

บทที่ 7

ผลการทำงานของโรงไฟฟ้าวัฏจักรที่แตกต่างกันเมื่อใช้กับเตสลาเทอร์ไบน์

จากการศึกษาของก่อนหน้านี้ (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 โรงไฟฟ้าวัฏจักรทีแอลซีเมื่อใช้สารผสมซีโอโทรปิกร่วมกับโรงไฟฟ้าวัฏจักรทีแอลซีโดยแสดงให้เห็นว่าสาร 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 รวมถึงโรงอัดการไหลเชิงมวลเท่ากับโรงไฟฟ้าคาลินา
- 3) โรงไฟฟ้าวัฏจักรทีแอลซีที่ใช้สารทำงานเป็นสารบริสุทธิ์ R236ea (ดีที่สุดในบทที่ 5)
- 4) โรงไฟฟ้าวัฏจักรทีแอลซีที่ใช้สารทำงานเป็นสารผสมที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม R1336mzz(Z)/R1234ze ที่อัตราส่วนโดยมวลเท่ากับ 0.25/0.75 (ดีที่สุดในบทที่ 6)

เห็นได้ว่าโรงไฟฟ้าแต่ละโรงมีสถานะของสารทำงานก่อนเข้าเทอร์ไบน์ที่แตกต่างกันออกไปซึ่งส่งผลต่อการทำงานของเตาเทอร์ไบน์ 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 ความดันไอที่ต่ำกว่าไม่ได้หมายความว่าต้องใช้ความดันในฮีตเตอร์ สูงกว่าเสมอไป ซึ่งในการในการศึกษานี้แสดงให้เห็นว่า โรงไฟฟ้าโรงที่แอลซีและกาลินาใช้ความดันที่อีวาโปเรเตอร์/ฮีตเตอร์ใกล้เคียงกัน ซึ่งเกิดจากอิทธิพลทั้งความเป็นไอของสารทำงานและชนิดของสารทำงาน

ตารางที่ 7.1 เงื่อนไขการทำงานที่เหมาะสมสำหรับโรงไฟฟ้าวัฏจักรต่าง ๆ ที่ใช้เทสลาเทอร์ไบน์

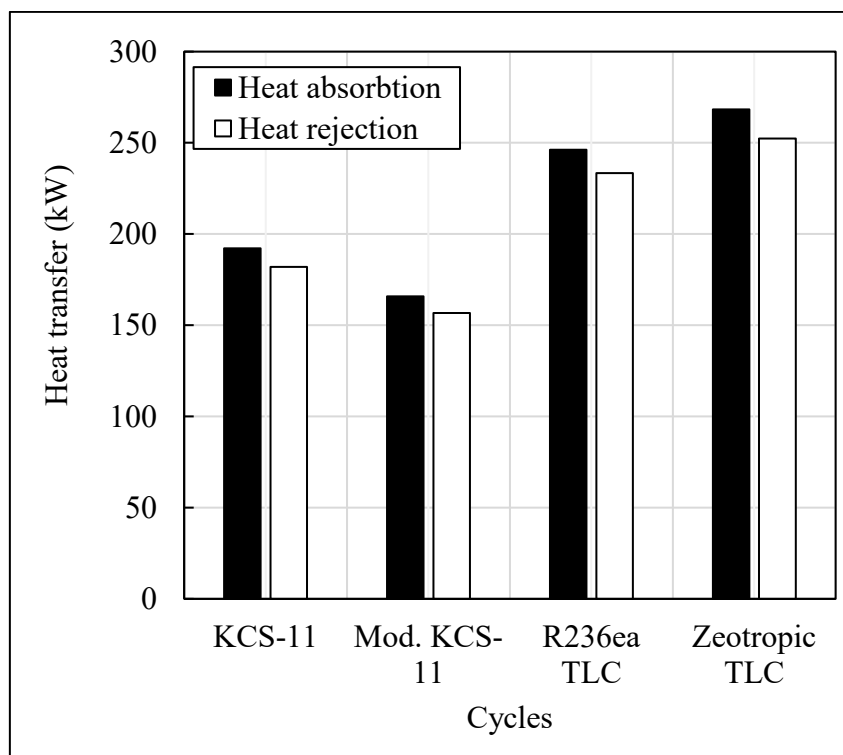
วัฏจักร		KCS-11	Mod. KCS-11	ทีแอลซี	
ตัวแปร	หน่วย	สารทำงาน			
		Ammonia/Water 0.90/0.10		R236ea	R1336mzz(Z)/ R1234ze(E) 0.25/0.75
$T_{critical}$	°C	180.91	180.91	139.29	121.00
P_1	MPa	1.45	1.45	0.46	0.69
P_2	MPa	2.96	2.96	1.86	2.87
$\dot{m}_{wf}$	kg/s	0.20	0.20	3.06	2.67
$\dot{m}_{wf,tesla}$	kg/s	0.15			
$T_{evap,out}$	°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
$A_{hx, IHX}$	m²	3.01	0.00	0.00	0.00
$A_{hx, cond}$	m²	24.08	20.38	26.49	72.98
$A_{hx, evap}$	m²	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 ที่แอลซีทีเป็นสารบริสุทธิ์ และที่แอลซีทีใช้สารผสม โดยโรงไฟฟ้าอื่น ๆ ใช้มากกว่าอยู่ 48% 110% และ 352% ตามลำดับ แสดงให้เห็นข้อได้เปรียบของของโรงไฟฟ้า Mod. KCS-11 ซึ่งนำไปสู่การลงทุนที่น้อยลงตามไปด้วย ในทางกลับกันโรงไฟฟ้าวัฏจักรที่แอลซีทีใช้สารผสมมีขนาดอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่มีขนาดใหญ่เพื่อรองรับการเกิดการไต้ของอุณหภูมิซึ่งได้นำเสนอวิเคราะห์ไว้ในบทที่ 6 ซึ่งนำไปสู่ 1 ข้อเสียเปรียบคือต้นทุนในการสร้างโรงไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้น

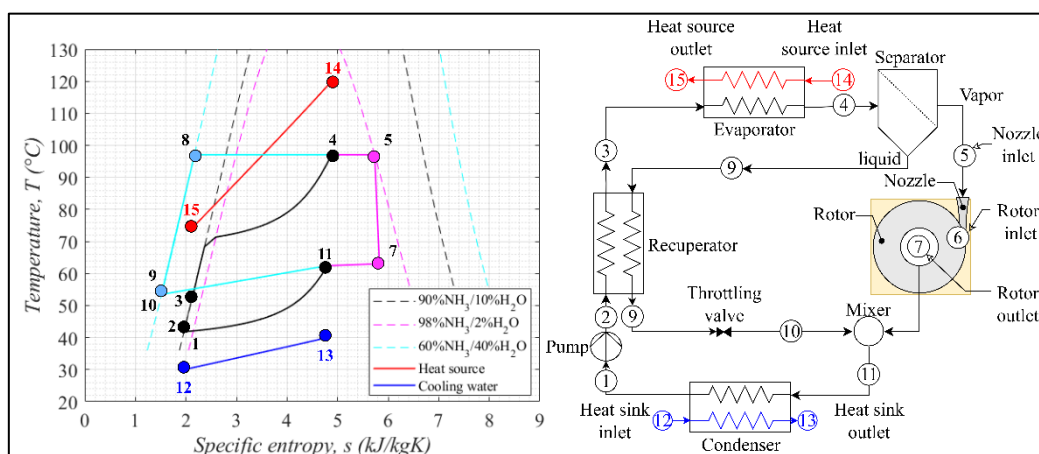
7.1.2 พฤติกรรมการถ่ายเทความร้อน

ในหัวข้อนี้ได้อภิปรายพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนระหว่างสารทำงานกับแหล่งความร้อนและแหล่งรับความร้อนภายในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน กับโรงไฟฟ้าวัฏจักรต่าง ๆ โดยผลดังรูปที่ 7.1

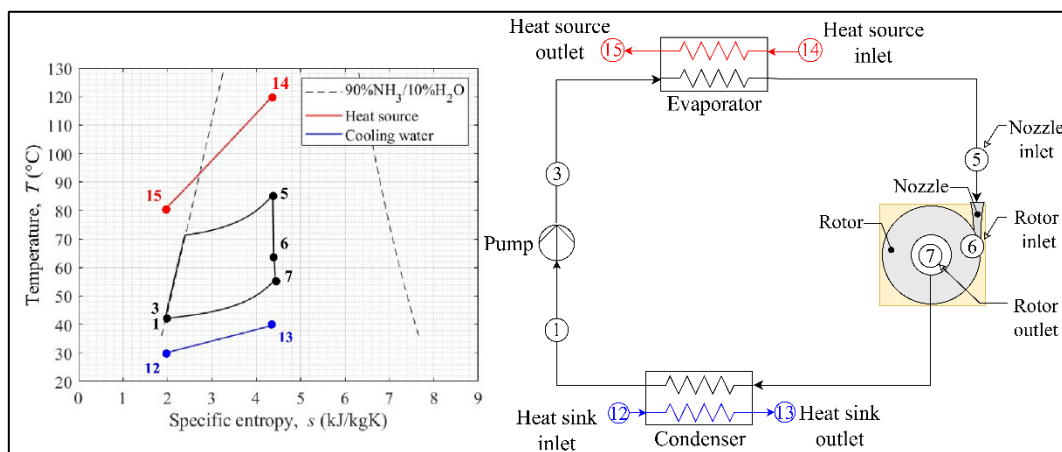


รูปที่ 7.1 ความร้อนที่ถ่ายเทเข้าและออกจากโรงไฟฟ้าวัฏจักรต่าง ๆ

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



(ก)



(ข)

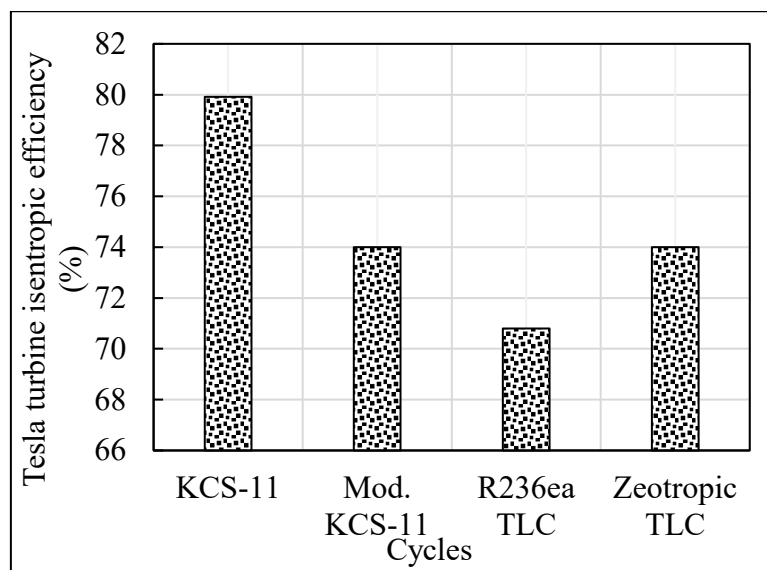
เมื่อพิจารณาผังอุณหภูมิและเอนโทรปีจำเพาะของโรงไฟฟ้าสามวัฏจักรพบว่า โรงไฟฟ้าวัฏจักร ทีแอลซีมีการถ่ายเทความร้อนที่มากกว่าโรงไฟฟ้าคาลินาและ Mod. KCS-11 โดยเมื่อพิจารณาดังรูปที่ 7.2 (ค) เทียบกับ รูปที่ 7.2 (ก) และ 7.2 (ข) แสดงให้เห็นว่าการถ่ายเทความร้อนระหว่างแหล่งความร้อนและสารทำงานในอีวาโปรเตอร์ โรงไฟฟ้าวัฏจักรทีแอลซีมีความสม่ำเสมอของอุณหภูมิในการถ่ายเทความร้อนที่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

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

นอกจากนี้ โรงไฟฟ้าวัฏจักรคาลินาแบบ KCS-11 และ Mod. KCS-11 เป็นโรงไฟฟ้าที่ใช้สารผสมซีโอโทรปิกเช่นเดียวกับกับโรงไฟฟ้าวัฏจักรทีแอลซี (แต่คนละสารทำ) ซึ่งสามารถทำให้อุณหภูมิของสารทำงานก่อนเข้าอีวาโปรเตอร์ต่ำกว่าสารบริสุทธิ์ (42°C) นอกจากนี้ ยังให้อุณหภูมิสารทำงานที่ทางเข้าอีวาโปรเตอร์ต่ำกว่าโรงไฟฟ้าวัฏจักรทีแอลซีที่ใช้สารซีโอโทรปิกอีกด้วย อย่างไรก็ตาม ความร้อนที่สารทำงานได้รับที่อีวาโปรเตอร์ยังคงน้อยกว่าโรงไฟฟ้าวัฏจักรทีแอลซีเนื่องจาก ความสม่ำเสมอของอุณหภูมิในการถ่ายเทความร้อนน้อยกว่า ดังนั้น ผลดังกล่าวแสดงให้เห็นถึงข้อได้เปรียบของการใช้สารทำงานที่เป็นสารผสม เพื่อเพิ่มความสามารถในการถ่ายเทความร้อนของโรงไฟฟ้าได้ ถึงแม้ว่าจะเป็นโรงไฟฟ้าวัฏจักรใดก็ตาม

7.1.3 พฤติกรรมการทำงานของเตสลาเทอร์ไบน์

ในหัวข้อนี้ได้ศึกษาการทำงานของเตสลาเทอร์ไบน์ในโรงไฟฟ้าวัฏจักรแบบต่าง ๆ โดยรูปที่ 7.3 แสดงประสิทธิภาพไอเซนโทรปิกของเตสลาเทอร์ไบน์ที่ในโรงไฟฟ้าวัฏจักรต่าง ๆ โดยผลของขนาดและขนาดที่เหมาะสมของเตสลาเทอร์ไบน์แสดงไว้ใน ภาคผนวก จ.



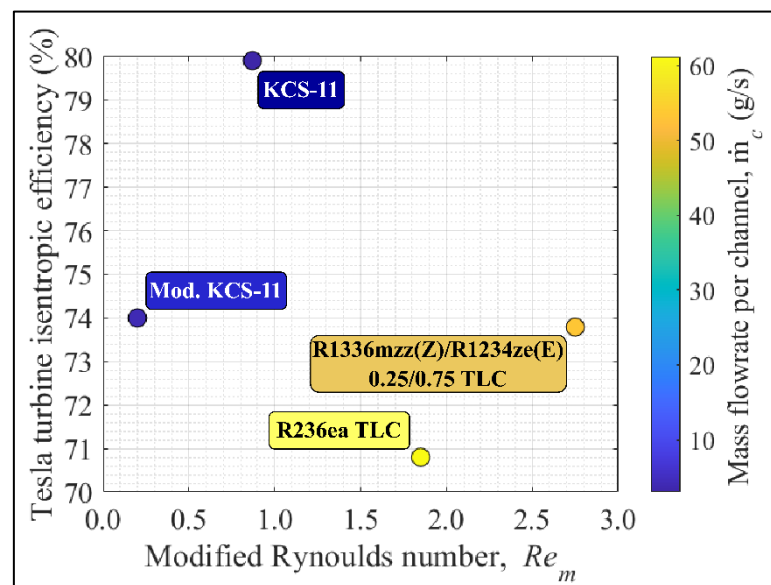
รูปที่ 7.3 ประสิทธิภาพไอเซนโทรปิกของเตสลาเทอร์ไบน์เมื่อใช้งานกับโรงไฟฟ้าวัฏจักรต่าง ๆ

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 ไม่ว่าจะเป็นวัฏจักรใด เตสลาเทอร์ไบน์ย่อมทำงานได้ดีเมื่อความเป็นไอสูง

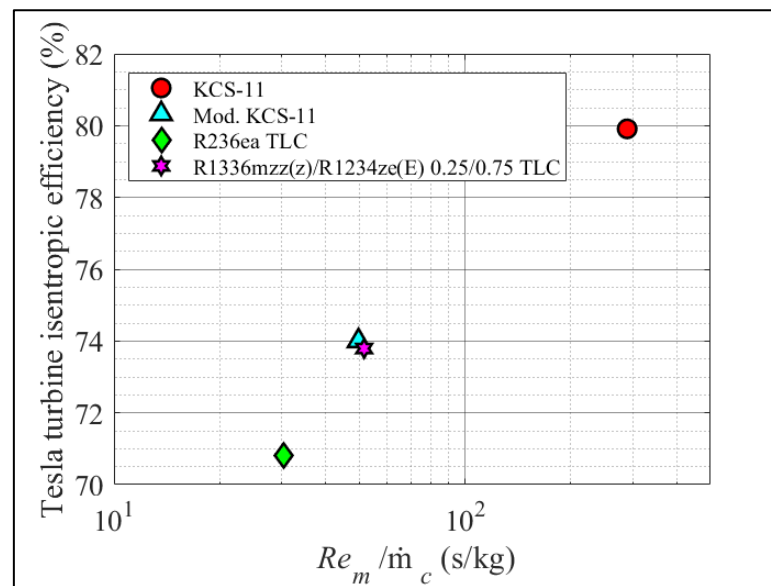
นอกจากนี้ แสดงให้เห็นว่าโรงไฟฟ้าวัฏจักรที่แอลซีที่ใช้สารทำงานต่างกันส่งผลต่อประสิทธิภาพอย่างมาก โดยที่ใช้สารทำงาน R236ea บริสุทธิ์ ซึ่งเลือกโดยใช้เฉพาะอุณหภูมิวิกฤตเป็นเกณฑ์ และสารผสม R1336mzz(Z)/R1234ze(E) ที่มาจากเลือกเทียบกันที่หลาย ๆ สารในบทที่ 6 โดยประสิทธิภาพไอเซนโทรปิกเท่ากับ 70.8% และ 73.7% ซึ่งเกิดจากความเหมาะสมของคุณสมบัติของสารทำงาน 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



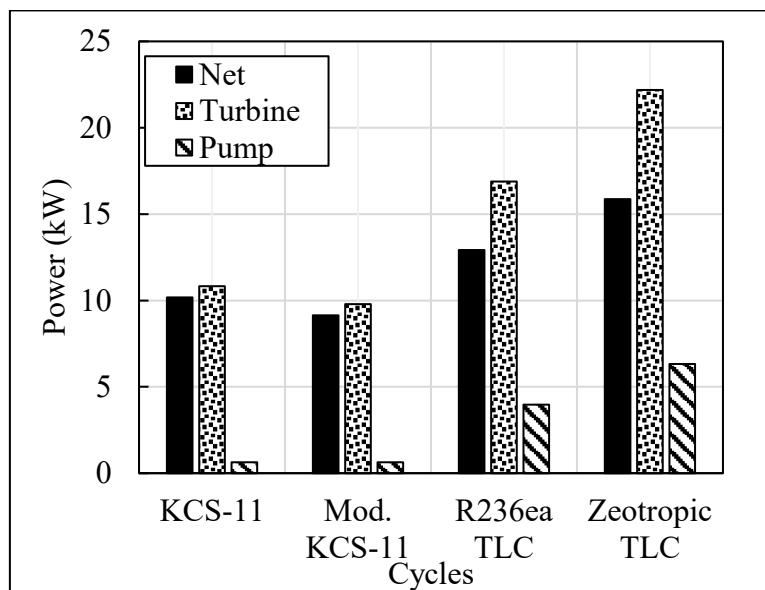
รูปที่ 7.5 ผลของ $Re_m / \dot{m}_c$ และประสิทธิภาพไอเซนโทรปิกของเตสลาเทอร์ไบน์ในโรงไฟฟ้าวัฏจักรต่าง ๆ

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

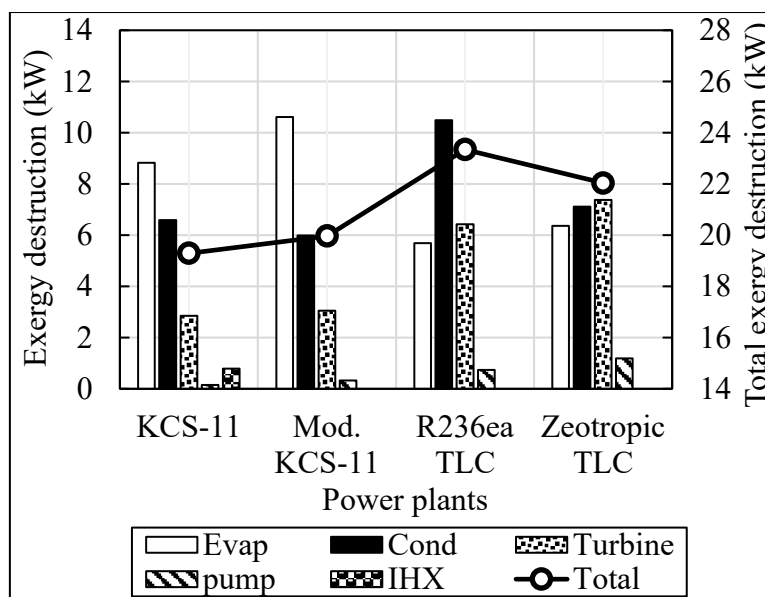
จากการศึกษาพฤติกรรมของการทำงานของเตสลาเทอร์ไบน์ข้างต้นแสดงให้เห็นว่าโรงไฟฟ้าแต่ละวัฏจักรส่งผลให้เตสลาเทอร์ไบน์ทำงานได้แตกต่างกันออกไปซึ่งส่งผลให้ประสิทธิภาพแตกต่างกันออกไปขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของสารทำงาน อัตราการไหลเชิงมวล ของสารทำงาน อย่างไรก็ตาม จากการศึกษาในบทที่ 5 และ 6 ยืนยันว่า ประสิทธิภาพของเตสลาเทอร์ไบน์ไม่ใช่ตัวกำหนดว่าสมรรถนะโดยรวม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

7.1.4 พฤติกรรมของสมรรถนะโดยรวมของโรงไฟฟ้า

ในหัวข้อนี้ได้ประเมินสมรรถนะของโรงไฟฟ้าวัฏจักรต่าง ๆ ที่ใช้เทสลาเทอร์ไบน์ โดยในรูปที่ 7.6 แสดงกำลังสุทธิ กำลังที่ได้จากเทอร์ไบน์ และกำลังที่ปั๊มต้องการของโรงไฟฟ้าวัฏจักรต่าง ๆ ที่ใช้กับเทสลาเทอร์ไบน์ โดยมีรายละเอียดเป็นดังต่อไปนี้



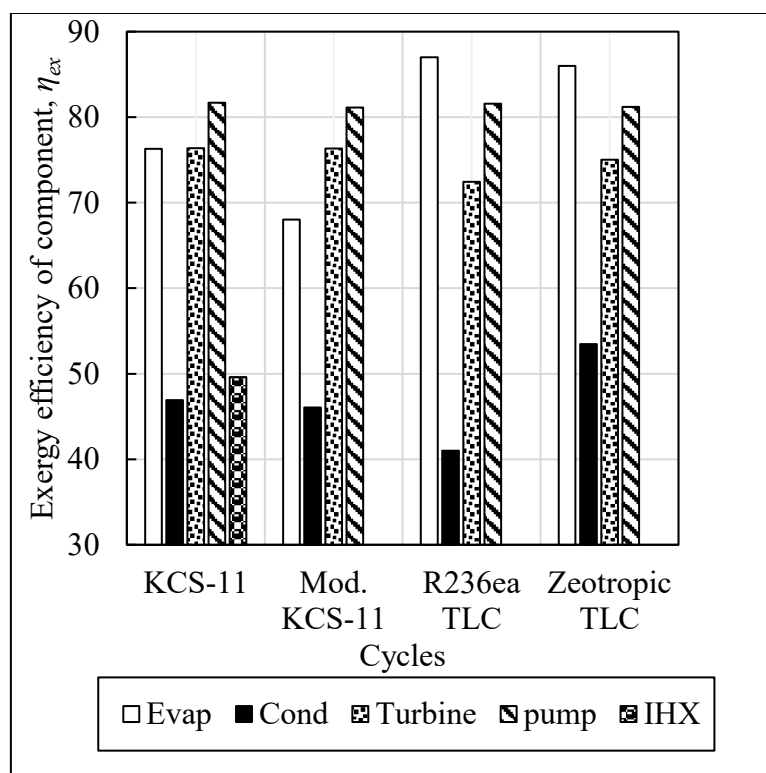
รูปที่ 7.6 กำลังสุทธิ กำลังจากเทอร์ไบน์ และกำลังที่ปั๊มต้องการของโรงไฟฟ้าวัฏจักรต่าง ๆ



รูปที่ 7.7 การทำลายเอ็กเซอร์ยีรายอุปกรณ์และของระบบโดยรวม

จากรูปที่ 7.6 พบว่า โรงไฟฟ้าวัฏจักรที่แอลซีที่ใช้สารผสมซีโอโทรปิกให้กำลังสุทธิสูงที่สุดโดยมีค่าเท่ากับ 15.87 kW ในขณะที่โรงไฟฟ้าวัฏจักรที่แอลซีที่ใช้สารบริสุทธิ์ได้รองลงมาเท่ากับ 12.91 kW ตามด้วยโรงไฟฟ้าวัฏจักรคาลินา KCS -11 และ Mod. KCS-11 โดยมีกำลังสุทธิเท่ากับ 10.08 kW และ 9.14 kW โดยจากผลในบทที่ 6 แสดงให้เห็นว่าการทำลายเอนโทรปีส่งผลกระทบต่อสมรรถนะโดยรวมของโรงไฟฟ้าอย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้น ความแตกต่างสมรรถนะของแต่ละวัฏจักรสามารถอธิบายได้ด้วยการทำลายเอนโทรปีของแต่ละอุปกรณ์และโดยรวมของโรงไฟฟ้า โดยรูปที่ 7.7 แสดงการทำลายเอนโทรปีของโรงไฟฟ้าแต่ละวัฏจักร

เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 7.7 พบว่า โรงไฟฟ้าที่มีกำลังสุทธิสูงที่สุดไม่ใช่โรงไฟฟ้าที่มีการทำลายเอนโทรปีต่ำที่สุด แต่เป็นวัฏจักรที่มีการกระจายการทำลายเอนโทรปีอย่างสมดุลในแต่ละอุปกรณ์ ซึ่งแนวโน้มนี้สอดคล้องกับผลการวิเคราะห์สมรรถนะระบบในบทที่ 6 อย่างไรก็ตาม การใช้ข้อมูลการทำลายเอนโทรปีรายอุปกรณ์หรือทั้งระบบเพียงอย่างเดียวไม่สามารถอธิบายความเปลี่ยนแปลงของสมรรถนะได้ทั้งหมด เนื่องจากโรงไฟฟ้าคาลินาและที่แอลซีมีปริมาณความร้อนที่รับเข้าสู่ระบบแตกต่างกัน โดยโรงไฟฟ้าวัฏจักรที่แอลซีมีค่าดังกล่าวสูงกว่าโรงไฟฟ้าคาลินาสูงสุดถึง 38% ซึ่งทำให้เกิดความไม่ผันกลับจากการถ่ายเทความร้อนมากขึ้นตามไปด้วยทำให้ปริมาณเอนโทรปีที่ถูกทำลายสูงขึ้น ส่งผลให้การทำลายเอนโทรปีโดยรวมสูงถึงแม้ว่าได้กำลังสุทธิสูงก็ตาม



รูปที่ 7.8 ประสิทธิภาพเอนโทรปีของรายอุปกรณ์

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

จากผลของประสิทธิภาพของเอ็กเซอร์ยีดังรูปที่ 7.8 มีแนวโน้มที่น่าสนใจเป็นดังต่อไปนี้

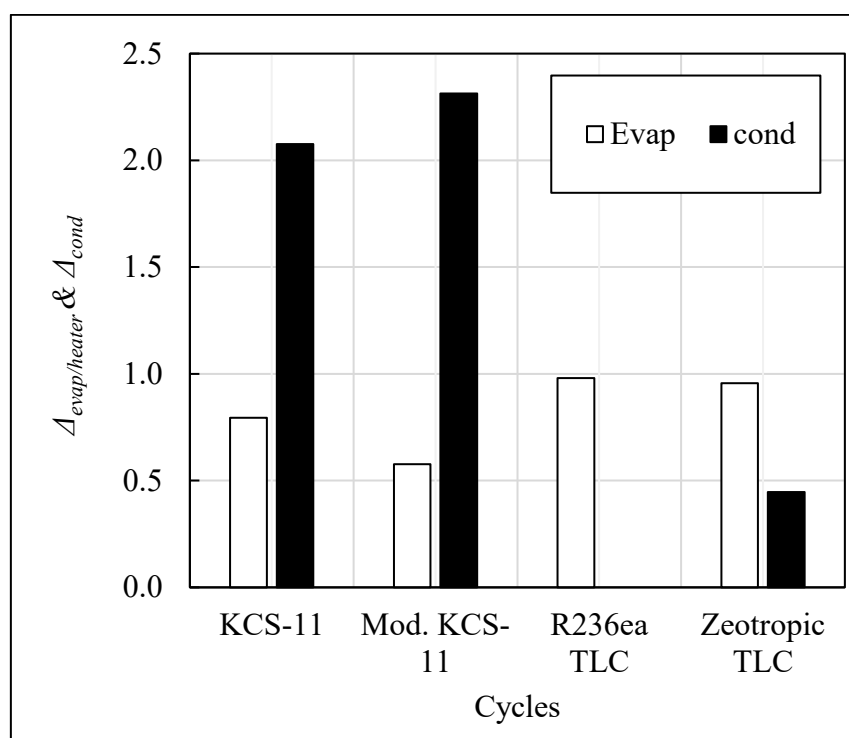
1) การถ่ายเทความร้อน: เมื่อพิจารณาโรงไฟฟ้าวัฏจักรที่แอลซีที่ใช้สารบริสุทธิ์เปรียบเทียบกับสารผสม พบว่าค่าประสิทธิภาพเอ็กเซอร์ยีอยู่ที่ 87% และ 86% ตามลำดับ โดยแม้สารบริสุทธิ์จะมีประสิทธิภาพสูงกว่าเพียง 1% แต่สารผสมกลับสามารถดึงความร้อนได้มากกว่าถึง 8% ความแตกต่างนี้สามารถอธิบายได้จากความเหมาะสมของคุณสมบัติของสารทำงานที่เข้ากันได้ดีกับลักษณะของแหล่งความร้อน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

ทั้งนี้ แนวโน้มของประสิทธิภาพเอ็กเซอร์ยีสามารถอธิบายเพิ่มเติมได้จากความชันของเส้นอุณหภูมิระหว่างแหล่งให้ความร้อนและแหล่งรับความร้อนในอีวาโปรเตอร์/ฮีตเตอร์และคอนเดนเซอร์ ซึ่งเป็นตัวบ่งชี้ความสอดคล้องของอุณหภูมิในการแลกเปลี่ยนความร้อน โดยค่าใกล้ 1 แสดงถึงความแมตช์ของเส้นอุณหภูมิทั้งสองฝั่งมากขึ้น ผลการวิเคราะห์ดังกล่าวแสดงไว้ในรูปที่ 7.9 โดยพบว่า ผลความแตกต่างของความชันระหว่างแหล่งให้ความร้อนและแหล่งรับความร้อนกับสารทำงานทั้งที่ อีวาโปรเตอร์/ฮีตเตอร์และคอนเดนเซอร์มีทิศทางเดียวกันกับประสิทธิภาพเอ็กเซอร์ยีของอีวาโปรเตอร์/ฮีตเตอร์และคอนเดนเซอร์ อย่างไรก็ตาม ค่าประสิทธิภาพเอ็กเซอร์ยีและความแมตช์กันของอุณหภูมิ (Temperature match) ในคอนเดนเซอร์ ไม่ได้แสดงถึงความปริมาณในการทิ้งความร้อนเพียงแต่บอกว่าสามารถทำงานได้ดีเพียงใด เนื่องจาก ปริมาณการทิ้งความร้อนขึ้นอยู่กับารับความร้อนของโรงไฟฟ้า โดยที่ยังรับมากก็จะส่งผลให้ทิ้งความร้อนมากตามไปด้วย

2) การทำงานของเทสลาเทอร์ไบน์: จากการวิเคราะห์พบว่าค่าประสิทธิภาพเอ็กเซอร์ยีมีแนวโน้มสอดคล้องกับประสิทธิภาพไอเซนโทรปิกของเทสลาเทอร์ไบน์ อย่างไรก็ตาม ปริมาณการทำลายเอ็กเซอร์ยีกลับไม่สอดคล้องกับค่าประสิทธิภาพไอเซนโทรปิก เนื่องจากในงานศึกษานี้ สารทำงานที่เข้าสู่เทสลาเทอร์ไบน์มีศักยภาพในแตกต่างกัน ทั้งในด้านอุณหภูมิและอัตราการไหล ซึ่งเป็นผลมาจากการใช้วัฏจักรที่แตกต่างกัน โดยปริมาณการทำลายเอ็กเซอร์ยีเป็นตัวแปรเชิงปริมาณที่ขึ้นอยู่กับศักยภาพในของสารทำงาน หากสารทำงานมีศักยภาพในสูงกว่ามาก (เช่น ได้รับพลังงานความร้อนในปริมาณที่มากกว่า) ก็จะมีแนวโน้มที่

จะเกิดการทำความเย็นยิ่งยวดขึ้นตามไปด้วย ดังนั้นการใช้ค่าการทำความเย็นยิ่งยวดเพียงอย่างเดียวอาจไม่เพียงพอในการประเมินสมรรถนะของเทอร์โบ

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



รูปที่ 7.9 ผลการเปรียบเทียบผลความแตกต่างของความชื้นระหว่าง แหล่งให้ความความร้อนและ แหล่งรับความร้อนกับสารทำงานภายในอีวาโปเรเตอร์/ฮีตเตอร์และคอนเดนเซอร์เมื่อวัฏจักรเปลี่ยนแปลงไป

จากการประเมินสมรรถนะพบว่า โรงไฟฟ้าวัฏจักรที่แอลซีที่ใช้สารซีโอโทรปิกให้กำลังสุทธิสูงสุด อย่างไรก็ตาม วัฏจักรนี้ความต้องการใช้อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่มีขนาดใหญ่ ความดันที่สูงรวมถึงระบบมีอัตราการไหลที่สูงและความดันที่จำเป็นต้องเพิ่มสูง ดังนั้น แม้ว่าจะให้ความโดดเด่นในสมรรถนะด้านอุณหพลศาสตร์แต่อาจส่งผลให้ลงทุนสูงกว่าตามไปด้วย ดังนั้นในหัวข้อที่ 7.2 ได้ประเมินทางเศรษฐศาสตร์โรงไฟฟ้าที่ใช้กับเทสลาเทอร์โบในวัฏจักรที่แตกต่างกันไป เพื่อใช้เป็นอีกหนึ่งเกณฑ์ในการตัดสินใจ

7.2 ผลการประเมินเศรษฐศาสตร์

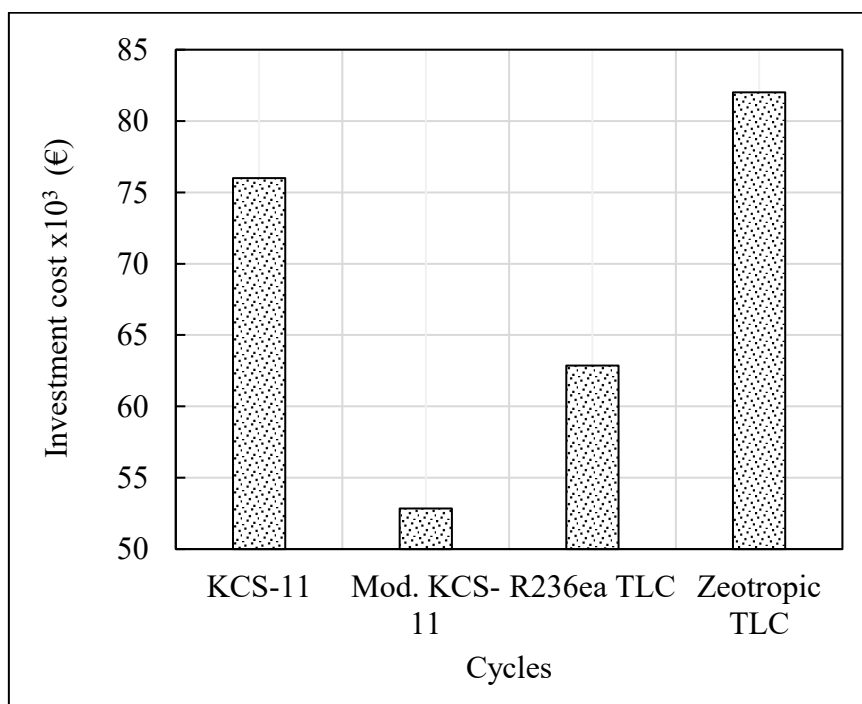
ในหัวข้อนี้ได้ทำการประเมินทางเศรษฐศาสตร์ของโรงไฟฟ้าแต่ละวัฏจักรที่ใช้เทคโนโลยีเทอร์โบ โดยพิจารณาจากหลายมุมมอง ได้แก่ เงินลงทุนเริ่มต้น ต้นทุนการผลิตไฟฟ้าต่อหน่วย มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (Net Present Value: NPV) ระยะเวลาคืนทุนที่ปรับด้วยอัตราคิดลด (Discounted Payback Period: d-PbP) และอัตราผลตอบแทนภายใน (Internal 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 และสารผสมที่ใช้เทคโนโลยีเทอร์โบ



รูปที่ 7.10 เงินลงทุนเริ่มต้นของโรงไฟฟ้าแต่ละวัฏจักร

จากรูปที่ 7.10 พบแนวโน้มที่น่าสนใจเป็นดังนี้

1) โรงไฟฟ้า Mod. KCS-11 ใช้เงินลงทุนที่น้อยกว่า KCS-11: สำหรับโรงไฟฟ้าคาถาแบบ Mod. KCS-11 ซึ่งได้รับการปรับปรุงโดยใช้เทคโนโลยีที่สามารถรองรับการทำงานที่มีความเป็นไอต่ำ 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)

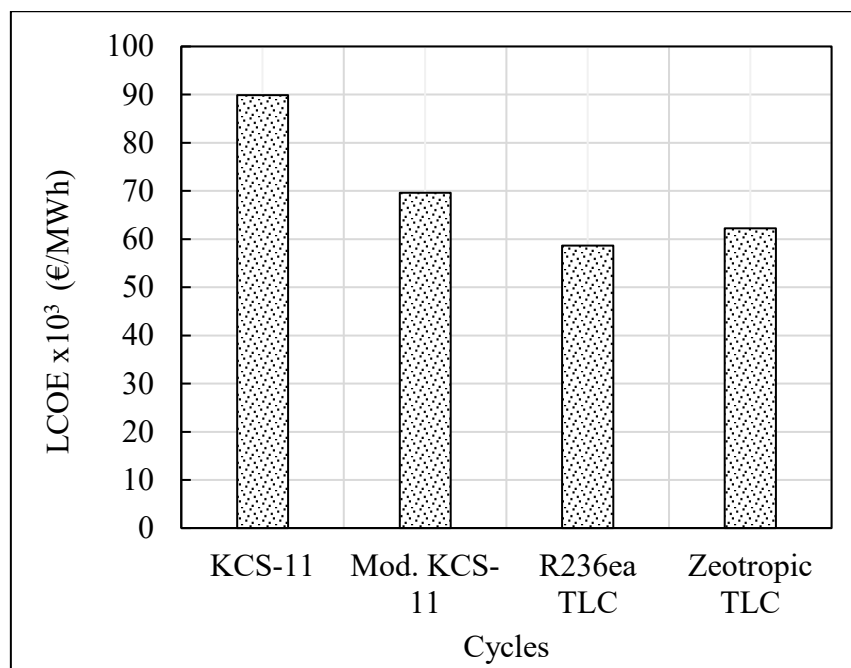
2) โรงไฟฟ้าวัฏจักรที่แอลซีใช้เงินลงทุนสูงและให้กำลังสูง: โรงไฟฟ้าวัฏจักรที่แอลซีเป็นโรงไฟฟ้าที่ใช้เงินลงทุนสูง และสูงที่สุดเมื่อใช้สารทำงานเป็นสารผสมซีโอโทรปิก เนื่องจาก ขนาดของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนที่มีขนาดใหญ่กว่าโรงไฟฟ้าวัฏจักรอื่น (ผลแสดงใน ตารางที่ 7.1) อย่างไรก็ตาม โรงไฟฟ้าวัฏจักรที่แอลซีให้กำลังสุทธิออกมาสูง

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% อย่างไรก็ตามเมื่อใช้สารผสมให้กำลังสุทธิน้อยกว่า 18 % (ดังรูปที่ 7.6)

จากผลการวิเคราะห์เงินลงทุนเริ่มต้น พบว่าโรงไฟฟ้าที่มีกำลังไฟฟ้าสุทธิสูง มักต้องใช้เงินลงทุนเริ่มต้นในระดับสูงตามไปด้วย เช่น โรงไฟฟ้าวัฏจักรที่แอลซีที่ใช้สารผสมซีโอโทรปิก ดังนั้น เพื่อประเมินความเป็นไปได้ของการลงทุนในแต่ละวัฏจักร หัวข้อนี้จึงได้พิจารณาตัวแปรด้านเศรษฐศาสตร์เพิ่มเติม โดยตัวแปรแรกที่น่าสนใจคือต้นทุนต่อหน่วยการผลิตไฟฟ้า ซึ่งนำเสนอในหัวข้อ 7.2.2

7.2.2 ต้นทุนต่อหน่วยของการผลิตไฟฟ้า (LCOE)

รูปที่ 7.11 ได้แสดงผลของต้นทุนต่อหน่วยของการผลิตกระแสไฟฟ้าของแต่ละวัฏจักรโดยมีรายละเอียดเป็นดังต่อไปนี้



รูปที่ 7.11 ต้นทุนต่อหน่วยของการผลิตไฟฟ้าของโรงไฟฟ้าแต่ละวัฏจักร

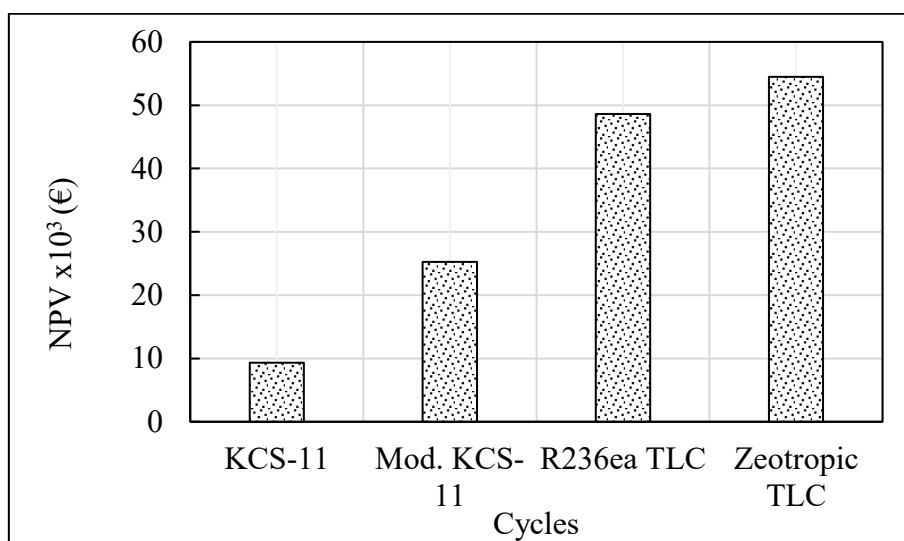
จากรูปที่ 7.11 พบว่าโรงไฟฟ้าที่มีต้นทุนต่อหน่วยการผลิตไฟฟ้าต่ำที่สุดคือ โรงไฟฟ้าวัฏจักรที่แอลซีที่ใช้สารบริสุทธิ์ รองลงมาคือ วัฏจักรที่แอลซีที่ใช้สารผสม ซีโอโทรปิก ตามด้วยโรงไฟฟ้า Mod. KCS-11 และ KCS-11 โดยมีค่าต้นทุนเท่ากับ 58.63 (2.05), 62.27 (2.18), 69.65 (2.44) และ 89.92 (3.15) $\times 10^3$ €/MWh (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 ที่ลดความซับซ้อนของระบบลงโดยการใช้เทสลาเทอร์ไบน์ซึ่งสามารถรับสารทำงานที่มีคุณสมบัติเป็นไอต่ำได้ ช่วยลดต้นทุนการผลิตไฟฟ้าลงได้ถึง 22% และใช้เงินลงทุนเริ่มต้นน้อยลงถึง 30% จึงเป็นตัวเลือกที่น่าสนใจสำหรับโครงการที่มีข้อจำกัดด้านงบประมาณ อย่างไรก็ตาม ต้นทุนต่อหน่วยการผลิตไฟฟ้าเพียงอย่างเดียวไม่สามารถบ่งชี้ได้ว่าโรงไฟฟ้าจะสร้างผลกำไรมากน้อยเพียงใดเมื่อสิ้นสุดอายุโครงการ ดังนั้น จึงจำเป็นต้องพิจารณาตัวแปรเพิ่มเติม

ที่สะท้อนถึงผลกำไรตลอดอายุการดำเนินงานของโครงการ นั่นคือมูลค่าปัจจุบันสุทธิ ซึ่งได้นำเสนอในหัวข้อ 7.2.3

7.2.3 มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (NPV)

รูปที่ 7.12 แสดงมูลค่าปัจจุบันสุทธิของโรงไฟฟ้าที่ใช้เทคโนโลยีเทอร์โบไบโอมเมื่อสิ้นสุดอายุโครงการที่ 20 ปี



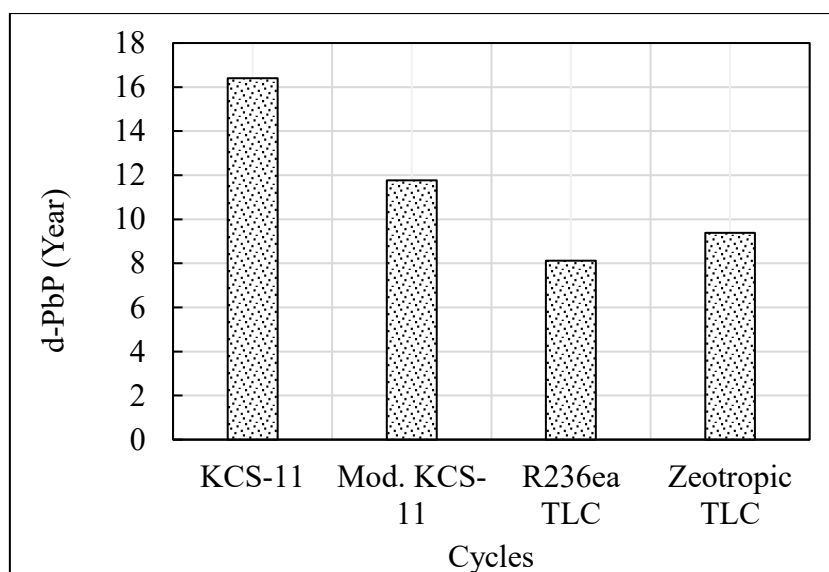
รูปที่ 7.12 มูลค่าปัจจุบันสุทธิของโรงไฟฟ้าแต่ละวัฏจักร

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

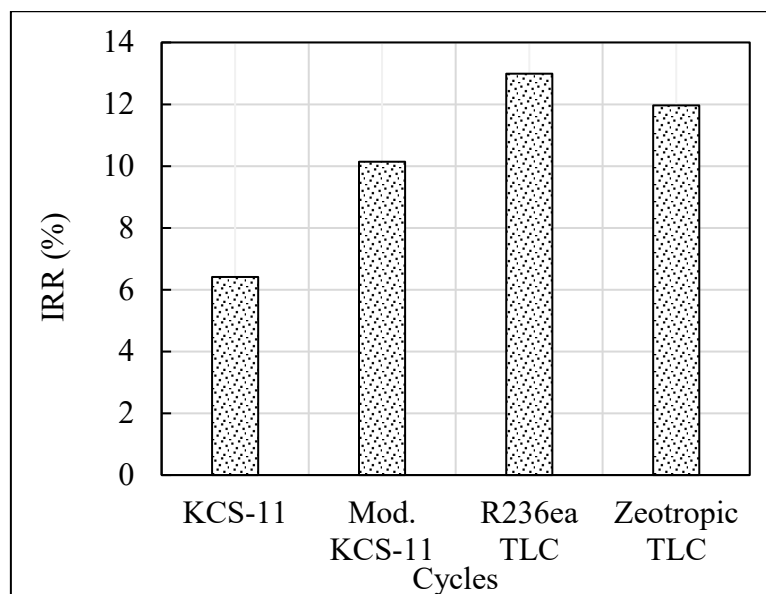
7.2.4 ระยะเวลาคืนทุนที่มีการคิดลด (d-PbP) และ อัตราผลตอบแทนภายใน (IRR)

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 ($\text{GWP} \sim 0$) 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 ที่ใช้เตาเผาเทอร์ไบน์ เพื่อใช้เป็นข้อมูลประกอบในการออกแบบและแนวทางการนำเตาเผาเทอร์ไบน์ไปใช้งาน โดยมีดังต่อไปนี้

1. ใช้เตาเผาเทอร์ไบน์เพื่อช่วยลดความซับซ้อนในโรงไฟฟ้า: เตาเผาเทอร์ไบน์ไม่จำเป็นต้องทำให้สารทำงานกลายเป็นไอก่อนเข้าสู่เทอร์ไบน์เสมอไป เนื่องจากเตาเผาเทอร์ไบน์สามารถทำงานได้แม้ในสภาวะที่สารทำงานมีความเป็นไอต่ำ ดังนั้นจึงไม่จำเป็นต้องมีอุปกรณ์พิเศษเพื่อแยกไอหรือเพิ่มความดันไอของสารทำงานซึ่งช่วยลดความซับซ้อนของระบบ และส่งผลให้รวมถึงลดเงินลงทุนในการก่อสร้างโรงไฟฟ้าได้อีกด้วย เช่น ในการศึกษา Mod. KCS-11 ช่วยลดเงินลงทุนได้
2. ในการออกแบบเตาเผาเทอร์ไบน์ควรพิจารณาอัตราการไหลรวมของสารทำงานด้วย: ในหัวข้อนี้แสดงให้เห็นว่า ลักษณะการไหลของสารทำงานที่เข้าสู่เตาเผาเทอร์ไบน์ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อประสิทธิภาพของเทอร์ไบน์ โดยพบว่าเมื่ออัตราการไหลระหว่างแผ่นดิสก์ต่ำ จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของการทำงานได้มากขึ้น ซึ่งอาจทำได้ด้วยการเพิ่มจำนวนแผ่นดิสก์ให้มากขึ้น
3. เลือกใช้โรงไฟฟ้าที่ใช้โรงไฟฟ้าที่สารทำงานเป็นสารผสมซีไอโทรปิกช่วยเพิ่มสมรรถนะของโรงไฟฟ้า: การใช้สารทำงานเป็นสารผสมซีไอโทรปิก เช่น สารผสม R1336mzz(Z)/R1234ze(E) ช่วยเพิ่มการผลิตไฟฟ้าและให้ผลกำไรที่สูงในระยะยาวตลอดโครงการได้ อย่างไรก็ตาม จำเป็นต้องใช้เงินลงทุนที่เพิ่มสูงขึ้นอาจจะไม่เหมาะกับโครงการที่มีงบจำกัด

7.4 ข้อจำกัดในการศึกษา

แม้ว่าหัวข้อนี้จะนำเสนอภาพรวมของโรงไฟฟ้าที่ใช้เตาเผาเทอร์ไบน์ภายใต้วัฏจักรที่แตกต่างกันอย่างครอบคลุม แต่อย่างไรก็ตาม ยังมีข้อจำกัดบางประการที่ควรพิจารณาดังต่อไปนี้

7.4.1 จำนวนวัฏจักรที่ใช้ในการเปรียบเทียบมีจำกัด

แม้ว่าการศึกษานี้จะทำการเปรียบเทียบวัฏจักรเพียง 4 รูปแบบ แต่ในทางปฏิบัติยังมีวัฏจักรอื่น ๆ อีกมากที่อาจมีศักยภาพในการทำงานร่วมกับเตาเผาเทอร์ไบน์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ดังนั้น ผลการศึกษาจึงยังไม่สามารถใช้เป็นข้อสรุปที่แน่ชัดเกี่ยวกับวัฏจักรที่เหมาะสมที่สุดได้ในทุกกรณี

7.4.2 จำนวนสารทำงานที่ใช้ในการศึกษามีจำกัด

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ มีการเลือกใช้สารทำงานในจำนวนจำกัด ซึ่งอาจทำให้ไม่สามารถแสดงให้เห็นถึงความหลากหลายของคุณสมบัติของสารทำงานที่ส่งผลต่อการทำงานของเตา

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