

บทที่ 5

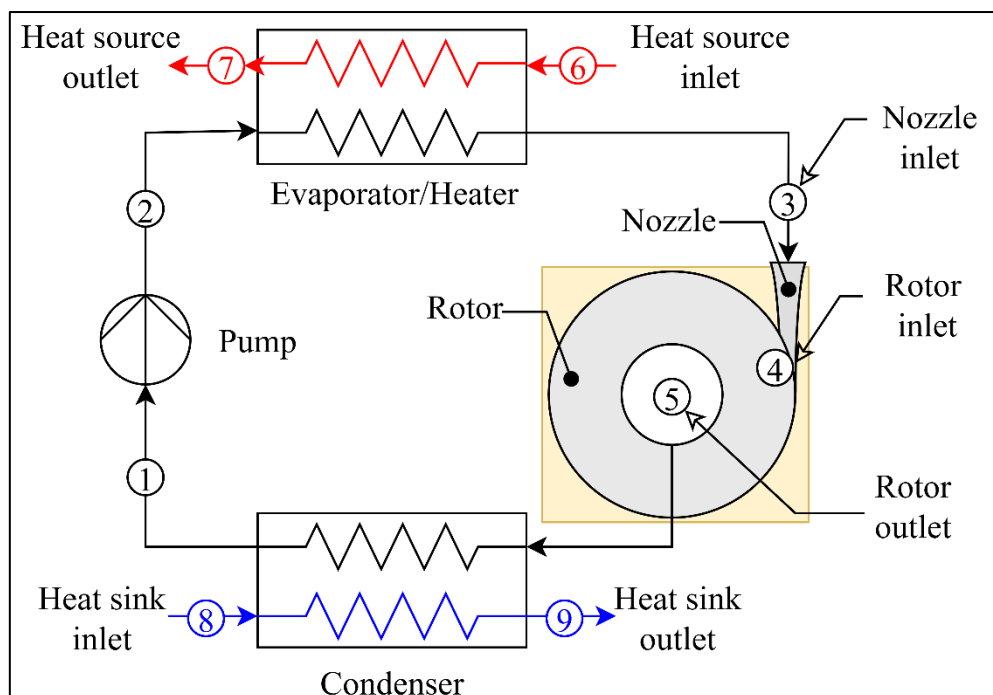
อิทธิพลของความเป็นไอของสารทำงานที่มีผลต่อสมรรถนะของโรงไฟฟ้า และเตสลาเทอร์ไบน์

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

5.1 การวิเคราะห์เงื่อนไขการทำงานของโรงไฟฟ้าที่ใช้จำลองเตสลาเทอร์ไบน์

ในหัวข้อนี้เป็นการศึกษาการทำงานของเตสลาเทอร์ไบน์โดยได้พิจารณาที่กำลังสุทธิของ โรงไฟฟ้าเป็นตัวแปรในการตัดสินใจ โดยการศึกษาเริ่มจากจำลองโรงไฟฟ้าวัฏจักรโออาร์ซีในหัวข้อที่ 3.1 เพื่อให้ได้เงื่อนไขการทำงานของโรงไฟฟ้าที่ให้ค่า ΔT_{pp} ทั้งคอนเดนเซอร์และอีวาโปเรเตอร์/ ฮีตเตอร์เท่ากับ 10°C ที่ความเป็นไอของสารทำงานแต่ละค่า โดยเงื่อนไขการทำงานได้แก่ ความดันที่ คอนเดนเซอร์ ความดันที่อีวาโปเรเตอร์/ฮีตเตอร์และอัตราการไหลเชิงมวลของสารทำงาน โดยเงื่อนไข ดังกล่าวได้ถูกใช้ในการออกแบบเตสลาเทอร์ไบน์เพื่อหาขนาดและการทำงานที่เหมาะสมดังหัวข้อ 3.3 ทั้งนี้ ผลของเงื่อนไขการทำงานของโรงไฟฟ้าวัฏจักรโออาร์ซีแสดงในตารางที่ 5.1 และผังของอุปกรณ์ ของโรงไฟฟ้าแสดงดังรูปที่ 5.1

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



รูปที่ 5.1 ผังอุปกรณ์ของโรงไฟฟ้าโออาร์ซีที่ใช้ในการศึกษาอิทธิพลของความเป็นไอของสารทำงาน ก่อนเข้าเตสลาเทอร์ไบน์

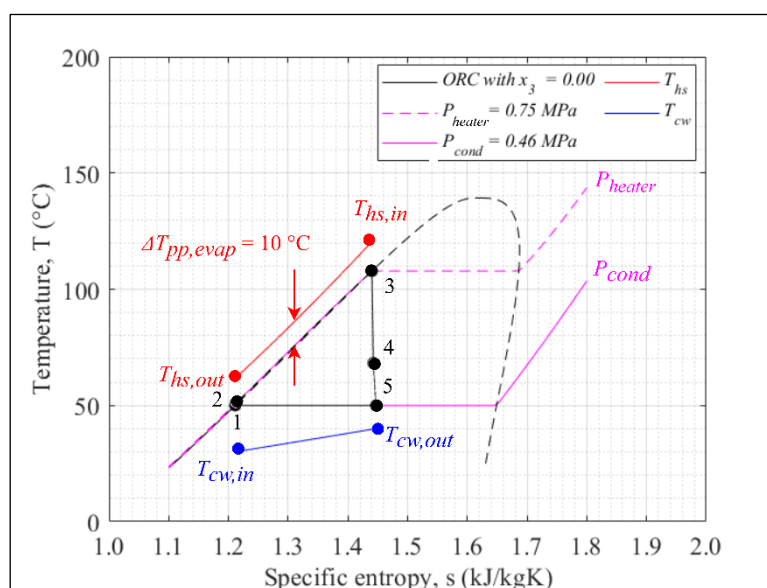
ตารางที่ 5.1 ผลของเงื่อนไขการทำงานของโรงไฟฟ้าที่ทำให้ได้กำลังสุทธิสูงสุดที่ความเป็นไอของสาร R236ea ก่อนเข้าเตสลาเทอร์ไบน์เปลี่ยนแปลงไป

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

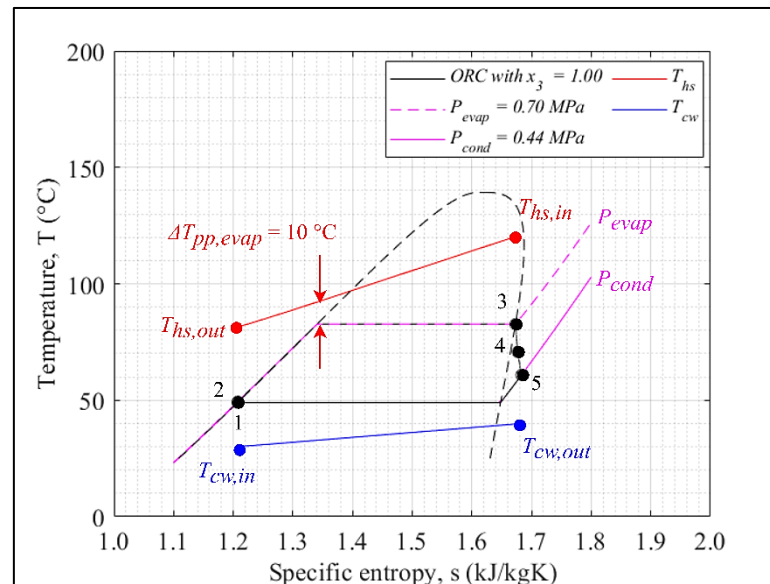
โดยเงื่อนไขการทำงานของโรงไฟฟ้าวัฏจักรโออาร์ซีเมื่อความเป็นไอเปลี่ยนแปลงไปดังตารางที่ 5.1 พบแนวโน้มที่น่าสนใจเป็นดังนี้

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

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



รูปที่ 5.2 ผังอุณหภูมิจำเพาะของโรงไฟฟ้าที่มีความเป็นไวก่อนเข้าเทอร์ไบน์เท่ากับ 0



รูปที่ 5.3 ผังอุณหภูมิและเอนโทรปีจำเพาะของโรงไฟฟ้าที่มีความเป็นไอก่อนเข้าเทอร์ไบน์เท่ากับ 1

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

4) อัตราการไหลของสารทำงาน: เพื่อเพิ่มความสามารถในการถ่ายเทความร้อนของโรงไฟฟ้าที่มีความเป็นไอของสารทำงานต่ำในอีวาโปเรเตอร์/ฮีตเตอร์จำเป็นต้องเพิ่มอัตราการไหลของสารทำงานเพื่อเป็นการเพิ่มความสามารถในการถ่ายเทความร้อนของสารทำงาน โดยในตารางที่ 5.1 แสดงให้เห็นว่าอัตราการไหลของสารทำงานเพิ่มมากขึ้นเมื่อความเป็นไอของสารทำงานลดลง

5) กำลังของปั๊ม: โดยที่กำลังของปั๊มสามารถเขียนออกดังสมการที่ 5.1

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

โดยที่ความหนาแน่นของสารทำงานที่เข้าปั๊มมีค่าใกล้เคียงกันเมื่อความเป็นไอของสารทำงานเปลี่ยนแปลงไป เนื่องจากความดันที่คอนเดนเซอร์และอุณหภูมิของสารทำงานก่อนเข้าปั๊มมีค่าใกล้เคียงกัน ดังนั้น กำลังของปั๊มขึ้นอยู่กับความดันที่อีวาโปเรเตอร์/ฮีตเตอร์และอัตราการไหลของสารทำงาน เมื่อความเป็นไอของสารทำงานเพิ่มขึ้นส่งผลให้ความดันที่อีวาโปเรเตอร์ และอัตราการไหลของสารทำงานลดลงส่งผลให้กำลังของปั๊มลดลงตามไปด้วย โดยผลแสดงดังตารางที่ 5.1

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

จากการศึกษาในปริทัศน์วรรณกรรม พบว่าเทสลาเทอร์ไบน์เป็นเทอร์ไบน์ที่สามารถรองรับการทำงานในกรณีที่สารทำงานเป็นของเหลวได้ [(Tesla, 1913); (Rusin et al., 2021); (Dumont et al., 2019); (Talluri et al., 2020); (Song et al., 2017); (Zhang et al., 2022)] ซึ่งทำให้เทสลาเทอร์ไบน์เหมาะกับการทำงานกับโรงไฟฟ้าที่มีความเป็นไอของสารทำงานก่อนเข้าเทอร์ไบน์เป็นของเหลวอิ่มตัว ($x_3=0$) ดังนั้น การใช้เทสลาเทอร์ไบน์สามารถเอาชนะความท้าทายที่หนึ่งได้โดยในหัวข้อที่ 5.2 เป็นการศึกษาการทำงานของโรงไฟฟ้าวัฏจักรโออาร์ซีเมื่อใช้เทสลาเทอร์ไบน์ในการผลิตกระแสไฟฟ้า โดยเป็นการวิเคราะห์ว่าเมื่อความเป็นไอของสารทำงานส่งผลอย่างไรกับประสิทธิภาพไอเซนโทรปิกของเทสลาเทอร์ไบน์และกำลังสุทธิของโรงไฟฟ้า

นอกจากนี้ ในส่วนของความท้าทายที่สอง ได้ถูกศึกษาในหัวข้อที่ 5.3 เพื่อทำการศึกษาเชิงเปรียบเทียบในการประเมินเศรษฐศาสตร์ของโรงไฟฟ้าวัฏจักรโออาร์ซีที่ใช้เทสลาเทอร์ไบน์เมื่อความเป็นไอของสารทำงานเปลี่ยนแปลงไป โดยวัตถุประสงค์เพื่อให้เห็นถึงความได้เปรียบของโรงไฟฟ้าวัฏจักรโออาร์ซีที่ใช้ความเป็นไต่ำแต่ได้กำลังสุทธิสูง ในขณะเดียวกันได้รวมการคำนวณในส่วนของเงินลงทุนร่วมด้วย

5.2 การประเมินกำลังสุทธิของโรงไฟฟ้าที่ใช้เตสลาเทอร์ไบน์เมื่อความเป็นไอของสารทำงานก่อนเข้าเทอร์ไบน์เปลี่ยนแปลงไป

จากการศึกษาที่ผ่านมาในปริทัศน์วรรณกรรมโรงไฟฟ้าวัฏจักรโออาร์ซีที่ใช้ในการศึกษา ร่วมกับเตสลาเทอร์ไบน์ [(Tesla, 1913); (Rusin et al., 2021); (Dumont et al., 2019); (Talluri et al., 2020); (Song et al., 2017); (Zhang et al., 2022)] พบว่า ความเป็นไอของสารทำงานก่อนเข้าเทอร์ไบน์ได้กำหนดเป็นไออิ่มตัว ($x_3=1$) ซึ่งพบช่องว่างในงานวิจัยในการศึกษาการทำงานของเตสลาเทอร์ไบน์เมื่อความเป็นไอของสารทำงานก่อนเข้าเทอร์ไบน์ไม่ได้เป็นไออิ่มตัว ($x_3<1$) โดยเฉพาะโรงไฟฟ้าที่ความเป็นไวก่อนเข้าเตสลาเทอร์ไบน์เป็นของเหลวอิ่มตัว ($x_3=0$) ซึ่งเป็นกรณีที่มีแนวโน้มที่ให้ออกกำลังสุทธิออกมาสูง จะได้ถูกศึกษาในหัวข้อนี้ เพื่อให้เห็นการทำงานของเตสลาเทอร์ไบน์เมื่อความเป็นไอของสารทำงานเปลี่ยนแปลงไป

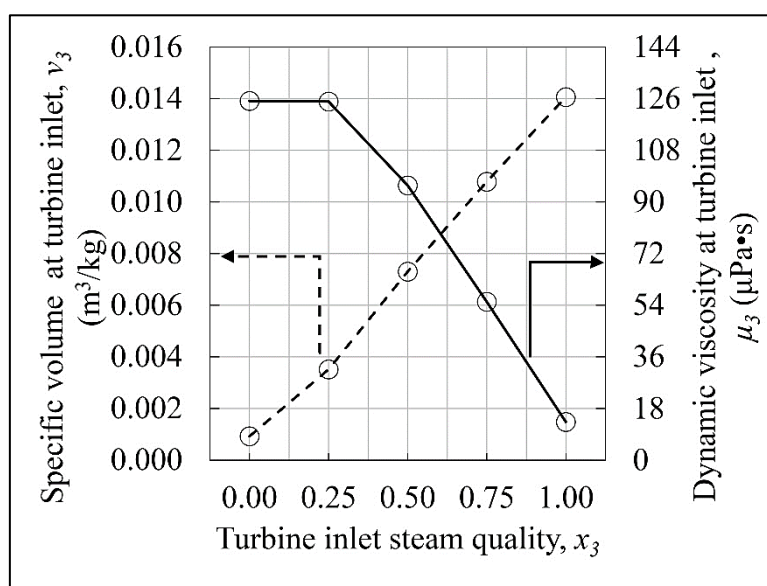
ในการหาเงื่อนไขการทำงานและขนาดที่ทำให้ได้กำลังและประสิทธิภาพไอเซนโทรปิกได้หาค่าความเร็วรอบของการทำงาน (ω) อัตราส่วนความดันของเตสลาเทอร์ไบน์ (PR) และเส้นผ่านศูนย์กลางของโรเตอร์ทางออก (D_5) เมื่อความเป็นไอของสารทำงานก่อนเข้าเทอร์ไบน์เปลี่ยนแปลงไป โดยขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของโรเตอร์ทางออก (D_4)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

