

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 พบว่ายังไม่มีงานวิจัยใดที่รายงานสมรรถนะของโรงไฟฟ้าวัฏจักรที่แอลซีที่ใช้เตสลาเทอร์ไบน์ร่วมกับสารซีโอโทรปิก (Zeotropic mixtures) รวมถึงในงานวิจัยก่อนหน้าแสดงให้เห็นว่าสามารถช่วยทำให้ผลิตไฟฟ้าได้สูงมากขึ้นในโรงไฟฟ้าโออาร์ซี ดังนั้น ในหัวข้อได้เพิ่มสารทำงานที่เป็นสารผสมซีโอโทรปิกที่เกิดจากการจัดคู่ของสารทดแทน R245fa ข้างต้นด้วย

โดยผลที่แสดงในหัวข้อนี้ประกอบไปด้วย 3 หัวข้อได้แก่ การประเมินสมรรถนะของระดับอุปกรณ์ การประเมินสมรรถนะของระบบและการประเมินความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ เมื่อสารทำงานของโรงไฟฟ้าวัฏจักรที่แอลซีเปลี่ยนแปลงไปโดยมีรายละเอียดเป็นดังต่อไปนี้

6.1 การประเมินสมรรถนะของระดับอุปกรณ์

ในหัวข้อนี้ได้ประเมินผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงสารทำงานที่กระทบต่อสมรรถนะของอุปกรณ์ภายในโรงไฟฟ้าวัฏจักรทีแอลซี 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								

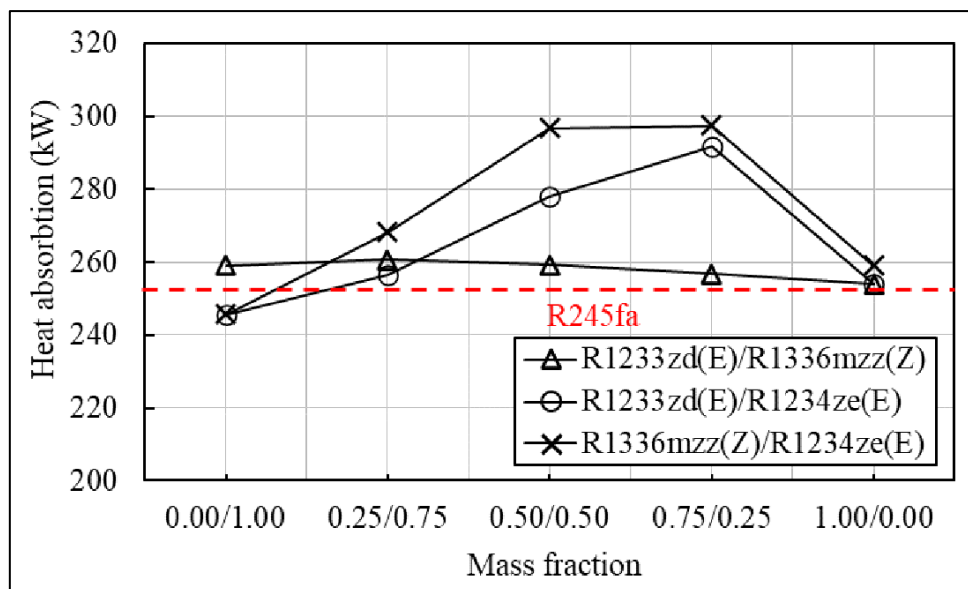
6.1.1 เงื่อนไขการทำงานของโรงไฟฟ้าและอุณหภูมิวิกฤตของสารทำงาน

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 แนวโน้มดังกล่าวไม่สอดคล้องกับอัตราการใช้ของสารทำงาน โดยอัตราการใช้ของสารทำงานนี้สูงกว่า R245fa อยู่ 22%

นอกจากนี้ การใช้สารทำงานบริสุทธิ์ที่เป็นตัวทดแทนสาร R245fa พบว่าเงื่อนไขการทำงานของโรงไฟฟ้าแตกต่างกับโรงไฟฟ้าที่ใช้ R245fa มาก แสดงให้เห็นว่าการใช้งานสารทำงานที่เป็นสารทดแทน R245 ในระบบทำความเย็นมาใช้กับโรงไฟฟ้าวัฏจักรที่แอลซีนั้นไม่สามารถนำไปใช้ทดแทนในระบบเดิมที่ใช้ R245fa อยู่แล้วได้ทันที

6.1.2 พฤติกรรมของการถ่ายเทความร้อน

โรงไฟฟ้าวัฏจักรที่แอลซีซึ่งสารทำงานก่อนเข้าเทอร์โบอยู่ในสถานะของเหลวอิ่มตัว ดังนั้นการเปลี่ยนสถานะของสารทำงานจะเกิดขึ้นเฉพาะที่คอนเดนเซอร์เท่านั้นโดยไม่มีการระเหยในฮีตเตอร์ ซึ่งลักษณะการทำงานเฉพาะนี้ส่งผลต่อพฤติกรรมของสารผสมซีโอโทรปิกในการถ่ายเทความร้อน เมื่อเปรียบเทียบกับโรงไฟฟ้าวัฏจักรโออาร์ซีแบบทั่วไป โดยผลของการรับความร้อนจากแหล่งความร้อนเมื่อใช้สารทำงานที่แตกต่างกันแสดงไว้ในรูปที่ 6.1



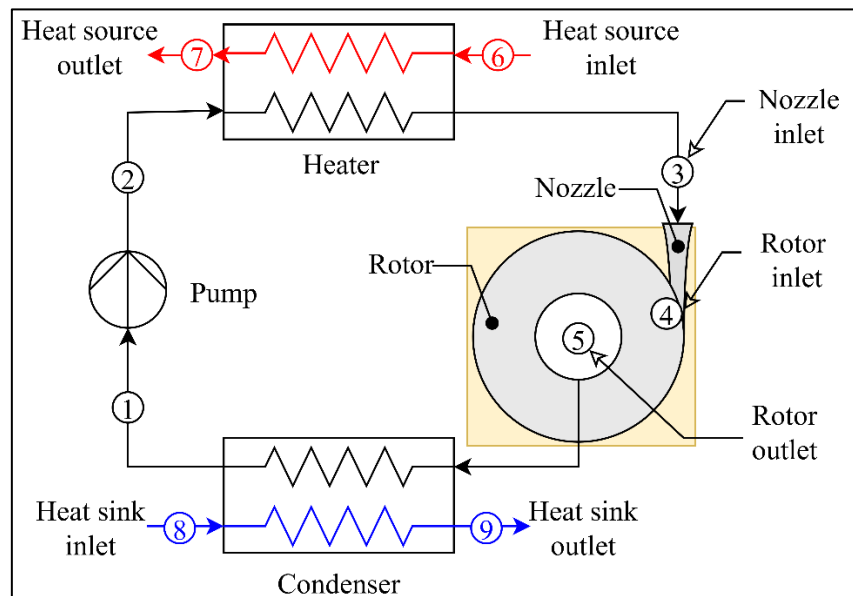
รูปที่ 6.1 ผลการรับความร้อนของสารทำงานในฮีตเตอร์เมื่อสารทำงานเปลี่ยนแปลงไป โดยเส้นสีแดงคือผลของสารทำงาน R245fa

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

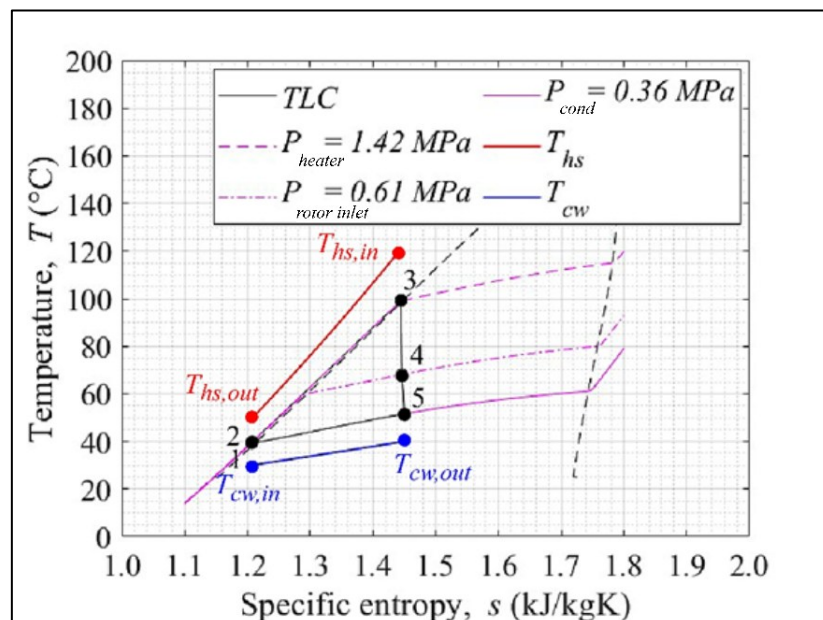
ที่สำคัญคือ เมื่อใช้สารทำงานที่เป็นสารผสมซีโอโทรปิกสามารถรับความร้อนได้มากกว่าสารบริสุทธิ์ทุกคู่ดังรูปที่ 6.1 ซึ่งโดยทั่วไปแล้ว การเพิ่มความสามารถในการรับความร้อนของสารทำงานเมื่อใช้ซีโอโทรปิกจากการเกิดการไถ่ของอุณหภูมิ (Temperature glide) ในขณะสารทำงานเปลี่ยนสถานะในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน อย่างไรก็ตาม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

