

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

ในการออกแบบและดำเนินการสร้าง รวมถึงการทดสอบประสิทธิภาพของเครื่องอบแห้งไขมันชั้นมีการใช้อุปกรณ์ต่าง ๆ ตามรายการดังต่อไปนี้

1. เครื่องอบแห้งไขมันชั้นระบบปั๊มความร้อนที่ออกแบบ (ภาพที่ 5)



ภาพที่ 5 เครื่องอบแห้งไขมันชั้นต้นแบบ

2. ตู้อบ (Oven) ใช้สำหรับอบชิ้นตัวอย่างเพื่อหาความชื้นเริ่มต้นและความชื้นสุดท้ายของไขมันชั้น
3. เครื่องวัดความชื้นอากาศแวดล้อม ยี่ห้อ Digicon รุ่น DM-760 ใช้สำหรับค่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศแวดล้อม
4. เครื่องชั่งน้ำหนักแบบดิจิทัล ยี่ห้อ Precisa รุ่น 6200 CSCS ความละเอียด 0.01 กรัม สำหรับชั่งน้ำหนักวัสดุอบแห้ง

5. อุปกรณ์วัดความเร็วลม (Hot wire anemometer) ยี่ห้อ Dwyer รุ่น 471 ใช้สำหรับวัดความเร็วลมของอากาศที่ใช้ในการอบแห้งและความเร็วลมในท่อ Bypass (ภาพที่ 6)



ภาพที่ 6 เครื่องวัดความเร็วลม (Hot wire anemometer)

6. สายเทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple type K) สำหรับวัดอุณหภูมิของอากาศร้อนที่บริเวณต่างๆ ภายในเครื่องอบแห้ง และอุณหภูมิอากาศแวดล้อม

7. เครื่องบันทึกข้อมูล (Datalogger) ยี่ห้อ Campbell Scientific รุ่น 21X ใช้สำหรับเก็บข้อมูลอุณหภูมิที่วัดโดยสายเทอร์โมคัปเปิลที่ตำแหน่งต่างๆ ภายในเครื่องอบแห้งและอุณหภูมิอากาศแวดล้อมตลอดการทดลอง (ภาพที่ 7)



ภาพที่ 7 เครื่องบันทึกข้อมูล (Datalogger)

8. อุปกรณ์วัดความดัน (Pressure gage) ใช้สำหรับวัดความดันของสารทำความเย็นในระบบปั๊มความร้อน

9. คลิปแอมป์ (Clip amp) ยี่ห้อ ITT Instrument รุ่น MX200 ใช้สำหรับวัดกระแสไฟฟ้าที่เข้าสู่เครื่องอัดไอ

10. อุปกรณ์วัดพลังงานไฟฟ้า (Watt-hour meter) ใช้วัดปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ตลอดการทดลอง

11. นาฬิกาจับเวลา

12. เครื่องวัดสี (Color meter) ของ Drlange Model Tricolor LFM 3 ใช้วัดเปรียบเทียบสีของขมิ้นชันหลังจากการอบแห้ง (ภาพที่ 8)



ภาพที่ 8 เครื่องวัดสี (Color meter)

13. อุปกรณ์วัดความเร็วรอบ (Digital Tachometer) ของ Yokogawa Japan. Model TM-300 ใช้วัดความเร็วรอบมอเตอร์ในการปรับความเร็วลม Blower

14. ขมิ้นชัน ใช้เป็นวัสดุอบแห้ง (ภาพที่ 9)



ภาพที่ 9 ขมิ้นชันสดและขมิ้นที่หั่นเป็นแว่น

วิธีการ

จากวัตถุประสงค์ของงานวิจัย เพื่อการออกแบบ สร้าง และทดสอบประสิทธิภาพของเครื่องอบแห้งขมิ้นชัน โดยพัฒนามาจากเครื่องอบแห้งระบบป้อนความร้อนที่ออกแบบและสร้างโดยสมยศและสุทธศักดิ์ (2543) จะมีรายละเอียดของวิธีการดำเนินงานดังต่อไปนี้

การออกแบบห้องอบแห้ง

สำหรับการออกแบบห้อง ในงานวิจัยครั้งนี้จะเป็นห้องอบแห้งแบบถาดอยู่กับที่ซึ่งมีส่วนประกอบต่างๆ ของอุปกรณ์ดังนี้

1. ตู้อบแห้งขนาดปริมาตรภายในตู้ เท่ากับ $0.76 \times 0.70 \times 0.64 \text{ m}^3$
2. ถาดอบแห้งขนาดพื้นที่ เท่ากับ $0.52 \times 0.60 \text{ m}^2$ ขอบถาดหนา 0.03 cm จำนวนถาดทั้งหมด 8 ถาด
3. ถาดมีปริมาตรภายใน เท่ากับ $0.54 \times 0.62 \times 0.55 \text{ m}^3$
4. ใบปรับการกระจายลมบริเวณทางเข้าตู้อบแห้ง 1 ชุด และช่องอากาศ Bypass 1 ชุด

5. ตู้อบแห้งหุ้มด้วยฉนวนใยแก้วหนา 2.5 cm ค่าความหนาแน่นของฉนวน 48 kg/m^3

เงื่อนไขในการออกแบบตู้อบแห้ง

สำหรับเงื่อนไขในการออกแบบตู้อบแห้งที่ได้กำหนดขึ้นมีดังนี้

1. ปริมาณขมิ้นชันอบแห้งครั้งละ 20-30 kg
2. ขมิ้นชันมีความชื้นเริ่มต้น 548.31 %db และต้องการอบแห้งขมิ้นชันให้มีความชื้นสุดท้าย 12 %db
3. อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ 0.47 kg/s เนื่องจากงานวิจัยที่ผ่านมา (Clements และคณะ, 1993) พบว่าอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศที่ผ่านเครื่องทำระเหยเป็น 30 เปอร์เซนต์ของอัตราการไหลของอากาศรวม และยังพบว่าขนาดเครื่องปรับอากาศจะใช้อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศที่ผ่านเครื่องทำระเหยเท่ากับ 0.14 kg/s

ขั้นตอนในการออกแบบตู้อบแห้ง

สำหรับขั้นตอนในการคำนวณหาข้อมูลต่างๆ ในอุปกรณ์ประกอบตู้อบแห้งมีดังนี้

1. การออกแบบจำนวนถาดในตู้อบแห้ง สามารถคำนวณได้จากความหนาแน่นของขมิ้นชันซึ่งหาจากห้องปฏิบัติการทดลองมีค่าเท่ากับ 1307.97 kg/m^3

ดังนั้นสามารถคำนวณหาปริมาตรของขมิ้นชันทั้งหมดได้จากความหนาแน่นและความชื้นดังกล่าวได้ดังนี้

$$\begin{aligned} V_{\text{total}} &= \text{ปริมาณอบแห้ง} / \text{ความหนาแน่น} & (14) \\ &= 30 / 1307.97 = 0.0229 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

กำหนดให้ขมิ้นชันหนึ่งชิ้นมีขนาดเฉลี่ย $2 \times 2 \times 2 \text{ cm}^3$ ดังนั้นสามารถคำนวณหาปริมาตรของขมิ้นชันทั้งหมดได้ดังนี้

$$\begin{aligned}\text{จำนวนชิ้นขมิ้นชันทั้งหมด} &= 0.0229 / (2 \times 2 \times 2 \times 10^{-6}) \\ &= 2863 \text{ ชิ้น}\end{aligned}$$

ถ้ากำหนดถาดมีขนาดความกว้าง 0.60 m ยาว 0.52 m เพราะฉะนั้นถาดหนึ่งถาดมีพื้นที่ 0.312 ตารางเมตร และสามารถวางขมิ้นชันได้เต็มที่ 780 ชิ้น แต่เนื่องจากการวางขมิ้นชันในถาดจะต้องไม่ชิดกันมากเกินไป ดังนั้นถาดหนึ่งถาดจะสามารถวางขมิ้นชันได้เต็มที่เพียงจำนวน 340 ชิ้นเท่านั้น และสามารถคำนวณหาจำนวนถาดได้ดังนี้

$$\begin{aligned}\text{จำนวนถาดทั้งหมด} &= 2863 / 340 \\ &= 8 \text{ ถาด}\end{aligned}$$

2. การคำนวณหามวลขมิ้นชันหลังการอบแห้ง จากเงื่อนไขการออกแบบขมิ้นชันความชื้นเริ่มต้นเท่ากับ 548.31 %db และมวลก่อนอบแห้งจำนวน 30 kg สามารถคำนวณหาผลแห้งของขมิ้นชันได้จากสมการ

$$M_i = (W_i - d) / d \quad (15)$$

$$\begin{aligned}\text{เมื่อ } M_i &= \text{ความชื้นเริ่มต้น, เศษส่วนมาตรฐานแห้ง} \\ W_i &= \text{มวลของขมิ้นชัน, kg} \\ d &= \text{มวลของขมิ้นชันแห้ง, kg}\end{aligned}$$

จากสมการแทนค่า $M_i = 5.4831$ เศษส่วนมาตรฐานแห้ง และ $W_i = 30 \text{ kg}$ จะได้มวลแห้งของขมิ้นชันขณะไม่มีความชื้นอยู่เลย ได้ดังนี้

$$\begin{aligned}d &= 30 / (5.4831 + 1) \\ &= 4.63 \text{ kg}\end{aligned}$$

จากเงื่อนไขการออกแบบที่กำหนดไว้ ซึ่งต้องการอบแห้งขมิ้นชันให้ความชื้นสุดท้ายเหลือ 12 %db สามารถคำนวณหาผลสุดท้ายของขมิ้นชันได้จากสมการดังนี้

$$W_f = (M_f + 1) d \quad (16)$$

เมื่อ M_f = ความชื้นสุดท้าย, เศษส่วนมาตรฐานแห้ง
 W_f = มวลของขมิ้นชันสุดท้าย, kg

จากสมการแทนค่า M_f เท่ากับ 0.12 เศษส่วนมาตรฐานแห้ง และ d เท่ากับ 4.63 kg จะได้มวลสุดท้ายของขมิ้นชันดังนี้

$$\begin{aligned} W_f &= (0.12 + 1) 4.63 \\ &= 5.18 \text{ kg} \end{aligned}$$

ดังนั้นสามารถคำนวณหาปริมาณน้ำที่ระเหยออกทั้งหมดได้ โดยการนำมวลก่อนอบแห้งลบด้วยมวลสุดท้ายหลังการอบแห้งซึ่งแทนค่าแสดงให้เห็นดังนี้

$$\begin{aligned} \text{ปริมาณน้ำที่ระเหยออกทั้งหมด} &= 30 - 5.18 \\ &= 24.82 \text{ kg} \end{aligned}$$

3. การคำนวณหาความเร็วอากาศที่ไหลผ่านถาด ทำได้โดยการคำนวณจากอัตราการไหลของอากาศที่ตั้งสมมติฐานไว้ในการออกแบบ ซึ่งกำหนดอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศมีค่าเท่ากับ 0.47 kg/s ดังนั้นสามารถคำนวณหาความเร็วอากาศที่ไหลผ่านถาดได้จากสมการดังนี้

$$V = m_a / \rho_a A \quad (17)$$

เมื่อ V = ความเร็วของอากาศที่ไหลผ่านถาด, m/s
 m_a = อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ, kg/s
 ρ_a = ความหนาแน่นของอากาศ (= 1.09 kg/m³)
 A = พื้นที่หน้าตัดห้องอบแห้ง, m²

$$= l \times n \times b$$

l = ความลึกของตู้อบแห้ง, m
 n = จำนวนถาด, ถาด
 b = ระยะห่างระหว่างถาด, m

กำหนดให้ $l = 0.82$ m, $n = 8$ ถาด, $b = 0.06$ m และ $m_a = 0.47$ kg/s แทนค่าในสมการที่ 17 จะได้ว่า

$$\begin{aligned}
 V &= 0.47 / (1.09 \times 0.82 \times 0.06 \times 8) \\
 &= 1.096 \text{ m/s}
 \end{aligned}$$

4. การคำนวณหาเวลาที่ใช้ในการอบแห้งขมิ้นชันจำนวน 30 kg ทำได้โดยสมมติว่าความร้อนแฝงของการระเหยน้ำจากขมิ้นชันมีค่าเท่ากับความร้อนสัมผัสของอากาศที่เปลี่ยนไป จากการสมดุลพลังงานจะได้ว่า

$$m_w h_{fg} = m_a C_a (T_d - T_f) t \quad (18)$$

เมื่อ

m_a = อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ, kg/s
 C_a = ความร้อนจำเพาะของอากาศ (= 1.006 kJ/kg⁰C)
 T_d = อุณหภูมิอากาศก่อนเข้าตู้อบแห้ง, ⁰C
 T_f = อุณหภูมิอากาศออกจากตู้อบแห้ง, ⁰C
 m_w = ปริมาณมวลน้ำที่ระเหยออกจากวัสดุ, kg
 h_{fg} = ความร้อนแฝงของการระเหยน้ำ (= 2370 kJ/kg)
 t = เวลาที่ใช้ในการอบแห้ง, s

แทนค่า $m_a = 0.47$ kg/s, $m_w = 24.82$ kg, $T_d = 60$ ⁰C และ $T_f = 59$ ⁰C ลงในสมการที่ 18 สามารถหาเวลาที่ใช้ในการอบแห้งได้ดังนี้

$$= (24.82 \times 2370) / [0.47 \times 1.006 (60-59) \times 3600]$$

$$= 34.56 \text{ h}$$

ดังนั้นจะได้อัตราการระเหยน้ำจากขมิ้นชันต่อเวลา (Drying rate) เท่ากับ $0.72 \text{ kg}_{\text{water}}/\text{h}$

การคำนวณหาขนาดของห้องอบแห้ง กำหนดให้

- จำนวนถาดทั้งหมด 8 ถาด
- ขอบถาดหนา 0.3 cm
- ระยะช่องว่างระหว่างถาด 6 cm
- ระยะช่องว่างจากผนังตู้อบแห้งถึงถาดอบ 5 cm
- ฉนวนหนาแต่ละ 2.5 cm
- ขนาดถาด $60 \times 52 \text{ cm}^2$

ดังนั้น สามารถคำนวณหาความสูงของถาดอบได้ดังนี้

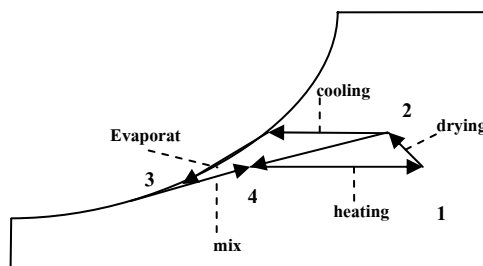
$$\begin{aligned} \text{ความสูงของถาดอบ} &= \text{ระยะห่างระหว่างถาด} \times \text{จำนวนถาด} \\ &= 0.06 \times 8 \\ &= 0.48 \text{ m เพื่อค่าต่างๆ จะเท่ากับ } 0.55 \text{ m} \\ \text{ปริมาตรของตู้อบแห้ง (ภายใน)} &= 0.82 \times 0.74 \times 0.65 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

การออกแบบระบบปั๊มความร้อน

สำหรับเงื่อนไขในการออกแบบระบบปั๊มความร้อนได้กำหนดดังนี้

1. จากงานวิจัยที่ผ่านมา (Zylla และคณะ, 1982) พบว่าการอบแห้งโดยใช้ปั๊มความร้อนแบบระบบปิด (Close loop system) จะให้ประสิทธิภาพระบบสูง ดังนั้นระบบที่ออกแบบนั้นจึงเป็นแบบระบบปิดด้วย

2. กำหนดสภาวะเงื่อนไขของอากาศดังต่อไปนี้ (ภาพที่ 10)



ภาพที่ 10 แผนภูมิอากาศชื้นของกระบวนการอบแห้งระบบปั๊มความร้อน

จากเงื่อนไขในการออกแบบตู้อบแห้งข้างต้นจะได้ว่า

$$\begin{aligned} T_d &= 60^{\circ}\text{C} & W_d &= 0.03 \text{ kg water/kg dry air} \\ T_f &= 59^{\circ}\text{C} & W_f &= 0.03196 \text{ kg water/kg dry air} \end{aligned}$$

กำหนดสถานะเงื่อนไขของอากาศในเครื่องทำระเหยให้เหมาะสมกับอัตราการทำระเหยของน้ำในวัสดุอบแห้งดังนี้

$$\begin{aligned} T_{ei} &= 43^{\circ}\text{C} & W_{ei} &= 0.01906 \text{ kg water/kg dry air} \\ T_{eo} &= 23^{\circ}\text{C} & W_{eo} &= 0.01760 \text{ kg water/kg dry air} \end{aligned}$$

และ $RH_{eo} = 95\%$

เมื่อ

$$\begin{aligned} T &= \text{อุณหภูมิของอากาศ, } ^{\circ}\text{C} \\ RH &= \text{ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ, \%} \\ W &= \text{อัตราส่วนความชื้นของอากาศ, kg water/kg dry air} \end{aligned}$$

สัญลักษณ์กำกับตัวอักษร

$$\begin{aligned} d &= \text{อากาศก่อนเข้าตู้อบแห้ง} \\ f &= \text{อากาศหลังการอบแห้ง} \\ ei &= \text{ทางเข้าเครื่องทำระเหย} \\ eo &= \text{ทางออกเครื่องทำระเหย} \end{aligned}$$

การคำนวณหาขนาดของเครื่องทำระเหย ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่มีความสำคัญโดยทำหน้าที่ลดอุณหภูมิและความชื้นอากาศ ในระหว่างกระบวนการดังกล่าวทำให้อากาศชื้นควบแน่นกลั่นตัวกลายเป็นหยดน้ำ โดยกระบวนการทำความเย็นมีเงื่อนไขคือ ในระหว่างกระบวนการความดันคงที่ และมีการดึงทั้งความร้อนและชื้นออก หากกำหนดอัตราการไหลของอากาศเท่ากับ 0.47 kg/s จะสามารถอบแห้งวัสดุ 30 kg ได้เสร็จภายในเวลา 34.56 h คิดเป็นอัตราน้ำระเหยได้เท่ากับ 0.72 kg/h และกำหนดให้อากาศหลังอบแห้งมีอัตราส่วน Bypass เท่ากับ 70% จะได้อัตราการไหลผ่านชุดลดความชื้นเท่ากับ 0.14 kg/s จากสภาวะดังกล่าวสามารถนำไปหาขนาดของเครื่องทำระเหย จากหลักการสมดุลพลังงานสามารถเขียนสมการแสดงความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$Q_e = m_e C_a (T_{ei} - T_{eo}) + m_e (W_{ei} - W_{eo}) h_{fg} \quad (19)$$

เมื่อ	Q_e	=	ความสามารถในการทำ ความเย็นสุทธิของเครื่องทำระเหย, kW
	T	=	อุณหภูมิของอากาศ, °C
	C_a	=	ความร้อนจำเพาะของอากาศ (= 1.006 kJ/kg °C)
	h_{fg}	=	เอนทัลปีของการระเหยน้ำ, kJ/kg
		=	$2502 - 2.386(T_{ei} + T_{eo})/2 = 2423 \text{ kJ/kg}$
	m_e	=	อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศที่ผ่านเครื่องทำระเหย, kg/s
	W	=	อัตราส่วนความชื้นของอากาศ, kg water/kg dry air

สามารถคำนวณหาปริมาณควบแน่นต่อเวลา (Moisture extraction rate, MER) โดยเครื่องทำระเหย ซึ่งจะมีความสัมพันธ์กับค่าอัตราการระเหยน้ำจากขมิ้นชันดังนี้

$$\begin{aligned} m_w &= m_e (W_{ei} - W_{eo}) \\ &= 0.14 \times 3600 (0.0196 - 0.0176) \\ &= 1.01 \text{ kg/h} \end{aligned} \quad (20)$$

แทนค่าลงในสมการที่ 19 สามารถคำนวณหาขนาดเครื่องทำระเหยจะได้ว่า

$$\begin{aligned} Q_e &= 0.14 \times 1.006 (43 - 23) + 0.14 (0.0196 - 0.0176) 2423 \\ &= 3.495 \text{ kW} \end{aligned}$$

ในงานวิจัยครั้งนี้ได้เลือกซื้อขนาดของเครื่องทำระเหยที่มีขายทางพาณิชย์ เท่ากับ 3.66 kW หรือขนาด 12,500 BTU/h

การคำนวณหาขนาดเครื่องควบแน่นจะแบ่งเครื่องควบแน่นเป็น 2 ชุด เป็นเครื่องควบแน่นตัวในซึ่งใช้อุ่นอากาศและเครื่องควบแน่นตัวนอกใช้ระบายความร้อนส่วนเกินออกจากระบบภายใน ซึ่งต้องทราบอุณหภูมิของอากาศผสมระหว่างอากาศที่ออกจากเครื่องทำระเหย กับอากาศร้อนที่ Bypass มาจากการอบแห้ง เพราะเป็นสภาวะอากาศก่อนเข้าเครื่องควบแน่น โดยสมมุติว่าอากาศผสมไม่มีการเปลี่ยนแปลงสถานะและไม่สูญเสียความร้อน จากการสมดุลพลังงานจะได้สมการ

$$m_a T_{ci} = m_{bp} T_f + m_{de} T_{eo} \quad (21)$$

เมื่อ m_a = อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศผสม (kg/s)
 m_{bp} = อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ Bypass (kg/s)
 T_f = อุณหภูมิอากาศหลังอบแห้ง ($^{\circ}\text{C}$)
 T_{ci} = อุณหภูมิอากาศก่อนเข้าเครื่องควบแน่น ($^{\circ}\text{C}$)

อัตราส่วน Bypass 70% จะมีอัตราการไหลเท่ากับ 0.33 kg/s จากสภาวะการออกแบบจะนำไปหาอุณหภูมิผสมของอากาศก่อนเข้าเครื่องควบแน่น เพื่อใช้ในการหาขนาดของเครื่องควบแน่นได้ดังนี้

$$\begin{aligned} T_{ci} &= m_{bp} T_f + m_{de} T_{eo} / m_a \\ &= [(0.33 \times 59) + (0.14 \times 23)] / 0.47 \\ &= 48.28 \text{ }^{\circ}\text{C} \end{aligned} \quad (22)$$

เมื่อทราบอุณหภูมิของอากาศผสมแล้ว การหาขนาดของเครื่องควบแน่นตัวในจากการสมดุลพลังงานจะได้สมการ คือ

$$Q_{cin} = m_a C_a (T_{co} - T_{ci}) \quad (23)$$

$$\begin{aligned} \text{เมื่อ } Q_{\text{cin}} &= \text{อัตราการทำความร้อนของเครื่องควบแน่นตัวใน (kW)} \\ T_{\text{co}} &= \text{อุณหภูมิอากาศออกจากเครื่องควบแน่น (°C)} \end{aligned}$$

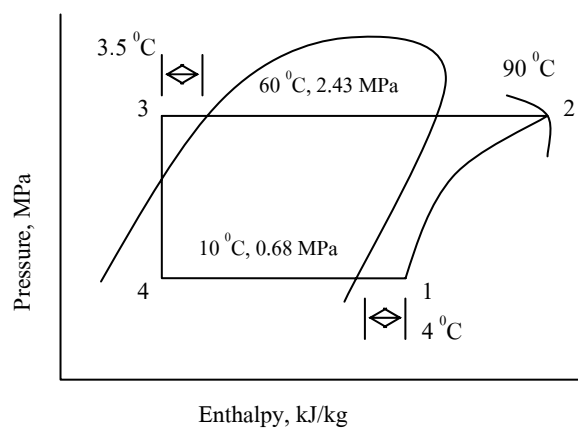
แทนค่าในสมการที่ 23 จะได้

$$\begin{aligned} Q_{\text{cin}} &= 0.47(1.006)(60-48.28) \\ &= 5.54 \text{ kW} \end{aligned}$$

การคำนวณหาขนาดเครื่องปั๊มความร้อน นำผลข้อมูลที่คำนวณไว้ข้างต้นมาเป็นเงื่อนไข และเพิ่มเติมเงื่อนไขของระบบปั๊มความร้อน ในการคำนวณหาขนาดเครื่องปั๊มความร้อนซึ่งมีข้อมูลดังต่อไปนี้

1. ความสามารถในการทำความเย็นสุทธิของเครื่องทำระเหยเท่ากับ 3.66 kW
2. อุณหภูมิสารทำความเย็นในเครื่องทำระเหยเท่ากับ 10 °C
3. อุณหภูมิสารทำความเย็นในเครื่องควบแน่นเท่ากับ 60 °C
4. อุณหภูมิสารทำความเย็นที่ทางออกเครื่องอัดไอเท่ากับ 90 °C
5. ช่วงผลต่างอุณหภูมิ Subcooling เท่ากับ 3.5 °C
6. ช่วงผลต่างอุณหภูมิ Superheating เท่ากับ 4 °C
7. ความดันภายในเครื่องควบแน่นเท่ากับ 2.43 Mpa
8. ความดันภายในเครื่องทำระเหยเท่ากับ 0.68 Mpa
9. สารทำความเย็นที่ใช้คือ R-22

นำข้อมูลต่าง ๆ เบื้องต้นมาแสดงไว้ในแผนภูมิความดันและเอนทัลปี (ภาพที่ 11)



ภาพที่ 11 แผนภูมิความดันและเอนทัลปี

จากแผนภูมิความดันและเอนทัลปี จะได้ค่าเอนทัลปีในระบบที่จุดต่าง ๆ ดังนี้

$$\begin{aligned} h_1 &= 258.2 \text{ kJ/kg} \\ h_2 &= 249.5 \text{ kJ/kg} \\ h_4 &= 116.3 \text{ kJ/kg} (= h_3) \end{aligned}$$

เมื่อ h = เอนทัลปีในระบบที่จุดใด ๆ , kJ/kg

สัญลักษณ์กำกับตัวอักษร

- 1 = Compressor inlet
- 2 = Condenser inlet
- 3 = Expansion valve inlet
- 4 = Evaporator inlet

ดังนั้นจึงคำนวณหาค่าต่าง ๆ ได้ดังนี้

ก. ความสามารถในการทำความเย็นต่อมวลของสารทำความเย็นจากสมการที่ 24

$$q_e = h_1 - h_4 \quad (24)$$

$$\begin{aligned}
 &= 258.2 - 116.3 \\
 &= 141.9 \text{ kJ/kg}
 \end{aligned}$$

ข. อัตราการไหลเชิงมวลสารทำความเย็นที่ไหลวนในวัฏจักรจากสมการที่ 25

$$\begin{aligned}
 m_f &= Q_c / q_c \\
 &= 3.66 / 141.9 \\
 &= 0.0258 \text{ kJ/kg}
 \end{aligned}
 \tag{25}$$

ค. ความสามารถในการทำความร้อนต่อมวลของสารทำความเย็นจากสมการที่ 26

$$\begin{aligned}
 q_c &= h_2 - h_4 \\
 &= 294.5 - 116.3 \\
 &= 178.2 \text{ kJ/kg}
 \end{aligned}
 \tag{26}$$

ง. พลังงานที่ป้อนให้แก่เครื่องอัดไอทางอุดมคติจากสมการที่ 27

$$\begin{aligned}
 q_w &= h_2 - h_1 \\
 &= 294.5 - 258.2 \\
 &= 36.3 \text{ kJ/kg}
 \end{aligned}
 \tag{27}$$

จากผลการคำนวณที่ได้มาสามารถคำนวณหาปัจจัยต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องได้ดังนี้

ก. คำนวณหาค่า COP ของระบบจากสมการที่ 28

$$\begin{aligned}
 \text{COP}_{re} &= q_c / q_w \\
 &= 141.9 / 36.3 \\
 &= 3.9
 \end{aligned}
 \tag{28}$$

$$\begin{aligned}
 \text{และ} \quad \text{COP}_{\text{hp}} &= q_c / q_w \\
 &= 178.2 / 36.2 \\
 &= 4.9
 \end{aligned} \tag{29}$$

ข. ความสามารถในการทำความร้อนสุทธิของเครื่องควบแน่น จากสมการที่ 30

$$\begin{aligned}
 Q_c &= m_r q_c \\
 &= 0.0258 \times 178.2 \\
 &= 4.6 \text{ kW}
 \end{aligned} \tag{30}$$

ค. งานที่ป้อนให้แก่เครื่องอัดไอทางอุณหพลศาสตร์ จากสมการที่ 31

$$\begin{aligned}
 W_c &= m_r q_w \\
 &= 0.0258 \times 36.3 \\
 &= 0.94 \text{ kW}
 \end{aligned} \tag{31}$$

เมื่อ	Q_c	=	ความสามารถในการทำความเย็นสุทธิของเครื่องทำระเหย, kW
	Q_c	=	ความสามารถในการทำความร้อนสุทธิของเครื่องควบแน่น, kW
	W_c	=	งานที่ป้อนเข้าสู่เครื่องอัดไอทางอุณหพลศาสตร์, kW
	m_r	=	อัตราการไหลเชิงมวลของสารทำความเย็น, kg/s
	q_w	=	พลังงานที่ป้อนให้กับเครื่องอัดไอ, kJ/kg
	q_e	=	ความสามารถในการทำความเย็นต่อมวลของสารทำความเย็น, kJ/kg
	q_c	=	ความสามารถในการทำความร้อนต่อมวลของสารทำความเย็น, kJ/kg

จากการคำนวณหาขนาดเครื่องควบแน่น จะเห็นได้ว่าความสามารถในการทำความร้อนสุทธิของเครื่องควบแน่นหรือปริมาณความร้อนที่ต้องการระบายทิ้งที่เครื่องควบแน่นมีสูงกว่าความต้องการใช้งาน ในขณะที่ความสามารถในการทำความเย็นสุทธิของเครื่องทำระเหยมีค่าเท่าเดิม ดังนั้นจึงจำเป็นต้องแบ่งเครื่องควบแน่นเป็น 2 ตัว ดังนี้

- ขนาดเครื่องควบแน่นตัวใน

$$Q_i = 5.54 \text{ kW}$$

- ขนาดเครื่องควบแน่นตัวนอก

$$\begin{aligned} Q_x &= W_c \text{COP}_{\text{hp(sys)}} - Q_i \\ &= 5.54 - (0.94 \times 4.9) \\ &= 0.93 \text{ kW} \end{aligned} \quad (32)$$

ดังนั้นจึงได้เลือกซื้อเครื่องควบแน่นตัวนอกและเครื่องควบแน่นตัวในขนาดที่มีขายในเชิงพาณิชย์เท่ากับ 5.5 kW (20,000 BTU/h) และ 2.5 kW (10,000 BTU/h) ซึ่งเป็นขนาดที่เหมาะสมพอดีในการใช้งานร่วมกับเครื่องทำระเหย

การคำนวณหาขนาดกำลังใช้งานจริงของเครื่องอัดไอ เนื่องจากเครื่องอัดไอเป็นอุปกรณ์หลักของระบบปั๊มความร้อน ซึ่งจะเกิดข้อบกพร่องอันเนื่องมาจากกำลังอัดของเครื่องอัดไอไม่เพียงพอต่อการใช้งานไม่ได้ เพราะจะมีผลเสียทำให้สมรรถนะของเครื่องจะต่ำลง ซึ่งขนาดกำลังใช้งานจริงของเครื่องอัดไอหาได้จากสมการที่ 33

$$P_c = W_c / \eta_m \eta_c \quad (33)$$

เมื่อ	P_c	=	ขนาดกำลังใช้งานจริงของเครื่องอัดไอ, kW
	W_c	=	งานที่ป้อนให้แก่เครื่องอัดไอทางอุณหพลศาสตร์, kW
	η_m	=	ประสิทธิภาพมอเตอร์ไฟฟ้า, เศษส่วน
	η_c	=	ประสิทธิภาพทางกลของเครื่องอัดไอ, เศษส่วน

จากค่า W_c ที่คำนวณได้จากข้างต้น ($W_c = 0.94 \text{ kW}$) และกำหนดให้ $\eta_m = 0.80$ และ $\eta_c = 0.85$ แทนค่าลงในสมการจะได้ขนาดของเครื่องอัดไอ ดังนี้

$$P_c = 0.94 / (0.80 \times 0.85)$$

$$= 1.38 \text{ kW}$$

ดังนั้นเลือกซื้อขนาดเครื่องอัดไอที่มีขายในทางพาณิชย์เท่ากับ 1.4 kW (12,000 BTU/h)

การคำนวณหาขนาดของพัดลม (Blower) ในการคำนวณขนาดพัดลมสามารถคำนวณได้จากการพิจารณาถึงความดันที่สูญเสียและอัตราการไหลของอากาศซึ่งแสดงไว้ในภาคผนวก ข ที่ต้องการซึ่งสามารถคำนวณกำลังงานของพัดลมได้ดังนี้

$$P_m = Q_a P / \eta_f \eta_m \quad (34)$$

และ

$$P = \rho_a g h_L \quad (35)$$

เมื่อ	P_m	=	กำลังงานมอเตอร์พัดลม, kW
	Q_a	=	อัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศ, m^3/s
	P	=	ความดันสูญเสียทั้งระบบ, Pa
	η_f	=	ประสิทธิภาพของพัดลม, เศษส่วน
	η_m	=	ประสิทธิภาพทางกลของมอเตอร์, เศษส่วน
	ρ_a	=	ความหนาแน่นของอากาศ ($= 1.09 \text{ kg/m}^3$)
	g	=	ความโน้มถ่วงของโลก ($= 9.81 \text{ m/s}^2$)
	h_L	=	ความดันสูญเสียทั้งระบบ, m-air

กำหนดให้ $\eta_f = 0.60$ และ $\eta_m = 0.85$ จากเงื่อนไขเบื้องต้น $Q_a = 0.47 \text{ m}^3/s$ แทนค่าลงในสมการที่ 34 จะได้ขนาดมอเตอร์พัดลมดังนี้

$$\begin{aligned} P_m &= 0.47 \times 343.03 / (0.6 \times 0.85) \\ &= 0.32 \text{ kW} \end{aligned}$$

ในงานวิจัยครั้งนี้ได้เลือกซื้อมอเตอร์ไฟฟ้าในขนาดที่มีขายทางพาณิชย์และใกล้เคียงกับขนาดที่ได้จากการคำนวณออกแบบคือ 0.75 kW หรือมอเตอร์ขนาด 1 Hp

เครื่องอบแห้งไขมันชั้นที่สร้างขึ้น

เครื่องอบแห้งไขมันชั้นระบบปั๊มความร้อนได้แสดงไว้ในภาพที่ 5 ซึ่งประกอบไปด้วย 2 ส่วนหลัก ๆ คือ ห้องอบแห้ง และระบบปั๊มความร้อน ดังต่อไปนี้

1. ห้องอบแห้ง ประกอบด้วยส่วนต่าง ๆ ดังนี้

1.1 ห้องอบแห้ง มีปริมาตรภายในเท่ากับ $757.4 \times 732.2 \times 641.4 \text{ mm}^3$ หุ้มด้วยฉนวนใยแก้วหนา 7.5 cm ความหนาแน่น 12 kg/m^3

1.2 ภาควัสดุขนาด $520 \times 600 \text{ mm}^2$ จำนวน 8 ภาควัสดุ ซึ่งมีพื้นที่อบแห้งรวม 2.5 m^2

2. ระบบปั๊มความร้อน ประกอบด้วยรายละเอียดอุปกรณ์ดังต่อไปนี้

2.1 เครื่องอัดไอน้ำแบบลูกสูบ (hermetic reciprocating compressor) ขนาด 1.4 kW (1 ตันความเย็นหรือ 12000 Btu/h) ใช้ R-22 เป็นสารทำความเย็น

2.2 เครื่องควบแน่นตัวใน (internal condenser) จำนวน 1 ชุด ขนาด 5.5 kW (20000 Btu/h)

2.3 เครื่องควบแน่นตัวนอก (external condenser) จำนวน 1 ชุด ขนาด 2.5 kW (10000 Btu/h)

2.4 เครื่องทำระเหย (evaporator) จำนวน 1 ชุด พิกัดการทำงาน 3.66 kW

2.5 พัดลมชนิดแรงเหวี่ยงใบโค้งหน้า (forward curved blade centrifugal fan) ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 10 นิ้ว ที่กำลังขับเคลื่อน 0.75 kW ความเร็วรอบ 1400 rpm จะมีความดันสถิตย 441-520 Pa อัตราการไหล $0.77 \text{ m}^3/\text{s}$

2.6 พัดลมชนิดใบพัดไหลตามแกน (axial fan) สำหรับเครื่องควบแน่นตัวนอก พิกัดมอเตอร์ 0.01 kW

ตารางที่ 2 ตารางเปรียบเทียบเมื่อมาตรฐานปริมาณการอบแห้งเพิ่มมากขึ้น

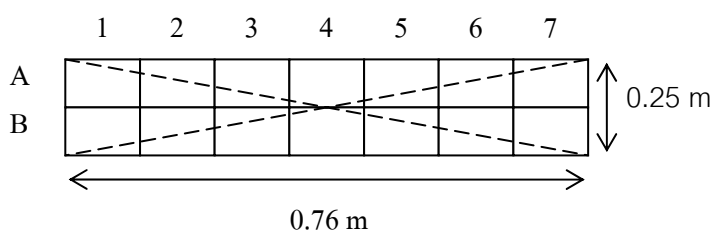
ปริมาณอบแห้ง (kg)	30	100	600
ปริมาตรห้องอบแห้ง (m ³)	0.253	2.271	5.85
ขนาดเครื่องทำระเหย (kW)	3.31	3.31	25
ขนาดเครื่องควบแน่นตัวใน (kW)	5.54	5.54	25
ขนาดเครื่องควบแน่นตัวนอก (kW)	0.93	0.93	10.5
ขนาดเครื่องอัดไอ (kW)	1.38	1.38	6.7
ขนาดมอเตอร์ (kW)	0.32	0.75	5.5
ขนาด Blower (m ³ /s)	0.77	0.77	2.8

การเก็บข้อมูล

ขั้นตอนการทดสอบและประเมินสมรรถนะของเครื่องอบแห้งระบบปั๊มความร้อนนี้ ได้กำหนดวิธีการวัดเพื่อเก็บข้อมูลออกเป็น 4 ส่วนดังนี้

1. อัตราการไหลและการกระจายของอากาศในห้องอบแห้ง โดยทำการวัดความเร็วลมของอากาศที่ไหลผ่านห้องอบแห้ง 2 จุด ดังแสดงในภาพที่ 14 คือตำแหน่งทางเข้าห้องอบและตำแหน่งที่ออกจากห้องอบ โดยทำการวัดตลอดหน้าตัดของห้องอบแล้วนำค่าที่ได้มาหาค่าเฉลี่ย

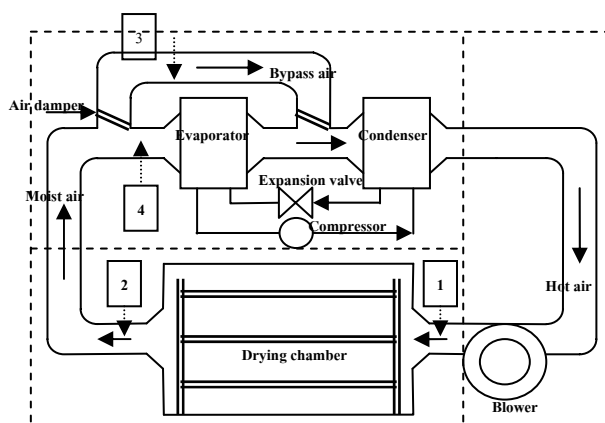
2. อัตราการไหลของอากาศที่ท่อ Bypass และอากาศที่ผ่านเครื่องทำระเหยดังภาพที่ 12 เพื่อนำมาหาความสัมพันธ์ของอากาศทั้งสองส่วนเพื่อให้สภาวะอากาศผสมมีความเหมาะสมตามที่ต้องการ ตำแหน่งการวัดแสดงในภาพที่ 12 โดยวัดจากความเร็วเฉลี่ยของหน้าตัดท่อลม 14 จุด (A₁, A₂, A₃, ..., B₆, B₇) ดังแสดงในภาพที่ 12



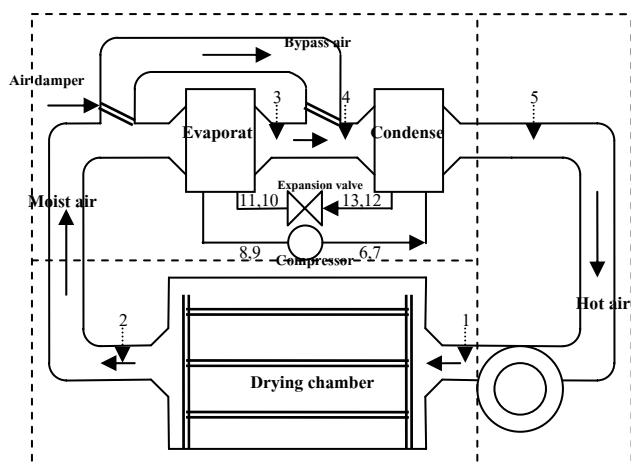
$$\text{พื้นที่ } 0.76 \times 0.25 = 0.19 \text{ m}^2$$

ภาพที่ 12 ตำแหน่งการวัดอากาศหลังอบแห้งและอากาศ Bypass

3. การวัดอุณหภูมิและความดันของระบบปั๊มความร้อน จะมีตำแหน่งการติดตั้ง Thermocouple และ Pressure Gauge ดังแสดงในภาพที่ 14 ทำการบันทึกค่าทุก ๆ ช่วง 1 ชั่วโมง แล้วนำค่าที่ได้มาหาประสิทธิภาพในการใช้พลังงานด้วยค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (Specific Energy Consumption, SEC) และค่าอัตราการระเหยน้ำจำเพาะ (Specific Moisture Extraction Rate, SMER) และหาประสิทธิภาพของปั๊มความร้อนในรูปค่า COP



ภาพที่ 13 ตำแหน่งวัดอัตราการไหลของอากาศ



ภาพที่ 14 แสดงวงจรอากาศของระบบและตำแหน่งการบันทึกข้อมูล

- 1 อุณหภูมิอากาศก่อนอบแห้ง
- 2 อุณหภูมิอากาศหลังอบแห้ง
- 3 อุณหภูมิอากาศออกจากเครื่องทำระเหย
- 4 อุณหภูมิอากาศผสม
- 5 อุณหภูมิอากาศออกจากเครื่องควบแน่น
- 6 อุณหภูมิสารทำความเย็นออกจากเครื่องอัดไอ
- 7 ความดันสารทำความเย็นออกจากเครื่องอัดไอ
- 8 อุณหภูมิสารทำความเย็นก่อนเข้าเครื่องอัดไอ
- 9 ความดันสารทำความเย็นก่อนเข้าเครื่องอัดไอ
- 10 ความดันสารทำความเย็นก่อนเข้าเครื่องทำระเหย
- 11 อุณหภูมิของสารทำความเย็นก่อนเข้าเครื่องทำระเหย
- 12 ความดันสารทำความเย็นก่อนเข้าวาล์วขยาย
- 13 อุณหภูมิสารทำความเย็นก่อนเข้าวาล์วขยาย

การวางแผนการทดลอง

ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมขมิ้นชันแห่ง มอก. 890-2532 ได้กำหนดมาตรฐานของขมิ้นชันแห่งไว้ดังตารางดังนี้

ตารางที่ 3 คุณลักษณะทางฟิสิกส์และทางเคมีของขมิ้นชันแห่ง

รายการ ที่	คุณลักษณะ	เกณฑ์ที่กำหนด		วิธีทดสอบตาม
		ชนิดก่อน	ชนิดผง	
1	ความชื้น ร้อยละ ไม่เกิน	12.0	10.0	มอก. 297*
2	เถ้า ร้อยละของน้ำหนักตัวอย่างที่ปราศจากความชื้น ไม่เกิน	-	9.0	มอก. 297*
3	เถ้าที่ไม่ละลายในกรด ร้อยละของน้ำหนักตัวอย่างที่ปราศจากความชื้น ไม่เกิน	-	1.0	มอก. 297*
4	น้ำมันระเหยง่าย ลูกบาศก์เซนติเมตร ต่อตัวอย่างที่ปราศจากความชื้น 100 กรัม ไม่น้อยกว่า	4.0	3.5	มอก. 297*
5	เคอร์คูมินอยด์รวม (คำนวณเป็นเคอร์คูมิน) ร้อยละของน้ำหนักตัวอย่างที่ ปราศจากความชื้น ไม่น้อยกว่า	4.0	4.0	ASTA**
6	โครเมียม	ไม่พบ	ไม่พบ	
7	สารหนู ไม่เกิน		1.0 มก./กก.	AOAC(1984)
8	ตะกั่ว ไม่เกิน		2.5 มก./กก.	AOAC(1984)
9	โซฟิสิกแอโรบิกแบคทีเรีย ไม่เกิน		106 โคโลนี	AOAC(1984)
10	เอสเชอริเชีย โคไล		ไม่พบ	
11	รา ไม่เกิน		100 โคโลนี	AOAC(1984)

หมายเหตุ * มอก.297 หมายถึง มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมพริกไทย มาตรฐานเลขที่ มอก.297

** ASTA หมายถึง American Spice Trade Association

การทดสอบการเคี้ยวรีงต่อเวลาการทำแห้ง

ในการทดลองนี้เลือกขมิ้นชันเป็นวัสดุอบแห้ง ซึ่งจัดเตรียมตามกระบวนการผลิตของเกษตรกรทั่ว ๆ ไป การทดลองที่ 1 จะต้องหาจุดที่เหมาะสมสำหรับสัดส่วนอากาศไหลข้ามเครื่องทำระเหย จุดเหมาะสมในที่นี้หมายถึงจุดที่ยังคงทำให้เครื่องอบแห้งสามารถทำงานได้ในทุกช่วงของการอบแห้ง ตั้งแต่ช่วงเริ่มต้นของการอบแห้ง จนถึงช่วงสุดท้ายของการอบแห้งที่ความชื้นในผลิตภัณฑ์มีค่าต่ำ ซึ่งจะทำให้ผู้วิจัยมีความสะดวก โดยไม่ต้องปรับเปลี่ยนภาระของเครื่องทำระเหย

ไปตามสภาวะการอบแห้ง ซึ่งมีลักษณะสภาวะไม่คงที่ในแง่ของความชื้น โดยวางแผนการทดลองปัจจัยที่ทำการศึกษา 3 ปัจจัย คือ ระยะเวลาในการเคียวรีงโดยวิธีการต้ม อุณหภูมิอากาศร้อนขาเข้า อัตราการไหลอากาศส่วน Bypass ตามตารางที่ 4 โดยวางแผนการทดลองแบบสุ่มตลอด (Completely Randomized Design, CRD) จำนวน 3 ซ้ำ ขั้นตอนการทดลองและการเก็บข้อมูลมีดังนี้

ตารางที่ 4 สภาวะต่างๆ ที่ใช้ทำการทดลองอบแห้งขมิ้นชัน

ปัจจัยที่ทำการศึกษา	ระดับปัจจัยที่ทำการศึกษา
ระยะเวลาในการเคียวรีง (min)	0, 30, 60, 90
อัตราการไหลอากาศส่วน Bypass (%)	70
อุณหภูมิของอากาศร้อนขาเข้า	60

1. เตรียมความพร้อมของเครื่องอบแห้ง โดยปรับบานปรับลมตรงทางเข้าของห้องอบให้ได้ปริมาณลมที่ต้องการ ประมาณ $0.77 \text{ m}^3/\text{s}$ โดยให้ลมกระจายสม่ำเสมอตลอดหน้าตัดห้องอบแห้ง ตั้งอุณหภูมิที่เครื่องควบคุมอุณหภูมิไว้ที่ 60°C

2. นำขมิ้นชันที่จะอบแห้งมาแยกเป็นแ่งแล้วนำไปล้างทำความสะอาด จากนั้นนำขมิ้นชันมาทำการเคียวรีงโดยวิธีการต้มในน้ำเดือดเป็นเวลา 0 (ไม่ผ่านการเคียวรีง), 30, 60 และ 90 min ตามลำดับ ในอัตราส่วนขมิ้น 500 g ต่อน้ำ 1.5 l แล้วหั่นเป็นแว่น ๆ ให้มีความหนาประมาณ 0.3 – 0.4 cm

3. นำขมิ้นชันที่จะอบแห้งมาชั่งน้ำหนักเพื่อหาน้ำหนักเริ่มต้นก่อนอบแห้ง จากนั้นนำมาวางบนถาดและลำเลียงเข้าห้องอบแห้ง สุ่มเก็บตัวอย่างขมิ้นชันในแต่ละถาดมาหาค่าความชื้นเริ่มต้นด้วยเตาอบ Oven ที่อุณหภูมิ 70°C เคนระบบปั๊มความร้อนบันทึกผลของน้ำหนักขมิ้นชันทุก 1 ชม.

4. บันทึกผลของอุณหภูมิ ความดัน ปริมาณน้ำควบแน่นที่เครื่องทำระเหย พลังงานไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้าที่ใช้ ทุก ๆ 1 ชม. ตามตำแหน่งภาพที่ 14 และภาพที่ 15 จากนั้นนำค่าต่าง ๆ

ข้างต้น ทำการหาอัตราการอบแห้ง (Drying Rate, DR) จากสมการที่ 9 และสมการที่ 10 อัตราการระเหยน้ำจำเพาะ (Specific Moisture Extraction Rate, SMER) จากสมการที่ 11 ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (Specific Energy Consumption, SEC) จากสมการที่ 12 อัตราความชื้น (Moisture Extraction Rate, MER) จากสมการที่ 13 และประสิทธิภาพทางพลังงานของปั๊มความร้อนค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะ (coefficient of performance, COP) จากสมการที่ 7 และสมการที่ 8

5. เมื่อเสร็จสิ้นกระบวนการอบแห้ง สุ่มเก็บไขมันชั้นหลังอบแห้งมาแต่ละภาค เพื่อหาความชื้นสุดท้าย

6. ทำการตรวจสอบคุณภาพ โดยสุ่มตัวอย่างไขมันชั้นแห้งมาจากการทดลองมาบดให้เป็นผง และนำไปตรวจสอบมาตรฐานสีด้วยเครื่อง Color meter เพื่อเป็นจุดอ้างอิงสีของไขมันชั้นที่ผ่านการอบแห้งด้วยระบบปั๊มความร้อนอยู่ในช่วงใด

การศึกษาผลของเวลาการเคี้ยวรีและการทำแห้งที่มีต่อคุณภาพของไขมันผง

นำไขมันผงที่ได้จากตัวอย่างไปวิเคราะห์เพื่อหาคุณภาพของไขมันชั้นปริมาณเคอร์คิวมิน ตามวิธีของ ASTA (1968) ดังแสดงในภาคผนวก ก โดยฝ่ายปฏิบัติการวิจัยและเรือนปลูกพืชทดลองแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สถานที่ทำการทดลอง

ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน

ระยะเวลาในการทดลอง

เริ่มทดลองตั้งแต่เดือนตุลาคม 2547 สิ้นสุดเดือนมีนาคม 2549