

บทที่ 3

วิธีดำเนินงานวิจัย

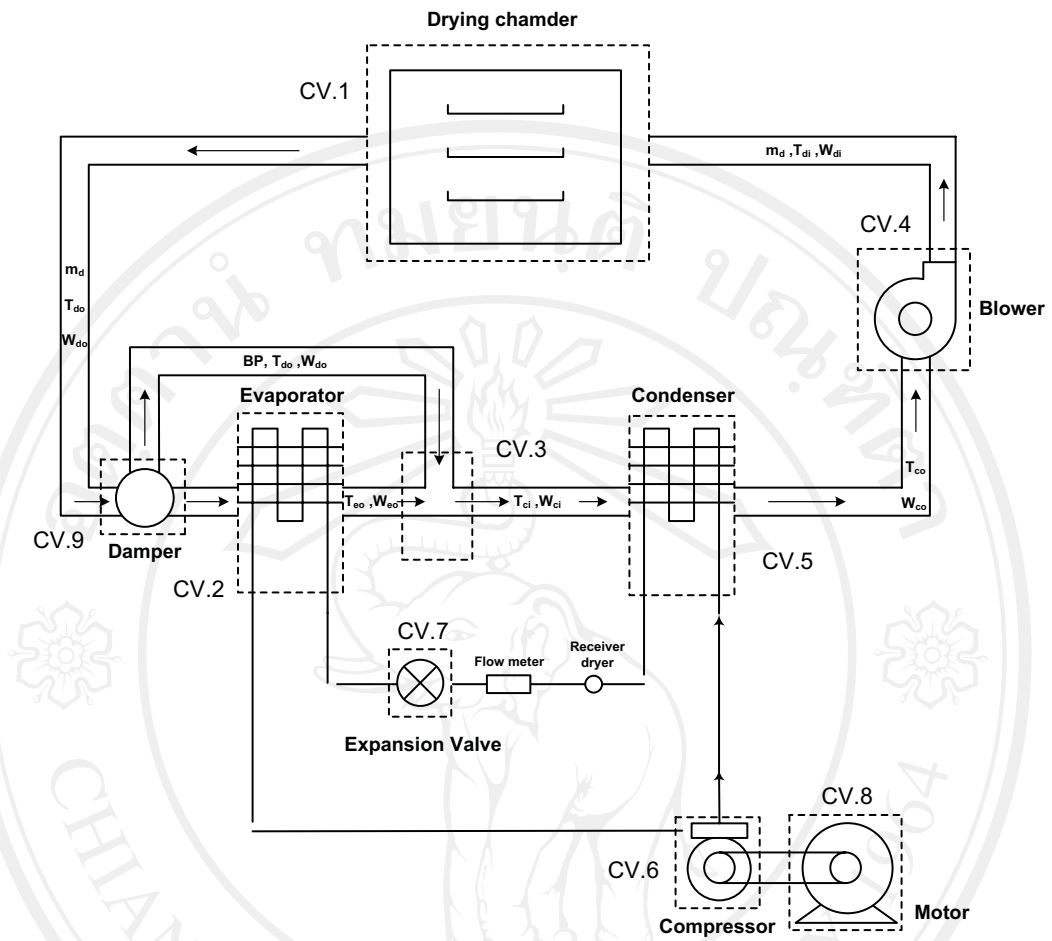
งานวิจัยนี้เป็นการเปรียบเทียบสมรรถนะของการอบแห้งและประสิทธิภาพการใช้พลังงานในการอบแห้งของวิธีการควบคุมอุณหภูมิอบแห้ง สองแบบด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยใช้ผลการทดลองเป็นการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง การดำเนินการวิจัยประกอบด้วยหัวข้อดังต่อไปนี้

1. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการอบแห้งของเครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อน
2. การจำลองสภาพการอบแห้ง
3. การทดลองและเก็บข้อมูลเพื่อนำมาเปรียบเทียบกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

3.1. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการอบแห้งของเครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อน

ส่วนประกอบต่างๆ ของ ระบบ เครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อนที่ศึกษา ประกอบด้วยชิ้นส่วนหลักๆ ดังรูปที่ 3.1 คือ ห้องอบแห้ง (CV.1) เครื่องทำระเหย (CV.2) จุดต่อผสมกระแสอากาศร้อนและกระแสอากาศเย็น (CV.3) พัดลม (CV.4) เครื่องควบแน่น (CV.5) เครื่องอัด (CV.6) วาล์วขยาย ความดัน (CV.7) มอเตอร์ (CV.8) และวาล์วปรับสัดส่วนอากาศข้ามเครื่องทำระเหย (CV.9)

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการอบแห้งของเครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อน ประกอบด้วย 3 แบบจำลองหลัก คือ แบบจำลองของห้องอบแห้ง (Drying Chamber Model), แบบจำลองของระบบปั๊มความร้อน (Heat Pump Model) และ แบบจำลองสมรรถนะและประสิทธิภาพการใช้พลังงานการอบแห้ง (Performance Model) โดยมีสมการคณิตศาสตร์ที่เกี่ยวข้องในแบบจำลองดังนี้



รูปที่ 3.1 แผนผังวงจรลมร้อนและวงจรสารทำงานที่ใช้สำหรับเครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อน

3.1.1 ปริมาตรควบคุมที่ 1 (CV.1)

แบบจำลองห้องอบแห้ง (Drying chamber model) ในงานวิจัยนี้ห้องอบแห้งมีลักษณะเป็นห้องอบแห้งแบบตู้ และวัสดุที่ใช้ศึกษาคือ กล้วยน้ำว่า การคำนวณหาความชื้นของกล้วยน้ำว่า ที่เวลาใดๆ หากจากสมการจลนศาสตร์ของการอบแห้งแบบกึ่งทฤษฎีตามสมการ (3.1) และ (3.2) ทำการอนุพันธ์เทียบกับเวลา และใช้วิธี Finite difference สามารถคำนวณได้ดังสมการ (3.1)

$$MR = \exp(-kt) \quad (3.1)$$

และ

$$MR = \frac{(M - M_{eq})}{M_{in} - M_{eq}} \quad (3.2)$$

เมื่อ	MR	คือ อัตราส่วนความชื้นของวัสดุ
	M_{in}	คือ ความชื้นเริ่มต้นของวัสดุ , เศษส่วนมาตรฐานแห้ง
	M_{eq}	คือ ความชื้นสมดุลของวัสดุ, เศษส่วนมาตรฐานแห้ง
	k	คือ ค่าคงที่ของการอบแห้ง, h^{-1}
	t	คือ เวลา, h

สำหรับค่าคงที่ของการอบแห้ง จากการศึกษาการ อบแห้งกล้วยน้ำว้าของ จุ ทารัตน์ บุญปัญญา และ ศิวะ อัจฉริยวิริยะ (2553) ได้แสดงความสัมพันธ์ในรูปแบบสมการ ความสัมพันธ์กับอุณหภูมิในช่วง 50-85°C

$$k = 0.02T - 0.77RH + 1.35 \times 10^{-16} T RH - 0.34 \quad (3.3)$$

เมื่อสมดุลมวลที่ห้องอบแห้งจะได้ว่ามวลน้ำที่เพิ่มขึ้นในอากาศชื้นเท่ากับมวล ของน้ำที่ระเหยออกจากกล้วยน้ำว้าสามารถหาอัตราความชื้นของอากาศออกจากห้อง อบแห้ง (W_{do}) ได้ดังสมการที่ (3.4)

$$\Delta t \cdot \dot{m}_d (W_{do} - W_{di}) = \dot{m}_p (M_i - M_f) \quad (3.4)$$

เมื่อ	W_{do}	คือ อัตราความชื้นของอากาศออกจากห้องอบแห้ง, $kg_{water}/kg_{dry air}$
	W_{di}	คือ อัตราส่วนความชื้นของอากาศก่อนเข้าห้องอบแห้ง, $kg_{water}/kg_{dry air}$
	$\dot{m}_d$	คือ อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ, $kg_{dry air}/h$
	$\dot{m}_p$	คือ มวลของวัสดุแห้ง, $kg_{dry product}$

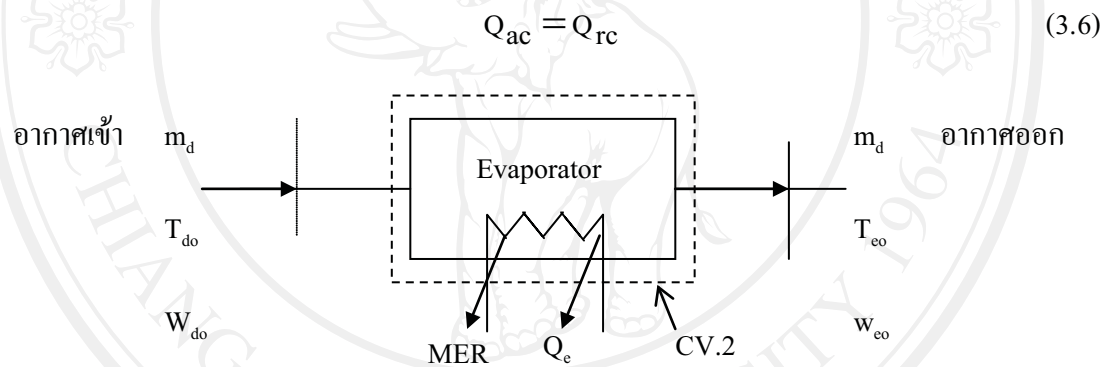
ในการทำนองเดียวกันเมื่อสมดุลพลังงานที่ห้องอบแห้งโดยกำหนดสมมุติฐานคือมี การหุ้มฉนวนที่ผนังห้องอบแห้งอย่างดี ไม่มีการอัดอากาศเข้าที่ห้องอบแห้งทำให้ไม่มีการ ยุบตัวของอากาศ และอุณหภูมิเริ่มต้นของกล้วยน้ำว้าและเครื่องอบแห้งเท่ากับอุณหภูมิ อบแห้งสามารถหาอุณหภูมิออกจากห้องอบแห้ง (T_{do}) ได้ดังสมการที่ (3.5)

$$\dot{m}_d C_a T_{di} + \dot{m}_d W_{di} h_{fg} + \dot{m}_d W_{di} C_v T_{di} = \dot{m}_d C_a T_{do} + \dot{m}_d W_{do} h_{fg} + \dot{m}_d W_{do} C_v T_{do} \quad (3.5)$$

เมื่อ	T_{di}	คือ อุณหภูมิก่อนเข้าห้องอบแห้ง, °C
	T_{do}	คือ อุณหภูมิออกจากห้องอบแห้ง, °C
	C_a	คือ ค่าความร้อนจำเพาะของอากาศ, kJ/kg °C
	h_{fg}	คือ ค่าความร้อนแฝงของการระเหยของน้ำ, kJ/kg
	C_v	คือ ค่าความร้อนแฝงจำเพาะของไอน้ำในอากาศ, kJ/kg °C

3.1.2 ปริมาตรควบคุมที่ 2 (CV.2)

แบบจำลองเครื่องทำระเหย (Evaporator model) พัฒนาจากสมการการถ่ายเทความร้อนระหว่างวงจรอากาศกับวงจรสารทำงาน จากสมดุลพลังงานอัตราการถ่ายเทความร้อนที่ออกจากอากาศ (Q_{ac}) จะเท่ากับอัตราการถ่ายเทความร้อนที่สารทำงาน (Q_{rc}) ได้รับซึ่ง Q_{rc} หาได้จากสมการ (2.19)



รูป 3.2 ปริมาตรควบคุมที่ 2 มวลของอากาศไหลผ่านและการถ่ายเทความร้อนที่เครื่องทำระเหย

จากรูป 3.2 พิจารณาปริมาตรควบคุมที่ 2 ใช้สมดุลมวลของไอน้ำ จะได้

$$(1 - BP) m_d W_{eo} = (1 - BP) m_d (1 - BF) W_{con} + (1 - BP) m_d BF W_{do} \quad (3.7)$$

จากสมดุลพลังงาน จะได้

$$(1 - BP) m_d [C_a T_{eo} + W_{eo} (h_{fg} + C_v T_{eo})] = (1 - BP) BF m_d [C_a T_f + W_f (h_{fg} + C_v T_{do})] + (1 - BP)(1 - BF) m_d [C_a T_{con} + W_{con} (h_{fg} + C_v T_{con})] \quad (3.8)$$

เมื่อ	BP	คือ อัตราส่วนอากาศไหลข้ามเครื่องทำระเหย, %
	W_{eo}	คือ อัตราความชื้นของอากาศออกจากเครื่องทำระเหย, $\text{kg}_{\text{water}}/\text{kg}_{\text{dry air}}$
	W_{con}	คือ อัตราส่วนความชื้นของอากาศที่ควบแน่น, $\text{kg}_{\text{water}}/\text{kg}_{\text{dry air}}$
	BF	คือ สัดส่วนของอากาศที่ไม่สัมผัส Cooling coils, %
	T_{con}	คือ อุณหภูมิอิ่มตัวของไอน้ำ, °C
	T_{eo}	คือ อุณหภูมิออกจากเครื่องทำระเหย, °C

3.1.3 ปริมาตรควบคุมที่ 3 (CV.3)

แบบจำลองของอากาศผสม ซึ่งเกิดจากการผสมกันของอากาศที่ออกจากห้องอบแห้ง ผสมกับอากาศที่ออกจากเครื่องทำระเหยจากสมดุลมวลของไอน้ำในอากาศ

$$(1 - BP)W_{eo} = W_{di} - BP(W_{do}) \quad (3.9)$$

และจากสมดุลพลังงานสามารถหาอุณหภูมิอากาศก่อนเข้าเครื่องควบแน่น (T_{ci}) จากสมการ (3.8)

$$T_{ci} = \frac{(1 - BP)[C_a T_{eo} + W_{eo}(h_{fg} + C_v T_{eo})] + BP[C_a T_{do} + W_{do}(h_{fg} + C_v T_{do})] - W_{di} h_{fg}}{C_a + W_{di} C_v} \quad (3.10)$$

3.1.4 ปริมาตรควบคุมที่ 4 (CV.4)

เป็นแบบจำลองของอากาศที่เข้าและออกจากพัดลมจากสมดุลพลังงาน การเปลี่ยนแปลงเอนทัลปีของอากาศเข้าและออกจากพัดลม จะเท่ากับกำลังงานเพลลาที่ให้กับพัดลม จะได้

$$m_d (C_a + W_{di} C_v)(T_{di} - T_{co}) = P_{blower} \quad (3.11)$$

เมื่อ P_{blower} คือ กำลังงานเพลลาที่ให้กับพัดลม, kJ/h

3.1.5 ปริมาตรควบคุมที่ 5 (CV.5)

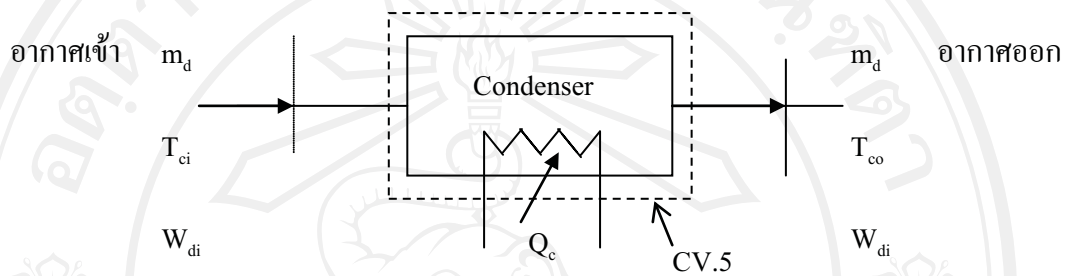
เป็นแบบจำลองเครื่องควบแน่นพัฒนาจากสมการการถ่ายเทความร้อน ระหว่างวงจรกระแสน้ำกับวงจรสารทำงาน จากสมดุลพลังงานอัตราการถ่ายเทความร้อนที่ออกจากสารทำงาน (Q_{rc}) จะเท่ากับอัตราการถ่ายเทความร้อนที่อากาศ (Q_{ac}) ได้รับ

$$Q_{rc} = Q_{ac} \quad (3.12)$$

ซึ่ง Q_{rc} สามารถหาได้จากสมการ (2.1 9) และจากรูป 3.3 Q_{ac} หาได้โดยจากสมดุลพลังงานตามสมการ(3.11)

$$Q_{aci} = \frac{m_d C_a (T_{co} - T_{ci}) + m_d W_{di} C_v (T_{co} - T_{ci})}{3600} \quad (3.13)$$

เมื่อ Q_{aci} คือ อัตราการถ่ายเทความร้อนให้อากาศที่เครื่องควบแน่น, kW



รูป 3.3 ปริมาตรควบคุมที่ 5 ความร้อนที่อากาศได้รับจากเครื่องควบแน่น

นอกจากนี้อัตราการถ่ายเทความร้อนที่เครื่องควบแน่น สามารถคำนวณได้จากสมการ (3.14)

$$Q_{aci} = \frac{U_c A_c [(T_{2s} - T_{ci}) - (T_3 - T_{co})]}{\ln[(T_{2s} - T_{ci})/(T_3 - T_{co})]} \quad (3.14)$$

เมื่อ U_c คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมของเครื่องควบแน่น, kW/m²-K

A_c คือ พื้นที่ที่มีการถ่ายเทความร้อนของเครื่องควบแน่น, m²

T_{2s} คือ อุณหภูมิของสารทำงานสภาพไออิ่มตัวก่อนเข้าเครื่องควบแน่น, °C

T_3 คือ อุณหภูมิของสารทำงานออกจากเครื่องควบแน่น, °C

การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม หาได้จาก

$$U_c = \frac{1}{\frac{A_o}{A_i} \frac{1}{h_i} + \frac{A_o \ln(r_o/r_i)}{2\pi k_c L} + \frac{1}{h_o}} \quad (3.15)$$

เมื่อ A_o คือ พื้นที่ที่มีการถ่ายเทความร้อนภายนอกท่อ, m²

A_i คือ พื้นที่ที่มีการถ่ายเทความร้อนภายในท่อ, m²

h_i คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อนภายในท่อ, kW/m²-K

h_o คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อนภายนอกท่อ, kW/m²-K

r_i	คือ รัศมีภายในของท่อ, m
r_o	คือ รัศมีภายนอกของท่อ, m
k_c	คือ สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของวัสดุที่ทำท่อ, $\text{kW/m}^2\text{-K}$
L	คือ ความยาวของท่อ, m

Ackers et al. (1959) ได้เสนอสมการสัมประสิทธิ์การพาความร้อนภายในท่อสำหรับเครื่องควบแน่น

$$h_i = 0.026(k_i/D)(C\mu_i/k_i)^{1/3}(DG_r/\mu_i)^{0.8} \quad (3.16)$$

Rich(1973) ได้เสนอสมการสัมประสิทธิ์การพาความร้อนภายนอกท่อสำหรับกลุ่มท่อที่มีครีบบนแผ่นเรียบ

$$h_o = 0.195G_a C_a Pr_a^{-2/3} Re_a^{-0.35} \quad (3.17)$$

เมื่อ	k_i	คือ สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของสารทำงาน, $\text{kW/m}^2\text{-K}$
	D	คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ, m
	G_a	คือ ความเร็วเชิงมวลของอากาศ, $\text{kg/m}^2\text{-s}$
	G_r	คือ ความเร็วเชิงมวลของสารทำงาน, $\text{kg/m}^2\text{-s}$
	Pr_a	คือ แปรนเทิลนัมเบอร์ของอากาศ
	Re_a	คือ เรย์โนลด์นัมเบอร์ของอากาศ

พิจารณาระบบปั๊มความร้อนทั้งระบบ จากสมดุลพลังงาน จะได้ดังสมการ (3.18)

$$Q_c = Q_e + P_{\text{comp}} \quad (3.18)$$

3.1.6 ปริมาตรควบคุมที่ 6 (CV.6)

เป็นแบบจำลองเครื่องอัดไอชนิดลูกสูบ สามารถคำนวณหากำลังงานที่ให้แก่เครื่องอัดจากวงจรสารทำความเย็นตามสมการ ที่พัฒนาโดย Threlkeld (1972) จากรูป 2.2 แผนภูมิความดัน-เอนทัลปี ของวัฏจักรปั๊มความร้อนแบบอัดไอทางอุดมคติ พิจารณากระบวนการที่ 1-2

การคำนวณกำลังงานที่ให้กับเครื่องอัดไอ (P_{com}) มีค่าเท่ากับ

$$P_{com} = P_1 v \dot{m}_r [k/(k-1)] [(P_2/P_1)^{(k-1)/k} - 1] \quad (3.19)$$

โดย $\dot{m}_r = (PD).N.\eta_v/v_2 \quad (3.20)$

$$\eta_v = [1+c-c(P_2/P_1)^{1/k}](v_2/v_1) \quad (3.21)$$

เมื่อ	P_{com}	คือ กำลังงานที่ให้กับเครื่องอัดไอ, kW
	k	คือ ดัชนีการอัด
	P_1	คือ ความดันของสารทำงานที่เข้าเครื่องอัดไอ, kPa
	P_2	คือ ความดันของสารทำงานที่ออกจากเครื่องอัดไอ, kPa
	v_1	คือ ปริมาตรจำเพาะของสารทำงานที่เข้าเครื่องอัดไอ, m^3/kg
	v_2	คือ ปริมาตรจำเพาะของสารทำงานที่ออกจากเครื่องอัดไอ, m^3/kg
	PD	คือ ปริมาตรของกระบอกสูบ, m^3
	c	คือ ตัวประกอบระยะช่องว่างของกระบอกสูบ
	η_v	คือ ประสิทธิภาพเชิงปริมาตรของ เครื่องอัด
	N	คือ จำนวนรอบเครื่องอัดไอ, rpm

การคำนวณอุณหภูมิของสารทำงานที่ออกจากเครื่องอัดไอ มีค่าเท่ากับ

$$T_2 = T_1 \times \frac{P_2^{(k-1)/k}}{P_1} \quad (3.22)$$

เมื่อ	T_1	คือ อุณหภูมิของสารทำงานที่เข้าเครื่องอัดไอ, °C.
	T_2	คือ อุณหภูมิของสารทำงานที่ออกจากเครื่องอัดไอ, °C

3.1.7 ปริมาตรควบคู่ที่ 7 (CV.7)

เป็นแบบจำลองวาล์วขยายตัว ซึ่งสามารถคำนวณได้ตามสมการ (2.16)

3.1.8 การคำนวณคุณสมบัติของสารทำงาน R-134a

Cleland, A. C. (1992) ได้เสนอสมการที่ใช้ในการคำนวณคุณสมบัติของสารทำงาน

R-134a ดังต่อไปนี้

ก. ความดันและอุณหภูมิที่สถานะไออิ่มตัว (Vapour pressure and saturation temperature)

$$P_{\text{sat}} = \exp \left(21.51297 - \frac{2200.9809}{246.61 + T_{\text{sat}}} \right) \quad (3.23)$$

$$T_{\text{sat}} = \left(\frac{-2200.9809}{\ln(P_{\text{sat}}) - 21.51297} \right) - 246.61 \quad (3.24)$$

range of applicability ($-40^{\circ}\text{C} \leq T_{\text{sat}} \leq 70^{\circ}\text{C}$)

เมื่อ P_{sat} คือ ความดันที่สถานะไออิ่มตัว , Pa

T_{sat} คือ อุณหภูมิที่สถานะไออิ่มตัว , $^{\circ}\text{C}$

ข. เอนทัลปีสถานะของเหลวอิ่มตัว (Liquid enthalpy, h_L)

$$h_L = 50.952 + 1335.29T_L + 1.70650T_L^2 + 7.6741 \times 10^{-3}T_L^3 \quad (3.25)$$

range of applicability ($-40^{\circ}\text{C} \leq T_L \leq 70^{\circ}\text{C}$)

เมื่อ T_L คือ อุณหภูมิในสถานะที่เป็นของเหลว, $^{\circ}\text{C}$

ค. เอนทัลปีสถานะที่เป็นไออิ่มตัว (Saturated vapour enthalpy, h_{i1})

$$h_{i1} = 249455 + 606.163T_{\text{sat}} - 1.05644T_{\text{sat}}^2 - 1.82426 \times 10^{-2}T_{\text{sat}}^3 \quad (3.26)$$

range of applicability ($-40^{\circ}\text{C} \leq T_{\text{sat}} \leq 70^{\circ}\text{C}$)

ง. เอนทัลปีสถานะที่เป็นซูเปอร์ฮีท (Superheated vapour enthalpy, h_{i2})

$$T_s = T_s - T_{\text{sat}} \quad (3.27)$$

$$h_{i2} = h_{i1} (1 + 3.48186 \times 10^{-3} \Delta T_s + 1.6886 \times 10^{-6} \Delta T_s^2 + 9.2642 \times 10^{-6} \Delta T_s T_{\text{sat}} - 7.698 \times 10^{-8} \Delta T_s^2 T_{\text{sat}} + 1.7070 \times 10^{-7} \Delta T_s T_{\text{sat}}^2 - 1.2130 \times 10^{-9} \Delta T_s^2 T_{\text{sat}}^2) \quad (3.28)$$

range of applicability ($-40^{\circ}\text{C} \leq T_{\text{sat}} \leq 70^{\circ}\text{C}$) and $\Delta T_s \leq 60^{\circ}\text{C}$

เมื่อ T_s คือ อุณหภูมิสถานะที่เป็นซูเปอร์ฮีท , $^{\circ}\text{C}$

จ. ปริมาตรจำเพาะสถานะที่เป็นไออิ่มตัว(Saturated vapour –specific volume, v_v)

$$v_v = \exp \left[-12.4539 + \frac{2669.0}{273.15 + T_{sat}} \right] \times (1.01357 + 1.06736 \times 10^{-3} T_{sat} - 9.2532 \times 10^{-6} T_{sat}^2 - 3.2192 \times 10^{-7} T_{sat}^3) \quad (3.29)$$

range of applicability ($-40^\circ\text{C} \leq T_{sat} \leq 70^\circ\text{C}$)

ฉ. ปริมาตรจำเพาะสถานะที่เป็นซูเปอร์ฮีท(Superheated vapour-specific volume, v_s)

$$v_s = v_v (1 + 4.7881 \times 10^{-3} T_s - 3.965 \times 10^{-6} T_s^2 + 2.5817 \times 10^{-5} T_s T_{sat} - 1.8506 \times 10^{-7} T_s^2 T_{sat} + 8.5739 \times 10^{-7} T_s T_{sat}^2 - 5.401 \times 10^{-9} T_s^2 T_{sat}^2) \quad (3.30)$$

range of applicability ($-40^\circ\text{C} \leq T_{sat} \leq 70^\circ\text{C}$) and $\Delta T_s \leq 60^\circ\text{C}$

3.1.9 แบบจำลองคุณสมบัติอากาศชื้น

ก. การคำนวณหาอัตราส่วนความชื้นของอากาศ

$$W = \frac{0.62189 P_v}{101.325 - P_v} \quad (3.31)$$

เมื่อ W คือ อัตราส่วนความชื้นของอากาศ, $\text{kg}_{\text{water}}/\text{kg}_{\text{dry air}}$

P_v คือ ความดันไอน้ำ, kPa

ข. การคำนวณค่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ

$$RH = \frac{P_v}{P_{vs}} \quad (3.32)$$

เมื่อ P_{vs} คือ ความดันไอน้ำอิ่มตัว, kPa

ค. การคำนวณความดันไอน้ำอิ่มตัว

$$p_{vs} = \exp \left[\begin{aligned} & \frac{-7511.52}{(T + 273)} + 89.6312 + 0.0239989(T + 273) - 1.1654551 * 10^{-5} (T + 273)^2 \\ & - 1.2810336 * 10^{-8} (T + 273)^3 + 2.09984 * 10^{-11} (T + 273)^4 \\ & - 12.150799 \ln(T + 273) \end{aligned} \right] \quad (3.33)$$

3.1.10 แบบจำลองสมรรถนะและประสิทธิภาพของการอบแห้ง

งานวิจัยนี้ศึกษา สมรรถนะ และประสิทธิภาพ ของการอบแห้ง 2 ระบบ โดยได้แสดงรายละเอียดของตามหัวข้อต่อไปนี้

ก. สมรรถนะการอบแห้ง พิจารณาจาก อัตราการอบแห้ง (Drying Rate, DR)

$$DR = \frac{\text{ปริมาณน้ำที่ระเหยออกจากวัสดุ}}{\text{เวลาที่ใช้ในการอบแห้ง}} \quad (3.34)$$

ข. ประสิทธิภาพการใช้พลังงานการอบแห้ง พิจารณาจาก ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (Specific Energy Consumption, SEC) และ อัตราการดึงน้ำออกจำเพาะ (Specific moisture extraction rate, SMER)

$$SMER = \frac{\text{ปริมาณน้ำที่ระเหยออกจากวัสดุ}}{\text{ความสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าของเครื่องอบแห้ง}} \quad (3.35)$$

$$SEC = \frac{\text{ความสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าของเครื่องอบแห้ง}}{\text{ปริมาณน้ำที่ระเหยออกจากวัสดุ}} \quad (3.36)$$

ค. สมรรถนะเครื่องอบแห้ง พิจารณาจากค่าสมรรถนะเครื่องอบแห้งปั๊มความ (COP_{HPD})

$$COP_{HPD} = \frac{Q_{aci}}{P_{comp.} + P_{blower}} \quad (3.37)$$

เมื่อ

$P_{comp.}$

คือ กำลังงานที่ให้แก่อุปกรณ์อัดไอ, kW

P_{blower}

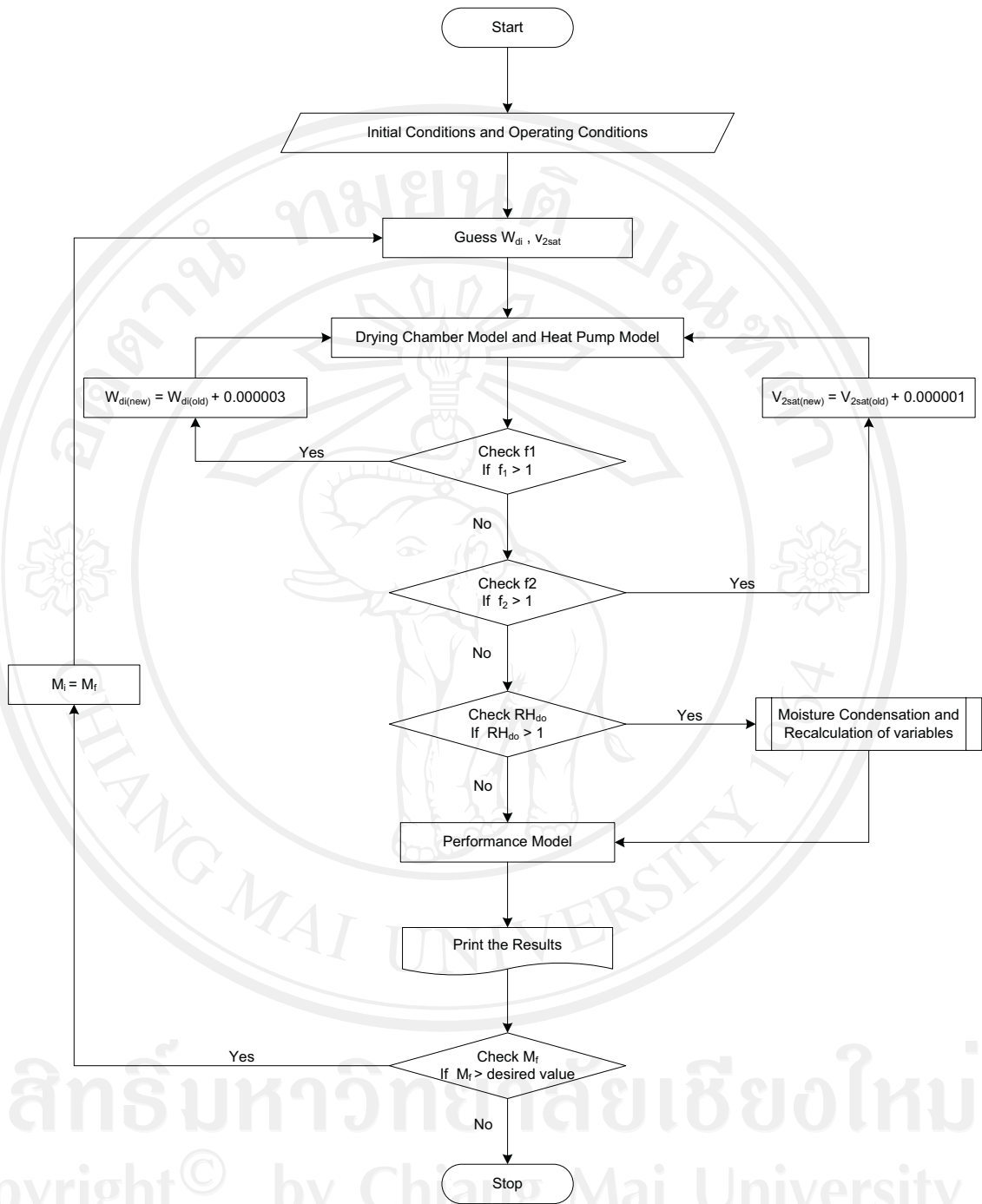
คือ กำลังงานเพลลาที่ให้กับพัดลม, kW

3.2. การจำลองสภาพการอบแห้ง

วิธีการคำนวณเพื่อหาค่าตัวแปรที่ไม่ทราบค่าในงานวิจัยนี้ ใช้วิธีการแทนค่าอย่างต่อเนื่อง หรือ Successive substitution โดยป้อนค่าที่เป็นเงื่อนไขซึ่งแสดงขั้นตอนการคำนวณดังรูป 3.4 โดยมีการกำหนดสมมติฐานของแบบจำลองดังนี้คือ

- ห้องอบแห้งมีการหุ้มฉนวนอย่างดี
- ผนังของชิ้นส่วนและอุปกรณ์ของระบบปั๊มความร้อนและห้องอบแห้งเป็น Adiabatic ไม่มีการถ่ายเทความร้อน
- มีความสมดุลทางความร้อนระหว่างอากาศที่ใช้ในการอบแห้งกับกล้วยน้ำว้าแผ่นที่อบแห้ง
- อุณหภูมิและความเร็วของอากาศในห้องอบแห้งมีการกระจายแบบทั่วถึงตลอดพื้นที่หน้าตัดการอบแห้ง
- ไม่มีการอัดตัวของอากาศที่ใช้ในการอบแห้ง
- อุณหภูมิเริ่มต้นของกล้วยน้ำว้าแผ่นและอุณหภูมิในห้องอบแห้งมีค่าเท่ากับอุณหภูมิอบแห้ง
- ไม่มีความสมดุลทางความชื้นระหว่างอากาศที่ใช้ในการอบแห้งกับกล้วยน้ำว้าแผ่นที่ใช้อบแห้ง

จากรูป 3.4 แผนผังแสดงขั้นตอนการคำนวณของแบบจำลองคณิตศาสตร์ จะเห็นว่าแบบจำลองมีตัวแปรที่ไม่ทราบค่าจำนวน 2 ตัวแปร คือ อัตราส่วนความชื้นของอากาศก่อนอบแห้ง (W_{air}) และปริมาตรจำเพาะสถานะที่เป็นไออิ่มตัวของสารทำงาน R-134a ก่อนเข้าเครื่องควบแน่น (v_{2s}) ดังนั้นจึงสมมุติค่าเริ่มต้นของตัวแปรทั้งสองแล้วทำการหาค่าตัวแปรดังกล่าวด้วยวิธีแทนค่าอย่างต่อเนื่อง จนกระทั่งค่าตัวแปรที่สมมุติขึ้นถูกคำนวณออกมาอีกครั้งหนึ่ง นำค่าที่ได้ใหม่ป้อนกลับเข้าไปในแบบจำลอง คำนวณจนกระทั่งค่าตัวแปรที่ได้ใหม่มีค่าไม่เปลี่ยนแปลงจากค่าเดิมที่ป้อนกลับเข้าแบบจำลอง หรือมีค่าอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ ทำการคำนวณจนกระทั่งค่าความชื้นสุดท้ายของกล้วยน้ำว้าแผ่นลดลงถึงค่าความชื้นสุดท้ายที่ต้องการ จึงสิ้นสุดการคำนวณ

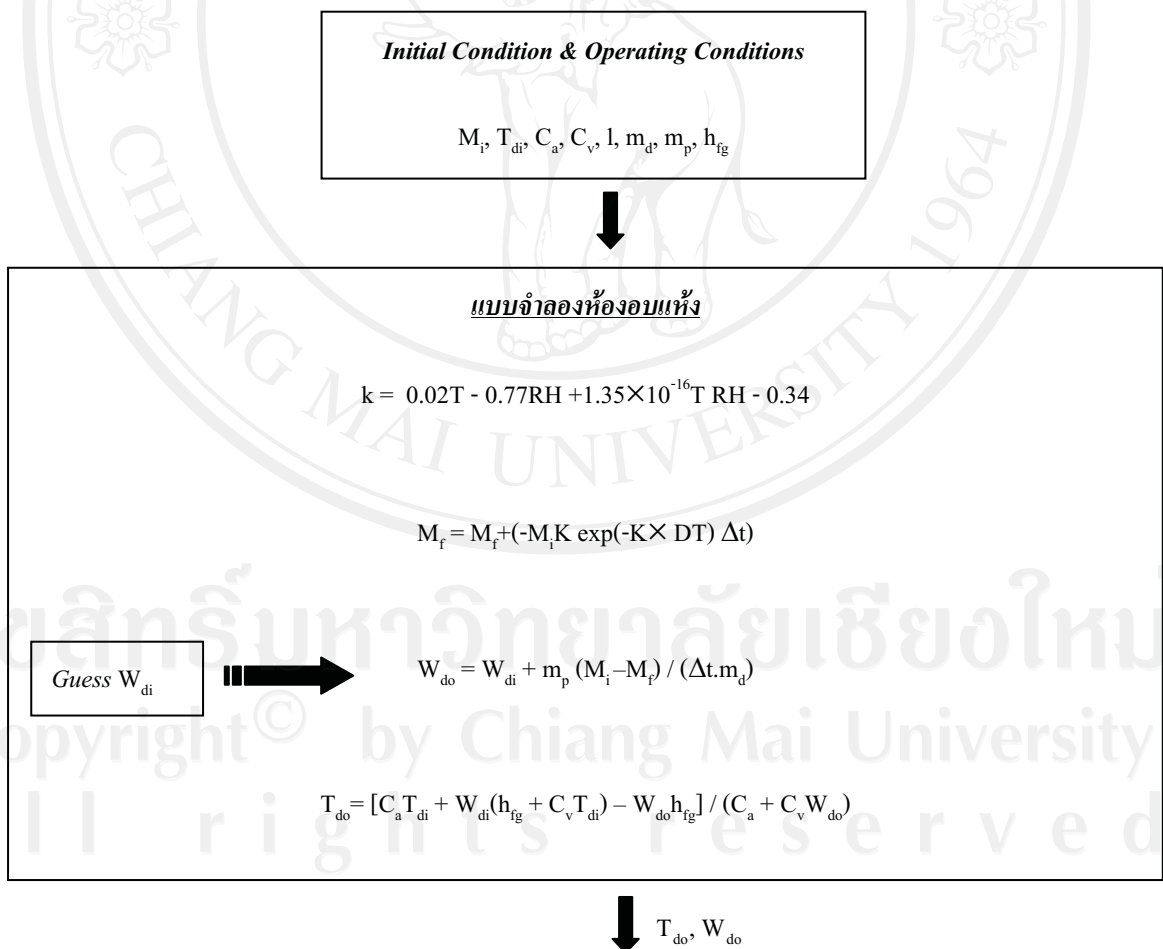


รูป 3.4 แผนผังแสดงขั้นตอนการคำนวณของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

แบบจำลองการอบแห้งแบบ BWS-HPD และ VSD-HPD นั้น มีความแตกต่างกันที่อัตราการไหลของสารทำงาน ทำให้ลำดับการคำนวณสมการในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีความแตกต่างกัน โดยแบบจำลองการอบแห้งแต่ละระบบมีลำดับการคำนวณสมการในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ดังนี้

3.2.1. การจำลองสภาพการอบแห้งของปฏิกิริยาความร้อนแบบ BWF-HPD

การอบแห้งของปฏิกิริยาความร้อนแบบ BWF-HPD นั้นอัตราการไหลของสารทำงานจะไหลอย่างคงที่ โดยมีความเร็วรอบของเครื่องอัดไอน้ำเป็นตัวแปรหลัก การคำนวณสมการในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีลำดับดังนี้



รูปที่ 3.5 แผนผังแสดงการจำลองสภาพการอบแห้งของปฏิกิริยาความร้อนแบบ BWF-HPD


 T_{do}, W_{do}

แบบจำลองเครื่องทำระเหย

$$W_{con} = (W_{co} - (BF)W_{do}) / (1 - BF)$$

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

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

$$T_1 = T_{lsat}$$

$$P_1 = \exp(21.51297 - (22.0098/246.21 + T_1))$$

$$h_1 = 249455 + 606.163 T_{lsat} - 1.05644 T_{lsat}^2 - 1.82426 \times 10^{-2} T_{lsat}^3$$

$$v_1 = \exp \left[-12.4539 + \frac{2669.0}{273.15 + T_{sat}} \right] \times (1.01357 + 1.06736 \times 10^{-3} T_{sat} \\ - 9.2532 \times 10^{-6} T_{sat}^2 - 3.2192 \times 10^{-7} T_{sat}^3)$$

$$Q_{ac} = (1 - BP) \cdot m_d \cdot [C_a (T_{co} - T_{do}) + (W_{co} - W_{do}) h_{fg} + W_{do} C_v (T_{co} - T_{do})]$$


 Q_{ac}, P_1, h_1

รูปที่ 3.5 แผนผังแสดงการจำลองสภาพการอบแห้งของปฏิกิริยาความร้อนแบบ BWF-HPD (ต่อ)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

↓ Q_{ac}, P_1, h_1

แบบจำลองเครื่องอัดไอ

Guess v_{2sat}

$$T_{2sat} = 2.9324 v_{2sat}^{-0.6547}$$

$$P_2 = \exp \left[\frac{21.51297 - \frac{2200.9809}{246.61 + T_{2sat}}}{T_{2sat}} \right]$$

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

$$T_3 = T_{2sat} - 8.02$$

$$\Delta T_2 = T_2 - T_{2sat}$$

$$h_{11} = 249455 + 606.163 T_{2sat} - 1.05644 T_{2sat}^2 - 1.82426 \times 10^{-2} T_{2sat}^3$$

$$h_2 = h_{11} (1 + 3.48186 \times 10^{-3} \Delta T_2 + 1.6886 \times 10^{-6} \Delta T_2^2 + 9.2642 \times 10^{-6} \Delta T_2 T_{2sat}$$

$$- 7.698 \times 10^{-8} \Delta T_2^2 T_{2sat} + 1.7070 \times 10^{-7} \Delta T_2 T_{2sat}^2 - 1.2130 \times 10^{-9} \Delta T_2^2 T_{2sat}^2$$

$$h_3 = 50.952 + 1335.29 T_3 + 1.7065 T_3^2 + 7.6741 \times 10^{-3} T_3^3$$

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

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

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

↓ $h_1, m_r, P_{comp}, h_2, h_3, T_2, T_3$

รูปที่ 3.5 แผนผังแสดงการจำลองสภาพการอบแห้งของปั๊มความร้อนแบบ BWF-HPD (ต่อ)

$$h_1 \quad \downarrow \quad m_r, P_{\text{comp}}, h_2, h_3, T_2, T_3$$

แบบจำลองเครื่องระเหย (ต่อ)

$$h_4 = h_3$$

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



$$T_{\text{co}}, T_{\text{do}}, h_2, h_3, Q_{\text{ac}}$$

แบบจำลองเครื่องควบแน่น

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

$$Q_{\text{re}} = m_r (h_3 - h_2)$$

$$Q_{\text{re}} = Q_{\text{ac}}$$

$$h_1 = 0.026 (k_l / D_c) (C \mu_l / k_l)^{1/3} (D_c G_r / \mu_l)^{0.8}$$

$$h_o = 0.195 G_a C_a \text{Pr}_a^{-2/3} \text{Re}_a^{-0.35}$$

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

$$Q_{\text{aci}} = \frac{U_c A_c [(T_{2s} - T_{\text{ci}}) - (T_3 - T_{\text{co}})]}{\ln[(T_{2s} - T_{\text{ci}}) / (T_3 - T_{\text{co}})]}$$

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



$$Q_{\text{aci}}, Q_{\text{ace}}$$

รูปที่ 3.5 แผนผังแสดงการจำลองสภาพการอบแห้งของปั๊มความร้อนแบบ BWF-HPD (ต่อ)

↓ Q_{aci}, Q_{ace}

ปริมาตรความคุมที่ 5 พัดลม

$$P_{blower} = (\Delta P \cdot m_d) / (\rho_D \cdot \eta_F)$$

$$T_{eo} = T_{di} - \{ P_{blower} / [m_d(C_a + W_{di}C_v)] \}$$

↓ $Q_{aci}, Q_{ace}, Q_{ac}, P_{comp}, T_{eo}, T_{ei}$

ตรวจสอบค่า f_1 และ f_2

$$f_1 = (Q_{aci} + Q_{ace}) - (Q_{ac} + P_{comp})$$

$$f_2 = Q_{aci} - m_d(C_a + W_{di}C_v)(T_{eo} - T_{ci})$$

ถ้า $f_1 > 1$ และ $f_2 > 2$ กลับไปยังแบบจำลองของห้องอบแห้งใหม่

โดยป้อนค่า W_{di} และ v_{2sat} ค่าใหม่

↓ $m_d, W_{di}, W_{do}, m_p, M_i, M_f$

แบบจำลองสมรรถนะ

$$DR = m_d(W_{do} - W_{di})$$

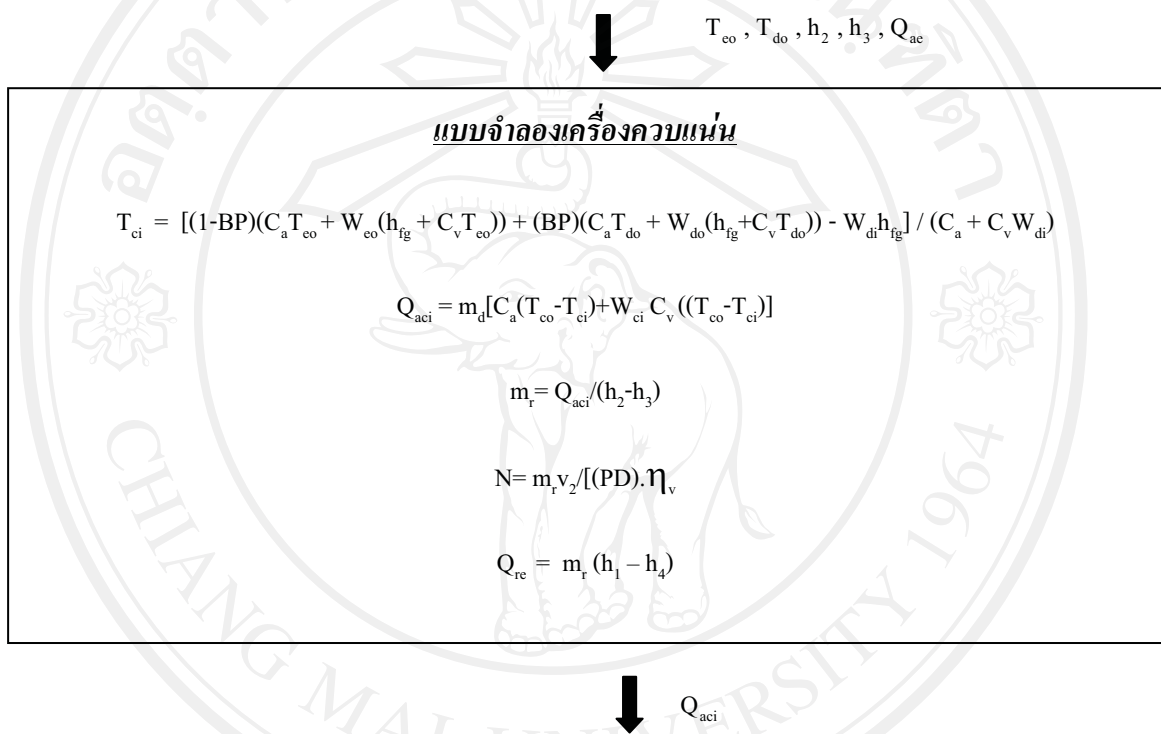
$$SMER = m_p(M_i - M_f) / (P_{comp} + P_{blower})$$

$$COP_{HPD} = \frac{Q_{aci}}{P_{comp.} + P_{blower}}$$

รูปที่ 3.5 แผนผังแสดงการจำลองสภาพการอบแห้งของปื้มความร้อนแบบ BWF-HPD (ต่อ)

3.2.2. การจำลองสภาพการอบแห้งของปื้มความร้อนแบบ VSD-HPD

เครื่องอบแห้งของปื้มความร้อนแบบ VSD-HPD จะมีการปรับเปลี่ยนอัตราการไหลของสารทำความเย็นให้มีความเหมาะสมกับภาระทางความร้อนของเครื่องอบแห้ง ดังนั้นขั้นตอนในการจำลองสภาพจึงมีความแตกต่างกับ แบบจำลองแบบ BWS-HPD ความแตกต่างจะอยู่ในส่วนของแบบจำลองเครื่องอัดไอ โดยมีขั้นตอนดังนี้



รูปที่ 3.6 แผนผังแสดงการจำลองสภาพการอบแห้งของปื้มความร้อนแบบ VSD-HPD

3.3. การทดลองและเก็บข้อมูลเพื่อนำมาเปรียบเทียบกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

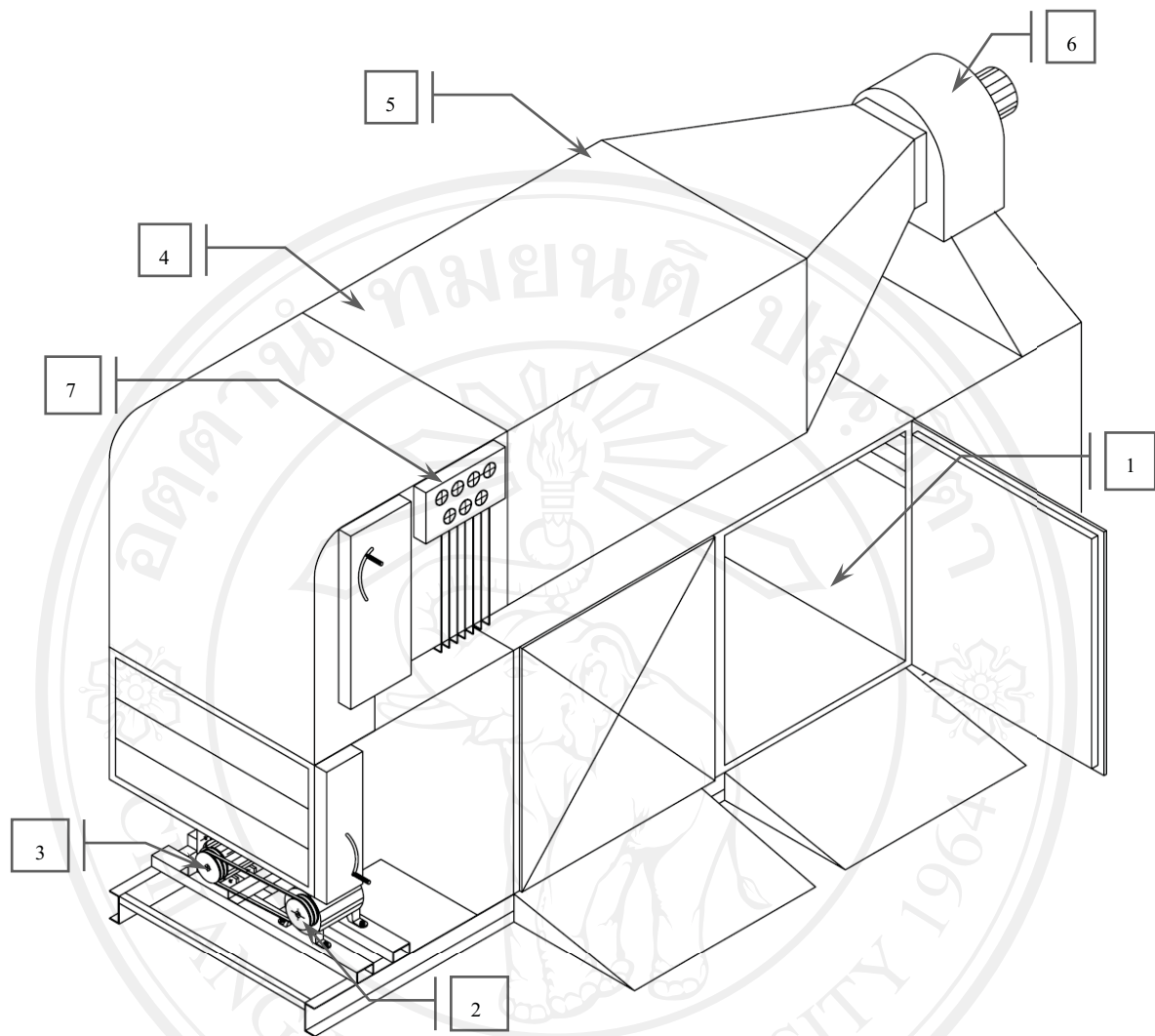
งานวิจัยนี้จะทำการทดลองเพื่อเก็บข้อมูล แล้วนำข้อมูลที่ได้มาทำการเปรียบเทียบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยมีอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองและเครื่องอบแห้งเพิ่มความร้อน ขั้นตอนการเตรียมวัตถุดิบในการทดลอง ขั้นตอนการทดลอง และการวิเคราะห์ข้อมูลจากการทดลองดังนี้

3.3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1. เครื่องวัดความเร็วลม (Anemometer, TSI Incorporated : Model 8385-M-GB) ดังรูป ก.1
2. ดิจิตอลเทอร์โมมิเตอร์ความละเอียด 0.1 °C ความเที่ยงตรง $\pm 0.5\%$ (Thermometer, Kane May Model KM330) ดังรูป ก.2
3. เครื่องชั่งน้ำหนักดิจิตอลความละเอียด 0.001 กรัม (Analytical balance, Satorius : Model EA35ED) ดังรูป ก.3
4. ตู้อบลมร้อน (Hot air oven, Binder : Model ED) ดังรูป ก.4
5. เครื่องชั่งน้ำหนักดิจิตอลความละเอียด 0.005 กิโลกรัม ดังรูป ก.5
6. เครื่องวัดความเร็วรอบแบบตัวเลข (รุ่น Testo 470) ดังรูป ก.6
7. กิโวลต์แอมป์-มิเตอร์ ดังรูป ก.7
8. บรูคคองเกจ ความละเอียด -1-30 bar และ -1-10 bar ดังรูป ก.8
9. อินเวอร์เตอร์ ขนาด 3.75 kW (5 แรงม้า) ดังรูป ก.9
10. อินเวอร์เตอร์ ขนาด 0.75 kW (1 แรงม้า) ดังรูป ก.10
11. เซ็นเซอร์อุณหภูมิ Platinum RTD Class B แบบสามสายความเที่ยงตรง $\pm 0.3^{\circ}\text{C}$ at 0°C ดังรูป ก.11
12. ชุดควบคุมแรงดันเครื่องทำระเหย (Evaporator pressure regulator : EPR) DANFOSS รุ่น 034L0042 ดังรูป ก.12

3.3.2 เครื่องอบแห้งเพิ่มความร้อน

เครื่องอบแห้งเพิ่มความร้อน ตั้งอยู่ที่ห้องปฏิบัติการอบแห้ง ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ประกอบด้วยอุปกรณ์ ดังรูป 3.7 โดยมีรายละเอียดดังนี้



รูปที่ 3.7 เครื่องอบแห้งแบบใช้ปั๊มความร้อนสำหรับอุตสาหกรรมขนาดเล็ก ตั้งอยู่ที่ห้องปฏิบัติการ
อบแห้ง ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

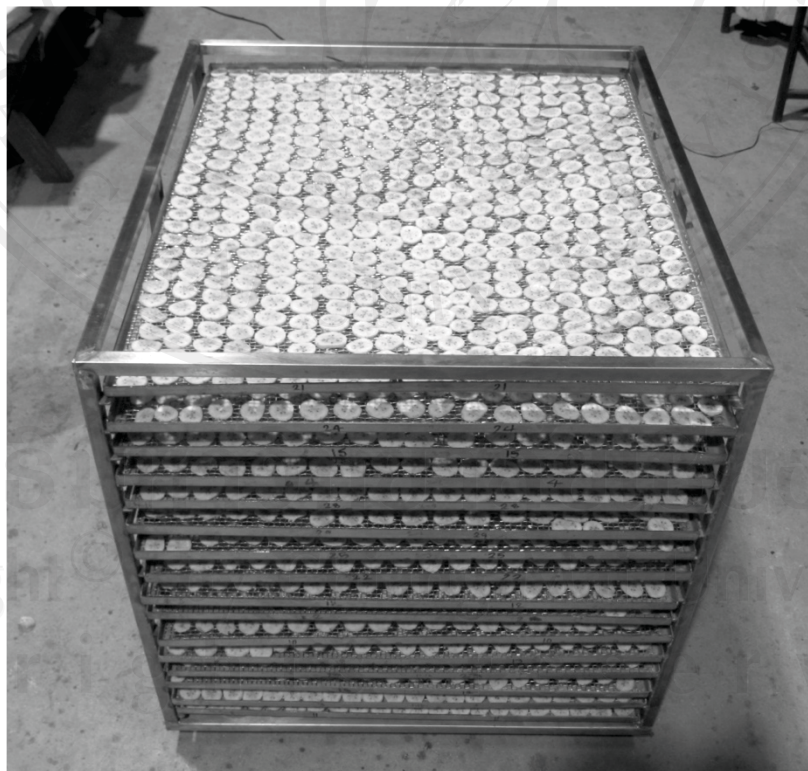
รายละเอียด:

- | | |
|---------|--|
| หมายเลข | 1. ห้องอบแห้ง ขนาด $0.8 \text{ m} \times 1.5 \text{ m} \times 0.8 \text{ m}$ |
| หมายเลข | 2. มอเตอร์ขับเคลื่อนเครื่องอัดไอ ขนาด 5 แรงม้า |
| หมายเลข | 3. เครื่องอัดไอ |
| หมายเลข | 4. ชุดเครื่องทำความเย็น ขนาด 10.5 kW |
| หมายเลข | 5. ชุดเครื่องควบแน่น ขนาด 12.5 kW |
| หมายเลข | 6. พัฒนแบบแรงเหวี่ยงใบพัดโค้งหน้าขนาด 1 แรงม้า |
| หมายเลข | 7. มาตรวัดความดันสารทำงาน |

3.3.3 การเตรียมกล้วยน้ำว้าแผ่นที่จะใช้อบแห้ง

กล้วยน้ำว้าที่เป็นวัตถุดิบในการทดลองจะใช้ลักษณะสีของเปลือกกล้วยเป็นหลักในการเลือกโดยทำการเปรียบเทียบระดับสีของเปลือกกล้วยตามระดับสีของเปลือกกล้วยในเชิงพาณิชย์ (Commercial peel color scale) ดังรูปที่ 2.8 ในบทที่ 2 การทดลองนี้กล้วยน้ำว้าถูกนำมาจากแหล่งเดียวกันถูกนำมาเก็บบ่มไว้ที่อุณหภูมิห้อง $25-30^{\circ}\text{C}$ และความชื้นสัมพัทธ์อากาศ 50-60 % จนกระทั่งระดับสีของเปลือกกล้วยอยู่ระดับที่ 4 สีเหลืองมากกว่าสีเขียว โดยมีสีเขียวปนเล็กน้อย (กล้วยห้ามค่อนข้างสุก) เพราะเนื้อกล้วยไม่แข็งและนิ่มจนเกินไป

หลังจากที่กล้วยมีสีตามต้องการแล้ว นำกล้วยมาหั่นเป็นแว่นตามแนวขวางโดยให้ความหนาของกล้วยแผ่นเท่ากันอยู่ที่ประมาณ 5 mm ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 30-35 mm แล้วนำมาวางเรียงกันในถาดอบแห้งจากนั้นนำมาชั่งมวลให้ได้มวลรวมของกล้วยแผ่นประมาณ 1.144 กิโลกรัมต่อ 1 ถาด ดังรูปที่ 3.8 แล้วนำเข้าห้องอบแห้งทันทีเพื่อมิให้ความชื้นของกล้วยระเหยไปสู่อากาศแวดล้อม



รูปที่ 3.8 กล้วยน้ำว้าหั่นเป็นแว่นตามแนวขวางความหนา 5 mm ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 30-35 mm นำมา วางเรียงกันในถาดอบแห้ง

3.3.4 ขั้นตอนการทดลอง

1. เลือกใช้วิธีการควบคุมอุณหภูมิแบบ VSD-HPD
2. นำกล้วยน้ำว้าแผ่นมวล 33.6 kg ใส่ลงในถาด แบ่งน้ำว้าแผ่นส่วนหนึ่งมาหาความชื้นเริ่มต้นแล้วนำเข้าห้องอบแห้ง
3. ทำการเดินเครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อน เปิดสวิตช์พัดลม และปรับอัตราการไหลของอากาศ 1.25 m/s ที่หน้าห้องอบแห้ง โดยปรับความเร็วของมอเตอร์ ด้วยเครื่องควบคุมความเร็วและปรับอัตราการไหลของอากาศข้ามเครื่องทำระเหย เท่ากับ 70 %
4. เปิด สวิตซ์ การทำงานชุดปั๊มความร้อน ใช้อุณหภูมิภายในห้องอบแห้ง 60°C ความเร็วรอบเริ่มต้นของเครื่องอัดไอ 2000 rpm
5. บันทึกอุณหภูมิกระเปาะเปียกและกระเปาะแห้งของอากาศ อุณหภูมิสารทำงาน และความดันสารทำงานในระบบปั๊มความร้อน
6. บันทึกความเร็วรอบของเครื่องอัดไอ
7. บันทึกผลการชั่งน้ำหนักน้ำ จากการกลั่นตัวของไอน้ำในอากาศชั้นที่เครื่องทำระเหย
8. บันทึกค่าความสิ้นเปลืองพลังงาน
9. การเก็บข้อมูลทุกๆ 1 ชั่วโมง และทำการอบจนกระทั่งตัวอย่างเหลือความชื้นสุดท้าย 16 % dry-basis
10. ทำการทดลองจาก ข้อ 2 จนถึง ข้อ 9 อีกครั้ง แต่เปลี่ยนวิธีการควบคุมอุณหภูมิภายในห้องอบแห้งเป็น BWF-HPD

3.3.5 การวิเคราะห์ข้อมูลจากการทดลอง

- ก. อัตราการถ่ายเทความร้อนที่เครื่องควบแน่น (Q_c) คำนวณจากการถ่ายเทความร้อนที่อากาศได้รับจากเครื่องควบแน่นภายในเครื่องอบแห้งแบบใช้ปั๊มความร้อน แสดงดังสมการ (3.13)
- ข. สมรรถนะ เครื่องอบแห้ง ปั๊มความร้อน (COP_{HPD}) คำนวณจากอัตราส่วนของอัตราการถ่ายเทความร้อนที่เครื่องควบแน่นตัวในต่อกำลังงานที่ให้แก่เครื่องอบแห้ง แสดงดังสมการ (3.37)

- ค. ประสิทธิภาพการใช้พลังงาน คำนวณจากอัตราการดึงน้ำออกจำเพาะ (Specific Moisture Extraction Rate, SMER) มีหน่วยเป็น กิโลกรัมน้ำระเหยต่อกิโลวัตต์-ชั่วโมง และ ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (Specific Energy Consumption, SEC) มีหน่วยเป็น กิโลวัตต์-ชั่วโมงต่อกิโลกรัมน้ำระเหยแสดงดังสมการ (3.35) และ (3.36) ตามลำดับ
- ง. ความสามารถในการอบแห้ง คำนวณจากอัตราการอบแห้ง (Drying Rate, DR) มีหน่วยเป็น กิโลกรัมน้ำระเหยต่อชั่วโมง และอัตราการดึงน้ำออก (Moisture Extraction Rate, MER) มีหน่วยเป็น กิโลกรัมน้ำควบแน่นต่อชั่วโมง แสดงดังสมการ (3.34) และ (3.36)

$$\text{MER} = \frac{\text{ปริมาณน้ำควบแน่นที่เครื่องทำระเหย}}{\text{เวลาที่ใช้ในการอบแห้ง}} \quad (3.36)$$