

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ค
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ฉ
สารบัญตาราง	ณ
สารบัญภาพ	ด
อักษรย่อและสัญลักษณ์	ท
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของการวิจัย	1
1.2 สรุปสาระสำคัญจากเอกสารที่เกี่ยวข้อง	3
1.2.1 กลุ่มที่ศึกษาเกี่ยวกับการสร้างและทดลอง	
เครื่องอุ่นอากาศแบบท่อความร้อน	3
1.2.2 กลุ่มที่ศึกษาการนำเครื่องอุ่นอากาศแบบท่อความร้อน	
มาประยุกต์ใช้งาน	7
1.3 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	9
1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย	10
1.5 ขอบเขตของการศึกษาวิจัย	10
บทที่ 2 หลักการและทฤษฎี	11
2.1 เครื่องอุ่นอากาศ	11
2.2 ท่อความร้อน	12
2.3 เทอร์มิสเตอร์	13
2.3.1 ทฤษฎีการคำนวณหาสมรรถนะของเทอร์มิสเตอร์	14
2.4 เครื่องอุ่นอากาศแบบท่อความร้อน	18
2.4.1 ทฤษฎีการคำนวณหาสมรรถนะของเครื่องอุ่นอากาศ	
แบบท่อความร้อน	19

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.5 ทฤษฎีเบื้องต้นของการอบแห้ง	22
2.5.1 เส้นลักษณะเฉพาะของการอบแห้ง	24
2.5.2 อัตราส่วนความชื้นวิกฤติ	26
2.5.3 อัตราส่วนความชื้นสมดุล	27
2.5.4 ชนิดของเครื่องอบแห้งด้วยลมร้อนแบบต่อเนื่อง	28
2.5.5 เครื่องอบแห้งด้วยความร้อนแบบไหลผ่าน	28
บทที่ 3 การออกแบบและสร้างเครื่องอุ่นอากาศแบบท่อความร้อน	29
3.1 การออกแบบเครื่องอุ่นอากาศแบบท่อความร้อน	29
3.1.1 ขั้นตอนของการออกแบบ	29
3.2 ข้อมูลการทดสอบสมรรถนะของเครื่องดังกล่าว	29
3.3 โปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับการออกแบบ	33
3.4 เงื่อนไขในการเลือกชุดข้อมูลที่ดีที่สุด	38
3.4.1 โดยการใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์	38
3.4.2 โดยการตัดสินใจของผู้ออกแบบ	40
3.5 ชุดของข้อมูลที่ใช้ในการออกแบบเครื่องอุ่นอากาศแบบท่อความร้อน	40
3.6 แบบสำหรับสร้างเครื่องอุ่นอากาศแบบท่อความร้อน	41
3.7 การสร้างเครื่องอุ่นอากาศแบบท่อความร้อน	42
3.7.1 เครื่องอุ่นอากาศแบบท่อความร้อน	42
3.7.2 ชุดทดสอบเครื่องอุ่นอากาศแบบท่อความร้อน	43
3.7.3 ชุดควบคุมการทำงานทางไฟฟ้า	48
3.7.4 เชื้อเพลิง	50
3.7.5 อุปกรณ์และเครื่องมือวัด	51
3.7.6 อุปกรณ์ที่ใช้ในการหาปริมาณความชื้นในยิปซัม	59

สารบาญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 ข้อมูลจำเพาะและประโยชน์ของยิปซัม	62
4.1 ข้อมูลจำเพาะของยิปซัม	62
4.1.1 องค์ประกอบของยิปซัม	64
4.1.2 การทำปูนพลาสเตอร์	64
4.1.3 การหล่อขึ้นรูปปูนพลาสเตอร์	64
4.2 ข้อมูลจำเพาะของการอบแห้งยิปซัม	65
4.2.1 ขั้นตอนการหาปริมาณความชื้นของยิปซัม	65
4.2.2 เส้นลักษณะเฉพาะของการอบแห้ง	66
4.3 ประโยชน์ของยิปซัม	71
บทที่ 5 วิธีดำเนินการทดสอบ	72
5.1 วัตถุประสงค์ของการทดสอบ	72
5.2 วิธีการทดสอบ	72
5.3 วิธีวิเคราะห์	73
บทที่ 6 ผลการทดสอบและวิเคราะห์ผลการทดสอบ	76
6.1 ผลการทดสอบที่สภาวะการทำงานจริง	76
6.2 ผลการทดสอบโดยการแปรค่าอุณหภูมิอากาศเข้าของก๊าซร้อน	77
6.2.1 ผลต่ออุณหภูมิอากาศออกของก๊าซร้อนและอากาศ	77
6.2.2 ผลต่อค่าความร้อนที่ถ่ายเทได้	78
6.2.3 ผลต่อค่าประสิทธิผล	79
6.3 ผลการทดสอบโดยการแปรค่าอัตราการไหลของก๊าซร้อน	79
6.3.1 ผลต่ออุณหภูมิอากาศออกของก๊าซร้อนและอากาศ	79
6.3.2 ผลต่อค่าความร้อนที่ถ่ายเทได้	80
6.3.3 ผลต่อค่าประสิทธิผล	81

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
6.4 ผลการทดสอบโดยการแปรค่าอุณหภูมิอากาศเข้าของอากาศ	82
6.4.1 ผลต่ออุณหภูมิอากาศของก๊าซร้อนและอากาศ	82
6.4.2 ผลต่อค่าความร้อนที่ถ่ายเทได้	83
6.4.3 ผลต่อค่าประสิทธิผล	84
6.5 ผลการทดสอบโดยการแปรค่าอัตราการไหลของอากาศเข้า	84
6.5.1 ผลต่ออุณหภูมิอากาศของก๊าซร้อนและอากาศ	85
6.5.2 ผลต่อค่าความร้อนที่ถ่ายเทได้	86
6.5.3 ผลต่อค่าประสิทธิผล	86
6.6 ผลการทดสอบโดยการแปรค่าเรย์โนลด์ นัมเบอร์ของด้านส่วนทำระเหย	87
6.7 ผลการทดสอบโดยการแปรค่าเรย์โนลด์ นัมเบอร์ของด้านส่วนควบแน่น	88
6.8 ผลของ NTU_{min} กับค่าประสิทธิผล	88
6.8.1 ที่ส่วนทำระเหย	88
6.8.2 ที่ส่วนควบแน่น	89
6.9 ผลการตรวจวัดความดันตกคร่อมกลุ่มท่อ	89
6.9.1 ที่ส่วนทำระเหย	89
6.9.2 ที่ส่วนควบแน่น	90
6.10 รูปแบบ ข้อมูลจำเพาะของระบบอบแห้งยิปซัมและการวิเคราะห์ด้านอื่นๆ	91
6.10.1 รูปแบบของระบบอบแห้งยิปซัม	92
6.10.2 ข้อมูลจำเพาะของระบบอบแห้งยิปซัม	93
6.10.3 การวิเคราะห์ผลเมื่ออุณหภูมิก๊าซร้อนต่ำกว่าอุณหภูมิน้ำค้าง	94
6.10.4 การวิเคราะห์ทางด้านเศรษฐศาสตร์	95
บทที่ 7 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	120
7.1 สรุปผลการวิจัย	120
7.2 ข้อเสนอแนะ	121
บรรณานุกรม	122

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
ภาคผนวก	125
ภาคผนวก ก ตัวอย่างการคำนวณ	126
ภาคผนวก ข โปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยออกแบบ	
เครื่องปรับอากาศแบบท่อความร้อน	132
ภาคผนวก ค แบบเครื่องปรับอากาศและอุปกรณ์ทดสอบ	153
ภาคผนวก ง ข้อมูลจำเพาะของระบบอบแห้งยิปซัม	169
ภาคผนวก จ ข้อมูลการทดสอบการทำงานของเครื่องปรับอากาศ	
แบบท่อความร้อนจำลอง	182
ประวัติผู้เขียน	212

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

Copyright© by Chiang Mai University

All rights reserved

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
3.1 แสดงการเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้จากโปรแกรมคอมพิวเตอร์ กับวิธีการวิเคราะห์แบบ Conductance model และ $E - NTU$	36
3.2 แสดงข้อมูลที่ทำให้การปรับเปลี่ยนค่า	37
3.3 แสดงชุดข้อมูลที่ดีที่สุดของแต่ละการจำลองสภาพ	39
4.1 แสดงคุณลักษณะและเกณฑ์ที่กำหนดชั้นคุณภาพของยิปซัม	62
4.2 แสดงส่วนประกอบทางเคมีของยิปซัมธรรมชาติและยิปซัมสังเคราะห์	63
6.1 แสดงการเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการจำลองสภาพและจากการทดสอบ	76

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

Copyright© by Chiang Mai University

All rights reserved

สารบัญภาพ

รูป	หน้า
1.1 แสดงลักษณะของการแลกเปลี่ยนความร้อนแบบไหลตัดกัน	2
2.1 แสดงเครื่องอุ่นอากาศแบบ Recuperative heat exchanger	11
2.2 แสดงเครื่องอุ่นอากาศแบบ Regenerative heat exchanger	12
2.3 แสดงการทำงานของท่อความร้อน	12
2.4 แสดงลักษณะของเทอร์โมไซฟอนสองสถานะแบบท่อแนวดิ่งและแนวเอียง	13
2.5 แสดงตำแหน่งของความต้านทานทางความร้อน	15
2.6 แสดง Flow chart การคำนวณหาสมรรถนะทางความร้อน	16
2.7 แสดงลักษณะของโครงสร้างของเครื่องอุ่นอากาศแบบท่อความร้อน	18
2.8 แสดงอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบการไหล 2 ชนิดไม่ผสมกัน	19
2.9 แสดงประสิทธิผลของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนซึ่งเป็นฟังก์ชันของ NTU_{min}	22
2.10 แสดงการเปลี่ยนแปลงมวลและอุณหภูมิของวัสดุอบแห้งกับเวลา	24
2.11 แสดงเส้นลักษณะเฉพาะของการอบแห้ง	26
2.12 แสดงเส้นอัตราส่วนความชื้นสมดุลสำหรับวัสดุประเภทต่างๆ	27
3.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของก๊าซร้อนกับเวลา	31
3.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วของก๊าซร้อนกับเวลา	32
3.3 แสดง Flow chart ของโปรแกรมคอมพิวเตอร์	34
3.4 แสดงรูปเครื่องอุ่นอากาศแบบท่อความร้อน	42
3.5 แสดงรูปแบบของชุดทดสอบจำลอง	43
3.6 แสดงชุดก๊าซร้อน	44
3.7 แสดงชุดท่อความร้อน	45
3.8 แสดงการต่อสายวัดอุณหภูมิของท่อความร้อน	46
3.9 แสดงชุดอากาศ	47
3.10 แสดงชุดควบคุมทางไฟฟ้า 1	48
3.11 แสดงชุดควบคุมทางไฟฟ้า 2	49

สารบัญภาพ (ต่อ)

รูป	หน้า
3.12 แสดงเชื้อเพลิงที่ใช้ในการทดสอบ	50
3.13 แสดงลักษณะของเครื่องบรรจุสารทำงาน	51
3.14 แสดงลักษณะของเครื่องบันทึกข้อมูลขนาด 6 ช่องสัญญาณ	52
3.15 แสดงลักษณะของสายเทอร์โมคัปเปิล	53
3.16 แสดงตำแหน่งติดตั้งสายเทอร์โมคัปเปิลของเครื่องอุ่นอากาศแบบท่อความร้อน	54
3.17 แสดงลักษณะของเครื่องบันทึกข้อมูลขนาด 10 ช่องสัญญาณ	55
3.18 แสดงลักษณะของเครื่องตรวจวัดและวิเคราะห์ไอเสีย	56
3.19 แสดงจุดวัดความเร็วและความดันของเครื่องอุ่นอากาศแบบท่อความร้อน	57
3.20 แสดงลักษณะของคอมพิวเตอร์	58
3.21 แสดงลักษณะของชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการเก็บตัวอย่างและอบแห้งยิปซัม	59
3.22 แสดงลักษณะของเครื่องชั่งน้ำหนัก	60
3.23 แสดงลักษณะของตู้อบไฟฟ้า	61
4.1 แสดงปริมาณความชื้นขอยิปซัมกับเวลาที่ใช้ในการอบแห้งที่อุณหภูมิ 113°C	67
4.2 แสดงเส้นลักษณะเฉพาะของการอบแห้งที่อุณหภูมิ 113°C	68
4.3 แสดงปริมาณความชื้นขอยิปซัมกับเวลาที่ใช้ในการอบแห้งที่อุณหภูมิ 150°C	69
4.4 แสดงเส้นลักษณะเฉพาะของการอบแห้งที่อุณหภูมิ 150°C	70
6.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิขาเข้าของก๊าซร้อนกับอุณหภูมิขาออกของก๊าซร้อนและอากาศ	97
6.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิขาเข้าของก๊าซร้อนกับค่าความร้อนที่ถ่ายเทได้	98
6.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิขาเข้าของก๊าซร้อนกับค่าประสิทธิภาพ	99
6.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของก๊าซร้อนกับอุณหภูมิขาออกของก๊าซร้อนและอากาศ	100
6.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของก๊าซร้อนกับค่าความร้อนที่ถ่ายเทได้	101
6.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของก๊าซร้อนกับค่าประสิทธิภาพ	102
6.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิขาเข้าของอากาศกับอุณหภูมิขาออกของก๊าซร้อนและอากาศ	103
6.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิขาเข้าของอากาศกับค่าความร้อนที่ถ่ายเทได้	104

สารบัญภาพ (ต่อ)

รูป	หน้า
6.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิอากาศเข้าของอากาศกับค่าประสิทธิผล	105
6.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของอากาศกับอุณหภูมิอากาศของ ก๊าซร้อนและอากาศ	106
6.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของอากาศกับค่าความร้อนที่ถ่ายเทได้	107
6.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของอากาศกับค่าประสิทธิผล	108
6.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเรย์โนลด์ นัมเบอร์ของด้านส่วนทำระเหย กับค่าประสิทธิผล	109
6.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเรย์โนลด์ นัมเบอร์ของด้านส่วนควบแน่น กับค่าประสิทธิผล	110
6.15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง NTU_{min} ที่ส่วนทำระเหยกับค่าประสิทธิผล	111
6.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง NTU_{min} ที่ส่วนควบแน่นกับค่าประสิทธิผล	112
6.17 แสดงค่าความดันและความดันตกคร่อมปริ เวณส่วนทำระเหยกับเวลา ณ $V_f = 8.59 \text{ m/s}$	113
6.18 แสดงค่าความดันและความดันตกคร่อมปริ เวณส่วนควบแน่นกับเวลา ณ $V_a = 4.29 \text{ m/s}$	114
6.19 แสดงบล็อกไดอะแกรมของระบบอบแห้ง	91
6.20 แสดงเครื่องอบแห้งแบบหมุน ชนิดรับความร้อนโดยตรงและโดยทางอ้อม	92
6.21 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความร้อนที่ป้อนความต้องการกับเวลา ณ อุณหภูมิของอากาศร้อน 150°C	115
6.22 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิอากาศเข้าของก๊าซร้อนกับการถ่ายเทความร้อน	116
6.23 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของก๊าซร้อนกับการถ่ายเทความร้อน	117
6.24 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิอากาศเข้าของอากาศกับการถ่ายเทความร้อน	118
6.25 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของอากาศกับการถ่ายเทความร้อน	119

รายการสัญลักษณ์

สัญลักษณ์

ความหมาย

A	Cross-section area (m^2)
C_{ph}	Specific heat capacity of flue gas (J/kg.K)
C_{pc}	Specific heat capacity of air (J/kg.K)
C	อัตราส่วนความขึ้นเฉพาะจุดภายในชั้นวัสดุ
d	Internal diameter (m)
E	Effectiveness of heat exchanger (%)
E_{hot}	Hot side heat exchanger efficiency (%)
E_{cold}	Cold side heat exchanger efficiency (%)
H	ความหนาของชั้นวัสดุ
h_{fg}	ความร้อนแฝงของการระเหยของน้ำที่อุณหภูมิต่ำ (KJ/kg)
L	ความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอของน้ำ (KJ/kg)
M_d	ความชื้นมาตรฐานแห้ง (%)
M_w	ความชื้นมาตรฐานเปียก (%)
M_i	ปริมาณความชื้นมาตรฐานเปียกเริ่มต้น (%)
M_f	ปริมาณความชื้นมาตรฐานเปียกสุดท้าย (%)
$\dot{m}_w$	อัตราการไหลของมวลน้ำที่ถูกดึงออกจากวัสดุ (kg/hr)
$\dot{m}_h$	Mass flow rate of flue gas (kg/s)
$\dot{m}_c$	Mass flow rate of air (kg/s)
NTU	Number of transfer unit
$\dot{Q}$	Rate of heat transfer (W)
$\dot{Q}_{hot}$	Rate of heat transfer of flue gas (W)
$\dot{Q}_{cold}$	Rate of heat transfer of air (W)
$\dot{Q}_{max}$	Maximum rate of heat transfer (W)
R_f	Rouling resistance ($W / m^2.K$)
ΔT	Effective overall temperature difference(K)

ΔT	Effective overall temperature difference(K)
ΔT_h	Mean temperature difference due to hydrostatic head (K)
ΔT_{max}	Difference between the stream inlet temperature (K)
ΔT_M	Mean temperature difference (K)
$T_{h,in}$	Inlet temperature of flue gas (K)
$T_{h,out}$	Outlet temperature of flue gas (K)
$T_{c,in}$	Inlet temperature of air (K)
$T_{c,out}$	Outlet temperature of air (K)
T_{so}	Temperature of heat source (K)
T_{st}	Temperature of heat sink (K)
T_{eo}	Temperature of the evaporator external surface (K)
T_i	อุณหภูมิเริ่มต้น (°C)
T_f	อุณหภูมิสุดท้าย (°C)
T_{amb}	อุณหภูมิเฉลี่ยของอากาศภายนอก (°C)
T_{co}	Temperature of the condenser external surface (K)
T_v	Vapour temperature (K)
U	Heat transfer coefficient (W/m ² . K)
W_c	อัตราส่วนความชื้นวิกฤต
W_e	อัตราส่วนความชื้นสมดุล
W_d	น้ำหนักของวัสดุล้วน ๆ (แห้ง) (kg)
W_w	น้ำหนักของน้ำที่อยู่ในวัสดุขณะนั้น ๆ (kg)
W_v	น้ำหนักของวัสดุที่ลดลงเนื่องจากการระเหยของน้ำ (kg.water)
W_i	น้ำหนักของวัสดุเริ่มต้น (kg)
W_f	น้ำหนักของวัสดุสุดท้าย (kg)
x	Thickness of the layer (m)
Z_1	Thermal resistance between heat source and evaporator external surface (K/W)
Z_2	Evaporator wall thermal resistance (K/W)
Z_3	Evaporator film thermal resistance (K/W)
Z_4	Evaporator liquid-vapour interface thermal resistance (K/W)

Z_5	Effective thermal resistance due to vapour pressure drop (K/W)
Z_6	Condenser vapour-liquid interface thermal resistance (K/W)
Z_7	Condenser film thermal resistance (K/W)
Z_8	Condenser wall thermal resistance (K/W)
Z_9	Thermal resistance between heat sink and condenser external surface (K/W)
Z_{10}	Wall axial thermal resistance (K/W)
Z_{int}	Internal thermal resistance (K/W)
Z_{total}	Overall thermal resistance (K/W)
β	Inclination of pipe to horizontal (deg)
λ	Thermal conductivity (W / m.K)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

Copyright© by Chiang Mai University

All rights reserved