# บทที่ 3
# วิธีการดำเนินงานวิจัย

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาจลนพลศาสตร์การอบแห้งแครอทแผ่นด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง โดยทำการทดลองและเก็บข้อมูลต่างๆ เพื่อนำผลที่ได้ไปทำการวิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นโดยรวมของการอบแห้งในรูปแบบสมการทางทฤษฎีและแบบกึ่งทฤษฎี และทำการศึกษาอิทธิพลของพารามิเตอร์การอบแห้งที่มีต่อการอบแห้งแครอทแผ่น คือ อุณหภูมิ และความเร็วไอน้ำร้อนยวดยิ่ง พร้อมทั้งพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้งแครอทแผ่นเพื่อทำนายการอบแห้งเปรียบเทียบกับผลการทดลองรวมทั้งการทดสอบคุณภาพของแครอทหลังการอบแห้ง คือ สี การหดตัว การคืนตัว และด้านเนื้อสัมผัส และหาสภาวะการอบแห้งแครอทแผ่นที่เหมาะสม โดยมีรายละเอียดในการดำเนินงานวิจัยดังนี้

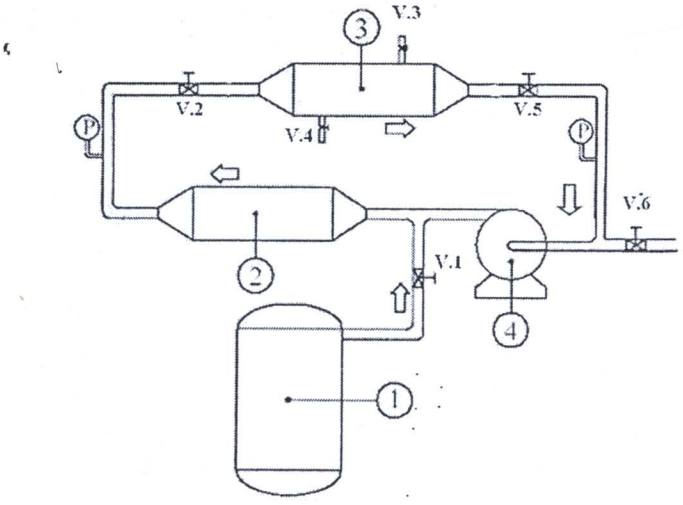
## 3.1 อุปกรณ์และเครื่องมือวัดที่ใช้ในการทดลอง

1. เครื่องอบแห้งไอน้ำร้อนยวดยิ่ง (รูปที่ ก.1)
2. ตู้อบลมร้อน (Hot Air Oven) ยี่ห้อ WBT Binder รุ่น BD/ED/FD with R3-Controller (รูปที่ ก.2)
3. เครื่องชั่งน้ำหนักความละเอียด 0.001 กรัม ยี่ห้อ Sartorius รุ่น CR323S (รูปที่ ก.3)
4. อุปกรณ์วัดความเร็วลมและความดัน ยี่ห้อ TSI รุ่น 8385-M-GB (รูปที่ ก.4)
5. เวอร์เนียร์ (รูปที่ ก.5)
6. เครื่องวัดสี Miniscan XE plus (รูปที่ ก.6)
7. เครื่องดูดอากาศและเครื่องผนึกถุง (รูปที่ ก.7)
8. เครื่องมือวัดอุณหภูมิ Kane-May รุ่น KM330 (Type K) (รูปที่ ก.8)
9. เครื่อง Texture Analyzer (TA.XT2*i*/50 Texture Technologies, US) (รูปที่ ก.9)

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ห้องสมุดงานวิจัย

**3.2 ขั้นตอนการทำงานของเครื่องอบแห้งไอน้ำร้อนยวดยิ่ง**

จากรูป 3.1 แสดงระบบอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่ใช้ในงานวิจัยนี้ เป็นการนำไอน้ำจากเครื่องกำเนิดไอน้ำเข้าสู่ระบบผ่านวาล์วตัวที่ 1 (V.1) เดินพัดลมเพื่อใช้ในการหมุนเวียนไอน้ำร้อนยวดยิ่งในระบบ และทำการเพิ่มอุณหภูมิของไอน้ำให้เป็นไอน้ำร้อนยวดยิ่งโดยผ่านอุปกรณ์ให้ความร้อน จากนั้นความร้อนจะถ่ายเทจากไอน้ำร้อนยวดยิ่งไปสู่วัสดุ เพื่อใช้ในการระเหยน้ำออกจากวัสดุ จนกว่าความชื้นเฉลี่ยของวัสดุมีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับค่าความชื้นที่ต้องการ ในกรณีที่ระบบมีความดันเพิ่มสูงขึ้นจะทำการปล่อยไอน้ำร้อนยวดยิ่งบางส่วนออกนอกระบบจากวาล์วตัวที่ 6 (V.6) เพื่อรักษาความดันภายในระบบ




รูป 3.1 แสดงระบบอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง
(1) เครื่องกำเนิดไอน้ำ (2) อุปกรณ์ให้ความร้อน (3) ห้องอบแห้ง (4) พัดลม
(V) วาล์ว (P) มาตรวัดความดัน

**3.3 ขั้นตอนการเตรียมวัสดุ**

นำบล็อกทรงกระบอกที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 30 ± 1 มิลลิเมตร มากดทางด้านบนของแครอทที่ปอกเปลือกแล้วนำมาหั่นตามขวางหนา 3 ± 0.1 มิลลิเมตร นำแครอทแผ่นที่ได้จัดเรียงบนตระแกรง ๆ ละ 8 ชิ้น

**3.4 วิธีการทดลอง**

**3.4.1 วิธีการทดลองอบแห้งแครอทโดยใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่ง**

ทำการเตรียมตัวอย่างตามหัวข้อ 3.3 นำตัวอย่างเข้าตู้อบแห้งของเครื่องอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่เดินเครื่องที่อุณหภูมิภายในห้องอบแห้ง 120, 140, 160 และ180°C ± 2°C ความเร็ว 2, 3 และ 4 m/s ก่อนการทดลองทำการเก็บข้อมูล คือ น้ำหนัก สี และปริมาตรตัวอย่าง ขณะทำการทดลองจะทำการเก็บข้อมูล คือ น้ำหนัก อุณหภูมิของตัวอย่าง อุณหภูมิและความเร็วไอน้ำร้อนยวดยิ่งในห้องอบตรงทางเข้าทุก 15 นาที จนแครอทแผ่นมีความชื้นสุดท้าย 18% d.b. ในแต่ละการทดลองทำซ้ำ 3 ครั้ง (เป็นการทดลองแบบทำลาย) จากนั้นวัดสี ปริมาตร เนื้อสัมผัส หลังการอบแห้งนำตัวอย่างแครอทแผ่นไปหาน้ำหนักแห้งโดยอบในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 103°C เป็นเวลา 72 ชั่วโมง

นำข้อมูลที่ได้จากการทดลองมาคำนวณหาค่าความชื้นเริ่มต้น ค่าความชื้น ณ เวลาอบแห้งใด ๆ และค่าความชื้นสุดท้าย จากนั้นทำการคำนวณหาอัตราส่วนความชื้นเทียบกับเวลาดังสมการ

$$MR = \frac{M}{M_{in}} \tag{3.1}$$

เมื่อ $M$ คือ ความชื้น ณ เวลาใดๆ, เศษส่วนมาตรฐานแห้ง หรือ % d.b.

$M_{in}$ คือ ความชื้นเริ่มต้น, เศษส่วนมาตรฐานแห้ง หรือ % d.b.

**3.4.2 การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของจลนพลศาสตร์ของการอบแห้งแครอทแผ่นโดยใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่ง**

นำข้อมูลความชื้นขณะอบแห้งที่ได้จากการทดลองมาทำการวิเคราะห์สมการถดถอยด้วยรูปแบบสมการทางทฤษฎีและกึ่งทฤษฎีโดยรูปแบบสมการทางทฤษฎีจะใช้จลนพลศาสตร์ของการอบแห้งวัสดุทรง Infinite slab สมการ (2.11) โดยใช้จำนวน 20 เทอม และรูปแบบสมการกึ่งทฤษฎีจะใช้สมการ (2.16) โดยคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นปรากฏ และค่าคงที่การอบแห้งได้จากสมการ (2.11) และ (2.16) ตามลำดับ จากนั้นนำมาวิเคราะห์หาความสัมพันธ์กับอุณหภูมิและความเร็วไอน้ำร้อนยวดยิ่ง ในรูปแบบสมการ Arrhenius สมการ (3.2) และ (3.4) และรูปแบบสมการของโพลิโนเมียลดีกรีที่ 2 สมการ (3.3) สำหรับค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นปรากฏ และในรูปแบบสมการของโฟลิโนเมียลดีกรีที่ 2 สมการ (3.5) และ (3.6) สำหรับค่าคงที่การอบแห้งโดยใช้การวิเคราะห์สมการถดถอยกำลังสองน้อยที่สุด

แบบจำลองที่ 1 : $D_{eff} = (a_1 V^2 + a_2 V + a_3) \exp\left[\frac{-E_a}{RT_{abs}}\right]$ (3.2)

แบบจำลองที่ 2 : $D_{eff} = (a_1 V^2 + a_2 V + a_3)(a_4 T^2 + a_5 T + a_6)$ (3.3)

แบบจำลองที่ 3 : $D_{eff} = D_0 \exp\left[\frac{-E_a}{RT_{abs}}\right]$ (3.4)

แบบจำลองที่ 4 : $k = (a_1 T^2 + a_2 T + a_3)(a_4 V^2 + a_5 V + a_6)$ (3.5)

แบบจำลองที่ 5 : $k = (a_1 T^2 + a_2 T + a_3)$ (3.6)

**3.4.3 การทดสอบคุณภาพของแครอทแผ่นหลังการอบแห้ง**

การวิเคราะห์คุณภาพของแครอทแผ่น จะพิจารณาคุณภาพ 4 อย่าง คือ

1. สี จะทำการวัดใช้เครื่องวัดสี Hunter Lab รุ่น Miniscan XE Plus ซึ่งค่าสีที่วัดได้แสดงด้วยค่าความสว่าง (Lightness, $L^*$) ค่าความเป็นสีแดง (Redness, $a^*$) และค่าความเป็นสีเหลือง (Yellowness, $b^*$) ในระบบ CIE LAB โดยจะทำการวัดสีแครอทก่อนการอบแห้ง และหลังการอบแห้ง ในการวัดค่าสีของแครอทแผ่นอบแห้งจะทำการวัดสีจำนวน 8 ชิ้น ทำการวัดสีแครอทแผ่น 2 ด้าน ด้านละ 3 จุด จุดละ 3 ซ้ำ

2. การหดตัว จะทำการวัดปริมาตรของตัวอย่างด้วยวิธีการแทนที่ในของเหลว (ซึ่งในงานวิจัยนี้เลือกใช้น้ำมันพืช) ทำการทดลองจำนวน 4 ซ้ำ โดยทำการทดลองดังรูป 3.2 ปริมาตรของวัตถุจะเท่ากับปริมาตรของของเหลวที่เพิ่มขึ้นในภาชนะ ดังนั้นจึงหาปริมาตรของวัตถุได้จาก

$$V = \frac{m_s - m_n}{\rho} \quad (3.7)$$

เมื่อ V คือ ปริมาตรของวัตถุที่ต้องการหาปริมาตร, ml

$m_s$ คือ มวลที่วัดได้จากเครื่องชั่งเมื่อใส่วัตถุที่ต้องการหาปริมาตร, g

$m_n$ คือ มวลที่วัดได้จากเครื่องชั่งเมื่อไม่ใส่วัตถุที่ต้องการหาปริมาตร, g

$\rho$ คือ ความหนาแน่นของของเหลว, g/ml

แล้วนำข้อมูลมาคำนวณการหดตัวจากความสัมพันธ์ดังนี้

$$\% \ Shrinkage = \frac{V_0 - V_f}{V_0} * 100 \tag{3.8}$$

เมื่อ $V_0$ คือ ปริมาตรของวัตถุเริ่มต้นอบแห้ง, ml

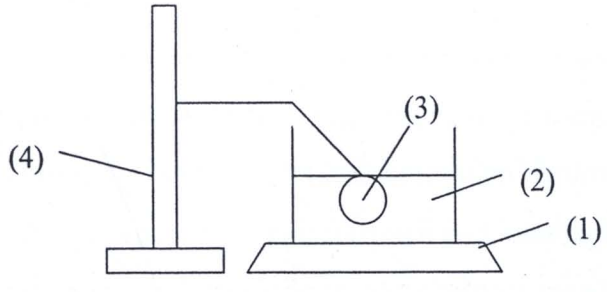
$V_f$ คือ ปริมาตรของวัตถุหลังอบแห้ง, ml

หรือสามารถเขียนได้เป็น

$$\% \ Shrinkage = \frac{(m_s - m_n)_0 - (m_s - m_n)_f}{(m_s - m_n)_0} * 100 \tag{3.9}$$

เมื่อ $(m_s - m_n)_0$ คือ ผลต่างมวลที่วัดได้ก่อนอบแห้ง, g

$(m_s - m_n)_f$ คือ ผลต่างมวลที่วัดได้หลังอบแห้ง, g




รูป 3.2 แสดงการหาปริมาตรของวัตถุ
(1) เครื่องชั่งน้ำหนัก (2) ของเหลว (3) วัตถุที่ต้องการหาปริมาตร (4) ชุดขาตั้งทดลอง

3. เนื้อสัมผัส ทำการวัดเนื้อสัมผัสของตัวอย่างหลังการอบแห้งโดยนำแครอทแผ่นหลังการอบแห้งมาทำการวัดโดยใช้เครื่อง Texture Analyzer โดยใช้หัวกดแบบใบมีด (Blade set with knife) ทำการกดด้วยความเร็วคงที่ 2 mm/s และนำข้อมูลมาหาค่าหาความแข็ง (Hardness) และค่า

ความเหนียว (Toughness) ซึ่งในแต่ละการทดลองจะนำแครอทหลังการอบแห้งจำนวน 8 ชิ้น มาทำการทดลองวัดเนื้อสัมผัสโดยแต่ละการทดลองทำ 3 ซ้ำ

4. คุณภาพด้านการคืนตัว

การทดสอบคุณภาพด้านการคืนตัว ใช้วิธีการคืนตัวในน้ำร้อน และใช้เครื่องชั่ง Sartorius รุ่น CP323s ซึ่งมีค่าความถูกต้อง ± 0.001 กรัม ชั่งน้ำหนักแครอทแห้งที่สุ่มมาจำนวน 8 ชิ้น แล้วนำแครอทที่นำมาทดสอบใส่ลงในน้ำร้อนที่มีอุณหภูมิประมาณ 90°C จากนั้นนำแครอทขึ้นมาเพื่อทำการบันทึกค่าน้ำหนักทุก ๆ 1 นาที โดยใช้ระยะเวลาในการทดสอบทั้งหมด 10 นาที การทดลองทำ 2 ซ้ำ คำนวณหาค่าการคืนตัวได้จาก

$$\text{Rehydration} = \frac{W_t - W_d}{W_d} \tag{3.10}$$

เมื่อ $W_t$ คือ มวลของแครอทที่ทำการคืนตัวที่เวลาใด ๆ, g

$W_d$ คือ มวลของแครอทแห้ง, g

**3.4.4 การวิเคราะห์ข้อมูล**

ทำการวิเคราะห์ความแม่นยำของสมการจลนพลศาสตร์ของการอบแห้ง โดยเปรียบเทียบผลการทดลองที่ได้กับผลการคำนวณโดยใช้ค่า $R^2$ (The coefficient of determination) และ MRS (Mean residual Square) ตามสมการ (3.11) และ (3.12) เป็นเกณฑ์เลือกใช้สมการที่มีความเหมาะสม โดยพิจารณาเปรียบเทียบผลการทดลองกับผลจากแบบจำลองที่ 1 - 5 ในแต่ละสภาวะการอบแห้งดังหัวข้อ 3.4.2 การวิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นโดยรวม และค่าคงที่การอบแห้งของแบบจำลองจะใช้โปรแกรมทางสถิติ (Statistica) หาความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ต่างๆ ที่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและเวลาการอบแห้ง

$$* R^2 = 1 - \frac{\sum_{j=1}^{n} (MR_{\exp} - MR_{pr})^2}{\sum_{j=1}^{n} (\overline{MR} - MR_{pr})^2}, \tag{3.11}$$

$$**MRS = \frac{\sum_{j=1}^{n}(MR_{pr} - MR_{\exp})^2}{N} \quad (3.12)$$

เมื่อ $MR_{pr}$ = ค่าตัวแปรตามที่คำนวณได้จากสมการการวิเคราะห์แบบกำลังสองน้อยที่สุด

$\overline{MR}$ = ค่าเฉลี่ยของตัวแปรตามที่ได้จากการทดลอง

$MR_{exp}$ = ค่าของตัวแปรตามที่ได้จากการทดลอง

N = จำนวนข้อมูลทั้งหมด

$R^2$ = เป็นค่าสถิติที่แสดงถึงสัดส่วนหรือร้อยละของความผิดพลาดที่แบบจำลองซึ่งสามารถอธิบายได้จากสมการที่ประมาณการหากสมการมีค่า $R^2$ ยิ่งสูงเท่าใดความแม่นยำของการนำสมการไปใช้เพื่อทำนายหรือคาดคะเนผลลัพธ์ย่อมมีสูงมากยิ่งขึ้น โดยทั่วไปสมการที่มักนำไปใช้ควรมีค่า $R^2$ อย่างน้อย 0.75

MRS = เป็นค่าชี้วัดเส้นที่ลากผ่านจุดๆหนึ่งของกลุ่มค่าในแนวแกนของผลการทดลอง โดยมีเงื่อนไขว่า ค่าทั้งหมดจะห่างจากเส้นตรงนี้อย่างสมดุลกันมากที่สุด โดยถ้าห่างมากค่า MRS ก็จะมีค่ามากส่งผลให้มีความผิดพลาดสูง ในทำทางกลับกันถ้าค่า MRS มีค่าน้อยก็จะมีความผิดพลาดน้อยด้วย โดยค่าความห่างนี้เราอาจเรียกว่า ค่า Error

ในส่วนของการวิเคราะ คุณภาพสี (Color), การหดตัว (Shrinkage), การคืนตัว (Rehydration) และเนื้อสัมผัส (Texture) จะวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ด้วยโปรแกรม SPSS (รุ่น10) มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($p < 0.05$)