

บทที่ 3

วิธีการดำเนินการวิจัย

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

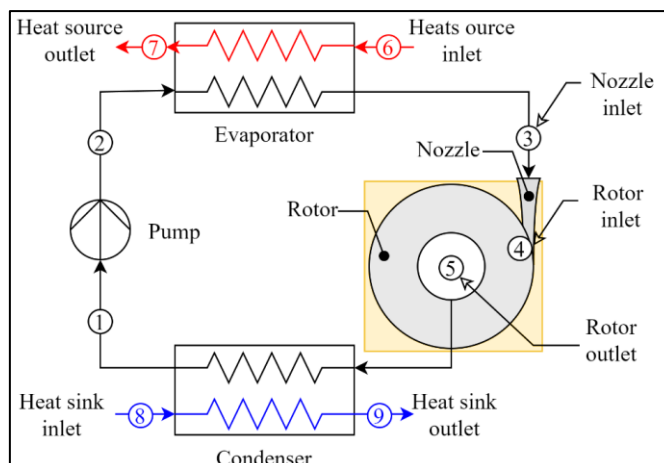
3.1 การจำลองของโรงไฟฟ้าวัฏจักรโออาร์ซีเพื่อหาเงื่อนไขการทำงานที่ให้กำลังสุทธิสูงสุด

ในหัวข้อนี้ได้นำเสนอรายละเอียดการจำลองของโรงไฟฟ้าวัฏจักรโออาร์ซีที่ใช้เตสลาเทอร์ไบน์ โดยประกอบไปด้วยการอธิบายองค์ประกอบของโรงไฟฟ้า แบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ การจำลองโรงไฟฟ้า และการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

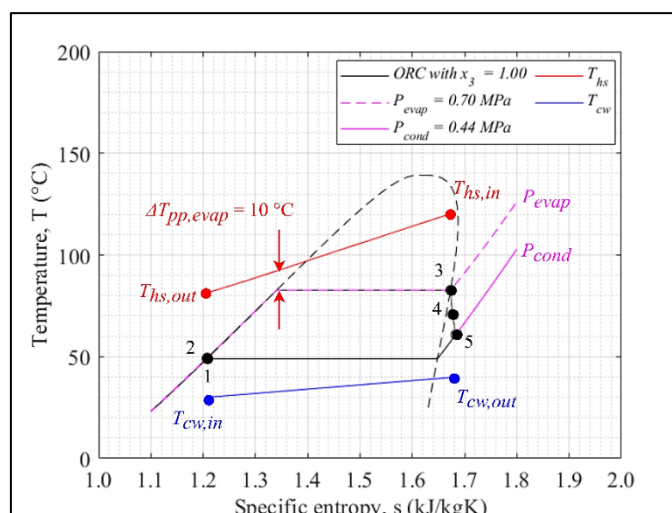
3.1.1 โรงไฟฟ้าวัฏจักรโออาร์ซีที่ใช้เตสลาเทอร์ไบน์และแบบจำลองของโรงไฟฟ้าวัฏจักรโออาร์ซี

องค์ประกอบของอุปกรณ์ภายในโรงไฟโรงไฟฟ้าวัฏจักรโออาร์ซีที่ใช้เตสลาเทอร์ไบน์ที่ใช้ในการศึกษานี้แสดงดังรูปที่ 3.1 และ ผังอุณหภูมิและเอนโทรปีจำเพาะของโรงไฟฟ้าแสดงดังรูปที่

3.2



รูปที่ 3.1 ผังอุปกรณ์ของโรงไฟฟ้าวัฏจักรโออาร์ซีที่ใช้เฟสเหลวไบนารี



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 เพื่อหาเงื่อนไขการทำงานที่ทำให้กำลังสุทธิสูงก่อนจำลองเตสลาเทอร์ไบน์ โดยกำลังที่เทอร์ไบน์สามารถผลิตได้แสดงดังต่อไปนี้

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

4) กระบวนการ 5-1: สารทำงานกลั่นตัวในคอนเดนเซอร์

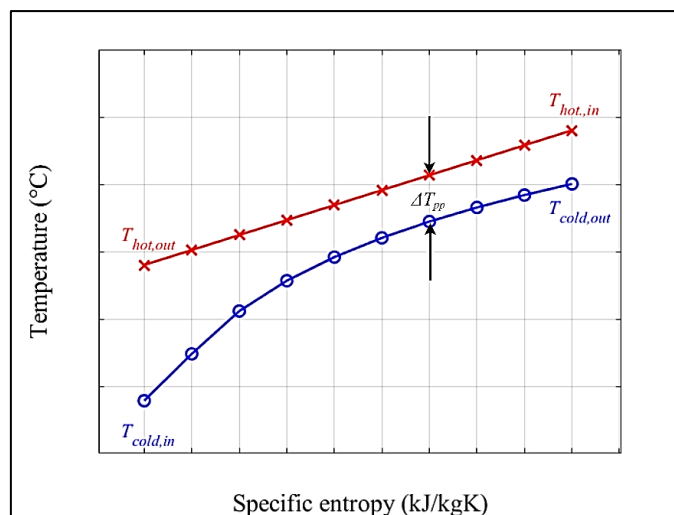
ในกระบวนการนี้ สารทำงานได้ถ่ายเทความร้อนออกไปที่น้ำหล่อเย็นและกลั่นตัวที่กลั่นตัวในคอนเดนเซอร์และกลับไปเข้าปั๊ม โดยอัตราการถ่ายเทความร้อนสามารถคำนวณได้ดังนี้

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

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

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

ความแตกต่างระหว่าง สารกระแสร้อนและสารกระแสเย็นภายในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน 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

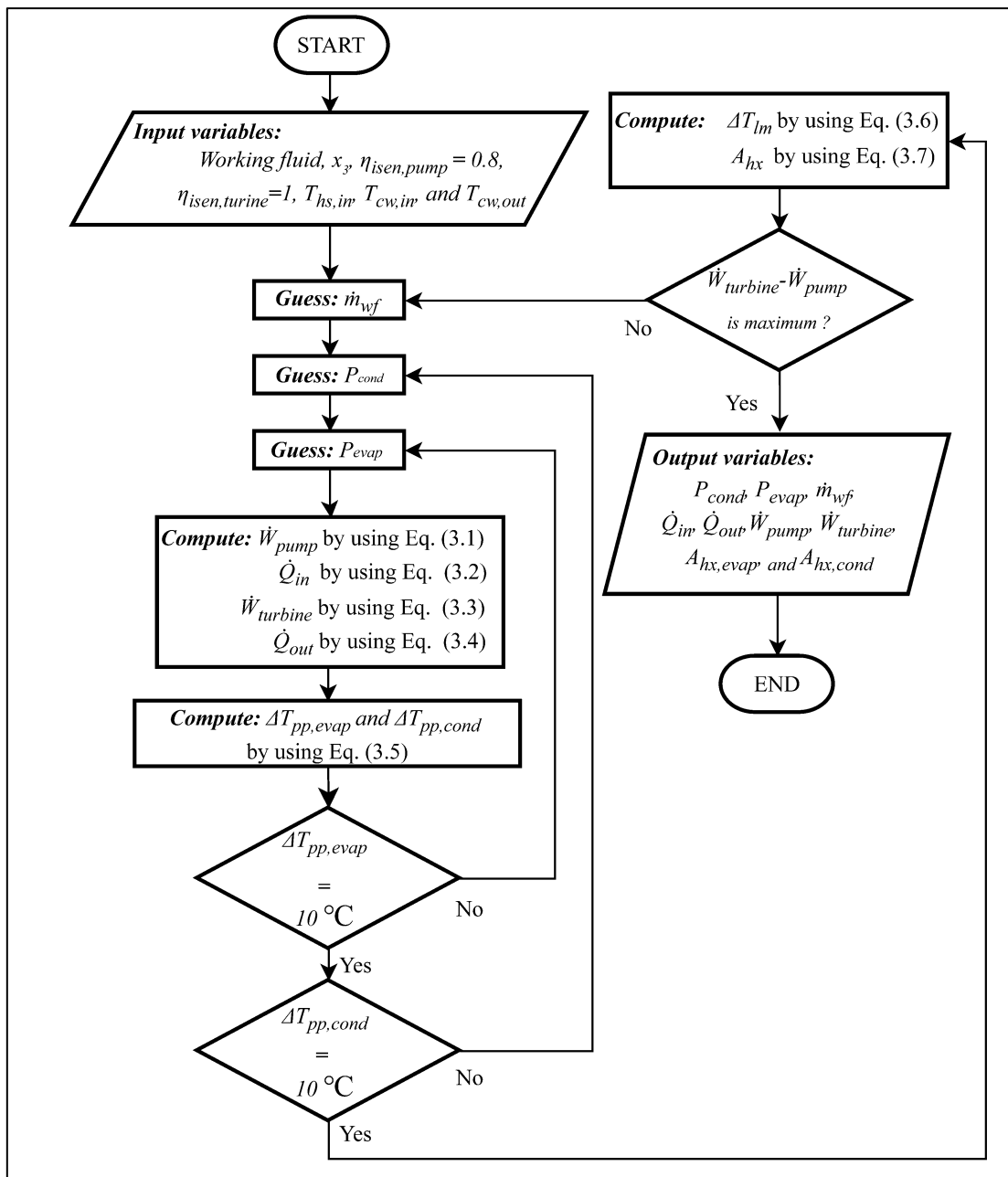
$$\Delta T_{lm} = \frac{(T_{hot,in} - T_{cold,out}) - (T_{hot,out} - T_{cold,in})}{\ln \left[\frac{T_{hot,in} - T_{cold,out}}{T_{hot,out} - T_{cold,in}} \right]} \quad (3.6)$$

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

โดยค่า Overall heat transfer coefficient (U) กำหนดให้ 0.638 kW/m²K [(Júnior et al., 2019), (Júnior et al., 2021)] ซึ่งเป็นการกำหนดของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนในโรงไฟฟ้าวัฏจักรโออาร์ซีเมื่อมองว่าเป็นแบบ Counter flow single passes

3.1.2 การจำลองโรงไฟฟ้าวัฏจักรโออาร์ซี

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 โดยกระบวนการนี้เป็นการกำหนดอัตราการไหลเชิงมวลของสารทำงานภายในโรงไฟฟ้าวัฏจักรโออาร์ซีเพื่อให้ได้กำลังสุทธิของโรงไฟฟ้าสูงสุด

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: ตรวจสอบว่ากำลังสุทธิของโรงไฟฟ้าสูงสุดหรือไม่ถ้ายังให้วนซ้ำที่กระบวนการที่ 2 จนกว่าจะได้กำลังสุทธิสูงสุด

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 ผลการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองกับงานวิจัยของ Fischer (2011)

ตัวแปร	Fischer (2011)	วิทยานิพนธ์ ฉบับนี้	ความผิดพลาด (%)	หน่วย
ป้อนเข้า				
สารทำงาน	ไซโคลเพนเทน			-
ประสิทธิภาพไอเซนโทรปิกของปั๊ม	65			%
ประสิทธิภาพไอเซนโทรปิกของเทอร์ไบน์	85			%
ความเป็นไอของสารทำงานที่ทางออก คอนเดนเซอร์	ของเหลวอิ่มตัว			-
ความเป็นไอของสารทำงานที่ทางออกอีวา โปเรเตอร์	ไออิ่มตัว			-
ความดันที่อีวาโปเรเตอร์	3.342			MPa
ความดันที่คอนเดนเซอร์	0.288			MPa
อุณหภูมิแหล่งความร้อนเข้า	280			°C
อุณหภูมิน้ำหล่อเย็นทางเข้า	62			°C
ผลลัพธ์				
อุณหภูมิสารทำงานที่ออกจากที่อีวาโปเร เตอร์	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

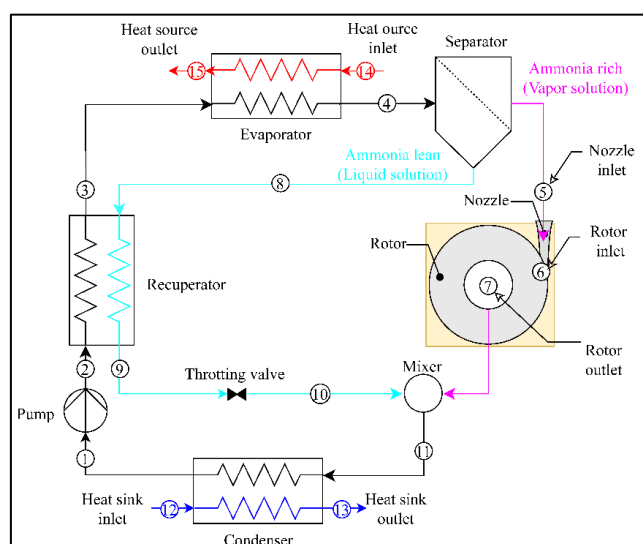
หลังจากที่ได้ทำการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองของโรงไฟฟ้าวัฏจักรโออาร์ซีแล้ว และเมื่อจำลองจนได้เงื่อนไขที่เหมาะสมเพื่อให้ได้กำลังสุทธิสูงสุด คือ ความดันที่คอนเดนเซอร์ ความดันที่อีวาโปเรเตอร์ และอัตราการไหลของสารทำงาน ซึ่งจะนำไปใช้ในการออกแบบสำหรับการจำลองเทสลาเทอร์ไบน์โดยมีรายละเอียดตามหัวข้อ 3.3

3.2 การจำลองโรงไฟฟ้าวัฏจักรคาลินาแบบ KCS-11

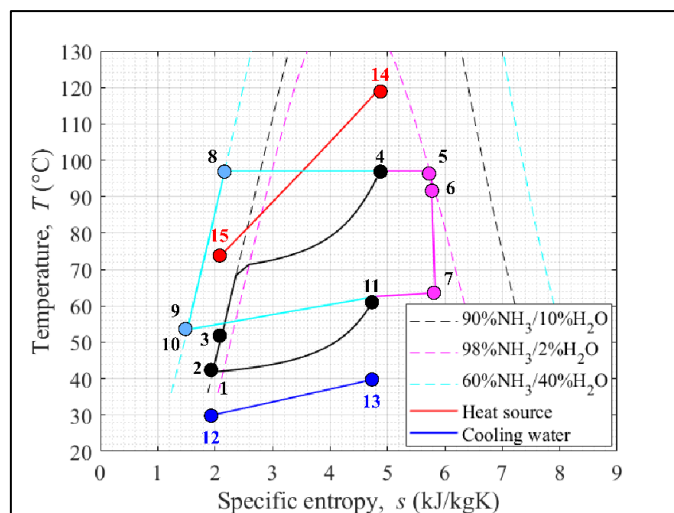
อีกหนึ่งโรงไฟฟ้าที่เป็นที่นิยมใช้กับแหล่งความร้อนอุณหภูมิต่ำ คือโรงไฟฟ้าวัฏจักรคาลินา ซึ่งคิดค้นโดย Kalina (1984) อย่างไรก็ตามวัฏจักรคาลินามีการจัดเรียงหลายรูปแบบ โดยชนิดการจัดเรียงที่สนใจศึกษาในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้คือแบบ KCS-11 เนื่องจาก มีความซับซ้อนน้อยกว่าแบบการจัดเรียงแบบอื่นและขนาดของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนน้อยกว่า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

3.2.1 โรงไฟฟ้าวัฏจักรคาลินาชนิด KCS-11 ที่ใช้เทสลาเทอร์ไบน์และแบบจำลองของโรงไฟฟ้าวัฏจักรคาลินาชนิด 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 นั้นมีการเพิ่มเซพারেเตอร์ (separator) ที่ใช้แยกสารทำงานที่เป็นของเหลวและสารทำงานที่เป็นไอออกจากกันหลังจากออกจากอีวาโปเรเตอร์ (จุดที่ 4) เพื่อให้สารทำงานที่เป็นไอเข้าเทอร์ไบน์ และมีการเพิ่มรีคูเปอเรเตอร์ (recuperator) เพื่อใช้สำหรับนำพลังงานความร้อนจากสารที่เป็นของเหลว (จุดที่ 8) ที่ยังมีอุณหภูมิสูงอยู่มาอุ่นสารทำงานก่อนเข้าอีวาโปเรเตอร์ (จุดที่ 2) ทั้งนี้แบบจำลองที่ใช้สำหรับโรงไฟฟ้าวัฏจักรคาลินาแบบ KCS-11 เป็นแบบจำลองทางเทอร์โมไดนามิกส์ โดยรายละเอียดของแต่ละกระบวนการและแบบจำลองมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1) กระบวนการ 1-2: สารทำงานถูกอัดโดยปั๊ม

ในกระบวนการนี้สารทำงานถูกเพิ่มแรงดันโดยใช้ปั๊มจากทางออกของคอนเดนเซอร์ไปยังทางเข้ารีคูเปอเรเตอร์โดยกำลังที่ปั๊มใช้สามารถคำนวณได้ดังนี้

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

โดยกำหนดประสิทธิภาพไอเซนโทรปิกของปั๊ม (η_{pump}) เท่ากับ 80%

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

ในกระบวนการนี้สารทำงานได้แลกเปลี่ยนความร้อนภายในวัฏจักร 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 ของรีคูเปอร์เตอร์ (ε_{rec}) มีค่าเท่ากับ 80 % จากนั้นสามารถคำนวณอุณหภูมิของสารทำงานที่ออกจากรีคูเปอร์เตอร์ (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: สารทำงานรับพลังงานความร้อนที่อีวาโปเรเตอร์

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: สารทำงานถูกแยกตามสถานะของสารทำงานในเซพพาเรเตอร์

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

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

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

5) กระบวนการ 5-7: สารทำงานขยายตัวในเทอร์โบ

ในกระบวนการนี้ สารทำงานขยายตัวภายในเทอร์โบและเปลี่ยนกำลังเป็นกำลังกล ในการจำลอง เบื้องต้นได้กำหนดประสิทธิภาพไอเซนโทรปิกของเทอร์โบ เพื่อหาเงื่อนไข

การทำงานที่ให้กำลังสุทธิสูงก่อนจำลองเตาเผาเทอร์ไบน์ 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) และสารที่มีความเข้มข้นของแอมโมเนียต่ำที่ออกจากรีคูปเรเตอร์ (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

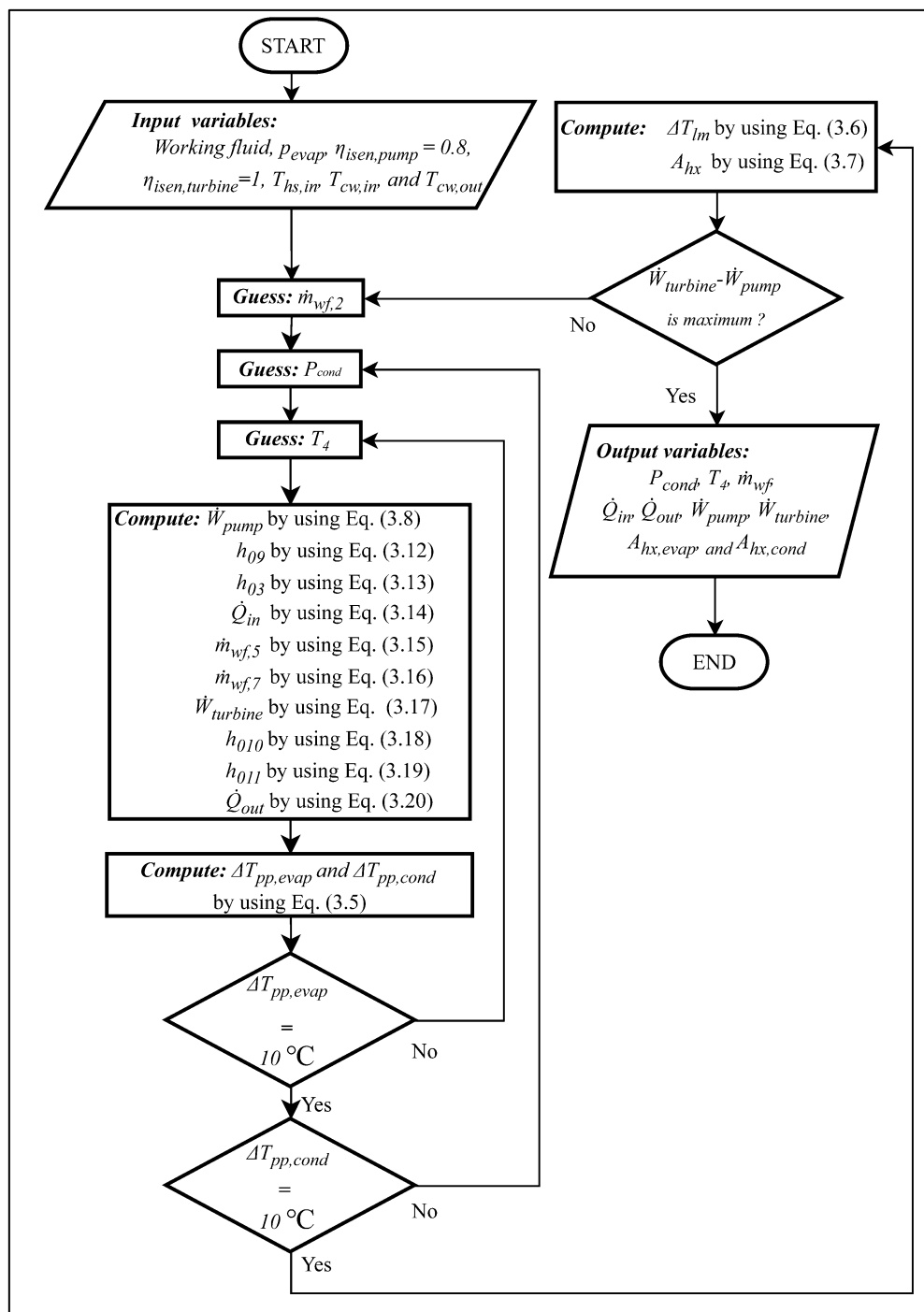
ในกระบวนการนี้ สารทำงานได้ถ่ายเทความร้อนออกไปที่น้ำหล่อเย็นและสารกลั่นตัวที่กลั่นตัวในคอนเดนเซอร์และกลับเข้าปั๊ม โดยอัตราการถ่ายเทความร้อนสามารถคำนวณได้ดังนี้

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

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: คำนวณหาค่าการถ่ายเทความร้อน 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	%

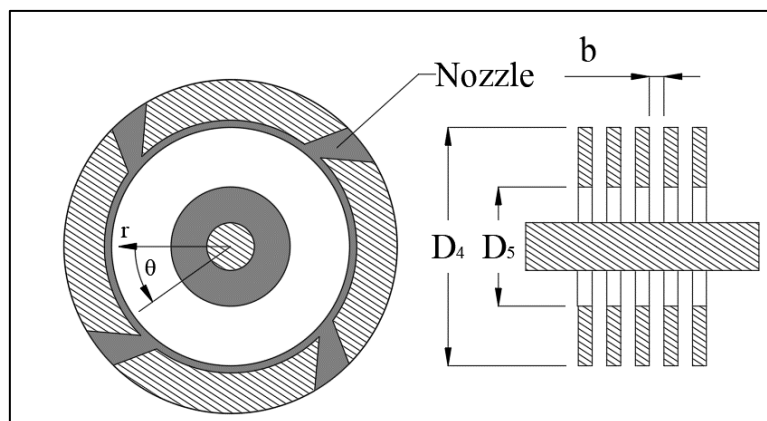
จากผลดังตารางที่ 3.2 พบว่าเมื่อตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองโรงไฟฟ้าวัฏจักรคาลินา (KCS-11) โดยนำไปเปรียบเทียบกับผลการวิจัยของ Hærvig et al. (2016) ค่าผิดพลาดสูงสุดอยู่ที่ 15.42% ซึ่งค่อนข้างสูงกว่าแบบจำลองโรงไฟฟ้าวัฏจักรโออาร์ซี ทั้งนี้อาจเป็นผลมาจากความซับซ้อนที่เพิ่มขึ้นของระบบ ทำให้ผลการจำลองมีความคลาดเคลื่อน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

3.3 การจำลองเทสลาเทอร์ไบน์

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

3.3.1 คำอธิบายและหลักการทำงานของเทสลาเทอร์ไบน์

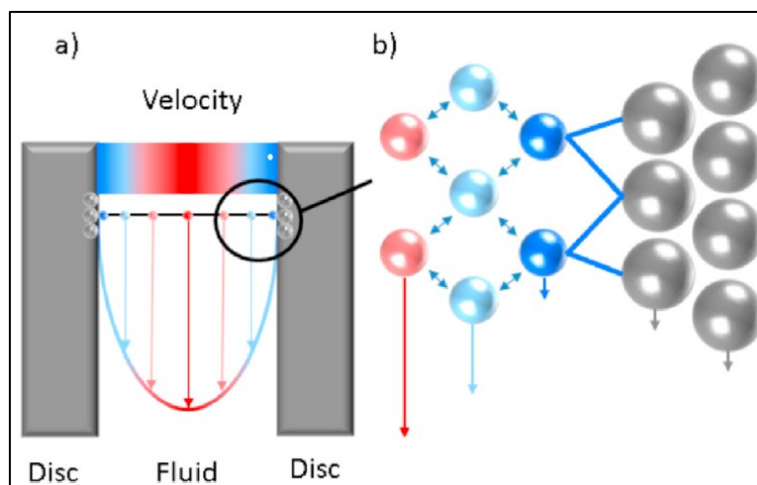
รายละเอียดขององค์ประกอบของเทสลาเทอร์ไบน์แสดงดังรูปที่ 3.8 องค์ประกอบหลักของ เทสลาเทอร์ไบน์แบ่งออกเป็นสองส่วนด้วยกัน ได้แก่ นอซเซิลและโรเตอร์ของเทสลาเทอร์ไบน์ โดยที่นอซเซิลมีหน้าที่ลดความดันและเพิ่มความเร็วของสารทำงานก่อนเข้าโรเตอร์ของเทสลาเทอร์ไบน์ ส่วนโรเตอร์ของเทสลาเทอร์ไบน์มีลักษณะเป็นแผ่นดิสก์ในโรเตอร์เรียงซ้อนกันโดยมีช่องระยะห่างระหว่างแผ่น (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) และพฤติกรรม การไหลของสารทำงานในช่องว่างระหว่างแผ่นดิสก์ในโรเตอร์ ดังแสดงในรูปที่ 3.9 เทสลาเทอร์ไบน์ ประกอบด้วยส่วนสำคัญสองส่วน ได้แก่ นอชเชลและโรเตอร์ของเทสลาเทอร์ไบน์ 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 สำหรับโรงไฟฟ้าวัฏจักรคาไลนา (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 โดยเราทราบความดันที่อีวาโปเรเตอร์ (P_3) ความดันที่คอนเดนเซอร์ (P_5) จากการจำลองโรงไฟฟ้าวัฏจักรโออาร์ซีเพื่อให้ได้กำลังสุทธิสูงสุดดังแสดงในหัวข้อที่ 3.1 และ 3.2 ซึ่งในการจำลองได้กำหนดค่า PR ทำให้ได้ค่าความดันที่สามารถลดลงได้ในนอชเชิลได้ โดยเลขบอกสถานะของสารทำงานจะอ้างอิงตามของโรงไฟฟ้าวัฏจักรโออาร์ซีดังรูปที่ 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