ตารางที่ 5.2 ผลการออกแบบของเตสลาเทอร์ไบน์ที่ทำให้ได้กำลังสูงสุดในแต่ละความเป็นไอของสาร R236ea ก่อนเข้าเตสลาเทอร์ไบน์

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

จากผลดังตารางที่ 5.2 แสดงค่าทั้งสามที่ทำให้เตสลาเทอร์ไบน์ได้กำลังและประสิทธิภาพไอเซนโทรปิกเพิ่มสูงขึ้น เมื่อความเป็นไอของสารทำงานเปลี่ยนแปลงไป โดยค่าที่เหมาะสมเปลี่ยนแปลงตามความเป็นไอของสารทำงาน นอกจากนี้ ยังแสดงให้เห็นว่าเตสลาเทอร์ไบน์สามารถทำงานได้กับโรงไฟฟ้าแม้ว่าสารทำงานเป็นของสถานะของผสม โดยแนวโน้มที่น่าสนใจจากตารางที่ 5.2 ได้ดังนี้:

1) ความเร็วรอบของเตสลาเทอร์โบ (ω): พบว่าความเร็วรอบของสารทำงานเพิ่มมากขึ้นเมื่อความเป็นไอของสารทำงานเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากความเป็นไอของสารทำงานเพิ่มมากขึ้นส่งผลให้ทำให้ปริมาตรจำเพาะ (Specific volume, v) เพิ่มสูงขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 5.4 และเมื่อปริมาตรจำเพาะเพิ่มสูงส่งผลให้ความเร็วของสารทำงานหลังออกจากรอกซ์เซลเพิ่มสูงขึ้นดังตารางที่ 5.3 ดังนั้น เพื่อให้เตสลาเทอร์โบได้กำลังและประสิทธิภาพสูงเมื่อความเร็วของสารทำงานที่ไหลเข้าโรเตอร์เพิ่มสูงขึ้น ต้องใช้ความเร็วรอบของโรเตอร์เพิ่มสูงขึ้นไปด้วย ดังได้วิเคราะห์ในหัวข้อที่ 4.1.2 โดยผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าการเปลี่ยนความเร็วรอบให้เหมาะสมกับสารทำงานแต่ละชนิดซึ่งค่าความเร็วรอบที่เหมาะสมขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของสารทำงานนั้น ๆ

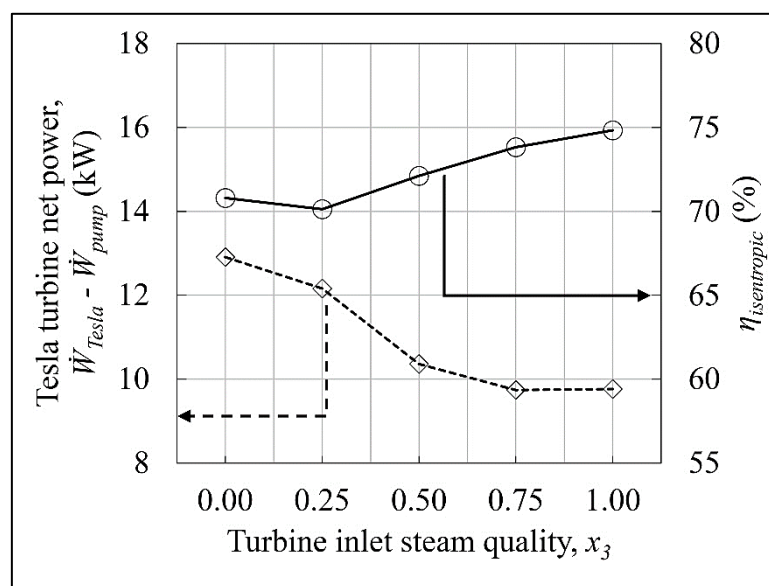


รูปที่ 5.4 ปริมาตรจำเพาะและความหนืดพลวัตของสารทำงานก่อนเข้าเทอร์โบเมื่อความเป็นไอของสาร R236ea ก่อนเข้าเตสลาเทอร์โบเปลี่ยนแปลงไป

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

3) เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของโรเตอร์ (D_5): ในการศึกษาเส้นผ่านศูนย์กลางของโรเตอร์ถูกใช้เป็นตัวแปรในการควบคุมความดันที่ออกจากโรเตอร์ โดยมีเป้าหมายให้ความดันขาออกมีค่าเท่ากับความดันของคอนเดนเซอร์ จากผลการศึกษาพบว่า เมื่อความเป็นไอของสารทำงานเพิ่มสูงขึ้น ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของโรเตอร์ลดลง ส่งผลให้พื้นที่ภายในโรเตอร์มีขนาดใหญ่ขึ้นเพื่อรองรับกระบวนการลดความดันให้ได้เท่ากับความดันที่คอนเดนเซอร์ที่ออกแบบไว้ ทั้งนี้จากสมการที่ 3.47 แสดงให้เห็นว่าการลดลงของความดันในแต่ละระยะภายในโรเตอร์ขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของสารทำงาน โดยจากรูปที่ 5.4 พบว่า เมื่อสารทำงานมีความเป็นไอเพิ่มสูงขึ้น ปริมาตรจำเพาะของสารทำงานจะสูงขึ้น หรือความหนาแน่นจะลดลง ซึ่งสารทำงานที่มีความหนาแน่นต่ำต้องการพื้นที่ในโรเตอร์ของเตสลาเทอร์ไบน์มากขึ้นเพื่อให้สามารถลดความดันได้ตามที่ต้องการ ส่งผลให้เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของโรเตอร์ของเตสลาเทอร์ไบน์ต้องลดลง ถึงแม้ว่าความดันที่ต้องลดลงในกรณีที่สารทำงานมีความเป็นไอสูงจะมีค่ามากขึ้นก็ตาม ดังที่แสดงในตารางที่ 5.1 ดังนั้น ความหนาแน่นของสารทำงานมีอิทธิพลโดยตรงต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของโรเตอร์ของเตสลาเทอร์ไบน์

จากการหาขนาดและเงื่อนไขการทำงานเหล่านี้ ผลการของกำลังสุทธิและประสิทธิภาพไอเซนโทรปิกของสารทำงาน เมื่อความเป็นไอของสารทำงานเปลี่ยนแปลงไปแสดงดังรูปที่ 5.5



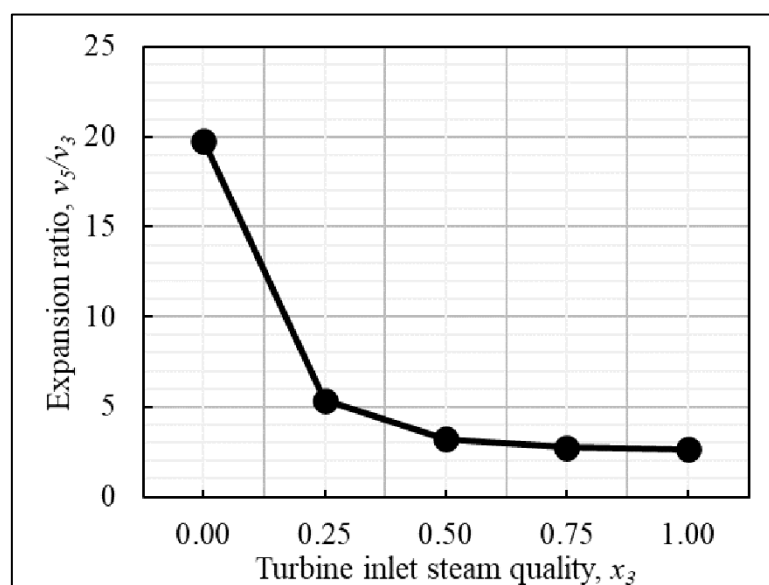
รูปที่ 5.5 กำลังสุทธิและประสิทธิภาพของเทอร์ไบน์เมื่อความเป็นไอของสาร R236ea ก่อนเข้าเตสลาเทอร์ไบน์เปลี่ยนแปลงไป

