

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ก
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
สารบัญตาราง	ช
สารบัญภาพ	ฎ
อักษรย่อและสัญลักษณ์	ท
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 สรุปสาระสำคัญจากเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	2
1.3 วัตถุประสงค์	8
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	8
1.5 ขอบเขตของการวิจัย	8
บทที่ 2 หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	
2.1 ความรู้พื้นฐานการอบแห้ง	9
2.2 ป้อนความร้อนแบบอัดไอ	13
2.3 เครื่องอบแห้งแบบใช้ป้อนความร้อน	15
2.4 การควบคุมอุณหภูมิเข้าห้องอบแห้งของเครื่องอบแห้งแบบป้อนความร้อน	17
2.5 ลักษณะทางพฤกษศาสตร์กล้วยน้ำว้า	22
บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย	
3.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการอบแห้งของเครื่องอบแห้งแบบป้อนความร้อน	24
3.2 การจำลองสภาพการอบแห้ง	35
3.3 การทดลองและเก็บข้อมูลเพื่อนำมาเปรียบเทียบกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์	43
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์	
4.1 การเปรียบเทียบแบบจำลองคณิตศาสตร์กับผลการทดลองอบแห้งแบบใช้ป้อนความร้อน โดยใช้กล้วยน้ำว้าแผ่นเป็นวัสดุทดสอบ	48

4.2 การเปรียบเทียบสมรรถนะของเครื่องอบแห้งแบบใช้ป้มความร้อนที่มีวิธีการควบคุมอุณหภูมิร้อนแบบ BWF-HPD กับ VSD-HPD โดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์	54
4.3 ผลกระทบของสัดส่วนอากาศข้ามเครื่องทำระเหย ที่มีต่อสมรรถนะและประสิทธิภาพการใช้พลังงานของการอบแห้งของเครื่องอบแห้งแบบใช้ป้มความร้อน	59
บทที่ 5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ	
5.1 สรุปผล	65
5.2 ข้อเสนอแนะ	66
เอกสารอ้างอิง	68
ภาคผนวก	71
ภาคผนวก ก อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	72
ภาคผนวก ข ข้อมูลการทดลองสอบและผลการคำนวณของเครื่องอบแห้งป้มความร้อนที่มีวิธีการควบคุมอุณหภูมิมอบแห้ง BWF-HPD และ VSD-HPD	77
ภาคผนวก ค รายละเอียดการคำนวณความชื้นสูญเสียในเครื่องอบแห้ง	115
ภาคผนวก ง บทความที่ตีพิมพ์	117
ประวัติผู้เขียน	125

