เอกสารประกอบการสอน

วิชา 421352

การอบแห้งและการเก็บรักษาผลผลิตเกษตร

(Drying and Storage Agricultural Products)

โดย

อ.ดร.เทวรัตน์ ทิพยวิมล

สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

พ.ศ. 2552

สารบัญ

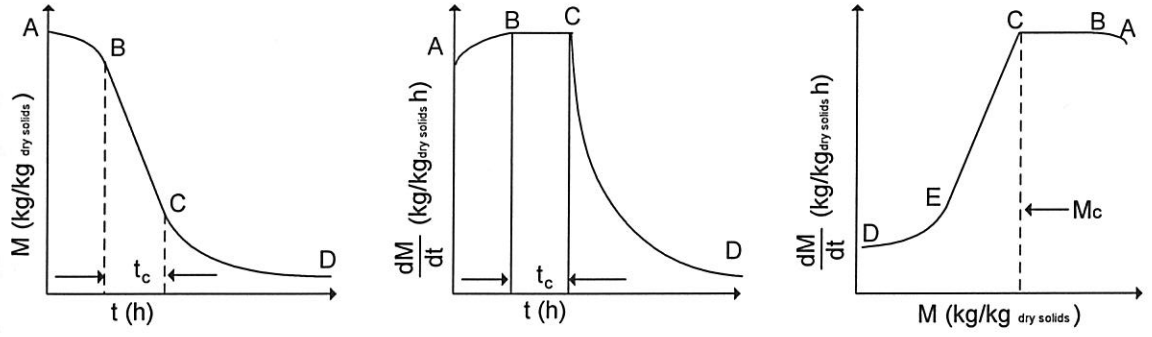
	หน้า
บทที่ 1 พื้นฐานของการอบแห้ง	1
บทที่ 2 ไซโครเมตริก	11
บทที่ 3 ความต้านทานการไหลและพัดลม	25
บทที่ 4 ความชื้นสมดุล	50
บทที่ 5 คุณสมบัติทางกายภาพและทางความร้อนของวัสดุเกษตร	59
บทที่ 6 การอบแห้งแบบชั้นบาง	68
บทที่ 7 เครื่องอบแห้ง	82
บทที่ 8 หลักการออกแบบเครื่องอบแห้งทั่วไป	99
บทที่ 9 การปรับปรุงประสิทธิภาพของกระบวนการอบแห้ง	109
บทที่ 10 หลักการเก็บรักษาผลผลิตเกษตร	114
บทที่ 11 การระบายอากาศในกองเมล็ดพืช	122
บทที่ 12 การออกแบบถังเก็บเมล็ดพืช	133
บรรณานุกรม	144

บทที่ 1
พื้นฐานของการอบแห้ง (Principle of Drying)

การอบแห้ง (Drying) คือการกำจัดความชื้นหรือน้ำที่มีอยู่ในวัสดุให้ลดลงจนมีความชื้นอยู่ในปริมาณที่ปลอดภัยต่อการเก็บรักษา และมีคำอีกคำหนึ่งซึ่งเรามักจะพบอยู่เป็นประจำคือ การทำแห้ง (Dehydration) ซึ่งเป็นการกำจัดความชื้นหรือน้ำออกจากวัสดุจะกระทั่งวัสดุนั้นไม่มีความชื้นหรือเข้าใกล้มวลแห้ง

การอบแห้งเป็นกระบวนการหลังการเก็บเกี่ยวที่สำคัญกระบวนการหนึ่งเพื่อให้ผลผลิตทางการเกษตรมีความเหมาะสมต่อการเก็บรักษา คือสามารถยืดอายุการเก็บรักษาไว้ได้นานโดยไม่เสียหายเนื่องจากการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ ทั้งนี้เนื่องจากผลิตผลทางการเกษตรส่วนใหญ่จะมีความชื้นค่อนข้างสูงขณะทำการเก็บเกี่ยวทำให้เก็บรักษาได้ไม่นาน การอบแห้งจะช่วยให้สามารถเก็บรักษาผลิตผลได้เป็นระยะเวลายาวนานขึ้น ผลิตผลทางการเกษตรที่สำคัญและต้องทำการอบแห้งได้แก่ ธัญพืช ผลไม้ ผลิตภัณฑ์ผลไม้แช่อิ่ม ผัก สมุนไพร เป็นต้น

การอบแห้งส่วนใหญ่ใช้การถ่ายเทความร้อนไปยังวัสดุที่ชื้นเพื่อไล่ความชื้นออกโดยการระเหย ความร้อนที่ได้รับเป็นความร้อนแฝงของการระเหย ปัจจัยที่มีความสำคัญต่อการอบแห้ง ได้แก่ อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ อัตราการไหลของอากาศ และประสิทธิภาพของเครื่องอบแห้ง โดยพฤติกรรมการอบแห้งโดยใช้ลมร้อนเป็นตัวกลางในการพาความชื้นออกจากวัสดุ เมื่อสมมติให้ อุณหภูมิ ความชื้นและความเร็วของอากาศเหนือผิวของวัสดุอบแห้งมีค่าคงที่ตลอดกระบวนการและมีการถ่ายเทความร้อนสู่วัสดุโดยการพาความร้อน การเปลี่ยนแปลงความชื้นของวัสดุตลอดระบวนการอบแห้งแสดงในภาพที่ 1 โดยแบ่งการอบแห้งออกเป็น 3 ช่วงคือ



ภาพที่ 1 การลดลงของความชื้นวัสดุ

ช่วง A-B ช่วงนี้เป็นช่วงสภาวะที่ผิวของวัสดุเข้าสู่สมดุลกับอากาศเกิดขึ้นเมื่อเริ่มทำการอบแห้ง ความร้อนจากลมร้อนจะถ่ายเทสู่ผิววัสดุจนถึงค่า ๆ หนึ่งซึ่งมีความสมดุลระหว่างผิววัสดุกับอากาศ

ช่วง B-C ช่วงนี้เป็นช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ (constant rate period of drying) ช่วงนี้ผิววัสดุยังคงชุ่มไปด้วยน้ำซึ่งจะถูกนำออกจากผิววัสดุด้วยการระเหยซึ่งอัตราการอบแห้งในช่วงนี้จะขึ้นอยู่กับอัตราการถ่ายเทความร้อนไปยังผิวของการอบแห้ง อัตราการถ่ายเทมวลมีความสมดุลกับอัตราการถ่ายเทความร้อนจึงทำให้อุณหภูมิที่ผิวของวัสดุอบแห้งคงที่ ซึ่งสอดคล้องกับอุณหภูมิกระเปาะเปียกของอากาศอบแห้ง

ช่วง C-D ช่วงนี้เป็นช่วงอัตราการอบแห้งลดลง (falling rate period) เนื่องจากปริมาณความชื้นภายในเนื้อวัสดุเคลื่อนที่มาสู่ผิวด้านนอกลดลง ณ จุด C ในภาพที่ 1 อัตราการอบแห้งเริ่มลดลงความชื้นของวัสดุที่จุดนี้เรียกว่า ความชื้นวิกฤต เมื่อกระบวนการอบแห้งดำเนินต่อไปอุณหภูมิที่ผิวของวัสดุจะเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตลอดกระบวนการ โดยปกติช่วงอัตราการอบแห้งลดลงประกอบไปด้วยสองช่วงคือ ช่วงของการอบแห้งลดลงส่วนที่ 1 (C-E) ช่วงนี้ผิวของวัสดุจะแห้งและอัตราการอบแห้งลดลง ช่วงของการอบแห้งลดลงส่วนที่ 2 (E-D) ช่วงนี้ระนาบของการระเหยจะเคลื่อนตัวเข้าสู่ภายในเนื้อวัสดุและผลกระทบจากปัจจัยภายนอก เช่น อัตราการไหลของอากาศ มีค่าน้อยลง เมื่อพิจารณาตลอดกระบวนการอบแห้งจะพบว่าช่วงของการอบแห้งลดลงเป็นช่วงหลักที่เกิดขึ้น

อัตราการอบแห้งวัสดุโดยทั่วไปที่ใช้ลมร้อนเป็นตัวกลางในการส่งผ่านความร้อนจะเกิดขึ้นช้าหรือเร็วนั้นมีปัจจัยที่สำคัญซึ่งมีผลต่ออัตราการอบแห้งคือ

1. ลักษณะทางธรรมชาติของวัสดุ เป็นปัจจัยที่สำคัญที่สุดที่มีผลต่ออัตราการอบแห้ง ถ้าสภาพทางธรรมชาติของวัสดุเอื้ออำนวยต่อการส่งผ่านความร้อนไปยังโมเลกุลของน้ำภายในเนื้อวัสดุและเอื้ออำนวยต่อการเคลื่อนที่ของไอน้ำออกจากวัสดุ เช่น วัสดุที่มีโครงสร้างเป็นรูพรุนโมเลกุลของน้ำในเนื้อวัสดุสามารถเคลื่อนที่ออกมาได้ง่ายทำให้อัตราการอบแห้งเร็วขึ้น

2. ขนาดและรูปร่างของวัสดุ วัสดุที่มีขนาดและรูปร่างที่ทำให้อัตราส่วนของพื้นที่ต่อปริมาตรมากจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการส่งผ่านความร้อนให้ทั่วชิ้นวัสดุทำให้การระเหยน้ำออกจากเนื้อวัสดุดีขึ้น อัตราการอบแห้งจึงเร็วขึ้น

3. ปริมาณและการจัดเรียงวัสดุ วัสดุที่นำมาจัดเรียงซ้อนกันหลาย ๆ ชั้นในถาด ทำให้ปริมาณของวัสดุต่อถาดมากเกินไปจะทำให้วัสดุที่อยู่บริเวณตรงกลางได้รับความร้อนไม่ทั่วถึงทำให้บริเวณนั้นมีอัตราการอบแห้งที่ช้า การจัดเรียงที่เหมาะสมควรทำการจัดเรียงเป็นแบบชั้นบางเพื่อให้วัสดุได้รับความร้อนอย่างสม่ำเสมอ

4. อุณหภูมิของอากาศร้อน เมื่ออุณหภูมิของอากาศร้อนสูงขึ้นอัตราการอบแห้งจะเร็วขึ้นเนื่องจากความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิของอากาศร้อนกับวัสดุมีมากทำให้การถ่ายเทความร้อนสู่น้ำในเนื้อวัสดุได้ดีจึงทำให้น้ำในเนื้อวัสดุเคลื่อนที่และระเหยได้เร็วขึ้น ถึงแม้ว่าอุณหภูมิที่สูงจะทำให้อัตราการอบแห้งเร็วขึ้นแต่ก็ต้องคำนึงถึงความเหมาะสมกับวัสดุที่ใช้ในการอบแห้งด้วย

5. ความชื้นของอากาศร้อน หากความชื้นของอากาศร้อนมีค่ามากจะมีผลให้การเคลื่อนที่ของน้ำและการระเหยของไอน้ำออกจากเนื้อวัสดุได้ยาก

6. ความดันของบรรยากาศ การอบแห้งโดยทั่วไปมักทำที่ความดันหนึ่งบรรยากาศ ถ้าหากมีการลดความดันของบรรยากาศในขณะทำการอบแห้งจะทำให้อัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้น เนื่องจากจะทำให้จุดเดือดของน้ำลดลง ซึ่งการอบแห้งประเภทนี้เหมาะกับการอบแห้งวัสดุที่เสื่อมคุณภาพได้ง่ายเนื่องจากความร้อน เครื่องอบแห้งมีการลดความดันในสภาวะการอบแห้งเช่น เครื่องอบแห้งสุญญากาศแบบลูกกลิ้ง (Vacuum drum drier) เป็นต้น

7. ความเร็วลมร้อน ถ้าความเร็วของลมร้อนมีค่ามากจะทำให้เกิดการระเหยของน้ำที่ผิวหน้าวัสดุได้ดีขึ้น ทำให้อัตราการอบแห้งเร็วขึ้น

8. คุณสมบัติเชิงความร้อนและฟิสิกส์ของวัสดุ คุณสมบัติเชิงความร้อนของวัสดุที่เกี่ยวข้องกับการอบแห้งคือ ความร้อนจำเพาะ สภาพการนำความร้อน และการแพร่ความร้อน ส่วนคุณสมบัติทางฟิสิกส์ได้แก่ ความหนาแน่นจริง ความหนาแน่นปรากฏ และสัดส่วนช่องว่างอากาศในกองวัสดุ

ประโยชน์ของการอบแห้ง

1. ช่วยให้เกษตรกรสามารถเก็บเกี่ยวผลผลิตได้เร็วขึ้น จึงลดการสูญเสียในแปลงได้

2. ช่วยในการถนอมรักษาให้วัสดุเกษตรและอาหารสามารถเก็บไว้ได้นานขึ้น เนื่องจากช่วยลดการเจริญเติบโตของเชื้อรา จุลินทรีย์ และปฏิกิริยาทางเคมีอันเนื่องมาจากความชื้น

3. ลดปริมาตรและน้ำหนัก ทำให้ประหยัดเนื้อที่ในการเก็บรักษาและลดค่าใช้จ่ายในการขนส่ง ซึ่งอาจส่งผลให้ราคาโดยรวมลดลงด้วย

4. ควบคุมราคาผลผลิตทางการเกษตรที่ออกตามฤดูกาลซึ่งมักมีปริมาณมากจนล้นตลาดทำให้มีราคาต่ำ การอบแห้งจะช่วยทำให้เก็บรักษาได้นานจึงสามารถเลือกช่วงเวลาจำหน่ายที่มีราคาดีได้

5. ปรับปรุงกระบวนการแปรรูป สามารถเลือกวิธีการแปรรูปได้กว้างขึ้นทำให้มูลค่าของผลิตภัณฑ์สูงขึ้น

ความชื้นในวัสดุ

ค่าความชื้นในวัสดุแสดงได้ 2 แบบคือ

1. ความชื้นมาตรฐานเปียก (wet basis)

$$M_w = \frac{\text{มวลของความชื้น(น้ำ)}}{\text{มวลแห้งของวัสดุ}} = \frac{m - m_d}{m} \qquad \text{.....(1)}$$

เมื่อ M_w คือ ความชื้นมาตรฐานเปียก, เศษส่วน

m คือ มวลของวัสดุ

m_d คือ มวลแห้งของวัสดุ (bone dry)

ปริมาณความชื้นมาตรฐานเปียกนิยมใช้ในวงการค้าและการเกษตรโดยพูดกันเป็นจุดหรือเปอร์เซ็นต์

ตัวอย่างที่ 1 ข้าวโพดที่เก็บเกี่ยวมาจากในไร่ มีความชื้น มีความชื้น 20 % wb. จำนวน 2000 กิโลกรัม ถูกนำไปลดความชื้นจนเหลือ 12 %wb. อยากทราบว่าน้ำหนักของข้าวโพดหลังการอบแห้งมีค่าเท่าไหร่

วิธีทำ

ทำการหามวลแห้งของข้าวโพดจากสมการ (1) จะได้ว่า

$$M_w = \frac{m - m_d}{m}$$

หรือ

$$m_d = m(1 - M_w) \qquad \text{(a)}$$

แทนค่า $m = 2{,}000$ kg และ $M_w = 20/100 = 0.2$ ลงใน (a)

$$m_d = 2{,}000 \text{ kg}\,(1 - 0.2) = 1{,}600 \text{ kg}$$

ดังนั้นน้ำหนักของข้าวโพดที่ความชื้น 12% wb จากสมการ (a) จะได้

$$m = \frac{m_d}{1 - M_w} = \frac{1{,}600 \text{ kg}}{1 - 0.12} = 1818.20 \text{ kg}$$ **ตอบ**

ตัวอย่างที่ 2 พ่อค้าคนกลางตกลงขายข้าวเปลือกให้กับโรงสีจำนวน 10 ตัน ที่ความชื้น 13 % wb หากข้าวที่เกษตรกรเก็บเกี่ยวมีความชื้น 20 % wb. อยากทราบว่าพ่อค้าจะต้องซื้อข้าวจากเกษตรกรกี่กิโลกรัมจึงจะพอส่งขายให้กับโรงสี

วิธีทำ

จากสมการ (a) ในตัวอย่างที่ 1 จะได้มวลแห้งของข้าวเปลือกคือ

$$m_d = 10{,}000 \quad kg\,(1-0.13) = 8{,}700 \quad kg$$

พ่อค้าซื้อข้าวเปลือกจากเกษตรกรที่ความชื้น 20% wb ดังนั้นต้องซื้อข้าวเปลือกทั้งสิ้น

$$m = \frac{m_d}{1-M_w}$$

$$= \frac{8{,}700 \text{ kg}}{1-0.2} = 10{,}875 \quad kg$$

นั่นคือพ่อค้าต้องซื้อข้าวเปลือกที่ความชื้น 20% wb จำนวน 10,875 kg เพื่อนำมาลดความชื้นแล้วเหลือข้าวเปลือกที่ความชื้น 13% wb จำนวน 10,000 kg **ตอบ**

2. ความชื้นมาตรฐานแห้ง (dry basis)

$$M_d = \frac{m-m_d}{m_d} \qquad \text{.....(2)}$$

เมื่อ M_d คือ ความชื้นมาตรฐานแห้ง, เศษส่วน

ปริมาณความชื้นมาตรฐานแห้งนิยมใช้วิเคราะห์ทางทฤษฎี เพราะการเปรียบเทียบค่าความชื้นกระทำบนค่าคงที่คือ m_d

ตัวอย่างที่ 3 ต้องการลดความชื้นกล้วยจำนวน 200 kg ที่ความชื้น 80 %db จนเหลือความชื้น 24 %db อยากทราบว่าต้องกำจัดน้ำออกจากกล้วยเป็นปริมาณเท่าไร

วิธีทำ

จากสมการ (2) เราสามารถหามวลแห้งของกล้วยได้ดังนี้

$$m_d = \frac{m}{1 + M_d}$$

โจทย์กำหนด ค่า $m = 200$ kg และ $M_d = 80\%$ db $= 0.8$ ดังนั้น

$$m_d = \frac{200 \text{ kg}}{1 + 0.8} = 111.11 \text{ kg}$$

หาน้ำหนักของกล้วยที่ความชื้น 24 % db ได้จาก

$$m = m_d(1 + m_d)$$

$$= 111.11 \text{ kg}(1 + 0.24)$$

$$= 137.78 \text{ kg}$$

ดังนั้นปริมาณน้ำที่ต้องกำจัดออกคือ $200 - 137.78 = 62.22$ kg **ตอบ**

ปริมาณความชื้นมาตรฐานเปียกและมาตรฐานแห้งสามารถที่จะแปลงกลับไปมาระหว่างค่าความชื้นทั้งสองแบบได้เมื่อรู้ค่าความชื้นแบบใดแบบหนึ่งดังนี้

แปลงจากความชื้นมาตรฐานเปียกไปเป็นมาตรฐานแห้ง : $M_d = \frac{M_w}{1 - M_w}$ .....(3)

แปลงจากความชื้นมาตรฐานแห้งไปเป็นมาตรฐานเปียก : $M_w = \frac{M_d}{1 + M_d}$ .....(4)

ตัวอย่างที่ 4 ทำการลดความชื้นข้าวเปลือกจำนวน 5000 กิโลกรัม จากความชื้น 22 %wb. ให้เหลือความชื้น 13 %wb เพื่อให้เหมาะสมต่อการเก็บรักษา จงหาค่า

(1) ค่าความชื้นก่อนและหลังการอบแห้งในหน่วย %db.

(2) ปริมาณน้ำที่ระเหยออกไป

วิธีทำ

(1) แปลงความชื้นจากมาตรฐานเปียกไปเป็นมาตรฐานแห้ง

ที่ความชื้น 22 %wb ; $M_d = \frac{M_w}{1-M_w} = \frac{0.22}{1-0.22} = 0.2820$ หรือ 28.20 %db

ที่ความชื้น 13 %wb ; $M_d = \frac{0.13}{1-0.13} = 0.1494$ หรือ 14.94 %db

(2) ปริมาณน้ำที่ระเหย

หามวลแห้งของกล้วยได้จาก

$$m_d = \frac{m}{1+M_d}$$

$$= \frac{5000\ kg}{1+0.2820} = 3{,}900.16\ kg$$

สามารถหาปริมาณน้ำที่ระเหยออกจากกล้วย (m_w) ได้จากความชื้นก่อนการอบแห้ง (M_{di})และความชื้นหลังการอบแห้ง (M_{df}) ดังนี้

$$m_w = m_d (M_{di} - M_{df})$$

$$= 39{,}000.16\ kg\ (0.2820 - 0.1494)$$

$$= 517.16\ kg$$

ดังนั้นต้องระเหยน้ำออกจากข้าวเปลือก 517.16 กิโลกรัม **ตอบ**

วิธีการหาความชื้น

การหาความชื้นอาจแบ่งได้เป็น 2 วิธี คือ วิธีตรงและวิธีอ้อม วิธีตรงถือเป็นวิธีมาตรฐานเพราะให้ค่าที่แม่นยำและคงที่ แต่ค่อนข้างเสียเวลานาน ส่วนวิธีอ้อมให้ค่าได้รวดเร็วแต่ไม่ค่อยแม่นยำนักเนื่องจากต้องอาศัยคุณสมบัติอื่นของวัสดุ นอกจากนี้การเก็บตัวอย่างเพื่อหาความชื้นเป็นปัญหาที่สำคัญอย่างหนึ่ง เนื่องจากอาจได้ตัวอย่างที่ไม่ได้เป็นตัวแทนที่เหมาะสมของวัสดุที่ต้องการอบแห้งทั้งหมด นอกจากนี้ควรเก็บตัวอย่างไว้ในภาชนะที่สามารถป้องกันมิให้เกิดการถ่ายเทความชื้นระหว่างตัวอย่างและอากาศก่อนที่จะทำการหาความชื้น

วิธีตรง

หลักการคือระเหยความชื้นในวัสดุออกให้หมดโดยปริมาณของความชื้นหาได้จากการชั่งน้ำหนัก โดยวิธีการหาความชื้นที่เป็นที่ยอมรับนั้นควรทำตามมาตรฐานที่กำหนดไว้จากสถาบันต่างๆ เช่น Association of Official Analytical Chemists (AOAC), International Standard Organization (ISO) และ American Society of Agricultural Engineering (ASAE) โดยวิธีทางตรงที่ใช้กันทั่วไปคือ การหาความชื้นด้วยตู้อบลมร้อน การหาความชื้นด้วยตู้อบแบบ vacuum การกลั่นด้วยวิธี Brown-Duvel ซึ่งขั้นตอน จำนวนตัวอย่าง อุณหภูมิ และระยะเวลาที่ใช้สามารถหาอ้างอิงได้จากมาตรฐานข้างต้น ตัวอย่างเช่นตารางที่ 1 แสดงวิธีการหาค่าความชื้นของวัสดุเกษตรบางชนิดตามมาตรฐานของ ASAE (1998)

วิธีอ้อม

หลักการคือทำการวัดค่าคุณสมบัติอื่นของวัสดุที่มีความสัมพันธ์กับความชื้นแล้วนำไปเปรียบเทียบค่าเป็นความชื้นต่อไป ซึ่งค่าที่นิยมใช้ได้แก่ ค่าความต้านทานไฟฟ้าและค่าการนำไฟฟ้า ค่าที่ได้เป็นค่าประมาณการ ไม่ถูกต้องแม่นยำนักและต้องทำการปรับเทียบค่า (calibrate) เป็นระยะเพื่อความถูกต้อง

การวัดความชื้นจากค่าความต้านทานไฟฟ้านั้น ค่าความต้านทานไฟฟ้าจะแปรผกผันกับความชื้น ความหนาแน่น และอุณหภูมิของวัสดุ เครื่องมือที่ใช้วัดความชื้นที่ใช้หลักการนี้ต้องวางวัสดุอยู่ระหว่างขั้วไฟฟ้าเพื่อวัดความต้านทานที่เกิดขึ้น

การวัดความชื้นจากค่าความการนำไฟฟ้า การนำไฟฟ้าของวัสดุแปรผันตรงกับความชื้นและความหนาแน่น แต่แปรผกผันกับอุณหภูมิของวัสดุเครื่องมือวัดความชื้นที่ใช้หลักการนี้ต้องการเมล็ดพืชวางอยู่ระหว่างขั้วไฟฟ้าเพื่อวัดค่าการนำไฟฟ้าที่เกิดขึ้นเช่นเดียวกับเครื่องวัดความชื้นจากค่าความต้านทานไฟฟ้าแต่ใช้ปริมาณวัสดุที่มากกว่า

ตารางที่ 1 อุณหภูมิและเวลาในการหาความชื้นวัสดุเกษตรบางชนิด (ASAE S352 DEC97)

Seed	Oven temperature ±1 °C	Heating time		Sample size	Reference
		hr	min	g	
Alfalfa	130	2	30	10	2
Barley	130	20	0	10	2
Beans, edible	103	72	0	15	1
Bentgrass	130	1	0	10	2
Bluegrass	130	1	0	5	2
Bluestem, yellow	100	1	0	1	2
Bromegrass, smooth	130	0	50	4	2
Cabbage	130	4	0	10	2
Carrot	100	1	40	10	2
Clover	130	2	30	10	2
Collard	130	4	0	10	2
Corn	103	72	0	15 or 100*	1, 3
Fescue	130	3	0	5	2
Flax	103	4	0	5–7	1, 3
Kale	130	4	0	10	2
Mustard	130	4	0	10	2
Oats	130	22	0	10	2
Onion	130	0	50	10	2
Orchardgrass	130	1	0	5	2
Parsley	100	2	0	10	2
Parsnip	100	1	0	10	2
Radish	130	1	10	10	2
Rape (Canola)	130	4	0	10	2
Rye	130	16	0	10	2
Ryegrass	130	3	0	5	2
Safflower	130	1	0	10	3
Sorghum	130	18	0	10	2
Soybeans	103	72	0	15	†
Sunflower	130	3	0	10	3
Timothy	130	1	40	10	2
Turnip	130	4	0	10	2
Wheat	130	19	0	10	2

*Use 100 g if moisture exceeds 25%.
†No official method exists for unground soybeans.

ตัวอย่างที่ 5 การทดลองหาความชื้นข้าวโพดตามมาตรฐาน ASAE S352 DEC97 โดยใช้ตัวอย่างขนาด 100 กรัม เข้าอบด้วยตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 103 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 72 ชั่วโมง เมื่อครบตามเวลาที่กำหนดนำตัวอย่างออกจากตู้อบแล้วพักไว้ในตู้ดูดความชื้น เมื่อตัวอย่างเย็นนำไปชั่งพบว่าตัวอย่างมีน้ำหนัก 78 กรัม อยากทราบว่าตัวอย่างข้าวโพดมีความชื้นเท่าใด (คิดทั้งสองมาตรฐาน)

วิธีทำ

หาความชื้นมาตรฐานแห้ง ; $M_d = \frac{m - m_d}{m_d} = \frac{100 - 78}{78} = 0.2820$ หรือ 28.20 %db

หาความชื้นมาตรฐานเปียก ; $M_w = \frac{m - m_d}{m} = \frac{100 - 78}{100} = 0.22$ หรือ 22 %wb

****

คำถามท้ายบท

1. จงพิสูจน์ว่า $M_w = \frac{M_d}{1 + M_d}$ และ $M_d = \frac{M_w}{1 - M_w}$

2. จงหาปริมาณน้ำที่ระเหยออกไปจากการลดความชื้นข้าวเปลือกจำนวน 1000 กิโลกรัม จากความชื้น 24 %wb ให้เหลือ 14 %db

3. เกษตรกรทำการตากข้าวโพดความชื้น 18 %wb จำนวน 50 กิโลกรัม ตอนเย็นนำไปชั่งน้ำหนักปรากฏว่าน้ำหนักเหลือ 47 กิโลกรัม อยากทราบว่าความชื้นหลังตากมีค่าเท่าไหร่ (ให้ตอบทั้งสองมาตรฐานความชื้น)

บทที่ 2

ไซโครเมตริก (Psychrometrics)

บทนำ

เรามักจะใช้อากาศเป็นตัวกลางในการอบแห้งวัสดุทั่วๆ ไป โดยการผ่านอากาศไปที่วัสดุที่ต้องการทำให้แห้ง อากาศนี้เรียกว่าอากาศชื้นเพราะประกอบไปด้วยอากาศแห้ง (dry air) และไอน้ำ (water vapor) โดยในอากาศแห้งจะประกอบไปด้วยก๊าซหลายชนิด เช่น ไนโตรเจน (N_2) ออกซิเจน (O_2) อาร์กอน (A) คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) และก๊าซอื่นๆ อีกเล็กน้อย ตารางที่ 1 แสดงสัดส่วนของไนโตรเจน และออกซิเจนในอากาศแห้งที่ระดับน้ำทะเล หรือความดันบรรยากาศ 101.3 kPa

ในบทนี้เป็นการศึกษาทำความเข้าใจเกี่ยวกับคุณสมบัติของอากาศชื้นเพื่อเป็นพื้นฐานสำหรับทำความเข้าใจกับกระบวนการอบแห้งต่อไป

ตารางที่ 1 ส่วนประกอบของอากาศแห้ง

	Composition		
	By Volume	By Weight	Molecular Weight
Nitrogen	79%	76.8%	28.02
Oxygen	21%	23.2%	32.00
Air (dry)	-	-	28.97

กฎของก๊าซอุดมคติ (The Ideal Gas Law)

จาก $$PV = NRT \qquad \text{.....(1)}$$

และ

$$\frac{P_1 V_1}{T_1} = \frac{P_2 V_2}{T_2} \qquad \text{.....(2)}$$

เมื่อ P คือ ความดัน, kPa

V คือ ปริมาตรของก๊าซ, m^3

T คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์, K

R คือ ค่าคงที่สากลของก๊าซ (universal gas constant = 8.315 kJ/kmol.K)

N คือ จำนวนโมลของก๊าซ มีค่าเท่ากับ มวลของก๊าซ (m) หารด้วย มวลโมเลกุลของก๊าซ (M)

แทนค่า $N=\frac{m}{M}$ ลงใน (1) ได้

$$PV=\frac{m}{M}RT \qquad \text{.....(3)}$$

หรือ

$$V=\frac{mRT}{PM} \qquad \text{.....(4)}$$

ดังนั้นสำหรับก๊าซผสมในปริมาตรจำกัด V จะได้ว่า

$$\frac{mRT}{PM}=\frac{m_1RT}{P_1M_1}=\frac{m_2RT}{P_2M_2}=..... \qquad \text{.....(5)}$$

หรือ

$$\frac{m}{PM}=\frac{m_1}{P_1M_1}=\frac{m_2}{P_2M_2}=..... \qquad \text{..... (6)}$$

กฎของดาลตัล (Dalton's Law)

ได้กล่าวว่าผลรวมของความดันย่อยของก๊าซแต่ละชนิดที่ผสมกันอยู่ในอากาศจะมีค่าเท่ากับความดันรวมของอากาศนั้นเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$P=P_1+P_2+P_3+..... \qquad \text{.....(7)}$$

สำหรับอากาศซึ่งประกอบไปด้วยอากาศแห้งและไอน้ำจะได้ว่า

$$P_{atm}=P_a+P_v \qquad \text{.....(8)}$$

คุณสมบัติอากาศทางไซโครเมตริก

1. Humidity Ratio (H) หรือ Absolute Humidity หรือ Moisture content เป็นค่าแสดงอัตราส่วนของปริมาณความชื้นต่อหนึ่งหน่วยมวลของอากาศแห้ง เขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$H = \frac{m_v}{m_a} = \frac{\text{มวลของไอน้ำ}}{\text{มวลของอากาศแห้ง}} \qquad \text{.....(9)}$$

จากสมการ (6) $\frac{m_v}{P_v M_v} = \frac{m_a}{P_a M_a} \Rightarrow \frac{m_v}{m_a} = \frac{P_v M_v}{P_a M_a}$

$$\therefore \quad H = \frac{M_v}{M_a}.\frac{P_v}{P_a} = \frac{18.10534}{28.9645}.\frac{P_v}{P_{atm} - P_v}$$

หรือ

$$H = \frac{0.6219\, P_v}{P_{atm} - P_v} \qquad \text{.....(10)}$$

ซึ่งทำให้ได้ค่า $P_v = \frac{P_{atm} H}{0.62198 + H}$ .....(11)

2. Relative Humidity (RH) หรือค่าความชื้นสัมพัทธ์ เป็นค่าที่แสดงอัตราส่วนระหว่างความดันของไอน้ำในอากาศต่อค่าความดันของไอน้ำในอากาศเมื่ออยู่ในสภาวะอิ่มตัวดังสมการ(12) RH มีค่าอยู่ระหว่าง 0-1 หรือ 0-100 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเมื่อกล่าวถึงความชื้นสัมพัทธ์นิยมกล่าวเป็นค่า %RH

$$RH = \frac{P_v}{P_s} \qquad \text{.....(12)}$$

3. Degree of saturation หรือบางตำราอาจเรียกว่า Percentage humidity คือค่าอัตราส่วนระหว่าง Humidity ratio ต่อค่า Humidity ratio ที่สภาวะอิ่มตัว

$$\mu = \frac{H}{H_s} \qquad \text{.....(13)}$$

4. Specific volume (V_{sa}) คือค่าอัตราส่วนระหว่างปริมาตรของอากาศชื้นต่อหนึ่งหน่วยมวลของอากาศแห้ง

$$V_{sa} = \frac{V}{m_a} \qquad .....(14)$$

แทนค่า

$$V_{sa} = \frac{m_a R_a T}{m_a P_a} = \frac{R_a T}{P_a}$$

โดยที่ R_a = gas constant ของอากาศแห้ง = 287 J/kg K

จะได้ว่า

$$V_{sa} = \frac{287\,T}{P_{atm} - P_v} \qquad .....(15)$$

หรือแทนค่า P_v จากสมการ (11) จะได้

$$V_{sa} = \frac{287\,T}{P_{atm}}\left(1 + \frac{H}{0.6219}\right) \qquad .....(16)$$

5. Dew point Temperature (t_{dp}) คืออุณหภูมิ ณ จุดซึ่งความชื้นเริ่มควบแน่น เมื่ออากาศเย็นลงที่ความดันคงที่

6. Wet Bulb Temperature (t_{wb}) คือ อุณหภูมิของไอน้ำอิ่มตัวที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงความร้อน หาได้จากอุณหภูมิของ bulb ของเทอร์โมมิเตอร์ปรอทที่คลุมด้วยผ้า wick เปียกแล้วปล่อยให้อากาศผ่านด้วยความเร็วสูง (ประมาณ 5 m/s) น้ำที่ผ้าจะระเหยทำให้อุณหภูมิลดลง เมื่อลดลงถึงจุดสมดุล t_{wb} จะต่ำกว่าอุณหภูมิแวดล้อม

7. Enthalpy (h) คือ พลังงานความร้อนของอากาศแห้งและพลังงานความร้อนของไอน้ำในอากาศ สมการแสดงค่าของ h ขณะนี้หาได้จาก Psychrometric data ใน ASAE D271.2 DEC94 หัวข้อ 2.2.8 ในหน่วย SI หรือประมาณค่าจากสมการ (17) ในหน่วยอังกฤษจาก Henderson and Perry, 1976

$$h = 0.24\,T + H h_g \qquad ..... (17)$$

โดยที่ h มีหน่วย เป็น btu/lb dry air

T มีหน่วยเป็น ^{o}F

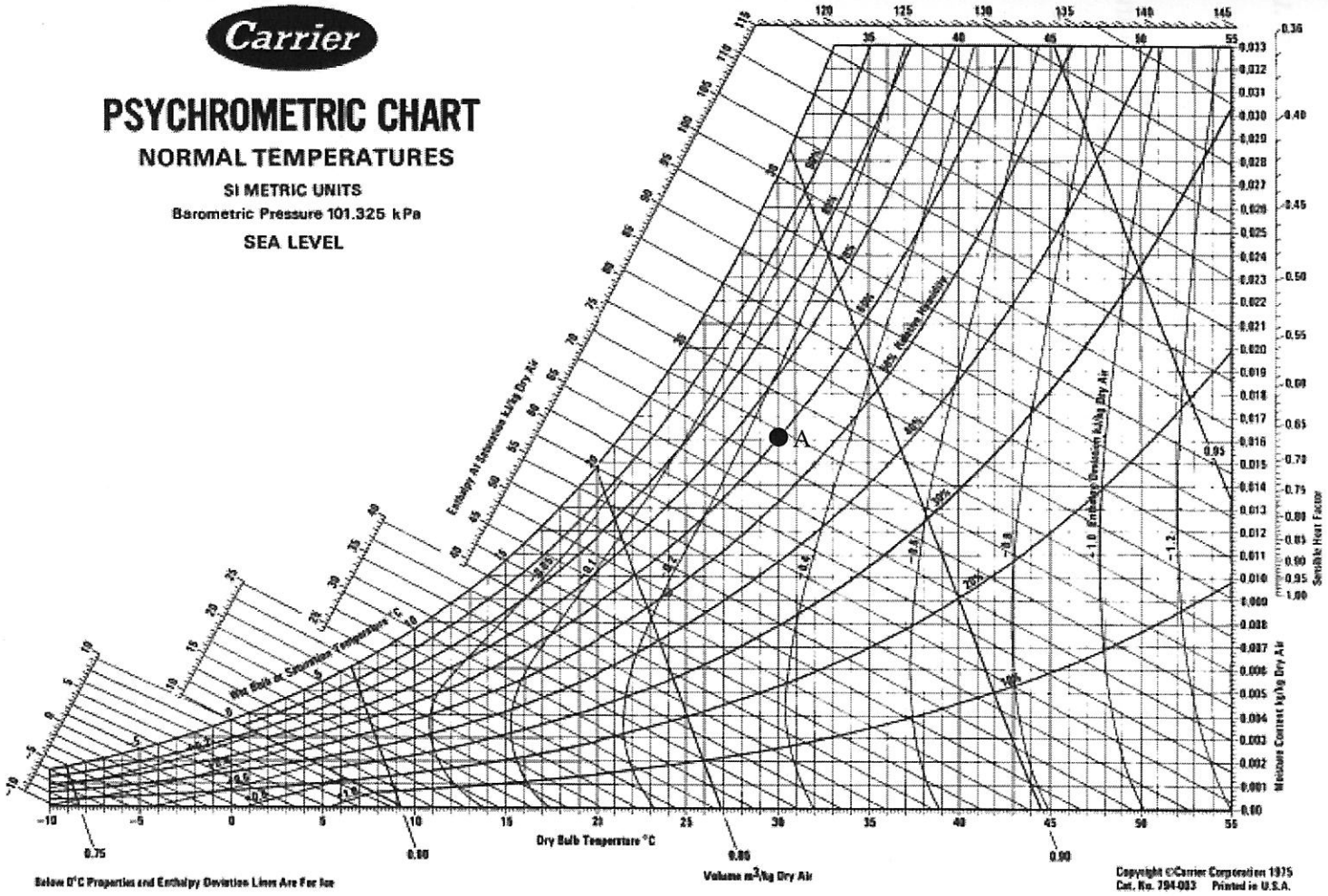
$h_g = 1075.2 + 0.45(t - 32)$

Psychrometric chart

เป็นกราฟฟิคที่ใช้อธิบายคุณสมบัติทางกายภาพและความร้อนของอากาศในบรรยากาศ และใช้ศึกษากระบวนการที่เกี่ยวเนื่องกับอากาศได้อีกด้วย psychrometric chart มีลักษณะดังแสดงในภาพที่ 1 จาก psychrometric chart ในภาพที่ 1 จะเห็นว่าแกนนอนจะแสดงค่าอุณหภูมิกระเปาะแห้ง (T) แกนตั้งเป็นค่าอัตราส่วนความชื้น (H) โดย psychrometric chart นี้จะแสดงค่าคุณสมบัติอากาศที่มีอุณหภูมิอยู่ในช่วง -10 ^{o}C ถึง 55 ^{o}C และความดันรวม 1 บรรยากาศ (101.325 kPa) ใช้อากาศแห้ง 1 กิโลกรัมเป็นมาตรฐาน

ถ้าหากเราทราบคุณสมบัติอากาศ 2 ชนิด จะสามารถหาคุณสมบัติอื่นๆ ของอากาศได้ ตัวอย่างเช่น หากเราทราบอุณหภูมิอากาศคือ 30 ^{o}C ความชื้นสัมพัทธ์ 60% (จุด A ภาพที่ 1) เราสามารถหาคุณอื่นของอากาศได้ดังนี้

1. อัตราส่วนความชื้น (H_A) : หาได้โดยการลากเส้นตรงตามแนวระดับขนานกับแนวนอนจากจุด A ไปที่แกนตั้งด้านขวามืออ่านค่าอัตราส่วนความชื้นได้ 0.016 $kg/kg_{\text{dry air}}$
2. อุณหภูมิจุดน้ำค้าง(t_{dp}): หาได้โดยการลากเส้นตรงตามแนวระดับขนานกับแนวนอนจากจุด A ไปชนกับเส้นโค้งของได้น้ำอิ่มตัวทางด้านซ้ายจะได้อุณหภูมิจุดน้ำค้างคือ 21.2 ^{o}C
3. อุณหภูมิกระเปาะเปียก(t_{wb}) : หาได้โดยการลากเส้นจากจุด A ตรงขนานกับเส้นเอนทาลปีซึ่งเอียงลงจากซ้ายไปขวาไปตัดกับเส้นโค้งไอน้ำอิ่มตัวทางด้านซ้ายจะได้อุณหภูมิกระเปาะเปียกคือ23.7 ^{o}C
4. เอนทาลปี (h) : หาได้โดยการลากเส้นจากจุด A ตรงขนานกับเส้นเอนทาลปีซึ่งเอียงลงจากซ้ายไปขวาผ่านเส้นโค้งไอน้ำอิ่มตัวทางด้านซ้ายไปถึงเส้นบอกค่าเอนทาลปีซึ่งจะอ่านค่าได้ 71 $kJ/kg_{\text{dry air}}$
5. ปริมาตรจำเพาะ (V_{sa}): หาได้โดยการลากเส้นจากจุด A ขนานกับเส้นปริมาตรจำเพาะของอากาศจากนั้นทำการหาค่าโดยการ interpolate ซึ่งจะได้ค่าปริมาตรจำเพาะของอากาศคือ 0.88 $m^3/kg_{\text{dry air}}$

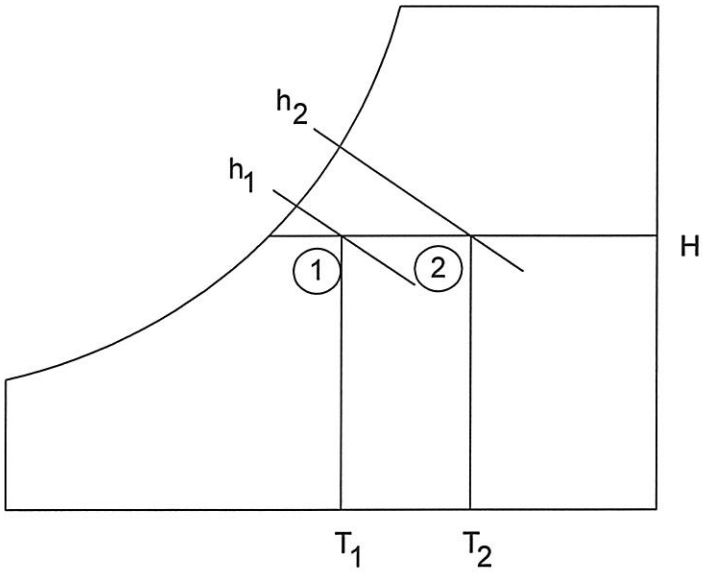


ภาพที่ 1 แผนภาพ psychrometric (ASAE standard, 1998)

กระบวนการทางไซโครเมตริก

1. กระบวนการให้ความร้อน (Heating) หรือทำความเย็น (Cooling) อากาศ

เป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นโดยไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้นของอากาศ กระบวนการนี้จึงเกิดขึ้นบนเส้นอัตราส่วนความชื้นอากาศคงที่ดังแสดงในภาพที่ 2



ภาพที่ 2 กระบวนการ heating และ cooling อากาศ

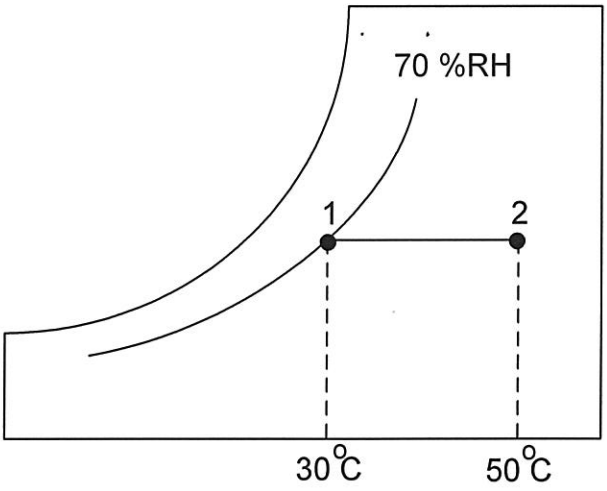
ค่าความร้อนที่ให้แก่อากาศเพื่อเพิ่มความร้อนให้กับอากาศต่อกิโลกรัมอากาศแห้งมีค่าเท่ากับ h_2-h_1 ในการเพิ่มอุณหภูมิของอากาศจาก T_1 ให้มีอุณหภูมิ T_2 และในทางกลับกันสำหรับการทำความเย็นก็จะต้องดึงความร้อนออกจากอากาศ h_2-h_1 เพื่อลดความร้อนอากาศจาก T_2 ให้มีอุณหภูมิ T_1 นอกจากนี้การทำความเย็นอุณหภูมิของอากาศที่ต้องการทำความเย็นต้องสูงกว่าอุณหภูมิจุดน้ำค้าง (dew point temperature) ไม่เช่นนั้นจะก่อให้เกิดการลดความชื้นของอากาศ ปริมาณความร้อนที่ใช้ในการในการให้ความร้อนหรือทำความเย็นหาได้จาก

$$q = \dot{m}(h_2 - h_1) \qquad (18)$$

เมื่อ $\dot{m}$ คือ อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศแห้ง (kg/s)

ตัวอย่างที่ 1 อากาศที่สภาวะ 30 ^{o}C ความชื้นสัมพัทธ์ 70 % ไหลผ่านเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนด้วยอัตราการไหล 10 m^3/s หากต้องการเพิ่มอุณหภูมิของอากาศเป็น 50 ^{o}C จงหาอัตราการให้ความร้อนแก่อากาศ

วิธีทำ



ภาพที่ 3 สภาวะอากาศของตัวอย่างที่ 1

จาก psychrometric chart (ภาพที่ 3):

ที่ สภาวะ 1 : T = 30 ^{o}C และ 70 %RH ได้

$h_1 = 78.0 - 0.2 = 77.8$ kJ / $kg_{dry\ air}$ และ $V_{sa} = 0.885$ m^3 / $kg_{dry\ air}$

เมื่อเพิ่มความร้อนโดยที่ H คงที่ ไปยังสภาวะ 2 : T= 50 ^{o}C ได้

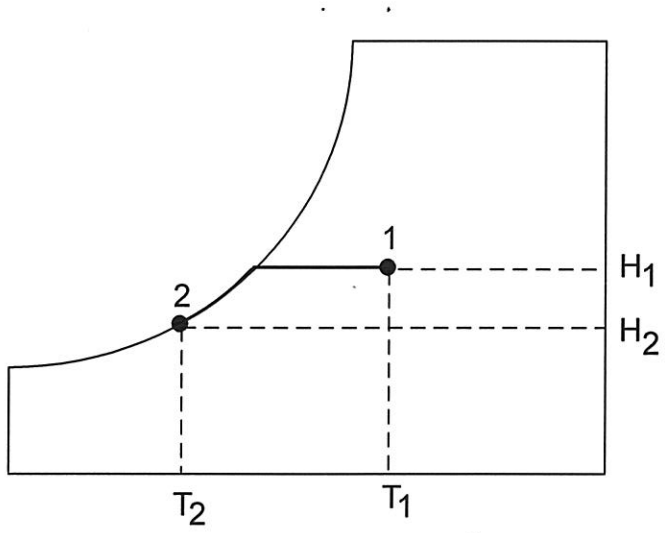
$h_2 = 100 - 1.08 = 98.92$ kJ / $kg_{dry\ air}$

ดังนั้นอัตราความร้อนที่ต้องการคือ

$$q = \frac{10}{0.885}\left(98.92 - 77.8\right) = 238.64 \text{ kJ/s หรือ } 238.64 \text{ kW}$$ **ตอบ**

2. กระบวนการลดความชื้นอากาศ (dehumidifying)

กระบวนการนี้ทำได้โดยการลดความชื้นของอากาศให้ลดลงถึงอุณหภูมิจุดน้ำค้างแล้วเกิดการควบแน่นตามเส้นไอน้ำอิ่มตัวดังแสดงในภาพที่ 4

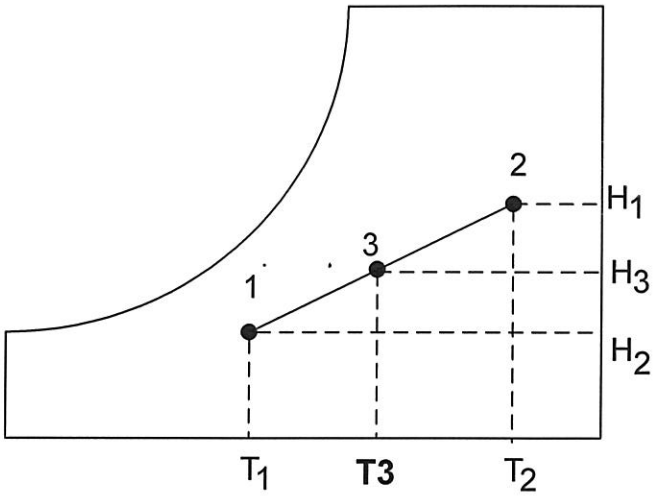


ภาพที่ 4 กระบวนการลดความชื้นอากาศ

อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่มีอุณหภูมิ T_2 จะดึงความร้อนออกจากอากาศที่สภาวะ 1 ให้อุณหภูมิลดลงจนถึงอุณหภูมิจุดน้ำค้างถ้าหากมีการการถ่ายเทความร้อนออกจากอากาศต่อไปจนกระทั่งสมดุลกับอุณหภูมิของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนความชื้นในอากาศจะถูกควบแน่นออกไปปริมาณ $H_1 - H_2$ แต่ในความเป็นจริงจะมีอากาศบางส่วนที่สัมผัสกับอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน และมีอากาศอีกส่วนหนึ่งที่ไม่สัมผัสกับอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน ทำให้การลดความความชื้นของอากาศเป็นไปในลักษณะของกระบวนการผสมอากาศ

3. กระบวนการผสมอากาศ (Mixing)

การผสมอากาศที่มีสภาวะ 1 เข้ากับอากาศที่มีสภาวะ 2 จะทำให้ได้อากาศที่สภาวะ 3 อยู่บนเส้นตรงที่ลากเชื่อมต่อบน psychrometric chart ระหว่างสภาวะ 1 หรือ 2 โดยตำแหน่งของสภาวะ 3 บนเส้นตรงนี้ขึ้นอยู่กับสัดส่วนของอากาศจากสภาวะเริ่มต้นทั้งสอง หากอัตราส่วนของอากาศจากสภาวะ 1 และสภาวะ 2 เป็นครึ่งหนึ่ง ตำแหน่งของสภาวะ 3 จะอยู่กึ่งกลางของเส้นตรง การหาสภาวะของอากาศผสมสามารถหาได้ทั้งจาก psychrometric chart โดยตรงดังแสดงในภาพที่ 5 หรือจากการคำนวณ



ภาพที่ 5 กระบวนการผสมอากาศบน psychrometric chart

หากกำหนดให้

m_1 = มวลของอากาศแห้งที่สภาวะ 1, $kg_{dry\ air}$

m_2 = มวลของอากาศแห้งที่สภาวะ 2, $kg_{dry\ air}$

m_3 = มวลของอากาศแห้งที่สภาวะ 3, $kg_{dry\ air}$

สมดุลมวลอากาศแห้งจะได้

$$m_3 = m_1 + m_2 \qquad \text{.....(19)}$$

สมดุลมวลอากาศชื้นจะได้

$$m_3 H_3 = m_1 H_1 + m_2 H_2 \qquad \text{.....(20)}$$

จะได้ $H_3 = \dfrac{m_1 H_1 + m_2 H_2}{m_3}$ แต่จากสมการ (19) จะได้ว่า

$$H_3 = \frac{\frac{m_1}{m_2} H_1 + H_2}{\frac{m_1}{m_2} + 1} \qquad \text{.....(21)}$$

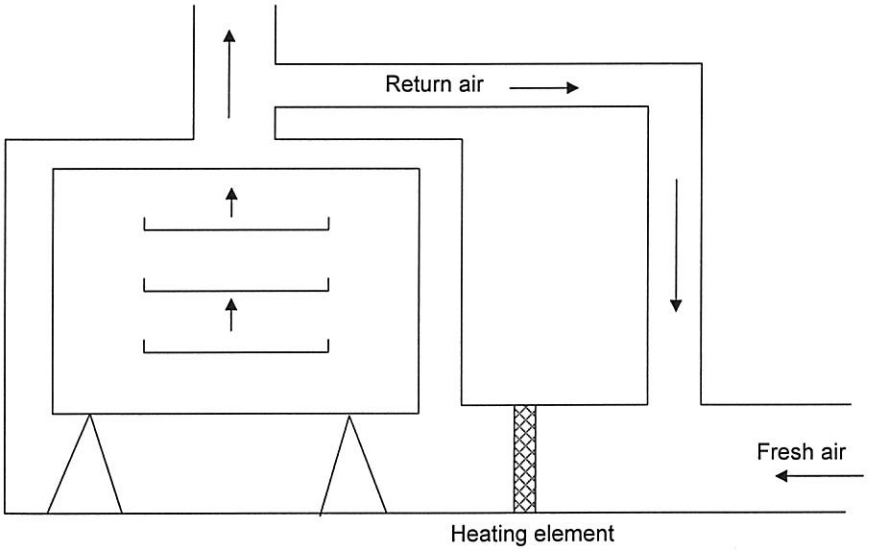
สมดุลความร้อนสัมผัสจะได้

$$m_3T_3 = m_1T_1 + m_2T_2 \qquad \text{.....(22)}$$

ดังนั้น $T_3 = \dfrac{m_1T_1 + m_2T_2}{m_3}$ และจากสมการ (19) จะได้

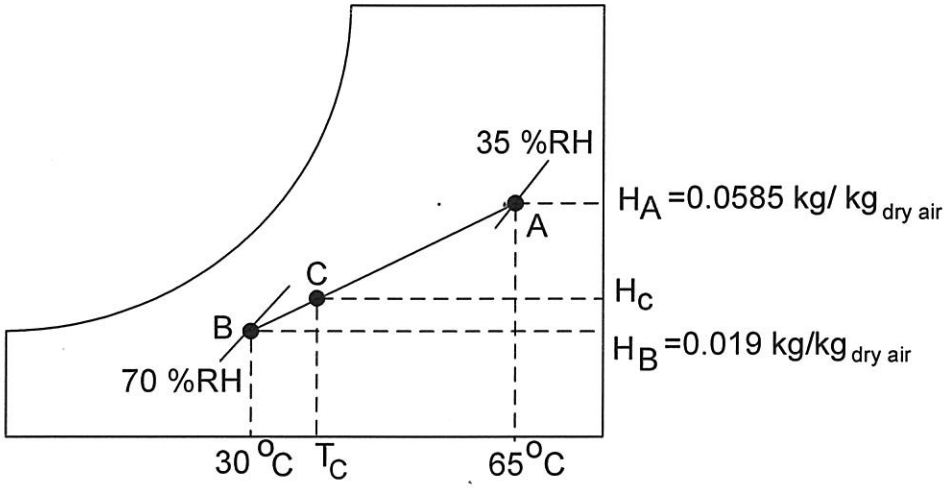
$$T_3 = \frac{\frac{m_1}{m_2}T_1 + T_2}{\frac{m_1}{m_2} + 1} \qquad \text{.....(23)}$$

ตัวอย่างที่ 2 เพื่อการประหยัดพลังงานของเครื่องอบแห้งแบบลมร้อนจึงต้องมีการออกแบบให้นำลมร้อนที่ออกจากทางออกของเครื่องนำกลับมาใช้ใหม่ให้ผสมกับอากาศภายนอก (ภาพที่ 6) โดยอากาศร้อนที่นำกลับมาใช้ใหม่มีอุณหภูมิ 65 ^{o}C ความชื้นสัมพัทธ์ 35% ไหลในอัตรา 5 m^3/s ผสมกับอากาศภายนอกที่อุณหภูมิ 30 ^{o}C ความชื้นสัมพัทธ์ 70% ไหลในอัตรา 15 m^3/s จงหาอุณหภูมิและความชื้นของอากาศผสม



ภาพที่ 6 ระบบการอบแห้งด้วยลมร้อนสำหรับตัวอย่างที่ 2

วิธีทำ



ภาพที่ 7 กระบวนการที่เกิดขึ้นบน psychrometric chart สำหรับตัวอย่างที่ 2

สำหรับการหาค่าจาก psychrometric chart มีขั้นตอนดังนี้

(1) กำหนดสถานะ A และ B ดังในภาพที่ 7

(2) เชื่อมจุด AB ด้วยเส้นตรง

(3) กำหนดจุด C บนเส้น AB โดยพิจารณาจากอากาศผสม โดยอากาศผสมจะประกอบด้วยอากาศหมุนเวียนกลับ 1 ส่วน และอากาศภายนอก 3 ส่วน ดังนั้นเส้น AB จึงถูกแบ่งด้วยอัตราส่วน AC:CB คือ 3:1 โดยจุด C จะอยู่ใกล้จุด B ซึ่งมีอัตราส่วนอากาศมากกว่า

(4) ที่จุด C จะได้ T= 38.5 ^{o}C และ อัตราส่วนความชื้น H=0.029 kg/kg $_{dry\ air}$

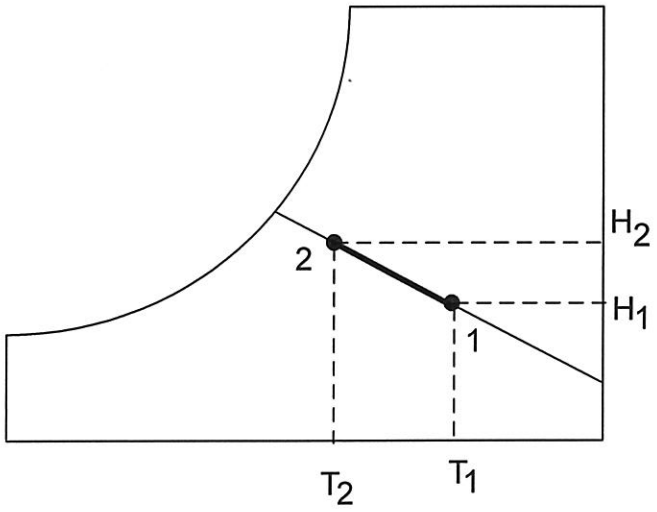
เปรียบเทียบค่ากับการคำนวณ

จากสมการ (21) จะได้ $$T_c = \frac{\frac{1}{3} * 65 + 30}{\frac{1}{3} + 1} = 38.75 \ ^{o}C$$

จำสมการ (23) จะได้ $$H_c = \frac{\frac{1}{3} * 0.0585 + 0.019}{\frac{1}{3} + 1} = 0.028875 \approx 0.029 \quad kg/kg_{dry\ air}$$ **ตอบ**

4. กระบวนการลดความชื้นวัสดุ (drying)

การลดความชื้นวัสดุโดยใช้อากาศร้อนเป็นแหล่งพลังงานความร้อน โดยการเป่าอากาศร้อนผ่านวัสดุจะก่อให้เกิดกระบวนการเพิ่มความชื้นอากาศแบบความร้อนคงที่ (adiabatic humidification) โดยอากาศที่ไหลผ่านวัสดุจะมีอุณหภูมิลงและมีความชื้นเพิ่มขึ้น ขณะที่ enthalpy มีค่าคงที่ กระบวนการนี้จึงดำเนินไปตามเส้นกระเปาะเปียกคงที่ ซึ่งปรากฏการณ์เช่นนี้จะเกิดขึ้นกับการอบแห้งในช่วงที่เรียกว่า ช่วงการอบแห้งคงที่ (constant rate period) ดังแสดงในภาพที่ 8



ภาพที่ 8 กระบวนการอบแห้งวัสดุบน psychrometric chart

ตัวอย่างที่ 3 การอบแห้งข้าวโพดแบบเบดอยู่กับที่ (fixed bed) โดยการเป่าอากาศร้อนที่อุณหภูมิ 70 ^{o}C ความชื้นสัมพัทธ์ 10% เมื่ออากาศผ่านชั้นข้าวโพดและออกจากเครื่องอบแห้งที่อุณหภูมิ 66 ^{o}C ความชื้นสัมพัทธ์ 17% จงหาปริมาณน้ำที่ระเหยออกไปต่อกิโลกรัมอากาศแห้ง

วิธีทำ

(1) กำหนดสภาวะอากาศก่อนและหลังอบแห้งดังแสดงในภาพที่ 9

(2) ที่สภาวะอากาศก่อนการอบแห้ง (สภาวะ 1) จะได้ว่า

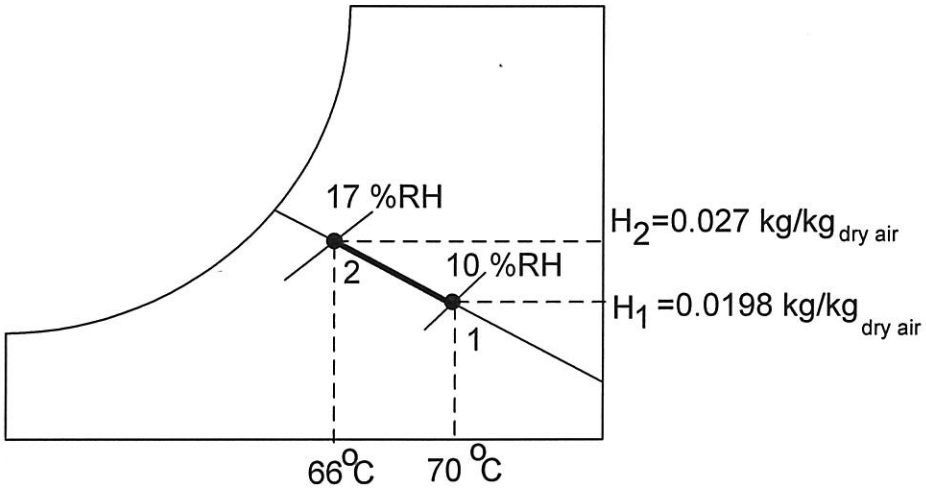
$$H_1 = 0.0198 \quad kg/kg_{dry\ air}$$

(3) ที่สภาวะอากาศหลังการอบแห้ง (สภาวะ 2) ได้

$$H_2 = 0.027 \quad kg/kg_{dry\,air}$$

(4) ปริมาณน้ำที่ระเหยออกจากข้าวโพดคือ

$$\Delta H = 0.027 - 0.0198 = 0.0072 \quad kg/kg_{dry\,air}$$ **ตอบ**



ภาพที่ 9 สภาวะการอบแห้งของตัวอย่างที่ 3

****

คำถามท้ายบท

1. จงหาค่าอัตราส่วนความชื้น อุณหภูมิกระเปาะเปียก อุณหภูมิจุดน้ำค้าง ปริมาตรจำเพาะ และเอนทาลปี ของอากาศที่อุณหภูมิ 40 ^{o}C ความชื้นสัมพัทธ์ 30%

2. อากาศอุณหภูมิ 20 ^{o}C และอุณหภูมิกระเปาะเปียก 12.8 ^{o}C ถูกทำให้ร้อนถึงอุณหภูมิ 70 ^{o}C เพื่อใช้ในการอบแห้ง หากอุณหภูมิที่ทางออกของเครื่องอบแห้งคือ 35 ^{o}C จงหา 1) อัตราส่วนความชื้นของอากาศที่ทางเข้าและทางออของเครื่องอบแห้ง 2) มวลแห้งของอากาศที่จำเป็นต่อการระเหยน้ำ 1 kg ออกจากวัสดุภายในเครื่องอบแห้ง

3. จงหาอัตราการระเหยน้ำออกจากข้าวเปลือกที่ทำการอบแห้งด้วยอากาศร้อนอุณหภูมิ 60 ^{o}C, 15 %RH อัตราการไหลอากาศ 10 m^3/s และวัดอุณหภูมิของอากาศขาออกได้ 52 ^{o}C

บทที่ 3

ความต้านทานการไหลและพัดลม

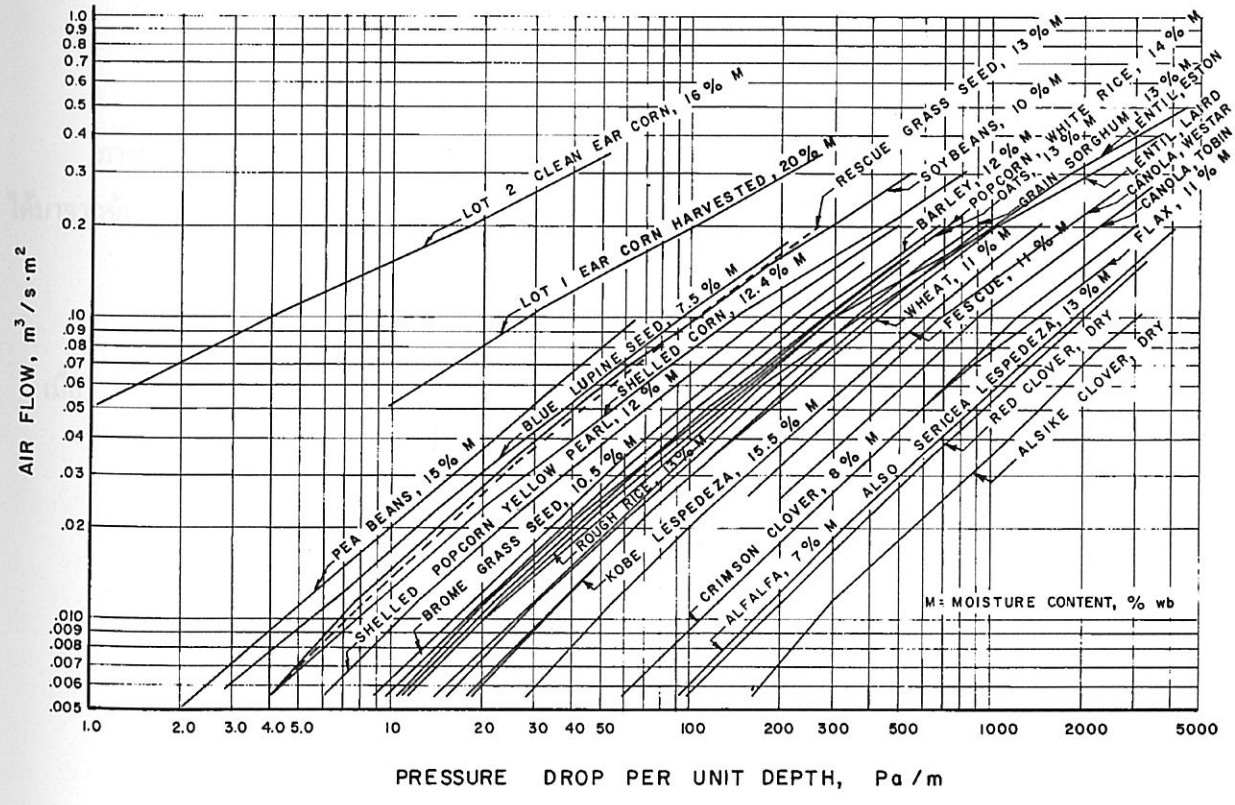
(Air Flow Resistance and Fans)

ความต้านทานต่อการไหลของอากาศเป็นผลอันเนื่องมาจากความเสียดทานอันเกิดจากความหนืดของของไหล (ความสูญเสียจากความเสียดทาน) และการรบกวนการไหลอันเกิดจากข้องอ ทางแยก การเพิ่มหรือลดขนาดของท่อ เป็นต้น ในบทนี้จะแสดงวิธีคำนวณหาความดันที่สูญเสียที่จุดต่างๆ ในระบบอบแห้ง และการเลือกพัดลมตามลำดับ

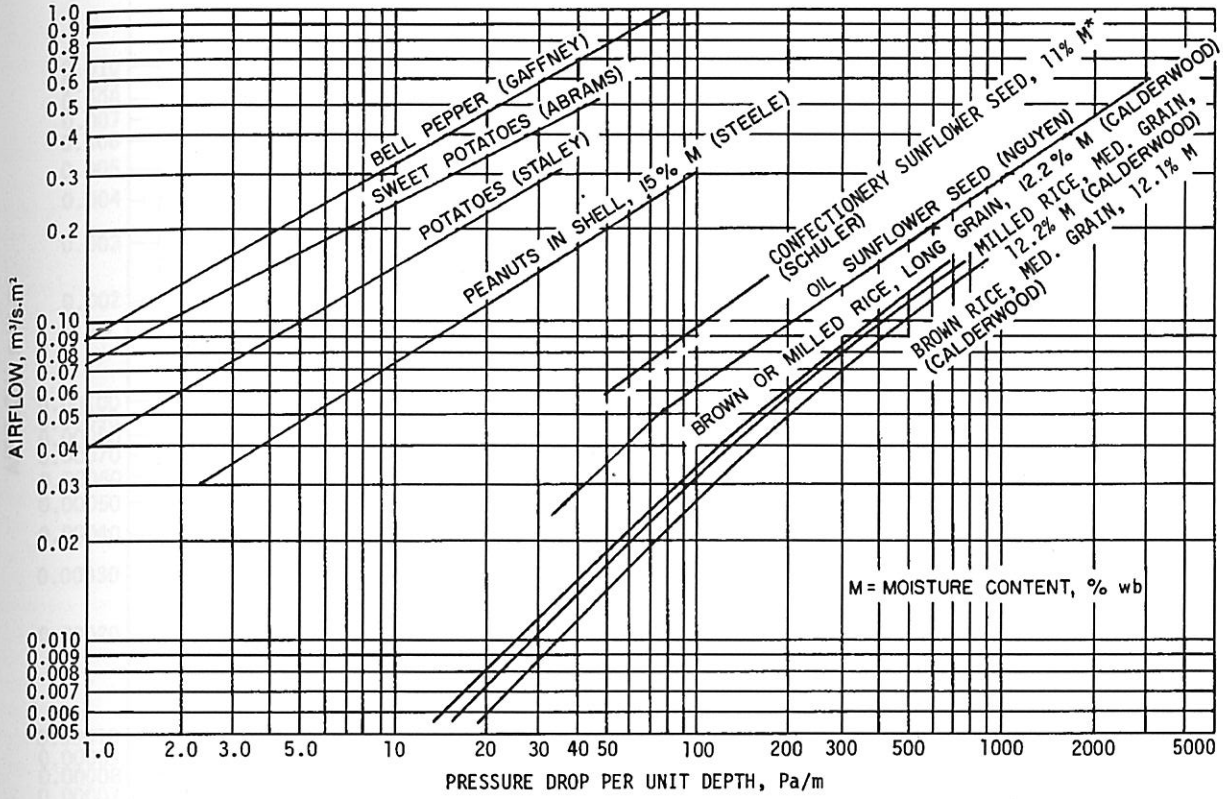
การคำนวณความดันลดเนื่องจากความต้านทานในชั้นเมล็ดพืช

เมื่ออากาศไหลผ่านชั้นเมล็ดพืช ความดันของอากาศจะลดลงโดยผลของความเสียดทานและการรบกวนการไหล การสูญเสียความดันจะขึ้นอยู่กับอัตราการไหลของอากาศ ผิว รูปทรง และขนาดของเมล็ด ช่องว่างระหว่างเมล็ด การกระจายของขนาดเมล็ด และความหนาของชั้นเมล็ดพืช

ข้อมูลการสูญเสียความดันของอากาศที่ไหลผ่านชั้นเมล็ดพืชที่เป็นที่รู้จักกันอย่างแพร่หลายเป็นข้อมูลที่ได้มาจากการทดลองซึ่งจาก ASAE Standards (1998) เราสามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลและการสูญเสียความดันสำหรับเมล็ดพืชชนิดต่างๆ ได้จากภาพที่ 1-ภาพที่ 3



ภาพที่ 1 ความต้านทานการไหลของเมล็ดพืช



ภาพที่ 2 ความต้านทานการไหลของเมล็ดพืช

ภาพที่ 1 เป็นเป็นการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของอากาศ และการสูญเสียความดันที่ได้มาจากข้อมูลของ Shedd (1953) ซึ่งแต่เส้นในภาพที่ 1 สามารถหาความสัมพันธ์ได้จาก

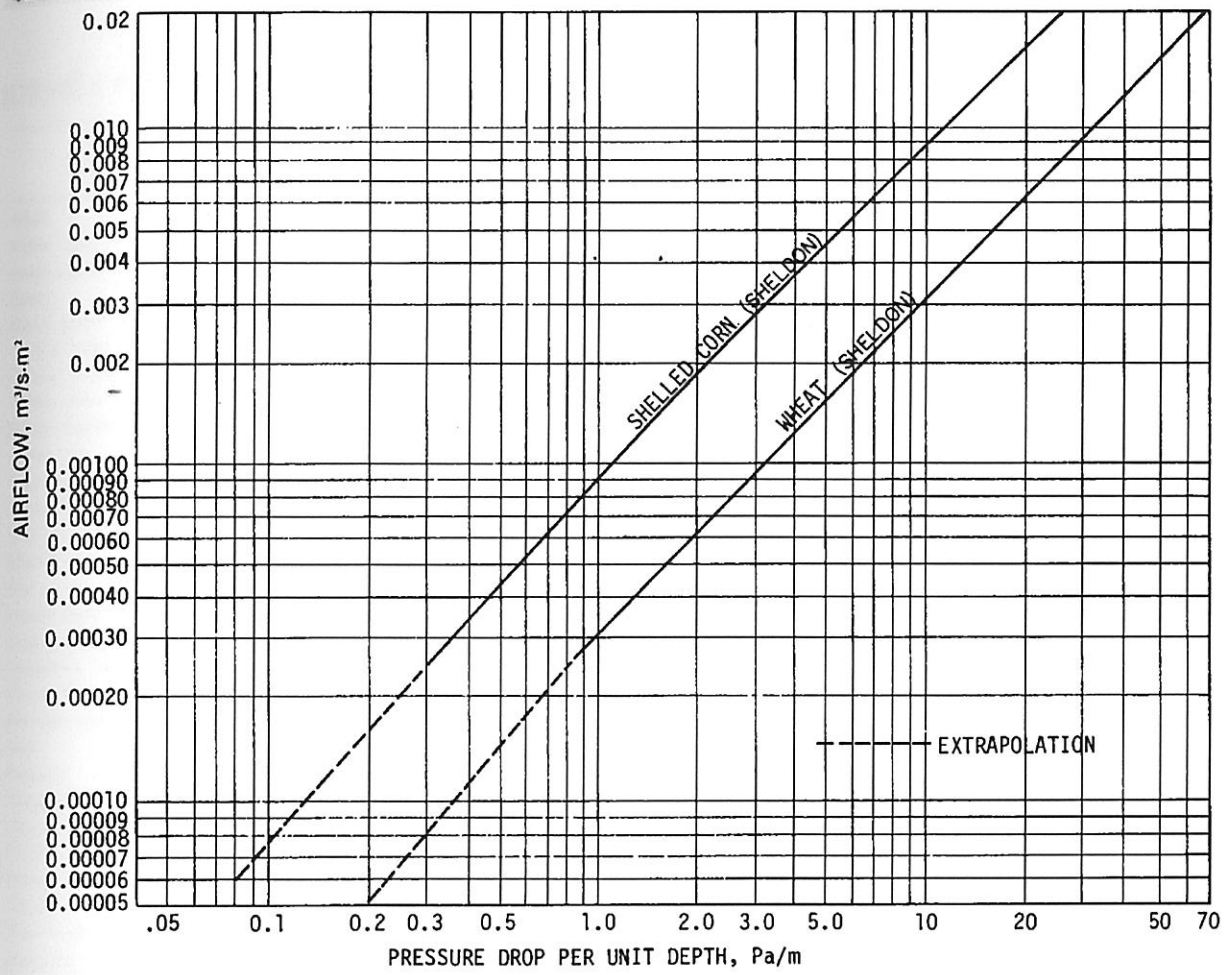
$$Q = a\Delta P'^{b} \qquad (1)$$

เมื่อ

$\Delta P'$ = pressure drop per unit length, Pa/m

Q = air flow, $m^3/s.m^2$

a, b = constant



ภาพที่ 3 ความต้านทานการไหลของข้าวโพดและข้าวสาลี

นอกจากสมการ (1) แล้ว ASAE Standards (1998) ยังได้แนะนำสมการสำหรับหาค่าความต้านทานการไหลของอากาศคือ

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{aQ^2}{\ln(1+bQ)} \qquad (2)$$

เมื่อ

ΔP = pressure drop, Pa

L = bed depth, m

Q = air flow, $m^3/s.m^2$

a, b = constant for particular grain (หาได้จากตารางที่ 1)

ตารางที่ 1 ค่าคงที่สำหรับความต้านทานการไหลผ่านวัสดุเกษตร

Material	Value of a ($Pa \cdot s^2/m^3$)	Value of b ($m^2 \cdot s/m^3$)	Range of Q ($m^3/m^2 s$)	Reference
Alfalfa	6.40×10^4	3.99	0.0056–0.152	Shedd (1953)
Alfalfa cubes	1.27×10^3	22.99	0.13–3.15	Sokhansanj et al. (1993)
Alfalfa pellets	1.80×10^4	68.72	0.0053–0.63	Sokhansanj et al. (1993)
Barley	2.14×10^4	13.2	0.0056–0.203	Shedd
Brome grass	1.35×10^4	8.88	0.0056–0.152	Shedd
Canola, Tobin	5.22×10^4	7.27	0.0243–0.2633	Jayas and Sokhansanj (1989)
Canola, Westar	4.55×10^4	9.72	0.0243–0.2633	Jayas and Sokhansanj (1989)
Clover, alsike	6.11×10^4	2.24	0.0056–0.101	Shedd
Clover, crimson	5.32×10^4	5.12	0.0056–0.203	Shedd
Clover, red	6.24×10^4	3.55	0.0056–0.152	Shedd
Corn, ear (lot 1)	1.04×10^4	325.	0.051–0.353	Shedd
Corn, shelled	2.07×10^4	30.4	0.0056–0.304	Shedd
Corn, shelled (low airflow)	9.77×10^3	8.55	0.00025–0.0203	Sheldon et al. (1960)
Fescue	3.15×10^4	6.70	0.0056–0.203	Shedd
Flax	8.63×10^4	8.29	0.0056–0.152	Shedd
Lentils, Laird	5.43×10^4	36.79	0.0028–0.5926	Sokhansanj et al. (1990)
Lespedeza, Kobe	1.95×10^4	6.30	0.0056–0.203	Shedd
Lespedeza, Sericea	6.40×10^4	3.99	0.0056–0.152	Shedd
Lupine, blue	1.07×10^4	21.1	0.0056–0.152	Shedd
Milkweed pods	2.11×10^3	4.65	0.06–0.4	Jones and Von Bargen (1992)
Oats	2.41×10^4	13.9	0.0056–0.203	Shedd
Peanuts	3.80×10^3	111.	0.030–0.304	Steele
Peppers, bell	5.44×10^2	868.	0.030–1.00	Gaffney and Baird (1975)
Popcorn, white	2.19×10^4	11.8	0.0056–0.203	Shedd
Popcorn, yellow	1.78×10^4	17.6	0.0056–0.203	Shedd
Potatoes	2.18×10^3	824.	0.030–0.300	Staley and Watson (1967)
Rescue	8.11×10^3	11.7	0.0056–0.203	Shedd
Rice, rough	2.57×10^4	13.2	0.0056–0.152	Shedd
Rice, long brown	2.05×10^4	7.74	0.0055–0.164	Calderwood (1973)
Rice, long milled	2.18×10^4	8.34	0.0055–0.164	Calderwood
Rice, medium brown	3.49×10^4	10.9	0.0055–0.164	Calderwood
Rice, medium milled	2.90×10^4	10.6	0.0055–0.164	Calderwood
Sorghum	2.12×10^4	8.06	0.0056–0.203	Shedd
Soybeans	1.02×10^4	16.0	0.0056–0.304	Shedd
Sunflower, confectionery	1.10×10^4	18.1	0.055–0.178	Schuler (1974)
Sunflower, oil	2.49×10^4	23.7	0.025–0.570	Nguyen (1981)
Sweet potatoes	3.40×10^3	6.10×10^8	0.050–0.499	Abrams and Fich (1982)
Wheat	2.70×10^4	8.77	0.0056–0.203	Shedd
Wheat (low airflow)	8.41×10^3	2.72	0.00025–0.0203	Sheldon et al.

NOTE – The parameters given were determined by a least square fit of the data in Figures 1 to 6. To obtain the corresponding values of (a) in inch-pound units (in H_2O min^2/ft^3) divide the above a-values by 31635726. To obtain corresponding values of (b) in inch-pound units (ft^2/cfm) divide the above b-values by 196.85. Parameters for the Lot 2 Ear Corn data are not given since the above equation will not fit the data.
Although the parameters listed in this table were developed from data at moderate airflows, extrapolations of the curves for shelled corn, wheat, and sorgbum agree well with available data (Stark and James) at airflows up to 1.0 $m^3/s \cdot m^2$.

ความต้านทานที่แผ่นเหล็กเจาะรู

เมื่ออากาศไหลผ่านชั้นเมล็ดพืชที่กอบทับอยู่เหนือแผ่นเหล็กเจาะรู การสูญเสียความดันส่วนหนึ่งจะเกิดขึ้นขณะที่อากาศไหล่านแผ่นเหล็กเจาะรูนี้ Henderson (1943) ทำการทดลองหาการสูญเสียความดันของอากาศเมื่อไหลผ่านแผ่นเหล็กเจาะรูที่ถูกทับด้วยชั้นเมล็ดพืช ได้สมการสำหรับคำนวณหาความดันรวมที่สูญเสียในรูปของความเร็ว สัดส่วนช่องว่างอากาศในชั้นเมล็ดพืช เปอร์เซ็นต์พื้นที่ที่เป็นรูของแผ่นเหล็กเจาะรู สมการดังกล่าวเขียนได้ว่า

$$\Delta P = 1.07\left(\frac{Q}{\phi O_f}\right)^2 \qquad (3)$$

เมื่อ

ϕ = สัดส่วนช่องว่างอากาศในกองเมล็ดพืช, เศษส่วน

O_f = พื้นที่ที่เป็นรูต่อพื้นที่ทั้งหมด, เศษส่วน

ถ้า O_f มีค่ามากว่า 10 เปอร์เซ็นต์ การสูญเสีย อันเนื่องมากจากแผ่นเหล็กเจาะรูจะมีค่าน้อยเมื่อเทียบกับการสูญเสียความดันในชั้นเมล็ดพืช

ความต้านทานในท่อ

1. ท่อตรง

ในขณะที่อากาศไหลในท่อตรง ความดันที่สูญเสียส่วนใหญ่มาจากความเสียดทานซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการของ Darcy-Weisbach

$$h_f = f\left(\frac{L}{D}\right)\left(\frac{V^2}{2g}\right) \qquad (4)$$

เมื่อ h_f = ค่าความดันสูญเสียในท่อ, m

L = ความยาวท่อ, m

D = เส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อ, m

V = ความเร็วของอากาศ, m/s

g = ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง, m/s^2

f = สัมประสิทธิ์ความเสียทาน, ไร้มิติ

สำหรับค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานนั้นเป็นค่าที่ได้จากความสัมพันธ์ระหว่างค่า Reynolds number (Re) และค่าความขรุขระสัมพัทธ์ (Relative roughness, $\frac{\varepsilon}{D}$) โดยค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานนี้สามารถหาได้จาก moody diagram (ภาพที่ 4) โดยถ้าหากการไหลเป็นแบบราบเรียบ ($Re \leq 2000$) ค่า f เป็นฟังก์ชั่นกับ Re เท่านั้น คือ

$$f = \frac{64}{Re} \tag{5}$$

ส่วนในช่วงที่มีการไหลในช่วงเปลี่ยนแปลง (transition) ซึ่งมีค่า $2000 < Re < 4000$ ค่า f เป็นฟังก์ชั่นกับ Re และ ε / D ตามสมการของ Colebrook และ White คือ

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left[\frac{\varepsilon}{3.7 D} + \frac{2.51}{Re \sqrt{f}} \right] \tag{6}$$

โดยค่าความขรุขระของผนังท่อ ε ขึ้นอยู่กับชนิดของท่อดังตารางที่ 2

สำหรับช่วงที่มีการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent) กรณีที่เป็นท่อเรียบ ที่ $4000 < Re < 100,000$ คือ

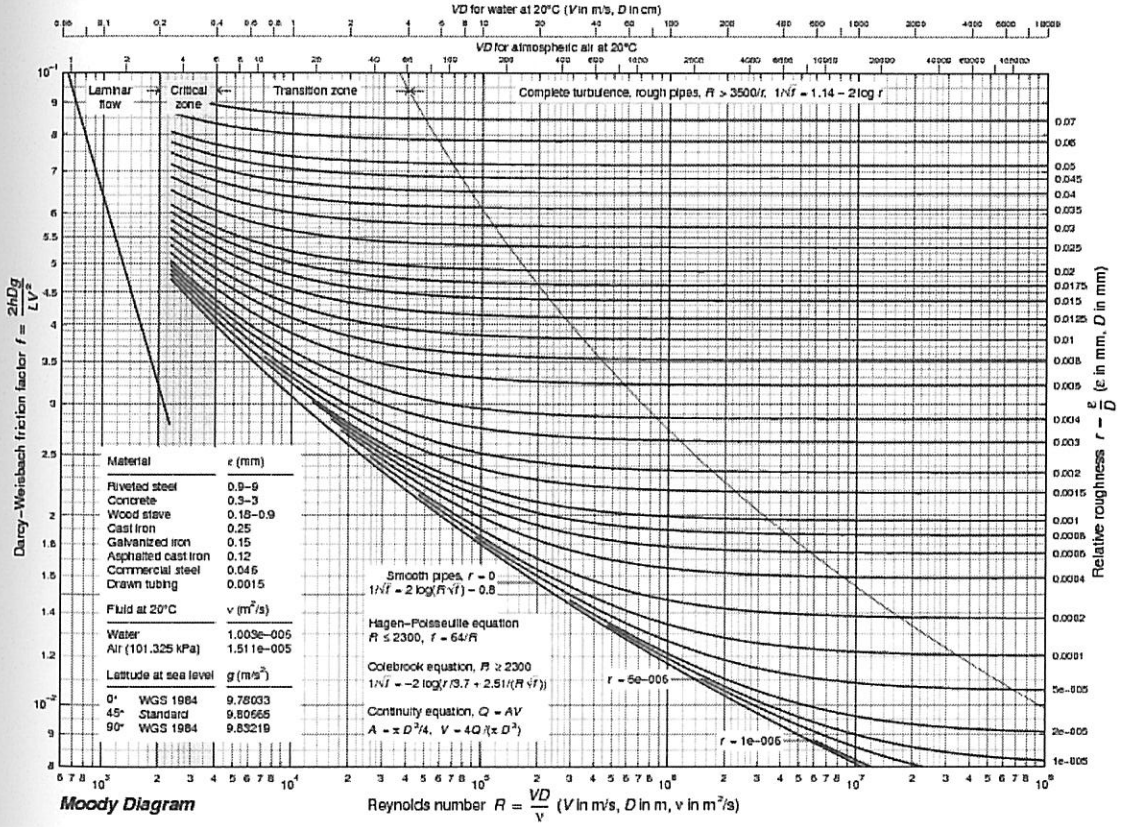
$$f = \frac{0.3164}{Re^{0.25}} \tag{7}$$

กรณีที่เป็นท่อขรุขระที่ $Re > 4000$ คือ

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 1.14 + 2 \log \left(\frac{D}{\varepsilon} \right) \tag{8}$$

ตารางที่ 2 ความขรุขระของผนังท่อ

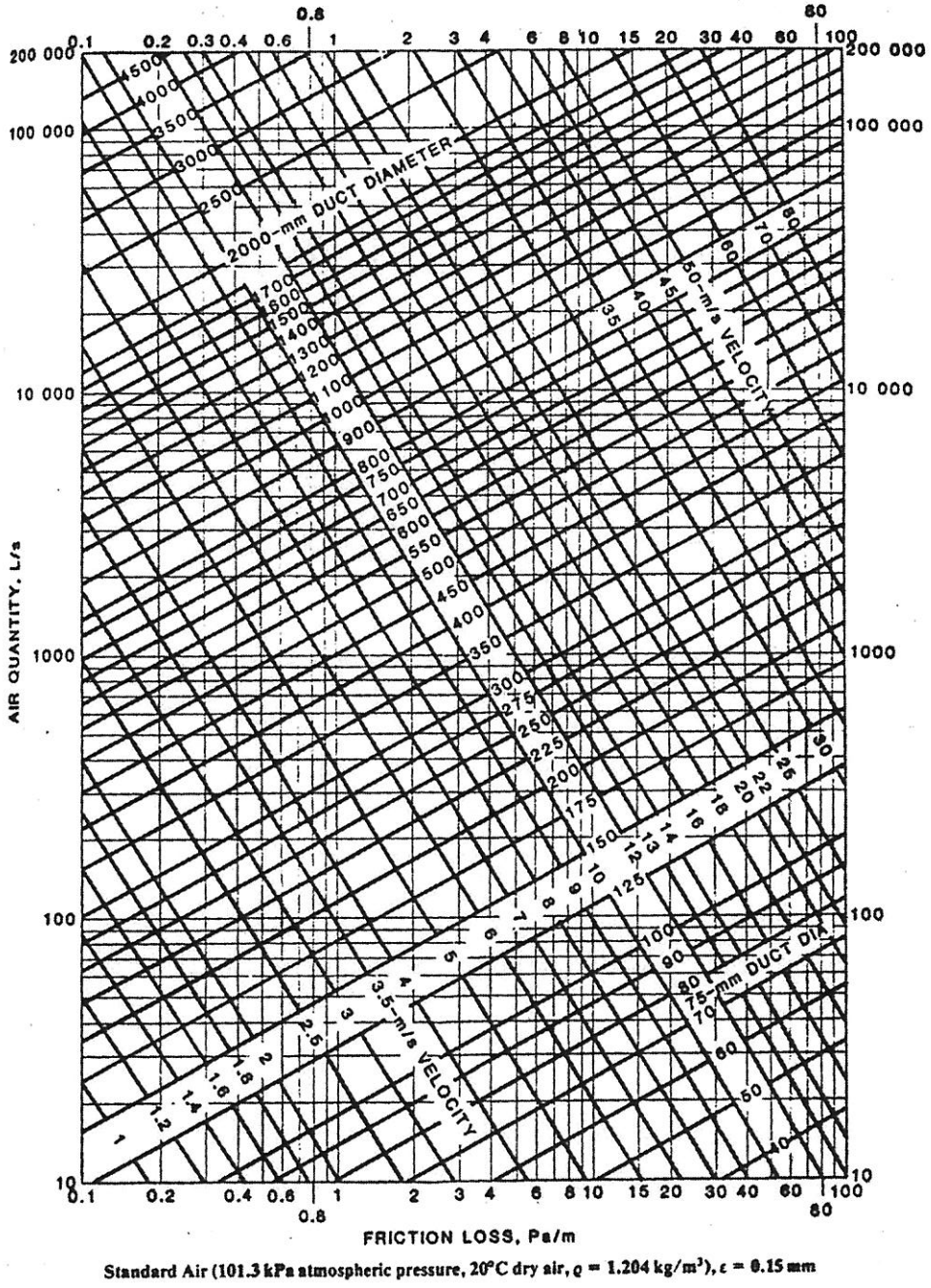
ชนิดท่อ	ε (mm)
เหล็กย้ำหมุด (riveted steel)	0.9-9
คอนกรีต (concrete)	0.3-3
ไม้ประกบ (wood stave)	0.18-0.9
เหล็กหล่อ (cast iron)	0.25
เหล็กอาบสังกะสี (galvanized iron)	0.15
เหล็กหล่ออาบยางมะตอย (asphalted cast iron)	0.12
เหล็กตลาดหรือเหล็กเหนียว (commercial steel or wrought iron)	0.046
ท่อเรียบ (drawn tubing)	0.0015
ท่อพีวีซี (PVC)	0.0015



ภาพที่ 4 Moody Diagram

เพื่อความสะดวกในการหาค่าความดันสูญเสียในท่อของระบบการอบแห้งสามารถหาค่าความดันสูญเสียได้จากแผนภาพความดันสูญเสียดังแสดงในภาพที่ 5 โดยแผนภาพนี้ใช้ได้กับท่อที่เป็นท่อกลม เมื่ออุณหภูมิของอากาศอยู่ในช่วง 9 ถึง 31 ^{o}C และความดันบรรยากาศปกติ ถ้าอุณหภูมิและความดันบรรยากาศ

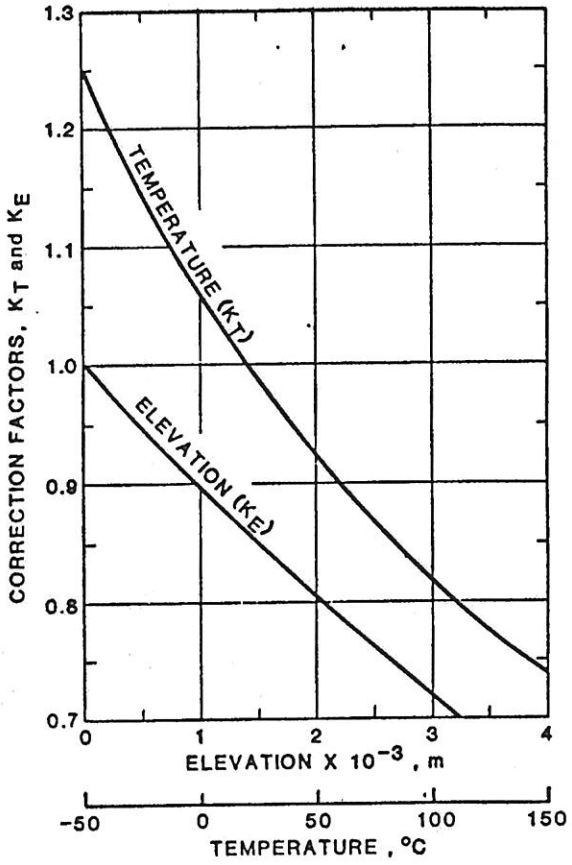
ไม่อยู่ในช่วงดังกล่าวให้ใช้ค่าปรับแก้สำหรับอุณหภูมิ (K_T) และความดันบรรยากาศโดยคิดจากความสูงเหนือระดับน้ำทะเล (K_E) จากภาพที่ 6



ภาพที่ 5 การสูญเสียความดันในท่อตรง

ในกรณีที่ท่อเป็นสี่เหลี่ยมกว้าง a สูง b ต้องปรับแก้เป็นเส้นผ่านศูนย์กลางสมมูลย์ (d) ก่อนแล้วจึงใช้แผนภาพในภาพที่ 5 หาค่าแรงดันสูญเสีย ซึ่งค่า d หาได้จาก

$$d = 1.265 \sqrt[5]{\frac{(ab)^3}{(a+b)}} \qquad (9)$$



ภาพที่ 6 ค่าปรับแก้สำหรับอุณหภูมิ (K_T) และความสูงเหนือระดับน้ำทะเล (K_E)

การสูญเสียเนื่องจากส่วนประกอบของท่อ (Minor losses)

การสูญเสียนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของส่วนประกอบที่นำมาประกอบในระบบท่อ เช่น ข้องอ ข้อต่อ วาล์ว ข้อลด ข้อขยาย เป็นต้น การสูญเสียความดันเนื่องจากส่วนประกอบนี้จะเป็น ปฏิภาคโดยตรงกับความดันเนื่องจากความเร็วดังสมการ

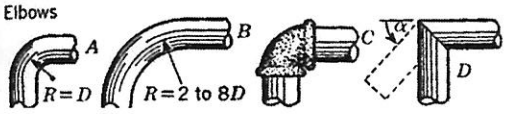
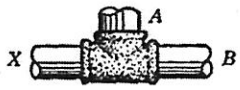
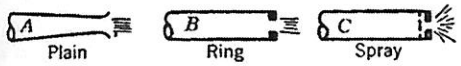
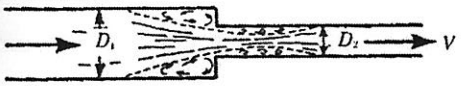
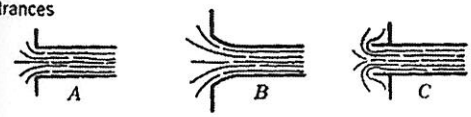
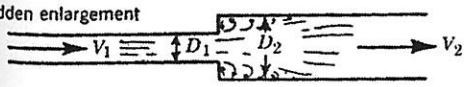
$$h_m = K\frac{V^2}{2g} \qquad (10)$$

เมื่อ h_m คือการสูญเสียเนื่องจากส่วนประกอบท่อ (m)

K คือ losses factor (สำหรับอุปกรณ์แต่ละชนิดหาได้จาก ตาราง 3)

หากต้องการแปลงค่า h_m ในสมการ (10) ให้มีหน่วยเป็น Pa ก็สามารถหาได้โดยแทนค่าเทอม $\frac{V^2}{2g}$ ด้วยเทอม $\left(\frac{V}{1.29}\right)^2$

ตารางที่ 3 ค่า losses factor K

Nature of resistance		K
Valves, fully open	Gate	0.15
	Globe	7.5
	Angle	4.0
Elbows 		A, 0.5 B, 0.25 C, 1.5 D, $1.25\left(\frac{\alpha}{90}\right)^2$
Tees 		XA, 1.50 XB, 0.50
Discharge nozzles 		A, 0.01-0.03 B, 0.01-0.04 C* Varies use manufacture valve
Sudden contraction 		$\frac{D_1}{D_2}$ / K 0.10 / 0.362 0.30 / 0.308 0.50 / 0.221 0.70 / 0.105 0.90 / 0.015
Entrances 		A, 0.50 B, 0.05 C, 1.00
Sudden enlargement 	$A_1 / D_2 = 0$ $A_2 = \infty$	K=1.0

ตัวอย่างที่ 1 ถังอบแห้งกลมเส้นผ่านศูนย์กลางที่ฐานรองรับ 8.5 เมตร ใช้แผ่นเหล็กเจาะรูซึ่งมีรูเปิด 10% ถังอบบรรจุเมล็ดข้าวโพดสูง 3.5 เมตร สัดส่วนช่องว่างในกองเมล็ดพืชคือ 42% ถังอบแห้งติดตั้งพัดลมแบบไหลตามแกนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 60 เซนติเมตร และท่อลมที่ต่อยาว 6 เมตร โดยต่อเข้าที่ช่องลมด้านล่างถังอบ ถ้าพื้นที่หน้าตัดข้อต่อและพื้นที่หน้าตัดท่อลมเท่ากัน จงคำนวณหา การสูญเสียแรงดันลมที่พัดลมเมื่อปริมาณลมเป็น 50 ลูกบาศก์เมตรต่อนาที และอุณหภูมิลม 30 ^{o}C

วิธีทำ

1. หาค่าความดันสูญเสียที่กองเมล็ดข้าวโพด จากสมการ (2)

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{aQ^2}{\ln(1+bQ)}$$

จากตารางที่ 1 สำหรับข้าวโพดได้ค่า $a = 2.07\times10^4$, $b = 30.4$ และ

$$Q = \frac{(50/60)}{\frac{\pi}{4}(8.5)^2} = 0.01468 \quad m^3/s.m^2$$

ดังนั้น $$\Delta P = \frac{2.07\times10^4 (0.01468)^2}{\ln(1+30.4\times0.01468)}\times 3.5 = \quad 42.31 \quad Pa$$

2. หาค่าความดันสูญเสียเนื่องจากแผ่นเหล็กเจาะรู จากสมการ (3)

$$\Delta P = 1.07\left(\frac{Q}{\phi O_f}\right)^2 = 1.07\left(\frac{0.01468}{0.42\times0.1}\right)^2 = 0.13 \quad Pa$$

3. หาค่าความดันสูญเสียที่ปากทางเข้าถังอบจาก

$$\Delta P = k\frac{V_1^2}{2g} \quad m \quad \Longrightarrow \quad \Delta P = \left(\frac{V_1}{1.29}\right)^2 \quad Pa$$

หาค่า $$V_1 = \frac{(50/60)}{\frac{\pi}{4}(0.6)^2} = 2.947 \quad m/s$$

ดังนั้น $\Delta P = \left(\frac{2.947}{1.29}\right)^2 = 5.22$ Pa

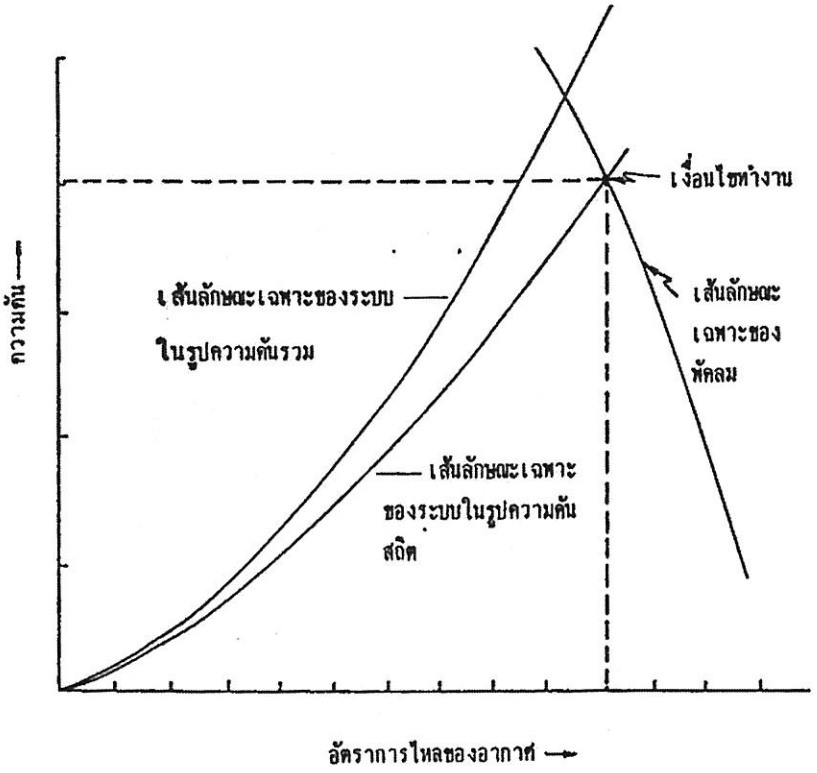
4. หาค่าความดันสูญเสียเนื่องจากความดันในท่อตรง ใช้ภาพที่ 5 จากสภาวะดังนี้

- อัตราการไหล 50 m^3/min = 0.833 m^3/s = 833 l/s
- เส้นผ่านศูนย์กลางท่อ 60 cm = 600 mm
- ได้ค่า friction loss = 0.18 Pa/m
- ท่อยาว 6 เมตร ดังนั้น $\Delta P = 0.18 \times 6 =$ 1.08 Pa

ดังนั้นความดันสูญเสียรวม = 42.31 + 0.13 + 5.22 + 1.08 = 48.74 Pa **ตอบ**

เส้นลักษณะเฉพาะของระบบ (System Characteristic Curves)

จากการคำนวณหาความดันสูญเสียที่จุดต่างๆ ดังกล่าวมาแล้ว เมื่อนำความดันเหล่านี้มารวมกันจะได้ความดันสูญเสียรวมของระบบอบแห้ง เมื่อแปรเปลี่ยนค่าอัตราการไหลของอากาศ ความดันที่สูญเสียก็จะเปลี่ยนไป โดยมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราการไหลสูงขึ้น ดังนั้นสามารถพลอตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความดันรวมที่สูญเสียและอัตราการไหลของอากาศ ดังภาพที่ 7 หากลบค่าความดันรวมที่สูญเสียด้วยค่าความดันความเร็ว จะได้ค่าความดันสถิต เส้นความดันสถิตนี้มีประโยชน์ต่อการเลือกชนิดและขนาดของพัดลม เราเรียกกราฟความดันสถิตนี้ว่าเส้นลักษณะเฉพาะของระบบ หากนำกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความดันสถิตและอัตราการไหลของพัดลมตัวใดตัวหนึ่งมาพลอตลงในรูปเดียวกันกับเส้นลักษณะเฉพาะของระบบ ดังเช่นในภาพที่ 7 กราฟทั้งสองจะตัดกัน โดยพัดลมจะทำงานตรงกับเงื่อนไขที่จุดตัดนี้ ดังนั้นสามารถอ่านค่าความดันสถิตย์และอัตราการไหลของอากาศที่พัดลมสร้างขึ้น



ภาพที่ 7 เส้นลักษณะเฉพาะของระบบและพัดลม

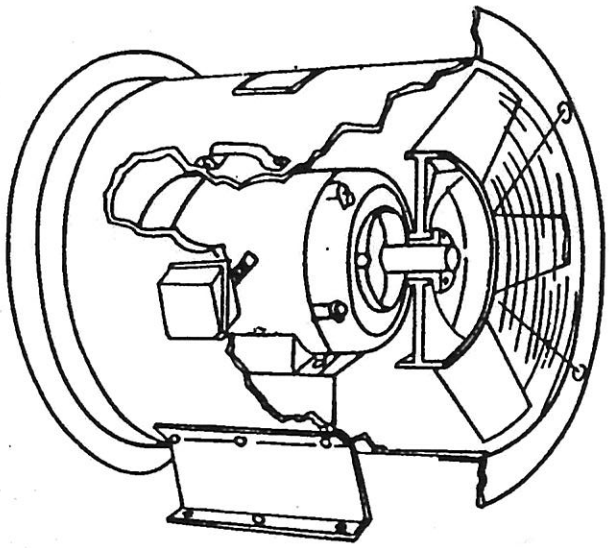
พัดลม

เครื่องมือที่ใช้ในการทำให้อากาศไหลในระบบอบแห้งโดยทั่วไปคือ พัดลม พัดลมสามารถแยกออกได้เป็น 2 ชนิดคือ

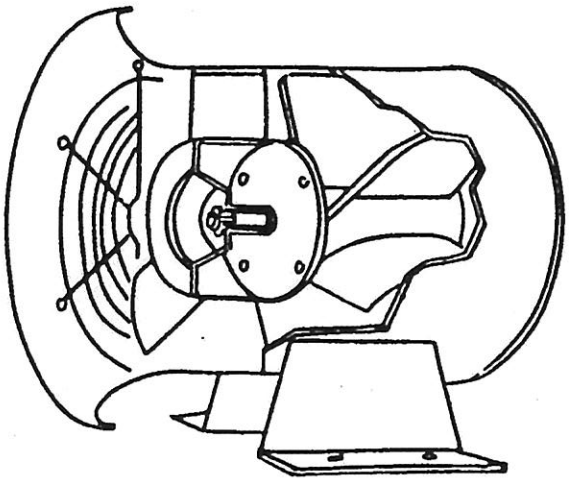
1. พัดลมแบบไหลตามแกน (axial – flow fan)

อากาศจะไหลขนานกับแกนของใบพัดและไหลตั้งฉากกับระนาบการหมุนของใบพัด พัดลมแบบนี้มีราคาถูก ไม่มีลักษณะที่มอเตอร์จะทำงานเกินกำลัง แต่การทำงานของพัดลมมีเสียงดังรบกวนเมื่อเทียบกับพัดลมแบบเหวี่ยง และมีช่วงของการทำงานที่ไม่มีเสถียรภาพ พัดลมแบบไหลตามแกนมีหลายแบบ เช่น แบบ โพรเพลเลอร์ (propeller) ซึ่งเป็นพัดลมที่ใช้ในการระบายอากาศทั่วๆ ไป ไม่เหมาะกับงานอบแห้งที่ต้องการความดันสถิตสูง แบบท่อ (tube) และแบบเวน (vane) ดังแสดงในภาพที่ 8 และภาพที่ 9 ซึ่งให้ความดันสถิตสูงกว่า คือประมาณ 0-1500 Pa ภาพที่ 10 แสดงกราฟสมรรถนะของพัดลมแบบท่อหรือแบบเวน ซึ่งอยู่ในรูปของความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ของความดันสูงสุด หรือเปอร์เซ็นต์ของกำลังสูงสุด หรือเปอร์เซ็นต์ของประสิทธิภาพ และเปอร์เซ็นต์ปริมาตรที่เปิดกว้าง ที่ช่วงเปอร์เซ็นต์ปริมาตรที่เปิดกว้างประมาณ 30-50% พบว่าความดันสถิตมีค่าลดลงแล้วเพิ่มขึ้น ดังนั้นพัดลมจะไม่มีเสถียรภาพหากทำงาน

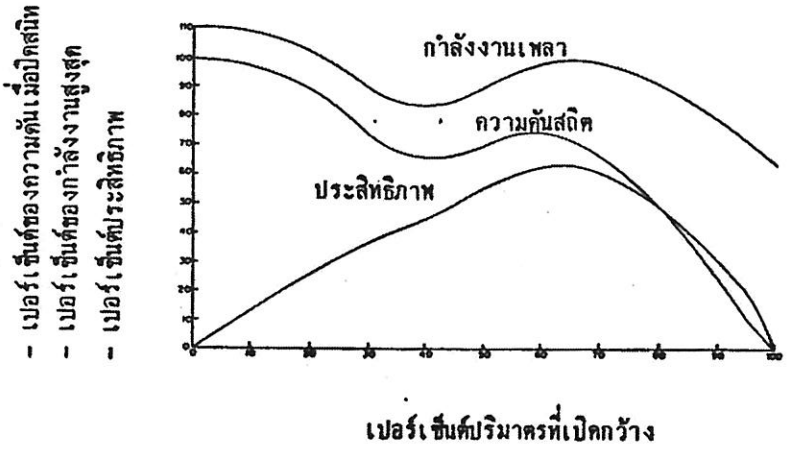
ในช่วงนี้ ช่วงที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการทำงานของพัดลมคือช่วงเปอร์เซ็นต์ปริมาตรที่เปิดกว้างระหว่าง 55-75% ซึ่งเป็นช่วงที่ให้ประสิทธิภาพสูงสุด และมีเสถียรภาพ



ภาพที่ 8 พัดลมแบบไหลตามแกนแบบท่อ



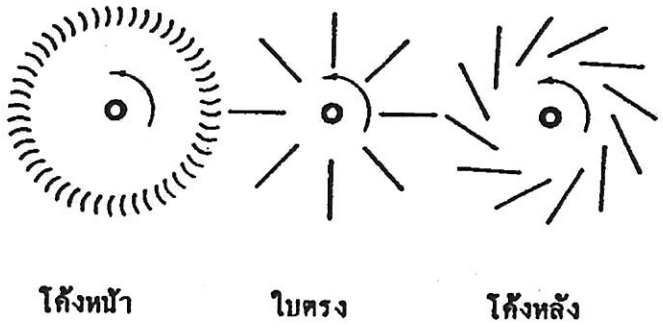
ภาพที่ 9 พัดลมไหลตามแกนแบบเวน



ภาพที่ 10 กราฟสมรรถนะของพัดลมแบบไหลตามแกนแบบท่อหรือแบบแวน

2. พัดลมแบบเหวี่ยง (centrifugal fan)

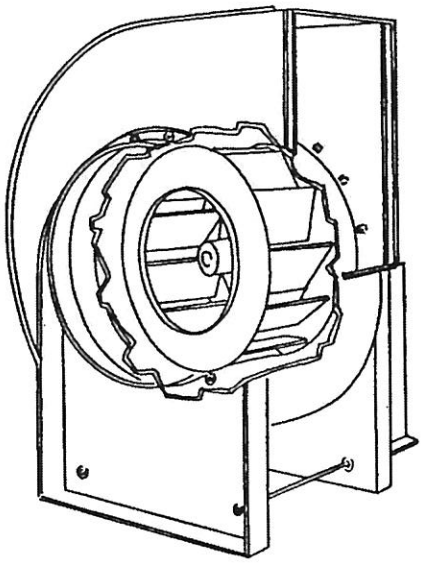
อากาศจะไหลขนานกับแกนของใบพัดตรงทางเข้าและไหลตั้งฉากกับแกนของใบพัดตรงทางออก พัดลมแบบนี้สามารถแบ่งได้ 3 แบบ ตามลักษณะของใบพัด คือ ใบพัดโค้งหลัง ใบพัดโค้งหน้า และใบพัดตรง ดังแสดงในภาพที่ 11 ใบพัดที่นิยมใช้ในการอบแห้งทั่วไปคือ ใบพัดโค้งหน้าและใบพัดโค้งหลัง ซึ่งใช้กับอากาศที่สะอาด ส่วนใบพัดตรงเหมาะกับอากาศสกปรกหรือใช้ในงานขนถ่ายวัสดุซึ่งไหลผ่านตัวพัดลม



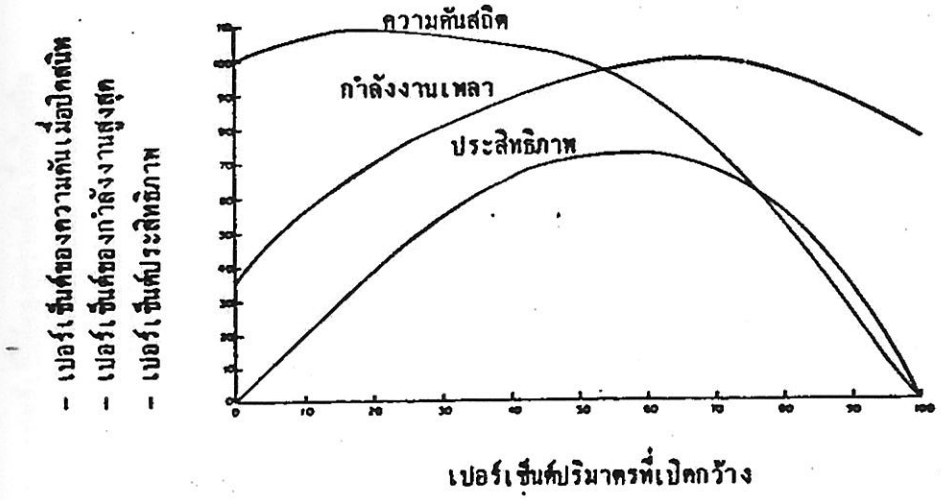
ภาพที่ 11 ใบพัดแบบต่างๆ ของพัดลมแบบเหวี่ยง

2.1 ใบพัดโค้งหลัง พัดลมชนิดนี้มีราคาแพง แต่ก็มีข้อดีหลายอย่างเมื่อเปรียบเทียบกับพัดลมชนิดอื่น ตัวอย่างเช่นการทำงานของพัดลมไม่ก่อให้เกิดเสียงดังเกินควร ไม่มีลักษณะของการที่มอเตอร์จะทำงานเกินกำลัง ไม่มีช่วงของการทำงานของพัดลมที่ไม่มีเสถียรภาพ และความดันสถิตย์มีค่าสูง 0 – 3000 Pa ภาพที่ 12 แสดงภาพพัดลมแบบเหวี่ยงแบบใบพัดโค้งหลัง ภาพที่ 13 แสดงกราฟสมรรถนะของพัดลมดังกล่าว ซึ่งพบว่าช่วงเปอร์เซ็นต์ปริมาตรที่เปิดกว้างที่เหมาะสมที่สุดคือ 50-65% ช่วงดังกล่าวให้ค่าประสิทธิภาพสูงสุด

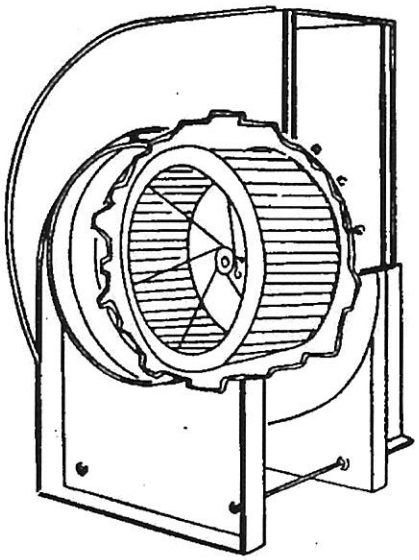
2.2 ใบพัดโค้งหน้า การทำงานของพัดลมชนิดนี้มีเสียงเบาที่สุดเมื่อเทียงกับพัดลมชนิดอื่นๆ ดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้นข้อเสียของพัดลมแบบนี้คือ มีลักษณะที่มอเตอร์จะทำงานเกินกำลังได้ มีช่วงการทำงานของพัดลมที่ไม่มีเสถียรภาพ ความดันสถิตโดยทั่วไปมีค่าระหว่าง 0 - 1500 Pa ภาพที่ 14 แสดงพัดลมแบลบเหวี่ยงแบบใบพัดโค้งหน้า ภาพที่ 15 แสดงกราฟสมรรถนะของพัดลมดังกล่าว ซึ่งพบว่าประสิทธิภาพจะมีค่าสูงสุดที่ช่วงเปอร์เซ็นต์ปริมาตรเปิดกว้างระหว่าง 30-50 % โดยทั่วไปเรามักจะเลือกขนาดของมอเตอร์สำหรับการทำงานที่เงื่อนไขนี้ เมื่อพิจารณาเปอร์เซ็นต์ของปริมาตรที่เปิดกว้างที่มีค่าเพิ่มขึ้น ค่ากำลังงานที่ต้องการก็เพิ่มขึ้นด้วย ดังนั้นหากระบบอบแห้งมีการรั่วของท่อลมเกิดขึ้น การทำงานของพัดลมอาจเปลี่ยนไปในลักษณะที่เปอร์เซ็นต์ของปริมาตรที่เปิดกว้างเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นผลให้มอเตอร์ทำงานเกินกำลัง พัดลมแบบนี้จึงไม่เหมาะกับระบบที่อัตราการไหลของอากาศเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา



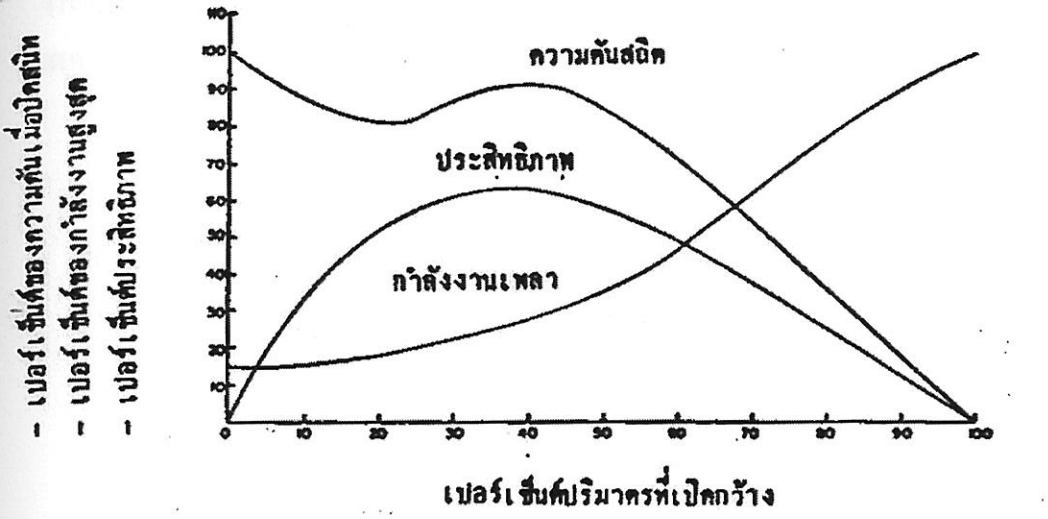
ภาพที่ 12 พัดลมแบบเหวี่ยงแบบใบพัดโค้งหลัง



ภาพที่ 13 กราฟสมรรถนะของพัดลมแบบเหวี่ยงแบบใบพัดโค้งหลัง (จาก ASHRAE,1969)



ภาพที่ 14 พัดลมแบบเหวี่ยงแบบใบพัดโค้งหน้า



ภาพที่ 15 กราฟสมรรถนะของพัดลมแบบเหวี่ยงแบบใบพัดโค้งหน้า(จาก ASHRAE,1969)

สมรรถนะของพัดลม (Fan Performance)

คำจำกัดความที่เกี่ยวข้องกับพัดลมมีดังนี้

1. ความดันลมทั้งหมดของพัดลม (Fan total pressure, P_t) คือความแตกต่างระหว่างความดันที่ปากทางออกกับปากทางเข้าพัดลม
2. ความดันสถิตย์ของพัดลม (Fan static pressure, P_s) คือความดันแตกต่างระหว่างความดันลมทั้งหมดกับคความดันลมเนื่องจากความเร็ว
3. ความดันเนื่องจากความเร็วของพัดลม (Fan velocity pressure) คือความดันที่เกิดเนื่องจากความเร็วลมเฉลี่ยที่ปากทางออกจากพัดลม
4. กำลังลม (Air Power) คือ กำลังงานที่ใช้ในการพัดพาลมให้เคลื่อนที่ หาได้จากผลคูณของความดันกับปริมาณลมแบ่งออกเป็น

a. กำลังลมทั้งหมด (Total Power) $W_T = P_t \times Q$ Watt (11)

b. กำลังลมสถิต (Static Power) $W_s = P_s \times Q$ Watt (12)

5. ประสิทธิภาพของพัดลม (Fan Efficiency) คืออัตราส่วนของกำลังงานที่ออกจากพัดลม ต่อกำลังงานที่ให้กับพัดลม โดยทั่วไปมีค่าประสิทธิภาพมักแสดงเป็นค่าเปอร์เซ็นต์ และสามารถแสดงได้ 2 แบบดังนี้

$$\text{ประสิทธิภาพทั้งหมดของพัดลม} = \frac{\text{Total Power}}{\text{Input Power}} \times 100\% \qquad (13)$$

$$\eta_T = \frac{W_T}{W_I} \times 100\% \qquad (14)$$

$$\text{ประสิทธิภาพสถิตของพัดลม} = \frac{\text{Static Power}}{\text{Input Power}} \times 100\% \qquad (15)$$

$$\eta_S = \frac{W_s}{W_I} \times 100\% \qquad (16)$$

ตัวอย่างที่ 2 เครื่องอบแห้งใช้ปริมาณลม 2 m^3/s ความดันลดในระบบ 375 Pa ถ้าประสิทธิภาพของพัดลมเป็น 75% จงคำนวณหากำลังที่ให้กับพัดลม

วิธีทำ

กำลังลมที่ได้จากพัดลมทั้งหมด $W_T = P_t \times Q = 375\ N/m^2 \times 2\ m^3/s$

$= 750$ W

หากำลังที่ให้กับพัดลมจาก $\eta_T = \frac{W_T}{W_i} \times 100\%$

$W_i = \frac{750\ W}{75\%} \times 100\% = 1{,}000$ W **ตอบ**

กฎของพัดลมแบบเหวี่ยง

หากเราทราบกราฟสมรรถนะของพัดลมแบบเหวี่ยงตัวหนึ่ง เราสามารถที่จะคำนวณว่าอัตราการไหล ความดันรวม และกำลังงานที่ต้องการของพัดลมตัวเดิมเปลี่ยนแปลงอย่างไร เมื่อความเร็วรอบของพัดลมเปลี่ยนไป หรือคำนวณว่าอัตราการไหล ความดันรวมและกำลังงานที่ต้องการของพัดลมเปลี่ยนแปลงอย่างไร เมื่อขนาดของใบพัดเปลี่ยนไปโดยคงลักษณะความคล้ายกันไว้ และความเร็วรอบยังคงเท่าเดิม กฎดังกล่าวใช้ได้กับพัดลมซึ่งไม่รวมถึงระบบที่นำมาติดเข้ากับตัวพัดลม

1. สำหรับพัดลมตัวเดิม แต่มีการเปลี่ยนความเร็วรอบ สามารถเขียนกฎของพัดลมได้ว่า

$$\frac{N_1}{N_2} = \frac{Q_1}{Q_2} \tag{17}$$

$$\frac{N_1^2}{N_2^2} = \frac{P_1}{P_2} \tag{18}$$

$$\frac{N_1^3}{N_2^3} = \frac{W_1}{W_2} \tag{19}$$

2. สำหรับพัดลมที่มีขนาดใบพัดเปลี่ยนไป โดยที่ความเร็วรอบคงที่ สามารถเขียนกฎของพัดลมได้ว่า

$$\frac{D_1^3}{D_2^3} = \frac{Q_1}{Q_2} \tag{20}$$

$$\frac{D_1^2}{D_2^2} = \frac{P_1}{P_2} \tag{21}$$

$$\frac{D_1^5}{D_2^5} = \frac{W_1}{W_2} \tag{22}$$

กฎพื้นฐานของพัดลมที่กล่าวมา เป็นการแสดงให้เห็นถึงผลของการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นกับลักษณะสมบัติของพัดลมเมื่อความเร็วรอบและขนาดของพัดลมอย่างใดอย่างหนึ่งเปลี่ยนแปลงไป แต่ในความเป็นจริง

แล้วในขณะที่ทำงานการเปลี่ยนแปลงอาจจะเกิดขึ้นได้พร้อมๆ กัน ทำให้ไม่อาจนำกฎพื้นฐานของพัดลมมาใช้ได้ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องสร้างกฎเพิ่มเติมขึ้นโดยอาศัยพื้นฐานจากกฎเดิม แต่ให้ใช้งานได้ในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นมากกว่าหนึ่งอย่าง กฎเพิ่มเติมซึ่งเป็นผลต่อเนื่องจากกฎหลักประกอบด้วย

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{N_1}{N_2} \cdot \frac{D_1^3}{D_2^3} \qquad (23)$$

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{N_1^2}{N_2^2} \cdot \frac{D_1^2}{D_2^2} \qquad (24)$$

$$\frac{W_1}{W_2} = \frac{N_1^3}{N_2^3} \cdot \frac{D_1^5}{D_2^5} \qquad (25)$$

การเลือกพัดลม

ในการออกแบบระบบการอบแห้งและเก็บรักษาเมล็ดพืช ผู้ออกแบบจำเป็นต้องเลือกขนาดพัดลมที่มีปริมาณลมและแรงดันลมเพียงพอ โดยทั่วไปบริษัทผู้ผลิตพัดลมมักจะมีเส้นลักษณะเฉพาะของพัดลมให้ดังแสดงในตารางที่ 4 และถ้าพลอตเส้นลักษณะเฉพาะของระบบและของพัดลมลงบนกระดาษแผ่นเดียวกันดังแสดงในภาพที่ 7 เส้นลักษณะเฉพาะสองเส้นนี้จะตัดกันที่จุดๆ หนึ่ง ที่จุดนี้เป็นจุดที่พัดลมจะทำงาน ในการเลือกพัดลมให้เหมาะสมกับงานนั้นๆ มีหลักเกณฑ์ดังต่อไปนี้

- ได้อัตราการไหลของอากาศตามที่ต้องการ
- พัดลมทำงานอยู่ในช่วงที่ประสิทธิภาพมีค่าสูงสุด และควรอยู่ไกลจากช่วงที่อาจก่อให้เกิดความไม่มีเสถียรภาพระหว่างการทำงาน
- ให้ภาระของมอเตอร์มีค่าใกล้ๆ กับกำลังงานที่กำหนด (rate power)

ตารางที่ 4 ข้อมูลสมรรถนะสำหรับพัดลมแบบไหลตามแกนแบบท่อ (CFM)

เส้นผ่าศูนย์กลาง(in)	Hp	RPM	ความดันสถิต (in WG)									
			0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	5	6
14	0.5	3,450	2,215	1,855	1,425	770	443					
14	1	3,450	2,880	2,635	2,360	1,935	973	810	665	445		
16	3	3,450		6,160		5,550	5,220	4,850	4,420	3,925		
20	5	3,450		9,350		8,400	7,910	7,380	6,700	6,090		
20	7.5	3,450		11,890		10,820	10,280	9,720	9,150	8,510		
24	5	3,450		11,100		10,000	9,400	8,720	7,970	6,910		
24	7.5	3,450		13,660		12,470	11,730	10,940	10,090	9,150		
28	10	3,450		19,400		17,300		15,100		12,800	9,500	5,200

จาก : Butler Manufacturing Co. and Farm Fans, Inc.

ตัวอย่างที่ 3 พัดลมแบบเหวี่ยงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.9 เมตร หมุนที่ความเร็วรอบ 1000 rpm. ให้ปริมาณลม 4 m^3/s ที่ความดัน 325 Pa และสมรรถนะของพัดลมตัวนี้แสดงในตาราง ถ้าพัดลมที่มีลักษณะรูปร่างเหมือนกับพัดลมตัวนี้ถูกนำไปใช้งานที่ต้องการความดัน 425 Pa ปริมาณลม 1 m^3/s จงหา 1) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใบพัด 2) ความเร็วรอบพัดลม 3) กำลังที่ให้พัดลม

อัตราการไหล (m^3/s)	ความดันสถิตย์ (Pa)	กำลังที่ใช้ (W)
0	350.0	500
1	387.5	750
2	400.0	1250
3	375.0	1500
4	325.0	1750
5	237.5	1975
6	112.5	1950

วิธีทำ

จากกฎสืบเนื่องของพัดลม สมการที่ (23), (24) และ (25) เมื่อทำการแก้สมการที่ (23) และ (24) จะสามารถหาค่าเส้นผ่านศูนย์กลาง (D_2) และ ความเร็วรอบ (N_2) ได้ดังนี้

$$D_2 = D_1\left(\frac{Q_2}{Q_1}\right)^{1/2}\left(\frac{P_1}{P_2}\right)^{1/4} \qquad \text{(a)}$$

$$N_2 = N_1\left(\frac{Q_1}{Q_2}\right)^{1/2}\left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{3/4} \qquad \text{(b)}$$

จากโจทย์กำหนด $D_1 = 0.9\,\text{m}$, $N_1 = 1000\ \text{rpm}$, $Q_1 = 4\ \text{m}^3/\text{s}, Q_2 = 1\ \text{m}^3/\text{s}$, $P_1 = 325\ \text{Pa}$ และ $P_2 = 425\ \text{Pa}$

ดังนั้น $D_2 = 0.9\left(\frac{1}{4}\right)^{1/2}\left(\frac{325}{425}\right)^{1/4} = 0.42\ \text{m}$

$$N_2 = 1000\left(\frac{4}{1}\right)^{1/2}\left(\frac{425}{325}\right)^{3/4} = 2446\ \text{rpm}$$

และ $W_2 = W_1\left(\frac{N_2}{N_1}\right)^3\left(\frac{D_2}{D_1}\right)^5 = 1750\left(\frac{2446}{1000}\right)^3\left(\frac{0.42}{0.9}\right)^5 = 566.8\ \text{W}$ **ตอบ**

การต่อพัดลมแบบอนุกรมและขนาน (Fans in Series and Parallel)

เมื่อพัดลมจำนวน 2 ตัวหรือมากกว่าถูกนำมาต่อกันในแบบอนุกรมหรือขนานมีผลทำให้กราฟสมรรถนะของพัดลมเปลี่ยนไป การเปลี่ยนแปลงนี้เป็นไปตามหลักการดังนี้

1. การต่อแบบอนุกรมที่ปริมาณลมเดียวกันทุกๆ ค่าให้นำค่าความดันรวมของแต่ละพัดลมมาบวกกัน เส้นกราฟที่ได้จะเป็นผลรวมของการต่อพัดลมแบบอนุกรม ดังภาพที่ 15

$$Q_S = Q_A = Q_B \tag{22}$$

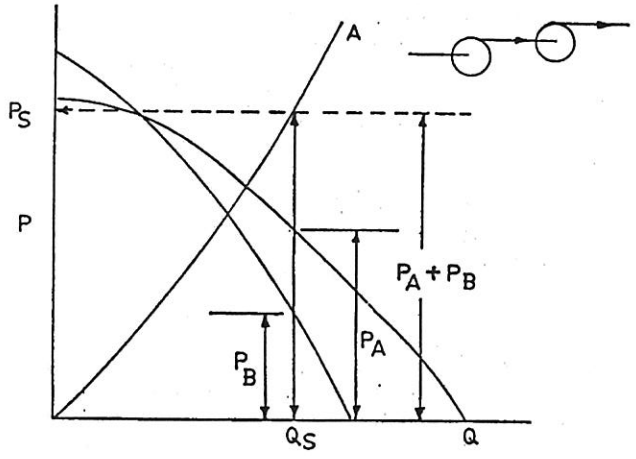
$$P_s = P_A + P_B \tag{23}$$

2. การต่อแบบขนาน ที่ความดันเดียวกันทุกๆ ค่าให้นำปริมาณลมมาบวกกันเส้นกราฟที่ได้จะเป็นผลรวมของการต่อแบบขนาน ดังภาพที่ 16

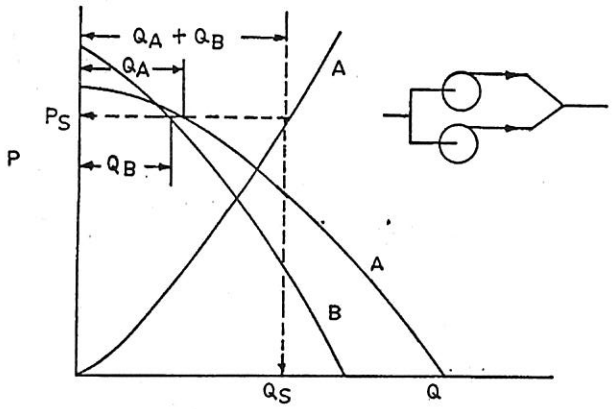
$$Q_s = Q_A + Q_B \tag{24}$$

$$P_s = P_A = P_B \tag{25}$$

ในกรณีที่พัดลมนำมาต่อกันมีขนาดต่างกัน หรือไม่เหมือนกันปริมาณลมอาจมีการย้อนกลับในพัดลมตัวที่เล็กกว่า เป็นผลให้ปริมาณลมที่ได้น้อยลงกว่าที่ใช้พัดลมตัวเดียว



ภาพที่ 16 กราฟสมรรถนะของพัดลมเมื่อต่อแบบอนุกรม



ภาพที่ 17 กราฟสมรรถนะของพัดลมเมื่อต่อแบบขนาน

****

คำถามท้ายบท

1. พัดลมหมุนที่ความเร็วรอบ 1250 rpm ให้ปริมาณลม 10 m^3/s ความดันสถิตย์ 75 มิลลิเมตรน้ำ กำลังพัดลมที่ใช้ 14 kW เมื่อปรับความเร็วรอบพัดลมเป็น 1900 rpm. จงคำนวณหาปริมาณลม ความดันสถิตย์ และกำลังพัดลมที่ใช้

2. ถังอบแห้งแบบถังกลมเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 m บรรจุเมล็ดข้าวโพดสูง 5.3 m ถังอบต่อกับท่อลมยาว 6 m เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.65 m จงหาการสูญเสียแรงดันสถิตย์เมื่อปริมาณลมเป็น 2 m^3/s

3. พัดลมเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.6 m หมุนที่ความเร็วรอบ 1450 rpm ให้ปริมาณลม 2 m^3/s ที่ความดัน 600 Pa และมีสมรรถนะดังนี้

อัตราการไหล (m^3/s)	ความดันสถิตย์ (Pa)	กำลัง (W)
0	700	820
1	675	1240
2	600	1570
3	475	1660
4	300	1490

ถ้าหากต้องการนำพัดลมที่มีลักษณะคล้ายคลึงกับพัดลมตัวดังกล่าวข้างต้นมาใช้เพื่อให้ได้ปริมาณลม 1.5 m^3/s ความดัน 750 Pa จงคำนวณหา ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของพัดลม ความเร็วรอบ และกำลังที่ต้องให้กับพัดลม

บทที่ 4

ความชื้นสมดุล (Equilibrium Moisture Content)

ความชื้นสมดุล (Equilibrium Moisture Content, MEC) เป็นค่าที่มีความสำคัญต่อการศึกษาการอบแห้ง ทั้งนี้เนื่องจาก EMC จะเป็นตัวบอกให้ทราบถึงค่าความชื้นต่ำสุดของวัสดุที่ต้องการทำให้แห้ง ภายใต้สภาวะการอบแห้งที่กำหนดขึ้น ค่า EMC ของเมล็ดพืช และวัสดุเกษตรนั้น จะหมายถึง ค่าความชื้นของวัสดุที่ถูกทิ้งไว้ในสภาวะแวดล้อมที่กำหนดเป็นระยะเวลายาวนาน หรืออีกนัยหนึ่งค่า EMC สามารถนิยามได้ว่าคือความชื้นซึ่งค่าความดันไอภายในวัสดุมีค่าสมดุลกับความดันไอของสิ่งแวดล้อม ดังนั้น EMC จึงขึ้นอยู่กับปริมาณความชื้นและ อุณหภูมิของสภาวะแวดล้อม และขึ้นอยู่กับ ชนิด พันธุ์ และความสุกแก่ของวัสดุเกษตรนั้น

ดังนั้นในบทนี้จะทำการศึกษาวิธีการหาค่าความชื้นสมดุลและ สมการที่ใช้ในการทำนายค่าความชื้นสมดุล

ความชื้นสมดุลของวัสดุ

ความชื้นสมดุลของวัสดุแต่ละชนิดจะมีค่าเฉพาะตัว ดังนั้นค่าความชื้นสมดุลจึงขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุ อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ ในหนังสือบางเล่มกล่าวว่า ความชื้นสมดุลขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุ อุณหภูมิ และ water activity ซึ่งก็มีความหมายเหมือนกันเพราะ water activity นี้มีค่าเท่ากับความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ เมื่อวัสดุและอากาศอยู่ในภาวะสมดุลทางเทอร์โมไดนามิกส์ และสมมติด้วยว่าไอน้ำเป็นก๊าซในอุดมคติ

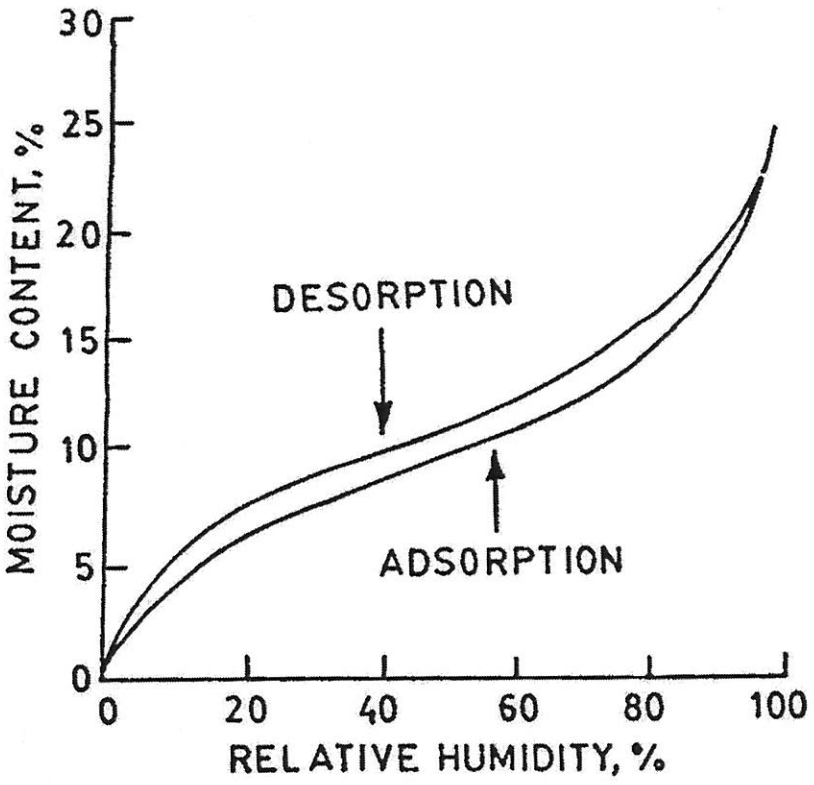
ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นสมดุลและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศที่อุณหภูมิคงที่ค่าหนึ่ง เรียกว่าเส้นความชื้นสมดุลไอโซเทอม (equilibrium moisture isotherm) เมล็ดพืชและวัสดุอาหารโดยส่วนใหญ่มีเส้นความชื้นสมดุลไอโซเทอมเป็นรูปตัว S (S-shaped) ดังแสดงในภาพที่ 1 วัสดุอาจเข้าสู่ภาวะสมดุลได้ 2 วิธี คือ โดยการคายความชื้น (desorption) ให้อากาศโดยรอบ หรือโดยการดูดความชื้น (adsorption) จากอากาศ ที่สภาวะอากาศคงที่เดียวกัน ความชื้นสมดุลในกรณีแรกจะมีค่าสูงกว่าของกรณีหลังเล็กน้อย ปรากฏการณ์นี้เรียกว่าการเกิดฮีสเทอรีซีส (hysteresis) ได้มีผู้พยายามอธิบายกลไกหรือสาเหตุในการเกิดฮีสเทอรีซีสไว้ ซึ่งยังไม่มีคำอธิบายที่มีเหตุผลเพียงพอ ในกรณีของการอบแห้งมักจะเกี่ยวข้องกับการคายความชื้นเป็นส่วนใหญ่

วิธีการหาค่าความชื้นสมดุล

การหาค่าความชื้นสมดุลของวัสดุมีวิธีการหาหลายวิธี แต่วิธีที่นิยมใช้กันมีอยู่ 2 วิธีคือ วิธีการแบบสถิต (Static method) กับวิธีแบบไดนามิก (Dynamic method)

1. ***วิธีสถิต*** เป็นการทำให้สภาวะอากาศอยู่นิ่ง ซึ่งวิธีการอาจใช้ขวดโหลที่ปิดสนิทภายในใส่สารละลายกรด หรือสารละลายเกลืออิ่มตัว เพื่อใช้เป็นตัวควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ เมล็ดพืชถูกนำไปใส่ตะแกรงและห้อยหรือ แขวนไว้ในขวดโหลเพื่อให้สัมผัสกับอากาศควบคุม หลังจากนั้นนำเข้าตู้อบเพื่อใช้ควบคุมอุณหภูมิในการหาความชื้นสมดุล ผู้ทดลองต้องเลือกชนิดสารละลายอิ่มตัวของกรดหรือเกลือ และอุณหภูมิให้เหมาะสมเพื่อให้ค่าความชื้นสัมพัทธ์ที่ต้องการ· โดยสารละลายเกลือมีคุณสมบัติค่อนข้างดีคือไม่กัดกร่อนโลหะ ราคาถูกกว่าสารละลายกรด สามารถเตรียมให้ได้ความชื้นสัมพัทธ์ตั้งแต่ 0-100% ทุกอุณหภูมิที่ต้องการแต่มีข้อเสียคือต้องใช้ปริมาณมาก ค่าความชื้นสัมพัทธ์เหนือสารละลายเกลืออิ่มตัวชนิดต่างๆ แสดงในตารางที่ 1

ส่วนสารละลายกรดที่ความเข้มข้นต่างๆ สามารถให้ค่าความชื้นสัมพัทธ์ที่ต้องการได้ โดยสารละลายกรดที่นิยมใช้คือกรดซัลฟูริค (H_2SO_4) แต่สารละลายกรดก็มีข้อเสียคือกัดกร่อนโลหะและต้องระมัดระวังในการใช้เนื่องจากมีผลต่อผิวหนัง ตารางที่ 2 แสดงค่าความชื้นสัมพัทธ์ของสารละลายกรดบางชนิดที่อุณหภูมิต่างๆ



ภาพที่ 1 เส้นความชื้นสมดุลไอโซเทอมของข้าวสาลี ที่อุณหภูมิ 35 ^{o}C

ตารางที่ 1 ความชื้นสัมพัทธ์ เหนือสารละลายเกลืออิ่มตัวบางชนิดที่อุณหภูมิต่างๆ

Salt	Equilibrium relative humidity (%)		
	30 ^{o}C	40 ^{o}C	50 ^{o}C
KOH	7.38	6.26	5.72
$MgCl_2$	32.38	31.59	30.54
N_2CO_3	43.17	42.30	40.91
$NaNO_3$	72.75	71.00	69.04
KCl	83.62	82.32	81.26
$BaCl_2$	89.90	89.10	88.23

ที่มา Lahsasni et al. (2002)

ตารางที่ 2 ความชื้นสัมพัทธ์ (%) เหนือกรดบางชนิดที่ความเข้มข้นและอุณหภูมิต่างๆ

Acid	อุณหภูมิ (^{o}C)	ความเข้มข้นของกรดโดยน้ำหนัก (%)						
		10	20	30	40	50	60	80
H_2SO_4	-17.8		87.3		55.7		15.0	3.14
(sulphuric)	10		87.4		56.6		15.8	3.88
	20		87.7		56.7		16.3	4.76
	30		87.5		56.6		17.0	5.75
	40		87.6		57.5		17.8	6.88
	44		88.8		58.2		18.8	8.20
HNO_3	-17.8		89.2	78.4	65.3	45.7		
(nitric)	10		86.7	77.0	63.0	45.6		
	20		86.6	75.2	61.5			
	30		86.6	74.9	61.3			
	40		85.9	74.1	60.5			
	44		86.5	74.6				
	60		86.9	75.6				
HCL	-17.8	83.5						
(hydrochloric)	10	83.5						
	20	83.2						
	30	84.2						

ที่มา Hall (1980)

2. วิธีไดนามิก เป็นการทำให้สภาวะอากาศเคลื่อนที่ทำให้ระยะเวลาที่ใช้ให้เมล็ดพืชสมดุลสั้นกว่าโดยอาจใช้ระยะเวลาแค่ 1-2 วัน แต่ถ้าเป็นวิธีสถิตแล้วใช้ระยะเวลานานเป็นสัปดาห์

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของความชื้นสมดุล

ได้มีผู้สนใจนำทฤษฎีทางเทอร์โมไดนามิกส์มาอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศและความชื้นสมดุลของวัสดุหลายชนิดในรูปของสมการทางคณิตศาสตร์ พบว่าสมการทางทฤษฎีมักจะไม่สามารถอธิบายความสัมพันธ์นั้นได้อย่างถูกต้องตลอดช่วงอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ สมการกึ่งทฤษฎีและสมการเอมไพริคเคิลที่สร้างขึ้นจากผลการทดลองมักให้ความถูกต้องมากว่าสมการทางทฤษฎี

ตัวอย่างแบบจำลองความชื้นสมดุลที่นิยมใช้กันมีดังนี้

Henderson Equation

Henderson (1952) ได้สร้างสมการกึ่งทฤษฎี สำหรับหาความชื้นสมดุลของวัสดุเกษตรรวมถึงเมล็ดพืช ดังนี้

$$1 - rh = \exp\left[- a\, T_{ab} (100\, M_e)^b \right] \qquad (1)$$

เมื่อ

rh คือความชื้นสัมพัทธ์, เศษส่วน

T_{ab} คืออุณหภูมิ, ^{o}K

M_e คือความชื้นสมดุล, เศษส่วน มาตรฐานแห้ง

a, b คือค่าคงที่

ต่อมา Thompson (1967) ได้ทำการพัฒนาสมการของ Henderson เพื่อทำนายค่าความชื้นสมดุลของเมล็ดพืช ดังนั้นจึงเรียกแบบจำลองนี้ว่า ***modified Henderson*** ซึ่งมีรูปแบบดังนี้

$$1 - rh = \exp\left[- a(T + c)(100\, M_e)^b \right] \qquad (2)$$

เมื่อ

M_e คือความชื้นสมดุล, เศษส่วน มาตรฐานแห้ง

T คืออุณหภูมิ, ^{o}C

a ,b,c คือค่าคงที่

ค่า a, b, c สำหรับเมล็ดพืชบางชนิดของสมการ (2) แสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ค่าคงที่ของแบบจำลอง modified Henderson สำหรับเมล็ดพืชบางชนิด

Grain	a ($\times 10^{-5}$)	b	c
Barley	2.2919	2.0123	195.267
Beans, edible	2.0899	1.8812	254.230
Corn, yellow dent	8.6541	1.8634	49.81
Peanut, kernel	65.0413	1.4984	50.561
Peanut, Pod	6.6587	2.5362	23.318
Rice, rough	1.9187	2.4451	51.161
Sorghum	0.8532	2.4757	113.725
Soybean	30.5327	1.2164	134.136
Wheat, durum	2.5738	2.2110	70.318
Wheat, hard	2.3007	2.2857	55.815
Wheat, soft	1.2299	2.5558	64.346

ที่มา ASAE(1988) อ้างอิงโดย Brooker et al., 1992

Chung and Pfost Equation

Chung and Pfost (1967) ได้สร้างสมการเอมไพริคเดิล เพื่อทำการทำนายค่าความชื้นสมดุลของเมล็ดพืช โดยสมการของ Chung and Pfost มีรูปแบบดังนี้

$$M_e = a - b \ln[-(T + c)\ln(rh)] \qquad (3)$$

เมื่อ

M_e คือความชื้นสมดุล, เศษส่วน มาตรฐานแห้ง

T คือ อุณหภูมิ, ^{o}C

a ,b,c คือค่าคงที่

ค่าคงที่ a, b และ c สำหรับสมการของ Chung and Pfost แสดงในตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ค่าคงที่ของแบบจำลอง Chung and Pfost สำหรับเมล็ดพืชบางชนิด

Grain	a	b	c
Barley	0.33363	0.050279	91.323
Beans, edible	0.43001	0.062596	160.629
Corn, yellow dent	0.33872	0.058970	30.205
Peanut, kernel	0.18948	0.034196	33.892
Peanut, Pod	0.16510	0.026383	12.354
Rice, rough	0.29394	0.046015	35.703
Sorghum	0.35649	0.050907	102.849
Soybean	0.41631	0.071853	100.288
Wheat, durum	0.37761	0.055318	112.350
Wheat, hard	0.35616	0.056788	50.998
Wheat, soft	0.27908	0.042360	35.662

ที่มา ASAE(1988) อ้างอิงโดย Brooker et al., 1992

Zuritz and Singh Equation

สำหรับการหาค่าความชื้นสมดุลของข้าวเปลือกแนะนำให้ใช้สมการของ Zuritz and Singh (1985) ซึ่งมีรูปแบบสมการดังนี้

$$\ln(rh) = -c_0 T_{ab}^{c_1} \exp(c_2 T_{ab}^{c_3} M_e) \qquad (4)$$

เมื่อ rh คือความชื้นสัมพัทธ์, เศษส่วน

T_{ab} คือ อุณหภูมิ, ^{o}K

M_e คือความชื้นสมดุล, เศษส่วน มาตรฐานแห้ง

$c_0 = 3.88368 \times 10^{9}$ $c_1 = -3.52486$

$c_2 = -1.1205 \times 10^{-2}$ $c_3 = 1.30047$

นอกจากนี้ยังมีสมการที่นิยมใช้กันอีกหลายสมการ ซึ่งในการหาค่าสมการเพื่อทำนายค่าความชื้นสมดุลของวัสดุเกษตรอาจจะต้องมีการทดลองใช้ค่าสมการหลายๆ สมการเพื่อทำนายค่า แล้วเลือกรูปแบบสมการที่สามารถทำนายได้ตรงกับค่าที่ได้จากการทดลองมากที่สุด

ตัวอย่างที่ 1 ในการทดลองหาค่าความชื้นสมดุลของเมล็ดของเมล็ดธัญพืชชนิดหนึ่งที่อุณหภูมิ 27 ^{o}C ความชื้นสัมพัทธ์ 90 % และ 70% ได้ค่าความชื้นสมดุลคือ 30% และ 20% มาตรฐานแห้งตามลำดับ ถ้าหากต้องการใช้สมการความชื้นสมดุลของ Henderson จงคำนวณหาค่าคงที่ a และ b

วิธีทำ จากสมการของ Henderson

$$1-\mathrm{rh}=\exp\left[-\mathrm{a}\,\mathrm{T_{ab}}\,(100\ \mathrm{M_e})^{\mathrm{b}}\right]$$

$$\ln(1-\mathrm{rh})=-\mathrm{a}\mathrm{T_{ab}}\,(100\mathrm{M_e})^{\mathrm{b}} \qquad \text{(a)}$$

ที่ $\mathrm{M_e}=30\%,\quad \mathrm{rh}=0.9,\quad \mathrm{T_{ab}}=273+27=300\ ^{\circ}\mathrm{K}$ จะได้

$$\ln(1-0.9)=-\mathrm{a}\times 300\times(100\times 0.03)^{\mathrm{b}}$$

$$\ln(0.1)=-\mathrm{a}\times 300\times 30^{\mathrm{b}} \qquad \text{(b)}$$

ที่ $\mathrm{M_e}=20\%,\quad \mathrm{rh}=0.7,\quad \mathrm{T_{ab}}=300$ จะได้

$$\ln(0.3)=-\mathrm{a}\times 300\times 20^{\mathrm{b}} \qquad \text{(c)}$$

นำ (c) ÷ (b) จะได้

$$\frac{\ln(0.3)}{\ln(0.1)}=\left(\frac{20}{30}\right)^{\mathrm{b}}$$

$$0.523=\left(\frac{2}{3}\right)^{\mathrm{b}}$$

หาค่า b จาก

$$\mathrm{b}=\frac{\ln(0.523)}{\ln(2/3)}=1.5986$$

แทนค่า b ลงในสมการ (b) จะได้ว่า

$$\ln(0.1)=-\mathrm{a}\times 300\times 30^{1.5986}$$

$$\mathrm{a}=\frac{-\ln(0.1)}{300\times 30^{1.5986}}=3.340\times 10^{-5}$$

ตอบ

ตัวอย่างที่ 2 ข้าวเปลือกถูกเก็บไว้ในถังเก็บซึ่งเปิดด้านบน อากาศมีอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ คือ 25 ^{o}C ความชื้นสัมพัทธ์ 70% หากไม่เกิดการถ่ายเทมวลจากผิวของข้าวเปลือกในถังแล้ว จงหาความชื้นของข้าวเปลือก โดยใช้สมการของ Zuritz-Singh

วิธีทำ จากสมการของ Zuritz-Singh ซึ่งมีค่าคงที่

$$c_0 = 3.88368 \times 10^{9} \qquad c_1 = -3.52486$$

$$c_2 = -1.1205 \times 10^{-2} \qquad c_3 = 1.30047$$

$$\ln(rh) = -c_0 T_{ab}^{c_1} \exp\left(c_2 T_{ab}^{c_3} M_e\right)$$

$$\frac{-\ln(rh)}{c_0 T_{ab}^{c_1}} = \exp\left(c_2 T_{ab}^{c_3} M_e\right)$$

$$\ln\left[\frac{-\ln(rh)}{c_0 T_{ab}^{c_1}}\right] = c_2 T_{ab}^{c_3} M_e$$

$$M_e = \frac{\ln\left[\dfrac{-\ln(rh)}{c_0 T_{ab}^{c_1}}\right]}{c_2 T_{ab}^{c_3}}$$

$$= \frac{\ln\left[\dfrac{-\ln(0.7)}{(3.88368 \times 10^{9}) \times (273+25)^{-3.52486}}\right]}{(-1.1205 \times 10^{-2}) \times (273+25)^{1.30047}}$$

$$= 0.1638$$

$$= 16.38 \quad \%db$$

ตอบ

ตัวอย่างที่ 3 ต้องการอบแห้งพันธุ์ข้าวเปลือกให้เหลือความชื้น 12% db ด้วยเครื่องอบแห้งแบบลมร้อนที่อุณหภูมิ 40 ^{o}C ความชื้นสัมพัทธ์ 30 % อยากทราบว่าจะสามารถทำการอบแห้งพันธุ์ข้าวเปลือกนี้ได้ความชื้นตามต้องการหรือไม่

วิธีทำ

การที่จะทราบว่าสามารถลดความชื้นได้ตามต้องการหรือไม่ให้ตรวจสอบจากค่าความชื้นสมดุล ณ สภาวะอากาศที่ใช้อบแห้ง จากสมการของ Zuritz-Singh จะหาค่าความชื้นสมดุลได้จาก

$$M_e = \frac{\ln\left[\frac{-\ln(rh)}{c_0 T_{ab}^{c_1}}\right]}{c_2 T_{ab}^{c_3}}$$

$$= \frac{\ln\left[\frac{-\ln(0.3)}{(3.88368\times10^{9})\times(273+40)^{-3.52486}}\right]}{(-1.1205\times10^{-2})\times(273+40)^{1.30047}}$$

$$= 0.0832 \text{ หรือ } 8.30\ \%db$$

ค่าความชื้นสมดุลของข้าวเปลือกมีค่าต่ำกว่าความชื้นสุดท้ายที่ต้องการ ดังนั้นเครื่องอบแห้งนี้สามารถลดความชื้นข้าวเปลือกให้เหลือ 12 %db ได้ **ตอบ**

****

คำถามท้ายบท

1. จงหาค่าความชื้นสมดุลของถั่วเขียวที่ อุณหภูมิ 35 ^{o}C ความชื้นสัมพัทธ์ 65% โดยใช้สมการของ Henderson เมื่อค่า $a = 5.59\times10^{-7}$ และ b =3.03
2. จงหาค่าคงที่ของสมการ Henderson จากข้อมูลต่อไปนี้

   RH=20% M_e= 6.5 % T = 25 ^{o}C

   RH=70% M_e= 12 % T = 25 ^{o}C
3. จงหาค่าความชื้นสมดุลของถั่วเหลืองโดยใช้สมการ modified Henderson และสมการของ Chung and Plost ที่อุณหภูมิ 60 ^{o}C ความชื้นสัมพัทธ์ 25%

บทที่ 5

คุณสมบัติทางกายภาพและทางความร้อนของวัสดุเกษตร

(Physical and Thermal Properties of Agricultural Products)

คุณสมบัติพื้นฐานทางกายภาพและความร้อนของผลิตผลทางการเกษตรนั้นมีความสำคัญต่อการวิเคราะห์การอบแห้งและเก็บรักษาผลิตผลทางการเกษตร ทั้งนี้เนื่องจากคุณสมบัติเหล่านี้ส่งผลต่อการออกแบบเครื่องอบแห้งและโรงเก็บรักษา อัตราการอบแห้ง นอกจากนี้ยังใช้ในการจำลองสถานการณ์เพื่อทำนายพฤติกรรมในการถ่ายเทความร้อนและมวลในขณะทำการอบแห้งและเก็บรักษา โดยคุณสมบัติทางกายภาพที่จะกล่าวถึงในที่นี้ได้แก่ ขนาดมิติ ความหนาแน่นรวม สัดส่วนช่องว่างอากาศ การหดตัว เป็นต้น ส่วนคุณสมบัติเชิงความร้อนที่จะกล่าวถึงได้แก่ ความร้อนจำเพาะ ค่าความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอ เป็นต้น

ขนาดมิติ (Physical Dimension)

ขนาดมิติของเมล็ดพืชมีส่วนสำคัญในการออกแบบอุปกรณ์คัดแยกขนาดและทำความสะอาด นอกจากนี้ยังเกี่ยวข้องกับการอบแห้งเมล็ดพืช ตัวอย่างเช่น เมล็ดพืชชนิดเดียวกันที่มีขนาดต่างกันเมื่อนำมาอบแห้งจะให้อัตราการอบแห้งที่ต่างกัน ทั้งนี้เกิดจากพื้นที่ผิวของการถ่ายโอนความร้อนและการส่งผ่านความร้อนภายในเมล็ด นอกจากนี้ขนาดมิติยังช่วยในการออกแบบขนาดห้องอบแห้งที่เหมาะสมกับผลิตภัณฑ์ที่ต้องการอบแห้งด้วย ขนาดมิติสามารถหาได้โดยตรงจากเครื่องมือวัดขนาด เช่น เวอร์เนียร์แคลิปเปอร์ ไมโครมิเตอร์ เป็นต้น

ความหนาแน่น (Density)

ความหนาแน่นเป็นพารามิเตอร์ที่จำเป็นสำหรับวิเคราะห์การอบแห้งเช่นกัน ความหนาแน่นแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ ความหนาแน่นจริง (True Density) และ ความหนาแน่นรวม (Bulk Density) ความหนาแน่นจริงหมายถึง อัตราส่วนของมวลของวัสดุต่อปริมาตรวัสดุ ส่วนความหนาแน่นรวม หมายถึง อัตราส่วนของมวลต่อปริมาตรทั้งหมดซึ่งรวมปริมาตรของเมล็ดวัสดุและปริมาตรของอากาศที่แทรกตัวอยู่ตามช่องว่าง สัดส่วนช่องว่างอากาศ ความหนาแน่นจริง และความหนาแน่นรวมมีความสัมพันธ์กันดังนี้

$$\varepsilon = 1 - \frac{\rho_b}{\rho_t} \qquad (1)$$

เมื่อ ε คือ สัดส่วนช่องว่างอากาศ

ρ_b คือ ความหนาแน่นรวม, kg/m^3

ρ_t คือ ความหนาแน่นจริง, kg/m^3

วิธีการหาค่าความหนาแน่นรวมทำได้โดยการนำเมล็ดพืชตัวอย่างจำนวนหนึ่งมาใส่ในภาชนะที่ทราบปริมาตร อาจใช้กระป๋องขนาด 1 ลิตร จากนั้นนำไปชั่งน้ำหนักและคำนวณหามวลเมล็ดพืชต่อปริมาตร ค่าความหนาแน่นรวมมีค่าไม่คงที่แปรเปลี่ยนไปตามความชื้นของเมล็ดพืช

เปอร์เซ็นต์การหดตัว (Shrinkage)

ในขณะที่ทำการอบแห้ง วัสดุที่อยู่ในระหว่างการอบแห้งจะเกิดการหดตัวเนื่องจากสูญเสียความชื้น ซึ่งพฤติกรรมการหดตัวของวัสดุขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุ เช่น Bala (1983) ได้หาความสัมพันธ์การลดลงของความชื้นกับการหดตัวของมอลท์พบว่ามีความสัมพันธ์ดังนี้

$$S = 15.91\left(1 - \exp(-0.0966(M_{w0} - M_w))\right) \qquad (2)$$

เมื่อ S คือ เปอร์เซ็นต์การหดตัว (%)

M_{w0} คือ ความชื้นเริ่มต้นของมอลท์ (%wb)

M_w คือ ความชื้นของมอลท์ (%wb)

ตัวอย่างที่ 1 ทำการอบแห้งมอลท์ที่มีความชื้น 45 %wb ความหนาของชั้นมอลท์ในกะบะคือ 1 เมตร จนเหลือความชื้น 3 %wb จงหาค่าความสูงของมอลท์ในกะบะ

วิธีทำ

จากสมการ (2) จะได้

$$S = 15.91\left\{1 - \exp(-0.0966(45 - 3))\right\}$$

$$= 15.635\%$$

ดังนั้นความลึกในการหดตัว $= 1\,\text{m} \times \dfrac{15.635}{100}$

$$= 0.15635 \quad \text{m}$$

ดังนั้นที่ความชื้น 3 %wb มอลท์ในกะบะสูง $= 1 - 0.15635 = 0.8437$ m **ตอบ**

ความร้อนจำเพาะ (Specific heat)

ความร้อนจำเพาะ หมายถึง ปริมาณความร้อนที่ใช้ในการทำให้วัสดุหนึ่งหน่วยมวลมีอุณหภูมิสูงขึ้นหนึ่งองศา ที่ความดันหรือปริมาตรคงที่ ในการอบแห้งและเก็บรักษาผลผลิตเกษตร ค่าความร้อนจำเพาะที่ความดันคงที่จะเข้ามาเกี่ยวข้อง โดยที่ค่าของความร้อนจำเพาะของของแข็งและของเหลวมีค่าแปรเปลี่ยนเล็กน้อยเมื่อความดันเปลี่ยนและในช่วงอุณหภูมิที่ไม่สูงหรือต่ำมากๆ ดังนั้นการคำนวณในช่วงอุณหภูมิที่ไม่แตกต่างกันมากอาจสมมติให้ค่าความร้อนจำเพาะของเมล็ดพืชมีค่าคงที่

Siebel (1892) ได้เสนอสมการทางคณิตศาสตร์สำหรับคำนวณหาค่าความร้อนจำเพาะของวัสดุอาหารจำพวกไข่ เนื้อสัตว์ ผัก และผลไม้ ดังนี้

- สำหรับอุณหภูมิที่สูงกว่าจุดเยือกแข็ง

$$C_{pg} = 0.837 + 0.00349\,M_w \qquad (3)$$

- สำหรับอุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็ง

$$C_{pg} = 0.837 + 0.01256\,M_w \qquad (4)$$

สำหรับเมล็ดพืชได้มีนักวิจัยได้เสนอสมการสำหรับหาค่าความร้อนจำเพาะโดยให้ขึ้นอยู่กับค่าความชื้นโดยสมการอยู่ในลักษณะเชิงเส้น กล่าวคือเมื่อความชื้นมากขึ้นค่าความร้อนจำเพาะจะมากตาม สำหรับค่าความร้อนของเมล็ดพืชบางชนิดแสดงในตารางที่ 1

วิธีการหาค่าความร้อนจำเพาะสามารถหาได้โดยใช้แคลอรีมิเตอร์ (calorimeter) และใช้วิธีการผสมซึ่งมีขั้นตอนการหาคร่าวๆ ดังนี้

1. นำน้ำในแคลอรีมิเตอร์ ไปทำให้เย็นหรืออุ่น วัดอุณหภูมิ
2. นำวัสดุที่ต้องการหาค่าความร้อนจำเพาะที่ทราบอุณหภูมิใส่ลงในแคลอรีมิเตอร์ โดยมากใช้อุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิห้องเพื่อไม่ให้เกิดการสูญเสียหรือได้รับความร้อน
3. คนให้เกิดอุณหภูมิผสมที่สมดุลในแคลอรีมิเตอร์โดยเร็วและวัดอุณหภูมิผสม
4. คำนวณหาค่าความร้อนจำเพาะของวัสดุโดยใช้หลักดังนี้

ตารางที่ 1 สมการความร้อนจำเพาะของเมล็ดพืชบางชนิด

Crops	Specific heat/Regression equation for specific heat (kJ/kg °K)	Authors	Remarks
Wheat	1.594	Babbit (1945)	Determined indirectly
Wheat	$C_{pg} = 1.184 + 0.03031\, M_w$	Pfalzner (1951)	Sample A
	$C_{pg} = 1.260 + 0.03068\, M_w$		Sample B
	$C_{pg} = 1.205 + 0.03466\, M_w$		Sample C
Wheat (Soft white)	$C_{pg} = 1.398 + 0.04080\, M_w$	Kazarian & Hall (1965)	-
Wheat (hard red spring)	$C_{pg} = 1.096 + 0.04080\, M_d$	Muir & Viravanichai (1972)	-
Rough rice	$C_{pg} = 1.109 + 0.04479\, M_w$	Haswell (1954)	-
Rough rice	$C_{pg} = 0.921 + 0.05447\, M_w$	Wratten et al. (1969)	-
Rough rice (short grain)	$C_{pg} = 1.269 + 0.03487\, M_w$	Morita & Singh (1979)	-
Rough rice (medium)	$C_{pg} = 1.136 + 0.01758\, M_w$	Vemuganti & Pfost (1980)	-
Corn (yellow dent)	$C_{pg} = 1.523 + 0.03562\, M_w$	Kazarian & Hall (1965)	Moisture content 0.91-30.2%
Maize	1.835	Matouk (1976)	For dry matter in the temperature 0-15°C
Corn dent	$C_{pg} = 0.77 + 0.00502\, M_w$	Vemuganti & Pfost (1980)	-
Soybean	$C_{pg} = 1.64 + 0.019\, M_d$	Alam & Shove (1973)	-
Barley	$C_{pg} = 0.878 + 0.03475\, M_w$	Vemuganti & Pfost (1980)	-
Barley	$C_{pg} = 1.445 + 0.04885\, M_d$	Boyce (1966)	Moisture content 7.70-34.52%
Malt	$C_{pg} = 1.651 + 0.4116\, M_w$	Bala (1983)	-
Rough rice	$C_{pg} = 1.620 + 0.03114\, M_w$	Bala et al. (1987)	Moisture content 9.76-30.44%

ปริมาณความร้อนที่ลดจากวัสดุ = ความร้อนที่เพิ่มขึ้นของน้ำและแคลอรีมิเตอร์

$$C_{pg}W_g(T_g - T_e) = C_{pw}W_w(T_e - T_i) + C_{pc}W_c(T_e - T_i) \qquad (5)$$

หรือ

$$C_{pg} = \frac{(C_{pw}W_w + C_{pc}W_c)(T_e - T_i)}{W_g(T_g - T_e)} \qquad (6)$$

เมื่อ W_g, W_c, W_w คือ มวลของวัสดุ แคลอรีมิเตอร์ และน้ำ ตามลำดับ

C_{pg}, C_{pc}, C_{pw} คือ ความร้อนจำเพาะของวัสดุ แคลอรีมิเตอร์ และน้ำตามลำดับ

T_g, T_i, T_e คือ อุณหภูมิวัสดุเริ่มต้น อุณหภูมิเริ่มต้นของแคลอรีมิเตอร์ และ อุณหภูมิสุดท้ายที่สมดุลของแคลอรีมิเตอร์ ตามลำดับ

สำหรับค่า W_cC_{pc} เป็นค่าคงที่สำหรับแคลอรีมิเตอร์ซึ่งเรียกว่าค่าความจุความร้อนของแคลอรีมิเตอร์ มีหน่วยเป็น J/°C

ตัวอย่างที่ 2 ข้าวเปลือกความชื้น 13.5 %wb อุณหภูมิ 22 °C จำนวน 25 กรัม นำมาใส่ในแคลอรีมิเตอร์ ที่บรรจุน้ำเย็นอุณหภูมิ 4.66 °C จำนวน 46.1 กรัม อุณหภูมิผสมสมดุลคือ 7.84 °C ถ้าค่าความจุความร้อนของแคลอรีมิเตอร์คือ 0.0743 kJ/°C จงหาความร้อนจำเพาะของข้าวเปลือก

วิธีทำ

จากสมการ (6) จะได้

$$C_{pg} = \frac{\left(4.186 \times \frac{46.1}{1000} + 0.0743\right)(7.84 - 4.66)}{\frac{25}{1000} \times (22 - 7.84)}$$

$$= 2.4 \quad \text{kJ/kg}^{\circ}\text{C}$$

ดังนั้นค่าความร้อนจำเพาะของข้าวเปลือกคือ 2.4 kJ/kg °C **ตอบ**

ความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอ (Heat of vaporization)

ความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอ หมายถึงพลังงานที่ต้องใช้ในการเปลี่ยนสถานะของสารจากของเหลวให้เป็นไอที่อุณหภูมิและความดันคงที่ ความร้อนแฝงของการระเหยของน้ำในวัสดุเกษตรและอาหารจะมีค่าสูงกว่าน้ำที่อยู่อย่างอิสระ โดยเฉพาะเมื่อวัสดุนั้นมีความชื้นต่ำ จากข้อมูลความชื้นสมดุล สามารถคำนวณหาความร้อนแฝงของการระเหยได้ ความร้อนที่ใช้ในการระเหยน้ำจากวัสดุขึ้นอยู่กับความชื้นและอุณหภูมิ ถ้าอุณหภูมิและความชื้นของวัสดุต่ำ ค่าความร้อนแฝงของการระเหยจะสูง

การหาความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอของเมล็ดพืชสามารถกระทำได้จากสมการของ Clapeyron ซึ่งให้ความสัมพันธ์ของคุณสมบัติของของเหลวอิ่มตัวดังนี้

$$\frac{dP_v}{dT} = \frac{h_{fg}}{T\left(V_v - V_f\right)} \qquad (7)$$

เนื่องจากปริมาตรของของเหลว (V_f) มีค่าน้อยกว่า (V_v) มาก ดังนั้นจึงตัดเทอม V_f ออก และ จาก $V_v = mRT/P_v$ เมื่อแทนในสมการ (7) จะได้

$$\frac{h_{fg}}{mR}\frac{dT}{T^2} = \frac{dP_v}{P_v} \qquad (8)$$

ถ้าเมล็ดพืชวางอยู่ในอุณหภูมิ T_1 และ T_2 จะได้ค่าความดันไอของเมล็ดพืชเป็น P_{v1} และ P_{v2} ตามลำดับ ถ้า ให้ h'_{fg} เป็นความร้อนแฝงของเมล็ดพืช จะได้ว่า

$$\frac{h'_{fg}}{mR}\int_{T_1}^{T_2}\frac{dT}{T^2} = \int_{P_{v1}}^{P_{v2}}\frac{dP_v}{P_v} \qquad (9)$$

$$\frac{h'_{fg}}{mR}\left[-\frac{1}{T_1}+\frac{1}{T_2}\right] = \ln P_{v1} - \ln P_{v2} \qquad (10)$$

ในกรณีเป็นน้ำบริสุทธิ์ในอุณหภูมิ T_1 และ T_2 จะได้ค่าความดันไออิ่มตัวเป็น P_{vs1} และ P_{vs2} ตามลำดับ โดยที่ h_{fg} เป็นความร้อนแฝงของน้ำจะได้

$$\frac{h_{fg}}{mR}\left[-\frac{1}{T_1}+\frac{1}{T_2}\right]=\ln P_{vs1}-\ln P_{vs2} \qquad (11)$$

นำสมการ (10) หารด้วย (11) จะได้

$$\frac{h'_{fg}}{h_{fg}}=\frac{\ln P_{v1}-\ln P_{v2}}{\ln P_{vs1}-\ln P_{vs2}} \qquad (12)$$

แต่ $P_v=(rh)P_{vs}$ ดังนั้น

$$\frac{h'_{fg}}{h_{fg}}=\frac{\ln\left((rh)_1 P_{vs1}\right)-\ln\left((rh)_2 P_{vs2}\right)}{\ln P_{vs1}-\ln P_{vs2}} \qquad (13)$$

สมการ (13) แสดงถึงอัตราส่วนความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอของเมล็ดพืชต่อความร้อนแฝงของน้ำบริสุทธิ์ ที่อุณหภูมิและความชื้นภายในคงที่ ถ้าจะหา h'_{fg} ที่อุณหภูมิ T_3 กระทำได้ดังนี้

1. เลือกอุณหภูมิ T_1 และ T_2 ให้ $T_1<T_3<T_2$
2. หาความชื้นสัมพัทธ์สมดุลของเมล็ดพืชที่ความชื้นและอุณหภูมิ T_1 และ T_2
3. หาค่า P_{vs1} และ P_{vs2} ที่อุณหภูมิ T_1 และ T_2 ตามลำดับ สำหรับน้ำบริสุทธิ์ และ h_{fg} ที่อุณหภูมิ T_3
4. แทนค่าในสมการ (13) หาค่า h'_{fg}

ตัวอย่างที่ 3 ข้าวฟ่างความชื้น 15 %db. และอุณหภูมิ 21 °C จงคำนวณหาค่าความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอ

วิธีทำ

1. อุณหภูมิ $T_3=21°C$ ดังนั้นเลือก $T_1=30$ ^{o}C และ $T_2=10$ ^{o}C

2. หาค่าความชื้นสัมพัทธ์สมดุลจากสมการ modified Henderson

$$rh=1-\exp\left(-a(T+C)(100M_e)^{b}\right)$$

จากตารางที่ 3 บทที่ 4 ได้ $a = 0.8532 \times 10^{-5}, C = 113.725, b = 2.4757$ ที่ $T = 30\ ^{o}C$

$$rh_1 = 1 - \exp\left\{(-0.8532 \times 10^{-5})(30 + 113.725)(100 \times 0.15)^{2.4757}\right\}$$

$$= 0.6323$$

ที่ $T = 10\ ^{o}C$

$$rh_2 = 1 - \exp\left\{(-0.8532 \times 10^{-5})(10 + 113.725)(100 \times 0.15)^{2.4757}\right\}$$

$$= 0.5774$$

จากตารางไอน้ำอิ่มตัวที่ $T_1 = 30\ ^{o}C$ ได้ $P_{vs1} = 4.246\ \ kPa$, $T_2 = 10\ ^{o}C$ ได้ $P_{vs2} = 1.2276\ \ kPa$

จากตารางที่ 2 ที่ $T = 21\ ^{o}C$ ได้ $h_{fg} = 2453.216\ \ kJ/kg$

แทนค่าในสมการ (13) $$\frac{h'_{fg}}{2453.216} = \frac{\ln(0.6323 \times 4.246) - \ln(0.5774 \times 1.2276)}{\ln(4.246) - \ln(1.2276)}$$

$$h'_{fg} = 1.0732 \times 2453.216 \quad = 2632.79\ \ kJ/kg$$

ค่าความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอของข้าวฟ่างคือ 263.79 kJ/kg **ตอบ**

ค่าความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอของข้าวโพด ข้าวฟ่างและข้าวสาลีสำหรับอุณหภูมิและความชื้นต่างๆ แสดงในตารางที่ 2 โดยค่าความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอใช้สมการดัดแปลงของ Henderson ในการคำนวณ จากข้อมูลในตารางแสดงค่าความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอมีค่าสูงขึ้นเมื่อความชื้นและอุณหภูมิของเมล็ดลดลงและมีค่าสูงกว่าค่าความร้อนแฝงการกลายเป็นไอของน้ำที่อุณหภูมิเดียวกันทุกๆ ค่า

ตารางที่ 2 ค่าความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอของข้าวสาลี ข้าวโพดและข้าวฟ่างที่อุณหภูมิและความชื้นต่างๆ

MC (%db)	0 °C kJ/kg	10 °C kJ/kg	21.1°C kJ/kg	37.8 °C kJ/kg	65.6 °C kJ/kg
			Wheat		
5	2,925	2,897	2,870	2,821	2,742
10	2,863	2,835	2,809	2,760	2,683
15	2,765	2,739	2,714	2,667	2,590
20	2,658	2,632	2,609	2,563	2,490
			Corn		
5	3,035	3,007	2,979	2,928	2,846
10	2,949	2,921	2,893	2,844	2,765
15	2,837	2,809	2,783	2,735	2,660
20	2,721	2,695	2,670	2,625	2,551
			Sorghum		
5	2,793	2,767	2,739	2,695	2,618
10	2,753	2,728	2,702	2,656	2,581
15	2,681	2,656	2,630	2,586	2,514
20	2,597	2,574	2,551	2,507	2,437
			water		
	2,500	2,477	2,453	2,411	2,343

****

คำถามท้ายบท

1. จากการทดลองหาค่า bulk density ของถั่วเหลือง พบว่ามีค่า 772 kg/m^3 และสัดส่วนช่องว่างในเมล็ดมีค่า 33.8% อยากทราบว่าความหนาแน่นจริงของถั่วเหลืองมีค่าเท่าไหร่
2. ทำการใส่ข้าวเปลือกที่อุณหภูมิ 25 °C จำนวน 30 กรัม ลงในแคลอรีมิเตอร์ ซึ่งบรรจุน้ำเย็นอุณหภูมิ 6 °C จำนวน 50 กรัม อุณหภูมิในแคลอรีมิเตอร์สมดุลที่ 11.5 °C จงหาค่าความร้อนจำเพาะของข้าวเปลือกเมื่อค่าความจุความร้อนของแคลอรีมิเตอร์คือ 0.0743 kJ/°C
3. จงหาค่าความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอของข้าวบาเล่ย์ ที่ความชื้น 20 %db อุณหภูมิ 33 °C (โดยใช้ข้อมูลความชื้นสมดุลของ modified Henderson บทที่ 4)

บทที่ 6
การอบแห้งแบบชั้นบาง
(Thin layer drying)

ในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้ง สิ่งหนึ่งที่มีความจำเป็นต้องทราบคือ สมการการอบแห้งแบบชั้นบางและค่าพารามิเตอร์ของการอบแห้งที่เป็นฟังก์ชั่นกับสภาวะการอบแห้ง ดังนั้นในบทนี้จะเรียนในหัวข้อ การพัฒนาสมการการอบแห้งแบบชั้นบางและการหาค่าพารามิเตอร์การอบแห้ง

ทฤษฎีการอบแห้ง

ผู้ที่กล่าวถึงทฤษฎีในการอบแห้งช่วงแรกๆ คือ Lewis (1921) และ Sherwood (1929) โดย Sherwood ได้แบ่งกลไกในการอบแห้งทั่วไปออกเป็น 3 แบบคือ

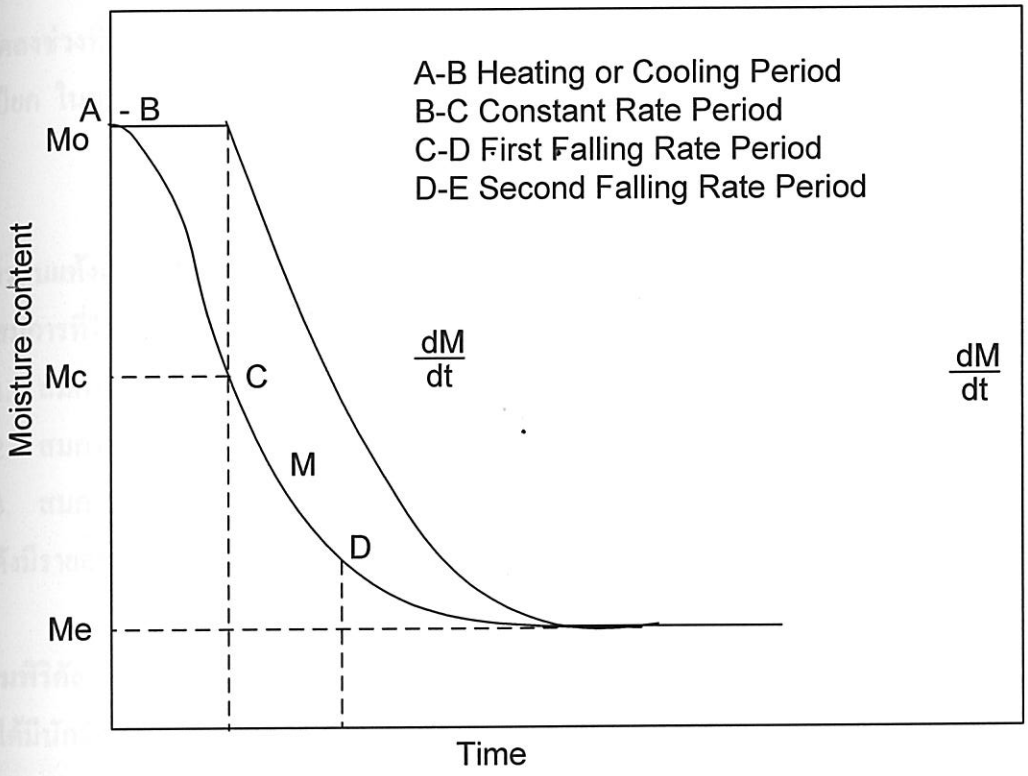
1. Evaporation of water takes place at the solid surface and the resistance to the internal diffusion of liquid is small as compared with the resistance to removal of vapour from surface.
2. Evaporation of water takes place at the solid surface and the resistance to the internal diffusion of liquid is great as compared with resistance to the removal of vapour from the surface.
3. Evaporation of water takes place in the interior of the solid and the resistance to the internal diffusion of liquid is great as compared with the total resistance to the removal of vapour.

ในการอบแห้งวัสดุกลไกดังกล่าวไม่ได้เกิดขึ้นเพียงอย่างใดอย่างหนึ่งแต่เกิดขึ้นได้ทั้ง 3 กรณี ตัวอย่างเช่นในการอบแห้งวัสดุที่เปียกชุ่มไปด้วยน้ำนั้นจะเป็นการระเหยน้ำออกจากผิวของวัสดุซึ่งกลไกในการอบแห้งเทียบได้กับกรณีที่ 1 ดังนั้นอัตราการอบแห้งที่ได้จึงมีค่าคงที่ เมื่อการอบแห้งดำเนินต่อไปปริมาณน้ำมีค่าลดลงกลไกในการอบแห้งก็จะเปลี่ยนไปเป็นกรณีใดกรณีหนึ่งในสองกรณีที่เหลือ อัตราการอบแห้งก็จะลดลง และค่าความชื้นซึ่งอัตราการอบแห้งเริ่มลดลงจะเรียกว่า ***"ความชื้นวิกฤต"*** ดังนั้นเมื่อความชื้นในวัสดุน้อยกว่าค่าความชื้นวิกฤตก็จะไม่ปรากฏช่วงอัตราการอบแห้งคงที่

Sherwood ได้แบ่งช่วงของการอบแห้งออกเป็นดังนี้

1. ช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ (Constant rate period)
2. อัตราการอบแห้งลดลงช่วงที่ 1 (First falling rate period)
3. อัตราการอบแห้งลดลงช่วงที่ 2 (Second falling rate period)

ในการอบแห้งวัสดุเกษตรทั่วไปมักจะไม่ค่อยพบช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ แต่จะพบว่าอยู่ในช่วงอัตราการอบแห้งลดลงมากกว่า รูปแบบของอัตราการอบแห้งแบบชั้นบางของวัสดุเกษตรแสดงในภาพที่ 1



ภาพที่ 1 Drying rate curve

ในระหว่างช่วงของการอบแห้งคงที่การระเหยจะเกิดขึ้นที่ผิวของวัสดุ และน้ำที่ผิววัสดุจะมีพฤติกรรมเหมือนกับพื้นที่เปิดของน้ำ สมการการอบแห้งช่วงอัตราการอบแห้งคงที่คือ

$$\frac{dW}{dt} = \frac{h_c A_s}{h_{fg}}(T_\alpha - T_{wb}) \qquad (1)$$

เมื่อ $\frac{dW}{dt}$ = อัตราการระเหยน้ำ (มวล/เวลา)

h_c = สัมประสิทธิ์การพาความร้อน ($kJ/m^2h\ °C$)

A_s = พื้นที่ผิว (m^2)

h_{fg} = ความร้อนแฝงกลายเป็นไอ (kJ/kg)

T_α = อุณหภูมิของกระแสอากาศ (°C)

T_{wb} = อุณหภูมิกระเปาะเปียกของอากาศ (°C)

ช่วงของการอบแห้งลดลงสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ช่วง คือ อัตราการอบแห้งลดลงช่วงที่1 และการอบแห้งลดลงช่วงที่2 ในระหว่างอัตราการอบแห้งลดลงช่วงที่1 อัตราการอบแห้งลดลงเนื่องจากการลดลงของพื้นที่ผิวเปียก ในขณะที่อัตราการอบแห้งลดลงช่วงที่2 การอบแห้งจะถูกควบคุมด้วยการแพร่กระจายของเหลวภายใน

สมการการอบแห้งแบบชั้นบาง

สมการที่ใช้ในการศึกษาการอบแห้งแบบชั้นบางสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 แบบคือ

1. สมการเอมพิริคัล
2. สมการทางทฤษฎี
3. สมการกึ่งทฤษฎี

ดังมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

สมการเอมพิริคัล (Empirical drying equations)

ได้มีนักวิจัยหลายท่านที่ทำการพัฒนาสมการการอบแห้งแบบนี้ขึ้นมา โดยสมการที่นิยมแพร่หลายจะเป็นสมการของ Page (Page's equation) ซึ่งมีรูปแบบดังนี้

$$\frac{M - M_e}{M_0 - M_e} = \exp\left(-kt^u\right) \qquad (2)$$

เมื่อ M = ความชื้นวัสดุ (%db)

M_e = ความชื้นสมดุล (%db)

M_0 = ความชื้นเริ่มต้น (%db)

t = เวลาที่ใช้ในการอบแห้ง

k = ค่าคงที่การอบแห้ง (เวลา$^{-1}$)

u = ค่าคงที่

Thompson et al. (1968) ได้พัฒนาสมการ quadratic สำหรับข้าวโพดดังนี้

$$t = A\ln(MR) + B\left(\ln(MR)\right)^2 \qquad (3)$$

เมื่อ t = เวลา (h)

$A = -1.862 + 0.00488\,T_F$, $B = 427.4\exp(-0.033\,T_F)$, T_F = อุณหภูมิ °F

Van Rest and Isaacs (1968) ได้พัฒนาสมการขึ้นมาสำหรับ ข้าวโพด ข้าวสาลีและ ข้าวโอ๊ต โดยสมการที่ได้มีรูปแบบดังนี้

$$\frac{M - M_e}{M_0 - M_e} = \dot{p} - q\dot{\log} t \qquad (4)$$

เมื่อ p, q = ค่าคงที่

Troeger and Hukill (1971) ได้พัฒนาแบบจำลองสำหรับข้าวโพด คือ

$$\frac{dM}{dt} = -k(M - M_e)^a \qquad (5)$$

เมื่อ a = ค่าคงที่

สมการทางทฤษฎี (Theoretical Drying Equations)

เนื่องจากการเคลื่อนที่ของความชื้นภายในเมล็ดพืชหรือวัสดุที่นำมาอบแห้งจะอยู่ในรูปของของเหลวและ/หรือไอน้ำ ดังนั้นกลไกทางฟิสิกส์ที่ใช้ในการอธิบายการถ่ายเทความชื้นคือ

1. การเคลื่อนที่ของของเหลวเนื่องจากแรงตึงผิว (capillary flow)
2. การเคลื่อนที่ของของเหลวเนื่องจากความแตกต่างของความเข้มข้นของความชื้น (liquid diffusion)
3. การเคลื่อนที่ของของเหลวเนื่องจากการแพร่กระจายของความชื้นบนช่องรูเล็กของผิว (surface diffusion)
4. การเคลื่อนที่ของไอน้ำเนื่องจากความแตกต่างของความเข้มข้นของความชื้น (vapour diffusion)
5. การเคลื่อนที่ของไอน้ำเนื่องจากความแตกต่างของอุณหภูมิ (thermal diffusion)
6. การเคลื่อนที่ของน้ำและไอน้ำเนื่องจากความแตกต่างของความดันรวม (hydrodynamic flow)

Luikov (1966,1980) ได้พัฒนาสมการสำหรับอธิบายการอบแห้งวัสดุพรุนบนพื้นฐานของทางกลไกทางฟิสิกส์ที่กล่าวด้านบนดังนี้

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \nabla^2 k_{11} M + \nabla^2 k_{12} T_g + \nabla^2 k_{13} P \qquad (6)$$

$$\frac{\partial T_g}{\partial t} = \nabla^2 k_{21} M + \nabla^2 k_{22} T_g + \nabla^2 k_{23} P \quad (7)$$

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \nabla^2 k_{31} M + \nabla^2 k_{32} T_g + \nabla^2 k_{33} P \quad (8)$$

การเคลื่อนที่ของความชื้นเนื่องจากเกรเดียนท์ของความดันมีค่าเพียงเล็กน้อยในช่วงอุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้ง ดังนั้นชุดสมการจึงลดรูปเหลือดังนี้

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \nabla^2 k_{11} M + \nabla^2 k_{12} T_g \quad (9)$$

$$\frac{\partial T_g}{\partial t} = \nabla^2 k_{12} M + \nabla^2 k_{22} T_g \quad (10)$$

Hussain et al. (1973) ประยุกต์สมการของ Luikov มาใช้กับการอบแห้งข้าวเปลือก ซึ่งพบว่าสามารถทำนายการอบแห้งได้ดี

สำหรับเมล็ดพืชอาหารที่การแพร่กระจายของความร้อน (thermal diffusion) มีค่าน้อย จึงสามารถสมมติได้ว่าเป็นศูนย์ ทำให้เทอม $\nabla^2 k_{12} M$ ใน $\frac{\partial T_g}{\partial t}$ มีค่าน้อยด้วยดังนั้น สมการ (9) และ (10) จึงลดรูปเหลือ

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \nabla^2 k_{11} M \quad (11)$$

$$\frac{\partial T_g}{\partial t} = \nabla^2 k_{22} T_g \quad (12)$$

สำหรับเมล็ดพืชอาหารที่การแพร่กระจายของความร้อนเมื่อเปรียบเทียบกับการแพร่กระจายความชื้นมีค่ามาก เกรเดียนท์ของอุณหภูมิจะมีค่าน้อยทำให้สมการการแพร่กระจายเป็นไปตามกฎของ Fick (Fick' law) คือ

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \nabla^2 k_{11} M \quad (13)$$

ซึ่งสมการ (13) เขียนให้อยู่ในรูปทั่วไปของเวคเตอร์คือ

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \text{Div}(D_{\upsilon} \text{ grad } M) \qquad (14)$$

เมื่อ D_{υ} = ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่

Sherwood (1931) และ Newman (1931) ได้แนะว่ากลไกทางฟิสิกส์ของการอบแห้งคือ การแพร่ดังแสดงในสมการ (14) และได้หาค่าในกรณีที่วัสดุมีรูปทรงต่างๆ สำหรับทรงกลมคือ

$$\frac{\partial M}{\partial t} = D\left(\frac{\partial^2 M}{\partial r^2} + \frac{2}{r}\frac{\partial M}{\partial r}\right) \qquad (15)$$

ผลเฉลยของสมการ (14) ในพิกัด ฉาก ทรงกลม และทรงกระบอก ได้มีอธิบายอยู่ใน Crank (1979) ดังนั้นผลเฉลยสำหรับ ทรงกลมคือ

$$\frac{M - M_e}{M_0 - M_e} = \frac{6}{\pi^2}\sum_{n=1}^{\infty}\frac{1}{n^2}\exp\left(-n^2\frac{D_{\upsilon}\pi^2}{r^2}t\right) \qquad (16)$$

และผลเฉลยสำหรับของครึ่งหนึ่งของระนาบความหนา z คือ

$$\frac{M - M_e}{M_0 - M_e} = \frac{8}{\pi^2}\sum_{n=1}^{\infty}\frac{1}{(2n-1)^2}\exp\left(-(2n-1)^2\frac{D_{\upsilon}\pi^2}{z^2}t\right) \qquad (17)$$

สมการกึ่งทฤษฎี (Semi-theoretical Drying Equations)

จากสมการ (16) และ (17) หากเราพิจารณาเฉพาะเทอมแรก จะได้สมการที่อยู่ในรูปต่อไปนี้คือ

$$\frac{M - M_e}{M_0 - M_e} = a\exp(-kt) \qquad (18)$$

จากกฎการเย็นตัวของวัตถุของนิวตัน (Newton's law of cooling) สำหรับอัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของวัตถุซึ่งถูกล้อมรอบด้วยตัวกลางที่มีอุณหภูมิคงที่มีค่าเป็นสัดส่วนระหว่างความแตกต่างของอุณหภูมิของวัตถุกับตัวกลางที่อยู่รอบๆ เขียนเป็นสมการได้ว่า

$$\frac{dT}{dt} = -k_t(T - T_e) \qquad (19)$$

เมื่อเทียบกับอัตราการลดลงของความชื้นจะได้ว่า

$$\frac{dM}{dt} = -k(M - M_e) \qquad (20)$$

สมการ (20) สามารถเขียนได้ดังนี้

$$\int_{M_0}^{M} \frac{dM}{M - M_e} = k \int_{t_0}^{t} - dt \qquad (21)$$

เมื่อทำการ อินทิเกรท จะได้

$$\frac{M - M_e}{M_0 - M_e} = e^{-k(t - t_0)} \qquad (22)$$

ซึ่งจะได้ว่า

$$\frac{M - M_e}{M_0 - M_e} = a\, e^{-kt} \qquad (23)$$

เมื่อ $a = e^{kt_0}$

ตัวอย่างที่ 1 ในการทดลองอบแห้งข้าวสาลีแบบชั้นบาง ที่ความชื้น 25 %db. สภาวะอากาศอบแห้ง 40 °C ความชื้นสัมพัทธ์ 50% จงหาปริมาณความชื้นและอัตราการอบแห้งหลังจากทำการอบแห้ง 5 นาที โดยค่าคงที่การอบแห้งและความชื้นสมดุลมีค่าตามสมการต่อไปนี้

$$k = 290\, e^{-2169/(T_a+273.15)} \quad \cdot \quad \text{min}^{-1}$$

$$(1-rh) = \exp(-c(T_a+273.15)\, M_e^n)$$

เมื่อ $c = 3.51\times10^{-6}$, $n = 2.79$

วิธีทำ

หาค่า k จาก $k = 290\exp(-2169/(40+273.15) = 0.2846 \quad \text{min}^{-1}$

หาค่าความชื้นสมดุลที่สภาวะ $T_a = 40\ ^{o}C$, $rh = 0.5$ จากสมการความชื้นสมดุล

$$\ln(1-rh) = -c\left(T_a+273.15\right)M_e^n$$

$$M_e^n = \frac{-\ln(1-rh)}{c\left(T_a+273.15\right)}$$

$$M_e = \left[\frac{-\ln(1-rh)}{c\left(T_a+273.15\right)}\right]^{1/n}$$

$$= \left[\frac{-\ln(1-0.5)}{3.51\times10^{-6}\left(40+273.15\right)}\right]^{1/2.79} = 10.08 \quad \%db$$

จากสมการของนิวตัน

$$\frac{M-M_e}{M_0-M_e} = a\exp(-kt)$$

ถ้า $a = 1$

$$M = M_e + (M_0 - M_e)\exp(-kt)$$

แทนค่า M_e, k, t

$$M = 10.08 + (25 - 10.08)\exp(-0.2846 \times 5) = 13.67 \quad \%db$$

หาค่า Drying rate จาก

$$\frac{dM}{dt} = -k(M - M_e)$$

$$= -0.2846(13.67 - 10.08)$$

$$= -1.0217 \quad \%db/min$$

ดังนั้นความชื้นและอัตราการอบแห้งหลังทำการอบแห้งไป 5 นาทีคือ 13.67 %db และ -1.0217 %db/min ตามลำดับ **ตอบ**

ตัวอย่างที่ 2 ตัวอย่างของข้าวเปลือกได้ถูกนำไปอบแห้งแบบชั้นบางที่อุณหภูมิ 43 °C หากหาความชื้นที่เวลา 2 ชั่วโมง และ 5 ชั่วโมงได้ 12.5 %db. และ 10.0 %db. ตามลำดับ สมมติว่า $k = 0.426 \quad h^{-1}$ จงหาค่าความชื้นสมดุลของข้าวสาลีในช่วงเวลานี้

วิธีทำ จาก $\frac{M - M_e}{M_0 - M_e} = a\exp(-kt)$ เมื่อ $a = 1$ สำหรับเวลา t_1 และ t_2 จะได้

$$\frac{M_1 - M_e}{M_0 - M_e} = \exp(-kt_1) \qquad (a)$$

$$\frac{M_2 - M_e}{M_0 - M_e} = \exp(-kt_2) \qquad (b)$$

(b) ÷ (a)

$$\frac{M_2 - M_e}{M_1 - M_e} = \exp\left(-k(t_2 - t_1)\right)$$

แทนค่า $M_1 = 12.5\%$, $M_2 = 10.0\%$, $k = 0.426 \quad h^{-1}$, $t_1 = 2 \quad h$, $t_2 = 5 \quad h$ จะได้

$$\frac{10 - M_e}{12.5 - M_e} = \exp(-0.426 \times 3)$$

$$10 - Me = (12.5 - M_e)0.2786$$

$$M_e = \frac{10 - 3.482}{(1 - 0.2786)} = 9.03 \quad \%db$$ **ตอบ**

พารามิเตอร์ของการอบแห้ง

1. ค่าคงที่อัตราการอบแห้ง (Drying Rate Constant)

ค่าคงที่การอบแห้งมักเป็นฟังก์ชั่นของอุณหภูมิการอบแห้ง โดย O'Callaghan (1954) สร้างสมการสำหรับค่าคงที่การอบแห้งดังนี้

$$k = A \exp(T) \qquad (24)$$

Henderson and Pabis (1961) ได้สร้างสมการสำหรับค่าคงที่การอบแห้งอยู่ในรูปแบบสมการ Arrhenius ดังนี้

$$k = d \exp\left(-\frac{f}{T}\right) \qquad (25)$$

โดยพวกเขาพิสูจน์ความสัมพันธ์นี้โดยใช้ผลการทดลองที่ได้จาก ข้าวสาลีและข้าวโพด โดย Bala (1983) ได้แสดงให้เห็นว่าค่าคงที่อัตราการอบแห้งของ มอลท์ มีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิการอบแห้งในช่วง 30.3 ถึง 90.2 °C และแสดงได้ด้วย สมการ Arrhenius ดังนี้

$$k = a \exp\left\{\frac{-b}{273.15 + T_a}\right\} \qquad (26)$$

การหาค่าคงที่การอบแห้ง

วิธีกราฟฟิค (Graphical Method) ค่าคงที่อัตราการอบแห้งอย่างง่ายด้วยวิธีกราฟฟิค ซึ่งจากสมการของ Page มีขั้นตอนดังนี้

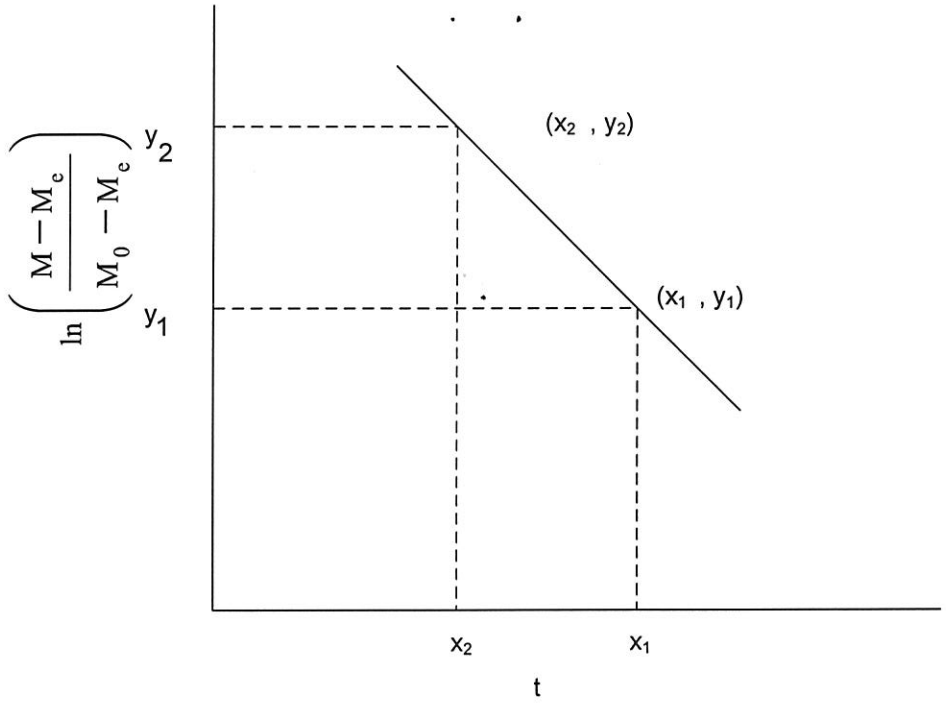
1. จากสมการ Single exponential สมการ (23) สามารถเขียนได้เป็น

$$\ln\left(\frac{M - M_e}{M_0 - M_e}\right) = \ln a - kt \qquad (27)$$

เมื่อเทียบกับสมการเส้นตรง $y = mx + c$ จะได้

$$y = \ln\left(\frac{M - M_e}{M_0 - M_e}\right),\ x = t,\ m = -k,\ c = \ln a$$

เมื่อทำการ plot สมการ (23) บนกระดาษ semi-log จะได้เส้นตรงที่มี slope เป็นลบดังแสดงในภาพที่ 2



<u>ภาพที่ 2</u> การหาค่า k จาก semi-logarithmic plot

2. จากสมการของ Page ดังแสดงในสมการ (2) จัดให้อยู่ในรูปสมการเส้นตรงได้โดย

$$-\left(\ln\frac{M - M_e}{M_0 - M_e}\right) = kt^u \qquad (28)$$

$$\ln\left[-\ln\left(\frac{M - M_e}{M_0 - M_e}\right)\right] = \ln k + u \ln t \qquad (29)$$

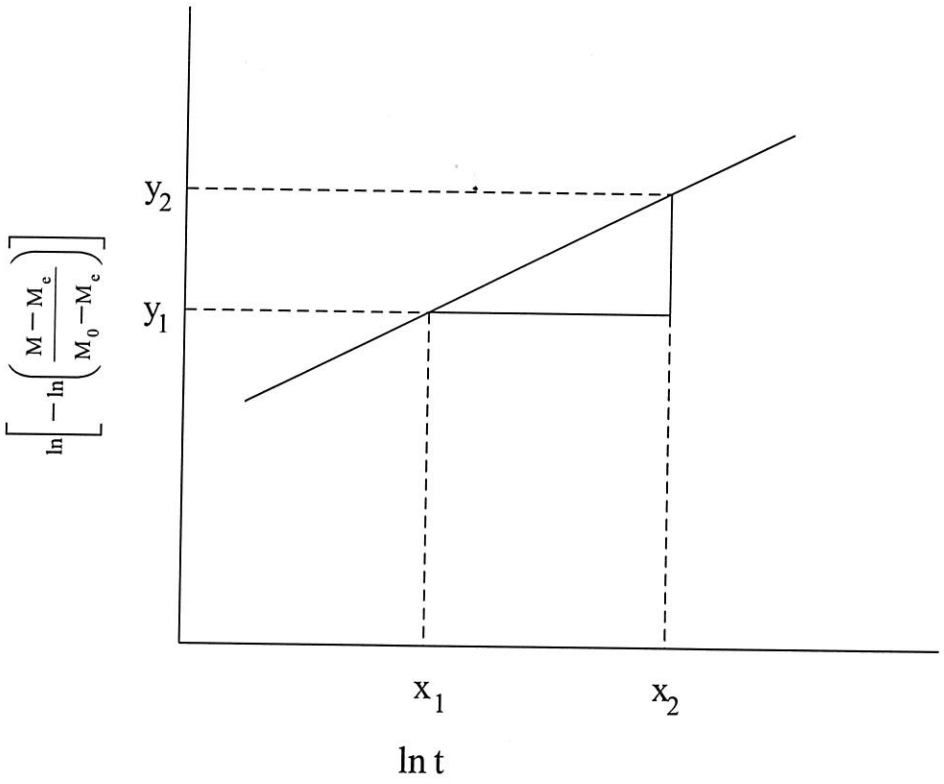
เมื่อเทียบกับสมการเส้นตรง $y = mx + c$ จะได้ว่า

$$y = \ln\left[-\ln\left(\frac{M - M_e}{M_0 - M_e}\right)\right]$$

$x = \ln t$

$m = u$ และ $c = \ln k$

เมื่อทำการ plot สมการ (28) ลงบนกระดาษ log-log ก็จะได้เส้นตรงที่มี slope เป็นบวก ดังแสดงในภาพที่ 3



ภาพที่ 3 การหาค่า k และ u จาก log-log plot

2. ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ (Diffusion Coefficient)

สำหรับค่าสัมประสิทธิ์การแพร่นั้นจะมีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิอากาศที่ใช้ในการอบแห้ง ซึ่งสมการค่าสัมประสิทธิ์การแพร่จะอยู่ในรูปของสมการ Arrhenius ดังนี้

$$D_\upsilon = A \exp\left\{\frac{-B}{T_a + 273.15}\right\} \qquad (30)$$

Half Response Time

คือเวลาที่ค่าอัตราส่วนความชื้นของการอบแห้งมีค่าครึ่งหนึ่ง ซึ่งหาได้จาก $\frac{M-M_e}{M_0-M_e}=e^{-kt}$

เมื่อค่าอัตราส่วนความชื้น เป็นครึ่งหนึ่งจะได้ $\frac{M-M_e}{M_0-M_e}=\frac{1}{2}$ ดังนั้น

$$t_{1/2}=\frac{\ln 2}{k} \qquad (31)$$

ในทำนองเดียวกันหากต้องการหาเวลาที่ทำให้อัตราส่วนความชื้นลดลง ¼ ก็จะหาได้จาก

$\frac{M-M_e}{M_0-M_e}=e^{-kt}$ เมื่อ $\frac{M-M_e}{M_0-M_e}=\frac{1}{4}$ แล้ว

$$t_{1/4}=\frac{\ln 4}{k} \qquad (32)$$

ตัวอย่างที่ 3 สมการการอบแห้งชั้นบางของข้าวโพดซึ่งอบแห้งที่อุณหภูมิ 40 °C สามารถอธิบายได้ด้วยสมการของ Page คือ $\frac{M-M_e}{M_0-M_e}=e^{-kt^u}$ โดยที่ $k = 0.208\ h^{-1}$ และ $u = 0.69$ จงหาเวลาที่ความชื้นของข้าวโพดลดลงครึ่งหนึ่งที่จะไปถึงความชื้นสมดุล

วิธีทำ จาก $\frac{M-M_e}{M_0-M_e}=e^{-kt^u}$ จะได้ว่า

$$\exp(-kt^u)=\frac{1}{2}$$

$$kt^u=\ln(2)$$

$$t=\left[\frac{\ln(2)}{k}\right]^{1/u}$$

แทนค่า $k = 0.208\ h^{-1}$, $u = 0.69$ จะได้ $t=\left[\frac{\ln(2)}{0.208}\right]^{1/0.69}=5.72$ h

ดังนั้นเวลาที่ความชื้นจะลดลงไปครึ่งหนึ่งของความชื้นสมดุลคือ 5.72 ชั่วโมง **ตอบ**

คำถามท้ายบท

1. ทำการอบแห้งข้าวเปลือกที่อุณหภูมิ 60 °C ความชื้นสัมพัทธ์ 18.5% ได้ข้อมูลดังนี้

Time (min)	Moisture content (%db)
0	34.00
10	30.00
30	26.80
60	21.00
90	16.20
120	13.70
180	10.90
210	10.10
240	9.66
270	9.30

หากความชื้นสมดุลคือ 9.30 %db จงหาค่า k และ u ในรูปสมการของ Page

2. จากการอบแห้งข้าวบาเล่ย์ความชื้นเริ่มต้น 34 %db. ด้วยอุณหภูมิ 50 °C และความชื้นสัมพัทธ์ 45% โดยมีสมการอบแห้งชั้นบางคือ $\frac{M-M_e}{M_0-M_e}=e^{-kt}$ จงหาเวลาที่ความชื้นลดลงครึ่งหนึ่งที่จะไปถึงความชื้นสมดุล และหาอัตราการอบแห้งที่เวลานี้ด้วยเมื่อกำหนดให้

$$k=139.3\exp\left(\frac{-4426}{T_a+273.15}\right) \quad s^{-1} \quad \text{และ}$$

$$M_e=21.63-3.57\ln(T_a)-6.73\ln(1-rh)$$

บทที่ 7
เครื่องอบแห้ง (Dryer)

การอบแห้งเป็นวิธีการหนึ่งที่นิยมใช้กันมากในการถนอมรักษาอาหาร การเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ในผลิตภัณฑ์อาหารมีน้อยหากว่าความชื้นต่ำกว่า 10 %wb เป็นผลให้สามารถเก็บรักษาผลิตผลทางการเกษตรและอาหารได้เป็นเวลานานโดยไม่เน่าเสีย การอบแห้งนอกจากช่วยถนอมรักษาวัสดุเกษตรและอาหารแล้ว ยังสามารถลดปริมาตรและน้ำหนักของอาหารหลังการอบแห้ง ทำให้การเก็บรักษาใช้เนื้อที่น้อย และการขนส่งมีประสิทธิภาพสูง

เนื่องจากความแตกต่างที่มีอยู่มากมายในรูปทรงและคุณสมบัติอบแห้งของอาหาร ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีเครื่องอบแห้งหลายๆ แบบเพื่อให้เหมาะกับชนิดของวัสดุที่นำมาทำการอบแห้ง ความผิดพลาดในการเลือกประเภทเครื่องอบแห้งจะก่อให้เกิดปัญหาในการปฏิบัติงาน แม้ว่าเครื่องอบแห้งจะทำงานได้ แต่ความสามารถในการอบแห้งก็จะลดลงอย่างมาก ในบทนี้จะกล่าวถึงลักษณะของเครื่องอบแห้งที่ใช้สำหรับการอบแห้งวัสดุเกษตรและอาหารในแบบต่างๆ

เครื่องอบแห้งเมล็ดพืช

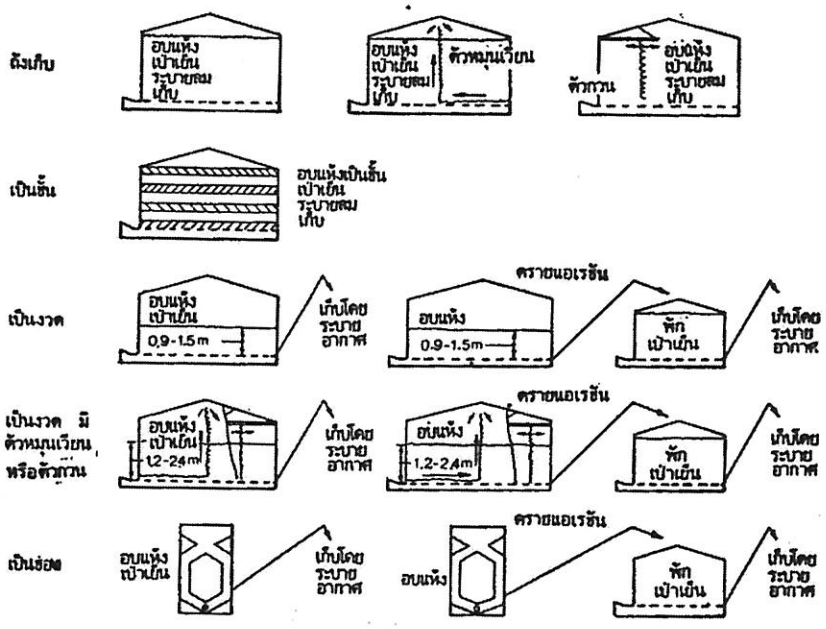
โดยทั่วไปเรามักใช้อากาศที่มีอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ต่ำเป็นตัวกลางในการอบแห้ง ทั้งนี้เพราะสามารถอบแห้งได้เร็ว และได้ความชื้นของเมล็ดพืชต่ำตามที่ต้องการ อุณหภูมิของอากาศจะสูงเท่าไรนั้นขึ้นอยู่กับลักษณะการนำเมล็ดพืชไปใช้งาน วิธีและเทคนิคที่ใช้ในการอบแห้ง โดยมากเรามักจะเลือกเอาอุณหภูมิสูงสุดที่ยอมให้ได้โดยคุณภาพของเมล็ดพืชไม่เสียหาย เพราะจะทำให้แห้งเร็ว มีผลให้เครื่องอบแห้งที่ต้องใช้มีขนาดเล็กลง ทำให้การลงทุนต่ำ ในการอบแห้งบางวิธีเราอาจใช้อากาศแวดล้อมในการอบแห้ง เช่นวิธีการอบแห้งในถังเก็บ คืออบแห้งเมล็ดพืชภายในตัวถังที่ใช้เก็บรักษา การใช้อากาศอบแห้งที่มีอุณหภูมิสูงเกินไปจะทำให้เมล็ดพืชทางด้านล่างของถังซึ่งสัมผัสกับลมร้อนก่อนแห้งเกินกว่าที่ต้องการ ส่วนเมล็ดพืชทางด้านบนของถังซึ่งสัมผัสกับลมร้อนทีหลังจะยังชื้นอยู่

ในขณะที่อากาศร้อนเคลื่อนที่ผ่านชั้นเมล็ดพืช จะเกิดกระบวนการถ่ายเทความร้อนและมวลขึ้นพร้อมๆ กัน ความร้อนจากอากาศจะถ่ายเทไปยังเมล็ดพืช และทำให้น้ำที่บริเวณผิวเมล็ดระเหยเข้าไปอยู่ในอากาศ เป็นผลให้อากาศมีอุณหภูมิลดลง และความชื้นสัมพัทธ์อากาศสูงขึ้น ส่วนเมล็ดพืชจะมีความชื้นลดต่ำลง และหากความชื้นลดลงมากพอแล้ว อุณหภูมิของเมล็ดพืชก็จะเริ่มสูงขึ้นด้วย จนในที่สุดเมล็ดพืชจะมีอุณหภูมิสูงเท่ากับอุณหภูมิอากาศที่ใช้อบแห้ง หากว่าความชื้นลดลงจนถึงความชื้นสมดุล เมื่อเมล็ดพืชแห้งดีแล้ว เรามักจะผ่านอากาศแวดล้อมเข้าชั้นเมล็ดพืชเพื่อให้อุณหภูมิลดลง หากเก็บเมล็ดพืชทั้งที่ยังมีอุณหภูมิสูงอยู่อาจเกิดปัญหาการไหลเวียนของอากาศโดยธรรมชาติอันเนื่องมาจากความแตกต่างของอุณหภูมิ ซึ่งมีผลให้เกิดการควบแน่นของไอ

น้ำในอากาศ ทำให้เมล็ดพืชในบริเวณที่มีการควบแน่นมีความชื้นสูงขึ้น โดยมากมักจะเป็นที่ชั้นบนๆ และเป็นจุดเริ่มต้นของการแพร่เชื้อราและแมลงต่อไป

ชนิดของเครื่องอบแห้งเมล็ดพืช

เครื่องอบแห้งเมล็ดพืชอาจแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิดคือ เครื่องอบแห้งเมล็ดพืชแบบอยู่กับที่ (fixed-bed dryer) และเครื่องอบแห้งแบบเมล็ดพืชไหล (moving-bed dryer) ซึ่งแต่ละชนิดยังสามารถแบ่งย่อยได้อีก ข้อดีข้อเสียก็แตกต่างกันออกไป ภาพที่ 1 แสดงเครื่องอบแห้งเมล็ดพืชชนิดต่างๆ พร้อมทั้งแนะนำกระบวนการหลังการอบแห้งต่างๆ ที่นิยมใช้กัน

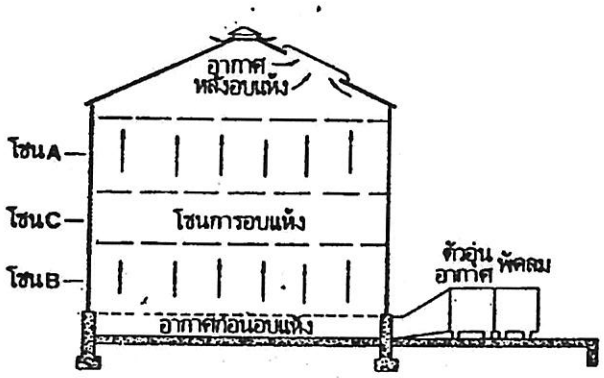


ภาพที่ 1 เครื่องอบแห้งเมล็ดพืชแบบต่างๆ

1. เครื่องอบแห้งแบบเมล็ดพืชอยู่กับที่

เครื่องอบแห้งแบบนี้อาจแบ่งออกได้เป็น 3 แบบ คือ แบบถังเก็บ (in-bin drying) แบบเป็นชั้น (layer drying) และแบบเป็นงวด (bath-in-bin drying) ในเครื่องอบแห้งแบบเมล็ดพืชอยู่กับที่ อัตราการไหลของอากาศค่อนข้างต่ำ อย่างเช่นในกรณีของการอบแห้งแบบถังเก็บ จะสามารถแบ่งชั้นเมล็ดพืชออกเป็น 3 โซน ดังภาพที่ 2 คือ โซน A อยู่ชั้นบนสุด โซน B อยู่ชั้นล่างสุด และโซน C อยู่ระหว่างโซน A และ โซน B จากภาพจะเห็นว่ากระแสอากาศไหลผ่านโซน B, C, และ A ตามลำดับ ที่โซน A เมล็ดพืชและอากาศอยู่ในสภาวะสมดุลความร้อนและความชื้น เมล็ดพืชมีความชื้นเท่ากับความชื้นเริ่มต้น และอากาศอบแห้งมีอุณหภูมิ

ใกล้เคียงกับอุณหภูมิกระเปาะเปียก ที่โซน B เมล็ดพืช มีความชื้นเท่ากับความชื้นสมดุลที่สภาวะอากาศตรงทางเข้าเครื่องอบแห้ง ที่โซน C เมล็ดพืชและอากาศไม่ได้อยู่ในสภาวะสมดุล มีการถ่ายเทความร้อนและความชื้นซึ่งกันและกัน เมื่อเวลาการอบแห้งเพิ่มขึ้น ความหนาของโซน B จะมากขึ้น และความหนาของโซน A จะลดลง เมื่อสิ้นสุดการอบแห้ง โซน C จะหายไป และจะเหลือเพียงโซน B เท่านั้น



ภาพที่ 2 การเคลื่อนที่ของโซนการอบแห้ง

1.1 อบแห้งแบบถังเก็บ

เมล็ดพืชหลังเก็บเกี่ยวจะถูกขนย้ายมาไว้ในถังเก็บซึ่งทำหน้าที่เป็นเครื่องอบแห้งด้วย ความสูงของชั้นเมล็ดพืชในเครื่องอบแห้งแบบนี้จะมากกว่าในเครื่องอบแห้งชนิดอื่น โดยอาจจะสูงถึง 6 เมตร อุณหภูมิและอัตราการไหลของอากาศที่ใช้อบแห้งมักจะต่ำ อากาศที่ใช้อาจเป็นอากาศแวดล้อม อัตราการไหลของอากาศที่ใช้กันแปรระหว่าง 0.5-5 $m^3/min\text{-}m^3_{เมล็ดพืช}$ การอบแห้งจะดำเนินไปอย่างช้าๆ โดยอาจกินเวลาหลายสัปดาห์ เนื่องจากระยะเวลาในการอบแห้งยาวนาน การเจริญเติบโตของเชื้อราและการสูญเสียมวลแห้งของเมล็ดพืชอาจมีมากเกินไป เพื่อหลีกเลี่ยงปัญหานี้ ความชื้นเริ่มต้นของเมล็ดพืชไม่ควรสูงเกินไป ในสหรัฐอเมริกา ซึ่งมีสภาวะอากาศแบบอบอุ่น ความชื้นเริ่มต้นของข้าวโพดควรต่ำกว่า 24 % ในประเทศเขตร้อนชื้น ความชื้นเริ่มต้นของเมล็ดควรต่ำกว่านี้ Soponronarit (1987) แนะนำว่าความชื้นเริ่มต้นของข้าวเปลือกที่อบแบบถังเก็บภายใต้สภาวะอากาศร้อนชื้นไม่ควรสูงกว่า 20% อากาศที่ใช้อบแห้งอาจถูกทำให้ร้อนขึ้นถ้าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศสูงเกินไป โดยทั่วไปเรามักจะใช้ตัวควบคุมความชื้น (humidistat) เป็นตัวควบคุมการทำงานของตัวอุ่นอากาศ คือ เมื่อความชื้นสัมพัทธ์อากาศสูง ตัวควบคุมจะให้ตัวอุ่นอากาศร้อนทำงาน สำหรับการอบแห้งข้าวโพดเราอาจตั้งตัวควบคุมที่ความชื้นสัมพัทธ์ประมาณ 55% เพื่อให้ระบบอบแห้งมีความง่าย เราอาจไม่ใช้ตัวควบคุมความชื้นก็ได้ แต่ใช้ตัวทำอากาศร้อนที่สามารถเพิ่มอุณหภูมิของอากาศได้ประมาณ 3-6 °C วิธีนี้มีข้อเสียคือ อากาศอาจแห้งเกินไป และเป็นผลให้เมล็ดพืชแห้งเกินกว่าที่ต้องการ ในกรณีที่ใช้อากาศร้อนในการอบแห้ง จะต้องทำให้เมล็ด

พืชเย็นลงหลังจากที่เมล็ดพืชแห้งแล้วโดยการเป่าอากาศแวดล้อม มิฉะนั้นอาจเกิดปัญหาการถ่ายเทความชื้นในถังเก็บอันเนื่องมากจากการไหลเวียนของอากาศ ซึ่งเกิดขึ้นจากความแตกต่างของอุณหภูมิภายในกองเมล็ดพืช เป็นผลให้เกิดการควบแน่นของไอน้ำในอากาศในบริเวณที่เมล็ดพืชมีอุณหภูมิต่ำ ทำให้เมล็ดพืชในบริเวณนี้มีความชื้นสูงขึ้น จนเกิดลุกลามของเชื้อราและการระบาดของแมลงในที่สุด

เกรเดียนท์ความชื้นในชั้นเมล็ดพืชจะลดลงได้ถ้าใช้ตัวกวนหรือตัวหมุนเวียนเมล็ดพืช ตัวกวนทำงานโดยอาศัยเกลียวลำเลียงในแนวดิ่ง โดยที่เกลียวลำเลียงนี้จะพาเอาเมล็ดพืชที่อยู่ด้านล่างขึ้นด้านบน และเมล็ดพืชจากชั้นบนจะเคลื่อนลงล่าง เมล็ดพืชจะเกิดการผสมกันเป็นบางส่วนในขณะที่เคลื่อนที่ ส่วนตัวหมุนเวียนเมล็ดพืชนั้นทำงานโดยอาศัยเกลียวลำเลียงซึ่งวางอยู่ในแนวราบโดยอยู่เหนือพื้นเครื่องอบแห้งเล็กน้อย เกลียวลำเลียงในแนวราบนี้จะกวาดเมล็ดพืชจากรอบนอกเข้าสู่จุดศูนย์กลางของถังอบแห้ง แล้วเคลื่อนที่ขึ้นด้านบนโดยเกลียวลำเลียงในแนวดิ่งอีกตัวหนึ่ง

ปัญหาการใช้เครื่องอบแห้งแบบนี้และเครื่องอบแห้งแบบอื่นๆ ด้วยก็คือการตรวจสอบความชื้นเมล็ดพืชว่าได้ลดลงถึงจุดที่ต้องการแล้วหรือยัง สำหรับเครื่องอบแห้งแบบเมล็ดพืชอยู่กับที่ เรามักจะตรวจสอบโดยใช้วิธีสุ่มตัวอย่างและนำมาตรวจสอบด้วยเครื่องวัดความชื้นซึ่งสะดวกและรวดเร็ว เครื่องมือวัดความชื้นและตัวควบคุมความชื้นสัมพัทธ์อากาศควรได้รับการตรวจสอบเป็นครั้งคราว

เครื่องอบแห้งแบบถังมีข้อดีข้อเสียพอสรุปได้ดังนี้

<u>ข้อดี</u>

1. จะเก็บเกี่ยวเมล็ดพืชด้วยอัตราใดก็ได้
2. การจัดการง่าย
3. ขั้นตอนการขนย้ายเมล็ดพืชมีน้อย ทำให้ประหยัดและลดการแตกร้าวของเมล็ดพืช
4. ใช้ความร้อนสัมผัสในอากาศที่ใช้อบแห้งได้อย่างมีประสิทธิภาพ
5. เมล็ดพืชหลังอบไม่แห้งเกินไป
6. การใช้อุณหภูมิต่ำทำให้เกิดการร้าวของเมล็ดพืชน้อย
7. ประหยัดพลังงานและค่าใช้จ่าย

<u>ข้อเสีย</u>

1. ไม่สามารถเก็บเกี่ยวเมื่อเมล็ดมีความชื้นสูงมาก
2. ระยะเวลาการอบแห้งยาวนานทำให้ต้องเสียเวลาในการจัดการมาก

โดยสรุปแล้ววิธีนี้เป็นวิธีที่นิยมใช้กันในระดับเกษตรกร และ/หรือระดับสหกรณ์ในประเทศเขตอบอุ่น เพราะการเก็บเกี่ยวข้าวโพด ข้าวฟ่างหรือข้าวเปลือก จะตรงกับฤดูใบไม้ร่วง ซึ่งมีอากาศเย็น ทำให้การ

เจริญเติบโตของเชื้อราเป็นไปอย่างช้าๆ สำหรับประเทศเขตร้อนอย่างประเทศไทย อากาศจะร้อนอยู่เกือบตลอดปี ดังนั้นจึงต้องร่นระยะเวลาในการอบแห้งให้สั้นลงโดยการเพิ่มอัตราการไหลของอากาศ

1.2 อบแห้งแบบเป็นชั้น

การอบแห้งแบบเป็นชั้นคล้ายกับการอบแห้งแบบถังเก็บ ต่างกันตรงที่ว่าปริมาณการเก็บเกี่ยวแต่ละครั้งไม่มากนัก เมล็ดพืชที่เก็บเกี่ยวในแต่ละวันจะถูกนำไปไว้ในถังเก็บซึ่งทำหน้าที่เป็นเครื่องอบแห้งด้วย การอบแห้งจะเริ่มทันทีเมื่อเมล็ดพืชชั้นงวดแรกมาถึง ในวันต่อๆ มาเมล็ดพืชจะถูกขนย้ายมาไว้ในถังเก็บอีก ในขณะที่เมล็ดพืชงวดก่อนหน้านั้นแห้งดีแล้ว จะเห็นได้ว่าการอบแห้งจะดำเนินไปเป็นชั้นๆ

เมล็ดพืชที่เก็บเกี่ยวก่อนจะมีความชื้นสูง ในขณะที่ความหนารวมของชั้นเมล็ดพืชจะยังน้อยอยู่ ดังนั้นอัตราการไหลของอากาศจะสูง เมล็ดพืชที่เก็บเกี่ยวครั้งหลังโดยปกติจะมีความชื้นต่ำลงกว่าเมื่อเก็บเกี่ยวครั้งแรก ในขณะเดียวกันความหนารวมของชั้นเมล็ดพืชจะเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นผลให้อัตราการไหลของอากาศลดลง

การอบแห้งด้วยวิธีนี้ทำให้สามารถเก็บเกี่ยวเมล็ดพืชที่มีความชื้นสูงได้ แต่จะต้องมีการจัดการที่ดีพอโดยเฉพาะการเก็บเกี่ยว ถ้าเก็บเกี่ยวในแต่ละครั้งมากเกินไปจะทำให้การอบแห้งสำหรับชั้นนั้นใช้เวลานาน และเมล็ดพืชอาจเสียหายได้ วิธีการอบแห้งแบบเป็นชั้นนี้น่าจะนำมาใช้กับประเทศในเขตร้อนชื้นได้

1.3 อบแห้งแบบเป็นงวด

เมล็ดพืชจะถูกอบในเครื่องอบแห้งแล้วทำให้เย็นลงก่อนนำไปเก็บไว้ในถังเก็บ อากาศที่ใช้อบแห้งมีอุณหภูมิสูงกว่าเครื่องอบแห้งสองชนิดแรกที่ได้กล่าวมาแล้ว คือประมาณ 49-71 °C อัตราการไหลของอากาศก็สูงกว่ามาก คือประมาณ 6-11 $m^3/min\text{-}m^3_{\text{เมล็ดพืช}}$ และความหนาของชั้นเมล็ดพืชน้อยกว่า คือประมาณ 1 เมตร หรืออาจน้อยกว่า การอบแห้งจะเป็นไปอย่างรวดเร็วโดยอาจแล้วเสร็จภายใน 12-24 ชั่วโมง

การควบคุมอุณหภูมิของอากาศร้อนโดยมากมักนิยมใช้ตัวควบคุมอุณหภูมิ (thermostat) เนื่องจากที่อุณหภูมิสูง การเปลี่ยนแปลงความชื้นสัมพัทธ์อากาศมีน้อย ทำให้ใช้ตัวควบคุมความชื้นไม่ได้ผล ตัวควบคุมอุณหภูมิควรได้รับการตรวจสอบเป็นครั้งคราว

ปัญหาของระบบนี้คือการเกิดเกรเดียนท์ของความชื้น (moisture gradient) ในชั้นเมล็ดพืชอันเนื่องมาจากการใช้อุณหภูมิสูงในการอบแห้ง โดยเมล็ดพืชที่บริเวณทางเข้าของอากาศจะแห้งเกินไป และเมล็ดพืชที่ตรงทางออกอาจมีความชื้นเท่ากับความชื้นเริ่มต้น ในขณะที่ความชื้นเฉลี่ยได้ตามที่ต้องการแล้ว ปัญหานี้สามารถแก้ไขได้เป็นบางส่วน โดยขณะที่เมล็ดพืชไหลออกจากเครื่องอบแห้งเพื่อนำไปเก็บรักษา จะเกิดการผสมกันระหว่างเมล็ดพืชแห้งและชื้นซึ่งต้องใช้เวลาหลายวันสำหรับการแพร่ความชื้นระหว่างเมล็ด นอกจากนี้การเป่าอากาศเพื่อให้เมล็ดพืชเย็นลงหลังการอบแห้งแล้วเสร็จ สามารถช่วยลดเกรเดียนท์ความชื้นเล็กน้อย และทำให้ความชื้นเฉลี่ยลดลงเล็กน้อยด้วย การเปล่าลมเย็นอาจใช้เวลาประมาณ 1-2 ชั่วโมง การทำให้เกรเดียนท์

ความชื้นในชั้นเมล็ดพืชลดลงอาจทำได้โดยการใช้ตัวกวน หรือตัวหมุนเวียนเมล็ดพืช หรือโดยการควบคุมความหนาของชั้นเมล็ดพืชที่อบแห้ง ความหนานี้อาจอยู่ระหว่าง 0.30-0.45 เมตร

ปัญหาที่สำคัญอีกข้อหนึ่งสำหรับระบบอบแห้งแบบเมล็ดพืชอยู่กับที่ก็คือการกระจายของกระแสอากาศ ระดับของเมล็ดพืชควรที่จะเท่ากันตลอดเพื่อให้การไหลของอากาศเป็นไปอย่างสม่ำเสมอ การใช้เกลียวลำเลียงในแนวราบ ซึ่งอยู่เหนือพื้นเครื่องอบแห้งเล็กน้อยเพื่อใช้กวาดเมล็ดพืชเข้าสู่จุดศูนย์กลางของเครื่องอบแห้ง อาจทำให้เศษผงและสิ่งสกปรกมารวมกันอยู่ที่จุดศูนย์กลางของเครื่องอบแห้ง ทำให้บริเวณนี้รับกระแสอากาศน้อยกว่าบริเวณที่อยู่รอบนอก เศษผงและสิ่งสกปรกเหล่านี้ควรได้รับการกำจัดเป็นครั้งคราว

2. เครื่องอบแห้งแบบเมล็ดพืชไหล

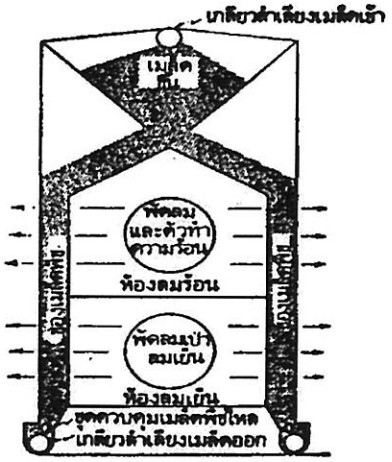
เครื่องอบแห้งแบบนี้ต่างกับเครื่องอบแห้งแบบเมล็ดพืชอยู่กับที่ตรงที่เมล็ดพืชมีการไหลในขณะทำการอบแห้ง โดยทั่วไปเมล็ดพืชจะไหลลงสู่ที่ต่ำโดยแรงโน้มถ่วง อัตราการไหลของเมล็ดพืชขึ้นอยู่กับตัวควบคุมการไหล ซึ่งอาจใช้คนปรับโดยดูจากความชื้นของเมล็ดพืชเป็นช่วงๆ หรืออาจควบคุมโดยอัตโนมัติโดยใช้เทอร์โมสแตทเป็นตัวควบคุมการทำงานของตัวควบคุมการไหล เมล็ดพืชที่แห้งแล้วจะมีอุณหภูมิสูงขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากอัตราการระเหยของน้ำมีน้อย หรืออาจใช้เครื่องวัดความชื้น ซึ่งอาจวัดได้ถูกต้องดี แต่ราคาจะแพงกว่ามาก เครื่องอบแห้งชนิดนี้สามารถแบ่งย่อยได้อีก 3 แบบคือ แบบไหลขวาง (cross-flow dryer) แบบไหลตาม (concurrent-flow dryer) และแบบไหลสวนทาง (counter-flow dryer) เครื่องอบแห้งทั้งสามแบบนี้เหมาะกับงานในระดับกลางและใหญ่ เพราะใช้อุณหภูมิและอัตราการไหลของอากาศสูง ทำให้การอบแห้งเป็นไปอย่างรวดเร็ว

2.1 เครื่องอบแห้งแบบไหลขวาง

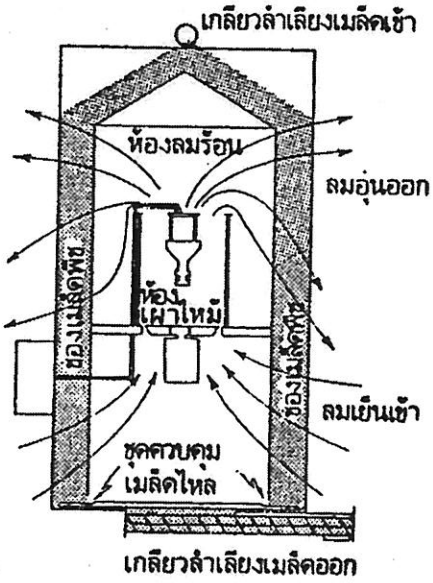
ในเครื่องอบแห้งแบบไหลขวาง อากาศที่ใช้อบแห้งจะไหลตัดผ่านทิศทางการไหลของเมล็ดพืช ดังแสดงในภาพที่ 3 และ ภาพที่ 4 ที่ทางด้านบนของเครื่องอบแห้งจะมีที่เก็บเมล็ดพืช เมล็ดพืชจะไหลลงด้านล่างผ่านช่องแคบซึ่งกว้างประมาณ 0.30-0.45 เมตร และไหลออกทางด้านล่างของเครื่องอบแห้งด้วยตัวควบคุมการไหล ช่องแคบที่เมล็ดพืชไหลลงนี้แบ่งได้เป็น 2 ส่วน ส่วนบนเป็นส่วนอบแห้งและส่วนล่างเป็นส่วนที่ทำให้เมล็ดพืชเย็นลงหลังอบแห้งแล้วเสร็จ การไหลของเมล็ดพืชและอากาศจะมีทิศทางตั้งฉากกัน อัตราการไหลของอากาศแปรระหว่าง 38-76 $m^3/min\text{-}m^3_{\text{เมล็ดพืช}}$ อัตราการไหลของเมล็ดพืชขึ้นอยู่กับตัวควบคุมการไหลซึ่งติดตั้งอยู่ที่ส่วนล่างของเครื่องอบแห้ง ปัญหาของเครื่องอบแห้งชนิดนี้ก็เช่นเดียวกับเครื่องอบแห้งแบบเป็นงวด คือการเกิดเกรเดียนท์ความชื้นในชั้นเมล็ดพืช เมล็ดพืชชื้นและแห้งจะผสมกันเป็นบางส่วนตรงทางออกของเครื่องอบแห้ง ทำให้ลดปัญหานี้ลงได้เป็นบางส่วน ปัญหาที่มักจะเกิดขึ้นเสมอคือการอุดตันที่ช่องทางออกของเครื่องอบแห้ง ดังนั้นจึงต้องตรวจสอบตัวควบคุมการไหลอย่างสม่ำเสมอ

ความแตกต่างของเครื่องอบแห้งแบบไหลขวาง 2 ชนิด ตามภาพที่ 3 และภาพที่ 4 อยู่ที่ช่วงทำให้เมล็ดพืชเย็นลงหลังอบแห้ง ทิศทางการไหลของอากาศจะตรงกันข้ามเครื่องอบแห้งที่มีทิศทางการไหลของอากาศ

เย็นจากด้านนอกเครื่องอบแห้งผ่านเมล็ดพืชและเข้าไปด้านในของเครื่องอบแห้งจะมีข้อดีตรงที่ว่าอากาศที่ใช้ทำให้เมล็ดพืชเย็นลงจะร้อนขึ้น และจะร้อนขึ้นอีกโดยตัวอุ่นอากาศ ก่อนที่จะนำไปใช้ในการอบแห้งต่อไป ซึ่งสามารถช่วยประหยัดพลังงานได้ส่วนหนึ่ง ข้อดีอีกอย่างหนึ่งคืออากาศส่วนที่เย็นที่สุดจะสัมผัสกับเมล็ดพืชส่วนที่เย็นที่สุด และอากาศส่วนที่ร้อนที่สุดจะสัมผัสกับเมล็ดพืชที่ร้อนที่สุดเช่นกัน การแตกร้าวของเมล็ดพืชอันเนื่องมาจากความเค้นภายในเมล็ดพืชน่าจะลดลง และทำให้ความเสียหายในรูปของเมล็ดแตกหักอันเนื่องมาจากการขนถ่ายเมล็ดพืชมีน้อยลงด้วย อย่างไรก็ตามระบบนี้มีข้อเสียตรงที่ว่าเศษผงและสิ่งสกปรกมีโอกาสสะสมในห้องเผาไหม้ได้มากกว่า ดังนั้นจึงต้องทำความสะอาดบ่อยขึ้น



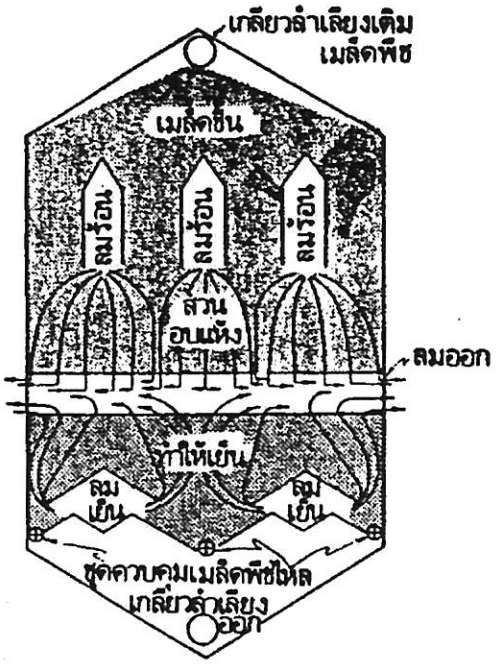
ภาพที่ 3 เครื่องอบแห้งแบบไหลขวาง



ภาพที่ 4 เครื่องอบแห้งแบบไหลขวางโดยนำเอาอากาศที่ใช้ระบายความร้อนจากเมล็ดพืชกลับมาใช้ใหม่

2.2 เครื่องอบแห้งแบบไหลตาม

ในเครื่องอบแห้งแบบไหลตาม การไหลของเมล็ดพืชและของอากาศอบแห้งจะขนานกัน และมีทิศทางเดียวกัน เมล็ดพืชส่วนที่ชื้นที่สุดจะสัมผัสกับอากาศส่วนที่ร้อนที่สุด เมื่อเมล็ดพืชไหลต่ำลงมาอากาศอบแห้งจะเริ่มเย็นลงและเมล็ดพืชจะมีความชื้นลดลง เมล็ดพืชที่แห้งแล้วจะไม่สัมผัสกับอากาศที่ร้อนจัดเลย ดังนั้นจึงสามารถใช้อากาศอบแห้งที่อุณหภูมิสูงมากได้ (อาจสูงถึง 150-250 °C) ทำให้สามารถอบแห้งได้เร็ว ข้อดีอีกอย่างหนึ่งคือการแตกร้าวของเมล็ดพืชจะมีน้อยเพราะเมล็ดพืชส่วนที่แห้งที่สุดจะสัมผัสกับอากาศอบแห้งที่เย็นที่สุด เมล็ดพืชที่แห้งแล้วจะไหลออกสู่ด้านล่างด้วยตัวควบคุมการไหลซึ่งถูกควบคุมโดยตัวควบคุมอุณหภูมิหรือความชื้นเมล็ดพืช เมล็ดพืชจะถูกทำให้เย็นลงก่อนที่จะไหลออกจากเครื่องอบแห้ง ความหนาของชั้นอบแห้งของเครื่องอบแห้งแบบนี้ควรหนากว่า 1 เมตร ทั้งนี้เพื่อให้การอบแห้งเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ ภาพที่ 5 แสดงเครื่องอบแห้งแบบไหลตามแบบหนึ่ง

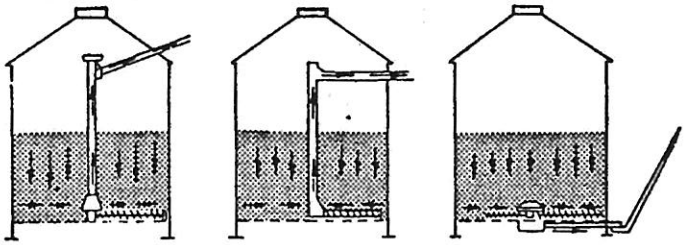


ภาพที่ 5 เครื่องอบแห้งแบบไหลตาม

2.3 เครื่องอบแห้งแบบไหลสวนทาง

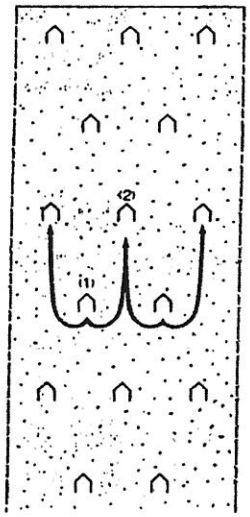
ในเครื่องอบแห้งแบบไหลสวนทาง การไหลของเมล็ดพืชและของอากาศอบแห้งขนานกัน แต่มีทิศทางตรงกันข้าม เมล็ดพืชจะไหลลงด้านล่าง และอากาศอบแห้งจะไหลขึ้นด้านบน เมล็ดพืชส่วนที่อยู่ล่างสุดจะแห้งที่สุด แต่จะไม่แห้งเกินไปเพราะจะถูกขนย้ายออกจากเครื่องอบแห้งก่อนที่จะแห้งเกินกว่าที่ต้องการ อัตราการขนย้ายเมล็ดพืชถูกควบคุมด้วยตัวควบคุมอุณหภูมิหรือความชื้นเมล็ดพืชซึ่งติดตั้งอยู่เหนือพื้นเครื่องอบแห้ง เมล็ดพืชที่ขนย้ายออกไปแล้วจะถูกทำให้เย็นลงในภายหลัง ภาพที่ 6 แสดงเครื่องอบแห้งแบบไหลสวนทาง

เครื่องอบแห้งแบบไหลสวนทางมีข้อดีคือ การใช้ความร้อนสัมผัสในอากาศอบแห้งเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ เนื่องจากเมล็ดพืชที่อยู่ชั้นล่างไม่แห้งเกินไปและอากาศอบแห้งตรงทางออกจะสัมผัสกับเมล็ดพืชส่วนที่ชื้นที่สุด ทำให้อุณหภูมิของอากาศอบแห้งตรงทางออกต่ำ ปัญหาที่อาจเกิดขึ้นคือ การควบแน่นของน้ำที่ใกล้ทางออกของเครื่องอบแห้ง ซึ่งเป็นผลมาจากการที่อากาศที่อิ่มตัวด้วยไอน้ำสัมผัสกับเมล็ดพืชที่ชื้นอยู่ด้านบนซึ่งมีอุณหภูมิต่ำกว่า ปัญหานี้อาจหลีกเลี่ยงได้โดยการเลือกอัตราการไหลของอากาศอบแห้งให้เหมาะสมกับความหนาของชั้นเมล็ดพืช แม้ว่าเครื่องอบแห้งแบบนี้จะมีประสิทธิภาพสูง แต่ก็ต้องการอุปกรณ์ขนย้ายเมล็ดพืชออกจากเครื่องอบแห้งที่ค่อนข้างยุ่งยากและมีราคาแพง



ภาพที่ 6 เครื่องอบแห้งแบบไหลสวนทาง

นอกจากการแบ่งเครื่องอบแห้งแบบเมล็ดพืชไหลตามลักษณะการไหลของเมล็ดพืชและกระแสอากาศแล้ว เราอาจแบ่งตามลักษณะการผสมกันของเมล็ดพืชชื้นและเมล็ดพืชแห้งในขณะที่ไหล ภาพที่ 7 แสดงภาพตัดของเครื่องอบแห้งที่มีการผสมกันของเมล็ดพืชโดยทั่วไปมักเรียกกันว่า เครื่องอบแห้งแบบ LSU ซึ่งเป็นชื่อย่อของ Luisiana State University ซึ่งเป็นผู้คิดค้น การผสมกันของเมล็ดพืชจะเกิดขึ้นในขณะที่ไหลผ่านท่ออากาศร้อนหรือเย็น ทำให้ปัญหาเรื่องเกรเดียนท์ความชื้นในชั้นเมล็ดพืชลดลงอย่างมาก



ภาพที่ 7 ภาพตัดของเครื่องอบแห้งแบบที่มีการผสมกันของเมล็ดพืช

เนื่องจากความยุ่งยากที่เพิ่มขึ้นของเครื่องอบแห้งเมล็ดพืชแบบไหล ดังนั้นจึงควรมีหลักการจัดการซึ่งสามารถสรุปได้ดังนี้

1. ควรมีการตรวจสอบความชื้นเมล็ดพืชหลังอบแห้งอย่างสม่ำเสมอว่าได้ตามที่ต้องการหรือไม่ เพื่อที่จะได้ทราบว่าตัวควบคุมอุณหภูมิหรือความชื้นเมล็ดพืชทำงานตามปกติหรือไม่
2. อุณหภูมิอากาศตรงทางออกของเครื่องอบแห้งควรได้รับการตรวจสอบเป็นครั้งคราว เพื่อที่จะได้ทราบว่าการไหลของอากาศอบแห้งเป็นไปอย่างทั่วถึงหรือไม่
3. ควรทำความสะอาดห้องอุ่นอากาศร้อนอย่างสม่ำเสมอ
4. ควรตรวจสอบตัวควบคุมการไหลของเมล็ดพืชอย่างสม่ำเสมอ เพื่อดูว่ามีการอุดตันของสิ่งสกปรกหรือไม่

นอกจากเครื่องอบแห้งแบบเมล็ดพืชไหลตามที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น ยังมีเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิไดเซชั่นและเครื่องอบแห้งแบบโรตารี่ซึ่งใช้กันมากในอุตสาหกรรมและสามารถประยุกต์ใช้กับการอบแห้งเมล็ดพืชได้

เครื่องอบแห้งอาหารและวัสดุเกษตรอื่น

สำหรับเครื่องอบแห้งอาหารและวัสดุเกษตรอื่นๆ นั้นมีเทคนิคในการอบแห้งหลายแบบทั้งนี้ในการเลือกใช้ ควรดูให้เหมาะสมกับผลิตภัณฑ์ที่เราต้องการนำมาอบแห้ง

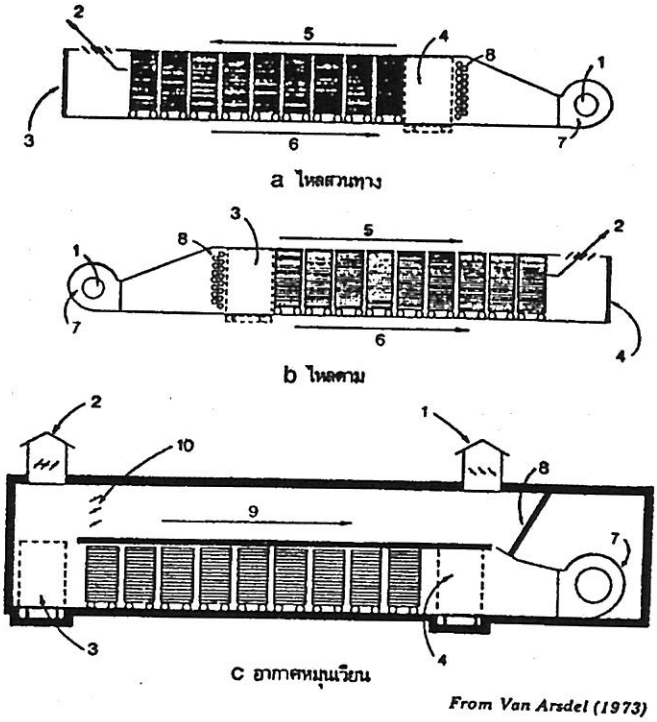
1. เครื่องอบแห้งแบบถาดอยู่กับที่ (fixed-tray dryer)

เครื่องอบแห้งแบบถาดอยู่กับที่เหมาะกับอาหารที่อยู่ในรูปของของแข็งที่ไม่สามารถอบแห้งแบบกองรวมกันเป็นปริมาณมาก (bulk drying) เครื่องอบแห้งแบบนี้แบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ เครื่องอบแห้งแบบอุโมงค์ (tunnel dryer) และเครื่องอบแห้งแบบตู้ (cabinet dryer) ผลิตภัณฑ์ที่ต้องการอบแห้งเรียงอยู่บนถาดซึ่งวางซ้อนกันโดยมีช่องว่างของอากาศระหว่างถาด ถาดดังกล่าวมีขนาดประมาณ 1 m ×1 m และวางอยู่บนรถเข็นซึ่งสูงประมาณ 1-1.5 m เพื่อให้คนจับและยกถาดได้สะดวก

