หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

ทฤษฎีการอบแห้ง

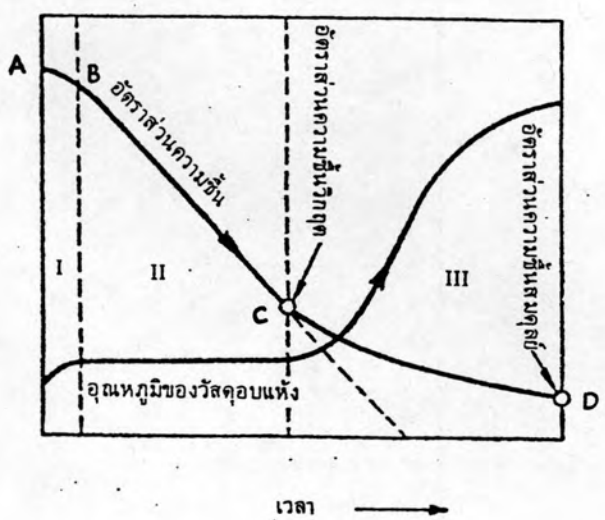
ความรู้พื้นฐานของการอบแห้ง

การอบแห้ง คือกระบวนการที่ความร้อนถูกถ่ายเทด้วยวิธีใดวิธีหนึ่งไปยังวัสดุที่มีความชื้น เพื่อไล่ความชื้นออกโดยการระเหยโดยอาศัยความร้อนที่ได้รับเป็นความร้อนแฝงของการระเหย หัวข้อที่สำคัญที่สุดของการอบแห้งคือ การถ่ายเทความร้อนไปยังวัสดุอบแห้งอย่างมีประสิทธิภาพที่สุด

ประโยชน์ของการอบแห้ง

1. ลดค่าใช้จ่ายในการขนส่ง
2. ทำให้สารมีรูปร่างที่ง่ายต่อการใช้งาน
3. เพื่อให้อายุการเก็บยาวนานขึ้นโดยไม่เสียคุณภาพ
4. เพื่อไม่ให้มีความชื้นในสาร ซึ่งความชื้นอาจทำให้เกิดการบูดเน่า หรือเกิดการสลายตัว

กลไกการอบแห้ง การอบแห้งแบ่งออกได้เป็น 3 ช่วงใหญ่ๆ ดังต่อไปนี้



รูปที่ 3.1 ลักษณะการอบแห้ง

A : ช่วงการให้ความร้อนเบื้องต้นแก่วัสดุ

B : ช่วงการอบแห้งที่อัตราเร็วคงที่

C : ช่วงการอบแห้งที่อัตราเร็วลดลง

กลไกในการอบแห้ง สามารถอธิบายได้ดังนี้

ที่ผิวของวัสดุที่เปียกชื้น ความชื้นที่ผิวจะอยู่ในรูปของน้ำ ถ้าเอาวัสดุนี้มาอบแห้งภายใต้เงื่อนไขที่คงที่ อุณหภูมิของวัสดุจะมีค่าใกล้เคียงกับอุณหภูมิกระเปาะเปียก (wet-bulb temperature , Tw) องกระแสลมร้อน ช่วงเวลาที่วัสดุใช้ในการเพิ่มอุณหภูมิจนถึงค่านี้ คือ ช่วง AB ในรูปที่ 3.1

ในช่วงเวลาถัดไปคือช่วง BC อุณหภูมิของวัสดุจะมีค่าคงที่ที่ Tw ตราบใดที่ยังมีความชื้นหลงเหลืออยู่ในรูปของน้ำที่ผิววัสดุ ความร้อนทั้งหมดที่วัสดุได้รับในช่วงนี้จะถูกใช้ในการระเหยความชื้นเท่านั้น ดังเห็นได้จากรูป อัตราส่วนความชื้นเฉลี่ย w ของวัสดุจะลดลงเป็นสัดส่วนกับเวลาในช่วง BC นี้ ดังนั้นอัตราเร็วของการระเหยจะมีค่าคงที่ (constant drying rate period)

ในช่วง CD ความชื้นในรูปของน้ำที่ผิววัสดุจะระเหยหมดไป เพราะการถ่ายเทความชื้นในรูปของน้ำจากส่วนในของวัสดุเกิดขึ้นไม่ทันกับการระเหยของน้ำจากผิวของวัสดุ ดังนั้นผิวของวัสดุจะอยู่ในสภาพที่แห้งและอุณหภูมิของวัสดุจะเริ่มสูงขึ้น สรุปแล้วอัตราเร็วของการอบแห้งจะค่อยๆลดลงเพราะปริมาณความร้อนที่วัสดุได้รับนอกจากจะลดลงแล้วความร้อนนี้ยังต้องใช้ในการระเหยความชื้นและเพิ่มอุณหภูมิของวัสดุด้วย

การอบแห้งจะสิ้นสุดลงเมื่ออัตราส่วนความชื้นลดลงถึงค่าอัตราส่วนความชื้นสมดุลย์ (w_E , equilibrium moisture content) ค่าอัตราส่วนความชื้นเฉลี่ยที่จุดต่อระหว่างช่วง AB และ BC มีชื่อเรียกว่า อัตราส่วนความชื้นวิกฤต (w_c, critical moisture content) ผลต่างระหว่างอัตราส่วนความชื้นเฉลี่ย w ใดๆ และ w_E มีชื่อเรียกว่า อัตราส่วนความชื้นอิสระ F (free moisture content)

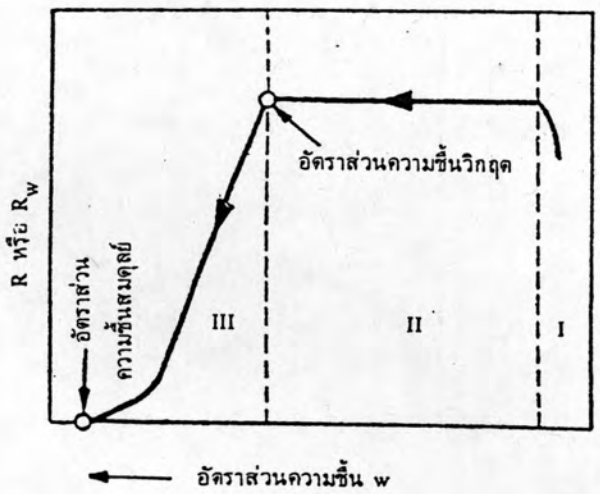
ในกรณีที่วัสดุมีช่วง BC และ CD เป็นเวลานานมาก จะไม่คำนึงถึงช่วง AB ก็ได้ แต่ในกรณีของวัสดุที่ไม่เปียกชื้นหรือในกรณีของวัสดุที่มีลักษณะเฉพาะบางชนิดอาจไม่มีช่วง BC เลยก็ได้

เงื่อนไขของการอบแห้งอาจแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท คือ เงื่อนไข

ภายนอกวัสดุที่ก่อให้เกิดการอบแห้งและเงื่อนไขภายในวัสดุเอง เงื่อนไขภายนอกจะเกี่ยวข้องกับวิธีถ่ายเทความร้อนและวิธีกำจัดไอน้ำที่ระเหยออกมา ส่วนเงื่อนไขภายในได้แก่ องค์ประกอบและรูปร่าง, อัตราส่วนความชื้น, อัตราส่วนความชื้นสมดุลย์ของวัสดุอบแห้ง เป็นต้น สัญญลักษณ์ที่ใช้แทนความร้อนของการอบแห้งมี อาทิ เช่น R (kg water/hr*m^2 drying area), R_w (kg water/hr*kg dry solid) เป็นต้น ถ้าให้ W เป็นมวล (kg) ของวัสดุแห้ง และ A เป็นพื้นที่ (m^2) ของการอบแห้ง เราจะได้

$$R = R_w(W/A)$$

เส้นกราฟที่ได้จากการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วของการอบแห้ง และ w มีชื่อเรียกว่า เส้นลักษณะเฉพาะของการอบแห้ง อัตราการเปลี่ยนแปลงของเส้นอัตราส่วนความชื้นเฉลี่ยกับเวลาในรูป 3.1 คือ R_w นั่นเอง ถ้าเขียนกราฟของ R_w (หรือ R) กับ w จะได้รูป 3.2

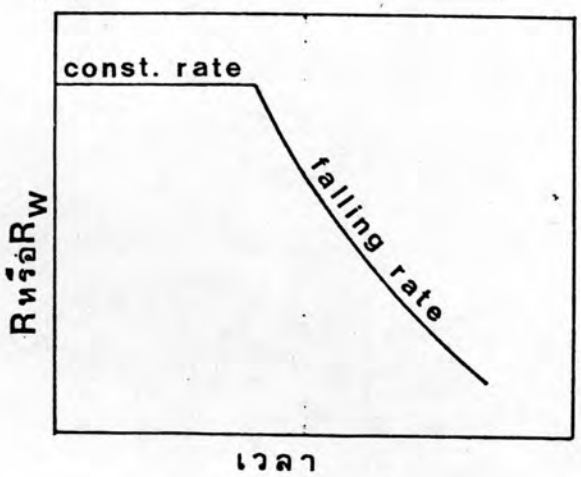


รูปที่ 3.2 เส้นลักษณะเฉพาะการอบแห้ง

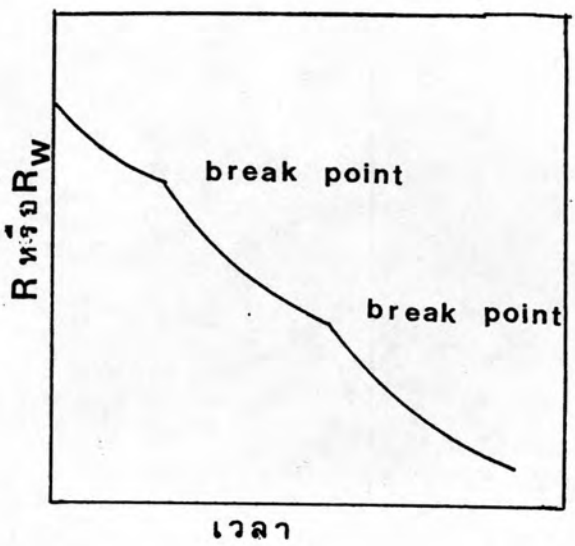
โดยทั่วๆไป การดึงน้ำออกจากวัสดุใดนั้น จะมีอยู่ 2 ลักษณะตามคุณสมบัติในการอุ้มน้ำไว้ในตัวของวัสดุนั้นๆ กล่าวคือ

1. การดึงน้ำออกจากวัสดุที่ไม่ดูดซับน้ำหรือไม่อุ้มน้ำไว้ในตัว (Non-hygroscopic material) เช่นพวกทราย หิน โลหะต่างๆ ลักษณะการไหลออกของน้ำจากวัสดุประเภทนี้จะเป็นแบบเป็นสัดส่วนโดยตรงต่อเวลา กล่าวคือ เมื่อเวลาที่ใช้นานขึ้น ปริมาณน้ำที่เหลือในวัสดุจะลดลงตามลำดับดังแสดงในรูป 3.3 จะเห็นว่าลักษณะการอบแห้งแบ่งออกเป็น 2 ช่วงคือ ช่วงที่อัตราการอบแห้งคงที่ (constant rate period) และช่วงอัตราการอบแห้งลดลง (falling rate period)

2. การดึงน้ำออกจากวัสดุที่ดูดซับน้ำหรืออุ้มน้ำไว้ในตัว (Hygroscopic material) เช่นพวกอาหารทั่วๆไป ซึ่งสามารถอุ้มน้ำไว้ในตัวหรือภายในเซลของอาหาร ทำให้มีความชื้นสูงกว่าความชื้นของอากาศ ทำให้การไหลออกของน้ำมีความยุ่งยากขึ้น ดังแสดงในรูป 3.4 จะพบว่าช่วงอัตราการอบแห้งลดลงจะแบ่งย่อยได้เป็นหลายช่วง (break points) แล้วแต่ประเภทของอาหาร โดยมักไม่ค่อยพบช่วงที่อัตราการอบแห้งคงที่



รูปที่ 3.3 ลักษณะการอบแห้งของวัสดุที่ไม่ดูดซับน้ำ



รูปที่ 3.4 ลักษณะการลบแห้งของวัสดุที่ดูดซับน้ำ

การเคลื่อนที่ของน้ำ (Moisture Movement)

ลักษณะการเคลื่อนที่ของน้ำ จะมีกลไก (Mechanism) 2 แบบ ซึ่งอธิบายได้ดังนี้ (Foust et al.,1980)

1. Diffusion Mechanism ส่วนใหญ่เกิดจากพวก Homogeneous solid คือพวกสารอินทรีย์ทั้งหลาย มีลักษณะเป็นสารพวก fibrous organic, gel-like substance , porous cakes เป็นต้น ความชื้นจะถูกกำจัดออกมาที่ผิวโดยวิธีการแพร่เชิงโมเลกุล (Molecular diffusion) ซึ่งเกิดขึ้นเนื่องจากมีความดันไอน้ำต่างกันระหว่างภายในกับภายนอกของสารนั้นเอง

อัตราการเคลื่อนที่ของความชื้นสามารถอธิบายได้โดย Fick's law

$$\frac{d\bar{x}}{d\theta} = D_L \frac{\partial^2 \bar{x}}{\partial x^2} \qquad (1)$$

D_L = ส.ป.ส. การแพร่ของของเหลวซึ่งแพร่ออกจากสาร (วัสดุของแข็ง)

$\bar{x}$ = ปริมาณความชื้นที่เวลา θ ใด ๆ

จากการศึกษาของ Sherwood & Newman ได้ความสัมพันธ์เป็นสมการโดยทำการอินทิเกรตสมการที่ 1 และถือว่าค่า D_L มีค่าคงที่ สำหรับกรณีที่ถือว่าเป็นการอบแห้งโดยมีการแพร่เพียงด้านเดียวของแผ่นวัสดุ ส่วนด้านข้างและด้านล่างปิดกั้นด้วยผนังทึบและสมมุติว่า ปริมาณความชื้นเริ่มต้นมีการกระจายทั่วแผ่นวัสดุนั้น ได้สมการดังนี้

$$\frac{\bar{X} - \bar{X}_E}{\bar{X}_C - \bar{X}_E} = \frac{8}{\pi^2}\left\{ e^{-D_L\theta\left(\frac{\pi}{l}\right)^2} + \frac{1}{9} e^{-9D_L\theta\left(\frac{\pi}{l}\right)^2} + \frac{1}{25} e^{-25D_L\theta\left(\frac{\pi}{l}\right)^2} \right\} \quad \text{— (2)}$$

l = ระยะทางจากด้านที่มีการแพร่ถึงศูนย์กลางของแผ่นวัสดุ โดยทั่วไปเป็นการแพร่ 2 ด้าน จึงคิดความหนาของแผ่นวัสดุทั้งหมด

x_E = ปริมาณความชื้นสมดุลย์

x = ปริมาณความชื้นที่เวลา θ ใด ๆ

x_c = ปริมาณความชื้นวิกฤต

เนื่องจากการเคลื่อนที่ของของเหลวแบบการแพร่เชิงโมเลกุลนี้เกิดขึ้นค่อนข้างช้า ดังนั้นกราฟของอัตราการอบแห้ง มักจะไม่ค่อยพบช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ ดังนั้นในกรณีทั่วไป สำหรับการเคลื่อนที่ของน้ำแบบแพร่ผ่านนี้ ค่า x_c จึงมักเป็นค่าปริมาณความชื้นตรงจุดท้ายของช่วงที่อัตราการอบแห้งคงที่

2. Capillarity Mechanism ในกรณีพวกสารจัดเรียงเป็นชั้นหรือของแข็งที่มีลักษณะโครงสร้างเป็นรูพรุนเล็กมาก ๆ เป็นแบบ Open-pore structure และมีขนาดของรูพรุนใหญ่ ๆ ซึ่งกลไกแบบแพร่ผ่านนั้นอธิบายไม่ได้

ในกรณีของพวกที่มีรูพรุนใหญ่ ๆ นั้น พบว่าการเคลื่อนที่ของของเหลวจะเนื่องมาจากความแตกต่างระหว่าง hydrostatic head และแรงตึงผิว (surface tension) แรงตึงผิวเป็นสาเหตุให้พื้นผิวของของเหลวเป็นเส้นโค้ง ทำ

ให้แตกต่างจากพื้นผิวเรียบ ในกรณีที่เป็นทรงกลม รัศมี r จะได้ว่า

$$-\Delta P = 2\sigma/r \qquad (3)$$

เมื่อ

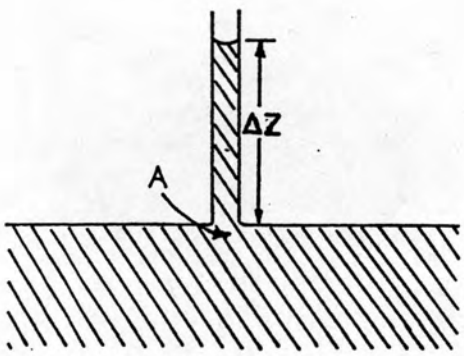
$-\Delta P$ = decrease in pressure เนื่องจากแรงดึงผิว

σ = แรงดึงผิวสัมผัสระหว่างสถานะของเหลวและก๊าซ

r = รัศมีของเส้นโค้งของทรงกลม

ค่ารัศมี r นี้จะมีค่าเป็นบวกเมื่อเป็นฟองก๊าซในของเหลว

ค่ารัศมี r นี้จะมีค่าเป็นลบเมื่อเป็นหยดของเหลวในก๊าซ



รูปที่ 3.5 Capillarity effect

รูปที่ 3.5 แสดงถึงกลไกท่อรูเข็ม (capillarity mechanism) อย่างหนึ่งการที่ของเหลวในหลอดแก้วสูงขึ้นเนื่องจากแรงสมดุลย์ที่จุด A พื้นผิวของของเหลวในหลอดแก้วเป็นเส้นโค้ง โดยรัศมีของเส้นโค้งนี้ให้ถือว่ามีค่าเท่ากับรัศมีของหลอดแก้ว เนื่องจากหลอดแก้วเปียกของเหลว ทำให้มุมสัมผัสที่ผนังหลอดแก้วเป็นศูนย์ ถ้าเป็นเช่นนี้แรงสมดุลย์จะกำหนดว่า

017846

$$-\Delta P = \Delta z g(\rho_L - \rho_v)/g_c$$

$$= 2\sigma/r$$

$$\Delta z = (g_c 2\sigma)/(rg(\rho_L - \rho_v)) \qquad (4)$$

เมื่อ

r = รัศมีภายในของหลอดแก้ว

ในสารอาหารหรือพวกสารประกอบอินทรีย์ทั่ว ๆ ไปนั้น เมื่อตอนเริ่มการอบแห้ง พบว่าการเคลื่อนที่ของน้ำภายในเนื้อสารอาหารนั้นจะเป็นกลไกแบบท่อรูเข็มก่อน ทั้งนี้เนื่องจากในตอนเริ่มต้นการให้ความร้อนนั้น น้ำในวัสดุยังมีปริมาณมากอยู่ และวัสดุอาหารนับว่าเป็นวัสดุพวกที่มีรูพรุนมากมาย ดังนั้นเมื่อได้รับความร้อน หรือเมื่อมีอากาศร้อนผ่านไปที่ผิวของวัสดุ จะเกิดการขยายตัวของอากาศ คล้ายกับว่ามีท่อขนาดเล็ก ๆ ติดอยู่ตรงรูนั้น พบว่าอากาศยิ่งขยายตัวมากขึ้นเท่าไหร่ จะทำให้แรงดึงดูดในท่อเล็ก ๆ นี้มากขึ้นเท่านั้น

หลังจากน้ำที่อยู่ตามรูพรุนของวัสดุอาหารนั้นหมดแล้ว การเคลื่อนที่ของน้ำภายในวัสดุก็จะเปลี่ยนเป็นกลไกการแพร่ ซึ่งเกิดจากความแตกต่างของความดันไอน้ำนั่นเอง โดยเริ่มจากเซลที่อยู่ติดกับรูพรุนหรือท่อเล็ก ๆ ก่อน เมื่อได้รับความร้อนทำให้อากาศขยายตัว ทำให้น้ำเริ่มแพร่ผ่านจากเซลขึ้นไปตามรูพรุนเล็ก ๆ จึงทำให้ภายในเซลมีความเข้มข้นของของแข็งมากขึ้นจึงเกิดแรงดึงดูดทำให้เกิดการแพร่ผ่านของน้ำจากเซลที่อยู่ติดกันแพร่เข้าไปในเซลที่ติดกับรูพรุน แล้วระเหยออกไปตามรูพรุนนั้น ซึ่งจะเกิดแรงดึงดูดต่อเนื่องไปเรื่อย ๆ จนทำให้วัสดุนั้นแห้งขึ้น

<u>คำนิยามต่างๆ</u>

1. moisture content , wet basis

w_w = kg moisture/kg wet solid

= kg moisture/(kg dry solid + kg moisture)

= $w_d/(1+w_d)$

2. moisture content , dry basis

$$W_d = \text{kg moisture/kg dry solid}$$

$$= W_w/(1-W_w)$$

3. equilibrium moisture content(W_E)

หมายถึงความชื้นของวัสดุใดๆก็ตามเมื่ออยู่ในสภาวะสมดุลย์ภายใต้ อันหนึ่งความดันย่อยค่าหนึ่งของไอน้ำในอากาศรอบ ๆ

4. critical moisture content (W_c)

อัตราส่วนความชื้นวิกฤต เป็นปริมาณความชื้นเฉลี่ยของวัสดุตรงจุดสุดท้ายของอัตราการอบแห้งคงที่

5. free moisture (F)

$$F = W - W_E$$

ในการอบแห้งทั่วๆไป ความชื้นของวัสดุที่เราสามารถระเหยออกไปได้นั้นจะเป็นความชื้นอิสระเท่านั้น