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

หลังจากได้ภาวะของสารทำงานก่อนเข้าโรเตอร์ของเทสลาเทอร์ไบน์แล้ว ซึ่งได้แก่ ความดันและความเร็วของสารทำงานรวมไปถึง Static enthalpy ของสารทำงานลำดับถัดไปเป็นการจำลองโรเตอร์ของเทสลาเทอร์ไบน์ โดยรายละเอียดแสดงดังหัวข้อที่ 3.3.2.2

3.3.2.2 การจำลองในส่วนของโรเตอร์ของเทสลาเทอร์ไบน์

แบบจำลองส่วนโรเตอร์ของเทสลาเทอร์ไบน์ของเทสลาเทอร์ไบน์ในงานวิจัยนี้อ้างอิงจากแบบจำลองของ Rice (1965), Carey (2010) และ Manfrida et al. (2019) อย่างไรก็ตาม แบบจำลองดังกล่าวจำลองการขยายตัวของสารทำงานในรูปแบบสถานะเดียว (Single-phase expansion) ขณะที่ในการทำงานจริงของเทสลาเทอร์ไบน์ 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 ในพิกัดทรงกระบอกสามารถทำให้เรียบง่ายขึ้นเป็นดังนี้

Continuity equations

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

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 พื้นผิวเปียกคือ 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

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

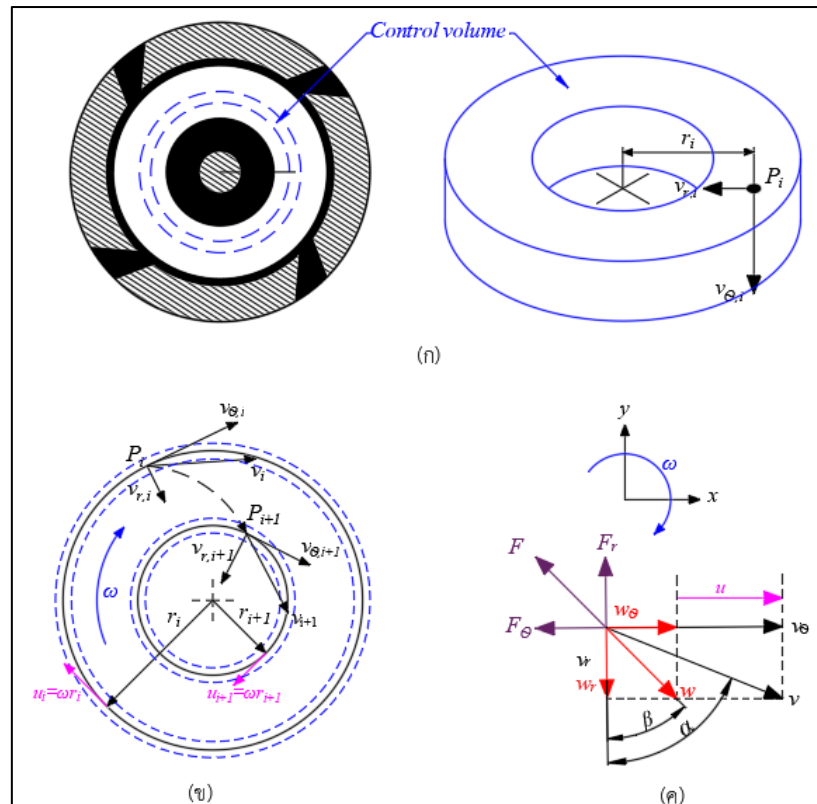
เมื่อ x คือความเป็นไอของสารทำงานของสารสองเฟส โดย μ_g และ μ_l เป็นค่าความหนืดพลวัต (Dynamic viscosity) ของสารทำงานที่มีสถานะเป็นไออิ่มตัวและของเหลวอิ่มตัวตามลำดับ

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

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

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

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 โดยที่เอนทาลปี (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 (I) เท่ากัน ดังนั้นเมื่อทราบค่าความเร็วสัมผัส (w) และ ความเร็วในแนวสัมผัสของแผ่นดิสก์ในโรเตอร์ (u_0) สามารถหาเอนทาลปีได้ ในขณะที่คุณสมบัติอื่น ๆ ของสารทำงานสามารถหาได้จากโปรแกรม REFPROP โดยให้เป็นฟังก์ชันของ เอนทาลปี และ ความดันของสารทำงาน

หลังจากจำลองเตสลาเทอร์โบโบ้ดังหัวข้อที่ 3.3.2.1 และ 3.3.2.2 จะได้คุณสมบัติของสารทำงาน ณ ทางเข้าและทางออกของเทอร์โบโบ้ ลำดับถัดไปได้นำมาคำนวณหาสมรรถนะของเตสลาเทอร์โบโบ้ในหัวข้อที่ 3.3.2.3

3.3.2.3 การคำนวณกำลังและประสิทธิภาพไอเซนโทรปิก

เมื่อจำลองเตสลาเทอร์โบโบ้แล้วเราทราบสถานะของสารทำงานที่ก่อนเข้าและหลังออกจากเทอร์โบโบ้ ซึ่งเราสามารถคำนวณกำลังที่ได้จากเทอร์โบโบ้และประสิทธิภาพไอเซนโทรปิกได้ดังสมการที่ 3.50 และ 3.51 ตามลำดับ

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

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

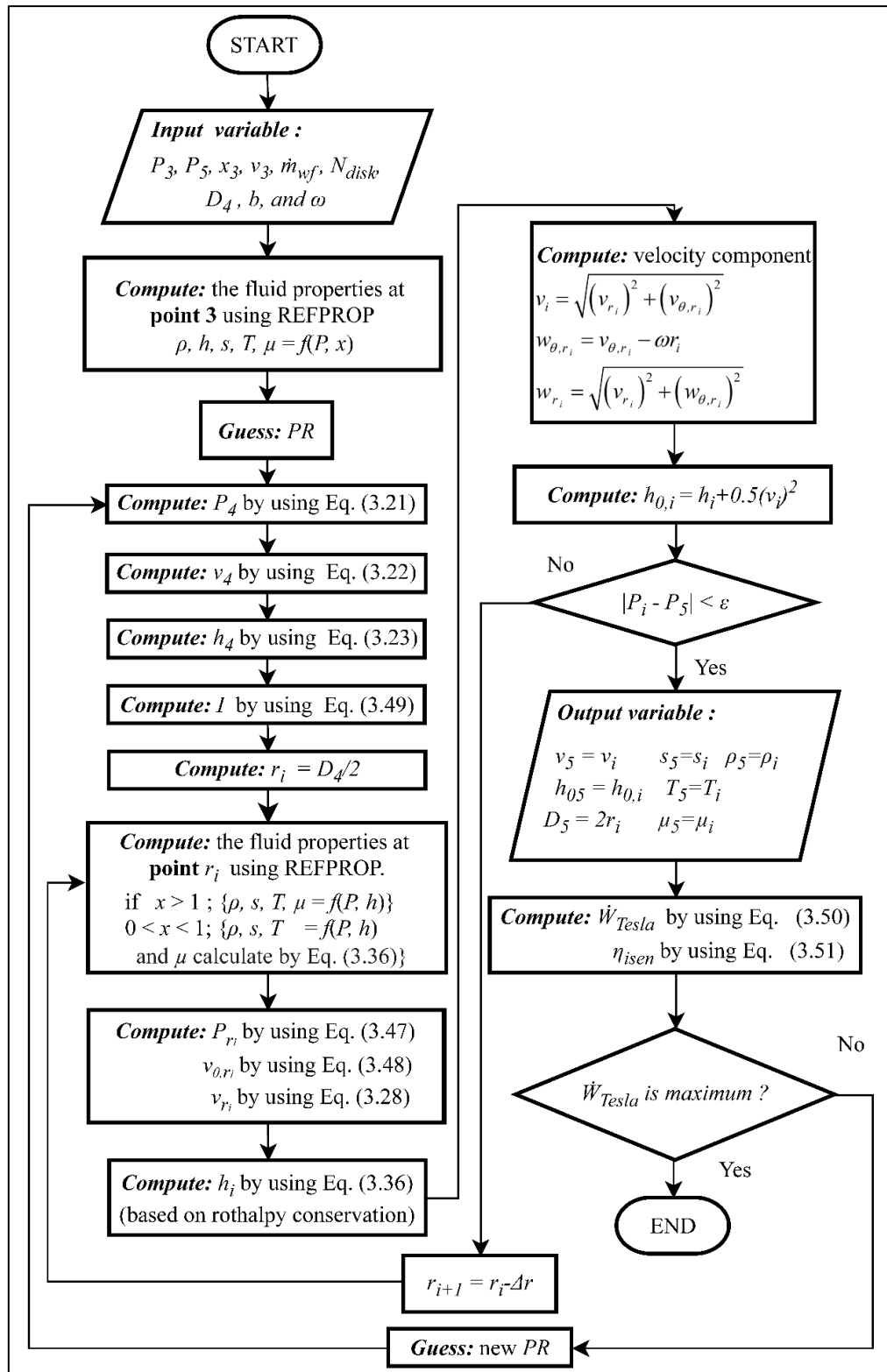
จากสมการที่ 3.50 เป็นสมการที่ใช้ในการคำนวณหา กำลังของเตสลาเทอร์โบโบ้ โดยหาจากกำลังผลต่างของ stagnation เอนทาลปีที่เข้าและออกจากเตสลาเทอร์โบ้แล้วคูณด้วยอัตราการเชิงมวลของสารทำงานที่เข้าเตสลาเทอร์โบ้ นอกจากนี้ ประสิทธิภาพไอเซนโทรปิกของเตสลาเทอร์โบ้ดังสมการที่ 3.51 คำนวณจากกำลังของเตสลาเทอร์โบ้ต่อกำลังของเตสลาเทอร์โบ้เมื่อเป็นกระบวนการไอเซนโทรปิก (เอนโทรปีของสารทำงานจุดที่ 3 ถึง 5 ไม่เปลี่ยนแปลง)

3.3.3 แนวทางการจำลองและการออกแบบเตสลาเทอร์โบโบ้

จากแบบจำลองในหัวข้อที่ 3.3.2 กระบวนการจำลองแสดงดังผังการจำลองดังรูปที่ 3.11 โดยที่นำเงื่อนไขการทำงานของโรงไฟฟ้าจากหัวข้อที่ 3.1 และ 3.2 ซึ่งประกอบไปด้วยความดันที่คอนเดนเซอร์ ความดันที่อีวาโปเรเตอร์ อัตราการไหลเชิงมวลของสารทำงาน และ และความเป็นไอของสารทำงานที่ก่อนเข้าเทอร์โบโบ้ นอกจากนี้ในแบบจำลองได้ใช้ขนาดของเทอร์โบโบ้และช่วงของการทำงานดังตารางที่ 3.3 โดยค่าเหล่านี้ถูกหาค่าที่เหมาะสมเพื่อให้ได้กำลังจากเทอร์โบโบ้สูงที่สุดภายใต้สภาวะการทำงานจริง

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

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

กระบวนการการจำลองดังผังการจำลองที่ 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 เพื่อให้มั่นใจว่าตรงกับเงื่อนไขการทำงานของโรงไฟฟ้าวัฏจักรโออาร์ซีหรือคาลินา
- 3) ถ้า P_i มีค่าไม่เท่ากันกับ P_5 เราทำการขยับ 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 สามารถนำมาสร้างผังอุณหภูมิและเอนโทรปีจำเพาะของโรงไฟฟ้าวัฏจักรโออาร์ซีและคาลินาแบบ KCS-11

3.3.4 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองเทสลาเทอร์ไบน์

เพื่อตรวจสอบความแม่นยำของแบบจำลองของเทสลาเทอร์ไบน์ วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้จำลองเปรียบเทียบกับผลการจำลองและผลการทดลองที่ได้จากการทำปรีทศวรรณกรรม อันดับแรกได้จำลองเปรียบเทียบกับผลการจำลองของ Talluri et al. (2020) โดยในการจำลองนี้สารทำงาน

ก่อนเข้าเทอร์โบและที่อยู่ระหว่างกระบวนการในเทอร์โบเป็นไอเสมอ โดยผลการเปรียบเทียบการจำลองที่ได้จากแบบจำลองในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้กับการทดลองจากปรีทศวรรณกรรมแสดงดังตารางที่ 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)
P_5	0.32	0.32
T_5	100.73	101.48
η_{isen}	0.35	0.30
$\dot{W}_{Tesla}$	940	800
		W

อีกทั้งในการศึกษาครั้งนี้ บางกรณีสารทำงานที่อยู่ภายในกระบวนการในเทสลาเทอร์โบมีลักษณะเป็นของผสมหรือการขยายตัวแบบสองเฟส (two-phase flow) ดังนั้นเพื่อให้มั่นใจได้ว่าแบบจำลองที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ 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

จากผลการเปรียบเทียบความถูกต้องของแบบจำลองทั้งการไหลแบบเฟสเดียวและการไหลแบบสองเฟสภายในเตสลาเทอร์ไบน์ พบว่า แบบจำลองของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สามารถประเมินกำลัง ประสิทธิภาพไอเซนโทรปิก และความดันที่ทางออกของเทอร์ไบน์ได้ โดยมีค่าคลาดเคลื่อนจากการศึกษาที่ได้จากการปรัศน์วรรณกรรมประมาณ 10% ซึ่งอยู่ในช่วงที่สามารถยอมรับได้สำหรับการศึกษาขั้นต้นในการออกแบบเตสลาเทอร์ไบน์ นอกจากนี้ ยังแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองนี้สามารถนำไปใช้ได้ทั้งในกรณีที่สารทำงานภายในเตสลาเทอร์ไบน์เป็นการไหลแบบเฟสเดียวและการไหลแบบสองเฟส

ภายหลังจากการออกแบบเตสลาเทอร์ไบน์แล้ว ได้ดำเนินการวิเคราะห์เอกเซอร์ยีในหัวข้อ 3.4 และประเมินความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ในหัวข้อ 3.5 เพื่อให้เกิดการเปรียบเทียบเชิงบูรณาการและมองเห็นภาพรวมในหลากหลายมุมมองมากยิ่งขึ้น

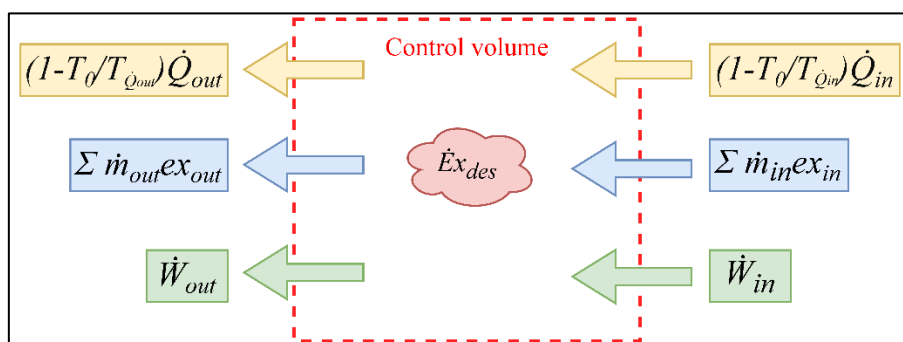
3.4 การวิเคราะห์เอกเซอร์ยี

ในหัวข้อนี้เป็นการประเมิน การถูกทำลายเอกเซอร์ยี (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 $\dot{E}x_{des}$ ของแต่ละอุปกรณ์จำเป็นต้องหาเอกเซอร์ยีทางกายภาพ (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 เอกเซอร์ยีที่เข้าและออกในอุปกรณ์ภายใต้ปริมาตรควบคุม

จากรูปที่ 3.12 การหาสมดุลของเอกเซอร์ยีในสถานะคงตัวสามารถหาได้ดังสมการที่ 3.53

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

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

ทำลายเอกเซอร์ยีสสำหรับอุปกรณ์ในโรงไฟฟ้าวัฏจักรโออาร์ซีสามารถเปรียบเทียบและอ้างอิงได้จากผังอุปกรณ์ในรูปที่ 3.1 และ 3.5 รายละเอียดของการคำนวณการทำลายเอกเซอร์ยีสแสดงดังต่อไปนี้

1. การทำลายเอกเซอร์ยีสที่ปั๊ม

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

2. การทำลายเอกเซอร์ยีสที่รีคูเปอร์เรเตอร์

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

3. การทำลายเอกเซอร์ยีสที่ฮีวโปเรเตอร์

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

4. การทำลายเอกเซอร์ยีสที่เซพาเรเตอร์

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

5. การทำลายเอกเซอร์ยีสที่เทอร์ไบน์

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

6. การทำลายเอกเซอร์ยีสที่เอ็กซ์แพนชันวาล์ว

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

7. การทำลายเอกเซอร์ยีสที่มิกซ์เซอร์

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

8. การทำลายเอกเซอร์ยีสที่คอนเดนเซอร์

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

9. การทำลายเอกเซอร์ยีสของระบบโดยรวม

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

3.5 การประเมินความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์

เพื่อประเมินความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของโรงไฟฟ้าวัฏจักรโออาร์ซีและคาลินาที่ใช้เทสลาเทอร์โบในภายใต้สภาวะการทำงานที่แตกต่างกัน 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 และราคาขายไฟฟ้าที่หลากหลายเพื่อให้เห็นถึงความเป็นไปได้ของโรงไฟฟ้าวัฏจักรโออาร์ซีที่ใช้เทสลาเทอร์โบ 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 ซึ่งขนาดของอุปกรณ์เหล่านี้ได้มาจากระบบการออกแบบโรงไฟฟ้าที่กล่าวไว้ในหัวข้อ 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 โดยส่วนใหญ่ มักไม่มีการตรวจสอบความถูกต้องของผลการประเมิน 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

กำลัง สุทธิ	ราคาที่ถูกรับ โดย CEPCI	ราคา อ้างอิง	ความ ผิดพลาด	อ้างอิง	ปีในการ ประเมิน
(kW)	(k€)	$\times 10^3$ (€)	(%)		
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 วิธีประมาณราคาที่ใช้ 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

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

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 ความดันที่อีวาโปเรเตอร์ (Evaporator pressure) ความดันที่คอนเดนเซอร์ (Condenser pressure) และอัตราการไหลเชิงมวลของสารทำงาน ซึ่งรายละเอียดในการหาดังกล่าวได้นำเสนอไว้ในหัวข้อที่ 3.1 จากนั้นจึงนำค่าที่ได้มาใช้ในการออกแบบเตสลาเทอร์ไบน์ โดยทำการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรที่ละตัวตามที่แสดงในตารางที่ 3.3 เพื่อศึกษาผลกระทบของแต่ละตัวแปรต่อการทำงานของเตสลาเทอร์ไบน์ โดยผลการวิเคราะห์ดังกล่าวได้นำเสนอไว้ในบทที่ 4

3.6.2 การศึกษาอิทธิพลของค่าความเป็นไอของสารทำงานที่มีผลต่อสมรรถนะของโรงไฟฟ้าและเตสลาเทอร์ไบน์

ในหัวข้อนี้ ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของค่าความเป็นไอของสารทำงานก่อนเข้าเทอร์ไบน์ โดยยังคงใช้สาร R236ea เป็นสารทำงาน และกำหนดอุณหภูมิของแหล่งความร้อนและแหล่งทิ้งความร้อนให้เหมือนกับที่ระบุไว้ในหัวข้อ 3.6.1 จากนั้นได้กำหนดค่าความเป็นไอของสารทำงานก่อน

เข้าทดสอบเทอร์โบกับ 0.00, 0.25, 0.50, 0.75 และ 1.00 แล้วหาค่าเงื่อนไขการทำงานที่เหมาะสมของแต่ละกรณี ได้แก่ ความดันที่ไอวาล์วโปรเตอร์ ความดันที่คอนเดนเซอร์ และอัตราการไหลเชิงมวลของสารทำงาน โดยรายละเอียดในการหาค่าได้แสดงไว้ในหัวข้อ 3.1

จากนั้น ได้นำเงื่อนไขการทำงานของแต่ละกรณีมาใช้ในการจำลองทดสอบเทอร์โบ โดยรายละเอียดของแบบจำลองได้นำเสนอไว้ในหัวข้อ 3.3 ซึ่งในแต่ละกรณีที่มีค่าความเป็นไอของสารทำงานต่างกัน จะได้ขนาดและเงื่อนไขการทำงานของเทอร์โบที่ทำให้ได้กำลังสุทธิสูงสุด โดยผลการออกแบบได้แสดงไว้ในหัวข้อ 3.6.1

สุดท้าย ได้ดำเนินการวิเคราะห์เอกเซอร์ยีและความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์โดยอ้างอิงวิธีการตามที่ระบุในหัวข้อ 3.4 และ 3.5 ตามลำดับ เพื่อประเมินค่าความเป็นไอที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการทำงานของทดสอบเทอร์โบ ซึ่งผลการวิเคราะห์ได้แสดงไว้ในบทที่ 5

3.6.3 การศึกษาพฤติกรรมการทำงานของทดสอบเทอร์โบในโรงไฟฟ้าวัฏจักรที่แอลซีเมื่อใช้สารผสมซีไอโทริกที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

โดยในหัวข้อนี้ เป็นการศึกษาอิทธิพลของสารทำงาน โดยเปรียบเทียบกับสารที่นิยมสำหรับโรงไฟฟ้าวัฏจักรโออาร์ซีคือ R245fa เทียบกับ สารทดแทน R245 ทั้งแบบสารบริสุทธิ์และซีไอโทริก โดยแสดงดังตารางที่ 3.10

โดยวัตถุประสงค์ของการศึกษานี้ เพื่อต้องการศึกษาอิทธิพลของสารทำงานที่มีต่อทดสอบเทอร์โบและหาสารทำงานทดแทน 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 นอกจากนี้ได้พิจารณากรณีที่นำอุปกรณ์บางส่วน ได้แก่ เซพพารเตอร์และรีคูเปอร์เตอร์ ออกจากวัฏจักร (Modified KCS-11) เพื่อให้ระบบมีความซับซ้อนน้อยลง ทั้งนี้เนื่องจากจุดเด่นของเตสลาเทอร์ไบน์คือสามารถทำงานได้ดีที่ความดันไอต่ำ จึงไม่จำเป็นต้องใช้เซพพารเตอร์ แยกให้เฉพาะสารทำงานที่เป็นไออิมตัวเข้าเทอร์ไบน์เหมือนโรงไฟฟ้าวัฏจักรคาลินา นอกจากนี้ ยังได้เปรียบเทียบกับโรงไฟฟ้าวัฏจักรที่แอลซีได้ดีที่สุดจากบทที่ 5 และ 6 และได้ประเมินประสิทธิภาพในมุมมองของกำลังสุทธิ การวิเคราะห์เอกเซอร์ยี และความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์

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

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

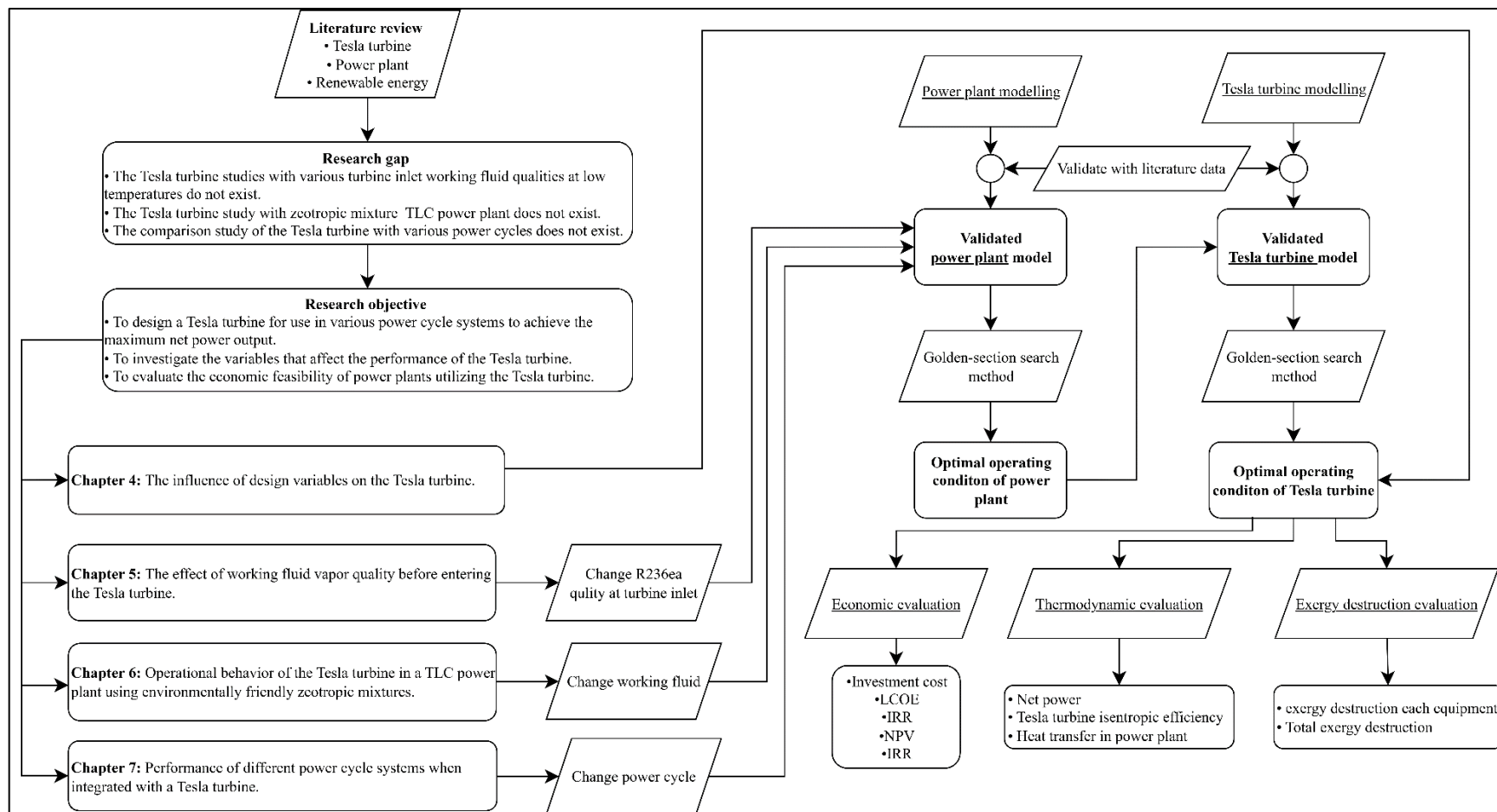
$$\eta_{ex,pump} = \frac{\dot{m}_{wf} (ex_{out} - ex_{in})}{\dot{W}_{pump}} \quad (3.72)$$

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

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

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 โดยผลการศึกษาสรุปไว้ในบทที่ 7

นอกจากนี้ เพื่อสรุปให้เห็นแนวทางภาพรวมในการศึกษาของวิทยานิพนธ์นี้ ดังนั้นผังลำดับการวิจัยแสดงดังรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 ผังลำดับการวิจัย