1.1 เครื่องอบแห้งแบบอุโมงค์

รถเข็นที่บรรจุถาดใส่ผลิตภัณฑ์อบแห้งอยู่เต็มเคลื่อนที่เข้าอุโมงค์อบแห้งที่ปลายด้านหนึ่งของเครื่องอบแห้ง (ทางเข้า) จำนวนรถเข็นในอุโมงค์ขึ้นอยู่กับขนาดของรถเข็นและความยาวของอุโมงค์ ลมร้อนไหลผ่านช่องว่างของอากาศระหว่างถาดและทำให้ผลิตภัณฑ์แห้ง เมื่อผลิตภัณฑ์บนรถเข็นแห้งดีแล้วจะเคลื่อนที่

ออกที่ปลายด้านตรงข้าม (ทางออก) และรถเข็นที่บรรจุอาหารเปียกจะเคลื่อนที่เข้าแทนที่ที่ทางเข้า และดันขบวนรถเข็นในเคลื่อนที่ไปข้างหน้า ดังนั้นจำนวนรถเข็นในอุโมงค์จะคงที่ตลอดเวลา อัตราการนำรถเข็นเข้าและออกสอดคล้องกับอัตราการอบแห้ง (ดูภาพที่ 8) เครื่องอบแห้งแบบอุโมงค์อาจแบ่งตามทิศทางการเคลื่อนที่ของลมร้อนและรถเข็นได้เป็น 2 ชนิด คือ เครื่องอบแห้งแบบไหลสวนทางและเครื่องอบแห้งแบบไหลตาม



ภาพที่ 8 เครื่องอบแห้งแบบอุโมงค์

สำหรับเครื่องอบแห้งแบบไหลสวนทาง (ภาพที่ 8 a) รถเข็นและลมร้อนมีทิศทางตรงกันข้าม ดังนั้นอาหารบนรถเข็นใกล้ทางออกจะสัมผัสกับอากาศที่ร้อนที่สุด ส่วนอาหารบนรถเข็นตรงทางเข้าจะสัมผัสกับอากาศที่มีอุณหภูมิต่ำแล้ว ทำให้การใช้ความร้อนสัมผัสในอากาศเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ เนื่องจากผลิตภัณฑ์ที่แห้งแล้วจะสัมผัสกับอากาศที่มีอุณหภูมิสูง ดังนั้นอาจทำให้คุณภาพของอาหารลดลงได้

สำหรับเครื่องอบแห้งแบบไหลตาม (ภาพที่ 8 b) รถเข็นและลมร้อนมีทิศทางตามกัน ผลิตภัณฑ์ที่แห้งแล้วสัมผัสกับอากาศที่มีอุณหภูมิต่ำ และผลิตภัณฑ์ที่ยังเปียกอยู่สัมผัสกับอากาศที่มีอุณหภูมิสูง ดังนั้นจึงมักไม่ค่อยมีปัญหาด้านคุณภาพของอาหารหลังอบแห้ง แต่การสิ้นเปลืองความร้อนอาจสูงกว่าของเครื่องอบแห้งแบบไหลสวนทาง

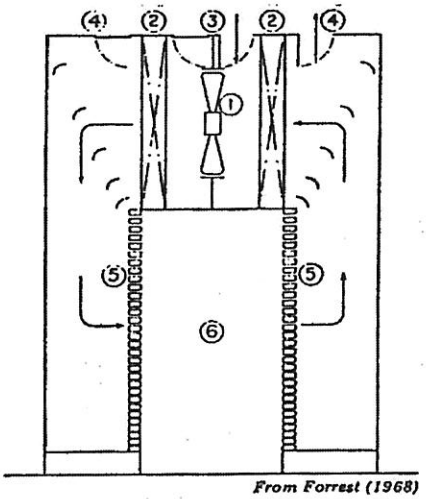
ภาพที่ 8 c แสดงแบบเครื่องอบแห้งแบบไหลสวนทาง ดังเช่นในภาพที่ 8 a แต่เพิ่มการนำเอาอากาศที่ใช้อบแห้งแล้วมาผสมกับอากาศใหม่ เครื่องอบแห้งแบบนี้อาจมีขนาดสั้นกว่าเครื่องอบแห้งในภาพที่ 8 a และ b เพราะไม่ต้องกลัวว่าอากาศหลังอบแห้งแล้วจะยังมีอุณหภูมิสูงอยู่ ซึ่งจะทำให้สิ้นเปลืองพลังงานมาก

ปัญหาสำคัญในเครื่องอบแห้งแบบอุโมงค์คือการกระจายของลมร้อนในอุโมงค์มักจะไม่ทั่วถึง ทำให้ผลิตภัณฑ์บางจุดแห้งเกินไปหรือชื้นเกินไป ดังนั้นอาจต้องมีตัวช่วยบังคับทิศทางลม เช่น เวนบังคับทิศทางลม หรือบานเกล็ดซึ่งปรับค่าช่องเปิดได้ ทั้งนี้เพื่อให้การกระจายลมร้อนเป็นไปอย่างทั่วถึงตลอดพื้นที่หน้าตัดขวางของอุโมงค์ ในกรณีของบานเกล็ดอาจมีปัญหาในเรื่องของความปั่นป่วน การออกแบบเวนบังคับทิศทางลมที่เหมาะสมจะช่วยในเรื่องของการกระจายของลมได้ดีกว่า

1.2 เครื่องอบแห้งแบบตู้

เครื่องอบแห้งแบบนี้คล้ายกับเครื่องอบแห้งแบบอุโมงค์ ผลิตภัณฑ์วางอยู่บนถาดซึ่งซ้อนกันอยู่ ลมร้อนไหลผ่านผลิตภัณฑ์และทำให้แห้ง ภาพที่ 9 แสดงลักษณะของเครื่องอบแห้งแบบตู้ซึ่งการไหลของอากาศขนานกับถาดบรรจุผลิตภัณฑ์ ทิศทางการไหลของอากาศสามารถกลับทางได้ อากาศแวดล้อมไหลเข้าทางช่อง 2 และผสมกับอากาศที่ใช้อบแห้งแล้ว ไหลผ่านขดลวดความร้อนเพื่ออุ่นอากาศให้ร้อนขึ้น ก่อนไหลผ่านถาดบรรจุผลิตภัณฑ์อบแห้ง อากาศที่ใช้อบแห้งแล้วไหลออกที่ช่อง 4 เป็นบางส่วน และบางส่วนไหลไปผสมกับอากาศแวดล้อม การไหลของอากาศอาจตั้งฉากกับตัวถาด เมื่อผลิตภัณฑ์แห้งตามที่ต้องการแล้วก็จะถูกนำออก และใส่ผลิตภัณฑ์ชื้นเข้าไปใหม่

ปัญหาของเครื่องอบแห้งแบบนี้อยู่ที่การกระจายของลมร้อนซึ่งมักจะไม่ทั่วถึง ทำให้ผลิตภัณฑ์ที่จุดต่างๆ แห้งไม่เท่ากัน อาจแก้ได้โดยการใช้เวนบังคับทิศทางลม ปัญหาอีกข้อหนึ่งคือผลิตภัณฑ์ที่ตรงทางเข้าของลมร้อนจะแห้งมากกว่าผลิตภัณฑ์ที่อยู่ตรงทางออก ซึ่งอาจแก้ได้โดยการกลับทิศทางการไหลของลมร้อน

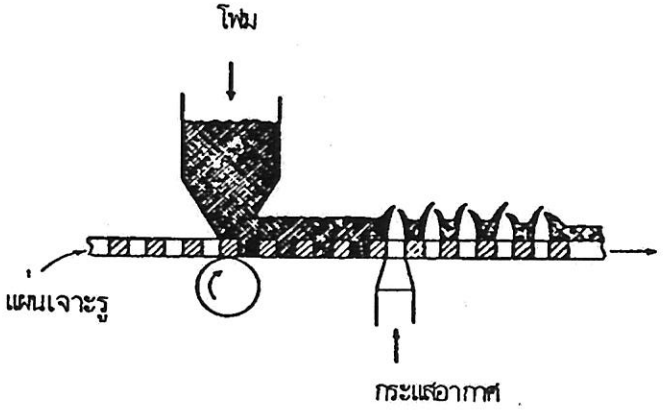


ภาพที่ 9 เครื่องอบแห้งแบบตู้

2. เครื่องอบแห้งแบบชั้นอบแห้งเคลื่อนที่ (moving-bed dryer)

ตัวอย่างอันหนึ่งของเครื่องอบแห้งแบบนี้คือ การอบแห้งโดยใช้สายพาน ชั้นของวัสดุที่ต้องการอบแห้งอยู่บนสายพานซึ่งเคลื่อนที่และมีรูให้อากาศผ่านได้ อากาศที่ใช้อบแห้งมีทิศทางไปด้านบนหรือด้านล่าง ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับวัสดุอบแห้ง ในบางครั้งอาจมีการกลับทิศทางลมร้อนเป็นช่วงเวลาเพื่อให้การอบแห้งเป็นไปอย่างทั่วถึง สภาวะของอากาศอาจเปลี่ยนแปลงไปตามระยะทางของสายพาน เช่นตอนต้นของสายพานวัสดุอบแห้งยังมีความชื้นสูงอยู่ก็ใช้ลมร้อนซึ่งมีอุณหภูมิสูง ส่วนตอนปลายของสายพานก็ใช้ลมร้อนซึ่งมีอุณหภูมิต่ำกว่าเพราะวัสดุอบแห้งมีความชื้นลดลงใกล้ถึงจุดที่ต้องการแล้ว การอบแห้งแบบสายพานนี้มีข้อเสียที่ว่าไม่สามารถอบแห้งวัสดุให้มีความชื้นต่ำกว่า 10 % wb ได้โดยประหยัด โดยทั่วไปเมื่อวัสดุมีความชื้นเหลือประมาณ 27% wb หรือต่ำกว่า ก็จะถูกถ่ายไปยังเครื่องอบแห้งตัวที่สอง เช่น เครื่องอบแห้งแบบถังหรือถังเก็บเพื่อลดความชื้นต่อไป

เครื่องอบแห้งแบบนี้สามารถใช้กับวัสดุในรูปของเหลว ซึ่งได้มีการทำให้คงตัวให้รูปของโฟมโดยการอัดอากาศหรือก๊าซอื่นและใส่สารเพิ่มเติมบางอย่าง โดยป้อนเข้าสายพานซึ่งมีรูแล้วผ่านลมร้อนไปตามรูเหล่านั้นดังภาพที่ 10 ชั้นของโฟมโดยทั่วไปมีความหนาประมาณ 3 มิลลิเมตร ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการอบแห้งโดยวิธีนี้จะมีโครงสร้างที่โปร่งพรุน สามารถนำกลับไปผสมกับน้ำเพื่อให้กลับคืนรูปได้อย่างรวดเร็ว ดังนั้นจึงเหมาะกับพวกน้ำผลไม้แห้งเป็นต้น นอกจากผลิตภัณฑ์พวกโฟมแล้ว เครื่องอบแห้งแบบสายพานยังใช้ได้กับผลิตภัณฑ์อื่นๆ ด้วย



ภาพที่ 10 เครื่องอบแห้งแบบสายพานโดยมีผลิตภัณฑ์อยู่ในรูปของโฟม

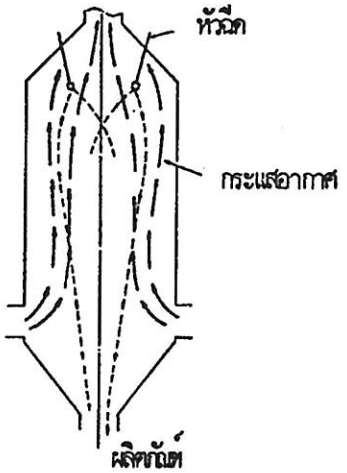
3. เครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย

เครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยเหมาะสำหรับวัสดุซึ่งอยู่ในรูปของของเหลว เมื่ออบแห้งแล้วผลิตภัณฑ์จะอยู่ในรูปของแข็งเม็ดเล็กๆ เช่น นมผง ไข่ผง กาแฟ เป็นต้น เนื่องจากช่วงเวลาในการอบแห้งในเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยสั้นมาก อาจประมาณ 3-10 วินาที ดังนั้นจึงเหมาะกับอาหารซึ่งคุณภาพสามารถ

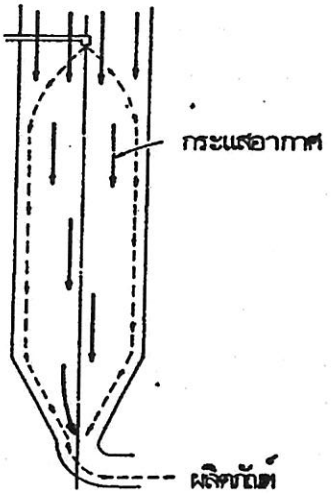
เปลี่ยนแปลงได้ง่ายเมื่อใช้อุณหภูมิอบแห้งสูง ระยะเวลาในการอบแห้งที่สั้นมากเป็นผลมาจากการทำให้อาหารเหลวเป็นละอองโดยใช้เครื่องทำละลอง (atomizer) ทำให้มีพื้นที่ผิวสำหรับการถ่ายเทความร้อนมาก เครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 แบบ คือ แบบไหลสวนทางและแบบไหลตามดังแสดงในภาพที่ 11 และภาพที่ 12 ข้อดีของเครื่องอบแห้งแบบไหลสวนทางคือการใช้ความร้อนเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ แต่ก็มีข้อเสียคือคุณภาพของผลิตภัณฑ์หลังการอบแห้งอาจจะไม่ดีนัก เนื่องจากผลิตภัณฑ์ส่วนที่แห้งแล้วจะสัมผัสกับอากาศซึ่งร้อนจัด นอกจากนี้อัตราการไหลของอากาศต้องไม่สูงมากนัก เพื่อป้องกันการพัดพาเอาอาหารซึ่งแห้งแล้วออกจากเครื่องอบแห้ง

สำหรับเครื่องอบแห้งแบบไหลตามมีข้อดีตรงที่ว่าคุณภาพของผลิตภัณฑ์หลังอบแห้งสูง แต่การใช้ประโยชน์ของลมร้อนอาจไม่ค่อยมีประสิทธิภาพมากนัก ในเครื่องอบแห้งแบบไหลตามความเร็วลมจะมีค่าระหว่าง 2.1-3 m/s

เครื่องทำละอองทำหน้าที่ผลิตหยดของเหลวเล็ก ๆ สามารถแบ่งได้เป็น 3 แบบ คือ แบบหัวฉีดความดัน (pressure nozzles) แบบของไหลสองชนิด (two-fluid atomizers) และแบบจานหมุน (rotary atomizers) เครื่องทำละอองแบบหัวฉีดความดันทำงานโดยอาศัยความดันสูงอัดของเหลวให้ผ่านรูเล็กๆ ส่วนแบบของไหลสองชนิดทำงานโดยอาศัยกระแสอากาศความเร็วสูงวิ่งเข้ากระทบของเหลว ทำให้ของเหลวแตกกระจายออกเป็นหยดเล็กๆ ส่วนแบบจานหมุนทำงานโดยอาศัยแรงเหวี่ยงซึ่งเกิดจากจานหมุนความเร็วสูงทำให้ของเหลวเหวี่ยงกระจายออกไปเป็นหยดเล็กๆ จำนวนมาก แบบจานหมุนมีข้อดี คือสามารถใช้กับผลิตภัณฑ์ที่อาจอุดตันในกรณีของหัวฉีดความดัน หน้าที่อีกอย่างหนึ่งของเครื่องทำละอองคือเป็นตัวควบคุมอัตราการไหลของผลิตภัณฑ์เหลว



ภาพที่ 11 เครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยแบบไหลสวนทาง

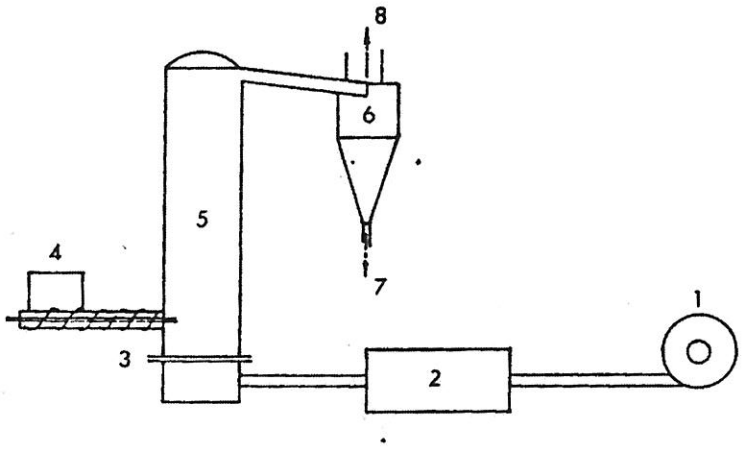


ภาพที่ 12 เครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยแบบไหลตาม

4. เครื่องอบแห้งแบบฟลูอิไดซ์เบด (fluidized bed dryer)

เครื่องอบแห้งแบบนี้ วัสดุอบแห้งอยู่ในลักษณะของแข็งชิ้นเล็กๆ ลมร้อนถูกเป่าด้วยความเร็วสูงพอที่จะเอาชนะแรงโน้มถ่วงของวัสดุ และทำให้วัสดุลอยตัวอยู่ในอากาศได้ ทำให้มีคุณลักษณะเหมือนของไหล ความเร็วลมที่นิยมใช้กันอยู่ในช่วง 100-200 m/min ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความหนาแน่น ขนาดและรูปทรงของวัสดุ ภาพที่ 13 แสดงเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิไดซ์เบด ซึ่ง พัดลม (1) เป่าอากาศผ่านตัวทำอากาศร้อน (2) และไหลผ่านแผ่นตะแกรง (3) วัสดุไหลเข้าเครื่องโดยเกลียวลำเลียง (4) และปะทะกับกระแสอากาศทำให้แขวนลอยอยู่ในห้องอบแห้ง (5) วัสดุที่แห้งแล้วจะเบาขึ้น ทำให้ลอยได้สูงขึ้น และไหลไปที่เครื่องแยกคัดแบบไซโคลน (6) โดยอากาศชื้นออกทางด้านบน (8) และวัสดุที่แห้งแล้วถูกรวบรวมที่ (7)

สมเกียรติและสมชาติ (2535) ได้ศึกษาการอบแห้งข้าวเปลือกโดยวิธีฟลูอิไดเซชั่นแบบกะ โดยพัฒนาสมการการอบแห้งของข้าวเปลือกในฟลูอิไดซ์เบด ซึ่งพบว่าอัตราส่วนความชื้นของข้าวเปลือกในเบดเปลี่ยนแปลงตามเวลา โดยขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศก่อนไหลเข้าเบด และอัตราการไหลจำเพาะของอากาศ (อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศแห้งต่อมวลแห้งของข้าวเปลือกในเบด) ซึ่งผลจากการทดลองสรุปว่าอุณหภูมิของอากาศก่อนเข้าเบดไม่ควรสูงกว่า 115 °C เพราะจะทำให้ข้าวสารเริ่มเหลืองและถ้าสูงถึง 150 °C จะเกิด gelatinization effect ด้วย เพื่อหลีกเลี่ยงไม่ให้ข้าวแตกหักมาก ควรจำกัดไม่ให้ความชื้นสุดท้ายของข้าวเปลือกต่ำกว่า 19 %wb



ภาพที่ 13 เครื่องอบแห้งแบบฟลูอิไดซ์เบด

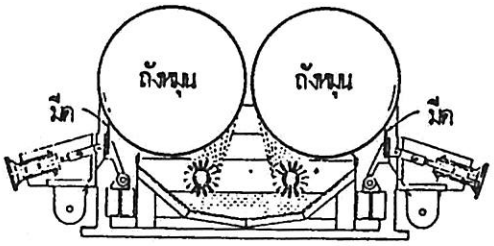
5. เครื่องอบแห้งแบบโรตารี่ (rotary dryer)

เครื่องอบแห้งแบบโรตารี่ใช้กับวัสดุเป็นชิ้น หรือพวกเมล็ดพืชที่มีความชื้นสูง ตัวเครื่องอบแห้งทำด้วยถังทรงกระบอกหมุน วางเอียงกับแนวราบเล็กน้อย วัสดุไหลเข้าทางปลายด้านสูงและไหลออกที่ปลายด้านต่ำของถัง ภายในตัวถังจะมีแผ่นครีบทำหน้าที่ตักวัสดุจากด้านล่างของถังขึ้นสู่ด้านบน แล้วไหลตกลงมาโดยแรงโน้มถ่วง พร้อมๆ กับเคลื่อนที่ไปข้างหน้าด้วย ในขณะเดียวกันลมร้อนจะไหลเข้าภายในถังเพื่อทำหน้าที่ลดความชื้นจากตัววัสดุ เนื่องจากวัสดุแขวนลอยอยู่ในอากาศขณะที่ไหลตกลงมา ทำให้การถ่ายเทความร้อนและความชื้นเป็นไปอย่างรวดเร็ว นอกจากแผ่นครีบที่ทำหน้าที่ตักวัสดุแล้ว ยังอาจมีแผ่นครีบที่ทำหน้าที่เป็นทางเกลียวบังคับให้วัสดุเคลื่อนที่ไปข้างหน้าด้วย

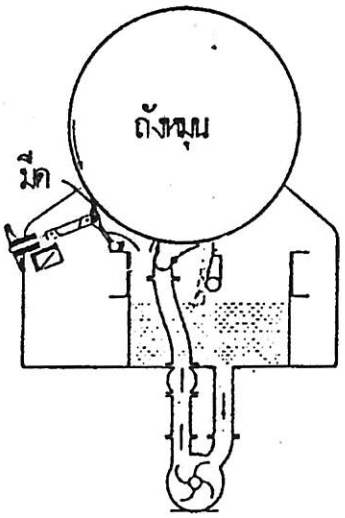
6. เครื่องอบแห้งแบบถังทรงกระบอกหมุน (drum dryer)

ถังทรงกระบอกหมุนรอบแกนนอนสามารถนำมาใช้ในการอบแห้งวัสดุในรูปของเหลวแบบต่อเนื่องได้ วัสดุจะแห้งในขณะที่แนบติดอยู่กับผิวของถังซึ่งได้รับการถ่ายเทความร้อนมาจากแหล่งความร้อน โดยทั่วไปนิยมใช้ไอน้ำ วัสดุที่แห้งแล้วจะถูกขูดออกโดยใบมีด ถังอาจมีเพียงใบเดียวหรือหลายใบ (ภาพที่ 14)

เครื่องอบแห้งแบบถังหมุนเหมาะกับการอบแห้งผลิตภัณฑ์เหลวที่ไม่ห่วงเรื่องคุณภาพมากนัก เพราะเครื่องอบแห้งแบบนี้มีข้อเสีย คือทำให้คุณภาพของผลิตภัณฑ์เสียหายอันเนื่องมาจากความร้อนสูง นอกจากนี้ผลิตภัณฑ์หลังอบแห้งยังอาจมีลักษณะเป็นแผ่นบางคล้ายแก้ว มีความหนาแน่นสูง จึงทำให้กลับคืนรูปได้ยากเมื่อผสมกับน้ำ แต่ก็มีข้อดีคือ ค่าใช้จ่ายต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องอบแห้งอาหารเหลวอื่นๆ



แบบถังคู่



แบบถังเดี่ยว

ภาพที่ 14 เครื่องอบแห้งแบบถังหมุน

นอกจากการอบแห้งโดยวิธีต่างๆ ตามที่ได้กล่าวมาแล้ว ยังมีเทคนิคการอบแห้งแบบอื่นๆ เช่น การอบแห้งภายใต้สุญญากาศ (vacuum drying) การอบแห้งแบบพัฟ (puff drying) การอบแห้งแบบแช่แข็ง (freeze drying) การอบแห้งด้วยไมโครเวฟ (microwave drying) เป็นต้น เทคนิคการอบแห้งแบบต่างๆ ตามที่ได้กล่าวมานี้ใช้เงินลงทุนค่อนข้างสูงและมักให้คุณภาพของผลิตภัณฑ์หลังอบแห้งที่มีคุณภาพสูงเช่นกัน

บทที่ 8
หลักการออกแบบเครื่องอบแห้งทั่วไป

ในปัจจุบันเครื่องอบแห้งมีมากมายหลายชนิดทั้งที่ใช้ในระดับเกษตรกรรายย่อยจนไปถึงการอบแห้งในระดับอุตสาหกรรม โดยในการจำแนกประเภทของเครื่องอบแห้งนั้นสามารถจำแนกได้จากลักษณะการทำงานหรือวิธีที่ให้ความร้อนแก่เครื่องอบแห้งนั้นๆ โดยเริ่มแรกอาจจะแบ่งลักษณะของเครื่องอบแห้งเป็นแบบต่อเนื่องและ แบบกะ (batch) เครื่องอบแห้งแบบต่อเนื่องนั้นมักจะใช้ในกรณีที่อัตราการอบแห้งค่อนข้างสูงมากเป็นจำนวนหลายตันต่อชั่วโมง ส่วนแบบไม่ต่อเนื่องหรือแบบกะนั่นจะเหมาะกับการอบแห้งในอัตราที่น้อยกว่า 100 กิโลกรัมต่อวัน หรือในกรณีที่จำเป็นต้องทำการควบคุมแต่ละกะอย่างใกล้ชิด สำหรับการจำแนกเครื่องอบแห้งตามวิธีที่ให้ความร้อนนั้นสามารถจำแนกได้ดังนี้

1. เครื่องอบแห้งแบบพาความร้อน
2. เครื่องอบแห้งแบบการนำความร้อน
3. เครื่องอบแห้งแบบการแผ่รังสีความร้อน
4. เครื่องอบแห้งแบบ dielectric (เช่น แบบไมโครเวฟ)
5. เครื่องอบแห้งแบบผสมรวมชนิดต่างๆ

หลักการในการเลือกเครื่องอบแห้งนั้น จะขึ้นอยู่กับรูปลักษณ์และขนาดของวัสดุเปียก ปริมาณที่ต้องการอบแห้ง และเงื่อนไขในการอบแห้ง ดังนั้นต้องเริ่มต้นด้วยการพิจารณาสมบัติของวัสดุที่นำมาอบแห้ง และในตอนท้ายจึงจะทำการประมาณขนาดของเครื่องอบแห้ง ดังนั้นจึงเป็นเรื่องสำคัญที่จะต้องทราบข้อมูลต่างๆ ก่อนที่จะทำการพิจารณาเลือกประเภทของเครื่องอบแห้ง

ในบทนี้จะเป็นการแจกแจงถึงขั้นตอนในการเลือกประเภทของเครื่องอบแห้งและวิธีการประมาณขนาดของเครื่องอบแห้งแบบหยาบๆ ในกรณีที่การให้ความร้อนแก่วัสดุเป็นแบบการพาความร้อน (เครื่องอบแห้งแบบใช้ลมร้อน)

วิธีการเลือกประเภทของเครื่องอบแห้ง

ปัจจัยที่ควรคำนึงถึงในการเลือกประเภทของเครื่องอบแห้งมีดังนี้

1. สภาพและคุณสมบัติของวัสดุที่นำมาอบแห้ง

เป็นปัจจัยสำคัญที่ต้องคำนึงถึงว่าวัสดุที่นำมาทำการอบแห้งอยู่ในสภาพใด เป็นของแข็ง ของหนืด หรือของเหลว มีขนาดและรูปร่างเป็นอย่างไร การเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อนของวัสดุนั้น โดยการพิจารณาความไวต่อความร้อนของวัสดุ จะสามารถกำหนดอุณหภูมิสูงสุดที่ใช้ในการอบแห้งได้ และอุณหภูมินี้เองจะเป็นเงื่อนไขการออกแบบข้อแรกเกี่ยวกับอุณหภูมิของลมร้อน โดยทั่วไปแล้วระดับของความเสื่อมคุณภาพ

จะขึ้นกับอุณหภูมิของวัสดุขณะอบแห้ง และระยะเวลาในการอบแห้ง ในหลายกรณีที่การอบแห้งที่ใช้อุณหภูมิสูง แต่ใช้เวลาสั้น จะทำให้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพดีกว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำแต่ใช้เวลาการอบแห้งนาน

2. ลักษณะสมบัติของการอบแห้ง

เป็นเงื่อนไขหนึ่งที่จำเป็นต้องทราบ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเส้นลักษณะเฉพาะของการอบแห้ง ซึ่งมีความจำเป็นสำหรับการคำนวณหาเวลาที่ต้องใช้ในการอบแห้ง แต่ถ้าไม่สามารถหาเส้นกราฟนี้ได้ อย่างน้อยก็ต้องมีความรู้เกี่ยวกับอัตราส่วนความชื้นวิกฤต ทั้งนี้ค่าของอัตราส่วนความชื้นวิกฤตและเส้นลักษณะเฉพาะของการอบแห้งนั้น จะขึ้นอยู่กับลักษณะการสัมผัสระหว่างวัสดุกับลมร้อน ตลอดจนรูปทรงและขนาดของวัสดุอบแห้งเป็นอย่างมาก

3. ปัจจัยทางเศรษฐกิจ

ได้แก่ ค่าใช้จ่าย ความสามารถและการใช้งานของเครื่องอบแห้ง ว่าเหมาะสมหรือไม่กับวัสดุอบแห้ง คือ ผลิตภัณฑ์ที่นำมาจำหน่ายในราคาถูก เช่น กล้วยตาก ถ้าใช้เครื่องอบแห้งที่ต้องเสียค่าใช้จ่ายสูง จะไม่คุ้มทุนในการผลิต เป็นต้น

ปัจจัยในการออกแบบเครื่องอบแห้ง

ส่วนประกอบที่สำคัญของเครื่องอบแห้งมีดังนี้ ห้องอบแห้ง ระบบการกระจายลม แหล่งให้ความร้อน พัดลม ระบบควบคุม และระบบการขนถ่าย โดยปัจจัยที่สำคัญสำหรับการออกบแบบเครื่องอบแห้งประกอบด้วยดังนี้

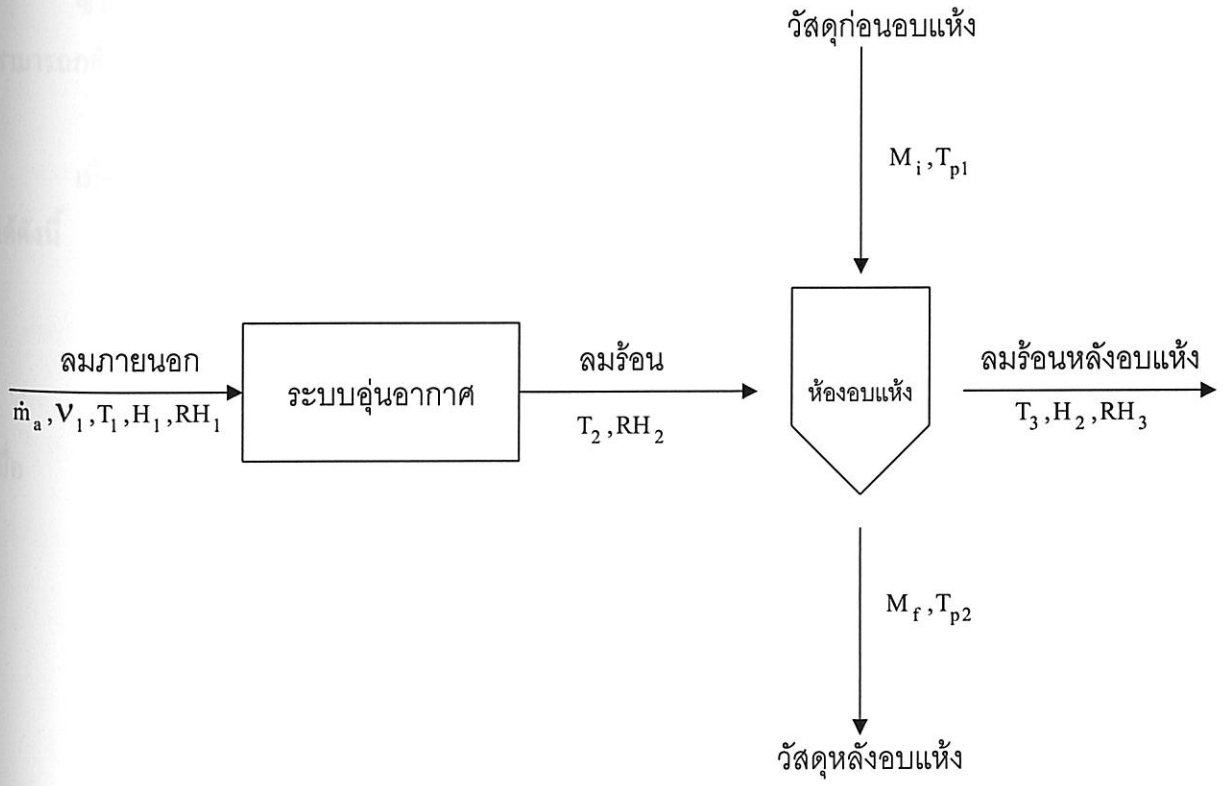
1. เครื่องอบแห้ง อันได้แก่
   - ขนาด ชนิด รูปทรงของห้องอบแห้ง
   - อัตราการป้อนวัสดุอบแห้ง
   - ระยะเวลาในการอบแห้ง
   - ระบบการกระจายลมร้อน
   - ความหนาของชั้นอบแห้ง
   -ระบบระบายความร้อน
2. ลมที่ใช้อบแห้ง ได้แก่
   - ความเร็วและปริมาณลมต่อมวลวัสดุอบแห้ง
   - อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของลมร้อน
   - ความดันสถิตของลมที่ใช้

- ค่าเฉลี่ยอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์อากาศภายนอก

3. วัสดุอบแห้ง
   - ความชื้นเริ่มต้นและความชื้นสุดท้ายของวัสดุอบแห้ง
   - ความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอของวัสดุอบแห้ง
4. ระบบให้ความร้อน
   - ชนิดของเชื้อเพลิง
   - ชนิดของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

การคำนวณหาปริมาณลม ความร้อนและเชื้อเพลิง สำหรับเครื่องอบแห้ง

ปริมาณลม ความร้อนที่ใช้ในการอบแห้งสามารถคำนวณได้จากการสมดุลความร้อน จากภาพที่ 1 หากกำหนดให้ระบบการอบแห้งแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ ส่วนในการสร้างลมร้อน คือระบบอุ่นอากาศ และส่วนของห้องอบแห้งจะสามารถคำนวณหาปริมาณความร้อนได้ดังนี้



ภาพที่ 1 ระบบการอบแห้งด้วยลมร้อนอย่างง่าย

พิจารณาที่ระบบอุ่นอากาศจะได้ว่าปริมาณความร้อนที่อากาศได้รับจากระบบอุ่นอากาศมีค่าเท่ากับผลต่างของเอนทาลปีของกระแสอากาศที่เข้าและออกจากระบบเขียนเป็นสมการได้ว่า

$$Q_a = \dot{m}_a (c_a + c_v H_1)(T_2 - T_1)t \qquad (1)$$

เมื่อ Q_a คือปริมาณความร้อนที่อากาศได้รับ (kJ)

$\dot{m}_a$ คือ อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศแห้ง ($kg_{dry\ air}$/h)

H_1 คือ อัตราส่วนความชื้นของอากาศ ($kg_{water}/kg_{dry\ air}$)

c_a คือ ความร้อนจำเพาะของอากาศแห้ง (kJ/$kg_{dry\ air}$ ^{O}C)

c_v คือ ความร้อนจำเพาะของไอน้ำ (kJ/kg_{water} ^{O}C)

T_1 คือ อุณหภูมิของอากาศก่อนเข้าเครื่องอุ่นอากาศ (°C)

T_2 คือ อุณหภูมิของอากาศออกจากเครื่องอุ่นอากาศ (°C)

t คือ เวลาที่ใช้ในการอบแห้ง (h)

ซึ่งอีกวิธีหนึ่งในการหาปริมาณความร้อนของเครื่องอุ่นอากาศก็คือการใช้ Psychrometrics โดยนักศึกษาสามารถกลับไปทบทวนในเรื่องกระบวนการอุ่นอากาศบน Psychrometrics chart ในบทที่ 2 ได้

เมื่อทำการพิจารณาที่ห้องอบแห้งเราจะสามารถหาค่าปริมาณความร้อนที่ใช้ในการระเหยน้ำออกจากวัสดุได้ดังนี้

$$Q_{evap} = W_d (M_i - M_f) h_{fg} \qquad (2)$$

เมื่อ Q_{evap} คือ ปริมาณความร้อนที่ใช้ในการระเหยน้ำ (kJ)

W_d คือ มวลแห้งของวัสดุ (kg)

M_i คือ ความชื้นวัสดุก่อนอบแห้งมาตรฐานแห้ง (เศษส่วน)

M_f คือ ความชื้นวัสดุหลังอบแห้งมาตรฐานแห้ง (เศษส่วน)

h_{fg} คือ ค่าความร้อนแฝงของน้ำ (kJ/kg)

ในการอบแห้งนั้นความร้อนจากอากาศไม่ได้ใช้เพื่อในการระเหยน้ำออกจากวัสดุเท่านั้น แต่ความร้อนส่วนหนึ่งซึ่งเป็นความร้อนสัมผัสจะทำให้อุณหภูมิของเมล็ดพืชมีอุณหภูมิสูงขึ้นจากอุณหภูมิเริ่มต้นไปสู่อุณหภูมิสุดท้ายที่ออกจากเครื่องอบแห้ง โดยปริมาณความร้อนนี้หาได้จาก

$$Q_s = W_d C_{pd}(T_{p2} - T_{p1}) + W_d C_{pw}(T_{p2} - T_{p1})M_i$$

เมื่อ Q_s คือปริมาณความร้อนที่ใช้ในการเพิ่มอุณหภูมิวัสดุ (kJ)

C_{pd} คือ ความร้อนจำเพาะของวัสดุแห้ง (kJ/kg °C)

C_{pw} คือ ความร้อนจำเพาะของน้ำ (kJ/kg °C)

T_{p1} คือ อุณหภูมิวัสดุก่อนอบแห้ง (°C)

T_{p2} คือ อุณหภูมิวัสดุหลังอบแห้ง (°C)

ดังนั้น

$$Q_a = Q_{evap} + Q_s$$

หรือ

$$\dot{m}_a(C_a + C_v H_1)(T_2 - T_1)t = W_d(M_i - M_f)h_{fg} + \{W_d C_{pd}(T_{p2} - Tp1) + W_d C_{pw}(T_{p2} - T_{p1})M_i$$

$$\dot{m}_a = \frac{W_d(M_i - M_f)h_{fg} + \{W_d C_{pd}(T_{p2} - T_{p1}) + W_d C_{pw}(T_{p2} - T_{p1})M_i}{(C_a + C_v H_1)(T_2 - T_1)t} \qquad (3)$$

สมการ (3) จะช่วยให้เราหาอัตราการไหลของอากาศที่เหมาะสมกับการอบแห้งได้ และจากอัตราการไหลอากาศที่ได้นี้ จะนำไปสู่การคำนวณหาขนาดของพัดลมที่เหมาะสมต่อไป

ในเครื่องอบแห้งที่ใช้เชื้อเพลิงเป็นแหล่งให้พลังงานความร้อนเราสามารถคำนวณหาค่าปริมาณเชื้อเพลิงที่ต้องการใช้ได้ดังนี้

$$f = \frac{\dot{Q}_a}{\eta \eta_{ex} C_f} \quad (4)$$

เมื่อ f คือ อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง (kg/h)

η คือ ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของระบบให้ความร้อน (ตัวอย่างเช่น เตาเผา หม้อไอน้ำ)

η_{ex} คือ ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

C_f คือ ค่าความร้อนของเชื้อเพลิง (kJ/kg)

อุณหภูมิลมร้อนที่ใช้อบแห้ง

อุณหภูมิลมร้อนที่ใช้เป็นสิ่งสำคัญที่มีผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการอบแห้ง อุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งจะขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุที่เรานำมาอบแห้ง สภาวะความชื้น และการนำไปใช้ประโยชน์ เช่นในการอบแห้งเมล็ดพืช มีวัตถุประสงค์ในการใช้ประโยชน์ต่างกัน เช่น นำไปเป็นอาหารสัตว์ อาหารคน หรือใช้สำหรับเป็นเมล็ดพันธุ์เป็นต้น

ปัจจัยเกี่ยวกับวัสดุอบแห้ง

ปัจจัยเกี่ยวกับวัสดุอบแห้งที่มีผลต่ออัตราการอบแห้ง มีดังนี้

ก) ชนิด และลักษณะเฉพาะของวัสดุที่นำมาอบแห้ง เช่น วัสดุที่นำมาอบแห้ง เป็นผัก ผลไม้ หรืออาหารที่มีความไวต่อความเสียหายต่อความร้อน มากน้อยเพียงใด ลักษณะรูปร่าง โครงสร้างที่เอื้อประโยชน์ต่อการอบแห้ง เป็นเป็น

ข) ความชื้นเริ่มต้น ความชื้นสุดท้าย และความชื้นสมดุลของวัสดุที่นำมาอบแห้ง

ค) องค์ประกอบทางเคมี หากวัสดุอบแห้งที่เป็นพวกสมุนไพร ซึ่งมีส่วนประกอบทางเคมีน้ำมันหอมระเหย อาจจะต้องพิจารณาเลือกการอบแห้งที่ใช้อุณหภูมิต่ำ

ปัจจัยที่กล่าวมานี้มีผลต่อการออกแบบเครื่องอบแห้ง ข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับคุณสมบัติทางกายภาพ เช่น ความหนาแน่นรวม มุมกอง ความพรุน คุณสมบัติการไหล คุณสมบัติทางอากาศพลศาสตร์ และสมบัติทางความร้อน ล้วนเป็นสิ่งจำเป็นในการออกแบบ และต้องนำมาใช้ประกอบการพิจารณาในการออกแบบ

รูปแบบของกระแสและการกระจายลม

สำหรับเครื่องอบแห้งแบบต่อเนื่องมีรูปแบบของกระแสลมไหลผ่านวัสดุได้ 3 รูปแบบคือ ไหลขวาง ไหลตาม และไหลสวนทาง กับการไหลของวัสดุอบแห้ง การกระจายของลมร้อนที่สม่ำเสมอจะช่วยให้การอบแห้งเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ ในการออกแบบเครื่องอบแห้งจึงต้องพิจารณาในส่วนนี้ด้วย

ระบบขนถ่าย

ในการอบแห้งวัสดุอย่างต่อเนื่อง เช่นการอบแห้งเมล็ดพืช จำเป็นต้องมีระบบขนถ่ายเข้ามาเกี่ยวข้องกับระบบการอบแห้งด้วย โดยระบบขนถ่ายจะใช้สำหรับลำเลียงวัสดุอบแห้งเข้า ออก ห้องอบแห้ง อุปกรณ์ดังกล่าว อาจได้แก่ กระพ้อลำเลียง สกรูลำเลียง สายพานลำเลียง เป็นต้น

ระบบการให้ความร้อนแก่อากาศ

ในการให้ความร้อนแก่อากาศ อาจใช้ พลังงานแสงอาทิตย์ ก๊าซอหรือเชื้อเพลิงเหลวเป็นเชื้อเพลิงในการเผาให้ความร้อนแก่อากาศ หรืออาจจะใช้ขดลวดไฟฟ้า เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน หรือในระบบการอบแห้งเมล็ดพืช ได้มีการนำเอาวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร เช่น แกลบ ซังข้าวโพด มาใช้กับเตาให้ความร้อนซึ่งเป็นทางเลือกหนึ่งที่สามารถลดต้นทุนการอบแห้งได้

การประเมินประสิทธิภาพของเครื่องอบแห้ง

ประสิทธิภาพของเครื่องอบแห้งนั้นจะพิจารณาจากสองส่วนคือ ประสิทธิภาพเชิงความร้อนและประสิทธิภาพในการอบแห้ง

ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของการอบแห้ง

ประสิทธิภาพเชิงความร้อนเป็นค่าอัตราส่วนระหว่างค่าความร้อนที่ใช้ในการระเหยน้ำออกจากวัสดุต่อปริมาณความร้อนที่ให้แก่เครื่องอบแห้ง

$$\eta_{dry} = \frac{Q_{evap}}{Q_a} \times 100 \qquad (5)$$

หรือ

$$\eta'_{dry} = \frac{Q_{evap} + Q_s}{Q_a} \times 100 \qquad (6)$$

นอกจากนี้ยังสามารถบอกประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเครื่องอบแห้งได้ในรูปของค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (Specific Energy Consumption, SEC) ซึ่งเป็นค่าพลังงานที่ใช้ต่อปริมาณน้ำที่ระเหยน้ำ ซึ่งหาได้จาก

$$SEC = \frac{Q_a}{W_i - W_f} \tag{7}$$

ประสิทธิภาพในการอบแห้ง

ในการพิจารณาประสิทธิภาพในการอบแห้งจะประเมินจากค่าอัตราการอบแห้ง (Drying Rate, DR) ซึ่งสามารถคิดได้จากปริมาณน้ำที่ระเหยออกจากวัสดุต่อระยะเวลาในการอบแห้ง หรือปริมาณความชื้นต่อระยะเวลาในการอบแห้ง คือ

$$DR = \frac{W_i - W_f}{t} \tag{8}$$

$$DR = \frac{M_i - M_f}{t} \tag{9}$$

เมื่อ η_{dry} คือ ประสิทธิภาพของการอบแห้ง (%)

η'_{dry} คือ ประสิทธิภาพของการอบแห้งเมื่อรวมความร้อนสัมผัส (%)

DR คือ อัตราการอบแห้ง (kg/h หรือ %db/h)

SEC คือ ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (kJ/h)

สำหรับประสิทธิภาพในการอบแห้งนอกจากจะพิจารณาได้จากอัตราการอบแห้งแล้วยังต้องดูที่คุณภาพของผลิตภัณฑ์ควบคู่กันไปด้วย นั่นคือความชื้นที่เหลือในผลิตภัณฑ์จะต้องมีค่าไม่เกินมาตรฐาน และมีความสม่ำเสมอทั่วทุกส่วนของผลิต สำหรับผลิตภัณฑ์อาหารแห้งคุณภาพที่ต้องคำนึงถึงยังรวมไปถึง รูป รส กลิ่น สี ตลอดจนคุณค่าทางโภชนาการ ความสะอาด อายุการเก็บรักษา (shelf life) และรสสัมผัส (ความกรอบ/ความนุ่ม) เป็นต้น

การอบแห้งเป็นศาสตร์ที่มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องนักศึกษาที่สนใจในด้านนี้สามารถค้นคว้าเพิ่มเติมได้จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ตัวอย่างที่ 1 การทดลองให้ห้อง lab พบว่าอุณหภูมิสูงสุดที่ไม่ทำให้สมุนไพรที่มีน้ำมันหอมระเหยเสียสภาพคือ 50 °C ด้วยอัตราการไหลของอากาศ 0.052 kg dry air /s kg $_{\text{dry solid}}$ และมีพฤติกรรมการอบแห้งแบบชั้นบางคือ $MR = \exp(-0.176453t^{1.125})$ หากต้องการอบแห้งสมุนไพรชนิดนี้ที่ความชื้นเริ่มต้น 300 %db ให้เหลือ 12 %db จำนวน 20 กิโลกรัม ด้วยเครื่องอบแห้งแบบลมร้อน ที่มีสภาวะอากาศแวดล้อม 30 °C , 65 %RH หากที่สภาวะอากาศร้อนที่ใช้อบแห้งสมุนไพรนี้มีค่าความชื้นสมดุล 10.5 %db จงหาปริมาณความร้อนที่ต้องให้กับอากาศ กำหนดให้ ความจุความร้อนจำเพาะของอากาศ (Ca) และไอน้ำ (Cv) 1.0069 kJ/kg dry air ^{o}C และ 1.5524 kJ/kg dry air ^{o}C

วิธีทำ

1. หาเวลาที่ใช้ในการอบแห้งจาก

$$\frac{M - M_e}{M_0 - M_e} = \exp(-kt^u)$$

$$\frac{12 - 10.5}{300 - 10.5} = \exp(-0.1764t^{1.125})$$

$$\ln\left(\frac{12 - 10.5}{300 - 10.5}\right) = -0.1764t^{1.125}$$

$$t = 20.45 \text{ h}$$

2. หาค่าสภาวะอากาศที่ 30 °C , 65 %RH ด้วยไซโครเมตริกได้ $H_1 = 0.0175 \text{ kg}_{\text{water}} / \text{kg}_{\text{dry air}}$

3. หาอัตราการไหลของอากาศแห้งโดยเริ่มจากหามวลแห้งของสมุนไพรจาก

$$m_d = \frac{m}{1 + M_d} = \frac{20}{1 + 3} = 5 \text{ kg}_{\text{dry solid}}$$

ดังนั้นอัตราการไหลอากาศ $\dot{m}_a = 0.052 \times 5 \times 3600 = 936 \text{ kg}_{\text{dry air}} / \text{h}$

4. แทนค่าต่างๆ ลงในสมการ (1) จะได้

$$Q_a = 936(1.0069 + 1.5524 \times 0.0175)(50 - 30)20.45$$

$$= 395865.67 \text{ kJ หรือ } 395.87 \text{ MJ}$$ **ตอบ**

คำถามท้ายบท

1. จงหาปริมาณความร้อนที่ต้องให้กับอากาศ เมื่อทำการอบแห้งถั่วเหลืองด้วยอุณหภูมิการอบแห้ง 65 °C อัตราการไหลของอากาศ 0.064 $kg_{dry\ air}$ /s. $kg_{dry\ solid}$ เพื่อลดความชื้นถั่วเหลืองจาก 275 %db จำนวน 100 kg. ให้เหลือความชื้นสุดท้าย 14 % db ซึ่งใช้เวลา 14 ชั่วโมง หากอุณหภูมิและอัตราส่วนความชื้นของสภาวะอากาศก่อนให้ความร้อนคือ 0.0162 $kg_{water}/kg_{dry\ air}$ และ 32 °C ตามลำดับ เมื่อกำหนดให้ ความจุความร้อนจำเพาะของอากาศ (C_a) และ ไอน้ำ (C_v) คือ 1.0069 $kJ/kg_{dry\ air}\ ^oC$ และ 1.5524 $kJ/kg_{water}\ ^oC$ ตามลำดับ

2. จงหาประสิทธิภาพเชิงความร้อนในการอบแห้งข้าวเปลือกจำนวน 2000 กิโลกรัม ที่ความชื้นเริ่มต้น 24 %wb ให้เหลือ 12 %wb เมื่อปริมาณความร้อนที่ให้กับอากาศอบแห้งคือ 1236 MJ และค่าความร้อนแฝงของน้ำคือ 2280 kJ/kg

บทที่ 9

การปรับปรุงประสิทธิภาพของกระบวนการอบแห้ง

จากบทที่แล้วนักศึกษาได้ทราบว่า ประสิทธิภาพของกระบวนการอบแห้งสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ คือ ประสิทธิภาพเชิงพลังงาน (ความร้อน) กับประสิทธิภาพการอบแห้งซึ่งรวมถึงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ได้หลังการอบแห้ง ในความหมายกว้างๆ ประสิทธิภาพของกระบวนการอบแห้งจะรวมไปถึงความจุหรือกำลังการผลิตของเครื่องอบแห้งอีกด้วย แต่ในบทนี้จะเน้นเฉพาะการเสนอแนวทางในการปรับปรุงประสิทธิภาพเชิงความร้อน และคุณภาพของผลิตภัณฑ์อบแห้งเป็นหลัก

แนวทางการปรับปรุงประสิทธิภาพของกระบวนการอบแห้ง

1. การไล่น้ำออกจากวัสดุก่อนทำการอบแห้ง

เพื่อเป็นการประหยัดพลังงานอย่างได้ผล เราควรศึกษาถึงผลลัพธ์ที่คาดว่าจะได้จากการลดความชื้นในวัสดุก่อนทำการอบแห้งดังนี้

1. ใช้ทุกวิถีทางในการลดปริมาณความชื้นให้เหลือน้อยที่สุดในระหว่างกระบวนการผลิต
2. ทุ่มเทความพยายามในด้านการไล่น้ำออกโดยวิธีทางกล ซึ่งเมื่อรวมค่าใช้จ่ายในการลงทุนที่เพิ่มขึ้นกับค่าใช้จ่ายในการปฏิบัติงานที่ลดลงแล้ว จะได้ค่าใช้จ่ายรวมที่ต่ำกว่า

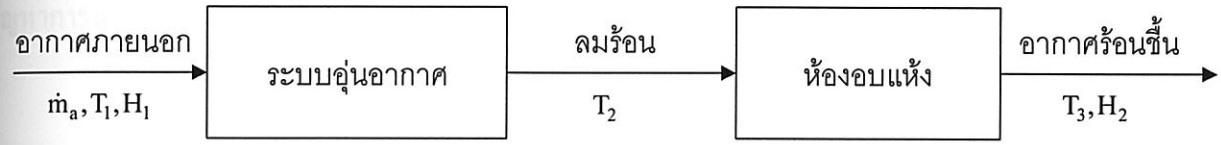
ตัวอย่างของวิธีทางกลที่ใช้ไล่น้ำออกล่วงหน้าได้แก่ เครื่องกรองแบบอัด (filler press) เครื่องสลัดเหวี่ยงที่ความเร็วรอบสูง (centrifugal dewatering) เป็นต้น ในระยะหลังได้มีการเพิ่มสมรรถนะของเครื่องกรองแบบอัดโดยการใช้แผ่นแมมเบรนพอลิเมอร์ ในการเพิ่มแรงอัดให้สูงถึง 40 บาร์ เมื่อเทียบกับพลังงานความร้อนที่ต้องใช้ในการระเหยน้ำออกจากวัสดุแล้ว พลังงานที่ใช้ในการไล่น้ำออกในปริมาณเท่ากันจะน้อยกว่าถึงหลายสิบเท่าหรือเกือบร้อยเท่า

2. การป้องกันการสูญเสียความร้อนจากเครื่องอบแห้ง

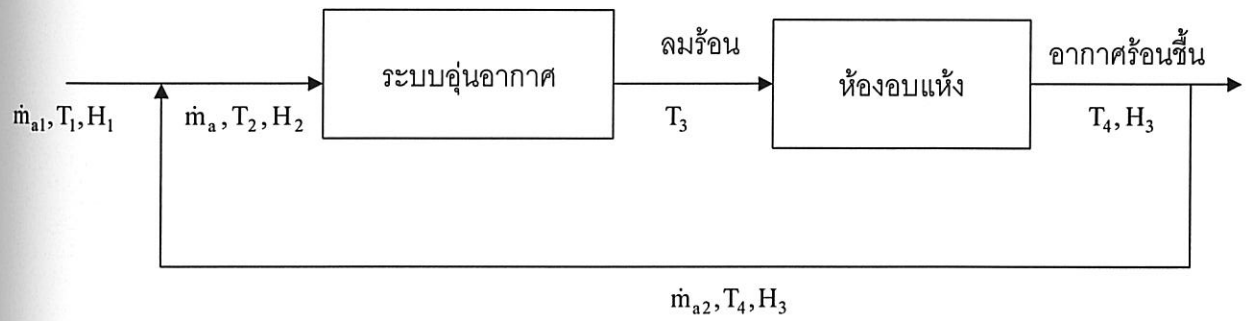
ในกรณีของเครื่องอบแห้งที่มีประสิทธิภาพเชิงความร้อนเท่ากับ 50% การสูญเสียของความร้อน การสูญเสียของความร้อน 1 MW จากเครื่องอบแห้งจะทำให้สิ้นเปลืองพลังงานในอัตรา 2 MW ถ้าประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงเพียง 25% การสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจะเพิ่มขึ้นเป็น 4 เท่า ด้วยเหตุนี้จึงควรดำเนินมาตรการป้องกันการสูญเสียความร้อน เช่น การติดตั้งฉนวนความร้อน การป้องกันการรั่วของอากาศร้อน (การป้องกันการแทรกซึมของอากาศเย็น) การป้องกันการรั่วบริเวณข้อต่อ การปรับสมดุลของความดันภายในและภายนอกเครื่องอบแห้ง เป็นต้น

3. การประหยัดพลังงานโดยการหมุนเวียนอากาศร้อนชื้นบางส่วน

เนื่องจากอากาศร้อนที่ปล่อยทิ้งจากเครื่องอบแห้งนั้น ยังมีอุณหภูมิค่อนข้างสูงมาก ด้วยเหตุนี้มาตรการประหยัดพลังงานที่นิยมใช้กันวิธีหนึ่ง คือการหมุนเวียนอากาศร้อนชื้นบางส่วนกลับไปใช้ในเครื่องอบแห้งดังแสดงในภาพที่ 1 แต่เนื่องจากอากาศที่กลับมาหมุนเวียนนี้มีความชื้นสูง ดังนั้นอาจเกิดปัญหาเนื่องจากการควบแน่นของไอน้ำ และในกรณีที่อากาศร้อนขาออกมีอนุภาคของฝุ่นของวัสดุปะปนอยู่ด้วย จะต้องระมัดระวังเกี่ยวกับการหลอมตัวของอนุภาคเหล่านี้ ในเครื่องอุ่นอากาศของเครื่องอบแห้ง ตลอดจนการสึกกร่อนของใบพัดลมเนื่องจากอนุภาคเหล่านี้เป็นต้น



(ก) กรณีไม่มีอากาศหมุนเวียน



(ข) กรณีมีอากาศหมุนเวียนกลับมาใช้ใหม่

ภาพที่ 1 ระบบการอบแห้ง

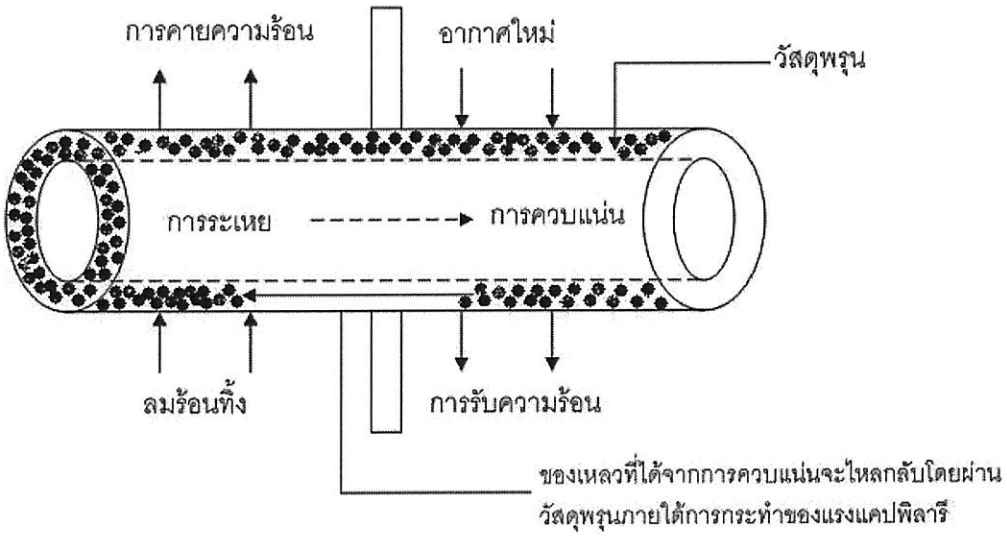
4. การเก็บความร้อนทิ้งจากอากาศ

ในบางกรณีการนำอากาศร้อนชื้นกลับมาใช้ใหม่โดยตรงไม่อาจทำได้เพราะมีปัญหาทางเทคนิคตลอดจนปัญหาทางคุณภาพ เช่น ปัญหากลิ่นเหม็น ปัญหาการควบแน่นของน้ำ เราควรพิจารณาวิธีการเก็บความร้อนทิ้ง

กลับมาใช้ประโยชน์ เช่นการอุ่นลมเข้าใหม่ โดยใช้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่เหมาะสม การเพิ่มความเข้มข้นของวัสดุป้อนเข้าโดยใช้อากาศร้อนชื้นเป็นต้น โดยวิธีในการเก็บความร้อนทิ้งจากอากาศมาใช้ประโยชน์อาจจะทำได้โดยวิธีการดังนี้

1. เมื่ออุณหภูมิและความชื้นของอากาศที่ปล่อยออกมามีค่าสูง อาจใช้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนธรรมดาถ่ายเทความร้อนให้แก่ลมเข้าใหม่ได้ ที่ความชื้นสูง จุดน้ำค้างของลมทิ้งมีค่าประมาณ 60°C ดังนั้นจึงเป็นไปได้ที่จะใช้ความร้อนแฝงของการควบแน่นให้เป็นประโยชน์ด้วย

2. อีกวิธีหนึ่งได้แก่การใช้ฮีทไปป์ (heat pipe) ดังแสดงในภาพที่ 2 ซึ่งภายในบรรจุ น้ำ ฟรีออน (freon) แอลกอฮอลล์ หรือสารอื่นๆ จะถูกบรรจุไว้อย่างมิดชิดภายใน ฮีทไปป์ ซึ่งความดันภายในใกล้สุญญากาศ กลไกของการถ่ายเทความร้อน ประกอบด้วย การระเหยของของไหลที่ปลายด้านอุณหภูมิสูงของฮีทไปป์ การไหลของไอไปยังปลายด้านอุณหภูมิต่ำ และการควบแน่นที่ปลายด้านอุณหภูมิต่ำ อุณหภูมิสูงสุดในการแลกเปลี่ยนความร้อนกับลมทิ้งที่ใช้ได้อาจมีตั้งแต่ 350 °C ถึง 120 °C ข้อพึงระวัง ได้แก่ การเกาะติดของฝุ่นบริเวณผิวท่อและปัญหาการสึกกร่อน



ภาพที่ 2 หลักการทำงานของฮีทไปป์

5. การเก็บกลับความร้อนจากผลิตภัณฑ์อบแห้งร้อน

วิธีนี้ใช้ได้ดีมากกับกรณีของเครื่องอบแห้งแบบไหลสวนทางระหว่างวัสดุและลมร้อน ผลิตภัณฑ์อบแห้งโดยเฉพาะอย่างยิ่งที่มีอุณหภูมิสูง สามารถใช้ในการอุ่นอากาศที่ใช้ในการอบแห้งได้ ในขณะเดียวกันผลิตภัณฑ์ก็จะเย็นตัวลง

6. การปรับปรุงเงื่อนไขและวิธีการเดินเครื่องอบแห้ง

นอกจากมาตรการประหยัดพลังงานแล้ว ควรทบทวนเงื่อนไขของการอบแห้ง ตลอดจนวิธีการเดินเครื่องอบแห้งเพื่อลดพลังงานรวมที่ต้องใช้ และ/หรือเพิ่มคุณภาพของผลิตภัณฑ์โดยการลดเวลาที่ต้องใช้ในการอบแห้งเพื่อให้สั้นเพื่อลดการใช้กำลังไฟฟ้า หรือโดยการเปลี่ยนทิศทางการไหลของลมร้อนเป็นต้น

7. การปรับปรุงลักษณะการกระจายตัวของลมร้อนในเครื่องอบแห้ง

นอกจากลดความชื้นในวัสดุไม่ให้เกินค่ามาตรฐานของผลิตภัณฑ์แล้ว เครื่องอบแห้งที่ดียังต้องให้ผลิตภัณฑ์ที่มีการกระจายค่าความชื้นในเนื้อวัสดุน้อยที่สุด หรือมีความสม่ำเสมอของความชื้นมากที่สุดด้วย เพราะนอกจากจะทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพดีสม่ำเสมอแล้ว ยังช่วยลดเวลาตลอดจนพลังงานที่ใช้ในการอบแหงด้วย (ไม่มีความสิ้นเปลืองจากการอบแห้งวัสดุบางส่วนมากเกินความจำเป็น) ในกรณีของเครื่องอบแห้งแบบต่อเนื่องที่ใช้ลมร้อน ลักษณะการกระจายตัวของลมร้อนในเครื่องอบแห้งจะมีบทบาทสำคัญต่อความสม่ำเสมอของความชื้นในผลิตภัณฑ์

จุดอ่อนข้อหนึ่งของเครื่องอบแห้งแบบอุโมงค์ซึ่งมีลักษณะการอบแห้งแบบไหลตามหรือไหลสวนทาง คือ การกระจายตัวของลมร้อนที่สัมผัสกับวัสดุไม่สม่ำเสมอ ถ้าเครื่องอบแห้งมีความยาวของอุโมงค์มาก ในกรณีนี้ควรเปลี่ยนลักษณะการไหลของลมร้อนให้เป็นแบบไหลตัดจากผนังด้านข้างด้านหนึ่งไปยังอีกด้านหนึ่ง

8. การพัฒนาเครื่องอบแห้งที่มีประสิทธิภาพสูง

การเพิ่มประสิทธิภาพของเครื่องอบแห้ง สามารถทำได้โดยการพัฒนาเครื่องอบแห้งแบบใหม่ การปรับปรุงเครื่องอบแห้งที่มีอยู่เดิม และ/หรือปรับปรุงอุปกรณ์ที่ใช้กับเครื่องอบแห้ง

9. การอบแห้งแบบสองขั้นตอน

เพื่อที่จะลดความชื้นที่เหลืออยู่น้อยในช่วงของอัตราการอบแห้งลดลง ให้มีค่าน้อยลงไปอีกภายในเครื่องอบแห้งแบบขั้นตอนเดียว เราจำต้องเพิ่มเวลาที่วัสดุอยู่ในเครื่อง หรือเพิ่มอุณหภูมิของก๊าซที่สัมผัสกับวัสดุ ในบางครั้งเราจะประหยัดพลังงานได้มากกว่า (อีกทั้งคุณภาพของผลิตภัณฑ์ก็จะดีขึ้นด้วย) ถ้าอบแห้งให้เหลือค่าอัตราส่วนความชื้นสูงกว่าค่าที่ต้องการในเครื่องอบแห้งตัวแรก และบรรลุวัตถุประสงค์ที่ต้องการในเครื่องอบแห้งตัวที่สองโดยใช้อากาศอุณหภูมิค่อนข้างต่ำ แต่ให้วัสดุมีเวลาอยู่ในเครื่องอย่างเหลือเฟือ (ปริมาตรของเครื่องอบแห้งใหญ่มาก) ตัวอย่างของการจัดวางชุดเครื่องอบแห้งแบบสองขั้นตอน ได้แก่ เครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย + เครื่องอบแห้งแบบฟลูอิไดท์เบด เป็นต้น

10. การลดเวลาในการปฏิบัติงาน

นอกจากมาตรการการประหยัดพลังงานดังที่กล่าวมาแล้ว ควรทบทวนเงื่อนไขของการอบแห้ง เพื่อลดพลังงานที่ต้องใช้โดยการลดเวลาในการอบแห้งให้สั้นลง ซึ่งการลดเวลาการอบแห้งให้สั้นลงจะทำให้ลดปริมาณการไฟฟ้า (มอเตอร์ พัดลม ปั๊มสุญญากาศลงด้วย)

แนวทางในการเพิ่มประสิทธิภาพของเครื่องอบแห้งที่กล่าวมาทั้งหมดข้างต้น สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการอบแห้งได้ 10-30% ดังแสดงในตารางที่ 1 ซึ่งในการทำงานจริงนักศึกษาก็สามารถที่จะนำแนวทางใดแนวทางหนึ่งหรือหลายๆ แนวทางรวมกันเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพในการอบแห้งสูงสุดได้

ตารางที่ 1 ประสิทธิภาพเชิงความร้อนโดยทั่วไปของเครื่องอบแห้ง

(ก) กรณีไม่หมุนเวียนอากาศชื้นหลังอบแห้ง

	อุณหภูมิของแหล่งความร้อน (°C)					
	50	80	100	200	400	> 600
การไหลแบบขนาน	15-30	20-40	30-45			
การไหลแบบทะลุ	20-45	30-50	40-55	45-60		
ฟลูอิไดซ์เบด	30-50	35-60	40-65	50-65	55-70	
พาหะลม หรือแฟลช		30-50	35-55	40-60	50-70	
แบบโรตารี่			35-55	40-60	50-70	65-75
แบบพ่นฝอย		20-40	30-50	40-60	45-65	

(ข) กรณีนำอากาศร้อนชื้นกลับมาใช้ใหม่

	อุณหภูมิของแหล่งความร้อน (°C)					
	50	80	100	200	400	> 600
การไหลแบบขนาน	30-50	35-55	40-60			
การไหลแบบทะลุ	40-55	40-60	45-70	50-70		
ฟลูอิไดซ์เบด	40-55	40-60	45-70	50-70	60-80	
พาหะลม หรือแฟลช		40-60	45-65	50-70	55-75	
แบบโรตารี่			40-60	45-65	55-75	65-80
แบบพ่นฝอย		30-45	4055	45-60	50-65	

บทที่ 10

หลักการเก็บรักษาผลผลิตเกษตร

ผลผลิตทางการเกษตรนั้นมีหลากหลายชนิด ซึ่งในแต่ละชนิดก็จะมีความต้องการในการเก็บรักษาที่แตกต่างกันไป เช่น ผักสด หรือเนื้อสัตว์ การที่จะเก็บให้คงความสดอยู่ได้นานนั้นอาจจะต้องอาศัยการเก็บรักษาด้วยความเย็น หรือเก็บรักษาด้วยการแช่แข็ง สำหรับการเก็บรักษาในวิชานี้นั้น จะเน้นสำหรับการเก็บรักษาเมล็ดพืชที่ผ่านการอบแห้งมาแล้ว และจำเป็นจะต้องได้รับการเก็บรักษาที่ดีเพื่อคงไว้ซึ่งคุณภาพและปริมาณของเมล็ดพืช ซึ่งระยะเวลาที่ใช้ในการเก็บรักษาอาจใช้เวลาหลายสัปดาห์หรือเป็นปีเลยก็ได้ ในช่วงระยะเวลาที่มีการเก็บรักษาอยู่นี้เมล็ดพืชอาจมีการเสื่อมสภาพ หรือเกิดความเสียหายเนื่องจาก รา แมลง และหนู ดังนั้นการจัดการที่ดีจะทำให้คุณภาพและปริมาณคงที่หรือมีการสูญเสียน้อยที่สุด สำหรับวัตถุประสงค์ของการเก็บรักษาเมล็ดพืชมีดังนี้

1. เพื่อเป็นแหล่งวัตถุดิบสำหรับตลาดในและต่างประเทศให้มีสม่ำเสมอตลอดปี
2. เพื่อเป็นแหล่งอาหารสำรองในยามฉุกเฉิน เช่น ยามสงคราม น้ำท่วม
3. เพื่อเก็บไว้รอราคาที่ดีกว่า หรือรอจำหน่ายหรือส่งออกต่างประเทศ

วิธีการเก็บรักษา

วิธีการเก็บรักษา สามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภทใหญ่ดังนี้

1. การเก็บรักษาในระดับเกษตรกร ปริมาณการเก็บรักษามีปริมาณน้อยเพื่อการบริโภค การจัดการค่อนข้างง่าย และไม่ค่อยมีปัญหา

2. การเก็บรักษาระดับการค้า ปริมาณการเก็บมีปริมาณมากจำเป็นต้องมีการจัดการเพื่อลดความสูญเสียขณะเก็บ สำหรับข้าวมีการเก็บ 2 แบบคือ เก็บรักษาข้าวเปลือกหลังจากอบแห้งกับนำข้าวเปลือกมาสีและทำการเก็บแบบข้าวสาร อายุการเก็บข้าวสารสั้นกว่าการเก็บข้าวเปลือก แต่มีข้อดีที่ใช้พื้นที่เก็บน้อยกว่าเกือบ 2 เท่า ดังนั้นโรงสีทั่วไปจะทยอยนำข้าวเปลือกมาสีเท่าที่จำเป็นและเก็บในรูปข้าวเปลือก ส่วนพื้นที่เก็บที่ต้องใช้ปริมาณมากใช้วิธีกองให้สูงขึ้น วิธีการเก็บระดับการค้า กระทำได้ดังนี้

2.1 โกดัง (Warehouse) เป็นอาคารเตี้ย ยาว มีประตูด้านข้าง มีการระบายอากาศใต้หลังคา การเก็บเมล็ดพืชอยู่ในกระสอบและเรียงซ้อนกันเป็นกองสูง

2.2 ยุ้งฉาง (Flat store) ลักษณะเป็นการเก็บแบบเป็นกอง (bulk storage) และจำเป็นต้องมีระบบระบายอากาศในกอง

2.3 ถังเก็บ (Rectangular steel/wooden bins) เป็นถังเก็บที่ทำจากไม้หรือเหล็กและติดตั้งอยู่โรงเรือนอาจใช้เก็บเมล็ดพืชแยกตามชนิด ความชื้น พันธุ์ที่ต้องการ การเก็บเป็นแบบกอง (bulk)

2.4 ไซโล (Silo) เป็นถังกลมสูง ทำจากคอนกรีตหรือเหล็กกล้า ใช้เก็บเมล็ดพืชแบบกอง มีระบบระบายอากาศ รมควันและขนถ่ายติดตั้งอยู่ในตัว

ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการเก็บรักษา

ในการเก็บรักษาเมล็ดพืชมีปัจจัยที่เกี่ยวข้องดังนี้

1. เมล็ดพืช เนื่องจากเมล็ดพืชเป็นสิ่งมีชีวิตขณะที่เก็บรักษา เมล็ดพืชจะรับออกซิเจนมาหายใจและปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ และความร้อนดังสมการ

$$C_6H_{12}O_6 + 6O_2 \rightarrow 6CO_2 + 6H_2O + \text{heat}$$

180 g 192 g 264 g 108 g 2820 kJ

ในการเก็บรักษาเมล็ดพืชคาร์บอนไดออกไซด์เป็นสิ่งที่ต้องการเพราะคาร์บอนไดออกไซด์จะไปแทนที่ออกซิเจนในสภาพแวดล้อมซึ่งทำให้อัตราการหายใจลดลง ส่วนน้ำและความร้อนที่เกิดเป็นสิ่งที่ไม่ต้องการในการเก็บเนื่องจากน้ำเป็นตัวทำให้ความชื้นในเมล็ดพืชสูงขึ้น อีกทั้งความร้อนที่เกิดจะเป็นตัวเร่งให้เกิดการหายใจของเมล็ดพืช สภาวะในกองที่มีความร้อนและความชื้นยังทำให้เกิดการงอกของเมล็ดพืชและราอีกด้วย กระบวนการหายใจของเมล็ดพืชนี้มีส่วนทำให้น้ำหนักแห้ง (dry matter loss) ของกองเมล็ดพืชที่เก็บสูญหายไป

ตารางที่ 1 การเกิดคาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ ความร้อนและการสูญเสียน้ำหนักในการเก็บข้าวเปลือกที่ความชื้นต่างๆ ในแต่ละวันของข้าวเปลือก น้ำหนัก 1000 ตัน

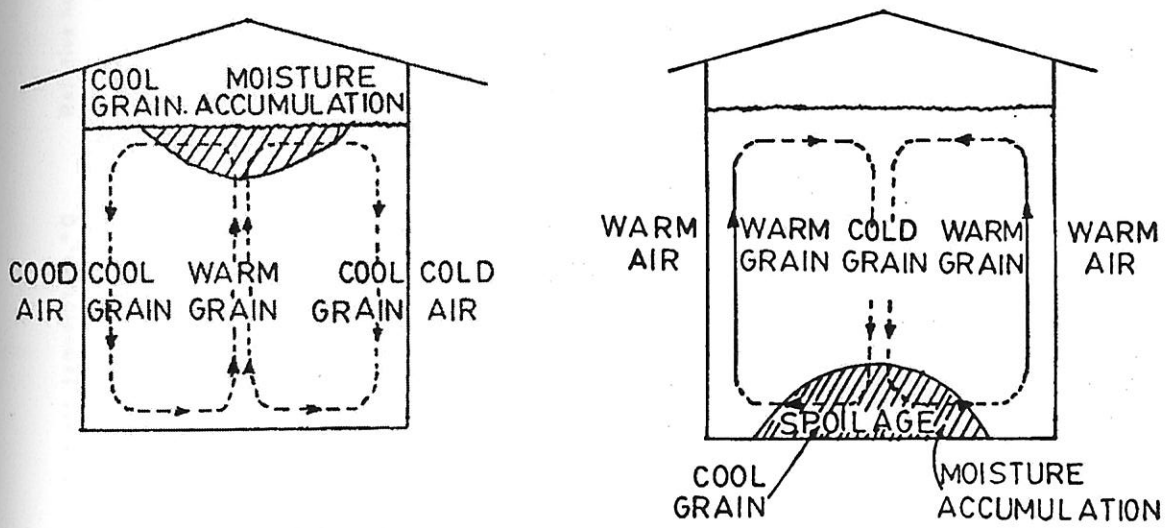
ความชื้น (% wb)	น้ำหนักแห้ง (ตัน)	CO_2 (kg)	H_2O (kg)	Heat (kJ)	Dry matter loss (kg)
13	870	4.26	1.738	45,380	2.897
14	860	10.32	4.22	110,080	7.031
15	850	28.152	11.485	299,720	19.142
16	840	68.769	28.056	732,014	46.763
18	820	230.492	54.041	2,455,512	156.7348
20	800	618.40	252.307	6,586,020	420.512

จากตารางที่ 1 จะพบว่าในการเก็บเมล็ดพืชจำเป็นที่ต้องเก็บเมล็ดพืชที่มีความชื้นต่ำเพราะปริมาณน้ำและความร้อนที่เกิดมีน้อยแต่หากความชื้นในเมล็ดพืชสูงขึ้นอย่างมาก การเกิดน้ำและความร้อนก็จะมากตามไปด้วย รวมทั้งการสูญเสียน้ำหนักยิ่งมากเป็นทวีคูณหลายเท่า ปริมาณน้ำและความร้อนที่เกิดจำเป็นต้องกำจัดออกไปใน

แต่ละวันเพื่อลดความเสียหายที่จะเกิดในกอง วิธีการกำจัดสามารถใช้วิธีระบายอากาศตามธรรมชาติหรือใช้วิธีระบายอากาศในกองโดยเป่าลมเย็นที่เรียกว่าแอเรชั่น (aeration)

2. โครงสร้างโรงเก็บหรือถังเก็บ โรงเก็บหรือถังเก็บเป็นสถานที่เก็บเมล็ดพืชซึ่งสามารถนำเมล็ดพืชไปขายแลกเปลี่ยนเป็นเงินตราได้ ดังนั้นโรงเก็บหรือถังเก็บควรแข็งแรง ป้องกัน นก หนู แมลง และความชื้นจากสภาพแวดล้อมได้ นอกจากนี้การออกแบบโรงเก็บที่ดีควรให้มีระบบระบายอากาศภายในได้เพื่อกำจัดความร้อนที่เกิดจากการหายใจ และป้องกันการเข้าทำลายของ นก หนู แมลงและ รา

3. สภาวะอากาศแวดล้อม เมล็ดพืชในโรงเก็บจะสัมผัสกับสภาวะอากาศแวดล้อมตลอดเวลา ขณะที่เมล็ดพืชหายใจเอาออกซิเจนเข้าไปและปลดปล่อยความชื้นและความร้อนออกมา นอกจากนี้เมล็ดพืชยังเป็นวัสดุที่สามารถดูดและคายความชื้นได้ตามสภาวะอากาศที่อยู่ โดยในประเทศเขตอบอุ่น อุณหภูมิในถังเก็บและนอกถังเก็บอาจแตกต่างกันมาก ทำให้เกิดการไหลเวียนของอากาศภายในถัง และเกิดการถ่ายเทความร้อนและความชื้น ทำให้บริเวณใดบริเวณหนึ่งชื้นกว่าปกติ และส่วนนั้นอาจเสียหายได้ดังแสดงในภาพที่ 1



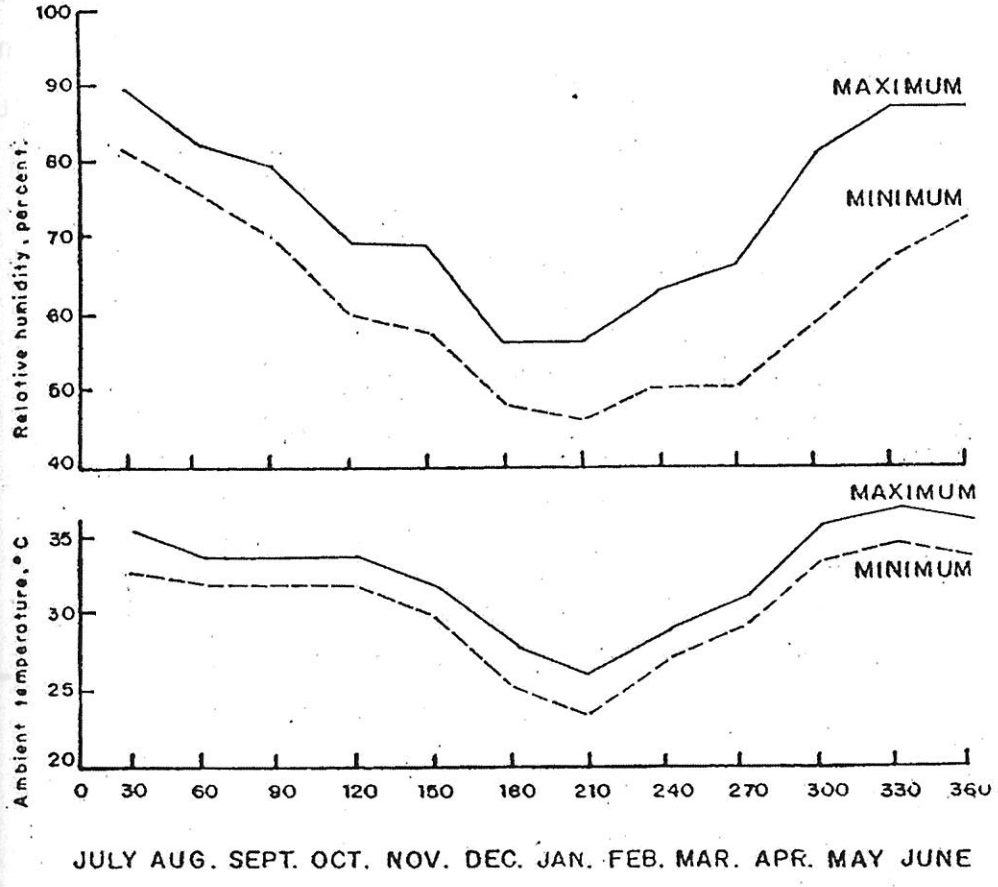
(ก) เมล็ดพืชร้อนกว่าสิ่งแวดล้อม (ข) เมล็ดพืชเย็นกว่าสิ่งแวดล้อม

ภาพที่ 1 การไหลเวียนของอากาศในถังเก็บ

สำหรับในประเทศไทยซึ่งอยู่ในเขตร้อนชื้นมีสภาวะอากาศที่ไม่เหมาะสมกับการเก็บเมล็ดพืช ทั้งนี้ค่าความชื้นสัมพัทธ์อากาศค่อนข้างสูงโดยเฉลี่ย 80% แต่เมล็ดพืชต้องการความชื้นที่ต่ำกว่านี้ในการเก็บ

ยกตัวอย่างเช่น ข้าวเปลือกความชื้น 14 % ต้องการความชื้นอากาศประมาณ 70% ในการเก็บแสดงว่าเมื่อนำเมล็ดพืชนี้มาเก็บบางเวลาเมล็ดพืชจะมีความชื้นสูง เนื่องจากความชื้นในบรรยากาศสูง

ภาพที่ 2 แสดงค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศในรอบปีในพื้นที่ที่มีอากาศชื้น จากข้อมูลในกราฟระยะเวลาประมาณ 6 เดือน ไม่เหมาะกับการนำลมมาใช้ ระบายความร้อนในกองเก็บเมล็ดพืช ในโรงเก็บที่ดีควรป้องกันเมล็ดพืชได้จากสภาวะอากาศที่มีความชื้นสัมพัทธ์สูง และควรเป่าลมจากอากาศเข้ากองข้าวเปลือกในช่วงที่ความชื้นสัมพัทธ์อากาศต่ำกว่า 70%

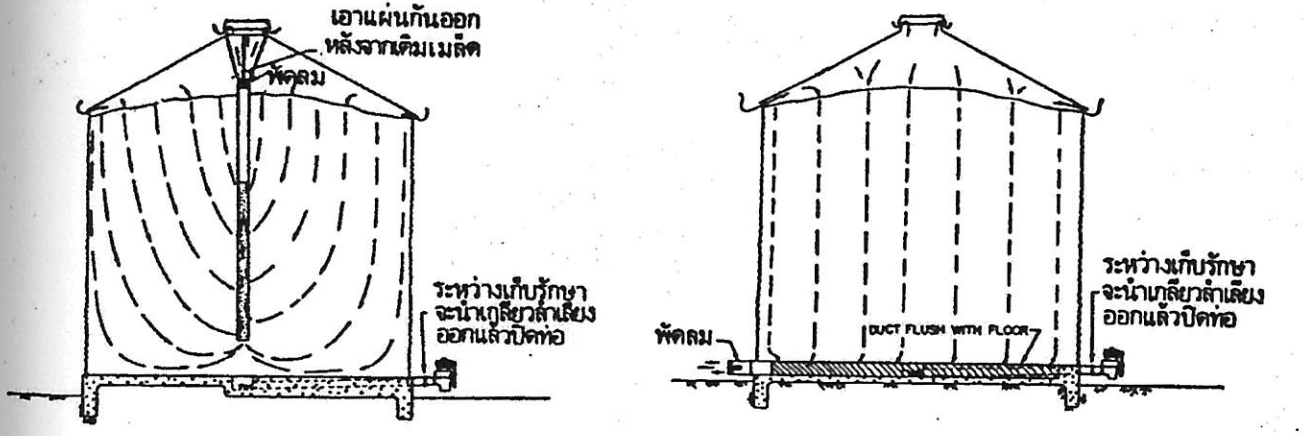


ภาพที่ 2 อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศในรอบปี

ส่วนความร้อนที่เกิดขึ้นจากการหายใจสะสมในกองเมล็ดพืชและมีอุณหภูมิสูงขึ้น มีผลให้เกิดราและแมลงในกองซึ่งราและแมลงก็จะหายใจและเพิ่มความร้อนในกองให้สูงขึ้น ถ้าความร้อนที่สะสมนี้ไม่ถูกระบายออกก็จะมีผลให้เมล็ดที่เก็บเกิดการเปลี่ยนสีได้ เช่น กรณีข้าวเปลือกที่เกิดข้าวเหลืองเมื่อนำไปสี ดังนั้นโรงเก็บที่ดีจึงต้องมีระบบระบายอากาศที่ดีด้วย

การถ่ายเทความชื้นในถังเก็บ

การถ่ายเทความชื้นในถังเก็บสามารถป้องกันได้โดยการระบายอากาศเป็นครั้งคราวเพื่อทำให้อุณหภูมิของเมล็ดพืชภายในถังเก็บเท่ากัน และไม่แตกต่างไปจากอุณหภูมิรอบนอกมากนัก เมื่อเมล็ดพืชเย็นลง การเจริญเติบโตของราและแมลงก็ลดน้อยลงด้วย อัตราการไหลของอากาศสำหรับการระบายอากาศควรอยู่ระหว่าง 0.04-0.08 $m^3/min\text{-}m^3_{grain}$ การระบายอากาศอาจเป็นไปแบบอัตโนมัติ โดยมีตัววัดอุณหภูมิอยู่ภายในถังเก็บ ถ้าอุณหภูมิในถังเก็บสูงพัดลมก็จะทำงาน ทิศทางของลมมักจะเป็นแบบลงล่างดังแสดงในภาพที่ 3 (ก) ทั้งนี้ก็เพื่อหลีกเลี่ยงการควบแน่นของไอน้ำที่บริเวณเมล็ดพืชชั้นบนและที่หลังคาของถังเก็บ ซึ่งมีอุณหภูมิต่ำกว่า ในกรณีที่เก็บเมล็ดพืชในถังเก็บที่เป็นเครื่องอบแห้ง เราสามารถใช้พัดลมที่ใช้ในการอบแห้งเป็นพัดลมระบายอากาศ ในกรณีนี้อัตราการไหลของอากาศจะสูง ทำให้ใช้เวลาน้อย ทิศทางของลมขึ้นด้านบน (ภาพที่ 3 (ข)) ซึ่งการระบายอากาศแบบนี้ได้ผลดีเช่นกัน และใช้เวลาในแต่ละครั้งไม่มากนัก อาจจะไม่กี่ชั่วโมง ในแต่ละครั้งอาจห่างกัน 1-2 สัปดาห์หรือ มากกว่านั้น ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของกองเมล็ดพืช

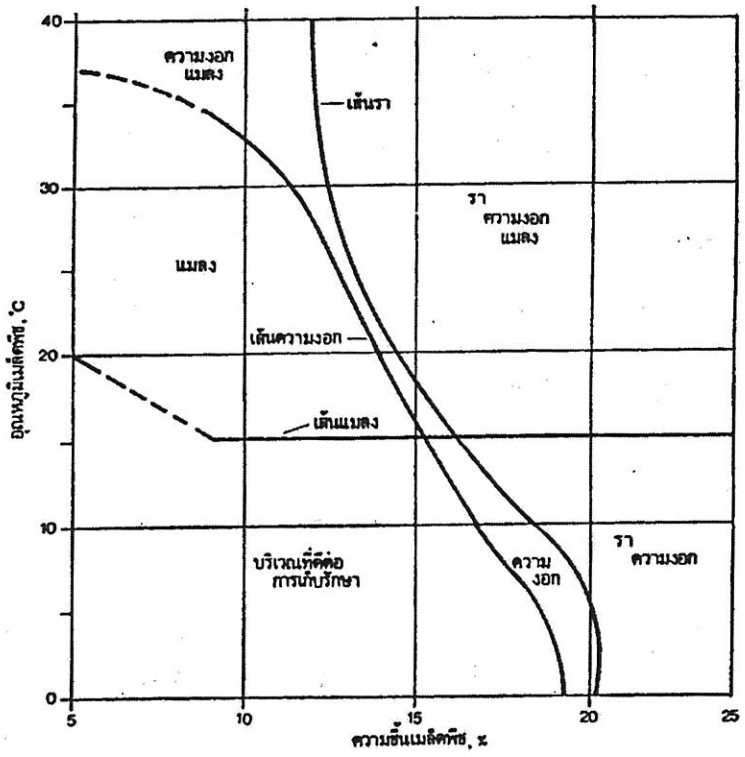


(ก) แบบแนวดิ่ง (ข) แบบแนวนอน

ภาพที่ 3 การระบายอากาศแบบท่อ

4. ปัจจัยอันเนื่องจาก รา แมลงและสัตว์ในโรงเก็บ ภาพที่ 4 แสดงไดอะแกรมการเก็บรักษาเมล็ดพืชโดยปลอดภัย การสูญเสียคุณภาพของเมล็ดพืชมีสาเหตุมาจาก รา แมลง และความงอกของเมล็ดพืช อุณหภูมิและความชื้นเมล็ดพืชมีอิทธิพลอย่างมากต่อคุณภาพของเมล็ดพืชระหว่างการเก็บรักษา ในภาพที่ 3 นั้นประกอบด้วยกราฟ 3 เส้น เส้นที่หนึ่ง เป็นเส้นที่เกี่ยวกับแมลง ซึ่งพบว่าการระบาดของเมลงจะมีน้อยมากถ้า

อุณหภูมิต่ำกว่า 15 °C ไม่ว่าเมล็ดพืชจะมีความชื้นเท่าไร กราฟเส้นที่สอง เกี่ยวข้องกับความงอกของเมล็ดพืช ทั้งอุณหภูมิและความชื้นมีอิทธิพลต่อความงอกของเมล็ด ที่อุณหภูมิสูงหรือความชื้นสูง ความสามารถในการงอกจะลดลง กราฟเส้นสุดท้ายเกี่ยวข้องกับรา ทั้งอุณหภูมิและความชื้นมีอิทธิพลต่อการเจริญเติบโตของเชื้อรา เช่นเดียวกับกรณีของความงอก ถ้าเมล็ดพืชมีความชื้นต่ำกว่า 12 % เมล็ดพืชนั้นจะปลอดภัยต่อเชื้อราไม่ว่าจะมีอุณหภูมิเท่าไร ถ้าจะให้เมล็ดพืชมีคุณภาพดีโดยปลอดจากแมลง รา และความงอก จะต้องเก็บรักษาที่อุณหภูมิต่ำกว่า 15 °C และความชื้นน้อยกว่า 15%



ภาพที่ 4 ไดอะแกรมการเก็บรักษาเมล็ดพืช

รา

การเจริญเติบโตของเชื้อราทำให้เกิดการสูญเสียมวลแห้ง อุณหภูมิของเมล็ดพืชสูงขึ้น เชื้อราบางชนิดสามารถสร้างสารพิษซึ่งเป็นอันตรายต่อคนและสัตว์เมื่อกินเข้าไป สารพิษที่รู้จักกันดีมากในบ้านเราคือ อาฟลาทอกซิน (aflatoxin) ในข้าวโพด เชื้อราจะเจริญเติบโตได้ดีถ้าเมล็ดพืชมีความชื้นสูง อุณหภูมิพอเหมาะ และเมล็ดพืชแตกหักมาก เนื่องจากอากาศแทรกตัวอยู่ตามช่องว่างระหว่างเมล็ดพืช ดังนั้นความชื้นสัมพัทธ์ของ

อากาศจึงถูกควบคุมด้วยความชื้นและอุณหภูมิของเมล็ดพืช ความชื้นสัมพัทธ์สามารถยังยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อราได้มีค่าประมาณ 65% หรือต่ำกว่า ซึ่งตรงกับค่าความชื้นเมล็ดพืชประมาณ 10-15% มาตรฐานเปียก ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของเมล็ดพืชและอุณหภูมิ หรืออาจควบคุมการเจริญเติบของเชื้อราได้จากการทำให้อุณหภูมิของเมล็ดพืชเท่ากับ 4 °C หรือต่ำกว่า ซึ่งเป็นที่ยอมรับกันว่าการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์จะหยุดชะงัก ส่วนการแตกหักของเมล็ดพืชนั้นมีผลให้เชื้อราใช้สารอาหารในเมล็ดพืชได้ง่ายขึ้น ซึ่งเท่ากับช่วยสนับสนุนการเจริญเติบโตของเชื้อรา เป็นที่ยอมรับกันว่าการควบคุมความชื้นของเมล็ดพืชเพื่อป้องกันการเจริญเติบโตของเชื้อราเป็นวิธีที่ประหยัด

ถ้าต้องการเก็บรักษาให้ได้ผลดีมากอาจกระทำได้โดยเก็บรักษาเมล็ดพืชไว้ในที่อับอากาศ เมล็ดพืชและอากาศจะเข้าสู่สภาวะสมดุลความร้อนและความชื้นภายในระยะเวลาไม่นานนัก ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศจะต่ำ และไม่เหมาะสำหรับการเจริญเติบโตของเชื้อรา นอกจากนี้ออกซิเจนยังมีจำกัดอีกด้วย ทำให้การเจริญเติบโตของเชื้อราและการหายใจของเมล็ดพืชหยุดชะงัก วิธีนี้ได้ผลดีแต่เสียค่าใช้จ่ายสูง

ในกรณีที่เมล็ดพืชยังมีความชื้นสูงอยู่ การป้องกันเชื้อราอาจทำได้โดยใช้สารเคมีเช่น กรดโพรไพโอนิคและกรดอาซิติค (propionic and acetic acids) แต่คุณภาพของเมล็ดพืชจะลดลง โดยเฉพาะเปอร์เซ็นต์การงอกของเมล็ดพืชจะต่ำมาก

แมลง นก หนู

สัตว์เหล่านี้จะเข้าทำลายเมล็ดพืชก่อให้เกิดความเสียหายทั้งปริมาณและคุณภาพ วิธีป้องกันและควบคุมอาจทำได้โดย

1. ทำความสะอาดถังเก็บก่อนที่จะนำเมล็ดพืชมาเก็บรักษา
2. เมล็ดพืชต้องมีความชื้นต่ำ
3. เมล็ดพืชสะอาดมีสิ่งเจือปนน้อย
4. ถังเก็บสามารถป้องกันการเข้ามาของนกหรือหนูได้
5. ใช้สารเคมีโดยอาจผสมกับเมล็ดพืชก่อนเก็บรักษาหรือใช้เป็นครั้งคราว หรือใช้เมื่อพบเห็นการระบาดของแมลงในถังเก็บ
6. ทำให้เมล็ดพืชเย็นลงโดยการระบายอากาศเป็นครั้งคราว หรือควบคุมอุณหภูมิภายในไซโลเก็บประมาณ 21 °C หรือต่ำกว่า วิธีหลังนี้เสียค่าใช้จ่ายสูง แต่ได้ผลและปลอดภัยจากสารเคมี
7. ตรวจสอบเมล็ดพืชทุกๆ เดือน

5. ปัจจัยเกี่ยวกับบุคคล ปัจจัยที่กล่าวถึงตอนต้น จะสามารถควบคุมและลดการสูญเสียได้ขึ้นอยู่กับปัจจัยบุคคลที่จะคอยดูแลเอาใจใส่ และปฏิบัติให้ถูกต้อง หน้าที่เหล่านี้ได้แก่ ซ่อมแซมโรงเก็บให้อยู่ในสภาพดี

ป้องกันการทำลายของสัตว์ ระบายอากาศในโรงเก็บ ดูแลสุขาภิบาลในโรงเก็บ ปัจจัยเกี่ยวกับบุคคลควรมีองค์ประกอบของทีมงานดังนี้

1. วิศวกรรมเกษตร ทำหน้าที่แก้ไขปัญหาในโรงเก็บ และปรับสภาพอากาศแวดล้อมในโรงเก็บ
2. นักกีฏวิทยา ทำหน้าที่ควบคุมและป้องกันการทำลายของสัตว์เช่น หนู นก และแมลง
3. ช่างเทคนิค ทำหน้าที่ซ่อมแซม และปฏิบัติงานในโรงเก็บ
4. ผู้จัดการ ทำหน้าที่บริหารและจัดการ

บทที่ 11

การระบายอากาศในกองเมล็ดพืช

(Aeration of Grain for Bulk Storage)

ในบทนี้กล่าวถึงดัชนีการเสื่อมของสภาวะอากาศที่จะใช้บ่งชี้สภาพอากาศที่เก็บรักษาเมล็ดพืช การเกิดเสื่อมสภาพของเมล็ดพืช การเกิดความร้อนในกองเมล็ดพืช การคำนวณหาปริมาณลมและการออกแบบระบบท่อลมเพื่อการระบายอากาศในกองเมล็ดพืช เพื่อควบคุมปริมาณความร้อนและความชื้นที่เกิดขึ้นจากการหายใจในกองเมล็ดพืชที่เก็บแบบกอง (bulk storage)

ดัชนีการเสื่อมของสภาพอากาศ (Deterioration Index of the climate)

Brooks (1950) ได้เสนอวิธีวัดระดับของสภาพอากาศขณะเก็บเมล็ดพืชเพื่อใช้เป็นตัวบ่งชี้สำหรับคำนวณหาปริมาณลมที่จะใช้ระบายความร้อนที่เกิดจากการหายใจในกองเมล็ดพืช ซึ่งจากการใช้หลักการนี้ในการคำนวณหาปริมาณลม สำหรับเขตร้อนชื้นทำให้ปริมาณลมที่ได้มีค่าสูงกว่าค่าที่ใช้กันในเขตอบอุ่น (Temperate climates) ซึ่งมีสภาพอากาศที่แห้งกว่า

ดัชนีที่ใช้วัดค่าเสื่อมสภาพของอากาศเรียกว่า Deterioration Index (DI) โดยที่ค่า DI หาได้จาก สมการ

$$DI = (rh - 65)P_{vs} \times 10^{-4} \qquad (1)$$

เมื่อ rh คือ ค่าความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ยในแต่ละเดือน (%)

P_{vs} คือ ค่าความดันไออิ่มตัวเฉลี่ยที่อุณหภูมิในแต่ละเดือน (Pa)

สำหรับเขตร้อนชื้นอุณหภูมิในรอบปีมีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย ดังนั้นค่าความดันไออิ่มตัวสามารถหาได้จากตารางไอน้ำอิ่มตัวหรือคำนวณคราวๆ ได้จากสมการเส้นตรงดังนี้

$$P_{vs} = 151(T) - 641 \quad \text{เมื่อ} \quad 20 \le T \le 25 \quad {}^{o}C$$

$$P_{vs} = 214(T) - 2240 \quad \text{เมื่อ} \quad 25 < T \le 30 \quad {}^{o}C$$

$$P_{vs} = 283(T) - 4310 \quad \text{เมื่อ} \quad 30 < T \le 35 \quad {}^{o}C$$

ตารางที่ 1 แสดงค่าเฉลี่ยของความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิของอากาศแต่ละเดือนในรอบปี เมื่อนำค่าความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิอากาสมาคำนวณหาค่าเฉลี่ยของความดันไออิ่มตัวและค่า DI

ตารางที่ 1 ค่าเฉลี่ยของ DI ที่คำนวณได้ในแต่ละเดือน

เดือน	ความชื้นสัมพัทธ์ (%)	อุณหภูมิ (^{o}C)	ความดันไอ (Pa)	DI
มกราคม	85	25.0	31.4	6.3
กุมภาพันธ์	80	25.6	32.5	4.9
มีนาคม	77	26.8	34.9	4.2
เมษายน	76	28.4	38.3	4.2
พฤษภาคม	78	28.8	39.3	5.1
มิถุนายน	83	28.2	37.8	6.8
กรกฎาคม	85	27.5	36.4	7.3
สิงหาคม	84	27.2	35.8	6.8
กันยายน	86	27.1	35.5	7.5
ตุลาคม	85	26.9	35.1	7.0
พฤศจิกายน	85	26.2	33.6	6.7
ธันวาคม	86	25.4	32.1	6.7

ค่า DI สำหรับเมล็ดพืชทั่วไปประมาณ 4.8 สำหรับเมล็ดพืชบางชนิด อาจใช้ค่าดังนี้

- ข้าวเปลือก 5.0-5.1
- ข้าวโพด 3.8
- ถั่วลิสงมีเปลือก 3.8

ในกรณีที่ต้องการออกแบบเฉพาะเจาะจงที่สภาพความชื้นเมล็ดพืชต่างๆ ให้ใช้ค่า DI จากตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ค่า DI สำหรับใช้ในการออกแบบเฉพาะเจาะจงที่ความชื้นเมล็ดพืชต่างๆ (อุณหภูมิ 28 °C)

เมล็ดพืช	ความชื้น % wb								
	9	10	11	12	13	14	15	16	17
ข้าวเปลือก					1.8	4.2	6.3	8.0	9.3
ข้าวโพด					0.2	2.3	4.3	6.0	7.4
ถั่วลิสงฝัก	3.3	6.6	8.9	10.5					
ถั่วเหลือง			0.4	2.3	3.9	5.4	6.7	7.9	8.8
ข้าวฟ่าง						2.2	4.5	6.4	7.9
ข้าวสาลี					2.5	5.0	7.0	8.7	9.9

การสูญเสียมวลแห้งของเมล็ดพืช

เมล็ดพืชมีองค์ประกอบของสารเป็นพวกแป้ง เมื่อมีการหายใจจะเป็นไปตามสมการดังนี้

$$C_6H_{12}O_6 + 6O_2 \rightarrow 6H_2O + CO_2 + \text{heat}$$

180 g 192 g 108 g 264 g 2820 kJ

จะเห็นว่าในการหายใจของเมล็ดพืช ถ้าน้ำหนักแห้งเมล็ดพืช ถ้าน้ำหนักแห้งเมล็ดพืชสูญหายไป 180 กรัม จะผลิตน้ำหรือความชื้น 108 กรัม คาร์บอนไดออกไซด์ 264 กรัม และความร้อน 2820 กิโลจูล หรือกล่าวได้ดังนี้

- 1 kg ของ CO_2 ที่เกิดให้
- 10680 kJ ความร้อน
- 0.409 kg น้ำและ
- 0.682 kg น้ำหนักแห้งของเมล็ดพืชที่สูญเสีย

Teter (1981) ได้สร้างสมาการความสัมพันธ์ของการเกิดคาร์บอนได้ออกไซด์ที่เกิดจากการหายใจที่ความชื้นภายในเมล็ดพืชต่างๆ โดยใช้ของมูลของ Hall ดังนี้

$$\log(CO_2) = AM - B \qquad (2)$$

เมื่อ

CO_2 = mg CO_2 /100 g น้ำหนักแห้ง. วัน

M = ความชื้นเมล็ดพืช, % มาตรฐานเปียก

A และ B = ค่าคงที่ดูจากตารางที่ 3

จากสมการที่ (2) สามารถสร้างความสัมพันธ์ในรูปการสูญเสียน้ำหนักแห้งของเมล็ดพืช (DML) ได้ดังนี้

$$\%\ DML / day = (CO_2) \times 10^{-3} \times 0.682 \qquad (3)$$

เนื่องจากการสูญเสียน้ำหนักเกิดขึ้นต่อเนื่องตลอดเวลาและมีผลต่อคุณภาพและรายได้ของผู้ประกอบการ Teter ได้แนะนำ สำหรับการเก็บเมล็ดพืช เมื่อสิ้นสุดการเก็บน้ำหนักแห้งไม่ควรต่ำกว่า 0.85 ของน้ำหนักแห้งเริ่มต้น

ตารางที่ 3 ค่าคงที่ A และ B

เมล็ดพืช	ความชื้น (%wb)	A	B
ข้าวโพด	10.0-13.2	0.17	2.00
	13.3-17.0	0.27	3.33
ข้าวฟ่าง	10.0-13.2	0.125	1.65
	13.3-17.0	0.32	4.19
ข้าวเปลือก	10.0-13.2	0.21	3.04
	13.3-17.0	0.44	6.08
ข้าวกล้อง	10.0-13.7	0.17	2.67
	13.8-17.0	0.44	6.41
ข้าวขาว	10.0-14.1	0.16	2.83
	14.2-17.0	0.49	7.48
ข้าวสาลี	10.0-14.0	0.09	1.35
	14.1-17.0	0.36	5.14

การระบายอากาศในโรงเก็บเมล็ดพืช

ในการออกแบบระบบการถ่ายเทอากาศในโรงเก็บเมล็ดพืชผู้ออกแบบต้องคำนวณหาปริมาณอากาศที่ใช้ต่อตันเมล็ดพืชต่อเวลาเพื่อนำมาใช้คำนวณหาขนาดพัดลม ท่อลม ขนาดพัดลมและมอเตอร์ รวมทั้งระบบควบคุมการถ่ายเทอากาศ โดยวัตถุประสงค์ในการเป่าอากาศผ่านเมล็ดพืชในโรงเก็บคือ

1. เพื่อทำให้อุณหภูมิของเมล็ดพืชอยู่ในสภาพสม่ำเสมอ
2. กำจัดความชื้นที่เกิดขึ้นในกองเมล็ดพืชเนื่องจากการหายใจ
3. ระบายความร้อนที่เกิดขึ้นในกองเมล็ดพืช

โดยวัตถุประสงค์หลักในการระบายอากาศในโรงเก็บเมล็ดพืชคือ เพื่อระบายคามร้อนที่เกิดขึ้นในกองเมล็ดพืช ซึ่งในการออกแบบระบบการระบายอากาศในการเก็บเมล็ดพืชแบบกองมีขั้นต้อน 7 ขั้นตอนดังนี้

1) กำหนดความชื้นของเมล็ดพืชเพื่อใช้ในการออกแบบ
2) คำนวณหาปริมาณความร้อนที่เกิดขึ้น
3) เลือกช่วงเวลาในการปฏิบัติงาน
4) คำนวณหาความชื้นสัมพัทธ์สมดุลกับความชื้นของเมล็ดพืช
5) พิจารณาหาชั่วโมงการทำงานต่อวัน
6) คำนวณปริมาณลมที่ใช้
7) การออกแบบขนาดถังบรรจุ ระบบท่อลม และขนาดพัดลม

ในการเก็บรักษาเมล็ดพืชควรระวังเรื่อง การทำให้เมล็ดพืชมีความชื้นสูงขึ้น เนื่องจากการถ่ายเทอากาศทั้งนี้เนื่องจากอากาศที่เป่าเข้าไปมีความชื้นสัมพัทธ์สูงกว่าค่าความชื้นสัมพัทธ์สมดุลของเมล็ดพืช รายละเอียดของในแต่ละขั้นตอนมีดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 กำหนดความชื้นของเมล็ดพืช เพื่อใช้ในการออกแบบ

ความชื้นของเมล็ดพืชที่ใช้สำหรับการออกแบบจะมีค่าเท่ากับความชื้นสมดุลของอากาศในท้องถิ่นนั้นๆ สำหรับข้าวเปลือกความชื้นในการออกแบบมีค่าประมาณ 14.5-15.2% มาตรฐานเปียก อย่างไรก็ตามในกรณีที่ฤดูเก็บเกี่ยวตรงกับหน้าฝน ความชื้นในการออกแบบอาจสูงถึง 17% ทั้งนี้ในฤดูฝน อากาศมีความชื้นสัมพัทธ์สูง

ขั้นตอนที่ 2 คำนวณหาความร้อนที่เกิดขึ้น

ความร้อนที่เกิดขึ้นสามารถคำนวณได้จากปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ซึ่งหามาได้จาก สมการที่ (2) ตัวอย่างเช่น สมมติว่าต้องการเก็บข้าวโพดที่มีความชื้น 16% ความร้อนและน้ำที่เกิดขึ้นสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\log(CO_2) = AM - B$$

จากตารางที่ 3 ที่ความชื้นข้าวโพด 16% จะได้ค่า A = 0.27 , B = 3.33 จะได้ว่า

$$\log(CO_2) = 0.27(16) - 3.33$$

$$CO_2 = 9.77 \quad mg/100\ g\ dry\ matter.day$$

ดังนั้น มวลแห้ง 1 ตันจะมีปริมาณ $CO_2 = \frac{0.0098\ g \times (1000\ kg \times 1000\ g)}{100\ g}$

ถ้าอบแห้งข้าวเปลือกจำนวน 1 ตัน จะมีมวลแห้งเท่ากับ 0.84×1000 kg ดังนั้นจะมีปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์

$$CO_2 = 0.0098 \times 0.84 \times 10000 \quad mg/ton.day$$

$$= 82.32 \ g/ton.\ day$$

จากการหายใจของพืชพบว่า CO_2 จำนวน 264 กรัม จะให้ความร้อน 2820 kJ และน้ำ 108 กรัม ดังนั้น ปริมาณความร้อนและน้ำที่เกิดจากข้าวโพดความชื้น 16%wb จำนวน 1 ตัน คือ

$$\text{ความร้อน} = \frac{82.32 \times 2820}{264} = 879.33 \quad kJ$$

$$\text{น้ำ} \qquad = \frac{82.32 \times 108}{264} = 33.7 \quad g$$

สำหรับในข้าวเปลือก ตารางที่ 4 จะแสดงปริมาณความร้อนและน้ำที่เกิดขึ้นจากการเก็บข้าวเปลือกที่ความชื้นต่างๆ

ตารางที่ 4 ค่าความร้อนและความชื้นที่ต้องระบายออกในการเก็บข้าวเปลือกและแสดงค่าความชื้นสัมพัทธ์สูงสุดของลมที่ใช้เป่า

ความชื้น (%wb)	%rh (°C)	ความร้อนที่ต้องกำจัดออก (kJ/ton-day)	น้ำที่ต้องกำจัดออก Zg/ton-day)
13	71.0	41	1.6
14	76.5	109	4.2
15	80.5	298	11.5
16	84.0	811	31.3
17	98.3	2211	85.3

ขั้นตอนที่ 3 กำหนดเวลาในการปฏิบัติงาน

การกำหนดเวลาในการปฏิบัติงาน ต้องอาศัยข้อมูลอากาศของท้องถิ่นนั้นๆ มาประกอบการพิจารณา ข้อมูลที่ใช้ต้องเป็นข้อมูลอย่างน้อยที่สุด 10 ปี สุดท้าย เดือนที่มีความชื้นสูงสุดจะเป็นเดือนที่นำมาใช้ประกอบการคำนวณ ซึ่งจากตารางที่ 1 พบว่าเดือนกันยายนเป็นเดือนที่มีความชื้นและค่า DI สูงสุด

ขั้นตอนที่ 4 คำนวณหาค่าความชื้นสัมพัทธ์สมดุล

จากบทที่ 4 เราจะมีสมการในการหาค่าความชื้นสมดุล ที่ความชื้นสัมพัทธ์ต่างๆ ซึ่งสามารถนำสมการเหล่านั้นมาใช้ในการคำนวณหาค่าความชื้นสัมพัทธ์สมดุลได้ ในที่นี้ของยกสมการของ modified Henderson ซึ่งมีรูปสมการ

$$rh = 1 - \exp\left[-a(T+c)(M_e)^b\right] \qquad (4)$$

เมื่อ

Rh คือความชื้นสัมพัทธ์ (เศษส่วน)

M_e คือความชื้นสมดุล (% db.)

T คืออุณหภูมิ (^oC)

a ,b,c คือค่าคงที่ ซึ่งสำหรับเมล็ดพืชบางชนิดแสดงในตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ค่าคงที่ของแบบจำลอง modified Henderson สำหรับเมล็ดพืชบางชนิด

Grain	a ($\times 10^{-5}$)	b	c
Barley	2.2919	2.0123	195.267
Beans, edible	2.0899	1.8812	254.230
Corn, yellow dent	8.6541	1.8634	49.81
Peanut, kernel	65.0413	1.4984	50.561
Peanut, Pod	6.6587	2.5362	23.318
Rice, rough	1.9187	2.4451	51.161
Sorghum	0.8532	2.4757	113.725
Soybean	30.5327	1.2164	134.136
Wheat, durum	2.5738	2.2110	70.318
Wheat, hard	2.3007	2.2857	55.815
Wheat, soft	1.2299	2.5558	64.346

ที่มา ASAE(1988) อ้างอิงโดย Brooker et al., 1992

ตัวอย่างในการหาค่าความชื้นสัมพัทธ์สมดุลเช่น ข้าวโพดความชื้น 16 %wb หาค่าความชื้นสัมพัทธ์สมดุลได้ดังนี้

เปลี่ยนความชื้นมาตรฐานเปียกเป็นมาตรฐานแห้งได้ $= \frac{16}{84} = 0.19$ หรือ 19 %db

จากตารางที่ 5 ค่าคงที่สำหรับข้าวโพดคือ $a = 8.6541 \times 10^{-5}$, $b = 1.8634$, $c = 49.81$

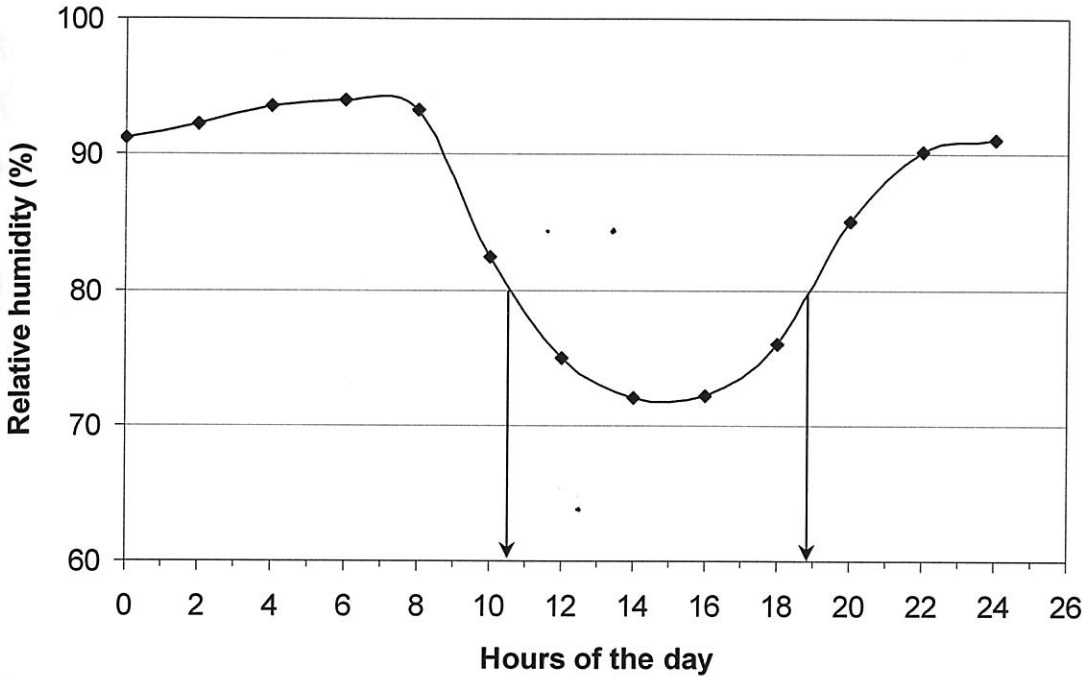
สมมติ T = 27 °C

$$rh = 1 - \exp\left[-8.6541 \times 10^{-5}(27 + 49.81)(19)^{1.8634}\right]$$

$$= 0.7991 \approx 80\%$$

ขั้นตอนที่ 5 หาชั่วโมงการทำงาน

ชั่วโมงการทำงานจะต้องอยู่ในช่วงเวลาที่กำหนดในขั้นที่ 3 คือใช้เดือนกันยายนในการออกแบบ ดังนั้นถ้าสมมติว่าข้าวโพดมีความชื้น 16 %wb ความชื้นสัมพัทธ์สมดุลคือ 80% จะหาชั่วโมงการทำงานได้จากเส้นระดับที่ลากผ่านความชื้น 80% ตัดกับความชื้นสัมพัทธ์ของเดือนกันยายน ตามภาพที่ 1 จากนั้นอ่านค่าชั่วโมงจากแกน X ซึ่งช่วงเวลาที่ใช้ทำงานจะเป็นช่วงที่มีความชื้นสัมพัทธ์ต่ำกว่า 80% ซึ่งจะได้ช่วงเวลาที่สามารถนำลมมาใช้ในการระบายอากาศได้อยู่ในช่วงเวลา 10.30-18.40 คือประมาณ 8.16 ชั่วโมงต่อวัน



ภาพที่1 ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศเฉลี่ยในแต่ละวันของเดือนกันยายน

ขั้นตอนที่ 6 คำนวณปริมาณลมที่ใช้

ลมที่ใช้เป่าระบายอากาศควรมีอุณหภูมิสูงขึ้นไม่เกิน 3 °C และค่าความร้อน จำเพาะของอากาศคือ 1 kJ/kg °C ดังนั้นตัวอย่างความร้อนที่คำนวณได้จากข้อ 2 จะต้องใช้ปริมาณลม

$$= \frac{879.33\ \text{kJ/ton-day}}{3\ \text{kJ/kg}} = 293.11\quad \text{kg/ton-day}$$

1 วัน ทำงาน 8.16 ชั่วโมง ดังนั้น

$$\text{ปริมาณลม} = \frac{293.11\ \text{kg/ton-day}}{8.16\ \text{h/day} \times 60\quad \text{min/h}} = 0.60\quad \text{kg/ton-min}$$

ปกติเราจะวัดอากาศโดยปริมาตร หากกำหนดให้ปริมาตรจำเพาะของอากาศชื้นคือ 0.85 m^3/kg จะได้

$$\text{ปริมาณลม} = 0.60 \times 0.85 = 0.51\quad m^3/\text{ton-min}$$

ขั้นตอนที่ 7 การออกแบบขนาดถังบรรจุ ระบบท่อลม และขนาดพัดลม

ขนาดของถังบรรจุเมล็ดพืชควรมีขนาดไม่ลึกมากเกินไปเพราะมีผลต่อการต้านแรงดันลมที่ต้องผ่านชั้นเมล็ดพืช ซึ่งเมื่อออกแบบให้ถังเก็บสูงๆ ต้องใช้กำลังลมมาก ขนาดของพัดลมก็ต้องใหญ่ กำลังมอเตอร์ก็ต้องสูงขึ้น ซึ่งมีผลต่อค่าใช้จ่ายไฟฟ้า ตารางที่ 6 แสดงปริมาตรของเมล็ดพืชต่อน้ำหนัก 1 ตัน ซึ่งใช้ในการคำนวณน้ำหนักของเมล็ดที่เก็บในถังเก็บได้

ตารางที่ 6 แสดงปริมาตรต่อน้ำหนักของเมล็ดพืชชนิดต่างๆ

เมล็ดพืช	ปริมาตรต่อน้ำหนัก (m^3/ton)
ข้าวเปลือก	1.72
ข้าวโพด	1.39
ข้าวสาลี	1.30
ข้าวโอ๊ต	2.43
ถั่วลิสง	4.27
ข้าวฟ่าง	1.37
ข้าวบาร์เล่ย์	1.55

หลักในการออกแบบท่อลมมีดังนี้

1. ท่อลมต้องทำจากวัสดุที่แข็งแรงและทำเป็นรูปครึ่งวงกลมเพื่อให้รับน้ำหนักเมล็ดที่กดลง
2. การวางท่อระยะห่างระหว่างท่อใช้หลักดังนี้
    a. ระยะทางที่ลมเคลื่อนที่ได้ไกลที่สุดจะต้องน้อยกว่า 1.5 เท่า ของระยะทางที่ใกล้ที่สุด
    b. ความสูงของกองเมล็ดพืชไม่ควรมีระยะยาวกว่าระยะห่างระหว่างท่อ
3. การหาขนาดของท่อให้พิจารณาตามความเร็วลมในท่อลมซึ่งมีมีข้อกำหนดดังนี้
    a. ความลึกเกิน 5 เมตร ความเร็วลม 400-900 เมตร/นาที
    b. ความลึกน้อยกว่า 5 เมตร ความเร็วลม 300-600 เมตร/นาที
4. การหาความยาวของท่อหาได้จากข้อกำหนดที่ว่าความเร็วในท่อ $v \leq 12$ m/min สำหรับถังลึก (depth bin) และ $v < 9$ m/min สำหรับถังตื้น (shallow bin)
5. สำหรับการคำนวณหาขนาดพัดลมให้ใช้หลักการที่เรียนมาแล้วในบทที่ 3

คำถามท้ายบท

1. จงคำนวณหาปริมาณลม(ลูกบาศก์เมตรต่อนาที)ที่ต้องใช้สำหรับระบายอากาศในกองเก็บข้าวเปลือกความชื้น 15%wb จำนวน 130 ตัน โดยให้ทำการระบายอากาศวันละ 6 ชั่วโมง
2. จากการคำนวณหาปริมาณลมเพื่อใช้ระบายอากาศในถังเก็บข้าวโพดแบบถังตื้นพบว่าต้องใช้พัดลมที่ให้ปริมาณลม 30.5 m^3/ นาที จงหาขนาดและความยาวของท่อระบายอากาศนี้ (กำหนดให้ใช้ความเร็วในการออกแบบขนาด 400 เมตร/นาที และความเร็วในการออกแบบความยาวท่อคือ 5 เมตร/นาที)
3. จงหาขนาดของถังเก็บข้าวเปลือกจำนวน 100 ตัน โดยมีข้อกำหนดว่าความสูงของเมล็ดพืชในถังเก็บต้องไม่เกิน 10 เมตร

บทที่ 12
การออกแบบถังเก็บเมล็ดพืช
(Design of grain storage)

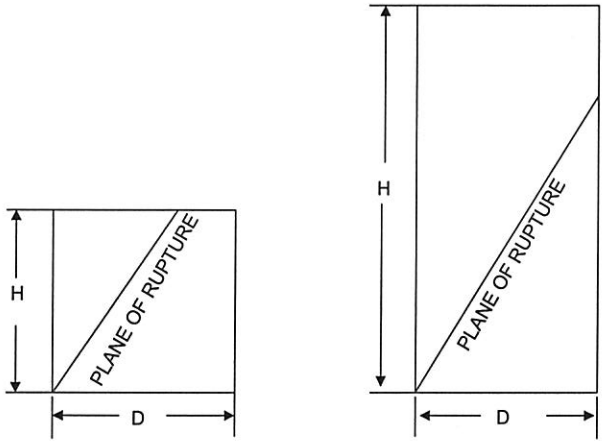
ถังเก็บเมล็ดพืชนั้นไม่ได้ทำหน้าที่เพียงแค่เก็บรวบรวมเมล็ดพืชเท่านั้นแต่ยังจะต้องสามารถป้องกันและลดความสูญเสียที่จะเกิดขึ้นกับเมล็ดพืช อันเนื่องมาจากการควบแน่นของความชื้น หรืออุณหภูมิที่สูงเกินได้ นอกจากนี้ถังเก็บจะต้องถูกออกแบบมาเพื่อรองรับการเปลี่ยนแปลงของความดันอันเนื่องมาจากเมล็ดพืชทั้งในช่วงเวลาที่มีเมล็ดพืชอยู่เต็มหรือเป็นเพียงถังเปล่า

ในการออกแบบถังเก็บมีหลายสิ่งที่เราต้องพิจารณา คือ ชนิดของเมล็ดพืช ปริมาณ ตำแหน่งที่ตั้ง จำนวนถังเก็บ วิธีการและเครื่องมือในการลำเลียงเมล็ดพืช ความแข็งแรงของโครงสร้าง โดยในบทนี้จะพิจารณาถึงค่าความดันที่เกิดขึ้นกับถังเก็บอันเนื่องมากจากเมล็ดพืช จากทฤษฎีการออกแบบของ Janssen, Rankine และ Airy

ความดันของถังเก็บ

ถังเก็บเมล็ดพืชจะต้องมีความแข็งแรง สามารถทนต่อแรงซึ่งเกิดจากเมล็ดพืชทั้งในขณะที่เมล็ดพืชอยู่นิ่งและเคลื่อนที่ นอกจากนี้ยังต้องสามารถต้านทานต่อแรงลมได้ทั้งในขณะที่มีเมล็ดพืชอยู่เต็มหรือในสภาวะที่เป็นถังเปล่า

ได้มีการศึกษาถึงความดันของเมล็ดพืชที่บรรจุอยู่ในถังมานานแล้ว ในทางทฤษฎีจะพิจารณาให้เมล็ดพืชเป็นกึ่งของไหล และแบ่งลักษณะของถังเก็บออกเป็น ถังตื้น (shallow bins) และ ถังลึก (deep bins) โดยใช้ลักษณะการเสียหายของถังเป็นตัวแบ่งดังภาพที่ 1 และสมการที่ใช้ในการออกมีดังนี้

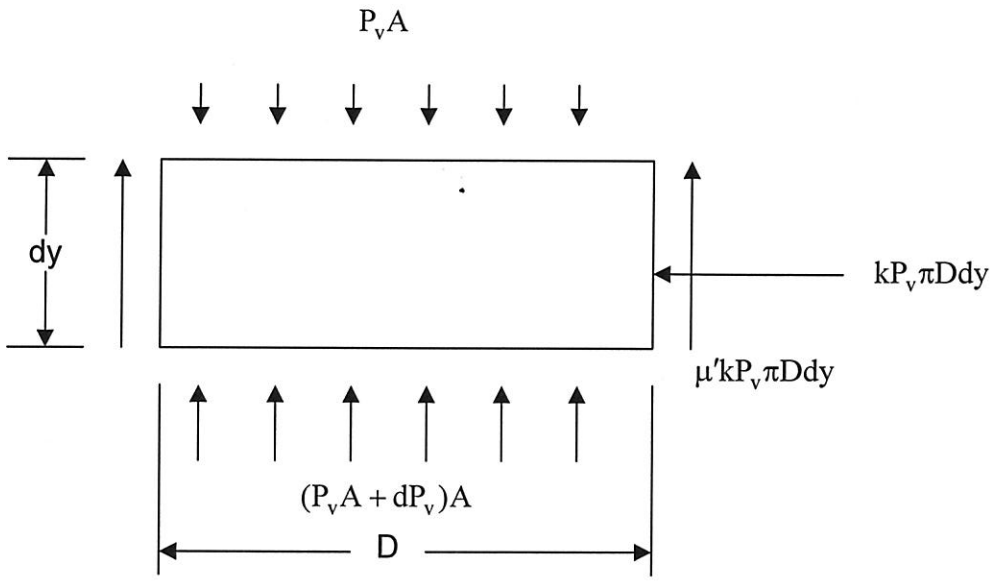


(ก) ถังตื้น (ข) ถังลึก

ภาพที่ 1 ความสัมพันธ์ระหว่างระนาบการเกิดรอยแยกของถังเก็บกับความสูงของถัง

Janssen's Equation

เขาเป็นคนแรกที่ทำการศึกษาถึงความดันที่เกิดในถังเก็บแบบลึก โดยสมมติว่าความดันอันเนื่องมาจากเมล็ดพืชที่กระทำต่อตัวถังเก็บในแนวนอนและแนวตั้งเป็นสัดส่วนกัน ซึ่งหากพิจารณา ส่วนของปริมาตร $\pi r^2 dy$ ซึ่งเป็นปริมาตรของเมล็ดพืชที่บรรจุอยู่ในถังทรงกระบอก ดังภาพที่ 2



ภาพที่ 2 แรงที่เกิดขึ้นเนื่องจากเมล็ดพืชในถังเก็บ

หากค่า bulk density ของเมล็ดพืชคือ ρ_d และอัตราส่วนระหว่างความดันในแนวนอนและแนวตั้งมีค่าเป็น k ที่ทุกๆ จุดที่บรรจุเมล็ดพืช ความดันตั้งฉากกับระนาบราบที่ความลึก y ต่ำกว่าผิวของเมล็ดพืชคือ P_v และความดันตั้งฉากบนผนังในแนวตั้งคือ

$$P_h = kP_v \qquad (1)$$

เมื่อ P_h คือความดันในแนวราบ, Pa

P_v คือ ความดันในแนวดิ่ง, Pa

k คือ อัตราส่วนของความดันในแนวราบต่อความดันในแนวดิ่ง

น้ำหนักของชิ้นปริมาตรในภาพที่ 2 ซึ่งมีความหนา dy คือ $\pi r^2 \rho_d g dy$ ดังนั้น ในสภาวะสถิตผลรวมของแรงในแนวดิ่งที่กระทำต่อชิ้นปริมาตรจะมีค่าเป็นศูนย์ดังนั้นจะได้ว่า

$$\pi r^2 \rho_d g dy = \pi r^2 (P_v + dP_v) - \pi r^2 P_v + 2\pi r k P_v \mu' dy \qquad (2)$$

$$\frac{dP_v}{dy} = \rho_d g - k\left(\frac{2\pi r}{\pi r^2}\right)\mu' P_v \quad \text{หรือ} \quad \frac{dP_v}{dy} = \rho_d g - \frac{k\mu'}{R} P_v \qquad (3)$$

เมื่อทำการ อินทิเกรตจะได้ว่า $P_v = 0$ สำหรับที่ $y = 0$ และที่ความลึก y จะได้ว่า

$$P_v = \left(\frac{\rho_d g R}{k\mu'}\right)\left[1 - \exp\left(\frac{-k\mu' y}{R}\right)\right] \qquad (4)$$

กำหนดให้ PJ คือค่าความดันในแนวราบ (กระทำต่อผนังของถังเก็บ) เราจะได้ว่า $PJ = kP_v$ ดังนั้น Janssen's equation คือ

$$PJ = \left[\frac{\rho_d g R}{\mu'}\right]\left(1 - \exp\left(\frac{-k\mu' y}{R}\right)\right) \qquad (5)$$

เมื่อ PJ คือ lateral pressure ของ Janssen's equation (Pa)

g คือค่าแรงโน้มถ่วง, m^2/s

r คือ รัศมีของของถังเก็บ, m

R คือ hydraulic radius, $\frac{\pi r^2}{2\pi r}$

μ' คือ สัมประสิทธิ์ความเสียดทานของเมล็ดบนผนังถังเก็บ

สำหรับถังเก็บแบบลึก จะสามารถหาแรงกระทำต่อพื้นของถังเก็บได้จาก

$$V = \frac{PJ}{k} \qquad (6)$$

เมื่อ V คือ ภาระที่กระทำต่อพื้น, N/m^2

ในการใช้ Janssen's equation จะมีข้อสงสัยอยู่ที่ว่าค่า k เป็นค่าที่ไม่แน่นอน ยังไม่มีการพิสูจน์หามาอย่างแน่ชัด ค่าทั่วไปที่ใช้จะมีค่า $(1-\sin\theta)/(1+\sin\theta)$ ซึ่งเป็นค่าสัมประสิทธิ์ของ Rankine's equation แต่ถึงอย่างไรก็ตาม Janssen's equation ก็เป็นที่นิยมอย่างกว้างขวางในการออกแบบถังเก็บ ตารางที่ 1 และ 2 แสดงคุณสมบัติของเมล็ดพืชบางชนิด ต่อถังเก็บ

ตารางที่ 1 คุณสมบัติของเมล็ดพืชที่สัมพันธ์กับภาระของถังเก็บ

Crop	Bulk density (kg/m^3)	Angle of repose (θ)	Tan ϕ Internal fiction coefficient	Ratio of lateral to vertical pressure (k)
Barley	610-680	16-28	0.29-0.53	-
Shelled corn	700-760	16-27	0.29-0.51	0.60-0.65
Rice	570	20-36	0.36-0.72	0.48
Soyabeans	730	16-29	0.29-0.55	0.38
Sorghum grain	700-760	20-33	0.36-0.65	-
wheat	730-830	16-28	0.29-0.53	0.30-0.60

ตารางที่ 2 สัมประสิทธิ์ความเสียดทานของเมล็ดพืชต่อผนังของถัง

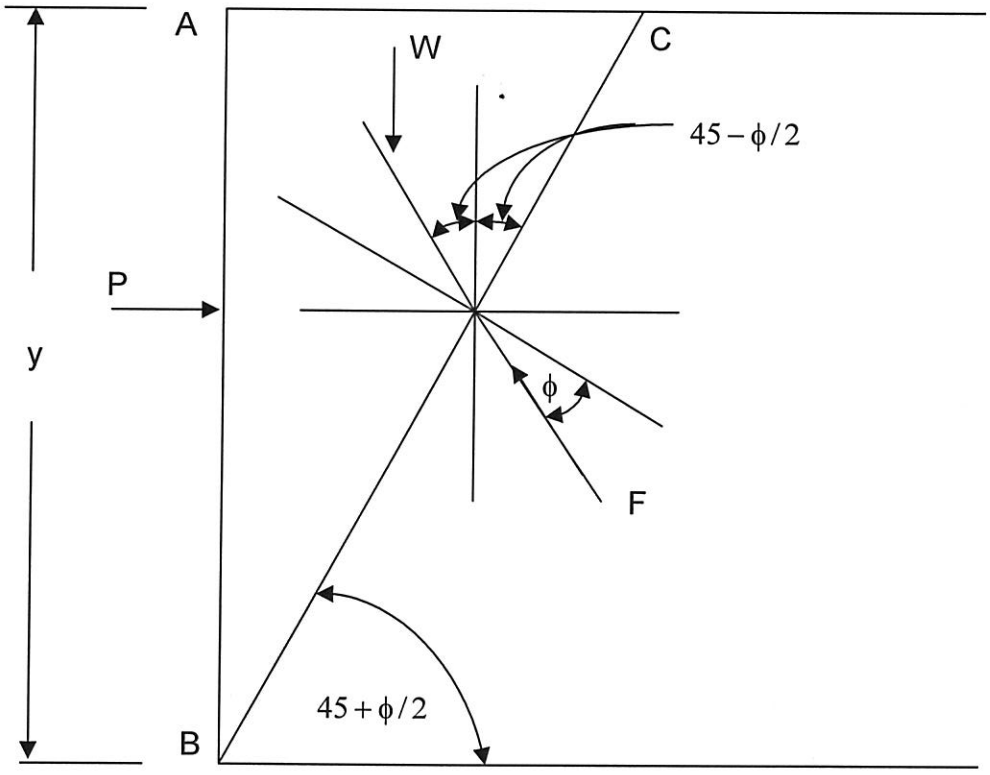
Grain	Plywood	Rough boards	Sheet steel	Galvanizing	Concrete
Barley	30-50	42-55	20-470	-	50-60
Shelled corn	25-50	30-35	20-60	20-40	50-60
Rice	40-45	50-55	40-50	-	45-60
Soyabeans	-	30	35-40	-	27
Sorghum grain	12-40	-	16-40	20-45	30-48
wheat	25-50	30-40	20-50	20-50	45-70

หมายเหตุ : ค่าในตารางถูกคูณด้วย 100

Rankine's Equation

Rankine ได้พัฒนาทฤษฎีความดันที่เกิดจากวัสดุเมล็ดกลมๆ ต่อผนัง ทฤษฎีของ Rankine จะพิจารณาที่ค่าความเค้น (stress) โดยความเสียหายจะเกิดเนื่องจากความเค้นเฉือนตามระนาบซึ่งทำมุม $45° + \phi/2$ กับระนาบหลัก

เมื่อพิจารณาถังเก็บแบบตื้นซึ่งมีระนาบความเสียหาย BC ตัดที่ผิวด้านบนของเมล็ดพืช ดังในภาพที่ 3 เมื่อสมดุลแรงในแนวดิ่งและแนวระดับจะได้ว่า



ภาพที่ 3 แรงที่กระทำบนระนาบความเสียหายของถังตื้นของ Rankine

$$P = F\sin(45 - \phi/2) \tag{7}$$

$$W = F\cos(45 - \phi/2) \tag{8}$$

หารสมการ (7) ด้วย (8) จะได้

$$P = W\tan(45 - \phi/2) \tag{9}$$

พื้นที่ของสามเหลี่ยม ABC คือ $\frac{1}{2}y \times y\tan(45-\phi/2)$ เมื่อพิจารณาน้ำหนักต่อหนึ่งหน่วยความกว้าง จะได้น้ำหนักของเมล็ดพืชใน ABC คือ

$$W = \frac{y^2\rho_d g}{2}\tan(45-\phi/2) \qquad (10)$$

จากสมการ (9) และ (10) เราจะได้

$$P = \frac{y^2\rho_d g}{2}\tan^2(45-\phi/2) = \frac{y^2\rho_d g}{2}\left(\frac{1-\sin\phi}{1+\sin\phi}\right) \qquad (11)$$

ซึ่งจะได้ค่าความดันที่กระทำกับผนังของถังเก็บ (lateral pressure) ของ Rankine คือ

$$PR = \rho_d g\, y\left(\frac{1-\sin\phi}{1+\sin\phi}\right) \qquad (12)$$

เมื่อ PR คือ lateral pressure ของ Rankine's equation (Pa)

ϕ คือ มุมกองของวัสดุ (angle of repose)

Airy's Equation

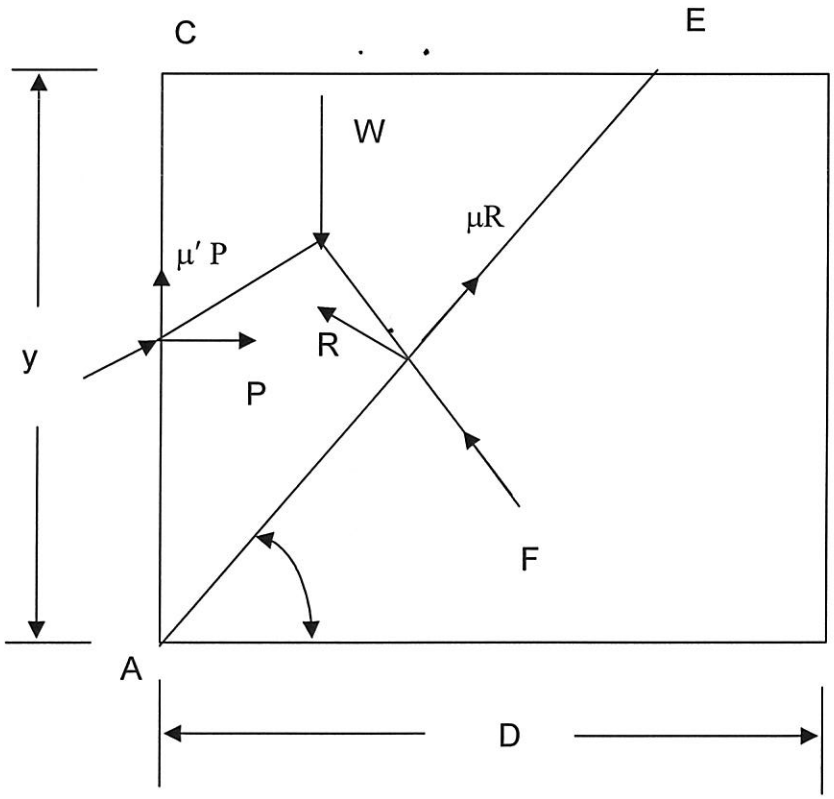
W. Airy (1898) ได้สร้างสมการเพื่อหาค่าความดันที่กระทำต่อถังเก็บ ทั้งแบบถังตื้นและถังลึกโดยการวิเคราะห์แรงที่เกิดขึ้นในถังเก็บดังในภาพที่ 4 หากพิจารณามวลของเมล็ดพืชในรูป ACE ซึ่งก่อให้เกิดความดันสูงสุดที่ด้านข้างของถังในแนว AE จะเกิดแรงสามแรงซึ่งกระทำต่อ ACE ในลักษณะสมดุลคือ แรงเนื่องจากน้ำหนักของเมล็ดพืช W แรงปฏิกิริยา F และแรงดันรวม P เมื่อรวมแรงในแนวขนานและตั้งฉากกับ AE จะได้

$$\mu R + P\cos\alpha = (W - \mu' P)\sin\alpha \qquad (13)$$

$$R - P\sin\alpha = (W - \mu' P)\cos\alpha \qquad (14)$$

จากสมการ (13) และ (14) จะได้ว่า

$$P = W\frac{\tan\alpha - \mu}{(1-\mu\mu') + (\mu+\mu')\tan\alpha} \qquad (15)$$



ภาพที่ 4 ลักษณะแรงของถังตื้นตามทฤษฎีของ Airy

น้ำหนัก W ของเมล็ดพืชหาได้จาก

$$W = \frac{y^2 \rho_d g}{2\tan\alpha} \qquad (16)$$

แทนค่า W ลงใน (15) จะได้

$$P = \rho_d g \frac{y^2}{2\tan\alpha}\frac{\tan\alpha - \mu}{(1-\mu\mu') + (\mu+\mu')\tan\alpha} \qquad (17)$$

ที่ค่าความดันสูงสุดจะให้ค่า $\tan\alpha = \mu + \sqrt{\mu\frac{1+\mu^2}{\mu+\mu'}}$ (18)

แทนค่า $\tan\alpha$ ในสมการ (17) จะได้

$$P = \frac{\rho_d g y^2}{2}\left[1/\left\{\sqrt{\mu(\mu+\mu')}+\sqrt{(1+\mu^2)}\right\}\right]^2 \quad (19)$$

จะได้ lateral pressure ของ Airy คือ

$$PA = \rho_d g y\left[1/\left\{\sqrt{\mu(\mu+\mu')}+\sqrt{(1+\mu^2)}\right\}\right]^2 \quad (20)$$

จากภาพที่ 4 หากระนาบ AE ตัดกับผนังถังเก็บอีกด้านหนึ่งแทนที่จะตัดผิวด้านบนของเมล็ดพืช (กรณีของถังลึก) ก็จะหาค่า PA ได้ในทำนองเดียวกันแต่ว่าในกรณีนี้

$$W = \frac{\rho_d g D}{2}(2y - D\tan\alpha) \quad (21)$$

$$\tan\alpha = \sqrt{\frac{2y}{D}.\frac{1+\mu^2}{\mu+\mu'}+\frac{1+\mu^2}{\mu+\mu'}.\frac{1-\mu\mu'}{\mu+\mu'}}-\frac{1-\mu\mu'}{\mu+\mu'} \quad (22)$$

และ

$$P = W.\frac{\tan\alpha-\mu}{1-\mu\mu'+(\mu+\mu')\tan\alpha} \quad (23)$$

สมการ (21)-(23) สำหรับ $y \geq D\tan\alpha$ ซึ่งสมการทั้งสามจะลดรูปลงเหลือ

$$P = \frac{\rho_d g D^2}{2}\left[\frac{\sqrt{(2y/D)(\mu+\mu')+(1-\mu\mu')}-\sqrt{1+\mu^2}}{(\mu+\mu')}\right]^2 \quad (24)$$

ซึ่งจะได้รูปแบบสมการของ Airy คือ

$$PA = \frac{\rho_d g D}{\mu+\mu'}\left[-\frac{\sqrt{1+\mu^2}}{\sqrt{(2y/D)(\mu+\mu')+(1-\mu\mu')}}\right] \quad (25)$$

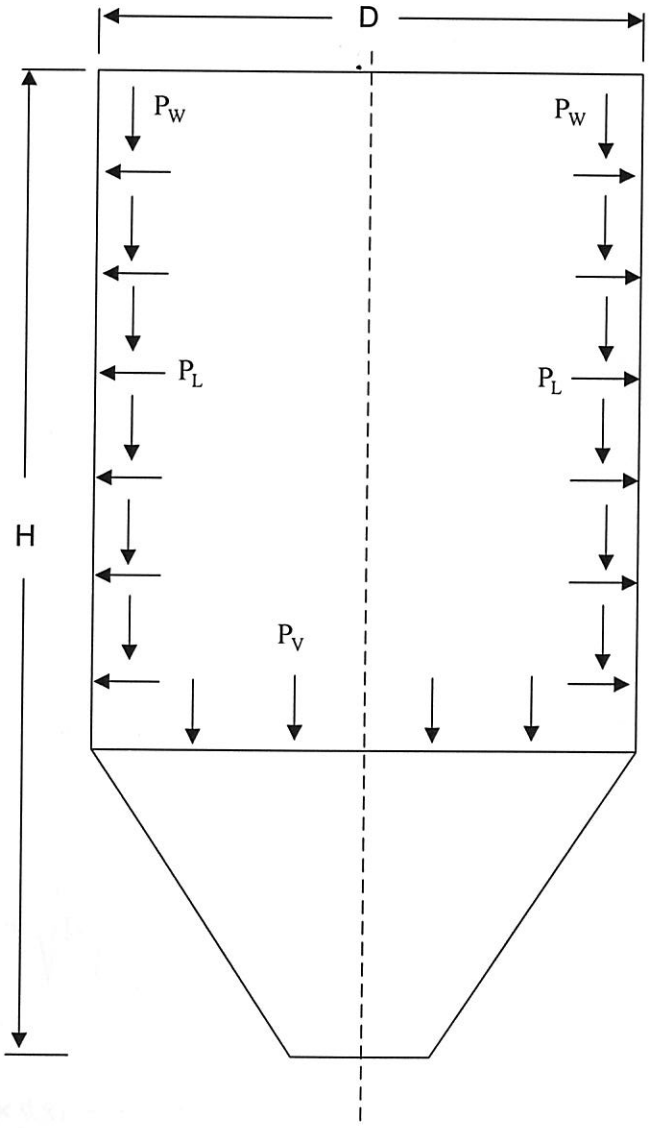
เมื่อ PA คือ lateral pressure ของ Airy's equation (Pa)

D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของถัง (m)

μ คือ ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานระหว่างเมล็ดพืช

μ' คือ ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของเมล็ดพืชบนผนังถังเก็บ

เนื่องจากการไม่ทราบค่า k ทำให้วิศวกรบางคนเลือกใช้สมการของ Airy ในการออกแบบถังเก็บ ภาพที่ 5 แสดงลักษณะการเกิดความดันที่ผนังของถังเก็บ



ภาพที่ 5ความดันในไซโล

ตัวอย่างที่ 1 ถังเก็บเมล็ดพืชแบบตื้นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 เมตร สูง 4.5 เมตร บรรจุข้าวสาลีหนัก 800 kg/m^3 หากข้าวสาลีมีมุมกอง (angle of repose) คือ 30 °, $\mu' = 0.361$, $\mu = 0.466$ และ $k = 0.5540$ จงเปรียบเทียบค่าความดันในแนวตั้งฉากกับผนัง (lateral pressure) ต่อค่าความลึก จากสมการของ Rankine และ Janssen และให้ระหว่างสมการ Airy สำหรับถังตื้นและสมการของ Janssen ด้วย

วิธีทำ

สมการของ Rankine สำหรับ lateral pressure, PR คือ

$$PR = \rho_d g \frac{1-\sin\phi}{1+\sin\phi} = 800 \times 9.81 \times y \frac{1-\sin 30^o}{1+\sin 30^o}$$

$$= 2616y \qquad (a)$$

สมการของ Jenssen สำหรับ lateral pressure, PJ คือ

$$PJ = \left[\frac{\rho_d g R}{\mu'}\right]\left(1-\exp\left(\frac{-k\mu' y}{R}\right)\right)$$

$$= \left[\frac{800 \times 9.81 \times 1.5}{0.361}\right]\left(1-\exp\left(\frac{-0.5540 \times 0.361 \times y}{1.5}\right)\right)$$

$$= 32609.42\left(1-\exp\left(-0.1333y\right)\right) \qquad (b)$$

สมากรของ Airy สำหรับ lateral pressure, PA ของถังตื้นคือ

$$PA = \rho_d g \frac{y}{\tan\alpha} \frac{\tan\alpha - \mu}{(1-\mu\mu')+(\mu+\mu')\tan\alpha}$$

โดยที่ $\tan\alpha = \mu + \sqrt{\mu\frac{1+\mu^2}{\mu+\mu'}} = 0.466 + \sqrt{0.466\frac{1+0.466^2}{0.466+0.361}} = 1.2941$

ดังนั้น

$$PA = 800 \times 9.81 \frac{y}{1.2941}\left[\frac{1.2941-0.466}{(1-0.466\times 0.361)+(0.466+0.361)1.2941}\right]$$

$$= 2639.9y \qquad (c)$$

ค่าความดัน PR, PJ และ PA จากสมการ (a) , (b) และ (c) ที่แต่ละความลึกของถังแสดงดังตาราง

y	1	2	3	4	4.5
y/Y	0.22	0.44	0.66	0.88	1.0
PR/PJ	0.64	0.69	0.73	0.78	0.80
PA/PJ	0.65	0.69	0.74	0.78	0.81

****

คำถามท้ายบท

1. ไซโลคอนกรีตขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 เมตร และบรรจุข้าวเปลือกลึก 20 เมตร โดยที่ข้าวเปลือกหนัก 636 kg/m^3 มุมเสียดทานระหว่างข้าวเปลือกและผนังไซโลมีค่า 30° และอัตราส่วนระหว่างความดันในแนวนอนต่อแนวตั้งคือ 0.4 จงหาค่าความดันที่กระทำต่อผนังไซโลทุกๆ ช่วงความลึก 2 เมตร

บรรณานุกรม

วิวัฒน์ ตัณฑะพานิชกุล. 2548. การปรับปรุงประสิทธิภาพของกระบวนการอบแห้ง, *ใน* เทคโนโลยีการอบแห้งในอุตสาหกรรมอาหาร. สำนักพิมพ์สมาคาส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น)

สมชาติ โสภณรณฤทธิ์. 2540. การอบแห้งเมล็ดพืชและอาหารบางประเภท. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

สาทิป รัตนภาสกร. มดป. เอกสารคำสอน วิชา 01115301 การอบแห้งและเก็บรักษาเมล็ดพืช. ภาควิชาวิศวกรรมอาหาร สถาบันเทคโนโลยีลาดกระบัง กรุงเทพฯ

Bala B.K. 1997. Drying and Storage of Cereal Grains. Science Publishers, Inc. USA.

Donald B. Brooker, Fred W. Bakker-Arkema andCarl W. Hall. 1992. Drying and Storage of Grains and Oilseeds. An AVI Book, Van Nostrand Reinhold, Newyork.

Paul R. Singh. 2001. Postharvest Technology. Science Publishers, Inc. USA.

Teter N.C. 1981. Grain Storage, ***In*** Grain Post-harvest Processing Technology. Publication of PUSTAKA IPB. Southeast ASIA cooperative Post –harvest Research & Development Program, LOS BANOS, Philippines.

Henderson S.M. and Perry R.L. 1976. Agricultural Process Engineering. The AVI Publishing Company, Inc.