สารบัญตาราง

ตาราง		หน้า
4.1	ผลการเปรียบเทียบของเครื่องอบแห้งแบบใช้ปั๊มความร้อน ความเร็วลมหน้าห้องอบแห้ง 1.25 m/s อุณหภูมิอบแห้ง 60°C ความเร็วรอบเริ่มต้นเครื่องอัดไอ 2000 rpm และสัดส่วนอากาศไหลข้ามเครื่องทำระเหย 70%	53
4.2	แสดงผลการทดสอบและสมรรถนะของเครื่องอบแห้งแบบใช้ปั๊มความร้อน โดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ความเร็วลมหน้าห้องอบแห้ง 1.25 m/s อุณหภูมิอบแห้ง 60°C ความเร็วรอบเริ่มต้นเครื่องอัดไอ 2000 rpm และสัดส่วนอากาศไหลข้ามเครื่องทำระเหย 70%	59
4.3	ข้อมูลคำนวณแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของของเครื่องอบแห้งแบบใช้ปั๊มความร้อน ความเร็วลมหน้าห้องอบแห้ง 1.25 m/s อุณหภูมิอบแห้ง 60°C สัดส่วนอากาศไหลข้ามเครื่องทำระเหย 60% 65% 70% และ 75%	60
ข.1	ข้อมูลการทดสอบการอบแห้งกล้วยน้ำว้าแผ่น และผลการคำนวณหาสมรรถนะของเครื่องอบแห้งชนิดปั๊มความร้อนแบบ BWF-HPD อุณหภูมิก่อนเข้าห้องอบแห้ง 60°C ความเร็วรอบเครื่องอัดไอเริ่มต้น 2,000 รอบ/นาที สัดส่วนอากาศไหลข้ามเครื่องทำระเหย 70 % ความเร็วลมก่อนเข้าห้องอบแห้ง 1.25 m/s	78
ข.2	ข้อมูลการทดสอบการอบแห้งกล้วยน้ำว้าแผ่น และผลการคำนวณหาสมรรถนะของเครื่องอบแห้งชนิดปั๊มความร้อนแบบ VSD-HPD อุณหภูมิก่อนเข้าห้องอบแห้ง 60°C ความเร็วรอบเครื่องอัดไอเริ่มต้น 2,000 รอบ/นาที สัดส่วนอากาศไหลข้ามเครื่องทำระเหย 70 % ความเร็วลมก่อนเข้าห้องอบแห้ง 1.25 m/s	79
ข.3	ข้อมูลการคำนวณจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ของเครื่องอบแห้งชนิดปั๊มความร้อน สำหรับกล้วยน้ำว้าแผ่นที่ควบคุมอุณหภูมิ แบบ BWF-HPD ความชื้นเริ่มต้น 192 % dry-basis ความชื้นสุดท้าย 15 % dry-basis อุณหภูมิที่ใช้ก่อนเข้าห้องอบแห้ง 60°C สัดส่วนอากาศไหลข้ามเครื่องทำระเหย 70 % ความเร็วลมก่อนเข้าห้องอบแห้ง 1.25 m/s	80
ข.4	ข้อมูลการคำนวณจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ของเครื่องอบแห้งชนิดปั๊มความร้อน สำหรับกล้วยน้ำว้าแผ่นที่ควบคุมอุณหภูมิ แบบ VSD-HPD ความชื้นเริ่มต้น 192 % dry-basis ความชื้นสุดท้าย 15 % dry-basis อุณหภูมิที่ใช้ก่อนเข้าห้องอบแห้ง 60°C สัดส่วนอากาศไหลข้ามเครื่องทำระเหย 70 % ความเร็วลมก่อนเข้าห้องอบแห้ง 1.25 m/s	83

[illegible]

- ข.12 ข้อมูลการคำนวณจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ของเครื่องอบแห้งชนิดปั่นความร้อน 111
 สำหรับกล้วยน้ำว้าแผ่นที่ควบคุมอุณหภูมิ แบบ VSD-HPD ความชื้นเริ่มต้น 200 % dry-
 basis ความชื้นสุดท้าย 16 % dry-basis อุณหภูมิที่ใช้ก่อนเข้าห้องอบแห้ง 60°C สัดส่วน
 อากาศไหลข้ามเครื่องทำระเหย 75 % ความเร็วลมก่อนเข้าห้องอบแห้ง 1.25 m/s



ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
 Copyright© by Chiang Mai University
 All rights reserved

สารบัญภาพ

รูป		หน้า
2.1	การอบแห้งในช่วงอบแห้งคงที่และลดลง	10
2.2	แผนภูมิอุณหภูมิ-เอนโทรปี และแผนภูมิความดัน-เอนทัลปีของวัฏจักรปั๊มความร้อนแบบอัดไอทางอุณหพลศาสตร์	14
2.3	ผังแสดงการทำงานของระบบอบแห้งแบบใช้ปั๊มความร้อน	16
2.4	แสดงกระบวนการของอากาศในการอบแห้งของระบบอบแห้งแบบใช้ปั๊มความร้อน	17
2.5	ปริมาตรควบคุมของเครื่องอบแห้ง (HPD) ในระบบปิด	18
2.6	ผังแสดงการทำงานของระบบอบแห้งแบบใช้ปั๊มความร้อนที่มีวิธีการควบคุมอุณหภูมิแบบ BWF-HPD	19
2.7	โครงสร้างของอินเวอร์เตอร์	21
2.8	ผังแสดงการทำงานของระบบอบแห้งแบบใช้ปั๊มความร้อนที่มีวิธีการควบคุมอุณหภูมิแบบ VSD-HPD	21
2.9	ไดอะแกรมแสดงวิธีการควบคุมอุณหภูมิของห้องอบแห้งโดยใช้อินเวอร์เตอร์	22
2.10	ระยะการสุกของผลกล้วย	23
3.1	แผนผังวงจรลมร้อนและวงจรสารทำงานที่ใช้สำหรับเครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อน	25
3.2	ปริมาตรควบคุมที่ 2 มวลของอากาศไหลผ่านและการถ่ายเทความร้อนที่เครื่องทำระเหย	27
3.3	ปริมาตรควบคุมที่ 5 ความร้อนที่อากาศได้รับจากเครื่องควบแน่น	29
3.4	แผนผังแสดงขั้นตอนการคำนวณของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์	36
3.5	แผนผังแสดงการจำลองสภาพการอบแห้งของปั๊มความร้อนแบบ BWF-HPD	37
3.6	แผนผังแสดงการจำลองสภาพการอบแห้งของปั๊มความร้อนแบบ VSD-HPD	42
3.7	เครื่องอบแห้งแบบใช้ปั๊มความร้อนสำหรับอุตสาหกรรมขนาดเล็กตั้งอยู่ที่ห้องปฏิบัติการ อบแห้ง ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่	44
3.8	กล้วยน้ำว้าหั่นเป็นแว่นตามแนวขวางความหนา 5 mm ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 30-35 mm นำมาวางเรียงกันในถาดอบแห้ง	45
4.1	ความชื้นของกล้วยน้ำว้าแผ่นที่อบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อนที่อุณหภูมิ 60 °C ความเร็วลมก่อนเข้าห้องอบแห้งเท่ากับ 1.25 m/s และมีสัดส่วนอากาศไหลเข้าเครื่องทำระเหย 70 %	49

4.2	อุณหภูมิกระแสอากาศของเครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อน ที่อุณหภูมิ 60 °C ความเร็วลมก่อนเข้าห้องอบแห้งเท่ากับ 1.25 m/s และมีสัดส่วนอากาศไหลข้ามเครื่องทำระเหย 70 %	50
4.3	อัตราความร้อนของเครื่องควบแน่นของเครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อนที่อุณหภูมิ 60 °C ความเร็วลมก่อนเข้าห้องอบแห้งเท่ากับ 1.25 m/s และมีสัดส่วนอากาศไหลข้ามเครื่องทำระเหย 70 %	51
4.4	พลังงานของเครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อน ที่อุณหภูมิ 60 °C ความเร็วลมก่อนเข้าห้องอบแห้งเท่ากับ 1.25 m/s และมีสัดส่วนอากาศไหลข้ามเครื่องทำระเหย 70 %	52
4.5	ความชื้นของกล้วยน้ำว้าแผ่นที่อบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบ VSD-HPD และ BWF-HPD ที่อุณหภูมิ 60 °C ความเร็วลมก่อนเข้าห้องอบแห้งเท่ากับ 1.25 m/s และมีสัดส่วนอากาศไหลข้ามเครื่องทำระเหย 70 %	54
4.6	ความชื้นของกล้วยน้ำว้าแผ่นขยายสเกล ที่อบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบ VSD-HPD และ BWF-HPD ที่อุณหภูมิ 60 °C ความเร็วลมก่อนเข้าห้องอบแห้งเท่ากับ 1.25 m/s และมีสัดส่วนอากาศไหลข้ามเครื่องทำระเหย 70 %	55
4.7	ความสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าเครื่องอบแห้ง VSD-HPD และ BWF-HPD ที่อุณหภูมิ 60 °C ความเร็วลมก่อนเข้าห้องอบแห้งเท่ากับ 1.25 m/s และมี สัดส่วนอากาศไหลข้ามเครื่องทำระเหย 70 %	56
4.8	สมรรถนะเครื่องอบแห้งปั๊มความร้อน VSD-HPD และ BWF-HPD ที่อุณหภูมิ 60 °C ความเร็วลมก่อนเข้าห้องอบแห้งเท่ากับ 1.25 m/s และมีสัดส่วนอากาศไหลข้ามเครื่องทำระเหย 70 %	57
4.9	ค่าอัตราการคั่งน้ำออกจำเพาะเฉลี่ยของเครื่องอบแห้ง VSD-HPD และ BWF-HPD ที่อุณหภูมิ 60 °C ความเร็วลมก่อนเข้าห้องอบแห้งเท่ากับ 1.25 m/s และมีสัดส่วนอากาศไหลข้ามเครื่องทำระเหย 70 %	58
4.10	อัตราการอบแห้งเฉลี่ยของเครื่องอบแห้ง VSD-HPD และ BWF-HPD ที่อุณหภูมิ 60 °C ความเร็วลมก่อนเข้าห้องอบแห้งเท่ากับ 1.25 m/s สัดส่วนอากาศไหลข้ามเครื่องทำระเหย 60 – 75 %	61
4.11	อัตราการคั่งน้ำออกจำเพาะเฉลี่ย ของเครื่องอบแห้ง VSD-HPD และ BWF-HPD ที่อุณหภูมิ 60 °C ความเร็วลมก่อนเข้าห้องอบแห้งเท่ากับ 1.25 m/s สัดส่วนอากาศไหลข้ามเครื่องทำระเหย 60 – 75 %	62

4.12	กำลังงานที่ให้แก่เครื่องอัดไอเฉลี่ย ของเครื่องอบแห้ง VSD-HPD และ BWF-HPD ที่อุณหภูมิ 60 °C ความเร็วลมก่อนเข้าห้องอบแห้งเท่ากับ 1.25 m/s สัดส่วนอากาศไหลข้ามเครื่องทำระเหย 60 – 75 %	63
4.13	สมรรถนะเครื่องอบแห้งป้อนความเฉลี่ย ของเครื่องอบแห้ง VSD-HPD และ BWF-HPD ที่อุณหภูมิ 60 °C ความเร็วลมก่อนเข้าห้องอบแห้งเท่ากับ 1.25 m/s สัดส่วนอากาศไหลข้ามเครื่องทำระเหย 60 – 75 %	64
ก.1	เครื่องวัดความเร็วลม (Anemometer, TSI Incorporated : Model 8385-M-GB)	63
ก.2	ดิจิตอลเทอร์โมมิเตอร์ความละเอียด 0.1 °C ความเที่ยงตรง $\pm 0.5 \%$	63
ก.3	เครื่องชั่งน้ำหนักดิจิตอลความละเอียด 0.001 กรัม (Analytical balance, Satorius : Model EA35ED)	63
ก.4	ตู้อบลมร้อน (Hot air oven, Binder : Model ED)	64
ก.5	เครื่องชั่งน้ำหนักดิจิตอลความละเอียด 0.005 กิโลกรัม	64
ก.6	เครื่องวัดความเร็วรอบแบบตัวเลข (รุ่น Testo470)	64
ก.7	กิโลวัตต์เอว-มิเตอร์	65
ก.8	บรูคคองเกจ ความละเอียด -1 – 30 bar และ -1 – 10 bar	65
ก.9	อินเวอร์เตอร์ ขนาด 3.75 kW (5 แรงม้า)	65
ก.10	อินเวอร์เตอร์ ขนาด 0.75 kW (1 แรงม้า)	66
ก.11	เซ็นเซอร์อุณหภูมิ Platinum RTD Class B แบบสามสายความเที่ยงตรง	66
ก.12	ชุดควบคุมแรงดันเครื่องทำระเหย (Evaporator pressure regulator : EPR) DANFOSS รุ่น 034L0042	66