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

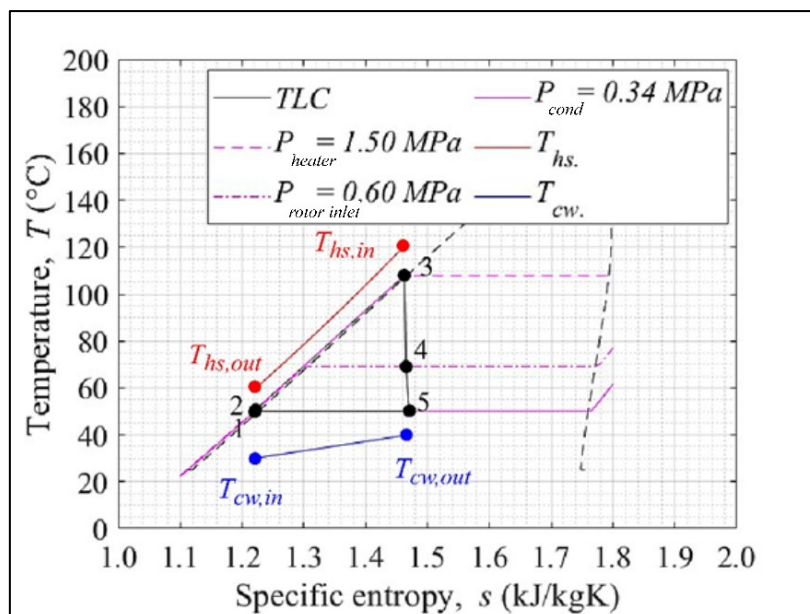
แสดงดังรูปที่ 6.2 และ 6.3 ตามลำดับ เพื่อใช้ในการวิเคราะห์พฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนระหว่างสารผสมและสารบริสุทธิ์



รูปที่ 6.2 ผังของอุปกรณ์ของโรงไฟฟ้าวัฏจักรที่แอลซี



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

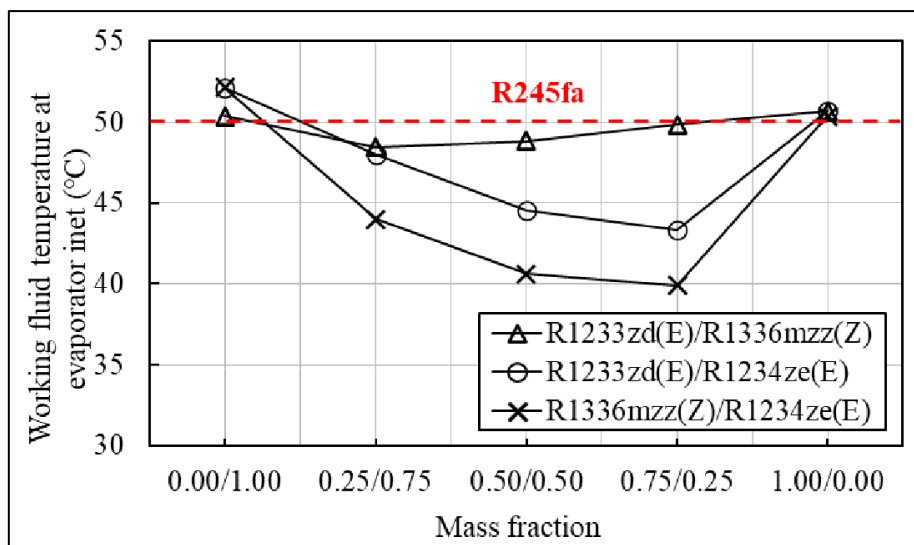


รูปที่ 6.4 ผังของอุณหภูมิและเอนโทรปีจำเพาะของสาร R245fa บริสุทธิ์

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 ส่งผลให้อุณหภูมิของสารทำงานที่ออกจากคอนเดนเซอร์มีอุณหภูมิต่ำกว่าเมื่อใช้สารผสมซีโอโทโรปิก ซึ่งผลดังกล่าวสอดคล้องกับการศึกษา ก่อนหน้า [(Zhao and Bao, 2014); (Thurairaja et al., 2019)] โดยพบว่า การไต่ของอุณหภูมิในคอนเดนเซอร์ส่งผลให้อุณหภูมิของสารทำงานก่อนเข้าฮีตเตอร์ต่ำลง

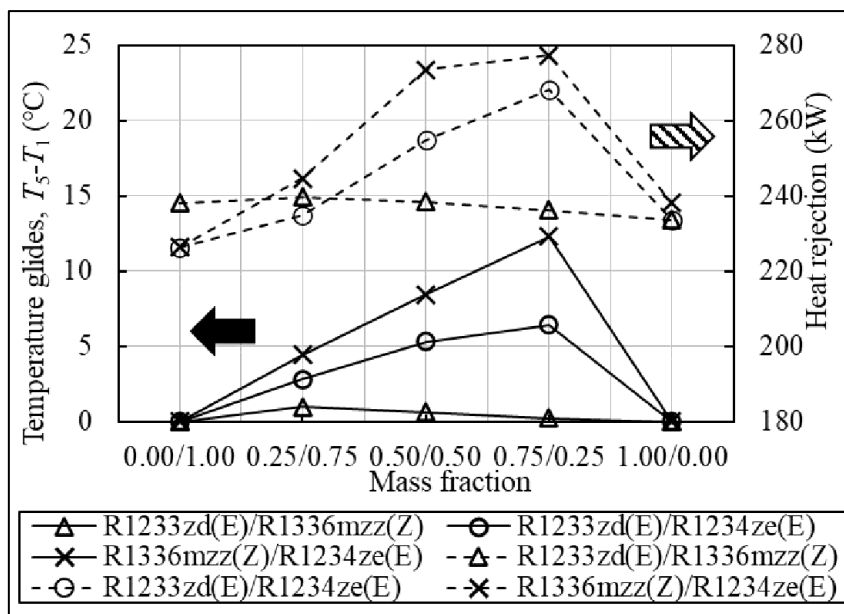
โดยจากผลการทดลอง สารผสม R1336mzz(Z)/R1234ze(E) และ R245fa บริสุทธิ์ มีอุณหภูมิของสารทำงานที่ทางออกของฮีตเตอร์มีค่าใกล้เคียงกันประมาณ 100 °C (จุดที่ 3) เนื่องจากกำหนดให้ทั้งสองโรงไฟฟ้ามีอุณหภูมิแหล่งความร้อนเท่ากัน ดังนั้น สารทำงานที่เป็นสารผสมที่อุณหภูมิของสารทำงานที่เข้าฮีตเตอร์ต่ำจึงทำให้เกิดความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างสารทำงานและแหล่งความร้อนมากขึ้นจึงส่งผลใ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

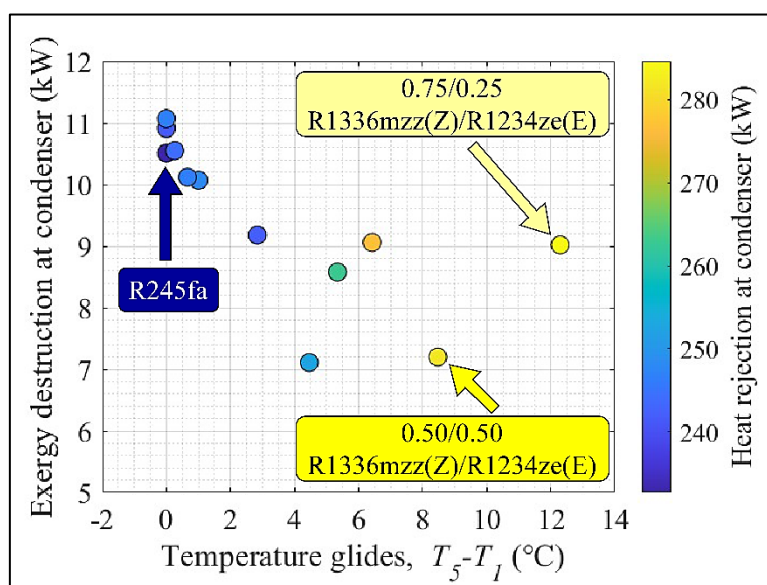
จากผลดังรูปที่ 6.5 แสดงให้เห็นว่าสารทำงานที่มีการไต่ของอุณหภูมิสูงโดยทั่วไปแล้วส่งผลให้ทิ้งความร้อนที่คอนเดนเซอร์ได้สูง อย่างไรก็ตามสารผสมบางคู่มีแนวโน้มแตกต่างกันออกไป อาทิ สารผสม R1233zd(E)/R1336mzz(Z) ที่อัตราส่วนโดยมวลเท่ากับ 0.25/0.75 แสดงให้เห็นว่าสามารถทิ้งความร้อนได้สูงในขณะที่มีการไต่ของอุณหภูมิต่ำ 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 °C โดยที่การไต่ของอุณหภูมิดังกล่าวมีความแมตช์อุณหภูมิ (Temperature match) กับน้ำหล่อเย็นที่มีความแตกต่างของอุณหภูมิเข้าและออกที่ 10 °C จึงส่งผลให้เกิดการถ่ายเทความร้อนที่มีประสิทธิภาพและสม่ำเสมอ

นอกจากค่าการไต่ของอุณหภูมิแล้ว การวิเคราะห์การทำลายเอกเซอร์ยีสามารถให้มุมมองของความไม่ผันกลับของกระบวนการ (Irreversibility) โดยการทำลายเอกเซอร์ยีมากยิ่งขึ้นเพิ่มความไม่ผันกลับของกระบวนการมากขึ้น โดยรูปที่ 6.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการไต่ของอุณหภูมิที่ส่งผลต่อการทำลายของเอกเซอร์ยีและการทิ้งความร้อนที่คอนเดนเซอร์



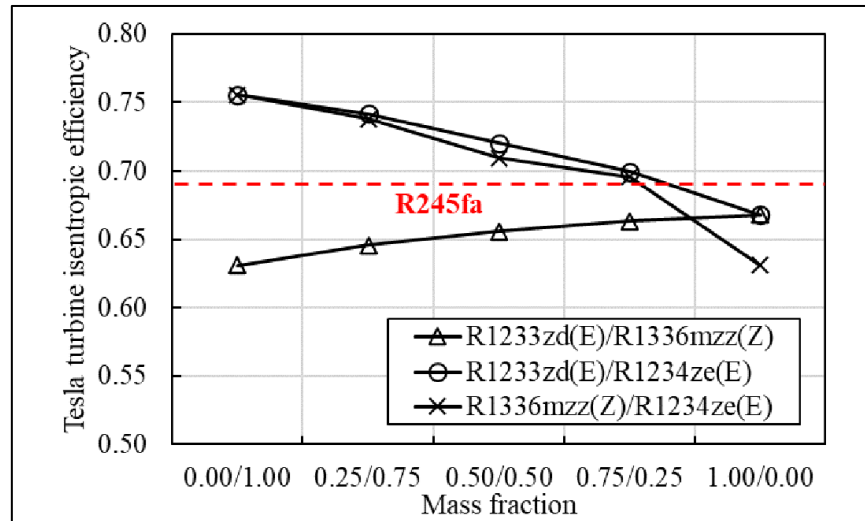
รูปที่ 6.7 ผลของการไต่ของอุณหภูมิต่อการทำลายเอกเซอร์ยีและการทิ้งความร้อนของสารทำงานที่คอนเดนเซอร์

จากรูปที่ 6.7 แสดงให้เห็นว่าสารทำงานที่มีการไต่ของอุณหภูมิใกล้ 10 °C (อยู่ในช่วง 6.7 °C ถึง 12.3 °C) การทำลายของเอกเซอร์ยีมีค่าต่ำในคอนเดนเซอร์ ในขณะที่ทิ้งความร้อนได้มาก โดยความแมตช์อุณหภูมิระหว่างสารทำงานและแหล่งทิ้งความร้อนช่วยให้ความแตกต่างของอุณหภูมิสม่ำเสมอระหว่างการถ่ายเทความร้อนในคอนเดนเซอร์ส่งผลให้ช่วยลดความไม่ผันกลับของกระบวนการ (Irreversibility) และเพิ่มความสามารถในการถ่ายเทความร้อน อย่างไรก็ตาม สารบริสุทธิ์ (ไม่เกิดการไต่ของอุณหภูมิ) แสดงให้เห็นว่ามีการทำลายเอกเซอร์ยีที่สูงกว่าสารผสม

6.1.3 พฤติกรรมของเทสลาเทอร์ไบน์

ในหัวข้อนี้ได้ศึกษาอิทธิพลของการเปลี่ยนสารทำงานที่ต่างกันส่งผลกระทบต่อสมรรถนะของเทสลาเทอร์ไบน์อย่างไรเมื่อใช้เป็นเทอร์ไบน์ในโรงไฟฟ้าวัฏจักรที่แอลซี โดยผลของ

ประสิทธิภาพของเตสลาเทอร์ไบน์แสดงดังรูปที่ 6.8 และขนาดของเทอร์ไบน์และการทำงานที่เหมาะสมแสดงในภาคผนวก ง



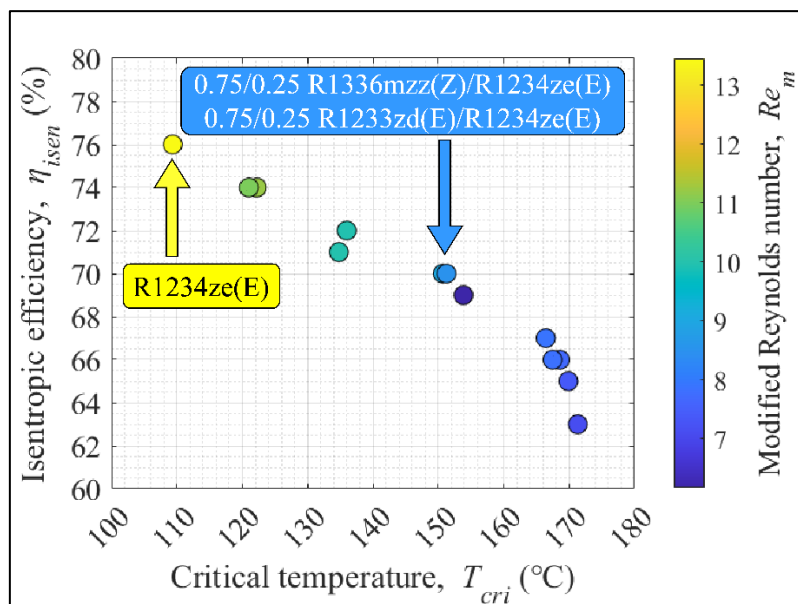
รูปที่ 6.8 ประสิทธิภาพไอเซนโทรปิกของเตสลาเทอร์ไบน์เมื่อสารทำงานเปลี่ยนแปลงไป

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

$$Re_m = \frac{2b\dot{m}_c}{\pi\mu_{TP,4}r_d^2} \quad (6.1)$$

โดยผลของอุณหภูมิวิกฤตและ Re_m ต่อประสิทธิภาพไอเซนโทรปิกของเทสลาเทอร์ไบน์แสดงดังรูปที่ 6.9



รูปที่ 6.9 อิทธิพลของอุณหภูมิวิกฤต และ Modified Reynold number ต่อประสิทธิภาพไอเซนโทรปิกของเทสลาเทอร์ไบน์

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

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

จากผลการศึกษาของ Moran et al. (2010) สารทำงานที่มีอุณหภูมิวิกฤตสูงจะมีความดันอิ่มตัวต่ำกว่า ภายใต้สภาวะอุณหภูมิและความดันที่เท่ากัน สำหรับโรงไฟฟ้าวัฏจักรที่แอลซีทีใช้ใน

