

การออกแบบและวิเคราะห์เทสลาเทอร์ไบน์สำหรับโรงไฟฟ้าวัฏจักรโออาร์ซี
เพื่อให้ได้กำลังไฟฟ้าสุทธิสูงสุด



นายธงชัย คชาวงศ์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาตรีบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกลและระบบกระบวนการ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2567

DESIGN AND ANALYSIS OF A TESLA TURBINE FOR AN ORGANIC
RANKINE CYCLE POWER PLANT BASED ON THE MAXIMIZATION
OF NET POWER OUTPUT



THONGCHAI KACHAWONG

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Degree of Doctor of Philosophy in Mechanical and Process System Engineering

Suranaree University of Technology

Academic Year 2024

การออกแบบและวิเคราะห์เสาเข็มสำหรับโรงไฟฟ้าวัฏจักรไออาร์ซี
เพื่อให้ได้กำลังไฟฟ้าสุทธิสูงสุด

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตาม
หลักสูตรปริญญาตรีบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



(ศ. ดร.ธนากร วงศ์วัฒนาเสถียร)

ประธานกรรมการ



(ผศ. ดร.อาทิตย์ คุณศรีสุข)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)


(ผศ. ดร.ชัยชัย ไกรทอง)

กรรมการ


(ผศ. ดร.กระวี ตรีอำนาจ)

กรรมการ


(ผศ. ดร.พรรษา ลิบลับ)

กรรมการ



(รศ. ดร.ยุพาพร รักสกุลพิวัฒน์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและประกันคุณภาพ


(รศ. ดร.พรศิริ จงกล)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

ธงชัย คชวงค์ : การออกแบบและวิเคราะห์เทสลาเทอร์ไบน์สำหรับโรงไฟฟ้าวัฏจักรโออาร์ซี เพื่อให้ได้กำลังไฟฟ้าสุทธิสูงสุด (DESIGN AND ANALYSIS OF A TESLA TURBINE FOR AN ORGANIC RANKINE CYCLE POWER PLANT BASED ON THE MAXIMIZATION OF NET POWER OUTPUT)

อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อาทิตย์ คุณศรีสุข, 226 หน้า.

คำสำคัญ: โรงไฟฟ้าแรงดันอินทรีย์/ เทสลาเทอร์ไบน์/ การเลือกสารทำงาน/ การประเมินเศรษฐกิจศาสตร์และเอกเซอร์ยี/ การนำพลังงานความร้อนอุณหภูมิต่ำกลับมาใช้งาน

โรงไฟฟ้าวัฏจักรโออาร์ซี (Organic Rankine Cycle: ORC) เป็นเทคโนโลยีที่นิยมใช้ในการผลิตไฟฟ้าจากแหล่งความร้อนทิ้ง โดยมีเทอร์ไบน์เป็นอุปกรณ์สำคัญในการดึงพลังงานจากสารทำงานมาแปลงเป็นพลังงานไฟฟ้า อย่างไรก็ตาม เทอร์ไบน์ทั่วไปมีต้นทุนสูง งานวิจัยนี้จึงมุ่งศึกษาการประยุกต์ใช้เทสลาเทอร์ไบน์ ซึ่งมีโครงสร้างที่เรียบง่าย ราคาถูกกว่า และยังสามารถทำงานได้เทียบเท่ากับเทอร์ไบน์แบบทั่วไป วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีเป้าหมายในการออกแบบขนาดและเงื่อนไขการทำงานที่เหมาะสมของเทสลาเทอร์ไบน์ภายในโรงไฟฟ้าวัฏจักรโออาร์ซี เพื่อให้ได้กำลังไฟฟ้าสุทธิสูงสุด โดยใช้แบบจำลองเชิงตัวเลขที่พัฒนาด้วยโปรแกรม MATLAB และ NIST REFPROP ภายใต้แหล่งความร้อนอุณหภูมิต่ำ 120 °C และแหล่งทิ้งความร้อนที่ 30 °C แบบจำลองได้รับการตรวจสอบความถูกต้องเทียบกับข้อมูลจากวรรณกรรม พบว่าความคลาดเคลื่อนสูงสุดของแบบจำลองอยู่ที่ 15% และของเทสลาเทอร์ไบน์อยู่ที่ 10% ซึ่งถือว่าอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้จากการวิเคราะห์พบว่า ตัวแปรที่มีผลต่อประสิทธิภาพและกำลังของเทสลาเทอร์ไบน์ ได้แก่ ระยะห่างระหว่างแผ่นดิสก์ อัตราส่วนความดันและความเร็วรอบ ซึ่งมีค่าที่เหมาะสมเฉพาะที่ให้ประสิทธิภาพและกำลังจากเทอร์ไบน์สูงที่สุด นอกจากนี้ การศึกษาผลของคุณภาพไอของสารทำงานก่อนเข้าเทสลาเทอร์ไบน์พบว่า เมื่อคุณภาพไอต่ำเทอร์ไบน์สามารถผลิตกำลังได้มากกว่าคุณภาพไอสูง โดยมีประสิทธิภาพไอเซนโทรปิกในช่วง 70.1% ถึง 74.8% ขึ้นอยู่กับความเป็นไอของสารทำงาน และให้ค่าประสิทธิภาพสูงสุดเมื่อสารทำงานอยู่ในภาวะไออิ่มตัว อีกทั้ง เมื่อ Re_m / \dot{m}_c มีค่ามากส่งผลให้ประสิทธิภาพไอเซนโทรปิกของเทสลาเทอร์ไบน์มีค่าสูงตามไปด้วย อย่างไรก็ตาม ประสิทธิภาพของเทสลาเทอร์ไบน์ที่สูงสุดไม่ได้หมายความว่าโรงไฟฟ้าวัฏจักรให้กำลังสุทธิสูงสุด เมื่อใช้สารทำงานที่เป็นของเหลวอิ่มตัว (ระบบวัฏจักรที่แอลซี) ให้กำลังไฟฟ้าสุทธิสูงสุด 12.91 kW พร้อมกับความคุ้มค่าทางเศรษฐกิจศาสตร์ที่ดีที่สุด โดยมี LCOE เท่ากับ 64 €/MWh (2.24 บาท/kWh) NPV เท่ากับ 61,000 € (2.14 ล้านบาท) d-PbP เท่ากับ 8.29 ปี และ IRR เท่ากับ 13.9% ภายใต้เงินลงทุนเริ่มต้น 71,000 € (2.45 ล้านบาท) ในกรณีที่ต้องการเลือกสารทำงานที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมเพื่อทดแทน R245fa พบว่า สารผสม

R1336mzz(Z)/R1234ze(E) ที่อัตราส่วนโดยมวล 0.25/0.75 เป็นทางเลือกที่ดี โดยมี GWP ~0 และให้ LCOE เท่ากับ 62.26 €/MWh (2.18 บาท/kWh) NPV เท่ากับ 54,000 € (1.89 ล้านบาท) PbP เท่ากับ 9.4 ปี และ IRR เท่ากับ 11.9% ที่เงินลงทุนเริ่มต้น 82,010 € (2.87 ล้านบาท) นอกจากนี้ ในการศึกษาเชิงเปรียบเทียบเมื่อใช้เทสลาเทอร์ไบน์กับโรงไฟฟ้าวัฏจักรที่แตกต่างกัน พบว่า การใช้เทสลาเทอร์ไบน์สามารถลดความซับซ้อนของระบบวัฏจักรคาลินาได้ถึง 30% และโรงไฟฟ้าวัฏจักรที่แอลซีที่ใช้สารผสม R1336mzz(Z)/R1234ze(E) ที่อัตราส่วนมวล 0.25/0.75 ยังเป็นทางเลือกที่คุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์มากที่สุดและให้กำลังสุทธิสูงสุด โดยความดันที่คอนเดนเซอร์และอีวาโปเรเตอร์เท่ากับ 0.69 MPa และ 2.67 MPa ที่อัตราการไหลเชิงมวลของสารทำงานเท่ากับ 3.33 kg/s โดยขนาดที่เหมาะสมของเทสลาเทอร์ไบน์มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกและภายในของโรเตอร์เท่ากับ 400 mm และ 65.5 mm รวมถึงระยะห่างระหว่างแผ่นดิสก์เท่ากับ 1 mm โดยต้องมีความเร็วรอบของโรเตอร์ของเทสลาเทอร์ไบน์เท่ากับ 4,500 RPM และอัตราส่วนความดันเท่ากับ 0.75 โดยเทสลาเทอร์ไบน์มีประสิทธิภาพเท่ากับ 74% นอกจากนี้ วิทยานิพนธ์ฉบับนี้แนะนำให้เสนอแนวทางในการประยุกต์ใช้เทสลาเทอร์ไบน์กับระบบ ORC ภายใต้สภาวะไอน้ำเข้าเทอร์ไบน์ที่หลากหลาย พร้อมข้อเสนอแนะในการออกแบบและเลือกสารทำงานที่เหมาะสม เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและความคุ้มค่าของโรงไฟฟ้าที่ใช้พลังงานพลังงานหมุนเวียน



สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล

ปีการศึกษา 2567

ลายมือชื่อนักศึกษา วรัชช ธรรมดี

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา อ.วิเศษ

THONGCHAI KACHAWONG: DESIGN AND ANALYSIS OF A TESLA TURBINE FOR AN ORGANIC RANKINE CYCLE POWER PLANT BASED ON THE MAXIMIZATION OF NET POWER OUTPUT.

THESIS AVISOR: ASST.PROF. ATIT KOONSRSUK, Ph.D., 226 PP.

Keyword: ORGANIC RANKINE CYCLE, TESLA TURBINE, WORKING FLUID SELECTION, EXERGY AND ECONOMIC ANALYSIS, AND LOW-TEMPERATURE WASTE HEAT RECOVERY

The Organic Rankine Cycle (ORC) power plant is a widely adopted technology for electricity generation from waste heat sources, with the turbine being a critical component that converts the working fluid's energy into electrical power. However, conventional turbines are expensive. This study aims to investigate the application of the Tesla turbine, which features a simpler structure, lower cost, and comparable performance to traditional turbines. The objective of this thesis is to design the optimal size and operating conditions of a Tesla turbine within an ORC system to maximize net power output. A numerical model was developed using MATLAB and NIST REFPROP, based on a heat source at 120 °C and a heat sink at 30 °C. The model was validated against data from the literature, showing a maximum deviation of 15% for the ORC model and 10% for the Tesla turbine, which are within acceptable limits. The analysis revealed that key parameters influencing the performance and power output of the Tesla turbine include the disk spacing, pressure ratio, and rotational speed, each having an optimal value that yields the highest performance. Furthermore, the study of the effect of the turbine inlet steam quality showed that lower steam quality leads to higher power output, with isentropic efficiency ranging from 70.1% to 74.8%. The highest efficiency was achieved when the working fluid was in a saturated vapor state. In addition, the high valve yield high tesla turbine isentropic efficiency. However, the highest turbine efficiency does not necessarily correspond to the highest net power output of the power plant. The study found that the system using saturated liquid as the working fluid before entering the turbine (TLC system) achieved the highest net power output of 12.91 kW and the best economic performance, with a Levelized Cost

of Electricity (LCOE) of 64 €/MWh (2.24 THB/kWh), Net Present Value (NPV) of 61 x10³ € (2.14 million THB), Payback Period (d-PbP) of 8.29 years, and Internal Rate of Return (IRR) of 13.9%, based on an initial investment of 71x10³ € (2.45 million THB). For environmentally friendly alternatives to R245fa, the R1336mzz(Z)/R1234ze(E) zeotropic mixture with a mass ratio of 0.25/0.75 was identified as a promising option. It offers a low Global Warming Potential (GWP ≈ 0) and delivers an LCOE of 62.26 €/MWh (2.18 THB/kWh), NPV of 54 x10³ € (1.89 million THB), PbP of 9.4 years, and IRR of 11.9%, with an initial investment of 82.01x10³ € (2.87 million THB). Moreover, the comparison with various cycles indicates that using a Tesla turbine can reduce the complexity of the Kalina cycle system by up to 30%. The TLC system using the R1336mzz(Z)/R1234ze(E) mixture at a 0.25/0.75 mass ratio is also found to be the most economically viable and provide maximum net power option with The condenser and evaporator pressures are 0.69 MPa and 2.67 MPa, respectively, with a working fluid mass flow rate of 3.33 kg/s. The optimal Tesla turbine has an outer and inner rotor diameter of 400 mm and 65.5 mm, respectively, and a disk spacing of 1 mm. The rotor speed of the Tesla turbine must be 4,500 RPM, with a pressure ratio of 0.75. The Tesla turbine achieves an efficiency of 74%. Therefore, this thesis proposes a practical approach for integrating Tesla turbines into ORC systems under various turbine inlet steam qualities, along with design and working fluid selection guidelines to enhance efficiency and economic viability of renewable energy power plants.

School of Mechanical Engineering

Academic year 2024

Student's Signature Thanychai Kachawong

Advisor' Signature Utta K.

กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณ บุคคล และกลุ่มบุคคลดังต่อไปนี้ ที่มีส่วนช่วยให้วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จไปได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับความช่วยเหลือจากบุคคลและกลุ่มบุคคล ที่คอยให้คำแนะนำ ปรึกษา ในการทำวิทยานิพนธ์ในการดำเนินงานและความรู้ทางด้านวิชาการ อันดับแรก ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณบิดา นายเล็ก เทียมทัต และมารดา นางสาวเยาวภา คชวงค์ รวมถึงครอบครัวทุก ๆ ท่านที่สนับสนุนทั้งเป็นกำลังใจในการดำเนินงาน สนับสนุนทรัพยากรที่จำเป็นต่อการศึกษา และสนับสนุนการศึกษาของข้าพเจ้าได้ดีเป็นอย่างยิ่ง

ลำดับถัดมา ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อาทิตย์ คุณศรีสุข อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งได้กรุณาให้คำปรึกษา อบรมสั่งสอนทั้งด้านวิชาการและการดำเนินชีวิตในรั้วมหาวิทยาลัยอย่างต่อเนื่อง ตั้งแต่ระดับปริญญาตรีไปจนถึงปริญญาเอก แม้อาจารย์จะมีภารกิจมากมายทั้งการสอนและการดำรงตำแหน่งผู้อำนวยการศูนย์สหกิจศึกษา แต่อาจารย์ก็ยังสละเวลาส่วนตัวเพื่อดูแลและให้คำแนะนำแก่ศิษย์ในที่ปรึกษาอย่างเต็มที่เสมอ การสนับสนุนและผลักดันจากอาจารย์มีส่วนสำคัญอย่างยิ่งที่ทำให้ข้าพเจ้าสามารถดำเนินงานวิจัยและเขียนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนเสร็จสมบูรณ์

นอกจากนี้ ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ดร.ธนากร วงศ์วัฒนาเสถียร (ประธานกรรมการ) ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ขวัญชัย ไกรทอง (กรรมการ) ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กระวี ตรีอานรรค (กรรมการ) และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พรรษา ลิบลับ (กรรมการ) ที่ให้เกียรติเป็นคณะกรรมการในการสอบปกป้องวิทยานิพนธ์ครั้งนี้ พร้อมทั้งให้คำแนะนำอันทรงคุณค่าในการดำเนินงานวิจัยและแนวทางในการเขียนวิทยานิพนธ์ จนข้าพเจ้าสามารถจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนแล้วเสร็จสมบูรณ์

อีกทั้ง ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณทุนวิจัยจากแหล่งทุนภายนอกจากกองทุนสนับสนุนการวิจัยและพัฒนา (ทุนOROG) ที่ให้ความอนุเคราะห์ทุนในการทำงานวิจัยสำเร็จจุล่งไปด้วยดี และสนับสนุนทุนการศึกษาของข้าพเจ้า ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งที่ทำให้วิทยานิพนธ์เสร็จสมบูรณ์

ข้าพเจ้าขอขอบคุณเพื่อน ๆ และน้อง ๆ ทั้งในกลุ่มวิจัยของตนเองและกลุ่มวิจัยอื่น (ห้อง B37) ที่ให้คำปรึกษาและช่วยเหลือในการทำวิทยานิพนธ์มาโดยตลอด ท้ายที่สุดนี้ ข้าพเจ้าขอขอบคุณคุณคุณนิชาภัทร หลอมประโคน เป็นอย่างยิ่ง ที่กรุณาช่วยอ่านและเรียบเรียงวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ อีกทั้งยังคอยให้กำลังใจในช่วงเวลาที่ยากลำบาก ซึ่งเป็นแรงสนับสนุนสำคัญที่ทำให้ข้าพเจ้าสามารถดำเนินงานวิทยานิพนธ์จนสำเร็จจุล่งไปด้วยดี

ธงชัย คชวงค์

สารบัญ

หน้า

| | |
|---|-----------|
| บทคัดย่อ..... | ก |
| Abstract..... | ค |
| กิตติกรรมประกาศ..... | จ |
| สารบัญ..... | ฉ |
| สารบัญตาราง..... | ฎ |
| สารบัญรูป..... | ท |
| คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ..... | น |
| บทที่ | |
| 1 บทนำ..... | 1 |
| 1.1 ที่มาและความสำคัญ..... | 1 |
| 1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย..... | 9 |
| 1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย..... | 9 |
| 1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ..... | 9 |
| 2 ปรัชญ์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... | 10 |
| 2.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา..... | 10 |
| 2.2 โรงไฟฟ้าวัฏจักรที่แอลซี..... | 11 |
| 2.3 โรงไฟฟ้าวัฏจักรคาลินา..... | 12 |
| 2.4 เทสลาเทอร์ไบน์..... | 15 |
| 2.4.1 เทสลาเทอร์ไบน์ในโรงไฟฟ้าวัฏจักรโออาร์ซี..... | 18 |
| 2.4.2 ตัวแปรที่ส่งผลต่อการทำงานของเทสลาเทอร์ไบน์..... | 28 |
| 2.5 การเลือกสารทำงานสำหรับโรงไฟฟ้า..... | 37 |

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

| | | |
|-------|--|----|
| 3 | วิธีการดำเนินการวิจัย..... | 44 |
| 3.1 | การจำลองของโรงไฟฟ้าวัฏจักรโออาร์ซีเพื่อหาเงื่อนไขการทำงานที่ทำให้กำลังสุทธิสูงสุด..... | 44 |
| 3.1.1 | โรงไฟฟ้าวัฏจักรโออาร์ซีที่ใช้เตสลาเทอร์ไบน์และแบบจำลองของโรงไฟฟ้าวัฏจักรโออาร์ซี..... | 44 |
| 3.1.2 | การจำลองโรงไฟฟ้าวัฏจักรโออาร์ซี..... | 47 |
| 3.1.3 | การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองโรงไฟฟ้าวัฏจักรโออาร์ซี..... | 49 |
| 3.2 | การจำลองโรงไฟฟ้าวัฏจักรคาลินาแบบ KCS-11..... | 51 |
| 3.2.1 | โรงไฟฟ้าวัฏจักรคาลินาชนิด KCS-11 ที่ใช้เตสลาเทอร์ไบน์และแบบจำลองของโรงไฟฟ้าวัฏจักรคาลินาชนิด KCS-11..... | 51 |
| 3.2.2 | การจำลองโรงไฟฟ้าวัฏจักรคาลินาแบบ KCS-11..... | 55 |
| 3.2.3 | การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองโรงไฟฟ้าวัฏจักรคาลินาแบบ KCS-11..... | 56 |
| 3.3 | การจำลองเตสลาเทอร์ไบน์..... | 58 |
| 3.3.1 | คำอธิบายและหลักการทำงานของเตสลาเทอร์ไบน์..... | 58 |
| 3.3.2 | แบบจำลองของเตสลาเทอร์ไบน์..... | 59 |
| 3.3.3 | แนวทางการจำลองและการออกแบบเตสลาเทอร์ไบน์..... | 66 |
| 3.3.4 | การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองเตสลาเทอร์ไบน์..... | 69 |
| 3.4 | การวิเคราะห์เอกเซอร์ยี..... | 72 |
| 3.5 | การประเมินความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์..... | 74 |
| 3.5.1 | การประเมินราคาของโรงไฟฟ้า..... | 75 |
| 3.5.2 | การประเมินราคาของอุปกรณ์ภายในโรงไฟฟ้า..... | 76 |
| 3.5.3 | การปรับราคาของอุปกรณ์ภายในโรงไฟฟ้าวัฏจักรโออาร์ซีด้วยดัชนีราคา..... | 76 |
| 3.5.4 | การตรวจสอบความถูกต้องของการประเมินราคาของโรงไฟฟ้า..... | 78 |
| 3.5.5 | ตัวแปรที่ใช้ประเมินความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์..... | 79 |

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

| | | |
|-------|---|-----|
| 3.6 | แนวทางการศึกษาการทำสมรรถนะของเตสลาเทอร์ไบน์ | 80 |
| 3.6.1 | การศึกษาอิทธิพลของตัวแปรที่ใช้ในการออกแบบของเตสลาเทอร์ไบน์ | 81 |
| 3.6.2 | การศึกษาอิทธิพลของความเป็นไอของสารทำงานที่มีผลต่อสมรรถนะของ โรงไฟฟ้าและเตสลาเทอร์ไบน์ | 81 |
| 3.6.3 | การศึกษาพฤติกรรมการทำงานของเตสลาเทอร์ไบน์ในโรงไฟฟ้าวัฏจักรที่ แอลซีเมื่อใช้สารผสมซีไอทริกที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม | 82 |
| 3.6.4 | การศึกษาการทำงานของโรงไฟฟ้าวัฏจักรที่แตกต่างกันเมื่อใช้กับเตสลา เทอร์ไบน์ | 83 |
| 4 | อิทธิพลของตัวแปรที่ใช้ในการออกแบบของเตสลาเทอร์ไบน์ | 86 |
| 4.1 | อัตราส่วนความดัน (PR) | 87 |
| 4.2 | ความเร็วรอบของการทำงาน (ω) | 92 |
| 4.3 | เส้นผ่านศูนย์กลางของภายนอกของโรเตอร์ (D_d) และจำนวนแผ่นของโรเตอร์ (N_{disk}) | 94 |
| 4.4 | ระยะห่างระหว่างแผ่นดิสก์ของโรเตอร์ (b) | 96 |
| 5 | อิทธิพลของความเป็นไอของสารทำงานที่มีผลต่อสมรรถนะของโรงไฟฟ้า และเตสลา เทอร์ไบน์ | 98 |
| 5.1 | การวิเคราะห์เงื่อนไขการทำงานของโรงไฟฟ้าที่ใช้จำลองเตสลาเทอร์ไบน์ | 98 |
| 5.2 | การประเมินกำลังสุทธิของโรงไฟฟ้าที่ใช้เตสลาเทอร์ไบน์เมื่อความเป็นไอของสาร ทำงานก่อนเข้าเทอร์ไบน์เปลี่ยนแปลงไป | 103 |
| 5.3 | การประเมินเศรษฐศาสตร์เมื่อความเป็นไอของสารทำงานก่อนเข้าเทอร์ไบน์ เปลี่ยนแปลงไป | 111 |
| 5.3.1 | เงินลงทุนเริ่มต้นและปริมาณไฟฟ้าที่ผลิตได้ | 112 |
| 5.3.2 | มูลค่าปัจจุบันสุทธิของต้นทุนต่อหน่วยของการผลิตไฟฟ้าตลอดอายุ โครงการ (LCOE) | 113 |
| 5.3.3 | มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (NPV) และระยะเวลาคืนทุนที่มีการคิดลด (d-PbP) | 114 |

สารบัญ (ต่อ)

| | หน้า |
|--|------------|
| 5.3.4 อัตราตอบแทนภายใน (IRR)..... | 117 |
| 5.3.5 การเปรียบเทียบผลกับงานวิจัยอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้อง..... | 118 |
| 5.4 ข้อจำกัดในการศึกษา..... | 120 |
| 6 พฤติกรรมการทำงานของเตสลาเทอร์โบในโรงไฟฟ้าวัฏจักรที่แอลซีเมื่อใช้สารผสม ซีโอโทรปิกที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม..... | 121 |
| 6.1 การประเมินสมรรถนะของระดับอุปกรณ์ | 122 |
| 6.1.1 เงื่อนไขการทำงานของโรงไฟฟ้าและอุณหภูมิวิกฤตของสารทำงาน | 124 |
| 6.1.2 พฤติกรรมของการถ่ายเทความร้อน..... | 124 |
| 6.1.3 พฤติกรรมของเตสลาเทอร์โบ..... | 130 |
| 6.2 การประเมินสมรรถนะของระบบ | 136 |
| 6.2.1 กำลังสุทธิของโรงไฟฟ้าและการทำลายเอกเซอร์ยี..... | 137 |
| 6.2.2 ความเหมาะสมของอุณหภูมิและการกระจายของเอกเซอร์ยี..... | 138 |
| 6.2.3 อิทธิพลของอุณหภูมิวิกฤตต่อสมรรถนะของโรงไฟฟ้า..... | 140 |
| 6.3 การประเมินความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ | 143 |
| 6.3.1 ต้นทุนต่อหน่วยในการผลิตไฟฟ้าและเงินลงทุนเริ่มต้น | 143 |
| 6.3.2 อัตราผลตอบแทนภายในและระยะเวลาในการคืนทุน..... | 144 |
| 6.4 แนวทางการประยุกต์ใช้ในทางปฏิบัติ..... | 146 |
| 6.4.1 การเลือกสารทำงาน..... | 146 |
| 6.4.2 การนำเตสลาเทอร์โบไปใช้งาน | 147 |
| 6.4.3 การพิจารณาในระดับอุปกรณ์ของโรงไฟฟ้า | 147 |
| 6.5 ข้อจำกัดในการศึกษา..... | 147 |
| 6.5.1 แบบจำลองและเงื่อนไขการจำลอง | 148 |
| 6.5.2 การทำการตรวจสอบความถูกต้องกับการทดลอง | 148 |
| 6.5.3 สมรรถนะที่แปรผันตามเวลา | 148 |
| 6.5.4 เพิ่มการพิจารณาทางเศรษฐศาสตร์ในด้านอื่น ๆ เพิ่มเติม | 149 |
| 6.5.5 การประเมินผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม | 149 |

สารบัญ (ต่อ)

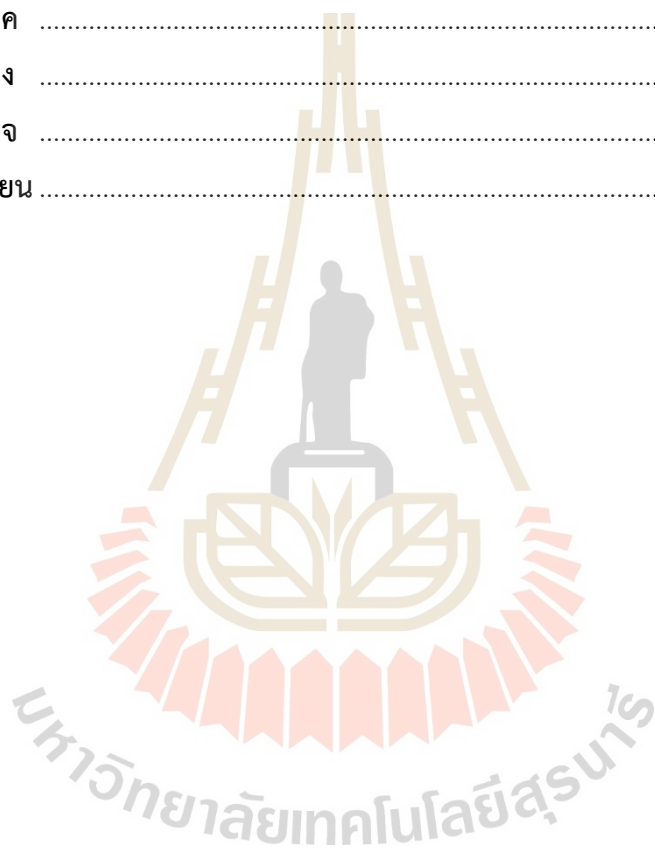
หน้า

| | | |
|----------|---|-----|
| 7 | ผลการทำงานของโรงไฟฟ้าวัฏจักรที่แตกต่างกันเมื่อใช้กับเตสลาเทอร์ไบน์ | 150 |
| 7.1 | ผลการเปรียบเทียบสมรรถนะทางอุณหพลศาสตร์ของแต่ละโรงไฟฟ้าที่ใช้เตสลาเทอร์ไบน์ | 151 |
| 7.1.1 | เงื่อนไขการทำงานโรงไฟฟ้าและอุณหภูมิวิกฤตของสารทำงาน | 151 |
| 7.1.2 | พฤติกรรมการถ่ายเทความร้อน | 153 |
| 7.1.3 | พฤติกรรมการทำงานของเตสลาเทอร์ไบน์ | 156 |
| 7.1.4 | พฤติกรรมของสมรรถนะโดยรวมของโรงไฟฟ้า | 160 |
| 7.2 | ผลการประเมินเศรษฐศาสตร์ | 164 |
| 7.2.1 | เงินลงทุนเริ่มต้นของโรงไฟฟ้า..... | 164 |
| 7.2.2 | ต้นทุนต่อหน่วยของการผลิตไฟฟ้า (LCOE) | 165 |
| 7.2.3 | มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (NPV) | 167 |
| 7.2.4 | ระยะเวลาคืนทุนที่มีการคิดลด (d-PbP) และ อัตราผลตอบแทนภายใน (IRR)..... | 168 |
| 7.3 | แนวทางการประยุกต์ใช้ในทางปฏิบัติ..... | 170 |
| 7.4 | ข้อจำกัดในการศึกษา..... | 170 |
| 7.4.1 | จำนวนวัฏจักรที่ใช้ในการเปรียบเทียบมีจำกัด..... | 170 |
| 7.4.2 | จำนวนสารทำงานที่ใช้ในการศึกษามีจำกัด..... | 170 |
| 7.4.3 | แบบจำลองและเงื่อนไขการจำลอง | 171 |
| 8 | บทสรุปและข้อเสนอแนะ | 172 |
| 8.1 | ผลสรุปสำหรับอิทธิของตัวแปรที่ใช้ในการออกแบบของเตสลาเทอร์ไบน์..... | 172 |
| 8.2 | ผลสรุปสำหรับอิทธิพลของความเป็นไอของสารทำงานที่มีผลต่อสมรรถนะของโรงไฟฟ้าและเตสลาเทอร์ไบน์ | 173 |
| 8.3 | ผลสรุปสำหรับพฤติกรรมการทำงานของเตสลาเทอร์ไบน์ในโรงไฟฟ้าวัฏจักรที่แอลซีเมื่อใช้สารผสมซีโทรปิกที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม | 174 |
| 8.4 | ผลสรุปสำหรับการทำงานของโรงไฟฟ้าวัฏจักรที่แตกต่างกันเมื่อใช้กับเตสลาเทอร์ไบน์ | 176 |

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

| | |
|-----------------------|-----|
| รายการอ้างอิง..... | 179 |
| ภาคผนวก ก | 189 |
| ภาคผนวก ข | 199 |
| ภาคผนวก ค | 212 |
| ภาคผนวก ง | 221 |
| ภาคผนวก จ | 223 |
| ประวัติผู้เขียน | 225 |



สารบัญตาราง

| ตารางที่ | หน้า |
|---|------|
| 2.1 ผลการศึกษาโรงไฟฟ้าวัฏจักรโออาร์ซี | 10 |
| 2.2 เงื่อนไขการทดลองของโรงไฟฟ้าวัฏจักรโออาร์ซีที่ใช้เตสลาเทอร์ไบน์ | 21 |
| 2.3 ค่าคุณสมบัติของ water SF-201-5 SF-201-10 และ SF-201-20 | 27 |
| 2.4 เงื่อนไขในการจำลองเปรียบเทียบค่าความหนาแน่นดิสก์และระหว่างแผ่นดิสก์ในเตสลาเทอร์ไบน์ | 30 |
| 2.5 เงื่อนไขที่ทำการจำลองเปรียบเทียบ | 30 |
| 2.6 ผลการเปลี่ยนแปลง Loss coefficient และประสิทธิภาพไอเซนโทรปิกต่อการเปลี่ยนแปลง ระยะห่างระหว่างแผ่นดิสก์ สำหรับ One to one | 32 |
| 2.7 ผลการเปลี่ยนแปลง Loss coefficient และประสิทธิภาพไอเซนโทรปิกต่อการเปลี่ยนแปลง ระยะห่างระหว่างแผ่นดิสก์ สำหรับ One to many | 35 |
| 2.8 คุณสมบัติของสารทำงานที่เลือกมาใช้กับโรงไฟฟ้าวัฏจักรโออาร์ซี | 38 |
| 2.9 ผลการจำลองของโรงไฟฟ้าวัฏจักรโออาร์ซีที่มีสารทำงานแตกต่างกันออกไป | 38 |
| 2.10 เงื่อนไขการจำลองของโรงไฟฟ้าวัฏจักรโออาร์ซี | 39 |
| 2.11 คุณสมบัติของสารทำงานที่เลือกมาใช้กับโรงไฟฟ้าวัฏจักรโออาร์ซี | 39 |
| 3.1 ผลการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองกับงานวิจัยของ | 50 |
| 3.2 ผลการตรวจสอบความถูกต้องของการจำลองของแบบจำลองโรงไฟฟ้าวัฏจักรคาลินา | 56 |
| 3.3 ขนาดและช่วงการทำงานของเตสลาเทอร์ไบน์ที่ใช้ในการจำลอง | 67 |
| 3.4 ผลการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการจำลองและการทดลองของ Talluri et al. (2020) โดยการ ไหลเป็นแบบสถานะเดียว | 70 |

สารบัญตาราง (ต่อ)

| ตารางที่ | หน้า |
|--|------|
| 3.5 ผลการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการจำลองและการทดลองของ Niknam et al. (2021) โดยการไหลเป็นแบบสองเฟส..... | 71 |
| 3.6 เงื่อนไขที่ใช้ในการประเมินความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของโรงไฟฟ้า..... | 74 |
| 3.7 ความสัมพันธ์ของราคาอุปกรณ์ของโรงไฟฟ้าจากบริษัทนวัตกรรม..... | 76 |
| 3.8 ค่าดัชนีราคาของ Chemical Engineering Plant Cost Index (CEPCI)..... | 77 |
| 3.9 ผลการตรวจสอบความถูกต้องของการประเมินราคาหลักจากปรับราคาโดยใช้ CEPCI ในปีที่แตกต่างกัน..... | 78 |
| 3.10 สารทำงานที่ใช้ในการจำลองเพื่อหาสารทดแทน R245fa..... | 83 |
| 4.1 เงื่อนไขการทำงานพื้นฐานของโรงไฟฟ้าวัฏจักรโออาร์ซีและเตสลาเทอร์ไบน์ที่ใช้สำหรับศึกษาอิทธิพลของตัวแปรที่ใช้ในการออกแบบ..... | 86 |
| 5.1 ผลของเงื่อนไขการทำงานของโรงไฟฟ้าที่ทำให้ได้กำลังสุทธิสูงสุดที่ความเป็นไอของสาร R236ea ก่อนเข้าเตสลาเทอร์ไบน์เปลี่ยนแปลงไป..... | 99 |
| 5.2 ผลการออกแบบของเตสลาเทอร์ไบน์ที่ทำให้ได้กำลังสูงสุดในแต่ละความเป็นไอของสาร R236ea ก่อนเข้าเตสลาเทอร์ไบน์..... | 103 |
| 5.3 ผลของความเร็วของสารทำงานและมันนิมเบอร์ที่ความเป็นไอของสาร R236ea ก่อนเข้าเตสลาเทอร์ไบน์แต่ละค่า..... | 108 |
| 5.4 ผลการเปรียบเทียบค่า LCOE กับงานวิจัยอื่น ๆ จากบริษัทนวัตกรรม..... | 119 |
| 7.1 เงื่อนไขการทำงานที่เหมาะสมสำหรับโรงไฟฟ้าวัฏจักรต่าง ๆ ที่ใช้เตสลาเทอร์ไบน์..... | 152 |

สารบัญรูป

| รูปที่ | หน้า |
|--------|--|
| 1.1 | ผังอุปกรณ์และสภาวะของสารทำงานแต่ละตำแหน่งของโรงไฟฟ้าวัฏจักรโออาร์ซีและทีแอลซี 2 |
| 1.2 | ผังอุปกรณ์และสภาวะของสารทำงานแต่ละตำแหน่งของโรงไฟฟ้าวัฏจักรคาลินาแบบ KCS-11... 4 |
| 1.3 | ลักษณะภายในของโรเตอร์ของเตสลาเทอร์ไบน์ 5 |
| 2.1 | สัดส่วนราคาอุปกรณ์ภายในโรงไฟฟ้าวัฏจักรโออาร์ซี 11 |
| 2.2 | โรงไฟฟ้าวัฏจักรคาลินาแบบ KCS-1..... 12 |
| 2.3 | โรงไฟฟ้าวัฏจักรคาลินาแบบ KCS-34 13 |
| 2.4 | โรงไฟฟ้าวัฏจักรคาลินาแบบ KSG-11 14 |
| 2.5 | ลักษณะของเตสลาเทอร์ไบน์..... 15 |
| 2.6 | ผลการเปรียบเทียบสมรรถนะของเตสลาเทอร์ไบน์ กับเทอร์ไบน์ชนิด Volume metric และ Axial 16 |
| 2.7 | เทคโนโลยีของเทอร์ไบน์สำหรับโรงไฟฟ้าวัฏจักรโออาร์ซี..... 16 |
| 2.8 | Pressure ratio และประสิทธิภาพไอเซนโทรปิกที่เปลี่ยนแปลงไป 17 |
| 2.9 | Pressure ratio และ Compactness ที่เปลี่ยนแปลงไป 17 |
| 2.10 | Pressure ratio และ Specific cost ที่เปลี่ยนแปลงไป 18 |
| 2.11 | ผังของอุปกรณ์ของโรงไฟฟ้าวัฏจักรโออาร์ซีที่ใช้เตสลาเทอร์ไบน์ 19 |
| 2.12 | ลักษณะของเตสลาเทอร์ไบน์ในการทดลอง..... 20 |
| 2.13 | T-s diagram ของโรงไฟฟ้าวัฏจักรโออาร์ซีที่ใช้เตสลาเทอร์ไบน์ 20 |
| 2.14 | Rotational speed เมื่อ Expansion ratio, β เปลี่ยนแปลงไป..... 22 |
| 2.15 | Thermodynamic power เมื่อ Expansion ratio, β เปลี่ยนแปลงไป 22 |
| 2.16 | Shaft power เมื่อ Expansion ratio, β เปลี่ยนแปลงไป 23 |
| 2.17 | Efficiency เมื่อ Expansion ratio, β เปลี่ยนแปลงไป 23 |
| 2.18 | ผังอุณหภูมิและเอนโทรปีจำเพาะของ two-phase expansion ของ R404A..... 24 |
| 2.19 | ค่าความเป็นไอของสารทำงานภายในโรเตอร์ของเตสลาเทอร์ไบน์..... 24 |

สารบัญรูป (ต่อ)

| รูปที่ | หน้า |
|---|------|
| 2.20 การกระจายตัวของ ความเร็วในแนวสัมผัส อุณหภูมิ และความดัน ของสารทำงานในโรเตอร์ของ เตสลาเทอร์ไบน์..... | 25 |
| 2.21 ประสิทธิภาพของเทอร์ไบน์ Two-phase expansion และ Single-phase expansion..... | 26 |
| 2.22 ลักษณะของเตสลาเทอร์ไบน์ที่ใช้ในการจำลอง | 26 |
| 2.23 ผลของแรงบิดที่ได้เมื่อเปลี่ยนความเร็วรอบของเตสลาเทอร์ไบน์ของแต่ละสารทำงาน | 27 |
| 2.24 ผลของแรงบิดและงานสุทธิที่ได้ของเตสลาเทอร์ไบน์ของสารทำงาน water และ SF-201-5.. | 28 |
| 2.25 ลักษณะของเตสลาเทอร์ไบน์ในการจำลองหาอิทธิพลของค่าความหนาแผ่นดิสก์และความกว้าง ระหว่างแผ่นดิสก์ | 29 |
| 2.26 ลักษณะของช่องการไหลแบบ: (a) One to One; (b) One to many..... | 29 |
| 2.27 ผลของความเร็วยภายในเตสลาเทอร์ไบน์เมื่อเปลี่ยนแปลงความหนาของแผ่นดิสก์ไปในแต่ละดิสก์ สำหรับ One to One ที่ความเร็วรอบเท่ากับ 30,000 RPM ในเงื่อนไข Case 1-0.5: (a) DC1; (b) DC2; (c) DC3..... | 31 |
| 2.28 ผลของความเร็วยภายในเตสลาเทอร์ไบน์เมื่อเปลี่ยนแปลงความหนาของแผ่นดิสก์ไปในแต่ละดิสก์ สำหรับ One to One ที่ความเร็วรอบเท่ากับ 30,000 RPM ในเงื่อนไข Case 2-0.5: (a) DC1; (b) DC2; (c) DC3..... | 31 |
| 2.29 ผลของความเร็วยภายในเตสลาเทอร์ไบน์เมื่อเปลี่ยนแปลงความหนาของแผ่นดิสก์เปลี่ยนแปลงไป ในแต่ละพื้นที่หน้าตัด สำหรับ One to One ที่ความเร็วรอบเท่ากับ 30,000 RPM: (a) DC1 for Case 1-0.5; (b) DC1 for Case 2-0.5 | 32 |
| 2.30 ผลของความเร็วยภายในเตสลาเทอร์ไบน์เมื่อเปลี่ยนแปลงระยะห่างระหว่างแผ่นดิสก์ สำหรับ One to One ที่ความเร็วรอบเท่ากับ 30,000 RPM: (a) DC1 for Case 1-0.3; (b) DC1 for Case 1-0.5; (c) DC1 for Case 1-1; (d) DC3 for Case 1-0.3; (e) DC3 for Case 1-0.5; (f) DC3 for Case 1-1..... | 33 |
| 2.31 ผลของความเร็วยภายในเตสลาเทอร์ไบน์เมื่อเปลี่ยนแปลงความหนาของแผ่นดิสก์ไปในแต่ละดิสก์ สำหรับ One to many ที่ความเร็วรอบเท่ากับ 30,000 RPM: (a) DC1 for Case 1-0.5; (b) DC1 for Case 2-0.5; (c) DC3 for Case 1-0.5;(d) DC3 for Case 2-0.5 | 34 |

สารบัญรูป (ต่อ)

| รูปที่ | หน้า |
|---|------|
| 2.32 ผลของความเร็วภายในเทสลาเทอร์ไบน์เมื่อเปลี่ยนแปลงความหนาของแผ่นดิสก์เปลี่ยนแปลงไป ในแต่ละพื้นที่หน้าตัด สำหรับ One to many: (a) Case 1-0.5; (b) Case 2-0.5 | 35 |
| 2.33 อิทธิพลของ Throat-width ratio ที่เปลี่ยนแปลงไปต่อประสิทธิภาพของเทสลาเทอร์ไบน์ | 36 |
| 2.34 อิทธิพลของ tangential velocity ratio ที่เปลี่ยนแปลงไปต่อประสิทธิภาพของเทสลาเทอร์ไบน์ | 37 |
| 2.35 ผลของประสิทธิภาพและงานสุทธิของเทสลาเทอร์ไบน์เมื่อสารทำงานเปลี่ยนแปลงไป | 38 |
| 2.36 Turbine efficiency ของสารทำงานที่แตกต่างกันออกไปที่ความเร็วรอบเท่ากับ 6000 RPM. 40 | 40 |
| 2.37 Turbine power output ของสารทำงานที่แตกต่างกันออกไปที่ความเร็วรอบเท่ากับ 6000 RPM | 40 |
| 2.38 Thermal efficiency ของโรงไฟฟ้าที่ใช้สารทำงานที่แตกต่างกันออกไปที่ความเร็วรอบเท่ากับ 6,000 RPM | 41 |
| 2.39 ผังอุณหภูมิและเอนโทรปีจำเพาะของของ: (d) Two-phase expansion; (b) Single-phase expansion..... | 42 |
| 2.40 ผังอุณหภูมิและเอนโทรปีจำเพาะของสารทำงาน Wet fluid | 43 |
| 3.1 ผังอุปกรณ์ของโรงไฟฟ้าวัฏจักรโออาร์ซีที่ใช้เทสลาเทอร์ไบน์ | 45 |
| 3.2 ผังอุณหภูมิและเอนโทรปีจำเพาะของโรงไฟฟ้าวัฏจักรโออาร์ซี | 45 |
| 3.3 รูปแบบของอุณหภูมิของสารกระแสน้ำและกระแสน้ำภายในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน .. | 47 |
| 3.4 ผังการจำลองโรงไฟฟ้าวัฏจักรโออาร์ซี..... | 48 |
| 3.5 รายละเอียดอุปกรณ์ภายในโรงไฟฟ้าวัฏจักรคาลินาแบบ KCS-11 | 51 |
| 3.6 ผังอุณหภูมิและเอนโทรปีจำเพาะของโรงไฟฟ้าวัฏจักรคาลินาแบบ KCS-11 | 52 |
| 3.7 ผังการจำลองของโรงไฟฟ้าวัฏจักรคาลินาแบบ KCS-11 | 55 |
| 3.8 ลักษณะและองค์ประกอบของเทสลาเทอร์ไบน์ | 58 |
| 3.9 การถ่ายเท Momentum ผ่าน Shear force ที่กระทำกันระหว่างผนังในเทสลาเทอร์ไบน์: (a) Velocity profile; (b) Adhesion และ Momentum transfer | 59 |

สารบัญรูป (ต่อ)

| รูปที่ | หน้า |
|--|------|
| 3.10 ปริมาตรควบคุม องค์ประกอบของแรง และความเร็วของสารทำงานในโรเตอร์ของเทสลาเทอร์โบไบน์: (ก) ปริมาตรควบคุมของสารทำงานที่พิจารณาที่จุด r_i ในโรเตอร์ของเทสลาเทอร์โบไบน์; (ข) ตำแหน่งรัศมีและองค์ประกอบความเร็วที่จุดต่อ ๆ ไปในแผ่นดิสก์ของโรเตอร์ของเทสลาเทอร์โบไบน์; (ค) สามเหลี่ยมความเร็วและองค์ประกอบของแรงที่จุด r_i ของโรเตอร์ | 64 |
| 3.11 ผังการจำลองและการหาค่าที่ดีที่สุดสำหรับอัตราส่วนความดันและขนาดของโรเตอร์ของเทสลาเทอร์โบไบน์ | 68 |
| 3.12 เอกซ์เซอร์ยี่ที่เข้าและออกในอุปกรณ์ภายใต้ปริมาตรควบคุม | 72 |
| 3.13 ผังลำดับการวิจัย | 85 |
| 4.1 อิทธิพลของการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความดันต่อความเร็วของสารทำงานที่ออกจาก นอชเชิล ความเร็วของสารทำงานที่ออกจากโรเตอร์ และความดันของสารทำงานที่ออกจากนอชเชิล | 87 |
| 4.2 กำลังจลน์ กำลังจากความดัน และพื้นที่ของโรเตอร์เมื่ออัตราส่วนความดันเปลี่ยนแปลงไป | 89 |
| 4.3 กำลังจลน์ที่ออกจากนอชเชิลและออกจากโรเตอร์เมื่ออัตราส่วนความดันเปลี่ยนแปลงไป | 90 |
| 4.4 กำลังของเทสลาเทอร์โบไบน์และประสิทธิภาพไอเซนโทรปิกเมื่ออัตราส่วนความดันเปลี่ยนแปลงไป | 91 |
| 4.5 กำลังและประสิทธิภาพไอเซนโทรปิกของเทสลาเทอร์โบไบน์เมื่อความเร็วรอบของเปลี่ยนแปลง ... | 92 |
| 4.6 Dimensionless velocity ratio และ Tangential velocity ratio ของเทสลาเทอร์โบไบน์เมื่อความเร็วรอบของเปลี่ยนแปลง | 93 |
| 4.7 ผลกระทบเมื่อเส้นผ่านศูนย์กลางของภายนอกของโรเตอร์และจำนวนดิสก์เปลี่ยนแปลงไป: (ก) กำลังของเทสลาเทอร์โบไบน์; (ข) ประสิทธิภาพไอเซนโทรปิกของเทสลาเทอร์โบไบน์ | 94 |
| 4.8 ความกะทัดรัดเมื่อเส้นผ่านศูนย์กลางของภายนอกของโรเตอร์และจำนวนดิสก์เปลี่ยนแปลงไป . | 95 |
| 4.9 กำลังและประสิทธิภาพไอเซนโทรปิกของเทสลาเทอร์โบไบน์เมื่อระยะห่างระหว่างแผ่นดิสก์ของโรเตอร์เปลี่ยนแปลงไป | 96 |
| 4.10 กำลังจลน์ กำลังจากความดัน และพื้นที่ของโรเตอร์เมื่อระยะห่างระหว่างแผ่นดิสก์ของโรเตอร์เปลี่ยนแปลงไป | 96 |

สารบัญรูป (ต่อ)

| รูปที่ | หน้า |
|---|------|
| 5.1 ผังอุปกรณ์ของโรงไฟฟ้าโออาร์ซีที่ใช้ในการศึกษาอิทธิพลของความเป็นไอของสารทำงานก่อนเข้า เตสลาเทอร์ไบน์..... | 99 |
| 5.2 ผังอุณหภูมิและเอนโทรปีจำเพาะของโรงไฟฟ้าที่มีความเป็นไวก่อนเข้าเทอร์ไบน์เท่ากับ 0 | 100 |
| 5.3 ผังอุณหภูมิและเอนโทรปีจำเพาะของโรงไฟฟ้าที่มีความเป็นไวก่อนเข้าเทอร์ไบน์เท่ากับ 1 | 101 |
| 5.4 ปริมาตรจำเพาะและความหนืดพลวัตของสารทำงานก่อนเข้าเทอร์ไบน์เมื่อความเป็นไอของสาร R236ea ก่อนเข้าเตสลาเทอร์ไบน์เปลี่ยนแปลงไป | 104 |
| 5.5 กำลังสุทธิและประสิทธิภาพของเทอร์ไบน์เมื่อความเป็นไอของสาร R236ea ก่อนเข้าเตสลาเทอร์ ไบน์เปลี่ยนแปลงไป | 105 |
| 5.6 อัตราการขยายตัวของสารทำงานเมื่อความเป็นไอของสาร R236ea ก่อนเข้าเตสลาเทอร์ไบน์ เปลี่ยนแปลงไป | 106 |
| 5.7 ผลการทำลายเอกเซอร์ยีและเอกเซอร์ยีที่ถูกทำลายทั้งหมดเมื่อความเป็นไอของสาร R236ea ก่อนเข้าเตสลาเทอร์ไบน์เปลี่ยนแปลงไป | 109 |
| 5.8 Log mean temperature difference ของอีวาโปเรเตอร์/ฮีตเตอร์และคอนเดนเซอร์เมื่อความ เป็นไอของสาร R236ea ก่อนเข้าเตสลาเทอร์ไบน์เปลี่ยนแปลงไป | 110 |
| 5.9 เงินลงทุนเริ่มต้นและปริมาณไฟฟ้าที่ผลิตได้ของโรงไฟฟ้าวัฏจักรโออาร์ซีใช้เตสลาเทอร์ไบน์ ภายใต้ค่าความเป็นไอของสาร R236ea ก่อนเข้าเตสลาเทอร์ไบน์ ราคาขายไฟฟ้า และอัตราคิด ลดที่แตกต่างกัน..... | 112 |
| 5.10 มูลค่าปัจจุบันสุทธิของต้นทุนต่อหน่วยของการผลิตไฟฟ้า (LCOE) ของโรงไฟฟ้าวัฏจักรโออาร์ซี ใช้เตสลาเทอร์ไบน์ ภายใต้ค่าความเป็นไอของสาร R236ea ก่อนเข้าเตสลาเทอร์ไบน์ ราคาขาย ไฟฟ้า และอัตราคิดลดที่แตกต่างกัน | 113 |
| 5.11 มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (NPV) ของโรงไฟฟ้าวัฏจักรโออาร์ซีใช้เตสลาเทอร์ไบน์ ภายใต้ค่าความเป็นไอ ของสาร R236ea ก่อนเข้าเตสลาเทอร์ไบน์ราคาขายไฟฟ้า และอัตราคิดลดที่แตกต่างกัน | 115 |
| 5.12 ระยะเวลาคืนทุนที่มีการคิดลด (d-PbP) ของโรงไฟฟ้าวัฏจักรโออาร์ซีใช้เตสลาเทอร์ไบน์ ภายใต้ ค่าความเป็นไอของสาร R236ea ก่อนเข้าเตสลาเทอร์ไบน์ ราคาขายไฟฟ้า และอัตราคิดลดที่ แตกต่างกัน | 117 |

สารบัญรูป (ต่อ)

| รูปที่ | หน้า |
|---|------|
| 5.13 อัตราผลตอบแทนภายใน (IRR) ของโรงไฟฟ้าวัฏจักรโออาร์ซีใช้เทสลาเทอร์ไบน์ ภายใต้ค่าความเป็นไอสาร R236ea ก่อนเข้าเทสลาเทอร์ไบน์ราคาขายไฟฟ้า และอัตราคิดลดที่แตกต่างกัน . | 118 |
| 6.1 ผลการรับความร้อนของสารทำงานในฮีตเตอร์เมื่อสารทำงานเปลี่ยนแปลงไป โดยเส้นสีแดงคือผลของสารทำงาน R245fa..... | 125 |
| 6.2 ผังของอุปกรณ์ของโรงไฟฟ้าวัฏจักรที่แอลซี | 126 |
| 6.3 ผังของอุณหภูมิและเอนโทรปีจำเพาะของสารผสม R1336mzz(Z)/R1234ze(E) ที่อัตราส่วนโดยมวล 0.75/0.25 | 126 |
| 6.4 ผังของอุณหภูมิและเอนโทรปีจำเพาะของสาร R245fa บริสุทธิ์ | 127 |
| 6.5 ผลของอุณหภูมิของสารทำงานที่เข้าฮีตเตอร์เมื่อสารทำงานเปลี่ยนแปลงไป..... | 128 |
| 6.6 การไต่ของอุณหภูมิและการทิ้งความร้อนของสารทำงานที่คอนเดนเซอร์เมื่อสารทำงานเปลี่ยนแปลงไป | 129 |
| 6.7 ผลของการไต่ของอุณหภูมิต่อการทำลายเอกเซอร์ยี่และการทิ้งความร้อนของสารทำงานที่คอนเดนเซอร์..... | 130 |
| 6.8 ประสิทธิภาพไอเซนโทรปิกของเทสลาเทอร์ไบน์เมื่อสารทำงานเปลี่ยนแปลงไป | 131 |
| 6.9 อิทธิพลของอุณหภูมิจุดเดือด และ Modified Reynold number ต่อประสิทธิภาพไอเซนโทรปิกของเทสลาเทอร์ไบน์..... | 132 |
| 6.10 อิทธิพลของอุณหภูมิจุดเดือด และ Modified Reynold number ต่อความหนืดจลน์ | 133 |
| 6.11 ความหนืดจลน์และความหนืดพลวัตของสารทำงานเมื่ออุณหภูมิจุดเดือดของสารทำงานเปลี่ยนแปลงไป | 134 |
| 6.12 ผลของกำลังสุทธิเมื่อสารทำงานของโรงไฟฟ้าวัฏจักรที่แอลซีเปลี่ยนแปลงไป | 135 |
| 6.13 ผลการเปรียบเทียบการทำลายเอกเซอร์ยี่ใน บีม เทสลาเทอร์ไบน์ ฮีตเตอร์ และ คอนเดนเซอร์เมื่อความเป็นไอของสารทำงานเปลี่ยนแปลงไป..... | 136 |
| 6.14 ผลการเปรียบเทียบผลความแตกต่างของความชันระหว่าง แหล่งให้และรับความร้อนกับสารทำงานภายในฮีตเตอร์และคอนเดนเซอร์ | 139 |

สารบัญรูป (ต่อ)

| รูปที่ | หน้า |
|---|------|
| 6.15 อิทธิพลของอุณหภูมิวิกฤตต่อกำลังสุทธิของโรงไฟฟ้าวัฏจักรที่แอลซีและการทำลาย เอ็กเซอร์ยี | 141 |
| 6.16 อิทธิพลของอุณหภูมิวิกฤตต่อกำลังสุทธิของโรงไฟฟ้าวัฏจักรที่แอลซีและการทำลายเอ็กเซอร์ยี เมื่อแหล่งความร้อนเป็น 150 °C | 142 |
| 6.17 ความสัมพันธ์ระหว่างต้นทุนต่อหน่วยในการผลิตไฟฟ้าและเงินลงทุนเริ่มต้นของโรงไฟฟ้าวัฏจักร ที่แอลซีเมื่อสารทำงานเปลี่ยนแปลงไป | 143 |
| 6.18 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราผลตอบแทนภายในและระยะเวลาในการคืนทุนของโรงไฟฟ้าวัฏจักร ที่แอลซีเมื่อสารทำงานเปลี่ยนแปลงไป | 145 |
| 7.1 ความร้อนที่ถ่ายเทเข้าและออกจากโรงไฟฟ้าวัฏจักรต่าง ๆ | 153 |
| 7.2 ผังอุณหภูมิและเอนโทรปีจำเพาะของโรงไฟฟ้า (ก) KCS-11 ใช้สารผสม ammonia/water ที่ อัตราส่วนโดยมวล 0.90/0.10 (ข) Mod. KCS-11 ammonia/water ที่อัตราส่วนโดยมวล 0.90/0.10 (ค) วัฏจักรที่แอลซีที่ใช้สารทำงานเป็น R236ea บริสุทธิ์ (ง) วัฏจักรที่แอลซีที่ใช้สาร ทำงานผสม R1336mzz(Z)/R1234ze(E) ที่อัตราส่วนโดยมวล 0.25/0.75 | 155 |
| 7.3 ประสิทธิภาพไอเซนโทรปิกของเตสลาเทอร์ไบน์เมื่อใช้งานกับโรงไฟฟ้าวัฏจักรต่าง ๆ | 157 |
| 7.4 ผลของ Modified Reynolds number และอัตราการไหลของสารทำงานที่ส่งผลต่อ ประสิทธิภาพไอเซนโทรปิกของเตสลาเทอร์ไบน์ | 158 |
| 7.5 ผลของ Re_m / \dot{m}_c และประสิทธิภาพไอเซนโทรปิกของเตสลาเทอร์ไบน์ในโรงไฟฟ้าวัฏจักรต่างๆ | 159 |
| กำลังสุทธิ กำลังจากเทอร์ไบน์ และกำลังที่ป้อนต้องการของโรงไฟฟ้าวัฏจักรต่าง ๆ | 160 |
| 7.7 การทำลายเอ็กเซอร์ยีรายอุปกรณ์และของระบบโดยรวม | 160 |
| 7.8 ประสิทธิภาพเอ็กเซอร์ยีของรายอุปกรณ์ | 161 |
| 7.9 ผลการเปรียบเทียบผลความแตกต่างของความชันระหว่าง แหล่งให้ความความร้อนและแหล่งรับ ความร้อนกับสารทำงานภายในอีวาโปเรเตอร์/ฮีตเตอร์และคอนเดนเซอร์เมื่อวัฏจักรเปลี่ยนแปลง ไป | 163 |

สารบัญรูป (ต่อ)

| รูปที่ | หน้า |
|--|------|
| 7.10 เงินลงทุนเริ่มต้นของโรงไฟฟ้าแต่ละวิสาหกิจ..... | 164 |
| 7.11 ต้นทุนต่อหน่วยของการผลิตไฟฟ้าของโรงไฟฟ้าแต่ละวิสาหกิจ | 166 |
| 7.12 มูลค่าปัจจุบันสุทธิของโรงไฟฟ้าแต่ละวิสาหกิจ | 167 |
| 7.13 ระยะเวลาคืนทุนที่มีการคิดลดของโรงไฟฟ้าแต่ละวิสาหกิจ | 168 |
| 7.14 อัตราตอบแทนภายในของโรงไฟฟ้าแต่ละวิสาหกิจ | 169 |

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

| | |
|------------------|---|
| A_{hx} | คือ พื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อนภายในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน (m^2) |
| A_e | คือ พื้นที่ผิวของโรเตอร์ในพื้นที่พิจารณา (m^2) |
| A_r | คือ พื้นที่ของโรเตอร์ (m^2) |
| A_w | คือ พื้นที่ผิวเปียก (m^2) |
| b | คือ ระยะห่างระหว่างแผ่นดิสก์ (m^2) |
| C | คือ ราคา (€ หรือ บาท) หรือ อัตราความจุความร้อน (W/K) |
| C_1 | คือ ราคาของอุปกรณ์ของโรงไฟฟ้าในปีที่ความสัมพันธถูกสร้าง (€ หรือ บาท) |
| C_2 | คือ ราคาของอุปกรณ์ของโรงไฟฟ้าในปีที่ศึกษา (€ หรือ บาท) |
| c_p | คือ ค่าสัมประสิทธิ์ความจุความร้อน (kJ/kg) |
| $Cost Index_1$ | คือ ดัชนีราคาในปีที่ศึกษา |
| $Cost Index_2$ | คือ ดัชนีราคาในปีที่ความสัมพันธถูกสร้าง |
| D | คือ เส้นผ่านศูนย์กลาง (m) |
| D_h | คือ เส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิก (m) |
| $\dot{E}x_{des}$ | คือ เอ็กเซอร์ยีที่ถูกทำลาย (kW) |
| ex | คือ เอ็กเซอร์ยีที่ทางกายภาพ (kJ/kg) |
| F | คือ แรงเฉือน (N) |
| F_θ | คือ แรงเฉือนในทิศแนวสัมผัส (N) |
| F_r | คือ แรงเฉือนในทิศตามแนวรัศมี (N) |
| f | คือ สัมประสิทธิ์เสียดทาน |
| h | คือ เอนทาลปีจำเพาะ (kJ/kg) |
| h_0 | คือ เอนทาลปีหยุดจำเพาะ (kJ/kg) |
| l | คือ โรทาลปีจำเพาะ (kJ/kg) |
| i | คือ อัตราคิดลด (%) |
| K | คือ สัมประสิทธิ์ความเร็ว |
| KE | คือ กำลังจลน์ (W) |

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

| | |
|-----------------|---|
| Ma | คือ มัคนัมเบอร์ |
| max | คือ ค่าสูงสุด |
| min | คือ ค่าต่ำสุด |
| \dot{m} | คือ อัตราการไหลเชิงมวล (kg/s) |
| N_{disk} | คือ จำนวนแผ่นดิสก์ในโรเตอร์ |
| P | คือ ความดัน (Pa) |
| PE | คือ กำลังความดัน (W) |
| PR | คือ อัตราส่วนความดันของเทสลาเทอร์ไบน์ |
| \dot{Q} | คือ อัตราการถ่ายเทความร้อน (W) |
| Q_e | คือ ปริมาตรควบคุม (m^3) |
| Re | คือ เรย์โนลด์นัมเบอร์ |
| r | คือ รัศมี |
| s | คือ เอนโทรปีจำเพาะ (kJ/kgK) |
| T | คือ อุณหภูมิ ($^{\circ}C$) |
| ΔT_{pp} | คือ ความแตกต่างของอุณหภูมิที่น้อยที่สุดภายในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน ($^{\circ}C$) |
| ΔT_{lm} | คือ ค่าความแตกต่างของอุณหภูมิเฉลี่ยแบบลอการิทึม ($^{\circ}C$) |
| U | คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อนโดยรวม (kW/m^2k) |
| u_{θ} | คือ ความเร็วในทิศสัมผัสของโรเตอร์ (m/s) |
| v | คือ ความเร็ว (m/s) |
| v_{θ} | คือ ความเร็วในทิศแนวสัมผัส (m/s) |
| v_r | คือ ความเร็วในทิศตามแนวรัศมี (m/s) |
| \dot{W} | คือ กำลัง (W) |
| \hat{W} | คือ ตัวแปรไรมิติของสัดส่วนความเร็วที่ตำแหน่งขอบของโรเตอร์ |
| w | คือ ความเร็วสัมผัส (m/s) |
| x | คือ ความเป็นไอของสารทำงาน |

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

ตัวอักษรกรีก

| | |
|--------------------|---|
| Δ | คือ ความแตกต่าง |
| β | คือ มุมของความเร็วสัมพัทธ์ ($^{\circ}$) |
| δ_{disk} | คือ ความหนาของแผ่นดิสก์ในโรเตอร์ (m) |
| ϵ | คือ ความไม่เรียบของผิว (m) หรือ ประสิทธิภาพของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน |
| η | คือ ประสิทธิภาพ (%) |
| κ | คือ บัลค์มอดูลัส (Pa) |
| μ | คือ ความหนืดพลวัต (Pa·s) |
| ρ | คือ ความหนาแน่น (kg/m^3) |
| ν | คือ ปริมาตรจำเพาะ (m^3/kg) |
| τ_w | คือ ความเครียดเฉือนที่ผิวผนังของแผ่นดิสก์ (N/m^2) |
| σ | คือ อัตราส่วนของความเร็วในแนวสัมผัส |
| φ | คือ ความเครียดจำเพาะ (N/kg) |
| φ_{θ} | คือ ความเครียดจำเพาะในทิศแนวสัมผัส (N/kg) |
| φ_r | คือ ความเครียดจำเพาะในทิศตามแนวรัศมี (N/kg) |
| ω | คือ ความเร็วรอบของโรเตอร์ (RPM หรือ rad/s) |

ตัวห้อย

| | |
|--------------------|---------------------------|
| <i>actual</i> | คือ จริง |
| <i>o</i> | คือ สิ่งแวดล้อม |
| <i>c</i> | คือ ช่องของระหว่างโรเตอร์ |
| <i>cold</i> | คือ สารเย็น |
| <i>cap</i> | คือ ต้นทุน |
| <i>cond</i> | คือ คอนเดนเซอร์ |
| <i>cw</i> | คือ น้ำหล่อเย็น |
| <i>electricity</i> | คือ ไฟฟ้า |
| <i>evap</i> | คือ อีวาโปเรเตอร์ |

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

| | |
|------------------|------------------------------------|
| <i>ex</i> | คือ เอกเซอร์ยี |
| <i>g</i> | คือ สถานะเป็นไอ |
| <i>gen</i> | คือ เครื่องผลิตไฟฟ้า |
| <i>heater</i> | คือ ฮีตเตอร์ |
| <i>hot</i> | คือ สารร้อน |
| <i>hs</i> | คือ แหล่งความร้อน |
| <i>hx</i> | คือ อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน |
| <i>in</i> | คือ ทางเข้า |
| <i>isen</i> | คือ ไอเซนโทรปิก |
| <i>inst</i> | คือ การติดตั้ง |
| <i>invest</i> | คือ การลงทุน |
| <i>l</i> | คือ สถานะเป็นของเหลว |
| <i>m</i> | คือ ปรับปรุง |
| <i>mf</i> | คือ อัตราส่วนโดยมวล |
| <i>O & M</i> | คือ ดำเนินงานและซ่อมบำรุง |
| <i>out</i> | คือ ทางออก |
| <i>pump</i> | คือ ปั๊ม |
| <i>Rec</i> | คือ เครื่องกู้คืนพลังงานจากสารร้อน |
| <i>Rec</i> | คือ เครื่องกู้คืนพลังงานจากสารร้อน |
| <i>screw</i> | คือ สกรูเอ็กแพนเดอร์ |
| <i>TP</i> | คือ สารที่มีสถานะเป็นของผสม |
| <i>turbine</i> | คือ เทอร์ไบน์ |
| <i>wf</i> | คือ สารทำงานในโรงไฟฟ้า |

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

ความสำคัญของพลังงานหมุนเวียนที่เพิ่มสูงขึ้นได้นำไปสู่การใช้โรงไฟฟ้าวัฏจักรโออาร์ซี (Organic Rankine Cycle: ORC) อย่างแพร่หลาย เพื่อนำพลังงานหมุนเวียนกลับมาใช้ประโยชน์ในการผลิตไฟฟ้า โดยโรงไฟฟ้าวัฏจักรโออาร์ซี เป็นเทคโนโลยีที่สามารถนำความร้อนระดับอุณหภูมิต่ำกลับมาใช้ในการผลิตไฟฟ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยมีจุดเด่นคือ ใช้เงินลงทุนเริ่มต้นต่ำ ต้องการการซ่อมบำรุงน้อย และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม (Biswas et al., 2022)

นอกจากนี้ ยังได้รับความนิยมอย่างกว้างขวาง (Tchanche et al., 2011) โดยจากการสำรวจในปี ค.ศ. 2016 มีการติดตั้งรวมกันมากกว่า 2,700 MW (Li et al., 2023) ทั้งนี้ โรงไฟฟ้าวัฏจักรโออาร์ซีเหมาะสำหรับแหล่งความร้อนพลังงานหมุนเวียนระดับอุณหภูมิปานกลางถึงต่ำ เช่น ไบโอบีโอม (Colwell et al., 2023); (Roumpedakis et al., 2019); (Kalina et al., 2019)] พลังงานความร้อนใต้พิภพ (Marrasso et al., 2016) และพลังงานแสงอาทิตย์ (Ahmed et al., 2007)

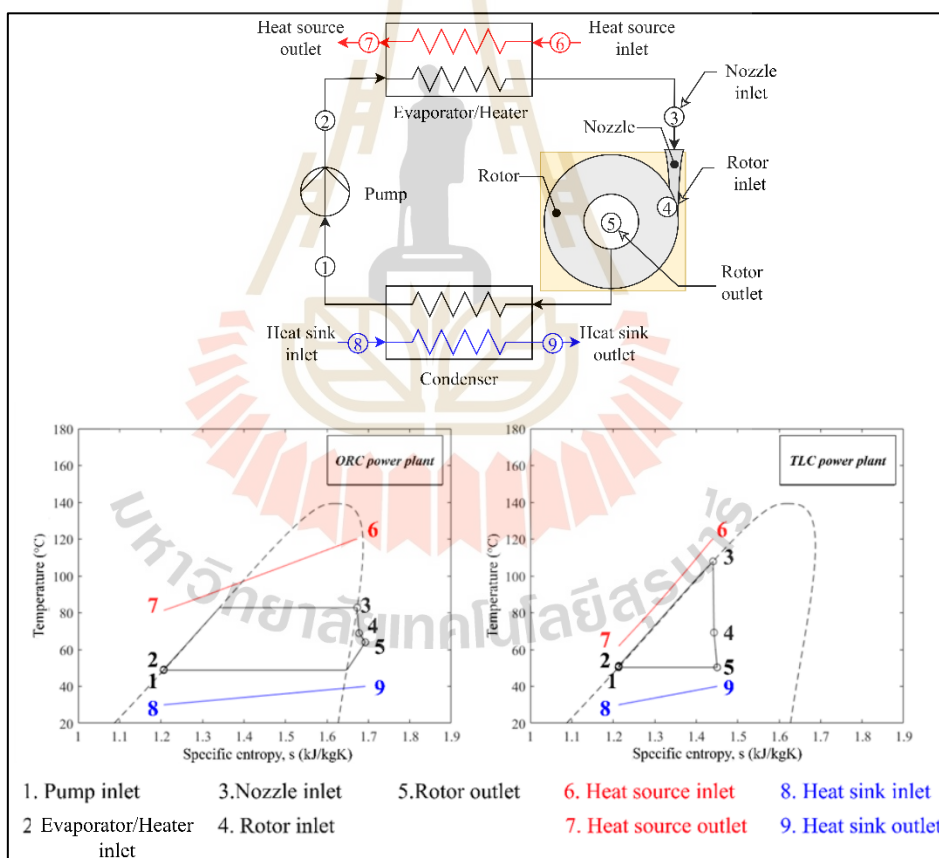
โรงไฟฟ้าอีกรูปแบบหนึ่งซึ่งเป็นอีกชนิดที่น่าสนใจ คือโรงไฟฟ้าวัฏจักรที่แอลซี (Trilateral Cycle–Organic Rankine Cycle: TLC) ซึ่งสามารถผลิตไฟฟ้าได้มากกว่าโรงไฟฟ้าวัฏจักรโออาร์ซี โดยความแตกต่างที่สำคัญระหว่างระบบทั้งสองอยู่ที่สถานะของสารทำงานก่อนเข้าสู่เทอร์ไบน์ โดยในโรงไฟฟ้าวัฏจักรโออาร์ซี สารทำงานจะอยู่ในสถานะไออิ่มตัว (Saturated vapor) ขณะที่ในโรงไฟฟ้าวัฏจักรที่แอลซี สารทำงานจะเป็นของเหลวอิ่มตัว (Saturated liquid) ซึ่งสามารถเปรียบเทียบลักษณะการทำงานได้จากผังอุณหภูมิต่ำและเอนโทรปีจำเพาะของทั้งสองระบบดังแสดงในรูปที่ 1.1

ความสำคัญของพลังงานหมุนเวียนที่เพิ่มสูงขึ้นได้นำไปสู่การใช้โรงไฟฟ้าวัฏจักรโออาร์ซี (Organic Rankine Cycle: ORC) อย่างแพร่หลาย เพื่อนำพลังงานหมุนเวียนกลับมาใช้ประโยชน์ในการผลิตไฟฟ้า โดยโรงไฟฟ้าวัฏจักรโออาร์ซี เป็นเทคโนโลยีที่สามารถนำความร้อนระดับอุณหภูมิต่ำกลับมาใช้ในการผลิตไฟฟ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยมีจุดเด่นคือ ใช้เงินลงทุนเริ่มต้นต่ำ ต้องการการซ่อมบำรุงน้อย และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม (Biswas et al., 2022)

นอกจากนี้ ยังได้รับความนิยมอย่างกว้างขวาง (Tchanche et al., 2011) โดยจากการสำรวจในปี ค.ศ. 2016 มีการติดตั้งรวมกันมากกว่า 2,700 MW (Li et al., 2023) ทั้งนี้ โรงไฟฟ้าวัฏจักรโอ

อาร์ซีเหมาะสำหรับแหล่งความร้อนพลังงานหมุนเวียนระดับอุณหภูมิมิปานกลางถึงต่ำ เช่น ไบโอมแอส [(Colwell et al., 2023); (Roumpedakis et al., 2019); (Kalina et al., 2019)] พลังงานความร้อนใต้พิภพ (Marrasso et al., 2016) และพลังงานแสงอาทิตย์ (Ahmed et al., 2007)

โรงไฟฟ้าอีกรูปแบบหนึ่งซึ่งเป็นอีกชนิดที่น่าสนใจ คือโรงไฟฟ้าวัฏจักรที่แอลซี (Trilateral Cycle–Organic Rankine Cycle: TLC) ซึ่งสามารถผลิตไฟฟ้าได้มากกว่าโรงไฟฟ้าวัฏจักรโออาร์ซี โดยความแตกต่างที่สำคัญระหว่างระบบทั้งสองอยู่ที่สถานะของสารทำงานก่อนเข้าสู่เทอร์ไบน์ โดยในโรงไฟฟ้าวัฏจักรโออาร์ซี สารทำงานจะอยู่ในสถานะไออิ่มตัว (Saturated vapor) ขณะที่ในโรงไฟฟ้าวัฏจักรที่แอลซี สารทำงานจะเป็นของเหลวอิ่มตัว (Saturated liquid) ซึ่งสามารถเปรียบเทียบลักษณะการทำงานได้จากผังอุณหภูมิจำเพาะของทั้งสองระบบดังแสดงในรูปที่ 1.1



รูปที่ 1.1 ผังอุปกรณ์และสถานะของสารทำงานแต่ละตำแหน่งของโรงไฟฟ้าวัฏจักรโออาร์ซีและที่แอลซี

โดยการศึกษาของ Fischer (2011) ได้ทำการจำลองโรงไฟฟ้าวัฏจักรที่แอลซีโดยใช้สารทำงานเป็นน้ำ และเปรียบเทียบกับโรงไฟฟ้าวัฏจักรโออาร์ซีที่ใช้สารทำงานเป็นไซโคลเพนเทน ภายใต้

เงื่อนไขแหล่งความร้อนที่อุณหภูมิ 280 °C และกำหนดประสิทธิภาพไอโซโทรปิกของเทอร์โบและปั๊ม เท่ากับ 85% และ 65% ตามลำดับ โดยให้กำลังสุทธิของทั้งสองระบบเท่ากับ 1 MW ผลการจำลอง พบว่า โรงไฟฟ้าวัฏจักรที่แอลซีให้ประสิทธิภาพสูงกว่าโรงไฟฟ้าวัฏจักรโออาร์ซี 13% หมายความว่า โรงไฟฟ้าวัฏจักรที่แอลซีสามารถเปลี่ยนพลังงานจากแหล่งความร้อนเป็นกำลังไฟฟ้าได้มากกว่า อย่างไรก็ตาม การใช้สารทำงานในสถานะของเหลวก่อนเข้าเทอร์โบอาจส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของเทอร์โบ ซึ่งในการศึกษาดังกล่าวยังไม่ได้กล่าวถึงชนิดของเทอร์โบที่ใช้กับโรงไฟฟ้าวัฏจักรที่แอลซีที่สามารถทนต่อความเป็นไอดำได้

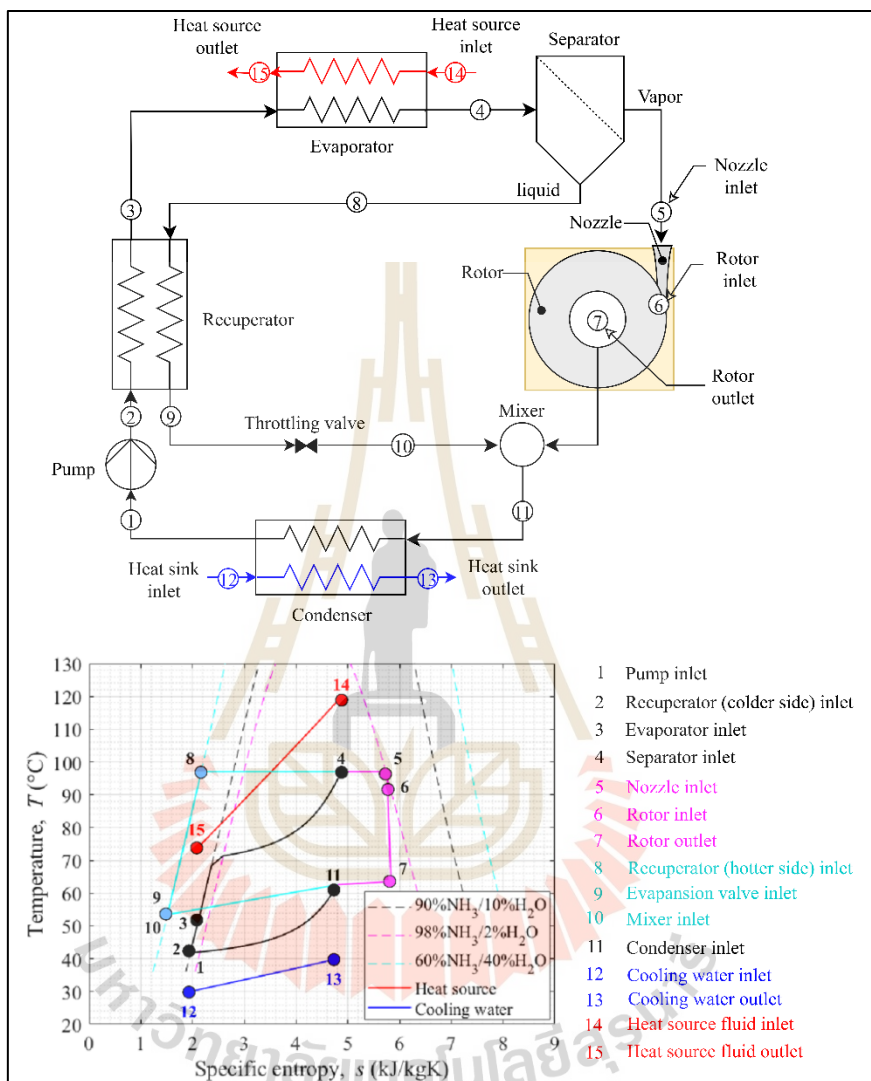
นอกจากนี้ White (2021) สำหรับโรงไฟฟ้าวัฏจักรโออาร์ซีที่ใช้ Radial inflow โดยใช้แหล่งความร้อนจากไอเสียที่อุณหภูมิ 200 °C ภายใต้ประสิทธิภาพของเทอร์โบและปั๊มที่ 80% และ 70% ตามลำดับ พบว่าเมื่อใช้สารทำงานชนิด Siloxanes ที่สถานะของเหลวอิ่มตัว สามารถเพิ่มกำลังงานสุทธิได้ถึง 15% เมื่อเทียบกับการใช้สารทำงานในสถานะไออิ่มตัว อย่างไรก็ตาม การใช้สารทำงานในสถานะของเหลวทำให้ต้องเพิ่มขนาดของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน ส่งผลให้ต้นทุนการลงทุนเริ่มต้นอาจสูงขึ้น และบทความนี้ไม่ได้ประเมินความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของกรณีดังกล่าว นอกจากนี้ เทอร์โบชนิด Radial inflow ยังมีรูปทรงซับซ้อน ซึ่งอาจทำให้มีต้นทุนการผลิตที่สูงขึ้น

จากการทำปรีทัศน์วรรณกรรม พบว่าอีกหนึ่งวัฏจักรสำหรับโรงไฟฟ้าที่น่าสนใจ คือวัฏจักรคาลินา โดยอุปกรณ์และผังของดังแสดงในรูปที่ 1.2 โดยจุดเด่นคือมีการเพิ่มเซพาราเตอร์ (Separator) เพื่อแยกเฉพาะสารทำงานที่เป็นไอเข้าเทอร์โบเพื่อลดการสึกหรอของเทอร์โบ โดยจากการศึกษาของ Kalina (1984) พบว่าโรงไฟฟ้าวัฏจักรแรงดันที่ใช้ Bottoming cycle โรงไฟฟ้าวัฏจักรคาลินามีค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงสุด 52% ในขณะที่ใช้โรงไฟฟ้าแรงดันวัฏจักรโออาร์ซีให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนเท่ากับ 39% ซึ่งน้อยกว่าอยู่ 20% ทำให้วัฏจักรคาลินาเป็นวัฏจักรที่น่าสนใจ เนื่องจากมีศักยภาพในการเปลี่ยนความร้อนเป็นไฟฟ้าได้สูง อย่างไรก็ตาม จุดด้อยสำคัญของโรงไฟฟ้าวัฏจักรคาลินาคือมีอุปกรณ์ที่ซับซ้อนอาจส่งผลให้ต้นทุนสูงได้

อีกทั้ง การศึกษาของ Yari et al. (2015) ได้จำลองเปรียบเทียบโรงไฟฟ้าวัฏจักรโออาร์ซี โรงไฟฟ้าวัฏจักรคาลินาแบบ KCS-11 และโรงไฟฟ้าวัฏจักรที่แอลซีที่แหล่งความร้อน 120 °C โดยกำหนดประสิทธิภาพของเทอร์โบเท่ากับ 85% ผลการเปรียบเทียบพบว่าโรงไฟฟ้าวัฏจักรที่แอลซีซึ่งใช้สารทำงานที่มีความเป็นไอต่ำก่อนเข้าเทอร์โบให้กำลังงานสุทธิสูงสุด โดยสูงกว่าโรงไฟฟ้าวัฏจักรโออาร์ซีและโรงไฟฟ้าวัฏจักรคาลินาแบบ KCS-11 ถึง 67% และ 74% ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าการยอมให้สารทำงานอยู่ในสถานะของเหลวก่อนเข้าเทอร์โบสามารถเพิ่มพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้อย่างมีนัยสำคัญ

อย่างไรก็ตาม ในการจำลองโรงไฟฟ้าส่วนใหญ่นิยมกำหนดค่าประสิทธิภาพของเทอร์โบคงที่ไม่ว่าความเป็นไอสารทำงาน รวมถึงชนิดของสารทำงานเปลี่ยนแปลงที่เปลี่ยนแปลง ทำให้ไม่สามารถ

ประเมินผลกระทบของความเป็นไอของสารทำงานและคุณสมบัติของสารทำงานที่กระทบต่อประสิทธิภาพของเทอร์ไบน์ได้อย่างชัดเจน

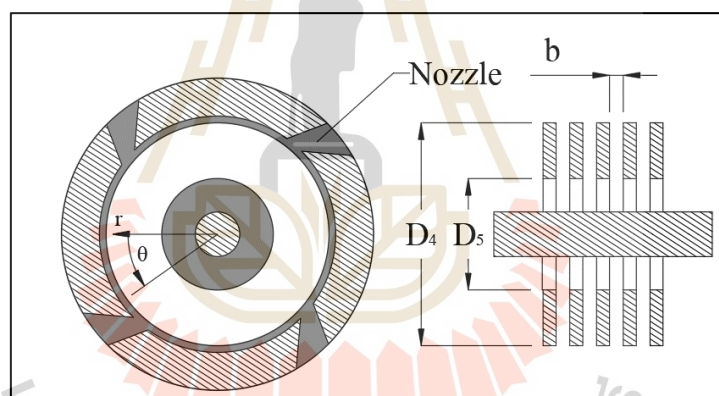


รูปที่ 1.2 ผังอุปกรณ์และสถานะของสารทำงานแต่ละตำแหน่งของโรงไฟฟ้าวัฏจักรคาลินาแบบ KCS-11

จากการศึกษาของ ธงชัย เทียมทัด และ อาทิตย์ คุณศรีสุข (2565) พบว่า สำหรับโรงไฟฟ้าวัฏจักรคาลินาที่แหล่งความร้อนอุณหภูมิ 100 120 และ 150 °C โดยทำการศึกษาเพื่อหาโรงไฟฟ้าวัฏจักรคาลินาสามลักษณะที่เหมาะสมได้แก่ KCS-34 KCS-11 และ KSG-1 ทั้งนี้ โดยผลการจำลองพบว่า KCS-34 ให้กำลังงานสุทธิสูงสุดที่เท่ากับ 12.84 kW รองลงมาเป็น KCS-11 คือ 9.46 kW ที่แหล่งความร้อนเท่ากับ 120 °C นอกจากนี้ ขนาดของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนโดยรวมของ KSG-1 นั้น

มีค่ามากกว่า 8.87% และ 8.15% ของ KSG-34 และ KCS-11 ตามลำดับ ดังนั้นจึงนำโรงไฟฟ้าวัฏจักรคาลินามาเป็นอีกหนึ่งตัวเปรียบเทียบ โดยที่สนใจศึกษา KCS-11 เนื่องจาก มีขนาดของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่น้อยและได้กำลังสุทธิใกล้เคียงกับแบบ KCS-34 โดยผังอุณหภูมิและเอนโทรปีจำเพาะของโรงไฟฟ้าวัฏจักรคาลินาเป็นดังรูปที่ 1.2

ทั้งนี้ ข้อจำกัดของการใช้สารทำงานในสถานะของเหลวอิมพัลส์คือการสึกหรอของเทอร์ไบน์ ซึ่งต้องใช้ เทอร์ไบน์เป็นพิเศษภายใต้ความเป็นไอต่ำ ปัจจุบันมีการศึกษาเทอร์ไบน์ชนิดหนึ่งซึ่งมีศักยภาพในการใช้งานกับสารทำงานในสถานะของเหลวได้ดี โดยที่ประสิทธิภาพเอนโทรปียังคงสูงคือ เทสลาเทอร์ไบน์ (Kachawong and Koonsrisuk, 2025) ซึ่งมีคุณสมบัติเด่นคือสามารถทำงานกับสารที่มีความเป็นไอต่ำและมีต้นทุนต่ำ เนื่องจากมีรูปทรงที่ไม่ซับซ้อน อีกทั้ง จากรายงานของ Palagi et al. (2019) พบว่า ต้นทุนของเทอร์ไบน์คิดเป็นสัดส่วนราว 25% – 45% ของงบลงทุนทั้งหมดในโรงไฟฟ้าวัฏจักรโออาร์ซี ดังนั้น หากใช้เทสลาเทอร์ไบน์ ซึ่งสามารถใช้งานร่วมกับสารทำงานในสถานะของเหลว และมีต้นทุนต่ำ จะช่วยเพิ่มสมรรถนะด้านอุณหพลศาสตร์และเศรษฐศาสตร์ของโรงไฟฟ้าได้



รูปที่ 1.3 ลักษณะภายในของโรเตอร์ของเทสลาเทอร์ไบน์

โดยเทสลาเทอร์ไบน์ซึ่งถูกพัฒนาโดย Nikola Tesla (1913) ซึ่งกำลังได้รับความสนใจเนื่องจากสามารถทำงานร่วมกับสารทำงานที่มีความเป็นไอของสารทำงานต่ำได้ อีกทั้งยังมีโครงสร้างที่เรียบง่ายซึ่งไม่ใช่ใบพัด (Bladeless turbine) โดยภายในโรเตอร์ประกอบด้วยดิสก์หลายแผ่นวางซ้อนกัน ดังรูปที่ 1.3 มีช่องว่างให้สารทำงานไหลผ่านเพื่อถ่ายเทพลังงาน โดยการไหลของสารทำงานจะเริ่มจากบริเวณขอบจานเข้าสู่ศูนย์กลางของโรเตอร์ของเทสลาเทอร์ไบน์ การถ่ายเทพลังงานในเทสลาเทอร์ไบน์อาศัยอิทธิพลของการไหลแบบหนืด (Viscous flow effect) เพื่อส่งต่อโมเมนตัมจากของไหลไปยังโรเตอร์ของเทสลาเทอร์ไบน์ ซึ่งสามารถแปลงเป็นพลังงานกลได้ (Rusin et al., 2021)

ความพิเศษของเตสลาเทอร์โบอินคือได้ออกแบบให้ใช้งานกับของไหลทั้งน้ำและอากาศ ซึ่งน่าสนใจว่าน้ำเป็นของเหลว จึงมีความเป็นไปได้ที่สามารถใช้กับโรงไฟฟ้าที่มีความเป็นไอของสารทำงานก่อนเข้าเทอร์โบอินต่ำได้ ซึ่งเป็นคุณลักษณะที่ตรงกับสถานการณ์ในระบบโรงไฟฟ้าวัฏจักรโออาร์ซีหรือที่แอลซีเมื่อใช้กับแหล่งความร้อนที่มีอุณหภูมิแหล่งความร้อนไม่แน่นอน ดังนั้น การนำเตสลาเทอร์โบอินมาประยุกต์ใช้กับโรงไฟฟ้าวัฏจักรโออาร์ซีจึงเป็นแนวทางที่มีศักยภาพในการเพิ่มการผลิตพลังงานไฟฟ้า

นอกจากนี้ อีกหนึ่งในจุดแข็งของเตสลาเทอร์โบอินคือโครงสร้างที่เรียบง่ายและต้นทุนการผลิตที่ต่ำกว่าชนิดอื่น เช่น Scroll Screw Roots และ Piston expander เนื่องจากเตสลาเทอร์โบอินประกอบด้วยแผ่นดิสก์ที่เรียงซ้อนกัน จึงสามารถผลิตได้ง่ายและมีต้นทุนต่ำ โดยจากการศึกษาของ Dumont et al. (2019) ได้ศึกษาและเปรียบเทียบเทอร์โบอินชนิดดังกล่าวกับเตสลาเทอร์โบอิน ที่ใช้ในโรงไฟฟ้าโออาร์ซี พบว่า เตสลาเทอร์โบอิน มีต้นทุนต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับเทอร์โบอินชนิดอื่น และทำงานได้ภายใต้สภาวะที่หลากหลาย นอกจากนี้ งานวิจัยของ Talluri et al. (2020) ที่ทดลองโรงไฟฟ้าโออาร์ซีใช้สารทำงาน R1233zd(E) โดยใช้เตสลาเทอร์โบอินในการดึงกำลังจากสารทำงาน พบว่า กำลังที่ได้จากเทอร์โบอินสูงถึง 371 W และมีประสิทธิภาพ 9.62% ที่ความเร็วรอบ 4,000 RPM

จากการทำศึกษางานวิจัยก่อนหน้าแสดงให้เห็นว่าเตสลาเทอร์โบอินเป็นอุปกรณ์ที่น่าสนใจเพื่อนำไปใช้ในสำหรับโรงไฟฟ้าโออาร์ซี เนื่องจากสามารถทำงานภายใต้ความเป็นไอต่ำได้ อีกทั้งยังมีรูปร่างไม่ซับซ้อน ซึ่งนำไปสู่ต้นทุนทั้งในการสร้างเทอร์โบอินที่และโรงไฟฟ้าต่ำลง นอกจากนี้ เตสลาเทอร์โบอินยังได้มีการนำไปสร้างและทดสอบจริงซึ่งแสดงให้เห็นถึงความเป็นไปได้ในการออกแบบ สร้าง และเทคโนโลยีไปใช้เพื่อเพิ่มโอกาสการนำพลังงานหมุนเวียนมาใช้มากขึ้น

นอกจากนี้ พบว่า ยังไม่มีงานวิจัยที่ศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพของเตสลาเทอร์โบอิน ในโรงไฟฟ้าวัฏจักรโออาร์ซีภายใต้สภาวะที่สารทำงานมีค่าความเป็นไอและสารทำงานที่แตกต่างกันก่อนเข้าสู่เทอร์โบอิน ส่วนใหญ่เพียงใช้ค่าประสิทธิภาพไอเซนโทรปิกแบบคงที่ ซึ่งอาจไม่สะท้อนความเป็นจริง เพราะประสิทธิภาพของเทอร์โบอินมีแนวโน้มเปลี่ยนแปลงตามสภาวะของสารทำงาน หากสามารถจำลองให้เห็นการเปลี่ยนแปลงนี้ได้ ทำให้แบบจำลองมีความแม่นยำมากขึ้น รวมถึงแสดงให้เห็นถึงพฤติกรรมการทำงานของเตสลาเทอร์โบอินอีกด้วย

เป็นที่น่าสนใจว่าโรงไฟฟ้าวัฏจักรที่แอลซีที่มีข้อจำกัดเรื่องหาเทอร์โบอินที่ใช้งานได้ยาก เนื่องจากความเป็นไอของสารทำงานต่ำแม้จะได้กำลังสุทธิที่สูง ทำให้เป็นข้อจำกัดในการเลือกเทอร์โบอิน รวมถึง โรงไฟฟ้าวัฏจักรคาลินาเองที่จำเป็นต้องมีเซพারেเตอร์เพื่อแยกเฉพาะสารที่เป็นไวก่อนเข้าเทอร์โบอินเพื่อลดการเสียหายของเทอร์โบอินส่งผลให้อัตราการไหลของสารทำงานลดลงและระบบซับซ้อน แสดงให้เห็นว่า การเลือกเทอร์โบอินมีความสำคัญ อย่างไรก็ตาม เตสลาเทอร์โบอินแสดงให้เห็นถึงข้อเด่นเพื่อก้าวข้ามข้อจำกัดดังกล่าวได้ ดังนั้น ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงต้องการใช้เตสลาเทอร์โบอิน

เพื่อจำลองภายใต้สภาวะการทำงานของโรงไฟฟ้าวัฏจักรและสารทำงานที่แตกต่างกันไปเพื่อให้ศึกษาพฤติกรรมของการทำงานของโรงไฟฟ้าและเตสลาเทอร์ไบน์

อย่างไรก็ตามได้มีการศึกษาเกี่ยวกับเตสลาเทอร์ไบน์กับโรงไฟฟ้าอยู่บ้าง อาทิ การศึกษาของ Song et al. (2017) ซึ่งใช้แหล่งความร้อนอุณหภูมิ 120 °C และสารทำงาน 7 ชนิด ได้แก่ R123, R600, R600a, R236ea, R236fa, R245ca และ R245fa พบว่า R245ca ให้ประสิทธิภาพสูงที่สุดที่ 38.7% และให้กำลังสุทธิ 1.25 kW ส่วนงานของ Zhang et al. (2023) ที่ใช้แหล่งความร้อน 100 °C และเปรียบเทียบสารทำงาน R22, R417a, R134a, R152a และ R290 พบว่า R417a ให้กำลังจากเทอร์ไบน์สูงสุดที่ 1.2 kW และประสิทธิภาพ 36%

จากปริทัศน์วรรณกรรมข้างต้น ชี้ให้เห็นว่าสมบัติของสารทำงาน เช่น ความหนืดพลวัต (Dynamic Viscosity) และ สัดส่วนการขยายตัว (Expansion ratio) มีบทบาทสำคัญในการเลือกสารสำหรับเตสลาเทอร์ไบน์ อย่างไรก็ตาม ยังไม่มีการศึกษาเปรียบเทียบสารทำงานในระบบที่ใช้เตสลาเทอร์ไบน์กับโรงไฟฟ้าวัฏจักรที่แอลซี ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมุ่งหาเกณฑ์ในการเลือกสารทำงานที่เหมาะสมในโรงไฟฟ้าวัฏจักรที่แอลซี โดยใช้คุณสมบัติต่าง ๆ ของสารทำงาน รวมถึงความหนืดพลวัตเป็นตัวแปรสำคัญ อย่างไรก็ตาม ในการศึกษานี้เป็นเพียงการศึกษาโดยใช้วัฏจักรของโรงไฟฟ้าแบบเดี่ยวซึ่งอาจยังไม่ครอบคลุม อีกทั้ง การเลือกสารทำงานโดยพิจารณาเพียงกำลังจากเทอร์ไบน์อาจไม่เพียงพอ เพราะในโรงไฟฟ้าหากปั๊มใช้กำลังมาก อาจส่งผลให้กำลังสุทธิของระบบลดลงได้ ดังนั้น งานวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงพิจารณาทั้งกำลังของเทอร์ไบน์และกำลังสุทธิของระบบร่วมกันในการในการพิจารณาสมรรถนะของโรงไฟฟ้า

นอกจากนี้ ในการเลือกสารทำงาน พบว่า R245fa เป็นสารทำงานที่เหมาะสมสำหรับโรงไฟฟ้าโออาร์ซีที่ใช้อุณหภูมิต่ำถึงปานกลาง [(Raksa-In et al., 2020); (Thematat et al., 2020); (Phueksaphanrat et al., 2020)] อย่างไรก็ตาม ข้อจำกัดสำคัญของสารนี้คือมีค่า Global Warming Potential (GWP) สูงถึง 1,030 ซึ่งส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม [(Tchanche et al., 2008); (Tchanche et al., 2015)] โดยเฉพาะในบริบทปัจจุบันที่หลายประเทศเริ่มออกข้อบังคับควบคุมค่า GWP เช่น สหภาพยุโรปที่กำหนดให้สารทำงานต้องมีค่า GWP ไม่เกิน 150 (European Parliament and the Council, 2024) โดย ในปัจจุบันได้มีการนำสารทำงานทางเลือกมาใช้แทน R245fa ในระบบทำความเย็น ซึ่งมีค่า GWP ต่ำลงอย่างมีนัยสำคัญ เช่น R1233zd(E) (GWP = 4.5) [(Eyerer et al., 2016); (Dawo et al., 2021)], R1336mzz(Z) (GWP = 2) [(Dawo et al., 2021); (Yang et al., 2019)], และ R1234ze(E) (GWP < 1) [(Yang et al., 2019); (Ziviani et al., 2019)]

นอกจากนี้การศึกษาของ Raksa-in et al. (2025) พบว่า การใช้สารทำงานเป็น ประเภทซีโอโทรปิก (Zeotropic mixtures) ช่วยเพิ่มความสามารถในการผลิตกระแสไฟฟ้าได้กับโรงไฟฟ้า ดังนั้น วิทยานิพนธ์นี้ได้ขยายการศึกษาด้วยการผสมสารทำงานเป็นคู่เพื่อให้เกิดสารประเภทซีโอโทรปิก เพื่อ

เพิ่มศักยภาพในการเพิ่มกำลังสุทธิของระบบ จากการเพิ่มการดูดซับพลังงานความร้อนได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น [(Blondel et al., 2022); (Lu et al., 2024); (Wang et al., 2022)]

จากปริทัศน์วรรณกรรมข้างต้น พบว่ายังไม่มีการศึกษาใดที่สามารถสรุปได้อย่างชัดเจนว่าในการเลือกสรรทำงานควรให้ความสำคัญกับการเลือกเพื่อให้เหมาะสมกับเทอร์โบอินหรือโรงไฟฟ้ามากกว่ากัน ดังนั้น ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงได้ศึกษาทั้งการทำงานของระบบโรงไฟฟ้าโดยรวมและการทำงานของเตลลาเทอร์โบอิน เพื่อกำหนดเกณฑ์ในการเลือกสรรทำงานที่เหมาะสม

อีกประเด็นหนึ่งที่ยังขาดในการศึกษาคือการประเมินความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของการใช้เตลลาเทอร์โบอินในโรงไฟฟ้าไออาร์ซีและโรงไฟฟ้าคาลินา ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญในการตัดสินใจลงทุน โดยตัวชี้วัดทางเศรษฐศาสตร์ที่นิยมใช้ได้แก่ Discounted payback period (d-PbP), Net Present Value (NPV), Internal Rate of Return (IRR) และ Levelized Cost of Electricity (LCOE) ซึ่งสามารถวัดทั้งระยะเวลาคืนทุน ผลตอบแทนตลอดอายุโครงการ และต้นทุนต่อหน่วยพลังงานที่ผลิตได้ [(Roumpedakis et al., 2020); (Mohammadi et al., 2020); (Quoilin et al., 2011)]

นอกจากนี้ ราคาของอุปกรณ์ภายในโรงไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลงอยู่เสมอ จึงมีการใช้ดัชนีปรับราคาที่เกี่ยวข้องว่า Chemical Engineering Plant Cost Index (CEPCI) ตามการแนะนำของ Vatauvuk et al. (2002) โดยดัชนีราคานี้นิยมใช้ในการปรับราคาของโรงไฟฟ้าวัฏจักรไออาร์ซี [(Boyaghchi et al., 2015); (Lemmens et al., 2016)] วิทยานิพนธ์นี้จึงเปรียบเทียบราคาของโรงไฟฟ้าวัฏจักรไออาร์ซี ที่คำนวณจาก correlation กับราคาจริงที่ใช้ในประเทศไทย เพื่อประเมินความเหมาะสมของวิธีการดังกล่าว

สำหรับการออกแบบเตลลาเทอร์โบอินให้ได้ขนาดที่เหมาะสมที่สุดนั้น แบบจำลองทางคณิตศาสตร์จึงมีความสำคัญ โดยงานของ Rice (1965) ได้เสนอแบบจำลองของโรเตอร์ที่ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลาย รวมถึงงานของ Cary (2010) ที่ใช้แบบจำลองนี้ในการออกแบบเทอร์โบอินสำหรับโรงไฟฟ้าไออาร์ซี อีกทั้ง Niknam et al. (2021) ยังได้เปรียบเทียบผลจากแบบจำลองนี้กับพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (CFD) พบว่าผลใกล้เคียงกัน จึงเลือกใช้แบบจำลองนี้ในการศึกษา

แหล่งความร้อนที่ใช้ในการศึกษานี้คือแหล่งความร้อนใต้พิภพ (Geothermal) ซึ่งมีความต่อเนื่องและเสถียร โดยจากข้อมูลของ Yongprawat (2022) พบว่าแหล่งความร้อนใต้พิภพในประเทศไทยมีอุณหภูมิระหว่าง 130 °C ถึง 160 °C โดยการเลือกให้น้อยกว่าช่วงแหล่งอุณหภูมิของแหล่งความร้อนเนื่องจากเพื่อให้มั่นใจได้ว่าโรงไฟฟ้าที่ออกแบบสามารถทำงานได้ นอกจากนี้ เมื่อนำพลังงานความร้อนมาใช้ อุณหภูมิน้ำที่ปรับความร้อนมาจะมีอุณหภูมิต่ำลง ดังนั้น จึงเลือกอุณหภูมิ 120 °C เพื่อใช้เป็นตัวแทนแหล่งความร้อนในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ดังนั้น งานวิจัยนี้ได้ทำการจำลองการทำงานของโรงไฟฟ้าโดยใช้วัฏจักรไออาร์ซีที่ใช้เตลลาเทอร์โบอิน โดยแบ่งออกเป็นทั้งสิ้น 4 การศึกษาได้แก่ การศึกษาอิทธิพลของตัวแปรที่ใช้ในการ

ออกแบบเตสลาเทอร์โบนเพื่อให้ได้กำลังและประสิทธิภาพไอเซนโทรปิกสูงสุด การศึกษาความเป็นไอของสารทำงานก่อนเข้าเตสลาเทอร์โบนโดยเพื่อให้เห็นซึ่งกำหนดค่าความเป็นไอของสารทำงานก่อนเข้าเทอร์โบนเท่ากับ 0.00 (เรียกว่าโรงไฟฟ้าวัฏจักรที่แอลซี), 0.25, 0.50, 0.75 และ 1.00 ว่าส่งผลอย่างไรกับการทำงานของเตสลาเทอร์โบนและโรงไฟฟ้า นอกจากนี้ ยังได้ศึกษาอิทธิพลของการใช้สารซีไอโทรปิกกับโรงไฟฟ้าที่ใช้เตสลาเทอร์โบน รวมถึงการจำลองโรงไฟฟ้าวัฏจักรคาลินาแบบ KCS-11 โดยทั้งสองระบบใช้เตสลาเทอร์โบนและแหล่งความร้อนจากพลังงานความร้อนใต้พิภพที่อุณหภูมิ 120 °C จากนั้นจึงวิเคราะห์กำลังและประสิทธิภาพของเทอร์โบน พร้อมทั้งประเมินความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ด้วยเกณฑ์ Discounted Payback Period, Net Present Value, Internal Rate of Return และ Levelized Cost of Electricity เพื่อหาโรงไฟฟ้าที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการใช้งานร่วมกับเตสลาเทอร์โบน

1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย

โดยการศึกษาความเป็นไปได้ในการนำเตสลาเทอร์โบนไปใช้กับโรงไฟฟ้าวัฏจักรโออาร์ซี มีวัตถุประสงค์ดังต่อไปนี้

1. เพื่อออกแบบเตสลาเทอร์โบนที่ใช้ในโรงไฟฟ้าวัฏจักรต่าง ๆ เพื่อให้ได้กำลังไฟฟ้าสุทธิสูงสุด
2. เพื่อศึกษาตัวแปรที่ส่งผลกระทบต่อสมรรถนะของเตสลาเทอร์โบน
3. เพื่อประเมินทางเศรษฐศาสตร์ของโรงไฟฟ้าที่ใช้เตสลาเทอร์โบน

1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

1. ใช้การจำลองเชิงตัวเลขโดยใช้โปรแกรม MATLAB และ NIST REFPROP
2. ทดลองภายใต้แหล่งความร้อนอุณหภูมิ 120 °C และแหล่งทิ้งความร้อนอุณหภูมิ 30 °C
3. ใช้กำลังงานสุทธิของโรงไฟฟ้าวัฏจักรโออาร์ซีและประสิทธิภาพของเตสลาเทอร์โบนเป็นตัวแปรที่ใช้ในการประเมินสมรรถนะ

1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

สามารถหาขนาดของเตสลาเทอร์โบนที่เหมาะสมและที่ใช้กับโรงไฟฟ้าวัฏจักรต่าง ๆ เพื่อให้ได้กำลังไฟฟ้าสุทธิสูงสุดได้

บทที่ 2

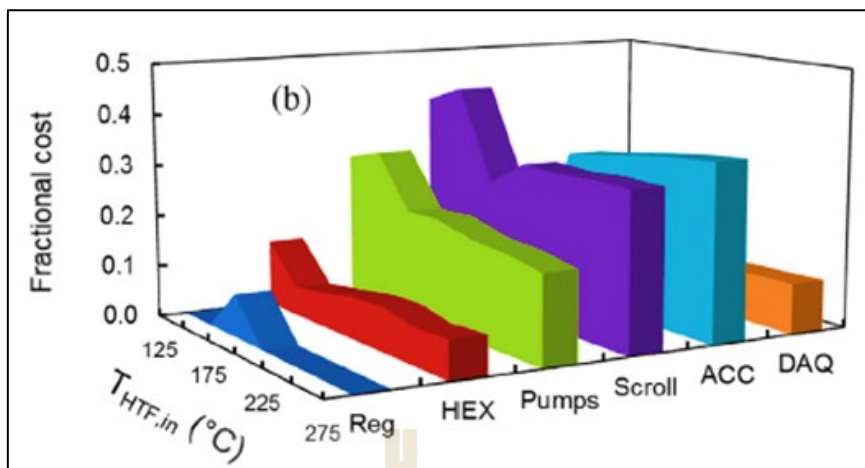
ปรีทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

ปัจจุบันการผลิตไฟฟ้าโดยใช้แหล่งความร้อนจากความร้อนทิ้งกลับมาใช้ประโยชน์ (Waste Heat Recovery) นิยมใช้โรงไฟฟ้าวัฏจักรโออาร์ซี (Organic Rankine cycle: ORC) ที่สารทำงานเป็นสารอินทรีย์ที่มีจุดเดือดต่ำ เนื่องจากความร้อนที่มีอุณหภูมิต่ำ (Palagi, 2019) ทั้งนี้การศึกษาโรงไฟฟ้าวัฏจักรโออาร์ซีในปรีทัศน์วรรณกรรมมีทั้งในการจำลองและการทดลองรายละเอียดเป็นดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ผลการศึกษาโรงไฟฟ้าวัฏจักรโออาร์ซี

| ขนาดของโรงไฟฟ้า (kW) | สารทำงาน | อุณหภูมิแหล่งความร้อน (°C) | ชนิดการศึกษา | รายการอ้างอิง |
|----------------------|-------------|----------------------------|--------------|------------------------|
| 81.5 | R245fa | 180 | จำลอง | Palagi et al. (2016) |
| 85.0 | R1234ze | 100 - 200 | จำลอง | Li et al. (2017) |
| 190.5 | cyclohexane | 150 - 350 | จำลอง | Xu et al. (2015) |
| 26.6 | R227ea | 120 | ทดลอง | Pantaleo et al. (2017) |
| 32.7 | R245fa | 60 - 200 | ทดลอง | Kang (2012) |
| 45.0 | R1233zd-E | 130 | ทดลอง | Eyerer (2016) |



รูปที่ 2.1 สัดส่วนราคาอุปกรณ์ภายในโรงไฟฟ้าวัฏจักรโออาร์ซี
ที่มา: (อาทิตย์ คุณศรีสุข และคณะ, 2561)

นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาถึงงบลงทุนของโรงไฟฟ้าวัฏจักรโออาร์ซี พบว่า Scroll expander นั้นมีราคาการลงทุนสูงที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับอุปกรณ์อื่นภายในวัฏจักร ซึ่งคิดเป็น 25%-45% ของงบลงทุนทั้งระบบ ดังรูปที่ 2.1 ดังนั้น ถ้าสามารถออกแบบให้เทอร์โบมีความเหมาะสมและราคาถูกลงโดยที่สามารถผลิตไฟฟ้าได้มากขึ้นจะส่งผลให้สามารถคืนทุนได้เร็วมากยิ่งขึ้น

2.2 โรงไฟฟ้าวัฏจักรที่แอลซี

นอกจากนี้ ยังมีโรงไฟฟ้าอีก 1 วัฏจักร คือโรงไฟฟ้า Trilateral cycle-organic Rankine cycle (TLC) ซึ่งสามารถผลิตไฟฟ้าที่สูงกว่าโรงไฟฟ้าวัฏจักรโออาร์ซี (Yu et al., 2018) โดยความแตกต่างของโรงไฟฟ้าทั้งสองคือความเป็นไอของสารทำงานก่อนเข้าเทอร์โบ โดยโรงไฟฟ้าวัฏจักรโออาร์ซีความเป็นไอของสารทำงานคือ ไออิ่มตัวในขณะที่ โรงไฟฟ้าวัฏจักรที่แอลซีคือของเหลวอิ่มตัวโดยฝังอุณหภูมิและเอนโทรปีจำเพาะของโรงไฟฟ้าทั้ง 2 วัฏจักรแสดงดังรูปที่ 1.1

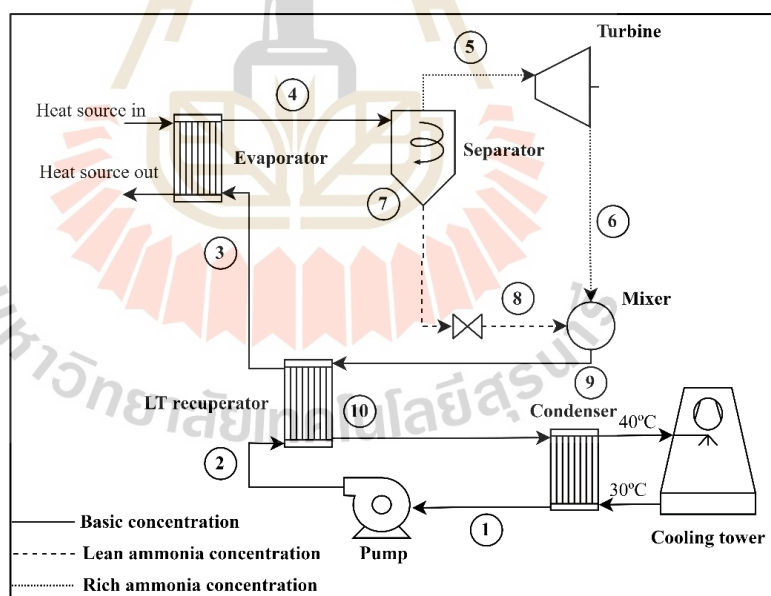
ซึ่งในการศึกษาของ (Yari et al., 2015) ได้ทำการจำลองการใช้ Trilateral ORC ที่แหล่งความร้อนเท่ากับ 120°C ได้งานสุทธิสูงสุดเท่ากับ 2.3 MW โดยใช้ Isobutane เป็นสารทำงาน ประสิทธิภาพเชิงความร้อนเท่ากับ 8.16%

อย่างไรก็ตาม ข้อจำกัดสำคัญของโรงไฟฟ้าวัฏจักรที่แอลซีคือความเป็นไอของสารทำงานก่อนเข้าเทอร์โบเป็นของเหลวส่งผลให้เกิดความเสียหายที่จะหาเทอร์โบนำมาใช้กับโรงไฟฟ้าวัฏจักรนี้ ถึงแม้ว่าจะให้กำลังสุทธิของโรงไฟฟ้าออกมาสูง

2.3 โรงไฟฟ้าวัฏจักรคาลินา

โดยจากการศึกษาของ Wang et al. (2016) พบว่าการโรงไฟฟ้าวัฏจักรคาลินาผ่านการที่ใช้ใช้งาน solar collector มาเป็นแหล่งความร้อนของ โดยมีอุณหภูมิแหล่งความร้อนสูงสุดเท่ากับ 122 °C โดยทำการปรับความดันที่เข้าเทอร์ไบน์และความเข้มข้นของแอมโมเนียให้เหมาะสม เพื่อหาช่วงการทำงานที่ได้ประสิทธิภาพของโรงไฟฟ้าที่มากที่สุด โดยผลจำลองทางคณิตศาสตร์ พบว่าประสิทธิภาพของโรงไฟฟ้าที่ผลิตได้มากที่สุดเท่ากับ 8.54%

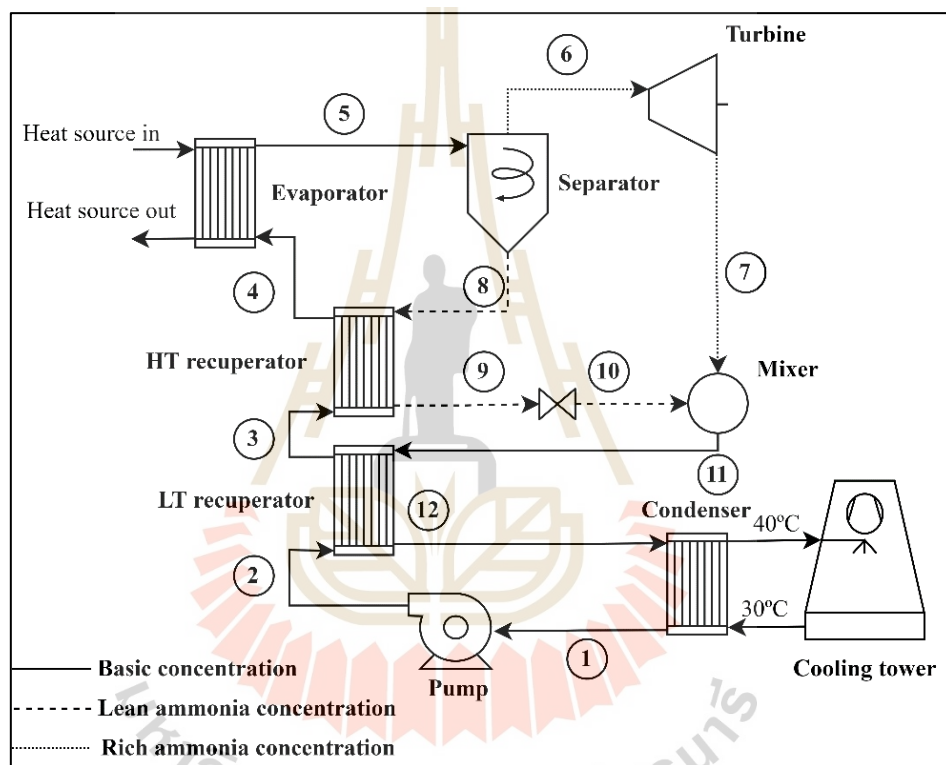
นอกจากนี้ Sun et al. (2014) เป็นศึกษาการที่ใช้ Solar collector มาเป็นแหล่งความร้อนของโรงไฟฟ้าวัฏจักรคาลินาแบบ KCS-11 ดังรูปที่ 2.3 โดยวิเคราะห์ผ่านหลักการของ Energy และ Exergy ซึ่งจากการศึกษา พบว่าอัตราการไหลของสารทำงาน ความเข้มข้นของแอมโมเนียเป็นตัวแปรที่ส่งผลต่อความสามารถในการรับความร้อนของ Solar collector และค่า Energy และ Exergy อย่างมีนัยสำคัญ โดยกำลังไฟฟ้าสุทธิที่ผลิตได้มากที่สุดมีค่าเท่ากับ 491 kW ซึ่งการปรับความเข้มข้นของแอมโมเนียถือว่าเป็นจุดเด่นที่สำคัญของโรงไฟฟ้าวัฏจักรคาลินาเพื่อให้สามารถปรับให้เหมาะสมกับแหล่งความร้อนเมื่อเทียบกับโรงไฟฟ้าวัฏจักรไออาร์ซี



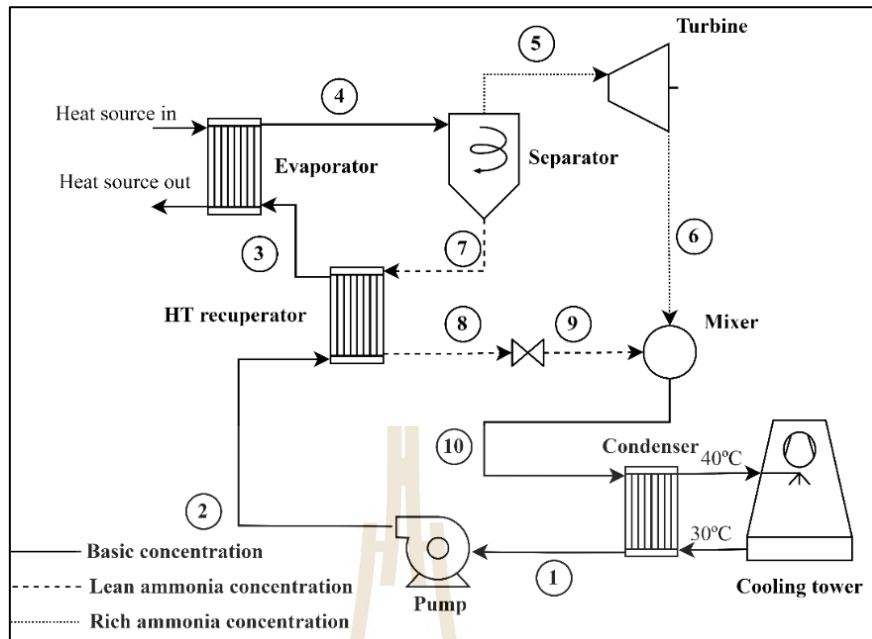
รูปที่ 2.2 โรงไฟฟ้าวัฏจักรคาลินาแบบ KCS-1

ทั้งนี้ สำหรับวัฏจักรคาลินามีการจัดเรียงหลากหลายรูปแบบซึ่งให้ผลลัพธ์แตกต่างกันออกไป อาทิ Mergner and Weimer (2015) ได้ทำการศึกษาและเปรียบเทียบระหว่าง KSG-1 กับ KCS-34 ดังรูปที่ 2.2 และ 2.3 ตามลำดับ ผ่านการจำลองที่แหล่งความร้อนเท่ากับ 93 °C ในช่วงความเข้มข้น

ของแอมโมเนียตั้งแต่ 25% – 100% โดยผลการจำลองแสดงให้เห็นว่า เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของแอมโมเนียทำให้ Evaporation กับ Condensation pressure เพิ่มขึ้น โดยโรงไฟฟ้าทั้ง 2 ชนิดมี Condensation pressure ที่ใกล้เคียงกัน ยกเว้น Evaporation pressure ของ KSG-1 ที่น้อยกว่า ส่งผลให้สารทำงานสามารถเดือดกลายเป็นไอได้มากกว่า ปริมาณของสารทำงานที่เข้าเทอร์ไบน์ของ KSG-1 จึงมากกว่า KCS-34 สูงสุดเท่ากับ 20% ส่งผลให้กำลังไฟฟ้าสุทธิที่ผลิตได้ของ KSG-1 มากกว่า KCS-34 อย่างไรก็ตามหากใช้ความเข้มข้นของแอมโมเนียที่ปริมาณน้อย KCS-34 จะผลิตกำลังไฟฟ้าสุทธิได้มากกว่า KSG-1 เนื่องจากความแตกต่างของปริมาณของสารทำงานที่เข้าเทอร์ไบน์มีค่าลดลง



รูปที่ 2.3 โรงไฟฟ้าวัฏจักรคาลินาแบบ KCS-34



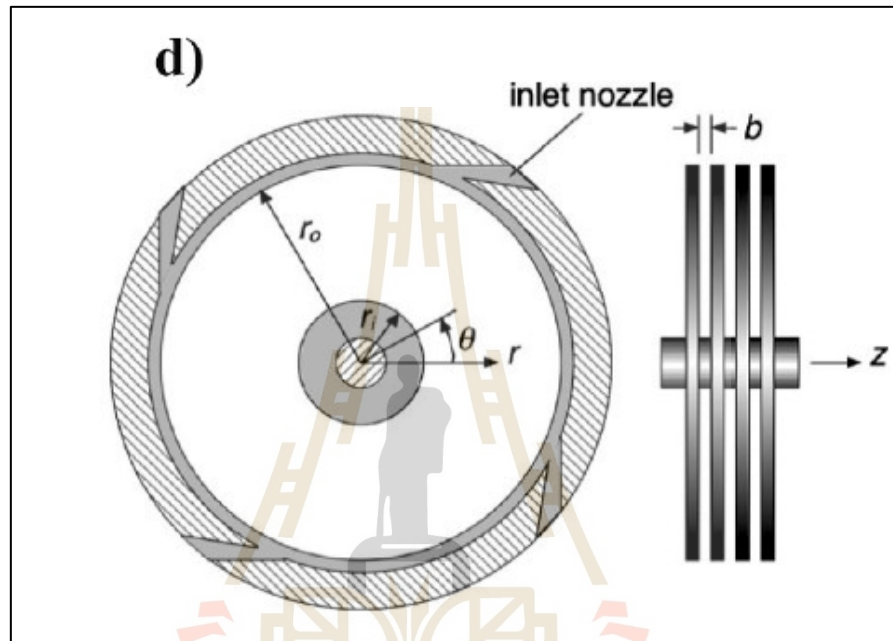
รูปที่ 2.4 โรงไฟฟ้าวัฏจักรคาลินาแบบ KSG-11

โดยจากผลการศึกษาเปรียบเทียบของ ธงชัย เทียมทัต และ อาทิตย์ คุณศรีสุข (2565) พบว่า สำหรับโรงไฟฟ้าวัฏจักรคาลินาที่แหล่งความร้อนอุณหภูมิ 100 °C 120°C และ 150 °C เพื่อหาโรงไฟฟ้าวัฏจักรคาลินาที่เหมาะสมโดยเปรียบเทียบสามลักษณะได้แก่ KCS-34 KCS-11 และ KSG-1 ทั้งนี้ การจำลองใช้ โปรแกรม MATLAB ซึ่ง MATLAB code ถูกพัฒนาโดยผู้วิจัย และได้ทำการตรวจสอบความถูกต้องกับการทดลองแล้ว โดยผลการจำลองพบว่า KCS-34 ให้กำลังงานสุทธิสูงสุดที่เท่ากับ 12.84 kW รองลงมาเป็น KCS-11 คือ 9.46 kW ที่แหล่งความร้อนเท่ากับ 120 °C โดยที่ความเข้มข้นพื้นฐานของแอมโมเนียและประสิทธิภาพมีค่าเท่ากับ 80% และ 7.89% ตามลำดับ โดยค่ากำลังงานสุทธิที่ได้มากที่สุดนี้ของ KCS-34 จะมีค่ามากกว่า 3.54% และ 8.88% ของกำลังงานสุทธิของ KSG-1 และ KCS-11 ตามลำดับ นอกจากนี้พบว่าขนาดของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนโดยรวมของ KSG-1 นั้น มีค่ามากกว่า 8.87% และ 8.15% ของ KSG-34 และ KCS-11 ตามลำดับ

อย่างไรก็ตาม จากการทำปฐมนิเทศกรรมยังไม่พบการใช้งานของโรงไฟฟ้าวัฏจักรคาลินากับเตสลาเทอร์ไบน์ ดังนั้นวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงสนใจที่จะศึกษาการทำงานของเตสลาเทอร์ไบน์กับโรงไฟฟ้าวัฏจักรคาลินา โดยโรงไฟฟ้าที่สนใจศึกษาคือโรงไฟฟ้าวัฏจักรคาลินาแบบ KCS-11 เนื่องจากมีขนาดของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่น้อยและได้กำลังสุทธิใกล้เคียงกับแบบ KCS-34

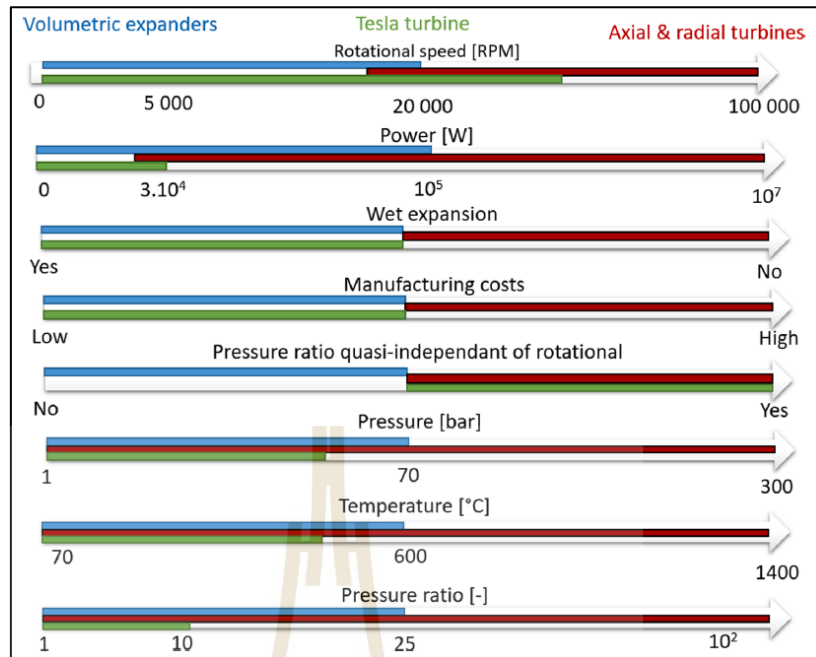
2.4 เทสลาเทอร์ไบน์

เทสลาเทอร์ไบน์ (Tesla turbine) ถูกคิดค้นโดย Tesla (1913) เป็นอีกหนึ่งเทอร์ไบน์ที่สามารถนำมาใช้ในโรงไฟฟ้าวัฏจักรโออาร์ซีเพื่อใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้าโดยลักษณะของเทสลาเทอร์ไบน์เป็นดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 ลักษณะของเทสลาเทอร์ไบน์

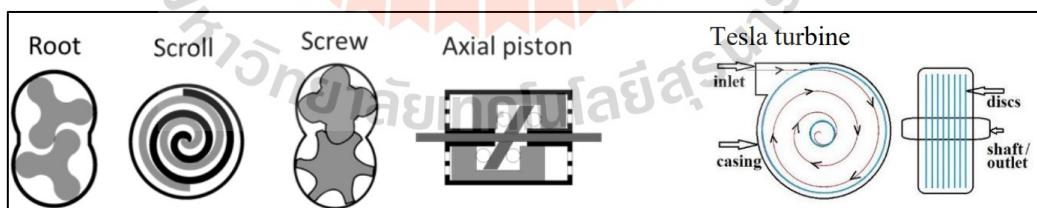
ที่มา: (Talluri et al., 2020)



รูปที่ 2.6 ผลการเปรียบเทียบสมรรถนะของเทสลาเทอร์ไบน์ กับเทอร์ไบน์ชนิด Volume metric และ Axial

ที่มา: (Talluri et al., 2020)

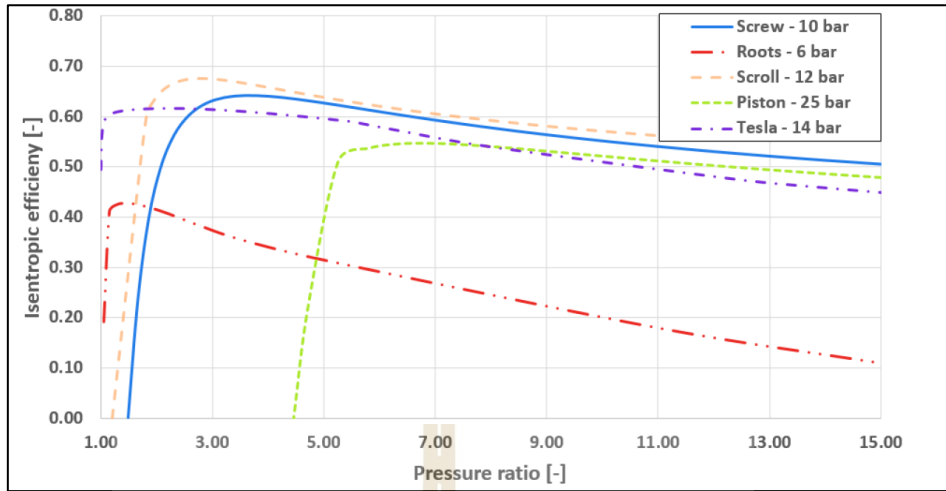
นอกจากนี้ การศึกษาของ Dumont et al. (2019) ได้เปรียบเทียบเทสลาเทอร์ไบน์กับเทอร์ไบน์ชนิดอื่นที่นิยมนำไปใช้กับโรงไฟฟ้าวัฏจักรโออาร์ซีขนาดเล็ก ได้แก่ Scroll Piston Screw และ Roots expander โดยมีลักษณะดังรูปที่ 2.7



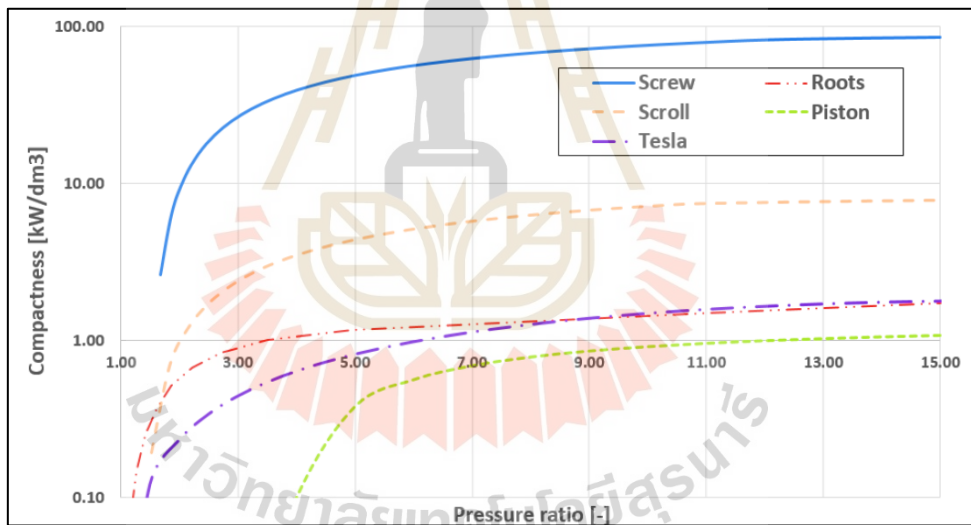
รูปที่ 2.7 เทคโนโลยีของเทอร์ไบน์สำหรับโรงไฟฟ้าวัฏจักรโออาร์ซี

ที่มา: (Dumont et al., 2019)

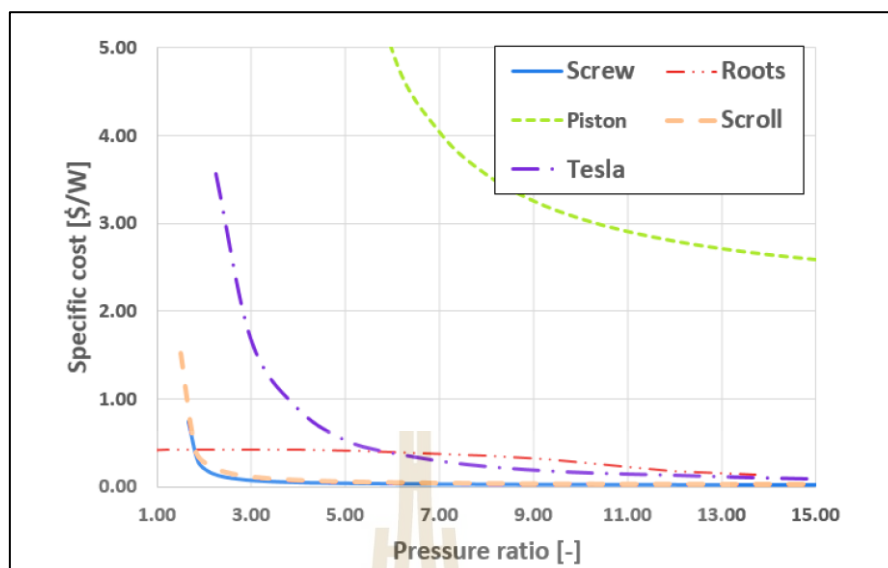
ทั้งนี้ผลการเปรียบเทียบเป็นการจำลองโรงไฟฟ้าวัฏจักรโออาร์ซีที่ใช้สารทำงานเป็น R245fa ที่มี Condensation temperature คงที่เท่ากับ 30 °C และในทุกกรณีสารทำงานที่ออกจาก Evaporator จะมี Superheated degree เท่ากับ 5 °C โดยผลการจำลองเป็นที่ 2.8 2.9 และ 2.10



รูปที่ 2.8 Pressure ratio และประสิทธิภาพไอเซนโทรปิกที่เปลี่ยนแปลงไป
ที่มา: (Dumont et al., 2019)



รูปที่ 2.9 Pressure ratio และ Compactness ที่เปลี่ยนแปลงไป
ที่มา: (Dumont et al., 2019)



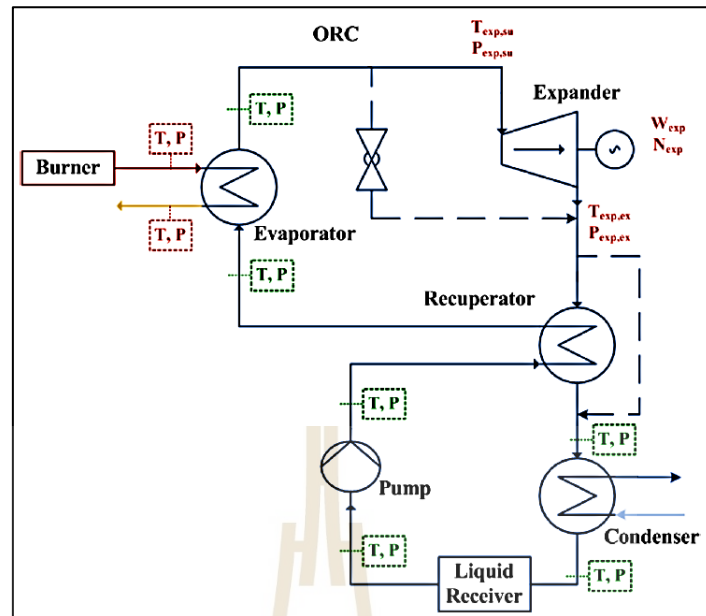
รูปที่ 2.10 Pressure ratio และ Specific cost ที่เปลี่ยนแปลงไป
ที่มา: (Dumont et al., 2019)

จากผลการศึกษาพบว่า เทสลาเทอร์โบเมื่อเปรียบเทียบกับเทอร์โบชนิดอื่น ๆ สามารถทำงานได้ในช่วงที่กว้างกว่าเทอร์โบชนิดอื่น ๆ ดังรูปที่ 2.8 เนื่องจากเทสลาเทอร์โบมีช่วงประสิทธิภาพไอเซนโทรปิกที่สูงตลอดเวลา นอกจากนี้ เทสลาเทอร์โบยังสามารถทำงานได้เมื่อสารทำงานที่เข้าเทอร์โบเป็นของผสม (Wet expansion) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Talluri et al. (2020)

โดยที่การทำงานของโรงไฟฟ้าวัฏจักรโออาร์ซีส่วนมากนิยมใช้พลังงานแหล่งความร้อนทิ้งซึ่งอาจเกิดความไม่แน่นอนของอุณหภูมิและปริมาณของแหล่งความร้อนทิ้ง ซึ่งส่งผลโดยตรงกับสถานะของสารทำงานที่เข้าเทอร์โบ ถ้าเทอร์โบสามารถรองรับสารทำงานที่เป็นของผสมได้ จะทำให้โรงไฟฟ้ามีความยืดหยุ่นในการทำงานมากขึ้น เป็นเหตุให้เทสลาเทอร์โบจึงมีความน่าสนใจใช้กับโรงไฟฟ้าวัฏจักรโออาร์ซี

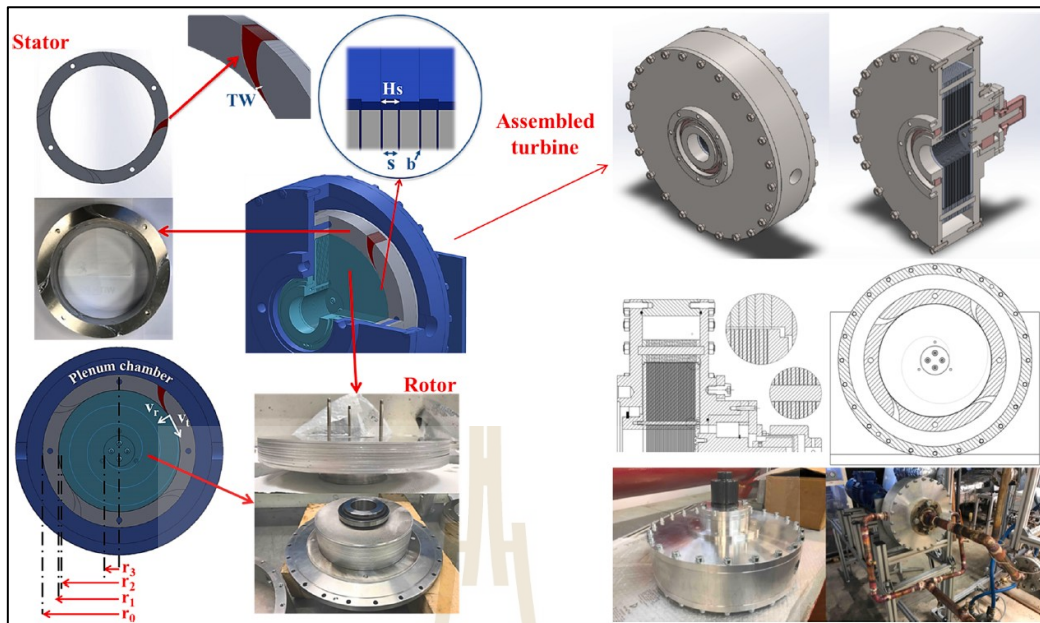
2.4.1 เทสลาเทอร์โบในโรงไฟฟ้าวัฏจักรโออาร์ซี

โดยจากการศึกษางานวิจัยก่อนหน้า พบว่ามีการศึกษาที่ใช้เทสลาเทอร์โบร่วมกับโรงไฟฟ้าวัฏจักรโออาร์ซี อาทิ ในการศึกษาของ Talluri et al. (2020) ได้ทำการทดลองโรงไฟฟ้าที่ใช้เทสลาเทอร์โบในโรงไฟฟ้าวัฏจักร โออาร์ซีที่ใช้สารทำงานเป็น R1233zd(E) ฝั่งของโรงไฟฟ้าเป็นดังรูปที่ 2.11

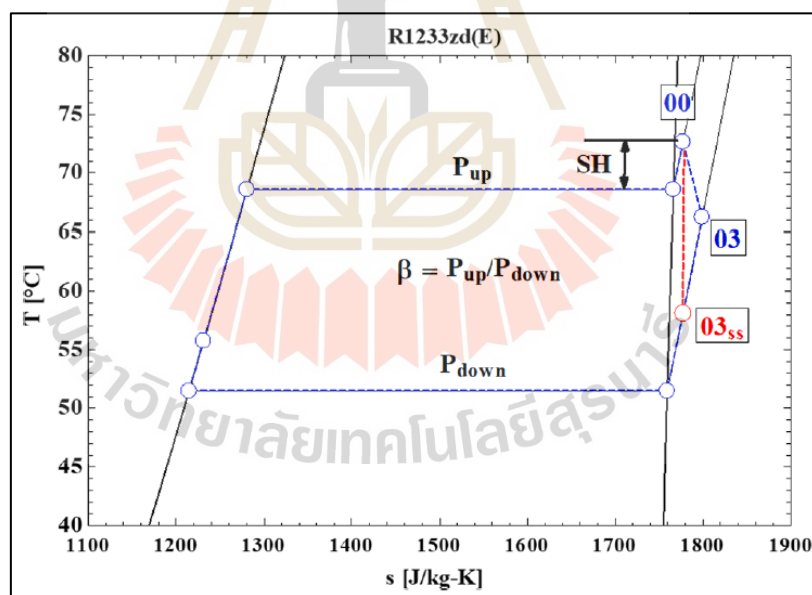


รูปที่ 2.11 ผังของอุปกรณ์ของโรงไฟฟ้าวัฏจักรโออาร์ซีที่ใช้เตสลาเทอร์ไบน์
ที่มา: (Talluri et al., 2020)

จากรูปที่ 2.11 ได้ว่าการทำงานของระบบที่ใช้ทำสองกับเตสลาเทอร์ไบน์มีลักษณะเหมือนกันโรงไฟฟ้าวัฏจักรโออาร์ซีทั่วไป ยกเว้นอุปกรณ์ Expander จะใช้เตสลาเทอร์ไบน์ ดังรูปที่ 2.12 โดยในการทดลองเงื่อนไขในการทดลองเป็นดังตารางที่ 2.2 และตำแหน่งต่าง ๆ โดยผังอุณหภูมิและเอนโทรปีจำเพาะ เป็นดังรูปที่ 2.13



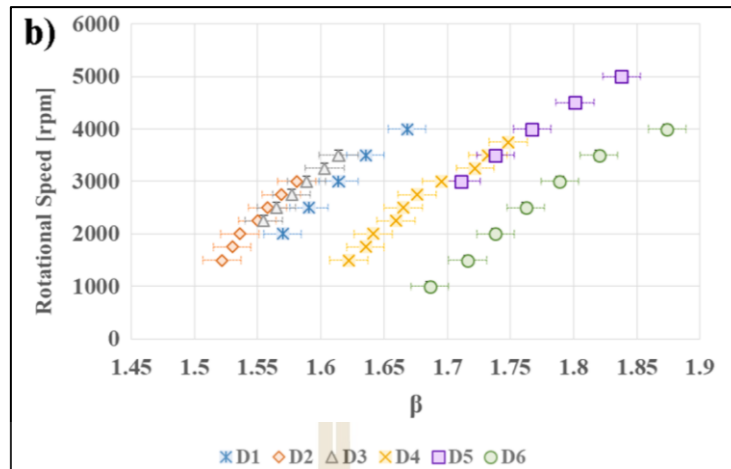
รูปที่ 2.12 ลักษณะของเตสลาเทอร์ไบน์ในการทดลอง
ที่มา: (Talluri et al., 2020)



รูปที่ 2.13 T-s diagram ของโรงไฟฟ้าวัฏจักรโออาร์ซีที่ใช้เตสลาเทอร์ไบน์
ที่มา: (Talluri et al., 2020)

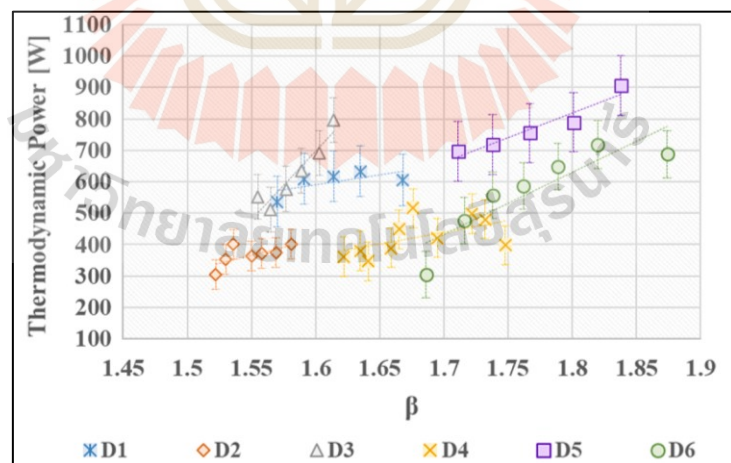
ตารางที่ 2.2 เงื่อนไขการทดลองของโรงไฟฟ้าวัฏจักรโออาร์ซีที่ใช้เทคโนโลยีเทอร์โบ (Huang et al., 2020)

| Dataset Nomenclature | Points | Rotational Speed [rpm] | Torque [Nm] | Mass flow rate [kg/s] | T ₀₀ [°C] | P ₀₀ [Pa] | T ₀₃ [°C] | P _{03_1} [Pa] |
|----------------------|--------|------------------------|-------------|-----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|------------------------|
| D1 | 1 | 2000 | 1.25 | 0.3568 | 86.84 | 635,633 | 80.40 | 404,818 |
| | 2 | 2500 | 1.09 | 0.3566 | 87.13 | 644,701 | 80.29 | 405,224 |
| | 3 | 3000 | 0.92 | 0.3564 | 87.08 | 653,135 | 80.01 | 404,749 |
| | 4 | 3500 | 0.73 | 0.3565 | 87.19 | 664,151 | 79.86 | 406,106 |
| | 5 | 4000 | 0.58 | 0.3567 | 87.11 | 673,920 | 79.59 | 403,996 |
| D2 | 6 | 1500 | 1.01 | 0.2541 | 73.42 | 473,535 | 68.41 | 311,123 |
| | 7 | 1750 | 0.95 | 0.2541 | 73.14 | 476,446 | 67.84 | 311,310 |
| | 8 | 2000 | 0.89 | 0.2541 | 73.25 | 479,870 | 67.69 | 312,341 |
| | 9 | 2250 | 0.83 | 0.2540 | 73.04 | 482,052 | 67.55 | 311,048 |
| | 10 | 2500 | 0.75 | 0.2538 | 72.98 | 486,119 | 67.37 | 311,947 |
| | 11 | 2750 | 0.70 | 0.2539 | 72.74 | 489,369 | 67.03 | 311,867 |
| | 12 | 3000 | 0.64 | 0.2539 | 72.66 | 493,133 | 66.74 | 312,004 |
| D3 | 13 | 3500 | 0.60 | 0.2532 | 108.10 | 518,962 | 101.48 | 321,518 |
| | 14 | 3250 | 0.63 | 0.2531 | 108.56 | 515,830 | 102.46 | 321,805 |
| | 15 | 3000 | 0.69 | 0.2530 | 108.39 | 512,314 | 102.59 | 322,445 |
| | 16 | 2750 | 0.74 | 0.2530 | 108.32 | 508,854 | 102.83 | 322,654 |
| | 17 | 2500 | 0.78 | 0.2529 | 107.60 | 505,954 | 102.43 | 323,276 |
| | 18 | 2250 | 0.82 | 0.2530 | 107.01 | 501,261 | 101.71 | 322,265 |
| D4 | 19 | 1500 | 1.26 | 0.3009 | 76.38 | 518,794 | 76.38 | 319,829 |
| | 20 | 1750 | 1.20 | 0.3009 | 76.32 | 521,596 | 76.32 | 318,935 |
| | 21 | 2000 | 1.12 | 0.3009 | 74.98 | 523,252 | 74.98 | 318,879 |
| | 22 | 2250 | 1.05 | 0.3009 | 75.31 | 527,202 | 75.31 | 317,822 |
| | 23 | 2500 | 0.97 | 0.3008 | 74.84 | 530,978 | 74.84 | 318,973 |
| | 24 | 2750 | 0.91 | 0.3007 | 75.44 | 536,251 | 75.44 | 319,886 |
| | 25 | 3000 | 0.84 | 0.3008 | 75.00 | 539,307 | 75.00 | 318,254 |
| | 26 | 3250 | 0.78 | 0.3007 | 74.96 | 543,242 | 74.96 | 315,476 |
| | 27 | 3500 | 0.70 | 0.3006 | 75.42 | 547,545 | 75.42 | 316,069 |
| | 28 | 3750 | 0.64 | 0.3008 | 74.59 | 550,591 | 74.59 | 315,065 |
| D5 | 29 | 5000 | 0.60 | 0.2993 | 120.26 | 598,959 | 112.95 | 325,804 |
| | 30 | 4500 | 0.76 | 0.2994 | 120.13 | 588,417 | 113.41 | 326,683 |
| | 31 | 4000 | 0.89 | 0.2993 | 120.20 | 577,387 | 113.78 | 326,823 |
| | 32 | 3500 | 0.99 | 0.2992 | 119.92 | 569,026 | 113.76 | 327,326 |
| | 33 | 3000 | 1.10 | 0.2992 | 119.76 | 561,617 | 113.80 | 328,327 |
| D6 | 34 | 1000 | 1.78 | 0.3651 | 78.59 | 578,933 | 72.42 | 343,426 |
| | 35 | 1500 | 1.65 | 0.3646 | 79.28 | 584,299 | 72.44 | 340,593 |
| | 36 | 2000 | 1.49 | 0.3642 | 79.88 | 589,228 | 72.68 | 339,009 |
| | 37 | 2500 | 1.33 | 0.3640 | 79.93 | 596,259 | 72.46 | 338,396 |
| | 38 | 3000 | 1.15 | 0.3641 | 79.81 | 605,988 | 71.92 | 338,649 |
| | 39 | 3500 | 1.01 | 0.3635 | 82.04 | 616,757 | 73.83 | 338,801 |
| | 40 | 4000 | 0.84 | 0.3640 | 81.26 | 624,814 | 72.78 | 333,418 |



รูปที่ 2.14 Rotational speed เมื่อ Expansion ratio, β เปลี่ยนแปลงไป
ที่มา: (Talluri et al., 2020)

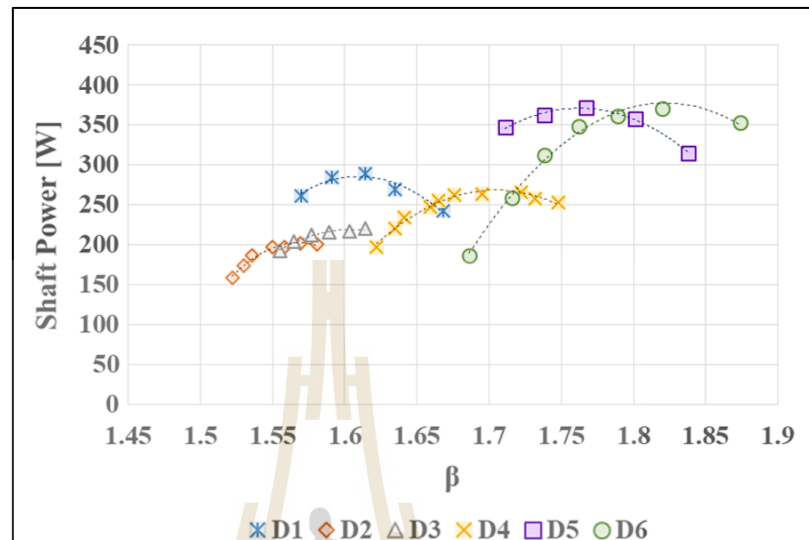
การศึกษาของ Talluri et al. (2020) ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของค่า Expansion ratio, β ที่ส่งผลต่อค่าที่แสดงต่อสมรรถนะต่าง ๆ ซึ่งการเปลี่ยนแปลงค่า β ดังรูปที่ 2.20 เกิดจากการเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบของเทอร์ไบน์โดยเมื่อเพิ่มความเร็วรอบจะส่งผลให้เกิดการขยายตัวของสารทำงานในเทอร์ไบน์เพิ่มมากขึ้น นอกจากนี้ ที่ความเร็วรอบเดียวมีหลาย β เกิดจากเงื่อนไขการทดลองไม่เหมือนกัน โดยผลของพลังงานที่ถูกดึงออกมา โดยสารทำงานเป็นดังรูปที่ 2.15



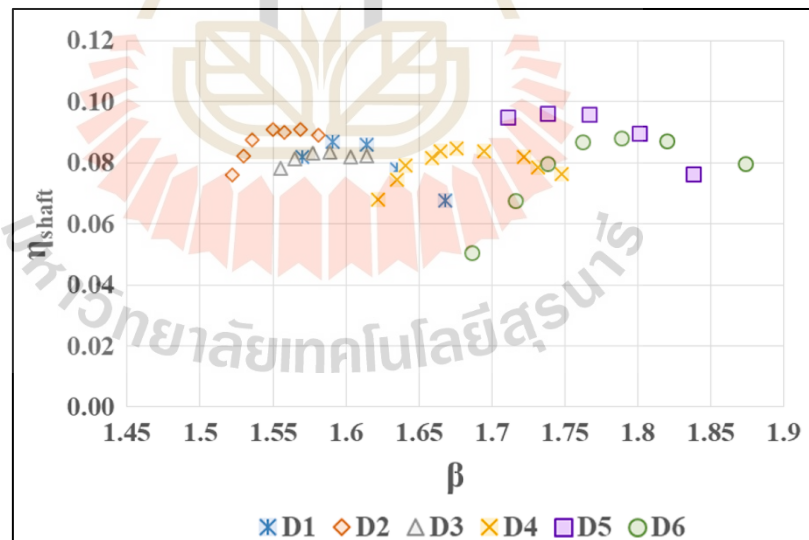
รูปที่ 2.15 Thermodynamic power เมื่อ Expansion ratio, β เปลี่ยนแปลงไป
ที่มา: (Talluri et al., 2020)

จากรูปที่ 2.15 จะเห็นได้ว่าเมื่อ β เพิ่มสูงขึ้นส่งผลให้พลังงานที่ถูกดึงออกจากสารทำงานมีค่ามากขึ้นเลยทำให้ Thermodynamic power เพิ่มสูงขึ้นตามไปด้วย อย่างไรก็ตาม เมื่อ

พิจารณาที่ Shaft power ของเทอร์ไบน์ซึ่ง รูปที่ 2.16 จะเห็นได้ว่าเมื่อ β เพิ่มสูงขึ้นถึงจุด ๆ หนึ่งจะมีค่าลดลง ซึ่งแนวโน้มของประสิทธิภาพของ Turbine จะมีแนวโน้มเช่นเดียวกัน ดังรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16 Shaft power เมื่อ Expansion ratio, β เปลี่ยนแปลงไป
ที่มา: (Talluri et al., 2020)

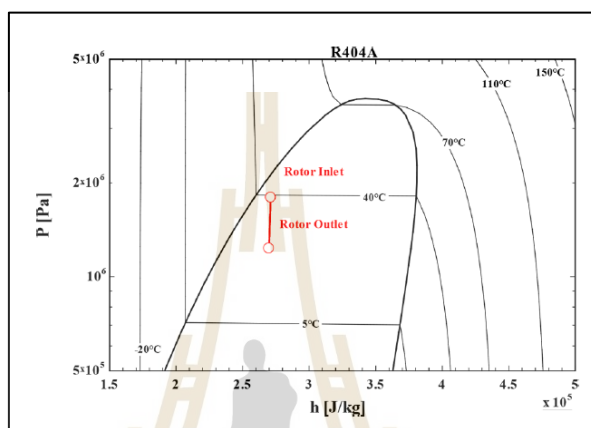


รูปที่ 2.17 Efficiency เมื่อ Expansion ratio, β เปลี่ยนแปลงไป
ที่มา: (Talluri et al., 2020)

จากการทดลองของ Talluri et al. (2020) พบว่า เทสลาเทอร์ไบน์สามารถใช้กับโรงไฟฟ้าวัฏจักรโออาร์ซีได้ โดยที่ Shaft power สูงที่สุดเท่ากับ 371 W และประสิทธิภาพเท่ากับ

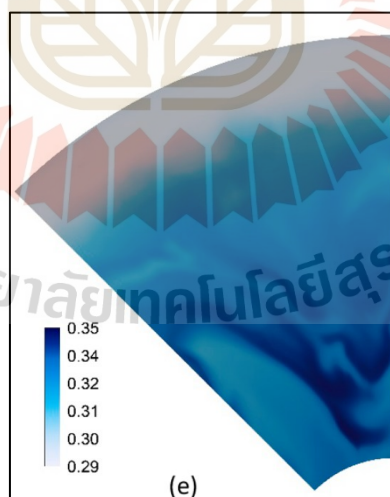
9.62 % ที่อัตราการไหลของสารทำงานเท่ากับ 0.299 kg/s และความเร็วรอบเท่ากับ 4,000 RPM (D5-31) และนอกจากนี้จะเห็นได้ว่าเตสลาเทอร์ไบน์ สามารถทำงานได้ที่หลากหลายสถานะ

จากการศึกษาของ Niknam et al. (2021) ทำการศึกษาโรงไฟฟ้าวัฏจักรโออาร์ซีที่ใช้สารทำงานเป็น R404A โดยที่กำหนดให้สารทำงานก่อนเข้าโรเตอร์ของเตสลาเทอร์ไบน์เป็น Two-phase ดังรูปที่ 2.18 และผลการจำลอง CFD ของสถานะของสารทำงานภายใน Turbine เป็นดังรูปที่ 2.19



รูปที่ 2.18 ผังอุณหภูมิและเอนโทรปีจำเพาะของ two-phase expansion ของ R404A

ที่มา: (Niknam et al., 2021)

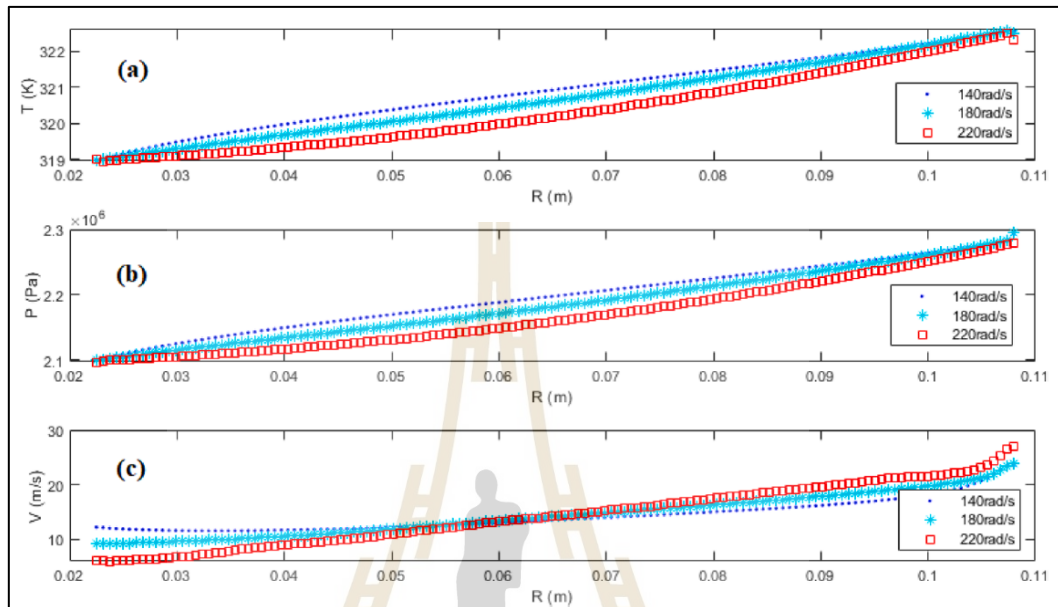


รูปที่ 2.19 ค่าความเป็นไอของสารทำงานภายในโรเตอร์ของเตสลาเทอร์ไบน์

ที่มา: (Niknam et al., 2021)

จากรูปที่ 2.19 จะได้ว่าเมื่อให้สารทำงานที่เข้าโรเตอร์ของเตสลาเทอร์ไบน์เป็นของผสม เมื่อเข้าโรเตอร์ของเตสลาเทอร์ไบน์แล้วจะเกิดการขยายตัว เนื่องจากความดันที่ลดลงจนถึงทางออกของ

โรเตอร์ของเตสลาเทอร์ไบน์โดยผลของการกระจายตัวของความเร็ว อุณหภูมิ และความดันเป็นดังรูปที่ 2.20

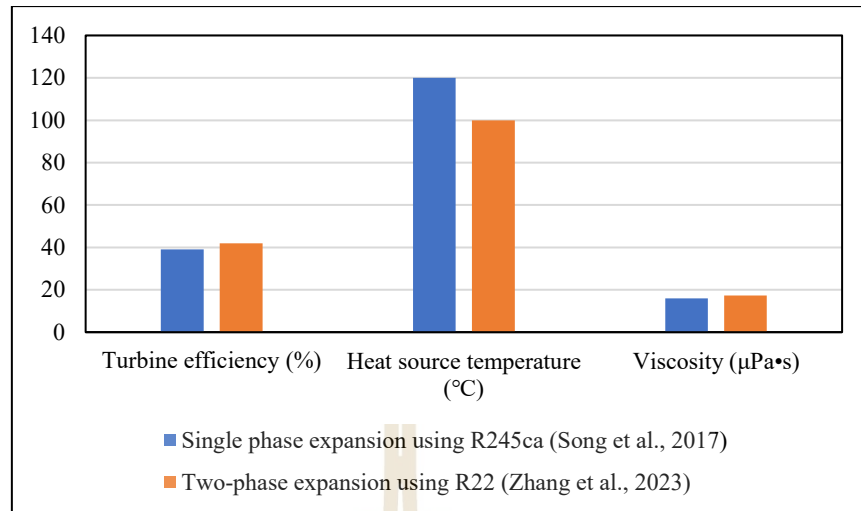


รูปที่ 2.20 การกระจายตัวของ ความเร็วในแนวสัมผัส อุณหภูมิ และความดัน ของสารทำงานในโรเตอร์ของเตสลาเทอร์ไบน์

ที่มา: (Niknam et al., 2021)

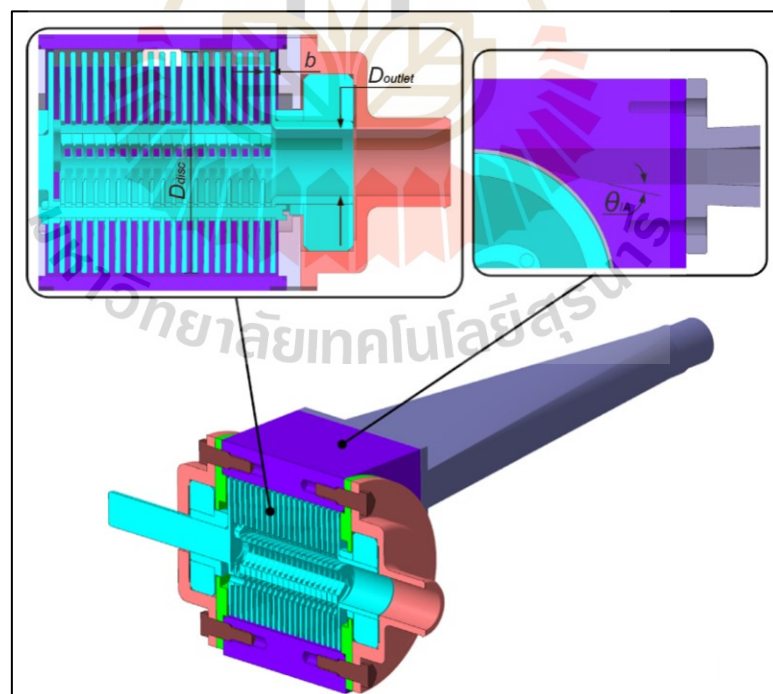
โดยจากผลการจำลองดังรูปที่ 2.20 พบว่าได้งานสูงที่สุดเท่ากับ 0.8 W ที่ความเร็วรอบเท่ากับ 220 rad/s (2,000 RPM) จากผลการศึกษาดังกล่าว Two-phase expansion นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบเตสลาเทอร์ไบน์แบบ Single และ Two phase พบว่า เตสลาเทอร์ไบน์ที่ทำงานแบบ two phase มีประสิทธิภาพสูงกว่าจึงมีความน่าสนใจเพื่อเพิ่มความสามารถของโรงไฟฟ้า

อย่างไรก็ตาม การศึกษาเชิงเปรียบเทียบระหว่าง Two-phase expansion และ Single-phase expansion ที่สภาวะการทำงานเดียวกันเพื่อเลือกวัฏจักรที่มีงานสุทธิและประสิทธิภาพสูงยังไม่ได้ถูกศึกษาในเชิงเปรียบเทียบ อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาจากการศึกษาเรื่อง Two-phase expansion ของ White (2021) แล้วพบว่า แบบ Two-phase expansion มีแนวโน้มที่เตสลาเทอร์ไบน์จะได้งานสุทธิออกมาสูงเนื่องจาก Two-phase expansion ให้งานสุทธิที่สูงและสารทำงานก่อนเข้าเทอร์ไบน์เป็นของเหลวซึ่งมี Viscosity สูงจะส่งผลทำให้เตสลาเทอร์ไบน์ให้งานและประสิทธิภาพสูง ดังรูปที่ 2.21



รูปที่ 2.21 ประสิทธิภาพของเทอร์ไบน์ Two-phase expansion และ Single-phase expansion

นอกจากนี้ จากการศึกษาของ Ji et al. (2018) ได้ศึกษาเทสลาเทอร์ไบน์สำหรับโรงไฟฟ้าสำหรับ Heat recovery จากเครื่องยนต์ โดยลักษณะของเทสลาเทอร์ไบน์เป็นดังรูปที่ 2.22 โดยเป็นการศึกษาในลักษณะเดียวกันกับ Zhang et al. (2023) และ Song et al. (2017) ในแง่ของการใช้สารทำงานที่แตกต่างกันโดยผลมีรายละเอียดดังนี้

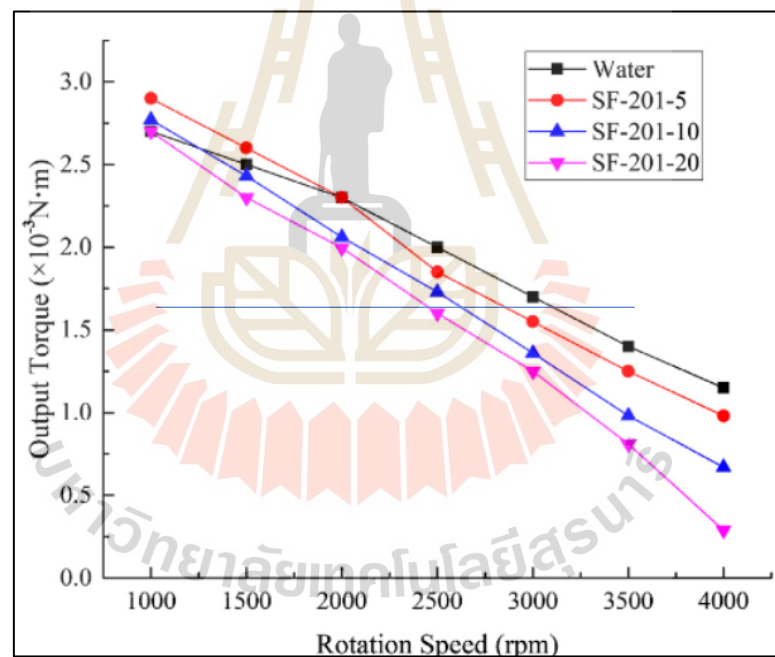


รูปที่ 2.22 ลักษณะของเทสลาเทอร์ไบน์ที่ใช้ในการจำลอง
ที่มา: (Ji et al., 2018)

โดยศึกษาเปรียบเทียบชนิดของสารทำงานทั้งหมด 4 ชนิด ประกอบไปด้วย Water SF-201-5 SF-201-10 และ SF-201-20 ดังตารางที่ 2.3 ที่สภาวะการทำงานเดียวกันได้ผลดังรูปที่ 2.23

ตารางที่ 2.3 ค่าคุณสมบัติของ water SF-201-5 SF-201-10 และ SF-201-20 (Ji et al., 2018)

| | Water | SF-201-5 | SF-201-10 | SF-201-20 |
|---------------------------------|---------|----------|-----------|-----------|
| Density/g/cm ³ | 1 | 0.935 | 0.945 | 0.955 |
| Specific heat capacity/J/kg-K | 4.183e3 | 1.47e3 | 1.47e3 | 1.47e3 |
| Viscosity/m ² /s | 10e-6 | 5e-3 | 10e-3 | 20e-3 |
| Thermal expansion coefficient/K | 2.89e-3 | 13.7e-4 | 13.7e-4 | 10.7e-4 |



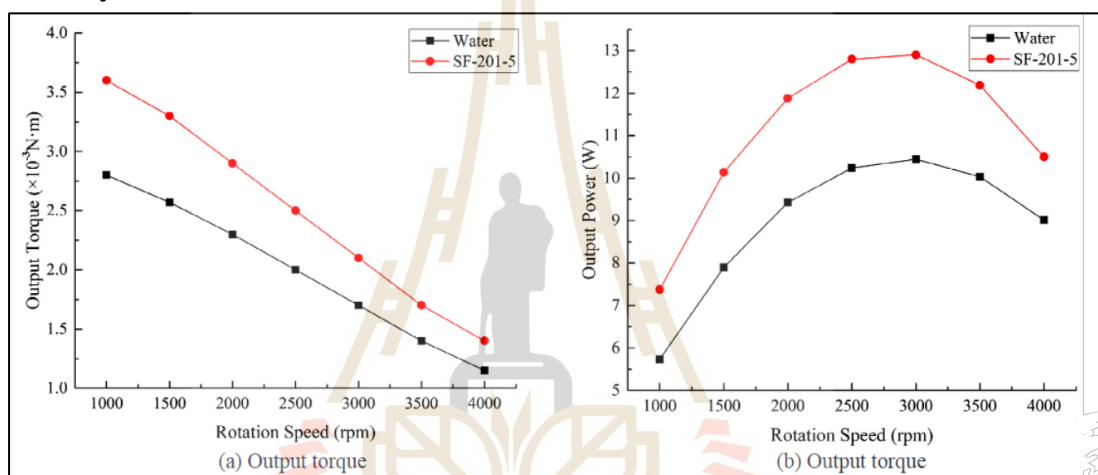
รูปที่ 2.23 ผลของแรงบิดที่ได้เมื่อเปลี่ยนความเร็วรอบของเพลลาเทอร์ไบน์ของแต่ละสารทำงาน
ที่มา: (Ji et al., 2018)

จากผลดังรูปที่ 2.23 พบว่าเมื่อใช้สารที่มีค่า Viscosity สูงขึ้นส่งผลให้ได้แรงบิดน้อยลง เช่นที่ความเร็วรอบเท่ากับ 2,500 RPM ใช้สารทำงานเป็น Water ได้แรงบิดเท่ากับ 2×10^{-3} Nm ซึ่ง Water มี Viscosity เท่ากับ 10^{-6} m²/s ในขณะที่ สารทำงานที่เป็น SF-201-20 ได้แรงบิดเท่ากับ 1.6×10^{-3} Nm ที่ Viscosity เท่ากับ 20×10^{-3} m²/s ซึ่งผลดังกล่าวขัดแย้งกับงานวิจัยของ

Song et al. (2017) และ Zhang et al. (2023) ที่ผลพบว่า เมื่อใช้สารทำงานที่มี Viscosity สูงจะทำงานสูงตามไปด้วย

ทั้งนี้ เมื่อใช้สารที่มีค่า Viscosity สูงขึ้นส่งผลให้ได้แรงบิดน้อยลง เนื่องจากเมื่อเลือกสารทำงานหนึ่ง ๆ จะมีระยะระหว่างแผ่นที่เหมาะสม (Optimal-gap) ซึ่งในรูปที่ 2.34 เป็นการออกแบบสำหรับ Water ทำให้เมื่อใช้สารทำงานชนิดอื่นส่งผลให้แรงบิดลดลงแม้โดย Viscosity สูงขึ้นก็ตาม

นอกจากนี้ ในงานวิจัยของ Ji et al. (2018) ได้ออกแบบระยะระหว่างแผ่นให้เหมาะสมกับสารทำงาน SF-201-5 และ Water ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.7 mm และ 1.78 mm ตามลำดับ ได้ผลดังรูปที่ 2.24

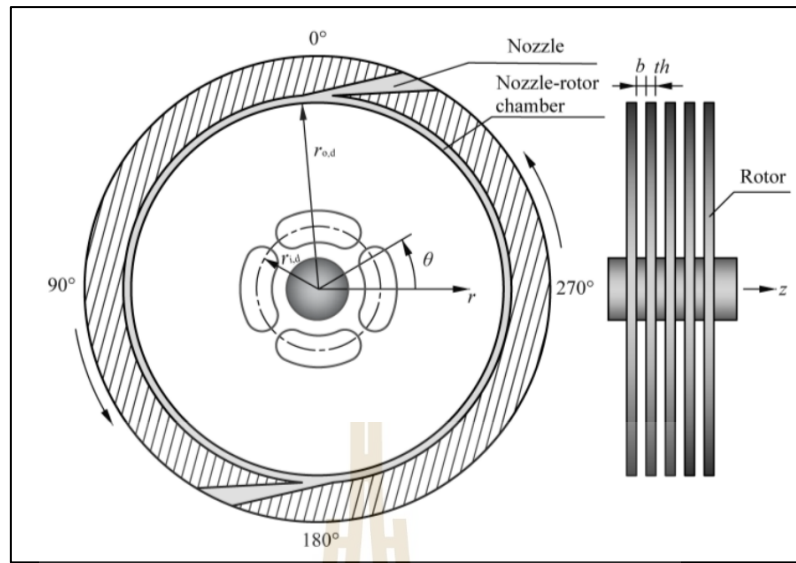


รูปที่ 2.24 ผลของแรงบิดและงานสุทธิที่ได้ของเตสลาเทอร์ไบน์ของสารทำงาน water และ SF-201-5 ที่มา: (Ji et al., 2018)

จากรูปที่ 2.24 พบว่าสารทำงานที่มี Viscosity สูง เมื่อออกแบบระยะระหว่างแผ่นให้เหมาะสมแล้วจะให้แรงบิดและงานที่มากกว่า ซึ่งก็จะสอดคล้องกับงานวิจัยของ Song et al. (2017) และ Zhang et al. (2023) ดังนั้น ในการออกแบบเทอร์ไบน์นั้นค่าระยะระหว่างแผ่นเป็นอีกตัวแปรหนึ่งที่ควรออกแบบให้เหมาะสมการชนิดของสารทำงานที่เลือกใช้

2.4.2 ตัวแปรที่ส่งผลต่อการทำงานของเตสลาเทอร์ไบน์

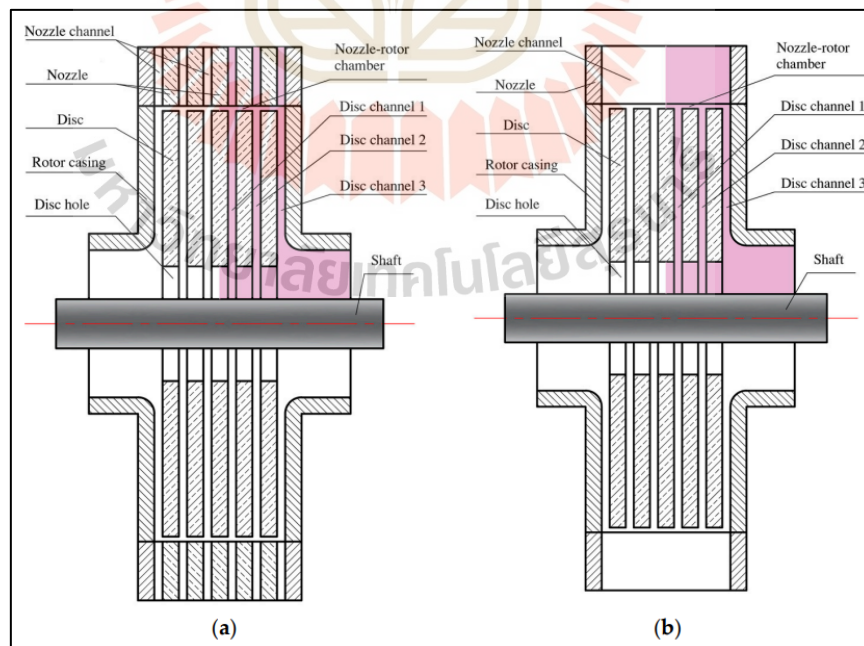
จากการทำปรีทัศน์วรรณกรรมได้มีการศึกษาตัวแปรที่ส่งผลต่อการออกแบบเตสลาเทอร์ไบน์เพื่อให้ได้ขนาดที่ทำให้เตสลาเทอร์ไบน์ผลิตไฟฟ้าได้กำลังสูงหรือประสิทธิภาพไอเซนโทรปิกสูง อาทิกการศึกษาของ Qi et al. (2018) ได้ศึกษาอิทธิพลของค่าความหนาแผ่นดิสก์และความกว้างระหว่างแผ่นดิสก์ในส่งผลต่อความสามารถของเตสลาเทอร์ไบน์ โดยลักษณะของเตสลาเทอร์ไบน์เป็นดังรูปที่ 2.25



รูปที่ 2.25 ลักษณะของเทสลาเทอร์ไบน์ในการจำลองหาอิทธิพลของค่าความหนาแผ่นดิสก์และความกว้างระหว่างแผ่นดิสก์

ที่มา: (Qi et al., 2018)

นอกจากนี้ งานวิจัยนี้ยังศึกษาอิทธิพลของลักษณะการไหลของสารทำงานจากนอชเซลล์ไปยังช่องต่าง ๆ ของเทอร์ไบน์โดยทดสอบทั้งหมด 2 ลักษณะด้วยกันได้แก่ One to One และ One to many ดังรูปที่ 2.26 โดยในการศึกษาจะเป็นการจำลอง โดยใช้โปรแกรม ANSYS CFX



รูปที่ 2.26 ลักษณะของช่องการไหลแบบ: (a) One to One; (b) One to many

ที่มา: (Qi et al., 2018)

โดยเงื่อนไขของการจำลองเป็นดังตารางที่ 2.4 และกรณีที่ทำการศึกษาเปรียบเทียบเป็นตารางที่ 2.5 โดยในการจำลองจะใช้สารทำงานเป็นอากาศ

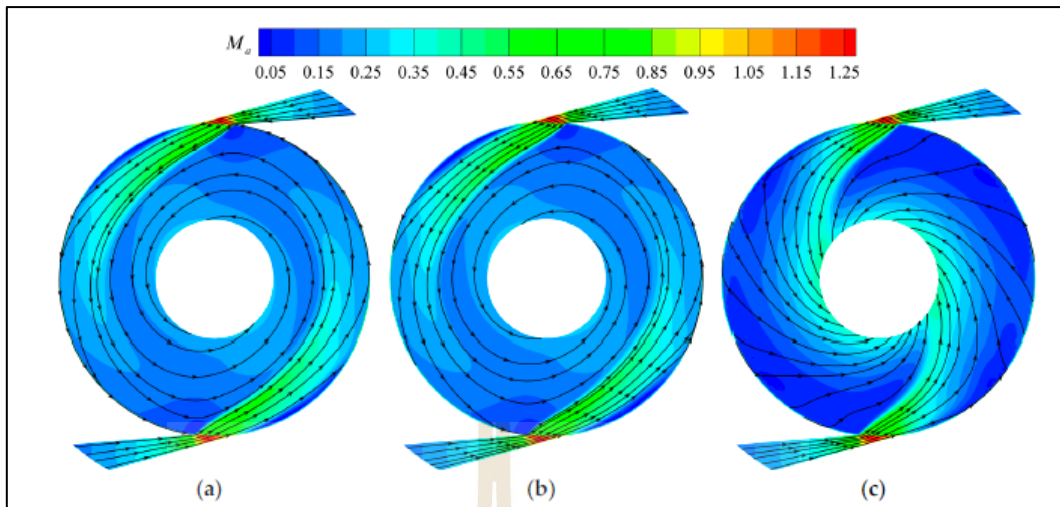
ตารางที่ 2.4 เงื่อนไขในการจำลองเปรียบเทียบค่าความหนาแผ่นดิสก์และระหว่างแผ่นดิสก์ในเทสลาเทอร์ไบน์ (Qi et al., 2018)

| Symbol | Unit | Value |
|--------------|------|-------|
| N_n | (-) | 2 |
| $d_{o,d}$ | (mm) | 100 |
| $d_{i,d}$ | (mm) | 38.4 |
| c | (mm) | 0.25 |
| N_d | (-) | 5 |
| N_{dc} | (-) | 6 |
| α | (°) | 10 |
| p_{nt}/p_i | (-) | 3.42 |
| T_{nt} | (K) | 373 |

ตารางที่ 2.5 เงื่อนไขที่ทำการศึกษาเปรียบเทียบ (Qi et al., 2018)

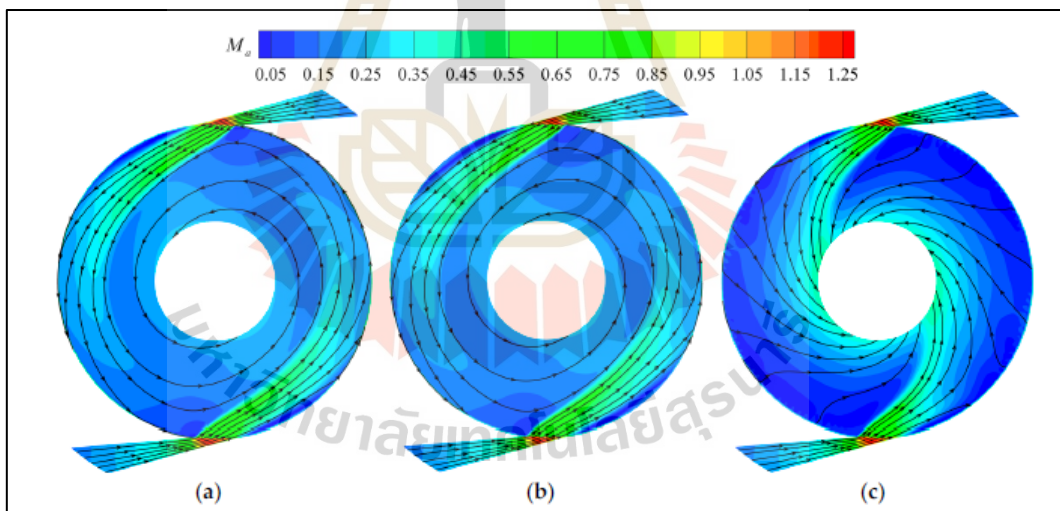
| Group 1 (One-To-One Multichannel Tesla Turbines) | | | |
|---|-----------|----------|------------|
| Case | th (mm) | b (mm) | b/th (-) |
| Case 1-0.3 | 1 | 0.3 | 0.3 |
| Case 1-0.5 | 1 | 0.5 | 0.5 |
| Case 1-1 | 1 | 1 | 1 |
| Case 2-0.3 | 2 | 0.3 | 0.15 |
| Case 2-0.5 | 2 | 0.5 | 0.25 |
| Case 2-1 | 2 | 1 | 0.5 |
| Group 2 (One-To-Many Multichannel Tesla Turbines) | | | |
| Case | th (mm) | b (mm) | b/th (-) |
| Case 1-0.3 | 1 | 0.3 | 0.3 |
| Case 1-0.5 | 1 | 0.5 | 0.5 |
| Case 1-1 | 1 | 1 | 1 |
| Case 2-0.5 | 2 | 0.5 | 0.25 |
| Case 2-1 | 2 | 1 | 0.5 |
| Case 2-2 | 2 | 2 | 1 |

โดยผลการจำลองการเปลี่ยนแปลงความหนาของแผ่นดิสก์เป็นดังรูปที่ 2.27 ถึง 2.29



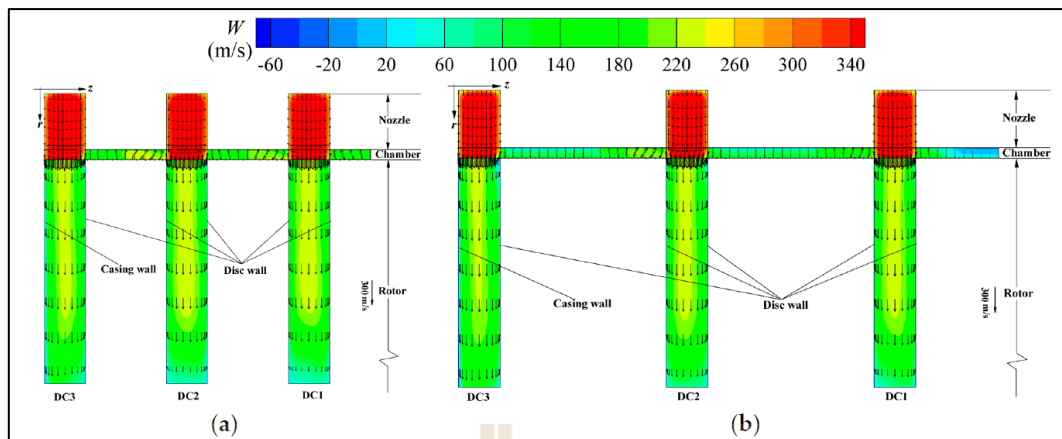
รูปที่ 2.27 ผลของความเร็วภายในเทสลาเทอร์ไบน์เมื่อเปลี่ยนแปลงความหนาของแผ่นดิสก์ไปในแต่ละดิสก์ สำหรับ One to One ที่ความเร็วรอบเท่ากับ 30,000 RPM ในเงื่อนไข Case 1-0.5: (a) DC1; (b) DC2; (c) DC3

ที่มา: (Qi et al., 2018)



รูปที่ 2.28 ผลของความเร็วภายในเทสลาเทอร์ไบน์เมื่อเปลี่ยนแปลงความหนาของแผ่นดิสก์ไปในแต่ละดิสก์ สำหรับ One to One ที่ความเร็วรอบเท่ากับ 30,000 RPM ในเงื่อนไข Case 2-0.5: (a) DC1; (b) DC2; (c) DC3

ที่มา: (Qi et al., 2018)



รูปที่ 2.29 ผลของความเร็วภายในเทสลาเทอร์ไบน์เมื่อเปลี่ยนแปลงความหนาของแผ่นดิสก์ เปลี่ยนแปลงไปในแต่ละพื้นที่หน้าตัด สำหรับ One to One ที่ความเร็วรอบเท่ากับ 30,000 RPM: (a) DC1 for Case 1-0.5; (b) DC1 for Case 2-0.5

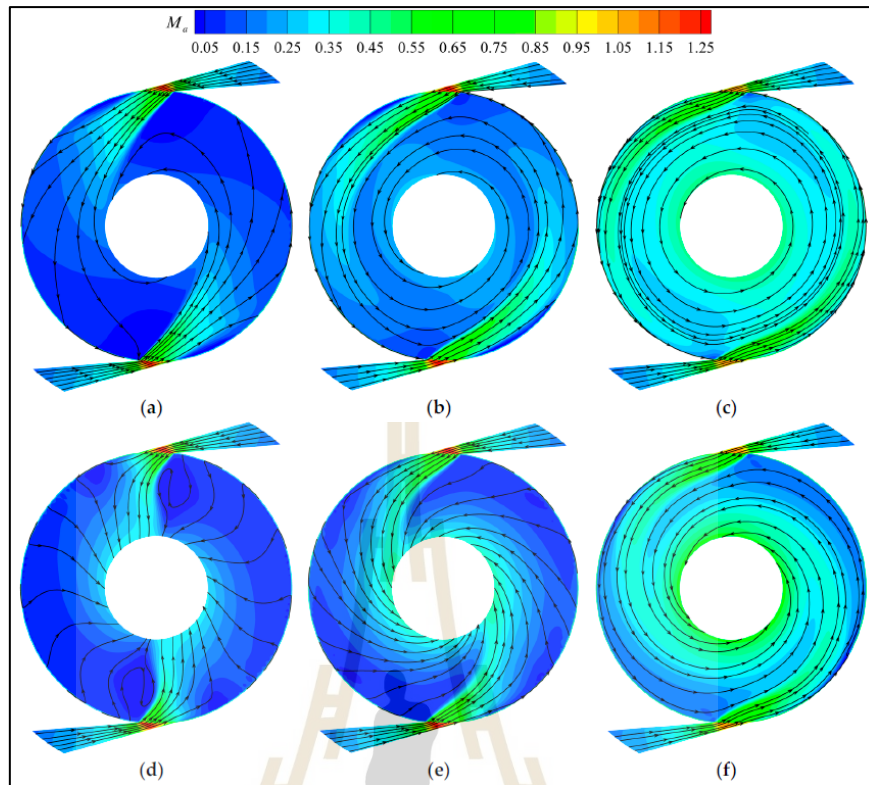
ที่มา: (Qi et al., 2018)

โดยผลของ One to One พบว่าอิทธิพลของการเปลี่ยนแปลงความหนาของแผ่นดิสก์มีผลแตกต่างกันต่อพื้นที่หน้าตัดของนอชเชิลต่อช่องว่างระหว่างแผ่นดิสก์มีค่าเท่าเดิมทำให้ความประสิทธิภาพเปลี่ยนแปลงน้อยมาก โดยผลแสดงตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6 ผลการเปลี่ยนแปลง Loss coefficient และประสิทธิภาพไอเซนโทรปิกต่อการเปลี่ยนแปลง ระยะห่างระหว่างแผ่นดิสก์ สำหรับ One to one (Qi et al., 2018)

| Case Name | Nozzle Loss Coefficient | Disc Loss Coefficient | Leaving-Velocity Loss Coefficient | Isentropic Efficiency |
|------------|-------------------------|-----------------------|-----------------------------------|-----------------------|
| Case 1-0.3 | 0.2857 | 0.4196 | 0.0760 | 0.2187 |
| Case 1-0.5 | 0.1849 | 0.4405 | 0.1303 | 0.2443 |
| Case 1-1 | 0.1085 | 0.4358 | 0.2440 | 0.2117 |

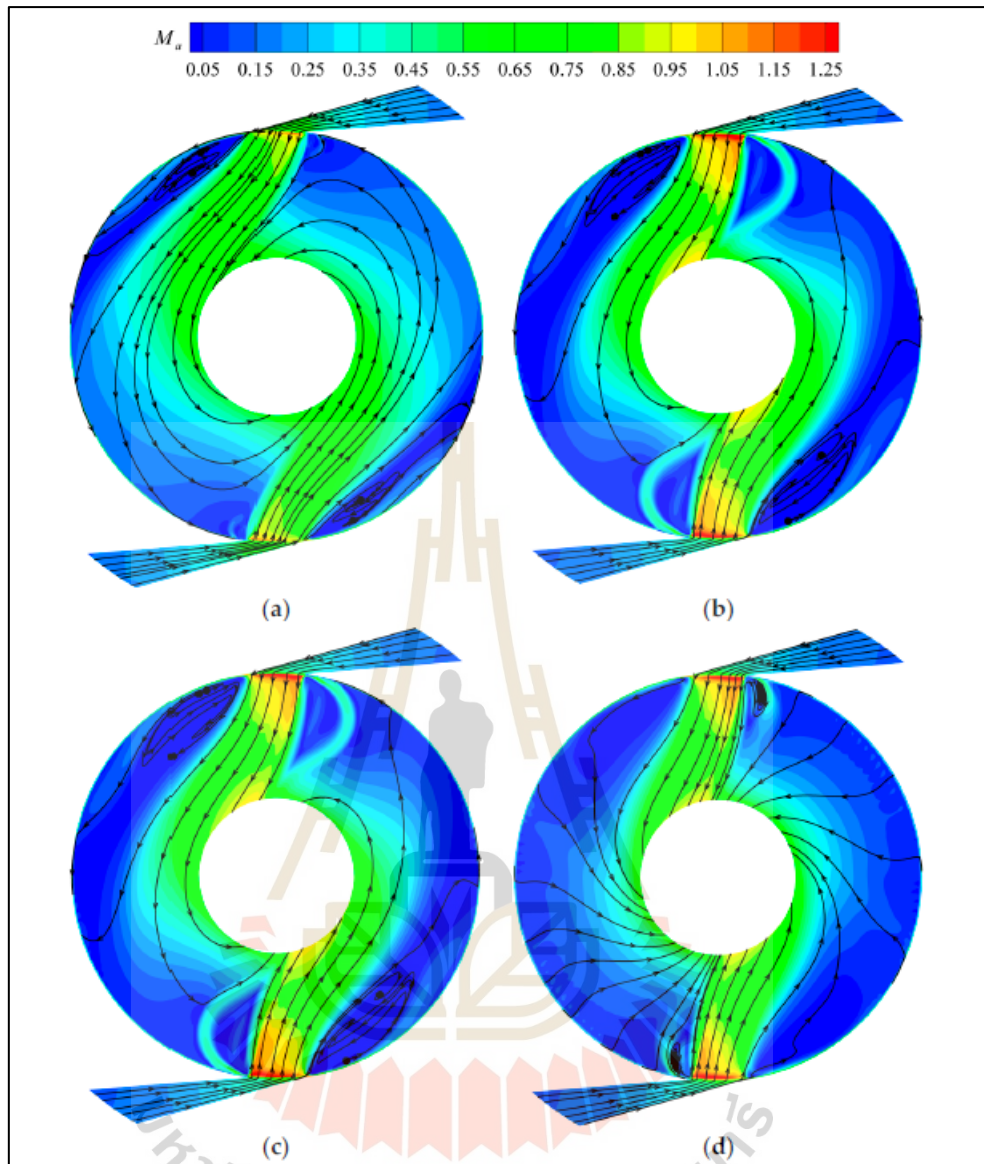
การศึกษาอิทธิพลของระยะห่างระหว่างแผ่นดิสก์ทำให้ความเร็วภายในแต่ละช่องของเทอร์ไบน์มีค่าเปลี่ยนแปลงไปดังรูปที่ 2.30 เนื่องจาก เปลี่ยนระยะห่างระหว่างแผ่นดิสก์ทำให้เป็นการเปลี่ยนพื้นที่หน้าตัดของการไหลส่งผลให้ความเร็วเปลี่ยนแปลงไปเช่นกัน นอกจากนี้ ถ้าเลือกระยะห่างของดิสก์ที่เหมาะสมจะส่งผลให้ได้ประสิทธิภาพออกมา



รูปที่ 2.30 ผลของความเร็วภายในเทอร์ไบน์เมื่อเปลี่ยนแปลงระยะห่างระหว่างแผ่นดิสก์ สำหรับ One to One ที่ความเร็วรอบเท่ากับ 30,000 RPM: (a) DC1 for Case 1-0.3; (b) DC1 for Case 1-0.5; (c) DC1 for Case 1-1; (d) DC3 for Case 1-0.3; (e) DC3 for Case 1-0.5; (f) DC3 for Case 1-1

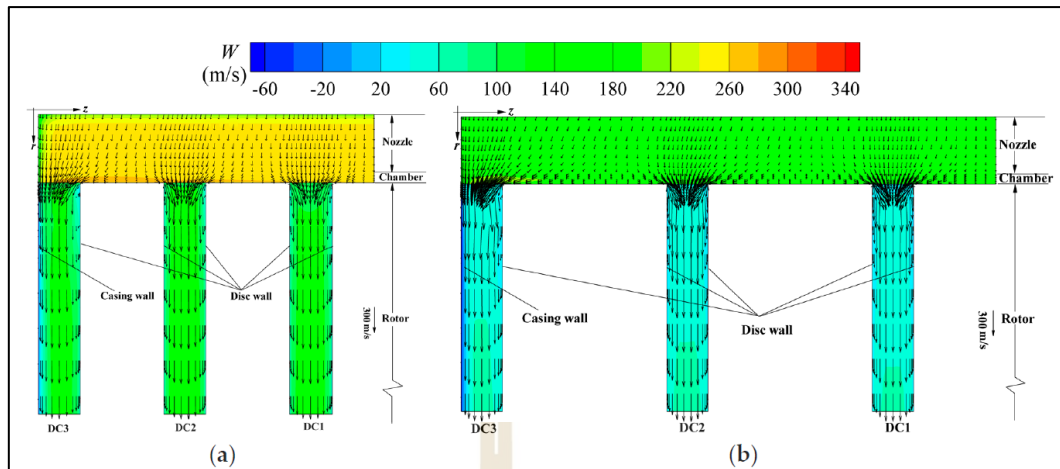
ที่มา: (Qi et al., 2018)

ความเร็วภายในเทอร์ไบน์แบบ One to many เปลี่ยนแปลงตามความหนาของแผ่นดิสก์แสดงดังรูปที่ 2.31 และ 2.32 พบว่า เมื่อความหนาของดิสก์มีค่าเพิ่มทำให้การไหลของอากาศที่ประทะกับเทอร์ไบน์ช้าลง เนื่องจากพื้นที่หน้าตัดของนอซเซลล์มีพื้นที่เพิ่มมากขึ้นทำให้ความเร็วทางเข้าแผ่นดิสก์ลดลงตามไปด้วย



รูปที่ 2.31 ผลของความเร็วยภายในเทสลาเทอร์ไบน์เมื่อเปลี่ยนแปลงความหนาของแผ่นดิสก์ไปในแต่ละดิสก์ สำหรับ One to many ที่ความเร็วรอบเท่ากับ 30,000 RPM: (a) DC1 for Case 1-0.5; (b) DC1 for Case 2-0.5; (c) DC3 for Case 1-0.5;(d) DC3 for Case 2-0.5

ที่มา: (Qi et al., 2018)



รูปที่ 2.32 ผลของความเร็วภายในเทสลาเทอร์ไบน์เมื่อเปลี่ยนแปลงความหนาของแผ่นดิสก์ เปลี่ยนแปลงไปในแต่ละพื้นที่หน้าตัด สำหรับ One to many: (a) Case 1-0.5; (b) Case 2-0.5

ที่มา: (Qi et al., 2018)

สำหรับอิทธิพลของระยะห่างระหว่างแผ่นดิสก์สำหรับ One to many พบว่า มีแนวโน้มเหมือนกันกับ One to one คือจะพบค่าที่ทำให้ได้ประสิทธิภาพสูงสุดโดยสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 2.7

ตารางที่ 2.7 ผลการเปลี่ยนแปลง Loss coefficient และประสิทธิภาพไอเซนโทรปิกต่อการเปลี่ยนแปลง ระยะห่างระหว่างแผ่นดิสก์ สำหรับ One to many (Qi et al., 2018)

| Case Name | Nozzle Loss Coefficient | Disc Loss Coefficient | Leaving-Velocity Loss Coefficient | Isentropic Efficiency |
|------------|-------------------------|-----------------------|-----------------------------------|-----------------------|
| Case 1-0.3 | 0.0724 | 0.5539 | 0.2387 | 0.1350 |
| Case 1-0.5 | 0.0578 | 0.4574 | 0.3310 | 0.1538 |
| Case 1-1 | 0.0417 | 0.3936 | 0.4055 | 0.1592 |
| Case 2-0.5 | 0.0699 | 0.4324 | 0.4040 | 0.0937 |
| Case 2-1 | 0.0471 | 0.3504 | 0.4925 | 0.1100 |
| Case 2-2 | 0.0375 | 0.3083 | 0.5561 | 0.0981 |

ดังนั้น ค่าระยะห่างระหว่างแผ่นดิสก์จึงเป็นตัวแปรที่สำคัญในการใช้ในการออกแบบสำหรับ นอกจากนี้ การศึกษาของ Galindo et al. (2021) ได้ศึกษาอิทธิพลของ ระยะห่างระหว่างแผ่นดิสก์ ของเทสลาเทอร์ไบน์ เช่นเดียวกับ การศึกษาของ Qi et al. (2018) และ Ji et al. (2018) โดยเป็นการทดลองและการจำลอง โดยพบว่าได้มีแนวโน้มที่เหมือนกัน ดังนั้น ระยะห่างระหว่างแผ่นดิสก์เป็นตัวแปรที่ส่งผลกระทบต่อสมรรถนะของเทสลาเทอร์ไบน์เป็นเหตุให้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะใช้ระยะห่างระหว่างแผ่นดิสก์เป็นตัวแปรหนึ่งที่ศึกษาอิทธิพลต่อสมรรถนะของเทอร์ไบน์

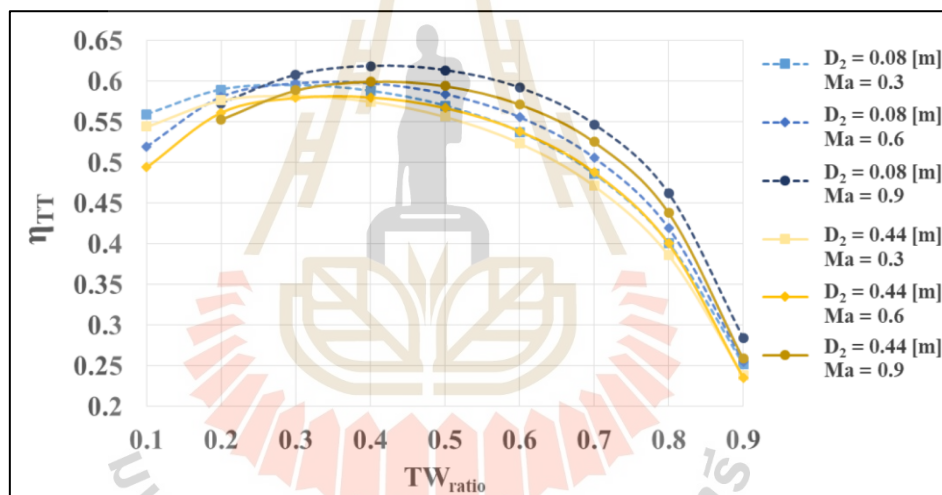
จากการศึกษาของ Talluri et al. (2018) พบว่า ในการออกแบบเทสลาเทอร์ไบน์ นั้นมีค่าขนาดต่างกัน ที่ทำให้ได้ประสิทธิภาพของเทอร์ไบน์สูงสุด โดยจะได้ศึกษาอิทธิพลของ Throat-width ratio และ Tangential velocity ratio

โดย throat-width ratio เป็นดังสมการที่ 2.1 และ Tangential velocity ratio เป็นดังสมการที่ 2.2

$$TW_{Ratio} = \frac{TW \times H_s \times Z_{stat}}{2\pi \times r_2 \times b \times n_{disk}} \quad (2.1)$$

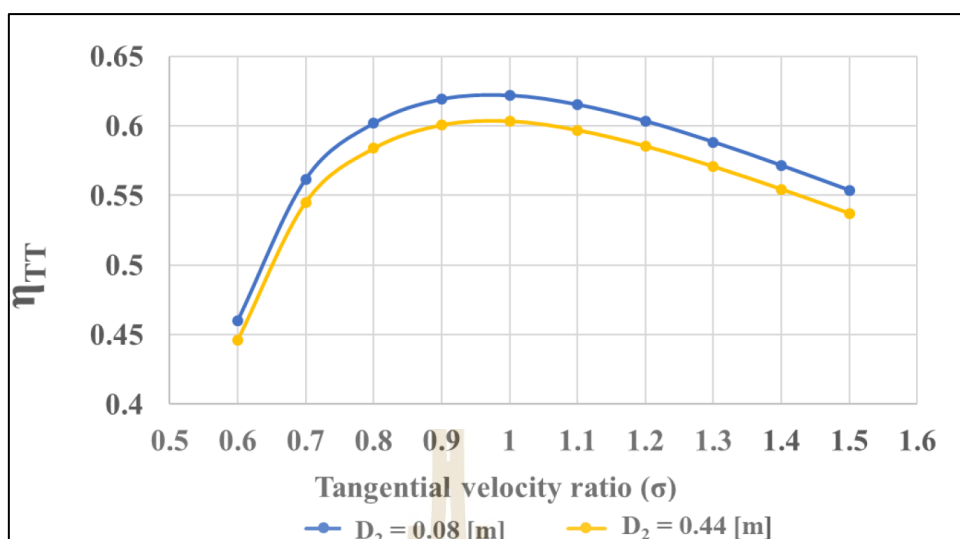
$$\sigma = \frac{V_{\theta,2}}{u_{\theta,2}} \quad (2.2)$$

โดยผลการศึกษาอิทธิพลของ Throat-width ratio และ Tangential velocity ratio เป็นดังรูปที่ 2.34



รูปที่ 2.33 อิทธิพลของ Throat-width ratio ที่เปลี่ยนแปลงไปต่อประสิทธิภาพของเทสลาเทอร์ไบน์
ที่มา: (Talluri et al., 2018)

จากรูปที่ 2.33 พบว่า TW_{ratio} ที่มีค่าน้อย ซึ่งหมายถึงพื้นที่หน้าตัดที่ทางออก stator มีค่าน้อยกว่า ทางเข้าโรเตอร์ส่งผลให้ประสิทธิภาพสูงขึ้น อย่างไรก็ตามถ้า TW_{ratio} มีค่าน้อยเกินไปจะส่งผลให้เกิดปัญหาทำให้ผลิตได้ยาก โดยพบว่าค่าที่ทำให้ประสิทธิภาพสูงอยู่ในช่วง 0.2 – 0.4 ขนาดของโรเตอร์และ ความเร็วของสารทำงาน



รูปที่ 2.34 อิทธิพลของ tangential velocity ratio ที่เปลี่ยนแปลงไปต่อประสิทธิภาพของเตสลาเทอร์ไบน์

ที่มา: (Talluri et al., 2018)

จากผลของ Tangential velocity ratio ดังรูปที่ 2.34 พบว่า ถ้าเลือกให้สารทำงานมี Working fluid tangential velocity ที่ใกล้เคียงกับความเร็วของ peripheral speed จะส่งผลให้ได้ประสิทธิภาพสูง เนื่องจากจะทำให้เกิดการ Match กัน โดยพบว่า Tangential velocity ratio เท่ากับ 1 จะทำให้ได้ประสิทธิภาพสูงที่สุด ดังนั้นในการศึกษานี้จะได้ทำการปรับความเร็วรอบให้เหมาะสมเพื่อให้เตสลาเทอร์ไบน์ให้ประสิทธิภาพออกมาสูงที่สุด

ปรีทัศน์วรรณกรรมของการศึกษาเตสลาเทอร์ไบน์พบว่า สามารถทำงานได้เหมือนกับเทอร์ไบน์ที่นิยมใช้กับวัฏจักรโออาร์ซี และยังคงมีความซับซ้อนน้อยกว่ารวมถึงราคาในการผลิตยังถูกกว่าอีกด้วย นอกจากนี้ ยังมีจุดเด่นที่สามารถทำงานภายใต้สถานะของสารทำงานที่เป็นของเหลวหรือของผสมได้ อีกทั้งเมื่อเปรียบเทียบกับเทอร์ไบน์ตามแนวแกนพบว่าสำหรับโรงไฟฟ้ากำลังผลิตน้อยหรือโรงไฟฟ้าที่แหล่งความร้อนเป็นแหล่งความร้อนคุณภาพต่ำเตสลาเทอร์ไบน์จะมีประสิทธิภาพที่สูงกว่า ดังนั้น วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สนใจจะนำเตสลาเทอร์ไบน์ใช้กับวัฏจักรโออาร์ซี

2.5 การเลือกสารทำงานสำหรับโรงไฟฟ้า

ในการศึกษาอิทธิพลของสารทำงานที่ส่งผลต่อเตสลาเทอร์ไบน์ของ Song et al. (2017) ได้จำลองวัฏจักรโออาร์ซีที่มีสารทำงานแตกต่างกันออกไปดังตารางที่ 2.8 โดยจำลองภายใต้สภาวะการทำงานเดียวกันและเตสลาเทอร์ไบน์ขนาดเดียวกันที่แหล่งความร้อนอุณหภูมิ 120 °C ที่อัตราการไหลเท่ากับ 0.14 kg/s สารทำงานมีอุณหภูมิกลับตัวเท่ากันที่ 31.8 °C โดยกำหนดให้สารทำงานที่ออกจาก

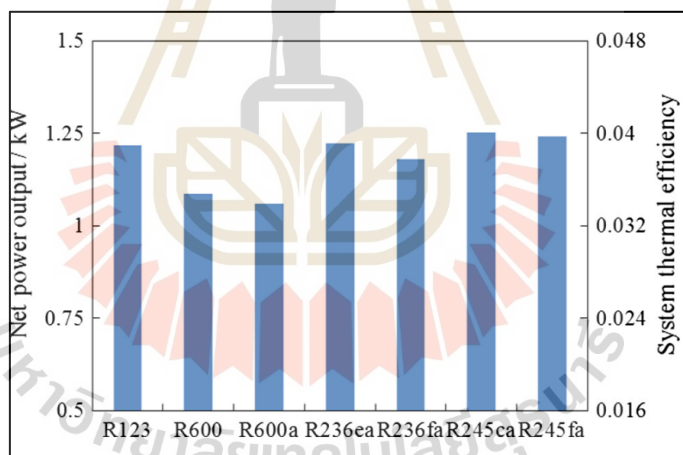
Evaporator จะมี Superheated degree เท่ากับ $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ และ ให้ Pinch point temperature difference ที่อุปกรณ์ Condenser และ Evaporator มีค่าเท่ากับ $6\text{ }^{\circ}\text{C}$ โดยผลการจำลองเป็นดังตารางที่ 2.9 และ รูปที่ 2.35

ตารางที่ 2.8 คุณสมบัติของสารทำงานที่เลือกมาใช้กับโรงไฟฟ้าวัฏจักรโออาร์ซี (Song et al., 2017)

| Working fluid | Molecular weight (g/mol) | Normal boiling point (K) | Critical temperature (K) | Critical pressure (kPa) | GWP | ODP |
|---------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|-------------------------|------|-------|
| R123 | 152.93 | 301.0 | 456.8 | 3661.8 | 120 | 0.012 |
| R600 | 58.12 | 272.7 | 425.1 | 3796.0 | ~20 | 0 |
| R600a | 58.12 | 261.4 | 407.8 | 3629.0 | ~20 | 0 |
| R236ea | 152.04 | 279.3 | 412.4 | 3502.0 | 1350 | 0 |
| R236fa | 152.04 | 271.7 | 398.1 | 3200.0 | 9400 | 0 |
| R245ca | 134.05 | 298.3 | 477.6 | 3940.7 | 693 | 0 |
| R245fa | 134.05 | 288.3 | 427.2 | 3651.0 | 950 | 0 |

ตารางที่ 2.9 ผลการจำลองของโรงไฟฟ้าวัฏจักรโออาร์ซีที่มีสารทำงานแตกต่างกันออกไป (Song et al., 2017)

| Working fluid | Evaporation temperature (K) | Evaporation pressure (kPa) | Mass flow rate of the working fluid (kg/s) | Viscosity at the rotor inlet ($\mu\text{Pa}\cdot\text{s}$) |
|---------------|-----------------------------|----------------------------|--|--|
| R123 | 343.8 | 383.8 | 0.17 | 11.4 |
| R600 | 346.5 | 873.2 | 0.08 | 7.9 |
| R600a | 348.9 | 1230.0 | 0.08 | 8.0 |
| R236ea | 349.8 | 924.2 | 0.17 | 11.7 |
| R236fa | 352.1 | 1216.9 | 0.19 | 11.8 |
| R245ca | 345.8 | 469.9 | 0.14 | 15.9 |
| R245fa | 346.9 | 672.9 | 0.15 | 11.1 |



รูปที่ 2.35 ผลของประสิทธิภาพและงานสุทธิของเตสลาเทอร์ไบน์เมื่อสารทำงานเปลี่ยนแปลงไป

ที่มา: (Song et al., 2017)

จากรูปที่ 2.35 จะเห็นได้ว่าสารทำงานที่มี Viscosity สูงก่อนเข้าเทอร์ไบน์ส่งผลให้ประสิทธิภาพของเทอร์ไบน์มีค่าสูง จากตารางที่ 2.6 จะเห็นได้ว่า R245ca มีค่า Viscosity สูงที่สุด ซึ่งมีค่าเท่ากับ $15.9\ \mu\text{Pa}\cdot\text{s}$ โดยมีประสิทธิภาพสูงที่สุดเท่ากับ 38.7 % และงานสุทธิเท่ากับ 1.25 kW เนื่องจาก การทำงานของเตสลาเทอร์ไบน์เป็นการใช้หลัก Viscous flow ของสารทำงานทำให้เกิดการหมุนของแผ่นดิสก์ในโรเตอร์ซึ่งถ้าสารทำงานใดมี Viscosity ก็จะทำให้ถ่าย momentum ให้กับ โรเตอร์ได้ดีซึ่งจะส่งผลให้ประสิทธิภาพของ เตสลาเทอร์ไบน์ดีขึ้นไปด้วย อย่างไรก็ตาม ในการ

พิจารณาในการเลือกสารทำงานที่ใช้ควรพิจารณาให้เหมาะสมการวัฏจักรของโรงไฟฟ้าด้วยเพื่อให้ได้งานออกมาสูงที่สุด โดยงานวิจัยของ Zhang et al. (2023) ได้ทำการจำลองโรงไฟฟ้าวัฏจักรโออาร์ซี โดยเงื่อนไขการจำลองเป็นดังตารางที่ 2.10 และรายละเอียดของสารทำงานเป็นดังตารางที่ 2.11

ตารางที่ 2.10 เงื่อนไขการจำลองของโรงไฟฟ้าวัฏจักรโออาร์ซี

| Parameter | Symbol | Value |
|---|----------------|--------|
| Inlet temperature of hot water (K) | Thw,in | 373.15 |
| Outlet temperature of hot water (K) | $T_{hw,out}$ | 323.15 |
| Mass flow rate of hot water (kg/s) | \dot{m}_{hw} | 0.143 |
| Input heat of hot water (kW) | Q_{hw} | 30 |
| Pinch temperature of heat exchanger (K) | ΔT | 3 |
| Superheating degree of working fluid (K) | T_{sd} | 0 |
| Condensation temperature of working fluid (K) | T_{cond} | 28 |
| Efficiency of working fluid pump | η_{pump} | 0.8 |

ที่มา: (Zhang et al., 2023)

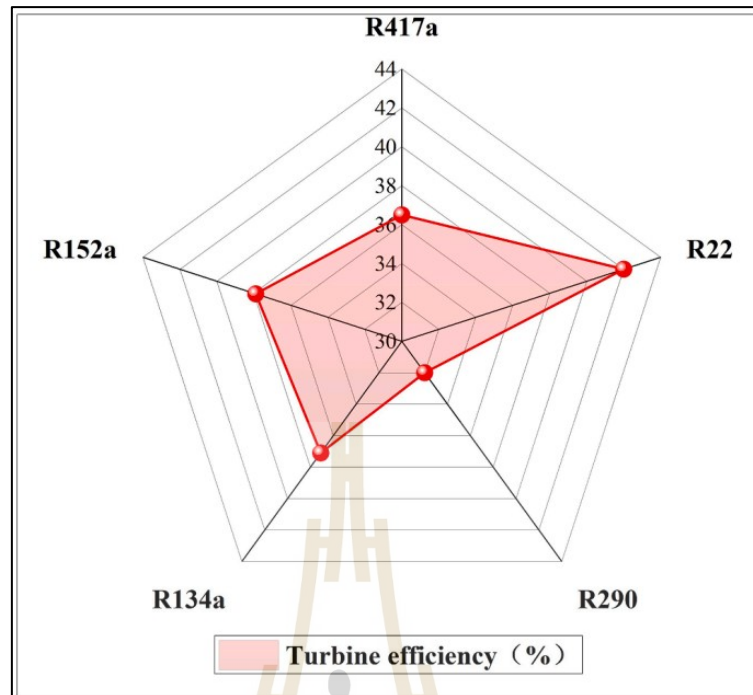
ตารางที่ 2.11 คุณสมบัติของสารทำงานที่เลือกมาใช้กับโรงไฟฟ้าวัฏจักรโออาร์ซี

| Working fluid | Evaporation temperature (K) | Evaporation pressure (kPa) | Mass flow rate of working medium (kg/s) | gas mass fraction | Density (kg/m ³) | Viscosity (μPa s) |
|---------------|-----------------------------|----------------------------|---|-------------------|------------------------------|-------------------|
| R417a | 342.35 | 2709.4 | 0.190 | 0.948 | 54.76 | 15.83 |
| R22 | 331.40 | 2336.8 | 0.163 | 0.932 | 51.36 | 17.26 |
| R290 | 334.05 | 2156.2 | 0.084 | 0.974 | 22.85 | 9.43 |
| R134a | 333.20 | 1683.8 | 0.159 | 0.978 | 36.15 | 13.49 |
| R152a | 329.50 | 1375.9 | 0.104 | 0.964 | 20.89 | 12.48 |

ที่มา: (Zhang et al., 2023)

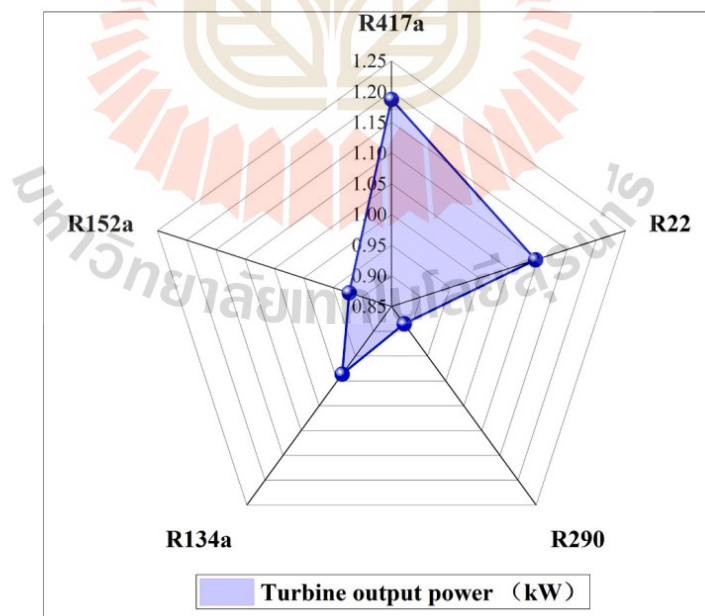
โดยผลการจำลองจะประกอบไปด้วย Turbine efficiency Turbine power output และ System efficiency ดังรูปที่ 2.36 ถึง 2.38 ตามลำดับ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รูปที่ 2.36 Turbine efficiency ของสารทำงานที่แตกต่างกันออกไปที่ความเร็วรอบเท่ากับ 6000 RPM

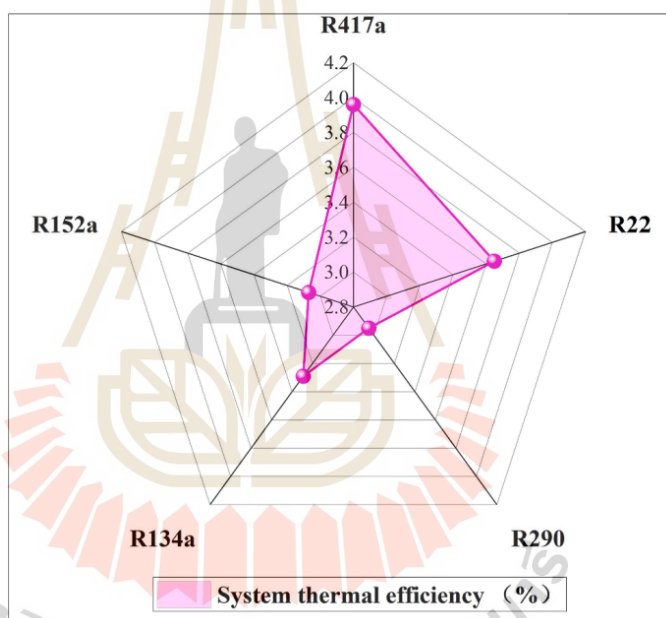
ที่มา: (Zhang et al., 2023)



รูปที่ 2.37 Turbine power output ของสารทำงานที่แตกต่างกันออกไปที่ความเร็วรอบเท่ากับ 6000 RPM

ที่มา: (Zhang et al., 2023)

จากรูปที่ 2.36 จะเห็นได้ว่าสารทำงาน R22 ทำให้ประสิทธิภาพของเทอร์ไบน์สูงที่สุดจากสารทำงานตัวอื่นเนื่องจากมี Viscosity สูงที่สุดซึ่งมีค่าเท่ากับ $17.26 \mu Pa \cdot s$ ซึ่งจะเห็นได้ว่ามีแนวโน้มเช่นเดียวกับการจำลองของ Song et al. (2017) อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณา Turbine work ดังรูปที่ 2.37 พบว่า R22 ไม่ใช่สารทำงานที่ให้งานออกมาสูงที่สุด โดยสารทำงานที่ให้งานสุทธิสูงที่สุดจะเป็น R417a ซึ่งมีค่าเท่ากับ 1.2 kW โดยได้งานสุทธิสูงกว่า R22 เท่ากับ 8% โดยในขณะที่ R417a ประสิทธิภาพน้อยกว่า R22 เท่ากับ 10% โดยที่ประสิทธิภาพของเทอร์ไบน์สูงอาจจะไม่จำเป็นที่ทำให้ได้งานสูงเสมอไป อาจต้องพิจารณาความเหมาะสมของสารทำงานที่ทำงานได้ดีในอุณหภูมิของแหล่งความร้อนนั้น ๆ ด้วยซึ่งในกรณีนี้ R417a จะมีความเหมาะสมมากกว่าส่งผลให้ได้งานสุทธิออกมาสูงกว่า



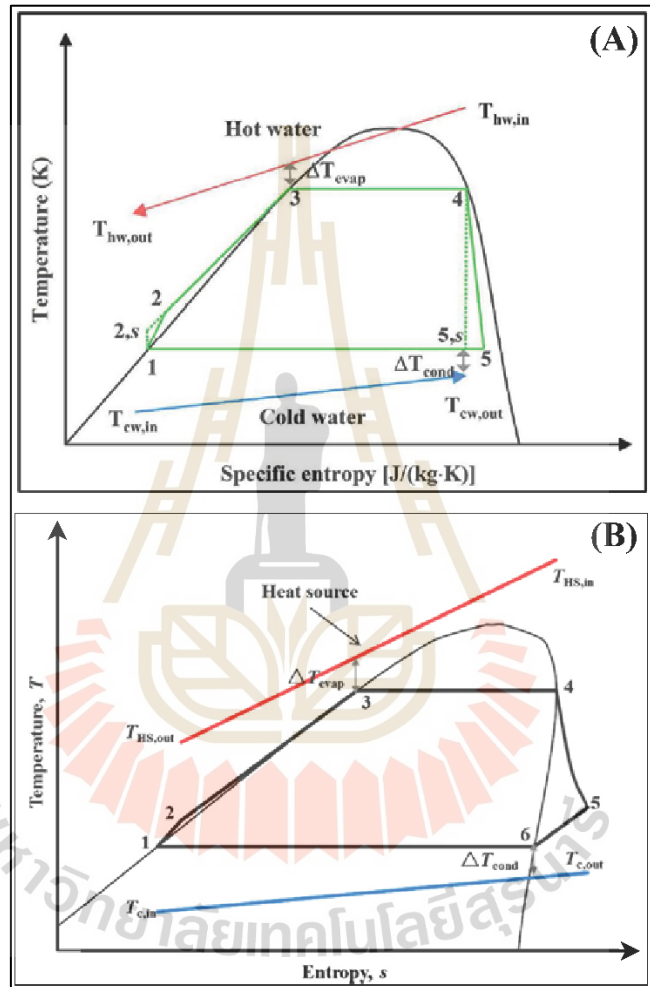
รูปที่ 2.38 Thermal efficiency ของโรงไฟฟ้าที่ใช้สารทำงานที่แตกต่างกันออกไปที่ความเร็วรอบเท่ากับ 6,000 RPM

ที่มา: (Zhang et al., 2023)

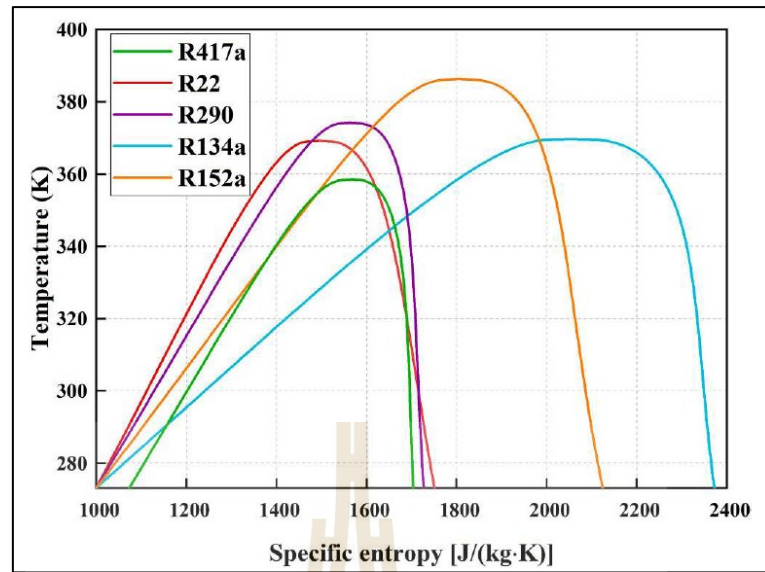
ทั้งนี้ ผลของประสิทธิภาพเชิงความร้อนของวัฏจักรจะมีแนวโน้มเดียวกันกับ Turbine power output ดังรูปที่ 2.38 คือ R417a ให้ประสิทธิภาพออกมามากที่สุด

นอกจากนี้ งานวิจัยของ Zhang et al. (2023) ได้ทำการจำลองโรงไฟฟ้าวัฏจักรโออาร์ซีแบบ Two-phase ดังรูปที่ 2.39 (A) ซึ่งโดยทั่วไปแล้วจะไม่เหมาะสมกับเทอร์ไบน์ชนิดอื่น ๆ ดังตารางที่ 2.8 เนื่องจากจะทำให้เทอร์ไบน์ประสิทธิภาพต่ำและทำให้เกิดความเสียหายกับตัวเทอร์ไบน์ อย่างไรก็ตาม งานวิจัยนี้ ได้เลือกใช้สารทำงานจำพวก Wet fluid ดังรูปที่ 2.40 เพื่อให้เกิด Two-phase

expansion ซึ่งส่งผลให้งานสุทธิออกมามากขึ้น เนื่องจากสารทำงานที่เป็น Two-phase นั้นมีค่า Viscosity สูงกว่าสารทำงานที่เป็นไอ ซึ่งผลการศึกษาของ Zhang et al. (2023) และ Song et al. (2017) ให้ผลการจำลองในทิศทางเดียวกัน คือสารทำงานที่มี Viscosity สูง จะส่งผลให้แนวโน้มของงานที่ได้จากเซลล์เทอร์ไบน์ มีค่าสูงตามไปด้วย



รูปที่ 2.39 ฟังก์ชันอุณหภูมิและเอนโทรปีจำเพาะของของ: (d) Two-phase expansion; (b) Single-phase expansion



รูปที่ 2.40 ผังอุณหภูมิและเอนโทรปีจำเพาะของสารทำงาน Wet fluid

ที่มา: (Song et al., 2017)

ดังนั้น คุณสมบัติของสารทำงานเป็นสิ่งที่จำเป็นต้องศึกษา เนื่องจากส่งผลต่อการทำงานของ
เทอร์สเตอร์

บทที่ 3

วิธีการดำเนินการวิจัย

ในหัวข้อวิธีการดำเนินการวิจัยของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอวิธีดำเนินงาน ทั้งนี้ในการศึกษานี้ใช้โปรแกรม MATLAB และ REFPROP ในการจำลอง โดยมีรายละเอียดได้แก่ การจำลองโรงไฟฟ้าวัฏจักรโออาร์ซีและคาลินาแบบ KCS-11 เพื่อหาเงื่อนไขการทำงานที่ทำให้ได้กำลังสุทธิสูงสุด การจำลองเตสลาเทอร์ไบน์เพื่อหาขนาดที่เหมาะสม การวิเคราะห์เอกเซอร์ยี รวมถึงการประเมินทางเศรษฐศาสตร์ของโรงไฟฟ้าและขนาดของเตสลาเทอร์ไบน์ที่เหมาะสม รวมถึงแนวทางในการศึกษาโดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

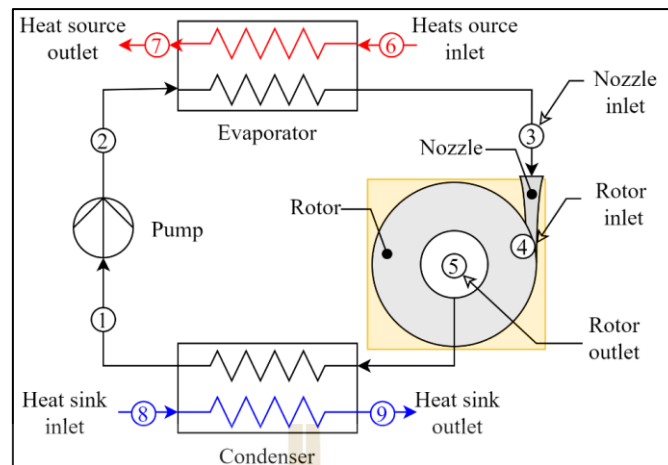
3.1 การจำลองของโรงไฟฟ้าวัฏจักรโออาร์ซีเพื่อหาเงื่อนไขการทำงานที่ให้กำลังสุทธิสูงสุด

ในหัวข้อนี้ได้นำเสนอรายละเอียดการจำลองของโรงไฟฟ้าวัฏจักรโออาร์ซีที่ใช้เตสลาเทอร์ไบน์ โดยประกอบไปด้วยการอธิบายองค์ประกอบของโรงไฟฟ้า แบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ การจำลองโรงไฟฟ้า และการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

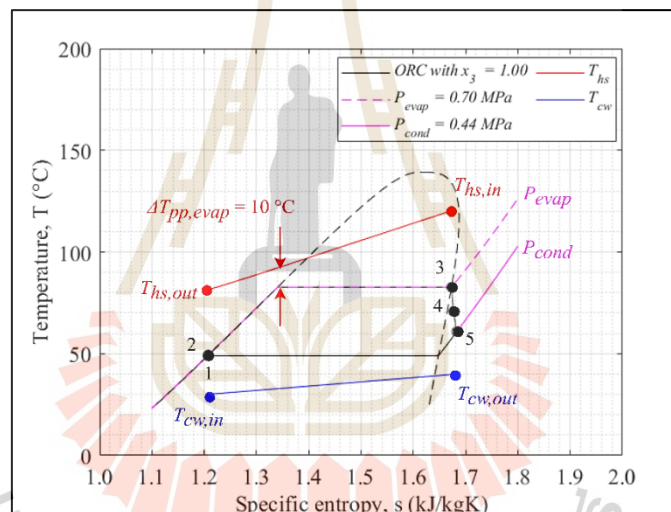
3.1.1 โรงไฟฟ้าวัฏจักรโออาร์ซีที่ใช้เตสลาเทอร์ไบน์และแบบจำลองของโรงไฟฟ้าวัฏจักรโออาร์ซี

องค์ประกอบของอุปกรณ์ภายในโรงไฟฟ้าวัฏจักรโออาร์ซีที่ใช้เตสลาเทอร์ไบน์ที่ใช้ในการศึกษานี้แสดงดังรูปที่ 3.1 และ ผังอุณหภูมิและเอนโทรปีจำเพาะของโรงไฟฟ้าแสดงดังรูปที่

3.2



รูปที่ 3.1 ผังอุปกรณ์ของโรงไฟฟ้าวัฏจักรโออาร์ซีที่ใช้เทสลาเทอร์ไบน์



รูปที่ 3.2 ผังอุณหภูมิและเอนโทรปีจำเพาะของโรงไฟฟ้าวัฏจักรโออาร์ซี

จากรูปที่ 3.1 และ 3.2 เห็นได้ว่าโรงไฟฟ้าที่ศึกษาประกอบไปด้วย 4 กระบวนการ ประกอบไปด้วย สารทำงานถูกอัดโดยปั๊ม สารทำงานรับพลังงานความร้อนที่อีวาโปเรเตอร์ สารทำงานขยายตัวในเทอร์ไบน์ และสารทำงานกลั่นตัวในคอนเดนเซอร์ ทั้งนี้แบบจำลองที่ใช้สำหรับโรงไฟฟ้าวัฏจักรโออาร์ซีเป็นแบบจำลองทางเทอร์โมไดนามิกส์ โดยรายละเอียดของแต่ละกระบวนการและแบบจำลองมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

- 1) กระบวนการ 1-2: สารทำงานถูกอัดโดยปั๊ม

ในกระบวนการนี้ สารทำงานถูกเพิ่มความดันจากคอนเดนเซอร์ไปที่อีวาโปเรเตอร์ โดยกำลังของปั๊มสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\dot{W}_{pump} = \dot{m}_{wf} (h_{02,isen} - h_{01}) / \eta_{pump} \quad (3.1)$$

โดยที่ประสิทธิภาพไอเซนโทรปิกของปั๊ม (η_{pump}) ในการศึกษานี้มีค่าเท่ากับ 80%

2) กระบวนการ 2-3: สารทำงานรับพลังงานความร้อนที่อิวาโปรเตอร์

ในกระบวนการนี้ สารทำงานรับพลังงานจากแหล่งความร้อนภายนอกจนถึงอุณหภูมิและความเป็นของสารทำงานที่ตำแหน่งก่อนเข้าเทอร์ไบน์ตามที่กำหนด โดยพลังงานความร้อนที่สารทำงานได้รับสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\dot{Q}_{in} = \dot{m}_{wf} (h_{03} - h_{02}) = \dot{m}_{hs} c_{p,hs} (T_{hs,out} - T_{hs,in}) \quad (3.2)$$

3) กระบวนการ 3-5: สารทำงานขยายตัวในเทอร์ไบน์

ในกระบวนการนี้ สารทำงานขยายตัวภายในเทอร์ไบน์เพื่อผลิตกำลัง โดยในการจำลองเบื้องต้นได้กำหนดประสิทธิภาพไอเซนโทรปิกของเทอร์ไบน์ เพื่อหาเงื่อนไขการทำงานที่ให้กำลังสุทธิสูงก่อนจำลองเตสลาเทอร์ไบน์ โดยกำลังที่เทอร์ไบน์สามารถผลิตได้แสดงดังต่อไปนี้

$$\dot{W}_{turbine} = \eta_{isen} \dot{m}_{wf} (h_{03} - h_{05,isen}) \quad (3.3)$$

4) กระบวนการ 5-1: สารทำงานกลั่นตัวในคอนเดนเซอร์

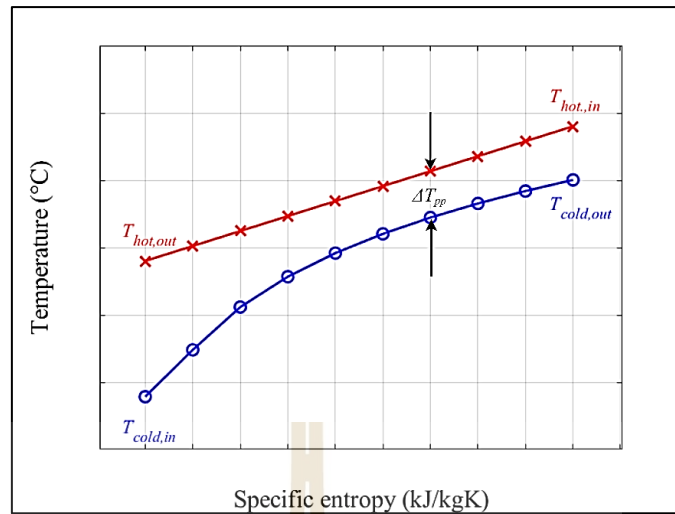
ในกระบวนการนี้ สารทำงานได้ถ่ายเทความร้อนออกไปที่น้ำหล่อเย็นและกลั่นตัวที่กลั่นตัวในคอนเดนเซอร์และกลับไปเข้าปั๊ม โดยอัตราการถ่ายเทความร้อนสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\dot{Q}_{out} = \dot{m}_{wf} (h_{05} - h_{01}) = \dot{m}_{cw} c_{p,cw} (T_{cw,in} - T_{cw,out}) \quad (3.4)$$

นอกจากนี้ ในการจำลองได้กำหนดให้ Pinch point temperature difference (ΔT_{pp}) ทั้งใน คอนเดนเซอร์และอิวาโปรเตอร์ เท่ากับ 10°C โดย ΔT_{pp} คือความแตกต่างน้อยที่สุดระหว่างสารกระแสร้อนและสารกระแเย็นภายในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน โดยสามารถหาได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$\Delta T_{pp} = \min(T_{hot} - T_{cold}) \quad (3.5)$$

ความแตกต่างระหว่าง สารกระแสร้อนและสารกระแเย็นภายในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน หาจากการการแบ่งอุณหภูมิของสารกระแสร้อนและเย็นภายในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนเป็นส่วน ๆ (Discretization) โดยการการจำลองนี้กำหนดให้อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนเป็นแบบ counterflow โดยแสดงดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 รูปแบบของอุณหภูมิของสารกระแสน้ำร้อนและกระแสน้ำเย็นภายในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน

นอกจากนี้ ขนาดของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนถูกคำนวณโดยใช้กระบวนการ Log Mean Temperature Difference (LMTD) (Patil et al., 2017), โดยสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 3.6 และ 3.7

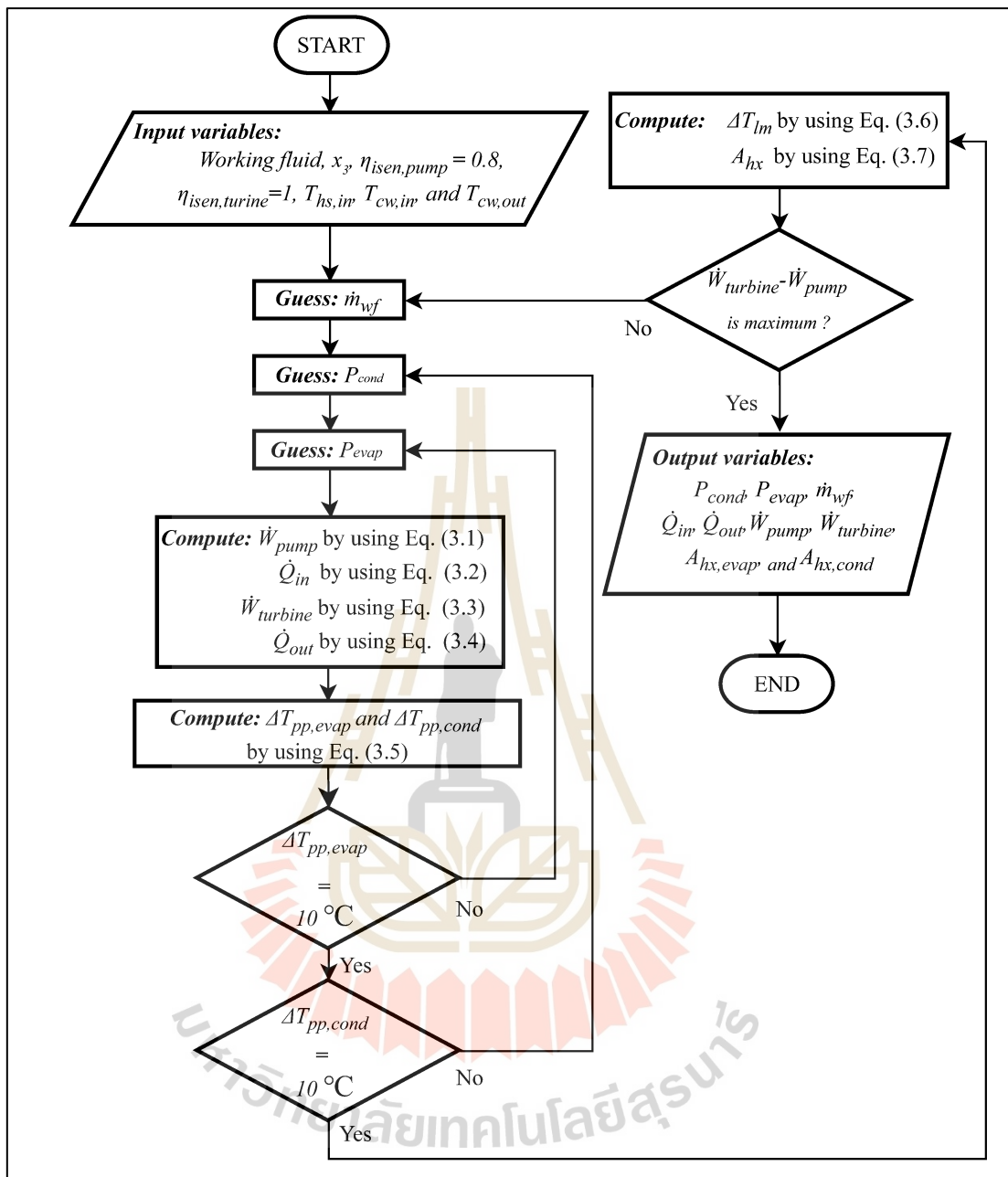
$$\Delta T_{lm} = \frac{(T_{hot,in} - T_{cold,out}) - (T_{hot,out} - T_{cold,in})}{\ln \left[\frac{T_{hot,in} - T_{cold,out}}{T_{hot,out} - T_{cold,in}} \right]} \quad (3.6)$$

$$UA_{hx} = \dot{Q} / \Delta T_{lm} \quad (3.7)$$

โดยค่า Overall heat transfer coefficient (U) กำหนดให้ $0.638 \text{ kW/m}^2\text{K}$ [(Junior et al., 2019), (Junior et al., 2021)] ซึ่งเป็นการกำหนดของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนในโรงไฟฟ้าวัฏจักรไออาร์ซีเมื่อมองว่าเป็นแบบ Counter flow single passes

3.1.2 การจำลองโรงไฟฟ้าวัฏจักรไออาร์ซี

ในการจำลองใช้ Golden-section search method เพื่อใช้สำหรับหาค่าความดันที่คอนเดนเซอร์และอีวาโปเรเตอร์ รวมถึงอัตราการไหลเชิงมวลของสารทำงาน โดยกระบวนการจำลองแสดงดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 ผังการจำลองโรงไฟฟ้าวัฏจักรโออาร์ซี

การจำลองโรงไฟฟ้าวัฏจักรโออาร์ซีดังรูปที่ 3.4 มีลำดับการจำลองดังต่อไปนี้
 กระบวนการที่ 1: กำหนดตัวแปรเริ่มต้น โดยกระบวนการนี้ได้ทำการกำหนดสารทำงาน ความเป็นไอของสารทำงาน ประสิทธิภาพไอเซนโทรปิกของปั๊ม อุณหภูมิของแหล่งความร้อน อัตราการไหลเชิงมวลของแหล่งความร้อน และกำหนดอุณหภูมิน้ำหล่อเย็นทางเข้าและทางออก

กระบวนการที่ 2: กำหนดอัตราการไหลของสารทำงาน โดยกระบวนการนี้เป็นการกำหนดอัตราการไหลเชิงมวลของสารทำงานภายในโรงไฟฟ้าวัฏจักรโออาร์ซีเพื่อให้ได้กำลังสุทธิของโรงไฟฟ้าสูงที่สุด

กระบวนการที่ 3: หาค่าความดันที่คอนเดนเซอร์และอีวาโปเรเตอร์ ที่ทำให้ $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ โดยในกระบวนการนี้ใช้ golden-section search method เพื่อหาค่า pinch point temperature ทั้งคอนเดนเซอร์และอีวาโปเรเตอร์ เท่ากับ $10\text{ }^{\circ}\text{C}$

กระบวนการที่ 4: คำนวณค่าการถ่ายเทความร้อน กำลังงานสุทธิ และ ΔT_{pp} ทั้งคอนเดนเซอร์และอีวาโปเรเตอร์ โดยใช้สมการที่ 3.1 ถึง 3.5

กระบวนการที่ 5: ตรวจสอบว่า pinch point temperature ทั้งคอนเดนเซอร์และอีวาโปเรเตอร์ เท่ากับ $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ หรือไม่ ถ้าไม่ให้กลับไปทำเริ่มวนซ้ำกระบวนการที่ 3 จนกว่า ΔT_{pp} ทั้งคอนเดนเซอร์และอีวาโปเรเตอร์ เท่ากับ $10\text{ }^{\circ}\text{C}$

กระบวนการที่ 6: หาขนาดของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนในโรงไฟฟ้าโดยใช้สมการที่ 3.6 และ 3.7

กระบวนการที่ 7: ตรวจสอบว่ากำลังสุทธิของโรงไฟฟ้าสูงที่สุดหรือไม่ถ้ายังให้วนซ้ำที่กระบวนการที่ 2 จนกว่าจะได้กำลังสุทธิสูงที่สุด

กระบวนการที่ 8: แสดงผลลัพธ์ของการจำลองโรงไฟฟ้า

โดยรายละเอียดของโปรแกรมที่ใช้ MATLAB ร่วมกับ REFPROP ในการจำลองแสดงรายละเอียดในภาคผนวก ก.

3.1.3 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองโรงไฟฟ้าวัฏจักรโออาร์ซี

เพื่อให้มั่นใจได้ว่าแบบจำลองที่ใช้ในการจำลองโรงไฟฟ้าวัฏจักรโออาร์ซีมีความถูกต้องและเชื่อถือได้ในหัวข้อนี้ได้ตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองโดยการเปรียบเทียบกับผลการจำลองที่ได้ถูกเผยแพร่ในบทความวิชาการที่มีความน่าเชื่อถือและเป็นที่ยอมรับ โดยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้จำลองเปรียบเทียบกับบทความของ Fischer (2011) โดยจำลองโรงไฟฟ้าขนาด 1 MW ซึ่งผลการจำลองเปรียบเทียบแสดงดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ผลการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองกังหันวิจัยของ Fischer (2011)

| ตัวแปร | Fischer (2011) | วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ | ความผิดพลาด (%) | หน่วย |
|--|----------------|--------------------|-----------------|-------|
| ป้อนเข้า | | | | |
| สารทำงาน | ไซโคลเพนเทน | | | - |
| ประสิทธิภาพไอเซนโทรปิกของปั๊ม | 65 | | | % |
| ประสิทธิภาพไอเซนโทรปิกของเทอร์ไบน์ | 85 | | | % |
| ความเป็นไอของสารทำงานที่ทางออกคอนเดนเซอร์ | ของเหลวอิ่มตัว | | | - |
| ความเป็นไอของสารทำงานที่ทางออกฮีวโปเรเตอร์ | ไออิ่มตัว | | | - |
| ความดันที่ฮีวโปเรเตอร์ | 3.342 | | | MPa |
| ความดันที่คอนเดนเซอร์ | 0.288 | | | MPa |
| อุณหภูมิแหล่งความร้อนเข้า | 280 | | | °C |
| อุณหภูมิน้ำหล่อเย็นทางเข้า | 62 | | | °C |
| ผลลัพธ์ | | | | |
| อุณหภูมิสารทำงานที่ออกจากฮีวโปเรเตอร์ | 135.55 | 133.97 | 1.17 | °C |
| อุณหภูมิแหล่งความร้อนออก | 135.55 | 133.97 | 0.39 | °C |
| อุณหภูมิน้ำหล่อเย็นทางออก | 75.20 | 75.88 | 0.05 | °C |
| ประสิทธิภาพเชิงความร้อน | 17.27 | 17.06 | 1.22 | °C |

ดังผลที่แสดงในตารางที่ 3.1 พบว่า ความผิดพลาดในการคำนวณระหว่างแบบจำลองของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้และการศึกษาของ Fischer (2011) มีค่าสูงที่สุดเท่ากับ 1.22% แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองที่ใช้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความถูกต้องและแม่นยำ ดังนั้นแบบจำลองของโรงไฟฟ้าวัฏจักรโออาร์ซินีได้ถูกใช้สำหรับการจำลองในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

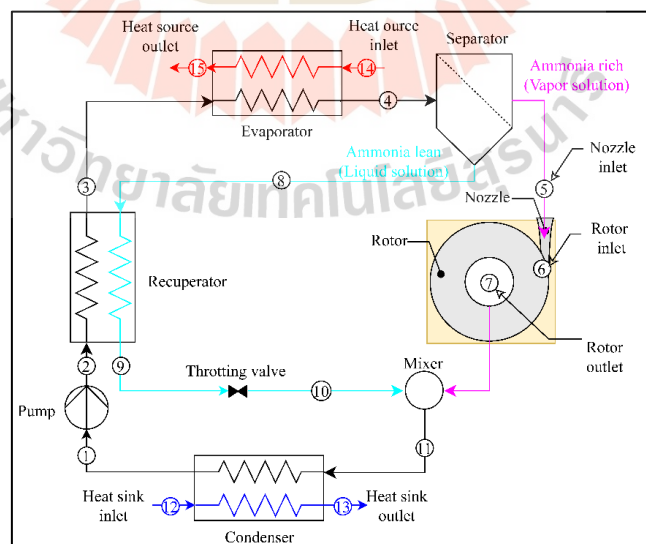
หลังจากที่ได้ทำการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองของโรงไฟฟ้าวัฏจักรโออาร์ซีแล้ว และเมื่อจำลองจนได้เงื่อนไขที่เหมาะสมเพื่อให้ได้กำลังสุทธิสูงสุด คือ ความดันที่คอนเดนเซอร์ ความดันที่อีวาโปเรเตอร์ และอัตราการไหลของสารทำงาน ซึ่งจะนำไปใช้ในการออกแบบสำหรับการจำลองเตสลาเทอร์ไบน์โดยมีรายละเอียดตามหัวข้อ 3.3

3.2 การจำลองโรงไฟฟ้าวัฏจักรคาลินาแบบ KCS-11

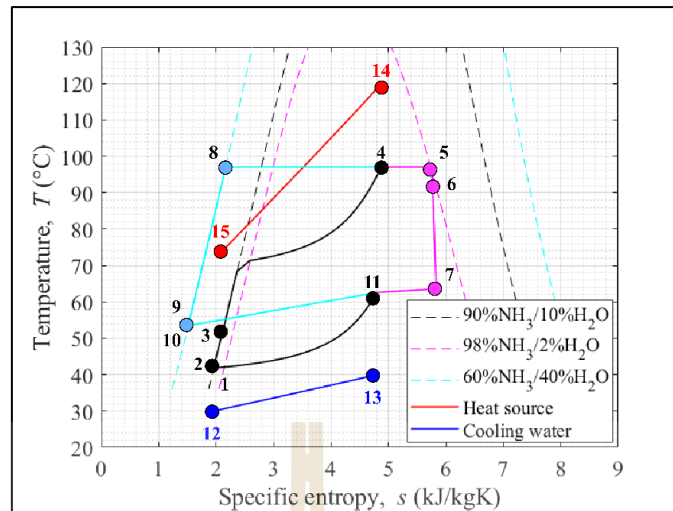
อีกหนึ่งโรงไฟฟ้าที่เป็นที่นิยมใช้กับแหล่งความร้อนอุณหภูมิต่ำ คือโรงไฟฟ้าวัฏจักรคาลินา ซึ่งคิดค้นโดย Kalina (1984) อย่างไรก็ตามวัฏจักรคาลินามีการจัดเรียงหลายรูปแบบ โดยชนิดการจัดเรียงที่สนใจศึกษาในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้คือแบบ KCS-11 เนื่องจาก มีความซับซ้อนน้อยกว่าแบบการจัดเรียงแบบอื่นและขนาดของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนน้อยกว่า KCS-34 และยังคงมีการนำความร้อนไปใช้ซ้ำในวัฏจักรซึ่งแตกต่างกับ KCS-1 (ธงชัย เทียมทัต และ อาทิตย์ คุณศรีสุข, 2565) โดยรายละเอียดของอุปกรณ์ การจำลอง และการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองเช่นเดียวกับโรงไฟฟ้าวัฏจักรโออาร์ซีโดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.2.1 โรงไฟฟ้าวัฏจักรคาลินาชนิด KCS-11 ที่ใช้เตสลาเทอร์ไบน์และแบบจำลองของโรงไฟฟ้าวัฏจักรคาลินาชนิด KCS-11

รายละเอียดของอุปกรณ์ภายในโรงไฟฟ้าวัฏจักรคาลินาแบบ KCS-11 แสดงดังรูปที่ 3.5 และ ผังอุณหภูมิและเอนโทรปีจำเพาะแสดงดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.5 รายละเอียดอุปกรณ์ภายในโรงไฟฟ้าวัฏจักรคาลินาแบบ KCS-11



รูปที่ 3.6 ผังอุณหภูมิและเอนโทรปีจำเพาะของโรงไฟฟ้าวัฏจักรคาลินาแบบ KCS-11

จากรูปที่ 3.5 และ 3.6 เมื่อเปรียบเทียบกับโรงไฟฟ้าวัฏจักรโออาร์ซีในหัวข้อ 3.1 รูปที่ 3.2 โดยแตกต่างกันที่โรงไฟฟ้าวัฏจักรคาลินาแบบ KCS-11 นั้นมีการเพิ่มเซพาราเตอร์ (separator) ที่ใช้แยกสารทำงานที่เป็นของเหลวและสารทำงานที่เป็นไอออกจากกันหลังจากออกจากอีวาโปเรเตอร์ (จุดที่ 4) เพื่อให้สารทำงานที่เป็นไอเข้าเทอร์ไบน์ และมีการเพิ่มรีคูเปอเรเตอร์ (recuperator) เพื่อใช้สำหรับนำพลังงานความร้อนจากสารที่เป็นของเหลว (จุดที่ 8) ที่ยังมีอุณหภูมิสูงอยู่มาอุ่นสารทำงานก่อนเข้าอีวาโปเรเตอร์ (จุดที่ 2) ทั้งนี้แบบจำลองที่ใช้สำหรับโรงไฟฟ้าวัฏจักรคาลินาแบบ KCS-11 เป็นแบบจำลองทางเทอร์โมไดนามิกส์ โดยรายละเอียดของแต่ละกระบวนการและแบบจำลองมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

- 1) กระบวนการ 1-2: สารทำงานถูกอัดโดยปั๊ม

ในกระบวนการนี้ สารทำงานถูกเพิ่มแรงดันโดยใช้ปั๊มจากทางออกของคอนเดนเซอร์ไปยังทางเข้ารีคูเปอเรเตอร์โดยกำลังที่ปั๊มใช้สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\dot{W}_{pump} = \dot{m}_{wf} (h_{02,isen} - h_{01}) / \eta_{pump} \quad (3.8)$$

โดยกำหนดประสิทธิภาพไอเซนโทรปิกของปั๊ม (η_{pump}) เท่ากับ 80%

- 2) กระบวนการ 2-3 และ 8-9: สารทำงานแลกเปลี่ยนความร้อนภายในวัฏจักร

ในกระบวนการนี้ สารทำงานได้แลกเปลี่ยนความร้อนภายในวัฏจักร โดยการแลกเปลี่ยนความร้อนภายในรีคูเปอเรเตอร์โดยความร้อนที่แลกเปลี่ยนภายในรีคูเปอเรเตอร์สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\varepsilon_{rec} = \frac{\dot{Q}_{actual}}{\dot{Q}_{max}} = \frac{\dot{m}_{wf,7} c_{p,ref,7} (T_8 - T_9)}{C_{min} (T_8 - T_2)} \quad (3.9)$$

โดยกำหนดให้ Effectiveness ของรีคูเปอเรเตอร์ (ε_{rec}) มีค่าเท่ากับ 80 % จากนั้นสามารถคำนวณอุณหภูมิของสารทำงานที่ออกจากรีคูเปอเรเตอร์ (จุดที่ 9 และ จุดที่ 3) ได้ดังนี้

$$T_9 = T_8 - \varepsilon_{rec} C_{min} (T_8 - T_2) / \dot{m}_{wf,8} c_{p,wf,8} \quad (3.10)$$

$$T_3 = T_2 + \varepsilon_{rec} C_{min} (T_8 - T_2) / \dot{m}_{wf} c_{p,wf,2} \quad (3.11)$$

โดยที่เอนทาลปีของจุดที่ 9 และ 3 สามารถหาได้จากการทำสมดุลพลังงานความร้อนดังนี้

$$h_{09} = h_{08} - \varepsilon_{rec} \dot{Q}_{max} / \dot{m}_{wf,8} \quad (3.12)$$

$$h_{03} = h_{02} + \varepsilon_{rec} \dot{Q}_{max} / \dot{m}_{wf,2} \quad (3.13)$$

3) กระบวนการ 3-4: สารทำงานรับพลังงานความร้อนที่ฮีวโปรเตอร์

ในกระบวนการนี้สารทำงานได้รับพลังงานจากแหล่งความร้อนโดยสามารถคำนวณพลังงานความร้อนที่สารทำงานได้รับได้ดังนี้

$$\dot{Q}_{in} = \dot{m}_{wf,4} (h_{04} - h_{03}) = \dot{m}_{hs} c_{p,hs} (T_{hs,in} - T_{hs,out}) \quad (3.14)$$

4) กระบวนการ 4-5 และ 8: สารทำงานถูกแยกตามสถานะของสารทำงานในเซพาราเรเตอร์

ในกระบวนการนี้สารทำงานถูกแยกสถานะที่เซพาราเรเตอร์โดยในการแยกสถานะของสารทำงานใช้ฟังก์ชันของโปรแกรม REFPROP คือ xmassvap เพื่อหาสัดส่วนของมวลของแอมโมเนียในส่วนที่เป็นไอ ($mf_{NH_3,5}$) และ xmassliq หาสัดส่วนของมวลแอมโมเนียในส่วนที่เป็นของเหลว ($mf_{NH_3,8}$) หลังจากนั้นสามารถคำนวณอัตราการไหลของสารทำงานที่ถูกแบ่งที่เซพาราเรเตอร์ได้ดังนี้

$$\dot{m}_{wf,5} = \dot{m}_{wf,4} \frac{mf_{NH_3,4} - mf_{NH_3,8}}{mf_{NH_3,5} - mf_{NH_3,8}} \quad (3.15)$$

$$\dot{m}_{wf,8} = \dot{m}_{wf,4} - \dot{m}_{wf,5} \quad (3.16)$$

5) กระบวนการ 5-7: สารทำงานขยายตัวในเทอร์โบ

ในกระบวนการนี้ สารทำงานขยายตัวภายในเทอร์โบและเปลี่ยนกำลังเป็นกำลังกล ในการจำลอง เบื้องต้นได้กำหนดประสิทธิภาพไอเซนโทรปิกของเทอร์โบ เพื่อหาเงื่อนไข

การทำงานที่ให้กำลังสุทธิสูงก่อนจำลองเตาเทอร์ไบน์ โดยกำลังที่เทอร์ไบน์สามารถผลิตได้แสดงดังต่อไปนี้

$$\dot{W}_{turbine} = \eta_{isen} \dot{m}_{wf,5} (h_{05} - h_{07,isen}) \quad (3.17)$$

6) กระบวนการ 9-10: สารทำงานลดความดัน

สารทำงานจุดที่ 9 ยังคงมีความดันสูง ดังนั้นในกระบวนการนี้ลดความดันสารทำงานด้วย expansion valve ก่อนนำไปผสมกับสารทำงานจุดที่ 7 โดยกำหนดให้เอนทาลปี (Enthalpy) ไม่เปลี่ยนแปลงตลอดกระบวนการดังนี้

$$h_{010} = h_{09} \quad (3.18)$$

7) กระบวนการที่ 7 และ 9 -11: ผสมสารทำงานความเข้มข้นของแอมโมเนียต่ำและสูง

ในกระบวนการนี้สารทำงานที่มีความเข้มข้นของแอมโมเนียความเข้มข้นสูงที่ออกจากเทอร์ไบน์ (จุดที่ 7) และสารที่มีความเข้มข้นของแอมโมเนียต่ำที่ออกจากรีคูเปอร์เรเตอร์ (จุดที่ 9) ผสมกันสามารถหาเอนทาลปีจากสมการดังต่อไปนี้

$$h_{011} = (h_{010} \dot{m}_{wf,8} + h_{07} \dot{m}_{wf,5}) / \dot{m}_{wf,2} \quad (3.19)$$

8) สารทำงานกลั่นตัวในคอนเดนเซอร์

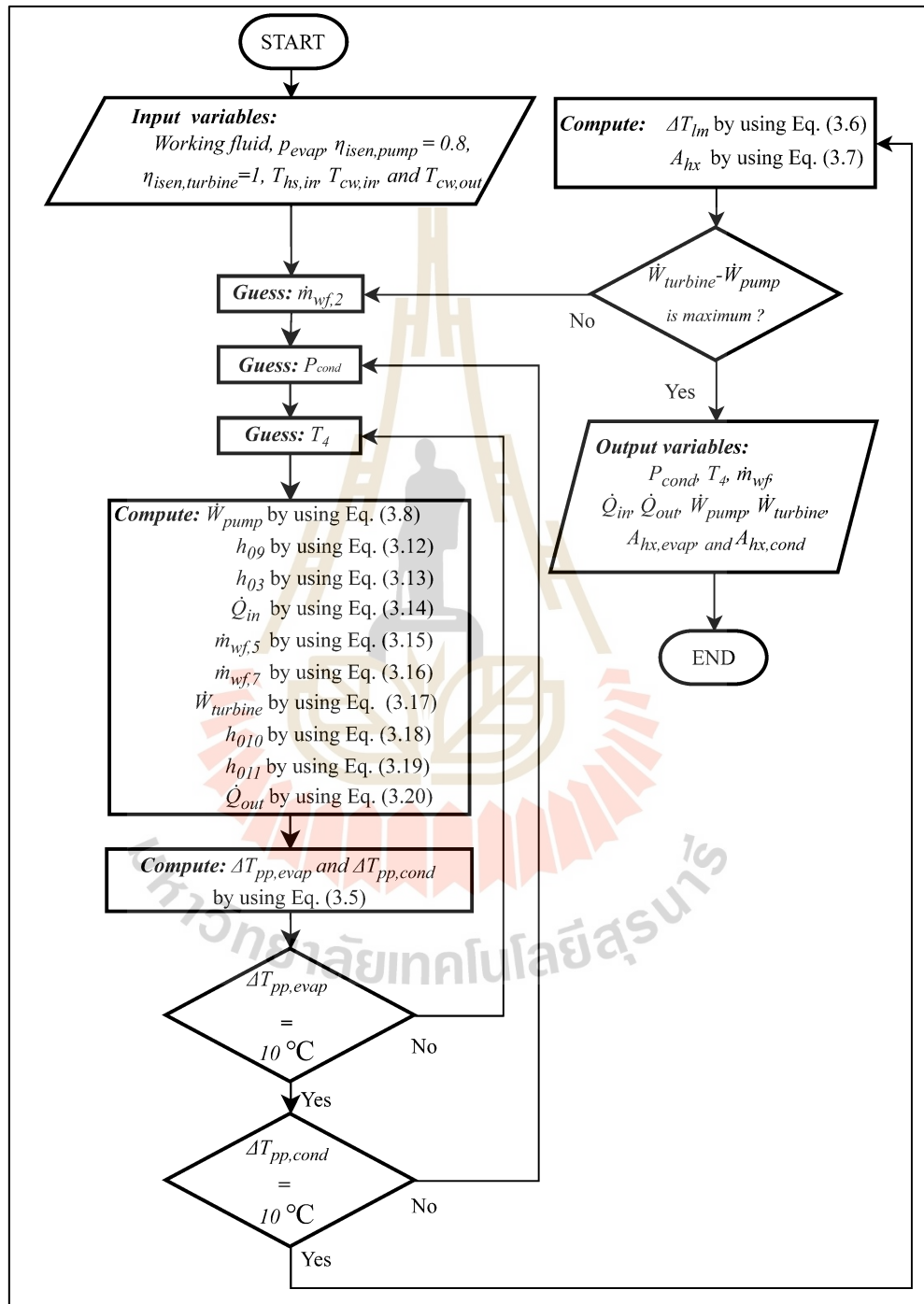
ในกระบวนการนี้ สารทำงานได้ถ่ายเทความร้อนออกไปที่น้ำหล่อเย็นและสารกลั่นตัวที่กลั่นตัวในคอนเดนเซอร์และกลับเข้าปั๊ม โดยอัตราการถ่ายเทความร้อนสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\dot{Q}_{out} = \dot{m}_{wf,2} (h_{010} - h_{01}) = \dot{m}_{cw} c_{p,cw} (T_{cw,in} - T_{cw,out}) \quad (3.20)$$

นอกจากนี้ในการจำลองได้กำหนด Pinch point temperature difference, (ΔT_{pp}) ทั้งใน คอนเดนเซอร์และอีวาโปเรเตอร์ เท่ากับ 10 °C เช่นเดียวกับการจำลองโรงไฟฟ้าวัฏจักรโออาร์ซี รวมถึงการหาขนาดของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน สามารถดูในรายละเอียดในหัวข้อที่ 3.1.1 โดยในหัวข้อถัดไป 3.2.2 เป็นการนำเสนอการจำลองและผังการจำลองของโรงไฟฟ้าวัฏจักรคาลินาแบบ KCS-11 โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.2.2 การจำลองโรงไฟฟ้าวัฏจักรคาลินาแบบ KCS-11

ในการจำลองโรงไฟฟ้าวัฏจักรคาลินาแบบ KCS-11 ได้ใช้แบบจำลองทางเทอร์โมไดนามิกส์ดังแสดงรายละเอียดในหัวข้อ 3.1.2 โดยผังการจำลองแสดงดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 ผังการจำลองของโรงไฟฟ้าวัฏจักรคาลินาแบบ KCS-11

การจำลองโรงไฟฟ้าวัฏจักรโออาร์ซีดังรูปที่ 3.7 มีลำดับการจำลองดังต่อไปนี้

กระบวนการที่ 1: กำหนดตัวแปรเริ่มต้น โดยกระบวนการนี้ได้ทำการกำหนดสารทำงาน และสัดส่วนมวลของของสารทำงาน ประสิทธิภาพไอเซนโทรปิกของปั๊ม อุณหภูมิของแหล่งความร้อน ความดันของสารทำงาน อัตราการไหลเชิงมวลของแหล่งความร้อน และกำหนดอุณหภูมิน้ำหล่อเย็นทางเข้าและทางออก

กระบวนการที่ 2: กำหนดอัตราการไหลของสารทำงาน โดยกระบวนการนี้เป็นการกำหนดอัตราการไหลเชิงมวลของสารทำงานภายในโรงไฟฟ้าวัฏจักรโออาร์ซีเพื่อให้ได้กำลังสุทธิของโรงไฟฟ้าสูงสุด

กระบวนการที่ 3: หาค่าความดันที่คอนเดนเซอร์และอุณหภูมิทางออกของอีวาโปเรเตอร์ ที่ทำให้ $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ โดยในกระบวนการนี้ใช้ Golden-section search method เพื่อหาค่า ΔT_{pp} ทั้งคอนเดนเซอร์และอีวาโปเรเตอร์ เท่ากับ $10\text{ }^{\circ}\text{C}$

กระบวนการที่ 4: คำนวณค่าการถ่ายเทความร้อน กำลังงานสุทธิ และ ΔT_{pp} ทั้งคอนเดนเซอร์ อีวาโปเรเตอร์ และรีคูเปอร์เรเตอร์ โดยใช้สมการที่ 3.8 ถึง 3.20

กระบวนการที่ 5: ตรวจสอบว่า ΔT_{pp} ทั้งคอนเดนเซอร์และอีวาโปเรเตอร์เท่ากับ $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ หรือไม่ ถ้าไม่ให้กลับไปทำเริ่มวนซ้ำกระบวนการที่ 3 จนกระทั่ง ΔT_{pp} ทั้งคอนเดนเซอร์และอีวาโปเรเตอร์ เท่ากับ $10\text{ }^{\circ}\text{C}$

กระบวนการที่ 6: หาขนาดของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนในโรงไฟฟ้าโดยใช้สมการที่ 3.6 และ 3.7

กระบวนการที่ 7: ตรวจสอบว่ากำลังสุทธิของโรงไฟฟ้าสูงสุดหรือไม่ถ้ายังให้วนซ้ำที่กระบวนการที่ 2 จนกว่าจะได้กำลังสุทธิสูงสุด

กระบวนการที่ 8: แสดงผลลัพธ์ของการจำลองโรงไฟฟ้า

กระบวนการที่ 9: ทำการเปลี่ยนความดันที่อีวาโปเรเตอร์ จนกว่าจะได้ค่าสูงสุดโดยวนซ้ำกระบวนการที่ 1

โดยรายละเอียดของโปรแกรมที่ใช้ MATLAB ร่วมกับ REFPROP ในการจำลองแสดงรายละเอียดในภาคผนวก ข.

3.2.3 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองโรงไฟฟ้าวัฏจักรคาลินาแบบ KCS-11

เพื่อแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองของโรงไฟฟ้าวัฏจักรคาลินาที่ใช้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความถูกต้อง ดังนั้นจึงได้ตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองโดยเปรียบเทียบกับงานวิจัยของ Hærvig et al. (2016) โดยผลการเปรียบเทียบแสดงดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 ผลการตรวจสอบความถูกต้องของการจำลองของแบบจำลองโรงไฟฟ้าวัฏจักรคาลินากับงานวิจัยของ Hærvig et al (2016)

| ตัวแปร | Hærvig et al. (2016) | วิทยานิพนธ์ ฉบับนี้ | ความผิดพลาด (%) | หน่วย |
|---|-------------------------|------------------------|--------------------|-------|
| ป้อนเข้า | | | | |
| อัตราส่วนมวลของแอมโมเนียต่อน้ำ | 0.82/0.18 | | | - |
| ประสิทธิภาพไอเซนโทรปิกของปั๊ม | 75 | | | % |
| ประสิทธิภาพไอเซนโทรปิกของเทอร์ไบน์ | 80 | | | % |
| อัตราการไหลของสารทำงาน | 13.7 | | | kg/s |
| อัตราการไหลของน้ำหล่อเย็น | 170.8 | | | kg/s |
| อัตราการไหลของน้ำร้อน | 86.4 | | | kg/s |
| ความดันที่อีวาโปเรเตอร์ | 3.23 | | | MPa |
| ความดันที่คอนเดนเซอร์ | 0.631 | | | MPa |
| อุณหภูมิแหล่งความร้อนเข้า | 122 | | | °C |
| อุณหภูมิน้ำหล่อเย็นทางเข้า | 5 | | | °C |
| อุณหภูมิสารทำงานที่ออกจากที่อีวาโปเรเตอร์ | 116.7 | | | °C |
| ผลลัพธ์ | | | | |
| กำลังจากเทอร์ไบน์ | 1.82 | 1.56 | 14.29 | MW |
| อุณหภูมิแหล่งความร้อนออก | 80 | 84.65 | 5.81 | °C |
| อุณหภูมิน้ำหล่อเย็นทางออก | 24 | 20.3 | 15.42 | °C |
| ประสิทธิภาพเชิงความร้อน | 11 | 10.5 | 4.55 | % |

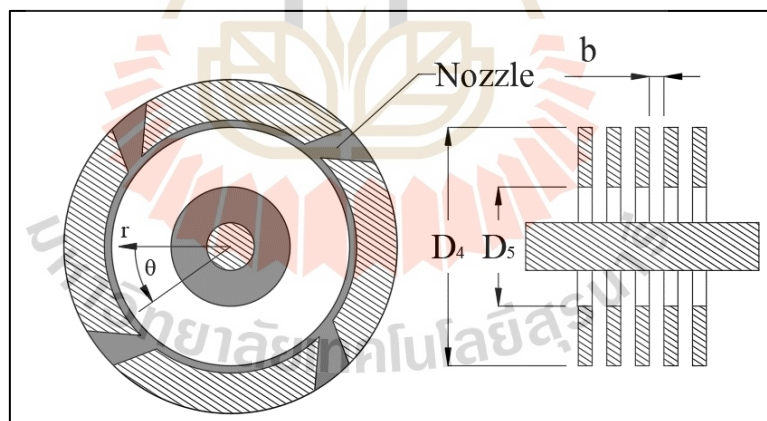
จากผลดังตารางที่ 3.2 พบว่าเมื่อตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองโรงไฟฟ้าวัฏจักรคาลินา (KCS-11) โดยนำไปเปรียบเทียบกับผลการวิจัยของ Hærvig et al. (2016) ค่าผิดพลาดสูงสุดอยู่ที่ 15.42% ซึ่งค่อนข้างสูงกว่าแบบจำลองโรงไฟฟ้าวัฏจักรโออาร์ซี ทั้งนี้อาจเป็นผลมาจากความซับซ้อนที่เพิ่มขึ้นของระบบ ทำให้ผลการจำลองมีความคลาดเคลื่อน อย่างไรก็ตาม ในการศึกษาครั้งนี้เป็นการออกแบบและวิเคราะห์เบื้องต้น เพื่อใช้ในการหาค่าแรงดันและอัตราการไหลที่จะนำไปใช้ในการจำลองเตสลาเทอร์ไบน์ในหัวข้อ 3.3 เพื่อศึกษาพฤติกรรมของเตสลาเทอร์ไบน์และโรงไฟฟ้าที่ใช้วัฏจักรคาลินา โดยข้อผิดพลาดดังกล่าวยังอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้สำหรับการออกแบบเบื้องต้น

3.3 การจำลองเทสลาเทอร์ไบน์

ในหัวข้อนี้เป็นการจำลองเทสลาเทอร์ไบน์ หลังจากได้เงื่อนไขการทำงานของโรงไฟฟ้าวัฏจักรโออาร์ซีและคาถินาที่ได้กำลังสุทธิสูงที่สุดจากหัวข้อที่ 3.1 และ 3.2 ซึ่งประกอบไปด้วย ความดันที่คอนเดนเซอร์ ความดันที่อีวาโปเรเตอร์ อัตราการไหลเชิงมวลของสารทำงานที่ผ่านเทอร์ไบน์ และความเป็นไอของสารทำงาน เพื่อนำมาใช้ในการออกแบบเทสลาเทอร์ไบน์ โดยในหัวข้อนี้ประกอบไปด้วยรายละเอียดของแบบจำลอง แนวทางการจำลอง และการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง โดยมีรายละเอียดดังนี้

3.3.1 คำอธิบายและหลักการทำงานของเทสลาเทอร์ไบน์

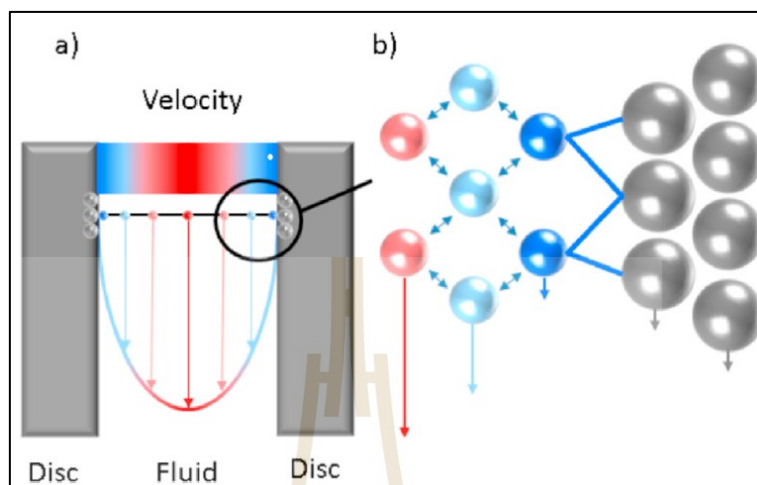
รายละเอียดขององค์ประกอบของเทสลาเทอร์ไบน์แสดงดังรูปที่ 3.8 องค์ประกอบหลักของ เทสลาเทอร์ไบน์แบ่งออกเป็นสองส่วนด้วยกัน ได้แก่ นอซเซิลและโรเตอร์ของเทสลาเทอร์ไบน์ โดยที่นอซเซิลมีหน้าที่ลดความดันและเพิ่มความเร็วของสารทำงานก่อนเข้าโรเตอร์ของเทสลาเทอร์ไบน์ ส่วนโรเตอร์ของเทสลาเทอร์ไบน์มีลักษณะเป็นแผ่นดิสก์ในโรเตอร์เรียงซ้อนกันโดยมีช่องระยะห่างระหว่างแผ่น (b) เพื่อให้สารทำงานวิ่งเข้าเพื่อถ่ายเทโมเมนตัมและลดความดันลง โดยขนาดที่สำคัญของโรเตอร์ของเทสลาเทอร์ไบน์คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก (D_4) และ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน (D_5)



รูปที่ 3.8 ลักษณะและองค์ประกอบของเทสลาเทอร์ไบน์

ทั้งนี้ หลักการทำงานของเทสลาเทอร์ไบน์จะใช้หลักการไหลแบบหนืด (Viscous flow) ของสารทำงาน โดยสารทำงานที่ไหลเข้าพื้นที่ว่างระหว่างโรเตอร์ของเทสลาเทอร์ไบน์เพื่อถ่ายเทโมเมนตัมให้กับโรเตอร์ของเทสลาเทอร์ไบน์ ทั้งนี้ แรงที่กระทำที่ส่งผลให้โรเตอร์ของเทสลาเทอร์ไบน์หมุนจะเป็นแรงยึดเกาะระหว่างสารทำงานและแผ่นดิสก์ (Adhesion force) ซึ่งเกิดจากโมเลกุลของสารทำงานกับโรเตอร์ของเทสลาเทอร์ไบน์เหนียวแน่นกัน ดังรูปที่ 3.9 ซึ่งส่งผลทำให้โรเตอร์

ของเทสลาเทอร์ไบน์ หมุนตามทิศทางการไหลของสารทำงาน โดยแบบจำลองของเทสลาเทอร์ไบน์ แสดงในหัวข้อที่ 3.2.2



รูปที่ 3.9 การถ่ายเท Momentum ผ่าน Shear force ที่กระทำกันระหว่างผนังในเทสลาเทอร์ไบน์:

(a) Velocity profile; (b) Adhesion และ Momentum transfer

ที่มา: (Rusin et al., 2021)

3.3.2 แบบจำลองของเทสลาเทอร์ไบน์

ในหัวข้อนี้ได้เสนอการพัฒนาแบบจำลองของเทสลาเทอร์ไบน์ โดยแบบจำลองนี้ มุ่งเน้นการกำหนดขนาดที่เหมาะสมที่สุดของเทสลาเทอร์ไบน์ เพื่อให้ได้กำลังสูงสุดจากเทอร์ไบน์ นอกจากนี้ แบบจำลองดังกล่าวยังคำนึงถึงการเปลี่ยนแปลงของประสิทธิภาพเทอร์ไบน์ภายใต้เงื่อนไขการทำงานของโรงไฟฟ้า ซึ่งแตกต่างจากการศึกษาทั่วไปที่มักกำหนดให้มีประสิทธิภาพคงที่

นอกจากนี้ แบบจำลองของเทสลาเทอร์ไบน์ที่นำเสนอในงานวิจัยนี้ได้รวมพฤติกรรมการทำงานจริงของเทอร์ไบน์ เช่น การถ่ายเทโมเมนตัมผ่านแรงหนืด (Viscous force) และพฤติกรรมของการไหลของสารทำงานในช่องว่างระหว่างแผ่นดิสก์ในโรเตอร์ ดังแสดงในรูปที่ 3.9 เทสลาเทอร์ไบน์ ประกอบด้วยส่วนสำคัญสองส่วน ได้แก่ นอชเชิลและโรเตอร์ของเทสลาเทอร์ไบน์ โดยมีรายละเอียดของการจำลองนำเสนอในหัวข้อ 3.3.2.1 และ 3.3.2.2 ตามลำดับ

ตำแหน่งสำคัญของสารทำงานที่ใช้ในการจำลองในหัวข้อนี้มีทั้งหมด 3 ตำแหน่ง ได้แก่ ตำแหน่งก่อนเข้าเทสลาเทอร์ไบน์ (จุดที่ 3), ตำแหน่งก่อนเข้าโรเตอร์ของเทสลาเทอร์ไบน์ (จุดที่ 4) และตำแหน่งหลังออกจากโรเตอร์ (จุดที่ 5) ซึ่งอ้างอิงจากแผนผังอุปกรณ์ของโรงไฟฟ้าวัฏจักรโออาร์ซี ดังแสดงในรูปที่ 3.1 เป็นหลัก อย่างไรก็ตาม สำหรับโรงไฟฟ้าวัฏจักรคาลินา (รูปที่ 3.5)

ตำแหน่งที่สอดคล้องกันคือจุดที่ 5, 6 และ 7 ตามลำดับ ทั้งนี้ เพื่อหลีกเลี่ยงความสับสนในการคำนวณ จึงยังคงใช้หมายเลขจุดที่ 3, 4 และ 5 ในหัวข้อนี้เป็นหลักในการอ้างอิง

3.3.2.1 การจำลองในส่วนของนอชเชิล

ในส่วนของการจำลองนอชเชิลวิทยานิพนธ์ฉบับนี้กำหนดให้อัตราส่วนความดัน (PR) คำนวณดังสมการที่ 3.21

$$PR = \frac{P_3 - P_4}{P_3 - P_5} \quad (3.21)$$

โดย PR เป็นตัวแปรที่แสดงถึงความดันที่ลดลงในนอชเชิลต่อความดันที่ลดลงได้ทั้งหมดในเทอร์ไบน์ โดยเราทราบความดันที่อิวาโปรเตอร์ (P_3) ความดันที่คอนเดนเซอร์ (P_5) จากการจำลองโรงไฟฟ้าวัฏจักรโออาร์ซีเพื่อให้ได้กำลังสุทธิสูงสุดดังแสดงในหัวข้อที่ 3.1 และ 3.2 ซึ่งในการจำลองได้กำหนดค่า PR ทำให้ได้ค่าความดันที่สามารถลดลงได้ในนอชเชิลได้ โดยเลขาบอกสถานะของสารทำงานจะอ้างอิงตามของโรงไฟฟ้าวัฏจักรโออาร์ซีดังรูปที่ 3.1 โดยสำหรับโรงไฟฟ้าวัฏจักรคาลินาแบบ KCS-11 สามารถเทียบเคียงตำแหน่งโดยพิจารณาตามตำแหน่งของการจัดวางอุปกรณ์ หลังจากนั้นสามารถคำนวณความเร็วของสารทำงานที่ออกจากรนอชเชิลได้ดังสมการที่ 3.22

$$v_4 = K \sqrt{2(h_{03} - h_{4,isen})} \quad (3.22)$$

ทั้งนี้ค่า K คือค่า สัมประสิทธิ์ความเร็ว (Velocity coefficient) ซึ่งกำหนดให้มีค่าเท่ากับ 0.9 โดยการจำลองนี้กำหนดให้นอชเชิลเป็นชนิด Laval nozzle ตามการศึกษาของ Song et al. (2017) ดังนั้น Static enthalpy ของสารทำงานก่อนเข้าเทอร์ไบน์สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 3.23

$$h_4 = h_{03} - 0.5v_4^2 \quad (3.23)$$

หลังจากได้ภาวะของสารทำงานก่อนเข้าโรเตอร์ของเตสลาเทอร์ไบน์แล้ว ซึ่งได้แก่ ความดันและความเร็วของสารทำงานรวมไปถึง Static enthalpy ของสารทำงานลำดับถัดไปเป็นการจำลองโรเตอร์ของเตสลาเทอร์ไบน์ โดยรายละเอียดแสดงดังหัวข้อที่ 3.3.2.2

3.3.2.2 การจำลองในส่วนของโรเตอร์ของเตสลาเทอร์ไบน์

แบบจำลองส่วนโรเตอร์ของเตสลาเทอร์ไบน์ของเตสลาเทอร์ไบน์ในงานวิจัยนี้อ้างอิงจากแบบจำลองของ Rice (1965), Carey (2010) และ Manfrida et al. (2019) อย่างไรก็ตาม แบบจำลองดังกล่าวจำลองการขยายตัวของสารทำงานในรูปแบบสถานะเดียว (Single-phase expansion) ขณะที่ในการทำงานจริงของเตสลาเทอร์ไบน์ สารทำงานเกิดการขยายตัวในรูปแบบสอง

เฟส (Two-phase expansion) ดังนั้น ในแบบจำลองนี้จึงได้พิจารณาอิทธิพลของการไหลแบบของผสมโดยใช้แนวทางของแบบจำลอง Two-phase homogeneous (Talluri et al., 2021) ทั้งนี้แบบจำลองที่ใช้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ตั้งอยู่บนสมมติฐานดังต่อไปนี้

- 1) การไหลเป็นแบบสภาวะคงตัว
- 2) แรงหนืดของสารทำงานทำหน้าที่เป็นแรงกระทำต่อมวลที่ตำแหน่งต่าง ๆ ($r - \theta$)
- 3) การไหลเป็นแบบสองมิติ โดยพิจารณาเฉพาะทิศทางแนวรัศมี (r) และทิศทางสัมผัส (θ)
- 4) สารทำงานไหลอย่างสม่ำเสมอในทุกตำแหน่งเชิงมุมในทิศทางแนวรัศมี
- 5) ไม่มีการเปลี่ยนแปลงของความดันในทิศทางสัมผัสที่รัศมีเดียวกัน
- 6) ความเร็วสัมผัสของเฟสของเหลวและไอถูกกำหนดให้เท่ากันตามแบบจำลองการไหลสองเฟสแบบสมมูล

จากสมมติฐานที่กำหนดในสมการพื้นฐานของ Navier-Stokes ในพิกัดทรงกระบอกสามารถทำให้เรียงง่ายขึ้นเป็นดังนี้

Continuity equations

$$\frac{1}{r} \frac{\partial(r\rho_{TP}v_r)}{\partial r} = 0 \quad \text{เมื่อ } r\rho_{TP}v_r = \text{constant} \quad (3.24)$$

Momentum, r - direction

$$v_r \frac{\partial v_r}{\partial r} - \frac{v_\theta^2}{r} = \frac{1}{\rho_{TP}} \left(\frac{\partial P}{\partial r} \right)_{TP} + \Phi_{r,TP} \quad (3.25)$$

Momentum, θ - direction

$$v_r \left(\frac{\partial v_\theta}{\partial r} \right)_{TP} + \frac{v_\theta v_r}{r} = -\Phi_{\theta,TP} \quad (3.26)$$

Momentum, z - direction

$$-\frac{1}{\rho_{TP}} \left(\frac{\partial P}{\partial z} \right)_{TP} = 0 \quad (3.27)$$

โดยความเร็วของสารทำงานที่ไหลในทิศ r ภายในช่องว่างระหว่างช่องที่ตำแหน่ง r ต่าง ๆ สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 3.28

$$v_r = -\frac{\dot{m}}{2\pi r b \rho_{TP}} \quad (3.28)$$

เมื่อพิจารณาตามปริมาณควบคุมคือ Q_e ของสารทำงานระหว่างแผ่นดิสก์สองแผ่น กำหนดให้พื้นที่ผิวฐานของปริมาณควบคุมคือ A_e และกำหนดให้ระยะแผ่นดิสก์ในโรเตอร์คือ b โดยกำหนดให้ พื้นที่ผิวเปียกคือ A_w ดังนั้น $A_w = 2A_e$ และ เส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิกมีค่าเท่ากับ $D_h = 2b$ เพื่อเป็นขนาดที่บ่งบอกถึงลักษณะการไหลของสารทำงาน ดังนั้นค่าของ A_c และ A_w สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 3.29 และ 3.30 ตามลำดับ

$$A_e = \frac{Q_e}{b} = \frac{2Q_e}{D_h} \quad (3.29)$$

$$A_w = 2A_e = \frac{4Q_e}{D_h} \quad (3.30)$$

สำหรับการคำนวณการไหลแบบสองเฟสแบบเนื้อเดียวกัน (Two-phase homogeneous flow model) ค่า Viscous shear stress สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 3.31

$$\tau_w = \frac{f_{TP} \rho_{TP}}{2} W^2 = \frac{f_{TP} \rho_{TP}}{2} \left((v_\theta - \omega r)^2 + v_r^2 \right) \quad (3.31)$$

เมื่อ ρ_{TP} คือความหนาแน่นของสารทำงานที่สามารถคำนวณได้จาก NIST REFPROP สัมประสิทธิ์ความเสียดทานคำนวณโดยใช้ Churchill correlation (Talluri, 2021) ดังสมการที่ 3.32

$$f_{TP} = 2 \left[\left(\frac{8}{Re_{TP}} \right)^{12} + \left(\frac{1}{(A+B)^{3/2}} \right) \right]^{1/12} \quad (3.32)$$

เมื่อ A B และ Re_{TP} คำนวณดังสมการที่ 3.33 ถึง 3.35

$$A = \left[2.457 \ln \left(\frac{1}{\left(7 / Re_{TP} \right)^{0.9} + \left(0.27 \epsilon / D_h \right)} \right) \right]^{16} \quad (3.33)$$

$$B = \left(37,530 / Re_{TP} \right)^{16} \quad (3.34)$$

$$Re_{TP} = \frac{\rho_{TP} w \cdot 2b}{\mu_{TP}} \quad (3.35)$$

เมื่อ ϵ คือ ความหยาบของผิว (Surface roughness) โดยกำหนดให้มีค่าเท่ากับ 0.05 mm เป็นของ Stainless steel และ μ_{TP} คือ ความหนืดพลวัต (Dynamic viscosity) ของสารทำงานรูปแบบสองเฟส อย่างไรก็ตาม ค่าความหนืดพลวัตของสารทำงานสองเฟสไม่สามารถคำนวณได้โดยตรงจาก NIST REFPROP ดังนั้นค่าความหนืดพลวัตของสารทำงานสองเฟสได้ใช้ความสัมพันธ์ของ Cicchitti [(Wong and Ooi., 1995) และ (Yufeng et al., 2005)] ในการคำนวณ ดังสมการที่ 3.36

$$\mu_{TP} = x\mu_g + (1-x)\mu_l \quad (3.36)$$

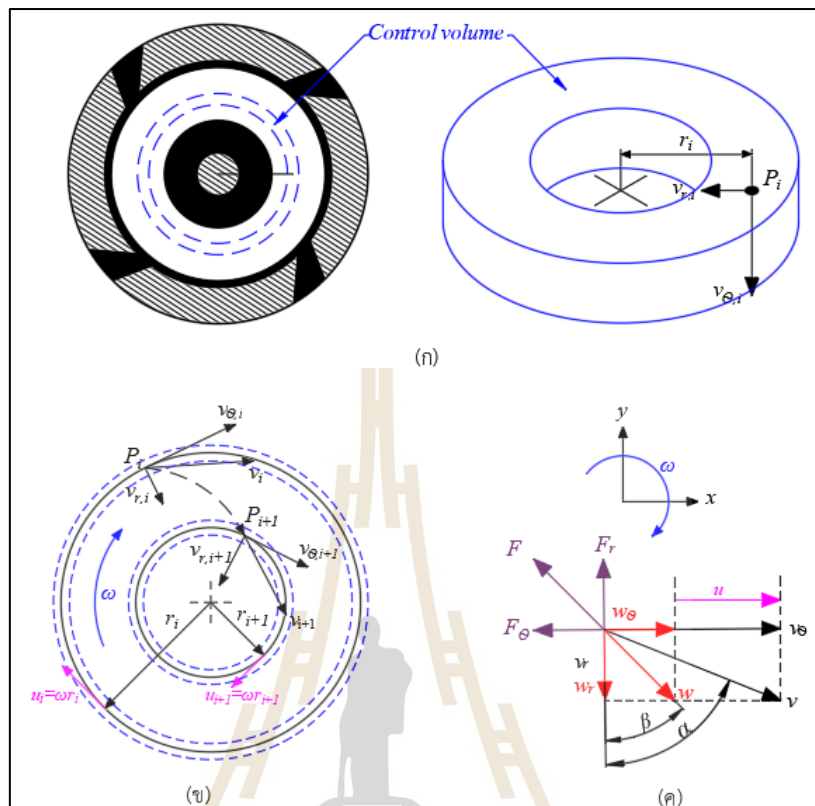
เมื่อ x คือความเป็นไอของสารทำงานของสารสองเฟส โดย μ_g และ μ_l เป็นค่าความหนืดพลวัต (Dynamic viscosity) ของสารทำงานที่มีสถานะเป็นไออิ่มตัวและของเหลวอิ่มตัวตามลำดับ

ดังนั้น แรงจากผลของความเสียดทานจากผนัง (F_{TP}) สามารถคำนวณให้อยู่ในรูปของความเครียดเฉือนที่ผนัง (Shear stress) และ พื้นที่เปียก (Wetted area) ดังสมการที่ 3.37

$$F_{TP} = \tau_w A_w \quad (3.37)$$

แทนความเครียดเฉือนที่ผนังจากสมการที่ 3.31 ลงในสมการที่ 3.37 ได้ดังสมการที่ 3.38

$$F_{TP} = \frac{f_{TP} \rho_{TP}}{2} \left((v_\theta - \omega r)^2 + v_r^2 \right) \cdot \frac{4Q_e}{D_h} \quad (3.38)$$



รูปที่ 3.10 ปริมาตรควบคุม องค์ประกอบของแรง และความเร็วของสารทำงานในโรเตอร์ของเตสลาเทอร์ไบน์: (ก) ปริมาตรควบคุมของสารทำงานที่พิจารณาที่จุด r_i ในโรเตอร์ของเตสลาเทอร์ไบน์; (ข) ตำแหน่งรัศมีและองค์ประกอบความเร็วที่จุดต่อ ๆ ไปในแผ่นดิสก์ของโรเตอร์ของเตสลาเทอร์ไบน์; (ค) สามเหลี่ยมความเร็วและองค์ประกอบของแรงที่จุด r_i ของโรเตอร์

ดังนั้น องค์ประกอบของแรงในแนวรัศมี (radial component) และ แนวสัมผัส (tangential component) จากรูปที่ 3.10 สามารถแสดงดังสมการที่ 3.39 และ 3.40

$$F_r = F \cos(\beta) \quad (3.39)$$

$$F_\theta = F \sin(\beta) \quad (3.40)$$

เมื่อ β คือมุมระหว่างความเร็วสัมผัส (w) และความเร็วในแนวรัศมี (v_r) โดยสามารถพิจารณาจาก $\cos(\beta)$ และ $\sin(\beta)$ ซึ่งได้ดังสมการที่ 3.41 และ 3.42

$$\cos(\beta) = \frac{v_r}{\sqrt{(v_\theta - \omega r)^2 + v_r^2}} \quad (3.41)$$

$$\sin(\beta) = \frac{v_\theta - \omega r}{\sqrt{(v_\theta - \omega r)^2 + v_r^2}} \quad (3.42)$$

แทนสมการที่ 3.28 และ 3.29 จะได้แรงในแนวรัศมีและแนวสัมผัสตั้งสมการที่ 3.43 และ 3.44

$$F_{r,TP} = F_{TP} \cos(\beta) = \frac{f_{TP} \rho_{TP}}{2} \sqrt{(v_\theta - \omega r)^2 + v_r^2} \cdot \frac{4Q_e}{D_h} \cdot v_r \quad (3.43)$$

$$F_{\theta,TP} = F_{TP} \sin(\beta) = \frac{f_{TP} \rho_{TP}}{2} \sqrt{(v_\theta - \omega r)^2 + v_r^2} \cdot \frac{4Q_e}{D_h} \cdot (v_\theta - \omega r) \quad (3.44)$$

หารสมการที่ 3.43 และ 3.44 ด้วยมวลของสารทำงานที่อยู่ภายในปริมาตรควบคุม ($m_e = \rho_{TP} \cdot Q_e$) จะได้ค่าแรงต่อมวลในรัศมีและแนวสัมผัสตั้งสมการที่ 3.45 และ 3.46

$$\varphi_{r,TP} = \frac{F_{r,TP}}{\rho_{TP} \cdot Q_e} = \frac{f_{TP}}{2} \sqrt{(v_\theta - \omega r)^2 + v_r^2} \cdot \frac{4}{D_h} \cdot v_r \quad (3.45)$$

$$\varphi_{\theta,TP} = \frac{F_{\theta,TP}}{\rho_{TP} \cdot Q_e} = \frac{f_{TP}}{2} \sqrt{(v_\theta - \omega r)^2 + v_r^2} \cdot \frac{4}{D_h} \cdot (v_\theta - \omega r) \quad (3.46)$$

แทนสมการที่ 3.45 และ 3.46 ในสมการที่ 3.25 และ 3.26 ซึ่งได้สมการที่คำนวณการกระจายตัวของความดัน และความเร็วในแนวสัมผัสของสารทำงานภายในโรเตอร์ของเทสลาเทอร์ไบน์ตั้งสมการที่ 3.47 และ 3.48

$$\left(\frac{\partial P}{\partial r} \right)_{TP} = \frac{\rho_{TP} v_\theta^2}{r} + \frac{\rho_{TP} v_{r,TP}^2}{r} + \frac{2\rho_{TP} f_{TP}}{D_h} \sqrt{(v_\theta - \omega r)^2 + v_r^2} \cdot v_r \quad (3.47)$$

$$\left(\frac{\partial v_\theta}{\partial r} \right)_{TP} = -\frac{2f_{TP}}{D_h} \cdot \frac{(v_\theta - \omega r)}{v_r} \cdot \sqrt{(v_\theta - \omega r)^2 + v_r^2} - \frac{v_\theta}{r} \quad (3.48)$$

จากสมการเชิงอนุพันธ์ย่อย (Partial differential equation) ตั้งสมการที่ 3.47 และ 3.48 ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้แก้สมการโดยใช้กระบวนการวิธีการหาผลต่างแบบจำกัด (Finite-difference method) เพื่อหาความดันและความเร็วแนวสัมผัสที่จุดต่าง ๆ โดยที่เอนทัลปี (Enthalpy: h) สามารถคำนวณได้โดยใช้การอนุรักษ์โรทาลปี (Rothalpy: l) โดยสามารถคำนวณได้ตั้งสมการที่ 3.49

$$l = h + \frac{w^2}{2} - \frac{u_\theta^2}{2} \quad (3.49)$$

โดยที่ ณ จุดที่ r ต่าง ๆ มีค่าโรทาลปี (l) เท่ากัน ดังนั้นเมื่อทราบค่าความเร็วสัมผัส (w) และ ความเร็วในแนวสัมผัสของแผ่นดิสก์ในโรเตอร์ (u_0) สามารถหาเอนทาลปีได้ ในขณะที่คุณสมบัติอื่น ๆ ของสารทำงานสามารถหาได้จากโปรแกรม REFPROP โดยให้เป็นฟังก์ชันของ เอนทาลปี และ ความดันของสารทำงาน

หลังจากจำลองเตสลาเทอร์โบइनด์ังหัวข้อที่ 3.3.2.1 และ 3.3.2.2 จะได้คุณสมบัติของสารทำงาน ณ ทางเข้าและทางออกของเทอร์โบइनน์ ลำดับถัดไปได้นำมาคำนวณหาสมรรถนะของเตสลาเทอร์โบइनน์ในหัวข้อที่ 3.3.2.3

3.3.2.3 การคำนวณกำลังและประสิทธิภาพไอเซนโทรปิก

เมื่อจำลองเตสลาเทอร์โบइनน์แล้วเราทราบสถานะของสารทำงานที่ก่อนเข้าและหลังออกจากเทอร์โบइनน์ ซึ่งเราสามารถคำนวณกำลังที่ได้จากเทอร์โบइनน์และประสิทธิภาพไอเซนโทรปิกได้ดังสมการที่ 3.50 และ 3.51 ตามลำดับ

$$\dot{W}_{Tesla} = \dot{m}_{wf} (h_{03} - h_{05}) = \dot{m}_{wf} (v_{\theta,4} \omega r_4 - v_{\theta,5} \omega r_5) \quad (3.50)$$

$$\eta_{Tesla,isen} = \frac{\dot{W}_{Tesla}}{h_{03} - h_{05,isen}} \quad (3.51)$$

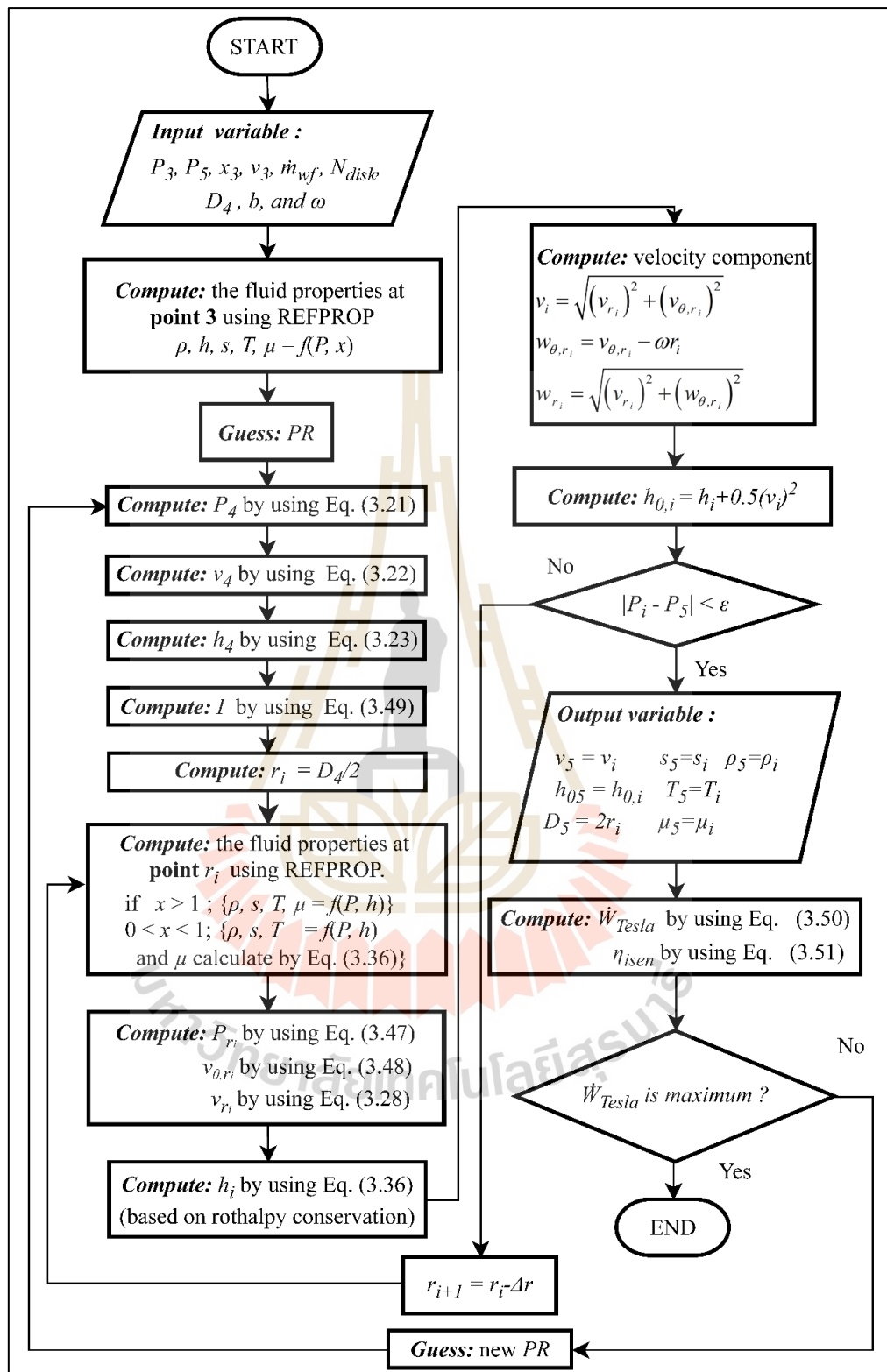
จากสมการที่ 3.50 เป็นสมการที่ใช้ในการคำนวณกำลังของเตสลาเทอร์โบइनน์ โดยหาจากกำลังผลต่างของ stagnation เอนทาลปีที่เข้าและออกจากเตสลาเทอร์โบइनน์แล้วคูณด้วยอัตราการเชิงมวลของสารทำงานที่เข้าเตสลาเทอร์โบइनน์ นอกจากนี้ ประสิทธิภาพไอเซนโทรปิกของเตสลาเทอร์โบइनน์ดังสมการที่ 3.51 คำนวณจากกำลังของเตสลาเทอร์โบइनน์ต่อกำลังของเตสลาเทอร์โบइनน์เมื่อเป็นกระบวนการไอเซนโทรปิก (เอนโทรปีของสารทำงานจุดที่ 3 ถึง 5 ไม่เปลี่ยนแปลง)

3.3.3 แนวทางการจำลองและการออกแบบเตสลาเทอร์โบइनน์

จากแบบจำลองในหัวข้อที่ 3.3.2 กระบวนการจำลองแสดงดังผังการจำลองดังรูปที่ 3.11 โดยที่นำเงื่อนไขการทำงานของโรงไฟฟ้าจากหัวข้อที่ 3.1 และ 3.2 ซึ่งประกอบไปด้วยความดันที่คอนเดนเซอร์ ความดันที่อีวาโปเรเตอร์ อัตราการไหลเชิงมวลของสารทำงาน และ และความเป็นไอของสารทำงานที่ก่อนเข้าเทอร์โบइनน์ นอกจากนี้ในแบบจำลองได้ใช้ขนาดของเทอร์โบइनน์และช่วงของการทำงานดังตารางที่ 3.3 โดยค่าเหล่านี้ถูกหาค่าที่เหมาะสมเพื่อให้ได้กำลังจากเทอร์โบइनน์สูงที่สุดภายใต้สภาวะการทำงานจริง

ตารางที่ 3.3 ขนาดและช่วงการทำงานของเทสลาเทอร์ไบน์ที่ใช้ในการจำลอง

| ตัวแปร | ค่า | หน่วย |
|--|---------|-------|
| อัตราส่วนความดัน (PR) | 0.4-0.9 | - |
| ความเร็วรอบของการทำงาน ($\omega \times 10^3$) | 1-15 | RPM |
| เส้นผ่านศูนย์กลาง ภายนอกของโรเตอร์ของเทสลาเทอร์ไบน์ (D_4) | 100-700 | mm |
| จำนวนแผ่นของโรเตอร์ของเทสลาเทอร์ไบน์ (N_{disk}) | 25-125 | แผ่น |
| ระยะห่างระหว่างแผ่นดิสก์ในโรเตอร์ (b) | 0.1-2 | mm |



รูปที่ 3.11 ผังการจำลองและการหาค่าที่ดีที่สุดสำหรับอัตราส่วนความดันและขนาดของโรเตอร์ของ เทสลาเทอร์ไบน์

โดยจากการทำปรีทศวรรษกรรม พบว่า ยิ่งระยะระหว่างแผ่นดิสก์ในโรเตอร์ (b) มีค่าน้อยทำให้เทสลาเทอร์ไบน์ทำงานได้ดีขึ้น อย่างไรก็ตามขนาดของระยะห่างที่น้อยเกินไปอาจเกิดอุปสรรคในการผลิตชิ้นงานจริงได้ โดยจากการศึกษาเทสลาเทอร์ไบน์ในลักษณะการทดลอง Talluri et al. (2020) และการจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณของ Traverso et al. (2019) และ Pacini et al. (2020) ใช้ค่าระยะห่างระหว่างแผ่นดิสก์ในโรเตอร์เท่ากับ 1 mm ดังนั้น ในการศึกษานี้ได้กำหนดให้ระยะห่างระหว่างแผ่นดิสก์ในโรเตอร์ภายในโรเตอร์ของเทสลาเทอร์ไบน์ มีค่าเท่ากับ 1 mm

กระบวนการการจำลองตั้งผังการจำลองที่ 3.7 มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

กระบวนการที่ 1: การหาค่าที่ดีที่สุดของอัตราส่วนความดัน (PR): วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการหาค่า Pressure ratio เพื่อให้ได้กำลังของเทสลาเทอร์ไบน์ (\dot{W}_{Tesla}) สูงที่สุด

กระบวนการที่ 2: หาขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของโรเตอร์ของเทสลาเทอร์ไบน์ (D_5): โดยการหาค่าอัตราส่วนความดันในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สามารถหาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของโรเตอร์ของเทสลาเทอร์ไบน์ได้ดังนี้

1) ใช้วิธีการหาผลต่างแบบจำกัดเพื่อใช้ในการหาค่าความเร็วความดันที่ตำแหน่ง r_i

2) ที่ตำแหน่ง r_i ตรวจสอบว่ามีค่าเท่ากับ P_i มีค่าเท่ากับ P_5 เพื่อให้มั่นใจว่าตรงเงื่อนไขการทำงานของโรงไฟฟ้าวัฏจักรโออาร์ซีหรือคาลินา

3) ถ้า P_i มีค่าไม่เท่ากันกับ P_5 เราจะทำการขยับ r_i ให้มีค่าน้อยลงในขนาดเล็กน้อยเท่ากับ Δr โดยมีค่าเท่ากับ $r_{i+1} = r_i - \Delta r$ ดังรูปที่ 3.7

4) ทำซ้ำจากข้อ 1. ถึง 3. เพื่อให้ P_i มีค่าเท่ากับ P_5

โดยการหาค่าที่ดีที่สุดนี้เพื่อต้องการให้ได้อัตราส่วนความดัน (PR) ที่ทำให้ได้กำลังสุทธิสูงสุด และได้ขนาดของโรเตอร์ของเทสลาเทอร์ไบน์ที่ส่งผลให้ได้เงื่อนไขการทำงานของโรงไฟฟ้าที่ออกแบบไว้ โดยรายละเอียดของโปรแกรมที่ใช้ในการจำลองเทสลาเทอร์ไบน์แสดงในภาคผนวก ค. นอกจากนี้ หลังจากดำเนินการจำลองหาขนาดและการทำงานที่เหมาะสมของเทสลาเทอร์ไบน์แล้วจากหัวข้อที่ 3.3.2 แล้วประกอบกับผลของเงื่อนไขในการทำงานที่เหมาะสมจากหัวข้อ 3.1 และ 3.2 สามารถนำมาสร้างผังอุณหภูมิจำเพาะของโรงไฟฟ้าวัฏจักรโออาร์ซีและคาลินาแบบ KCS-11

3.3.4 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองเทสลาเทอร์ไบน์

เพื่อตรวจสอบความแม่นยำของแบบจำลองของเทสลาเทอร์ไบน์ วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้จำลองเปรียบเทียบกับผลการจำลองและผลการทดลองที่ได้จากการทำปรีทศวรรษกรรม อันดับแรกได้จำลองเปรียบเทียบกับผลการจำลองของ Talluri et al. (2020) โดยในการจำลองนี้สารทำงาน

ก่อนเข้าเทอร์โบและที่อยู่ระหว่างกระบวนการในเทอร์โบเป็นไอเสมอ โดยผลการเปรียบเทียบการจำลองที่ได้จากแบบจำลองในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้กับการทดลองจากบริษัทวิศวกรรมแสดงดังตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 ผลการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการจำลองและการทดลองของ Talluri et al. (2020) โดยการไหลเป็นแบบสถานะเดียว

| ตัวแปร | ค่า | หน่วย | |
|-------------------------|--------------------|-----------------------|-------|
| D_4 | 218 | mm | |
| D_5 | 55 | mm | |
| b | 1 | mm | |
| จำนวนแผ่นดิสก์ในโรเตอร์ | 60 | แผ่น | |
| ω | 3,500 | RPM | |
| สารทำงาน | R1233zd(E) | - | |
| อัตราการไหลของสารทำงาน | 0.2532 | kg/s | |
| V_3 | - | m/s | |
| P_3 | 0.518 | MPa | |
| T_3 | 108.1 | °C | |
| X_3 | Superheated vapor | - | |
| ตัวแปร | วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ | Talluri et al. (2020) | หน่วย |
| P_5 | 0.32 | 0.32 | MPa |
| T_5 | 100.73 | 101.48 | °C |
| η_{isen} | 0.35 | 0.30 | - |
| \dot{W}_{Tesla} | 940 | 800 | W |

อีกทั้งในการศึกษานี้ บางกรณีสารทำงานที่อยู่ภายในกระบวนการในเตสลาเทอร์โบมีลักษณะเป็นของผสมหรือการขยายตัวแบบสองเฟส (two-phase flow) ดังนั้นเพื่อให้มั่นใจได้ว่าแบบจำลองที่ใช้ในการศึกษานี้ สามารถจำลองการขยายตัวแบบสองเฟสได้นั้น จึงได้ทำการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองกับการศึกษาของ Niknam et al. (2021) เพื่อตรวจสอบความถูกต้องโดยผลการเปรียบเทียบแสดงดังตารางที่ 3.5

ตารางที่ 3.5 ผลการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการจำลองและการทดลองของ Niknam et al. (2021)

โดยการไหลเป็นแบบสองเฟส

| | | | |
|-------------------------|----------------------|----------------------|-------|
| ตัวแปร | ค่า | | หน่วย |
| D_4 | 218 | | mm |
| D_5 | 40 | | mm |
| b | 0.4 | | mm |
| จำนวนแผ่นดิสก์ในโรเตอร์ | 1 | | แผ่น |
| ω | 2,100 | | RPM |
| สารทำงาน | R404A | | - |
| อัตราการไหลของสารทำงาน | 0.0016 | | kg/s |
| V_4 | 25.71 | | m/s |
| P_4 | 2.28 | | MPa |
| T_4 | 49.38 | | °C |
| x_4 | 0.35 (vapor-mixture) | | - |
| ตัวแปร | วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ | Niknam et al. (2021) | |
| P_5 | 2.18 | 2.10 | MPa |
| T_5 | 47.73 | 45.83 | °C |
| η_{isen} | 0.91 | 0.93 | - |
| \dot{W}_{Tesla} | 0.93 | 0.80 | W |

จากผลการเปรียบเทียบความถูกต้องของแบบจำลองทั้งการไหลแบบเฟสเดี่ยวและการไหลแบบสองเฟสภายในเตสลาเทอร์ไบน์ พบว่า แบบจำลองของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สามารถประเมินกำลัง ประสิทธิภาพไอเซนโทรปิก และความดันที่ทางออกของเทอร์ไบน์ได้ โดยมีค่าคลาดเคลื่อนจากผลการศึกษาที่ได้จากการปริทัศน์วรรณกรรมประมาณ 10% ซึ่งอยู่ในช่วงที่สามารถยอมรับได้สำหรับการศึกษาขั้นต้นในการออกแบบเตสลาเทอร์ไบน์ นอกจากนี้ ยังแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองนี้สามารถนำไปใช้ได้ทั้งในกรณีที่สารทำงานภายในเตสลาเทอร์ไบน์เป็นการไหลแบบเฟสเดี่ยวและการไหลแบบสองเฟส

ภายหลังจากการออกแบบเตสลาเทอร์ไบน์แล้ว ได้ดำเนินการวิเคราะห์เอกเซอร์ยีในหัวข้อ 3.4 และประเมินความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ในหัวข้อ 3.5 เพื่อให้เกิดการเปรียบเทียบเชิงบูรณาการและมองเห็นภาพรวมในหลากหลายมุมมองมากยิ่งขึ้น

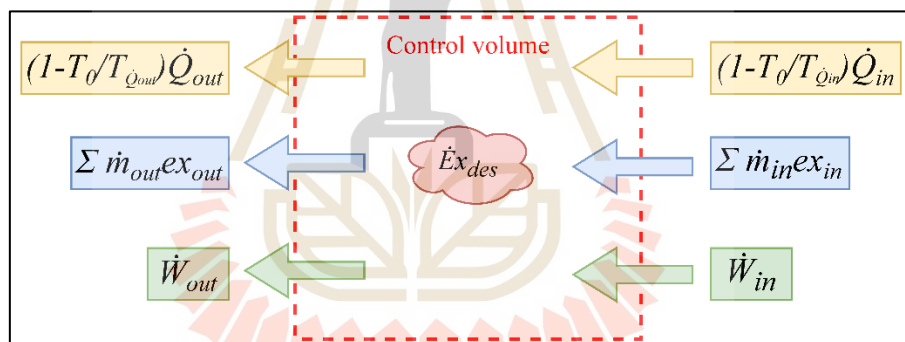
3.4 การวิเคราะห์เอ็กเซอร์ยี

ในหัวข้อนี้เป็นการประเมิน การถูกทำลายเอ็กเซอร์ยี (Exergy destruction: $\dot{E}x_{des}$) ที่เกิดขึ้นในโรงไฟฟ้าแต่ละวัฏจักร โดยเป็นการหา $\dot{E}x_{des}$ ของแต่ละอุปกรณ์ภายในโรงไฟฟ้า โดย $\dot{E}x_{des}$ เป็นตัวบ่งชี้ว่าศักยภาพของสารทำงานถูกทำลายมากน้อยเพียงใดในอุปกรณ์ โดยตัวแปรดังกล่าวถูกใช้เพื่อเปรียบเทียบว่าเมื่อโรงไฟฟ้าหรือสารทำงานเปลี่ยนไปส่งผลอย่างไรต่อศักยภาพของสารทำงาน รวมถึงเปรียบเทียบศักยภาพที่ถูกทำลายระหว่างอุปกรณ์ภายในวัฏจักรอีกด้วย โดยในการศึกษานี้ กำหนดให้เป็นการจำลองแบบสถานะคงตัวไม่ขึ้นกับเวลา (Steady stage)

อย่างไรก็ตามเพื่อหา $\dot{E}x_{des}$ ของแต่ละอุปกรณ์จำเป็นต้องหาเอ็กเซอร์ยีทางกายภาพ (Physical exergy: ex) ของสารทำงานที่แต่ละสถานะซึ่งหาได้ดังนี้ (Çengel, 2024)

$$ex_{phy} = (h - h_o) + T_o (s - s_o) \quad (3.52)$$

โดยค่า $\dot{E}x_{des}$ ซึ่งสามารถหาได้จากการคำนวณ ได้จากการกำหนดปริมาณควบคุมภายในอุปกรณ์ภายในโรงไฟฟ้าได้ดังรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 เอ็กเซอร์ยีที่เข้าและออกในอุปกรณ์ภายใต้ปริมาตรควบคุม

จากรูปที่ 3.12 การหาสมดุลของเอ็กเซอร์ยีในสถานะคงตัวสามารถหาได้ดังสมการที่ 3.53

$$\sum \dot{m}_i ex_{in,i} - \sum \dot{m}_i ex_{out,i} + \dot{W}_{in} - \dot{W}_{out} + \sum \left\{ \left(1 - \frac{T_o}{T_{Q_{in,i}}} \right) \dot{Q}_{in,i} \right\} - \sum \left\{ \left(1 - \frac{T_o}{T_{Q_{out,i}}} \right) \dot{Q}_{out,i} \right\} - \dot{E}x_{des} = 0 \quad (3.53)$$

การทำลายเอ็กเซอร์ยี (Exergy destruction: $\dot{E}x$) ของแต่ละอุปกรณ์สามารถหาได้จากการทำสมดุลเอ็กเซอร์ยีของแต่ละอุปกรณ์ โดยการระบุตำแหน่งจะอ้างอิงตามโรงไฟฟ้าวัฏจักรคาลินาแบบ KCS-11 เนื่องจากมีจำนวนอุปกรณ์มากกว่าโรงไฟฟ้าวัฏจักรโออาร์ซี อย่างไรก็ตาม การคำนวณการ

ทำลายเอกเซอร์ยีสำหรับอุปกรณ์ในโรงไฟฟ้าวัฏจักรโออาร์ซีสามารถเปรียบเทียบและอ้างอิงได้จากผังอุปกรณ์ในรูปที่ 3.1 และ 3.5 รายละเอียดของการคำนวณการทำลายเอกเซอร์ยีแสดงดังต่อไปนี้

1. การทำลายเอกเซอร์ยีที่ปั๊ม

$$\dot{E}x_{des,pump} = \dot{m}_1 ex_1 - \dot{m}_2 ex_2 + \dot{W}_{in} \quad (3.54)$$

2. การทำลายเอกเซอร์ยีที่รีคูเปอร์เรเตอร์

$$\dot{E}x_{des,rec} = \dot{m}_2 ex_2 + \dot{m}_8 ex_8 - \dot{m}_3 ex_3 - \dot{m}_9 ex_9 \quad (3.55)$$

3. การทำลายเอกเซอร์ยีที่อีวาโปเรเตอร์

$$\dot{E}x_{des,evap} = \dot{m}_3 ex_3 + \dot{m}_{14} ex_{14} - \dot{m}_4 ex_4 - \dot{m}_{15} ex_{15} \quad (3.56)$$

4. การทำลายเอกเซอร์ยีที่เซพาเรเตอร์

$$\dot{E}x_{des,sep} = \dot{m}_4 ex_4 - \dot{m}_5 ex_5 - \dot{m}_7 ex_7 \quad (3.57)$$

5. การทำลายเอกเซอร์ยีที่เทอร์ไบน์

$$\dot{E}x_{des,turbine} = \dot{m}_5 ex_5 - \dot{m}_7 ex_7 - \dot{W}_{out} \quad (3.58)$$

6. การทำลายเอกเซอร์ยีที่เอ็กซ์แพนชันวาล์ว

$$\dot{E}x_{des,exp} = \dot{m}_8 ex_8 - \dot{m}_9 ex_9 \quad (3.59)$$

7. การทำลายเอกเซอร์ยีที่มิกซ์เซอร์

$$\dot{E}x_{des,mixer} = \dot{m}_9 ex_9 + \dot{m}_7 ex_7 - \dot{m}_{10} ex_{10} \quad (3.60)$$

8. การทำลายเอกเซอร์ยีที่คอนเดนเซอร์

$$\dot{E}x_{des,cond} = \dot{m}_{10} ex_{10} + \dot{m}_{12} ex_{12} - \dot{m}_1 ex_1 - \dot{m}_{13} ex_{13} \quad (3.61)$$

9. การทำลายเอกเซอร์ยีของระบบโดยรวม

$$\begin{aligned} \dot{E}x_{des,total} &= \dot{E}x_{des,pump} + \dot{E}x_{des,rec} + \dot{E}x_{des,evap} \\ &+ \dot{E}x_{des,sep} + \dot{E}x_{des,turbine} + \dot{E}x_{des,exp} \\ &+ \dot{E}x_{des,mixer} + \dot{E}x_{des,cond} + \dot{E}x_{des,total} \end{aligned} \quad (3.62)$$

3.5 การประเมินความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์

เพื่อประเมินความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของโรงไฟฟ้าวัฏจักรโออาร์ซีและคาลินาที่ใช้เทสลาเทอร์ไบน์ภายใต้สภาวะการทำงานที่แตกต่างกัน ได้มีการพัฒนาแบบจำลองทางเศรษฐศาสตร์ โดยแบบจำลองนี้พิจารณาทั้งค่าใช้จ่ายในการลงทุนเริ่มต้นและต้นทุนการดำเนินงานในระยะยาวของโรงไฟฟ้า โดยใช้ตัวชี้วัดทางเศรษฐศาสตร์ ได้แก่ มูลค่าปัจจุบันสุทธิของต้นทุนต่อหน่วยของการผลิตไฟฟ้า (Levelized Cost of Electricity: LCOE) มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (Net Present Value: NPV) ระยะเวลาคืนทุนที่คิดลดแล้ว (Discounted Payback Period: d-PbP) และอัตราผลตอบแทนภายใน (Internal Rate of Return: IRR) นอกจากนี้ ได้มีการปรับปรุงราคาของอุปกรณ์ต่าง ๆ ในระบบให้เป็นปัจจุบันโดยอ้างอิงจากดัชนีราคา (Cost index) และทำการตรวจสอบความถูกต้องของการประเมินราคาด้วย เพื่อให้ผลการวิเคราะห์มีความแม่นยำและสอดคล้องกับสภาวะราคาในปัจจุบัน โดยเงื่อนไขการประเมินแสดงดังตารางที่ 3.6

ตารางที่ 3.6 เงื่อนไขที่ใช้ในการประเมินความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของโรงไฟฟ้า

| ตัวแปร | ค่า | หน่วย |
|---|--------------------------------|-----------------|
| อัตราคิดลด | 5%, 7%, 9% | % |
| อายุโครงการ [(Turton, 2002); (Humphreys, 1991); (Thurairaja et al., 2018)] | 20 | ปี |
| ระยะเวลาในการทำงาน (Ochoa et al., 2019) | 7,300 | ชั่วโมง/ปี |
| ราคาไฟฟ้า* | 86 (3.0), 100 (3.5), 114 (4.0) | €/MWh (บาท/kWh) |
| *ราคาค่าไฟฟ้าของประเทศไทย | | |

จากตารางที่ 3.6 แสดงให้เห็นว่าวิทยานิพนธ์ได้ศึกษาอัตราคิดลดที่ และราคาขายไฟฟ้าที่หลากหลายเพื่อให้เห็นถึงความเป็นไปได้ของโรงไฟฟ้าวัฏจักรโออาร์ซีที่ใช้เทสลาเทอร์ไบน์ เพื่อให้เห็นความเป็นไปได้ในการประเมินเศรษฐศาสตร์ภายใต้สภาวะเศรษฐกิจที่เปลี่ยนแปลงไป โดยที่อัตราคิดลดที่ 7% เป็นดอกเบี้ยเงินกู้โดยทั่วไปของประเทศไทยใน พศ. 2556 และ ราคาขายไฟฟ้า 3.5 บาท/

kWh เป็นราคาขายไฟฟ้าโดยเฉลี่ยของประเทศไทย โดยค่าเหล่านี้สามารถเปลี่ยนแปลงไปตามสถานะเศรษฐกิจที่เปลี่ยนแปลงไป

3.5.1 การประเมินราคาของโรงไฟฟ้า

โดยในการประเมินราคาของโรงไฟฟ้าสามารถคำนวณได้ดังนี้

ต้นทุนเงินทุนทั้งหมดของโรงไฟฟ้า (Total capital cost: C_{cap}) สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 3.63

$$C_{cap} = C_{Tesla} + C_{hx} + C_{pump} + C_{gen} + C_{mis} \quad (3.63)$$

จากการทำปรีทัศน์วรรณกรรมจากงานวิจัยของ Quoilin et al. (2011) แนะนำว่า งบประมาณในการติดตั้ง (Installation cost: C_{inst}) คิดเป็น 30% ของต้นทุนเงินทุนทั้งหมดของโรงไฟฟ้าโดยสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 3.64

$$C_{inst} = 0.3 \times C_{cap} \quad (3.64)$$

ดังนั้น เงินลงทุนรวม (Investment cost: C_{invest}) สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 3.65

$$C_{invest} = C_{cap} + C_{inst} \quad (3.65)$$

โดยที่รายจ่ายสำหรับการซ่อมบำรุงและดำเนินการ (Operation and maintenance cost: $C_{O\&M}$) จากการทำปรีทัศน์วรรณกรรม พบว่างานวิจัยของ Roumpedakis et al. (2020) แนะนำให้เป็น 1% ต้นทุนเงินทุนทั้งหมดของโรงไฟฟ้าโดยสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 3.66

$$C_{O\&M} = 0.01 \times C_{cap} \quad (3.66)$$

โดยรายได้รวมต่อปีจากการขายไฟฟ้าสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 3.67

$$C_{selling} = C_{electricity} \times (\dot{W}_{turbine} - \dot{W}_{pump}) = C_{electricity} \times \dot{W}_{net} \quad (3.67)$$

ตารางที่ 3.7 ความสัมพันธ์ของราคาอุปกรณ์ของโรงไฟฟ้าจากปริทัศน์วรรณกรรม

| อุปกรณ์ | ความสัมพันธ์ (€) | ปีที่สร้าง |
|---|---|------------|
| เตสลาเทอร์โบ (Dumont et al., 2019) | $C_{Tesla} = 3,373.3 \times D_4^{0.652}$ | 2019 |
| สกรูเอ็กซ์แพนเดอร์ (Zare, 2015) | $\log_{10}(C_{screw}) = 2.659 + 1.4398 \log_{10}(\dot{W}_{turbine}) - 0.1776(\log_{10}(\dot{W}_{turbine}))^2$ | 2015 |
| อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน (Zare, 2015) | $C_{hx} = 10,000 + 324 \times (A_{hx, evap} + A_{hx, cond})^{0.91}$ | 2015 |
| ปั๊ม (Roumpedakis et al., 2020) | $C_{pump} = 900 \times (\dot{W}_{pump} [kW] / 300)^{0.25}$ | 2019 |
| เครื่องผลิตไฟฟ้า (Zare, 2015) | $C_{gen} = 71.7 \times (\dot{W}_{turbine} [kW])^{0.95}$ | 2015 |
| เบ็ดเตล็ด (Roumpedakis et al., 2020) | $C_{mis} = 800$ | 2019 |

3.5.2 การประเมินราคาของอุปกรณ์ภายในโรงไฟฟ้า

ในการประเมินความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ จำเป็นต้องประเมินต้นทุนของอุปกรณ์ภายในโรงไฟฟ้า โดยใช้สมการความสัมพันธ์ระหว่างราคากับขนาดหรือกำลังการทำงานของอุปกรณ์ ซึ่งขนาดของอุปกรณ์เหล่านี้ได้มาจากกระบวนการออกแบบโรงไฟฟ้าที่กล่าวไว้ในหัวข้อ 3.1 และ 3.2 รวมถึงการออกแบบขนาดของเตสลาเทอร์โบในหัวข้อ 3.3 โดยรายละเอียดของการประเมินราคามีดังตารางที่ 3.7

3.5.3 การปรับราคาของอุปกรณ์ภายในโรงไฟฟ้าวัฏจักรโออาร์ซีด้วยดัชนีราคา

ในการประเมินราคาของอุปกรณ์ภายในโรงไฟฟ้าโดยใช้สมการความสัมพันธ์ของราคา ซึ่งแสดงในตารางที่ 3.7 ในหัวข้อ 3.5.2 อาจเกิดความคลาดเคลื่อนได้ เนื่องจากสมการความสัมพันธ์เหล่านี้ถูกพัฒนาขึ้นมาเป็นเวลานานแล้ว เมื่อเปรียบเทียบกับช่วงเวลาปัจจุบัน ราคาของอุปกรณ์อาจเปลี่ยนแปลงไปตามอัตราเงินเฟ้อที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้การประเมินราคาอาจต่ำกว่าความเป็นจริง นอกจากนี้ จากตารางที่ 3.7 ยังพบว่าสมการความสัมพันธ์แต่ละรายการถูกสร้างขึ้นในปีที่ต่างกัน การนำมาใช้ร่วมกันโดยไม่ปรับให้เป็นช่วงเวลาเดียวกัน อาจก่อให้เกิดความไม่สมจริงในการประเมินต้นทุน

ดังนั้น หากสามารถปรับราคาจากสมการความสัมพันธ์ให้อยู่ในช่วงเวลาเดียวกันหรือปรับให้เป็นราคาปัจจุบัน จะช่วยให้การประเมินความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์มีความสมเหตุสมผลมากยิ่งขึ้น โดยอ้างอิงจากงานวิจัยของ Bejan (1995) ได้มีการเสนอวิธีการปรับราคาโดยใช้ดัชนีราคา (Cost Index) ดังแสดงในสมการที่ 3.66

$$C_2 = C_1 \left(\frac{Cost Index_2}{Cost Index_1} \right) \quad (3.66)$$

โดยที่ C_1 และ $Cost Index_1$ เป็นราคาก่อนปรับและดัชนีราคาของปีที่สมการความสัมพันธ์ถูกสร้างขึ้น ส่วน C_2 และ $Cost Index_2$ เป็นราคาที่ปรับแล้วและดัชนีราคาของปีที่ต้องการศึกษา ทั้งนี้ดัชนีราคามีอยู่หลายค่าให้เลือกใช้ แต่ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เลือกใช้ค่า Chemical Engineering Plant Cost Index (CEPCI) เนื่องจากเป็นดัชนีที่ได้รับความนิยมในการปรับราคาของอุปกรณ์ภายในโรงไฟฟ้า [(Boyaghchi et al., 2015); (Lemmens et al., 2016)] โดยค่า CEPCI ของแต่ละปีที่ใช้ในการศึกษาแสดงไว้ในตารางที่ 3.8

ตารางที่ 3.8 ค่าดัชนีราคาของ Chemical Engineering Plant Cost Index (CEPCI)

| CEPCI | ปี |
|-------|------|
| 575.4 | 2008 |
| 567.3 | 2013 |
| 556.8 | 2015 |
| 607.5 | 2019 |
| 803.0 | 2024 |

กระบวนการปรับราคาเริ่มต้นจากการคำนวณราคาของอุปกรณ์ โดยใช้สมการความสัมพันธ์ระหว่างราคากับขนาดหรือกำลังการทำงานของอุปกรณ์ ซึ่งแสดงไว้ในตารางที่ 3.7 ในหัวข้อ 3.5.2 จากนั้นจึงทำการปรับราคาให้เป็นปัจจุบันตามปีที่ศึกษา โดยใช้สมการที่ 3.66 ร่วมกับค่า CEPCI ที่แสดงในตารางที่ 3.8 จะทำให้ได้ค่าปรับราคาจากเงินเฟ้อเพื่อนำไปใช้ในการหาราคาของโรงไฟฟ้าในหัวข้อที่ 3.5.1

3.5.4 การตรวจสอบความถูกต้องของการประเมินราคาของโรงไฟฟ้า

จากปริทัศน์วรรณกรรมพบว่าหลายงานวิจัยมีการใช้สมการความสัมพันธ์ลักษณะเดียวกับที่แสดงในตารางที่ 3.7 เพื่อประเมินต้นทุนในการวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์ โดยส่วนใหญ่ยังไม่มีการตรวจสอบความถูกต้องของผลการประเมิน อีกทั้งบางงานวิจัยยังมีการนำค่า Chemical Engineering Plant Cost Index (CEPCI) มาใช้ในการปรับต้นทุนโดยไม่มีการตรวจสอบความแม่นยำของผลที่ได้ อย่างไรก็ตาม ผู้สร้าง CEPCI ได้ระบุไว้ว่าดัชนีราคานี้จะให้ผลที่แม่นยำที่สุดเมื่อใช้สำหรับการปรับราคาภายในช่วงเวลาไม่เกิน 5 ปี (Vatavuk, 2002) ดังนั้น เนื่องจากสมการความสัมพันธ์ที่เก่าที่สุดในตารางที่ 3.7 ถูกพัฒนาขึ้นตั้งแต่ปี 2015 ซึ่งเกินช่วงเวลา 5 ปีดังกล่าว อาจส่งผลให้เกิดความคลาดเคลื่อนในการประเมินต้นทุนได้

เพื่อเพิ่มความน่าเชื่อถือให้กับการวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ได้มีการตรวจสอบความถูกต้องของการประมาณราคาที่ปรับด้วย CEPCI โดยเปรียบเทียบกับข้อมูลจริงจากหลายช่วงเวลา ดังนี้

1) เปรียบเทียบกับราคาประเมินปัจจุบัน (ปี 2024) ที่ได้รับจากบริษัท แอดวานซ์ เทอร์มอล โซลูชั่น จำกัด (Advanced Thermal Solutions Co., Ltd. – ATS Co., Ltd.) ซึ่งเป็นบริษัทในประเทศไทย สำหรับระบบผลิตไฟฟ้าขนาด 25 กิโลวัตต์สุทธิ

2) เปรียบเทียบกับข้อมูลประมาณราคาจากงานวิจัยโรงไฟฟ้าวัฏจักรโออาร์ซี โดย Loeffler et al. (2017) สำหรับระบบผลิตไฟฟ้าขนาด 50 กิโลวัตต์และ 162 กิโลวัตต์สุทธิ ซึ่งอ้างอิงข้อมูลย้อนกลับไปในปี 2013 และ 2008 ตามลำดับ

ผลลัพธ์จากการตรวจสอบความถูกต้องอย่างครอบคลุมนี้แสดงไว้ในตารางที่ 3.9

ตารางที่ 3.9 ผลการตรวจสอบความถูกต้องของการประเมินราคาหลักจากปรับราคาโดยใช้ CEPCI ในปีที่แตกต่างกัน

| กำลังสุทธิ (kW) | ราคาที่ถูกปรับโดย CEPCI (k€) | ราคาอ้างอิง (x10 ³ €) | ความผิดพลาด (%) | อ้างอิง | ปีในการประเมิน |
|-----------------|------------------------------|----------------------------------|-----------------|-------------------------|----------------|
| 25 | 74.8 | 65.9 | 11.9 | ATS Co., Ltd. | 2024 |
| 50 | 105.7 | 110.7 | 4.71 | Loeffler et al., (2017) | 2013 |
| 162 | 347.7 | 423.9 | 21.9 | Loeffler et al., (2017) | 2008 |

ผลการตรวจสอบพบว่า วิธีประมาณราคาที่ใช้โดย CEPCI ให้ผลลัพธ์อยู่ในช่วงความแม่นยำที่ยอมรับได้ในแต่ละช่วงเวลา โดยมีค่าความแตกต่างสูงสุดอยู่ที่ 21.9% ซึ่งยังอยู่ในช่วง $\pm 30\%$ ที่โดยทั่วไปถือว่ายอมรับได้สำหรับการประเมินในขั้นออกแบบเบื้องต้น (Lemmens, 2016) ผลลัพธ์นี้ช่วยเพิ่มความเชื่อมั่นในความถูกต้องของการวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

3.5.5 ตัวแปรที่ใช้ประเมินความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์

ตัวแปรที่ใช้ในการประเมินความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ดำเนินการโดยใช้ตัวชี้วัดสำคัญในวิทยานิพนธ์ ได้แก่ มูลค่าปัจจุบันสุทธิของต้นทุนต่อหน่วยของการผลิตไฟฟ้า (Levelized Cost of Electricity: LCOE) มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (Net Present Value: NPV) ระยะเวลาคืนทุนที่มีการคิดลด (Discounted Payback Period: d-PbP) และอัตราผลตอบแทนภายใน (Internal Rate of Return: IRR) [(Roumpedakis et al., 2020); (Mohammadi et al., 2020); (Quoilin et al., 2011)] โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.5.5.1 Levelized cost of electricity (LCOE)

มูลค่าปัจจุบันสุทธิของต้นทุนต่อหน่วยของการผลิตไฟฟ้าตลอดอายุการใช้ คือ ตัวชี้วัดที่ใช้ในการประเมินต้นทุนเฉลี่ยต่อหน่วยพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ โดยคำนวณจากมูลค่าปัจจุบันสุทธิของต้นทุนรวมตลอดอายุโครงการ ทั้งในส่วนของต้นทุนการลงทุนเริ่มต้น ต้นทุนในการดำเนินงาน และค่าบำรุงรักษา หาค่าด้วยมูลค่าปัจจุบันสุทธิของพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ทั้งหมดในช่วงเวลาเดียวกัน โดยสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 3.67

$$LCOE = \frac{C_{invest} + \sum_{t=1}^{Lifetime} \left[\frac{(C_{O\&M})_t}{(1+i)^t} \right]}{\sum_{t=1}^{Lifetime} \left[\frac{(W_{turbine} - W_{pump})_t}{(1+i)^t} \right]} \quad (3.67)$$

3.5.5.2 Net present value (NPV)

มูลค่าปัจจุบันสุทธิ คือ ตัวชี้วัดทางเศรษฐศาสตร์ที่ใช้ประเมินความคุ้มค่าของโครงการลงทุน โดยพิจารณาจากผลต่างระหว่างมูลค่าปัจจุบันของกระแสเงินสดเข้า (รายรับหรือผลตอบแทน) กับมูลค่าปัจจุบันของกระแสเงินสดออก (ต้นทุนหรือค่าใช้จ่าย) ตลอดอายุโครงการ โดยการแปลงมูลค่าเงินในอนาคตให้เป็นมูลค่าในปัจจุบันผ่านอัตราคิดลด (Discount rate)

หาก $NPV > 0$ แสดงว่าโครงการมีความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์

หาก $NPV < 0$ แสดงว่าโครงการไม่คุ้มค่าในการลงทุน

โดยสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 3.68

$$NPV = \sum_{t=1}^{Lifetime} \left[\frac{(C_{selling} - C_{O\&M})_t}{(1+i)^t} \right] - C_{invest} \quad (3.68)$$

3.5.5.3 Discounted payback period (d-PbP)

ระยะเวลาคืนทุนที่มีการคิดลด คือการหาจำนวนปีที่มูลค่าปัจจุบันของกระแสเงินสดสุทธิที่ได้รับจากโครงการสะสมจนเท่ากับหรือลดลงถึงต้นทุนเริ่มต้นของโครงการ โดยจะใช้การคิดลดกระแสเงินสดในแต่ละปีให้มีมูลค่าเป็นปัจจุบันก่อนนำมาคำนวณหาจุดที่มูลค่าปัจจุบันสุทธิสะสมของกระแสเงินสดรวมเท่ากับต้นทุนเริ่มต้นของโครงการสมการที่ใช้คำนวณ d-PbP สามารถเขียนได้ดังสมการที่ 3.69

$$d - PbP = \frac{C_{invest}}{\sum_{t=1}^{Lifetime} \left[\frac{(C_{selling} - C_{O\&M})_t}{(1+i)^t} \right]} \quad (3.69)$$

3.5.5.4 Internal rate of return (IRR)

อัตราผลตอบแทนภายในคือ อัตราดอกเบี้ยที่ทำให้มูลค่าปัจจุบัน ของกระแสเงินสดจากโครงการทั้งหมดเท่ากับศูนย์ กล่าวคือ IRR คือ อัตราผลตอบแทนที่คำนวณจากกระแสเงินสดที่คาดว่าจะได้รับในอนาคตเมื่อจบโครงการ โดยสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 3.70

$$0 = \sum_{t=1}^{Lifetime} \left[\frac{(C_{selling} - C_{O\&M})_t}{(1+IRR)^t} \right] - C_{invest} \quad (3.70)$$

3.6 แนวทางการศึกษาการทำสมรรถนะของเตสลาเทอร์ไบน์

สำหรับการศึกษาในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการศึกษาการทำงานของเตสลาเทอร์ไบน์กับโรงไฟฟ้าแบบต่าง ๆ โดยประกอบไปด้วยโรงไฟฟ้าวัฏจักรโออาร์ซีที่ความเป็นไอของสารทำงานเปลี่ยนแปลงไป และโรงไฟฟ้าวัฏจักรคาลินา โดยแบบจำลองแบบจำลองของโรงไฟฟ้าวัฏจักรโออาร์ซีคาลินาและของเตสลาเทอร์ไบน์แสดงในหัวข้อที่ 3.1 3.2 และ 3.3 ตามลำดับ นอกจากนี้ ในแต่ละการศึกษาการทำงานของโรงไฟฟ้ากับเตสลาเทอร์ไบน์ได้วิเคราะห์เอกเซอร์ยีและความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์โดยรายละเอียดของการประเมินแสดงในหัวข้อที่ 3.4 และ 3.5 ตามลำดับ โดยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้กำหนดให้แหล่งความร้อนเป็นน้ำร้อนอุณหภูมิ 120 °C อัตราการไหลเท่ากับ 1

kg/s (เป็นของเหลวตลอดเวลา) และแหล่งทิ้งความร้อนมีอุณหภูมิน้ำเข้าเท่ากับ 30 °C และทางออกเท่ากับ 40 °C รายละเอียดของหัวข้อที่ได้ศึกษาเป็นดังต่อไปนี้

3.6.1 การศึกษาอิทธิพลของตัวแปรที่ใช้ในการออกแบบของเตสลาเทอร์ไบน์

ในหัวข้อนี้เป็นการศึกษาอิทธิพลของขนาดรวมถึงเงื่อนไขการทำงานของเตสลาเทอร์ไบน์ ได้แก่

1. อัตราส่วนความดัน (PR)
2. ความเร็วรอบของการทำงาน (ω)
3. เส้นผ่านศูนย์กลางของภายนอกของโรเตอร์ของเตสลาเทอร์ไบน์ (D_4)
4. จำนวนแผ่นของโรเตอร์ของเตสลาเทอร์ไบน์ (N_{disk})
5. ระยะห่างระหว่างแผ่นดิสก์ในโรเตอร์ (b)

โดยได้ประเมินอิทธิพลของตัวแปรดังกล่าวต่อกำลังและประสิทธิภาพไอเซนโทรปิกของเตสลาเทอร์ไบน์

ทั้งนี้ โรงไฟฟ้าวัฏจักรโออาร์ซี ที่มีค่าความเป็นไอของสารทำงานที่ทางเข้าเทอร์ไบน์เท่ากับ 1.00 หรืออยู่ในสถานะไออิ่มตัว (Saturated vapor) ถูกเลือกเป็นระบบตัวแทนในการศึกษาอิทธิพลของปัจจัยที่ส่งผลต่อการทำงานของเตสลาเทอร์ไบน์ โดยสารทำงานที่เลือกใช้ในงานวิจัยนี้คือ สาร R236ea ซึ่งเลือกตามข้อเสนอแนะของงานวิจัยโดย He et al. (2011) ที่ระบุว่า “ควรเลือกสารทำงานที่มีอุณหภูมิวิกฤตใกล้เคียงกับอุณหภูมิของแหล่งความร้อนเพื่อให้ได้กำลังสุทธิสูงสุด” ทั้งนี้ R236ea มีอุณหภูมิวิกฤตเท่ากับ 139.29 °C ซึ่งอยู่ใกล้เคียงกับอุณหภูมิของแหล่งความร้อนที่ใช้ในการศึกษา (120 °C)

กระบวนการศึกษานี้เริ่มต้นจากการหาค่าเงื่อนไขการทำงานที่เหมาะสมของโรงไฟฟ้าวัฏจักรโออาร์ซี ได้แก่ ความดันที่ไอวาโปเรเตอร์ (Evaporator pressure) ความดันที่คอนเดนเซอร์ (Condenser pressure) และอัตราการผลิตเชิงมวลของสารทำงาน ซึ่งรายละเอียดในการหาค่าดังกล่าวได้นำเสนอไว้ในหัวข้อที่ 3.1 จากนั้นจึงนำค่าที่ได้มาใช้ในการออกแบบเตสลาเทอร์ไบน์ โดยทำการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรที่ละตัวตามที่แสดงในตารางที่ 3.3 เพื่อศึกษาผลกระทบของแต่ละตัวแปรต่อการทำงานของเตสลาเทอร์ไบน์ โดยผลการวิเคราะห์ดังกล่าวได้นำเสนอไว้ในบทที่ 4

3.6.2 การศึกษาอิทธิพลของความเป็นไอของสารทำงานที่มีผลต่อสมรรถนะของโรงไฟฟ้าและเตสลาเทอร์ไบน์

ในหัวข้อนี้ ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของค่าความเป็นไอของสารทำงานก่อนเข้าเทอร์ไบน์ โดยยังคงใช้สาร R236ea เป็นสารทำงาน และกำหนดอุณหภูมิของแหล่งความร้อนและแหล่งทิ้งความร้อนให้เหมือนกับที่ระบุไว้ในหัวข้อ 3.6.1 จากนั้นได้กำหนดค่าความเป็นไอของสารทำงานก่อน

เข้าทดสอบเทอร์ไบน์เท่ากับ 0.00, 0.25, 0.50, 0.75 และ 1.00 แล้วหาค่าเงื่อนไขการทำงานที่เหมาะสมของแต่ละกรณี ได้แก่ ความดันที่อีวาโปเรเตอร์ ความดันที่คอนเดนเซอร์ และอัตราการไหลเชิงมวลของสารทำงาน โดยรายละเอียดในการหาค่าได้แสดงไว้ในหัวข้อ 3.1

จากนั้น ได้นำเงื่อนไขการทำงานของแต่ละกรณีมาใช้ในการจำลองทดสอบเทอร์ไบน์ โดยรายละเอียดของแบบจำลองได้นำเสนอไว้ในหัวข้อ 3.3 ซึ่งในแต่ละกรณีที่มีค่าความเป็นไอของสารทำงานต่างกัน จะได้ขนาดและเงื่อนไขการทำงานของเทอร์ไบน์ที่ทำให้ได้กำลังสุทธิสูงสุด โดยผลการออกแบบได้แสดงไว้ในหัวข้อ 3.6.1

สุดท้าย ได้ดำเนินการวิเคราะห์เอกเซอร์ยีและความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์โดยอ้างอิงวิธีการตามที่ระบุในหัวข้อ 3.4 และ 3.5 ตามลำดับ เพื่อประเมินค่าความเป็นไอที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการทำงานของทดสอบเทอร์ไบน์ ซึ่งผลการวิเคราะห์ได้แสดงไว้ในบทที่ 5

3.6.3 การศึกษาพฤติกรรมการทำงานของทดสอบเทอร์ไบน์ในโรงไฟฟ้าวัฏจักรที่แอลซี เมื่อใช้สารผสมซีไอโทริกที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

โดยในหัวข้อนี้ เป็นการศึกษาอิทธิพลของสารทำงาน โดยเปรียบเทียบกับสารที่นิยมสำหรับโรงไฟฟ้าวัฏจักรโออาร์ซีคือ R245fa เทียบกับ สารทดแทน R245 ทั้งแบบสารบริสุทธิ์และซีไอโทริก โดยแสดงดังตารางที่ 3.10

โดยวัตถุประสงค์ของการศึกษานี้ เพื่อต้องการศึกษาอิทธิพลของสารทำงานที่มีต่อทดสอบเทอร์ไบน์และหาสารทำงานทดแทน R245fa ผ่านการประเมินด้านพลังงาน เอกเซอร์ยีและความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ โดยการคำนวณ ทำเช่นเดียวกับหัวข้อ 3.6.2 ผลการศึกษาแสดงในบทที่ 6

ตารางที่ 3.10 สารทำงานที่ใช้ในการจำลองเพื่อหาสารทดแทน R245fa

| สารทำงาน | อัตราส่วนโดยมวล |
|--------------------------------------|------------------------------|
| สารผสม R1233zd(E)/ R1336mzz(Z) | 0.00/1.00* |
| | 0.25/0.75 |
| | 0.50/0.50 |
| | 0.75/0.25 |
| | 1.00/0.00** |
| สารผสม R1233zd(E)/ R1234ze(E) | 0.00/1.00*** |
| | 0.25/0.75 |
| | 0.50/0.50 |
| | 0.75/0.25 |
| | 1.00/0.00** |
| สารผสม R1336mzz(Z)/ R1234ze(E) | 0.00/1.00*** |
| | 0.25/0.75 |
| | 0.50/0.50 |
| | 0.75/0.25 |
| | 1.00/0.00* |
| R245fa บริสุทธิ์ | |
| หมายเหตุ | * คือ R1336mzz(Z) บริสุทธิ์ |
| | ** คือ R1233zd(E) บริสุทธิ์ |
| | *** คือ R1234ze(E) บริสุทธิ์ |

3.6.4 การศึกษาการทำงานของโรงไฟฟ้าวัฏจักรที่แตกต่างกันเมื่อใช้กับเตสลาเทอร์ไบน์

ในหัวข้อนี้ได้ศึกษาการทำงานของเตสลาเทอร์ไบน์ร่วมกับโรงไฟฟ้าวัฏจักรคาลินาแบบ KCS-11 นอกจากนี้ได้พิจารณากรณีที่น่าอุปกรณ์บางส่วน ได้แก่ เซพพารเตอร์และรีคูเปอร์เตอร์ ออกจากวัฏจักร (Modified KCS-11) เพื่อให้ระบบมีความซับซ้อนน้อยลง ทั้งนี้เนื่องจากจุดเด่นของเตสลาเทอร์ไบน์คือสามารถทำงานได้ดีที่ความดันไอต่ำ จึงไม่จำเป็นต้องใช้เซพพารเตอร์ แยกให้เฉพาะสารทำงานที่เป็นไออิมตัวเข้าเทอร์ไบน์เหมือนโรงไฟฟ้าวัฏจักรคาลินา นอกจากนี้ ยังได้เปรียบเทียบกับโรงไฟฟ้าวัฏจักรที่แอลซีได้ดีที่สุดจากบทที่ 5 และ 6 และได้ประเมินประสิทธิภาพในมุมมองของกำลังสุทธิ การวิเคราะห์เอ็กเซอร์ยี และความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์

โดยในการศึกษาในหัวข้อนี้ใช้เพียงการทำลายของเอกซ์เซอร์ยีในแต่ละอุปกรณ์ยังไม่เพียงพอในการประเมินความสามารถในการทำงาน เนื่องจาก ความแตกต่างของชนิดวัฏจักรอาจส่งผลกระทบต่อความร้อนที่วัฏจักรได้รับแตกต่างกันออกไป ดังนั้น ในหัวข้อนี้ได้ทำการประเมินประสิทธิภาพเอกซ์เซอร์ยีรวมด้วย (η_{ex}) โดยจากงานวิจัยของ Karimi and Mansouri (2018) ได้นิยาม η_{ex} ของแต่ละอุปกรณ์ดังต่อไปนี้

$$\eta_{ex,hx} = \frac{\dot{m}_{cold} (ex_{cold,out} - ex_{cold,in})}{\dot{m}_{hot} (ex_{hot,in} - ex_{hot,out})} \quad (3.71)$$

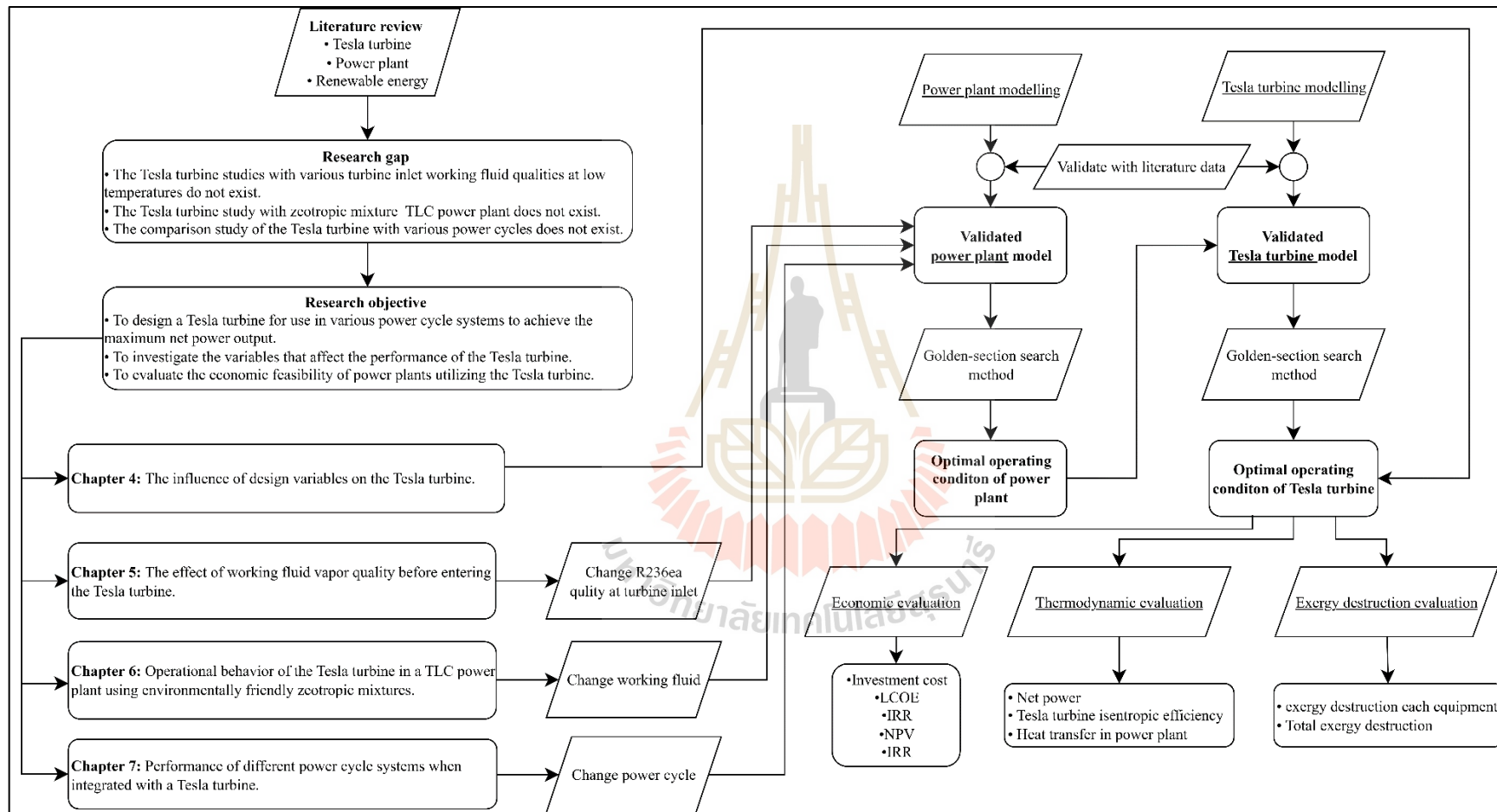
$$\eta_{ex,pump} = \frac{\dot{m}_{wf} (ex_{out} - ex_{in})}{\dot{W}_{pump}} \quad (3.72)$$

$$\eta_{ex,turbine} = \frac{\dot{W}_{turbine}}{\dot{m}_{wf} (ex_{out} - ex_{in})} \quad (3.73)$$

$$\eta_{ex,total} = \frac{\dot{W}_{turbine} - \dot{W}_{pump}}{\dot{m}_{hs} (ex_{hs,out} - ex_{hs,in})} \quad (3.74)$$

กระบวนการศึกษานี้ เริ่มจากการหาเงื่อนไขการทำงานที่เหมาะสมของโรงไฟฟ้าวัฏจักรคาลินาแบบ KCS-11 และของระบบโออาร์ซี โดยใช้ใช้สารทำงานเป็น แอมโมเนีย/น้ำ ที่อัตราส่วนมวล 0.9/0.1 โดยเป็นค่าที่ทำให้ได้กำลังสุทธิของโรงไฟฟ้าวัฏจักรคาลินาที่แหล่งความร้อน 120 °C สูงที่สุด [(Rodríguez et al., 20130); (Cao et al., 2017)] จากนั้นจึงดำเนินการวิเคราะห์เอกซ์เซอร์ยีและเศรษฐศาสตร์ในลักษณะเดียวกับหัวข้อ 3.6.2 และ 3.6.3 โดยผลการศึกษารูปไว้ในบทที่ 7

นอกจากนี้ เพื่อสรุปให้เห็นแนวทางภาพรวมในการศึกษาของวิทยานิพนธ์นี้ ดังนั้นผังลำดับการวิจัยแสดงดังรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 ผังลำดับการวิจัย

บทที่ 4

อิทธิพลของตัวแปรที่ใช้ในการออกแบบของเตสลาเทอร์ไบน์

ในหัวข้อนี้นำเสนอผลการศึกษามลกระทบของตัวแปรที่ใช้ในการออกแบบเตสลาเทอร์ไบน์ โดยใช้โรงไฟฟ้าวัฏจักรโออาร์ซีที่มีสารทำงานเป็น R236ea ซึ่งอยู่ในสถานะไออิ่มตัวก่อนเข้าสู่เทอร์ไบน์ และใช้แหล่งความร้อนที่อุณหภูมิ 120 °C การจำลองดำเนินการตามรายละเอียดในหัวข้อ 3.6.1 โดยผลกระทบของแต่ละตัวแปรจะนำเสนอและวิเคราะห์เป็นรายประเด็น ทั้งนี้เงื่อนไขการทำงานพื้นฐานของโรงไฟฟ้าวัฏจักรโออาร์ซีและเตสลาเทอร์ไบน์ที่ใช้ในการศึกษาอิทธิพลของตัวแปรต่าง ๆ แสดงดังตารางที่ 4.1

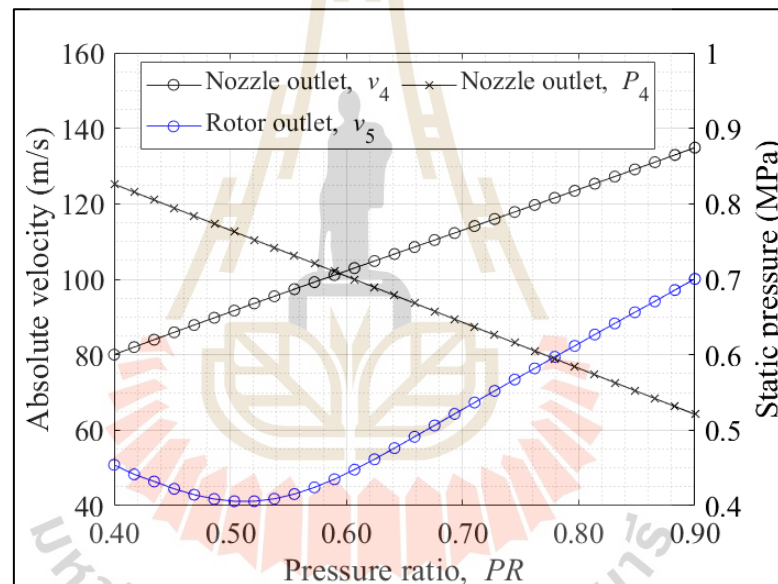
ตารางที่ 4.1 เงื่อนไขการทำงานพื้นฐานของโรงไฟฟ้าวัฏจักรโออาร์ซีและเตสลาเทอร์ไบน์ที่ใช้สำหรับศึกษาอิทธิพลของตัวแปรที่ใช้ในการออกแบบ

| ตัวแปร | ค่า | หน่วย |
|--------------------------|-----------------|-------|
| P_3 | 218 | MPa |
| P_5 | 40 | MPa |
| สารทำงาน | R236ea | - |
| อัตราการไหลของสารทำงาน | 1 | kg/s |
| X_3 | ไออิ่มตัว (1.0) | - |
| PR | *0.6 | - |
| ω | *5,000 | RPM |
| จำนวนแผ่นดิสก์ของโรเตอร์ | *50 | แผ่น |
| D_4 | *400 | mm |
| b | *1 | mm |

หมายเหตุ * ค่าพื้นฐานในการศึกษาอิทธิพลของตัวแปรออกแบบ

4.1 อัตราส่วนความดัน (PR)

ในการศึกษานี้ ได้วิเคราะห์อิทธิพลของอัตราส่วนความดัน (Pressure ratio: PR) ซึ่งเป็นตัวแปรที่สำคัญในขั้นตอนการลดความดันของสารทำงานผ่านนอซเซิล (Nozzle) โดยการลดความดันนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อลดความเร็วของสารทำงานก่อนเข้าสู่แผ่นดิสก์ในเทสลาเทอร์ไบน์ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการถ่ายโอนโมเมนตัม การศึกษานี้ได้ทำการเปลี่ยนค่าอัตราส่วนความดันตั้งแต่ 0.4 ถึง 0.9 เพื่อประเมินว่าการทำงานของเทสลาเทอร์ไบน์จะเปลี่ยนแปลงไปอย่างไรภายใต้เงื่อนไขที่แตกต่างกัน และคงที่ค่าพื้นฐานอื่น ๆ โดยรูปที่ 4.1 แสดงอิทธิพลของการเปลี่ยนแปลง PR ต่อความเร็วของสารทำงานที่ออกจากนอซเซิล (v_4) ความเร็วของสารทำงานที่ออกจากโรเตอร์ (v_5) และความดันของสารทำงานที่ออกจากนอซเซิลหรือก่อนเข้าโรเตอร์ (P_5)



รูปที่ 4.1 อิทธิพลของการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความดันต่อความเร็วของสารทำงานที่ออกจากนอซเซิล ความเร็วของสารทำงานที่ออกจากโรเตอร์ และความดันของสารทำงานที่ออกจากนอซเซิล

จากรูปที่ 4.1 แสดงให้เห็นว่า ความเร็วของสารทำงานที่ออกจากนอซเซิล (v_4) เพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนความดันที่เพิ่มขึ้น ขณะที่ความดันของสารทำงานลดลง อย่างไรก็ตาม พบพฤติกรรมที่น่าสนใจในช่วงอัตราส่วนความดันระหว่าง 0.4 ถึง 0.5 ซึ่งเป็นช่วงที่ความเร็วของสารทำงานหลังจากผ่านโรเตอร์ (v_5) กลับมีแนวโน้มลดลง และเพิ่มขึ้นอีกครั้งเมื่ออัตราส่วนความดันเกิน 0.5 ปรากฏการณ์นี้ แสดงให้เห็นว่า ในช่วงอัตราส่วนความดันช่วง 0.4–0.5 ความเร็วของสารทำงานยังอยู่

ในระดับที่โรเตอร์สามารถลดความเร็วได้ดี แต่เมื่ออัตราส่วนความดันสูงกว่า 0.5 ความเร็วของสารทำงานออกจากรอบของเซลล์เพิ่มขึ้นจนโรเตอร์ไม่สามารถถ่ายโอนโมเมนตัมได้อย่างเต็มที่ ส่งผลให้ความเร็วของสารทำงานหลังโรเตอร์กลับเพิ่มขึ้นอีกครั้ง โดยค่าความเร็วต่ำสุดหลังโรเตอร์อยู่ที่ 40 m/s ที่อัตราส่วนความดัน 0.5

นอกจากนี้ เมื่ออัตราส่วนความดันเพิ่มสูงขึ้นส่งผลให้ความดันที่ออกจากรอบของเซลล์มีค่าลดลง (P_5) ซึ่งอาจส่งผลให้เทสลาเทอร์ไบน์ดิ่งกำลังจากความดันของสารทำงานได้น้อยลง อย่างไรก็ตาม กำลังของเทสลาเทอร์ไบน์ขึ้นอยู่กับสองอิทธิพล ได้แก่ กำลังจลน์ (Kinetic power: KE) และกำลังจากความดัน (Pressure power: PE) โดยการเพิ่มของอัตราส่วนความดันส่งผลให้ความเร็วของสารทำงานออกจากรอบของเซลล์เพิ่มสูงขึ้น ในขณะเดียวกันก็ทำให้ความดันน้อยลง ดังนั้นเพื่อให้เทสลาเทอร์ไบน์ให้กำลังและประสิทธิภาพออกมาสูง ดังนั้นต้องหาค่าอัตราส่วนความดันที่ทำให้เกิดสมดุลระหว่างกำลังจลน์และกำลังจากความดันที่เทสลาเทอร์ไบน์ผลิตได้

โดยสามารถคำนวณกำลังจลน์ของสารทำงานได้จากสมการที่ 4.1 และกำลังจากความดันได้จากสมการที่ 4.2 ซึ่งทั้งสองสมการใช้ในการวิเคราะห์ศักยภาพของเทสลาเทอร์ไบน์ในการถ่ายโอนกำลังจากสารทำงานในแต่ละกรณี

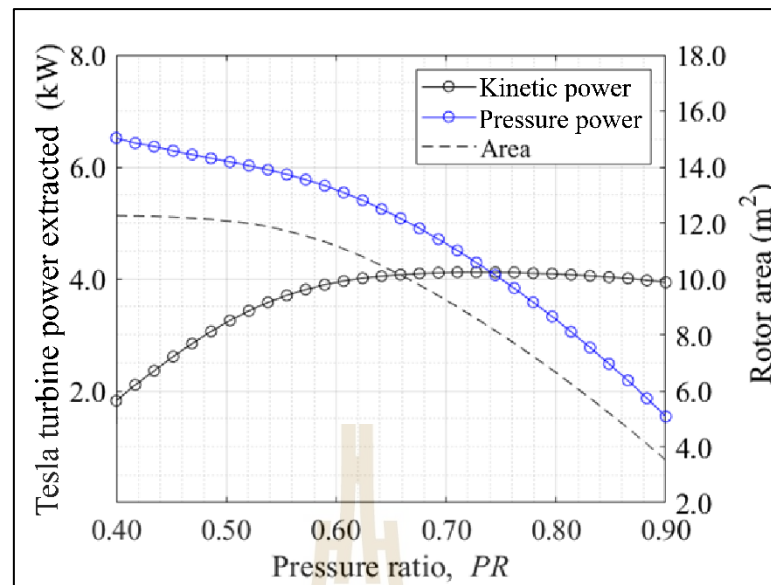
$$KE = 0.5 \dot{m}_{wf} (v_4^2 - v_5^2) \quad (4.1)$$

$$PE = \dot{m}_{wf} (h_4 - h_5) \quad (4.2)$$

นอกจากนี้ การลดลงของความดันของสารทำงานอันเนื่องมาจากการเพิ่มอัตราส่วนความดันยังส่งผลให้พื้นที่ผิวที่สารทำงานสัมผัสกับโรเตอร์ด้วยเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย ซึ่งเป็นพื้นที่สำหรับการแลกเปลี่ยนโมเมนตัม (Momentum transfer area: A_{rotor}) โดยสามารถคำนวณพื้นที่แลกเปลี่ยนโมเมนตัมภายในโรเตอร์ได้จากสมการที่ 4.3

$$A_{rotor} = 0.5 N_{disk} (D_4^2 - D_5^2) \quad (4.3)$$

โดยผลของกำลังจลน์ กำลังจากความดัน และพื้นที่แลกเปลี่ยนของโรเตอร์ของเทสลาเทอร์ไบน์ เมื่ออัตราส่วนความดันเปลี่ยนแปลงแสดงดังรูปที่ 4.2

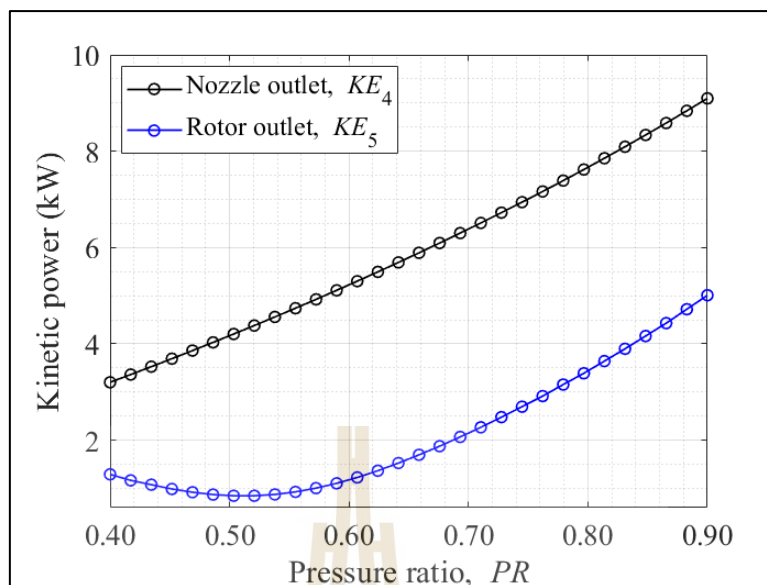


รูปที่ 4.2 กำลังจลน์ กำลังจากความดัน และพื้นที่ของโรเตอร์เมื่ออัตราส่วนความดันเปลี่ยนแปลงไป

จากรูปที่ 4.2 สามารถสังเกตเห็นได้ว่า เมื่ออัตราส่วนความดันเพิ่มขึ้นตั้งแต่ 0.4 ถึง 0.7 การดึงกำลังจลน์จากสารทำงานมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยมีค่ามากที่สุดที่อัตราส่วนความดันเท่ากับ 0.7 ก่อนจะลดลงเล็กน้อยเมื่ออัตราส่วนความดันเพิ่มขึ้นต่อไป

ทั้งนี้แนวโน้มดังกล่าวมีจุดสูงสุดที่ไม่สอดคล้องกับแนวโน้มในรูปที่ 4.1 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าอัตราส่วนความดันที่ทำให้สารทำงานลดความเร็วได้มากที่สุด คือที่อัตราส่วนความดัน 0.5 เนื่องจากกำลังจลน์ได้ดีจำเป็นต้องดูที่ ความแตกต่างของกำลังจลน์ของสารทำงานระหว่างทางออกของนอซเซิลและทางออกของโรเตอร์ ($0.5(v_4^2 - v_5^2)$) ว่ามีความแตกต่างมากที่สุด จึงเป็นตัวบอกว่าดึงพลังงานได้ดี

ดังนั้น เพื่อให้เห็นภาพรวมของกระบวนการถ่ายเทกำลังจลน์จากสารทำงานภายในโรเตอร์ สามารถพิจารณาได้จากค่ากำลังจลน์ของสารทำงานก่อนและหลังผ่านโรเตอร์ ซึ่งแสดงไว้ในรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 กำลังจลน์ที่ออกจากนอซเซิลและออกจากโรเตอร์เมื่ออัตราส่วนความดันเปลี่ยนแปลงไป

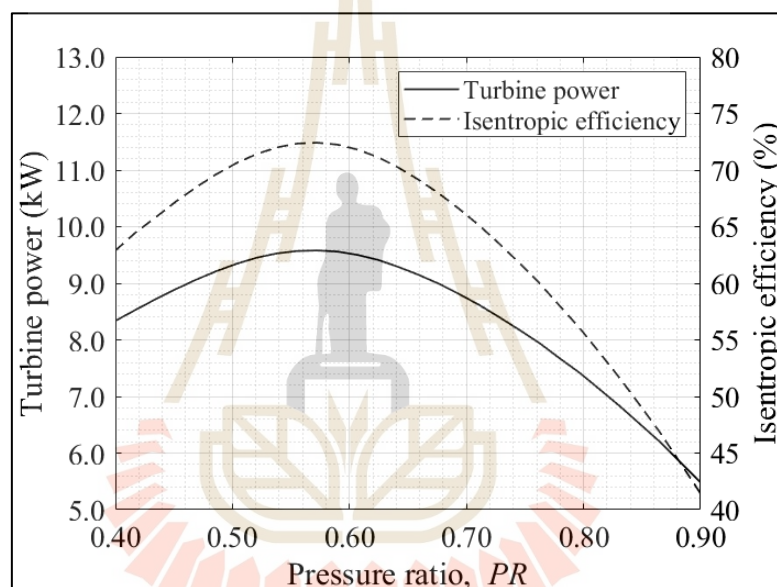
จากรูปที่ 4.3 แสดงให้เห็นแนวโน้มของกำลังที่ถูกดึงออกจากโรเตอร์ในรูปของกำลังจลน์ พบว่าอัตราส่วนความดันที่ทำให้โรเตอร์สามารถดึงกำลังจลน์ได้มากที่สุดคือที่อัตราส่วนความดันเท่ากับ 0.7 ซึ่งสอดคล้องกับผลลัพธ์ในรูปที่ 4.1 ที่แสดงให้เห็นว่าความเร็วของสารทำงานหลังผ่านโรเตอร์มีแนวโน้มลดลงน้อยลงเมื่ออัตราส่วนความดันเพิ่มขึ้น และส่งผลให้การเปลี่ยนแปลงกำลังจลน์ในช่วงอัตราส่วนความดัน 0.7 มีค่ามากที่สุด

ทั้งนี้สังเกตได้ว่า เมื่ออัตราส่วนความดันเพิ่มมากขึ้นส่งผลให้ความเร็วของสารทำงานและกำลังจลน์เพิ่มสูงขึ้นดังรูปที่ 4.2 และ 4.3 ควรจะส่งผลให้ดึงกำลังจลน์ได้มากขึ้นตามไปด้วย แต่เพิ่มถึงค่า ๆ หนึ่งแล้วมีแนวโน้มลดลง โดยเหตุผลดังกล่าวเกิดจากกระบวนการออกแบบของขนาดโรเตอร์ของเตสลาเทอร์โบสำหรับโรงไฟฟ้าวัฏจักรโออาร์ซี ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

โดยในกระบวนการออกแบบเตสลาเทอร์โบ ได้หาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของโรเตอร์ (D_5) เพื่อให้ความดันที่คอนเดนเซอร์มีค่าเท่ากับเงื่อนไขที่ได้ออกแบบไว้สำหรับโรงไฟฟ้า ซึ่งมีเป้าหมายเพื่อให้ได้กำลังสุทธิสูงสุด (รายละเอียดของการจำลองโรเตอร์ของเตสลาเทอร์โบสามารถดูได้ในหัวข้อ 3.2) โดยเมื่อค่าอัตราส่วนความดันเพิ่มขึ้น จะส่งผลให้ความดันที่เข้าสู่โรเตอร์ลดลง ตัวอย่างเช่น เมื่ออัตราส่วนความดันเปลี่ยนจาก 0.4 เป็น 0.9 ความดันจะลดลงจาก 0.82 MPa เหลือ 0.52 MPa ดังแสดงในรูปที่ 4.1 ซึ่งทำให้สารทำงานไม่จำเป็นต้องใช้พื้นที่ภายในโรเตอร์มากเพื่อลดความดันให้เท่ากับค่าที่ออกแบบไว้ส่งผลให้พื้นที่ภายในโรเตอร์ลดลงไปด้วย อาทิ พบว่าพื้นที่ลดลงจาก 12 m² เหลือเพียง 3.8 m² เมื่ออัตราส่วนความดันเพิ่มจาก 0.4 เป็น 0.9 เนื่องจากเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของโรเตอร์มีค่ามากขึ้น ทำให้พื้นที่การแลกเปลี่ยนโมเมนตัมลดลงตามไปด้วย ดัง

แสดงในรูปที่ 4.2 จากเหตุผลดังกล่าว แม้ว่าความเร็วของสารทำงานที่ออกจากนอชเชิลจะเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนความดันเพิ่มขึ้น แต่ไม่ได้หมายความว่ากำลังในรูปของกำลังจลน์จะเพิ่มขึ้นตามเสมอไป

เทสลาเทอร์ไบน์ยังดึงกำลังในรูปของความดันอีกด้วยดังนั้นจากผลในรูปที่ 4.2 พบว่า เมื่ออัตราส่วนความดันมีค่าเพิ่มสูงขึ้นทำให้ความดันลดลงและทำให้โรงเตอร์ดึงกำลังในรูปของความดันลดลงตามไปด้วย ดังนั้น ค่าอัตราส่วนความดันที่เหมาะสมเพื่อให้เทสลาเทอร์ไบน์ให้กำลังออกมาสูงที่สุดจึงต้องทำให้เกิดสมดุลทั้งการดึงกำลังในรูปกำลังจลน์และกำลังจากความดัน โดยสามารถแสดงออกมาในรูปของกำลังจากเทสลาเทอร์ไบน์และประสิทธิภาพไอเซนโทรปิกได้ดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 กำลังของเทสลาเทอร์ไบน์และประสิทธิภาพไอเซนโทรปิกเมื่ออัตราส่วนความดันเปลี่ยนแปลงไป

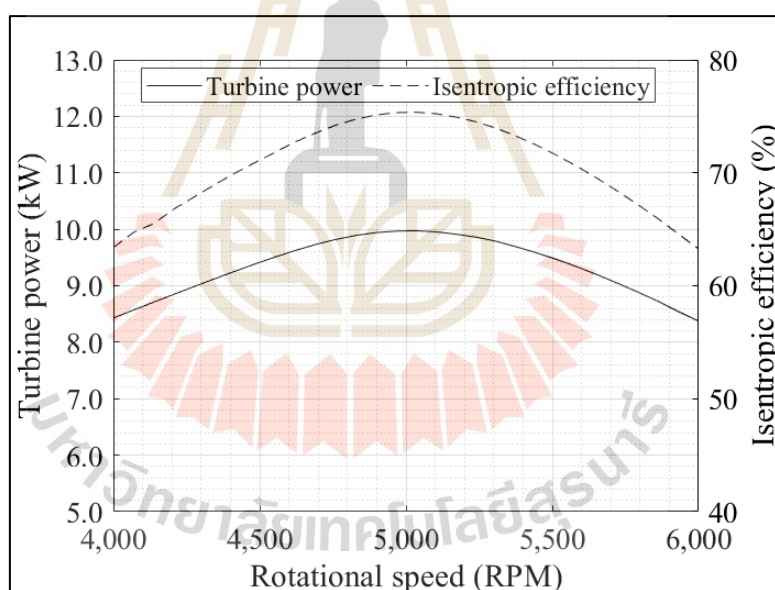
จากรูปที่ 4.4 พบว่าอัตราส่วนความดันที่เหมาะสมในการทำงานของเทสลาเทอร์ไบน์คือ 0.57 ซึ่งเป็นจุดที่โรงเตอร์สามารถดึงกำลังจากสารทำงานได้มากที่สุด ทั้งในรูปของกำลังจลน์และกำลังจากความดัน ส่งผลให้ได้กำลังจากเทอร์ไบน์สูงสุดเท่ากับ 11.5 kW และมีประสิทธิภาพไอเซนโทรปิกอยู่ที่ 73%

อย่างไรก็ตาม ค่าของอัตราส่วนความดันที่เหมาะสมนี้ขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย ได้แก่ เงื่อนไขการทำงานของระบบ ชนิดของสารทำงาน และสถานะของสารทำงานก่อนเข้าสู่เทอร์ไบน์ ดังนั้น

การศึกษาผลในบทที่ 5 6 และ 7 ซึ่งเกี่ยวข้องกับการออกแบบเทสลาเทอร์ไบน์ภายใต้เงื่อนไขการทำงานของโรงไฟฟ้ารูปแบบต่าง ๆ ได้ถูกใช้เพื่อหาค่าอัตราส่วนความดันที่เหมาะสมที่สุด ซึ่งสามารถทำให้เทสลาเทอร์ไบน์ผลิตกำลังได้สูงสุดภายใต้แต่ละเงื่อนไขที่กำหนด

4.2 ความเร็วรอบของการทำงาน (ω)

ในหัวข้อนี้เป็นการศึกษาอิทธิพลของความเร็วยรอบของเทสลาเทอร์ไบน์ ซึ่งจากการทบทวนปริทัศน์วรรณกรรม [Song et al., 2017; Talluri et al., 2018] พบว่า ความเร็วยรอบเป็นอีกหนึ่งตัวแปรสำคัญที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของเทสลาเทอร์ไบน์ โดยมีค่าที่เหมาะสมซึ่งสามารถทำให้เทอร์ไบน์ผลิตกำลังได้สูงที่สุด ดังนั้นจะได้เปลี่ยนความเร็วยรอบของโรเตอร์ในเทสลาเทอร์ไบน์จาก 4,000 RPM ถึง 6,000 RPM และคงที่ค่าพื้นฐานอื่น ๆ โดยผลของกำลังและประสิทธิภาพไอเซนโทรปิกของเทสลาเทอร์ไบน์เมื่อความเร็วยรอบของสารทำงานเปลี่ยนแปลงไป แสดงดังรูปที่ 4.5



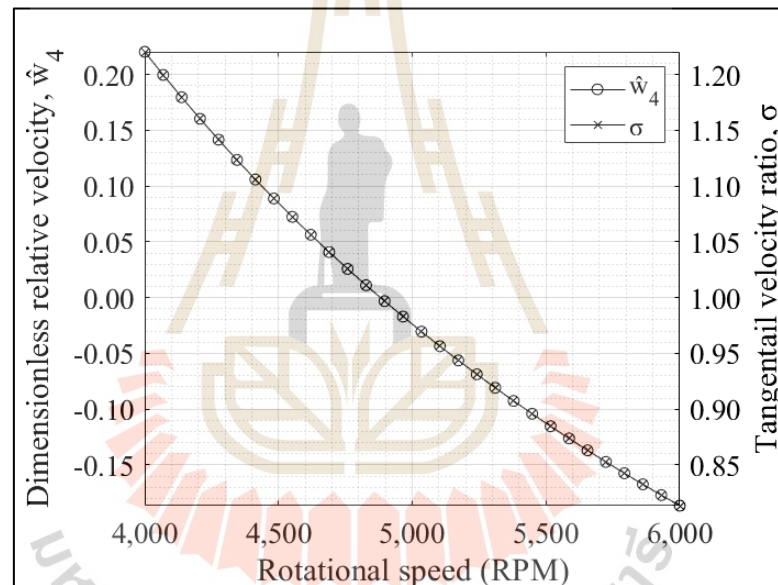
รูปที่ 4.5 กำลังและประสิทธิภาพไอเซนโทรปิกของเทสลาเทอร์ไบน์เมื่อความเร็วยรอบของเปลี่ยนแปลง

จากรูปที่ 4.5 แสดงให้เห็นว่าที่ความเร็วยรอบ 5,000 RPM เป็นจุดที่ทำให้ได้กำลังและประสิทธิภาพสูงที่สุด โดยตัวแปรที่ใช้ในการประเมินความเร็วยรอบที่ใช้ได้แก่ ตัวแปรไรมิติของสัดส่วนความเร็วที่ตำแหน่งขอบของโรเตอร์ (Dimensionless velocity ratio: \hat{W}_4) (Song et al. 2017) ดังสมการที่ 4.4 และ อัตราส่วนของความเร็วในแนวสัมผัส (Tangential velocity ratio: σ) (Talluri et al., 2018) ดังสมการที่ 4.5

$$\hat{W}_4 = \frac{(v_{\theta 4} - U_{\theta 4})}{U_{\theta 4}} = \frac{(v_{\theta 4} - \omega r_4)}{\omega r_4} \quad (4.4)$$

$$\sigma = v_{\theta 4} / U_{\theta 4} = v_{\theta 4} / \omega r_4 \quad (4.5)$$

ทั้งสองอัตราส่วนนี้เป็นตัวแปรที่ใช้แสดงระดับความใกล้เคียงระหว่างความเร็วของโรเตอร์ที่ตำแหน่งทางเข้า ($U_{\theta 4}$) ซึ่งขึ้นอยู่กับความเร็วรอบ (ω) และรัศมีของโรเตอร์ภายนอก (r_4) กับความเร็วของสารทำงานในแนวสัมผัส ($v_{\theta 4}$) โดยอัตราส่วน \hat{W}_4 จะมีค่าใกล้ศูนย์เมื่อความเร็วของโรเตอร์และความเร็วของสารทำงานมีค่าที่ใกล้เคียงกัน ในขณะที่ σ จะมีค่าใกล้ 1 ภายใต้ง่อนไขเดียวกัน โดยผลของ \hat{W}_4 และ $v_{\theta 4}$ เมื่ออัตราการไหลของสารทำงานเปลี่ยนแปลงไปแสดงดังรูปที่ 4.6

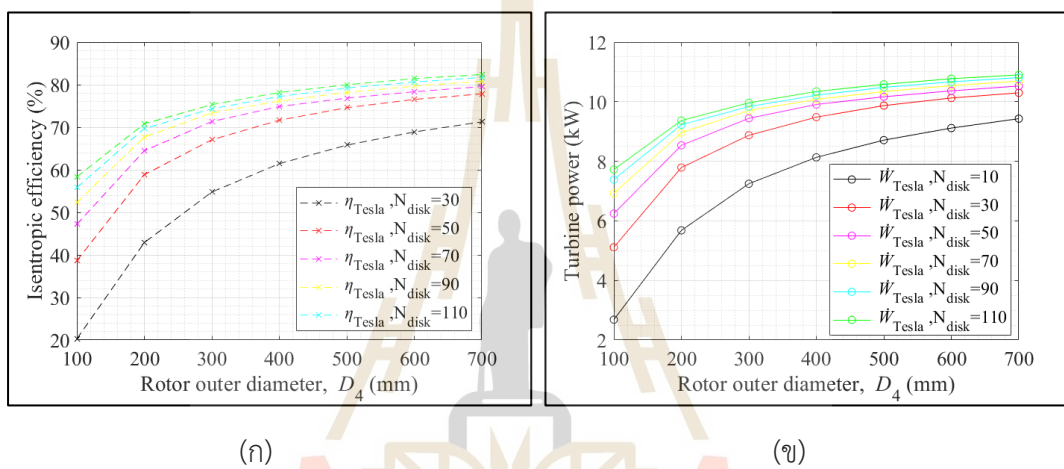


รูปที่ 4.6 Dimensionless velocity ratio และ Tangential velocity ratio ของเทสลาเทอร์ไบน์ เมื่อความเร็วรอบของเปลี่ยนแปลง

จากรูปที่ 4.6 พบว่า ที่ 5,000 เป็นจุดที่มีค่า \hat{W}_4 และ $v_{\theta 4}$ เท่ากับ -0.03 และ 0.97 ตามลำดับ กล่าวคือความเร็วของโรเตอร์ช้ากว่าสารทำงานเล็กน้อย ส่งผลทำให้ได้ค่ากำลังและประสิทธิภาพไอเซนโทรปิกสูง ดังนั้นในการศึกษาผลในบทที่ 5 6 และ 7 ได้ทำการหาความเร็วรอบสำหรับเทสลาเทอร์ไบน์ในแต่ละเงื่อนไขเพื่อให้ได้กำลังจากเทอร์ไบน์สูงที่สุด

4.3 เส้นผ่านศูนย์กลางของภายนอกของโรเตอร์ (D_4) และจำนวนแผ่นของโรเตอร์ (N_{disk})

ในหัวข้อนี้เป็นผลการศึกษาอิทธิพลของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของโรเตอร์ (D_4) และจำนวนแผ่นของโรเตอร์ (N_{disk}) ส่งผลอย่างไรกับกำลังและประสิทธิภาพไอเซนโทรปิกของเทสลาเทอร์ไบน์ โดยคงที่ค่าพื้นฐานอื่น ๆ อย่งไรก็ตาม เพื่อให้ได้กำลังสูงสุดของโรเตอร์แต่ละขนาดดังแสดงในหัวข้อนี้ได้หาอัตราส่วนความดันและความเร็วรอบที่เหมาะสมของโรเตอร์แต่ละขนาดดังในหัวข้อที่ 4.1.1 และ 4.1.2 เพื่อเปรียบเทียบในสภาวะที่ได้กำลังทางเทอร์ไบน์สูงที่สุด โดยผลเป็นดังรูปที่ 4.7



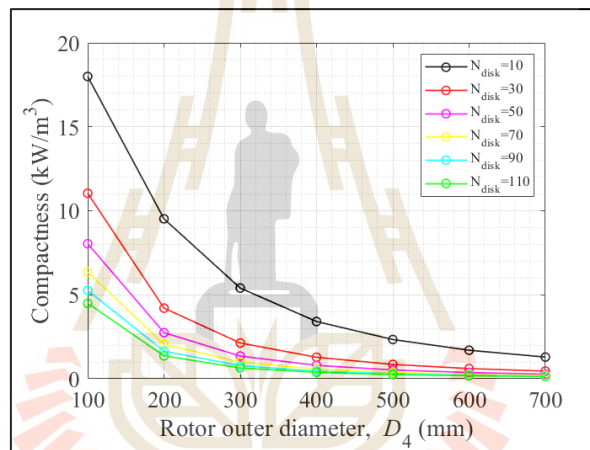
รูปที่ 4.7 ผลกระทบเมื่อเส้นผ่านศูนย์กลางของภายนอกของโรเตอร์และจำนวนดิสก์เปลี่ยนแปลงไป: (ก) กำลังของเทสลาเทอร์ไบน์; (ข) ประสิทธิภาพไอเซนโทรปิกของเทสลาเทอร์ไบน์

จากรูปที่ 4.7 แสดงให้เห็นว่าเมื่อเส้นผ่านศูนย์กลางของภายนอกโรเตอร์และจำนวนดิสก์เพิ่มมากขึ้นทำให้กำลังและประสิทธิภาพของเทสลาเทอร์ไบน์เพิ่มสูงขึ้น เนื่องจาก เมื่อผ่านศูนย์กลางของภายนอกโรเตอร์เพิ่มสูงขึ้นทำให้มีพื้นที่ในการแลกเปลี่ยนโมเมนตัมมากขึ้น จึงส่งผลให้ได้กำลังมากขึ้น นอกจากนี้ เมื่อจำนวนแผ่นดิสก์เพิ่มสูงขึ้นส่งผลให้สารทำงานที่ไหลต่อช่องน้อยลง ส่งผลให้สารทำงานค่อย ๆ แลกเปลี่ยนโมเมนตัมส่งผลให้ได้กำลังและประสิทธิภาพไอเซนโทรปิกสูงเช่นเดียวกัน

อย่างไรก็ตาม เมื่อการขยายขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกและจำนวนแผ่นดิสก์ของโรเตอร์เพิ่มขึ้นจนถึงจุด ๆ หนึ่ง การเพิ่มขึ้นของกำลังและประสิทธิภาพไอเซนโทรปิกจะเริ่มมีอัตราการเพิ่มลดลง ปรากฏการณ์นี้เกิดจากการที่สารทำงานเข้าสู่เทสลาเทอร์ไบน์ได้ใช้กำลังจนเกือบเต็มศักยภาพแล้ว จึงไม่สามารถดึงกำลังเพิ่มเติมออกมาได้อีก

นอกจากนี้ ในการศึกษาของ Dumont et al. (2019) ได้เสนอใช้ “ความกะทัดรัด” (Compactness) เป็นตัวชี้วัดประสิทธิภาพเฉพาะเชิงปริมาตรของเทอร์โบ โดยนิยามว่าเป็น อัตราส่วนระหว่างกำลังสุทธิและปริมาตรของเครื่องจักร เมื่อค่าความกะทัดรัดสูงขึ้น จะสะท้อนว่าเทอร์โบสามารถผลิตกำลังได้มากขึ้นต่อหน่วยปริมาตรที่เล็กลง วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงนำ compactness มาใช้เป็นหนึ่งในตัวแปรประกอบการพิจารณาเลือกขนาดโรเตอร์ โดยคำนวณตามสมการที่ 4.6 และผลการจำลองเป็นดังรูปที่ 4.8

$$Compactness = \frac{4\dot{W}_{Tesla}}{\pi D_4^2 (bN_{disk} + \delta_{disk} (N_{disk} - 1))} \quad (4.6)$$



รูปที่ 4.8 ความกะทัดรัดเมื่อเส้นผ่านศูนย์กลางของภายนอกของโรเตอร์และจำนวนดิสก์เปลี่ยนแปลงไป

จากผลการวิเคราะห์ พบว่าการเพิ่มขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของโรเตอร์และจำนวนดิสก์อย่างต่อเนื่อง แม้จะช่วยเพิ่มกำลังของเทอร์โบ แต่ไม่สามารถเพิ่มกำลังของเทอร์โบต่อปริมาตรของโรเตอร์ของเทสลาเทอร์โบ ส่งผลให้ค่าวัดความกะทัดรัด (Compactness) ลดลงตามไปด้วย

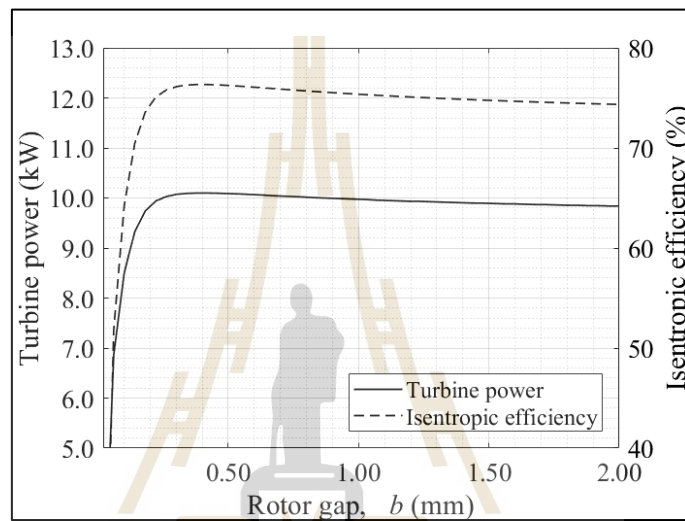
ดังนั้น วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงกำหนดขนาดโรเตอร์ที่เหมาะสมไว้ที่

- 1) เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของโรเตอร์: 400 mm
- 2) จำนวนแผ่นดิสก์: 50 แผ่น

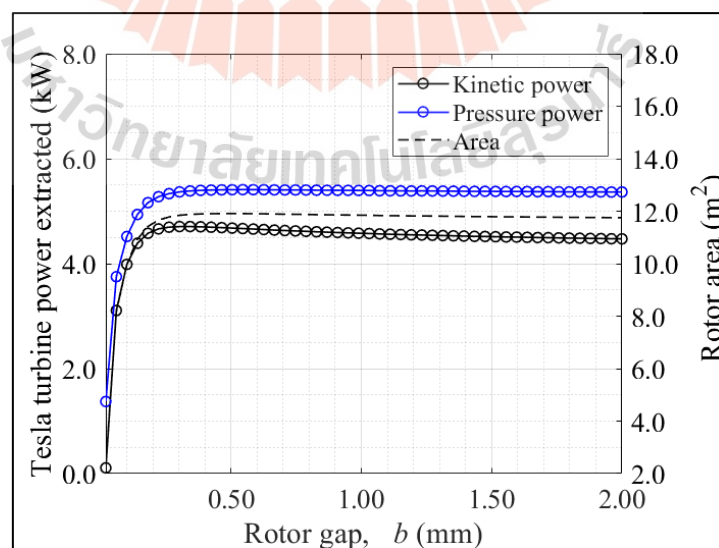
เนื่องจากเมื่อขยายขนาดเหนือกว่านี้แล้ว พบว่าการเพิ่มกำลังขับและประสิทธิภาพเชิงไอโซนโทรปิกมีอัตราการเพิ่มลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ขณะที่ความกะทัดรัดไม่เปลี่ยนแปลง จึงสรุปได้ว่าขนาดดังกล่าวเป็นจุดสมดุลที่เหมาะสมสำหรับการออกแบบโรเตอร์ของเทสลาเทอร์โบในบทที่ 5 6 และ 7

4.4 ระยะห่างระหว่างแผ่นดิสก์ของโรเตอร์ (b)

ในหัวข้อนี้เป็นการศึกษาอิทธิพลของระยะห่างระหว่างแผ่นดิสก์ภายนอกของโรเตอร์ (b) โดยต่อกำลังและประสิทธิภาพของเทสลาเทอร์ไบน์ โดยจากการทำปรีทัศน์วรรณกรรม พบว่าค่า b เป็นอีกค่าถ้าเลือกให้เหมาะสมจะทำให้ได้กำลังและประสิทธิภาพไอเซนโทรปิกออกมาสูง (Manfrida et al., 2019) โดยในหัวข้อนี้กำหนดให้คงที่ค่าพื้นฐานอื่น ๆ โดยจะเปลี่ยนค่า b ในช่วง 0.1 ถึง 2 mm เพื่อศึกษาอิทธิพลดังกล่าวโดยผลเป็นดังต่อไปนี้



รูปที่ 4.9 กำลังและประสิทธิภาพไอเซนโทรปิกของเทสลาเทอร์ไบน์เมื่อระยะห่างระหว่างแผ่นดิสก์ของโรเตอร์เปลี่ยนแปลงไป



รูปที่ 4.10 กำลังจลน์ กำลังจากความดัน และพื้นที่ของโรเตอร์เมื่อระยะห่างระหว่างแผ่นดิสก์ของโรเตอร์เปลี่ยนแปลงไป

จากรูปที่ 4.9 พบว่า เมื่อระยะห่างระหว่างแผ่นดิสก์ของโรเตอร์ลดลงต่ำกว่า 0.4 mm ค่ากำลังขับและประสิทธิภาพไอโซนโทรปิกจะเพิ่มขึ้นจนถึงจุดสูงสุดที่ระยะห่าง 0.4 mm โดยให้กำลังขับสูงสุดเท่ากับ 10.09 kW และประสิทธิภาพไอโซนโทรปิก 76.33% หลังจากนั้น เมื่อระยะห่างแผ่นดิสก์มากกว่า 0.4 mm ค่ากำลังขับและประสิทธิภาพจะลดลงเล็กน้อย พฤติกรรมดังกล่าวสามารถอธิบายได้จากความสัมพันธ์ระหว่างการดึงกำลังจลน์ การดึงกำลังจากความดัน ของสารทำงานภายในโรเตอร์ และพื้นที่ภายในโรเตอร์ ซึ่งแสดงไว้ในรูปที่ 4.10

จากรูปที่ 4.10 พบว่า กำลังที่ถูกลำเลียงภายในโรเตอร์ทั้งในรูปของกำลังจลน์และกำลังจากความดันจะเพิ่มขึ้นเมื่อระยะห่างระหว่างแผ่นดิสก์ลดลงจนถึงค่า 0.4 mm ซึ่งส่งผลให้ได้กำลังขับและประสิทธิภาพไอโซนโทรปิกสูงสุดตามที่ปรากฏในรูปที่ 4.9

โดยที่ระยะห่างระหว่างแผ่นดิสก์ยังมีค่าน้อยส่งผลให้สามารถลดความดันของสารทำงานได้มากส่งผลให้ไม่จำเป็นต้องให้สารทำงานอยู่ภายในโรเตอร์มากนักความดันก็ถึงค่าที่ได้ออกแบบไว้ โดยปรากฏการดังกล่าวสามารถพิจารณาได้จาก พื้นที่ของโรเตอร์ ซึ่งค่าของพื้นที่โรเตอร์มีค่าลดลงเมื่อระยะห่างระหว่างแผ่นดิสก์ลดลง ซึ่งส่งผลกระทบต่อกระบวนการดึงกำลังในรูปกำลังจลน์ทำให้พื้นที่ในการลดความเร็วของสารทำงานลดลงตามไปด้วยทำให้การดึงกำลังในรูปของกำลังจลน์ลดลง

นอกจากนี้ การดึงกำลังในรูปของกำลังจากความดันก็ลดลงเช่นเดียวกันเมื่อระยะห่างระหว่างแผ่นดิสก์เล็กลง ถึงแม้ว่าความดันทางเข้าและทางออกของโรเตอร์จะถูกกำหนดให้เท่ากัน (อัตราส่วนความดันคงที่) การลดลงของพื้นที่แลกเปลี่ยนโมเมนตัมอย่างรวดเร็วในพื้นที่น้อยทำให้เกิดเอนโทรปีจำเพาะเกิดขึ้นในกระบวนการสูงตามไปด้วย (Entropy generation) ส่งผลให้ประสิทธิภาพไอโซนโทรปิกลดลงตาม ดังแสดงในรูปที่ 4.9

ถึงแม้ว่า ในงานจำลองจะพบว่าระยะห่างระหว่างแผ่นดิสก์ 0.4 mm ให้กำลังสุทธิและประสิทธิภาพไอโซนโทรปิกสูงสุด แต่ค่าดังกล่าวอาจไม่เหมาะสมในการผลิตจริง เนื่องจากระยะห่างที่แคบมากจะทำให้กระบวนการผลิตโรเตอร์ซับซ้อน งานวิจัยในวรรณกรรมก็รายงานผลที่แตกต่างกัน เช่น Manfrida et al. (2019) พบว่าจุดสมดุลอยู่ที่ระยะห่าง 0.7 mm เพื่อความเป็นไปในการนำผลการออกแบบไปผลิตจริง งานวิจัยนี้จึงเลือกใช้ระยะห่างระหว่างแผ่นดิสก์ที่ 1 mm ซึ่งค่าเท่ากับ 1 mm ได้เคยถูกสร้างออกมาเป็นชุดทดสอบจริงแล้วจากงานวิจัยของ Talluri et al. (2020) ดังนั้นค่าระยะห่างระหว่างแผ่นดิสก์เท่ากับ 1 mm เป็นค่าสำหรับการออกแบบในบทที่ 5 6 และ 7

โดยจากผลในบทที่ 4 เป็นเพียงการจำลองเพื่อศึกษาอิทธิพลของตัวแปรที่ใช้ในการออกแบบ เทสลาเทอร์ไบน์เท่านั้น ทั้งนี้ผลของขนาดและสภาวะการทำงานที่เหมาะสมของเทสลาเทอร์ไบน์ เช่น อัตราส่วนความดันและความเร็วรอบโรเตอร์ จะขึ้นอยู่กับประเภทของโรงไฟฟ้าวัฏจักรและสารทำงาน อย่างไรก็ตาม สำหรับค่าเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของโรเตอร์และจำนวนแผ่นดิสก์ของโรเตอร์ได้ถูกกำหนดให้คงที่ โดยมีค่าเท่ากับ 400 mm และ 50 แผ่น ตามลำดับ

บทที่ 5

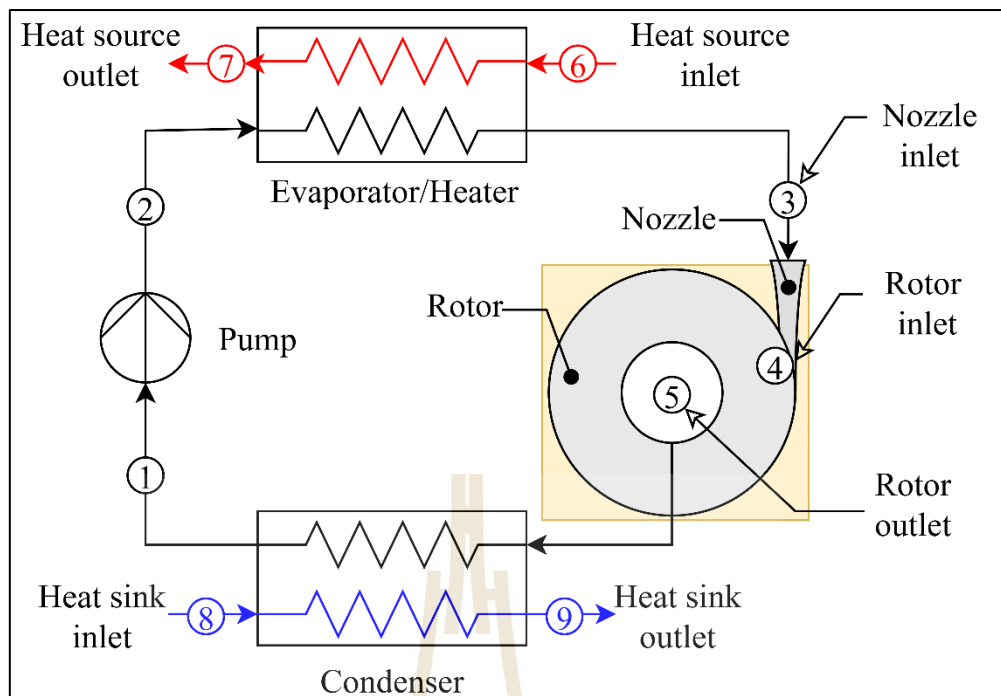
อิทธิพลของความเป็นไอของสารทำงานที่มีผลต่อสมรรถนะของโรงไฟฟ้า และเตสลาเทอร์ไบน์

ในหัวข้อนี้ได้นำเสนอผลการศึกษางานของเตสลาเทอร์ไบน์เมื่อเปลี่ยนค่าความเป็นไอ (Steam quality: x_3) ของสารทำงาน R236ea ก่อนเข้าสู่เทอร์ไบน์ ตั้งแต่ $x_3 = 0$ (ของเหลวอิ่มตัว) จนถึง $x_3 = 1$ (ไออิ่มตัวหรือโรงไฟฟ้าวัฏจักรโออาร์ซี) โดยแบ่งออกเป็น 5 ค่าได้แก่ x_3 เท่ากับ 0.00 0.25 0.50 0.75 และ 1.00 โดยทำการประเมินกำลังสุทธิของโรงไฟฟ้า วิเคราะห์เอกเซอร์ยี และ ประเมินความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ (LCOE NPV d-PbP และ IRR) เพื่อให้เห็นถึงผลกระทบของ ความเป็นไอของสารทำงานก่อนเข้าเทอร์ไบน์ที่เปลี่ยนไปต่อการทำงานของเตสลาเทอร์ไบน์และ การทำงานของโรงไฟฟ้าวัฏจักรโออาร์ซี โดยในการศึกษานี้แบ่งผลการศึกษาดังกล่าวออกเป็น 3 ส่วนดังนี้

5.1 การวิเคราะห์เงื่อนไขการทำงานของโรงไฟฟ้าที่ใช้จำลองเตสลาเทอร์ไบน์

ในหัวข้อนี้เป็นการศึกษางานของเตสลาเทอร์ไบน์โดยได้พิจารณาที่กำลังสุทธิของ โรงไฟฟ้าเป็นตัวแปรในการตัดสินใจ โดยการศึกษาเริ่มจากจำลองโรงไฟฟ้าวัฏจักรโออาร์ซีในหัวข้อที่ 3.1 เพื่อให้ได้เงื่อนไขการทำงานของโรงไฟฟ้าที่ให้ค่า ΔT_{pp} ทั้งคอนเดนเซอร์และอีวาโปเรเตอร์/ ฮีตเตอร์เท่ากับ $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ ที่ความเป็นไอของสารทำงานแต่ละค่า โดยเงื่อนไขการทำงานได้แก่ ความดันที่ คอนเดนเซอร์ ความดันที่อีวาโปเรเตอร์/ฮีตเตอร์และอัตราการไหลเชิงมวลของสารทำงาน โดยเงื่อนไข ดังกล่าวได้ถูกใช้ในการออกแบบเตสลาเทอร์ไบน์เพื่อหาขนาดและการทำงานที่เหมาะสมดังหัวข้อ 3.3 ทั้งนี้ ผลของเงื่อนไขการทำงานของโรงไฟฟ้าวัฏจักรโออาร์ซีแสดงในตารางที่ 5.1 และผังของอุปกรณ์ ของโรงไฟฟ้าแสดงดังรูปที่ 5.1

โดยในกรณีที่ความเป็นไอของสารทำงานก่อนเข้าเทอร์ไบน์ ($x_3=0$) สารทำงานภายใน อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่รับความร้อนจากสารทำงานไม่เกิดการเปลี่ยนสถานะของสารทำงาน เพียงแต่สารทำงานนั้นอุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น ดังนั้นจะเรียกอุปกรณ์ชนิดนี้ว่าฮีตเตอร์ (heater) และใน กรณีที่ความเป็นไอที่สูงขึ้น ($x_3 > 0$) อุปกรณ์ดังกล่าวใช้คำเรียกว่าอีวาโปเรเตอร์/ฮีตเตอร์ เพื่อให้ สอดคล้องกับหน้าที่ของอุปกรณ์นั้น ๆ



รูปที่ 5.1 ผังอุปกรณ์ของโรงไฟฟ้าโออาร์ซีที่ใช้ในการศึกษาอิทธิพลของความเป็นไอของสารทำงาน ก่อนเข้าเตสลาเทอร์ไบน์

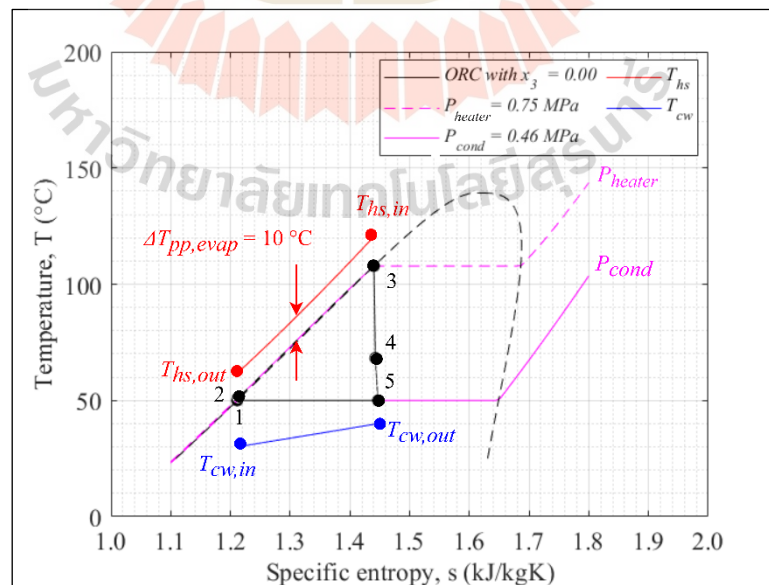
ตารางที่ 5.1 ผลของเงื่อนไขการทำงานของโรงไฟฟ้าที่ทำให้ได้กำลังสุทธิสูงสุดที่ความเป็นไอของสาร R236ea ก่อนเข้าเตสลาเทอร์ไบน์เปลี่ยนแปลงไป

| ตัวแปร | ความเป็นไอของสารทำงานก่อนเข้าเทอร์ไบน์, x_3 | | | | | หน่วย |
|------------------|---|--------|--------|--------|--------|----------------|
| | 0.00 | 0.25 | 0.50 | 0.75 | 1.00 | |
| P_2 | 1.86 | 1.28 | 1.09 | 1.06 | 1.07 | MPa |
| P_1 | 0.44 | 0.46 | 0.46 | 0.46 | 0.46 | MPa |
| \dot{m}_{wf} | 3.06 | 2.94 | 1.94 | 1.33 | 1.00 | kg/s |
| \dot{Q}_{in} | 245.92 | 243.55 | 201.67 | 176.56 | 163.40 | kW |
| \dot{Q}_{out} | 226.09 | 225.22 | 186.83 | 163.06 | 150.16 | kW |
| \dot{W}_{pump} | 3.98 | 2.25 | 1.14 | 0.76 | 0.58 | kW |
| $A_{hx, evap}$ | 34.59 | 30.04 | 17.54 | 13.87 | 12.42 | m ² |
| $A_{hx, cond}$ | 22.41 | 22.32 | 18.52 | 16.16 | 15.98 | m ² |

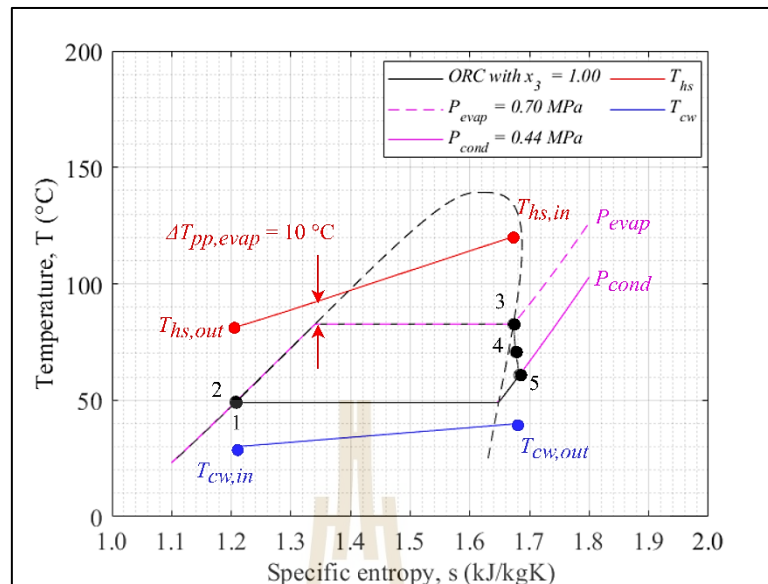
โดยเงื่อนไขการทำงานของโรงไฟฟ้าวัฏจักรโออาร์ซีเมื่อความเป็นไอเปลี่ยนแปลงไปดังตารางที่ 5.1 พบแนวโน้มที่น่าสนใจเป็นดังนี้

1) ความดันที่อีวาโปเรเตอร์/ฮีตเตอร์ (P_2): เมื่อความเป็นไอของสารทำงานเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้ความดันที่อีวาโปเรเตอร์/ฮีตเตอร์มีค่าลดลง ดังแสดงในผังอุณหภูมิจำเพาะของดังรูปที่ 5.1 และ 5.2 ซึ่งเป็นสารทำงาน R236ea ที่ความเป็นไอของสารทำงานเท่ากับ 0 และ 1 ตามลำดับ โดย P_2 ของโรงไฟฟ้าทั้งสองเป็นค่าที่ยังคงให้ Pinch point temperature difference เท่ากับ $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ เท่ากัน โดยเหตุผลที่สารทำงานที่มีความเป็นไอสูงใช้ความดันที่ต่ำกว่า เนื่องจากการให้สารทำงานเดือดเป็นไอจำเป็นต้องใช้พลังงานต่อหน่วยมวลที่มากขึ้น (เอนทาลปีจำเพาะเปลี่ยนแปลงใน อีวาโปเรเตอร์/ฮีตเตอร์สูงเมื่อความเป็นไอสูง) ดังนั้น เมื่อความเป็นไอของสารทำงานสูงขึ้นจึงจำเป็นต้องลดความดันลงเพื่อให้สารทำงานเดือดได้ตามความเป็นไอของสารทำงานที่กำหนดไว้ ซึ่งพลังงานต่อหน่วยมวลที่เปลี่ยนแปลงในอีวาโปเรเตอร์/ฮีตเตอร์สามารถคำนวณได้จากความร้อนที่สารทำงานได้รับที่ อีวาโปเรเตอร์/ฮีตเตอร์ต่ออัตราการไหลของสารทำงาน โดยเมื่อค่าค่าในตารางที่ 5.1 มาคำนวณ พบว่าที่ความเป็นไอของสารทำงานตั้งแต่ 0 ถึง 1 พลังงานต่อมวลที่ใช้การระเหยตัวมีค่ามากตามความเป็นไอที่สูงขึ้น ดังนี้ 80.3 82.8 103.9 132.7 และ 163.4 kJ/kg

2) ความดันที่คอนเดนเซอร์ (P_1): สำหรับความดันที่คอนเดนเซอร์มีการเปลี่ยนแปลงน้อยมากเมื่อความเป็นไอของสารทำงานเปลี่ยนแปลงไป โดยแสดงดังตารางที่ 5.1 และรูปที่ 5.2 และ 5.3 โดยเกิดจากการจำลองนี้กำหนดให้อุณหภูมิทางเข้าและออกทางของน้ำหล่อเย็นเท่ากับ $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ และ $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ ตามลำดับอีกทั้งกำหนด ΔT_{pp} เท่ากับ $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ เท่ากันทุกกรณี ดังนั้นเมื่อใช้สารทำงานเดียวกัน จึงทำให้ความดันที่คอนเดนเซอร์มีค่าเท่ากัน



รูปที่ 5.2 ผังอุณหภูมิจำเพาะของโรงไฟฟ้าที่มีความเป็นไอก่อนเข้าเทอร์ไบน์เท่ากับ 0



รูปที่ 5.3 ผังอุณหภูมิและเอนโทรปีจำเพาะของโรงไฟฟ้าที่มีความเป็นไอก่อนเข้าเทอร์ไบน์เท่ากับ 1

3) พลังงานความร้อนที่สารทำงานได้รับในอีวาโปเรเตอร์/ฮีตเตอร์ : จากรูปที่ 5.2 แสดงให้เห็นว่าสารทำงานที่มีความเป็นไอของสารทำงานก่อนเข้าเทอร์ไบน์เป็นของเหลวอิ่ม (ของเหลวอิ่มตัว, $x_3=0$) แสดงให้เห็นว่าเกิดความแมตช์กันของอุณหภูมิ (thermal match) ระหว่างแหล่งความร้อนและสารทำงานที่มากกว่า โดยแสดงออกมาในค่าความแตกต่างของอุณหภูมิเฉลี่ยแบบลอการิทึม (The Log Mean Temperature Difference: ΔT_{lm}) ระหว่างแหล่งความร้อนและสารทำงานในอีวาโปเรเตอร์/ฮีตเตอร์ โดยยังมีค่าใกล้เคียงกับ ΔT_{pp} หมายถึงยังเกิดความแมตช์กันของอุณหภูมิมาก โดยโรงไฟฟ้าที่มี $x_3=0$ และ $x_3=1$ มีค่า ΔT_{lm} เท่ากับ 11.3°C และ 20.6°C ตามลำดับ เมื่อเกิดความแมตช์กันของอุณหภูมิมาก ซึ่งส่งผลให้สามารถดึงพลังงานจากแหล่งความร้อนได้มากกว่าโรงไฟฟ้าที่มีความเป็นไอของสารทำงานเป็นของผสม (สารสถานะของผสม, $0 < x_3 < 1$) หรือเป็นไออิ่มตัว (ไออิ่มตัว $x_3=1$) โดยการดึงความร้อนของสารทำงานเพิ่มขึ้น 50.5% เมื่อเปลี่ยนความเป็นไอของโรงไฟฟ้า $x_3=1$ ซึ่งเป็นแบบทั่วไปที่นิยม เป็น $x_3=0$ ซึ่งสามารถดึงความร้อนได้มากกว่า และเนื่องจากสามารถดึงความร้อนได้มากกว่าส่งผลให้อุณหภูมิแหล่งความร้อนลดลงมากกว่าอีกด้วย โดยที่อุณหภูมิของน้ำร้อนทางออกของ $x_3=0$ และ $x_3=1$ มีค่าเท่ากับ 60°C และ 80°C ตามลำดับ นอกจากนี้ การปรับปรุงการถ่ายเทความร้อนนี้ เมื่อใช้ $x_3=0$ สอดคล้องกับการศึกษาของ Yari et al. (2015) อย่างไรก็ตาม ความแตกต่างกับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ คือวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้จำลองความเป็นในช่วงที่เป็นของผสมด้วย แต่การศึกษาของ Yari et al. (2015) ไม่ได้ทำการศึกษา ซึ่งช่วยให้เห็นพฤติกรรมของช่วงที่เป็นของผสมเพิ่มขึ้น

4) อัตราการไหลของสารทำงาน: เพื่อเพิ่มความสามารถในการถ่ายเทความร้อนของโรงไฟฟ้าที่มีความเป็นไอของสารทำงานต่ำในอีวาโปเรเตอร์/ฮีตเตอร์จำเป็นต้องเพิ่มอัตราการไหลของสารทำงานเพื่อเป็นการเพิ่มความสามารถในการถ่ายเทความร้อนของสารทำงาน โดยในตารางที่ 5.1 แสดงให้เห็นว่าอัตราการไหลของสารทำงานเพิ่มมากขึ้นเมื่อความเป็นไอของสารทำงานลดลง

5) กำลังของปั๊ม: โดยที่กำลังของปั๊มสามารถเขียนออกดังสมการที่ 5.1

$$\dot{W}_{pump} = \dot{m}_{wf} \Delta P_{2-1} / \rho_1 \quad (5.1)$$

โดยที่ความหนาแน่นของสารทำงานที่เข้าปั๊มมีค่าใกล้เคียงกันเมื่อความเป็นไอของสารทำงานเปลี่ยนแปลงไป เนื่องจากความดันที่คอนเดนเซอร์และอุณหภูมิของสารทำงานก่อนเข้าปั๊มมีค่าใกล้เคียงกัน ดังนั้น กำลังของปั๊มขึ้นอยู่กับความดันที่อีวาโปเรเตอร์/ฮีตเตอร์และอัตราการไหลของสารทำงาน เมื่อความเป็นไอของสารทำงานเพิ่มขึ้นส่งผลให้ความดันที่อีวาโปเรเตอร์ และอัตราการไหลของสารทำงานลดลงส่งผลให้กำลังของปั๊มลดลงตามไปด้วย โดยผลแสดงดังตารางที่ 5.1

โดยผลการค้นพบเหล่านี้แสดงให้เห็นถึงความสำคัญของความเป็นไอของสารทำงานก่อนเข้าเทอร์ไบน์ของโรงไฟฟ้าวัฏจักรโออาร์ซี อย่างไรก็ตาม การที่ความเป็นไอของสารทำงานต่ำนั้น ส่งผลทำให้เกิดความสึกหรอกับเทอร์ไบน์แบบปกติทั่วไปจากหยดน้ำที่เกิดจากสารทำงานที่เป็นสถานะของผสมปะทะกับใบในเทอร์ไบน์เทอร์ไบน์ และใช้เงินลงทุนในการสร้างโรงไฟฟ้ามากขึ้นเนื่องจาก: (1) ขนาดอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน ที่เพิ่มมากขึ้น; (2) ความดันสูงสุดในโรงไฟฟ้าที่มากขึ้น; และ (3) พลังงานของปั๊มที่ใช้เพิ่มมากขึ้น

จากการศึกษาในบริษัทนวัตกรรม พบว่าเตสลาเทอร์ไบน์เป็นเทอร์ไบน์ที่สามารถรองรับการทำงานในกรณีที่สารทำงานเป็นของเหลวได้ [(Tesla, 1913); (Rusin et al., 2021); (Dumont et al., 2019); (Talluri et al., 2020); (Song et al., 2017); (Zhang et al., 2022)] ซึ่งทำให้เตสลาเทอร์ไบน์เหมาะกับการทำงานกับโรงไฟฟ้าที่มีความเป็นไอของสารทำงานก่อนเข้าเทอร์ไบน์เป็นของเหลวอิ่มตัว ($x_3=0$) ดังนั้น การใช้เตสลาเทอร์ไบน์สามารถเอาชนะความท้าทายที่หนึ่งได้ โดยในหัวข้อที่ 5.2 เป็นการศึกษาการทำงานของโรงไฟฟ้าวัฏจักรโออาร์ซีเมื่อใช้เตสลาเทอร์ไบน์ในการผลิตกระแสไฟฟ้า โดยเป็นการวิเคราะห์ว่าเมื่อความเป็นไอของสารทำงานส่งผลอย่างไรกับประสิทธิภาพไอเซนโทรปิกของเตสลาเทอร์ไบน์และกำลังสุทธิของโรงไฟฟ้า

นอกจากนี้ ในส่วนของความท้าทายที่สอง ได้ถูกศึกษาในหัวข้อที่ 5.3 เพื่อทำการศึกษาเชิงเปรียบเทียบในการประเมินเศรษฐศาสตร์ของโรงไฟฟ้าวัฏจักรโออาร์ซีที่ใช้เตสลาเทอร์ไบน์เมื่อความเป็นไอของสารทำงานเปลี่ยนแปลงไป โดยวัตถุประสงค์เพื่อให้เห็นถึงความได้เปรียบของโรงไฟฟ้าวัฏจักรโออาร์ซีที่ใช้ความเป็นไต่ำแต่ได้กำลังสุทธิสูง ในขณะที่เดียวกันได้รวมการคำนวณในส่วนของเงินลงทุนร่วมด้วย

5.2 การประเมินกำลังสุทธิของโรงไฟฟ้าที่ใช้เตสลาเทอร์โบเมื่อความเป็นไอของสารทำงานก่อนเข้าเทอร์โบเปลี่ยนแปลงไป

จากการศึกษาที่ผ่านมาในปริทัศน์วรรณกรรมโรงไฟฟ้าวัฏจักรโออาร์ซีที่ใช้ในการศึกษา ร่วมกับเตสลาเทอร์โบ [(Tesla, 1913); (Rusin et al., 2021); (Dumont et al., 2019); (Talluri et al., 2020); (Song et al., 2017); (Zhang et al., 2022)] พบว่า ความเป็นไอของสารทำงานก่อนเข้าเทอร์โบได้กำหนดเป็นไออิมตัว ($x_3=1$) ซึ่งพบช่องว่างในงานวิจัยในการศึกษาการทำงานของเตสลาเทอร์โบเมื่อความเป็นไอของสารทำงานก่อนเข้าเทอร์โบไม่ได้เป็นไออิมตัว ($x_3 < 1$) โดยเฉพาะโรงไฟฟ้าที่ความเป็นไวก่อนเข้าเตสลาเทอร์โบเป็นของเหลวอิมตัว ($x_3=0$) ซึ่งเป็นกรณีที่มีแนวโน้มที่ให้กำลังสุทธิออกมาสูง จะได้ถูกศึกษาในหัวข้อนี้ เพื่อให้เห็นการทำงานของเตสลาเทอร์โบเมื่อความเป็นไอของสารทำงานเปลี่ยนแปลงไป

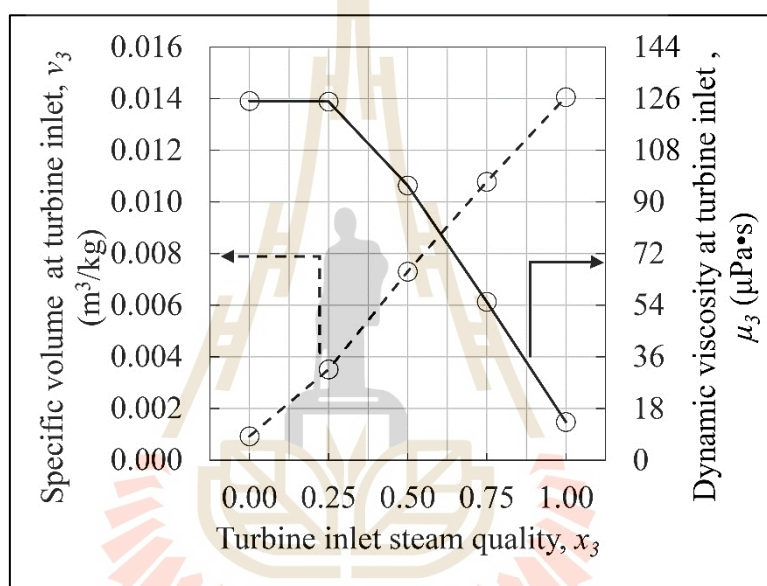
ในการหาเงื่อนไขการทำงานและขนาดที่ทำให้ได้กำลังและประสิทธิภาพไอเซนโทรปิกได้หาค่าความเร็วรอบของการทำงาน (ω) อัตราส่วนความดันของเตสลาเทอร์โบ (PR) และเส้นผ่านศูนย์กลางของโรเตอร์ทางออก (D_5) เมื่อความเป็นไอของสารทำงานก่อนเข้าเทอร์โบเปลี่ยนแปลงไป โดยขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของโรเตอร์ทางออก (D_4) กำหนดให้เท่ากับ 400 mm จำนวนแผ่นดิสก์เท่ากับ (N_{disk}) 50 แผ่น และระยะห่างระหว่างแผ่นดิสก์ (b) เท่ากับ 1 mm โดยรายละเอียดการจำลองแสดงในหัวข้อที่ 3.3 โดยผลการจำลองเป็นดังตารางที่ 5.2

ตารางที่ 5.2 ผลการออกแบบของเตสลาเทอร์โบที่ทำให้ได้กำลังสูงสุดในแต่ละความเป็นไอของสาร R236ea ก่อนเข้าเตสลาเทอร์โบ

| ตัวแปร | ความเป็นไอของสารทำงานก่อนเข้าเทอร์โบ, x_3 | | | | | หน่วย |
|----------|---|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 0.00 | 0.25 | 0.50 | 0.75 | 1.00 | |
| ω | 3,600 | 3,600 | 3,800 | 4,400 | 5,000 | RPM |
| PR | 0.79 | 0.67 | 0.64 | 0.62 | 0.60 | - |
| D_5 | 97.60 | 99.85 | 89.44 | 82.24 | 83.04 | mm |

จากผลดังตารางที่ 5.2 แสดงค่าทั้งสามที่ทำให้เตสลาเทอร์โบได้กำลังและประสิทธิภาพไอเซนโทรปิกเพิ่มสูงขึ้น เมื่อความเป็นไอของสารทำงานเปลี่ยนแปลงไป โดยค่าที่เหมาะสมเปลี่ยนแปลงตามความเป็นไอของสารทำงาน นอกจากนี้ ยังแสดงให้เห็นว่าเตสลาเทอร์โบสามารถทำงานได้กับโรงไฟฟ้าแม้ว่าสารทำงานเป็นของสถานะของผสม โดยแนวโน้มที่น่าสนใจจากตารางที่ 5.2 ได้ดังนี้:

1) ความเร็วรอบของเตสลาเทอร์ไบน์ (ω): พบว่าความเร็วรอบของสารทำงานเพิ่มมากขึ้นเมื่อความเป็นไอของสารทำงานเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากความเป็นไอของสารทำงานเพิ่มมากขึ้นส่งผลให้ทำให้ปริมาตรจำเพาะ (Specific volume, v) เพิ่มสูงขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 5.4 และเมื่อปริมาตรจำเพาะเพิ่มสูงส่งผลให้ความเร็วของสารทำงานหลังออกจากนอซเซิลเพิ่มสูงขึ้นดังตารางที่ 5.3 ดังนั้น เพื่อให้เตสลาเทอร์ไบน์ได้กำลังและประสิทธิภาพสูงเมื่อความเร็วของสารทำงานที่ไหลเข้าโรเตอร์เพิ่มสูงขึ้น ต้องใช้ความเร็วรอบของโรเตอร์เพิ่มสูงขึ้นไปด้วย ดังได้วิเคราะห์ในหัวข้อที่ 4.1.2 โดยผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าการเปลี่ยนความเร็วรอบให้เหมาะสมกับสารทำงานแต่ละชนิดซึ่งค่าความเร็วรอบที่เหมาะสมขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของสารทำงานนั้น ๆ

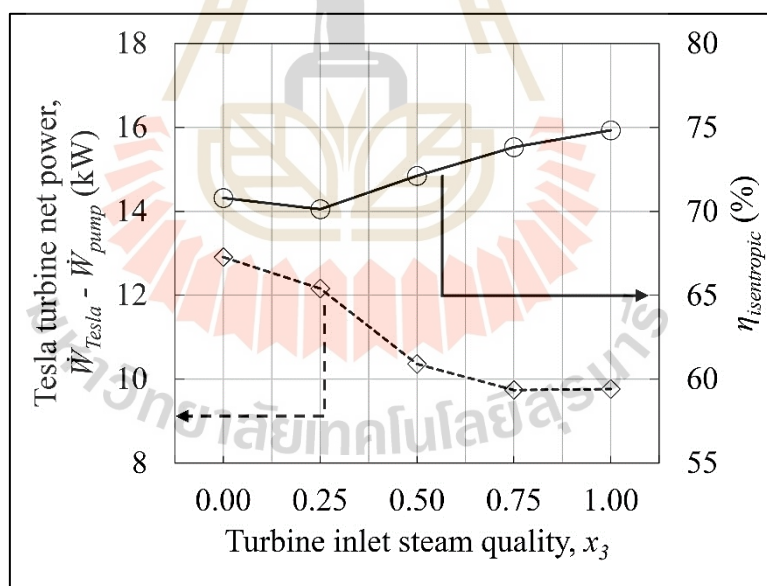


รูปที่ 5.4 ปริมาตรจำเพาะและความหนืดพลวัตของสารทำงานก่อนเข้าเทอร์ไบน์เมื่อความเป็นไอของสาร R236ea ก่อนเข้าเตสลาเทอร์ไบน์เปลี่ยนแปลงไป

2) อัตราส่วนความดัน (PR): ค่าอัตราส่วนความดันที่เหมาะสมมีค่าลดลงเมื่อความเป็นไอของสารทำงานมีค่าเพิ่มสูงขึ้น โดยจากนิยามของอัตราส่วนความดันดังสมการที่ 3.21 ดังนั้นการลดลงของอัตราส่วนความดันหมายถึงว่าสารทำงานถูกลดความดันเพื่อความเร็วของสารทำงานน้อยลง จากรูปที่ 5.4 เห็นได้ว่าสารทำงานเมื่อความเป็นไอสูงมากขึ้นทำให้ปริมาตรจำเพาะสูงขึ้นหรือความหนาแน่นต่ำลง ซึ่งสารทำงานที่มีความหนาแน่นต่ำ เมื่อลดความดันจะเปลี่ยนกำลังงานความดันเป็นกำลังงานจลน์ (เพิ่มความเร็วของสารทำงาน) ได้ดี ส่งผลให้ไม่ต้องลดความดันมากที่นอซเซิลเท่ากับสารทำงานที่มีความหนาแน่นที่สูงกว่าหรือสารทำงานที่มีความเป็นไอลดกว่าเพื่อเพิ่มความเร็วของสารทำงาน

3) เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของโรเตอร์ (D_5): ในการศึกษาี้ เส้นผ่านศูนย์กลางของโรเตอร์ถูกใช้เป็นตัวแปรในการควบคุมความดันที่ออกจากโรเตอร์ โดยมีเป้าหมายให้ความดันขาออกมีค่าเท่ากับความดันของคอนเดนเซอร์ จากผลการศึกษาพบว่า เมื่อความเป็นไอของสารทำงานเพิ่มสูงขึ้น ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของโรเตอร์ลดลง ส่งผลให้พื้นที่ภายในโรเตอร์มีขนาดใหญ่ขึ้นเพื่อรองรับกระบวนการลดความดันให้ได้เท่ากับความดันที่คอนเดนเซอร์ที่ออกแบบไว้ ทั้งนี้จากสมการที่ 3.47 แสดงให้เห็นว่าการลดลงของความดันในแต่ละระยะภายในโรเตอร์ขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของสารทำงาน โดยจากรูปที่ 5.4 พบว่า เมื่อสารทำงานมีความเป็นไอเพิ่มสูงขึ้น ปริมาตรจำเพาะของสารทำงานจะสูงขึ้น หรือความหนาแน่นจะลดลง ซึ่งสารทำงานที่มีความหนาแน่นต่ำต้องการพื้นที่ในโรเตอร์ของเทสลาเทอร์ไบน์มากขึ้นเพื่อให้สามารถลดความดันได้ตามที่ต้องการ ส่งผลให้เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของโรเตอร์ของเทสลาเทอร์ไบน์ต้องลดลง ถึงแม้ว่าความดันที่ต้องลดลงในกรณีที่สารทำงานมีความเป็นไอสูงจะมีค่ามากขึ้นก็ตาม ดังที่แสดงในตารางที่ 5.1 ดังนั้น ความหนาแน่นของสารทำงานมีอิทธิพลโดยตรงต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของโรเตอร์ของเทสลาเทอร์ไบน์

จากการหาขนาดและเงื่อนไขการทำงานเหล่านี้ ผลการของกำลังสุทธิและประสิทธิภาพไอเซนโทรปิกของสารทำงาน เมื่อความเป็นไอของสารทำงานเปลี่ยนแปลงไปแสดงดังรูปที่ 5.5



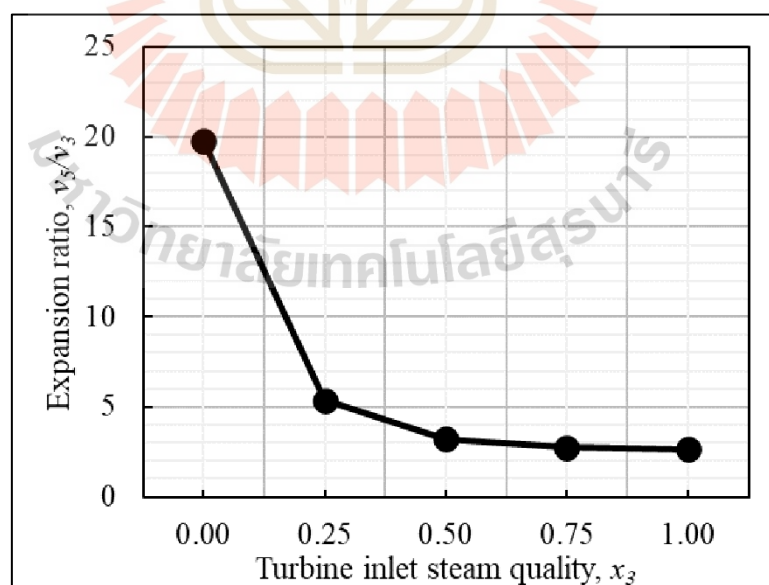
รูปที่ 5.5 กำลังสุทธิและประสิทธิภาพของเทอร์ไบน์เมื่อความเป็นไอของสาร R236ea ก่อนเข้าเทสลาเทอร์ไบน์เปลี่ยนแปลงไป

จากรูปที่ 5.5 แสดงให้เห็นว่ากำลังสุทธิของโรงไฟฟ้าลดลงเมื่อความเป็นไอของสารทำงานเพิ่มมากขึ้น และประสิทธิภาพโดยรวมเพิ่มขึ้น พบว่าที่ความเป็นไอของสารทำงานเท่ากับ 0 ให้กำลังสุทธิสูงสุดเท่ากับ 12.91 kW สูงกว่าโรงไฟฟ้าวัฏจักรโออาร์ซีที่มีความเป็นไอของสารทำงานเท่ากับ 1 อยู่

39% โดยผลดังกล่าวสอดคล้องกับพลังงานความร้อนที่โรงไฟฟ้าตั้งอธิบายในหัวข้อที่ 5.1 โดยโรงไฟฟ้าที่มีความเป็นไอต่ำสามารถดึงความร้อนเข้าสู่สารทำงานได้มากกว่าส่งผลให้พลังงานของสารทำงานก่อนเข้าเทอร์ไบน์สูง และเทอร์ไบน์ได้กำลังสุทธิต่อออกมาสูงตามไปด้วย

ประสิทธิภาพไอเซนโทรปิกของเตสลาเทอร์ไบน์ โดยรวมเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อความเป็นไอของสารทำงานเพิ่มสูงขึ้นโดยมีค่าอยู่ในช่วง 70.1% ถึง 74.8% ดังแสดงในรูปที่ 5.5 โดยค่าสูงที่สุดเมื่อความเป็นไอของสารทำงานเท่ากับ 1 ($x_3 = 1$) ดังนั้นเห็นได้ว่าความเป็นไอของสารทำงานเปลี่ยนจาก 0 เป็น 1 ประสิทธิภาพเปลี่ยนน้อยกว่า 5% ซึ่งเปลี่ยนแปลงน้อยมาก แสดงให้เห็นว่าเตสลาเทอร์ไบน์สามารถทำงานได้ภายในความเป็นไอที่หลากหลายได้

โดยความแตกต่างของประสิทธิภาพไอเซนโทรปิกของเตสลาเทอร์ไบน์ เมื่อความเป็นไอของสารทำงานเปลี่ยนแปลงไปสามารถสังเกตผลดังรูปที่ 5.5 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเมื่อความเป็นไอของสารทำงานก่อนเข้าเทอร์ไบน์เพิ่มสูงขึ้นประสิทธิภาพไอเซนโทรปิกเพิ่มสูงขึ้นตามไปด้วย โดยประสิทธิภาพของเตสลาเทอร์ไบน์มีค่าสูงที่สุดเมื่อความเป็นไอของสารทำงานเท่ากับ 1 โดยการเปลี่ยนแปลงเกิดจากการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของสารทำงานก่อนเข้าเทอร์ไบน์ที่เปลี่ยนแปลงไป โดยเฉพาะความหนืดพลวัต ซึ่งช่วยให้เกิดการถ่ายเทโมเมนตัมจากอิทธิพลการไหลแบบหนืด (Viscos flow effect) ซึ่งโดยทั่วไปแล้วส่งผลให้เตสลาเทอร์ไบน์ทำงานได้ดี อย่างไรก็ตาม ในการศึกษาประสิทธิภาพไอเซนโทรปิกไม่ได้เป็นไปตามการเพิ่มขึ้นของความหนืดพลวัต ซึ่งสามารถอธิบายได้จากอัตราการขยายตัวของสารทำงานภายในเทอร์ไบน์ (Expansion ratio) ดังรูปที่ 5.6



รูปที่ 5.6 อัตราการขยายตัวของสารทำงานเมื่อความเป็นไอของสาร R236ea ก่อนเข้าเตสลาเทอร์ไบน์เปลี่ยนแปลงไป

จากรูปที่ 5.6 พบว่าเมื่อความเป็นไอของสารทำงานเพิ่มสูงขึ้นอัตราการขยายตัวมีค่าลดลง ซึ่งจากการศึกษาของ Song et al. (2019) พบว่า สารทำงานที่มีอัตราการขยายตัวต่ำส่งผลให้ได้ประสิทธิภาพสูง จากผลดังรูปที่ 5.5 แสดงให้เห็นถึงอิทธิพลของการขยายตัวของสารทำงานที่มากกว่าความหนืดพลวัต ส่งผลให้ประสิทธิภาพไอเซนโทรปิกมีค่าเพิ่มสูงขึ้นเมื่อความเป็นไอของสารทำงานสูงขึ้น เนื่องจากมีการขยายตัวที่น้อยกว่า ถึงแม้ว่ามีความหนืดที่ต่ำกว่า

นอกจากนี้ อีกหนึ่งข้อจำกัดในการศึกษานี้คือประสิทธิภาพไอเซนโทรปิกของเทสลาเทอร์ไบน์ อาจสูงมากไปกว่าเทสลาเทอร์ไบน์จริงเนื่องจากใช้แบบจำลองเชิงตัวเลขในการจำลอง ดังนั้น ผลของการศึกษานี้ต้องใช้ความระมัดระวังในการตีความ อาทิ กำลังสุทธิของโรงไฟฟ้า อย่างไรก็ตาม แนวโน้มของการศึกษานี้ยังคงเป็นประโยชน์ในการศึกษาเทสลาเทอร์ไบน์เมื่อความเป็นไอของสารทำงานเปลี่ยนแปลงไป

อีกทั้งเป็นที่น่าสังเกตว่าในงานวิจัยก่อนหน้า [(Fisher, 2011); (White, 2021); (Yari et al., 2015); (Rusin et al., 2021)] กำหนดการประสิทธิภาพไอเซนโทรปิกของโรงไฟฟ้าอยู่ในช่วง 70% ถึง 85% สำหรับในกรณี $x_3=0$ และ $x_3=1$ ในการจำลอง โดยการกำหนดประสิทธิภาพของเทอร์ไบน์ให้คงที่ส่งผลให้ประเมินกำลังจากเทอร์ไบน์ได้สูงกว่าที่ควรจะเป็น อีกทั้งผลการจำลองในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้แสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพไอเซนโทรปิกของเทสลาเทอร์ไบน์เปลี่ยนแปลงไปเมื่อความเป็นไอของสารทำงานเปลี่ยนถึงแม้ว่าจะเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย ดังนั้นจากผลการจำลองแสดงให้เห็นถึงความสำคัญของการเลือกประสิทธิภาพของเทอร์ไบน์เมื่อ $x_3=0$ และโรงไฟฟ้าวัฏจักรโออาร์ซีในการจำลองเพื่อให้แบบจำลองถูกต้องมากขึ้น

นอกจากนี้ ในการศึกษาที่ได้ศึกษาความเป็นไปได้ในการเกิดการไหลแบบอุดตัน (Choked flow) ที่เกิดขึ้นเมื่อสารทำงานไหลออกจากนอซเซิลซึ่งเป็นตำแหน่งที่ความเร็วของสารทำงานสูงที่สุด เนื่องจากเมื่อเกิดการไหลแบบอุดตันจะส่งผลให้ประสิทธิภาพของเทสลาเทอร์ไบน์แย่ง โดยการไหลแบบอุดตันจะเกิดขึ้นเมื่อความเร็วของสารทำงานเกิดความเร็วเสียงในสภาวะนั้น หรือมัคคัมเบอร์ (Ma_4) มีค่าเกิด 1 ($Ma_4 > 1$) โดยการคำนวณมัคคัมเบอร์หาได้ดังสมการที่ 5.2

$$Ma_4 = \frac{v_4}{\sqrt{\kappa_4 / \rho_4}} \quad (5.2)$$

เมื่อ v_4 คือความเร็วของสารทำงานที่ออกจากนอซเซิล และ $\sqrt{\kappa_4 / \rho_4}$ คือความเร็วเสียงในสภาวะนั้น ๆ โดยตารางที่ 5.3 นำเสนอผลของความเร็วของสารทำงานหลังออกจากนอซเซิลและมัคคัมเบอร์

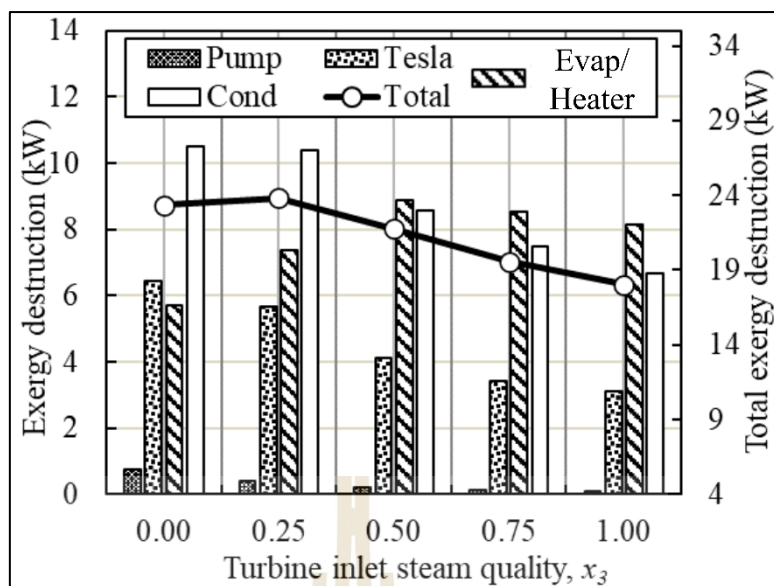
ตารางที่ 5.3 ผลของความเร็วยังของสารทำงานและมัคินัมเบอร์ที่ความเป็นไอของสาร R236ea ก่อนเข้า
เตสลาเทอร์ไบน์แต่ละค่า

| ตัวแปร | ความเป็นไอของสารทำงานก่อนเข้าเทอร์ไบน์, x_3 | | | | | หน่วย |
|--------|---|------|------|------|-------|-------|
| | 0 | 0.25 | 0.5 | 0.75 | 1 | |
| v_4 | 81.0 | 73.3 | 81.6 | 92.8 | 102.9 | m/s |
| Ma_4 | 0.08 | 0.07 | 0.07 | 0.11 | 0.85 | - |

จากผลดังตารางที่ 5.3 แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างความเป็นไอของสารทำงานและมัคินัมเบอร์ โดยเมื่อความเป็นไอของสารเพิ่มสูงขึ้นส่งผลให้ความเร็วของสารทำงานเพิ่มสูงขึ้นและมัคินัมเบอร์ของสารทำงานก่อนเข้าเทอร์ไบน์เพิ่มสูงขึ้นตามไปด้วย โดยในกรณีที่สารทำงานมีความเป็นไต่ต่ำ ($x_3 \leq 0.75$) ค่ามัคินัมเบอร์ยังคงต่ำซึ่งการไหลยังไม่เป็นการไหลแบบอัดตัว อย่างไรก็ตาม ในกรณีที่ความเป็นไอของสารทำงานเป็นไออิ่มตัว ($x_3 = 1$) ค่ามัคินัมเบอร์มีค่าเท่ากับ 0.85 ซึ่งมีค่าใกล้กับกรณีที่จะเกิดการไหลแบบอัดตัว ดังนั้นพฤติกรรมของการเปลี่ยนแปลงความเป็นไอของสารทำงานต่อมัคินัมเบอร์ของสารทำงานที่ออกจากนอชเชิลสามารถนำไปปรับใช้งานกับการออกแบบเตสลาเทอร์ไบน์ได้ดังนี้

- 1) การทำงานที่ความเป็นไต่ต่ำช่วยป้องกันไม่ให้เกิดการไหลแบบอัดตัวในเตสลาเทอร์ไบน์
- 2) สำหรับในกรณีที่ความเป็นไอเท่ากับ 1 อาจต้องการการออกแบบพิเศษเพื่อรองรับการไหลแบบอัดตัว
- 3) การใช้โรงไฟฟ้าที่มีความเป็นไอเท่ากับ 1 เมื่อใช้กับเตสลาเทอร์ไบน์แล้วอาจต้องการออกแบบเป็นเป็นพิเศษเพื่อรองรับการไหลแบบอัดตัว

นอกจากนี้ ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ได้วิเคราะห์เอกเซอร์ยี่ที่ถูกทำลายของแต่ละอุปกรณ์เมื่อความเป็นไอของสารทำงานเปลี่ยนแปลงไป โดยผลดังรูปที่ 5.7 เป็นการผลกาวิเคราะห์เอกเซอร์ยี่ที่อุปกรณ์แต่ละอุปกรณ์ในโรงไฟฟ้าและโดยผลรวม



รูปที่ 5.7 ผลการทำลายเอกเซอร์ยีและเอกเซอร์ยีที่ถูกทำลายทั้งหมดเมื่อความเป็นไอของสาร R236ea ก่อนเข้าเตสลาเทอร์ไบน์เปลี่ยนแปลงไป

จากผลดังรูปที่ 5.7 พบว่า เมื่อความเป็นไอเพิ่มสูงขึ้นส่งผลให้โดยรวมแล้วเอกเซอร์ยีที่ถูกทำลายทั้งหมดมีค่าลดลงโดยเกิดขึ้นเนื่องจากเมื่อความเป็นไอของสารทำงานเพิ่มมากขึ้นทำให้เกิดความร้อนที่ถ่ายเทเข้าและออกโรงไฟฟ้าที่น้อยลง ดังแสดงในตารางที่ 5.1 รวมถึงได้กำลังสุทธิน้อยลงด้วยดังรูปที่ 5.5 โดยผลการวิเคราะห์รายอุปกรณ์เมื่อความเป็นไอของสารทำงานเปลี่ยนแปลงไปได้ดังนี้

1) เทสลาเทอร์ไบน์: จากผลของเอกเซอร์ยีที่ถูกทำลายในเตสลาเทอร์ไบน์เห็นได้ว่าเมื่อความเป็นไอของสารทำงานเพิ่มสูงขึ้นมีค่าลดลง ซึ่งสอดคล้องกับผลของประสิทธิภาพไอเซนโทรปิกของเตสดังรูปที่ 5.5

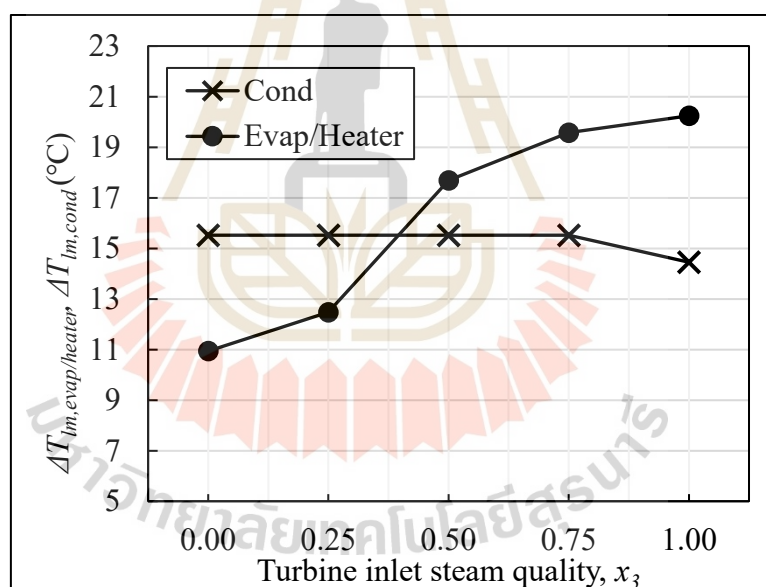
2) คอนเดนเซอร์: เมื่อความเป็นไอของสารทำงานเพิ่มสูงขึ้นส่งผลให้เอกเซอร์ยีที่ถูกทำลายมีสัดส่วนน้อยลงเนื่องจากความร้อนที่ถูกถ่ายเทที่คอนเดนเซอร์มีค่าน้อยลงดังตารางที่ 5.1 ทำให้เอกเซอร์ยีที่ถูกทำลายที่ถูกทำลายน้อยลงไปด้วย

3) ปั๊ม: เมื่อความเป็นไอของสารทำงานเพิ่มมากขึ้นส่งผลให้เอกเซอร์ยีที่ถูกทำลายในปั๊มมีสัดส่วนน้อยลง เนื่องจากความดันที่ต้องเพิ่มจากทางออกของคอนเดนเซอร์ไปทางเข้าอีวาโปเรเตอร์/ฮีตเตอร์น้อยลงดังแสดงในตารางที่ 5.1 ทำให้ต้องใช้กำลังน้อยลงส่งผลให้เอกเซอร์ยีที่ถูกทำลายน้อยลงตามไปด้วย

4) อีวาโปเรเตอร์/ฮีตเตอร์ : พบว่าที่ความเป็นไอเท่ากับ 0.5 เกิดการทำลายเอกเซอร์ยีที่สูงที่สุด ซึ่งการทำลายเอกเซอร์ยีที่สูงเกิดได้จากหลายสาเหตุ แต่ในการแลกเปลี่ยนความร้อนในอุปกรณ์

แลกเปลี่ยนความร้อนมักเกิดจาก การถ่ายเทความร้อนที่สูงและการแลกเปลี่ยนความร้อนที่อุณหภูมิแตกต่างกันสูง โดยถ้าพิจารณาเพียงการถ่ายเทความร้อนเช่นเดียวกันการวิเคราะห์ที่คอนเดนเซอร์ที่ความเป็นไอเท่ากับ 0 จะต้องมีการทำลายเอกเซอร์ยีที่สูงที่สุด เนื่องจากการถ่ายเทความร้อนสูงที่สุด ดังตารางที่ 5.1 อย่างไรก็ตาม ผลไม่ได้เป็นไปตามแนวโน้มดังกล่าว ดังนั้น ต้องมีอีกอิทธิพลเข้ามากระทบกับการทำลายเอกเซอร์ยี โดยอิทธิพลดังกล่าวคือการแลกเปลี่ยนความร้อนที่อุณหภูมิแตกต่างกันสูง โดยพิจารณาดังรูปที่ 5.2 และ 5.3 เห็นได้ว่าความแตกต่างของอุณหภูมิของสารทำงานและแหล่งความร้อน ของความเป็นไอของสารทำงานต่ำมีความสม่ำเสมอมากกว่ากรณีที่ความเป็นไอของสารทำงานสูง

โดยทุกความแตกต่างของความเป็นไอของสารทำงานได้กำหนดให้จุดที่อุณหภูมิใกล้เคียงกันที่สุด (Pinch point temperature difference) เท่ากับ 10°C ดังนั้น ความสม่ำเสมอของอุณหภูมิที่ในการแลกเปลี่ยนความร้อน สามารถพิจารณาได้จาก Log mean temperature difference, ΔT_{lm} ดังสมการที่ 3.6 ในหัวข้อที่ 3 โดยผลของ ΔT_{lm} แสดงดังรูปที่ 5.8



รูปที่ 5.8 Log mean temperature difference ของอีวาโปเรเตอร์/ฮีตเตอร์และคอนเดนเซอร์ เมื่อความเป็นไอของสาร R236ea ก่อนเข้าเตสลาเทอร์ไบน์เปลี่ยนแปลงไป

จากผลดังรูปที่ 5.8 แสดงให้เห็นว่าเมื่อความเป็นไอของสารทำงานเพิ่มสูงขึ้นส่งผลให้ $\Delta T_{lm, \text{evap/heater}}$ เพิ่มมากขึ้น โดยค่า $x_3 = 0$ มีค่า $\Delta T_{lm, \text{heater}}$ น้อยที่สุดและใกล้เคียงกับ 10°C มากที่สุดส่งผลให้การทำลายเอกเซอร์ยีน้อยลงตามไปด้วย เนื่องจากเกิดการทำลายเอกเซอร์ยีจากการแลกเปลี่ยนความร้อนที่อุณหภูมิแตกต่างกันสูงในปริมาณที่น้อย ทำให้ในกรณีที่ความเป็นไอก่อนเข้า

เทอร์ไบน์เป็นของเหลวอิมตัว ($x_3 = 1$) มีการทำลายเอกเซอร์ยีไม่สูงสุดถึงแม้ว่ามีการถ่ายเทความร้อนสูงสุด

ดังนั้น จึงเป็นเหตุที่ความเป็นไอของสารทำงานที่เข้าเทอร์ไบน์เท่ากับ 0.5 มีการทำลายเอกเซอร์ยีในอีวาโปเรเตอร์ สูงที่สุด เนื่องจากเป็นจุดที่อิทธิพลของการถ่ายเทความร้อนที่สูง (เทียบกับ $x_3 = 1$) และความแตกต่างของอุณหภูมิที่สูง (เทียบกับ $x_3 = 0$) ส่งผลให้จุดดังกล่าวเกิดการทำลายเอกเซอร์ยีที่สูงที่สุด จากผลรวมของสองอิทธิพลดังกล่าว

อย่างไรก็ตาม ในขณะที่ $\Delta T_{lm,cond}$ เปลี่ยนแปลงน้อยมากส่งผลให้การทำลายเอกเซอร์ยีขึ้นอยู่กับอัตราการถ่ายเทความร้อนภายในคอนเดนเซอร์เป็นหลัก

จากการศึกษาการทำงานของเตสลาเทอร์ไบน์เมื่อความเป็นไอของสารทำงานเปลี่ยนแปลงไปนั้นสามารถแสดงให้เห็นถึงขีดความสามารถในการเอาชนะความท้าทายที่ 1 ดังแสดงไว้ในหัวข้อ 4.2.1 ว่าการทำงานของเตสลาเทอร์ไบน์เป็นอย่างไรเมื่อความเป็นไอของสารทำงานเปลี่ยนแปลงไปจากของเหลวอิมตัวถึงไออิมตัว พบว่า เมื่อความเป็นไอของสารทำงานเป็นของเหลวอิมตัวได้ให้กำลังสุทธิสูงสุดเท่ากับ 12.91 kW ซึ่งสอดคล้องกับเงื่อนไขในการทำงานที่ระบุไว้ในหัวข้อที่ 4.2.1 อย่างไรก็ตาม ความท้าทายที่ 2 การใช้โรงไฟฟ้าที่มีความเป็นไอต่ำส่งผลให้ขนาดอุปกรณ์ในโรงไฟฟ้ามีขนาดใหญ่มากขึ้น ดังได้วิเคราะห์ในหัวข้อ 5.1 ซึ่งอาจส่งผลต่อเงินลงทุนในการสร้างโรงไฟฟ้า ดังนั้น เพื่อให้เห็นถึงความเป็นไปได้ทางเศรษฐศาสตร์ของโรงไฟฟ้าที่ใช้เตสลาเทอร์ไบน์เมื่อความเป็นไอของสารทำงานเปลี่ยนแปลงไป หัวข้อที่ 5.3 ได้ประเมินทางเศรษฐศาสตร์ เพื่อแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มกำลังสุทธิของโรงไฟฟ้าเมื่อใช้ความเป็นไอของสารทำงานต่ำสามารถเอาชนะเงินลงทุนที่เพิ่มขึ้นได้หรือไม่

5.3 การประเมินเศรษฐศาสตร์เมื่อความเป็นไอของสารทำงานก่อนเข้าเทอร์ไบน์เปลี่ยนแปลงไป

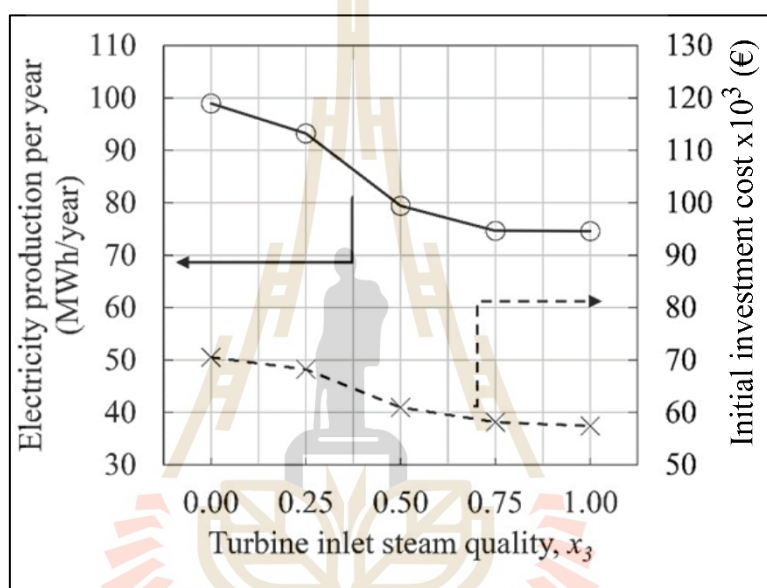
จากผลการวิเคราะห์ในหัวข้อ 5.1 และ 5.2 ได้นำไปสู่การประเมินเศรษฐศาสตร์ของโรงไฟฟ้าที่ใช้เตสลาเทอร์ไบน์ ภายใต้เงื่อนไขที่ความเป็นไอของสารทำงานมีการเปลี่ยนแปลง โดยผลการศึกษาในทั้งสองหัวข้อพบว่า เมื่อความเป็นไอของสารทำงานก่อนเข้าเทอร์ไบน์อยู่ในระดับต่ำ จะให้กำลังสุทธิของระบบสูงขึ้น แต่ขณะเดียวกันก็นำไปสู่ต้นทุนการลงทุนเริ่มต้นที่สูงขึ้นเช่นกัน ดังนั้นวัตถุประสงค์ของหัวข้อนี้คือการวิเคราะห์หาความสมดุลระหว่างกำลังสุทธิที่เพิ่มขึ้นและงบลงทุนที่เพิ่มขึ้น เพื่อระบุค่าความเป็นไอของสารทำงานที่ให้ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์สูงสุด

กระบวนการประเมินเศรษฐศาสตร์ดำเนินการตามรายละเอียดในบทที่ 3 หัวข้อ 3.4 โดยตัวแปรหลักที่ใช้ในการประเมินประกอบด้วย ต้นทุนไฟฟ้าต่อหน่วยที่ ปรับด้วยเวลา (Levelized cost of Electricity: LCOE) มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (Net Present Value: NPV) ระยะเวลาคืนทุน (Discounted Payback Period: d-PbP) และ อัตราผลตอบแทนภายใน

(Internal Rate of Return: IRR) ทั้งนี้ เพื่อให้การวิเคราะห์ครอบคลุมในหลากหลายเงื่อนไข การศึกษานี้จึงพิจารณาในกรณีที่มีอัตราคิดลด (Discount rate) ที่แตกต่างกัน ได้แก่ 5%, 7% และ 9% รวมถึงพิจารณาราคาขายไฟฟ้าที่หลากหลาย ได้แก่ 86 €/MWh (3 บาท/kWh), 100 €/MWh (3.5 บาท/kWh) และ 114 €/MWh (4 บาท/kWh) เพื่อสะท้อนถึงความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ใน สภาวะตลาดที่แตกต่างกัน

5.3.1 เงินลงทุนเริ่มต้นและปริมาณไฟฟ้าที่ผลิตได้

รูปที่ 5.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเงินลงทุนเริ่มต้นของโรงไฟฟ้าและปริมาณ ไฟฟ้าที่ผลิตได้ต่อปีเมื่อความเป็นไอของสารทำงานเปลี่ยนแปลงไป

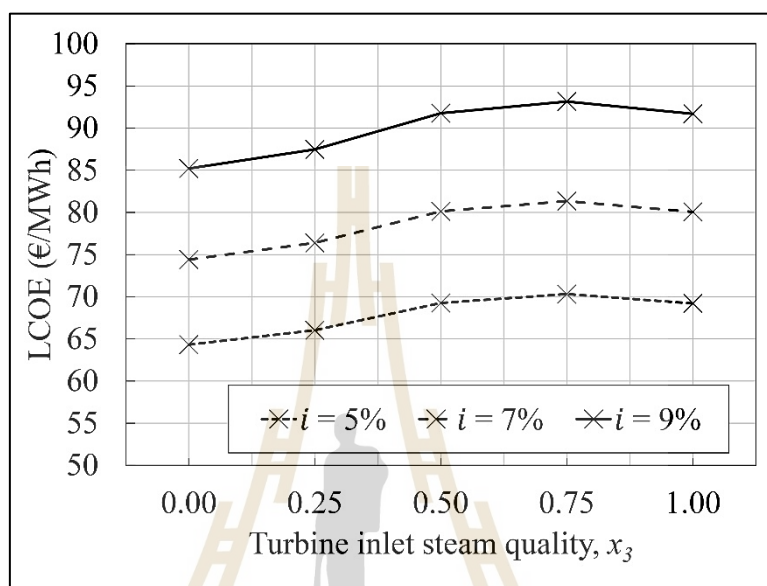


รูปที่ 5.9 เงินลงทุนเริ่มต้นและปริมาณไฟฟ้าที่ผลิตได้ของโรงไฟฟ้าวัฏจักรโออาร์ซีใช้เทสลาเทอร์ โบน์ ภายใต้ค่าความเป็นไอของสาร R236ea ก่อนเข้าเทสลาเทอร์โบน์ ราคาขายไฟฟ้า และอัตราคิดลดที่แตกต่างกัน

จากรูปที่ 5.9 แสดงให้เห็นว่าปริมาณไฟฟ้าที่ผลิตได้สูงที่สุดเท่ากับ 98 MWh/year เมื่อเป็น โรงไฟฟ้าที่ความเป็นไอของสารทำงานเท่ากับ 0 โดยผลดังกล่าวสอดคล้องกับผลในหัวข้อ 5.1 และ 5.2 เนื่องจากสามารถรับความร้อนได้มากส่งผลให้ได้กำลังสุทธิที่สูงมากขึ้น อย่างไรก็ตาม สิ่งตามมา เมื่อใช้โรงไฟฟ้าที่มีความเป็นไอต่ำส่งผลให้เงินลงทุนเริ่มต้นสำหรับโรงไฟฟ้ามีค่าสูง เนื่องจากขนาด อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่มีขนาดใหญ่ต้องการวิเคราะห์ในหัวข้อ 5.1

5.3.2 มูลค่าปัจจุบันสุทธิของต้นทุนต่อหน่วยของการผลิตไฟฟ้าตลอดอายุโครงการ (LCOE)

รูปที่ 5.10 ได้นำเสนอผลของมูลค่าปัจจุบันสุทธิของต้นทุนต่อหน่วยของการผลิตไฟฟ้าตลอดอายุโครงการ (Levelized Cost of Electricity: LCOE) เมื่อความเป็นไอของสารทำงานเปลี่ยนแปลงไป



รูปที่ 5.10 มูลค่าปัจจุบันสุทธิของต้นทุนต่อหน่วยของการผลิตไฟฟ้า (LCOE) ของโรงไฟฟ้าวัฏจักรโออาร์ซีใช้เทสลาเทอร์ไบน์ ภายใต้ค่าความเป็นไอของสาร R236ea ก่อนเข้าเทสลาเทอร์ไบน์ ราคาขายไฟฟ้า และอัตราคิดลดที่แตกต่างกัน

จากผลการประเมิน LCOE พบว่าโดยทั่วไปแล้วเมื่อความเป็นไอดำเนินทุนในการผลิตไฟฟ้ามีค่าต่ำลง โดยต่ำที่สุดที่ $x_3 = 0$ โดยมีค่าอยู่ในช่วง 64 €/MWh ถึง 85 €/MWh (2.24 บาท/kWh ถึง 2.98 บาท/kWh) โดยขึ้นอยู่กับอัตราลด (Discount rate: i) โดยเมื่อ x_3 เพิ่มสูงขึ้นส่งผลให้โดยทั่วไปแล้วต้นทุนในการผลิตไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้นโดยสูงที่สุดที่ $x_3 = 0.75$

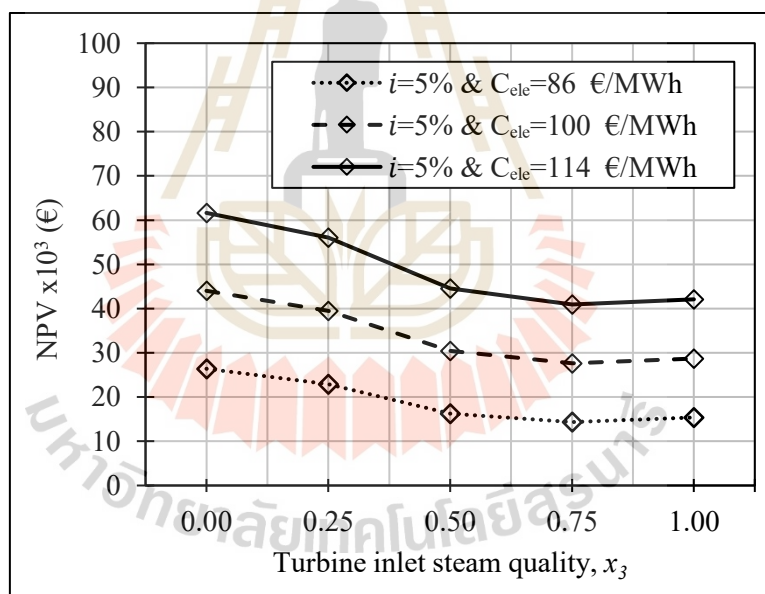
โดยแนวโน้มดังกล่าวสามารถอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างเงินลงทุนเริ่มต้นแลปริมาณไฟฟ้าที่ขายได้ต่อปี ดังการคำนวณ LCOE ดังสมการที่ 3.67 ดังแสดงในหัวข้อที่ 5.2 โดยโรงไฟฟ้าที่ความเป็นไอของสารทำงานต่ำให้กำลังสุทธิที่สูงส่งผลให้ปริมาณการผลิตไฟฟ้าแต่ละปีเพิ่มสูงขึ้น ในขณะที่เดียวกันต้องใช้เงินลงทุนที่สูงขึ้นตามไปด้วยจากขนาดอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่มีขนาดใหญ่ขึ้นดังหัวข้อที่ 5.3.1 อย่างไรก็ตาม จากอิทธิพลทั้งสองรวมกันแล้วยังคงส่งผลให้โรงไฟฟ้าที่ความเป็นไอของสารทำงานต่ำยังมีต้นทุนในการผลิตไฟฟ้าที่ยังต่ำถึงแม้ว่าเงินลงทุนสูงกว่า

เป็นที่น่าสนใจว่า LCOE เริ่มลดลงเล็กน้อยเมื่อความเป็นไอของสารทำงานเพิ่มจาก $x_3 = 0.75$ ถึง $x_3 = 1$ โดยการเปลี่ยนแปลงแนวโน้มเกิดจากการลดลงของต้นทุนเริ่มต้น (1.32%) มีค่ามากกว่าการลดลงของไฟฟ้าที่ผลิตได้ต่อปี (0.08%) ดังการคำนวณ LCOE สมการที่ 3.67 ดังนั้น จากความเป็นไอ $x_3 = 0.75$ ถึง $x_3 = 1$ จึงทำให้ค่า LCOE ลดลง

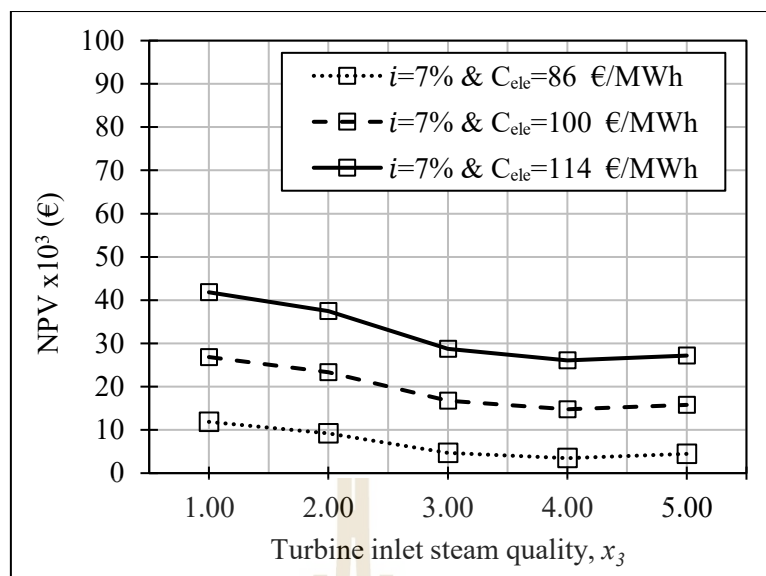
สำหรับอิทธิพลของอัตราผลตอบแทนต่อ LCOE อย่างมาก เมื่ออัตราผลตอบแทนสูงขึ้นส่งผลให้ต้นทุนในการผลิตไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 5.10 โดยพบว่าที่ทุกความเป็นไอของสารทำงานส่งผลให้ LCOE เพิ่มสูงขึ้น ซึ่งเกิดจากมูลค่าของเงินที่ได้จากการขายไฟฟ้าที่ผลิตได้ต่อปีมีมูลค่าน้อยลงตลอดโครงการเมื่ออัตราผลตอบแทนสูงขึ้น

5.3.3 มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (NPV) และระยะเวลาคืนทุนที่มีการคิดลด (d-PbP)

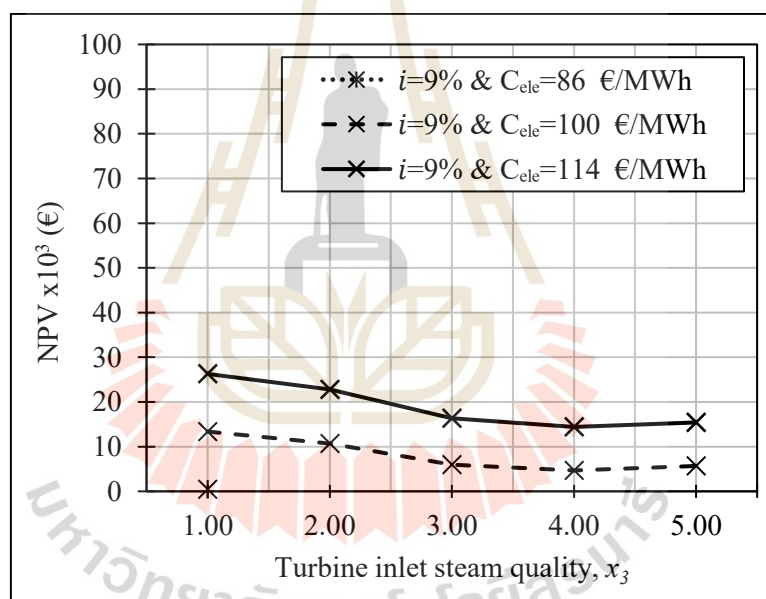
ในขณะที่ LCOE ให้มุมมองของต้นทุนต่อหน่วยของการผลิตไฟฟ้า อย่างไรก็ตาม ไม่ได้หมายถึงกำไรหรือผลประโยชน์ของโครงการ ดังนั้นเพื่อให้เห็นถึงความเป็นไปได้ทางเศรษฐศาสตร์ ในหัวข้อนี้ได้ประเมินมูลค่าปัจจุบันสุทธิ โดยในรูปที่ 5.11 แสดงค่ามูลค่าปัจจุบันสุทธิเมื่อความเป็นไอของสารทำงาน อัตราคิดลดและราคาขายไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไป



(ก) Discount rate = 5%



(ข) Discount rate = 7%



(ค) Discount rate = 9%

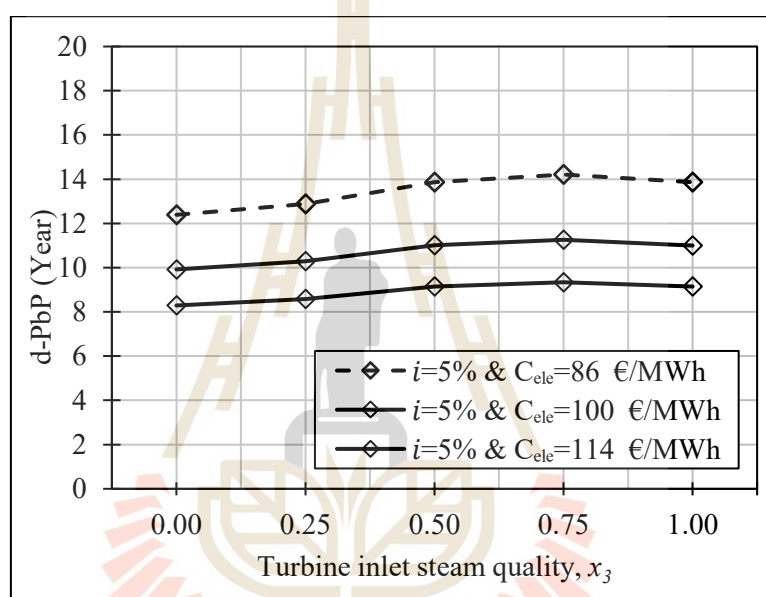
รูปที่ 5.11 มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (NPV) ของโรงไฟฟ้าวัฏจักรโออาร์ซีใช้เทสลาเทอร์ไบน์ ภายใต้ค่าความเป็นไอของสาร R236ea ก่อนเข้าเทสลาเทอร์ไบน์ราคาขายไฟฟ้า และอัตราลดที่แตกต่างกัน

เพื่อเกิดความเป็นไปได้ทางเศรษฐศาสตร์ค่า LCOE ของเงื่อนไขต่าง ๆ ต้องต่ำกว่าราคาขายไฟฟ้า (C_{ele}) โดย พบว่า บางกรณีที่มีอัตราคิดลดสูงและราคาขายไฟฟ้าต่ำ ส่งผลให้ไม่เกิดความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ เช่น ในกรณีที่ $i = 9\%$ และ $C_{ele} = 86$ €/MWh (3 บาท/kWh) มี

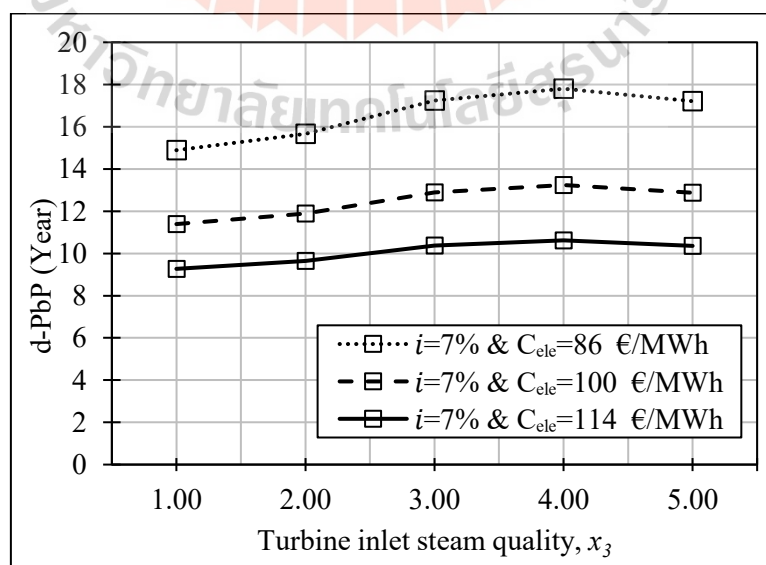
โรงไฟฟ้าที่ $x_3 = 0$ เพียงเท่านั้นที่ยังคงให้ผลกำไร โดยโรงไฟฟ้าที่ $x_3 > 0$ เหล่านี้ค่า LCOE สูงกว่าราคาขายไฟฟ้าทั้งสิ้น ดังนั้นผลของ NPV ดังรูปที่ 5.11 ได้แสดงเพียงกรณีที่เกิดผลกำไรเท่านั้น

โดยผลของ NPV แสดงให้เห็นว่ามีค่าลดลงเมื่อ x_3 มีค่าเพิ่มสูงขึ้น โดยในเงื่อนไขที่ $x_3 = 0$ ที่ $i = 5\%$ และ $C_{ele} = 114 \text{ €/MWh}$ (4 บาท/kWh) ให้กำไรสูงสุดโดยแสดงได้จากการที่เงื่อนไขดังกล่าวสามารถผลิตไฟฟ้าได้สูงที่สุดและต้นทุนทางไฟฟ้าต่ำที่สุด

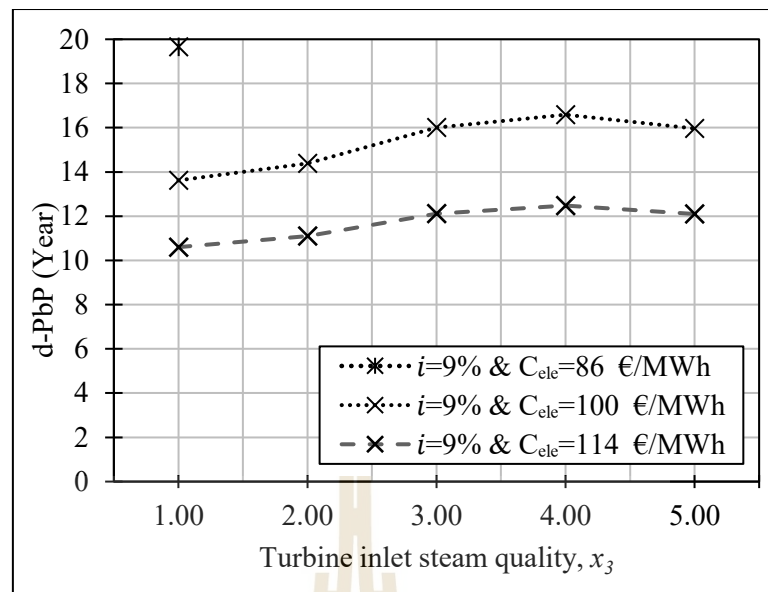
ระยะเวลาคืนทุนที่มีการคิดลด ซึ่งเป็นตัวแปรที่บ่งบอกถึงระยะเวลาที่ใช้ในการคืนทุนโดยผลของระยะเวลาคืนทุนแสดงดังรูปที่ 5.12 ซึ่งพบว่า โดยในเงื่อนไขที่ $x_3 = 0$ คืนทุนเร็วที่สุดซึ่งสอดคล้องกับผลมูลค่าปัจจุบันสุทธิ ซึ่งเมื่อมีผลกำไรที่สูงส่งผลให้คืนทุนได้เร็ว



(ก) Discount rate = 9%



(ข) Discount rate = 9%



(ค) Discount rate = 9%

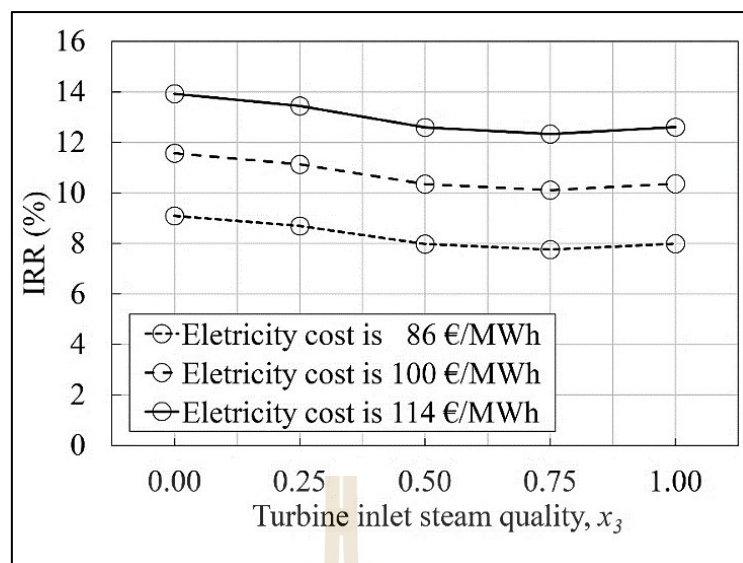
รูปที่ 5.12 ระยะเวลาคืนทุนที่มีการคิดลด (d-PbP) ของโรงไฟฟ้าวัฏจักรโออาร์ซีใช้เทสลาเทอร์ไบน์ ภายใต้ค่าความเป็นไอของสาร R236ea ก่อนเข้าเทสลาเทอร์ไบน์ ราคาขายไฟฟ้า และ อัตราคิดลดที่แตกต่างกัน

5.3.4 อัตราผลตอบแทนภายใน (IRR)

อัตราผลตอบแทนภายใน ให้มุมมองถึงอัตราผลกำไรตอบแทนที่ได้เมื่อจบโครงการ โดย

รูปที่ 5.13 แสดงผลของ IRR เมื่อความเป็นไอของสารทำงานเปลี่ยนแปลงไปที่ราคาขายไฟฟ้าแตกต่างกัน

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รูปที่ 5.13 อัตราผลตอบแทนภายใน (IRR) ของโรงไฟฟ้าวัฏจักรโออาร์ซีใช้เทสลาเทอร์ไบน์ ภายใต้ค่าความเป็นไอสาร R236ea ก่อนเข้าเทสลาเทอร์ไบน์ราคาขายไฟฟ้า และอัตราคิดลดที่แตกต่างกัน

จากผลการประเมิน IRR แสดงให้เห็นว่าผลของ IRR สอดคล้องกับผลของ NPV และ PbP โดยพบว่า โรงไฟฟ้าที่มีความเป็นไอต่ำให้อัตราผลตอบแทนที่สูง ทั้งนี้ เงื่อนไขที่มีค่า IRR สูงที่สุดเมื่อ $x_3 = 0$ โดยมีค่าเท่ากับ 14% ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเงื่อนไขดังกล่าวมีความเป็นไปได้ในเชิงเศรษฐศาสตร์เหนือกรณีอื่น ๆ ในการศึกษา

5.3.5 การเปรียบเทียบผลกับงานวิจัยอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้อง

การเปรียบเทียบผลในการวิจัยนี้กับผลการจำลองในปริทัศน์วรรณกรรม พบว่าโรงไฟฟ้าวัฏจักรโออาร์ซีที่ใช้เทสลาเทอร์ไบน์มีค่า LCOE ต่ำกว่าโรงไฟฟ้าวัฏจักรโออาร์ซีโดยทั่วไปเมื่อเปรียบเทียบที่แหล่งความร้อนอุณหภูมิใกล้เคียงกัน ยกตัวอย่างเช่น เมื่อ $x_3 = 0$ ในการศึกษานี้ได้ LCOE เท่ากับ 64 €/MWh (2.24 บาท/kWh) ซึ่งต่ำกว่าผลของ LCOE จากงานวิจัยจากปริทัศน์วรรณกรรม (135 €/MWh หรือ 4.75 บาท/kWh) ที่แหล่งความร้อนในช่วง 70 °C ถึง 275°C ดังตารางที่ 5.4

ตารางที่ 5.4 ผลการเปรียบเทียบค่า LCOE กับงานวิจัยอื่น ๆ จากปริทัศน์วรรณกรรม

| อ้างอิง | $T_{hs,in}$ | สารทำงาน | LCOE | อายุโครงการ | อัตราคิดลด | ชนิดแหล่งความร้อน | x_3 | ชนิดของเทอร์ไบน์ |
|-----------------------------|-------------|----------|-----------|-------------|------------|-------------------|-------|------------------|
| | (°C) | | (€/MWh) | (ปี) | (%) | | | |
| (Walraven et al., 2015) | 70 | R1234yf | 55 - 185 | 30 | 4.00 | Geothermal | 1 | Axial |
| (Sonsaree et al., 2019) | 100 | R25fa | 142 | 25 | 7.33 | Solar | 1 | Screw |
| (Feng et al., 2015) | 120 | R245fa | 104 - 108 | 20 | 5.00 | Low-grade | 1 | Radial |
| (Sun et al., 2018) | 100 - 150 | R600a | 100 - 150 | 25 | 12.0 | Geothermal | 1 | Radial |
| (Karimi and Mansouri, 2017) | 150 | R123 | 49 - 147 | 20 | 7.00 | Geothermal | 1 | Radial |
| (Patil et al., 2017) | 161 - 275 | R600a | 170 - 242 | 25 | 12.0 | Solar | 1 | Scroll |

การปรับปรุงทางเศรษฐศาสตร์นี้สามารถแบ่งได้ออกเป็นสองปัจจัยสำคัญได้แก่

1) โรงไฟฟ้าใช้สารทำงานที่เป็นของเหลวอิมมิตัว ($x_3 = 0$) ซึ่งส่งผลให้ผลิตกระแสไฟฟ้าต่อปีได้สูงขึ้น โดยสามารถผลิตได้มากกว่าโรงไฟฟ้าวัฏจักรโออาร์ซีโดยทั่วไปที่ความเป็นไอของสารทำงานก่อนเข้าเทอร์ไบน์เป็นไออิมมิตัว 32% จากผลในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

2) โรงไฟฟ้าใช้เทสลาเทอร์ไบน์ซึ่งมีราคาต่ำกว่าส่งผลให้เงินลงทุนเริ่มต้นต่ำกว่าโรงไฟฟ้าที่ใช้เทอร์ไบน์แบบทั่ว ๆ ไป

นอกจากนี้แล้ว เมื่อเปรียบเทียบผลจำลองจากปริทัศน์วรรณกรรมในตารางที่ 5.5 ของ Feng et al. (2015) ที่ใช้ radial เทอร์ไบน์ และแหล่งความร้อนเท่ากับ 120 °C เข้ากับผลของโรงไฟฟ้าที่ความเป็นไอของสารทำงานก่อนเข้าเทอร์ไบน์เป็นไออิมมิตัว ($x_3 = 1$) จากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้พบว่า โรงไฟฟ้าที่ใช้เทสลาเทอร์ไบน์ในวิทยานิพนธ์นี้มี LCOE ที่ต่ำกว่าอยู่ 34% ที่อัตราคิดลด 5% โดยผลนี้แสดงให้เห็นถึงความได้เปรียบทางเศรษฐศาสตร์เมื่อใช้เทสลาเทอร์ไบน์กับโรงไฟฟ้า ถึงแม้ว่าเป็นเงื่อนไขความเป็นไอเดียวกัน

5.4 ข้อจำกัดในการศึกษา

ในขณะที่การศึกษานี้ให้มุมมองของสมรรถนะและความเป็นไปได้ทางเศรษฐศาสตร์ของโรงไฟฟ้าที่ใช้เทคโนโลยีเทอร์โบไบน์เมื่อความเป็นไอของสารทำงานเปลี่ยนแปลงไป อย่างไรก็ตาม ในการศึกษานี้มีข้อจำกัดดังต่อไปนี้

1) ใช้สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนโดยรวมคงที่: ในการศึกษาที่กำหนดให้ใช้สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนโดยรวมคงที่ไม่ว่าความเป็นไอของสารทำงานเปลี่ยนแปลงไป ซึ่งในความเป็นจริงค่าใช้สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนมีค่าลดลงเมื่อความเป็นไอของสารทำงานเพิ่มสูงขึ้น ดังนั้นการถ่ายเทความร้อนของสารทำงานที่มีสถานะเป็นของเหลวมีค่าใช้สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่สูงกว่าไอน้ำ ดังนั้นการกำหนดให้ใช้สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนมีค่าคงที่นี้อาจส่งผลต่อความแม่นยำของผลการคำนวณขนาดของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน

2) ไม่คิดราคาของเชื้อเพลิง: โดยการประเมินความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ไม่ได้รวมค่าเชื้อเพลิงเป็นต้นทุนในการประเมิน ซึ่งโดยทั่วไปแล้วโรงไฟฟ้ามักใช้พลังงานหมุนเวียนหรือพลังงานความร้อนทิ้ง ซึ่งในการศึกษานี้ เน้น ใช้พลังงานความร้อนใต้พิภพพลังงานแสงแดด หรือพลังงานความร้อนทิ้ง ดังนั้น ผลประเมินต้นทุนอาจจะน้อยกว่าที่ควรเป็น โดยในการศึกษาในอนาคตอาจจะเพิ่มเติมในส่วนของต้นทุนทางพลังงานเพื่อให้การประเมินสมจริงมากขึ้น

3) แบบจำลองเทอร์โบไบน์ในอุดมคติ: ในขณะที่แบบจำลองของเทอร์โบไบน์ได้ถูกตรวจสอบความถูกต้องกับการทดลองและการจำลอง ซึ่งแบบจำลองดังกล่าวสามารถจำลองแสดงให้เห็นถึงสมรรถนะของเทอร์โบไบน์ได้ โดยแบบจำลอง 2 มิติดังกล่าว กำหนดให้สภาวะของสารทำงานทางเข้าของโรเตอร์ที่รอบ ๆ ขอบด้านนอกสุดมีค่าเท่ากัน (Uniform inlet conditions around the periphery) ในขณะที่ในความเป็นจริงแล้วเทอร์โบไบน์มีจำนวนนอซเซลล์จำกัด ดังนั้น สภาวะของสารทำงานบริเวณรอบ ๆ ขอบของโรเตอร์จึงอาจไม่สม่ำเสมอได้ นอกจากนี้ ในการผลิตเทอร์โบไบน์จริง อาจมีผลกระทบจากการผลิตจริง อาทิ ความคลาดเคลื่อนในการผลิต คุณสมบัติวัสดุ และการไหลแบบ 3 มิติ ผลกระทบเหล่านี้ส่งผลต่อประสิทธิภาพและกำลังสุทธิของเทอร์โบไบน์ ดังนั้นผลของการใช้แบบจำลองแบบเรียบง่ายส่งผลให้ได้ผลลัพธ์ดีเกินกว่าความเป็นจริงเล็กน้อย อย่างไรก็ตาม ข้อสรุปและแนวโน้มของผลในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ยังคงเป็นประโยชน์

4) ใช้สารทำงานจำกัด: ในการศึกษาที่ใช้เพียงสารทำงาน R236ea เป็นสารทำงาน โดยเลือกจากการแนะนำจากการศึกษาในปริทัศน์วรรณกรรม เพื่อให้เห็นถึงอิทธิพลของการศึกษาความเป็นไอของสารทำงานมากขึ้น ควรศึกษาสารทำงานอื่น ๆ ให้มากขึ้น เพื่อให้มุมมองที่กว้างมากขึ้น

ดังนั้น ในการศึกษาควรแก้ไขข้อจำกัดเหล่านี้ เพื่อให้มุมมองของโรงไฟฟ้าที่ใช้เทอร์โบไบน์ที่ครอบคลุมมากขึ้น

บทที่ 6

พฤติกรรมการทำงานของเตสลาเทอร์ไบน์ในโรงไฟฟ้าวัฏจักรที่แอลซีเมื่อใช้ สารผสมซีโอโทรปิกที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

จากผลการวิเคราะห์ในบทที่ 5 พบว่า โรงไฟฟ้าที่ใช้สารทำงานในสถานะเป็นของเหลวอิมตัว ก่อนเข้าสู่เทอร์ไบน์ หรือโรงไฟฟ้าวัฏจักรที่แอลซี (Trilateral Organic Rankine Cycle: TLC) ให้กำลังสุทธิและความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ที่ดีกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับโรงไฟฟ้าวัฏจักรโออาร์ซีแบบดั้งเดิม (Organic Rankine Cycle: ORC) นอกจากนี้ การใช้เตสลาเทอร์ไบน์ยังแสดงให้เห็นว่ามีความเหมาะสมในการใช้งานร่วมกับโรงไฟฟ้าวัฏจักรที่แอลซีได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ดังนั้น ในหัวข้อนี้จึงมุ่งศึกษาประสิทธิภาพของโรงไฟฟ้าวัฏจักรที่แอลซีที่ใช้เตสลาเทอร์ไบน์ โดยจากการทบทวนปริทัศน์วรรณกรรมพบว่า สารทำงานที่นิยมใช้ในระบบผลิตไฟฟ้าจากแหล่งความร้อนต่ำถึงปานกลาง ได้แก่ R245fa ถึงแม้ว่าสารทำงานนี้ทำให้สมรรถนะโรงไฟฟ้าสูงเมื่อใช้เป็นสารทำงานแต่มีค่า Global Warming Potential (GWP) สูงถึง 1,030 ปี ซึ่งไม่สอดคล้องกับแนวโน้มการลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

อีกทั้ง เพื่อให้สอดคล้องกับแนวทางการลด GWP ในหัวข้อนี้จึงได้คัดเลือกสารทำงานทางเลือกที่มี GWP ต่ำ ซึ่งเป็นสารทำงานที่ถูกนำมาใช้ทดแทน R245fa ในระบบทำความเย็น โดยประกอบด้วย R1233zd(E) (GWP = 4.5) R1336mzz(Z) (GWP = 2) และ R1234ze(E) (GWP < 1) นอกจากนี้ จากการศึกษาปริทัศน์วรรณกรรมยัง พบว่ายังไม่มียานวิจัยใดที่รายงานสมรรถนะของโรงไฟฟ้าวัฏจักรที่แอลซีที่ใช้เตสลาเทอร์ไบน์ร่วมกับสารซีโอโทรปิก (Zeotropic mixtures) รวมถึงในงานวิจัยก่อนหน้าแสดงให้เห็นว่าสามารถช่วยทำให้ผลิตไฟฟ้าได้สูงมากขึ้นในโรงไฟฟ้าโออาร์ซี ดังนั้น ในหัวข้อนี้ได้เพิ่มสารทำงานที่เป็นสารผสมซีโอโทรปิกที่เกิดจากการจัดคู่ของสารทดแทน R245fa ข้างต้นด้วย

โดยผลที่แสดงในหัวข้อนี้ประกอบไปด้วย 3 หัวข้อได้แก่ การประเมินสมรรถนะของระดับอุปกรณ์ การประเมินสมรรถนะของระบบและการประเมินความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ เมื่อสารทำงานของโรงไฟฟ้าวัฏจักรที่แอลซีเปลี่ยนแปลงไปโดยมีรายละเอียดเป็นดังต่อไปนี้

6.1 การประเมินสมรรถนะของระดับอุปกรณ์

ในหัวข้อนี้ได้ประเมินผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงสารทำงานที่กระทบต่อสมรรถนะของอุปกรณ์ภายในโรงไฟฟ้าวัฏจักรที่แอลซี เพื่อให้เห็นถึงกลไกพื้นฐานที่ส่งผลกระทบต่อสมรรถนะโดยรวมของโรงไฟฟ้า โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้



ตารางที่ 6.1 ผลของเงื่อนไขการทำงานที่เหมาะสมและอุณหภูมิวิกฤตของโรงไฟฟ้าวัฏจักรที่แอลซีเมื่อสารทำงานเปลี่ยนแปลงไป

| สารทำงาน | อัตราส่วนโดย มวล | P_{heater} | | P_{cond} | | \dot{m}_{wf} | | $T_{critical}$ | |
|----------------------------|--|--------------|------------------------|------------|------------------------|----------------|------------------------|----------------|------------------------|
| | | (MPa) | (%) เทียบกับ R245fa | (MPa) | (%) เทียบกับ R245fa | (kg/s) | (%) เทียบกับ R245fa | (°C) | (%) เทียบกับ R245fa |
| R1233zd(E)/ R1336mzz(Z) | 0.00/1.00* | 0.85 | -43.30 | 0.18 | -48.12 | 3.33 | 11.10 | 171.35 | 11.37 |
| | 0.25/0.75 | 0.97 | -35.38 | 0.21 | -39.13 | 3.33 | 11.10 | 169.90 | 10.43 |
| | 0.50/0.50 | 1.08 | -28.38 | 0.24 | -30.14 | 3.33 | 11.10 | 168.62 | 9.59 |
| | 0.75/0.25 | 1.16 | -22.58 | 0.27 | -21.74 | 3.33 | 11.10 | 167.48 | 8.85 |
| | 1.00/0.00** | 1.23 | -18.19 | 0.29 | -14.78 | 3.33 | 11.10 | 166.45 | 8.18 |
| R1233zd(E)/ R1234ze(E) | 0.00/1.00*** | 3.25 | 116.52 | 1.00 | 189.57 | 2.67 | -11.10 | 109.36 | -28.92 |
| | 0.25/0.75 | 2.94 | 95.74 | 0.77 | 122.90 | 2.67 | -11.10 | 122.24 | -20.55 |
| | 0.50/0.50 | 2.38 | 58.56 | 0.58 | 67.54 | 3.00 | 0.00 | 135.99 | -11.62 |
| | 0.75/0.25 | 1.81 | 20.32 | 0.42 | 21.74 | 3.33 | 11.10 | 150.69 | -2.06 |
| | 1.00/0.00** | 1.23 | -18.19 | 0.29 | -14.78 | 3.33 | 11.10 | 166.45 | 8.18 |
| R1336mzz(Z)/ R1234ze(E) | 0.00/1.00*** | 3.25 | 116.52 | 1.00 | 189.57 | 2.67 | -11.10 | 109.36 | -28.92 |
| | 0.25/0.75 | 2.87 | 91.41 | 0.69 | 100.29 | 2.67 | -11.10 | 121.02 | -21.34 |
| | 0.50/0.50 | 2.08 | 38.57 | 0.52 | 49.28 | 3.33 | 11.10 | 134.78 | -12.40 |
| | 0.75/0.25 | 1.42 | -5.53 | 0.36 | 4.35 | 3.67 | 22.23 | 151.26 | -1.69 |
| | 1.00/0.00* | 0.85 | -43.30 | 0.18 | -48.12 | 3.33 | 11.10 | 171.35 | 11.37 |
| R245fa บริสุทธิ์ | - | 1.50 | - | 0.35 | - | 3.00 | - | 153.86 | - |
| หมายเหตุ | * คือ R1336mzz(Z) บริสุทธิ์ ** คือ R1233zd(E) บริสุทธิ์ *** คือ R1234ze(E) บริสุทธิ์ | | | | | | | | |

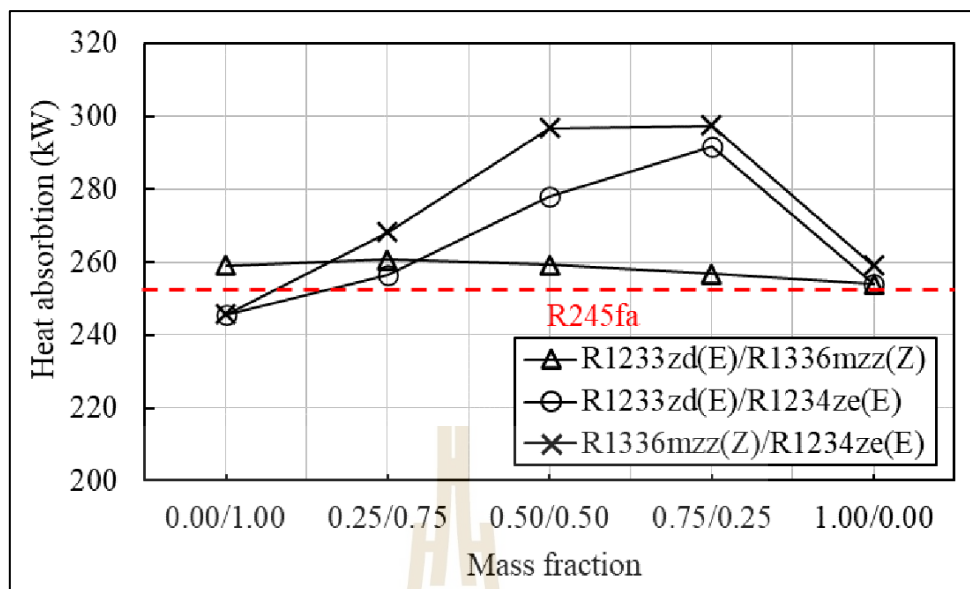
6.1.1 เงื่อนไขการทำงานของโรงไฟฟ้าและอุณหภูมิวิกฤตของสารทำงาน

โดยผลดังตารางที่ 6.1 ได้นำเสนอเงื่อนไขการทำงานของโรงไฟฟ้าที่เหมาะสมเพื่อให้ได้กำลังสุทธิสูงสุดที่สุดของแต่ละสารทำงาน จากผลการจำลองแสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิวิกฤต ($T_{critical}$) ส่งผลโดยตรงกับเงื่อนไขการทำงาน โดยเมื่อสารซีโอโทรปิกใดที่ผสมกันแล้วมี $T_{critical}$ ใกล้เคียงกับ R245fa ทำให้เงื่อนไขการทำงานใกล้เคียงกับ R245fa อาทิ สารทำงาน R1336mzz(Z)/R1234ze(E) ที่อัตราส่วนมวลเท่ากับ 0.75/0.25 มี $T_{critical}$ ต่ำกว่า R245fa เท่ากับ 1.69% พบว่าความดันที่เหมาะสมที่ฮีตเตอร์ต่ำกว่า R245fa อยู่ 5.3% และคอนเดนเซอร์สูงกว่า R245fa อยู่ 5.7 % อย่างไรก็ตาม แนวโน้มดังกล่าวไม่สอดคล้องกับอัตราการไหลของสารทำงาน โดยอัตราการไหลของสารทำงานนี้สูงกว่า R245fa อยู่ 22%

นอกจากนี้ การใช้สารทำงานบริสุทธิ์ที่เป็นตัวทดแทนสาร R245fa พบว่าเงื่อนไขการทำงานของโรงไฟฟ้าแตกต่างกับโรงไฟฟ้าที่ใช้ R245fa มาก แสดงให้เห็นว่าการใช้งานสารทำงานที่เป็นสารทดแทน R245 ในระบบทำความเย็นมาใช้กับโรงไฟฟ้าวัฏจักรที่แอลซีนั้นไม่สามารถนำไปใช้ทดแทนในระบบเดิมที่ใช้ R245fa อยู่แล้วได้ทันที

6.1.2 พฤติกรรมของการถ่ายเทความร้อน

โรงไฟฟ้าวัฏจักรที่แอลซีซึ่งสารทำงานก่อนเข้าเทอร์โบอยู่ในสถานะของเหลวอิ่มตัว ดังนั้นการเปลี่ยนสถานะของสารทำงานจะเกิดขึ้นเฉพาะที่คอนเดนเซอร์เท่านั้นโดยไม่มีภาระเหยในฮีตเตอร์ ซึ่งลักษณะการทำงานเฉพาะนี้ส่งผลต่อพฤติกรรมของสารผสมซีโอโทรปิกในการถ่ายเทความร้อน เมื่อเปรียบเทียบกับโรงไฟฟ้าวัฏจักรโออาร์ซีแบบทั่วไป โดยผลของการรับความร้อนจากแหล่งความร้อนเมื่อใช้สารทำงานที่แตกต่างกันแสดงไว้ในรูปที่ 6.1



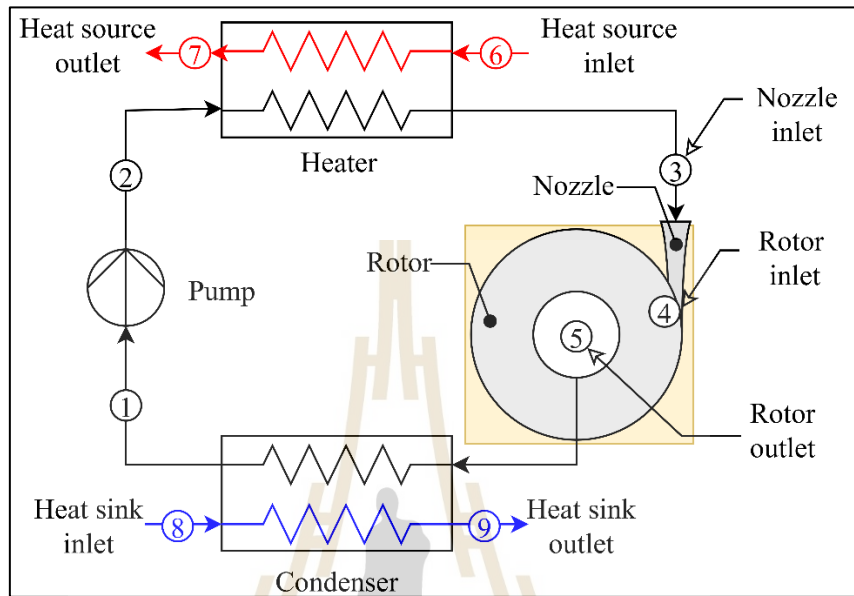
รูปที่ 6.1 ผลการรับความร้อนของสารทำงานในฮีตเตอร์เมื่อสารทำงานเปลี่ยนแปลงไป โดยเส้นสีแดงคือผลของสารทำงาน R245fa

จากรูปที่ 6.1 พบว่าสารผสม R1336mzz(Z)/R1234ze(E) ที่สัดส่วนมวลเท่ากับ 0.50/0.50 และ 0.75/0.25 สามารถรับความร้อนจากแหล่งความร้อนได้สูงที่สุด โดยมีค่าเท่ากับ 296 kW และ 297 kW ตามลำดับ โดยมากกว่า R245fa ประมาณ 17% เป็นที่น่าสนใจว่า โรงไฟฟ้าที่ใช้สารทำงานเป็นผสมซีโอโทรปิกในมีอัตราส่วนที่เหมาะสมที่ส่งผลให้สารทำงานรับความร้อนได้สูงที่สุด โดยสารผสม R1233zd(E)/R1234ze(E) สามารถรับความร้อนได้สูงที่สุดที่ 0.75/0.25 ในขณะที่สารผสม R1233zd(E)/R1336mzz(Z) สูงที่สุดที่ 0.25/0.75

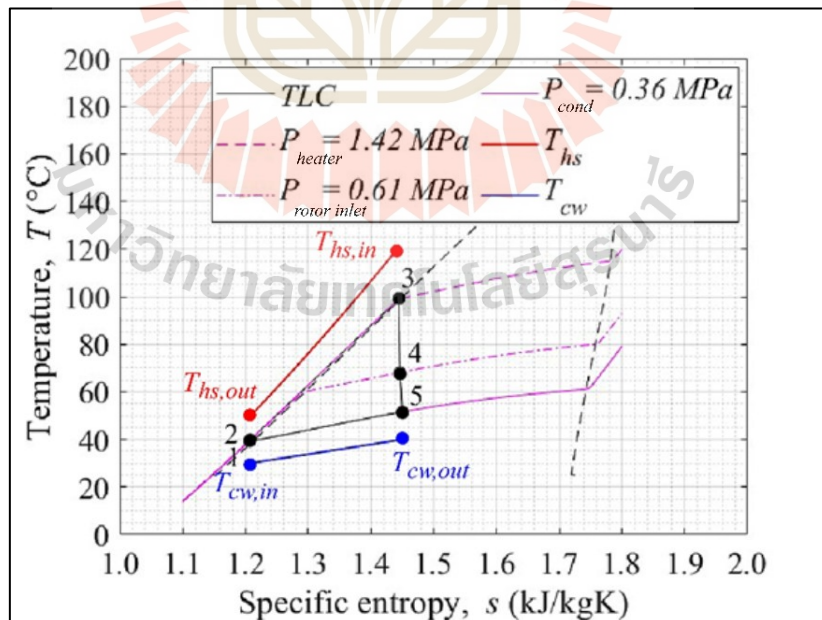
ที่สำคัญคือ เมื่อใช้สารทำงานที่เป็นสารผสมซีโอโทรปิกสามารถรับความร้อนได้มากกว่าสารบริสุทธิ์ทุกคู่ดังรูปที่ 6.1 ซึ่งโดยทั่วไปแล้ว การเพิ่มความสามารถในการรับความร้อนของสารทำงานเมื่อใช้ซีโอโทรปิกจากการเกิดการไต่ของอุณหภูมิ (Temperature glide) ในขณะสารทำงานเปลี่ยนสถานะในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน อย่างไรก็ตาม สำหรับโรงไฟฟ้าวัฏจักรที่แอลซีไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงสถานะของสารทำงานในฮีตเตอร์ ดังรูปที่ 1.1 ดังนั้น จึงเกิดคำถามสำคัญคือ “เมื่อใช้สารผสมซีโอโทรปิกช่วยเพิ่มการถ่ายเทความร้อนของสารทำงานได้อย่างไรเมื่อไม่เกิดการไต่ของอุณหภูมิในฮีตเตอร์”

เพื่อตอบคำถามดังกล่าว วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ใช้อุปกรณ์ของโรงไฟฟ้าวัฏจักรที่แอลซี ดังรูปที่ 6.2 และฝั่งของอุณหภูมิและเอนโทรปีจำเพาะของสารผสม R1336mzz(Z)/R1234ze(E) ที่อัตราส่วนโดยมวล 0.75/0.25 (สารทำงานนี้รับความร้อนได้สูงที่สุด) และสาร R245fa บริสุทธิ์ โดยผล

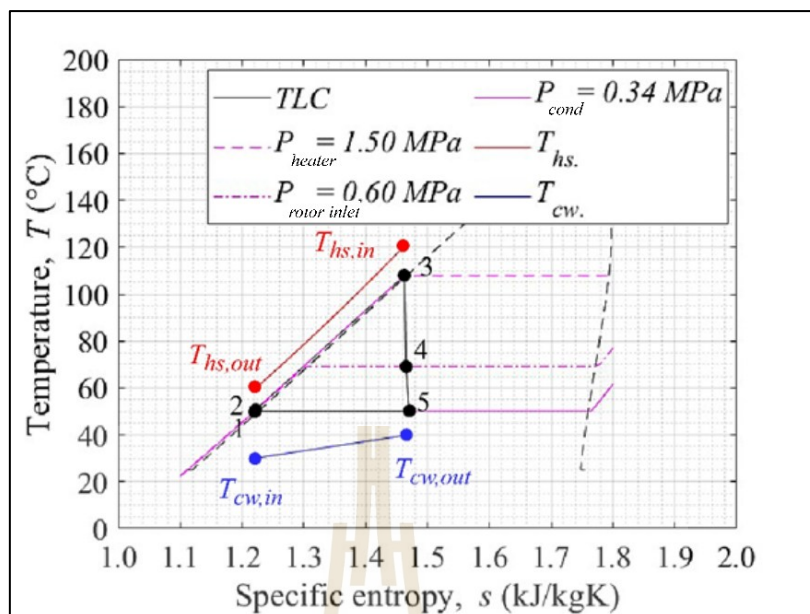
แสดงดังรูปที่ 6.2 และ 6.3 ตามลำดับ เพื่อใช้ในการวิเคราะห์พฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนระหว่างสารผสมและสารบริสุทธิ์



รูปที่ 6.2 ผังของอุปกรณ์ของโรงไฟฟ้าวัฏจักรที่แอลซี



รูปที่ 6.3 ผังของอุณหภูมิและเอนโทรปีจำเพาะของสารผสม R1336mzz(Z)/R1234ze(E) ที่อัตราส่วนโดยมวล 0.75/0.25

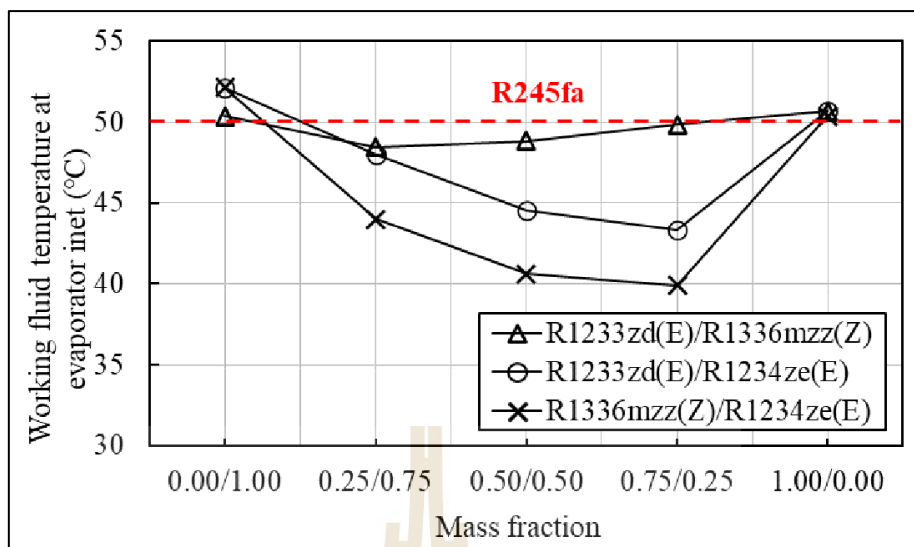


รูปที่ 6.4 ผังของอุณหภูมิและเอนโทรปีจำเพาะของสาร R245fa บริสุทธิ์

จากรูปที่ 6.3 และ 6.4 แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิของสารทำงานที่เข้าฮีตเตอร์ (จุดที่ 2) ทั้งสองสารทำงานมีความแตกต่างกัน โดยสาร R1336mzz(Z)/R1234ze(E) ที่อัตราส่วนโดยมวลเท่ากับ 0.75/0.25 มีอุณหภูมิเท่ากับ 39.9°C ในขณะที่สาร R245fa บริสุทธิ์มีค่าเท่ากับ 50°C โดยความแตกต่างนี้เกิดจากการไต่ของอุณหภูมิภายในคอนเดนเซอร์ ส่งผลให้อุณหภูมิของสารทำงานที่ออกจากคอนเดนเซอร์มีอุณหภูมิต่ำกว่าเมื่อใช้สารผสมซีไอโตรีปิก ซึ่งผลดังกล่าวสอดคล้องกับการศึกษาก่อนหน้า [(Zhao and Bao, 2014); (Thurairaja et al., 2019)] โดยพบว่า การไต่ของอุณหภูมิในคอนเดนเซอร์ส่งผลให้อุณหภูมิของสารทำงานก่อนเข้าฮีตเตอร์ต่ำลง

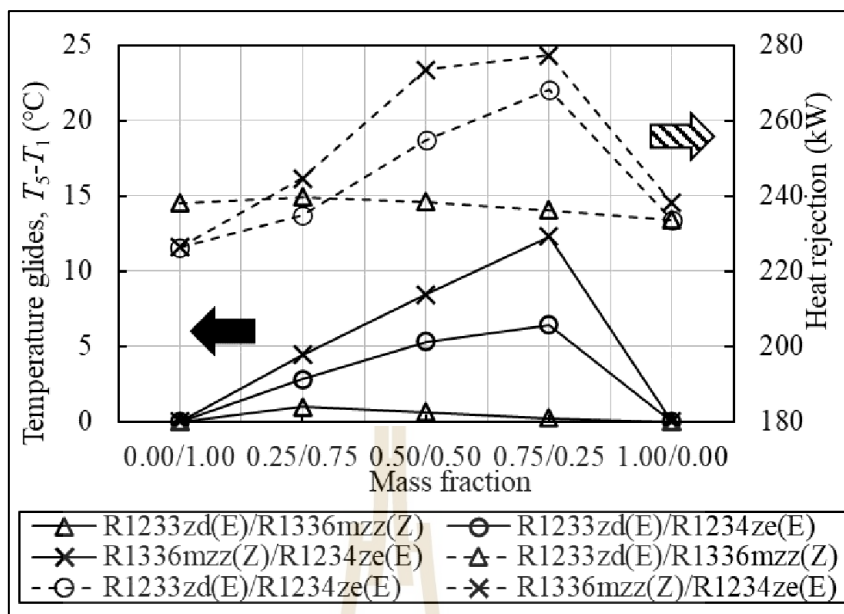
โดยจากผลการทดลอง สารผสม R1336mzz(Z)/R1234ze(E) และ R245fa บริสุทธิ์ มีอุณหภูมิของสารทำงานที่ทางออกของฮีตเตอร์มีค่าใกล้เคียงกันประมาณ 100°C (จุดที่ 3) เนื่องจากกำหนดให้ทั้งสองโรงไฟฟ้ามีอุณหภูมิแหล่งความร้อนเท่ากัน ดังนั้น สารทำงานที่เป็นสารผสมที่อุณหภูมิของสารทำงานที่เข้าฮีตเตอร์ต่ำจึงทำให้เกิดความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างสารทำงานและแหล่งความร้อนมากขึ้นจึงส่งผลให้โรงไฟฟ้ารับความร้อนได้มากขึ้นดังรูปที่ 6.1

ความสัมพันธ์ดังกล่าว สามารถยืนยันเพิ่มเติมได้จากการเปรียบเทียบอุณหภูมิทางเข้าฮีตเตอร์ของสารทำงานทั้งหมดในรูปที่ 6.5 โดยพบว่า สารผสม R1336mzz(Z)/R1234ze(E) ที่อัตราส่วนมวล 0.75/0.25 และ 0.50/0.50 มีปริมาณการรับความร้อนใกล้เคียงกัน (รูปที่ 6.1) และมีอุณหภูมิก่อนเข้าฮีตเตอร์ที่ใกล้เคียงกันเช่นเดียวกัน โดยมีค่าเท่ากับ 39.9°C และ 40.6°C ตามลำดับ



รูปที่ 6.5 ผลของอุณหภูมิของสารทำงานที่เข้าฮีตเตอร์เมื่อสารทำงานเปลี่ยนแปลงไป

จากการพิจารณาอุณหภูมิวิกฤตของสารทำงานดังตารางที่ 6.1 เข้ากับแนวโน้มการรับความร้อนของแต่ละสารทำงาน พบว่าความแตกต่างของอุณหภูมิวิกฤตของสารทำงานที่นำมาผสมกันมีผลกระทบต่อความสามารถในการรับความร้อน โดยสารทำงานที่มีอุณหภูมิวิกฤตใกล้เคียงกัน (ตัวอย่างเช่น R1233zd(E) อุณหภูมิวิกฤตเท่ากับ 166.45 °C และ R1336mzz(Z) อุณหภูมิวิกฤตเท่ากับ 171.35 °C) สารทำงานดังกล่าวรับความร้อนได้น้อยเมื่อนำมาผสมกัน ในขณะที่การผสมสารทำงานที่มีอุณหภูมิวิกฤตแตกต่างกันมากช่วยเพิ่มความสามารถในการถ่ายเทความร้อนได้ โดยผลแสดงดังรูปที่ 6.6



รูปที่ 6.6 การไต่ของอุณหภูมิและการทิ้งความร้อนของสารทำงานที่คอนเดนเซอร์เมื่อสารทำงานเปลี่ยนแปลงไป

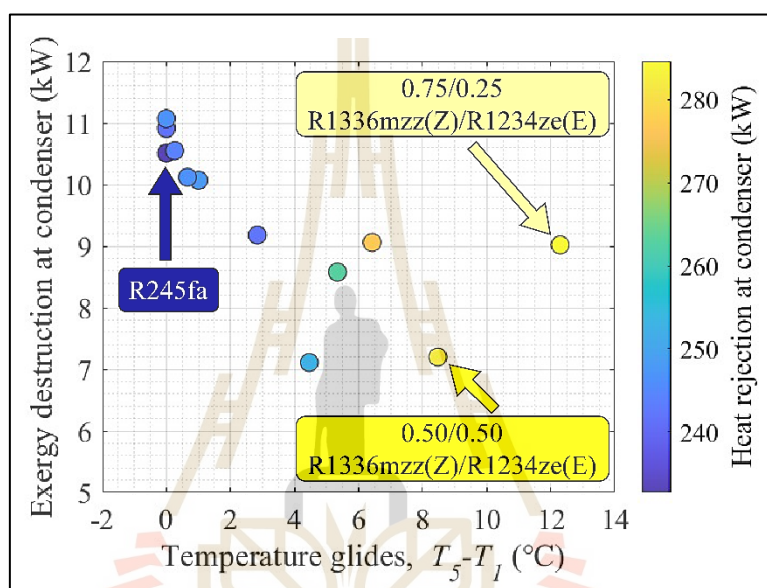
จากผลดังรูปที่ 6.5 แสดงให้เห็นว่าสารทำงานที่มีการไต่ของอุณหภูมิสูงโดยทั่วไปแล้วส่งผลให้ทิ้งความร้อนที่คอนเดนเซอร์ได้สูง อย่างไรก็ตามสารผสมบางคู่มิแนวโน้มแตกต่างกันออกไป อาทิ สารผสม R1233zd(E)/R1336mzz(Z) ที่อัตราส่วนโดยมวลเท่ากับ 0.25/0.75 แสดงให้เห็นว่าสามารถทิ้งความร้อนได้สูงในขณะที่มีการไต่ของอุณหภูมิต่ำ ซึ่งเกิดจากความสามารถในการทิ้งความร้อนของสาร R1336mzz(Z) ซึ่งเมื่อพิจารณาเฉพาะสารบริสุทธิ์ พบว่าสาร R1336mzz(Z) เป็นสารที่ทิ้งความร้อนได้มากที่สุด ดังนั้นเมื่อนำไปผสมกับสารอื่นส่งผลให้สามารถทิ้งความร้อนได้ดีตามไปด้วย

เป็นที่น่าสนใจว่า สารผสม R1233zd(E)/R1336mzz(Z) แสดงให้เห็นว่าเป็นสารที่มีการไต่ของอุณหภูมิกายในคอนเดนเซอร์ต่ำที่สุด เนื่องจากอุณหภูมิจุดเดือดของสองสารทำงานที่นำมาผสมมีค่าใกล้เคียงกัน (166.45 °C และ 171.35 °C ตามลำดับ) ซึ่งส่งผลให้อุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงเมื่อสารทำงานเปลี่ยนแปลงสถานะ (การไต่ของอุณหภูมิ) เปลี่ยนแปลงน้อยตามไปด้วย ดังนั้น การเลือกสารทำงานที่มีความแตกต่างของอุณหภูมิจุดเดือดสูงสามารถช่วยเพิ่มการไต่ของอุณหภูมิและเพิ่มศักยภาพของคอนเดนเซอร์ได้

นอกจากนี้ พบว่า R1336mzz(Z)/R1234ze(E) ที่อัตราส่วนโดยมวลเท่ากับ 0.75/0.25 มีการไต่ของอุณหภูมิที่สูงที่สุด โดยมีค่าเท่ากับ 12.3 °C ตามด้วยสารผสมเดียวกันแต่

อัตราส่วนโดยมวลเท่ากับ 0.50/0.50 มีการไต่ของอุณหภูมิเท่ากับ $8.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ โดยที่การไต่ของอุณหภูมิดังกล่าวมีความแมตช์อุณหภูมิ (Temperature match) กับน้ำหล่อเย็นที่มีความแตกต่างของอุณหภูมิเข้าและออกที่ $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ จึงส่งผลให้เกิดการถ่ายเทความร้อนที่มีประสิทธิภาพและสม่ำเสมอ

นอกจากค่าการไต่ของอุณหภูมิแล้ว การวิเคราะห์การทำลายเอกเซอร์ยีสามารถให้มุมมองของความไม่ผันกลับของกระบวนการ (Irreversibility) โดยการทำลายเอกเซอร์ยีมากยิ่งขึ้นเพิ่มความไม่ผันกลับของกระบวนการมากขึ้น โดยรูปที่ 6.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการไต่ของอุณหภูมิที่ส่งผลต่อการทำลายของเอกเซอร์ยีและการทิ้งความร้อนที่คอนเดนเซอร์



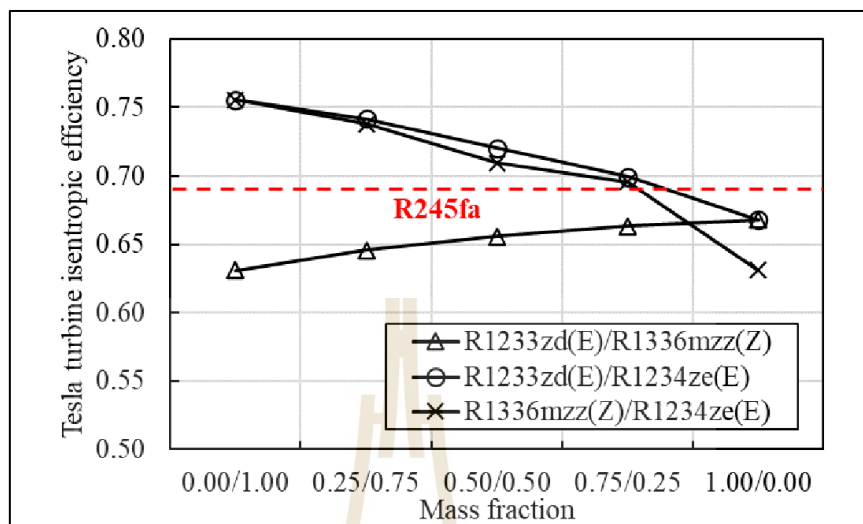
รูปที่ 6.7 ผลของการไต่ของอุณหภูมิต่อการทำลายเอกเซอร์ยีและการทิ้งความร้อนของสารทำงานที่คอนเดนเซอร์

จากรูปที่ 6.7 แสดงให้เห็นว่าสารทำงานที่มีการไต่ของอุณหภูมิใกล้ $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ (อยู่ในช่วง $6.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ ถึง $12.3\text{ }^{\circ}\text{C}$) การทำลายของเอกเซอร์ยีมีค่าต่ำในคอนเดนเซอร์ ในขณะที่ทิ้งความร้อนได้มาก โดยความแมตช์อุณหภูมิระหว่างสารทำงานและแหล่งทิ้งความร้อนช่วยให้ความแตกต่างของอุณหภูมิสม่ำเสมอระหว่างการถ่ายเทความร้อนในคอนเดนเซอร์ส่งผลให้ช่วยลดความไม่ผันกลับของกระบวนการ (Irreversibility) และเพิ่มความสามารถในการถ่านความร้อน อย่างไรก็ตาม สารบริสุทธิ์ (ไม่เกิดการไต่ของอุณหภูมิ) แสดงให้เห็นว่ามีการทำลายเอกเซอร์ยีที่สูงกว่าสารผสม

6.1.3 พฤติกรรมของเทสลาเทอร์ไบน์

ในหัวข้อนี้ได้ศึกษาอิทธิพลของการเปลี่ยนสารทำงานที่แตกต่างกันส่งผลกระทบต่อสมรรถนะของเทสลาเทอร์ไบน์อย่างไรเมื่อใช้เป็นเทอร์ไบน์ในโรงไฟฟ้าวัฏจักรที่แอลซี โดยผลของ

ประสิทธิภาพของเตสลาเทอร์ไบน์แสดงดังรูปที่ 6.8 และขนาดของเทอร์ไบน์และการทำงานที่เหมาะสมแสดงในภาคผนวก ง



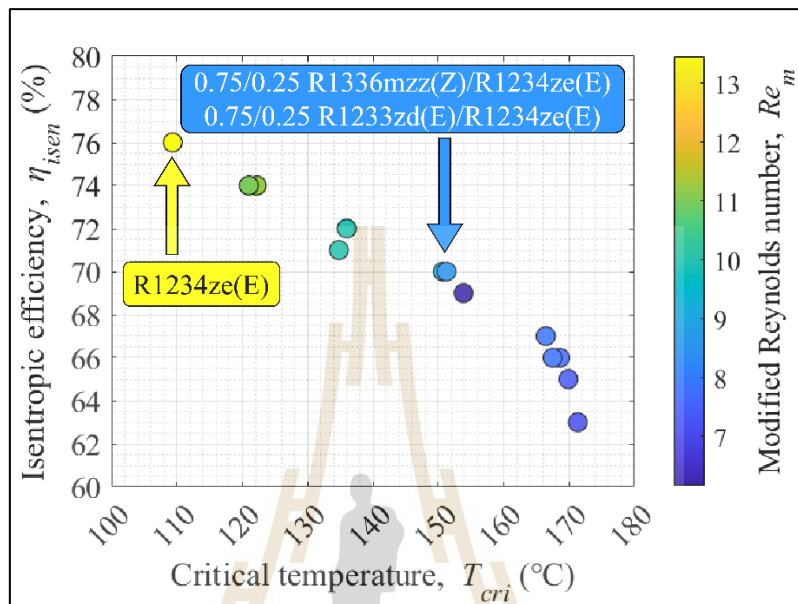
รูปที่ 6.8 ประสิทธิภาพไอเซนโทรปิกของเตสลาเทอร์ไบน์เมื่อสารทำงานเปลี่ยนแปลงไป

จากรูปที่ 6.8 แสดงให้เห็นว่าสารทำงาน R1234ze(E) บริสุทธิ์ ส่งผลให้ประสิทธิภาพไอเซนโทรปิกของเตสลาเทอร์ไบน์สูงที่สุดโดยมีค่าเท่ากับ 76% ในขณะที่สาร R245fa บริสุทธิ์ให้ประสิทธิภาพไอเซนโทรปิกน้อยกว่าเล็กน้อยที่ 69% อีกทั้ง พบว่าประสิทธิภาพไอเซนโทรปิกของ เตสลาเทอร์ไบน์เมื่อใช้กับสารผสมซีโอโทรปิกขึ้นอยู่กับส่วนประกอบของสารที่นำมาผสมกัน ดังนั้นแสดงให้เห็นว่าคุณสมบัติของสารทำงานส่งผลอย่างมากกับประสิทธิภาพไอเซนโทรปิกของสารทำงาน

เพื่อให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติของสารทำงานกับประสิทธิภาพไอเซนโทรปิกของเตสลาเทอร์ไบน์ ในหัวข้อนี้ได้ใช้ modified Reynolds number (Re_m) เทียบกับประสิทธิภาพไอเซนโทรปิกของเตสลาเทอร์ไบน์ โดยที่ Re_m เป็นตัวแปรไร้มิติที่ได้จากการทำ non-dimensionalized Navier-Stokes equations (Alrabie et al., 2017) โดยสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 6.1 ซึ่งจากการศึกษาพบว่า เป็นตัวแปรที่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของเทอร์ไบน์และขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของสารทำงาน

$$Re_m = \frac{2b\dot{m}_c}{\pi\mu_{TP,A}r_d^2} \quad (6.1)$$

โดยผลของอุณหภูมิวิกฤตและ Re_m ต่อประสิทธิภาพไอเซนโทรปิกของเทสลาเทอร์ไบน์แสดงดังรูปที่ 6.9



รูปที่ 6.9 อิทธิพลของอุณหภูมิวิกฤต และ Modified Reynolds number ต่อประสิทธิภาพไอเซนโทรปิกของเทสลาเทอร์ไบน์

จากรูปที่ 6.9 แสดงให้เห็นว่าสารทำงานที่มีอุณหภูมิวิกฤตต่ำส่งผลให้ได้ประสิทธิภาพไอเซนโทรปิกสูง โดยการเปลี่ยนแปลงของประสิทธิภาพไอเซนโทรปิกอยู่ในช่วง 60% ถึง 76% โดยที่สาร R1234ze(E) บริสุทธิ์ที่มีอุณหภูมิวิกฤตต่ำที่สุดในการศึกษาครั้งนี้คือ 110 °C ได้ประสิทธิภาพไอเซนโทรปิกสูงที่สุดเท่ากับ 76%

นอกจากนี้ จากรูปที่ 6.9 ยังแสดงให้เห็นว่าการทำงานของเทสลาเทอร์ไบน์ยังทำงานอยู่ในช่วงการไหลแบบราบเรียบ (Laminar flow) ตามค่าของ Re_m โดยประเด็นนี้มีความสำคัญเนื่องจากเทสลาเทอร์ไบน์สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงภายใต้สภาวะการไหลแบบลามินาร์ ซึ่งแรงหนืดจะมีบทบาทหลักในการถ่ายเทโมเมนตัมจากสารทำงานไปยังโรเตอร์อย่างมีประสิทธิภาพ

จากผลการศึกษาของ Moran et al. (2010) สารทำงานที่มีอุณหภูมิวิกฤตสูงจะมีความดันอิ่มตัวต่ำกว่า ภายใต้สภาวะอุณหพลศาสตร์ที่เท่ากัน สำหรับโรงไฟฟ้าวัฏจักรที่แอลซีที่ใช้ใน

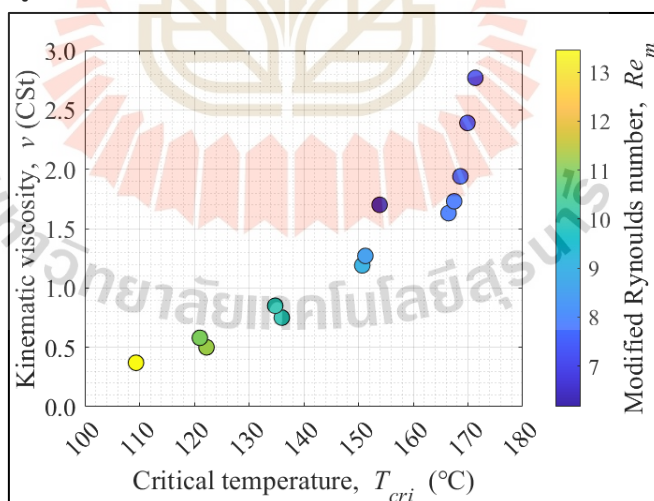
งานวิจัยนี้ ความดันของสารทำงานที่ฮีตเตอร์จำเป็นต้องสูงพอที่จะทำให้สารทำงานกลายเป็นของเหลว อิมตัวที่ทางออกของฮีตเตอร์ที่อุณหภูมิ $\sim 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ขณะที่ความดันที่คอนเดนเซอร์ต้องต่ำพอเพื่อให้สารทำงานกลั่นตัวก่อนออกจากคอนเดนเซอร์ที่อุณหภูมิ $\sim 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ ทั้งสองความดันนี้จะต่ำกว่าสารทำงานที่มีอุณหภูมิวิกฤตต่ำกว่า โดยแนวโน้มดังกล่าวสามารถสังเกตได้อย่างชัดเจนในตารางที่ 4.1

โดยที่เมื่อความดันของสารทำงานเปลี่ยนตามอุณหภูมิวิกฤต ส่งผลให้เกิดผลกระทบต่อคุณสมบัติของสารทำงาน โดยจากสมการ Re_m ดังสมการที่ 4.1 ซึ่งส่งผลโดยตรงกับประสิทธิภาพของเทสลาเทอร์ไบน์ดังรูปที่ 6.9

โดย Re_m สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของความสัมพันธ์ของคุณสมบัติของสารทำงาน ได้ดังสมการที่ 6.2 เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ประสิทธิภาพไอเซนโทรปิกที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อสารทำงานเปลี่ยน

$$Re_m = \frac{2b(2v_{r,4}\rho_{TP,4})}{\mu_{TP,4}r_4} = \frac{4v_{r,4}b^2}{r_4V_{TP,4}} \quad (6.2)$$

โดยจากสมการที่ 6.2 แสดงให้เห็นว่า Re_m แปรผกผันกับ $V_{TP,4}$ หรือความหนืดจลน์ (Kinematic viscosity) ดังนั้น ในการศึกษานี้ได้วิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่าง $V_{TP,4}$ และ Re_m เมื่ออุณหภูมิวิกฤตของสารทำงานเปลี่ยนแปลงไป โดยความสัมพันธ์แสดงได้รูปที่ 6.10



รูปที่ 6.10 อิทธิพลของอุณหภูมิวิกฤต และ Modified Reynolds number ต่อความหนืดจลน์

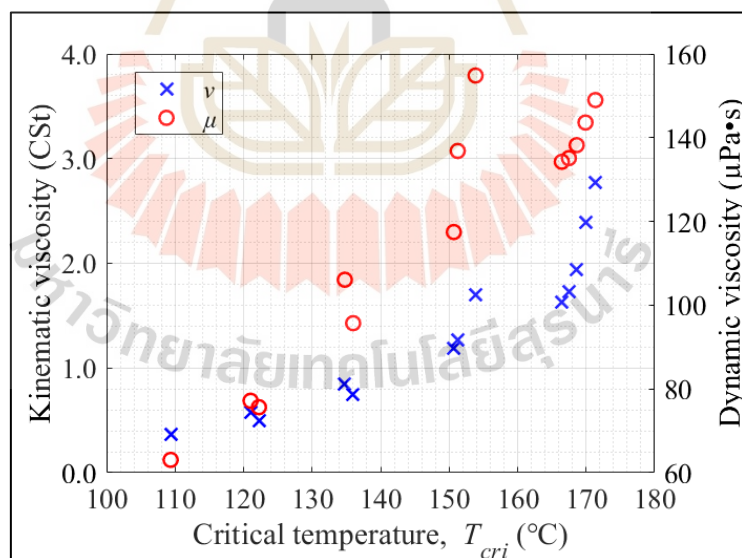
โดยจากรูปที่ 6.10 แสดงให้เห็นว่าเมื่ออุณหภูมิวิกฤตเพิ่มสูงขึ้นส่งผลให้ความหนืดจลน์เพิ่มสูงขึ้นส่งผลให้ Re_m^* ลดลง จึงทำให้ประสิทธิภาพของเทสลาเทอร์ไบน์ลดลงตามไปด้วยดังรูปที่ 6.9 โดยความหนืดจลน์คือความต้านทานการไหลจากแรงเฉื่อยหรือน้ำหนักของตัวสารทำงานเอง โดย

เป็นสัดส่วนระหว่างความหนืดพลวัต (Dynamic viscosity) ต่อความหนาแน่นของสารทำงาน (Density) ซึ่งหมายถึงสารที่มีความหนืดจลน์สูงจะไหลได้ยากซึ่งผลกระทบที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงความดันของเตสลาเทอร์ไบน์ดังสมการที่ 3.47 (บทที่ 3) สามารถปรับเขียนให้อยู่ในรูปความสัมพันธ์ของความหนืดจลน์ได้ดังสมการที่ 4.3

$$\left(\frac{\partial P}{\partial r}\right)_{TP} = \frac{\mu_{TP} v_{\theta}^2}{v_{TP} r} + \frac{\mu_{TP} v_{r,TP}^2}{v_{TP} r} + \frac{2\mu_{TP} f_{TP}}{v_{TP} D_h} \sqrt{(v_{\theta} - \omega r)^2 + v_r^2} \cdot v_r \quad (6.3)$$

จากรูปที่ 4.3 แสดงให้เห็นว่าสารทำงานสามารถลดความดันภายในโรเตอร์ได้ดีขึ้นเมื่อค่าความหนืดจลน์ (v_{TP}) ลดลง (แปรผกผัน) กล่าวคือ เมื่อสารทำงานมีความหนืดจลน์ต่ำ จะสามารถไหลผ่านโรเตอร์ของเตสลาเทอร์ไบน์ได้สะดวกมากขึ้น เนื่องจากแรงเฉื่อยจากมวลของสารทำงานลดลง ส่งผลให้การถ่ายเทพลังงานภายในโรเตอร์มีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น

นอกจากนี้ จากสมการที่ 4.3 จะเห็นได้ว่า ความหนืดพลวัต (μ_{TP}) เป็นอีกคุณสมบัติหนึ่งของสารทำงานที่ส่งผลต่อความสามารถของเตสลาเทอร์ไบน์ในการลดความดัน โดยมีแนวโน้มแปรผันตรงกัน รูปที่ 6.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดพลวัตและความหนืดจลน์เมื่ออุณหภูมิวิกฤตของสารทำงานเปลี่ยนแปลง

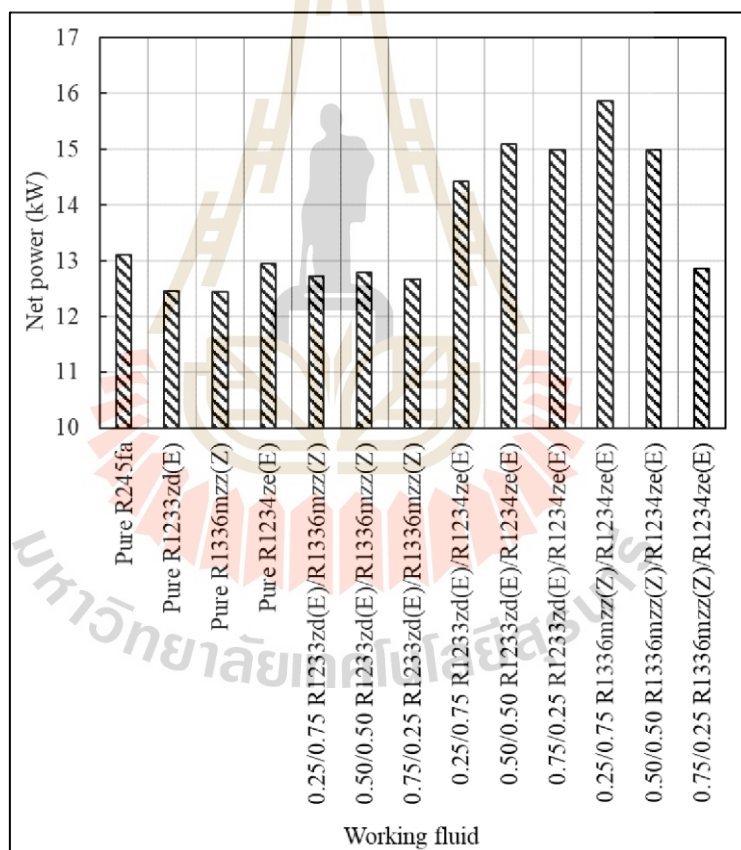


รูปที่ 6.11 ความหนืดจลน์และความหนืดพลวัตของสารทำงานเมื่ออุณหภูมิวิกฤตของสารทำงานเปลี่ยนแปลงไป

ผลการวิเคราะห์พบว่า เมื่ออุณหภูมิวิกฤตของสารทำงานเพิ่มขึ้นจาก 109 °C เป็น 171 °C ความหนืดจลน์มีการเปลี่ยนแปลงมากกว่าความหนืดพลวัตอย่างชัดเจน โดยเพิ่มขึ้นประมาณ

7.8 เท่า ขณะที่ความหนืดพลวัตเพิ่มขึ้นเพียง 2.4 เท่า ดังนั้น ในการศึกษาที่อิทธิพลของความหนืด จลน์จึงมีบทบาทเหนือกว่าความหนืดพลวัตต่อสมรรถนะของเตสลาเทอร์โบนั้น ดังนั้นความหนืดพลวัต จึงส่งผลน้อยกับประสิทธิภาพของเตสลาเทอร์โบในการศึกษาในหัวข้อนี้

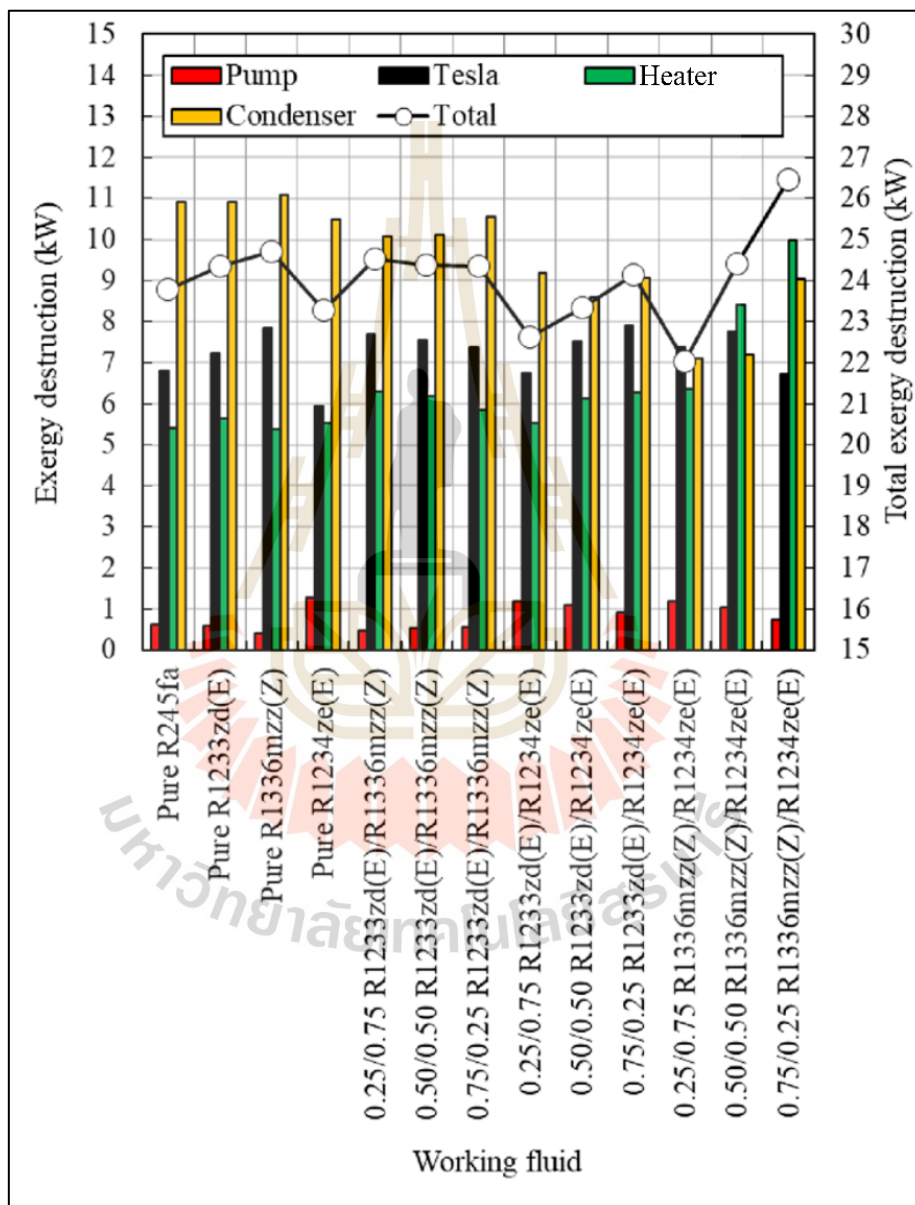
การศึกษาในหัวข้อนี้แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ที่สำคัญระหว่างอุณหภูมิวิกฤต ความหนืดพลวัต ความหนืดจลน์ และ Re_m ซึ่งแสดงให้เห็นถึงบทบาทของคุณสมบัติของสารทำงานที่ ส่งผลต่อประสิทธิภาพของเตสลาเทอร์โบ อย่างไรก็ตาม จากการศึกษาของ Kachawong and Koonsrisuk (2025) พบว่า แม้เทอร์โบจะมีประสิทธิภาพสูง แต่ก็ไม่ได้รับประกันว่าโรงไฟฟ้าจะมี กำลังสุทธิสูงเสมอไป ดังนั้นการวิเคราะห์ในบทนี้จึงได้ประเมินสมรรถนะระดับระบบ โดยศึกษารวม พฤติกรรมของอุปกรณ์หลักในวัฏจักรที่แอลซี เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของสารทำงาน ซึ่งนำเสนอใน หัวข้อ 6.2



รูปที่ 6.12 ผลของกำลังสุทธิเมื่อสารทำงานของโรงไฟฟ้าวัฏจักรที่แอลซีเปลี่ยนแปลงไป

6.2 การประเมินสมรรถนะของระบบ

หัวข้อนี้ประเมินสมรรถนะโดยรวมของระบบในโรงไฟฟ้าวัฏจักรที่แอลซี โดยพิจารณาหลายมิติ ได้แก่ กำลังสุทธิ การทำลายเอกเซอร์ยี่ ประสิทธิภาพของความแมตซ์อุณหภูมิ และความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติทางอุณหพลศาสตร์กับประสิทธิภาพของระบบโดยรวมโดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้



รูปที่ 6.13 ผลการเปรียบเทียบการทำลายเอกเซอร์ยี่ใน ปั๊ม เทสลาเทอร์ไบน์ ฮีตเตอร์ และ คอนเดนเซอร์เมื่อความเป็นไอของสารทำงานเปลี่ยนแปลงไป

6.2.1 กำลังสุทธิของโรงไฟฟ้าและการทำลายเอกเซอร์ยี

รูปที่ 6.12 แสดงกำลังสุทธิของโรงไฟฟ้าวัฏจักรที่แอลซี เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงชนิดของสารทำงาน โดยผลลัพธ์ดังกล่าวสะท้อนภาพรวมของสมรรถนะระบบผลิตไฟฟ้า

จากผลในรูปที่ 6.12 พบว่า R245fa บริสุทธิ์ให้กำลังสุทธิสูงกว่าสารทดแทนที่เป็นสารบริสุทธิ์ทั้งหมด อย่างไรก็ตาม สารผสม R1336mzz(Z)/R1234ze(E) ที่อัตราส่วนมวล 0.25/0.75 ให้กำลังสุทธิสูงสุดที่ 15.87 kW ซึ่งสูงกว่า R245fa ถึง 21.1% ขณะเดียวกัน สารผสม R1233zd(E)/R1234ze(E) ที่อัตราส่วนมวล 0.50/0.50 ให้กำลังสุทธิรองลงมาเท่ากับ 15.10 kW หรือมากกว่า R245fa อยู่ 15.2 %

เพื่อให้เข้าใจถึงการเปลี่ยนแปลงสมรรถนะของโรงไฟฟ้า รูปที่ 6.13 แสดงถึงการทำลายของเอกเซอร์ยีของแต่ละอุปกรณ์เมื่อสารทำงานเปลี่ยนแปลงไป

จากรูปที่ 6.13 แสดงให้เห็นความสัมพันธ์ที่ชัดเจนระหว่างการทำลายเอกเซอร์ยีและกำลังสุทธิของโรงไฟฟ้า พบว่าอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนเป็นแหล่งหลักของการทำลายเอกเซอร์ยี คิดเป็นประมาณ 70% ของการทำลายเอกเซอร์ยีทั้งหมดในระบบ โดยส่วนใหญ่เกิดขึ้นในคอนเดนเซอร์มากกว่าฮีตเตอร์ สำหรับเทสลาเทอร์โบน์มีการทำลายเอกเซอร์ยีประมาณ 30% ซึ่งแนวโน้มดังกล่าวสอดคล้องกับประสิทธิภาพไอเซนโทรปิก กล่าวคือ เมื่อการทำลายเอกเซอร์ยีเพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพจะลดลง ตามที่ได้วิเคราะห์ไว้ในหัวข้อ 6.1.3 ขณะที่ปั๊มเป็นอุปกรณ์ที่มีการทำลายเอกเซอร์ยีน้อยที่สุด เนื่องจากใช้พลังงานต่ำและกระบวนการอัดของสารทำงานอยู่ในลักษณะใกล้เคียงกับการอัดแบบไม่อัดตัว (Near-incompressible compression)

เป็นที่น่าสังเกตว่า แม้เทสลาเทอร์โบน์จะมีสัดส่วนเอกเซอร์ยีที่ถูกทำลายสูงถึงประมาณ 30% ของทั้งระบบ แต่การเลือกสารทำงานโดยอิงจากประสิทธิภาพไอเซนโทรปิกของเทอร์โบน์เพียงอย่างเดียวไม่ได้รับประกันว่าโรงไฟฟ้าจะให้กำลังสุทธิสูงสุดเสมอไป ตัวอย่างเช่น R1234ze(E) ซึ่งให้ประสิทธิภาพของเทสลาเทอร์โบน์สูงที่สุด (แสดงดังรูปที่ 6.9) แต่กลับไม่ได้ให้กำลังสุทธิสูงสุด (แสดงดังรูปที่ 6.12) สะท้อนให้เห็นถึงความสำคัญของการประเมินสมรรถนะในระดับระบบมากกว่าการพิจารณาเฉพาะรายอุปกรณ์

แม้ว่ากระบวนการถ่ายเทความร้อนจะมีส่วนสำคัญต่อการเกิดความไม่ผันกลับในระบบ (Irreversibility) และนำไปสู่การทำลายเอกเซอร์ยี (Exergy destruction) อย่างมีนัยสำคัญ แต่ระบบที่ให้กำลังสุทธิสูงสุดไม่ใช่ระบบที่ทำลายเอกเซอร์ยีจากการถ่ายเทความร้อนน้อยที่สุด โดยเป็นระบบที่สามารถกระจายการทำลายเอกเซอร์ยีไปในทุก ๆ อุปกรณ์ เท่า ๆ กันจึงให้กำลังสุทธิออกมาสูงที่สุด

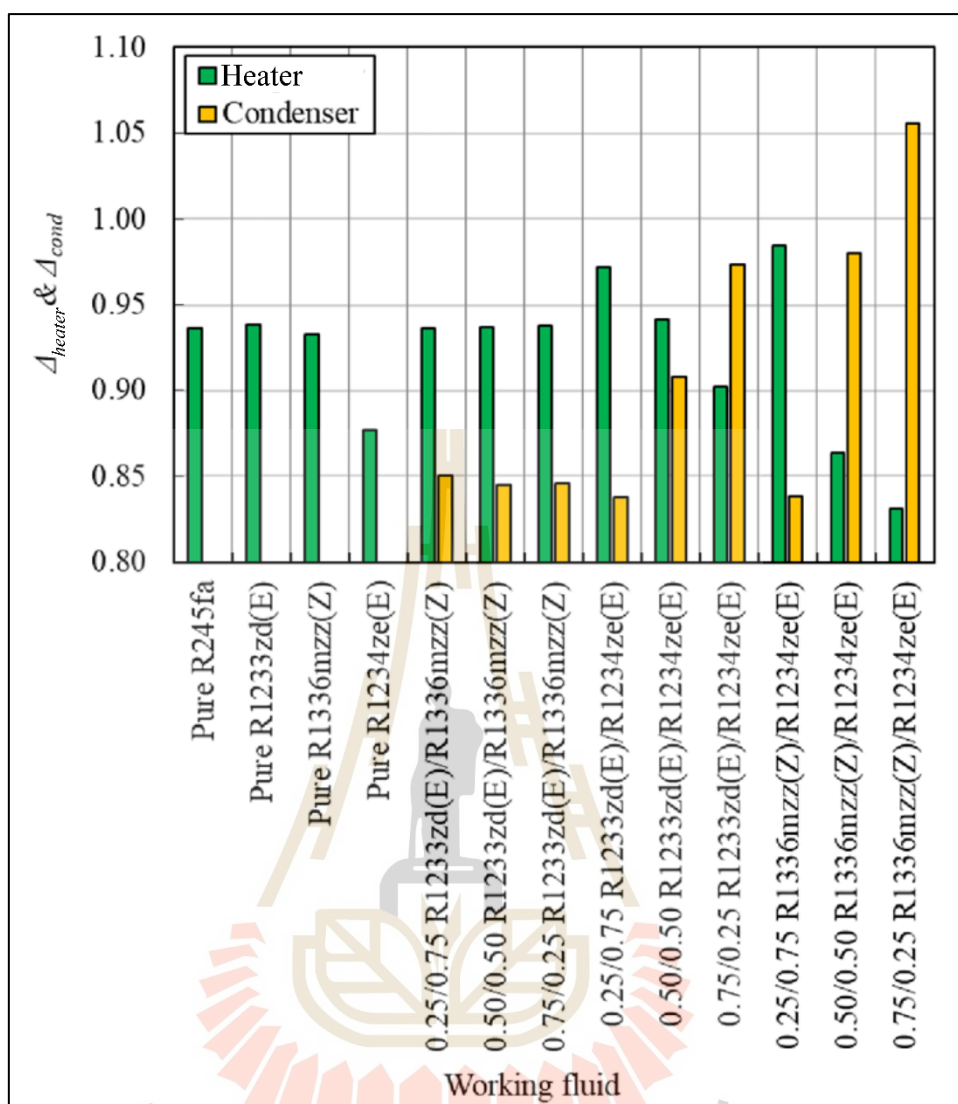
6.2.2 ความเหมาะสมของอุณหภูมิและการกระจายของเอกเซอร์ยี

เพื่อประเมินความสามารถในการถ่ายเทความร้อน หัวข้อนี้ได้ทำการวิเคราะห์ประสิทธิภาพของความร้อนแฝงของอุณหภูมิในฮีตเตอร์และคอนเดนเซอร์ โดยพิจารณาค่าความแตกต่างของความชื้น (Δ_{heater} และ Δ_{cond}) ระหว่างเส้นอุณหภูมิของสารทำงานกับแหล่งความร้อนและแหล่งทิ้งความร้อนตามสมการที่ 6.1 และ 6.2 ซึ่งค่าที่เข้าใกล้ 1 บ่งชี้ว่าเกิดความแตกต่างของความชื้นอุณหภูมิได้ดีระหว่างสารทำงานกับแหล่งความร้อนและแหล่งทิ้งความร้อน โดยผลของ Δ_{heater} และ Δ_{cond} แสดงดังรูปที่ 6.14

$$\Delta_{heater} = (T_{hs,in} - T_{hs,out}) / (T_3 - T_2) \quad (6.4)$$

$$\Delta_{cond} = (T_5 - T_1) / (T_{cw,out} - T_{cw,in}) \quad (6.5)$$

โดยจากผลดังรูปที่ 6.14 แสดงให้เห็นว่าสารบริสุทธิ์ไม่เกิดความชื้นของอุณหภูมิภายในคอนเดนเซอร์ ($\Delta_{cond} = 0$) เนื่องจาก สารบริสุทธิ์อุณหภูมิสารไม่เปลี่ยนแปลงเมื่อเกิดการเปลี่ยนสถานะ (Isothermal phase change) ในคอนเดนเซอร์ส่งผลให้ความแตกต่างของอุณหภูมิของสารทำงานเข้าและออกจากคอนเดนเซอร์มีค่าเท่ากัน (เช่น สาร R245fa บริสุทธิ์ดังรูปที่ 6.3 ซึ่ง $T_5 = T_1$) ในทางกลับกัน สารผสมซีไอโตรอปิกเกิดการไต่ของอุณหภูมิระหว่างกระบวนการกลั่นตัวในคอนเดนเซอร์โดยการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิดังกล่าวทำให้สามารถคำนวณ Δ_{cond} ได้ เพื่อประเมินความเหมาะสมของอุณหภูมิกับน้ำหล่อเย็น



รูปที่ 6.14 ผลการเปรียบเทียบผลความแตกต่างของความชันระหว่าง แหล่งให้และรับความร้อนกับ สารทำงานภายในฮีตเตอร์และคอนเดนเซอร์

โดยรูปที่ 6.14 ได้ให้แนวโน้มที่สำคัญการเกิดความแตกต่างของอุณหภูมิดังนี้

- 1) สารทำงานส่วนมากพบว่าความแตกต่างของอุณหภูมิที่ฮีตเตอร์มากกว่าที่คอนเดนเซอร์ ด้วยค่า Δ_{heater} ที่มีค่าใกล้เคียง 1 มากกว่าค่า Δ_{cond} โดยแนวโน้มดังกล่าวให้ผลลัพธ์ตรงข้ามกับ โรงไฟฟ้าไออาร์ซีแบบทั่ว ๆ ไป [(Yousefizadeh et al., 2020); (Wang et al., 2021)] ซึ่งพบว่า ที่ ฮีตเตอร์โดยทั่วไปแล้วความแตกต่างของอุณหภูมิแยกกว่าที่คอนเดนเซอร์ อย่างไรก็ตาม ผลลัพธ์ที่แตกต่างกับ ผลในหัวข้อนี้ คือโรงไฟฟ้าวัฏจักรที่แอลซีในกระบวนการรับความร้อนในฮีตเตอร์เกิดแบบไม่เปลี่ยน

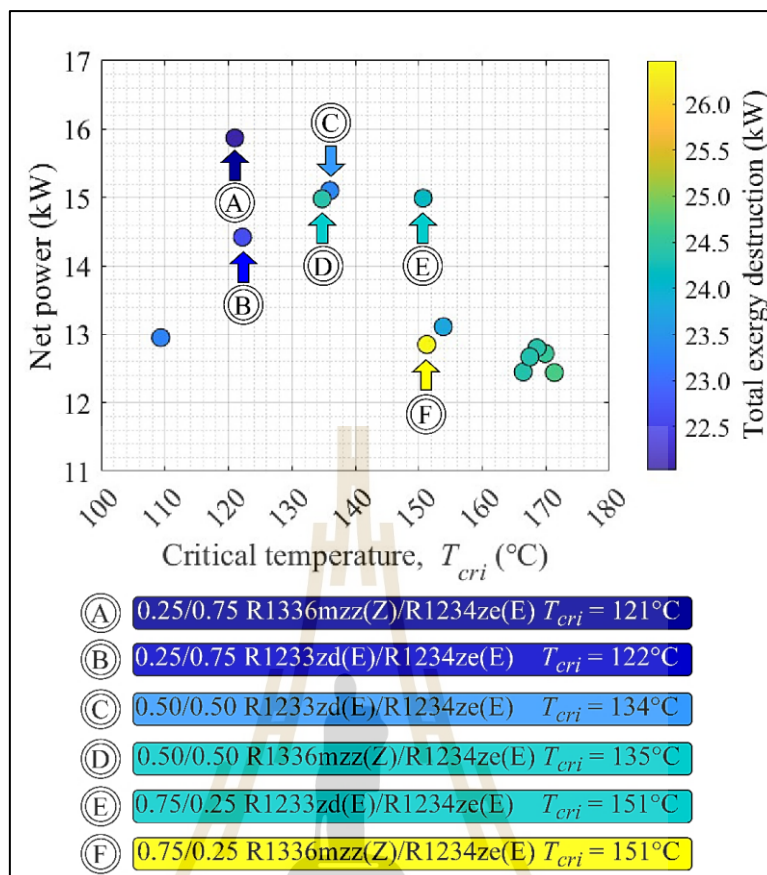
สถานะ (Non-phase change heat absorption) ในขณะที่โรงไฟฟ้าโออาร์ซีโดยทั่วไปมีการเปลี่ยนสถานะระหว่างรับความร้อน (Non-phase change heat absorption) ส่งผลให้ฮีตเตอร์โรงไฟฟ้าวิจัยจักรที่แอลซีมีความแฉะของอุณหภูมิที่ดีกว่าคอนเดนเซอร์ เพราะไม่มีการเปลี่ยนแปลงสถานะทำให้อุณหภูมิในการแลกเปลี่ยนความร้อนสม่ำเสมอ มากกว่าฮีตเตอร์ในโรงไฟฟ้าโออาร์ซี

2) สารผสม R1336mzz(Z)/R1234ze(E) ที่อัตราส่วนโดยมวล 0.50/0.50 และ 0.75/0.25 เป็นสองสารทำงานที่แนวโน้มที่แตกต่างกันกับส่วนมาก โดยที่ Δ_{heater} มีค่าใกล้เคียง 1 น้อยกว่า Δ_{cond} ซึ่งเป็นเพียงสองสารที่เอกเซอร์ยี่ที่ถูกทำลายที่คอนเดนเซอร์สูงกว่าที่ ฮีตเตอร์ในการศึกษา นี้ โดยทั้งสองสารนี้เป็นสารทำงานที่อุณหภูมิของสารทำงานที่เข้า ฮีตเตอร์ต่ำที่สุด (40.6 °C และ 39.9°C ตามลำดับ โดยแสดงในรูปที่ 6.5) ซึ่งช่วยเพิ่มความสามารถในการดึงพลังงานความร้อนจากแหล่งความร้อนได้มากขึ้น (แสดงดังรูปที่ 6.1) แต่ส่งผลให้ความแฉะกันของอุณหภูมิน้อยลง (Δ_{heater} มีค่าเท่ากับ 0.86 และ 0.83 ตามลำดับ) ในทางกลับกันสารผสมนี้มีการไต่ของอุณหภูมิภายในคอนเดนเซอร์ใกล้เคียงกับน้ำหล่อเย็นซึ่งมีความแตกต่างของอุณหภูมิเท่ากับ 10 °C ส่งผลให้ค่า Δ_{cond} มีค่าใกล้เคียง 1 และมีการทิ้งความร้อนที่สูง (แสดงดังรูปที่ 6.7)

เป็นที่น่าสังเกตว่าสารผสม R1336mzz(Z)/R1234ze(E) ที่อัตราส่วนโดยมวล 0.25/0.75 เป็นสารที่ไม่ได้มีความแฉะของอุณหภูมิที่ดีที่สุดในแต่ละอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน อย่างไรก็ตามสารดังกล่าวมีการทำลายเอกเซอร์ยี่รวมที่น้อยที่สุดดังแสดงในรูปที่ 6.13 และให้กำลังสุทธิสูงที่สุดดังแสดงในรูปที่ 6.12 ข้อสังเกตนี้สนับสนุนผลการศึกษาก่อนหน้าที่ระบุว่า ความไม่สมบูรณ์ต่าง ๆ (เช่น ความต้านทานและความไม่ผันกลับ) ไม่สามารถกำจัดออกได้ทั้งหมด และระบบที่เหมาะสมที่สุดคือระบบที่สามารถกระจายความไม่สมบูรณ์เหล่านี้ได้อย่างเหมาะสมไปยังทุกองค์ประกอบ แทนที่จะมุ่งลดความไม่สมบูรณ์ในอุปกรณ์ใดอุปกรณ์หนึ่งเพียงอย่างเดียว [(Koonsrisuk et al., 2010); (Lorente et al., 2010)] โดยเมื่อพิจารณาเอกเซอร์ยี่ในอุปกรณ์ต่าง ๆ ของสารทำงานนี้เห็นได้ว่าที่ เทอร์โบน์ ฮีตเตอร์ และคอนเดนเซอร์มีส่วนเท่า ๆ กันซึ่งสอดคล้องกับการค้นพบในการศึกษาก่อนหน้า

6.2.3 อิทธิพลของอุณหภูมิจากต่อสมรรถนะของโรงไฟฟ้า

ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิจากต่อสมรรถนะของระบบโรงไฟฟ้าแสดงให้เห็นถึงแนวทางการเลือกสารทำงานสำหรับโรงไฟฟ้าวิจัยจักรที่แอลซี โดยรูปที่ 6.15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิจากต่อสมรรถนะของสารทำงานกับกำลังสุทธิและการทำลายเอกเซอร์ยี่ของโรงไฟฟ้า



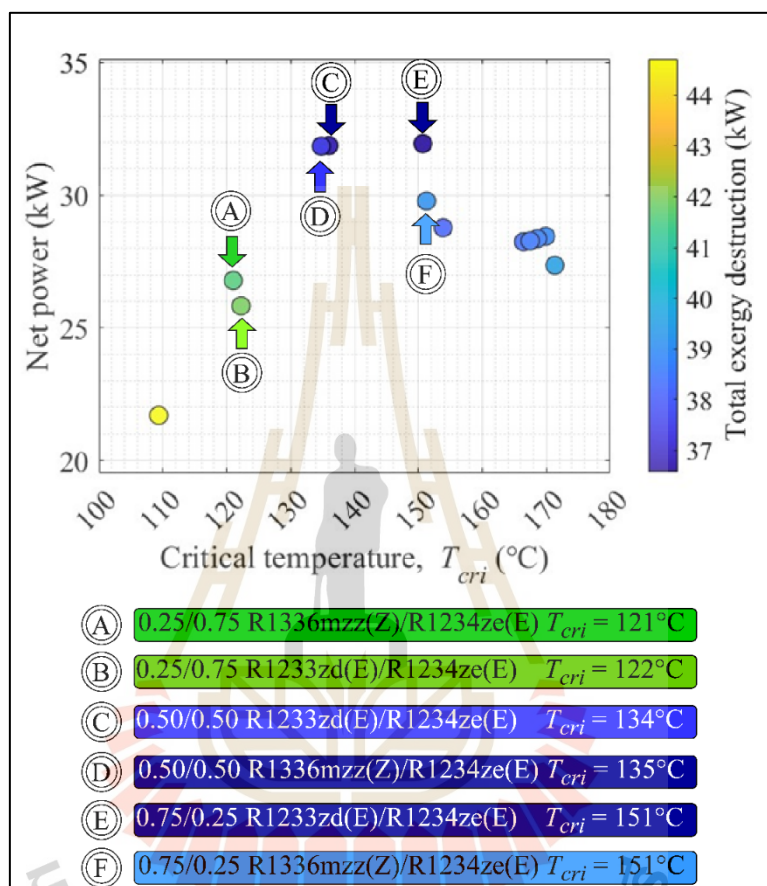
รูปที่ 6.15 อิทธิพลของอุณหภูมิวิกฤตต่อกำลังสุทธิของโรงไฟฟ้าวัฏจักรที่แอลซีและการทำลายเอกเซอร์ยี

จากผลในรูปที่ 6.15 พบว่าสารทำงานที่มีอุณหภูมิวิกฤตใกล้เคียงกับอุณหภูมิของแหล่งความร้อนทางเข้า จะให้กำลังสุทธิสูงและมีการทำลายเอกเซอร์ยีต่ำ โดยเฉพาะสารทำงานที่มีอุณหภูมิวิกฤตอยู่ในช่วง 120 °C – 150 °C ซึ่งเป็นช่วงที่เหมาะสมสำหรับแหล่งความร้อนที่อุณหภูมิ 120 °C

นอกจากนี้ เพื่อยืนยันความถูกต้องของข้อค้นพบนี้ จึงได้จำลองโรงไฟฟ้าวัฏจักรที่แอลซีโดยใช้อุณหภูมิแหล่งความร้อนที่ 150 °C และใช้กลุ่มสารทำงานเดิม ผลลัพธ์ตามรูปที่ 6.16 แสดงให้เห็นว่าสารที่มีอุณหภูมิวิกฤตใกล้ 150 °C ยังคงให้กำลังสุทธิสูงและมีการทำลายเอกเซอร์ยีต่ำ

โดยแนวโน้มดังกล่าว ถึงแม้ว่าอุณหภูมิของแหล่งความร้อนเปลี่ยนแปลงไปยืนยันว่าโรงไฟฟ้าวัฏจักรที่แอลซีที่เมื่อสารทำงานที่เลือกใช้เป็นสารที่มีอุณหภูมิวิกฤตใกล้เคียงกับอุณหภูมิของแหล่งความร้อน โดยผลดังกล่าวสอดคล้องกับการศึกษาเพื่อหาสารทำงานที่เหมาะสมกับโรงไฟฟ้าวัฏจักรโออาร์ซีของ He et al. (2011) ดังนั้น เห็นได้ถึงความสัมพันธ์ของการใช้อุณหภูมิวิกฤตเพื่อในการ

เลือกสารทำงานสามารถใช้ได้ทั้งสารบริสุทธิ์และสารผสมที่ใช้ในการศึกษานี้สามารถนำไปใช้ในการเลือกสารทำงานให้เหมาะสมกับแหล่งความร้อนที่อุณหภูมิแตกต่างกันได้โดยใช้อุณหภูมิวิกฤตเป็นเกณฑ์ในการเลือกสารทำงาน



รูปที่ 6.16 อิทธิพลของอุณหภูมิวิกฤตต่อกำลังสุทธิของโรงไฟฟ้าวัฏจักรที่แอลซีและการทำลายเอกเซอร์ยี เมื่อแหล่งความร้อนเป็น 150°C

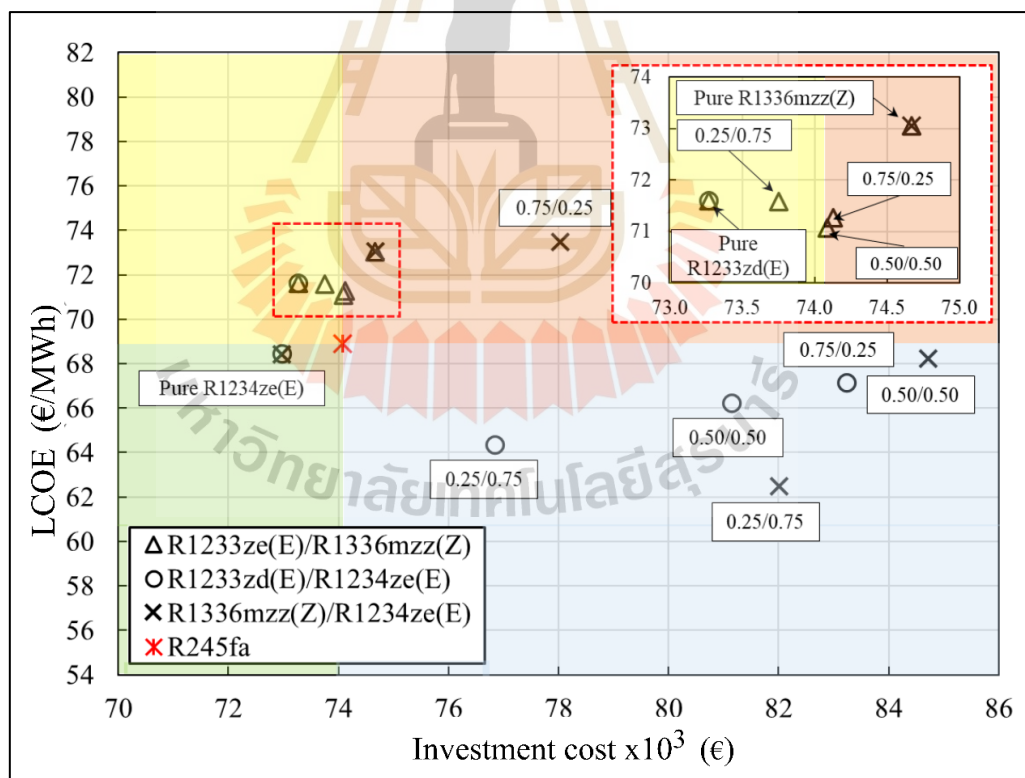
นอกจากนี้ สารผสมซีไอโทรปิกให้ความยืดหยุ่นในปรับส่วนผสมเพื่อให้สามารถปรับอุณหภูมิวิกฤตและการไต่ของอุณหภูมิเพื่อให้เข้ากับอุณหภูมิแหล่งความร้อนที่แตกต่างกันออกไป อย่างไรก็ตาม การเพิ่มขึ้นความสามารถของโรงไฟฟ้าจากการใช้สารผสมซีไอโทรปิกจำเป็นต้องใช้ขนาดอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่ใหญ่ขึ้นซึ่งเกิดจากการไต่ของอุณหภูมิ [(Lu et al., 2024); (Zhang et al., 2024)] ดังนั้นการประเมินความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์จึงเข้ามามีส่วนสำคัญเพื่อประเมินการแลกเปลี่ยนระหว่างการผลิตและต้นทุนอุปกรณ์ที่เพิ่มขึ้น

6.3 การประเมินความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์

โดยในหัวข้อนี้ ได้ประเมินความเป็นไปได้ทางเศรษฐศาสตร์ของการใช้สารทำงานทดแทน R245fa โดยใช้ต้นทุนต่อหน่วยในการผลิตไฟฟ้า (Levelized Cost of Electricity: LCOE) และ ต้นทุนต่อหน่วยในการผลิตไฟฟ้า (Investment cost) อีกทั้ง อัตราผลตอบแทนภายใน (Internal Rate of Return: IRR) และ ระยะเวลาในการคืนทุน (Discounted Payback Period: PbP) ทั้งนี้ เงื่อนไขในการประเมินกำหนด คือระยะเวลาโครงการ 20 ปี อัตราคิดลด 5% ชั่วโมงทำงาน 7,300 ชั่วโมง/ปี และราคาค่าไฟฟ้าที่ขาย 100 €/MWh (3.5 บาท/kWh) โดยผลการประเมินความเป็นไปได้ทางเศรษฐศาสตร์มีรายละเอียดเป็นดังต่อไปนี้

6.3.1 ต้นทุนต่อหน่วยในการผลิตไฟฟ้าและเงินลงทุนเริ่มต้น

จากรูปที่ 6.17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างต้นทุนต่อหน่วยในการผลิตไฟฟ้า (LCOE) และเงินลงทุนเริ่มต้นเมื่อสารทำงานของโรงไฟฟ้าวัฏจักรที่แอลซีเปลี่ยนแปลงไป



รูปที่ 6.17 ความสัมพันธ์ระหว่างต้นทุนต่อหน่วยในการผลิตไฟฟ้าและเงินลงทุนเริ่มต้นของโรงไฟฟ้าวัฏจักรที่แอลซีเมื่อสารทำงานเปลี่ยนแปลงไป

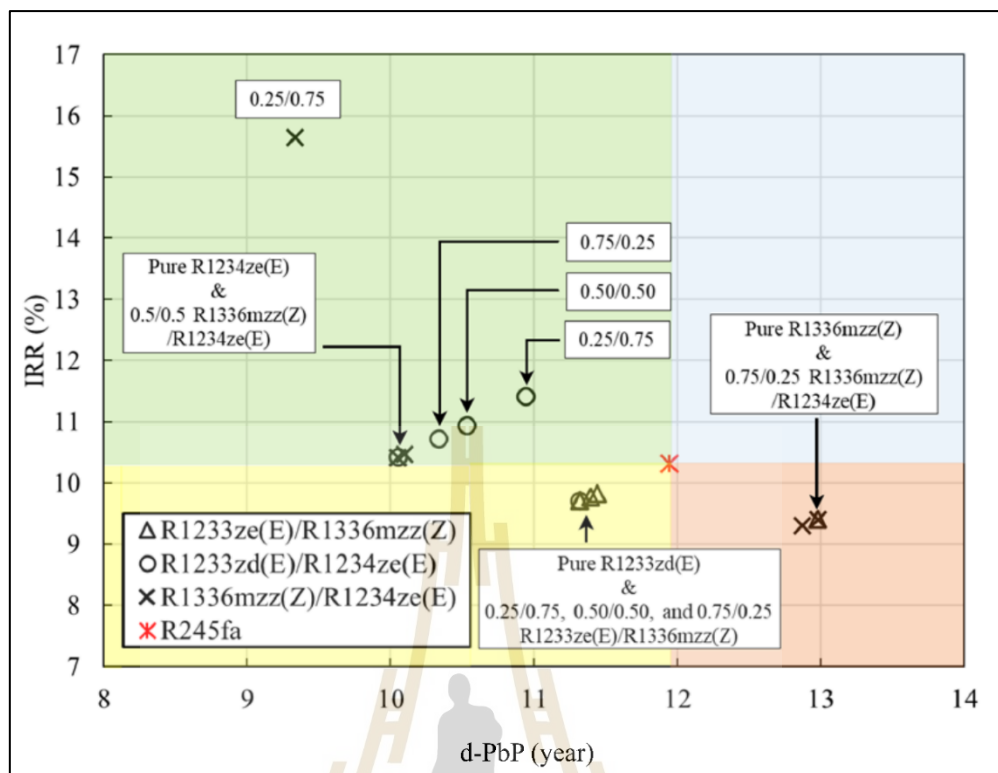
รูปที่ 6.17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างต้นทุนต่อหน่วยในการผลิตไฟฟ้า (LCOE) กับเงินลงทุนเริ่มต้นของโรงไฟฟ้า โดยจากกลุ่มสารทำงานทดแทน R245fa พบว่า โรงไฟฟ้าที่มีเงินลงทุนเริ่มต้นสูงกว่ามีต้นทุนต่อหน่วยในการผลิตไฟฟ้าต่ำกว่า ซึ่งสะท้อนถึงความคุ้มค่าในระยะยาวของระบบ ทั้งนี้ในรูปแบบได้แบ่งสารทำงานออกเป็น 4 กลุ่มตามสี โดยมีตำแหน่งของสาร R245fa บริสุทธิ์อยู่ที่กึ่งกลาง เพื่อใช้เป็นเกณฑ์ในการจำแนกคุณลักษณะทางเศรษฐศาสตร์ของสารทำงานแต่ละกลุ่ม

จากกลุ่มของสารทำงานได้ศึกษา สารผสม R1336mzz(Z)/R1234ze(E) ที่อัตราส่วนโดยมวลเท่ากับ 0.25/0.75 ให้ LCOE ต่ำที่สุดโดยมีค่าเท่ากับ 62.50 €/MWh (2.19 บาท/kWh) โดยเมื่อเปรียบเทียบกับ R245fa บริสุทธิ์ พบว่ามีค่าเท่ากับ 69 €/MWh (2.4 บาท/kWh) อย่างไรก็ตาม สารผสมนี้จำเป็นต้องใช้เงินลงทุนที่สูงโดยมีค่าเท่ากับ $82 \times 10^3 \text{€}$ (2.87 ล้านบาท) ซึ่งสูงกว่าสาร R245fa บริสุทธิ์ อยู่ 11% นอกจากนี้สาร R1234ze(E) บริสุทธิ์เป็นอีกสารทำงานที่ได้ LCOE ใกล้เคียงกับ R245fa บริสุทธิ์ และใช้เงินลงทุนเริ่มต้นเท่ากับ $72.97 \times 10^3 \text{€}$ (2.55 ล้านบาท) ซึ่งต่ำกว่า R245fa บริสุทธิ์ 3% โดยจากทั้งค่า LCOE และเงินลงทุนเริ่มต้นของสาร R1234ze(E) แสดงให้เห็นถึงความสมดุลระหว่างสมรรถนะและเงินลงทุนที่ต่ำส่งผลให้สารทำงานดังกล่าวเป็นอีกหนึ่งตัวเลือกแสดงให้เห็นถึงความเป็นไปได้ทางเศรษฐศาสตร์

นอกจากนี้ สารผสมซีไอโตรีปิกโดยเฉพาะ R1233zd(E)/R1234ze(E) ให้ LCOE อยู่ในช่วง 64 ถึง 67 €/MWh (2.2 ถึง 2.3 บาท/kWh) อย่างไรก็ตาม สารผสมเหล่านี้ต้องการเงินลงทุนที่สูง เนื่องจากความต้องการขนาดอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่เพิ่มมากขึ้นจากการเกิดการไต่ของอุณหภูมิ แม้ว่าสารทำงานเหล่านี้ให้ค่า LCOE อยู่ในช่วงกลางเมื่อเทียบกับสารทำงานอื่น ๆ และสารทำงานเหล่านี้จำเป็นต้องใช้เงินลงทุนที่สูงจึงต้องมีความระมัดระวังในการเลือกสารทำงานเหล่านี้ในโรงไฟฟ้าวัฏจักรที่แอลซี

6.3.2 อัตราผลตอบแทนภายในและระยะเวลาในการคืนทุน

รูปที่ 6.18 แสดงความสัมพันธ์ของอัตราผลตอบแทนภายใน (IRR) และระยะเวลาในการคืนทุน (PbP) เมื่อสารทำงานที่ใช้ในโรงไฟฟ้าวัฏจักรที่แอลซีเปลี่ยนแปลงไป โดยผลแสดงดังต่อไปนี้



รูปที่ 6.18 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราผลตอบแทนภายในและระยะเวลาในการคืนทุนของโรงไฟฟ้าวัฏจักรที่แอลซีเมื่อสารทำงานเปลี่ยนแปลงไป

จากรูปที่ 6.18 พบว่าสารทำงานที่มีระยะเวลาคืนทุน (d-PbP) สั้นให้ค่าอัตราผลตอบแทนภายใน (IRR) สูงตามไปด้วย โดยเฉพาะสารผสม R1336mzz(Z)/R1234ze(E) ที่อัตราส่วนมวล 0.25/0.75 ซึ่งให้ IRR สูงสุดที่ 15.64% และมี PbP สั้นที่สุดเพียง 9.33 ปี ที่สุด นอกจากนี้ สาร R1234ze(E) บริสุทธิ์ยังแสดงให้เห็นถึงความสามารถในการแข่งขันกับสารอื่น ๆ โดยให้ IRR เท่ากับ 10.74% และ PbP เท่ากับ 10.53 ปี ซึ่งดีกว่าสาร R245fa อย่างไรก็ตาม สาร R1336mzz(Z) บริสุทธิ์ และสารผสม R1336mzz(Z)/R1234ze(E) ที่อัตราส่วนมวล 0.75/0.25 แสดงความคุ้มค่าทางเศรษฐกิจต่ำ

โดยจากการประเมินเศรษฐศาสตร์ชี้ให้เห็นว่าการใช้สารผสมซีโอโทรปิกกับโรงไฟฟ้าวัฏจักรที่แอลซีให้ผลประโยชน์อย่างมีนัยสำคัญ โดยพบว่าช่วยให้ LCOE ต่ำ ช่วยให้คืนทุนได้เร็วขึ้น อย่างไรก็ตามสารผสมซีโอโทรปิกต้องการงบลงทุนที่มาก เนื่องจากความต้องการอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนขนาดใหญ่กว่าสารบริสุทธิ์ จากกลุ่มสารทดแทนที่ได้ศึกษา แสดงให้เห็นว่าสาร

R1336mzz(Z)/R1234ze(E) ที่อัตราส่วนโดยมวลเท่ากับ 0.25/0.75 เป็นตัวเลือกที่มีแนวโน้มดีที่สุด เนื่องจากเป็นสารทำงานที่ใช้แล้วให้ LCOE ต่ำ IRR สูง ในขณะที่เดียวกันยังสามารถคืนทุนได้เร็ว

6.4 แนวทางการประยุกต์ใช้ในทางปฏิบัติ

หัวข้อนี้นำเสนอแนวทางในการประยุกต์ใช้โรงไฟฟ้าวัฏจักรที่แอลซีร่วมกับเทคโนโลยีอื่น อ้างอิงจากผลการศึกษานี้ เพื่อเลือกสารทำงานที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม โดยแนวทางดังกล่าวสามารถใช้เป็นพื้นฐานในการออกแบบระบบและต่อยอดสู่การวิจัยและทดสอบในเชิงปฏิบัติจริงได้

6.4.1 การเลือกสารทำงาน

เมื่อเลือกสารทำงานสำหรับโรงไฟฟ้าวัฏจักรที่แอลซีควรใช้เกณฑ์ในการเลือกสารทำงานเป็นดังต่อไปนี้:

6.4.1.1 เลือกสารทำงานให้มีอุณหภูมิวิกฤตให้เหมาะสมกับแหล่งความร้อน:

การเลือกสารทำงานด้วยอุณหภูมิวิกฤตให้เหมาะสมใกล้เคียงกับอุณหภูมิของแหล่งความร้อน โดยการใช้หลักเกณฑ์อย่างง่ายนี้ในการคัดเลือกสารทำงานช่วยเพิ่มสมรรถนะของโรงไฟฟ้าอย่างมีนัยสำคัญ

6.4.1.2 พิจารณางค์ประกอบของสารผสมซีไอโทรปิก:

เมื่อสร้างสารผสมซีไอโทรปิกควรพิจารณาดังต่อไปนี้

- 1) เลือกสารทำงานที่มีความแตกต่างของอุณหภูมิวิกฤตเพื่อช่วยเพิ่มให้มีการไต่ของอุณหภูมิ (Temperature glide) มากขึ้น
- 2) ปรับสัดส่วนโดยมวลให้เหมาะสมกับระบบที่นำไปใช้โดยเฉพาะ
- 3) สำหรับสารผสมที่มีส่วนประกอบของ R1234ze(E) สูงสามารถช่วยเพิ่มความสามารถในการปรับปรุงประสิทธิภาพของเทคโนโลยีได้

6.4.1.3 พิจารณาการนำไปใช้ในระบบที่มีข้อจำกัดแตกต่างกัน:

ควรพิจารณาดังต่อไปนี้:

- 1) ข้อจำกัดในงบประมาณ (สารทำงานที่เป็นสารบริสุทธิ์ใช้งบประมาณในการลงทุนเริ่มต้นน้อยกว่าสารผสม)
- 2) การจัดลำดับความสำคัญของสมรรถนะ (สารผสมซีไอโทรปิกเมื่อใช้กับโรงไฟฟ้าวัฏจักรที่แอลซีให้สมรรถนะที่ดีกว่าสารบริสุทธิ์)

6.4.2 การนำเทสลาเทอร์โบนไปใช้งาน

สำหรับการนำเทสลาเทอร์โบนนำไปใช้งานกับสารทำงานที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมสามารถพิจารณาได้ดังนี้

- 1) ทำให้การไหลในเทสลาเทอร์โบนยังคงเป็นการไหลแบบราบเรียบ (laminar flow): ในการออกแบบขนาดของเทสลาเทอร์โบนควรออกแบบให้มั่นใจได้ว่าสารทำงานที่ไหลอยู่ในโรเตอร์เป็นการไหลแบบราบเรียบจะช่วยให้เทสลาเทอร์โบนทำงานได้มีประสิทธิภาพมากขึ้น
- 2) ให้สัดส่วนความดันที่เหมาะสม: ในการปรับใช้งานในระบบควบคุม ควรปรับให้สัดส่วนความดันของคอนเดนเซอร์และฮีตเตอร์ให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสม (อยู่ในช่วง 3.25 ถึง 4.72 ขึ้นอยู่กับสารทำงาน) เพื่อให้ได้กำลังจากเทอร์โบนออกมาสูง

6.4.3 การพิจารณาในระดับอุปกรณ์ของโรงไฟฟ้า

การพิจารณาการออกแบบในระดับระบบบางประการ สามารถนำไปประยุกต์ใช้การนำโรงไฟฟ้าวัฏจักรที่แอลซีที่ใช้เทสลาเทอร์โบนและสารผสมซีโอโทรปิกมาใช้งาน โดยมีรายละเอียดดังนี้

- 1) การออกแบบอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน: การออกแบบให้มีพื้นที่เพียงพอเพื่อรองรับการเกิดการไต่ของอุณหภูมิ (Temperature glide) ในสารผสมซีโอโทรปิก โดยเฉพาะที่คอนเดนเซอร์เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงสถานะของสารทำงาน
- 2) การประยุกต์ใช้ในการควบคุมระบบ: ในการออกแบบระบบควบคุมควรพิจารณารักษาให้สัดส่วนความดันระหว่างคอนเดนเซอร์และฮีตเตอร์คงที่ภายใต้การทำงานที่เปลี่ยนแปลงไป ติดตามและปรับอัตราส่วนของสารผสมซีโอโทรปิก เพื่อป้องกันไม่ให้อัตราส่วนประกอบของสารทำงานเปลี่ยนแปลงไประหว่างการทำงาน

หลังจากนำการประยุกต์เหล่านี้ไปปรับใช้ สามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการใช้โรงไฟฟ้า วัฏจักรที่แอลซีที่ใช้เทสลาเทอร์โบนที่สารทำงานที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมเพื่อให้ได้สมรรถนะที่สูง ในขณะที่ยังคงคำนึงถึงข้อกำหนดด้านสิ่งแวดล้อม

6.5 ข้อจำกัดในการศึกษา

ในขณะที่การศึกษานี้ให้แง่ที่ครอบคลุมของการหาสารทดแทน R245fa บริสุทธิ์ที่ใช้กับโรงไฟฟ้าวัฏจักรที่แอลซีที่ใช้เทสลาเทอร์โบนทั้งสารบริสุทธิ์และสารผสม อย่างไรก็ตาม ยังคงมีข้อจำกัดบางประการดังต่อไปนี้

6.5.1 แบบจำลองและเงื่อนไขการจำลอง

ในการศึกษานี้ได้ใช้แบบจำลองการไหลของสารสองสถานะแบบเนื้อเดียว (homogeneous two-phase flow model) โดยได้ทำการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองกับข้อมูลจากการทดลองและผลการจำลองด้วยพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ พบว่า ผลลัพธ์มีความสอดคล้องกันในระดับที่ยอมรับได้ โดยมีความคลาดเคลื่อนสูงสุดประมาณ 10% ดังนั้น ในงานวิจัยอนาคต อาจเกิดประโยชน์มากยิ่งขึ้นหากมีการพัฒนาแบบจำลองที่ซับซ้อนมากขึ้น เช่น

- 1) พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (CFD) สามารถช่วยให้เก็บพฤติกรรมที่ซับซ้อนมากขึ้นได้ของเทสลาเทอร์ไบน์
- 2) การจำลองแบบไม่เป็นเนื้อเดียวกันของสารทำงานทั้งสองสถานะเพื่อให้ความเร็วของสารที่เป็นไอและของเหลวแตกต่างกัน
- 3) หารายละเอียดการวิเคราะห์ที่ Boundary layer มากขึ้น เพื่อกำหนดคุณลักษณะของการถ่ายเทโมเมนตัมที่มีรายละเอียดมากขึ้น

นอกจากนี้ ในการคำนวณการถ่ายเทความร้อนใช้สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่คงที่ (Constant overall heat transfer coefficient) ซึ่งอาจจะไม่สามารถแสดงถึงพฤติกรรมทั้งหมดของการถ่ายเทความร้อนเมื่อใช้สารผสมซีไอโทรปิก

6.5.2 การทำการตรวจสอบความถูกต้องกับการทดลอง

แม้ว่าการศึกษานี้จะได้มีการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองด้วยข้อมูลจากงานวิจัยที่เผยแพร่ในบทความวิชาการแล้วก็ตาม การตรวจสอบเพิ่มเติมโดยใช้ข้อมูลจากโรงไฟฟ้าไออาร์ซีทีใช้ เทสลาเทอร์ไบน์ร่วมกับสารผสมซีไอโทรปิกจะช่วยเพิ่มความน่าเชื่อถือให้กับแบบจำลองได้มากยิ่งขึ้น เนื่องจาก ระบบมีความซับซ้อนและมีความเชื่อมโยงระหว่างองค์ประกอบต่าง ๆ รวมถึงสัดส่วนของสารทำงานที่ส่งผลต่อสมรรถนะโดยรวม ซึ่งพฤติกรรมบางประการอาจไม่สามารถสะท้อนออกมาได้อย่างครบถ้วนจากการจำลองเพียงอย่างเดียว

6.5.3 สมรรถนะที่แปรผันตามเวลา

การศึกษานี้มุ่งเน้นการทำงานของระบบภายใต้สภาวะคงที่ (Steady stage) และเงื่อนไขที่เหมาะสม อย่างไรก็ตาม ในการใช้งานจริง โรงไฟฟ้าวัฏจักรที่แอลซีต้องทำงานกับสภาวะไม่คงที่ เช่น การทำงานภายใต้โหลดบางส่วน ความไม่แน่นอนของแหล่งความร้อน และอุณหภูมิน้ำหล่อเย็นที่เปลี่ยนแปลง ซึ่งอาจส่งผลต่อสมรรถนะของโรงไฟฟ้าที่ออกแบบภายใต้สภาวะคงที่ และทำให้ประสิทธิภาพของระบบเปลี่ยนแปลงไปจากที่คาดการณ์ไว้

6.5.4 เพิ่มการพิจารณาทางเศรษฐศาสตร์ในด้านอื่น ๆ เพิ่มเติม

การวิเคราะห์ด้านเศรษฐศาสตร์ในงานวิจัยนี้ครอบคลุมองค์ประกอบต้นทุนหลักและตัวชี้วัดทางการเศรษฐศาสตร์มาตรฐาน อย่างไรก็ตาม ยังมีปัจจัยที่อาจส่งผลกระทบต่อการใช้งานซึ่งยังไม่ได้พิจารณา ได้แก่

- 1) ต้นทุนการบำรุงรักษาที่อาจสูงขึ้นในกรณีของสารผสมซีไอโทรปิก เนื่องจากองค์ประกอบของสารอาจเปลี่ยนแปลงเมื่อเวลาผ่านไป
- 2) ความแตกต่างของราคาอุปกรณ์และราคาขายไฟฟ้าในแต่ละพื้นที่
- 3) ต้นทุนในการติดตั้งในกรณีที่น่าไปใช้กับระบบของอุตสาหกรรมที่มีอยู่แล้ว
- 4) ต้นทุนด้านประกันภัยและการบริหารความเสี่ยงที่เกี่ยวข้องกับการใช้สารทำงานแต่ละชนิด

6.5.5 การประเมินผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

แม้ว่าการศึกษานี้ได้ประเมินสารทำงานที่มีค่าศักย์ในการก่อให้เกิดภาวะโลกร้อน (GWP) ต่ำกว่าสาร R245fa บริสุทธิ์อย่างมีนัยสำคัญ แต่การประเมินวัฏจักรชีวิต (Life Cycle Assessment: LCA) ซึ่งครอบคลุมตั้งแต่กระบวนการผลิต การขนส่ง การใช้งาน ไปจนถึงการจัดการเมื่อสิ้นสุดอายุการใช้งาน จะช่วยให้การประเมินผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมมีความครอบคลุมและแม่นยำยิ่งขึ้น นอกจากนี้ ผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมอื่น ๆ เช่น ศักย์ในการก่อให้เกิดฝนกรด ศักย์ในการทำลายชั้นโอโซน (Ozone Depletion Potential: ODP) และการใช้ทรัพยากรธรรมชาติ ยังไม่ได้รวมอยู่ในการศึกษานี้

โดยข้อจำกัดเหล่านี้เปิดโอกาสให้การวิจัยในอนาคตสามารถพัฒนาความเข้าใจเกี่ยวกับโรงไฟฟ้าวัฏจักรที่แอลซีที่ใช้เทคโนโลยีไฮโดรเจนร่วมกับสารทำงานที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมได้ดียิ่งขึ้น

บทที่ 7

ผลการทำงานของโรงไฟฟ้าวัฏจักรที่แตกต่างกันเมื่อใช้กับเตสลาเทอร์ไบน์

จากการศึกษาของก่อนหน้า (ธงชัย เทียมทัต และ อาทิตย์ คุณศรีสุข, 2565) พบว่า โรงไฟฟ้าคาลินาแบบ KCS-11 เป็นอีกหนึ่งวัฏจักรที่มีสมรรถนะสูง โดยซึ่งมีความแตกต่างกับโรงไฟฟ้าวัฏจักรโออาร์ซีและทีแอลซี คือมีตัวแยกเพื่อไม่ให้เกิดความเสียหายกับเทอร์ไบน์ นอกจากนี้ จากการศึกษาของ Raksa-in et al. (2015) พบว่าโรงไฟฟ้าคาลินาเป็นโรงไฟฟ้าที่ให้กำลังสุทธิสูง ดังนั้น โรงไฟฟ้าวัฏจักรคาลินาเป็นอีกหนึ่งวัฏจักรที่น่าสนใจเมื่อนำมาใช้กับเตสลาเทอร์ไบน์ อย่างไรก็ตาม จึงทำให้เกิดคำถามสำคัญว่า “ถ้าใช้ได้ความเปรียบของเตสลาเทอร์ไบน์ที่สามารถทำงานภายใต้ความเป็นไอต่ำได้ โดยลดความซับซ้อนของระบบคาลินาโดยการตัดอุปกรณ์แยกไอออกและอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนบางตัวออก และปล่อยให้สารทำงานซึ่งอยู่ในภาวะที่ความเป็นไอต่ำเข้าสู่เตสลาเทอร์ไบน์โดยตรง” เพื่อลดอุปกรณ์ และลดความซับซ้อนและลดงบประมาณเริ่มต้น ได้หรือไม่

นอกจากนี้ บทที่ 5 พบว่า โรงไฟฟ้าวัฏจักรทีแอลซีที่ใช้สาร R236ea บริสุทธิ์ และผลการศึกษาจากบทที่ 6 โรงไฟฟ้าวัฏจักรทีแอลซีเมื่อใช้สารผสมซีไอโอโทรปิกร่วมกับโรงไฟฟ้าวัฏจักรทีแอลซีโดยแสดงให้เห็นว่าสาร R1336mzz(Z)/R1234ze ที่อัตราส่วนโดยมวลเท่ากับ 0.25/0.75 เป็นตัวที่โดดเด่น และยังแสดงให้เห็นถึงข้อได้เปรียบทั้งในด้านอุณหพลศาสตร์และเศรษฐศาสตร์ เพื่อให้เห็นการทำงานของโรงไฟฟ้าที่ใช้เตสลาเทอร์ไบน์ของแต่ละวัฏจักร ดังนั้น ในหัวข้อนี้จึงได้เปรียบเทียบโรงไฟฟ้าทั้งหมด 4 วัฏจักร ได้แก่

- 1) โรงไฟฟ้าวัฏจักรคาลินาแบบ KCS-11
- 2) โรงไฟฟ้าวัฏจักรคาลินาแบบ KCS-11 แบบดัดแปลง (Mod. KCS-11) ตัดบางอุปกรณ์จากโรงไฟฟ้าคาลินาแบบ KCS-11 โดยให้ความดันที่คอนเดนเซอร์และอีวาโปเรเตอร์ รวมถึงโรงอัตรการไหลเชิงมวลเท่ากับโรงไฟฟ้าคาลินา
- 3) โรงไฟฟ้าวัฏจักรทีแอลซีที่ใช้สารทำงานเป็นสารบริสุทธิ์ R236ea (ดีที่สุดในบทที่ 5)
- 4) โรงไฟฟ้าวัฏจักรทีแอลซีที่ใช้สารทำงานเป็นสารผสมที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม R1336mzz(Z)/R1234ze ที่อัตราส่วนโดยมวลเท่ากับ 0.25/0.75 (ดีที่สุดในบทที่ 6)

เห็นได้ว่าโรงไฟฟ้าแต่ละโรงมีสถานะของสารทำงานก่อนเข้าเทอร์ไบน์ที่แตกต่างกัน ออกไปซึ่งส่งผลต่อการทำงานของเตาเทอร์ไบน์ ดังนั้นในหัวข้อนี้ได้วิเคราะห์ออกเป็นสองส่วนได้แก่ สมรรถนะทางอุณหพลศาสตร์และการประเมินเศรษฐศาสตร์ โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

7.1 ผลการเปรียบเทียบสมรรถนะทางอุณหพลศาสตร์ของแต่ละโรงไฟฟ้าที่ใช้เตาเทอร์ไบน์

ในหัวข้อนี้ได้ทำการประเมินและวิเคราะห์สมรรถนะทางอุณหพลศาสตร์ของโรงไฟฟ้าโรงต่าง ๆ ที่ใช้เตาเทอร์ไบน์ ผ่านการวิเคราะห์ในหลายด้าน ได้แก่ เงื่อนไขการทำงานที่เหมาะสม พฤติกรรมการถ่ายเทความร้อน ลักษณะการทำงานของเตาเทอร์ไบน์ และสมรรถนะโดยรวมของโรงไฟฟ้า เพื่อให้เห็นถึงความแตกต่างในพฤติกรรมทางอุณหพลศาสตร์และสมรรถนะของโรงไฟฟ้าแต่ละโรงอย่างชัดเจน โดยรายละเอียดการวิเคราะห์มีดังนี้

7.1.1 เงื่อนไขการทำงานโรงไฟฟ้าและอุณหภูมิวิกฤตของสารทำงาน

ตารางที่ 7.1 แสดงเงื่อนไขการทำงานที่เหมาะสมของโรงไฟฟ้าโรงประเภทต่าง ๆ ซึ่งประกอบด้วย ความดันที่คอนเดนเซอร์ ความดันที่อีวาโปเรเตอร์ อุณหภูมิของสารทำงานออกจากอีวาโปเรเตอร์ อัตราการไหลของสารทำงาน กำลังที่ต้องใช้สำหรับปั๊ม และขนาดของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่จำเป็นต้องใช้ นอกจากนี้ บทที่ 6 พบว่าอุณหภูมิวิกฤตของสารทำงานมีบทบาทสำคัญต่อสมรรถนะของระบบ ดังนั้นจึงได้แสดงค่าอุณหภูมิวิกฤตของสารแต่ละชนิดไว้ในตารางนี้

จากผลของเงื่อนไขการทำงานของโรงไฟฟ้าโรงต่าง ๆ ดังตารางที่ 7.1 พบแนวโน้มที่น่าสนใจดังต่อไปนี้

- 1) ความดันที่อีวาโปเรเตอร์/ฮีตเตอร์ (P_2): จากผลการศึกษาพบว่า โรงไฟฟ้าโรงที่แอลซีมีความต้องการความดันในฮีตเตอร์ น้อยกว่าความดันในอีวาโปเรเตอร์โรงไฟฟ้าโรงกาลินาเพียงเล็กน้อย อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาจากบทที่ 5 พบว่า เมื่อสารทำงานมีความเป็นไอต่ำ จะต้องใช้ความดันในอีวาโปเรเตอร์สูงขึ้น ซึ่งไม่สอดคล้องกับแนวโน้มที่พบในหัวข้อนี้ ทั้งนี้ บทที่ 5 แสดงให้เห็นว่า ชนิดของสารทำงานมีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อความดันที่เหมาะสมใน อีวาโปเรเตอร์/ฮีตเตอร์ ดังนั้น ความเป็นไอที่ต่ำกว่าไม่ได้หมายความว่าต้องใช้ความดันในฮีตเตอร์ สูงกว่าเสมอไป ซึ่งในการในการศึกษานี้ แสดงให้เห็นว่า โรงไฟฟ้าโรงที่แอลซีและกาลินาใช้ความดันที่อีวาโปเรเตอร์/ฮีตเตอร์ใกล้เคียงกัน ซึ่งเกิดจากอิทธิพลทั้งความเป็นไอของสารทำงานและชนิดของสารทำงาน

ตารางที่ 7.1 เงื่อนไขการทำงานที่เหมาะสมสำหรับโรงไฟฟ้าวัฏจักรต่าง ๆ ที่ใช้เทสลาเทอร์ไบน์

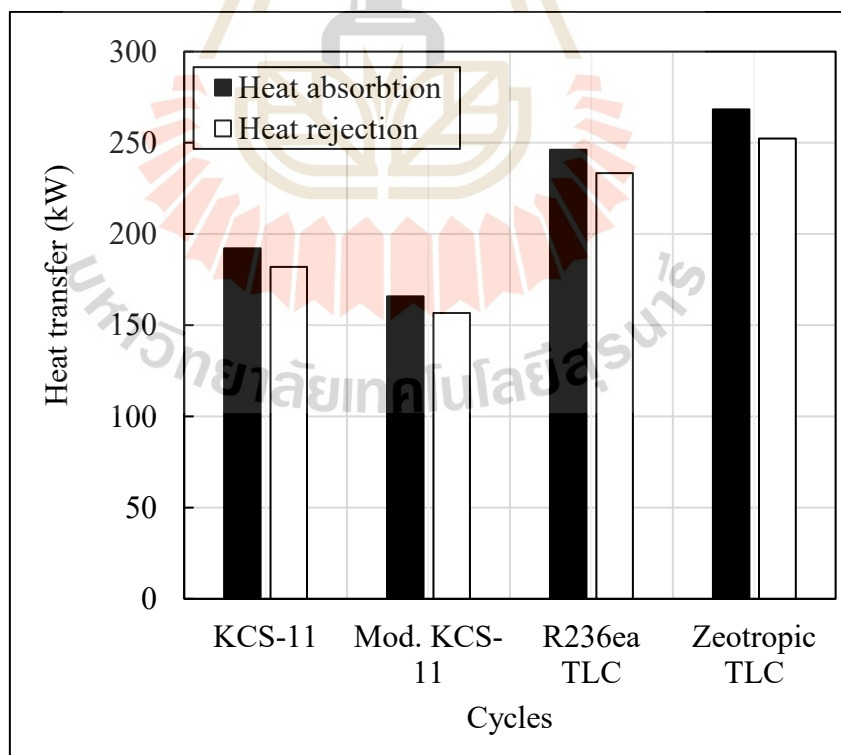
| วัฏจักร | | KCS-11 | Mod. KCS-11 | ทีแอลซี | |
|----------------------|----------------|----------------------------|-------------|---------|---|
| ตัวแปร | หน่วย | สารทำงาน | | | |
| | | Ammonia/Water 0.90/0.10 | | R236ea | R1336mzz(Z)/ R1234ze(E) 0.25/0.75 |
| $T_{critical}$ | °C | 180.91 | 180.91 | 139.29 | 121.00 |
| P_1 | MPa | 1.45 | 1.45 | 0.46 | 0.69 |
| P_2 | MPa | 2.96 | 2.96 | 1.86 | 2.87 |
| \dot{m}_{wf} | kg/s | 0.20 | 0.20 | 3.06 | 2.67 |
| $\dot{m}_{wf,tesla}$ | kg/s | 0.15 | | | |
| $T_{evap,out}$ | °C | 97.0 | 84.28 | 107.82 | 101.96 |
| $x_{evap,out}$ | - | 0.64 | 0.63 | - | - |
| \dot{W}_{pump} | kW | 0.64 | 0.64 | 3.98 | 6.32 |
| $A_{hx,IHX}$ | m ² | 3.01 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| $A_{hx,cond}$ | m ² | 24.08 | 20.38 | 26.49 | 72.98 |
| $A_{hx,evap}$ | m ² | 16.41 | 9.03 | 35.20 | 60.00 |

2) อัตราการไหลของสารทำงาน (\dot{m}_{wf}) และกำลังที่ปั๊มต้องการ (\dot{W}_{pump}): จากแนวโน้มของผลการศึกษา พบว่า โรงไฟฟ้าวัฏจักรทีแอลซีมีอัตราการไหลของสารทำงานสูงกว่าโรงไฟฟ้าวัฏจักรคาลินา ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ในบทที่ 5 เกี่ยวกับอิทธิพลของความเป็นไอของสารทำงาน โดยโรงไฟฟ้าวัฏจักรคาลินามีค่าความเป็นไอของสารทำงานก่อนเข้าเทอร์ไบน์สูงกว่า ส่งผลให้สามารถใช้อัตราการไหลของสารทำงานที่ต่ำกว่าได้ และทำให้กำลังที่ต้องการจากปั๊มลดลงตามไปด้วย ดังนั้น เมื่อเปรียบเทียบลักษณะการทำงานระหว่างโรงไฟฟ้าทั้งสองระบบ การใช้โรงไฟฟ้าวัฏจักรทีแอลซีอาจนำไปสู่เงินลงทุนที่สูงขึ้น และอาจทำให้กำลังสุทธิของโรงไฟฟ้าลดลง เนื่องจากความต้องการพลังงานจากปั๊มที่เพิ่มขึ้น ทั้งนี้โรงไฟฟ้าวัฏจักรคาลินาแบบ KCS-11 ไม่ได้มีการกล่าวถึง เนื่องจากใช้ความดันและอัตราการไหลเชิงมวลที่เท่ากันกับโรงไฟฟ้าคาลินา ดังนั้นในส่วนของการพิจารณาอัตราการไหลและกำลังที่ปั๊มจึงไม่ได้ทำเปรียบเทียบ

3) ขนาดของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่ต้องการ (A_{hx}): สำหรับขนาดอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่ต้องการพบว่า ขนาดอุปกรณ์ของโรงไฟฟ้าวัฏจักรคาลินาแบบ Mod. KCS-11 พื้นที่ต้องการน้อยกว่า โรงไฟฟ้าทั้ง Mod. KCS-11 ที่แอลซีที่เป็นสารบริสุทธิ์ และที่แอลซีที่ใช้สารผสม โดยโรงไฟฟ้าอื่น ๆ ใช้มากกว่าอยู่ 48% 110% และ 352% ตามลำดับ แสดงให้เห็นข้อได้เปรียบของของโรงไฟฟ้า Mod. KCS-11 ซึ่งนำไปสู่การลงทุนที่น้อยลงตามไปด้วย ในทางกลับกันโรงไฟฟ้าวัฏจักรที่แอลซีใช้สารผสมมีขนาดอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่มีขนาดใหญ่เพื่อรองรับการเกิดการไต่ของอุณหภูมิซึ่งได้นำเสนอวิเคราะห์ไว้ในบทที่ 6 ซึ่งนำไปสู่ 1 ข้อเสียเปรียบคือต้นทุนในการสร้างโรงไฟฟ้ามีค่าเพิ่มสูงขึ้น

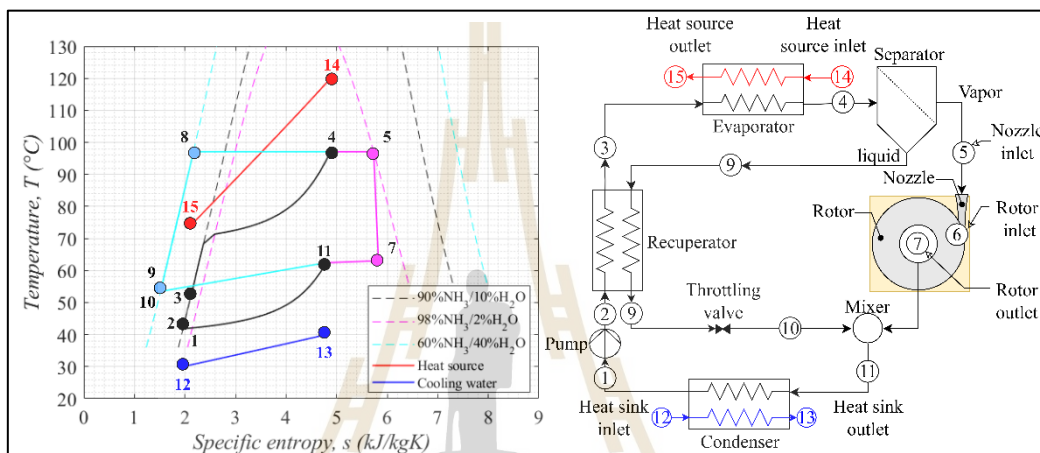
7.1.2 พฤติกรรมการถ่ายเทความร้อน

ในหัวข้อนี้ได้อภิปรายพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนระหว่างสารทำงานกับแหล่งความร้อนและแหล่งรับความร้อนภายในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน กับโรงไฟฟ้าวัฏจักรต่าง ๆ โดยผลดังรูปที่ 7.1

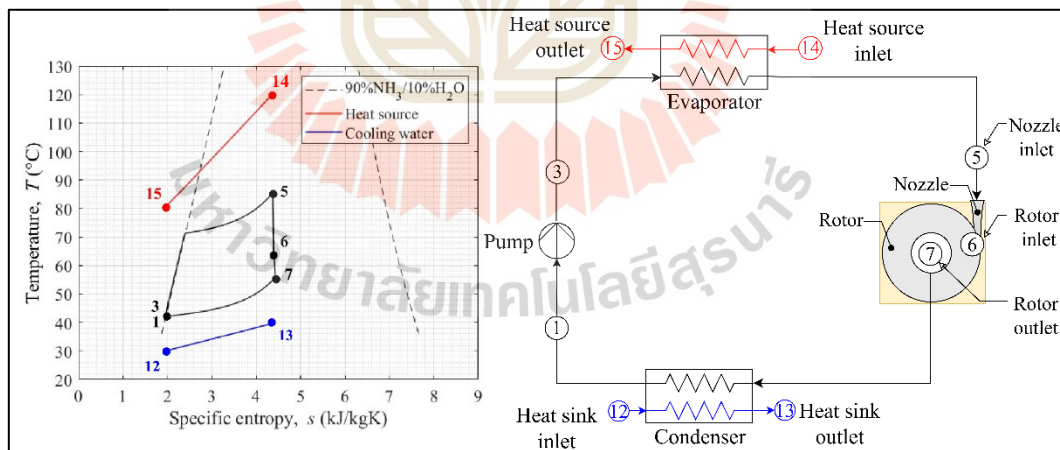


รูปที่ 7.1 ความร้อนที่ถ่ายเทเข้าและออกจากโรงไฟฟ้าวัฏจักรต่าง ๆ

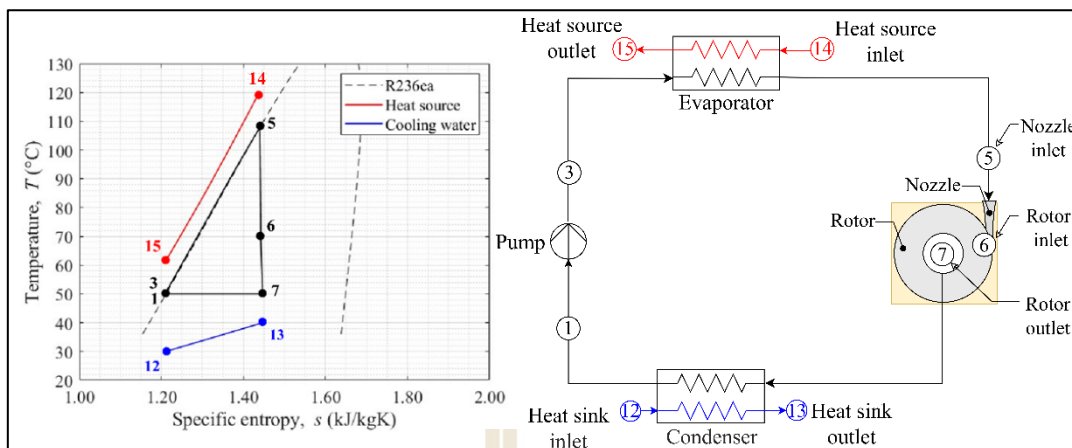
จากผลดังรูปที่ 7.1 แสดงให้เห็นว่าโรงไฟฟ้าวัฏจักรที่แอลซีที่เป็นสารผสมให้ผลลัพธ์ที่โดดเด่นในด้านการถ่ายเทความร้อนของโรงไฟฟ้าโดยสามารถถ่ายเทความร้อนได้สูงที่สุดในกลุ่ม ซึ่งเป็นที่มาของขนาดอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่มากที่สุดเช่นเดียวกัน ดังที่วิเคราะห์ไว้ในหัวข้อที่ 7.1.1 ซึ่งเกิดจากการไต่ของอุณหภูมิ โดยรองลงมาคือโรงที่แอลซีที่ใช้สารบริสุทธิ์ และโรงไฟฟ้า Mod. KCS-11 ซึ่งสามารถอธิบายแนวโน้มที่เกิดขึ้นโดยใช้ผังอุณหภูมิและเอนโทรปีจำเพาะของโรงไฟฟ้าแต่ละวัฏจักร โดยแสดงดังรูปที่ 7.2



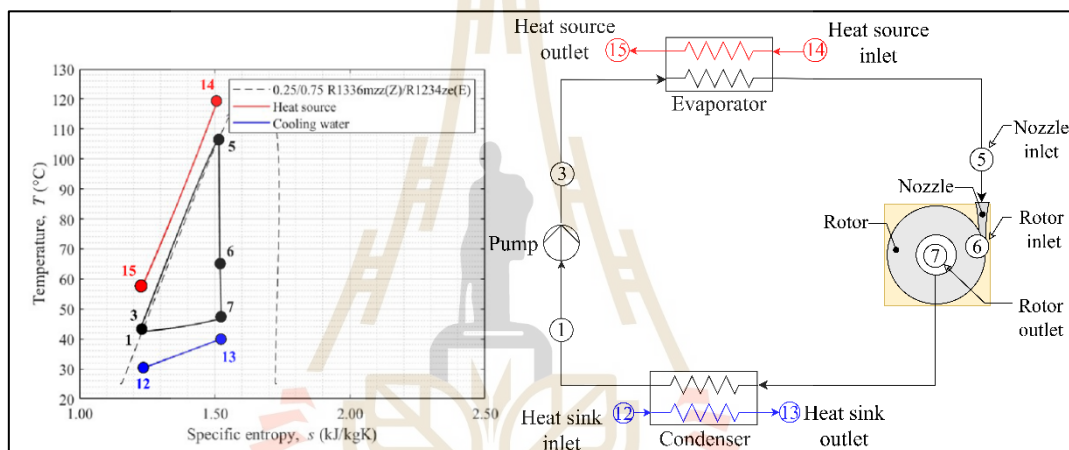
(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

รูปที่ 7.2 ผังอุณหภูมิและเอนโทรปีจำเพาะของโรงไฟฟ้า (ก) KCS-11 ใช้สารผสม ammonia/water ที่อัตราส่วนโดยมวล 0.90/0.10 (ข) Mod. KCS-11 ammonia/water ที่อัตราส่วนโดยมวล 0.90/0.10 (ค) วัฏจักรที่แอลซีที่ใช้สารทำงานเป็น R236ea บริสุทธิ์ (ง) วัฏจักรที่แอลซีที่ใช้สารทำงานผสม R1336mzz(Z)/R1234ze(E) ที่อัตราส่วนโดยมวล 0.25/0.75

จากรูปที่ 7.2 แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของสารทำงาน แหล่งความร้อน และแหล่งทิ้งความร้อนของโรงไฟฟ้าแต่ละวัฏจักรจากรูปที่ 7.1 พบว่า ปริมาณความร้อนที่โรงไฟฟ้า รับสอดคล้องกับอุณหภูมิของแหล่งความร้อนทางออก (จุดที่ 15) ดังรูปที่ 7.2 โดยอุณหภูมิของ โรงไฟฟ้าวัฏจักรที่แอลซีที่ใช้สารทำงานซีโอโทรปิกมีค่าต่ำที่สุด รองลงมาเป็นวัฏจักรที่แอลซีใช้สาร บริสุทธิ์ คาลินา KCS-11 และ Mod. KCS-11 โดยมีค่าเท่ากับ 57 61 72 และ 80 °C ตามลำดับ

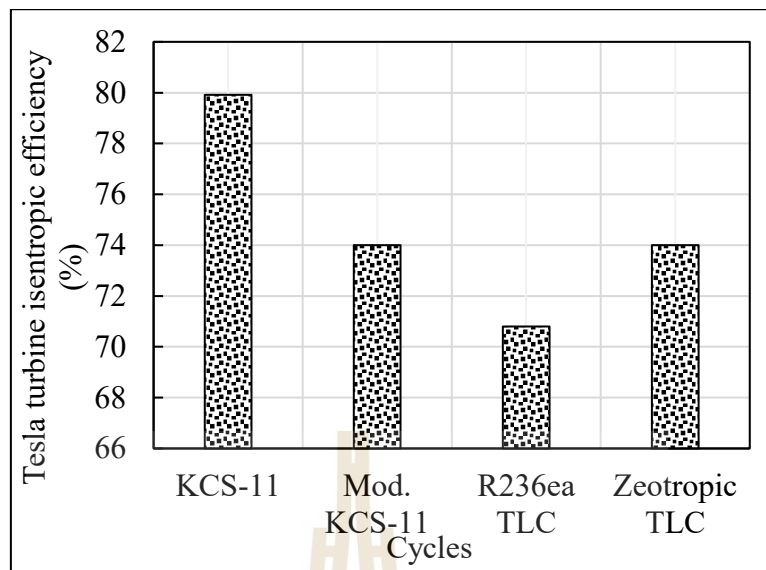
เมื่อพิจารณาผังอุณหภูมิและเอนโทรปีจำเพาะของโรงไฟฟ้าสามวัฏจักรพบว่า โรงไฟฟ้าวัฏจักร ทีแอลซีมีการถ่ายเทความร้อนที่มากกว่าโรงไฟฟ้าคาลินาและ Mod. KCS-11 โดยเมื่อพิจารณาดังรูปที่ 7.2 (ค) เทียบกับ รูปที่ 7.2 (ก) และ 7.2 (ข) แสดงให้เห็นว่าการถ่ายเทความร้อนระหว่างแหล่งความร้อนและสารทำงานในอีวาโปรเรเตอร์ โรงไฟฟ้าวัฏจักรทีแอลซีมีความสม่ำเสมอของอุณหภูมิในการถ่ายเทความร้อนที่มากกว่า ส่งผลให้ถ่ายเทความร้อนได้มากตามไปด้วย ซึ่งปรากฏการดังกล่าว ถูกพบในการศึกษาในบทที่ 5 อย่างไรก็ตาม ยังศึกษาภายใต้สารทำงานเดียวกัน ในขณะที่หัวข้อนี้ได้เปรียบเทียบกันคนละสารทำงาน ดังนั้น เป็นการตอกย้ำว่าการใช้โรงไฟฟ้าที่มีความเป็นก่อนเข้าเทอร์ไบน์ต่ำช่วยให้เพิ่มการถ่ายเทความร้อนได้

นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาโรงไฟฟ้าวัฏจักรทีแอลซีที่เป็นสารบริสุทธิ์และสารผสม ดังรูปที่ 7.2 (ค) และ 7.2 (ง) พบว่า อุณหภูมิของสารทำงานก่อนเข้าอีวาโปรเรเตอร์ของสารผสมต่ำกว่า ซึ่งเกิดจากการใช้สารผสมช่วยทำให้อุณหภูมิของสารทำงานที่ออกจากคอนเดนเซอร์ (จุดที่ 1) ต่ำลง โดยในกรณีที่ใช้สารผสมและสารบริสุทธิ์มีค่าเท่ากับ 43°C และ 50°C ตามลำดับ โดยทำให้เกิดความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างสารทำงานและแหล่งความร้อนที่มากขึ้นส่งผลให้ถ่ายเทความร้อนได้มากขึ้น

นอกจากนี้ โรงไฟฟ้าวัฏจักรคาลินาแบบ KCS-11 และ Mod. KCS-11 เป็นโรงไฟฟ้าที่ใช้สารผสมซีไอโทรปิกเช่นเดียวกับโรงไฟฟ้าวัฏจักรทีแอลซี (แต่คนละสารทำ) ซึ่งสามารถทำให้อุณหภูมิของสารทำงานก่อนเข้าอีวาโปรเรเตอร์ต่ำกว่าสารบริสุทธิ์ (42°C) นอกจากนี้ ยังให้อุณหภูมิสารทำงานที่ทางเข้าอีวาโปรเรเตอร์ต่ำกว่าโรงไฟฟ้าวัฏจักรทีแอลซีที่ใช้สารซีไอโทรปิกอีกด้วย อย่างไรก็ตามก็ตาม ความร้อนที่สารทำงานได้รับที่อีวาโปรเรเตอร์ยังคงน้อยกว่าโรงไฟฟ้าวัฏจักรทีแอลซีเนื่องจาก ความสม่ำเสมอของอุณหภูมิในการถ่ายเทความร้อนน้อยกว่า ดังนั้น ผลดังกล่าวแสดงให้เห็นถึงข้อได้เปรียบของการใช้สารทำงานที่เป็นสารผสม เพื่อเพิ่มความสามารถในการถ่ายเทความร้อนของโรงไฟฟ้าได้ ถึงแม้ว่าจะเป็นโรงไฟฟ้าวัฏจักรใดก็ตาม

7.1.3 พฤติกรรมการทำงานของเตสลาเทอร์ไบน์

ในหัวข้อนี้ได้ศึกษาการทำงานของเตสลาเทอร์ไบน์ในโรงไฟฟ้าวัฏจักรแบบต่าง ๆ โดยรูปที่ 7.3 แสดงประสิทธิภาพไอเซนโทรปิกของเตสลาเทอร์ไบน์ที่ในโรงไฟฟ้าวัฏจักรต่าง ๆ โดยผลของขนาดและขนาดที่เหมาะสมของเตสลาเทอร์ไบน์แสดงไว้ใน ภาคผนวก จ.



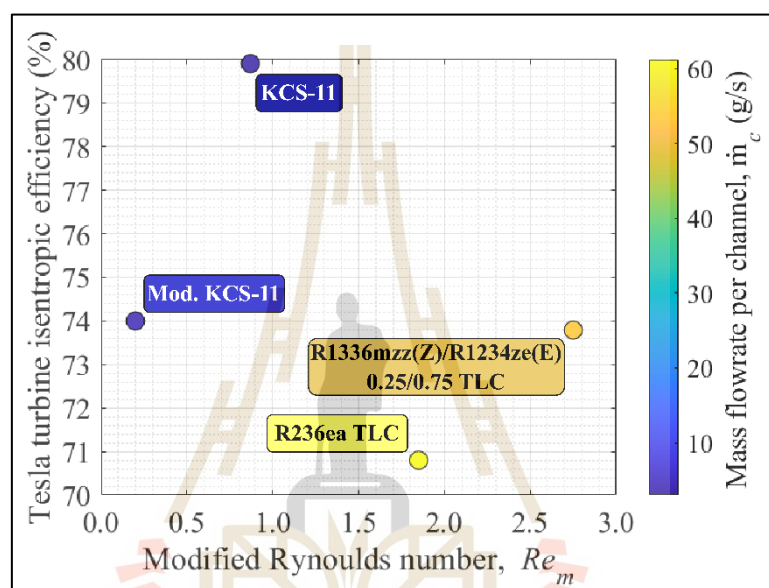
รูปที่ 7.3 ประสิทธิภาพไอเซนโทรปิกของเตสลาเทอร์ไบน์เมื่อใช้งานกับโรงไฟฟ้าวัฏจักรต่าง ๆ

จากรูปที่ 7.3 แสดงให้เห็นว่าการใช้โรงไฟฟ้าวัฏจักรคาลินาให้ประสิทธิภาพสูงที่สุด โดยมีค่าเท่ากับ 80% รองลงมาเป็นโรงไฟฟ้าวัฏจักร Mod. KCS-11 ได้เท่ากับ 74% และโรงไฟฟ้าวัฏจักรที่แอลซีแบบสารผสมมีค่าเท่ากับ 73.9% โดยที่น้อยที่สุดเมื่อเป็นโรงไฟฟ้าวัฏจักรที่แอลซีแบบสารบริสุทธิ์ โดยพบแนวโน้มที่น่าสนใจเป็นดังต่อไปนี้

จากผลแสดงให้เห็นว่าโรงไฟฟ้าที่มีความเป็นไอของสารทำงานสูงทำให้ประสิทธิภาพสูงขึ้นตามไปด้วย โดยที่โรงไฟฟ้าคาลินาที่มีตัวแยกไอของสารทำงานทำให้สารทำงานที่ไหลเข้าเตสลาเทอร์ไบน์ (จุดที่ 5 รูปที่ 7.2 (ก)) มีสถานะเป็นไออิ่มตัว ในขณะที่โรงไฟฟ้าคาลินาแบบ Mod. KCS-11 มีประสิทธิภาพรองลงมาโดยมีความเป็นไอของสารทำงานก่อนเข้าเทอร์ไบน์เท่ากับ 0.63 (จุดที่ 5 รูปที่ 7.2 (ข)) และน้อยที่สุดเป็นโรงไฟฟ้าวัฏจักรที่แอลซี (จุดที่ 5 รูปที่ 7.2 (ค) และ 7.2 (ง)) มีสถานะของสารทำงานเป็นของเหลวอิ่มตัว แนวโน้มนี้ได้ผลลัพธ์ดังบทที่ 5 ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ไม่ว่าจะเป็วัฏจักรใด เตสลาเทอร์ไบน์ย่อมทำงานได้ดีเมื่อความเป็นไอสูง

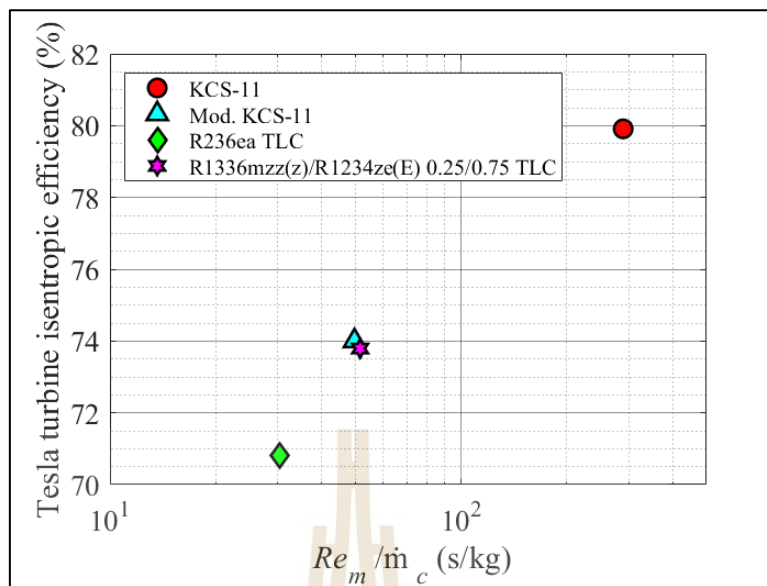
นอกจากนี้ แสดงให้เห็นว่าโรงไฟฟ้าวัฏจักรที่แอลซีที่ใช้สารทำงานต่างกันส่งผลต่อประสิทธิภาพอย่างมาก โดยที่ใช้สารทำงาน R236ea บริสุทธิ์ ซึ่งเลือกโดยใช้เฉพาะอุณหภูมิวิกฤตเป็นเกณฑ์ และสารผสม R1336mzz(Z)/R1234ze(E) ที่มาจากเลือกเทียบกันที่หลาย ๆ สารในบทที่ 6 โดยประสิทธิภาพไอเซนโทรปิกเท่ากับ 70.8% และ 73.7% ซึ่งเกิดจากความเหมาะสมของคุณสมบัติของสารทำงาน ซึ่งผลจากบทที่ 6 พบว่า Modified Reynolds number (Re_m) ที่เป็นตัวแปรที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพไอเซนโทรปิกอย่างมีนัยสำคัญ อย่างไรก็ตาม Re_m เป็นฟังก์ชันของอัตราการ

ไหลเชิงมวลของสารทำงานในแต่ละดิสก์ (\dot{m}_c) (ดังสมการที่ 6.1 ในบทที่ 6) เมื่อพิจารณาผลดังตารางที่ 7.1 แล้วแสดงให้เห็นว่าอัตราการไหลของสารทำงานของสารทำงานของโรงไฟฟ้าวัฏจักรที่แอลซีมีค่าสูงกว่าโรงไฟฟ้าคาลินาและ Mod. KCS-11 อยู่ประมาณ 13 ถึง 15 เท่า ซึ่งอาจส่งผลต่อค่า Re_m ทำให้ไม่สามารถแน่ใจได้ว่า Re_m สามารถใช้เป็นเกณฑ์เดียวได้หรือไม่ ดังนั้นรูปที่ 7.4 แสดงอิทธิพลของ Re_m และ \dot{m}_c ที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพ ไอเซนโทรปิกของเตสลาเทอร์ไบน์



รูปที่ 7.4 ผลของ Modified Reynolds number และอัตราการไหลของสารทำงานที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพไอเซนโทรปิกของเตสลาเทอร์ไบน์

โดยจากรูปที่ 7.4 แสดงให้เห็นว่า Re_m ไม่สัมพันธ์กับประสิทธิภาพไอเซนโทรปิกของเตสลาเทอร์ไบน์เช่นเดียวกับบทสรุปในบทที่ 6 อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาวัฏจักรที่มีอัตราการไหลใกล้เคียงกัน เช่น โรงไฟฟ้าวัฏจักรที่แอลซีสารผสม ($Re_m = 2.75$) มี Re_m ของสารผสมสูงกว่าสารบริสุทธิ์ ($Re_m = 1.85$) โดยโรงไฟฟ้าวัฏจักรที่แอลซีสารผสมมีประสิทธิภาพของเตสลาเทอร์ไบน์ที่สูงกว่า ซึ่งแนวโน้มที่พบตรงกับผลการศึกษานี้ในบทที่ 6 ดังนั้นเพื่อรวมอิทธิพลของอัตราการไหลของสารทำงานเข้าด้วยกัน ผู้วิจัยนำเสนอให้ใช้เป็น Re_m / \dot{m}_c โดยรูปที่ 7.5 แสดงอิทธิพลของ Re_m / \dot{m}_c ต่อประสิทธิภาพของเตสลาเทอร์ไบน์เมื่อวัฏจักรของโรงไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงไป



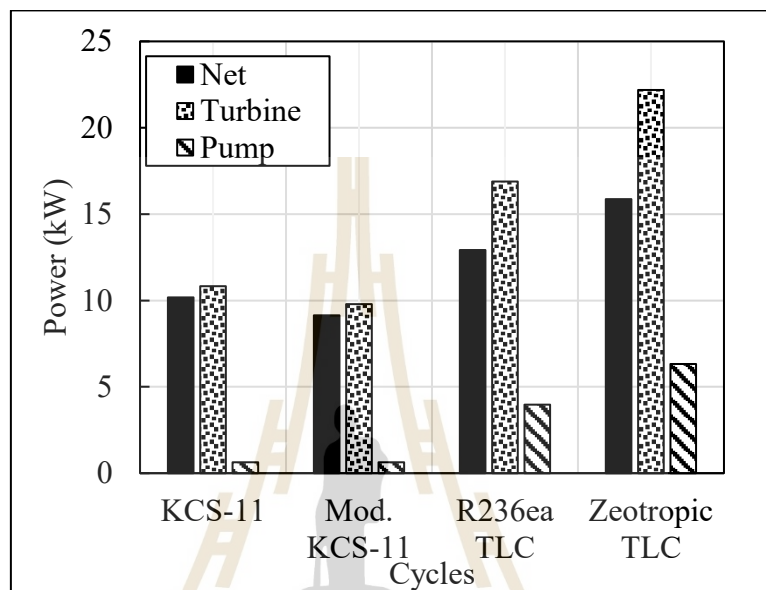
รูปที่ 7.5 ผลของ Re_m / \dot{m}_c และประสิทธิภาพไอเซนโทรปิกของเตสลาเทอร์ไบน์ในโรงไฟฟ้าวัฏจักรต่าง ๆ

จากรูปที่ 7.5 แสดงให้เห็นว่า Re_m / \dot{m}_c แปรผันตรงกับประสิทธิภาพของเตสลาเทอร์ไบน์อย่างมีนัยสำคัญ แม้ว่า \dot{m}_c ของสารทำงานไม่เท่ากันก็ตาม โดยผลพบว่าโรงไฟฟ้าที่ทำให้ Re_m / \dot{m}_c มีค่าสูงส่งผลให้ประสิทธิภาพของเตสลาเทอร์ไบน์ออกมาสูง ดังนั้น ในการออกแบบเตสลาเทอร์ไบน์ไม่จำเป็นต้องออกแบบให้มีความ Re_m / \dot{m}_c ที่สูงเพื่อให้กำลังจากเทอร์ไบน์ออกมาสูงตามไปด้วย หรือ ในการออกแบบเตสลาเทอร์ไบน์ควรให้อัตราการไหลของสารทำงานในระหว่างแต่ละแผ่นดิสก์มีค่าน้อย (ทำให้ Re_m / \dot{m}_c สูงขึ้น) สามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของเตสลาเทอร์ไบน์ได้

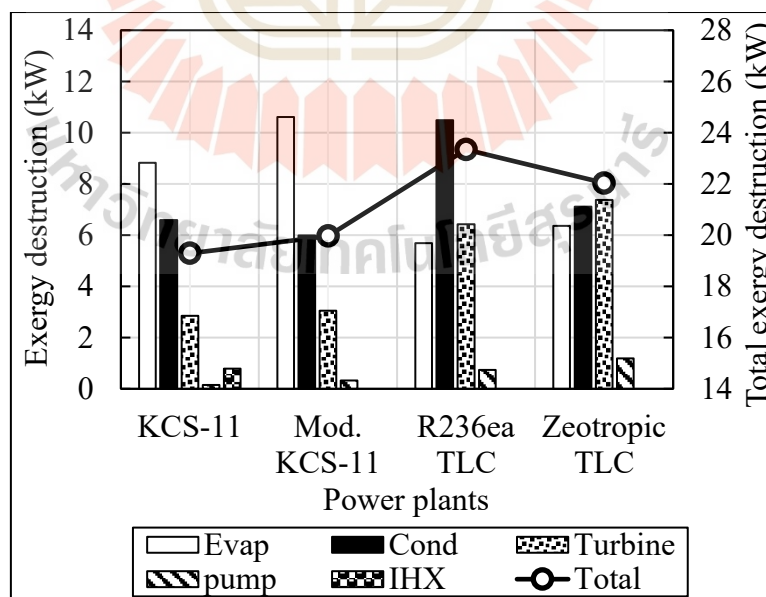
จากการศึกษาพฤติกรรมของการทำงานของเตสลาเทอร์ไบน์ข้างต้นแสดงให้เห็นว่าโรงไฟฟ้าแต่ละวัฏจักรส่งผลให้เตสลาเทอร์ไบน์ทำงานได้แตกต่างกันออกไปซึ่งส่งผลให้ประสิทธิภาพแตกต่างกันออกไปขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของสารทำงาน อัตราการไหลเชิงมวล ของสารทำงาน อย่างไรก็ตาม จากการศึกษาในบทที่ 5 และ 6 ยืนยันว่า ประสิทธิภาพของเตสลาเทอร์ไบน์ไม่ใช่ตัวกำหนดว่าสมรรถนะโดยรวม เช่น กำลังสุทธิของโรงไฟฟ้าออกมาสูง ดังนั้น ในหัวข้อที่ 7.1.4 ได้ศึกษาพฤติกรรมของระบบเมื่อเปลี่ยนแปลงวัฏจักรของโรงไฟฟ้า ถึงแม้ว่าประสิทธิภาพไอเซนโทรปิกไม่ใช่ตัวแปรที่เป็นอิทธิพลหลักของกำลังสุทธิของโรงไฟฟ้า อย่างไรก็ตาม ถ้าสามารถเลือกสารทำงานให้เหมาะสมทั้งเตสลาเทอร์ไบน์และโรงไฟฟ้าได้จะช่วยให้มีโอกาสได้กำลังสุทธิสูงขึ้น

7.1.4 พฤติกรรมของสมรรถนะโดยรวมของโรงไฟฟ้า

ในหัวข้อนี้ได้ประเมินสมรรถนะของโรงไฟฟ้าวัฏจักรต่าง ๆ ที่ใช้เทคโนโลยีเทอร์โบ โดยในรูปที่ 7.6 แสดงกำลังสุทธิ กำลังที่ได้จากเทอร์โบ และกำลังที่ป้อนต้องการของโรงไฟฟ้าวัฏจักรต่าง ๆ ที่ใช้กับเทคโนโลยีเทอร์โบ โดยมีรายละเอียดเป็นดังต่อไปนี้



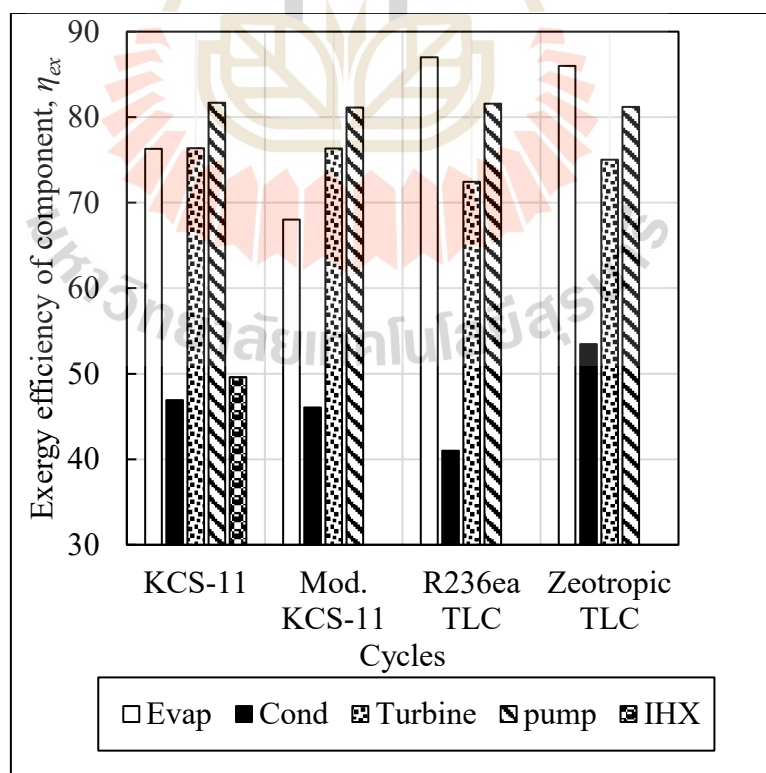
รูปที่ 7.6 กำลังสุทธิ กำลังจากเทอร์โบ และกำลังที่ป้อนต้องการของโรงไฟฟ้าวัฏจักรต่าง ๆ



รูปที่ 7.7 การทำลายเอ็กเซอร์ยีรายอุปกรณ์และของระบบโดยรวม

จากรูปที่ 7.6 พบว่า โรงไฟฟ้าวัฏจักรที่แอลซีที่ใช้สารผสมซีไอโตรอปิกให้กำลังสุทธิสูงที่สุดโดยมีค่าเท่ากับ 15.87 kW ในขณะที่โรงไฟฟ้าวัฏจักรที่แอลซีที่ใช้สารบริสุทธิ์ได้รองลงมาเท่ากับ 12.91 kW ตามด้วยโรงไฟฟ้าวัฏจักรคาลินา KCS -11 และ Mod. KCS-11 โดยมีกำลังสุทธิเท่ากับ 10.08 kW และ 9.14 kW โดยจากผลในบทที่ 6 แสดงให้เห็นว่าการทำลายเอนทาลปีส่งผลกระทบต่อสมรรถนะโดยรวมของโรงไฟฟ้าอย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้น ความแตกต่างสมรรถนะของแต่ละวัฏจักรสามารถอธิบายได้ด้วยการทำลายเอนทาลปีของแต่ละอุปกรณ์และโดยรวมของโรงไฟฟ้า โดยรูปที่ 7.7 แสดงการทำลายเอนทาลปีของโรงไฟฟ้าแต่ละวัฏจักร

เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 7.7 พบว่า โรงไฟฟ้าที่มีกำลังสุทธิสูงที่สุดไม่ใช่โรงไฟฟ้าที่มีการทำลายเอนทาลปีต่ำที่สุด แต่เป็นวัฏจักรที่มีการกระจายการทำลายเอนทาลปีอย่างสมดุลในแต่ละอุปกรณ์ ซึ่งแนวโน้มนี้สอดคล้องกับผลการวิเคราะห์สมรรถนะระบบในบทที่ 6 อย่างไรก็ตาม การใช้ข้อมูลการทำลายเอนทาลปีรายอุปกรณ์หรือทั้งระบบเพียงอย่างเดียวไม่สามารถอธิบายความเปลี่ยนแปลงของสมรรถนะได้ทั้งหมด เนื่องจากโรงไฟฟ้าคาลินาและที่แอลซีมีปริมาณความร้อนที่รับเข้าสู่ระบบแตกต่างกัน โดยโรงไฟฟ้าวัฏจักรที่แอลซีมีค่าดังกล่าวสูงกว่าโรงไฟฟ้าคาลินาสูงสุดถึง 38% ซึ่งทำให้เกิดความไม่ผันกลับจากการถ่ายเทความร้อนมากขึ้นตามไปด้วยทำให้ปริมาณเอนทาลปีที่ถูกทำลายสูงขึ้น ส่งผลให้การทำลายเอนทาลปีโดยรวมสูงถึงแม้ว่าได้กำลังสุทธิสูงก็ตาม



รูปที่ 7.8 ประสิทธิภาพเอนทาลปีของรายอุปกรณ์

ในทางตรงกันข้าม การศึกษาในบทที่ 6 แสดงให้เห็นว่า การใช้ค่าการทำลายเอ็กเซอร์ยีสามารถให้มุมมองในการประเมินสมรรถนะของระบบได้ดี เนื่องจากความแตกต่างของการถ่ายเทความร้อนในแต่ละกรณีมีไม่มากนัก โดยมีค่าต่างกันสูงสุดเพียง 17% ดังนั้น ในการประเมินความเปลี่ยนแปลงของสมรรถนะ จึงได้ใช้ค่าประสิทธิภาพเอ็กเซอร์ยีของแต่ละอุปกรณ์ เพื่อให้เห็นภาพว่าอุปกรณ์แต่ละชนิดสามารถทำงานได้เต็มสมรรถนะมากน้อยเพียงใด ซึ่งแสดงผลไว้ในรูปที่ 7.8

จากผลของประสิทธิภาพของเอ็กเซอร์ยีดังรูปที่ 7.8 มีแนวโน้มที่น่าสนใจเป็นดังต่อไปนี้

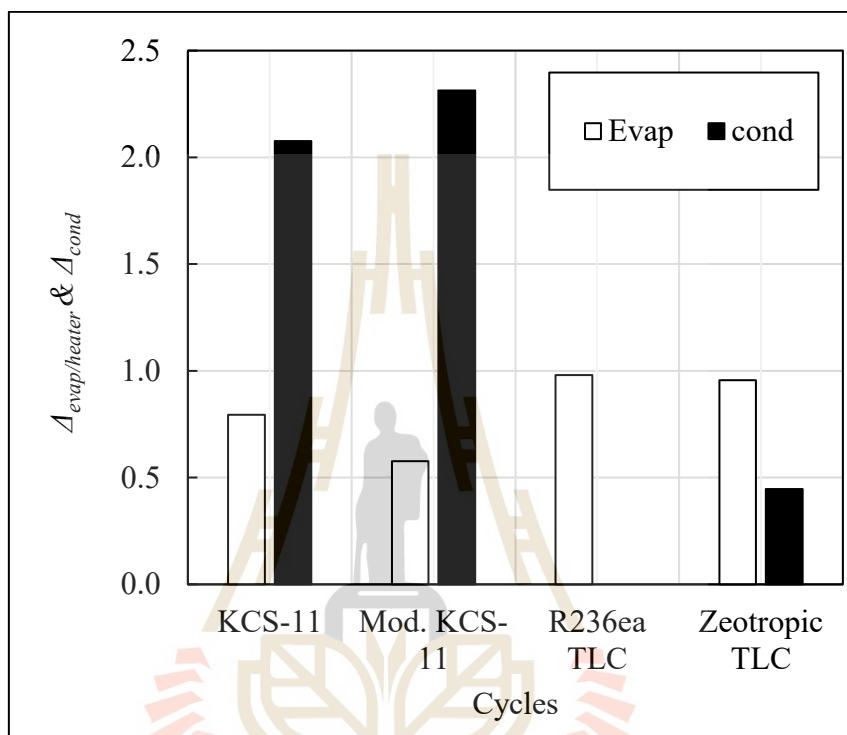
1) การถ่ายเทความร้อน: เมื่อพิจารณาโรงไฟฟ้าวัฏจักรที่แอลซีที่ใช้สารบริสุทธิ์เปรียบเทียบกับสารผสม พบว่าค่าประสิทธิภาพเอ็กเซอร์ยีอยู่ที่ 87% และ 86% ตามลำดับ โดยแม้สารบริสุทธิ์จะมีประสิทธิภาพสูงกว่าเพียง 1% แต่สารผสมกลับสามารถดึงความร้อนได้มากกว่าถึง 8% ความแตกต่างนี้สามารถอธิบายได้จากความเหมาะสมของคุณสมบัติของสารทำงานที่เข้ากันได้ดีกับลักษณะของแหล่งความร้อน ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษานำเสนอในบทที่ 6 ซึ่งระบุว่าสาร R1336mzz(Z) เป็นหนึ่งในสารที่สามารถดึงพลังงานความร้อนได้อย่างมีประสิทธิภาพ ส่งผลให้สารผสมซีโอโทรปิก R1336mzz(Z)/R1234ze(E) ดึงพลังงานความร้อนได้สูงกว่า

ทั้งนี้ แนวโน้มของประสิทธิภาพเอ็กเซอร์ยีสามารถอธิบายเพิ่มเติมได้จากความชันของเส้นอุณหภูมิระหว่างแหล่งให้ความร้อนและแหล่งรับความร้อนในอีวาโปรเรเตอร์/ฮีตเตอร์และคอนเดนเซอร์ ซึ่งเป็นตัวบ่งชี้ความสอดคล้องของอุณหภูมิในการแลกเปลี่ยนความร้อน โดยค่าใกล้เคียง 1 แสดงถึงความแมตช์ของเส้นอุณหภูมิทั้งสองฝั่งมากขึ้น ผลการวิเคราะห์ดังกล่าวแสดงไว้ในรูปที่ 7.9 โดยพบว่า ผลความแตกต่างของความชันระหว่างแหล่งให้ความร้อนและแหล่งรับความร้อนกับสารทำงานทั้งที่ อีวาโปรเรเตอร์/ฮีตเตอร์และคอนเดนเซอร์มีทิศทางเดียวกันกับประสิทธิภาพเอ็กเซอร์ยีของอีวาโปรเรเตอร์/ฮีตเตอร์และคอนเดนเซอร์ อย่างไรก็ตาม ค่าประสิทธิภาพเอ็กเซอร์ยีและความแมตช์กันของอุณหภูมิ (Temperature match) ในคอนเดนเซอร์ ไม่ได้แสดงถึงความปริมาณในการทิ้งความร้อนเพียงแต่บอกว่าสามารถทำงานได้ดีเพียงใด เนื่องจาก ปริมาณการทิ้งความร้อนขึ้นอยู่กับารรับความร้อนของโรงไฟฟ้า โดยที่ยังรับมากก็จะส่งผลให้ทิ้งความร้อนมากตามไปด้วย

2) การทำงานของเทสลาเทอร์ไบน์: จากการวิเคราะห์พบว่าค่าประสิทธิภาพเอ็กเซอร์ยีมีแนวโน้มสอดคล้องกับประสิทธิภาพไอเซนโทรปิกของเทสลาเทอร์ไบน์ อย่างไรก็ตาม ปริมาณการทำลายเอ็กเซอร์ยีกลับไม่สอดคล้องกับค่าประสิทธิภาพไอเซนโทรปิก เนื่องจากในงานศึกษานี้ สารทำงานที่เข้าสู่เทสลาเทอร์ไบน์มีศักยภาพภายในแตกต่างกัน ทั้งในด้านอุณหภูมิและอัตราการไหล ซึ่งเป็นผลมาจากการใช้วัฏจักรที่แตกต่างกัน โดยปริมาณการทำลายเอ็กเซอร์ยีเป็นตัวแปรเชิงปริมาณที่ขึ้นอยู่กับศักยภาพภายในของสารทำงาน หากสารทำงานมีศักยภาพภายในสูงมาก (เช่น ได้รับพลังงานความร้อนในปริมาณที่มากกว่า) ก็จะมีแนวโน้มที่

จะเกิดการทำความเย็นสูงขึ้นตามไปด้วย ดังนั้นการใช้ค่าการทำความเย็นเพียงอย่างเดียวอาจไม่เพียงพอในการประเมินสมรรถนะของเทอร์โบ

3) การทำงานของปั๊ม: จะเห็นได้ว่าการจำลองประสิทธิภาพเอ็กเซอร์ยีของปั๊มมีค่าค่อนข้างคงที่เนื่องจาก ในการจำลองนั้นได้กำหนดให้ประสิทธิภาพของปั๊มคงที่ (80%) เท่ากันทุก วัฏจักร



รูปที่ 7.9 ผลการเปรียบเทียบผลความแตกต่างของความชื้นระหว่าง แหล่งให้ความความร้อนและแหล่งรับความร้อนกับสารทำงานภายในอีวาโปเรเตอร์/ฮีตเตอร์และคอนเดนเซอร์เมื่อวัฏจักรเปลี่ยนแปลงไป

จากการประเมินสมรรถนะพบว่า โรงไฟฟ้าวัฏจักรที่แอลซีที่ใช้สารซีโอโทรปิกให้กำลังสุทธิสูงสุด อย่างไรก็ตาม วัฏจักรนี้ความต้องการใช้อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่มีขนาดใหญ่ ความดันที่สูงรวมถึงระบบมีอัตราการไหลที่สูงและความดันที่จำเป็นต้องเพิ่มสูง ดังนั้น แม้ว่าจะให้ความโดดเด่นในสมรรถนะด้านอุณหพลศาสตร์แต่อาจส่งผลให้ลงทุนสูงกว่าตามไปด้วย ดังนั้นในหัวข้อที่ 7.2 ได้ประเมินทางเศรษฐศาสตร์โรงไฟฟ้าที่ใช้กับเทอร์โบในวัฏจักรที่ต่างกันไป เพื่อใช้เป็นอีกหนึ่งเกณฑ์ในการตัดสินใจ

7.2 ผลการประเมินเศรษฐศาสตร์

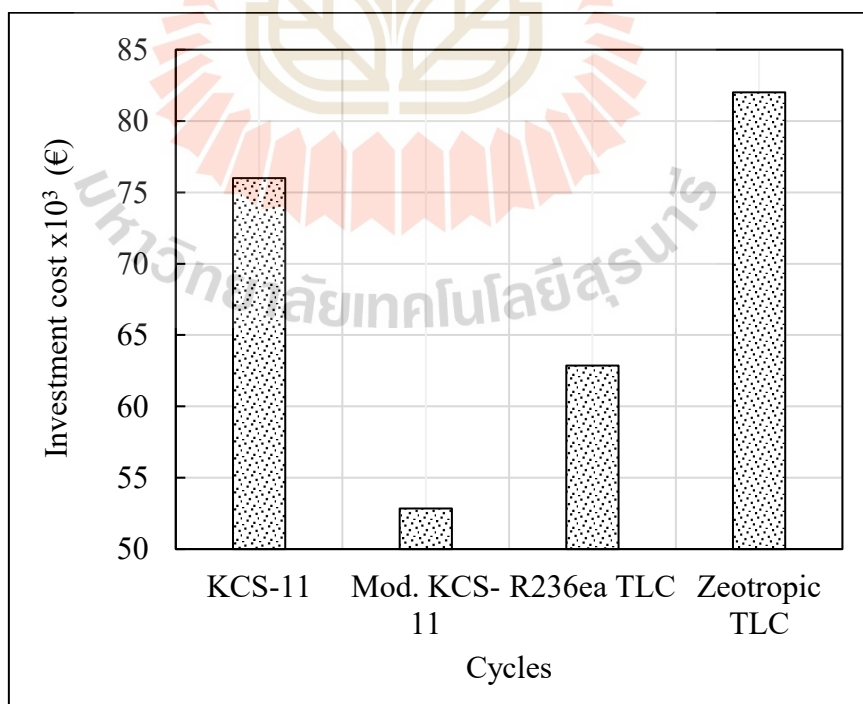
ในหัวข้อนี้ได้ทำการประเมินทางเศรษฐศาสตร์ของโรงไฟฟ้าแต่ละวัฏจักรที่ใช้เทคโนโลยีเทอร์โบไบน์ โดยพิจารณาจากหลายมุมมอง ได้แก่ เงินลงทุนเริ่มต้น ต้นทุนการผลิตไฟฟ้าต่อหน่วย มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (Net Present Value: NPV) ระยะเวลาคืนทุนที่ปรับด้วยอัตราคิดลด (Discounted Payback Period: d-PbP) และอัตราผลตอบแทนภายใน (Internal Rate of Return: IRR) ทั้งนี้เงื่อนไขในการประเมินกำหนดเป็นดังนี้

- 1) ระยะเวลาโครงการ 20 ปี
- 2) อัตราคิดลด 5%
- 3) ชั่วโมงทำงาน 7,300 ชั่วโมง/ปี
- 4) ราคาค่าไฟฟ้าที่ขาย 100 €/MWh (3.5 บาท/kWh)

โดยรายละเอียดของผลการประเมินเป็นดังต่อไปนี้

7.2.1 เงินลงทุนเริ่มต้นของโรงไฟฟ้า

รูปที่ 7.10 ได้แสดงผลของเงินลงทุนเริ่มต้นของโรงไฟฟ้าวัฏจักร KCS-11 Mod. KCS-11 ทีแอลซี (TLC) สารบริสุทธิ์ และสารผสมที่ใช้เทคโนโลยีเทอร์โบไบน์



รูปที่ 7.10 เงินลงทุนเริ่มต้นของโรงไฟฟ้าแต่ละวัฏจักร

จากรูปที่ 7.10 พบแนวโน้มที่น่าสนใจเป็นดังนี้

1) โรงไฟฟ้า Mod. KCS-11 ใช้เงินลงทุนที่น้อยกว่า KCS-11: สำหรับโรงไฟฟ้าคาถินาแบบ Mod. KCS-11 ซึ่งได้รับการปรับปรุงโดยใช้เทคโนโลยีเทอร์โบที่สามารถรองรับการทำงานที่มีความเป็นไอต่ำ ส่งผลให้สามารถตัดอุปกรณ์แยกไอและรีคูเปอร์เรเตอร์ออกได้ ลดความซับซ้อนของระบบและช่วยลดเงินลงทุนได้อย่างมีนัยสำคัญ โดยโรงไฟฟ้า KCS-11 มีเงินลงทุนเริ่มต้นที่ $76 \times 10^3 \text{ €}$ (2.66 ล้านบาท) ขณะที่ Mod. KCS-11 ใช้เพียง $52.85 \times 10^3 \text{ €}$ (1.85 ล้านบาท) ซึ่งลดลงประมาณ 30% แม้กำลังไฟฟ้าสุทธิที่ผลิตได้จะลดลงเพียง 15% จึงอาจนำไปสู่ข้อได้เปรียบด้านการลงทุนในภาพรวม (ดังรูปที่ 7.6)

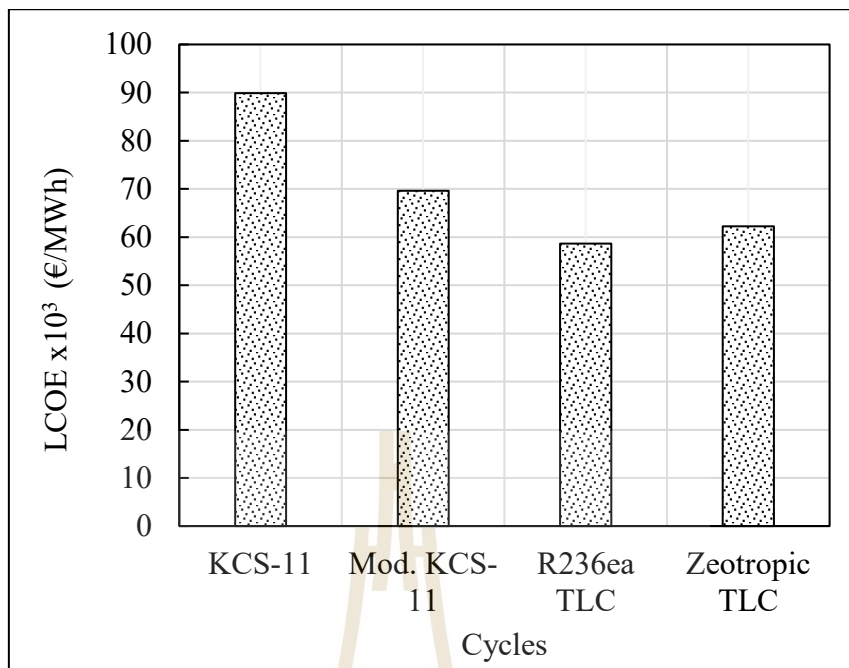
2) โรงไฟฟ้าวัฏจักรที่แอลซีใช้เงินลงทุนสูงและให้กำลังสูง: โรงไฟฟ้าวัฏจักรที่แอลซีเป็นโรงไฟฟ้าที่ใช้เงินลงทุนสูง และสูงที่สุดเมื่อใช้สารทำงานเป็นสารผสมซีไอโทรปิก เนื่องจาก ขนาดของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนที่มีขนาดใหญ่กว่าโรงไฟฟ้าวัฏจักรอื่น (ผลแสดงใน ตารางที่ 7.1) อย่างไรก็ตาม โรงไฟฟ้าวัฏจักรที่แอลซีให้กำลังสุทธิออกมากสูง

3) โรงไฟฟ้าวัฏจักรที่แอลซีสารผสมใช้เงินลงทุนมากกว่าสารบริสุทธิ์: โรงไฟฟ้าวัฏจักรที่แอลซีใช้สารผสมที่มีเงินลงทุนมากกว่าเนื่องจาก ขนาดของคอนเดนเซอร์ต้องการใช้พื้นที่ที่มากกว่าสารบริสุทธิ์ เพื่อรองรับการเกิดการไต่ของอุณหภูมิ (ผลแสดงใน ตารางที่ 7.1) โดยที่เมื่อใช้สารผสมต้องใช้เงินลงทุนเท่ากับ $82 \times 10^3 \text{ €}$ (2.87 ล้านบาท) ในขณะที่สารบริสุทธิ์เท่ากับ $62 \times 10^3 \text{ €}$ (2.17 ล้านบาท) ซึ่งน้อยกว่าอยู่ 24% อย่างไรก็ตามเมื่อใช้สารผสมให้กำลังสุทธิต่ำกว่า 18 % (ดังรูปที่ 7.6)

จากผลการวิเคราะห์เงินลงทุนเริ่มต้น พบว่าโรงไฟฟ้าที่มีกำลังไฟฟ้าสุทธิสูง มักต้องใช้เงินลงทุนเริ่มต้นในระดับสูงตามไปด้วย เช่น โรงไฟฟ้าวัฏจักรที่แอลซีที่ใช้สารผสมซีไอโทรปิก ดังนั้น เพื่อประเมินความเป็นไปได้ของการลงทุนในแต่ละวัฏจักร หัวข้อนี้จึงได้พิจารณาตัวแปรด้านเศรษฐศาสตร์เพิ่มเติม โดยตัวแปรแรกที่น่ามาประเมินคือต้นทุนต่อหน่วยการผลิตไฟฟ้า ซึ่งนำเสนอในหัวข้อ 7.2.2

7.2.2 ต้นทุนต่อหน่วยของการผลิตไฟฟ้า (LCOE)

รูปที่ 7.11 ได้แสดงผลของต้นทุนต่อหน่วยของการผลิตกระแสไฟฟ้าของแต่ละวัฏจักรโดยมีรายละเอียดเป็นดังต่อไปนี้



รูปที่ 7.11 ต้นทุนต่อหน่วยของการผลิตไฟฟ้าของโรงไฟฟ้าแต่ละวัฏจักร

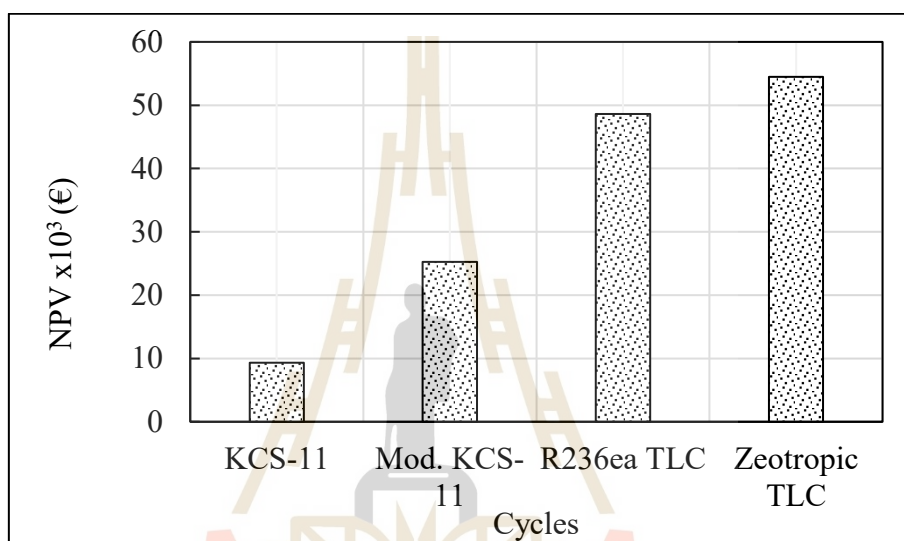
จากรูปที่ 7.11 พบว่าโรงไฟฟ้าที่มีต้นทุนต่อหน่วยการผลิตไฟฟ้าต่ำที่สุดคือ โรงไฟฟ้าวัฏจักรที่แอลซีที่ใช้สารบริสุทธิ์ รองลงมาคือ วัฏจักรที่แอลซีที่ใช้สารผสม ซีโอโทรปิก ตามด้วยโรงไฟฟ้า Mod. KCS-11 และ KCS-11 โดยมีค่าต้นทุนเท่ากับ 58.63 (2.05), 62.27 (2.18), 69.65 (2.44) และ 89.92 (3.15) $\times 10^3$ €/MWh (บาท/kWh) ตามลำดับ ซึ่งเกิดจากต้นทุนของโรงไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ที่แตกต่างกัน โดยผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าผลลัพธ์นี้สะท้อนให้เห็นถึงข้อได้เปรียบของโรงไฟฟ้าวัฏจักรที่แอลซีในด้านต้นทุนการผลิตไฟฟ้าที่ต่ำ อย่างไรก็ตาม แม้ว่าวัฏจักรที่แอลซีจะมีต้นทุนต่อหน่วยการผลิตต่ำ แต่ก็ต้องใช้เงินลงทุนเริ่มต้นสูงกว่า ซึ่งอาจไม่เหมาะสมกับโครงการที่มีข้อจำกัดด้านงบประมาณ อย่างไรก็ตาม หากมีงบลงทุนเพียงพอ โรงไฟฟ้าวัฏจักรที่แอลซีถือเป็นทางเลือกที่น่าสนใจ เนื่องจากมีแนวโน้มให้ผลตอบแทนที่ดีในระยะยาว

นอกจากนี้ โรงไฟฟ้าคาลินาแบบ KCS-11 ซึ่งมีความซับซ้อนของระบบสูง ส่งผลให้ต้นทุนการผลิตไฟฟ้าสูง เนื่องจากต้องใช้เงินลงทุนเริ่มต้นจำนวนมาก แต่กลับให้กำลังไฟฟ้าสุทธิไม่สูงนัก ในทางกลับกัน โรงไฟฟ้า Mod. KCS-11 ที่ลดความซับซ้อนของระบบลงโดยการใช้เทคโนโลยีเทอร์ไบน์ที่สามารถรับสารทำงานที่มีคุณสมบัติเป็นไอต่ำได้ ช่วยลดต้นทุนการผลิตไฟฟ้าลงได้ถึง 22% และใช้เงินลงทุนเริ่มต้นน้อยลงถึง 30% จึงเป็นตัวเลือกที่น่าสนใจสำหรับโครงการที่มีข้อจำกัดด้านงบประมาณ อย่างไรก็ตาม ต้นทุนต่อหน่วยการผลิตไฟฟ้าเพียงอย่างเดียวไม่สามารถบ่งชี้ได้ว่าโรงไฟฟ้าจะสร้างผลกำไรมากน้อยเพียงใดเมื่อสิ้นสุดอายุโครงการ ดังนั้น จึงจำเป็นต้องพิจารณาตัวแปรเพิ่มเติม

ที่สะท้อนถึงผลกำไรตลอดอายุการดำเนินงานของโครงการ นั่นคือมูลค่าปัจจุบันสุทธิ ซึ่งได้นำเสนอในหัวข้อ 7.2.3

7.2.3 มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (NPV)

รูปที่ 7.12 แสดงมูลค่าปัจจุบันสุทธิของโรงไฟฟ้าที่ใช้เทคโนโลยีเทอร์โบไบน์เมื่อสิ้นสุดอายุโครงการที่ 20 ปี



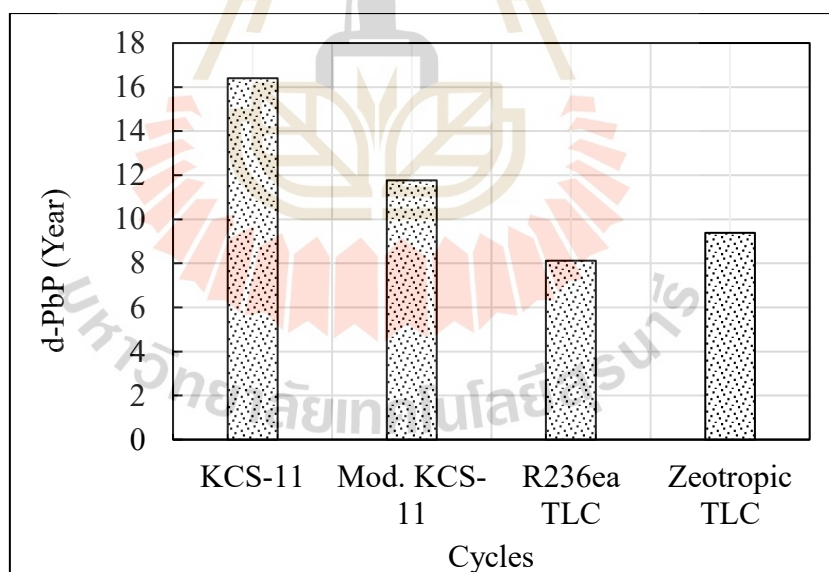
รูปที่ 7.12 มูลค่าปัจจุบันสุทธิของโรงไฟฟ้าแต่ละวัฏจักร

จากรูปที่ 7.12 พบว่าโรงไฟฟ้าที่ให้ผลกำไรสุทธิสูงที่สุดคือโรงไฟฟ้าวัฏจักรที่แอลซีที่ใช้สารทำงานเป็นสารผสม โดยมีมูลค่าปัจจุบันสุทธิ (NPV) เท่ากับ $54.47 \times 10^3 \text{ €}$ (1.9 ล้านบาท) ขณะที่โรงไฟฟ้าวัฏจักรคาลินาแบบ KCS-11 ให้ผลกำไรสุทธิน้อยที่สุด โดยมี NPV เท่ากับ $9.33 \times 10^3 \text{ €}$ (0.33 ล้านบาท) ทั้งนี้ NPV เป็นตัวแปรที่สามารถสะท้อนปริมาณกำไรตลอดอายุโครงการได้ อย่างไรก็ตาม NPV เพียงอย่างเดียวไม่สามารถบ่งชี้ถึงความได้เปรียบทางเศรษฐศาสตร์ของแต่ละโครงการได้อย่างครบถ้วน เนื่องจากอาจได้รับผลกระทบจากขนาดของเงินลงทุนเริ่มต้น (เช่น โครงการที่ใช้เงินลงทุนสูงอาจได้กำไรมากแต่ไม่ได้แปลว่าคุ้มค่ามากกว่า) ดังนั้น หัวข้อนี้จึงได้ประเมินเพิ่มเติมในด้านระยะเวลาคืนทุนที่มีการคิดลด และอัตราผลตอบแทนภายใน เพื่อสะท้อนถึงความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ได้ครอบคลุมมากขึ้นโดยผลแสดงดังหัวข้อที่ 7.2.4

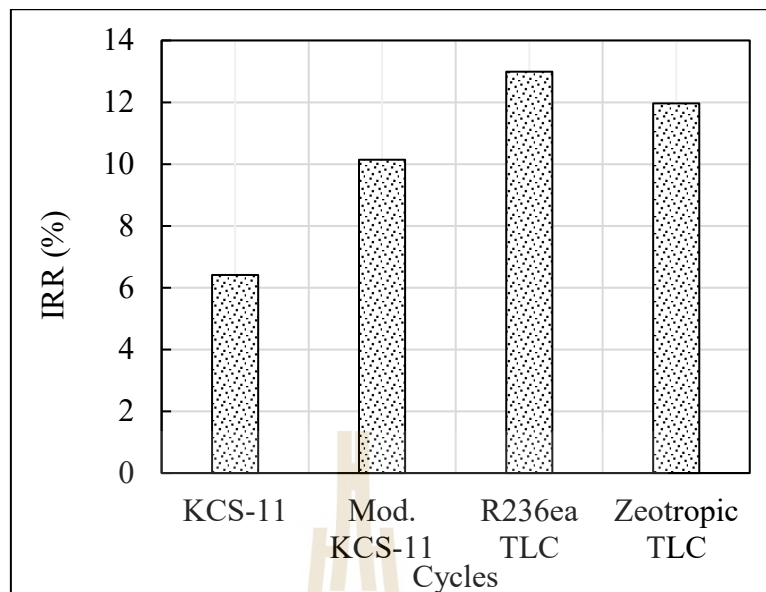
7.2.4 ระยะเวลาคืนทุนที่มีการคิดลด (d-PbP) และ อัตราผลตอบแทนภายใน (IRR)

รูปที่ 7.13 และ 7.14 แสดงผลของระยะเวลาคืนทุนที่มีการคิดลด และอัตราผลตอบแทนภายใน ของโรงไฟฟ้าแต่ละวัฏจักร โดยพบว่าแนวโน้มของ d-PbP และ IRR เป็นไปในทิศทางเดียวกัน กล่าวคือ โรงไฟฟ้าที่สามารถคืนทุนได้เร็ว มักมีค่า IRR ที่สูงตามไปด้วย โดยโรงไฟฟ้าวัฏจักรที่แอลซีที่ใช้สารบริสุทธิ์มีระยะเวลาคืนทุนที่สั้นที่สุดและ IRR สูงที่สุด โดยมีค่าเท่ากับ 8.1 ปี และ 12.9% ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับผลการประเมินต้นทุนต่อหน่วยการผลิตไฟฟ้า (LCOE) ที่แสดงในหัวข้อ 7.2.2

อย่างไรก็ตาม แนวโน้มดังกล่าวไม่สอดคล้องในกรณีของโรงไฟฟ้าวัฏจักรที่แอลซีที่ใช้สารผสม เนื่องจากแม้จะมีมูลค่าปัจจุบันสุทธิ (NPV) สูงที่สุดจากการผลิตไฟฟ้าได้มากที่สุดในบรรดาทุกวัฏจักร แต่กลับไม่ได้มีระยะเวลาคืนทุนที่สั้นที่สุดหรือ IRR ที่สูงที่สุด อันเนื่องมาจากเงินลงทุนเริ่มต้นที่สูง ดังนั้น เมื่อพิจารณาาร่วมกันทั้ง d-PbP IRR และ LCOE จะเห็นได้ว่าโรงไฟฟ้าวัฏจักรที่แอลซีที่ใช้สารผสมอาจไม่ใช่ตัวเลือกที่ดีที่สุดเชิงความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ โดยเฉพาะในโครงการที่มีข้อจำกัดด้านงบประมาณเริ่มต้น



รูปที่ 7.13 ระยะเวลาคืนทุนที่มีการคิดลดของโรงไฟฟ้าแต่ละวัฏจักร



รูปที่ 7.14 อัตราผลตอบแทนภายในของโรงไฟฟ้าแต่ละวัฏจักร

ดังนั้น จากการประเมินด้านเศรษฐศาสตร์พบว่า โรงไฟฟ้าวัฏจักรที่แอลซีที่ใช้สารบริสุทธิ์ R236ea มีความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์มากที่สุด โดยมีต้นทุนการผลิตไฟฟ้าต่อหน่วย (LCOE) ต่ำที่สุดเท่ากับ $58.63 \times 10^3 \text{ €/MWh}$ (2.05 บาท/kWh) มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (NPV) เท่ากับ $48 \times 10^3 \text{ €}$ (1.68 ล้านบาท) ระยะเวลาคืนทุนที่มีการคิดลด (d-PbP) เท่ากับ 8.1 ปี และมีอัตราผลตอบแทนภายใน (IRR) เท่ากับ 12.9% โดยใช้เงินลงทุนเริ่มต้นที่ $62.86 \times 10^3 \text{ €}$ (2.2 ล้านบาท)

อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาประเด็นด้านสิ่งแวดล้อม พบว่าสาร R236ea มีค่าศักยภาพในการก่อให้เกิดภาวะเรือนกระจก (GWP) เท่ากับ 1,400 ซึ่งถือว่าสูง ดังนั้นอีกหนึ่งตัวเลือกที่น่าสนใจคือ โรงไฟฟ้าวัฏจักรที่แอลซีที่ใช้สารผสมซีโอโทรปิก R1336mzz(Z)/R1234ze(E) ซึ่งมีค่า GWP ต่ำมาก (GWP ~ 0) และเป็นตัวเลือกที่โดดเด่นในด้านสิ่งแวดล้อมจากบทที่ 6 โดยมี LCOE เท่ากับ $62.26 \times 10^3 \text{ €/MWh}$ (2.18 บาท/kWh), NPV เท่ากับ $54 \times 10^3 \text{ €}$ (1.89 ล้านบาท) PbP เท่ากับ 9.4 ปี และ IRR เท่ากับ 11.9% โดยใช้เงินลงทุนเริ่มต้นที่ $82.01 \times 10^3 \text{ €}$ (2.87 ล้านบาท)

นอกจากนี้ โรงไฟฟ้าที่ใช้วัฏจักร Mod. KCS-11 ยังเป็นอีกทางเลือกที่น่าสนใจ เนื่องจากมีโครงสร้างที่ซับซ้อนน้อยกว่า ใช้เงินลงทุนเริ่มต้นต่ำกว่าโรงไฟฟ้าวัฏจักรที่แอลซีที่ใช้สารบริสุทธิ์และสารผสมอยู่ 13.9% และ 35% ตามลำดับ ขณะที่ยังให้ผลตอบแทนทางเศรษฐศาสตร์ที่สามารถแข่งขันได้ โดยมี LCOE เท่ากับ $69.64 \times 10^3 \text{ €/MWh}$ (2.44 บาท/kWh) NPV เท่ากับ $25 \times 10^3 \text{ €}$ (0.88 ล้านบาท) PbP เท่ากับ 11.77 ปี และ IRR เท่ากับ 11.77% โดยใช้เงินลงทุนเริ่มต้นที่ $52.85 \times 10^3 \text{ €}$ (1.85 ล้านบาท)

7.3 แนวทางการประยุกต์ใช้ในทางปฏิบัติ

ในหัวข้อนี้ได้นำเสนอแนวทางการประยุกต์ใช้ผลการศึกษาเชิงเปรียบเทียบของโรงไฟฟ้าวัฏจักรต่าง ๆ ที่ใช้เตสลาเทอร์ไบน์ เพื่อใช้เป็นข้อมูลประกอบในการออกแบบและแนวทางการนำเตสลาเทอร์ไบน์ไปใช้งาน โดยมีดังต่อไปนี้

1. ใช้เตสลาเทอร์ไบน์เพื่อช่วยลดความซับซ้อนในโรงไฟฟ้า: เตสลาเทอร์ไบน์ไม่จำเป็นต้องทำให้สารทำงานกลายเป็นไอก่อนเข้าสู่เทอร์ไบน์เสมอไป เนื่องจากเตสลาเทอร์ไบน์สามารถทำงานได้แม้ในสภาวะที่สารทำงานมีความเป็นไอต่ำ ดังนั้นจึงไม่จำเป็นต้องมีอุปกรณ์พิเศษเพื่อแยกไอหรือเพิ่มความดันไอของสารทำงานซึ่งช่วยลดความซับซ้อนของระบบ และส่งผลให้รวมถึงลดเงินลงทุนในการก่อสร้างโรงไฟฟ้าได้อีกด้วย เช่น ในการศึกษาที่ Mod. KCS-11 ช่วยลดเงินลงทุนได้
2. ในการออกแบบเตสลาเทอร์ไบน์ควรพิจารณาอัตราการไหลรวมของสารทำงานด้วย: ในหัวข้อนี้แสดงให้เห็นว่า ลักษณะการไหลของสารทำงานที่เข้าสู่เตสลาเทอร์ไบน์ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อประสิทธิภาพของเทอร์ไบน์ โดยพบว่าเมื่ออัตราการไหลระหว่างแผ่นดิสก์ต่ำ จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของการทำงานได้มากขึ้น ซึ่งอาจทำได้ด้วยการเพิ่มจำนวนแผ่นดิสก์ให้มากขึ้น
3. เลือกใช้โรงไฟฟ้าที่ใช้โรงไฟฟ้าที่สารทำงานเป็นสารผสมซีไอโทรปิกช่วยเพิ่มสมรรถนะของโรงไฟฟ้า: การใช้สารทำงานเป็นสารผสมซีไอโทรปิก เช่น สารผสม R1336mzz(Z)/R1234ze(E) ช่วยเพิ่มการผลิตไฟฟ้าและให้ผลกำไรที่สูงในระยะยาวตลอดโครงการได้ อย่างไรก็ตาม จำเป็นต้องใช้เงินลงทุนที่เพิ่มขึ้นซึ่งอาจจะไม่เหมาะกับโครงการที่มีงบจำกัด

7.4 ข้อจำกัดในการศึกษา

แม้ว่าหัวข้อนี้จะนำเสนอภาพรวมของโรงไฟฟ้าที่ใช้เตสลาเทอร์ไบน์ภายใต้วัฏจักรที่แตกต่างกันอย่างครอบคลุม แต่อย่างไรก็ตาม ยังมีข้อจำกัดบางประการที่ควรพิจารณาดังต่อไปนี้

7.4.1 จำนวนวัฏจักรที่ใช้ในการเปรียบเทียบมีจำกัด

แม้ว่าการศึกษานี้จะทำการเปรียบเทียบวัฏจักรเพียง 4 รูปแบบ แต่ในทางปฏิบัติยังมีวัฏจักรอื่น ๆ อีกมากที่อาจมีศักยภาพในการทำงานร่วมกับเตสลาเทอร์ไบน์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ดังนั้น ผลการศึกษาจึงยังไม่สามารถใช้เป็นข้อสรุปที่แน่ชัดเกี่ยวกับวัฏจักรที่เหมาะสมที่สุดในทุกกรณี

7.4.2 จำนวนสารทำงานที่ใช้ในการศึกษามีจำกัด

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ มีการเลือกใช้สารทำงานในจำนวนจำกัด ซึ่งอาจทำให้ไม่สามารถแสดงให้เห็นถึงความหลากหลายของคุณสมบัติของสารทำงานที่ส่งผลต่อการทำงานของ

สลาเทอร์ไบน์ได้อย่างครอบคลุม อีกทั้งในแต่ละวัฏจักรอาจมีสารทำงานที่เหมาะสมแตกต่างกัน เพื่อให้ได้กำลังสุทธิสูงสุด ดังนั้น วัฏจักรบางประเภทในงานวิจัยนี้อาจยังไม่ได้จับคู่กับสารทำงานที่เหมาะสมที่สุด

7.4.3 แบบจำลองและเงื่อนไขการจำลอง

ในการศึกษานี้ ได้ใช้แบบจำลองการไหลของสารสองสถานะแบบเนื้อเดียว (Homogeneous two-phase flow model) เพื่อลดความซับซ้อนของกระบวนการคำนวณ โดยได้ทำการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองกับข้อมูลจากการทดลองและผลการจำลองด้วยพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ ซึ่งพบว่าผลลัพธ์มีความสอดคล้องกันในระดับที่ยอมรับได้

นอกจากนี้ ได้มีการสมมติให้สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม (Overall heat transfer coefficient) มีค่าคงที่ ซึ่งอาจไม่สามารถสะท้อนพฤติกรรมการแลกเปลี่ยนความร้อนที่เกิดขึ้นจริงได้อย่างครบถ้วน โดยเฉพาะในกรณีที่ใช้สารทำงานเป็นสารผสม

ดังนั้น ในงานวิจัยในอนาคต อาจได้รับประโยชน์มากยิ่งขึ้นหากมีการพัฒนาแบบจำลองที่มีความซับซ้อนมากขึ้น เช่นเดียวกับข้อจำกัดที่กล่าวถึงในบทที่ 6 และบทที่ 5



บทที่ 8

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

ในหัวข้อนี้ได้นำเสนอบทสรุปและข้อเสนอแนะจากการศึกษาระบบโรงไฟฟ้าที่ใช้เตสลาเทอร์ไบน์ภายใต้แหล่งความร้อน $120\text{ }^{\circ}\text{C}$ โดยบทสรุปประกอบด้วยผลของตัวแปรที่ใช้ในการออกแบบเตสลาเทอร์ไบน์ อิทธิพลของความเป็นไอของสารทำงานที่มีผลต่อสมรรถนะของทั้งโรงไฟฟ้าและเตสลาเทอร์ไบน์ การวิเคราะห์สารทำงานทดแทน R245fa สำหรับโรงไฟฟ้าวัฏจักรที่แอลซีที่ใช้เตสลาเทอร์ไบน์ ตลอดจนการประเมินสมรรถนะของโรงไฟฟ้าวัฏจักรที่แตกต่างกันเมื่อใช้เตสลาเทอร์ไบน์ นอกจากนี้ ในส่วนของข้อเสนอแนะได้กล่าวถึงแนวทางการปรับปรุงการจำลอง โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

8.1 ผลสรุปสำหรับอิทธิพลของตัวแปรที่ใช้ในการออกแบบของเตสลาเทอร์ไบน์

จากผลการศึกษาค่าตัวแปรที่ใช้ในการออกแบบเตสลาเทอร์ไบน์พบว่า:

1) อัตราส่วนความดัน (PR) เป็นตัวแปรที่ส่งผลต่อการถ่ายเทโมเมนตัมของสารทำงานและพื้นที่ในการแลกเปลี่ยนโมเมนตัมภายในโรเตอร์ของเตสลาเทอร์ไบน์ โดยการเพิ่มความเร็วของสารทำงานและลดความดันส่งผลต่อการดึงกำลังจากสารทำงานอย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งจากการศึกษาโดยใช้สารทำงาน R236ea พบว่า เมื่อใช้อัตราส่วนความดันเท่ากับ 0.6 จะได้ค่ากำลังและประสิทธิภาพไอเซนโทรปิกสูงสุด โดยให้กำลังเท่ากับ 10.09 kW และประสิทธิภาพไอเซนโทรปิกอยู่ที่ 76%

2) ความเร็วรอบของการทำงาน (ω) เป็นตัวแปรที่ส่งผลต่อความเร็วในการทำงานของโรเตอร์ (U_4) จากผลการศึกษาพบว่า ถ้าเลือกให้ความเร็วรอบของโรเตอร์ช้ากว่าความเร็วของสารทำงานเล็กน้อย ซึ่งแสดงออกมาอยู่ในค่า dimensionless velocity ratio, W_4 และ tangential velocity ratio, σ โดยค่าทั้งสองจะมีค่า ตีลบน้อยกว่าเล็กน้อย และน้อยกว่าหนึ่งเล็กน้อยตามลำดับจะทำให้ได้กำลังสุทธิและประสิทธิภาพไอเซนโทรปิกออกมากสูง ซึ่งจากการศึกษาโดยใช้สารทำงาน R236ea พบว่าที่ 5,000 RPM ได้กำลังและประสิทธิภาพสูงสุดเท่ากับ 10.09 kW และประสิทธิภาพไอเซนโทรปิกอยู่ที่ 76% ที่ค่า W_4 และ σ มีค่าเท่ากับ -0.03 และ 0.97 ตามลำดับ

3) เส้นผ่านศูนย์กลางของภายนอกของโรเตอร์ (D_4) และจำนวนแผ่นของโรเตอร์ (N_{disk}) เป็นตัวแปรที่บอกถึงขนาดของโรเตอร์ซึ่งค่าทั้งสองมีค่ามากจะทำให้ได้กำลังและประสิทธิภาพเพิ่มสูงขึ้น อย่างไรก็ตาม เมื่อเพิ่มค่าสองค่านี้ไปถึงจุด ๆ หนึ่งกำลังและประสิทธิภาพไอเซนโทรปิกจะเพิ่มขึ้นน้อยลง ซึ่งส่งผลให้ความกะทัดรัดน้อยลง กล่าวคือใช้เทอร์ไบน์ขนาดใหญ่ขึ้นแต่กำลังที่ได้ไม่เพิ่มขึ้นตามในอัตราที่เท่ากันหรือน้อยกว่า ดังนั้น จึงต้องเลือกขนาดให้เหมาะสม ซึ่งในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เลือกขนาดซึ่งจากการศึกษาโดยใช้สารทำงาน R236ea พบว่าที่ 5,000 RPM เท่ากับ 400 mm และจำนวนแผ่นของโรเตอร์เท่ากับ 50 แผ่นในการศึกษา

4) ระยะห่างระหว่างแผ่นดิสก์ของโรเตอร์ (b) เป็นตัวแปรที่ส่งผลต่อการถ่ายเทโมเมนตัมโดยและการลดความดันของสารทำงานภายในโรเตอร์ อย่างไรก็ตามการใช้ระยะห่างระหว่างแผ่นดิสก์ของโรเตอร์ เล็กเกินไปทำให้เกิดการลดความดันอย่างรวดเร็วส่งผลให้เกิดเอนโทรปีเกิดขึ้นในกระบวนการสูงตามไปด้วย ส่งผลให้ประสิทธิภาพไอเซนโทรปิกลดลง โดยในกรณีศึกษาที่ใช้สารทำงานเป็น R236ea พบค่าที่ให้ระยะห่างระหว่างแผ่นดิสก์ของโรเตอร์ เท่ากับ 0.4 mm เป็นค่าที่ให้กำลังและประสิทธิภาพไอเซนโทรปิกสูงที่สุด ทั้งนี้ ค่าดังกล่าวทำให้ระยะห่างระหว่างแผ่นดิสก์มีค่าเล็กซึ่งการศึกษาในบริษัทวิศวกรรมเองก็พบเช่นเดียวกัน ทำให้ยากต่อการนำไปใช้สร้างจริง ในวิทยานิพนธ์จึงเสนอให้ใช้ 1 mm เนื่องจากเป็นค่าที่ได้เคยทดลองสร้างจริงและกำลังสุทธิจากการจำลองไม่แตกต่างกันกับ 0.4 mm มากนัก

8.2 ผลสรุปสำหรับอิทธิพลของความเป็นไอของสารทำงานที่มีผลต่อสมรรถนะของโรงไฟฟ้าและเตสลาเทอร์ไบน์

จากผลการศึกษาการทำงานของเตสลาเทอร์ไบน์เมื่อความเป็นไอของสารทำงานเปลี่ยนแปลงไปพบว่า: อิทธิพลของความเป็นไอของสารทำงานที่ส่งผลต่อการเงื่อนไขการทำงานของโรงไฟฟ้า

1) เมื่อความเป็นไอของสารทำงานลดลงส่งผลให้อัตราการไหลของสารทำงานเพิ่มสูงขึ้น โดยเพิ่มจาก 1 kg/s ที่ $x_3 = 0$ ถึง 3.06 ที่ $x_3 = 1$

2) เมื่อความเป็นไอของสารทำงานลดลงส่งผลให้ต้องใช้อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่สูงขึ้นโดยเฉพาะที่อีเว็ปเรเตอร์ โดยเพิ่มจาก 12.42 m² ที่ $x_3 = 1$ ถึง 34.59 m² ที่ $x_3 = 0.00$

3) เมื่อความเป็นไอของสารทำงานลดลงส่งผลให้ต้องใช้กำลังที่ปั๊มเพิ่มสูงขึ้นโดยเพิ่มจาก 0.58 kW ที่ $x_3 = 1$ ถึง 3.98 kW ที่ $x_3 = 0$

โดยผลเหล่านี้แสดงให้เห็นถึงความซับซ้อนในการเลือกเพื่อออกแบบโรงไฟฟ้าเมื่อความเป็นไอของสารทำงานเปลี่ยนแปลงไป

สมรรถนะของเตสลาเทอร์ไบน์เมื่อความเป็นไอของสารทำงานเปลี่ยนแปลงไป

1) กำลังสุทธิของโรงไฟฟ้าที่ใช้เทคโนโลยีเทอร์โบไฮดรอลิกที่สูงสุดได้เท่ากับ 12.91 kW ที่ $X_3 = 0$ (โรงไฟฟ้าวัฏจักรที่แอลซี) แสดงให้เห็นถึงศักยภาพของการใช้ความเป็นไอของสารทำงานต่ำกว่าก่อนเข้าเทอร์โบ

2) ประสิทธิภาพไอเซนโทรปิกของเทคโนโลยีเทอร์โบไฮดรอลิกเปลี่ยนแปลงไม่มากเมื่อความเป็นไอเปลี่ยนแปลงไปจากของเหลวอิ่มตัวถึงไออิ่มตัว โดยเปลี่ยนอยู่ในช่วง 70.1% ถึง 74.8% โดยค่าสูงสุดเมื่อ $X_3 = 1$

โดยผลดังกล่าวแสดงให้เห็นถึงความสามารถในการทำงานของเทคโนโลยีเทอร์โบไฮดรอลิกที่สามารถทำงานได้ภายใต้ความเป็นไอของสารทำงานที่ต่ำ โดยที่สมรรถนะของเทคโนโลยีเทอร์โบไฮดรอลิกยังมีเสถียรภาพ ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของโรงไฟฟ้าที่ใช้เทคโนโลยีเทอร์โบไฮดรอลิก

1) กรณีที่มีความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์มากที่สุดเมื่อ $X_3 = 0$ โดยให้ LCOE เท่ากับ 64 €/MWh (2.24 บาท/kWh) NPV เท่ากับ 61×10^3 € (2.14 ล้านบาท) PbP เท่ากับ 8.29 ปี และ IRR เท่ากับ 13.9% ที่เงินลงทุนเท่ากับ 71×10^3 € (2.45 ล้านบาท)

2) โดยเงื่อนไขของโรงไฟฟ้าที่ $X_3 = 0$ ในการศึกษาเมื่อเปรียบเทียบกับผลจากปริศน์วรรณกรรมแล้ว พบว่า ค่า LCOE ต่ำกว่า 34% เมื่อเทียบกับโรงไฟฟ้าแบบทั่วไปที่ความเป็นไอของสารทำงานเป็นไออิ่มตัว

ดังนั้นสรุปได้ว่า การศึกษานี้ได้ให้มุมมองที่ครอบคลุมของโรงไฟฟ้าวัฏจักรโออาร์ซีที่ใช้เทคโนโลยีเทอร์โบไฮดรอลิกเมื่อความเป็นไอของสารทำงานเปลี่ยนแปลงไป โดยจากผลการศึกษาเสนอให้ใช้โรงไฟฟ้าวัฏจักรโออาร์ซีที่ใช้เทคโนโลยีเทอร์โบไฮดรอลิกโดยเฉพาะในกรณีที่ความเป็นไอของสารทำงานก่อนเข้าเทอร์โบไฮดรอลิกต่ำ เนื่องจากให้สมรรถนะและความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ที่มากกว่าโรงไฟฟ้าโออาร์ซีแบบทั่วไป อีกทั้งการศึกษานี้ให้มุมมองเพื่อพัฒนาโรงไฟฟ้าเพื่อให้มีประสิทธิภาพและคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์มากขึ้น สำหรับการนำไปใช้งานกับความร้อนใต้พิภพอุณหภูมิต่ำ

8.3 ผลสรุปสำหรับพฤติกรรมการทำงานของเทคโนโลยีเทอร์โบไฮดรอลิกในโรงไฟฟ้าวัฏจักรที่แอลซีเมื่อใช้สารผสมซีโทรปิกที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

จากผลการหาสารทดแทน R245fa ที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมเมื่อใช้กับโรงไฟฟ้าวัฏจักรที่แอลซีที่ใช้เทคโนโลยีเทอร์โบไฮดรอลิกพบว่า:

1) สารทำงานที่มีอุณหภูมิวิกฤตมีค่าใกล้เคียงกับอุณหภูมิแหล่งความร้อนแสดงให้เห็นถึงความได้เปรียบในด้านสมรรถนะด้านอุณหพลศาสตร์ โดยพฤติกรรมดังกล่าวได้ถูกพบที่แหล่งอุณหภูมิแหล่งความร้อนเท่ากับ 120 °C และ 150 °C ซึ่งให้มุมมองในการเลือกสารทำงานเมื่อใช้กับโรงไฟฟ้าวัฏจักรที่แอลซี

2) สารผสมซีไอโทรปิกที่มีองค์ประกอบเป็นสารทำงานที่มีความแตกต่างของอุณหภูมิวิกฤต (> 60 °C) ช่วยเพิ่มผลการแมตช์อุณหภูมิ (temperature match) และเพิ่มกำลังสุทธิได้ โดยสารผสม R1336mzz(Z)/R1234ze(E) ที่อัตราส่วนโดยมวลเท่ากับ 0.25/0.75 ให้กำลังสุทธิสูงสุดเท่ากับ 15.87 kW ซึ่งสูงกว่า R245fa บริสุทธิ์อยู่ 21%

3) modified Reynold number, Re_m เป็นตัวแปรไร้มิติที่สามารถนำไปใช้เป็นแนวทางในการออกแบบได้โดยพบว่าเมื่อค่า Re_m สูงส่งผลให้ประสิทธิภาพไอเซนโทรปิกของเตสลาเทอร์ไบน์เพิ่มสูงขึ้น

4) การวิเคราะห์สมรรถนะของเตสลาเทอร์ไบน์พบว่าทุกสารทำงานอยู่ภายใต้การไหลแบบราบเรียบ โดย R1234ze(E) เป็นสารทำงานที่ให้ประสิทธิภาพไอเซนโทรปิกสูงสุด โดยมีค่าเท่ากับ 76% โดยที่สารทำงานที่อุณหภูมิวิกฤตแสดงให้เห็นถึงความได้เปรียบของประสิทธิภาพของเตสลาเทอร์ไบน์เนื่องจากคุณสมบัติของสารทำงานและความดันที่เหมาะสม

5) ในการประเมินเศรษฐศาสตร์แสดงให้เห็นว่าสารผสม R1336mzz(Z)/R1234ze(E) ที่อัตราส่วนโดยมวลเท่ากับ 0.25/0.75 ให้ LCOE ต่ำที่สุด โดยมีค่าเท่ากับ 62.50 €/MWh (2.18 บาท/kWh) มี IRR ที่สูงที่สุดเท่ากับ 15.64% และมี d-PbP สั้นที่สุดเท่ากับ 9.33 ปี อย่างไรก็ตาม สารทำงานนี้เมื่อใช้กับโรงไฟฟ้าวัฏจักรที่แอลซีแล้วต้องใช้งบลงทุนมากกว่าสาร R245fa บริสุทธิ์อยู่ 11%

6) สารทำงาน R1234ze(E) บริสุทธิ์แสดงให้เห็นว่าเป็นอีกหนึ่งตัวเลือกที่ให้ความสมดุลระหว่างกำลังสุทธิที่ผลิตได้และงบลงทุน โดยที่ให้กำลังสุทธิของโรงไฟฟ้าน้อยกว่า R245fa เล็กน้อย ในขณะที่งบลงทุนน้อยกว่า 3% โดยให้ค่า IRR (10.74%) ซึ่งสามารถสู้ได้กับสารทำงานอื่น ๆ

7) พบว่าการปรับสมรรถนะของระบบให้มีความเหมาะสม จำเป็นต้องสมดุลของอุปกรณ์แต่ละอุปกรณ์ภายในวัฏจักรไม่ใช่เน้นเพียงอุปกรณ์ใดอุปกรณ์หนึ่ง โดยสารทำงานที่ให้สมรรถนะที่ดีที่สุดพบว่า มีการกระจายตัวของความไม่ผันกลับของกระบวนการในแต่ละอุปกรณ์เท่า ๆ กัน ในทางกลับกันสารทำงานที่ทำให้อุปกรณ์ใดอุปกรณ์หนึ่งมีการทำลายเอ็กเซอร์ยีค่าไม่ช่วยให้ได้กำลังสุทธิออกมาสูงที่สุด

จากผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าสารทำงานทางเลือกที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมที่นำมาทดแทนสารทำงาน R245fa บริสุทธิ์ เพื่อให้ได้สมรรถนะทางอุณหพลศาสตร์สูงและมีความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ในโรงไฟฟ้าวัฏจักรที่แอลซีที่ใช้เตสลาเทอร์ไบน์ คือสารผสม R1336mzz(Z)/R1234ze(E) ที่อัตราส่วนโดยมวลเท่ากับ 0.25/0.75 โดยการเลือกสารนี้ใช้หลักเกณฑ์ของกำลังสุทธิที่สูงที่สุดและความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ในการประเมิน นอกจากนี้สาร

R1234ze(E) ยังเป็นอีกหนึ่งสารทำงานที่แสดงให้เห็นถึงความสมดุลระหว่างงบประมาณและความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ จึงเป็นอีกหนึ่งตัวเลือกที่น่าสนใจ

ในการศึกษานี้ แสดงให้เห็นถึงความได้เปรียบของการใช้เทคโนโลยีการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานทดแทนอุณหภูมิต่ำ โดยให้แนวทางในการเลือกสารทำงานของโรงไฟฟ้าวัฏจักรที่แอลซีทีใช้เทสลาเทอร์ไบน์ที่เหมาะสม

8.4 ผลสรุปสำหรับการทำงานของโรงไฟฟ้าวัฏจักรที่แตกต่างกันเมื่อใช้กับเทสลาเทอร์ไบน์

จากผลการประเมินโรงไฟฟ้าที่ใช้เทสลาเทอร์ไบน์ที่วัฏจักรแตกต่างกันโดยการประเมินสมรรถนะทางอุณหพลศาสตร์ และเศรษฐศาสตร์พบว่า:

1) ในการออกแบบเทสลาเทอร์ไบน์ควรพิจารณาอัตราการไหลของสารทำงานในการออกแบบเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพเพิ่มสูงขึ้นด้วย โดยพบว่า อัตราการไหลของสารทำงานต่ำระหว่างแผ่นดิสก์ทำให้ประสิทธิภาพของเทสลาเทอร์ไบน์เพิ่มสูงขึ้น โดยพบว่าตัวแปร Re_m / \dot{m}_c เป็นตัวแปรที่สามารถนำไปใช้เป็นแนวทางในการออกแบบเทสลาเทอร์ไบน์ได้ โดยที่ค่า Re_m / \dot{m}_c มีค่ามากประสิทธิภาพไอเซนโปรปิกของเทสลาเทอร์ไบน์มีค่าสูงมากขึ้น โดยสามารถใช้ตัวแปรนี้ได้แม้ว่าอัตราการไหลของสารทำงานมีค่าแตกต่างกันมาก

2) โรงไฟฟ้าวัฏจักรที่แอลซีทีใช้สารทำงานเป็นสารบริสุทธิ์ R236ea เป็นโรงไฟฟ้าที่เมื่อใช้กับเทสลาเทอร์ไบน์ ให้ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์มากที่สุด โดยมีต้นทุนการผลิตไฟฟ้าต่อหน่วย (LCOE) ต่ำที่สุดเท่ากับ $58.63 \times 10^3 \text{€ MWh}$ (2.05 บาท/kWh) มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (NPV) เท่ากับ $48 \times 10^3 \text{€}$ (1.68 ล้านบาท) ระยะเวลาคืนทุนที่มีการคิดลด (d-PbP) เท่ากับ 8.1 ปี และมีอัตราผลตอบแทนภายใน (IRR) เท่ากับ 12.9% โดยใช้เงินลงทุนเริ่มต้นที่ $62.86 \times 10^3 \text{€}$ (2.2 ล้านบาท) แต่มี GWP สูง (GWP=1,400)

3) โรงไฟฟ้าวัฏจักรที่แอลซีทีใช้สารผสม R1336mzz(Z)/R1234ze(E) ที่อัตราส่วนโดยมวลเท่ากับ 0.25/0.75 เป็นตัวเลือกสำหรับในกรณีที่ต้องการให้เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม หรือ GWP ต่ำ (GWP ~ 0) โดย LCOE เท่ากับ $62.26 \times 10^3 \text{€ MWh}$ (2.18 บาท/kWh), NPV เท่ากับ $54 \times 10^3 \text{€}$ (1.89 ล้านบาท) PbP เท่ากับ 9.4 ปี และ IRR เท่ากับ 11.9% โดยใช้เงินลงทุนเริ่มต้นที่ 82.01×10^3 (2.87 ล้านบาท)

4) การใช้เทสลาเทอร์ไบน์ในโรงไฟฟ้าคาถาแบบ Mod. KCS-11 ช่วยลดเงินลงทุนจากการลดความซับซ้อนของโรงไฟฟ้าคาถาแบบ KCS-11 เท่ากับ 30% ในขณะที่ผลิตไฟฟ้าได้ลดลงเพียง 15%

โดยในการศึกษานี้แสดงให้เห็นว่าการใช้โรงไฟฟ้าวัฏจักรที่แอลซีทีใช้สารทำงานเป็น R236ea แสดงให้เห็นถึงข้อได้เปรียบทางด้านเศรษฐศาสตร์ อย่างไรก็ตาม ยังมีปัญหาในด้านสิ่งแวดล้อม โดยที่สารผสม R1336mzz(Z)/R1234ze(E) เป็นอีกสารหนึ่งที่เป็นตัวเลือกที่น่าสนใจ อีกทั้งการใช้ เทสลา

เทอร์ไบน์ทำให้ไม่จำเป็นต้องมีอุปกรณ์แยกไอส่งผลให้เมื่อใช้ในโรงไฟฟ้าคาลيناแล้วสามารถลดเงินลงทุนเริ่มต้นได้ 30% เมื่อเทียบกับโรงไฟฟ้าคาลيناแบบ KCS-11

ดังนั้น ในการศึกษาี้แสดงให้เห็นถึงข้อได้เปรียบของการใช้เทสลาเทอร์ไบน์ ที่สามารถทำงานได้โดยที่ความเป็นไอต่ำหรือเป็นของเหลวก่อนเข้าเทอร์ไบน์ ซึ่งช่วยให้สามารถลดเงินลงทุนเริ่มต้น หรือช่วยเพิ่มการผลิตกระแสไฟฟ้า โดยโรงไฟฟ้าวัฏจักรที่แอลซีทีใช้สารผสม R1336mzz(Z)/R1234ze(E) ที่อัตราส่วนมวล 0.25/0.75 ยังเป็นทางเลือกที่คุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์มากที่สุดและให้กำลังสุทธิสูงสุด โดยความดันที่คอนเดนเซอร์และอีวาโปเรเตอร์เท่ากับ 0.69 MPa และ 2.67 MPa ที่อัตราการไหลเชิงมวลของสารทำงานเท่ากับ 3.33 kg/s โดยขนาดที่เหมาะสมของเทสลาเทอร์ไบน์มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกและภายในของโรเตอร์เท่ากับ 400 mm และ 65.5 mm รวมถึงระยะห่างระหว่างแผ่นดิสก์เท่ากับ 1 mm โดยต้องมีความเร็วรอบของโรเตอร์ของเทสลาเทอร์ไบน์เท่ากับ 4,500 RPM และอัตราส่วนความดันเท่ากับ 0.75 โดยเทสลาเทอร์ไบน์มีประสิทธิภาพเท่ากับ 74%

8.5 ข้อเสนอแนะ

1) วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ใช้แหล่งความร้อนเพียงอุณหภูมิเดียวที่ 120 °C โดยมีอัตราการไหลของแหล่งความร้อน 1 kg/s และอุณหภูมิ น้ำหล่อเย็นคงที่ที่ 30 °C หากมีการศึกษาภายใต้ช่วงอุณหภูมิของแหล่งความร้อนและน้ำหล่อเย็นที่หลากหลายมากขึ้น จะช่วยให้สามารถวิเคราะห์อิทธิพลของอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงได้ชัดเจนยิ่งขึ้น

2) การประเมินด้านเศรษฐศาสตร์ในงานวิจัยนี้ยังไม่ได้รวมต้นทุนของพลังงาน ที่ดิน หรือค่าเช่าที่ดิน ซึ่งอาจทำให้ผลการประเมินความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ออกมาดีกว่าความเป็นจริง อย่างไรก็ตาม การละเว้นต้นทุนพลังงานในกรณีนี้มีเหตุผล เนื่องจากใช้แหล่งพลังงานหมุนเวียนที่มีอยู่แล้ว

3) สารทำงานที่ใช้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีจำนวนจำกัด หากขยายการศึกษาให้ครอบคลุมสารทำงานชนิดอื่น ๆ ที่หลากหลายมากขึ้น จะช่วยให้เข้าใจพฤติกรรมของเทสลาเทอร์ไบน์และวัฏจักรโออาร์ซี ได้อย่างครอบคลุมและลึกซึ้งยิ่งขึ้น

4) แบบจำลองที่ใช้ในการศึกษานี้เป็นแบบจำลองเชิงตัวเลขที่มีความเรียบง่ายทั้งในส่วนโรงไฟฟ้าและเทสลาเทอร์ไบน์ ซึ่งอาจไม่สามารถสะท้อนพฤติกรรมจริงได้ทั้งหมด ดังนั้น การพัฒนาแบบจำลองที่มีความละเอียดและซับซ้อนมากขึ้น เช่น การใช้ CFD หรือแบบจำลองสองเฟสแบบไม่เป็นเนื้อเดียวกัน จะช่วยเพิ่มความแม่นยำและความเข้าใจต่อพฤติกรรมของระบบได้มากขึ้น

5) แม้ว่าเทสลาเทอร์ไบน์จะมีข้อดีหลายประการ แต่การเปรียบเทียบผลการจำลองกับเทอร์ไบน์ชนิดอื่น ภายใต้เงื่อนไขเดียวกัน จะช่วยยืนยันข้อดีเชิงเปรียบเทียบของเทสลาเทอร์ไบน์ในแง่ของสมรรถนะและความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ได้ชัดเจนยิ่งขึ้น

โดยจากการศึกษาของวิทยานิพนธ์นี้ พบว่า โรงไฟฟ้าวัฏจักรที่แอลซีที่ใช้สารผสม R1336mzz(Z)/R1234ze(E) ที่อัตราส่วนมวล 0.25/0.75 ยังเป็นทางเลือกที่คุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์มากที่สุดและให้กำลังสุทธิสูงสุด โดยความดันที่คอนเดนเซอร์และอีวาโปเรเตอร์เท่ากับ 0.69 MPa และ 2.67 MPa ที่อัตราการไหลเชิงมวลของสารทำงานเท่ากับ 3.33 kg/s โดยขนาดที่เหมาะสมของเทสลาเทอร์ไบน์มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกและภายในของโรเตอร์เท่ากับ 400 mm และ 65.5 mm รวมถึงระยะห่างระหว่างแผ่นดิสก์เท่ากับ 1 mm โดยต้องมีความเร็วรอบของโรเตอร์ของเทสลาเทอร์ไบน์เท่ากับ 4,500 RPM และอัตราส่วนความดันเท่ากับ 0.75 โดยเทสลาเทอร์ไบน์มีประสิทธิภาพเท่ากับ 74%



รายการอ้างอิง

- ธงชัย เทียมทัต และ อาทิตย์ คุณศรีสุข. (2565). การวิเคราะห์ทางอุณหพลศาสตร์ การศึกษาเชิงพารามิเตอร์ และสภาวะการทำงานที่เหมาะสมที่สุดของวัฏจักรคาลินาสำหรับแหล่งความร้อนที่มีอุณหภูมิ 100, 110 และ 120 องศาเซลเซียส. การถ่ายทอดพลังงานความร้อนและมวลในอุปกรณ์ด้านความร้อนและกระบวนการ ครั้งที่ 22, เชียงใหม่, 10-11 มีนาคม 2565.
- อาทิตย์ คุณศรีสุข และคณะ (2561). การออกแบบโรงไฟฟ้า ORC ที่ใช้กังหันขยายตัวแบบ 2 เฟสเพื่อผลิตไฟฟ้าจากความร้อนทิ้งและการวิเคราะห์สมรรถนะที่สภาวะออกแบบและที่สภาวะนอกเหนือสภาวะออกแบบ. สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ และการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย
- Ahmadi Boyaghchi F, Heidarnejad P. Thermo-economic assessment and multi-objective optimization of a solar micro CCHP based on Organic Rankine Cycle for domestic application. *Energy*. 2015;97: 224-234.
- Ahmed, M., Hooman, K., & Hashemi, S. M. (2007). Double cascade organic Rankine cycle for solar-driven reverse osmosis desalination. *Desalination*, 216, 306-313.
- Alrabie, M. S., Altamimi, F. N., Altarragemy, M. H., Hadi, F., Akbar, M. K., & Traum, M. J. (2017). Method to design a hydro Tesla turbine for sensitivity to varying laminar Reynolds number modulated by changing working fluid viscosity. In *Energy Sustainability* (Vol. 57595, p. V001T07A004). American Society of Mechanical Engineers.
- Bejan A. *Thermal Design and Optimization*. 1st ed. New York: John Wiley & Sons; 1995.
- Biswas, A., & Mandal, B. K. (2023). Analysis of Organic Rankine Cycle using various working fluids for low-grade waste heat recovery. In S. Doolla, Z. H. Rather, & V. Ramadesigan (Eds.), *Advances in clean energy and sustainability*. ICAER 2022. Green energy and technology (pp. 1-20). Springer.
- Blondel Q, Tauveron N, Lhermet G, Caney N. Zeotropic mixtures study in plate heat exchangers and ORC systems. *Applied Thermal Engineering*. 2022;119418.

รายการอ้างอิง (ต่อ)

- Cao, L., Wang, J., Chen, L., & Dai, Y. (2018). Comprehensive analysis and optimization of Kalina-Flash cycles for low-grade heat source. *Applied Thermal Engineering*, 131, 540-552.
- Carey, V. P. (2010). Assessment of Tesla turbine performance for small scale Rankine combined heat and power systems. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 132(2), 12230.
- Çengel Y, Boles M, Kanoglu M. *Thermodynamics: An engineering approach*. 9th ed. New York (NY): McGraw-Hill; 2024.
- Colwell, C. (2023). An innovative biomass-fueled gas turbine-ORC system equipped with electrochemically mediated amine regeneration (EMAR) for CO₂ capture. *Journal of CO₂ Utilization*, 68, 102365.
- Dawo, F., Fleischmann, J., Kaufmann, F., Schiffler, C., Eyerer, S., Wieland, C., & Spliethoff, H. (2021). R1224yd (Z), R1233zd (E) and R1336mzz (Z) as replacements for R245fa: Experimental performance, interaction with lubricants and environmental impact. *Applied Energy*, 288, 116661.
- Dumont, O., Talluri, L., Fiaschi, D., Manfrida, G., & Lemort, V. (2019). Comparison of a scroll, a screw, a roots, a piston expander and a Tesla turbine for small-scale organic Rankine cycle. In *ORC conference 2019*.
- European Parliament and the Council. Regulation (EU) 2024/573 on fluorinated greenhouse gases, amending Directive (EU) 2019/1937 and repealing Regulation (EU) No 517/2014. *Official Journal of the European Union*. 2024.
- Eyerer, S., Wieland, C., Vandersickel, A., & Spliethoff, H. (2016). Experimental study of an ORC (Organic Rankine Cycle) and analysis of R1233zd-E as a drop-in replacement for R245fa for low temperature heat utilization. *Energy*, 103, 660-671.
- Feng, Y., Hung, T., Zhang, Y., Li, B., Yang, J., & Shi, Y. (2015). Performance comparison of low-grade ORCs (organic Rankine cycles) using R245fa, pentane and their mixtures based on the thermoeconomic multi-objective optimization and decision makings. *Energy*, 93, 2018-2029.

รายการอ้างอิง (ต่อ)

- Fischer, J. (2011). Comparison of trilateral cycles and organic Rankine cycles. *Energy*, 36(10), 6208-6219.
- G. Xu, Xu, G., Song, G., Zhu, X., Gao, W., Li, H., & Quan, Y. (2015). Performance evaluation of a direct vapor generation supercritical ORC system driven by linear Fresnel reflector solar concentrator. *Applied Thermal Engineering*, 80, 196-204.
- Hærvig, J., Sørensen, K., & Condra, T. J. (2016). Guidelines for optimal selection of working fluid for an organic Rankine cycle in relation to waste heat recovery. *Energy*, 96, 592-602.
- Harikishan Gupta E. and Shyam P. Kodal. (2013). Design and Operation of Tesla Turbo machine - A state of the art review. *International Journal of Advanced Transport Phenomena* Vol. 02, No. 01, Jan-Dec 2013
- He, C., Liu, C., Gao, H., Xie, H., Li, Y., Wu, S., & Xu, J. (2012). The optimal evaporation temperature and working fluids for subcritical organic Rankine cycle. *Energy*, 38(1), 136-143.
- Humphreys K. *Jelen's Cost and Optimization Engineering*. 3rd ed. New York: McGraw-Hill; 1991.
- Júnior, E. P. B., Arrieta, M. D. P., Arrieta, F. R. P., & Silva, C. H. F. (2019). Assessment of a Kalina cycle for waste heat recovery in the cement industry. *Applied thermal engineering*, 147, 421-437.
- Kachawong, T., & Koonsrisuk, A. (2025). From vapor to liquid: Unlocking the potential of Tesla turbines in ORC power plants with variable steam qualities. *Energy*, 315, 134306.
- Kalina, J., & Świerzewski, M. (2019). Identification of ORC unit operation in biomass-fired cogeneration system. *Renewable Energy*, 142, 400-414.
- Kang, S. H. (2012). Design and experimental study of ORC (organic rankine cycle) and radial turbine using R245FA working fluid. *Energy*, 41(1), 514-524.

รายการอ้างอิง (ต่อ)

- Karimi, S., & Mansouri, S. (2018). A comparative profitability study of geothermal electricity production in developed and developing countries: Exergoeconomic analysis and optimization of different ORC configurations. *Renewable Energy*, 115, 600-619.
- Kalina, A. I. (1984). Combined-cycle system with novel bottoming cycle. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 106(4), 737-742.
- Koonsrisuk, A., Lorente, S., & Bejan, A. (2010). Constructal solar chimney configuration. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 53(1-3), 327-333.
- Lecompte, S., Huisseune, H., Van Den Broek, M., Vanslambrouck, B., & De Paepe, M. (2015). Review of organic Rankine cycle (ORC) architectures for waste heat recovery. *Renewable and sustainable energy reviews*, 47, 448-461.
- Lemmens, S. (2016). Cost engineering techniques and their applicability for cost estimation of organic Rankine cycle systems. *Energies*, 9(7), 485.
- Li, J., Liu, Q., Ge, Z., Duan, Y., & Yang, Z. (2017). Thermodynamic performance analyses and optimization of subcritical and transcritical organic Rankine cycles using R1234ze(E) for 100–200 °C heat sources. *Energy Conversion and Management*, 149, 140-154.
- Li, T., Wang, Z., Wang, J., & Gao, X. (2023). Dynamic performance of organic Rankine cycle driven by fluctuant industrial waste heat for building power supply. *Energies*, 16(2), 765.
- Li, Y., Zhang, Y., & Cui, X. (2023). Study on fracture mechanism of low-pressure blades of steam turbines in power plants. *Journal of Physics: Conference Series*, 2528, 012046. Presented at the 7th International Conference on Mechanical, Electric and Industrial Engineering (MEIE 2023).
- Lu, P., Chen, K., Luo, X., Wu, W., Liang, Y., Chen, J., & Chen, Y. (2024). Experimental and simulation study on a zeotropic ORC system using R1234ze (E)/R245fa as working fluid. *Energy*, 292, 130453.

รายการอ้างอิง (ต่อ)

- Manfrida G, Talluri L. Fluid Dynamics Assessment of the Tesla turbine rotor. *Thermal Science*. 2019;23(1):1-10.
- Manfrida, G., & Talluri, L. (2019). Fluid dynamics assessment of the Tesla turbine rotor. *Thermal Science*, 23(1), 1-10.
- Mergner, H., & Weimer, T. (2015). Performance of ammonia-water based cycles for power generation from low enthalpy heat sources. *Energy*, 88, 93-100.
- Mohammadi, K., Ellingwood, K., & Powell, K. (2020). A novel triple power cycle featuring a gas turbine cycle with supercritical carbon dioxide and organic Rankine cycles: Thermoeconomic analysis and optimization. *Energy Conversion and Management*, 220, 113123.
- Moran, M. J., Shapiro, H. N., Boettner, D. D., & Bailey, M. B. (2010). *Fundamentals of engineering thermodynamics*. John Wiley & Sons.
- Niknam, P. H., Talluri, L., Ciappi, L., & Fiaschi, D. (2021). Numerical assessment of a two-phase Tesla turbine: Parametric analysis. *Applied Thermal Engineering*, 197, 117364.
- Ochoa, G. V., Peñaloza, C. A., & Rojas, J. P. (2019). Thermoeconomic modelling and parametric study of a simple ORC for the recovery of waste heat in a 2 MW gas engine under different working fluids. *Applied Sciences*, 9(21), 4526.
- Pacini, L., Ciappi, L., Talluri, L., Fiaschi, D., Manfrida, G., & Smolka, J. (2020). Computational investigation of partial admission effects on the flow field of a tesla turbine for ORC applications. *Energy*, 212, 118687.
- Palagi, L., Pesyridis, A., Sciubba, E., & Tocci, L. (2019). Machine learning for the prediction of the dynamic behavior of a small scale ORC system. *Energy*, 166, 72-82.
- Pantaleo, A., Fordham, J., Oyewunmi, O., & Markides, C. (2017). Intermittent waste heat recovery via ORC in coffee torrefaction. *Energy Procedia*, 142, 1714-1720.
- Patil, V. R., Biradar, V. I., Shreyas, R., Garg, P., Orosz, M. S., & Thirumalai, N. C. (2017). Techno-economic comparison of solar organic Rankine cycle (ORC) and photovoltaic (PV) systems with energy storage. *Renewable Energy*, 113, 1250-1260.

รายการอ้างอิง (ต่อ)

- Phueksaphanrat, T., Schulz, E., & Koonsrisuk, A. (2020). Energy cost analysis of an organic rankine cycle with exhaust gas in off design conditions. *Journal of Research and Applications in Mechanical Engineering*, 8(1), 48-58.
- Quoilin, S., Declaye, S., Tchanche, B. F., & Lemort, V. (2011). Thermo-economic optimization of waste heat recovery Organic Rankine Cycles. *Applied thermal engineering*, 31(14-15), 2885-2893.
- Raksa-in, W., & Koonsrisuk, A. (2020). Waste heat recovery power plant for a heat source temperature of 130-150 C. *Journal of Research and Applications in Mechanical Engineering*, 8(2), 101-113.
- Raksa-in, W., Duangduean, S., Schulz, E., & Koonsrisuk, A. (2025). Resolving performance contradictions in ORC and alternative power cycles: Systematic analysis of five technologies with time-adjusted economic insights. *Energy*, 324, 136130.
- Rice, W. (1965). An analytical and experimental investigation of multiple-disk turbines. *ASME Journal of Engineering for Power*, 87(1), 29-36.
- Rodríguez, C. E. C., Palacio, J. C. E., Venturini, O. J., Lora, E. E. S., Cobas, V. M., Dos Santos, D. M., ... & Gialluca, V. (2013). Exergetic and economic comparison of ORC and Kalina cycle for low temperature enhanced geothermal system in Brazil. *Applied Thermal Engineering*, 52(1), 109-119.
- Roumpedakis, T. C., Christou, T., Monokrousou, E., Braimakis, K., & Karellas, S. (2019). Integrated ORC-adsorption cycle: A first and second law analysis of potential configurations. *Energy*, 179, 1-15.
- Roumpedakis, T. C., Loumpardis, G., Monokrousou, E., Braimakis, K., Charalampidis, A., & Karellas, S. (2020). Exergetic and economic analysis of a solar driven small scale ORC. *Energy*, 157, 116145.
- Rusin, K., Wróblewski, W., & Rulik, S. (2021). Efficiency based optimization of a Tesla turbine. *Energy*, 236, 121374.
- Song, J., Gu, C., & Li, X. (2017). Performance estimation of Tesla turbine applied in small scale organic Rankine cycle (ORC) system. *Applied Thermal Engineering*, 110, 318-326.

รายการอ้างอิง (ต่อ)

- Sonsaree, S., & Jiajitsawat, S. (2019). Small-scale Solar Organic Rankine Cycle Power Plant: A Simplified Formula to Estimate the Power Output of Six Areas in Thailand. *NU. International Journal of Science*, 16(2), 11-30.
- Sun, F., Zhou, W., Ikegami, Y., Nakagami, K., & Su, X. (2014). Energy–exergy analysis and optimization of the solar-boosted Kalina cycle system 11 (KCS-11). *Renewable Energy*, 66, 268-279.
- Talluri, L., Dumont, O., Manfrida, G., Lemort, V., & Fiaschi, D. (2020). Experimental investigation of an organic Rankine Cycle Tesla turbine working with R1233ZD(E). *Applied Thermal Engineering*, 174, 115293.
- Talluri, L., Dumont, O., Manfrida, G., Lemort, V., & Fiaschi, D. (2020). Geometry definition and performance assessment of Tesla turbines for ORC. *Energy*, 211, 118570.
- Talluri, L., Niknam, P., Copeta, A., Amato, M., Iora, P., Uberti, S., ... & Fiaschi, D. (2021). A revised Tesla Turbine concept for 2-phase applications. In *E3S Web of Conferences* (Vol. 238, p. 10006). EDP Sciences.
- Tchanche, B. F., Papadakis, G., Lambrinos, G., & Frangoudakis, A. (2009). Fluid selection for a low-temperature solar organic Rankine cycle. *Applied Thermal Engineering*, 29(11-12), 2468-2476.
- Tchanche, B., Lambrinos, G., Frangoudakis, A., & Papadakis, G. (2011). Low-grade heat conversion into power using organic Rankine cycles: A review of various applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(6), 3963-3979.
- Tesla, N. (1913). Turbine. U.S. Patent No. 1,061,206.
- Theamtat, T., & Koonsrisuk, A. (2020). Fluid selection and optimal operating conditions of an ORC, and trilateral Rankine cycle power plant for a heat source temperature of 210 °C-250 °C. *Journal of Research and Applications in Mechanical Engineering*, 8(2), 135-147.
- Thurairaja, K., Wijewardane, A., & Ranasinghe, C. (2018). Thermo-economic analysis of organic rankine cycle for power generation. In *2018 IEEE 7th International Conference on Power and Energy (PECon)* (pp. 389-393). IEEE.

รายการอ้างอิง (ต่อ)

- Thurairaja, K., Wijewardane, A., Jayasekara, S., & Ranasinghe, C. (2019). Working fluid selection and performance evaluation of ORC. *Energy Procedia*, 156, 244-248.
- Traverso, A., Reggio, F., Silvestri, P., Rizzo, S., Engelbrecht, G., & Chasoglou, A. (2019). Two-phase flow expansion: development of an innovative test-rig for flow characterisation and CFD validation. In *E3S Web of Conferences* (Vol. 113, p. 03017). EDP Sciences.
- Turton, R., Bailie, R. C., Whiting, W. B., & Shaeiwitz, J. A. (2008). *Analysis, synthesis and design of chemical processes*. Pearson Education.
- Vatavuk, W. M. (2002). Updating the CE plant cost index. *Chemical Engineering*, 109(1), 62-70.
- Walraven, D., Laenen, B., & 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*, 142, 144-153.
- Wang, E., & Yu, Z. (2016). A numerical analysis of a composition-adjustable Kalina cycle power plant for power generation from low-temperature geothermal sources. *Applied Energy*, 180, 834-848.
- Wang, M., Zhang, J., & Liu, H. (2022). Comparison of dual-pressure organic Rankine cycle using zeotropic mixtures. *Applied Thermal Engineering*, 204, 117996.
- Wang, Y., Qin, G., Zhang, Y., Yang, S., Liu, C., Jia, C., & Cui, Q. (2021). Conventional and advanced exergy analyses of an organic Rankine cycle by using the thermodynamic cycle approach. *Energy Science & Engineering*, 9(12), 2474-2492.
- White, M. T. (2021). Cycle and turbine optimisation for an ORC operating with two-phase expansion. *Applied Thermal Engineering*, 192, 116852.
- White, M. T. (2021). Cycle and turbine optimization for an ORC operating with two-phase expansion. *Applied Thermal Engineering*, 192, 116852.
- Wong, T. N., & Ooi, K. T. (1995). Refrigerant flow in capillary tube: an assessment of the two-phase viscosity correlations on model prediction. *International communications in heat and mass transfer*, 22(4), 595-604.

รายการอ้างอิง (ต่อ)

- Yang, J., Ye, Z., Yu, B., Ouyang, H., & Chen, J. (2019). Simultaneous experimental comparison of low-GWP refrigerants as drop-in replacements to R245fa for Organic Rankine cycle application: R1234ze (Z), R1233zd (E), and R1336mzz (E). *Energy*, 173, 721-731.
- Yari, M., Mehr, A., Zare, V., Mahmoudi, S., & Rosen, M. (2015). Exergoeconomic comparison of TLC (trilateral Rankine cycle), ORC (organic Rankine cycle) and Kalina cycle using a low-grade heat source. *Energy*, 83, 712-722.
- Yongprawat, M. (2022). Hydrochemical and environmental isotope study of the geothermal water in Mae Chan (North) and Ranong (South) geothermal areas in Thailand [PhD thesis, University of Göttingen].
- Yousefizadeh Dibazar, S., Salehi, G., & Davarpanah, A. (2020). Comparison of exergy and advanced exergy analysis in three different organic Rankine cycles. *Processes*, 8(5), 586.
- Yu, X., Li, Z., Lu, Y., Huang, R., & Roskilly, A. P. (2018). Investigation of an innovative cascade cycle combining a trilateral cycle and an Organic Rankine Cycle (TLC-ORC) for industry or transport application. *Energies*, 11(11), 3032.
- Yufeng, Z., Guobing, Z., Hui, X., & Jing, C. (2005). An assessment of friction factor and viscosity correlations for model prediction of refrigerant flow in capillary tubes. *International journal of energy research*, 29(3), 233-248.
- Zare, V. (2015). A comparative exergoeconomic analysis of different ORC configurations for binary geothermal power plants. *Energy conversion and management*, 105, 127-138.
- Zhang, Y., Ren, X., Duan, X., Gong, L., & Hung, T. C. (2024). Strategy for the zeotropic organic rankine cycle operation to match the heat sink variation. *Energy*, 286, 129541.
- Zhang, Y., Zhang, S., Peng, H., Tian, Z., Gao, W., & Yang, K. (2023). Thermodynamic analysis of Tesla turbine in Organic Rankine cycle under two-phase flow conditions. *Energy Conversion and Management*, 276, 116477.

รายการอ้างอิง (ต่อ)

- Zhao, L., & Bao, J. (2014). Thermodynamic analysis of organic Rankine cycle using zeotropic mixtures. *Applied energy*, 130, 748-756
- Ziviani, D., Dickes, R., Quoilin, S., Lemort, V., De Paepe, M., & van den Broek, M. (2016, June). Organic Rankine cycle modelling and the ORCmKit library: analysis of R1234ze (Z) as drop-in replacement of R245fa for low-grade waste heat recovery. In *ECOS 2016-29th international conference on Efficiency, Cost, Optimisation, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems*.





ภาคผนวก ก

โปรแกรมสำหรับออกแบบโรงไฟฟ้าวัฏจักรโออาร์ซีเพื่อให้ได้กำลังสุทธิสูงสุด

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

รายละเอียดโปรแกรมเป็นดังต่อไปนี้

```

clc
clear
Params.RP      = py.ctREFPROP.ctREFPROP.REFPROPFunctionLibrary('C:\Program Files (x86)\REFPROP\REFPRP64.DLL');
Params.X3      = 0;
MDOT           = linspace(2, 4, 10);
Params.mdot_hf = 1;
Params.T_hf_in = 150+273.15;
Params.fluid   = 'R1234ze (E)';
Params.z      = {1 0};
Params.hf_fluid = 'water';
Params.cf_fluid = 'water';
Params.T_cf_in = 30+273.15;
Params.T_cf_out = 40+273.15;
Params.T_0     = 25+273.15;
Params.P_0     = 101.325e3;
Params.P_water = 5e6;
for i = 1 : length(MDOT)

    DUMMY = reff(Params.fluid, 'TQ', Params.T_cf_in, 1, 'P', Params.RP, Params.z);
    Pcond_xL= reff(Params.fluid, 'TQ', Params.T_cf_in, 0, 'P', Params.RP, Params.z);
    DUMMY = reff(Params.fluid, 'TQ', Params.T_cf_in, 0, 'P', Params.RP, Params.z);
    Pcond_xU= reff(Params.fluid, 'TQ', Params.T_cf_out+10, 0, 'P', Params.RP, Params.z);
    Pevap_xL= Pcond_xU;

    if i ==1
        TC = reff(Params.fluid, 'TQ', Params.T_cf_in, 0, 'TC', Params.RP, Params.z);
        if TC < Params.T_hf_in
            DUMMY1 = reff(Params.fluid, 'TQ', TC, 0, 'P', Params.RP, Params.z);
            Pevap_xU = reff(Params.fluid, 'TQ', TC-1, Params.X3, 'P', Params.RP, Params.z);
        else
            DUMMY2 = reff(Params.fluid, 'TQ', Params.T_hf_in, Params.X3, 'P', Params.RP, Params.z);
            Pevap_xU= reff(Params.fluid, 'TQ', Params.T_hf_in, Params.X3, 'P', Params.RP, Params.z);
        end
    end
end

```

```

Params.RP,Params.z);
    end
% elseif T_pp_evap_result(i-1) > 12 || T_pp_evap_result(i-1) < 8
%     i = i -1;
%     Pevap_xU=Pevap_result(i-1)*0.8;
% else
%     Pevap_xU=Pevap_result(i-1)*1.2;
end

mdot_wf      = MDOT(i)
i
over_10_check = 1;
%==== OTP P evap=====
Tol           = 5e-3;
Num_iter      = 50;
count=0;
ea_old=0;

while (1)
    count=count+1;
    d= ((sqrt(5)-1)/2)*(Pevap_xU-Pevap_xL);
    x1=Pevap_xL+d;
    x2=Pevap_xU-d;

    [Tpp_max1,Pcond_1,Pevap_1,mdot_1,Wnet_orc_1,T_pp_evap_1,T_pp_cond_1]←
=Function_det_Pcond(Pcond_xL,Pcond_xU,x1,mdot_wf,Params);
    [Tpp_max2,Pcond_2,Pevap_2,mdot_2,Wnet_orc_2,T_pp_evap_2,T_pp_cond_2]←
=Function_det_Pcond(Pcond_xL,Pcond_xU,x2,mdot_wf,Params);
    f1 = abs(T_pp_evap_1-10);
    f2 = abs(T_pp_evap_2-10);
    if T_pp_cond_1 < 11 && T_pp_cond_1 > 9 && over_10_check == 1
        Pcond_xL= Pcond_1*0.9;
        Pcond_xU= Pcond_1*1.1;
        over_10_check =0;
    end
    if T_pp_cond_2 < 11 && T_pp_cond_2 > 9 && over_10_check == 1
        Pcond_xL= Pcond_2*0.9;
        Pcond_xU= Pcond_2*1.1;
        over_10_check =0;
    end
end
ea = abs(x1-x2)/x1;

```

```

if(ea <= Tol) || count >= Num_iter
    if f1 < f2
        Pcond_result(i) = Pcond_1;
        Pevap_result(i) = Pevap_1;
        Mdot_result(i) = mdot_1;
        Wnet_orc_result(i) = Wnet_orc_1;
        T_pp_evap_result(i) = T_pp_evap_1;
        T_pp_cond_result(i) = T_pp_cond_1;
    else
        Pcond_result(i) = Pcond_2;
        Pevap_result(i) = Pevap_2;
        Mdot_result(i) = mdot_2;
        Wnet_orc_result(i) = Wnet_orc_2;
        T_pp_evap_result(i) = T_pp_evap_2;
        T_pp_cond_result(i) = T_pp_cond_2;
    end
    break;
else
    if (f1 > f2)
        Pevap_xU = x1;
    elseif(f1 < f2)
        Pevap_xL = x2;
    end
    ea_old = ea;
end
end
end
%-----
end
figure
plot(Mdot_result,Wnet_orc_result)
title('Set A')

[max_W_net,index_max] = max(Wnet_orc_result);
max_mdot=MDOT(index_max)
max_Pcond=Pcond_result(index_max)
max_Pevap=Pevap_result(index_max)

%===plot=====
[RESULT_Tpp_max_result,RESULT_Pcond_result,RESULT_Pevap_result,✓
RESULT_mdot_result,RESULT_Wnet_orc,RESULT_T_pp_evap_result,✓
RESULT T pp cond result]=ORC calculation(max Pcond,max Pevap,max mdot,✓

```

```

Params, 1);
%=====

function [Tpp_max_result, Pcond_result, Pevap_result, mdot_result,
Wnet_orc_result, T_pp_evap_result, T_pp_cond_result]=Function_det_Pcond
(Pcond_xL, Pcond_xU, Pevap, mdot_wf, Params)

Tol                = 5e-3;
Num_iter           = 50;
count=0;
ea_old=0;

while (1)
count=count+1;
d= ((sqrt(5)-1)/2) * (Pcond_xU-Pcond_xL);
x1=Pcond_xL+d;
x2=Pcond_xU-d;
[Tpp_max1, Pcond_1, Pevap_1, mdot_1, Wnet_orc_1, T_pp_evap_1, T_pp_cond_1]
=ORC_calculation(x1, Pevap, mdot_wf, Params, 0); %%Not to plot using mode 0
[Tpp_max2, Pcond_2, Pevap_2, mdot_2, Wnet_orc_2, T_pp_evap_2, T_pp_cond_2]
=ORC_calculation(x2, Pevap, mdot_wf, Params, 0); %%Not to plot using mode 0
f1 = abs(T_pp_cond_1-10);
f2 = abs(T_pp_cond_2-10);
ea = abs(x1-x2)/x1;
    if(ea <= Tol) || count >= Num_iter
        if f1 < f2
            Tpp_max_result = f1;
            Pevap_result   = Pevap_1;
            Pcond_result   = Pcond_1;
            mdot_result    = mdot_1;
            Wnet_orc_result = Wnet_orc_1;
            T_pp_evap_result= T_pp_evap_1;
            T_pp_cond_result= T_pp_cond_1;
        else
            Tpp_max_result = f2;
            Pevap_result   = Pevap_2;
            Pcond_result   = Pcond_2;
            mdot_result    = mdot_2;
            Wnet_orc_result = Wnet_orc_2;
            T_pp_evap_result= T_pp_evap_2;
            T_pp_cond_result= T_pp_cond_2;
        end
    end
end

```

```

        end
        break;
    else
        if(f1 > f2)
            Pcond_xU=x1;
        elseif(f1 < f2)
            Pcond_xL=x2;
        end
        ea_old =ea;
    end
end
end
function [Tpp_max_result,Pcond_result,Pevap_result,mdot_result,Wnet_orc,
T_pp_evap,T_pp_cond]=ORC_calculation(Pcond,Pevap,mdot_wf,Params,mode)
RP          = Params.RP;
Wf_ORC      = Params.fluid;
z           = Params.z;

%====Boundary=====
T_hin  = Params.T_hf_in;
Q3     = Params.X3;
T_cin  = Params.T_cf_in-273.15;
T_cout = Params.T_cf_out-273.15;
m_hin  = 1;
p_hin  = 5e6;
eff_p  = .80;
eff_t  = 1;

h_hin  =refp('water','PT',p_hin,T_hin,'h',RP,z);
cp_hin =refp('water','PT',p_hin,T_hin,'cp',RP,z);
cp_win =refp('water','PT',p_hin,273.15+35,'cp',RP,z);
h_cin  =refp('water','PT',p_hin,30+273.15,'h',RP,z);
h_cout =refp('water','PT',p_hin,40+273.15,'h',RP,z);

%====ORC=====
mf_orc  = mdot_wf;
pevap_orc = Pevap;
pcond_orc = Pcond;

Dummy=refp(Wf_ORC,'PQ',pcond_orc,0,'h',RP,z);

```

```

h1_orc=refp(Wf_ORC, 'PQ', pcond_orc, 0, 'h', RP, z);
s1_orc=refp(Wf_ORC, 'PQ', pcond_orc, 0, 's', RP, z);
T1_orc=refp(Wf_ORC, 'PQ', pcond_orc, 0, 'T', RP, z);

h2s_orc=refp(Wf_ORC, 'PS', pevap_orc, s1_orc, 'h', RP, z);
h2_orc=h1_orc+(h2s_orc-h1_orc)/eff_p;
s2_orc=refp(Wf_ORC, 'PH', pevap_orc, h2_orc, 's', RP, z);
T2_orc=refp(Wf_ORC, 'PH', pevap_orc, h2_orc, 'T', RP, z);

h3_orc=refp(Wf_ORC, 'PQ', pevap_orc, Q3, 'h', RP, z);
s3_orc=refp(Wf_ORC, 'PQ', pevap_orc, Q3, 's', RP, z);
T3_orc=refp(Wf_ORC, 'PH', pevap_orc, h3_orc, 'T', RP, z);

h4s_orc=refp(Wf_ORC, 'PS', pcond_orc, s3_orc, 'h', RP, z);
h4_orc=h3_orc-(h3_orc-h4s_orc)*eff_t;
s4_orc=refp(Wf_ORC, 'PH', pcond_orc, h4_orc, 's', RP, z);
T4_orc=refp(Wf_ORC, 'PH', pcond_orc, h4_orc, 'T', RP, z);

Wnet_orc=mf_orc*((h3_orc-h4_orc)-(h2_orc-h1_orc));
T_hout_orc=T_hin-(mf_orc*(h3_orc-h2_orc))/(cp_hin*m_hin);
%mcf_orc=(mf_orc*(h4_orc-h1_orc))/(10*cp_win);
mcf_orc = (mf_orc*(h4_orc-h1_orc))/(h_cout-h_cin);
h_hout_orc=refp('water', 'PT', p_hin, T_hout_orc, 'h', RP, z);

section          = 3;
T23_orc(1)       = T2_orc;
T23_orc(section+1) = T3_orc;
h23_orc(1)       = h2_orc;
h23_orc(section+1) = h3_orc;
s23_orc(1)       = s2_orc;
s23_orc(section+1) = s3_orc;
Thf_orc(1)       = T_hout_orc;
Thf_orc(section+1) = T_hin;
hhf_orc(1)       = h_hout_orc;
hhf_orc(section+1) = h_hin;
DeltaTe          = -(T_hin-T_hout_orc)/section;

T14_orc(1)       = T1_orc;
T14_orc(section+1) = T4_orc;
h14_orc(1)       = h1_orc;

```

```

h14_orc(section+1) = h4_orc;
s14_orc(1)         = s1_orc;
s14_orc(section+1) = s4_orc;
Tcf_orc(1)         = 30+273.15;
Tcf_orc(section+1) = 40+273.15;
hcf_orc(1)         = h_cin;
hcf_orc(section+1) = h_cout;
DeltaTc            = (10)/section;
UA_evap            = 0;
UA_cond            = 0;

for i = 2 : section+1
    Thf_orc(i) = Thf_orc(i-1)+DeltaTe;
    Dummy = refp('water', 'PT', p_hin, Thf_orc(i), 'H', RP, z);
    hhf_orc(i) = refp('water', 'PT', p_hin, Thf_orc(i), 'H', RP, z);
    h23_orc(i) = h23_orc(i-1) + (m_hin*(hhf_orc(i)-hhf_orc(i-1))) ✓
/mf_orc;
    Dummy = refp(Wf_ORC, 'PH', pevap_orc, h23_orc(i), 'T', RP, z);
    T23_orc(i) = refp(Wf_ORC, 'PH', pevap_orc, h23_orc(i), 'T', RP, z);
    s23_orc(i) = refp(Wf_ORC, 'PH', pevap_orc, h23_orc(i), 'S', RP, z);
    T_check_evap(i) = (Thf_orc(i)-T23_orc(i));

    T_lm_evaps(i-1) = abs(((Thf_orc(i)-T23_orc(i))-(Thf_orc(i-1)-T23_orc(i-1)))/log((Thf_orc(i)-T23_orc(i))/(Thf_orc(i-1)-T23_orc(i-1))));
    UA_s_evap(i) = ((h23_orc(i)-h23_orc(i-1))*mf_orc)/T_lm_evaps(i-1);
    UA_evap = UA_evap + UA_s_evap(i);

    % ✓
----- ✓

    Tcf_orc(i) = Tcf_orc(i-1)+DeltaTc;
    Dummy = refp('water', 'PT', p_hin, Tcf_orc(i), 'H', RP, z);
    hcf_orc(i) = refp('water', 'PT', p_hin, Tcf_orc(i), 'H', RP, z);
    h14_orc(i) = h14_orc(i-1)+(mcf_orc*(hcf_orc(i)-hcf_orc(i-1))) ✓
/mf_orc;
    Dummy = refp(Wf_ORC, 'PH', pcond_orc, h14_orc(i), 'T', RP, z);
    T14_orc(i) = refp(Wf_ORC, 'PH', pcond_orc, h14_orc(i), 'T', RP, z);
    s14_orc(i) = refp(Wf_ORC, 'PH', pcond_orc, h14_orc(i), 'S', RP, z);
    T_check_cond(i) = (Tcf_orc(i)-T14_orc(i));

```



```

    T_lm_conds(i-1) = abs(((Tcf_orc(i)-T14_orc(i))-(Tcf_orc(i-1)-
T14_orc(i-1)))/log((Tcf_orc(i)-T14_orc(i))/(Tcf_orc(i-1)-T14_orc(i-
1))));
    UA_s_cond(i) = ((h23_orc(i)-h23_orc(i-1))*mf_orc)/T_lm_conds
(i-1);
    UA_cond = UA_cond + UA_s_cond(i);

```

```
end
```

```

Pcond_result = Pcond;
Pevap_result = Pevap;
mdot_result = mdot_wf;

T_check_cond(1) = T_check_cond(2);
T_check_evap(1) = T_check_evap(2);
if min(T_check_evap) < 0
    T_pp_evap = 9999;
else
    T_pp_evap = min(abs(Thf_orc-T23_orc));
end

if max(T_check_cond) > 0
    T_pp_cond = 9999;
else
    T_pp_cond = min(abs(Tcf_orc-T14_orc));
end

Tpp_max_result = max(abs(T_pp_cond-10), abs(T_pp_evap-10));

T_turbine_orc_dot = [T23_orc(section+1) T14_orc(section+1)];
s_turbine_orc_dot = [s23_orc(section+1) s14_orc(section+1)];
h_turbine_orc_dot = [h23_orc(section+1) h14_orc(section+1)];
T_pump_orc_dot = [T23_orc(1) T14_orc(1)];
s_pump_orc_dot = [s23_orc(1) s14_orc(1)];
h_pump_orc_dot = [h23_orc(1) h14_orc(1)];

T_turbine_orc = linspace(T23_orc(section+1), T14_orc(section+1),

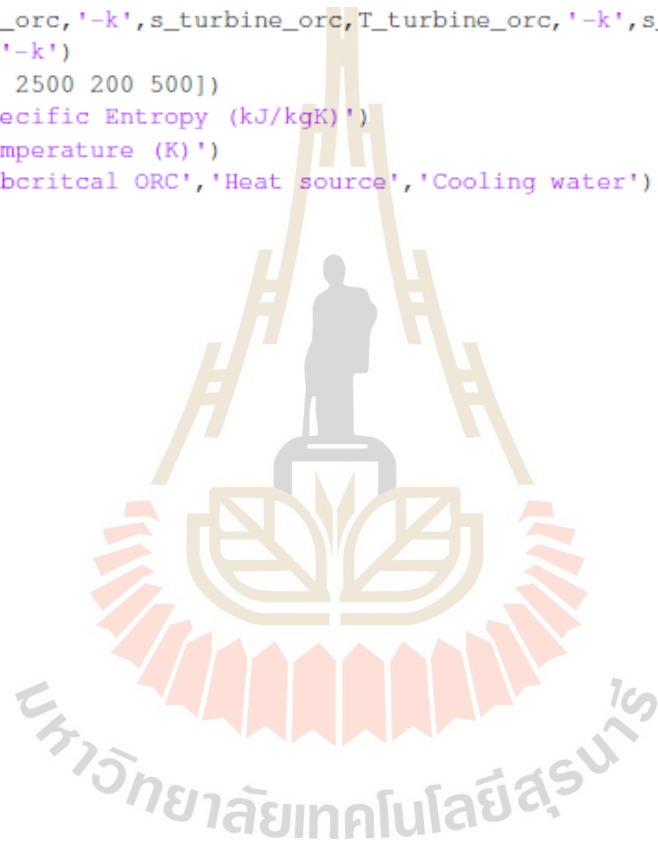
```

```

section+1);
    s_turbine_orc = linspace(s23_orc(section+1),s14_orc(section+1),✓
section+1);
    h_turbine_orc = linspace(h23_orc(section+1),h14_orc(section+1),✓
section+1);
    T_pump_orc    = linspace(T14_orc(1),T23_orc(1),section+1);
    s_pump_orc    = linspace(s14_orc(1),s23_orc(1),section+1);
    h_pump_orc    = linspace(h14_orc(1),h23_orc(1),section+1);
    reversible_work =mf_orc*(h3_orc-h4s_orc);

    if mode == 1
    figure
    plot(s23_orc,T23_orc,'-k',s23_orc,Thf_orc,'-r',s14_orc,Tcf_orc,'-b',✓
s14_orc,T14_orc,'-k',s_turbine_orc,T_turbine_orc,'-k',s_pump_orc,✓
T_pump_orc,'-k')
    axis([1000 2500 200 500])
    xlabel('Specific Entropy (kJ/kgK)')
    ylabel('Temperature (K)')
    legend('Subcritical ORC','Heat source','Cooling water')
    title('A')
    end
end

```



ภาคผนวก ข
โปรแกรมสำหรับออกแบบโรงไฟฟ้าวัฏจักรคาลินาแบบ KCS-11 เพื่อให้ได้
กำลังสุทธิสูงสุด

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

รายละเอียดโปรแกรมเป็นดังต่อไปนี้

```

clear
clc
global RP fluid fluid_c
RP = py.ctREFPROP.ctREFPROP.REFPROPFunctionLibrary('C:\Program Files\
(x86)\REFPROP');
fluid = 'ammonia;water';
fluid_c = 'water';
%-----Input-----
mass_faction_a = [0.9];
mass_faction_w = 1-mass_faction_a;
z = {mass_faction_a mass_faction_w}; %First fluid is ammonia Secound is
water
Pevap = [6.5]*1e6;
m_wf = 0.4;
i=1;
j=1;
%*****Guess T4 (inlet temperature separator)*****
xstop = 99;
K=0;
epsilon = 0.02;
iter= 30;
a = refp(fluid,'QP',1,Pevap,'T',RP,z);
b = refp(fluid,'QP',0,Pevap,'T',RP,z);
while ((xstop>epsilon) && (K<iter))

    phi=(sqrt(5)- 1)/2;
    x1 = a+(1-phi)*(b-a);
    x2 = a+phi*(b-a);
    [Pcond1, Wnet1, Tpp_evap1, Tpp_cond1, LCOE1] = Golden_Pcond
(m_wf, Pevap, z, x1, mass_faction_a);
    [Pcond2, Wnet2, Tpp_evap2, Tpp_cond2, LCOE2] = Golden_Pcond
(m_wf, Pevap, z, x2, mass_faction_a);

    if(Tpp_evap1<Tpp_evap2)
        b=x2;
        x2=x1;
        x1=a+(1-phi)*(b-a);
    else
        a=x1;

```

```

        x1=x2;
        x2=a+phi*(b-a);
    end

    K=K+1
    xstop = 100*abs(x1-x2)/x2
end

if (Tpp_cond1<Tpp_cond2)
    Pevap/1e6
    P1(i,j) = Pcond1/1e6
    T4(i,j) = x1
    Wnet(i,j) = Wnet1
    Tpp_evap(i,j) = Tpp_evap1
    Tpp_cond(i,j) = Tpp_cond1
    LCOE(i,j) = LCOE1;
else
    Pevap/1e6
    P1(i,j) = Pcond2/1e6
    T4(i,j) = x2
    Wnet(i,j) = Wnet2
    Tpp_evap(i,j) = Tpp_evap2
    Tpp_cond(i,j) = Tpp_cond2
    LCOE(i,j) = LCOE2;
end

%=====Function=====
function [P1, Wnet, Tpp_evap, Tpp_cond, LCOE] = Golden_Pcond(m_wf, P2, ✓
z, T4, z_f1)
    global RP fluid
    a = refp(fluid, 'QT', 0, 273.15 + 30 + 5, 'P', RP, z); ✓
% start of interval condensation pressure
    b = refp(fluid, 'QT', 0, 273.15 + 40 + 10, 'P', RP, z); ✓
% end of interval condensation pressure
    epsilon = 0.02; % accuracy value
    iter= 30; % maximum number of iterations
    phi=(sqrt(5)- 1)/2; % golden proportion coefficient, around ✓
0.618
    x1 = a+(1-phi)*(b-a); % computing x values

```

```

x2 = a+phi*(b-a);
[ Tpp_evap1, Tpp_cond1, Wnet1, LCOE1 ] = KCS11(m_wf, x1, P2, z, T4, z_f1);
[ Tpp_evap2, Tpp_cond2, Wnet2, LCOE2 ] = KCS11(m_wf, x2, P2, z, T4, z_f1);
H = 1;
xstop = 100*abs(x1-x2)/x2;

while ((xstop>epsilon) && (H<iter))

    if(Tpp_cond1<Tpp_cond2)
        b=x2;
        x2=x1;
        x1=a+(1-phi)*(b-a);
        [ Tpp_evap1, Tpp_cond1, Wnet1, LCOE1 ] = KCS11(m_wf, x1, P2, z, T4, z_f1);
        [ Tpp_evap2, Tpp_cond2, Wnet2, LCOE2 ] = KCS11(m_wf, x2, P2, z, T4, z_f1);
    else
        a=x1;
        x1=x2;
        x2=a+phi*(b-a);
        [ Tpp_evap1, Tpp_cond1, Wnet1, LCOE1 ] = KCS11(m_wf, x1, P2, z, T4, z_f1);
        [ Tpp_evap2, Tpp_cond2, Wnet2, LCOE2 ] = KCS11(m_wf, x2, P2, z, T4, z_f1);
    end

    H=H+1;
    xstop = 100*abs(x1-x2)/x2;
end
number_iteration_Pcond = H;
if (Tpp_cond1<Tpp_cond2)
    P1 = x1;
    Wnet = Wnet1;
    Tpp_evap = Tpp_evap1;
    Tpp_cond = Tpp_cond1;
    LCOE = LCOE1;
else
    P1 = x2;

```

```

        Wnet = Wnet2;
        Tpp_evap = Tpp_evap2;
        Tpp_cond = Tpp_cond2;
        LCOE = LCOE2;

    end
end
function [Tpp_evap, Tpp_cond, Wnet, LCOE] = KCS11(m_wf, P1, P2, z, T4,
z_f1)
%
-----
--Input
parameter-----
-----%
global RP fluid fluid_c

z_c = {1 0 };

Phf = 10e6;
eff_gen = 1;
m_hot = 1;
Pcf = 1e5;
Tcold_in = 273.15 + 30;
Tcold_out = 273.15 + 40;
Thot_in = 273.15 + 200; %Ths
P_0 = 1e5;
T0 = 273.15+25;
isen_p = 0.75;
isen_t = 0.8;
n_evap = 20;
n_cond = 20;
n_HT = 10;
PPTD_cond = 10;
PPTD_evap = 10;
Eff_HX = 0.8;
%
%State 1: Pump inlet
T11 = refp(fluid, 'QP', 0, P1, 'T', RP, z);
T1 = refp(fluid, 'PQmass', P1, 0, 'T', RP, z);
h1 = refo(fluid, 'PQmass', P1, 0, 'h', RP, z);

```

```

s1 = refp(fluid, 'PQmass', P1, 0, 's', RP, z);

Tcri = refp(fluid, 'PQmass', P1, 0, 'Tc', RP, z) - 273.15;

%State 2: HT rec inlet (cold fluid)
s2s = s1;
h2s = refp(fluid, 'PS', P2, s2s, 'h', RP, z);
h2 = h1 + (h2s - h1)/isen_p;
T2 = refp(fluid, 'hP', h2, P2, 'T', RP, z);
if T2 < T1
    T2 = T1;
end

%State 4: Separator inlet
h4 = refp(fluid, 'PT', P2, T4, 'h', RP, z);

%State 5: Turbine inlet
% % for 2 fluid
[m_f_f1_V] = refp(fluid, 'PT', P2, T4, 'xmassvap', RP, z); %% xmassvap = find✓
mass friction for vapor phase
m_f_f2_V = 1 - m_f_f1_V;
z5 = {m_f_f1_V m_f_f2_V};

%State 7: HT rec inlet (hot fluid)
% for 2 fluid
[m_f_f1_L] = refp(fluid, 'PT', P2, T4, 'xmassliq', RP, z); %% xmassliq = ✓
find mass friction for liquid phase
m_f_f2_L = 1 - m_f_f1_L;
z7 = {m_f_f1_L m_f_f2_L}; z7 = {m_f_f1_L m_f_f2_L};
m5 = m_wf * (z_f1 - m_f_f1_L) / (m_f_f1_V - m_f_f1_L);
m7 = m_wf - m5;
h5 = refp(fluid, 'PT', P2, T4, 'h', RP, z5);
s5 = refp(fluid, 'PT', P2, T4, 's', RP, z5);

%State 6: Mixer inlet (rich ammonia)
s6s = s5;
h6s = refp(fluid, 'PS', P1, s6s, 'h', RP, z5);
h6 = h5 - isen_t * (h5 - h6s);
h7 = refp(fluid, 'PT', P2, T4, 'h', RP, z7);

%State 8: Expansion valve inlet

```



```

T7 = T4;
T8 = T7 - Eff_HX*(T7 - T2);
h8 = refp(fluid, 'PT', P2, T8, 'h', RP, z7);
Q_HT = m7*(h7 - h8);

%State 3: Evaporator inlet
h3 = h2 + Q_HT/m_wf;
T3 = refp(fluid, 'PH', P2, h3, 'T', RP, z);

%State 9: Mixer inlet (lean ammonia)
h9 = h8;

%State 10: Condenser inlet
h10 = (m5*h6 + m7*h9)/m_wf;
T10 = refp(fluid, 'Ph', P1, h10, 'T', RP, z);

%✓
-----✓
--Thermodynamic✓
analysis-----✓
-----%
Wturbine = m5*(h5 - h6)/1000;
Wpump = m_wf*(h2 - h1)/1000;
Wgen = Wturbine*eff_gen;
Wnet = Wturbine - Wpump;
Qin = m_wf*(h4 - h3)/1000;
    h_hot_in_dummy = refp(fluid_c, 'TP', Thot_in, Phf, 'h', RP, z_c);
    h_hot_in = refp(fluid_c, 'TP', Thot_in, Phf, 'h', RP, z_c);
    s_hot_in = refp(fluid_c, 'TP', Thot_in, Phf, 's', RP, z_c);
    h_hot_out = h_hot_in - (1000*Qin/m_hot);
    s_hot_out = refp(fluid_c, 'HP', h_hot_out, Phf, 's', RP, z_c);
    h0_hf = refp(fluid_c, 'TP', T0, P_0, 'h', RP, z_c);
    s0_hf = refp(fluid_c, 'TP', T0, P_0, 's', RP, z_c);
    cp_hot = refp(fluid_c, 'PT', Phf, Thot_in, 'cp', RP, z_c);
    Thot_out = Thot_in - (1000*Qin/(m_hot*cp_hot));
    T_hot_avg = (Thot_in + Thot_out)/2;
    Thotout = Thot_out - 273.15;
Qout = m_wf*(h10 - h1)/1000;
    h_cold_in = refp(fluid_c, 'TP', Tcold_in, Pcf, 'h', RP, z_c);
    h_cold_out = refp(fluid_c, 'TP', Tcold_out, Pcf, 'h', RP, z_c);
    s_cold_in = refp(fluid_c, 'TP', Tcold_in, Pcf, 's', RP, z_c);

```

```

s_cold_out = reffp(fluid_c, 'TP', Tcold_out, Pcf, 's', RP, z_c);
m_cold = 1000*Qout/(h_cold_out - h_cold_in);
T_cold_avg = (Tcold_in + Tcold_out)/2;
% Eff1 = 100*Wnet/Qin
% Qin
% Qout
% Wnet

%✓
-----✓
--✓
Discretization-----✓
-----%
    %Evaporator
        [Tpp_e T_hf h_hf T_wf_e h_wf_e Photf Pwf_e UA_E] =✓
Discretization_Evap(n_evap, h_hot_out, h_hot_in, Thot_out, Thot_in,✓
fluid_c, z_c, Phf, Phf, h3, h4, T3, T4, fluid, z, P2, P2, m_hot, RP);
        Tpp_evap = abs(Tpp_e - PPTD_evap);

    %Condenser
        [Tpp_c T_wf_c h_wf_c T_cf h_cf Pwf_c Pcoldf UA_C] =✓
Discretization_Cond(n_cond, h1, h10, T1, T10, fluid, z, P1, P1,✓
h_cold_in, h_cold_out, Tcold_in, Tcold_out, fluid_c, z_c, Pcf, Pcf,✓
m_wf, RP);
        Tpp_cond = abs(Tpp_c - PPTD_cond);

    %HT rec
        [Tpp_HT_rec T_87 h_87 T_23 h_23 P87 P23 UA_H] =✓
Discretization_ex(n_HT, h8, h7, T8, T7, fluid, z7, P2, P2, h2, h3, T2,✓
T3, fluid, z, P2, P2, m_wf, RP);

Eff1 = 100*Wnet/Qin;
% LCOE = 1;
%✓
-----✓
-----✓
LCOE-----✓
-----%
U_evap = 39.7;
U_cond = 709.3;
U_HT_rec = 638.4;
C_hx = 588;

```

```

C_tur0 = 4405;
C_pump0 = 1120;
crf = 0.87;
Wgen_kW = Wgen;
Wturbine_kW = Wturbine;
N_year = 40;
i_c = 0.0675;
CRF = (i_c*(i_c+1)^N_year)/((i_c+1)^N_year - 1);
hr_net = 365*24*crf;
Ele_year = Wnet*hr_net;
A_evap = UA_E/U_evap;
A_cond = UA_C/U_cond;
A_rec = UA_H/U_HT_rec;

C_evap = C_hx*(A_evap)^0.8;
C_cond = C_hx*(A_cond)^0.8;
C_rec = C_hx*(A_rec)^0.8;
C_tur = C_tur0*(Wturbine_kW)^0.7;
C_pump = C_pump0*(Wpump)^0.8;
C_gen = 10*10^6*(Wgen_kW/(160*10^3))^0.7;
C_sep = 1; %minimum value, it is a estimate
C_pec = C_tur + C_gen + C_cond + C_pump + C_sep + C_rec + C_evap;
C_pip = 0.66*C_pec;
C_insc = 0.1*C_pec;
C_el = 0.1*C_pec;
C_inst = 0.45*C_pec;
C_misc = C_pip + C_insc + C_el + C_inst;
C_inv = C_pec + C_misc;
C_OaM = 5*hr_net;
LCOE = (CRF*C_inv + C_OaM)/Ele_year;
end
function [Tpp Th hh Tc hc Pc Ph sum_UA] = Discretization_Cond(n, h_hf_L, ✓
h_hf_R, T_hf_L, T_hf_R, fluid_hf, z_hf, Phf_L, Phf_R, h_cf_L, h_cf_R, ✓
T_cf_L, T_cf_R, fluid_cf, z_cf, Pcf_L, Pcf_R, m_hot, RP)
%hf = hot fluid, cf = cold fluid
Tcri = refp(fluid_hf, 'QP', 1, 0, 'Tc', RP, z_hf) - 273.15;
sum_UA = 0;
h_hot(1) = h_hf_L;
h_hot(n + 1) = h_hf_R;
del_h_hot = abs(h_hf_L - h_hf_R)/(n);
T_hot(1) = T_hf_L;

```

```

T_hot(n+ 1) = T_hf_R;
del_T_hot = abs(T_hf_L - T_hf_R)/(n);
del_T_cold = abs(T_cf_L - T_cf_R)/(n);
Phf(1) = Phf_L;
Phf(n+ 1) = Phf_R;
del_Phf = abs(Phf(1) - Phf(n+1))/(n);
h_cold(1) = h_cf_L;
h_cold(n+ 1) = h_cf_R;
del_h_cold = abs(h_cf_L - h_cf_R)/(n);
T_cold(1) = T_cf_L;
T_cold(n+ 1) = T_cf_R;
Pcf(1) = Pcf_L;
Pcf(n+ 1) = Pcf_R;
del_Pcf = abs(Pcf(1) - Pcf(n+1))/(n);
diffTemp(1) = abs(T_hot(1) - T_cold(1));
diffTemp(n + 1) = abs(T_hot(n+ 1) - T_cold(n+ 1));
for i = 2: n +1
    %hot fluid
    Phf(i) = Phf(i - 1) + del_Phf;
    h_hot(i) = h_hot(i - 1) + del_h_hot;
    T_hot_dummy = refp(fluid_hf, 'Ph', Phf(i), h_hot(i), 'T', RP, z_hf);
    T_hot1 = refp(fluid_hf, 'Ph', Phf(i), h_hot(i), 'T', RP, z_hf);
    T_hot(i) = refp(fluid_hf, 'Ph', Phf(i), h_hot(i), 'T', RP, z_hf);
    if T_hot(i) < 200
        T_hot(i) = T_hot(i-1);
    end

    h_cold(i) = h_cold(i - 1) + del_h_cold;
    Pcf(i) = Pcf(i - 1) - del_Pcf;
    T_cold(i) = T_cold(i-1) + del_T_cold;

    diffTemp(i) = abs(T_hot(i) - T_cold(i));
end

%UA heat exchanger
for i = 1: n
    dT_L(i) = (T_hot(i) - T_cold(i));
    dT_R(i) = (T_hot(i+1) - T_cold(i+1));
    LMTD(i) = (dT_L(i) - dT_R(i))/log(dT_L(i)/dT_R(i));
    UA(i) = m_hot*(h_hot(i+1) - h_hot(i))/LMTD(i);
end

```

```

sum_UA = sum(UA);
Tpp = min(diffTemp);
Th = T_hot;
hh = h_hot;
Tc = T_cold;
hc = h_cold;
Pc = Pcf;
Ph = Phf;
end
function [Tpp Th hh Tc hc Pc Ph sum_UA Q] = Discretization_Evap(n, ✓
h_hf_L, h_hf_R, T_hf_L, T_hf_R, fluid_hf, z_hf, Phf_L, Phf_R, h_cf_L, ✓
h_cf_R, T_cf_L, T_cf_R, fluid_cf, z_cf, Pcf_L, Pcf_R, m_hot, RP)
%hf = hot fluid, cf = cold fluid
Tcri = refp(fluid_hf, 'QP', 1, 0, 'Tc', RP, z_hf) - 273.15;
sum_UA = 0;
h_hot(1) = h_hf_L;
h_hot(n + 1) = h_hf_R;
del_h_hot = abs(h_hf_L - h_hf_R) / (n);
T_hot(1) = T_hf_L;
T_hot(n+ 1) = T_hf_R;
del_T_hot = abs(T_hf_L - T_hf_R) / (n);
del_T_cold = abs(T_cf_L - T_cf_R) / (n);
Phf(1) = Phf_L;
Phf(n+ 1) = Phf_R;
del_Phf = abs(Phf(1) - Phf(n+1)) / (n);
h_cold(1) = h_cf_L;
h_cold(n+ 1) = h_cf_R;
del_h_cold = abs(h_cf_L - h_cf_R) / (n);
T_cold(1) = T_cf_L;
T_cold(n+ 1) = T_cf_R;
Pcf(1) = Pcf_L;
Pcf(n+ 1) = Pcf_R;
del_Pcf = abs(Pcf(1) - Pcf(n+1)) / (n);
diffTemp(1) = abs(T_hot(1) - T_cold(1));
diffTemp(n + 1) = abs(T_hot(n+ 1) - T_cold(n));
for i = 2: n + 1
    %hot fluid
    Phf(i) = Phf(i - 1) + del_Phf;
    h_hot(i) = h_hot(i - 1) + del_h_hot;
    T_hot(i) = T_hot(i-1) + del_T_hot;

```

```

h_cold(i) = h_cold(i - 1) + del_h_cold;
Pcf(i) = Pcf(i - 1) - del_Pcf;
T_cold_dummy = refp(fluid_cf, 'Ph', Pcf(i), h_cold(i), 'T', RP, z_cf);
T_cold(i) = refp(fluid_cf, 'Ph', Pcf(i), h_cold(i), 'T', RP, z_cf);
if T_cold(i) < T_cold(i - 1)
    del_T_cold = abs(T_cf_R - T_cold(i-1))/(n - i + 2);
    T_cold(i) = T_cold(i-1) + del_T_cold ;
end
diffTemp(i) = abs(T_hot(i) - T_cold(i));
end

%UA heat exchanger
for i = 1: n
    dT_L(i) = (T_hot(i) - T_cold(i));
    dT_R(i) = (T_hot(i+1) - T_cold(i+1));
    LMTD(i) = (dT_L(i) - dT_R(i))/log(dT_L(i)/dT_R(i));
    UA(i) = m_hot*(h_hot(i+1) - h_hot(i))/LMTD(i);
    Q(i) = m_hot*(h_hot(i+1) - h_hot(i));
end
sum_UA = sum(UA);
Tpp = min(diffTemp);
Th = T_hot;
hh = h_hot;
Tc = T_cold;
hc = h_cold;
Pc = Pcf;
Ph = Phf;
end
function [Tpp Th hh Tc hc Pc Ph sum_UA] = Discretization_ex(n, h_hf_L,
h_hf_R, T_hf_L, T_hf_R, fluid_hf, z_hf, Phf_L, Phf_R, h_cf_L, h_cf_R,
T_cf_L, T_cf_R, fluid_cf, z_cf, Pcf_L, Pcf_R, m_hot, RP)
%hf = hot fluid, cf = cold fluid
Tcri = refp(fluid_hf, 'QP', 1, 0, 'Tc', RP, z_hf) - 273.15;
sum_UA = 0;
h_hot(1) = h_hf_L;
h_hot(n + 1) = h_hf_R;
del_h_hot = abs(h_hf_L - h_hf_R)/(n);
T_hot(1) = T_hf_L;
T_hot(n+ 1) = T_hf_R;
del_T_hot = abs(T_hf_L - T_hf_R)/(n);
del_T_cold = abs(T_cf_L - T_cf_R)/(n);

```

```

Phf(1) = Phf_L;
Phf(n+ 1) = Phf_R;
del_Phf = abs(Phf(1) - Phf(n+1))/ (n);
h_cold(1) = h_cf_L;
h_cold(n+ 1) = h_cf_R;
del_h_cold = abs(h_cf_L - h_cf_R)/ (n);
T_cold(1) = T_cf_L;
T_cold(n+ 1) = T_cf_R;
Pcf(1) = Pcf_L;
Pcf(n+ 1) = Pcf_R;
del_Pcf = abs(Pcf(1) - Pcf(n+1))/ (n);
diffTemp(1) = abs(T_hot(1) - T_cold(1));
diffTemp(n + 1) = abs(T_hot(n+ 1) - T_cold(n+ 1));
for i = 2: n + 1
    %hot fluid
    Phf(i) = Phf(i - 1) + del_Phf;
    h_hot(i) = h_hot(i - 1) + del_h_hot;
    T_hot_dummy = refp(fluid_hf, 'Ph', Phf(i), h_hot(i), 'T', RP, z_hf);
    T_hot(i) = refp(fluid_hf, 'Ph', Phf(i), h_hot(i), 'T', RP, z_hf);
    if T_hot(i) < T_hot(i - 1)
        T_hot(i) = T_hot(i-1) + del_T_hot;
    else (abs(T_hot(i) - T_hot(i - 1)) < 0.5 );
        T_hot(i) = T_hot(i-1) + del_T_hot;
    end

    h_cold(i) = h_cold(i - 1) + del_h_cold;
    Pcf(i) = Pcf(i - 1) - del_Pcf;
    T_cold_dummy = refp(fluid_cf, 'Ph', Pcf(i), h_cold(i), 'T', RP, z_cf);
    T_cold(i) = refp(fluid_cf, 'Ph', Pcf(i), h_cold(i), 'T', RP, z_cf);
    if T_cold(i) < T_cold(i - 1)
        del_T_cold = abs(T_cf_R - T_cold(i-1))/(n - i + 2);
        T_cold(i) = T_cold(i-1) + del_T_cold ;
    end
    diffTemp(i) = abs(T_hot(i) - T_cold(i));
end

%UA heat exchanger
for i = 1: n
    dT_L(i) = (T_hot(i) - T_cold(i));
    dT_R(i) = (T_hot(i+1) - T_cold(i+1));
    LMTD(i) = (dT_L(i) - dT_R(i))/log(dT_L(i)/dT_R(i));

```

ภาคผนวก ค
โปรแกรมสำหรับออกแบบเทสลาเทอร์ไบน์เพื่อให้กำลังสูงสุด



รายละเอียดโปรแกรมเป็นดังต่อไปนี้

```

clc
clear
RP = py.ctREFPROP.ctREFPROP.REFPROPFunctionLibrary('C:\Program Files\
(x86)\REFPROP\REFPRP64.DLL');
z = {1 0};

P3_Array = [0.455536 0.455536 0.455536 0.455536 0.442376];
P1_Array = [1.855810 1.278437 1.087585 1.064399 1.067544];
M_Array = [3.06 2.94 1.94 1.33 1.00];
X_Array = [0 0.25 0.5 0.75 1];
RPM_Array= [3000 3200 3400 3600 3800 4000];
for i = 1 : 1
for k = 4: length(RPM_Array)

seclct = i;
k

fluid_Array = 'R236ea'

RPM = RPM_Array(k)
%%ORC condition
P1 = P1_Array(seclct)*1e6;
P3 = P3_Array(seclct)*1e6;
Mdot = M_Array(seclct);
fluid=fluid_Array;
%%geometry
N_disk = 50;
D02 = 400e-3;
%D03 = 80e-3;
X1 = X_Array(seclct);
v1 = 0;

%%STAGE I
%liner search PR
PR_xU = 0.9;
PR_xL = 0.65;
Tol = 5e-3;
Num_iter = 200;
count=0;
ea_old=0;

```

```

while (1)
count=count+1;
d=(((sqrt(5)-1)/2)*(PR_xU-PR_xL));
x1=PR_xL+d;
x2=PR_xU-d;
[W_turbine_11,BD_11]=Function_Det_DB(fluid,x1,N_disk,D02,P1,P3,Mdot,X1,✓
v1,RPM,RP,z);
[W_turbine_12,BD_12]=Function_Det_DB(fluid,x2,N_disk,D02,P1,P3,Mdot,X1,✓
v1,RPM,RP,z);
f1 = -W_turbine_11;
f2 = -W_turbine_12;
ea = abs(x1-x2)/x1;
FF_CHECK = abs(ea_old-ea)/ea;
    if(ea <= Tol) || count >= Num_iter || FF_CHECK == 0
        [W_turbine_1(i,k),Eta_tos_turbine_1(i,k),X_des_tur_1(i,k),✓
Eta_II_turbine_1(i,k),v3_1(i,k),X3_1(i,k),h3_1(i,k),D3_1,rpml,Aera(i,k),✓
W_DL(i,k),X_DL(i,k),expansion(i,k),v2(i,k)] ✓
=OMFS_Tesla_Function_VR3_GiveRPM_Ref_Newnozzle_v3(fluid,x1,BD_11,✓
N_disk,D02,P1,P3,Mdot,X1,v1,RPM,RP,z)
        PR(i,k) = x1
        BD(i,k) = BD_11
        RPM_recheck(i,k)= rpml
        D03(i,k) = D3_1
        break;
    else
        if(f1 > f2)
            PR_xU=x1;
        elseif(f1 < f2)
            PR_xL=x2;
        end
        ea_old=ea;
    end
end

end
end

function [W_turbine,x1]=Function_Det_DB(fluid,PR,N_disk,D02,P2,P3,Mdot,✓
X3,v3,RPM,RP,z)
Tol = 5e-3;
Num_iter = 200;
count=0;

```

```

BD_xU = 25e-4;
BD_xL = 10e-4;

while (1)
    count=count+1;
    d= ((sqrt(5)-1)/2)*(BD_xU-BD_xL));
    x1=BD_xL+d;
    x2=BD_xU-d;

    f1=-OMFS_Tesla_Function_VR3_GiveRPM_Ref_Newnozzle_v3(fluid,PR,x1,
    N_disk,D02,P2,P3,Mdot,X3,v3,RPM,RP,z);
    f2=-OMFS_Tesla_Function_VR3_GiveRPM_Ref_Newnozzle_v3(fluid,PR,x2,
    N_disk,D02,P2,P3,Mdot,X3,v3,RPM,RP,z);
    ea = abs(x1-x2)/x1;
    if(ea <= Tol) || count >= Num_iter
        W_turbine=-f1;
        break;
    else
        if(f1 > f2)
            BD_xU = x1;
        elseif(f1 < f2)
            BD_xL = x2;
        end
        ea_old = ea;
    end
end
end

function [W_turbine,Eta_tos_turbine,X_des_tur,Eta_II_turbine,v3,X3,h3,
D3,rpm,Aera,W_DL,X_DL,expansion,v2]
=OMFS_Tesla_Function_VR3_GiveRPM_Ref_Newnozzle_v3(fluid,pressure_ratio,
BD,N_disk,D02,P1,P3,Mdot,X1,v1,RPM,RP,z)
%new viscosity model + Two phase

mdot      = Mdot/N_disk;
T1        = refp(fluid,'PQ',P1,X1,'T',RP,z);%c
h1        = refp(fluid,'PQ',P1,X1,'H',RP,z);
s1        = refp(fluid,'PQ',P1,X1,'s1',RP,z);
h01       = refp(fluid,'PQ',P1,X1,'h',RP,z)+0.5*v1^2;
rho1      = refp(fluid,'PQ',P1,X1,'d',RP,z);

```

```

h1fg      = refp(fluid, 'PQ', P1, 1, 'h', RP, z) - refp(fluid, 'PQ', P1, 0, 'h',
RP, z);
h1f       = refp(fluid, 'PQ', P1, 0, 'h', RP, z);
X1s       = (h1 - h1f) / h1fg;
mul_g_1   = refp(fluid, 'PQ', P1, 1, 'vis', RP, z);
mul_g_0   = refp(fluid, 'PQ', P1, 0, 'vis', RP, z);
mul       = mul_g_1 * X1s + (1 - X1s) * mul_g_0;

P2        = P1 - (P1 - P3) * pressure_ratio;
R02R03    = 0.0005;
h01       = h1 + 0.5 * v1^2;
s2s       = s1;
h02s      = h01;
h2s       = refp(fluid, 'PS', P2, s2s, 'h', RP, z);
v2        = 0.9 * sqrt(2 * (h02s - h2s));

h2        = h01 - 0.5 * v2^2;
h02       = h01 - sqrt(2 * (h02s - h2s));
s2        = refp(fluid, 'Ph', P2, h2, 's', RP, z);
T2        = refp(fluid, 'PH', P2, h2, 'T', RP, z);

h2fg      = refp(fluid, 'PQ', P2, 1, 'h', RP, z) - refp(fluid, 'PQ', P2, 0, 'h',
RP, z);
h2f       = refp(fluid, 'PQ', P2, 0, 'h', RP, z);
X2s       = (h2 - h2f) / h2fg;

if X2s < 1
mu2_g_1   = refp(fluid, 'PQ', P2, 1, 'vis', RP, z);
mu2_g_0   = refp(fluid, 'PQ', P2, 0, 'vis', RP, z);
mu2       = mu2_g_1 * X2s + (1 - X2s) * mu2_g_0;
rho2      = refp(fluid, 'Ph', P2, h2, 'd', RP, z);
else
mu2       = refp(fluid, 'PT', P2, T2, 'vis', RP, z);
rho2      = refp(fluid, 'PT', P2, T2, 'd', RP, z);
end

%=====Rotor calculations=====
aplpla2   = 87.5;
mc        = mdot;
T(1)     = T2;

```

```

p(1)      = P2;
b         = D02*BD;
R02       = D02/2;
R03       = R02*R02R03;

mu(1)     = mu2;
pho(1)    = rho2;
X(1)      = X2s;
r         = linspace(R02,R03,1000);
vr(1)     = mc/(2*pi*r(1)*b*pho(1)); %Radial velocity, v_r (m/s)
vt(1)     = v2*sind(aplpla2);
vt(1)     = (v2^2-vr(1)^2)^.5;

omega_otp = 0.9*vt(1)/R02;
rpm_otp   = omega_otp*60/(2*pi);
rpm       = RPM;
omega     = 2*pi*RPM/60;

ut(1)     = omega*r(1);
wt(1)     = vt(1)-ut(1);
v(1)     = sqrt(vt(1).^2+vr(1).^2);
w(1)     = sqrt(wt(1).^2+vr(1).^2);
h(1)     = h2;
h0(1)    = h02;
%Rothalpy method 1
I2       = h02-ut(1)*vt(1); %Rothalpy constant
%Rothalpy method 2
p0(1)    = p(1)/pho(1);
delr     = r(2)-r(1);
del_h_isen = 0;
R(1)     = r(1);
for i = 2 : length(r)
    %two phase check
    R(i)   = r(i);
    %Churchill correlation
    Dh = 2*b;
    Re= (mc/(pi*r(i)*mu(1-1))); %Manfrida
    AA = ((7/Re)^0.9);
    AB = 0.27*((0.05*10^-3)/Dh); %stainless (0.050mm)
    A = (2.457*log(1/((AA+AB))))^16;

```

```

B = (37530/Re)^16;
f_TP= 2*((8/Re)^12)+(1/((A+B)^1.5))^ (1/12);
R(i) = r(i);
%Radial velocity, v_r (m/s)
vr(i) = mc/(2*pi*r(i)*b*pho(i-1));
%Tangential velocity, v_t (m/s)
ut(i) = omega*r(i);
dvt_A = -2*(f_TP/Dh)*((vt(i-1)-(ut(i-1)))/(-vr(i-1)));%need to change
the direction of vr
dvt_B_A = (vt(i-1)-(ut(i-1)))^2;
dvt_B_B = (-vr(i-1))^2;%need to change the direction of vr
dvt_B = sqrt(dvt_B_A+dvt_B_B);
dvt_C = vt(i-1)/r(i-1);
dvt = dvt_A*dvt_B-dvt_C;
vt(i) = delr*dvt+vt(i-1);
wt(i) = vt(i)-ut(i);
v(i) = sqrt(vt(i).^2+vr(i).^2);
w(i) = sqrt(wt(i).^2+vr(i).^2);
%Static pressure, p (Pa)
dp_A = (pho(i-1)*vt(i-1)^2)/(r(i-1));
dp_B = (pho(i-1)*vr(i-1)^2)/(r(i-1));
dp_C = (2*pho(i-1)*f_TP/Dh)*dvt_B*(vr(i));%need to change the
direction of vr
dp = dp_A+dp_B+dp_C;

%==Properties calculation==
p(i) = dp*delr+p(i-1);

%Static enthalpy, h (kJ/kg)
h0(i) = I2+ut(i)*vt(i);
h(i) = h0(i)-0.5*v(i)^2;
%Static Temperature, T (K)
T(i) = refp(fluid,'Ph',p(i),h(i),'t',RP,z);
%T0(i) = refp(fluid,'Ph',p0(i),h0(i),'t',RP,z);

hfg = refp(fluid,'PQ',p(i),1,'h',RP,z)-refp(fluid,'PQ',p(i),
0,'h',RP,z);
hf = refp(fluid,'PQ',p(i),0,'h',RP,z);
X(i) = (h(i)-hf)/hfg;
if X(i) <= 1

```

```

mu_g_0      = refp(fluid, 'PQ', p(i), 0, 'vis', RP, z);
mu(i)       = mu_g_1*X(i)+(1-X(i))*mu_g_0;
pho(i)      = refp(fluid, 'PQ', p(i), X(i), 'd', RP, z);
else
mu(i)       = refp(fluid, 'PT', p(i), T(i), 'vis', RP, z);
pho(i)      = refp(fluid, 'PT', p(i), T(i), 'd', RP, z);
end

v3          = v(i);
D3          = r(i)*2;
if p(i) <= P3

    break
end
end
hfg         = refp(fluid, 'PQ', p(i), 1, 'h', RP, z)-refp(fluid, 'PQ', p(i), 0, 'h', RP, z);
hf          = refp(fluid, 'PQ', p(i), 0, 'h', RP, z);
X3          = (h(i)-hf)/hfg;

%velocity calculation
wt_b_U0     = wt./ut(1);
alpha_in    = atand(vt(1)/vr(1));
alpha_out   = atand(vt(i)/vr(i));
beta_in     = atand(wt(1)/vr(1));
beta_out    = atand(wt(i)/vr(i));

h3          = h(i);
h03         = h0(i);
h3ss        = refp(fluid, 'PS', p(i), s1, 'h', RP, z);
h03ss       = h3ss+0.5*v(i)^2;
W_turbine   = N_disk*mc*(vt(1)*ut(1)-vt(i)*ut(i));
W_turbine_H = N_disk*mc*(h02-h03);
W_isen      = N_disk*mc*(h01-h3ss);
Eta_tos_turbine = (vt(1)*ut(1)-vt(i)*ut(i))/(h01-h3ss);
Eta_tot_turbine = (vt(1)*ut(1)-vt(i)*ut(i))/(h01-h03ss);
P3_out      = p(i);
R03_out     = r(i);
Aera        = 2*(N_disk-1)*(pi*R02^2)-(pi*r(i)^2); %Exergy
destruction
T_surr      = 25+275.15;

```


```

P_surr          = 101.325e3;
s3              = refp(fluid, 'PH', p(i), h03, 's', RP, z);
s_surr         = PropsSI('S', 'T', T_surr, 'P', P_surr, fluid);
h_surr         = PropsSI('H', 'T', T_surr, 'P', P_surr, fluid);
x01            = (h1-h_surr)-T_surr*(s1-s_surr)+0.5*v1^2;
x03            = (h3-h_surr)-T_surr*(s3-s_surr)+0.5*v(i)^2;
X_des_tur      = N_disk*mc*(x01-x03)-W_turbine;
Eta_II_turbine = W_turbine/(N_disk*mc*(x01));
W_DL           = (vt(1)-ut(1))/ut(1);
X_DL           = (2*b*mc)/(pi*mu(i)*R02^2);
expansion      = rho1/pho(i);

if W_turbine < 0
elseif W_turbine > 0
else
    W_turbine=0
end
end
end

```



The logo of Sakon Nakhon Rajabhat University is a large, faint watermark in the background. It features a central figure of a person standing on a pedestal, surrounded by a circular emblem with a crown-like top and a base of red and orange segments. The text "มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี" is written in a semi-circle below the emblem.

ภาคผนวก ง
ผลของขนาดที่เหมาะสมของเทสลาเทอร์ไบน์สำหรับสารทำงานทดแทน
R245fa บริสุทธิ์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

จากผลการประเมินการหาสารสารทำงานทดแทน R245fa บริสุทธิ์ในโรงไฟฟ้าวัฏจักรที่แอลซีที่ใช้เตสลาเทอร์ไบน์ โดยผลของขนาดและการทำงานที่เหมาะสมของเตสลาเทอร์ไบน์แสดงดังตารางที่ ง.1

ตารางที่ ง.1 ผลของขนาดและการทำงานที่เหมาะสมของเตสลาเทอร์ไบน์ของสารทำงานแต่ละชนิด

| สารทำงาน | อัตราส่วนโดยมวล | D_5 | PR | ความเร็ว |
|------------------------|------------------------------|--------|------|----------|
| | | (mm) | | (RPM) |
| R1233zd(E)/R1336mzz(Z) | 0.00/1.00* | 116.72 | 0.84 | 3,000 |
| | 0.25/0.75 | 106.68 | 0.84 | 3,000 |
| | 0.50/0.50 | 102.66 | 0.84 | 3,000 |
| | 0.75/0.25 | 104.67 | 0.84 | 3,000 |
| | 1.00/0.00** | 80.56 | 0.75 | 3,500 |
| R1233zd(E)/R1234ze(E) | 0.00/1.00*** | 100.65 | 0.71 | 4,500 |
| | 0.25/0.75 | 98.64 | 0.75 | 4,500 |
| | 0.50/0.50 | 122.75 | 0.75 | 4,500 |
| | 0.75/0.25 | 86.59 | 0.75 | 4,000 |
| | 1.00/0.00** | 80.56 | 0.75 | 3,500 |
| R1336mzz(Z)/R1234ze(E) | 0.00/1.00*** | 100.65 | 0.71 | 4,500 |
| | 0.25/0.75 | 66.50 | 0.75 | 4,500 |
| | 0.50/0.50 | 86.59 | 0.75 | 4,000 |
| | 0.75/0.25 | 86.59 | 0.75 | 3,500 |
| | 1.00/0.00* | 116.72 | 0.84 | 3,000 |
| R245fa บริสุทธิ์ | | 104.00 | 0.75 | 4,000 |
| หมายเหตุ | * คือ R1336mzz(Z) บริสุทธิ์ | | | |
| | ** คือ R1336mzz(Z) บริสุทธิ์ | | | |
| | *** คือ R1234ze(E) บริสุทธิ์ | | | |

โดยขนาดที่และการทำงานของเตสลาเทอร์ไบน์ที่เหมาะสมขึ้นอยู่กับคุณสมบัติและความเป็นไอของสารทำงานก่อนเข้าเตสลาเทอร์ไบน์ส่งผลให้แต่ละสารทำงานมีค่าแตกต่างกันออกไป โดยที่มาของค่าที่เหมาะสมได้ทำการอภิปรายและวิเคราะห์ไว้ในบทที่ 4 และ 5

ภาคผนวก จ
ผลของขนาดที่เหมาะสมของเทสลาเทอร์ไบน์สำหรับโรงของโรงไฟฟ้า
แต่ละวัฏจักร

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

จากผลการประเมินการหาเปรียบเทียบโรงไฟฟ้าวัฏจักรต่าง ๆ ที่ใช้เทสลาเทอร์ไบน์ โดยผลของขนาดและการทำงานที่เหมาะสมของเทสลาเทอร์ไบน์แสดงดังตารางที่ ข.1

ตารางที่ จ.1 ผลของขนาดและการทำงานที่เหมาะสมของเทสลาเทอร์ไบน์ของโรงไฟฟ้าแต่ละวัฏจักร

| วัฏจักร | | KCS-11 | Mod. KCS-11 | ที่แอลซี | |
|----------|-------|--------------------------|-------------|----------|--------------------------------------|
| ตัวแปร | หน่วย | สารทำงาน | | | |
| | | ammonia/water 0.9/0.1 | | R236ea | R1336mzz(Z)/ R1234ze(E) 0.25/0.75 |
| ω | RPM | 14,500 | 10,000 | 3,600 | 4,500 |
| PR | - | 0.55 | 0.62 | 0.80 | 0.76 |
| D_5 | mm | 84 | 55 | 94 | 80 |

โดยขนาดที่และการทำงานของเทสลาเทอร์ไบน์ที่เหมาะสมขึ้นอยู่กับคุณสมบัติและความเป็นไอของสารทำงานก่อนเข้าเทสลาเทอร์ไบน์ส่งผลให้แต่ละสารทำงานมีค่าแตกต่างกันออกไป โดยที่มาของค่าที่เหมาะสมได้ทำการอภิปรายและวิเคราะห์ไว้ในบทที่ 4 และ 5



ประวัติผู้เขียน

นาย ชงชัย คชวงค์ (นามสกุลเดิม เทียมทัต) เกิดเมื่อวันที่ 1 กรกฎาคม พ.ศ. 2538 บ้านเกิดอยู่ที่ จังหวัดประจวบคีรีขันธ์ อำเภอหัวหิน สำเร็จการศึกษาระดับประถมศึกษาที่โรงเรียนมัธยมสาธิตการวิทยา ระดับมัธยมศึกษาที่โรงเรียนหัวหินวิทยาลัย ณ จังหวัดประจวบคีรีขันธ์ และระดับปริญญาตรีจากสาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล (หลักสูตรวิศวกรรมเครื่องกล) โดยมี ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อาทิตย์ คุณศรีสุข และภายหลังเป็น อาจารย์ ดร. พิจิตรา เอื้องไพโรจน์ เป็นอาจารย์ที่ปรึกษาสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี พ.ศ. 2560 (เกียรตินิยมอันดับ 1) และสำเร็จการศึกษาต่อระดับบัณฑิตศึกษาที่มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในสาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล และระบบกระบวนการ (วิศวกรรมเครื่องกล) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี โดยรับทุนกิตติบัณฑิต ปี พ.ศ. 63 โดยมี ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อาทิตย์ คุณศรีสุข อาจารย์ เป็นอาจารย์ที่ปรึกษา และได้เข้าศึกษาต่อระดับดุษฎีบัณฑิต ในสาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกลและระบบกระบวนการ (วิศวกรรมเครื่องกล) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อีกทั้งได้มีโอกาสเป็นผู้ช่วยสอนวิชาปฏิบัติการรายวิชา โดยในระหว่างศึกษาได้เป็นผู้ช่วยวิจัยทั้ง โดยมี ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อาทิตย์ คุณศรีสุข อาจารย์ เป็นอาจารย์ที่ปรึกษา หมวด 2 ทุน ได้แก่ “ศักยภาพการประหยัดพลังงานของระบบปรับอากาศแบบไฮบริด ระหว่างระบบทำความเย็นแบบน้ำระเหยกับระบบอัดไอเพื่อร้านสะดวกซื้อในประเทศไทย” และ “การพัฒนากระบวนการอบแห้งกัญชงที่ใช้พลังงานได้อย่างมีประสิทธิภาพและสมาร์ท” นอกจากนี้ได้นำเสนองานวิจัยทั้งหมด 6 การประชุม และในระหว่างการศึกษาได้มีการตีพิมพ์วารสารทางวิชาการระดับนานาชาติ 2 ฉบับ