บทที่ 3
อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

3.1 วัตถุดิบ อุปกรณ์ และสารเคมี

3.1.1 วัตถุดิบ

ผลมะม่วงพันธุ์โชคอนันต์ จากไร่ประพัฒน์และบุตร อ.สันทราย จ.เชียงใหม่ ซึ่งเก็บเกี่ยวเพื่อจำหน่ายในฤดูกาลปกติ ปี พ.ศ. 2546-2547 โดยคัดเลือกผลที่มีน้ำหนัก 270-300 g

3.1.2 อุปกรณ์

- Data Logger System (Ebro Electronic; EBI-2-TH-612, Germany)
- Differential Scanning Calorimeter (TA Instruments; DSC Q100 (MDSC), USA)
- Digital Burette (BRAND; Digital Burette III, Finland)
- Gas Chromatograph (Trace GC2000; ThermoFinnigan, Italy)
- Hand Blender (Moulinex; DG1, France)
- pH Meter (Sartorius; PB-20, Germany)
- Specific Gravity Meter (COLE-PARMER; U-25755-14, USA)
- Thermoanemometer (Testo 445, Germany)
- ขวดหาความถ่วงจำเพาะ (Pycnometer, BRAND; 43428, Germany)
- เครื่องกลั่นตัวอย่างอัตโนมัติ (Kjeldahl Distillation Apparatus, Gerhardt; Vapodest 30, Germany)
- เครื่องชั่งดิจิตอล 2 ตำแหน่ง (Digital Balance, Mettler-Toledo; AB204-S, Switzerland)
- เครื่องชั่งดิจิตอล 4 ตำแหน่ง (Digital Balance, Mettler-Toledo; PB3002-S, Switzerland)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

- เครื่องชั่งดิจิตอล 6 ตำแหน่ง (Digital Balance, Sartorius; MC5, Germany)
- เครื่องดูดจ่ายสารละลายจากขวด (Reagent Dispenser, BIOHOT; Proline Prospenser 2.5-25 ml, United Kingdom)
- เครื่องบันทึกเวลาและอุณหภูมิ (Time-Temperature Recorder, Ellab; CMC-821, Denmark)
- เครื่องวัดความแน่นเนื้อ (Fruit Hardness Tester, NOW; 5 kg, Japan)
- เครื่องวัดความหวานแบบดิจิตอล (Digital Refractometer, ATAGO; PR-101, Japan)
- เครื่องวิเคราะห์ไขมันทั้งหมด (Fat Analyser, FOSS; AVATI 2055, Sweden)
- เครื่องสกัดน้ำผลไม้ (Juicer, National; MJ-68M, Japan)
- ตู้ควบคุมอุณหภูมิ (Cooled Incubator, SANYO; MIR-553, Japan)
- ตู้แช่แข็ง -86°C (Deep Freezer -86°C, SANYO; MDF-U71V, Japan)
- ตู้อบลมร้อน (Hot Air Oven, MMM; Venticell 111, Germany)
- ตู้อบสุญญากาศ (Vacuum Dryer, BINDER; VD 53, Germany)
- เตาเผาอุณหภูมิสูง (Muffle Furnace, CARBOLITE; CWF 1100, England)
- เวอร์เนียร์คาลิเปอร์แบบตัวเลข (Electronic Digital Caliper, F 35117, China)
- อ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ (Water Bath, Heto; Chill Master, Denmark)

3.1.3 สารเคมี

- Boric acid
- Copper sulphate
- Methyl blue
- Methyl red
- Petroleum ether 40-60°C
- Potassium sulphate
- Sodium hydroxide
- Sulfuric acid
- เกลือแกง

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

3.2 วิธีการทดลอง

งานวิจัยนี้แบ่งออกเป็น 6 การทดลอง ดังนี้

3.2.1 ศึกษาวิธีการคัดเลือกผลมะม่วงตัวอย่าง

การคัดเลือกผลมะม่วงตัวอย่าง เพื่อให้สิ่งทดลองมีความสม่ำเสมอกัน โดยศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความถ่วงจำเพาะของผลมะม่วงพันธุ์โชคอนันต์กับคุณภาพหลังการเก็บเกี่ยว เพื่อหาระดับความสุกและความถ่วงจำเพาะที่เหมาะสมในการคัดมะม่วงพันธุ์โชคอนันต์ ซึ่งมีขั้นตอนดังนี้

3.2.1.1 การแบ่งกลุ่มมะม่วงพันธุ์โชคอนันต์ตามความถ่วงจำเพาะ

หาความถ่วงจำเพาะของมะม่วง โดยวิธี Platform Scale (Mohsenin, 1986) จากนั้นแบ่งมะม่วงออกเป็น 5 กลุ่ม ตามความถ่วงจำเพาะ คือ กลุ่มต่ำกว่า 1.001, 1.001-1.010, 1.011-1.020, 1.021-1.030, 1.031-1.040 และ 1.041-1.050 ตามลำดับ ทำการแบ่งผลมะม่วงในแต่ละกลุ่มเป็นสองชุด ตามการทดลอง ดังนี้

ชุดทดลองที่ 1 วิเคราะห์คุณภาพผลมะม่วงในแต่ละกลุ่ม ณ วันเริ่มต้น

ชุดทดลองที่ 2 นำผลมะม่วงแต่ละกลุ่มมาบ่มให้สุก วิเคราะห์คุณภาพผลสุก

3.2.1.2 การวางแผนการทดลอง

วางแผนการทดลองแบบ Completely Randomized Design (CRD) โดยทำการทดลอง 3 ซ้ำ ซ้ำละ 1 ผล

3.2.1.3 การวิเคราะห์คุณภาพ

นำผลมะม่วงในแต่ละกลุ่ม มาวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพและเคมี ได้แก่

1. ความแน่นเนื้อ โดยใช้ Fruit Hardness Tester
2. ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด โดยใช้ Digital Refractometer
3. ค่าความเป็นกรดด่าง โดยใช้ pH meter
4. ปริมาณกรดทั้งหมดที่ไตเตรตได้ โดยวิธี Glass Electrode Method (AOAC, 2000)
5. อัตราส่วนระหว่างปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดต่อปริมาณกรดทั้งหมดที่ไตเตรตได้

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

โดยในชุดทดลองที่ 2 นั้น จะทำการบันทึกระยะเวลาที่ใช้ในการสุก ลักษณะของผลสุก และเปอร์เซ็นต์สีเหลืองที่ผิวผลสุกในแต่ละกลุ่มด้วย

3.2.1.4 หาความถ่วงจำเพาะที่เหมาะสมของผลมะม่วงพันธุ์โชคอนันต์

จากขั้นตอนที่ 3.2.1.3 นำข้อมูลที่ได้ไปวิเคราะห์ เพื่อใช้พิจารณาความถ่วงจำเพาะที่เหมาะสมในการคัดเลือกผลมะม่วงพันธุ์โชคอนันต์ต่อไป

3.2.2 ศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของมะม่วงพันธุ์โชคอนันต์

วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของเปลือกและเนื้อมะม่วงพันธุ์โชคอนันต์ในวันเริ่มต้น ดังนี้

3.2.2.1 ความชื้น โดยวิธี Oven Method (AOAC, 2000)

3.2.2.2 ปริมาณโปรตีน โดยวิธี Kjeldahl Method (AOAC, 2000)

3.2.2.3 ปริมาณไขมัน โดยวิธี Soxhlet Method (AOAC , 2000)

3.2.2.4 ปริมาณเถ้า โดยวิธีการวิเคราะห์ปริมาณเถ้าทั้งหมด (ลักขณาและนิธิยา, 2544)

3.2.2.5 ปริมาณคาร์โบไฮเดรต โดยวิธี Proximate Analysis

3.2.3 ศึกษาสมบัติทางความร้อนของมะม่วงพันธุ์โชคอนันต์

วัดสมบัติทางความร้อนของของเปลือกและเนื้อ มะม่วงพันธุ์โชคอนันต์ในวันเริ่มต้น ดังนี้

3.2.3.1 ค่าความร้อนจำเพาะ

วัดค่าความร้อนจำเพาะโดยใช้เครื่อง Differential Scanning Calorimeter (DSC, TA Instruments, 1998)

วิธีการนี้ทำได้โดยชั่งตัวอย่างให้มีน้ำหนักประมาณ 20.0 mg บรรจุลงในถ้วยอลูมิเนียม (aluminium hermatic pan) จากนั้นทำการปิดฝาด้วยเครื่องปิดผนึก นำถ้วยที่บรรจุตัวอย่างแล้ววางในช่องสำหรับวางตัวอย่าง นำถ้วยเปล่าที่ปิดฝาแล้วมาวางในช่อง reference กำหนดขั้นตอนการทำงานของเครื่องดังนี้

1. ปรับเข้าสู่สภาวะสมดุลที่อุณหภูมิ 30.0°C
2. ให้ความร้อนแบบ Modulate $\pm$ 1°C ทุก 60 วินาที คงที่ที่อุณหภูมินี้เป็นเวลา 5 นาที

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

3. ลดอุณหภูมิลงจาก 30.0°C เป็น 5.0°C ด้วยอัตรา 3.0°C ต่อนาที

นำค่าที่ได้มาหาค่าความร้อนจำเพาะที่อุณหภูมิ 13.0°C และ 28.0°C นอกจากนี้ยังหาค่าความร้อนจำเพาะในช่วงการเพิ่มอุณหภูมิจาก 28.0°C ไปเป็น 46.5°C โดยกำหนดขั้นตอนการทำงานไว้เช่นเดียวกัน แต่กำหนดอุณหภูมิสมดุลที่ 20.0°C และให้ความร้อนไปจนกระทั่งได้อุณหภูมิ 55.0°C นำค่าที่ได้มาหาค่าความร้อนจำเพาะที่อุณหภูมิ 28.0°C และ 46.5°C

3.2.3.2 ค่าการนำความร้อน

ค่าการนำความร้อนวิเคราะห์โดยใช้เครื่อง DSC (ASTM, 1998)

วิธีการนี้ทำได้โดยเตรียมตัวอย่าง 2 ขนาด คือ แผ่นบางซึ่งมีความหนา 0.4 mm ซึ่งบรรจุในถ้วยอลูมิเนียมและปิดฝา ใช้วัดค่าความร้อนจำเพาะ และแผ่นหนาซึ่งเป็นทรงกระบอกมีความหนา 3.5 mm เส้นผ่าศูนย์กลาง 6.3 mm ใช้วัดค่าความจุความร้อนปรากฏ โดยมี Polystyrene เป็นวัสดุที่ใช้ในการ Calibrate กำหนดขั้นตอนการทำงานของเครื่องดังนี้

1. ปรับเข้าสู่สภาวะสมดุลที่อุณหภูมิ 28.0°C
2. ให้ความร้อนแบบ Modulate $\pm$ 1°C ทุก 80 วินาที คงที่ที่อุณหภูมินี้เป็นเวลา 15 นาที

คำนวณหาค่าการนำความร้อนของมะม่วงที่อุณหภูมิ 28.0°C โดยมีขั้นตอนการคำนวณดังนี้

ค่าการนำความร้อนที่วัดได้คำนวณจากสมการ

$$k_o = \frac{8LC^2}{C_p m d^2 P} \qquad (3.1)$$

เมื่อ k_o คือ ค่าการนำความร้อนที่วัดได้ (W/m·°C)

L คือ ความหนาของชิ้นตัวอย่าง (mm)

C คือ ความจุความร้อนปรากฏ (mJ/°C)

C_p คือ ค่าความร้อนจำเพาะ (J/g·°C)

m คือ มวลของชิ้นตัวอย่าง (mg)

d คือ เส้นผ่าศูนย์กลางของชิ้นตัวอย่าง (mm)

P คือ ช่วงเวลาที่ทำการให้ความร้อนแบบ modulate (s)

จากนั้นคำนวณหาค่าคงที่ D (thermal conductivity calibration constant) ในหน่วย W/m·°C โดยใช้สมการ

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

$$D = (k_o \cdot k_r)^{0.5} - k_r \qquad (3.2)$$

เมื่อ k_r คือ ค่าการนำความร้อนของสารอ้างอิง (W/m·°C) ในที่นี้คือ Polystyrene

คำนวณหาค่าการนำความร้อนของชิ้นตัวอย่าง (k) ในหน่วย W/m·°C จากสมการ

$$k = \frac{k_0 - 2D + \left(k_0^2 - 4Dk_0\right)^{1/2}}{2} \qquad (3.3)$$

3.2.3.3 ความหนาแน่น

ความหนาแน่นวิเคราะห์โดยใช้ Pycnometer (Mohsenin, 1986)

ชั่งน้ำหนัก Pycnometer ที่บรรจุน้ำเต็มขวด จากนั้นนำผลมะม่วงมาปอกเปลือก โดยใช้มีดปอกผิว หั่นมะม่วงเป็นชิ้นเล็ก ๆ ขนาดประมาณ 3 x 3 x 3 mm บรรจุลงใน Pycnometer ให้ได้ปริมาณ 1 ใน 3 ของขวด บันทึกน้ำหนักมะม่วงที่บรรจุลงไป จากนั้นเติมน้ำให้เต็ม Pycnometer ทำการบันทึกน้ำหนักที่ได้ คำนวณหาความหนาแน่นของมะม่วงจากสมการ

$$\rho_s = \frac{m_s \times \rho_w}{m_A + m_s - m_B} \qquad (3.4)$$

เมื่อ ρ_s คือ ความหนาแน่นของตัวอย่าง (kg/m^3)

ρ_w คือ ความหนาแน่นของน้ำ (kg/m^3)

m_s คือ มวลของมะม่วงที่บรรจุในขวด Pycnometer (kg)

m_A คือ มวลของ Pycnometer ที่บรรจุน้ำเต็มขวด (kg)

m_B คือ มวลของ Pycnometer ที่บรรจุมะม่วงและเติมน้ำให้เต็มขวด (kg)

3.2.3.4 ค่าการแพร่ความร้อน

ค่าการแพร่ความร้อนคำนวณจากค่าความร้อนจำเพาะ ค่าการนำความร้อน และความหนาแน่น มีรูปแบบสมการเป็น

$$\alpha = \frac{k}{\rho C_p} \qquad (3.5)$$

เมื่อ α คือ ค่าการแพร่ความร้อน (m^2/s)

k คือ ค่าการนำความร้อน (W/m·°C)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

ρ_s คือ ความหนาแน่น (kg/m^3)

C_p คือ ค่าความร้อนจำเพาะ (J/g·°C)

3.2.4 เปรียบเทียบสมบัติทางความร้อนที่ได้จากการทดลองกับค่าที่คำนวณจากองค์ประกอบทางเคมี

เปรียบเทียบสมบัติทางความร้อนที่ได้จากการทดลองกับค่าที่คำนวณจากองค์ประกอบทางเคมีโดยใช้สมการความสัมพันธ์ที่มีผู้รายงานไว้ พิจารณาความแตกต่างจากสมการ

$$\text{ค่าความแตกต่าง (ร้อยละ)} = \frac{\left| \text{ค่าจากการทดลอง} - \text{ค่าจากสมการ} \right| \text{x } 100}{\text{ค่าจากสมการ}} \quad (3.6)$$

3.2.5 การวัดปริมาณความร้อนจากการหายใจของผลมะม่วงพันธุ์โชคอนันต์

ทำการหาปริมาณความร้อนจากการหายใจของผลมะม่วงพันธุ์โชคอนันต์ขณะผ่านกระบวนการทางความร้อนที่เวลาต่าง ๆ ในช่วงที่มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ดังนี้

3.2.5.1 ปริมาณความร้อนจากการหายใจขณะทำการลดอุณหภูมิจาก 28.0°C ไปเป็น 13.0°C

ปริมาณความร้อนจากการหายใจของผลมะม่วงภายในตู้ควบคุมอุณหภูมิ (13.0 ± 0.5°C) ขณะที่มีการลดอุณหภูมิใจกลางผลจาก 28.0°C ไปเป็น 13.0°C (ใช้เวลา 6 ชั่วโมง) ทำการวิเคราะห์ในระบบปิด โดยบรรจุมะม่วงจำนวน 3 ผล ลงในภาชนะขนาด 5000 มิลลิลิตร ปิดฝาภาชนะให้สนิท และนำไปไว้ในตู้ควบคุมอุณหภูมิ เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นนำก๊าซในภาชนะบรรจุมาวิเคราะห์โดยใช้เครื่อง Gas Chromatography (GC) เพื่อหาปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้น ทำการวัดทุก 1 ชั่วโมง เป็นเวลา 6 ชั่วโมง

3.2.5.2 ปริมาณความร้อนจากการหายใจขณะทำการเพิ่มอุณหภูมิจาก 28.0°C ไปเป็น 46.5°C

ปริมาณความร้อนจากการหายใจของผลมะม่วงภายในตู้ควบคุมอุณหภูมิ (50.0 ± 0.5°C) ขณะที่มีการเพิ่มอุณหภูมิใจกลางผล จาก 28.3°C ไปเป็น 46.5°C (ใช้เวลา 160 นาที) ทำการวิเคราะห์ในระบบปิด โดยบรรจุมะม่วงจำนวน 3 ผล ลงในภาชนะขนาด 5000 มิลลิลิตร ปิดฝาภาชนะให้สนิท และนำไปไว้ในตู้ควบคุมอุณหภูมิ เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นนำก๊าซในภาชนะบรรจุ มาวิเคราะห์โดยใช้เครื่อง GC เพื่อหาปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้น โดยทำการวัด 3 ครั้ง คือ ขณะเริ่มต้น นาทีที่ 60 และนาทีที่ 160

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

นำค่าที่ได้มาคำนวณอัตราการหายใจ จากสมการต่อไปนี้

$$rr = \frac{V \times D_{CO_2} \times A \times B \times E}{100 \times t \times w \times C \times T \times F} \qquad (3.7)$$

เมื่อ rr คือ อัตราการหายใจของผลมะม่วง (mg CO_2/kg·hr)

V คือ ปริมาตรของอากาศภายในภาชนะ (ml)

D_{CO_2} คือ ปริมาณ CO_2 ที่วัดได้จาก GC (%)

A คือ มวลโมเลกุลของ CO_2 เท่ากับ 44

B คือ อุณหภูมิมาตรฐาน เท่ากับ 273 K

t คือ เวลาที่ใช้ในการปิดภาชนะ (hr)

w คือ น้ำหนักของผลมะม่วง (kg)

C คือ ปริมาตรของก๊าซที่สภาวะมาตรฐาน เท่ากับ 22.4 dm^3

T คือ อุณหภูมิในขณะที่ทำการวัด (K)

E คือ ความดันบรรยากาศที่เชียงใหม่ เท่ากับ 740 mmHg

F คือ ความดันบรรยากาศที่ระดับน้ำทะเล เท่ากับ 760 mmHg

คำนวณค่าความร้อนที่เกิดขึ้นจากการหายใจ โดยเทียบจากปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเมื่อผลิตผลมีการหายใจ

$$C_6H_{12}O_6 + 6O_2 \longrightarrow 6CO_2 + 6H_2O + \text{ความร้อน } 2817 \text{ kJ} \qquad (3.8)$$

นั่นคือ เมื่อมีการปลดปล่อย CO_2 ออกมา 6 g mole จะให้พลังงานความร้อน 2817 kJ

3.2.6 การใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขเพื่อทำนายการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในผลมะม่วงพันธุ์โชคอนันต์ขณะผ่านกระบวนการทางความร้อน

3.2.6.1 แบบจำลองอุณหภูมิ (simulation of temperature)

กำหนดสมมติฐานดังนี้

1. สมบัติทางความร้อน ได้แก่ ความร้อนจำเพาะ ค่าการนำความร้อน และความหนาแน่นของผลมะม่วงมีค่าคงที่
2. ผลมะม่วงมีรูปร่างเป็นทรงกระบอก มีรัศมีเท่ากับระยะทางจากจุดกึ่งกลางผลถึงผิวมะม่วงส่วนที่กว้างที่สุด

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

3. การถ่ายเทความร้อนภายในผลมะม่วงคิดทิศทางเดียว (One dimension) คือในแนวรัศมี

การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิต่อเวลาของวัตถุรูปทรงกระบอก มีรูปแบบสมการเป็น (Holdsworth, 1997)

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = k\left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r}\frac{\partial T}{\partial r}\right) + Q \qquad (3.9)$$

เมื่อ k คือ ค่าการนำความร้อน (W/m·°C)

ρ คือ ความหนาแน่น (kg/m^3)

C_p คือ ค่าความร้อนจำเพาะ (kJ/kg·°C)

T คือ อุณหภูมิของผลมะม่วง (°C)

r คือ ระยะทางจากจุดกึ่งกลางในแนวรัศมีของทรงกระบอก (m)

t คือ ระยะเวลา (s)

Q คือ ความร้อนที่เกิดขึ้นภายในผลิตผล (W/m^3)

สภาวะเริ่มต้น (initial condition) ของสมการ (3.8) คือ

$$T(r,t) = T_i(r) \qquad \text{ที่ } t = 0 \qquad (3.10)$$

เมื่อ T_i คือ อุณหภูมิเริ่มต้นของผลมะม่วง (°C)

สภาวะที่ผิว $r = r_0$ (boundary condition) ของสมการ (3.9) เป็นดังนี้

$$-k\left(\frac{\partial T}{\partial r}\right)_{r=r_0} = h(T_{a,t} - T_{r_0,t}) \quad \text{ที่ } t > 0 \qquad (3.11)$$

เมื่อ h คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อน (W/m^2·°C)

T_a คือ อุณหภูมิของตัวกลาง (°C)

ที่ผิวของมะม่วงจะมีการถ่ายเทความร้อนแบบพาความร้อนโดยตัวกลาง สัมประสิทธิ์การพาความร้อนสำหรับการไหลของตัวกลางผ่านทรงกระบอกในแนวแกนมีสมการความสัมพันธ์ ดังนี้ (Geankoplis, 1993)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

$$Nu = C\,\mathrm{Re}^{m}\,\mathrm{Pr}^{1/3} \qquad (3.12)$$

เมื่อ Nu คือ Nusselt number

$$Nu = \frac{hD}{k}$$

Re คือ Reynolds number

$$\mathrm{Re} = \frac{Dv\rho}{\mu}$$

Pr คือ Prandtl number

$$\mathrm{Pr} = \frac{C_p\mu}{k}$$

C คือ ค่าคงที่ขึ้นกับค่า Re (ที่ $40 < \mathrm{Re} < 4 \times 10^3$, $C = 0.683$)

m คือ ค่าคงที่ขึ้นกับค่า Re (ที่ $40 < \mathrm{Re} < 4 \times 10^3$, $m = 0.466$)

D คือ เส้นผ่าศูนย์กลางของทรงกระบอก (m)

v คือ ความเร็วของตัวกลางที่สัมผัสกับวัตถุ (m/s)

k คือ ค่าการนำความร้อนของตัวกลาง (W/m·°C)

ρ คือ ความหนาแน่นของตัวกลาง (kg/m^3)

μ คือ ความหนืดของตัวกลาง (kg/m·s)

โดยที่สมบัติของตัวกลางคิดที่อุณหภูมิฟิล์ม (T_f) ซึ่งได้จากอุณหภูมิเฉลี่ยของตัวกลางกับวัตถุ

เมื่อทราบสภาวะเริ่มต้นและสภาวะที่ผิวแล้ว สามารถใช้ระเบียบวิธีทางคณิตศาสตร์เพื่อแก้ปัญหาสมการเชิงอนุพันธ์ย่อย ในที่นี้จะใช้ระเบียบวิธี finite difference กับสมการการถ่ายเทความร้อนข้างต้น

จากสมการ (3.9) เมื่อถือว่าความร้อนที่เกิดขึ้นภายในผลมีค่าน้อยมากจนสามารถตัดทิ้งได้ จะได้ว่า

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha\left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r}\frac{\partial T}{\partial r}\right) \qquad (3.13)$$

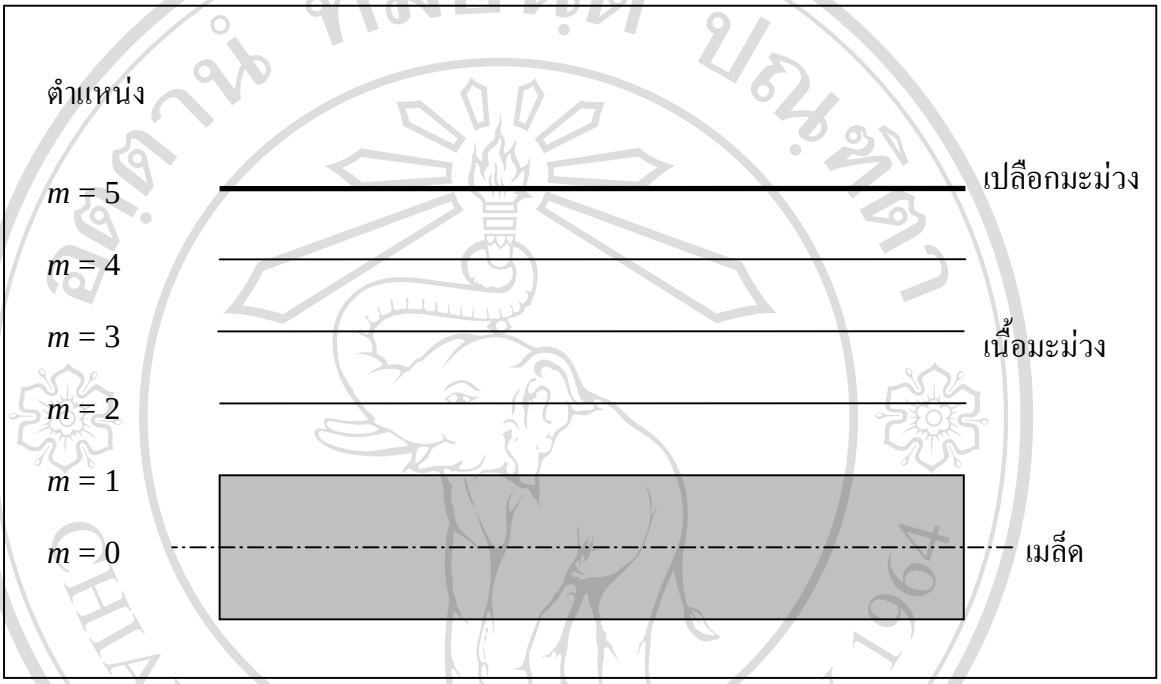
เมื่อ α คือ ค่าการแพร่ความร้อน (m^2/s)

$$\alpha = \frac{k}{\rho C_p} \qquad (3.14)$$

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

อุณหภูมิ T แปรผันกับตัวแปรอิสระคือ ระยะทางในแนวรัศมี r จากจุดกึ่งกลางของทรงกระบอก และระยะเวลา t อุณหภูมิที่ตำแหน่งและเวลาใด ๆ จะใช้สัญลักษณ์ $T_{m,n}$

จากระเบียบวิธี finite difference ทำการแบ่งรัศมีเป็นส่วน ๆ ดังรูป 3.1



รูป 3.1 แผนภาพของมะม่วงที่ใช้ในการศึกษาการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิโดยวิธี finite difference

ถ้า เนื้อมะม่วงมีความหนา = 0.02710 m

เมล็ดมีความหนา = 0.01355 m

ให้ Δr = ครึ่งหนึ่งของความหนาของเมล็ด

Δr = 0.006775 m

จาก Δr ที่คำนวณได้ สามารถแบ่งเนื้อมะม่วงได้ 4 ส่วน ทำให้ m มีค่าเท่ากับ 5

แบ่งเวลาในการพิจารณาครั้งละ $1\Delta t$

ที่เวลาเริ่มต้นกำหนดให้ $n = 0$

นั่นคือเมื่อเวลาผ่านไป $1\Delta t$ จะเป็นช่วงเวลาที่ $n+1$

จะได้ผลเฉลยของสมการเชิงอนุพันธ์ย่อย (3.9) ดังนี้

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

$$\frac{1}{\alpha}\left(\frac{T_{m,n+1}-T_{m,n}}{\Delta t}\right)=\left(\frac{T_{m+1,n}+T_{m-1,n}-2T_{m,n}}{(\Delta r)^2}\right)+\frac{1}{m\Delta r}\left(\frac{T_{m+1,n}-T_{m,n}}{\Delta r}\right) \quad (3.15)$$

เมื่อ $T_{m,n}$ คือ อุณหภูมิที่ตำแหน่ง m เมื่อเวลาผ่านไป $n\,\Delta t$

$T_{m,n+1}$ คือ อุณหภูมิที่ตำแหน่ง m เมื่อเวลาผ่านไป $(n+1)\,\Delta t$

จะได้สมการเพื่อใช้หาอุณหภูมิที่ตำแหน่ง $5 < m < 0$ เมื่อเวลาผ่านไป $(n+1)\,\Delta t$ ดังนี้

$$T_{m,n+1}=(F_0+\frac{F_0}{m})T_{m+1,n}+\left(1-2F_0-\frac{F_0}{2m}\right)T_{m,n}+(F_0)T_{m-1,n} \quad (3.16)$$

เมื่อ $F_0=\dfrac{\alpha\Delta t}{(\Delta r)^2}$ (finite difference form of Fourier number)

สมการ (3.16) ไม่สามารถใช้หาอุณหภูมิที่จุดศูนย์กลางได้ เนื่องจาก $m = 0$ ใช้ L'Hospital's rule จะได้ว่า

$$\lim_{r\to 0}\left(\frac{1}{r}\frac{\partial T}{\partial r}\right)=\left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2}\right)_{r=0} \quad (3.17)$$

ดังนั้นสมการ (3.9) จะเปลี่ยนเป็น

$$\left(\frac{\partial T}{\partial t}\right)=\alpha\left(2\frac{\partial^2 T}{\partial r^2}\right) \quad (3.18)$$

จะได้สมการ finite difference สำหรับหาอุณหภูมิที่ $r = 0$ ($m = 0$) เมื่อเวลาผ่านไป $(n+1)\,\Delta t$ ดังนี้

$$T_{0,n+1}=4F_0T_{1,n}+(1-4F_0)T_{0,n} \quad (3.19)$$

จากสมการ (3.11) สามารถหาอุณหภูมิที่ผิว ($m = 5$) ได้ดังนี้

$$T_{m,n+1}=\frac{BiT_{a,n+1}+T_{m-1,n+1}}{1+Bi} \quad (3.20)$$

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

เมื่อ $Bi = \frac{h\Delta r}{k_{pf}}$ (finite difference form of Biot number)

ที่ระยะ Δr จากผิวหน้าจะประกอบไปด้วยเปลือกและเนื้อ ความร้อนมีการถ่ายเทในแนวรัศมี ค่าการนำความร้อน (k_{pf}) คำนวณจาก Perpendicular Model (Sweat, 1994) ดังนี้

$$k = (\frac{v_p}{k_p} + \frac{v_f}{k_f})^{-1} \quad (3.21)$$

เมื่อ v_p คือ สัดส่วนปริมาตรของเปลือก

v_f คือ สัดส่วนปริมาตรของเนื้อ

k_{pf} คือ ค่าการนำความร้อนของเปลือกและเนื้อ

k_p คือ ค่าการนำความร้อนของเปลือก

k_f คือ ค่าการนำความร้อนของเนื้อ

3.2.6.2 ตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองอุณหภูมิ

แบบจำลองอุณหภูมิภายในผลมะม่วงที่สร้างขึ้นจะนำมาตรวจสอบความถูกต้อง โดยทำการทดลองวัดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในผลมะม่วงพันธุ์โชคอนันต์ ขณะผ่านกระบวนการทางความร้อนที่อุณหภูมิต่ำและที่อุณหภูมิสูง โดยมีขั้นตอนดังนี้

1. วัดเส้นผ่าศูนย์กลางของผลมะม่วง ความหนาของเนื้อมะม่วงจากส่วนที่กว้างที่สุดจนถึงเมล็ด ความหนาของเปลือกมะม่วงและขนาดของเมล็ดโดยใช้เวอร์เนียร์คาลิเปอร์

2. วัดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในผลมะม่วงขณะผ่านกระบวนการทางความร้อน โดยแบ่งเป็น

2.1) การเก็บรักษาที่อุณหภูมิต่ำ โดยนำผลมะม่วงมาเก็บรักษาในตู้ควบคุมอุณหภูมิ (อุณหภูมิอากาศ 13.0 ± 0.5°C)

2.2) การให้ความร้อนด้วยน้ำร้อน โดยจุ่มผลมะม่วงในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ (อุณหภูมิน้ำ 48.0 ± 0.5°C)

ในแต่ละกระบวนการจะควบคุมอุณหภูมิของตัวกลางให้คงที่ วัดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของผลมะม่วงบริเวณเปลือก ($m = 5$) เนื้อ ($m = 3$) เนื้อติดเมล็ด ($m = 1$) และอุณหภูมิของตัวกลาง (T_a) โดยใช้เครื่องบันทึกเวลาและอุณหภูมิ จนกระทั่งอุณหภูมิของเนื้อติดเมล็ดเป็น 13.0°C และ 46.5°C ตามลำดับ

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

3. ใช้ค่า Root Mean Square Error (*RMSE*) ในการพิจารณาความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Lawson and Hanson, 1974) คำนวณจาก

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{p}\sum_{i=1}^{p}\left[T_{mea}(i) - T_{sim}(i)\right]^2} \qquad (3.22)$$

เมื่อ p คือ จำนวนข้อมูลทั้งหมด

$T_{mea}(i)$ คือ อุณหภูมิที่ได้จากการวัด ที่เวลา i ใด ๆ

$T_{sim}(i)$ คือ อุณหภูมิที่ได้จากการทำนาย ที่เวลา i ใด ๆ

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved