บทที่ 4
การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องอบแห้งมะละกอแช่อิ่ม แบบปั๊มความร้อน

4.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องอบแห้งมะละกอแช่อิ่ม แบบปั๊มความร้อน

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องอบแห้งมะละกอแช่อิ่ม แบบปั๊มความร้อน ในงานวิจัยประกอบด้วย 3 แบบจำลองหลัก คือ

4.1.1 แบบจำลองของห้องอบแห้ง (Drying Chamber Model)

ห้องอบแห้งในงานวิจัยมีขนาด กว้าง*ยาว*สูง เท่ากับ 0.80*0.90*0.75 เมตร

4.1.2 แบบจำลองของระบบปั๊มความร้อน ประกอบด้วย 3 แบบจำลองย่อย ได้แก่

4.1.2.1 แบบจำลองเครื่องทำระเหย (Evaporator Model)

เครื่องทำระเหยในงานวิจัยมีขนาด 3.66 กิโลวัตต์ จำนวนแถวของท่อตามมิติความหนา*ความสูง เท่ากับ 3*8 แถว และจำนวนครีบ 14 ครีบต่อนิ้ว

4.1.2.2 แบบจำลองเครื่องอัดไอ (Compressor Model)

เครื่องอัดไอในงานวิจัยเป็นแบบลูกสูบ (Reciprocating Compressor) ขนาด 1.3 กิโลวัตต์

4.1.2.3 แบบจำลองเครื่องควบแน่น (Condenser Model)

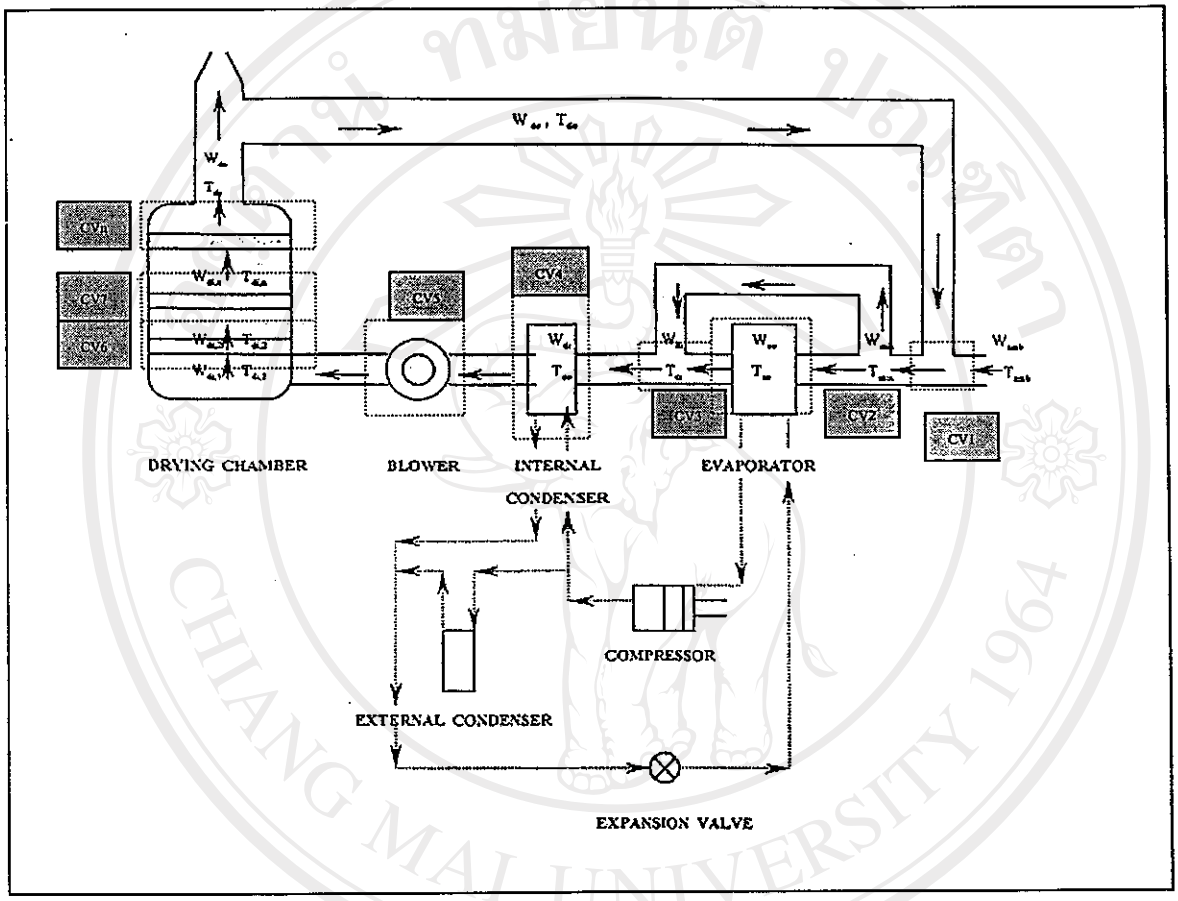
เครื่องควบแน่นตัวในมีขนาด 4.5 กิโลวัตต์ จำนวนแถวของท่อตามมิติ ความหนา*ความสูง เท่ากับ 4*13 แถว และจำนวนครีบ 14 ครีบต่อนิ้ว สำหรับเครื่องควบแน่นตัวนอกซึ่งใช้ระบายความร้อนส่วนเกินออกจากห้องอบแห้ง มีขนาด 4.5 กิโลวัตต์ จำนวนแถวของท่อตามมิติ ความหนา*ความสูง เท่ากับ 4*13 แถว และจำนวนครีบ 14 ครีบต่อนิ้ว

4.1.3 แบบจำลองสมรรถนะของการอบแห้ง (Performance Model)

สมรรถนะของการอบแห้งที่พิจารณาได้แก่ เวลาที่ใช้ในการอบแห้ง (Drying Time : DT) อัตราการอบแห้ง (Drying rate : DR) และอัตราการระเหยจำเพาะ (Specific Moisture Extraction Rate : SMER)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

รายละเอียดของส่วนประกอบต่างๆ ของเครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อน แสดงดังรูปที่ 4.1 แสดงส่วนประกอบของระบบอบแห้งปั๊มความร้อนที่ทำการศึกษาในงานวิจัย



รูปที่ 4.1 แผนผังแสดงส่วนประกอบของระบบอบแห้งปั๊มความร้อนที่ทำการศึกษาในงานวิจัย

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

4.2 สมการคณิตศาสตร์ที่เกี่ยวข้องในแบบจำลองของเครื่องอบแห้งมะละกอแช่อิ่มแบบปั๊มความร้อน

4.2.1. แบบจำลองของห้องอบแห้ง (Drying Chamber Model)

สมการคณิตศาสตร์ของแบบจำลองห้องอบแห้งเป็นสมการทางเอ็มไพริคอล ซึ่งได้จากข้อมูลการทดลอง โดยมีรูปแบบของสมการขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุที่นำมาทำการอบแห้ง ซึ่งในงานวิจัยนี้ห้องอบแห้งมีลักษณะเป็นห้องอบแห้งแบบตู้ (Cabinet Dryer) และวัสดุที่ทำการศึกษาคือมะละกอแช่อิ่ม

การคำนวณค่าความชื้นของมะละกอแช่อิ่ม ณ เวลาใดๆ สำหรับมะละกอแช่อิ่มในงานวิจัยนี้มีลักษณะเป็นทรงลูกบาศก์ ซึ่งค่าอัตราส่วนความชื้น (MR) มีค่าเท่ากับ

$$MR = (\frac{8}{\pi^2})^3[\exp\{\frac{-3\pi^2 Dt}{l^2}\} + (\frac{3}{9})\exp\{\frac{-11\pi^2 Dt}{l^2}\} + (\frac{3}{25})\exp\{\frac{-27\pi^2 Dt}{l^2}\}]$$

