดล้อมเพิ่มขึ้น ขนาดของรีกิวเปอร์เรเตอร์อุณหภูมิต่ำ ในการออกแบบให้ปรับความดันในการควบแน่นมีขนาดลดลงเช่น เมื่ออุณหภูมิสิ่งแวดล้อมเพิ่มขึ้นจาก 25.19 เป็น 30.66°C ส่งผลให้ขนาดของรีกิวเปอร์เรเตอร์อุณหภูมิต่ำลดลงจาก 1.16 เหลือ 0.47 m<sup>2</sup> ในขณะที่การออกแบบในกรณีทั่วไปมีขนาดของอุปกรณ์ที่น้อยกว่าเท่ากับ 0.47 m<sup>2</sup> แสดงว่าการออกแบบให้ปรับความดันในการควบแน่นมีขนาดรีกิวเปอร์เรเตอร์อุณหภูมิต่ำที่ใหญ่กว่าการออกแบบในกรณีทั่วไป

#### 4.4.6 อิทธิพลของอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมที่ส่งผลต่อขนาดของคอนเดนเซอร์

สำหรับการพิจารณากรณีดังกล่าวเป็นการเปรียบเทียบขนาดของ ระหว่างวิธีการปรับความดันในการควบแน่นกับวิธีการในกรณีทั่วไปว่ามีขนาดที่แตกต่างกันอย่างไร เนื่องจากอิทธิพลของอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมน่าจะส่งผลกระทบต่อขนาดของ เนื่องจากมีการอ้างอิงว่าอุณหภูมิสารหล่อเย็นเท่ากับอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม โดยผลการเปรียบเทียบแสดงผลลัพธ์ดังรูปที่ 4.27



รูปที่ 4.27 การเปรียบเทียบอิทธิพลของอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมต่อขนาดของคอนเดนเซอร์ระหว่างวิธีการเปลี่ยนความดันในการควบแน่นกับวิธีการแบบทั่วไป

จากรูปที่ 4.27 สำหรับกรณีการออกแบบให้ปรับความดันในการควบแน่น พบว่าอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อมมีอิทธิพลกับขนาดของคอนเดนเซอร์อย่างชัดเจน เนื่องจากเมื่ออุณหภูมิสิ่งแวดล้อมมีค่าเพิ่มขึ้นไม่สามารถบอกได้ว่าขนาดของคอนเดนเซอร์จะเพิ่มขึ้นหรือลดลงอย่างไร เนื่องจากตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับขนาดของคอนเดนเซอร์มีหลายตัวแปรที่เกิดการเปลี่ยนแปลง ได้แก่ อุณหภูมิสารหล่อเย็น ความดันในการควบแน่น และอัตราการไหลเชิงมวลของสารหล่อเย็น โดยตัวแปรต่าง ๆ เหล่านี้ต่างได้รับอิทธิพลจากอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมทั้งหมด จึงทำให้อิทธิพลของอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมที่ส่งผลต่อขนาดของคอนเดนเซอร์ไม่สามารถบ่งบอกได้

นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบระหว่างการออกแบบให้ปรับความดันในการควบแน่นกับวิธีการออกแบบทั่วไป พบว่าขนาดคอนเดนเซอร์ในการออกแบบในกรณีทั่วไปมีขนาดที่เล็กกว่าการออกแบบให้ปรับความดันในการควบแน่น เนื่องจาก การออกแบบในกรณีทั่วไปมีอัตราการไหลเชิงมวลของสารหล่อเย็นที่น้อยกว่าการออกแบบให้ปรับความดันในการควบแน่น จึงส่งผลให้อัตราการแลกเปลี่ยนความร้อนของการออกแบบในกรณีทั่วไปมีค่าน้อยกว่า จากเหตุผลดังกล่าว ทำให้ขนาดของคอนเดนเซอร์มีค่าน้อยกว่า

เมื่อพิจารณาอิทธิพลของอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อมที่เปลี่ยนแปลงไป โดยส่งผลกระทบต่อเงื่อนไขในการทำงานของโรงไฟฟ้า คือ เมื่ออุณหภูมิสิ่งแวดล้อมเพิ่มขึ้นทำให้ค่าความดัน



ในการควบคุมเพิ่มขึ้น อุณหภูมิที่เข้าคอนเดนเซอร์เพิ่มขึ้น แต่อัตราการไหลเชิงมวลของสารหล่อเย็นอัตราการขยายตัวของไอ และกำลังไฟฟ้าสุทธิลดลง ซึ่งการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมส่งผลต่ออุณหภูมิที่เข้าคอนเดนเซอร์ที่ต้องปรับตามการเปลี่ยนแปลงดังกล่าว และการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิทางเข้าส่งผลให้อัตราการแลกเปลี่ยนความร้อนที่คอนเดนเซอร์ลดลง ส่งผลให้อัตราการไหลเชิงมวลของสารหล่อเย็นลดลงไปเช่นกัน เพราะ การจำลองจะกำหนดอุณหภูมิเข้าและออกเอาไว้ ดังนั้นอัตราการไหลของสารหล่อเย็นจึงลดลง

จากอิทธิพลของอุณหภูมิทางเข้าคอนเดนเซอร์ที่เพิ่มขึ้น เพื่อให้สารทำงานสามารถควบคุมที่บริเวณคอนเดนเซอร์ได้ ความดันในการควบคุมของสารทำงานจึงต้องเพิ่มขึ้นเพื่อให้สารทำงานสามารถควบคุมได้ตามอุณหภูมิที่ทางเข้าของคอนเดนเซอร์และเพื่อให้สอดคล้องกับค่าของ pinch point temperature ที่บริเวณคอนเดนเซอร์ซึ่งจากการเพิ่มขึ้นของความดันในการควบคุม ส่งผลกระทบไปสู่กำลังไฟฟ้าทำให้ผลิตได้น้อยลง เนื่องจากการที่ความดันและอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นส่งผลต่อค่าของเอนทาลปีที่ทางออกจากเทอร์ไบน์เพิ่มตามไปด้วย ทำให้ผลต่างของเอนทาลปีที่เทอร์ไบน์ลดลง จึงทำให้กำลังไฟฟ้าสุทธิที่ผลิตได้ลดลงเช่นกัน

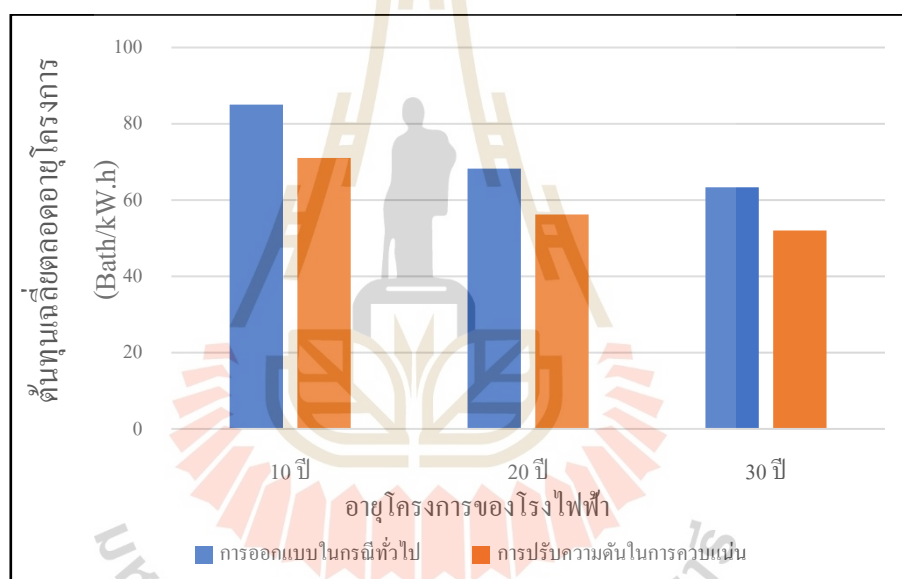
นอกจากนี้ จากการเพิ่มขึ้นของความดันในการควบคุมส่งผลต่ออัตราการขยายตัวของไอให้มีค่าลดลง โดยนิยามของอัตราการขยายไอ คือ อัตราการไหลเชิงปริมาตรที่ทางออกส่วนด้วยอัตราการไหลเชิงปริมาตรที่ทางเข้า ซึ่งการเพิ่มขึ้นของความดันในการควบคุมทำให้ความหนาแน่นของสารทำงานที่ทางออกเทอร์ไบน์เพิ่มขึ้น ส่งผลให้อัตราการไหลเชิงปริมาตรที่ทางออกเทอร์ไบน์ลดลง ทำให้อัตราการขยายตัวของไอเพิ่มขึ้น

สำหรับการเพิ่มขึ้นของความดันในการควบคุมและการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมส่งผลกระทบไปสู่อุณหภูมิที่ทางเข้าและทางออกของปั๊มให้เพิ่มขึ้นจึงส่งผลให้ผลต่างของอุณหภูมิที่ทางเข้ากับทางออกของรีคิเพอร์เรเตอร์อุณหภูมิต่ำลดลง ส่งผลให้อัตราการแลกเปลี่ยน ความร้อนที่บริเวณดังกล่าวมีค่าน้อยลงขนาดของอุปกรณ์จึงมีขนาดลดลง

เมื่อพิจารณาถึงความคุ้มค่าระหว่างการออกแบบโดยปรับความดันในการควบคุมให้สอดคล้องกับอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมข้อดีคือ ทำให้โรงไฟฟ้าสามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้มากกว่าการออกแบบที่ใช้งานทั่วไป อย่างไรก็ตาม ระบบดังกล่าวมีความซับซ้อนขึ้น เนื่องจากต้องมีการปรับอัตราการไหลเชิงมวลของสารหล่อเย็น และต้องพิจารณขนาดของเทอร์ไบน์ให้สอดคล้องกับอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อม ทำให้งบประมาณในระบบดังกล่าวมีค่าสูงขึ้น ดังนั้นเพื่อความยุติธรรมในการพิจารณาความคุ้มค่าของการออกแบบทั้ง 2 แบบ จึงนำวิธีการคิดทางเศรษฐศาสตร์เข้ามาร่วมพิจารณาในลำดับถัดไป

#### 4.4.7 การเปรียบเทียบเชิงเศรษฐศาสตร์ระหว่างวิธีการปรับความดันในการควบแน่นกับการออกแบบในกรณีทั่วไป

สำหรับการเปรียบเทียบกรณีดังกล่าว พิจารณาถึงค่าของต้นทุนในการผลิตไฟฟ้าระหว่างวิธีการปรับความดันในการควบแน่นกับวิธีการออกแบบในกรณีทั่วไป ทั้งนี้สำหรับการออกแบบให้ปรับความดันในการควบแน่นขนาดของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน บีเอ็ม เทอร์ไบน์มีขนาดที่ไม่คงที่ ดังนั้นจึงได้นำขนาดของอุปกรณ์ดังกล่าวที่มีขนาดสูงสุดมาคำนวณหางบประมาณในการลงทุนที่มากที่สุดและเปรียบเทียบกับงบประมาณในการลงทุนสำหรับการออกแบบในกรณีทั่วไป รวมถึงได้เปรียบเทียบอายุของโครงการที่จะสร้างโรงไฟฟ้าเป็น 3 ค่า ได้แก่ 10, 20, และ 30 ปี ซึ่งผลการเปรียบเทียบแสดงดังรูปที่ 4.28