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

39% โดยผลดังกล่าวสอดคล้องกับพลังงานความร้อนที่โรงไฟฟ้าตั้งอธิบายในหัวข้อที่ 5.1 โดยโรงไฟฟ้าที่มีความเป็นไอต่ำสามารถดึงความร้อนเข้าสู่สารทำงานได้มากกว่าส่งผลให้พลังงานของสารทำงานก่อนเข้าเทอร์ไบน์สูง และเทอร์ไบน์ได้กำลังสุทธิต่อออกมาสูงตามไปด้วย

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

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



รูปที่ 5.6 อัตราการขยายตัวของสารทำงานเมื่อความเป็นไอของสาร R236ea ก่อนเข้าเตสลาเทอร์ไบน์เปลี่ยนแปลงไป

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

นอกจากนี้ อีกหนึ่งข้อจำกัดในการศึกษานี้คือประสิทธิภาพไอเซนโทรปิกของเทสลาเทอร์ไบน์อาจสูงมากไปกว่าเทสลาเทอร์ไบน์จริงเนื่องจากใช้แบบจำลองเชิงตัวเลขในการจำลอง ดังนั้น ผลของการศึกษานี้ต้องใช้ความระมัดระวังในการตีความ อาทิ กำลังสุทธิของโรงไฟฟ้า อย่างไรก็ตาม แนวโน้มของการศึกษานี้ยังคงเป็นประโยชน์ในการศึกษาเทสลาเทอร์ไบน์เมื่อความเป็นไอของสารทำงานเปลี่ยนแปลงไป

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

นอกจากนี้ ในการศึกษานี้ได้ศึกษาความเป็นไปได้ในการเกิดการไหลแบบอุดตัน (Choked flow) ที่เกิดขึ้นเมื่อสารทำงานไหลออกจากรอกซึ่งเป็นตำแหน่งที่ความเร็วของสารทำงานสูงที่สุด เนื่องจากเมื่อเกิดการไหลแบบอุดตันจะส่งผลให้ประสิทธิภาพของเทสลาเทอร์ไบน์แยลง โดยการไหลแบบอุดตันจะเกิดขึ้นเมื่อความเร็วของสารทำงานเกิดความเร็วเสียงในสภาวะนั้น หรือมัคคัมเบอร์ (Ma_4) มีค่าเกิด 1 ($Ma_4 > 1$) โดยการคำนวณมัคคัมเบอร์หาได้ดังสมการที่ 5.2

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

เมื่อ v_4 คือความเร็วของสารทำงานที่ออกจากรอกและ $\sqrt{\kappa_4 / \rho_4}$ คือความเร็วเสียงในสภาวะนั้น ๆ โดยตารางที่ 5.3 นำเสนอผลของความเร็วของสารทำงานหลังออกจากรอกและมัคคัมเบอร์

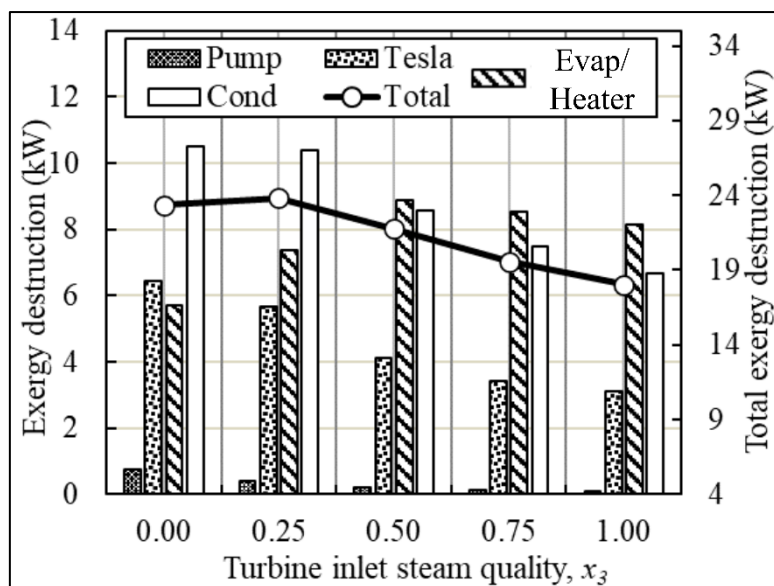
ตารางที่ 5.3 ผลของความเร็วของสารทำงานและมัคนัมเบอร์ที่ความเป็นไอของสาร R236ea ก่อนเข้า
เตสลาเทอร์ไบน์แต่ละค่า

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

จากผลดังตารางที่ 5.3 แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างความเป็นไอของสารทำงานและมัคนัมเบอร์ โดยเมื่อความเป็นไอของสารเพิ่มสูงขึ้นส่งผลให้ความเร็วของสารทำงานเพิ่มสูงขึ้น และมัคนัมเบอร์ของสารทำงานก่อนเข้าเทอร์ไบน์เพิ่มสูงขึ้นตามไปด้วย โดยในกรณีที่สารทำงานมีความเป็นไต่ต่ำ ($x_3 \leq 0.75$) ค่ามัคนัมเบอร์ยังคงต่ำซึ่งการไหลยังไม่เป็นการไหลแบบอัดตัว อย่างไรก็ตาม ในกรณีที่ความเป็นไอของสารทำงานเป็นไออิ่มตัว ($x_3 = 1$) ค่ามัคนัมเบอร์มีค่าเท่ากับ 0.85 ซึ่งมีค่าใกล้กับกรณีที่จะเกิดการไหลแบบอัดตัว ดังนั้นพฤติกรรมของการเปลี่ยนแปลงความเป็นไอของสารทำงานต่อมัคนัมเบอร์ของสารทำงานที่ออกจากนอชเชิลสามารถนำไปปรับใช้งานกับการออกแบบเตสลาเทอร์ไบน์ได้ดังนี้

- 1) การทำงานที่ความเป็นไต่ต่ำช่วยป้องกันไม่ให้เกิดการไหลแบบอัดตัวในเตสลาเทอร์ไบน์
- 2) สำหรับในกรณีที่ความเป็นไต่เท่ากับ 1 อาจต้องการการออกแบบพิเศษเพื่อรองรับการไหลแบบอัดตัว
- 3) การใช้โรงไฟฟ้าที่มีความเป็นไต่เท่ากับ 1 เมื่อใช้กับเตสลาเทอร์ไบน์แล้วอาจต้องการออกแบบเป็นเป็นพิเศษเพื่อรองรับการไหลแบบอัดตัว

นอกจากนี้ ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ได้วิเคราะห์เอกเซอร์ยี่ที่ถูกทำลายของแต่ละอุปกรณ์เมื่อความเป็นไอของสารทำงานเปลี่ยนแปลงไป โดยผลดังรูปที่ 5.7 เป็นการผลกาวิเคราะห์เอกเซอร์ยี่ที่อุปกรณ์แต่ละอุปกรณ์ในโรงไฟฟ้าและโดยผลรวม



รูปที่ 5.7 ผลการทำลายเอกเซอร์ยีและเอกเซอร์ยีที่ถูกทำลายทั้งหมดเมื่อความเป็นไอของสาร R236ea ก่อนเข้าเตสลาเทอร์ไบน์เปลี่ยนแปลงไป

จากผลดังรูปที่ 5.7 พบว่า เมื่อความเป็นไอเพิ่มสูงขึ้นส่งผลให้โดยรวมแล้วเอกเซอร์ยีที่ถูกทำลายทั้งหมดมีค่าลดลงโดยเกิดขึ้นเนื่องจากเมื่อความเป็นไอของสารทำงานเพิ่มมากขึ้นทำให้เกิดความร้อนที่ถ่ายเทเข้าและออกโรงไฟฟ้าลดลง ดังแสดงในตารางที่ 5.1 รวมถึงได้กำลังสุทธิน้อยลงด้วยดังรูปที่ 5.5 โดยผลการวิเคราะห์รายอุปกรณ์เมื่อความเป็นไอของสารทำงานเปลี่ยนแปลงไปได้ดังนี้

1) เทสลาเทอร์ไบน์: จากผลของเอกเซอร์ยีที่ถูกทำลายในเตสลาเทอร์ไบน์เห็นได้ว่าเมื่อความเป็นไอของสารทำงานเพิ่มสูงขึ้นมีค่าลดลง ซึ่งสอดคล้องกับผลของประสิทธิภาพไอเซนโทรปิกของเตสดังรูปที่ 5.5

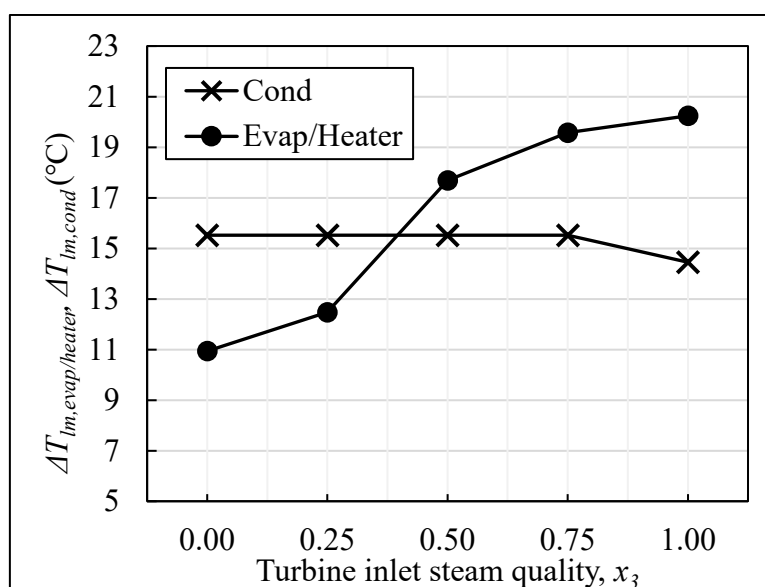
2) คอนเดนเซอร์: เมื่อความเป็นไอของสารทำงานเพิ่มสูงขึ้นส่งผลให้เอกเซอร์ยีที่ถูกทำลายมีสัดส่วนน้อยลงเนื่องจากความร้อนที่ถูกถ่ายเทที่คอนเดนเซอร์มีค่าน้อยลงดังตารางที่ 5.1 ทำให้เอกเซอร์ยีที่ถูกทำลายที่ถูกทำลายน้อยลงไปด้วย

3) ปั๊ม: เมื่อความเป็นไอของสารทำงานเพิ่มมากขึ้นส่งผลให้เอกเซอร์ยีที่ถูกทำลายในปั๊มมีสัดส่วนน้อยลง เนื่องจากความดันที่ต้องเพิ่มจากทางออกของคอนเดนเซอร์ไปทางเข้าอีวาโปเรเตอร์/ฮีตเตอร์น้อยลงดังแสดงในตารางที่ 5.1 ทำให้ต้องใช้กำลังน้อยลงส่งผลให้เอกเซอร์ยีที่ถูกทำลายน้อยลงตามไปด้วย

4) อีวาโปเรเตอร์/ฮีตเตอร์ : พบว่าที่ความเป็นไอเท่ากับ 0.5 เกิดการทำลายเอกเซอร์ยีที่สูงที่สุด ซึ่งการทำลายเอกเซอร์ยีที่สูงเกิดได้จากหลายสาเหตุ แต่ในการแลกเปลี่ยนความร้อนในอุปกรณ์

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

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



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

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

เทอร์ไบน์เป็นของเหลวอิมตัว ($x_3 = 1$) มีการทำลายเอกเซอร์ยีไม่สูงสุดถึงแม้ว่ามีการถ่ายเทความร้อนสูงสุด

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

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

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

5.3 การประเมินเศรษฐศาสตร์เมื่อความเป็นไอของสารทำงานก่อนเข้าเทอร์ไบน์เปลี่ยนแปลงไป

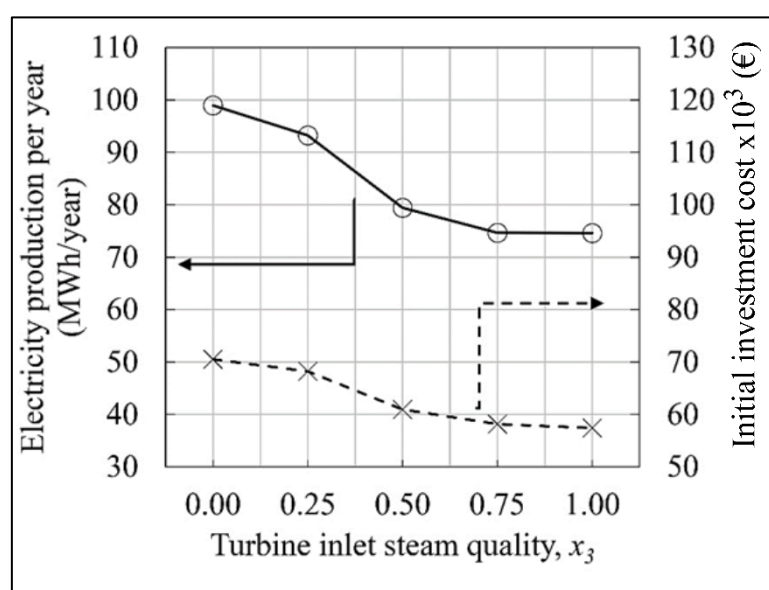
จากผลการวิเคราะห์ในหัวข้อ 5.1 และ 5.2 ได้นำไปสู่การประเมินเศรษฐศาสตร์ของโรงไฟฟ้าที่ใช้เตสลาเทอร์ไบน์ ภายใต้เงื่อนไขที่ความเป็นไอของสารทำงานมีการเปลี่ยนแปลง โดยผลการศึกษาในทั้งสองหัวข้อพบว่า เมื่อความเป็นไอของสารทำงานก่อนเข้าเทอร์ไบน์อยู่ในระดับต่ำ จะให้กำลังสุทธิของระบบสูงขึ้น แต่ขณะเดียวกันก็นำไปสู่ต้นทุนการลงทุนเริ่มต้นที่สูงขึ้นเช่นกัน ดังนั้น วัตถุประสงค์ของหัวข้อนี้คือการวิเคราะห์หาความสมดุลระหว่างกำลังสุทธิที่เพิ่มขึ้นและงบลงทุนที่เพิ่มตาม เพื่อระบุค่าความเป็นไอของสารทำงานที่ให้ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์สูงสุด

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

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

5.3.1 เงินลงทุนเริ่มต้นและปริมาณไฟฟ้าที่ผลิตได้

รูปที่ 5.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเงินลงทุนเริ่มต้นของโรงไฟฟ้าและปริมาณไฟฟ้าที่ผลิตได้ต่อปีเมื่อความเป็นไอของสารทำงานเปลี่ยนแปลงไป

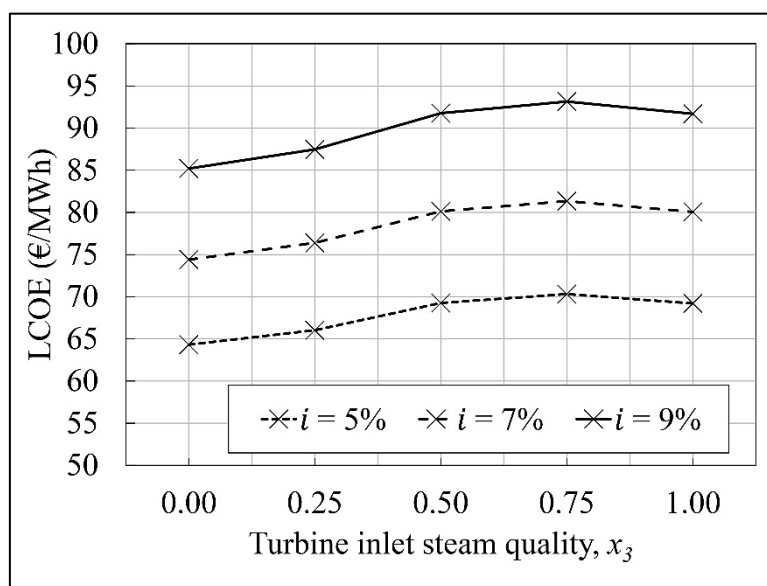


รูปที่ 5.9 เงินลงทุนเริ่มต้นและปริมาณไฟฟ้าที่ผลิตได้ของโรงไฟฟ้าวัฏจักรโออาร์ซีใช้เทสลาเทอร์โบइन ภายใต้ค่าความเป็นไอของสาร R236ea ก่อนเข้าเทสลาเทอร์โบइन ราคาขายไฟฟ้าและอัตราคิดลดที่แตกต่างกัน

จากรูปที่ 5.9 แสดงให้เห็นว่าปริมาณไฟฟ้าที่ผลิตได้สูงที่สุดเท่ากับ 98 MWh/year เมื่อเป็นโรงไฟฟ้าที่ความเป็นไอของสารทำงานเท่ากับ 0 โดยผลดังกล่าวสอดคล้องกับผลในหัวข้อ 5.1 และ 5.2 เนื่องจากสามารถรับความร้อนได้มากส่งผลให้ได้กำลังสุทธิที่สูงมากขึ้น อย่างไรก็ตาม สิ่งตามมาเมื่อใช้โรงไฟฟ้าที่มีความเป็นไอลำบากส่งผลให้เงินลงทุนเริ่มต้นสำหรับโรงไฟฟ้ามีค่าสูง เนื่องจากขนาดอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่มีขนาดใหญ่ต้องการวิเคราะห์ในหัวข้อ 5.1

5.3.2 มูลค่าปัจจุบันสุทธิของต้นทุนต่อหน่วยของการผลิตไฟฟ้าตลอดอายุโครงการ (LCOE)

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



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

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

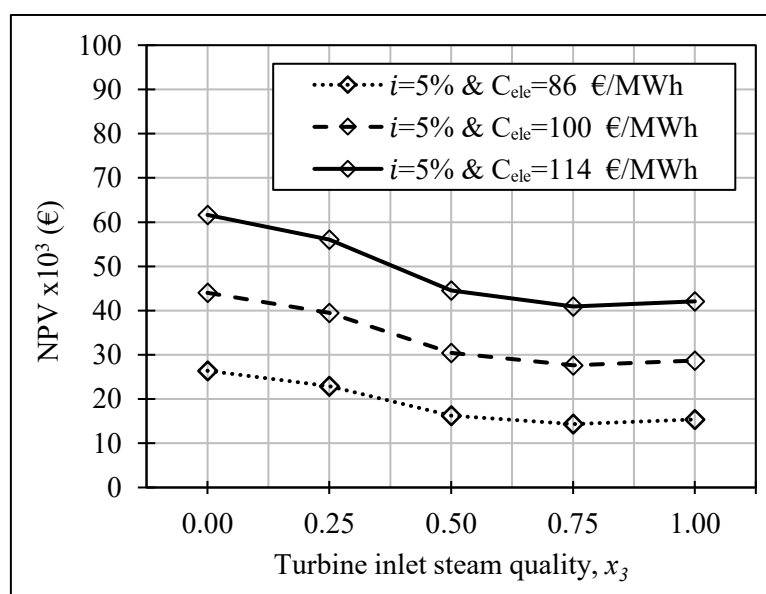
โดยแนวโน้มดังกล่าวสามารถอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างเงินลงทุนเริ่มต้นแลปริมาณไฟฟ้าที่ขายได้ต่อปี ดังการคำนวณ LCOE ดังสมการที่ 3.67 ดังแสดงในหัวข้อที่ 5.2 โดยโรงไฟฟ้าที่ความเป็นไอของสารทำงานต่ำให้กำลังสุทธิที่สูงส่งผลให้ปริมาณการผลิตไฟฟ้าแต่ละปีเพิ่มสูงขึ้น ในขณะเดียวกันต้องใช้เงินลงทุนที่สูงขึ้นตามไปด้วยจากขนาดอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่มีขนาดใหญ่ขึ้นดังหัวข้อที่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

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

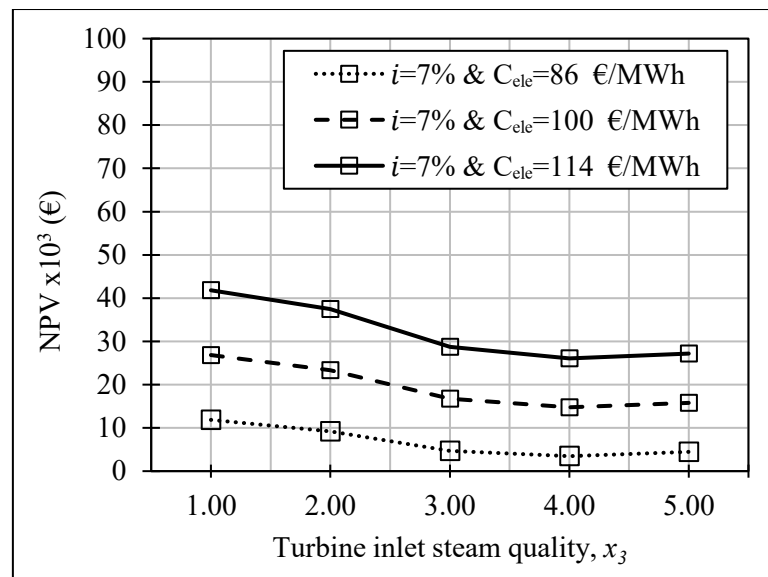
สำหรับอิทธิพลของอัตราผลตอบแทนต่อ LCOE อย่างมาก เมื่ออัตราผลตอบแทนสูงขึ้นส่งผลให้ต้นทุนในการผลิตไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 5.10 โดยพบว่าที่ทุกความเป็นไอของสารทำงานส่งผลให้ LCOE เพิ่มสูงขึ้น ซึ่งเกิดจากมูลค่าของเงินที่ได้จากการขายไฟฟ้าที่ผลิตได้ต่อปีมีมูลค่าน้อยลงตลอดโครงการเมื่ออัตราผลตอบแทนสูงขึ้น

5.3.3 มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (NPV) และระยะเวลาคืนทุนที่มีการคิดลด (d-PbP)

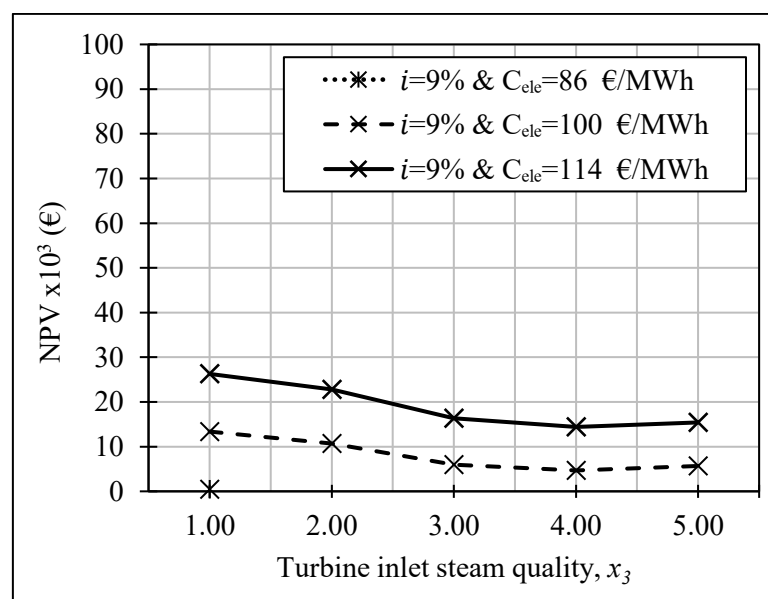
ในขณะที่ LCOE ให้มุมมองของต้นทุนต่อหน่วยของการผลิตไฟฟ้า อย่างไรก็ตาม ไม่ได้หมายถึงกำไรหรือผลประโยชน์ของโครงการ ดังนั้นเพื่อให้เห็นถึงความเป็นไปได้ทางเศรษฐศาสตร์ ในหัวข้อนี้ได้ประเมินมูลค่าปัจจุบันสุทธิ โดยในรูปที่ 5.11 แสดงค่ามูลค่าปัจจุบันสุทธิเมื่อความเป็นไอของสารทำงาน อัตราคิดลดและราคาขายไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไป



(ก) Discount rate = 5%



(ก) Discount rate = 7%



(ค) Discount rate = 9%

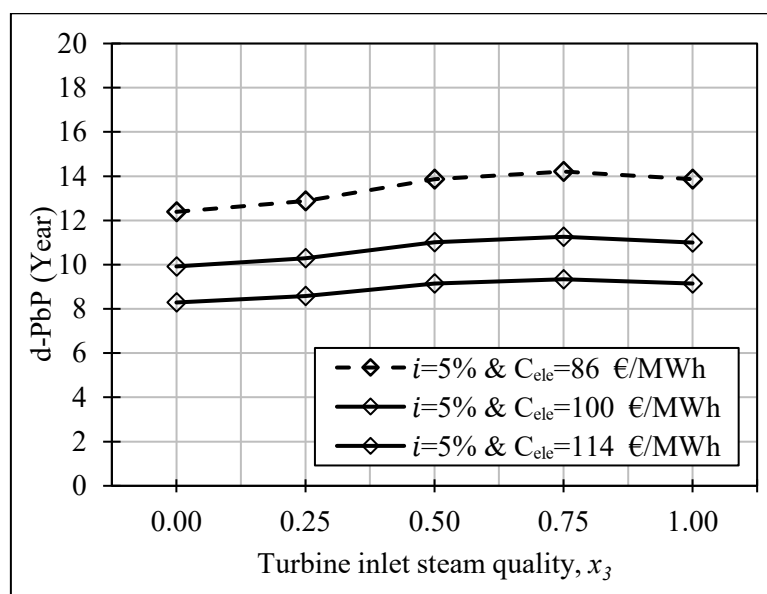
รูปที่ 5.11 มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (NPV) ของโรงไฟฟ้าวัฏจักรโออาร์ซีใช้เทสลาเทอร์โบน์ ภายใต้ค่าความเป็นไอของสาร R236ea ก่อนเข้าเทสลาเทอร์โบน์ราคาขายไฟฟ้า และอัตราลดที่แตกต่างกัน

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

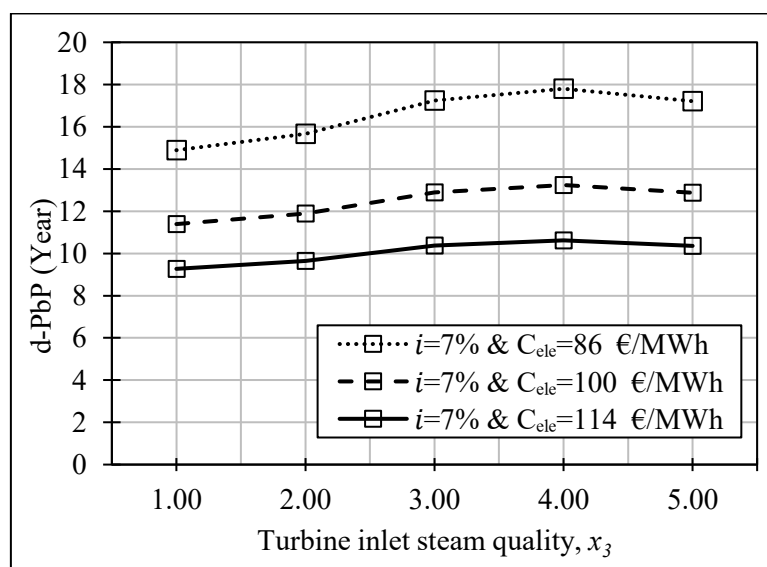
โรงไฟฟ้าที่ $x_3 = 0$ เพียงเท่านั้นที่ยังคงให้ผลกำไร โดยโรงไฟฟ้าที่ $x_3 > 0$ เหล่านี้ค่า LCOE สูงกว่าราคาขายไฟฟ้าทั้งสิ้น ดังนั้นผลของ NPV ดังรูปที่ 5.11 ได้แสดงเพียงกรณีที่เกิดผลกำไรเท่านั้น

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

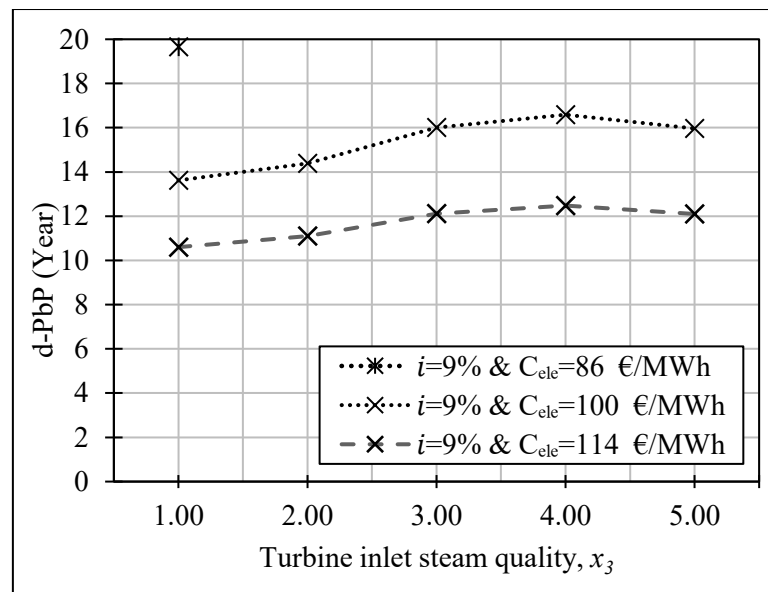
ระยะเวลาคืนทุนที่มีการคิดลด ซึ่งเป็นตัวแปรที่บ่งบอกถึงระยะเวลาที่ใช้ในการคืนทุนโดยผลของระยะเวลาคืนทุนแสดงดังรูปที่ 5.12 ซึ่งพบว่า โดยในเงื่อนไขที่ $x_3 = 0$ คืนทุนเร็วที่สุดซึ่งสอดคล้องกับผลมูลค่าปัจจุบันสุทธิ ซึ่งเมื่อมีผลกำไรที่สูงส่งผลให้คืนทุนได้เร็ว



