



รายงานการวิจัย

การคงคุณภาพผักอบแห้งกิ่งตำเร็จรูป
ด้วยเทคนิคการอบแห้งแบบปั๊มความร้อน
(Maintaining Quality of Instant Dried Vegetable
by Heat Pump Drying Technique)

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว



รายงานการวิจัย

**การคงคุณภาพผักอบแห้งกึ่งสำเร็จรูป
ด้วยเทคนิคการอบแห้งแบบปั๊มความร้อน
(Maintaining Quality of Instant Dried Vegetable
by Heat Pump Drying Technique)**

คณะผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการ

ดร. เทวรัตน์ ทิพย์วิมล

สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร

สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ที่ปรึกษา

ผศ.ดร. วีรชัย อางหาญ

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ พ.ศ. 2553

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

พฤษภาคม 2555

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ 2553 ผู้วิจัยขอขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิรัช อัจหาญ หัวหน้าศูนย์ความเป็นเลิศด้านชีวมวลที่อำนวยความสะดวกเรื่องการใช้สถานที่ในการทำวิจัยและขอขอบคุณคุณจรรยาศักดิ์ สมพงษ์ วิศวกรประจำศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีที่ได้ช่วยอำนวยความสะดวกในเรื่องการจัดหาเครื่องมือวัด



บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้จัดทำขึ้นโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อทำการออกแบบ สร้างและทดสอบเครื่องอบแห้ง ระบบปั๊มความร้อนสำหรับการอบแห้งผักกึ่งสำเร็จรูป เครื่องอบแห้งที่สร้างขึ้นประกอบด้วย ห้องอบแห้งขนาดปริมาตรภายใน $70 \times 70 \times 85 \text{ cm}^3$ ชั้นถาดบรรจุถาดซึ่งทำจากเหล็กกล้าไร้สนิม เจาะรูขนาด $50 \times 60 \text{ cm}^2$ จำนวน 10 ถาด ระบบปั๊มความร้อนแบบอัดไอขนาด 13900 BTU/h อัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศ $0.51 \text{ m}^3/\text{s}$ อัตราส่วนอากาศข้ามเครื่องทำระเหย 80 เปอร์เซ็นต์ ทำการทดสอบอบแห้งแครอท หอมสับ และข้าวโพดหวานที่อุณหภูมิอบแห้ง 45 50 และ $55 \text{ }^\circ\text{C}$ พบว่าวัสดุต่างชนิดกันมีอัตราการอบแห้งที่แตกต่างกัน โดยแครอทมีอัตราการอบแห้งที่สูงกว่าหอมสับและข้าวโพดหวานเมื่อทำการอบแห้งที่สภาวะเดียวกัน เมื่อพิจารณาด้านคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ได้หลังการอบแห้งด้านสีพบว่าผลิตภัณฑ์แครอทอบแห้งที่ได้มีการเปลี่ยนแปลงของสีที่แตกต่างจากสีของแครอทสด (ΔE) อยู่ในช่วง 12.08-12.38 และอุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งไม่ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของสีที่แตกต่างกันที่ระดับความชื้น 95 เปอร์เซ็นต์ ผลิตภัณฑ์ที่ได้หลังการอบแห้งเมื่อทำการคั่วตัวในน้ำร้อนอุณหภูมิ $90 \text{ }^\circ\text{C}$ พบว่ามีอัตราส่วนการคั่วตัว 4.14-4.61 และมีค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะต่ำสุด $3.37 \text{ MJ/kg}_{\text{water}}$ ที่อุณหภูมิการอบแห้ง $50 \text{ }^\circ\text{C}$ สำหรับการอบแห้งหอมสับพบว่าคุณภาพด้านสีของหอมสับมีการเปลี่ยนแปลงสีแตกต่างจากหอมสับสดอยู่ในช่วง 5.58-7.34 โดยอุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งไม่ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของสีที่แตกต่างกันที่ระดับความชื้น 95 เปอร์เซ็นต์ ผลิตภัณฑ์ที่ได้หลังการอบแห้งเมื่อทำการคั่วตัวด้วยน้ำร้อนอุณหภูมิ $90 \text{ }^\circ\text{C}$ พบว่ามีอัตราส่วนการคั่วตัว 5.04-5.13 โดยอุณหภูมิของการอบแห้งไม่ส่งผลต่ออัตราส่วนการคั่วตัวของหอมสับที่ระดับความชื้น 95 เปอร์เซ็นต์ ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะต่ำสุดคือ $7.26 \text{ MJ/kg}_{\text{water}}$ ที่อุณหภูมิการอบแห้ง $50 \text{ }^\circ\text{C}$ ซึ่งสรุปได้ว่าการอบแห้งแครอทและหอมสับด้วยเครื่องอบแห้งระบบปั๊มความร้อนที่สร้างขึ้นนี้ด้วยอุณหภูมิลมร้อนในการอบแห้ง $50 \text{ }^\circ\text{C}$ มีความเหมาะสมที่สุดเนื่องจากคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ได้หลังการอบแห้งอยู่ในระดับคุณภาพที่ดีไม่แตกต่างจากการอบแห้งด้วยอุณหภูมิที่ต่ำกว่าแต่ใช้เวลาในการอบแห้งที่สั้นกว่าพร้อมทั้งประหยัดพลังงานมากกว่าอีกด้วย ส่วนการอบแห้งข้าวโพดหวานนั้นได้ทำการอบแห้งเฉพาะที่อุณหภูมิ $50 \text{ }^\circ\text{C}$ โดยทำการแบ่งตัวอย่างออกเป็นสองแบบคือข้าวโพดดิบ และข้าวโพดที่ผ่านการนึ่งสุก ซึ่งผลจากการทดสอบพบว่าข้าวโพดนึ่งสุกมีอัตราการอบแห้งที่สูงกว่าข้าวโพดดิบ แต่มีลักษณะของเมล็ดที่หืดตัวมากกว่าข้าวโพดดิบ ส่วนคุณภาพด้านสีของผลิตภัณฑ์ข้าวโพดนึ่งสุกจะมีลักษณะสีเหลืองที่เข้มขึ้นกว่าสีของข้าวโพดดิบที่มีลักษณะของสีขาวนวล

Abstract

The objective of this research was to design, development, and evaluate performance of a heat pump dryer for instant dried vegetable. The dryer consist of a drying chamber of 70 x 70 x 85 cm³ which containing of 10 stainless steel trays, each area of 50 x 60 cm² and a compression heat pump system of 13900 BTU/h. The volume flow of drying air of 0.51 m³/s with bypassing air of 80 percent. Carrot, spring onion, and sweet corn were used to drying materials at drying air temperature of 45, 50, and 55 °C. It was found that carrot has highest drying rate and sweet corn has the lowest. The color differences of dried carrot from fresh were 12.08-12.38 and at the confidential level of 95 percent there were not differences in the total color difference between all drying air temperatures. The rehydration ratios of dried carrot in hot water, temperature of 90 °C, were 4.14-4.61. The lowest of specific energy consumption was 3.37 MJ/kg_{water} at drying temperature of 50 °C. For drying spring onion, it was found that the color differences of dried spring onion from fresh were 5.58-7.34 and at the confidential level of 95 percent there were not differences in the total color difference between all drying air temperatures. The rehydration ratios of dried spring onion in hot water, temperature of 90 °C, were 5.04-5.13 and all drying air temperature, there are not difference in rehydration ratio at the confidential level of 95 percent. The lowest of specific energy consumption was 7.26 MJ/kg_{water} at drying temperature of 50 °C. The optimum drying condition of the dryer were drying air temperature of 50 °C, air flow rate 0.51 m³/s, and bypass air 80 percent because the products has quality like drying by lower temperature but it lower consume time and energy. For drying two group of sweet corn, fresh kernel and boiled kernel, at drying air temperature of 50 °C. It was found that boiled kernel has higher drying rate than fresh kernel but it more shrink kernel. The colors of boiled kernel product have more yellowness than fresh kernel product.

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ.....	ก
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญภาพ	ช
คำอธิบายสัญลักษณ์.....	ณ
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 การตรวจเอกสาร	
2.1 สถานการณ์ความต้องการฝักรอบแห้ง	3
2.2 ทฤษฎีการอบแห้ง	4
2.3 ความชื้นวัสดุ.....	8
2.4 การอบแห้งด้วยบั้งความร้อน.....	9
บทที่ 3 อุปกรณ์และวิธีการ	
3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย	18
3.2 วิธีการ.....	19
บทที่ 4 ผลการดำเนินการ	
4.1 เครื่องอบแห้งระบบบั้งความร้อน	33
4.2 ผลการทดสอบประสิทธิภาพเครื่องอบแห้งระบบบั้งความร้อน.....	35
4.3 การวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์.....	50
บทที่ 5 สรุปผลการดำเนินการและข้อเสนอแนะ	
5.1 สรุปผลการดำเนินการ	53
5.2 ข้อเสนอแนะ	54
เอกสารอ้างอิง	55

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก การคำนวณความดันลดในระบบ	57
ภาคผนวก ข ผลการทดลอง	63
ภาคผนวก ค แบบเครื่องอบแห้งระบบบั้งความร้อน	74
ภาคผนวก ง เอกสารเผยแพร่งานวิจัย.....	79
ประวัติผู้วิจัย.....	85



สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 4.1 ผลการอบแห้งแครอท	38
ตารางที่ 4.2 ค่าพารามิเตอร์สีของแครอท	39
ตารางที่ 4.3 ผลการอบแห้งหอมสับ	43
ตารางที่ 4.4 ค่าพารามิเตอร์สีของหอมสับ	44
ตารางที่ 4.5 ผลการอบแห้งข้าวโพดหวาน	48
ตารางที่ 4.6 ค่าพารามิเตอร์สีของข้าวโพดหวาน	49
ตารางที่ 4.7 ค่าใช้จ่ายในการสร้างเครื่องอบแห้งระบบปั๊มความร้อน	52
ตารางผนวกที่ ข1 ผลการอบแห้งแครอทอุณหภูมิอากาศอบแห้ง 45 °C	64
ตารางผนวกที่ ข2 ผลการอบแห้งแครอทอุณหภูมิอากาศอบแห้ง 50 °C	65
ตารางผนวกที่ ข3 ผลการอบแห้งแครอทอุณหภูมิอากาศอบแห้ง 55 °C	66
ตารางผนวกที่ ข4 ผลการอบแห้งหอมสับอุณหภูมิอากาศอบแห้ง 45 °C	67
ตารางผนวกที่ ข5 ผลการอบแห้งหอมสับอุณหภูมิอากาศอบแห้ง 50 °C	68
ตารางผนวกที่ ข6 ผลการอบแห้งหอมสับอุณหภูมิอากาศอบแห้ง 55 °C	69
ตารางผนวกที่ ข7 ผลการอบแห้งข้าวโพดหวานอุณหภูมิอากาศอบแห้ง 50 °C	70
ตารางผนวกที่ ข8 ผลการอบแห้งข้าวโพดหวานอุณหภูมิอากาศอบแห้ง 50 °C	71
ตารางผนวกที่ ข9 ผลการทดลองการคืนตัวของแครอท	72
ตารางผนวกที่ ข10 ผลการทดลองการคืนตัวของหอมสับ	73

สารบัญภาพ

	หน้า
ภาพที่ 2.1 การลดลงของความชื้นวัสดุ.....	5
ภาพที่ 2.2 หลักการทำงานทั่วไปของเครื่องอบแห้งระบบปั๊มความร้อน	10
ภาพที่ 2.3 ระบบการทำงานของเครื่องอบแห้งระบบปั๊มความร้อน.....	11
ภาพที่ 2.4 องค์ประกอบของเครื่องอบแห้งระบบปั๊มความร้อน	16
ภาพที่ 3.1 กระบวนการบนไซโครเมตริกซ์ เพื่อใช้ในการออกแบบระบบการอบแห้งแบบปั๊มความร้อน.....	23
ภาพที่ 3.2 วัฏจักรการทำงานของระบบปั๊มความร้อนแบบอัดไอบน p-h ไดอะแกรม	25
ภาพที่ 3.3 เครื่องอบแห้งระบบปั๊มความร้อนที่สร้างขึ้น	27
ภาพที่ 3.4 เครื่องหาความชื้นแบบอินฟราเรด.....	28
ภาพที่ 3.5 ลักษณะการจัดเรียงแครอทและถุงผ้าตาข่าย.....	29
ภาพที่ 3.6 ลักษณะการจัดเรียงหอมสับและถุงผ้าตาข่าย.....	30
ภาพที่ 3.7 ลักษณะการจัดเรียงข้าวโพดหวานนึ่งสุกและถุงผ้าตาข่าย.....	31
ภาพที่ 4.1 เครื่องอบแห้งระบบปั๊มความร้อนและส่วนประกอบ	33
ภาพที่ 4.2 ลักษณะการติดตั้งเครื่องควบแน่นตัวนอกและเครื่องอัดไอ.....	34
ภาพที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นกับเวลาของการอบแห้งแครอทด้วยเครื่องอบแห้งระบบปั๊มความร้อน.....	35
ภาพที่ 4.4 อัตราการอบแห้งแครอทด้วยเครื่องอบแห้งระบบปั๊มความร้อน.....	36
ภาพที่ 4.5 ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของการอบแห้งแครอท	36
ภาพที่ 4.6 ลักษณะของแครอทก่อนและหลังอบแห้ง.....	37
ภาพที่ 4.7 พฤติกรรมการคืนตัวของแครอทอบแห้งที่ได้จากอุณหภูมิการอบแห้งต่างๆ.....	40
ภาพที่ 4.8 เปรียบเทียบลักษณะของแครอท	40
ภาพที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นกับเวลาของการอบแห้งหอมสับด้วยเครื่องอบแห้งระบบปั๊มความร้อน.....	41
ภาพที่ 4.10 อัตราการอบแห้งหอมสับด้วยเครื่องอบแห้งระบบปั๊มความร้อน.....	42
ภาพที่ 4.11 ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของการอบแห้งหอมสับ.....	42
ภาพที่ 4.12 ลักษณะของหอมสับก่อนและหลังการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งระบบปั๊มความร้อน.....	43
ภาพที่ 4.13 พฤติกรรมการคืนตัวของหอมสับอบแห้งที่ได้จากการอบแห้งอุณหภูมิต่างๆ.....	45
ภาพที่ 4.14 ลักษณะของหอมสับหลังการอบแห้งและหลังการคืนตัวเทียบกับหอมสับสด.....	46
ภาพที่ 4.15 พฤติกรรมการอบแห้งข้าวโพดดิบและข้าวโพดข้าวโพดนึ่งสุก.....	47

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

	หน้า
ภาพที่ 4.16 ลักษณะของข้าวโพดดิบและข้าวโพดนี้่สุกก่อนการอบแห้ง.....	47
ภาพที่ 4.17 ลักษณะของข้าวโพดหลังการอบแห้ง	49
ภาพผนวกที่ ก1 แสดงตำแหน่งท่อลมในตำแหน่งที่นำมาคิดความดันลด.....	58
ภาพผนวกที่ ก2 กราฟความดันสูญเสียของอากาศไหลผ่าน fin-coil.....	61

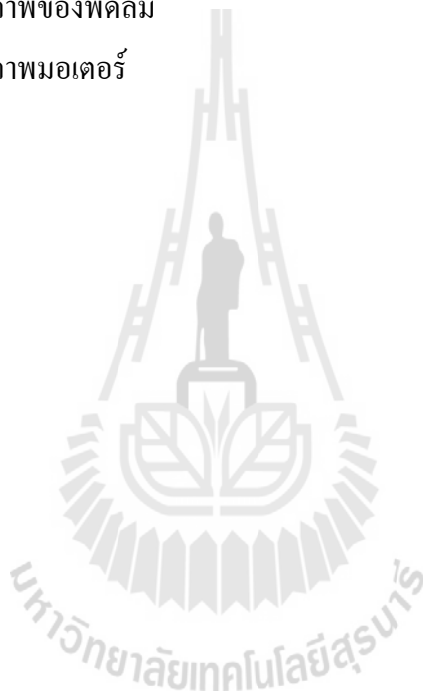


คำอธิบายสัญลักษณ์

m_w	คือ มวลของน้ำที่ระเหยออกจากวัสดุ (kg)
m_{wc}	คือ มวลของน้ำควบแน่นที่เครื่องทำระเหย (kg)
m_d	คือ มวลของวัสดุแห้ง (kg)
m_i	คือ น้ำหนักเริ่มต้นของวัสดุ (kg)
m_f	คือ น้ำหนักวัสดุหลังอบแห้ง (kg)
\dot{m}_a	คือ อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศอบแห้ง/อากาศผสม (kg/s)
\dot{m}_{bp}	คือ อัตราการไหลของอากาศ bypass (kg/s)
\dot{m}_{ae}	คือ อัตราการไหลอากาศผ่านเครื่องทำระเหย (kg/s)
M_{di}	คือ ความชื้นเริ่มต้นของวัสดุมาตรฐานแห้ง (เศษส่วน)
M_{df}	คือ ความชื้นสุดท้ายของวัสดุมาตรฐานแห้ง (เศษส่วน)
M_w	คือ ความชื้นมาตรฐานเปียก (wb, อัตราส่วน)
M_d	คือ ความชื้นมาตรฐานแห้ง (db, อัตราส่วน)
h_{fg}	คือ ความร้อนแฝงของการระเหยน้ำ (kJ/kg)
c_a	คือ ความร้อนจำเพาะของอากาศ (kJ/kg °C)
T_{ai}	คือ อุณหภูมิอากาศก่อนอบแห้ง (°C)
T_{af}	คือ อุณหภูมิของอากาศหลังอบแห้ง (°C)
T_{ei}	คือ อุณหภูมิอากาศก่อนเข้าเครื่องทำระเหย (°C)
T_{eo}	คือ อุณหภูมิของอากาศออกจากเครื่องทำระเหย (°C)
T_{ci}	คือ อุณหภูมิอากาศก่อนเข้าเครื่องควบแน่น (°C)
T_{co}	คือ อุณหภูมิของอากาศออกจากเครื่องควบแน่น (°C)
t	คือ เวลาที่ใช้ในการอบแห้ง (s)
Q_e	คือ อัตราการทำความเย็นของเครื่องทำระเหย (kW)
Q_{cin}	คือ อัตราการทำความร้อนของเครื่องควบแน่นตัวใน (kW)
Q_{cex}	คือ อัตราการทำความร้อนของเครื่องควบแน่นตัวนอก (kW)
W_c	คือ กำลังของเครื่องอัดไอ (kW)
W_f	คือ กำลังของพัดลม (kW)
DR	คือ อัตราการอบแห้ง, kg/h หรือ %db/h
SMER	คือ อัตราการระเหยน้ำจำเพาะ, kg/kWh

คำอธิบายสัญลักษณ์ (ต่อ)

SEC	คือ ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ, MJ/kg
MER	คือ อัตราควบแน่นน้ำ, kg/h
COP	คือ coefficient of performance
Pe	คือ พลังงานไฟฟ้าที่ใช้, kWh
RR	คือ อัตราส่วนการคืนตัว
ΔP	คือ ความดันตกในระบบ (Pa)
η_f	คือ ประสิทธิภาพของพัดลม
η_m	คือ ประสิทธิภาพมอเตอร์



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

ในปัจจุบันอาหารกึ่งสำเร็จรูปได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายเนื่องจากมีความสะดวกและเหมาะสมกับวิถีชีวิตของคนทำงานที่ถูกรัดด้วยเวลา จากรายงานของศูนย์วิจัยกสิกรรมไทยพบว่าความนิยมบริโภคอาหารกึ่งสำเร็จรูปมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น พร้อมๆกับความต้องการอาหารเพื่อสุขภาพ (ศูนย์วิจัยกสิกรรมไทย: 2548 ก,ข ออนไลน์) โดยผักอบแห้งเป็นทางเลือกหนึ่งสำหรับการเพิ่มคุณค่าทางอาหารและเพิ่มสีสันให้กับอาหารจากรายงานของธิดาวัฒน์ (2550) พบว่าปัจจัยด้านคุณภาพที่มีอิทธิพลต่อผู้บริโภคในการเลือกซื้อผักอบแห้งคือ สี สัน สดใส สวยงาม นำรับประทาน ความปลอดภัยต่อการบริโภคและสามารถผสมลงในอาหารได้อย่างสะดวกและลงตัว

เป็นที่ทราบกันดีในวงการอบแห้งว่าเครื่องอบแห้งที่ให้คุณภาพของผลิตภัณฑ์หลังการอบแห้งใกล้เคียงกับผลิตภัณฑ์สดมากที่สุดคือการอบแห้งแบบเยือกแข็ง (freeze drying) ซึ่งการอบแห้งด้วยเทคนิคนี้จะเหมาะสมกับผลิตภัณฑ์ที่มีมูลค่าสูงเหมาะแก่การลงทุนเท่านั้นเนื่องจากเทคโนโลยีการอบแห้งแบบเยือกแข็งเป็นเทคนิคที่มีต้นทุนการลงทุน และต้นทุนในการดำเนินการอบแห้งที่สูงมาก ดังนั้นนักวิจัยจึงได้พยายามหาเทคนิคในการอบแห้งแบบอื่นๆ เข้ามาทดแทน เทคนิคการอบแห้งด้วยระบบบีบความร้อนเป็นอีกเทคนิคหนึ่งที่น่าสนใจ เนื่องจากกระบวนการอบแห้งแบบนี้ สามารถทำการอบแห้งในรูปแบบของระบบปิดซึ่งเป็นอิสระต่อสภาวะแวดล้อมภายนอก จึงทำให้สภาวะอากาศแวดล้อมไม่ส่งผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ภายในห้องอบแห้ง โดยเฉพาะในช่วงที่อากาศมีความชื้นสูงและการปนเปื้อน อีกทั้งมีประสิทธิภาพในการใช้พลังงานสูงเพราะมีการคืนความร้อนกลับ (recovery heat) ผู้การอบแห้งผ่านทางอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน ทำให้ไม่ต้องปล่อยอากาศร้อนหลังการอบแห้งสู่สภาวะอากาศเป็นการช่วยลดปัญหาโลกร้อน อีกทั้งการอบแห้งด้วยเทคนิคนี้ยังใช้อุณหภูมิในการอบแห้งที่ต่ำทำให้เหมาะสมต่อการอบแห้งวัสดุที่มีความไวต่อการเสียหายเนื่องจากความร้อน ผลิตภัณฑ์ที่ได้หลังการอบแห้งจึงมีคุณภาพที่ดี แต่ต้นทุนในการลงทุนตัวเครื่องอบแห้งและต้นทุนการดำเนินการต่ำกว่าการอบแห้งแบบเยือกแข็ง ด้วยเหตุผลนี้การนำเอาระบบบีบความร้อนมาใช้ในการอบแห้งผักจึงเป็นการช่วยคงคุณภาพของผักที่ได้หลังการอบแห้ง และยังช่วยลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมที่ประสบกับปัญหาราคาผักตกต่ำได้อีกด้วย

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อออกแบบ สร้าง เครื่องอบแห้งระบบปั๊มความร้อนต้นแบบสำหรับการอบแห้งผักกึ่งสำเร็จรูป
2. เพื่อประเมินคุณภาพของผักที่ได้หลังการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งระบบปั๊มความร้อน
3. เพื่อประเมินความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ในการลงทุนอบแห้งผักด้วยเครื่องอบแห้งระบบปั๊มความร้อน

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. เครื่องอบแห้งระบบปั๊มความร้อนที่ออกแบบสร้างต้นแบบมีความจุห้องอบแห้งขนาด 400 ลิตร
2. ผักที่ใช้สำหรับการอบแห้งเป็นคือ ต้นหอมสดสับ แครอท ข้าวโพดหวาน
3. คุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ได้ ประเมินจาก คุณภาพด้านสี และการกินตัว

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. เครื่องอบแห้งระบบปั๊มความร้อนต้นแบบ
2. แนวทางการและความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ในการนำเอาเครื่องอบแห้งระบบปั๊มความร้อนมาสำหรับการอบแห้งผักกึ่งสำเร็จรูป
3. ทำให้สามารถเข้าใจถึงพฤติกรรมการอบแห้งผักตัวอย่างที่ทำการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งระบบปั๊มความร้อน

บทที่ 2

การตรวจเอกสาร

2.1 สถานการณ์ความต้องการผักอบแห้ง

ประเทศไทยถือเป็นแหล่งอาหารที่สำคัญแห่งหนึ่งของโลก และมีผลผลิตวัตถุดิบอาหารสดที่เพียงพอบริโภคภายในประเทศ แต่เนื่องจากภาวะทางเศรษฐกิจส่งผลในผู้บริโภคภายในประเทศมีพฤติกรรมการบริโภคอาหารกึ่งสำเร็จรูปมากขึ้น ทั้งนี้ จากรายงานของศูนย์วิจัยกสิกรไทย (2005) พบว่าความต้องการอาหารกึ่งสำเร็จรูปของผู้บริโภคมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากเป็นสินค้าที่มีความสามารถตอบสนองต่อความต้องการของผู้บริโภคในปัจจุบันได้ดี โดยเฉพาะในช่วงที่ผู้บริโภคต้องการประหยัด จากค่าครองชีพที่สูงมากขึ้น เนื่องจากจุดเด่นของอาหารกึ่งสำเร็จรูปคือ ราคาจำหน่ายอยู่ในเกณฑ์ต่ำเมื่อเทียบกับอาหารประเภทอื่นๆ ไม่ต้องเสียเวลาในการเตรียมอาหารมากนัก มีความสะดวกรวดเร็ว และมีให้เลือกหลากหลายรสชาติ รวมทั้งยังเป็นอาหารที่เก็บไว้ได้นานอีกด้วย

การคาดการณ์ทางการตลาดของอาหารกึ่งสำเร็จรูปในปี 2548 พบว่ามีมูลค่ารวมมากกว่า 11,000 ล้านบาท โดยกะหมี่กึ่งสำเร็จรูปเป็นสินค้าที่ได้รับความนิยมอันดับหนึ่ง มีมูลค่าทางการตลาดสูงสุดในบรรดาอาหารกึ่งสำเร็จรูปทุกประเภท รองลงมาคือ โจ๊กกึ่งสำเร็จรูป ซึ่งมีแนวโน้มการขยายตัวทางการตลาดที่สูงขึ้น

ถึงแม้ว่าอาหารกึ่งสำเร็จรูปจะมีแนวโน้มทางการตลาดที่ดี แต่ก็ยังมีข้อกังขาที่ว่า เป็นอาหารที่มีคุณค่าทางอาหารต่ำ เนื่องจากจะประกอบไปด้วยแป้งเป็นส่วนใหญ่ และผู้บริโภคในปัจจุบันมีแนวโน้มที่จะหันมาสนใจในสุขภาพเพิ่มมากขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากมีแรงหนุนที่สำคัญคือ กระแสสุขภาพเชิงป้องกัน ที่เน้นการดูแลสุขภาพให้แข็งแรงไม่เจ็บป่วย เพื่อจะได้ไม่ต้องเสียค่ารักษาพยาบาล (ศูนย์วิจัยกสิกรไทย, 2007) ดังนั้นการเพิ่มคุณค่าให้กับอาหารกึ่งสำเร็จรูปที่มีความนิยมสูงขึ้นในปัจจุบันสามารถทำได้โดยการเพิ่มคุณค่าทางโภชนาการเข้าไป ผักอบแห้งจึงเป็นทางเลือกหนึ่ง นอกเหนือจากผลิตภัณฑ์เนื้อสัตว์อบแห้ง ซึ่งจากรายงานของ ธิดิววัฒน์ (2550) ที่ทำการศึกษาถึงความต้องการของผู้บริโภคต่อผลิตภัณฑ์ผักรวมอบแห้งสำเร็จรูป ในอำเภอเมือง จังหวัดเชียงใหม่ ผู้บริโภคส่วนใหญ่เห็นความสำคัญของคุณประโยชน์ของอาหารในระดับมาก และมีความต้องการในการรับประทานผักและธัญพืชในปริมาณที่มากขึ้น และมีปัจจัยในการเลือกรับประทานอาหารคือ ความสะอาด ถูกสุขอนามัย มีมาตรฐานการผลิต และเห็นว่าผักอบแห้งกึ่งสำเร็จรูปสามารถนำมาผสมได้ดีในอาหารกึ่งสำเร็จรูป เช่น ข้าวต้ม โจ๊ก เพื่อเพิ่มคุณค่าทางอาหารในรูปของใยอาหาร และ

สารอาหารจากผักและธัญพืช สามารถรับประทานได้ทุกมื้อ แต่ผู้บริโภคก็เกรงว่าคุณค่าสารอาหารบางชนิดในผักอบแห้งจะลดลง รสชาติไม่อร่อยเท่าผักสดและธัญพืชปรุงเสร็จใหม่ และไม่มีความมั่นใจด้านความปลอดภัยในการบริโภค

2.2 ทฤษฎีการอบแห้ง

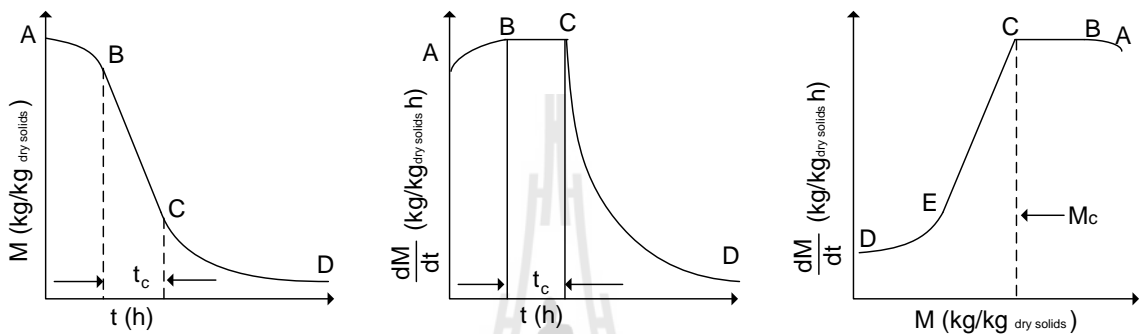
การอบแห้ง (Drying) คือการกำจัดความชื้นหรือน้ำที่มีอยู่ในวัสดุให้ลดลงจนมีความชื้นอยู่ในปริมาณที่ปลอดภัยต่อการเก็บรักษา และมีค่าอีกค่าหนึ่งซึ่งเรามักจะพบอยู่เป็นประจำคือ การทำแห้ง (Dehydration) ซึ่งเป็นการกำจัดความชื้นหรือน้ำออกจากวัสดุจะกระทั่งวัสดุนั้นไม่มีความชื้นหรือเข้าไปใกล้มวลแห้ง

การอบแห้งเป็นกระบวนการหลังการเก็บเกี่ยวที่สำคัญกระบวนการหนึ่งเพื่อให้ผลผลิตทางการเกษตรมีความเหมาะสมต่อการเก็บรักษา คือสามารถยืดอายุการเก็บรักษาไว้ได้นานโดยไม่เสียหายเนื่องจากการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ ทั้งนี้เนื่องจากผลผลิตทางการเกษตรส่วนใหญ่จะมีความชื้นค่อนข้างสูงขณะทำการเก็บเกี่ยวทำให้เก็บรักษาได้ไม่นาน การอบแห้งจะช่วยให้สามารถเก็บรักษาผลผลิตได้เป็นระยะเวลายาวนานขึ้น ผลผลิตทางการเกษตรที่สำคัญและต้องทำการอบแห้งได้แก่ ธัญพืช ผลไม้ ผลิตภัณฑ์ผลไม้แช่อิ่ม ผัก สมุนไพร เป็นต้น

การอบแห้งส่วนใหญ่ใช้การถ่ายเทความร้อนไปยังวัสดุที่ชื้นเพื่อไล่ความชื้นออกโดยการระเหย (สมชาติ, 2540) ปัจจัยที่มีความสำคัญต่อการอบแห้ง ได้แก่ อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ อัตราการไหลของอากาศ และประสิทธิภาพของเครื่องอบแห้ง โดยพฤติกรรมการอบแห้งโดยใช้ลมร้อนเป็นตัวกลางในการพาความชื้นออกจากวัสดุ เมื่อสมมติให้ อุณหภูมิ ความชื้นและความเร็วของอากาศเหนือผิวของวัสดุอบแห้งมีค่าคงที่ตลอดกระบวนการและมีการถ่ายเทความร้อนสู่วัสดุโดยการพาความร้อน การเปลี่ยนแปลงความชื้นของวัสดุตลอดกระบวนการอบแห้งแสดงในภาพที่ 2.1 โดยแบ่งการอบแห้งออกเป็น 3 ช่วงคือ

ช่วง A-B ช่วงนี้เป็นช่วงสภาวะที่ผิวของวัสดุเข้าสู่สมดุลกับอากาศเกิดขึ้นเมื่อเริ่มทำการอบแห้ง ความร้อนจากลมร้อนจะถ่ายเทสู่ผิววัสดุจนถึงค่า ๆ หนึ่งซึ่งมีความสมดุลระหว่างผิววัสดุกับอากาศ

ช่วง B-C ช่วงนี้เป็นช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ (constant rate period of drying) ช่วงนี้ผิววัสดุยังคงชุ่มไปด้วยน้ำซึ่งจะถูกนำออกจากผิววัสดุด้วยการระเหยซึ่งอัตราการอบแห้งในช่วงนี้จะขึ้นอยู่กับอัตราการถ่ายเทความร้อนไปยังผิวของการอบแห้ง อัตราการถ่ายเทความร้อนมีความสมดุลกับอัตราการถ่ายเทความร้อนจึงทำให้อุณหภูมิที่ผิวของวัสดุอบแห้งคงที่ ซึ่งสอดคล้องกับอุณหภูมิกระเปาะเปียกของอากาศอบแห้ง



ภาพที่ 2.1 การลดลงของความชื้นวัสดุ

ที่มา: Brennan et al. (1990)

ช่วง C-D ช่วงนี้เป็นช่วงอัตราการอบแห้งลดลง (falling rate period) เนื่องจากปริมาณความชื้นภายในเนื้อวัสดุเคลื่อนที่มาสู่ผิวด้านนอกลดลง ณ จุด C ในภาพที่ 2.1 อัตราการอบแห้งเริ่มลดลงความชื้นของวัสดุที่จุดนี้เรียกว่าความชื้นวิกฤต เมื่อกระบวนการอบแห้งดำเนินต่อไปอุณหภูมิที่ผิวของวัสดุจะเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตลอดกระบวนการ โดยปกติช่วงอัตราการอบแห้งลดลงประกอบไปด้วยสองช่วงคือ ช่วงของการอบแห้งลดลงส่วนที่ 1 (C-E) ช่วงนี้ผิวของวัสดุจะแห้งและอัตราการอบแห้งลดลง ช่วงของการอบแห้งลดลงส่วนที่ 2 (E-D) ช่วงนี้ระนาบของการระเหยจะเคลื่อนตัวเข้าสู่ภายในเนื้อวัสดุและผลกระทบจากปัจจัยภายนอก เช่น อัตราการไหลของอากาศ มีค่าน้อยลง เมื่อพิจารณาตลอดกระบวนการอบแห้งจะพบว่าช่วงของการอบแห้งลดลงเป็นช่วงหลักที่เกิดขึ้น

อัตราการอบแห้งวัสดุโดยทั่วไปที่ใช้ความร้อนเป็นตัวกลางในการส่งผ่านความร้อนจะเกิดขึ้นช้าหรือเร็วขึ้นมีปัจจัยที่สำคัญซึ่งมีผลต่ออัตราการอบแห้งคือ

1. ลักษณะทางธรรมชาติของวัสดุ เป็นปัจจัยที่สำคัญที่สุดที่มีผลต่ออัตราการอบแห้งของวัสดุ ถ้าสภาพทางธรรมชาติของวัสดุเอื้ออำนวยต่อการส่งผ่านความร้อนไปยังโมเลกุลของน้ำภายในเนื้อวัสดุและเอื้ออำนวยต่อการเคลื่อนที่ของไอน้ำออกจากวัสดุ เช่น วัสดุที่มีโครงสร้างเป็นรูพรุน โมเลกุลของน้ำในเนื้อวัสดุสามารถเคลื่อนที่ออกมาได้ง่ายทำให้อัตราการอบแห้งเร็วขึ้น

2. ขนาดและรูปร่างของวัสดุ วัสดุที่มีขนาดและรูปร่างที่ทำให้อัตราส่วนของพื้นที่ต่อปริมาตรมาก จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการส่งผ่านความร้อนให้ทั่วชิ้นวัสดุทำให้การระเหยน้ำออกจากเนื้อวัสดุดีขึ้น อัตราการอบแห้งจึงเร็วขึ้น

3. ปริมาณและการจัดเรียงวัสดุ วัสดุที่นำมาจัดเรียงซ้อนกันหลาย ๆ ชั้นในถาดทำให้ปริมาณของวัสดุต่อถาดมากเกินไปจะทำให้วัสดุที่อยู่บริเวณตรงกลางได้รับความร้อนไม่ทั่วถึงทำให้บริเวณนั้นมีอัตราการอบแห้งที่ช้า การจัดเรียงที่เหมาะสมควรทำการจัดเรียงเป็นแบบชั้นบางเพื่อให้วัสดุได้รับความร้อนอย่างสม่ำเสมอ

4. อุณหภูมิของอากาศร้อน เมื่ออุณหภูมิของอากาศร้อนสูงขึ้นอัตราการอบแห้งจะเร็วขึ้น เนื่องจากความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิของอากาศร้อนกับวัสดุมีมากทำให้การถ่ายเทความร้อนสู่ น้ำในเนื้อวัสดุได้ดีจึงทำให้น้ำในเนื้อวัสดุเคลื่อนที่และระเหยได้เร็วขึ้น ถึงแม้ว่าอุณหภูมิที่สูงจะทำให้ อัตราการอบแห้งเร็วขึ้นแต่ก็ต้องคำนึงถึงความเหมาะสมกับวัสดุที่ใช้ในการอบแห้งด้วย

5. ความชื้นของอากาศร้อน หากความชื้นของอากาศร้อนมีค่ามากจะมีผลให้การเคลื่อนที่ของน้ำและการระเหยของไอน้ำออกจากเนื้อวัสดุได้ยาก

6. ความดันของบรรยากาศ การอบแห้งโดยทั่วไปมักทำที่ความดันหนึ่งบรรยากาศ ถ้าหากมีการลดความดันของบรรยากาศในขณะที่ทำการอบแห้งจะทำให้อัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้น เนื่องจากจะทำให้จุดเดือดของน้ำลดลง ซึ่งการอบแห้งประเภทนี้เหมาะกับการอบแห้งวัสดุที่เสื่อมคุณภาพได้ง่ายเนื่องจากความร้อน เครื่องอบแห้งมีการลดความดันในสภาวะการอบแห้งเช่น เครื่องอบแห้งสุญญากาศแบบลูกกลิ้ง (Vacuum drum drier) เป็นต้น

7. ความเร็วลมร้อน ถ้าความเร็วของลมร้อนมีค่ามากจะทำให้เกิดการระเหยของน้ำที่ผิวหน้าวัสดุได้ดีขึ้นทำให้อัตราการอบแห้งเร็วขึ้น

8. สมบัติเชิงความร้อนและฟิสิกส์ของวัสดุ คุณสมบัติเชิงความร้อนของวัสดุที่เกี่ยวข้องกับการอบแห้งคือ ความร้อนจำเพาะ สภาพการนำความร้อน และการแพร่ความร้อน ส่วนคุณสมบัติทางฟิสิกส์ ได้แก่ ความหนาแน่นจริง ความหนาแน่นปรากฏ และสัดส่วนช่องว่างอากาศในกองวัสดุ

การส่งผ่านความร้อนภายในผลิตภัณฑ์เกิดขึ้นโดยการนำเนื่องจาก internal gradient ของอุณหภูมิและมีเพียงเล็กน้อยที่เกิดจากการพาเนื่องจากการเคลื่อนที่ของความชื้น การเคลื่อนที่ของความชื้นในวัสดุอาหารอาจเกิดขึ้นจากกลไกที่ต่างกันคือ

1. Capillary flow เนื่องจาก gradients ของ capillary suction pressure
2. การแพร่กระจายของเหลวเนื่องจาก gradient ของความเข้มข้น
3. การแพร่กระจายของไอเนื่องจาก partial vapor-pressure gradients
4. Viscous flow เนื่องจาก total pressure gradient ซึ่งมีสาเหตุมาจากความดันภายนอกหรืออุณหภูมิที่สูง

การถ่ายเทมวลจากผลิตภัณฑ์ไปสู่สิ่งแวดล้อมเกิดขึ้นเนื่องจากการพาความร้อน ซึ่งเป็นผลมาจากความแตกต่างของ partial vapor pressure ที่ boundary layer ในบริเวณรอยต่อของอากาศและผลิตภัณฑ์ การระเหยโดยตรงเกิดขึ้นเมื่อความดันไอในผิวมีค่าเท่ากับความดันบรรยากาศอย่างเช่นในกรณีนี้ของ vacuum drying และ freeze drying

การสมดุลความร้อนอย่างง่ายของกระบวนการอบแห้งด้วยลมร้อน Brooker et al. (1992) ได้แนะนำสมการซึ่งทำการสมดุลพลังงานของอากาศกับความชื้นของวัสดุ โดยสมมติให้ความร้อนแฝงของการระเหยน้ำจากวัสดุชื้น มีค่าเท่ากับการเปลี่ยนแปลงความร้อนสัมผัสของอากาศ ซึ่งมีรูปสมการคือ

$$m_w h_{fg} = \dot{m}_a c_a (T_{ai} - T_{af})t \quad (2.1)$$

เมื่อ m_w คือ มวลของน้ำที่ระเหยออกจากวัสดุ (kg)
 h_{fg} คือ ความร้อนแฝงของการระเหยน้ำ (kJ/kg)
 \dot{m}_a คือ อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ (kg/s)
 c_a คือ ความร้อนจำเพาะของอากาศ (kJ/kg °C)

- T_{ai} คือ อุณหภูมิอากาศก่อนอบแห้ง ($^{\circ}\text{C}$)
 T_{af} คือ อุณหภูมิของอากาศหลังอบแห้ง ($^{\circ}\text{C}$)
 t คือ เวลาที่ใช้ในการอบแห้ง (s)

สำหรับปริมาณน้ำที่ระเหยออกจากวัสดุ สามารถหาได้จากความสัมพันธ์ระหว่าง น้ำหนักเริ่มต้น ความชื้นเริ่มต้น และความชื้นสุดท้ายของวัสดุ ดังสมการคือ

$$m_w = m_i \left(1 - \frac{M_{df} + 1}{M_{di} + 1} \right) \quad (2.2)$$

เมื่อ m_i คือ น้ำหนักเริ่มต้นของวัสดุ (kg)

M_{di} คือ ความชื้นเริ่มต้นของวัสดุมาตรฐานแห้ง (เศษส่วน)

M_{df} คือ ความชื้นสุดท้ายของวัสดุมาตรฐานแห้ง (เศษส่วน)

2.3 ความชื้นวัสดุ

ปริมาณความชื้นของวัสดุจะอธิบายอยู่ในรูปของเปอร์เซ็นต์ความชื้น ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือความชื้นมาตรฐานเปียกและความชื้นมาตรฐานแห้ง

ความชื้นมาตรฐานเปียก จะแสดงน้ำหนักของน้ำที่มีอยู่ต่อน้ำหนักรวมของวัสดุ โดยปกติจะแสดงอยู่ในรูปเปอร์เซ็นต์ ปริมาณความชื้นมาตรฐานเปียกนิยมใช้ในทางการค้า เขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$M_w = \frac{m_w}{m_w + m_d} \quad (2.3)$$

ความชื้นมาตรฐานแห้ง ซึ่งจะใช้ในงานวิจัยทางวิศวกรรมและวิทยาศาสตร์ เนื่องจากมวลแห้งของวัสดุไม่เปลี่ยนแปลงในระหว่างการอบแห้งดังนั้นจึงง่ายในการวิเคราะห์การถ่ายเทความชื้น ความชื้นมาตรฐานแห้งหาได้จาก

$$M_d = \frac{m_w}{m_d} \quad (2.4)$$

จากสมการ (3) และ (4) จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นมาตรฐานเปียกและความชื้นมาตรฐานแห้งดังนี้

$$M_d = \frac{M_w}{1 - M_w} \quad (2.5)$$

และ

$$M_w = \frac{M_d}{1 + M_d} \quad (2.6)$$

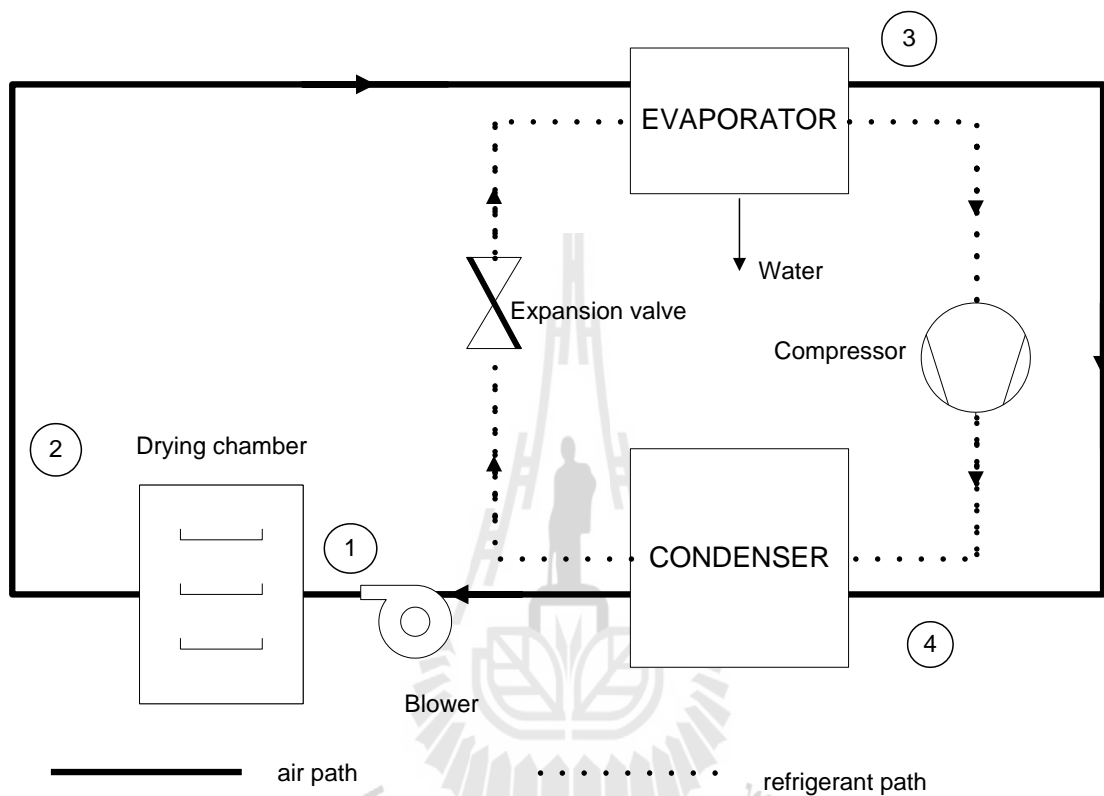
เมื่อ M_w คือ ความชื้นมาตรฐานเปียก (w.b, อัตราส่วน)
 M_d คือ ความชื้นมาตรฐานแห้ง (d.b, อัตราส่วน)
 m_w คือ มวลของความชื้น (kg)
 m_d คือ มวลของวัสดุแห้ง (kg)

2.4 การอบแห้งด้วยปั๊มความร้อน

การทำงานของเครื่องอบแห้งระบบปั๊มความร้อนแสดงในภาพที่ 2.2 โดยอากาศอบแห้งจะไหลเข้าสู่ห้องอบแห้งที่ตำแหน่ง 1 อากาศได้รับความชื้นจากวัสดุเป็นอากาศร้อนชื้นและออกจากห้องอบแห้งที่ตำแหน่ง 2 และเข้าสู่เครื่องทำระเหย (Evaporator) เพื่อทำการลดความชื้นโดยการควบแน่นน้ำออกจากอากาศ กระบวนการจาก 2-3 ความร้อนแฝงของการระเหยจะถูกใช้ในการระเหยสารทำความเย็นในเครื่องทำระเหยจากนั้นสารทำความเย็นจะถูกอัดด้วยเครื่องอัดไอ (Compressor) ทำให้มีอุณหภูมิและความดันสูงแล้วส่งต่อไปยังเครื่องควบแน่น (Condenser) อากาศเย็นที่ผ่านการลดความชื้นจะได้รับความร้อนคืนกลับเมื่อไหลผ่านเครื่องควบแน่นจากตำแหน่ง 4-1

ส่วนสารทำความเย็นก็จะไหลจากเครื่องควบแน่นสู่เครื่องทำระเหยโดยผ่านวาล์วขยายเพื่อทำการลดความดันให้ต่ำลง การอบแห้งระบบปั๊มความร้อนสามารถแบ่งออกตามลักษณะการทำงานได้ 3 ระบบคือ

1. การอบแห้งระบบเปิด (open system) เมื่ออากาศร้อนซึ่งมีความชื้นต่ำถูกนำไปใช้อบแห้งแล้วทำให้มีความชื้นสูงขึ้น อากาศนี้จะถูกปล่อยทิ้งออกสู่บรรยากาศทั้งหมด ซึ่งการอบแห้งระบบเปิดนี้จะมีการใช้ประโยชน์จากระบบปั๊มความร้อนในการอุ่นอากาศเพียงอย่างเดียวหรืออาจมีการลดความชื้นอากาศก่อนปล่อยสู่บรรยากาศก็ได้ ลักษณะการอบแห้งระบบเปิดแสดงในภาพที่ 2.3 (ก)



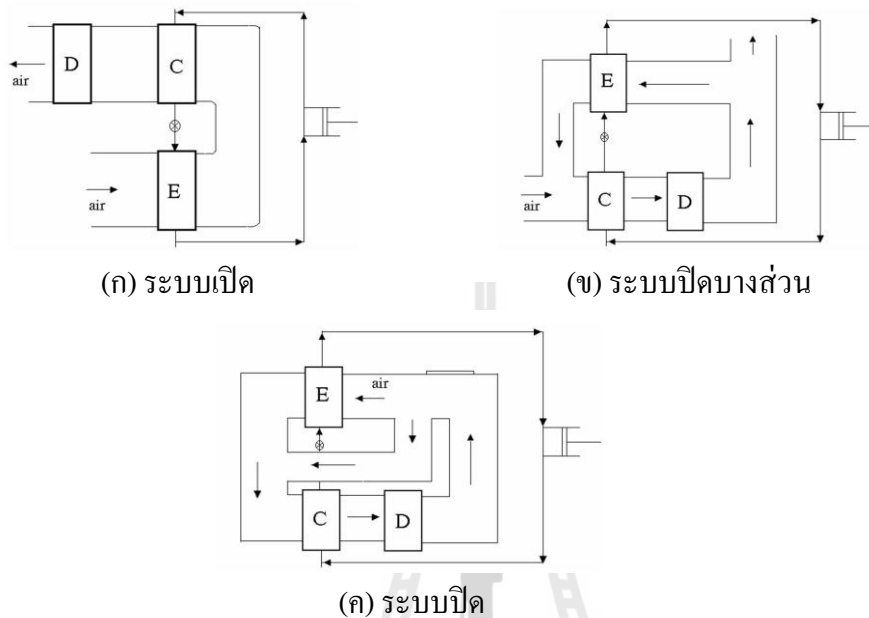
ภาพที่ 2.2 หลักการทำงานทั่วไปของเครื่องอบแห้งระบบปั๊มความร้อน

ที่มา: ดัดแปลงจาก Chua et al. (2000)

2. การอบแห้งระบบปิดบางส่วน (partial closed system) เมื่ออากาศร้อนซึ่งมีความชื้นต่ำถูกนำไปใช้อบแห้งแล้ว จะถูกปล่อยทิ้งออกสู่บรรยากาศส่วนหนึ่ง และอีกส่วนหนึ่งจะถูกลดความชื้นก่อนนำกลับมาใช้ผสมกับอากาศใหม่ การอบแห้งรูปแบบนี้จึงมีการใช้ประโยชน์จากปั๊มความร้อนทั้งการอุ่นอากาศและลดความชื้นอากาศ ลักษณะการอบแห้งระบบปิดบางส่วนแสดงในภาพที่ 2.3 (ข)

3. การอบแห้งระบบปิด (closed system) การอบแห้งรูปแบบนี้จะนำอากาศที่ผ่านการอบแห้งแล้วกลับมาใช้ใหม่ทั้งหมด โดยอากาศที่นำกลับมาใช้ใหม่จะถูกแบ่งออกเป็นสองส่วนคือ

ส่วนแรกจะถูกนำไปลดความชื้นที่เครื่องทำระเหย อีกส่วนหนึ่งจะนำมาผสมกับอากาศส่วนแรกที่ผ่านการลดความชื้นแล้ว การอบแห้งระบบปิดนี้จึงมีการใช้ประโยชน์จากระบบปั๊มความร้อนทั้งการอุ่นอากาศและการลดความชื้น ลักษณะการอบแห้งระบบปิดแสดงในภาพที่ 2.3 (ค)



ภาพที่ 2.3 ระบบการทำงานของเครื่องอบแห้งระบบปั๊มความร้อน

เนื่องจากเครื่องอบแห้งระบบปั๊มความร้อนเป็นการรวมเอาส่วนประกอบหลักสองส่วนเข้าด้วยกันคือ ส่วนอบแห้ง กับระบบปั๊มความร้อน ดังนั้นการออกแบบระบบปั๊มความร้อนจึงต้องมีความสัมพันธ์กับส่วนอบแห้ง สำหรับการอบแห้งด้วยระบบปั๊มความร้อนแบบปิด เมื่อพิจารณาที่วงจรอากาศ (ภาพที่ 2.3 (ค)) จะพบว่าอากาศหลังการอบแห้งที่เวียนกลับมาใช้ใหม่จะถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ส่วนแรกนำไปลดความชื้นที่เครื่องทำระเหย อีกส่วนจะไหลข้ามเครื่องทำระเหย (bypass) ไปผสมกับอากาศส่วนแรก แล้วนำไปอุ่นที่เครื่องควบแน่นต่อไป การออกแบบจึงเริ่มจากการหาขนาดของเครื่องทำระเหย ซึ่งจากการสมดุลความพลังงานจะได้ว่า

$$Q_e = \dot{m}_{ac} c_a (T_{ei} - T_{eo}) \quad (2.7)$$

- เมื่อ Q_e คือ อัตราการทำความเย็นของเครื่องทำระเหย (kW)
 \dot{m}_{ac} คือ อัตราการไหลอากาศผ่านเครื่องทำระเหย (kg/s)
 T_{ei} คือ อุณหภูมิอากาศก่อนเข้าเครื่องทำระเหย ($^{\circ}\text{C}$)
 T_{eo} คือ อุณหภูมิของอากาศออกจากเครื่องทำระเหย ($^{\circ}\text{C}$)

ในการอบแห้งระบบปิดจะมีเครื่องควบแน่น 2 ชุด เป็นชุดเครื่องควบแน่นตัวในซึ่งใช้ในการอุ่นอากาศ และเครื่องควบแน่นตัวนอกใช้สำหรับระบายความร้อนส่วนเกินออกจากระบบ ในการหาขนาดเริ่มจากเครื่องควบแน่นตัวใน ซึ่งจำเป็นต้องทราบอุณหภูมิของอากาศผสมระหว่างอากาศที่ออกจากเครื่องทำระเหยกับอากาศ bypass ซึ่งเป็นสภาวะอากาศก่อนเข้าเครื่องควบแน่น ซึ่งจากการสมดุลความร้อนสัมผัสของอากาศผสมจะได้ว่า

$$\dot{m}_a T_{ci} = \dot{m}_{bp} T_f + \dot{m}_{ae} T_{co} \quad (2.8)$$

เมื่อ \dot{m}_a คือ อัตราการไหลของอากาศผสม (kg/s)
 \dot{m}_{bp} คือ อัตราการไหลของอากาศ bypass (kg/s)
 T_{ci} คือ อุณหภูมิอากาศก่อนเข้าเครื่องควบแน่น ($^{\circ}\text{C}$)
 T_f คือ อุณหภูมิของอากาศหลังการอบแห้ง ($^{\circ}\text{C}$)

เมื่อทราบอุณหภูมิของอากาศผสมแล้ว ก็สามารถหาขนาดของเครื่องควบแน่นตัวในได้จากสมการการถ่ายเทความร้อนคือ

$$Q_{cin} = \dot{m}_a c_a (T_{co} - T_{ci}) \quad (2.9)$$

เมื่อ Q_{cin} คือ อัตราการทำความร้อนของเครื่องควบแน่นตัวใน (kW)
 T_{co} คือ อุณหภูมิของอากาศออกจากเครื่องควบแน่น ($^{\circ}\text{C}$)

เมื่อได้ขนาดของเครื่องทำระเหยและเครื่องควบแน่นตัวในแล้ว สามารถนำไปหาขนาดของเครื่องอัดไอได้จาก catalogue ของบริษัทผู้ผลิต และเมื่อได้เครื่องอัดไอแล้วสามารถหาขนาดของเครื่องควบแน่นตัวนอกได้จาก

$$Q_{cex} = Q_e + W_c - Q_{in} \quad (2.10)$$

เมื่อ Q_{cex} คือ อัตราการทำความร้อนของเครื่องควบแน่นตัวนอก (kW)
 W_c คือ กำลังของเครื่องอัดไอ (kW)

สมรรถนะของเครื่องอบแห้งระบบปั๊มความร้อนจะพิจารณาเป็นสองส่วนคือ

1. ประสิทธิภาพทางพลังงานของปั๊มความร้อนค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะ (coefficient of performance, COP) ซึ่งหาได้จาก

$$\text{COP} = \frac{\text{useful heat output}}{\text{power input}} = \frac{Q_{\text{cin}}}{W_c} \quad (2.11)$$

ค่าประสิทธิภาพสูงสุดทางทฤษฎีของปั๊มความร้อนคือ Carnot efficiency ซึ่งหาได้จาก

$$\text{COP}_{\text{carnot}} = \frac{T_{\text{condenser}}}{T_{\text{condenser}} - T_{\text{evaporator}}} \quad (2.12)$$

ซึ่งค่า ประสิทธิภาพการใช้งานจะมีค่าประมาณ 40 ถึง 50% ของค่าทางทฤษฎี Chua et al. (2000)

2. ประสิทธิภาพทางด้านกรอบแห้งแบ่งสามารถพิจารณาได้จาก

อัตราการอบแห้ง (Drying Rate, DR) คิดจากปริมาณน้ำที่ระเหยออกจากวัสดุต่อระยะเวลาในการอบแห้ง หรือปริมาณความชื้นต่อระยะเวลาในการอบแห้ง คือ

$$\text{DR} = \frac{m_i - m_f}{t} \quad (2.13)$$

$$\text{DR} = \frac{M_{\text{di}} - M_{\text{df}}}{t} \quad (2.14)$$

อัตราการระเหยน้ำจำเพาะ (Specific Moisture Extraction Rate, SMER) คือปริมาณน้ำที่ระเหยออกจากวัสดุต่อพลังงานที่ใช้ทั้งหมดตลอดการอบแห้ง

$$\text{SMER} = \frac{m_i - m_f}{P_e} \quad (2.15)$$

ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (Specific Energy Consumption, SEC) เป็นพลังงานที่ใช้ต่อปริมาณน้ำที่ระเหยซึ่งเป็นค่าส่วนกลับของ SMER

$$SEC = \frac{3.6 Pe}{m_i - m_f} \quad (2.16)$$

อัตราการควบแน่น (Moisture Extraction Rate, MER) คือปริมาณน้ำควบแน่นที่เครื่องทำระเหยต่อเวลาที่ใช้อบแห้ง

$$MER = \frac{m_{wc}}{t} \quad (2.17)$$

เมื่อ	DR	คือ อัตราการอบแห้ง, kg_{water}/h หรือ %db/h
	m	คือ น้ำหนักของวัสดุ, kg
	M_d	คือ ความชื้นวัสดุ, %db
	t	คือ ระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง, h
	SMER	คือ อัตราการระเหยน้ำจำเพาะ, kg_{water}/kWh
	Pe	คือ พลังงานไฟฟ้าที่ใช้, kWh
	SEC	คือ ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ, MJ/kg_{water}
	MER	คือ อัตราควบแน่นน้ำ, kg/h

ตัวห้อย

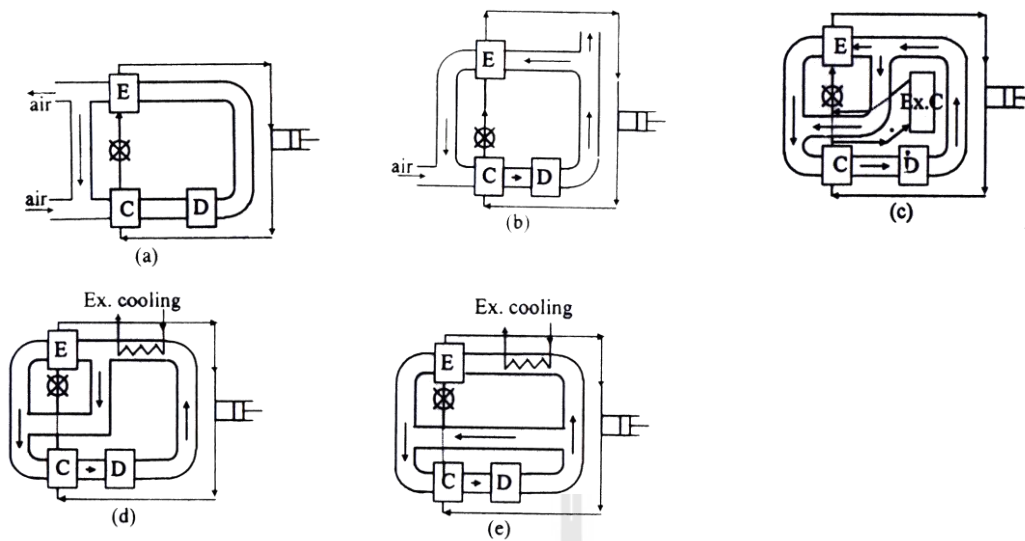
- i คือ ก่อนอบแห้ง
- f คือ หลังอบแห้ง
- wc คือ น้ำควบแน่น

เนื่องจากเครื่องอบแห้งระบบปั๊มความร้อนเป็นเครื่องอบแห้งที่สามารถทำการอบแห้งได้หลากหลายรูปแบบ จึงมีนักวิจัยได้ทำการศึกษาและพัฒนาเครื่องอบแห้งระบบปั๊มความร้อนเพื่อการอบแห้งวัสดุเกษตรและอาหารในรูปแบบต่างๆ ดังต่อไปนี้

Sosle et al. (2003) ทำการออกแบบและสร้างเครื่องอบแห้งระบบปั๊มความร้อน โดยปั๊มความร้อนมีขนาด 2.3 kW และมี external condenser เป็นแบบ water-cooled ทำการทดลองอบแห้ง apple

เปรียบเทียบกับ hot air drying พบว่าผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งระบบปั๊มความร้อนมีการคืนน้ำกลับได้ดีกว่า และมีค่า water activity ต่ำกว่าที่ค่าความชื้นเท่ากัน แต่ในด้านความสิ้นเปลืองพลังงานกับพบว่าเครื่องอบแห้งระบบปั๊มความร้อนสิ้นเปลืองพลังงานมากกว่า ซึ่งเป็นผลเนื่องมาจากการสูญเสียความร้อนของระบบออกไปทาง external condenser ซึ่งต่างจากผลการทดลองของ Prasertsan and Sean-saby (1998) ที่ทำการทดลองอบแห้งกล้วยโดยใช้เครื่องอบแห้งระบบปั๊มความร้อนเปรียบเทียบกับกรอบแห้งด้วยลมร้อนซึ่งใช้ก๊าซหุงต้มและน้ำมันดีเซลเป็นเชื้อเพลิง พบว่าการอบแห้งด้วยปั๊มความร้อนจะเสียค่าใช้จ่ายในการทำงานที่ต่ำกว่าซึ่งผลการศึกษาก็ได้เป็นไปในทิศทางเดียวกับ Meyer and Greyvenstein (1992) ที่นำเอาระบบปั๊มความร้อนมาประยุกต์ใช้กับการอบแห้งเมล็ดพืชแทนที่การอบแห้งโดยใช้พลังงานจากขดลวดความร้อนและเชื้อเพลิงดีเซล แต่เนื่องจากการอบแห้งเมล็ดพืชจะกระทำเพียงไม่กี่ครั้งในรอบปี ดังนั้นเพื่อให้คุ้มค่ากับการลงทุนจึงแนะนำว่าควรที่จะนำระบบปั๊มความร้อนไปใช้ประโยชน์อย่างอื่นร่วมด้วย เช่นการทำน้ำอุ่น เป็นต้น

นอกจากนี้ Saensabai and Prasertsan (2003) ได้ทำการศึกษาสมรรถนะของเครื่องอบแห้งระบบปั๊มความร้อนซึ่งมีส่วนประกอบต่างๆ กัน ดังแสดงในภาพที่ 2.4 ซึ่งเป็นการศึกษาทั้งสามรูปแบบการทำงานคือ ระบบเปิด ระบบปิดบางส่วน ระบบปิด โดยมุ่งเน้นหาระบบการทำงานที่เหมาะสมกับสภาพอากาศร้อนชื้น โดยการศึกษาได้ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ Prasertsan et al. (1996) พัฒนาขึ้นซึ่งเป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับระบบเปิดและระบบปิดบางส่วนมาใช้ในการจำลองสถานการณ์และใช้ผลการทดลองของ Prasertsan et al. (1997) มาทำการพิสูจน์เปรียบเทียบ แต่ว่าผลการทดลองในปี 1997 ของ Prasertsan et al. นี้ไม่ครอบคลุมถึงช่วงอุณหภูมิที่ทำการศึกษาและการศึกษานี้ไม่ได้มุ่งเน้นที่จะศึกษาถึงผลกระทบที่เกิดจากการจัดเรียงตำแหน่งของอุปกรณ์ในรูปแบบ (d) และ (e) ด้วย ผลจากการศึกษาทั้ง 5 รูปแบบนี้พวกเขาสรุปว่าเครื่องอบแห้งที่ทำงานเป็นแบบระบบปิดบางส่วนมีความเหมาะสมกับสภาวะอากาศร้อนชื้นมากที่สุดและยังพบว่าการทำงานที่เหมาะสมขึ้นอยู่กับอัตราการอบแห้งและสภาวะอากาศแวดล้อมด้วย



C = condenser, D = dryer, E = evaporator, Ex.C = external condenser,
Ex. Cooling = external cooling

ภาพที่ 2.4 องค์ประกอบของเครื่องอบแห้งระบบปั๊มความร้อน

ที่มา: Saensabi and Prasertsan, 2003

สุทธิศักดิ์ (2543) ได้ทำการพัฒนาเครื่องอบแห้งระบบปั๊มความร้อนซึ่งทำงานเป็นแบบระบบปิด โดยการนำชุดกลักความร้อนมาช่วยลดความชื้นและการคืนความร้อนกลับของอากาศ เครื่องอบแห้งประกอบด้วย ห้องอบแห้งขนาด $0.65 \times 0.58 \times 0.55 \text{ m}^3$ ภายในบรรจุผลิตภัณฑ์ได้จำนวน 8 ถาด มีพื้นที่ใช้งาน 2.5 m^2 ใช้ระบบปั๊มความร้อนขนาดหนึ่งตันความเย็นและชุดกลักความร้อนขนาด 1.6 กิโลวัตต์ การทำงานของเครื่องเป็นระบบปิดมีอุณหภูมิอบแห้ง $50 \text{ }^\circ\text{C}$ จากการประเมินสมรรถนะจากการระเหยน้ำจำนวน 4 กิโลกรัม ที่อัตราการไหลอากาศ 0.363, 0.447 และ 0.536 kg/s อัตราส่วนอากาศ Bypass 60-67% เป็นเวลา 3 ชั่วโมง พบว่า ค่า SMER (Specific Moisture Extraction Rate) ของระบบอยู่ในช่วง 0.330-0.3338 kg/kWh ค่า MER (Moisture Extraction Rate) ทำได้สูงสุด 0.590 kg/h และค่า COP (Coefficient Of Performance) ของระบบปั๊มความร้อนอยู่ในช่วง 3.31-4.09 ประสิทธิภาพของกลักความร้อนอยู่ในช่วง 0.194-0.212 และจากการทดลองอบแห้งเห็ดฟางจำนวน 6 การทดลอง ที่อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศเฉลี่ยอยู่ระหว่าง $0.544 - 0.568 \text{ kg/s}$ อัตราส่วนอากาศ Bypass ที่เหมาะสมมีค่าอยู่ระหว่าง 65.42 - 67.82 % เมื่อพิจารณาค่าเฉลี่ยของอัตราการอบแห้งตลอดการทดลองมีค่าอยู่ระหว่าง $0.530 - 1.019 \text{ kg/h}$ โดยอัตราการอบแห้งจะขึ้นอยู่กับปริมาณของผลผลิตและความชื้นเริ่มต้นของแต่ละการทดลอง ในด้านการใช้พลังงานพบว่าอัตราการใช้พลังงานไฟฟ้าเฉลี่ยต่อชั่วโมงอยู่ระหว่าง 1.71- 1.83

kWh ซึ่งคิดเป็นปริมาณน้ำที่ระเหยต่อหน่วยพลังงาน (SMER) ได้ค่าระหว่าง 0.305 -0.594 kg/kWh คุณภาพของผลิตภัณฑ์หลังการอบแห้งจากการทดสอบเทียบสีมาตรฐานพบว่ามีความสม่ำเสมออยู่ในค่ามาตรฐานเดียวกัน และจากรายงานของ Tawarat and Somyot (2007) พบว่าคุณภาพของไพลที่ได้หลังการอบแห้งด้วยระบบบ่มความร้อนมีคุณภาพทางด้านสีที่ดีกว่าการทำแห้งไพลด้วยวิธีการตากแดดอย่างเห็นได้ชัด นอกจากนี้องค์ประกอบทางเคมีของไพลก็ไม่แตกต่างจากไพลสด ดังนั้นการอบแห้งด้วยระบบบ่มความร้อนจึงสามารถที่จะยังคงคุณภาพของผลิตไว้ได้ โดยเฉพาะไพลซึ่งเป็นพืชที่มีน้ำมันหอมระเหยซึ่งจำเป็นต้องระมัดระวังในเรื่องของอุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้ง

จากรายงานที่กล่าวมาข้างต้นจะเห็นว่าเครื่องอบแห้งระบบบ่มความร้อนมีศักยภาพในการอบแห้งผัก ผลไม้ และสมุนไพร ที่ต้องการคงไว้ซึ่งคุณภาพ และต้องการประหยัดพลังงานในการอบแห้ง โดยค่าอัตราการระเหยน้ำจำเพาะของการอบแห้งด้วยระบบบ่มความร้อนอาจจะสูงได้ถึง $4 \text{ kg}_{\text{water}}/\text{kWh}$ (Perera and Rahman, 1997) ทั้งนี้ก็ขึ้นอยู่กับปัจจัยอื่นๆ ด้วย เช่น ชนิดของวัสดุที่ใช้อบแห้ง ขนาดของชั้นวัสดุ อุณหภูมิและความชื้นของอากาศอบแห้ง อัตราการไหลอากาศ และการจัดเรียงวัสดุในชั้นอบแห้ง เป็นต้น



บทที่ 3

อุปกรณ์และวิธีการ

3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย

สำหรับการดำเนินโครงการวิจัยนี้ ได้ใช้ เครื่องมือ อุปกรณ์และวัสดุสำหรับการวัด และทดสอบมีรายการดังต่อไปนี้

1. เครื่องอบแห้งระบบบีบความร้อนที่ทำดำเนินการออกแบบและสร้างขึ้น ดังมีรายละเอียดแสดงในหัวข้อวิธีการ
2. ตู้อบหาความชื้นแบบลมร้อน (Hot air oven) ใช้สำหรับอบชิ้นตัวอย่างเพื่อหาความชื้นเริ่มต้นและความชื้นสุดท้าย
3. เครื่องหาความชื้นแบบอินฟราเรด
4. อุปกรณ์วัดความเร็วลม (Hot wire anemometer) ยี่ห้อ Dwyer รุ่น 471 ใช้สำหรับวัดความเร็วลมของอากาศที่ใช้ในการอบแห้งและความเร็วในท่อ Bypass
5. เครื่องวัดอุณหภูมิใช้สำหรับวัดอุณหภูมิของอากาศอบแห้งที่ตำแหน่งต่างๆ รวมทั้งอุณหภูมิของผลิตภัณฑ์อบแห้งและระบบบีบความร้อน
6. เครื่องชั่งน้ำหนักแบบดิจิทัล ความละเอียด 0.01 กรัมสำหรับชั่งน้ำหนักวัสดุอบแห้ง
7. อุปกรณ์วัดความดัน (Pressure gage) ใช้สำหรับวัดความดันของสารทำความเย็นในระบบบีบความร้อน
8. คลิปแอมป์ (Clip amp) ยี่ห้อ ITT Instrument รุ่น MX 200 ใช้สำหรับวัดกระแสไฟฟ้าที่เข้าสู่เครื่องอัดไอ
9. อุปกรณ์วัดพลังงานไฟฟ้า (Watt-hour meter) ใช้วัดพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลองอบแห้ง

10. นาฬิกาจับเวลา

11. แครอท หอมสับ และข้าวโพดหวานใช้เป็นวัสดุตัวอย่างในการอบแห้ง

3.2 วิธีการ

3.2.1 การออกแบบสร้างเครื่องอบแห้งระบบปั๊มความร้อน

เนื่องจากเครื่องอบแห้งระบบปั๊มความร้อนประกอบไปด้วยส่วนประกอบสองส่วนหลักคือ ส่วนของห้องอบแห้งและส่วนระบบปั๊มความร้อนที่สัมพันธ์กัน การออกแบบดำเนินการดังนี้

1. ขนาดห้องอบแห้ง

การออกแบบเครื่องอบแห้งได้กระทำบนขอบเขตของงานวิจัยที่กำหนดไว้ว่าปริมาตรส่วนของห้องอบแห้งมีขนาด 400 ลิตรหรือ 0.4 m^3 ซึ่งจากข้อกำหนดดังกล่าว ได้นำมาเป็นเงื่อนไขในการออกแบบขนาดห้องอบแห้งโดยเริ่มการคำนวณจาก การกำหนดขนาดของถาดใส่วัสดุขนาด $50 \text{ cm} \times 60 \text{ cm}$ เพื่อให้ผู้ปฏิบัติการทดสอบสามารถทำงานได้สะดวก

จากความกว้างและลึกของถาดได้ทำการเผื่อระยะห่างระหว่างผนังด้านข้างออกจากส่วนที่วางชั้นถาดข้างละ 10 cm และเผื่อระยะด้านหน้าและด้านหลังอีกข้างละ 5 cm ดังนั้นในส่วนของห้องอบแห้งจึงมีขนาด กว้าง \times ลึก คือ $70 \text{ cm} \times 70 \text{ cm}$ ดังนั้นจึงสามารถหาส่วนสูงของห้องอบแห้งได้ดังนี้

$$H(\text{m}) = \frac{V}{A} = \frac{0.4 \text{ m}^3}{0.7 \text{ m} \times 0.7 \text{ m}} = 0.816 \text{ m}$$

เลือกใช้ความสูงของห้องอบ 85 cm

ดังนั้นห้องอบแห้งมีขนาด กว้าง \times ลึก \times สูง คือ $70 \text{ cm} \times 70 \text{ cm} \times 85 \text{ cm}$

2. ออกแบบชั้นถาดวางวัสดุ

จำนวนถาดที่ใส่ผลิตภัณฑ์ห่อหุ้มหาได้จากข้อกำหนดเบื้องต้นดังนี้

1. กำหนดให้ถาดเป็นแบบมีขอบสูง 1 cm และระยะห่างจากขอบถึงกันถาดชั้นถัดไป 5 cm ดังนั้น ระยะห่างรวมระหว่างคือ 6 cm

2. จากความสูงของห้องอบแห้ง เพื่อระยะจากถาดชั้นบนสุดถึงผนังด้านบนของห้องอบแห้งไว้ 15 cm และจากกันถาดด้านล่างถึงผนังด้านล่างห้องอบแห้ง 10 cm

ดังนั้นจำนวนชั้นถาดหาได้ดังนี้

กำหนดให้ n คือ จำนวนช่องว่างระหว่างชั้นถาด

x คือระยะห่างระหว่างชั้นถาด (cm)

t คือระยะห่างจากถาดชั้นบนถึงผนังด้านบนของห้องอบแห้ง (cm)

b คือระยะห่างจากกันถาดชั้นล่างถึงผนังด้านล่างของห้องอบแห้ง (cm)

h คือความสูงของห้องอบแห้ง (cm)

สามารถสร้างสมการเพื่อใช้ในการคำนวณหาจำนวนชั้นถาดได้ดังนี้

$$xn + t + b = h$$

แทนค่าตัวแปรที่รู้ค่าจะได้

$$6n + 15 + 10 = 85$$

$$6n = 60$$

$$n = 10$$

นั่นคือจำนวนช่องว่างระหว่างชั้นถาด คือ 10 ช่อง หรือมีจำนวนชั้นถาด 11 ชั้น แต่เนื่องจากชั้นถาดมีความหนาและต้องสร้างครีบบนเพื่อวางชั้นถาดด้วย จึงเลือกใช้ถาดจำนวน 10 ชั้น

3. ปริมาณตัวอย่างที่ใช้สำหรับทดลองอบแห้ง

ได้ทำการทดลองเบื้องต้นเพื่อหาค่า bulk density ของ แครอท สดพบว่าที่ความชื้นเริ่มต้นเฉลี่ย 88 %wb. มีค่า bulk density 410 kg/m^3 และหอมสดสับที่ความชื้น 95 %wb. มีค่า bulk density คือ 205 kg/m^3 หากกำหนดให้การอบแห้งเป็นแบบชั้นบาง โดยให้ความหนาของการบรรจุ

ผลิตภัณฑ์อบแห้งมีความสูง 0.8 เท่าของความสูงของอบถาดจะสามารถหาปริมาณของผลิตภัณฑ์สดที่จะนำมาอบแห้งได้ดังนี้

สำหรับแครอท

$$\begin{aligned} \text{ปริมาณแครอทใน 1 ถาด} &= 410 \frac{\text{kg}}{\text{m}} \times 0.5 \text{ m} \times 0.6 \text{ m} \times 0.008 \text{ m} \\ &= 0.984 \text{ kg} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้น 10 ถาดใช้แครอท} &= 0.984 \text{ kg} \times 10 \\ &= 9.84 \text{ kg} \end{aligned}$$

นั่นคือใช้ตัวอย่างแครอทสดแห้งประมาณ 10 กิโลกรัมในการทดลองอบแห้ง 1 ครั้ง

สำหรับหอมสับ

$$\begin{aligned} \text{ปริมาณหอมสับใน 1 ถาด} &= 205 \frac{\text{kg}}{\text{m}} \times 0.5 \text{ m} \times 0.6 \text{ m} \times 0.008 \text{ m} \\ &= 0.492 \text{ kg} \end{aligned}$$

$$\text{ดังนั้น 10 ถาดใช้ตัวอย่างหอมสับ} = 4.92 \text{ kg}$$

นั่นคือในการทดลองอบแห้ง 1 ครั้งใช้ตัวอย่างหอมสับประมาณ 5 กิโลกรัม

4. ออกแบบระบบป้อนความร้อน

เนื่องจากแครอทมีลักษณะ โครงสร้างในการถ่ายเทความร้อนออกจากตัววัสดุที่ยากกว่าใบหอม สับดังนั้นในการออกแบบจึงเลือกใช้แครอทเป็นผลิตภัณฑ์หลักในการคำนวณออกแบบขนาดของชุด ระบบป้อนความร้อน โดยพิจารณาการอบแห้งแครอทภายใต้เงื่อนไขดังนี้

ความชื้นเริ่มต้น	88 %wb. หรือ 733.33 %db.
ปริมาณเริ่มต้น	10 kg
ความชื้นสุดท้ายที่ต้องการ	14 %db

ดังนั้นต้องระเหยน้ำออกจากแครอท หาได้จากสมการ

$$m_w = m_d (M_{di} - M_{df})$$

- เมื่อ m_w คือปริมาณน้ำที่ระเหย (kg_{water})
 m_d คือปริมาณมวลแห้งปราศจากน้ำ ($\text{kg}_{\text{dry solid}}$)
 M_{di} คือความชื้นเริ่มต้น (decimal, $\text{kg}_{\text{water}}/\text{kg}_{\text{dry solid}}$)
 M_{df} คือความชื้นสุดท้าย (decimal, $\text{kg}_{\text{water}}/\text{kg}_{\text{dry solid}}$)

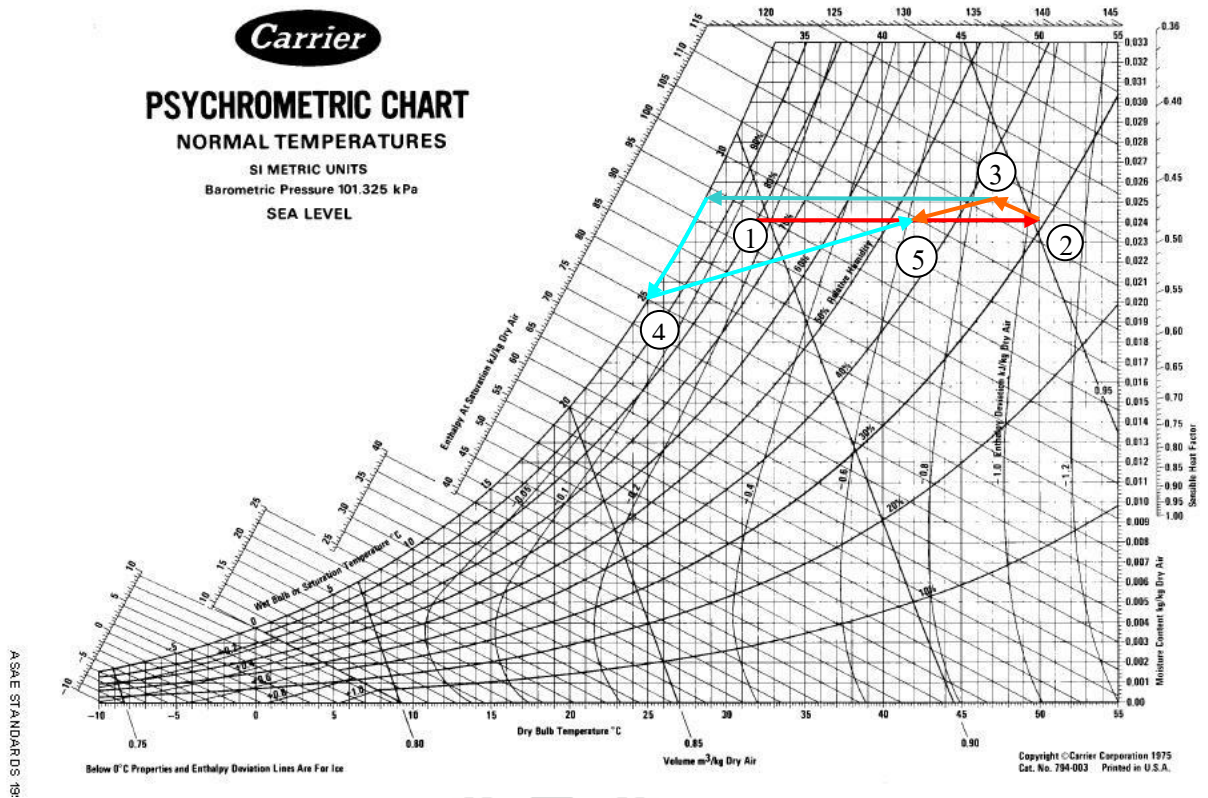
แทนค่าต่างๆ ลงในสมการ จะได้

$$m_w = \frac{10 \text{ kg}}{1 + 7.33} (7.33 - 0.14) = 8.63 \text{ kg}$$

หากใช้เวลาในการระเหยน้ำอิสระ 4 ชั่วโมง จะได้อัตราการอบแห้งคือ 2.1575 kg/h ซึ่งจากอัตราการระเหยน้ำนี้ นำไปหาอัตราการไหลของอากาศที่ใช้ในการอบแห้งโดยวิธีการทางไซโครเมตริก โดยมีกระบวนการต่างๆ ดังนี้

1. กระบวนการเพิ่มอุณหภูมิให้กับอากาศ โดยกำหนดให้อากาศเข้าเริ่มต้นคือ 32 °C, 80%rh (สภาวะอากาศเฉลี่ยของนครราชสีมา) เป็น 50 °C
2. กระบวนการอบแห้ง โดยกำหนดให้อากาศอบแห้งออกจากเครื่องอบแห้งที่อุณหภูมิ 47 °C
3. กระบวนการลดความชื้นอากาศโดยอากาศขาออกจะถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ส่วนที่ 1 นำมาลดความชื้นที่เครื่องทำระเหย โดยกำหนดให้อุณหภูมิของอากาศที่ออกจากเครื่องทำระเหยมีค่า 25 °C
4. กระบวนการผสมอากาศ อากาศส่วนที่ 1 ซึ่งผ่านการลดความชื้นแล้วจะถูกนำมาผสมกับอากาศขาออกจากห้องอบแห้งส่วนที่เหลือ
5. กระบวนการเพิ่มอุณหภูมิอากาศ สภาวะอากาศผสมเป็นอากาศอบแห้งที่อุณหภูมิ 50 °C

กระบวนการต่างๆ ที่เกิดขึ้นแสดงได้ด้วยภาพที่ 3.1



ภาพที่ 3.1 กระบวนการบนไซโครเมตริกซ์ เพื่อใช้ในการออกแบบระบบการอบแห้งแบบป้อนความร้อน

- จากแผนภาพไซโครเมตริกซ์ ที่สภาวะ 32 °C , 80% rh จะหาค่าอัตราส่วนความชื้นได้ 0.0241

$\text{kg}_{\text{water}}/\text{kg}_{\text{dry air}}$

- อัตราส่วนความชื้นอากาศขาออกจากห้องอบแห้ง $0.0252 \text{ kg}_{\text{water}}/\text{kg}_{\text{dry air}}$
- หากต้องการอัตราการระเหยน้ำ $2.16 \text{ kg}_{\text{water}}/\text{h}$ จะได้ว่า

$$2.16 \frac{\text{kg}_{\text{water}}}{\text{h}} = \dot{m}_a (0.0252 - 0.0241) \frac{\text{kg}_{\text{water}}}{\text{kg}_{\text{dry air}}}$$

$$\dot{m}_a = 1,963.64 \frac{\text{kg}_{\text{dry air}}}{\text{h}} = 0.545 \frac{\text{kg}_{\text{dry air}}}{\text{s}}$$

สมยศและเทวรัตน์ (2546) ได้สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อหาอัตราส่วนอากาศ ข้ามเครื่องทำระเหย (bypass air) ที่เหมาะสมพบว่า อัตราส่วนอากาศข้ามเครื่องทำระเหย 80% จะให้

ประสิทธิภาพการทำงานสูงสุดดังนั้นในการออกแบบครั้งนี้จึงใช้สภาวะอากาศข้ามเครื่องทำระเหย 80%

ดังนั้นอัตราการไหลของอากาศผ่านเครื่องทำระเหยมีค่า ดังนี้

$$\dot{m}_{a,\text{evap}} = 0.545 \frac{\text{kg dryair}}{\text{s}} (1 - 0.8) = 0.109 \frac{\text{kg dryair}}{\text{s}}$$

เมื่อต้องการให้อุณหภูมิอากาศผ่านเครื่องทำระเหยมีอุณหภูมิ 25 °C ซึ่งมีคุณสมบัติของอากาศ ดังนี้ ค่าอัตราส่วนความชื้น 0.0201 kg_{water}/kg_{dryair} ค่าความจุความร้อนจำเพาะของอากาศแห้ง (C_a) คือ 1.0069 kJ/(kg_{dryair} °C) และ ค่าความจุความร้อนของไอน้ำ (C_v) คือ 1.5524 kJ/(kg_{water} °C) แล้วจะได้ค่าการถ่ายเทความร้อนที่เครื่องทำระเหยคือ

$$\begin{aligned} Q_e &= \dot{m}_{a,\text{evap}} \left[(C_a + C_v H_f) T_{ei} + H_f h_{fg} \right] - \dot{m}_{a,\text{evap}} \left[(C_a + C_v H_{eo}) T_{eo} + H_{eo} h_{fg} \right] \\ &= 0.109 \frac{\text{kg dryair}}{\text{s}} \left[\left(1.0069 \frac{\text{kJ}}{\text{kg dryair } ^\circ\text{C}} + (1.5524 \frac{\text{kJ}}{\text{kg water } ^\circ\text{C}}) (0.0252 \frac{\text{kg water}}{\text{kg dryair}}) \right) 47^\circ\text{C} + (0.0252 \frac{\text{kg water}}{\text{kg dryair}}) (2388.5 \frac{\text{kJ}}{\text{kg water}}) \right] \\ &\quad - 0.109 \frac{\text{kg dryair}}{\text{s}} \left[\left(1.0069 \frac{\text{kJ}}{\text{kg dryair } ^\circ\text{C}} + (1.5524 \frac{\text{kJ}}{\text{kg water } ^\circ\text{C}}) (0.0201 \frac{\text{kg water}}{\text{kg dryair}}) \right) 45^\circ\text{C} + (0.0201 \frac{\text{kg water}}{\text{kg dryair}}) (2443.19 \frac{\text{kJ}}{\text{kg water}}) \right] \\ &= 3.74 \text{ kW} \end{aligned}$$

เพื่อให้เหมาะสมกับเครื่องอัดไอที่จำหน่ายเชิงพาณิชย์ จึงเลือกเครื่องทำระเหยที่มีขนาด 4.07 kW (13900 BTU/h) ซึ่งใช้กับเครื่องอัดไอแบบลูกสูบสำหรับสารทำความเย็น R-22 ขนาด 1.25 hp

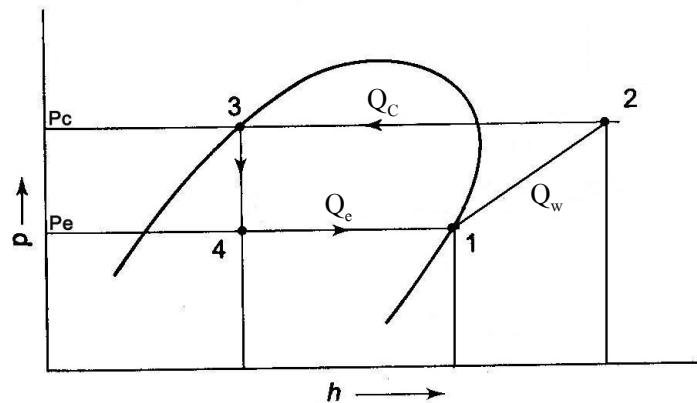
สำหรับการคำนวณหาขนาดของเครื่องควบแน่น (Condenser) สามารถหาได้จากสมการ

$$\begin{aligned} Q_C &= \dot{m}_{a,\text{cond}} [C_a + C_v H_{\text{mix}}] (T_{co} - T_{ci}) \\ &= 0.545 \frac{\text{kg dryair}}{\text{s}} \left[1.0069 \frac{\text{kJ}}{\text{kg dryair } ^\circ\text{C}} + (1.5524 \frac{\text{kJ}}{\text{kg water } ^\circ\text{C}}) (0.0241 \frac{\text{kg water}}{\text{kg dryair}}) \right] (50 - 42)^\circ\text{C} \end{aligned}$$

$$= 4.55 \text{ kW}$$

ซึ่งจากขนาดของเครื่องทำระเหย เครื่องควบแน่นและเครื่องอัดไอ เมื่อพิจารณาแผนภาพ p-h ของระบบการทำความเย็นแบบอัดไอดังแสดงในภาพที่ 3.2 จะได้ว่าเมื่อระบบอยู่ในภาวะสมดุลจะได้ว่าอัตราการถ่ายเทความร้อนที่เครื่องควบแน่น (Q_c) มีค่าเท่ากับอัตราการถ่ายเทความร้อนที่เครื่องทำระเหย (Q_e) รวมกับกำลังที่ต้องป้อนให้เครื่องอัดไอ (Q_w) เขียนเป็นสมการ (3.1) คือ

$$Q_c = Q_e + Q_w \quad (3.1)$$



ภาพที่ 3.2 วัฏจักรการทำงานของระบบปั๊มความร้อนแบบอัดไอบน p-h ไดอะแกรม

จากสมการ (3.1) เมื่อแทนค่าขนาดของเครื่องทำระเหยและเครื่องอัดไอที่เลือกไว้ จะได้

$$Q_c = 4.07 \text{ kW} + 0.93 \text{ kW}$$

$$= 5 \text{ kW}$$

เนื่องจากค่าความร้อนที่ต้องการในระบบมีค่าน้อยกว่าปริมาณความร้อนที่ต่อระบายออกจากเครื่องควบแน่นดังนั้นจึงต้องมีเครื่องควบแน่นตัวนอกมาช่วยในการระบายความร้อนส่วนเกินออกจากเครื่องควบแน่นตัวในโดยขนาดของเครื่องควบแน่นตัวนอกหาได้ดังนี้

$$Q_{c,ext} = Q_c - Q_{c,in} \quad (3.2)$$

$$= 5 \text{ kW} - 4.55 \text{ kW}$$

$$= 0.45 \text{ kW}$$

เมื่อ $Q_{c,ext}$ คืออัตราการถ่ายเทความร้อนที่เครื่องควบแน่นตัวนอก (kW)

$Q_{c,in}$ คืออัตราการถ่ายเทความร้อนที่เครื่องควบแน่นตัวใน (kW)

5. ขนาดพัดลมในระบบ

การคำนวณหาขนาดพัดลม สามารถหาได้จากการพิจารณาความดันสูญเสียและอัตราการไหลของอากาศที่ต้องการ ดังนี้

$$W_f = \frac{\dot{m}\Delta P}{\eta_f \eta_m} \quad (3.3)$$

เมื่อ W_f คือกำลังที่ให้กับพัดลม (W)

ΔP คือความดันลดในระบบ (Pa)

\dot{m} คืออัตราการไหลของอากาศอบแห้ง (m^3/s)

η_f คือประสิทธิภาพของพัดลม

η_m คือประสิทธิภาพมอเตอร์

ดังนั้นจากการคำนวณความดันลดของเครื่องอบแห้งระบบปั๊มความร้อนในภาคผนวก ก จะได้ค่าความดันลดในระบบรวม 666 Pa และอัตราการไหลที่ต้องการคือ $0.51 \text{ m}^3/\text{s}$ ดังนั้น กำลังที่ให้กับพัดลมสำหรับเครื่องอบแห้งระบบปั๊มความร้อนนี้คือ

$$W_f = \frac{(0.51 \text{ m}^3/\text{s})(666 \text{ Pa})}{(0.65)(0.80)}$$

$$= 653.2 \text{ W}$$

ดังนั้นจึงสามารถเลือกซื้อพัดลมที่มีขายในเชิงพาณิชย์ ที่มีขนาดพิกัดมอเตอร์ 350 W จำนวน 2 ตัว

เมื่อได้ขนาดอุปกรณ์ของเครื่องอบแห้งระบบปั๊มความร้อนทั้งหมดแล้วจึงดำเนินการสร้างเครื่องอบแห้งระบบปั๊มความร้อนดังแสดงในภาพที่ 3.3



ภาพที่ 3.3 เครื่องอบแห้งระบบปั๊มความร้อนที่สร้างขึ้น

3.2.2 การทดสอบประสิทธิภาพเครื่องอบแห้งระบบปั๊มความร้อน

การทดสอบการอบแห้งเพื่อประเมินสมรรถนะการอบแห้งของเครื่องอบแห้งระบบปั๊มความร้อนที่สร้างขึ้นจะใช้วัสดุในการอบแห้งเป็น แครอท และหอมสับ เนื่องจากวัสดุทั้งสองชนิดเป็นวัสดุที่มีลักษณะสีที่ปรากฏดึงดูดต่อผู้บริโภค และยังเป็นผักที่นิยมใช้เป็นส่วนประกอบของผลิตภัณฑ์อาหารกึ่งสำเร็จรูปโดยทั่วไปด้วย

การทดลองอบแห้งแครอท

สำหรับการทดลองอบแห้งแครอทจะทำการอบแห้งแครอทสดที่ผ่านกระบวนการปอกเปลือกและหั่นเป็นชิ้นสี่เหลี่ยมขนาดโดยเฉลี่ยประมาณ $1 \times 1 \times 0.5 \text{ cm}^3$ จำนวนครั้งละ 10 กิโลกรัม ที่อุณหภูมิการอบแห้ง 45 50 และ 55 °C โดยทำการอบแห้งที่อุณหภูมิละ 3 ชั่วโมง ในระหว่างทำการ

อบแห้งจะบันทึกข้อมูลทุกๆ 60 นาที และ อบแห้งจนได้ความชื้นสุดท้ายประมาณ 12 %wb ซึ่งเป็นความชื้นที่เหมาะสมต่อการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์อบแห้ง โดยมีขั้นตอนในการทดลองดังนี้

1. นำหัวแคโรทสดมาทำการปอกเปลือกทำความสะอาด แล้วหั่นเป็นชิ้นสี่เหลี่ยม ขนาด กว้าง x ยาว x หนา เฉลี่ยโดยประมาณคือ 1 cm. x 1 cm. x 0.5 cm
2. นำแคโรทที่ผ่านกระบวนการหั่นแล้วมาเรียงใส่ถาดทั้ง 10 ถาด ให้มีลักษณะการอบแห้งเป็นแบบชั้นบาง
3. สุ่มหยิบตัวอย่างแคโรทไปทำการหาความชื้นเริ่มต้นด้วย hot air oven ที่อุณหภูมิ 103 °C เป็นเวลา 72 ชั่วโมง และนำตัวอย่างอีกส่วนหนึ่งไปหาความชื้นเริ่มต้นด้วยเครื่องหาความชื้นแบบอินฟราเรด (ภาพที่ 3.4) นำค่าทั้งหมดมาหาค่าเฉลี่ยเพื่อเป็นตัวแทนความชื้นเริ่มต้นของแคโรททั้งหมด
4. นำแคโรทส่วนหนึ่งมาชั่งน้ำหนักเริ่มต้น และบรรจุในถุงผ้าตาข่ายจำนวน 5 ใบเพื่อติดตามการลดลงของความชื้นแคโรทในระหว่างการอบแห้ง
5. นำแคโรททั้ง 10 ถาดเข้าห้องอบแห้ง พร้อมทั้งนำถุงผ้าตาข่ายที่บันทึกน้ำหนักเริ่มต้นแล้วทั้ง 5 ใบ วางบนถาดแคโรทในลักษณะถาดเว้นถาด (ภาพที่ 3.5)
6. ทำการเก็บข้อมูลการอบแห้งทุกๆ 60 นาที จนได้ความชื้นสุดท้ายที่ต้องการจึงทำการยุติการทดลอง



ภาพที่ 3.4 เครื่องหาความชื้นแบบอินฟราเรด



ภาพที่ 3.5 ลักษณะการจัดเรียงแครอทและถุงผ้าตาข่าย

การทดลองอบแห้งหอมสับ

ในการทดลองอบแห้งหอมสับจะทำการอบแห้งหอมแบ่งสับจำนวนครั้งละ 5 กิโลกรัมที่อุณหภูมิการอบแห้ง 45 50 และ 55 °C โดยทำการอบแห้งที่อุณหภูมิละ 3 ชั่วโมง ในระหว่างทำการอบแห้งจะบันทึกข้อมูลทุกๆ 60 นาที และ อบแห้งจนได้ความชื้นสุดท้ายประมาณ 12 %wb ซึ่งเป็นความชื้นที่เหมาะสมต่อการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์อบแห้ง โดยมีขั้นตอนในการทดลองดังนี้

1. ทำความสะอาดต้นหอมสด แล้วหั่นเป็นชิ้นตามยาว เฉลี่ยโดยประมาณ 0.5 cm.
2. นำหอมสดที่ผ่านกระบวนการหั่นแล้วมาเรียงใส่ถาดทิ้ง 10 ถาด ให้มีลักษณะการอบแห้งเป็นแบบชั้นบาง
3. สุ่มหยิบตัวอย่างหอมสับไปทำการหาความชื้นเริ่มต้นด้วยตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 103 °C เป็นเวลา 72 ชั่วโมง และนำตัวอย่างอีกส่วนหนึ่งไปหาความชื้นเริ่มต้นด้วยเครื่องหาความชื้นแบบอินฟราเรด นำค่าทั้งหมดมาหาค่าเฉลี่ยเพื่อเป็นตัวแทนความชื้นเริ่มต้นของหอมสับ
4. นำหอมสับอีกส่วนหนึ่งมาชั่งน้ำหนักเริ่มต้น และบรรจุในถุงผ้าตาข่ายจำนวน 5 ใบเพื่อติดตามการลดลงของความชื้นหอมสับในระหว่างการอบแห้ง

5. นำหอมสับทั้ง 10 ถาดเข้าห้องอบแห้ง พร้อมทั้งนำถุงผ้าตาข่ายที่บันทึกน้ำหนักเริ่มต้นแล้วทั้ง 5 ใบ วางบนถาดหอมสับในลักษณะถาดเว้นถาด (ภาพที่ 3.6)

6. ทำการเก็บข้อมูลการอบแห้งทุก ๆ 60 นาที จนได้ความชื้นสุดท้ายที่ต้องการจึงทำการยุติการทดลอง



ภาพที่ 3.6 ลักษณะการจัดเรียงหอมสับและถุงผ้าตาข่าย

การทดลองอบแห้งข้าวโพดหวาน

ในการทดลองอบแห้งข้าวโพดหวานได้แบ่งข้าวโพดออกเป็น 2 กลุ่มคือข้าวโพดหวานที่ผ่านการทำให้สุกโดยการนึ่ง และข้าวโพดหวานดิบ โดยในการทดสอบอบแห้งข้าวโพดหวานได้ทำการทดสอบที่อุณหภูมิอบแห้งที่ 50 °C โดยทำการทดลองที่สภาวะละ 3 ชั่วโมง โดยมีขั้นตอนดังนี้

1. นำข้าวโพดหวานที่ผ่านการนึ่งให้สุกมาผ่านเอาเฉพาะเมล็ด โดยการผ่านจะทำให้ติดกับแกนซึ่งมากที่สุด โดยเตรียมตัวอย่างให้ได้จำนวน 10 กิโลกรัมในการทดลองแต่ละครั้ง
2. นำเมล็ดข้าวโพดหวานที่ได้จากข้อ 1. แล้วมาเรียงใส่ถาดทั้ง 10 ถาด ให้มีลักษณะการอบแห้งเป็นแบบชั้นบาง

3. สุ่มหยิบตัวอย่างข้าวโพดหวานนึ่งสุกไปทำการหาความชื้นเริ่มต้นด้วย hot air oven ที่อุณหภูมิ 103 °C เป็นเวลา 72 ชั่วโมง และนำตัวอย่างอีกส่วนหนึ่งไปหาความชื้นเริ่มต้นด้วยเครื่องหาความชื้นแบบอินฟราเรด นำค่าทั้งหมดมาหาค่าเฉลี่ยเพื่อเป็นตัวแทนความชื้นเริ่มต้นของข้าวโพดหวานนึ่งสุก
4. นำข้าวโพดหวานอีกส่วนหนึ่งมาชั่งน้ำหนักเริ่มต้น และบรรจุในถุงผ้าตาข่ายจำนวน 5 ใบ เพื่อติดตามการลดลงของความชื้นข้าวโพดหวานในระหว่างการอบแห้ง
5. ข้าวโพดหวานที่จัดเรียงไว้ทั้ง 10 ถาดเข้าห้องอบแห้ง พร้อมทั้งนำถุงผ้าตาข่ายที่บันทึกน้ำหนักเริ่มต้นแล้วทั้ง 5 ใบ วางบนถาดข้าวโพดหวานในลักษณะถาดเว้นถาด (ภาพที่ 3.7)
6. ทำการเก็บข้อมูลการอบแห้งทุก ๆ 60 นาที จนได้ความชื้นสุดท้ายที่ต้องการจึงทำการยุติการทดลอง



ภาพที่ 3.7 ลักษณะการจัดเรียงข้าวโพดหวานนึ่งสุกและถุงผ้าตาข่าย

7. สำหรับกรณีของข้าวโพดหวานดิบกระทำเช่นเดียวกับขั้นตอน 1-6

3.2.3 การตรวจสอบคุณภาพของผลิตภัณฑ์

การตรวจสอบคุณภาพด้านสี

ตัวอย่างผลิตภัณฑ์สดและผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งระบบบีบความร้อน ได้ถูกนำไปตรวจสอบคุณภาพสี โดยแบ่งออกเป็น การตรวจสอบคุณภาพสีของแครอทและหอมสับอบแห้ง กระทำโดยการส่งตัวอย่างไปตรวจด้วยเครื่อง HunterLab Spectrophotometer ColorQuest XE ที่ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ซึ่งการส่งตัวอย่างตรวจสอบจะต้องเสียค่าบริการ ส่วนผลิตภัณฑ์ข้าวโพดหวาน ได้ทำการตรวจสอบด้วยเครื่องวัดสี Minota cr300 เนื่องจากไม่เสียค่าใช้จ่ายในการใช้เครื่องและตรวจสอบ

ข้อมูลด้านสีของผลิตภัณฑ์อบแห้งที่ได้จะถูกนำมาคำนวณ ค่าความแตกต่างสีสุทธิ (ΔE) จากผลิตภัณฑ์สด เพื่อแสดงการเปลี่ยนแปลงสีจากการอบแห้งดังนี้

$$\Delta E = \sqrt{(L_0^* - L^*)^2 + (a_0^* - a^*)^2 + (b_0^* - b^*)^2} \quad (3.4)$$

เมื่อ ตัวห้อย “0” คือค่าสีของผลิตภัณฑ์สด

การตรวจสอบอัตราส่วนการคืนตัว (Rehydration Ratio, RR)

ตัวอย่างผลิตภัณฑ์จากการอบแห้งได้นำมาทำการทดสอบการคืนตัวดังนี้

1. นำตัวอย่างผลิตภัณฑ์อบแห้งมาชั่งน้ำหนักเริ่มต้น
2. นำตัวอย่างที่ผ่านการชั่งน้ำหนักเริ่มต้นแล้วแช่ลงในน้ำร้อนอุณหภูมิ 90 °C ซึ่งควบคุมอุณหภูมิด้วยเครื่องให้ความร้อน (hot plate)
3. ทุกๆ ช่วงเวลา 2 นาทีตัวอย่างจะถูกนำขึ้นจากน้ำร้อน ทำการซับน้ำส่วนเกินให้แห้ง แล้วทำการชั่งน้ำหนัก เป็นเวลา 10 นาที
4. คำนวณหาค่าอัตราส่วนการคืนตัวของผลิตภัณฑ์ จากสมการ 3.5 (ภารดรและคณะ, 2552)

$$RR = \frac{m_f}{m_i} \quad \dots\dots\dots (3.5)$$

เมื่อ m_i คือน้ำหนักของผลิตภัณฑ์ก่อนการคืนตัว (g)

m_f คือน้ำหนักของผลิตภัณฑ์หลังการคืนตัว (g)

บทที่ 4

ผลการดำเนินการ

4.1 เครื่องอบแห้งระบบปั๊มความร้อน

เครื่องอบแห้งระบบปั๊มความร้อนที่ดำเนินการพัฒนาขึ้นมีลักษณะดังภาพที่ 4.1 โดยตัวเครื่องมีขนาด กว้าง x ลึก x สูง คือ 1.7 m x 0.8 m x 1.5 m โดยมีส่วนประกอบหลักดังนี้



ภาพที่ 4.1 เครื่องอบแห้งระบบปั๊มความร้อนและส่วนประกอบ

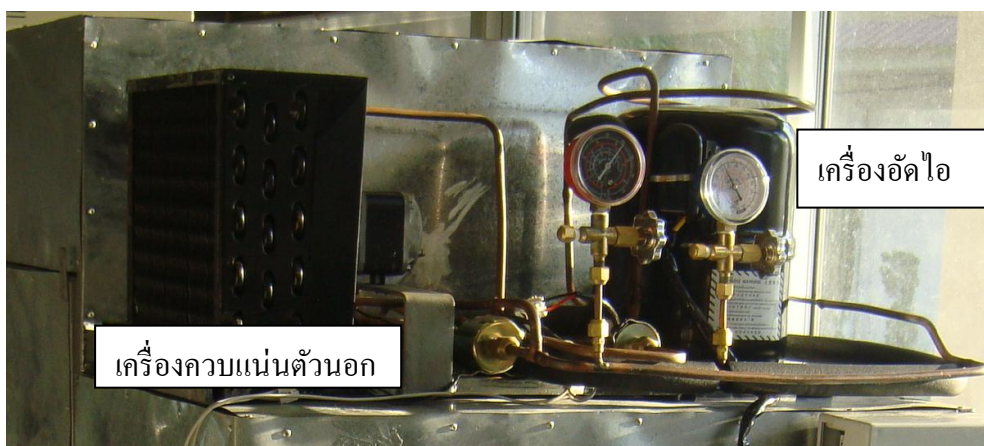
ห้องอบแห้ง

ห้องอบแห้งมีปริมาตรภายในเท่ากับ $ก \times ล \times ส = 70 \times 70 \times 85 \text{ cm}^3$ บุด้วยฉนวนใยแก้วกันความร้อนหนา 3 นิ้ว ภายในประกอบด้วยถาดใส่วัสดุขนาด $50 \times 60 \text{ cm}^2$ จำนวน 10 ถาด ตัวถาดทำจากเหล็กกล้าไร้สนิมเจาะรู ชุดโครงสร้างรับถาดเหล็กกล้าไร้สนิมมีความแข็งแรงทนทาน

ชุดปั๊มความร้อน

ชุดปั๊มความร้อนประกอบด้วยอุปกรณ์หลักคือ เครื่องอัดไอแบบลูกสูบขนาด $1 \frac{1}{4} \text{ hp}$ ใช้สารทำความเย็น R-22 เครื่องทำระเหย (evaporator) แบบ 3 แฉกขนาด 3.75 kW ทำจากท่อทองแดงขนาด 9.5 mm. ประกอบด้วยครีบอลูมิเนียมแบบลอนคลื่นจำนวน 13 ครีบต่อนิ้ว พร้อมวาล์วลดความดันชนิดท่อรูเข็ม เครื่องควบแน่นตัวใน แบบ 2 แฉก ขนาด 4.5 kW ทำจากท่อทองแดง

ขนาด 9.5 mm. ประกอบด้วยครีบอลูมิเนียมแบบลอนคลื่นจำนวน 13 ครีบท่อน้ำ และเครื่องควบแน่นตัวนอก ขนาด 2.5 kW พร้อมชุดพัดลมระบายความร้อนขนาด 40 W เนื่องจากในระบบการทำงานจริงจะมีความร้อนเพิ่มขึ้นเนื่องจากความเสียดทานภายใน การใช้เครื่องควบแน่นตัวนอกมากกว่าที่ออกแบบไว้จะช่วยทำให้การควบคุมอุณหภูมิภายในทำได้ดีขึ้น เครื่องควบแน่นตัวในและเครื่องทำระเหยจะทำการติดตั้งอยู่ในท่อส่งอากาศ ภายในเครื่องอบแห้ง ส่วนเครื่องอัดไอและเครื่องควบแน่นตัวนอกจะทำการติดตั้งอยู่ภายนอกเพื่อประโยชน์ในการระบายความร้อนส่วนเกินดังแสดงในภาพที่ 4.2



ภาพที่ 4.2 ลักษณะการติดตั้งเครื่องควบแน่นตัวนอกและเครื่องอัดไอ

พัดลม

พัดลมที่ใช้เป็นพัดลมโถงหน้า จำนวน 2 ตัว ต่อขนาน ขับด้วยมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ขนาด 350 W

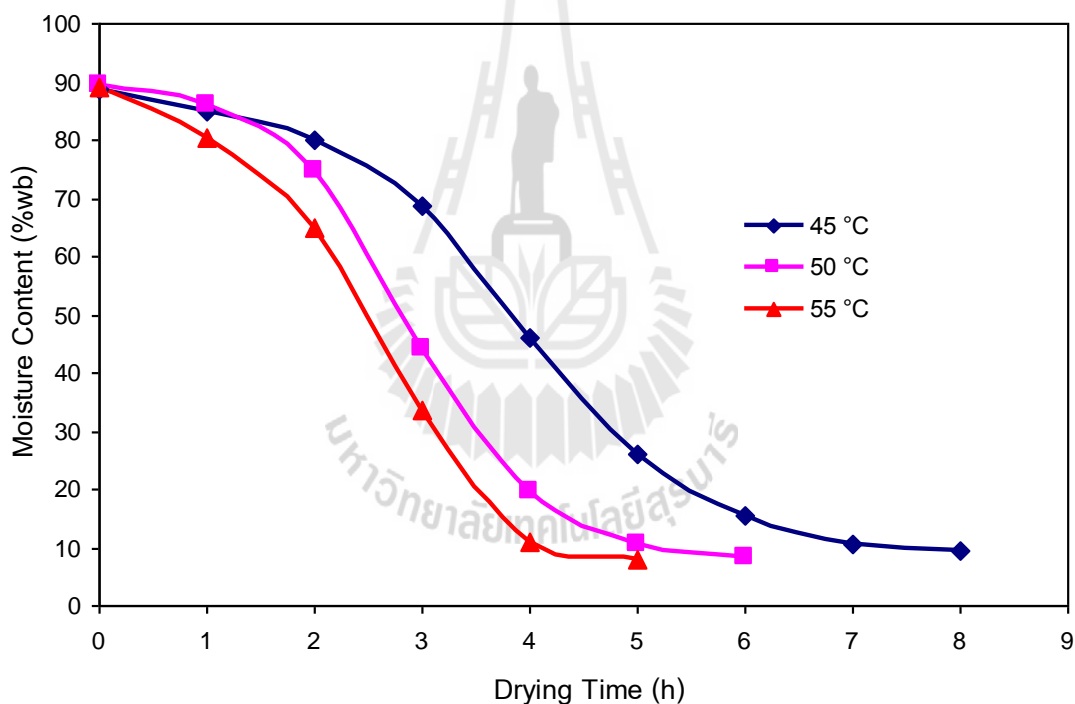
ชุดควบคุม

ทำการควบคุมอุณหภูมิแบบอัตโนมัติ ประกอบด้วยเซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิ และชุดควบคุมการไหลของสารทำความเย็นในวงจรระบบปั๊มความร้อนที่สัมพันธ์กับอุณหภูมิการอบแห้งที่ต้องการ

4.2 ผลการทดสอบประสิทธิภาพเครื่องอบแห้งระบบปั๊มความร้อน

4.2.1 ผลการอบแห้งแคโรท

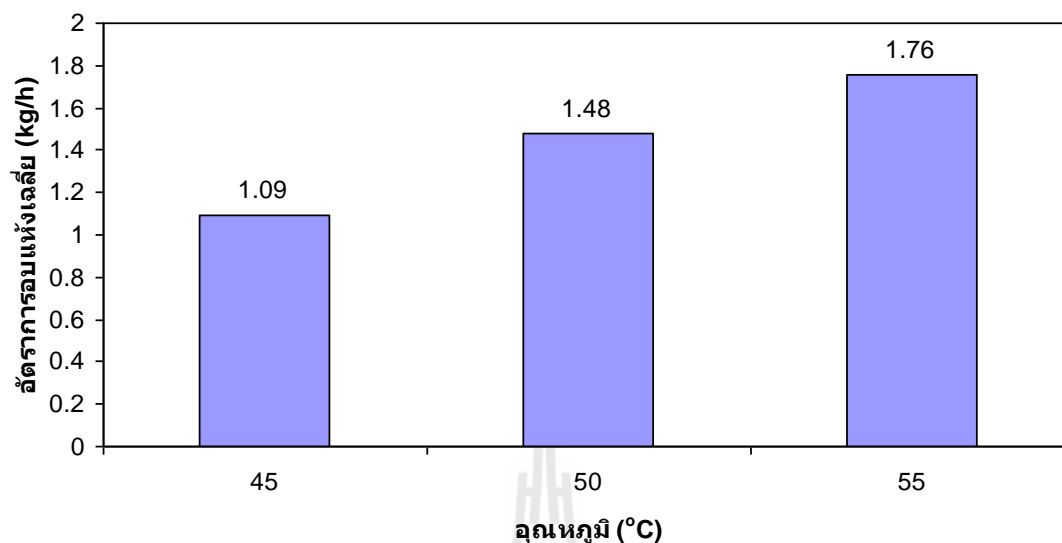
การอบแห้งแคโรทด้วยเครื่องอบแห้งระบบปั๊มความร้อน พบว่ามีพฤติกรรมการอบแห้งดังแสดงในภาพที่ 4.3 ซึ่งจากภาพจะเห็นว่า การอบแห้งแคโรทด้วยเครื่องอบแห้งระบบปั๊มความร้อนมีพฤติกรรมการอบแห้งส่วนใหญ่อยู่ในช่วงของการอบแห้งลดลง โดยอุณหภูมิของการอบแห้งเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อการอบแห้งแคโรท โดยพบว่าที่อุณหภูมิ 55 °C การลดลงของความชื้นของแคโรทจะเกิดขึ้นเร็วที่สุดทั้งนี้เนื่องจากที่อุณหภูมิสูงกว่าจะทำให้ค่าความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศมีค่าลดต่ำลงทำให้มีความสามารถในการดูดซับความชื้นได้มากขึ้น ในทางตรงกันข้ามเมื่ออุณหภูมิต่ำกว่าจะทำให้อากาศมีความสามารถในการรับความชื้นจากวัสดุไปน้อยกว่า การอบแห้งจึงเกิดขึ้นได้ช้ากว่า



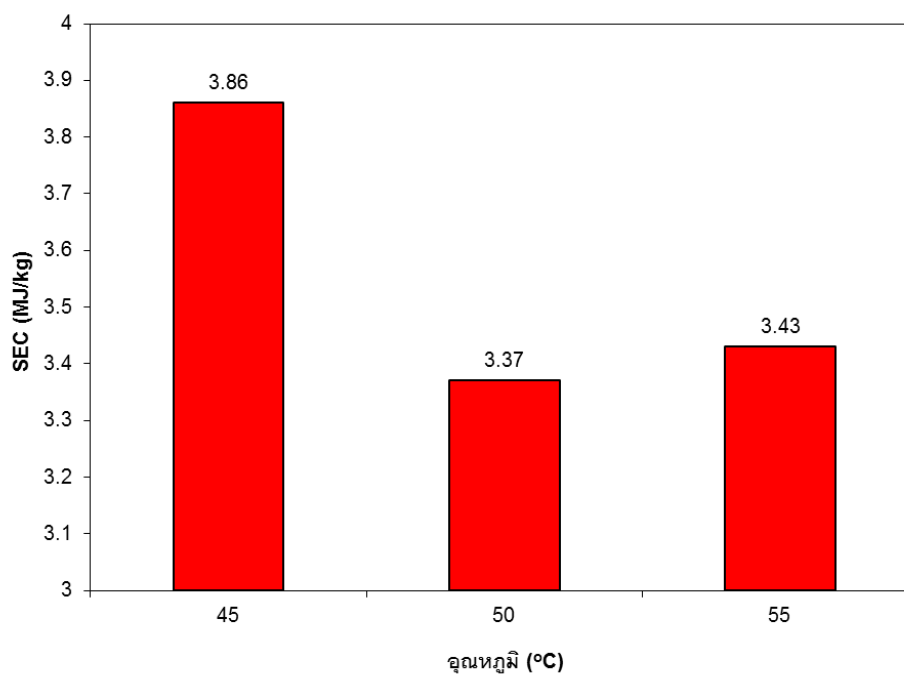
ภาพที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นกับเวลาของการอบแห้งแคโรทด้วยเครื่องอบแห้งระบบปั๊มความร้อน

เมื่อทำการคำนวณหาอัตราการอบแห้งของแคโรทในรูปของอัตราการระเหยน้ำต่อชั่วโมง พบว่า อัตราการอบแห้งของแคโรทที่อุณหภูมิ 45 50 และ 55 °C โดยเฉลี่ยดังแสดงในภาพที่ 4.4

ซึ่งจะเห็นว่ามีความสัมพันธ์เช่นเดียวกับพฤติกรรมการอบแห้งนั้นคือที่อุณหภูมิสูงกว่า (55 °C) มีอัตราการอบแห้งสูงสุด และที่อุณหภูมิต่ำกว่าคือ 45 °C จะมีอัตราการอบแห้งเฉลี่ยต่ำที่สุด



ภาพที่ 4.4 อัตราการอบแห้งเครื่องด้วยเครื่องอบแห้งระบบปั๊มความร้อน



ภาพที่ 4.5 ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของการอบแห้งเครื่อง

เมื่อพิจารณาด้านพลังงานพบว่าค่าอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของการอบแห้งแคโรตด้วยเครื่องอบแห้งระบบปั๊มความร้อนที่อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 45 °C และ 55 °C มีค่า 3.86 และ 3.37 และ 3.43 MJ/kg_{water} ซึ่งจะเห็นว่าที่อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 50 °C มีค่าต่ำที่สุด (ภาพที่ 4.5) ทั้งนี้เนื่องจาก ค่าเฉลี่ยการใช้พลังงานในการอบแห้งที่แต่ละอุณหภูมิการอบแห้งมีค่าแตกต่างกันโดยที่อุณหภูมิสูงกว่าจะใช้พลังงานมากกว่า โดยที่อุณหภูมิการอบแห้ง 55 °C มีอัตราการใช้พลังงานไฟฟ้าเฉลี่ยอยู่ที่ 1.68 kWh/h ในขณะที่อุณหภูมิ 50 และ 45 °C มีอัตราการใช้พลังงานไฟฟ้าอยู่ที่ 1.38 และ 1.17 kWh/h ตามลำดับ แต่ช่วงเวลาที่ใช้ในการอบแห้งที่อุณหภูมิ 50 และ 55 °C แตกต่างกันเพียง 1 ชั่วโมง ส่วนที่อุณหภูมิ 45 °C ถึงแม้จะมีอัตราการใช้พลังงานไฟฟ้าที่ต่ำแต่ระยะเวลาการอบแห้งที่นานมากกว่าจึงทำให้มีค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะสูงที่สุด สำหรับพารามิเตอร์อื่นของการอบแห้งแสดงในตารางที่ 4.1

เมื่อพิจารณาถึงคุณภาพของผลิตภัณฑ์แคโรตอบแห้งที่ได้จากเครื่องอบแห้งระบบปั๊มความร้อนพบว่าสีของแคโรตอบแห้งที่ได้จะเข้มขึ้นเนื่องจากมีการสูญเสียน้ำออกจากตัววัสดุ แต่ไม่ปรากฏสีดำให้เห็น ซึ่งจากภาพที่ 4.6 จะเห็นว่าแคโรตสดและแคโรตอบแห้งที่ได้ยังคงมีสีส้มที่สวยงามน่ารับประทานโดยที่ทุกๆ อุณหภูมิการอบแห้งจะให้ผลิตภัณฑ์แคโรตอบแห้งที่มีสีสันสวยงามเมื่อมองด้วยตาเปล่า



(ก) ก่อนอบแห้ง

(ข) หลังอบแห้ง

ภาพที่ 4.6 ลักษณะของแคโรตก่อนและหลังอบแห้ง

ตารางที่ 4.1 ผลการอบแห้งแครอท

รายการ	อุณหภูมิอบแห้ง		
	45 °C	50 °C	55 °C
น้ำหนักตัวอย่าง (kg)	10	10	10
ความชื้นเริ่มต้น (%wb)	88.70	89.10	89.00
ความชื้นสุดท้าย (%wb)	9.52	8.16	7.81
เวลาในการอบแห้ง (h)	8	6	5
ปริมาณน้ำระเหยจากวัสดุ (kg)	8.75	8.86	8.81
ปริมาณไฟฟ้าที่ใช้ทั้งหมด (kWh)	9.39	8.30	8.4
ปริมาณน้ำควบแน่นที่เครื่องทำระเหย (kg)	6.10	4.03	4.42
อัตราการไหลอากาศ (m ³ /s)	0.51	0.51	0.51
อัตราการไหลอากาศ bypass (m ³ /s)	0.408	0.408	0.408
อัตราส่วนอากาศ bypass (%)	80	80	80
อัตราการอบแห้ง (kg _{water} /h)	1.09	1.48	1.76
MER (kg _{water} /h)	0.76	0.67	0.88
SMER (kg _{water} /kWh)	0.93	1.07	1.05
SEC (MJ/kg _{water})	3.86	3.37	3.43
COP _{hp(used)}	3.12	3.04	2.64

จากการตรวจสอบคุณภาพสีด้วยเครื่องวัดสีด้วยเครื่องสเปคโตรโฟโตมิเตอร์ ได้ค่าเฉลี่ยสีของแครอทอบแห้งที่อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 45 50 และ 55 °C แสดงอยู่ในตารางที่ 4.2 ซึ่งจะเห็นว่า ค่าความแตกต่างด้านสีมีค่าที่ใกล้เคียงกันทั้งสามอุณหภูมิอากาศอบแห้ง เมื่อทำการตรวจสอบทางสถิติ ด้วยการวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว โดยใช้วิธีการทดสอบของ Duncan ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% แล้วพบว่าความแตกต่างของสีทั้งสามอุณหภูมิไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ เช่นเดียวกับพารามิเตอร์ L* และ a* จะมีเพียงค่า b* ของอุณหภูมิอากาศอบแห้ง 55 °C ที่แตกต่างจากอีกสองระดับอุณหภูมิ

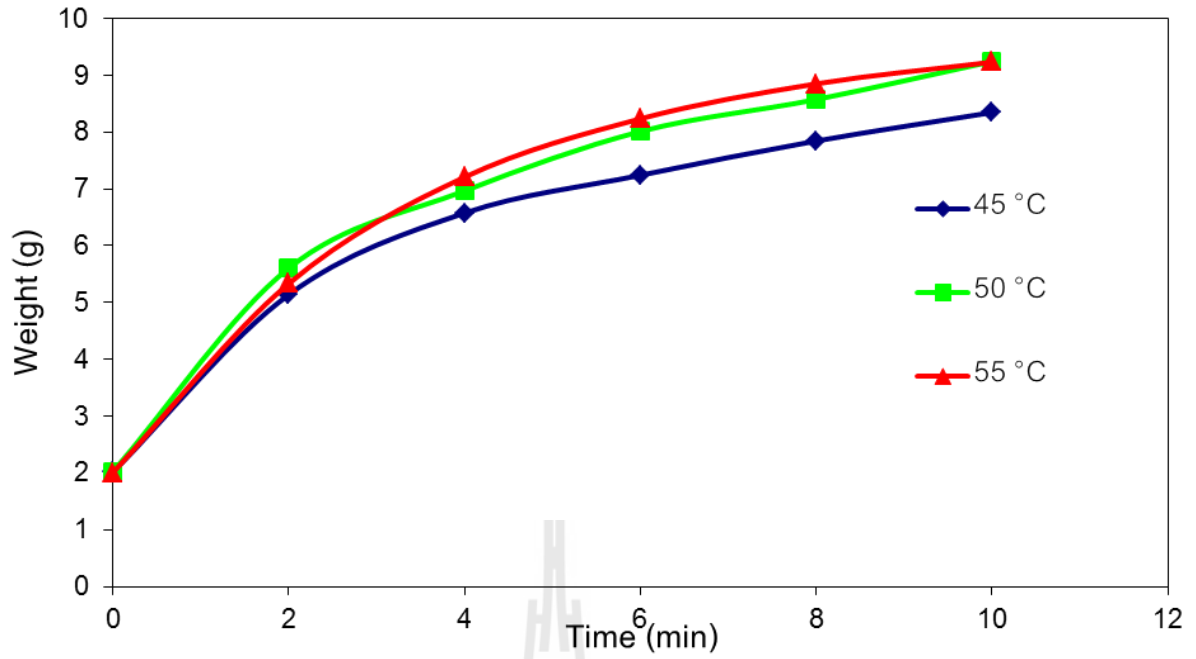
ตารางที่ 4.2 ค่าพารามิเตอร์สีของแครอท

Methods	Parameter			
	L*	a*	b*	ΔE
Fresh	40.70 ^a	33.70 ^a	21.60 ^c	-
45 °C	41.79 ^a	23.49 ^b	15.20 ^b	12.08 ^a
50 °C	41.93 ^a	23.11 ^b	15.28 ^b	12.38 ^a
55 °C	42.66 ^a	23.87 ^b	14.48 ^a	12.28 ^a

a, b, c อักษรที่เหมือนกันในคอลัมน์เดียวกันหมายถึง ไม่มีความแตกต่างกันที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

เมื่อนำตัวอย่างแครอทอบแห้งมาทำการหาค่าอัตราส่วนการคืนตัว พฤติกรรมการคืนตัวของแครอทอบแห้งแสดงในภาพที่ 4.7 ซึ่งจะพบว่าในช่วงเริ่มต้นอัตราการดูดคืนน้ำมีค่าสูงแล้วค่อยๆ ลดลง ซึ่งมีแนวโน้มคงที่เมื่อเวลาผ่านไปมากขึ้น และที่อุณหภูมิสูงกว่าจะมีอัตราส่วนการคืนตัวที่สูงกว่า สำหรับค่าอัตราส่วนการคืนตัวเฉลี่ยของแครอทอบแห้งที่อุณหภูมิตอบแห้งที่อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 45 50 และ 55 °C ค่าอัตราส่วนการคืนตัวมีค่า 4.14 4.58 และ 4.61 ตามลำดับ ซึ่งเมื่อทำการตรวจสอบทางสถิติ ด้วยการวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว โดยใช้วิธีการทดสอบของ Duncan ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% แล้วพบว่าอัตราส่วนการคืนตัวที่อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 50 และ 55 °C ไม่มีความแตกต่างกันในทางสถิติ และเมื่อสังเกตด้วยตาจะเห็นว่าแครอทที่ได้จากการคืนตัวมีลักษณะใกล้เคียงกับแครอทสดก่อนการอบแห้งดังแสดงในภาพที่ 4.8

ดังนั้นการอบแห้งแครอทด้วยเครื่องอบแห้งระบบปั๊มความร้อนจะช่วยรักษาคุณภาพด้านสีของแครอทไว้ได้ และมีอัตราส่วนการคืนตัวที่เร็วสามารถนำไปใช้เป็นส่วนประกอบในการปรุงอาหารกึ่งสำเร็จรูปได้



ภาพที่ 4.7 พฤติกรรมการคั่วตัวของแครอทอบแห้งที่ได้จากอุณหภูมิการอบแห้งต่างๆ



(ก) ก่อนอบแห้ง

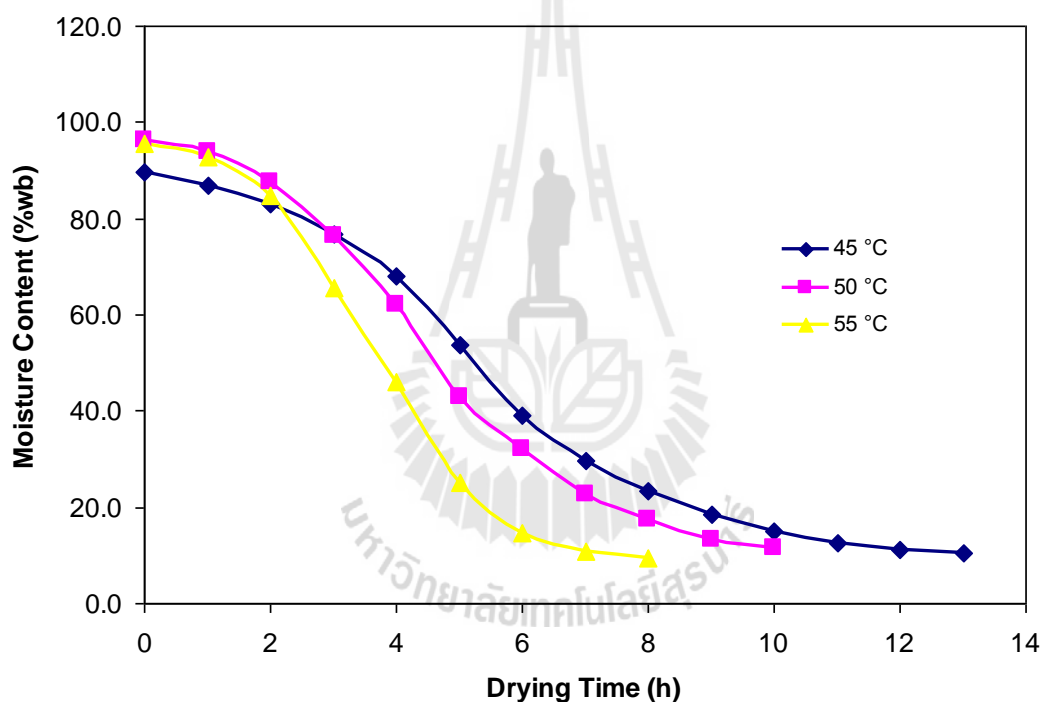
(ข) หลังอบแห้ง

(ค) หลังคั่วตัว

ภาพที่ 4.8 เปรียบเทียบลักษณะของแครอท

4.2.2 ผลการอบแห้งหอมสับ

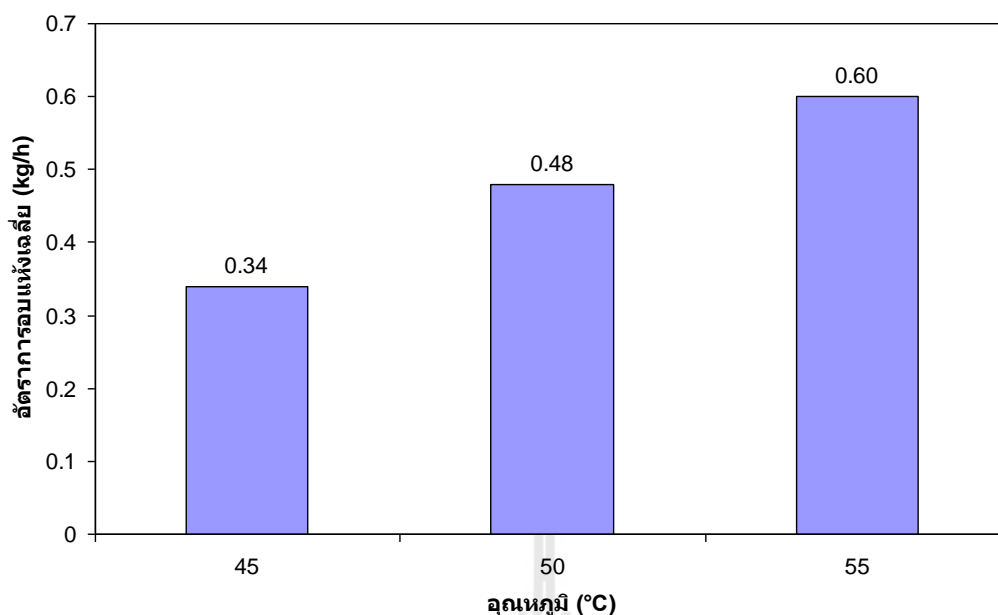
สำหรับผลการอบแห้งหอมสับด้วยเครื่องอบแห้งระบบบีบความร้อนด้วยอุณหภูมิของอากาศอบแห้ง 45 50 และ 55 °C มีพฤติกรรมการอบแห้งดังแสดงในภาพที่ 4.9 จะพบว่าพฤติกรรมการอบแห้งหอมสับอยู่ในช่วงการอบแห้งลดลงเช่นเดียวกับการอบแห้งแครอท แต่เป็นที่น่าสังเกตว่าหอมสับใช้เวลาในการอบแห้งนานกว่าแครอท ซึ่งอาจจะขัดกับความรู้สึกที่ว่าหอมสับมีลักษณะเป็นหลอดกลวงน่าจะใช้เวลาในการอบแห้งที่สั้นกว่า ทั้งนี้สาเหตุที่การอบแห้งหอมสับใช้เวลานานในการทดลองนี้อาจเป็นผลเนื่องจากการเตรียมตัวอย่างหอมสับสำหรับการอบแห้งทางสุญญากาศไม่ได้ทำการอบเฉพาะใบของหอมแต่ได้ทำการอบส่วนที่เป็นหัวหอมด้วย และส่วนของหัวหอมนี้มีลักษณะเป็นชั้นซ้อนกันแบบหนาทำให้ความชื้นจึงลดลงช้ากว่าส่วนที่เป็นใบ



ภาพที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นกับเวลาของการอบแห้งหอมสับด้วยเครื่องอบแห้งระบบบีบความร้อน

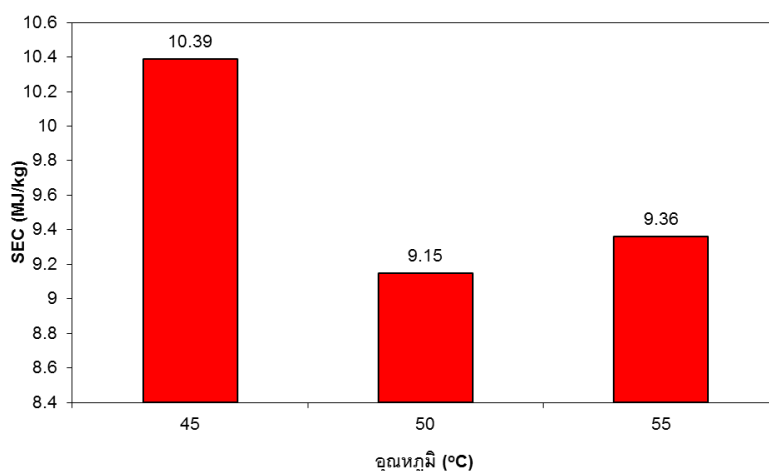
เมื่อพิจารณาอิทธิพลของอุณหภูมิอบแห้งก็ยิ่งพบว่า การอบแห้งที่อุณหภูมิสูงกว่าคือ 55 °C ก็สามารถทำการลดความชื้นได้เร็วกว่าที่อุณหภูมิต่ำถึงแม้ว่าจะมีค่าความชื้นเริ่มต้นสูงกว่าก็ตาม

เมื่อทำการคำนวณค่าอัตราการอบแห้งในรูปของความสามารถในการระเหยน้ำออกจากหอมสับเฉลี่ยต่อเวลาที่ใช้ในการอบแห้งพบว่าอัตราการอบแห้งเป็นไปตามพฤติกรรมการอบแห้งนั้นคือที่อุณหภูมิสูงกว่ามีอัตราการอบแห้งสูงกว่าดังแสดงในภาพที่ 4.10



ภาพที่ 4.10 อัตราการอบแห้งหอมสับด้วยเครื่องอบแห้งระบบปั๊มความร้อน

เมื่อพิจารณาด้านพลังงานพบว่ามิติศทางเดียวกับการอบแห้งแคโรทนั้นคือที่อุณหภูมิอบแห้ง 50 °C มีค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะต่ำกว่าที่อุณหภูมิ 55 °C ทั้งๆ ที่มีอัตราการอบแห้งที่ต่ำกว่า และเป็นที่น่าสังเกตว่าเมื่อไหลตกภายในห้องอบแห้งต่ำลง (อบแห้งหอมสับใช้ 5 กิโลกรัมขณะที่แคโรทใช้ตัวอย่าง 10 กิโลกรัม) ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานต่อชั่วโมงก็ลดลงด้วยซึ่งจากการทดลองพบว่าอุณหภูมิ 45 50 และ 55 °C คือ 0.98 1.22 และ 1.55 kWh/h เมื่อคิดเป็นค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะเฉลี่ยตลอดช่วงของการอบแห้งจึงได้ดังแสดงในภาพที่ 4.11 ซึ่งผลจากการทดลองอบแห้งหอมสับนี้ก็เป็นสิ่งยืนยันว่าอุณหภูมิต่ำกว่า 50 °C ตามที่ออกแบบไว้มีความเหมาะสมต่อการอบแห้งทั้งแคโรทและหอมสับเนื่องจากมีค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะน้อยที่สุด สำหรับพารามิเตอร์อื่นของการอบแห้งหอมสับแสดงในตารางที่ 4.3



ภาพที่ 4.11 ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของการอบแห้งหอมสับ

ตารางที่ 4.3 ผลการอบแห้งหอมสับ

รายการ	อุณหภูมิอบแห้ง		
	45 °C	50 °C	55 °C
น้ำหนักตัวอย่าง (kg)	5	5	5
ความชื้นเริ่มต้น (%wb)	89.50	96.20	95.70
ความชื้นสุดท้าย (%wb)	10.50	11.50	9.27
เวลาในการอบแห้ง (h)	13	10	8
ปริมาณน้ำระเหยจากวัสดุ (kg)	4.41	4.79	4.76
ปริมาณไฟฟ้าที่ใช้ทั้งหมด (kWh)	12.74	12.16	12.38
ปริมาณน้ำควบแน่นที่เครื่องทำระเหย (kg)	3.41	3.38	4.42
อัตราการไหลอากาศ (m ³ /s)	0.51	0.51	0.51
อัตราการไหลอากาศ bypass (m ³ /s)	0.408	0.408	0.408
อัตราส่วนอากาศ bypass (%)	80	80	80
อัตราการอบแห้ง (kg _{water} /h)	0.34	0.48	0.60
MER (kg _{water} /h)	0.26	0.34	0.55
SMER (kg _{water} /kWh)	0.35	0.39	0.38
SEC (MJ/kg _{water})	10.40	9.14	9.36
COP _{hp(used)}	3.32	3.08	2.83

เมื่อพิจารณาคุณภาพของหอมสับที่ได้หลังการอบแห้งด้วยตาเปล่าพบว่าหอมสับที่ได้มีค่าสีเขียวที่ลดลงไปในลักษณะสีเขียวซีดลง เนื่องจากเกิดการสูญเสียสีน้ำออกไปลักษณะของหอมสับก่อนและหลังการอบแห้งแสดงในภาพที่ 4.12



(ก) หอมสับก่อนอบแห้ง



(ข) หอมสับหลังอบแห้ง

ภาพที่ 4.12 ลักษณะของหอมสับก่อนและหลังการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งระบบปั๊มความร้อน

จากการตรวจสอบสีของหอมสับด้วยเครื่องวัดสีแบบสเปคโตรโฟโตมิเตอร์ได้ค่าเฉลี่ยของการสีก่อนและหลังการอบแห้งที่อุณหภูมิการอบแห้ง 45 50 และ 55 °C ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4.4 ซึ่งจะเห็นว่าเมื่อพิจารณาค่าเฉลี่ยของพารามิเตอร์สี จะพบว่าที่อุณหภูมิการอบแห้ง 55 °C มีค่าความสว่างของสี (L*) ใกล้เคียงกับค่าความสว่างของหอมสดที่ยังไม่ได้ทำการอบแห้งมากที่สุดเนื่องจากความแตกต่างของสีไม่มีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ส่วนที่ระดับอุณหภูมิ 45 และ 50 °C มีแนวโน้มความแตกต่างไปในทางที่ลดลงนั่นคือ หอมสับที่ได้จากการอบแห้งจะมีสีคล้ำลงจากผลิตภัณฑ์สดนั่นเอง

ตารางที่ 4.4 ค่าพารามิเตอร์สีของหอมสับ

Methods	Parameters			
	L*	a*	b*	ΔE
Fresh	43.18 ^a	-5.98667 ^a	15.79667 ^a	-
45 °C	38.10 ^b	-2.63667 ^c	13.21667 ^{ab}	6.88 ^a
50 °C	37.07 ^b	-3.85333 ^b	12.19333 ^c	7.34 ^a
55 °C	40.11 ^{ab}	-3.45222 ^b	12.34333 ^{bc}	5.58 ^a

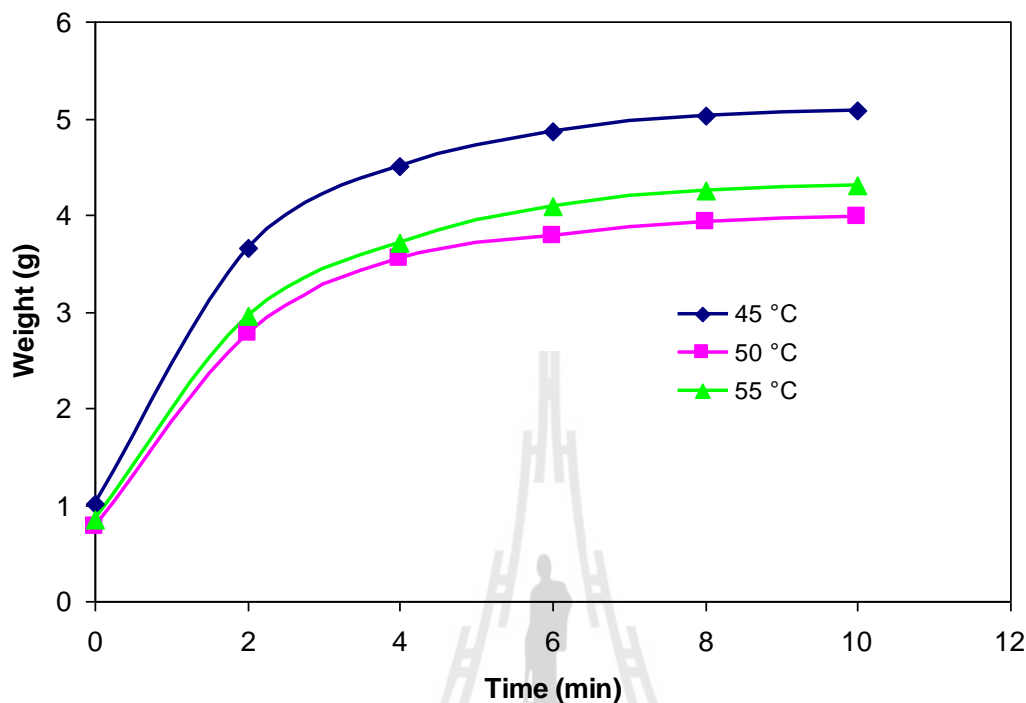
a, b, c อักษรที่เหมือนกันในคอลัมภ์เดียวกันหมายถึงไม่มีความแตกต่างกันที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

เมื่อพิจารณาค่าพารามิเตอร์ a* ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่บ่งบอกถึงการเปลี่ยนแปลงสีจากค่า +a สีแดงไปเป็น -a สีเขียว ซึ่งจากค่าที่ได้พบว่ามีค่า a* มีค่าเปลี่ยนแปลงไปในทางเพิ่มมากขึ้นจากค่าอ้างอิงของหอมสดแสดงว่าเมื่อทำการอบแห้งแล้วแนวโน้มความเป็นสีเขียวลดลงโดยการอบแห้งที่อุณหภูมิ 45 °C มีแนวโน้มของการเปลี่ยนไปเป็นสีแดงมากที่สุด

เมื่อพิจารณาค่าพารามิเตอร์ b* ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่บ่งบอกถึงการเปลี่ยนแปลงสีจากค่า +b สีเหลืองไปเป็น -b สีน้ำเงิน ซึ่งจากตารางที่ 4.2 จะพบว่าแนวโน้มค่าสีเหลืองจะลดลงในทุกสภาวะการอบแห้ง

เมื่อทำการหาค่าผลต่างของพารามิเตอร์สีรวมกับพบว่าค่าความแตกต่างของพารามิเตอร์สีเมื่อทำการอบแห้งหอมสับด้วยเครื่องอบแห้งระบบปั่นความร้อนที่อุณหภูมิ 45 50 และ 55 °C ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 นั่นคือในช่วงการอบแห้งด้วยอุณหภูมิ 45-55 °C จะไม่ส่งผลกระทบต่อคุณภาพด้านสีของผลิตภัณฑ์หลังการอบแห้งที่แตกต่างกันดังนั้นการเลือกใช้

อุณหภูมิการอบแห้งที่เหมาะสมจึงสามารถพิจารณาได้จากอัตราการอบแห้งและค่าพลังงานจำเพาะที่ให้ ความคุ้มค่าในด้านการใช้พลังงานมากที่สุดได้



ภาพที่ 4.13 พฤติกรรมการคืนตัวของหอมสับอบแห้งที่ได้จากการอบแห้งอุณหภูมิต่างๆ

เมื่อนำหอมสับมาทำการคืนตัวด้วยน้ำร้อนอุณหภูมิ 90 °C พบพฤติกรรมการคืนตัวของหอมสับดังแสดงในภาพที่ 4.13 ซึ่งจากภาพจะเห็นว่าเส้นพฤติกรรมการคืนตัวของหอมสับที่อุณหภูมิการอบแห้ง 45 °C มีค่าสูงกว่าที่อุณหภูมิ 50 และ 55 °C เนื่องจากพฤติกรรมการคืนน้ำกลับของหอมสับในภาพที่ 4.13 เป็นการพลอตค่าระหว่างน้ำหนักของหอมสับที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลาเนื่องจากการทดสอบการคืนน้ำกลับของหอมสับไม่ได้ควบคุมน้ำหนักเริ่มต้นของตัวอย่างไว้จึงทำให้กราฟที่ได้ออกมาแสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิ 45 °C สามารถคืนน้ำกลับได้มากกว่า ซึ่งในความเป็นจริงเมื่อทำการคำนวณค่าอัตราส่วนการคืนตัวของหอมสับด้วยสมการที่ 3.5 จะได้อัตราส่วนการคืนตัวของหอมสับอบแห้งที่อุณหภูมิ 45 50 และ 55 °C คือ 5.04 5.13 และ 5.08 ตามลำดับ ซึ่งการตรวจสอบทางสถิติ ด้วยการวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว โดยใช้วิธีการทดสอบของ Duncan ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% แล้วพบว่าอัตราส่วนการคืนตัวที่อุณหภูมิกาศอบแห้งทั้ง 3 ระดับไม่มีความแตกต่างกันในทางสถิติ และเมื่อสังเกตด้วยตาจะเห็นว่าหอมสับที่ได้จากการคืนตัวมีเมื่อได้รับน้ำกลับคืนจะมีลักษณะของสีเขียวที่เข้มกว่าหอมสด ส่วนลักษณะของส่วนหัวยังคงมีลักษณะที่ขาวดังแสดงในภาพที่ 4.14



(ก) หอมสับก่อนอบแห้ง

(ข) หอมสับหลังอบแห้ง

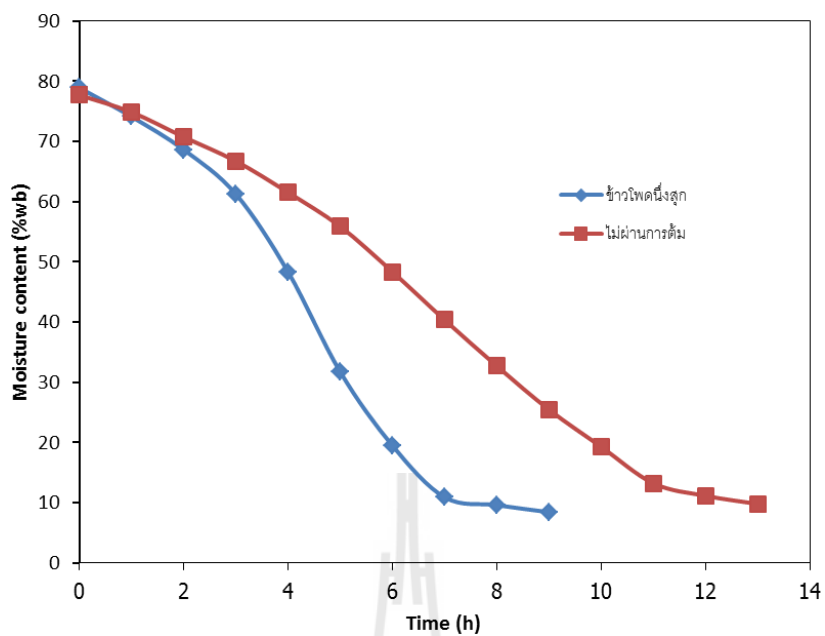
(ค) หอมสับหลังการคั้นตัว

ภาพที่ 4.14 ลักษณะของหอมสับหลังการอบแห้งและหลังการคั้นตัวเทียบกับหอมสับสด

จากการอบแห้งหอมสับด้วยเครื่องอบแห้งระบบบีบความร้อนจะเห็นได้ว่าลักษณะคุณภาพที่ได้ทั้งในด้านสีและการคั้นตัวเป็นที่น่าพอใจ เพียงแต่หากต้องการทำการอบแห้งให้ได้ประสิทธิภาพมากขึ้นอาจต้องมีการคัดแยกส่วนที่เป็นหัวของหอมออกให้เหลือเพียงใบหอมก็จะทำให้การอบแห้งเสร็จสิ้นได้เร็วขึ้น เนื่องจากความแตกต่างของลักษณะวัตถุที่นำมาอบแห้งส่งผลให้สิ้นเปลืองเวลาและพลังงานในการอบแห้งมากเกินไป

4.2.3 ผลการอบแห้งข้าวโพดหวาน

สำหรับการอบแห้งข้าวโพดทางผู้วิจัยได้ทดลองทำการทดสอบโดยอาศัยข้อมูลจากการอบแห้งแครอทและการอบแห้งหอมสับที่พบว่าอุณหภูมิการอบแห้ง 50°C ให้สภาวะการอบแห้งที่เหมาะสมทั้งในด้านการใช้พลังงานและคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ได้ ในการทดลองอบแห้งจึงได้ทำการทดลองโดยพิจารณาความเป็นไปได้ในการอบแห้งข้าวโพดหวานด้วยเครื่องอบแห้งระบบบีบความร้อน โดยทำการแบ่งเป็นการทดลองออกเป็น 2 ลักษณะคือการอบแห้งข้าวโพดหวานดิบและการอบแห้งข้าวโพดหวานที่ผ่านการนึ่งสุก ซึ่งผลจากการอบแห้งข้าวโพดหวานทั้งสองชนิดพบว่ามีความชื้นจากการอบแห้งดังแสดงในภาพที่ 4.15 ซึ่งจะเห็นว่าข้าวโพดที่ผ่านการนึ่งสุกแล้วจะสามารถลดความชื้นจากความชื้นเริ่มต้น $78.90\% \text{wb}$ ให้เหลือ $8.45\% \text{wb}$ ได้ในเวลา 9 ชั่วโมง ส่วนข้าวโพดดิบนั้นลดความชื้นจากความชื้นเริ่มต้น $77.70\% \text{wb}$ ให้เหลือ $9.81\% \text{wb}$ ใช้เวลาในการอบแห้ง 13 ชั่วโมง ซึ่งเวลาในการอบแห้งแตกต่างกันถึง 4 ชั่วโมงที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากการนึ่งข้าวโพดทำให้เซลล์ของข้าวโพดเกิดการเปลี่ยนแปลงและการผ่านเอาเมล็ดข้าวโพดออกจากฝักมีส่วนพื้นที่ผิวเปิดที่ทำให้ความชื้นระเหยออกได้ง่าย ส่วนข้าวโพดดิบนั้นถึงแม้จะมีรอยปากออกจากฝักเช่นเดียวกันแต่การไม่ผ่านการนึ่งทำให้ชั้นพืวด้านนอกกักน้ำไว้ทำให้การระเหยความชื้นเกิดขึ้นได้ช้ากว่า ลักษณะของข้าวโพดนึ่งสุกและข้าวโพดดิบที่ใช้ในการทดลองมีลักษณะดังแสดงในภาพที่ 4.16 สำหรับผลการประเมินผลการอบแห้งข้าวโพดแสดงในตารางที่ 4.5



ภาพที่ 4.15 พฤติกรรมการอบแห้งข้าวโพดดิบและข้าวโพดข้าวโพดนึ่งสุก



(ก) ข้าวโพดดิบ



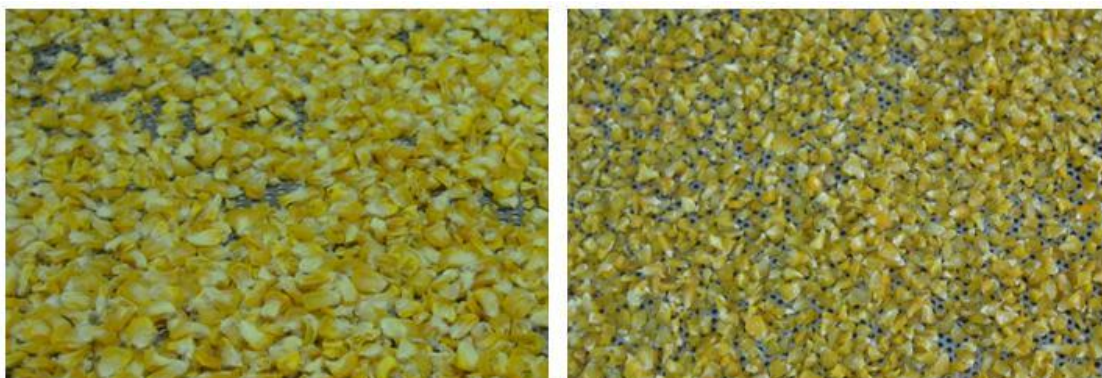
(ข) ข้าวโพดนึ่งสุก

ภาพที่ 4.16 ลักษณะของข้าวโพดดิบและข้าวโพดนึ่งสุกก่อนการอบแห้ง

ตารางที่ 4.5 ผลการอบแห้งข้าวโพดหวาน

รายการ	ชนิดตัวอย่าง	
	ข้าวโพดนึ่งสุก	ข้าวโพดดิบ
น้ำหนักตัวอย่าง (kg)	10	10
ความชื้นเริ่มต้น (%wb)	78.90	77.70
ความชื้นสุดท้าย (%wb)	8.45	9.81
เวลาในการอบแห้ง (h)	9	13
ปริมาณน้ำระเหยจากวัสดุ (kg)	7.70	7.53
ปริมาณไฟฟ้าที่ใช้ทั้งหมด (kWh)	11.98	16.10
ปริมาณน้ำควบแน่นที่เครื่องทำระเหย (kg)	7.30	6.67
อัตราการไหลอากาศ (m^3/s)	0.51	0.51
อัตราการไหลอากาศ bypass (m^3/s)	0.408	0.408
อัตราส่วนอากาศ bypass (%)	80	80
อัตราการอบแห้ง (kg_{water}/h)	0.86	0.58
MER (kg_{water}/h)	0.81	0.51
SMER (kg_{water}/kWh)	0.64	0.47
SEC (MJ/kg_{water})	5.60	7.70
COP _{hp(used)}	3.12	3.07

เมื่อพิจารณาลักษณะของข้าวโพดที่ได้หลังการอบแห้งจะพบเมล็ดของข้าวโพดมีลักษณะที่เกิดการหดตัวอย่างมากทั้งนี้เนื่องจากปริมาณน้ำส่วนใหญ่อยู่ในส่วนที่เป็นเนื้อส่วนเชื่อมเมล็ดที่เป็นชั้นบางด้านนอกจะมีความชื้นน้อยกว่า เมื่อเนื้อสูญเสียไปทำให้เกิดการหดตัวของเนื้อเยื่อชั้นนอกและส่วนเนื้อภายในนั้นเมื่อเกิดการสูญเสียเนื้อก็ทำให้เกิดที่ว่างขึ้นระหว่างส่วนเนื้อและส่วนเชื่อมเมล็ดด้านนอก ลักษณะของข้าวโพดหลังการอบแห้งมีลักษณะดังแสดงในภาพที่ 4.17 ซึ่งลักษณะของข้าวโพดดิบจะมีลักษณะของการหดตัวที่น้อยกว่า



(ก) ข้าวโพดดิบ

(ข) ข้าวโพดนึ่งสุก

ภาพที่ 4.17 ลักษณะของข้าวโพดหลังการอบแห้ง

ผลการวัดสีของข้าวโพดดิบ ข้าวโพดนึ่งสุก ข้าวโพดดิบผ่านการอบแห้ง และข้าวโพดนึ่งสุกผ่านการอบแห้งพบว่าข้าวโพดที่ผ่านการนึ่งจะมีสีเหลืองที่เข้มขึ้น โดยดูได้จากค่า b^* ที่สูงกว่าค่าที่วัดได้จากข้าวโพดดิบปกติ และพบว่าข้าวโพดที่ผ่านการนึ่งเมื่อทำการอบแห้งจะได้ผลิตภัณฑ์หลังการอบแห้งที่ลักษณะคล้ำขึ้น โดยค่า L^* ที่ได้จะมีค่าต่ำกว่าค่าที่วัดได้จากผลิตภัณฑ์อื่น โดยค่าพารามิเตอร์สีของตัวอย่างข้าวโพดในแต่ละสถานะแสดงในตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 ค่าพารามิเตอร์สีของข้าวโพดหวาน

Methods	Parameters			
	L^*	a^*	b^*	ΔE
ข้าวโพดดิบ	74.29 ^c	-2.80 ^b	25.59 ^a	-
ข้าวโพดนึ่งสุก	73.86 ^c	-4.87 ^c	44.08 ^b	18.80 ^a
ข้าวโพดดิบหลังอบแห้ง	64.96 ^b	1.99 ^a	31.26 ^a	14.53 ^a
ข้าวโพดนึ่งสุกหลังอบแห้ง	53.85 ^a	0.94 ^a	46.26 ^b	29.63 ^b

a, b, c อักษรที่เหมือนกันในคอลัมน์เดียวกันหมายถึงไม่มีความแตกต่างกันที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

ซึ่งเมื่อพิจารณาคุณภาพโดยรวมของข้าวโพดที่ได้จากการอบแห้งทั้งสองแบบจะพบว่าการอบแห้งข้าวโพดหวานในลักษณะที่เป็นข้าวโพดดิบจะให้ลักษณะทางคุณภาพเป็นที่น่าพอใจมากกว่าเนื่องจากลักษณะที่ได้ค่อนข้างที่จะคงรูปมากกว่าข้าวโพดที่ผ่านการนึ่งสุกแล้วที่มีลักษณะการหดตัวค่อนข้างมากทำให้มีลักษณะเหี่ยวยุบ ส่วนคุณภาพด้านสีนั้นยังคงให้ลักษณะสีที่เป็นสีเหลืองไม่แตกต่างจากลักษณะก่อนการอบแห้งมากนัก

4.3 การวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์

จากข้อมูลค่าใช้จ่ายในการลงทุนสร้างเครื่องอบแห้งระบบบีบความร้อนที่แสดงในตารางที่ 4.7 สามารถวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายและผลตอบแทนในเชิงเศรษฐศาสตร์โดยมีรายละเอียดและเงื่อนไขต่างๆ ของการคำนวณดังนี้

- ต้นทุนการสร้างเครื่องอบแห้งรวม 70,544 บาท
- สามารถแห้งแครอทได้ครั้งละ 10 กิโลกรัม
- ผลิตแครอทแห้งได้ครั้งละ 1.11 กิโลกรัม (คิดความชื้นเริ่มต้น 90%wb ลดเหลือ 10% wb)
- ราคาแครอทสดเฉลี่ย 45 บาทต่อกิโลกรัม
- ราคาแครอทอบแห้ง 500 บาทต่อกิโลกรัมแห้ง (คิดเป็น 50 เปอร์เซ็นต์ของราคาขายในท้องตลาด)
- ใช้เวลาในการอบแห้งครั้งละ 8 ชั่วโมง
- ทำการอบแห้งสัปดาห์ละ 6 วัน ดังนั้นทำงานปีละ 312 วัน
- สมมติให้มีการอบแห้งผลผลิตอื่นรวมด้วยตลอดปี ที่เงื่อนไขการทำงานเดียวกัน
- อัตราการใช้ไฟฟ้าเฉลี่ยต่อชั่วโมงเท่ากับ 1.70 kWh
- อัตราดอกเบี้ยเงินกู้ 7.75%
- ตัวเครื่องมีอายุการใช้งาน 10 ปี
- มูลค่าซากคิดเป็น 10% ของต้นทุน
- ค่าบำรุงรักษารายปีคิดเป็น 5% ของต้นทุน
- ค่าไฟฟ้าราคา 2.5 บาท/kWh
- ค่าจ้างแรงงาน 1 คน ราคา 300 บาท/วัน

ค่าใช้จ่ายเปรียบเทียบรายปีของต้นทุนสร้างเครื่อง

$$\begin{aligned}
 &= 70,544(A/P, 7.75\%, 10) - 70,544(0.1)(A/F, 7.75\%, 10) \\
 &= 70,544 \left(\frac{0.0775(0.0775+1)^{10}}{(0.0775+1)^{10}-1} \right) - 70,544(0.1) \left(\frac{0.0775}{(0.0775+1)^{10}-1} \right) \\
 &= 9,902.12 \text{ บาท}
 \end{aligned}$$

ค่าใช้จ่ายด้านพลังงานไฟฟ้ารายปี

$$\begin{aligned}
 &= \text{ชั่วโมงการทำงานรวม} \times \text{อัตราการใช้ไฟฟ้า} \times \text{ราคาไฟฟ้าต่อหน่วย} \\
 &= 312 \times 8 \times 1.70 \times 2.5
 \end{aligned}$$

$$= 10,608 \text{ บาท}$$

ค่าใช้จ่ายบำรุงรักษารายปี

$$= 70,554 \times 0.05$$

$$= 3,527.20 \text{ บาท}$$

ค่าจ้างแรงงานรายปี

$$= 300 \times 312$$

$$= 93,600 \text{ บาท}$$

ค่าใช้จ่ายรวมรายปี

$$= 9,902.12 + 10,608 + 3527.20 + 93,600$$

$$= 117,637.32 \text{ บาท}$$

ค่าใช้จ่ายต่อปริมาณผลผลิตคิดแยกประเภทตามต้นทุน

$$\text{ต้นทุนค่าเครื่อง} = 9,902.12 / (312 \times 1.11)$$

$$= 28.59 \text{ บาทต่อกิโลกรัมผลผลิตแห้ง}$$

$$\text{ค่าไฟฟ้า} = 10,608 / (312 \times 1.11)$$

$$= 30.63 \text{ บาทต่อกิโลกรัมผลผลิตแห้ง}$$

$$\text{บำรุงรักษา} = 3527.20 / (312 \times 1.11)$$

$$= 10.18 \text{ บาทต่อกิโลกรัมผลผลิตแห้ง}$$

$$\text{ค่าจ้างแรงงาน} = 93,600 / (312 \times 1.11)$$

$$= 270.27 \text{ บาทต่อกิโลกรัมผลผลิตแห้ง}$$

$$\text{ค่าใช้จ่ายรวม} = 117,637.32 / (312 \times 1.11)$$

$$= 339.68 \text{ บาทต่อกิโลกรัมผลผลิตแห้ง}$$

ผลตอบแทนรายปี

$$= \text{ปริมาณวัสดุ} \times \text{ราคาขาย}$$

$$= 346.32 \times 500$$

$$= 173,160 \text{ บาท}$$

กำไรสุทธิรายปี

$$= \text{ผลตอบแทน} - \text{ต้นทุนการผลิต}$$

$$= 173,160 - 117,637.32$$

$$= 55,522.68 \text{ บาท}$$

ระยะเวลาคืนทุน (Payback period)

= ต้นทุนสร้างเครื่อง/กำไรสุทธิรายปี

= 70,544/55,522.68

= 1.27 ปี

ตารางที่ 4.7 ค่าใช้จ่ายในการสร้างเครื่องอบแห้งระบบบีบความร้อน

ลำดับที่	รายการ	จำนวน	ราคาต่อหน่วย	จำนวนเงิน (บาท)
1	เหล็กแผ่นเคลือบสังกะสีเบอร์ 28 ขนาด $1.2 \times 2.4 \text{ m}^2$	12 แผ่น	390	4680
2	เหล็กกล่องนิ้วหนา 2 mm	10 เส้น	285	2850
3	ฉนวน	4 ม้วน	320	1280
4	ชุดพัดลมหลักและมอเตอร์	1 ชุด	4050	4050
5	ชุดพัดลมเครื่องควบแน่นตัวนอกและมอเตอร์	1 ชุด	1300	1300
6	โซลินอยด์วาล์ว	2 ชุด	1250	2500
7	วาล์วกันกลับ	2 ชุด	550	1100
8	ถาดอลูมิเนียม	10 ถาด	780	7800
9	เครื่องอัดไอแบบลูกสูบขนาด $1 \frac{1}{4}$ hp	1 ชุด	4250	4250
10	Capacitor start	1 ตัว	756	756
11	ชุดแผงคอยล์เย็นและร้อน	1 ชุด	6000	6000
12	ชุดกลอนประตูแบบมือจับพร้อมบานพับ	1 ชุด	310	310
13	โครงวางชั้นถาด	1 ชั้น	1600	1600
14	ชุดควบคุมอุณหภูมิแบบดิจิตอล	1 ตัว	3500	3500
15	ชุดอุปกรณ์ตู้ควบคุม	1 ชุด	4210	4210
16	สื่อยางใหญ่	4 สื่อย	175	700
17	มิเตอร์ และสายไฟหลัก	1 ชุด	658	658
18	วัสดุสิ้นเปลือง (เหมาจ่าย)			5000
19	ค่าจ้างประกอบเครื่อง			15,000
20	ค่าจ้างติดตั้งระบบบีบความร้อน			3,000
รวมค่าใช้จ่าย				70,544

บทที่ 5

สรุปผลการดำเนินการ

เครื่องแห่งระบบปั๊มความร้อนที่สร้างขึ้นประกอบไปด้วยส่วนประกอบที่สำคัญสองส่วนคือ ระบบปั๊มความร้อนและห้องอบแห้ง โดยชุดระบบปั๊มความร้อนซึ่งประกอบด้วยเครื่องอัดไอขนาด 1/4 แรงม้า เครื่องทำระเหยขนาด 3.75 kW เครื่องควบแน่นตัวใน 4.5 kW และเครื่องควบแน่นตัวนอกขนาด 2.5 kW สำหรับห้องอบแห้งมีปริมาตรภายใน 1.34 m³ ภายในบรรจุชั้นถาดขนาด 50 x 60 cm² จำนวน 10 ถาด เครื่องอบแห้งระบบปั๊มความร้อนนี้ทำงานแบบระบบปิดโดยอากาศที่ใช้ในการอบแห้งจะไหลเวียนอยู่ภายในห้องอบแห้งไม่ได้ปล่อยออกสู่บรรยากาศภายนอก ทำการทดสอบการอบแห้งด้วย แครอท หอมสับ และข้าวโพดหวาน ผลจากการทดสอบอบแห้งพบว่าวัสดุต่างชนิดกันมีอัตราการอบแห้งที่แตกต่างกันโดยแครอทมีอัตราการอบแห้งที่สูงกว่า หอมสับและข้าวโพดหวานเมื่อทำการอบแห้งที่สภาวะการอบแห้งเดียวกัน เมื่อพิจารณาด้านคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ได้หลังการอบแห้งด้านสีพบว่าผลิตภัณฑ์แครอทอบแห้งที่ได้มีการเปลี่ยนแปลงของสีที่แตกต่างจากสีของแครอทสด (ΔE) อยู่ในช่วง 12.08-12.38 และอุณหภูมิที่ใช้ในการทดสอบอบแห้งไม่ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของสีที่แตกต่างกันที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ ผลิตภัณฑ์ที่ได้หลังการอบแห้งเมื่อทำการคั่วในน้ำร้อนอุณหภูมิ 90 °C พบว่ามีอัตราส่วนการคั่ว 4.14-4.61 และมีค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะต่ำสุด 3.37 MJ/kg ที่อุณหภูมิการอบแห้ง 50 °C สำหรับการอบแห้งหอมสับพบว่าคุณภาพด้านสีของหอมสับอบแห้งมีการเปลี่ยนแปลงสีแตกต่างจากหอมสดอยู่ในช่วง 5.58-7.34 โดยอุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งไม่ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของสีที่แตกต่างกันที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ ผลิตภัณฑ์ที่ได้หลังการอบแห้งเมื่อทำการคั่วด้วยน้ำร้อนอุณหภูมิ 90 °C พบว่ามีอัตราส่วนการคั่ว 5.04-5.13 โดยอุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งไม่ส่งผลต่ออัตราส่วนการคั่วของหอมสับที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะต่ำสุดคือ 7.26 MJ/kg ที่อุณหภูมิการอบแห้ง 50 °C ซึ่งสรุปได้ว่าการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งที่สร้างขึ้นนี้ด้วยอุณหภูมิความร้อนในการอบแห้ง 50 °C มีความเหมาะสมที่สุดเนื่องจากคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ได้หลังการอบแห้งอยู่ในระดับคุณภาพที่ดีไม่แตกต่างจากการอบแห้งด้วยอุณหภูมิที่ต่ำกว่าแต่ใช้เวลาในการอบแห้งที่สั้นกว่าพร้อมทั้งประหยัดพลังงานมากกว่าอีกด้วย ส่วนการอบแห้งข้าวโพดหวานนั้นได้ทำ

การอบแห้งเฉพาะที่อุณหภูมิ 50 °C โดยทำการแบ่งตัวอย่างออกเป็นสองแบบคืออบแห้งข้าวโพดคิบ และการอบแห้งข้าวโพดที่ผ่านการต้มสุกซึ่งข้าวโพดต้มสุกมีอัตราการอบแห้งที่สูงกว่าข้าวโพดคิบ แต่มีลักษณะของเมล็ดที่หดรัดมากกว่าข้าวโพดต้มสุก ส่วนคุณภาพด้านสีของผลิตภัณฑ์ข้าวโพดต้มสุกจะมีลักษณะของสีเหลืองที่เข้มขึ้นกว่าสีของข้าวโพดคิบที่มีลักษณะของสีขาวนวล

จากการทดสอบอบแห้งผักตัวอย่างพบว่าเครื่องอบแห้งระบบปั๊มความร้อนสามารถทำการอบแห้งผักเพื่อใช้เป็นส่วนประกอบของอาหารกึ่งสำเร็จรูป อย่างเช่น แครอท และหอมสับ ได้ดีเมื่อประเมินผลทางเศรษฐศาสตร์พบว่าต้นทุนที่ใช้ในการอบแห้งรวมทั้งสิ้น 339.68 โดยแบ่งออกเป็น ต้นทุนค่าเครื่องอบแห้ง 28.59 บาทต่อกิโลกรัมแครอทแห้ง ค่าใช้จ่ายด้านพลังงานไฟฟ้า 30.63 บาทต่อกิโลกรัมแครอทแห้ง ค่าบำรุงรักษารายปี 10.18 บาทต่อกิโลกรัมแครอทแห้ง ค่าจ้างแรงงาน 270.27 บาทต่อกิโลกรัมแครอทแห้ง ซึ่งจะพบว่าค่าจ้างแรงงานเป็นต้นทุนที่มากที่สุดเมื่อเทียบกับต้นทุนอื่น แต่เนื่องจากการผลิตที่ต่ำดังนั้นแรงงานนี้อาจนำไปใช้ประโยชน์อื่นในระหว่างทำการอบแห้งก็จะยังทำให้เกิดความคุ้มค่ามากขึ้น

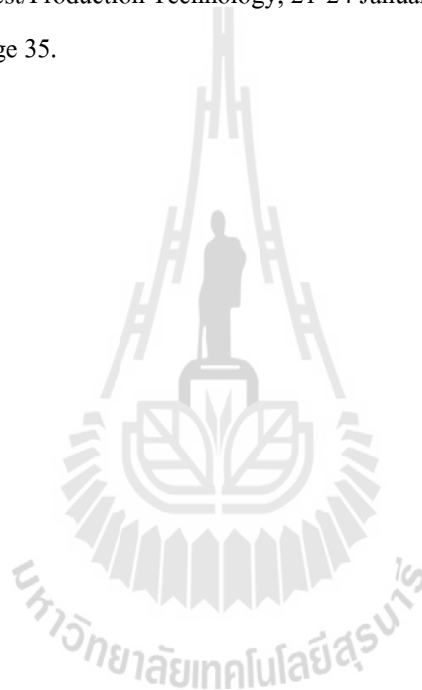
ข้อเสนอแนะ

1. การอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งระบบปั๊มความร้อนที่สร้างขึ้นยังใช้สารทำความเย็น R-22 เนื่องจากเป็นสารทำความเย็นที่หาง่ายและมีราคาไม่สูงมากนักในระบบปั๊มความร้อนซึ่งในอนาคตสารทำความเย็นนี้จะถูกยกเลิกการผลิต จึงควรรหาสารทำความเย็นชนิดใหม่ทดแทนซึ่งเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมมากขึ้น

เอกสารอ้างอิง

- ธิดิวัดน์ สิริพันธุ์กุล. 2550. ความต้องการของผู้บริโภคที่มีต่อผลิตภัณฑ์ผักรวมอบแห้งกิ่งสำเร็จรูปในอำเภอเมือง จังหวัดเชียงใหม่. รายงานการค้นคว้าอิสระ บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 85 หน้า.
- การดร หนูทอง, กอดขวัญ นามสงวน, ศิวะ อัจฉริยวิริยะ และ อารีย์ อัจฉริยวิริยะ. 2552. จลนพลศาสตร์การอบแห้งและคุณภาพของลำไยโดยใช้อินฟราเรดร่วมกับลมร้อน. เอกสารประกอบการประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 23, 4-7 พฤศจิกายน 2552 คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. ไม่มีเลขหน้า.
- ศูนย์วิจัยกสิกรรมไทย. 2005. อาหารกิ่งสำเร็จรูป: แนวนอนไม้ขยายตัว...สอได้รับพฤติกรรมผู้บริโภค รัศมีชัด, (11 สิงหาคม 2005). ระบบออนไลน์, <http://www.kasikornresearch.com/>, สืบค้นเมื่อ (20 มีนาคม 2554).
- ศูนย์วิจัยกสิกรรมไทย. 2007. แนวนอนอาหารสุภาพปี'51: ปรับพฤติกรรมรับค่าครองชีพ(มองเศรษฐกิจฉบับที่ 2065), (8 พฤศจิกายน 2007). ระบบออนไลน์, <http://www.kasikornresearch.com/>, สืบค้นเมื่อ (20 มีนาคม 2554).
- สมชาติ โสภณธฤทธิ์. 2540. การอบแห้งเมล็ดพืชและอาหารบางประเภท. พิมพ์ครั้งที่ 7. คณะพลังงานและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, กรุงเทพฯ. 338น.
- สุทธิศักดิ์ ภัทรสถาพรกุล. 2543. การพัฒนาเครื่องอบแห้งระบบบ่มความร้อน. วิทยานิพนธ์ระดับปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กำแพงแสน จ. นครปฐม. 123 น.
- Brennan, J.G., J.R. Butters, N.D. Cowell and A.E.V. Lilley. 1990. Food Engineering Operations. Elsevier Science Publishing, New York. 700p.
- Brooker, Donald B., Fred W. Bakker-Arkema, Carl W. Hall. 1992. Drying and Storage of Grains and Oilseeds. Van Nostrand Reinhold, New York.450p.
- Honeywell. 1998. Damper Selection and Sizing, section of engineering manual of automatic control 77-1100. Retrieved March 24, 20012 from Metropac HVAC Master distributor website <http://www.metropac.com/pneu/PDFs/77-1142.pdf>
- Perera, O., Conrad and M.Shafiur Rahman. 1997. Heat pump dehumidifier drying of food. Tends in Food Science & Technology, 8: 75-79.

- Prasertsan, S., P. Sean-saby, P. Ngamsritrakul and G. Prateepchaikul. 1996. Heat pump dryer Part1: Simulation of the model. *Int.J. Energy Res.* 20: 1067-1079.
- Prasertsan, S., P. Sean-saby, P. Ngamsritrakul and G. Prateepchaikul. 1996. Heat pump dryer Part2: Results of Simulation. *Int.J. Energy Res.* 21: 1-20.
- Stoecker, W.F. and J. W. Jones. 1982. Refrigeration and air conditioning. McGrew-Hill, Singapore, 443p.
- Tawarat Tipyavimol and Somyot Chirnakorn. 2007. Performance Study of Heat pump-Microwave Combination Dryer. Proceeding of International Conference on Agricultural, Food and Biological Engineering & Post Harvest/Production Technology, 21-24 January, Sofitel Raja Orchid Hotel, Khon Kean, Thailand. Page 35.



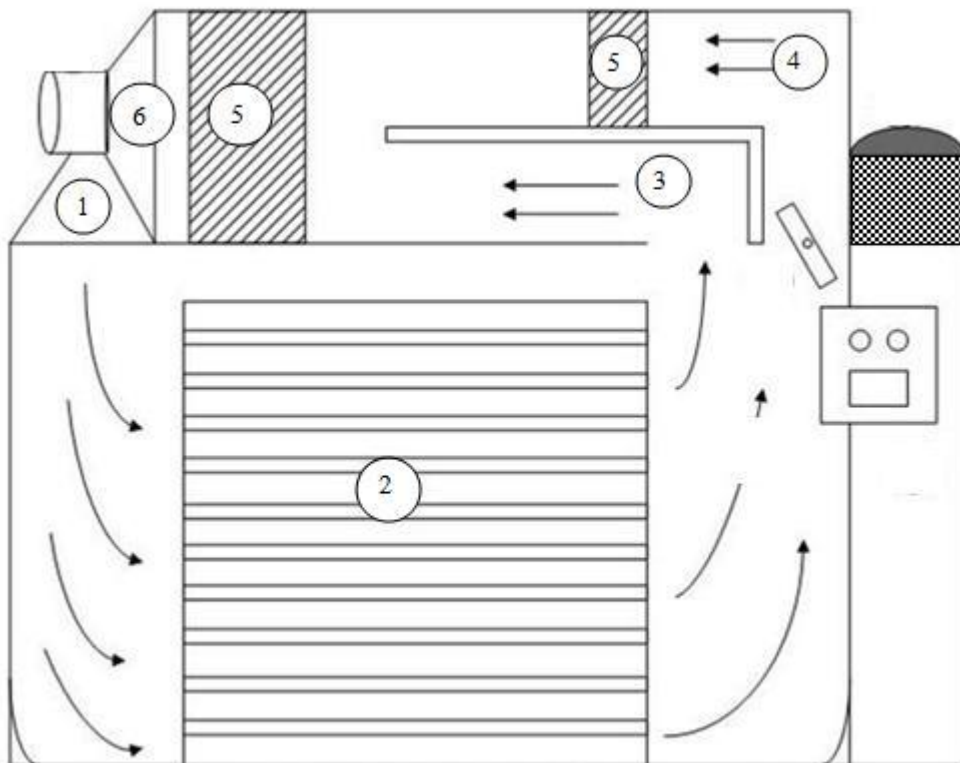
ภาคผนวก ก
การคำนวณความดันลวดในเครื่องอบแห้งระบบป้อนความร้อน



การคำนวณความดันตกในเครื่องอบแห้งระบบบีบความร้อน

การออกแบบระบบอากาศ จะเริ่มจากการคำนวณความดันสูญเสียในเครื่องอบแห้งซึ่งเกิดจากการไหลของอากาศในระบบผ่านท่อลม (ASHRAE, 1992) ซึ่งจะพิจารณาจากภาพผนวกที่ 1 ตามหมายเลขของอุปกรณ์และส่วนของห้องอบแห้งซึ่งมีรายละเอียดสถานะของอากาศในการอบแห้งดังนี้

- อากาศอบแห้งอุณหภูมิ 50 °C มีค่าความหนาแน่น 1.0915 kg/m³
- อัตราการไหลอากาศรวม 0.51 m³/s
- อัตราการไหลอากาศ bypass 0.408 m³/s
- อัตราการไหลอากาศผ่านเครื่องทำระเหย 0.102 m³/s



ภาพผนวกที่ ก1 แสดงตำแหน่งท่อลมในตำแหน่งที่นำมาคิดความดันตก

1. ท่อขยายจากพัดลมสู่ห้องอบแห้ง

$$\begin{aligned}
 A_1 &= \text{พื้นที่หน้าตัดทางเข้า} &= 0.204 \text{ m} \times 0.100 \text{ m} &= 0.0204 \text{ m}^2 \\
 A_0 &= \text{พื้นที่หน้าตัดทางออก} &= 0.250 \text{ m} \times 0.750 \text{ m} &= 0.1875 \text{ m}^2 \\
 V_0 &= \text{ความเร็วของอากาศขาออก} &= (0.51 \text{ m}^3/\text{s}) / (0.1875 \text{ m}^2) &= 2.72 \text{ m/s} \\
 \theta &= \text{มุมเอียงของท่อขยาย} &= 117.66^\circ \\
 A_0/A_1 &= 9.19 \text{ ดังนั้น } C_0 = 81.93 \\
 \Delta P &= C_0 \left(\frac{V_0^2}{1.29} \right) = 81.94 \left(\frac{2.72^2}{1.29} \right) = 469.94 \text{ Pa}
 \end{aligned}$$

2. ภายในห้องอบแห้ง

การคำนวณหาค่าความดันลดของอากาศที่ไหลผ่านชั้นถาดภายในห้องอบแห้ง ทำได้โดยการสมมติให้การไหลของอากาศผ่านชั้นถาดอบแห้งมีพฤติกรรมเหมือนกับการไหลของอากาศผ่านไบปรบัลคมแบบขนาน (parallel damper) ที่มีมุม 90° หรือเปิดสุดซึ่งสามารถคำนวณได้ดังนี้ (Honeywell, 1998)

$$\begin{aligned}
 - \text{ Free area ratio} &= (0.00005149 \times 658.75 \text{ in}^2)^{0.1007} \times \frac{658.75 \text{ in}^2}{922.25 \text{ in}^2} = 0.508 \\
 - \text{ Pressure drop at 1000 fpm} &= -0.01254 \times (1 - 0.508^{-4.274}) = 0.214 \text{ in. wc} \\
 - \text{ Approach velocity} &= 179.13 \text{ fpm} \\
 - \text{ Correction factor} &= \frac{10^6}{179.13^2} = 31.16 \\
 - \text{ Pressure drop across damper} &= \frac{0.214 \text{ in. wc}}{31.16} = 0.0069 \text{ in. wc} = 67.69 \text{ Pa}
 \end{aligned}$$

3. ช่องอกเข้าท่อ Bypass

$$\begin{aligned}
 H &= 0.750 \text{ m} \\
 W &= 0.242 \text{ m} \\
 H/W &= 3.1 \\
 C_0 &= 0.974
 \end{aligned}$$

$$V_0 = \frac{0.408 \text{ m}^3 / \text{s}}{0.1815 \text{ m}^2} = 2.25 \text{ m/s}$$

$$\Delta P = 0.974 \left(\frac{2.25^2}{1.29} \right) = 3.82 \text{ Pa}$$

4. ช่องฉากรับท่อเครื่องทำระเหย

$$H = 0.750 \text{ m}$$

$$W = 0.125 \text{ m}$$

$$H/W = 6$$

$$C_0 = 0.85$$

$$V_0 = \frac{0.102 \text{ m}^3 / \text{s}}{(0.75 \times 0.125) \text{ m}^2} = 1.09 \text{ m/s}$$

$$\Delta P = 0.85 \left(\frac{1.09^2}{1.29} \right) = 0.78 \text{ Pa}$$

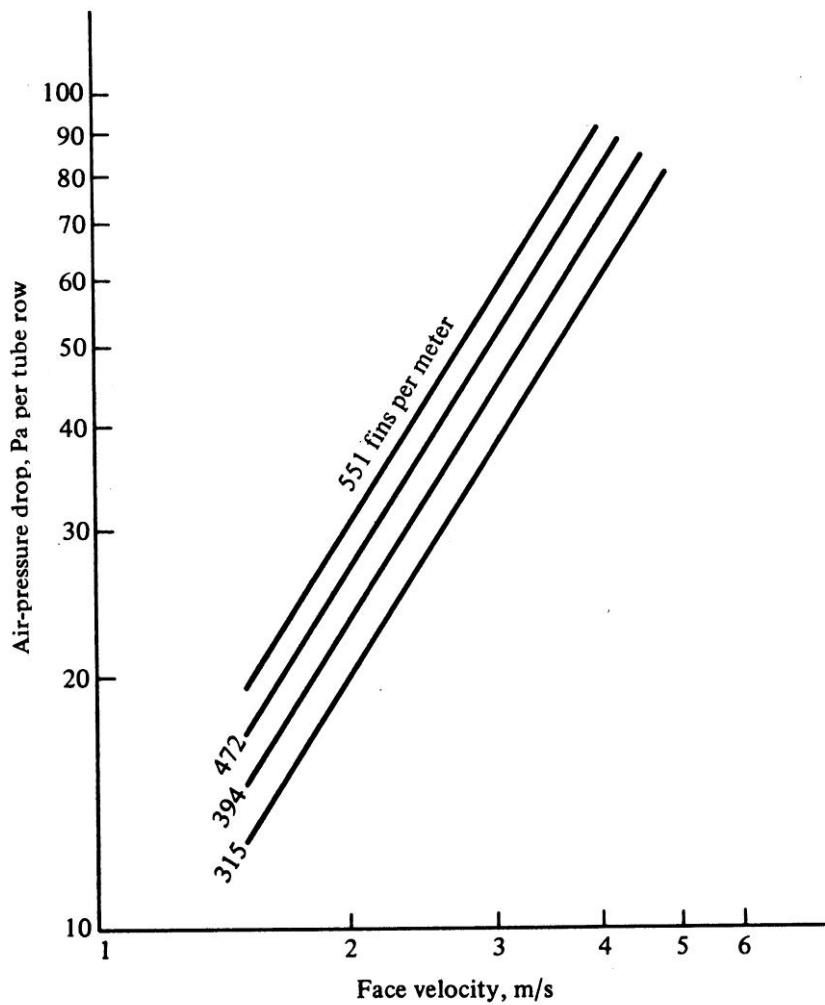
5. ความดันลดผ่านอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน

การหาความดันลดของอากาศที่ไหลผ่านอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนซึ่งในระบบปั๊มความร้อนเป็นแบบครีปและท่อ (Fin and tube) จะใช้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วลมและความดันลดต่อแถวของ Stoecker and Jones (1982) ดังแสดงในภาพผนวกที่ 2 ซึ่งจะได้ค่าความดันลดที่อุปกรณ์ดังนี้

เครื่องทำระเหย

เครื่องทำระเหยมีความเร็วของอากาศไหลผ่านคือ 1.09 m/s ที่จำนวนครีป 551 ครีปต่อเมตรจะได้ความดันสูญเสียประมาณ 15 Pa/แถว เครื่องทำระเหยที่ใช้เป็นแบบ 3 แถวดังนั้น

$$\Delta P = 15 \times 3 = 45 \text{ Pa}$$



ภาพผนวกที่ ก2 กราฟความดันสูญเสียของอากาศไหลผ่าน fin-coil
ที่มา: Stoecker and Jones (1982)

เครื่องควบแน่น

เครื่องควบแน่นมีความเร็วของอากาศไหลผ่านคือ 2.25 m/s ที่จำนวนครีบ 551 ครีบต่อเมตรจะได้ความดันสูญเสียประมาณ 38 Pa/แถว เครื่องทำระเหยที่ใช้เป็นแบบ 2 แถวดังนั้น

$$\Delta P = 38 \times 2 = 76 \text{ Pa}$$

6. ท่อลดที่ทางเข้าพัดลม

A_1	= พื้นที่หน้าตัดทางเข้า	= 0.750 m x 0.575 m	= 0.4313 m ²
A_0	= พื้นที่หน้าตัดทางออก	= 0.250 m x 0.450 m	= 0.1125 m ²

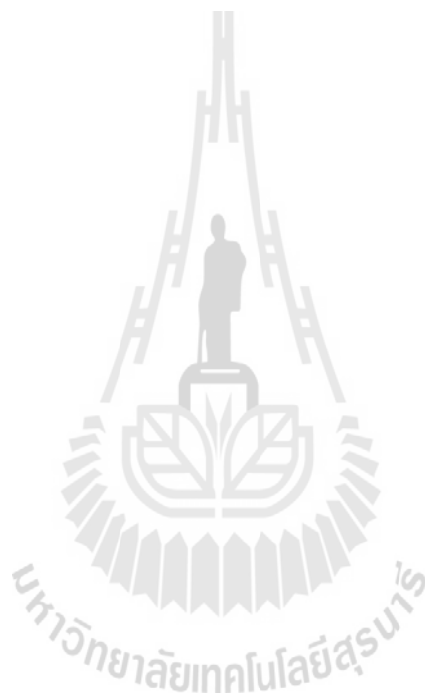
$$V_0 = \text{ความเร็วของอากาศออก} = (0.51 \text{ m}^3/\text{s}) / (0.1125 \text{ m}^2) = 4.53 \text{ m/s}$$

$$\theta = \text{มุมเอียงของท่อขยาย} = 76.48^\circ$$

$$A_0/A_1 = 2.06 \text{ ดังนั้น } C_0 = 0.14$$

$$\Delta P = C_0 \left(\frac{V_0^2}{1.29} \right) = 0.14 \left(\frac{4.53^2}{1.29} \right) = 2.23 \text{ Pa}$$

จากการคำนวณได้ความดันสูญเสียรวมทั้งสิ้น 665.46 Pa ซึ่งค่าความดันลดที่คำนวณได้นี้
นำไปใช้เพื่อหาพิคัดขนาดมอเตอร์สำหรับขับพัดลม



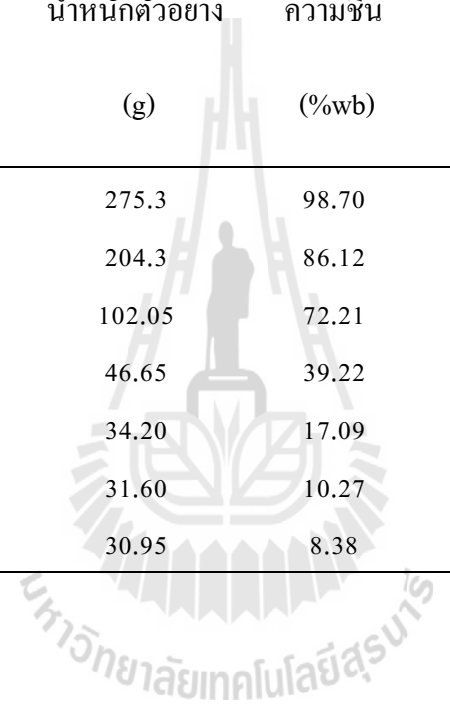


ตารางผนวกที่ ข1 ผลการอบแห้งเครื่องทอผ้าไหมอากาศอบแห้ง 45 °C

เวลา (ชั่วโมง)	การทดลองที่ 1			การทดลองที่ 2			การทดลองที่ 3		
	น้ำหนักตัวอย่าง	ความชื้น	พลังงาน	น้ำหนักตัวอย่าง	ความชื้น	พลังงาน	น้ำหนักตัวอย่าง	ความชื้น	พลังงาน
	(g)	(%wb)	(kWh)	(g)	(%wb)	(kWh)	(g)	(%wb)	(kWh)
0	245.14	89.20	-	255.20	87.60	-	242.4	89.30	-
1	173.17	84.71	1.27	206.98	84.71	1.24	169.52	84.70	1.22
2	136.57	80.61	1.13	163.24	80.61	1.20	133.10	80.51	1.31
3	81.13	67.37	1.41	96.98	67.37	1.18	75.49	66.96	1.14
4	49.90	46.95	1.12	59.65	46.95	1.21	48.50	46.52	1.12
5	36.18	26.83	1.13	43.25	26.83	1.15	35.17	26.25	1.13
6	30.96	14.69	1.12	37.01	14.49	1.12	30.21	14.14	1.15
7	30.06	11.92	1.12	35.93	11.92	1.10	29.12	10.93	1.14
8	29.46	11.13	1.11	35.16	10.00	1.13	28.51	9.03	1.13

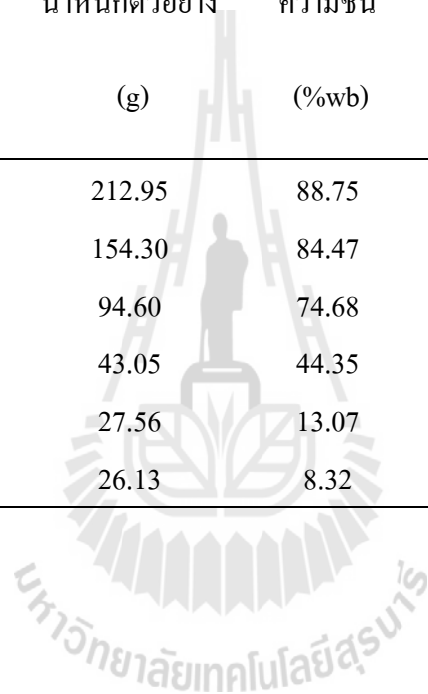
ตารางผนวกที่ ข2 ผลการอบแห้งเครื่องทอหมึกอากาศอบแห้ง 50 °C

เวลา (ชั่วโมง)	การทดลองที่ 1			การทดลองที่ 2			การทดลองที่ 3		
	น้ำหนักตัวอย่าง	ความชื้น	พลังงาน	น้ำหนักตัวอย่าง	ความชื้น	พลังงาน	น้ำหนักตัวอย่าง	ความชื้น	พลังงาน
	(g)	(%wb)	(kWh)	(g)	(%wb)	(kWh)	(g)	(%wb)	(kWh)
0	238.5	89.50	-	275.3	98.70	-	273.15	89.30	-
1	117.15	85.86	1.34	204.3	86.12	1.32	202.85	85.59	1.40
2	92.55	72.94	1.41	102.05	72.21	1.34	109.8	73.38	1.35
3	43.60	42.56	1.40	46.65	39.22	1.40	45.95	36.39	1.38
4	31.20	19.74	1.40	34.20	17.09	1.44	35.70	18.30	1.40
5	28.10	10.88	1.35	31.60	10.27	1.42	332.60	10.35	1.39
6	27.40	8.60	1.40	30.95	8.38	1.38	31.6	7.51	1.35



ตารางผนวกที่ ข3 ผลการอบแห้งเครื่องทอหมึกอากาศอบแห้ง 55 °C

เวลา (ชั่วโมง)	การทดลองที่ 1			การทดลองที่ 2			การทดลองที่ 3		
	น้ำหนักตัวอย่าง	ความชื้น	พลังงาน	น้ำหนักตัวอย่าง	ความชื้น	พลังงาน	น้ำหนักตัวอย่าง	ความชื้น	พลังงาน
	(g)	(%wb)	(kWh)	(g)	(%wb)	(kWh)	(g)	(%wb)	(kWh)
0	242.25	89.25	-	212.95	88.75	-	203.85	89.12	-
1	123.50	78.91	1.68	154.30	84.47	1.69	108.00	79.46	1.69
2	60.60	57.03	1.69	94.60	74.68	1.68	56.55	60.78	1.70
3	33.55	22.38	1.70	43.05	44.35	1.67	31.30	28.69	1.68
4	29.05	10.35	1.66	27.56	13.07	1.67	24.30	8.73	1.67
5	28.10	7.32	1.65	26.13	8.32	1.69	24.05	7.78	1.68



ตารางผนวกที่ ข4 ผลการอบแห้งหอมสับอุณหภูมิอากาศอบแห้ง 45 °C

เวลา (ชั่วโมง)	การทดลองที่ 1			การทดลองที่ 2			การทดลองที่ 3		
	น้ำหนักตัวอย่าง	ความชื้น	พลังงาน	น้ำหนักตัวอย่าง	ความชื้น	พลังงาน	น้ำหนักตัวอย่าง	ความชื้น	พลังงาน
	(g)	(%wb)	(kWh)	(g)	(%wb)	(kWh)	(g)	(%wb)	(kWh)
0	169.05	89.41	-	154.35	89.33	-	177.35	89.75	-
1	146.15	87.76	1.01	116.80	85.86	1.00	146.55	87.60	0.98
2	114.60	84.39	0.90	90.55	81.76	0.98	117.60	84.55	0.97
3	83.05	78.45	0.98	64.45	74.37	0.99	92.90	80.44	0.98
4	62.05	71.16	0.95	46.25	64.29	1.10	67.75	73.18	1.00
5	44.55	59.83	0.97	31.20	47.07	0.96	44.25	58.93	1.02
6	33.05	45.86	0.98	23.45	29.57	0.98	31.65	42.58	1.01
7	26.55	32.60	1.00	21.75	24.07	0.94	24.95	27.17	0.98
8	24.15	25.90	0.96	20.65	20.02	0.96	23.75	23.49	0.97
9	22.05	18.85	0.97	19.60	15.74	0.95	22.60	19.59	0.97
10	20.90	14.38	0.99	18.95	12.85	0.96	21.80	16.64	0.98
11	20.55	12.92	1.00	18.50	10.73	0.95	21.05	13.67	0.96
12	20.15	11.19	0.97	18.20	9.26	0.96	20.75	12.42	1.00
13	20.05	10.75	1.01	18.08	8.65	0.97	20.65	12.00	0.98

ตารางผนวกที่ ข5 ผลการอบแห้งหอมสับอุณหภูมิอากาศอบแห้ง 50 °C

เวลา (ชั่วโมง)	การทดลองที่ 1			การทดลองที่ 2			การทดลองที่ 3		
	น้ำหนักตัวอย่าง	ความชื้น	พลังงาน	น้ำหนักตัวอย่าง	ความชื้น	พลังงาน	น้ำหนักตัวอย่าง	ความชื้น	พลังงาน
	(g)	(%wb)	(kWh)	(g)	(%wb)	(kWh)	(g)	(%wb)	(kWh)
0	120.90	96.25	-	103.6	96.10	-	101.45	96.20	-
1	61.60	92.63	1.21	65.65	93.85	1.20	67.60	94.30	1.22
2	30.40	85.08	1.23	31.25	87.07	1.22	35.55	89.16	1.24
3	13.30	65.89	1.21	17.15	76.44	1.23	22.55	82.91	1.23
4	8.60	47.24	1.23	11.30	64.24	1.23	11.80	67.34	1.23
5	6.75	32.78	1.24	7.05	42.69	1.21	8.05	52.12	1.20
6	5.90	23.10	1.21	6.00	32.66	1.23	6.45	40.25	1.22
7	5.45	16.75	1.22	5.40	25.18	1.22	5.30	27.28	1.21
8	5.25	13.58	1.24	4.85	16.69	1.24	4.85	20.53	1.21
9	5.20	12.75	1.22	4.65	13.11	1.21	4.45	13.39	1.23
10	5.15	11.90	1.23	4.55	12.20	1.22	4.35	11.40	1.22

ตารางผนวกที่ ข6 ผลการอบแห้งหอมสับอุณหภูมิอากาศอบแห้ง 55 °C

เวลา (ชั่วโมง)	การทดลองที่ 1			การทดลองที่ 2			การทดลองที่ 3		
	น้ำหนักตัวอย่าง	ความชื้น	พลังงาน	น้ำหนักตัวอย่าง	ความชื้น	พลังงาน	น้ำหนักตัวอย่าง	ความชื้น	พลังงาน
	(g)	(%wb)	(kWh)	(g)	(%wb)	(kWh)	(g)	(%wb)	(kWh)
0	170.90	95.64	-	153.60	95.69	-	151.45	95.80	-
1	87.90	91.93	1.57	103.55	93.61	1.58	88.45	92.81	1.60
2	48.85	84.76	1.54	50.45	86.88	1.53	43.90	85.51	1.54
3	22.00	66.16	1.53	24.50	72.98	1.54	17.70	64.06	1.57
4	13.60	45.27	1.54	13.55	51.14	1.56	12.45	48.91	1.52
5	9.65	22.86	1.54	9.80	32.44	1.55	8.60	26.04	1.53
6	8.35	10.85	1.56	7.90	16.19	1.55	7.80	18.45	1.54
7	8.15	8.66	1.57	7.40	10.53	1.56	7.20	11.65	1.55
8	8.10	8.10	1.57	7.30	9.30	1.57	7.10	10.41	1.53

ตารางผนวกที่ ข7 ผลการอบแห้งข้าวโพดหวานนี้้งสุกอุณหภูมิอากาศอบแห้ง 50 °C

เวลา (ชั่วโมง)	การทดลองที่ 1			การทดลองที่ 2			การทดลองที่ 3		
	น้ำหนักตัวอย่าง	ความชื้น	พลังงาน	น้ำหนักตัวอย่าง	ความชื้น	พลังงาน	น้ำหนักตัวอย่าง	ความชื้น	พลังงาน
	(g)	(%wb)	(kWh)	(g)	(%wb)	(kWh)	(g)	(%wb)	(kWh)
0	295.80	78.90	-	317.00	79.45	-	313.45	78.47	-
1	223.70	72.10	1.30	245.65	73.49	1.34	270.75	75.08	1.33
2	178.15	64.97	1.32	192.15	66.10	1.33	240.00	71.88	1.34
3	138.70	55.00	1.34	152.35	57.25	1.32	205.15	67.11	1.34
4	101.40	38.45	1.32	112.90	42.31	1.35	161.30	58.16	1.32
5	78.95	20.94	1.35	86.50	24.70	1.31	119.55	43.55	1.32
6	17.05	12.15	1.33	76.95	15.36	1.33	92.30	26.89	1.35
7	68.30	8.62	1.32	71.95	9.48	1.33	78.60	14.15	1.33
8	67.28	7.23	1.33	71.90	9.41	1.33	75.60	10.74	1.33
9	67.25	7.19	1.33	71.85	9.35	1.33	74.00	8.81	1.33

ตารางผนวกที่ ข8 ผลการอบแห้งข้าวโพดหวานดิบอุณหภูมิอากาศอบแห้ง 50 °C

เวลา (ชั่วโมง)	การทดลองที่ 1			การทดลองที่ 2			การทดลองที่ 3		
	น้ำหนักตัวอย่าง	ความชื้น	พลังงาน	น้ำหนักตัวอย่าง	ความชื้น	พลังงาน	น้ำหนักตัวอย่าง	ความชื้น	พลังงาน
	(g)	(%wb)	(kWh)	(g)	(%wb)	(kWh)	(g)	(%wb)	(kWh)
0	240.10	77.70	-	231.35	77.70	-	234.32	77.75	-
1	211.35	74.67	1.45	205.65	74.92	1.43	212.31	75.44	1.47
2	181.00	70.42	1.45	170.50	69.75	1.46	188.33	72.32	1.46
3	155.55	65.58	1.46	155.75	66.89	1.47	167.58	68.89	1.46
4	132.35	59.54	1.47	135.60	61.97	1.47	147.38	64.62	1.45
5	114.45	53.22	1.46	118.50	56.48	1.47	129.51	59.74	1.45
6	97.70	45.20	1.45	101.70	49.29	1.48	110.93	53.00	1.46
7	84.85	36.90	1.45	88.45	41.69	1.45	95.22	45.25	1.46
8	75.70	29.27	1.46	78.55	34.35	1.45	83.18	37.32	1.47
9	68.95	22.35	1.46	71.15	27.52	1.40	74.43	29.96	1.46
10	64.10	16.47	1.47	65.60	21.39	1.47	67.95	23.28	1.45
11	60.30	11.21	1.47	60.65	14.97	1.46	62.24	16.23	1.47
12	59.30	9.71	1.48	59.25	12.96	1.46	59.04	11.70	1.47
13	59.00	9.25	1.45	57.25	9.92	1.47	58.10	10.26	1.46

ตารางผนวกที่ ข9 ผลการทดลองการคืนตัวของแครอท

เวลา (นาทื)	อุณหภูมิอบแห้ง 45 °C				อุณหภูมิอบแห้ง 50 °C				อุณหภูมิอบแห้ง 55 °C			
	น้ำหนักตัวอย่าง (กรัม)				น้ำหนักตัวอย่าง (กรัม)				น้ำหนักตัวอย่าง (กรัม)			
	1	2	3	เฉลี่ย	1	2	3	เฉลี่ย	1	2	3	เฉลี่ย
0	2.0125	2.0528	1.9787	2.0146	2.0315	1.9264	2.1026	2.0202	2.0179	2.0783	1.9126	2.0029
2	5.1499	5.2024	5.0634	5.1386	5.5614	5.4974	5.7560	5.6050	5.3285	5.5151	5.1543	5.3326
4	6.5659	6.6995	6.4595	6.5750	7.0021	6.8132	7.0813	6.9655	7.2318	7.4778	9.9145	7.2080
6	7.3183	7.2115	7.1932	7.2410	7.9535	7.8519	8.2313	8.0124	8.2824	8.5710	7.8546	8.2360
8	7.8322	7.9875	7.7120	7.8439	8.6114	8.4136	8.6975	8.5742	8.9075	9.2193	8.4278	8.8515
10	8.2701	8.4355	8.3353	8.3470	9.1875	9.0815	9.4681	9.2457	9.3024	9.6045	8.7921	9.2330



ตารางผนวกที่ ข10 ผลการทดลองการคืนตัวของหอมสับ

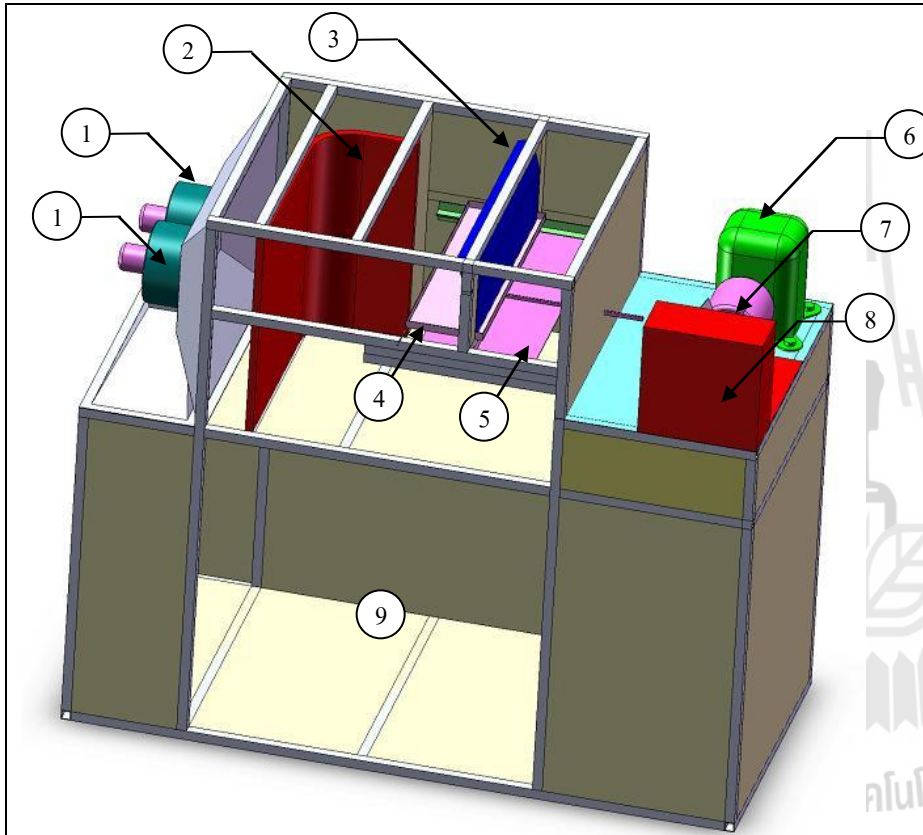
เวลา (นาทื)	อุณหภูมิอบแห้ง 45 °C				อุณหภูมิอบแห้ง 50 °C				อุณหภูมิอบแห้ง 55 °C			
	น้ำหนักตัวอย่าง (กรัม)				น้ำหนักตัวอย่าง (กรัม)				น้ำหนักตัวอย่าง (กรัม)			
	1	2	3	เฉลี่ย	1	2	3	เฉลี่ย	1	2	3	เฉลี่ย
0	0.9896	1.2006	0.8320	1.0074	0.7690	0.8102	0.7500	0.7764	0.8012	0.9803	0.7680	0.8498
2	3.5626	4.4422	2.9952	3.6667	2.7670	2.8762	2.7000	2.7811	2.5703	3.4703	2.8416	2.9607
4	4.2968	5.6638	3.5343	4.4983	3.3631	3.8254	3.4560	3.5482	3.1016	4.4419	3.6088	3.7175
6	4.7136	6.0037	3.8878	4.8683	3.6540	3.9860	3.6979	3.7793	3.5706	4.8195	3.8975	4.0959
8	4.7984	6.0757	4.1988	5.0243	3.8858	4.0578	3.8458	3.9298	3.9200	4.8725	3.9443	4.2456
10	4.8512	6.1310	4.2408	5.0743	4.0039	4.0943	3.8497	3.9826	4.0392	4.9164	3.9775	4.3110





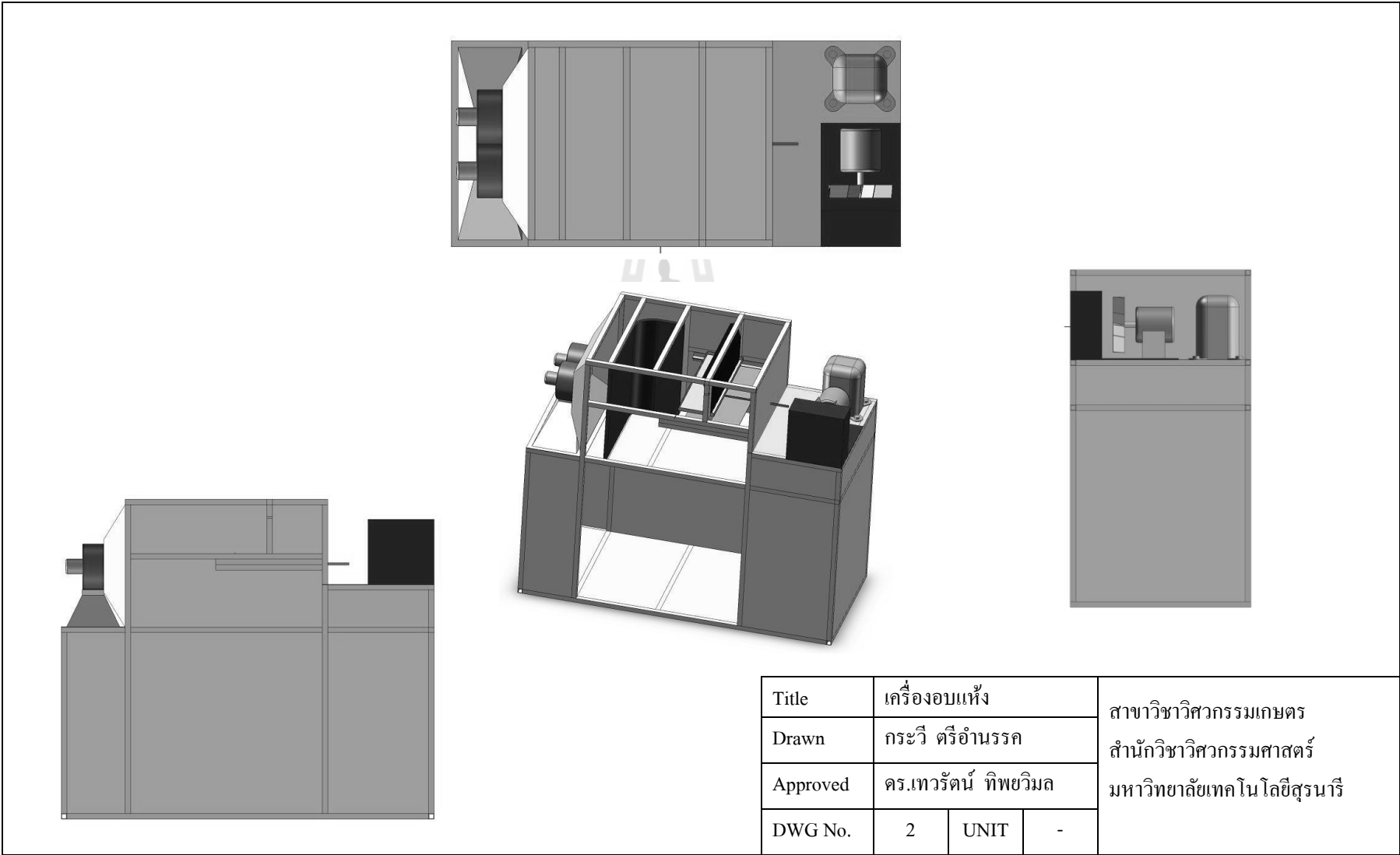
ภาคผนวก ค

แบบเครื่องอบแห้งระบบปั๊มความร้อน

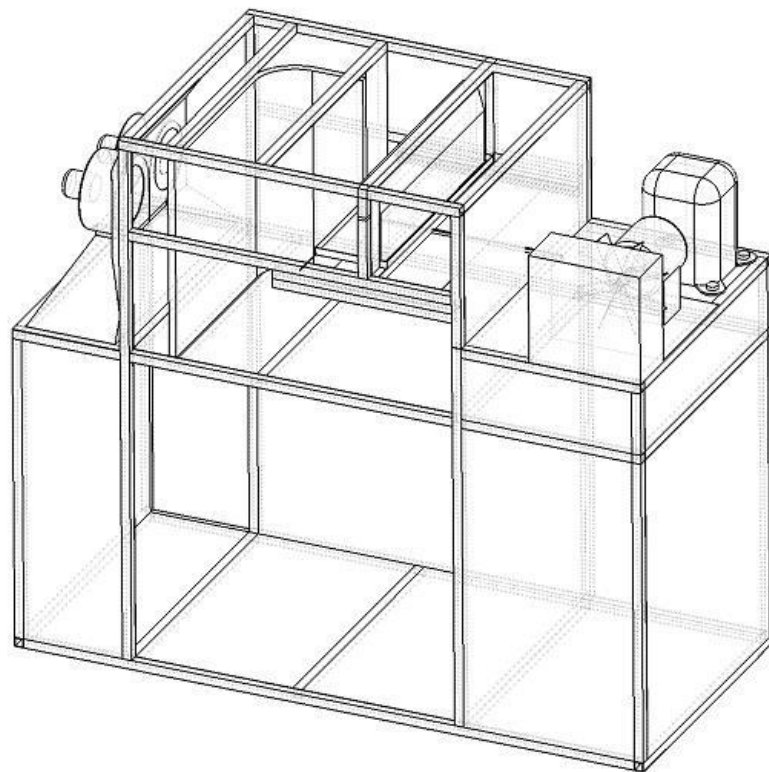


- 1 = ชุดมอเตอร์พัดลม
- 2 = เครื่องควบแน่นตัวใน
- 3 = เครื่องทำระเหย
- 4 = ถาดรับน้ำควบแน่น
- 5 = แผ่นกั้นอากาศข้ามเครื่องทำระเหย
- 6 = เครื่องอัดไอ
- 7 = มอเตอร์พัดลมระบายความร้อนเครื่องควบแน่นตัวนอก
- 8 = เครื่องควบแน่นตัวนอก
- 9 = ห้องอบภายในเครื่อง

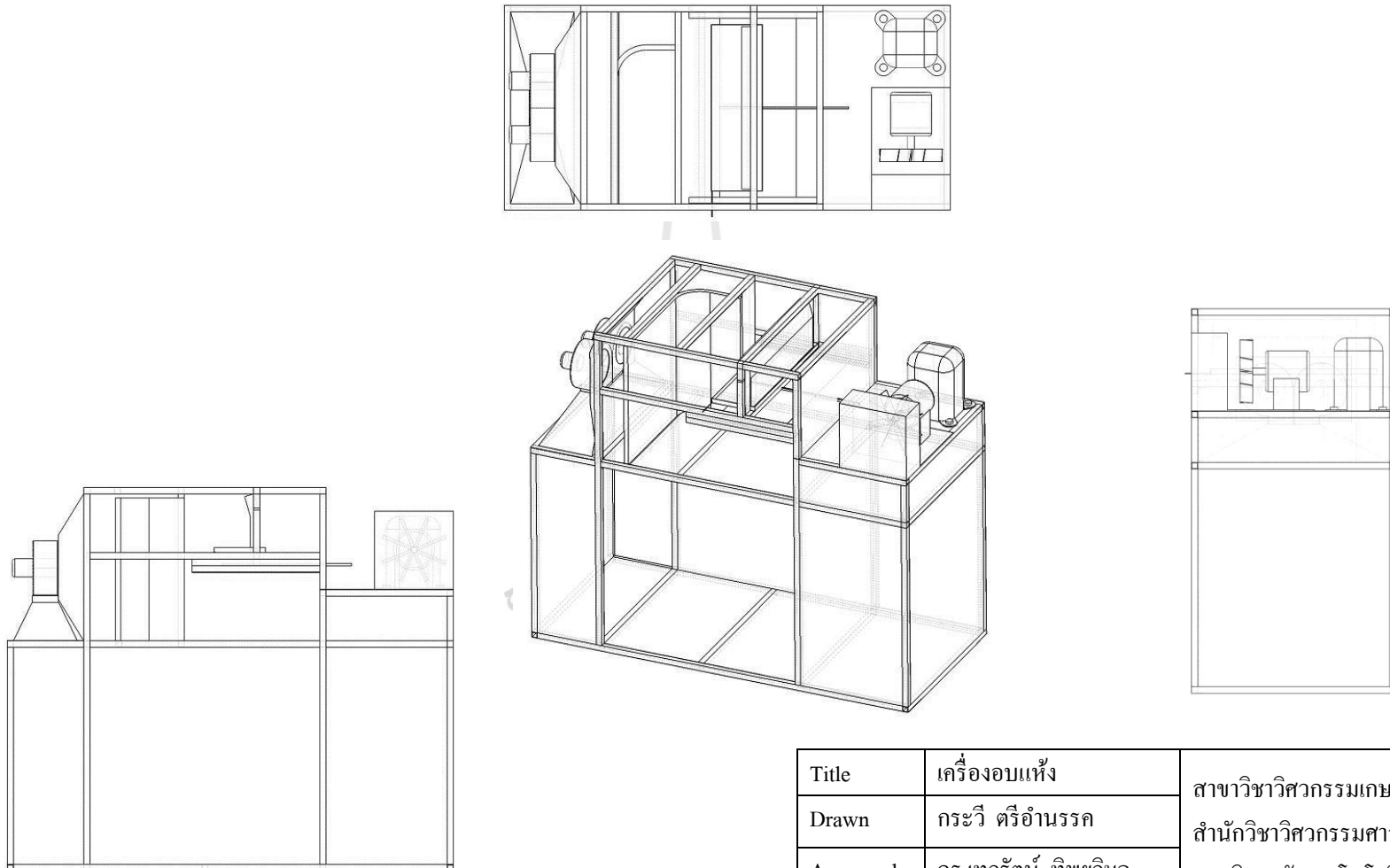
Title	เครื่องอบแห้ง			สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
Drawn	กระวี ตรีอำนรรค			
Approved	ดร.เทวรัตน์ ทิพย์วิมล			
DWG No.	1	UNIT	-	



Title	เครื่องอบแห้ง			สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
Drawn	กระวี ตรีอำนาจ			
Approved	ดร.ทวารตัน ทัพยิมล			
DWG No.	2	UNIT	-	



Title	เครื่องอบแห้ง			สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
Drawn	กระวี ตรีอำนาจ			
Approved	ดร.เทวรัตน์ ทิพย์นิล			
DWG No.	3	UNIT	-	



Title	เครื่องอบแห้ง			สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
Drawn	กระวี ตรีอำรรค			
Approved	ดร.ทวารตัน ทัพยิมล			
DWG No.	4	UNIT	-	







การอบแห้งแครอทด้วยเครื่องอบแห้งระบบปั๊มความร้อน Carrot Drying by Heat Pump Dryer

เทวรัตน์ ทิพย์วิมล¹ และ วีรชัย อัจหาญ¹
Tawarat Tipyavimol¹ and Weerachai Arjarn¹

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อทำการทดสอบการอบแห้งแครอทด้วยเครื่องอบแห้งระบบปั๊มความร้อนที่พัฒนาขึ้น สภาวะการอบแห้งที่ใช้ในการทดลองคือ อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 45, 50 และ 55 °C ความเร็วลมเฉลี่ย 1.3 m/s อัตราส่วนอากาศข้ามเครื่องทำระเหย 80 เปอร์เซ็นต์ แครอทสดที่ใช้ในการทดสอบอบแห้งถูกนำมาปอกเปลือกแล้วหั่นเป็นทรงสี่เหลี่ยมขนาด กว้าง × ยาว × หนา คือ 1 cm × 1 cm × 0.5 cm ปริมาณครั้งละ 10 กิโลกรัม ทำการประเมินสมรรถนะการอบแห้งจากอัตราการอบแห้ง อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ และคุณภาพของแครอทโดยดูจากอัตราการคืนตัว และการเปลี่ยนแปลงสีของแครอทแห้งเทียบกับแครอทสด ผลจากการทดลองพบว่าอัตราการอบแห้งแครอทมีค่า 1.09 1.48 และ 1.76 กิโลกรัมน้ำระเหยต่อชั่วโมงและสามารถทำการอบแห้งแครอทจากความชื้นเริ่มต้น 88.70 %wb ลงเหลือ 10.98 %wb โดยใช้เวลานในการอบแห้ง 7, 5 และ 4 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 45, 50 และ 55 °C ตามลำดับ สำหรับด้านการสิ้นเปลืองพลังงานพบว่าที่อุณหภูมิ 50 °C มีค่าความสิ้นเปลืองพลังงานต่ำสุด สำหรับค่าความแตกต่างสีจากผลิตภัณฑ์สดของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการอบแห้งทั้งสามอุณหภูมิไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ส่วนอัตราการคืนตัวพบว่าไม่มีความแตกต่างกันที่อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 50 และ 55 °C

คำสำคัญ: แครอท, อบแห้ง, ปั๊มความร้อน

ABSTRACT

The objective of this research was to evaluate the performance of a heat pump dryer and the qualities of dried carrot. Carrot roots were peeled and then cut to dimension width x length x thick of 1 cm x 1cm x 0.5 cm. The 10 kilograms of carrot sample were dried in the dryer under the condition of: Drying air temperature of 45, 50 and 55 °C, drying air velocity of 1.3 m/s and 80 percent of evaporation bypass air. Drying rate, specific energy consumption (SEC), color and rehydration rate of dried carrot were evaluated. It was found that the drying rates were 1.09, 1.48 and 1.76 kilograms of moisture evaporated per hour at drying temperature of 45, 50 and 55 °C respectively. The carrot samples were dried from the initial moisture content of 88.70 percent wet basis to 10.98 percent wet basis within 7, 5 and 4 hours at drying temperature of 45, 50 and 55 °C respectively. The lowest specific energy consumption was at drying air temperature of 50 °C. Color quality of dried carrot, at the confidential level of 95 percents there were not differences in the total color difference between all drying air temperatures and there were not differences in rehydration rate between drying air temperature of 50 and 55 °C

Keywords: Carrot, Drying, Heat pump

บทนำ

แครอทเป็นพืชกินหัวชนิดหนึ่ง มีหลากหลายสี แต่สีแต่แครอทสีส้มจะเป็นที่นิยมในการบริโภคเป็นอาหาร

มากที่สุดนอกจากนี้แครอทยังเป็นผักที่มีคุณค่าทางโภชนาการสูง อุดมไปด้วยวิตามินเอ และเกลือแร่ และสารเบต้าแคโรทีน ที่ช่วยยับยั้งเซลล์ของมะเร็งและต่อต้านสาร

¹ สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี ต. สุรนารี อ. เมือง จ. นครราชสีมา 30000

School of Agricultural Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhonratchasima, 30000

*Corresponding author. Tel: 044-224583; Fax: 044-224610; E-mail: tawarat@sut.ac.th

อนุมูลอิสระซึ่งเป็นต้นกำเนิดของเซลล์มะเร็ง (วิกิพีเดีย สารานุกรมเสรี, 2554 ออนไลน์) เนื่องจากประโยชน์ของแครอทที่มีมาก จึงได้มีผู้ผลิตอาหารกึ่งสำเร็จรูปประเภทบะหมี่กึ่งสำเร็จรูป โจ๊กกึ่งสำเร็จรูปและข้าวต้มกึ่งสำเร็จรูป บางยี่ห้อนำมาเป็นส่วนประกอบเพื่อเสริมคุณค่าทางอาหาร แต่อย่างไรก็ตามก็ยังมีผลิตภัณฑ์อาหารกึ่งสำเร็จรูปอีกหลายยี่ห้อและหลายชนิดที่ไม่ได้เสริมผลิตภัณฑ์ผักอบแห้งเข้าไป อีกทั้งในภาวะที่เร่งรีบในปัจจุบัน ความต้องการในการบริโภคอาหารกึ่งสำเร็จรูปจึงมีเพิ่มมากขึ้น (ศูนย์วิจัยกสิกรรมไทย, 2548 ก.ข ออนไลน์) ผักอบแห้งจึงเป็นทางเลือกหนึ่งสำหรับการเพิ่มคุณค่าทางอาหาร และสีสันทันรับประทานมากขึ้น จากรายงานของอิติวัฒน์ (2550) พบว่าปัจจัยด้านคุณภาพที่มีอิทธิพลต่อผู้บริโภคในการเลือกซื้อผักอบแห้งคือ สีสดใส สวยงาม นำรับประทาน ความปลอดภัยต่อการบริโภค และสามารถผสมลงในอาหารได้อย่างสะดวกและลงตัว ดังนั้นแครอทอบแห้งจึงเป็นผลิตภัณฑ์หนึ่งที่น่าสนใจ เนื่องจากตัวแครอทเองเป็นพืชที่มีคุณค่าทางอาหารและมีสีสันทันที่สามารถเพิ่มความน่ารับประทานของอาหารได้ จึงได้นำนักวิจัยได้ให้ความสนใจทำการศึกษารอบแห้งแครอท ซึ่งจากรายงานของ อัครวิน (2546) พบว่าการทำแห้งแครอทด้วยเครื่องอบแห้งแบบลมร้อนที่อุณหภูมิ 50 60 และ 70 °C นั้นใช้เวลาในการอบแห้งนานถึง 19 17 และ 10 ชั่วโมงตามลำดับ พร้อมทั้งได้เสนอแนะว่า ที่อุณหภูมิการอบแห้ง 70 °C มีความเหมาะสมต่อการอบแห้งมากที่สุด แต่ก็ยังพบว่าการอบแห้งด้วยลมร้อนปกติจะใช้เวลาในการอบแห้งช่วงสุดท้ายนาน และผลิตภัณฑ์ที่ได้มีลักษณะเป็นสีน้ำตาล

เป็นที่ทราบกันดีว่าการนำเทคโนโลยีบ่มความร้อนมาใช้ในการอบแห้งจะช่วยในเรื่องของการคงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ได้หลังการอบแห้ง เนื่องจากเทคโนโลยีบ่มความร้อนที่นำมาใช้ในการอบแห้งจะช่วยให้สามารถทำการอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำลงได้ เนื่องจากแทนที่จะใช้อุณหภูมิเป็นตัวเร่งอัตราการอบแห้งแต่เพียงอย่างเดียวยังเป็นการใช้ความแตกต่างของความชื้นระหว่างตัววัสดุกับอากาศอบแห้งจึงทำให้การอบแห้งวิธีนี้เป็นทางเลือกหนึ่งและมีนักวิจัยหลายท่านได้นำมาใช้ในการอบแห้งผลิตภัณฑ์ที่หลากหลาย เช่น เห็ดฟาง (สุทธิศักดิ์, 2543) มะละกอแช่อิ่ม (ฐานิตย์, 2541) และ ไพล (Tawatrat and Somyot, 2007) เป็นต้น

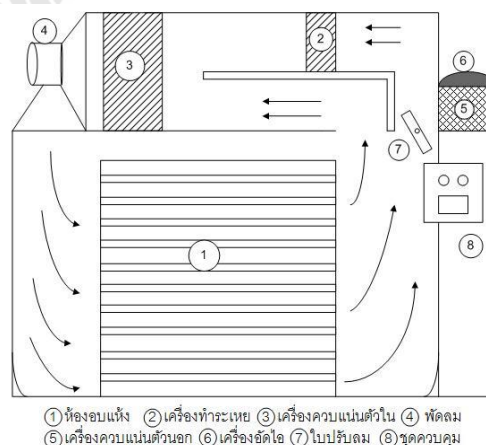
ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อทำการทดสอบอบแห้งแครอทด้วยเครื่องอบแห้งระบบบ่มความร้อนที่ได้ทำการออกแบบและสร้างขึ้น

อุปกรณ์และวิธีการ

เครื่องอบแห้งระบบบ่มความร้อน

เครื่องอบแห้งระบบบ่มความร้อนที่สร้างขึ้นมีลักษณะดังแสดงในภาพที่ 1 ซึ่งประกอบด้วย 1) ห้องอบแห้งที่มีชั้นถาดอบแห้งจำนวน 10 ถาด สามารถบรรจุแครอทสดได้ 10 กิโลกรัม 2) ระบบบ่มความร้อนประกอบด้วยเครื่องอัดไอขนาด 1-1/4 แรงม้า เครื่องทำระเหย เครื่องควบแน่นตัวใน เครื่องควบแน่นตัวนอกพร้อมพัดลมระบายความร้อน ลดความดันสารทำความเย็นด้วยท่อแคปพิลารี 3) พัดลมหลักสำหรับส่งลมเข้าสู่ห้องอบแห้ง และ 4) ระบบควบคุมสำหรับควบคุมอุณหภูมิภายในห้องอบแห้งให้ได้ตามที่ต้องการ

การทดสอบการอบแห้งจะทำการอบแห้งแบบระบบปิด เพื่อป้องกันการปนเปื้อนที่เพิ่มเข้ามาจากอากาศและเป็นการรักษาสิ่งแวดล้อมโดยไม่ปล่อยอากาศร้อนขึ้นออกสู่อากาศ ซึ่งหลักการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งระบบบ่มความร้อนมีดังนี้ อากาศอบแห้งไหลผ่านห้องอบแห้งเพื่อนำความชื้นออกจากวัสดุอบแห้ง จากนั้นอากาศจะถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ส่วนหนึ่งจะถูกลดความชื้นที่เครื่องทำระเหย หลังจากนั้นจะผสมกับอากาศอีกส่วนหนึ่งที่ข้ามเครื่องทำระเหย (bypass air) แล้วรับความร้อนคืนที่เครื่องควบแน่นแล้วส่งกลับเข้าสู่ห้องอบแห้ง โดยอากาศข้ามเครื่องทำระเหย ที่ใช้ในการทดสอบครั้งนี้ตั้งไว้ที่ 80% (สมยศและเทวรัตน์, 2546)



ภาพที่ 1 เครื่องอบแห้งระบบบ่มความร้อน

แครอท

การทดสอบการอบแห้งจะใช้แครอทที่ซื้อมาจากตลาดขายส่งในจังหวัดนครราชสีมา จากนั้นจะนำมาปอกเปลือก ล้างทำความสะอาด แล้วหั่นเป็นเป็นชิ้นขนาด กว้าง x ยาว x หนา เฉลี่ยคือ 1cm x 1cm x 0.5cm ก่อนทำการทดสอบการอบแห้ง จะแบ่งตัวอย่างแครอทสดจำนวนหนึ่งไปหาความชื้นเริ่มต้นด้วยตู้อบลมร้อน ที่

อุณหภูมิ 103 °C เป็นเวลา 72 ชั่วโมง ซึ่งได้ค่าความชื้นเริ่มต้นเฉลี่ย 88.70 %wb

วิธีการทดลอง

วิธีการทดลองอบแห้งแครอทมีขั้นตอนดังนี้

1) นำแครอทที่เตรียมไว้จำนวน 10 กิโลกรัม บรรจุลงบนถาดทั้ง 10 ถาด เกลี่ยให้สม่ำเสมอ เป็นการอบแห้งแบบชั้นบาง

2) ทำการซั่งถุงตาข่าย บันทึกน้ำหนัก จากนั้นตัวอย่างนำแครอทที่เตรียมไว้อีกส่วนหนึ่งลงบรรจุ ซั่งน้ำหนัก แล้ววางไว้บนถาดซึ่งบรรจุแครอทไว้แล้วในข้อ 1

3) นำถาดเข้าไปในหีบอบแห้ง ซึ่งกำหนดอุณหภูมิการอบแห้งไว้ที่ 45 50 และ 55 °C ความเร็วลมร้อน 1.3 m/s โดยทุกๆ 1 ชั่วโมงจะนำถุงตาข่ายซึ่งบรรจุตัวอย่างแครอทออกมาซั่งเพื่อดูการลดลงของความชื้น โดยการทดลองจะสิ้นสุด เมื่อน้ำหนักของตัวอย่างแครอทในถุงตาข่ายเปลี่ยนแปลงน้อยกว่า 1 กรัม

การประเมินประสิทธิภาพ

ทำการประเมินประสิทธิภาพการอบแห้งจากเส้นคุณลักษณะการอบแห้ง (Drying curve) อัตราการอบแห้งเฉลี่ย (DR) โดยคำนวณจากสมการ (1) และค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (Specific Energy Consumption, SEC) ซึ่งมีหน่วยเป็น MJ/kg_{water} หาได้จากสมการ (2)

$$DR = \frac{W_i - W_f}{t} \quad (1)$$

$$SEC = \frac{3.6Pe}{W_i - W_f} \quad (2)$$

เมื่อ W คือมวลของวัสดุ (kg), t คือเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง (h), Pe คือ ปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการอบแห้ง (kWh)

ตัวห้อย i และ f แทนก่อนและหลังการอบแห้ง

คุณภาพของผลิตภัณฑ์

ผลิตภัณฑ์ที่ได้หลังการอบแห้งทำการตรวจสอบคุณภาพการเปลี่ยนแปลงสีและอัตราการคืนตัว

1) การวัดคุณภาพด้านการเปลี่ยนแปลงสี

จากการวัดสีเปรียบเทียบกับความแตกต่างของสีที่ได้หลังการอบแห้งกับสีของผลิตภัณฑ์สด การวัดสีทำการวัดในเทอม L* (degree of lightness), a* (degree of redness), b* (degree of yellowness) โดยตัวอย่างของ

ผลิตภัณฑ์แครอทอบแห้งจะถูกส่งไปตรวจสอบค่าสี ณ ห้องปฏิบัติการ ศูนย์เครื่องมือทางวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ค่าความแตกต่างสุทธิ (ΔE) จากแครอทคำนวณจากสมการ (3) เพื่อแสดงการเปลี่ยนแปลงสีจากการอบแห้ง

$$\Delta E = \sqrt{(L_0^* - L^*)^2 + (a_0^* - a^*)^2 + (b_0^* - b^*)^2} \quad (3)$$

เมื่อตัวห้อย "0" คือค่าสีของแครอทสด

2) อัตราการคืนตัว

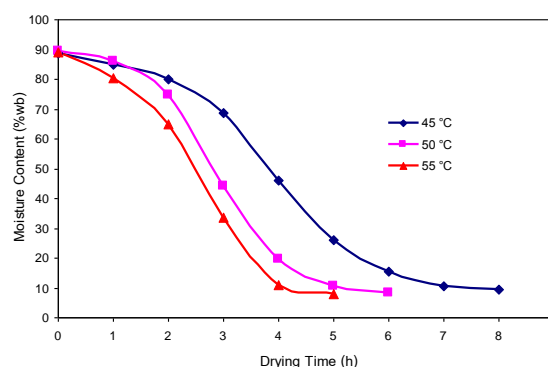
การหาอัตราการคืนตัว (Rehydration Ratio, RR) ของแครอทอบแห้ง กระทำโดยการนำตัวอย่างแครอทอบแห้งมาซั่งน้ำหนักและแช่น้ำร้อนอุณหภูมิ 90 °C ซึ่งควบคุมอุณหภูมิของน้ำด้วยเครื่องควบคุมอุณหภูมิ (hot plate) ตัวอย่างแครอทจะถูกนำขึ้นจากน้ำร้อน ชั่งน้ำหนักให้แห้งและซั่งน้ำหนักทุกๆ 2 นาทีเพื่อดูอัตราการคืนตัวเป็นระยะเวลา 10 นาที จากนั้นทำการคำนวณค่าอัตราการคืนตัวจากสมการ (4) (ภารตและคณะ, 2552)

$$RR = \frac{m_f}{m_i} \quad (4)$$

เมื่อ m_f คือน้ำหนักแครอทหลังการคืนตัว (g), m_i คือน้ำหนักแครอทแห้งก่อนการคืนตัว (g)

ผลการทดลองและวิจารณ์

พฤติกรรมของการอบแห้งแครอทด้วยเครื่องอบแห้งระบบปั๊มความร้อนที่อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 45 50 และ 55 °C แสดงในภาพที่ 2 ซึ่งจะเห็นว่าที่อุณหภูมิการอบแห้งสูงกว่าจะมีอัตราการอบแห้งที่เร็วกว่า คือ 55 °C จะใช้เวลาในการอบแห้งสั้นที่สุด



ภาพที่ 2 เส้นคุณลักษณะการอบแห้งแครอทด้วยเครื่องอบแห้งระบบปั๊มความร้อนที่อุณหภูมิต่างๆ

เมื่อพิจารณาที่อัตราการอบแห้งเฉลี่ยตลอดช่วงการอบแห้งพบว่าที่อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 45 50 และ 55 °C มีอัตราการอบแห้ง หรืออัตราการระเหยน้ำออกจากแครอท คือ 1.09 1.48 และ 1.76 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ตามลำดับ

สำหรับค่าความประสิทธิภาพด้านการใช้พลังงานพบว่าอัตราความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของการอบแห้งแครอทด้วยเครื่องอบแห้งระบบบีบความร้อนที่อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 45 50 และ 55 °C มีค่า 3.86 3.37 และ 3.43 MJ/kg_{water} ซึ่งจะเห็นว่าที่อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 50 °C มีค่าต่ำที่สุดทั้งนี้เนื่องจาก ค่าเฉลี่ยการใช้พลังงานในการอบแห้งที่แต่ละอุณหภูมิการอบแห้งมีค่าแตกต่างกันโดยที่อุณหภูมิสูงกว่าจะใช้พลังงานมากกว่า โดยที่อุณหภูมิการอบแห้ง 55 °C มีอัตราการใช้พลังงานไฟฟ้าเฉลี่ยอยู่ที่ 1.68 kWh/h ในขณะที่อุณหภูมิ 50 และ 45 °C มีอัตราการใช้พลังงานไฟฟ้าอยู่ที่ 1.38 และ 1.17 kWh/h ตามลำดับ แต่ช่วงเวลาที่ใช้ในการอบแห้งที่อุณหภูมิ 50 และ 55 °C แตกต่างกันเพียง 1 ชั่วโมง ส่วนที่อุณหภูมิ 45 °C ถึงแม้จะมีอัตราการใช้พลังงานไฟฟ้าที่ต่ำแต่ระยะเวลาการอบแห้งที่นานมากกว่าจึงทำให้มีค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะสูงที่สุด

เมื่อพิจารณาถึงคุณภาพของผลิตภัณฑ์แครอทอบแห้งที่ได้จากการอบแห้ง ภาพที่ 3 แสดงการเปรียบเทียบลักษณะของแครอทก่อนและหลังการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งระบบบีบความร้อนซึ่งจะเห็นว่าแครอทหลังการอบแห้งจะมีลักษณะสีแดงเข้มขึ้น



ภาพที่ 3 ลักษณะของแครอทก่อนและหลังอบแห้ง

สำหรับผลของค่าเฉลี่ยจากการวัดค่าสีของแครอทที่อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 45 50 และ 55 °C แสดงอยู่ในตารางที่ 1 ซึ่งจะเห็นว่า ค่าความแตกต่างด้านสีมีค่าที่ใกล้เคียงกันทั้งสามอุณหภูมิอากาศอบแห้ง เมื่อทำการตรวจสอบทางสถิติ ด้วยการใช้วิธีวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว โดยใช้วิธีการทดสอบของ Duncan ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% แล้วพบว่าความแตกต่างของสีทั้งสามอุณหภูมิไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ เช่นเดียวกับพารามิเตอร์ L* และ a* จะมีเพียงค่า b* ของอุณหภูมิ

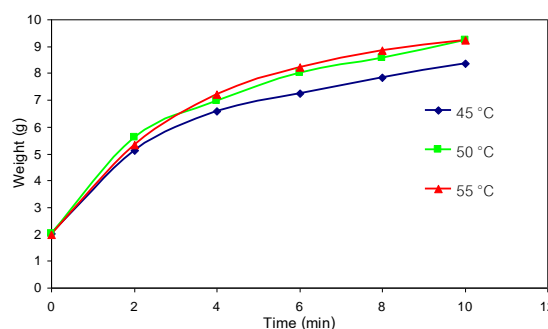
อากาศอบแห้ง 55 °C ที่แตกต่างจากอีกสองระดับอุณหภูมิ

ตารางที่ 1 ค่าพารามิเตอร์สีของแครอท

Methods	Parameter			
	L*	a*	b*	ΔE
Fresh	40.70 ^a	33.70 ^a	21.60 ^c	-
45 °C	41.79 ^a	23.49 ^b	15.20 ^b	12.08 ^a
50 °C	41.93 ^a	23.11 ^b	15.28 ^b	12.38 ^a
55 °C	42.66 ^a	23.87 ^b	14.48 ^a	12.28 ^a

a, b, c อักษรที่เหมือนกันในคอลัมภ์เดียวกันหมายถึงไม่มีความแตกต่างกันที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

เมื่อนำตัวอย่างแครอทอบแห้งมาทำการหาค่าอัตราการคืนตัว พฤติกรรมการคืนตัวของแครอทอบแห้งแสดงในภาพที่ 4 ซึ่งจะพบว่าในช่วงเริ่มต้นอัตราการคืนตัวมีค่าสูงแล้วค่อยๆ ลดลง ซึ่งมีแนวโน้มคงที่เมื่อเวลาผ่านไปมากขึ้น และที่อุณหภูมิสูงกว่าจะมีอัตราการคืนตัวที่สูงกว่า สำหรับค่าอัตราการคืนตัวเฉลี่ยของแครอทอบแห้งที่อุณหภูมิตอบแห้งที่อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 45 50 และ 55 °C ค่าอัตราการคืนตัวมีค่า 4.14 4.58 และ 4.61 ตามลำดับ ซึ่งเมื่อทำการตรวจสอบทางสถิติ ด้วยการใช้วิธีวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว โดยใช้วิธีการทดสอบของ Duncan ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% แล้วพบว่าอัตราการคืนตัวที่อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 50 และ 55 °C ไม่มีความแตกต่างกันในทางสถิติ



ภาพที่ 4 พฤติกรรมการคืนตัวของแครอทอบแห้งที่อุณหภูมิตอบแห้งต่างๆ

จากผลการทดลองอบแห้งแครอทที่อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 45 50 และ 55 °C พบว่าสภาวะการอบแห้งที่อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 50 °C มีความเหมาะสมต่อการ

อบแห้งแครอทด้วยเครื่องอบแห้งระบบปั๊มความร้อนมากที่สุด เนื่องจากสามารถลดความชื้นแครอทให้อยู่ในระดับที่ปลอดภัยต่อการเก็บรักษา ซึ่งใช้เวลา 5 ชั่วโมงในการลดความชื้นจาก 89.50%wb ลงเหลือ 10.55 %wb โดยมีค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะต่ำสุด และมีค่าความแตกต่างของสีและอัตราการคืนตัวที่ไม่แตกต่างจากอุณหภูมิอบแห้ง 55 °C ที่มีค่าอัตราการอบแห้งสูงสุด

สรุปผลการทดลอง

สภาวะการอบแห้งแครอทด้วยเครื่องอบแห้งระบบปั๊มความร้อนที่เหมาะสมคือ อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 50 °C ความเร็วลมร้อน 1.3 m/s อัตราส่วนอากาศข้ามเครื่องทำระเหย 80% โดยมีค่าอัตราการอบแห้ง 1.48 กิโลกรัมน้ำระเหยต่อชั่วโมง ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ 3.37 MJ/kg_{water} ค่าความแตกต่างของสีจากแครอทสด 12.38 และค่าอัตราการคืนตัว 4.58

คำขอขอบคุณ

ผู้วิจัยขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีที่ให้ทุนสนับสนุนการวิจัย (วช. 53)

เอกสารอ้างอิง

- สุวานิตย์ เมธิยานนท์. 2541. การอบแห้งโดยใช้ปั๊มความร้อนในระดับอุตสาหกรรม. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, กรุงเทพฯ. 263 น.
- ธิตติวัฒน์ สิริพันธุ์กุล. 2550. ความต้องการของผู้บริโภคที่มีต่อผลิตภัณฑ์ผักรวมอบแห้งกิ่งสำเร็จรูปในอำเภอเมืองจังหวัดเชียงใหม่. รายงานการค้นคว้าแบบอิสระบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. 74 น.
- ภารดร หนูทอง, กอดขวัญ นามสงวน, ศิวะ อัจฉริยวิริยะ และ อารีย์ อัจฉริยวิริยะ. 2552. จลนพลศาสตร์การอบแห้งและคุณภาพของลำไยโดยใช้อินฟราเรดร่วมกับลมร้อน. เอกสารประกอบการประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 23, 4-7 พฤศจิกายน 2552 คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. ไม่มีเลขหน้า.
- วิกิพีเดียสารานุกรมเสรี. 2554. แครอท. [ระบบออนไลน์] แหล่งที่มา <http://th.wikipedia.org/wiki/แครอท> (7 มกราคม 2554).

ศูนย์วิจัยกสิกรรมไทย. 2549ก. “อาหารกิ่งสำเร็จรูป :

แนวโน้มขยายตัว...สอดรับพฤติกรรมผู้บริโภค รัตธีเมซด์.” [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา <http://www.kasikomresearch.com>. (16 สิงหาคม 2551).

ศูนย์วิจัยกสิกรรมไทย. 2549ข. “อาหารเสริมสุขภาพปี'48 :

ตลาดขยายตัวร้อยละ 11.” [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา <http://www.kasikomresearch.com> (16 สิงหาคม 2551).

สมยศ เชิญอักษรและเทวรัตน์ ทิพย์วิมล. 2546.

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องอบแห้งระบบปั๊มความร้อน. รายงานการประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 5. หน้า 367-374.

สุทธิศักดิ์ ภัทรสถาพรกุล. 2543. การพัฒนาเครื่องอบแห้งระบบปั๊มความร้อน. วิทยานิพนธ์ระดับปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กำแพงแสน จ. นครปฐม. 123 น.

อัศวิน ชินธรรมมิตร. 2546. การพัฒนากรรมวิธีการอบแห้งแครอทและเนื้อไก่โดยอบแห้งแบบลมร้อนกับการใช้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ. วิทยานิพนธ์ ปริญญาโท. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. กรุงเทพฯ. 154 น.

Tawarat Tipyavimol and Somyot Chirnaksorn. 2007. Performance Study of Heat pump-Microwave Combination Dryer. Proceeding of International Conference on Agricultural, Food and Biological Engineering & Post Harvest/Production Technology, 21-24 January, Sofitel Raja Orchid Hotel, Khon Kean, Thailand. Page 35.

ประวัตินักวิจัย

1. ชื่อ

(ภาษาไทย) นางสาวเทวรัตน์ ทิพยวิมล
(ภาษาอังกฤษ) Miss Tawarat Tipyavimol

2. ตำแหน่งปัจจุบัน

อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร

3. หน่วยงานที่อยู่ติดต่อได้

สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
111 ถ. มหาวิทยาลัย ต. สุรนารี อ. เมือง จ. นครราชสีมา 300000
โทร. 044-224583
E-mail: tawarat@sut.ac.th

4. ประวัติการศึกษา

วศ.บ (วิศวกรรมเกษตร) มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2542
วศ.ม (วิศวกรรมเกษตร) มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2545
วศ.ด (วิศวกรรมเกษตร) มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2551

5. ผลงานวิชาการ / ผลงานวิจัย

- บัณฑิต จริโมภาส, ชัยพร ทองปัญญา, **เทวรัตน์ ทิพยวิมล**, นฤมล บุญกระจ่าง และ มาลัย ไกรทอง. 2543. การศึกษาการยุบตัวของส้มเขียวหวานในบรรจุภัณฑ์ขายส่งระหว่างการขนส่งทางบก. วารสารวิชาการเกษตร, ปีที่ 18 (2), หน้า 137-147.
- สมยศ เชิญอักษร และ **เทวรัตน์ ทิพยวิมล**. 2546. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องอบแห้งระบบป้อนความร้อน. รายงานการประชุมวิชาการประจำปี 2546 สมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย. หน้า 367-374.
- บัณฑิต จริโมภาส และ **เทวรัตน์ ทิพยวิมล**. 2547. ภาชนะสุญญากาศสำหรับการทดสอบรอยรั่วของบรรจุภัณฑ์อ่อนตัว .2547. บทความวิจัย เสนอในการประชุมวิชาการ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน ครั้งที่ 1 จัดโดย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน อ.กำแพงแสน จ.นครปฐม วันที่ 7-9 ธันวาคม.

- เทวรัตน์ ทิพย์วิมล และ สมยศ เชิญอักษร. 2548. การอบแห้งพริกด้วยระบบลมร้อนและไมโครเวฟ. รายงานการประชุมวิชาการประจำปี 2548 สมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย. หน้า 113-114.
- เทวรัตน์ ทิพย์วิมล และ สมยศ เชิญอักษร. 2549. การอบสมุนไพรด้วยลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟแบบเป็นช่วง. รายงานการประชุมวิชาการประจำปี 2549 สมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย. หน้า 112.
- เทวรัตน์ ทิพย์วิมล และ สมยศ เชิญอักษร. 2550. การอบแห้งพริกชี้ฟ้าด้วยลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟ. วารสารวิชาการเกษตร. ปีที่ 25 (1), หน้า 46-57.
- เทวรัตน์ ทิพย์วิมล, สมยศ เชิญอักษร, ศิวลักษณ์ ปฐวีรัตน์, อนุพันธ์ เทิดวงศ์วรกุล และเชาว์อินประสิทธิ์. 2550. การอบแห้งไพลด้วยเครื่องอบแห้งระบบบีบความร้อนร่วมกับไมโครเวฟ. วารสารสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย. ปีที่ 13 (1), หน้า 23-29.
- เทวรัตน์ ทิพย์วิมล และสมยศ เชิญอักษร. 2551. ความชื้นสมดุลและจลศาสตร์การอบแห้งของไพล. รายงานการประชุมวิชาการประจำปี 2551 สมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย. หน้า 86.
- เทวรัตน์ ทิพย์วิมล และสมยศ เชิญอักษร. 2551. การอบแห้งไพลด้วยเครื่องอบแห้งระบบบีบความร้อนร่วมกับไมโครเวฟ: การวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์. วารสารวิทยาศาสตร์เกษตร. ปีที่ 39 ฉบับที่ 3 (พิเศษ), หน้า 164-167.
- เทวรัตน์ ทิพย์วิมล. 2552. เอกสารประกอบการสอนวิชาการอบแห้งและการเก็บรักษาผลผลิตเกษตร. สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, 144 น.
- ธนัช มุขจันทร์, เทวรัตน์ ทิพย์วิมล, พรธมา ดิปลับ และวีรชัย อาจหาญ. 2552. การอบแห้งมันเส้นด้วยเครื่องอบแห้งหมุนแบบกะ. รายงานการประชุมวิชาการมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน ครั้งที่ 6., หน้า 582-588.
- เทวรัตน์ ทิพย์วิมล และสมยศ เชิญอักษร. 2554. ความชื้นสมดุลและคุณสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์ของไพล. วารสารวิทยาศาสตร์เกษตร, ปีที่ 42 ฉบับที่ 1 (พิเศษ), หน้า 139-142
- เทวรัตน์ ทิพย์วิมล, เกียรติศักดิ์ ใจโต, ชรรมรัตน์ ขาวสำอางค์ และ กระวี ตรีอำรรค. 2554. เครื่องแยกแกลบจากข้าวกล้องซ้อมมือแบบประหยัด. วารสารวิทยาศาสตร์เกษตร ปีที่ 42 ฉบับที่ 3 (พิเศษ) หน้า 517-520.
- บัณฑิต แก้วธรรม, วันพิทักษ์ คงสนุ่น, กระวี ตรีอำรรค และ เทวรัตน์ ทิพย์วิมล. 2554 [การอบแห้งสับปะรดเชื่อมด้วยเครื่องอบแห้งแบบลมร้อน-ไมโครเวฟ](#). วารสารวิทยาศาสตร์เกษตร ปีที่ 42 ฉบับที่ 3 (พิเศษ) หน้า 493-496.

- พยุงศักดิ์ จุลยุเสณ, คธา วาทกิจ, พรรษา ลิบลับ, เทวรัตน์ ทิพย์วิมล และวีรชัย ออาจหาญ. 2554. [การออกแบบและทดสอบเครื่องทำความสะอาดมันสำปะหลัง](#). วารสารวิทยาศาสตร์เกษตร ปีที่ 42 ฉบับที่ 3 (พิเศษ) หน้า 501-504.
- เทวรัตน์ ทิพย์วิมล และวีรชัยออาจหาญ. 2554. การอบแห้งแครอทด้วยเครื่องอบแห้งระบบปั๊มความร้อน. รายงานการประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทยครั้งที่ 12. หน้า 96.
- เทวรัตน์ ทิพย์วิมล, ปริศนา แสงรุ่ง และ ปัตตะนิ์ สุดตะนะ. 2555. สมบัติทางกายภาพและความร้อนของข้าวขาวดอกมะลิ 105. รายงานการประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 13. หน้า 93
- ศักยะ สมบัติไพรวรรณ, เทวรัตน์ ทิพย์วิมล และกระวี ตรีอำนาจ. 2555. การเปลี่ยนแปลงลักษณะทางคุณภาพของมะม่วงน้ำดอกไม้ภายหลังการเก็บเกี่ยว. รายงานการประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 13. หน้า 92.
- วิเชียร ดวงสีเสน, เทวรัตน์ ทิพย์วิมล และวีรชัย ออาจหาญ. 2555. การศึกษาการอบแห้งกากมันสำปะหลังโดยใช้เครื่องอบแห้งแบบตะแกรงหมุน. รายงานการประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 13. หน้า 114.
- **Tawarat Tipyavimol** and Somyot Chirnaksorn. 2006. Thai aroma herb drying with microwave assisted heat pump dryer. Proceedings of the 13th Tri-University International Joint Seminar & Symposium 2006, Oct. 29-Nov. 2. Mie University, Japan. Pp. 278-281.
- **Tawarat Tipyavimol** and Somyot Chirnaksorn. 2007. Performance Study of Heat pump-Microwave Combination Dryer. Proceeding of International Conference on Agricultural, Food and Biological Engineering & Post Harvest/Production Technology, 21-24 January, Sofitel Raja Orchid Hotel, Khon Kean, Thailand. Page 35.