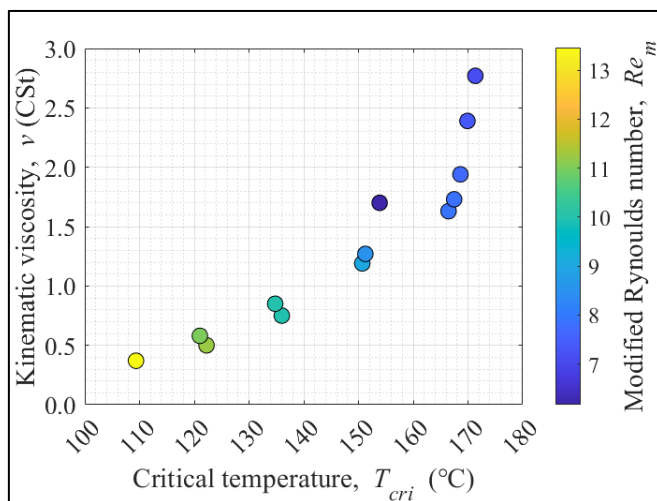
งานวิจัยนี้ ความดันของสารทำงานที่ฮีตเตอร์จำเป็นต้องสูงพอที่จะทำให้สารทำงานกลายเป็นของเหลว อิมตัวที่ทางออกของฮีตเตอร์ที่อุณหภูมิ $\sim 100^\circ\text{C}$ ขณะที่ความดันที่คอนเดนเซอร์ต้องต่ำพอเพื่อให้สารทำงานกลั่นตัวก่อนออกจากคอนเดนเซอร์ที่อุณหภูมิ $\sim 50^\circ\text{C}$ ทั้งสองความดันนี้จะต่ำกว่าสารทำงานที่มีอุณหภูมิวิกฤตต่ำกว่า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

โดยที่เมื่อความดันของสารทำงานเปลี่ยนตามอุณหภูมิวิกฤต ส่งผลให้เกิดผลกระทบต่อคุณสมบัติของสารทำงาน โดยจากสมการ Re_m ดังสมการที่ 4.1 ซึ่งส่งผลโดยตรงกับประสิทธิภาพของเซลล์เทอร์โบไดรฟ์รูปที่ 6.9

โดย Re_m สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของความสัมพันธ์ของคุณสมบัติของสารทำงาน ได้ดังสมการที่ 6.2 เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ประสิทธิภาพไอเซนโทรปิกที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อสารทำงานเปลี่ยน

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

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 Reynold number ต่อความหนืดจลน์

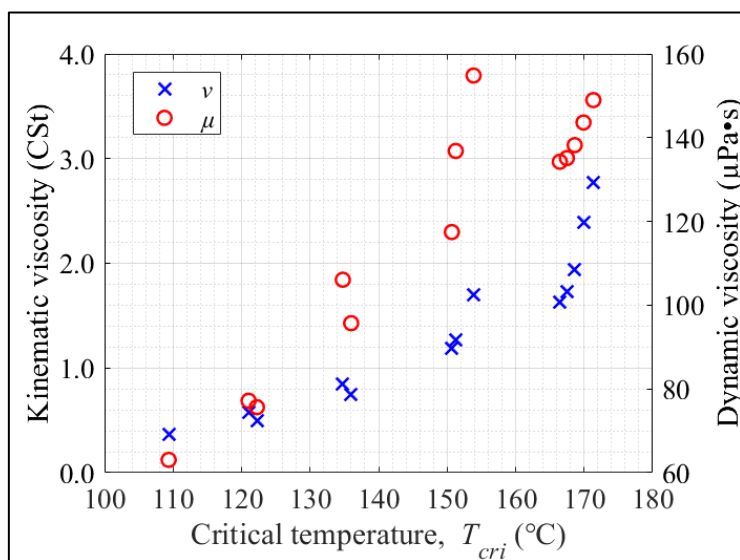
โดยจากรูปที่ 6.10 แสดงให้เห็นว่าเมื่ออุณหภูมิวิกฤตเพิ่มสูงขึ้นส่งผลให้ความหนืดจลน์เพิ่มสูงขึ้นส่งผลให้ Re_m^* ลดลง จึงทำให้ประสิทธิภาพของเซลล์เทอร์โบไดรฟ์ลดลงตามไปด้วยดังรูปที่ 6.9 โดยความหนืดจลน์คือความต้านทานการไหลจากแรงเฉื่อยหรือน้ำหนักของตัวสารทำงานเอง โดย

เป็นสัดส่วนระหว่างความหนืดพลวัต (Dynamic viscosity) ต่อความหนาแน่นของสารทำงาน (Density) ซึ่งหมายถึงสารที่มีความหนืดจลน์สูงจะไหลได้ยากซึ่งผลกระทบที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงความดันของเทสลาเทอร์ไบน์ดังสมการที่ 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 จะสามารถไหลผ่านโรเตอร์ของเทสลาเทอร์ไบน์ได้สะดวกมากขึ้น เนื่องจากแรงเฉื่อยจากมวลของสารทำงานลดลง ส่งผลให้การถ่ายเทพลังงานภายในโรเตอร์มีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น

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

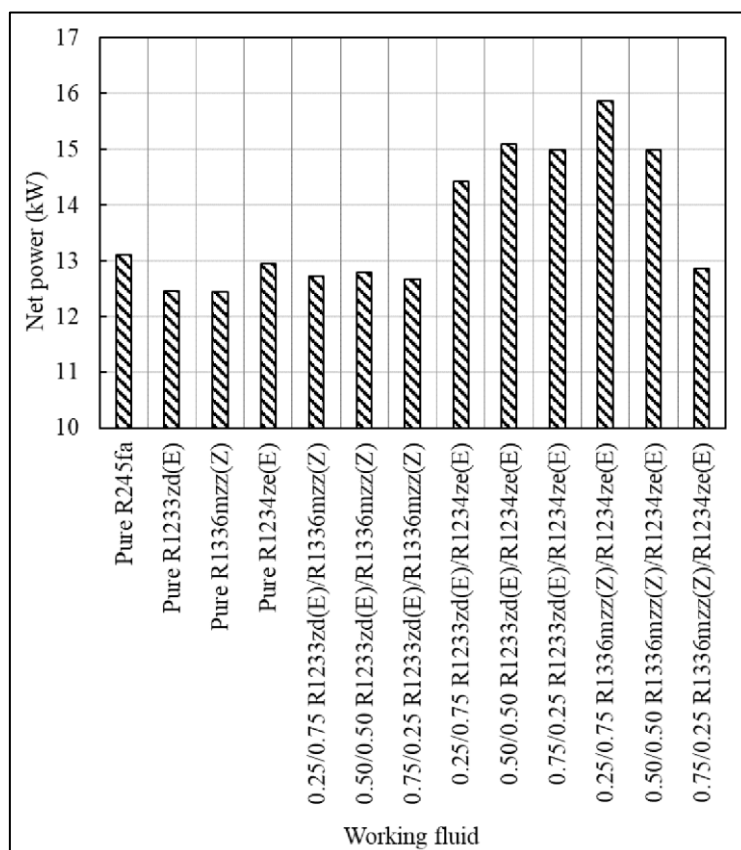


รูปที่ 6.11 ความหนืดจลน์และความหนืดพลวัตของสารทำงานเมื่ออุณหภูมิวิกฤตของสารทำงานเปลี่ยนแปลงไป

ผลการวิเคราะห์พบว่า เมื่ออุณหภูมิวิกฤตของสารทำงานเพิ่มขึ้นจาก 109 °C เป็น 171 °C ความหนืดจลน์มีการเปลี่ยนแปลงมากกว่าความหนืดพลวัตอย่างชัดเจน โดยเพิ่มขึ้นประมาณ

7.8 เท่า ขณะที่ความหนืดพลวัตเพิ่มขึ้นเพียง 2.4 เท่า ดังนั้น ในการศึกษานี้อิทธิพลของความหนืดจลน์จึงมีบทบาทเหนือกว่าความหนืดพลวัตต่อสมรรถนะของเตสลาเทอร์โบน์ ดังนั้นความหนืดพลวัตจึงส่งผลน้อยกับประสิทธิภาพของเตสลาเทอร์โบน์ในการศึกษาในหัวข้อนี้