(ก) Discount rate = 9%



(ข) Discount rate = 9%



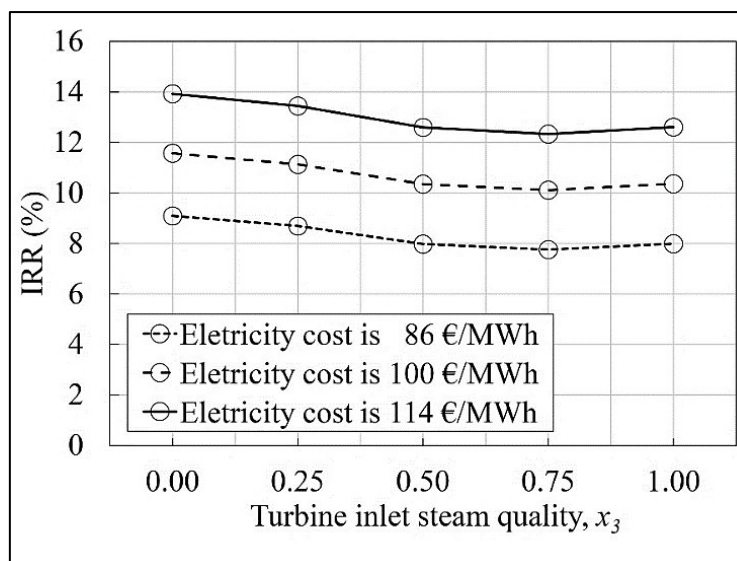
(ค) Discount rate = 9%

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

5.3.4 อัตราผลตอบแทนภายใน (IRR)

อัตราผลตอบแทนภายใน ให้มุมมองถึงอัตราผลกำไรตอบแทนที่ได้เมื่อจบโครงการ โดย

รูปที่ 5.13 แสดงผลของ IRR เมื่อความเป็นไอของสารทำงานเปลี่ยนแปลงไปที่ราคาขายไฟฟ้าแตกต่างกัน



รูปที่ 5.13 อัตราผลตอบแทนภายใน (IRR) ของโรงไฟฟ้าวัฏจักรโออาร์ซีใช้เทสลาเทอร์โบน์ ภายใต้ค่าความเป็นไอสาร R236ea ก่อนเข้าเทสลาเทอร์โบน์ราคาขายไฟฟ้า และอัตราคิดลดที่แตกต่างกัน

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

5.3.5 การเปรียบเทียบผลกับงานวิจัยอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้อง

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

ตารางที่ 5.4 ผลการเปรียบเทียบค่า LCOE กับงานวิจัยอื่น ๆ จากปริทัศน์วรรณกรรม

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

การปรับปรุงทางเศรษฐศาสตร์นี้สามารถแบ่งได้ออกเป็นสองปัจจัยสำคัญได้แก่

1) โรงไฟฟ้าใช้สารทำงานที่เป็นของเหลวอิมมิด ($x_3 = 0$) ซึ่งส่งผลให้ผลิตกระแสไฟฟ้าต่อปีได้สูงขึ้น โดยสามารถผลิตได้มากกว่าโรงไฟฟ้าวัฏจักรโออาร์ซีโดยทั่วไปที่ความเป็นไอของสารทำงานก่อนเข้าเทอร์ไบน์เป็นไออิมมิด 32% จากผลในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

2) โรงไฟฟ้าใช้เทสลาเทอร์ไบน์ซึ่งมีราคาต่ำกว่าส่งผลให้เงินลงทุนเริ่มต้นต่ำกว่าโรงไฟฟ้าที่ใช้เทอร์ไบน์แบบทั่ว ๆ ไป

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

5.4 ข้อจำกัดในการศึกษา

ในขณะที่การศึกษานี้ให้มุมมองของสมรรถนะและความเป็นไปได้ทางเศรษฐศาสตร์ของโรงไฟฟ้าที่ใช้เตสลาเทอร์ไบน์เมื่อความเป็นไอของสารทำงานเปลี่ยนแปลงไป อย่างไรก็ตาม ในการศึกษานี้มีข้อจำกัดดังต่อไปนี้

1) ใช้สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนโดยรวมคงที่: ในการศึกษาที่กำหนดให้ใช้สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนโดยรวมคงที่ไม่ว่าความเป็นไอของสารทำงานเปลี่ยนแปลงไป ซึ่งในความเป็นจริงค่าใช้สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนมีค่าลดลงเมื่อความเป็นไอของสารทำงานเพิ่มสูงขึ้น ดังนั้นการถ่ายเทความร้อนของสารทำงานที่มีสถานะเป็นของเหลวมีค่าใช้สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่สูงกว่าไอน้ำ ดังนั้นการกำหนดให้ใช้สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนมีค่าคงที่นี้อาจส่งผลต่อความแม่นยำของผลการคำนวณขนาดของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน

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

3) แบบจำลองเตสลาเทอร์ไบน์ในอุดมคติ: ในขณะที่แบบจำลองของเตสลาเทอร์ไบน์ได้ถูกตรวจสอบความถูกต้องกับการทดลองและการจำลอง ซึ่งแบบจำลองดังกล่าวสามารถจำลองแสดงให้เห็นถึงสมรรถนะของเตสลาเทอร์ไบน์ได้ โดยแบบจำลอง 2 มิติดังกล่าว กำหนดให้สภาวะของสารทำงานทางเข้าของโรเตอร์ที่รอบ ๆ ขอบด้านนอกสุดมีค่าเท่ากัน (Uniform inlet conditions around the periphery) ในขณะที่ในความเป็นจริงแล้วเตสลาเทอร์ไบน์มีจำนวนนอซเซิลจำกัด ดังนั้น สภาวะของสารทำงานบริเวณรอบ ๆ ขอบของโรเตอร์จึงอาจไม่สม่ำเสมอได้ นอกจากนี้ ในการผลิตเตสลาเทอร์ไบน์ขึ้นจริง อาจมีผลกระทบจากการผลิตจริง อาทิ ความคลาดเคลื่อนในการผลิต คุณสมบัติวัสดุ และการไหลแบบ 3 มิติ ผลกระทบเหล่านี้ส่งผลต่อประสิทธิภาพและกำลังสุทธิของเทอร์ไบน์ ดังนั้นผลของการใช้แบบจำลองแบบเรียบง่ายส่งผลให้ได้ผลลัพธ์ดีเกินกว่าความเป็นจริงเล็กน้อย อย่างไรก็ตาม ข้อสรุปและแนวโน้มของผลในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ยังคงเป็นประโยชน์

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

ดังนั้น ในการศึกษาควรแก้ไขข้อจำกัดเหล่านี้ เพื่อให้มุมมองของโรงไฟฟ้าที่ใช้เตสลาเทอร์ไบน์ที่ครอบคลุมมากขึ้น