รูปที่ 4.28 การเปรียบเทียบต้นทุนเฉลี่ยตลอดอายุโครงการระหว่างวิธีการเปลี่ยนความดันในการควบแน่นกับวิธีการแบบทั่วไป

จากรูปที่ 4.28 เป็นการสมมติให้ผลิตไฟฟ้าในช่วง 08.00 ถึง 17.00 น. ซึ่งเป็นการคาดเดาการทำงานของโรงไฟฟ้าที่ใช้แหล่งความร้อนทิ้งจากโรงงานที่มีการทำงานในช่วงเวลาดังกล่าวเป็นส่วนมาก จากผลการจำลองพบว่า วิธีการปรับความดันในการควบแน่นให้สอดคล้องกับอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมมีต้นทุนในการผลิตไฟฟ้าที่น้อยกว่าการออกแบบในกรณีทั่วไป ทั้งนี้จากการจำลองถึงขนาดอุปกรณ์ต่าง ๆ พบว่าการปรับความดันในการควบแน่นจะมีขนาดที่ใหญ่กว่า จึงส่งผลให้ราคาของอุปกรณ์ ราคาของท่อ อุปกรณ์ไฟฟ้าในระบบ การติดตั้ง และระบบควบคุมมีราคา

ที่สูงกว่าการออกแบบในกรณีทั่วไป อย่างไรก็ตามผลลัพธ์ของกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ภายในปีที่ทำการจำลองมีค่าเพิ่มขึ้นมากกว่าการเพิ่มขึ้นของงบประมาณในการลงทุนส่งผลให้ต้นทุนในการผลิตไฟฟ้าของการปรับความดันในการควบแน่นมากกว่าการออกแบบในกรณีทั่วไป ส่งผลให้เมื่อพิจารณาที่อายุโครงการ 10 ปี วิธีการปรับความดันในการควบแน่นมีต้นทุนในการผลิตไฟฟ้าเท่ากับ 71 Baht/kW.h ในขณะที่การออกแบบในกรณีทั่วไปมีต้นทุนถึง 85 Baht/kW.h เมื่อเพิ่มอายุโครงการเป็น 20 ปี วิธีการปรับความดันในการควบแน่นมีต้นทุนในการผลิตไฟฟ้าเท่ากับ 56 Baht/kW.h ในขณะที่การออกแบบในกรณีทั่วไปมีต้นทุนถึง 68 Baht/kW.h ปี และเมื่อพิจารณาที่อายุโครงการเป็น 30 ปี วิธีการปรับความดันในการควบแน่นมีต้นทุนในการผลิตไฟฟ้าเท่ากับ 51 Baht/kW.h ในขณะที่การออกแบบในกรณีทั่วไปมีต้นทุนถึง 63 Baht/kW.h

ดังนั้นสำหรับวิธีการปรับความดันในการควบแน่นจึงมีความคุ้มค่าในการใช้งานสำหรับปรับปรุงโรงไฟฟ้าคาลินาให้ผลิตกำลังไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากมีปริมาณไฟฟ้าที่ผลิตได้มากกว่าการออกแบบในกรณีทั่วไป รวมถึงมีต้นทุนในการผลิตไฟฟ้าเฉลี่ยต่ออายุโครงการที่น้อยกว่าอย่างเห็นได้ชัด



## บทที่ 5

### บทสรุปและข้อเสนอแนะ

สำหรับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการศึกษาการปรับปรุงโรงไฟฟ้าคาลินาโดยใช้วิธีการปรับความดันในการควบแน่นให้สอดคล้องกับอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อม นอกจากนี้ยังได้เปรียบเทียบโรงไฟฟ้าซับคริติคอลลีโออาร์ซี ซุปเปอร์คริติคอลลีโออาร์ซี และไตรเลทเทอร์รอลโออาร์ซีกับโรงไฟฟ้าคาลินา โดยมีวัตถุประสงค์ คือเสนอวิธีการปรับปรุงโรงไฟฟ้าคาลินาให้ผลิตกำลังไฟฟ้าได้มากที่สุดเมื่ออุณหภูมิสิ่งแวดล้อมเปลี่ยนแปลงไป และเปรียบเทียบว่าเมื่ออุณหภูมิแหล่งความร้อนอยู่ในช่วงนี้ ควรเลือกใช้งานโรงไฟฟ้าประเภทอะไร

#### 5.1 สรุปผลการเปรียบเทียบโรงไฟฟ้าคาลินา โรงไฟฟ้าซับคริติคอลลีโออาร์ซี ซุปเปอร์คริติคอลลีโออาร์ซี และโรงไฟฟ้าไตรเลทเทอร์รอลโออาร์ซี

สำหรับการเปรียบเทียบโรงไฟฟ้าคาลินากับโรงไฟฟ้าโออาร์ซีทั้ง 4 ประเภท โดยพิจารณาอุณหภูมิแหล่งความร้อนในช่วง  $100 - 200^{\circ}\text{C}$  เพื่อเป็นเกณฑ์ตัดสินใจเลือกสร้างโรงไฟฟ้าที่นำแหล่งความร้อนทิ้งมาใช้ประโยชน์ สำหรับการเปรียบเทียบในกรณีดังกล่าวสรุปผลได้ดังนี้

กำลังไฟฟ้าสุทธิของโรงไฟฟ้าไตรเลทเทอร์รอลโออาร์ซีผลิตกำลังไฟฟ้าได้สูงที่สุดทุกช่วงอุณหภูมิของแหล่งความร้อนทิ้ง โดยเมื่ออุณหภูมิแหล่งความร้อนทิ้งอยู่ในช่วง  $100 - 200^{\circ}\text{C}$  สามารถผลิตกำลังไฟฟ้าอยู่ในช่วง 7.96 ถึง 79.65 kW และเมื่ออุณหภูมิแหล่งความร้อนเพิ่มเป็น  $200 - 300^{\circ}\text{C}$  กำลังไฟฟ้าสุทธิผลิตเพิ่มเป็น 89 ถึง 260 kW

โรงไฟฟ้าซับคริติคอลลีโออาร์ซีผลิตกำลังไฟฟ้าน้อยที่สุดเมื่ออุณหภูมิแหล่งความร้อนอยู่ในช่วง  $100 - 200^{\circ}\text{C}$  ผลิตได้ 4.7 ถึง 61.59 kW แต่เมื่ออุณหภูมิของแหล่งความร้อนอยู่ในช่วง  $200 - 300^{\circ}\text{C}$  โรงไฟฟ้าซับคริติคอลลีโออาร์ซีผลิตกำลังไฟฟ้าได้มากขึ้น ซึ่งมากกว่าโรงไฟฟ้าคาลินาทำให้โรงไฟฟ้าซับคริติคอลลีโออาร์ซีผลิตกำลังไฟฟ้ามากเป็นอันดับ 3 โดยผลิตได้เท่ากับ 89 ถึง 260 kW

สำหรับโรงไฟฟ้าคาลินาสามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้มากกว่าโรงไฟฟ้าซับคริติคอลลีโออาร์ซีเมื่ออุณหภูมิแหล่งความร้อนอยู่ในช่วง  $100 - 200^{\circ}\text{C}$  โดยผลิตได้เท่ากับ 4.6 ถึง 70 kW อย่างไรก็ตามเมื่ออุณหภูมิแหล่งความร้อนเพิ่มเป็น  $200 - 300^{\circ}\text{C}$  โรงไฟฟ้าคาลินาผลิตกำลังไฟฟ้าได้น้อยกว่าโรงไฟฟ้าซับคริติคอลลีโออาร์ซีและผลิตได้น้อยกว่าโรงไฟฟ้าทุกชนิดที่นำมาเปรียบเทียบ โดยผลิตได้เท่ากับ 77.87 ถึง 170.9 kW ความดันที่ใช้งานสำหรับโรงไฟฟ้าจะมีความดันในการควบแน่นกับ

ความดันในการระเหย พบว่า โรงไฟฟ้าคาลินามีความดันในการควบแน่นและความดันในการระเหยที่มากกว่าโรงไฟฟ้าทุกประเภท สำหรับโรงไฟฟ้าไตรเลทเทอร์รอล โออาร์ซีจะมีความดันในการควบแน่นและความดันในการระเหยที่น้อยกว่าโรงไฟฟ้าทุกชนิดที่เปรียบเทียบ อย่างไรก็ตามค่าความดันทั้ง 2 ประเภทนั้นจะมีค่าที่ต่ำกว่าความดันบรรยากาศ ซึ่งเป็นการออกแบบที่ยากกว่าโรงไฟฟ้าแบบอื่น

อย่างไรก็ตาม สำหรับโรงไฟฟ้าคาลินามีขนาดของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่เล็กกว่าโรงไฟฟ้าทุกประเภท รวมไปถึงมีอัตราการไหลเชิงมวลของสารทำงานที่น้อยกว่าและมีอัตราการขยายของไอที่น้อยกว่าโรงไฟฟ้าชนิดอื่นอีกด้วย

สำหรับโรงไฟฟ้าซูเปอร์คริติคัล โออาร์ซีและโรงไฟฟ้าไตรเลทเทอร์รอล โออาร์ซีมีค่าอัตราการขยายตัวของไอที่มากกว่าโรงไฟฟ้าซับคริติคัล โออาร์ซีและโรงไฟฟ้าคาลินาอย่างมาก ทำให้โรงไฟฟ้าซูเปอร์คริติคัล โออาร์ซีและโรงไฟฟ้าไตรเลทเทอร์รอล โออาร์ซีมีงบลงทุนมากกว่าอย่างชัดเจน

ในการเปรียบเทียบต้นทุนเฉลี่ยในการผลิตไฟฟ้าของโรงไฟฟ้า ทำการพิจารณาเฉพาะโรงไฟฟ้าคาลินากับโรงไฟฟ้าซับคริติคัล โออาร์ซีเท่านั้น โดยผลการเปรียบเทียบพบว่าโรงไฟฟ้าคาลินามีต้นทุนเฉลี่ยในการผลิตไฟฟ้าน้อยกว่าโรงไฟฟ้าโออาร์ซีทุกช่วงอุณหภูมิที่ทำการจำลอง นอกจากนี้ในช่วงอุณหภูมิ 100 - 200°C โรงไฟฟ้าคาลินามีกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้มากกว่า รวมถึงต้นทุนในการผลิตไฟฟ้าที่น้อยกว่าจึงทำให้โรงไฟฟ้าคาลินาเหมาะสมที่แหล่งความร้อน 100 - 200°C

## 5.2 สรุปผลการเปรียบเทียบวิธีการปรับความดันในการควบแน่นกับการออกแบบในกรณีทั่วไป

การศึกษาในกรณีนี้ ต้องการปรับปรุงโรงไฟฟ้าคาลินาให้ผลิตกำลังไฟฟ้าได้สูงสุดตลอดปี โดยไม่มีการจำกัดการทำงานที่กำหนดไว้ว่าการออกแบบโรงไฟฟ้าจะเอาอุณหภูมิที่ร้อนสุดมาออกแบบ ซึ่งจะทำให้กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้มีเพียงค่าเดียวตลอดปี จึงเสนอวิธีการเพิ่มกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ให้สอดคล้องกับอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมที่เปลี่ยนแปลงไป

### 5.2.1 สรุปผลการเปรียบเทียบวิธีการปรับความดันในการควบคุม ปรับความดันในการควบคุมกับความเข้มข้นของแอมโมเนีย และปรับเงื่อนไขในการทำงานทุกชนิดกับการออกแบบในกรณีทั่วไป

สำหรับการศึกษาคกรณดังกล่าวเป็นการนำเสนอว่า การปรับความดันในการควบคุมเพียงอย่างเดียวก็เพียงพอต่อการปรับปรุงโรงไฟฟ้าคาถินาให้ผลิตกำลังไฟฟ้าได้มากกว่าการออกแบบในกรณีทั่วไป ซึ่งจากการเปรียบเทียบกระบวนการปรับปรุงโรงไฟฟ้าคาถินาทั้ง 3 แบบ คือ ปรับเฉพาะความดันการควบคุม ปรับเฉพาะความดันในการควบคุมกับความเข้มข้นของแอมโมเนีย และปรับเงื่อนไขในการทำงานทุกชนิด พบว่า เงื่อนไขในการทำงานที่ถูกปรับเปลี่ยนให้สอดคล้องกับอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อมที่มีการเปลี่ยนแปลงมีแค่ความดันในการควบคุมเท่านั้น ดังนั้นการออกแบบให้ระบบปรับความดันในการควบคุมเพียงอย่างเดียวก็เพียงพอต่อการเพิ่มกำลังไฟฟ้าของโรงไฟฟ้าคาถินาแล้ว

### 5.2.2 สรุปผลการเปรียบเทียบวิธีการปรับความดันในการควบคุมกับการออกแบบในกรณีทั่วไปเมื่ออุณหภูมิสิ่งแวดล้อมเปลี่ยนแปลง

ข้อมูลในการจำลองใช้อุณหภูมิของจ.นครราชสีมา ซึ่งช่วงเวลาที่ทำการศึกษาคือ 10.00 – 16.00น. โดยเป็นการพิจารณาถึงเวลาทำงานของการผลิตไฟฟ้าและอุณหภูมิอยู่ในช่วง 25 - 38°C โดยเปรียบเทียบถึงกำลังไฟฟ้าสุทธิที่ผลิตได้รวมไปถึงเงื่อนไขในการทำงานต่าง ๆ โดยสรุปผลจากการจำลองได้ดังนี้

การออกแบบวิธีการปรับความดันในการควบคุมสามารถผลิตกำลังไฟฟ้าสุทธิอยู่ในช่วง 4.18 ถึง 6.87 kW โดยที่กำลังไฟฟ้าสุทธิส่วนใหญ่มีค่า 4.8 – 6.1 kW เนื่องจากอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมส่วนใหญ่อยู่ในช่วง 29 ถึง 36°C ในขณะที่การออกแบบในกรณีทั่วไปผลิตกำลังไฟฟ้าสุทธิได้ค่าเดียวคือ 4.18 kW ซึ่งน้อยกว่าการออกแบบให้ปรับความดันในการควบคุมอย่างชัดเจน

นอกจากนี้ ความดันการควบคุมของการปรับความดันในการควบคุมยังน้อยกว่าวิธีการออกแบบในกรณีทั่วไป เมื่อการปรับความดันในการควบคุมมีค่าความดันอยู่ในช่วง 1.42 เป็น 1.96 MPa นอกจากนี้อุณหภูมิที่พบมากอยู่ในช่วง 29 ถึง 36°C ส่งผลให้ ความดันในการควบคุมของโรงไฟฟ้าคาถินาถูกใช้งานมากในช่วง 1.56 ถึง 1.8 MPa ในขณะที่การออกแบบในกรณีทั่วไปมีค่าความดันเท่ากับ 1.96 MPa

อย่างไรก็ตามสำหรับวิธีการปรับปรุงดังกล่าวส่งผลให้ขนาดของรีคิพเพอร์เรเตอร์อุณหภูมิค่าและคอนเดนเซอร์มีขนาดที่ใหญ่กว่ารวมไปถึงต้องการใช้อัตราการไหลของสารหล่อเย็นที่มากกว่าการออกแบบในกรณีทั่วไปด้วย



### 5.2.3 สรุปผลการเปรียบเทียบเชิงเศรษฐศาสตร์ของวิธีการปรับความดันในการ ควบคุมกับการออกแบบในกรณีทั่วไปเมื่ออุณหภูมิสิ่งแวดล้อมเปลี่ยนแปลง

สำหรับกรณีดังกล่าวเป็นการพิจารณาถึงต้นทุนเฉลี่ยตลอดอายุโครงการ โดยแบ่งอายุโครงการเป็น 10, 20, และ 30 ปี พบว่า วิธีการปรับความดันในการควบคุมมีต้นทุนในการผลิตไฟฟ้าเท่ากับ 71 Baht/kW.h, 56 Baht/kW.h, และ 51 Baht/kW.h ในขณะที่การออกแบบในกรณีทั่วไปมีต้นทุนถึง 85 Baht/kW.h, 68 Baht/kW.h, และ 63 Baht/kW.h แสดงว่าวิธีการปรับความดันในการควบคุมมีความคุ้มค่าในการปรับปรุงโรงไฟฟ้าคาถินาให้สอดคล้องกับอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมที่เปลี่ยนแปลงไป

## 5.3 ข้อเสนอแนะ

5.3.1 สำหรับการจำลองในวิทยานิพนธ์ได้เลือกสมการที่จำลองทางหลักเศรษฐศาสตร์ ซึ่งเป็นการใช้สมการเพื่อหาราคาของอุปกรณ์ รวมถึงเป็นการประมาณในส่วนของงบในการติดตั้ง งบในการซ่อมบำรุงซึ่งเป็นการประเมินไม่ละเอียด ดังนั้นหากต้องเลือกสร้างโรงไฟฟ้าควรนำข้อมูลราคาของอุปกรณ์แต่ละประเภทมาคำนวณ เพื่อพิจารณาว่าโรงไฟฟ้าแบบไหนมีต้นทุนในการผลิตไฟฟ้าน้อยกว่า

5.3.2 สำหรับชนิดของสารทำงานของโรงไฟฟ้าคาถินาถูกจำกัดให้ใช้เฉพาะแอมโมเนียผสมกับน้ำจึงอาจเป็นข้อจำกัดของโรงไฟฟ้าคาถินา ดังนั้นในการจำลองครั้งถัดไปอาจควรใช้สารทำงานที่ผสมระหว่างสารทำงานประเภทอื่นนอกเหนือจากแอมโมเนียผสมกับน้ำ

5.3.3 กรณีปรับปรุงโรงไฟฟ้าคาถินาให้ปรับความดันในการควบคุมให้สอดคล้องกับอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม โดยใช้ข้อมูลอุณหภูมิของจ. นครราชสีมา ซึ่งอาจไม่ยืนยันได้ว่าวิธีการปรับความดันในการควบคุมเป็นวิธีการที่สามารถเพิ่มกำลังไฟฟ้าและลดต้นทุนในการผลิตไฟฟ้าได้ตลอด ดังนั้นควรนำข้อมูลของจังหวัดอื่นมาทำการพิจารณาโดยเฉพาะอย่างยิ่ง จังหวัดที่มีโรงงานอุตสาหกรรมเป็นจำนวนมาก เช่น จังหวัดชลบุรี จังหวัดสมุทรปราการ เป็นต้น

5.3.4 สำหรับการจำลองเพื่อปรับปรุงโรงไฟฟ้าคาถินาให้สอดคล้องกับอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมไม่จำเป็นต้องปรับให้ไปถึงจุดที่อุณหภูมิต่ำสุดในปีที่ทำการออกแบบ อาจจำลองถึงอุณหภูมิที่พบมากที่สุดที่มีค่าต่ำสุดแทน เพื่อลดต้นทุนเกี่ยวกับอุปกรณ์ต่าง ๆ อย่างไรก็ตามในกรณีดังกล่าวยังต้องพิจารณาด้านทุนในการผลิตไฟฟ้าระหว่างการปรับความดันในการควบคุมให้สอดคล้องไปกับอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมกับแบบปรับความดันในการควบคุมให้สอดคล้องไปกับอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมที่โดยระบบจะออกแบบไว้ไม่ให้ต่ำกว่าอุณหภูมิต่ำ ๆ หนึ่ง



## รายการอ้างอิง

กระทรวงพลังงาน (2562). นโยบายด้านพลังงานของรัฐ สืบค้นเมื่อ 7 กันยายน 2562 จาก

<https://energy.go.th/2015/government-energy-policy/#collapseTwo>

การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (ก) (2562). **สัดส่วนการใช้เชื้อเพลิงผลิตพลังงานไฟฟ้าในระบบของกฟผ.** สืบค้นเมื่อ 28 เมษายน 2562 จาก

[https://www.egat.co.th/index.php?option=com\\_content&view=article](https://www.egat.co.th/index.php?option=com_content&view=article&id=2455&Itemid=116)

[https://www.egat.co.th/index.php?option=com\\_content&view=article](https://www.egat.co.th/index.php?option=com_content&view=article&id=2455&Itemid=116)

[https://www.egat.co.th/index.php?option=com\\_content&view=article](https://www.egat.co.th/index.php?option=com_content&view=article&id=2455&Itemid=116)

การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (ข) (2562). **การผลิตและซื้อพลังงานไฟฟ้า** สืบค้นเมื่อ 15

เมษายน 2562 จาก <https://www.egat.co.th/index.php?option=com>

[https://www.egat.co.th/index.php?option=com\\_content&view=article](https://www.egat.co.th/index.php?option=com_content&view=article&id=81&Itemid=116)

[https://www.egat.co.th/index.php?option=com\\_content&view=article](https://www.egat.co.th/index.php?option=com_content&view=article&id=81&Itemid=116)

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 และโรงไฟฟ้าแรงดันไอเคิลแบบ**

**ไตรแลทเทอร์รัลสำหรับแหล่งความร้อนที่อุณหภูมิ 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

วชิราภรณ์ รักษาอินทร์ และอาทิตย์ คุณศรีสุข. (2562). **การศึกษาโรงไฟฟ้าไออาร์ซีแบบซับคริติคัล,**

**โรงไฟฟ้าไออาร์ซีแบบซูเปอร์คริติคัล และโรงไฟฟ้าแรงดันไอเคิลแบบไตรแลทเทอร์รัล**

**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

- 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
- อนุกุล โมงปราณีต 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
- Bahrampoury, R., & Behbahaninia, A. (2017). **Thermodynamic optimization and thermoeconomic analysis of four double pressure Kalina cycles driven from Kalina cycle system 11.** *Energy conversion and management*, 152, 110-123.
- Bombarda, P., Invernizzi, C. M., & Pietra, C. (2010). **Heat recovery from Diesel engines: A thermodynamic comparison between Kalina and ORC cycles.** *Applied thermal engineering*, 30(2-3), 212-219.
- D. Fiaschi, G. Manfrida, E. Rogai, L. Talluri. (2017). **Exergoeconomic analysis and comparison between ORC and Kalina cycles to exploit low and medium-high temperature heat from two different geothermal sites.** *Energy conversion and management*, 154, 503-516.
- Dorj, P. (2005). **Thermoeconomic analysis of a new geothermal utilization CHP plant in Tsetserleg, Mongolia (No. 2).** United Nations University.
- Eller, T., Heberle, F., & Brüggemann, D. (2017). **Techno-economic analysis of novel working fluid pairs for the Kalina cycle.** *Energy Procedia*, 129, 113-120.
- Fischer, J. (2011). **Comparison of trilateral cycles and organic Rankine cycles.** *Energy*, 36(10), 6208-6219.
- Júnior, E. P. B., Arrieta, M. D. P., Arrieta, F. R. P., & Silva, C. H. F. (2019). **Assessment of a Kalina cycle for waste heat recovery in the cement industry.** *Applied Thermal Engineering*, 147, 421-437.
- Li, H., Hu, D., Wang, M., & Dai, Y. (2016). **Off-design performance analysis of Kalina cycle for low temperature geothermal source.** *Applied Thermal Engineering*, 107, 728-737.

- Maraver, D., Royo, J., Lemort, V., & Quoilin, S. (2014). **Systematic optimization of subcritical and transcritical organic Rankine cycles (ORCs) constrained by technical parameters in multiple applications**. *Applied energy*, 117, 11-29.
- Meng, F., Wang, E., Zhang, B., Zhang, F., & Zhao, C. (2019). **Thermo-economic analysis of transcritical CO<sub>2</sub> power cycle and comparison with Kalina cycle and ORC for a low-temperature heat source**. *Energy Conversion and Management*, 195, 1295-1308
- Milani, S. M., Saray, R. K., & Najafi, M. (2019). **Exergo-economic analysis of different power-cycle configurations driven by heat recovery of a gas engine**. *Energy Conversion and Management*, 186, 103-119.
- Modi, A., Andreasen, J. G., Kærn, M. R., & Haglind, F. (2015). **Part-load performance of a high temperature Kalina cycle**. *Energy conversion and management*, 105, 453 - 461.
- Modi, A., Kærn, M. R., Andreasen, J. G., & Haglind, F. (2016). **Thermoeconomic optimization of a Kalina cycle for a central receiver concentrating solar power plant**. *Energy Conversion and Management*, 115, 276-287.
- Muhammad, U., Imran, M., Lee, D. H., & Park, B. S. (2015). **Design and experimental investigation of a 1 kW organic Rankine cycle system using R245fa as working fluid for low-grade waste heat recovery from steam**. *Energy Conversion and Management*, 103, 1089-1100.
- Nemati, A., Nami, H., Ranjbar, F., & Yari, M. (2017). **A comparative thermodynamic analysis of ORC and Kalina cycles for waste heat recovery: a case study for CGAM cogeneration system**. *Case Studies in Thermal Engineering*, 9, 1-13.
- Ogriseck, S. (2009) **Integration of Kalina cycle in a combined heat and power plant, a case study**. *Applied Thermal Engineering*, 29(14-15), 2843-2848.
- Pan, Z., Zhang, L., Zhang, Z., Shang, L., & Chen, S. (2017). **Thermodynamic analysis of KCS/ORC integrated power generation system with LNG cold energy exploitation and CO<sub>2</sub> capture**. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 46, 188-198.
- Pei, G., Li, J., Li, Y., Wang, D., & Ji, J. (2011). **Construction and dynamic test of a small - scale organic rankine cycle**. *Energy*, 36(5), 3215-3223.

- Rodríguez, C. E. C., Palacio, J. C. E., Venturini, O. J., Lora, E. E. S., Cobas, V. M., dos Santos, D. M., ... & Gialluca, V. (2013). **Exergetic and economic comparison of ORC and Kalina cycle for low temperature enhanced geothermal system in Brazil.** *Applied Thermal Engineering*, 52(1), 109-119.
- Saffari, H., Sadeghi, S., Khoshzat, M., & Mehregan, P. (2016). **Thermodynamic analysis and optimization of a geothermal Kalina cycle system using Artificial Bee Colony algorithm.** *Renewable Energy*, 89, 154-167.
- Wang, E., Yu, Z., & Zhang, F. (2017). **Investigation on efficiency improvement of a Kalina cycle by sliding condensation pressure method.** *Energy Conversion and Management*, 151, 123-135.
- Walraven, D., Laenen, B., & D'haeseleer, W. (2013). **Comparison of thermodynamic cycles for power production from low-temperature geothermal heat sources.** *Energy Conversion and Management*, 66, 220-233.
- Yari, M., Mehr, A. S., Zare, V., Mahmoudi, S. M. S., & Rosen, M. A. (2015). **Exergoeconomic comparison of TLC (trilateral Rankine cycle), ORC (organic Rankine cycle) and Kalina cycle using a low-grade heat source.** *Energy*, 83, 712 - 722.
- Zare, V., & Mahmoudi, S. M. S. (2015). **A thermodynamic comparison between organic Rankine and Kalina cycles for waste heat recovery from the Gas -Modular Helium Reactor.** *Energy*, 79, 398-406.
- Zhang, X., He, M., & Zhang, Y. (2012) **A review of research on the Kalina cycle.** *Renewable and sustainable energy reviews*, 16(7), 5309-5318



ภาคผนวก ก.

ข้อมูลผลการจำลองการเปรียบเทียบระหว่างโรงไฟฟ้าคาลินา โรงไฟฟ้าชั้นkriti  
คอลโออาร์ซี ซุปเปอร์kritiคอลโออาร์ซี และไตรเลทเทอร์รอลโออาร์ซี

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ ก.1 ข้อมูลผลการเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าสุทธิของโรงไฟฟ้าซับคริติคอลโออาร์ซี  
 ซุปเปอร์คริติคอลโออาร์ซี ไตรเลทเทอร์รอล โออาร์ซี และ โรงไฟฟ้าคาลินา

heat source (°C)	Net power (kW)			
	ซับคริติคอลโออาร์ซี	ซุปเปอร์คริติคอลโออาร์ซี	ไตรเลทเทอร์รอลโออาร์ซี	คาลินา
100	4.7	5.5	7.96	4.6
110	7.7	9.16	12.27	9.66
120	11.2	12.89	17.38	11.63
130	15.45	17.14	21	19.05
140	22.4	24.27	27.23	24.9
150	25.94	28.18	34.5	29.4
160	31.8	38.22	41.67	37.08
180	46.8	55.01	58.2	57.96
200	61.59	74.34	79.65	70
210	82.65	87.16	89.09	77.87
230	101.56	113.53	113.55	105.8
250	134.9	141.72	138.67	124.5
260	154	157	168	140.2
280	194.69	197	210	150.2
300	231.44	245	266	170.9

ตารางที่ ก.2 ข้อมูลผลการเปรียบเทียบอัตราขยายตัวของไอของโรงไฟฟ้าซับคริติคอลโออาร์ซี  
 ซุปเปอร์คริติคอลโออาร์ซี ไตรเลทเทอร์รอลโออาร์ซี และโรงไฟฟ้ากาลินา

heat source (°C)	expansion ratio			
	ซับคริติคอลโออาร์ซี	ซุปเปอร์คริติคอลโออาร์ซี	ไตรเลทเทอร์รอลโออาร์ซี	กาลินา
100	1.92	2.09	220	1.3
110	1.82	2.92	270	1.64
120	2.23	2.2	330	1.6
130	2.83	5.05	44.04	1.66
140	5.19	13.65	46.76	1.76
150	5.47	14.24	46.94	2.05
160	4.75	15.01	10.31	2.29
180	6.41	25.9	78.19	3.9
200	6.73	23.77	109.58	4.57
210	21.23	33.7	58.34	4.9
230	13.08	60.58	77.18	5.39
250	30	68.97	67.61	8.1
260	42.48	177	2073	9.13
280	39.36	283	4451	13.15
300	98.43	562	3407	10.6



ตารางที่ ก.3 ข้อมูลผลการเปรียบเทียบอัตราการไหลเชิงมวลของโรงไฟฟ้าซับคริติคอลโออาร์ซี  
 ซุปเปอร์คริติคอลโออาร์ซี ไตรเลทเทอร์รอดโออาร์ซี และโรงไฟฟ้าคาลินา

heat source (°C)	mass flow rate (kg/s)			
	ซับคริติคอลโออาร์ซี	ซุปเปอร์คริติคอลโออาร์ซี	ไตรเลทเทอร์รอดโออาร์ซี	คาลินา
100	1.1	0.8	1.7	0.17
110	1.4	2.2	1.7	0.16
120	1.75	1.3	1.7	0.2
130	2	2.7	3.5	0.3
140	2.4	2.9	3.5	0.35
150	2.5	3.3	3.5	0.32
160	0.91	2.75	1.6	0.35
180	1.1	3	0.75	0.37
200	1.2	3.3	4.5	0.38
210	2.5	3	1.6	0.4
230	2.99	3	1.8	0.54
250	1.625	3.6	4.2	0.54
260	4.1	1.7	1.9	0.57
280	5.2	2	2.4	0.6
300	2	2.1	2.6	0.62

ตารางที่ ก.4 ข้อมูลผลการเปรียบเทียบความดันในการควบแน่นของโรงไฟฟ้าซับคริติคอลโออาร์ซี  
 ซุปเปอร์คริติคอลโออาร์ซี ไตรเลทเทอร์รอลโออาร์ซี และโรงไฟฟ้าคาลินา

heat source (°C)	condensation pressure (MPa)			
	ซับคริติคอลโออาร์ซี	ซุปเปอร์คริติคอลโออาร์ซี	ไตรเลทเทอร์รอลโออาร์ซี	คาลินา
100	0.902	2.27	0.018	1.7
110	0.902	1.52	0.018	1.64
120	0.627	2.2	0.018	1.65
130	0.624	1.411	0.202	1.9
140	0.622	0.638	0.201	1.9
150	0.185	0.105	0.195	1.75
160	0.672	0.578	0.158	1.7
180	0.338	0.45	0.158	1.55
200	0.195	0.436	0.109	1.35
210	0.197	0.333	0.2	1.3
230	0.23	0.23	0.15	1.18
250	0.14826	0.18	0.18	1.12
260	0.101	0.065	0.006	1.07
280	0.10159	0.048	0.003	0.96
300	0.01621	0.033	0.0045	0.91

ตารางที่ ก.5 ข้อมูลผลการเปรียบเทียบความดันในการระเหยของโรงไฟฟ้าซับคริติคอลโออาร์ซี  
 ซุปเปอร์คริติคอลโออาร์ซี ไตรเลทเทอร์รอลโออาร์ซี และโรงไฟฟ้ากาลินา

heat source (°C)	evaporation pressure (MPa)			
	ซับคริติคอลโออาร์ซี	ซุปเปอร์คริติคอลโออาร์ซี	ไตรเลทเทอร์รอลโออาร์ซี	กาลินา
100	1.47	4.2	0.078	2.3
110	2.18	3.35	0.11	2.85
120	2.12	6.3	0.137	2.8
130	1.669	4.732	1.154	3.3
140	2.203	4.016	1.383	3.51
150	0.841	3.543	1.597	3.8
160	2.486	4.12	1.475	4.2
180	1.734	5.548	2.085	6.5
200	1.169	5.495	2.071	6.6
210	2.685	5.77	3.2	6.8
230	2.349	7.188	3.15	6.82
250	2.795	5.899	3.87	9.4
260	2.84	3.76	1.014	10
280	2.724	5.238	0.995	12.3
300	1.27963	10.8	1.476	10

ตารางที่ ก.6 ข้อมูลผลการเปรียบเทียบขนาดของคอนเดนเซอร์ของโรงไฟฟ้าซับคริติคอลโออาร์ซี  
 ซุปเปอร์คริติคอลโออาร์ซี ไตรเลทเทอร์รอดโออาร์ซี และโรงไฟฟ้ากาลินา

heat source (°C)	condenser area (m <sup>2</sup> )			
	ซับคริติคอล โอ อาร์ซี	ซุปเปอร์คริติคอล โออาร์ซี	ไตรเลทเทอร์รอด โออาร์ซี	กาลินา
100	11.19	12.44	15.29	18.53
110	14.33	15.26	18.98	18.89
120	17.72	17.91	22.60	23.20
130	21.38	24.74	26.03	20.43
140	25.66	27.88	30.00	20.68
150	29.71	34.07	34.96	26.82
160	29.46	35.24	37.05	30.06
180	36.77	43.71	42.57	41.43
200	45.19	52.00	52.54	40.08
210	51.48	55.96	55.36	37.00
230	59.99	61.01	62.52	46.55
250	63.96	68.74	74.02	44.50
260	70.41	69.64	77.88	45.09
280	89.21	87.07	87.59	44.35
300	89.87	92.73	104.39	46.21

ตารางที่ ก.7 ข้อมูลผลการเปรียบเทียบขนาดของอีแวปโปเรเตอร์ของโรงไฟฟ้าซับคริติคอลโออาร์ซี  
 ชุปเปอร์คริติคอลโออาร์ซี ไตรเลทเทอร์รอลโออาร์ซี และโรงไฟฟ้ากาลินา

heat source (°C)	evaporator area (m <sup>2</sup> )			
	ซับคริติคอลโออาร์ซี	ชุปเปอร์คริติคอล โออาร์ซี	ไตรเลทเทอร์รอล โออาร์ซี	กาลินา
100	169.65	263.80	406.45	274.58
110	213.78	304.91	509.62	223.20
120	270.23	316.45	609.80	268.09
130	312.14	560.48	690.10	223.00
140	469.82	631.99	780.78	237.00
150	453.95	803.75	878.59	253.02
160	416.45	842.02	956.68	281.06
180	520.86	1047.71	1066.65	286.98
200	584.31	1155.77	1339.62	397.00
210	887.66	1289.67	1241.26	400.40
230	1263.22	1524.18	1403.83	423.65
250	1061.21	1618.49	1190.93	425.59
260	1399.92	1798.72	1898.99	387.38
280	1899.27	2013.65	2181.26	421.99
300	2175.74	2300.68	2506.60	542.92

ตารางที่ ก.8 ข้อมูลผลการเปรียบเทียบต้นทุนในการผลิตไฟฟ้าของโรงไฟฟ้าชัรบคริดคอดโออาร์ซี กับโรงไฟฟ้าคาลินาเมื่อแหล่งความร้อนเป็น 100 - 130°C

heat source (°C)	100		110		120		130	
	Kalina	subORC	Kalina	subORC	Kalina	subORC	Kalina	subORC
power pump (kW)	0.234	0.53	0.44	0.7248	0.53	2.03	0.977	1.99
power turbine (kW)	4.84	3.97	9.66	7.48584	12.15	13.23	20.03	17.43
Net power (kW)	4.7	5.5	9.22	6.76104	11.62	11.2	19.053	15.44
Evaporator area	169.65	263.80	213.78	304.91	270.23	316.45	312.14	560.48
Condenser area	11.19	12.44	14.33	15.26	17.72	17.91	21.38	24.74
Ct (USD)	13284.27	11563.77	21549.14	18026.62	25301.68	26855.78	35902.33	32572.72
Cp (USD)	350.42	673.97	580.74	865.75	673.97	1973.40	1099.34	1942.23
Cevap (USD)	35728.52	50862.98	42988.10	57110.60	51851.33	58832.81	58191.30	92944.68
Ccond (USD)	4060.15	4419.30	4946.99	5201.32	5864.32	5914.30	6814.64	7657.10
Cgen (USD)	6862.90	5974.06	11132.69	9312.89	13071.32	13874.20	18547.81	16827.68
Ceq (USD)	60286.26	73494.07	81197.66	90517.18	96762.62	107450.49	120555.41	151944.41
Cpip (USD)	39788.93	48506.09	53590.45	59741.34	63863.33	70917.32	79566.57	100283.31
Cinvc (USD)	6028.63	7349.41	8119.77	9051.72	9676.26	10745.05	12055.54	15194.44
Cel (USD)	6028.63	7349.41	8119.77	9051.72	9676.26	10745.05	12055.54	15194.44
Cinst (USD)	27128.82	33072.33	36538.95	40732.73	43543.18	48352.72	54249.94	68374.99
Cmis (USD)	78975.00	96277.23	106368.93	118577.51	126759.03	140760.14	157927.59	199047.18
Cinv (USD)	139261.25	169771.30	187566.59	209094.69	223521.65	248210.63	278483.01	350991.59
Ey (kW.h)	36025.5	42157.5	70671.3	51823.3716	89067.3	85848	146041.245	118347.6
LCOE (USD/kW.h)	1.61	1.48	0.92	1.31	0.78	0.85	0.53	0.74
LCOE (Baht/kW.h)	48.24	44.28	27.47	39.22	23.50	25.60	15.92	22.24

ตารางที่ ก.9 ข้อมูลผลการเปรียบเทียบต้นทุนในการผลิตไฟฟ้าของโรงไฟฟ้าชับริตติคคัลโออาร์ซี กับโรงไฟฟ้าคาลินาเมื่อแหล่งความร้อนเป็น 140 - 180°C

heat source (°C)	140			150			160			180		
	Kalina	subORC	Kalina	subORC	Kalina	subORC	Kalina	subORC	Kalina	subORC	Kalina	subORC
power pump (kW)	1.29	3.6	1.48	4.24	1.89	4.2315	1.89	4.2315	4.1	3.6663	4.1	3.6663
power turbine (kW)	26.2	26	30.89	27.445	38.97	36.0269	38.97	36.0269	62.06	50.523	62.06	50.523
Net power (kW)	24.91	22.4	29.41	23.205	37.08	31.7954	37.08	31.7954	57.96	46.8567	57.96	46.8567
Evaporator area	469.82	631.99	453.95	803.75	416.45	842.02	416.45	842.02	520.86	1047.71	520.86	1047.71
Condenser area	25.66	27.88	29.71	34.07	29.46	35.24	29.46	35.24	36.77	43.71	36.77	43.71
Ct (USD)	43326.82	43095.04	48620.39	44757.95	57208.06	54148.29	57208.06	54148.29	79234.47	68610.14	79234.47	68610.14
Cp (USD)	1373.06	3120.76	1532.59	3557.22	1863.75	3551.51	1863.75	3551.51	3462.94	3166.65	3462.94	3166.65
Cevap (USD)	80709.61	102316.45	78521.27	124015.36	73286.88	128716.21	73286.88	128716.21	87649.96	153309.64	87649.96	153309.64
Ccond (USD)	7883.63	8424.81	8864.95	9890.93	8805.65	10161.93	8805.65	10161.93	10515.09	12074.56	10515.09	12074.56
Cgen (USD)	22383.44	22263.70	25118.20	23122.79	29554.75	27974.02	29554.75	27974.02	40934.01	35445.28	40934.01	35445.28
Ceq (USD)	155676.57	179220.75	162657.41	205344.25	170719.09	224551.95	170719.09	224551.95	221796.47	272606.27	221796.47	272606.27
Cpip (USD)	102746.54	118285.70	107353.89	135527.21	112674.60	148204.29	112674.60	148204.29	146385.67	179920.14	146385.67	179920.14
Cinvc (USD)	15567.66	17922.08	16265.74	20534.43	17071.91	22455.20	17071.91	22455.20	22179.65	27260.63	22179.65	27260.63
Cel (USD)	15567.66	17922.08	16265.74	20534.43	17071.91	22455.20	17071.91	22455.20	22179.65	27260.63	22179.65	27260.63
Cinst (USD)	70054.46	80649.34	73195.84	92404.91	76823.59	101048.38	76823.59	101048.38	99808.41	122672.82	99808.41	122672.82
Cmis (USD)	203936.31	234779.19	213081.21	269000.97	223642.00	294163.06	223642.00	294163.06	290553.38	357114.22	290553.38	357114.22
Cinv (USD)	359612.88	413999.94	375738.62	474345.22	394361.09	518715.01	394361.09	518715.01	512349.86	629720.49	512349.86	629720.49
Ey (kW.h)	190935.15	171696	225427.65	177866.325	284218.2	243711.741	284218.2	243711.741	444263.4	359156.6055	444263.4	359156.6055
LCOE (USD/kW.h)	0.47	0.56	0.40	0.59	0.33	0.46	0.33	0.46	0.25	0.35	0.25	0.35
LCOE (Baht/kW.h)	13.97	16.88	12.14	17.72	9.90	13.70	9.90	13.70	7.46	10.60	7.46	10.60



ตารางที่ ก.10 ข้อมูลผลการเปรียบเทียบต้นทุนในการผลิตไฟฟ้าของโรงไฟฟ้าชนิดรีคิกคูล โออาร์ซี กับ โรงไฟฟ้าคาลินาเมื่อแหล่งความร้อนเป็น 200 - 250°C

heat source (°C)	200		210		230		250	
	Kalina	subORC	Kalina	subORC	Kalina	subORC	Kalina	subORC
power pump (kW)	4.12	2.64	4.44	6.25	5.74	6.3687	7.97	9.555
power turbine (kW)	74.14	64.224	82.32	88.9075	111.51	107.939	132.45	144.49175
Net power (kW)	70.02	61.584	77.88	82.6575	105.77	101.5703	124.48	134.93675
Evaporator area	584.31	1155.77	887.66	1289.67	1263.22	1524.18	1061.21	1618.49
Condenser area	45.19	52.00	51.48	55.96	59.99	61.01	63.96	68.74
Ct (USD)	89739.31	81158.51	96560.54	101906.71	119416.84	116726.86	134704.56	143164.73
Cp (USD)	3476.45	2435.01	3690.83	4852.01	4532.60	4925.59	5893.65	6814.01
Cevap (USD)	96092.70	165834.14	134268.35	181034.31	178058.07	206921.99	154888.11	217102.62
Ccond (USD)	12399.79	13872.40	13762.41	14712.07	15553.09	15765.13	16371.62	17343.36
Cgen (USD)	46361.00	41928.00	49884.98	52646.91	61692.97	60303.27	69590.89	73961.57
Ceq (USD)	248069.25	305228.06	298167.11	355152.02	379253.58	404642.84	381448.83	458386.29
Cpip (USD)	163725.70	201450.52	196790.29	234400.33	250307.36	267064.27	251756.23	302534.95
Cinvc (USD)	24806.92	30522.81	29816.71	35515.20	37925.36	40464.28	38144.88	45838.63
Cel (USD)	24806.92	30522.81	29816.71	35515.20	37925.36	40464.28	38144.88	45838.63
Cinst (USD)	111631.16	137352.63	134175.20	159818.41	170664.11	182089.28	171651.97	206273.83
Cmis (USD)	324970.71	399848.76	390598.91	465249.15	496822.19	530082.12	499697.96	600486.03
Cinv (USD)	573039.96	705076.83	688766.01	820401.17	876075.76	934724.95	881146.79	1058872.32
Ey (kW.h)	536703.3	472041.36	596950.2	633569.7375	810727.05	778536.3495	954139.2	1034290.189
LCOE (USD/kW.h)	0.22	0.29	0.23	0.24	0.20	0.22	0.17	0.18
LCOE (Baht/kW.h)	6.65	8.74	6.80	7.28	5.98	6.55	5.10	5.43

ตารางที่ ก.11 ข้อมูลผลการเปรียบเทียบต้นทุนในการผลิตไฟฟ้าของโรงไฟฟ้าชีวมวลคอคอดเคอราชี กับโรงไฟฟ้าคานาเมื่อแหล่งความร้อนเป็น 260 - 300°C

heat source (°C)	260		280		300	
	Kalina	subORC	Kalina	subORC	Kalina	subORC
power pump (kW)	9.6	10.7	12.42	13.8	10.2	14.7
power turbine (kW)	149.8	167.7	162.6	210.8	181.1	259.7
Net power (kW)	154	157	194.69	197	231.44	245
Evaporator area	1399.92	1798.72	1899.27	2013.65	2175.74	2300.68
Condenser area	70.41	69.64	89.21	87.07	89.87	92.73
Ct (USD)	146826.41	158898.23	155499.96	186489.91	167682.92	215812.34
Cp (USD)	6839.67	7459.76	8404.57	9143.69	7179.57	9617.71
Cevap (USD)	193312.97	236236.65	246744.00	258562.14	275082.79	287648.63
Ccond (USD)	17681.04	17525.61	21365.29	20953.54	21491.66	22036.90
Cgen (USD)	75853.27	82089.79	80334.18	96344.17	86628.13	111492.69
Ceq (USD)	440513.36	502210.04	512348.01	571493.44	558065.06	646608.28
Cpip (USD)	290738.82	331458.63	338149.68	377185.67	368322.94	426761.46
Cinvc (USD)	44051.34	50221.00	51234.80	57149.34	55806.51	64660.83
Cel (USD)	44051.34	50221.00	51234.80	57149.34	55806.51	64660.83
Cinst (USD)	198231.01	225994.52	230556.60	257172.05	251129.28	290973.72
Cmis (USD)	577072.50	657895.16	671175.89	748656.40	731065.23	847056.84
Cinv (USD)	1017585.86	1160105.20	1183523.89	1320149.84	1289130.30	1493665.12
Ey (kW.h)	1180410	1203405	1492298.85	1510005	1773987.6	1877925
LCOE (USD/kW.h)	0.15	0.17	0.14	0.15	0.12	0.13
LCOE (Baht/kW.h)	4.61	5.03	4.12	4.45	3.72	3.97



ภาคผนวก ข.

ข้อมูลผลการจำลองของการใช้วิธีการปรับความดันในการควบแน่นกับวิธีการ  
ออกแบบโดยทั่วไปเมื่ออุณหภูมิถึงแวลด้อยมเป็นของจ.นครราชสีมาในปีพ.ศ.2560

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ ข.1 ข้อมูลผลการเปรียบเทียบตัวแปรต่าง ๆ ระหว่างวิธีการปรับความดันในการความแน่น (Sliding) กับวิธีการออกแบบในกรณีทั่วไป (Opt)  
ณ เวลา 10.00น. ในปีพ.ศ. 2560

เดือน	Ambient temp (°C)	Net power (kW)		P <sub>cond</sub> (MPa)		Expansion		UA <sub>LT</sub> (m <sup>2</sup> )		UA <sub>Cond</sub> (m <sup>2</sup> )		T in condenser	
		Sliding	Opt	Sliding	Opt	Sliding	Opt	Sliding	Opt	Sliding	Opt	Sliding	Opt
มกราคม	25.44	6.87	4.18	1.42	1.96	2.08	1.55	1.163527	0.465403	14.7272	13.84548	56.74	65.15
กุมภาพันธ์	29.98	5.87	4.18	1.6	1.96	1.87	1.55	0.921909	0.465403	14.59185	13.84548	60.1	65.15
มีนาคม	31.8	5.44	4.18	1.687	1.96	1.78	1.55	0.809446	0.465403	14.21965	13.84548	61.52	65.15
เมษายน	33.87	5.03	4.18	1.77	1.96	1.7	1.55	0.703962	0.465403	14.37756	13.84548	62.76	65.15
พฤษภาคม	32.64	5.23	4.18	1.73	1.96	1.74	1.55	0.754265	0.465403	14.00113	13.84548	62.17	65.15
มิถุนายน	32.37	5.32	4.18	1.71	1.96	1.76	1.55	0.780065	0.465403	14.24926	13.84548	61.88	65.15
กรกฎาคม	31.44	5.52	4.18	1.67	1.96	1.79	1.55	0.831242	0.465403	14.27746	13.84548	61.25	65.15
สิงหาคม	30.19	5.82	4.18	1.61	1.96	1.85	1.55	0.908868	0.465403	14.54392	13.84548	60.26	65.15
กันยายน	29.1	6.09	4.18	1.56	1.96	1.9	1.55	0.974468	0.465403	14.74552	13.84548	59.39	65.15
ตุลาคม	29.93	5.87	4.18	1.6	1.96	1.86	1.55	0.921923	0.465403	14.527	13.84548	60.09	65.15
พฤศจิกายน	27.53	6.45	4.18	1.49	1.96	1.99	1.55	1.067249	0.465403	15.04018	13.84548	58.11	65.15
ธันวาคม	25.19	6.91	4.18	1.43	1.96	2.1	1.55	1.14902	0.465403	14.08854	13.84548	57	65.15

ตารางที่ ข.2 ข้อมูลผลการเปรียบเทียบตัวแปรต่าง ๆ ระหว่างวิธีการปรับความดันในการควบแน่น (Sliding) กับวิธีการออกแบบในกรณีทั่วไป (Opt)

ณ เวลา 13.00น. ในปีพ.ศ. 2560

เดือน	Ambient temp (°C)	Net power (kW)		P <sub>cond</sub> (MPa)		Expansion		UA <sub>LT</sub> (m <sup>2</sup> )		UA <sub>Cond</sub> (m <sup>2</sup> )		T in condenser	
		Sliding	Opt	Sliding	Opt	Sliding	Opt	Sliding	Opt	Sliding	Opt	Sliding	Opt
มกราคม	29.92	5.93	4.18	1.59	1.96	1.87	1.55	0.935006	0.465403	14.83857	13.84548	59.92	65.15
กุมภาพันธ์	34.79	4.8	4.18	1.82	1.96	1.66	1.55	0.640998	0.465403	14.09418	13.84548	63.45	65.15
มีนาคม	36.41	4.53	4.18	1.88	1.96	1.61	1.55	0.565755	0.465403	14.4551	13.84548	64.22	65.15
เมษายน	37.68	4.18	4.18	1.96	1.96	1.55	1.55	0.465403	0.465403	13.84548	13.84548	65.15	65.15
พฤษภาคม	35.08	4.8	4.18	1.82	1.96	1.66	1.55	0.640998	0.465403	14.46779	13.84548	63.45	65.15
มิถุนายน	34.36	4.94	4.18	1.79	1.96	1.69	1.55	0.67874	0.465403	14.41703	13.84548	63.04	65.15
กรกฎาคม	34.3	4.94	4.18	1.79	1.96	1.69	1.55	0.67874	0.465403	14.33949	13.84548	63.04	65.15
สิงหาคม	32.64	5.2	4.18	1.72	1.96	1.75	1.55	0.76732	0.465403	14.29296	13.84548	62.03	65.15
กันยายน	31.34	5.6	4.18	1.65	1.96	1.81	1.55	0.857	0.465403	14.77231	13.84548	60.95	65.15
ตุลาคม	31.62	5.52	4.18	1.67	1.96	1.79	1.55	0.831242	0.465403	14.50726	13.84548	61.25	65.15
พฤศจิกายน	30.82	5.67	4.18	1.64	1.96	1.83	1.55	0.869928	0.465403	14.3846	13.84548	60.76	65.15
ธันวาคม	29.72	6.04	4.18	1.57	1.96	1.9	1.55	0.961286	0.465403	15.24884	13.84548	59.57	65.15



ตารางที่ ข.3 ข้อมูลผลการเปรียบเทียบตัวแปรต่าง ๆ ระหว่างวิธีการปรับความดันในการความแน่น (Sliding) กับวิธีการออกแบบในกรณีทั่วไป (Opt)

ณ เวลา 16.00น. ในปีพ.ศ. 2560

เดือน	Ambient temp (°C)	Net power (kW)		P <sub>cond</sub> (MPa)		Expansion		UA_LT (m <sup>2</sup> )		UA Cond (m <sup>2</sup> )		T in condenser	
		Sliding	Opt	Sliding	Opt	Sliding	Opt	Sliding	Opt	Sliding	Opt	Sliding	Opt
มกราคม	31.49	5.52	4.18	1.67	1.96	1.79	1.55	0.831242	0.465403	14.3409	13.84548	61.25	65.15
กุมภาพันธ์	35.89	4.57	4.18	1.87	1.96	1.62	1.55	0.578288	0.465403	14.0688	13.84548	64.1	65.15
มีนาคม	37.17	4.26	4.18	1.94	1.96	1.56	1.55	0.49054	0.465403	13.75018	13.84548	64.93	65.15
เมษายน	36.31	4.53	4.18	1.88	1.96	1.61	1.55	0.565755	0.465403	14.32398	13.84548	64.22	65.15
พฤษภาคม	34.05	4.94	4.18	1.79	1.96	1.68	1.55	0.67874	0.465403	14.0251	13.84548	63.04	65.15
มิถุนายน	34.06	4.94	4.18	1.79	1.96	1.69	1.55	0.67874	0.465403	14.03637	13.84548	63.04	65.15
กรกฎาคม	34.16	4.94	4.18	1.79	1.96	1.69	1.55	0.67874	0.465403	14.16185	13.84548	63.04	65.15
สิงหาคม	32.61	5.2	4.18	1.72	1.96	1.75	1.55	0.76732	0.465403	14.24221	13.84548	62.03	65.15
กันยายน	31.06	5.6	4.18	1.65	1.96	1.81	1.55	0.857	0.465403	14.77231	13.84548	60.95	65.15
ตุลาคม	31.83	5.47	4.18	1.68	1.96	1.78	1.55	0.818398	0.465403	14.46919	13.84548	61.41	65.15
พฤศจิกายน	31.06	5.62	4.18	1.65	1.96	1.82	1.55	0.857	0.465403	14.34372	13.84548	60.93	65.15
ธันวาคม	30.66	5.77	4.18	1.62	1.96	1.85	1.55	0.895249	0.465403	14.83998	13.84548	60.43	65.15

ตารางที่ ๗.4 ข้อมูลผลการเปรียบเทียบอัตราการไหลของสารหล่อเย็นระหว่างวิธีการปรับความดันในการควบคุมแน่น (Sliding) กับวิธีการออกแบบในกรณีทั่วไป (Opt) ในปีพ.ศ. 2560

เดือน	mass flow rate of cooling water (kg/s)									
	Ambient temp (10.00 am) (°C)	Sliding	Opt	Ambient temp (01.00 pm) (°C)	Sliding	Opt	Ambient temp (04.00 pm) (°C)	Sliding	Opt	
มกราคม	25.44	2.92	2.66	29.92	2.85	2.66	31.49	2.81	2.66	
กุมภาพันธ์	29.98	2.84	2.66	34.79	2.74	2.66	35.89	2.71	2.66	
มีนาคม	31.8	2.8	2.66	36.41	2.71	2.66	37.17	2.67	2.66	
เมษายน	33.87	2.76	2.66	37.68	2.66	2.66	36.31	2.71	2.66	
พฤษภาคม	32.64	2.78	2.66	35.08	2.74	2.66	34.05	2.75	2.66	
มิถุนายน	32.37	2.79	2.66	34.36	2.75	2.66	34.06	2.75	2.66	
กรกฎาคม	31.44	2.81	2.66	34.3	2.75	2.66	34.16	2.75	2.66	
สิงหาคม	30.19	2.84	2.66	32.64	2.79	2.66	32.61	2.79	2.66	
กันยายน	29.1	2.86	2.66	31.34	2.82	2.66	31.06	2.82	2.66	
ตุลาคม	29.93	2.84	2.66	31.62	2.81	2.66	31.83	2.8	2.66	
พฤศจิกายน	27.53	2.89	2.66	30.82	2.82	2.66	31.06	2.82	2.66	
ธันวาคม	25.19	2.92	2.66	29.72	2.85	2.66	30.66	2.84	2.66	



ตารางที่ ข.5 ข้อมูลผลการเปรียบเทียบต้นทุนในการผลิตไฟฟ้าระหว่างวิธีการปรับความดันในการ  
 ควบแน่น (Sliding) กับวิธีการออกแบบในกรณีทั่วไป (Opt) ในปีพ.ศ. 2560

	Sliding	Opt
power pump (kW)	0.47	0.34
power turbine (kW)	7.34	4.50
Net power (kW)	6.87	4.16
A evap (m <sup>2</sup> )	161.96	161.96
A HT rec (m <sup>2</sup> )	0.86	0.86
A LT rec (m <sup>2</sup> )	1.16	0.47
A cond (m <sup>2</sup> )	14.73	13.85
Ct (USD)	17780.06	12623.93
Cp (USD)	610.12	469.16
Cevap (USD)	34428.15	34428.15
Cht (USD)	521.41	521.41
Clt (USD)	663.74	318.89
Ccond (USD)	5056.77	4813.09
Cgen (USD)	8771.51	6175.90
Ceq (USD)	67831.75	59350.53
Cpip (USD)	44768.96	39171.35
Cinsec (USD)	6783.18	5935.05
Cel (USD)	6783.18	5935.05
Cinst (USD)	30524.29	26707.74
Cmis (USD)	88859.60	77749.20
Cinv (USD)	156691.35	137099.73
capital factor	0.875	0.875
hr_conv_total	3240	3240
hr_conv_capital factor	2835	2835
Co&m (USD)	14175	14175
Ey	11802.11	15285.77
LCOE (USD/kW.h)	2.84	2.37
LCOE (Baht/kW.h)	85.08	71.10



ภาคผนวก ค.

บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

## รายชื่อบทความที่ได้รับการตีพิมพ์

สิริชัย ดวงเดือน และอาทิตย์ คุณศรีสุข. (2562). การศึกษาสมรรถนะของโรงไฟฟ้าไออาร์ซีสำหรับแหล่งความร้อนที่อุณหภูมิ 160 – 200 องศาเซลเซียส. การประชุมวิชาการการถ่ายเทพลังงานความร้อนและมวลในอุปกรณ์ด้านความร้อน และกระบวนการ ครั้งที่ 18, โรงแรมกระบี่ ฟรอนท์ เบย์ รีสอร์ท จังหวัดกระบี่, 20 – 21 มีนาคม 2562

สิริชัย ดวงเดือนและอาทิตย์ คุณศรีสุข. (2562). การศึกษาสมรรถนะของโรงไฟฟ้าไออาร์ซีแบบซับคริติคัล, โรงไฟฟ้าไออาร์ซีแบบซูเปอร์คริติคัล และ โรงไฟฟ้าแรงดันไอเซลล์แบบไตรแลทเทอร์ลสำหรับแหล่งความร้อนที่อุณหภูมิ 160 – 200 องศาเซลเซียส. การประชุมวิชาการ เครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 15 (15th Conference on Energy Network of Thailand), ECE-0039, เดอะกรีนเนอรี รีสอร์ท เขาใหญ่ จังหวัดนครราชสีมา, 21 - 24 พฤษภาคม 2562

Sirichai duangduean and Atit Koonsrisuk. ( 2019). Electricity generation from a heat source at temperature of 160 – 200°C. The 10<sup>th</sup> TSME International Conference on Mechanical Engineering, CST-0010, A-One The Royal Cruise Hotel, Pattaya, Thailand, 10-13 December 2019

สิริชัย ดวงเดือน และอาทิตย์ คุณศรีสุข. (2563). การเปรียบเทียบสมรรถนะระหว่างโรงไฟฟ้าคาลินากับโรงไฟฟ้าไออาร์ซีที่แหล่งความร้อนอุณหภูมิ 100 – 300 องศาเซลเซียส. การประชุมวิชาการการถ่ายเทพลังงานความร้อนและมวลในอุปกรณ์ด้านความร้อน และกระบวนการ ครั้งที่ 19, โรงแรมเจ้าหลาว คาบาน่า รีสอร์ท จังหวัดจันทบุรี, 12 - 13 มีนาคม 2563

การศึกษาสมรรถนะของโรงไฟฟ้าโออาร์ซีสำหรับแหล่งความร้อนที่อุณหภูมิ 160 – 200 องศาเซลเซียส

PERFORMANCE INVESTIGATION OF AN ORC POWERPLANT OF A HEAT SOURCE TEMPERATURE OF 160 – 200°C

สิริชัย ดวงเดือน

อาทิตย์ คุณศรีสุข

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตำบลสุรนารี อำเภอเมือง

จังหวัดนครราชสีมา 30000

E-mail: kangduangdean@gmail.com

Tel: 092-452-9699

บทคัดย่อ

โรงไฟฟ้า ORC เป็นเทคโนโลยีที่สำคัญในการนำความร้อนทิ้งมาใช้ประโยชน์ ซึ่งได้รับการยอมรับว่าเป็นเทคโนโลยีที่สามารถเปลี่ยนความร้อนทิ้งเป็นพลังงานไฟฟ้า โดยรายงานวิจัยฉบับนี้ทำการศึกษาโรงไฟฟ้า ORC ในการทำงานแบบ subcritical กับ supercritical ภายใต้ อุณหภูมิความร้อน 160°C, 180°C, และ 200°C โดยทำการจำลองระบบเพื่อหาค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ผลิตได้ ซึ่งจะทำการทดสอบสารทำงานโดยสำหรับโรงไฟฟ้า ORC ที่ทำงานแบบ subcritical จะใช้สารทำงาน 5 สารทำงาน คือ R11, R123, R141b, R245fa, และ R1234ze ส่วนกรณีโรงไฟฟ้า ORC ที่ทำงานแบบ supercritical ทดสอบ 5 สารทำงาน คือ R227ea, R236ea, ipentane, R245fa, และ R1234ze ซึ่งผลจากการจำลองโรงไฟฟ้า ORC แสดงให้เห็นว่า ในกรณีการทำงานของ subcritical สารทำงานที่ให้กำลังไฟฟ้าปริมาณสูงสุดคือ คือ R245fa โดยผลิตได้เท่ากับ 41.4 kW ที่แหล่งความร้อนอุณหภูมิ 200°C จากนั้นได้ทำการ off-design เพื่อทำการหาการเปลี่ยนเงื่อนไขของระบบการทำงานเพื่อสามารถผลิตกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้ โดยการเปลี่ยนค่าของความดันและอัตราการไหลของสารทำงาน

คำสำคัญ : แหล่งความร้อนทิ้ง, subcritical ORC, supercritical ORC, off-design

Abstract

The ORC (Organic Rankine cycle) powerplant is one of the important technologies for waste heat utilization. It has been commonly accepted as a viable technology to convert waste heat into electricity. This paper investigates a subcritical and supercritical ORC power plant with the heat source temperature at 160°C, 180°C, and 200°C. The simulations were conducted using various working fluids to determine the one that provides a maximum net work output. R11, R123, R141b, R245fa, and R1234ze were selected as the working fluid for the subcritical power plant, and R227ea, R236ea, ipentane, R245fa, and R1234ze were selected for the supercritical power plant. The results show that the subcritical ORC plant with R245fa as the working fluid provide the maximum net work of 41.4 kW when the heat source temperature is 200°C. The off-design operation of this plant configuration was conducted and found that the net work can maintain by proper adjustment of the pressures and flow rate of the working fluid.

Keywords: Waste heat recovery, subcritical ORC, supercritical ORC, off-design

ECE-0014

การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 15  
22-24 พฤษภาคม 2562 จังหวัดนครราชสีมา



การศึกษาสมรรถนะของโรงไฟฟ้าโออาร์ซีแบบซับคริติคัล, โรงไฟฟ้าโออาร์ซีแบบซูเปอร์คริติคัล และ  
โรงไฟฟ้าแรงดันไอเคิลแบบไตรแลทเทอร์รัลสำหรับแหล่งความร้อนที่อุณหภูมิ 160 – 200 องศา  
เซลเซียส

**Performance investigation of a subcritical ORC, supercritical ORC, and trilateral Rankine cycle  
power plant for a heat source temperature of 160 – 200°C**

สิริชัย ดวงเดือน และ อาทิตย์ คุณศรีสุข

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 111 ถนนมหาวิทยาลัย ตำบลสุรนารี อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000  
kangduangdean@gmail.com, 09-2452-9699

#### บทคัดย่อ

โรงไฟฟ้า ORC เป็นเทคโนโลยีที่สำคัญในการนำความร้อนทิ้งมาใช้ประโยชน์ ซึ่งได้รับการยอมรับว่าเป็นเทคโนโลยีที่สามารถเปลี่ยนความร้อนทิ้งเป็นพลังงานไฟฟ้า โดยรายงานวิจัยฉบับนี้ทำการศึกษาโรงไฟฟ้าโออาร์ซีในการทำงานแบบ ซับคริติคัล, ซูเปอร์คริติคัล, และ โรงไฟฟ้าแรงดันไอเคิลแบบไตรแลทเทอร์รัล (TLC) ภายใต้อุณหภูมิความร้อน 160°C, 180°C, และ 200°C โดยทำการจำลองระบบเพื่อหาค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ผลิตได้ โดยทดสอบสารทำงานสำหรับโรงไฟฟ้าโออาร์ซีที่ทำงานแบบ ซับคริติคัล, ซูเปอร์คริติคัล, และ TLC จะทดสอบโดยใช้สารทำงานทั้งหมด 14, 12, และ 14 สารทำงาน ซึ่งผลจากการจำลองโรงไฟฟ้า ORC แสดงให้เห็นว่า สารทำงานที่ให้กำลังไฟฟ้าปริมาณสูงสุดที่การทำงานแบบซับคริติคัลใช้สารทำงาน isopentane โดยผลิตได้เท่ากับ 62.6 kW ที่แหล่งความร้อนอุณหภูมิ 200°C ในกรณีการทำงานแบบซูเปอร์คริติคัลใช้สารทำงานเป็น R236ea ที่อุณหภูมิ 200°C ผลิตกำลังไฟฟ้าสุทธิได้ 74.3 kW และสำหรับกรณี TLC เมื่อใช้สารทำงานเป็น R113 ที่แหล่งความร้อนอุณหภูมิ 200°C ผลิตกำลังไฟฟ้าสุทธิได้ 79.66 kW จากนั้นได้ทำการ off-design เพื่อทำการหาการเปลี่ยนเงื่อนไขของระบบการทำงานโดยมีขนาดของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนให้มีขนาดคงที่ ผ่านการเปลี่ยนค่าของความดันของสารทำงาน

**คำหลัก:** แหล่งความร้อนทิ้ง, ซับคริติคัล โออาร์ซี, ซูเปอร์คริติคัล โออาร์ซี, วัฏจักรแรงดันไอแบบไตรแลทเทอร์รัล, ออฟดีไซน์

#### Abstract

The ORC (Organic Rankine cycle) powerplant is one of the important technologies for waste heat utilization. It has been commonly accepted as a viable technology to convert waste heat into electricity. This paper investigates a subcritical ORC, supercritical ORC, and trilateral Rankine cycle (TLC) power plant with the heat source temperature at 160°C, 180°C, and 200°C. The simulations were conducted using various working fluids to determine the one that provides a maximum net work output. The number of working fluids used in the simulations for the subcritical power plant, supercritical power plant, and TLC are 14, 12, and 14, respectively. The results show that the subcritical ORC plant with isopentane as the working fluid provide the maximum net work of 62.6 kW when the heat source temperature is 200°C. Also, the supercritical ORC plant with R236ea as the working fluid provides the maximum net work of 74.3 kW when the heat source temperature is 200°C. In addition, the TLC plant with R113 as the working fluid provides the maximum net work of 79.66 kW when the heat source temperature is 200°C. Furthermore, the off-design performances of those plant were investigated and found that the heat exchanger size can be maintained by a proper adjustment of the pressures of the working fluid.

**Keywords:** Waste heat recovery, subcritical ORC, supercritical ORC, trilateral Rankine cycle, off-design.



The 10<sup>th</sup> TSME International Conference on Mechanical Engineering  
10<sup>th</sup> – 13<sup>rd</sup> December 2019  
Pattaya, Thailand



CST0018

## Electricity generation from a heat source at temperature of 160 – 200°C

Sirichai Duangduean, and Atit Koonsrisuk\*,

School of Mechanical engineering, Institute of engineer, Suranaree University of Technology, 111 University Avenue, Suranaree Sub-District, Muang Nakhon Ratchasima District, Nakhon Ratchasima 30000 Thailand

\*Corresponding Author: atit@sut.ac.th

**Abstract.** The ORC (Organic Rankine cycle) power plant is believed to be one of the most promising technologies for waste heat recovery. A method of thermodynamic optimization was conducted to design a subcritical ORC, supercritical ORC, and trilateral Rankine cycle (TLC) power plant in this study. The heat source inlet temperatures of 160°C, 180°C, and 200°C and the heat sink temperature of 30°C were investigated. Various working fluids were examined to determine the one that provides a maximum net power output. The number of working fluids studied in the simulations for the subcritical power plant, supercritical power plant, and TLC are 14, 12, and 14, respectively. The results show that the subcritical ORC power plant with isopentane as the working fluid provides the maximum net power of 62.6 kW when the heat source temperature is 200°C. It was found that the appropriate working fluids, that provide the maximum net power output, have their critical temperature 10°C - 20°C colder than the heat source temperature tested for the subcritical ORC power plant. Furthermore, the supercritical ORC plant with R236ea as the working fluid provides the maximum net power of 74.3 kW when the heat source temperature is 200°C. Moreover, the TLC plant with R113 as the working fluid provides the maximum net power of 79.66 kW when the heat source temperature is 200°C. Additionally, the off-design performances of those plants were investigated and found that the net power output can be maintained by a proper adjustment of the evaporation and condensation pressures of the working fluids.

**Keywords:** Waste heat recovery, subcritical ORC, supercritical ORC, trilateral Rankine cycle, off-design.

### 1. Introduction

The global fossil fuel consumption has increased over the years. This contributes to various serious environmental problems, such as global warming and resource depletion. As a result, it is necessary to identify alternative sources of energy that can mitigate harmful effects to the environment [1]. The renewable energy has potential to relax the environmental pollution and reduce fossil fuel consumption. There are various forms of renewable energy such as wind, sea waves, and waste heat.

Organic Rankine Cycle (ORC) power plants have been investigated numerically and experimentally over the last two decades [2]. It was found that the ORC power plant is one of the promising technologies for waste heat utilization [3].

การเปรียบเทียบสมรรถนะระหว่างโรงไฟฟ้าคาลินากับโรงไฟฟ้าโออาร์ซีที่แหล่งความร้อน  
อุณหภูมิตั้งที่ 100 – 300 องศาเซลเซียส

PERFORMANCE COMPARISON BETWEEN KALINA CYCLE POWERPLANT AND ORC  
POWERPLANT OF A HEAT SOURCE TEMPERATURE OF 100 – 300°C

สิริชัย ดวงเดือน

อาทิติย์ คุณศรีสุข

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตำบลสุรนารี อำเภอเมือง

จังหวัดนครราชสีมา 30000

E-mail: atit.sut@gmail.com

Tel:0-4422-4410

บทคัดย่อ

พลังงานความร้อน เป็นพลังงานทดแทนที่ใช้ในการผลิตไฟฟ้า โดยพลังงานความร้อนที่มีหลายแบบ เช่น ความร้อนถูกทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม ความร้อนจากใต้พิภพ โดยโรงไฟฟ้าโออาร์ซี กับ โรงไฟฟ้าคาลินา เป็นเทคโนโลยี ที่เปลี่ยนพลังงานความร้อน เป็นพลังงานไฟฟ้า ดังนั้น รายงานวิจัยฉบับนี้จึงทำการศึกษารองไฟฟ้าโออาร์ซีกับโรงไฟฟ้าคาลินา ภายใต้อุณหภูมิความร้อน 100 – 300°C โดยเงื่อนไขในการจำลอง คือ เพื่อหาค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ผลิตได้ เมื่อโรงไฟฟ้าโออาร์ซีใช้สารเป็นสารออสเทติก โดยเลือกสารทำงานที่ผลิตกำลังไฟฟ้าได้มากที่สุด ส่วนโรงไฟฟ้าคาลินาใช้สารทำงานเป็น แอมโมเนียผสมกับน้ำ ผลจากการจำลองพบว่า โรงไฟฟ้าคาลินาผลิตกำลังไฟฟ้าได้มากกว่าโรงไฟฟ้าโออาร์ซีเท่ากับ 22.47% เมื่ออุณหภูมิแหล่งความร้อนเท่ากับ 150°C โดยโรงไฟฟ้าคาลินาผลิตกำลังไฟฟ้าได้ 31 kW แต่โรงไฟฟ้าโออาร์ซีผลิตได้ 25 kW ในทางกลับกัน โรงไฟฟ้าโออาร์ซีผลิตกำลังไฟฟ้ามากกว่าโรงไฟฟ้าคาลินาถึง 19.17% เมื่ออุณหภูมิแหล่งความร้อนเท่ากับ 250°C โดยโรงไฟฟ้าโออาร์ซีผลิตกำลังไฟฟ้าเท่ากับ 134 kW แต่โรงไฟฟ้าคาลินาผลิตได้ 109 kW นอกจากนี้ ในช่วงอุณหภูมิที่ทดสอบ โรงไฟฟ้าคาลินา มีขนาดของเทอร์ไบน์ที่เล็กกว่าโรงไฟฟ้าโออาร์ซีประมาณ 54%

คำสำคัญ : แหล่งความร้อนทิ้ง, โรงไฟฟ้าโออาร์ซี, โรงไฟฟ้าคาลินา

Abstract

Thermal energy is renewable energy, it is using generated electricity. Thermal energy has many types such as waste heat from industry, geothermal. ORC and kalina power plant, they have a viable technology to convert waste heat into electricity. This paper investigates an ORC power plant and kalina power plant with the heat source temperature at 100 – 300°C. The condition for simulation were provides a maximum net power output. When ORC power plant using organic fluid is working fluid and kalina power plant using ammonia – water is working. The results show that, Kalina power plant generate more than ORC power plant about 22.5% at heat source temperature about 150°C, when kalina power plant generate about 31 kW but ORC power plant generated about 22 kW. However, when heat source temperature about 250°C, ORC power plant generated more than kalina power plant about 19.17%, when ORC power plant generated about 134 kW but kalina power plant generated about 109 kW. In addition, turbine size of kalina power plant less than ORC power plant about 64%

Keywords: Waste heat recovery, Organic Rankine cycle, Kalina cycle



## ประวัติผู้เขียน

นายสิริชัย ดวงเดือน เกิดเมื่อวันที่ 16 พฤษภาคม พ.ศ. 2539 ณ จังหวัดจันทบุรี สำเร็จการศึกษาในระดับประถมศึกษา และระดับมัธยมศึกษาที่โรงเรียนสตรีมารดาพิทักษ์ จังหวัดจันทบุรี และระดับปริญญาตรีสาขาวิศวกรรมเครื่องกล สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา เมื่อปี พ.ศ. 2561 ภายหลังสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีได้เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโทในสาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกลและระบบขนวนการ (วิศวกรรมเครื่องกล) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี โดยขณะทำการศึกษามีโอกาสเป็นผู้สอนในรายวิชาปฏิบัติการวิศวกรรมเครื่องกล และเป็นผู้ช่วยสอนในรายวิชาปฏิบัติการด้านความร้อนและของไหล และวิชากลศาสตร์ของไหล ส่งผลให้ผู้วิจัยได้มีโอกาสทบทวนความรู้ รวมไปถึงได้ต่อยอดความรู้และพัฒนาทักษะความรู้ความเข้าใจจนนำไปสู่การนำความรู้ที่ได้มาต่อยอดและพัฒนาวิทยานิพนธ์เป็นอย่างดี นอกจากนี้ได้มีโอกาสเผยแพร่งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์ที่งานประชุมวิชาการหลายแห่ง ส่งผลให้ผู้วิจัยมีความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับการออกแบบโรงไฟฟ้าคาถินามากขึ้น



มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี