

บทที่ 3

วิธีดำเนินงานวิจัย

ในงานวิจัยนี้ทำการศึกษาการอบแห้งลำไยแบบใช้อุณหภูมิการอบแห้งแบบเป็นลำดับขั้น ซึ่งได้วางแผนทำการทดลองหาอัตราการอบแห้งลำไยทั้งลูก อุณหภูมิลำไยและวัดสีของเนื้อลำไย เพื่อนำผลที่ได้มาวิเคราะห์หาสมการจลนศาสตร์การเปลี่ยนสีของเนื้อลำไย เพื่อนำมาใช้ออกแบบ และทดลองอบแห้งลำไยแบบใช้อุณหภูมิการอบแห้งแบบเป็นลำดับขั้น หาค่าความสัมพันธ์พลังงานในการอบแห้ง นอกจากนี้ยังได้ทำการจำลองสภาพการอบแห้งเพื่อหาค่าความสัมพันธ์พลังงานในการอบแห้งแล้วนำมาเปรียบเทียบกับค่าทดลองแบบใช้อุณหภูมิอบแห้งคงที่และใช้อุณหภูมิการอบแห้งแบบเป็นลำดับขั้น โดยมีรายละเอียดดังนี้

3.1 อุปกรณ์และเครื่องมือวัดที่ใช้ในการทดลอง

1. เครื่องอบแห้งแบบตู้ (รูปที่ ก.1)
2. เครื่องบันทึกอุณหภูมิอัตโนมัติ (รูปที่ ก.2)
3. ตู้อบลมร้อน (Hot Air Oven) (รูปที่ ก.3)
4. เครื่องชั่งน้ำหนัก รุ่น EA35EDE-I MAX 35 Kg ความละเอียด 0.001 (รูปที่ ก.4)
5. อุปกรณ์วัดความเร็วลม (รูปที่ ก.5)
6. เวอร์เนียร์ (รูปที่ ก.6)
7. เครื่องวัดสี Color Quest XE Colorimeter ในระบบ Hunter Lab (รูปที่ ก.7)

3.2 ข้อกำหนดในการทดลอง

1. ลำไยที่ใช้ในการทดลองคือลำไยพันธุ์ค้อ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 2.0–2.3 เซนติเมตร ที่มาจากแหล่งเดียวกัน
2. เครื่องอบแห้งที่ใช้ในห้องปฏิบัติการแสดงไดอะแกรมห้องอบแห้ง ดังรูปที่ 3.1
3. ความเร็วลมที่ใช้ในการทดลองคงที่ 0.7 m/s
4. ทดลองอบแห้งที่อุณหภูมิอบแห้ง 65-95 °C

3.3 การทดลองหาอัตราการอบแห้งและการวิเคราะห์อัตราส่วนอุณหภูมิของเนื้อลำไย

3.3.1 วิธีการทดลองหาอัตราการอบแห้งของลำไยทั้งลูก

ในการทดลองนี้ใช้ลำไยพันธุ์คอ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 20-23 mm มาทำการทดลองอบแห้งลำไยทั้งลูกหนักประมาณ 6 กิโลกรัม นำมาใส่ในตระแกรงแบบกะ (Bulk) แล้วนำเข้าห้องอบแห้ง และทำการทดลองอบแห้งที่อุณหภูมิอบแห้ง $65 \pm 2^{\circ}\text{C}$ ความเร็วลมคงที่ 0.7 m/s บันทึคน้ำหนักลำไยด้วยเครื่องชั่งน้ำหนักโหลดเซล และอุณหภูมิของเนื้อลำไยตัวอย่าง, อุณหภูมิลมร้อน, อุณหภูมิกระเปาะแห้งและอุณหภูมิกระเปาะเปียกด้วยเครื่องบันทึกอัตโนมัติ ทุก 15 นาทีในช่วงโมงแรก, ทุก 30 นาทีในช่วงโมงถัดมา และทุก 2 ชั่วโมงจนถึงความชื้นสุดท้าย 18% d.b. นำตัวอย่างลำไยที่อบแห้งแล้วไปหาค่าน้ำหนักแห้ง โดยอบในตู้อบลมร้อน (Hot Air Oven) ที่อุณหภูมิ 103°C เป็นเวลา 72 ชั่วโมง ทำการทดลองเช่นเดิมแต่เปลี่ยนอุณหภูมิอบแห้งเป็น 75°C , 85°C และ 95°C

3.3.2 การวิเคราะห์หาสมการอัตราส่วนอุณหภูมิของเนื้อลำไย

นำข้อมูลอุณหภูมิของลำไย และอุณหภูมิลมร้อน ขณะเวลาใดๆ (หัวข้อ 3.3.1) มาคำนวณหาอัตราส่วนอุณหภูมิเนื้อลำไยที่เวลาใดๆ ตามสมการ 2.15 ทำการวิเคราะห์สมการถดถอยด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด ตามรูปแบบสมการ 3.1 เพื่อหาค่าคงที่ P,N ที่อุณหภูมิอบแห้งต่างๆ แล้วสร้างสมการหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ (P,N) กับอุณหภูมิอบแห้ง ด้วยการวิเคราะห์สมการถดถอยด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด

$$TR = \frac{(T(t) - T_0)}{(T_h - T_0)} = 1 - \exp(-Pt^N) \quad (3.1)$$

เมื่อ TR คือ อัตราส่วนอุณหภูมิเนื้อลำไย

$T(t)$ คือ อุณหภูมิลำไยที่เวลาใดๆ ($^{\circ}\text{C}$)

T_0 คือ อุณหภูมิลำไยเริ่มต้น ($^{\circ}\text{C}$)

T_h คือ อุณหภูมิห้องอบแห้ง ($^{\circ}\text{C}$)

t คือ เวลาอบแห้ง (h)

k คือ ค่าคงที่

3.4 การทดลองและวิเคราะห์หาการเปลี่ยนแปลงสีของเนื้อลำไย

3.4.1 วิธีการทดลอง

ทำการทดลองอบแห้งลำไยประมาณ 5-8 kg. ด้วยตู้อบแห้งลมร้อน ที่อุณหภูมิ 65°C, 75°C, 85°C, และ 95°C ความเร็วลมคงที่ 0.7 m/s แต่ละการทดลองทำการเก็บข้อมูลดังนี้ ที่อุณหภูมิ อบแห้ง 65°C และ 75°C เก็บตัวอย่างใน 16 ชั่วโมงแรกทุก 4 ชั่วโมง ในช่วงชั่วโมงที่ 16-20 เก็บตัวอย่างทุก 2 ชั่วโมง และช่วงชั่วโมงที่ 21-30 เก็บตัวอย่างทุก 1 ชั่วโมง จนตัวอย่างลำไยมีความชื้นสุดท้ายประมาณ 18% มาตรฐานแห้ง สำหรับที่อุณหภูมิ 85°C และ 95°C เก็บตัวอย่าง 10 ชั่วโมงแรกทุก 2 ชั่วโมง และเก็บตัวอย่างทุก 1 ชั่วโมง จนตัวอย่างลำไยมีความชื้นสุดท้ายประมาณ 18% มาตรฐานแห้ง ในแต่ละครั้งทำการเก็บตัวอย่างลำไยจำนวน 6 ลูก นำไปวัดสีโดยใช้เครื่องวัดสี Color Quest XE Colorimeter ในระบบ Hunter Lab แต่ละลูก โดย 1 ลูก ทำการวัดสีเนื้อของตัวอย่าง 3 ครั้ง ซึ่งค่าสีที่วัดได้แสดงด้วยค่าความสว่าง (Lightness, L) ค่าความเป็นสีแดง (Redness, a) และค่าความเป็นสีเหลือง (Yellowness, b)

3.4.2 การวิเคราะห์หาสมการการเปลี่ยนแปลงสีของเนื้อลำไย

นำข้อมูลการวัดสีของเนื้อลำไยที่ได้จากการทดลองแต่ละอุณหภูมิ คำนวณหาค่าความแตกต่างจากค่าสีเริ่มต้นในแต่ละพารามิเตอร์ ได้แก่ค่าความแตกต่างของความสว่าง ($\Delta L = L - L_0$), ค่าความแตกต่างของความเป็นสีแดง ($\Delta a = a - a_0$), ค่าความแตกต่างของความเป็นสีเหลือง ($\Delta b = b - b_0$) แล้วพัฒนาสมการจลนศาสตร์ของอัตราการเปลี่ยนแปลงสี ตามสมการ 2.17 เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเปลี่ยนแปลงสีที่แสดงด้วยค่าความเป็นสีแดง (a), สีเหลือง (b) และค่าความสว่าง (L) กับเวลาอบแห้ง โดยการวิเคราะห์สมการถดถอยด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุดตามรูปแบบสมการ 3.2

$$\frac{(C - C_e)}{(C_0 - C_e)} = At^3 + Bt^2 + Ct + D \quad (3.2)$$

เมื่อ C คือ ค่าสีที่เวลาต่างๆ (a, b หรือ L)

C_0 คือ ค่าสีเริ่มต้นก่อนการอบแห้ง

C_e คือ ค่าที่สถานะสมดุล

t คือ เวลาอบแห้ง (ชั่วโมง)

A, B คือ ค่าคงที่ (ชั่วโมง⁻¹)

3.5 การทดลองอบแห้งลำไยแบบใช้อุณหภูมิอบแห้งเป็นลำดับขั้น

3.5.1 การออกแบบการทดลอง

จากผลการทดลองอบแห้งลำไยทั้งลูกที่อุณหภูมิอบแห้งคงที่, สมการการเปลี่ยนแปลงสีของเนื้อลำไยอบแห้ง(หัวข้อ3.3และ3.4) และสมการอัตราส่วนอุณหภูมิเนื้อลูกนำมาใช้ในการกำหนดจำนวนชั่วโมงของอุณหภูมิที่ใช้ในแต่ละแบบของการอบแห้งลำไยทั้งลูกโดยใช้อุณหภูมิอบแห้งแบบเป็นลำดับขั้นโดยควบคุมอุณหภูมิของเนื้อลำไยไม่ให้เกิน 75°C ซึ่งพบว่าที่อุณหภูมิอบแห้ง 95°C ใช้เวลา 4 ชั่วโมงอุณหภูมิเนื้อลำไยถึง 70°C และที่อุณหภูมิอบแห้ง 85°C ใช้เวลาอีก 8 ชั่วโมงอุณหภูมิเนื้อลำไยจึงถึง 75°C จากนั้นจึงเปลี่ยนอุณหภูมิห้องอบแห้งเป็นช่วงสุดท้ายจนถึงกระบวนการอบแห้งซึ่งมีแนวทางที่จะทำการทดลองอบแห้งลำไยทั้งลูกโดยใช้อุณหภูมิอบแห้งแบบเป็นลำดับขั้นดังนี้

แบบที่ 1 อุณหภูมิอบแห้ง 95°C , 85°C และ 75°C ใช้ระยะเวลา 4 ชั่วโมง, 8 ชั่วโมง และจนถึงความชื้นสุดท้าย 18 % มาตรฐานแห้ง ตามลำดับ

แบบที่ 2 อุณหภูมิอบแห้ง 95°C , 85°C และ 65°C จำนวน 4 ชั่วโมง, 8 ชั่วโมงและจนถึงความชื้นสุดท้าย 18 % มาตรฐานแห้ง ตามลำดับ

แบบที่ 3 อุณหภูมิอบแห้ง 85°C และ 75°C จำนวน 14 ชั่วโมง และจนถึงความชื้นสุดท้าย 18 % มาตรฐานแห้ง ตามลำดับ

แบบที่ 4 เลือกจาก 3 แบบข้างต้นที่ดีที่สุดโดยพิจารณาจากความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ, เวลาอบแห้ง และคุณภาพสี โดยมีการนำอากาศมาใช้ใหม่ 90%

3.5.2 การทดลอง

ทำการทดลองอบแห้งลำไยทั้งลูกตามแบบการทดลองที่1 (ตามหัวข้อ3.5.1) นำลำไยหนักประมาณ 6 กิโลกรัม ใส่ในตระแกรงแบบกะ (Bulk) อบแห้งที่อุณหภูมิ 95°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง หลังจากนั้นเปลี่ยนอุณหภูมิห้องอบแห้งเป็น 85°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง แล้วเปลี่ยนอุณหภูมิห้องอบแห้งเป็น 75°C จนกระทั่งความเหลือความชื้น 18 % มาตรฐานแห้ง ที่ความเร็วลมคงที่ 0.7 m/s ชั่งน้ำหนักลำไยพร้อมทั้งบันทึกอุณหภูมิของเนื้อลำไยตัวอย่าง, อุณหภูมิลมร้อน, อุณหภูมิกระเปาะแห้งและอุณหภูมิกระเปาะเปียกทุก 15 นาทีในช่วงแรก, ทุก 30 นาทีในช่วงถัดมา และทุก 2 ชั่วโมงจนถึงสิ้นสุดการทดลอง นำตัวอย่างลำไยที่อบแห้งแล้วไปหาน้ำหนัก

ทำการทดลองเช่นเดียวกับที่กล่าวมาตอนต้น แต่เปลี่ยนอุณหภูมิอบแห้งเป็นแบบที่2 แบบที่3 และแบบที่4 ตามลำดับ นำลำไยที่ได้หลังการอบแห้งจำนวน 8 ลูกในแต่ละการทดลองไปวัดสีโดยใช้เครื่องวัดสี Color Quest XE Colorimeter ในระบบ Hunter Lab โดย 1 ลูก ทำการวัดสีเนื้อของตัวอย่าง 3 ครั้ง ซึ่งค่าสีที่วัดได้แสดงด้วยค่าความสว่าง (Lightness, L) ค่าความเป็นสี

แดง (Redness, a) และค่าความเป็นสีเหลือง (Yellowness, b) พร้อมทั้งทำการทดลองหาอัตราการกินตัวของเนื้อลำไย

3.6 การทดลองและคำนวณอัตราการกินตัวของเนื้อลำไยอบแห้ง

นำเนื้อลำไยที่ได้จากการอบแห้ง (หัวข้อ 3.5) จำนวน 3-5 กรัมมาชั่งน้ำหนัก แล้วใส่ในบีกเกอร์ขนาด 500 มิลลิลิตร เติมน้ำกลั่นจำนวน 150 มิลลิลิตร และปิดด้วยกระจกนาฟิกันนำไปต้มให้น้ำเดือดภายใน 3 นาที จากนั้นต้มต่ออีก 10 นาที นำไปกรองแยกน้ำออกโดยใช้กระดาษกรองแล้วชั่งน้ำหนักที่กินตัว ทำการทดลอง 3 ซ้ำ แล้วนำผลการทดลองที่ได้มาคำนวณอัตราการกินตัว ดังสมการ 2.16

3.7 การทดลองและคำนวณหาความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของการอบแห้งลำไยทั้งลูก

3.7.1 การทดลองหาค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของการอบแห้งอุณหภูมิอบแห้งคงที่

เดินเครื่องอบแห้งให้ได้อุณหภูมิห้องอบแห้งคงที่ที่ $65 \pm 2^{\circ}\text{C}$ ความเร็วลม 0.7 m/s ซึ่งลำไยหนักประมาณ 6 กิโลกรัม นำตัวอย่างลำไยใส่ในตระแกรงแบบกะ (Bulk) ใส่ในห้องอบแห้ง บันทึกตัวเลขมิเตอร์ของพัคคัมและมิเตอร์ฮีทเตอร์ อบจนถึงความชื้นสุดท้าย $18\% \text{ d.b.}$ หยุดเครื่องอบแห้ง ชั่งน้ำหนักลำไยหลังจากอบแห้ง บันทึกตัวเลขมิเตอร์ของพัคคัมและมิเตอร์ฮีทเตอร์ ทำการทดลองเช่นเดิมแต่เปลี่ยนอุณหภูมิอบแห้งเป็น 75°C , 85°C และ 95°C นำตัวอย่างลำไยที่อบแห้งแล้วไปหาน้ำหนักแห้ง

3.7.2 การทดลองหาค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของการอบแห้งแบบใช้อุณหภูมิ

อบแห้งเป็นลำดับขั้น

เดินเครื่องอบแห้งให้ได้อุณหภูมิห้องอบแห้งคงที่ที่ 95°C ความเร็วลม 0.7 m/s ซึ่งลำไยหนักประมาณ 6 กิโลกรัม นำตัวอย่างลำไยใส่ในตระแกรงแบบกะ (Bulk) ใส่ในห้องอบแห้ง บันทึกตัวเลขมิเตอร์ของพัคคัมและมิเตอร์ฮีทเตอร์ อบเป็นเวลา 4 ชั่วโมง หลังจากนั้นเปลี่ยนอุณหภูมิห้องอบแห้งเป็น 85°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง แล้วเปลี่ยนเป็นอุณหภูมิ 75°C อบจนกระทั่งความเหลือความชื้น $18\% \text{ d.b.}$ หยุดเครื่องอบแห้ง บันทึกตัวเลขมิเตอร์ของพัคคัมและมิเตอร์ฮีทเตอร์ ชั่งน้ำหนักลำไยหลังจากอบแห้ง นำตัวอย่างลำไยที่อบแห้งแล้วไปหาน้ำหนักแห้ง ทำการทดลองเช่นเดิมแต่เปลี่ยนอุณหภูมิเป็นแบบที่ 2, แบบที่ 3 และแบบที่ 4 ตามลำดับ(จากหัวข้อ 3.5.1)

3.7.3 การคำนวณหาค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะในการอบแห้ง

นำข้อมูลการพลังงานที่ใช้จากพัดลมและฮีตเตอร์, ความชื้นเริ่มต้น, ความชื้นสุดท้าย และน้ำหนักแห้ง ที่ได้จากการทดลอง (หัวข้อ 3.7.1 และ 3.7.2) มาคำนวณหาค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะในแต่ละอุณหภูมิอบแห้งมาคำนวณดังนี้

$$SEC = \frac{(2.6E_{\text{blower}} + E_{\text{heater}})}{(M_{\text{in}} - M_{\text{r}}) * m_p} \quad (3.3)$$

เมื่อ SEC คือ ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะที่ใช้ในการอบแห้ง, MJ/kg-water

E_{blower} คือ พลังงานจากพัดลมที่ใช้, MJ

E_{heater} คือ พลังงานจากฮีตเตอร์ที่ใช้, MJ

M_{in} คือ ความชื้นเริ่มต้น, เศษส่วนมาตรฐานแห้ง

M_{r} คือ ความชื้นเริ่มต้น, เศษส่วนมาตรฐานแห้ง

m_p คือ มวลแห้งของวัสดุ, kg.

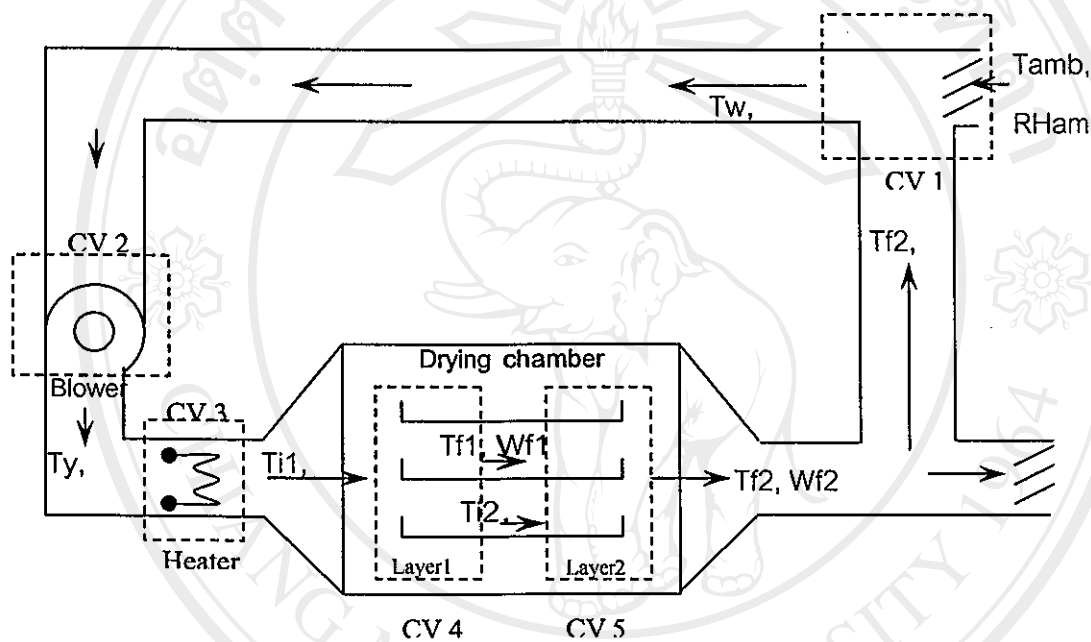
ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

Copyright© by Chiang Mai University

All rights reserved

3.8 การจำลองสภาพการอบแห้งเพื่อหาค่าความเปลืองพลังงานจำเพาะในการอบแห้ง

ในงานวิจัยครั้งนี้ได้นำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้งลำไยทั้งลูกของวีรศักดิ์ (2546) ซึ่งเป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้งแบบใกล้เคียงมาใช้โดยพัฒนาบางเงื่อนไขเพื่อให้สอดคล้องกับการทดลอง โดยมีสมมุติฐานของแบบจำลองดังนี้ มีสมมูลทางความร้อนแต่ไม่มีสมมูลทางความชื้นระหว่างอากาศชั้นและวัสดุ, มีการหุ้มฉนวนที่ผนังของเครื่องอบแห้งอย่างดี และอุณหภูมิเริ่มต้นของลำไยและเครื่องอบแห้งเท่ากับอุณหภูมิอบแห้ง



รูป 3.1 แผนผังรายละเอียดของเครื่องอบแห้งแบบตู้ขนาดห้องปฏิบัติการ

ในการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับเครื่องอบแห้งดังรูป 3.1 ประกอบด้วย 3 แบบจำลองย่อยคือ แบบจำลองการผสมกันของอากาศชั้น แบบจำลองการสิ้นเปลืองพลังงาน และแบบจำลองการอบแห้ง โดยแต่ละแบบจำลองมีรายละเอียดดังนี้

3.8.1 แบบจำลองการผสมกันของอากาศชั้น

เมื่อเครื่องอบแห้งแบบตู้ที่มีการนำอากาศร้อนที่ออกจากห้องอบแห้งเวียนกลับมาผสมกับอากาศแวดล้อม ดังรูปที่ 3.1 เมื่อทำการพิจารณาที่ CV1 จะได้สมดุลมวลอากาศแห้งที่ CV1

$$\dot{m}_{rc} + \dot{m}_{amb} = \dot{m}_{mix} \quad (3.4)$$

และทำสมดุลมวลของไอน้ำที่ CV 1 จะได้ว่า

$$\dot{m}_{rc} \omega_{r2} + \dot{m}_{amb} \omega_{amb} = \dot{m}_{mix} \omega_{mix} \quad (3.5)$$

เมื่อ

$\dot{m}_{rc}$ คือ อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศที่นำกลับมาใช้ใหม่, $\text{kg}_{dry air} / \text{h}$

$\dot{m}_{amb}$ คือ อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศแวดล้อม, $\text{kg}_{dry air} / \text{h}$

$\dot{m}_{mix}$ คือ อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศผสม, $\text{kg}_{dry air} / \text{h}$

ω_{amb} คือ อัตราส่วนความชื้นของอากาศแวดล้อม, $\text{kg}_{น้ำ} / \text{kg}_{dry air}$

ω_{r2} คือ อัตราส่วนความชื้นของอากาศที่ออกจากชั้นอบแห้งชั้นที่ 2 (เนื่องจากในงานวิจัยนี้ใช้จำนวนชั้นอบแห้งเท่ากับ 2 ชั้น), $\text{kg}_{น้ำ} / \text{kg}_{dry air}$

ω_{mix} คือ อัตราส่วนความชื้นของอากาศผสม, $\text{kg}_{น้ำ} / \text{kg}_{dry air}$

จากสมการที่ 3.4 และสมการที่ 3.5 จะได้ว่า

$$\omega_{mix} = [(1 - RC)\omega_{amb}] + RC\omega_{r2} \quad (3.6)$$

เมื่อ

RC คือ สัดส่วนของการนำอากาศที่ใช้แล้วกลับมาใช้ใหม่ มีค่าเท่ากับ $\dot{m}_{rc} / \dot{m}_{mix}$

ในทำนองเดียวกันทำสมดุลพลังงานที่ CV1 โดยที่คิดว่าไม่มีการสูญเสียความร้อนของอากาศขณะที่ผสมกัน สามารถกล่าวได้ว่าการเปลี่ยนแปลงเอนทัลปีของอากาศชั้นเท่ากับศูนย์ และทำสมดุลมวลอากาศแห้งที่ CV1 ซึ่งจะได้

$$\begin{aligned} \dot{m}_{mix} C_a T_{mix} + \dot{m}_{mix} \omega_{mix} h_{fg} + \dot{m}_{mix} \omega_{mix} C_v T_{mix} &= (1 - RC) * \\ [(\dot{m}_{mix} C_a T_{amb}) + (\dot{m}_{mix} \omega_{amb} h_{fg}) + (\omega_{amb} C_v T_{amb})] &+ RC[(\dot{m}_{mix} C_a T_{r2}) + \\ (\omega_{r2} h_{fg}) + (\omega_{r2} C_v T_{r2})] \end{aligned} \quad (3.7)$$

หรือเขียนได้ว่า

$$T_{mix} = \{ (1 - RC) [(\dot{m}_{mix} C_a T_{amb}) + (\dot{m}_{mix} \omega_{amb} h_{fg}) + \quad (3.8)$$

$$(\dot{m}_{mix} \omega_{amb} C_v T_{amb})] + RC [(\dot{m}_{mix} C_a T_{f2}) + (\dot{m}_{mix} \omega_{f2} h_{fg}) + (\dot{m}_{mix} \omega_{f2} C_v T_{f2})] - (\dot{m}_{mix} \omega_{mix} h_{fg}) \} / [(\dot{m}_{mix} C_a) + (\dot{m}_{mix} \omega_{mix} C_v)]$$

เมื่อ T_{mix} คือ อุณหภูมิของอากาศผสมหรือเป็นอุณหภูมิของอากาศก่อนเข้าพัดลม, °C

C_a คือ ความจุความร้อนจำเพาะของอากาศแห้ง, kJ / kg_{dry air} - °C

C_v คือ ความจุความร้อนจำเพาะของไอน้ำ, kJ / kg_{air} - °C

T_{f2} คือ อุณหภูมิอากาศที่ออกจากชั้นอบแห้งชั้นที่ 2, °C

3.8.2 แบบจำลองความสิ้นเปลืองพลังงาน

เนื่องจากเครื่องอบแห้งที่ใช้ในงานวิจัยนี้ใช้พลังงานไฟฟ้าเป็นแหล่งให้พลังงานแก่พัดลม และให้พลังงานความร้อนแก่อากาศ ดังนั้นในแบบจำลองความสิ้นเปลืองพลังงานนี้จึงประกอบไปด้วยแบบจำลองความสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้า และแบบจำลองความสิ้นเปลืองพลังงานความร้อน

3.8.2.1 แบบจำลองความสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้า

จากรูปที่ 3.1 เมื่อพิจารณาที่ CV2 (ที่ Blower) และเมื่อทำสมดุลพลังงานที่ CV2 จะได้ว่า

$$W_s + (\dot{m}_{mix} C_a T_{mix}) + (\dot{m}_{mix} \omega_{mix} h_{fg}) + (\dot{m}_{mix} \omega_{mix} C_v T_{mix}) = (\dot{m}_{mix} C_a T_y) + (\dot{m}_{mix} \omega_{mix} h_{fg}) + (\dot{m}_{mix} \omega_{mix} C_v T_y) \quad (3.9)$$

หรือเขียนได้ว่า

$$T_y = [W_s + (\dot{m}_{mix} C_a T_{mix}) + (\dot{m}_{mix} \omega_{mix} C_v T_{mix})] / [(\dot{m}_{mix} C_a) + (\dot{m}_{mix} \omega_{mix} C_v)] \quad (3.10)$$

เมื่อ T_y คือ อุณหภูมิของอากาศที่ออกจากพัดลม, °C

W_s คือ งานทางไฟฟ้าที่ให้ที่เพลลาของพัดลม, kJ / h

โดย $W_s = \Delta P [M_{mix} / (1000 \rho_a \eta_f)] \quad (3.11)$

เมื่อ ρ_a คือ ความหนาแน่นของอากาศแห้ง, kg_{dry air} / m³

η_f คือ ประสิทธิภาพของพัดลม, เศษส่วน

ΔP คือ ความดันตกของระบบอบแห้ง, Pa

สำหรับความสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าที่ต้องให้มอเตอร์ของพัดลมคำนวณได้จากสมการ

$$E_{fan} = W_s / \eta_m \quad (3.12)$$

หรือ $E_{fan} = \Delta P [M_{mix} / (1000 \rho_a \eta_r \eta_m)] \quad (3.13)$

เมื่อ E_{fan} คือ ความสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าที่ให้อากาศของพัดลม, kJ/h

η_m คือ ประสิทธิภาพของมอเตอร์ไฟฟ้า, เศษส่วน

3.8.2.2 แบบจำลองความสิ้นเปลืองพลังงานความร้อน

เมื่อทำการพิจารณาที่ CV3 (Heater) ทำสมดุลพลังงานที่ CV 3 จะได้ว่า

$$\begin{aligned} Q_h + (\dot{m}_{mix} C_a T_y) + (\dot{m}_{mix} \omega_{mix} h_{fg}) + (\dot{m}_{mix} \omega_{mix} C_v T_y) \\ = (\dot{m}_{mix} C_a T_{i1}) + (\dot{m}_{mix} \omega_{mix} h_{fg}) + (\dot{m}_{mix} \omega_{mix} C_v T_{i1}) \end{aligned} \quad (3.14)$$

หรือเขียนได้ว่า

$$\begin{aligned} Q_h = (\dot{m}_{mix} C_a T_{i1}) + (\dot{m}_{mix} \omega_{mix} C_v T_{i1}) - (\dot{m}_{mix} C_a T_y) - \\ (\dot{m}_{mix} \omega_{mix} C_v T_y) \end{aligned} \quad (3.15)$$

โดยที่ $\omega_{mix1} = \omega_{mix}$ เนื่องจากอากาศไม่ได้รับความชื้นหรือสูญเสียความชื้น (3.16)

เมื่อ Q_h คือ ความสิ้นเปลืองพลังงานความร้อน, kJ/h

T_y คือ อุณหภูมิของอากาศที่ออกจากพัดลม หรือเป็นอุณหภูมิของอากาศที่เข้า

Heater, °C

T_{i1} คือ อุณหภูมิของอากาศที่เข้าชั้นอบแห้งชั้นที่ 1 หรือเป็นอุณหภูมิอบแห้ง, °C

ω_{mix1} คือ อัตราส่วนความชื้นของอากาศที่เข้าชั้นอบแห้งชั้นที่ 1, kg_{น้ำ} / kg_{dry air}

สำหรับค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (SEC) ซึ่งเป็นปริมาณของพลังงานที่ใช้ต่อหนึ่งหน่วยมวลของน้ำที่ระเหยออกจากวัสดุ คำนวณได้จากสมการ

$$SEC = \{ [2.6 (\sum E_{fan}) + (\sum Q_h)] \Delta t \} / [(M_{in} - M_{av}) m_p] \quad (3.17)$$

เมื่อ SEC คือ ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ, kJ/kg_{น้ำ}

$\sum E_{fan}$ คือ พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการอบแห้ง ที่สะสมมาตั้งแต่เริ่มอบจนถึงเวลาใดๆ, kJ/h

$\sum Q_h$ คือ พลังงานความร้อนที่ใช้ในการอบแห้ง ที่สะสมมาตั้งแต่เริ่มอบจนถึงเวลาใดๆ, kJ/h

Δt คือ ช่วงเวลาสั้นๆ, h

M_{in} คือ ความชื้นเริ่มต้นของลำไย, เศษส่วนมาตรฐานแห้ง

m_p คือ มวลแห้งของลำไย, kg_{dry longan}

M_{av} คือ ความชื้นเฉลี่ยของลำไยที่ปลายช่วงเวลา Δt , เศษส่วนมาตรฐานแห้ง

โดย $M_{av} = (M_{f1} + M_{f2})/2$ (เนื่องจากในงานวิจัยนี้ใช้จำนวนชั้นอบแห้งเท่ากับ 2 ชั้น)

เมื่อ M_{f1} คือ ความชื้นของวัสดุที่ปลายของช่วงเวลานั้นๆ ของชั้นอบแห้งที่ 1 , เศษส่วน
มาตรฐานแห้ง

M_{f2} คือ ความชื้นของวัสดุที่ปลายของช่วงเวลานั้นๆ ของชั้นอบแห้งที่ 2 , เศษส่วน
มาตรฐานแห้ง

3.8.3 แบบจำลองที่ชั้นอบแห้งใดๆ

การหาความชื้นของลำไยที่เวลาใดๆ อาศัยสมการจลนศาสตร์ของการอบแห้งแบบทรง
กลม ซึ่งมีรูปแบบดังนี้

$$\overline{MR} = \left(\frac{6}{\pi^2} \right) \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{1}{n^2} \right) \exp \left(\frac{-n^2 \pi^2 Dt}{r^2} \right) \quad (3.18)$$

โดย

$$\overline{MR} = \frac{(\overline{M} - M_{eq})}{(\overline{M}_{in} - M_{eq})} \quad (3.19)$$

จากสมการที่ 3.18 และสมการที่ 3.19 จะได้ว่า

$$\frac{(\overline{M} - M_{eq})}{(\overline{M}_{in} - M_{eq})} = \left(\frac{6}{\pi^2} \right) \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{1}{n^2} \right) \exp \left(\frac{-n^2 \pi^2 Dt}{r^2} \right) \quad (3.20)$$

จากสมการ 3.20 เมื่อแทนค่า $n = 1$ ถึง 130 เทอมแรกจะได้ว่า

$$\begin{aligned} \frac{(\overline{M} - M_{eq})}{(\overline{M}_{in} - M_{eq})} = & \left(\frac{6}{\pi^2} \right) \left[\exp \left(\frac{-\pi^2 Dt}{r^2} \right) + \left(\frac{1}{4} \right) \exp \left(\frac{-4\pi^2 Dt}{r^2} \right) + \left(\frac{1}{9} \right) \exp \left(\frac{-9\pi^2 Dt}{r^2} \right) + \dots \right. \\ & \left. + \left(\frac{1}{16900} \right) \exp \left(\frac{-16900\pi^2 Dt}{r^2} \right) \right] \quad (3.21) \end{aligned}$$

ทำการหาอนุพันธ์ของสมการข้างต้นเทียบกับเวลาจะได้ว่า

$$\begin{aligned} \frac{d\overline{M}}{dt} = & \left(\frac{6}{\pi^2} \right) (\overline{M}_{in} - M_{eq}) \left[\left\{ \left(\frac{-\pi^2 Dt}{r^2} \right) \exp \left(\frac{-\pi^2 Dt}{r^2} \right) \right\} + \left\{ \left(\frac{1}{4} \right) \left(\frac{-4\pi^2 Dt}{r^2} \right) \exp \left(\frac{-4\pi^2 Dt}{r^2} \right) \right\} \right. \\ & \left. + \dots + \left\{ \left(\frac{1}{16900} \right) \left(\frac{-16900\pi^2 Dt}{r^2} \right) \exp \left(\frac{-16900\pi^2 Dt}{r^2} \right) \right\} \right] \quad (3.22) \end{aligned}$$

จากสมการ 3.22 หาความชื้นสุดท้ายโดยใช้หลักการของ Finite difference จะได้ว่า

$$M_f = M_i + \left(\frac{6}{\pi^2} \right) (M_{in} - M_{eq}) \Delta t \left(\frac{-\pi^2 D}{r^2} \right) \left[\exp \left(\frac{-\pi^2 D t}{r^2} \right) + \exp \left(\frac{-4\pi^2 D t}{r^2} \right) + \dots \right. \\ \left. \dots + \exp \left(\frac{-16900\pi^2 D t}{r^2} \right) \right] \quad (3.23)$$

จากสมการ 3.23 เมื่อแทนค่าคงที่ในแต่ละเทอม จะได้สมการที่ใช้หาความชื้นของลำไย ณ เวลาใดๆ ได้ดังนี้

$$M_f = M_i - \left[\left\{ (M_{in} - M_{eq}) \frac{6\Delta t D}{r^2} \right\} \left\{ \exp \left(\frac{-\pi^2 D t}{r^2} \right) + \exp \left(\frac{-4\pi^2 D t}{r^2} \right) + \dots \right. \right. \\ \left. \left. \dots + \exp \left(\frac{-16900\pi^2 D t}{r^2} \right) \right\} \right] \quad (3.24)$$

หรือถ้าพิจารณาในแต่ละชั้นที่อบแห้งจะได้ว่า

$$M_{fn} = M_{in} - \left[\left\{ (M_{in} - M_{eq}) \frac{6\Delta t D_n}{r^2} \right\} \left\{ \exp \left(\frac{-\pi^2 D_n t}{r^2} \right) + \exp \left(\frac{-4\pi^2 D_n t}{r^2} \right) + \dots \right. \right. \\ \left. \left. \dots + \exp \left(\frac{-16900\pi^2 D_n t}{r^2} \right) \right\} \right] \quad (3.25)$$

เมื่อ M_{fn} คือ ความชื้นของลำไยที่ปลายช่วงเวลา Δt ของชั้นอบแห้งนั้นๆ, เศษส่วนมาตรฐานแห้ง

M_{in} คือ ความชื้นเริ่มต้นของลำไยที่ต้นช่วงเวลา Δt ของชั้นอบแห้งนั้นๆ, เศษส่วนมาตรฐานแห้ง

D_n คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นของลำไยทั้งลูกในชั้นอบแห้งนั้นๆ

M_{eq} คือ ความชื้นเริ่มต้นของลำไย, เศษส่วนมาตรฐานแห้ง

M_{eq} คือ ความชื้นสมดุล, เศษส่วนมาตรฐานแห้ง

t คือ เวลาอบแห้ง, h

r คือ รัศมีของลำไย, m

n คือ ลำดับชั้นที่อบแห้งมีค่า 1 หรือ 2 (ในงานวิจัยนี้ใช้จำนวนชั้นอบแห้งเท่ากับ 2

ชั้น)

เมื่อใช้กฎทรงมวลพิจารณาปริมาตรควบคุมของชั้นอบแห้งใดๆ จะได้ว่ามวลของน้ำที่เพิ่มขึ้นในอากาศชื้นเท่ากับมวลของน้ำที่ระเหยออกจากลำไย ซึ่งเขียนเป็นสมการได้ว่า

$$\Delta t \dot{m}_{\text{mix}} (\omega_{\text{mix},fn} - \omega_{\text{mix},n}) = m_{p,n} (M_{i,n} - M_{f,n}) \quad (3.26)$$

หรือเขียนได้ว่า

$$\omega_{fn} = [(M_{i,n} - M_{f,n}) m_{p,n} / (\Delta t \dot{m}_{\text{mix}})] + \omega_{\text{mix},n} \quad (3.27)$$

เมื่อ ω_{fn} คือ อัตราส่วนความชื้นของอากาศที่ออกจากชั้นอบแห้งนั้นๆ, $\text{kg}_\text{น้ำ} / \text{kg}_\text{dry air}$

$m_{p,n}$ คือ มวลแห้งของลำไยในชั้นอบแห้งนั้นๆ (โดยที่ $m_{p,n} = m_p / 2$), $\text{kg}_\text{dry longan}$

$\omega_{\text{mix},n}$ คือ อัตราส่วนความชื้นของอากาศที่เข้าชั้นอบแห้งนั้นๆ, $\text{kg}_\text{น้ำ} / \text{kg}_\text{dry air}$

ในทำนองเดียวกันเมื่อทำสมดุลพลังงานที่ปริมาตรควบคุมของชั้นอบแห้งนั้นๆ โดยที่ในงานวิจัยนี้กำหนดให้มีการหุ้มฉนวนที่ผนังห้องอบแห้งอย่างดี และผลรวมของการเปลี่ยนแปลงเอนทัลปีของลมร้อนแห้งและการเปลี่ยนแปลงเอนทัลปีของไอน้ำในลมร้อนมีค่าเท่ากับศูนย์ ซึ่งเขียนเป็นสมการได้ว่า

$$(\dot{m}_{\text{mix}} C_a T_{in}) + (\dot{m}_{\text{mix}} \omega_{\text{mix},n} h_{fg}) + (\dot{m}_{\text{mix}} \omega_{\text{mix},n} C_v T_{in}) = (\dot{m}_{\text{mix}} C_a T_{fn}) + (\dot{m}_{\text{mix}} \omega_{fn} h_{fg}) + (\dot{m}_{\text{mix}} \omega_{fn} C_v T_{fn}) \quad (3.28)$$

จัดรูปแบบสมการใหม่ได้สมการอุณหภูมิของอากาศที่ออกจากชั้นอบแห้งนั้นๆ ดังนี้

$$T_{fn} = \left[\frac{[(\dot{m}_{\text{mix}} C_a T_{in}) + (\dot{m}_{\text{mix}} \omega_{\text{mix},n} h_{fg}) + (\dot{m}_{\text{mix}} \omega_{\text{mix},n} C_v T_{in}) - (\dot{m}_{\text{mix}} \omega_{fn} h_{fg})]}{[(\dot{m}_{\text{mix}} C_a) + (\dot{m}_{\text{mix}} \omega_{fn} C_v)]} \right] \quad (3.29)$$

เมื่อ T_{fn} คือ อุณหภูมิของอากาศที่ออกจากชั้นอบแห้งนั้นๆ, $^{\circ}\text{C}$

T_{in} คือ อุณหภูมิของอากาศที่เข้าชั้นอบแห้งนั้นๆ, $^{\circ}\text{C}$

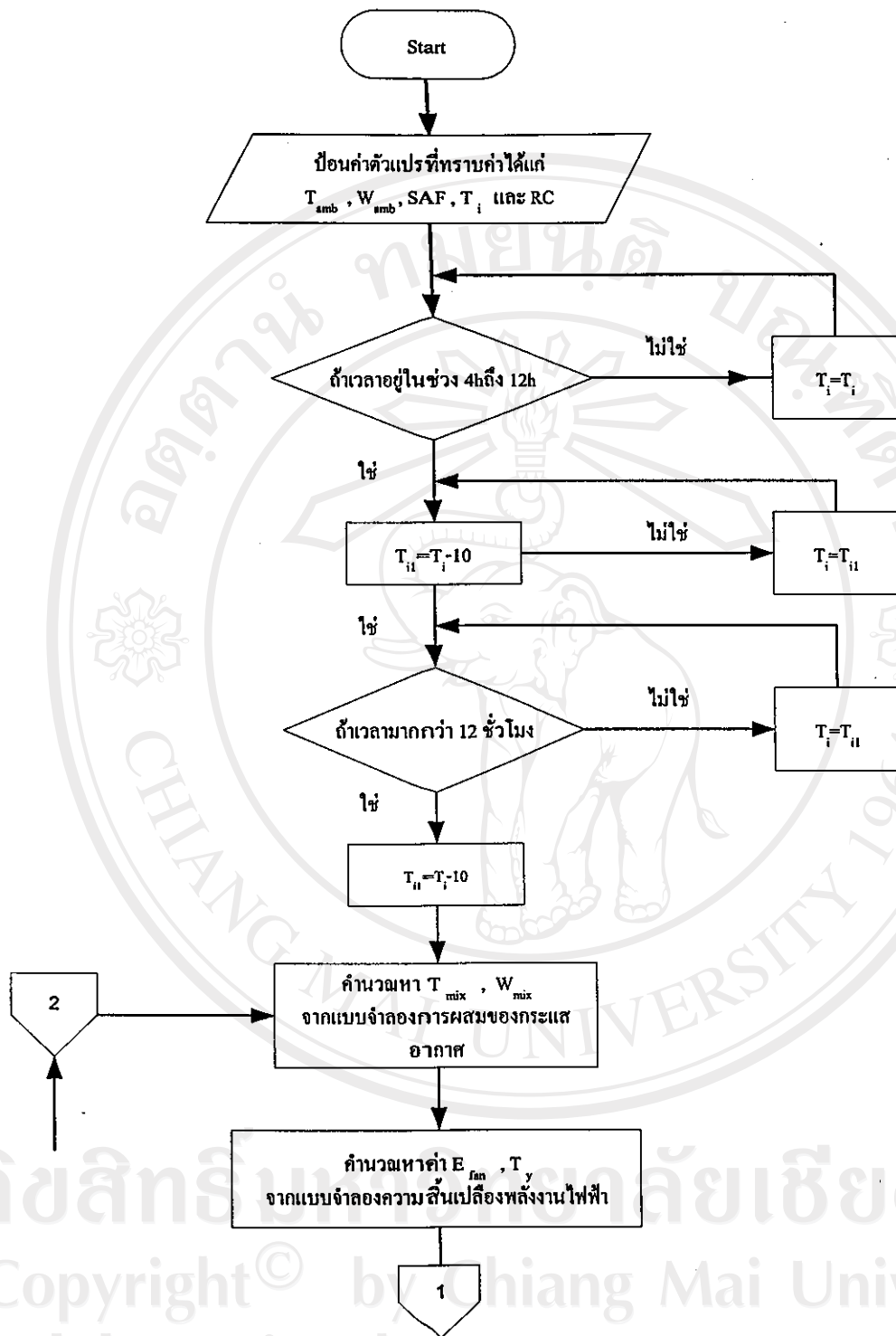
n คือ ลำดับชั้นที่อบแห้งมีค่า 1 หรือ 2

3.9 ขั้นตอนการจำลองสภาพการอบแห้ง

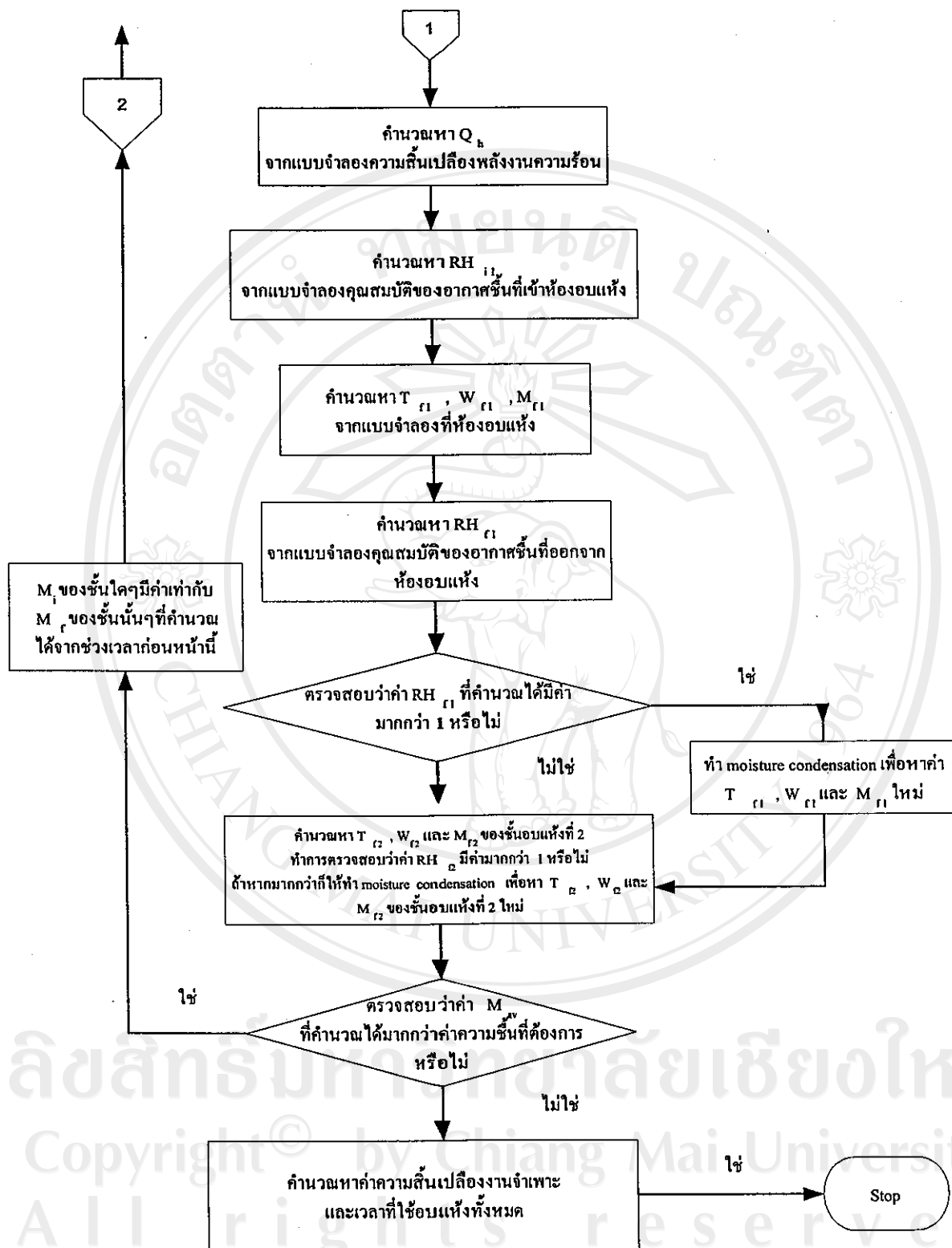
วีรศักดิ์ (2546) ได้ทำการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้งลำไยทั้งลูก โดยเครื่องอบแห้งที่ใช้มีการนำความร้อนที่กลับมาใช้ใหม่ ในงานวิจัยครั้งนี้จึงได้นำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้งลำไยทั้งลูกของวีรศักดิ์(2546) มาพัฒนาบางเงื่อนไขเพื่อให้สอดคล้องกับการทดลองอบแห้งลำไยทั้งลูกแบบใช้อุณหภูมิอบแห้งเป็นลำดับขั้น ซึ่งในการจำลองสภาพการอบแห้งนั้นได้ป้อนข้อมูลดังนี้ อุณหภูมิห้องอบแห้ง อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศแวดล้อม อัตราการไหลเฉพาะของอากาศ และค่าคงที่ต่างๆ (หัวข้อ 3.8) ซึ่งมีขั้นตอนการคำนวณดังรูป 3.9 โดยเมื่อป้อนค่าของตัวแปรและค่าคงที่ต่างๆ จะคำนวณหาค่าของตัวแปรต่างๆที่ไม่ทราบค่าตามลำดับของสมการที่ใช้ในแบบจำลอง ได้แก่ $T_p, M_a, W_s, E_{fan}, T_y, Q_h, P_{vi}, P_{vsi}, RH_i, M_{eq}, M_{il}, W_{mix1}, T_{i1}, D_1, t, M_{f1}, P_{vf1}, P_{vsf1}, RH_{f1}$ ทำการตรวจสอบว่าค่า RH_{f1} มีค่าเกิน 1 หรือไม่ ถ้ามีค่าเกิน 1 ก็ให้ทำ Moisture condensation เพื่อหาค่า T_{f1}, W_{f1} และ M_{f1} ใหม่ หลังจากนั้นอากาศจะเข้าชั้นอบแห้งขั้นที่ 2 โดยค่าของ T_{i2} และ W_{f2} มีค่าเท่ากับ T_{f1}, W_{f1} ตามลำดับคำนวณหาค่าของตัวแปรต่างๆตามลำดับของสมการต่อไป จะได้หาค่าของตัวแปรที่ไม่ทราบค่าที่จะต้องทำการคำนวณหาตามลำดับของสมการต่อไปคือ $M_{i2}, W_{mix2}, T_{i2}, D_2, M_{f2}, W_{f2}, T_{f2}, P_{vf2}, P_{vsf2}, RH_{f2}$ ทำการตรวจสอบว่าค่า RH_{f2} มีค่าเกิน 1 หรือไม่ ถ้ามีค่าเกิน 1 ก็ให้ทำ Moisture condensation เพื่อหาค่า T_{f2}, W_{f2} และ M_{f2} ใหม่ คำนวณหาค่าของตัวแปรที่ไม่ทราบค่าต่อไปได้แก่ค่า M_{av}, SEC และ CT ที่ช่วงเวลาสั้นๆถัดไปก็ทำการคำนวณเหมือน โปรแกรมจะทำการคำนวณไปเรื่อยๆจนกว่าค่าความชื้นของลำไยจะมีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับค่าความชื้นของลำไยที่ต้องการ

โดยเงื่อนไขที่ใช้ในการคำนวณดังนี้

อุณหภูมิอากาศแวดล้อม	20 – 30 °C
ความชื้นสัมพัทธ์อากาศแวดล้อม	20 – 90 %
ความชื้นสุดท้ายของลำไย	18 % มาตรฐานแห้ง
อุณหภูมิอบแห้ง	65-95 °C
ความหนาแน่นของอากาศแห้ง	1.008 kg _{dry air} / m ³
ความจุความร้อนจำเพาะของไอน้ำ	1.88 kJ / kg _{water} - °C
ความจุความร้อนจำเพาะของอากาศแห้ง	1.006 kJ / kg _{dry air} - °C
ความร้อนแฝงของการระเหยน้ำ	2502 kJ / kg _{water}
ความดันบรรยากาศ	101.325 kPa
ช่วงเวลาสั้นๆ (Δt)	0.005 h



รูป 3.2 FlowChart แสดงการคำนวณในแบบจำลองคณิตศาสตร์ของการอบแห้งลำไยทั้งลูก
แบบใช้อุณหภูมิอบแห้งเป็นลำดับขั้น



รูป 3.2 (ต่อ) FlowChart แสดงการคำนวณในแบบจำลองคณิตศาสตร์ของการอบแห้งลำไยทั้งลูก แบบใช้อุณหภูมิอบแห้งเป็นลำดับขั้น