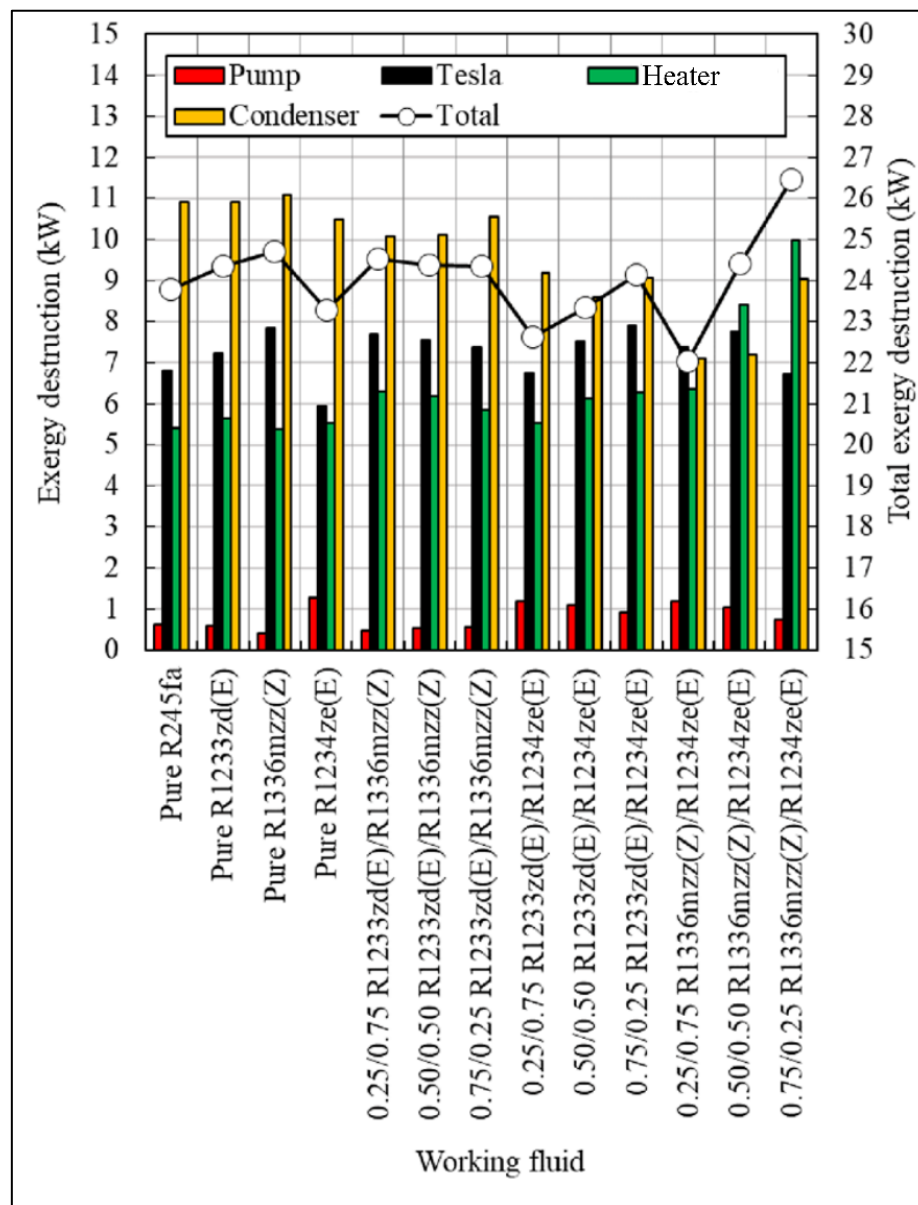
การศึกษาในหัวข้อนี้แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ที่สำคัญระหว่างอุณหภูมิวิกฤต ความหนืดพลวัต ความหนืดจลน์ และ Re_m ซึ่งแสดงให้เห็นถึงบทบาทของคุณสมบัติของสารทำงานที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของเตสลาเทอร์โบน์ อย่างไรก็ตาม จากการศึกษานี้ของ Kachawong and Koonsrisuk (2025) พบว่า แม้เทอร์โบน์จะมีประสิทธิภาพสูง แต่ก็ไม่ได้รับประกันว่าโรงไฟฟ้าจะมีกำลังสุทธิสูงเสมอไป ดังนั้นการวิเคราะห์ในบทนี้จึงได้ประเมินสมรรถนะระดับระบบ โดยศึกษารวมพฤติกรรมของอุปกรณ์หลักในวัฏจักรทีแอลซี เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของสารทำงาน ซึ่งนำเสนอในหัวข้อ 6.2



รูปที่ 6.12 ผลของกำลังสุทธิเมื่อสารทำงานของโรงไฟฟ้าวัฏจักรทีแอลซีเปลี่ยนแปลงไป

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 สำหรับเตสลาเทอร์โบน์มีการทำลายเอกเซอร์ยีประมาณ 30% ซึ่งแนวโน้มดังกล่าวสอดคล้องกับประสิทธิภาพไอเซนโทรปิก กล่าวคือ เมื่อการทำลายเอกเซอร์ยีเพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพจะลดลง ตามที่ได้วิเคราะห์ไว้ในหัวข้อ 6.1.3 ขณะที่ปั๊มเป็นอุปกรณ์ที่มีการทำลายเอกเซอร์ยีน้อยที่สุด เนื่องจากใช้พลังงานต่ำและกระบวนการอัดของสารทำงานอยู่ในลักษณะใกล้เคียงกับการอัดแบบไม่อัดตัว (Near-incompressible compression)

เป็นที่น่าสังเกตว่า แม้เตสลาเทอร์โบน์จะมีสัดส่วนเอกเซอร์ยีที่ถูกทำลายสูงถึงประมาณ 30% ของทั้งระบบ แต่การเลือกสารทำงานโดยอิงจากประสิทธิภาพไอเซนโทรปิกของเทอร์โบน์เพียงอย่างเดียวไม่ได้รับประกันว่าโรงไฟฟ้าจะให้กำลังสุทธิสูงสุดเสมอไป ตัวอย่างเช่น R1234ze(E) ซึ่งให้ประสิทธิภาพของเตสลาเทอร์โบน์สูงที่สุด (แสดงดังรูปที่ 6.9) แต่กลับไม่ได้ให้กำลังสุทธิสูงสุด (แสดงดังรูปที่ 6.12) สะท้อนให้เห็นถึงความสำคัญของการประเมินสมรรถนะในระดับระบบมากกว่าการพิจารณาเฉพาะรายอุปกรณ์

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

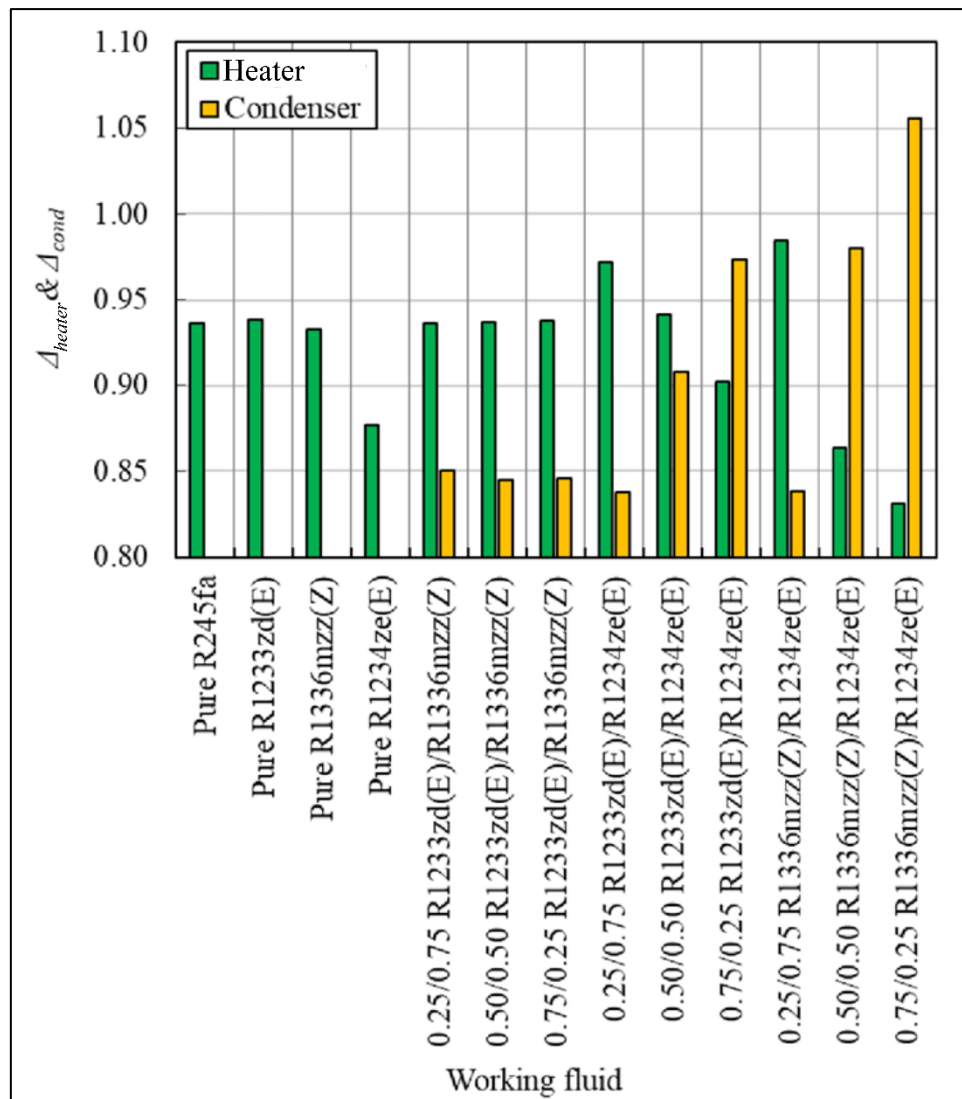
6.2.2 ความเหมาะสมของอุณหภูมิและการกระจายของเอกเซอร์ยี

เพื่อประเมินความสามารถในการถ่ายเทความร้อน หัวข้อนี้ได้ทำการวิเคราะห์ประสิทธิภาพของความแมตซ์อุณหภูมิในฮีตเตอร์และคอนเดนเซอร์ โดยพิจารณาค่าความแตกต่างของความชื้น (Δ_{heater} และ Δ_{cond}) ระหว่างเส้นอุณหภูมิของสารทำงานกับแหล่งความร้อนและแหล่งทิ้งความร้อนตามสมการที่ 6.1 และ 6.2 ซึ่งค่าที่เข้าใกล้ 1 บ่งชี้ว่าเกิดความแมตซ์ของความชื้นอุณหภูมิได้ดีระหว่างสารทำงานกับแหล่งความร้อนและแหล่งทิ้งความร้อน 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 สารผสมซีโอโทรปิกเกิดการไต่ของอุณหภูมิระหว่างกระบวนการกลั่นตัวในคอนเดนเซอร์โดยการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิดังกล่าวทำให้สามารถคำนวณ Δ_{cond} ได้ เพื่อประเมินความแมตซ์อุณหภูมิกับน้ำหล่อเย็น



รูปที่ 6.14 ผลการเปรียบเทียบผลความแตกต่างของความชันระหว่าง แหล่งให้และรับความร้อนกับ สารทำงานภายในฮีตเตอร์และคอนเดนเซอร์

โดยรูปที่ 6.14 ได้ให้แนวโน้มที่สำคัญการเกิดความแมตซ์อุณหภูมิดังนี้

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

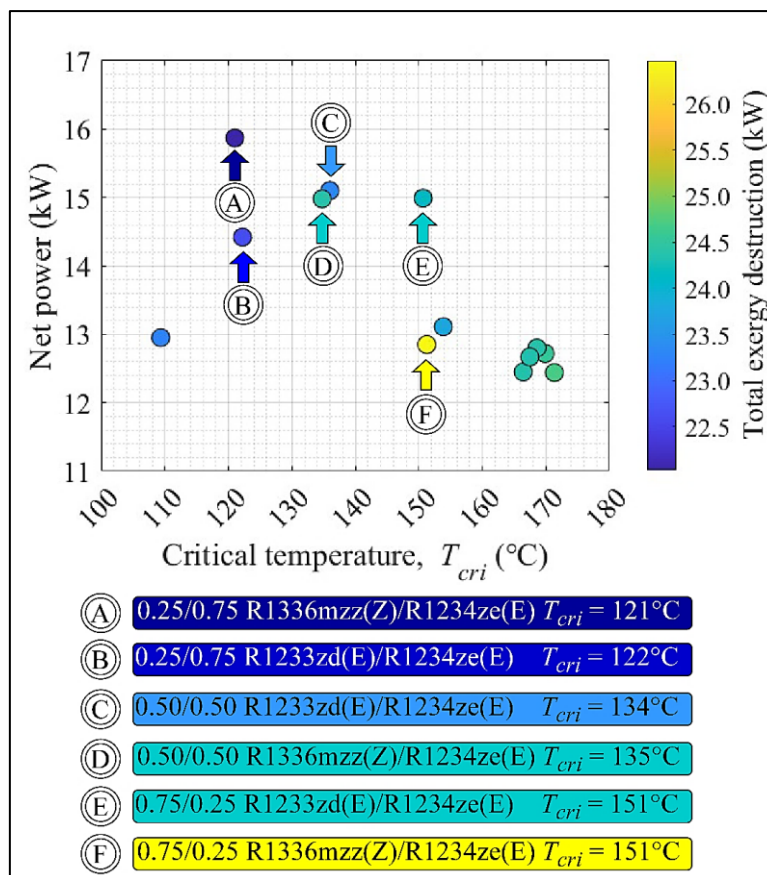
สถานะ (Non-phase change heat absorption) ในขณะที่โรงไฟฟ้าโออาร์ซีโดยทั่วไปมีการเปลี่ยนสถานะระหว่างรับความร้อน (Non-phase change heat absorption) ส่งผลให้ฮีตเตอร์โรงไฟฟ้าวัฏจักรที่แอลซีมีความแมตซ์อุณหภูมิที่ดีกว่าคอนเดนเซอร์ เพราะไม่มีการเปลี่ยนแปลงสถานะทำให้อุณหภูมิในการแลกเปลี่ยนความร้อนสม่ำเสมอ มากกว่าฮีตเตอร์ในโรงไฟฟ้าโออาร์ซี

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 ฮีตเตอร์ในการศึกษานี้ โดยทั้งสองสารนี้เป็นสารทำงานที่อุณหภูมิของสารทำงานที่เข้า ฮีตเตอร์ต่ำที่สุด (40.6 °C และ 39.9°C ตามลำดับ โดยแสดงในรูปที่ 6.5) ซึ่งช่วยเพิ่มความสามารถในการดึงพลังงานความร้อนจากแหล่งความร้อนได้มากขึ้น (แสดงดังรูปที่ 6.1) แต่ส่งผลให้ความแมตซ์กันของอุณหภูมิน้อยลง (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 เป็นสารที่ไม่ได้มีความแมตซ์ของอุณหภูมิที่ดีที่สุดในแต่ละอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน อย่างไรก็ตามสารดังกล่าวมีการทำลายเอกเซอร์ยี่รวมที่น้อยที่สุดดังแสดงในรูปที่ 6.13 และให้กำลังสุทธิสูงที่สุดดังแสดงในรูปที่ 6.12 ข้อสังเกตนี้สนับสนุนผลการศึกษาก่อนหน้าที่ระบุว่า ความไม่สมบูรณ์ต่าง ๆ (เช่น ความต้านทานและความไม่ผันกลับ) ไม่สามารถกำจัดออกได้ทั้งหมด และระบบที่เหมาะสมที่สุดคือระบบที่สามารถกระจายความไม่สมบูรณ์เหล่านี้อย่างเหมาะสมไปยังทุกองค์ประกอบ แทนที่จะมุ่งลดความไม่สมบูรณ์ในอุปกรณ์ใดอุปกรณ์หนึ่งเพียงอย่างเดียว [(Koonsrisuk et al., 2010); (Lorente et al., 2010)] โดยเมื่อพิจารณาเอกเซอร์ยี่ในอุปกรณ์ต่าง ๆ ของสารทำงานนี้เห็นได้ว่าที่ เทอร์โบน์ ฮีตเตอร์ และคอนเดนเซอร์มีส่วนเท่า ๆ กันซึ่งสอดคล้องกับการค้นพบในการศึกษาก่อนหน้า

6.2.3 อิทธิพลของอุณหภูมิวิกฤตต่อสมรรถนะของโรงไฟฟ้า

ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิวิกฤตของสารทำงานและสมรรถนะของระบบโรงไฟฟ้าแสดงให้เห็นถึงแนวทางการเลือกสารทำงานสำหรับโรงไฟฟ้าวัฏจักรที่แอลซี โดยรูปที่ 6.15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิวิกฤตของสารทำงานกับกำลังสุทธิและการทำลายเอกเซอร์ยี่ของโรงไฟฟ้า



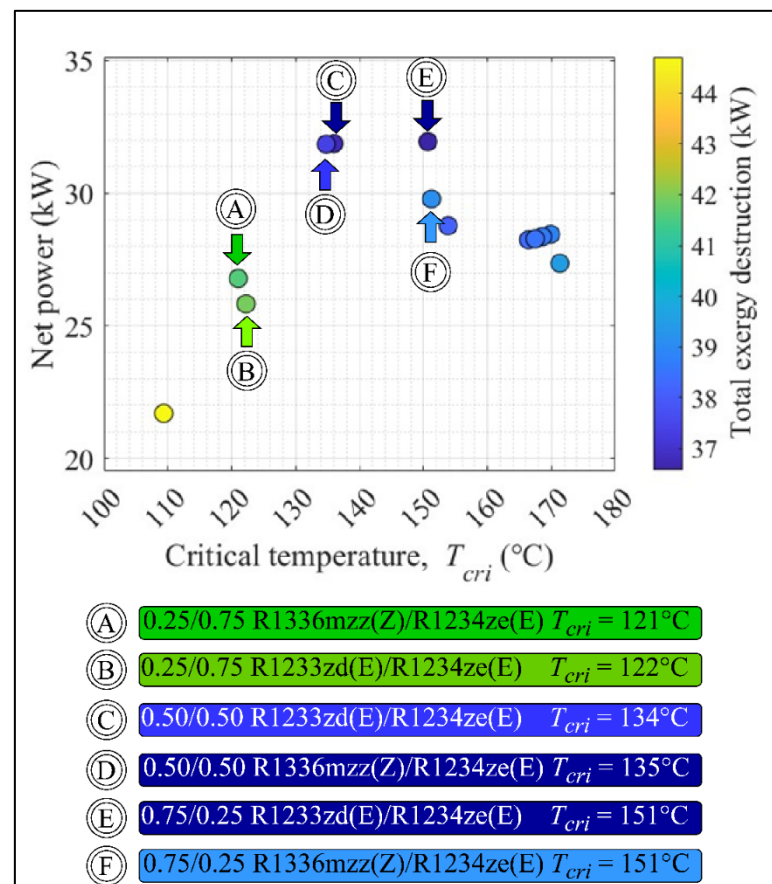
รูปที่ 6.15 อิทธิพลของอุณหภูมิวิกฤตต่อกำลังสุทธิของโรงไฟฟ้าวัฏจักรที่แอลซีและการทำลายเอกเซอร์ยี

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

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

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

เลือกสารทำงานสามารถใช้ได้ทั้งสารบริสุทธิ์และสารผสมที่ใช้ในการศึกษานี้สามารถนำไปใช้ในการเลือกสารทำงานให้เหมาะสมกับแหล่งความร้อนที่อุณหภูมิแตกต่างกันได้โดยใช้อุณหภูมิวิกฤตเป็นเกณฑ์ในการเลือกสารทำงาน



รูปที่ 6.16 อิทธิพลของอุณหภูมิวิกฤตต่อกำลังสุทธิของโรงไฟฟ้าวัฏจักรที่แอลซีและการทำลายเอกเซอร์ยี เมื่อแหล่งความร้อนเป็น 150 °C

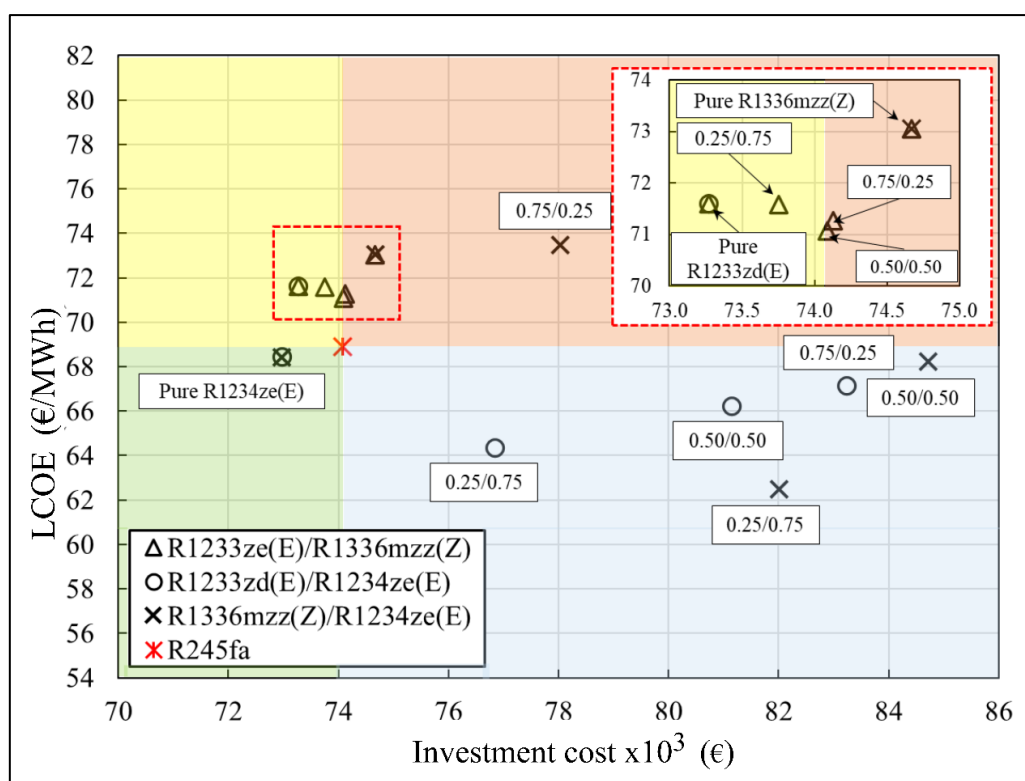
นอกจากนี้ สารผสมซีโอโทรปิกให้ความยืดหยุ่นในปรับส่วนผสมเพื่อให้สามารถปรับอุณหภูมิวิกฤตและการไต้ของอุณหภูมิเพื่อให้เข้ากับอุณหภูมิแหล่งความร้อนที่แตกต่างกันออกไป อย่างไรก็ตาม การเพิ่มขึ้นความสามารถของโรงไฟฟ้าจากการใช้สารผสมซีโอโทรปิกจำเป็นต้องใช้ขนาดอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่ใหญ่ขึ้นซึ่งเกิดจากการไต้ของอุณหภูมิ [(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

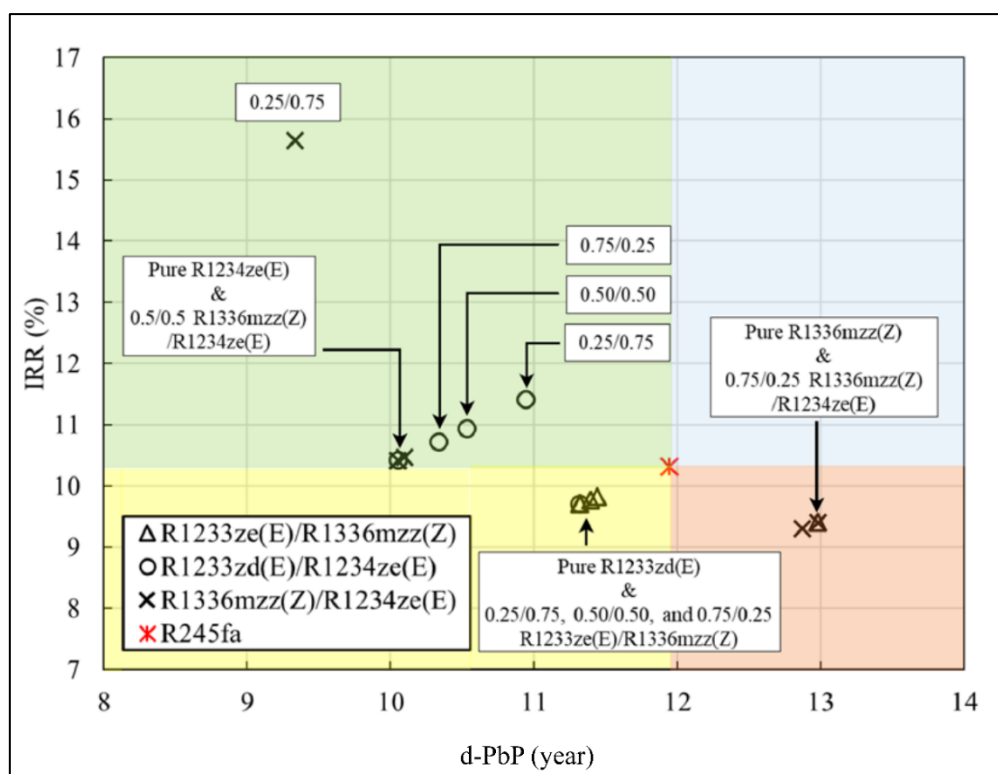
รูปที่ 6.17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างต้นทุนต่อหน่วยในการผลิตไฟฟ้า (LCOE) กับเงินลงทุนเริ่มต้นของโรงไฟฟ้า โดยจากกลุ่มสารทำงานทดแทน R245fa พบว่า โรงไฟฟ้าที่มีเงินลงทุนเริ่มต้นสูงกว่ามีต้นทุนต่อหน่วยในการผลิตไฟฟ้าต่ำกว่า ซึ่งสะท้อนถึงความคุ้มค่าในระยะยาวของระบบ ทั้งนี้ในรูปแบบได้แบ่งสารทำงานออกเป็น 4 กลุ่มตามสี โดยมีตำแหน่งของสาร R245fa บริสุทธิ์อยู่กึ่งกลาง 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 สารผสมซีโอโทรปิกโดยเฉพาะ 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 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราผลตอบแทนภายในและระยะเวลาในการคืนทุนของ โรงไฟฟ้าวัฏจักรที่แอลซีเมื่อสารทำงานเปลี่ยนแปลงไป

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 ที่สุดนอกจากนี้ 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

โดยจากการประเมินเศรษฐศาสตร์ชี้ให้เห็นว่าการใช้สารผสมซีโอโทโรปิกกับ โรงไฟฟ้าวัฏจักรที่แอลซีให้ผลประโยชน์อย่างมีนัยสำคัญ โดยพบว่าช่วยให้ LCOE ต่ำ ช่วยให้คืนทุนได้เร็วขึ้น อย่างไรก็ตามสารผสมซีโอโทโรปิกต้องการงบลงทุนที่มาก เนื่องจากความต้องการอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนขนาดใหญ่กว่าสารบริสุทธิ์ จากกลุ่มสารทดแทนที่ได้ศึกษา แสดงให้เห็นว่าสาร

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

6.4 แนวทางการประยุกต์ใช้ในทางปฏิบัติ

หัวข้อนี้นำเสนอแนวทางในการประยุกต์ใช้โรงไฟฟ้าวัฏจักรที่แอลซีร่วมกับเตาเผาเทอร์ไบน์ อ้างอิงจากผลการศึกษา เพื่อเลือกสารทำงานที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม โดยแนวทางดังกล่าวสามารถใช้เป็นพื้นฐานในการออกแบบระบบและต่อยอดสู่การวิจัยและทดสอบในเชิงปฏิบัติจริงได้

6.4.1 การเลือกสารทำงาน

เมื่อเลือกสารทำงานสำหรับโรงไฟฟ้าวัฏจักรที่แอลซีควรใช้เกณฑ์ในการเลือกสารทำงานเป็นดังต่อไปนี้:

6.4.1.1 เลือกสารทำงานให้มีอุณหภูมิวิกฤตให้เหมาะกับแหล่งความร้อน:

การเลือกสารทำงานด้วยอุณหภูมิวิกฤตให้เหมาะสมกับอุณหภูมิใกล้เคียงกับอุณหภูมิของแหล่งความร้อน โดยการใช้หลักเกณฑ์อย่างง่ายนี้ในการคัดเลือกสารทำงานช่วยเพิ่มสมรรถนะของโรงไฟฟ้าอย่างมีนัยสำคัญ

6.4.1.2 พิจารณางค์ประกอบของสารผสมซีโอโทรปิก:

เมื่อสร้างสารผสมซีโอโทรปิกควรพิจารณาดังต่อไปนี้

- 1) เลือกสารทำงานที่มีความแตกต่างของอุณหภูมิวิกฤตเพื่อช่วยเพิ่มให้มีการไถ่ของอุณหภูมิ (Temperature glide) มากขึ้น
- 2) ปรับสัดส่วนโดยมวลให้เหมาะสมกับระบบที่นำไปใช้โดยเฉพาะ
- 3) สำหรับสารผสมที่มีส่วนประกอบของ R1234ze(E) สูงสามารถช่วยเพิ่มความสามารถในการปรับปรุงประสิทธิภาพของเตาเผาเทอร์ไบน์ได้

6.4.1.3 พิจารณานำไปใช้ในระบบที่มีข้อจำกัดแตกต่างกัน:

ควรพิจารณาดังต่อไปนี้:

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

6.4.2 การนำเทสลาเทอร์โบน์ไปใช้งาน

สำหรับการนำเทสลาเทอร์โบน์นำไปใช้งานกับสารทำงานที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม สามารถพิจารณาได้ดังนี้

- 1) ทำให้การไหลในเทสลาเทอร์โบน์ยังคงเป็นการไหลแบบราบเรียบ (laminar flow): ในการออกแบบขนาดของเทสลาเทอร์โบน์ควรออกแบบให้มั่นใจได้ว่าสารทำงานที่ไหลอยู่ในโรเตอร์เป็นการไหลแบบราบเรียบจะช่วยให้เทสลาเทอร์โบน์ทำงานได้มีประสิทธิภาพมากขึ้น
- 2) ให้สัดส่วนความดันที่เหมาะสม: ในการปรับใช้งานในระบบควบคุม ควรปรับให้สัดส่วนความดันของคอนเดนเซอร์และฮีตเตอร์ให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสม (อยู่ในช่วง 3.25 ถึง 4.72 ขึ้นอยู่กับสารทำงาน) เพื่อให้ได้กำลังจากเทอร์โบน์ออกมาสูง

6.4.3 การพิจารณาในระดับอุปกรณ์ของโรงไฟฟ้า

การพิจารณาการออกแบบในระดับระบบบางประการ สามารถนำไปประยุกต์ใช้การนำโรงไฟฟ้าวัฏจักรที่แอลซีที่ใช้เทสลาเทอร์โบน์และสารผสมซีโอโทรปิกมาใช้งาน โดยมีรายละเอียดดังนี้

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

หลังจากนำการประยุกต์เหล่านี้ไปปรับใช้ สามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการใช้โรงไฟฟ้า วัฏจักรที่แอลซีที่ใช้เทสลาเทอร์โบน์ที่สารทำงานที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมเพื่อให้ได้สมรรถนะที่สูง ในขณะที่ยังคงคำนึงถึงข้อกำหนดด้านสิ่งแวดล้อม

6.5 ข้อจำกัดในการศึกษา

ในขณะที่การศึกษานี้ให้แง่ที่ครอบคลุมของการหาสารทดแทน R245fa บริสุทธิ์ที่ใช้กับโรงไฟฟ้าวัฏจักรที่แอลซีที่ใช้เทสลาเทอร์โบน์ทั้งสารบริสุทธิ์และสารผสม 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) ซึ่งอาจจะไม่สามารถแสดงถึงพฤติกรรมทั้งหมดของการถ่ายเทความร้อนเมื่อใช้สารผสมซีโอโทรปิก

6.5.2 การทำการตรวจสอบความถูกต้องกับการทดลอง

แม้ว่าการศึกษานี้จะได้มีการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองด้วยข้อมูลจากงานวิจัยที่เผยแพร่ในบทความวิชาการแล้วก็ตาม การตรวจสอบเพิ่มเติมโดยใช้ข้อมูลจากโรงไฟฟ้าไออาร์ซีทีใช้ เทสลาเทอร์ไบน์ร่วมกับสารผสมซีโอโทรปิกจะช่วยเพิ่มความน่าเชื่อถือให้กับแบบจำลองได้มากยิ่งขึ้น 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 ยังมีปัจจัยที่อาจส่งผลต่อการนำไปใช้งานซึ่งยังไม่ได้พิจารณา ได้แก่

- 1) ต้นทุนการบำรุงรักษาที่อาจสูงขึ้นในกรณีของสารผสมซีโอโทรปิก เนื่องจากองค์ประกอบของสารอาจเปลี่ยนแปลงเมื่อเวลาผ่านไป
- 2) ความแตกต่างของราคาอุปกรณ์และราคาขายไฟฟ้าในแต่ละพื้นที่
- 3) ต้นทุนในการติดตั้งในกรณีที่นำไปใช้กับระบบของอุตสาหกรรมที่มีอยู่แล้ว
- 4) ต้นทุนด้านประกันภัยและการบริหารความเสี่ยงที่เกี่ยวข้องกับการใช้สารทำงานแต่ละชนิด

6.5.5 การประเมินผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

แม้ว่าการศึกษานี้ได้ประเมินสารทำงานที่มีค่าศักยภาพในการก่อให้เกิดภาวะโลกร้อน (GWP) ต่ำกว่าสาร R245fa บริสุทธิ์อย่างมีนัยสำคัญ แต่การประเมินวัฏจักรชีวิต (Life Cycle Assessment: LCA) ซึ่งครอบคลุมตั้งแต่กระบวนการผลิต การขนส่ง การใช้งาน ไปจนถึงการจัดการเมื่อสิ้นสุดอายุการใช้งาน จะช่วยให้การประเมินผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมมีความครอบคลุมและแม่นยำยิ่งขึ้น นอกจากนี้ ผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมอื่น ๆ เช่น ศักยภาพในการก่อให้เกิดฝนกรด ศักยภาพในการทำลายชั้นโอโซน (Ozone Depletion Potential: ODP) และการใช้ทรัพยากรธรรมชาติ ยังไม่ได้รวมอยู่ในการศึกษานี้

โดยข้อจำกัดเหล่านี้เปิดโอกาสให้การวิจัยในอนาคตสามารถพัฒนาความเข้าใจเกี่ยวกับโรงไฟฟ้าวัฏจักรที่แอลซีที่ใช้เทสลาเทอร์ไบน์ร่วมกับสารทำงานที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมได้ดีมากขึ้น