โดย

$$MR = \frac{(M - M_{eq})}{(M_{in} - M_{eq})}$$

จะได้

$$\frac{(M - M_{eq})}{(M_{in} - M_{eq})} = (\frac{8}{\pi^2})^3[\exp\{\frac{-3\pi^2 Dt}{l^2}\} + (\frac{3}{9})\exp\{\frac{-11\pi^2 Dt}{l^2}\} + (\frac{3}{25})\exp\{\frac{-27\pi^2 Dt}{l^2}\}]$$

เมื่อ

MR	คือ	อัตราส่วนความชื้น
l	คือ	ขนาดชิ้นวัสดุ (m.)
D	คือ	สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น (m^2/h.)
t	คือ	เวลา (h.)
M	คือ	ความชื้น ณ เวลาใดๆ (% dry-basis)
M_{eq}	คือ	ความชื้นสมดุล (% dry-basis)
M_{in}	คือ	ความชื้นเริ่มต้น (% dry-basis)

ทำการหาอนุพันธ์เทียบกับเวลา

$$\frac{dM}{dt} = (M_{in} - M_{eq})(\frac{8}{\pi^2})^3[\{\frac{-3\pi^2 D}{l^2}\exp\frac{-3\pi^2 Dt}{l^2}\} - \{(\frac{33}{9})(\frac{\pi^2 D}{l^2})\exp\frac{-11\pi^2 Dt}{l^2}\} - \{(\frac{81}{25})(\frac{\pi^2 D}{l^2})\exp\frac{-27\pi^2 Dt}{l^2}\}]$$

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ใช้หลักการ Finite Difference จะได้ค่าความชื้นสุดท้ายที่เวลาใดๆ มีค่าดังสมการที่ (4.1)

$$M_f = M_i + (M_{in} - M_{eq}).\Delta t(\frac{8}{\pi^2})^3[\{\frac{-3\pi^2 D}{l^2}\exp\ \frac{-3\pi^2 Dt}{l^2}\} - \{(\frac{33}{9})(\frac{\pi^2 D}{l^2})\exp\frac{-11\pi^2 Dt}{l^2}\} - \{(\frac{81}{25})(\frac{\pi^2 D}{l^2})\exp\frac{-27\pi^2 Dt}{l^2}\}] \quad (4.1)$$

การคำนวณค่าความชื้นสมดุล (M_{eq}) ของมะละกอแช่อิ่ม สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (4.2)

$$M_{eq} = \frac{\frac{1}{100}[\frac{RH_{di}}{1-RH_{di}}]}{[\frac{1}{M_m C_m} + \frac{(C_m - 1)}{M_m C_m}RH_{di}]} \quad (4.2)$$

โดยค่า C_m และ M_m มีค่าเท่ากับ $M_m = 3.1987 + 0.1407T_{di}$

$C_m = 163.15\exp(-0.0647T_{di})$

เมื่อ RH_{di} คือ ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศที่เข้าห้องอบแห้ง

T_{di} คือ อุณหภูมิของอากาศที่เข้าห้องอบแห้ง ($^{\circ}C$)

M_m คือ ความชื้นสูงสุดใน 1 ชั้นโมเลกุล (% dry-basis)

C_m คือ ค่าคงที่

การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นของมะละกอแช่อิ่ม (D) ในงานวิจัยนี้ใช้สมการที่ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น (D) เป็นฟังก์ชันกับความชื้น (M) และอุณหภูมิอบแห้ง (T_{di})

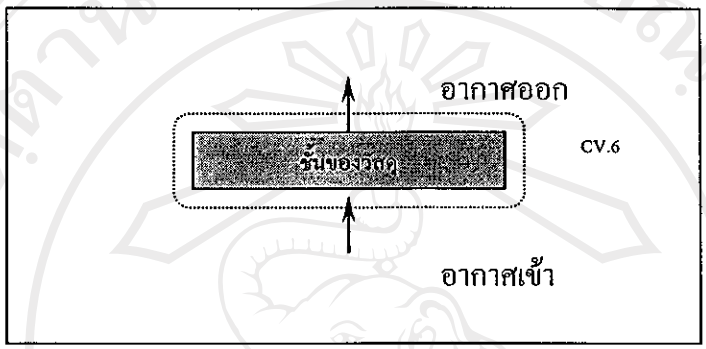
$$D = (-6.86M_i^2 + 8.08M_i - 0.36)\exp[-41.23/(RT_{abs})] \quad (4.3)$$

เมื่อ R คือ ค่าคงที่ของก๊าซ (kJ/mol-K)

T_{abs} คือ อุณหภูมิอบแห้งสัมบูรณ์ ($^{\circ}C$)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

การพิจารณาคุณสมบัติของอากาศที่ไหลผ่านชั้นของวัสดุ คุณสมบัติต่างๆ ของอากาศชื้นที่ออกจากชั้นวัสดุ คำนวณโดยอาศัยหลักของสมดุลมวลและสมดุลพลังงาน จากรูปที่ 4.1 แผนผังแสดงส่วนประกอบของระบบอบแห้งปั๊มความร้อนที่ทำการศึกษาในงานวิจัย โดยพิจารณาปริมาตรควบคุมที่ 6 ชั้นของวัสดุในห้องอบแห้ง ดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 ปริมาตรควบคุมที่ 6 ชั้นของวัสดุในห้องอบแห้ง

พิจารณาอากาศที่เข้าและออกจากชั้นวัสดุ ความชื้นที่เพิ่มขึ้นในอากาศจะต้องมีค่าเท่ากับความชื้นที่ลดลงในวัสดุ จากสมดุลมวลจะได้

$$\Delta t.m_d.(W_{do} - W_{di}) = m_p.(M_i - M_f) \qquad (4.4)$$

เมื่อ Δt คือ ช่วงเวลา (h.)

m_d คือ อัตราการไหลของอากาศ (kg. dry air/h.)

W_{di} และ W_{do} คือ อัตราส่วนความชื้นของอากาศที่เข้าและออกจากชั้นวัสดุ ตามลำดับ (kg. water vapor/kg. dry air)

m_p คือ มวลของวัสดุ (kg. dry product)

M_i คือ ความชื้นเริ่มต้นที่ช่วงเวลาใดๆ (% dry-basis)

M_f คือ ความชื้นสุดท้ายที่ช่วงเวลาใดๆ (% dry-basis)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

การพิจารณาการแบ่งชั้นของวัสดุ พิจารณาโดยการแบ่งมวลของวัสดุออกเป็นชั้นๆ ละเท่าๆ กัน คุณสมบัติของอากาศอบแห้ง (อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์) ที่ออกจากชั้นแรกจะเป็นคุณสมบัติของอากาศที่เข้าชั้นต่อไป การพิจารณาค่าความชื้นที่เวลาใดๆ โดยนำผลรวมของความชื้นที่เวลาใดๆ ของวัสดุแต่ละชั้นหารด้วยจำนวนชั้นทั้งหมดที่พิจารณา จะได้ค่าความชื้นเฉลี่ยของวัสดุทั้งหมด ซึ่งจะมีความละเอียดและใกล้เคียงกับการอบแห้งจริงมากกว่าการพิจารณาวัสดุทั้งหมดเพียงชั้นเดียว

