

บทที่ 2

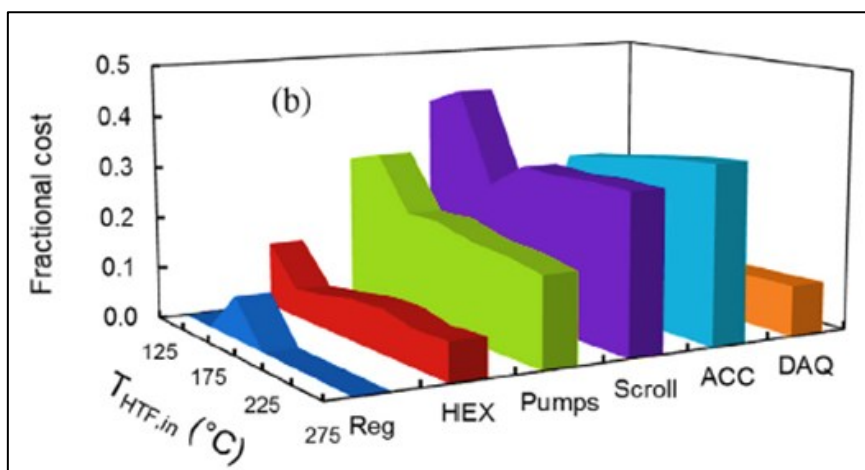
ปรีทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

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

ตารางที่ 2.1 ผลการศึกษาโรงไฟฟ้าวัฏจักรโออาร์ซี

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



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

นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาถึงการลงทุนของโรงไฟฟ้าวัฏจักรโออาร์ซี พบว่า Scroll expander นั้นมีราคาการลงทุนสูงที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับอุปกรณ์อื่นภายในวัฏจักร ซึ่งคิดเป็น 25%-45% ของการลงทุนทั้งระบบ ดังรูปที่ 2.1 ดังนั้น ถ้าสามารถออกแบบให้เทอร์โบइनมีความเหมาะสมและราคาถูกลงโดยที่สามารถผลิตไฟฟ้าได้มากขึ้นจะส่งผลให้สามารถคืนทุนได้เร็วมากยิ่งขึ้น

2.2 โรงไฟฟ้าวัฏจักรที่แอลซี

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

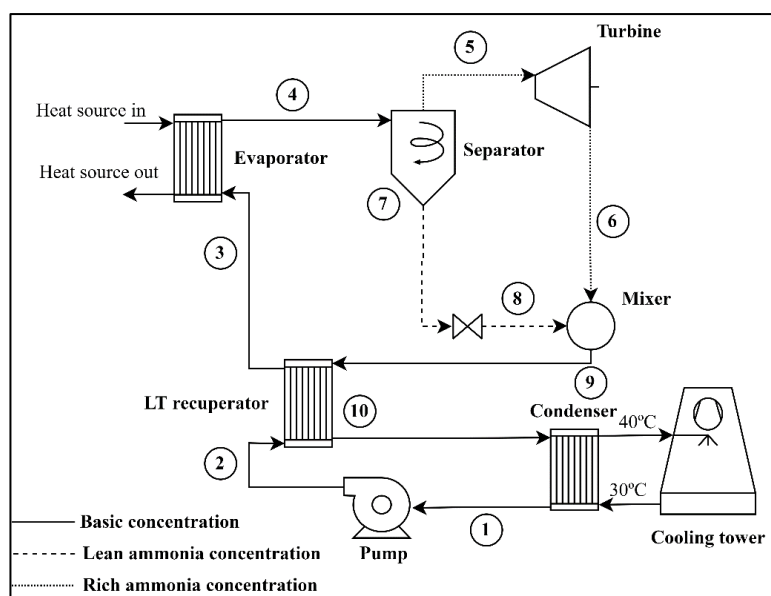
ซึ่งในการศึกษาของ (Yari et al., 2015) ได้ทำการจำลองการใช้ Trilateral ORC ที่แหล่งความร้อนเท่ากับ 120°C ได้งานสุทธิสูงสุดเท่ากับ 2.3 MW โดยใช้ Isobutane เป็นสารทำงาน ประสิทธิภาพเชิงความร้อนเท่ากับ 8.16%

อย่างไรก็ตาม ข้อจำกัดสำคัญของโรงไฟฟ้าวัฏจักรที่แอลซีคือความเป็นไอของสารทำงานก่อนเข้าเทอร์โบइनเป็นของเหลวส่งผลให้เกิดความเสียหายที่จะหาเทอร์โบइनนำมาใช้กับโรงไฟฟ้าวัฏจักรนี้ ถึงแม้ว่าจะให้กำลังสุทธิของโรงไฟฟ้าออกมาสูง

2.3 โรงไฟฟ้าวัฏจักรคาลินา

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

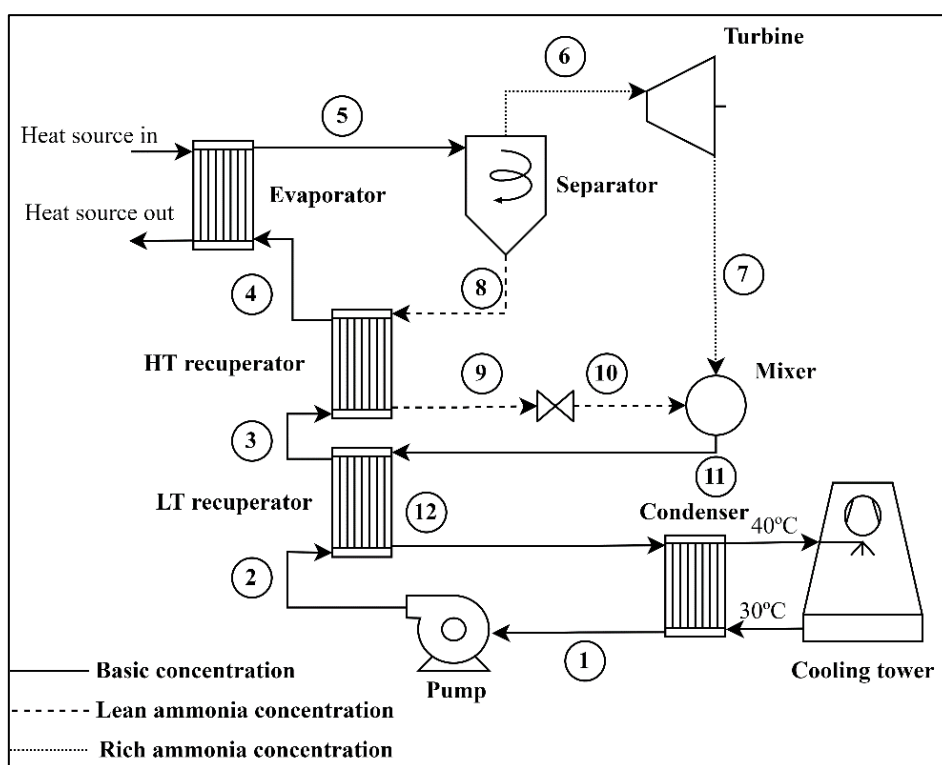
นอกจากนี้ Sun et al. (2014) เป็นศึกษาการที่ใช้ Solar collector มาเป็นแหล่งความร้อนของโรงไฟฟ้าวัฏจักรคาลินาแบบ KCS-11 ดังรูปที่ 2.3 โดยวิเคราะห์ผ่านหลักการของ Energy และ Exergy ซึ่งจากการศึกษา พบว่าอัตราการไหลของสารทำงาน ความเข้มข้นของแอมโมเนียเป็นตัวแปรที่ส่งผลต่อความสามารถในการรับความร้อนของ Solar collector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



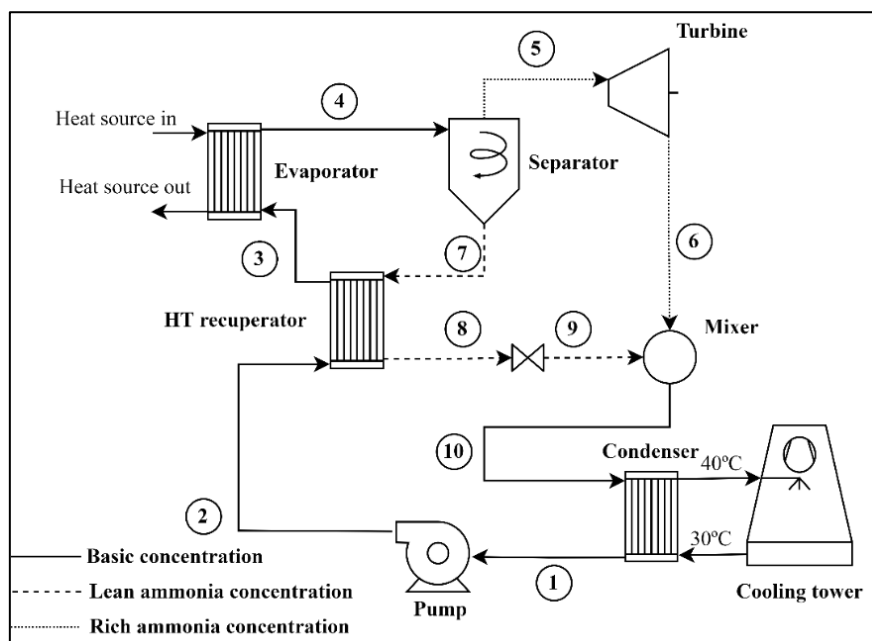
รูปที่ 2.2 โรงไฟฟ้าวัฏจักรคาลินาแบบ KCS-1

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

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



รูปที่ 2.3 โรงไฟฟ้าวัฏจักรคาลินาแบบ KCS-34



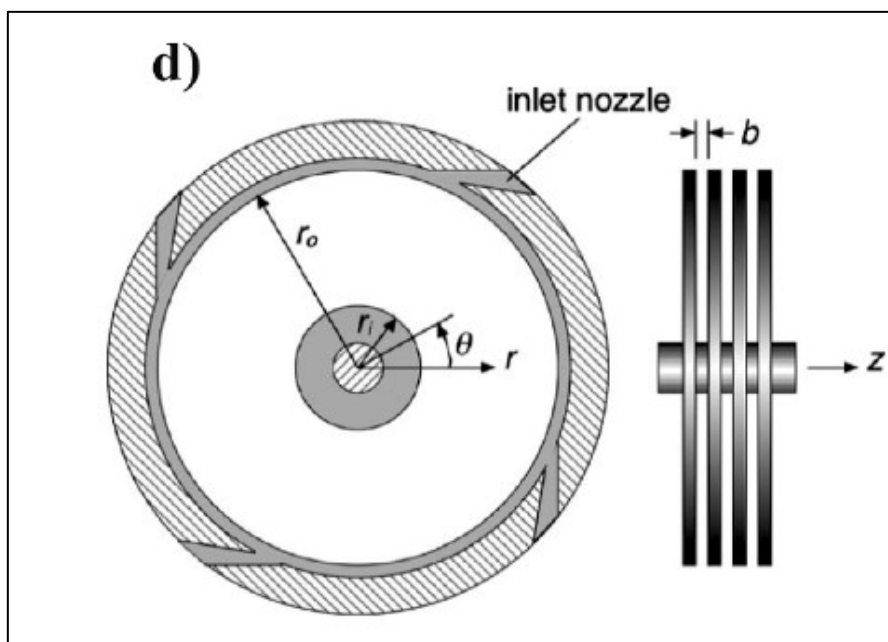
รูปที่ 2.4 โรงไฟฟ้าวัฏจักรคาลินาแบบ KSG-11

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

อย่างไรก็ตาม จากการทำปฐมนิเทศกรรมยังไม่พบการใช้งานของโรงไฟฟ้าวัฏจักรคาลินากับเตสลาเทอร์โบน์ ดังนั้นวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงสนใจที่จะศึกษาการทำงานของเตสลาเทอร์โบน์กับโรงไฟฟ้าวัฏจักรคาลินา โดยโรงไฟฟ้าที่สนใจศึกษาคือโรงไฟฟ้าวัฏจักรคาลินาแบบ KCS-11 เนื่องจากมีขนาดของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่น้อยและได้กำลังสุทธิใกล้เคียงกับแบบ KCS-34

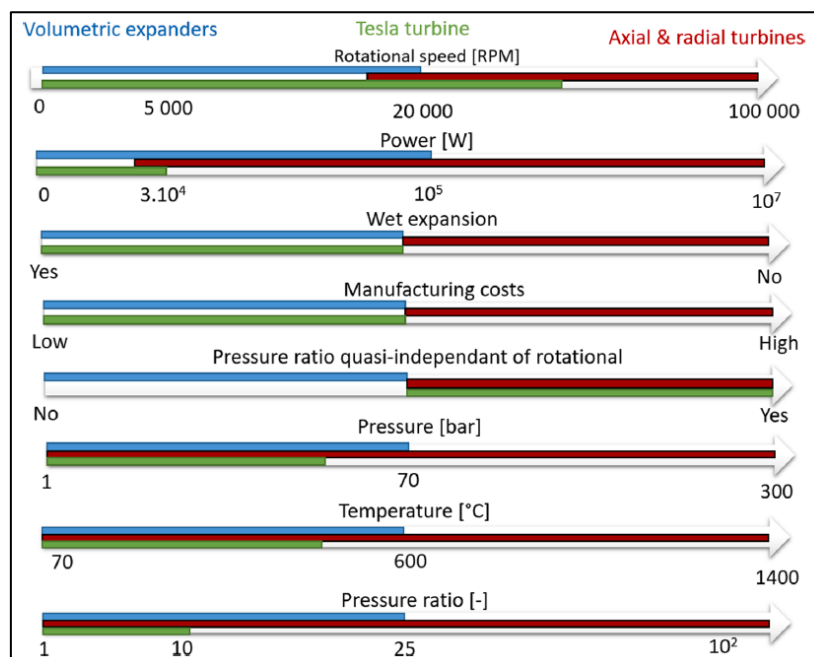
2.4 เทสลาเทอร์ไบน์

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



รูปที่ 2.5 ลักษณะของเทสลาเทอร์ไบน์

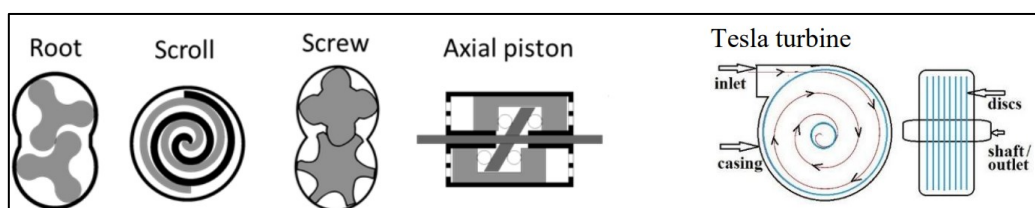
ที่มา: (Talluri et al., 2020)



รูปที่ 2.6 ผลการเปรียบเทียบสมรรถนะของเทสลาเทอร์ไบน์ กับเทอร์ไบน์ชนิด Volume metric และ Axial

ที่มา: (Talluri et al., 2020)

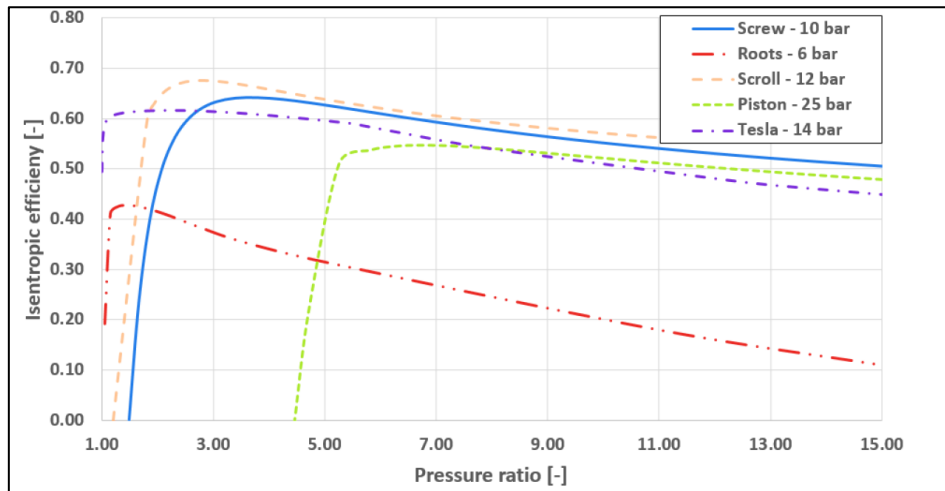
นอกจากนี้ การศึกษาของ Dumont et al. (2019) ได้เปรียบเทียบเทสลาเทอร์ไบน์กับเทอร์ไบน์ชนิดอื่นที่นิยมนำไปใช้กับโรงไฟฟ้าวัฏจักรโออาร์ซีขนาดเล็ก ได้แก่ Scroll Piston Screw และ Roots expander โดยมีลักษณะดังรูปที่ 2.7



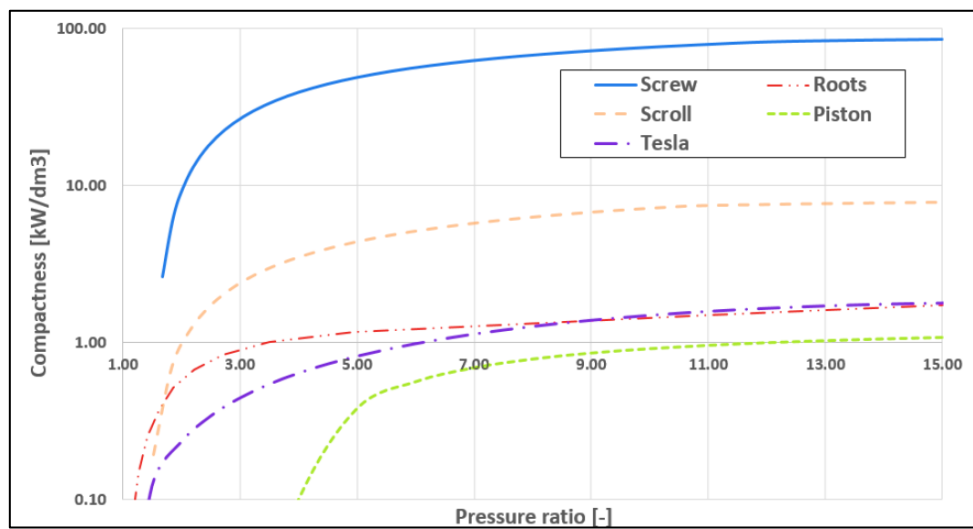
รูปที่ 2.7 เทคโนโลยีของเทอร์ไบน์สำหรับโรงไฟฟ้าวัฏจักรโออาร์ซี

ที่มา: (Dumont et al., 2019)

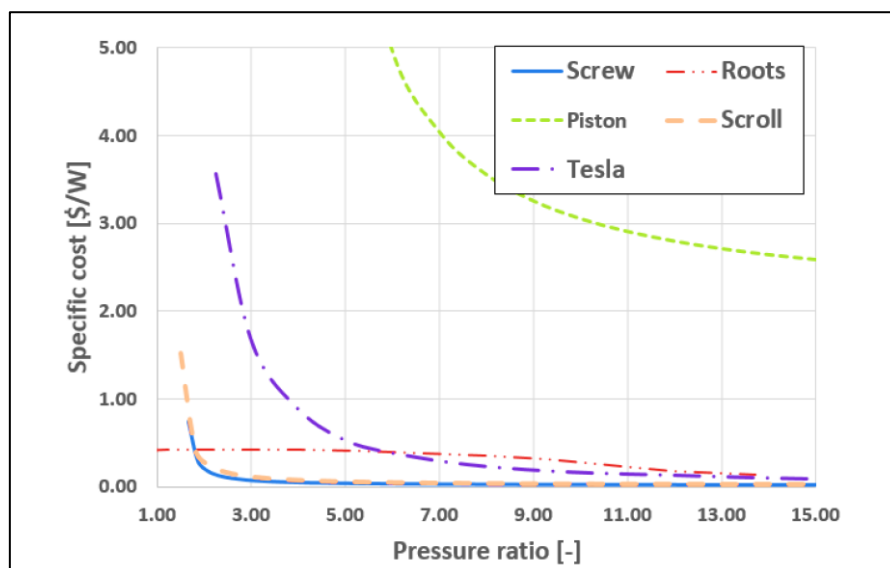
ทั้งนี้ผลการเปรียบเทียบเป็นการจำลองโรงไฟฟ้าวัฏจักรโออาร์ซีที่ใช้สารทำงานเป็น R245fa ที่มี Condensation temperature คงที่เท่ากับ 30 °C และในทุกกรณีสารทำงานที่ออกจาก Evaporator จะมี Superheated degree เท่ากับ 5 °C โดยผลการจำลองเป็น 2.8 2.9 และ 2.10



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



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



รูปที่ 2.10 Pressure ratio และ Specific cost ที่เปลี่ยนแปลงไป

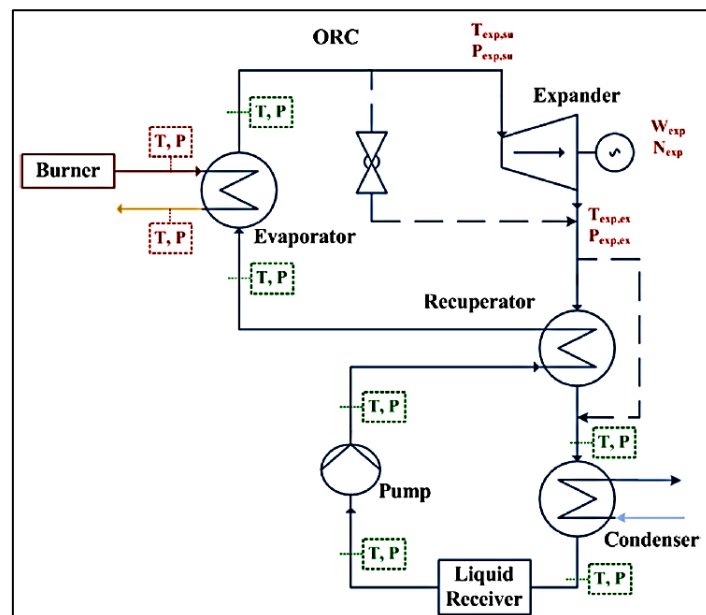
ที่มา: (Dumont et al., 2019)

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

โดยที่การทำงานของโรงไฟฟ้าวัฏจักรโออาร์ซีส่วนมากนิยมใช้พลังงานแหล่งความร้อนทิ้งซึ่งอาจเกิดความไม่แน่นอนของอุณหภูมิและปริมาณของแหล่งความร้อนทิ้ง ซึ่งส่งผลโดยตรงกับสถานะของสารทำงานที่เข้าเทอร์โบ ถ้าเทอร์โบสามารถรองรับสารทำงานที่เป็นของผสมได้ จะทำให้โรงไฟฟ้ามีความยืดหยุ่นในการทำงานมากขึ้น เป็นเหตุให้เทสลาเทอร์โบจึงมีความน่าสนใจใช้กับโรงไฟฟ้าวัฏจักรโออาร์ซี

2.4.1 เทสลาเทอร์โบในโรงไฟฟ้าวัฏจักรโออาร์ซี

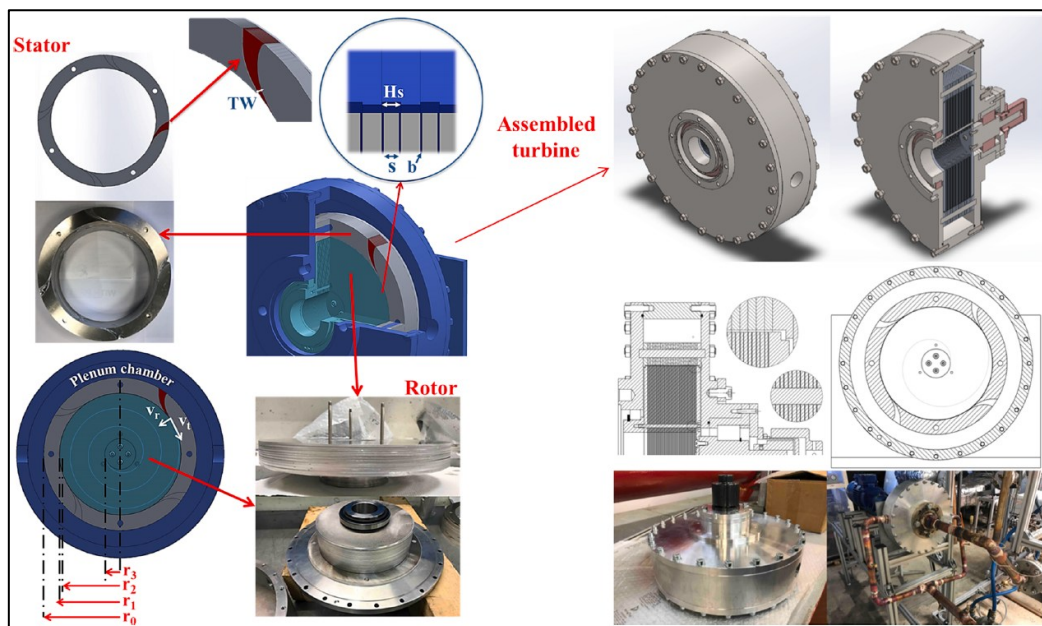
โดยจากการศึกษางานวิจัยก่อนหน้า พบว่ามีการศึกษาที่ใช้เทสลาเทอร์โบร่วมกับโรงไฟฟ้าวัฏจักรโออาร์ซี อาทิ ในการศึกษาของ Talluri et al. (2020) ได้ทำการทดลองโรงไฟฟ้าที่ใช้เทสลาเทอร์โบในโรงไฟฟ้าวัฏจักร โออาร์ซีที่ใช้สารทำงานเป็น R1233zd(E) พลังของโรงไฟฟ้าเป็นดังรูปที่ 2.11



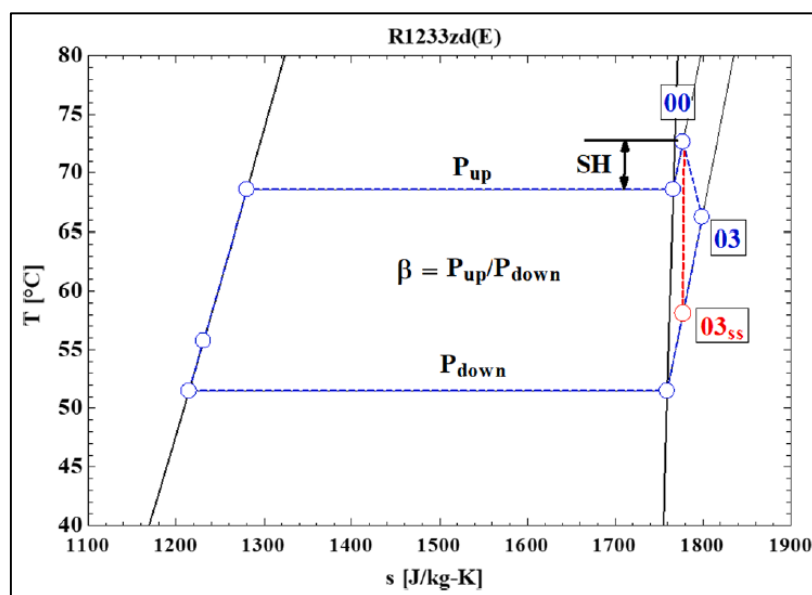
รูปที่ 2.11 ผังของอุปกรณ์ของโรงไฟฟ้าวัฏจักรโออาร์ซีที่ใช้เทสลาเทอร์ไบน์

ที่มา: (Talluri et al., 2020)

จากรูปที่ 2.11 ได้ว่าการทำงานของระบบที่ใช้ทำสองกับเทสลาเทอร์ไบน์มีลักษณะเหมือนกันโรงไฟฟ้าวัฏจักรโออาร์ซีทั่วไป ยกเว้นอุปกรณ์ Expander จะใช้เทสลาเทอร์ไบน์ ดังรูปที่ 2.12 โดยในการทดลองเงื่อนไขในการทดลองเป็นดังตารางที่ 2.2 และตำแหน่งต่าง ๆ โดยผังอุณหภูมิและเอนโทรปีจำเพาะ เป็นดังรูปที่ 2.13



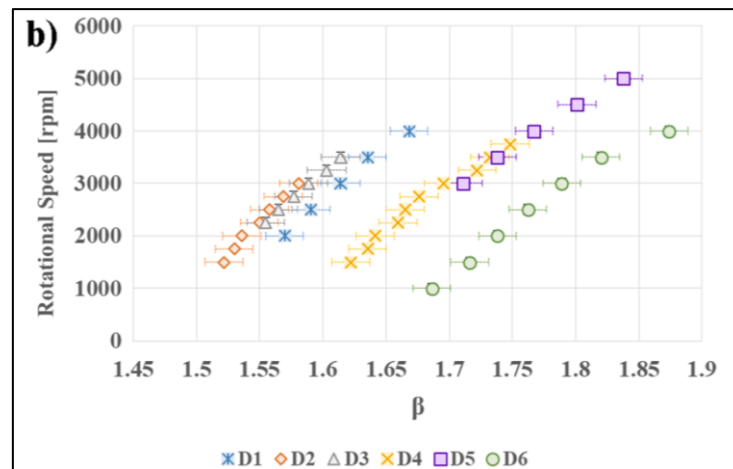
รูปที่ 2.12 ลักษณะของเทสลาเทอร์โบในการทดลอง
ที่มา: (Talluri et al., 2020)



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

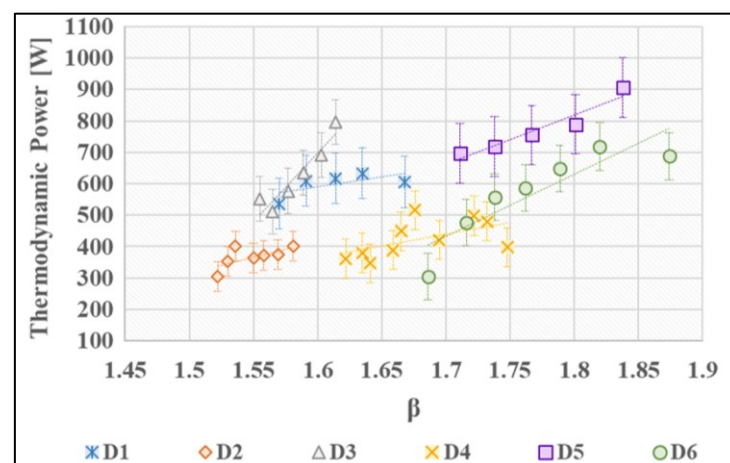
ตารางที่ 2.2 เงื่อนไขการทดลองของโรงไฟฟ้าวัฏจักรโออาร์ซีที่ใช้เตาเผาเทอร์ไบน์ (Huang et al., 2020)

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



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

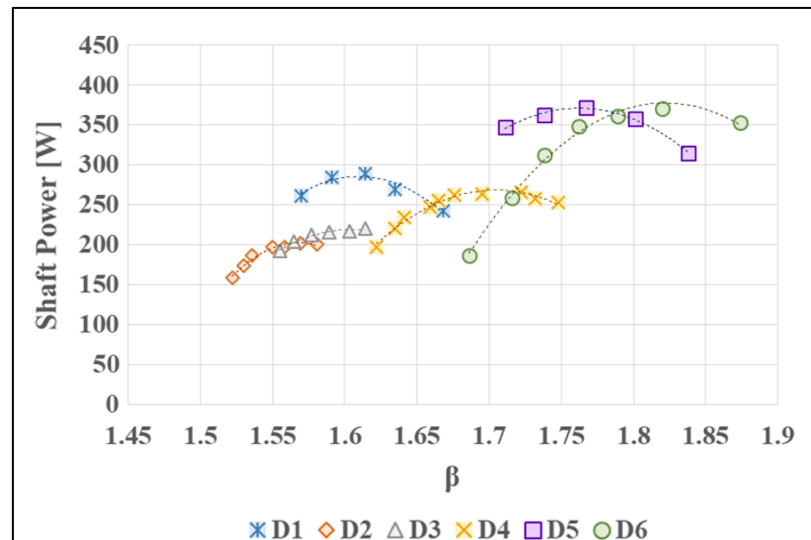
การศึกษาของ Talluri et al. (2020) ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของค่า Expansion ratio, β ที่ส่งผลต่อค่าที่แสดงต่อสมรรถนะต่าง ๆ ซึ่งการเปลี่ยนแปลงค่า β ดังรูปที่ 2.20 เกิดจากการเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบของเทอร์โบไบน์โดยเมื่อเพิ่มความเร็วรอบจะส่งผลให้เกิดการขยายตัวของสารทำงานในเทอร์โบไบน์เพิ่มมากขึ้น นอกจากนี้ ที่ความเร็วรอบเดียวมีหลาย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



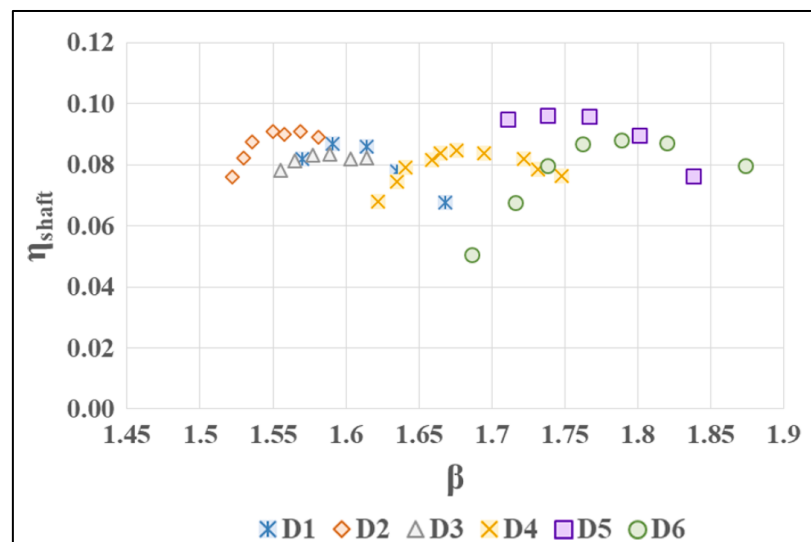
รูปที่ 2.15 Thermodynamic power เมื่อ Expansion ratio, β เปลี่ยนแปลงไป
ที่มา: (Talluri et al., 2020)

จากรูปที่ 2.15 จะเห็นได้ว่าเมื่อ β เพิ่มสูงขึ้นส่งผลให้พลังงานที่ถูกดึงออกจากสารทำงานมีค่ามากขึ้นเลยทำให้ Thermodynamic power เพิ่มสูงขึ้นตามไปด้วย อย่างไรก็ตาม เมื่อ

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



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

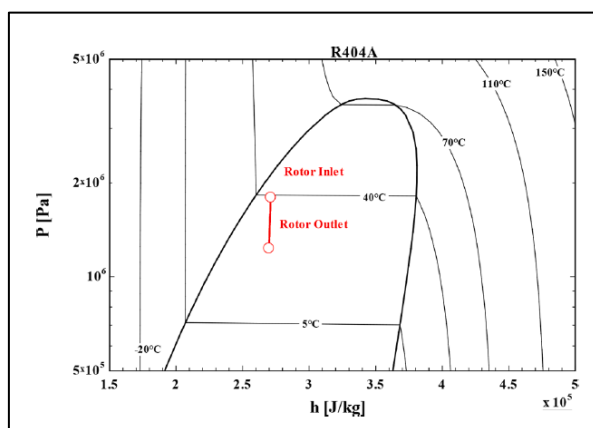


รูปที่ 2.17 Efficiency เมื่อ Expansion ratio, β เปลี่ยนแปลงไป
ที่มา: (Talluri et al., 2020)

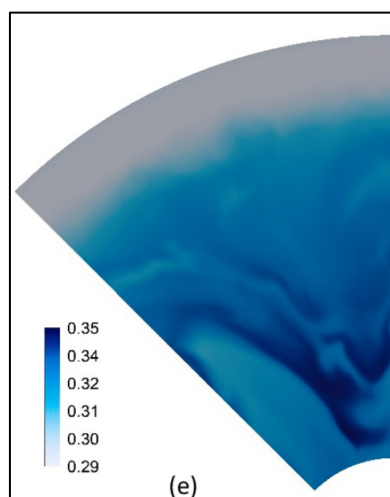
จากการทดลองของ Talluri et al. (2020) พบว่า เทสลาเทอร์ไบน์สามารถใช้กับโรงไฟฟ้าวัฏจักรโออาร์ซีได้ โดยที่ Shaft power สูงที่สุดเท่ากับ 371 W และประสิทธิภาพเท่ากับ

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

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



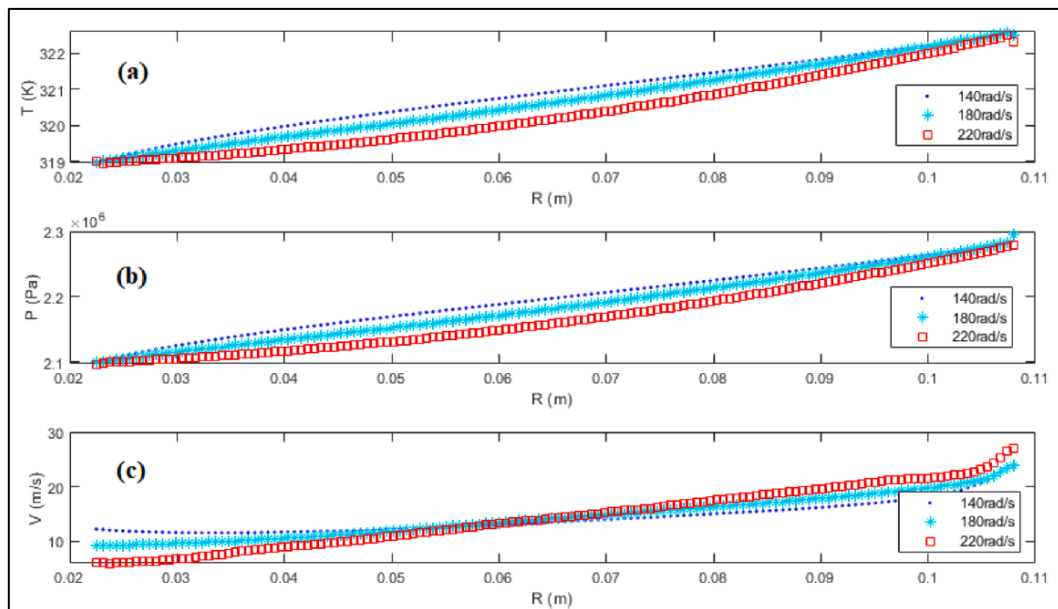
รูปที่ 2.18 ผังอุณหภูมิและเอนโทรปีจำเพาะของ two-phase expansion ของ R404A
ที่มา: (Niknam et al., 2021)



รูปที่ 2.19 ค่าความเป็นไอของสารทำงานภายในโรเตอร์ของเทสลาเทอร์ไบน์
ที่มา: (Niknam et al., 2021)

จากรูปที่ 2.19 จะได้ว่าเมื่อให้สารทำงานที่เข้าโรเตอร์ของเทสลาเทอร์ไบน์เป็นของผสม เมื่อเข้าโรเตอร์ของเทสลาเทอร์ไบน์แล้วจะเกิดการขยายตัว เนื่องจากความดันที่ลดลงจนถึงทางออกของ

โรเตอร์ของเทสลาเทอร์ไบน์โดยผลของการกระจายตัวของความเร็ว อุณหภูมิ และความดันเป็นดังรูปที่ 2.20

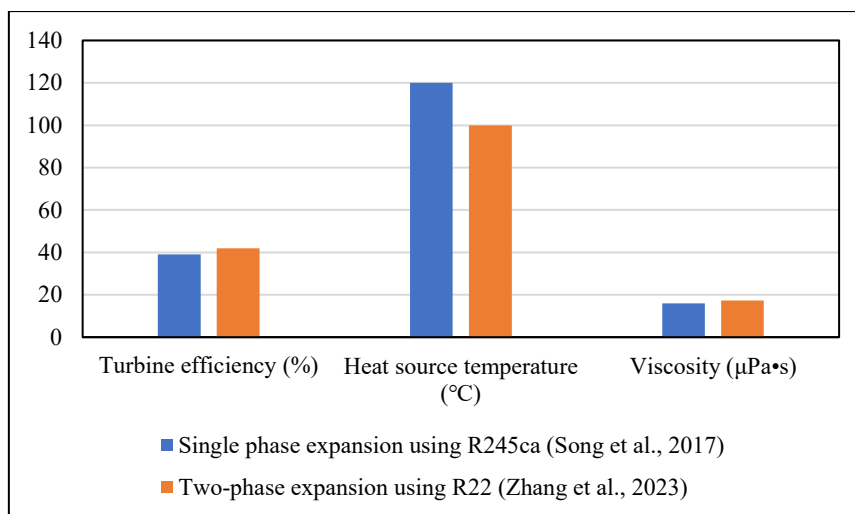


รูปที่ 2.20 การกระจายตัวของ ความเร็วในแนวสัมผัส อุณหภูมิ และความดัน ของสารทำงานในโรเตอร์ของเทสลาเทอร์ไบน์

ที่มา: (Niknam et al., 2021)

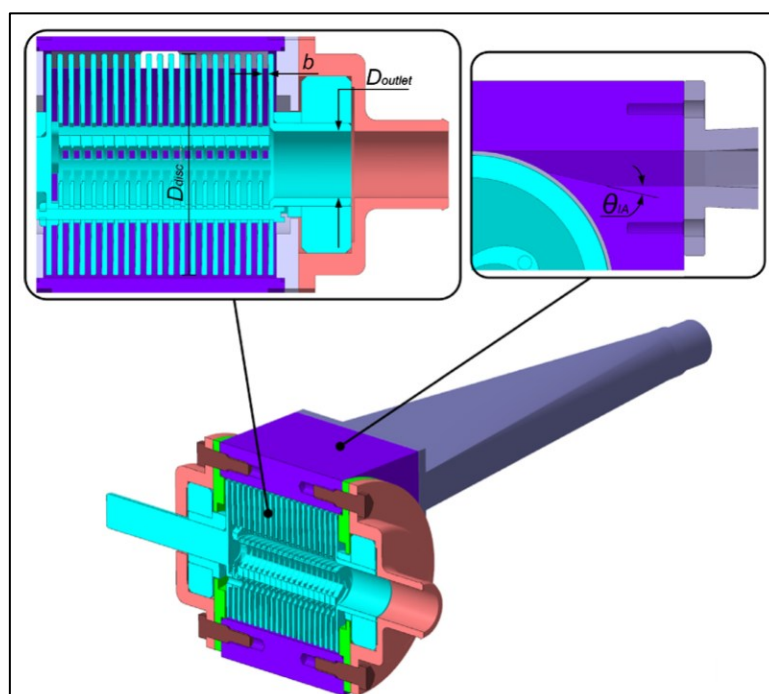
โดยจากผลการจำลองดังรูปที่ 2.20 พบว่าได้งานสูงสุดเท่ากับ 0.8 W ที่ความเร็วรอบเท่ากับ 220 rad/s (2,000 RPM) จากผลการศึกษาดังกล่าว Two-phase expansion นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบเทสลาเทอร์ไบน์แบบ Single และ Two phase พบว่า เทสลาเทอร์ไบน์ที่ทำงานแบบ two phase มีประสิทธิภาพสูงกว่าจึงมีความน่าสนใจเพื่อเพิ่มความสามารถของโรงไฟฟ้า

อย่างไรก็ตาม การศึกษาเชิงเปรียบเทียบระหว่าง Two-phase expansion และ Single-phase expansion ที่สภาวะการทำงานเดียวกันเพื่อเลือกวัฏจักรที่มีงานสุทธิและประสิทธิภาพสูงยังไม่ได้ถูกศึกษาในเชิงเปรียบเทียบ อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาจากการศึกษาเรื่อง Two-phase expansion ของ White (2021) แล้วพบว่า แบบ Two-phase expansion มีแนวโน้มที่เทสลาเทอร์ไบน์จะได้งานสุทธิออกมาสูงเนื่องจาก Two-phase expansion ให้งานสุทธิที่สูง และสารทำงานก่อนเข้าเทอร์ไบน์เป็นของเหลวซึ่งมี Viscosity สูงจะส่งผลทำให้เทสลาเทอร์ไบน์ให้งานและประสิทธิภาพสูง ดังรูปที่ 2.21



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

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

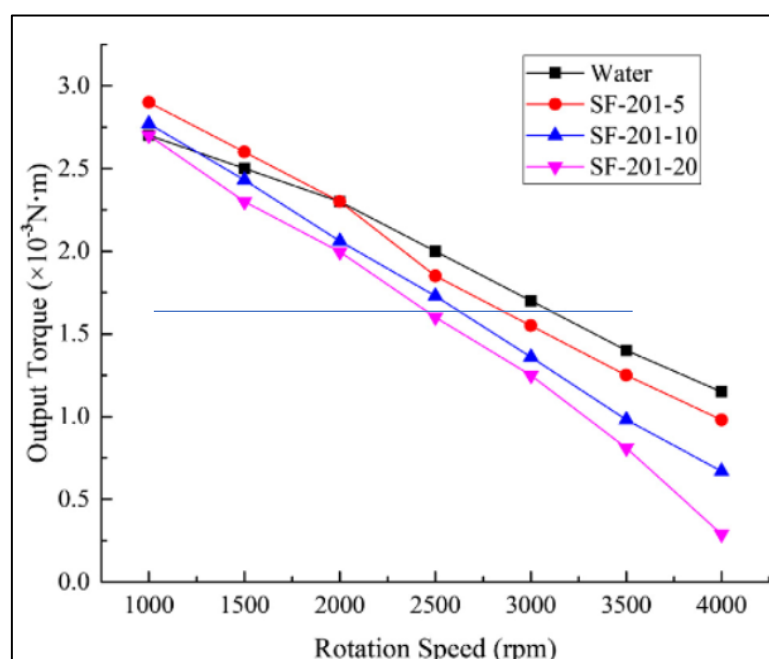


รูปที่ 2.22 ลักษณะของเทสลาเทอร์ไบน์ที่ใช้ในการจำลอง
ที่มา: (Ji et al., 2018)

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

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

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



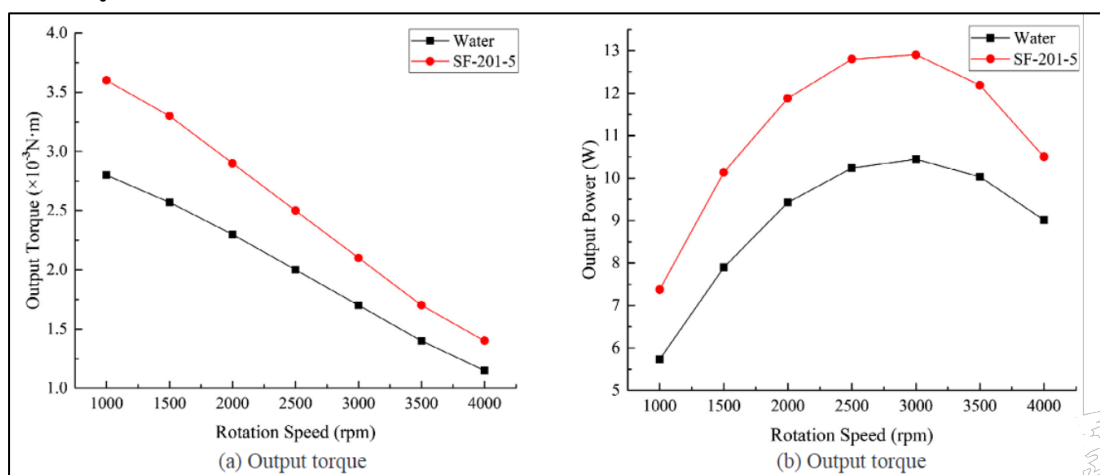
รูปที่ 2.23 ผลของแรงบิดที่ได้เมื่อเปลี่ยนความเร็วรอบของเพลลาเทอร์ไบน์ของแต่ละสารทำงาน
ที่มา: (Ji et al., 2018)

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

Song et al. (2017) และ Zhang et al. (2023) ที่พบพบว่า เมื่อใช้สารทำงานที่มี Viscosity สูงจะได้งานสูงตามไปด้วย

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

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

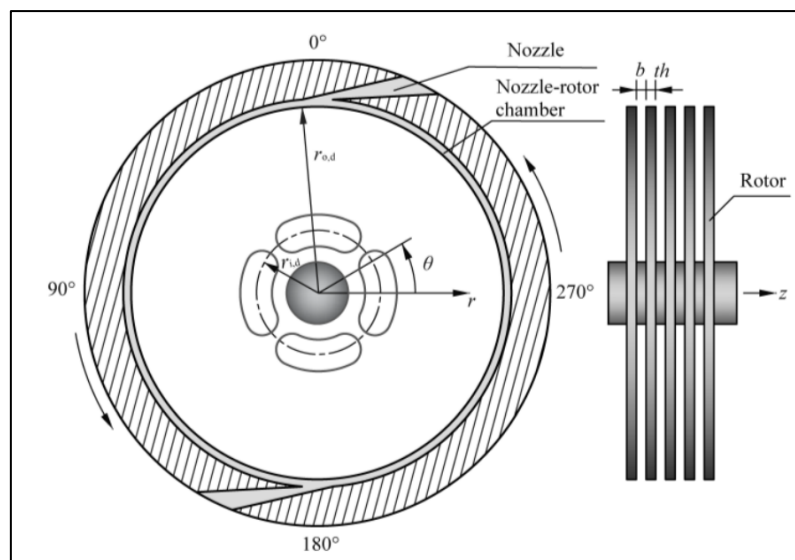


รูปที่ 2.24 ผลของแรงบิดและงานสุทธิที่ได้ของเตสลาเทอร์ไบน์ของสารทำงาน water และ SF-201-5
ที่มา: (Ji et al., 2018)

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

2.4.2 ตัวแปรที่ส่งผลต่อการทำงานของเตสลาเทอร์ไบน์

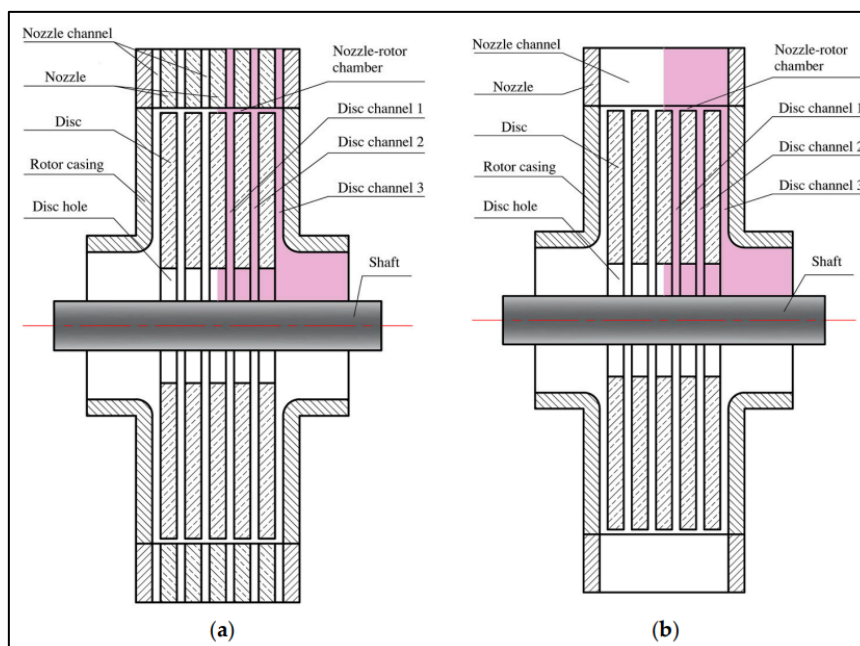
จากการทำปรัทัศนวรรณกรรมได้มีการศึกษาตัวแปรที่ส่งผลต่อการออกแบบเตสลาเทอร์ไบน์เพื่อให้ได้ขนาดที่ทำให้เตสลาเทอร์ไบน์ผลิตไฟฟ้าได้กำลังสูงหรือประสิทธิภาพไอเซนโทรปิกสูง อาทการศึกษาของ Qi et al. (2018) ได้ศึกษาอิทธิพลของค่าความหนาแผ่นดิสก์และความกว้างระหว่างแผ่นดิสก์ในที่ส่งผลต่อความสามารถของเตสลาเทอร์ไบน์ โดยลักษณะของเตสลาเทอร์ไบน์เป็นดังรูปที่ 2.25



รูปที่ 2.25 ลักษณะของเทสลาเทอร์ไบน์ในการจำลองหาอิทธิพลของค่าความหนาแผ่นดิสก์และความกว้างระหว่างแผ่นดิสก์

ที่มา: (Qi et al., 2018)

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



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

ที่มา: (Qi et al., 2018)

โดยเงื่อนไขของการจำลองเป็นดังตารางที่ 2.4 และกรณีที่ทำการศึกษาเปรียบเทียบเป็นตารางที่ 2.5 โดยในการจำลองจะใช้สารทำงานเป็นอากาศ

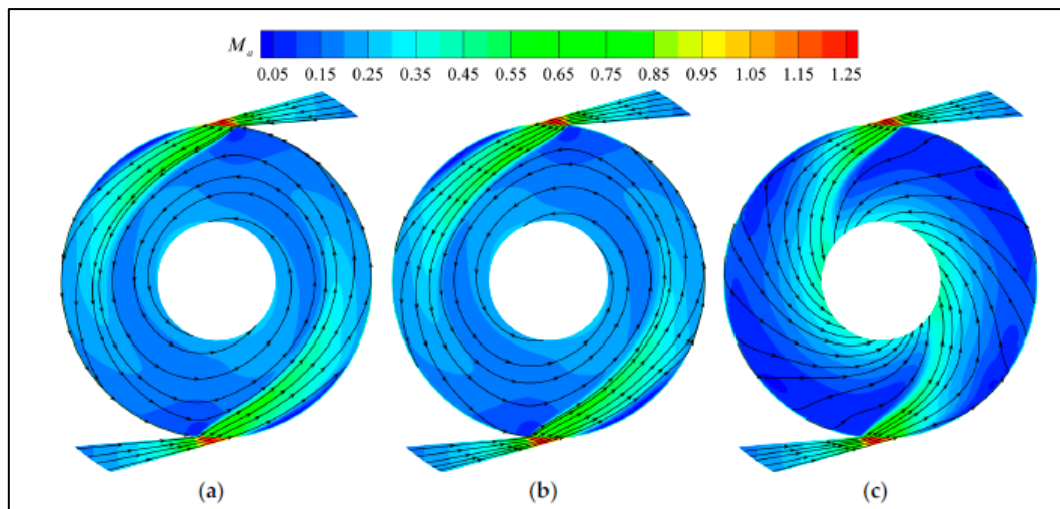
ตารางที่ 2.4 เงื่อนไขในการจำลองเปรียบเทียบค่าความหนาแน่นแผ่นดิสก์และระหว่างแผ่นดิสก์ในเทสลาเทอร์ไบน์ (Qi et al., 2018)

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

ตารางที่ 2.5 เงื่อนไขที่ทำการศึกษาเปรียบเทียบ (Qi et al., 2018)

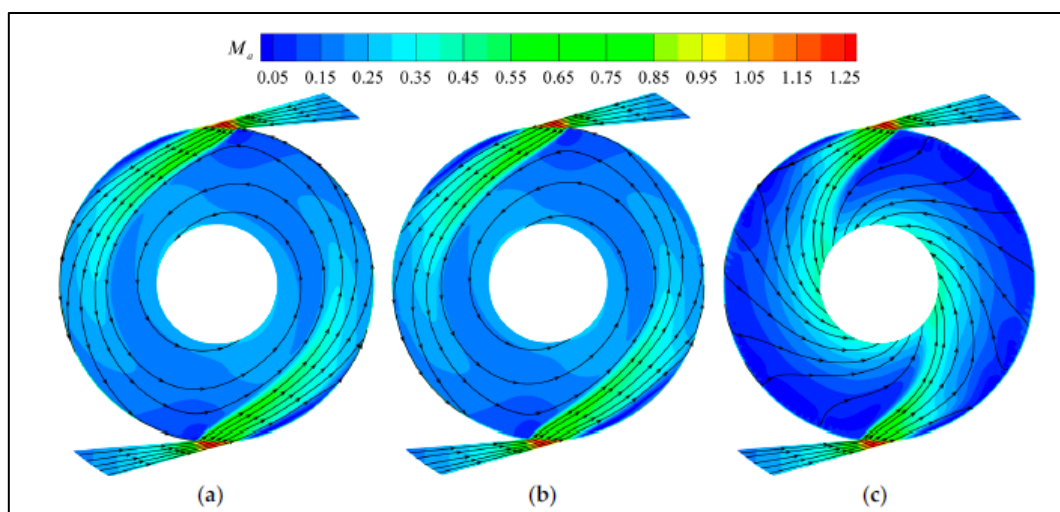
Group 1 (One-To-One Multichannel Tesla Turbines)			
Case	th (mm)	b (mm)	b/th (-)
Case 1-0.3	1	0.3	0.3
Case 1-0.5	1	0.5	0.5
Case 1-1	1	1	1
Case 2-0.3	2	0.3	0.15
Case 2-0.5	2	0.5	0.25
Case 2-1	2	1	0.5
Group 2 (One-To-Many Multichannel Tesla Turbines)			
Case	th (mm)	b (mm)	b/th (-)
Case 1-0.3	1	0.3	0.3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

โดยผลการจำลองการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของแผ่นดิสก์เป็นดังรูปที่ 2.27 ถึง 2.29



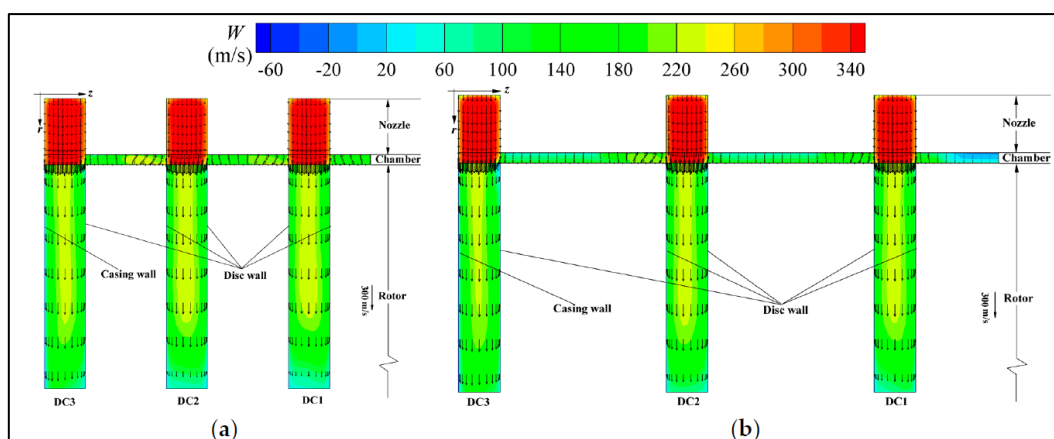
รูปที่ 2.27 ผลของความเร็วภายในเทสลาเทอร์ไบน์เมื่อเปลี่ยนแปลงความหนาของแผ่นดิสก์ไปในแต่ละดิสก์ สำหรับ One to One ที่ความเร็วรอบเท่ากับ 30,000 RPM ในเงื่อนไข Case 1-0.5: (a) DC1; (b) DC2; (c) DC3

ที่มา: (Qi et al., 2018)



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

ที่มา: (Qi et al., 2018)



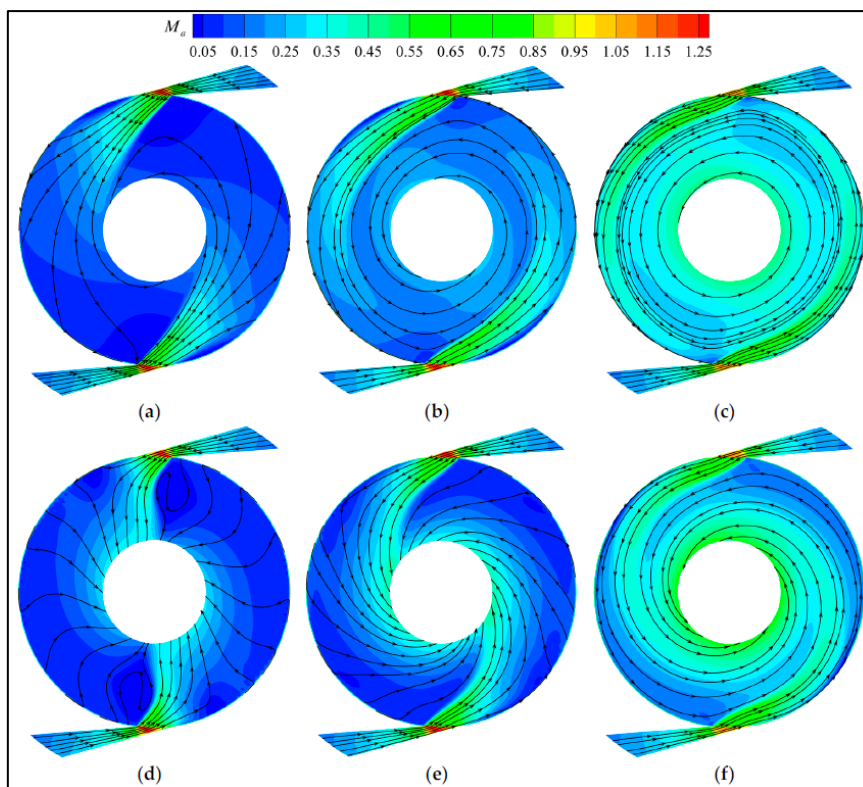
รูปที่ 2.29 ผลของความเร็วภายในเทสลาเทอร์ไบน์เมื่อเปลี่ยนแปลงความหนาของแผ่นดิสก์ เปลี่ยนแปลงไปในแต่ละพื้นที่หน้าตัด สำหรับ One to One ที่ความเร็วรอบเท่ากับ 30,000 RPM: (a) DC1 for Case 1-0.5; (b) DC1 for Case 2-0.5
ที่มา: (Qi et al., 2018)

โดยผลของ One to One พบว่าอิทธิพลของการเปลี่ยนแปลงความหนาของแผ่นดิสก์มีผลแตกต่างกันต่อพื้นที่หน้าตัดของนอซเซิลต่อช่องว่างระหว่างแผ่นดิสก์ที่มีค่าเท่าเดิมทำให้ความประสิทธิภาพเปลี่ยนแปลงน้อยมาก โดยผลแสดงตารางที่ 2.6

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

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

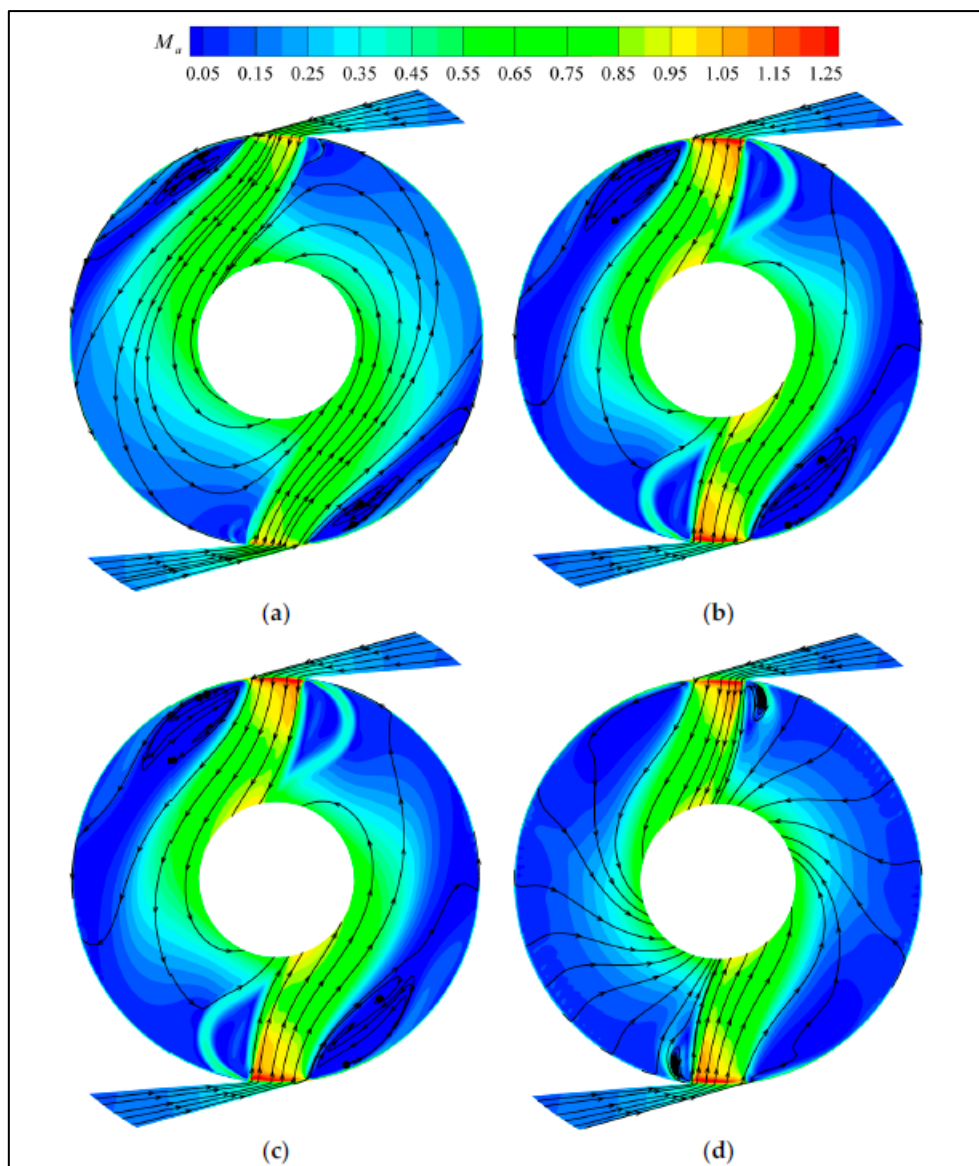
การศึกษาอิทธิพลของระยะห่างระหว่างแผ่นดิสก์ทำให้ความเร็วภายในแต่ละช่องของเทอร์ไบน์มีค่าเปลี่ยนแปลงไปดังรูปที่ 2.30 เนื่องจาก เปลี่ยนระยะห่างระหว่างแผ่นดิสก์ทำให้เป็นการเปลี่ยนพื้นที่หน้าตัดของการไหลส่งผลให้ความเร็วเปลี่ยนแปลงไปเช่นกัน นอกจากนี้ ถ้าเลือก ระยะห่างของดิสก์ที่เหมาะสมจะส่งผลให้ได้ประสิทธิภาพออกมา



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

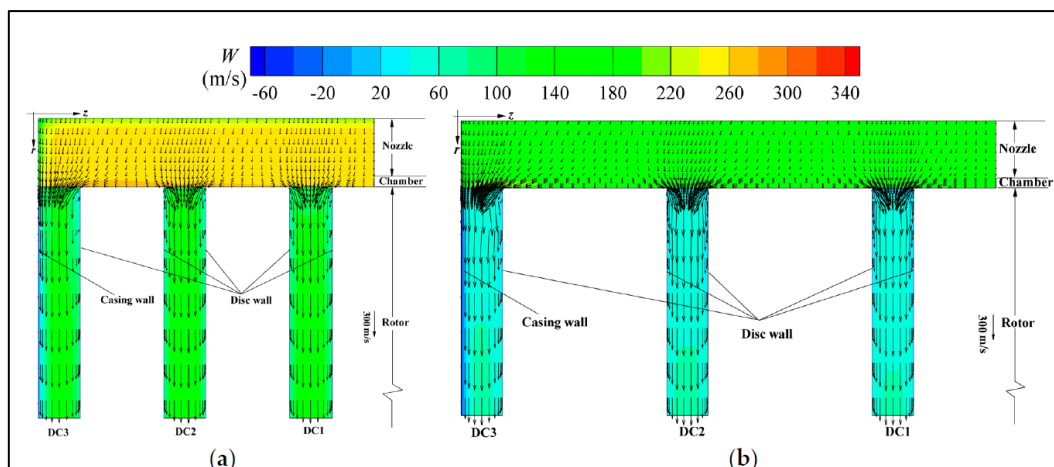
ที่มา: (Qi et al., 2018)

ความเร็วภายในเทอร์ไบน์แบบ One to many เปลี่ยนแปลงตามความหนาของแผ่นดิสก์แสดงดังรูปที่ 2.31 และ 2.32 พบว่า เมื่อความหนาของดิสก์มีค่าเพิ่มทำให้การไหลของอากาศที่ประทะกับเทอร์ไบน์ช้าลง เนื่องจากพื้นที่หน้าตัดของนอซเซลล์มีพื้นที่เพิ่มมากขึ้นทำให้ความเร็วทางเข้าแผ่นดิสก์ลดลงตามไปด้วย



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

ที่มา: (Qi et al., 2018)



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

ที่มา: (Qi et al., 2018)

สำหรับอิทธิพลของระยะห่างระหว่างแผ่นดิสก์สำหรับ One to many พบว่า มีแนวโน้มเหมือนกันกับ One to one คือจะพบค่าที่ทำให้ได้ประสิทธิภาพสูงสุดโดยสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 2.7

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

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

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

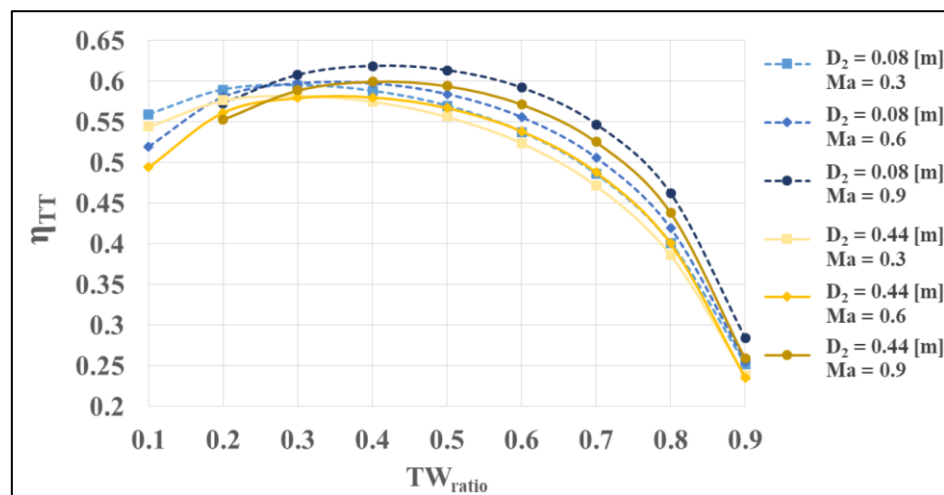
จากการศึกษาของ Talluri et al. (2018) พบว่า ในการออกแบบเทสลาเทอร์ไบน์ นั้นมีค่าขนาดต่างกัน ที่ทำให้ได้ประสิทธิภาพของเทอร์ไบน์สูงสุด โดยจะได้ศึกษาอิทธิพลของ Throat-width ratio และ Tangential velocity ratio

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

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

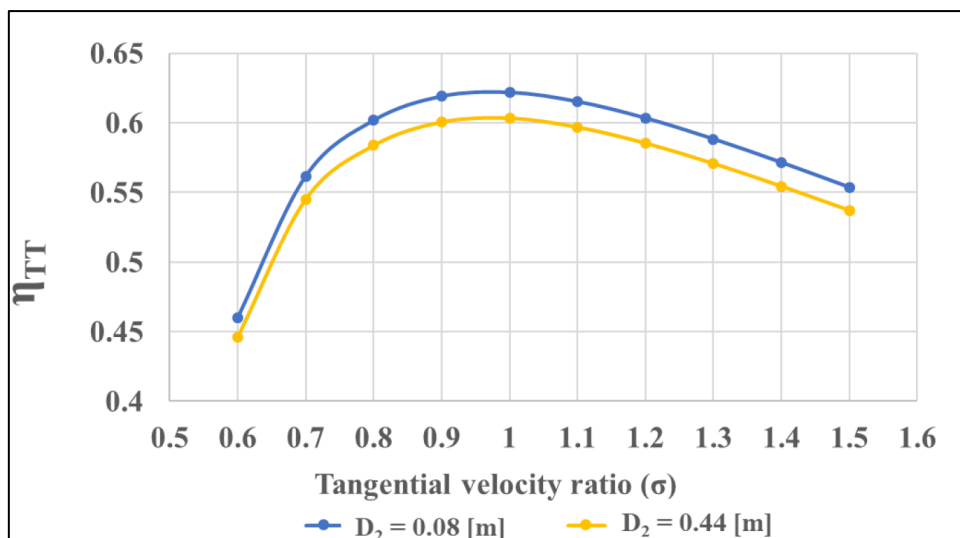
$$\sigma = \frac{V_{\theta,2}}{U_{\theta,2}} \quad (2.2)$$

โดยผลการศึกษาอิทธิพลของ Throat-width ratio และ Tangential velocity ratio เป็นดังรูปที่ 2.34



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

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



รูปที่ 2.34 อิทธิพลของ tangential velocity ratio ที่เปลี่ยนแปลงไปต่อประสิทธิภาพของเตสลาเทอร์ไบน์

ที่มา: (Talluri et al., 2018)

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

ปรีทัศน์วรรณกรรมของการศึกษาเตสลาเทอร์ไบน์พบว่า สามารถทำงานได้เหมือนกับเทอร์ไบน์ที่นิยมใช้กับวัฏจักรโออาร์ซี และยังคงมีความซับซ้อนน้อยกว่ารวมถึงราคาในการผลิตยังถูกกว่าอีกด้วย นอกจากนี้ ยังมีจุดเด่นที่สามารถทำงานภายใต้สถานะของสารทำงานที่เป็นของเหลวหรือของผสมได้ อีกทั้งเมื่อเปรียบเทียบกับเทอร์ไบน์ตามแนวนอนพบว่าสำหรับโรงไฟฟ้ากำลังผลิตน้อยหรือโรงไฟฟ้าที่แหล่งความร้อนเป็นแหล่งความร้อนคุณภาพต่ำเตสลาเทอร์ไบน์จะมีประสิทธิภาพที่สูงกว่า ดังนั้น วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สนใจจะนำเตสลาเทอร์ไบน์ใช้กับวัฏจักรโออาร์ซี

2.5 การเลือกสารทำงานสำหรับโรงไฟฟ้า

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

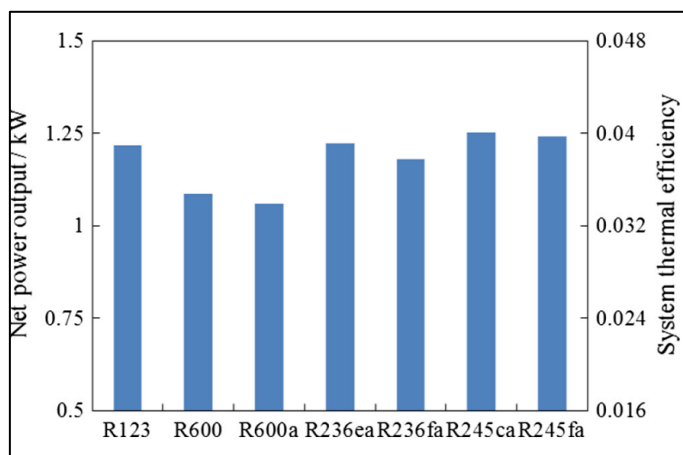
Evaporator จะมี Superheated degree เท่ากับ 1°C และ ให้ Pinch point temperature difference ที่อุปกรณ์ Condenser และ Evaporator มีค่าเท่ากับ 6°C โดยผลการจำลองเป็นดังตารางที่ 2.9 และ รูปที่ 2.35

ตารางที่ 2.8 คุณสมบัติของสารทำงานที่เลือกมาใช้กับโรงไฟฟ้าวัฏจักรโออาร์ซี (Song et al., 2017)

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

ตารางที่ 2.9 ผลการจำลองของโรงไฟฟ้าวัฏจักรโออาร์ซีที่มีสารทำงานแตกต่างกันออกไป (Song et al., 2017)

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



รูปที่ 2.35 ผลของประสิทธิภาพและงานสุทธิของเทสลาเทอร์ไบน์เมื่อสารทำงานเปลี่ยนแปลงไป

ที่มา: (Song et al., 2017)

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

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

ตารางที่ 2.10 เงื่อนไขการจำลองของโรงไฟฟ้าวัฏจักรโออาร์ซี

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

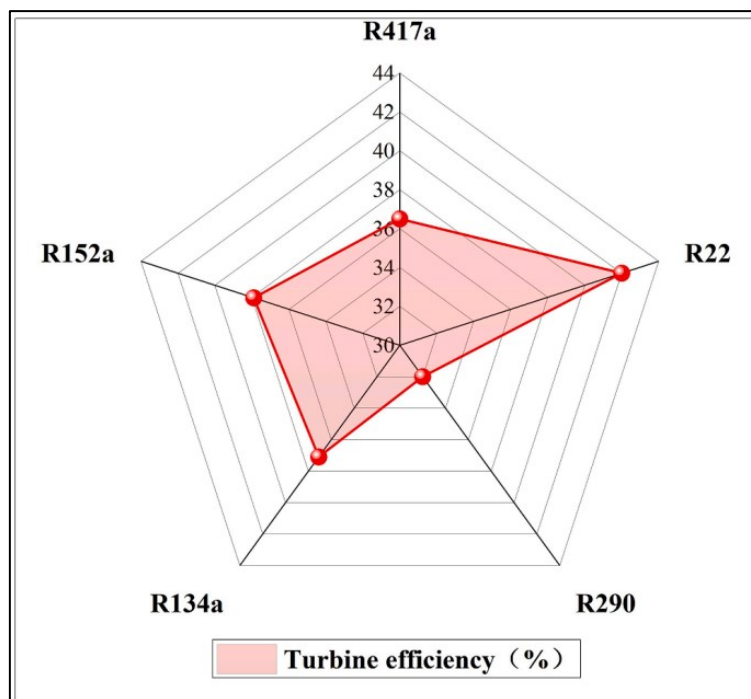
ที่มา: (Zhang et al., 2023)

ตารางที่ 2.11 คุณสมบัติของสารทำงานที่เลือกมาใช้กับโรงไฟฟ้าวัฏจักรโออาร์ซี

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

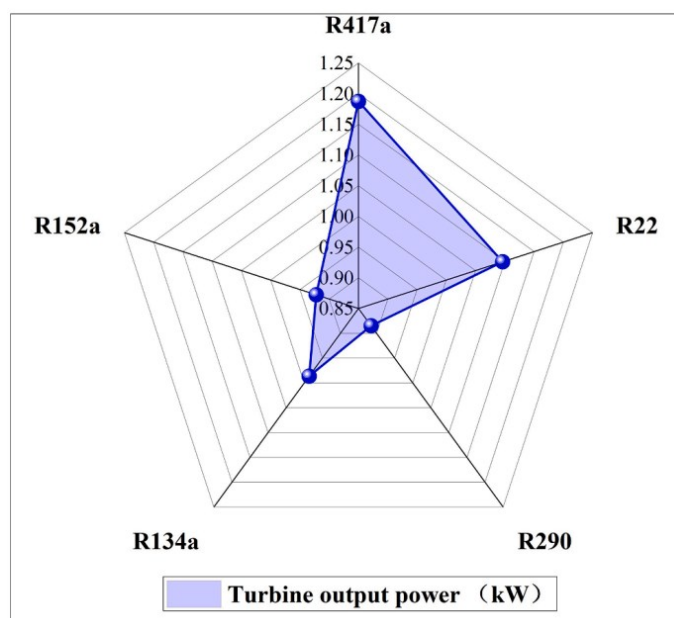
ที่มา: (Zhang et al., 2023)

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



รูปที่ 2.36 Turbine efficiency ของสารทำงานที่แตกต่างกันออกไปที่ความเร็วรอบเท่ากับ 6000 RPM

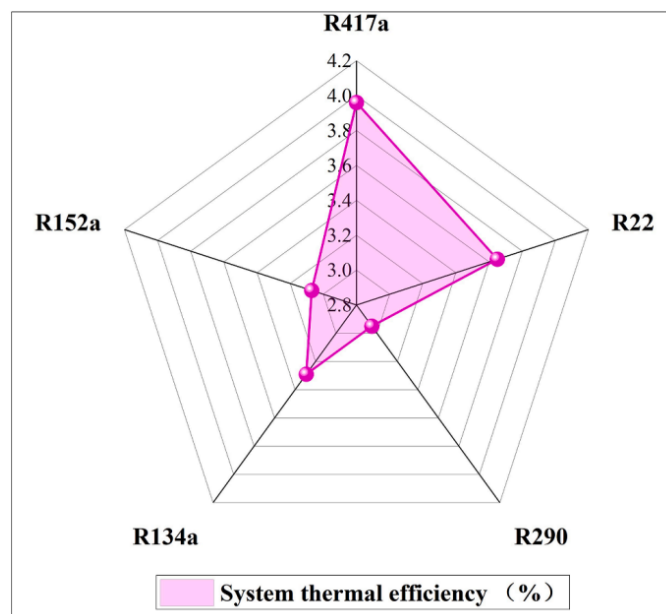
ที่มา: (Zhang et al., 2023)



รูปที่ 2.37 Turbine power output ของสารทำงานที่แตกต่างกันออกไปที่ความเร็วรอบเท่ากับ 6000 RPM

ที่มา: (Zhang et al., 2023)

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



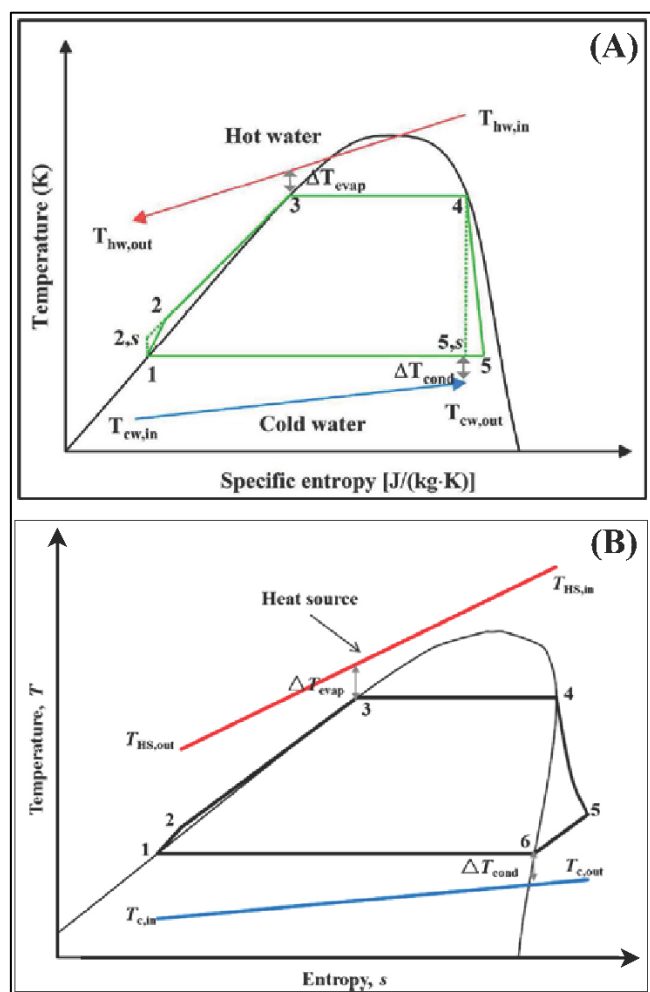
รูปที่ 2.38 Thermal efficiency ของโรงไฟฟ้าที่ใช้สารทำงานที่แตกต่างกันออกไปที่ความเร็วรอบเท่ากับ 6,000 RPM

ที่มา: (Zhang et al., 2023)

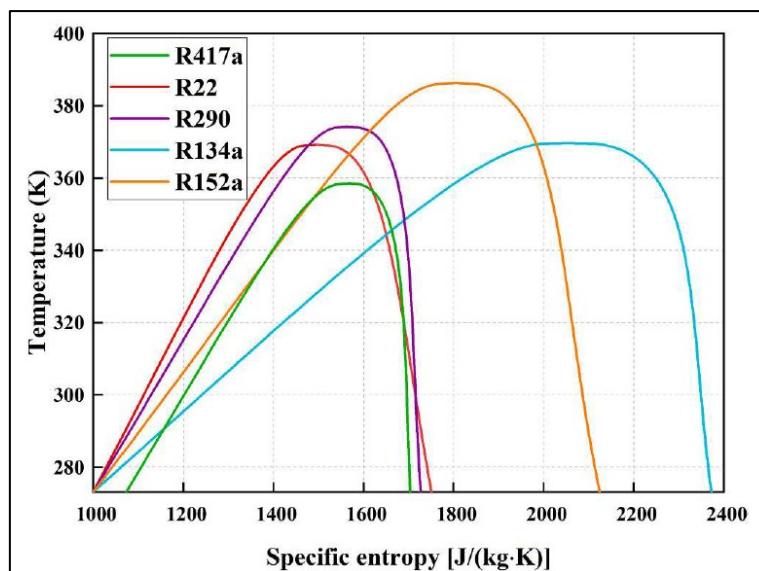
ทั้งนี้ ผลของประสิทธิภาพเชิงความร้อนของวัฏจักรจะมีแนวโน้มเดียวกันกับ Turbine power output ดังรูปที่ 2.38 คือ R417a ให้ประสิทธิภาพออกมามากที่สุด

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

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



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



รูปที่ 2.40 ผังอุณหภูมิและเอนโทรปีจำเพาะของสารทำงาน Wet fluid
ที่มา: (Song et al., 2017)

ดังนั้น คุณสมบัติของสารทำงานเป็นสิ่งที่จำเป็นต้องศึกษา เนื่องจากส่งผลต่อการทำงานของ
เทอร์โมทอร์