

การออกแบบโรงไฟฟ้า ORC โดยใช้แหล่งความร้อนใต้พิภพเป็นแหล่งพลังงาน
สำหรับประเทศไทย



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2561

**DESIGN OF THE ORGANIC RANKINE CYCLE POWER
PLANT DRIVEN BY GEOTHERMAL HEAT SOURCE
FOR THAILAND**



**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for
the Degree of Master of Engineering in Mechanical Engineering**

Suranaree University of Technology

Academic Year 2018

การออกแบบโรงไฟฟ้า ORC โดยใช้แหล่งความร้อนใต้พิภพเป็นแหล่งพลังงาน
สำหรับประเทศไทย

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



(รศ. ดร.จิระพล ศรีเสริฐผล)

ประธานกรรมการ

อ.ทศพร

(ผศ. ดร.อาทิตย์ อุณศรีสุข)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)



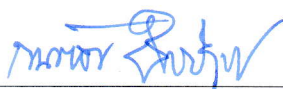
(รศ. ดร.บัณฑิต กฤตาคม)

กรรมการ



(ผศ. ดร.พรรญา ลิปลับ)

กรรมการ



(รศ. ร.อ. ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ

และพัฒนาความเป็นสากล



(รศ. ดร.พรศิริ จงกล)

รักษาการแทนคณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

อนุฤต โม่งปราณีต : การออกแบบโรงไฟฟ้า ORC โดยใช้แหล่งความร้อนใต้พิภพเป็น
แหล่งพลังงานสำหรับประเทศไทย (DESIGN OF THE ORGANIC RANKINE CYCLE
POWER PLANT DRIVEN BY GEOTHERMAL HEAT SOURCE FOR THAILAND)
อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อาทิตย์ อุณศรีสุข, 148 หน้า.

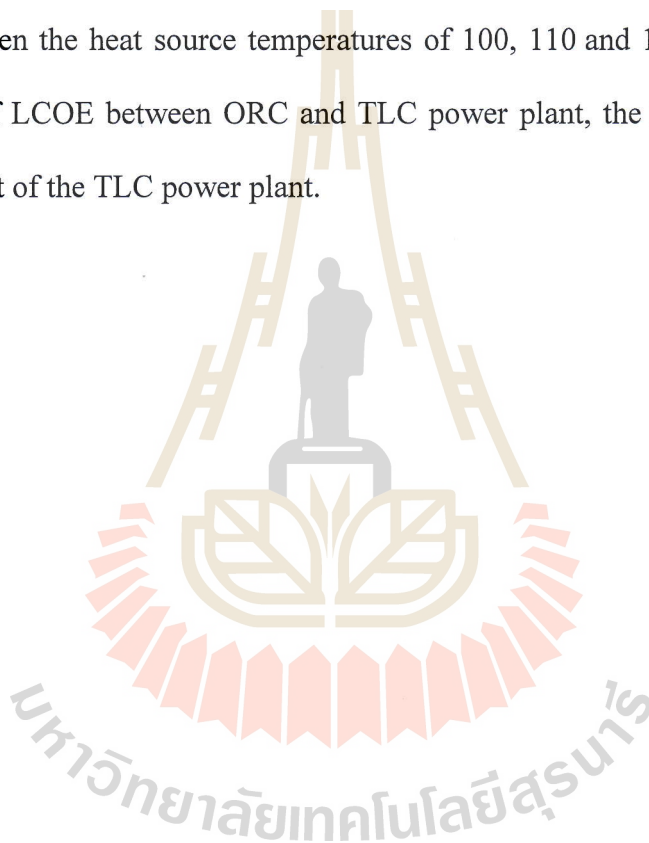
การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบและจำลองโรงไฟฟ้า Organic Rankine cycle (ORC) และโรงไฟฟ้า Trilateral cycle (TLC) โดยใช้แหล่งความร้อนใต้พิภพเป็นแหล่งพลังงาน อีกทั้งในวิทยานิพนธ์ได้นำเสนอการวิเคราะห์ทางด้านเศรษฐศาสตร์ของโรงไฟฟ้า ORC และ TLC โดยพิจารณาแหล่งความร้อนที่อุณหภูมิ 100 110 และ 120°C ร่วมกับการใช้สารทำงานทั้งหมด 16 ชนิด ในการจำลองและคำนวณหาพลังงานสุทธิ ประสิทธิภาพทางความร้อน และต้นทุนการผลิตไฟฟ้าของโรงไฟฟ้า ORC และ TLC จากผลการศึกษาพบว่า โรงไฟฟ้า ORC เมื่อใช้สารทำงาน R227ea เป็นสารที่ผลิตงานสุทธิได้สูงสุด มีค่าเท่ากับ 200 290 และ 406 kW ที่แหล่งความร้อนอุณหภูมิ 100 110 และ 120°C ตามลำดับ และพบว่าสารทำงานที่มีประสิทธิภาพทางความร้อนสูงสุด คือ R245fa มีค่าเท่ากับ 6.57 และ 8.79% ที่แหล่งความร้อนอุณหภูมิ 100 และ 120°C ตามลำดับ ในขณะที่ สารทำงาน R236ea เป็นสารที่มีประสิทธิภาพทางความร้อนสูงสุดเท่ากับ 7.77% ที่แหล่งความร้อนอุณหภูมิ 110°C นอกจากนี้ยังพบว่า ต้นทุนการผลิตไฟฟ้าต่ำสุดของโรงไฟฟ้า ORC ที่แหล่งความร้อนอุณหภูมิ 100°C เท่ากับ 1.23 Baht/kWh เมื่อใช้ propane เป็นสารทำงาน ในขณะที่อุณหภูมิ 110°C และ 120°C สารทำงาน R134a มีต้นทุนการผลิตไฟฟ้าต่ำสุดเท่ากับ 1.02 Baht/kWh และ 0.86 Baht/kWh ตามลำดับ สำหรับผลการศึกษาของโรงไฟฟ้า TLC พบว่า water เป็นสารทำงานที่ผลิตงานสุทธิสูงสุด ที่แหล่งความร้อนอุณหภูมิ 100 110 และ 120°C มีค่าเท่ากับ 323.13 443.8 และ 581.39 kW และมีประสิทธิภาพทางความร้อนสูงสุดเท่ากับ 6.73 7.80 และ 8.86% ตามลำดับ นอกจากนี้ผลการวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์พบว่า สารทำงาน R1234ze R227ea และ RC318 มีต้นทุนการผลิตไฟฟ้าต่ำสุด ที่แหล่งความร้อนอุณหภูมิ 100 110 และ 120°C ซึ่งมีค่าเท่ากับ 1.40 1.13 และ 1.04 Baht/kWh ตามลำดับ ในขณะที่ต้นทุนการผลิตไฟฟ้าของโรงไฟฟ้า TLC ที่ใช้ water เป็นสารทำงาน ที่แหล่งความร้อนอุณหภูมิ 100 110 และ 120°C มีค่าเท่ากับ 24.61 20.92 และ 18.23 Baht/kWh ตามลำดับ และในการเปรียบเทียบต้นทุนการผลิตไฟฟ้าของ ORC กับ TLC พบว่าโรงไฟฟ้า ORC มีต้นทุนการผลิตไฟฟ้าต่ำกว่าโรงไฟฟ้า TLC

ANUGUL MONGPRANEET : DESIGN OF THE ORGANIC RANKINE
CYCLE POWER PLANT DRIVEN BY GEOTHERMAL HEAT SOURCE
FOR THAILAND. THESIS ADVISOR : ASST. PROF. ATIT
KOONSRSISUK, Ph.D., 148 PP.

ORGANIC RANKINE CYCLE/TRILATERAL CYCLE/GEOTHERMAL HEAT
SOURCE

This study aims to design and simulate an organic Rankine cycle (ORC) and Trilateral cycle (TLC) power plants driven by the geothermal heat. The economic analyses of the ORC and TLC power plants were also performed in the present thesis. Three distinct temperatures of 100, 110 and 120°C coupled with 16 different working fluid candidates were used to simulate and calculate the net power output, thermal efficiency, and levelized cost of electricity (LCOE) of ORC and TLC power plants. The results for the ORC plant demonstrated that R227ea provided the highest net power output of 200, 290 and 406 kW at temperatures of 100, 110 and 120°C, respectively. Furthermore, the maximum thermal efficiencies of 6.57 and 8.79% were obtained when R245fa was used as the working fluid at heat source temperatures of 100 and 120°C, respectively, while R236ea gave the highest thermal efficiency of 7.77% at 110°C. In addition, the minimum LCOE was 1.23 THB/kWh when propane was used as a working fluid for the ORC power plant with heat source temperature of 100°C. Interestingly, R134a at heat source temperatures of 110 and 120 °C provided the lowest LCOE of 1.02 and 0.86 THB/kWh, respectively, for ORC power generation. For TLC power plant study, it was found that water is the working fluid that provides the highest net power output. At heat source temperatures of 100, 110 and 120°C, it provided

323.13, 443.80, and 581.39 kW, and their corresponding thermal efficiencies were 6.73, 7.80 and 8.86%, respectively. The economic analysis showed that R1234ze, R227ea and RC318 was the working fluid that provided the lowest LCOE for the TLC power plant at heat source temperatures of 100, 110 and 120°C, respectively. The corresponding LCOEs were 1.40, 1.13 and 1.04 THB/kWh. While the LCOEs for the TLC power plant with water as its working fluid were 24.61, 20.92, and 18.23 THB/kWh when the heat source temperatures of 100, 110 and 120°C were used. In comparison of LCOE between ORC and TLC power plant, the LCOE of ORC was lower than that of the TLC power plant.



School of Mechanical Engineering

Academic Year 2018

Student's Signature อ.กนก

Advisor's Signature อ.ทศพร

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดีจากความรัก ความเมตตาของบิดาและมารดาข้าพเจ้าผู้ซึ่งเฝ้าเลี้ยง คุนแล อบรมข้าพเจ้าจนเติบโตเป็นผู้มีสติสัมปชัญญะและมีความสามารถจนสำเร็จการศึกษาได้ รวมถึงความกรุณาของ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อาทิตย์ คุณศรีสุข อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ถ่ายทอดความรู้ คำแนะนำ ชี้แนะทางทั้งในด้านวิชาการและการดำเนินชีวิต รวมทั้งให้กำลังใจในการทำงาน จนงานวิจัยและวิทยานิพนธ์สำเร็จเป็นอย่างดี

ขอขอบพระคุณคณาจารย์และเจ้าหน้าที่ในสาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่คอยให้คำสั่งสอน คำแนะนำ ตลอดจนความช่วยเหลือในการทำวิทยานิพนธ์จนสำเร็จลุล่วงเป็นอย่างดี

ขอขอบคุณเพื่อนบัณฑิตศึกษา รุ่นพี่บัณฑิตศึกษาและรุ่นน้องบัณฑิตศึกษาในกลุ่มวิจัยและในสาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ที่ให้ความช่วยเหลือ ให้คำแนะนำ ให้ข้อเสนอ จนส่งผลให้การเรียนรู้และการทำวิทยานิพนธ์สำเร็จอย่างดี

สุดท้ายนี้ ข้าพเจ้าขอขอบคุณนางสาวสุพัตรา พรหมมา ที่ให้กำลังใจ ความห่วงใย และให้ความช่วยเหลือ จนการทำงานวิจัยและวิทยานิพนธ์นี้สำเร็จเป็นอย่างดี

คุณประโยชน์และคุณงามความดีใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์นี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้นายประสิทธิ์ โมงปราณีตและนางบุญอุ้ม โมงปราณีต ผู้เป็นบิดา มารดาที่รักยิ่งของข้าพเจ้า ซึ่งอบรมเลี้ยงดูข้าพเจ้าจนเติบโตและประสบความสำเร็จในการศึกษากครั้งนี้

อนุกุล โมงปราณีต

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ง
สารบัญ.....	จ
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ญ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	ฐ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	6
1.4 ขอบเขตการศึกษา.....	6
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	6
2 ปรักษัณัวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	7
2.1 ศักยภาพแหล่งความร้อนใต้พิภพในประเทศไทย.....	7
2.2 การพัฒนาและใช้ประโยชน์พลังงานความร้อนใต้พิภพในประเทศไทย.....	9
2.3 วัฏจักรแรงคิน (Rankine cycle, RC).....	12
2.4 วัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ (Organic Rankine cycle, ORC).....	15
2.5 วัฏจักรไตรแลทเทอร์ล (Trilateral cycle, TLC).....	16
3 ขั้นตอนการดำเนินการ.....	29
3.1 วิธีดำเนินงาน.....	29
3.2 เครื่องมือสำหรับการใช้การศึกษา.....	30
3.2.1 โปรแกรมที่ใช้ในการจำลอง.....	30
3.2.2 ระเบียบวิธีการจำลอง.....	32

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.3	การเลือกใช้สารทำงาน (Selection of the working fluid)	40
3.4	ประเภทของสารทำงาน (Types of working fluid)	41
3.4.1	สารทำงานที่เลือกใช้ในการจำลองในการศึกษานี้ (Working fluid selected)	42
3.5	ตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง	43
3.6	การประเมินขนาดและราคาอุปกรณ์	45
3.6.1	การเลือกขนาดและประเมินราคาอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน	45
3.6.2	การเลือกขนาดและประเมินราคาเครื่องกำเนิดไฟฟ้า	47
3.6.3	การเลือกขนาดและประเมินราคา Expander	48
3.6.4	การประเมินขนาดและราคาปั๊มสารทำงาน	50
3.6.5	ราคาสารทำงาน	51
3.6.6	การประเมินขนาดและราคาปั๊มน้ำร้อนและน้ำหล่อเย็น	53
3.6.7	การประเมินขนาดและราคาถังเก็บสารทำงานในโรงไฟฟ้า	53
3.7	การวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์ (Economic analysis)	54
4	ผลการศึกษาและวิเคราะห์ผล	57
4.1	ผลการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง	57
4.2	ผลการศึกษาสมรรถนะของโรงไฟฟ้า ORC และ TLC	59
4.2.1	ผลการศึกษาด้านสมรรถนะของโรงไฟฟ้า ORC	59
4.2.2	ผลการศึกษาด้านสมรรถนะของโรงไฟฟ้า TLC	67
4.2.3	เปรียบเทียบสมรรถนะของโรงไฟฟ้า ORC กับ โรงไฟฟ้า TLC	74
4.2.3.1	เปรียบเทียบกำลังงานสุทธิที่ผลิตได้	74
4.2.3.2	เปรียบเทียบประสิทธิภาพ	74
4.2.3.2	เปรียบเทียบขนาดของอุปกรณ์	76
4.3	การวิเคราะห์ด้านเศรษฐศาสตร์	79
4.3.1	การวิเคราะห์เศรษฐศาสตร์ของโรงไฟฟ้า ORC	79
4.3.2	การวิเคราะห์เศรษฐศาสตร์ของโรงไฟฟ้า TLC	82
4.3.2	เปรียบเทียบเศรษฐศาสตร์ของโรงไฟฟ้า ORC กับ TLC	85

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

5	สรุปงานวิจัยและข้อเสนอแนะ	88
5.1	สรุปผลการศึกษา	88
5.1.1	สรุปผลการจำลองสมรรถนะของโรงไฟฟ้า	88
5.1.2	สรุปผลการวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์ของโรงไฟฟ้า	89
5.2	ข้อเสนอแนะ	89
	รายการอ้างอิง	90
	ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก.	ขนาดและราคาอุปกรณ์โรงไฟฟ้า	95
ก.1	การเลือกขนาดและอุปกรณ์ในโรงไฟฟ้า	96
ก.2	ขนาดและราคาอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน	97
ก.3	ขนาดและราคาของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า	101
ก.4	ขนาดและราคาปั๊มสูบน้ำทำงาน	105
ก.5	ขนาดและราคาปั๊มน้ำร้อนและน้ำหล่อเย็น	109
ก.6	ขนาดและราคาถังเก็บสารทำงานในโรงไฟฟ้า	112
ภาคผนวก ข.	แหล่งน้ำพุร้อนในประเทศไทย	114
ภาคผนวก ค.	ผลการจำลองโรงไฟฟ้า ORC และ TLC	121
ภาคผนวก ง.	ผลการวิเคราะห์เศรษฐศาสตร์โรงไฟฟ้า ORC และ TLC	135
	ประวัติผู้เขียน	148

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 แหล่งน้ำพุร้อนทางภาคเหนือของประเทศไทย	9
2.2 การใช้ประโยชน์แหล่งน้ำพุร้อนแบ่งตามอุณหภูมิความร้อน	10
2.3 The input data assumed in the simulations	20
2.4 Comparison of different fluid cycle performance	25
3.1 ค่าตัวแปรสำหรับการจำลองของโรงไฟฟ้า ORC และ TLC	33
3.2 สารทำงานที่ใช้ในการจำลอง	44
3.3 ราคาสารทำงาน	52
4.1 ผลการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองโรงไฟฟ้า ORC	57
4.2 ผลการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองโรงไฟฟ้า TLC	58
4.3 ค่าตัวแปรสำหรับการจำลองของโรงไฟฟ้า ORC และ TLC	59
4.4 งานสุทธิสูงสุดของสารทำงานที่มีความดันเกินกว่าเกณฑ์ที่รับได้ (2500 kPa)	68
4.5 ตารางเปรียบเทียบงานสุทธิสูงสุดและต่ำสุดระหว่างโรงไฟฟ้า ORC กับ TLC	74
4.6 ตารางเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างโรงไฟฟ้า ORC กับ TLC	75
4.7 เปรียบเทียบขนาดของ condenser และ evaporator ของโรงไฟฟ้า ORC และ TLC	76
ก.1 ผลการออกแบบโรงไฟฟ้า ORC สำหรับประเมินขนาดและราคาอุปกรณ์โรงไฟฟ้า	96
ก.2 ขนาดและราคาของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน	98
ก.3 ขนาดและราคาของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า	104
ก.4 ราคาปั๊มแรงดันหลายใบพัดของสารทำงาน (SEAR Pump)	107
ก.5 ขนาดและราคาปั๊มแรงดันหลายใบพัดของสารทำงานที่เลือกใช้	107
ก.6 ราคาปั๊มหอยโข่งสำหรับน้ำร้อนและน้ำหล่อเย็น	109
ก.7 ขนาดและราคาปั๊มหอยโข่งที่เลือกใช้สำหรับน้ำร้อน	110
ก.8 ขนาดและราคาปั๊มหอยโข่งที่เลือกใช้สำหรับน้ำหล่อเย็น	110
ก.9 ผลขนาดและราคากังเกี่ยสารทำงาน บริษัท เจเอ็นเค เพาเวอร์ทูลส์	112
ข.1 แหล่งน้ำพุร้อนในประเทศไทย	115
ค.1 ค่าตัวแปรสำหรับการจำลองของโรงไฟฟ้า ORC และ TLC	122

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ค.2 ผลการจำลองโรงไฟฟ้า ORC ที่แหล่งความร้อนอุณหภูมิ 100°C.....	123
ค.3 ผลการจำลองโรงไฟฟ้า ORC ที่แหล่งความร้อนอุณหภูมิ 110°C.....	125
ค.4 ผลการจำลองโรงไฟฟ้า ORC ที่แหล่งความร้อนอุณหภูมิ 120°C.....	127
ค.5 ผลการจำลองโรงไฟฟ้า TLC ที่แหล่งความร้อนอุณหภูมิ 100°C.....	129
ค.6 ผลการจำลองโรงไฟฟ้า TLC ที่แหล่งความร้อนอุณหภูมิ 110°C.....	131
ค.7 ผลการจำลองโรงไฟฟ้า TLC ที่แหล่งความร้อนอุณหภูมิ 120°C.....	133
ง.1 ผลการคำนวณราคาอุปกรณ์ในโรงไฟฟ้า ORC ที่ใช้แหล่งความร้อนอุณหภูมิ 100°C.....	136
ง.2 ผลการคำนวณราคาอุปกรณ์ในโรงไฟฟ้า ORC ที่ใช้แหล่งความร้อนอุณหภูมิ 110°C.....	138
ง.3 ผลการคำนวณราคาอุปกรณ์ในโรงไฟฟ้า ORC ที่ใช้แหล่งความร้อนอุณหภูมิ 120°C.....	140
ง.4 ผลการคำนวณราคาอุปกรณ์ในโรงไฟฟ้า TLC ที่ใช้แหล่งความร้อนอุณหภูมิ 100°C.....	142
ง.5 ผลการคำนวณราคาอุปกรณ์ในโรงไฟฟ้า TLC ที่ใช้แหล่งความร้อนอุณหภูมิ 110°C.....	144
ง.6 ผลการคำนวณราคาอุปกรณ์ในโรงไฟฟ้า TLC ที่ใช้แหล่งความร้อนอุณหภูมิ 120°C.....	146



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 แหล่งน้ำพุร้อนทางภาคเหนือของประเทศไทย	9
2.2 การใช้ประโยชน์แหล่งน้ำพุร้อนแบ่งตามอุณหภูมิความร้อน	10
2.3 The input data assumed in the simulations	20
2.4 Comparison of different fluid cycle performance	25
3.1 ค่าตัวแปรสำหรับการจำลองของโรงไฟฟ้า ORC และ TLC	33
3.2 สารทำงานที่ใช้ในการจำลอง	44
3.3 ราคาสารทำงาน	52
4.1 ผลการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองโรงไฟฟ้า ORC	57
4.2 ผลการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองโรงไฟฟ้า TLC	58
4.3 ค่าตัวแปรสำหรับการจำลองของโรงไฟฟ้า ORC และ TLC	59
4.4 งานสุทธิสูงสุดของสารทำงานที่มีความดันเกินกว่าเกณฑ์ที่รับได้ (2500 kPa)	68
4.5 ตารางเปรียบเทียบงานสุทธิสูงสุดและต่ำสุดระหว่างโรงไฟฟ้า ORC กับ TLC	74
4.6 ตารางเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างโรงไฟฟ้า ORC กับ TLC	75
4.7 เปรียบเทียบขนาดของ condenser และ evaporator ของโรงไฟฟ้า ORC และ TLC	76
ก.1 ผลการออกแบบโรงไฟฟ้า ORC สำหรับประเมินขนาดและราคาอุปกรณ์โรงไฟฟ้า	96
ก.2 ขนาดและราคาของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน	98
ก.3 ขนาดและราคาของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า	104
ก.4 ราคาปั๊มแรงดันหลายใบพัดของสารทำงาน (SEAR Pump)	107
ก.5 ขนาดและราคาปั๊มแรงดันหลายใบพัดของสารทำงานที่เลือกใช้	107
ก.6 ราคาปั๊มหอยโข่งสำหรับน้ำร้อนและน้ำหล่อเย็น	109
ก.7 ขนาดและราคาปั๊มหอยโข่งที่เลือกใช้สำหรับน้ำร้อน	110
ก.8 ขนาดและราคาปั๊มหอยโข่งที่เลือกใช้สำหรับน้ำหล่อเย็น	110
ก.9 ผลขนาดและราคากังเกี่ยสารทำงาน บริษัท เจเอ็นเค เพาเวอร์ทูลส์	112
ข.1 แหล่งน้ำพุร้อนในประเทศไทย	115
ค.1 ค่าตัวแปรสำหรับการจำลองของโรงไฟฟ้า ORC และ TLC	122

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ค.2 ผลการจำลองโรงไฟฟ้า ORC ที่แหล่งความร้อนอุณหภูมิ 100°C.....	123
ค.3 ผลการจำลองโรงไฟฟ้า ORC ที่แหล่งความร้อนอุณหภูมิ 110°C.....	125
ค.4 ผลการจำลองโรงไฟฟ้า ORC ที่แหล่งความร้อนอุณหภูมิ 120°C.....	127
ค.5 ผลการจำลองโรงไฟฟ้า TLC ที่แหล่งความร้อนอุณหภูมิ 100°C.....	129
ค.6 ผลการจำลองโรงไฟฟ้า TLC ที่แหล่งความร้อนอุณหภูมิ 110°C.....	131
ค.7 ผลการจำลองโรงไฟฟ้า TLC ที่แหล่งความร้อนอุณหภูมิ 120°C.....	133
ง.1 ผลการคำนวณราคาอุปกรณ์ในโรงไฟฟ้า ORC ที่ใช้แหล่งความร้อนอุณหภูมิ 100°C.....	136
ง.2 ผลการคำนวณราคาอุปกรณ์ในโรงไฟฟ้า ORC ที่ใช้แหล่งความร้อนอุณหภูมิ 110°C.....	138
ง.3 ผลการคำนวณราคาอุปกรณ์ในโรงไฟฟ้า ORC ที่ใช้แหล่งความร้อนอุณหภูมิ 120°C.....	140
ง.4 ผลการคำนวณราคาอุปกรณ์ในโรงไฟฟ้า TLC ที่ใช้แหล่งความร้อนอุณหภูมิ 100°C.....	142
ง.5 ผลการคำนวณราคาอุปกรณ์ในโรงไฟฟ้า TLC ที่ใช้แหล่งความร้อนอุณหภูมิ 110°C.....	144
ง.6 ผลการคำนวณราคาอุปกรณ์ในโรงไฟฟ้า TLC ที่ใช้แหล่งความร้อนอุณหภูมิ 120°C.....	146



คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

A	=	พื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อน, m^2
C_{eq}	=	Equipment cost, USD
C_{land}	=	ราคาที่ดินในพื้นที่ตั้งโรงไฟฟ้า, USD
C_{plant}	=	ราคาโรงไฟฟ้า, USD
$C_{service}$	=	งบประมาณสิ่งอำนวยความสะดวก เช่น ยานพาหนะ, USD
C_{site}	=	งบประมาณสร้างอาคารสำหรับโรงไฟฟ้าและสำนักงาน, USD
$C_{startup}$	=	งบประมาณสำรวจแหล่งความร้อนและขุดเจาะ, USD
C_{wf}	=	ราคาสารทำงานที่ใช้ในโรงไฟฟ้า, USD
$C_{p_{hf}}$	=	ความร้อนจำเพาะน้ำร้อน, $kJ/(kg.K)$
$\dot{E}$	=	เอ็กเซอร์จี, W
$\dot{E}_5$	=	เอ็กเซอร์จีที่ตำแหน่งที่ 5, W
$\dot{E}_6$	=	เอ็กเซอร์จีที่ตำแหน่งที่ 6, W
$\dot{E}_7$	=	เอ็กเซอร์จีที่ตำแหน่งที่ 7, W
$\dot{E}_8$	=	เอ็กเซอร์จีที่ตำแหน่งที่ 8, W
h	=	เอนทัลปี, kJ/kg
h_1	=	เอนทัลปีที่ตำแหน่งที่ 1, kJ/kg
h_2	=	เอนทัลปีที่ตำแหน่งที่ 2, kJ/kg
h_3	=	เอนทัลปีที่ตำแหน่งที่ 3, kJ/kg
h_4	=	เอนทัลปีที่ตำแหน่งที่ 4, kJ/kg
Inv	=	Investment cost, USD
$LCOE$	=	ต้นทุนการผลิตไฟฟ้าต่อหน่วยปรับเฉลี่ยตลอดอายุโครงการ, USD/kWh
$\dot{m}_{cf}$	=	อัตราการไหลของน้ำหล่อเย็น, kg/s
$\dot{m}_{hf}$	=	อัตราการไหลของน้ำร้อน, kg/s
$\dot{m}_{wf}$	=	อัตราการไหลของสารทำงาน, kg/s
n	=	อายุโครงการ, year
PEC	=	Production electricity cost, USD
$\dot{Q}$	=	พลังงานความร้อน, W

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

$\dot{Q}_{cf}$	=	พลังงานความร้อนที่น้ำหล่อเย็นได้รับจากสารทำงาน, W
$\dot{Q}_{cond}$	=	พลังงานความร้อนที่เครื่องควบแน่น, W
$\dot{Q}_{evap}$	=	พลังงานความร้อนที่เครื่องระเหยได้รับจากแหล่งความร้อน, W
$\dot{Q}_{hf}$	=	พลังงานความร้อนจากแหล่งความร้อน, W
r	=	อัตราดอกเบี้ยเงินกู้ธนาคาร
t	=	ปีที่โครงการดำเนินงาน
t_{op}	=	ระยะเวลาผลิตไฟฟ้าใน 1 ปี, hr
T	=	อุณหภูมิ, °C
T_5	=	อุณหภูมิน้ำร้อนที่ตำแหน่งที่ 5, °C
T_6	=	อุณหภูมิน้ำร้อนที่ตำแหน่งที่ 6, °C
T_7	=	อุณหภูมิน้ำหล่อเย็นที่ตำแหน่งที่ 7, °C
T_8	=	อุณหภูมิน้ำหล่อเย็นที่ตำแหน่งที่ 8, °C
T_{sur}	=	อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม, °C
U	=	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม, W/(m ² .K)
$\dot{V}$	=	ปริมาตรการไหล, l/s
$\dot{V}_3$	=	ปริมาตรการไหลที่ตำแหน่งที่ 3, l/s
$\dot{V}_4$	=	ปริมาตรการไหลที่ตำแหน่งที่ 4, l/s
VFR	=	อัตราส่วนปริมาตรการไหล
$\dot{W}_{net}$	=	งานสุทธิ, W
$\dot{W}_{pump}$	=	งานของปั๊ม, W
$\dot{W}_{turb}$	=	งานของกังหัน, W
$Z_{cold,pump}$	=	ราคาปั๊มน้ำหล่อเย็น, USD
Z_{cond}	=	ราคาเครื่องควบแน่น, USD
$Z_{elect\&contr}$	=	ราคาอุปกรณ์ไฟฟ้าเครื่องวัดและควบคุม, USD
$Z_{engineer}$	=	ค่าจ้างวิศวกร, USD
Z_{evap}	=	ราคาเครื่องระเหย, USD
$Z_{expander}$	=	ราคาเครื่องขยาย หรือกังหัน, USD
Z_{gen}	=	ราคาเครื่องกำเนิดไฟฟ้า, USD

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

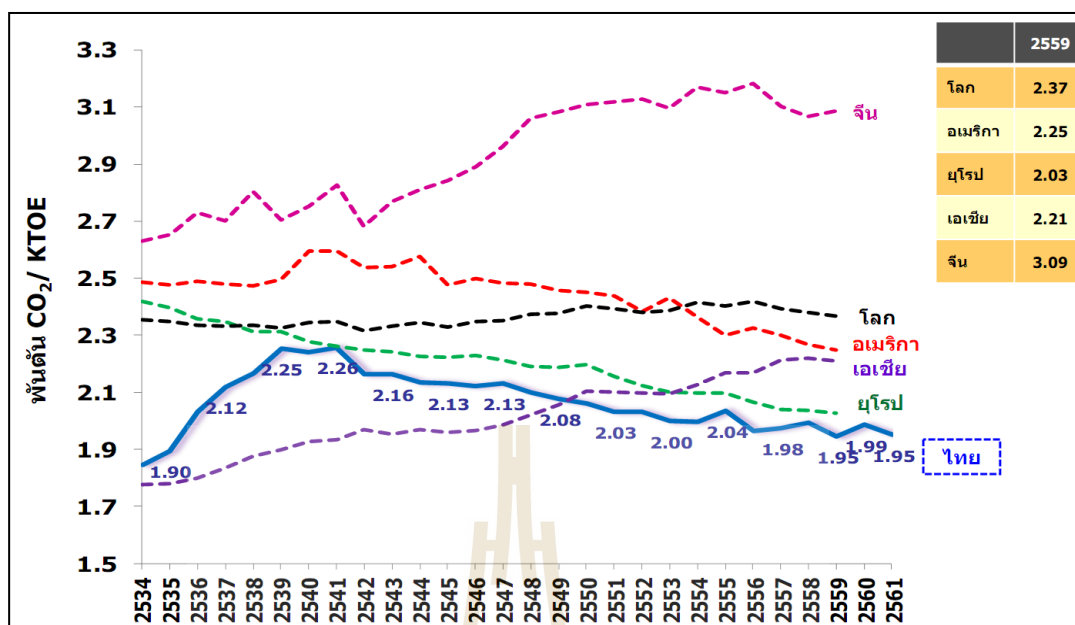
$Z_{\text{hot,pump}}$	=	ราคาปั๊มน้ำร้อน, USD
$Z_{\text{O\&M}}$	=	Operating and maintenance cost, USD
Z_{operator}	=	งบประมาณค่าแรงงานต่อปี, USD
Z_{pipe}	=	รากระบบท่อในโรงไฟฟ้า, USD
Z_{pump}	=	ราคาปั๊มสารทำงาน, USD
Z_{tank}	=	ราคาถังเก็บสารทำงาน, USD
$Z_{\text{technician}}$	=	ค่าจ้างช่างเทคนิค, USD
ΔT_{LM}	=	ความแตกต่างอุณหภูมิเฉลี่ยแบบล็อก, °C
ΔT_{pp}	=	Pinch point temperature difference, °C
ρ	=	ความหนาแน่น, kg/m ³
ρ_3	=	ความหนาแน่นสารทำงานที่ตำแหน่งที่ 3, kg/m ³
ρ_4	=	ความหนาแน่นสารทำงานที่ตำแหน่งที่ 4, kg/m ³
$\eta_{\text{E,overall}}$	=	ประสิทธิภาพเอ็กเซอร์จีรวมของโรงไฟฟ้า
$\eta_{\text{E,p}}$	=	ประสิทธิภาพเอ็กเซอร์จีของกำลังงาน
$\eta_{\text{i,pump}}$	=	ประสิทธิภาพไอเซนโทรปิกของปั๊ม
$\eta_{\text{i,turb}}$	=	ประสิทธิภาพไอเซนโทรปิกของกังหัน
η_{th}	=	ประสิทธิภาพทางความร้อน

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันไม่อาจจะปฏิเสธได้ว่าพลังงานมีความสำคัญต่อการดำเนินชีวิตของมนุษย์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งพลังงานไฟฟ้า ซึ่งเป็นพลังงานขับเคลื่อนที่สำคัญ ทั้งในด้านเศรษฐกิจ โทรมนาคม และด้านอื่น ๆ อีกทั้งการใช้พลังงานไฟฟ้านั้นมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นจากการเพิ่มขึ้นของประชากร และความเจริญทางด้านเทคโนโลยี โดยส่วนใหญ่เชื้อเพลิงที่ใช้ผลิตไฟฟ้านั้นจะใช้เชื้อเพลิงฟอสซิล ไม่ว่าจะเป็น น้ำมัน ถ่านหิน และก๊าซธรรมชาติ ซึ่งสิ่งเหล่านี้ล้วนเป็นเชื้อเพลิงที่ใช้แล้วหมดไป โดยต้องใช้เวลาหลายล้านปีในกระบวนการทับถมจากซากพืชซากสัตว์ เพื่อให้เกิดเชื้อเพลิงดังกล่าว อีกทั้งการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิลในการผลิตไฟฟ้า การคมนาคม และอุตสาหกรรมยังก่อให้เกิดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ไนโตรสออกไซด์ และก๊าซโอโซน ก๊าซเหล่านี้เป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของโลก หรือปรากฏการณ์ที่เรียกว่า ภาวะโลกร้อน ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อสภาพแวดล้อมและสิ่งมีชีวิต ในปัจจุบันหลายประเทศตระหนักถึงปัญหาดังกล่าว และได้มีการลดการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิล เพื่อลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ดังแสดงในรูปที่ 1.1 แผนภาพแสดงการปล่อยก๊าซ CO₂ ต่อการใช้พลังงาน (สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน) สำหรับประเทศไทยในปี 2561 มีการปล่อยก๊าซ CO₂ เฉลี่ย 1.95 พันตัน CO₂ต่อการ ใช้พลังงาน 1 KTOE ลดลง 0.6% เมื่อเปรียบเทียบการปล่อยก๊าซ CO₂ ต่อการใช้พลังงานของประเทศไทยกับต่างประเทศ ซึ่งพบว่าประเทศไทยมีอัตราการปล่อยก๊าซ CO₂ ในปี 2561 ที่ระดับค่อนข้างต่ำเมื่อเทียบกับค่าเฉลี่ยของประเทศต่าง ๆ ทั้งนี้เป็นผลสืบเนื่องมาจากนโยบายของกระทรวงพลังงาน อาทิ แผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก (AEDP) และแผนพัฒนากำลังผลิตไฟฟ้าของประเทศไทย (PDP) ซึ่งแผนดังกล่าวมีการส่งเสริมการใช้พลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือกมากขึ้น อีกทั้งมีการกระจายชนิดเชื้อเพลิงในการผลิตไฟฟ้าโดยปรับลดสัดส่วนการผลิตไฟฟ้าจากก๊าซธรรมชาติ และเพิ่มสัดส่วนการใช้พลังงานหมุนเวียนในการผลิตไฟฟ้ามากขึ้น ซึ่งทำให้การปล่อยก๊าซ CO₂ ลดลงเนื่องจากเป็นพลังงานสะอาดเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมไม่ก่อให้เกิดมลพิษทางอากาศ สำหรับประเทศที่พัฒนาแล้วในทวีปอเมริกาและกลุ่มสหภาพยุโรปมีการใช้นิวเคลียร์ ซึ่งเป็นเชื้อเพลิงที่ไม่เกิดการปล่อยก๊าซ CO₂ ในการผลิตไฟฟ้า แต่ประเทศไทยยังต้องพึ่งพาพลังงานจากเชื้อเพลิงฟอสซิลเป็นเชื้อเพลิงหลักในการ

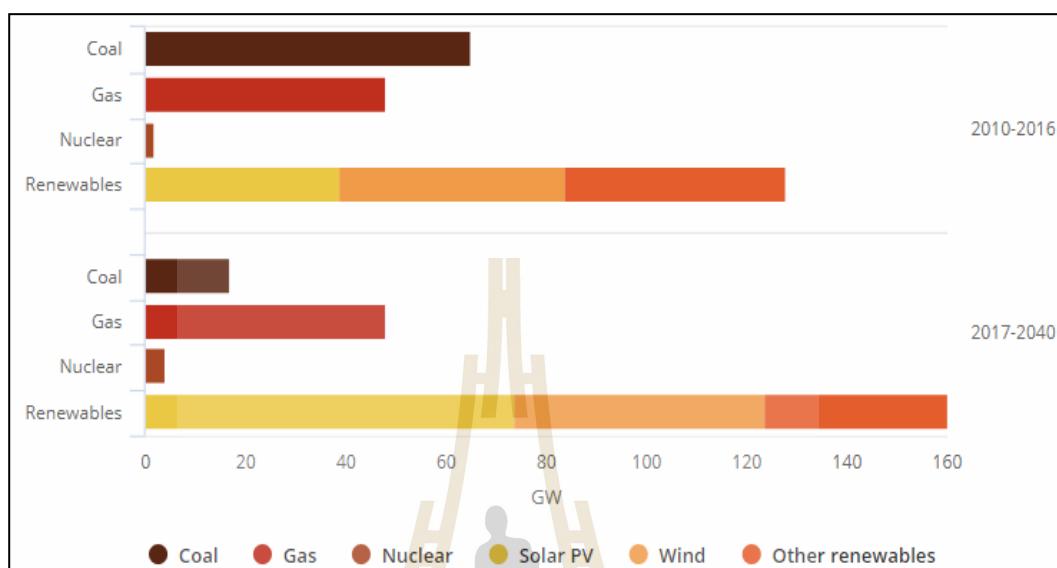


รูปที่ 1.1 แผนภาพปริมาณการปล่อยก๊าซ CO₂ต่อการใช้พลังงาน 1 KTOE
(สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน, 2561)

ผลิตไฟฟ้าโดยเฉพาะอย่างยิ่ง ก๊าซธรรมชาติ ซึ่งมีปริมาณการใช้สูงถึง 70% ของเชื้อเพลิงทั้งหมดที่ใช้ผลิตไฟฟ้า จากปัญหาการปล่อยก๊าซ CO₂ ที่ก่อให้เกิดสภาวะโลกร้อน ทั่วโลกมีค่าเฉลี่ยการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิลผลิตไฟฟ้าในปริมาณลดลง โดยเฉพาะถ่านหิน (coal) และฟิสิกการใช้พลังงานทดแทนผลิตไฟฟ้าเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะการผลิตไฟฟ้าด้วยแสงอาทิตย์ ซึ่งมีการคาดการณ์จะเพิ่มขึ้น 40% จากปี 2017 - 2040 (International energy agency, 2017) ดังแสดงในรูปที่ 1.2 แผนภาพการเพิ่มกำลังการผลิตไฟฟ้าสุทธิเฉลี่ยทั่วโลกแยกตามประเภทของพลังงาน

สำหรับพลังงานทดแทนในประเทศไทยนั้นมีการนำพลังงานทดแทนมาใช้ผลิตไฟฟ้ามากขึ้น เช่น พลังงานแสงอาทิตย์ ชีวมวล ก๊าซชีวภาพ เชื้อเพลิงขยะ และนอกจากนี้ประเทศไทยยังมีพลังงานทดแทนที่เป็นอีกหนึ่งทางเลือกที่น่าสนใจคือ แหล่งความร้อนใต้พิภพ สามารถแบ่งได้ 3 ประเภท ได้แก่ 1. ความร้อนใต้พิภพที่เป็นลักษณะหินร้อน 2. ความร้อนใต้พิภพที่อยู่ในรูปของไอน้ำ และ 3. ความร้อนใต้พิภพที่อยู่ในรูปของน้ำร้อน ดังแสดงในรูปที่ 1.3 สำหรับประเทศไทยโดยส่วนใหญ่จะเป็นประเภทที่ 3 โดยกรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน (พพ.) ได้มีการศึกษาไว้เมื่อ ปี 2549 ประเทศไทยมีศักยภาพแหล่งน้ำพุร้อนประมาณ 112 แหล่ง กระจายอยู่ทุกภูมิภาค ยกเว้นภาคตะวันออกเฉียงเหนือ และมีอุณหภูมิน้ำร้อนที่ผิวดินอยู่ในช่วง 40-100 องศาเซลเซียส ซึ่งส่วนใหญ่จะพบแหล่งน้ำพุร้อนที่มีต้นกำเนิดจากหินแกรนิต โดยเฉพาะบริเวณที่เป็น

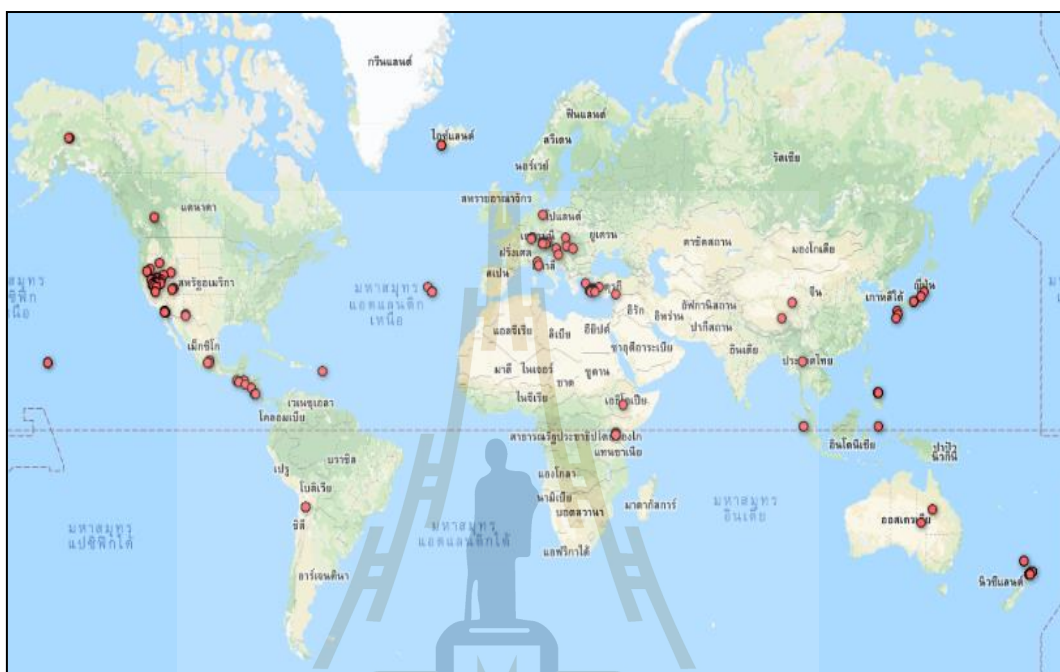
แนวรอยเลื่อนส่วนใหญ่อยู่ในแถบภาคเหนือ เช่น แหล่งน้ำพุร้อนแม่จัน จ.เชียงราย และ อ.ฝาง จ.เชียงใหม่ (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2562)



รูปที่ 1.2 แผนภาพการเพิ่มกำลังการผลิตไฟฟ้าสุทธิเฉลี่ยทั่วโลกแยกตามประเภทของพลังงาน (International energy agency, 2017)

แหล่งความร้อนข้างต้นสามารถนำมาใช้เป็นแหล่งความร้อนเพื่อผลิตไฟฟ้าด้วยเทคโนโลยีที่เรียกว่า Organic Rankine Cycle (ORC) โรงไฟฟ้า ORC หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า โรงไฟฟ้าวัฏจักรแรงดันอินทรีย์ มีลักษณะการทำงานเหมือนกับโรงไฟฟ้าพลังไอน้ำ แต่จะเปลี่ยนสารทำงานจากน้ำไปเป็นสารอินทรีย์ (Organic fluid) เช่น สารทำความเย็น R134a R32 R245fa และอื่น ๆ สารเหล่านี้จะมีจุดเดือดที่ต่ำกว่าหรือน้อยกว่าหรือน้ำ มีทั้งสารที่มีจุดเดือดต่ำกว่าน้ำและสูงกว่าน้ำ ซึ่งสามารถเลือกใช้ให้เหมาะสมกับแหล่งความร้อนได้ ทั้งนี้สารที่มีจุดเดือดต่ำกว่าน้ำจะสามารถใช้แหล่งความร้อนที่มีอุณหภูมิต่ำเป็นแหล่งพลังงานได้ เช่น แหล่งความร้อนใต้พิภพ ซึ่งจากอดีตถึงปัจจุบันในต่างประเทศมีการนำเทคโนโลยีนี้ไปใช้ผลิตไฟฟ้าด้วยแหล่งความร้อนใต้พิภพกว่า 155 แห่ง ทั่วโลก (ORC world map, 2018) ดังแสดงในรูปที่ 1.3 ซึ่งเป็นแผนที่แสดงตำแหน่งของโรงไฟฟ้า ORC ที่แหล่งความร้อนใต้พิภพเป็นแหล่งพลังงาน โดยการนำแหล่งความร้อนใต้พิภพที่อยู่ในรูปของน้ำร้อนมาใช้ผลิตไฟฟ้า ดังแสดงในรูปที่ 1.4 ซึ่งปั๊มจะสูบน้ำร้อนมาแลกเปลี่ยนความร้อนในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่มีสารทำงาน ด้วยสารทำงานที่มีจุดเดือดต่ำกว่าสารทำงานจะระเหยกลายเป็นไอ ซึ่งไอที่ได้จะปั่นกังหันให้ทำงาน เพื่อปั่นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

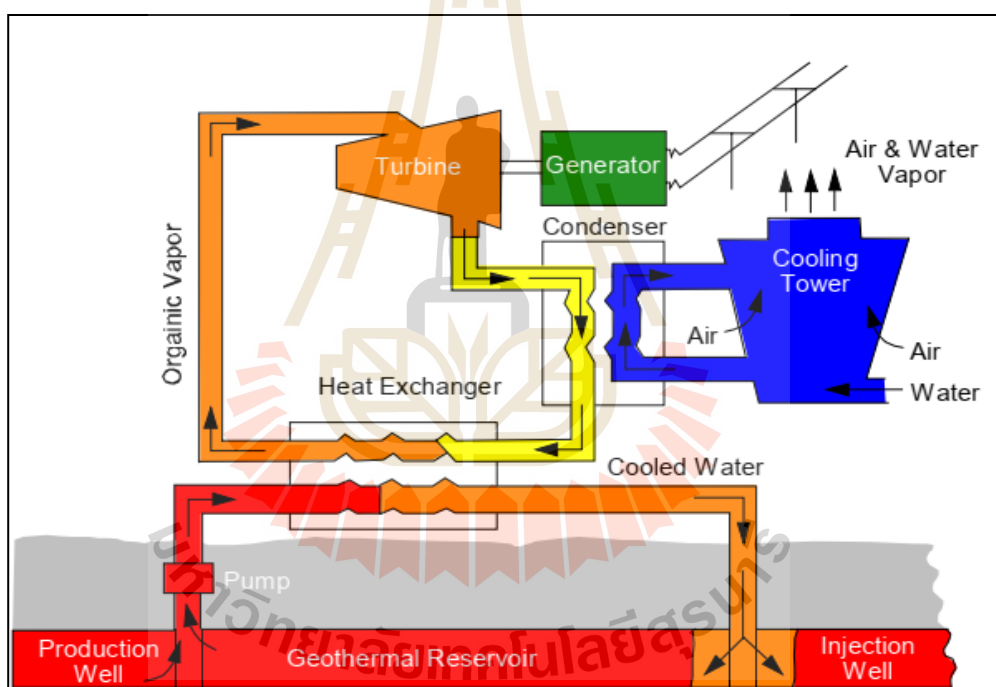
สารทำงานที่ออกจากกังหันจะเข้าเครื่องควบแน่น โดยมีน้ำหล่อเย็นดึงเอาความร้อนออกจากสารทำงาน ทำให้สารทำงานกลั่นตัวเป็นของเหลว บั้มสารทำงานจะสูบสารทำงานเข้าไปรับความร้อนอีกรอบ โดยทำงานเป็นวัฏจักรและมีกระบวนการทำงานเป็นระบบปิด



รูปที่ 1.3 แผนที่ระบุตำแหน่งโรงไฟฟ้า ORC ที่ใช้แหล่งความร้อนได้พิภพเป็นแหล่งพลังงาน (ORC world map, 2018)

ทั้งนี้เทคโนโลยีโรงไฟฟ้าประเภทนี้ยังสามารถใช้กับแหล่งความร้อนได้หลากหลาย เช่น ชีวมวล แสงอาทิตย์ และความร้อนทิ้งจากอุตสาหกรรม และเป็นเทคโนโลยีที่มีจำหน่ายในต่างประเทศ เช่น ประเทศสหรัฐอเมริกา มีบริษัท ORMAT, Electratherm ประเทศอิตาลีมีบริษัท Turboden, Exergy ประเทศเยอรมัน Bosch KWK, GMK (Quoilin et al., 2013) และประเทศไทยมีบริษัท Advance Thermo Solution (บริษัท แอดวานซ์ เทอร์โม โซลูชั่น จำกัด, 2562) นอกจากนี้จากแผนที่ ORC World Map ในรูปที่ 1.3 จะเห็นว่าสำหรับประเทศไทยมีโรงไฟฟ้า ORC ที่ใช้แหล่งความร้อนได้พิภพออยู่ 1 แห่ง ซึ่งตั้งอยู่ที่จังหวัดเชียงใหม่ โดยมีการศึกษาทดลองการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานความร้อนได้พิภพที่ อ.ฝาง จ.เชียงใหม่ ด้วยความร่วมมือระหว่างกรมทรัพยากรธรณี มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ และการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย มีกำลังการผลิต 300 กิโลวัตต์ ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2532 – ปัจจุบัน ซึ่งเป็นโรงไฟฟ้าสาธิตที่ใช้แหล่งความร้อนได้พิภพผลิตไฟฟ้าแห่งแรกของ

ประเทศ และเป็นแห่งแรกในเอเชียอาคเนย์ (กรมทรัพยากรธรณี, 2561) ซึ่งจากอดีตจนถึงปัจจุบัน ในระยะเวลากว่า 30 ปี การพัฒนาแหล่งความร้อนใต้พิภพในประเทศไทยล่าช้าเนื่องจากข้อจำกัดของเทคโนโลยีและงบประมาณในการลงทุนที่ยังสูง โดยเฉพาะด้านการสำรวจและการขุดเจาะ และล่าสุดเมื่อปี 2561 วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ได้รับทุนสนับสนุนจากกองทุนเพื่อส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงาน สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน กระทรวงพลังงาน ในโครงการผลิตไฟฟ้าร่วมกับความเย็นและความร้อนแบบบรันได จากพลังงานความร้อนใต้พิภพในประเทศไทย เป็นโรงไฟฟ้า ORC ที่ใช้แหล่งความร้อนใต้พิภพน้ำพุร้อนสันกำแพง อ.แม่ออน ตามพระราชดำริ จ.เชียงใหม่ มีกำลังการผลิตไฟฟ้า 15 kW นอกจากนี้ยังเป็นศูนย์เรียนรู้เทคโนโลยีพลังงานความร้อนใต้พิภพ



รูปที่ 1.4 แผนภาพการนำความร้อนใต้พิภพมาใช้ผลิตไฟฟ้าด้วยโรงไฟฟ้า ORC

(John Lund, 2007)

วิทยานิพนธ์นี้จึงสนใจที่จะศึกษาการใช้แหล่งความร้อนใต้พิภพมาผลิตไฟฟ้า ด้วยเทคโนโลยีของโรงไฟฟ้า ORC และโรงไฟฟ้า Trilateral cycle (TLC) เพื่อออกแบบและประเมินศักยภาพกำลังการผลิตไฟฟ้าสูงสุดของโรงไฟฟ้าทั้งสองประเภท พร้อมทั้งประเมินงบประมาณในการลงทุน ต้นทุนการผลิตไฟฟ้า

1.2 วัตถุประสงค์

- 1.2.1 เพื่อศึกษาและออกแบบโรงไฟฟ้า ORC และโรงไฟฟ้า TLC ที่ใช้แหล่งความร้อนใต้พิภพเป็นแหล่งพลังงาน
- 1.2.2 เพื่อเปรียบเทียบสมรรถนะของโรงไฟฟ้า ORC และโรงไฟฟ้า TLC
- 1.2.3 เพื่อประเมินต้นทุนการผลิตไฟฟ้าโรงไฟฟ้า ORC และโรงไฟฟ้า TLC ที่ใช้แหล่งความร้อนใต้พิภพเป็นแหล่งพลังงาน

1.3 ขอบเขตการศึกษา

การศึกษานี้เป็นการสร้างแบบจำลองระบบโรงไฟฟ้า ORC ที่ใช้แหล่งความร้อนใต้พิภพเป็นแหล่งพลังงานด้วยคอมพิวเตอร์ เพื่อประเมินศักยภาพการทำงานและหาจุดทำงานที่โรงไฟฟ้า ORC และ TLC ผลิตไฟฟ้าสูงสุด โดยมีขอบเขตการศึกษาดังนี้

- 1.3.1 พิจารณาแหล่งความร้อนใต้พิภพ (น้ำพุร้อนฝาง) อำเภอฝาง จังหวัดเชียงใหม่
- 1.3.2 พิจารณาอุณหภูมิความร้อนอยู่ในช่วง $100 - 120^{\circ}\text{C}$
- 1.3.3 ใช้โปรแกรม MATLAB เพื่อการสร้างแบบจำลองระบบ
- 1.3.4 ใช้โปรแกรม NIST REFPROP เพื่อคำนวณค่าคุณสมบัติของสารทำงาน

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 มีองค์ความรู้และความเข้าใจในระบบโรงไฟฟ้า ORC และโรงไฟฟ้า TLC
- 1.4.2 เป็นแนวทางในการประเมินต้นทุนการผลิตไฟฟ้าด้วยเทคโนโลยี ORC และ TLC ที่ใช้แหล่งความร้อนใต้พิภพเป็นแหล่งพลังงาน
- 1.4.3 เป็นข้อมูลทางเลือกของการนำพลังงานทดแทนมาใช้ในการผลิตไฟฟ้า

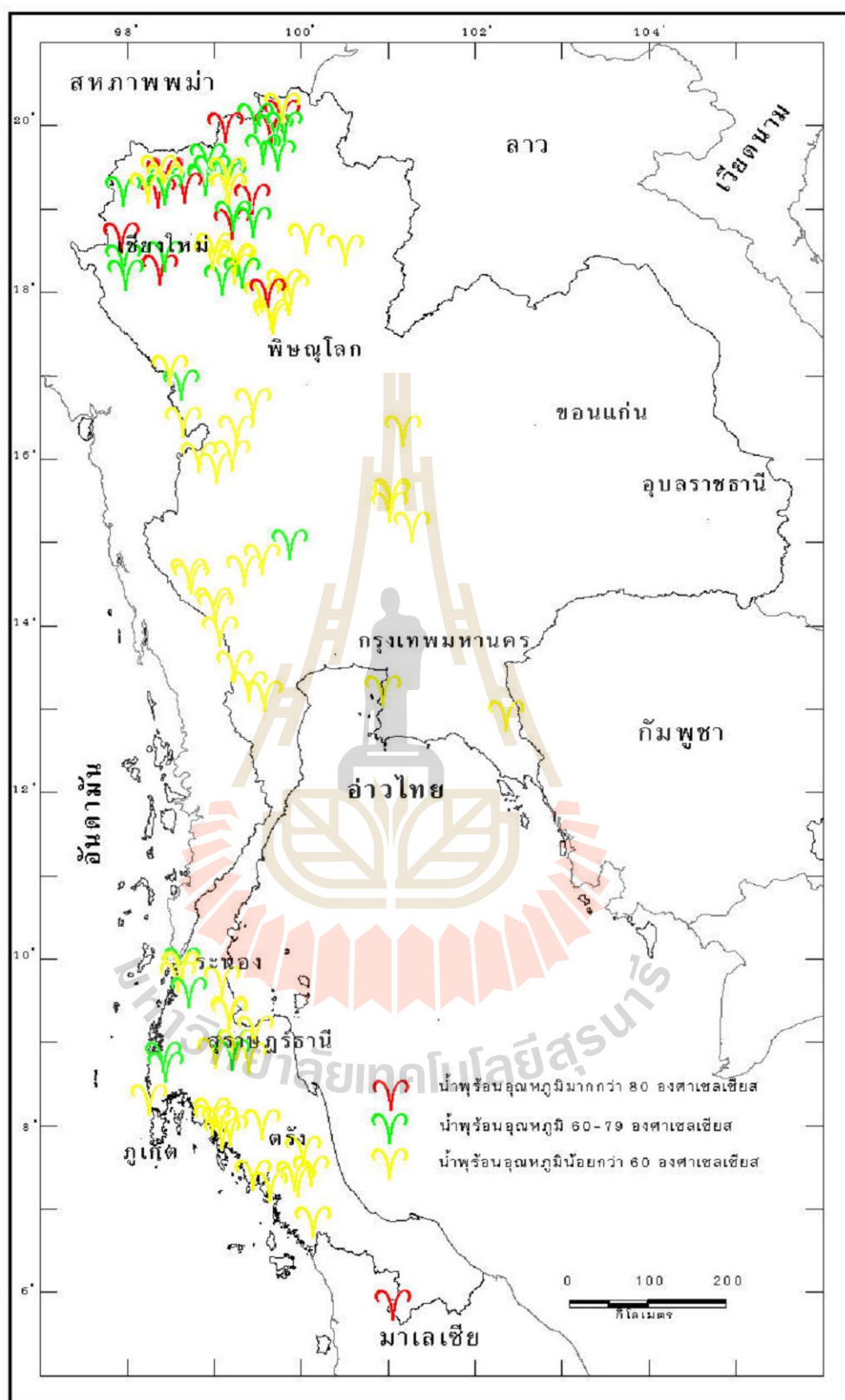
บทที่ 2

ปรัทัศนัวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

พลังงานความร้อนใต้พิภพ (geothermal energy) เป็นพลังงานความร้อนที่ถูกกักเก็บอยู่ใต้พื้นผิวโลก ซึ่งจะมีอุณหภูมิสูงขึ้นตามความลึกของพื้นผิวโลก พลังงานความร้อนใต้พิภพนี้ มีทั้งที่อยู่ในสถานะเป็นไอน้ำร้อน สถานะน้ำร้อน สถานะหินร้อน และที่เป็นหินหลอมเหลว ขึ้นอยู่กับโครงสร้างทางธรณีและสภาวะแวดล้อมในพื้นที่ สำหรับประเทศไทย มีการนำแหล่งความร้อนมาใช้ประโยชน์ทั้งทางตรงและทางอ้อม เช่น การใช้เพื่อเป็นแหล่งท่องเที่ยวเชิงสุขภาพ การบำบัดทางการแพทย์ รวมถึงการนำความร้อนไปใช้ประโยชน์ในการอบแห้งผลผลิตทางการเกษตรและทำห้องเย็นสำหรับการเก็บผลผลิตทางการเกษตร นอกจากนี้ยังสามารถนำมาใช้ผลิตไฟฟ้า โดยมีกำลังการผลิต ขนาด 300 kW น้ำพุร้อนฝาง ที่อำเภอฝาง และ 15 kW น้ำพุร้อนสันกำแพง ที่อำเภอแม่ฮ่องสอน จังหวัดเชียงใหม่ (กรมทรัพยากรธรณี, 2561)

2.1 ศักยภาพแหล่งความร้อนใต้พิภพในประเทศไทย

สำหรับประเทศไทยนั้นมีแหล่งน้ำพุร้อนอยู่เป็นจำนวนมากที่จะนำมาเป็นแหล่งพลังงานให้กับโรงไฟฟ้า ORC จากการสำรวจของกรมทรัพยากรธรณี พบว่าในประเทศไทยในปัจจุบันมีแหล่งน้ำร้อนที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติที่มีน้ำร้อนออกมาจากใต้ดิน จำนวน 112 แหล่ง มีอุณหภูมิอยู่ในช่วง 40 - 100°C กระจายอยู่ทั่วไปตั้งแต่ทางภาคเหนือ ภาคตะวันตก ภาคกลาง และภาคใต้ ดังแสดงในรูปที่ 2.1 และส่วนใหญ่แหล่งน้ำพุร้อนที่มีอุณหภูมิ น้ำผิวดิน สูงกว่า 90°C จะอยู่ทางภาคเหนือของประเทศไทย ดังแสดงในตารางที่ 2.1 และแสดงอุณหภูมิ น้ำร้อน ทั้ง 112 แหล่งในภาคผนวก ข แหล่งน้ำพุร้อนในไทยนอกจากจะใช้เป็นแหล่งท่องเที่ยวแล้วนั้น ยังนำไปใช้ประโยชน์ทางการเกษตรและอุตสาหกรรม (กรมทรัพยากรธรณี, 2561) และในประเทศไทยจังหวัดเชียงใหม่เป็นจังหวัดที่มีการนำพลังงานความร้อนใต้พิภพมาใช้ประโยชน์มากที่สุด เช่น บ่มใบยาสูบ อบแห้งพริก ลำไย และห้องเย็นรวมถึงการนำมาใช้ในการผลิตไฟฟ้าดังที่กล่าวไว้ข้างต้น ข้อมูลค่าศักยภาพการผลิตพลังงานไฟฟ้าจากพลังงานความร้อนใต้พิภพหรือน้ำพุร้อน มีเกณฑ์ที่ใช้ในการประเมินศักยภาพการผลิตพลังงาน คือ อุณหภูมิ น้ำร้อนผิวดิน ซึ่งสามารถแบ่งได้ 5 ช่วงอุณหภูมิ (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2558)



รูปที่ 2.1 แผนที่แสดงแหล่งน้ำพุร้อนในประเทศไทย (กรมทรัพยากรธรณี, 2561)

ตารางที่ 2.1 แหล่งน้ำร้อนทางภาคเหนือของประเทศไทยที่อุณหภูมิสูงกว่า 90 องศาเซลเซียส
(กรมทรัพยากรธรณี, 2561)

บ่อน้ำร้อน	อำเภอ	จังหวัด	อุณหภูมิ (°C)
แม่จันทร์	แม่จัน	เชียงราย	93
สันกำแพง	แม่ออน	เชียงใหม่	99
สบโป่ง	เวียงป่าเป้า	เชียงราย	92
ฝาง	ฝาง	เชียงใหม่	99
โป่งเดือด	แม่แตง	เชียงใหม่	99
เทพนม	แม่แจ่ม	เชียงใหม่	99
เมืองแปง	ปาย	แม่ฮ่องสอน	95

1) ค่าอุณหภูมิน้ำร้อนที่ผิวดินมากกว่า 90°C มีศักยภาพสูงมาก ทั้งในการผลิตไฟฟ้าด้วยระบบวัฏจักรแรงดันอินทรีย์ (organic Rankine cycle) หรือระบบ thermoelectric และศักยภาพในการผลิตความร้อนเพื่อการอบแห้งด้วยการให้ความร้อนโดยตรง (heating & drying) การอบแห้งด้วยการลดความชื้น (cooling & drying)

2) ค่าอุณหภูมิน้ำร้อนที่ผิวดินระหว่าง 70 – 90°C มีศักยภาพสูง สามารถใช้ในการผลิตไฟฟ้าด้วยระบบ thermoelectric และศักยภาพในการผลิตความร้อนเพื่อการอบแห้งด้วยการให้ความร้อนโดยตรง (heating & drying) การอบแห้งด้วยการลดความชื้น (cooling & drying)

3) ค่าอุณหภูมิน้ำร้อนที่ผิวดินระหว่าง 50 – 70°C มีศักยภาพปานกลาง สามารถใช้ในการผลิตความร้อนเพื่อการอบแห้งด้วยระบบผลิตความร้อน (heat pump & drying)

4) ค่าอุณหภูมิน้ำร้อนที่ผิวดินระหว่าง 40 – 50°C มีศักยภาพต่ำ สามารถใช้ในการผลิตความร้อนเพื่อการอบแห้งด้วยระบบผลิตความร้อน (heat pump & drying) และผลิตน้ำร้อนเพื่อการอุปโภค บริโภค

5) ค่าอุณหภูมิน้ำร้อนที่ผิวดินต่ำกว่า 40°C ไม่มีศักยภาพในการผลิตพลังงาน

2.2 การพัฒนาและใช้ประโยชน์พลังงานความร้อนใต้พิภพในประเทศไทย

การนำแหล่งความร้อนมาใช้ประโยชน์นั้นในประเทศทางยุโรปและอเมริกาใช้มานานกว่า 100 ปี เพื่อให้ความอบอุ่นแก่ที่อยู่อาศัย และมีการนำมาใช้เพื่อผลิตไฟฟ้าขนาด 250 kW เริ่มขึ้นในปี ค.ศ. 1904 ที่เมือง Larderello ประเทศอิตาลี และสหรัฐอเมริกาเริ่มใช้แหล่งความร้อนใต้พิภพผลิต

ตารางที่ 2.2 การใช้ประโยชน์แหล่งน้ำพุร้อนแบ่งตามอุณหภูมิน้ำร้อน (มานพ รักษาสกุลวงศ์, 2556)

อุณหภูมิ (°C)	การใช้ประโยชน์โดยตรง	ใช้ผลิตไฟฟ้า
200	-	โรงผลิตกระแสไฟฟ้าจากแรงดันไอน้ำ
180	อุตสาหกรรมห้องเย็นจากแอมโมเนีย, โรงงานกระดาษ	
160	เครื่องอบแห้งปลาและไม้, โรงงานอุตสาหกรรมอลูมินา	
140	โรงบรรจุอาหารกระป๋อง, โรงทำน้ำตาล	
120	การผลิตน้ำดื่ม, โรงบ่มซีเมนต์	โรงผลิตกระแสไฟฟ้าจากการถ่ายเทความร้อน
100	เครื่องบ่มแห้งผลิตผลการเกษตร, อุตสาหกรรมปลาแห้ง	
80	ให้ความอบอุ่นบ้านเรือน, ห้องควบคุมอุณหภูมิสำหรับปลูกต้นไม้, ห้องเย็น	
60	เครื่องปรับอากาศ, ห้องควบคุมอุณหภูมิสำหรับเลี้ยงสัตว์	-
40	โรงบ่มดิน, ห้องควบคุมอุณหภูมิสระว่ายน้ำ	
20	ควบคุมอุณหภูมิเลี้ยงปลา	

ไฟฟ้าขนาด 250 kW เมื่อ ค.ศ. 1922 ปัจจุบันการพัฒนาแหล่งความร้อนและเทคโนโลยีสามารถเพิ่มกำลังการผลิตไฟฟ้าได้มากกว่า 3 MW (มานพ รักษาสกุลวงศ์, 2556) การใช้ประโยชน์สามารถแบ่งได้ 2 วิธี คือ การใช้ประโยชน์โดยตรงและใช้ผลิตไฟฟ้า ดังแสดงในตารางที่ 2.2 และรูปที่ 2.2 สำหรับประเทศไทยนำแหล่งความร้อนไปใช้ในหลายด้าน ได้แก่ กระบวนการอบแห้ง (drying process) ซึ่งมหาวิทยาลัยเชียงใหม่ กรมวิชาการเกษตรและการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ได้ร่วมมือพัฒนาห้องอบแห้งโดยใช้น้ำร้อนที่ปล่อยจากโรงไฟฟ้า ซึ่งมีอุณหภูมิ 77°C ไหลเวียนเพื่อใช้ในการเกษตร ซึ่งได้ทดลองอบพริกให้แห้งโดยใช้เวลา 3 วัน มีอัตราค่าอบแห้ง 1.20 บาท/กิโลกรัม อีกทั้งมีการใช้แหล่งความร้อนมาใช้เป็นแหล่งความร้อนให้กับระบบห้องทำความเย็นซึ่งมีกำลังทำความเย็น 24,000 บีทียูต่อชั่วโมง ให้ความเย็นที่อุณหภูมิ 4°C ใช้สำหรับเก็บผลผลิตทางการเกษตรได้ถึง 5 ตัน และใช้สำหรับนันทนาการและการท่องเที่ยว ซึ่งน้ำที่ผ่านกระบวนการต่าง ๆ ทั้งห้องอบแห้งและห้องทำความเย็น อุณหภูมิน้ำร้อนจะอยู่ประมาณ 40°C เหมาะสำหรับการอาบน้ำ



รูปที่ 2.2 แสดงการพัฒนาโครงการเอนกประสงค์ พลังงานความร้อนใต้พิภพ
(มานพ รักษาสกุลวงศ์, 2556)

นอกจากนี้แหล่งความร้อนใต้พิภพยังสามารถนำมาเป็นแหล่งความร้อนเพื่อผลิตไฟฟ้า ดังที่กล่าวไว้ข้างต้น ซึ่งเป็นโรงไฟฟ้าสองวงจร หรือ โรงไฟฟ้า ORC ที่ติดตั้งอยู่ที่บ่อน้ำพุร้อนฝาง อ.ฝาง จ.เชียงใหม่ ด้วยความร่วมมือระหว่างกรมทรัพยากรธรณี มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ และการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย โดยมีกำลังการผลิต 300 กิโลวัตต์

สำหรับโรงไฟฟ้า 2 วงจรที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น หมายถึงโรงไฟฟ้าที่อาศัยหลักการพื้นฐาน เช่นเดียวกับวัฏจักรแรงคิน (Rankine cycle) หรือโรงไฟฟ้าพลังไอน้ำ ซึ่งจะประกอบด้วยวงจรน้ำร้อนเป็นวงจรที่ 1 และวงจรของสารทำงานเป็นวงจรที่ 2 ดังแสดงในรูปที่ 1.4 ในบทที่ 1 หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่าโรงไฟฟ้าโออาร์ซี ซึ่งโรงไฟฟ้าโออาร์ซีที่บ่อน้ำพุร้อนฝาง จ.เชียงใหม่ มีลักษณะของโรงไฟฟ้าเป็น module สำเร็จรูป ประกอบด้วยอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน เทอร์ไบน์ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเกียร์ปั๊มน้ำมันหล่อลื่น วาล์ว อุปกรณ์การวัดและควบคุม อุปกรณ์ทั้งหมดประกอบและติดตั้งในโครงสร้างเหล็กเท่าตู้คอนเทนเนอร์มาตรฐาน 40 ฟุต สารทำงานนำมาบรรจุภายหลังเมื่อทำการติดตั้งเสร็จแล้ว นอกจากนี้ยังมีข้อมูลของการออกแบบและข้อมูลของการบันทึกค่าระหว่างการเดินเครื่องของโรงไฟฟ้า มีดังนี้ (เชิดชัย อุทธากิจ, 2538)

ข้อมูลการออกแบบที่กำลังการผลิต 300 kW

Tin – hot	115°C
Tout – hot	77°C
อัตราการไหลของน้ำร้อน	79 m ³ /h
Tin – cold	15°C
Tout – cold	23°C
อัตราการไหลของน้ำหล่อเย็น	79 m ³ /h

จากข้อมูลที่ทำการบินที่ตลอดระยะเวลาที่เดินเครื่องสามารถสรุปได้ดังนี้

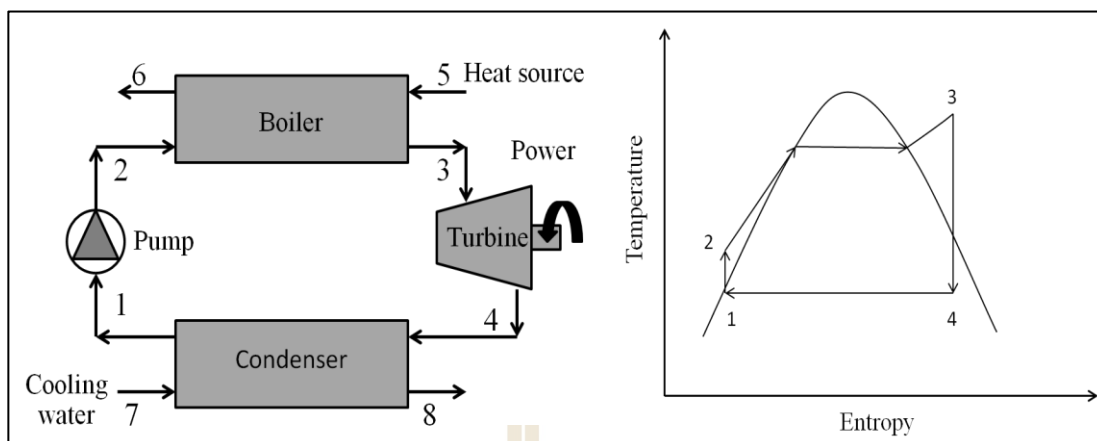
กำลังการผลิตเฉลี่ยของโรงไฟฟ้า	175.5 kW
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	38.2 kW
ค่าเฉลี่ย	
Tin – hot	116.7°C
Tout – hot	77.5°C
Tin – cold	20.6°C
Tout – cold	27.1°C

เมื่อ	Tin – hot	=	อุณหภูมิน้ำร้อนเข้า, °C
	Tout – hot	=	อุณหภูมิน้ำร้อนออก, °C
	Tin – cold	=	อุณหภูมิน้ำเย็นเข้า, °C
	Tout – cold	=	อุณหภูมิน้ำเย็นออก, °C

2.3 วัฏจักรแรงคิน (Rankine cycle, RC)

การทำงานของโรงไฟฟ้ากำลังไอน้ำอาศัยหลักการของวัฏจักรแรงคิน (Rankine cycle)

ซึ่งวัฏจักรที่ใช้งานจริงจะมีความซับซ้อนมากกว่า วัฏจักรแรงคินอย่างง่ายในทางอุดมคติ ประกอบไปด้วย อุปกรณ์ในการทำงาน 4 อุปกรณ์ คือ กังหัน (turbine) เครื่องควบแน่น (condenser) ปั๊ม (pump) และ หม้อต้มน้ำ (boiler) และกระบวนการทางเทอร์โมไดนามิกส์ (อนิรุตต์ มัทธูจีกร, 2559) ดังแสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 แผนภาพวัฏจักรแรงคิน (Rankine cycle, RC)

กระบวนการที่ 1-2 เป็นกระบวนการเพิ่มความดันแบบไอเซนโทรปิก (isentropic compression) โดยที่สารทำงานจะมีสถานะเป็นของเหลวอัดตัวเคลื่อนที่เข้าปั๊ม (pump) และถูกอัดเพิ่มความดันแบบไอเซนโทรปิกจนมีความดันเท่ากับความดันในหม้อต้ม (boiler) และพลังงานที่ปั๊มต้องใช้ในการเพิ่มความดันผลักดันสารทำงานมีค่าตามสมการที่ 2.1

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

เมื่อ	$\dot{W}_{pump}$	คือ	พลังงานที่ปั๊มใช้งาน, W
	$\dot{m}_{wf}$	คือ	อัตราการไหลของสารทำงาน, kg/s
	h_1, h_2	คือ	เอนทัลปีของสารทำงานที่ตำแหน่ง 1 และ 2, kJ/kg (รูปที่ 2.3)

กระบวนการที่ 2-3 เป็นกระบวนการที่สารทำงานได้รับความร้อน โดยมีค่าความดันคงที่ (isobaric heat addition) สารทำงานจะเคลื่อนที่เข้าสู่หม้อต้มหรือเครื่องระเหย (evaporator) ในสถานะของเหลว เมื่อสารทำงานได้รับความร้อนจะมีอุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น จนสารทำงานมีสถานะเป็นของผสมระหว่างของเหลวและก๊าซ (mixture) และมีสถานะเป็นไอร้อนยิ่งยวด (superheated vapor) ที่มีอุณหภูมิสูงกว่าสถานะไออัดตัว จากนั้นไอร้อนยิ่งยวดจะเคลื่อนที่เข้าสู่เครื่องกังหัน ปริมาณความร้อนที่สารทำงานได้รับในกระบวนการนี้ เป็นไปตามสมการที่ 2.2

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

เมื่อ	$\dot{Q}_{evap}$	คือ	ปริมาณความร้อนที่สารทำงานได้ในเครื่องระเหย, W
	h_2, h_3	คือ	เอนทัลปีของสารทำงานที่ตำแหน่ง 2 และ 3, kJ/kg (รูปที่ 2.3)

กระบวนการที่ 3-4 เป็นกระบวนการขยายตัวแบบไอเซนโทรปิกภายในเครื่องกังหัน (turbine) โดยสารทำงานจะมีสถานะเป็นไอร้อนยิ่งยวด เคลื่อนที่เข้าเครื่องกังหัน และขยายตัวแบบไอเซนโทรปิก ทำให้เครื่องกังหันเกิดการหมุนได้พลังงานออกมา ไอร้อนยิ่งยวดที่ขยายตัวผ่านเครื่องกังหันแล้วจะมีค่าความดันและอุณหภูมิลดลงจนมีค่าเท่ากับอุณหภูมิและความดันภายในเครื่องควบแน่น พลังงานที่ได้จากเครื่องกังหันมีค่าตามสมการที่ 2.3

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

เมื่อ	$\dot{W}_{turb}$	คือ	กำลังงานที่ได้จากเครื่องกังหัน, W
	h_3, h_4	คือ	เอนทัลปีของสารทำงานที่ตำแหน่ง 3 และ 4, kJ/kg (รูปที่ 2.3)

กระบวนการที่ 4-1 เป็นกระบวนการระบายความร้อนโดยความดันคงที่ (Isobaric heat rejection) เมื่อสารทำงานออกจากเครื่องกังหัน มีสถานะเป็นไอร้อนยิ่งยวดเข้าสู่เครื่องควบแน่นและถ่ายเทความร้อนให้กับน้ำหล่อเย็น ทำให้ไอร้อนยิ่งยวดเปลี่ยนสถานะเป็นของเหลวอิ่มตัว และสถานะของสารทำงานที่อยู่ในเครื่องควบแน่นเป็นของผสม และไอร้อนยิ่งยวด ซึ่งปริมาณความร้อนของสารทำงานที่ถ่ายเทให้กับน้ำหล่อเย็น เป็นไปตามสมการที่ 2.4

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

เมื่อ	$\dot{Q}_{cond}$	คือ	ปริมาณความร้อนที่เครื่องควบแน่น, W
	h_1, h_4	คือ	เอนทัลปีของสารทำงานที่ตำแหน่ง 1 และ 4, kJ/kg (รูปที่ 2.3)

กำลังงานสุทธิของโรงไฟฟ้าคำนวณได้จากสมการที่ 2.5 หรือ 2.6

$$\dot{W}_{net} = \dot{W}_{turb} - \dot{W}_{pump} \quad (2.5)$$

$$\dot{W}_{net} = \dot{Q}_{evap} - \dot{Q}_{cond} \quad (2.6)$$

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

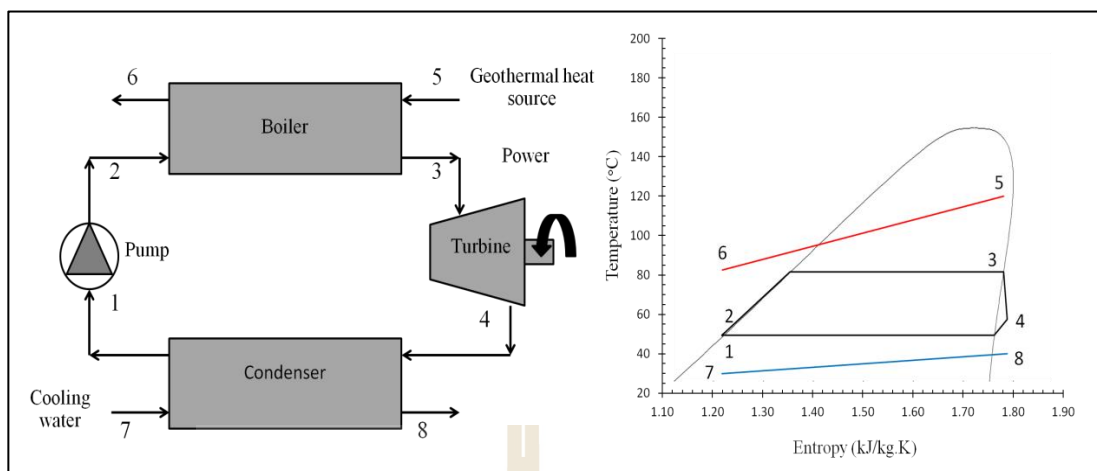
สำหรับการหาค่าประสิทธิภาพของโรงจักรไอน้ำ (Rankine cycle) ตามกฎข้อที่ 1 ของเทอร์โมไดนามิกส์ เป็นไปตามสมการที่ 2.7

$$\eta_{th} = \frac{\text{Output}}{\text{Input}} = \frac{\dot{W}_{net}}{\dot{Q}_{evap}} \quad (2.7)$$

เมื่อ η_{th} คือ ประสิทธิภาพทางความร้อน

2.4 วัฏจักรแรงดันอินทรีย์ (Organic Rankine cycle, ORC)

โรงไฟฟ้าที่ทำงานด้วยวัฏจักร organic Rankine cycle (ORC) ได้มีการดัดแปลงและพัฒนา มาจากโรงจักรไอน้ำต้นกำลัง (Rankine cycle) โดยโรงไฟฟ้า ORC มีส่วนประกอบและ กระบวนการทำงานเหมือนกับโรงจักรไอน้ำ ดังที่แสดงในรูปที่ 2.1 หากแต่โรงไฟฟ้า ORC เปลี่ยน สารทำงานจากที่เคยใช้น้ำเป็นสารทำงานให้กับโรงจักรไอน้ำ เปลี่ยนมาใช้สารทำงานที่เรียกว่า สารอินทรีย์ (organic fluid) จึงเรียกว้วัฏจักรใหม่นี้ว่า organic Rankine cycle ซึ่งสารอินทรีย์เป็นสารที่มี ชาติคาร์บอนเป็นส่วนประกอบหลัก ทำให้สารทำงานมีจุดเดือดต่ำกว่าน้ำมาก เช่น สารทำความ เย็น (refrigerant) สารประกอบไฮโดรคาร์บอน (hydrocarbon) สารทำงานเหล่านี้เหมาะสำหรับใช้ กับแหล่งความร้อนที่มีอุณหภูมิต่ำ ซึ่งสารทำความเย็นเหมาะที่จะใช้กับแหล่งความร้อนที่มีอุณหภูมิ ต่ำกว่า 150°C และสารทำงานที่เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอน เหมาะที่จะนำไปใช้กับแหล่ง ความร้อนที่มีอุณหภูมิอยู่ในช่วง 150 - 300°C ซึ่งแหล่งความร้อนอุณหภูมิดังกล่าวไม่เหมาะที่จะ นำไปใช้เป็นแหล่งพลังงานให้กับโรงจักรต้นกำลังไอน้ำ (Bronicki., 2017) ซึ่งในการศึกษานี้เป็น การศึกษาโรงไฟฟ้า ORC ที่ใช้แหล่งความร้อนได้พิภพเป็นแหล่งพลังงาน โดยส่วนประกอบ โรงไฟฟ้าและกระบวนการทางเทอร์โมไดนามิกส์มีรายละเอียดดังรูปที่ 2.4

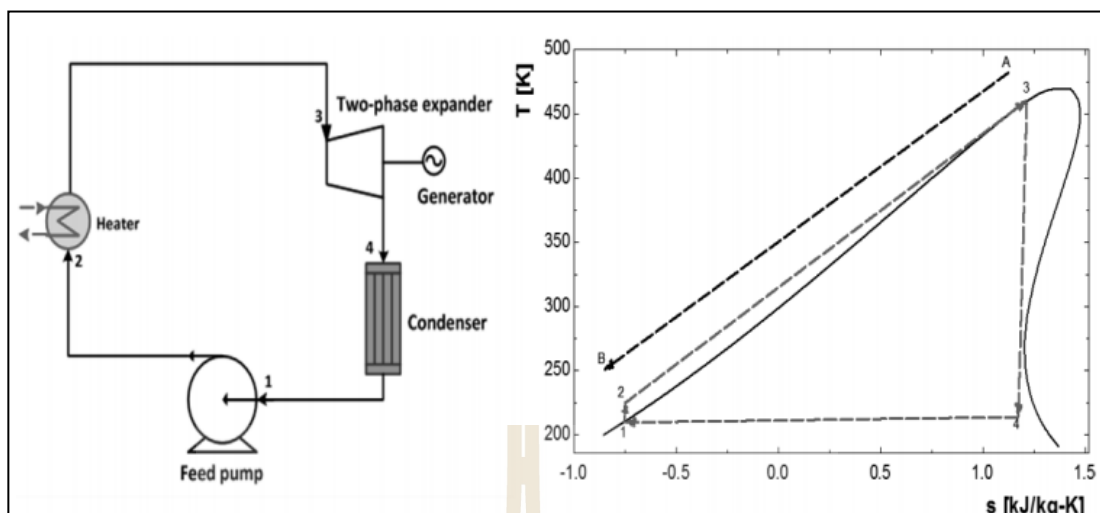


รูปที่ 2.4 แผนภาพแสดงกระบวนการทางเทอร์โมไดนามิกส์ของโรงไฟฟ้า ORC

2.3 วัฏจักรไตรแลทเทอร์อัล (Trilateral cycle, TLC)

โรงไฟฟ้า TLC เป็นโรงไฟฟ้าที่มีส่วนประกอบพื้นฐานเหมือนกับโรงไฟฟ้า ORC และพลังไอน้ำ แต่จะมีกระบวนการทางเทอร์โมไดนามิกส์ ที่ต่างจากโรงไฟฟ้าทั้งสองแบบ โดยกระบวนการที่ต่างออกไปคือกระบวนการที่เกิดขึ้นในเครื่องระเหย ซึ่งโรงไฟฟ้า TLC จะไม่มีการเปลี่ยนเฟสหรือสถานะของสารทำงานในขณะที่ได้รับความร้อน หากแต่จะให้ความร้อนกับสารทำงานจนมีอุณหภูมิและความดันสูงขึ้นและยังคงสถานะของเหลว แล้วจึงนำไปผ่านกังหันเพื่อผลิตงานออกมา (Bianchi et al., 2017; Ajimotokan et al., 2014; Wang et al., 2012) และจะเห็นว่ากระบวนการที่เกิดขึ้นในรูปที่ 2.5 มีลักษณะเป็นรูปสามเหลี่ยม โรงไฟฟ้าชนิดนี้จึงถูกเรียกว่า trilateral cycle (TLC) นอกจากนี้ยังมีการเรียกชื่อระบบนี้ว่า trilateral flash cycle (TFC)

ทั้งนี้งานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวข้องกับโรงไฟฟ้า ORC และ โรงไฟฟ้า TLC มีการศึกษาอยู่หลายด้าน เช่น การเลือกสารทำงานที่เหมาะสมกับแหล่งความร้อน การวิเคราะห์สมรรถนะของระบบโรงไฟฟ้า การหาจุดทำงานที่สามารถผลิตงานได้สูงสุดของระบบทางเทอร์โมไดนามิกส์ และประเมินทางเศรษฐศาสตร์ในเรื่องของงบประมาณในการลงทุน ต้นทุนการผลิต นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยจำนวนมากที่ได้ศึกษาของโรงไฟฟ้าทั้งสองประเภท ที่จะได้กล่าวถึงต่อไป



รูปที่ 2.5 แผนภาพ กระบวนการทางเทอร์โมไดนามิกส์ของโรงไฟฟ้า TLC

(Ajimotokan et al., 2014)

Chaiyat (2015) ได้ศึกษาพลังงานทดแทนในประเทศไทยที่เหมาะสมสำหรับใช้เป็นแหล่งพลังงานให้กับโรงไฟฟ้า ORC ซึ่งได้ทำการทดสอบและพิจารณาแหล่งพลังงานทดแทนทั้งหมด 3 แหล่ง คือ พลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์ พลังงานความร้อนใต้พิภพ และพลังงานความร้อนจากเชื้อเพลิงชีวมวล มาใช้สำหรับผลิตไฟฟ้า โดยพิจารณาจากความเป็นไปได้ในด้านเศรษฐศาสตร์และผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม เป็นเครื่องมือในการชี้วัดความเหมาะสม จากผลการศึกษาได้มีการทดสอบและจำลองระบบการทำงานของโรงไฟฟ้า ORC โดยใช้ R245fa เป็นสารทำงาน พบว่า ประสิทธิภาพของโรงไฟฟ้า ORC ที่ใช้แหล่งความร้อนทั้ง 3 แหล่ง โดยพิจารณาให้แหล่งพลังงานให้เป็นน้ำร้อนป้อนเข้าระบบในช่วงอุณหภูมิเดียวกัน มีประสิทธิภาพประมาณ 8 % ซึ่งดำเนินงานในช่วงอุณหภูมิมากกว่า 100 องศาเซลเซียส และมีต้นทุนการผลิตไฟฟ้าต่อหน่วย ของแหล่งความร้อนใต้พิภพ ความร้อนจากแสงอาทิตย์ และ เชื้อเพลิงชีวมวลเท่ากับ 0.1660 USD/kWh 0.747 USD/kWh และ 1.037 USD/kWh ตาม ลำดับ และ มี ปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของการใช้แหล่งพลังงานความร้อนแต่ละแหล่งมีค่าเท่ากับ 0.186 kg CO₂ /kWh 0.537 kg CO₂ /kWh และ 2.38 kg CO₂ /kWh ตามลำดับ จะเห็นว่าการใช้พลังงานความร้อนใต้พิภพมาใช้ในการผลิตไฟฟ้านั้นเป็นทางเลือกที่น่าสนใจ เพราะมีต้นทุนการผลิตไฟฟ้าและมีการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ต่ำสุดเมื่อเทียบกับแหล่งพลังงานทั้งสองแหล่ง

ธรณิศวรร ดิทยาพาท และ ทนงเกียรติ เกียรติศิริโรจน์ (2557) ได้ทำการวิเคราะห์ต้นทุนการผลิตของโรงไฟฟ้า ORC ที่ใช้เชื้อเพลิงชีวมวลเป็นแหล่งพลังงาน โดยพิจารณาโรงไฟฟ้า ORC

2 ขนาด ที่มีจำหน่ายในท้องตลาด มีกำลังการผลิตไฟฟ้าสุทธิ 35 kW และ 65 kW และได้พิจารณาถึงอิทธิพลของการไหลและอุณหภูมิของน้ำร้อนที่ใช้ในการผลิตไฟฟ้า ที่ส่งผลต่อต้นทุนการผลิตไฟฟ้า จากการศึกษาพบว่า เมื่อเพิ่มอัตราการไหลของน้ำร้อนและอุณหภูมิของน้ำร้อนเข้าเครื่องระเหย พบว่าประสิทธิภาพของระบบเพิ่มขึ้นและมีต้นทุนการผลิตไฟฟ้าต่อหน่วยลดลง 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

Guzovie.et al. (2012) ได้ทำการศึกษาความเป็นไปได้ของการนำพลังงานความร้อนใต้พิภพในประเทศ โครเอเชีย มาใช้ในการผลิตไฟฟ้า ซึ่งในการศึกษาได้พิจารณาโรงไฟฟ้าเปรียบเทียบกัน 2 ประเภท คือ ORC และ Kalina cycle โดยในการจำลองระบบ ใช้ isopentane เป็นสารทำงานใน ORC และ water กับ ammonia เป็นสารทำงานใน Kalina และแหล่งความร้อนมีอุณหภูมิ 140°C มีอัตราการไหล 64.87 kg/s ระบายความร้อนด้วยอากาศที่มีอุณหภูมิอากาศเฉลี่ย 15°C มี isentropic efficiency ของ pump กับ turbine เท่ากับ 0.85 และ 0.89 สำหรับ ORC และ Kalina เท่ากับ 0.8 กับ 0.8 ตามลำดับ จากผลการศึกษาสามารถสรุปได้ดังนี้

- กำลังงานสูงสุดที่ ORC และ Kalina ผลิตได้มีค่าเท่ากับ 2259.4 kW ที่อัตราการไหล 34.27 kg/s และ 2165.5 kW ที่อัตราการไหล 15.59 kg/s ตามลำดับ
- พลังงานที่ปั๊มใช้งานของระบบ ORC และ Kalina เท่ากับ 33.9 kW และ 64 kW ตามลำดับ
- งานสุทธิและประสิทธิภาพของระบบ ORC และ Kalina เท่ากับ 2225.5 kW 13.5% และ 2101.4 kW 12.8% ตามลำดับ
- ทั้งนี้ยังพบว่า ความดันใน condenser ของระบบ Kalina สูงกว่า ORC (6.35 bar vs 0.68 bar)

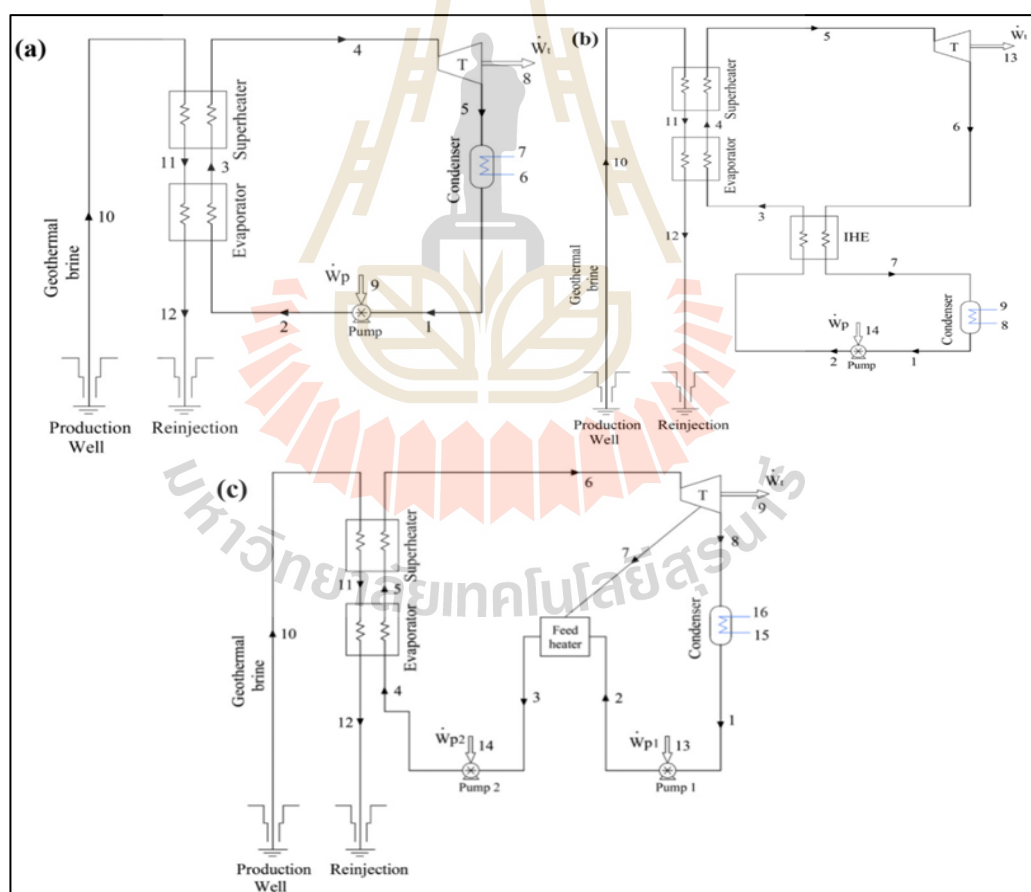
จากข้อสรุปดังกล่าวจะเห็นได้ว่าระบบที่ใช้แหล่งความร้อนใต้พิภพที่มีอุณหภูมิปานกลาง ซึ่งระบบ ORC ดีกว่าระบบ Kalina cycle รวมถึงระบบ Kalina มีความซับซ้อนมากกว่าระบบ ORC และใช้สารทำงานที่เป็นพิษ และกัดกร่อนอุปกรณ์และใบกังหัน

Zare (2015) ได้ทำการศึกษาการเปรียบเทียบโรงไฟฟ้า ORC 3 ประเภท ในทางเทอร์โมไดนามิกส์และทางเศรษฐศาสตร์โดยใช้แหล่งความร้อนใต้พิภพเป็นแหล่งพลังงานและใช้ isobutane เป็นสารทำงาน ลักษณะของ ORC 3 ประเภทประกอบด้วย simple organic Rankine cycle (S-ORC), organic Rankine cycle with internal heat exchanger (ORC-IHE) และ regenerative

Rankine cycle (R-ORC) ดังแสดงในรูปที่ 2.6 โดยพิจารณาค่าที่ใช้ในการจำลองระบบในตารางที่ 2.3 จากผลการศึกษาสามารถสรุปได้ว่า

- S-ORC ให้งานสุทธิได้สูงสุด 4.23 MW ที่แหล่งความร้อนอุณหภูมิ 170°C และมีงบลงทุนต่อ kW ต่ำสุด มีค่าเท่ากับ 1,341 USD/kW อีกทั้งมีระยะเวลาคืนทุนเร็วที่สุด 3.639 ปี ในขณะที่ ORC-IHE กับ R-ORC คืนทุนใน 4.238 ปี และ 8.718 ปี ตามลำดับ
- ORC-IHE มีประสิทธิภาพตามกฎข้อที่ 1 และ 2 ทางเทอร์โมไดนามิกส์สูงสุดมีค่าเท่ากับ 15.33% และ 54.29% ที่แหล่งความร้อนอุณหภูมิ 160°C

ทั้งนี้ในการจำลองได้มีการนำสารทำงานชนิดอื่นมาใช้ในการจำลอง 3 ชนิด คือ R245fa, n-pentane และ R125a พบว่า n-pentane มีประสิทธิภาพตามกฎข้อที่ 1 และ 2 ทางเทอร์โมไดนามิกส์สูงสุด และมีต้นทุนราคาไฟฟ้ารวมต่ำกว่าสารชนิดอื่น

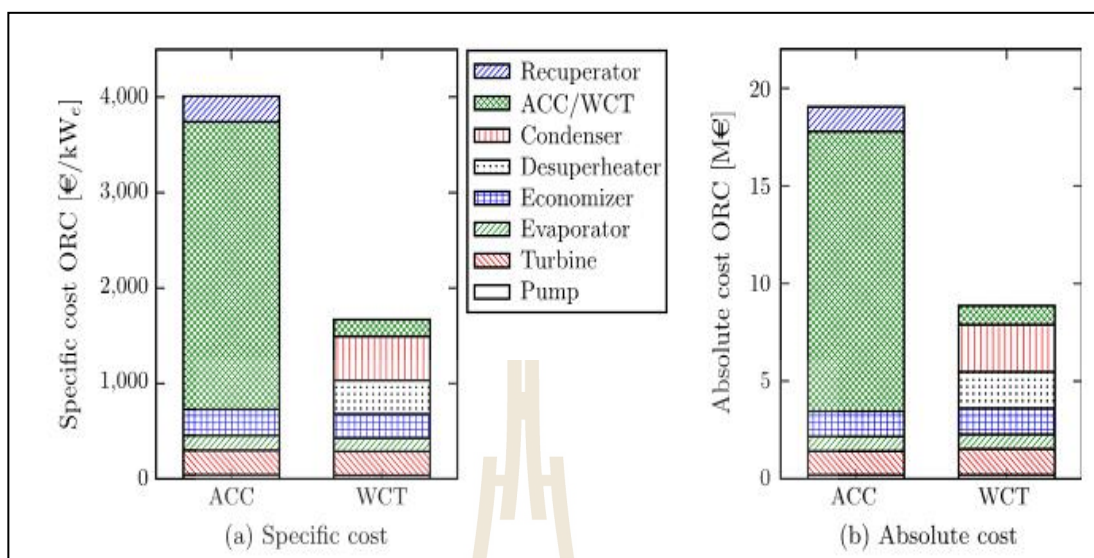


รูปที่ 2.6 ORC geothermal plant (a) Simple ORC (S-ORC), (b) ORC with Internal HeatExchanger (ORC-IHE), (c) Regenerative ORC (R-ORC). (Zare, 2015)

ตารางที่ 2.3 The input data assumed in the simulations (Zare, 2015)

Parameter	Symbol	Value
Ambient (dead state) pressure	P_0 (bar)	1
Ambient (dead state) temperature	T_0 ($^{\circ}\text{C}$)	15
Geothermal brine (heat source) temperature	$T_{\text{GB}}(T_{10})$ ($^{\circ}\text{C}$)	160–170
Geothermal brine mass flow rate	(kg/s)	100
Turbine isentropic efficiency	η_T (%)	85
Pump isentropic efficiency	η_p (%)	90
Pinch point temperature difference	ΔT_{pp} ($^{\circ}\text{C}$)	5
Interest rate	i_r (%)	10
Plant economic life	n (year)	20
Annual operating hours	τ (h)	7500

Walraven et al. (2015) ได้ทำการศึกษาต้นทุนค่าใช้จ่ายในการผลิตไฟฟ้าด้วยโรงไฟฟ้า ORC ที่ใช้พลังงานความร้อนใต้พิภพเป็นแหล่งพลังงาน โดยจะเปรียบเทียบระบบที่ใช้วิธีการระบายความร้อนด้วยน้ำ และระบายความร้อนด้วยอากาศ และใช้สารทำงาน isobutane โดยพิจารณาแหล่งความร้อนที่มีอุณหภูมิอยู่ในช่วง 100°C - 150°C และอุณหภูมิ dry bulb และ wet bulb อยู่ในช่วงประมาณ -5°C - 35°C จากผลการศึกษาพบว่า เมื่อเปรียบเทียบในด้านเศรษฐศาสตร์ระบบที่ใช้การระบายความร้อนด้วยน้ำดีกว่าระบบที่ใช้อากาศระบายความร้อน เนื่องจากค่าใช้จ่ายของระบบที่ระบายความร้อนด้วยอากาศมีค่าใช้จ่ายสูงมากประมาณ 80% ของงบลงทุนในการสร้างโรงไฟฟ้า แสดงในรูปที่ 2.7 ทั้งนี้ยังพบว่าระบบที่ระบายความร้อนด้วยอากาศน่าสนใจกว่าระบบที่ระบายความร้อนด้วยน้ำ หากราคาน้ำมีค่ามากกว่า $1 \text{ EUR}/\text{m}^3$ และพบว่าเมื่ออุณหภูมิแหล่งความร้อนเพิ่มขึ้นจะช่วยให้ต้นทุนค่าใช้จ่ายในการผลิตไฟฟ้าต่อหน่วยถูกลง จาก $170 \text{ EUR}/\text{MWh}$ ลดลงเหลือ $60 \text{ EUR}/\text{MWh}$ สำหรับระบบที่ระบายความร้อนด้วยอากาศ และจาก $140 \text{ EUR}/\text{MWh}$ ลดลงเหลือ $55 \text{ EUR}/\text{MWh}$ สำหรับระบบที่ระบายความร้อนด้วยน้ำ ไม่เพียงแต่อุณหภูมิของแหล่งความร้อนที่ส่งผลต่อค่าใช้จ่ายในการผลิตไฟฟ้า อุณหภูมิของสิ่งแวดล้อมที่เพิ่มสูงขึ้นก็ทำให้ค่าใช้จ่ายในการผลิตไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้นด้วย



รูปที่ 2.7 Distribution of the specific cost (a) and the absolute cost (b) for single-pressure, simple and recuperated ORCs with isobutane as the working fluid for a brine-inlet temperature of 125°C. (Walraven et al., 2015)

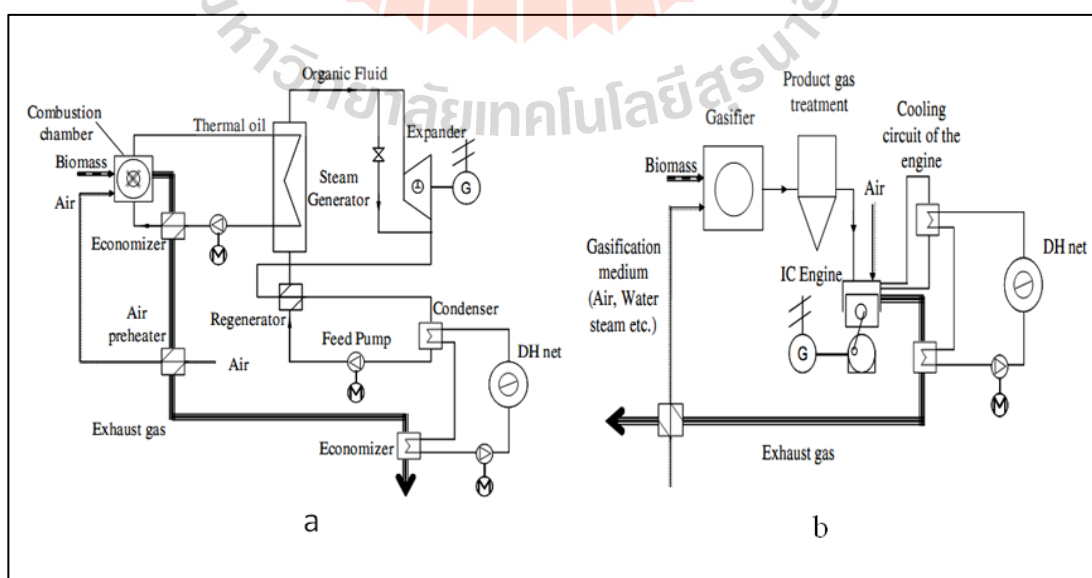
Hettiarachchi et al. (2007) ได้ศึกษาโรงไฟฟ้า ORC ที่ใช้แหล่งความร้อนใต้พิภพ โดยเปรียบเทียบการใช้สารทำงาน 4 ชนิด คือ ammonia, n-pentane, HCFC-123 และ PF5050 ในการศึกษาได้พิจารณาทั้งทางเทอร์โมไดนามิกส์และทางเศรษฐศาสตร์ ซึ่งกำหนดให้ไฟฟ้าที่ผลิตได้ 10 MW มีอุณหภูมิแหล่งความร้อน 90°C มีอุณหภูมิของน้ำหล่อเย็น 30°C และพิจารณาให้ isentropic efficiency ของ pump, turbine และ generator เท่ากับ 0.75, 0.85 และ 0.96 ตามลำดับ จากผลการศึกษาพบว่า ammonia มีต้นทุนของโรงไฟฟ้าต่ำกว่าสารทำงานอื่นๆ ซึ่งพิจารณาจากอัตราส่วนของขนาดพื้นที่อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนทั้งหมดต่องานสุทธิที่ผลิตได้ ซึ่ง ammonia มีค่าเท่ากับ 0.35 m²/kW ในขณะที่ HCFC 123 n-pentane และ PF5050 มีค่าเท่ากับ 0.7 0.89 และ 1.26 m²/kW ทั้งนี้เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพโรงไฟฟ้า พบว่าการใช้สารทำงาน n-pentane มีประสิทธิภาพสูงสุดเท่ากับ 9.9% และสารทำงาน HCFC-123, ammonia และ PF5050 มีค่าเท่ากับ 9.8%, 8.9% และ 7.8% ตามลำดับ

นอกจากนี้โรงไฟฟ้า ORC ใช้แหล่งความร้อนใต้พิภพเป็นแหล่งพลังงานแล้ว ยังสามารถใช้กับแหล่งความร้อนที่มีอุณหภูมิต่ำชนิดอื่นได้ เช่น พลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์ พลังงาน

ความร้อนจากเชื้อเพลิงชีวมวล ความร้อนทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม ซึ่งมีนักวิจัยจำนวนมากที่ได้ทำการศึกษาโรงไฟฟ้าที่ใช้แหล่งความร้อนดังกล่าวเป็นแหล่งพลังงาน เช่น

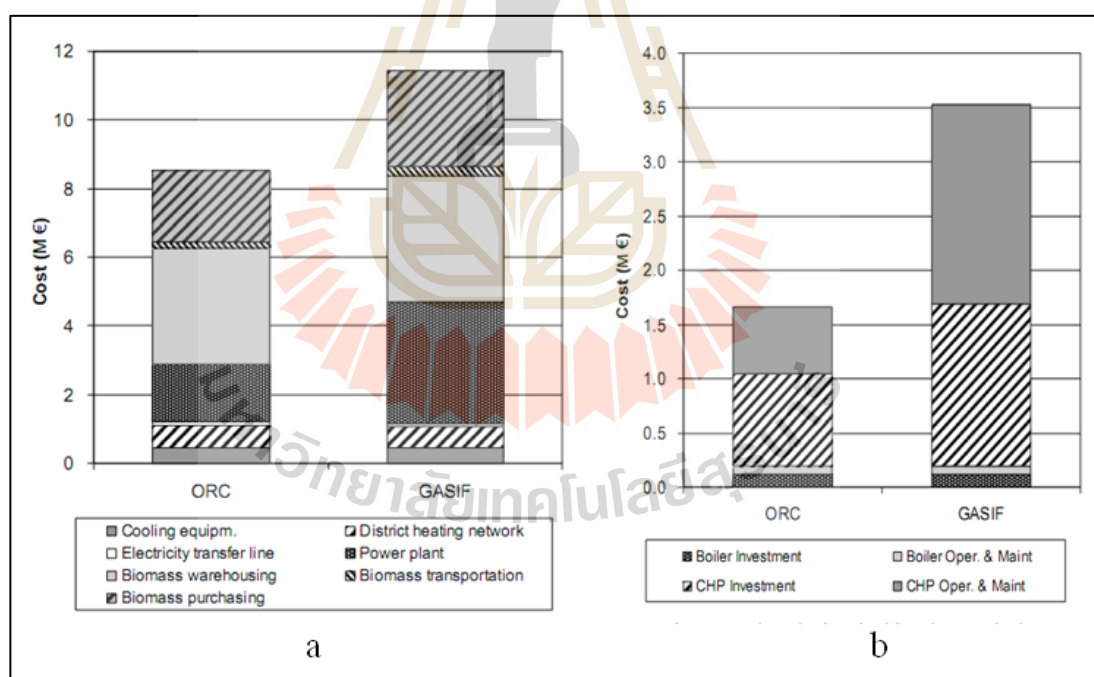
Peris et al. (2015) ทำการทดลองเอาความร้อนทิ้งจากอุตสาหกรรมเซรามิกส์ มาใช้เป็นแหล่งพลังงานให้กับโรงไฟฟ้า ORC ที่มีกำลังการผลิตไฟฟ้า 20 kW และใช้สารทำงาน R245fa ซึ่งนำความร้อนจากเตาเผาเซรามิกส์ ที่มีอุณหภูมิประมาณ 285°C ผ่านเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (recuporator) ถ่ายเทความร้อนให้กับน้ำมัน และถูกส่งไปยังเครื่องแลกเปลี่ยน (heat recovery vapor generator) เพื่อถ่ายเทความร้อนให้กับสารทำงานในระบบ ORC ซึ่งน้ำมันจะมีอุณหภูมิประมาณ $153.69^{\circ}\text{C} - 168.48^{\circ}\text{C}$ และระบบหล่อเย็น จะใช้การหล่อเย็นด้วยอากาศ ประกอบด้วย พัดลม 5 ตัว ซึ่งสามารถถ่ายเทความร้อนได้สูงสุด 157.90 kW จากผลการทดลองพบว่า พลังงานความร้อนที่ให้กับระบบ ORC อยู่ระหว่าง 128.19 kW - 179.87 kW พลังงานไฟฟ้าสูงสุดที่ผลิตได้และพลังงานไฟฟ้าสุทธิ มีค่าเท่ากับ 21.79 kW และ 18.51 kW ตามลำดับ และมีประสิทธิภาพสูงสุด 10.94% ทั้งนี้ได้พิจารณาในเชิงเศรษฐศาสตร์พบว่า มีต้นทุนค่าไฟฟ้า 0.1246 EUR/kWh และมีระยะเวลาคืนทุน 4.63 ปี

Rentizelas et al. (2009) ได้เปรียบเทียบเทคโนโลยีและเศรษฐศาสตร์ของโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนร่วมของ ORC และ gasification โดยใช้พลังงานจากเชื้อเพลิงชีวมวล ซึ่งแผนภาพของโรงไฟฟ้าทั้งสองแสดงในรูปที่ 2.8 ในการศึกษาได้ใช้ข้อมูลจากกรณีศึกษาในการจำลองระบบ ทั้งนี้เชื้อเพลิงชีวมวลที่ใช้มี 3 ชนิดได้แก่ กิ่งไม้ ต้น olive almond และ peach รวมกันมีราคาประมาณ 30 EUR/ton ของเชื้อเพลิงชีวมวลแต่ละชนิด



รูปที่ 2.8 แผนภาพส่วนประกอบโรงไฟฟ้า (a) โรงไฟฟ้า ORC (b) โรงไฟฟ้า gasification
(Rentizelas et al., 2009)

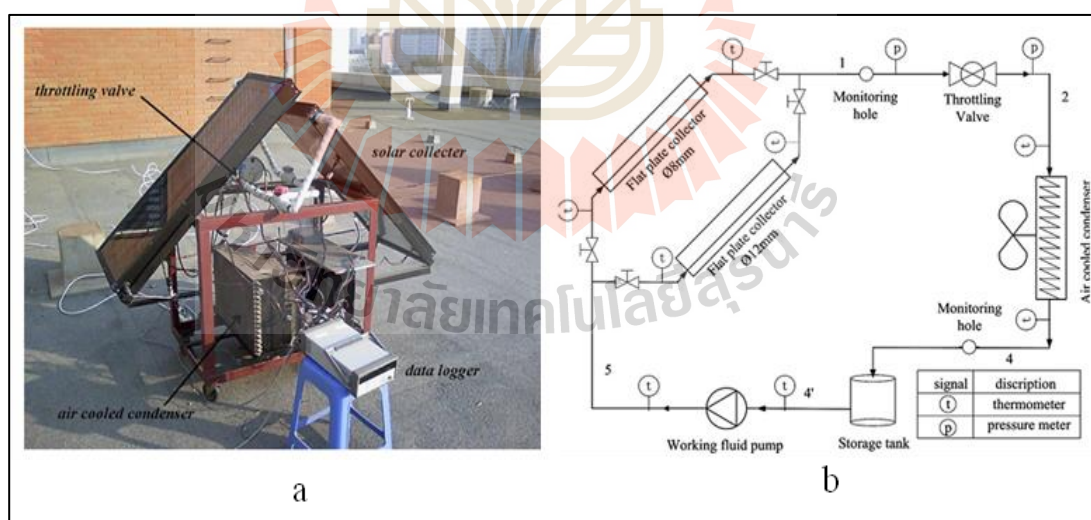
จากผลการศึกษาพบว่า โรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนร่วมของ gasification และ ORC สามารถผลิตไฟฟ้าได้ 931 kW และ 390 kW ตามลำดับ และพลังงานความร้อนมีค่าใกล้เคียงกัน และเมื่อพิจารณาปริมาณไฟฟ้าที่ผลิตได้ตลอดทั้งปี gasification ผลิตได้ 6,979 MWh และ ORC ผลิตได้ 2,738.5 MWh ทั้งนี้ gasification ใช้เชื้อเพลิงชีวมวลมากกว่าโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนร่วม ORC ประมาณ 34.3% เมื่อพิจารณาทางเศรษฐศาสตร์พบว่า โรงไฟฟ้า gasification มีงบประมาณในการลงทุนสูงกว่าโรงไฟฟ้า ORC ซึ่งมีค่าเท่ากับ 3.25×10^6 EUR และ 1.61×10^6 EUR ตามลำดับ และค่าใช้จ่ายด้านอื่นรวมทั้งค่าดำเนินการและค่าซ่อมบำรุงแสดงในรูปที่ 2.9 เมื่อพิจารณาระยะเวลาคืนทุน ORC คืนทุนใน 9.9 ปี ในขณะที่ gasification คืนทุนใน 7.8 ปี



รูปที่ 2.9 แสดงรายละเอียดค่าใช้จ่ายโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนร่วม (a) ค่าใช้จ่ายในส่วนต่าง ๆ ของโรงไฟฟ้า (b) ค่าใช้จ่ายของอุปกรณ์รวมทั้งค่าดำเนินการและค่าซ่อมบำรุง
(Rentizelas et al., 2009)

จากผลที่ได้ เมื่อพิจารณาด้านเทคโนโลยีและการเงิน เปรียบเทียบกันทั้งสองระบบ โรงไฟฟ้า gasification ให้ผลตอบแทนที่ดีกว่าเนื่องจาก สามารถผลิตไฟฟ้าได้สูงจึงทำให้ชดเชยค่าใช้จ่ายในส่วนต่าง ๆ ของโรงไฟฟ้าได้

Wang et al. (2010) ได้ทำการศึกษาและทดลองโรงไฟฟ้า ORC โดยใช้ความร้อนจาก แสงอาทิตย์เป็นแหล่งพลังงาน พร้อมทั้งเปรียบเทียบสารทำงาน 3 ชนิดคือ M1 (R245fa), M2 (R245fa/R152a, 0.9/0.1) และ M3 (R245fa/R152a, 0.7/0.3) ในการทดลองได้สร้างต้นแบบของ โรงไฟฟ้า ORC ซึ่งประกอบด้วยเครื่องผลิตน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์แบบแผ่นเรียบ 2 แผ่น วาล์วลดความดัน (throttling valve) ชุดระบายความร้อนด้วยอากาศ (air-cooled condenser) แทงค์ (storage tank) ปั๊ม (working fluid pump) และชุดเก็บข้อมูล (data logger) แสดงในรูปที่ 2.10 (a) ทั้งนี้เครื่องต้นแบบที่ใช้ทดลองให้กำลังงานน้อยจึงไม่มี expander ดังนั้นจึงถูกแทนที่ด้วยวาล์วลดความดัน และปรับวาล์วให้เกิดความแตกต่างของความดันให้เหมือนกับ expander แล้วนำค่า อุณหภูมิและความดันที่ได้จากการทดลองไปจำลองตามสมการทางคณิตศาสตร์ โดยตั้งสมมติฐาน ให้ ระบบทำงานในสภาวะคงตัว (steady state) พลังงานจลน์ พลังงานศักย์ และแรงเสียดทานมีค่าน้อยมาก และไม่พิจารณาการสูญเสียความดันในอุปกรณ์ต่าง ๆ จากผลการทดลองได้ผลลัพธ์ดัง แสดงในตารางที่ 2.4



รูปที่ 2.10 ORC solar energy (a) เครื่อง ORC ที่ใช้ทดลอง (b) แผนภาพส่วนประกอบเครื่อง ORC (Wang et al., 2010)

จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า สารทำงานที่มีการผสมสารทำงานเข้าด้วยกัน (zeotropic mixtures) ให้พลังงานและให้ประสิทธิภาพสูงกว่าสารที่ไม่ได้มีการผสม (R245fa) และในช่วงของการทดสอบที่เป็น superheating ค่าเฉลี่ยของพลังงานที่ได้จากสารทำงาน M3 มีค่ามากกว่าสารทำงาน M1 และ M2 ประมาณ 29.10% และ 28.03% ตามลำดับ ยังพบอีกว่าพลังงานที่ได้มีค่าเปลี่ยนแปลงตามปริมาณของสารทำงานที่นำมาผสมกัน ค่าเฉลี่ยของประสิทธิภาพรวม ของสารทำงาน M1 M2 และ M3 เท่ากับ 0.88% 0.92% และ 1.28% ตามลำดับ

ตารางที่ 2.4 Comparison of different fluid cycle performance (Wang et al., 2010).

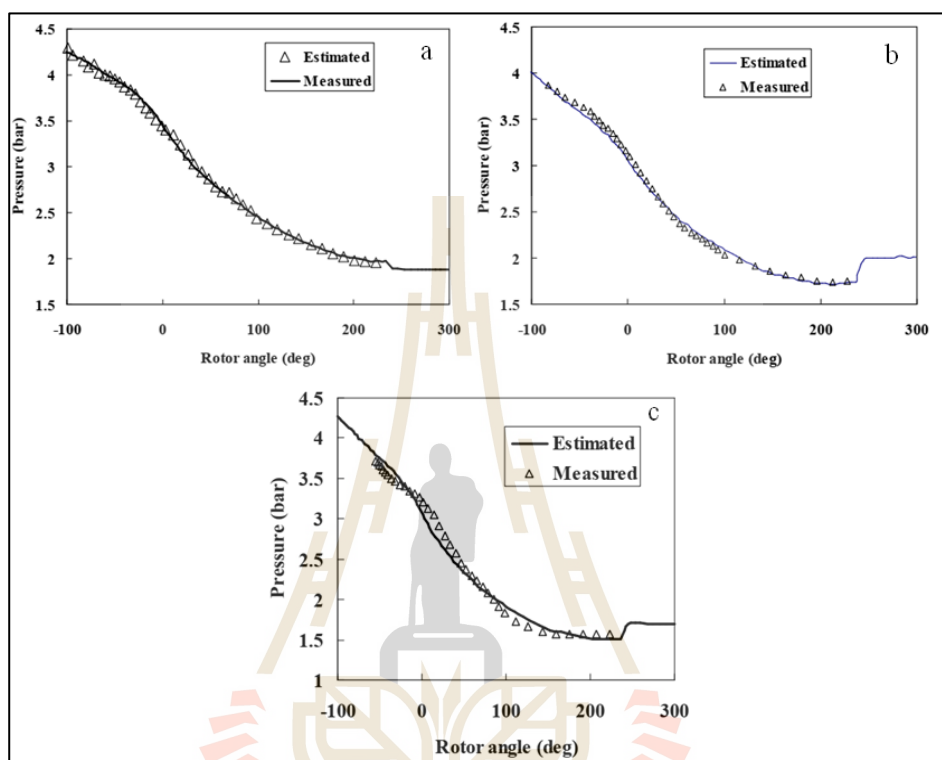
Working fluid	M ₁ (April 1st)	M ₂ (April 6th)	M ₃ (April 16th)
Period of superheating	9:50–15:19	9:50–15:19	9:50–15:19
Average heat absorbed in the collector, W	118.87	120.17	118.86
Average power consumed by working fluid pump, W	1.04	0.88	1.07
Average power output, W	5.98	6.03	7.72
Average collector efficiency, %	21.25	21.54	22.93
Average Rankine cycle efficiency, %	4.16	4.29	5.59
Average overall efficiency, %	0.88	0.92	1.28

ในส่วน of โรงไฟฟ้า TLC ซึ่งสามารถใช้แหล่งความร้อนที่มีอุณหภูมิต่ำและใช้สารทำงาน เช่นเดียวกับโรงไฟฟ้า ORC ได้ดังที่กล่าวไว้ข้างต้น ซึ่งโรงไฟฟ้า TLC ได้รับความสนใจมาก เช่นเดียวกันกับโรงไฟฟ้า ORC ทั้งด้านการวิจัยและทดลอง เช่น

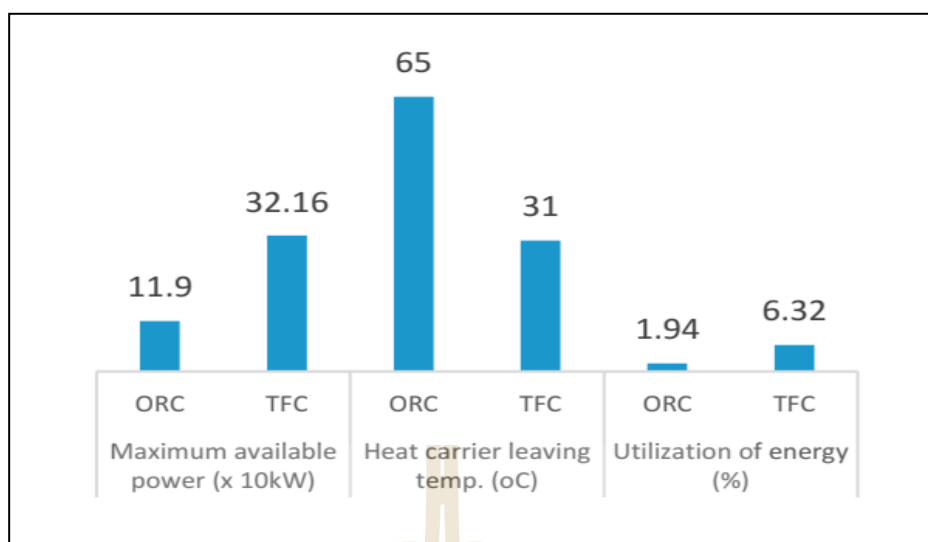
Wang et al. (2011) ได้ทำการสร้างแบบจำลองของ Twin screw expander เทียบกับผลการทดลองในโรงไฟฟ้า TLC จากผลการศึกษาพบว่า ในแบบจำลองได้มีการระบุพารามิเตอร์ที่จะทำนายไดอะแกรม โดยมีตัวบ่งชี้คือค่า fluid pressure in the control volume (P) และ angle of rotation of the main rotor (φ) จากผลที่ได้ให้ค่าความแม่นยำค่อนข้างสูง ดังผลที่แสดงในรูปที่ 2.11

Iqbal et al. (2019) ได้ทำการศึกษาความเป็นไปได้ของการใช้แหล่งความร้อนทิ้งที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า 100°C เป็นแหล่งพลังงานให้กับโรงไฟฟ้า TLC และเปรียบเทียบกับโรงไฟฟ้า ORC ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 2.12 และ 2.13 ซึ่งจะพบว่า โรงไฟฟ้า TLC ผลิตรกำลังได้มากกว่าโรงไฟฟ้า ORC ประมาณ 140% ภายใต้แหล่งความร้อนที่มีอุณหภูมิและแหล่งทิ้งความร้อนเดียวกัน โรงไฟฟ้า TLC ใช้พลังงานจากแหล่งความร้อนได้สูงถึง 70% ในขณะที่ ORC ใช้ได้เพียง 20% ของพลังงาน

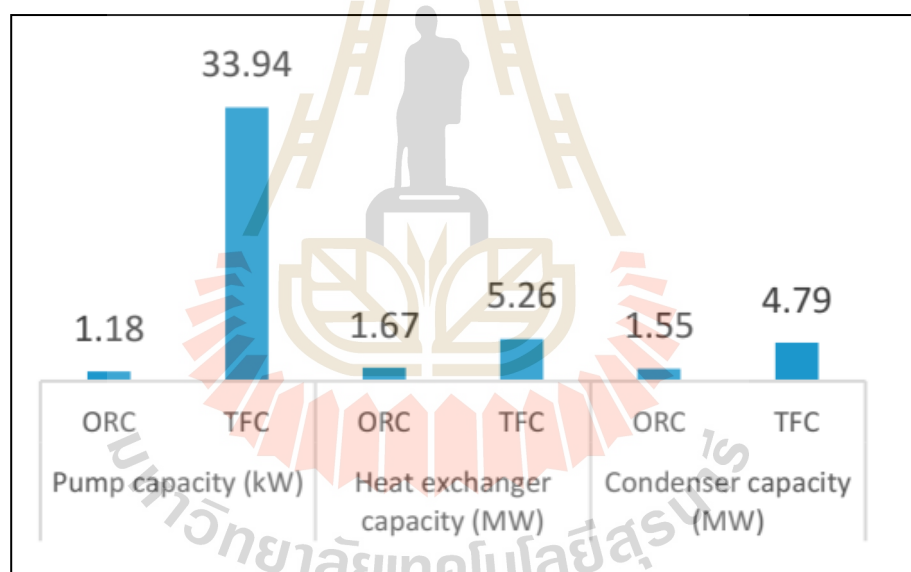
ความร้อนทั้งหมดที่มี ในทางตรงกันข้าม เมื่อเปรียบเทียบขนาดของปั๊ม อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน พบว่าอุปกรณ์ดังกล่าวในโรงไฟฟ้า TLC จะมีขนาดใหญ่กว่า โรงไฟฟ้า ORC ซึ่งจะใช้งบประมาณที่เพิ่มขึ้นแต่จะสามารถชดเชยด้วยการผลิตพลังงานสูงขึ้น



รูปที่ 2.11 Predicted and measured pressure change with rotation in a two-phase expander operating (a) 20 m/s tip speed, (b) 20 m/s tip speed and (c) 20 m/s tip speed (Wang et al., 2011)



รูปที่ 2.12 Comparative performance of TLC and ORC (Iqbal et al., 2019)



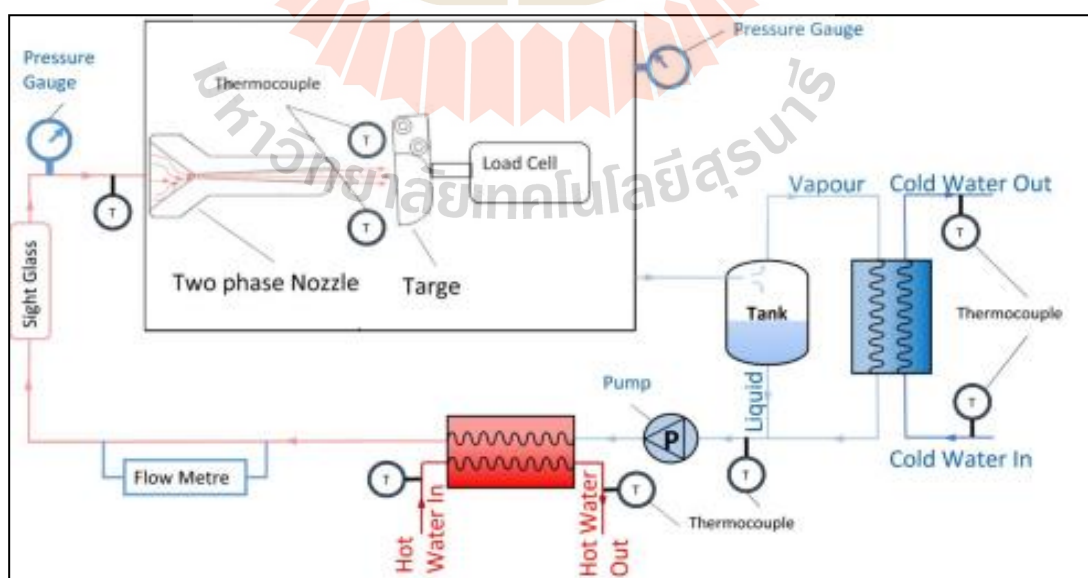
รูปที่ 2.13 Comparative component sizing for of TLC and ORC (Iqbal et al., 2019)

Ajimoto et al. (2014) ได้ศึกษาความเป็นไปได้ทางเทอร์โมไดนามิกส์ของการใช้น้ำร้อนเป็นแหล่งความร้อนให้กับโรงไฟฟ้า TLC โดยใช้ Isobutane เป็นสารทำงานในระบบ และแหล่งความร้อนอุณหภูมิ 363 – 393 K พร้อมทั้งเพิ่มความดันที่ทางเข้า expander 2 – 3 MPa และปรับค่า isentropic efficiency expander ในช่วง 0.5 – 0.85 จากผลการศึกษาพบว่า ประสิทธิภาพเชิง

ความร้อนอยู่ในช่วง 13.6 – 17.1% มีสัมประสิทธิ์ซึ่งกันที่ได้ 35 – 60 kJ/kg และมี ประสิทธิภาพ Exergy สูงถึง 81.11%

Marchionni et al. (2019) ได้จำลองระบบโรงไฟฟ้า TLC ภายใต้เงื่อนไขการเดินเครื่องไม่เป็นไปตามที่ออกแบบ (off - design) โดยการปรับมีอุณหภูมิแหล่งความร้อนในช่วง 75 – 95°C ความเร็วรอบของปั๊มสารทำงาน 2500 – 3500 RPM และความเร็วรอบของ expander 3000 – 6000 RPM และใช้อุณหภูมิ 85°C สำหรับค่าออกแบบ อีกทั้งใช้อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบเพลต และใช้ R245fa เป็นสารทำงาน จากผลการศึกษาพบว่า การปรับความเร็วรอบ expander ได้งานสูงสุดที่ได้คือ 85 kW ที่ความเร็วรอบ expander 4500 RPM ในขณะที่ การปรับลดความเร็วรอบของปั๊มสารทำงาน จาก 3000 RPM เหลือ 2500 RPM ทำให้งานและประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นจาก 86 kW เป็น 93 kW และ 4.3% เป็น 5.4% ตามลำดับ

Ahmadi et al. (2019) ได้ศึกษาและทำการทดลอง โรงไฟฟ้า TLC โดยใช้กังหัน Pelton turbine ผลิดงาน ซึ่งมีลักษณะชุดทดสอบดังรูปที่ 2.14 ใช้ Isopentane เป็นสารทำงาน และมีแหล่งความร้อนอุณหภูมิ 60 - 100°C ในการทดลองได้เพิ่มอุณหภูมิให้กับสารทำงานจาก 40°C ถึง 70°C พบว่าแรงที่เกิดขึ้นกับใบกังหัน Pelton เพิ่มขึ้นจาก 1.5 N เป็น 3.9 N หรือเพิ่มขึ้น 2.6 เท่า และมี isentropic efficiency ประมาณ 45% ที่อุณหภูมิสารทำงาน 68.3°C ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้สามารถนำไปใช้ผลิตงานในทางกลและทางไฟฟ้า และความเป็นไปได้ที่จะนำไปสู่งานวิจัยในอนาคต เช่นการนำไปผลิตไฟฟ้าจริง การศึกษาที่มีการใช้สารทำงานอื่น เช่นสาร Isobutane เป็นต้น



รูปที่ 2.14 Process and instrumentation diagram of test rig set-up (Ahmadi et al., 2019)

บทที่ 3

ขั้นตอนการดำเนินการ

สำหรับการออกแบบโรงไฟฟ้าที่ใช้แหล่งความร้อนใต้พิภพเป็นแหล่งพลังงาน ซึ่งในการศึกษานี้ได้ออกแบบโรงไฟฟ้าอยู่ 2 ประเภท คือ โรงไฟฟ้า ORC และโรงไฟฟ้า TLC ดังที่ได้อธิบายในบทที่ 2 โดยใช้แหล่งความร้อนใต้พิภพน้ำพุร้อนฝาง อำเภอฝาง จังหวัดเชียงใหม่ ซึ่งได้ทำการเปรียบเทียบสมรรถนะของทั้งสองโรงไฟฟ้า และการเลือกสารทำงานเพื่อให้ได้งานสุทธิจากโรงไฟฟ้าทั้งสองประเภทสูงสุด รวมถึงการประเมินทางด้านเศรษฐศาสตร์ของโรงไฟฟ้าทั้งสองแบบภายใต้เงื่อนไขการจำลองเดียวกัน โดยใช้โปรแกรมในการจำลองรวมถึงรายละเอียดการวิเคราะห์ทางด้านเศรษฐศาสตร์มีรายละเอียดดังนี้

3.1 วิธีดำเนินงาน

ในงานวิจัยนี้ได้สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของโรงไฟฟ้า ORC และ โรงไฟฟ้า TLC โดยใช้แหล่งความร้อนใต้พิภพฝางเป็นแหล่งพลังงาน เพื่อประเมินศักยภาพการผลิตไฟฟ้าที่สูงสุดและต้นทุนเชิงเศรษฐศาสตร์ จากการเลือกใช้สารทำงานต่างชนิดกันนั้น มีวิธีการดำเนินงานดังนี้

1) ศึกษาหลักการทำงานของโรงไฟฟ้าและข้อมูลที่เกี่ยวข้อง

ทำการศึกษาโรงไฟฟ้า ORC และ TLC พร้อมทั้งข้อมูลที่เกี่ยวข้องและสร้างแบบจำลองคณิตศาสตร์เพื่อใช้สำหรับการศึกษา

2) ตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง

การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองเป็นหนึ่งในวิธีการสร้างความน่าเชื่อถือของผลการศึกษา ซึ่งในการศึกษานี้ได้มีการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง โดยเปรียบเทียบระหว่างผลจากการจำลองกับผลการทดลองจริง

3) พิจารณาเลือกสารทำงาน

การพิจารณาเลือกสารทำงานเป็นปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลต่อสมรรถนะของโรงไฟฟ้า และต้นทุนการผลิตไฟฟ้า ดังนั้นจึงต้องเลือกสารทำงานที่เหมาะสมเพื่อให้ได้งานสูงสุดและได้ต้นทุนการผลิตไฟฟ้าต่ำที่สุด

4) จำลองเปรียบเทียบสมรรถนะ

สำหรับการเปรียบเทียบสมรรถนะ โดยมีการพิจารณาเปรียบเทียบระหว่างโรงไฟฟ้า ORC กับโรงไฟฟ้า TLC และเปรียบเทียบสมรรถนะของแต่ละสารทำงานโดยเปรียบเทียบงานสุทธิที่ผลิตได้ เปรียบเทียบขนาดของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน เปรียบเทียบขนาดของ Expander และเปรียบเทียบประสิทธิภาพทางความร้อน

5) การวิเคราะห์ด้านเศรษฐศาสตร์

การประเมินต้นทุนทางด้านเศรษฐศาสตร์ ในงานวิจัยนี้เป็นการประเมินต้นทุนของการผลิตไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้าของทั้งสองแบบ ซึ่งมีวิธีการดำเนินงานดังนี้

- 1) สำรวจประเภทของอุปกรณ์ที่มีการใช้งานทั้งสองโรงไฟฟ้า
- 2) สำรวจราคาอุปกรณ์เพื่อสร้างสมการความสัมพันธ์ของราคาในแต่ละอุปกรณ์

6) รายงานผลการศึกษาและอภิปรายผล

ในส่วนของการรายงานผลการศึกษาจะรายงานในส่วนที่เป็นผลของสมรรถนะและขนาดของอุปกรณ์ในโรงไฟฟ้าทั้งสองแบบ รวมถึงรายงานผลทางด้านเศรษฐศาสตร์

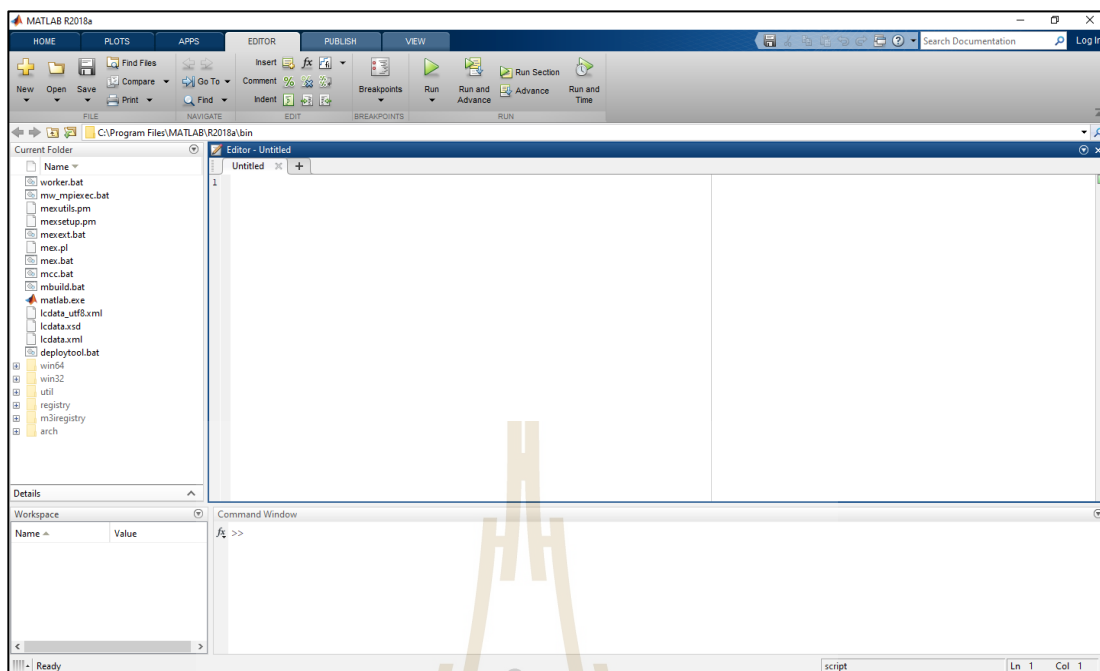
7) สรุปผลการศึกษา

3.2 เครื่องมือสำหรับการใช้การศึกษา

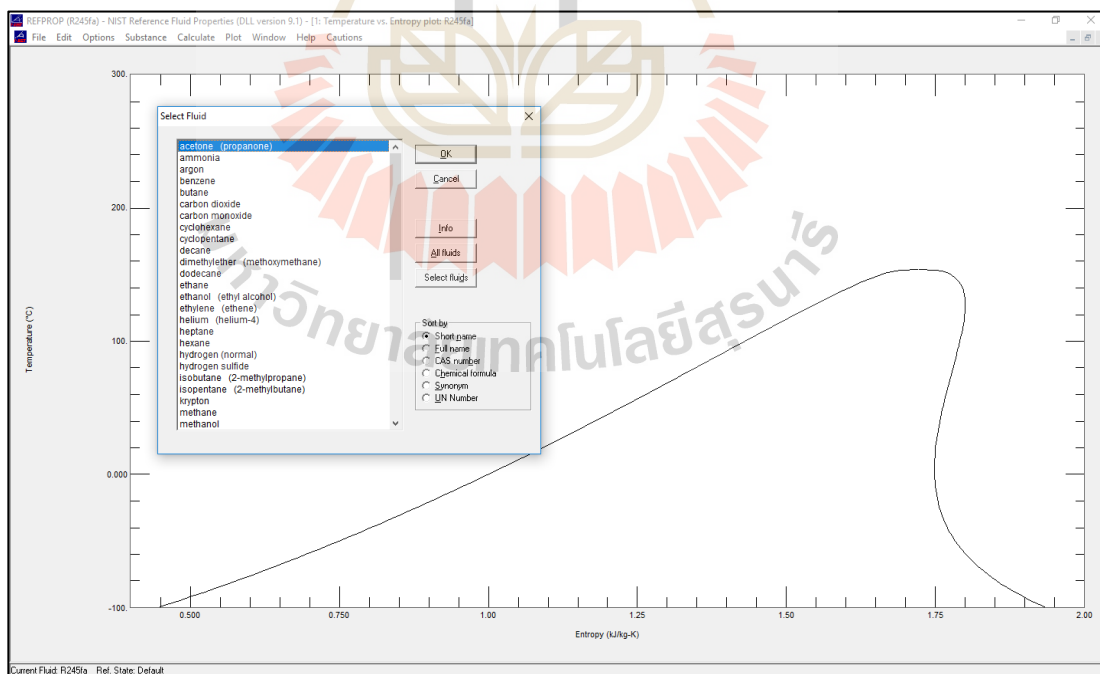
ในงานวิจัยนี้ได้ใช้แบบจำลองสมการคณิตศาสตร์ที่ได้แสดงไว้ในบทที่ 2 และใช้โปรแกรมร่วมด้วยในการจำลองการศึกษาในครั้งนี้ รวมถึงระเบียบวิธีการจำลอง

3.2.1 โปรแกรมที่ใช้ในการจำลอง

สำหรับโปรแกรมที่ใช้ในการศึกษานี้ประกอบไปด้วย 2 โปรแกรม คือ โปรแกรม MATLAB และ โปรแกรม NIST REFPROP ทั้งสองโปรแกรมแสดงในรูปที่ 3.1 และ 3.2 ตามลำดับ สำหรับโปรแกรม MATLAB จะใช้ในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อคำนวณสมรรถนะของโรงไฟฟ้า และเศรษฐศาสตร์ ส่วนโปรแกรม NIST REFPROP เป็นโปรแกรมสำหรับใช้ในการคำนวณคุณสมบัติของสารทำงานทางเทอร์โมไดนามิกส์ ซึ่งจะต้องเชื่อมต่อการทำงานของทั้งสองโปรแกรมให้ทำงานร่วมกัน



รูปที่ 3.1 หน้าต่างโปรแกรม MATLAB

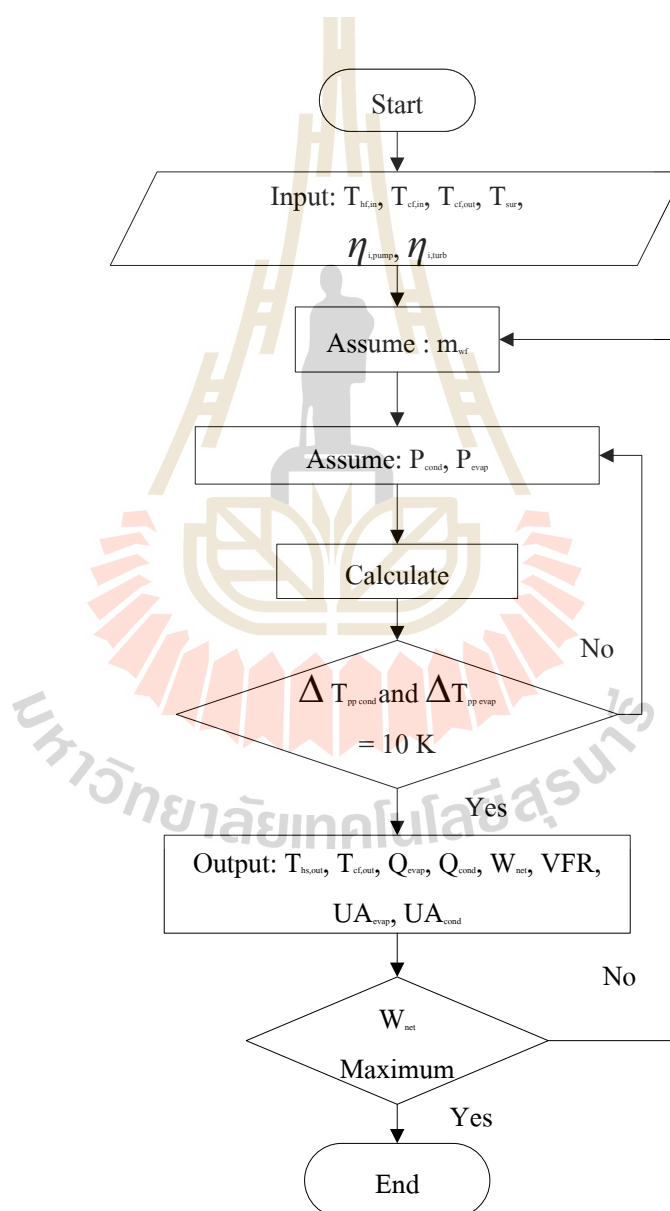


รูปที่ 3.2 หน้าต่างโปรแกรม NIST REFPROP

3.2.2 ระเบียบวิธีการจำลอง

ในการศึกษานี้มีจุดประสงค์เพื่อจำลองหางานสุทธิสูงสุดของสารทำงานแต่ละชนิดที่ใช้ในโรงไฟฟ้า ORC และ โรงไฟฟ้า TLC โดยใช้ระเบียบวิธี golden section search method ซึ่งมี objective function คือ ผลต่างของอุณหภูมิของสารทำงานกับแหล่งความร้อนที่อยู่ในเครื่องระเหย (evaporator) และ ผลต่างของอุณหภูมิของสารทำงานกับแหล่งความร้อนที่อยู่ในเครื่องควบแน่น (condenser) เพื่อให้ได้งานสุทธิสูงในภาวะดังกล่าว โดยกระบวนการจำลองแสดงดังรูปที่

3.3



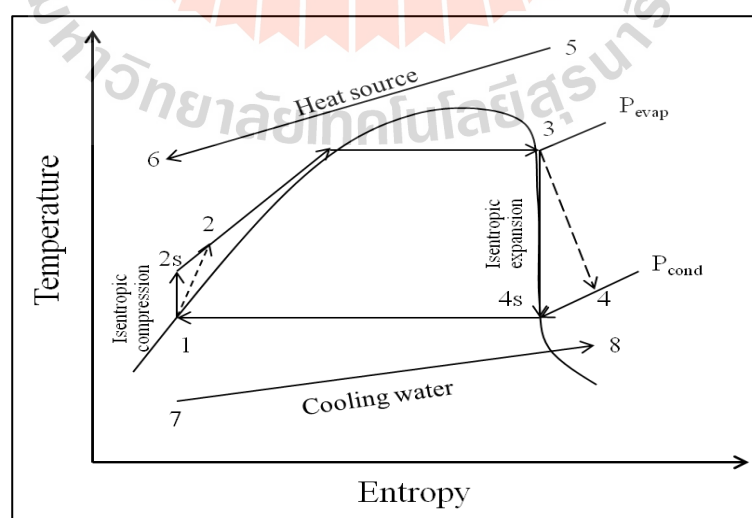
รูปที่ 3.3 แผนผังกระบวนการคำนวณทางคณิตศาสตร์

จากรูปที่ 3.3 แสดงผังกระบวนการการจำลองในระบบซึ่งในกระบวนการเริ่มต้นนั้น เป็นกระบวนการป้อนค่าเริ่มต้น เช่น อุณหภูมิแหล่งความร้อน อุณหภูมิน้ำหล่อเย็นเข้าและออก อุณหภูมิถังเวดล้อน และ isentropic efficiency ของปั๊มและกังหัน ดังแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ค่าตัวแปรสำหรับการจำลองของโรงไฟฟ้า ORC และ TLC

Parameters	Value
Hot water inlet temperature ($^{\circ}\text{C}$)	100, 110, 120
Mass flow rate hot water (kg/s)	20.83
Cooling water inlet ($^{\circ}\text{C}$)	15
Cooling water outlet ($^{\circ}\text{C}$)	25
Isentropic efficiency pump	0.65
Isentropic efficiency turbine or expander	0.85
Pinch point temperature difference ($^{\circ}\text{C}$)	10
State of working fluid inlet pump	Sat. liquid
State of working fluid inlet expander	Sat. vapor/ Sat. liquid*
Heat loss to environment	neglect
Pressure drop in system	neglect

หมายเหตุ : * ใช้กับ TLC



รูปที่ 3.4 แผนภาพกระบวนการทางเทอร์โมไดนามิกส์ของโรงไฟฟ้า ORC

กระบวนการต่อมาคือสุ่มเดาค่าอัตราการไหลของสารทำงาน และช่วงของค่าความดันสูงสุดและต่ำสุดในเครื่องควบแน่นและเครื่องระเหย แล้วให้โปรแกรมทำการคำนวณหาคุณสมบัติของสารทำงานเพื่อนำไปใช้คำนวณหาสมรรถนะ โดยคำนวณค่าต่าง ๆ ดังสมการที่ 3.1 - 3.28

โดยเริ่มต้นของกระบวนการคำนวณของแบบจำลองจะเริ่มคำนวณหางานของปั๊ม คำนวณได้จากสมการที่ 3.1 โดยที่ $\dot{m}_{wf}$ เป็นตัวแปรที่ทราบค่าจากการสุ่มเข้ามา และ h_1 เป็นค่าเอนทัลปีที่ทางเข้าของปั๊ม ที่ได้จากการใช้ NIST REFPROP คำนวณหาจากการสุ่มค่าความดันในเครื่องระเหย และกำหนดสถานะสารทำงานที่เข้าปั๊มเป็น ของเหลวอิ่มตัว (saturated liquid) จากนั้นใช้สมการที่ 3.2 เพื่อคำนวณค่าเอนทัลปีที่ทางออกของปั๊ม (h_2) โดยที่ $\eta_{i,pump}$ ทราบค่า และ h_{2s} ทราบค่าจากการใช้ NIST REFPROP คำนวณหาที่ความดันเครื่องระเหยและให้ค่าเอนโทรปี $S_{2s}=S_1$

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

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

เมื่อ	$\dot{W}_{pump}$	คือ	พลังงานที่ปั๊มใช้งาน, W
	$\dot{m}_{wf}$	คือ	อัตราการไหลของสารทำงาน, kg/s
	h_1, h_2	คือ	เอนทัลปีของสารทำงานที่ตำแหน่ง 1 และ 2, kJ/kg (รูปที่ 3.4)
	S_1, S_2	คือ	เอนโทรปีของสารทำงานที่ตำแหน่ง 1 และ 2, kJ/kg.K (รูปที่ 3.4)
	$\eta_{i,pump}$	คือ	ประสิทธิภาพไอเซนโทรปิกของปั๊ม

จากการคำนวณในสมการที่ 3.1 จะได้งานของปั๊มสารทำงาน หลังจากนั้นจะคำนวณหาพลังงานความร้อนที่เครื่องระเหยได้รับ สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.3 โดยที่ h_2 ได้จากสมการที่ 3.2 และ h_3 จากการใช้นิสต์ REFPROP คำนวณหาที่ความดันเครื่องระเหยและให้สถานะของสารทำงานที่ออกจากเครื่องระเหยเป็น ไออิ่มตัว (saturated vapor) สำหรับกรณีที่เป็นโรงไฟฟ้า ORC แต่สำหรับโรงไฟฟ้า TLC จะให้สถานะของสารทำงานที่ออกจากเครื่องระเหยเป็นของเหลวอิ่มตัว (saturated liquid)

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

เมื่อ	$\dot{Q}_{evap}$	คือ	พลังงานความร้อนที่สารทำงานได้ในเครื่องระเหย, W
	h_2, h_3	คือ	เอนทัลปีของสารทำงานที่ตำแหน่ง 2 และ 3, kJ/kg (รูปที่ 3.4)

จากการคำนวณหาพลังงานความร้อนที่เครื่องระเหยในสมการที่ 3.3 จากนั้นคำนวณหางานที่ได้จากกังหัน (turbine) หรือเครื่องขยาย (expander) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.4 โดย h_3 ทราบจากการคำนวณในสมการที่ 3.3 และ h_4 ได้จากการคำนวณในสมการที่ 3.5 เพื่อคำนวณหาค่าเอนทัลปีที่ทางออกของกังหัน (h_4) โดยที่ $\eta_{i,exp}$ หรือ $\eta_{i,turb}$ ทราบค่า และ h_{4s} ทราบค่าจากการใช้ NIST REFPROP คำนวณหาที่ความดันเครื่องควบแน่นและให้ค่าเอนโทรปี $S_{4s} = S_3$

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

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

เมื่อ	$\dot{W}_{turb}$	คือ	พลังงานที่เครื่องกังหัน, W
	h_3, h_4	คือ	เอนทัลปีของสารทำงานที่ตำแหน่ง 3 และ 4, kJ/kg (รูปที่ 3.4)
	S_3, S_4	คือ	เอนโทรปีของสารทำงานที่ตำแหน่ง 3 และ 4, kJ/kg.K (รูปที่ 3.4)
	$\eta_{i,turb}$	คือ	ประสิทธิภาพไอเซ็นโทรปีของกังหัน หรือ เครื่องขยาย

สำหรับการคำนวณหาพลังงานความร้อนที่เครื่องควบแน่นคำนวณได้จากสมการที่ 3.6

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

เมื่อ	$\dot{Q}_{cond}$	คือ	พลังงานความร้อนที่เครื่องควบแน่น, W
	h_1, h_4	คือ	เอนทัลปีของสารทำงานที่ตำแหน่ง 1 และ 4, kJ/kg (รูปที่ 3.4)

จากการคำนวณหาพลังงานความร้อนในเครื่องระเหย และเครื่องควบแน่นในสมการที่ 3.3 และ 3.6 สามารถคำนวณหาอุณหภูมิของน้ำร้อนที่ออกจากเครื่องระเหย (T_6) ได้จากสมการสมดุล

พลังงานความร้อน ในสมการที่ 3.7 เมื่อ Cp_{hf} ได้จากการใช้ NIST REFPROP คำนวณโดยระบุ อุณหภูมิและสถานะของน้ำร้อนที่เป็นของเหลวอิ่มตัว และคำนวณหาอัตราการไหลของน้ำหล่อเย็น ($\dot{m}_{cf}$) ได้จากสมการที่ 3.9

$$\dot{Q}_{hf} = \dot{Q}_{evap} \quad (3.7)$$

$$\dot{Q}_{hf} = \dot{m}_{hf} Cp_{hf} (T_5 - T_6) \quad (3.8)$$

เมื่อ	$\dot{Q}_{hf}$	คือ	ปริมาณความร้อนของแหล่งความร้อน, W
	$\dot{m}_{hf}$	คือ	อัตราการไหลของแหล่งความร้อน, kg/s
	Cp_{hf}	คือ	ความร้อนจำเพาะของน้ำร้อน, kJ/kg.K
	T_5, T_6	คือ	อุณหภูมิของแหล่งความร้อนที่ตำแหน่ง 5 และ 6, °C (รูปที่ 3.4)

$$\dot{Q}_{cf} = \dot{Q}_{cond} \quad (3.9)$$

$$\dot{Q}_{cf} = \dot{m}_{cf} Cp_{cf} (T_8 - T_7) \quad (3.10)$$

เมื่อ	$\dot{Q}_{cf}$	คือ	ปริมาณความร้อนของแหล่งความร้อน, W
	$\dot{m}_{cf}$	คือ	อัตราการไหลของน้ำหล่อเย็น, kg/s
	Cp_{cf}	คือ	ความร้อนจำเพาะของน้ำร้อน, kJ/kg.K
	T_7, T_8	คือ	อุณหภูมิของแหล่งความร้อนที่ตำแหน่ง 7 และ 8, °C (รูปที่ 3.4)

จากการคำนวณค่าที่ตำแหน่งต่าง ๆ ที่แสดงในรูปที่ 3.4 เช่น ค่าพลังงานความร้อน งานที่ปั๊มและกังหัน นอกจากนี้การคำนวณหางานสุทธิ และประสิทธิภาพทางความร้อนสามารถคำนวณได้จาก สมการที่ 3.11 - 3.13 ตามลำดับ

$$\dot{W}_{net} = \dot{W}_{turb} - \dot{W}_{pump} \quad (3.11)$$

$$\dot{W}_{net} = \dot{Q}_{evap} - \dot{Q}_{cond} \quad (3.12)$$

$$\eta_{th} = \frac{\text{Output}}{\text{Input}} = \frac{\dot{W}_{net}}{\dot{Q}_{evap}} \quad (3.13)$$

เมื่อ	$\dot{W}_{net}$	คือ	กำลังงานสุทธิ, W
	η_{th}	คือ	ประสิทธิภาพเชิงความร้อน

นอกจากนี้ในงานวิจัยนี้ยังมีการพิจารณาพลังงานและประสิทธิภาพตามกฎข้อที่ 2 ทางเทอร์โมไดนามิกส์สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.14 – 3.19 ตามลำดับ

$$\dot{E}x_5 = \dot{m}_{hf} C_{p_{hf}} \left((T_5 - T_{sur}) - T_{sur} \log(T_5/T_{sur}) \right) \quad (3.14)$$

$$\dot{E}x_6 = \dot{m}_{hf} C_{p_{hf}} \left((T_6 - T_{sur}) - T_{sur} \log(T_6/T_{sur}) \right) \quad (3.15)$$

$$\dot{E}x_7 = \dot{m}_{hf} C_{p_{hf}} \left((T_7 - T_{sur}) - T_{sur} \log(T_7/T_{sur}) \right) \quad (3.16)$$

$$\dot{E}x_8 = \dot{m}_{hf} C_{p_{hf}} \left((T_8 - T_{sur}) - T_{sur} \log(T_8/T_{sur}) \right) \quad (3.17)$$

$$\eta_{Ex,p} = \frac{\dot{W}_{net}}{\dot{E}x_5} \quad (3.18)$$

$$\eta_{Ex,overall} = \frac{\dot{W}_{net} + \dot{E}x_6 + \dot{E}x_8}{\dot{E}x_5 + \dot{E}x_7} \quad (3.19)$$

เมื่อ	$\eta_{Ex,p}$	คือ	Power exergy efficiency
	$\eta_{Ex,overall}$	คือ	Overall exergy efficiency
	$\dot{E}x_5$	คือ	Exergy ที่ตำแหน่งที่ 5, W (รูปที่ 3.4)
	$\dot{E}x_6$	คือ	Exergy ที่ตำแหน่งที่ 6, W (รูปที่ 3.4)

$\dot{E}x_7$	คือ	Exergy ที่ตำแหน่งที่ 7, W (รูปที่ 3.4)
$\dot{E}x_8$	คือ	Exergy ที่ตำแหน่งที่ 8, W (รูปที่ 3.4)
T_{sur}	คือ	อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม, °C (รูปที่ 3.4)

ทั้งนี้ได้มีกระประเมินขนาดของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนโดยใช้ค่าตัวแปร UA และขนาดของกังหันหรือเครื่องขยาย จากอัตราส่วนปริมาตรการไหลที่ทางออกต่อทางเข้าของกังหัน (volume flow rate ratio, VFR) ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 1.20 – 1.28 ตามลำดับ ทั้งนี้ในการประเมินขนาดของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน จะใช้วิธีการที่เรียกว่า discretization ซึ่งจะเป็นการแบ่งพื้นที่ในอุปกรณ์เป็นขนาดเล็กดังแสดงในรูปที่ 3.5 แล้วให้โปรแกรมหาผลรวมของค่า UA ของแต่ละพื้นที่ที่ถูกแบ่ง

$$\dot{Q} = UA \Delta T_{LM} \quad (3.20)$$

$$\dot{Q}_{evap} = (UA)_{evap} \Delta T_{LM, evap} \quad (3.21)$$

$$\dot{Q}_{cond} = (UA)_{cond} \Delta T_{LM, cond} \quad (3.22)$$

$$\Delta T_{LM, evap} = \frac{(T_5 - T_3) - (T_6 - T_2)}{\log \left(\frac{T_5 - T_3}{T_6 - T_2} \right)} \quad (3.23)$$

$$\Delta T_{LM, cond} = \frac{(T_4 - T_8) - (T_1 - T_7)}{\log \left(\frac{T_4 - T_8}{T_1 - T_7} \right)} \quad (3.24)$$

เมื่อ	A	คือ	พื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อน, m ²
	U	คือ	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม, W/m ² .K
	ΔT_{LM}	คือ	ความแตกต่างอุณหภูมิเฉลี่ยแบบล็อก, °C

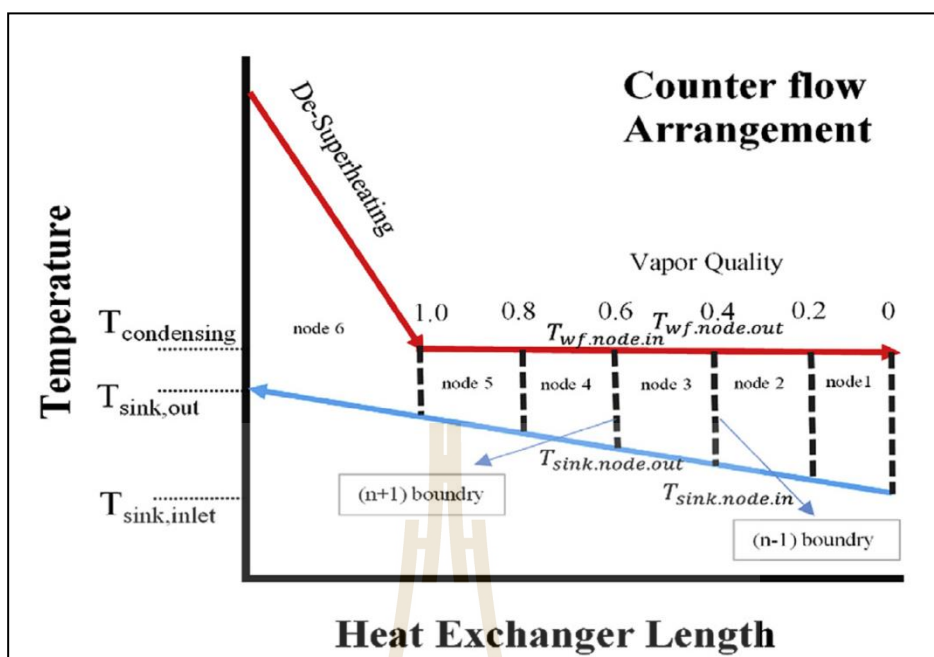
$$\dot{V}_3 = \frac{\dot{m}_{wf} 10^3}{\rho_3} \quad (3.25)$$

$$\dot{V}_4 = \frac{\dot{m}_{wf} 10^3}{\rho_4} \quad (3.26)$$

$$VFR = \frac{\dot{V}_4}{\dot{V}_3} \quad (3.28)$$

เมื่อ $\dot{V}_3, \dot{V}_4$ คือ ปริมาตรการไหลของสารทำงานที่ตำแหน่งที่ 3 และ 4, l/s (รูปที่ 3.4)
 ρ_3, ρ_4 คือ ความหนาแน่นของสารทำงานที่ตำแหน่งที่ 3 และ 4, kg/m³ (รูปที่ 3.4)
 VFR คือ อัตราส่วนปริมาตรการไหล

จากการคำนวณค่าสมรรถนะของโรงไฟฟ้าจากนั้นเข้าสู่กระบวนการเช็คเงื่อนไขแรกๆของโปรแกรม โดยมีเงื่อนไขว่า ความดันที่โปรแกรมสุ่มเข้ามาค่าแรก ทำให้เกิดผลต่างของอุณหภูมิสารทำงานกับแหล่งความร้อนในเครื่องระเหย และผลต่างของอุณหภูมิสารทำงานกับน้ำหล่อเย็นต่างกัน 10°C (pinch point temperature difference, ΔT_{pp}) ถ้ายังไม่เท่ากับ 10°C ให้กลับไปสุ่มค่าใหม่ ซึ่งในกระบวนการสุ่มค่าใหม่จะเป็นกระบวนการใช้วิธี golden section search method เพื่อให้ค่าที่สุ่มใหม่ได้ค่าผลต่างของอุณหภูมิเข้าใกล้เงื่อนไขมากยิ่งขึ้น ซึ่งในกระบวนการเช็คผลต่างของอุณหภูมิเข้าใกล้เงื่อนไขหรือไม่นั้น จะใช้วิธีการที่เรียกว่า discretization เช่นเดียวกับการหาค่า UA ซึ่งจะเป็นการแบ่งพื้นที่ในอุปกรณ์เป็นขนาดเล็กลงแสดงในรูปที่ 3.5 แล้วให้โปรแกรมหาผลต่างของอุณหภูมิที่เกิดขึ้น เมื่อผ่านเงื่อนไขดังกล่าวให้แสดงค่าสมรรถนะของระบบ เช่น ค่างานสุทธิ พลังงานความร้อน ค่า VFR เป็นต้น หลังจากนั้นจะเข้าสู่เงื่อนไขถัดมาคือการเช็คค่าอัตราการไหลของสารทำงานที่สุ่มเข้ามาให้งานสุทธิสูงสุดหรือไม่ ถ้าไม่ได้งานสูงสุดให้กลับไปสุ่มค่าอัตราการไหลสารทำงานใหม่ ซึ่งในกระบวนการนี้จะเป็นกระบวนการ trial and error จนกว่าจะได้อัตราการไหลที่ทำให้เกิดงานสุทธิสูงสุด



รูปที่ 3.5 Discretization scheme of condenser model. (Usman et al., 2017)

3.3 การเลือกใช้สารทำงาน (Selection of the working fluid)

การเลือกสารทำงานที่ใช้ในโรงไฟฟ้า ORC นั้นมีความสำคัญอย่างยิ่ง เนื่องจากแหล่งความร้อนที่ใช้กับ ORC นั้นมีหลากหลายประเภท มีอุณหภูมิของแหล่งความร้อนซึ่งแตกต่างกันไป ในการเลือกควรเลือกให้เหมาะสมกับแหล่งความร้อนที่จะนำมาใช้กับ ORC ซึ่งจะมีเกณฑ์ในการเลือก เช่น มีราคาไม่แพง ไม่เป็นพิษ ไม่ติดไฟ และเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม ซึ่งสารทำงานที่เป็นตามเกณฑ์ดังกล่าวมีไม่มากนัก และยังมีข้อจำกัดอื่น ๆ ที่ต้องพิจารณาในเบื้องต้นมีดังนี้ (Vélez et al. 2012)

1) ผลกระทบกับสิ่งแวดล้อม

สารทำงานบางชนิดถูกจำกัดการใช้งานเนื่องจากมีค่า ozone depleting potential (ODP) และ ค่า global warming potential (GWP) เกินค่าที่กำหนด ซึ่งข้อกำหนดดังกล่าวเกิดจากการร่วมมือของนานาชาติในการทำสนธิสัญญาว่าด้วยข้อกำหนดการใช้สารที่ทำลายชั้นบรรยากาศโอโซน (Montreal protocol) และสนธิสัญญาว่าด้วยการปล่อยก๊าซเรือนกระจก (Tokyo protocol)

2) ความปลอดภัย

สารทำงานจะต้องมีความปลอดภัย ไม่เป็นพิษ ไม่กัดกร่อนอุปกรณ์ ซึ่งจะทำให้ประหยัดค่าซ่อมบำรุง และไม่ไวไฟ ซึ่งการจำแนกระดับความเป็นอันตรายของสารทำงานและ

ข้อกำหนดที่ใช้ในระบบทำความเย็น คือ American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE)

3) เสถียรภาพของสารทำงาน

เสถียรภาพทางเคมีของสารทำงาน เสถียรภาพทางความร้อน สารทำงานบางชนิดได้รับอุณหภูมิสูงอาจจะทำให้เกิดการขยายตัวของสารทำงานอย่างรวดเร็ว ซึ่งอาจจะทำให้เกิดอันตรายได้ หรือสารทำงานทำปฏิกิริยากับสารบางอย่างที่อยู่ในอุปกรณ์ทำให้เป็นพิษ หากเกิดการรั่วไหลจะสามารถทำให้เกิดอันตรายได้

4) ความดัน

เพื่อให้ระบบทำงานอย่างมีประสิทธิภาพ สารทำงานบางชนิดต้องใช้ความดันค่าสูง ซึ่งส่งผลให้อุปกรณ์มีความสามารถทนแรงดันได้สูงขึ้น ดังนั้นอุปกรณ์จึงมีราคาสูงขึ้นด้วย

5) สารทำงานหาซื้อได้ง่าย และราคาไม่แพง

อย่างที่ได้อธิบายไว้ก่อนหน้านี้ สารทำงานที่สามารถใช้งานได้มีไม่มากนักที่หาซื้อได้ทั่วไป เนื่องจากข้อกำหนดต่างๆของสนธิสัญญา Montreal protocol และ Tokyo protocol

6) ความร้อนแฝงของสารทำงาน

สารทำงานที่สามารถดูดซับพลังงานได้ดีหรือมีค่าความร้อนแฝงสูง จะทำให้สามารถเลือกใช้นาของปั๊มเล็กลงได้ ทำให้ความต้องการอัตราการไหลของสารทำงานลดลง

7) จุดเยือกแข็งของสารทำงาน

อุณหภูมิจุดเยือกแข็งของสารทำงานจะต้องต่ำกว่าอุณหภูมิต่ำสุดของระบบ

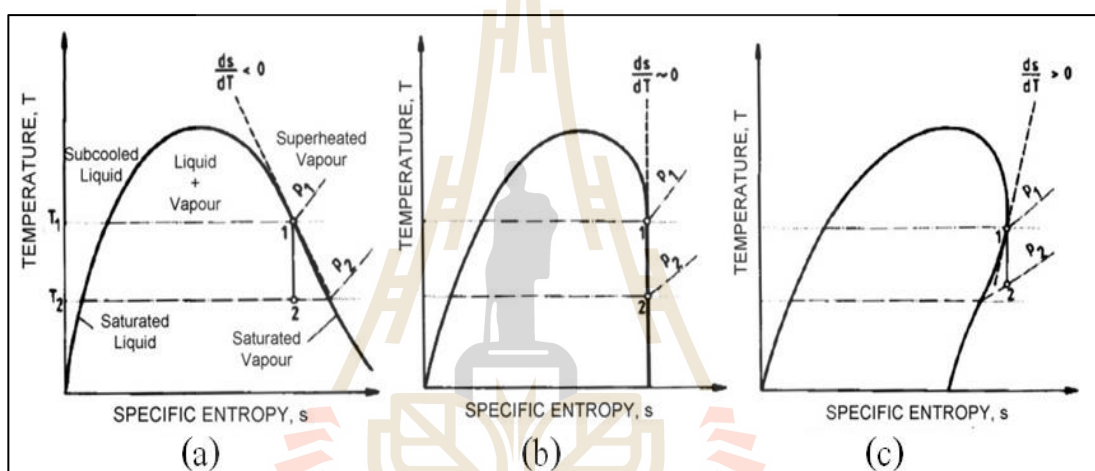
8) ประเภทของสารทำงาน

สารทำงานที่มีการใช้งานในโรงไฟฟ้า ORC จะเป็นสารอินทรีย์ หรือสารทำความเย็นซึ่งมีอยู่หลายชนิด แต่ละสารจะมีคุณสมบัติแตกต่างกัน โดยสารเหล่านี้สามารถแบ่งได้ 3 ประเภท คือ wet fluid, isentropic fluid และ dry fluid ได้อธิบายในหัวข้อ 3.4

3.4 ประเภทของสารทำงาน (Type of working fluid)

สารทำงานที่ใช้ในโรงไฟฟ้าพลังไอน้ำและ organic Rankine cycle นั้นสามารถแบ่งตามคุณสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์ได้ 3 ประเภท คือ 1. wet fluid 2. isentropic fluid และ 3. dry fluid โดยจะพิจารณาจากกราฟความสัมพันธ์ของอุณหภูมิ และเอนโทรปี (T-S diagram) ซึ่งในการพิจารณาประเภทของสารทำงานจะพิจารณาจาก เส้นกราฟไออิมตัว (saturated vapor line) (Vélez et al. 2012) ดังแสดงในรูปที่ 3.6 หากเส้นกราฟไออิมตัว มีค่าความชันเป็นลบ หรือน้อยกว่าศูนย์ สารทำงานนั้นจัดอยู่ในประเภท wet fluid เช่น น้ำ แอมโมเนีย หากเส้นกราฟมีค่าความชัน

ประมาณศูนย์ หรือ มีค่านันต์ สารทำงานนั้นจัดอยู่ในประเภท isentropic fluid และเส้นกราฟไออิมตัวมีค่าความชันเป็นบวกหรือมากกว่าศูนย์ สารทำงานนั้นจัดอยู่ในประเภท dry fluid โดยส่วนใหญ่สารทำงานที่ใช้ในโรงไฟฟ้า ORC จะเป็น isentropic fluid และ dry fluid ทั้งนี้เพื่อป้องกันความเสียหายที่อาจจะเกิดขึ้นกับเครื่องกังหัน หากสถานะของสารทำงานที่ขยายตัวในเครื่องกังหันมีทั้งน้ำและไอผสมกันซึ่งจะทำให้เครื่องกังหันเกิดความเสียหายและมีอายุการใช้งานสั้นลง หากใช้สารทำงานที่เป็น isentropic และ dry fluid ไม่ต้องกังวลว่าสารทำงานจะมีสถานะเป็นของผสม เพราะหลังการขยายตัวของสารทำงานจะมีสถานะเป็น ไอ หรือ ไอร้อนยิ่งยวด ซึ่งเป็นข้อดีของสารทำงานทั้งสองประเภท

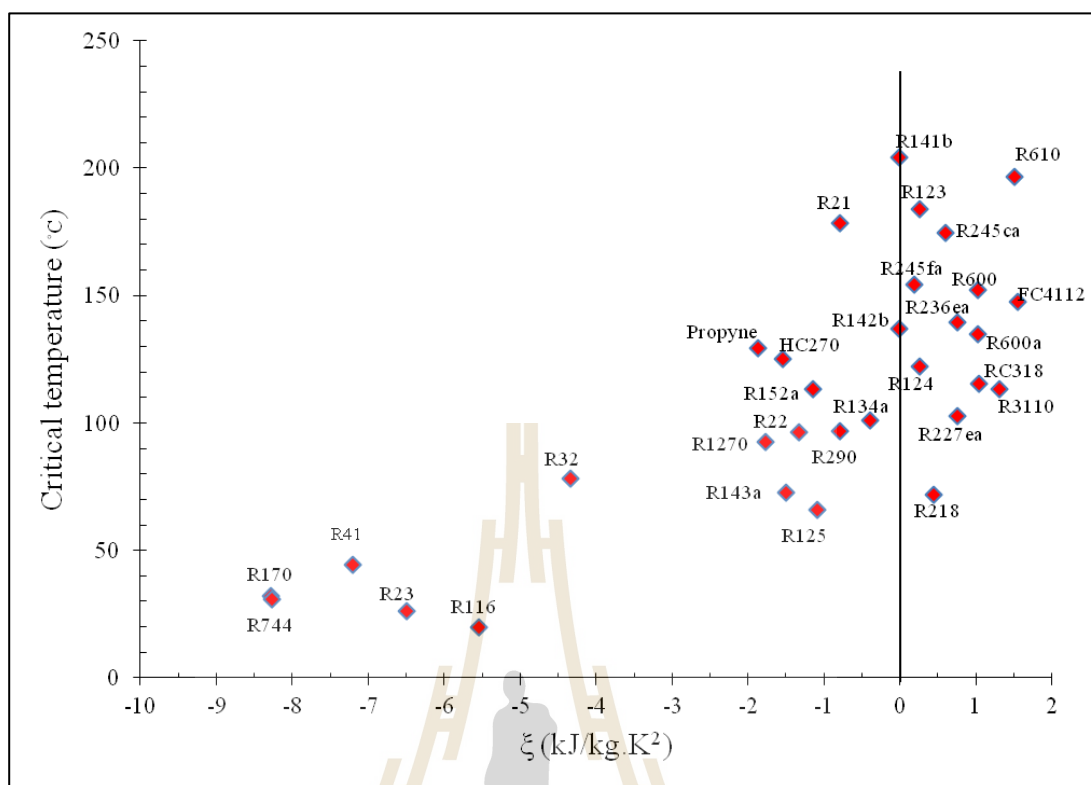


รูปที่ 3.6 ประเภทของสารทำงาน (a) wet (b) isentropic และ (c) dry (Vélez et al. 2012)

นอกจากนี้ในรูปที่ 3.7 กราฟแสดงค่าความชันของเส้นไออิมตัวกับอุณหภูมิวิกฤติสารทำงาน ซึ่งจะเห็นว่าเส้นแกนนอนจะมีเส้นอ้างอิงที่ตำแหน่งหมายเลขศูนย์ สารทำงานที่อยู่ในพื้นที่แกนนอนเป็นลบ สารทำงานจะมีความชันของเส้นไออิมตัวเป็นลบซึ่งหมายถึงสารทำงานประเภท wet fluid ในทางตรงกันข้ามสารทำงานที่อยู่ในพื้นที่ที่มีค่าบวก จะเป็นสารทำงานประเภท dry fluid และสารทำงานที่อยู่ใกล้เส้นศูนย์ จะเป็นสารทำงานประเภท isentropic fluid

3.4.1 สารทำงานที่เลือกใช้ในการจำลองในการศึกษานี้ (working fluid selected)

สารทำงานที่เลือกใช้ในการจำลองในโรงไฟฟ้า ORC และ โรงไฟฟ้า TLC แสดงในตารางที่ 3.1 มีทั้งหมด 16 ชนิด ซึ่งมีอุณหภูมิวิกฤติของสารอยู่ในช่วง 94 – 373°C และมีสารทำงานหลายประเภท ส่วนใหญ่เป็นสารทำงานประเภท dry fluid



รูปที่ 3.7 กราฟแสดงค่าความชันของเส้นไออิมตัวกับอุณหภูมิวิกฤตสารทำงาน (Chen et al., 2010)

3.5 ตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง (Model validation)

สำหรับงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการจำลองเชิงตัวเลขโดยการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของโรงไฟฟ้า ORC และโรงไฟฟ้า TLC ซึ่งแบบจำลองที่สร้างขึ้นต้องมีการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง เพื่อให้แบบจำลองมีความน่าเชื่อถือและยอมรับได้ โดยในงานวิจัยนี้ได้ตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองเทียบกับผลการทำงานของโรงไฟฟ้า ORC ฝางและเปรียบเทียบกับผลการจำลองกับแบบจำลองของนักวิจัยท่านอื่นที่ได้มีการศึกษากับโรงไฟฟ้า ORC และโรงไฟฟ้า TLC ซึ่งมีรายละเอียดผลการตรวจสอบในหัวข้อ 4.1

ตาราง 3.1 สารทำงานที่ใช้ในการจำลอง (Xu and Yu 2014)

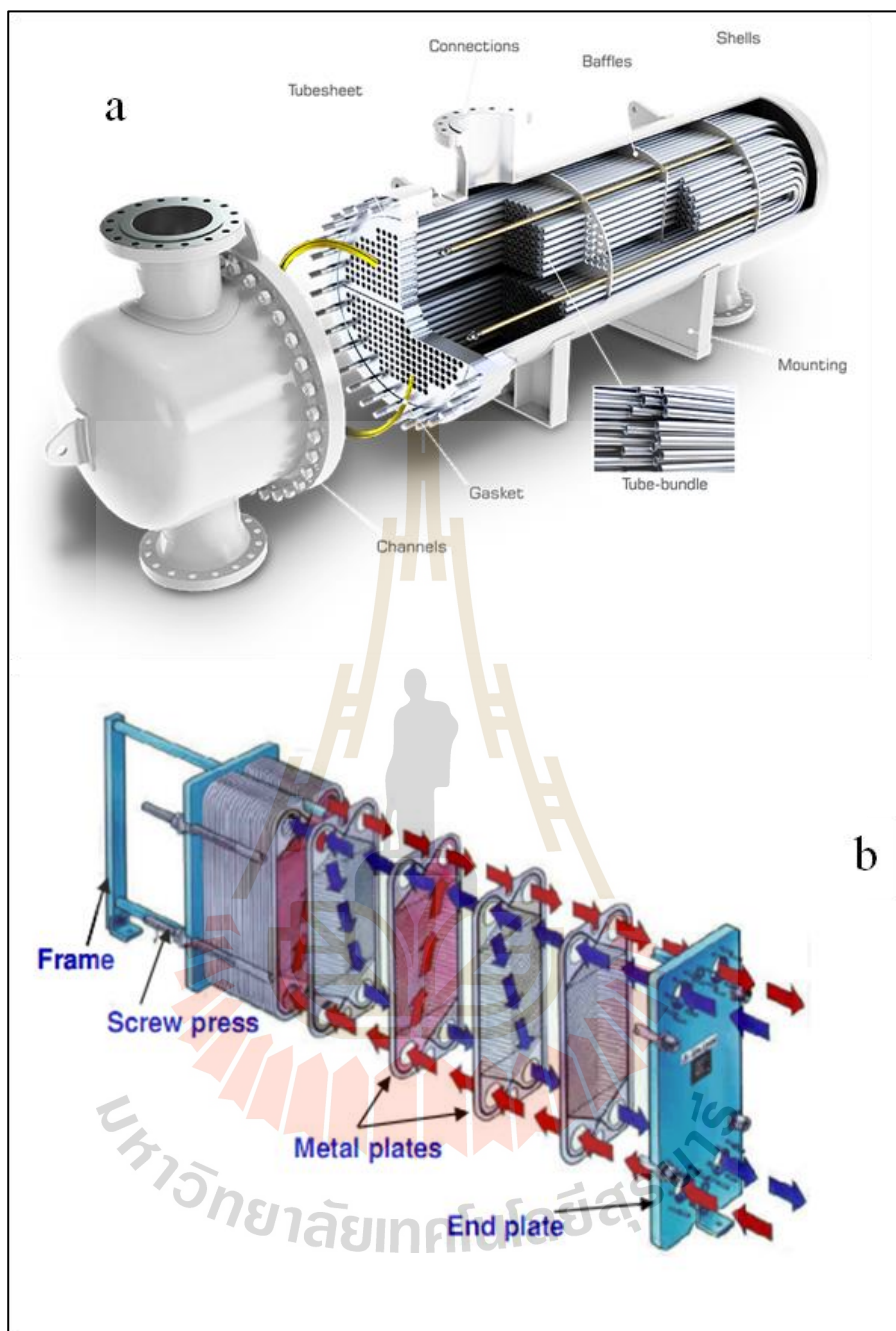
No.	Substance	T _{cri} (°C)	P _{cri} (bar)	ODP	GWP	Type	Toxicity	Flammability
1	R1234yf	94.7	33.822	0	4	Isentropic	non	highly
2	R22	96.145	49.9	0.05	1810	Wet	non	non
3	Propane	96.74	42.512	0	3	Wet	low	extremely
4	R134a	101.06	40.593	0	1300	Wet	low	non
5	R227ea	101.75	29.25	0	3500	Dry	/	/
6	R1234ze	109.36	36.349	0	7	Isentropic	non	highly
7	R152a	113.26	45.168	0	120	Wet	low	common
8	RC318	115.23	27.775	0	10250	Dry	low	non
9	R236fa	124.92	32	0	6300	Isentropic	low	non
10	Isobutane	134.66	36.29	0	3	Dry	low	extremely
11	R236ea	139.29	34.2	0	1200	Dry	/	/
12	Butane	151.98	37.96	0.12	725	Isentropic	low	extremely
13	R245fa	154.01	36.51	0	950	Dry	low	non
14	R245ca	174.42	39.407	0	650	Dry	/	/
15	Isopentane	187.2	33.78	0	4	Dry	low	extremely
16	Water	373.95	220.64	0	/	Wet	non	non

3.6 การประเมินขนาดและราคาอุปกรณ์

การประเมินขนาดและราคาของอุปกรณ์เป็นกระบวนการพิจารณาเลือกใช้อุปกรณ์ในระบบที่มีขายในประเทศไทยเพื่อใช้ข้อมูลขนาดและราคาของอุปกรณ์มาออกแบบเพื่อหาความสัมพันธ์ของตัวแปรดังกล่าวให้สามารถใช้งานได้ครอบคลุมสภาวะการทำงานที่ได้ออกแบบระบบในย่านต่าง ๆ ได้ เช่น มีอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนหลายขนาด เครื่องกำเนิดไฟฟ้าหลายขนาด เป็นต้น ในหัวข้อนี้จึงได้นำเสนอรายละเอียดพร้อมประเมินขนาดและอุปกรณ์ต่าง ๆ ภายในโรงไฟฟ้า โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.6.1 การเลือกขนาดและประเมินราคาอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน

ในการเลือกอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนจะมีอยู่ 2 ส่วนคือ เครื่องระเหย (evaporator) และเครื่องควบแน่น (condenser) ทั้งนี้เมื่อพิจารณาอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับโรงไฟฟ้า ORC และโรงไฟฟ้า TLC สามารถแบ่งอุปกรณ์ดังกล่าวได้เป็น 2 ประเภทคือ แบบสารทำงานอยู่ในเปลือก น้ำร้อนไหลในท่อ (shell and tube) และแบบแผ่น (plate heat exchanger) ดังแสดงในรูปที่ 3.7 ซึ่งจากการศึกษางานวิจัยที่มีนักวิจัยได้ทำการศึกษาเปรียบเทียบการใช้อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนทั้ง 2 ประเภท พบว่าอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบ plate heat exchanger ให้สมรรถนะของโรงไฟฟ้าดีกว่าการใช้แบบ shell and tube heat exchanger (Walraven et al., 2014) อีกทั้ง plate heat exchanger ใช้พื้นที่ในการติดตั้งน้อยกว่า ทำความสะอาดและซ่อมบำรุงง่ายกว่า และถ่ายเทความร้อนได้ดีกว่า (Bani and Peschel., 2012) ยังมีข้อเสียคือ เกิดความดันสูญเสียมากกว่าแบบ shell and tube มีข้อจำกัดการใช้เรื่องของอุณหภูมิการใช้งาน ซึ่งจะขึ้นอยู่กับชนิดของปะเก็นกันรั่ว (gasket) สำหรับงานวิจัยนี้ได้คำนึงถึงสมรรถนะของระบบเป็นหลัก จึงเลือกใช้อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบ plate heat exchanger ซึ่งมีลักษณะดังรูปที่ 3.8 (b) สำหรับการเลือกขนาดผู้วิจัยได้ทำการออกแบบโรงไฟฟ้า ที่มีกำลังการผลิตขนาดตั้งแต่ 10 kW ถึง 500 kW แล้วนำข้อมูลที่ได้ออกแบบให้กับบริษัทที่จำหน่าย plate heat exchanger ได้ทำการประเมินขนาดและราคา แล้วนำข้อมูลดังกล่าวมาหาความสัมพันธ์ของขนาดและราคาซึ่งได้ ดังสมการที่ ก.1 - ก.4 และแสดงอยู่ในภาคผนวก ก



รูปที่ 3.8 อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน (a) shell and tube (b) plate heat exchanger

สมการขนาดและราคาของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่นของเครื่องระเหยและเครื่องควบแน่น

$$A_{evap} = 0.0197Q_{evap} + 1.1935 \quad (ก.1)$$

$$A_{cond} = 0.0795Q_{cond} + 1.0656 \quad (ก.2)$$

$$Z_{evap} = 1749.1A_{evap}^{0.8854} \quad (ก.3)$$

$$Z_{cond} = 944.43A_{cond}^{0.7919} \quad (ก.4)$$

เมื่อ	A_{evap}	คือ	พื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อนเครื่องระเหย (evaporator), m^2
	A_{cond}	คือ	พื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อนเครื่องควบแน่น (condenser), m^2
	$\dot{Q}_{evap}$	คือ	พลังงานความร้อนที่เครื่องระเหย, kW
	$\dot{Q}_{cond}$	คือ	พลังงานความร้อนที่เครื่องควบแน่น, kW
	Z_{evap}	คือ	ราคาเครื่องระเหย, USD
	Z_{cond}	คือ	ราคาเครื่องควบแน่น, USD

3.6.2 การประเมินขนาดและราคาเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

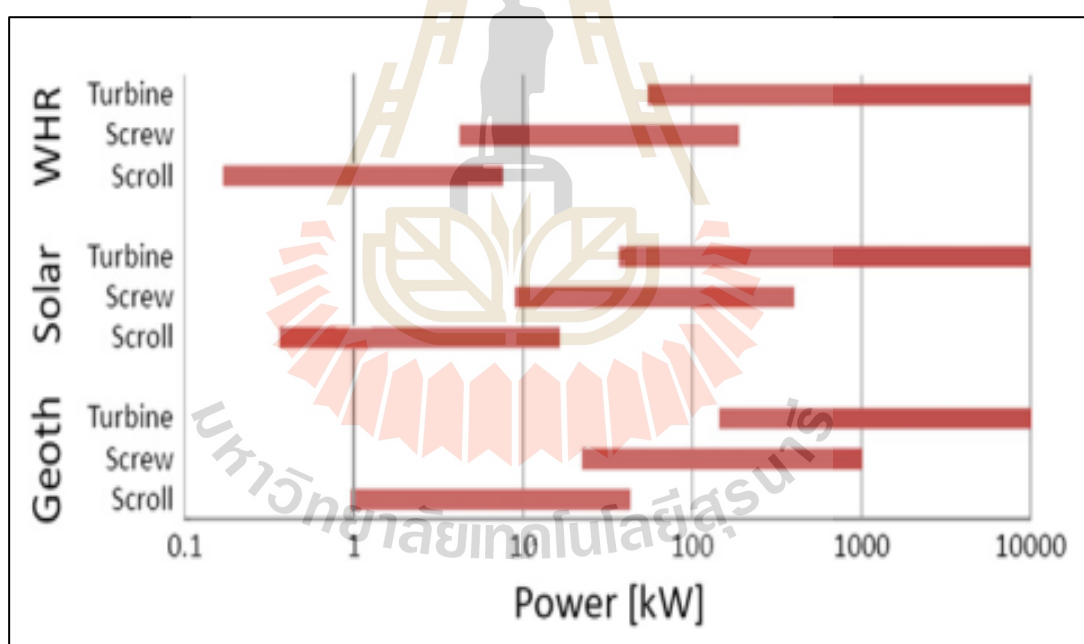
การเลือกและประเมินขนาดเครื่องกำเนิดไฟฟ้า พิจารณาจากรอบทำงานของ expander ที่นำมาใช้งานในโรงไฟฟ้าซึ่งพิจารณารอบการทำงานอยู่ที่ 1500 rpm ให้เหมาะสมกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มีขายในท้องตลาด โดยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่เลือกใช้มีรอบการผลิตไฟฟ้าอยู่ที่ 1500 rpm ซึ่งเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 3 เฟส กระแสสลับให้แรงดันไฟฟ้า 380V ขนาดสำหรับการประเมินจากกำลังที่ได้จาก Turbine หรือ expander ผลิตได้ จากการออกแบบของโรงไฟฟ้าที่มีขนาด 10 kW ถึง 500 kW ดังที่อธิบายไว้ก่อนหน้านี้ นั้น ขนาดที่ประเมินจะอยู่ในช่วง 10 kW – 800 kW และนำข้อมูลดังกล่าวไปขอใบเสนอราคากับบริษัทที่จำหน่ายเครื่องกำเนิดไฟฟ้า แล้วนำข้อมูลที่ได้อามาหาความสัมพันธ์ของขนาดกำลังการผลิตไฟฟ้าและราคาเครื่องกำเนิดไฟฟ้า สามารถคำนวณได้จากสมการที่ ก.5

$$Z_{gen} = 20.118 \dot{W}_{expander} + 1276.6 \quad (\text{ก.5})$$

เมื่อ Z_{gen} คือ ราคาเครื่องกำเนิดไฟฟ้า, USD
 $\dot{W}_{expander}$ คือ พลังงานจากเครื่องขยาย หรือ กังหัน, kW

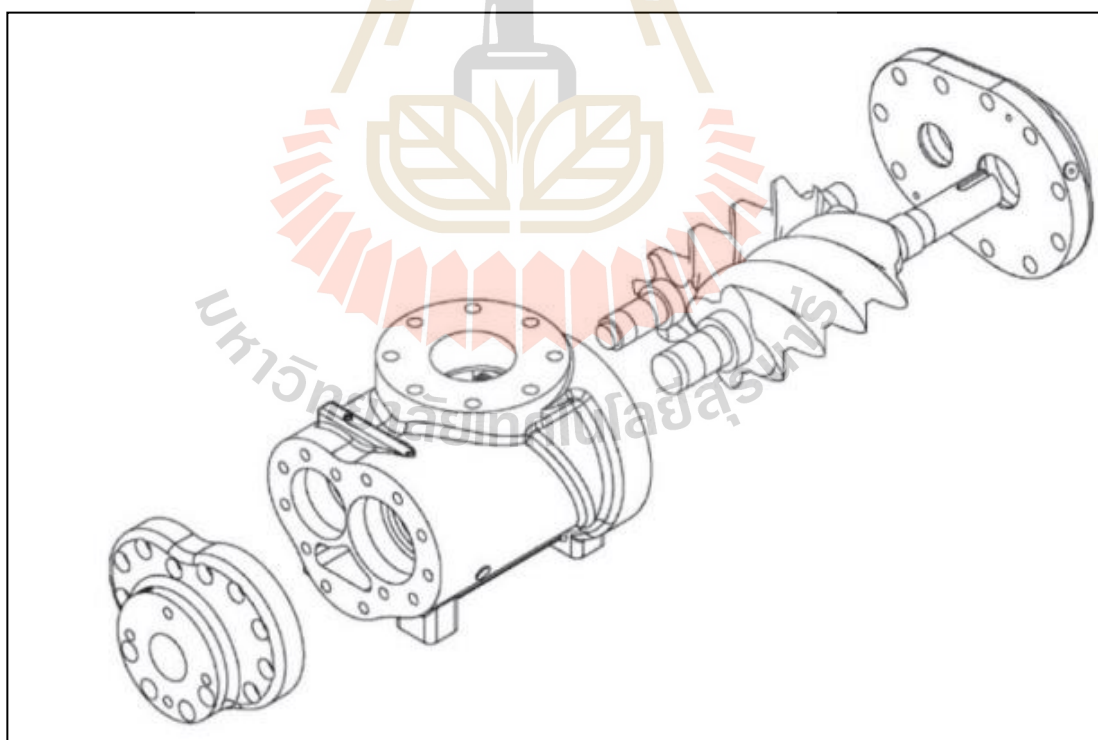
3.6.3 การเลือกขนาดและประเมินราคา Expander

สำหรับการเลือกขนาดของอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับผลิตงานซึ่งเรียกว่า กังหัน (turbine) หรือ เครื่องขยาย (expander) ในโรงไฟฟ้าที่ใช้สารอินทรีย์ (organic fluid) หรือสารทำความเย็น เป็นสารทำงานในระบบมีการใช้งาน expander อยู่หลายชนิด เช่น scroll expander, screw expander, radial turbine และ axial turbine ซึ่งแต่ละชนิดจะใช้ผลิตพลังงานในช่วงที่แตกต่างกัน และราคาจึงต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 3.9 และรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.9 แผนภาพแสดง expander ที่เหมาะสำหรับการผลิตงานในช่วงต่าง ๆ ภายใต้การใช้แหล่งความร้อนแต่ละประเภท (Quoilin et al., 2013)

จากรูปที่ 3.9 จะเห็นว่าแหล่งความร้อนแต่ละประเภท expander แต่ละชนิดมีศักยภาพในการผลิตงานในช่วงที่แตกต่างกัน ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ใช้แหล่งความร้อนที่เป็น geothermal จากการประเมินศักยภาพของแหล่งความร้อนที่ใช้ในการศึกษาจะนำมาผลิตพลังงานไฟฟ้าได้ประมาณ 100 - 500 kW เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 3.9 จะมี turbine กับ screw ที่สามารถผลิตงานในช่วงดังกล่าวได้ ซึ่งในงานวิจัยนี้จึงได้พิจารณาเลือก screw expander ในการศึกษารุ่นนี้ ซึ่งมีลักษณะดังรูปที่ 3.10 สาเหตุที่เลือก screw expander เนื่องจากมีศักยภาพในการผลิตงานในช่วงที่ต้องการ isentropic efficiency screw expander สูงได้ถึง 90% (Kainhan, 2018) และจากการศึกษาของ Tang et al. (2015) ได้ศึกษาสมรรถนะของ screw expander ในโรงไฟฟ้า ORC ที่ใช้แหล่งความร้อนได้พิภพเป็นแหล่งพลังงานผลการศึกษพบว่า screw expander สามารถผลิตงานได้ตั้งแต่ 200 kW ถึง 560 kW เมื่อความเร็วรอบของ screw expander สูงขึ้นและมี isentropic efficiency screw expander สูงถึง 87% ที่ความเร็วรอบ screw 1500 rpm นอกจากนี้ข้อดีของ screw expander ก็คือสามารถใช้กับสารทำงานประเภท wet ได้และทำงานในสภาวะสารทำงานที่เป็นของผสมระหว่างระหว่างไอน้ำกับของเหลวได้ ด้วยความสามารถดังกล่าว โรงไฟฟ้า TLC ส่วนใหญ่จึงใช้ screw expander



รูปที่ 3.10 Screw expander main component (Richter, 2017)

สมการสำหรับใช้ในการประเมินราคา screw expander ได้เลือกใช้สมการความสัมพันธ์ที่ Astolfi (2015). ได้มีการสำรวจราคาไว้แล้วนำมาสร้างสมการราคาดังแสดงในสมการที่ 3.29

$$Z_{\text{expander}} = 3143.7 + 217423 \dot{V}_{\text{expander, outlet}} \quad (3.29) \text{ (Astolfi, 2015)}$$

เมื่อ	$\dot{V}_{\text{expander, outlet}}$	คือ	ปริมาตรการไหลของสารทำงานที่ออกจากกังหัน, m ³ /s
	Z_{expander}	คือ	ราคา screw expander, USD

3.6.4 การเลือกขนาดและประเมินราคาปั๊มสารทำงาน

ในระบบจะมีปั๊มที่ใช้สำหรับขับสารทำงาน เพื่อขับสารทำงานเข้าไปในเครื่องระเหย ซึ่งจากการสำรวจงานวิจัยที่มีการทำการทดลอง และโรงไฟฟ้า ORC จะใช้ปั๊มขับสารทำงานหลายประเภทขึ้นอยู่กับขนาดของโรงไฟฟ้า อัตราการไหล และความดันในระบบ เช่น โรงไฟฟ้า ORC ฝางขนาด 300 kW อ.ฝาง จ.เชียงใหม่ และโรงไฟฟ้า ORC ขนาด 20 kW ที่วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ใช้ปั๊มแนวตั้งหลายใบพัด (vertical multistage centrifugal pump) ในการขับสารทำงานซึ่งมีลักษณะดังรูปที่ 3.11 ซึ่งในงานวิจัยนี้เลือกปั๊มประเภทดังกล่าวใช้ในการประเมินขนาดและราคาโดยจากการออกแบบเบื้องต้นที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อ 3.6.1 ซึ่งประเมินขนาดโรงไฟฟ้า ORC 10 kW – 500 kW ได้นำข้อมูลการออกแบบทั้งความดันในระบบ ความดันสูญเสียในอุปกรณ์และอัตราการไหลของสารทำงานในโรงไฟฟ้า ให้กับบริษัทที่จำหน่ายปั๊มแนวตั้งหลายใบพัดประเมินขนาดและราคา แล้วนำข้อมูลที่ได้อามาหาความสัมพันธ์ของขนาดและราคาปั๊ม แสดงในภาคผนวก ก. สามารถคำนวณราคาปั๊มได้จากสมการที่ ก.6 และ ก.7

$$\dot{W}_{\text{pump}} = 1.3099 \dot{V}_{\text{wf}} + 0.8239 \quad (\text{ก.6})$$

$$Z_{\text{pump}} = 168.68 \dot{W}_{\text{pump}} + 1737.3 \quad (\text{ก.7})$$

เมื่อ	$\dot{W}_{\text{pump}}$	คือ	กำลังงานของปั๊ม, kW
	$\dot{V}_{\text{wf}}$	คือ	อัตราการไหล, L/s
	Z_{pump}	คือ	ราคาปั๊มสารทำงาน, USD



รูปที่ 3.11 Vertical multistage centrifugal pump

3.6.5 ราคาสารทำงาน

สำหรับสารทำงานที่ใช้ในการจำลองผู้วิจัยได้มีการสำรวจราคาสารทำงานที่มีขายในประเทศไทย พบว่าสารทำงานที่ใช้ในการจำลองหลายชนิดไม่มีขายในประเทศไทย ผู้วิจัยจึงได้อ้างอิงราคาสารทำงานจากงานวิจัย thermo-economic evaluation of ORCs for various working fluids (Garg et al., 2016) และเปรียบเทียบราคาสารทำงานบางชนิดที่มีขายในประเทศไทยกับงานวิจัยดังกล่าว เช่น สารทำงาน R245fa ที่มีการนำเข้ามาขายราคาประมาณ 367 บาท/กิโลกรัม หรือ 11.47 USD/kg สารทำงาน R134a 187 บาท/กิโลกรัม หรือประมาณ 5.86 USD/kg ซึ่งใกล้เคียงกับราคาในงานวิจัยกล่าว ดังแสดงในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 ราคาสารทำงาน (Garg et al. 2016)

No.	Substance	Cost (USD/kg)
1	Isopentane	2.85
2	R245ca	13.6
3	R245fa	12.4
4	R236ea	19.6
5	Butane	3.4
6	R236fa	7.5
7	RC318	9
8	Isobutane	4.68
9	R227ea	11.2
10	R1234ze	26
11	R152a	3.51
12	R134a	5.84
13	R1234yf	4.5
14	Propane	3
15	R22	3.56
16	Water	0

3.6.6 การประเมินขนาดและราคาปั้มน้ำร้อนและน้ำหล่อเย็น

การเลือกพิจารณาปั้มน้ำร้อนจะพิจารณาจากความสามารถของปั้มที่ใช้กับน้ำร้อนที่อุณหภูมิได้ 120°C ตามเงื่อนไขของแหล่งความร้อนที่อุณหภูมิสูงสุดที่ได้พิจารณา และประเมินความสามารถในการทำความดันของปั้มที่ต้องทำได้สูงกว่าความดันของการกลายเป็นไอน้ำร้อนร่วมกับความดันที่เกิดการสูญเสียในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน เพื่อป้องกันการกลายเป็นไอระหว่างการไหลหรือการถ่ายเทความร้อนให้กับสารทำงาน ซึ่งแสดงรายละเอียดในภาคผนวก ก. และราคาของปั้มน้ำร้อนและน้ำหล่อเย็นสามารถคำนวณได้จากสมการ ก.8 และ ก.9

$$Z_{hf,pump} = 1.1588 \dot{V}_{hf} + 817.71 \quad (\text{ก.8})$$

$$Z_{cf,pump} = 0.8254 \dot{V}_{cf} + 472.54 \quad (\text{ก.9})$$

เมื่อ	$Z_{hf,pump}$	คือ	ราคาปั้มน้ำร้อน, USD
	$\dot{V}_{hf}$	คือ	อัตราการไหลน้ำร้อน, l/min
	$Z_{cf,pump}$	คือ	ราคาปั้มน้ำหล่อเย็น, USD
	$\dot{V}_{cf}$	คือ	อัตราการไหลน้ำหล่อเย็น, l/min

3.6.7 การประเมินขนาดและราคาถังเก็บสารทำงานในโรงไฟฟ้า

การเลือกถังเก็บสารทำงานพิจารณาจากการประเมินความดันที่เกิดขึ้นในเครื่องควบแน่นที่ได้จากการออกแบบและได้สำรวจขนาดและราคา จาก บริษัท เจเอ็นเค เพาเวอร์ทูลส์ จำกัด ซึ่งมีขนาดตั้งแต่ 100 ลิตร ถึง 10000 ลิตร สามารถรับความดันได้ 10 บาร์ สามารถนำไปพิจารณาเป็นสมการความสัมพันธ์ของขนาดและราคา ซึ่งราคาของถังเก็บสารทำงานคำนวณได้จากสมการที่ ก.10

$$Z_{tank} = 7.8342 V_{tank}^{0.7501} \quad (\text{ก.10})$$

เมื่อ	Z_{tank}	คือ	ราคาถังเก็บสารทำงาน, USD
	V_{tank}	คือ	ปริมาตรถังเก็บสารทำงาน, Liter

3.7 การวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์ (Economic analysis)

การวิเคราะห์ทางด้านเศรษฐศาสตร์เป็นปัจจัยหนึ่งที่มีความสำคัญที่ใช้ในการพิจารณาและการตัดสินใจในการลงทุน ในงานวิจัยนี้ได้พิจารณาถึงต้นทุนการผลิตไฟฟ้าตลอดอายุโครงการ (levelized cost of electricity, LCOE) ซึ่งพิจารณาปัจจัยที่ก่อให้เกิดต้นทุนของการผลิตไฟฟ้า เช่น ต้นทุนค่าก่อสร้างโรงไฟฟ้า ต้นทุนการเดินเครื่อง ราคาเชื้อเพลิงตลอดอายุของโรงไฟฟ้า เป็นต้น โดยต้นทุนที่เกิดขึ้นตลอดอายุของโรงไฟฟ้าจะถูกปรับมูลค่าตามหลักการคิดมูลค่าเงินตามเวลา เพื่อสะท้อนถึงต้นทุนเฉลี่ยตลอดอายุโครงการโรงไฟฟ้า สามารถคำนวณได้ตามสมการที่ 3.30 - 3.35

$$LCOE = \frac{Inv + \sum_{t=1}^n \frac{PEC}{(1+r)^t}}{\sum_{t=1}^n \frac{\dot{W}_{net} t_{op}}{(1+r)^t}} \quad (3.30)$$

$$PEC = Z_{o\&m} + Z_{operator} \quad (3.31)$$

$$Z_{operator} = Z_{engineer} + Z_{technician} \quad (3.32)$$

$$Inv = C_{plant} + C_{site} + C_{serv} + C_{startup} + C_{land} \quad (3.33)$$

$$C_{plant} = C_{eq} + C_{wf} + Z_{pipe} + Z_{elect\&contr} \quad (3.34)$$

$$C_{eq} = Z_{evap} + Z_{cond} + Z_{gen} + Z_{expand} + Z_{pump} + Z_{tank} + Z_{hot,pump} + Z_{cold,pump} \quad (3.35)$$

เมื่อ $LCOE$ คือ ต้นทุนการผลิตไฟฟ้าต่อหน่วยปรับเฉลี่ยตลอดอายุโครงการ, USD/kWh

Inv คือ เงินลงทุนระบบโรงไฟฟ้า (investment cost), USD

PEC	คือ	ค่าใช้จ่ายสำหรับการดำเนินการผลิตไฟฟ้า (Production electricity cost), USD
$Z_{o\&m}$	คือ	ค่าดำเนินการและซ่อมบำรุง, USD
$Z_{operator}$	คือ	งบประมาณค่าแรงงานต่อปี, USD
$Z_{engineer}$	คือ	ค่าจ้างวิศวกร ต่อปี, USD
$Z_{technician}$	คือ	ค่าจ้างช่างเทคนิค ต่อปี, USD
$\dot{W}_{net}$	คือ	พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ต่อปี (Net power electricity), kW
t_{op}	คือ	ระยะเวลาผลิตไฟฟ้าใน 1 ปี (Time operation plant), hr
n	คือ	อายุโครงการ 10 ปี
r	คือ	อัตราดอกเบี้ยเงินกู้ธนาคารร้อยละ 7.12 บาท หรือ 0.22691 USD
t	คือ	ปีที่โครงการดำเนินงาน
C_{plant}	คือ	ราคาโรงไฟฟ้า, USD
C_{site}	คือ	งบประมาณสร้างอาคารสำหรับโรงไฟฟ้าและสำนักงาน, USD
C_{serv}	คือ	งบประมาณสิ่งอำนวยความสะดวก เช่น ยานพาหนะ, USD
$C_{startup}$	คือ	งบประมาณสำรวจแหล่งความร้อนและขุดเจาะ, USD
C_{land}	คือ	ราคาที่ดินในพื้นที่ตั้งโรงไฟฟ้า, USD
C_{eq}	คือ	ราคาอุปกรณ์หลักในโรงไฟฟ้า (equipment cost), USD
C_{wf}	คือ	ราคาสารทำงาน, USD
Z_{pipe}	คือ	ราคาระบบท่อในโรงไฟฟ้า (pipe power plant), USD
$Z_{elect\&contr}$	คือ	ราคาอุปกรณ์ไฟฟ้าเครื่องวัดและควบคุม, USD
Z_{evap}	คือ	ราคาเครื่องระเหย (evaporator), USD
Z_{cond}	คือ	ราคาเครื่องควบแน่น (condenser), USD
Z_{gen}	คือ	ราคาเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (generator), USD
Z_{expand}	คือ	ราคาเครื่องขยาย (expander), USD
Z_{pump}	คือ	ราคาปั๊มสารทำงาน (pump working fluid), USD
Z_{tank}	คือ	ราคาถังเก็บสารทำงาน (storage tank), USD
$Z_{cold,pump}$	คือ	ราคาปั๊มน้ำหล่อเย็น (cooling water pump), USD
$Z_{hot,pump}$	คือ	ราคาปั๊มน้ำร้อน (hot water pump), USD

ในการคำนวณต้นทุนการผลิตไฟฟ้าในงานวิจัยนี้ได้มีการออกแบบโรงไฟฟ้าซึ่งแสดงในภาคผนวก ก. แล้วสำรวจราคาอุปกรณ์นำมาหาความสัมพันธ์ในรูปสมการของขนาดและราคาอุปกรณ์ดังที่ได้แสดงไว้ในหัวข้อ 3.5 ซึ่งบางส่วนไม่ได้มีการหาราคาแต่ใช้วิธีการประมาณการของค่าวัสดุอุปกรณ์เช่น ราคาท่อ ราคาชุดอุปกรณ์ไฟฟ้า เครื่องวัด อุปกรณ์ควบคุม ค่าดำเนินการและซ่อมบำรุง ค่าก่อสร้าง ค่าสำรวจและขุดเจาะแหล่งความร้อน และอื่น ๆ ดังนี้

$t_{op} = 8,400 \text{ hr}$	(อดิศักดิ์ คงคำ และนัฐพร ไชยญาติ, 2559)
$Z_{o\&m} = 0.05C_{plant}$	(ศรศักดิ์ เสงนาวงศ์ และคณะ 2561)
$Z_{pipe} = 0.1C_{eq}$	(Braumakis and Karellas, 2017)
$Z_{elect\&contr} = 0.1C_{eq}$	(Braumakis. and Karellas, 2017)
$C_{site} = 0.05C_{eq}$	(Karimi and Mansouri, 2018)
$C_{serv} = 0.05C_{eq}$	(Karimi and Mansouri, 2018)
$C_{startup} = 0.1C_{eq}$	(Karimi and Mansouri, 2018)
$C_{land} = 0$	(อดิศักดิ์ คงคำ และนัฐพร ไชยญาติ, 2559)

สำหรับในงานวิจัยนี้ได้พิจารณาอายุการใช้งานดำเนินโครงการโรงไฟฟ้าไว้ที่ 10 ปี หรือคิดระยะเวลาคืนทุนใน 10 ปี นอกจากนี้ จะเห็นว่า ค่าที่ดิน (C_{land}) เท่ากับศูนย์ เนื่องจากแหล่งความร้อนที่ใช้ในการพิจารณาอยู่ในเขตพื้นที่อุทยาน และมีพื้นที่ที่ตั้งของโรงไฟฟ้า ORC อยู่ในปัจจุบัน จึงประเมินให้มีค่าเท่ากับศูนย์ (อดิศักดิ์ คงคำ และนัฐพร ไชยญาติ, 2559) ทั้งนี้ควรพิจารณาเป็นกรณีสำหรับราคาพื้นที่ หากพื้นที่แหล่งความร้อนไม่อยู่ในพื้นที่ดังกล่าวหรือโครงการพัฒนาแหล่งความร้อน ควรจะมีการคิดต้นทุนของพื้นที่ร่วมด้วย ในงานวิจัยนี้ได้พิจารณาค่าจ้างวิศวกร และช่างเทคนิค อย่างละ 1 ตำแหน่ง ทำหน้าที่คอยควบคุมดูแลโรงไฟฟ้า โดยประเมินอัตราเงินเดือนที่ 22,000 บาทต่อเดือน สำหรับวิศวกร และ 15,000 บาทต่อเดือน สำหรับช่างเทคนิค นอกจากนี้ได้พิจารณาอัตราแลกเปลี่ยนค่าเงินบาทเป็นดอลลาร์สหรัฐจากธนาคารแห่งประเทศไทย วันที่ 7 มิถุนายน 2562 คือ 31.378 บาท ต่อ 1 ดอลลาร์สหรัฐ ทั้งนี้ในงานวิจัยนี้ไม่ได้พิจารณาดำเนินการของเชื้อเพลิงที่ป้อนให้กับโรงไฟฟ้า เนื่องจากน้ำพุร้อนเป็นน้ำที่ไหลเองตามธรรมชาติที่รับความร้อนจากใต้พื้นผิวโลก จึงไม่มีต้นทุนของเชื้อเพลิง แต่จะมีเพียงงบประมาณที่ใช้ในการสำรวจและขุดเจาะ และโรงไฟฟ้าที่ทำการศึกษามีการใช้หอทำความเย็น เนื่องจากพิจารณาให้ใช้น้ำจากแหล่งกักเก็บน้ำธรรมชาติ ในการดึงความร้อนจากเครื่องควบแน่นของโรงไฟฟ้าและปล่อยสู่สิ่งแวดล้อม จึงไม่มีงบประมาณของหอทำความเย็น

บทที่ 4

ผลการศึกษา และวิเคราะห์ผล

4.1 ผลการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง

การศึกษานี้ได้สร้างแบบจำลองคณิตศาสตร์ของโรงไฟฟ้า ORC และ TLC ด้วยโปรแกรม MATLAB เพื่อใช้ในการศึกษาสมรรถนะและเศรษฐศาสตร์โรงไฟฟ้าทั้ง 2 แบบ ดังนั้นเพื่อให้ผลการจำลองมีความน่าเชื่อถือและสามารถนำไปใช้งานได้อย่างถูกต้อง ในบทนี้จึงนำเสนอผลการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองโดยมีข้อมูลผลดังตารางที่ 4.1. และ 4.2

ตารางที่ 4.1 ผลการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองโรงไฟฟ้า ORC

Parameters	เชิดชัย อุทธากิจ (2538)	Present study	% difference
$T_{hs,out}$ (°C)	75	75.25	0.33
m_{hf} (kg/s)	20.83	22.18	6.50
$T_{cf,out}$ (°C)	25.6	25.62	0.06
m_{cf} (kg/s)	72.24	70.52	2.38
m_{wf} (kg/s)	8.17	8.59	5.14
$T_{evap,in}$ (°C)	27.5	27.61	0.40
$T_{evap,out}$ (°C)	84.11	84.55	0.52
Q_{evap} (kW)	3517.9	3712.40	5.53
Q_{cond} (kW)	3194.6	3131.80	1.97

จากตารางที่ 4.1 เป็นผลการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองเทียบกับผลการเดินเครื่องของโรงไฟฟ้า ORC ฝ่าย อ.ฝ่าย จ.เชียงใหม่ โดยพิจารณาให้ระบบผลิตกำลังไฟฟ้าที่เท่ากัน จากผลพบว่าร้อยละความแตกต่างสูงสุด มีค่าเท่ากับ 6.5% เป็นผลความแตกต่างของอัตราการไหลของแหล่งความร้อน และในตารางที่ 4.2 เป็นผลการจำลองของโรงไฟฟ้า TLC เป็นผลการศึกษาของ (Johann Fischer., 2011)

ตารางที่ 4.2 ผลการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองโรงไฟฟ้า TLC

Parameters	TLC		
	Fischer (2017)	Present study	% difference
T_1 (K)	358.15	358.15	0.00
T_3 (K)	590	589.99	0.00
T_4 (K)	358.15	358.15	0.00
V_3 (l/s)	7	7	0.00
V_4 (l/s)	4993	4993.4	0.01
T_6 (K)	370.53	370.47	0.02
T_8 (K)	348.15	348.15	0.00
η_{th}	0.1979	0.1979	0.00
$\eta_{Ex,overall}$	0.8732	0.8733	0.01
$\eta_{Ex,p}$	0.4435	0.4435	0.00

จากตารางที่ 4.2 แสดงผลการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองโรงไฟฟ้า TLC เทียบกับผลการจำลองของ Fischer ซึ่งจากผลที่ได้พบว่าย่อยละความแตกต่างสูงสุดมีค่าเท่ากับ 0.02 ที่อุณหภูมิแหล่งความร้อนที่ออกจากโรงไฟฟ้า (T_6) ซึ่งมีค่าน้อยมากทั้งนี้เนื่องจากเป็นผลการจำลองทางคณิตศาสตร์เหมือนกันจึงให้ผลต่างน้อย สาเหตุที่การศึกษานี้ได้เทียบผลการจำลอง เนื่องจากโรงไฟฟ้า TLC ที่มีการทำการทดลองให้ค่าที่ไม่เพียงพอต่อการเปรียบเทียบ การศึกษานี้จึงเลือกตรวจสอบความถูกต้องกับผลของ Fischer ซึ่งงานวิจัยอื่นได้มีการอ้างอิงจำนวนมาก มี Citation Indexes เท่ากับ 99 จึงทำให้เชื่อได้ว่าการศึกษาของ Fischer มีความน่าเชื่อถือ

4.2 ผลการศึกษาสมรรถนะของโรงไฟฟ้า ORC และ TLC

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงสมรรถนะ ของโรงไฟฟ้า ORC และ TLC ซึ่งในการจำลองโรงไฟฟ้าทั้งสองประเภทนี้ ได้พิจารณาใช้แหล่งความร้อนได้พิภพฝางมีช่วงอุณหภูมิของแหล่งความร้อน ที่ 100°C 110°C และ 120°C และอัตราการไหลของน้ำร้อนอยู่ที่ 20.83 kg/s และมีอุณหภูมิน้ำหล่อเย็น 15°C ตามการรายงานค่าในการศึกษาของ เชิดชัย อุทธากิจ, 2538 และค่าอื่นที่จำเป็นสำหรับการใช้ในการจำลองแสดงในตารางที่ 4.3

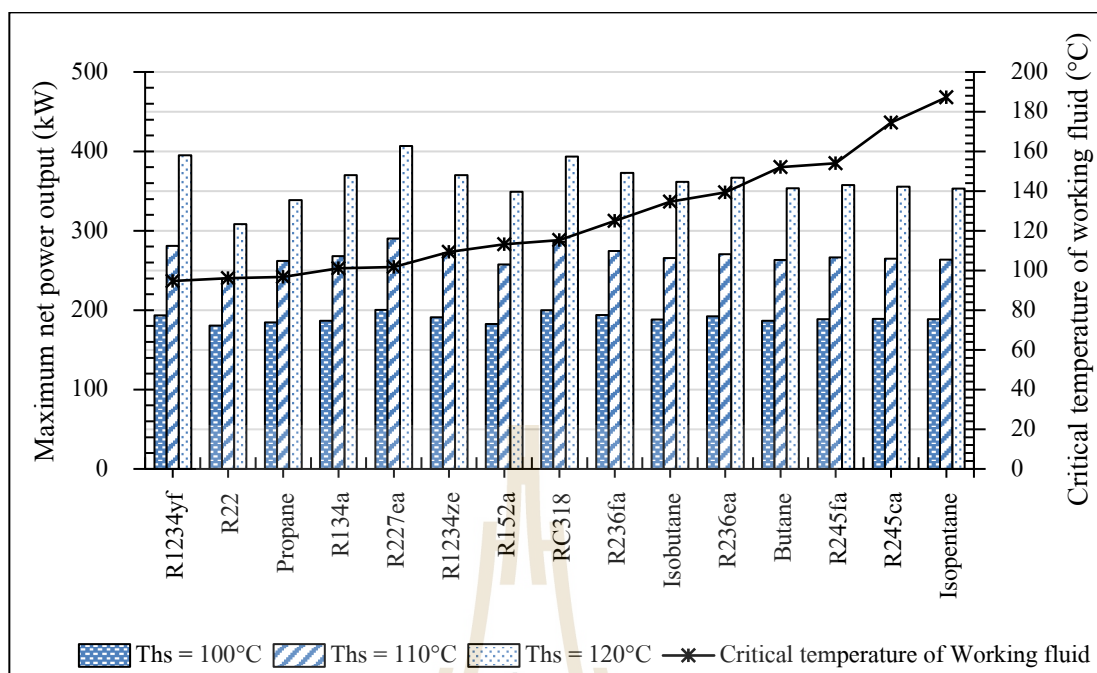
ตารางที่ 4.3 ค่าตัวแปรสำหรับการจำลองของโรงไฟฟ้า ORC และ TLC

Parameters	Value
Hot water inlet temperature ($^{\circ}\text{C}$)	100, 110, 120
Mass flow rate hot water (kg/s)	20.83
Cooling water inlet ($^{\circ}\text{C}$)	15
Cooling water outlet ($^{\circ}\text{C}$)	25
Isentropic efficiency pump	0.65
Isentropic efficiency expander	0.85
Pinch point temperature difference ($^{\circ}\text{C}$)	10
State of working fluid inlet pump	Sat. liquid
State of working fluid inlet expander	Sat. vapor/ Sat. liquid *
Heat loss to environment	neglect
Pressure drop in system	neglect

หมายเหตุ : * ใช้กับ TLC

4.2.1 ผลการศึกษาด้านสมรรถนะของโรงไฟฟ้า ORC

สำหรับผลการศึกษาสมรรถนะของโรงไฟฟ้า ORC ที่ได้รายงาน คือ ค่าพลังงานสุทธิสูงสุดของการใช้สารทำงานแต่ละชนิดและแหล่งความร้อนที่มีอุณหภูมิแตกต่างกัน ค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อน (thermal efficiency) และประสิทธิภาพ exergy นอกจากนี้ยังพิจารณาถึงตัวแปรที่ใช้ในการประเมินขนาดของอุปกรณ์ในโรงไฟฟ้า ORC เช่น ขนาดของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ขนาดของ expander ซึ่งผลที่ได้มีดังนี้



รูปที่ 4.1 Maximum net power output ของการใช้สารทำงานแต่ละชนิดที่แหล่งความร้อนอุณหภูมิ 100 – 120°C

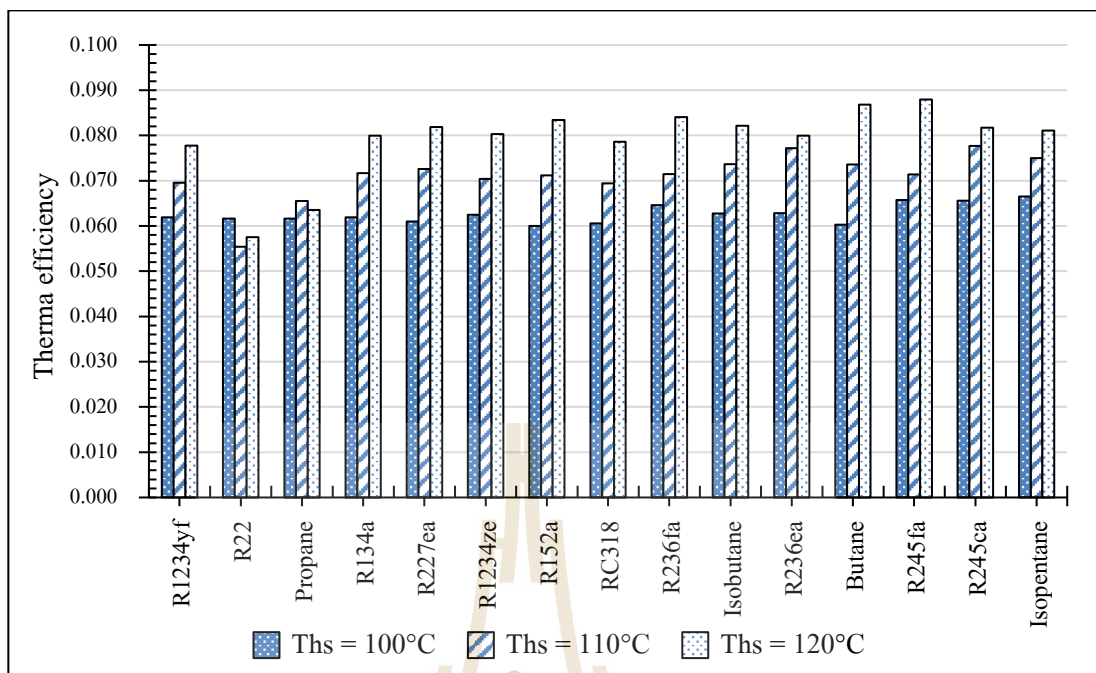
จากรูปที่ 4.1 แสดงผลการจำลองโรงไฟฟ้า ORC ของการใช้สารทำงานแต่ละชนิดที่แหล่งความร้อนอุณหภูมิแตกต่างกันจากผลที่ได้จะพบว่าสารทำงานทุกชนิดที่ใช้ในการจำลอง เมื่อมีอุณหภูมิแหล่งความร้อนสูงขึ้นระบบจะผลิตกำลังได้สูงขึ้นเช่นกัน เนื่องจากเมื่ออุณหภูมิแหล่งความร้อนสูงขึ้น ระบบจะได้รับพลังงานความร้อนสูงขึ้นทำให้ความดันที่อยู่ในเครื่องระเหยสูงขึ้น ส่งผลให้เกิดผลต่างของความดันที่ทางเข้าและทางออกของ expander มากขึ้น ทำให้ระบบสามารถผลิตงานได้มากขึ้นเมื่อแหล่งความร้อนมีอุณหภูมิสูง

เมื่อพิจารณาที่แหล่งความร้อนอุณหภูมิ 100°C ศักยภาพของสารทำงานแต่ละชนิดมีความสามารถในการผลิตงานได้ไม่ต่างกันมากหรือค่อนข้างใกล้เคียงกันซึ่งมีค่าประมาณ 190 – 200 kW ในขณะที่อุณหภูมิแหล่งความร้อนสูงขึ้นเป็น 110°C -120°C จะเริ่มเห็นความแตกต่างของพลังงานที่ผลิตได้ชัดเจนขึ้นเนื่องจากปัจจัยที่ได้กล่าวไว้ก่อนหน้านี้ และหากพิจารณาสารทำงานแต่ละชนิด จะพบว่าสารทำงานแต่ละชนิดมีอัตราการผลิตงานได้เพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิแหล่งความร้อนที่สูงขึ้น ในขณะที่สารทำงาน R22 propane และ R134a มีอัตราการเพิ่มขึ้นของงานสุทธิค่อนข้างคงที่เมื่อเทียบกับสารอื่น เนื่องจากในการจำลองหาค่า optimum maximum net power output สารทำงานดังกล่าวให้อัตราการผลิตงานที่สูงขึ้นแต่เนื่องจากค่างานสุทธิสูงสุดที่ผลิตได้ มีค่าความดันทำงานในเครื่องระเหยเกินกว่า 2.5 MPa ซึ่งเกินกว่าขนาดความดันที่อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน

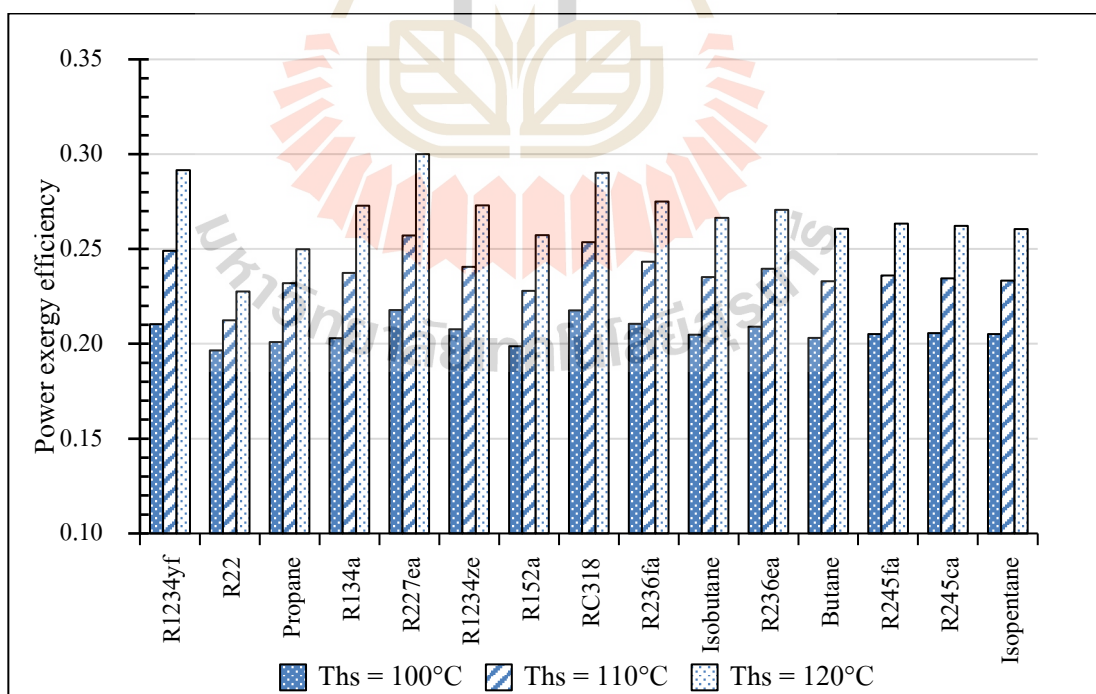
ที่พิจารณานำมาใช้งาน จึงมีการเลือกค่างานสุทธิในช่วงที่ทำให้ระบบมีความดันทำงานไม่เกินค่า 2.5 MPa ซึ่งมีค่าน้อยกว่าค่างานสุทธิสูงสุดที่ผลิตได้จริง จึงส่งผลให้สารทำงาน 3 ชนิดที่ได้กล่าวไว้ข้างต้นมีอัตราการเพิ่มขึ้นของงานสุทธิที่ผลิตได้ค่อนข้างคงที่ เมื่ออุณหภูมิแหล่งความร้อนสูงขึ้น ซึ่งจะส่งผลต่อค่าประสิทธิภาพ นอกจากนี้จะเห็นว่ารูปที่ 4.1 ได้แสดงเส้นอุณหภูมิวิกฤติของสารทำงานแต่ละชนิด ซึ่งจากการสำรวจงานวิจัยมีงานวิจัยที่ได้ศึกษาการเลือกสารทำงานเพื่อให้ได้งานสุทธิสูงสุด โดยการจำลองสารทำงานหลายชนิด เช่น (He et al., 2012). ศึกษาสารทำงานที่ใช้สำหรับ subcritical ORC ซึ่งมีแหล่งความร้อนที่อุณหภูมิ 150°C โดยเลือกสารทำงานกว่า 20 ชนิด มาจำลองและเปรียบเทียบผล พบว่า สารทำงานที่มีอุณหภูมิวิกฤติใกล้เคียงกับอุณหภูมิแหล่งความร้อน โดยส่วนใหญ่จะให้งานสุทธิสูง ซึ่งจากผลที่ได้ในรูปที่ 4.1 จะเห็นได้ว่า ไม่ว่าสารทำงานจะมีอุณหภูมิวิกฤติใกล้เคียงหรือห่างจากอุณหภูมิแหล่งความร้อน ไม่ส่งผลต่องานสุทธิที่ผลิตได้ ในช่วงอุณหภูมิ 100 – 120°C โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ที่แหล่งความร้อนอุณหภูมิ 100°C ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าในงานวิจัยนี้อุณหภูมิวิกฤติของสารทำงานไม่มีนัยสำคัญที่ส่งผลต่องานสุทธิที่ผลิตได้ ที่ช่วงแหล่งความร้อนอุณหภูมิ 100 – 120°C และในการจำลองโรงไฟฟ้า ORC สารทำงานที่ให้งานสุทธิสูงสุดทุกแหล่งความร้อน คือสาร R227ea มีค่าเท่ากับ 200kW 290 kW และ 406 kW ที่แหล่งความร้อนอุณหภูมิ 100°C 110°C และ 120°C ตามลำดับ นอกจากนี้ยังมีการประเมินประสิทธิภาพเชิงความร้อนของระบบ ซึ่งแสดงในรูปที่ 4.2

จากรูปที่ 4.2 ผลประสิทธิภาพเชิงความร้อนของสารทำงาน จะเห็นได้ว่าสารทำงานส่วนใหญ่เมื่อแหล่งความร้อนอุณหภูมิสูงขึ้น ประสิทธิภาพสูงขึ้นเนื่องจากผลิตงานเยื้องขึ้นดังที่ได้อธิบายในประเด็นผลของงานสุทธิสูงสุด ในขณะที่จะมีสารทำงานบางชนิดที่ประสิทธิภาพไม่เพิ่มขึ้นตามงานที่ผลิตได้ เช่น R22 และ Propane เนื่องจากปัจจัยของข้อจำกัดความดันที่รับได้ของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน ส่งผลไปถึงงานที่ผลิตได้ ดังที่อธิบายไว้ในประเด็นงานสุทธิสูงสุดของโรงไฟฟ้า และจะเห็นว่าประสิทธิภาพของสารทำงาน โดยส่วนใหญ่จะมีค่าใกล้เคียงที่แหล่งความร้อนอุณหภูมิเดียวกัน สารทำงานที่มีประสิทธิภาพสูงสุดที่แหล่งความร้อนอุณหภูมิ 100°C 110°C และ 120°C คือ R245fa 6.57% R245ca 7.8% และ R245fa 8.79% ตามลำดับ

ในส่วนถัดมาเป็นการแสดงประสิทธิภาพ exergy ของโรงไฟฟ้า ORC ซึ่งจะมี 2 แบบ คือ ประสิทธิภาพ exergy ที่พิจารณาเฉพาะงานสุทธิที่ผลิตได้ (power exergy efficiency) และ ประสิทธิภาพ exergy ที่พิจารณาจากงานสุทธิที่ผลิตได้รวมกับพลังงานที่เหลือจากการใช้ในโรงไฟฟ้า (overall exergy efficiency) เช่น น้ำร้อนที่ออกจากโรงไฟฟ้าที่มีอุณหภูมิสูงยังมีพลังงานเหลืออยู่ น้ำหล่อเย็นที่มีอุณหภูมิสูงขึ้น ซึ่งผลที่ได้แสดงในรูปที่ 4.3 และ 4.4

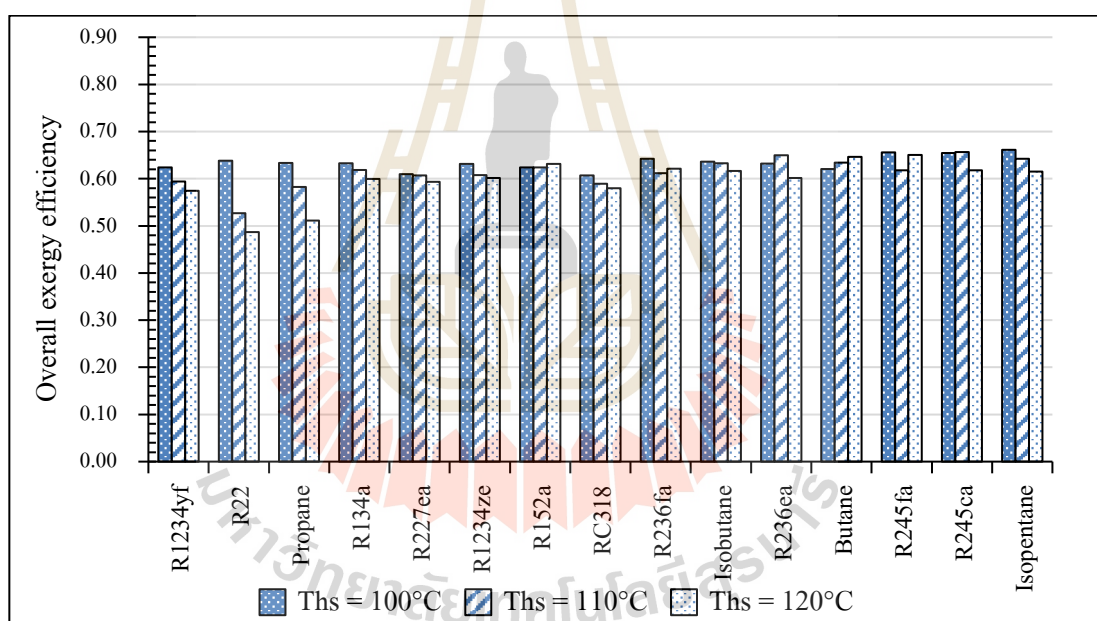


รูปที่ 4.2 ประสิทธิภาพทางร้อนของโรงไฟฟ้า ORC ที่แหล่งความร้อนอุณหภูมิ 100 - 120°C



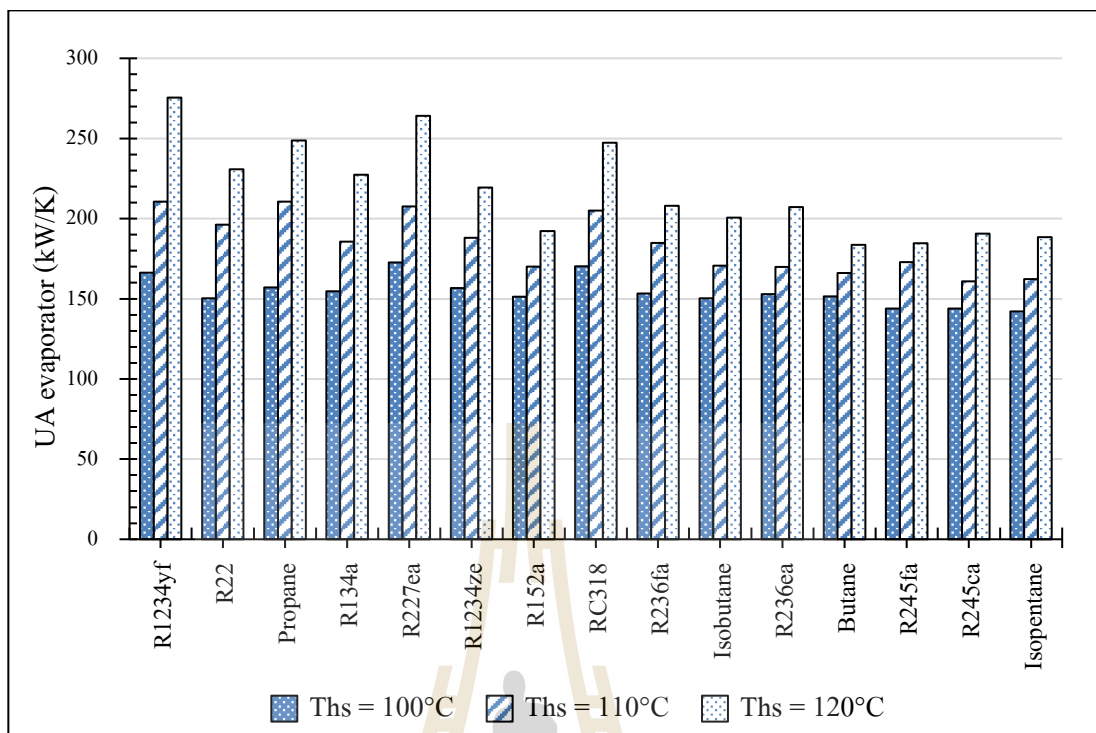
รูปที่ 4.3 Power exergy efficiency ของสารทำงานที่แหล่งความร้อนอุณหภูมิ 100 - 120°C

จากรูปที่ 4.3 แสดงผลของ power exergy efficiency จากผลที่ได้จะพบว่า มีแนวโน้มคล้ายกับผลในส่วนของการสูญเสียสูงสุด และให้ผลเช่นเดียวกับผลในส่วนของการสูญเสีย พบว่าสารทำงานที่ให้ประสิทธิภาพ exergy สูงสุดในทุกอุณหภูมิแหล่งความร้อน 100°C 110°C และ 120°C คือ สาร R227ea มีค่าเท่ากับ 21.79% 25.71% และ 30% ตามลำดับ ในขณะที่ overall exergy efficiency ทุกสารทำงานมีค่าประสิทธิภาพไม่ต่างกันมาก ของทั้ง 3 แหล่งความร้อนอุณหภูมิซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 60 – 65% ดังแสดงในรูปที่ 4.4 และจากรูปจะเห็นได้ว่าเมื่อแหล่งความร้อนมีอุณหภูมิสูงขึ้นโดยส่วนใหญ่ส่งผลให้ประสิทธิภาพลดลงเล็กน้อย และจะมีสารบางชนิดที่ประสิทธิภาพมีค่าที่ลดลงมาก คือ สารทำงาน R22 และ propane ซึ่งเป็นผลมาจากการปรับลดความดันระบบให้สามารถใช้งานกับอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนได้จึงส่งผลให้งานที่ผลิตได้ลดลง และส่งผลถึงประสิทธิภาพดังที่ได้อธิบายไว้ในส่วนของผลกำลังงานสุทธิสูงสุด

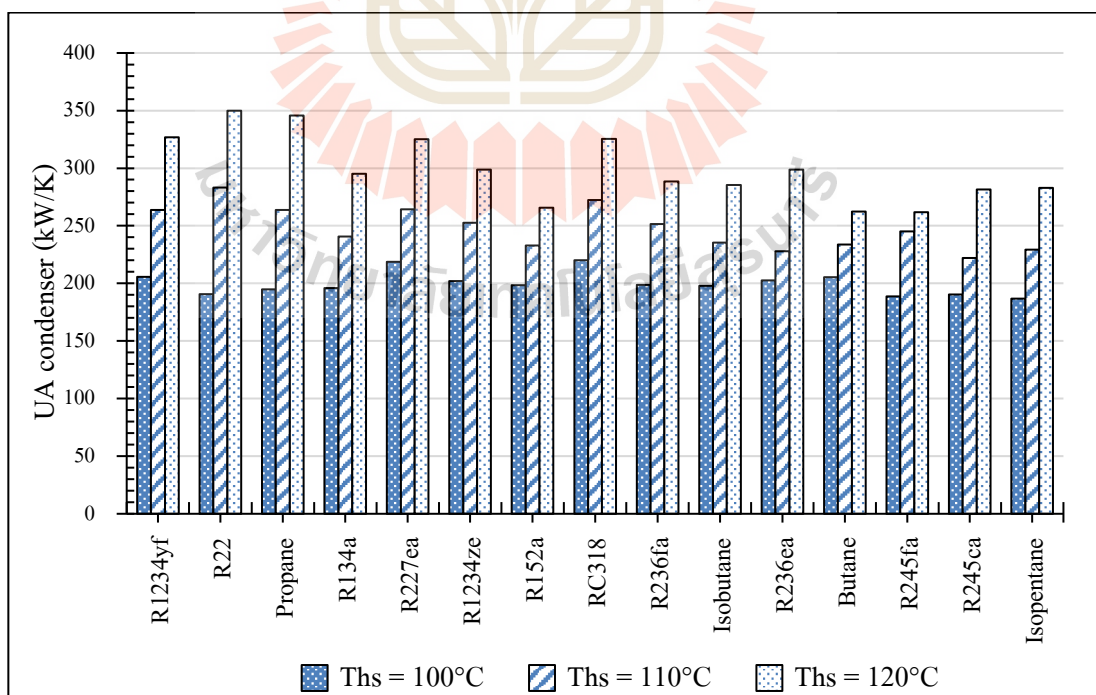


รูปที่ 4.4 Overall exergy efficiency ของสารทำงานที่แหล่งความร้อนอุณหภูมิ 100 - 120°C

ทั้งนี้ในงานวิจัยยังได้มีการประเมินขนาดของอุปกรณ์ในโรงไฟฟ้า ORC ซึ่งประกอบด้วยขนาดของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน evaporator และ condenser โดยใช้ตัวแทนเป็นค่า UA เป็นตัวแทนของขนาดทั้งสองอุปกรณ์ และขนาดของ expander โดยใช้ตัวแทนเป็นค่า VFR (volume flow rate ratio) ซึ่งผลที่ได้แสดงในรูปที่ 4.5 4.6 และ 4.7 ตามลำดับ

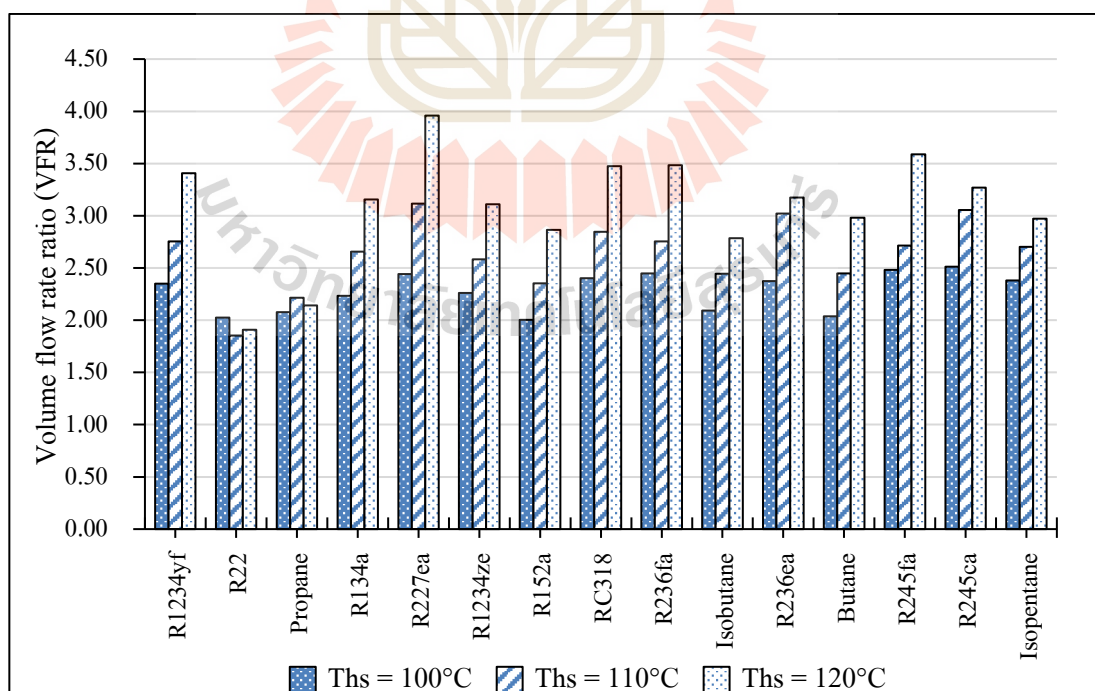


รูปที่ 4.5 ขนาดของ evaporator ของสารทำงานที่แหล่งความร้อนอุณหภูมิ 100 - 120°C



รูปที่ 4.6 ขนาดของ condenser ของสารทำงานที่แหล่งความร้อนอุณหภูมิ 100 - 120°C

จากรูปที่ 4.5 และ 4.6 แสดงค่า UA ที่เป็นตัวแปรบอกถึงขนาดของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนซึ่งจากแนวโน้มจะพบว่าการใช้แหล่งความร้อนที่มีอุณหภูมิสูงขึ้นจะส่งผลให้ขนาดของ evaporator และ condenser ใหญ่ขึ้นเนื่องจากมีปริมาณความร้อนเข้ามาในระบบมากขึ้นกว่าเดิม และเมื่อพิจารณาแต่ละสารจะพบว่า มีขนาดของ evaporator และ condenser แตกต่างกันซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดและคุณสมบัติของสารทำงาน สารทำงานบางชนิดมีศักยภาพในการดึงเอาความร้อนมาผลิตเป็นงานได้มาก โดยส่วนใหญ่จะมีอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนขนาดใหญ่กว่าสารทำงานอื่น เช่น สารทำงาน R1234yf R227ea และ RC318 จะมี evaporator ใหญ่กว่าสารทำงานชนิดอื่น และหากพิจารณา ถึงสมการที่ 3.20 ในบทที่ 3 จะพบว่า ปัจจัยที่ส่งผลต่อขนาดของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนจะขึ้นอยู่กับ ปริมาณความร้อนที่เข้ามาในระบบ และผลต่างของอุณหภูมิน้ำร้อนที่ทางเข้าและทางออกของสารทำงาน และ ผลต่างของอุณหภูมิน้ำร้อนทางออกกับอุณหภูมิของสารทำงานที่ทางเข้าของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน ยังมีค่าผลต่างของอุณหภูมิดังกล่าวน้อย ก็จะทำให้ UA หรือขนาดของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนมีขนาดใหญ่ และเมื่อเปรียบเทียบขนาด UA ของ evaporator กับ condenser จะพบว่า condenser จะมีขนาดที่ใหญ่กว่าถึงแม้ว่าปริมาณความร้อนจะน้อยกว่าใน evaporator ก็ตาม เนื่องจากปัจจัยของผลต่างของอุณหภูมิดังที่กล่าวไว้ข้างต้น ใน condenser จะมีค่าน้อยกว่าจึงส่งผลให้ค่า UA มีค่ามากกว่า evaporator



รูปที่ 4.7 Volume flow rate ratio (VFR) ของสารทำงานที่ใช้ในโรงไฟฟ้า ORC

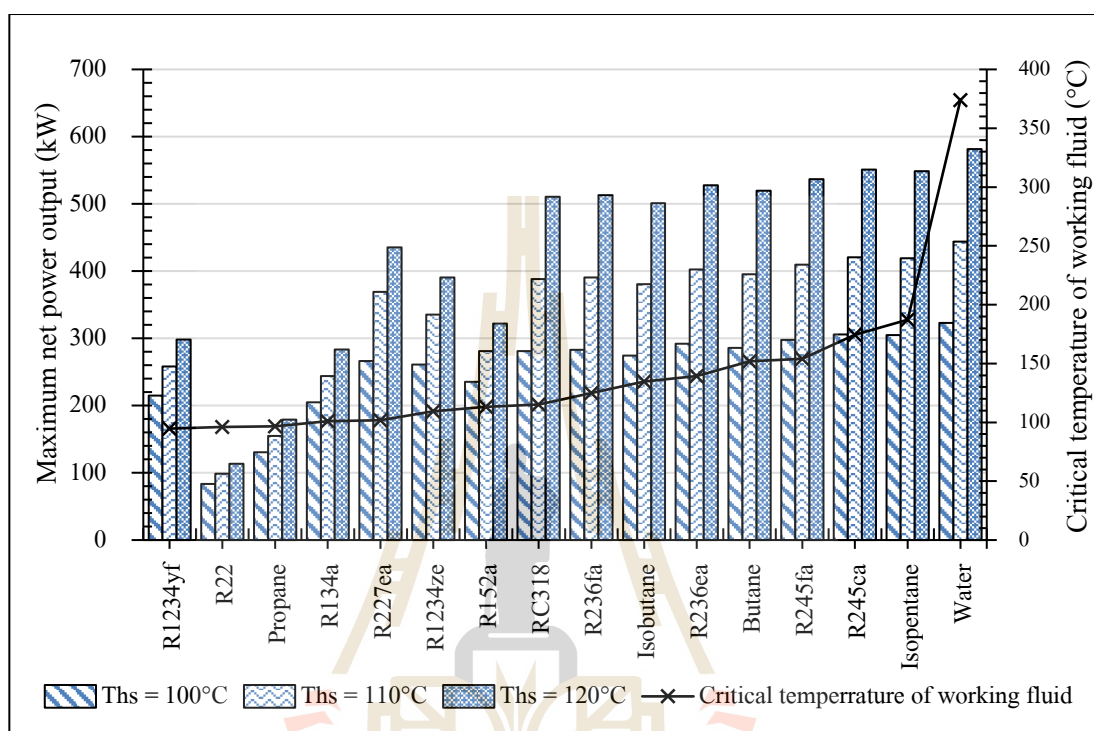
นอกจากนี้ยังมีการคำนวณค่าอัตราส่วนปริมาตรการไหล volume flow rate ratio ที่เป็นตัวแปรบอกถึงขนาดของ expander หรือ turbine ผลที่ได้แสดงในรูปที่ 4.7

จากรูปที่ 4.7 จะเห็นว่าค่า VFR ของแต่ละสารทำงาน มีค่าเพิ่มสูงขึ้นตามอุณหภูมิแหล่งความร้อนซึ่งเกิดจากอุณหภูมิและความดันภายใน evaporator สูงขึ้นจึงส่งผลให้ผลต่างของความดันที่ทางเข้าและทางออกของ expander มีค่าสูงทำให้ค่าความหนาแน่นสารทำงานที่ทางเข้าและทางออกของ expander มีค่าลดลงโดยเฉพาะอย่างยิ่งที่ทางออกของ expander ทำให้ค่า VFR มีค่าเพิ่มสูงขึ้นเป็นไปตามสมการที่ 3.25 – 3.28 และนอกจากนี้เมื่อพิจารณาสารทำงานที่มีค่า VFR สูงจะพบว่าโดยส่วนใหญ่จะเป็นสารทำงานประเภท dry fluid และ isentropic fluid เช่น R123yfR227ea RC318 R236fa และ R245fa เนื่องจาก เมื่อสารทำงานที่ออกจากเครื่องกังหันสารทำงานจะยังมีสถานะเป็นไอร้อนยิ่งยวด (superheated vapor) ความหนาแน่นสารทำงานจะมีค่าน้อย จึงทำให้ปริมาตรจำเพาะ (specific volume) มีค่าเยอะ ส่งผลให้เมื่อนำไปพิจารณาตามสมการที่ 3.25 ทำให้อัตราส่วนของปริมาตรการไหล (VFR) มีค่าสูงตาม ซึ่งการที่มีค่า VFR สูงอาจจะส่งผลถึงขนาดและราคาของ expander หรือ turbine ที่แพงขึ้นตามไปด้วย ซึ่งสารทำงานที่มีค่า VFR สูงคือ R227ea มีค่าเท่ากับ 3.9 และเป็นสารทำงานที่ให้งานสุทธิสูงสุดของทุกแหล่งอุณหภูมิความร้อน

สรุปผลการประเมินสมรรถนะของโรงไฟฟ้า ORC จากผลการศึกษาพบว่า ที่แหล่งความร้อนอุณหภูมิ 100°C สารทำงานทุกชนิดผลิตงานสุทธิได้ใกล้เคียงกัน และเมื่อใช้แหล่งความร้อนที่มีอุณหภูมิสูงขึ้นทำให้เห็นความแตกต่างของงานสุทธิที่ผลิตได้ชัดเจนขึ้น โดยสารทำงานที่ผลิตงานสุทธิได้สูงสุดคือสาร R227ea มีค่าเท่ากับ 200 kW 290 kW และ 406 kW ที่แหล่งความร้อนอุณหภูมิ 100°C 110°C และ 120°C ตามลำดับ และปัจจัยในการเลือกสารทำงานที่มีอุณหภูมิจากคุณสมบัติของสารใกล้เคียงกับแหล่งความร้อนเพื่อให้ได้งานสุทธิสูงสุด จากผลที่ได้พบว่าอุณหภูมิวิกฤติของสารทำงานไม่มีนัยสำคัญต่องานสุทธิสำหรับสารที่ใช้จำลองในช่วงอุณหภูมิแหล่งความร้อน 100 – 120°C นอกจากนี้ประสิทธิภาพ ก่อนข้างมีค่าใกล้เคียงกันที่แหล่งความร้อนอุณหภูมิเดียวกันที่แหล่งความร้อนอุณหภูมิ 100°C 110°C และ 120°C มีประสิทธิภาพโดยรวมประมาณ 6% 7% และ 7.8-8.8% ตามลำดับ และ power exergy efficiency มีแนวโน้มเหมือนกับผลของงานสุทธิสูงสุดที่ผลิตได้ สารทำงานที่มีประสิทธิภาพสูงสุดคือ สาร R227ea มีค่าเท่ากับ 21.79% 25.7% และ 30% ที่แหล่งความร้อนอุณหภูมิ 100°C 110°C และ 120°C ตามลำดับ และ overall exergy efficiency ของแต่ละสารทำงานและอุณหภูมิแหล่งความร้อนมีค่าใกล้เคียงกันประมาณ 60% และขนาดของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน และขนาดของ expander ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติและประเภทของสารทำงาน โดยเฉพาะอย่างยิ่งสารทำงานที่ให้งานสุทธิสูงจะมีอุปกรณ์ดังกล่าวขนาดใหญ่ ซึ่งจะส่งผลถึงงบประมาณราคาของอุปกรณ์

4.2.2 ผลการศึกษาด้านสมรรถนะของโรงไฟฟ้า TLC

ในหัวข้อนี้จะเป็นการรายงานผลของสมรรถนะของโรงไฟฟ้า TLC ซึ่งจะรายงานค่าเช่นเดียวกับการรายงานของผลสมรรถนะของโรงไฟฟ้า ORC ซึ่งมีผลดังต่อไปนี้



รูปที่ 4.8 Maximum net power output โรงไฟฟ้า TLC ของการใช้สารทำงานแต่ละชนิดที่แหล่งความร้อนอุณหภูมิ 100 - 120°C

จากรูปที่ 4.8 จะเห็นได้ว่างานสุทธิของสารทำงานตั้งแต่ RC318 ถึง Water มีแนวโน้มการเพิ่มขึ้นและมีกำลังงานสุทธิที่ผลิตได้เพิ่มขึ้นเมื่อแหล่งความร้อนมีอุณหภูมิสูงขึ้น เนื่องจากมีปริมาณความร้อนเข้าระบบสูงขึ้นจึงทำให้ผลิตงานสุทธิได้เพิ่มขึ้น โดยสารทำงานที่เป็นน้ำให้งานสุทธิสูงสุดของทุกแหล่งความร้อน นอกจากนี้จะเห็นว่าสารทำงาน R1234yf จนถึง R152a ผลิตงานสุทธิได้น้อยกว่าสารทำงานที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น ซึ่งการผลิตงานสุทธิได้น้อยโดยเฉพาะอย่างยิ่ง R22 เนื่องจากสาร R1234yf จนถึง R152a ให้งานสุทธิสูงแต่มีความดันทำงานเกิน 2500 kPa ดังแสดงในตารางที่ 4.4 จึงมีการปรับลดความดันลงมาให้อยู่ที่ 2500 kPa ทำให้งานสุทธิที่ได้มีค่าลดลง ซึ่งงานสุทธิที่ลดลงจะส่งผลต่อสมรรถนะค่าอื่น ๆ ตามมา เช่น ประสิทธิภาพ ขนาดของอุปกรณ์ในโรงไฟฟ้า เป็นต้น สำหรับสารทำงานที่ผลิตงานสุทธิได้สูงสุด ที่แหล่งความร้อนอุณหภูมิ 100°C 110°C และ 120°C คือ water มีค่าเท่ากับ 323.13 kW 443.82 kW และ 581.39 kW ตามลำดับ

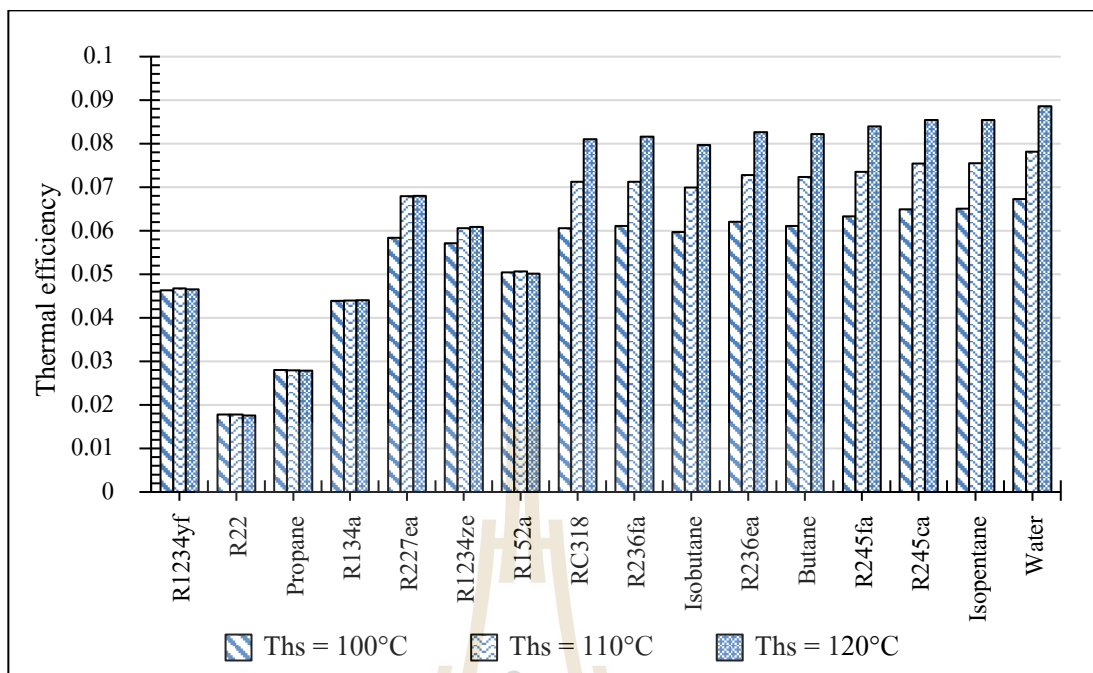
เมื่อเทียบกับสารทำงานอื่นที่ไม่มีปัญหาเรื่องความดันทำงานที่เกินข้อจำกัดของอุปกรณ์ จะพบว่าค่าใกล้เคียงกัน

ตารางที่ 4.4 งานสุทธิสูงสุดของสารทำงานที่มีความดันเกินกว่าเกณฑ์ที่จะรับได้ (2500 kPa)

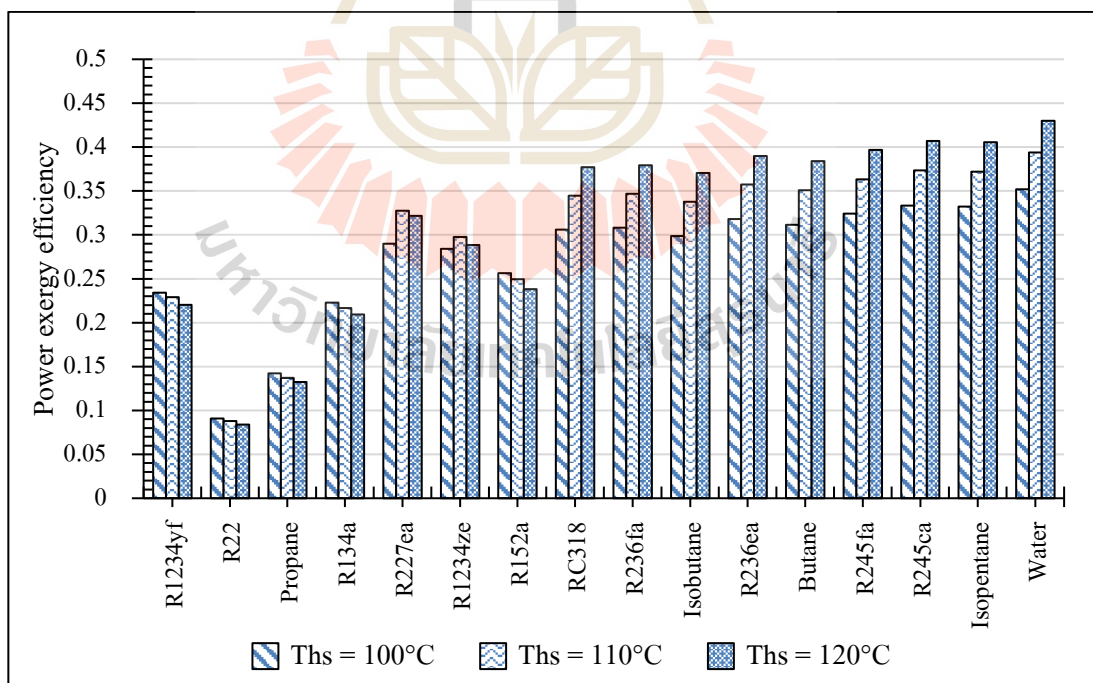
Working fluid		R1234yf	R22	Propane	R134a	R227ea	R1234ze	R152a
Ths = 100°C	P _{evap} (MPa)	2.84	4.07	3.47	3.01	-	-	2.73
	W _{net} (kW)	246.67	218.17	225.96	249.14	-	-	252.80
Ths = 110°C	P _{evap} (MPa)	3.22	4.58	3.94	3.51	2.54	2.78	3.24
	W _{net} (kW)	347.37	313.49	323.10	349.25	369.93	363.39	353.27
Ths = 120°C	P _{evap} (MPa)	3.30	4.90	4.19	3.92	2.85	3.22	3.72
	W _{net} (kW)	438.32	423.39	434.69	464.81	489.22	480.53	468.44

จากตารางที่ 4.1 จะเห็นได้ว่าหาก evaporator มีความสามารถในการทนความดันในค่าดังที่แสดงในตารางจะทำให้งานที่ผลิตได้มีค่าใกล้เคียงกับผลในรูปที่ 4.8 และจากผลกระทบดังที่กล่าวไว้ข้างต้น จะส่งผลต่อประสิทธิภาพเชิงความร้อน และประสิทธิภาพ exergy ดังแสดงในรูปที่ 4.9 – 4.11 จากผลทั้งสามรูป จะพบว่ามีแนวโน้มที่เหมือนกัน และเหมือนกับแนวโน้มของงานสุทธิที่ผลิตได้ ซึ่งสารทำงานที่ให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อน และประสิทธิภาพ exergy สูงสุดคือ water

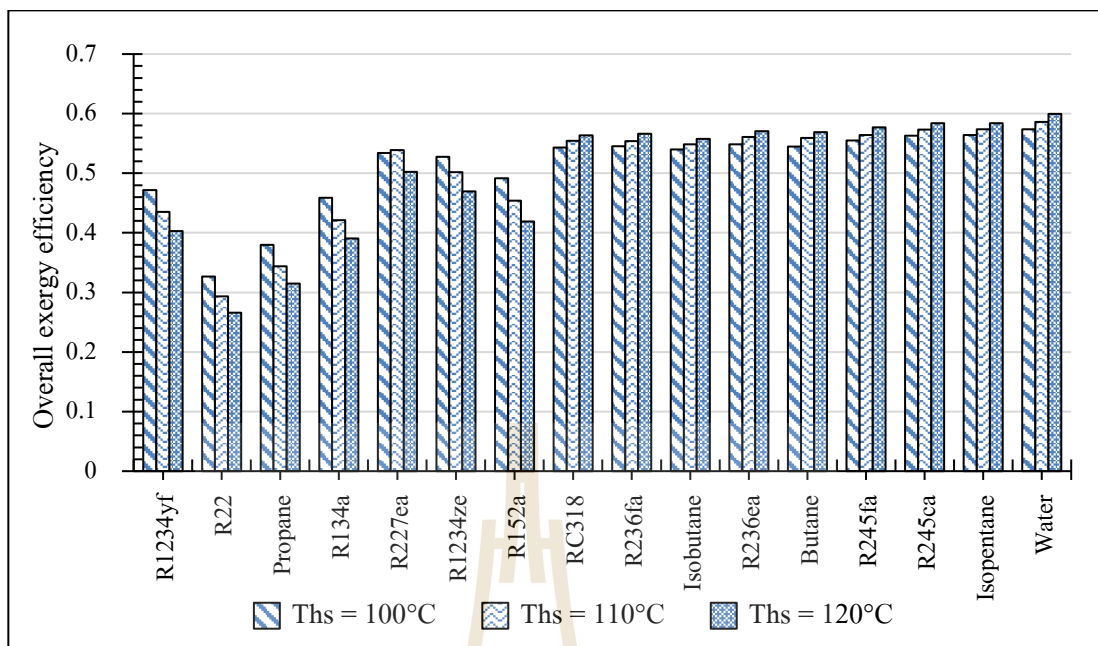
จากรูปที่ 4.10 และ 4.11 จะพบว่าสารทำงาน R1234yf จนถึง R152a จะมีประสิทธิภาพลดลงเมื่อแหล่งความร้อนอุณหภูมิสูงขึ้น เนื่องจากปัจจัยข้อจำกัดเรื่องความดัน ดังที่กล่าวไว้ข้างต้น ส่งผลให้ประสิทธิภาพลดลงในขณะที่สารทำงานอื่นมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น ซึ่งสารทำงาน water มีประสิทธิภาพ power exergy สูงสุดมีค่าเท่ากับ 35.2% 39.4% และ 42.98% ที่แหล่งความร้อนอุณหภูมิ 100°C 110°C และ 120°C ตามลำดับ ในส่วนของประสิทธิภาพ overall exergy สารทำงาน water มีประสิทธิภาพสูงสุดเท่ากับ 57.4% 58.63% และ 59.99% ที่แหล่งความร้อนอุณหภูมิ 100°C 110°C และ 120°C ตามลำดับ นอกจากนี้ยังมีการประเมินขนาดของ อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน และขนาดของ expander เช่นเดียวกับผลของโรงไฟฟ้า ORC ผลที่ได้แสดงใน รูปที่ 4.12 – 4.14



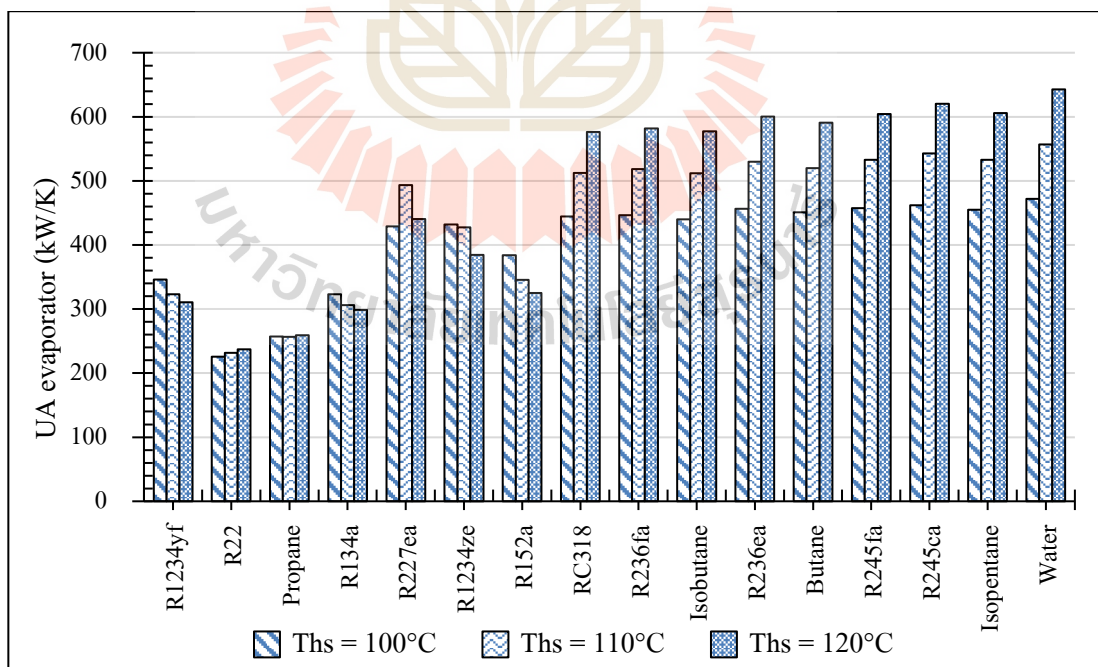
รูปที่ 4.9 ประสิทธิภาพทางความร้อน โรงไฟฟ้า TLC ที่แหล่งความร้อนอุณหภูมิ 100°C - 120°C



รูปที่ 4.10 ประสิทธิภาพ power exergy ของโรงไฟฟ้า TLC ที่แหล่งความร้อนอุณหภูมิ 100 - 120°C

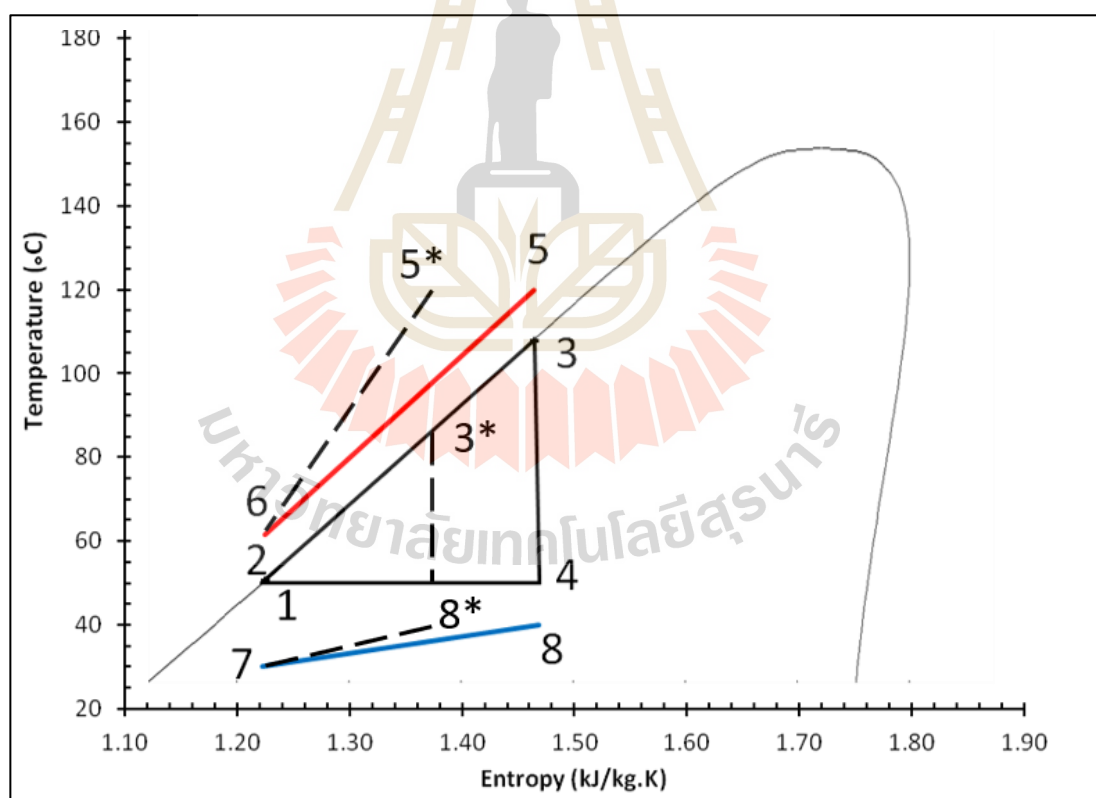


รูปที่ 4.11 ประสิทธิภาพ overall exergy ของโรงไฟฟ้า TLC ที่แหล่งความร้อนอุณหภูมิ 100 - 120°C

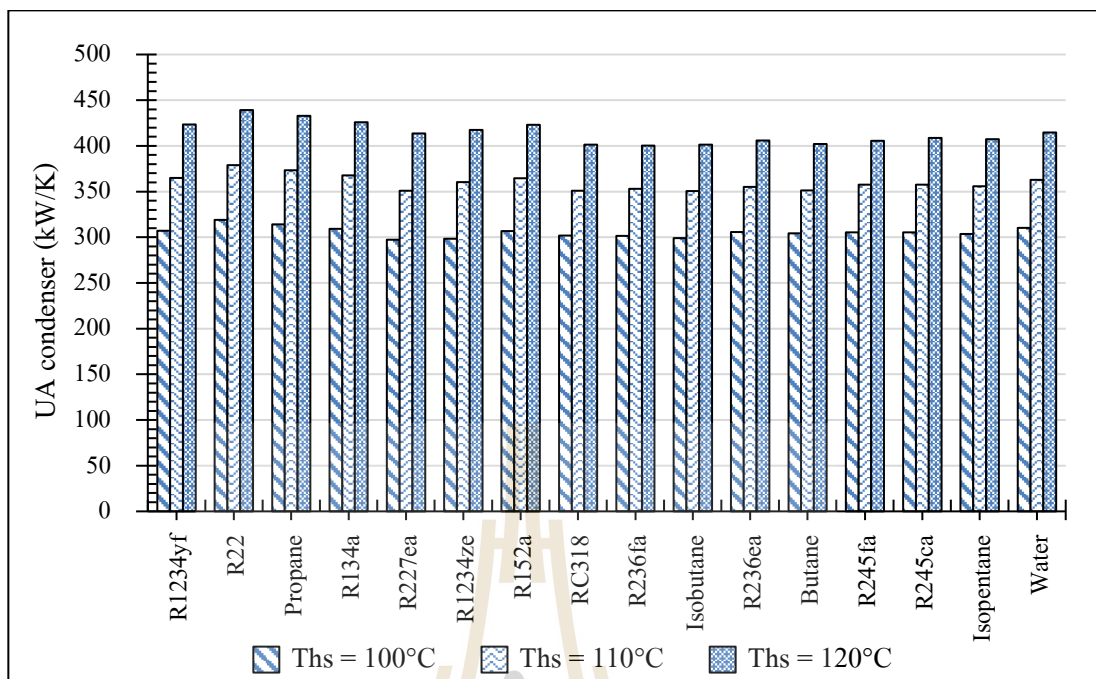


รูปที่ 4.12 แสดงขนาดของ evaporator ของโรงไฟฟ้า TLC ที่แหล่งความร้อนอุณหภูมิ 100 - 120°C

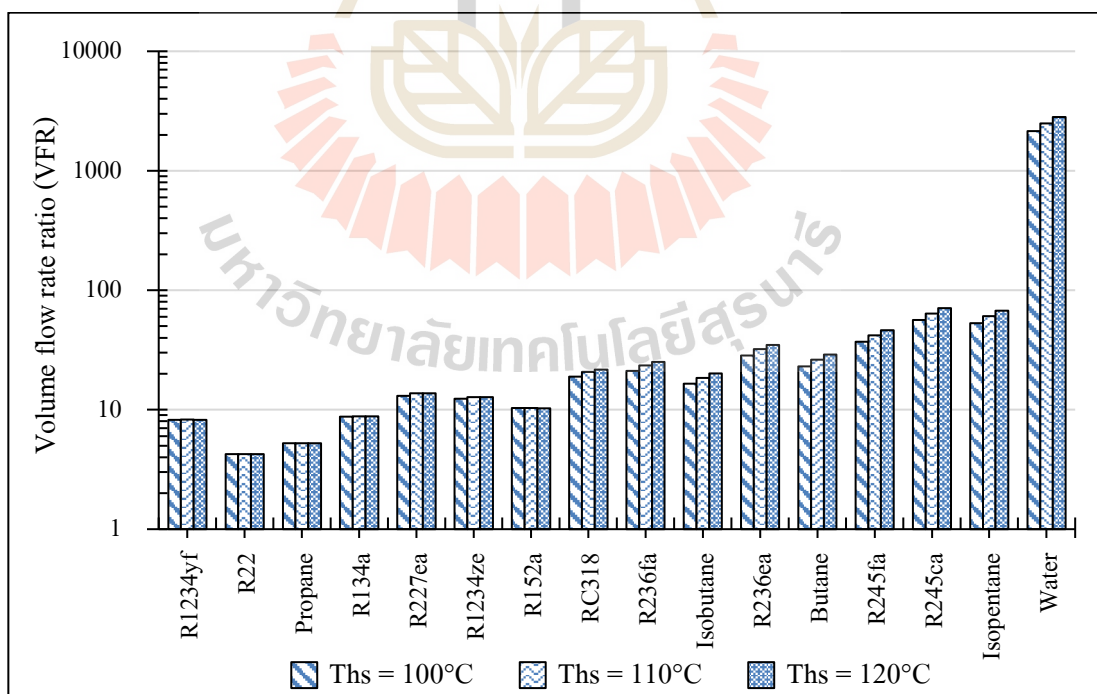
จากรูปที่ 4.12 แสดงค่า UA หรือขนาดของ evaporator ซึ่งจะพบว่าสารทำงาน R1234yf ถึง R152a มีปัญหาได้งานสุทธิสูงสุดแต่ความดันที่ใช้งานอุปกรณ์ไม่สามารถรับได้ จึงมีการลดความดันลงจึงส่งผลให้ งานที่ผลิตได้ลดลงพร้อมทั้งส่งผลถึงขนาดของ evaporator มีขนาดเล็กลงตามไปด้วย เนื่องจากการลดความดันใน evaporator ทำให้อุณหภูมิของน้ำร้อนที่ทางเข้าและอุณหภูมิของสารทำงานที่ทางออก evaporator ต่างกันมากขึ้นทำให้ค่า ΔT_{LM} ดังแสดงในรูปที่ 4.13 อีกทั้งยังส่งผลให้ต้องรับความร้อนเข้ามามากขึ้นเนื่องจากการลดความดันลงทำให้อัตราการไหลของสารทำงานสูงขึ้น และต้องทิ้งความร้อนมากขึ้นด้วยซึ่งจะส่งผลให้ ขนาดของ condenser ใหญ่ขึ้นดังแสดงในรูปที่ 4.14 ขนาดของ condenser ของสารทำงาน R1234yf ถึง R152a จะมีค่ามากกว่าสารทำงานอื่น ในขณะที่สารทำงาน RC318 ถึง water ค่า UA condenser จะมีค่าใกล้เคียงกันในแต่ละช่วงอุณหภูมิแหล่งความร้อน และในส่วนของการประเมินขนาดของ expander หรือ turbine ผลที่ได้แสดงในรูปที่ 4.15



รูปที่ 4.13 แผนภาพ T-s ของกระบวนการทางเทอร์โมไดนามิกส์ของโรงไฟฟ้า TLC



รูปที่ 4.14 แสดงขนาดของ Condenser ของโรงไฟฟ้า TLC ที่แหล่งความร้อนอุณหภูมิ 100 - 120°C



รูปที่ 4.15 Volume flow rate ratio (VFR) ของสารทำงานที่ใช้ในโรงไฟฟ้า TLC

จากรูปที่ 4.15 ผลของค่า VFR ของการใช้สารทำงานแต่ละชนิดที่ใช้ในโรงไฟฟ้า TLC จากผลที่ได้จะพบว่าค่า VFR มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นตามอุณหภูมิวิกฤติของสารทำงานอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งสารทำงานเรียงจากซ้ายที่มีอุณหภูมิวิกฤติต่ำไปด้านขวาที่มีอุณหภูมิวิกฤติสูงและจะเห็นว่า water มีค่า VFR สูงกว่าสารทำงานอื่น ๆ หลายเท่าซึ่งสารทำงานอื่น ๆ มีค่า VFR อยู่ในช่วงประมาณ 6 -70 ส่วน water มีค่าอยู่ที่ 2,825 ซึ่งอาจจะส่งผลกระทบต่อราคาของ expander ที่มีราคาแพง สาเหตุที่ทำให้ water มีค่า VFR สูงเนื่องจากความดันใช้งานของสาร water ที่ condenser มีค่าความดันอยู่ที่ประมาณ 5 kPa ซึ่งต่ำกว่าความดันบรรยากาศมาก จึงส่งผลให้ความหนาแน่นของสารทำงานเมื่อออกจาก expander มีค่าน้อยมาก อีกทั้งสถานะของสารงานที่ทางเข้าของ expander เป็นของเหลวอิ่มตัวซึ่งมีความหนาแน่นมากกว่าสถานะของสารทำงานที่ทางออก expander สูงมาก จึงส่งผลให้ค่า VFR ของน้ำมีค่าสูง ดังนั้นจะเห็นได้ว่า water เป็นสารทำงานที่ให้งานสูงสุด ซึ่งเมื่อพิจารณาถึงขนาดของ expander จาก VFR จะเห็นได้ว่าการเลือกน้ำเป็นสารทำงานจะต้องใช้ expander ขนาดใหญ่ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อราคาของ expander หรือ turbine ที่มีราคาแพงตามไปด้วย

สรุปผลในส่วนของการจำลองโรงไฟฟ้า TLC จากผลการจำลองสารทำงานที่ใช้แหล่งความร้อนที่มีอุณหภูมิ 100°C 110°C และ 120°C มีสารทำงาน R1234yf, R22, propane, R134a, R227ea, R1234ze R152a ที่ไม่สามารถทำงานในช่วงที่ผลิตงานได้สูงสุด เนื่องจากความดันสารทำงานใน evaporator มีค่าสูงกว่า evaporator จะรับได้จึงต้องลดความดันสารทำงานลง ส่งผลให้งานสุทธิลดลงและยังส่งผลถึงประสิทธิภาพเชิงความร้อนและประสิทธิภาพ exergy รวมไปถึงขนาดของ evaporator ที่เล็กลงและ ขนาดของ condenser ที่จะใหญ่ขึ้น นอกจากนี้ยังมีสารทำงานที่สามารถทำงานได้ภายใต้ความดันที่มีข้อจำกัดไม่เกิน 2500 kPa คือสารทำงาน RC318, R236fa, isobutene, R236ea, butane, R245fa, isopentane และ water สารทำงานเหล่านี้ ให้งานสุทธิอยู่ในช่วง 280 kW - 323 kW ที่แหล่งความร้อนอุณหภูมิ 100°C และ ที่แหล่งความร้อนอุณหภูมิ 110°C ผลิตงานสุทธิอยู่ในช่วง 388 kW – 443 kW และที่อุณหภูมิ 120°C ผลิตงานสุทธิได้ 510 kW – 580 kW สารทำงานที่ผลิตงานสุทธิได้สูงสุดของทุกแหล่งความร้อน คือ water นอกจากนี้ยังพบว่า สารทำงานโดยส่วนใหญ่จะมีค่า VFR เพิ่มสูงขึ้นตามอุณหภูมิวิกฤติของสารทำงานอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งการมีค่า VFR ที่สูงขึ้น อาจจะส่งผลให้มี expander ขนาดใหญ่ขึ้นตามไปด้วยและจะส่งผลกระทบต่อราคารวมถึงงบประมาณในการลงทุนของโรงไฟฟ้า

4.2.3 เปรียบเทียบสมรรถนะของโรงไฟฟ้า ORC กับ โรงไฟฟ้า TLC

ในหัวข้อนี้จะเป็นการเปรียบเทียบผลของการจำลองสมรรถนะของโรงไฟฟ้า ORC กับ โรงไฟฟ้า TLC เพื่อพิจารณาถึงข้อดีข้อเสียของโรงไฟฟ้าทั้งสองแบบ โดยพิจารณาตามหัวข้อดังต่อไปนี้

4.2.3.1 เปรียบเทียบกำลังงานสุทธิที่ผลิตได้

จากผลการจำลองสมรรถนะของโรงไฟฟ้า ORC และ โรงไฟฟ้า TLC พบว่า โรงไฟฟ้า ORC โดยรวมจะผลิตงานสุทธิได้น้อยกว่าโรงไฟฟ้า TLC ดังแสดงในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.5 ตารางเปรียบเทียบงานสุทธิสูงสุดและต่ำสุดระหว่างโรงไฟฟ้า ORC กับ TLC

Heat source	Power plant	W _{net} (kW)	
		Min	Max
Th _s = 100°C	ORC	180.68	200.26
	TLC	83.26	323.13
Th _s = 110°C	ORC	239.64	290.20
	TLC	98.88	443.82
Th _s = 120°C	ORC	308.27	406.66
	TLC	113.57	581.39

จากตารางที่ 4.5 จะเห็นได้ว่างานสูงสุดของโรงไฟฟ้า ORC ผลิตได้น้อยกว่า โรงไฟฟ้า TLC ของทุกแหล่งความร้อน และจะเห็นว่าค่าต่ำสุดของโรงไฟฟ้าที่ TLC จะมีค่าน้อยกว่า ค่างานสุทธิต่ำสุดของโรงไฟฟ้า ORC เนื่องจากปัจจัยของสารทำงานที่ให้งานสุทธิสูง แต่ความดันสารทำงานเกินข้อจำกัดของ evaporator ดังที่ได้กล่าวเหตุผลไว้ในหัวข้อ 4.2.1

4.2.3.2 เปรียบเทียบประสิทธิภาพ

ในหัวข้อนี้จะเป็นการเปรียบเทียบสมรรถนะในส่วนของประสิทธิภาพของโรงไฟฟ้า ORC และ TLC ซึ่งได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.6 ตารางเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างโรงไฟฟ้า ORC กับ TLC

Heat source	Power plant	Efficiency (%)	Min	Max
Ths = 100°C	ORC	Thermal	6.00	6.65
		Power exergy	19.65	21.79
		Overall exergy	60.69	66.10
	TLC	Thermal	1.78	6.73
		Power exergy	9.07	35.21
		Overall exergy	32.68	57.38
Ths = 110°C	ORC	Thermal	5.54	7.77
		Power exergy	21.24	25.71
		Overall exergy	52.70	65.68
	TLC	Thermal	1.78	7.81
		Power exergy	8.78	39.40
		Overall exergy	29.33	58.63
Ths = 120°C	ORC	Thermal	5.75	8.79
		Power exergy	22.76	30.00
		Overall exergy	48.69	65.04
	TLC	Thermal	1.76	8.86
		Power exergy	8.39	42.98
		Overall exergy	26.60	59.93

จากผลในตาราง 4.2 จะพบว่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงสุดของทั้งสองโรงไฟฟ้า มีค่าใกล้เคียงกันเมื่อเปรียบเทียบที่ความร้อนอุณหภูมิเท่ากัน ในขณะที่ประสิทธิภาพ power exergy ของโรงไฟฟ้า TLC จะสูงกว่าโรงไฟฟ้า ORC เนื่องจากโรงไฟฟ้า TLC จะผลิตงานได้มากกว่าโรงไฟฟ้า ORC จึงทำให้มีประสิทธิภาพสูงกว่า ของทุกค่าอุณหภูมิแหล่งความร้อน และ ประสิทธิภาพ overall exergy efficiency ของโรงไฟฟ้า TLC มีค่าน้อยกว่าโรงไฟฟ้า ORC ในทุกอุณหภูมิแหล่งความร้อน เนื่องจากโรงไฟฟ้า ORC มีน้ำร้อนที่ออกจากโรงไฟฟ้าอุณหภูมิ ประมาณ 67-70°C ในขณะที่โรงไฟฟ้า TLC มีน้ำร้อนที่ออกจากโรงไฟฟ้าอุณหภูมิประมาณ 42 – 47°C จึงทำให้มี exergy ของน้ำร้อนที่ออกจากโรงไฟฟ้า ORC สูงกว่า TLC จึงส่งผลให้ผลรวมของงานสุทธิกับ exergy มีค่ามากกว่า TLC ประสิทธิภาพจึงมีค่าสูงกว่า โดยพิจารณาตามสมการที่ 2.8 ในบทที่ 2

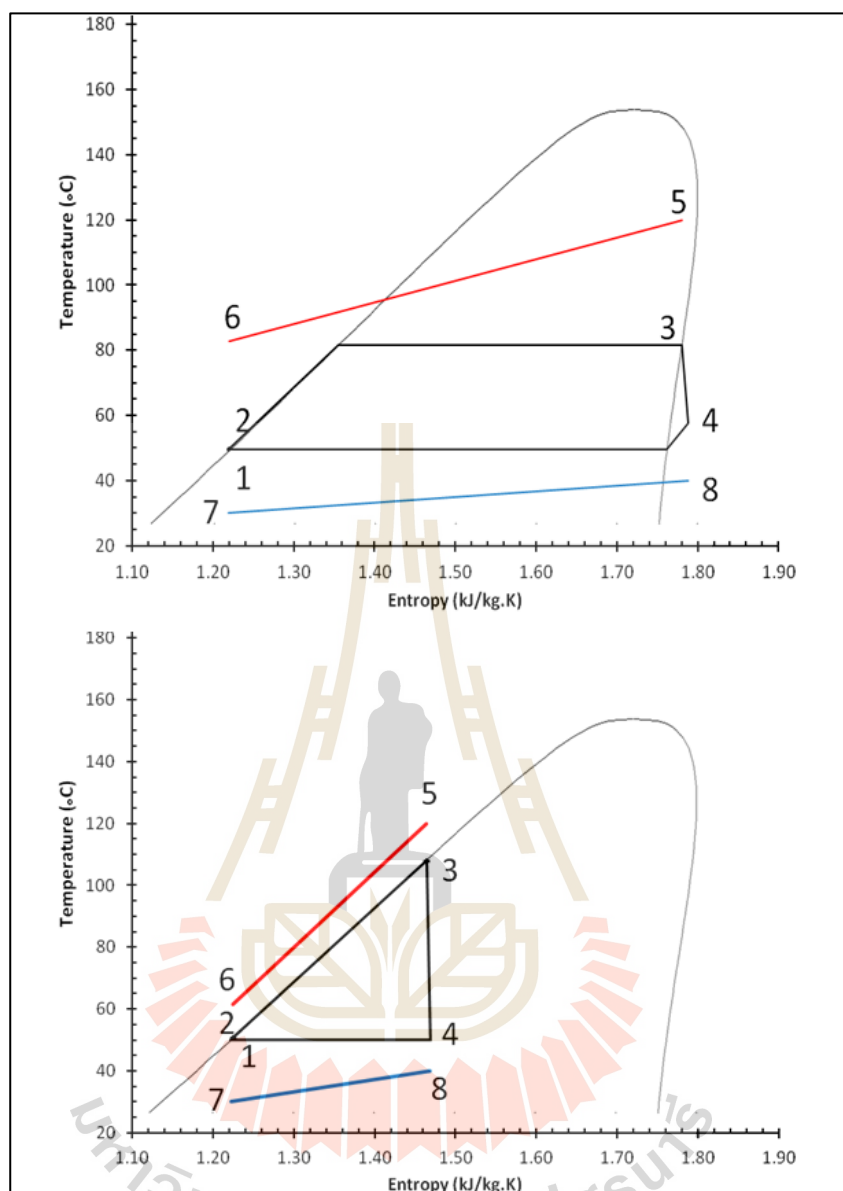
4.2.3.3 เปรียบเทียบขนาดของอุปกรณ์

สำหรับการเปรียบเทียบขนาดของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนทั้ง condenser และ evaporator ได้ผลดังแสดงในตารางที่

ตารางที่ 4.7 เปรียบเทียบขนาดของ condenser และ evaporator ของโรงไฟฟ้า ORC และ TLC

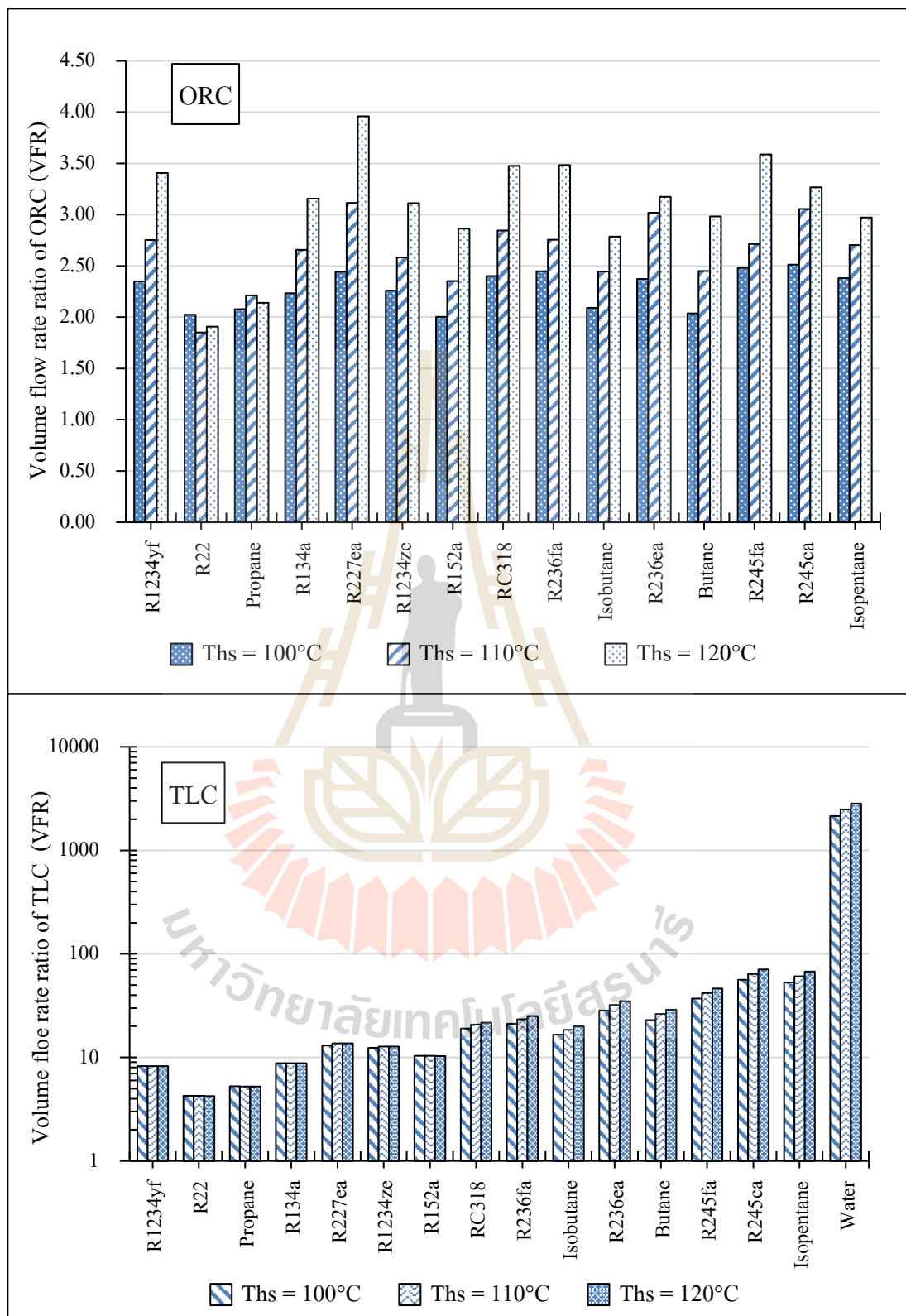
Heat source	Power plant	UA (kW/K)	Min	Max
Ths = 100°C	ORC	UA condenser	186.69	220.01
		UA evaporator	142.12	172.68
	TLC	UA condenser	297.45	319.02
		UA evaporator	225.55	471.94
Ths = 110°C	ORC	UA condenser	222.10	283.15
		UA evaporator	160.89	210.52
	TLC	UA condenser	350.64	378.94
		UA evaporator	231.54	557.13
Ths = 120°C	ORC	UA condenser	261.77	349.95
		UA evaporator	183.69	275.55
	TLC	UA condenser	400.25	439.18
		UA evaporator	237.34	642.64

จากตารางที่ 4.7 จะเห็นว่าขนาดของ condenser และ evaporator ในโรงไฟฟ้า ORC จะมีขนาดเล็กกว่าของโรงไฟฟ้า TLC เนื่องจากกระบวนการที่เกิดขึ้นของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนในโรงไฟฟ้า TLC เนื่องจากกระบวนการภายในของโรงไฟฟ้า TLC จะเกิดปรากฏการณ์หรือพฤติกรรมที่เรียกว่า thermal match คือเส้นอุณหภูมิของแหล่งความร้อนอยู่ใกล้กับเส้นอุณหภูมิของสารทำงานตลอดทั้งเส้น ดังแสดงในรูปที่ 4.16 (ล่าง) ทำให้ระบบมีความสามารถในการถ่ายเทความร้อนได้มากขึ้น ซึ่งหมายถึงอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนจะมีขนาดใหญ่ดังแสดงในรูปที่ 4.16 ในขณะที่โรงไฟฟ้า ORC เกิด thermal match น้อยกว่าจึงทำให้ evaporator และ condenser มีขนาดเล็กกว่าโรงไฟฟ้า TLC



รูปที่ 4.16 แผนภาพ T-s ของกระบวนการทางเทอร์โมไดนามิกส์ (บน) ORC (ล่าง) TLC

สำหรับการเปรียบเทียบขนาดของ expander หรือค่า VFR ของโรงไฟฟ้าทั้งสองประเภท พบว่าโรงไฟฟ้า ORC ที่แหล่งความร้อนในช่วง $100 - 120^{\circ}\text{C}$ จะมีค่า VFR อยู่ที่ 1.8 - 4 ในขณะที่โรงไฟฟ้า TLC จะมีค่าตั้งแต่ 3 - 2825 โดยรวมโรงไฟฟ้า TLC จะมีค่า VFR สูงกว่า ดังแสดงในรูปที่ 4.17



รูปที่ 4.17 เปรียบเทียบค่า VFR ระหว่างโรงไฟฟ้า ORC (บน) และ TLC (ล่าง)

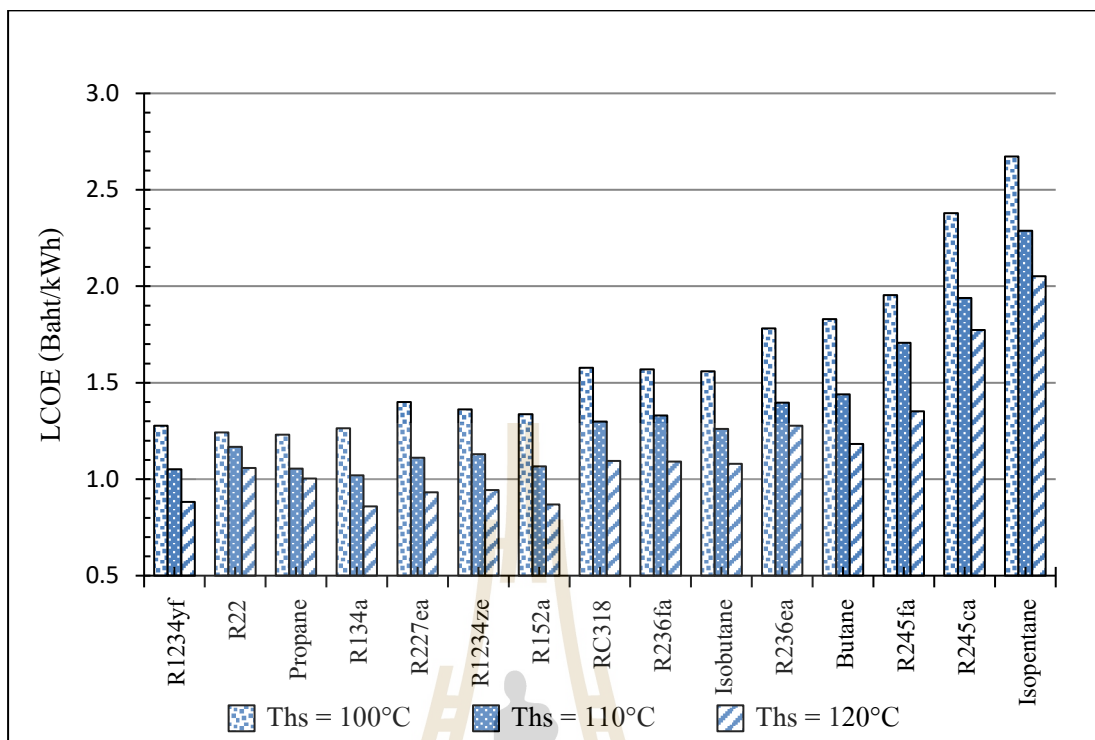
4.3 การวิเคราะห์ด้านเศรษฐศาสตร์

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงการวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์ของโรงไฟฟ้า ORC และ โรงไฟฟ้า TLC ซึ่งจะเป็นการคำนวณหาราคาค่าต้นทุนที่ใช้ในการผลิตไฟฟ้าตลอดอายุการใช้งานของโรงไฟฟ้า (levelized cost of electricity, LCOE) ทั้งสองประเภท ในงานวิจัยนี้ได้ใช้อายุโครงการของโรงไฟฟ้า 10 ปี ซึ่งผลการคำนวณที่ได้มีดังนี้

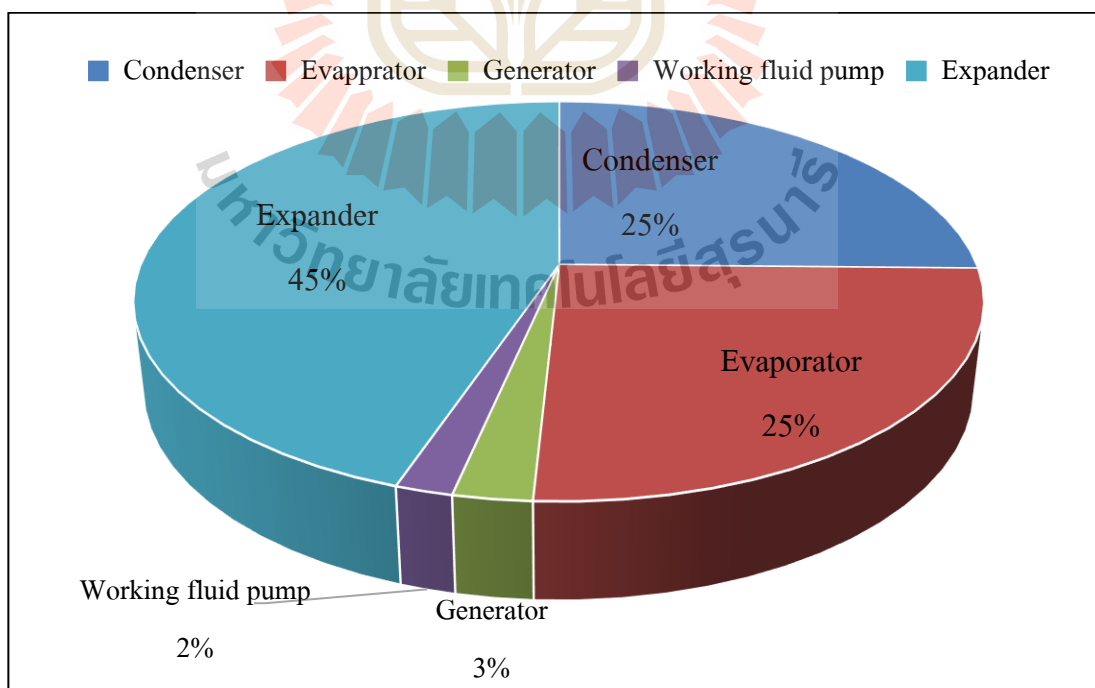
4.3.1 การวิเคราะห์เศรษฐศาสตร์ของโรงไฟฟ้า ORC

สำหรับการวิเคราะห์ต้นทุนการผลิตไฟฟ้าของโรงไฟฟ้า ORC ได้ผลการคำนวณค่า LCOE ดังแสดงในรูปที่ 4.18 ซึ่งจะเห็นว่า สารทำงานมีค่า LCOE สูงขึ้นตามอุณหภูมิวิกฤติ อย่างมีนัยสำคัญ และทุกสารทำงานจะมีค่า LOCE ลดลงเมื่อแหล่งความร้อนมีอุณหภูมิสูงขึ้น เนื่องจากการผลิตไฟฟ้าได้สูงขึ้นจึงส่งผลให้ค่า LCOE ลดลง ทั้งนี้เมื่อพิจารณาปัจจัยราคาอุปกรณ์ที่ส่งผลต่อค่า LOCE ของโรงไฟฟ้า ORC สามารถพิจารณาได้จากรูปที่ 4.19 ซึ่งจากรูปจะเห็นได้ว่าอุปกรณ์ที่มีผลต่อค่า LOEC ของโรงไฟฟ้า คือ ราคาของ expander ซึ่งมีค่าประมาณ 45% และ condenser กับ evaporator อย่างละ 25% เมื่อพิจารณาราคาของ expander ของสารทำงานแต่ละชนิดที่แหล่งความร้อนอุณหภูมิ 100 - 120°C โดยพิจารณาจากปริมาตรการไหลของสารทำงานที่ทางออกของ expander เนื่องจาก ค่าดังกล่าวเป็นฟังก์ชันของราคา expander ดังสมการที่ 3.5 ในบทที่ 3 ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 4.20 จากรูปจะเห็นว่า volume flow rate outlet expander ของสารทำงานมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นตาม Critical temperature อย่างมีนัยสำคัญ และเมื่อแหล่งความร้อนอุณหภูมิสูงขึ้นค่า volume flow rate outlet expander สูงขึ้นตามซึ่งส่งผลต่อราคาของ expander ดังผลที่แสดงในรูปที่ 4.21

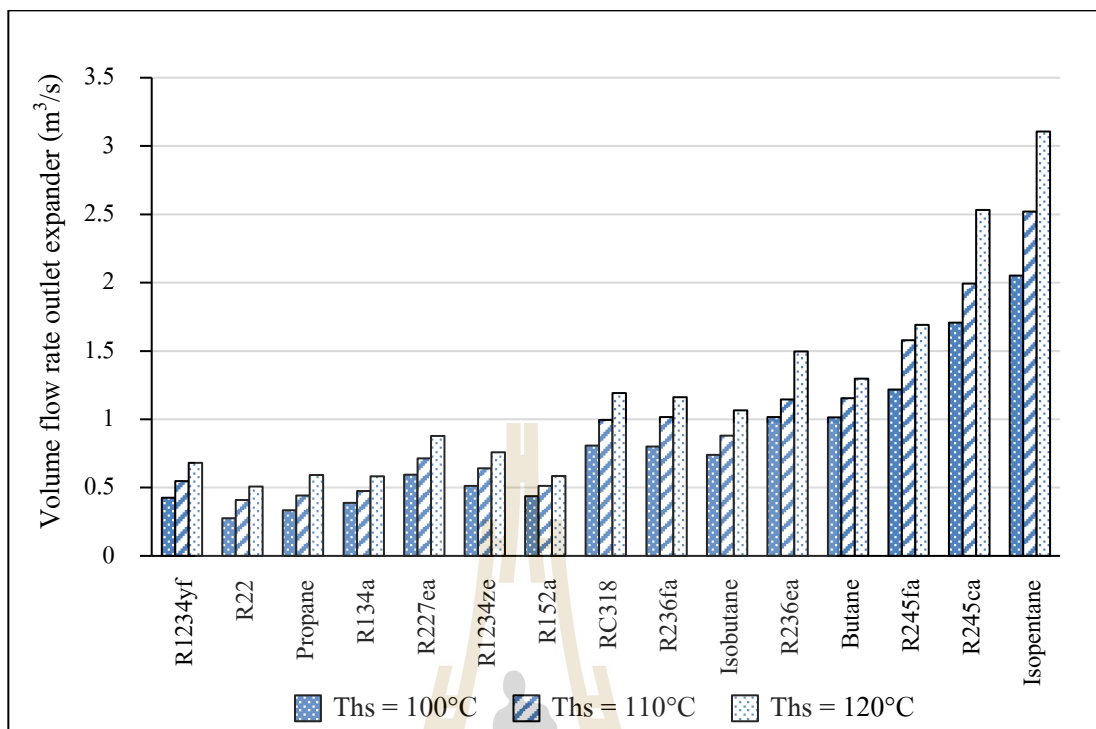
จากรูปที่ 4.21 ราคา screw expander ของโรงไฟฟ้า ORC มีแนวโน้มเหมือนกับผลของ Volume flow rate outlet expander ในรูปที่ 4.20 นอกจากนี้จะเห็นได้ว่า สารทำงาน isopentane มีราคาของ expander แพงที่สุด จึงเป็นเหตุผลที่ว่าต้นทุนการผลิตไฟฟ้า LCOE ที่แสดงในรูปที่ 4.18 ที่สารทำงาน isopentane มีค่า LCOE แพงที่สุด ที่แหล่งความร้อนอุณหภูมิ 100°C 110°C และ 120°C มีค่า LCOE เท่ากับ 2.67 Baht/kWh 2.29 Baht/kWh และ 2.05 Baht/kWh ตามลำดับ นอกจากนี้เมื่อพิจารณาค่า LCOE ของแต่ละสารทำงานจะเห็นว่าสาร R1234yf, R22, propane, R134a, R227ea, R1234ze และ R152a มีค่า LCOE ค่อนข้างต่ำเมื่อเทียบกับสารทำงานอื่น ซึ่งมีค่า LCOE อยู่ในช่วง 1.23 – 1.40 Bath/kWh 1.02 – 1.17 Bath/kWh และ 0.86 – 1 Bath/kWh ที่แหล่งความร้อน 100°C 110°C และ 120°C ตามลำดับ



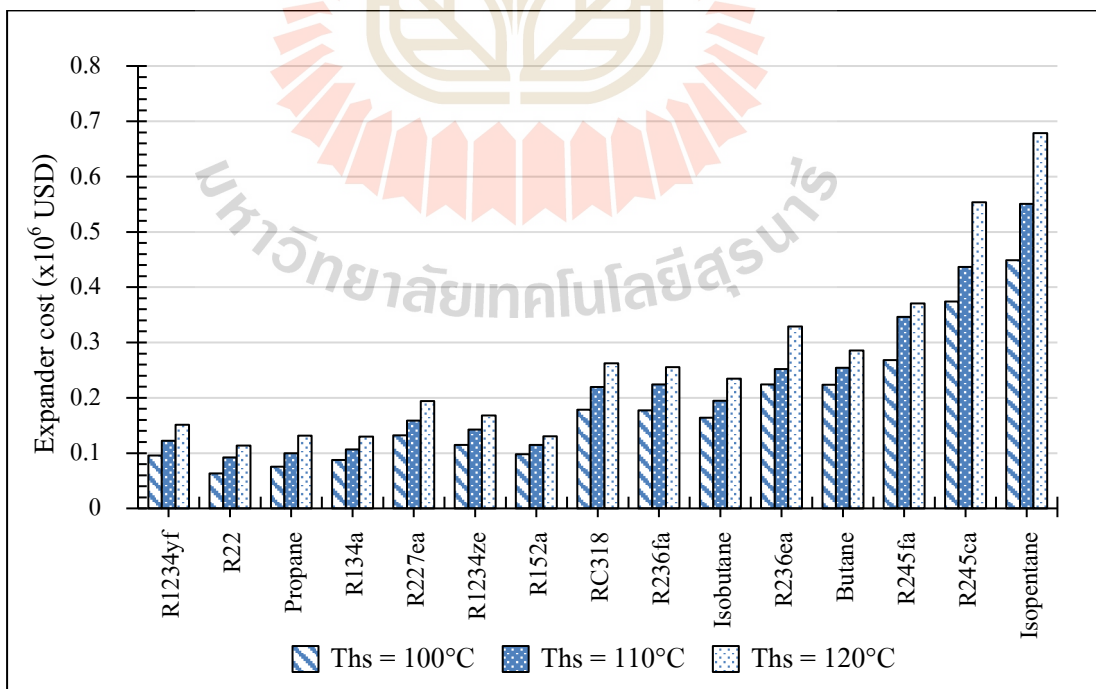
รูปที่ 4.18 ต้นทุนการผลิตไฟฟ้าตลอดอายุโครงการของโรงไฟฟ้า ORC



รูปที่ 4.19 ร้อยละราคาของอุปกรณ์ที่มีผลต่อค่า LCOE ในโรงไฟฟ้า ORC ของสารทำงาน R1234ze



รูปที่ 4.20 Volume flow rate outlet expander ของโรงไฟฟ้า ORC



รูปที่ 4.21 ราคา screw expander ของโรงไฟฟ้า ORC

สรุปในส่วนของการวิเคราะห์ทางด้านเศรษฐศาสตร์ของโรงไฟฟ้า ORC ซึ่งวิเคราะห์ผลในด้านต้นทุนการผลิตไฟฟ้าตลอดอายุโครงการ จากผลที่ได้พบว่า ปัจจัยที่ส่งผลต่อการวิเคราะห์ต้นทุนการผลิตไฟฟ้า หรือ LCOE มาจากปัจจัยในส่วนของราคา screw expander ซึ่งคิดเป็นร้อยละของราคาอุปกรณ์ที่ส่งผลต่อค่า LCOE มีค่าสูงถึงร้อยละ 45 ดังแสดงในรูปที่ 4.19 นอกจากนี้ยังพบว่าสารทำงานที่มีอุณหภูมิวิกฤติสูงทำให้ค่า volume flow rate outlet expander หรือปริมาตรการไหลที่ทางออกของ expander จะมีค่าสูงตามไปด้วย ซึ่งส่งผลต่อขนาดและราคาของ expander และส่งผลถึงค่า LCOE ของโรงไฟฟ้า และยังพบว่าสารทำงานมีค่า LCOE ต่ำเมื่อเทียบกับสารอื่น มีจำนวน 7 สารได้แก่ R1234yf, R22, propane, R134a, R227ea, R1234ze และ R152a

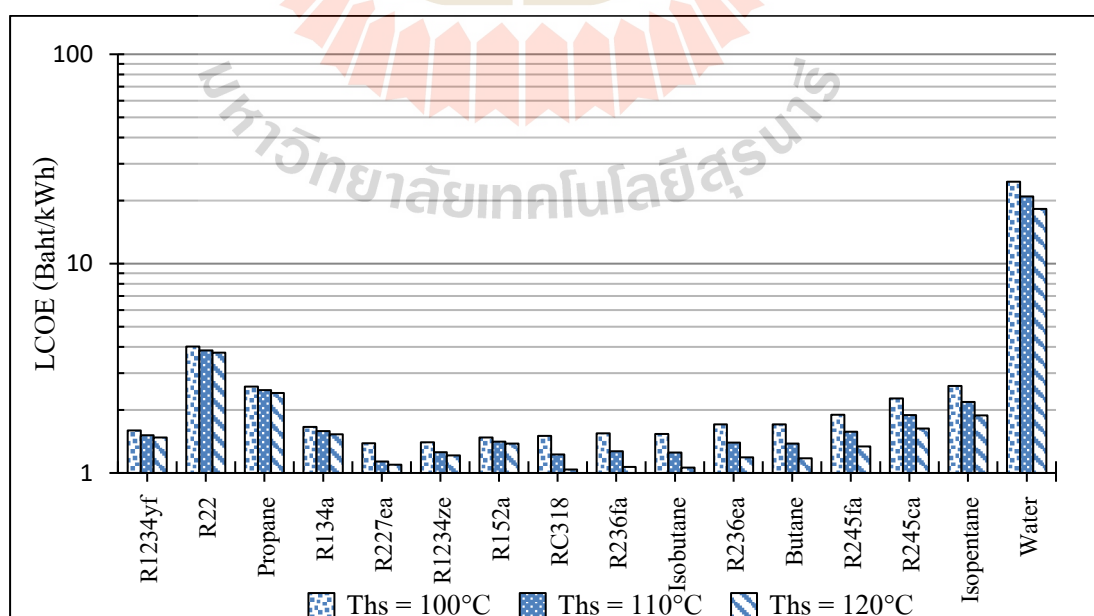
4.3.2 การวิเคราะห์เศรษฐศาสตร์ของโรงไฟฟ้า TLC

สำหรับการวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์ของโรงไฟฟ้า TLC เป็นวิเคราะห์ค่าต้นทุนการผลิตไฟฟ้าตลอดอายุโครงการ เช่นเดียวกับโรงไฟฟ้า ORC ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 4.22 นอกจากนี้ยังมีการวิเคราะห์ถึงปัจจัยที่ส่งผลต่อ ค่า LCOE ของโรงไฟฟ้า โดยพิจารณาในส่วน of ราคาอุปกรณ์ในโรงไฟฟ้าที่มีผลต่อค่า LCOE ได้แสดงในรูปที่ 4.23 ซึ่งได้เลือกราคาของอุปกรณ์ของโรงไฟฟ้า TLC ที่ใช้สารทำงาน isobutane จากผลที่ได้พบว่า ร้อยละ 55 เกิดจากราคาของ expander ในโรงไฟฟ้า และร้อยละ 20 เป็นของ condenser และ evaporator ร้อยละ 3 เป็นของปั๊มขับสารทำงาน และ ร้อยละ 2 คือ generator ซึ่งจะเห็นได้ว่าราคาของ expander มีผลต่อต้นทุนการผลิตไฟฟ้าค่อนข้างสูง เช่นเดียวกับโรงไฟฟ้า ORC เมื่อพิจารณาถึงราคาของ expander ซึ่งใช้ค่าปริมาตรการไหลของสารทำงานที่ทางออกของ expander พิจารณาแสดงในรูปที่ 4.24 ซึ่งในรูปที่ 4.24 แสดงค่าปริมาตรการไหลของสารทำงานที่ทางออกของ expander ของสารทำงานแต่ละชนิด และจะเห็นว่าแนวโน้มของค่า volume flow rate outlet expander มีค่าเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิวิกฤติของสารทำงานเช่นเดียวกับโรงไฟฟ้า ORC สารที่มีค่าดังกล่าวสูงที่สุดคือ water เนื่องจากปัจจัยความดันใน condenser ต่ำกว่าบรรยากาศจึงส่งผลต่อค่าความหนาแน่นของสารทำงาน ดังที่ได้อธิบายไว้ในส่วนของการประเมินขนาดของ expander หรือ ค่า VFR ของโรงไฟฟ้า TLC ทั้งนี้ ค่า volume flow rate outlet expander จะส่งผลถึงราคาของ expander ค่าดังกล่าวมาก็จะทำให้ expander มีราคาแพงตามสมการความสัมพันธ์ที่ใช้พิจารณาคำนวณราคาของ expander แสดงใน รูปที่ 4.25

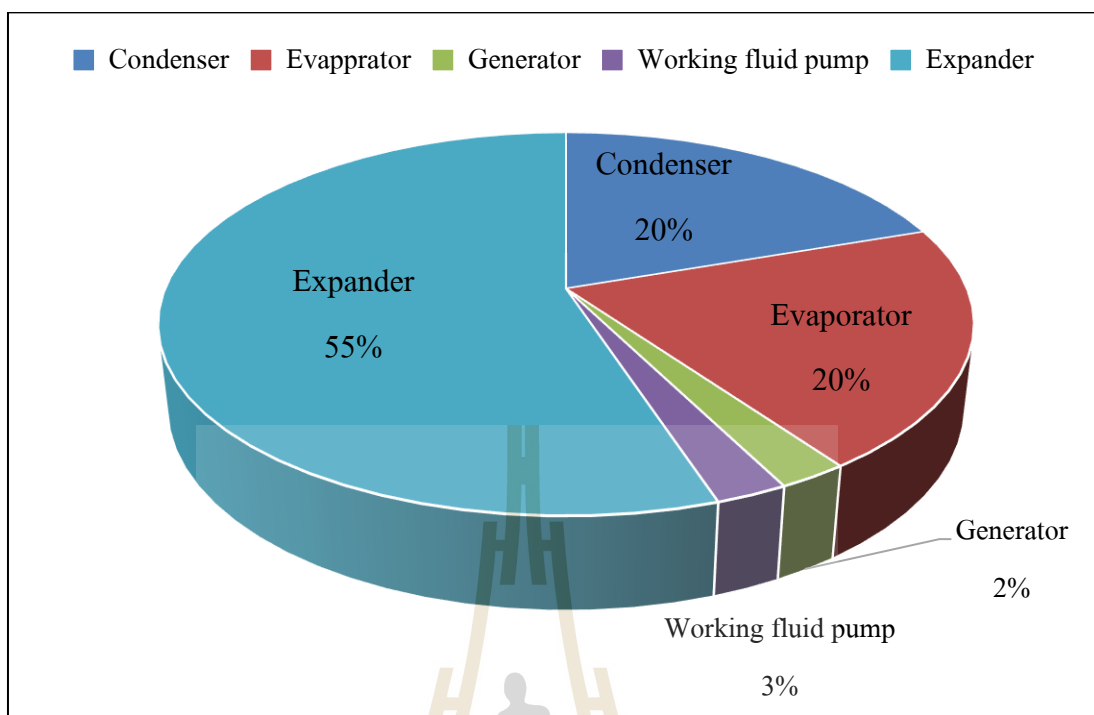
จากรูปที่ 4.25 แสดงราคาของ screw expander ที่ใช้ในโรงไฟฟ้า TLC ซึ่งจะเห็นว่าราคามีแนวโน้มตามผลในรูปที่ 4.20 ที่เป็นค่าสำหรับใช้คำนวณราคาของ expander ซึ่งจากราคาของ screw expander ที่ได้ พบว่า สารทำงาน R1234yf, R22, propane, R134a, R227ea และ R152a และจะมีราคาเพิ่มขึ้นอีก ที่สารทำงาน RC318 และราคาต่ำสุดที่สารทำงาน R22 มีค่าประมาณ 120,000 – 168,000 USD ในช่วงแหล่งความร้อนอุณหภูมิ 100 -120°C ในขณะที่สารทำงาน water มีราคา

สูงสุดมีค่าเท่ากับ 10 ล้าน USD ดังที่ได้กล่าวไว้ข้างต้นแล้วว่าราคา expander เป็นปัจจัยสำคัญที่จะส่งผลต่อค่า LCOE ค่อนข้างสูงซึ่งผลการคำนวณค่า LCOE แสดงไว้ในรูปที่ 4.22

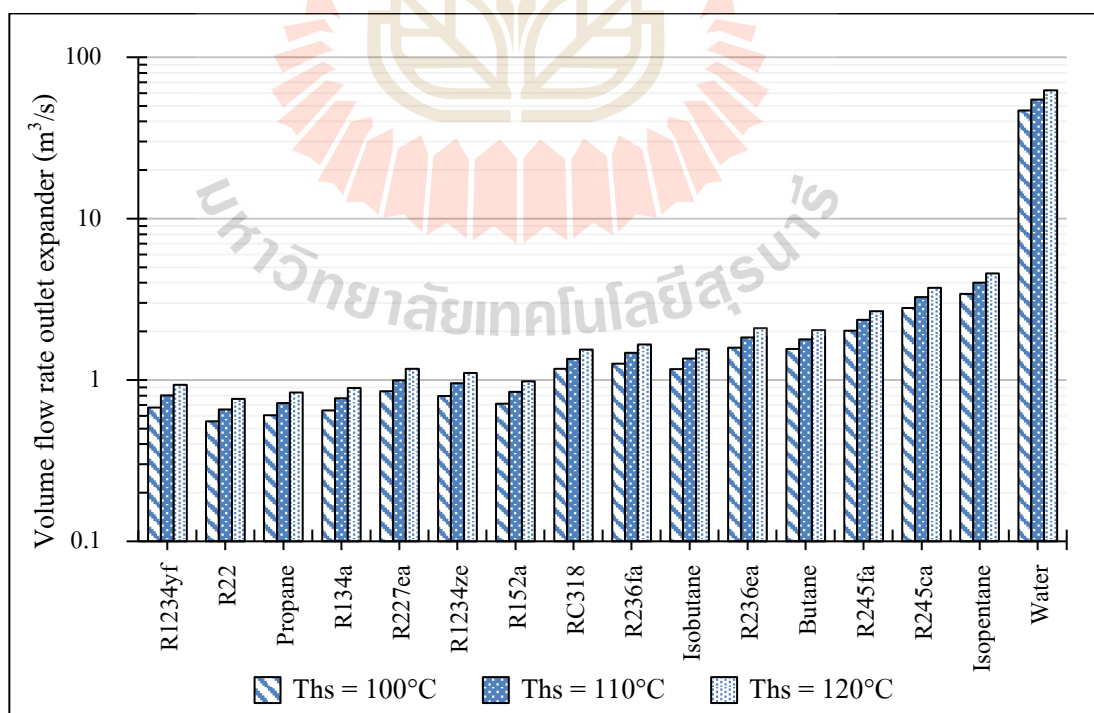
จากรูปที่ 4.22 เป็นค่า LCOE ของสารทำงานแต่ละชนิดที่ใช้แหล่งความร้อน 110°C 110°C และ 120°C จากผลที่ได้จึงเกิดเห็นว่าสารทำงาน R22 และ propane มีต้นทุนการผลิตไฟฟ้าที่สูงกว่าสารทำงานใกล้เคียง ทั้งที่ราคา expander ทั้งสองสารทำงานมีราคาถูกกว่าสารทำงานอื่น เมื่อพิจารณาที่แหล่งความร้อนเดียวกัน ซึ่งทั้งสองสารทำงานมีต้นทุนการผลิตไฟฟ้าเท่ากับ 3.76 – 4.02 Baht/kWh และ 2.41 – 2.59 Baht/kWh ตามลำดับ ซึ่งแพงกว่าสารทำงานที่อยู่ใกล้เคียง เนื่องจากพลังงานไฟฟ้าของสารทำงานทั้งสองชนิด พลังงานที่ผลิตได้มีค่าน้อยกว่าสารทำงานอื่น เยอะมากดังที่ได้แสดงผลไว้ในรูปที่ 4.8 จะพบว่าสารทำงาน R22 และ propane ให้งานสุทธิประมาณ 83-113 kW และ 130 – 179 kW ตามลำดับ ในขณะที่สารทำงานอื่นผลิตงานสุทธิได้ 200 kW ขึ้นไป จึงส่งผลให้สารทำงาน R22 และ propane มีค่า LCOE สูงถึงแม้ว่าราคา expander จะมีราคาถูกกว่าสารทำงานอื่นก็ตาม สาเหตุของการผลิตงานสุทธิได้น้อยได้อธิบายไว้ใน หัวข้อ 4.2.2 และ จะเห็นได้ว่าสารทำงาน water สามารถผลิตงานได้สูงสุดแต่ต้นทุนการผลิตไฟฟ้าสูง เนื่องจาก expander มีราคาแพง ดังที่กล่าวไว้ข้างต้นจึงทำให้มีต้นทุนการผลิตไฟฟ้าสูงถึง 18.23 – 24.61 Baht/kWh นอกจากนี้ยังมีสารทำงานที่มีต้นทุนการผลิตไฟฟ้าต่ำกว่า 2 Baht/kWh เช่นสารทำงาน R1234yf, R134a, R227ea, R1234ze, R152a, RC318, isobutene, R236ea, butane และ R245fa ที่เป็นสารทำงานที่น่าสนใจ



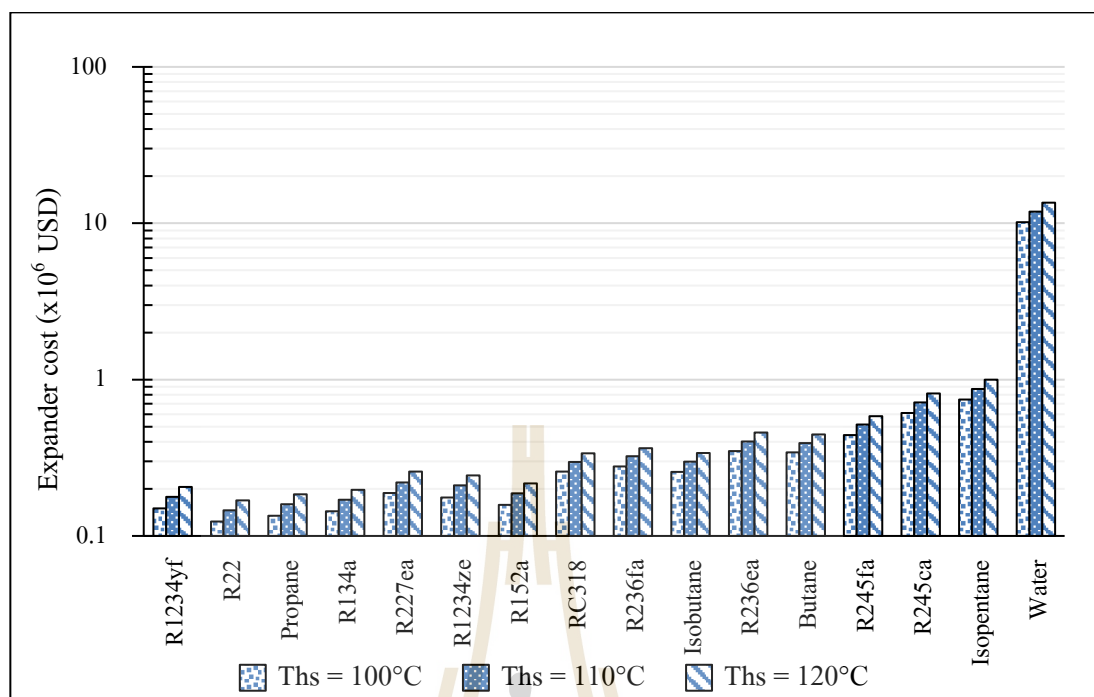
รูปที่ 4.22 ต้นทุนการผลิตไฟฟ้าตลอดอายุโครงการของโรงไฟฟ้า TLC



รูปที่ 4.23 ร้อยละราคาของอุปกรณ์ที่มีผลต่อค่า LCOE ในโรงไฟฟ้า TLC ของสารทำงาน isobutane



รูปที่ 4.24 Volume flow rate outlet expander ของโรงไฟฟ้า TLC

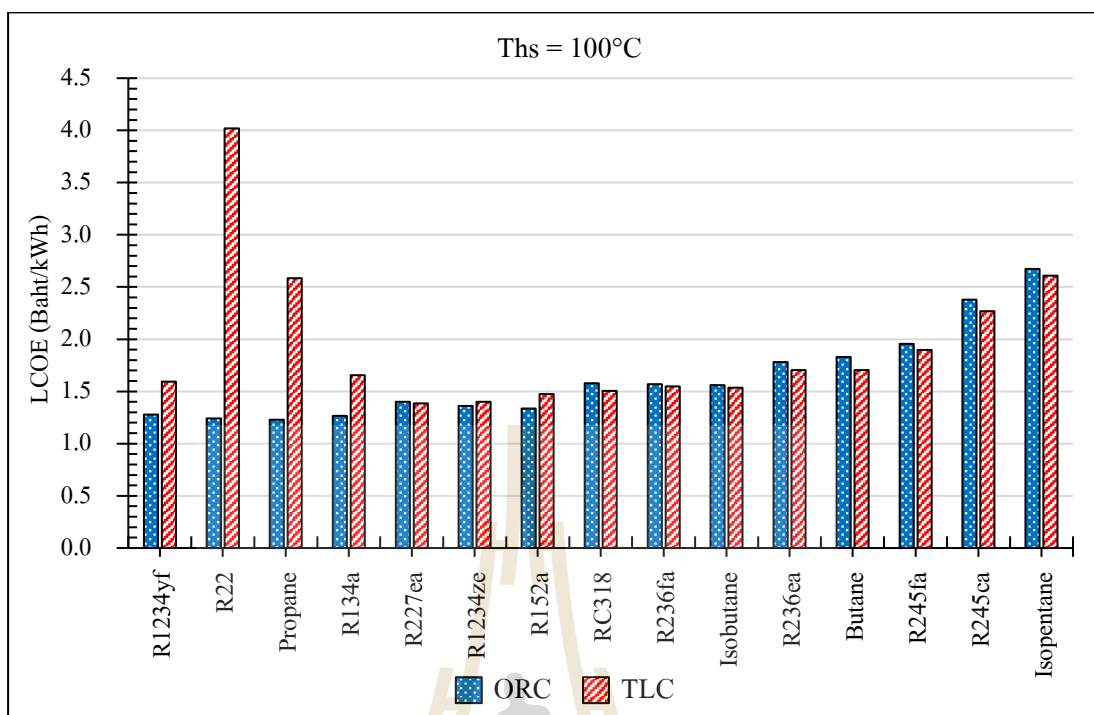


รูปที่ 4.25 ราคา screw expander ของโรงไฟฟ้า TLC

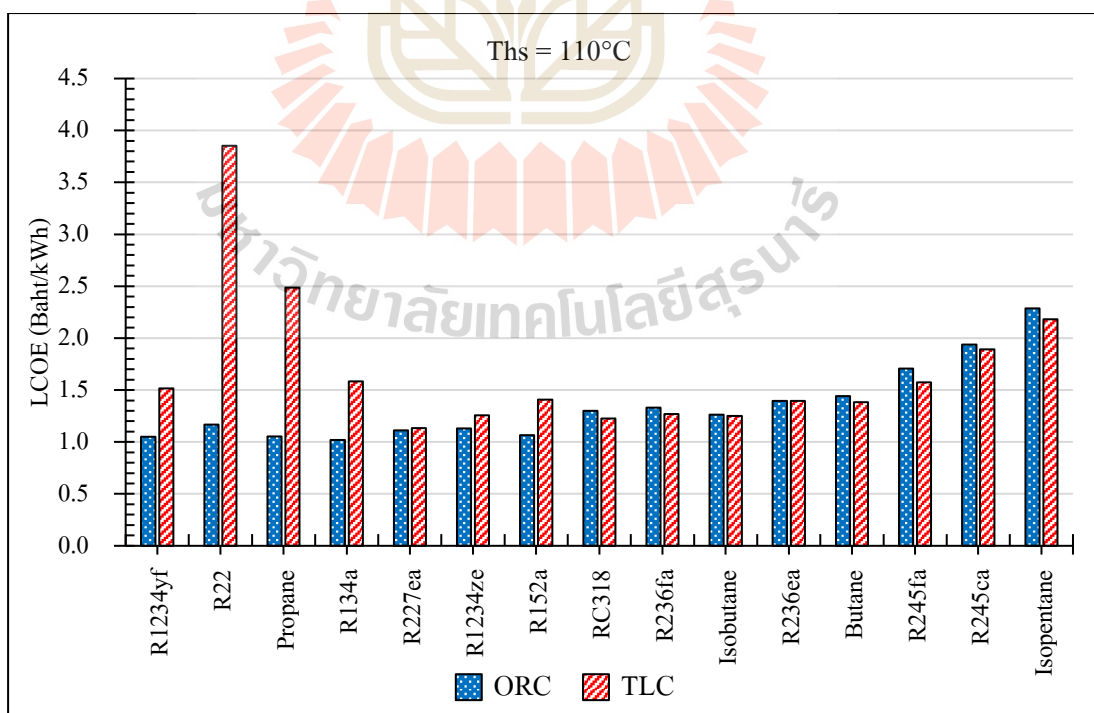
สรุปการวิเคราะห์เศรษฐศาสตร์ของโรงไฟฟ้า TLC โดยการพิจารณาด้านทุนการผลิตไฟฟ้าตลอดอายุโครงการ 10 ปี พบว่าต้นทุนการผลิตไฟฟ้ามีราคาของ expander เป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อต้นทุนการผลิตไฟฟ้า โดยเฉพาะอย่างยิ่งสารทำงานที่มีอุณหภูมิวิกฤตสูงจะส่งผลให้ราคาของ expander เพิ่มสูงขึ้นตามไปด้วย นอกจากนี้ยังพบว่า บางสารทำงานมีราคาของ expander ถูก แต่ระบบผลิตงานได้น้อยก็ส่งผลให้มีต้นทุนการผลิตไฟฟ้าที่แพงได้เช่นกัน นอกจากนี้ยังพบว่า มีสารทำงานที่มีต้นทุนการผลิตไฟฟ้าต่ำกว่า 2 Baht/kWh ที่แหล่งความร้อน 100-120°C มีอยู่หลายสารทำงานให้เลือกตั้งที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น และควรเลือกสารทำงานที่เหมาะสมกับแหล่งความร้อน รวมถึงสารทำงานที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมด้วย

4.3.3 เปรียบเทียบเศรษฐศาสตร์ของโรงไฟฟ้า ORC กับ TLC

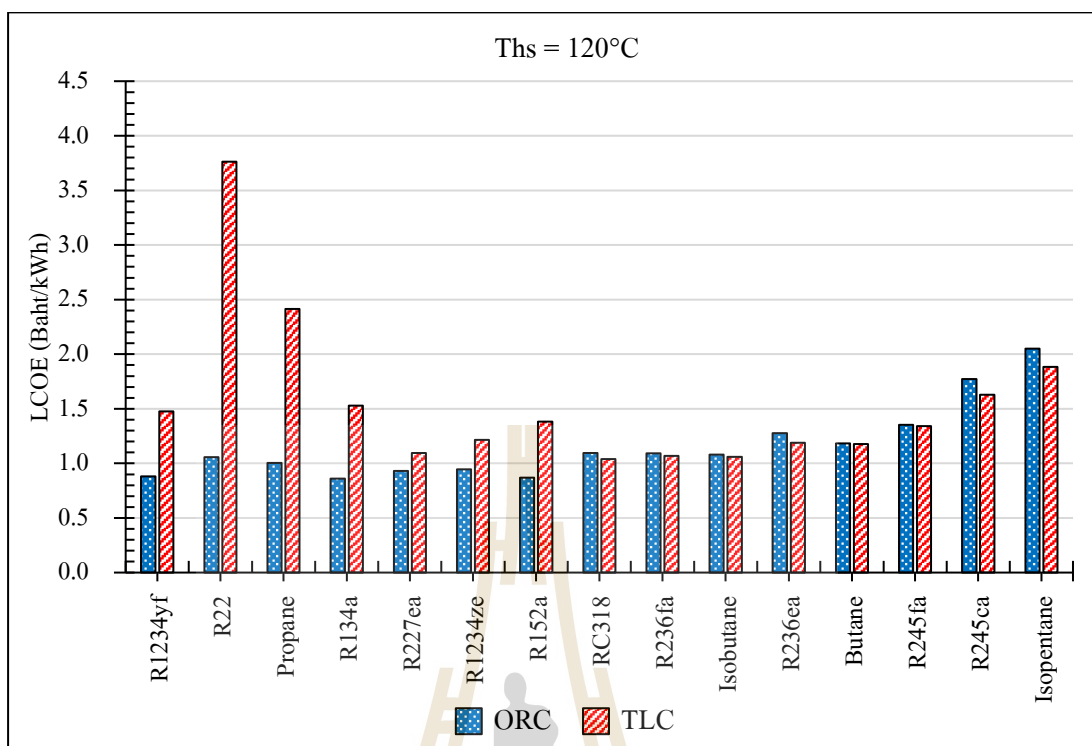
จากการวิเคราะห์ทางด้านเศรษฐศาสตร์ของโรงไฟฟ้า ORC และ โรงไฟฟ้า TLC โดยการพิจารณาด้านทุนของการผลิตไฟฟ้าตลอดอายุโครงการ เมื่อพิจารณาด้านทุนการผลิตไฟฟ้าของโรงไฟฟ้าทั้งสองประเภท ที่แหล่งความร้อนอุณหภูมิเดียวกัน ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 4.26 – 4.28 ทั้งนี้ไม่ได้นำสารทำงาน water มาพิจารณาเนื่องจากโรงไฟฟ้า ORC ไม่ได้ใช้สารทำงานดังกล่าวในการจำลองจึงไม่ได้นำมาเปรียบเทียบกับด้านเศรษฐศาสตร์



รูปที่ 4.26 เปรียบเทียบ LCOE ของโรงไฟฟ้า ORC และ TLC ที่แหล่งความร้อนอุณหภูมิ 100°C



รูปที่ 4.27 เปรียบเทียบ LCOE ของโรงไฟฟ้า ORC และ TLC ที่แหล่งความร้อนอุณหภูมิ 110°C



รูปที่ 4.28 เปรียบเทียบ LCOE ของโรงไฟฟ้า ORC และ TLC ที่แหล่งความร้อนอุณหภูมิ 120°C

จากผลการเปรียบเทียบต้นทุนการผลิตไฟฟ้าของโรงไฟฟ้าของโรงไฟฟ้าทั้งสองประเภทที่แสดงในรูปที่ 2.26 – 2.28 สามารถสรุปได้ดังนี้

- 1) ที่แหล่งความร้อนอุณหภูมิ 100°C โรงไฟฟ้า ORC มีต้นทุนการผลิตไฟฟ้าต่ำสุดมีค่าเท่ากับ 1.23 Baht/kWh ใช้สารทำงาน propane ในขณะที่โรงไฟฟ้า TLC มีค่าเท่ากับ 1.40 Baht/kWh ใช้สารทำงาน R1234ze
- 2) ที่แหล่งความร้อนอุณหภูมิ 110°C โรงไฟฟ้า ORC มีต้นทุนการผลิตไฟฟ้าต่ำสุดมีค่าเท่ากับ 1.02 Baht/kWh ใช้สารทำงาน R134a ในขณะที่โรงไฟฟ้า TLC มีค่าเท่ากับ 1.13 Baht/kWh ใช้สารทำงาน R227ea
- 3) ที่แหล่งความร้อนอุณหภูมิ 120°C โรงไฟฟ้า ORC มีต้นทุนการผลิตไฟฟ้าต่ำสุดมีค่าเท่ากับ 0.86 Baht/kWh ใช้สารทำงาน R134a ในขณะที่โรงไฟฟ้า TLC มีค่าเท่ากับ 1.04 Baht/kWh ใช้สารทำงาน RC318

จากผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าโรงไฟฟ้า ORC ต้นทุนการผลิตไฟฟ้าต่ำกว่า โรงไฟฟ้า TLC ทุกแหล่งอุณหภูมิความร้อน ทั้งนี้ปัจจัยของการเลือกสารทำงานควรเลือกให้เหมาะสมกับแหล่งความร้อน พิจารณาถึงต้นทุนการผลิตและความเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมของสารทำงานด้วย

บทที่ 5

สรุปงานวิจัยและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้ได้ทำการออกแบบโรงไฟฟ้า ORC และ TLC โดยใช้ความร้อนใต้พิภพเป็นแหล่งพลังงานสำหรับประเทศไทย โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาและออกแบบโรงไฟฟ้า ORC และโรงไฟฟ้า TLC และเปรียบเทียบสมรรถนะของโรงไฟฟ้าทั้งสองแบบ พร้อมทั้งประเมินต้นทุนการผลิตไฟฟ้าของโรงไฟฟ้า ORC และโรงไฟฟ้า TLC

5.1 สรุปผลการศึกษา

จากผลการศึกษาการจำลองโรงไฟฟ้า ORC และโรงไฟฟ้า TLC ที่ใช้แหล่งความร้อนอุณหภูมิตั้งที่ 100°C 110°C และ 120°C สามารถสรุปได้ดังนี้

5.1.1 สรุปผลการจำลองสมรรถนะของโรงไฟฟ้า ORC และ TLC

ผลการประเมินสมรรถนะของโรงไฟฟ้า ORC จากผลการศึกษาพบว่า ที่แหล่งความร้อนอุณหภูมิตั้งที่ 100°C สารทำงานทุกชนิดผลิตงานสุทธิได้ใกล้เคียงกันมีค่าอยู่ในช่วง 180 – 200 kW โดยสารทำงานที่ผลิตงานสุทธิได้สูงสุดคือสาร R227ea มีค่าเท่ากับ 200 kW 290 kW และ 406 kW ที่แหล่งความร้อนอุณหภูมิตั้งที่ 100°C 110°C และ 120°C ตามลำดับ และพบว่าสารทำงานที่มีประสิทธิภาพสูงสุดที่แหล่งความร้อนอุณหภูมิตั้งที่ 100°C คือสาร isopentane ที่ 110°C คือสาร R245ca และ 120°C คือสาร R245fa มีค่าเท่ากับ 6.65% 7.77% และ 8.8% ตามลำดับ

ผลการจำลองโรงไฟฟ้า TLC จากผลการจำลองสารทำงานที่ใช้แหล่งความร้อนที่มีอุณหภูมิ 100°C 110°C และ 120°C มีสารทำงาน R1234yf R22 Propane R134a R227ea R1234ze และ R152a ที่ไม่สามารถทำงานในช่วงที่ผลิตงานได้สูงสุดเนื่องจากความดันสารทำงานใน evaporator มีค่าสูงกว่า evaporator จะรับได้จึงต้องลดความดันสารทำงานลง จึงส่งผลให้งานสุทธิลดลงและยังส่งผลถึงประสิทธิภาพเชิงความร้อนและประสิทธิภาพ exergy รวมไปถึงขนาดของ evaporator ที่เล็กลงและ ขนาดของ condenser ที่จะใหญ่ขึ้น สารทำงาน RC318, R236fa, isobutene, R236ea, Butane, R245fa, isopentane และ Water สารทำงานเหล่านี้ ให้งานสุทธิอยู่ในช่วง 280 kW - 323 kW ที่แหล่งความร้อนอุณหภูมิตั้งที่ 100°C และ ที่ 110°C ผลิตงานสุทธิในช่วง 388 kW – 443 kW และ 120°C ผลิตงานสุทธิได้ 510 kW – 580 kW สารทำงานที่ผลิตงานสุทธิได้สูงสุดของทุกแหล่งความร้อน คือ water

5.1.2 สรุปผลการวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์ของโรงไฟฟ้า ORC และ TLC

สรุปผลการวิเคราะห์ทางด้านเศรษฐศาสตร์ของโรงไฟฟ้า ORC ซึ่งวิเคราะห์ผลในด้านต้นทุนการผลิตไฟฟ้าตลอดอายุโครงการ (LCOE) จากผลที่ได้พบว่า สารทำงานมีค่า LCOE ต่ำเมื่อเทียบกับสารอื่น มีจำนวน 7 สารได้แก่ R1234yf, R22, propane, R134a, R227ea, R1234ze และ R152a มีค่า LCOE ค่อนข้างต่ำเมื่อเทียบกับสารทำงานอื่น ซึ่งมีค่า LCOE อยู่ในช่วง 1.23 – 1.40 Bath/kWh 1.02 – 1.17 Bath/kWh และ 0.86 – 1 Bath/kWh ที่แหล่งความร้อน 100°C 110°C และ 120°C ตามลำดับ และสารทำงานที่มีต้นทุนการผลิตไฟฟ้าต่ำที่สุดที่แหล่งความร้อนอุณหภูมิ 100°C คือ propane มีค่าเท่ากับ 1.23 Baht/kWh ที่ 110°C คือ R134a ค่าเท่ากับ 1.02 Baht/kWh และที่ 120°C คือ R134a มีค่าเท่ากับ 0.86 Baht/kWh

สรุปการวิเคราะห์เศรษฐศาสตร์ของโรงไฟฟ้า TLC สารทำงานที่มีต้นทุนการผลิตไฟฟ้าต่ำที่สุดที่แหล่งความร้อนอุณหภูมิ 100°C คือ R1234ze มีค่าเท่ากับ 1.40 Baht/kWh ที่ 110°C คือ R227ea ค่าเท่ากับ 1.13 Baht/kWh และที่ 120°C คือ RC318 มีค่าเท่ากับ 1.04 Baht/kWh ส่วนสารทำงานที่เป็น water ในช่วงอุณหภูมิ 100°C 110°C และ 120°C มีค่าเท่ากับ 24.61 Baht/kWh 20.92 Baht/kWh และ 18.23 Baht/kWh ตามลำดับ

5.2 ข้อเสนอแนะ

1) ในงานวิจัยนี้เป็นการออกแบบให้ระบบทำงานตามที่ design ในความเป็นจริงระบบมักจะทำงานในสถานะที่ไม่ได้ออกแบบเนื่องจากปัจจัยหลายอย่าง ดังนั้นในการจำลองเพื่อให้ระบบมีความสมจริงในการผลิตไฟฟ้า ควรมีการศึกษาการจำลองในกรณีที่ระบบทำงานนอกเหนือจากค่าที่ได้ออกแบบไว้ (off-design)

2) ในงานวิจัยนี้ได้มีการเลือกใช้อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่นสำหรับการประเมินราคาซึ่งรับความดันได้ไม่เกิน 2.5 MPa ในกระบวนการจำลองสารทำงานบางชนิดให้งานสุทธิสูงแต่ความดันสารทำงานในระบบเกินข้อจำกัดของอุปกรณ์จึงต้องมีการลดความดันสารทำงานลงให้สามารถใช้งานกับอุปกรณ์ได้ ส่งผลให้งานสุทธิลดลง ดังนั้นจึงควรพิจารณาเลือกอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่สามารถรองรับความดันของสารทำงานได้ เพื่อที่จะดึงศักยภาพของสารทำงานให้ผลิตงานได้มากที่สุด

รายการอ้างอิง

- สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน (2561) สถานการณ์การปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จาก
ภาคพลังงานรายปี 2561. Retrieved 15 พ.ค.2562 <http://www.eppo.go.th>.
- กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน. (2560). สถิติพลังงานของ
ประเทศไทย (เบื้องต้น). Retrieved 15 พ.ค.2562 <http://www.dede.go.th>
- กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน (2562), โครงการศึกษาแนวทางการพัฒนา
พลังงานความร้อนใต้พิภพในประเทศไทย. Retrieved 15 พ.ค.2562 <http://www.dede.go.th>
- กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. (2558), แผนที่ศักยภาพพลังงานความร้อนใต้
พิภพของประเทศไทย. Retrieved 15 พ.ค.2562 <http://www.geothermal.dede.go.th>
- กรมทรัพยากรธรณี (2561), น้ำพุร้อน. Retrieved 15 พ.ค.2562 <http://www.dmr.go.th>
- เชิดชัย อุทถากิจ. (2538). การอบแห้งต้นหอมแบ่งโดยใช้พลังงานความร้อนเหลือทิ้งจากโรงไฟฟ้า
พลังงานความร้อนใต้พิภพ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท สาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงาน
คณะพลังงานและวัสดุ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- มานพ รักษาสกุลวงศ์. (2556). ความร้อนใต้พิภพในประเทศไทย : พลังงานทดแทนทางเลือก.
รายงานวิชาการ ฉบับที่ สทช 2 1/2556
- บริษัท แอดวานซ์ เทอร์โม โซลูชั่น จำกัด.(2562). **Product ORC Engine**. Retrieved 15 พ.ค.2562
<https://www.advancethermo.com>
- ธนาคารแห่งประเทศไทย (2562). อัตราแลกเปลี่ยนเงินตราต่างประเทศ. Retrieved 7 มิ.ย.2562
https://www.bot.or.th/thai/_layouts/application/exchangerate/exchangerate.aspx
- ธนาคารแห่งประเทศไทย (2562). อัตราดอกเบี้ยเงินให้สินเชื่อ ของธนาคารกรุงไทย. Retrieved
30 พ.ค.2562 [https://www.bot.or.th/thai/statistics/_layouts/application/interest_rate/
in_rate.aspx](https://www.bot.or.th/thai/statistics/_layouts/application/interest_rate/in_rate.aspx)
- ธนิศวรรค์ ดีทายาท และ ทนงเกียรติ เกียรติศิริโรจน์ (2014). การวิเคราะห์ต้นทุนการผลิตไฟฟ้าจาก
โรงไฟฟ้าวัฏจักรแรงดันอินทรีย์ขนาดโมดูลาร์ที่ใช้ชีวมวลเป็นเชื้อเพลิง. วารสาร
วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, ปีที่ 21, ฉบับที่ 3, หน้า 84-93.

ศรศักดิ์ เสงनावงศ์, นัฐพร ไชยญาติ, ชวโรจน์ ใจสิน และ จักรพันธ์ ถาวรงามยิ่งสกุล. การวิเคราะห์ต้นทุนด้านพลังงานของวัฏจักรแรงดันอินทรีย์ด้วยเชื้อเพลิงขยะติดเชื้อ กรณีศึกษา: โรงพยาบาลลำปาง บทความวิจัยใน, **การประชุมวิชาการระดับชาติ IAMBEST ครั้งที่ 3**, 24-25 พฤษภาคม 2561, จังหวัดชุมพร, หน้า 370-383.

อดิศักดิ์ กองคำ และนัฐพร ไชยญาติ, (2559) การศึกษาศักยภาพการผลิตไฟฟ้าโดยวัฏจักรแรงดันอินทรีย์กรณีศึกษา กิจการของน้ำพุร้อนสันกำแพง จังหวัดเชียงใหม่, **การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทยครั้งที่ 12**, 8-10 มิถุนายน 2559, จังหวัดพิษณุโลก, หน้า 1194-1201.

อนิรุตต์ มัทธูจกร.(2559). **วิศวกรรมโรงจักรต้นกำเนิด**. สำนักพิมพ์ บริษัท ซีอีดูเคชั่น จำกัด (มหาชน)

Ahmadi, M., Vahaji, S., Iqbal, M. A., Date, A. and Akbarzadeh, A. (2019). Experimental study of converging-diverging nozzle to generate power by Trilateral Flash Cycle (TFC). **Applied Thermal Engineering**, Vol. 147, pp. 675-683.

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**, pp.1831-1836.

Astolfi, M. (2015). Techno-economic Optimization of Low Temperature CSP Systems Based on ORC with Screw Expanders. **Energy Procedia**, Vol. 69, pp. 1100-1112.

Bani, A. and Peschel, J. (2012). Fouling in Plate Heat Exchangers: Some Practical Experience. **Heat Exchangers - Basics Design Applications**.

Bianchi, G., McGinty, R., Oliver, D., Brightman, D., Zaher, O., Tassou, S. A. 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, pp. 113-121.

Braimakis, K. and Karellas, S. (2017). Integrated thermoeconomic optimization of standard and regenerative ORC for different heat source types and capacities. **Energy**, Vol. 121, pp 570–598.

- Chaiyat, N. (2015). Sustainability of Alternative Energy for Organic Rankine Cycle Power Plant in Thailand. **Naresuan University Journal: Science And Technology (NUJST)**, Vol. 23(1), pp. 45-62.
- Chen, H., Goswami, D. Y. and Stefanakos, E. K. (2010). A review of thermodynamic cycles and working fluids for the conversion of low-grade heat. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Vol. 14(9), pp. 3059-3067.
- Garg, P., Orosz, M. S. and Kumar, P. (2016). Thermo-economic evaluation of ORCs for various working fluids. **Applied Thermal Engineering**, Vol. 109, pp. 841-853.
- GuzoviĆ, Z., LonČar, D. and Ferdelji, N. (2010). Possibilities of electricity generation in the Republic of Croatia by means of geothermal energy. **Energy**, vol. 35(8), pp. 3429-3440.
- GuzoviĆ, Z., Majcen, B. and CvetkoviĆ, S. (2012). Possibilities of electricity generation in the Republic of Croatia from medium-temperature geothermal sources. **Applied Energy**, Vol. 98, pp. 404-414.
- He, C., Liu, C., Gao, H., Xie, H., Li, Y., Wu, S. and Xu, J. (2012). The optimal evaporation temperature and working fluids for subcritical organic Rankine cycle. **Energy**, Vol. 38(1), pp. 136-143.
- Hettiarachchi, H. M., Golubovic, M., Worek, W. M. and Ikegami, Y. (2007). Optimum design criteria for an Organic Rankine cycle using low-temperature geothermal heat sources. **Energy**, Vol. 32(9), pp. 1698-1706.
- Iqbal, M. A., Rana, S., Ahmadi, M., Date, A. and Akbarzadeh, A. (2019). Trilateral Flash Cycle (TFC): A promising thermodynamic cycle for low grade heat to power generation. **Energy Procedia**, Vol. 160, pp. 208-214.
- International energy agency, IEA (2017), **World Energy Outlook 2017**. Retrieved 17 May 2019 <https://www.iea.org/weo2017>
- Lund, J. (2007). Development and Utilization of Geothermal Resources. Proceedings of ISES World Congress. **Solar Energy and Human Settlement**. Vol. 1-4, pp.87-95.
- KAISHAN. **Steam screw expander**. Retrieved 17 May 2019 <https://kaishanusa.com>

- Karimi, S. and 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**, Vol. 115, pp. 600-619.
- Raksaskulwong, M. (2015). Update on Geothermal Utilizations in Thailand. **Proceedings World Geothermal Congress**. Melbourne, Australia, 19-25 April 2015
- Marchionni, M., Bianchi, G., Tassou, S. A., Zaher, O. and Miller, J. (2019). Numerical investigations of a Trilateral Flash Cycle under system off-design operating conditions. **Energy Procedia**, Vol. 161, pp. 464-471.
- ORC World Map (2018), **World map**. Retrieved 18 May 2019 <https://orc-world-map.org>
- Peris, B., Navarro-Esbrí, J., Molés, F. and Mota-Babiloni, A. (2015). Experimental study of an ORC (organic Rankine cycle) for low grade waste heat recovery in a ceramic industry. **Energy**, Vol. 85, pp. 534-542.
- Quoilin, S., Broek, M.V.D., Declaye, S., Dewallef, P. and Lemort, V. (2013). Techno-economic survey of Organic Rankine Cycle (ORC) systems. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Vol. 22, pp. 168-186.
- Rentizelas, A., Karellas, S., Kakaras, E. and Tatsiopoulou, I. (2009). Comparative techno-economic analysis of ORC and gasification for bioenergy applications. **Energy Conversion and Management**, Vol. 50(3), pp. 674-681.
- Richter, L. (2017). Screw engine used as an expander in ORC for low-potential heat utilization. **AIP Conference Proceedings** 1889, 020050.
- Tang, H., Wu, H., Wang, X. and Xing, Z. (2015). Performance study of a twin-screw expander used in a geothermal organic Rankine cycle power generator. **Energy**, Vol. 90, pp. 631-642.
- Usman, M., Imran, M., Yang, Y., Lee, D. H. and Park, B. (2017). Thermo-economic comparison of air-cooled and cooling tower based Organic Rankine Cycle (ORC) with R245fa and R1233zde as candidate working fluids for different geographical climate conditions. **Energy**, Vol. 123, pp. 353-366.

- Vélez, F., Segovia, J. J., Martín, M. C., Antolín, G., Chejne, F. and Quijano, A. (2012). A technical, economical and market review of organic Rankine cycles for the conversion of low-grade heat for power generation. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Vol. 16(6), pp. 4175-4189.
- Walraven, D., Laenen, B. and D'Haeseleer, W. (2015). Minimizing the levelized cost of electricity production from low-temperature geothermal heat sources with ORCs: Water or air cooled?. **Applied Energy**, Vol. 142, pp. 144-153.
- Walraven, D., Laenen, B., & D'Haeseleer, W. (2014). Comparison of shell-and-tube with plate heat exchangers for the use in low-temperature organic Rankine cycles. **Energy Conversion and Management**, Vol. 87, pp. 227-237.
- Wang, J., Zhao, L. and Wang, X. (2010). A comparative study of pure and zeotropic mixtures in low-temperature solar Rankine cycle. **Applied Energy**, Vol. 87(11), pp. 3366-3373.
- Wang, Z. G., He, S., Li, J. X. and Song, G. J. (2011). Modeling and Testing a Screw Expander Integrated into a Trilateral Flash Cycle. **Advanced Materials Research**, Vol. 383-390, pp. 727-733.
- Xu, J. and Yu, C. (2014). Critical temperature criterion for selection of working fluids for subcritical pressure Organic Rankine cycles. **Energy**, Vol. 74, pp. 719-733.
- Zare, V. (2015). A Comparative Exergoeconomic Analysis of Different ORC Configurations for Binary Geothermal Power Plants. **Energy Conversion and Management**, Vol. 105, pp. 127-138.



ภาคผนวก ก

ขนาดและราคาอุปกรณ์โรงไฟฟ้า

ความสัมพันธ์ของขนาดและราคาของอุปกรณ์ในโรงไฟฟ้า

ก.1 การเลือกขนาดและอุปกรณ์ในโรงไฟฟ้า

สำหรับการเลือกขนาดและอุปกรณ์ในโรงไฟฟ้านั้นทางผู้วิจัยได้ทำการออกแบบโรงไฟฟ้า ORC ทั้งหมด 5 ขนาด ซึ่งมีกำลังการผลิต 10 50 100 300 และ 500 kW ซึ่งใช้แบบจำลองที่ได้ทำการตรวจสอบความถูกต้องของโรงไฟฟ้า ORC มาใช้ในการออกแบบโรงไฟฟ้าทั้ง 5 ขนาดเพื่อนำไปเลือกขนาดของอุปกรณ์ในโรงไฟฟ้า ได้ผลดังแสดงในตารางที่ ก.1 โดยสารทำงานที่ใช้ในการจำลองสำหรับการออกแบบ คือ R245fa ที่แหล่งความร้อนมีอุณหภูมิ 115°C

ตารางที่ ก.1 ผลการออกแบบโรงไฟฟ้า ORC สำหรับประเมินขนาดและราคาอุปกรณ์โรงไฟฟ้า

Power	10 kW	50 kW	100 kW	300 kW	500 kW
Q_{evap} (kW)	102	509.96	1019.9	3059.7	5099.6
Q_{cond} (kW)	89.34	446.69	893.38	2680.1	4466.9
P_{evap} (kPa)	910	910	910	910	910
P_{cond} (kPa)	187.48	187.48	187.48	187.48	187.48
$T_{\text{evap,in}}$ ($^{\circ}\text{C}$)	28.7	28.7	28.7	28.7	28.7
$T_{\text{evap,out}}$ ($^{\circ}\text{C}$)	85.79	85.79	85.79	85.79	85.79
$T_{\text{cond,in}}$ ($^{\circ}\text{C}$)	31.5	31.5	31.5	31.5	31.5
$T_{\text{cond,out}}$ ($^{\circ}\text{C}$)	21.5	21.5	21.5	21.5	21.5
$T_{\text{hf,in}}$ ($^{\circ}\text{C}$)	115	115	115	115	115
$T_{\text{hf,out}}$ ($^{\circ}\text{C}$)	75.33	75.33	75.33	75.33	75.33
$T_{\text{cf,in}}$ ($^{\circ}\text{C}$)	15	15	15	15	15
$T_{\text{cf,out}}$ ($^{\circ}\text{C}$)	25.55	25.55	25.55	25.55	25.55
m_{hf} (kg/s)	0.61	3.05	6.11	18.33	30.55
m_{wf} (kg/s)	0.45	2.24	4.47	13.42	22.37
m_{cf} (kg/s)	2.04	10.22	20.44	61.31	102.18

จากผลการออกแบบในตารางที่ ก.1 ผู้วิจัยได้ทำการสำรวจราคาอุปกรณ์หลักที่เหมาะสมกับโรงไฟฟ้าแต่ละขนาด เช่น อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน เครื่องกำเนิดไฟฟ้า และอุปกรณ์อื่น ๆ

ก.2 ขนาดและราคาอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน

สำหรับการประเมินขนาดและราคาของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน โดยชนิดอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่เลือกใช้เป็นแบบแผ่น (plate heat exchanger) ผู้วิจัยได้ใช้ข้อมูลจากการออกแบบในตาราง ก.1 ให้กับบริษัท Siam International Products ที่จำหน่ายอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนเพื่อประเมินขนาดและราคา ซึ่งได้ราคาของอุปกรณ์ดังแสดงในรูปที่ ก.1 ทั้งนี้ อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนมีความสามารถรับความดันได้สูงสุดที่ 2.5 MPa หรือ 25 bar

SIAM International Products Co., Ltd.		QUOTATION		
74/26-27 Moo 11 Rai Khing Sampran, Nakornpathom 73210 Tel : +66 2408 1280 Fax : +66 2408 1281 www.siaminterpro.com		DATE 12 Apr 19 REF : CUSTOMER NAME : ADDRESS : TEL : FAX :		
ATTN :				
WE WOULD LIKE TO SUBMIT OUR QUOTATION WITH DETAILS AS FOLLOWS :				
ลำดับที่รหัสสินค้า ITEM CODE	รายการ DESCRIPTION	จำนวน Q'TY	ราคา/หน่วย UNITPRICE	จำนวนเงิน (บาท) AMOUNT(THB)
Plate Heat Exchanger "SONDEX A/S => 10 kW"				
1	SW19A Model : SW19A-IG25-34-TLA-COND	1	169,252.00	169,252.00
2	SW19A Model : SW19A-IG25-12-TLA-EVAPDX	1	118,700.00	118,700.00
Plate Heat Exchanger "SONDEX A/S => 50 kW"				
3	SW40A Model : SW40A-IS25-86-TLA-COND	1	432,000.00	432,000.00
4	SW54 Model : SW54-IS25-24-TLA-EVAPDX	1	442,600.00	442,600.00
Plate Heat Exchanger "SONDEX A/S => 100 kW"				
5	SW40A Model : SW40A-IS25-170-TLA-COND	1	699,300.00	699,300.00
6	SW59 Model : SW59-IS25-36-TLA-EVAPDX	1	712,000.00	712,000.00
Plate Heat Exchanger "SONDEX A/S => 300 kW"				
7	SW102 Model : SW102-IS25-222-TLA-COND	1	2,390,700.00	2,390,700.00
8	SW202 Model : SW202-IS25-32-TLA-EVAPDX	1	2,737,200.00	2,737,200.00
Plate Heat Exchanger "SONDEX A/S => 500 kW"				
9	SW102 Model : SW102-IS25-366-TLA-COND	1	3,492,500.00	3,492,500.00
10	SW19A Model : SW202-IS25-50-TLA-EVAPDX	1	2,978,300.00	2,978,300.00
TOTAL				14,172,552.00
Vat 7%				992,078.64
GRAND TOTAL				15,164,630.64
WARRANTY: N/A PAYMENT : N/A DELIVERY : N/A VALIDITY : 30 days Kind Regards, F. Anucha (BIRD) Sales Engineer SIAM INTERNATIONAL PRODUCTS CO.,LTD. E-MAIL anucha@siaminterpro.com MOBILE 097 135 4968				
P. KUPPADES GENERAL MANAGER SIAM INTERNATIONAL PRODUCTS CO.,LTD E-MAIL : kade@siaminterpro.com MOBILE : 083 1334633				
Siam International Products Co.,Ltd				

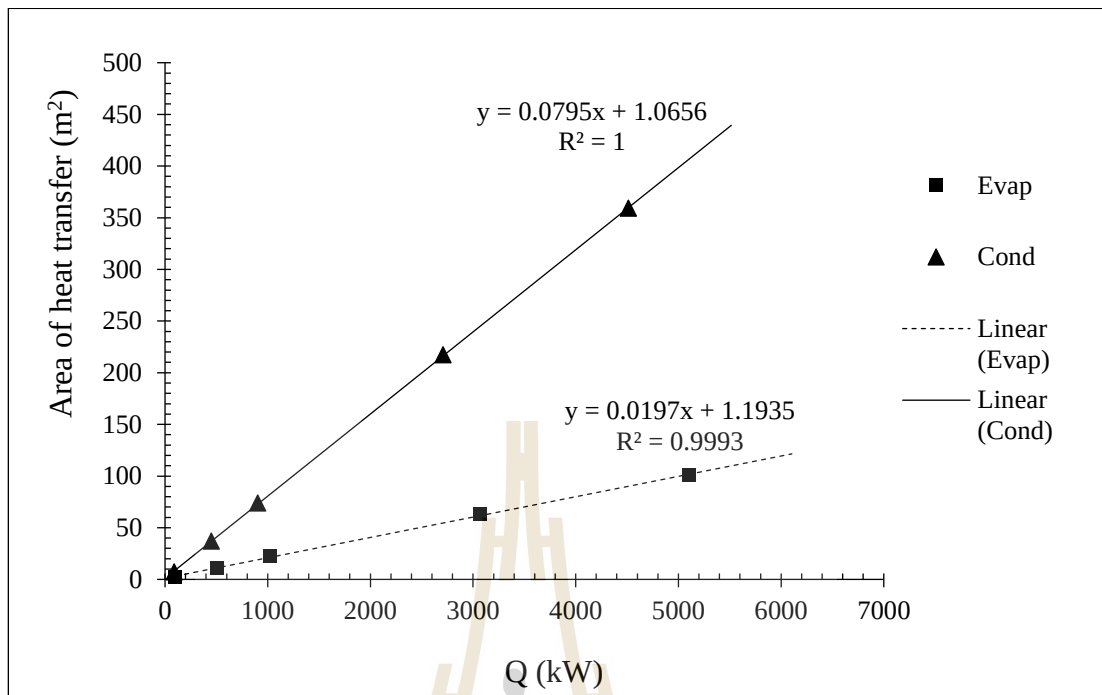
รูปที่ ก.1 ใบเสนอราคาอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่น

ตารางที่ ก.2 ขนาดและราคาของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน

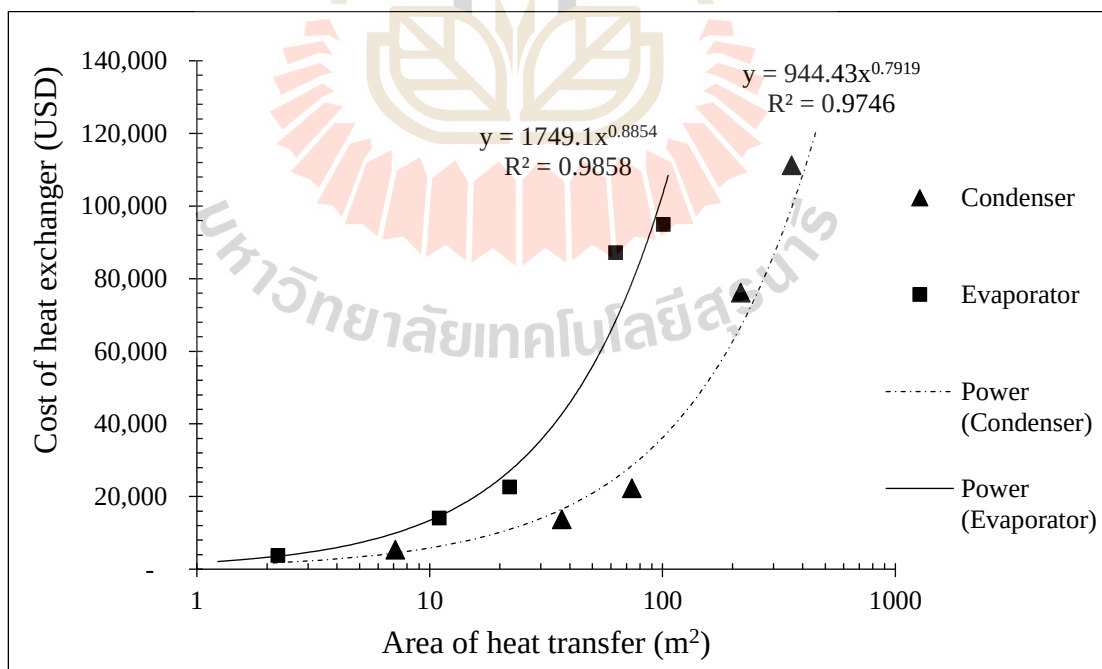
ORC (kW)	Q_{evap} (kW)	A_{evap} (m ²)	U_{evap} (W/m ² .K)	Z_{evap} (Baht)	Z_{evap}^* (USD)	Q_{cond} (kW)	A_{cond} (m ²)	U_{cond} (W/m ² .K)	Z_{cond} (Baht)	Z_{cond}^* (USD)
10	102	2.23	710	118,700	3,783	91	7.13	1229	169,252	5,394
50	511	11	721	442,600	14,105	452	36.96	1181	432,000	13,768
100	1021	22.07	718	712,000	22,691	903	73.92	1181	699,300	22,286
300	3063	63	754	2,737,200	87,233	2709	217.14	1206	2,390,700	76,190
500	5105	100.8	786	2,978,300	94,917	4515	359.27	1215	3,492,500	111,304

หมายเหตุ : * อัตราการแลกเปลี่ยนค่าเงิน 31.378 Baht/USD ณ วันที่ 7 มิถุนายน 2562 (ธนาคารแห่งประเทศไทย, 2562)

จากข้อมูลที่ได้รับจากบริษัท Siam international products ทั้งขนาดและราคาพร้อมทั้งข้อมูลจำเพาะ แสดงในตารางที่ ก.2 จากข้อมูลในตารางสามารถนำมาพิจารณาหาความสัมพันธ์ของขนาดและราคาของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน ทั้งเครื่องระเหย (evaporator) และ เครื่องควบแน่น (condenser) ดังแสดงในรูปที่ ก.2 และ ก.3 ตามลำดับ



รูปที่ ก.2 ความสัมพันธ์ของพลังงานความร้อนเทียบกับขนาดของพื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อน



รูปที่ ก.3 ความสัมพันธ์ขนาดของพื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อนเทียบกับราคาอุปกรณ์

จากรูปที่ ก.2 และ ก.3 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ของพลังงานความร้อนเทียบกับพื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อน และกราฟแสดงความสัมพันธ์ของพื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อนเทียบกับราคาอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน ตามลำดับ สามารถหาความสัมพันธ์ของขนาดและราคาได้จากกราฟดังกล่าวซึ่งได้สมการสำหรับการหาขนาดของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนได้ดังสมการที่ ก.1 และ ก.2 ของเครื่องระเหยและเครื่องควบแน่น และสมการราคาของเครื่องระเหยและเครื่องควบแน่นสามารถคำนวณได้จากสมการที่ ก.3 และ ก.4 ตามลำดับ

$$A_{evap} = 0.0197\dot{Q}_{evap} + 1.1935 \quad (ก.1)$$

$$A_{cond} = 0.0795\dot{Q}_{cond} + 1.0656 \quad (ก.2)$$

$$Z_{evap} = 1749.1A_{evap}^{0.8854} \quad (ก.3)$$

$$Z_{cond} = 944.43A_{cond}^{0.7919} \quad (ก.4)$$

เมื่อ	A_{evap}	คือ	พื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อนเครื่องระเหย (evaporator), m^2
	A_{cond}	คือ	พื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อนเครื่องควบแน่น (condenser), m^2
	$\dot{Q}_{evap}$	คือ	พลังงานความร้อนที่เครื่องระเหย, kW
	$\dot{Q}_{cond}$	คือ	พลังงานความร้อนที่เครื่องควบแน่น, kW
	Z_{evap}	คือ	ราคาเครื่องระเหย, USD
	Z_{cond}	คือ	ราคาเครื่องควบแน่น, USD

ก.3 ขนาดและราคาของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

การประเมินขนาดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าได้พิจารณาจากขนาดของกำลังการผลิตไฟฟ้าของโรงไฟฟ้า ORC ที่ได้ทำการออกแบบ ได้สำรวจราคาของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจาก 2 บริษัท คือ 965 อินเตอร์เทรด จำกัด และบริษัท ชีโน เอ็นจิเนียริง จำกัด ที่ให้กำลังการผลิตไฟฟ้าตั้งแต่ 10 kW – 800 kW ซึ่งข้อมูลดังแสดงในรูปที่ ก.4 และ ก.5 ตามลำดับ จากข้อมูลที่ได้สามารถรวมข้อมูลขนาดและราคาเครื่องกำเนิดไฟฟ้างดังแสดงในตารางที่ ก.3 และสามารถนำไปพิจารณาความสัมพันธ์ของขนาดและราคาได้ดังรูปที่ ก.6 จากรูปที่ ก.6 สามารถพิจารณาสมการความสัมพันธ์ของขนาดและราคาเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ ก.5

$$Z_{gen} = 20.118 W_{expander} + 1276.6 \quad (ก.5)$$

เมื่อ	Z_{gen}	คือ	ราคาเครื่องกำเนิดไฟฟ้า, USD
	$W_{expander}$	คือ	พลังงานจากเครื่องขยาย หรือ กังหัน, kW



บริษัท 956 อินเตอร์เทรด จำกัด (สำนักงานใหญ่)
119/389 หมู่ 8 ต.ลำโพ อ.บางบัวทอง
จ.นนทบุรี 11110
เลขประจำตัวผู้เสียภาษี 0125557008500
โทร. 02-5713977, 02-8030779
เบอร์มือถือ 086-0698038, 081-2552370, 093-6451456
โทรสาร 02-5713978, 02-8030861
www.956intertrade.com

ใบเสนอราคา

เลขที่	9562019050017
วันที่	07/05/2019
ผู้ขาย	คุณป๊อ 0860698038
ผู้ติดต่อ	คุณ อนุกุล โมงปราณีต
เบอร์โทร	0859969714
อีเมล	mongpraneet38@gmail.com

ลูกค้า
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
สาขาวิศวกรรมเครื่องกล
111, ถนน มหาวิทยาลัย ตำบล สุรนารี อำเภอเมืองนครราชสีมา
จังหวัด นครราชสีมา 30000

#	รายละเอียด	จำนวน	ราคาต่อหน่วย	ยอดรวม
1	ไดนาโม ENGGA 375KVA ไดนาโม ENGGA ขนาด 300 kw/375 kva /380v./1500 rpm.	1 ลูก	225,000.00	225,000.00
2	ไดนาโม ENGGA 625KVA ไดนาโม ENGGA ขนาด 500 KW/625 kva /380v./1500 rpm.	1 ลูก	349,000.00	349,000.00
3	ไดนาโม ENGGA 1000KVA ไดนาโม ENGGA ขนาด 800 KW/1000 kva/380v./1500 rpm.	1 ลูก	495,800.00	495,800.00

รวมเป็นเงิน

ภาษีมูลค่าเพิ่ม 7%

จำนวนเงินรวมทั้งสิ้น

1,069,800.00 บาท

74,886.00 บาท

1,144,686.00 บาท

(หนึ่งล้านหนึ่งแสนสี่พันหกร้อยแปดสิบหกบาทถ้วน)

หมายเหตุ

- ราคานี้รวมภาษีมูลค่าเพิ่มเรียบร้อยแล้ว
- ราคานี้ไม่รวมค่าติดตั้ง ค่าสายไฟ และค่าขนส่งกรณีต่างจังหวัด (ฟรีค่าขนส่งเฉพาะกรุงเทพฯ และปริมณฑล)
- เงื่อนไขการชำระเงิน : มัดจำ 40%, ส่งสินค้า 60%
- กำหนดส่งสินค้า : 3-7 วันหลังจากได้รับสั่งซื้อ และ มัดจำ
- กำหนดยืนยันราคา = 30 วัน
- การรับประกันคุณภาพ : 1 ปี เกิดจากการผลิตเท่านั้น ไม่รวมความเสียหายเกิดจากการใช้งานผิดวิธี และขาดการดูแลรักษา

ไม่รวมวัสดุสิ้นเปลือง. แบตเตอรี่ 30 วัน

ในนาม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



ในนาม บริษัท 956 อินเตอร์เทรด จำกัด

ผู้สั่งซื้อสินค้า

วันที่

ผู้อนุมัติ

วันที่

รูปที่ ก.4 ใบเสนอราคาเครื่องกำเนิดไฟฟ้า บริษัท 956 อินเตอร์เทรด จำกัด



บริษัท ชีโน เอ็นจิเนียริง จำกัด

CHINO ENGINEERING COMPANY LIMITED

220 ซ.บางแค 3 แขวงบางหว้า เขตภาษีเจริญ กรุงเทพฯ 10160

Tel : 02-0521272 , 080-9955738 , 097-9471469 Fax : 02-0521272

เลขประจำตัวผู้เสียภาษีอากร 0105561177167 www.chinoengineering.com

ใบเสนอราคา
QUOTATION

เรียน : คุณอนุตล โม่งปราณีต มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี สาขาวิศวกรรมเครื่องกล โทรศัพท์ : 085-9969714 โทรสาร : E-mail mongpraneet38@gmail.com	วันที่ : 7 พฤษภาคม 2562 เลขที่ : Q1905006 กำหนดยื่นอัตรา : 30 วัน นับจากวันที่เสนอราคาเป็นต้นไป เงื่อนไขการชำระเงิน : เงินสด พนักงานขาย : สุชาติ 080-9955738 กำหนดส่งสินค้า : มีสินค้าพร้อมส่ง
--	--

บริษัทฯ มีความยินดีขอเรียนเสนอราคาสินค้าตามราคาและรายการดังต่อไปนี้

ลำดับที่	รายการ/รายละเอียด	จำนวน / หน่วย	ราคาต่อหน่วย	ส่วนลด	ราคารวม
No.	Description	Quantity/Unit	Unit Price		Amount
1	ไดนาโมเฟลาตอย INFINITY รุ่น IF164C ขนาด 10 KW 1500 rpm 380 V.	1 ลูก	35,000.00		35,000.00
2	ไดนาโมเฟลาตอย INFINITY รุ่น IF224E16 ขนาด 48 KW 1500 rpm 380 V.	1 ลูก	65,000.00		65,000.00
3	ไดนาโมเฟลาตอย INFINITY รุ่น IF274D14 ขนาด 100 KW 1500 rpm 380 V.	1 ลูก	92,000.00		92,000.00
หมายเหตุ : ราคาตั้งถ่วงยังไม่รวมค่าขนส่งกรณีต่างจังหวัด					192,000.00
รวมเงินทั้งสิ้น					205,440.00



 คุณสุชาติ หงษ์ทอง
 (ผู้เสนอราคา)
 ทางบริษัทฯ ขอขอบคุณที่ได้มีโอกาสเสนอราคาให้กับท่านและหวังว่าคงจะได้พิจารณาสั่งซื้อจากท่านในวันนี้

.....
 ผู้อนุมัติ
 AUTHORIZED SIGNATURE

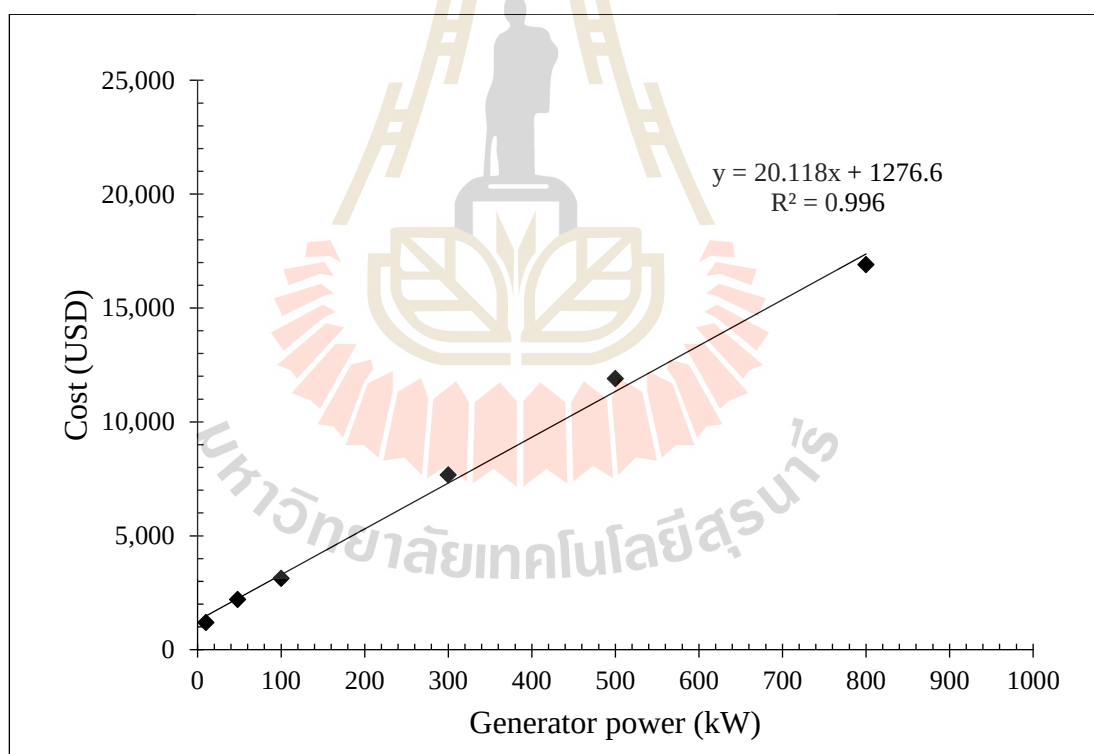
รูปที่ ก.5 ใบเสนอราคาเครื่องกำเนิดไฟฟ้า บริษัท ชีโน เอ็นจิเนียริง จำกัด

ตารางที่ ก.3 ขนาดและราคาของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

Generator power (kW)	Z_{gen} (Baht)	$Z_{gen} + \text{Vat } 7\%$ (Baht)	Z_{gen} (USD)*
10	35000	37450	1193.51
48	65000	69550	2216.52
100	92000	98440	3137.23
300	225000	240750	7672.57
500	349000	373430	11901.01
800	495800	530506	16906.94

หมายเหตุ : * อัตราการแลกเปลี่ยนค่าเงิน 31.378 Baht/USD ณ วันที่ 7 มิถุนายน 2562

(ธนาคารแห่งประเทศไทย, 2562)



รูปที่ ก.6 ความสัมพันธ์ของขนาดกำลังการผลิตไฟฟ้าเทียบกับราคา

ก.4 ขนาดและราคาปั๊มสูบน้ำสารทำงาน

การประเมินขนาดของเครื่องสูบน้ำสารทำงานได้พิจารณาเลือกปั๊มสารทำงานประเภท ปั๊ม แนวตั้งหลายใบพัด (vertical multistage centrifugal pump) โดยใช้ข้อมูลความดันและอัตราการไหลของสารทำงานที่อยู่ในตารางที่ ก.1 ในการเลือกขนาดของปั๊ม โดยพิจารณาจากความดันที่ปั๊มต้องสร้างให้ได้มากกว่าความดันในเครื่องระเหย รวมกับความดันที่เกิดการสูญเสียในอุปกรณ์ แลกเปลี่ยนความร้อน เครื่องระเหย และอัตราการไหลของสารทำงาน มาใช้ในการประเมินขนาดของปั๊ม ให้กับโรงไฟฟ้า จากการสำรวจราคาปั๊มที่ใช้สูบน้ำสารทำงานจาก 2 บริษัทที่มีจำหน่าย คือ บริษัท บุญไทยแมชชีนเนอรี คอมเพล็กซ์ จำกัด ได้ดังรูปที่ ก.7 และ ห้างหุ้นส่วนจำกัด บุญไทย สาร์ดแวร์ (จ.นครราชสีมา) ดังแสดงในตาราง ก.4 จากข้อมูลขนาดและราคาของปั๊มที่ได้ นำไปพิจารณาเลือกปั๊มที่สามารถทำความดันและอัตราการไหลสารทำงานในโรงไฟฟ้า จะได้ขนาดและราคาดังแสดงในตารางที่ ก.5 จากข้อมูลการเลือกปั๊มในตารางที่ ก.5 สามารถนำข้อมูลในตารางไปสร้างความสัมพันธ์ในการประเมินขนาดและราคาในรูปของสมการดังแสดงในรูปที่ ก.8 และ ก.9 สมการที่ใช้ในการประเมินขนาดและราคาแสดงในสมการที่ ก.6 และ ก.7 ตามลำดับ

$$W_{pump} = 1.3099 \dot{V}_{wf} + 0.8239 \quad (ก.6)$$

$$Z_{pump} = 168.68 \dot{W}_{pump} + 1737.3 \quad (ก.7)$$

เมื่อ	$\dot{W}_{pump}$	คือ	กำลังงานของปั๊ม, kW
	$\dot{V}_{wf}$	คือ	อัตราการไหล, l/s
	Z_{pump}	คือ	ราคาปั๊มสารทำงาน, USD



บริษัท บุญไทยแมชชีนเนอรี่ คอมเพล็กซ์ จำกัด (สำนักงานใหญ่)
 417, 419, 421, 423 ถ.มหาไถไทย ต.ในเมือง อ.เมือง จ.นครราชสีมา 30000
 โทรศัพท์ 044-269444-48 แฟกซ์ 044-269453
 เลขประจำตัวผู้เสียภาษี 0305540000207

ใบเสนอราคา / ใบสั่งซื้อ

รหัส 0 ชื่อผู้ติดต่อ

ชื่อ เงินสด

ที่อยู่ ตำบลในเมือง
อำเภอเมืองนครราชสีมา จ.นครราชสีมา 30000 โทร. 0 แฟกซ์. 0

กำหนดยื่นราคา วัน

หน้าที่ 1 / 1

วันที่เอกสาร 07/05/2562

เลขที่เอกสาร QTU6205/0012

เงื่อนไขการชำระ เงินสด(I)(B)

วันที่หมดอายุ 06/07/2562

พนักงานขาย (เขต4) คุณสมหมาย พิมพ์เงิน

วิธีจัดส่ง เคอาร์.เอ็กเพรส (Tel.02-633-1417)

ผู้พิมพ์ PIMLADA

ลำดับ	รหัสสินค้า	รายละเอียด	หน่วยนับ	จำนวน	แกน	ราคา@	ส่วนลด	จำนวนเงิน
1	CRN15-16	ปั๊มแรงดันสูง CRN15-16 BM-FGJ-A-E 3x400/690 50Hz GRUNDFOS	PCS	2.00		85,100.00		170,200.00
2	CRN15-16	ปั๊มแรงดันสูง CRN15-16 BM-FGJ-A-E 3x400D 50Hz GRUNDFOS	PCS	1.00		59,010.00		59,010.00
3	CRN64-4-2	ปั๊มแรงดันสูง CRN64-4-2 B-F-A-E-PQQE 3x400/690 50Hz GRUNDFOS	PCS	1.00		181,900.00		181,900.00
	CRN45-4-2	ปั๊มแรงดันสูง CRN45-4-2 BM-F-A-E 3x400/690 50Hz GRUNDFOS	PCS	1.00		191,000.00		191,000.00

ขออนุญาตแจ้ง leadtime ตามหลัง

คือ สินค้าที่ยกเว้นภาษีมูลค่าเพิ่ม

รวมจำนวนขึ้น 5.00 ขึ้น รวมจำนวนรายการ 4 รายการ

รวมหน้านี้ 602,110.00

รวมทั้งหมด 602,110.00

หมายเหตุ **มัดจำสินค้า 50% เมื่อสั่งซื้อ***
และอีก 50% ก่อนส่งสินค้า

หักส่วนลด .00

มูลค่าสินค้าหลังหักส่วนลด 562,719.63

มูลค่าสินค้ายกเว้นภาษี 0.00

ภาษีมูลค่าเพิ่ม 7% 39,390.37

มูลค่าสุทธิ 602,110.00

(หกแสนสองพันหนึ่งร้อยสิบบาทถ้วน)

PIMLADA

ผู้เสนอราคา

วันที่/...../.....

PIMLADA

ผู้อนุมัติการเสนอราคา

วันที่/...../.....

ผู้มีอำนาจ / ยืนยันการสั่งซื้อ

วันที่/...../.....

รูปที่ ก.7 ใบเสนอราคาปั๊มแนวตั้งหลายใบพัดของสารทำงาน (Grundfos pump)

ตารางที่ ก.4 ราคาปั๊มแนวตั้งหลายใบพัดของสารทำงาน (SEAR Pump)

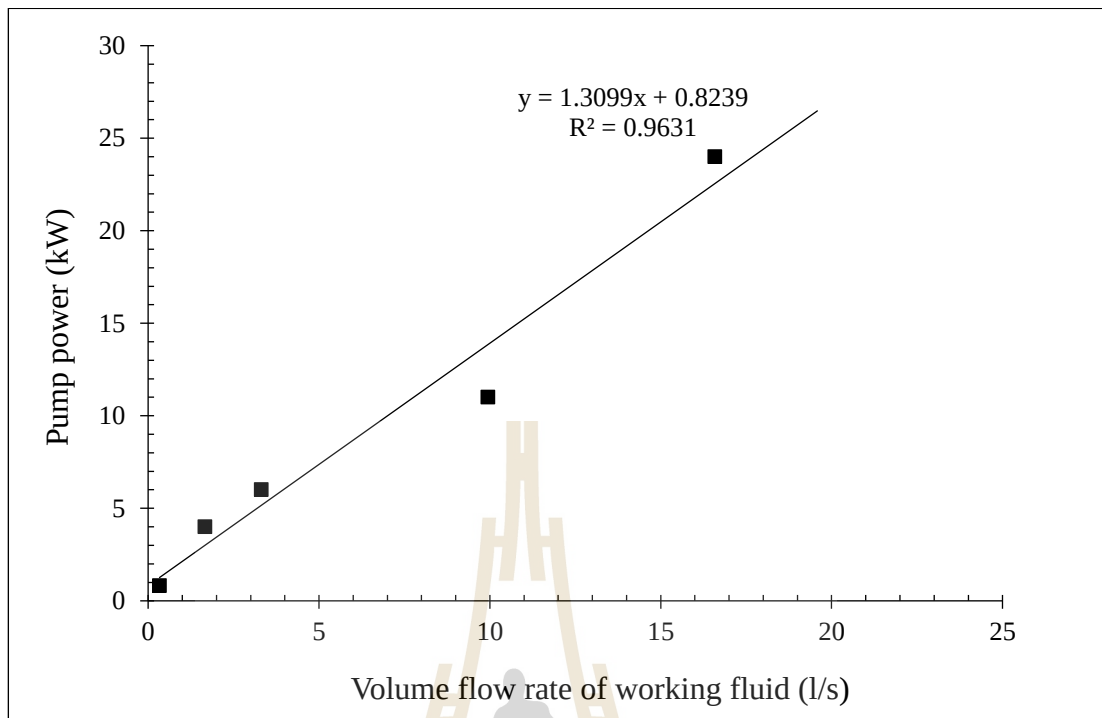
Model.	Hp	l/min	0	42	53	67	83	105	Cost (Baht)
CWM200A/2-T	7.5	Head (m)	48	42	39	34	30	26	74,800
CWM200A/3A-T	10		68	59	55	48	43	36	84,340
CWM200A/4-T	15		96	83	78	67	60	51	112,100
Model.	Hp	l/min	0	33	50	83	100	108	Cost (Baht)
MK32/R7	1.5	Head (m)	59	54	50	38	29	-	37,000
MK32/R9	2		76	70	65	49	37	-	43,000
MK32/R13	3		118	105	98	76	63	55	51,000
MK32/R13-T	3		118	105	98	76	63	55	52,000
Model.	Hp	l/min	0	83	117	150	183	200	Cost (Baht)
MK40/R13-T	5.5	Head (m)	137	118	105	87	59	45	77,000
MK40/R16-T	7.5		168	147	129	110	72	56	87,000
MK40/R20-T	10		210	182	162	136	90	70	99,000

ตารางที่ ก.5 ขนาดและราคาปั๊มแนวตั้งหลายใบพัดของสารทำงานที่เลือกใช้

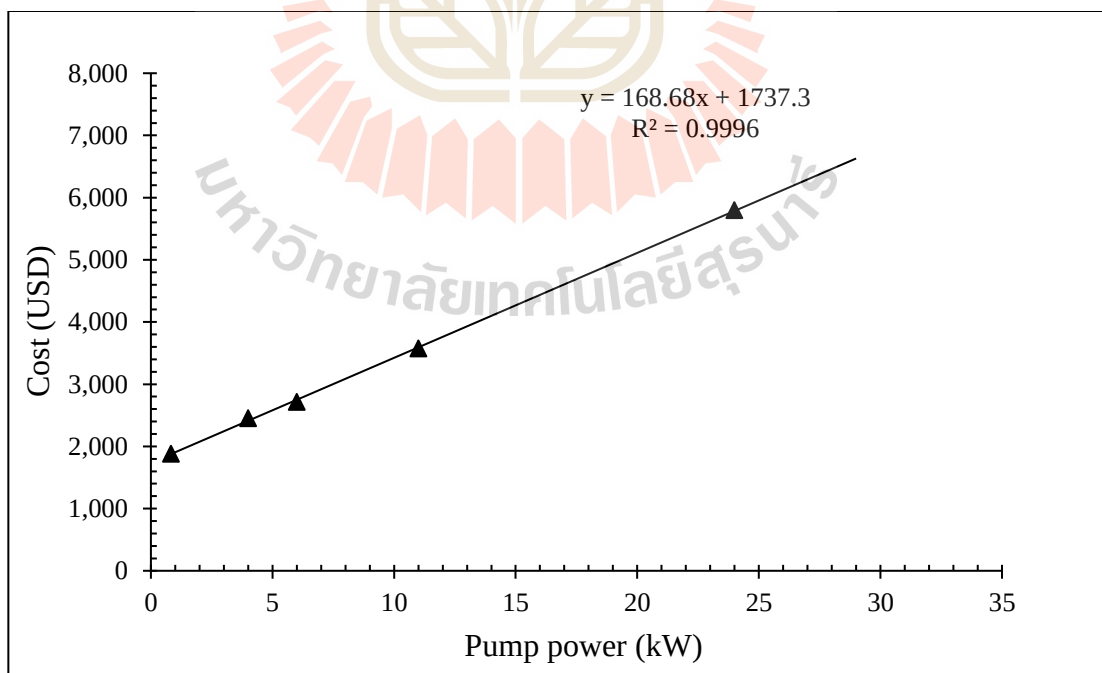
ORC (kW)	Model.	$\dot{V}_{wf}$ (l/s)	W_{pump} (kW)	Z_{pump} (Baht)	Z_{pump} (USD)*
10	CRN1	0.34	0.825	59,010	1,880.62
50	MK40/R13-T	1.66	4	77,000	2,453.95
100	CRN15	3.31	6	85,100	2,712.09
300	CWM200A/4-T	9.95	11	112,100	3,572.57
500	CRN64	16.58	24	181,900	5,797.06

หมายเหตุ : * อัตราการแลกเปลี่ยนค่าเงิน 31.378 Baht/USD ณ วันที่ 7 มิถุนายน 2562

(ธนาคารแห่งประเทศไทย, 2562)



รูปที่ ก.8 ความสัมพันธ์ของปริมาณการไหลเทียบกับขนาดกำลังงานของปั๊ม



รูปที่ ก.9 ความสัมพันธ์ขนาดกำลังงานเทียบกับราคาปั๊ม

ก.5 ขนาดและราคาปั๊มน้ำร้อนและน้ำหล่อเย็น

การเลือกพิจารณาปั๊มน้ำร้อนจะพิจารณาจากความสามารถของปั๊มที่ใช้กับน้ำร้อนที่อุณหภูมิได้ 120°C ตามเงื่อนไขของแหล่งความร้อนที่อุณหภูมิสูงสุดที่ได้พิจารณา และประเมินความสามารถในการทำความดันของปั๊มที่ต้องทำได้สูงกว่าความดันของการกลายเป็นไอของน้ำร้อนรวมกับความดันที่เกิดการสูญเสียในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน เพื่อป้องกันการกลายเป็นไอระหว่างการไหลหรือถ่ายเทความร้อนให้กับสารทำงาน และ ปั๊มน้ำหล่อเย็นต้องทำความดันที่สูงกว่าความดันที่สูญเสียจากการไหลในเครื่องควบแน่นหรืออุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน และปั๊มต้องทำอัตราการไหลที่ต้องการได้ จากการสำรวจราคาจากบริษัท เคดี แมชชีนเนอรี จำกัด ได้ข้อมูลขนาดและราคาดังแสดงในตารางที่ ก.6

ตารางที่ ก.6 ราคาปั๊มหอยโข่งสำหรับน้ำร้อนและน้ำหล่อเย็น

Model	Size In-Out (Inch)	Flow rate (l/min)	Head (m)	HP	Cost (Baht)
3D32-125/1.1	2 x 1¼	100-333	12.5-22.4	1.5	24,900
3D32-160/1.5	2 x 1¼	100-333	16.4-27.5	2	26,100
3D32-160/2.2	2 x 1¼	100-333	25.5-35.4	3	26,400
3D32-160/2.2M	2 x 1¼	100-333	25.5-35.4	3	27,400
3D32-200/3.0	2 x 1¼	100-333	31-44	4	33,900
3D32-200/4.0	2 x 1¼	100-360	39-52.5	5.5	36,400
3D40-125/1.5	2 ½ x 1½	200-700	6.3-18.2	2	25,300
3D40-125/2.2	2 ½ x 1½	200-700	13.7-24.4	3	25,800
3D40-125/2.2M	2 ½ x 1½	200-700	18.7-29.4	3	26,800
3D40-160/3.0	2 ½ x 1½	200-700	18.7-29.4	4	29,900
3D40-160/4.0	2 ½ x 1½	200-700	27-37.2	5.5	34,300
3D40-200/5.5	2 ½ x 1½	200-700	33-44.5	7.5	40,400
3D40-200/7.5	2 ½ x 1½	200-700	43-53.5	10	42,100
3D50-125/2.2	2 ½ x 2	400-1000	9-18	3	27,900
3D50-125/3.0	2 ½ x 2	400-1200	10-21.5	4	30,200
3D50-125/4.0	2 ½ x 2	400-1200	15.3-25.8	5.5	34,500
3D50-160/5.5	2 ½ x 2	400-1200	20-32	7.5	40,600
3D50-160/7.5	2 ½ x 2	400-1200	26.7-38.2	10	42,200
3D50-200/9.2	2 ½ x 2	500-1200	34.4-49.5	12.5	54,900
3D50-200/11	2 ½ x 2	500-1200	42-55.5	15	66,300
3D65-125/5.5	3 x 2 ½	700-2100	8-25	7.5	46,000
3D65-125/7.5	3 x 2 ½	700-2200	13-29.6	10	47,600
3D65-160/11	3 x 2 ½	700-2300	20-39	15	60,500
3D65-160/15	3 x 2 ½	700-2300	29-46	20	94,500
3D65-200/18.5	3 x 2 ½	700-2300	36.6-58	25	104,900
3D65-200/22	3 x 2 ½	700-2300	42.5-65.5	30	112,500

ตารางที่ ก.7 ขนาดและราคาปั๊มหอยโข่งที่เลือกใช้น้ำร้อน

ORC (kW)	Model	$\dot{V}_{hf}$ (l/min)	$\dot{W}_{pump}$ (kW)	Cost (Baht)	Cost (USD)*
10	32-160/2.2	38.81	1	26,400	841.35
50	32-200/3.0	182.32	2.5	33,900	1,080.37
100	40-200/5.5	364.77	4.2	40,400	1,287.53
300	65-160/11	1094.30	8	60,500	1,928.10
500	665-160/15	1823.84	13	94,500	3,011.66

ตารางที่ ก.8 ขนาดและราคาปั๊มหอยโข่งที่เลือกใช้น้ำหล่อเย็น

ORC (kW)	Model.	$\dot{V}_{cf}$ (l/min)	$\dot{W}_{pump}$ (kW)	Cost (Baht)	Cost (USD)*
10	3D32-125/1.1	122.03	0.82	24,900	793.55
50	3D40-160/3	610.13	2.8	29,900	952.90
100	3D65-125/5.5	1220.27	5	46,000	1,466.00
300	3D65-125/7.5	3660.21	7 x 2	95,200	3,033.97
500	3D65-160/11	6100.15	11 x 3	181,500	5,784.31

หมายเหตุ : * อัตราการแลกเปลี่ยนค่าเงิน 31.378 Baht/USD ณ วันที่ 7 มิถุนายน 2562

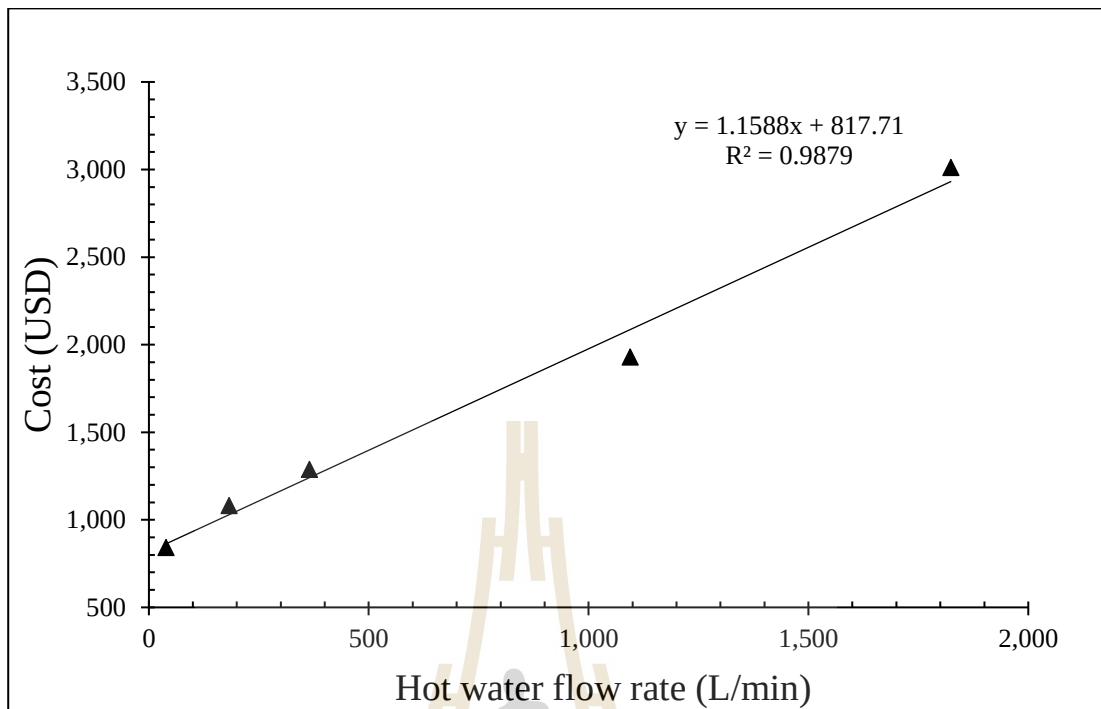
(ธนาคารแห่งประเทศไทย, 2562)

จากตารางที่ ก.6 ได้พิจารณาเลือกปั๊มน้ำร้อนและปั๊มน้ำหล่อเย็น ได้ดังแสดงในตารางที่ ก.7 และ ก.8 จากทั้งสองตารางสามารถนำไปพิจารณาหาสมการความสัมพันธ์ของขนาดและราคาของปั๊มได้ดังแสดงในรูปที่ ก.10 และ ก.11 ราคาของปั๊มสามารถคำนวณได้จากสมการที่ ก.8 และ ก.9

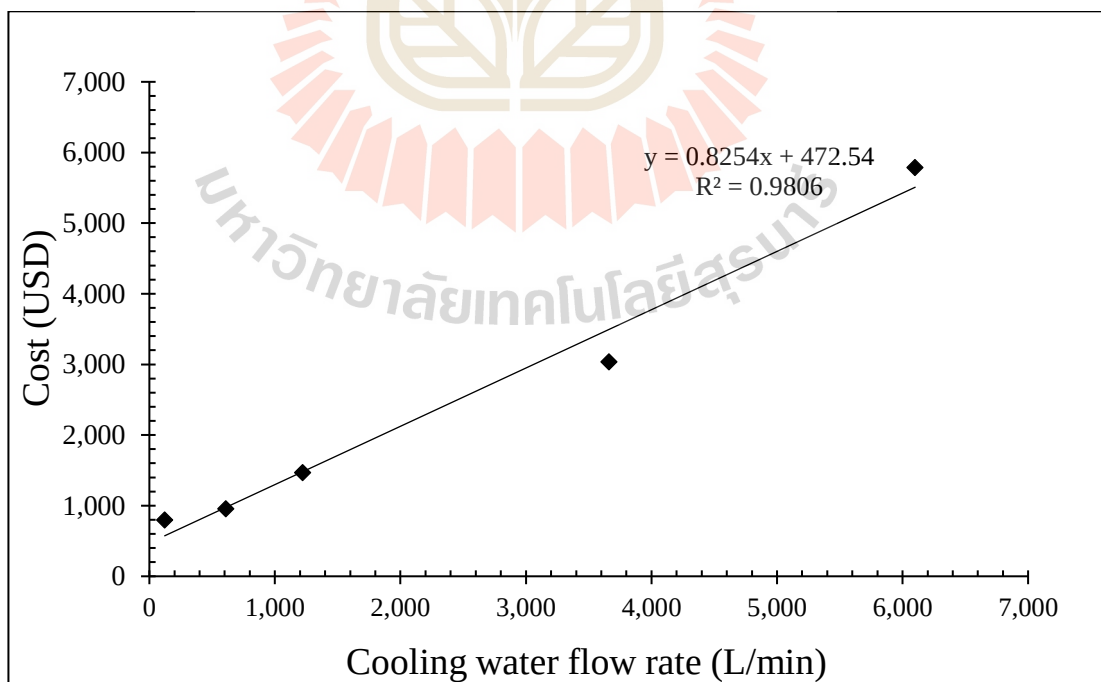
$$Z_{hf, pump} = 1.1588 \dot{V}_{hf} + 817.71 \quad (\text{ก.8})$$

$$Z_{cf, pump} = 0.8254 \dot{V}_{cf} + 472.54 \quad (\text{ก.9})$$

เมื่อ	$Z_{hf, pump}$	คือ	ราคาปั๊มน้ำร้อน, USD
	$\dot{V}_{hf}$	คือ	อัตราการไหลน้ำร้อน, l/min
	$Z_{cf, pump}$	คือ	ราคาปั๊มน้ำหล่อเย็น, USD
	$\dot{V}_{cf}$	คือ	อัตราการไหลน้ำหล่อเย็น, l/min



รูปที่ ก.10 ความสัมพันธ์อัตราการไหลน้ำร้อนเทียบกับราคาปั๊ม



รูปที่ ก.11 ความสัมพันธ์อัตราการไหลน้ำหล่อเย็นเทียบกับราคาปั๊ม

ก.6 ขนาดและราคาดังเก็บสารทำงานในโรงไฟฟ้า

การเลือกถังเก็บสารทำงานพิจารณาจากการประเมินความดันที่เกิดขึ้นในเครื่องควบแน่นที่ได้จากการออกแบบและได้สำรวจขนาดและราคา จาก บริษัท เจเอ็นเค เพาเวอร์ทูลส์ จำกัด ซึ่งมีขนาดตั้งแต่ 100 ลิตร ถึง 10000 ลิตร สามารถรับความดันได้ 10 บาร์ ดังแสดงในตารางที่ ก.9 จากข้อมูลที่ได้สามารถนำไปพิจารณาเป็นสมการความสัมพันธ์ของขนาดและราคาดังแสดงในรูปแบบที่ ก.12 ซึ่งราคาของถังเก็บสารทำงานคำนวณได้จากสมการที่ ก.10

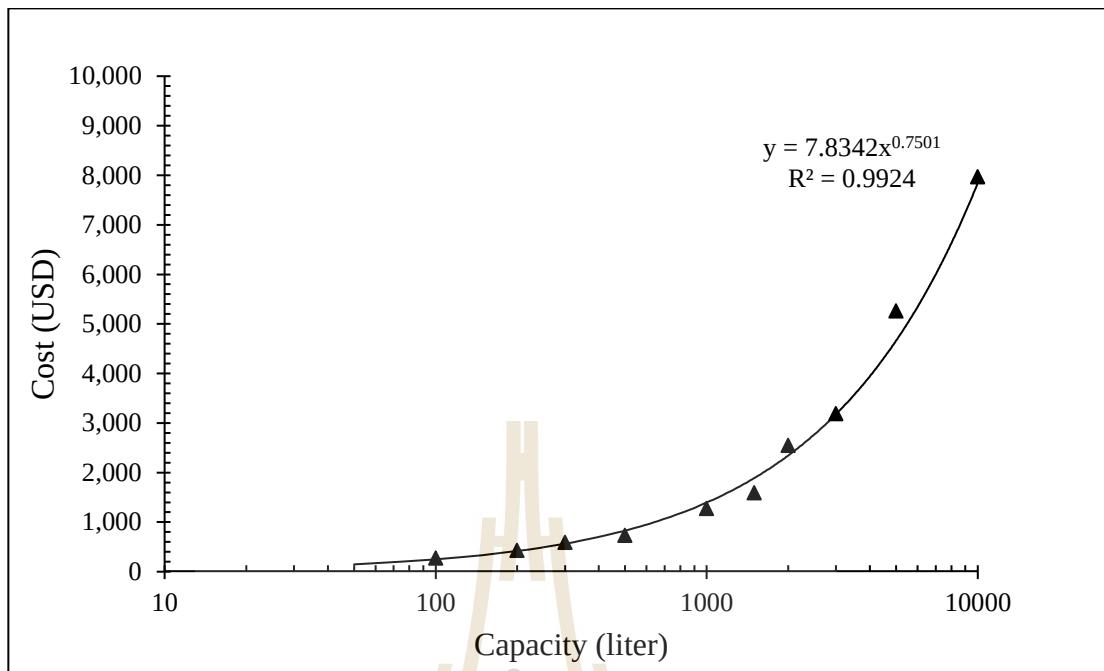
$$Z_{tank} = 7.8342 V_{tank}^{0.7501} \quad (ก.10)$$

เมื่อ Z_{tank} คือ ราคาดังเก็บสารทำงาน, USD
 V_{tank} คือ ปริมาตรถังเก็บสารทำงาน, Liter

ตารางที่ ก.9 ขนาดและราคาดังเก็บสารทำงาน บริษัท เจเอ็นเค เพาเวอร์ทูลส์

V (Liter)	Cost (Baht)	Cost (USD)*
100	8,500	270.89
200	13,500	430.24
300	18,500	589.59
500	23,000	733.00
1000	40,000	1,274.78
1500	50,000	1,593.47
2000	80,000	2,549.56
3000	100,000	3,186.95
5000	165,000	5,258.46
10000	250,000	7,967.37

หมายเหตุ : * อัตราการแลกเปลี่ยนค่าเงิน 31.378 Baht/USD ณ วันที่ 7 มิถุนายน 2562
 (ธนาคารแห่งประเทศไทย, 2562)



รูปที่ ก.12 ความสัมพันธ์ขนาดถังเก็บสารทำงานเทียบกับราคาถัง



แหล่งน้ำพุร้อนในประเทศไทย

น้ำพุร้อน เป็นปรากฏการณ์ธรรมชาติที่มีน้ำร้อนไหลขึ้นมาจากใต้ดิน ปัจจุบันประเทศไทยพบแหล่งน้ำพุร้อน 112 แหล่ง กระจายอยู่ทั่วไปตั้งแต่ทางภาคเหนือ ภาคตะวันตก ภาคกลาง และภาคใต้ ดังแสดงในตารางที่ ข.1 ทั้งนี้อุณหภูมิน้ำร้อนที่ผิวดินที่วัดได้อยู่ในช่วง 40 - 100 องศาเซลเซียส โดยทั่วไป มีการใช้ประโยชน์จากน้ำพุร้อนไม่ว่าจะใช้เป็นแหล่งท่องเที่ยว ใช้ในการบำบัดทางการแพทย์ อีกทั้งน้ำพุร้อนยังสามารถนำมาพัฒนาใช้ประโยชน์ในด้านอื่น ๆ เช่น การผลิตกระแสไฟฟ้า ด้านอุตสาหกรรม และการเกษตรกรรมอีกด้วย (กรมทรัพยากรธรณี, 2561)

ตารางที่ ข.1 แหล่งน้ำพุร้อนในประเทศไทย (กรมทรัพยากรธรณี, 2561)

ภาค	รหัสพื้นที่	แหล่งน้ำพุร้อน	หมู่บ้าน	อำเภอ	จังหวัด	T (°C)
เหนือ	KP3	อุทยานแห่งชาติแม่วังก์	อุทยานแห่งชาติแม่วังก์	คลองลาน	กำแพงเพชร	38
	KP2	โป่งน้ำร้อน	สำนักสงฆ์โป่งน้ำร้อน	คลองลาน	กำแพงเพชร	38
	KP1	พระร่วง	ลานหิน	เมือง	กำแพงเพชร	54
	PR1	ปิ่นเงิน	ปิ่นเงิน	วังชิ้น	แพร่	53
	PR4	วัดสะแล่ง	วัดสะแล่ง	ลอง	แพร่	59
	PR3	โป่งน้ำร้อน	แม่ตุ้ หมู่ 11	ลอง	แพร่	50
	MH9	แม่สุ	ห้วยหมากไฟ	แม่ลาน้อย	แม่ฮ่องสอน	78
	MH10	แม่อุ้มลองหลวง	สบแม่อุ้มลอง	แม่สะเรียง	แม่ฮ่องสอน	76
	CM5	เทพพนม	อมกุด	แม่แจ่ม	เชียงใหม่	99
	CM6	โป่งเหม็น	โป่งเหม็น	แม่แจ่ม	เชียงใหม่	70
	MH11	หนองแห้ง	หนองแห้ง	ขุนยวม	แม่ฮ่องสอน	85
	LN1	เหมืองเทพนิธิ	ตากาศ	แม่ทา	ลำพูน	42

ตารางที่ ข.1 แหล่งน้ำพุร้อนในประเทศไทย (กรมทรัพยากรธรณี, 2561) (ต่อ)

ภาค	รหัสพื้นที่	แหล่งน้ำพุร้อน	หมู่บ้าน	อำเภอ	จังหวัด	T (°C)
เหนือ	LN2	หนองหล่ม	หนองหล่ม	เมือง	ลำพูน	42
	LP2	เวียงเหนือ	เวียงเหนือ	ห้างฉัตร	ลำปาง	55
	LP4	โป่งน้ำร้อน	โป่งน้ำร้อน	เสริมงาม	ลำปาง	77
	LP3	บ้านโป่งน้ำร้อน	โป่งน้ำร้อน	เกาะคา	ลำปาง	60
	PR2	แม่จอก	แม่จอก	วังจั่น	แพร่	82
	MH1	ผาบ่อง	ผาบ่อง	เมือง	แม่ฮ่องสอน	63
	MH12	โป่งจ๊ะจา		ปาย	แม่ฮ่องสอน	43
	MH8	แม่ฮี้	แม่ฮี้	ปาย	แม่ฮ่องสอน	38
	CM8	บ้านโป่งอ่าง	โป่งอ่าง	เชียงดาว	เชียงใหม่	60
	CM7	ปิงโค้ง	ปิงโค้ง	เชียงดาว	เชียงใหม่	70
	CM12	บ้านห้วยยูง	ห้วยยูง	พร้าว	เชียงใหม่	45
	CM15	บ้านประคู้	ประคู้	พร้าว	เชียงใหม่	58
	CR6	สบโป่ง	สบโป่ง	เวียงป่าเป้า	เชียงราย	92
	CM12	หนองครก	หนองครก	พร้าว	เชียงใหม่	72
	CM3	ฝาง	โป่งน้ำร้อน	ฝาง	เชียงใหม่	99
	CR5	โป่งปู่เฟื่อง	โป่งปู่เฟื่อง	แม่สรวย	เชียงราย	72
	CR7	ห้วยทรายขาว	ห้วยทรายขาว	พาน	เชียงราย	60
	CM10	บ้านยางทุ่งโป่ง	ยางทุ่งโป่ง	เชียงดาว	เชียงใหม่	60
	MH6	แม่นะ	แม่นะ	ปาย	แม่ฮ่องสอน	40
	LP7	โป่งน้ำร้อน	ห้วยเรียน	ห้างฉัตร	ลำปาง	48
	LP5	โป่งเหม็น	แม่ตาลน้อย	ห้างฉัตร	ลำปาง	38
	CM1	สันกำแพง	โป่งฮ่อม	กแม่ออน	เชียงใหม่	99
	CM2	คอยสะเก็ด	โป่งกุ่ม	คอยสะเก็ด	เชียงใหม่	78

ตารางที่ ข.1 แหล่งน้ำพุร้อนในประเทศไทย (กรมทรัพยากรธรณี, 2561) (ต่อ)

ภาค	รหัสพื้นที่	แหล่งน้ำพุร้อน	หมู่บ้าน	อำเภอ	จังหวัด	T (°C)
เหนือ	LP1	แจ้ซ้อน	แจ้ซ้อน	กิ่งเมืองปาน	ลำปาง	78
	LP6	ห้วยน้ำร้อน	ดอกคำใต้	งาว	ลำปาง	51
	NN1	ห้วยน้ำอุ่น	ห้วยน้ำอุ่น	เวียงสา	น่าน	34
	CM11	บ้านโป่ง	โป่ง	พร้าว	เชียงใหม่	72
	CM16	มะลิกา	เมืองงาม	แม่อาว	เชียงใหม่	70
	CR2	ยางผาเคียว	โป่งยางผาเคียว	เมือง	เชียงราย	85
	CR9	นาโป่ง	แม่สลองนอก	แม่จัน	เชียงราย	45
	CR4	แม่จัน	ห้วยยาโน	แม่จัน	เชียงราย	93
	CR3	โป่งน้ำร้อน	ผาเสริฐ	เมือง	เชียงราย	80
	CR8	โป่งพระบาท	โป่งพระบาท	เมือง	เชียงราย	60
	CM14	โป่งเย็น	ห้วยมะหิน	พร้าว	เชียงใหม่	40
	CM9	บ้านโป่งโรงวัว	โป่งโรงวัว	เชียงดาว	เชียงใหม่	60
	CR1	โป่งนาคำ	โป่งนาคำ	เมือง	เชียงราย	65
	MH3	โป่งไหม้	โป่งไหม้	ปาย	แม่ฮ่องสอน	78
	MH7	เมืองแปง	เมืองแปง	ปาย	แม่ฮ่องสอน	95
	MH5	เหมืองแร่	เหมืองแร่	ปาย	แม่ฮ่องสอน	75
	MH2	โป่งสัก	ตาลเจ็ดคั่น	ปาย	แม่ฮ่องสอน	85
	MH4	โป่งปะ	ตาลเจ็ดคั่น	ปาย	แม่ฮ่องสอน	88

ตารางที่ ข.1 แหล่งน้ำพุร้อนในประเทศไทย (กรมทรัพยากรธรณี, 2561) (ต่อ)

ภาค	รหัสพื้นที่	แหล่งน้ำพุร้อน	หมู่บ้าน	อำเภอ	จังหวัด	T (°C)
เหนือ	CM4	ป่าแป๋	แม่สะละ	แม่แตง	เชียงใหม่	99
	SK2	บ่อน้ำร้อน	สุเม่น หมู่ที่ 1	ศรีสันดาลย์	สุโขทัย	50
	SK1	โป่งลำปาง	โป่งลำปาง	ศรีสันดาลย์	สุโขทัย	52
กลาง	PT1	หนองหญ้าปล้อง	ใหม่พุน้ำร้อน	หนองหญ้าปล้อง	เพชรบุรี	47
	UT1	บ้านสมอทอง	หมู่ที่ 2	ห้วยคต	อุทัยธานี	67
	PB1	บ้านน้ำร้อน	น้ำร้อน	เมือง	เพชรบูรณ์	42
	PB4	บ้านพุเตย	พุเตย	วิเชียรบุรี	เพชรบูรณ์	32
	LB1	เขาสมโขชน์	เขาสมโขชน์	ชัยบาดาล	ลพบุรี	34
	PB3	บ้านพุขาม	พุขาม	วิเชียรบุรี	เพชรบูรณ์	46
	PB2	บ้านวังขาม	วังขาม	ศรีเทพ	เพชรบูรณ์	52
ตะวันออก	CH1	บางพระ	-	ศรีราชา	ชลบุรี	-
	CN1	โป่งน้ำร้อน	โป่งน้ำร้อน	โป่งน้ำร้อน	จันทบุรี	39
ตะวันตก	RB2	บ้านพุน้ำร้อน	พุน้ำร้อน	สวนผึ้ง	ราชบุรี	50
	RB1	บ้านบ่อคลึง	บ่อคลึง	สวนผึ้ง	ราชบุรี	56
	KC6	บ้านพุน้ำร้อน	พุน้ำร้อน หมู่ 12	เมือง	กาญจนบุรี	-
	KC4	บ้านเขาพัง	เขาพัง	ไทรโยค	กาญจนบุรี	40
	KC1	ห้องช้าง	ห้องช้าง	ไทรโยค	กาญจนบุรี	0
	KC3	บ้านน้ำพุร้อน	กุยเห่	ทองผาภูมิ	กาญจนบุรี	40
	KC2	หินดาด	กุยมั่ง	ทองผาภูมิ	กาญจนบุรี	40
	KC5	บ้านต้นลำไย	ต้นลำไย	หนองปรือ	กาญจนบุรี	42
	SP1	บ้านพุน้ำร้อน	พุน้ำร้อน หมู่ 5	ด่านช้าง	สุพรรณบุรี	38
	TK5	ห้วยแม่กลอง	ห้วยแม่กลอง	อัมพาง	ตาก	-
	TK4	ห้วยแม่แล	เขาโมโกจู	อัมพาง	ตาก	-

ตารางที่ ข.1 แหล่งน้ำพุร้อนในประเทศไทย (กรมทรัพยากรธรณี, 2561) (ต่อ)

ภาค	รหัสพื้นที่	แหล่งน้ำพุร้อน	หมู่บ้าน	อำเภอ	จังหวัด	T (°C)
ตะวันตก	TK3	ห้วยน้ำนั้ก	ห้วยน้ำนั้ก	พบพระ	ตาก	58
	TK2	ห้วยโป่งร้อน	หม่องวา	แม่ระมาด	ตาก	40
	TK1	บ้านแม่กาษา	แม่กาษา	แม่สอด	ตาก	75
ใต้	YL1	ตานะแมเราะ	บ่อน้ำร้อน	เบตง	ยะลา	80
	ST1	บ้านโตนป่าหนัน	โตนป่าหนัน	ควนกาหลง	สตูล	50
	TR2	บ้านควนสระ	ควนสระ	ปะเหลียน	ตรัง	41
	PL1	เขาชัยสน	เขาชัยสน	เขาชัยสน	พัทลุง	57
	PL3	บ้านนาทุ่งโพธิ์	นาทุ่งโพธิ์	กงหรา	พัทลุง	50
	PL2	บ้านโล๊ะจังกระ	โล๊ะจังกระ	กงหรา	พัทลุง	46
	PL4	บ้านระหว่างควน	ระหว่างควน	ควนขนุน	พัทลุง	41
	TR1	อุทยานบ่อน้ำร้อน	หาดเจ้าไหม	กันตัง	ตรัง	52
	NS1	อุทยานบ่อน้ำร้อน	น้ำร้อน หมู่ 3	บางขัน	นครศรีธรรมราช	55
	KB1	บ้านห้วยยูดก	ห้วยยูดก หมู่ 1	เหนือคลอง	กระบี่	45
	KB2	คลองบ่อน้ำร้อน	ตลาดเหนือคลอง	เหนือคลอง	กระบี่	47
	KB3	บางฝั่ง	บางฝั่ง	คลองท่อม	กระบี่	45
	KB4	บ้านน้ำร้อน	น้ำร้อน หมู่ที่ 7	คลองท่อม	กระบี่	47
	KB5	น้ำตกร้อน สะพานยูง	บางคราม หมู่ 4	คลองท่อม	กระบี่	47
	PG3	บ้านบ่อदान	บ่อदान	ท้ายเหมือง	พังงา	45
	PG1	คลองปลายพู่	บางจับ	กะปง	พังงา	60
	PG2	รมณีย์	รมณีย์	กะปง	พังงา	63
	SR6	บ้านเขาน้อย	เขาน้อย หมู่ที่ 5	คีรีรัฐนิคม	สุราษฎร์ธานี	53

ตารางที่ ข.1 แหล่งน้ำพุร้อนในประเทศไทย (กรมทรัพยากรธรณี, 2561) (ต่อ)

ภาค	รหัสพื้นที่	แหล่งน้ำพุร้อน	หมู่บ้าน	อำเภอ	จังหวัด	T (°C)
ใต้	SR7	รัตนโกสัย	ท่าสะท้อน หมู่ 6	พุนพิน	สุราษฎร์ธานี	70
	SR8	บ้านเขาพลู	เขาพลู หมู่ 5	บ้านนาเค็ม	สุราษฎร์ธานี	56
	SR3	วัดธารน้ำร้อน	วัดธารน้ำร้อน	ท่าฉาง	สุราษฎร์ธานี	51
	SR4	บ้านบ่อน้ำร้อน	บ่อน้ำร้อน	กาญจนดิษฐ์	สุราษฎร์ธานี	41
	SR2	เขานางสี	เขาน้ำร้อนใน	ไชยา	สุราษฎร์ธานี	40
	SR5	บ้านวังหิน	วังหิน หมู่ที่ 5	นาสาร	สุราษฎร์ธานี	42
	CP1	ละแม	ควด	ละแม	ชุมพร	50
	RN5	ราชกรุค	กองพันทหารราบที่ 2	เมือง	ระนอง	46
	SR1	บ้านน้ำพุร้อน	น้ำพุร้อน หมู่ที่ 2	ไชยา	สุราษฎร์ธานี	45
	RN4	คลองบางรีน	ทุ่งยอ	เมือง	ระนอง	50
	RN3	บ้านพรรั้ง	พรรั้ง	เมือง	ระนอง	45
	RN2	บ้านทุ่งยอ	ทุ่งยอ	เมือง	ระนอง	40
	RN1	วัดโปธาราม	วัดโปธาราม	เมือง	ระนอง	65
	SR9	บ้านเขาตอก	สัตว์ป่าหนองทุ่งทอง	เคียนซา	สุราษฎร์ธานี	62
	RN6	ห้วยน้ำร้อน	หน่วยพิทักษ์ป่าวังน้ำเย็น	กะเปอร์	ระนอง	75

ภาคผนวก ค

ผลการจำลองโรงไฟฟ้า ORC และ TLC



ผลการคำนวณสมรรถนะของโรงไฟฟ้า ORC และ TLC

จากผลการจำลองของโรงไฟฟ้า ORC และโรงไฟฟ้า LTC โดยใช้แหล่งความร้อนใต้พิภพเป็นแหล่งพลังงานโดยมีเงื่อนไขการจำลองดังแสดงในตารางที่ ค.1 ซึ่งเป็นข้อมูลและสมมติฐานในการจำลอง ทั้งอุณหภูมิแหล่งความร้อน อัตราการไหลของน้ำร้อน อุณหภูมิน้ำหล่อเย็น และค่าอื่น ๆ เพื่อหางานสุทธิสูงสุดของสารทำงานแต่ละชนิดที่ผลิตได้

ตารางที่ ค.1 ค่าตัวแปรสำหรับการจำลองของโรงไฟฟ้า ORC และ TLC

Parameters	Value
Hot water inlet temperature ($^{\circ}\text{C}$)	100, 110, 120
Mass flow rate hot water (kg/s)	20.83
Cooling water inlet ($^{\circ}\text{C}$)	15
Cooling water outlet ($^{\circ}\text{C}$)	25
Isentropic efficiency pump	0.65
Isentropic efficiency expander	0.85
Pinch point temperature difference ($^{\circ}\text{C}$)	10
State of working fluid inlet pump	Sat. liquid
State of working fluid inlet expander	Sat. vapor /Sat. liquid*
Heat loss to environment	neglect
Pressure drop in system	neglect

หมายเหตุ : * ใช้กับ TLC

จากข้อมูลที่แสดงในตาราง ค.1 ที่ใช้จำลองในโรงไฟฟ้า ORC และ TLC ผลลัพธ์ที่ได้แสดงในตารางที่ ค.2 – ค.7 เป็นผลจำลองที่ผลิตงานสุทธิได้สูงสุด จากการจำลองการคำนวณด้วยโปรแกรม MATLAB โดยใช้ระเบียบวิธี golden section search method ที่สามารถหาค่าความดันของการระเหย ความดันของการกลั่นตัว และอัตราการไหลของสารทำงานที่เหมาะสมที่สุดสำหรับค่าอุณหภูมิแหล่งความร้อนและแหล่งทิ้งความร้อน ซึ่งโปรแกรมได้คำนวณและค้นหาสภาวะการทำงานของโรงไฟฟ้าทั้ง 2 แบบที่ให้กำลังงานสุทธิสูงสุด

ตารางที่ ค.2 ผลการจำลองโรงไฟฟ้า ORC ที่แหล่งความร้อนอุณหภูมิ 100°C

Ths = 100°C	R1234yf	R22	Propane	R134a	R227ea	R1234ze	R152a	RC318
T _{critical} (°C)	94.7	96.145	96.74	101.06	101.75	109.36	113.26	115.23
P _{critical} (bar)	33.822	49.9	42.512	40.593	29.25	36.349	45.168	27.775
m _{wf} (kg/s)	21	17	9	17	27	17.6	11	28
V _{wf} (l/s)	19.91	14.78	18.90	14.56	20.04	15.57	12.59	19.16
P _{cond} (kPa)	890.52	1354.79	1217.88	886.98	598.52	661.79	793.85	412.68
P _{evap} (kPa)	1847.92	2654.80	2341.85	1851.95	1296.36	1396.35	1564.00	907.35
Q _{in} (W)	3124629.3	2930220.8	2995392.8	3015065.0	3281860.5	3054029.5	3046097.6	3302032.2
Q _{out} (W)	2931216.6	2749545.6	2810720.7	2828475.9	3081603.3	2863121.30	2863366.3	3101979.7
W _{pump} (W)	29247.86	29496.26	32598.47	21575.17	21478.74	17572.86	14904.89	14569.01
W _{turb} (W)	222660.58	210171.53	217270.64	208164.21	221735.97	208481.02	197636.19	214621.53
W _{net} (W)	193412.71	180675.27	184672.17	186589.04	200257.23	190908.17	182731.30	200052.53
V ₃ (l/s)	181.45	136.36	160.38	173.52	243.22	226.98	217.85	335.82
V ₄ (l/s)	426.62	276.15	333.22	387.53	594.15	512.96	436.52	806.80
VFR	2.35	2.03	2.08	2.23	2.44	2.26	2.00	2.40
η _{th}	0.0619	0.0617	0.0617	0.0619	0.0610	0.0625	0.0600	0.0606
η _{E,p}	0.21	0.20	0.20	0.20	0.2179	0.21	0.20	0.22
η _{E,overall}	0.624	0.638	0.633	0.632	0.610	0.631	0.624	0.607
T _{hf,out} (K)	337.39	339.62	338.87	338.65	335.59	338.20	338.29	335.35
T _{cf,out} (K)	298.15	298.15	298.15	298.15	298.15	298.15	298.15	298.15
m _{cf} (kg/s)	70.07	65.72	67.19	67.61	73.66	68.44	68.45	74.15
UA _{cond} (W/K)	205592.11	190583.82	194824.68	196054.79	218702.01	201974.75	198475.01	220011.65
UA _{evap} (W/K)	166199.11	150259.27	157087.95	154747.02	172675.31	156726.12	151235.59	170270.58

ตารางที่ ก.2 ผลการจำลองโรงไฟฟ้า ORC ที่แหล่งความร้อนอุณหภูมิ 100°C (ต่อ)

Ths = 100°C	R236fa	Isobutane	R236ea	Butane	R245fa	R245ca	Isopentane
T _{critical} (°C)	124.92	134.66	139.29	151.98	154.01	174.42	187.2
P _{critical} (bar)	32	36.29	34.2	37.96	36.51	39.407	33.78
m _{wf} (kg/s)	19	8.5	18	8	14	13	7.4
V _{wf} (l/s)	14.319	15.79	12.89	14.25	10.67	9.54	12.23
P _{cond} (kPa)	368.19	459.74	282.46	324.58	208.83	142.88	126.48
P _{evap} (kPa)	850.38	928.12	648.13	652.72	513.78	360.98	302.12
Q _{in} (W)	2997439.72	3001216.20	3057140.34	3098719.36	2870314.13	2884747.72	2835878.21
Q _{out} (W)	2803776.65	2812846.58	2865008.07	2911942.86	2681611.02	2695616.85	2647191.07
W _{pump} (W)	10614.73	11369.03	7251.88	7189.89	5004.64	3199.42	3246.57
W _{turb} (W)	204277.80	199738.65	199384.15	193966.39	193707.75	192330.30	191990.25
W _{net} (W)	193663.07	188369.62	192132.27	186776.50	188703.11	189130.88	188687.13
V ₃ (l/s)	327.17	354.10	428.16	497.99	491.28	679.34	861.20
V ₄ (l/s)	800.66	740.58	1016.11	1014.20	1218.67	1707.09	2050.81
VFR	2.45	2.09	2.37	2.04	2.48	2.51	2.38
η _{th}	0.0646	0.0628	0.0628	0.0603	0.0657	0.0656	0.0665
η _{E,p}	0.21	0.20	0.21	0.20	0.21	0.21	0.21
η _{E,overall}	0.643	0.636	0.632	0.621	0.656	0.654	0.661
T _{hf,out} (K)	338.85	338.80	338.16	337.69	340.31	340.14	340.70
T _{cf,out} (K)	298.15	298.15	298.15	298.15	298.15	298.15	298.15
m _{cf} (kg/s)	67.02	67.24	68.48	69.61	64.10	64.44	63.28
UA _{cond} (W/K)	198744.06	198009.30	202666.86	205288.96	188833.99	190458.95	186686.75
UA _{evap} (W/K)	153206.13	150262.09	152901.05	151473.49	144009.01	143943.24	142124.51

ตารางที่ ค.3 ผลการจำลองโรงไฟฟ้า ORC ที่แหล่งความร้อนอุณหภูมิ 110°C

Ths = 110°C	R1234yf	R22	Propane	R134a	R227ea	R1234ze	R152a	RC318
T _{critical} (°C)	94.7	96.145	96.74	101.06	101.75	109.36	113.26	115.23
P _{critical} (bar)	33.822	49.9	42.512	40.593	29.25	36.349	45.168	27.775
m _{wf} (kg/s)	27	25	12	21	32	22	13	34
V _{wf} (l/s)	25.60	21.74	25.60	17.99	23.74	19.46	14.89	23.26
P _{cond} (kPa)	890.52	1354.79	1217.88	886.98	595.29	661.79	793.85	410.22
P _{evap} (kPa)	2084.06	2451.52	2466.02	2141.84	1561.26	1564.81	1811.67	1041.28
Q _{in} (W)	4039835.7	4324656.7	3997278.8	3739194.6	3997850.6	3856171.4	3616534.7	4125370.2
Q _{out} (W)	3758760.7	4085020.9	3735376.4	3471182.7	3707648.5	3584621.8	3359146.6	3839137.7
W _{pump} (W)	46849.30	36607.10	48252.01	34638.60	35192.01	26995.73	23270.64	22549.35
W _{turb} (W)	327924.26	276242.81	310154.39	302650.54	325394.10	298545.31	280658.53	308781.83
W _{net} (W)	281074.98	239635.72	261902.37	268011.93	290202.09	271549.59	257387.90	286232.48
V ₃ (l/s)	198.74	221.36	200.05	179.01	229.52	248.67	217.80	349.97
V ₄ (l/s)	547.24	410.05	442.92	475.70	714.94	642.12	512.21	996.09
VFR	2.75	1.85	2.21	2.66	3.11	2.58	2.35	2.85
η _{th}	0.070	0.055	0.066	0.072	0.073	0.070	0.071	0.069
η _{E,p}	0.249	0.212	0.232	0.237	0.2571	0.241	0.228	0.254
η _{E,overall}	0.5943	0.5270	0.5825	0.6182	0.6071	0.6073	0.6240	0.5892
T _{hf,out} (K)	336.99	333.72	337.47	340.43	337.47	339.09	341.84	336.01
T _{cf,out} (K)	298.15	298.15	298.15	298.15	298.15	298.15	298.15	298.15
m _{cf} (kg/s)	89.85	97.65	89.29	82.97	88.63	85.69	80.30	91.77
UA _{cond} (W/K)	263787.27	283153.97	263787.27	240603.78	264242.31	252692.32	232840.17	272337.26
UA _{evap} (W/K)	210517.08	196225.90	210517.08	185733.23	207529.70	188032.24	170006.00	204960.52

ตารางที่ ก.3 ผลการจำลองโรงไฟฟ้า ORC ที่แหล่งความร้อนอุณหภูมิ 110°C (ต่อ)

Ths = 110°C	R236fa	Isobutane	R236ea	Butane	R245fa	R245ca	Isopentane
T _{critical} (°C)	124.92	134.66	139.29	151.98	154.01	174.42	187.2
P _{critical} (bar)	32	36.29	34.2	37.96	36.51	39.407	33.78
m _{wf} (kg/s)	24	10	20	9	18	15	9
V _{wf} (l/s)	18.0879364	18.57070412	14.32559421	16.02539853	13.71610405	11.00192916	14.86660106
P _{cond} (kPa)	368.19	458.48	281.55	323.64	208.11	142.37	126.06
P _{evap} (kPa)	944.80	1066.67	806.77	775.35	558.64	435.70	340.92
Q _{in} (W)	3840383.18	3605463.79	3506029.92	3573872.65	3729940.54	3408950.09	3514797.81
Q _{out} (W)	3565800.51	3339865.69	3235390.63	3310782.47	3463531.29	3144147.16	3251289.06
W _{pump} (W)	16031.36	17359.62	11568.37	11130.60	7394.36	4963.75	4913.10
W _{turb} (W)	290614.02	282957.72	282207.67	274220.79	273803.62	269766.69	268421.85
W _{net} (W)	274582.67	265598.10	270639.29	263090.19	266409.26	264802.94	263508.75
V ₃ (l/s)	368.94	359.85	379.34	471.08	581.00	652.31	932.25
V ₄ (l/s)	1016.54	879.90	1145.75	1153.91	1577.68	1993.19	2519.60
VFR	2.76	2.45	3.02	2.45	2.72	3.06	2.70
η _{th}	0.07150	0.07367	0.07719	0.07361	0.07142	0.07768	0.07497
η _{E,p}	0.243	0.235	0.240	0.233	0.236	0.234	0.233
η _{E,overall}	0.6118	0.6326	0.6495	0.6343	0.6180	0.6568	0.6421
T _{hf,out} (K)	339.27	341.97	343.11	342.33	340.54	344.22	343.01
T _{cf,out} (K)	298.15	298.15	298.15	298.15	298.15	298.15	298.15
m _{cf} (kg/s)	85.24	79.84	77.34	79.14	82.79	75.16	77.72
UA _{cond} (W/K)	251636.21	235516.62	227941.60	233625.29	245103.91	222101.31	229285.70
UA _{evap} (W/K)	184869.10	170725.49	169852.54	166095.69	172908.33	160886.92	162367.73

ตารางที่ ก.4 ผลการจำลองโรงไฟฟ้า ORC ที่แหล่งความร้อนอุณหภูมิ 120°C

Ths = 120°C	R1234yf	R22	Propane	R134a	R227ea	R1234ze	R152a	RC318
T _{critical} (°C)	94.7	96.145	96.74	101.06	101.75	109.36	113.26	115.23
P _{critical} (bar)	33.822	49.9	42.512	40.593	29.25	36.349	45.168	27.775
m _{wf} (kg/s)	34	31	16	26	39	26	15	40
V _{wf} (l/s)	32.25	26.95	33.61	22.27	28.92	23.00	17.18	27.35
P _{cond} (kPa)	892.86	1354.79	1217.88	886.98	593.77	661.79	793.85	408.24
P _{evap} (kPa)	2428.85	2517.93	2400.69	2455.96	1857.08	1825.45	2157.88	1220.83
Q _{in} (W)	5078399.5	5357019.8	5327839.1	4627063.6	4966176.4	4608500.3	4182701.9	5004220.3
Q _{out} (W)	4683315.1	5048749	4989351.9	4257123	4559514.9	4238302.4	3833659.7	4610790.2
W _{pump} (W)	75879.81	48135.73	60978.22	53588.75	56035.91	41093.45	35964.48	34131.59
W _{turb} (W)	470964.14	356406.50	399465.33	423529.34	462697.39	411291.40	385006.75	427561.67
W _{net} (W)	395084.34	308270.78	338487.11	369940.59	406661.48	370197.95	349042.27	393430.07
V ₃ (l/s)	199.94	265.63	276.19	184.94	221.96	244.00	204.09	342.78
V ₄ (l/s)	681.21	506.88	591.55	583.62	878.71	759.17	584.75	1191.36
VFR	3.41	1.91	2.14	3.16	3.96	3.11	2.87	3.48
η _{th}	0.0778	0.0575	0.0635	0.0800	0.0819	0.0803	0.0834	0.0786
η _{E,p}	0.2915	0.2275	0.2498	0.2728	0.3000	0.27	0.26	0.29
η _{E,overall}	0.5744	0.4869	0.5113	0.5995	0.5932	0.6015	0.6312	0.5800
T _{hf,out} (K)	335.20	332.00	332.34	340.38	336.49	340.59	345.47	336.05
T _{cf,out} (K)	298.15	298.15	298.15	298.15	298.15	298.15	298.15	298.15
m _{cf} (kg/s)	111.95	120.68	119.26	101.76	108.99	101.31	91.64	110.22
UA _{cond} (W/K)	326828.27	349952.70	345835.57	295080.95	325119.98	298714.91	265731.16	325480.78
UA _{evap} (W/K)	275546.60	230838.23	248705.33	227397.32	264043.83	219474.18	192326.55	247418.11

ตารางที่ ก.4 ผลการจำลองโรงไฟฟ้า ORC ที่แหล่งความร้อนอุณหภูมิ 120°C (ต่อ)

Ths = 120°C	R236fa	Isobutane	R236ea	Butane	R245fa	R245ca	Isopentane
T _{critical} (°C)	124.92	134.66	139.29	151.98	154.01	174.42	187.2
P _{critical} (bar)	32	36.29	34.2	37.96	36.51	39.407	33.78
m _{wf} (kg/s)	27	12	26	10	19	19	11
V _{wf} (l/s)	20.34	22.28	18.62	17.80	14.48	13.94	18.17
P _{cond} (kPa)	365.90	457.23	280.64	322.70	207.40	142.37	125.65
P _{evap} (kPa)	1151.63	1194.92	841.55	928.54	725.17	465.15	372.71
Q _{in} (W)	4438349.43	4399814.45	4587902.17	4074877.40	4064206.09	4353284.47	4357312.71
Q _{out} (W)	4065401.05	4038405.82	4220924.79	3721193.26	3706831.00	3997601.21	4004029.77
W _{pump} (W)	24555.15	25255.97	16056.31	16580.48	11524.69	6918.69	6903.50
W _{turb} (W)	397503.52	386664.61	383033.69	370264.63	368899.78	362601.95	360186.45
W _{net} (W)	372948.38	361408.63	366977.37	353684.14	357375.09	355683.25	353282.94
V ₃ (l/s)	333.32	382.23	471.76	435.03	471.00	774.80	1045.12
V ₄ (l/s)	1161.45	1064.93	1497.63	1297.58	1689.88	2532.31	3105.66
VFR	3.48	2.79	3.17	2.98	3.59	3.27	2.97
η _{th}	0.0840	0.0821	0.0800	0.0868	0.0879	0.0817	0.0811
η _{E,p}	0.27	0.27	0.27	0.26	0.26	0.26	0.26
η _{E,overall}	0.6210	0.6167	0.6013	0.6465	0.6504	0.6175	0.6153
T _{hf,out} (K)	342.54	342.98	340.83	346.71	346.83	343.52	343.47
T _{cf,out} (K)	298.15	298.15	298.15	298.15	298.15	298.15	298.15
m _{cf} (kg/s)	97.18	96.53	100.90	88.95	88.61	95.56	95.71
UA _{cond} (W/K)	288507.77	285452.61	298795.52	262441.34	261766.33	281513.82	282807.72
UA _{evap} (W/K)	207958.20	200704.84	207242.83	183690.13	184657.13	190626.36	188345.96

ตารางที่ ค.5 ผลการจำลองโรงไฟฟ้า TLC ที่แหล่งความร้อนอุณหภูมิ 100°C

Ths = 100°C	R1234yf	R22	Propane	R134a	R227ea	R1234ze	R152a	RC318
T _{critical} (°C)	94.7	96.145	96.74	101.06	101.75	109.36	113.26	115.23
P _{critical} (bar)	33.822	49.9	42.512	40.593	29.25	36.349	45.168	27.775
m _{wf} (kg/s)	67	133	47	70	66	57	49	72
V _{wf} (l/s)	63.57	115.65	98.72	59.96	49.11	50.47	56.11	49.42
P _{cond} (kPa)	895.21	1354.79	1217.88	886.98	610.79	667.41	793.85	425.15
P _{evap} (kPa)	2485.92	2506.90	2506.52	2498.61	2161.19	2345.49	2496.77	1604.09
Q _{in} (W)	4644036.8	4685771.6	4661183.6	4666969.5	4557392.4	4567436.3	4662828.4	4634895.8
Q _{out} (W)	4428962.0	4602508.6	4530686.7	4462246.8	4291334.5	4306553.1	4427445.2	4354001.4
W _{pump} (W)	154889.22	204563.48	195101.55	148186.74	116675.79	129915.34	146595.91	89416.44
W _{turb} (W)	369963.99	287826.54	325598.36	352909.41	382733.64	390798.46	381979.05	370310.85
W _{net} (W)	215074.77	83263.06	130496.81	204722.66	266057.85	260883.12	235383.15	280894.41
V ₃ (l/s)	82.25	130.14	115.24	73.97	65.23	64.34	68.83	61.72
V ₄ (l/s)	676.13	553.15	605.37	648.35	850.32	794.26	711.59	1170.51
VFR	8.22	4.25	5.25	8.77	13.03	12.35	10.34	18.97
η _{th}	0.0463	0.0178	0.0280	0.0439	0.0584	0.0571	0.0505	0.0606
η _{E,p}	0.2343	0.0907	0.1422	0.2230	0.2898	0.2842	0.2564	0.3060
η _{E,overall}	0.4717	0.3268	0.3796	0.4586	0.5342	0.5277	0.4918	0.5430
T _{hf,out} (K)	319.95	319.47	319.75	319.69	320.95	320.83	319.74	320.06
T _{cf,out} (K)	298.15	298.15	298.15	298.15	298.15	298.15	298.15	298.15
m _{cf} (kg/s)	105.87	110.02	108.30	106.66	102.58	102.94	105.83	104.08
UA _{cond} (W/K)	306991.65	319023.72	314043.87	309300.07	297453.05	298508.11	306889.57	301795.86
UA _{evap} (W/K)	345961.54	225545.93	257055.75	322975.75	428891.84	432103.36	384256.72	444626.63

ตารางที่ ค.5 ผลการจำลองโรงไฟฟ้า TLC ที่แหล่งความร้อนอุณหภูมิ 100°C (ต่อ)

Ths = 100°C	R236fa	Isobutane	R236ea	Butane	R245fa	R245ca	Isopentane	Water
T _{critical} (°C)	124.92	134.66	139.29	151.98	154.01	174.42	187.2	373.95
P _{critical} (bar)	32	36.29	34.2	37.96	36.51	39.407	33.78	220.64
m _{wf} (kg/s)	65	32	66	33	62	60	35	21
V _{wf} (l/s)	49.07	59.50	47.35	58.82	47.30	44.06	57.88	21.13
P _{cond} (kPa)	375.11	464.77	288.00	328.36	211.72	145.46	128.99	5.63
P _{evap} (kPa)	1515.73	1598.06	1225.65	1209.37	979.87	725.86	567.71	69.09
Q _{in} (W)	4630864.8	4589607.5	4703273.4	4677804.8	4703894.4	4710710.5	4684789.6	4800122.7
Q _{out} (W)	4347977.0	4315472.4	4411307.0	4391832.0	4406186.9	4404832.2	4379969.4	4476991.9
W _{pump} (W)	85950.03	103553.27	68233.02	79642.85	55851.11	39322.91	39052.00	2062.64
W _{turb} (W)	368837.92	377688.42	360199.35	365615.67	353558.61	345201.21	343872.18	325193.38
W _{net} (W)	282887.88	274135.15	291966.34	285972.83	297707.50	305878.30	304820.18	323130.74
V ₃ (l/s)	59.69	70.52	55.76	67.75	54.50	49.74	64.54	21.75
V ₄ (l/s)	1263.58	1167.88	1587.55	1559.80	2018.61	2796.11	3421.02	46692.11
VFR	21.17	16.56	28.47	23.02	37.04	56.22	53.01	2146.88
η _{th}	0.0611	0.0597	0.0621	0.0611	0.0633	0.0649	0.0651	0.0673
η _{E,p}	0.3082	0.2986	0.3181	0.3115	0.3243	0.3332	0.3321	0.3521
η _{E,overall}	0.5455	0.5399	0.5488	0.5446	0.5549	0.5630	0.5642	0.5738
T _{hf,out} (K)	320.10	320.58	319.27	319.56	319.26	319.19	319.48	318.16
T _{cf,out} (K)	298.15	298.15	298.15	298.15	298.15	298.15	298.15	298.15
m _{cf} (kg/s)	103.93	103.16	105.45	104.98	105.32	105.29	104.70	107.02
UA _{cond} (W/K)	301381.70	299128.78	305770.79	304418.76	305414.09	305321.52	303604.46	310349.31
UA _{evap} (W/K)	446415.44	440067.74	456426.13	450744.52	457578.08	462039.85	455052.80	471935.27

ตารางที่ ก.6 ผลการจำลองโรงไฟฟ้า TLC ที่แหล่งความร้อนอุณหภูมิ 110°C

Ths = 110°C	R1234yf	R22	Propane	R134a	R227ea	R1234ze	R152a	RC318
T _{critical} (°C)	94.7	96.145	96.74	101.06	101.75	109.36	113.26	115.23
P _{critical} (bar)	33.822	49.9	42.512	40.593	29.25	36.349	45.168	27.775
m _{wf} (kg/s)	79	158	56	83	67	65	58	71
V _{wf} (l/s)	74.96	137.38	117.62	71.09	49.85	57.56	66.41	48.74
P _{cond} (kPa)	895.21	1354.79	1217.88	886.98	610.79	667.41	793.85	425.15
P _{evap} (kPa)	2502.10	2506.73	2503.26	2503.32	2502.53	2483.78	2505.92	1932.73
Q _{in} (W)	5522515.3	5565838.5	5541575.7	5546626.4	5430357.2	5532829.8	5542137.0	5449667.5
Q _{out} (W)	5264393.1	5466959.9	5386906.9	5302699.3	5061274.4	5197574.4	5261168.4	5061321.8
W _{pump} (W)	184480.69	242979.28	231875.64	176219.28	144400.30	160319.47	174451.62	112678.48
W _{turb} (W)	442602.87	341857.90	386544.44	420146.35	513483.04	495574.85	455420.16	501024.23
W _{net} (W)	258122.18	98878.62	154668.80	243927.07	369082.74	335255.38	280968.54	388345.76
V ₃ (l/s)	97.30	154.60	137.25	87.77	72.66	75.06	81.57	65.15
V ₄ (l/s)	803.06	657.06	720.03	770.31	994.82	955.24	845.33	1351.95
VFR	8.25	4.25	5.25	8.78	13.69	12.73	10.36	20.75
η _{th}	0.0467	0.0178	0.0279	0.0440	0.0680	0.0606	0.0507	0.0713
η _{E,p}	0.2291	0.0878	0.1373	0.2165	0.3276	0.2976	0.2494	0.3447
η _{E,overall}	0.4354	0.2933	0.3437	0.4212	0.5390	0.5019	0.4539	0.5544
T _{hf,out} (K)	319.97	319.47	319.75	319.69	321.03	319.85	319.74	320.81
T _{cf,out} (K)	298.15	298.15	298.15	298.15	298.15	298.15	298.15	298.15
m _{cf} (kg/s)	125.84	130.68	128.77	126.75	120.98	124.24	125.76	120.98
UA _{cond} (W/K)	364899.21	378943.32	373392.64	367554.70	350821.29	360269.12	364679.32	350823.49
UA _{evap} (W/K)	323145.42	231544.46	256816.59	305907.94	493390.76	427724.49	345695.65	512295.85

ตารางที่ ก.6 ผลการจำลองโรงไฟฟ้า TLC ที่แหล่งความร้อนอุณหภูมิ 110°C (ต่อ)

Ths = 110°C	R236fa	Isobutane	R236ea	Butane	R245fa	R245ca	Isopentane	Water
T _{critical} (°C)	124.92	134.66	139.29	151.98	154.01	174.42	187.2	373.95
P _{critical} (bar)	32	36.29	34.2	37.96	36.51	39.407	33.78	220.64
m _{wf} (kg/s)	65	32	65	32	62	60	35	21
V _{wf} (l/s)	49.07	59.50	46.64	57.04	47.30	44.06	57.88	21.13
P _{cond} (kPa)	375.11	464.77	288.00	328.36	211.72	145.46	128.99	5.63
P _{evap} (kPa)	1834.16	1893.87	1515.29	1478.00	1211.55	911.02	698.79	99.77
Q _{in} (W)	5481332.7	5439126.0	5527102.7	5462230.1	5567168.5	5577984.4	5553732.1	5679681.1
Q _{out} (W)	5090611.4	5058634.8	5124598.7	5066977.2	5157788.4	5157328.6	5134482.2	5235860.4
W _{pump} (W)	109891.41	130522.05	87926.86	100743.57	72680.27	51860.38	50713.59	3059.89
W _{turb} (W)	500612.67	511013.23	490430.86	495996.45	482060.33	472516.18	469963.49	446880.59
W _{net} (W)	390721.26	380491.19	402504.00	395252.87	409380.06	420655.79	419249.89	443820.70
V ₃ (l/s)	62.86	73.49	57.27	68.08	56.30	51.08	66.04	21.91
V ₄ (l/s)	1471.02	1358.75	1835.88	1788.76	2354.88	3266.22	4000.37	54603.03
VFR	23.40	18.49	32.06	26.28	41.83	63.94	60.58	2492.70
η _{th}	0.0713	0.0700	0.0728	0.0724	0.0735	0.0754	0.0755	0.0781
η _{E,p}	0.3468	0.3377	0.3573	0.3508	0.3634	0.3734	0.3721	0.3940
η _{E,overall}	0.5541	0.5483	0.5610	0.5595	0.5641	0.5732	0.5737	0.5863
T _{hf,out} (K)	320.44	320.93	319.92	320.66	319.46	319.33	319.61	318.16
T _{cf,out} (K)	298.15	298.15	298.15	298.15	298.15	298.15	298.15	298.15
m _{cf} (kg/s)	121.69	120.92	122.50	121.12	123.29	123.28	122.73	125.16
UA _{cond} (W/K)	352857.70	350637.71	355212.77	351213.86	357511.22	357471.44	355904.71	362954.79
UA _{evap} (W/K)	518626.54	511815.54	529962.06	519955.92	533060.66	542896.46	532847.17	557125.74

ตารางที่ ก.7 ผลการจำลองโรงไฟฟ้า TLC ที่แหล่งความร้อนอุณหภูมิ 120°C

Ths = 120°C	R1234yf	R22	Propane	R134a	R227ea	R1234ze	R152a	RC318
T _{critical} (°C)	94.7	96.145	96.74	101.06	101.75	109.36	113.26	115.23
P _{critical} (bar)	33.822	49.9	42.512	40.593	29.25	36.349	45.168	27.775
m _{wf} (kg/s)	92	184	65	96	79	75	68	71
V _{wf} (l/s)	87.29	159.99	136.52	82.23	58.78	66.41	77.86	48.74
P _{cond} (kPa)	895.21	1354.79	1217.88	886.98	610.79	667.41	793.85	425.15
P _{evap} (kPa)	2494.68	2500.16	2501.58	2507.73	2503.13	2495.31	2481.90	2263.43
Q _{in} (W)	6406351.8	6449591.4	6424884.2	6429384.2	6404668.1	6415024.2	6427190.6	6298458.6
Q _{out} (W)	6108175.0	6336022.9	6245846.9	6145965.9	5969257.0	6024483.2	6105005.6	5787978.3
W _{pump} (W)	213850.74	281351.78	268790.15	204374.77	170316.59	186154.43	201666.65	137302.97
W _{turb} (W)	512027.58	394920.22	447827.45	487793.04	605727.71	576695.41	523851.65	647783.25
W _{net} (W)	298176.84	113568.44	179037.30	283418.27	435411.12	390540.98	322185.00	510480.28
V ₃ (l/s)	113.14	179.92	159.28	101.57	85.69	86.77	95.35	71.01
V ₄ (l/s)	932.10	762.28	834.98	892.64	1173.27	1106.91	981.71	1539.05
VFR	8.24	4.24	5.24	8.79	13.69	12.76	10.30	21.67
η _{th}	0.0465	0.0176	0.0279	0.0441	0.0680	0.0609	0.0501	0.0810
η _{E,p}	0.2204	0.0839	0.1323	0.2095	0.3218	0.2887	0.2381	0.3773
η _{E,overall}	0.4027	0.2660	0.3151	0.3906	0.5026	0.4693	0.4189	0.5637
T _{hf,out} (K)	319.96	319.46	319.75	319.70	319.98	319.86	319.72	321.20
T _{cf,out} (K)	298.15	298.15	298.15	298.15	298.15	298.15	298.15	298.15
m _{cf} (kg/s)	146.01	151.46	149.30	146.91	142.69	144.01	145.93	138.35
UA _{cond} (W/K)	423385.59	439178.79	432929.93	426005.42	413755.59	417588.27	423170.13	401191.40
UA _{evap} (W/K)	310574.38	237337.70	259065.37	298853.05	440301.76	384363.64	324853.92	576484.00

ตารางที่ ก.7 ผลการจำลองโรงไฟฟ้า TLC ที่แหล่งความร้อนอุณหภูมิ 120°C (ต่อ)

Ths = 120°C	R236fa	Isobutane	R236ea	Butane	R245fa	R245ca	Isopentane	Water
T _{critical} (°C)	124.92	134.66	139.29	151.98	154.01	174.42	187.2	373.95
P _{critical} (bar)	32	36.29	34.2	37.96	36.51	39.407	33.78	220.64
m _{wf} (kg/s)	64	32	65	32	61	60	35	21
V _{wf} (l/s)	48.31	59.50	46.64	57.04	46.53	44.06	57.88	21.13
P _{cond} (kPa)	375.11	464.77	288.00	328.36	211.72	145.46	128.99	5.63
P _{evap} (kPa)	2201.51	2211.80	1825.50	1753.11	1494.29	1125.45	847.49	141.02
Q _{in} (W)	6287341.7	6289305.9	6385019.2	6319471.5	6389160.4	6446316.1	6424210.6	6562277.9
Q _{out} (W)	5774330.3	5788138.3	5857397.0	5799869.1	5852449.6	5895553.7	5875415.5	5980885.7
W _{pump} (W)	135366.38	159481.92	110111.51	124809.78	91704.48	66375.30	63939.05	4400.45
W _{turb} (W)	648377.75	660649.55	637733.66	644412.17	628415.25	617137.70	612734.18	585792.66
W _{net} (W)	513011.37	501167.63	527622.15	519602.40	536710.78	550762.40	548795.13	581392.21
V ₃ (l/s)	66.13	77.03	59.96	70.58	57.55	52.58	67.66	22.07
V ₄ (l/s)	1661.25	1546.11	2091.73	2039.23	2664.90	3727.45	4569.29	62369.65
VFR	25.12	20.07	34.89	28.89	46.30	70.89	67.53	2825.41
η _{th}	0.0816	0.0797	0.0826	0.0822	0.0840	0.0854	0.0854	0.0886
η _{E,p}	0.3791	0.3704	0.3900	0.3840	0.3967	0.4071	0.4056	0.4298
η _{E,overall}	0.5662	0.5575	0.5708	0.5690	0.5771	0.5839	0.5838	0.5993
T _{hf,out} (K)	321.33	321.31	320.21	320.96	320.16	319.50	319.76	318.17
T _{cf,out} (K)	298.15	298.15	298.15	298.15	298.15	298.15	298.15	298.15
m _{cf} (kg/s)	138.03	138.36	140.01	138.64	139.90	140.93	140.44	142.97
UA _{cond} (W/K)	400249.94	401204.63	406006.86	402013.73	405661.54	408640.25	407263.66	414600.65
UA _{evap} (W/K)	581714.55	577177.07	600408.89	590717.50	604519.05	620148.70	605691.32	642635.41

ภาคผนวก ง

ผลการวิเคราะห์เศรษฐศาสตร์โรงไฟฟ้า ORC และ TLC



ผลคำนวณราคาอุปกรณ์ของโรงไฟฟ้าและต้นทุนการผลิตไฟฟ้า

ในภาคผนวก ง. ที่แสดงผลการการคำนวณต้นทุนการผลิตไฟฟ้า (levelized cost of electricity, LCOE) ของโรงไฟฟ้า ORC และ TLC รวมถึงแสดงผลการคำนวณราคาของอุปกรณ์ในโรงไฟฟ้า ทั้ง 2 ประเภท ซึ่งการคำนวณในแต่ละอุปกรณ์ได้จากการสำรวจราคาของอุปกรณ์ของโรงไฟฟ้าที่ได้ทำการออกแบบและนำมาหาความสัมพันธ์ของขนาดและอุปกรณ์ ซึ่งแสดงไว้ใน ภาคผนวก ก. ได้ผลดังแสดงในตาราง ง.1 – ง.6

ตารางที่ ง.1 ผลการคำนวณราคาอุปกรณ์ในโรงไฟฟ้า ORC ที่ใช้แหล่งความร้อนอุณหภูมิ 100°C

Equipment cost (USD)	R1234yf	R22	Propane	R134a	R227ea	R1234ze	R152a	RC318
Condenser	71038.67	71016.77	68726.69	69068.63	73896.77	69734.58	69739.29	74281.77
Evaporator	68298.92	68021.29	65839.55	66214.67	71275.69	66956.86	66805.86	71656.42
Generator	5756.09	5463.73	5647.65	5464.45	5737.48	5470.82	5252.64	5594.36
Working fluid pump	6275.48	5334.49	6053.06	5093.58	6304.59	5316.69	4659.21	6110.53
Storage tank	563.77	502.42	549.48	486.32	565.64	501.24	456.81	553.19
Expander	95899.89	67104.72	75593.40	87400.95	132326.07	114673.26	98053.09	178559.50
Working fluid	945.00	640.80	270.00	994.50	3024.00	4576.00	386.10	2520.00
Hot water pump	2265.98	2265.98	2265.98	2265.98	2265.98	2265.98	2265.98	2265.98
Cooling water pump	3942.55	3941.20	3799.91	3820.93	4120.58	3861.94	3862.23	4144.70
Pipe system	25404.14	22365.06	22847.57	23981.55	29649.28	26878.14	25109.51	34316.64
Electrical and control	25404.14	22365.06	22847.57	23981.55	29649.28	26878.14	25109.51	34316.64
Total	305794.62	269021.51	274440.85	288773.10	358815.36	327113.64	301700.23	414319.73
LCOE (USD/kWh)	0.0401	0.0396	0.0392	0.0403	0.0446	0.0434	0.0426	0.0503
LCOE (Baht/kWh)*	1.28	1.24	1.23	1.27	1.40	1.36	1.34	1.58

หมายเหตุ : * อัตราการแลกเปลี่ยนค่าเงิน 31.378 Baht/USD ณ วันที่ 7 มิถุนายน 2562 (ธนาคารแห่งประเทศไทย, 2562)

ตารางที่ ง.1 ผลการคำนวณราคาอุปกรณ์ในโรงไฟฟ้า ORC ที่ใช้แหล่งความร้อนอุณหภูมิ 100°C (ต่อ)

Equipment cost (USD)	R236fa	Isobutane	R236ea	Butane	R245fa	R245ca	Isopentane
Condenser	68592.83	68767.65	69770.80	70670.20	66226.51	66498.92	65555.81
Evaporator	65878.60	65950.62	67016.06	67806.79	63447.93	63724.50	62787.45
Generator	5386.26	5294.94	5287.81	5178.82	5173.61	5145.90	5139.06
Working fluid pump	5040.25	5364.90	4725.72	5024.39	4233.94	3983.47	4577.61
Storage tank	482.73	504.44	461.37	481.66	427.30	409.60	451.20
Expander	177226.46	164162.06	224070.30	223653.81	268110.36	374303.43	449036.67
Working fluid	1425.00	397.80	3528.00	272.00	1904.00	1768.00	210.90
Hot water pump	2265.98	2265.98	2265.98	2265.98	2265.98	2265.98	2265.98
Cooling water pump	3791.69	3802.42	3864.17	3919.74	3647.07	3663.65	3606.32
Pipe system	32866.48	31611.30	37746.22	37900.14	41353.27	51999.55	59342.01
Electrical and control	32866.48	31611.30	37746.22	37900.14	41353.27	51999.55	59342.01
Total	395822.75	379733.43	456482.66	455073.66	498143.23	625762.54	712315.01
LCOE (USD/kWh)	0.0500	0.0497	0.0568	0.0583	0.0623	0.0758	0.0852
LCOE (Baht/kWh)*	1.57	1.56	1.78	1.83	2.38	2.38	3.67

หมายเหตุ : * อัตราการแลกเปลี่ยนค่าเงิน 31.378 Baht/USD ณ วันที่ 7 มิถุนายน 2562 (ธนาคารแห่งประเทศไทย, 2562)

ตารางที่ ๖.2 ผลการคำนวณราคาอุปกรณ์ในโรงไฟฟ้า ORC ที่ใช้แหล่งความร้อนอุณหภูมิ 110°C

Equipment cost (USD)	R1234yf	R22	Propane	R134a	R227ea	R1234ze	R152a	RC318
Condenser	86431.61	92300.04	86007.03	81170.85	85502.88	83256.43	79097.15	87886.83
Evaporator	85414.81	90647.54	84629.44	79845.97	84640.00	82018.55	77559.59	86990.50
Generator	7873.78	6834.05	7516.29	7365.32	7822.88	7282.73	6922.89	7488.67
Working fluid pump	7532.40	6679.35	7445.32	5850.60	7121.33	6176.80	5165.19	7014.88
Storage tank	642.43	589.42	637.09	536.36	617.08	557.45	491.12	610.46
Expander	122126.06	92298.35	99445.42	106572.03	158588.09	142754.43	114510.02	219716.38
Working fluid	1215.00	890.00	360.00	1228.50	3584.00	5720.00	456.30	3060.00
Hot water pump	2265.98	2265.98	2265.98	2265.98	2265.98	2265.98	2265.98	2265.98
Cooling water pump	4922.21	5308.44	4894.53	4581.77	4861.70	4716.06	4449.14	5017.36
Pipe system	31720.93	29692.32	29284.11	28818.89	35141.99	32902.84	29046.11	41699.11
Electrical and control	31720.93	29692.32	29284.11	28818.89	35141.99	32902.84	29046.11	41699.11
Total	381866.14	357197.81	351769.32	347055.15	425287.92	400554.11	349009.59	503449.28
LCOE (USD/kWh)	0.0335	0.0372	0.0336	0.0325	0.0354	0.0360	0.0340	0.0414
LCOE (Baht/kWh)*	1.05	1.17	1.05	1.02	1.11	1.13	1.07	1.30

หมายเหตุ : * อัตราการแลกเปลี่ยนค่าเงิน 31.378 Baht/USD ณ วันที่ 7 มิถุนายน 2562 (ธนาคารแห่งประเทศไทย, 2562)

ตารางที่ ง.2 ผลการคำนวณราคาอุปกรณ์ในโรงไฟฟ้า ORC ที่ใช้แหล่งความร้อนอุณหภูมิ 110°C (ต่อ)

Equipment cost (USD)	R236fa	Isobutane	R236ea	Butane	R245fa	R245ca	Isopentane
Condenser	82911.36	78738.83	76789.76	78197.55	81029.67	75076.85	77087.19
Evaporator	81725.76	77352.80	75492.28	76762.33	79673.77	73670.07	75656.58
Generator	7123.17	6969.14	6954.05	6793.37	6784.98	6703.77	6676.71
Working fluid pump	5872.88	5979.55	5041.57	5417.15	4906.90	4307.19	5161.11
Storage tank	537.81	544.73	482.82	507.91	473.71	432.44	490.85
Expander	224163.48	194454.79	252255.52	254031.03	346166.58	436508.55	550963.27
Working fluid	1800.00	468.00	3920.00	306.00	2232.00	2040.00	2265.98
Hot water pump	2265.98	2265.98	2265.98	2265.98	2265.98	2265.98	2265.98
Cooling water pump	4693.78	4426.32	4302.64	4391.89	4572.71	4194.62	4321.46
Pipe system	40929.42	37073.21	42358.46	42836.72	52587.43	60315.95	72262.31
Electrical and control	40929.42	37073.21	42358.46	42836.72	52587.43	60315.95	72262.31
Total	492953.06	445346.56	512221.55	514346.65	633281.17	725831.36	869413.76
LCOE (USD/kWh)	0.0424	0.0402	0.0445	0.0459	0.0544	0.0618	0.0729
LCOE (Baht/kWh)*	1.33	1.26	1.40	1.44	1.71	1.94	2.29

หมายเหตุ : * อัตราการแลกเปลี่ยนค่าเงิน 31.378 Baht/USD ณ วันที่ 7 มิถุนายน 2562 (ธนาคารแห่งประเทศไทย, 2562)

ตารางที่ 3.3 ผลการคำนวณราคาอุปกรณ์ในโรงไฟฟ้า ORC ที่ใช้แหล่งความร้อนอุณหภูมิต่ำ 120°C

Equipment cost (USD)	R1234yf	R22	Propane	R134a	R227ea	R1234ze	R152a	RC318
Condenser	102816.93	109102.22	108087.22	95356.16	100664.82	95023.22	87787.85	101557.63
Evaporator	104314.75	109306.99	108785.55	96160.90	102295.27	95823.66	88044.58	102980.45
Generator	10751.46	8446.79	9313.04	9797.16	10585.15	9550.96	9022.17	9878.29
Working fluid pump	9001.46	7832.09	9301.66	6796.86	8266.78	6958.71	5671.18	7918.86
Storage tank	730.48	660.70	748.03	596.82	686.91	606.95	524.65	665.96
Expander	151254.55	113350.59	131761.12	130035.79	194195.77	168205.54	130282.35	262171.72
Working fluid	1530.00	1103.60	480.00	1521.00	4368.00	6760.00	526.50	3600.00
Hot water pump	2265.98	2265.98	2265.98	2265.98	2265.98	2265.98	2265.98	2265.98
Cooling water pump	6016.71	6449.32	6379.00	5512.18	5870.15	5489.90	5010.88	5930.85
Pipe system	38715.23	35741.47	37664.16	34652.19	42483.08	38392.49	32860.96	49336.97
Electrical and control	38715.23	35741.47	37664.16	34652.19	42483.08	38392.49	32860.96	49336.97
Total	466112.77	430001.21	452449.92	417347.23	514165.01	467469.90	394858.06	595643.69
LCOE (USD/kWh)	0.0281	0.0337	0.0320	0.0274	0.0297	0.0301	0.0277	0.0349
LCOE (Baht/kWh)*	0.88	1.06	1.00	0.86	0.93	0.94	0.87	1.10

หมายเหตุ : * อัตราการแลกเปลี่ยนค่าเงิน 31.378 Baht/USD ณ วันที่ 7 มิถุนายน 2562 (ธนาคารแห่งประเทศไทย, 2562)

ตารางที่ 3.3 ผลการคำนวณราคาอุปกรณ์ในโรงไฟฟ้า ORC ที่ใช้แหล่งความร้อนอุณหภูมิ 120°C (ต่อ)

Equipment cost (USD)	R236fa	Isobutane	R236ea	Butane	R245fa	R245ca	Isopentane
Condenser	91949.96	91467.70	94715.53	85749.25	85488.00	90737.48	90852.62
Evaporator	92725.30	92021.74	95449.28	86060.79	85864.14	91171.29	91244.96
Generator	9273.58	9055.52	8982.47	8725.58	8698.13	8571.43	8522.83
Working fluid pump	6370.03	6799.00	5990.18	5809.74	5074.59	4955.44	5890.38
Storage tank	569.81	596.95	545.42	533.70	485.04	477.00	538.95
Expander	255669.57	234683.74	328762.54	285268.43	370561.98	553725.07	678386.03
Working fluid	2025.00	561.60	5096.00	340.00	2356.00	2584.00	313.50
Hot water pump	2265.98	2265.98	2265.98	2265.98	2265.98	2265.98	2265.98
Cooling water pump	5285.22	5253.26	5469.33	4877.74	4860.74	5204.95	5212.56
Pipe system	46410.94	44214.39	54218.07	47929.12	56329.86	75710.86	88291.43
Electrical and control	46410.94	44214.39	54218.07	47929.12	56329.86	75710.86	88291.43
Total	558956.31	531134.27	655712.87	575489.46	678314.30	911114.36	1059810.68
LCOE (USD/kWh)	0.0348	0.0344	0.0407	0.0377	0.0431	0.0565	0.0654
LCOE (Baht/kWh)*	1.09	1.08	1.28	1.18	1.35	1.77	2.05

หมายเหตุ : * อัตราการแลกเปลี่ยนค่าเงิน 31.378 Baht/USD ณ วันที่ 7 มิถุนายน 2562 (ธนาคารแห่งประเทศไทย, 2562)

ตารางที่ ๓.4 ผลการคำนวณราคาอุปกรณ์ในโรงไฟฟ้า TLC ที่ใช้แหล่งความร้อนอุณหภูมิ 100°C

Equipment cost (USD)	R1234yf	R22	Propane	R134a	R227ea	R1234ze	R152a	RC318
Condenser	98382.14	101413.57	100161.95	98965.43	95960.60	96229.15	98355.54	97065.18
Evaporator	96469.12	97226.44	96780.36	96885.35	94894.39	95077.11	96810.21	96303.14
Generator	8719.54	7067.09	7826.99	8376.43	8976.44	9138.68	8961.25	8726.51
Working fluid pump	15922.35	27428.64	23688.35	15124.01	12726.92	13028.86	14272.97	12796.15
Storage tank	1107.41	1654.49	1484.31	1066.36	939.74	955.99	1022.01	943.47
Expander	150149.46	123411.38	134766.01	144110.83	188023.82	175835.05	157860.46	257639.06
Working fluid	3015.00	4734.80	1410.00	4095.00	7392.00	14820.00	1719.90	6480.00
Hot water pump	2265.98	2265.98	2265.98	2265.98	2265.98	2265.98	2265.98	2265.98
Cooling water pump	5715.60	5921.05	5836.03	5755.01	5552.68	5570.69	5713.81	5626.86
Pipe system	37873.16	36638.86	37281.00	37254.94	40934.06	39810.15	38526.22	48136.64
Electrical and control	37873.16	36638.86	37281.00	37254.94	40934.06	39810.15	38526.22	48136.64
Total	457492.92	444401.17	448781.96	451154.28	498600.67	492541.82	464034.57	584119.65
LCOE (USD/kWh)	0.0508	0.1281	0.0824	0.0528	0.0442	0.0446	0.0470	0.0480
LCOE (Baht/kWh)*	1.59	4.02	2.59	1.66	1.39	1.40	1.47	1.51

หมายเหตุ : * อัตราการแลกเปลี่ยนค่าเงิน 31.378 Baht/USD ณ วันที่ 7 มิถุนายน 2562 (ธนาคารแห่งประเทศไทย, 2562)

ตารางที่ ง.4 ผลการคำนวณราคาอุปกรณ์ในโรงไฟฟ้า TLC ที่ใช้แหล่งความร้อนอุณหภูมิ 100°C (ต่อ)

Equipment cost (USD)	R236fa	Isobutane	R236ea	Butane	R245fa	R245ca	Isopentane	Water
Condenser	96959.14	96386.45	98072.39	97730.40	97982.51	97958.72	97521.94	99223.53
Evaporator	96229.94	95480.28	97543.81	97081.94	97555.06	97678.62	97208.63	99297.58
Generator	8696.88	8874.94	8523.09	8632.06	8389.49	8221.36	8194.62	7818.84
Working fluid pump	12717.97	15022.73	12339.17	14873.42	12326.30	11610.99	14666.08	6544.36
Storage tank	939.26	1061.11	918.73	1053.36	918.03	878.84	1042.57	580.89
Expander	277876.09	257067.13	348313.58	342280.55	442036.39	611083.15	746951.49	10155082.47
Working fluid	4875.00	1497.60	12936.00	1122.00	7688.00	8160.00	997.50	0.00
Hot water pump	2265.98	2265.98	2265.98	2265.98	2265.98	2265.98	2265.98	2265.98
Cooling water pump	5619.73	5581.25	5694.70	5671.65	5688.64	5687.04	5657.61	5772.46
Pipe system	50130.50	48173.99	57367.14	56958.94	66716.24	83538.47	97350.89	1037658.61
Electrical and control	50130.50	48173.99	57367.14	56958.94	66716.24	83538.47	97350.89	1037658.61
Total	606440.99	579585.45	701341.74	684629.22	808282.89	1010621.64	1169208.20	12451903.34
LCOE (USD/kWh)	0.0493	0.0489	0.0543	0.0543	0.0605	0.0723	0.0831	0.7842
LCOE (Baht/kWh)*	1.55	1.53	1.70	1.70	1.90	2.27	2.61	24.61

หมายเหตุ : * อัตราการแลกเปลี่ยนค่าเงิน 31.378 Baht/USD ณ วันที่ 7 มิถุนายน 2562 (ธนาคารแห่งประเทศไทย, 2562)

ตารางที่ ๓.5 ผลการคำนวณราคาอุปกรณ์ในโรงไฟฟ้า TLC ที่ใช้แหล่งความร้อนอุณหภูมิ 110°C

Equipment cost (USD)	R1234yf	R22	Propane	R134a	R227ea	R1234ze	R152a	RC318
Condenser	112766.67	116180.61	114834.64	113414.32	109315.94	111634.61	112712.11	109316.75
Evaporator	112258.30	113029.22	112597.56	112687.43	110616.09	112441.90	112607.54	110960.45
Generator	10180.88	8154.10	9053.10	9729.10	11606.85	11246.57	10438.74	11356.21
Working fluid pump	18438.06	32231.71	27865.13	17584.31	12891.33	14594.13	16549.91	12644.49
Storage tank	1233.62	1864.87	1673.97	1191.29	948.60	1038.82	1139.32	935.29
Expander	177747.38	146003.99	159694.12	170627.13	219440.61	210834.39	186938.33	297087.73
Working fluid	3555.00	5624.80	1680.00	4855.50	7504.00	16900.00	2035.80	6390.00
Hot water pump	2265.98	2265.98	2265.98	2265.98	2265.98	2265.98	2265.98	2265.98
Cooling water pump	6704.60	6944.40	6849.63	6749.95	6464.14	6625.50	6700.78	6464.20
Pipe system	44159.55	42667.49	43483.41	43424.95	47354.95	47068.19	44935.27	55103.11
Electrical and control	44159.55	42667.49	43483.41	43424.95	47354.95	47068.19	44935.27	55103.11
Total	533469.60	517634.65	523480.95	525954.92	575763.45	581718.28	541259.06	667627.29
LCOE (USD/kWh)	0.0483	0.1228	0.0793	0.0505	0.0361	0.0401	0.0449	0.0391
LCOE (Baht/kWh)*	1.52	3.85	2.49	1.58	1.13	1.26	1.41	1.23

หมายเหตุ : * อัตราการแลกเปลี่ยนค่าเงิน 31.378 Baht/USD ณ วันที่ 7 มิถุนายน 2562 (ธนาคารแห่งประเทศไทย, 2562)

ตารางที่ ๓.5 ผลการคำนวณราคาอุปกรณ์ในโรงไฟฟ้า TLC ที่ใช้แหล่งความร้อนอุณหภูมิ 110°C (ต่อ)

Equipment cost (USD)	R236fa	Isobutane	R236ea	Butane	R245fa	R245ca	Isopentane	Water
Condenser	109816.09	109270.91	110394.77	109413.21	110959.11	110951.30	110562.91	112283.63
Evaporator	111524.83	110772.48	112339.96	111184.40	113052.88	113245.23	112813.86	115051.79
Generator	11347.93	11557.16	11143.09	11255.06	10974.69	10782.68	10731.33	10266.94
Working fluid pump	12717.97	15022.73	12180.64	14479.57	12326.30	11610.99	14666.08	6544.36
Storage tank	939.26	1061.11	910.10	1032.83	918.03	878.84	1042.57	580.89
Expander	322978.21	298566.27	402305.48	392060.65	515148.07	713295.63	872915.08	11875099.03
Working fluid	4875.00	1497.60	12740.00	1088.00	7688.00	8160.00	997.50	0.00
Hot water pump	2265.98	2265.98	2265.98	2265.98	2265.98	2265.98	2265.98	2265.98
Cooling water pump	6498.87	6461.02	6539.11	6470.89	6578.40	6577.85	6550.81	6670.82
Pipe system	57808.91	55497.77	65807.91	64816.26	77222.34	96960.85	113154.86	1212876.34
Electrical and control	57808.91	55497.77	65807.91	64816.26	77222.34	96960.85	113154.86	1212876.34
Total	698581.97	667470.80	802434.95	778883.11	934356.14	1171690.20	1358855.83	14554516.12
LCOE (USD/kWh)	0.0404	0.0399	0.0445	0.0441	0.0502	0.0603	0.0695	0.6668
LCOE (Baht/kWh)*	1.27	1.25	1.40	1.38	1.58	1.89	2.18	20.92

หมายเหตุ : * อัตราการแลกเปลี่ยนค่าเงิน 31.378 Baht/USD ณ วันที่ 7 มิถุนายน 2562 (ธนาคารแห่งประเทศไทย, 2562)

ตารางที่ 3.6 ผลการคำนวณราคาอุปกรณ์ในโรงไฟฟ้า TLC ที่ใช้แหล่งความร้อนอุณหภูมิ 120°C

Equipment cost (USD)	R1234yf	R22	Propane	R134a	R227ea	R1234ze	R152a	RC318
Condenser	126819.97	130543.71	129073.34	127439.56	124535.50	125444.99	126767.98	121537.72
Evaporator	127857.89	128614.52	128182.25	128260.99	127828.41	128009.69	128222.61	125967.37
Generator	11577.57	9221.60	10285.99	11090.02	13462.63	12878.56	11815.45	14308.70
Working fluid pump	21163.42	37226.92	32041.91	20044.60	14864.17	16550.72	19079.85	12644.49
Storage tank	1365.67	2075.57	1856.71	1312.00	1052.88	1139.36	1265.13	935.29
Expander	205802.71	168880.65	184688.36	197224.25	258240.20	243811.65	216590.71	337768.13
Working fluid	4140.00	6550.40	1950.00	5616.00	8848.00	19500.00	2386.80	6390.00
Hot water pump	2265.98	2265.98	2265.98	2265.98	2265.98	2265.98	2265.98	2265.98
Cooling water pump	7703.48	7973.21	7866.46	7748.22	7539.03	7604.40	7699.73	7324.43
Pipe system	50455.67	48680.22	49626.10	49538.56	54978.88	53770.54	51370.74	62275.21
Electrical and control	50455.67	48680.22	49626.10	49538.56	54978.88	53770.54	51370.74	62275.21
Total	609608.02	590712.99	597463.19	550540.18	668594.56	664746.42	618835.70	753692.51
LCOE (USD/kWh)	0.0470	0.1199	0.0769	0.0487	0.0349	0.0387	0.0441	0.0331
LCOE (Baht/kWh)*	1.47	3.76	2.41	1.53	1.10	1.21	1.38	1.04

หมายเหตุ : * อัตราการแลกเปลี่ยนค่าเงิน 31.378 Baht/USD ณ วันที่ 7 มิถุนายน 2562 (ธนาคารแห่งประเทศไทย, 2562)

ตารางที่ 3.6 ผลการคำนวณราคาอุปกรณ์ในโรงไฟฟ้า TLC ที่ใช้แหล่งความร้อนอุณหภูมิ 120°C (ต่อ)

Equipment cost (USD)	R236fa	Isobutane	R236ea	Butane	R245fa	R245ca	Isopentane	Water
Condenser	121311.24	121540.37	122687.96	121734.95	122606.07	123318.99	122986.05	124727.15
Evaporator	125772.37	125806.83	127484.38	126335.85	127556.90	128557.22	128170.46	130583.67
Generator	14320.66	14567.55	14106.53	14240.88	13919.06	13692.18	13603.59	13061.58
Working fluid pump	12551.18	15022.73	12180.64	14479.57	12157.75	11610.99	14666.08	6544.36
Storage tank	930.24	1061.11	910.10	1032.83	908.85	878.84	1042.57	580.89
Expander	364338.11	339303.90	457934.17	446520.11	582555.04	813576.30	996611.60	13563739.39
Working fluid	4800.00	1497.60	12740.00	1088.00	7564.00	8160.00	997.50	0.00
Hot water pump	2265.98	2265.98	2265.98	2265.98	2265.98	2265.98	2265.98	2265.98
Cooling water pump	7308.27	7324.61	7406.60	7338.50	7400.75	7451.77	7427.93	7552.79
Pipe system	64879.80	62689.31	74497.64	73394.87	86937.04	110135.23	128677.43	1384905.58
Electrical and control	64879.80	62689.31	74497.64	73394.87	86937.04	110135.23	128677.43	1384905.58
Total	783357.65	753769.30	906711.62	881826.39	1050808.47	1329782.73	1545126.61	16618866.97
LCOE (USD/kWh)	0.0341	0.0338	0.0379	0.0375	0.0427	0.0519	0.0600	0.5808
LCOE (Baht/kWh)*	1.07	1.06	1.19	1.18	1.34	1.63	1.88	18.22

หมายเหตุ : * อัตราการแลกเปลี่ยนค่าเงิน 31.378 Baht/USD ณ วันที่ 7 มิถุนายน 2562 (ธนาคารแห่งประเทศไทย, 2562)

ประวัติผู้เขียน

นายอนุกุล โม่งปราณีต เกิดเมื่อวันที่ 13 มกราคม 2533 ที่จังหวัดชัยภูมิ สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล หลักสูตร วิศวกรรมอากาศยาน) จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี นครราชสีมา เมื่อปี พ.ศ. 2555 ในปี พ.ศ. 2555 – 2556 ได้ทำงานในสาขาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในตำแหน่งผู้ช่วยสอนและวิจัยเป็นระยะเวลา 1 ปี จากนั้นในปี 2556 เข้ารับการเกณฑ์ทหาร โดยอาสาที่จะสมัคร และเข้าเป็นทหารประจำอยู่ที่กองบิน 1 จ. นครราชสีมา เป็นระยะเวลา 6 เดือน และในปี พ.ศ. 2557 ได้เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล ณ สถาบันเดิม โดยในขณะศึกษาได้เป็นผู้ช่วยสอนปฏิบัติการของสาขาวิศวกรรมเครื่องกล จำนวน 3 รายวิชา คือ (1) วิชาเขียนแบบทางวิศวกรรม (2) วิชาปฏิบัติการวิศวกรรมเครื่องกล (3) วิชาปฏิบัติการของไหลและความร้อน ผลงานวิจัยในระดับปริญญาโท ได้นำเสนอบทความวิชาการดังนี้

- 1) อนุกุล โม่งปราณีต และ อาทิตย์ คุณศรีสุข. (2558) การจำลองเชิงตัวเลขของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบ ORC ด้วยโปรแกรม MATLAB. ในการประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 29 ระหว่างวันที่ 1-3 กรกฎาคม พ.ศ.2558 ณ จังหวัด นครราชสีมา
- 2) อนุกุล โม่งปราณีต ทิรพรชัย ศรีอ่อน และ อาทิตย์ คุณศรีสุข (2559) การประเมินสมรรถนะของระบบปรับอากาศแบบดูดกลืน ที่ใช้เครื่องทำน้ำร้อนพลังแสงอาทิตย์แบบแผ่นเรียบเป็นแหล่งความร้อนสำหรับร้าน 7-Eleven ในการประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 30 ระหว่างวันที่ 5-8 กรกฎาคม พ.ศ.2558 ณ โรงแรม บีพี สมิทลา บีชริสอร์ท สงขลา
- 3) อนุกุล โม่งปราณีต และ อาทิตย์ คุณศรีสุข. (2562) การศึกษาสมรรถนะของโรงไฟฟ้า Trilateral, Subcritical ORC และ Supercritical ORC โดยใช้แหล่งความร้อนใต้พิภพเป็นแหล่งพลังงาน ในการประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 15 ระหว่างวันที่ 21-23 พฤษภาคม 2562 ณ จังหวัด นครราชสีมา
- 4) อนุกุล โม่งปราณีต และ อาทิตย์ คุณศรีสุข. (2562) การผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานใต้พิภพโดยใช้โรงไฟฟ้าโออาร์จี ในการประชุมวิชาการวิศวกรรมศาสตร์ วิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี และสถาปัตยกรรมศาสตร์ ครั้งที่ 10 ในวันที่ 30 สิงหาคม 2562 ณ มหาวิทยาลัยวงษ์ชวลิตกุล จังหวัด นครราชสีมา