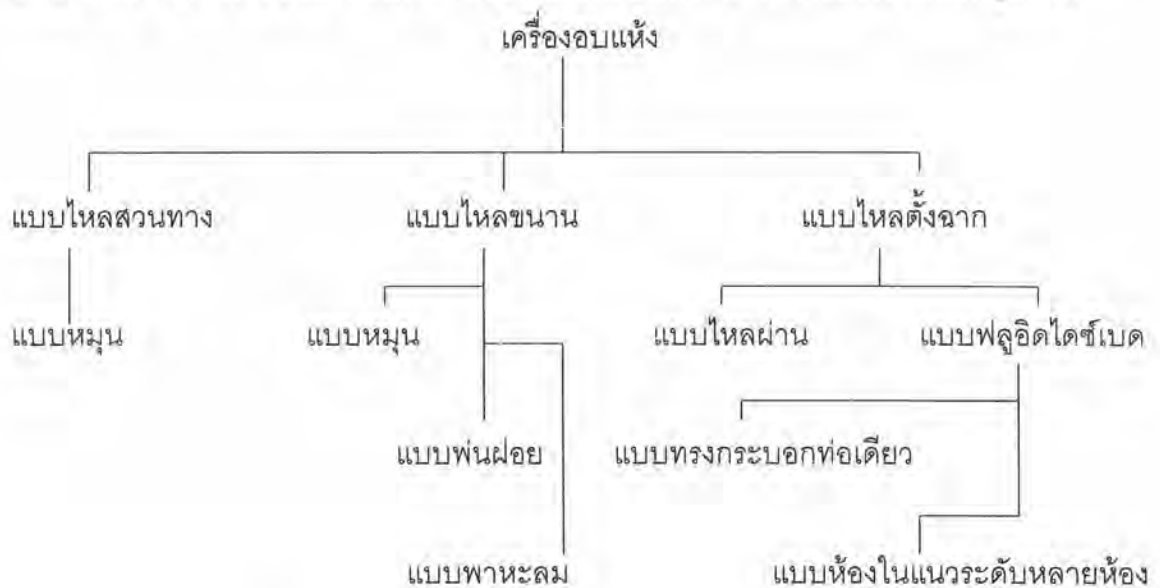


บทที่ 4

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการออกแบบ

งานวิทยานิพนธ์นี้จะทำการเขียนโปรแกรมที่ใช้ในการออกแบบเครื่องอบแห้งทั้งหมด 5 ชนิดคือเครื่องอบแห้งแบบหมุน, แบบพ่นฝอย, แบบพาหะลม, แบบไหลผ่าน และแบบฟลูอิดไดซ์เบด โดยแต่ละชนิดจะมีหลักการออกแบบที่สัมพันธ์กัน ดังรายละเอียดแผนภูมิดังนี้



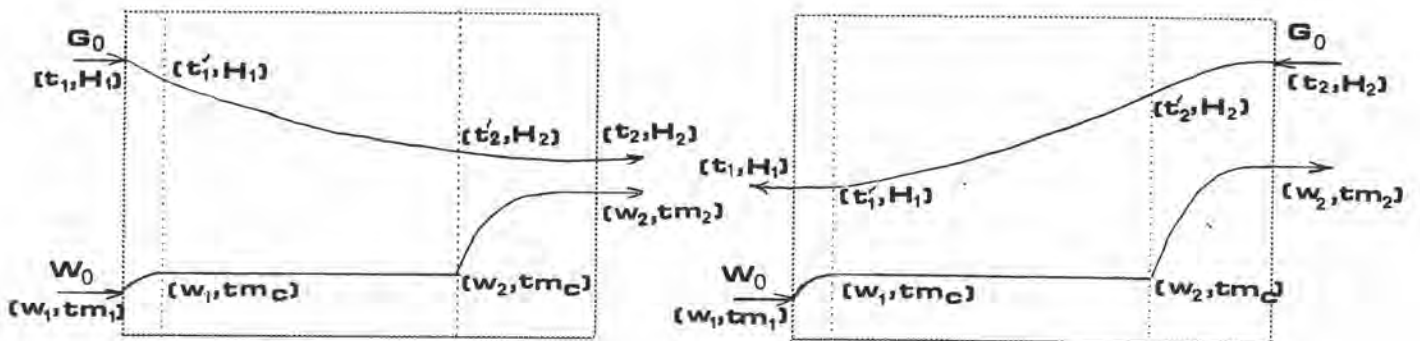
4.1 การออกแบบเครื่องอบแห้งด้วยลมร้อนแบบต่อเนื่องแบบไหลขนานและไหลสวนทาง

สมมุติฐานของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการออกแบบ มีดังนี้

1. อุณหภูมิของวัสดุกับความชื้นของวัสดุ และอุณหภูมิของลมร้อนกับความชื้นของลมร้อน ณ ตำแหน่งใดๆ ของพื้นที่หน้าตัดท่ออบแห้งเดียวกันจะมีค่าเท่ากัน
2. ขนาดของวัสดุที่จะอบแห้งถือว่าขนาดเท่ากันทุกอนุภาค
3. ไม่มีการสูญเสียความร้อนผ่านทางผนังท่ออบแห้ง หรือสูญเสียแก่สิ่งแวดล้อม
4. ไม่มีการถ่ายเทมวลและพลังงานใดภายในท่ออบแห้ง นอกเหนือจากการถ่ายเทระหว่างวัสดุกับลมร้อน

5. การอบแห้งนี้วัสดุจะต้องกระจายในกระแสลมร้อน
6. ความชื้นทั้งหมดของวัสดุจะถือว่าระเหยไปในช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ทั้งหมด ส่วนช่วงอัตราการอบแห้งช้าลงจะถือว่าเป็นช่วงที่เพิ่มอุณหภูมิของวัสดุหลังจากการระเหยเท่านั้น

จากสมมุติฐานทั้งหมด สามารถออกแบบเครื่องอบแห้งด้วยลมร้อนแบบต่อเนื่องแบบไหลขนานหรือไหลสวนทาง โดยอาศัยหลักการออกแบบของเรียวโซ โทเอ (2529) ดังนี้



4.1.1 การไหลแบบขนาน

4.1.2 การไหลแบบสวนทาง

รูปที่ 4.1 การเปลี่ยนแปลงสภาพของลมร้อนและวัสดุอบแห้งภายในเครื่องอบแห้ง

การเปลี่ยนแปลงสภาพของลมร้อนและวัสดุภายในเครื่องอบแห้งจะเป็นไปตามรูปที่ 4.1 เนื่องจากอุณหภูมิของวัสดุจะเปลี่ยนค่าตามสภาพของลมร้อนค่อนข้างรวดเร็ว จึงสามารถคำนวณอุณหภูมิของวัสดุที่ทางออกได้จากสภาพของลมร้อนดังนี้

$$\frac{t - t_m}{t - t_w} = \frac{\lambda_w F - C_s(t - t_w) \left(\frac{F}{F_c} \right)^{F_c \lambda_w / \{C_s(t - t_w)\}}}{\lambda_w F_c - C_s(t - t_w)} \quad \text{---(4.1)}$$

จากการถ่ายเทมวลระหว่างวัสดุและลมร้อน

$$\text{ความชื้นที่ระเหยออกจากวัสดุ} = \text{ความชื้นที่ลมร้อนได้รับ}$$

$$W_0(w_1 - w_2) = \pm G_0(H_2 - H_1) \quad \text{----- (4.2)}$$

โดย + แสดงถึงการไหลแบบขนาน และ - แสดงถึงการไหลแบบสวนทาง

และจากการถ่ายเทพลังงานระหว่างวัสดุและลมร้อน

ความร้อนที่วัสดุได้รับ = ความร้อนที่ลมร้อนถ่ายเทออกจากลมร้อน

$$W_O C_S (tm_1 - tm_2) + W_O C_W (w_1 - w_2)(tm_1 - tm_2) = \pm G_O (i_2 - i_1) \quad (4.3)$$

จัดรูปสมการใหม่ได้

$$G_O i_1 \pm W_O (C_S + C_W w_1) tm_1 = G_O i_2 \pm W_O (C_S + C_W w_2) tm_2 \quad (4.4)$$

โดย + แสดงถึงการไหลแบบขนาน และ - แสดงถึงการไหลแบบสวนทาง

จากสมการ (4.1) ถึง (4.3) จะสามารถกำหนดค่าตัวแปรทั้งหมดที่ปลายทั้งสองข้างของเครื่องอบแห้งได้

การคำนวณหาปริมาตรของเครื่องอบแห้ง จะแบ่งเครื่องอบแห้งออกเป็น 3 ช่วงคือ

1. ช่วงการให้ความร้อนเบื้องต้นแก่วัสดุ

ช่วงนี้ถือว่าเป็นการเพิ่มอุณหภูมิแก่วัสดุก่อนการระเหย โดยวัสดุจะเพิ่มอุณหภูมิจนมีค่าเท่ากับอุณหภูมิกระเปาะเปียกของลมร้อน การคำนวณจะเพิ่มสมมุติฐานว่า ความชื้นของอากาศมีค่าคงที่ตลอดช่วง

จากสมการถ่ายเทพลังงานระหว่างลมร้อนและวัสดุ

ปริมาณความร้อนที่ถ่ายเท = ความร้อนที่วัสดุได้รับ = ความร้อนที่ลมร้อนถ่ายเทออกจากลมร้อน

$$Q_1 = W_O C_S (tmc - tm_1) + W_O C_W w_1 (tmc - tm_1) = \pm G_O C_{H1} (t_1 - t'_1) \quad (4.5)$$

จัดรูปสมการใหม่ได้เป็น

$$Q_1 = W_O (C_S + C_W w_1) (tmc - tm_1) = \pm G_O C_{H1} (t_1 - t'_1) \quad (4.6)$$

จากสมการอัตราการถ่ายเทพลังงาน

$$Q_1 = haV_1 \frac{(t_1 - tm_1) - (t'_1 - tmc)}{\ln\{(t_1 - tm_1)/(t'_1 - tmc)\}} \quad \text{----- (4.7)}$$

2. ช่วงการอบแห้งที่มีความเร็วการอบแห้งคงที่

ช่วงนี้ถือเป็นช่วงที่ความชื้นทั้งหมดของวัสดุถูกระเหยโดยที่อุณหภูมิของวัสดุยังเท่ากับอุณหภูมิกระเปาะเปียกของลมร้อน และความชื้นของลมร้อนมีค่าคงที่เป็นความชื้นเฉลี่ย

จากสมการถ่ายเทพลังงานระหว่างลมร้อนและวัสดุ

$$\begin{aligned} \text{ปริมาณความร้อนที่ถ่ายเท} &= \text{ความร้อนที่ความชื้นในวัสดุใช้ในการระเหย} \\ &= \text{ความร้อนที่ลมร้อนถ่ายเทออก} \end{aligned}$$

$$Q_2 = W_O(w_1 - w_2)\lambda_{mc} = \pm G_O((C_{H1} + C_{H2})/2)(t'_1 - t'_2) \quad \text{----- (4.8)}$$

จากสมการอัตราการถ่ายเทพลังงาน

$$Q_2 = haV_2 \frac{(t'_1 - t'_2)}{\ln\{(t'_1 - tmc)/(t'_2 - tmc)\}} \quad \text{----- (4.9)}$$

3. ช่วงการอบแห้งที่มีความเร็วการอบแห้งลดลง

ช่วงนี้ถือว่าการเพิ่มอุณหภูมิของวัสดุหลังการระเหยอย่างเดียว และความชื้นของอากาศมีค่าคงที่ตลอดช่วง

จากสมการถ่ายเทพลังงานระหว่างลมร้อนและวัสดุ

$$\text{ปริมาณความร้อนที่ถ่ายเท} = \text{ความร้อนที่วัสดุได้รับ} = \text{ความร้อนที่ลมร้อนถ่ายเทออกมา}$$

$$Q_3 = W_O C_s (tm_2 - tmc) + W_O C_w w_2 (tm_2 - tmc) = \pm G_O C_{H2} (t'_2 - t_2) \quad \text{----- (4.10)}$$

จัดรูปสมการใหม่ได้เป็น

$$Q_3 = W_o(C_s + C_w w_2)(tm_2 - tmc) = \pm G_o C_{H2}(t'_2 - t_2) \quad (4.11)$$

จากสมการอัตราการถ่ายเทพลังงาน

$$Q_3 = haV_3 \frac{(t'_2 - tmc) - (t_2 - tm_2)}{\ln\{(t'_2 - tmc)/(t_2 - tm_2)\}} \quad (4.12)$$

4.2 หลักการออกแบบเครื่องอบแห้งด้วยลมร้อนแบบต่อเนื่องแบบไหลตั้งฉาก

เครื่องอบแห้งแบบไหลตั้งฉากเป็นเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบดและแบบไหลผ่าน เนื่องจากลมร้อนจะไหลผ่านชั้นวัสดุ อุณหภูมิและความชื้นลมร้อนจึงเปลี่ยนไปตามความสูงของชั้นวัสดุ แต่อัตราส่วนความชื้นและอุณหภูมิของวัสดุจะแปรผันตามทิศทางการไหลของวัสดุ ดังนั้นจึงต้องใช้วิธีออกแบบแต่ละเครื่องแตกต่างกัน

4.2.1 หลักการออกแบบเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบด

ในเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบด วัสดุจะถูกกวนและผสมอย่างรุนแรงโดยกระแสลมร้อนที่ไหลผ่านชั้นของวัสดุจึงถือว่าการผสมกันอย่างสมบูรณ์ อัตราส่วนความชื้นวิกฤตของวัสดุจะมีค่าต่ำมากน้อยกว่า 0.02) และสามารถถือได้ว่าปริมาณความชื้นของวัสดุถูกระเหยไปในช่วงการระเหยจากผิววัสดุ หรือช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ทั้งหมด ส่วนช่วงที่อัตราการอบแห้งมีความเร็วลดลง จะมีหน้าที่เพิ่มอุณหภูมิของวัสดุหลังการระเหยเท่านั้น (เรียวไซ โทเอ, 2529)

เครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบด แบ่งออกเป็น 2 ชนิดคือ

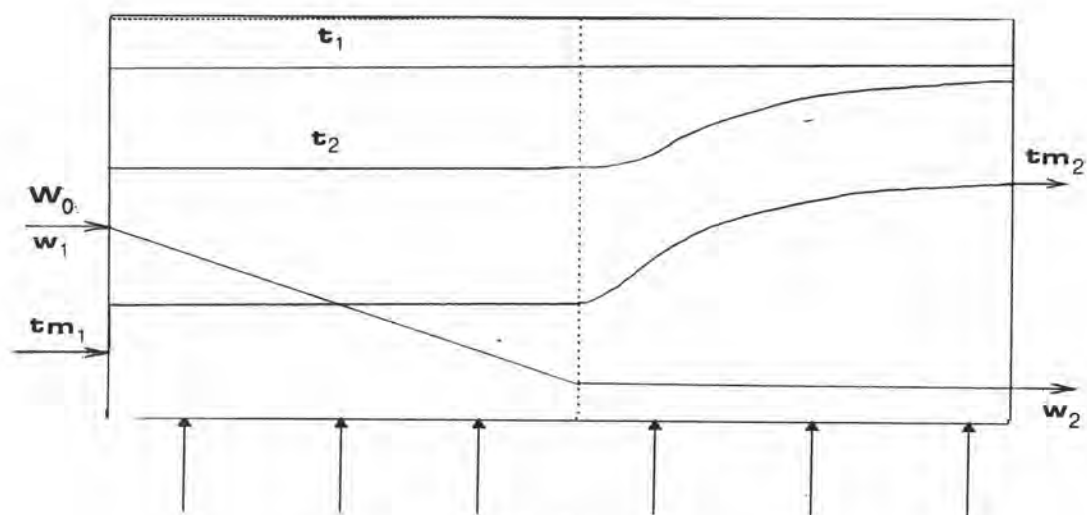
1. เครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบดที่มีห้องในแนวระดับหลายห้อง (Horizontal Multi-Chamber Fluidized Bed Dryer)
2. เครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบดแบบทรงกระบอกท่อเดียว (Single Cylinder Fluidized Bed Dryer)

สมมุติฐานของแบบจำลองคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการออกแบบเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบด มีดังนี้

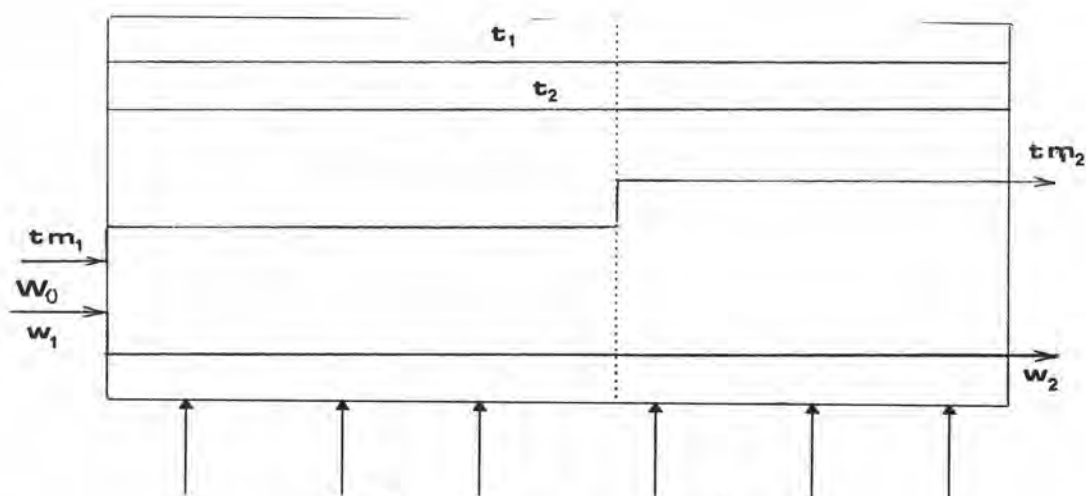
1. จะถือว่าอุณหภูมิและความชื้นของวัสดุ ไม่แปรเปลี่ยนตามความสูงของชั้นวัสดุ
2. ขนาดของวัสดุที่อบแห้ง ถือว่าขนาดเท่ากันทุกอนุภาค
3. ไม่มีการสูญเสียความร้อนผ่านทางผนังห้องอบแห้ง
4. ไม่มีการถ่ายเทมวลและพลังงานใดภายในเครื่องอบแห้ง นอกเหนือจากการถ่ายเทระหว่างวัสดุและลมร้อน
5. ถือว่าช่วงการให้ความร้อนเบื้องต้นแก่วัสดุน้อยมากตัดทิ้งได้
6. ในกรณีเครื่องอบแห้งแบบที่มีห้องในแนวระดับหลายห้อง ถือว่าการไหลของลมร้อนผ่านชั้นของวัสดุและการไหลของวัสดุ เป็นการไหลแบบลูกสูบ
7. ในกรณีเครื่องอบแห้งแบบทรงกระบอกท่อเดียว ถือว่าการไหลของลมร้อนเป็นแบบลูกสูบ และวัสดุถือว่าเกิดการผสมกันอย่างทั่วถึงในเครื่องอบแห้ง

จากสมมุติฐานสามารถออกแบบเครื่องอบแห้งแบบต่อเนื่องแบบฟลูอิดไดซ์เบดโดยใช้ชุดสมการของเวียวโซ โทเฮ (2529) ดังนี้

การเปลี่ยนแปลงสภาพของลมร้อนและวัสดุจะเป็นไปตามรูปที่ 4.2 และการคำนวณหาพื้นที่ของเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบด จะแบ่งเครื่องอบแห้งออกเป็น 2 ช่วงคือ ช่วงที่มีอัตราการอบแห้งที่คงที่และช่วงที่มีอัตราการอบแห้งที่ลดลง



รูปที่ 4.2.1 แบบที่มีห้องในแนวระดับหลายห้อง



รูปที่ 4.2.2 แบบทรงกระบอกท่อเดียว

รูปที่ 4.2 รูปแสดงการเปลี่ยนแปลงสภาพของลมร้อนและวัสดุภายในเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบด

จากรูปที่ 4.2 ในช่วงแรกเครื่องอบแห้งทั้งสองแบบจะมีอุณหภูมิของอากาศขาออกคงที่ และอุณหภูมิของวัสดุก็คงที่ และเนื่องจากช่วงนี้เป็นช่วงที่ความชื้นระเหยจากผิววัสดุ อุณหภูมิของวัสดุจึงมีค่าเท่ากับอุณหภูมิกระเปาะเปียกของลมร้อน

จากสมการดุลพลังงานของส่วนสูงดิฟเฟอเรนเชียล dL ของฟลูอิดไดซ์เบด จะได้

$$\begin{aligned} -GC_{H1}dt &= ha(t - t_w)dL \\ \int \frac{-dt}{(t - t_w)} &= \int_0^L \frac{ha}{GC_{H1}} dL \\ (t_2 - t_w) &= (t_1 - t_w)e^{-haL/GC_{H1}} \quad \text{—————(4.13)} \end{aligned}$$

จากสมการดุลพลังงานสำหรับพื้นที่ dA_1 ที่เล็กมาก

$$\int W_O \lambda_W (-dw) = \int GC_{H1}(t_1 - t_2)dA_1$$

ปริมาณความร้อนที่ถ่ายเทระหว่างวัสดุและลมร้อน ในช่วงนี้เท่ากับ

$$Q_1 = W_O(w_1 - w_2)\lambda_W = GC_{H1}(t_1 - t_2)A_1 \quad \text{—————(4.14)}$$

และจากการแทนสมการ 4.13 ในสมการ 4.14 จะได้

$$W_O(w_1 - w_2)\lambda_W = GC_{H1}(t_1 - t_w)(1 - e^{-haL/GC_{H1}})A_1 \quad \text{—————(4.15)}$$

จากรูปที่ 4.2.1 ในกรณีเครื่องอบแห้งที่มีห้องในแนวระดับหลายห้อง อุณหภูมิของลมร้อนและวัสดุ จะแปรผันตามทิศทางการไหลของวัสดุ

จากสมการดุลพลังงานของส่วนสูงดิฟเฟอเรนเชียล dL ของฟลูอิดไดซ์เบด จะสามารถหาพื้นที่ A_2 ที่ต้องใช้ในการเพิ่มอุณหภูมิของวัสดุ

$$\begin{aligned} -GC_{H1}dt &= ha(t - tm)dL \\ (t_2 - tm) &= (t_1 - tm)e^{-\frac{haL}{GC_{H1}}} \end{aligned} \quad \text{—————(4.16)}$$

จากสมการดุลพลังงานของพื้นที่ dA_2 ที่เล็กมาก

$$W_oC_S dtm = GC_{H1}(t_1 - t_2)dA_2$$

โดยการแทนสมการที่ 4.16 จะได้

$$\begin{aligned} W_oC_S dtm &= GC_{H1}((t_1 - tm) - (t_1 - tm)e^{-\frac{haL}{GC_{H1}}})dA_2 \\ W_oC_S \ln\left(\frac{t_1 - tm_1}{t_1 - tm_2}\right) &= GC_{H1}(1 - e^{-\frac{haL}{GC_{H1}}})A_2 \end{aligned} \quad \text{—————(4.17)}$$

ส่วนปริมาณความร้อนที่ถ่ายเทระหว่างวัสดุและลมร้อนในช่วงนี้เท่ากับ

$$Q_2 = W_oC_S(tm_2 - tm_1) = GC_{H1}(t_1 - t_2)A_2 \quad \text{—————(4.18)}$$

จากรูป 4.2.2 ในเครื่องอบแห้งทรงกระบอกท่อเดียว เนื่องจากวัสดุผสมกันอย่างทั่วถึง จึงถือว่าอุณหภูมิของวัสดุและลมร้อนจะมีค่าคงที่

จากสมการดุลพลังงานของส่วนสูงดิฟเฟอเรนเชียล dL ของฟลูอิดไดซ์เบด

$$-GC_{H1}dt = ha(t - tm_2)dL$$

$$(t_2 - tm_2) = (t_1 - tm_2) e^{-haL/GC_{H1}} \quad \text{-----} \quad (4.19)$$

จากสมการดุลพลังงานของพื้นที่ dA_2 ที่เล็กมาก

$$\begin{aligned} W_o C_s dtm &= GC_{H1}(t_1 - t_2)dA_2 \\ W_o C_s (tm_2 - tm_1) &= GC_{H1}(t_1 - t_2)A_2 \end{aligned} \quad \text{-----} \quad (4.20)$$

แทนสมการ 4.19 ใน 4.20 ได้

$$W_o C_s \frac{(tm_2 - tm_1)}{(t_1 - tm_2)} = GC_{H1}(1 - e^{-haL/GC_{H1}})A_2$$

พารามิเตอร์ที่สำคัญของเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบด คือความเร็วของลมร้อนที่ใช้ เนื่องจากความเร็วของลมร้อนที่ไหลเข้าเครื่องจะต้องพอดีที่จะก่อให้เกิดเป็นฟลูอิดไดซ์เบด ทำให้วัสดุสามารถเคลื่อนไหวอยู่ในลักษณะแขวนลอยได้ ดังนั้นความเร็วของลมร้อนจะต้องมากกว่าความเร็วของการเริ่มเกิดฟลูอิดไดซ์ขึ้น U_{mf} ของอนุภาค แต่น้อยกว่าความเร็วปั่นป่วน U_t (Terminal Velocity) ของอนุภาค โดยปกติจะใช้ความเร็วของลมร้อนประมาณ 3-8 เท่าของ U_{mf} หรือ 0.2-0.6 เท่าของ U_t (เรียวกไซ โทเอ, 2529)

$$U_{mf} = (dp^2/180)(\rho_s - \rho_f)(g/\mu_f)Emf^3 / (1 - Emf) ; Re_{p,umf} < 20 \quad \text{-----} \quad (4.21)$$

$$U_{mf}^2 = dp(\rho_s - \rho_f)gEmf^3 / 1.75 \rho_f ; Re_{p,umf} > 1000$$

$$\begin{aligned}
 Ut &= g(\rho_s - \rho_f)(dp^2 / 18\mu_f); \text{Re}_{p,ut} < 2 \\
 Ut &= dp[(4/225)(\rho_s - \rho_f)^2 (g^2 / \mu_f \rho_f)]^{1/3}; 2 < \text{Re}_{p,ut} < 500 \quad \text{--- (4.22)} \\
 Ut &= [3g(\rho_s - \rho_f)dp / \rho_f]^{1/2}; \text{Re}_{p,ut} > 500
 \end{aligned}$$

$$\text{ที่ซึ่ง} \quad \text{Re}_p = dpU\rho_f / \mu_f$$

4.2.2 หลักการออกแบบเครื่องอบแห้งแบบไหลผ่าน

ในเครื่องอบแห้งแบบไหลผ่าน วัสดุจะถูกวางบนแผ่นที่มีรูพรุนหรือตาข่าย ที่มีลมร้อนไหลผ่านได้ โดยลมร้อนจะถูกเป่าตั้งฉากกับชั้นวัสดุ โดยทั่วไปความเร็วของลมร้อนจะอยู่ประมาณ 0.3-1.2 เมตร/วินาที

ในการออกแบบเครื่องอบแห้งแบบไหลผ่านจะใช้หลักการของเรียโวไซ โทเอ (2529) โดยสมมุติฐานของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการออกแบบเครื่องอบแห้งแบบไหลผ่านมีดังนี้

1. ขนาดของวัสดุที่จะอบแห้งถือว่าขนาดเท่ากันทุกอนุภาค
2. ไม่มีการสูญเสียความร้อนผ่านทางผนังเครื่องอบแห้งหรือสูญเสียแก๊สแวดล้อม
3. ไม่มีการถ่ายเทพลังงานใดภายในเครื่องอบแห้ง นอกเหนือจากการถ่ายเทระหว่างวัสดุและลมร้อน
4. ถือว่าช่วงการให้ความร้อนเบื้องต้นแก่วัสดุน้อยมากตัดทิ้งได้

ลมร้อนไหลผ่านชั้นวัสดุด้วยความเร็วค่าหนึ่ง โดยขณะที่ลมร้อนเคลื่อนที่ผ่านชั้นวัสดุ ลมร้อนก็จะค่อยสูญเสียความร้อนและมีความชื้นเพิ่ม ดังนั้นลมร้อนจะเปลี่ยนสภาพไปตามความลึกของชั้นวัสดุ แต่อย่างไรก็ตามตราบไคที่อัตราส่วนความชื้นของแต่ละอนุภาคยังมีค่าสูงกว่าอัตราส่วนความชื้นวิกฤตของอนุภาค สภาพของลมร้อนจะแปรผันตามเส้น adiabatic cooling line โดยที่อุณหภูมิของวัสดุจะเท่ากับอุณหภูมิกระเปาะเปียกของลมร้อน (เรียโวไซ โทเอ, 2529)

จากสมการดุลพลังงานของส่วนสูงดิฟเฟอเรนเชียล

$$-GC_{H1}dt = ha(t - t_w)dl = \lambda_w \rho_b \left(\frac{-dc}{d\theta} \right) dl$$

$$\frac{(t_1 - t_w)}{(t_2 - t_w)} = e^{N_t} \quad \text{----- (4.23)}$$

ที่ซึ่ง $N_t = \frac{haL}{GC_{H1}}$

N_t เป็นตัวแปรไร้มิติ มีชื่อเรียกว่าจำนวนหน่วยการถ่ายเท

อัตราการอบแห้งที่คงที่สำหรับชั้นวัสดุ R_c (กก.น้ำ/ชม.ม² พื้นที่ของชั้นวัสดุ) จะมีค่าคงที่เท่ากับ

$$R_c = G(H_2 - H_1) = W_o(-dw) \lambda_w = G_o CH_1 \frac{(t_1 - t_2)}{\lambda_w} \quad \text{----- (4.24)}$$

แทนสมการ 4.23 ในสมการ 4.24 จะได้

$$R_c = GCH_1(t_1 - t_w)(1 - e^{-N_t}) / \lambda_w \quad \text{----- (4.25)}$$

จากสมการดุลพลังงานของส่วนสูงดิฟเฟอเรนเชียลจะได้

$$ha \frac{(t - t_w)}{\lambda_w} = \rho_b \left(\frac{-dc}{d\theta} \right)$$

ดังนั้นเวลาที่ใช้ในการลดอัตราส่วนความชื้นจากค่าแรกเริ่มถึงอัตราส่วนความชื้นวิกฤตจะเท่ากับ

$$\theta_1 = \frac{\rho_b (c_0 - c_c) \lambda_w}{ha(t_1 - t_w)} \quad \text{----- (4.26)}$$

ณ เวลาเดียวกันกับที่อัตราส่วนความชื้นที่ผิวบนของชั้นวัสดุเป็น c_1 อัตราส่วนความชื้น c ที่ความลึก l หาได้จาก

$$(c_0 - c_1) / (c_0 - c) = \frac{(t_1 - t_w)}{(t - t_w)} = e^{haL / GC_{H1}} \quad \text{----- (4.27)}$$

ถ้าให้ค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนความชื้นในชั้นวัสดุเป็น w' จะได้

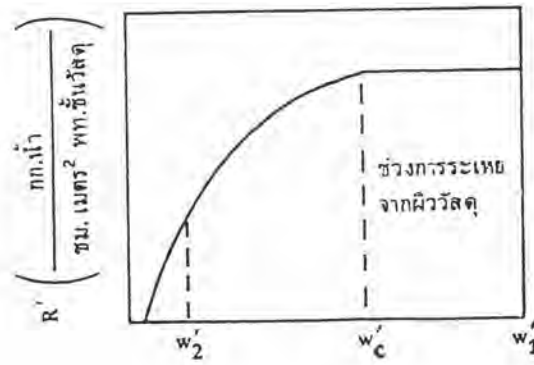
$$w' = \frac{1}{L} \int_0^L c dl \quad \text{----- (4.28)}$$

เมื่ออัตราส่วนความชื้นของอนุภาคที่ผิวบนของชั้นวัสดุลดลงถึงค่าอัตราส่วนความชื้นวิกฤต c_c จะมีผลทำให้ชั้นวัสดุเริ่มเข้าสู่ช่วงของการอบแห้งที่มีความเร็วการอบแห้งลดลงด้วย

ส่วนในช่วงความเร็วของการอบแห้งลดลงจะพบว่าเส้นลักษณะเฉพาะของการอบแห้งแบบไหลผ่านในช่วงความเร็วของการอบแห้งลดลง จะสูงขึ้นด้านบนดังรูปที่ 4.3 แต่อย่างไรก็ตาม เส้นลักษณะเฉพาะของการอบแห้งในช่วงความเร็วของการอบแห้งลดลงของแต่ละอนุภาคก็ยังคงลดลงเป็นส่วนกับอัตราส่วนความชื้นอิสระของอนุภาค จากเรียวไซ โทเอ (2529) พบว่า อัตราการอบแห้งเฉลี่ยของชั้นวัสดุในช่วงความเร็วของการอบแห้งช้าลง (R_d) สามารถแสดงเป็นกราฟในรูปความสัมพันธ์ระหว่าง (R_d/R_c) กับ (w'/w_c') โดยมีจำนวนหน่วยการถ่ายเท เป็น พารามิเตอร์ และเนื่องจาก

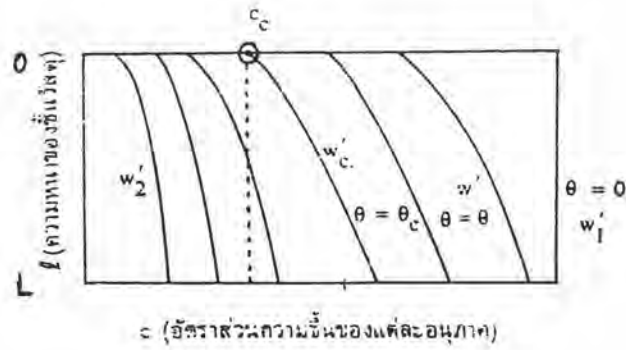
$$\begin{aligned} \frac{-dw'}{d\theta} &= \frac{R_d}{\rho_b L} \\ \int \left(\frac{-d\theta}{dw'} \right) dw' &= \theta_d \end{aligned} \quad \text{----- (4.29)}$$

จะสามารถหาเวลาที่ต้องใช้สำหรับช่วงการอบแห้งที่มีความเร็วช้าลงได้



รูปที่ 4.3 รูปแสดงอัตราการอบแห้งที่ขึ้นขึ้นด้านบนของเครื่องอบแห้งแบบไหลผ่าน

(เรียวไซ โทเอ, 2529: 89)



รูปที่ 4.4 รูปแสดงการกระจายปริมาณความชื้นในชั้นวัสดุตามเวลาของการอบแห้ง

(เรียวไซ โทเอ, 2529: 89)