บทที่ 3
วิธีการดำเนินงานวิจัย

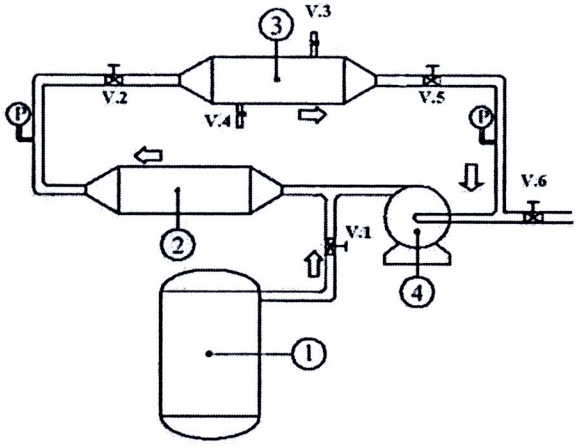
ในงานวิจัยนี้ทำการศึกษาจลนพลศาสตร์ของการการอบแห้งฟักทองภายใต้การอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งซึ่งทำการเก็บข้อมูลต่างๆ เพื่อนำผลที่ได้มาวิเคราะห์หาจลนพลศาสตร์ของการอบแห้งฟักทองด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง อีกทั้งทำการวิเคราะห์คุณภาพของฟักทองหลังการอบแห้ง โดยมีรายละเอียดดังนี้

3.1 อุปกรณ์และเครื่องมือวัดที่ใช้ในการทดลอง

1. เครื่องอบแห้งไอน้ำร้อนยวดยิ่ง (รูปที่ ก.1)
2. เครื่องชั่งน้ำหนักความละเอียด 0.001 กรัม ยี่ห้อ Sartorius รุ่น CR323S (รูปที่ ก.3)
3. เวอร์เนียร์ (รูปที่ ก.5)
4. เครื่องวัดสี Miniscan XE plus (รูปที่ ก.6)
5. เครื่องดูดอากาศและเครื่องผนึกถุง (รูปที่ ก.7)
6. เครื่องวัด รุ่น Testo 650 (รูปที่ ก.8)
7. เครื่องมือวัดอุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์ (รูปที่ ก.12)
8. เครื่อง Texture Analyzer (TA.XT2*i*/50 Texture Technologies, US) (รูปที่ ก.10)

3.2 ขั้นตอนการทำงานของเครื่องอบแห้งไอน้ำร้อนยวดยิ่ง

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



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

3.3 ขั้นตอนการเตรียมวัสดุ

หั่นฟักทองพันธุ์ทองอำพันที่ปอกเปลือกแล้วด้วยมีดบางบนแม่พิมพ์ให้เป็นรูปทรงลูกบาศก์ขนาด $10\times10\times10$ mm^3

3.4 วิธีการทดลอง

3.4.1 วิธีการทดลองอบแห้งฟักทองด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง

การทดลองอบแห้งฟักทองโดยใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่ง

1. นำตัวอย่างที่เตรียมไว้ตามหัวข้อ 3.3 ประมาณ 20 - 25 กรัมวางบนถาด
2. เก็บข้อมูลก่อนการทดลอง คือ น้ำหนัก สี ปริมาตรของตัวอย่าง
3. นำตัวอย่างเข้าตู้อบแห้งของเครื่องอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่เดินเครื่องที่อุณหภูมิภายในห้องอบแห้ง 120°C ความเร็ว 2 m/s
4. ขณะทำการทดลองจะทำการเก็บข้อมูล คือ น้ำหนักและอุณหภูมิของตัวอย่าง อุณหภูมิและความเร็วไอน้ำร้อนยวดยิ่งในห้องอบตรงทางเข้าทุก ๆ 10 นาที จนกระทั่งตัวอย่างมีความชื้นสุดท้ายประมาณ 18% d.b.
5. นำตัวอย่างฟักทองหลังการอบแห้งไปทดสอบคุณภาพตามหัวข้อ 3.4.3 ต่อไป

6. นำตัวอย่างเนื้อฟักทองไปหาน้ำหนักแห้งโดยนำไปใส่ตู้อบที่อุณหภูมิประมาณ 103°C เป็นเวลาประมาณ 72 ชั่วโมง แล้วชั่งน้ำหนักอีกครั้งหนึ่ง โดยน้ำหนักของวัสดุที่ผ่านการอบนี้มาแล้วถือว่าเป็นน้ำหนักแห้ง

7. ทำการทดลองในทำนองเดียวกันนี้ที่อุณหภูมิเดิมแต่เปลี่ยนความเร็วเป็น 4 m/s จากนั้นทำการทดลองโดยเปลี่ยนอุณหภูมิเป็น 140, 160 และ 180°C พร้อมทั้งเปลี่ยนความเร็วเป็น 2 และ 4 m/s ตามลำดับ แต่ละการทดลองทำ 2 ซ้ำ (เป็นการทดลองแบบทำลาย)

นำข้อมูลที่ได้จากการทดลองมาคำนวณหาค่าความชื้นเริ่มต้น ค่าความชื้น ณ เวลาอบแห้งใด ๆ และค่าความชื้นสุดท้าย จากนั้นทำการคำนวณหาอัตราส่วนความชื้นเทียบกับเวลาและเปรียบเทียบการลดลงของความชื้นในแต่ละสภาวะการอบแห้ง

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

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

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

3.4.2 การพัฒนาสมการจลนพลศาสตร์ของการอบแห้งฟักทองโดยใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่ง

นำข้อมูลความชื้นขณะอบแห้งที่ได้จากการทดลองมาทำการวิเคราะห์สมการถดถอยด้วยรูปแบบสมการทางทฤษฎีและกึ่งทฤษฎีโดยรูปแบบสมการทางทฤษฎีจะใช้จลนพลศาสตร์ของการอบแห้งวัสดุทรงลูกบาศก์สมการ (2.6) โดยใช้จำนวน 19 เทอม และรูปแบบสมการกึ่งทฤษฎีจะใช้สมการ (2.10) โดยคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นปรากฏและค่าคงที่การอบแห้งได้จากสมการ (2.6) และ (2.10) ตามลำดับ จากนั้นนำมาวิเคราะห์หาความสัมพันธ์กับอุณหภูมิและความเร็วไอน้ำร้อนยวดยิ่งในรูปแบบสมการโพลีโนเมียล โดยสมการ (3.2) ใช้สำหรับคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นปรากฏที่มีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิเพียงอย่างเดียวและสมการ (3.3) ใช้สำหรับคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นปรากฏที่มีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิและความเร็วไอน้ำร้อนยวดยิ่ง ส่วนสมการ(3.4) ใช้คำนวณค่าคงที่การอบแห้งที่มีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิเพียงอย่างเดียวในรูปแบบสมการโพลิโนเมียลดีกรีที่ 2 และสมการ(3.5) ใช้สำหรับคำนวณค่าคงที่การอบแห้งที่มีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิและความเร็วไอน้ำร้อนยวดยิ่ง โดยใช้การวิเคราะห์สมการถดถอยกำลังสองน้อยที่สุด

แบบจำลองที่ 1 : $D = a_1T^2 + a_2T + a_3$ (3.2)

แบบจำลองที่ 2 : $D = (a_1T^2 + a_2T + a_3)(b_1v + b_2)$ (3.3)

แบบจำลองที่ 3 : $k = a_1T^2 + a_2T + a_3$ (3.4)

แบบจำลองที่ 4 : $k = (a_1T^2 + a_2T + a_3)(b_1v + b_2)$ (3.5)

3.4.3 การทดสอบคุณภาพของฟักทองหลังการอบแห้ง

ในการตรวจสอบด้านคุณภาพของฟักทองนั้น จะพิจารณาคุณภาพ 4 อย่างคือ

1. สี จะทำการวัดโดยใช้เครื่องวัดสี Hunter Lab รุ่น Miniscan XE Plus โดยวัดค่าสีออกมาเป็น L เป็นค่าความสว่าง (Lightness: 0-100; ดำ - ขาว), a เป็นค่าสีแดงและเขียว (+ Redness/-Greenness) และ b เป็นค่าสีเหลืองและน้ำเงิน (+ Yellowness/-Blueness) ในระบบ CIE LAB โดยจะทำการวัดสีฟักทองก่อนการอบแห้งและหลังการอบแห้ง โดยในแต่ละการทดลองจะทำการวัดสีฟักทองจำนวน 5 ชิ้นชิ้นละ 3 จุด ๆ ละ 3 ซ้ำ

2. การหดตัว จะทำการวัดปริมาตรของตัวอย่างก่อนและหลังการอบแห้งโดยวิธีแทนที่ปริมาตรโดยการแทนที่ลงในน้ำมันพืช ในแต่ละการทดลองจะทำการวัดการหดตัวของฟักทองจำนวน 10 ชิ้น มีขั้นตอนดังนี้

1. เตรียมตัวอย่างเนื้อฟักทองสดและหลอดทดลอง
2. นำน้ำมันพืชเทใส่หลอดทดลองให้มีปริมาณที่เหมาะสมไม่ให้มากเกิน
3. นำตัวอย่างเนื้อฟักทองก่อนการอบแห้งมาใส่ลงในหลอดทดลอง
4. บันทึกค่าปริมาตรที่เพิ่มขึ้นจากหลอดทดลอง
5. ทดสอบหาปริมาตรหลังการอบแห้งโดยทำตามขั้นตอนที่ 1 - 4 แต่เปลี่ยนเป็นเอาเนื้อฟักทองหลังการอบแห้งมาทำการทดสอบแทน เพื่อหาปริมาตรหลังการอบแห้ง

6. การหดตัว จะทำการวัดปริมาตรของตัวอย่างด้วยวิธีการแทนที่ในของเหลว (ซึ่งในงานวิจัยนี้เลือกใช้น้ำมันพืช) ทำการทดลองจำนวน 3 ซ้ำ โดยทำการทดลองดังรูป 3.2 ปริมาตรของวัตถุจะเท่ากับปริมาตรของของเหลวที่เพิ่มขึ้นในภาชนะ ดังนั้นจึงหาปริมาตรของวัตถุได้จาก

$$V = \frac{m_s - m_n}{\rho} \tag{3.6}$$

เมื่อ V คือ ปริมาตรของวัตถุที่ต้องการหาปริมาตร, ml

m_s คือ มวลที่วัดได้จากเครื่องชั่งเมื่อใส่วัตถุที่ต้องการหาปริมาตร, g

m_n คือ มวลที่วัดได้จากเครื่องชั่งเมื่อไม่ใส่วัตถุที่ต้องการหาปริมาตร, g

ρ คือ ความหนาแน่นของของเหลว, g/ml

แล้วนำข้อมูลมาคำนวณการหดตัวจากความสัมพันธ์ดังนี้

$$\%\ Shrinkage = \frac{V_0 - V_f}{V_0} * 100 \tag{3.7}$$

เมื่อ V_0 คือ ปริมาตรของวัตถุเริ่มต้นอบแห้ง, ml

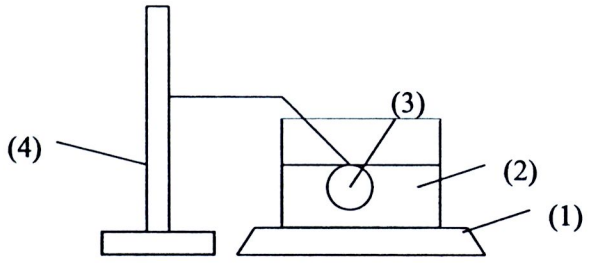
V_f คือ ปริมาตรของวัตถุหลังอบแห้ง, ml

หรือสามารถเขียนได้เป็น

$$\%\ Shrinkage = \frac{(m_s - m_n)_0 - (m_s - m_n)_f}{(m_s - m_n)_0} * 100 \tag{3.8}$$

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 จะทำการวัดเนื้อสัมผัสของฟักทองตัวอย่างละ 10 ชิ้นโดยใช้ เครื่อง texture analyzer รุ่น TA XT Plus ใช้หัวกดแบบทรงกระบอก เส้นผ่านศูนย์กลาง 25 มิลลิเมตร (P25 Cly Aluminium) ความเร็วหัววัด 2.0 mm/sec และนำข้อมูลมาหาค่าความแข็ง (Hardness) และค่าความเหนียว (Toughness) ทำการทดลอง 2 ซ้ำ

4. คุณภาพด้านการคืนตัว (Rehydration)

การทดสอบคุณภาพด้านการคืนตัว ทำการวัดฟักทองจำนวนตัวอย่างละ 3 ชิ้น ใช้วิธีการคืนตัวในน้ำร้อนที่อุณหภูมิประมาณ 90°C เป็นเวลา 10 นาที (Namsanguan, 2004) ทำการชั่งน้ำหนักโดยใช้เครื่องชั่ง Sartorius รุ่น CP323s ซึ่งมีค่าความถูกต้อง ± 0.001 กรัม โดยมีขั้นตอนดังนี้

1. ชั่งน้ำหนักฟักทองแห้งที่นำมาทำการทดสอบคุณภาพด้านการคืนตัวและบันทึกค่า

2. นำฟักทองที่นำมาทดสอบใส่ลงในน้ำร้อนที่มีอุณหภูมิประมาณ 90°C

3.นำฟักทองขึ้นมาจากน้ำร้อนเพื่อทำการบันทึกค่าน้ำหนักทุก ๆ 1 นาที โดยใช้ระยะเวลาในการทดสอบทั้งหมด 10 นาที

4.คำนวณหาค่าการคืนตัวของฟักทองจากสมการความสัมพันธ์ดังนี้ (Maskan, 2001)

$$\text{Rehydration} = \frac{W_t - W_d}{W_d} \qquad (3.9)$$

เมื่อ W_t คือ มวลของฟักทองก่อนแช่น้ำ, g

W_d คือ มวลของฟักทองหลังแช่น้ำ, g

3.5 การวิเคราะห์ข้อมูล

ทำการวิเคราะห์ความแม่นยำของสมการจลนพลศาสตร์ของการอบแห้ง โดยเปรียบเทียบผลการทดลองที่ได้กับผลการคำนวณโดยใช้ค่า R^2 (The coefficient of determination) และ MRS (Mean residual Square) ตามสมการ (3.10) และ (3.11) เป็นเกณฑ์เลือกใช้สมการที่มีความเหมาะสม โดยพิจารณาเปรียบเทียบผลการทดลองกับผลจากแบบจำลองที่ 1 - 3 ในแต่ละช่วงการอบแห้งดังหัวข้อ 3.4.2 การวิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธ์การแพร่ความชื้นโดยรวม และค่าคงที่การอบแห้งของแบบจำลองจะใช้โปรแกรมทางสถิติ (Statistica) หาความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ต่างๆ ที่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและเวลาการอบแห้ง

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{j=1}^{n}(MR_{exp} - \overline{MR})^2}{\sum_{j=1}^{n}(\overline{MR} - MR_{pr})^2} \qquad (3.10)$$

$$MRS = \frac{\sum_{j=1}^{n}(MR_{pr} - \overline{MR})^2}{N} \qquad (3.11)$$

เมื่อ MR_p = ค่าตัวแปรตามที่คำนวณได้จากสมการการวิเคราะห์แบบกำลังสองน้อยที่สุด

$\overline{MR}$ = ค่าเฉลี่ยของตัวแปรตามที่ได้จากการทดลอง

MR_{ex} = ค่าของตัวแปรตามที่ได้จากการทดลอง

N = จำนวนข้อมูลทั้งหมด

R^2 = ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (The Coefficient of Determination)

MRS = ข้อผิดพลาดมาตรฐานของการประมาณการ (Mean residual Square)

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