การพิจารณาการเปลี่ยนแปลงเอนทัลปี (h) ของอากาศในกระบวนการอบแห้ง พบว่าขณะที่อากาศไหลผ่านชั้นของวัสดุในห้องอบแห้ง จะเกิดการถ่ายเทความร้อนและความชื้นระหว่างอากาศกับวัสดุ โดยอากาศจะมีอุณหภูมิลดลงแต่ค่าอัตราส่วนความชื้นจะเพิ่มขึ้น ซึ่งกระบวนการดังกล่าวมีการเปลี่ยนแปลงเอนทัลปีเกิดขึ้นน้อยมาก จึงกำหนดสมมุติฐานให้เอนทัลปีของอากาศระหว่างการอบแห้งไม่มีการเปลี่ยนแปลง หรือผลต่างของเอนทัลปีของอากาศที่เข้าและออกจากชั้นวัสดุ มีค่าเท่ากับ 0 ดังสมการที่ (4.5)

$$m_d[C_a T_{di} + W_{di}(h_{fg} + C_v T_{di}) - C_a T_{do} - W_{do}(h_{fg} + C_v T_{do})] = 0 \qquad (4.5)$$

เมื่อ T_{di} และ T_{do} คือ อุณหภูมิของอากาศที่เข้าและออกชั้นวัสดุตามลำดับ ($^{\circ}C$)

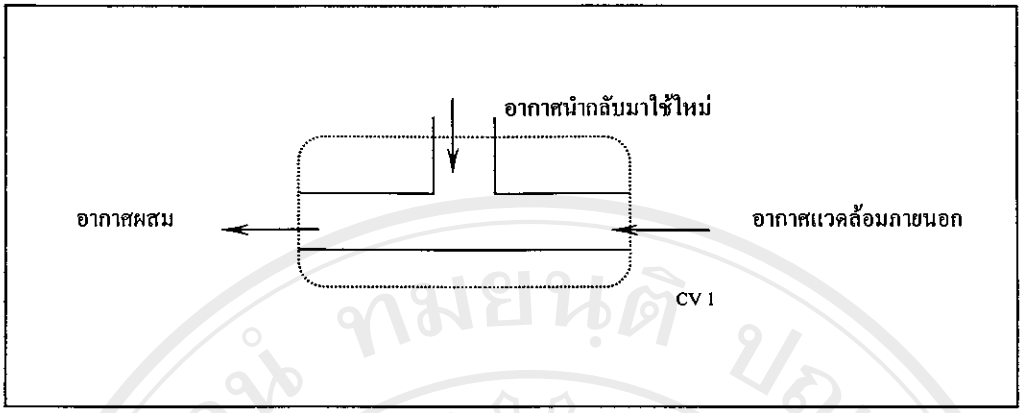
C_a คือ ความร้อนจำเพาะของอากาศ (kJ/kg.-K)

C_v คือ ความร้อนจำเพาะของไอน้ำ (kJ/kg.-K)

h_{fg} คือ ความร้อนแฝงของการระเหยน้ำ (kJ/kg.)

การคำนวณคุณสมบัติของอากาศผสม ซึ่งเกิดจากการผสมกันของอากาศที่ออกจากห้องอบแห้งซึ่งมีการนำกลับมาใช้ใหม่ ผสมกับอากาศแวดล้อมภายนอก จากรูปที่ 4.1 แผนผังแสดงส่วนประกอบของระบบอบแห้งปั๊มความร้อนที่ทำการศึกษาในงานวิจัย โดยพิจารณาปริมาตรควบคุมที่ 1 การผสมของอากาศที่ออกจากห้องอบแห้ง ซึ่งมีการนำกลับมาใช้ใหม่ในระบบ กับอากาศแวดล้อมภายนอก ดังรูปที่ 4.3

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved



รูปที่ 4.3 ปริมาตรควบคุมที่ 1 การผสมของอากาศที่นำกลับมาใช้ใหม่กับอากาศแวดล้อมภายนอก

จากสมดุลมวลของไอน้ำในอากาศ จะได้

$$(1-RC)m_d W_{amb} + (RC)m_d W_{do} = m_d W_{mix} \qquad (4.6)$$

และจากสมดุลพลังงาน จะได้

$$m_d[C_a T_{mix} + W_{mix}(h_{fg} + C_v T_{mix})] = (1-RC)m_d[C_a T_{amb} + W_{amb}(h_{fg} + C_v T_{amb})] + (RC)m_d[C_a T_{do} + W_{do}(h_{fg} + C_v T_{do})] \qquad (4.7)$$

เมื่อ W_{amb} คือ อัตราส่วนความชื้นของอากาศแวดล้อม (kg. water vapor/kg. dry air)

W_{mix} คือ อัตราส่วนความชื้นของอากาศผสม (kg. water vapor/kg. dry air)

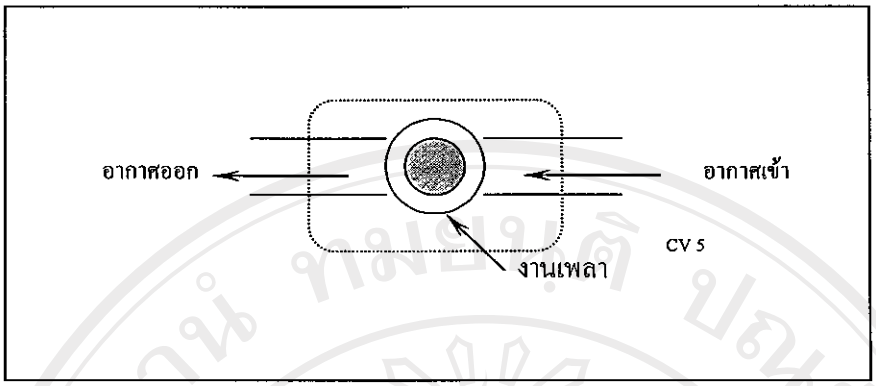
RC คือ สัดส่วนของอากาศที่นำกลับมาใช้ใหม่ (%)

T_{amb} คือ อุณหภูมิของอากาศแวดล้อม ($^{\circ}$C)

T_{mix} คือ อุณหภูมิของอากาศผสม ($^{\circ}$C)

การคำนวณคุณสมบัติของอากาศที่เข้าและออกจากพัดลม จากรูปที่ 4.1 แผนผังแสดงส่วนประกอบของระบบอบแห้งปั๊มความร้อนที่ทำการศึกษาในงานวิจัย พิจารณาปริมาตรควบคุมที่ 5 พัดลม ดังรูปที่ 4.4

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved



รูปที่ 4.4 ปริมาตรควบคุมที่ 5 พัดลม

จากสมดุลพลังงาน การเปลี่ยนแปลงเอนทัลปีของอากาศที่เข้าและออกจากพัดลม จะเท่ากับงานเพลาที่ให้กับพัดลม จะได้

$$m_d(C_a + W_{di}C_v)(T_{di} - T_{co}) = W_s \qquad (4.8)$$

เมื่อ T_{co} คือ อุณหภูมิของอากาศที่ออกจากเครื่องทำระเหย ($^{\circ}C$)

W_s คือ งานเพลา (kJ/h.)

นอกจากนี้ยังมีการใช้สมการคุณสมบัติของอากาศชื้นอื่นๆ ในแบบจำลอง ดังต่อไปนี้

การคำนวณค่าอัตราส่วนความชื้นของอากาศ (W)

$$W = \frac{0.62189P_v}{101.325 - P_v} \qquad (4.9)$$

เมื่อ W คือ อัตราส่วนความชื้นของอากาศ (kg. water vapor/kg. dry air)

P_v คือ ความดันไอน้ำ (kPa)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

การคำนวณค่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ (RH)

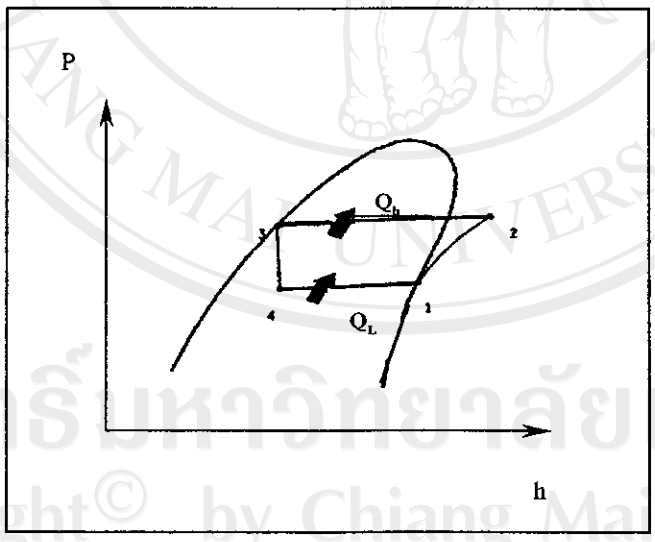
$$RH = \frac{P_v}{P_{vs}} \qquad (4.10)$$

เมื่อ P_{vs} คือ ความดันไอน้ำอิ่มตัว (kPa) สามารถคำนวณได้จากสมการ (4.11)

$$\ln(P_{vs}) = -7511.52/T_{abs} + 89.63121 + 0.023998970T_{abs} - (1.1654551*10^{-5})T_{abs}^{2} - (1.2810336*10^{-8})T_{abs}^{3} + (2.0998405*10^{-11})T_{abs}^{4} - 12.150799\ln(T_{abs}) \qquad (4.11)$$

4.2.2. แบบจำลองของระบบปั๊มความร้อน (Heat Pump Model)

แบบจำลองของระบบปั๊มความร้อนสามารถอธิบายจากรูปที่ 4.1 แผนผังแสดงส่วนประกอบของระบบอบแห้งปั๊มความร้อนที่ทำการศึกษาในงานวิจัย และรูปที่ 4.5 แผนภาพความสัมพันธ์ระหว่างความดันและเอนทัลปี



รูปที่ 4.5 แผนภาพความสัมพันธ์ระหว่างความดันและเอนทัลปี

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

1). แบบจำลองเครื่องทำระเหย (Evaporator Model)

แบบจำลองเครื่องทำระเหยพัฒนาจากสมการการถ่ายเทความร้อน ระหว่างวงจรของอากาศกับสารทำความเย็น จากรูปที่ 4.1 แผนผังแสดงส่วนประกอบของระบบอบแห้งปั๊มความร้อนที่ทำการศึกษาในงานวิจัย โดยพิจารณาปริมาตรควบคุมที่ 2 และรูปที่ 4.5 แผนภาพความสัมพันธ์ระหว่างความดันและเอนทัลปี พิจารณากระบวนการที่ 4-1 จากกฎข้อที่ 1 ทางเทอร์โมไดนามิก อัตราการถ่ายเทความร้อนที่ออกจากอากาศจะเท่ากับอัตราการถ่ายเทความร้อนที่สารทำความเย็นได้รับ

$$Q_{ae} = Q_{re} \tag{4.12}$$

เมื่อ Q_{ae} คือ อัตราการถ่ายเทความร้อนของอากาศที่เครื่องทำระเหย (kJ/h.)

Q_{re} คือ อัตราการถ่ายเทความร้อนของสารทำความเย็นที่เครื่องทำระเหย (kJ/h.)

โดย Q_{ae} และ Q_{re} มีค่าเท่ากับ

$$Q_{ae} = (1\text{-}BP).m_d.[C_a(T_{eo}-T_{mix}) + (W_{eo}-W_{mix})h_{fg} + W_{mix}C_v(T_{eo}-T_{mix})] \tag{4.13}$$

$$Q_{re} = m_r (h_1 - h_4) \tag{4.14}$$

เมื่อ T_{eo} คือ อุณหภูมิของอากาศที่ออกจากเครื่องทำระเหย ($^{\circ}C$)

W_{eo} คือ อัตราส่วนความชื้นของอากาศที่ออกจากเครื่องทำระเหย (kg. water vapor/kg. dry air)

BP คือ สัดส่วนของอากาศที่ไม่ผ่านเครื่องทำระเหย (%)

m_r คือ อัตราการไหลของสารทำความเย็น (kg/h.)

h_1 คือ เอนทัลปีจำเพาะของสารทำความเย็นที่ออกจากเครื่องทำระเหย (kJ/kg.)

h_4 คือ เอนทัลปีจำเพาะของสารทำความเย็นที่เข้าเครื่องทำระเหย (kJ/kg.)

จากสมดุลมวลของไอน้ำ จะได้

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

$$(1\text{-}BP).m_d.W_{eo} = (1\text{-}BP).m_d.(1\text{-}BF)W_{con} + (1\text{-}BP).m_d.BF.W_{mix} \quad (4.15)$$

เมื่อ W_{con} คือ อัตราส่วนความชื้นของอากาศที่ควบแน่น(kg. water vapor/kg. dry air)

BF คือ สัดส่วนของอากาศที่ไม่สัมผัส Cooling Coils (%)

จากสมดุลพลังงาน จะได้

$$(1-BP)m_d[C_aT_{eo} + W_{eo}(h_{fg} + C_vT_{eo})] = (1-BP)(BF)m_d[C_aT_{mix} + W_{mix}(h_{fg} + C_vT_{mix})] + (1-BP)(1-BF)m_d[C_aT_{con} + W_{con}(h_{fg} + C_vT_{con})] \quad (4.16)$$

เมื่อ T_{con} คือ อุณหภูมิควบแน่นของอากาศ ($^{\circ}C$)

การคำนวณคุณสมบัติของสารทำความเย็น R-22 มีดังต่อไปนี้

ที่สถานะของเหลวอิ่มตัว (Saturated Liquid Conditions)

$$h = 199.8 + 1.136T_{sat} + 0.002686T_{sat}^{2} \quad (4.17)$$

ที่สถานะของไอร้อนยิ่งยวด (Superheat Conditions)

$$h = 438.9 - 6.986\ln P + (-0.676+0.5342\ln P)(T - T_{sat}) \quad (4.18)$$

$$v = 41.77 - 10.04\ln P + (0.1871-0.03652\ln P)(T - T_{sat}) \quad (4.19)$$

เมื่อ $18<P<40$

และ $$h = 386.4 - 11.154\ln P + (0.6379+0.05315\ln P)(T - T_{sat}) \quad (4.20)$$

$$v = 153.16 - 65.249\ln P + (0.80308-0.38128\ln P)(T - T_{sat}) \quad (4.21)$$

เมื่อ $2<P<8$

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

สมการความดันของการระเหยและการควบแน่น

$$P = 4.805 + 0.1427T + 0.003092T^2 \quad (4.22)$$

สมการสำหรับอุณหภูมิควบแน่น

$$T = 114.08 - 7671.9v + 184150v^2 \quad (4.23)$$

เมื่อ v คือ ปริมาตรจำเพาะของสารทำความเย็น ($m^3/kg.$)

2). แบบจำลองเครื่องอัดไอ (Compressor Model)

สมการของแบบจำลองสำหรับเครื่องอัดไอชนิดลูกสูบ (Reciprocating Compressor) พัฒนาโดย Threlkeld (1972) จากรูปที่ 4.5 แผนภาพความสัมพันธ์ระหว่างความดันและเอนทัลปี พิจารณากระบวนการที่ 1-2

การคำนวณกำลังที่ให้กับเครื่องอัดไอ (P_{com}) มีค่าเท่ากับ

$$P_{com} = P_1 v_1 m_r [k/(k-1)][(P_2/P_1)^{(k-1)/k} - 1] \quad (4.24)$$

โดย

$$m_r = (PD).N.\eta_v / v_2 \quad (4.25)$$

$$\eta_v = [1 + c - c(P_2/P_1)^{1/k}] (v_2/v_1) \quad (4.26)$$

เมื่อ P_{com} คือ กำลังที่ให้กับเครื่องอัดไอ (kW.)

P_1 คือ ความดันของสารทำความเย็นที่เข้าเครื่องอัดไอ (kPa)

P_2 คือ ความดันของสารทำความเย็นที่ออกจากเครื่องอัดไอ (kPa)

v_1 คือ ปริมาตรจำเพาะของสารทำความเย็นที่เข้าเครื่องอัดไอ ($m^3/kg.$)

v_2 คือ ปริมาตรจำเพาะของสารทำความเย็นที่ออกจากเครื่องอัดไอ($m^3/kg.$)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

k คือ ดัชนีการอัด

PD คือ ปริมาตรของกระบอกสูบ (m^3)

N คือ จำนวนรอบของเครื่องอัดไอ (rpm)

c คือ ตัวประกอบระยะช่องว่างของกระบอกสูบ

η_v คือ ประสิทธิภาพเชิงปริมาตรของเครื่องอัดไอ

การคำนวณอุณหภูมิของสารทำความเย็นที่ออกจากเครื่องอัดไอ มีค่าเท่ากับ

$$T_2 = T_1(P_2/P_1)^{(k-1)/k} \quad (4.27)$$

เมื่อ T_1 คือ อุณหภูมิของสารทำความเย็นที่เข้าเครื่องอัดไอ ($^\circ C$)

T_2 คือ อุณหภูมิของสารทำความเย็นที่ออกจากเครื่องอัดไอ ($^\circ C$)

3). แบบจำลองเครื่องควบแน่นตัวใน (Internal Condenser Model)

แบบจำลองเครื่องควบแน่นตัวในพัฒนาจากสมการการถ่ายเทความร้อน ระหว่างวงจรของอากาศกับสารทำความเย็น จากรูปที่ 4.1 แผนผังแสดงส่วนประกอบของระบบบอบแห้งปั๊มความร้อนที่ทำการศึกษาในงานวิจัย พิจารณาปริมาตรควบคุมที่ 4 และรูปที่ 4.5 แผนภาพความสัมพันธ์ระหว่างความดันและเอนทัลปี พิจารณากระบวนการที่ 2-3 จากกฎข้อที่ 1 ทางเทอร์โมไดนามิก อัตราการถ่ายเทความร้อนที่ออกจากสารทำความเย็นจะเท่ากับอัตราการถ่ายเทความร้อนที่อากาศได้รับ

$$Q_{rc} = Q_{aci} \quad (4.28)$$

เมื่อ Q_{aci} คือ อัตราการถ่ายเทความร้อนของอากาศที่เครื่องควบแน่นตัวใน (kJ/h.)

Q_{rc} คือ อัตราการถ่ายเทความร้อนของสารทำความเย็นที่เครื่องควบแน่นตัวใน (kJ/h.)

โดย Q_{aci} และ Q_{rc} มีค่าเท่ากับ

$$Q_{aci} = m_d.[C_a(T_{co}-T_{ci}) + W_{ci}C_v(T_{co}-T_{ci})] \quad (4.29)$$

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

$$Q_{rc} = m_r (h_3 - h_2) \quad (4.30)$$

เมื่อ T_{ci} คือ อุณหภูมิของอากาศที่เข้าเครื่องควบแน่น ($^{\circ}C$)

W_{ci} คือ อัตราส่วนความชื้นของอากาศที่เข้าเครื่องควบแน่น (kg. water vapor/kg. dry air)

h_2 คือ เอนทัลปีจำเพาะของสารทำความเย็นที่เข้าเครื่องควบแน่น (kJ/kg.)

h_3 คือ เอนทัลปีจำเพาะของสารทำความเย็นที่ออกจากเครื่องควบแน่น (kJ/kg.)

นอกจากนี้อัตราการถ่ายเทความร้อนที่เครื่องควบแน่นตัวใน สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (4.31)

$$Q_{aci} = \frac{U_c A_c[(T_{ci} - T_3) - (T_{co} - T_3)]}{[\ln\{\frac{(T_{ci} - T_3)}{(T_{co} - T_3)}\}]} \quad (4.31)$$

เมื่อ U_c คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมของเครื่องควบแน่น (kW/m^2-K)

A_c คือ พื้นที่ที่มีการถ่ายเทความร้อนของเครื่องควบแน่น (m^2) (พื้นที่ของท่อรวมกับพื้นที่ครีบ)

T_3 คือ อุณหภูมิของสารทำความเย็นที่ออกจากเครื่องควบแน่น ($^{\circ}C$)

การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม (U_c) มีค่าเท่ากับ

$$U_c = \frac{1}{\frac{A_o}{A_i}.\frac{1}{h_i} + \frac{A_o \ln(r_o / r_i)}{2\pi k_c L} + \frac{1}{h_o}} \quad (4.32)$$

เมื่อ A_o คือ พื้นที่ที่มีการถ่ายเทความร้อนภายในท่อ (m^2)

A_i คือ พื้นที่ที่มีการถ่ายเทความร้อนภายนอกท่อ (m^2)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

h_i คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อนภายในท่อ (kW/m^2-K)

h_o คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อนภายนอกท่อ (kW/m^2-K)

r_i คือ รัศมีภายในของท่อ (m^2)

r_o คือ รัศมีภายนอกของท่อ (m^2)

k_c คือ สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของวัสดุที่ทำท่อ (kW/m^2-K)

ค่า h_i และ h_o พัฒนาโดย Rich (1973) คำนวณได้ดังสมการที่ (4.33) และ (4.34)

$$h_i = 0.026(k_l/D_c)(C\mu_l/k_l)^{1/3}(DcG_l/\mu_l)^{0.8} \quad (4.33)$$

$$h_o = 0.195G_aC_aPr_a^{-2/3}Re_a^{-0.35} \quad (4.34)$$

เมื่อ k_l คือ สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของสารทำความเย็นเหลว (kW/m^2-K)

D_c คือ เส้นผ่าศูนย์กลางของคอยล์ (m^2)

G_a คือ ความเร็วเชิงมวลของอากาศ (kg/m^2-s)

G_r คือ ความเร็วเชิงมวลของสารทำความเย็น (kg/m^2-s)

Pr_a คือ แพรนเทิลนัมเบอร์

Re_a คือ เรย์โนลด์นัมเบอร์

พิจารณาระบบปั๊มความร้อนทั้งระบบ จากสมดุลพลังงาน พบว่า อัตราการถ่ายเทความร้อนที่เครื่องควบแน่นตัวในและเครื่องควบแน่นตัวนอก จะต้องเท่ากับ อัตราการถ่ายเทความร้อนที่เครื่องทำระเหยรวมกับกำลังที่ให้กับเครื่องอัดไอ ดังสมการ (4.35)

$$Q_{aci} + Q_{ace} = Q_{ae} + P_{com} \quad (4.35)$$

เมื่อ Q_{ace} คือ อัตราการถ่ายเทความร้อนของอากาศที่เครื่องควบแน่นตัวนอก (kJ/h.)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ก
664.84
ม5631 ก
เลขหมู่.....
สำนักหอสมุด มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

4.2.3. แบบจำลองสมรรถนะของการอบแห้ง (Performance Model)

งานวิจัยนี้มีการศึกษาสมรรถนะของการอบแห้งที่สำคัญ 3 ตัว ได้แก่ เวลาที่ใช้ในการอบแห้ง (DT), อัตราการระเหยจำเพาะ (SMER) และอัตราการอบแห้ง (DR) โดยมีค่าดังต่อไปนี้

เวลาที่ใช้ในการอบแห้ง (Drying Time : DT) คือ เวลาที่ใช้ทั้งหมดในการอบแห้ง ซึ่งได้จากผลการคำนวณด้วยโปรแกรมของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

อัตราการอบแห้ง (Drying rate : DR)

อัตราการอบแห้ง = ปริมาณน้ำระเหยจากวัสดุ / เวลาที่ใช้ในการอบแห้ง (4.36)
มีหน่วยเป็น (kg. water/h.)

อัตราการระเหยจำเพาะ (Specific Moisture Extraction Rate : SMER)

อัตราการระเหยจำเพาะ = ปริมาณน้ำระเหยจากวัสดุ / ปริมาณพลังงานที่ใช้ (4.37)
มีหน่วยเป็น (kg. water/kW-h.)

4.3 ขั้นตอนการคำนวณในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

วิธีการคำนวณเพื่อหาค่าของตัวแปรที่ไม่ทราบค่าในงานวิจัยนี้ ใช้วิธีการแทนค่าอย่างต่อเนื่อง หรือ Successive Substitution โดยป้อนค่าที่เป็นเงื่อนไขเริ่มต้นและเงื่อนไขการทำงานของการอบแห้ง และมีการกำหนดสมมุติฐานของแบบจำลอง ดังต่อไปนี้

- ห้องอบแห้งมีการหุ้มฉนวนอย่างดี
- ผนังของชิ้นส่วน/อุปกรณ์, ท่อต่างๆของระบบปั๊มความร้อนและห้องอบแห้งเป็น Adiabatic คือ ไม่มีการถ่ายเทความร้อน
- อุณหภูมิและความเร็วของอากาศในห้องอบแห้งมีการกระจายแบบทั่วถึง ตลอดพื้นที่หน้าตัดของห้องอบแห้ง
- มีความสมดุลทางความร้อนระหว่างอากาศที่ใช้ในการอบแห้งกับวัสดุที่อบแห้ง
- ไม่มีความสมดุลทางความชื้นระหว่างอากาศที่ใช้ในการอบแห้งกับวัสดุที่อบแห้ง
- ไม่มีการอัดตัวของอากาศที่ใช้ในการอบแห้ง
- กำหนดให้สภาวะของอากาศแวดล้อมภายนอกคงที่ ตลอดการอบแห้ง
- อุณหภูมิเริ่มต้นของวัสดุและอุณหภูมิในห้องอบแห้ง มีค่าเท่ากับอุณหภูมิอบแห้ง

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

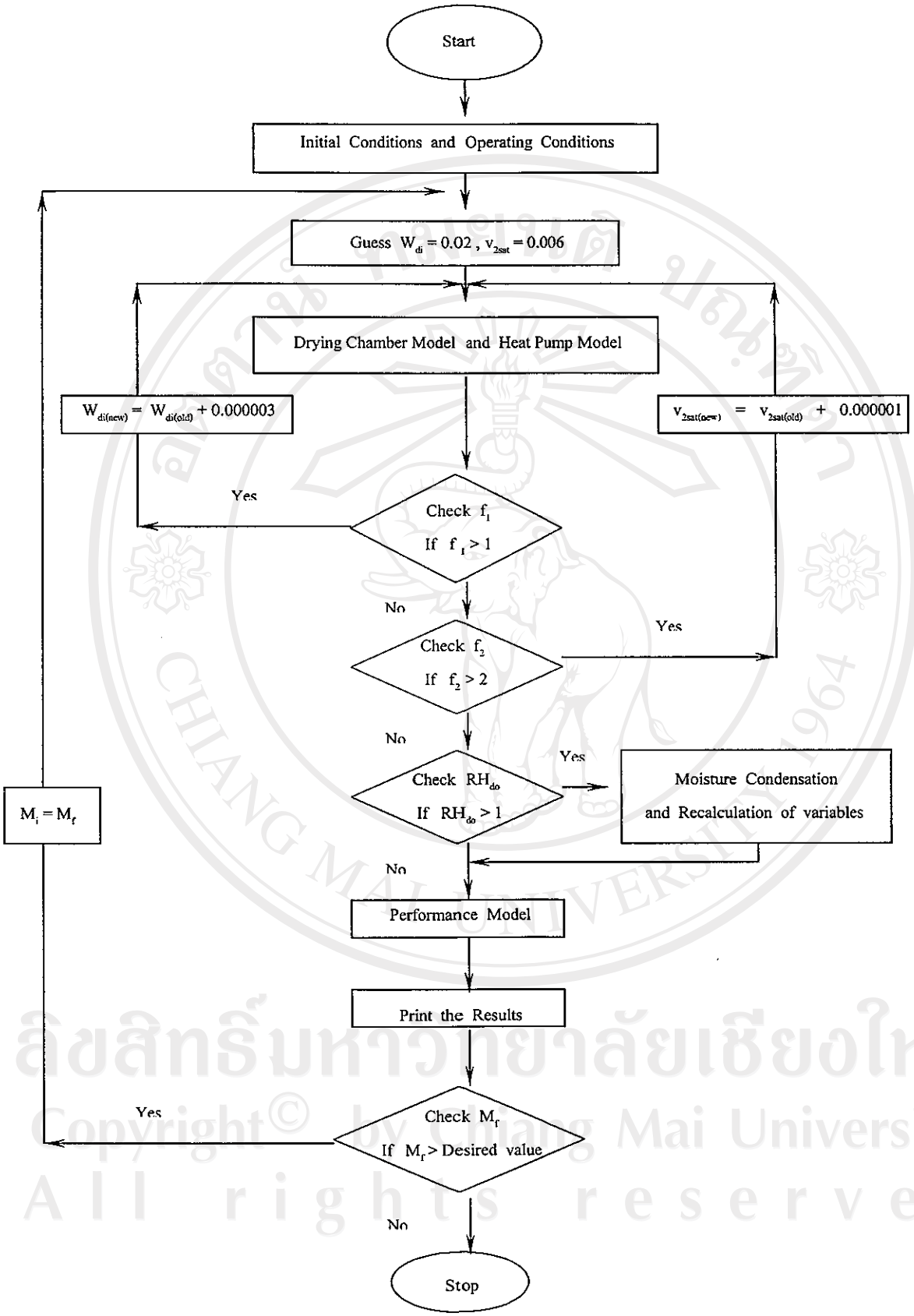
- อุณหภูมิอากาศอบแห้งสูงสุดที่พิจารณา สำหรับเครื่องอบแห้งปั๊มความร้อนในงานวิจัยซึ่งมีสารทำความเย็น คือ R-22 เท่ากับ 55 °C เนื่องจากการใช้อุณหภูมิอบแห้งสูงจะทำให้ระบบปั๊มความร้อนมีความดันสูงขึ้น อาจก่อให้เกิดความเสียหายต่อชิ้นส่วนและอุปกรณ์ต่างๆได้ นอกจากนี้การใช้อุณหภูมิอบแห้งสูงยังมีผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ เช่น ทำให้ผลิตภัณฑ์มีสีคล้ำ ผิวเหี่ยวย่น เป็นต้น

กำหนดให้เงื่อนไขเริ่มต้นและเงื่อนไขการทำงานของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ของการอบแห้งมะละกอแช่อิ่มแบบปั๊มความร้อน ที่ทำการศึกษาทั้งในระบบปิด, ระบบเปิด และระบบปิดบางส่วน มีดังต่อไปนี้

- ปริมาณมะละกอแช่อิ่มที่ทำการอบแห้ง (m_p)	100	kg.
- ความชื้นเริ่มต้นของมะละกอแช่อิ่ม (M_{in})	40%	(% dry-basis)
- ความชื้นสุดท้ายของมะละกอแช่อิ่มที่ต้องการ (M_p)	18%	(% dry-basis)
- ขนาดชิ้นมะละกอแช่อิ่ม (l)	1.2*1.2*1.2	cm.
- ช่วงเวลาที่พิจารณา (Δt)	0.025	h.
- ค่าความร้อนแฝงของการระเหยน้ำ	2502	kJ/kg.
- ความร้อนจำเพาะของอากาศ (C_a)	1.006	kJ/kg.-K
- ความร้อนจำเพาะของไอน้ำ (C_v)	1.88	kJ/kg.-K

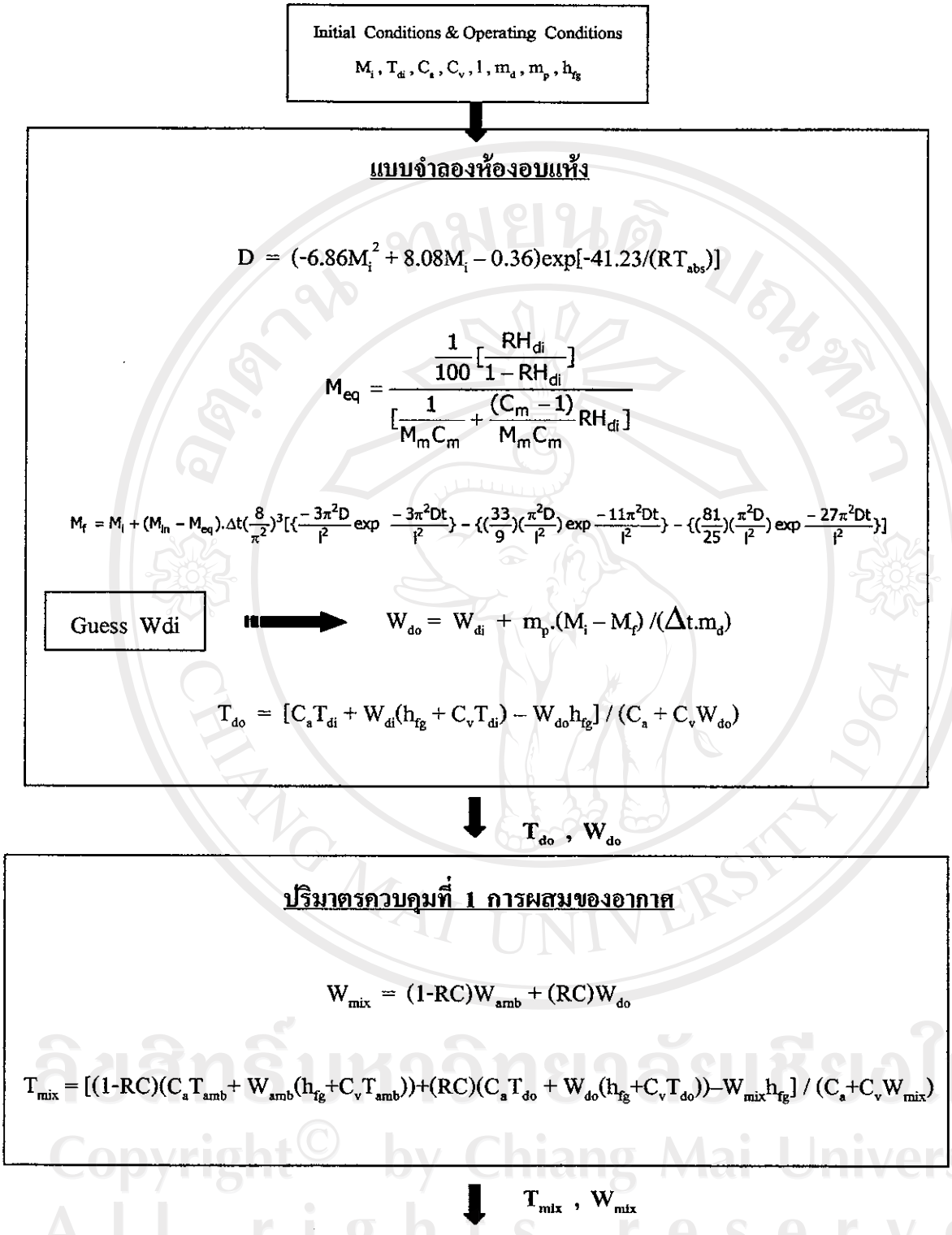
สามารถแสดงขั้นตอนการคำนวณได้ดังรูปที่ 4.6 แผนผังแสดงขั้นตอนการคำนวณของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และรูปที่ 4.7 แผนผังแสดงลำดับการคำนวณสมการในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ สำหรับการพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับการคำนวณโดยใช้โปรแกรม Visual Fortran Version 6.1 แสดงในภาคผนวก ก.

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved



รูปที่ 4.6 แผนผังแสดงขั้นตอนการคำนวณของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved



รูปที่ 4.7 แผนผังแสดงลำดับการคำนวณสมการในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

W_{mix}

ปริมาตรควบคุมที่ 3 การผสมของอากาศ

$$W_{eo} = (W_{di} + (BP)W_{mix}) / (1\text{-}BP)$$

W_{eo}

แบบจำลองเครื่องทำระเหย

$$W_{con} = (W_{eo} - (BF)W_{mix}) / (1\text{-}BF)$$

$$P_{vscon} = 101325W_{con} / (0.62189+W_{con})$$

$$T_{Isat} = -273.1+0.00100492(\log(P_{vscon})^4 + 0.00139291(\log(P_{vscon})^3 + 0.281515157(\log(P_{vscon})^2 + 7.3116211(\log(P_{vscon}) + 212.589$$

Superheat at 4 °C $\quad T_1 = T_{Isat} + 4$

$$P_1 = 4805 + 1427T_{Isat} + 0.003092T_{Isat}^2$$

$$h_1 = 386.4 - 11.154\ln P_1 + (0.6379+0.05315\ln P_1)(T_1 - T_{Isat})$$

$$v_1 = 153.16 - 65.249\ln P_1 + (0.80308-0.38128\ln P_1)(T_1 - T_{Isat})$$

$$Q_{ac} = (1\text{-}BP).m_d.[C_a(T_{eo}-T_{mix}) + (W_{eo}-W_{mix})h_{fg} + W_{mix}C_v(T_{eo}-T_{mix})]$$

Q_{ac} , P_1 , h_1

รูปที่ 4.7 แผนผังแสดงลำดับการคำนวณสมการในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (ต่อ)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

Q_{ae} , P_1 , h_1

แบบจำลองเครื่องอัดไอ

Guess v_{2sat} → $T_{2sat} = 114.08 - 7671.9v_{2sat} + 184150v^2_{2sat}$

$$P_2 = 4805 + 1427T_{2sat} + 0.003092T_{2sat}^2$$

$$T_2 = T_1(P_2/P_1)^{(k-1)/k}$$

$$T_3 = T_{2sat}$$

$$h_2 = 438.9 - 6.986\ln P_2 + (-0.676+0.5342\ln P_2)(T_2 - T_{2sat})$$

$$h_3 = 199.8 + 1.136T_3 + 0.002686T_3^2$$

$$v_2 = 41.77 - 10.04\ln P_2 + (0.1871-0.03652\ln P_2)(T_2 - T_{2sat})$$

$$\eta_v = [1 + c - c(P_2/P_1)^{1/k}] (v_2/v_1)$$

$$m_r = (PD).N.\eta_v /v_2$$

$$P_{com} = P_1.v_1.m_r[k/(k-1)][(P_2/P_1)^{(k-1)/k} - 1]$$

h_1 ↓ m_r , P_{com} , h_2 , h_3 , T_2 , T_3

แบบจำลองเครื่องทำระเหย (ต่อ)

$$h_4 = h_3$$

$$Q_{re} = m_r (h_1 - h_4)$$

↓ Q_{re}

รูปที่ 4.7 แผนผังแสดงลำดับการคำนวณสมการในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (ต่อ)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