อักษรย่อและสัญลักษณ์

A	พื้นที่ที่มีการถ่ายเทความร้อน, m^2
BF	สัดส่วนของอากาศที่ไม่สัมผัส Cooling coils, %
BP	อัตราส่วนอากาศไหลข้ามเครื่องทำระเหย, %
C	ค่าความร้อนจำเพาะ, $kJ/kg \cdot ^\circ C$
COP	ค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะของปั๊มความร้อน
COP _{HPD}	สมรรถนะเครื่องอบแห้งปั๊มความร้อน
c	ตัวประกอบระยะช่องว่างของกระบอกสูบ
D	เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ, m
DR	อัตราการอบแห้ง, kg_{water}/h
d	มวลของวัสดุแห้งที่ไม่มีน้ำ, $kg_{dry product}$
f	ความถี่ไฟฟ้า, Hz
G	ความเร็วเชิงมวล, $kg/m^2 \cdot s$
h	เอนทัลปีของสารทำความเย็น, kJ/kg ; สัมประสิทธิ์การพาความร้อน, $kW/m^2 \cdot K$
h _{fg}	ค่าความร้อนแฝงของการระเหยของน้ำ, kJ/kg
k	ดัชนีการอัด; ค่าคงที่ของการอบแห้ง, h^{-1}
k _c	สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของวัสดุที่ทำท่อ, $kW/m^2 \cdot K$
k _i	สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของสารทำงาน, $kW/m^2 \cdot K$
L	ความยาวของท่อ, m
M _a	น้ำหนักโมเลกุล, $kg/kg \text{ mole K}$
M _d	ความชื้นมาตรฐานแห้ง, เศษส่วน
M _{eq}	ความชื้นสมดุลของวัสดุ, เศษส่วนมาตรฐานแห้ง
M _w	ความชื้นมาตรฐานเปียก, เศษส่วน
MR	อัตราส่วนความชื้นของวัสดุ
m	อัตราการไหลเชิงมวล, kg/s
m _p	มวลของวัสดุแห้ง, $kg_{dry product}$
MER	อัตราการควบแน่นน้ำที่เครื่องทำระเหย, kg_{water}/h
N	จำนวนรอบเครื่องอัดไอ, rpm
P	ความดันของสารทำงาน, kPa

P_{blower}	กำลังงานเพลลาที่ให้กับพัดลม, kW
P_{comp}	กำลังงานที่ให้แก่อุปกรณ์อัดไอ, kW
PD	ปริมาตรของกระบอกสูบ, m^3
Pr_a	แปรนเทิลนัมเบอร์ของอากาศ
p	จำนวนขั้วของมอเตอร์ (pole)
Q	อัตราการถ่ายเทความร้อน, kW
Q_L	อัตราการถ่ายเทความร้อนที่สูญเสีย, kW
R	ค่าคงที่สากลของอากาศ, kg/kg mole K
Re	เรย์โนลด์นัมเบอร์ของอากาศ
r	รัศมีของท่อ, m
SMER	อัตราการดึงน้ำออกจำเพาะ, $\text{kg}_{\text{water evap.}}/\text{kW-h}$
T	อุณหภูมิ, $^{\circ}\text{C}$
t	เวลา, h
U	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน, $\text{kW/m}^2\text{-K}$
v	ปริมาตรจำเพาะของสารทำงาน, m^3/kg
W	อัตราส่วนความชื้นของอากาศ, $\text{kg}_{\text{water}}/\text{kg}_{\text{dry air}}$
w	มวลของวัสดุ, kg
ΔU_{sys}	อัตราการเปลี่ยนแปลงพลังงานภายในของระบบที่เพิ่มขึ้น, kW
η_v	ประสิทธิภาพเชิงปริมาตรของเครื่องอัด

สัญลักษณ์กำกับล่าง

a	อากาศ
abs	อุณหภูมิสัมบูรณ์
ac	อากาศที่เครื่องควบแน่น
c	เครื่องควบแน่น
con	ไอน้ำอิ่มตัว
di	ก่อนเข้าห้องอบแห้ง
dp	จุดน้ำค้าง
do	ออกจากห้องอบแห้ง
e	ที่เครื่องทำระเหย
eq	สภาวะสมดุล
eo	ออกจากเครื่องทำระเหย
i	ภายใน
in	เริ่มต้น
L	ของเหลว
o	ภายนอก
r	สารทำงาน
set	สถานะไอน้ำอิ่มตัว
s	ซูเปอร์ฮีท
v	ไอน้ำในอากาศ
vs	ไอน้ำอิ่มตัว
wb	กระเปาะเปียก
w	น้ำ