

การควบคุมเชิงกลยุทธ์ที่เหมาะสมที่สุดสำหรับระบบหล่อเย็นของ  
โรงไฟฟ้าไออาร์ซีที่นำความร้อนทิ้งมาใช้ประโยชน์



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกลและระบบกระบวนการ  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี  
ปีการศึกษา 2563

**OPTIMAL CONTROL STRATEGY FOR A COOLING  
SYSTEM OF AN ORC POWER PLANT FOR  
WASTE HEAT RECOVERY**



**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirement for the  
Degree of Master of Engineering in Mechanical  
and Process System Engineering  
Suranaree University of Technology  
Academic Year 2020**

การควบคุมเชิงกลยุทธ์ที่เหมาะสมที่สุดสำหรับระบบหล่อเย็นของโรงไฟฟ้าโออาร์จี  
ที่นำความร้อนทิ้งมาใช้ประโยชน์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา  
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



(รศ. ดร.บัณฑิต กฤตาคม)

ประธานกรรมการ

**อาทิตย**

(ผศ. ดร.อาทิตย คุณศรีสุข)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)

**ประเมศวร์ พงษ์**

(ผศ. ดร.ประเมศวร์ ห่อแก้ว)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม)



(ผศ. ดร.กระวี ตรีอำนาจ)

กรรมการ



(ผศ. ดร.พรรษา ลิปลับ)

กรรมการ



(รศ. ร.อ. ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและพัฒนาความเป็นสากล



(รศ. ดร.พรศิริ จงกล)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

วสุ พิริยะกุลวัฒน์ : การควบคุมเชิงกลยุทท์ที่เหมาะสมที่สุดสำหรับระบบหล่อเย็นของโรงไฟฟ้า  
โออาร์ซีที่นำความร้อนทิ้งมาใช้ประโยชน์ (OPTIMAL CONTROL STRATEGY FOR  
A COOLING SYSTEM OF AN ORC POWER PLANT FOR WASTE HEAT  
RECOVERY) อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อาทิตย์ คุณศรีสุข, 78 หน้า.

ในวิทยานิพนธ์จะศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้ก๊าซไอเสียจากหม้อไอน้ำของโรงพยาบาล  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี (SUTH) เป็นแหล่งความร้อนสำหรับโรงไฟฟ้าโออาร์ซี (ORC)  
โดยมีการจำลองโรงไฟฟ้าโออาร์ซีแบบพื้นฐานและแบบ TLC ที่ใช้สารทำงาน 6 ชนิด ทำงาน  
ร่วมกับระบบหล่อเย็นด้วยน้ำ (หอผึ่งเย็น) หรือการระบายความร้อนด้วยอากาศ (ACC)  
โดยวัตถุประสงค์เพื่อหาค่าที่เหมาะสมที่สุดสำหรับโรงไฟฟ้าโออาร์ซีและกลยุทท์การควบคุม  
ที่เหมาะสมที่สุดของโรงไฟฟ้าที่ใช้สภาพอากาศของจังหวัดนครราชสีมา

แบบจำลองที่พัฒนาขึ้นได้ตรวจสอบความถูกต้องกับผลลัพธ์จากวรรณกรรมอื่น ๆ ใช้  
วิธี Golden section เพื่อหาเงื่อนไขที่เหมาะสมกับอุณหภูมิของแหล่งความร้อน อุณหภูมิของ  
แหล่งรับความร้อนและ Pinch point temperature difference ในเครื่องระเหยและเครื่องควบแน่น  
เพื่อให้ได้งานสุทธิสูงสุดพบว่า โรงไฟฟ้าโออาร์ซีแบบ TLC ให้งานสุทธิสูงกว่าโรงไฟฟ้าโออาร์ซี  
แบบพื้นฐาน สำหรับด้านเศรษฐศาสตร์แสดงให้เห็นว่าต้นทุนต่อหน่วยไฟฟ้า (LCOE) ของ  
โรงไฟฟ้าโออาร์ซีแบบ TLC ที่ใช้สารทำงาน R1233zd ทำงานร่วมกับระบบหล่อเย็นด้วยหอผึ่งเย็น  
เป็นตัวเลือกสำหรับการศึกษานี้ เมื่อใช้ก๊าซไอเสียจากหม้อไอน้ำจำนวน 12 ตัว LCOE จะอยู่ที่  
ประมาณ 5.50 บาท/หน่วยไฟฟ้า อุณหภูมิกระเปาะแห้งและความชื้นสัมพัทธ์หลายคู่ถูกเลือกมาจาก  
สภาพอากาศจังหวัดนครราชสีมา เพื่อหาสภาวะการทำงานที่ทำให้ได้งานสุทธิสูงสุดในแต่ละ  
สภาวะอากาศพบว่า ความชื้นสัมพัทธ์เป็นปัจจัยที่สำคัญเมื่อความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศต่ำ  
ในขณะที่อุณหภูมิก่อนข้างสูงอัตราการไหลของอากาศและน้ำหล่อเย็นที่ใช้จะต่ำ เนื่องจาก  
น้ำหล่อเย็นภายในหอผึ่งเย็นสามารถระเหยตัวได้ดี อย่างไรก็ตาม เมื่อความชื้นสัมพัทธ์สูง อัตรา  
การไหลของอากาศและน้ำหล่อเย็นจะต้องสูงมากเนื่องจากความสามารถในการระเหยตัวของน้ำ  
ในหอผึ่งเย็นต่ำ เมื่อความชื้นสัมพัทธ์ต่ำกว่า 67% ระบบหล่อเย็นสามารถทำงานได้โดยมีอัตรา  
การไหลของอากาศต่ำเนื่องจากการระเหยของน้ำ แต่เมื่อความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศมากกว่า 67%  
การระเหยของน้ำจะลดลง หอผึ่งเย็นจึงต้องการอัตราการไหลของอากาศเพิ่มมากขึ้นเพื่อเพิ่ม  
การแลกเปลี่ยนความร้อนในรูปแบบความร้อนสัมผัสสำหรับระบายความร้อนสู่บรรยากาศ

สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล

ปีการศึกษา 2563

ลายมือชื่อนักศึกษา วสุ พิริยะกุลวัฒน์

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา อาทิตย์

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ปัทมาพร วัฒนาวี

WASU PIRIYAKULWAT : OPTIMAL CONTROL STRATEGY FOR A COOLING SYSTEM OF AN ORC POWER PLANT FOR WASTE HEAT RECOVERY. THESIS ADVISOR : ASST. PROF. ATIT KOONSRIK, Ph.D., 78 PP.

## ORGANIC RANKINE CYCLE/LOW TEMPERATURE WASTE HEAT/BOILER/COOLING SYSTEM

This study numerically examines a possibility of using the exhaust gas from the boilers of Suranaree University of Technology Hospital (SUTH) as a heat source for an Organic Rankine Cycle (ORC) power plant. Two configurations of the ORC power plant were chosen: the basic ORC and the Trilateral (TLC) ORC cycle, and simulated. Also, six promising fluids were tested as the working fluids for these 2 power plants. In addition, the wet cooling tower and the air-cooled condenser were stimulated as the cooling system of these 2 power plants. The ultimate objective of this study is to determine the optimal plant configuration and then to determine the optimal control strategy of that plant using Nakhon Ratchasima's weather conditions.

First, a computational code was developed and validated with a result taken from the literature. The golden section method was used to search for an optimum operating condition that provides a highest net power output for the prescribed heat source temperature, heat sink temperature, and pinch point temperature differences in the design and off-design conditions. It was found that the TLC power plant provides higher net power output than that of the ORC power plant. An economic analysis reveals that a Levelized Cost of Electricity (LCOE) of TLC power plant with R1233zd

as its working fluid that uses a wet cooling system is the promising choice for this study. When using 12 boilers, its LCOE is about 5.5 Baht/kW·hr.

Several different pairs of dry-bulb temperature and relative humidity were selected from the measured weather conditions of Nakhon Ratchasima recorded by the Thai Meteorological Department. The operating condition of the power plant that provides the highest net power output for each weather pair was searched. The operating conditions for all weather pairs were proposed as the optimal control strategy of this power plant configuration were proposed. It was found that the relative humidity is the key factor. When the relative humidity is moderate while the temperature is relatively high, the flowrates of cooling air and cooling water are relatively moderate as the evaporative cooling in the cooling tower can work well. However, when the relative humidity is high, the flowrates of cooling air and cooling water must be very high as the evaporative cooling in the cooling tower is low.

When the relative humidity is lower than 67% the cooling system can operate with low air mass flow rate because of the evaporation of the water. But when the relative humidity is more than 67% the evaporation of the water decreasing, a cooling tower needs more air flow rate for increases the sensible heat for rejects waste heat to atmosphere.

School of Mechanical Engineering

Academic year 2020

Student's Signature ดร. นิตยาพร อภิบาล

Advisor's Signature อ.วิวัฒน์

Co-Advisor's Signature ดร.นพวิทย์ พลิกศรี

## กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบุคคลและกลุ่มบุคคลต่าง ๆ ดังต่อไปนี้ ที่เป็นส่วนหนึ่งที่ทำให้วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับความกรุณาให้คำปรึกษา แนะนำ และช่วยเหลืออย่างดียิ่ง ทั้งในด้านวิชาการและด้านการดำเนินงานวิจัย

ขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อาทิตย์ คุณศรีสุข อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปรเมศวร์ ห่อแก้ว อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วมที่เมตตาให้การอบรม สั่งสอน ให้คำปรึกษา ชี้แนะแนวทางในการทำการวิจัย ตลอดจนให้คำแนะนำในการเขียน และตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์จนเสร็จสมบูรณ์

ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.บัณฑิต กฤตาคม (ประธานกรรมการ) ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กระวี ตรีอำรรค และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พรรษา ลิบลับ (กรรมการ) ที่กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำ ชี้แนะแนวทางการเขียน และช่วยตรวจทานเนื้อหาวิทยานิพนธ์จนเสร็จสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ พี่ ๆ น้อง ๆ บัณฑิตศึกษาทุกท่าน โดยเฉพาะอย่างยิ่ง คุณสิริชัย ดวงเดือน ที่ให้คำปรึกษาด้านวิชาการและการดำเนินงานวิจัย

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และครอบครัวของผู้วิจัยที่ให้การอุปการะเลี้ยงดู ให้การส่งเสริมการศึกษา และเป็นกำลังใจในการดำเนินงาน อีกทั้งคุณปณยาพร วิรุณจิตร ที่คอยให้คำปรึกษาและเป็นกำลังใจที่ดีเสมอมา จนทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

วสุ พิริยะกุลวัฒน์

# สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ง
สารบัญ.....	จ
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ฉ
<b>บทที่</b>	
<b>1 บทนำ.....</b>	<b>1</b>
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหาการวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
<b>2 ปรีक्षणวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....</b>	<b>4</b>
2.1 บทนำ.....	4
2.2 วัฏจักรแรงคิน (Rankine cycle).....	5
2.3 โรงไฟฟ้าไออาร์ซีแบบพื้นฐาน.....	7
2.4 โรงไฟฟ้าไออาร์ซีแบบ Trilateral (TLC).....	9
2.5 ระบบหล่อเย็นด้วยอากาศ (Air-cooled condenser).....	10
2.6 ระบบหล่อเย็นด้วยน้ำ (Cooling tower).....	11
<b>3 วิธีดำเนินการวิจัย.....</b>	<b>14</b>
3.1 บทนำ.....	14
3.2 การเลือกสารทำงานและชนิดของโรงไฟฟ้า.....	15
3.2.1 การเลือกสารทำงาน.....	15
3.2.2 การเลือกชนิดของโรงไฟฟ้าและแบบจำลองเชิงตัวเลข.....	16



## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.2.3	การตรวจสอบความถูกต้องและขั้นตอนการจำลองเชิงตัวเลข.....	24
3.2.4	Golden section search method.....	28
3.2.5	การประเมินทางเศรษฐศาสตร์.....	31
3.3	การศึกษาผลกระทบจากการเพิ่มอัตราการไหลของก๊าซไอเสีย.....	39
3.4	การศึกษาอิทธิพลเมื่อทำการปรับระบบหล่อเย็น.....	40
3.5	การหากลยุทธ์การควบคุมระบบหล่อเย็น.....	40
<b>4</b>	<b>ผลการดำเนินการวิจัย.....</b>	<b>43</b>
4.1	บทนำ.....	43
4.2	การเลือกสารทำงานและชนิดของโรงไฟฟ้า.....	43
4.2.1	โรงไฟฟ้าไออาร์ซีแบบพื้นฐาน.....	43
4.2.2	โรงไฟฟ้าไออาร์ซีแบบ TLC.....	47
4.3	การศึกษาผลกระทบจากการเพิ่มอัตราการไหลของก๊าซไอเสีย.....	53
4.4	การศึกษาอิทธิพลเมื่อทำการปรับระบบหล่อเย็น.....	54
4.5	การหากลยุทธ์การควบคุมระบบหล่อเย็น.....	55
<b>5</b>	<b>บทสรุปและข้อเสนอแนะ.....</b>	<b>57</b>
5.1	สรุปผลการวิจัย.....	57
5.2	ข้อเสนอแนะ.....	58
รายการอ้างอิง.....		59
ภาคผนวก		
ภาคผนวก ก.	ข้อมูลอุณหภูมิความร้อนที่จากหม้อไอน้ำ.....	63
ภาคผนวก ข.	ข้อมูลผลการจำลองโรงไฟฟ้าไออาร์ซีในสถานะที่ออกแบบ.....	65
ภาคผนวก ค.	ข้อมูลผลการจำลองโรงไฟฟ้าไออาร์ซีเมื่ออัตราการไหล ของก๊าซไอเสียเพิ่มขึ้น.....	70
ภาคผนวก ง.	ข้อมูลผลการศึกษาผลกระทบจากการปรับอัตราการไหลของ น้ำหล่อเย็นของโรงไฟฟ้าไออาร์ซีแบบ TLC.....	73

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

ภาคผนวก จ. ข้อมูลผลการศึกษาผลกระทบจากสภาพอากาศที่เปลี่ยนแปลงไปของ โรงไฟฟ้าโออาร์ซีแบบ TLC ที่ใช้ระบบหล่อเย็นด้วยน้ำ.....	75
ประวัติผู้เขียน.....	77



## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	สัดส่วนการใช้ไฟฟ้า ปี พ.ศ. 2560 - 2563.....4
3.1	สารทำงานที่ใช้ในการจำลอง..... 16
3.2	ผลการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองโรงไฟฟ้าไออาร์ซี.....25
3.3	ผลการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองหอผึ่งเย็น .....25
3.4	เงื่อนไขในการจำลองระบบในสถานะที่ออกแบบ .....26
3.5	การเปรียบเทียบ Plate heat exchanger กับ Shell and Tube heat exchanger .....33
3.6	ราคาของสารทำงานแต่ละชนิด .....38
3.7	สภาพอากาศที่ใช้ในการจำลองในสถานะนอกเหนือสถานะที่ออกแบบ .....41
4.1	ข้อมูลประกอบโรงไฟฟ้าไออาร์ซีแบบ TLC เมื่ออัตราการไหลของก๊าซไอเสียเพิ่มขึ้น .....54
ข.1	ข้อมูลผลการจำลองโรงไฟฟ้าไออาร์ซีแบบพื้นฐานเมื่อใช้ระบบหล่อเย็นด้วยน้ำ.....66
ข.2	ข้อมูลผลการจำลองโรงไฟฟ้าไออาร์ซีแบบพื้นฐานเมื่อใช้ระบบหล่อเย็นด้วยอากาศ.....67
ข.3	ข้อมูลผลการจำลองโรงไฟฟ้าไออาร์ซีแบบ TLC เมื่อใช้ระบบหล่อเย็นด้วยน้ำ .....68
ข.4	ข้อมูลผลการจำลองโรงไฟฟ้าไออาร์ซีแบบ TLC เมื่อใช้ระบบหล่อเย็นด้วยอากาศ .....69
ค.1	ข้อมูลผลการจำลองโรงไฟฟ้าไออาร์ซีแบบ TLC ที่ทำงานร่วมกับระบบหล่อเย็น ด้วยน้ำเมื่ออัตราการไหลของก๊าซไอเสียเพิ่มขึ้น.....71
ค.2	ข้อมูลผลการจำลองโรงไฟฟ้าไออาร์ซีแบบ TLC ที่ทำงานร่วมกับระบบหล่อเย็น ด้วยอากาศเมื่ออัตราการไหลของก๊าซไอเสียเพิ่มขึ้น.....72
ง.1	ข้อมูลผลการจำลองโรงไฟฟ้าไออาร์ซีแบบ TLC เมื่ออัตราการไหลของน้ำหล่อเย็น เปลี่ยนไป.....74
จ.1	ข้อมูลผลการจำลองพลังงานและอัตราการไหลที่ต้องใช้ของโรงไฟฟ้าไออาร์ซี แบบ TLC เมื่อสภาพอากาศเปลี่ยนแปลงไป.....76

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	หลักการทํางานของ Rankine cycle .....5
2.2	T-s diagram ของโรงไฟฟ้าไออาร์ซีแบบพื้นฐาน ..... 8
2.3	T-s diagram ของโรงไฟฟ้าไออาร์ซีแบบ TLC .....9
2.4	A-frame air-cooled condenser ..... 11
2.5	หอผึ่งเย็นแบบเป็ยกชนิด open recirculating ..... 12
3.1	หม้อไอน้ําของโรงพยาบาลเทคโนโลยีสุรนารี..... 14
3.2	ลำดับการดำเนินงาน ..... 15
3.3	Pinch point temperature difference..... 17
3.4	อุปกรณ์พื้นฐานของวัฏจักรไออาร์ซี..... 17
3.5	ขั้นตอนการจำลองโรงไฟฟ้าไออาร์ซีในสภาวะที่ออกแบบ .....27
3.6	กฎของ Golden section.....28
3.7	ผลการจำลองโรงไฟฟ้าไออาร์ซีแบบ TLC ด้วยวิธี Golden section เมื่อปรับค่า ความดันที่เครื่องระเหย.....30
3.8	ผลการจำลองโรงไฟฟ้าไออาร์ซีแบบ TLC ด้วยวิธี Golden section เมื่อปรับค่า ความดันที่เครื่องควบแน่น .....30
3.9	ลักษณะของเครื่องสูบหอยโข่ง แนวตั้งหลายใบพัด..... 34
3.10	ขั้นตอนการจำลองในสภาวะนอกเหนือจากสภาวะที่ออกแบบ .....42
4.1	ค่างานสุทธิสูงสุดที่ได้จากโรงไฟฟ้าไออาร์ซีแบบพื้นฐาน เมื่อใช้สารทํางาน และระบบหล่อเย็นที่แตกต่างกัน ..... 43
4.2	ค่า Overall efficiency ของโรงไฟฟ้าไออาร์ซีแบบพื้นฐาน เมื่อใช้สารทํางาน และระบบหล่อเย็นที่แตกต่างกัน ..... 44
4.3	ขนาดของเครื่องระเหยของโรงไฟฟ้าไออาร์ซีแบบพื้นฐาน เมื่อใช้สารทํางาน และระบบหล่อเย็นที่แตกต่างกัน .....45
4.4	ขนาดของเครื่องควบแน่นของโรงไฟฟ้าไออาร์ซีแบบพื้นฐาน เมื่อใช้สารทํางาน และระบบหล่อเย็นที่แตกต่างกัน ..... 46

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.5 งานที่ต้องจ่ายให้กับระบบหล่อเย็นของโรงไฟฟ้าไออาร์ซีแบบพื้นฐาน .....	46
4.6 อัตราส่วนการขยายตัวภายในกังหันแบบไอขยายตัวของโรงไฟฟ้าไออาร์ซีแบบพื้นฐาน .....	47
4.7 ค่างานสุทธิสูงสุดที่ได้จากโรงไฟฟ้าไออาร์ซีแบบ TLC เมื่อใช้สารทำงานและระบบหล่อเย็นที่แตกต่างกัน .....	48
4.8 ค่า Overall efficiency ของโรงไฟฟ้าไออาร์ซีแบบ TLC เมื่อใช้สารทำงานและระบบหล่อเย็นที่แตกต่างกัน .....	48
4.9 ขนาดของเครื่องระเหยของโรงไฟฟ้าไออาร์ซีแบบ TLC เมื่อใช้สารทำงานและระบบหล่อเย็นที่แตกต่างกัน.....	49
4.10 ขนาดของเครื่องควบแน่นของโรงไฟฟ้าไออาร์ซีแบบ TLC เมื่อใช้สารทำงานและระบบหล่อเย็นที่แตกต่างกัน .....	50
4.11 งานที่ต้องจ่ายให้กับระบบหล่อเย็นของโรงไฟฟ้าไออาร์ซีแบบ TLC.....	50
4.12 อัตราส่วนการขยายตัวภายในกังหันแบบไอขยายตัวของโรงไฟฟ้าไออาร์ซีแบบ TLC เมื่อใช้สารทำงานและระบบหล่อเย็นที่แตกต่างกัน.....	51
4.13 ต้นทุนต่อหน่วยไฟฟ้าตลอดอายุโครงการของโรงไฟฟ้าไออาร์ซีแบบพื้นฐาน .....	52
4.14 ต้นทุนต่อหน่วยไฟฟ้าตลอดอายุโครงการของโรงไฟฟ้าไออาร์ซีแบบ TLC .....	52
4.15 ต้นทุนต่อหน่วยไฟฟ้าของโรงไฟฟ้าไออาร์ซีแบบ TLC เมื่ออัตราการไหลของก๊าซไอเสียเพิ่มขึ้น .....	53
4.16 ผลกระทบจากการปรับอัตราการไหลของน้ำหล่อเย็นที่ส่งผลต่อค่า LCOE ของโรงไฟฟ้าไออาร์ซีแบบ TLC.....	54
4.17 การควบคุมอัตราการไหลของน้ำหล่อเย็นและอากาศเมื่อเทียบกับความชื้นสัมพัทธ์ .....	55
4.18 พลังงานที่ต้องใช้สำหรับเครื่องสูบลมและพัดลมเมื่อเทียบกับความชื้นสัมพัทธ์ .....	56
ก.1 อุณหภูมิความร้อนทิ้งจากหม้อไอน้ำในแต่ละช่วงเวลา .....	64

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหาการวิจัย

ไฟฟ้าเป็นพลังงานรูปแบบหนึ่งที่มีความสำคัญในการใช้ชีวิตเป็นอย่างมากและเป็นตัวบ่งชี้ถึงความเจริญของประเทศ สำนักงานสารสนเทศด้านพลังงานสหรัฐ (EIA) เปิดเผยรายงานทิศทางพลังงานโลกว่าภายในปี พ.ศ. 2583 ปริมาณไฟฟ้าที่ผลิตของโลกจะเพิ่มขึ้นจาก 21.6 ล้านล้านกิโลวัตต์-ชั่วโมง เป็น 36.5 ล้านล้านกิโลวัตต์-ชั่วโมง หรือคิดเป็น 69% นับจากปี พ.ศ. 2555 นั่นเป็นสิ่งที่สะท้อนถึงความต้องการพลังงานที่มากขึ้น ประเทศไทยเป็นประเทศหนึ่งที่มีความต้องการใช้พลังงานเพิ่มขึ้นในทุกปี และพึ่งพาก๊าซธรรมชาติในสัดส่วนที่มากถึง 66.1% สำหรับการผลิตพลังงานไฟฟ้า (การไฟฟ้าฝ่ายผลิต, 2559) จากรายงานสถิติพลังงานของประเทศไทยหรือ Energy statistics of Thailand 2020 พบว่าในปี พ.ศ. 2562 มีการใช้ก๊าซธรรมชาติทั้งสิ้น 4,762 ล้านลูกบาศก์ฟุตต่อวัน ซึ่งถูกนำไปใช้ผลิตไฟฟ้าคิดเป็นร้อยละ 59% (สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน, 2563) ซึ่งการใช้ก๊าซธรรมชาติย่อมส่งผลให้มีการปล่อยก๊าซไอเสียเป็นผลเสียต่อสิ่งแวดล้อม การปรับลดสัดส่วนการผลิตไฟฟ้าจากก๊าซธรรมชาติและเพิ่มสัดส่วนการใช้พลังงานหมุนเวียนในการผลิตไฟฟ้าจะทำให้มีการปล่อยก๊าซไอเสียลดลง เนื่องจากเป็นพลังงานสะอาดและเป็นการเพิ่มความมั่นคงด้านพลังงานเนื่องจากไม่พึ่งพาการผลิตไฟฟ้าจากก๊าซธรรมชาติจนมากเกินไป สำหรับประเทศไทยมีแหล่งพลังงานทดแทนที่น่าสนใจมีหลากหลายชนิด ไม่ว่าจะเป็นพลังงานแสงอาทิตย์ ชีวมวล ก๊าซชีวภาพ เชื้อเพลิงขยะ ความร้อนที่ถูกทิ้งจากเครื่องยนต์และอุตสาหกรรมต่าง ๆ ซึ่งในอดีตความร้อนทิ้งส่วนนี้จะถูกทิ้งออกสู่สิ่งแวดล้อมทั้งที่ความร้อนดังกล่าวมีศักยภาพที่จะนำมาใช้ประโยชน์ หากสามารถนำความร้อนส่วนนี้กลับมาใช้ประโยชน์ได้ก็จะทำให้ลดพลังงานที่ต้องป้อนเข้า หมายความว่าระบบจะมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นและค่าใช้จ่ายด้านพลังงานลดลง (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2553)

สำหรับความร้อนทิ้งจากเครื่องยนต์และอุตสาหกรรมที่อยู่ในรูปของก๊าซไอเสียสามารถนำมาผลิตไฟฟ้าได้ด้วยเทคโนโลยีที่เรียกว่า “Organic Rankine Cycle (ORC)” หรือโรงไฟฟ้าโออาร์ซี ซึ่งเป็นเทคโนโลยีหนึ่งที่เกิดขึ้นมาเพื่อแก้ไขปัญหาทางด้านพลังงานและสิ่งแวดล้อม เนื่องจากใช้สารทำงานเป็นสารอินทรีย์ (Li et al., 2012) โรงไฟฟ้าโออาร์ซี เป็นเทคโนโลยีที่มีระบบไม่ซับซ้อนมีส่วนประกอบที่สำคัญ ได้แก่ เครื่องสูบ (Pump) เครื่องระเหย (Evaporator) กังหันแบบไอขยายตัว (Expander) และเครื่องควบแน่น (Condenser) เพื่อให้สารทำงานนั้นสามารถควบแน่นได้ภายใน

เครื่องควบคุม ระบบยังจำเป็นต้องมีแหล่งที่ความร้อน นั่นหมายความว่าต้องมีระบบหล่อเย็น ซึ่งมีหน้าที่นำความร้อนออกจากวัฏจักรทางเทอร์โมไดนามิกส์ให้ได้มากที่สุดสู่สิ่งแวดล้อม (Smrekar et al., 2006) โดยระบบหล่อเย็นที่นิยมใช้กันโดยทั่วไปจะระบายความร้อนด้วยอากาศหรือน้ำ โดยความสามารถในการหล่อเย็นจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อมและอัตราการไหลของน้ำหล่อเย็นหรืออากาศ

ประสิทธิภาพของโรงไฟฟ้าไออาร์ซีนั้นนอกจากจะขึ้นอยู่กับสถานะของแหล่งความร้อนแล้วยังขึ้นอยู่กับสถานะของแหล่งที่ความร้อนด้วย (Zhang et al., 2019) อีกทั้งประเทศไทยเป็นประเทศที่ตั้งอยู่ในเขตร้อนทางทิศตะวันออกเฉียงใต้ของทวีปเอเชีย โดยทั่วไปสามารถแบ่งฤดูกาลออกเป็น 3 ฤดู คือ ฤดูร้อน ฤดูฝน และฤดูหนาว ซึ่งอุณหภูมิและความชื้นจะแตกต่างกันไปในแต่ละพื้นที่และฤดูกาล (กรมอุตุนิยมวิทยา, 2558) ส่งผลไฟฟ้าที่สามารถผลิตได้เปลี่ยนแปลงไปตามสถานะอากาศ

วิทยานิพนธ์นี้จึงจะหากลยุทธ์การควบคุมระบบหล่อเย็นที่เหมาะสมที่สุดเมื่อสถานะอากาศเปลี่ยนแปลงไปตามฤดูกาลเพื่อให้โรงไฟฟ้าไออาร์ซีสามารถผลิตไฟฟ้าได้คงที่ โดยใช้สถานะอากาศจากจังหวัดนครราชสีมาในปี พ.ศ. 2558

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อออกแบบระบบโรงไฟฟ้าไออาร์ซีสำหรับผลิตกระแสไฟฟ้าจากไอเสียของหม้อไอน้ำ

1.2.2 เพื่อประเมินความเป็นไปได้ทางเศรษฐศาสตร์ของระบบผลิตกระแสไฟฟ้าไออาร์ซี เพื่อเป็นทางเลือกสำหรับการใช้ไอเสียจากหม้อไอน้ำ

1.2.3 เพื่อหากลยุทธ์การควบคุมระบบหล่อเย็นที่เหมาะสมที่สุดเมื่ออุณหภูมิ ปริมาณความร้อนที่จ่ายเข้าสู่ระบบและสถานะอากาศเปลี่ยนแปลงไป

## 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1 หากกลยุทธ์การควบคุมระบบหล่อเย็นที่เหมาะสมที่สุดเมื่อสถานะอากาศเปลี่ยนแปลงไป

1.3.2 ใช้สถานะอากาศจากจังหวัดนครราชสีมา

1.3.3 ใช้โปรแกรม MATLAB และ NIST REFPROP เพื่อคำนวณค่าคุณสมบัติต่าง ๆ ของสารทำงาน

1.3.4 ใช้ไอเสียจากหม้อไอน้ำที่มีอุณหภูมิอยู่ที่  $160\text{ }^{\circ}\text{C}$  และมีอัตราการไหล  $0.92\text{ kg/s}$  เป็นแหล่งความร้อน

1.3.5 ความเป็นไปได้ทางเศรษฐศาสตร์ของระบบจะประเมินจากต้นทุนเฉลี่ยตลอดอายุโครงการ (Levelized cost of electricity, LCOE)

#### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 ได้กลยุทธ์การควบคุมระบบหล่อเย็นที่เหมาะสมที่สุดเมื่อสภาพอากาศเปลี่ยนแปลง
- 1.4.2 เป็นข้อมูลทางเลือกสำหรับการปรับปรุงประสิทธิภาพของโรงไฟฟ้าไออาร์ซี
- 1.4.3 เป็นแนวทางในการประเมินต้นทุนการผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยเทคโนโลยีโรงไฟฟ้าไออาร์ซีที่ใช้ไอเสียจากหม้อไอน้ำเป็นแหล่งความร้อน





## บทที่ 2

### ปรัทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 บทนำ

สำหรับความต้องการใช้ไฟฟ้าของประเทศไทยในแต่ละปีจากสถิติของกระทรวงพลังงานพบว่าแนวโน้มการใช้ไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ดังตารางที่ 2.1 โดยในปี พ.ศ. 2563 มีแนวโน้มลดลง เนื่องจากสถานการณ์ COVID-19

ตารางที่ 2.1 สัดส่วนการใช้ไฟฟ้า ปี พ.ศ. 2560 - 2563 (สำนักนโยบายและแผนพลังงาน, 2564)

สาขา/ปี พ.ศ	2560	2561	2562	2563
ครัวเรือน	44,374	45,205	49,202	52,860
ธุรกิจ	45,100	46,764	49,128	43,950
อุตสาหกรรม	87,772	87,829	86,104	82,158
ส่วนราชการและองค์กรไม่แสวงหากำไร**	198	204	211	204
เกษตรกรรม	298	365	468	417
การใช้ไฟฟ้าที่ไม่คิดมูลค่า	3,135	3,255	3,410	3,586
อื่น ๆ	4,247	4,210	4,438	3,872
รวมทั้งสิ้น	185,124	187,832	192,960	187,046

\*หน่วย GWh

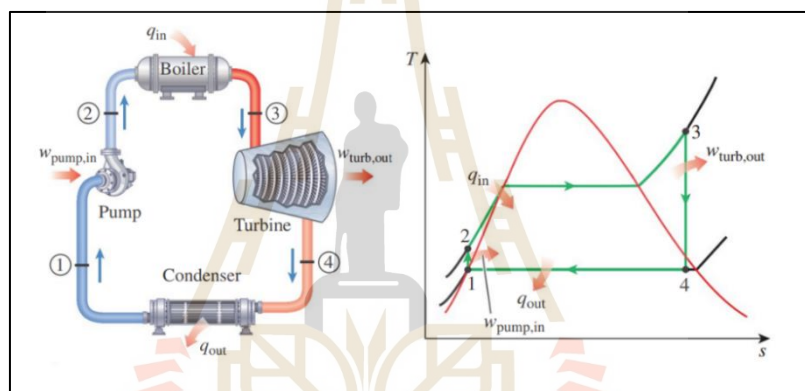
\*\*ตั้งแต่เดือน ต.ค. พ.ศ. 2555 เป็นต้นไป ผู้ใช้ไฟฟ้าที่เป็นหน่วยงานราชการจะถูกจัดเข้าประเภทธุรกิจ/กิจการขนาดเล็ก แล้วแต่กรณี

จากตารางที่ 2.1 จะเห็นได้ว่าภาคอุตสาหกรรมมีสัดส่วนการใช้พลังงานมากที่สุดและความร้อนที่จากภาคอุตสาหกรรมส่วนหนึ่งมาจากที่เตาเผา เครื่องยนต์หรือหม้อต้มไอน้ำ ซึ่งมากกว่า 50% ของความร้อนทั้งหมดนี้อยู่ในรูปของความร้อนที่อุณหภูมิต่ำโดย Tchanche et al. (2011) ได้จำแนกช่วงอุณหภูมิของความร้อนที่เอาไว้ 3 ช่วง คือ 1) มากกว่า 650 °C เรียกว่า “ความร้อนที่อุณหภูมิสูง” 2) ช่วง 230 °C – 650 °C เรียกว่า “ความร้อนที่อุณหภูมิมกกลาง” และ 3) ต่ำกว่า 230 °C เรียกว่า “ความร้อนที่อุณหภูมิต่ำ” ซึ่ง Hung et al. (1997) และ Quoilin et al. (2013) ได้นำเสนอ

เทคโนโลยีที่สามารถนำความร้อนอุณหภูมิต่ำมาใช้ประโยชน์ได้นั้นคือ โรงไฟฟ้าโออาร์ซี (Organic Rankine cycle, ORC) ที่มีพื้นฐานมาจากโรงไฟฟ้าพลังงานไอน้ำที่ใช้วัฏจักรแรงคิน มีข้อดีที่มีขนาดเล็กกว่าโรงไฟฟ้าพลังงานไอน้ำ สารทำงานที่ใช้เป็นสารอินทรีย์ ทำให้ไม่ต้องมีค่าใช้จ่ายเพื่อบำบัดน้ำ เป็นต้นโดยจากสถิติมากกว่า 50% โรงไฟฟ้าใช้ความร้อนเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรม

## 2.2 วัฏจักรแรงคิน (Rankine cycle)

วัฏจักรแรงคินจะใช้น้ำเป็นสารทำงาน และมีอุปกรณ์พื้นฐาน 4 ชนิด ได้แก่ เครื่องสูบลม (Pump) หม้อไอน้ำ (Boiler) กังหัน (Turbine) และเครื่องควบแน่น (Condenser) ซึ่งหลักการทำงานเป็นดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 หลักการทำงานของ Rankine cycle (Cengel and Boles, 2015)

กระบวนการที่ 1-2 เป็นกระบวนการเพิ่มความดันแบบไอเซนโทรปิก (Isentropic compression) โดยสารทำงานจะมีสถานะเป็นของเหลวอิ่มตัว (Saturated liquid) เข้าสู่เครื่องสูบลม และถูกอัดเพิ่มความดันแบบไอเซนโทรปิกจนมีความดันเท่ากับความดันในหม้อไอน้ำ และพลังงานที่เครื่องสูบลมต้องใช้ในการเพิ่มความดันให้กับสารทำงาน สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.1

$$\dot{W}_{in} = \dot{m}_{wf} (h_2 - h_1) \quad (2.1)$$

เมื่อ  $\dot{W}_{in}$  คือ งานที่จ่ายให้เครื่องสูบลม, W  
 $\dot{m}_{wf}$  คือ อัตราการไหลเชิงมวล, kg/s  
 $h_1, h_2$  คือ เอนทาลปีของสารทำงานในตำแหน่งที่ 1 และ 2, J/kg

กระบวนการที่ 2-3 เป็นกระบวนการที่สารทำงานได้รับความร้อนโดยที่ความดันคงที่ (Isobaric heat addition) สารทำงานจะเข้าสู่หม้อไอน้ำ ในสถานะของเหลวอัดตัว (Compressed liquid) เมื่อสารทำงานได้รับความร้อนจะมีอุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น เริ่มมีการเปลี่ยนสถานะเป็นไออิ่มตัว (Saturated vapor) ปริมาณความร้อนที่สารทำงานได้รับสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.2

$$\dot{Q}_{in} = \dot{m}_{wf} (h_3 - h_2) \quad (2.2)$$

เมื่อ  $\dot{Q}_{in}$  คือ ความร้อนที่สารทำงานได้รับ, W  
 $\dot{m}_{wf}$  คือ อัตราการไหลเชิงมวล, kg/s  
 $h_2, h_3$  คือ เอนทาลปีของสารทำงานในตำแหน่งที่ 2 และ 3, J/kg

กระบวนการที่ 3-4 เป็นกระบวนการขยายตัวแบบไอเซนโทรปิก (Isentropic expansion) โดยสารทำงานเข้าสู่ turbine และขยายตัวแบบไอเซนโทรปิก ทำให้กังหันหมุนและได้พลังงาน สารทำงานที่ขยายตัวผ่านกังหัน ความดันและอุณหภูมิลดลงจนมีค่าเท่ากับความดันและอุณหภูมิภายในเครื่องควบแน่น พลังงานที่ได้จากกังหันสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.3

$$\dot{W}_{out} = \dot{m}_{wf} (h_3 - h_4) \quad (2.3)$$

เมื่อ  $\dot{W}_{out}$  คือ งานที่ได้รับจากกังหัน, W  
 $\dot{m}_{wf}$  คือ อัตราการไหลเชิงมวล, kg/s  
 $h_3, h_4$  คือ เอนทาลปีของสารทำงานในตำแหน่งที่ 3 และ 4, J/kg

กระบวนการที่ 4-1 เป็นกระบวนการระบายความร้อนโดยความดันคงที่ (Isobaric heat rejection) เมื่อสารทำงานออกจากกังหัน แล้วจะเข้าสู่เครื่องควบแน่น และถ่ายเทความร้อนสารหล่อเย็น ทำให้เปลี่ยนเป็นสถานะของเหลวอิ่มตัว ซึ่งปริมาณความร้อนที่ถ่ายเทสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.4

$$\dot{Q}_{out} = \dot{m}_{wf} (h_4 - h_1) \quad (2.4)$$

เมื่อ  $\dot{Q}_{out}$  คือ ความร้อนที่สารทำงานถ่ายเท, W

$\dot{m}_{wf}$  คือ อัตราการไหลเชิงมวล, kg/s

$h_1, h_4$  คือ เอนทาลปีของสารทำงานในตำแหน่งที่ 1 และ 4, J/kg

งานสุทธิที่จะได้จากโรงไฟฟ้าสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.5

$$\dot{W}_{net} = \dot{W}_{out} - \dot{W}_{in} \quad (2.5)$$

เมื่อ  $\dot{W}_{net}$  คือ งานสุทธิของโรงไฟฟ้า, W

$\dot{W}_{out}$  คือ งานที่ได้รับจากกังหันแบบไอขยายตัว, W

$\dot{W}_{in}$  คือ งานที่จ่ายให้แก่เครื่องสูบ, W

ส่วนค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อน โรงไฟฟ้า (Thermal efficiency,  $\eta_{th}$ ) จะสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.6

$$\eta_{th} = \frac{\dot{W}_{net}}{\dot{Q}_{evap}} \quad (2.6)$$

เมื่อ  $\eta_{th}$  คือ ประสิทธิภาพเชิงความร้อน

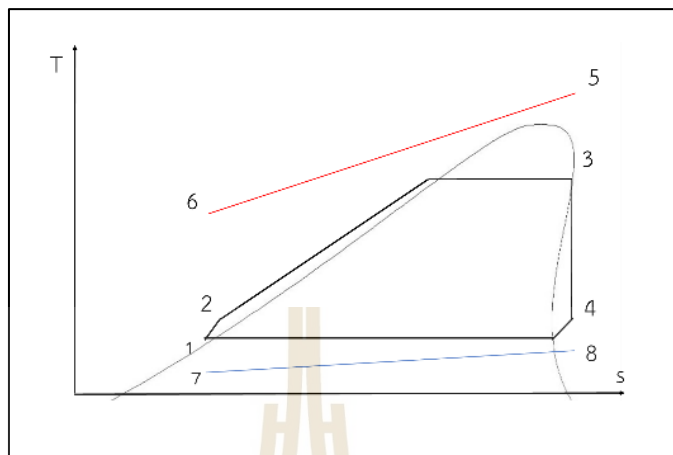
$\dot{W}_{net}$  คือ งานสุทธิของโรงไฟฟ้า, W

$\dot{Q}_{in}$  คือ ความร้อนที่สารทำงานได้รับ, W

### 2.3 โรงไฟฟ้าโออาร์ซีแบบพื้นฐาน

โรงไฟฟ้าโออาร์ซีจะมีลักษณะการคล้ายกับโรงไฟฟ้าพลังงานไอน้ำ แต่จะมีการใช้สารอินทรีย์เป็นสารที่มีธาตุคาร์บอนเป็นส่วนประกอบหลักทำให้สารทำงานมีจุดเดือดต่ำกว่าน้ำ เช่น สารทำความเย็น (Refrigerant) สารประกอบไฮโดรคาร์บอน (Hydrocarbon) สารทำงานเหล่านี้เหมาะสำหรับใช้กับแหล่งความร้อนที่มีอุณหภูมิต่ำ ซึ่งสารทำความเย็นเหมาะที่จะใช้กับแหล่งความร้อนที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า 150°C และสารทำงานที่เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอน เหมาะที่จะนำไปใช้กับแหล่งความร้อนที่มีอุณหภูมิอยู่ในช่วง 150 - 300 °C ซึ่งแหล่งความร้อนอุณหภูมิดังกล่าวไม่เหมาะที่จะนำไปใช้เป็นแหล่งพลังงานให้กับโรงจักรต้นกำลังไอน้ำ (Bronicki., 2017) และโรงไฟฟ้าโออาร์ซีจะมีอุปกรณ์ที่แตกต่างไปเล็กน้อย ได้แก่ เครื่องระเหย (Evaporator) ใช้แทนหม้อไอน้ำ กังหันแบบไอขยายตัว (Expander) ใช้แทนกังหัน

โรงไฟฟ้าไออาร์ซีแบบพื้นฐาน จะมี T-s diagram เป็นดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 T-s diagram ของโรงไฟฟ้าไออาร์ซีแบบพื้นฐาน

โรงไฟฟ้าไออาร์ซีเป็นเทคโนโลยีหนึ่งที่ได้รับการศึกษากันอย่างแพร่หลาย ยกตัวอย่างเช่น Wiedemann and Span (2016) ได้ศึกษาการนำโรงไฟฟ้าไออาร์ซีไปประยุกต์ใช้กับ ก๊าซไอเสียจากเครื่องยนต์ดีเซล พบว่าสามารถลดการปล่อยมลพิษได้ 3%

Zhou et al. (2017) ใช้น้ำร้อนทิ้งจากโรงงานถลุงเหล็ก อุณหภูมิ 70 - 90 °C อัตราการไหลเชิงปริมาตร (Volume flow rate) 380 m<sup>3</sup>/hr เป็นแหล่งความร้อนสำหรับโรงไฟฟ้าไออาร์ซี โดยใช้สารทำงาน คือ R245fa และ R123 ซึ่งพบว่าเป็นสารทำงานชนิด R245fa สามารถให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงกว่า จากนั้นจึงไปหาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิแหล่งความร้อนกับกำลังไฟฟ้าที่ได้และประสิทธิภาพเชิงความร้อน ซึ่งพบว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 70 °C เป็น 90 °C กำลังไฟฟ้าและประสิทธิภาพเชิงความร้อนจะเพิ่มขึ้นด้วย ซึ่งแสดงว่ากำลังไฟฟ้าที่ได้และประสิทธิภาพเชิงความร้อนของโรงไฟฟ้าจะแปรผันตามอุณหภูมิของแหล่งความร้อน

He et al. (2012) ที่ใช้ความร้อนทิ้งอุณหภูมิ 150 °C เป็นแหล่งความร้อน เพื่อหาค่าอุณหภูมิในการระเหยตัวที่เหมาะสมที่สุด (Optimal evaporation temperature, OET) ของสารทำงาน 22 ชนิด โดยใช้โปรแกรม “Engineering Equation Solver (EES)” หาค่า OET และงานสุทธิที่เหมาะสมที่สุด พบว่าเมื่อใช้สารทำงานที่มีอุณหภูมิวิกฤต (Critical temperature,  $T_{cr}$ ) ใกล้เคียงกับอุณหภูมิของแหล่งความร้อน (Heat source temperature,  $T_{h,im}$ ) จะทำให้สามารถผลิตงานสุทธิได้สูงที่สุด

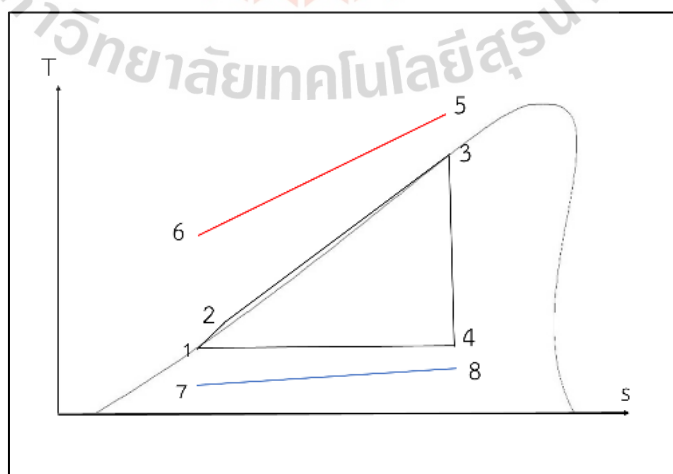
Saleh et al. (2007) ได้ศึกษาการเลือกใช้สารทำงานสำหรับโรงไฟฟ้าไออาร์ซีที่ใช้ความร้อนได้พิภพที่มีอุณหภูมิ 100 °C เป็นแหล่งความร้อน โดยใช้สารทำงานในการจำลองทั้งสิ้น

31 ชนิด พบว่า สารทำงานที่สามารถให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงจะเป็นสารที่มีจุดเดือด (Boiling point) สูงเช่นกัน

ธนิศวรรี ดิทยาาท และทงเกียรติ เกียรติศิริโรจน์ (2557) ได้ทำการวิเคราะห์ต้นทุนการผลิตของโรงไฟฟ้าไออาร์ซี ที่ใช้เชื้อเพลิงชีวมวลเป็นแหล่งพลังงาน โดยพิจารณาโรงไฟฟ้าไออาร์ซีที่มีจำหน่ายในท้องตลาด มีกำลังการผลิตไฟฟ้าสุทธิ 35 kW และ 65 kW และได้พิจารณาถึงอิทธิพลของการไหลและอุณหภูมิของน้ำร้อนที่ใช้ในการผลิตไฟฟ้า ที่ส่งผลต่อต้นทุนการผลิตไฟฟ้า จากการศึกษาพบว่า เมื่อเพิ่มอัตราการไหลของน้ำร้อนและอุณหภูมิของน้ำร้อนเข้าเครื่องระเหยพบว่า ประสิทธิภาพของระบบเพิ่มขึ้นและมีต้นทุนการผลิตไฟฟ้าต่อหน่วยลดลง สำหรับโรงไฟฟ้า ขนาด 35 kW และ 65 kW ที่อัตราการไหลของน้ำร้อนที่เข้าเครื่องระเหย 12.6 l/s และมีอุณหภูมิน้ำร้อนเข้า 116 °C มีประสิทธิภาพทางความร้อนเท่ากับ 16.9% และ 16.53% ตามลำดับ สำหรับเชื้อเพลิงชีวมวลที่มีต้นทุนการผลิตไฟฟ้าต่ำสุด เมื่อเทียบกับชีวมวลอื่น ๆ คือ ทะลายปาล์ม โดยมีค่าเท่ากับ 6.66 และ 4.85 Baht/kWh ตามลำดับ

## 2.4 โรงไฟฟ้าไออาร์ซีแบบ trilateral (TLC)

โรงไฟฟ้าไออาร์ซีแบบ TLC เป็นโรงไฟฟ้าที่มีส่วนประกอบเช่นเดียวกับแบบโรงไฟฟ้าไออาร์ซีแบบพื้นฐาน แต่จะมีกระบวนการที่เกิดขึ้นภายในเครื่องระเหยที่แตกต่าง โดยสถานะของสารทำงานที่ออกจากเครื่องระเหยจะต้องเป็นของเหลวอิ่มตัว ทำได้โดยการเพิ่มความดันให้สูงแล้วจึงนำไปผ่านกังหันไอแบบขยายตัวเพื่อให้ได้งานออกมา (Bianchi et al., 2017; Ajimotokan et al., 2014) ซึ่งลักษณะของ T-s diagram จะเป็นดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 T-s diagram ของโรงไฟฟ้าไออาร์ซีแบบ TLC

Li et al. (2017) ได้จำลองเปรียบเทียบโรงไฟฟ้าไออาร์ซีแบบพื้นฐานกับแบบ TLC โดยใช้สารทำงานเป็นสารชนิด R245fa และใช้ไอเสียเป็นแหล่งความร้อน โดยมีอุณหภูมิ 200 °C พบว่าค่ากำลังไฟฟ้าสุทธิจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิในการระเหยตัวของสารทำงานในเครื่องระเหยเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิในการระเหยตัวของสารทำงานเพิ่มขึ้นมากกว่า 125 °C โรงไฟฟ้าไออาร์ซีแบบ TLC จะให้กำลังไฟฟ้าสุทธิและประสิทธิภาพเชิงความร้อนเท่ากับ 13.6 kW และ 14.8% ซึ่งสูงกว่าโรงไฟฟ้าไออาร์ซีแบบ Subcritical ที่มีกำลังไฟฟ้าสุทธิ 9.9 kW และประสิทธิภาพเชิงความร้อน 10.6% แต่โรงไฟฟ้าไออาร์ซีแบบ TLC จะมีค่า UA มากกว่า โรงไฟฟ้าไออาร์ซีแบบพื้นฐานซึ่งสะท้อนถึงขนาดของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่ต้องมากกว่า

Fischer (2011) ได้ใช้แหล่งความร้อนที่มี 150 - 350 °C และแหล่งรับความร้อนที่มีอุณหภูมิ 15 °C และ 62 °C ในการเปรียบเทียบโรงไฟฟ้าไออาร์ซีแบบ TLC กับโรงไฟฟ้าไออาร์ซี 5 โดยในโรงไฟฟ้าไออาร์ซีแบบ TLC จะใช้สารทำงานที่เป็นน้ำ ส่วนโรงไฟฟ้าไออาร์ซีแบบ Subcritical จะใช้สารทำงานเป็น Cyclopentane สำหรับแหล่งความร้อนที่มีอุณหภูมิ 350 °C และ 280 °C สารทำงานชนิด n-butane สำหรับแหล่งความร้อนที่มีอุณหภูมิ 220 °C และสารทำงานชนิด Propane สำหรับแหล่งความร้อนที่มีอุณหภูมิ 150 °C พบว่า โรงไฟฟ้าไออาร์ซีแบบ TLC มีค่าประสิทธิภาพตามกฎข้อที่ 2 ทางเทอร์โมไดนามิกส์ (Exergy efficiency) จะสูงกว่าโรงไฟฟ้าไออาร์ซี นอกจากนี้ค่าอัตราการไหลเชิงปริมาตรที่ทางออกของ Expander ในโรงไฟฟ้าไออาร์ซีแบบ TLC จะสูงกว่าโรงไฟฟ้าไออาร์ซี 2.8 - 70 เท่า

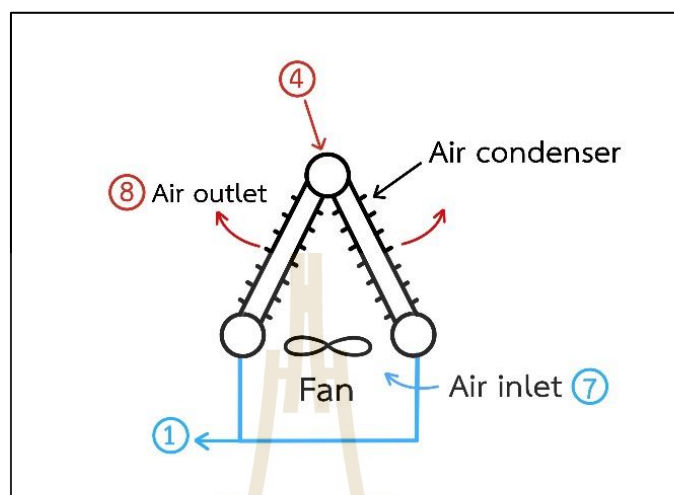
จากหลาย ๆ บทความในข้างต้นมุ่งเน้นไปที่การพัฒนาหรือเปรียบเทียบประสิทธิภาพของระบบเมื่อเปลี่ยนสารทำงาน สภาวะของแหล่งความร้อนและแหล่งทิ้งความร้อน แต่บทความที่ศึกษาโรงไฟฟ้าไออาร์ซีที่คำนึงถึงพลังงานที่ใช้ในระบบหล่อเย็นร่วมด้วยยังมีน้อย โดยระบบหล่อเย็นถือเป็นระบบหนึ่งที่สำคัญของโรงไฟฟ้า มีหน้าที่นำความร้อนออกจากวัฏจักรทางเทอร์โมไดนามิกส์ให้ได้มากที่สุดสู่สิ่งแวดล้อม (Smrekar et al., 2006) หากจำแนกระบบหล่อเย็นตามชนิดของไหลจะได้เป็นระบบหล่อเย็นด้วยอากาศและระบบหล่อเย็นด้วยน้ำ

## 2.5 ระบบหล่อเย็นด้วยอากาศ (Air-cooled Condenser)

น้ำจืดเป็นทรัพยากรหมุนเวียน (Renewable) ที่กำลังถูกทำลายเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของสภาพภูมิอากาศและความต้องการที่เพิ่มขึ้นจากครัวเรือน พาณิชยกรรม การเกษตร และกระบวนการผลิตไฟฟ้า ทางเลือกหนึ่งในการแก้ไขปัญหาเหล่านี้คือการเลือกใช้ระบบหล่อเย็นด้วยอากาศ (Air-Cooled Condenser, ACCs) (Lin et al., 2020; Walraven et al., 2015)

ACCs ที่ถูกจัดอยู่ในรูปแบบ A-frame เป็นตัวอย่างเพื่อให้อธิบายโดยทั่วไปของระบบหล่อเย็นด้วยอากาศซึ่งประกอบไปด้วยท่อที่มีครีบริบายความร้อน (Finned tube) เอียงทำมุม

กับแวนอนเพื่อลดพื้นที่หน้าตัดที่ต้องใช้ พัดลมจะถูกติดตั้งอยู่ด้านล่างทำหน้าที่บังคับให้อากาศโดยรอบไหลผ่านท่อ ทำให้ไอที่ไหลผ่านด้านบนควบแน่นและไหลลงตามท่อเอียง ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 A-frame air-cooled Condenser

จากรูปที่ 2.4 ACC ทำหน้าที่เป็นเครื่องกลั่นมีลักษณะการทำงานคือ สารทำงานที่มีอุณหภูมิสูงจะไหลในท่อ หมายเลข 4 โดยที่มีอากาศแวดล้อมเข้ามาทางหมายเลข 7 และรับความร้อนออกไปที่หมายเลข 8 หลังจากนั้นสารทำงานที่ทิ้งความร้อนสู่อากาศจะควบแน่นและไหลผ่านทางท่อหมายเลข 1

## 2.6 ระบบหล่อเย็นด้วยน้ำ (Cooling tower)

สำหรับหอผึ่งเย็น (Cooling tower) มีข้อได้เปรียบจาก ACCs ที่ความดันบรรยากาศน้ำมีความจุความร้อนจำเพาะ (Specific heat capacity) เป็น 4 เท่าของอากาศ ซึ่งมีค่า 4.18 kJ/kg และ 1.01 kJ/kg ตามลำดับและมีการถ่ายเทความร้อน 2 ส่วน คือ

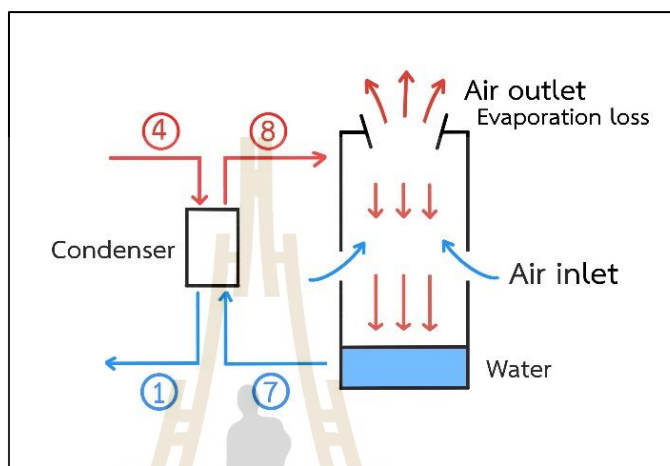
1. การถ่ายเทความร้อนแฝง (Latent heat) คือ การถ่ายเทอุณหภูมิของน้ำร้อนสู่อากาศ
2. การถ่ายเทความร้อนสัมผัส (Sensible heat) คือ การดึงความร้อนรอบข้างขณะที่น้ำระเหยเป็นไอ

และหอผึ่งเย็นสามารถแบ่งตามลักษณะการใช้น้ำออกได้เป็น 3 ประเภท ได้แก่

1. Once through cooling system เป็นการสูบน้ำจากแหล่งน้ำ นำไปหล่อเย็นแล้วปล่อยทิ้ง
2. Open recirculating cooling system เป็นการหมุนเวียนนำน้ำกลับมาใช้ซ้ำ
3. Closed system เป็นระบบปิด



โดยทั่วไปแล้วหอผึ่งเย็นที่นิยมใช้คือ แบบ Open recirculating ซึ่งมีลักษณะการทำงาน คือน้ำหล่อเย็นที่ไปรับความร้อนจาก Condenser จะถูกปล่อยให้ตกลงมาจากด้านบน สวนทางกับอากาศที่จะเข้ามาจากด้านล่างของหอผึ่งเย็น โดยอากาศจะรับความร้อนและไอน้ำที่ระเหยบางส่วน ออกจากด้านบน ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 หอผึ่งเย็นแบบเปียกชนิด Open recirculating

สำหรับข้อดีของการเลือกใช้ระบบหล่อเย็น Walraven et al. (2015) ได้นำเสนอการเปรียบเทียบต้นทุนเฉลี่ยของค่าไฟฟ้า (Levelized cost of electricity) ของการระบายความร้อนจากโรงไฟฟ้าไออาร์ซี ที่ใช้แหล่งความร้อนได้พิภพด้วยน้ำและอากาศ พบว่าการระบายความร้อนด้วยน้ำมีต้นทุนที่ต่ำกว่า แต่การใช้หอผึ่งเย็นยังต้องพิจารณาถึงปัจจัยอื่นนอกจากอุณหภูมิอากาศแวดล้อมด้วย เช่น ความชื้นในอากาศ อัตราการไหลของน้ำหล่อเย็นและอากาศที่สวนทางกัน

Lemouari and Boumaza (2010) ได้นำเสนอผลกระทบจากอัตราการไหลของน้ำและอากาศที่ส่งผลต่อความสามารถในการระบายความร้อนของหอผึ่งเย็นว่าประสิทธิภาพจะลดลงเมื่ออัตราส่วนของอัตราการไหลระหว่างน้ำและอากาศเพิ่มขึ้น (L/G ratio) ประสิทธิภาพของหอผึ่งเย็นจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิของน้ำขาเข้าและอัตราการไหลของน้ำสูงขึ้นเมื่อสภาวะอากาศคงที่

Papaefthimiou et al. (2012) ได้นำเสนอผลกระทบของสภาวะอากาศแวดล้อมที่มีต่อหอผึ่งเย็นเปียกแบบปิด (Closed wet cooling tower) ว่าจะระบายความร้อนได้ดีเมื่ออากาศมีอัตราส่วนความชื้นต่ำ

Shahali et al. (2016) ได้ศึกษาผลกระทบจากการเปลี่ยนอัตราการไหลของน้ำหล่อเย็น อุณหภูมิของน้ำหล่อเย็นขาเข้าหอผึ่งเย็น อัตราการไหลของอากาศ และจำนวน Packing พบว่า

ประสิทธิภาพของการระบายความร้อนจะเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราการไหลของน้ำลดลง อัตราการไหลของอากาศ อุณหภูมิของน้ำหล่อเย็นขาเข้า และจำนวน Packing เพิ่มขึ้น

Shao et al. (2017) ได้ศึกษาผลกระทบจากอัตราการไหลของน้ำหล่อเย็นพบว่า เมื่ออัตราการไหลเพิ่มขึ้นพลังงานรวมของระบบก็จะเพิ่มขึ้น การถ่ายเทความร้อนที่ Evaporator และ Condenser เพิ่มขึ้น กำลังของ Pump สารทำงานก็จะเพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน โดยประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงสุดอยู่ที่ 5.3% ประสิทธิภาพไอเซนโทรปิกของกังหันแบบไอขยายตัวเท่ากับ 75.2% เมื่ออัตราการไหลของน้ำหล่อเย็นเท่ากับ 0.591 kg/s จะเห็นว่าการเลือกใช้ระบบหล่อเย็นและการควบคุมที่เหมาะสมกับโรงไฟฟ้าไออาร์ซี เมื่ออุณหภูมิและสภาวะอากาศเปลี่ยนแปลงไป จะส่งผลให้ประสิทธิภาพสูงขึ้น ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงจะศึกษาเพื่อหากลยุทธ์ที่เหมาะสมที่สุดสำหรับระบบหล่อเย็นสำหรับโรงไฟฟ้าไออาร์ซีที่สภาวะอากาศที่แตกต่างกัน



## บทที่ 3

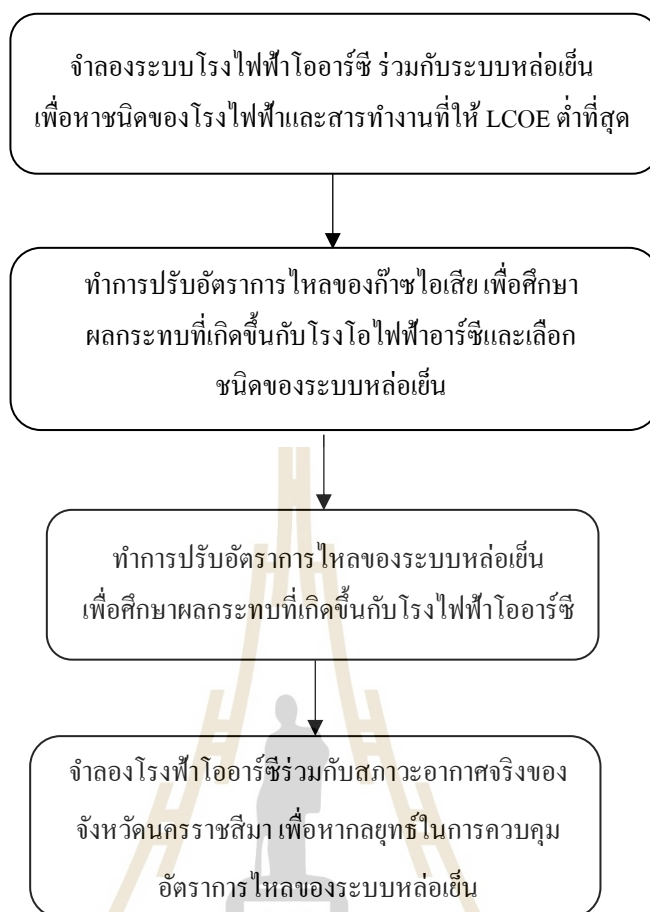
### วิธีการดำเนินการวิจัย

#### 3.1 บทนำ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นการศึกษาการนำเอาก๊าซไอเสียจากหม้อไอน้ำขนาด 350 BHP ของโรงพยาบาลมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี มาเป็นแหล่งความร้อนให้แก่โรงไฟฟ้า ซึ่งมีอุณหภูมิ  $160\text{ }^{\circ}\text{C}$  มีอัตราการไหลอยู่ที่  $0.92\text{ kg/s}$  อุณหภูมิกระเปาะแห้ง  $30\text{ }^{\circ}\text{C}$  อุณหภูมิกระเปาะเปียก  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  และน้ำที่มีเท่ากับอุณหภูมิกระเปาะแห้ง ด้วยวิธีการจำลองเชิงตัวเลข เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการผลิตกระแสไฟฟ้า กลยุทธ์การควบคุมระบบหล่อเย็นและประเมินความคุ้มค่าทางด้านเศรษฐศาสตร์ ในบทนี้จึงได้นำเสนอขั้นตอนการดำเนินงานตามรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.1 หม้อไอน้ำของโรงพยาบาลเทคโนโลยีสุรนารี



รูปที่ 3.2 ลำดับการดำเนินงาน

### 3.2 การเลือกสารทำงานและชนิดของโรงไฟฟ้า

#### 3.2.1 การเลือกสารทำงาน

การเลือกใช้สารทำงานเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่สำคัญ เนื่องจากสารทำงานแต่ละตัวมีคุณสมบัติที่แตกต่างกันส่งผลต่อศักยภาพของโรงไฟฟ้าและสิ่งแวดล้อม จากที่กล่าวมาในบทที่ 2 ในวิทยานิพนธ์นี้จึงทำการเลือกสารทำงานที่มีอุณหภูมิวิกฤต ( $T_{cu}$ ) ที่ใกล้เคียงกับอุณหภูมิของแหล่งความร้อน ( $T_{hs,in}$ ) โดยยังไม่ได้พิจารณาปัจจัยอื่น ๆ เป็นจำนวน 6 จึงทำให้สารทำงานที่ใช้ในการจำลองเป็นดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 สารทำงานที่ใช้ในการจำลอง

Working fluid	Properties			
	T <sub>cri</sub> (°C)	P <sub>cri</sub> (kPa)	ODP	GWP
R245fa	154.01	3,651	0	1,030
R1234ze	109.36	3,635	0	7
Neopentane	160.59	3,196	0	0
R1233zd	165.50	3,573	0	1
R114	145.68	3,257	1	8,590
Perfluoropentane	147.41	2,045	0	8,900

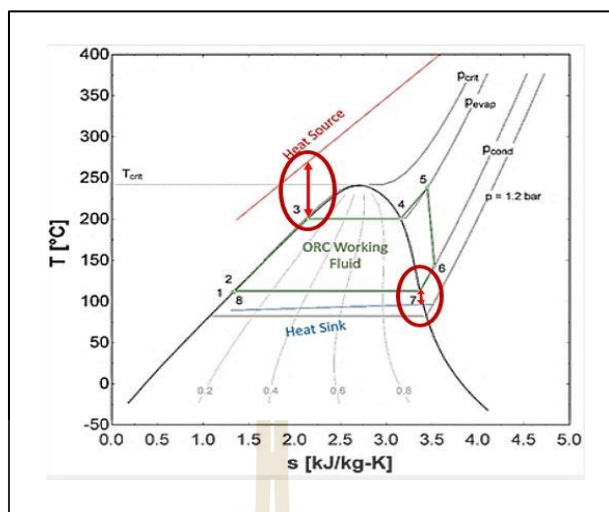
ค่าที่แสดงถึงผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของสารทำงาน ได้แก่ ค่าศักยภาพในการทำลายโอโซน (Ozone depleting potential, ODP) ค่าศักยภาพในการทำให้เกิดสภาวะโลกร้อน (Global warming potential, GWP) เป็นต้น

ค่าศักยภาพในการทำลายโอโซน (Ozone depleting potential, ODP) เป็นค่าที่แสดงถึงระดับการทำลายโอโซนในชั้นบรรยากาศสตราโตสเฟียร์ของสารทำงานชนิดต่าง ๆ โดยใช้ค่าของสารทำงานชนิด R11 เป็นมาตรฐาน

ค่าศักยภาพในการทำให้เกิดสภาวะโลกร้อน (Global warming potential, GWP) แก๊สเรือนกระจกที่ถูกปล่อย ซึ่งสารทำงานแต่ละชนิดมีความสามารถในการทำให้เกิดภาวะโลกร้อนที่แตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพในการแผ่รังสีความร้อนของโมเลกุลแต่ละประเภท โดย GWP จะถูกนำไปเทียบกับความสามารถในการทำให้เกิดสภาวะโลกร้อนของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในช่วงระยะเวลา 100 ปี (องค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก, 2554)

### 3.2.2 การเลือกชนิดของโรงไฟฟ้าและแบบจำลองเชิงตัวเลข

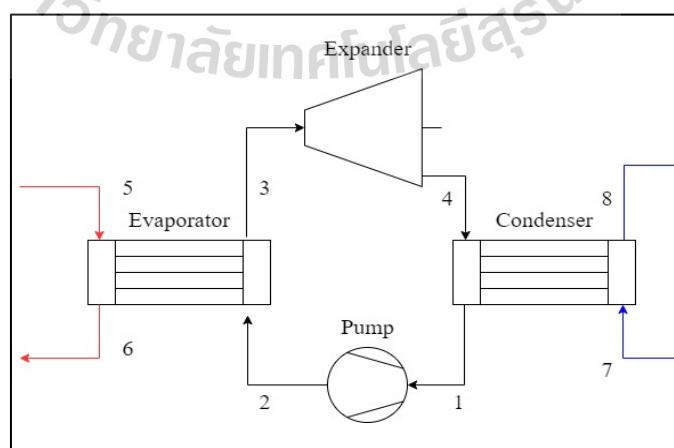
ในการเลือกเทคโนโลยีโรงไฟฟ้าได้จำเป็นต้องมีการสร้างแบบจำลองโดยใช้โปรแกรม MATLAB R2015a ร่วมกับโปรแกรม NIST REFPROP version 9.1 ในการจำลองโรงไฟฟ้าไออาร์ซีแบบพื้นฐานและแบบ TLC โดยในจำลองระบบจะมีแนวคิดที่ใช้คือ Pinch point temperature difference หรือความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่าง 2 แหล่ง ที่มีค่าน้อยที่สุด โดยในวัฏจักรไออาร์ซีจะเกิด Pinch point temperature difference อยู่ 2 ที่ด้วยกัน คือ สารทำงานกับแหล่งความร้อนซึ่งเกิดขึ้นภายในเครื่องระเหยและสารทำงานกับแหล่งรับความร้อนซึ่งเกิดขึ้นในเครื่องควบแน่นดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 Pinch point temperature difference (Lion et al., 2017)

ในการจำลองจะเป็นการหาความดันในเครื่องระเหย ( $P_{\text{evap}}$ ) และเครื่องควบแน่น ( $P_{\text{cond}}$ ) ที่เหมาะสมกับอุณหภูมิของแหล่งความร้อน ( $T_{\text{hs,in}}$ ) และแหล่งรับความร้อน ( $T_{\text{cf,in}}$ ) ค่า Pinch point temperature difference ในเครื่องระเหย ( $\Delta T_{\text{pp,evap}}$ ) และเครื่องควบแน่น ( $\Delta T_{\text{pp,cond}}$ ) โดยใช้วิธี Golden section search ในการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด และได้งานสุทธิสูงที่สุด โดยจะมีการแบ่งเครื่องระเหยและเครื่องควบแน่นออกเป็น ส่วน ๆ และไม่มีการบังคับตำแหน่งการเกิด pinch point temperature difference

สำหรับโรงไฟฟ้าไออาร์ซีแบบพื้นฐานและแบบ TLC มีอุปกรณ์พื้นฐานดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 อุปกรณ์พื้นฐานของวัฏจักรไออาร์ซี

กระบวนการแรกเป็นการทำงานที่จ่ายให้เครื่องสูบจากสมการที่ 3.1 โดยกำหนดให้สถานะของสารทำงานตำแหน่งที่ 1 เป็นของเหลวอิ่มตัว (Saturated liquid)

ส่วนที่ตำแหน่งทางออก (ตำแหน่งที่ 2) ของเครื่องสูบ จะมีการกำหนดค่าเอนโทรปีตำแหน่งที่ 2 โดยใช้ค่า Isentropic efficiency ของเครื่องสูบในการคำนวณหาค่าเอนทาลปีตำแหน่งที่ 2 จากสมการที่ 3.2

$$\dot{W}_p = \dot{m}_{wf} (h_2 - h_1) \quad (3.1)$$

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

เมื่อ  $\dot{W}_p$  คือ งานที่จ่ายให้กับเครื่องสูบ, W  
 $\dot{m}_{wf}$  คือ อัตราการไหลเชิงมวลของสารทำงาน, kg/s  
 $h_1, h_2, h_{2s}$  คือ เอนทาลปีของสารทำงานตำแหน่งที่ 1, 2 และตำแหน่งที่ 2 ในกรณี Isentropic efficiency ของเครื่องสูบเท่ากับ 100% ตามลำดับ, J/kg  
 $\eta_{isen,p}$  คือ Isentropic efficiency ของเครื่องสูบ

การหาค่าความร้อนที่สารทำงานได้รับภายในเครื่องระเหยสามารถหาได้จากสมการที่ 3.3 ตำแหน่งทางออกของเครื่องระเหย (ตำแหน่งที่ 3) จะกำหนดสถานะของสารทำงานให้เป็นไออิ่มตัว (Saturated vapor) เมื่อเป็นโรงไฟฟ้าไออาร์ซีแบบพื้นฐาน หรือเป็นของเหลวอิ่มตัว (Saturated liquid) เมื่อเป็นโรงไฟฟ้าไออาร์ซีแบบ TLC

$$\dot{Q}_{evap} = \dot{m}_{wf} (h_3 - h_2) \quad (3.3)$$

เมื่อ  $\dot{Q}_{evap}$  คือ ความร้อนที่สารทำงานได้รับภายในเครื่องระเหย, W  
 $\dot{m}_{wf}$  คือ อัตราการไหลเชิงมวลของสารทำงาน, kg/s  
 $h_2, h_3$  คือ เอนทาลปีของสารทำงานในตำแหน่งที่ 2 และ 3 ตามลำดับ, J/kg

การหาผลผลิตได้จากกังหันแบบไอขยายตัวสามารถหาได้จากสมการที่ 3.4 โดยที่ตำแหน่งทางออกของกังหันแบบไอขยายตัว (ตำแหน่งที่ 4) จะมีการกำหนดค่าเอนโทรปีตำแหน่งที่ 4 ในกรณี Isentropic efficiency เท่ากับ 100% ให้เท่ากับเอนโทรปีในตำแหน่งที่ 3

หลังจากนั้นจะใช้ NIST REFPROP ในการคำนวณหาค่าเอนทาลปีตำแหน่งที่ 4 กรณี Isentropic efficiency เท่ากับ 100% เพื่อนำมาใช้ในการหาค่าเอนทาลปีตำแหน่งที่ 4 จากสมการที่ 3.5

$$\dot{W}_{ex} = \dot{m}_{wf} (h_3 - h_4) \quad (3.4)$$

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

เมื่อ  $\dot{W}_{turb}$  คือ งานที่สามารถผลิตได้จากกังหันแบบไอขยายตัว, W  
 $\dot{m}_{wf}$  คือ อัตราการไหลเชิงมวลของสารทำงาน, kg/s  
 $h_3, h_4, h_{4s}$  คือ เอนทาลปีของสารทำงานในตำแหน่งที่ 3, 4 และตำแหน่งที่ 4 ในกรณี Isentropic efficiency ของกังหันแบบไอขยายตัวเท่ากับ 100% ตามลำดับ, J/kg  
 $\eta_{isen,ex}$  คือ Isentropic efficiency ของกังหันแบบไอขยายตัว

การหาค่าความร้อนที่ระบายออกภายในเครื่องควบแน่นสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.6 โดยที่ตำแหน่งทางออกของเครื่องควบแน่น (ตำแหน่งที่ 1) จะเป็นเช่นเดียวกับคุณสมบัติของสารทำงานในตำแหน่งทางเข้าของเครื่องสูบลมเช่นกัน

$$\dot{Q}_{out} = \dot{m}_{wf} (h_4 - h_1) \quad (3.6)$$

เมื่อ  $\dot{Q}_{out}$  คือ ความร้อนที่สารทำงานระบายออกภายในเครื่องควบแน่น, W  
 $\dot{m}_{wf}$  คือ อัตราการไหลเชิงมวลของสารทำงาน, kg/s  
 $h_1, h_4$  คือ เอนทาลปีของสารทำงานในตำแหน่งที่ 1 และ 4 ตามลำดับ, J/kg

สำหรับการคำนวณหาขนาดของเครื่องระเหยและเครื่องควบแน่น โดยจะแสดงค่าในรูปของตัวแปร UA จะใช้วิธีการ Discretization ซึ่งเป็นการแบ่งพื้นที่ภายในอุปกรณ์ออกเป็น ส่วน ๆ ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.7-3.10

$$\dot{Q}_{in} = (UA)_{evap} \Delta T_{LM, evap} \quad (3.7)$$



$$\Delta T_{LM, \text{evap}} = \frac{(T_5 - T_3) - (T_6 - T_2)}{\log\left(\frac{T_5 - T_3}{T_6 - T_2}\right)} \quad (3.8)$$

$$\dot{Q}_{\text{out}} = (UA)_{\text{cond}} \Delta T_{pp, \text{cond}} \quad (3.9)$$

$$\Delta T_{LM, \text{cond}} = \frac{(T_4 - T_8) - (T_1 - T_7)}{\log\left(\frac{T_4 - T_8}{T_1 - T_7}\right)} \quad (3.10)$$

- เมื่อ  $U$  คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม (Overall heat transfer coefficient),  $W/m^2K$   
 $A$  คือ พื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อน,  $m^2$   
 $\Delta T_{LM}$  คือ ค่าเฉลี่ยความแตกต่างของอุณหภูมิ (Log mean temperature difference),  $^{\circ}C$

การคำนวณหาขนาดของกังหันแบบไอขยายตัวจากอัตราส่วนการขยายตัวของสารทำงานที่ทางออกต่อทางเข้า (Expansion ratio) ของกังหันแบบไอขยายตัว สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.11-3.13

$$\dot{V}_3 = \frac{\dot{m}_{wf}}{\rho_3} \quad (3.11)$$

$$\dot{V}_4 = \frac{\dot{m}_{wf}}{\rho_4} \quad (3.12)$$

$$\text{Expansion ratio} = \frac{\dot{V}_4}{\dot{V}_3} \quad (3.13)$$

- เมื่อ  $\dot{V}_3, \dot{V}_4$  คือ อัตราการไหลเชิงปริมาตรของสารทำงานตำแหน่งที่ 3 และ 4,  $m^3/s$   
 $\rho_3, \rho_4$  คือ ความหนาแน่นของสารทำงานตำแหน่งที่ 3 และ 4,  $kg/m^3$   
 Expansion ratio คือ อัตราส่วนการขยายตัวสารทำงานในกังหันแบบไอขยายตัว

สำหรับระบบหล่อเย็นด้วยอากาศ (Air-Cooled Condenser) งานที่ต้องจ่ายให้พัดลมสามารถคำนวณโดยใช้สมการที่ 3.8

$$\dot{W}_{\text{aux}} = \dot{W}_{\text{fan}} = \frac{\dot{V}_{\text{air}} \Delta P}{\eta_{\text{fan}}} \quad (3.14)$$

เมื่อ	$\dot{W}_{\text{fan}}$	คือ งานที่จ่ายให้พัดลม, W
	$\dot{V}_{\text{air}}$	คือ อัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศ, m <sup>3</sup> /s
	$\Delta P$	คือ ความดันที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่ออากาศไหลผ่านพัดลม, Pa
	$\eta_{\text{fan}}$	คือ ประสิทธิภาพของพัดลม

สำหรับระบบหล่อเย็นด้วยน้ำ (หอฝิ่งเย็นแบบเปียก, Wet cooling tower) ประกอบไปด้วยพัดลมและเครื่องสูบลม สามารถคำนวณโดยใช้สมการที่ 3.9

$$\dot{W}_{\text{aux}} = \dot{W}_{\text{fan}} + \dot{W}_{\text{cf,p}} = \left( \frac{\dot{V}_{\text{air}} \Delta P}{\eta_{\text{fan}}} \right) + \left( \frac{\dot{m}_{\text{cf}} g \Delta H}{\eta_{\text{cf,p}}} \right) \quad (3.15)$$

เมื่อ	$\dot{m}_{\text{cf}}$	คือ อัตราการไหลของน้ำหล่อเย็น, kg/s
	$g$	คือ ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง, m <sup>2</sup> /s
	$\Delta H$	คือ เสดความดันที่เครื่องสูบลมต้องทำ, m
	$\eta_{\text{cf,p}}$	คือ ประสิทธิภาพของเครื่องสูบลม

และเนื่องจากระบบหล่อเย็นด้วยน้ำมีความซับซ้อนมากกว่าระบบหล่อเย็นด้วยอากาศ เป็นระบบที่ใช้กระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อนสัมผัส (Sensible heat) และความร้อนแฝง (Latent heat) โดยความร้อนที่แลกเปลี่ยนสามารถคำนวณโดยใช้สมการที่ 3.16

$$\dot{Q} = \dot{m}_{\text{cw,in}} c_{\text{pwm}} T_{\text{wi}} - (\dot{m}_{\text{cw,in}} - \dot{m}_{\text{evap}}) c_{\text{pwm}} T_{\text{wo}} \quad (3.16)$$

เมื่อ	$\dot{m}_{\text{cw,in}}$	คือ อัตราการของน้ำหล่อเย็นที่เข้าสู่หอฝิ่งเย็นแบบเปียก, kg/s
	$c_{\text{pwm}}$	คือ ความร้อนจำเพาะเฉลี่ยของน้ำหล่อเย็น, kJ/kg °C

$T_{cw,in}$ ,  $T_{cw,out}$  คือ อุณหภูมิของน้ำที่ทางเข้าและออกหอฝุ้งเย็น, °C

$\dot{m}_{evap}$  คือ อัตราการระเหยของน้ำหล่อเย็น, kg/s

สำหรับอัตราการระเหยของน้ำหล่อเย็นสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.17

$$\dot{m}_{evap} = \dot{m}_{air} (\omega_{out} - \omega_{in}) \quad (3.17)$$

เมื่อ  $\omega_{out}$ ,  $\omega_{in}$  คือ ความชื้นสัมบูรณ์ในอากาศที่ทางเข้าและออกหอฝุ้งเย็น, kg/kg dry air

ในการคำนวณหอฝุ้งเย็น สัมประสิทธิ์หรือหอฝุ้งเย็น (Merkel's number, Me) เป็นตัวแปรที่สำคัญในการคำนวณหา NTU (Number of transfer unit) ของหอฝุ้งเย็น สามารถคำนวณได้จากสมการของ Costelloe and Finn (2009) ดังสมการที่ 3.18

$$Me = 1.3 \left( \frac{\dot{m}_{cw}}{\dot{m}_{air}} \right)^{-0.77} \quad (3.18)$$

สำหรับ Number of transfer unit ของหอฝุ้งเย็น จำเป็นต้องหาค่าความชันของเอนทัลปีและอุณหภูมิของอากาศอิ่มตัว (Gradient of the saturated air enthalpy-temperature) ก่อนจึงจะสามารถคำนวณได้จากสมการของ Nasrabadi and Finn (2013) จากสมการที่ 3.19 ถึงสมการที่ 3.21

$$\frac{\Delta h_{masw}}{\Delta T_{cw}} = \frac{h_{masw,in} - h_{masw,out}}{T_{cw,in} - T_{cw,out}} \quad (3.19)$$

เมื่อ  $h_{masw,in}$ ,  $h_{masw,out}$  คือ ค่าเอนทัลปีอากาศอิ่มตัวที่อุณหภูมิทางเข้าและออกของน้ำหล่อเย็น, J/kg

$$\text{ถ้า } \dot{m}_{air} > \dot{m}_{cw} c_{pcw} \frac{\Delta h_{masw}}{\Delta T_{cw}} ; NTU = Me \left( \frac{\dot{m}_{cw}}{\dot{m}_{air}} \right) \quad (3.20)$$

$$\text{ถ้า } \dot{m}_{\text{air}} \leq \dot{m}_{\text{cw}} c_{\text{pcw}} \frac{\Delta h_{\text{masw}}}{\Delta T_{\text{cw}}} ; \text{NTU} = \text{Me} \left( \frac{\Delta h_{\text{masw}}}{\Delta T_{\text{cw}}} \right) \quad (3.21)$$

สำหรับความร้อนที่ถ่ายเทได้สูงสุดของหอฝึ้งเย็นคำนวณได้จากสมการที่ 3.22

$$\dot{Q}_{\text{max}} = C_{\text{min}} (h_{\text{masw,in}} - f - h_{\text{mai}}) \quad (3.22)$$

เมื่อ  $f$  คือ correlation factor

$h_{\text{mai}}$  คือ เอลทาลปีของอากาศที่ทางเข้าหอฝึ้งเย็น, J/kg

$$\text{โดยที่ } f = \frac{(h_{\text{masw,out}} + h_{\text{masw,in}} - 2h_{\text{masw,m}})}{4} \quad (3.23)$$

เมื่อ  $h_{\text{masw,m}}$  คือ ค่าเอนทาลปีอากาศอิมตัวที่อุณหภูมิเฉลี่ยทางเข้าและออกของน้ำหล่อเย็น, J/kg

เมื่อได้งานที่ต้องจ่ายให้เครื่องสูบ ความร้อนที่ได้รับภายในเครื่องระเหย งานที่ผลิตได้จากกังหันแบบไอขยายตัว ความร้อนที่ระบายออกภายในเครื่องควบแน่น และงานที่ใช้ในระบบหล่อเย็นแล้ว หลังจากนั้นจะทำการคำนวณหาค่างานสุทธิของโรงไฟฟ้าโดยใช้สมการที่ 3.24

$$\dot{W}_{\text{net}} = \dot{W}_{\text{ex}} - \dot{W}_{\text{p}} - \dot{W}_{\text{aux}} \quad (3.24)$$

เมื่อ  $\dot{W}_{\text{net}}$  คือ งานสุทธิของโรงไฟฟ้า, W

$\dot{W}_{\text{ex}}$  คือ งานที่ได้รับจากกังหันแบบไอขยายตัว, W

$\dot{W}_{\text{p}}$  คือ งานที่จ่ายให้กับเครื่องสูบ, W

$\dot{W}_{\text{aux}}$  คือ งานที่จ่ายให้กับระบบหล่อเย็น, W

นอกจากนี้ยังหาค่าประสิทธิภาพตามกฎข้อที่ 1 ของ Thermodynamics (Thermal efficiency,  $\eta_{\text{th}}$ ) จากสมการที่ 3.25

$$\eta_{th} = \frac{\dot{W}_{net}}{\dot{Q}_{in}} \quad (3.25)$$

เมื่อ  $\eta_{th}$  คือ ประสิทธิภาพเชิงความร้อน  
 $\dot{W}_{net}$  คือ งานสุทธิของโรงไฟฟ้า, W  
 $\dot{Q}_{in}$  คือ ความร้อนที่สารทำงานได้รับภายในเครื่องระเหย, W

### 3.2.3 การตรวจสอบความถูกต้องและขั้นตอนการจำลองเชิงตัวเลข

เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง จำได้นำแบบจำลองของโรงไฟฟ้าโออาร์ซีแบบพื้นฐานและแบบ TLC ไปเปรียบเทียบกับผลการจำลองของ Fischer (2011) สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 3.2 และแบบจำลองในส่วนของหอผึ่งเย็นได้นำไปเปรียบเทียบกับผลการทดลองจริงของ Simpson and Sherwood (1946) สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 3.3

สำหรับระบบหล่อเย็นด้วยอากาศ Conradie and Kröger (1996) และ Moser et al. (2014) ได้นำเสนอไว้ว่าในการคำนวณอย่างง่าย สามารถใช้วิธี LMTD ในการคำนวณอุณหภูมิขาออกของอากาศได้โดยตรง

ตารางที่ 3.2 ผลการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองโรงไฟฟ้าไออาร์ซี

Parameter	ORC			TLC		
	Fischer (2011)	Present study	Error (%)	Fischer (2011)	Present study	Error (%)
$T_1$ (°C)	85.00	85.20	0.06	85.00	85.00	0.00
$T_3$ (°C)	215.85	216.05	0.04	316.85	316.85	0.0
$T_4$ (°C)	123.26	122.88	0.10	85.00	85.00	0.00
$T_{hf,out}$ (°C)	135.55	133.97	0.39	97.38	97.32	0.02
$T_{cf,out}$ (°C)	75.70	75.88	0.05	75.00	75.00	0.00
$Q_{in}$ (kW)	5.79	5.85	1.09	5,052.40	5,053.60	0.02
$Q_{out}$ (kW)	4.79	4.85	1.32	4,053.50	4,053.50	0.00
$\eta_{th}$ (%)	17.27	17.09	1.04	19.79	19.79	0.01

ตารางที่ 3.3 ผลการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองหอผึ่งเย็น

Case	Simpson and Sherwood (1946)							Present study			
	$m_{a,in}$ (kg/s)	$m_{w,in}$ (kg/s)	$T_{db,in}$ (°C)	$T_{wb,in}$ (°C)	$T_{v,in}$ (°C)	$T_{w,out}$ (°C)	$T_{db,out}$ (°C)	$m_a$ (kg/s)	$m_a$ dif.	$T_{db,out}$ (°C)	Temp. dif.
1	1.19	1.01	28.83	21.11	33.22	25.50	28.44	1.17	0.02	28.85	-0.41
2	1.16	0.75	34.11	21.11	41.44	26.00	31.16	1.17	-0.01	31.10	0.06
3	1.19	1.01	28.83	21.11	33.22	25.50	28.44	1.17	0.01	28.84	-0.40
4	1.17	1.01	31.78	26.67	34.39	29.00	31.22	1.21	-0.05	31.06	0.16

หลังจากที่ตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองเรียบร้อยแล้วพบว่าแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นมีความแม่นยำ จึงนำมาสู่การจำลองสภาวะที่ออกแบบ (Design condition) โดยมีรายละเอียดในการจำลองดังนี้

ตารางที่ 3.4 เงื่อนไขในการจำลองระบบในสภาวะที่ออกแบบ

Parameter	Value
$T_{hf,in}$	160°C
$\dot{m}_{hs}$	0.92 kg/s
$T_{cf,in}$ and $T_{cf,out}$	30 °C and 40 °C
$T_{db}$ and $T_{wb}$	30 °C and 20 °C
$\Delta T_{pp, evap}$ and $\Delta T_{pp, cond}$	10°C
$\eta_{isen,ex}$ and $\eta_{isen,p}$	80% and 75%
$\eta_f$ and $\eta_{pcw}$	85% and 75%
$\Delta H$ (Water pump in cooling tower)	20 m
Diameter <sub>fan, WCT</sub>	0.525 m
$V_{Packing}$	0.26 m <sup>3</sup>
$\Delta P$ (Fan in ACC and cooling tower)	100 kPa
$U_{ACC, finned tube}$	21.52 W/m <sup>2</sup> °C
Diameter <sub>fan, ACC</sub>	0.80 m

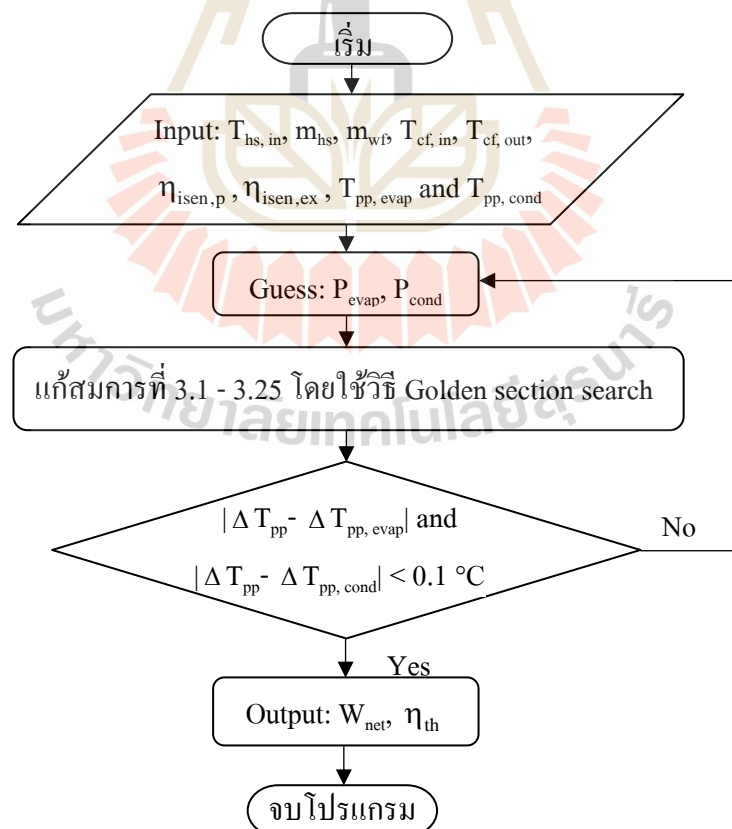
สำหรับแหล่งรับความร้อนที่เป็นน้ำโดยมีอุณหภูมิเท่ากับ 30 °C เนื่องจากเป็นอุณหภูมิของน้ำเฉลี่ย (การประปาส่วนภูมิภาค, 2562) จึงกำหนดให้อุณหภูมิอากาศเท่ากับ 30 °C ด้วยเช่นกัน เมื่อทำการจำลองในสภาวะนอกเหนือสภาวะที่ออกแบบจะกำหนดให้อุณหภูมิน้ำหล่อเย็นเท่ากับอุณหภูมิกระเปาะแห้ง

Ingadóttir (2014) ได้นำเสนอค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ซึ่งเป็นค่าสำหรับวัสดุ Stainless steel ที่ใช้เป็นท่อ และ Aluminum alloy สำหรับครีป

สำหรับค่า  $\Delta P$  ของพัดลม คู่มือการอบรมผู้รับผิดชอบพลังงานของกรมพัฒนาพลังงานทดแทนได้ระบุถึงความแตกต่างความดันของพัดลมชนิด Induced draft มีค่าประมาณ 100 kPa (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2563)

สำหรับหอยิ่งเย็น เลือกใช้โมเดล LBC-T-8 ของบริษัทเหล็กชิ่ง อุตสาหกรรมจำกัด และ ACC เลือกใช้โมเดล THV-50 ของบริษัท Angthong Universal จำกัด โดยพิจารณาจากขนาดของความร้อนทิ้งที่แต่ละโมเดลสามารถทำได้ ส่งผลให้ได้ขนาดของพัคคัมและปริมาตรของ Packing

การจำลองในสภาวะนี้จะใช้เงื่อนไขดังตารางที่ 3.4 และมีขั้นตอนการจำลองดังรูปที่ 3.2 โดยมีกระบวนการคือทำการเดาค่าอัตราการไหลของสารทำงาน ความดันที่เครื่องระเหยและเครื่องควบแน่น จากนั้นทำการคำนวณหาค่า Pinch point temperature ที่เกิดขึ้นในเครื่องระเหยและเครื่องควบแน่น หากมีค่าเกินกว่าที่กำหนดไว้ในตารางที่ 3.4 จะทำการเดาค่าความดันใหม่อีกครั้ง จนกระทั่งได้ค่าที่เหมาะสมที่สุดสำหรับอัตราการไหล จากนั้นจึงทำการเลือกค่าความดันที่สามารถให้งานสุทธิสูงสุดของสารทำงานนั้น ๆ และทำการเปลี่ยนชนิดของสารทำงาน เพื่อหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของแต่ละสารทำงานจนครบถ้วน หลังจากนั้นจึงคำนวณผลลัพธ์ที่ได้จากโรงไฟฟ้าไออาร์ซีแต่ละแบบ สารทำงานแต่ละตัวมาเปรียบเทียบกัน โดยมุ่งเน้นไปยังงานสุทธิสูงสุดซึ่งแนวโน้มของ LCOE จะมีค่าลดลงเมื่องานสุทธิสูงขึ้น



รูปที่ 3.5 ขั้นตอนการจำลองโรงไฟฟ้าไออาร์ซีในสภาวะที่ออกแบบ



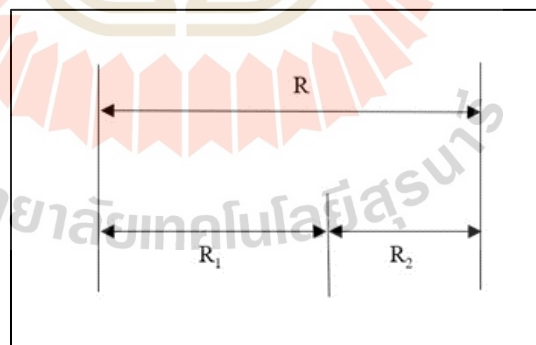
### 3.2.4 Golden section search method

Golden section search method เป็นเทคนิคที่ใช้ในการหาค่า Minimum และ Maximum ของฟังก์ชันฐานนิยมเดียว (Unimodal function) โดยจะเริ่มพิจารณาข้อมูลทั้งหมดที่อยู่ในช่วงความไม่แน่นอนเริ่มต้น (Initial interval of uncertainty) จากนั้นจะแบ่งข้อมูลเป็น 2 ช่วง แล้วทำการเปรียบเทียบค่าของข้อมูลในแต่ละช่วง แล้วทำการตัดข้อมูลในส่วนที่ไม่สนใจออกไป แล้วทำซ้ำจนกระทั่งเหลือช่วงความไม่แน่นอนที่ยอมรับได้ ซึ่งจะกล่าวได้ว่าในช่วงความไม่แน่นอนที่เกิดขึ้นจุดสุดท้ายจะมีจุด Optimal เกิดขึ้น

กฎพื้นฐานของ Golden section คือ อัตราส่วนระหว่างช่วงที่น้อยกว่า (Smaller interval) เทียบกับช่วงที่มากกว่า (Larger interval) เท่ากับ อัตราส่วนระหว่างช่วงที่มากกว่าเทียบกับช่วงทั้งหมด

$$R = R_1 + R_2 \quad (3.26)$$

- โดยที่ R คือ ช่วงทั้งหมดของฟังก์ชัน  
 R<sub>1</sub> คือ ช่วงที่มีความยาวมากกว่าของฟังก์ชัน  
 R<sub>2</sub> คือ ช่วงที่มีความยาวน้อยกว่าของฟังก์ชัน



รูปที่ 3.6 กฎของ Golden section

กฎของ Golden section กล่าวไว้ว่า

$$\frac{R_2}{R_1} = \frac{R_1}{R} \quad (3.27)$$

จากสมการที่ 2.7 และสมการที่ 2.8 จะได้

$$\left(\frac{R_2}{R_1}\right)^2 + \frac{R_2}{R_1} = 1 \quad (3.28)$$

กำหนดให้  $K = R_2/R_1$  แทนในสมการที่ 2.9 จะได้

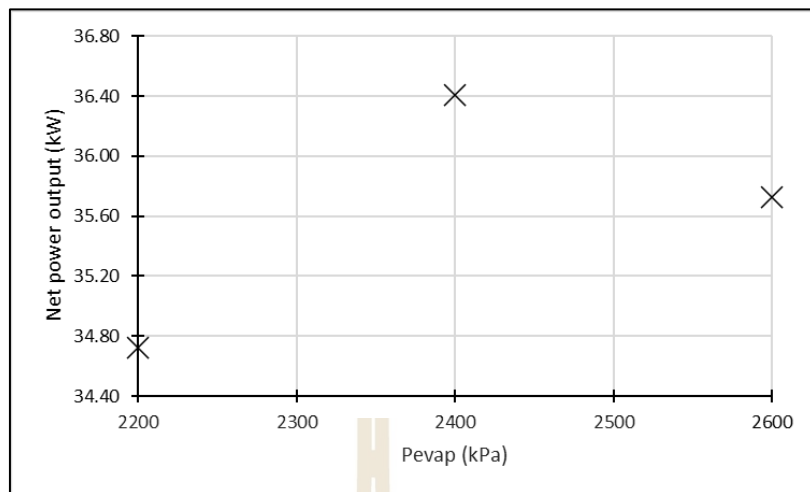
$$K^2 + K = 1 \quad (3.29)$$

จากสมการที่ 2.10 จะได้คำตอบคือ  $K = 0.618$  เมื่อนำกฎของ Golden section มาประยุกต์ใช้ในวิธี Search method จะได้ช่วงของความไม่แน่นอนลดลง ด้วยค่าคงที่  $K = 0.618$  และเมื่อนำมาใช้กับการทำซ้ำจะให้ความสัมพันธ์ดังสมการ

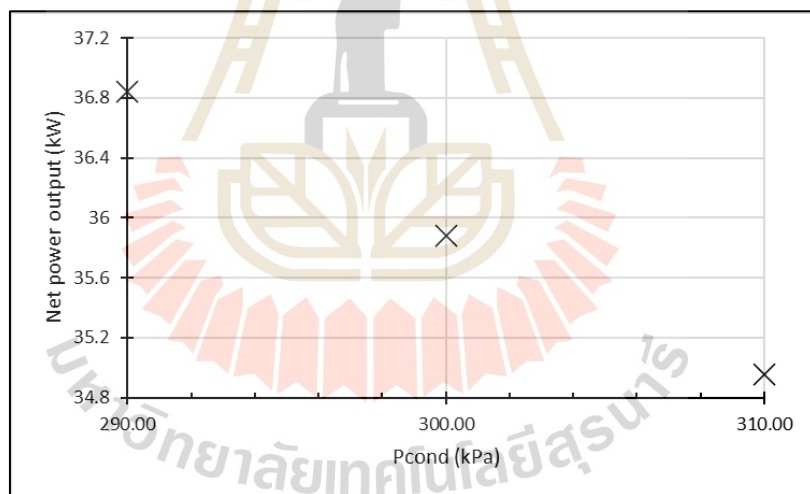
$$I_n = I_0(0.618)^{n-1} \quad (3.30)$$

โดยที่  $I_n$  คือ ช่วงของความไม่แน่นอนที่ได้จากการหาค่าครั้งที่  $n$   
 $I_0$  คือ ช่วงของความไม่แน่นอนเริ่มต้น  
 $n$  คือ จำนวนที่ใช้ในการหาค่า

เพื่อทดสอบว่าปัญหาโรงไฟฟ้าไออาร์ซีที่ทำการจำลองสามารถใช้วิธีการ Golden section ได้หรือไม่ จึงทำการจำลองระบบโรงไฟฟ้าไออาร์ซีแบบ TLC ที่ใช้สารทำงานเป็น R1233zd ทำงานร่วมกับระบบหล่อเย็นด้วยอากาศ โดยปรับค่าความดันที่เครื่องระเหย ให้ความดันที่เครื่องควบแน่นคงที่อยู่ที่ 293.27 kPa หลังจากนั้นจึงจำลองโดยให้ความดันที่เครื่องควบแน่นคงที่อยู่ที่ 2,427 kPa และปรับความดันที่เครื่องควบแน่น ทั้ง 2 การจำลองนี้จะมีการปรับค่าอัตราการไหลของสารทำงาน เพื่อให้ได้ค่า  $\Delta T_{pp} = 10^\circ\text{C}$  ได้ผลดังรูปที่ 3.7 และรูปที่ 3.8 ตามลำดับ



รูปที่ 3.7 ผลการจำลองโรงไฟฟ้าไออาร์ซีแบบ TLC ด้วยวิธี Golden section เมื่อปรับค่าความดันที่เครื่องระเหย



รูปที่ 3.8 ผลการจำลองโรงไฟฟ้าไออาร์ซีแบบ TLC ด้วยวิธี Golden section เมื่อปรับค่าความดันที่เครื่องควบแน่น

จากรูปที่ 3.7 และรูปที่ 3.8 จะเห็นได้ว่าเมื่อความดันที่เครื่องระเหยเปลี่ยนแปลงไปทำให้เกิดจุดที่ทำให้ได้งานสุทธิสูงสุดที่สุด เมื่อความดันที่เครื่องควบแน่นเพิ่มขึ้นจะทำให้งานสุทธิที่ได้ลดลง ดังนั้นปัญหาของโรงไฟฟ้าอาร์ซีที่จำลองเป็นปัญหาแบบฐานนิยมเดียว (Unimodal function) สามารถใช้วิธี Golden section ในการแก้ปัญหาได้

### 3.2.5 การประเมินทางเศรษฐศาสตร์

การประเมินทางเศรษฐศาสตร์เป็นปัจจัยหนึ่งที่มีความสำคัญในการพิจารณาความคุ้มค่าในการลงทุน ในวิทยานิพนธ์นี้จะคำนวณต้นทุนเฉลี่ยตลอดอายุโครงการ (Levelized cost of electricity, LCOE) ของโรงไฟฟ้าไออาร์ซีในสถานะที่ออกแบบ โดยจะคำนวณในเงื่อนไขที่ทำให้ได้งานสุทธิสูงที่สุดในแต่ละสัปดาห์เมื่อโรงไฟฟ้าใช้เวลาทำงานใน 1 ปี คือ 365 วัน และทำงานวันละ 8 ชั่วโมง ตามการทำงานของหม้อไอน้ำของโรงพยาบาล อายุโครงการเท่ากับ 10 ปี โดยอัตราแลกเปลี่ยนระหว่างค่าเงินบาทกับดอลลาร์สหรัฐ (USD) เท่ากับ 29.83 บาท ต่อ 1 ดอลลาร์สหรัฐ อัตราดอกเบี้ยเงินกู้ ( $r$ ) ร้อยละ 7.12 บาท และมีการจ้างวิศวกรและช่างเทคนิคอย่างละ 1 ตำแหน่ง ในการดำเนินการและซ่อมบำรุงโรงไฟฟ้า โดยให้อัตรารายเดือนของวิศวกร ( $C_{eng}$ ) คือ 20,000 บาท และอัตรารายเดือนของช่างเทคนิค ( $C_{tech}$ ) คือ 15,000 บาท ซึ่งการคำนวณต้นทุนเฉลี่ยตลอดอายุโครงการจะแสดงดังสมการที่ 3.26

$$LCOE = \frac{Inv + \sum_{t=1}^n \frac{PEC}{(1+r)^t}}{\sum_{t=1}^n \frac{\dot{W}_{net} \cdot t_{op}}{(1+r)^t}} \quad (3.31)$$

เมื่อ	LCOE	คือ ต้นทุนเฉลี่ยตลอดอายุโครงการ, Baht/kW·hr
	Inv	คือ เงินลงทุนเริ่มต้น, USD
	n	คือ อายุโครงการที่ประเมิน, ปี
	t	คือ ปีที่ดำเนินงาน
	r	คือ อัตราดอกเบี้ยเงินกู้ธนาคาร, USD
	PEC	คือ ค่าใช้จ่ายการดำเนินการผลิตไฟฟ้า, USD
	$t_{op}$	คือ ระยะเวลาในการผลิตไฟฟ้าใน 1 ปี, hrs.
	$\dot{W}_{net \text{ per year}}$	คือ ปริมาณไฟฟ้าที่ผลิตได้ต่อปี, kW

ค่าเงินลงทุนเริ่มต้น สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.27

$$Inv = C_{plant} + C_{site} + C_{service} + C_{setup} \quad (3.32)$$

เมื่อ	Inv	คือ เงินลงทุนเริ่มต้น, USD
	$C_{\text{plant}}$	คือ ราคาของโรงไฟฟ้า, USD
	$C_{\text{site}}$	คือ งบประมาณในการสร้างอาคารสำหรับโรงไฟฟ้าและสำนักงาน, USD
	$C_{\text{service}}$	คือ งบประมาณสิ่งอำนวยความสะดวก, USD
	$C_{\text{set up}}$	คือ งบประมาณในการติดตั้งอุปกรณ์ภายในโรงไฟฟ้า, USD

ราคาของโรงไฟฟ้า ( $C_{\text{plant}}$ ) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.28

$$C_{\text{plant}} = C_{\text{component}} + C_{\text{pipe}} + C_{\text{elec}} + C_{\text{wf}} \quad (3.33)$$

เมื่อ	$C_{\text{plant}}$	คือ ราคาของโรงไฟฟ้า, USD
	$C_{\text{component}}$	คือ ราคาอุปกรณ์ต่าง ๆ ภายในโรงไฟฟ้า, USD
	$C_{\text{pipe}}$	คือ ราคาท่อ, USD
	$C_{\text{elec}}$	คือ ราคาอุปกรณ์ทางไฟฟ้า, USD
	$C_{\text{wf}}$	คือ ราคาของสารทำงานแต่ละชนิด, USD

ราคาของอุปกรณ์ภายในโรงไฟฟ้าสามารถแจกแจงและคำนวณจากสมการที่ 3.29

$$C_{\text{component}} = C_{\text{evap}} + C_{\text{pump,wf}} + C_{\text{cond}} + C_{\text{ex}} + C_{\text{gen}} + C_{\text{tank}} + C_{\text{cooling,sys}} \quad (3.34)$$

เมื่อ	$C_{\text{component}}$	คือ ราคาอุปกรณ์ต่าง ๆ ภายในโรงไฟฟ้า, USD
	$C_{\text{evap}}$	คือ ราคาของเครื่องระเหย, USD
	$C_{\text{pump,wf}}$	คือ ราคาของเครื่องสูบสารทำงาน, USD
	$C_{\text{cond}}$	คือ ราคาของเครื่องควบแน่น, USD
	$C_{\text{ex}}$	คือ ราคาของกังหันแบบไอขยายตัว, USD
	$C_{\text{gen}}$	คือ ราคาของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (generator), USD
	$C_{\text{tank}}$	คือ ราคาของถังเก็บสารทำงาน, USD
	$C_{\text{cooling,sys}}$	คือ ราคาของระบบหล่อเย็น, USD

สำหรับเครื่องระเหยและเครื่องควบแน่นเป็นเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (Heat exchanger) ของโรงไฟฟ้า ซึ่งประเภทของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่นิยมใช้ในโรงไฟฟ้า มีอยู่ด้วยกัน 2 ประเภท คือ Shell and Tube heat exchanger และ Plate heat exchanger

การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (2562) ได้ทำการเปรียบเทียบ Shell and Tube heat exchanger กับ Plate heat exchanger และได้อธิบายประโยชน์ของ Plate heat exchanger ไว้ ดังตารางที่ 3.5

ตารางที่ 3.5 การเปรียบเทียบ Plate heat exchanger กับ Shell and Tube heat exchanger (การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย, 2562)

	Plate Heat Exchanger	Shell-and-Tube Heat Exchanger
ทำอุณหภูมิใกล้ที่สุด	10 °C (20 °F)	50 °C (100 °F)
ใช้งานได้หลายหน้าที่	ทำได้	ทำไม่ได้
การต่อท่อเข้า-ออก	ทิศทางเดียว (บนเฟรมหน้า)	หลายทิศทาง
อัตราการแลกเปลี่ยนความร้อน	3 - 5	1
อัตราส่วนน้ำหนักขณะใช้งาน	1	3 - 10

ในวิทยานิพนธ์นี้จึงเลือกประเภทของเครื่องระเหยและเครื่องควบแน่นเป็นแบบ Plate heat exchanger เนื่องจากมีอัตราการแลกเปลี่ยนความร้อนที่มากกว่า โดยใช้สมการในการคำนวณราคาของ Plate heat exchanger จากอนุกรม โม่งปราณีต (2562) ซึ่งสามารถแสดงได้ ดังสมการที่ 3.35 - 3.38 ตามลำดับ

$$C_{\text{evap}} = 1749.1A_{\text{evap}}^{0.8854} \quad (3.35)$$

$$C_{\text{cond}} = 944.43A_{\text{cond}}^{0.7919} \quad (3.36)$$

$$A_{\text{evap}} = 0.0197\dot{Q}_{\text{evap}} + 1.1935 \quad (3.37)$$

$$A_{\text{cond}} = 0.0795\dot{Q}_{\text{cond}} + 1.0656 \quad (3.38)$$

เมื่อ	$C_{\text{evap}}$	คือ ราคาของเครื่องระเหย, USD
	$C_{\text{cond}}$	คือ ราคาของเครื่องควบแน่น, USD
	$A_{\text{evap}}$	คือ พื้นที่ในการแลกเปลี่ยนความร้อนของเครื่องระเหย, $\text{m}^2$
	$A_{\text{cond}}$	คือ พื้นที่ในการแลกเปลี่ยนความร้อนของเครื่องควบแน่น, $\text{m}^2$
	$\dot{Q}_{\text{evap}}$	คือ ความร้อนที่สารทำงานได้รับภายในเครื่องระเหย, kW
	$\dot{Q}_{\text{cond}}$	คือ ความร้อนที่สารทำงานระบายออกภายในเครื่องควบแน่น, kW

สำหรับกังหันแบบไอขยายตัวที่นิยมใช้ในโรงไฟฟ้ามีอยู่ด้วยกัน 3 ประเภท ได้แก่ Scroll expander, Screw expander และ Axial turbine

โดย Quoilin et al. (2013) ได้นำเสนอว่างานประเภท Waste heat recovery และงานที่ได้จากกังหันไอแบบขยายตัวในตอนนี้ออกแบบอยู่ในช่วงไม่เกิน 10 kW จึงจะเลือกใช้ Screw expander ซึ่งการคำนวณราคาจะใช้สมการของ Astolfi (2015) ดังแสดงในสมการที่ 3.50

$$C_{\text{ex}} = 3143.7 + 217423\dot{V}_{\text{expander,outlet}} \quad (3.39)$$

เมื่อ	$C_{\text{ex}}$	คือ ราคาของกังหันแบบไอขยายตัว, USD
	$\dot{V}_{\text{expander,outlet}}$	คือ อัตราการไหลเชิงปริมาตรของสารทำงานที่ 4, $\text{m}^3/\text{s}$

ในวิทยานิพนธ์นี้จะเลือกใช้เครื่องสูบลประเภทเครื่องสูบลอยโซ่แนวตั้งหลายใบพัด โดยใช้สมการของอนุกุล โมงปราณีต (2562) ดังแสดงในสมการที่ 3.51



รูปที่ 3.9 ลักษณะของเครื่องสูบลอยโซ่แนวตั้งหลายใบพัด  
(บริษัท สยามอีสต์ โซลูชั่น จำกัด (มหาชน), 2019)

$$C_{\text{pump, wf}} = 168.68(1309.9 \dot{V}_1 + 0.8239) + 1737.3 \quad (3.40)$$

เมื่อ  $C_{\text{pump, wf}}$  คือ ราคาของเครื่องสูบลมทำงาน, USD  
 $\dot{V}_1$  คือ อัตราการไหลเชิงปริมาตรของสารทำงานที่ตำแหน่งที่ 1, Liter/s

โดยสมการที่ใช้ในการคำนวณราคาของระบบหล่อเย็นเมื่อเป็นระบบหล่อเย็นด้วยอากาศและน้ำจะเป็นไปดังสมการที่ 3.52 และสมการที่ 3.53

$$C_{\text{ACC}} = C_f \quad (3.41)$$

$$C_{\text{ctw}} = C_{\text{housing}} + C_f + C_{\text{pcw}} \quad (3.42)$$

เมื่อ  $C_{\text{ACC}}$  คือ ราคาของระบบหล่อเย็นด้วยอากาศ, USD  
 $C_f$  คือ ราคาของพัดลม, USD  
 $C_{\text{ctw}}$  คือ ราคาของห่อหุ้มเย็นแบบเปียก, USD  
 $C_{\text{housing}}$  คือ ราคาของตัวเรือนของห่อหุ้มเย็น, USD  
 $C_{\text{pcw}}$  คือ ราคาของเครื่องสูบน้ำ, USD

สำหรับราคาพัดลม และราคาของเครื่องควบแน่นเมื่อใช้ระบบหล่อเย็นด้วยอากาศจะใช้สมการของ Nusiaputra et al. (2014) ดังสมการที่ 3.54 และสมการที่ 3.55

$$C_{\text{fan}} = (1887.5 + 159.95 \cdot D_f^2 + 3.53 \cdot D_f + 281.25 \cdot P_f) N_f \quad (3.43)$$

$$C_{\text{ACC, cond}} = 5.6 A_{\text{acc}} \quad (3.44)$$

เมื่อ  $D_f$  คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของพัดลม, mm  
 $P_f$  คือ ความดันที่พัดลมสร้างขึ้น, kPa  
 $N_f$  คือ ความเร็วรอบของพัดลม, rpm



ราคาของเครื่องสูบน้ำสำหรับระบบหล่อเย็นด้วยน้ำสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.56 (อนุกุล โมงปราณีต, 2562)

$$C_{pcw} = 1.1588\dot{V}_{hf} + 817.71 \quad (3.45)$$

เมื่อ  $C_{pcw}$  คือ ราคาของเครื่องสูบน้ำ, USD  
 $\dot{V}_{cw}$  คือ อัตราการไหลเชิงปริมาตรของน้ำ, Liter/min

สำหรับตัวหอผึ่งเย็นแบบเปียกจะสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.57 - 3.59 (Walraven, 2015)

$$C_{housing} = C_{construct} + C_{packing} \quad (3.46)$$

$$C_{construct} = 332.56A \quad (3.47)$$

$$C_{packing} = 41.57V_{pack} \quad (3.48)$$

เมื่อ  $A$  คือ พื้นที่ในการตั้งหอผึ่งเย็น,  $m^2$   
 $V_{pack}$  คือ ปริมาตรของ packing ภายในหอผึ่งเย็น,  $m^3$

โดยที่ราคาที่ได้จะเป็นสกุลเงิน Euro ซึ่ง ณ วันที่ทำการจำลอง 1 euro = 1.22 usd สมการที่ใช้ในการคำนวณราคาของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Generator) จะเป็นไปดังสมการที่ 3.49 (อนุกุล โมงปราณีต, 2562)

$$C_{gen} = 20.118\dot{W}_{ex} + 127.6 \quad (3.49)$$

เมื่อ  $C_{gen}$  คือ ราคาของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า, USD  
 $\dot{W}_{ex}$  คือ งานที่สามารถผลิตได้จากกังหันแบบไอขยายตัว, kW

สำหรับราคาของถังเก็บสารทำงานที่ใช้สามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้ (อนุกุล โมงปราณีต, 2562)

$$C_{\text{tank}} = 7.8342V_{\text{tank}}^{0.7501} \quad (3.50)$$

$$V_{\text{tank}} = V_{\text{wf, support}} + 100 \quad (3.51)$$

$$V_{\text{wf, support}} = \frac{m_{\text{wf, support}}}{\rho_1} \quad (3.52)$$

$$m_{\text{wf, support}} = 10\dot{m}_{\text{wf}} \quad (3.53)$$

เมื่อ	$C_{\text{tank}}$	คือ ราคาของถังเก็บสารทำงาน, USD
	$V_{\text{tank}}$	คือ ปริมาตรของถังเก็บสารทำงาน, Liter
	$V_{\text{wf, support}}$	คือ ปริมาตรของสารทำงานทั้งหมด, Liter
	$m_{\text{wf, support}}$	คือ มวลของสารทำงานทั้งหมด, kg
	$\rho_1$	คือ ความหนาแน่นของสารทำงานในตำแหน่งที่ 1, kg/Liter
	$\dot{m}_{\text{wf}}$	คือ อัตราการไหลเชิงมวลของสารทำงาน, kg/s

ราคาต่อทั้งหมดที่ใช้ทั้งหมดและราคาอุปกรณ์ทางไฟฟ้าทั้งหมดสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.65 และสมการที่ 3.66 ตามลำดับ (Braumakis and Karellas, 2017)

$$C_{\text{pipe}} = 0.1C_{\text{component}} \quad (3.54)$$

$$C_{\text{elec}} = 0.1C_{\text{component}} \quad (3.55)$$

เมื่อ	$C_{\text{pipe}}$	คือ ราคาท่อ, USD
	$C_{\text{elec}}$	คือ ราคาอุปกรณ์ทางไฟฟ้า, USD
	$C_{\text{component}}$	คือ ราคาอุปกรณ์ต่าง ๆ ภายในโรงไฟฟ้า, USD

โดยราคาของสารทำงานของโรงไฟฟ้าสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.38 (อนุกุลไม่ปรานิต, 2562) และราคาของสารทำงานแต่ละชนิดดังตารางที่ 3.6

$$C_{wf} = C_{wf \text{ per kg}} m_{wf, support} \quad (3.56)$$

เมื่อ	$C_{wf}$	คือ ราคาของสารทำงานแต่ละชนิด, USD
	$C_{wf \text{ per kg}}$	คือ ราคาของสารทำงานต่อ 1 kg, USD/kg
	$m_{wf, support}$	คือ มวลของสารทำงานทั้งหมด, kg

ตารางที่ 3.6 ราคาของสารทำงานแต่ละชนิด

Working fluid	USD/kg
R245fa	55.39
R1233zd	49.79
R1234ze	19.88
Neopentane	1.19
R114	9.94
Perfluoropentane (C5F12)	29.8

Karimi and Mansouri (2018) ได้นำเสนอสำหรับงบประมาณในการสร้างอาคารสำหรับโรงไฟฟ้าและสำนักงาน งบประมาณของสิ่งอำนวยความสะดวก คิดเป็นชนิดละ 5% ของราคาอุปกรณ์ทั้งหมด และงบประมาณในการติดตั้งอุปกรณ์คิดเป็น 10% ของราคาโรงไฟฟ้า ดังสมการที่ 3.57 - 3.59

$$C_{site} = 0.05C_{component} \quad (3.57)$$

$$C_{service} = 0.05C_{component} \quad (3.58)$$

$$C_{set up} = 0.1C_{plant} \quad (3.59)$$

เมื่อ	$C_{site}$	คือ งบประมาณในการสร้างอาคารสำหรับโรงไฟฟ้าและสำนักงาน, USD
	$C_{service}$	คือ งบประมาณของสิ่งอำนวยความสะดวก, USD
	$C_{set up}$	คือ งบประมาณในการติดตั้งอุปกรณ์ภายในโรงไฟฟ้า, USD
	$C_{component}$	คือ ราคาอุปกรณ์ต่าง ๆ ภายในโรงไฟฟ้า, USD

$C_{\text{plant}}$  คือ ราคาของโรงไฟฟ้า, USD

การคำนวณค่าใช้จ่ายในการดำเนินการผลิตไฟฟ้าและปริมาณไฟฟ้าที่ผลิตได้ต่อปี ซึ่งจำผลิตไฟฟ้า 8 ชั่วโมงต่อวัน 365 วันต่อปี จะเป็นไปดังสมการที่ 3.60 - 3.63

$$PEC = C_{\text{O\&M}} + C_{\text{salary per year}} \quad (3.60)$$

$$C_{\text{O\&M}} = 0.05C_{\text{plant}} \quad (3.61)$$

$$C_{\text{salary per year}} = C_{\text{eng}} + C_{\text{tech}} \quad (3.62)$$

$$\dot{W}_{\text{net per year}} = 24 \times 350 \times \dot{W}_{\text{net}} \quad (3.63)$$

เมื่อ  $PEC$  คือ ค่าใช้จ่ายในการดำเนินการผลิตไฟฟ้า, USD

$C_{\text{O\&M}}$  คือ ค่าดำเนินการและซ่อมบำรุง, USD

$C_{\text{salary per year}}$  คือ เงินเดือนพนักงาน, USD

$\dot{W}_{\text{net per year}}$  คือ ปริมาณไฟฟ้าที่ผลิตได้ต่อปี, kW

$C_{\text{plant}}$  คือ ราคาของโรงไฟฟ้า, USD

$C_{\text{eng}}$  คือ อัตราเงินเดือนของวิศวกร, USD

$C_{\text{tech}}$  คือ อัตราเงินเดือนของช่างเทคนิค, USD

$\dot{W}_{\text{net}}$  คือ งานสุทธิของโรงไฟฟ้า, kW

เมื่อพิจารณาค่า LCOE และผลกระทบสิ่งแวดล้อมแล้วจะสามารถเลือกสารทำงาน และชนิดของโรงไฟฟ้าโออาร์ซีได้

### 3.3 การศึกษาผลกระทบจากการเพิ่มอัตราการไหลของก๊าซไอเสีย

เนื่องจากโรงพยาบาลมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี มีการขยายตัวเพิ่มขึ้นทำให้ความต้องการใช้หม้อไอน้ำมากขึ้น จึงทำการหาจุดคุ้มทุนเมื่ออัตราการไหลของก๊าซไอเสียเพิ่มขึ้น

เพื่อให้ได้แนวทางการออกแบบโรงไฟฟ้าไออาร์ซีเพื่อรองรับการขยายตัวของโรงพยาบาล โดยจะคิดค่า LCOE เทียบกับต้นทุนพลังงานทางเลือกเฉลี่ยที่ 5.50 บาท (ภิญโญ มีชำนะ, 2563)

### 3.4 การศึกษาอิทธิพลเมื่อทำการปรับระบบหล่อเย็น

การศึกษาอิทธิพลเมื่อทำการปรับระบบหล่อเย็นเป็นการศึกษาหาอิทธิพลของการควบคุมระบบหล่อเย็นโดยทดลองปรับอัตราการไหลของอากาศและน้ำที่ใช้ในการหล่อเย็น

### 3.5 การหาค่าการควบคุมระบบหล่อเย็น

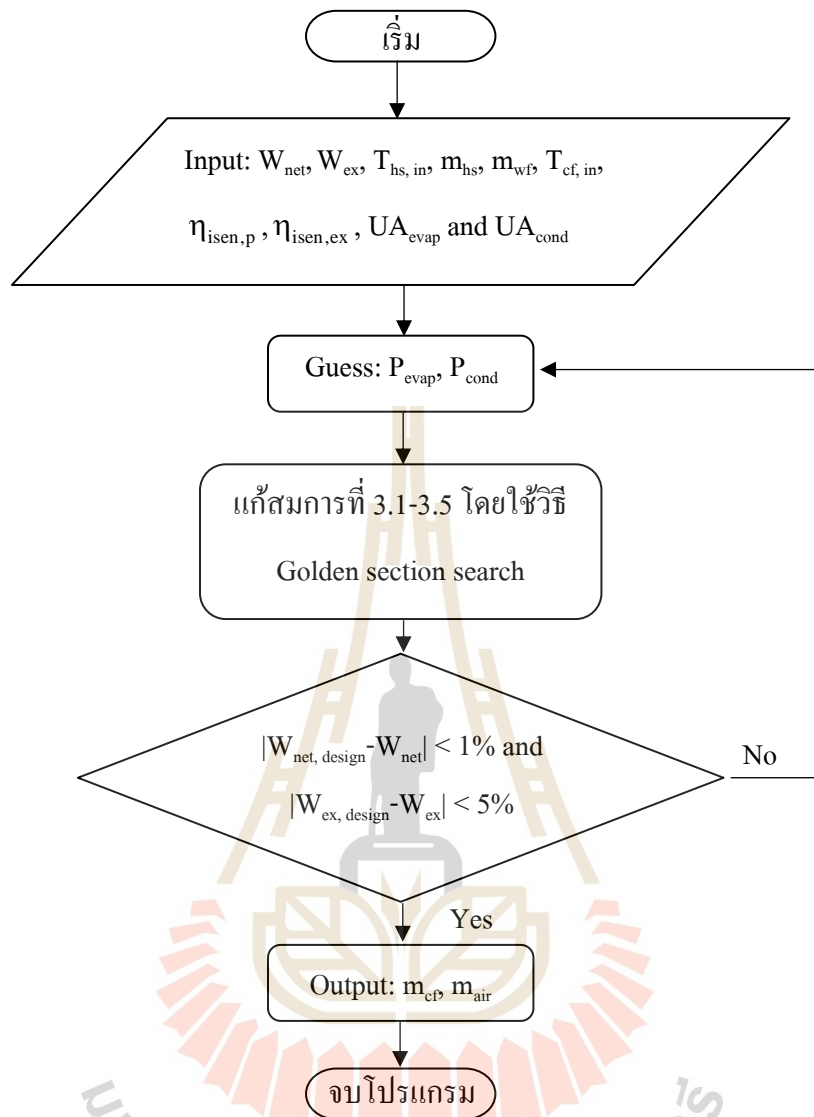
การหาค่าการควบคุมระบบหล่อเย็นเป็นการนำข้อมูลสภาพอากาศของจังหวัดนครราชสีมาในปี พ.ศ. 2560 ในแต่ละช่วงเวลาโดยเลือกเป็นฤดูกาล แต่ละฤดูกาลประกอบไปด้วยช่วงที่มีอุณหภูมิกระเปาะแห้ง (Dry-bulb temperature) สูงที่สุด ปานกลาง ต่ำที่สุด และช่วงที่มีความชื้นสัมพัทธ์ (Relative humidity) สูงที่สุด ปานกลาง ต่ำที่สุด เพื่อนำมาหาค่าการปรับอัตราการไหลของน้ำและอากาศหล่อเย็นที่ทำให้ได้งานสุทธิและงานที่ได้จากกังหันแบบไอขยายตัวเท่ากับระบบโรงไฟฟ้าไออาร์ซีที่ได้ออกแบบไว้ ซึ่งกระบวนการนี้เรียกว่า “การจำลองสถานะนอกเหนือจากสถานะที่ออกแบบ (Off-design condition)”

#### ขั้นตอนการจำลองเชิงตัวเลข

การจำลองระบบในสถานะนอกเหนือจากสถานะที่ออกแบบจะมีการคงค่าขนาดเครื่องระเหย ( $UA_{\text{evap, design}}$ ) ขนาดของเครื่องควบแน่น ( $UA_{\text{cond, design}}$ ) แต่จะมีการเปลี่ยนแปลงสภาพอากาศแวดล้อมดังตารางที่ 3.7 เพื่อหาค่าความดันทั้งที่เครื่องระเหยและเครื่องควบแน่นที่ทำให้ได้งานสุทธิสูงสุด ซึ่งขั้นตอนการจำลองสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.6

ตารางที่ 3.7 สภาพอากาศที่ใช้ในการจำลองในสภาวะนอกเหนือสภาวะที่ออกแบบ

ฤดูร้อน ช่วง ก.พ. - พ.ค.					
Parameter	Date	Time	T <sub>db</sub> (°C)	T <sub>wb</sub> (°C)	RH (%)
T <sub>db</sub> high	13/3/2560	16.00	38.8	26.1	34
T <sub>db</sub>	19/2/2560	13.00	31.0	22.8	47
T <sub>db</sub> low	27/3/2560	10.00	23.1	19.8	72
RH high	18/3/2560	16.00	24.4	24	97
RH	2/4/2560	16.00	30.0	22.6	50
RH low	4/3/2560	16.00	36.8	23.5	29
ฤดูฝน ช่วง ก.ค. - ต.ค.					
T <sub>db</sub> high	21/5/2560	16.00	37.1	27.9	48
T <sub>db</sub>	3/7/2560	10.00	30.6	25.3	63
T <sub>db</sub> low	20/9/2560	10.00	24.2	23.2	91
RH high	4/10/2560	13.00	25.4	25	97
RH	9/8/2560	10.00	30.5	26.6	72
RH low	12/6/2560	13.00	32.4	23.9	47
ฤดูหนาว ช่วง ต.ค. - ก.พ.					
T <sub>db</sub> high	7/2/2560	16.00	36.7	23.6	30
T <sub>db</sub>	8/11/2560	16.00	27.6	23.2	67
T <sub>db</sub> low	19/12/2560	10.00	18.6	12.5	45
RH high	27/12/2560	13.00	20.1	19.8	97
RH	25/10/2560	13.00	29.7	24.5	63
RH low	6/2/2560	16.00	36.0	22.6	28



รูปที่ 3.10 ขั้นตอนการจำลองในสภาวะนอกเหนือจากสภาวะที่ออกแบบ

## บทที่ 4

### ผลการดำเนินการวิจัย

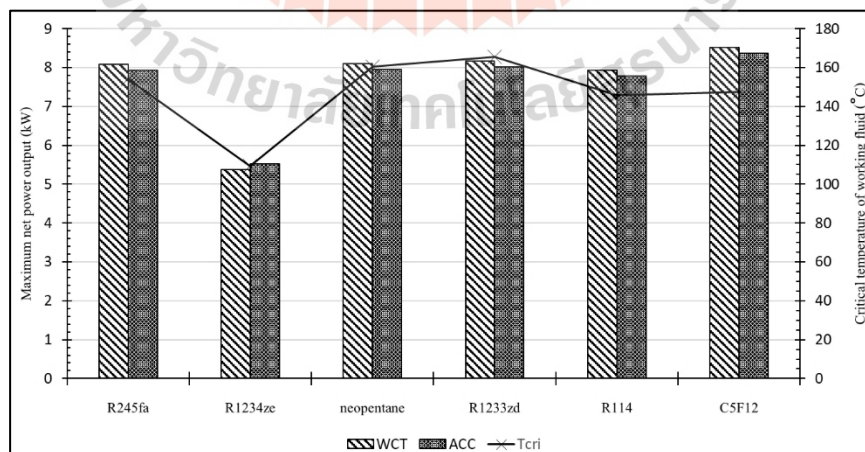
#### 4.1 บทนำ

ในวิทยานิพนธ์นี้จะแบ่งลำดับงานออกเป็น 4 ช่วง คือ 1) การเลือกสารทำงานและเทคโนโลยีของโรงไฟฟ้า 2) การศึกษาผลกระทบจากการเพิ่มอัตราการไหลของก๊าซไอเสีย 3) การศึกษาอิทธิพลเมื่อทำการปรับระบบหล่อเย็น และ 4) การหากลยุทธ์การควบคุมระบบหล่อเย็นเมื่อจำลองร่วมกับสภาพอากาศจริง ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

#### 4.2 การเลือกสารทำงานและชนิดของโรงไฟฟ้า

จากการจำลองโรงไฟฟ้าไออาร์ซีที่ใช้ความร้อนทิ้งจากหม้อไอน้ำที่มีอุณหภูมิ 160 °C เป็นแหล่งความร้อน และใช้เงื่อนไขจากตารางที่ 3.2 ในการจำลองโรงไฟฟ้าแบบพื้นฐานและแบบ TLC ซึ่งทำงานร่วมระบบหล่อเย็นแบบใช้อากาศและน้ำ ซึ่งจะแสดง ค่างานสุทธิสูงสุด ค่าประสิทธิภาพโดยรวม นอกจากนี้ยังแสดงขนาดของอุปกรณ์ต่าง ๆ ภายในโรงไฟฟ้า ได้แก่ เครื่องระเหย เครื่องควบแน่น และกังหันแบบไอขยายตัว ซึ่งจะแสดงผลได้ดังต่อไปนี้

##### 4.2.1 โรงไฟฟ้าไออาร์ซีแบบพื้นฐาน



รูปที่ 4.1 ค่างานสุทธิสูงสุดที่ได้จากโรงไฟฟ้าไออาร์ซีแบบพื้นฐาน เมื่อใช้สารทำงาน และระบบหล่อเย็นที่แตกต่างกัน



เมื่อพิจารณางานสุทธิสูงสุดที่ได้จากโรงไฟฟ้าไออาร์ซีแบบพื้นฐานเทียบกับค่าอุณหภูมิวิกฤตของสารทำงาน โดยอัตราการไหลของสารทำงานมีค่าอยู่ระหว่าง 0.19 - 0.64 kg/s สามารถแสดงผลการจำลองได้ดังรูปที่ 4.1

จากรูปที่ 4.1 เห็นว่าโรงไฟฟ้าไออาร์ซีที่ทำงานร่วมกับระบบหล่อเย็นด้วยน้ำจะได้งานสุทธิที่มากกว่าระบบหล่อเย็นด้วยอากาศ เนื่องจากข้อได้เปรียบของระบบหล่อเย็นด้วยน้ำที่ใช้กลไกการระเหยของน้ำในการระบายความร้อน ยกเว้นเมื่อใช้สารทำงานเป็น R1234ze ที่จะได้งานสุทธิเมื่อทำงานร่วมกับระบบหล่อเย็นด้วยอากาศและงานสุทธิที่ได้จาก R1234ze มีค่าน้อยกว่าสารทำงานอื่น เนื่องจาก R1234ze มีอุณหภูมิวิกฤตที่ต่ำกว่าสารทำงานอื่นมาก ซึ่งเป็นผลที่สอดคล้องกับการศึกษาของ He et al. (2012)

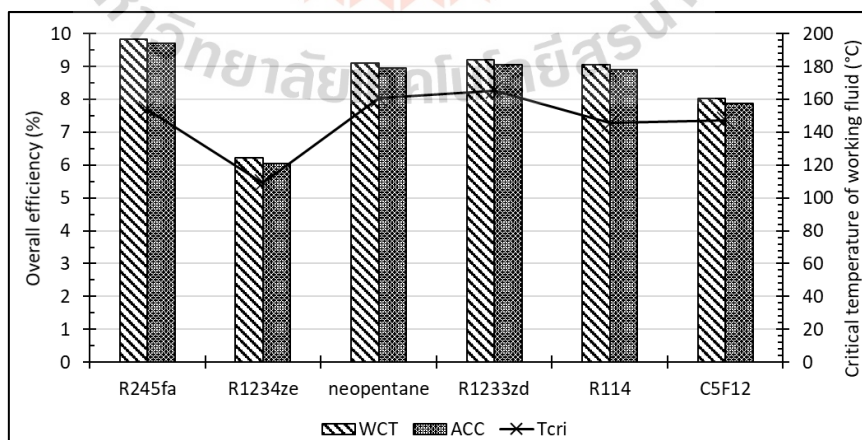
เมื่อโรงไฟฟ้าไออาร์ซีแบบพื้นฐานทำงานร่วมกับระบบหล่อเย็นด้วยน้ำ

- งานสุทธิสูงสุดจะมีค่าอยู่ในช่วงประมาณ 5.4 - 8.5 kW
- สารทำงานที่ให้งานสุทธิสูงสุดมีค่าสูงและต่ำที่สุด คือ สารทำงานชนิด C5F12 (Perfluoro pentane) และ R1234ze ตามลำดับ

เมื่อโรงไฟฟ้าไออาร์ซีแบบพื้นฐานทำงานร่วมกับระบบหล่อเย็นด้วยอากาศ

- งานสุทธิสูงสุดจะมีค่าอยู่ในช่วงประมาณ 5.5 - 8.3 kW
- สารทำงานที่ให้งานสุทธิสูงสุดมีค่าสูงและต่ำที่สุด คือ สารทำงานชนิด C5F12 และ R1234ze ตามลำดับ

ในการพิจารณาค่า Overall efficiency ของโรงไฟฟ้าไออาร์ซีแบบพื้นฐานเทียบกับค่าอุณหภูมิวิกฤตของสารทำงาน โดยสามารถแสดงผลการจำลองดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 ค่า Overall efficiency ของโรงไฟฟ้าไออาร์ซีแบบพื้นฐาน เมื่อใช้สารทำงานและระบบหล่อเย็นที่แตกต่างกัน

จากรูปที่ 4.2 อุณหภูมิวิกฤติของสารทำงานส่งผลต่อค่า Overall efficiency และระบบหล่อเย็นด้วยน้ำจะให้ค่า Overall efficiency ที่สูงกว่าระบบหล่อเย็นด้วยอากาศ เมื่อพิจารณาแยกแต่ละระบบหล่อเย็นพบว่า

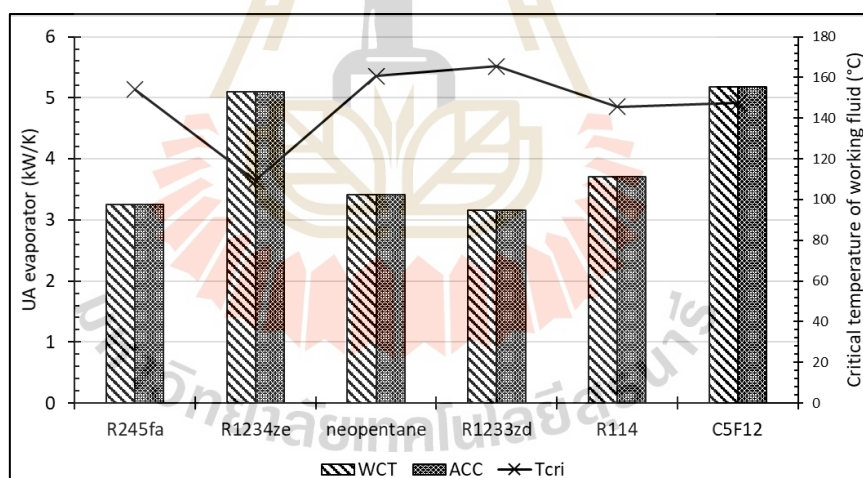
ระบบหล่อเย็นด้วยน้ำ

- ค่า Overall efficiency จะมีค่าอยู่ในช่วงประมาณ 6.2 - 9.8%
- สารทำงานที่ทำให้ค่า Overall efficiency มีค่าสูงและต่ำที่สุด คือ สารทำงานชนิด R245fa และ R1234ze ตามลำดับ

ระบบหล่อเย็นด้วยอากาศ

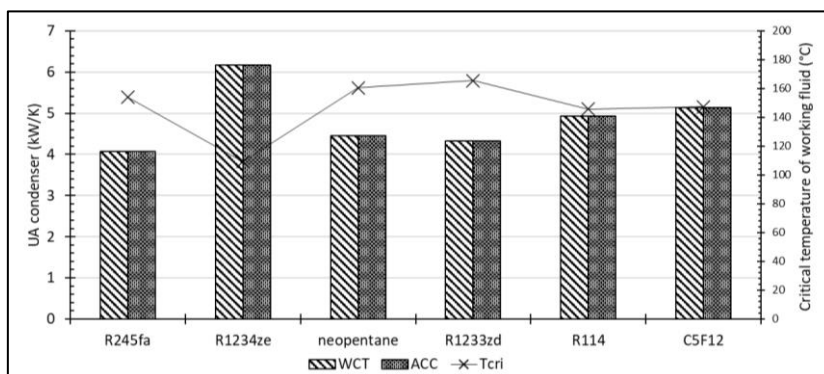
- ค่า Overall efficiency จะมีค่าอยู่ในช่วงประมาณ 6 - 9.7%
- สารทำงานที่ทำให้ Overall efficiency มีค่าสูงและต่ำที่สุด คือ สารทำงานชนิด R245fa และ R1234ze ตามลำดับ

ในการพิจารณาขนาดของเครื่องระเหยและเครื่องควบแน่นในโรงไฟฟ้าโออาร์ซีแบบพื้นฐาน โดยสามารถแสดงผลการจำลองดังรูปที่ 4.3 และรูปที่ 4.4 ตามลำดับ



รูปที่ 4.3 ขนาดของเครื่องระเหยของโรงไฟฟ้าโออาร์ซีแบบพื้นฐาน เมื่อใช้สารทำงานและระบบหล่อเย็นที่แตกต่างกัน

จากรูปที่ 4.3 ซึ่งเป็นการพิจารณาขนาดของเครื่องระเหยจากค่า UA พบว่า ไม่ว่าจะใช้ระบบหล่อเย็นด้วยอากาศหรือน้ำขนาดของเครื่องระเหยไม่แตกต่างกัน โดยขนาดของเครื่องระเหยจะมีค่าอยู่ในช่วงประมาณ 3.1 - 5.2 kW/K และสารทำงานที่ทำให้เครื่องระเหยมีขนาดใหญ่และเล็กที่สุด คือ C5F12 และ R1233zd ตามลำดับ

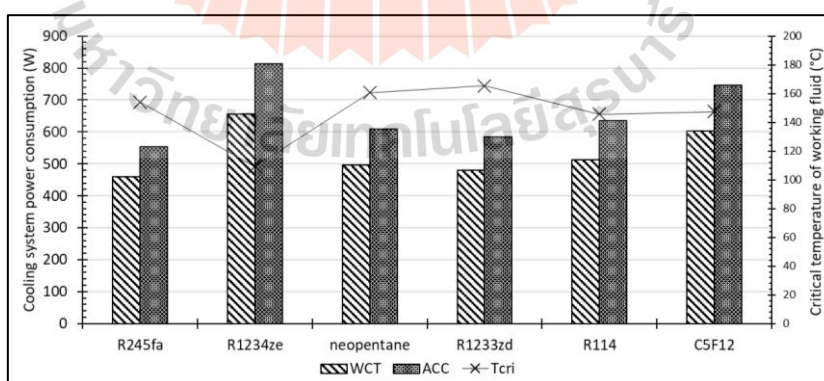


รูปที่ 4.4 ขนาดของเครื่องควบแน่นของโรงไฟฟ้าไออาร์ซีแบบพื้นฐาน เมื่อใช้สารทำงาน และระบบหล่อเย็นที่แตกต่างกัน

จากรูปที่ 4.4 เป็นการพิจารณาขนาดของเครื่องควบแน่น พบว่า การเลือกใช้ระบบหล่อเย็นไม่ส่งผลต่อขนาดของเครื่องระเหย

โดยขนาดของเครื่องควบแน่นจะมีค่าอยู่ในช่วงประมาณ 4 - 6.2 kW/K และสารทำงานที่ทำให้เครื่องควบแน่นมีขนาดใหญ่และเล็กที่สุด คือ สารทำงานชนิด R1234ze และ R245fa ตามลำดับ

เมื่อพิจารณางานที่ต้องจ่ายให้กับระบบหล่อเย็นสำหรับโรงไฟฟ้าไออาร์ซีแบบพื้นฐานจะได้ดังรูปที่ 4.5

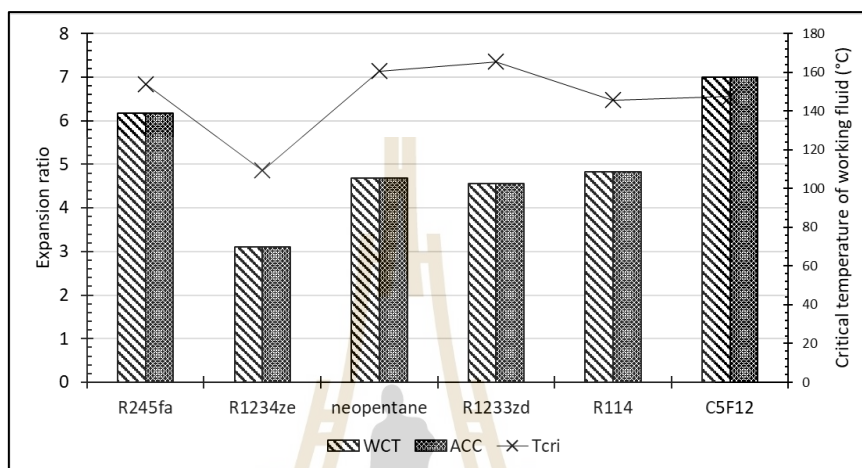


รูปที่ 4.5 งานที่ต้องจ่ายให้กับระบบหล่อเย็นของโรงไฟฟ้าไออาร์ซีแบบพื้นฐาน

จากรูปที่ 4.5 พบว่างานที่ต้องจ่ายให้กับระบบหล่อเย็นด้วยอากาศจะมากกว่าการใช้ระบบหล่อเย็นด้วยน้ำอยู่ในช่วง 93 - 160 W เนื่องจากการใช้ระบบหล่อเย็นด้วยน้ำเป็นการใช้

ข้อได้เปรียบจากการระเหยของน้ำทำให้สามารถทิ้งความร้อนได้มากกว่า ถึงแม้ว่าจะต้องจ่ายงานให้แก่พัดลมและเครื่องสูบน้ำ

ในการพิจารณาขนาดของกังหันแบบไอขยายตัวในโรงไฟฟ้าไออาร์ซีแบบพื้นฐานเทียบกับค่าอุณหภูมิจุดวิกฤตของสารทำงาน จะแสดงผลการจำลองดังรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 อัตราส่วนการขยายตัวภายในกังหันแบบไอขยายตัวของโรงไฟฟ้าไออาร์ซีแบบพื้นฐาน

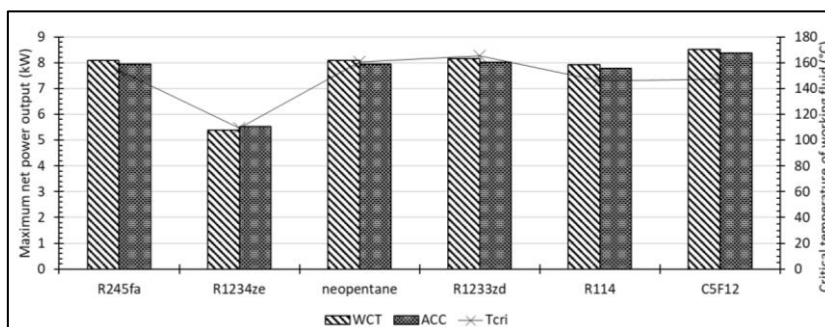
จากรูปที่ 4.6 เป็นการพิจารณาขนาดของกังหันแบบไอขยายตัวจากค่าอัตราส่วนการขยายตัว (Expansion ratio) อุณหภูมิจุดวิกฤตของสารทำงาน ไม่ส่งผลต่อขนาดของกังหันแบบไอขยายตัว โดยขนาดของกังหันแบบไอขยายตัวจะมีค่าอยู่ในช่วงประมาณ 3.1 - 7 และสารทำงานที่ทำให้กังหันแบบไอขยายตัวมีขนาดใหญ่และเล็กที่สุด คือ C5F12 และ R1234ze ตามลำดับ ซึ่งขนาดของกังหันแบบไอขยายตัวเป็นปัจจัยหนึ่งที่ทำให้งบลงทุนสูงขึ้นเนื่องจากเป็นอุปกรณ์หนึ่งที่มีราคาแพง

#### 4.2.2 โรงไฟฟ้าไออาร์ซีแบบ TLC

เมื่อพิจารณางานสุทธิสูงสุดที่ได้จากโรงไฟฟ้าไออาร์ซีแบบ TLC เทียบกับค่าอุณหภูมิจุดวิกฤตของสารทำงาน สามารถแสดงผลการจำลองได้ดังรูปที่ 4.7

จากรูปที่ 4.7 เมื่อพิจารณาที่อุณหภูมิจุดวิกฤตของสารทำงานพบว่า มีผลต่องานสุทธิสูงสุด โดยสารทำงานที่มีอุณหภูมิจุดวิกฤตสูงจะให้งานสุทธิสูงเช่นกัน

อัตราการไหลของสารทำงานภายในโรงไฟฟ้าจะมีค่าอยู่ระหว่าง 0.34 - 0.82 kg/s



รูปที่ 4.7 ค่างานสุทธิสูงสุดที่ได้จากโรงไฟฟ้าไออาร์ซีแบบ TLC เมื่อใช้สารทำงาน และระบบหล่อเย็นที่แตกต่างกัน

เมื่อพิจารณาที่ระบบหล่อเย็น จะเห็นได้ว่าเมื่อใช้ระบบหล่อเย็นด้วยน้ำ ค่างานสุทธิสูงสุดที่จะได้มีค่ามากกว่าเมื่อใช้ระบบหล่อเย็นด้วยอากาศ ยกเว้นการใช้ R1234ze เป็นสารทำงาน เมื่อใช้ระบบหล่อเย็นด้วยน้ำ

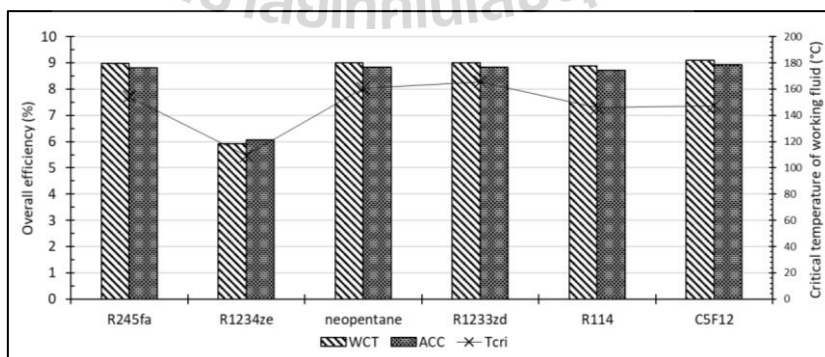
- ค่างานสุทธิสูงสุดจะมีค่าอยู่ในช่วง 5.3 - 8.5 kW

เมื่อใช้ระบบหล่อเย็นด้วยอากาศ

- ค่างานสุทธิสูงสุดจะมีค่าอยู่ในช่วง 5.5 - 8.3 kW

ซึ่งจะเห็นว่างานสุทธิสูงสุดของโรงไฟฟ้าไออาร์ซีแบบ TLC จะมีค่าที่มากกว่าโรงไฟฟ้าไออาร์ซีแบบพื้นฐาน

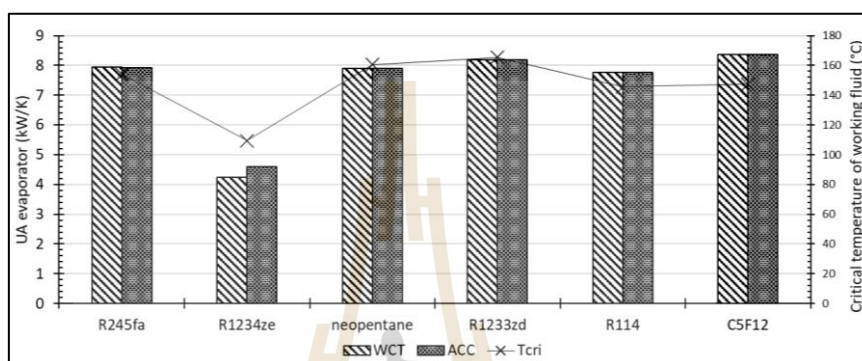
ในการพิจารณาค่า Overall efficiency ของโรงไฟฟ้าไออาร์ซีแบบ TLC เทียบกับค่าอุณหภูมิวิกฤตของสารทำงาน โดยสามารถแสดงผลการจำลองดังรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 ค่า Overall efficiency ของโรงไฟฟ้าไออาร์ซีแบบ TLC เมื่อใช้สารทำงาน และระบบหล่อเย็นที่แตกต่างกัน

จากรูปที่ 4.8 ซึ่งเป็นการพิจารณาค่า Overall efficiency ของโรงไฟฟ้า พบว่ามีแนวโน้มแปรผันตามค่าอุณหภูมิวิกฤติของสารทำงาน โดยสารที่มีอุณหภูมิวิกฤตสูงสุด คือ R2133zd โดยช่วงของค่า Overall efficiency ของ TLC จะมีค่าอยู่ในช่วงประมาณ 5.9 - 9%

ในการพิจารณาขนาดของเครื่องระเหยและเครื่องควบแน่นในโรงไฟฟ้าไออาร์ซีแบบ TLC จะแสดงผลการจำลองดังรูปที่ 4.9 และ 4.10 ตามลำดับ



รูปที่ 4.9 ขนาดของเครื่องระเหยของโรงไฟฟ้าไออาร์ซีแบบ TLC เมื่อใช้สารทำงานและระบบหล่อเย็นที่แตกต่างกัน

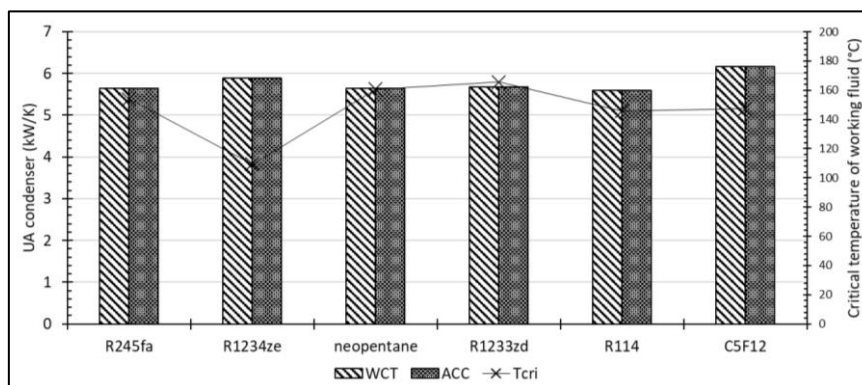
จากรูปที่ 4.9 เป็นการพิจารณาขนาดของเครื่องระเหยจากค่า UA จะพบว่า อุณหภูมิวิกฤติของสารทำงานจะส่งผลต่อขนาดของเครื่องระเหย โดยช่วงขนาดของเครื่องระเหยเมื่อแบ่งด้วยระบบหล่อเย็นพบว่า

เมื่อใช้ระบบหล่อเย็นด้วยน้ำ

- ขนาดของเครื่องระเหยจะมีค่าอยู่ในช่วงประมาณ 4.2 - 8.4 kW/K
- สารทำงานที่ทำให้เครื่องระเหยมีขนาดใหญ่และเล็กที่สุด คือ สารทำงานชนิด C5F12 และ R1234ze ตามลำดับ

เมื่อใช้ระบบหล่อเย็นด้วยอากาศ

- ขนาดของเครื่องระเหยจะมีค่าอยู่ในช่วงประมาณ 4.6 - 8.4 kW/K
- สารทำงานที่ทำให้เครื่องระเหยมีขนาดใหญ่และเล็กที่สุด คือ สารทำงานชนิด C5F12 และ R1234ze ตามลำดับ

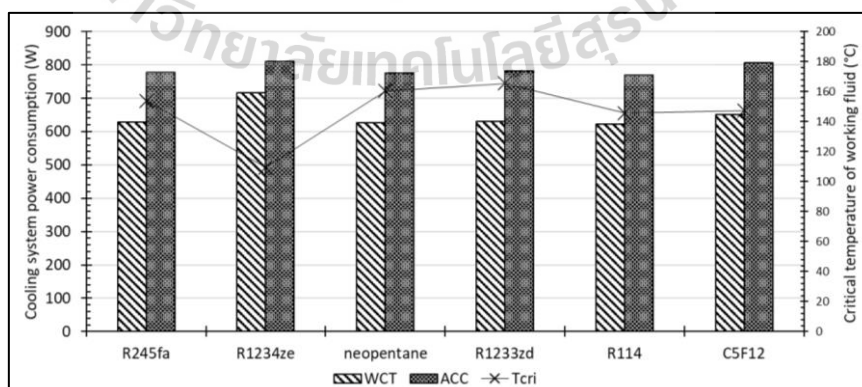


รูปที่ 4.10 ขนาดของเครื่องควบแน่นของโรงไฟฟ้าไออาร์ซีแบบ TLC เมื่อใช้สารทำงาน และระบบหล่อเย็นที่แตกต่างกัน

จากรูปที่ 4.10 เป็นการพิจารณาขนาดของเครื่องควบแน่นจากค่า UA พบว่า อุณหภูมิวิกฤติของสารทำงานจะไม่ส่งผลต่อขนาดของเครื่องควบแน่น โดยช่วงขนาดของเครื่องควบแน่นเมื่อพิจารณาตามระบบหล่อเย็นพบว่าไม่แตกต่างกัน โดย

- ขนาดของเครื่องควบแน่นจะมีค่าอยู่ในช่วงประมาณ 5.6 - 6.2 kW/K
- สารทำงานที่ทำให้เครื่องควบแน่นมีขนาดใหญ่และสุดที่สุด คือ C5F12 และ R114 ตามลำดับ

เมื่อพิจารณางานที่ต้องจ่ายให้กับระบบหล่อเย็นสำหรับโรงไฟฟ้าไออาร์ซีแบบ TLC จะได้ดังรูปที่ 4.11

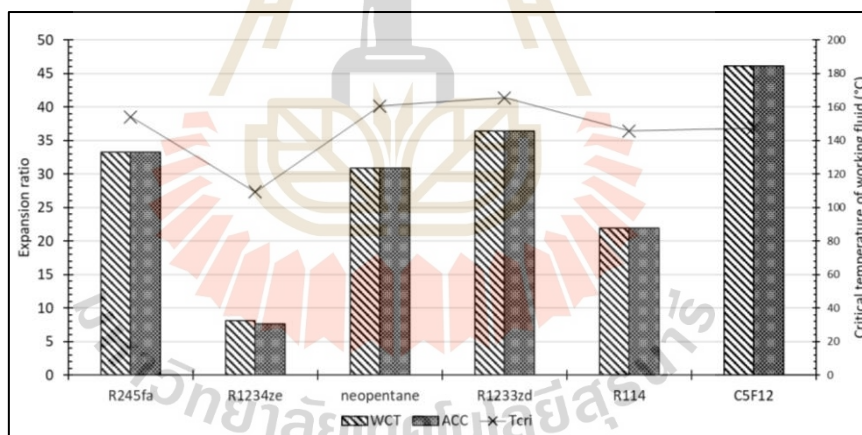


รูปที่ 4.11 งานที่ต้องจ่ายให้กับระบบหล่อเย็นของโรงไฟฟ้าไออาร์ซีแบบ TLC

จากรูปที่ 4.11 พบว่า งานที่ต้องจ่ายให้กับระบบหล่อเย็นด้วยน้ำจะน้อยกว่าการใช้ระบบหล่อเย็นด้วยน้ำอยู่ในช่วง 94 - 156 W เนื่องจากการใช้ระบบหล่อเย็นด้วยน้ำเป็นการใช้ข้อได้เปรียบจากการระเหยของน้ำทำให้สามารถทิ้งความร้อนได้มากส่งผลให้ไม่จำเป็นต้องจ่ายงานให้ระบบหล่อเย็นมาก ถึงแม้ว่าจะต้องจ่ายงานให้แก่พัดลมและเครื่องสูบน้ำ

ในการพิจารณาขนาดของกังหันแบบไอขยายตัวในโรงไฟฟ้าไออาร์ซีแบบ TLC เทียบกับค่าอุณหภูมิวิกฤตของสารทำงาน จะแสดงผลการจำลองดังรูปที่ 4.12

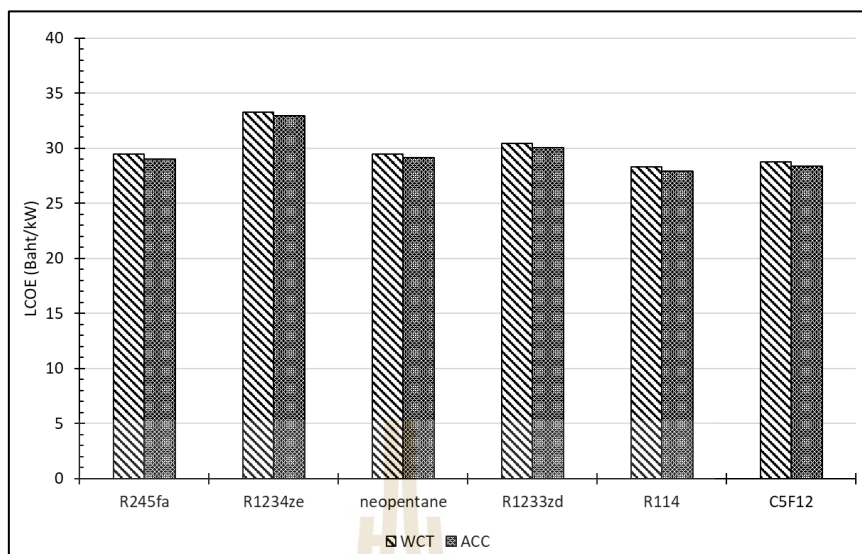
จากรูปที่ 4.12 เป็นการพิจารณาขนาดของกังหันแบบไอขยายตัวจากค่าอัตราส่วนการขยายตัว (Expansion ratio) พบว่า ขนาดของกังหันแบบไอขยายตัวจะแปรผันตามอุณหภูมิวิกฤตของสารทำงานยกเว้นสารทำงานชนิด C5F12 โดยการเลือกใช้ระบบหล่อเย็นไม่ส่งผลต่อขนาดของกังหันแบบไอขยายตัวยกเว้นที่สารทำงานชนิด R1234ze การใช้ระบบหล่อเย็นด้วยน้ำจะส่งผลให้มีขนาดที่ใหญ่กว่าเล็กน้อย และขนาดของกังหันแบบไอขยายตัวจะมีค่าอยู่ในช่วงประมาณ 7.6 - 46 ซึ่งมีขนาดที่ใหญ่กว่าโรงไฟฟ้าไออาร์ซีแบบพื้นฐาน นั่นหมายความว่าต้นทุนในส่วนของกังหันแบบไอขยายตัวจะสูงมากกว่าด้วย



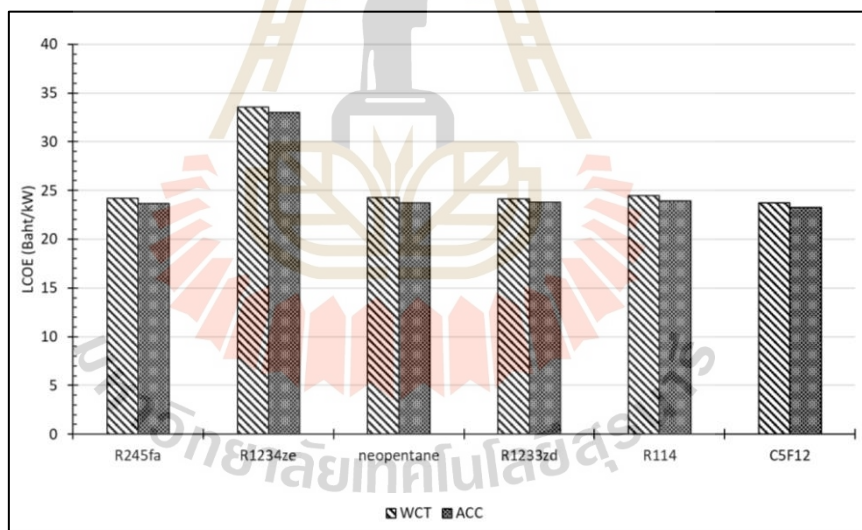
รูปที่ 4.12 อัตราส่วนการขยายตัวภายในกังหันแบบไอขยายตัวของโรงไฟฟ้าไออาร์ซีแบบ TLC เมื่อใช้สารทำงานและระบบหล่อเย็นที่แตกต่างกัน

การพิจารณาด้านเศรษฐศาสตร์เป็นอีกด้านหนึ่งที่สำคัญ เนื่องจากส่งผลต่อการพิจารณาความคุ้มค่าในการลงทุน อย่างไรก็ตามการพิจารณาอุปกรณ์เป็นส่วนๆ ไม่ได้สะท้อนถึงต้นทุนอย่างแท้จริง ดังนั้นจึงต้องพิจารณาด้านต้นทุนต่อหน่วยไฟฟ้าตลอดอายุโครงการหรือ LCOE เมื่อใช้โรงไฟฟ้าไออาร์ซีแบบพื้นฐานและแบบ TLC ที่ทำงานร่วมกับระบบหล่อเย็นด้วยน้ำและอากาศ ตลอดอายุโครงการ 10 ปี จะแสดงในรูปที่ 4.13 และรูปที่ 4.14 ตามลำดับ





รูปที่ 4.13 ต้นทุนต่อหน่วยไฟฟ้าตลอดอายุโครงการของโรงไฟฟ้าไออาร์ซีแบบพื้นฐาน



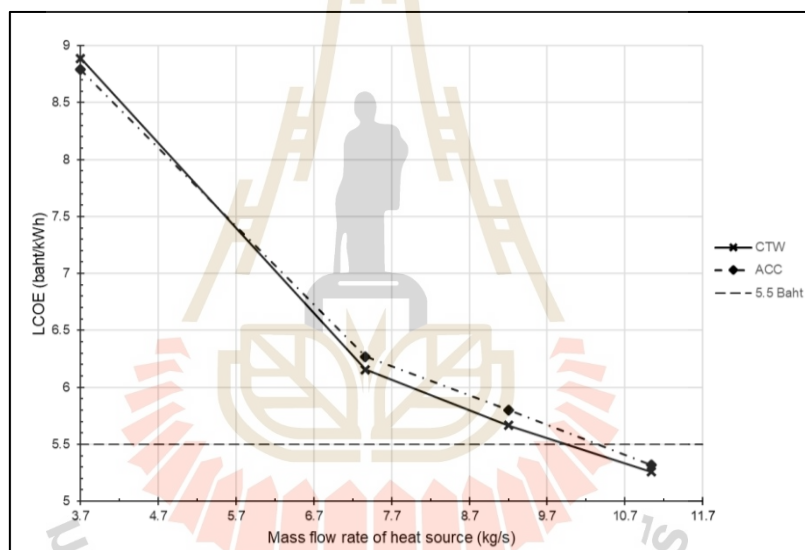
รูปที่ 4.14 ต้นทุนต่อหน่วยไฟฟ้าตลอดอายุโครงการของโรงไฟฟ้าไออาร์ซีแบบ TLC

เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 4.13 และรูปที่ 4.14 พบว่า โรงไฟฟ้าไออาร์ซีแบบพื้นฐาน มีต้นทุนต่อหน่วยไฟฟ้าอยู่ที่ ประมาณ 28 - 33 บาท โรงไฟฟ้าไออาร์ซีแบบ TLC มีต้นทุนต่อหน่วยไฟฟ้าอยู่ที่ 23 - 33 บาท โรงไฟฟ้าไออาร์ซีแบบ TLC มีค่าต้นทุนต่อหน่วยไฟฟ้าที่ถูกกว่า เนื่องจากระบบสามารถผลิตไฟฟ้าได้มากกว่า ถึงแม้ว่าอุปกรณ์ที่ใช้จะต้องมีขนาดใหญ่กว่าและแข็งแรงกว่า โรงไฟฟ้าไออาร์ซีแบบพื้นฐาน ดังนั้นโรงไฟฟ้าไออาร์ซีแบบ TLC จึงมีความน่าสนใจ

จะเห็นได้ว่าสารทำงานทุกชนิดยกเว้น R1234ze มีต้นทุนประมาณ 23 - 24 บาท จึงต้องพิจารณาผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมร่วมด้วย ทำให้วิทยานิพนธ์นี้เลือกใช้โรงไฟฟ้าไออาร์ซีแบบ TLC ที่ใช้สารทำงานเป็นสาร R1233zd

#### 4.3 การศึกษาผลกระทบจากการเพิ่มอัตราการไหลของก๊าซไอเสีย

ภิญโญ มีชำนะ (2563) ได้นำเสนอถึงต้นทุนเฉลี่ยต่อหน่วยไฟฟ้าของโรงไฟฟ้าพลังงานทางเลือก (Levelized cost of electricity, LCOE) ว่ามีต้นทุนอยู่ที่ประมาณ 5.5 บาทต่อหน่วยไฟฟ้า และเนื่องจากโรงพยาบาลมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีมีการขยายตัวอย่างต่อเนื่อง หากจำนวนหม้อไอน้ำเพิ่มขึ้น ค่า LCOE จะแสดงได้ดังรูปที่ 4.15



รูปที่ 4.15 ต้นทุนต่อหน่วยไฟฟ้าของโรงไฟฟ้าไออาร์ซีแบบ TLC เมื่ออัตราการไหลของก๊าซไอเสียเพิ่มขึ้น

จะเห็นได้ว่าเมื่อมีก๊าซไอเสียมีอุณหภูมิ  $160^{\circ}\text{C}$  อัตราการไหลเท่ากับ  $11.04\text{ kg/s}$  หรือเทียบเท่ากับก๊าซไอเสียจากหม้อไอน้ำจำนวน 12 ตัว จะทำให้ค่า LCOE ต่ำกว่า 5.5 บาท โดยที่การใช้ระบบหล่อเย็นด้วยน้ำจะมีค่า LCOE อยู่ที่ 5.26 บาท และเมื่อใช้ระบบหล่อเย็นด้วยอากาศจะอยู่ที่ 5.32 บาท และหากมีการใช้ inverter ค่า LCOE จะอยู่ที่ 5.29 บาท และ 5.34 บาท ตามลำดับ

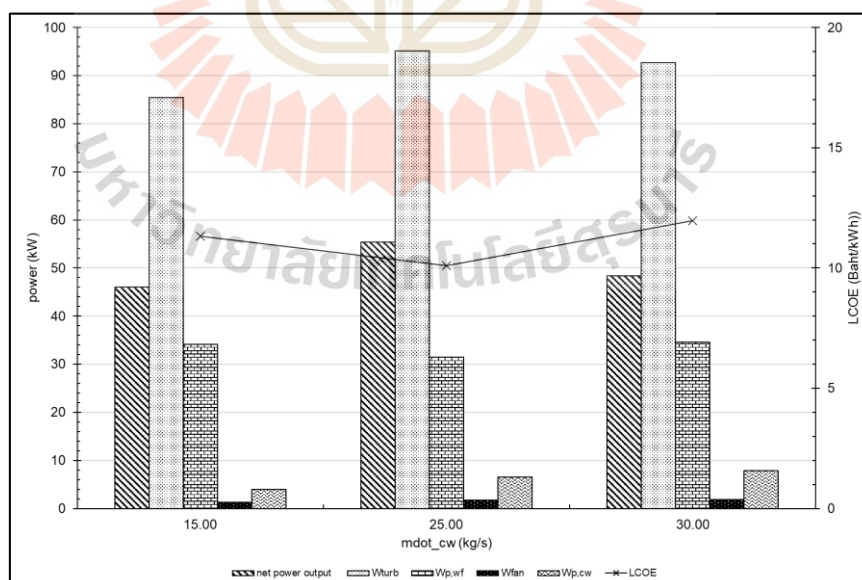
สำหรับเงินลงทุนที่ต้องใช้ในการลงทุน ปริมาณไฟฟ้าที่ผลิตได้ และปริมาณน้ำที่ระเหยจะแสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ข้อมูลประกอบโรงไฟฟ้าไออาร์ซีแบบ TLC เมื่ออัตราการไหลของก๊าซไอเสียเพิ่มขึ้น

จำนวนหม้อไอน้ำ	LCOE (Baht/kWhr)		ปริมาณไฟฟ้าต่อปี (MWhr)		Cooling unit		Makeup water (ลบ. เมตร/ปี)	
	ACC	CTW	ACC	CTW	ACC	CTW	ACC	CTW
1	24.20	24.05	23.39	23.80	1	1	-	317
4	8.79	8.89	85.48	95.05	2	4	-	1,278
8	6.27	6.16	170.99	190.45	4	7	-	2,535
10	5.80	5.66	213.82	237.96	5	9	-	3,175
12	5.32	5.26	280.58	285.52	6	10	-	3,813

#### 4.4 การศึกษาอิทธิพลเมื่อทำการปรับระบบหล่อเย็น

จากลำดับงานช่วงที่ 2 จึงได้เลือกโรงไฟฟ้าไออาร์ซีแบบ TLC ที่ใช้สารทำงานชนิด R123zd และระบบหล่อเย็นด้วยน้ำ จากนั้นเพื่อศึกษาผลกระทบจากการควบคุมระบบหล่อเย็นที่มีต่อค่า LCOE จึงได้ทดลองทำการปรับอัตราการไหลของน้ำหล่อเย็น พบว่ามีจุดที่ทำให้เกิดค่า LCOE ที่ต่ำดังรูปที่ 4.16



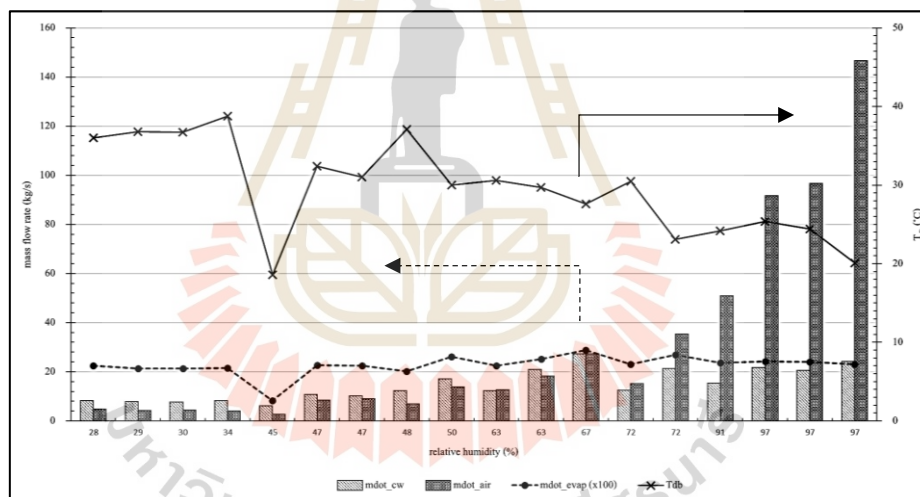
รูปที่ 4.16 ผลกระทบจากการปรับอัตราการไหลของน้ำหล่อเย็นที่ส่งผลต่อค่า LCOE ของโรงไฟฟ้าไออาร์ซีแบบ TLC

จากรูปที่ 4.16 จะเห็นได้ว่าเมื่อระบบมีงานสุทธิสูงที่สุดจะส่งผลให้มีค่า LCOE ที่ต่ำ เนื่องจากว่าการเร่งระบบหล่อเย็นส่งผลให้ความดันในเครื่องควบแน่นลดลง จึงทำให้งานที่ได้จากกังหันแบบไอขยายตัวเพิ่มขึ้นด้วย แต่จะทำให้งานที่ต้องใช้ที่เครื่องสูบลมและระบบหล่อเย็นเพิ่มขึ้นด้วย

#### 4.5 การหากลยุทธ์การควบคุมระบบหล่อเย็น

ในวิทยานิพนธ์นี้กลยุทธ์การควบคุมระบบหล่อเย็นจะเป็นการปรับอัตราการไหลของน้ำและอากาศของระบบหล่อเย็นด้วยน้ำโดยจำลองในสภาวะนอกเหนือจากสภาวะที่ออกแบบ

เมื่อจำลองสภาวะนอกเหนือจากสภาวะที่ออกแบบโดยมีระบบจะพยายามควบคุมให้งานสุทธิและงานที่ได้จากกังหันไอแบบขยายตัวใกล้เคียงกับสภาวะที่ออกแบบจะได้กลยุทธ์การควบคุมระบบหล่อเย็น ดังรูปที่ 4.17 และพลังงานที่ต้องใช้สำหรับเครื่องสูบลมและพัดลม ดังรูปที่ 4.18



รูปที่ 4.17 การควบคุมอัตราการไหลของน้ำหล่อเย็นและอากาศเมื่อเทียบกับความชื้นสัมพัทธ์

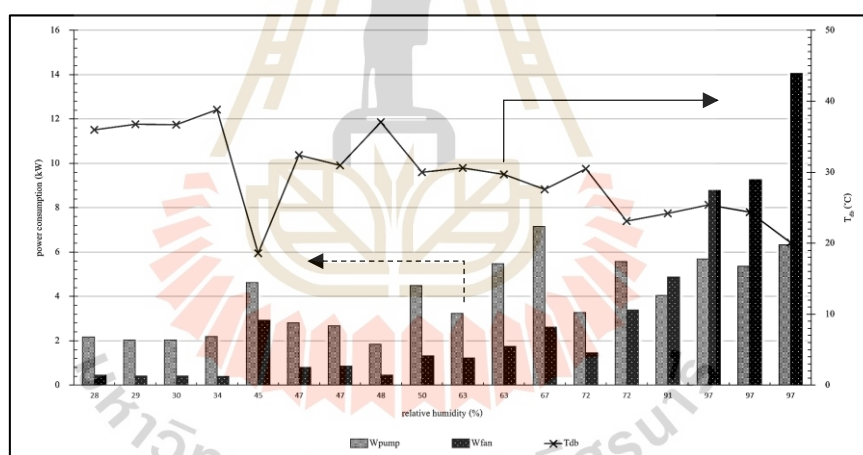
จากรูปที่ 4.17 จะสามารถแบ่งได้ออกเป็น 2 ช่วง คือ

1. ในช่วงที่ความชื้นต่ำกว่า 67% อัตราการไหลของน้ำจะสูงกว่าอัตราการไหลของอากาศ ถึงแม้ว่าอัตราการไหลของอากาศจะต่ำ แต่ความชื้นในอากาศต่ำทำให้น้ำก็ยังสามารถระเหยเข้าสู่อากาศได้ดี พัดลมจึงไม่จำเป็นเร่งอัตราการไหลของอากาศเพื่อให้มีการระบายความร้อนด้วยกลไกความร้อนสัมผัสมากกว่า และเมื่ออุณหภูมิกระเปาะแห้งต่ำจะส่งผลให้ภาระการทำงานของระบบหล่อเย็นด้วยน้ำลดลงด้วย เนื่องจากสามารถระบายความร้อนด้วยกลไกความร้อนสัมผัสได้มาก

2. ช่วงที่ความชื้นมากกว่า 67% พบว่า การระบายความร้อนด้วยรูปแบบของความชื้นแฝง จะเป็นไปได้ยาก ผลกระทบเนื่องจากความชื้นสัมพัทธ์มีผลมากกว่าผลกระทบจากอุณหภูมิ กระเปาะแห้งเนื่องจากความชื้นในอากาศที่สูงขึ้นจึงต้องเร่งอัตราการไหลของอากาศ เพื่อให้สามารถระบายความร้อนในรูปของความชื้นสัมพัทธ์มากขึ้นเพื่อทดแทน

สำหรับอัตราการระเหยของน้ำจะสังเกตเห็นได้ว่าในช่วงที่ความชื้นสัมพัทธ์มากกว่า อัตราการระเหยของไอน้ำจะเพิ่มขึ้นด้วย เนื่องจากการเพิ่มอัตราการไหลของอากาศ เพื่อเพิ่มความสามารถในการระบายความร้อนด้วยกลไกความร้อนสัมผัสจะส่งผลให้น้ำความดันภายในหอผึ่งเย็นลดลง ทำให้น้ำระเหยตัวมากขึ้น

กล่าวได้ว่าเมื่อช่วงที่มีความชื้นสัมพัทธ์ต่ำอัตราการไหลของอากาศ อาจจะมีการเพิ่มขึ้นหรือลดลงได้ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิกระเปาะแห้ง แต่เมื่อความชื้นสัมพัทธ์สูงควรเร่งอัตราการไหลของน้ำและอากาศให้มากที่สุดเท่าที่ทำได้เพื่อระบายความร้อน ไม่ว่าอุณหภูมิกระเปาะแห้งจะสูงหรือต่ำ



รูปที่ 4.18 พลังงานที่ต้องใช้สำหรับเครื่องสูบลมและพัดลมเมื่อเทียบกับความชื้นสัมพัทธ์

จากรูปที่ 4.18 ช่วงที่ความชื้นสัมพัทธ์ต่ำกว่า 91% พลังงานที่ต้องจ่ายให้พัดลมจะน้อยกว่าเครื่องสูบลม แต่เมื่อช่วงที่ความชื้นสัมพัทธ์มากกว่า 91% พลังงานที่ต้องจ่ายให้พัดลมจะสูงขึ้นมากกว่าเครื่องสูบลม เนื่องจากระบบหล่อเย็นด้วยน้ำ เมื่อความชื้นสัมพัทธ์สูงขึ้น ความสามารถในการระเหยของน้ำจะน้อยลงทำให้พัดลมต้องทำงานมากขึ้นเพื่อให้อากาศไหลผ่านและรับความร้อนในรูปของความชื้นสัมผัส

## บทที่ 5

### บทสรุปและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

ในวิทยานิพนธ์นี้เป็นการศึกษาความเป็นไปได้ที่จะนำเอาความร้อนทิ้งจากหม้อไอน้ำโรงพยาบาลเทคโนโลยีสุรนารีมาใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยโรงไฟฟ้าไออาร์ซีและหากลยทุทธ์ในการควบคุมระบบหล่อเย็น ด้วยวิธีจำลองเชิงตัวเลขและประเมินทางด้านเศรษฐศาสตร์ของระบบผลิตกระแสไฟฟ้าไออาร์ซี เพื่อเป็นทางเลือกสำหรับการใช้ความร้อนทิ้งจากหม้อไอน้ำ

จากการออกแบบโรงไฟฟ้าไออาร์ซีแบบพื้นฐานและแบบ TLC ที่ใช้ระบบระบายความร้อนด้วยน้ำและอากาศ เมื่อใช้ก๊าซไอเสียจากหม้อไอน้ำที่มีอุณหภูมิ 160 °C เป็นแหล่งความร้อน โดยใช้สารทำงานที่มีอุณหภูมิวิกฤตใกล้เคียงกับอุณหภูมิของแหล่งความร้อนด้วยวิธีการจำลองเชิงตัวเลขโดยใช้โปรแกรม MATLAB ร่วมกับ NIST REFPROP และวิธี Golden section ระบบสามารถทำงานได้ในสภาวะที่ออกแบบและสภาวะนอกเหนือจากสภาวะที่ออกแบบ ซึ่งสามารถสรุปผลการจำลองได้ดังนี้

1. สำหรับโรงไฟฟ้าไออาร์ซีแบบพื้นฐานเมื่อใช้ความร้อนทิ้งจากหม้อไอน้ำจำนวน 1 ตัว พบว่าอุณหภูมิวิกฤตของสารทำงานส่งผลต่องานสุทธิสูงสุด โดยที่งานสุทธิสูงสุดจะอยู่ในช่วง 5.4 - 8.3 kW โดยการให้ระบบหล่อเย็นด้วยน้ำจะได้งานสุทธิสูงสุดมากกว่าการใช้อากาศ สารที่ให้งานสุทธิมากที่สุด คือ C5F12 ซึ่งการใช้ระบบหล่อเย็นด้วยน้ำจะส่งผลให้มีค่า Overall efficiency สูงกว่าการใช้อากาศ ซึ่งมีค่าในช่วง 6.2 - 9.8% สารที่ให้ค่า Overall efficiency สูงที่สุด คือ R245fa

2. สำหรับโรงไฟฟ้าไออาร์ซีแบบ TLC ใช้ความร้อนทิ้งจากหม้อไอน้ำจำนวน 1 ตัว พบว่าอุณหภูมิวิกฤตของสารทำงานส่งผลต่องานสุทธิสูงสุดเช่นกัน โดยที่งานสุทธิสูงสุดจะอยู่ในช่วง 5.3 - 8.5 kW โดยการให้ระบบหล่อเย็นด้วยน้ำจะได้งานสุทธิสูงสุดมากกว่าเช่นเดียวกันกับโรงไฟฟ้าไออาร์ซีแบบพื้นฐาน สารที่ให้งานสุทธิมากที่สุด คือ C5F12 ซึ่งการใช้ระบบหล่อเย็นด้วยน้ำจะส่งผลให้มีค่า Overall efficiency สูงกว่าการใช้อากาศ ซึ่งมีค่าในช่วง 5.9 - 9% สารที่ให้ค่า Overall efficiency สูงที่สุด คือ C5F12

3. เมื่อพิจารณาถึงต้นทุนเฉลี่ยตลอดอายุโครงการ (Levelized cost of electricity, LCOE) และเหตุผลทางด้านสิ่งแวดล้อมจะได้ว่าโรงไฟฟ้าไออาร์ซีแบบ TLC จะได้งานสุทธิที่มากกว่าแบบพื้นฐาน และการเลือกใช้สารทำงานเป็น R1233zd เป็นตัวเลือกที่น่าสนใจไม่ว่าจะใช้ร่วมกับ

## ระบบด้วยน้ำหรืออากาศ

4. จากการศึกษาหาอัตราการไหลของก๊าซไอเสียที่จะทำให้ค่า LCOE ต่ำกว่า 5.5 บาท พบว่า เมื่อมีอัตราการไหลเท่ากับ 11.04 kg/s หรือเทียบเท่ากับไอน้ำมีจำนวน 12 ตัว จะสามารถทำให้ค่า LCOE อยู่ในช่วง 5.26 - 5.32 บาท เมื่อใช้ระบบหล่อเย็นด้วยน้ำและอากาศ ตามลำดับ และยังพบอีกว่าเมื่อจำนวนหม้อไอน้ำเพิ่มมากขึ้นการใช้ระบบหล่อเย็นด้วยน้ำจะมีค่า LCOE ที่ต่ำกว่าการใช้ระบบระบายความร้อนด้วยอากาศ

5. จากการศึกษาผลกระทบจากการควบคุมระบบหล่อเย็นด้วยน้ำ เมื่อระบบโรงไฟฟ้า โออาร์ซีแบบ TLC ใช้งานสุทธิสูงสุด จะส่งผลให้ค่า LCOE ต่ำที่สุดด้วย

6. จากการศึกษาสภาวะอากาศที่เปลี่ยนแปลงไปพบว่า อุณหภูมิกระเปาะแห้งและความชื้นสัมพัทธ์ส่งผลต่อกลยุทธ์ในการควบคุมระบบหล่อเย็น แต่เมื่อความชื้นสัมพัทธ์สูง อุณหภูมิกระเปาะแห้งจะส่งผลกระทบน้อยลง จำเป็นต้องเร่งอัตราการการไหลของน้ำและอากาศเพิ่มขึ้นเพื่อให้สามารถระบายความร้อนได้มากขึ้น แต่ถ้าความชื้นสัมพัทธ์ต่ำอัตราการไหลของน้ำหล่อเย็นและอากาศไม่จำเป็นต้องสูงเพราะน้ำสามารถระเหยสู่อากาศได้ดี

7. เมื่อความชื้นสัมพัทธ์มากกว่า 91% ระบบหล่อเย็นด้วยน้ำจะต้องจ่ายพลังงานให้พัดลมสูงมากกว่าเครื่องสูบลม เพื่อเพิ่มอัตราการไหลของอากาศให้มากขึ้น ส่งผลให้สามารถระบายความร้อนในรูปของความร้อนสัมผัสได้มากขึ้น

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

1. วิทยานิพนธ์นี้เลือกใช้อุณหภูมิและอัตราการไหลของหม้อไอน้ำที่เกิดขึ้นจริง จึงทำให้สามารถนำผลการจำลองนี้ไปใช้เป็นแนวทางหากมีการเพิ่มจำนวนหม้อไอน้ำได้
2. ในวิทยานิพนธ์นี้เลือกใช้สภาพอากาศที่เกิดขึ้นจริง จึงทำให้สามารถนำไปใช้เป็นแนวทางในการควบคุมระบบหล่อเย็นด้วยน้ำได้

## รายการอ้างอิง

- การประปาส่วนภูมิภาค. (2562). รายงานข้อมูลคุณภาพน้ำและระดับน้ำ. Retrieved 2562, สืบค้นจาก <http://tele-wrd.pwa.co.th>
- การไฟฟ้าฝ่ายผลิต. (2559). สัดส่วนการใช้เชื้อเพลิงผลิตพลังงานไฟฟ้า. Retrieved 2559, สืบค้นจาก <http://egat.co.th>
- กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. (2553). การนำความร้อนทิ้งกลับมาใช้ประโยชน์. Retrieved 2559, สืบค้นจาก <http://dede.co.th>
- กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. (2563). ตำราฝึกอบรมผู้รับผิดชอบด้านพลังงาน (ผชพ) ด้านความร้อน. Retrieved 2563, สืบค้นจาก <http://dede.co.th>
- กรมอุตุนิยมวิทยา. (2558). ฤดูกาลของประเทศไทย. Retrieved 2558, สืบค้นจาก <http://www.tmd.go.th/>
- สำนักนโยบายและแผนพลังงาน. (2560). สัดส่วนการใช้ไฟฟ้า. Retrieved 2560, สืบค้นจาก <http://www.eppo.go.th/>
- สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน. (2563). Energy statistics of Thailand 2020. Retrieved 2564, สืบค้นจาก <http://www.eppo.go.th/>
- การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย. (2562). เอกสารเผยแพร่ความรู้เทคโนโลยีประหยัดพลังงาน. Retrieved 2562, สืบค้นจาก <http://www.egat.go.th>
- บริษัท สยามอีสต์ โซลูชั่น จำกัด (มหาชน). (2019). CR บั๊มน้ำหอยโข่งหลายใบพัดแนวตั้งชนิด inline. Retrieved 5 November 2019, สืบค้นจาก <http://www.siameastsolutions.com>
- ธนิศวรรค์ ดีทายาท และ ทนงเกียรติ เกียรติศิริโรจน์ (2014). การวิเคราะห์ต้นทุนการผลิตไฟฟ้าจาก โรงไฟฟ้าวัฏจักรแรงดันอินทรีย์ขนาดโมดูลาร์ที่ใช้ชีวมวลเป็นเชื้อเพลิง. วารสาร วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, ปีที่ 21, ฉบับที่ 3, หน้า 84-93
- กัญญา มีชานะ. (2563). ค่าไฟฟ้าที่ประชาชนจ่าย กับความท้าทายการผลิตไฟฟ้า. Retrieved 5 ม.ค. 2564, สืบค้นจาก <http://thaipublica.org>
- องค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก (องค์การมหาชน). (2554). ค่าศักยภาพในการทำให้เกิดภาวะโลกร้อน (Global Warming Potential: GWP). Retrieved 2560, สืบค้นจาก <http://www.tgo.or.th>



- อนุกุล โมงปราณีต. (2562). การออกแบบโรงไฟฟ้า ORC โดยใช้แหล่งความร้อนใต้พิภพเป็นแหล่งพลังงานสำหรับประเทศไทย. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- Ajimotokan, H. A., Sher, I., Biliyok, C. and Yeung, H. (2014). Trilateral Flash Cycle for Recovery of Power from a Finite Low-Grade Heat Source. **Computer Aided Chemical Engineering 24th European Symposium on Computer Aided Process Engineering**, 1831-1836.
- Astolfi, M. (2015). Techno-economic Optimization of Low Temperature CSP Systems Based on ORC with Screw Expanders. **Energy Procedia**, 69, 1100-1112.
- Bianchi, G., McGinty, R., Oliver, D., Brightman, D., Zaher, O., Tassou, S. A., Miller, J. and Jouhara, H. (2017). Development and analysis of a packaged Trilateral Flash Cycle system for low grade heat to power conversion applications. **Thermal Science and Engineering Progress**, Vol. 4, 113-121.
- Braimakis, K. and Karellas, S. (2017). Integrated thermo economic optimization of standard and regenerative ORC for different heat source types and capacities. **Energy**, 121, 570–598
- Cengel, Y. A. and Boles, M. A. (2015). **Thermodynamics: An Engineering approach (8th ed.)**. McGraw-Hill Education.
- Conradie, A. E. and Kröger, D. G. (1996). Performance evaluation of dry-cooling systems for power plant applications. **Applied Thermal Engineering**, 16, Issue 3, 219-232.
- Costelloe, B. and Finn, D.P. (2009) Heat transfer correlations for low approach evaporative cooling systems in buildings. **Applied Thermal Engineering**, 29, 105-115.
- Fischer, J. (2011). Comparison of trilateral cycles and organic Rankine cycles. **Energy**, 36(10), 6208-6219.
- He, C., Liu, C., Gao, H., Xie, H., Li, Y., Wu, S., & Xu, J. (2012). The optimal evaporation temperature and working fluids for subcritical organic Rankine cycle. **Energy**, 38 (1), 136-143.
- Hung, T.C., Shai, T.Y. and Wang, S.K., (1997), A review of organic rankine cycles (ORCs) for the recovery of low-grade waste heat, **Energy**, 22, (7), 661-667
- Ingadóttir, S.B. (2014), **Analysis of Heat Transfer in Air Cooled Condensers**. Master degree thesis, Faculty of Industrial Engineering Mechanical Engineering and Computer science, School of Engineering and Natural sciences, University of Iceland.

- Karimi, S., & Mansouri, S. (2018). A comparative profitability study of geothermal electricity production in developed and developing countries: Exergoeconomic analysis and optimization of different ORC configurations. **Renewable energy**, 115, 600-619.
- Lemouari, M, and Boumaza, M. (2010). Experimental Investigation of the Performance Characteristics of a Counter Flow Wet Cooling Tower. **International Journal of Thermal Sciences**. 49 (10), 2049-2056.
- Li, J., Liu, Q., Ge, Z., Duan, Y., & Yang, Z. (2017). Thermodynamic performance analyses and optimization of subcritical and trans critical organic Rankine cycles using R1234ze (E) for 100-200 C heat sources. **Energy Conversion and Management**, 149, 140-154.
- Li, T., Zhu, J., & Zhang, W. (2012). Cascade utilization of low temperature geothermal water in oilfield combined power generation, gathering heat tracing and oil recovery. **Applied Thermal Engineering**, 40, 27-35.
- Lin, J., Mahvi, J.A., Kunke, S.T., Garimella, S. (2020). Improving air-side heat transfer performance in air-cooled power plant condensers. **Applied Thermal Engineering**, 170, 114913.
- Moser, M., Trieb, F., Fichter, T., Kern, J., Maier, H., Schicktanz, P. (2014). Techno-economic Analysis of Enhanced Dry Cooling for CSP. **Energy Procedia**, 49, 1177-1186.
- Nasrabadi, M., Finn, D.P. (2014). Mathematical modeling of a low temperature low approach direct cooling tower for the provision of high temperature chilled water for conditioning of building spaces. **Applied Thermal Engineering**, 64, 273-282.
- Nusiaputra, Y.Y., Wiemer, H.J., Kuhn, D. (2014). Thermal-Economic Modularization of Small Organic Rankine Cycle Power Plants for Mid-Enthalpy Geothermal Fields. **Energies**, 7, 4221-4240.
- Papaefthimiou, V.D., Rogdakis, E.D., Koronaki, I.P., Zannis, T.C. (2012), Thermodynamic study of the effects of ambient air conditions on the thermal performance characteristics of a closed wet cooling tower. **Applied Thermal Engineering**, 33-34, 199-207.
- Quoilin, S., Van Den Broek, M., Declaye, S., Dewallef, P., Lemort, V. (2013). Techno-economic survey of Organic Rankine Cycle (ORC) systems. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 22, 168-186.
- Saleh, B., Koglbauer, G., Wendland, M., Fischer, J. (2007). Working fluids for low-temperature organic Rankine cycles. **Energy**, 32 (7), 1210-1221.

- Shahali, P., Rahmati, M., Alavi, S.R., Sedaghat, A. (2016). Experimental study on improving operating conditions of wet cooling towers using various rib numbers of packing. **International Journal of Refrigeration**, 65 (C), 80-91.
- Shao, L., Ma, X., Wei, X., Hou, Z., Meng, X. (2017). Design and experimental study of a small-sized organic Rankine cycle system under various cooling conditions. **Energy**, 130, 236-245.
- Simpson, W.M., Sherwood T.K. (1946). Performance of small mechanical draft cooling towers, **Refrigeration Engineering**, 52, 535-543, 574-576.
- Smrekar, J, J Oman, and B.Sirok. (2006). Improving the Efficiency of Natural Draft Cooling Towers. **Energy Conversion and Management**, 47, 1086-1100.
- Tchanche, Bertrand F. & Lambrinos, Gr. & Frangoudakis, A. & Papadakis, G. (2011). Low-Grade Heat Conversion into Power Using Organic Rankine Cycles- A Review of Various Applications. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 15(8), 3963-3979.
- Walraven, D., Laenen, B., D'haeseleer, D. (2015). Minimizing the levelized cost of electricity production from low-temperature geothermal heat sources with ORCs: Water or air cooled, **Applied Energy**, 142, 144-153.
- Wiedemann, J., & Span, R. (2016). Simulation of an Exhaust Heat Driven Rankine-cycle for Heavy-duty Diesel Engines. **Energy Procedia**, 88, 531-536.
- Zhang, H., Xi, H., He, Y., Zhang, Y., Ning, B. (2019). Experimental study of the organic rankine cycle under different heat and cooling conditions, **Energy**, 180, 678-688.
- Zhou, X., Cui, P., Wang, X., & He, L. (2017). Thermal Investigations into an Organic Rankine Cycle (ORC) System Utilizing Low Grade Waste Heat Sources. **Procedia Engineering**, 205, 4142-4148.

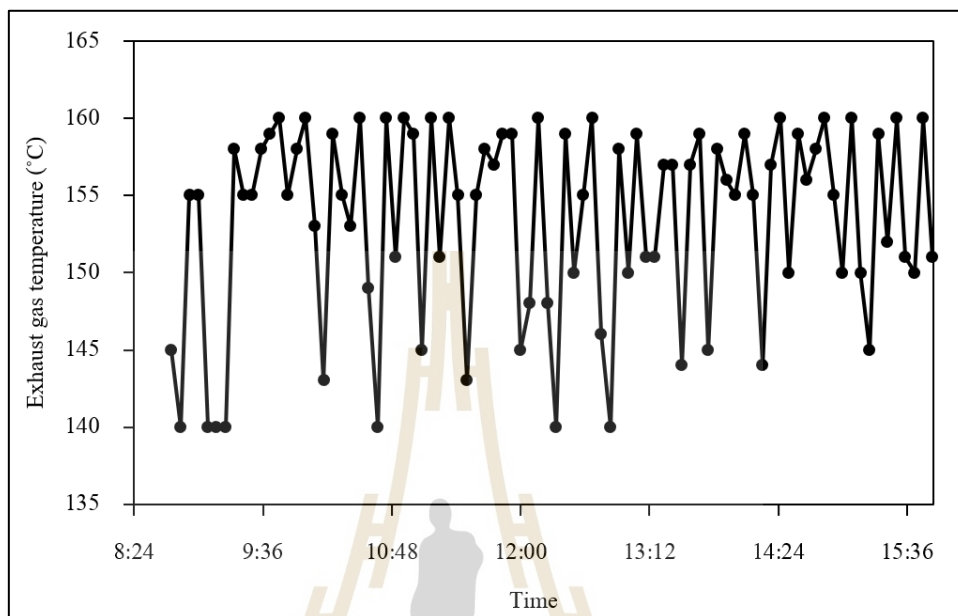


ภาคผนวก ก

ข้อมูลอุณหภูมิความร้อนทั้งจากหม้อไอน้ำ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ข้อมูลอุณหภูมิความร้อนทิ้งจากหม้อไอน้ำของโรงพยาบาลมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี  
ที่วัดจริงตามแต่ละช่วงเวลาแสดงดังรูปที่ ก.1



รูปที่ ก.1 อุณหภูมิความร้อนทิ้งจากหม้อไอน้ำในแต่ละช่วงเวลา



ภาคผนวก ข

ข้อมูลผลการจำลองโรงไฟฟ้าไออาร์ซีในสถานะที่ออกแบบ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

### ข.1 ข้อมูลผลการจำลองโรงไฟฟ้าไออาร์ซีในสถานะที่ออกแบบ

จากการจำลองโรงไฟฟ้าไออาร์ซีแบบพื้นฐานและแบบ TLC ที่ใช้ความร้อนทิ้งจากหม้อไอน้ำที่มีอุณหภูมิ 160 °C เป็นแหล่งความร้อน สามารถแสดงผลการจำลองได้ดังตารางที่ ข.1 - ข.4

ตารางที่ ข.1 ข้อมูลผลการจำลองโรงไฟฟ้าไออาร์ซีแบบพื้นฐานเมื่อใช้ระบบหล่อเย็นด้วยน้ำ

$T_{hs, in} = 160 \text{ }^{\circ}\text{C}$	R245fa	R1234ze	Neopentane	R1233zd	R114	C5F12
$T_{cri} \text{ (}^{\circ}\text{C)}$	154.01	109.36	160.59	165.5	145.68	147.41
$\dot{m}_{wf} \text{ (kg/s)}$	0.30	0.58	0.19	0.32	0.50	0.64
$P_{cond} \text{ (kPa)}$	0.34	0.98	0.34	0.28	0.42	0.18
$P_{evap} \text{ (kPa)}$	1.76	2.50	1.35	1.2	1.70	1.01
$\dot{Q}_{in} \text{ (kW)}$	64.80	91.6	70.79	68.02	73.79	85.75
$\dot{Q}_{out} \text{ (kW)}$	57.96	85.26	63.85	61.28	66.60	78.26
$\dot{W}_p \text{ (W)}$	447.34	1085.8	461.18	323.22	615.91	459.79
$\dot{W}_{ex} \text{ (W)}$	7285.38	7432.66	7404.33	7061.20	7814.21	7950.77
$\dot{W}_{cooling, sys} \text{ (W)}$	459.07	656.75	495.92	479.86	513.10	602.86
$\dot{W}_{net} \text{ (W)}$	6378.97	5690.11	6447.23	6258.13	6685.20	6888.13
$\eta_{overall}$	9.84	6.21	9.11	9.2	9.06	8.03
$UA_{evap} \text{ (kW/K)}$	4.07	6.16	3.41	4.32	4.93	5.14
$UA_{cond} \text{ (kW/K)}$	3.25	5.10	4.45	3.16	3.70	5.18
Expansion ratio	6.18	3.11	4.68	4.56	4.83	7.00

ตารางที่ ข.2 ข้อมูลผลการจำลองโรงไฟฟ้าโออาร์ซีแบบพื้นฐานเมื่อใช้ระบบหล่อเย็นด้วยอากาศ

$T_{hs, in} = 160 \text{ }^{\circ}\text{C}$	R245fa	R1234ze	Neopentane	R1233zd	R114	C5F12
$T_{cri} \text{ (}^{\circ}\text{C)}$	154.01	109.36	160.59	165.5	145.68	147.41
$\dot{m}_{wf} \text{ (kg/s)}$	0.30	0.58	0.19	0.32	0.50	0.64
$P_{cond} \text{ (kPa)}$	0.34	0.98	0.34	0.28	0.42	0.18
$P_{evap} \text{ (kPa)}$	1.76	2.50	1.35	1.2	1.70	1.01
$\dot{Q}_{in} \text{ (kW)}$	64.80	91.6	70.79	68.02	73.79	85.75
$\dot{Q}_{out} \text{ (kW)}$	57.96	85.26	63.85	61.28	66.60	78.26
$\dot{W}_p \text{ (W)}$	447.34	1085.8	461.18	323.22	615.91	459.79
$\dot{W}_{ex} \text{ (W)}$	7285.38	7432.66	7404.33	7061.20	7814.21	7950.77
$\dot{W}_{cooling, sys} \text{ (W)}$	552.95	656.75	495.92	479.86	513.10	602.86
$\dot{W}_{net} \text{ (W)}$	6285.10	5533.52	6334.52	6153.36	6563.01	6744.38
$\eta_{overall}$	9.70	6.04	8.95	9.05	8.89	7.87
$UA_{evap} \text{ (kW/K)}$	4.07	6.16	3.41	4.32	4.93	5.14
$UA_{cond} \text{ (kW/K)}$	3.25	5.10	4.45	3.16	3.70	5.18
Expansion ratio	6.18	3.11	4.68	4.56	4.83	7.00



ตารางที่ ข.3 ข้อมูลผลการจำลองโรงไฟฟ้าไออาร์ซีแบบ TLC เมื่อใช้ระบบหล่อเย็นด้วยน้ำ

$T_{hs, in} = 160\text{ }^{\circ}\text{C}$	R245fa	R1234ze	Neopentane	R1233zd	R114	C5F12
$T_{cri}\text{ (}^{\circ}\text{C)}$	154.01	109.36	160.59	165.5	145.68	147.41
$\dot{m}_{wf}\text{ (kg/s)}$	0.62	0.77	0.34	0.69	0.82	0.78
$P_{cond}\text{ (kPa)}$	0.34	1.00	0.36	0.29	0.45	0.19
$P_{evap}\text{ (kPa)}$	2.95	3.63	2.41	2.47	2.99	1.85
$\dot{Q}_{in}\text{ (kW)}$	90.24	91.06	90.05	90.74	89.34	93.82
$\dot{Q}_{out}\text{ (kW)}$	81.52	84.69	81.33	81.95	80.78	84.64
$\dot{w}_p\text{ (W)}$	1693.49	2504.42	1669.83	1665.29	2012.04	1127.08
$\dot{w}_{ex}\text{ (W)}$	7343.95	8873.29	10393.14	10455.71	10567.10	10301.77
$\dot{w}_{cooling, sys}\text{ (W)}$	627.94	716.30	626.51	631.28	622.38	652.17
$\dot{w}_{net}\text{ (W)}$	8090.27	5652.57	8096.80	8159.20	7932.68	8522.52
$\eta_{overall}$	8.97	6.21	8.99	8.99	8.88	9.08
$UA_{evap}\text{ (kW/K)}$	7.93	5.87	7.89	8.19	7.77	8.37
$UA_{cond}\text{ (kW/K)}$	5.65	4.57	5.64	5.68	5.60	6.16
Expansion ratio	33.26	7.58	30.90	36.38	21.93	46.09



ตารางที่ ข.4 ข้อมูลผลการจำลองโรงไฟฟ้าไออาร์ซีแบบ TLC เมื่อใช้ระบบหล่อเย็นด้วยอากาศ

$T_{hs, in} = 160\text{ }^{\circ}\text{C}$	R245fa	R1234ze	Neopentane	R1233zd	R114	C5F12
$T_{cri}\text{ (}^{\circ}\text{C)}$	154.01	109.36	160.59	165.5	145.68	147.41
$\dot{m}_{wf}\text{ (kg/s)}$	0.62	0.77	0.34	0.69	0.82	0.78
$P_{cond}\text{ (kPa)}$	0.34	1.00	0.36	0.29	0.45	0.19
$P_{evap}\text{ (kPa)}$	2.95	3.63	2.41	2.47	2.99	1.85
$\dot{Q}_{in}\text{ (kW)}$	90.24	91.06	90.05	90.74	89.34	93.82
$\dot{Q}_{out}\text{ (kW)}$	81.52	84.69	81.33	81.95	80.78	84.64
$\dot{w}_p\text{ (W)}$	1693.49	2504.42	1669.83	1665.29	2012.04	1127.08
$\dot{w}_{ex}\text{ (W)}$	7343.95	8873.29	10393.14	10455.71	10567.10	10301.77
$\dot{w}_{cooling, sys}\text{ (W)}$	777.65	811.18	775.87	781.79	770.69	807.48
$\dot{w}_{net}\text{ (W)}$	7939.84	5531.60	7947.65	8008.64	7784.56	8367.22
$\eta_{overall}$	8.80	6.05	8.83	8.83	8.71	8.92
$UA_{evap}\text{ (kW/K)}$	7.93	5.87	7.89	8.19	7.77	8.37
$UA_{cond}\text{ (kW/K)}$	5.65	4.57	5.64	5.68	5.60	6.16
Expansion ratio	33.26	7.58	30.90	36.38	21.93	46.09





ภาคผนวก ค

ข้อมูลผลการจำลองโรงไฟฟ้าไออาร์ซีเมื่ออัตราการไหล  
ของก๊าซไอเสียเพิ่มขึ้น

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

### ค.1 ข้อมูลผลการจำลองโรงไฟฟ้าไออาร์ซีเมื่ออัตราการไหลของก๊าซเพิ่มขึ้น

จากการจำลองโดยใช้โรงไฟฟ้าไออาร์ซีแบบพื้นฐานและแบบ TLC ที่ใช้สารทำงานชนิด R1233zd และใช้ความร้อนทิ้งจากหม้อไอน้ำที่มีอุณหภูมิ 160 °C เป็นแหล่งความร้อน เมื่ออัตราการไหลของก๊าซไอเสียเพิ่มขึ้น สามารถแสดงผลการจำลองได้ดังตารางที่ ค.1 - ค.3

ตารางที่ ค.1 ข้อมูลผลการจำลองโรงไฟฟ้าไออาร์ซีแบบ TLC ที่ทำงานร่วมกับระบบหล่อเย็นด้วยน้ำเมื่ออัตราการไหลของก๊าซไอเสียเพิ่มขึ้น

เทียบเท่าหม้อไอน้ำ	1	4	8	10	12
$\dot{m}_{wf}$ (kg/s)	0.69	2.8	5.5	6.9	8.3
$P_{cond}$ (kPa)	0.29	0.29	0.29	0.29	0.29
$P_{evap}$ (kPa)	2.47	2.44	2.48	2.47	2.47
$\dot{Q}_{in}$ (kW)	90.74	365.16	724.84	907.41	1090.03
$\dot{Q}_{out}$ (kW)	81.95	330.02	654.50	819.50	984.55
$\dot{W}_p$ (W)	1665.29	6670.81	13318.31	16653.28	19990.03
$\dot{W}_{ex}$ (W)	8790.43	35134.07	70343.16	87906.87	105481.85
$\dot{W}_{cooling,sys}$ (W)	641.23	2582.39	5121.36	6412.48	7702.58
$\dot{W}_{net}$ (W)	8149.19	32551.68	65221.79	81494.39	97779.26
$\eta_{overall}$	8.98	8.91	8.99	8.98	8.97
$UA_{evap}$ (kW/K)	8.20	32.80	65.54	81.89	98.32
$UA_{cond}$ (kW/K)	5.68	22.88	45.38	56.82	68.27
Expansion ratio	36.38	36.29	36.41	36.38	36.36

ตารางที่ ค.2 ข้อมูลผลการจำลองโรงไฟฟ้าไออาร์ซีแบบ TLC ที่ทำงานร่วมกับระบบหล่อเย็นด้วย  
อากาศเมื่ออัตราการไหลของก๊าซไอเสียเพิ่มขึ้น

เทียบเท่าหม้อไอน้ำ	1	4	8	10	12
$\dot{m}_{wf}$ (kg/s)	0.69	2.7	5.5	6.9	8.3
$P_{cond}$ (kPa)	0.29	0.33	0.33	0.33	0.29
$P_{evap}$ (kPa)	2.47	2.50	2.48	2.50	2.47
$\dot{Q}_{in}$ (kW)	90.74	346.30	698.77	869.06	1090.03
$\dot{Q}_{out}$ (kW)	81.95	314.03	634.17	788.31	984.55
$\dot{W}_p$ (W)	1665.29	6581.90	13216.59	16487.41	19990.03
$\dot{W}_{ex}$ (W)	10455.71	38852.52	77824.31	97233.43	125471.88
$\dot{W}_{cooling,sys}$ (W)	781.79	2995.37	6048.97	7519.29	9392.62
$\dot{W}_{net}$ (W)	8008.64	29275.25	58558.75	73226.73	96089.23
$\eta_{overall}$	8.83	8.45	8.38	8.43	8.82
$UA_{evap}$ (kW/K)	8.19	31.30	63.22	78.71	98.32
$UA_{cond}$ (kW/K)	5.68	21.77	43.97	54.65	68.27
Expansion ratio	36.38	32.29	32.20	32.26	36.37





ภาคผนวก ง

ข้อมูลผลการศึกษาผลกระทบจากการปรับอัตราค่าไฟของน้ำหล่อเย็น  
ของโรงไฟฟ้าไออาร์ซีแบบ TLC

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

### ง.1 ข้อมูลผลกระทบบจากอัตรการไหลน้ำหล่อเย็น

ในภาคผนวก ค. ผลการศึกษาผลกระทบจากการปรับอัตรการไหลของน้ำหล่อเย็นของโรงไฟฟ้าไออาร์ซีแบบ TLC ที่ใช้สารทำงานเป็น R1233zd ดังตารางที่ ง.1

ตารางที่ ง.1 ข้อมูลผลการจำลองโรงไฟฟ้าไออาร์ซีแบบ TLC เมื่ออัตรการไหลของน้ำหล่อเย็นเปลี่ยนไป

$\dot{m}_{cw}$ (kg/s)	15	25	30
$\dot{m}_{air}$ (kg/s)	13.56	17.76	19.30
$\dot{m}_{wf}$ (kg/s)	17.92	16.31	17.92
$P_{cond}$ (kPa)	0.35	0.31	0.31
$P_{evap}$ (kPa)	2.04	2.04	2.04
$\dot{Q}_{in}$ (kW)	1146.39	1188.11	1200.60
$\dot{Q}_{out}$ (kW)	1095.08	1124.43	1140.96
$\dot{W}_p$ (W)	34085.13	31431.07	34621.48
$\dot{W}_{ex}$ (W)	85389.88	95115.64	92654.54
$\dot{W}_{cooling,sys}$ (W)	5226.47	8245.98	9701.97
$\dot{W}_{net}$ (W)	46078.28	55438.59	48331.10
$\eta_{overall}$	4.02	4.67	4.03
$UA_{evap}$ (kW/K)	98.32	98.32	98.32
$UA_{cond}$ (kW/K)	68.27	68.27	68.27
Expansion ratio	20.13	24.63	23.62

ภาคผนวก จ

ข้อมูลผลการศึกษาผลกระทบจากสภาพอากาศที่เปลี่ยนแปลงไปของโรงไฟฟ้า  
โออาร์ซีแบบ TLC ที่ใช้ระบบหล่อเย็นด้วยน้ำ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



### จ.1 ข้อมูลผลกระทบบจากการเปลี่ยนแปลงของสภาพอากาศ

ในภาคผนวก จ. ผลการศึกษาผลกระทบบจากสภาพอากาศ ดังตารางที่ จ.1

ตารางที่ จ.1 ข้อมูลผลการจำลองพลังงานและอัตราการไหลที่ต้องใช้ของโรงไฟฟ้าโออาร์ซีแบบ TLC เมื่อสภาพอากาศเปลี่ยนแปลงไป

RH	T <sub>db</sub> (°C)	W <sub>p, ctw</sub> (W)	W <sub>r</sub> (W)	m <sub>cw</sub> (kg/s)	m <sub>air</sub> (kg/s)	L/G	m <sub>evap</sub> (kg/s)
28	36.0	2171.23	454.35	8.30	4.74	1.75	0.22
29	36.8	2038.20	410.13	7.79	4.27	1.82	0.21
30	36.7	2032.56	416.50	7.77	4.35	1.79	0.21
34	38.8	2185.55	391.85	8.35	4.09	2.04	0.22
45	18.6	1604.97	250.81	6.14	2.62	2.34	0.08
47	32.4	2813.16	800.97	10.75	8.36	1.29	0.23
47	31	2678.41	856.88	10.24	8.94	1.14	0.23
48	37.1	1833.36	451.05	12.35	6.85	1.80	0.20
50	30.0	4494.08	1318.61	17.18	13.76	1.25	0.26
63	30.6	3224.30	1214.17	12.33	12.67	0.97	0.23
63	29.7	5468.54	1743.74	20.90	18.20	1.15	0.25
67	27.6	7152.40	2607.22	27.34	27.21	1.00	0.29
72	30.5	3265.05	1459.64	12.48	15.24	0.82	0.23
72	23.1	5569.80	3382.27	21.29	35.30	0.60	0.27
91	24.2	4038.18	4878.49	15.44	50.92	0.30	0.24
97	25.4	5685.23	8785.00	21.73	91.70	0.24	0.24
97	24.4	5364.14	9255.36	20.51	95.61	0.21	0.24
97	20.1	6335.38	14048.73	24.22	146.64	0.17	0.23

## ประวัติผู้เขียน

นายวสุ พิริยะกุลวัฒน์ เกิดเมื่อวันที่ 23 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2536 ณ จังหวัดจันทบุรี สำเร็จการศึกษาในระดับประถมศึกษาที่โรงเรียนอนุบาลจังหวัดจันทบุรี ระดับมัธยมศึกษาที่โรงเรียนเบญจมราชูทิศ จังหวัดจันทบุรี และระดับปริญญาตรีจากสาขาวิศวกรรมเครื่องกล สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา เมื่อปี พ.ศ. 2557 โดยหลังจากสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีได้เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท ในหลักสูตรวิศวกรรมเครื่องกลและระบบกระบวนการ (วิศวกรรมเครื่องกล) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี โดยขณะที่กำลังศึกษาได้มีโอกาสนเป็นผู้สอนปฏิบัติการ ผู้ช่วยสอนและผู้ช่วยวิจัยในสาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จำนวน 3 รายวิชา ได้แก่ รายวิชาปฏิบัติการวิศวกรรมเครื่องกล รายวิชาปฏิบัติการด้านความร้อนและของไหล และรายวิชาเขียนแบบทางวิศวกรรม ซึ่งช่วยให้ผู้วิจัยได้รับประสบการณ์และนำความรู้ที่ได้มาประยุกต์ใช้ร่วมกับวิทยานิพนธ์ได้เป็นอย่างดี นอกจากนี้ยังทำให้ผู้วิจัยได้รับใบอนุญาตเป็นผู้ประกอบวิชาชีพวิศวกรรมควบคุมระดับภาคีวิศวกร สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล และการทำวิจัยนี้ทำให้ผู้วิจัยได้รับความรู้ ความเข้าใจในด้านของการผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยเทคโนโลยีโออาร์ซีได้ดียิ่งขึ้น

ขณะที่กำลังศึกษาในระดับปริญญาโท ได้มีโอกาสนำเสนอบทความวิชาการดังนี้

1. Piriyaikulwat, W., Prasetyadi, A., Koonsrisuk, A. (2017), Simple Linear Heat Model for Virtual Water Estimation of Thermal Power Plant. ในการประชุมเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 13 ระหว่างวันที่ 31 พฤษภาคม ถึงวันที่ 2 มิถุนายน พ.ศ. 2560 ณ จังหวัดเชียงใหม่
2. วสุ พิริยะกุลวัฒน์ และอาทิตย์ คุณศรีสุข (2561) การจำลองการถ่ายเทความร้อนและความดันสูญเสียภายในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่น ในการประชุมวิชาการวิศวกรรมศาสตร์ วิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี และสถาปัตยกรรมศาสตร์ ครั้งที่ 9 ในวันที่ 7 กันยายน พ.ศ. 2561 ณ จังหวัดขอนแก่น
3. Piriyaikulwat, W., and Koonsrisuk, A. (2018), Thermal performance and pressure drop characteristics of the heat exchangers in an ORC power plant. ใน Tri-University International Joint Seminar and Symposium ครั้งที่ 25 ในวันที่ 8 พฤศจิกายน พ.ศ. 2561 ณ จังหวัดเชียงใหม่

4. วสุ พิริยะกุลวัฒน์ และอาทิตย์ คุณศรีสุข (2562) การศึกษาความเป็นไปได้ของการผลิตไฟฟ้าจากก๊าซไอเสียของหม้อต้มไอน้ำโดยใช้เทคโนโลยีไออาร์ซี ในการประชุมวิชาการเรื่อง การถ่ายเทพลังงานความร้อนและมวลในอุปกรณ์ด้านความร้อนและกระบวนการ ครั้งที่ 18 ในระหว่างวันที่ 20 - 21 มีนาคม พ.ศ. 2562 ณ โรงแรมกระบี่ฟร็อน เบย์ รีสอร์ท จังหวัดกระบี่
5. วสุ พิริยะกุลวัฒน์ และอาทิตย์ คุณศรีสุข (2563) การศึกษาเชิงเปรียบเทียบของโรงไฟฟ้าไออาร์ซีและทีแอลซี ในการประชุมวิชาการเรื่อง การถ่ายเทพลังงานความร้อนและมวลในอุปกรณ์ด้านความร้อนและกระบวนการ ครั้งที่ 19 ในระหว่างวันที่ 12 - 13 มีนาคม พ.ศ. 2563 ณ โรงแรมเจ้าหลาว คาบาน่า รีสอร์ท จังหวัดจันทบุรี