T_{eo} , T_{mix} , h_2 , h_3 , Q_{ac}

แบบจำลองเครื่องควบแน่น

$$T_{ci} = [(1-BP)(C_a T_{co} + W_{eo}(h_{fg}+C_v T_{co}))+(BP)(C_a T_{mix} + W_{mix}(h_{fg}+C_v T_{mix}))-W_{di}h_{fg}] / (C_a+C_v W_{di})$$

$$Q_{rc} = m_r (h_3 - h_2)$$

$$Q_{rc} = Q_{ac}$$

$$h_i = 0.026(k_l/D_c)(C\mu_l/k_l)^{1/3}(DcG_r/\mu_l)^{0.8}$$

$$h_o = 0.195 G_a C_a Pr_a^{-2/3} Re_a^{-0.35}$$

$$U_C = \frac{1}{\frac{A_o}{A_i}\cdot\frac{1}{h_i} + \frac{A_o \ln(r_o/r_i)}{2\pi k_c L} + \frac{1}{h_o}}$$

$$Q_{aci} = \frac{U_c A_c[(T_{ci} - T_3) - (T_{co} - T_3)]}{[\ln\{\frac{(T_{ci} - T_3)}{(T_{co} - T_3)}\}]}$$

$$Q_{ace} = Q_{ac} - Q_{aci}$$

Q_{aci} , Q_{ace}

ปริมาตรควบคุมที่ 5 พัดลม

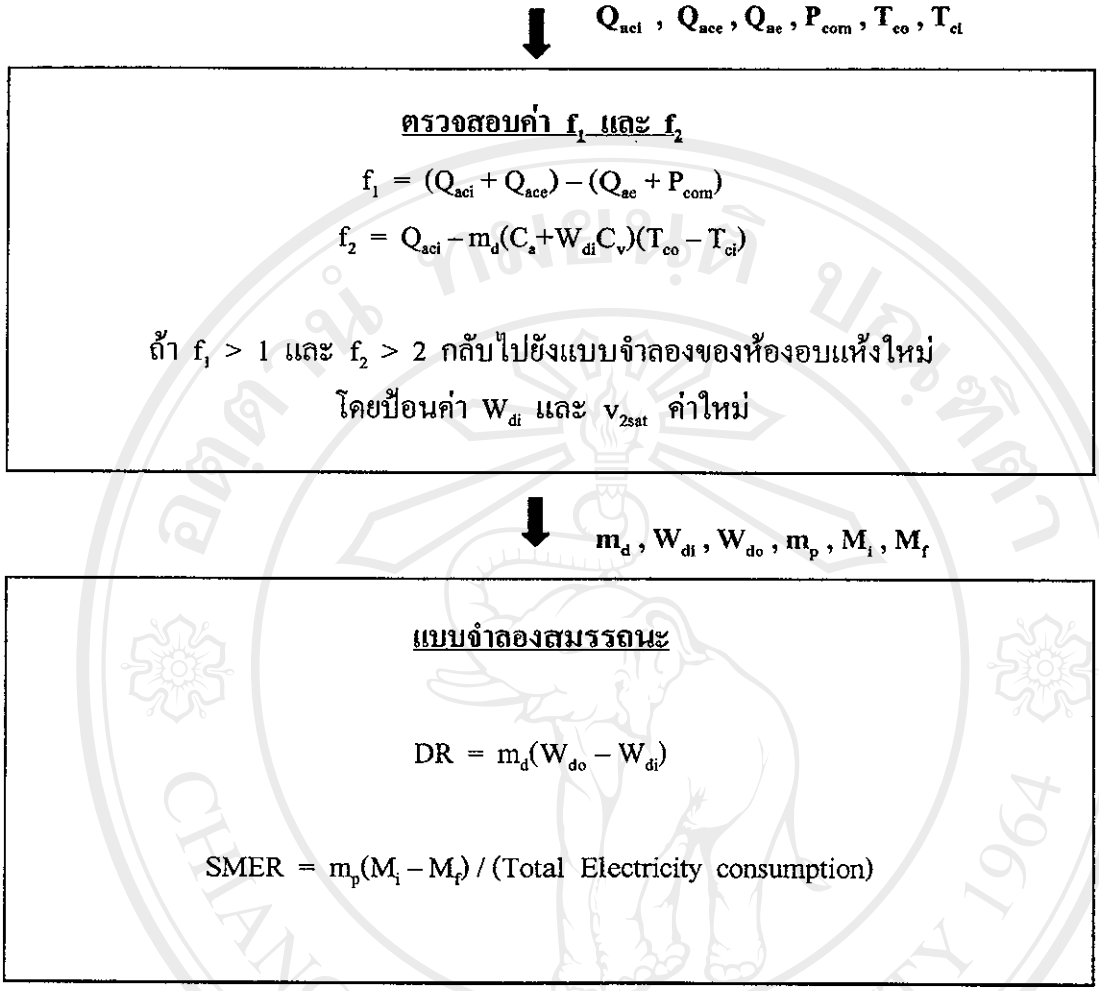
$$W_s = (\Delta P.m_d) / (\rho_D . \eta_F)$$

$$T_{co} = (T_{di} - W_s) / [m_d(C_a + W_{di}C_v)]$$

T_{eo}

รูปที่ 4.7 แผนผังแสดงลำดับการคำนวณสมการในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (ต่อ)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved



รูปที่ 4.7 แผนผังแสดงลำดับการคำนวณสมการในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (ต่อ)

จากรูปที่ 4.6 แผนผังแสดงขั้นตอนการคำนวณของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และรูปที่ 4.7 แผนผังแสดงลำดับการคำนวณสมการในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เริ่มต้นด้วยการป้อนค่าเงื่อนไขเริ่มต้นและเงื่อนไขการทำงานของการอบแห้งในแบบจำลอง พิจารณาสมการของแบบจำลองพบว่ามีตัวแปรที่ไม่ทราบค่าจำนวน 2 ตัวแปร คือ อัตราส่วนความชื้นของอากาศที่เข้าห้องอบแห้ง (W_{di}) และปริมาตรจำเพาะของสารทำความเย็นที่ออกจากเครื่องอัดไอ (v_{2sat}) ดังนั้นจึงทำการหาค่าของตัวแปรดังกล่าวด้วยวิธีการแทนค่าอย่างต่อเนื่อง โดยการสมมุติค่าเริ่มต้นของตัวแปรทั้งสอง จากนั้นทำการคำนวณตามลำดับสมการซึ่งจะสามารถหาค่าตัวแปรอื่นๆได้ตามลำดับการคำนวณ และตรวจสอบค่า f_1 และ f_2 หากยังไม่อยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ต้องป้อนค่าของตัวแปรที่สมมุติขึ้น

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ใหม่กลับเข้าไปในแบบจำลอง คำนวณจนกระทั่งได้ค่า f_1 และ f_2 ในช่วงที่ยอมรับได้ ทำการคำนวณจนกระทั่งค่าความชื้นสุดท้ายของมะละกอแช่อิ่มลดลงถึงค่าความชื้นสุดท้ายที่ต้องการ จึงสิ้นสุดการคำนวณ

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved