

บทที่ 4

การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

เนื่องจากเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบอุโมงค์ลมต้องใช้พลังงานแสงอาทิตย์เป็นแหล่งพลังงานทั้งในรูปแบบของความร้อนเพื่อทำให้ผลิตภัณฑ์แห้งและในรูปแบบของไฟฟ้าเพื่อขับเคลื่อนพัดลมระบายอากาศ ดังนั้นสมรรถนะของเครื่องอบแห้งดังกล่าวจึงขึ้นกับความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงไปตามสภาวะทางอุตุนิยมวิทยา ในการทำนายสมรรถนะของเครื่องอบแห้งในสภาวะต่างๆที่ละเอียดถูกต้อง จำเป็นต้องใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เป็นเครื่องมือ ดังนั้นในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยจึงได้ดำเนินการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องอบแห้งแบบดังกล่าวขึ้น ดังรายละเอียดตามหัวข้อต่อไปนี้

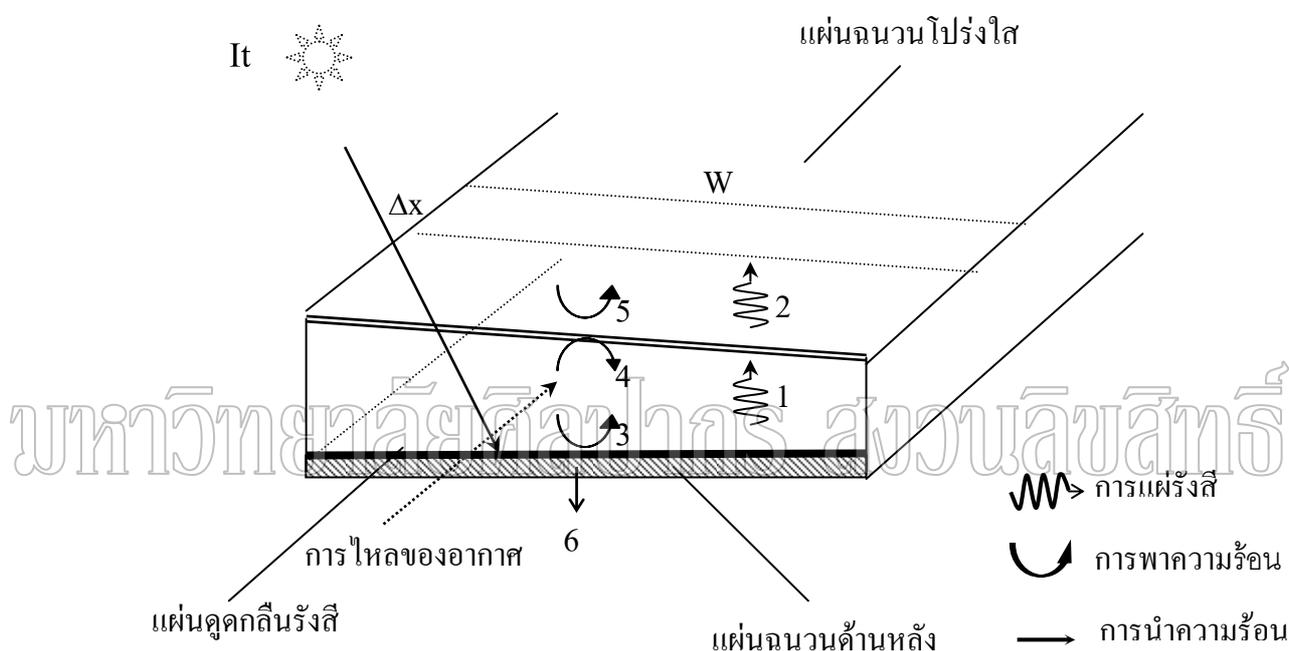
4.1 การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

จากที่กล่าวมาแล้วในบทที่ 3 ว่าเครื่องอบแห้งแบบอุโมงค์ลมสามารถแบ่งองค์ประกอบได้เป็น 2 ส่วน ได้แก่ ส่วนแผงรับรังสีดวงอาทิตย์ ส่วนพื้นที่วางผลิตภัณฑ์ ดังนั้นจะทำการสร้างแบบจำลองของแต่ละส่วนดังนี้

4.1.1 แบบจำลองของแผงรับรังสีดวงอาทิตย์

4.1.1.1 การเขียนสมการสมดุลทางความร้อน

แผงรับรังสีดวงอาทิตย์ของเครื่องอบแห้งแบบอุโมงค์ลมเป็นแบบแผ่นราบ (flat plate solar collector) โดยอากาศที่ไหลผ่านจะรับความร้อนจากแผ่นดูดกลืนรังสี และการสูญเสียความร้อนด้วยวิธีต่างๆ ไปยังสิ่งแวดล้อมตามแผนภูมิในรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 แสดงการส่งผ่านความร้อนในปริมาตรควบคุมที่เกิดขึ้นในส่วนแผงรับรังสีของเครื่องอบแห้งแบบอุโมงค์ลม 1) การแผ่รังสีระหว่างแผ่นดูดกลืนรังสีไปยังแผ่นฉนวนโปร่งแสง 2) การแผ่รังสีจากแผ่นฉนวนโปร่งแสงไปยังท้องฟ้า 3) การพาความร้อนจากแผ่นดูดกลืนรังสีไปยังอากาศภายในแผงรับรังสี 4) การพาความร้อนจากแผ่นฉนวนโปร่งแสงไปยังอากาศภายในแผงรับรังสี 5) การพาความร้อนจากแผ่นฉนวนโปร่งแสงไปยังอากาศแวดล้อม 6) การนำความร้อนจากแผ่นรับรังสีไปยังอากาศแวดล้อม 7) การดูดกลืนรังสีดวงอาทิตย์ของแผ่นดูดกลืนรังสี 8) การส่งผ่านรังสีดวงอาทิตย์ของแผ่นฉนวนโปร่งแสง

จากนั้นจะหาสมการสมดุลทางความร้อน (heat balance) ในปริมาตรเล็กๆ ($WD\Delta x$) ขององค์ประกอบแต่ละส่วน โดยจะพิจารณาการเปลี่ยนแปลงเอนทาลปีของแต่ละองค์ประกอบซึ่งขึ้นอยู่กับปริมาณการส่งผ่านความร้อนที่องค์ประกอบนั้นได้รับหรือเสียไป แสดงรายละเอียดดังต่อไปนี้

1) สมการสมดุลพลังงานของแผ่นฉนวนโปร่งแสง

เอนทาลปีของแผ่นฉนวน โปร่งใสที่เปลี่ยนไปในช่วงเวลา Δt

- = ความร้อนจากการพาความร้อนที่ได้รับจากอากาศในเครื่องอบแห้ง
- + ความร้อนจากการแผ่รังสีระหว่างแผ่นดูดกลืนรังสีกับฉนวน โปร่งแสง
- + ความร้อนที่สูญเสียไปจากการพาความร้อนเนื่องจากลม
- + ความร้อนจากการแผ่รังสีไปให้กับท้องฟ้า
- + รังสีดวงอาทิตย์ที่ดูดกลืนไว้ได้

แทนค่าแต่ละเทอมจะได้สมการต่อไปนี้

$$\rho_c \delta_c \Delta x W C_c \left(T_c + \frac{dT_c}{dt} \Delta t \right) - \rho_c \delta_c \Delta x W C_c T_c = h_{r,b-c} \Delta x W (T_b - T_c) \Delta t + h_{c,f-c} \Delta x W (T_f - T_c) \Delta t + h_w \Delta x W (T_a - T_c) \Delta t + h_{r,c-s} \Delta x W (T_s - T_c) \Delta t + \Delta x W \alpha_c I_t \Delta t$$

จัดรูปสมการใหม่ได้เป็น

$$\rho_c \delta_c C_c \frac{dT_c}{dt} = h_{r,b-c} (T_b - T_c) + h_{c,f-c} (T_f - T_c) + h_w (T_a - T_c) + h_{r,c-s} (T_s - T_c) + \alpha_c I_t \quad (4.1)$$

- เมื่อ
- T_c คือ อุณหภูมิของแผ่นฉนวน โปร่งแสง [K]
 - T_f คือ อุณหภูมิของอากาศภายในแผงรับรังสี [K]
 - T_r คือ อุณหภูมิของอากาศภายในแผงรับรังสี [K]
 - T_a คือ อุณหภูมิอากาศแวดล้อม [K]
 - T_s คือ อุณหภูมิท้องฟ้า [K]
 - ρ_c คือ ความหนาแน่นของแผ่นฉนวน โปร่งแสง [kg/m^3]
 - δ_c คือ ความหนาของแผ่นฉนวน โปร่งแสง [m]

- C_c คือ ความจุความร้อนจำเพาะของแผ่นฉนวนโปร่งแสง [J/kg-K]
 α_c คือ สัมประสิทธิ์การดูดกลืนรังสีของแผ่นฉนวนโปร่งแสง [decimal]
 $h_{r,b-c}$ คือ สัมประสิทธิ์การแผ่รังสีระหว่างแผ่นดูดกลืนรังสีกับฉนวนโปร่งแสง [W/m²-K]
 $h_{r,c-s}$ คือ สัมประสิทธิ์การแผ่รังสีจากฉนวนโปร่งแสงไปยังท้องฟ้า [W/m²-K]
 $h_{c,c-f}$ คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อนระหว่างฉนวนโปร่งแสงกับอากาศอบแห้ง [W/m²-K]
 h_w คือ สัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อนเนื่องจากลม [W/m²-K]
 I_t คือ ความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ที่เวลาใดๆ [W/m²]

2) สมการสมดุลพลังงานของอากาศภายในแผงรับรังสี

เอนทาลปีของอากาศที่เปลี่ยนไปในช่วงเวลา Δt ในระยะทาง Δx
 = ความร้อนจากการพาความร้อนที่ได้จากแผ่นฉนวนโปร่งใส
 + ความร้อนจากการพาความร้อนที่ได้จากแผ่นฉนวนด้านหลัง

เนื่องจากอากาศมีความร้อนจำเพาะต่ำ จึงไม่คิดการสะสมความร้อนของอากาศ ดังนั้นจึงเขียนสมการดุลพลังงานของอากาศได้ดังนี้

$$DGW(C_f + C_v H)(T_f + \frac{dT_f}{dx} \Delta x)\Delta t - DGW(C_f + C_v H)T_f \Delta t = \Delta x Wh_{c,f-c}(T_c - T_f)\Delta t + \Delta x Wh_{c,b-f}(T_b - T_f)\Delta t$$

จัดรูปสมการใหม่ได้เป็น

$$DG C_f \frac{dT_f}{dx} = h_{c,c-f}(T_c - T_f) + h_{c,b-f}(T_b - T_f) \quad (4.2)$$

- เมื่อ T_f คือ อุณหภูมิของอากาศภายในแผงรับรังสี [K]
 G คือ อัตราการไหลต่อพื้นที่ของอากาศภายในแผงรับรังสี [kg/m²-s]
 D คือ ความหนาของอากาศภายในแผงรับรังสี [m]
 C_f คือ ความจุความร้อนจำเพาะของอากาศภายในแผงรับรังสี [J/kg-K]
 C_v คือ ความจุความร้อนจำเพาะของไอน้ำ [J/kg-K]
 $h_{c,c-f}$ คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อนระหว่างฉนวนโปร่งแสงกับอากาศอบแห้ง [W/m²-K]
 $h_{c,b-f}$ คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อนระหว่างแผ่นดูดกลืนรังสีกับอากาศอบแห้ง [W/m²-K]

3) สมการสมดุลพลังงานของแผ่นดูดกลืนรังสี

เอนทาลปีของแผ่นฉนวนดูดกลืนรังสีที่เปลี่ยนไปในช่วงเวลา Δt

- = ความร้อนจากการพาความร้อนที่ให้กับอากาศอบแห้ง
- + ความร้อนจากการแผ่รังสีระหว่างแผ่นฉนวน โปร่งใสกับแผ่นดูดกลืนรังสี
- + ความร้อนที่สูญเสียจากการนำความร้อนผ่านฉนวนด้านหลัง
- + รังสีดวงอาทิตย์ที่ดูดกลืนไว้ได้

แทนค่าแต่ละเทอมลงไปแสดงได้ดังนี้

$$\rho_b \Delta x w \delta_b c_b (T_b + \frac{dT_b}{dt} \Delta t) - \rho_b \Delta x w \delta_b c_b T_b$$

$$= h_{c,f-b} \Delta x w (T_f - T_b) \Delta \Delta + h_{r,b-c} \Delta x w (T_c - T_b) \Delta \Delta + u_b \Delta x w (T_a - T_b) \Delta \Delta + \Delta x W (\tau \alpha) I_t \Delta t$$

จัดรูปสมการใหม่ได้เป็น

$$\rho_b \delta_b c_b \frac{dT_b}{dt} = h_{c,b-f} (T_f - T_b) + h_{r,b-c} (T_c - T_b) + U_b (T_a - T_b) + (\tau \alpha) I_t \quad (4.3)$$

เมื่อ T_b คือ อุณหภูมิของแผ่นดูดกลืนรังสี [K]

ρ_b คือ ความหนาแน่นของแผ่นดูดกลืนรังสี [kg/m^3]

δ_b คือ ความหนาของแผ่นดูดกลืนรังสี [m]

C_b คือ ความจุความร้อนจำเพาะของแผ่นดูดกลืนรังสี [J/kg-K]

$(\tau \alpha)$ คือ สัมประสิทธิ์การดูดกลืนและส่งผ่านรังสีของแผ่นดูดกลืนรังสีของแผงรับรังสี [decimal]

4.1.1.2 การหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน

ก) สัมประสิทธิ์การแผ่รังสี

สัมประสิทธิ์การแผ่รังสีจากแผ่นฉนวนโปร่งแสงไปยังท้องฟ้า ($h_{r,c-s}$) หาได้จากสมการ (Duffie and Beckman, 1992)

$$h_{r,c-s} = \varepsilon_c \sigma (T_c^2 + T_s^2) (T_c + T_s) \quad (4.4)$$

โดยที่อุณหภูมิท้องฟ้าสามารถหาได้จาก $T_s = 0.552 T_a^{1.5}$

สำหรับสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีแผ่นดูดกลืนรังสีไปยังแผ่นฉนวนโปร่งแสง ($h_{r,b-c}$) หาได้จาก (Duffie and Beckman, 1992)

$$h_{r,b-c} = \frac{\sigma (T_b^2 + T_c^2) (T_b + T_c)}{\frac{1}{\varepsilon_b} + \frac{1}{\varepsilon_c} - 1} \quad (4.5)$$

มหาวิทยาลัยศิลปากร ส่วนอนุรักษ์มรดก

เมื่อ σ คือ ค่าคงที่สเตฟาน-โบลต์ซมานน์ (Stefan-Boltzmann's constant)

ε_c คือ สัมประสิทธิ์การแผ่รังสีของแผ่นฉนวนโปร่งแสง [decimal]

ε_b คือ สัมประสิทธิ์การแผ่รังสีของแผ่นดูดกลืนรังสี [decimal]

ข) สัมประสิทธิ์การพาความร้อน

สัมประสิทธิ์การพาความร้อนจากแผ่นฉนวนโปร่งแสงไปยังอากาศแวดล้อมเนื่องจากลม (h_w) ใช้แบบจำลองของ McAdams (1954) ซึ่งเขียนได้ดังสมการ

$$h_w = 5.7 + 3.8 V \quad (4.6)$$

เมื่อ V คือ ความเร็วลม [m/s]

สำหรับสัมประสิทธิ์การพาความร้อนระหว่างอากาศในแผงรับรังสีกับแผ่นดูดกลืนรังสี และระหว่างอากาศในแผงรับรังสีกับแผ่นฉนวนโปร่งแสงจะสามารถหาได้จากสมการที่ 4.7 โดยถือว่าสัมประสิทธิ์ทั้งสองมีค่าเท่ากัน

$$h_c = \frac{Nu k}{D_h} \quad (4.7)$$

เมื่อ h_c คือ ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน [W/m^2-K]

Nu คือ ค่า Nusselt number [decimal]

k คือ ค่าสภาพการนำความร้อนของอากาศ [$W/m-K$]

D_h คือ ค่า hydraulic diameter [m] ซึ่งหาได้จาก

$$D_h = \frac{4WD}{2(W+D)} \quad (4.8)$$

เมื่อ W คือ ความกว้างของแผงรับรังสี [m]

D คือ ความหนาของอากาศในแผงรับรังสี [m]

โดย Nu จะหาได้จากสมการของ Kays and Crawford (1980) ดังสมการ

$$Nu = 0.0158 Re^{0.8} \quad (4.9)$$

เมื่อ Re คือ ค่า Reynolds number ซึ่งหาได้จากสมการ

$$Re = \frac{D_h V \rho}{\nu} \quad (4.10)$$

เมื่อ V คือ อัตราเร็วของอากาศภายในแผงรับรังสี [m/s]

ρ คือ ความหนาแน่นของอากาศ [kg/m^3]

ν คือ viscosity ของอากาศ [m^2/s]

ค) สัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อนด้านล่าง

สำหรับสัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อนด้านล่างของแผ่นฉนวนด้านหลัง

(U_b) จะหาได้จากสมการ

$$U_b = \frac{k_b}{L_b} \quad (4.11)$$

เมื่อ k_b คือ ค่าสภาพการนำความร้อนของฉนวน [$W/m-K$]

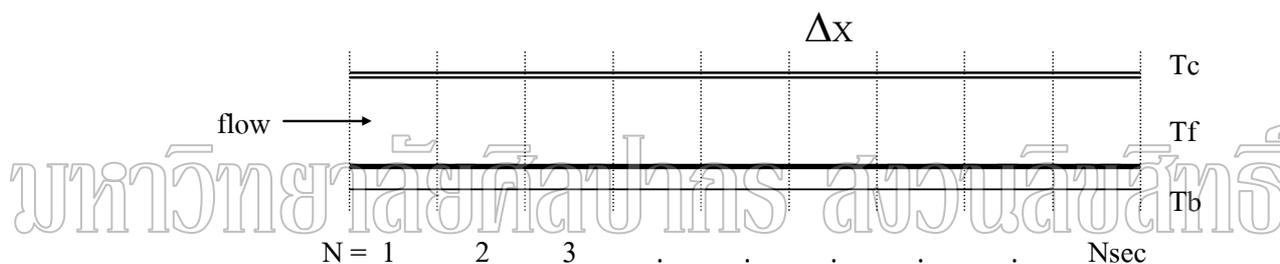
L_b คือ ความหนาของแผ่นฉนวนด้านหลัง [m]

4.1.1.3 การหาผลเฉลย (solution) ของสมการแบบจำลอง

สมการที่ (4.1)-(4.3) เป็นระบบสมการอนุพันธ์ที่ไม่สามารถหาผลเฉลยเชิงวิเคราะห์ (analytical solution) ดังนั้นในการหาผลเฉลยของระบบสมการดังกล่าวจำเป็นต้องใช้วิธีเชิงตัวเลข ในงานวิจัยนี้จะหาผลเฉลยของระบบสมการดังกล่าวโดยใช้วิธีผลต่างสี่เหลี่ยม (finite difference method)

หลักการโดยทั่วไปของวิธีผลต่างสี่เหลี่ยมคือ แทนค่าตัวอนุพันธ์ด้วยผลต่างในช่วงเล็กๆ แล้วทำการคำนวณหาผลเฉลยที่ต้องการ โดยผลที่ได้จะเป็นตัวเลข ระบบสมการแบบจำลองของแผงรับรังสีดังกล่าวก็ใช้เทคนิคเดียวกันนี้ สำหรับรายละเอียดการหาผลเฉลยของระบบสมการที่ (4.1) – (4.3) แสดงดังต่อไปนี้

เริ่มจากการพิจารณาแบ่งแผงรับรังสีเป็นช่วงเล็กๆ เท่าๆ กันตามความยาวเป็น N ช่วง โดยแต่ละช่วงยาว ΔX แสดงดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 แสดงการแบ่งองค์ประกอบของแผงรับรังสีออกเป็นช่วงย่อยตามทิศทางกรไหลของอากาศ

จากสมการที่ (4.1) - (4.3) จะได้สมการที่เขียนในรูป finite difference ที่ช่วงใดๆ ได้ดังนี้

$$\rho_c \delta_c C_c \frac{T_{c,t+\Delta t} - T_{c,t}}{\Delta t} = h_{r,b-c} (T_{b,t+\Delta t} - T_{c,t+\Delta t}) + h_{c,f-c} (T_{f,t+\Delta t} - T_{c,t+\Delta t}) + h_{w,c-a} (T_{a,t+\Delta t} - T_{c,t+\Delta t}) + h_{r,c-s} (T_{s,t+\Delta t} - T_{c,t+\Delta t}) + \alpha_c I_{t,t+\Delta t} \quad (4.12)$$

$$DGC_f 0.5 \left[\frac{T_{f,x+\Delta x,t+\Delta t} - T_{f,x-\Delta x,t+\Delta t}}{2\Delta x} + \frac{T_{f,x+\Delta x,t} - T_{f,x-\Delta x,t}}{2\Delta x} \right] = h_{c,b-f} (T_{b,x,t+\Delta t} - T_{f,x,t+\Delta t}) + h_{c,c-f} (T_{c,x,t+\Delta t} - T_{f,x,t+\Delta t}) \quad (4.13)$$

$$\rho_b \delta_b C_b \frac{T_{b,t+\Delta t} - T_{b,t}}{\Delta t} = h_{c,b-f} (T_{f,t+\Delta t} - T_{b,t+\Delta t}) + h_{r,b-c} (T_{c,t+\Delta t} - T_{b,t+\Delta t}) + U_b (T_{a,t+\Delta t} - T_{b,t+\Delta t}) + \langle \tau \alpha \rangle I_{t,t+\Delta t} \quad (4.14)$$

จากสมการที่ 4.12 – 4.14 เขียนใหม่ในรูปสมการเชิงเส้นของตัวแปร T_c, T_f และ T_b ที่เวลา $t + \Delta t$ ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} & \left(\frac{\rho_c \delta_c C_c}{\Delta t} + h_{r,b-c} + h_{c,f-c} + h_{w,c-a} h_{r,c-s} \right) T_{c,t+\Delta t} - h_{r,b-c} T_{b,t+\Delta t} - h_{c,f-c} T_{f,t+\Delta t} \\ & = \frac{\rho_c \delta_c C_c}{\Delta t} T_{c,t} + h_{w,c-a} T_{a,t+\Delta t} + h_{r,c-s} T_{s,t+\Delta t} + \alpha_c I_{t,t+\Delta t} \end{aligned} \quad (4.15)$$

$$\begin{aligned} & - h_{c,c-f} T_{c,x,t+\Delta t} + (h_{c,c-f} + h_{c,b-f}) T_{f,x,t+\Delta t} - h_{c,b-f} T_{b,x,t+\Delta t} \\ & - \left(\frac{0.25 \text{ DGC } f}{\Delta x} \right) T_{f,x-\Delta x,t+\Delta t} + \left(\frac{0.25 \text{ DGC } f}{\Delta x} \right) T_{f,x+\Delta x,t+\Delta t} \\ & = - \left(\frac{0.25 \text{ DGC } f}{\Delta x} \right) T_{f,x+\Delta x,t} + \left(\frac{0.25 \text{ DGC } f}{\Delta x} \right) T_{f,x-\Delta x,t} \end{aligned} \quad (4.16)$$

$$\begin{aligned} & - h_{r,b-c} T_{c,t+\Delta t} - h_{c,b-f} T_{f,t+\Delta t} + \left(\frac{\rho_b \delta_b C_b}{\Delta t} + h_{c,b-f} + h_{r,b-c} + U_b \right) T_{b,t+\Delta t} \\ & = \left(\frac{\rho_b \delta_b C_b}{\Delta t} \right) T_{b,t} + U_b T_{a,t+\Delta t} + (\tau \alpha) I_{t,t+\Delta t} \end{aligned} \quad (4.17)$$

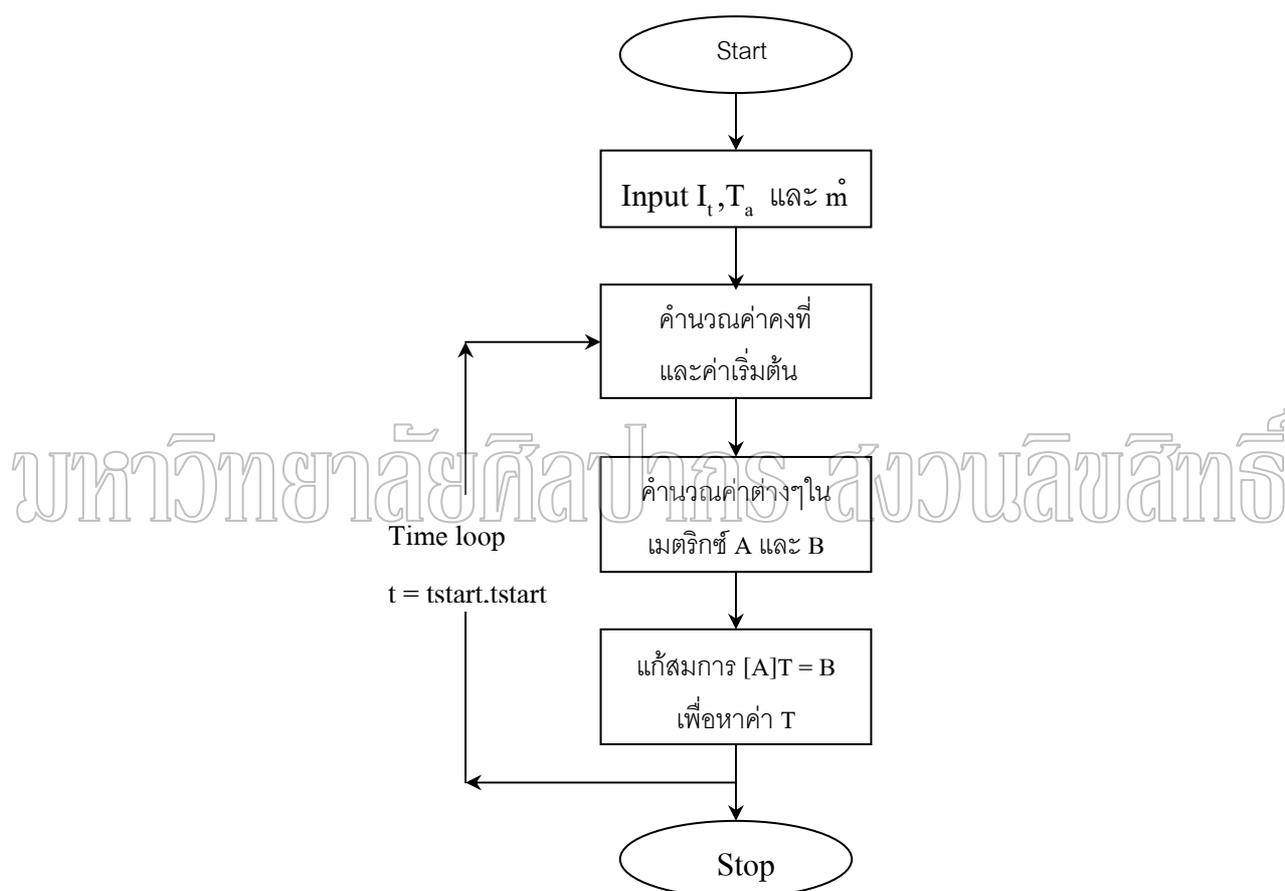
มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์

ระบบสมการเชิงเส้นของสมการที่ (4.15) – (4.17) จะสามารถหาผลเฉลยของสมการซึ่งได้แก่ T_c, T_f และ T_b ที่เวลา $t + \Delta t$ ในช่วงความยาวใดๆ ได้ สำหรับงานวิจัยนี้ จะเขียนระบบสมการที่ช่วง N ใดๆ ทั้งหมดอยู่ในระบบสมการเดียวกันกล่าวคือ จะได้เมตริกซ์สัมประสิทธิ์ของระบบสมการทั้ง $N \text{sec}$ ก่อนที่มีขนาด $3N \text{sec} \times 3N \text{sec}$ แล้วทำการแก้สมการเพื่อหาค่าอุณหภูมิตลอดทั้งความยาวของแผงรับรังสีในคราวเดียวกัน ซึ่งจะทำให้ผลเฉลยที่ได้มีความละเอียดถูกต้องมากกว่าในกรณีที่แก้สมการทีละช่วง

ในการคำนวณจริงจำเป็นต้องใส่ค่าเงื่อนไขตั้งต้นและเงื่อนไขค่าขอบต่างๆ ให้กับระบบสมการดังกล่าวด้วย โดยเงื่อนไขตั้งต้นที่สำคัญในการคำนวณคือ ที่เวลาเริ่มต้น $t = 0$ จะกำหนดให้อุณหภูมิของแต่ละส่วนมีค่าเท่ากับอุณหภูมิอากาศแวดล้อม และเงื่อนไขค่าขอบในการคำนวณที่เวลาใดๆแต่ละครั้งคือ ที่ช่วงแรก ($N=1$) จะกำหนดให้อุณหภูมิอากาศก่อนเข้าแผงรับรังสีที่เวลา t จะเท่ากับอุณหภูมิอากาศขาเข้าที่เวลา $t + \Delta t$

4.1.1.4 การเขียนโปรแกรมสำหรับคำนวณในการหาผลเฉลย

เนื่องจากในการหาค่าอุณหภูมิขององค์ประกอบต่างๆ ของแผงรับรังสีตามวิธีที่กล่าวไปแล้วต้องคำนวณหลายขั้นตอน และต้องทำซ้ำทุกๆ เวลา Δt ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้เขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ในภาษาฟอร์แทรน โดยมีลำดับขั้นตอนการคำนวณตามแผนภูมิในรูปที่ 4.3 ดังนี้

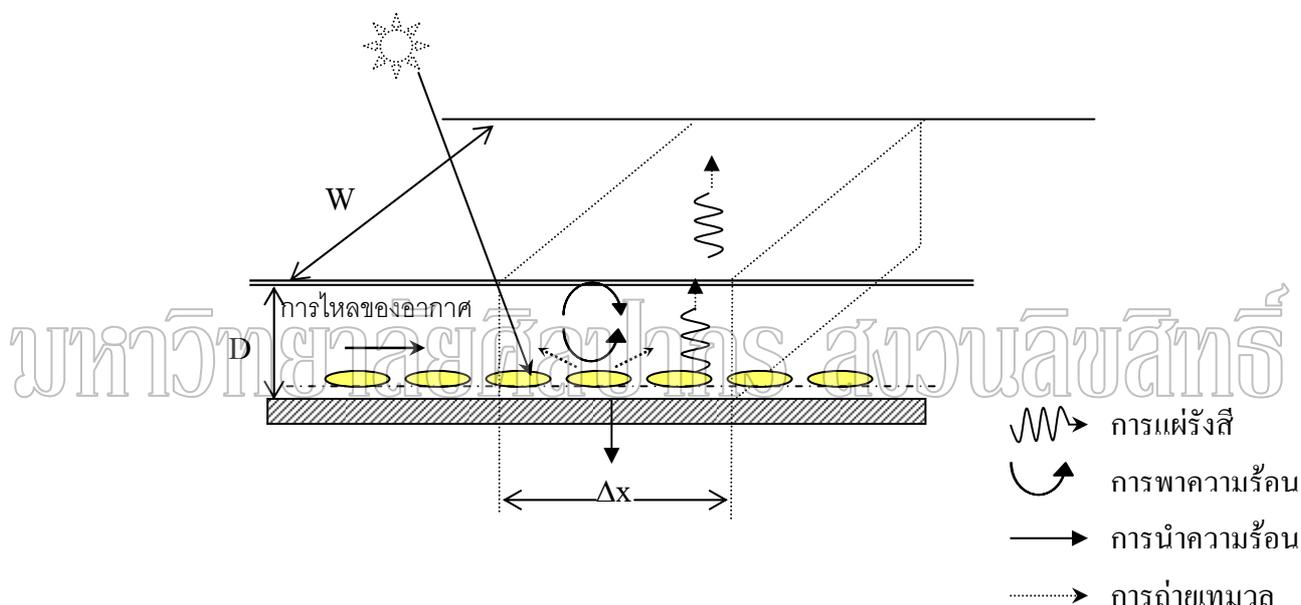


รูปที่ 4.3 แสดงแผนภูมิขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับส่วนแผงรับรังสี

4.1.2 แบบจำลองของส่วนตักแห่งผลิตภัณฑ์

4.1.2.1 การเขียนสมการสมดุลทางความร้อน

ส่วนตักแห่งผลิตภัณฑ์ของเครื่องอบแห้งแบบอุโมงค์ลมประกอบไปด้วยผลิตภัณฑ์ที่ต้องการตากวางบนตะแกรงซึ่งอยู่บนแผ่นคูกกลิ้งรังสี โดยมีอากาศจากส่วนแผงรับรังสีไหลผ่านและด้านบนปิดด้วยแผ่นฉนวนโปรงแสง ส่วนด้านล่างเป็นแผ่นฉนวนป้องกันการสูญเสียความร้อนด้านหลัง ในการสร้างแบบจำลองของส่วนที่ใช้ตากผลิตภัณฑ์ ผู้วิจัยจะเขียนสมดุลพลังงานและมวลที่เกิดขึ้นในแต่ละองค์ประกอบดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 แสดงการถ่ายเทความร้อนและมวลภายในปริมาตรควบคุมของส่วนตักแห่งผลิตภัณฑ์

ในแบบจำลองสำหรับส่วนอบแห้งจะพิจารณาสมดุลทางความร้อนคล้ายกันกับส่วนแผงรับรังสี แต่จะต่างกันอยู่ที่ความร้อนส่วนหนึ่งจะถูกใช้ไปในการอบแห้งผลิตภัณฑ์ โดยจะพิจารณา ผลิตภัณฑ์เหมือนเป็นตัวรับรังสีที่มีการเปลี่ยนแปลงของมวลอันเนื่องจากการสูญเสียความชื้นในขณะอบแห้ง

พิจารณาสมดุลพลังงานของผลิตภัณฑ์ในปริมาตรควบคุม (WDAX) ในรูปที่ 4.4 เนื่องจากเอนทาลปีที่เปลี่ยนไปของแต่ละองค์ประกอบเป็นผลมาจากปริมาณความร้อนที่องค์ประกอบนั้น ได้รับหรือเสียไป ดังนั้นจะสามารถเขียนสมการดุลพลังงานของแต่ละองค์ประกอบได้ในทำนองเดียวกับส่วนแผงรับรังสีดังรายละเอียดต่อไปนี้

1) สมการสมดุลพลังงานของผลิตภัณฑ์

เอนทาลปีของผลิตภัณฑ์ที่เปลี่ยนไปในช่วงเวลา Δt = ความร้อนที่ใช้ไปในการระเหยน้ำ
 + ความร้อนที่ใช้ไปในการเพิ่มอุณหภูมิ
 + ความร้อนจากการพาความร้อนที่ได้รับจากอากาศอบแห้ง
 + ความร้อนจากการแผ่รังสีระหว่างแผ่นฉนวนโปร่งใส
 + รังสีดวงอาทิตย์ที่ผลิตภัณฑ์ดูดกลืนไว้ได้

แทนค่าแต่ละเทอมจะได้สมการดังนี้

$$\begin{aligned} & \Delta x W \rho_{s,p} (C_p + C_w M) \left(T_p + \frac{dT_p}{dt} \Delta t \right) + \Delta x W \rho_{s,p} (C_p + C_w M) T_p \\ & = h_{fg} DG \frac{dH}{dx} \Delta x \Delta t + C_v (T_f - T_p) DG \frac{dH}{dx} \Delta x \Delta t \\ & + \Delta x W h_{c,p-f} (T_f - T_p) \Delta t + \Delta x W h_{r,p-c} (T_c - T_p) \Delta t + \Delta x W \tau \alpha_p (1 - \varepsilon) I_t \Delta t \end{aligned}$$

จัดรูปสมการใหม่ได้เป็น

$$\rho_{s,p} (C_p + C_w M) \frac{dT_p}{dt} = [h_{fg} + C_w (T_p - T_f)] DG \frac{dH}{dx} + h_{c,p-f} (T_f - T_p) + h_{r,p-c} (T_c - T_p) + \tau \alpha_p (1 - \varepsilon) I_t \quad (4.18)$$

เมื่อ	T_p	คือ อุณหภูมิของผลิตภัณฑ์ [K]
	T_b	คือ อุณหภูมิของแผ่นฉนวนด้านหลัง [K]
	T_c	คือ อุณหภูมิของแผ่นฉนวนโปร่งใส [K]
	T_f	คือ อุณหภูมิอากาศภายในเครื่องอบแห้ง [K]
	M	คือ อัตราส่วนความชื้นของผลิตภัณฑ์ [decimal ,d.b.]
	H	คือ อัตราส่วนความชื้นของอากาศอบแห้ง [kg/kg]
	h_{fg}	คือ ความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอของน้ำ [J/kg]
	$\rho_{s,p}$	คือ ความหนาแน่นเชิงพื้นที่ของผลิตภัณฑ์ [kg/m ²]
	C_p	คือ ความร้อนจำเพาะของผลิตภัณฑ์ [J/kg-K]
	C_w	คือ ความร้อนจำเพาะของน้ำ [J/kg-K]
	α_p	คือ สัมประสิทธิ์การดูดกลืนรังสีของผลิตภัณฑ์ [decimal]
	ε	คือ อัตราส่วนของช่องว่างอากาศต่อพื้นที่ตากแห้ง [decimal]
	τ	คือ สัมประสิทธิ์การส่งผ่านรังสีของแผ่นฉนวน โปร่งใส [decimal]

2) สมการสมดุลพลังงานของอากาศอบแห้ง

เอนทาลปีของผลิตภัณฑ์ที่เปลี่ยนไปในช่วงเวลา Δt = ความร้อนจากการพาความร้อนที่ให้กับผลิตภัณฑ์
 + ความร้อนจากการพาความร้อนที่ได้จากแผ่นฉนวนโปร่งแสง
 + ความร้อนจากการพาความร้อนที่ได้จากแผ่นฉนวนด้านหลัง

แทนค่าแต่ละเทอมลงไปแสดงได้ดังนี้

$$\begin{aligned} DGW(C_f + C_v H) \left(T_f + \frac{dT_f}{dx} \Delta x \right) \Delta t - DGW(C_f + C_v H) T_f \Delta t \\ = \Delta x W h_{c,p-f} (T_p - T_f) \Delta t + \Delta x W h_{c,f-c} (T_c - T_f) \Delta t + \Delta x W h_{c,b-f} (T_b - T_f) \Delta t \end{aligned}$$

จัดรูปสมการใหม่ได้เป็น

$$DG(C_f + C_v H) \frac{dT_f}{dx} = h_{c,p-f} (T_p - T_f) + h_{c,f-c} (T_c - T_f) + h_{c,b-f} (T_b - T_f) \quad (4.19)$$

3) สมการสมดุลพลังงานของแผ่นฉนวนโปร่งแสง

เอนทาลปีของแผ่นฉนวนโปร่งแสงที่เปลี่ยนไปในช่วงเวลา Δt

= ความร้อนจากการพาความร้อนที่ได้รับจากอากาศอบแห้ง
 + ความร้อนจากการแผ่รังสีระหว่างผลิตภัณฑ์กับฉนวนโปร่งแสง
 + ความร้อนจากการแผ่รังสีไปให้กับท้องฟ้า
 + รังสีดวงอาทิตย์ที่ดูดกลืนโดยแผ่นฉนวนโปร่งแสง

แทนค่าแต่ละเทอมลงไปแสดงได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \rho_c \delta_c \Delta x W C_c \left(T_c + \frac{dT_c}{dt} \Delta t \right) - \rho_c \delta_c \Delta x W C_c T_c \\ = h_{r,p-c} \Delta x W (T_p - T_c) \Delta t + h_{c,f-c} \Delta x W (T_f - T_c) \Delta t + h_{r,c-s} \Delta x W (T_{sky} - T_c) \Delta t + \Delta x W \alpha_c I_t \Delta t \end{aligned}$$

จัดรูปสมการใหม่ได้เป็น

$$\rho_c \delta_c C_c \frac{dT_c}{dt} = h_{r,p-c} (T_p - T_c) + h_{c,f-c} (T_f - T_c) + h_{r,c-s} (T_{sky} - T_c) + \alpha_c I_t \quad (4.20)$$

4) สมการสมดุลพลังงานของแผ่นฉนวนด้านหลัง

เอนทาลปีของแผ่นฉนวนด้านหลังที่เปลี่ยนไปในช่วงเวลา Δt
 = ความร้อนจากการพาความร้อนที่ให้กับอากาศอบแห้ง
 + ความร้อนที่สูญเสียจากการนำความร้อนด้านหลัง

แทนค่าแต่ละเทอมลงไปแสดงได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \rho_b \Delta x W \delta_b C_b (T_b + \frac{dT_b}{dt} \Delta t) - \rho_b \Delta x W \delta_b C_b T_b \\ = h_{c,f-b} \Delta x W (T_f - T_b) \Delta t + u_b \Delta x W (T_a - T_b) \Delta t \end{aligned}$$

จัดรูปสมการใหม่ได้เป็น

$$\rho_b \delta_b C_b \frac{dT_b}{dt} = h_{c,f-b} (T_f - T_b) + u_b (T_a - T_b) \quad (4.21)$$

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี สงวนลิขสิทธิ์

5) สมการสมดุลความชื้นระหว่างอากาศอบแห้งกับผลิตภัณฑ์

เนื่องจากความชื้นของอากาศอบแห้งเพิ่มขึ้นเพราะได้รับความชื้นจากผลิตภัณฑ์จึงจำเป็นต้องพิจารณาสมดุลความชื้นระหว่างผลิตภัณฑ์กับอากาศอบแห้งเพื่อใช้หาความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศพร้อมกันไปด้วย การเขียนสมการสมดุลความชื้นระหว่างอากาศกับผลิตภัณฑ์จะเริ่มจากความสัมพันธ์ดังนี้

$$\text{ความชื้นที่เพิ่มขึ้นของอากาศอบแห้ง} = \text{ความชื้นที่ลดลงของผลิตภัณฑ์}$$

หรือ

$$DGW \Delta t (H + \frac{dH}{dx} \Delta x) - DGW \Delta t H = \rho_{s,p} \Delta x W M - \rho_{s,p} \Delta x W (M + \frac{dM}{dt} \Delta t)$$

จัดรูปสมการใหม่ได้ดังนี้

$$DG \frac{dH}{dx} = - \rho_{s,p} \frac{dM}{dt} \quad (4.22)$$

6) สมการอบแห้งชั้นบางของผลิตภัณฑ์

ในงานวิจัยนี้จะเลือกใช้สมการอบแห้งชั้นบาง ซึ่งพัฒนาโดย Page สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\frac{M - M_c}{M_0 - M_c} = A \exp(-Bt) \quad (4.23)$$

เมื่อ M_c คือ ความชื้นสมดุลของผลิตภัณฑ์ [decimal, d.b.]

M_0 คือ ความชื้นเริ่มต้นของผลิตภัณฑ์ [decimal, d.b.]

โดย A และ B เป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศแห้ง ซึ่งหาได้จากการทดลองด้วยเครื่องอบแห้งระดับห้องทดลองที่สามารถควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ โดยได้สมการดังนี้

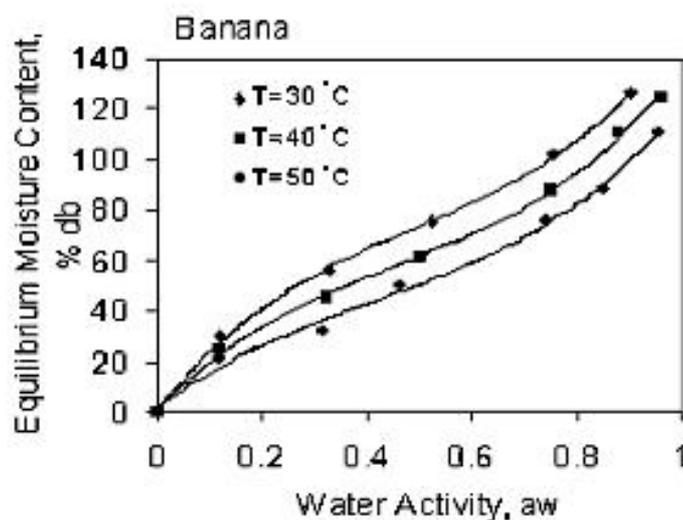
$$A = 1.503574 - 0.013267T - 0.505455rh + 0.000094T^2$$

$$B = 0.1814 - 0.006347T + 0.193rh - 0.000081T^2$$

เมื่อ T คือ อุณหภูมิอากาศ, [K]

rh คือ ความชื้นสัมพัทธ์, [decimal]

จากการทดลองหาความชื้นสมดุลของกล้วย (เสริม จันทร์ฉาย, 2544) ที่อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ต่างๆกัน แสดงผลการทดลองทั้งหมดในกราฟซอฟต์แวร์ไอโซเทอมดังรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 กราฟแสดงความชื้นสมดุลของกล้วยที่ได้จากการทดลอง

จากกราฟจะเห็นชัดเจนว่า เส้นความชื้นสมดุลที่อุณหภูมิสูงจะต่ำกว่าเส้นความชื้นสมดุลที่อุณหภูมิต่ำ และในแต่ละเส้นจะมีค่าความชื้นสมดุลเพิ่มขึ้นตามความชื้นสัมพัทธ์

ในการนำไปใช้งานในแบบจำลอง จำเป็นต้องหาความสัมพันธ์จากกราฟดังกล่าวในรูปของแบบจำลอง 3 ตัวแปร ซึ่งผู้วิจัยได้เลือกแบบจำลองเอมไพริคัล (empirical) หาความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นสมดุลกับอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ โดยแบบจำลองดังกล่าวเขียนได้ดังสมการ

$$M_c = b_0 + b_1 a_w + b_2 a_w^2 + b_3 a_w^3 \quad (4.24)$$

เมื่อ M_c คือ ความชื้นสมดุลของกล้วย [% , d.b.]
 b_0, b_1, b_2, b_3 คือ ค่าคงที่ [decimal]
 a_w คือ water activity ($a_w = \frac{Rh}{100}$)

โดยค่าคงที่ b_0, b_1, b_2, b_3 แสดงดังตารางที่ 4.1

มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์

ตารางที่ 4.1 แสดงค่าคงที่ b_0, b_1, b_2, b_3

Crop	Temp. (°C)	Model	Coefficients				RMSE	R ²
			b ₀	b ₁	b ₂	b ₃		
Banana	30	Henderson		2.2187	0.00005		1.0763	0.9991
	40	Empirical	1.732	215.27	-299.02	218.4	1.9922	0.9978
	50	Henderson		1.8754	0.00044		2.9587	0.9864

4.1.2.2 การหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน

ก) สัมประสิทธิ์การแผ่รังสี

เนื่องจากส่วนแผ่รังสีกับส่วนตากแห้งผลิตภัณฑ์ใช้โครงสร้างเดียวกัน ดังนั้นค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีจากแผ่นฉนวนโปร่งแสงไปยังท้องฟ้า ($h_{r,c-s}$) ในส่วนตาก

แห่งผลิตภัณฑ์ก็ยังคงใช้สมการเดียวกันกับส่วนแผ่รังสี และสำหรับสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีระหว่างผลิตภัณฑ์กับแผ่นฉนวนโปร่งใส ($h_{r,p-c}$) ก็ยังสามารถเขียนได้ในรูปแบบเดียวกันดังนี้

$$h_{r,p-c} = \frac{\sigma(T_p^2 + T_c^2)(T_p + T_c)}{\frac{1}{\epsilon_p} + \frac{1}{\epsilon_c} - 1} \quad (4.25)$$

เมื่อ	T_p	คือ อุณหภูมิของผลิตภัณฑ์ [$^{\circ}\text{C}$]
	T_c	คือ อุณหภูมิของแผ่นฉนวนโปร่งใส [$^{\circ}\text{C}$]
	ϵ_p	คือ สัมประสิทธิ์การแผ่รังสีของผลิตภัณฑ์ [decimal]
	ϵ_c	คือ สัมประสิทธิ์การแผ่รังสีของแผ่นฉนวนโปร่งใส [decimal]

ข) สัมประสิทธิ์การพาความร้อน

สัมประสิทธิ์การพาความร้อนจากแผ่นฉนวน โปร่งใสไปยังอากาศแวดล้อมเนื่องจากลม (h_w) ใช้แบบจำลองของ McAdams (1954) เช่นเดียวกับส่วนแผ่รังสี ในทำนองเดียวกันสำหรับสัมประสิทธิ์การพาความร้อนจากฉนวน โปร่งใสไปยังอากาศอบแห้ง ($h_{c,c-p}$) ซึ่งจะใช้แบบจำลองของ Kays and Crawford (1980) เหมือนกันกับในส่วนแผ่รังสี

สำหรับสัมประสิทธิ์การพาความร้อนจากผลิตภัณฑ์ไปยังอากาศอบแห้ง ($h_{c,p-p}$) ผู้วิจัยจะประมาณค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนดังกล่าวให้มีค่าเท่ากับสัมประสิทธิ์การพาความร้อนจากฉนวน โปร่งใสไปยังอากาศอบแห้ง

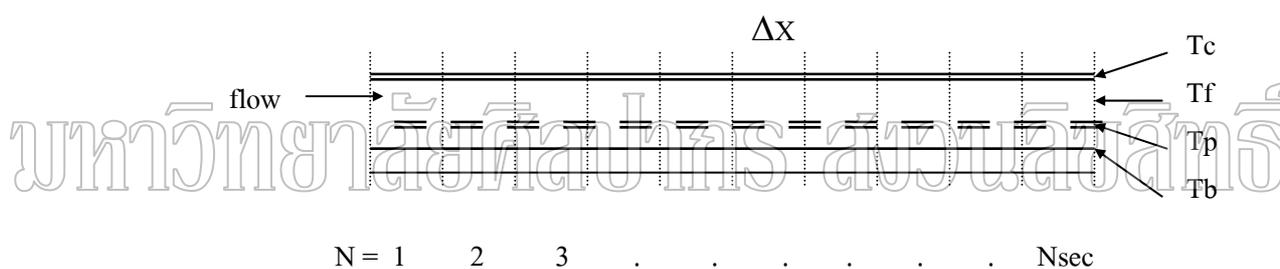
ค) สัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อนด้านล่าง

สำหรับสัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อนด้านล่างของแผ่นฉนวนด้านหลัง (U_b) ของส่วนตากแห้งผลิตภัณฑ์ก็มีค่าเท่ากับในส่วนแผ่รังสี

4.1.2.3 การหาผลเฉลยของสมการแบบจำลอง

ผู้วิจัยจะทำการแก้สมการ (4.18) – (4.21) โดยใช้วิธีเดียวกับกรณีของส่วน
แผงรับรังสีดังรายละเอียดต่อไปนี้

การหาผลเฉลยของส่วนตากแห้งผลิตภัณฑ์จะเริ่มจากการพิจารณาแบ่งส่วน
ตากแห้งผลิตภัณฑ์ออกเป็นช่วงเล็กๆเท่าๆกันตามความยาวเป็น Nsec ช่วง โดยแต่ละช่วงยาว Δx
เช่นเดียวกับใน ส่วนแผงรับรังสี แสดงดังรูปที่ 4.6 แต่จะมีองค์ประกอบที่เป็นชั้นบางของผลิตภัณฑ์
อยู่ระหว่างอากาศอบแห้ง



รูปที่ 4.6 แสดงการแบ่งส่วนตากแห้งผลิตภัณฑ์ออกเป็นช่วงเล็ก

โดยระเบียบวิธีผลต่างสืบเนื่อง (finite difference) ที่ใช้ในการหาผลเฉลย
สำหรับส่วนตากแห้งผลิตภัณฑ์ก็ยังคงใช้รูปแบบเดียวกันกับส่วนแผงรับรังสี นอกจากนี้แล้วจะ
พิจารณาในส่วนของการเปลี่ยนแปลงความชื้นในผลิตภัณฑ์ให้อยู่ในรูปผลต่างสืบเนื่องแบบ
forward เช่นกัน สำหรับรายละเอียดการหาผลเฉลยทั้งหมดแสดงดังต่อไปนี้

เริ่มต้นจะเขียนสมการแบบจำลองที่ได้ก่อนหน้านี้ให้อยู่ในรูปผลต่าง
สืบเนื่องก่อนจากสมการที่ (4.18) จะได้สมการของผลิตภัณฑ์ในช่วงใดๆเป็นดังนี้

$$\rho_p \delta_p (C_p + C_w M_t) \frac{T_{p,t+\Delta t} - T_{p,t}}{\Delta t} = [h_{fg} + C_w (T_{f,t+\Delta t} - T_{p,t+\Delta t})] DG \frac{dH}{dx} \quad (4.26)$$

$$h_{c,b-f} (T_{f,t+\Delta t} - T_{p,t+\Delta t}) + h_{r,b-c} (T_{c,t+\Delta t} - T_{p,t+\Delta t}) + \tau \alpha_p I_{t,t+\Delta t}$$

จากสมการสมดุลความชื้นในสมการที่ (4.22) จะสามารถเขียนสมการ (4.26) ใหม่ได้ดังนี้

$$\rho_p \delta_p (C_p + C_w M_t) \frac{T_{p,t+\Delta t} - T_{p,t}}{\Delta t} = -[h_{fg} + C_w (T_{f,t+\Delta t} - T_{p,t+\Delta t})] \rho_{s,p} \frac{M_{t+\Delta t} - M_t}{\Delta t} \quad (4.27)$$

$$h_{c,b-f} (T_{f,t+\Delta t} - T_{p,t+\Delta t}) + h_{r,b-c} (T_{c,t+\Delta t} - T_{p,t+\Delta t}) + \tau \alpha_p I_{t,t+\Delta t}$$

โดยค่า M ที่เวลา $t+\Delta t$ จะสามารถคำนวณได้โดยตรงจากสมการอบแห้งชั้นบางที่ได้จากการทดลอง นอกจากนี้ค่าความร้อนจำเพาะของผลิตภัณฑ์ก็จะหาจากการทดลองเช่นเดียวกัน

จากสมการที่ (4.19) จะได้สมการของอากาศภายในแผงรับรังสีสำหรับที่ N ใดๆดังนี้

$$DGC_f 0.5 \left[\frac{T_{f,x+\Delta x,t+\Delta t} - T_{f,x-\Delta x,t+\Delta t}}{2\Delta x} + \frac{T_{f,x+\Delta x,t} - T_{f,x-\Delta x,t}}{2\Delta x} \right] \quad (4.28)$$

$$= h_{c,p-f} (T_{p,x,t+\Delta t} - T_{f,x,t+\Delta t}) + h_{c,c-f} (T_{c,x,t+\Delta t} - T_{f,x,t+\Delta t}) + h_{c,b-f} (T_{b,x,t+\Delta t} - T_{f,x,t+\Delta t})$$

จากสมการที่ (4.20) จะได้สมการของแผ่นฉนวนโปร่งใสในแต่ละช่วงเป็นดังนี้

$$\rho_c \delta_c C_c \frac{T_{c,t+\Delta t} - T_{c,t}}{\Delta t} = h_{r,p-c} (T_{p,t+\Delta t} - T_{c,t+\Delta t}) + h_{c,f-c} (T_{f,t+\Delta t} - T_{c,t+\Delta t}) \quad (4.29)$$

$$+ h_{w,c-a} (T_{a,t+\Delta t} - T_{c,t+\Delta t}) + h_{r,c-s} (T_{s,t+\Delta t} - T_{c,t+\Delta t}) + \alpha_c I_{t,t+\Delta t}$$

และจากสมการที่ (4.21) จะได้สมการของแผ่นฉนวนด้านหลังที่ช่วงใดๆ เป็นดังนี้

$$\rho_b \delta_b C_b \frac{T_{b,t+\Delta t} - T_{b,t}}{\Delta t} = h_{c,b-f} (T_{f,t+\Delta t} - T_{b,t+\Delta t}) + U_b (T_{a,t+\Delta t} - T_{b,t+\Delta t}) \quad (4.30)$$

สมการผลต่างสี่บเนื่องทั้งหมดที่ได้จะสามารถเขียนให้อยู่ในรูปของระบบสมการเชิงเส้นของ T_c, T_f, T_p และ T_b ที่เวลา $t + \Delta t$ เช่นเดียวกันกับในส่วนแผงรับรังสี โดยค่าคงที่และค่าตัวแปรที่เวลา t จะเป็นค่าที่อยู่ทางขวามือของระบบสมการ กล่าวคือที่ช่วง N ใดๆ จะ

สามารถเขียนระบบสมการดังกล่าวได้ในรูปของเมทริกซ์ $[A]T = B$ ซึ่งมีเมทริกซ์สัมประสิทธิ์ขนาด 4×4 โดยผลเฉลยที่ต้องการหาคือค่า T_c, T_f, T_p และ T_b แสดงดังสมการ

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_c \\ T_f \\ T_p \\ T_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \\ b_4 \end{bmatrix} \quad (4.31)$$

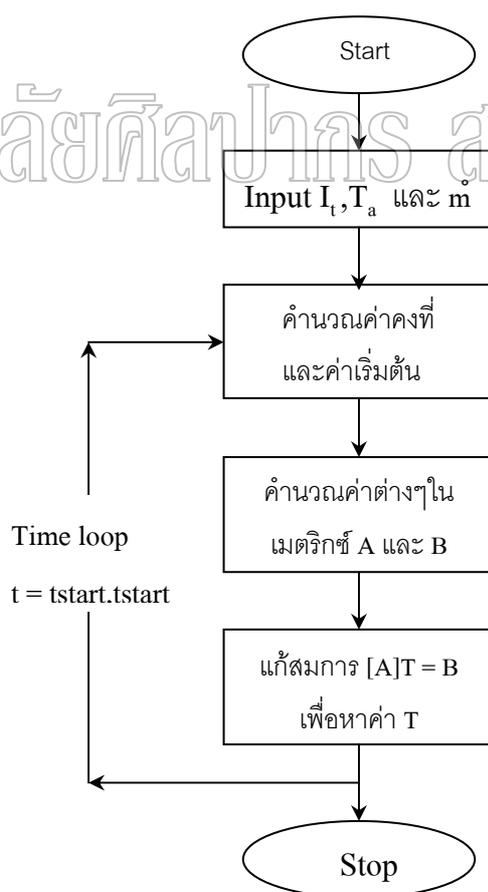
เมื่อกำหนดค่าสัมประสิทธิ์ในเมทริกซ์ A และ B ได้ก็จะสามารถหาค่า T_c, T_f, T_p และ T_b ที่ช่วงนั้นๆ ได้

ทำนองเดียวกันในส่วนแผงรับรังสีก็คือ ระบบสมการดังกล่าวของแต่ละช่วงจะถูกนำมาเขียนต่อกันแล้วรวมกันเป็นระบบสมการเดียวกันซึ่งมีขนาดเป็น $4N$ สมการ แล้วจึงนำมาแก้สมการเพื่อหาค่า T_c, T_f, T_p และ T_b ตลอดทั้งความยาว

ในการคำนวณเงื่อนไขขอบเขตและเงื่อนไขตั้งต้นที่สำคัญนอกจากที่กล่าวมาแล้วในส่วนแผงรับรังสีคือ ค่าอุณหภูมิขาเข้าของส่วนตากแห้งมีค่าเท่ากับอุณหภูมิตรงทางออกของส่วนแผงรับรังสีนั่นเอง เมื่อได้ค่าอุณหภูมิอากาศตลอดทั้งความยาวของส่วนตากแห้งผลิตภัณฑ์แล้วจะสามารถนำไปคำนวณค่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศตลอดทั้งความยาวต่อไปได้ โดยจะต้องพิจารณาความชื้นของอากาศที่เพิ่มขึ้นตามความยาวด้วยเช่นกัน นั่นคือสุดท้ายแล้วในการคำนวณที่เวลาใดๆ จะได้โปรไฟล์ของอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศอบแห้งตามความยาวของส่วนตากแห้งผลิตภัณฑ์สำหรับนำไปคำนวณค่าความชื้นของผลิตภัณฑ์ที่เวลาต่อไป

4.1.2.4 การเขียนโปรแกรมสำหรับคำนวณในการหาผลเฉลย

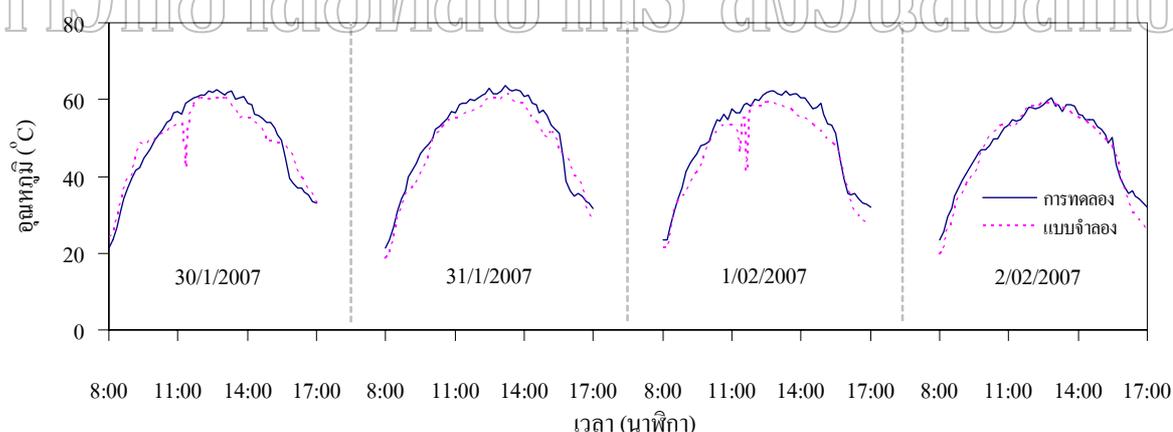
โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่พัฒนาขึ้นสำหรับการจำลองการทำงานในส่วนตาดกแห่งวัตถุประสงค์หลักคือ คำนวณค่าความชื้นของผลิตภัณฑ์ที่เวลาและตำแหน่งใดๆในส่วนตาดกแห่ง โดยจะต้องหาค่าอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศภายในเครื่องอบแห้งตลอดทั้งความยาวที่เวลาใดๆ ให้ได้ก่อน จากนั้นจึงจะสามารถคำนวณค่าความชื้นของผลิตภัณฑ์ดังกล่าวโดยใช้สมการอบแห้งชั้นบาง โดยค่าอุณหภูมิอากาศตรงทางเข้าของส่วนตาดกแห่งที่เวลาใดๆ จะให้มีค่าเท่ากับอุณหภูมิอากาศตรงทางออกจากแผงรับรังสี ($T_{r,o}$) แผนภูมิขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมดังกล่าวแสดงดังรูปที่ 4.7 ดังนี้



รูปที่ 4.7 แสดงแผนภูมิขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับส่วนแผงรับรังสี

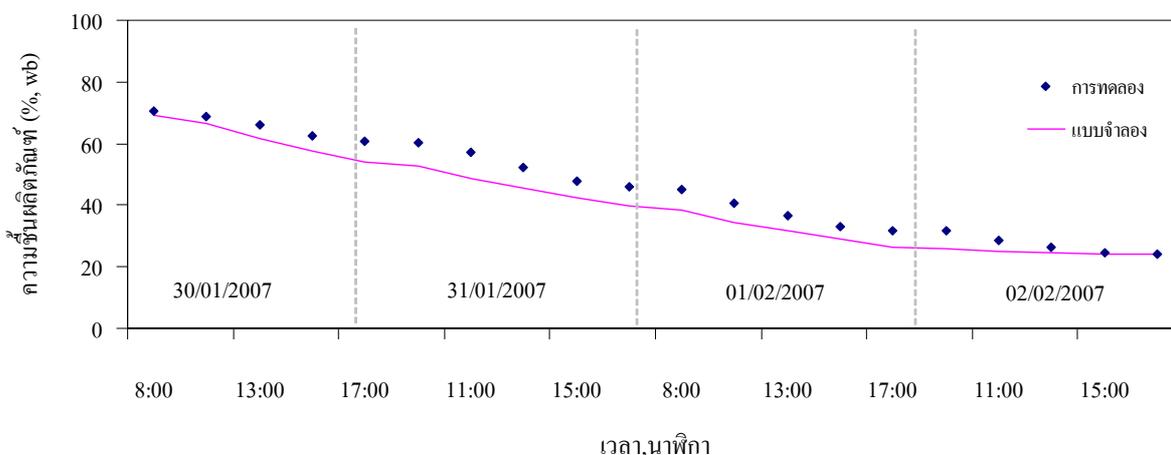
4.2 การทดสอบแบบจำลอง

ในการทดสอบแบบจำลองที่ได้พัฒนาขึ้นนั้น ผู้วิจัยจะทำการจำลองแบบการทำงานของเครื่องอบแห้งทั้งระบบ แล้วนำผลมาเปรียบเทียบกับการทดลอง สำหรับค่าตัวแปรต่างๆในแบบจำลอง กรณีตัวแปรทางเรขาคณิต เช่นขนาดขององค์ประกอบของส่วนอบแห้งจะใช้ขนาดที่เป็นจริง สำหรับสมบัติทางความร้อน เช่น สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนต่างๆ จะคำนวณตามสูตรที่กล่าวไปแล้ว โดยใช้ค่าพารามิเตอร์ในสูตรจากเอกสารอ้างอิงต่างๆของ Duffie and Beckman (1991) และข้อมูลความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศแวดล้อมจะใช้ค่าที่ได้จากการวัดจริงที่ทำการทดลอง โดยการ simulation จะทำทุกๆ 10 นาทีเท่ากับช่วงเวลาการเก็บข้อมูล ผลการเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิส่วนรับรังสี แสดงไว้ในรูปที่ 4.8 และผลการเปรียบเทียบการลดลงของความชื้นของผลิตภัณฑ์แสดงไว้ในรูปที่ 4.9 นอกจากนี้ ผู้วิจัยยังได้หาความแตกต่างของผลที่ได้จากแบบจำลองและจากการวัด ในรูปของ root mean square differences (RMSD)



รูปที่ 4.8 กราฟแสดงการแปรค่าอุณหภูมิอากาศบริเวณส่วนรับรังสีที่ได้จากแบบจำลอง

และจากผลการทดลองอบกล้วยระหว่างวันที่ 30 ม.ค. 50 – 2 ก.พ. 50



รูปที่ 4.9 กราฟแสดงการคำนวณความชื้นของผลิตภัณฑ์ที่อบแห้ง โดยอาศัยแบบจำลองเมื่อเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการวัดในช่วงวันที่ 30 ม.ค. 50 – 2 ก.พ. 50

จากผลการจำลองการทำงานของส่วนรับรังสีพบว่ากรณีที่ท้องฟ้าแจ่มใส อุณหภูมิอากาศที่คำนวณได้มีค่าใกล้เคียงกับค่าอุณหภูมิที่ได้จากการวัด แต่ในกรณีที่รังสีดวงอาทิตย์มีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วเนื่องจากเมฆ อุณหภูมิจากการ simulation จะมีค่าต่ำกว่าผลการวัด แต่ยังคงมีรูปแบบการเปลี่ยนแปลงคล้ายกันทั้งนี้เพราะค่าตัวแปรบางตัว เช่น ความร้อนจำเพาะที่นำมาใช้อาจมีความคลาดเคลื่อน เมื่อพิจารณาค่าความแตกต่างของอุณหภูมิที่ได้การวัดและการคำนวณพบว่าค่า RMSD จะแปรค่าอยู่ในช่วง 4°C ซึ่งถือว่ามีความคลาดเคลื่อนค่อนข้างน้อย

สำหรับผลการทำนายค่าความชื้นของกล้วย ในการจำลองการทำงานของเครื่องอบแห้งพบว่า กราฟการลดลงของความชื้นในกล้วยวันแรกที่ได้จากการคำนวณมีลักษณะใกล้เคียงกับผลที่ได้จากการทดลอง สำหรับในวันที่ 2-4 จะพบว่าค่าความชื้นของกล้วยจากแบบจำลองจะมีค่าต่ำกว่าค่าที่ได้จากการทดลองเล็กน้อย ซึ่งอาจเป็นผลมาจากความคลาดเคลื่อนของตัวแปรที่ใช้ในแบบจำลอง และแบบจำลองการอบแห้งขั้นบันไดรวมถึงแบบจำลองความชื้นสมดุลที่ยังมีความคลาดเคลื่อน และเมื่อนำค่าความชื้นของผลิตภัณฑ์ที่วัดได้มาเปรียบเทียบกับที่ได้จากแบบจำลองพบว่า ค่า RMSD มีอยู่ในช่วง 5.2% (w.b.)

จากผลการทดลองนี้แบบจำลองสามารถนำไปใช้ในการทำนายค่าสมรรถนะของเครื่องอบแห้งในสถานะของการอบแห้งต่างๆ ได้ นอกจากนี้ยังสามารถใช้ในการศึกษาผลของตัวแปรต่างๆ ที่มีผลต่อสมรรถนะของเครื่องอบแห้ง ซึ่งจะเป็นแนวทางในการปรับปรุงสมรรถนะของเครื่องอบแห้งให้ดีขึ้น หรือใช้ในงานด้าน optimization ต่อไป