สารบาญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ค
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
สารบาญตาราง	ฎ
สารบาญภาพประกอบ	ฎ
อักษรย่อและสัญลักษณ์	ณ
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ที่มาและความสำคัญของการวิจัย	1
1.2 สรุปสาระสำคัญจากเอกสารที่เกี่ยวข้อง	1
1.2.1 การศึกษาการกัดกร่อนภายในท่อความร้อนที่ยังไม่ได้รับการป้องกันการกัดกร่อน	1
1.2.2 การศึกษาการกัดกร่อนภายในท่อความร้อนที่ได้รับการป้องกันการกัดกร่อนด้วยการเคลือบผิวภายในท่อ	2
1.2.3 การศึกษาการกัดกร่อนภายในท่อความร้อนที่ได้รับการป้องกันการกัดกร่อนด้วยการเติมสารยับยั้งลงในสารทำงาน	4
1.2.4 การศึกษาการกัดกร่อนภายในท่อความร้อนที่ได้รับการป้องกันการกัดกร่อนด้วยการเคลือบผิวภายในท่อและเติมสารยับยั้งลงในสารทำงาน	6
1.3 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	8
1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย	9
1.5 ของเขตของการศึกษาวิจัย	9
บทที่ 2 หลักการและทฤษฎี	
2.1 เทอร์โมไซฟอน	11

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Chiang Mai University

สารบาญ (ต่อ)

	หน้า
2.2 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอน	12
2.3 การกัดกร่อน	13
2.4 การตรวจสอบลักษณะการกัดกร่อน	17
2.5 ก๊าซโครมาโทกราฟี	21
2.6 ค่าความต้านทานการถ่ายเทความร้อนรวมของเทอร์โมไซฟอน	22
2.7 แบบจำลอง fouling ของ Kern and Seaton	25
2.8 การทำนายสมรรถนะในระยะยาวของท่อความร้อน จากการทดสอบอายุการใช้งานแบบเร่ง	27
บทที่ 3 วิธีดำเนินการทดสอบ	
3.1 วัตถุประสงค์ในการทดสอบ	31
3.2 ตัวแปรสำหรับการทดสอบ	31
3.3 อุปกรณ์การทดสอบ	33
3.4 อุปกรณ์ประกอบและเครื่องมือวัด	40
3.5 วิธีการทดสอบ	52
3.6 วิธีการวิเคราะห์	54
บทที่ 4 ผลการทดสอบและวิจารณ์ผลการทดสอบ	
4.1 ลักษณะการกัดกร่อนของเทอร์โมไซฟอน	59
4.2 ปริมาตรก๊าซไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นภายในเทอร์โมไซฟอน	71
4.3 ค่าความต้านทานการถ่ายเทความร้อนรวมของเทอร์โมไซฟอน	76
บทที่ 5 สรุปผลการทดสอบและข้อเสนอแนะ	
5.1 สรุปผลการทดสอบ	92
5.2 ข้อเสนอแนะ	92

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ Chiang Mai University

สารบาญ (ต่อ)

	หน้า
บรรณานุกรม	93
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก ตารางแสดงค่าคงตัวของสมการอัตราการกัดกร่อนเฉลี่ย อัตราการกัดกร่อนสูงสุด ปริมาตรก๊าซไฮโดรเจน และความต้านทานความร้อนของ fouling	96
ภาคผนวก ข รายละเอียดของวิธีการวัดค่าความลึกของร่องสูงสุดจากภาพถ่ายกล้องจุลทรรศน์กำลังขยาย 50 เท่าของภาคตัดขวางของเทอร์โมไซฟอน	107
ประวัติผู้เขียน	108

มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ Chiang Mai University

สารบาญตาราง

ตาราง	หน้า
1.1 แสดงผลการวิเคราะห์ท่อความร้อนที่ได้ทำการทดสอบเป็นเวลา 6000 ชั่วโมง	8
2.1 แสดงตัวอย่างสารยับยั้งและวิธีการใช้	16
3.1 แสดงรายละเอียดของเทอร์โมไซฟอนในแต่ละอุณหภูมิการใช้งาน	38

มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ Chiang Mai University

สารบาญภาพประกอบ

รูป	หน้า
1.1 แสดงภาพตัดขวางของท่อความร้อนหลังการทดสอบ	3
1.2 แสดงการเปลี่ยนแปลงของผลต่างของอุณหภูมิในส่วนควบแน่น	5
1.3 แสดงการกระจายอุณหภูมิในส่วนควบแน่นของเทอร์โมไซฟอนที่เวลา 4000 ชั่วโมง	6
2.1 เทอร์โมไซฟอนแบบตั้งตรง	11
2.2 แสดงตัวอย่างเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอน	12
2.3 ทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้าเนื่องจากปฏิกริยาไฟฟ้าเคมี	14
2.4 แสดงรูปแบบภาคตัดขวางของ Pit ในแบบต่างๆ กัน	15
2.5 แสดงการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์โดยระนาบผลึก	20
2.6 แสดงไดอะแกรมของเครื่อง XRD	20
2.7 แผนภาพแสดงอุปกรณ์ก๊าซโครมาโทกราฟี	22
2.8 ตำแหน่งค่าความต้านทานความร้อนต่างๆ และวงจรความต้านทาน	23
2.9 แสดงการเกิดก๊าซไฮโดรเจนในท่อความร้อน	29
2.10 Universal curve ของข้อมูลการเกิดก๊าซไฮโดรเจนจากท่อความร้อน	29
2.11 แสดงการเขียนค่าตัวคูณเลื่อนค่าบนแผนภาพอาร์เรนห์เนียส	30
3.1 ชุดทดสอบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่อุณหภูมิ 150°C	35
3.2 ชุดทดสอบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่อุณหภูมิ 250°C	36
3.3 ชุดทดสอบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่อุณหภูมิ 350°C	37
3.4 แสดงท่อที่ได้รับการเชื่อมปิดหัวและท้ายของท่อแล้ว	39
3.5 แสดงการเผาท่อในเตาเผา	40
3.6 ฮีตเตอร์แบบแผ่นขนาด 280, 480 และ 560 วัตต์ จากซ้ายไปขวา	41
3.7 เครื่องบรรจุสารทำงาน	41
3.8 สารโซเดียมไฮโดรเจนฟอสเฟต	42
3.9 เครื่องมือสำหรับวัดอุณหภูมิที่ส่วนควบแน่น	43
3.10 เครื่องอ่านอุณหภูมิ 10 ช่องสัญญาณ	43
3.11 เครื่องอ่านอุณหภูมิ 20 ช่องสัญญาณ	44

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Chiang Mai University

สารบาญภาพประกอบ (ต่อ)

รูป	หน้า
3.12 เครื่องชั่ง	44
3.13 เครื่องชั่งมวลละเอียด	45
3.14 เครื่องก๊าซโครมาโทกราฟี	45
3.15 เครื่องบันทึกผลการตรวจวิเคราะห์จากเครื่อง GC	46
3.16 เข็มฉีดยาขนาด 1 mL	46
3.17 เครื่อง X-ray diffractrometer	47
3.18 เครื่องบันทึกผลการตรวจวิเคราะห์จากเครื่อง XRD	47
3.19 เครื่องอัดความดันไฮดรอลิก	48
3.20 เครื่อง Infra-red spectroscopy	48
3.21 เครื่องบันทึกผลการตรวจวิเคราะห์จากเครื่อง IR	49
3.22 สาร Potassium bromine	49
3.23 เครื่องอัดและแม่พิมพ์	50
3.24 กล้องจุลทรรศน์	50
3.25 เวอร์เนีย	51
3.26 โพลีเอสเตอร์เรซิ่น	51
3.27 ฟิล์มถ่ายรูป	52
4.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการกัดกร่อนเฉลี่ยกับระยะเวลาการทดสอบสำหรับเทอร์โมไซฟอนที่ทำจากท่อเหล็กซึ่งได้รับการป้องกันการกัดกร่อนด้วยการเผาท่อเป็นเวลา 2 ชั่วโมง และเติม Na_2HPO_4 ลงในสารทำงาน 20 ppm	78
4.2 Universal curve ของข้อมูลอัตราการกัดกร่อนเฉลี่ยจากเทอร์โมไซฟอนที่ทำด้วยท่อเหล็กซึ่งถูกเผาเป็นเวลา 2 ชั่วโมง และเติม Na_2HPO_4 ลงในสารทำงาน 20 ppm	79
4.3 แสดงการเขียนตัวคูณเลื่อนค่าอัตราการกัดกร่อนเฉลี่ยบนแผนภาพอาร์เรนห์เนียสของเทอร์โมไซฟอนที่ทำด้วยท่อเหล็กซึ่งถูกเผาเป็นเวลา 2 ชั่วโมง และเติม Na_2HPO_4 ลงในสารทำงาน 20 ppm	80

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ Chiang Mai University

สารบาญภาพประกอบ (ต่อ)

รูป หน้า

4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการกัดกร่อนเฉลี่ยกับเวลาที่ทำการทดสอบของเทอร์โมไซฟอนที่ทำจากท่อเหล็กซึ่งได้รับการป้องกันการกัดกร่อนด้วยการเผาท่อเป็นเวลา 2 ชั่วโมง และเติม Na_2HPO_4 ลงในสารทำงาน 20 ppm สำหรับอุณหภูมิการใช้งาน 150°C 81

4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการกัดกร่อนเฉลี่ยกับส่วนกลับของอุณหภูมิการใช้งานของเทอร์โมไซฟอนที่ทำจากท่อสเตนเลสที่ผิวภายในเป็นร่องซึ่งได้รับการป้องกันการกัดกร่อนด้วยการเติม Na_2HPO_4 ลงในสารทำงาน 20 ppm สำหรับระยะเวลาการทดสอบ 1000 ชั่วโมง 82

4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการกัดกร่อนเฉลี่ยกับวิธีการป้องกันการกัดกร่อนของเทอร์โมไซฟอนที่ทำจากท่อทองแดง สำหรับอุณหภูมิการใช้งานและระยะเวลาการทดสอบต่างๆ กัน 83

4.7 ภาพถ่ายกล้องจุลทรรศน์กำลังขยาย 25 เท่า ของภาคตัดขวางของเทอร์โมไซฟอนที่ทำจากเหล็กซึ่งถูกเผาเป็นเวลา 2 ชั่วโมง และสารทำงานเป็นน้ำผสม Na_2HPO_4 ความเข้มข้น 10 ppm โดยผ่านการทดสอบเป็นเวลา 1000 ชั่วโมงที่อุณหภูมิ 350 °C 84

4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการกัดกร่อนสูงสุดกับเวลาที่ทำการทดสอบของเทอร์โมไซฟอนที่ทำจากท่อเหล็กซึ่งได้รับการป้องกันการกัดกร่อนด้วยการเผาท่อเป็นเวลา 2 ชั่วโมง และเติม Na_2HPO_4 ลงในสารทำงาน 20 ppm สำหรับอุณหภูมิการใช้งาน 250°C 85

4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการกัดกร่อนสูงสุดกับส่วนกลับของอุณหภูมิการใช้งานของเทอร์โมไซฟอนที่ทำจากท่อสเตนเลสที่ผิวภายในเป็นร่องซึ่งได้รับการป้องกันการกัดกร่อนด้วยการเติม Na_2HPO_4 ลงในสารทำงาน 20 ppm สำหรับระยะเวลาการทดสอบ 1000 ชั่วโมง 86

4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรก๊าซไฮโดรเจนกับเวลาที่ทำการทดสอบของเทอร์โมไซฟอนที่ทำจากท่อเหล็กซึ่งได้รับการป้องกันการกัดกร่อนด้วยการเผาท่อเป็นเวลา 1 ชั่วโมง สำหรับอุณหภูมิการใช้งาน 150°C 87

สารบาญภาพประกอบ (ต่อ)

รูป หน้า

4.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรก๊าซไฮโดรเจนกับส่วนกลับของอุณหภูมิการใช้งานของเทอร์โมไซฟอนที่ทำจากท่อสเตนเลสที่ผิวภายในเป็นร่องซึ่งได้รับการป้องกันการกัดกร่อนด้วยการเติม Na_2HPO_4 ลงในสารทำงาน 20 ppm สำหรับระยะเวลาการทดสอบ 4000 ชั่วโมง 88

4.12 แสดงวงจรความต้านทานความร้อนที่ประกอบด้วย $Z_{fouling}$ และ Z_H 84

4.13 กราฟแสดงการหาค่า ϕ_d และ β ของสมการ fouling ของ Kern and Seaton สำหรับเทอร์โมไซฟอนที่ทำจากท่อเหล็กซึ่งได้รับการป้องกันการกัดกร่อนด้วยการเผาท่อเป็นเวลา 1 ชั่วโมง และเติม Na_2HPO_4 ลงในสารทำงาน10 ppm ที่อุณหภูมิการใช้งาน 350°C 89

4.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานความร้อนของ fouling กับระยะเวลาที่ทำการทดสอบสำหรับเทอร์โมไซฟอนที่ทำจากท่อเหล็กซึ่งได้รับการป้องกันการกัดกร่อนด้วยการเผาท่อเป็นเวลา 1 ชั่วโมง และเติม Na_2HPO_4 ลงในสารทำงาน 10 ppm ที่อุณหภูมิการใช้งาน 350°C 90

อักษรย่อและสัญลักษณ์

สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
A	พื้นที่ผิวภายนอกท่อ	m^2
Al	ท่ออะลูมิเนียมที่มีผิวภายในเรียบ	
C_{ave}	ความเข้มข้นเฉลี่ยของก๊าซไฮโดรเจน คิดเป็น %ใน 1 mL	
Cr	อัตราการกัดกร่อนเฉลี่ย	mil/year
Cr_{max}	อัตราการกัดกร่อนสูงสุด	mil/year
Cu	ท่อทองแดงที่มีผิวภายในเรียบ	
CuG	ท่อทองแดงที่มีผิวภายในเป็นร่องแบบ Spiral	
d	ระยะห่างระหว่างอะตอม	m
D_i	เส้นผ่าศูนย์กลางภายในท่อ	cm
D_o	เส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกท่อ	m
Fe	ท่อเหล็กที่มีผิวภายในเรียบ	
g	ค่าความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก	m/s^2
Gr	Grashof number	
I	ความเข้มของรังสีเอ็กซ์หลังการดูดกลืน	
I_0	ความเข้มของรังสีเอ็กซ์ก่อนการดูดกลืน	
k	ค่าการนำความร้อน	W/m-K
L	ความยาวของเทอร์โมไซฟอน	m
L_c	ความยาวของส่วนควบแน่น	m
mpy	อัตราการกัดกร่อน	mil/year
M	ค่าคงตัวของขนาดก๊าซไฮโดรเจน	mg/m^2
$\overline{Nu}$	Nusselt number	
p	ค่าความลึกของรูสูงสุดที่เกิดจากการกัดกร่อน	mil
Pr	Prandtl number	
S	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	

อักษรย่อและสัญลักษณ์ (ต่อ)

สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
SSt	ท่อสเตนเลสที่มีผิวภายในเป็นร่องแบบ Spiral	
t	เวลาที่ทำการทดสอบ	hrs
T	อุณหภูมิการใช้งาน	R
T_{co}	อุณหภูมิส่วนควบแน่นของเทอร์โมไซฟอนเฉลี่ย	°C
T_f	อุณหภูมิแผ่นฟิล์ม	K
T_{so}	อุณหภูมิแหล่งความร้อนเฉลี่ย	°C
T_α	อุณหภูมิอากาศบริเวณที่ทำการทดสอบ	°C
T'	อุณหภูมิการใช้งานของท่อความร้อน	K
V	ปริมาตรก๊าซไฮโดรเจน	ml
V_l	ปริมาตรสารทำงาน	ml
W	ผลต่างของมวลท่อที่ยาว 1 นิ้ว ก่อนทำการทดสอบและหลังการทดสอบ	mg
$Z_{fouling}$	ค่าความต้านทานการถ่ายเทความร้อนของ fouling	K/W
Z_H	ค่าความต้านทานการถ่ายเทความร้อนจากก๊าซไฮโดรเจน	K/W
Z_{total}	ค่าความต้านทานการถ่ายเทความร้อนรวม	K/W
β	สัมประสิทธิ์ของอัตราการหลุดร่วงของ fouling	hrs^{-1}
θ	ค่ามุมที่รังสีตกกระทบ	degree
ϕ_d	อัตราการก่อตัวของ fouling	K/W-hrs
ϕ_r	อัตราการหลุดร่วงของ fouling	K/W-hrs
λ	ความยาวคลื่นของรังสีเอ็กซ์	m
ν	Kinematic viscosity	m^2/s
ρ	ความหนาแน่นของชิ้นงาน	g/cm^3