

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ก
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
สารบัญตาราง	ช
สารบัญภาพ	ฐ
อักษรย่อและสัญลักษณ์	ณ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 สรุปสาระสำคัญจากเอกสารที่เกี่ยวข้อง	2
1.3 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	5
1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย	5
1.5 ขอบเขตของการศึกษาวิจัย	6
บทที่ 2 หลักการและทฤษฎี	7
2.1 สับปะรด	7
2.2 การอบแห้ง	10
2.3 ปั่นความร้อน	16
2.4 การประเมินสมรรถนะเครื่องอบแห้งแบบปั่นความร้อน	24
2.5 การวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์	25
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย	28
3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการประเมินสมรรถนะของเครื่องอบแห้งแบบปั่นความร้อน	28
3.2 การวิเคราะห์สมรรถนะของเครื่องอบแห้งแบบปั่นความร้อน	
สำหรับแกนสับปะรดแช่เย็น	30
3.3 วิธีการเตรียมแกนสับปะรดแช่เย็นก่อนการทดลอง	31
3.4 วิธีการทดลอง	31
3.5 วิเคราะห์ทุนการอบแห้งแกนสับปะรดแช่เย็นด้วยเครื่องอบแห้งแบบปั่นความร้อน	32

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล	33
4.1 ผลกระทบของอุณหภูมิอบแห้งและสัดส่วนอากาศข้ามเครื่องทำระเหย ต่อการเปลี่ยนแปลงความชื้นของแกนสับปะรดแช่แข็ง	33
4.2 ผลการศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิอบแห้งที่มีต่อสมรรถนะของเครื่องอบแห้ง แกนสับปะรดแช่แข็งแบบปั๊มความร้อน	40
4.2.1 อัตราการอบแห้ง	40
4.2.2 ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ	43
4.2.3 สมรรถนะของระบบปั๊มความร้อน	46
4.3 การคัดเลือกเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุดของเครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อน สำหรับแกนสับปะรดแช่แข็ง	48
4.4 การวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์ของเครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อน สำหรับแกนสับปะรดแช่แข็ง	49
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย	51
5.1 สรุปผลการวิจัย	51
5.2 ข้อเสนอแนะ	51
บรรณานุกรม	52
ภาคผนวก	54
ภาคผนวก ก การทำแกนสับปะรดแช่แข็ง	55
ภาคผนวก ข อุปกรณ์และวัสดุทดสอบที่ใช้ในการทดลอง	61
ภาคผนวก ค ตารางผลการทดลอง	67
ภาคผนวก ง ตัวอย่างการคำนวณการประเมินสมรรถนะ	95
ภาคผนวก จ ตัวอย่างการคำนวณการวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์	99
ภาคผนวก ฉ แผนภูมิประกอบการวิเคราะห์ข้อมูล	103
ภาคผนวก ช เอกสารเผยแพร่ผลงานทางวิชาการ	106
ประวัติผู้เขียน	115

## สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
4.1 ผลการวิเคราะห์มูลค่าปัจจุบันสุทธิของเครื่องอบแห้งแบบบีบความร้อน สำหรับแกนสับประรดแช่แข็ง	49
ค.1 ผลการทดลองอบแห้งแกนสับประรดแช่แข็งแบบหั่นเฉียง ที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส อากาศข้ามเครื่องทำระเหย 60 เปอร์เซ็นต์ ครั้งที่ 1	68
ค.2 ผลการทดลองอบแห้งแกนสับประรดแช่แข็งแบบหั่นเฉียง ที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส อากาศข้ามเครื่องทำระเหย 60 เปอร์เซ็นต์ ครั้งที่ 2	68
ค.3 ผลการทดลองอบแห้งแกนสับประรดแช่แข็งแบบหั่นเฉียง ที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส อากาศข้ามเครื่องทำระเหย 60 เปอร์เซ็นต์ ครั้งที่ 3	69
ค.4 ผลการทดลองอบแห้งแกนสับประรดแช่แข็งแบบหั่นเฉียง ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส อากาศข้ามเครื่องทำระเหย 60 เปอร์เซ็นต์ ครั้งที่ 1	69
ค.5 ผลการทดลองอบแห้งแกนสับประรดแช่แข็งแบบหั่นเฉียง ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส อากาศข้ามเครื่องทำระเหย 60 เปอร์เซ็นต์ ครั้งที่ 2	70
ค.6 ผลการทดลองอบแห้งแกนสับประรดแช่แข็งแบบหั่นเฉียง ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส อากาศข้ามเครื่องทำระเหย 60 เปอร์เซ็นต์ ครั้งที่ 3	70
ค.7 ผลการทดลองอบแห้งแกนสับประรดแช่แข็งแบบหั่นเฉียง ที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส อากาศข้ามเครื่องทำระเหย 60 เปอร์เซ็นต์ ครั้งที่ 1	71
ค.8 ผลการทดลองอบแห้งแกนสับประรดแช่แข็งแบบหั่นเฉียง ที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส อากาศข้ามเครื่องทำระเหย 60 เปอร์เซ็นต์ ครั้งที่ 2	71
ค.9 ผลการทดลองอบแห้งแกนสับประรดแช่แข็งแบบหั่นเฉียง ที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส อากาศข้ามเครื่องทำระเหย 60 เปอร์เซ็นต์ ครั้งที่ 3	72
ค.10 ผลการทดลองอบแห้งแกนสับประรดแช่แข็งแบบหั่นเฉียง ที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส อากาศข้ามเครื่องทำระเหย 70 เปอร์เซ็นต์ ครั้งที่ 1	72
ค.11 ผลการทดลองอบแห้งแกนสับประรดแช่แข็งแบบหั่นเฉียง ที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส อากาศข้ามเครื่องทำระเหย 70 เปอร์เซ็นต์ ครั้งที่ 2	73









## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตาราง		หน้า
ค.51	ผลการทดลองอบแห้งแกนสับประรดแช่ส้มแบบลูกเต๋า ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส อากาศข้ามเครื่องทำระเหย 80 เปอร์เซ็นต์ ครั้งที่ 3	93
ค.52	ผลการทดลองอบแห้งแกนสับประรดแช่ส้มแบบลูกเต๋า ที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส อากาศข้ามเครื่องทำระเหย 80 เปอร์เซ็นต์ ครั้งที่ 1	93
ค.53	ผลการทดลองอบแห้งแกนสับประรดแช่ส้มแบบลูกเต๋า ที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส อากาศข้ามเครื่องทำระเหย 80 เปอร์เซ็นต์ ครั้งที่ 2	94
ค.54	ผลการทดลองอบแห้งแกนสับประรดแช่ส้มแบบลูกเต๋า ที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส อากาศข้ามเครื่องทำระเหย 80 เปอร์เซ็นต์ ครั้งที่ 3	94
จ.1	ผลการวิเคราะห์มูลค่าปัจจุบันสุทธิของเครื่องอบแห้งแบบบีบความร้อน สำหรับแกนสับประรดแช่ส้ม	101

## สารบัญภาพ

รูป	หน้า
2.1 ลักษณะของต้นสับปะรด	7
2.2 แสดงกระบวนการถ่ายเทความร้อนและมวลระหว่างการอบแห้ง	10
2.3 การเปลี่ยนแปลงมวลและอุณหภูมิของวัสดุอบแห้งกับเวลา	11
2.4 อัตราการอบแห้งเทียบความชื้นวัสดุ	12
2.5 พฤติกรรมการระเหยของน้ำในวัสดุพรุณ	12
2.6 หลักการทำงานของระบบปั๊มความร้อนและระบบทำความเย็น	17
2.7 ส่วนประกอบหลักที่สำคัญของระบบปั๊มความร้อนแบบอัดไอ	18
2.8 แผนภูมิแรงดันและเอนทัลปี (P-h Diagram) ของระบบปั๊มความร้อน	20
2.9 แสดงการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของอากาศในระบบอบแห้งแบบปิด	23
3.1 วงจรอากาศ วงจรสารทำงาน	28
3.2 วงจรอากาศ วงจรสารทำงานและจุดวัดอุณหภูมิและความดันของเครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อน	29
3.3 ขั้นตอนการอบแห้งแกนสับปะรดแช่แข็ง	31
4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นกับเวลาในการอบแห้งแกนสับปะรดแช่แข็งแบบหันเฉียงที่อัตราส่วนข้ามเครื่องทำระเหย 80 องศาเซลเซียส อุณหภูมิอบแห้ง 45, 50 และ 55 องศาเซลเซียส	33
4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นกับเวลาในการอบแห้งแกนสับปะรดแช่แข็งแบบลูกเต๋าที่อัตราส่วนข้ามเครื่องทำระเหย 80 องศาเซลเซียส อุณหภูมิอบแห้ง 45, 50 และ 55 องศาเซลเซียส	34
4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นกับเวลาในการอบแห้งแกนสับปะรดแช่แข็งแบบหันเฉียง ที่อัตราส่วนอากาศข้ามเครื่องทำระเหย 80, 70 และ 60 เปอร์เซ็นต์ที่อุณหภูมิอบแห้ง 55 องศาเซลเซียส	36



## สารบัญภาพ (ต่อ)

รูป	หน้า
4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความความชื้นกับเวลาในการอบแห้งแกนสับปะรดเชื่อมแบบหั่นเฉียง ที่อัตราส่วนอากาศข้ามเครื่องทำระเหย 80, 70 และ 60 เปอร์เซ็นต์ ที่อุณหภูมิอบแห้ง 55 องศาเซลเซียส	37
4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นกับเวลาในการอบแห้งแกนสับปะรดเชื่อมแบบหั่นเฉียงและแบบลูกเต๋า ที่อัตราส่วนข้ามเครื่องทำระเหย 80% อุณหภูมิอบแห้ง 50 องศาเซลเซียส	38
4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการอบแห้งกับอุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งแบบหั่นเฉียง ที่อัตราส่วนอากาศข้ามเครื่องทำระเหย 80, 70 และ 60 เปอร์เซ็นต์	40
4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการอบแห้งกับอุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งแบบลูกเต๋า ที่อัตราส่วนอากาศข้ามเครื่องทำระเหย 80, 70 และ 60 เปอร์เซ็นต์	41
4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการอบแห้งกับอุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งแบบหั่นเฉียงและแบบลูกเต๋า ที่อัตราส่วนอากาศข้ามเครื่องทำระเหย 80 เปอร์เซ็นต์ อุณหภูมิ 45, 50 และ 55 องศาเซลเซียส	42
4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะกับอุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งแบบหั่นเฉียง ที่อัตราส่วนอากาศข้ามเครื่องทำระเหย 80, 70 และ 60 เปอร์เซ็นต์	43
4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะกับอุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งแบบลูกเต๋า ที่อัตราส่วนอากาศข้ามเครื่องทำระเหย 80, 70 และ 60 เปอร์เซ็นต์	44
4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะกับอุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งแบบหั่นเฉียงและแบบลูกเต๋า ที่อัตราส่วนอากาศข้ามเครื่องทำระเหย 80 เปอร์เซ็นต์	45
4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์สมรรถนะของระบบปั๊มความร้อนกับอุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งแกนสับปะรดเชื่อมแบบหั่นเฉียง ที่อัตราส่วนอากาศข้ามเครื่องทำระเหย 80, 70 และ 60 เปอร์เซ็นต์	46
4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์สมรรถนะของระบบปั๊มความร้อนกับอุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งแกนสับปะรดเชื่อมแบบลูกเต๋า ที่อัตราส่วนอากาศข้ามเครื่องทำระเหย 80, 70 และ 60 เปอร์เซ็นต์	47

สารบัญภาพ (ต่อ)

รูป	หน้า
4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์สมรรถนะของระบบปั๊มความร้อน กับอุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งแกนสับประรดแช่แข็งแบบหันเหียงและแบบลูกเต๋า ที่อัตราส่วนอากาศข้ามเครื่องทำระเหย 70 เปอร์เซ็นต์	48
ก.1 แกนสับประรดแช่แข็งอบแห้ง	57
ข.1 เครื่องอบแบบปั๊มความร้อนสำหรับแกนสับประรดแช่แข็ง	62
ข.2 เครื่องวัดอุณหภูมิแบบดิจิตอล	63
ข.3 เครื่องวัดความเร็วลม	63
ข.4 เครื่องบันทึกข้อมูล	64
ข.5 เครื่องชั่งน้ำหนักแบบดิจิตอล	64
ข.6 เครื่องวัดพลังงานไฟฟ้า กิโลวัตต์เอวาร์-มิเตอร์	65
ข.7 ตู้อบลมร้อน	65
ข.8 แกนสับประรดแช่แข็งแบบหันเหียงก่อนและหลังการอบแห้ง	66
ข.9 แกนสับประรดแช่แข็งแบบลูกเต๋าก่อนและหลังการอบแห้ง	66
ฉ.1 แผนภาพความดัน-เอนทาลปีของสารทำงาน R-134a	104
ฉ.2 แผนภาพคุณสมบัติอากาศ	105

อักษรย่อและสัญลักษณ์

สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
$COP_{HP}$	สมรรถนะของปั๊มความร้อน	-
$C_0$	ทุนเริ่มแรกของโครงการ	bath
PB	มูลค่าปัจจุบันของรายได้	bath
PC	มูลค่าปัจจุบันของต้นทุน	bath
DR	อัตราการอบแห้ง	$kg_{water\ evap.}/h$
d	น้ำหนักแห้งของวัสดุ	kg
FV	มูลค่าเงินต้นในปัจจุบัน	bath
$h_1, h_2, h_3, h_4$	เอนทัลปีจำเพาะของสารทำงานที่สภาวะต่างๆ	$kJ/kg$
IRR	อัตราผลตอบแทนของโครงการ	%
i	อัตราดอกเบี้ย	bath
$M_a$	มวลของอากาศแห้ง	$kg/m^3$
$M_d$	ความชื้นมาตรฐานแห้ง	% db
$M_w$	ความชื้นมาตรฐานเปียก	% wb
$\dot{m}_r$	อัตราการไหลของสารทำงาน	$kg/s$
NPV	มูลค่าปัจจุบันสุทธิ	bath
n	จำนวนปีในอนาคต	-
Q	อัตราการไหลเชิงปริมาตรอากาศร้อน	$m^3/s$
$\dot{Q}_c$	อัตราความร้อนทิ้งที่เครื่องควบแน่น	kW
$\dot{Q}_e$	อัตราความร้อนที่ถ่ายเทเข้าสู่เครื่องทำระเหย	kW
P	ความดันที่บรรยากาศ (P=101.325)	kPa
PC	มูลค่าปัจจุบันของต้นทุน	bath
PV	มูลค่าเงินในอนาคต	bath
$P_v$	ความดันไอ	Pa

## อักษรย่อและสัญลักษณ์ (ต่อ)

สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
$P_{vs}$	ความดันไออิ่มตัว	Pa
R	รายได้สุทธิรายปีซึ่งมีค่าเท่ากันทุกปี	bath/year
R	ค่าคงที่ (8.314)	kJ/kg <sub>mole</sub> K
RH	ความชื้นสัมพัทธ์	-
SEC	ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ	MJ/kg <sub>water</sub>
$T_{abs}$	อุณหภูมิสัมบูรณ์	K
$T_{db}$	อุณหภูมิกระเปาะแห้ง	°C
$T_{wb}$	อุณหภูมิกระเปาะเปียก	°C
$v$	ปริมาตรจำเพาะของอากาศชื้น	m <sup>3</sup> /kg <sub>dry air</sub>
w	น้ำหนักของวัสดุ	kg
W	อัตราส่วนความชื้น	kg <sub>water</sub> /kg <sub>dry air</sub>
$W_{wb}^*$	อัตราส่วนความชื้นที่อุณหภูมิกระเปาะเปียก	kg <sub>water</sub> /kg <sub>dry air</sub>
$\dot{W}_c$	กำลังงานของเครื่องอัดไอ	kW
$\Delta T$	ความแตกต่างของอุณหภูมิ	°C
$\rho_g$	ความหนาแน่นของอากาศ	kg/m <sup>3</sup>

สัญลักษณ์กำกับล่าง

สัญลักษณ์

ความหมาย

a	อากาศแห้ง หรือ อากาศแวดล้อม
abs	ค่าสัมบูรณ์
c	Compressor หรือ Condenser
db	กระเปาะแห้ง
d.b.	มาตรฐานแห้ง
e	Evaporator
hp	Heat pump
r	สารทำงาน
wb	กระเปาะเปียก
w.b.	มาตรฐานเปียก