

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ.....	ก
Abstract.....	ค
กิตติกรรมประกาศ	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง	ฎ
สารบัญรูป.....	ท
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	น

บทที่

1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย	9
1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย	9
1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ	9
2 ทัศนวิสัยวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	10
2.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา	10
2.2 โรงไฟฟ้าวัฏจักรที่แอลซี.....	11
2.3 โรงไฟฟ้าวัฏจักรคาลินา.....	12
2.4 เทสลาเทอร์ไบน์.....	15
2.4.1 เทสลาเทอร์ไบน์ในโรงไฟฟ้าวัฏจักรโออาร์ซี.....	18
2.4.2 ตัวแปรที่ส่งผลต่อการทำงานของเทสลาเทอร์ไบน์.....	28
2.5 การเลือกสารทำงานสำหรับโรงไฟฟ้า	37

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3	วิธีการดำเนินการวิจัย.....	44
3.1	การจำลองของโรงไฟฟ้าวัฏจักรโออาร์ซีเพื่อหาเงื่อนไขการทำงานที่ให้กำลังสุทธิสูงสุด.....	44
3.1.1	โรงไฟฟ้าวัฏจักรโออาร์ซีที่ใช้เตสลาเทอร์ไบน์และแบบจำลองของโรงไฟฟ้าวัฏจักรโออาร์ซี.....	44
3.1.2	การจำลองโรงไฟฟ้าวัฏจักรโออาร์ซี.....	47
3.1.3	การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองโรงไฟฟ้าวัฏจักรโออาร์ซี.....	49
3.2	การจำลองโรงไฟฟ้าวัฏจักรคาลินาแบบ KCS-11.....	51
3.2.1	โรงไฟฟ้าวัฏจักรคาลินาชนิด KCS-11 ที่ใช้เตสลาเทอร์ไบน์และแบบจำลองของโรงไฟฟ้าวัฏจักรคาลินาชนิด KCS-11.....	51
3.2.2	การจำลองโรงไฟฟ้าวัฏจักรคาลินาแบบ KCS-11.....	55
3.2.3	การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองโรงไฟฟ้าวัฏจักรคาลินาแบบ KCS-11.....	56
3.3	การจำลองเตสลาเทอร์ไบน์.....	58
3.3.1	คำอธิบายและหลักการทำงานของเตสลาเทอร์ไบน์.....	58
3.3.2	แบบจำลองของเตสลาเทอร์ไบน์.....	59
3.3.3	แนวทางการจำลองและการออกแบบเตสลาเทอร์ไบน์.....	66
3.3.4	การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองเตสลาเทอร์ไบน์.....	69
3.4	การวิเคราะห์เอ็กเซอร์ยี.....	72
3.5	การประเมินความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์.....	74
3.5.1	การประเมินราคาของโรงไฟฟ้า.....	75
3.5.2	การประเมินราคาของอุปกรณ์ภายในโรงไฟฟ้า.....	76
3.5.3	การปรับราคาของอุปกรณ์ภายในโรงไฟฟ้าวัฏจักรโออาร์ซีด้วยดัชนีราคา.....	76
3.5.4	การตรวจสอบความถูกต้องของการประเมินราคาของโรงไฟฟ้า.....	78
3.5.5	ตัวแปรที่ใช้ประเมินความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์.....	79

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.6	แนวทางการศึกษาการทำสมรรถนะของเตสลาเทอร์ไบน์	80
3.6.1	การศึกษาอิทธิพลของตัวแปรที่ใช้ในการออกแบบของเตสลาเทอร์ไบน์	81
3.6.2	การศึกษาอิทธิพลของความเป็นไอของสารทำงานที่มีผลต่อสมรรถนะของ โรงไฟฟ้าและเตสลาเทอร์ไบน์	81
3.6.3	การศึกษาพฤติกรรมการทำงานของเตสลาเทอร์ไบน์ในโรงไฟฟ้าวัฏจักรที่ แอลซีเมื่อใช้สารผสมซีโอโทริกที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม	82
3.6.4	การศึกษาการทำงานของโรงไฟฟ้าวัฏจักรที่แตกต่างกันเมื่อใช้กับเตสลา เทอร์ไบน์	83
4	อิทธิพลของตัวแปรที่ใช้ในการออกแบบของเตสลาเทอร์ไบน์	86
4.1	อัตราส่วนความดัน (PR)	87
4.2	ความเร็วรอบของการทำงาน (ω)	92
4.3	เส้นผ่านศูนย์กลางของภายนอกของโรเตอร์ (D_d) และจำนวนแผ่นของโรเตอร์ (N_{disk})	94
4.4	ระยะห่างระหว่างแผ่นดิสก์ของโรเตอร์ (b)	96
5	อิทธิพลของความเป็นไอของสารทำงานที่มีผลต่อสมรรถนะของโรงไฟฟ้า และเตสลา เทอร์ไบน์	98
5.1	การวิเคราะห์เงื่อนไขการทำงานของโรงไฟฟ้าที่ใช้จำลองเตสลาเทอร์ไบน์	98
5.2	การประเมินกำลังสุทธิของโรงไฟฟ้าที่ใช้เตสลาเทอร์ไบน์เมื่อความเป็นไอของสาร ทำงานก่อนเข้าเทอร์ไบน์เปลี่ยนแปลงไป	103
5.3	การประเมินเศรษฐศาสตร์เมื่อความเป็นไอของสารทำงานก่อนเข้าเทอร์ไบน์ เปลี่ยนแปลงไป	111
5.3.1	เงินลงทุนเริ่มต้นและปริมาณไฟฟ้าที่ผลิตได้	112
5.3.2	มูลค่าปัจจุบันสุทธิของต้นทุนต่อหน่วยของการผลิตไฟฟ้าตลอดอายุ โครงการ (LCOE)	113
5.3.3	มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (NPV) และระยะเวลาคืนทุนที่มีการคิดลด (d-PbP)	114

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

5.3.4 อัตราตอบแทนภายใน (IRR)	117
5.3.5 การเปรียบเทียบผลกับงานวิจัยอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้อง.....	118
5.4 ข้อจำกัดในการศึกษา.....	120
6 พฤติกรรมการทำงานของเตสลาเทอร์ไบน์ในโรงไฟฟ้าวัฏจักรที่แอลซีเมื่อใช้สารผสม ซีโอโทริกที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม.....	121
6.1 การประเมินสมรรถนะของระดับอุปกรณ์	122
6.1.1 เงื่อนไขการทำงานของโรงไฟฟ้าและอุณหภูมิวิกฤตของสารทำงาน	124
6.1.2 พฤติกรรมของการถ่ายเทความร้อน.....	124
6.1.3 พฤติกรรมของเตสลาเทอร์ไบน์.....	130
6.2 การประเมินสมรรถนะของระบบ	136
6.2.1 กำลังสุทธิของโรงไฟฟ้าและการทำลายเอกเซอร์ยี.....	137
6.2.2 ความเหมาะสมของอุณหภูมิและการกระจายของเอกเซอร์ยี.....	138
6.2.3 อิทธิพลของอุณหภูมิวิกฤตต่อสมรรถนะของโรงไฟฟ้า	140
6.3 การประเมินความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์	143
6.3.1 ต้นทุนต่อหน่วยในการผลิตไฟฟ้าและเงินลงทุนเริ่มต้น	143
6.3.2 อัตราผลตอบแทนภายในและระยะเวลาในการคืนทุน.....	144
6.4 แนวทางการประยุกต์ใช้ในทางปฏิบัติ.....	146
6.4.1 การเลือกสารทำงาน	146
6.4.2 การนำเตสลาเทอร์ไบน์ไปใช้งาน	147
6.4.3 การพิจารณาในระดับอุปกรณ์ของโรงไฟฟ้า	147
6.5 ข้อจำกัดในการศึกษา.....	147
6.5.1 แบบจำลองและเงื่อนไขการจำลอง	148
6.5.2 การทำการตรวจสอบความถูกต้องกับการทดลอง	148
6.5.3 สมรรถนะที่แปรผันตามเวลา	148
6.5.4 เพิ่มการพิจารณาทางเศรษฐศาสตร์ในด้านอื่น ๆ เพิ่มเติม	149
6.5.5 การประเมินผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม	149

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

7	ผลการทำงานของโรงไฟฟ้าวัฏจักรที่แตกต่างกันเมื่อใช้กับเตสลาเทอร์ไบน์	150
7.1	ผลการเปรียบเทียบสมรรถนะทางอุณหพลศาสตร์ของแต่ละโรงไฟฟ้าที่ใช้เตสลาเทอร์ไบน์	151
7.1.1	เงื่อนไขการทำงานของโรงไฟฟ้าและอุณหภูมิวิกฤตของสารทำงาน	151
7.1.2	พฤติกรรมการถ่ายเทความร้อน	153
7.1.3	พฤติกรรมการทำงานของเตสลาเทอร์ไบน์	156
7.1.4	พฤติกรรมของสมรรถนะโดยรวมของโรงไฟฟ้า	160
7.2	ผลการประเมินเศรษฐศาสตร์	164
7.2.1	เงินลงทุนเริ่มต้นของโรงไฟฟ้า	164
7.2.2	ต้นทุนต่อหน่วยของการผลิตไฟฟ้า (LCOE)	165
7.2.3	มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (NPV)	167
7.2.4	ระยะเวลาคืนทุนที่มีการคิดลด (d-PbP) และ อัตราผลตอบแทนภายใน (IRR)	168
7.3	แนวทางการประยุกต์ใช้ในทางปฏิบัติ	170
7.4	ข้อจำกัดในการศึกษา	170
7.4.1	จำนวนวัฏจักรที่ใช้ในการเปรียบเทียบมีจำกัด	170
7.4.2	จำนวนสารทำงานที่ใช้ในการศึกษามีจำกัด	170
7.4.3	แบบจำลองและเงื่อนไขการจำลอง	171
8	บทสรุปและข้อเสนอแนะ	172
8.1	ผลสรุปสำหรับอิทธิพลของตัวแปรที่ใช้ในการออกแบบของเตสลาเทอร์ไบน์	172
8.2	ผลสรุปสำหรับอิทธิพลของความเป็นไอของสารทำงานที่มีผลต่อสมรรถนะของโรงไฟฟ้าและเตสลาเทอร์ไบน์	173
8.3	ผลสรุปสำหรับพฤติกรรมการทำงานของเตสลาเทอร์ไบน์ในโรงไฟฟ้าวัฏจักรที่แอลซีเมื่อใช้สารผสมซีโทรปิกที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม	174
8.4	ผลสรุปสำหรับการทำงานของโรงไฟฟ้าวัฏจักรที่แตกต่างกันเมื่อใช้กับเตสลาเทอร์ไบน์	176

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

รายการอ้างอิง.....	179
ภาคผนวก ก	189
ภาคผนวก ข	199
ภาคผนวก ค	212
ภาคผนวก ง	221
ภาคผนวก จ	223
ประวัติผู้เขียน	225

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ผลการศึกษาโรงไฟฟ้าวัฏจักรโออาร์ซี	10
2.2 เงื่อนไขการทดลองของโรงไฟฟ้าวัฏจักรโออาร์ซีที่ใช้เทสลาเทอร์โบน์	21
2.3 ค่าคุณสมบัติของ water SF-201-5 SF-201-10 และ SF-201-20	27
2.4 เงื่อนไขในการจำลองเปรียบเทียบค่าความหนาแน่นดิสก์และระหว่างแผ่นดิสก์ในเทสลาเทอร์โบน์	30
2.5 เงื่อนไขที่ทำการจำลองเปรียบเทียบ	30
2.6 ผลการเปลี่ยนแปลง Loss coefficient และประสิทธิภาพไอเซนโทรปิกต่อการเปลี่ยนแปลง ระยะห่างระหว่างแผ่นดิสก์ สำหรับ One to one	32
2.7 ผลการเปลี่ยนแปลง Loss coefficient และประสิทธิภาพไอเซนโทรปิกต่อการเปลี่ยนแปลง ระยะห่างระหว่างแผ่นดิสก์ สำหรับ One to many	35
2.8 คุณสมบัติของสารทำงานที่เลือกมาใช้กับโรงไฟฟ้าวัฏจักรโออาร์ซี	38
2.9 ผลการจำลองของโรงไฟฟ้าวัฏจักรโออาร์ซีที่มีสารทำงานแตกต่างกันออกไป	38
2.10 เงื่อนไขการจำลองของโรงไฟฟ้าวัฏจักรโออาร์ซี	39
2.11 คุณสมบัติของสารทำงานที่เลือกมาใช้กับโรงไฟฟ้าวัฏจักรโออาร์ซี	39
3.1 ผลการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองกับงานวิจัยของ	50
3.2 ผลการตรวจสอบความถูกต้องของการจำลองของแบบจำลองโรงไฟฟ้าวัฏจักรคาลินา	56
3.3 ขนาดและช่วงการทำงานของเทสลาเทอร์โบน์ที่ใช้ในการจำลอง	67
3.4 ผลการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการจำลองและการทดลองของ Talluri et al. (2020) โดยการ ไหลเป็นแบบสถานะเดียว	70

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
3.5 ผลการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการจำลองและการทดลองของ Niknam et al. (2021) โดยการไหลเป็นแบบสองเฟส.....	71
3.6 เงื่อนไขที่ใช้ในการประเมินความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของโรงไฟฟ้า.....	74
3.7 ความสัมพันธ์ของราคาอุปกรณ์ของโรงไฟฟ้าจากบริษัทนวัตกรรม.....	76
3.8 ค่าดัชนีราคาของ Chemical Engineering Plant Cost Index (CEPCI).....	77
3.9 ผลการตรวจสอบความถูกต้องของการประเมินราคาหลักจากปรับราคาโดยใช้ CEPCI ในปีที่แตกต่างกัน.....	78
3.10 สารทำงานที่ใช้ในการจำลองเพื่อหาสารทดแทน R245fa.....	83
4.1 เงื่อนไขการทำงานพื้นฐานของโรงไฟฟ้าวัฏจักรโออาร์ซีและเตสลาเทอร์ไบน์ที่ใช้สำหรับศึกษาอิทธิพลของตัวแปรที่ใช้ในการออกแบบ.....	86
5.1 ผลของเงื่อนไขการทำงานของโรงไฟฟ้าที่ทำให้ได้กำลังสุทธิสูงสุดที่ความเป็นไอของสาร R236ea ก่อนเข้าเตสลาเทอร์ไบน์เปลี่ยนแปลงไป.....	99
5.2 ผลการออกแบบของเตสลาเทอร์ไบน์ที่ทำให้ได้กำลังสูงสุดในแต่ละความเป็นไอของสาร R236ea ก่อนเข้าเตสลาเทอร์ไบน์.....	103
5.3 ผลของความเร็วของสารทำงานและมัคนัมเบอร์ที่ความเป็นไอของสาร R236ea ก่อนเข้าเตสลาเทอร์ไบน์แต่ละค่า.....	108
5.4 ผลการเปรียบเทียบค่า LCOE กับงานวิจัยอื่น ๆ จากบริษัทนวัตกรรม.....	119
7.1 เงื่อนไขการทำงานที่เหมาะสมสำหรับโรงไฟฟ้าวัฏจักรต่าง ๆ ที่ใช้เตสลาเทอร์ไบน์.....	152

สารบัญรูป

รูปที่

หน้า

1.1 ผังอุปกรณ์และสภาวะของสารทำงานแต่ละตำแหน่งของโรงไฟฟ้าวัฏจักรโออาร์ซีและทีแอลซี	2
1.2 ผังอุปกรณ์และสภาวะของสารทำงานแต่ละตำแหน่งของโรงไฟฟ้าวัฏจักรคาลินาแบบ KCS-11...	4
1.3 ลักษณะภายในของโรเตอร์ของเตสลาเทอร์ไบน์	5
2.1 สัดส่วนราคาอุปกรณ์ภายในโรงไฟฟ้าวัฏจักรโออาร์ซี	11
2.2 โรงไฟฟ้าวัฏจักรคาลินาแบบ KCS-1.....	12
2.3 โรงไฟฟ้าวัฏจักรคาลินาแบบ KCS-34	13
2.4 โรงไฟฟ้าวัฏจักรคาลินาแบบ KSG-11	14
2.5 ลักษณะของเตสลาเทอร์ไบน์.....	15
2.6 ผลการเปรียบเทียบสมรรถนะของเตสลาเทอร์ไบน์ กับเทอร์ไบน์ชนิด Volume metric และ Axial	16
2.7 เทคโนโลยีของเทอร์ไบน์สำหรับโรงไฟฟ้าวัฏจักรโออาร์ซี.....	16
2.8 Pressure ratio และประสิทธิภาพไอเซนโทรปิกที่เปลี่ยนแปลงไป	17
2.9 Pressure ratio และ Compactness ที่เปลี่ยนแปลงไป	17
2.10 Pressure ratio และ Specific cost ที่เปลี่ยนแปลงไป	18
2.11 ผังของอุปกรณ์ของโรงไฟฟ้าวัฏจักรโออาร์ซีที่ใช้เตสลาเทอร์ไบน์	19
2.12 ลักษณะของเตสลาเทอร์ไบน์ในการทดลอง.....	20
2.13 T-s diagram ของโรงไฟฟ้าวัฏจักรโออาร์ซีที่ใช้เตสลาเทอร์ไบน์	20
2.14 Rotational speed เมื่อ Expansion ratio, β เปลี่ยนแปลงไป.....	22
2.15 Thermodynamic power เมื่อ Expansion ratio, β เปลี่ยนแปลงไป	22
2.16 Shaft power เมื่อ Expansion ratio, β เปลี่ยนแปลงไป	23
2.17 Efficiency เมื่อ Expansion ratio, β เปลี่ยนแปลงไป	23
2.18 ผังอุณหภูมิและเอนโทรปีจำเพาะของ two-phase expansion ของ R404A.....	24
2.19 ค่าความเป็นไอของสารทำงานภายในโรเตอร์ของเตสลาเทอร์ไบน์.....	24

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.20 การกระจายตัวของ ความเร็วในแนวสัมผัส อุณหภูมิ และความดัน ของสารทำงานในโรเตอร์ของ เทสลาเทอร์ไบน์	25
2.21 ประสิทธิภาพของเทอร์ไบน์ Two-phase expansion และ Single-phase expansion.....	26
2.22 ลักษณะของเทสลาเทอร์ไบน์ที่ใช้ในการจำลอง	26
2.23 ผลของแรงบิดที่ได้เมื่อเปลี่ยนความเร็วรอบของเทสลาเทอร์ไบน์ของแต่ละสารทำงาน	27
2.24 ผลของแรงบิดและงานสุทธิที่ได้ของเทสลาเทอร์ไบน์ของสารทำงาน water และ SF-201-5..	28
2.25 ลักษณะของเทสลาเทอร์ไบน์ในการจำลองหาอิทธิพลของค่าความหนาแผ่นดิสก์และความกว้าง ระหว่างแผ่นดิสก์	29
2.26 ลักษณะของช่องการไหลแบบ: (a) One to One; (b) One to many.....	29
2.27 ผลของความเร็วภายในเทสลาเทอร์ไบน์เมื่อเปลี่ยนแปลงความหนาของแผ่นดิสก์ไปในแต่ละดิสก์ สำหรับ One to One ที่ความเร็วรอบเท่ากับ 30,000 RPM ในเงื่อนไข Case 1-0.5: (a) DC1; (b) DC2; (c) DC3.....	31
2.28 ผลของความเร็วภายในเทสลาเทอร์ไบน์เมื่อเปลี่ยนแปลงความหนาของแผ่นดิสก์ไปในแต่ละดิสก์ สำหรับ One to One ที่ความเร็วรอบเท่ากับ 30,000 RPM ในเงื่อนไข Case 2-0.5: (a) DC1; (b) DC2; (c) DC3.....	31
2.29 ผลของความเร็วภายในเทสลาเทอร์ไบน์เมื่อเปลี่ยนแปลงความหนาของแผ่นดิสก์เปลี่ยนแปลงไป ในแต่ละพื้นที่หน้าตัด สำหรับ One to One ที่ความเร็วรอบเท่ากับ 30,000 RPM: (a) DC1 for Case 1-0.5; (b) DC1 for Case 2-0.5	32
2.30 ผลของความเร็วภายในเทสลาเทอร์ไบน์เมื่อเปลี่ยนแปลงระยะห่างระหว่างแผ่นดิสก์ 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.....	33
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	34

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.32 ผลของความเร็วภายในเทสลาเทอร์ไบน์เมื่อเปลี่ยนแปลงความหนาของแผ่นดิสก์เปลี่ยนแปลงไป ในแต่ละพื้นที่หน้าตัด สำหรับ One to many: (a) Case 1-0.5; (b) Case 2-0.5	35
2.33 อิทธิพลของ Throat-width ratio ที่เปลี่ยนแปลงไปต่อประสิทธิภาพของเทสลาเทอร์ไบน์	36
2.34 อิทธิพลของ tangential velocity ratio ที่เปลี่ยนแปลงไปต่อประสิทธิภาพของเทสลาเทอร์ไบน์	37
2.35 ผลของประสิทธิภาพและงานสุทธิของเทสลาเทอร์ไบน์เมื่อสารทำงานเปลี่ยนแปลงไป	38
2.36 Turbine efficiency ของสารทำงานที่แตกต่างกันออกไปที่ความเร็วรอบเท่ากับ 6000 RPM. 40	
2.37 Turbine power output ของสารทำงานที่แตกต่างกันออกไปที่ความเร็วรอบเท่ากับ 6000 RPM	40
2.38 Thermal efficiency ของโรงไฟฟ้าที่ใช้สารทำงานที่แตกต่างกันออกไปที่ความเร็วรอบเท่ากับ 6,000 RPM	41
2.39 ผังอุณหภูมิและเอนโทรปีจำเพาะของของ: (d) Two-phase expansion; (b) Single-phase expansion.....	42
2.40 ผังอุณหภูมิและเอนโทรปีจำเพาะของสารทำงาน Wet fluid	43
3.1 ผังอุปกรณ์ของโรงไฟฟ้าวัฏจักรโออาร์ซีที่ใช้เทสลาเทอร์ไบน์	45
3.2 ผังอุณหภูมิและเอนโทรปีจำเพาะของโรงไฟฟ้าวัฏจักรโออาร์ซี	45
3.3 รูปแบบของอุณหภูมิของสารกระแสน้ำและกระแสน้ำภายในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน ..	47
3.4 ผังการจำลองโรงไฟฟ้าวัฏจักรโออาร์ซี.....	48
3.5 รายละเอียดอุปกรณ์ภายในโรงไฟฟ้าวัฏจักรคาลินาแบบ KCS-11	51
3.6 ผังอุณหภูมิและเอนโทรปีจำเพาะของโรงไฟฟ้าวัฏจักรคาลินาแบบ KCS-11	52
3.7 ผังการจำลองของโรงไฟฟ้าวัฏจักรคาลินาแบบ KCS-11	55
3.8 ลักษณะและองค์ประกอบของเทสลาเทอร์ไบน์	58
3.9 การถ่ายเท Momentum ผ่าน Shear force ที่กระทำกันระหว่างผนังในเทสลาเทอร์ไบน์: (a) Velocity profile; (b) Adhesion และ Momentum transfer	59

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่

หน้า

3.10 ปริมาตรควบคุม องค์ประกอบของแรง และความเร็วของสารทำงานในโรเตอร์ของเทสลาเทอร์ไบน์: (ก) ปริมาตรควบคุมของสารทำงานที่พิจารณาที่จุด r_i ในโรเตอร์ของเทสลาเทอร์ไบน์; (ข) ตำแหน่งรัศมีและองค์ประกอบความเร็วที่จุดต่อ ๆ ไปในแผ่นดิสก์ของโรเตอร์ของเทสลาเทอร์ไบน์; (ค) สามเหลี่ยมความเร็วและองค์ประกอบของแรงที่จุด r_i ของโรเตอร์	64
3.11 ผังการจำลองและการหาค่าที่ดีที่สุดสำหรับอัตราส่วนความดันและขนาดของโรเตอร์ของเทสลาเทอร์ไบน์	68
3.12 เอกซ์เซอร์ยี่ที่เข้าและออกในอุปกรณ์ภายใต้ปริมาตรควบคุม	72
3.13 ผังลำดับการวิจัย.....	85
4.1 อิทธิพลของการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความดันต่อความเร็วของสารทำงานที่ออกจาก นอชเชิล ความเร็วของสารทำงานที่ออกจากโรเตอร์ และความดันของสารทำงานที่ออกจากนอชเชิล	87
4.2 กำลังจลน์ กำลังจากความดัน และพื้นที่ของโรเตอร์เมื่ออัตราส่วนความดันเปลี่ยนแปลงไป	89
4.3 กำลังจลน์ที่ออกจากนอชเชิลและออกจากโรเตอร์เมื่ออัตราส่วนความดันเปลี่ยนแปลงไป	90
4.4 กำลังของเทสลาเทอร์ไบน์และประสิทธิภาพไอเซนโทรปิกเมื่ออัตราส่วนความดันเปลี่ยนแปลงไป	91
4.5 กำลังและประสิทธิภาพไอเซนโทรปิกของเทสลาเทอร์ไบน์เมื่อความเร็วรอบของเปลี่ยนแปลง ...	92
4.6 Dimensionless velocity ratio และ Tangential velocity ratio ของเทสลาเทอร์ไบน์เมื่อความเร็วรอบของเปลี่ยนแปลง	93
4.7 ผลกระทบเมื่อเส้นผ่านศูนย์กลางของภายนอกของโรเตอร์และจำนวนดิสก์เปลี่ยนแปลงไป: (ก) กำลังของเทสลาเทอร์ไบน์; (ข) ประสิทธิภาพไอเซนโทรปิกของเทสลาเทอร์ไบน์.....	94
4.8 ความกะทัดรัดเมื่อเส้นผ่านศูนย์กลางของภายนอกของโรเตอร์และจำนวนดิสก์เปลี่ยนแปลงไป .	95
4.9 กำลังและประสิทธิภาพไอเซนโทรปิกของเทสลาเทอร์ไบน์เมื่อระยะห่างระหว่างแผ่นดิสก์ของโรเตอร์เปลี่ยนแปลงไป	96
4.10 กำลังจลน์ กำลังจากความดัน และพื้นที่ของโรเตอร์เมื่อระยะห่างระหว่างแผ่นดิสก์ของโรเตอร์เปลี่ยนแปลงไป.....	96

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.1 ผังอุปกรณ์ของโรงไฟฟ้าโออาร์ซีที่ใช้ในการศึกษาอิทธิพลของความเป็นไอของสารทำงานก่อนเข้า เทสลาเทอร์ไบน์.....	99
5.2 ผังอุณหภูมิและเอนโทรปีจำเพาะของโรงไฟฟ้าที่มีความเป็นไวก่อนเข้าเทอร์ไบน์เท่ากับ 0	100
5.3 ผังอุณหภูมิและเอนโทรปีจำเพาะของโรงไฟฟ้าที่มีความเป็นไวก่อนเข้าเทอร์ไบน์เท่ากับ 1	101
5.4 ปริมาตรจำเพาะและความหนาแน่นพลวัตของสารทำงานก่อนเข้าเทอร์ไบน์เมื่อความเป็นไอของสาร R236ea ก่อนเข้าเทสลาเทอร์ไบน์เปลี่ยนแปลงไป	104
5.5 กำลังสุทธิและประสิทธิภาพของเทอร์ไบน์เมื่อความเป็นไอของสาร R236ea ก่อนเข้าเทสลาเทอร์ ไบน์เปลี่ยนแปลงไป	105
5.6 อัตราการขยายตัวของสารทำงานเมื่อความเป็นไอของสาร R236ea ก่อนเข้าเทสลาเทอร์ไบน์ เปลี่ยนแปลงไป.....	106
5.7 ผลการทำลายเอกเซอร์ยีและเอกเซอร์ยีที่ถูกทำลายทั้งหมดเมื่อความเป็นไอของสาร R236ea ก่อนเข้าเทสลาเทอร์ไบน์เปลี่ยนแปลงไป	109
5.8 Log mean temperature difference ของอีวาโปเรเตอร์/ฮีตเตอร์และคอนเดนเซอร์เมื่อความ เป็นไอของสาร R236ea ก่อนเข้าเทสลาเทอร์ไบน์เปลี่ยนแปลงไป	110
5.9 เงินลงทุนเริ่มต้นและปริมาณไฟฟ้าที่ผลิตได้ของโรงไฟฟ้าวัฏจักรโออาร์ซีใช้เทสลาเทอร์ไบน์ ภายใต้ค่าความเป็นไอของสาร R236ea ก่อนเข้าเทสลาเทอร์ไบน์ ราคาขายไฟฟ้า และอัตราคิด ลดที่แตกต่างกัน.....	112
5.10 มูลค่าปัจจุบันสุทธิของต้นทุนต่อหน่วยของการผลิตไฟฟ้า (LCOE) ของโรงไฟฟ้าวัฏจักรโออาร์ซี ใช้เทสลาเทอร์ไบน์ ภายใต้ค่าความเป็นไอของสาร R236ea ก่อนเข้าเทสลาเทอร์ไบน์ ราคาขาย ไฟฟ้า และอัตราคิดลดที่แตกต่างกัน	113
5.11 มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (NPV) ของโรงไฟฟ้าวัฏจักรโออาร์ซีใช้เทสลาเทอร์ไบน์ ภายใต้ค่าความเป็นไอ ของสาร R236ea ก่อนเข้าเทสลาเทอร์ไบน์ราคาขายไฟฟ้า และอัตราคิดลดที่แตกต่างกัน	115
5.12 ระยะเวลาคืนทุนที่มีการคิดลด (d-PbP) ของโรงไฟฟ้าวัฏจักรโออาร์ซีใช้เทสลาเทอร์ไบน์ ภายใต้ ค่าความเป็นไอของสาร R236ea ก่อนเข้าเทสลาเทอร์ไบน์ ราคาขายไฟฟ้า และอัตราคิดลดที่ แตกต่างกัน	117

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.13 อัตราผลตอบแทนภายใน (IRR) ของโรงไฟฟ้าวัฏจักรโออาร์ซีใช้เทสลาเทอร์โบไนน์ ภายใต้ค่าความเป็นไอสาร R236ea ก่อนเข้าเทสลาเทอร์โบไนน์ราคาขายไฟฟ้า และอัตราคิดลดที่แตกต่างกัน .	118
6.1 ผลการรับความร้อนของสารทำงานในฮีตเตอร์เมื่อสารทำงานเปลี่ยนแปลงไป โดยเส้นสีแดงคือผลของสารทำงาน R245fa.....	125
6.2 ผังของอุปกรณ์ของโรงไฟฟ้าวัฏจักรที่แอลซี	126
6.3 ผังของอุณหภูมิและเอนโทรปีจำเพาะของสารผสม R1336mzz(Z)/R1234ze(E) ที่อัตราส่วนโดยมวล 0.75/0.25	126
6.4 ผังของอุณหภูมิและเอนโทรปีจำเพาะของสาร R245fa บริสุทธิ์	127
6.5 ผลของอุณหภูมิของสารทำงานที่เข้าฮีตเตอร์เมื่อสารทำงานเปลี่ยนแปลงไป.....	128
6.6 การไต่ของอุณหภูมิและการทิ้งความร้อนของสารทำงานที่คอนเดนเซอร์เมื่อสารทำงานเปลี่ยนแปลงไป	129
6.7 ผลของการไต่ของอุณหภูมิต่อการทำลายเอกเซอร์ยี่และการทิ้งความร้อนของสารทำงานที่คอนเดนเซอร์.....	130
6.8 ประสิทธิภาพไอเซนโทรปิกของเทสลาเทอร์โบไนน์เมื่อสารทำงานเปลี่ยนแปลงไป	131
6.9 อิทธิพลของอุณหภูมิวิกฤต และ Modified Reynold number ต่อประสิทธิภาพไอเซนโทรปิกของเทสลาเทอร์โบไนน์.....	132
6.10 อิทธิพลของอุณหภูมิวิกฤต และ Modified Reynold number ต่อความหนืดจลน์	133
6.11 ความหนืดจลน์และความหนืดพลวัตของสารทำงานเมื่ออุณหภูมิวิกฤตของสารทำงานเปลี่ยนแปลงไป	134
6.12 ผลของกำลังสุทธิเมื่อสารทำงานของโรงไฟฟ้าวัฏจักรที่แอลซีเปลี่ยนแปลงไป	135
6.13 ผลการเปรียบเทียบการทำลายเอกเซอร์ยี่ใน บีม เทสลาเทอร์โบไนน์ ฮีตเตอร์ และ คอนเดนเซอร์เมื่อความเป็นไอของสารทำงานเปลี่ยนแปลงไป.....	136
6.14 ผลการเปรียบเทียบผลความแตกต่างของความชันระหว่าง แหล่งให้และรับความร้อนกับสารทำงานภายในฮีตเตอร์และคอนเดนเซอร์	139

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.15 อิทธิพลของอุณหภูมิวิกฤตต่อกำลังสุทธิของโรงไฟฟ้าวัฏจักรที่แอลซีและการทำลาย เอ็กเซอร์ยี	141
6.16 อิทธิพลของอุณหภูมิวิกฤตต่อกำลังสุทธิของโรงไฟฟ้าวัฏจักรที่แอลซีและการทำลายเอ็กเซอร์ยี เมื่อแหล่งความร้อนเป็น 150 °C	142
6.17 ความสัมพันธ์ระหว่างต้นทุนต่อหน่วยในการผลิตไฟฟ้าและเงินลงทุนเริ่มต้นของโรงไฟฟ้าวัฏจักร ที่แอลซีเมื่อสารทำงานเปลี่ยนแปลงไป	143
6.18 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราผลตอบแทนภายในและระยะเวลาในการคืนทุนของโรงไฟฟ้าวัฏจักร ที่แอลซีเมื่อสารทำงานเปลี่ยนแปลงไป	145
7.1 ความร้อนที่ถ่ายเทเข้าและออกจากโรงไฟฟ้าวัฏจักรต่าง ๆ	153
7.2 ผังอุณหภูมิและเอนโทรปีจำเพาะของโรงไฟฟ้า (ก) KCS-11 ใช้สารผสม ammonia/water ที่ อัตราส่วนโดยมวล 0.90/0.10 (ข) Mod. KCS-11 ammonia/water ที่อัตราส่วนโดยมวล 0.90/0.10 (ค) วัฏจักรที่แอลซีที่ใช้สารทำงานเป็น R236ea บริสุทธิ์ (ง) วัฏจักรที่แอลซีที่ใช้สาร ทำงานผสม R1336mzz(Z)/R1234ze(E) ที่อัตราส่วนโดยมวล 0.25/0.75	155
7.3 ประสิทธิภาพไอเซนโทรปิกของเตสลาเทอร์ไบน์เมื่อใช้งานกับโรงไฟฟ้าวัฏจักรต่าง ๆ	157
7.4 ผลของ Modified Reynolds number และอัตราการไหลของสารทำงานที่ส่งผลต่อ ประสิทธิภาพไอเซนโทรปิกของเตสลาเทอร์ไบน์	158
7.5 ผลของ $Re_m / \dot{m}_c$ และประสิทธิภาพไอเซนโทรปิกของเตสลาเทอร์ไบน์ในโรงไฟฟ้าวัฏจักรต่างๆ	159
กำลังสุทธิ กำลังจากเทอร์ไบน์ และกำลังที่ปั๊มต้องการของโรงไฟฟ้าวัฏจักรต่าง ๆ	160
7.7 การทำลายเอ็กเซอร์ยีรายอุปกรณ์และของระบบโดยรวม	160
7.8 ประสิทธิภาพเอ็กเซอร์ยีของรายอุปกรณ์	161
7.9 ผลการเปรียบเทียบผลความแตกต่างของความชันระหว่าง แหล่งให้ความความร้อนและแหล่งรับ ความร้อนกับสารทำงานภายในอีวาโปเรเตอร์/ฮีตเตอร์และคอนเดนเซอร์เมื่อวัฏจักรเปลี่ยนแปลง ไป	163

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
7.10 เงินลงทุนเริ่มต้นของโรงไฟฟ้าแต่ละวิสาหกิจ.....	164
7.11 ต้นทุนต่อหน่วยของการผลิตไฟฟ้าของโรงไฟฟ้าแต่ละวิสาหกิจ	166
7.12 มูลค่าปัจจุบันสุทธิของโรงไฟฟ้าแต่ละวิสาหกิจ	167
7.13 ระยะเวลาคืนทุนที่มีการคิดลดของโรงไฟฟ้าแต่ละวิสาหกิจ	168
7.14 อัตราตอบแทนภายในของโรงไฟฟ้าแต่ละวิสาหกิจ	169

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

A_{hx}	คือ พื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อนภายในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน (m^2)
A_e	คือ พื้นที่ผิวของโรเตอร์ในพื้นที่พิจารณา (m^2)
A_r	คือ พื้นที่ของโรเตอร์ (m^2)
A_w	คือ พื้นที่ผิวเปียก (m^2)
b	คือ ระยะห่างระหว่างแผ่นดิสก์ (m^2)
C	คือ ราคา (€ หรือ บาท) หรือ อัตราความจุความร้อน (W/K)
C_1	คือ ราคาของอุปกรณ์ของโรงไฟฟ้าในปีที่ความสัมพันธ์ถูกสร้าง (€ หรือ บาท)
C_2	คือ ราคาของอุปกรณ์ของโรงไฟฟ้าในปีที่ศึกษา (€ หรือ บาท)
c_p	คือ ค่าสัมประสิทธิ์ความจุความร้อน (kJ/kg)
$Cost Index_1$	คือ ดัชนีราคาในปีที่ศึกษา
$Cost Index_2$	คือ ดัชนีราคาในปีที่ความสัมพันธ์ถูกสร้าง
D	คือ เส้นผ่านศูนย์กลางกลาง (m)
D_h	คือ เส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิก (m)
$\dot{Ex}_{des}$	คือ เอ็กเซอร์ยีที่ถูกทำลาย (kW)
ex	คือ เอ็กเซอร์ยีที่ทางกายภาพ (kJ/kg)
F	คือ แรงเฉือน (N)
F_θ	คือ แรงเฉือนในทิศแนวสัมผัส (N)
F_r	คือ แรงเฉือนในทิศตามแนวรัศมี (N)
f	คือ สัมประสิทธิ์เสียดทาน
h	คือ เอนทาลปีจำเพาะ (kJ/kg)
h_0	คือ เอนทาลปีหยุดจำเพาะ (kJ/kg)
l	คือ โรทาลปีจำเพาะ (kJ/kg)
i	คือ อัตราคิวดล ($\%$)
K	คือ สัมประสิทธิ์ความเร็ว
KE	คือ กำลังจลน์ (W)

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

Ma	คือ มัคนัมเบอร์
max	คือ ค่าสูงสุด
min	คือ ค่าต่ำสุด
$\dot{m}$	คือ อัตราการไหลเชิงมวล (kg/s)
N_{disk}	คือ จำนวนแผ่นดิสก์ในโรเตอร์
P	คือ ความดัน (Pa)
PE	คือ กำลังความดัน (W)
PR	คือ อัตราส่วนความดันของเทสลาเทอร์ไบน์
$\dot{Q}$	คือ อัตราการถ่ายเทความร้อน (W)
Q_e	คือ ปริมาตรควบคุม (m ³)
Re	คือ เรย์โนลด์นัมเบอร์
r	คือ รัศมี
s	คือ เอนโทรปีจำเพาะ (kJ/kgK)
T	คือ อุณหภูมิ (°C)
ΔT_{pp}	คือ ความแตกต่างของอุณหภูมิที่น้อยที่สุดภายในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน (°C)
ΔT_{lm}	คือ ค่าความแตกต่างของอุณหภูมิเฉลี่ยแบบลอการิทึม (°C)
U	คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อนโดยรวม (kW/m ² k)
u_θ	คือ ความเร็วในทิศสัมผัสของโรเตอร์ (m/s)
v	คือ ความเร็ว (m/s)
v_θ	คือ ความเร็วในทิศแนวสัมผัส (m/s)
v_r	คือ ความเร็วในทิศตามแนวรัศมี (m/s)
$\dot{W}$	คือ กำลัง (W)
$\hat{W}$	คือ ตัวแปรไรมิติของสัดส่วนความเร็วที่ตำแหน่งขอบของโรเตอร์
w	คือ ความเร็วสัมผัส (m/s)
x	คือ ความเป็นไอของสารทำงาน

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

ตัวอักษรกรีก

Δ	คือ ความแตกต่าง
β	คือ มุมของความเร็วสัมพัทธ์ ($^{\circ}$)
δ_{disk}	คือ ความหนาของแผ่นดิสก์ในโรเตอร์ (m)
ε	คือ ความไม่เรียบของผิว (m) หรือ ประสิทธิภาพของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน
η	คือ ประสิทธิภาพ (%)
κ	คือ บัลค์มอดูลัส (Pa)
μ	คือ ความหนืดพลวัต (Pa·s)
ρ	คือ ความหนาแน่น (kg/m ³)
ν	คือ ปริมาตรจำเพาะ (m ³ /kg)
τ_w	คือ ความเค้นเฉือนที่ผิวผนังของแผ่นดิสก์ (N/m ²)
σ	คือ อัตราส่วนของความเร็วในแนวสัมผัส
φ	คือ ความเค้นเฉือนจำเพาะ (N/kg)
φ_{θ}	คือ ความเค้นเฉือนจำเพาะในทิศแนวสัมผัส (N/kg)
φ_r	คือ ความเค้นเฉือนจำเพาะในทิศตามแนวรัศมี (N/kg)
ω	คือ ความเร็วรอบของโรเตอร์ (RPM หรือ rad/s)

ตัวห้อย

<i>actual</i>	คือ จริง
<i>o</i>	คือ สิ่งแวดล้อม
<i>c</i>	คือ ช่องของระหว่างโรเตอร์
<i>cold</i>	คือ สารเย็น
<i>cap</i>	คือ ต้นทุน
<i>cond</i>	คือ คอนเดนเซอร์
<i>cw</i>	คือ น้ำหล่อเย็น
<i>electricity</i>	คือ ไฟฟ้า
<i>evap</i>	คือ อีวาโปเรเตอร์

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

<i>ex</i>	คือ เอกเซอร์ยี
<i>g</i>	คือ สถานะเป็นไอ
<i>gen</i>	คือ เครื่องผลิตไฟฟ้า
<i>heater</i>	คือ ฮีตเตอร์
<i>hot</i>	คือ สารร้อน
<i>hs</i>	คือ แหล่งความร้อน
<i>hx</i>	คือ อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน
<i>in</i>	คือ ทางเข้า
<i>isen</i>	คือ ไอเซนโทรปิก
<i>inst</i>	คือ การติดตั้ง
<i>invest</i>	คือ การลงทุน
<i>l</i>	คือ สถานะเป็นของเหลว
<i>m</i>	คือ ปรับปรุง
<i>mf</i>	คือ อัตราส่วนโดยมวล
<i>O & M</i>	คือ ดำเนินงานและซ่อมบำรุง
<i>out</i>	คือ ทางออก
<i>pump</i>	คือ ปั๊ม
<i>Rec</i>	คือ เครื่องกู้คืนพลังงานจากสารร้อน
<i>Rec</i>	คือ เครื่องกู้คืนพลังงานจากสารร้อน
<i>screw</i>	คือ สกรูเอ็กแพนเดอร์
<i>TP</i>	คือ สารที่มีสถานะเป็นของผสม
<i>turbine</i>	คือ เทอร์ไบน์
<i>wf</i>	คือ สารทำงานในโรงไฟฟ้า