# บทที่ 2

# วิธีการวิจัย

## 2.1 วัสดุ

1. มันฝรั่งสด และ ฝรั่งสด
2. น้ำมันถั่วเหลือง
3. เฮกเซน (Hexane)

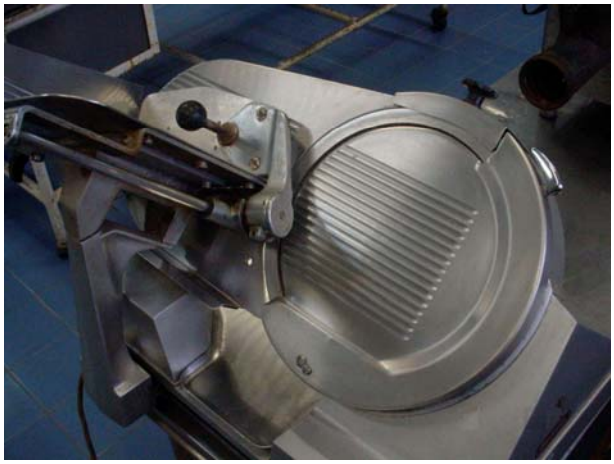
## 2.2 อุปกรณ์

1. ชุดเครื่องทอดสุญญากาศ
2. เครื่องระเหยสุญญากาศ
3. ชุดสกัดไขมัน
4. เครื่องสไลด์
5. ตู้อบ
6. กระดาษกรอง
7. โปรแกรม MATLAB 6.1

(ก)

ภาพประกอบ 2.1 อุปกรณ์ในการวิจัย (ก) ชุดหม้อทอดสุญญากาศ (ข) เครื่องระเหยสุญญากาศ (ค) เครื่องสไลส์

(ข)



(ค)

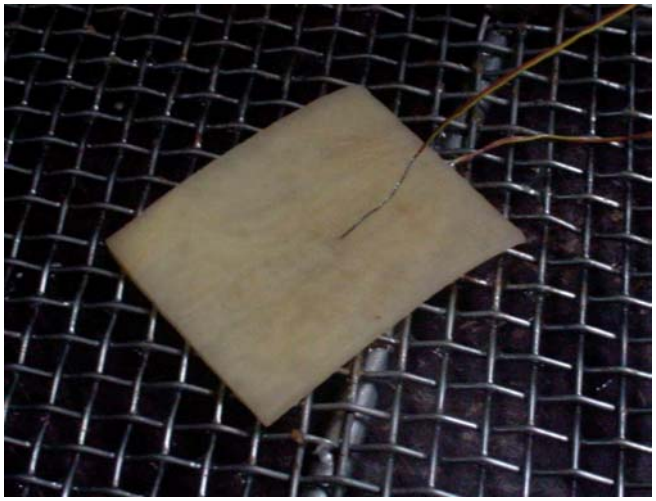
ภาพประกอบ 2.1 (ต่อ) อุปกรณ์ในการวิจัย (ก) ชุดหม้อทอดสุญญากาศ (ข) เครื่องระเหยสุญญากาศ (ค) เครื่องสไลส์

**2.3 วิธีดำเนินการ**

2.3.1 ศึกษาข้อมูลของการทอดผักและผลไม้ที่สภาวะสุญญากาศ ได้แก่ อุณหภูมิ ปริมาณความชื้นและปริมาณน้ำมันต่อระยะเวลาในการทอด

2.3.1.1 อิทธิพลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิต่อระยะเวลาในการทอด

ทำการทดลองโดย ตัดชิ้นตัวอย่างมันฝรั่งให้มีขนาด 5.0 x 5.0 x 0.5 cm เสียบสายวัดอุณหภูมิ (Thermocouple) ที่บริเวณกึ่งกลางและผิวของตัวอย่าง (ลึกประมาณ 1 mm) ดังแสดงในภาพประกอบ 2.2 ทอดชิ้นตัวอย่างโดยใช้เครื่องทอดสุญญากาศที่ 2 สภาวะ คือ ที่อุณหภูมิ 120°C ความดัน 60 mm Hg และ อุณหภูมิ 160°C ความดัน 760 mm Hg วัดอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไปในแต่ละตำแหน่งและบันทึกค่าทั้ง 2 จุด จนกระทั่งมีอุณหภูมิคงที่



ภาพประกอบ 2.2 ชิ้นตัวอย่างเสียบสายวัดอุณหภูมิบริเวณกึ่งกลางและผิวของตัวอย่างมันฝรั่ง

2.3.1.2 อิทธิพลของปริมาณความชื้นและปริมาณน้ำมันต่อระยะเวลาในการทอด

ทำการทดลองโดย ตัดชิ้นตัวอย่างมันฝรั่งให้มีขนาด 2.5 x 2.5 x 0.1 cm ชั่งน้ำหนักบันทึกค่า จากนั้นแบ่งตัวอย่างออกเป็น 3 กลุ่ม เพื่อนำไปหาปริมาณความชื้นและปริมาณน้ำมันภายในตอนเริ่มต้น ปริมาณความชื้นและปริมาณน้ำมันภายในที่ระยะเวลาทอด ๆ ต่างกัน (ดัดแปลงจาก A.O.A.C., 2003)

- นำตัวอย่างกลุ่มที่ 1 ไปอบในตู้อบที่อุณหภูมิ 105°C ใช้เวลา 5-6 ชั่วโมง เพื่อคำนวณหาปริมาณความชื้นเริ่มต้น และนำตัวอย่างไปสกัดด้วยเฮกเซนปริมาตร 250 mL ใช้ระยะเวลา 14 ชั่วโมง เพื่อคำนวณปริมาณน้ำมันภายในตัวอย่างตอนเริ่มต้น

- นำตัวอย่างกลุ่มที่ 2 ไปทอดที่อุณหภูมิ (120, 140 และ 160°C) และความดัน (260, 360 และ 460 mm Hg) เก็บตัวอย่างทุก 30 วินาที ต่อจากนั้นนำไปอบในตู้อบที่อุณหภูมิ 105°C ระยะเวลาประมาณ 5-6 ชั่วโมง เพื่อวิเคราะห์หาปริมาณความชื้นของตัวอย่างที่ทอด ณ. เวลาใดๆ

- นำตัวอย่างกลุ่มที่ 3 ไปทอดที่อุณหภูมิ (120, 140 และ160°C) และความดัน (260, 360 และ 460 mm Hg) เก็บตัวอย่างทุก 30 วินาที จากนั้นนำไปสกัดโดยใช้เฮกเซนปริมาตร 250 mL ระยะเวลา 14 ชั่วโมง เพื่อคำนวณหาปริมาณน้ำมันภายในตัวอย่างที่ทอด ณ. เวลาใดๆ

2.3.1.3 ทำการทดลองเช่นเดียวกันกับมันฝรั่งในขั้นต้น แต่ใช้ชิ้นฝรั่งตัดชิ้นตัวอย่างให้มีขนาด 2.5 x 2.5 x 0.2 cm เพื่อคำนวณหาค่าเช่นเดียวกับมันฝรั่ง

2.3.2 การทดสอบทางประสาทสัมผัสและวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

ทดสอบทางประสาทสัมผัส ผลิตภัณฑ์มันฝรั่งและฝรั่งทอด ด้าน สี ผิวสัมผัส รสชาติ ความกรอบและการยอมรับรวม ซึ่งใช้ผู้ทดสอบ จำนวน 35 คน โดยวิธี Hedonic scale (7 คะแนน) เพื่อประเมินผลการยอมรับต่อผลิตภัณฑ์ของผู้บริโภค

2.3.3 ศึกษาการถ่ายโอนมวลสารและความร้อนในการทอดภายใต้สภาวะสุญญากาศ เพื่อเขียนแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

2.3.4 ศึกษาการใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อประยุกต์ใช้กับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและมวลสารในระหว่างกระบวนการทอดที่สภาวะสุญญากาศซึ่งมีพื้นฐานที่สำคัญอันประกอบด้วยสมการที่เกี่ยวกับพลังงานและมวลสารเป็นสำคัญ ในแต่ละสภาวะยังมีสมมุติฐาน เงื่อนไขขอบเขต กลไกการถ่ายโอนและคุณสมบัติทางด้านฟิสิกส์ที่แตกต่างกันในแต่ละสภาวะ โดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ดังกล่าวมีสมการที่ปฏิบัติการบนโปรแกรม MATLAB 6.1 ดังแสดงในสมการ 2.2 และ 2.4

**สมการการถ่ายโอนความร้อน** (Heat Transfer Equation)

$$\text{rho} * C * T' - \text{div}\,[k * \text{grad}\,(T)] = Q + h * (T_{ext} - T) \quad (2.1)$$

รูปแบบของสมการทั่วไป

$$\rho \times C_p \times \frac{dT}{dt} - div\left[k \times \nabla(T)\right] = Q_{heat} + h \times \left(T_{ext} - T\right) \quad (2.2)$$

เมื่อ $\rho$ = ความหนาแน่นของตัวอย่าง (kg/m$^3$)

$C_p$ = ความร้อนจำเพาะ (J/kg $^o$C)

$k$ = สัมประสิทธิ์การนำความร้อน (W/m $^o$C)

$Q_{heat}$ = Heat Source (J)

$h$ = สัมประสิทธิ์การพาความร้อน (W/m$^2$ $^o$C)

$T_{ext}$ = อุณหภูมิภายนอก ($^o$C)

T = อุณหภูมิแต่ละตำแหน่งในตัวอย่าง ($^o$C)

**สมการการถ่ายโอนมวลสาร** (Mass Transfer Equation)

$$c' - \text{div}\,(D * \text{grad}\,(c)) = Q \quad (2.3)$$

รูปแบบของสมการทั่วไป

$$\frac{dc}{dt} - div\left(D \times \nabla(c)\right) = Q_{mass} \quad (2.4)$$

เมื่อ $\frac{dc}{dt}$ = การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้น (kg mol/m$^2$ s)

$D$ = สัมประสิทธิ์การแพร่ (m$^2$/s)

$c$ = ความเข้มข้น (kg mol/m$^3$)

$Q_{mass}$ = Volume source (kg mol/m$^2$ s)

ค่าของตัวแปรที่ใช้ในสมการข้างต้นซึ่งมีความสำคัญมากเพื่อให้ผลลัพธ์ที่ได้ออกมาจากแบบจำลองมีความถูกต้องและแม่นยำ โดยค่าของตัวแปรที่ใช้จะเปลี่ยนแปลงไปตามชนิดและลักษณะของผลิตภัณฑ์

จากการศึกษาการทอดผักและผลไม้ ณ. สภาวะสุญญากาศ พบว่าในระหว่างการทอดค่าของตัวแปรจะมีการเปลี่ยนแปลงไปตามลักษณะและปริมาณความชื้นภายในตัวอย่างที่สูญเสียออกไปในกระบวนการ ซึ่งจะมีปริมาณลดลงเมื่อระยะเวลาในการทอดนานขึ้น ดังนั้นค่าของตัวแปรในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้ในระหว่างการทอดที่สภาวะสุญญากาศจึงแบ่งออกได้เป็น 2 ช่วง คือ Constant-drying rate และ Falling rate ซึ่งค่าของตัวแปรสามารถคำนวณได้จากสมการในภาคผนวก ช. มีลักษณะดังนี้

- ความหนาแน่น ($\rho$) คือ อัตราส่วนระหว่างมวลต่อปริมาตรของตัวอย่าง สำหรับค่าที่ใช้ในสมการดังกล่าวมีค่าประมาณ 930 $kg/m^3$ ซึ่งเป็นค่าที่ได้จากการทดลอง

- ความร้อนจำเพาะ ($C_p$) เป็นปริมาณความร้อนที่ได้รับหรือสูญเสียไปต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักเพื่อให้อุณหภูมิเปลี่ยนแปลงไปตามต้องการ สามารถคำนวณได้โดย

$$C_p = 1.547m_c + 1.711m_p + 1.928m_f + 0.908m_a + 4.180m_m \qquad (2.5)$$

เมื่อ $m_c$ $m_p$ $m_f$ $m_a$ และ $m_m$ คือ สัดส่วนมวลของคาร์โบไฮเดรต โปรตีน ไขมัน เถ้า และ ความชื้น ตามลำดับ Moreira และคณะ (1999) สำหรับค่าที่ใช้ในสมการมีค่าประมาณ 3,000 – 3,500 J/kg $^{o}$C

- สัมประสิทธิ์การนำความร้อน (k) คือ อัตราความร้อนที่ผ่านความหนาของวัตถุ 1 หน่วย เมื่อมีอุณหภูมิแตกต่างระหว่างความหนา 1 หน่วย ดังนั้นในระหว่างการทอดปริมาณความชื้นที่มีค่าลดลงย่อมส่งผลให้สัมประสิทธิ์การนำความร้อนมีการเปลี่ยนแปลงไป ซึ่งจะมีค่าประมาณ 0.162 – 0.545 W/m $^{o}$C (ปริมาณความชื้นร้อยละ 6.25 – 51.35 ตามลำดับ)

- สัมประสิทธิ์การพาความร้อน (h) คือ อัตราการถ่ายโอนความร้อนในระหว่างบริเวณน้ำมันและผิวหน้าของอาหารโดยผ่านตัวกลางที่มีอุณหภูมิค่าหนึ่ง ซึ่งค่าดังกล่าวมีความสำคัญมากในการออกแบบหรือเขียนแบบจำลองในระบบการทอดอาหาร ที่อุณหภูมิ 170 $^{o}$C – 190 $^{o}$C ค่าโดยทั่วไปอยู่ระหว่าง 251 - 276 $W/m^2$ $^{o}$C

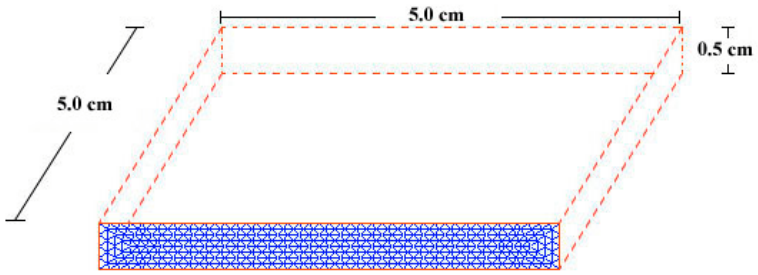
- ปริมาณความร้อน (Q) ในสมการดังกล่าวหมายถึง พลังงานที่ใช้ในการระเหยน้ำและไอน้ำออกจากตัวอย่างในระหว่างกระบวนการทอดโดยสามารถคำนวณได้จาก ซึ่งค่าที่ได้จากการคำนวณมีค่า 15,000 – 35,000 J

- สัมประสิทธิ์การแพร่ (D) คือ มวลสารที่สามารถแพร่ผ่านพื้นที่ต่อหน่วยของระยะเวลา โดยค่าดังกล่าวมีปัจจัยขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและความดัน โดยสามารถคำนวณได้จากสมการ

ตาราง 2.1 ค่าของตัวแปรสำหรับมันฝรั่งทอดที่อุณหภูมิ 120$^{o}$C และ ความดัน 60 mm Hg

| ตัวแปร | ค่า | หน่วย |
|---|---|---|
| ความหนาแน่น (Density); $\rho$ | 930 | kg/m$^3$ |
| **การถ่ายโอนความร้อน** | | |
| ความร้อนจำเพาะ (Specific Heat); $C_p$ | | |
| - ระยะ Constant-drying rate | 3,450 | J/kg $^{o}$C |
| - ระยะ Falling rate | 3,050 | J/kg $^{o}$C |
| สัมประสิทธิ์การนำความร้อน (Thermal Conductivity); k | | |
| - ระยะ Constant-drying rate | 0.655 | W/m $^{o}$C |
| - ระยะ Falling rate | 0.495 | W/m $^{o}$C |
| สัมประสิทธิ์การพาความร้อน (Heat Transfer Coefficient) h | 250 | W/m$^2$ $^{o}$C |
| ปริมาณความร้อน (Heat Source); Q | | |
| - ระยะ Constant-drying rate | 32,000 | J |
| - ระยะ Falling rate | 17,000 | J |
| **การถ่ายโอนมวลสาร** | | |
| สัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำ (Water Diffusivity Coefficient); $D_{water}$ | | |
| - ระยะ Constant-drying rate | 7.5 x 10$^{-9}$ | m$^2$/s |
| - ระยะ Falling rate | 3.8 x 10$^{-8}$ | m$^2$/s |
| สัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำมัน (Oil Diffusivity Coefficient); $D_{oil}$ | | |
| - ระยะ Constant-drying rate | 6.1 x 10$^{-9}$ | m$^2$/s |
| - ระยะ Falling rate | 1.4 x 10$^{-8}$ | m$^2$/s |

ดังนั้นในการศึกษากระบวนการถ่ายโอนมวลสารและความร้อน สามารถแบ่งตัวอย่างออกเป็น 2 แนวแกน (แนวแกน x และ แกน y) ซึ่งภายในตัวอย่างจะประกอบด้วยเอลิเมนต์สามเหลี่ยม (triangle element) จำนวน 704 เอลิเมนต์ (401 node) ดังภาพประกอบ 2.3




ภาพประกอบ 2.3 ชิ้นตัวอย่างขนาด 5.0 x 5.0 x 0.5 cm ถูกแบ่งออกเป็น 704 เอลิเมนต์