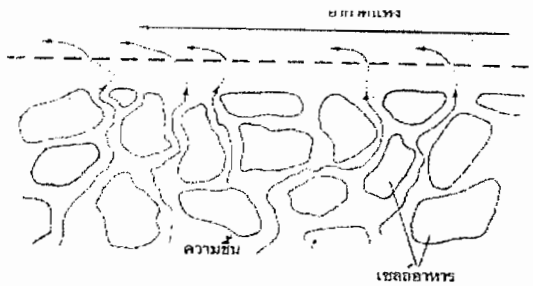
บทที่ 2

หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ทฤษฎีการอบแห้ง [1] คือ กระบวนการลดความชื้นส่วนใหญ่ใช้วิธีการถ่ายเทความร้อนไปยังวัสดุที่มีความชื้น เพื่อไล่ความชื้นออกโดยการระเหยโดยใช้ความร้อนที่ได้รับเป็นความร้อนแฝงของการระเหย ความร้อนจะถ่ายเทจากกระแสอากาศไปยัง ผิววัสดุ ความร้อนส่วนใหญ่ถูกใช้ไปในการระเหยน้ำ ในขณะเดียวกันไอน้ำจะเคลื่อนที่จากบริเวณผิววัสดุมายังกระแสอากาศ ถ้าผิว วัสดุมีปริมาณน้ำอยู่จำนวนมาก อุณหภูมิและความเข้มข้นของไอน้ำที่ผิวก็จะคงที่ ซึ่งส่งผลให้อัตราการถ่ายเทความร้อนและอัตราการอบแห้งคงที่ด้วย ถ้าอุณหภูมิ ความชื้น และความเร็วของกระแสอากาศมีค่าคงที่ เมื่อผิววัสดุมีปริมาณน้ำลดลงมากแล้วอุณหภูมิและความเข้มข้นของไอน้ำที่ผิววัสดุย่อมเปลี่ยนแปลงไป โดยที่อุณหภูมิจะสูงขึ้นและความเข้มข้นจะลดลง ซึ่งส่งผลให้อัตราการถ่ายเทความร้อนและอัตราการอบแห้งลดลง ความชื้นที่อยู่ระหว่างช่วงอัตราการอบแห้งคงที่และช่วงอัตราการอบแห้งลดลงเรียกว่า ความชื้นวิกฤต เมื่อวัสดุ มีความชื้นลดต่ำลงจนถึงความชื้นวิกฤต น้ำจากภายในวัสดุจะเคลื่อนที่มายังผิววัสดุในรูปของของเหลวหรือไอน้ำ แล้วจึงระเหยเคลื่อนที่ไปยังกระแสอากาศ การเคลื่อนที่ของน้ำในรูปของเหลวจะเกิดขึ้นในระยะแรก ขณะที่วัสดุยังมีความชื้นสูงพอประมาณเมื่อความชื้นลดต่ำมากแล้วน้ำอาจเคลื่อนที่ในรูปของไอน้ำ

2.1 กลไกการทำแห้ง[2]

เมื่ออากาศร้อนหรือลมร้อนพัดผ่านหน้าอาหารที่เปียก ความร้อนจะถูกถ่ายเทไปยังผิวของอาหารและน้ำในอาหารจะระเหยออกมาด้วยความร้อนแฝงของการเกิดไอ ไอน้ำจะแพร่ผ่านแผ่นฟิล์มอากาศและถูกพัดพาไปโดยความร้อนที่เคลื่อนที่ ดังแสดงในภาพที่ 2.1



ภาพที่ 2.1 การเคลื่อนที่ของความชื้นระหว่างการทำแห้ง [2]

สภาวะดังกว่าวจะทำให้ความดันไอที่ผิวหน้าของอาหารต่ำกว่าความดันไอด้านในของอาหาร เป็นผลให้เกิดความแตกต่าง ของความดันไอขึ้น อาหารชั้นด้านในจะมีความดันไอสูงและค่อย ๆ ลดต่ำลงเมื่อชั้นอาหารเข้าใกล้อากาศแห้ง ความแตกต่างนี้จะทำให้เกิดแรงดันเมื่อไล่น้ำออกจากอาหาร น้ำจะเคลื่อนที่ไปยังผิวหน้าด้วยกลไกดังต่อไปนี้

2.1.1การเคลื่อนที่ของของเหลวด้วยแรงคาปิลารี่

การแพร่ของของเหลวซึ่งเกิดจากความแตกต่างของความเข้มข้นของตัวละลายในอาหารส่วนต่าง ๆ

2.1.2การแพร่ของของเหลวซึ่งถูกดูดซับโดยผิวหน้าของของแข็งในอาหาร

2.1.3การแพร่ของไอน้ำในช่องอากาศของอาหารซึ่งเกิดจากความแตกต่างของความดันไอ

2.2 สภาวะในขณะทำแห้ง

นอกจากสภาพธรรมชาติของอาหาร ขนาด รูปร่าง การเตรียม และการจัดเรียงอาหารซึ่งมีผลต่ออัตราการทำแห้งแล้ว สภาวะในขณะทำแห้งด้วยวิธีการหรือเครื่องมือทำแห้งแบบต่างๆ ก็เป็นปัจจัยสำคัญมากประการหนึ่งที่มีผลต่ออัตราการทำแห้งอาหารเนื่องจากถ้าสภาวะการทำแห้งเอื้ออำนวยให้ประสิทธิภาพการ ส่งผ่านความร้อนเข้าไปทำให้น้ำในอาหารเป็นไปได้ดี และขณะเดียวกันทำให้น้ำหรือไอน้ำเคลื่อนที่ออกจากอาหารได้เร็วขึ้นจะเป็นผลทำ ให้อัตราการทำแห้งเร็วขึ้น

2.2.1 อุณหภูมิ ซึ่งเป็นปัจจัยหนึ่งที่สำคัญที่มีอิทธิพลต่ออัตราการทำแห้ง กล่าวคือ ถ้าตัวกล่าวที่ให้ความร้อนแก่น้ำในอาหาร เช่น อากาศร้อนในเครื่องทำแห้งแบบตู้มีอุณหภูมิสูง จะมีผลทำให้อุณหภูมิในอากาศร้อนกับอุณหภูมิของน้ำในอาหารนั้นมีความแตกต่างกันมาก ทำให้ความร้อนส่งผ่านให้กับน้ำในอาหารได้ดี ซึ่งจะทำให้น้ำในอาหารเคลื่อนที่และระเหยออกจากอาหารได้ง่ายและทำให้อัตราการทำแห้งสูงขึ้น แต่ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับปัจจัยอื่น ๆ ด้วย ถึงแม้ว่าอุณหภูมิของการทำแห้งที่สูงขึ้น โดยทั่วไปมักจะทำให้อัตราการทำแห้งเร็วขึ้นก็ตาม แต่อุณหภูมิที่ใช้ในการทำแห้งอาหารนั้นควรใช้อยู่ในระดับที่เหมาะสม ไม่ควรสูงเกินไป เนื่องจากถ้าอุณหภูมิที่สูงเกินไปจะมีผลต่อการเสื่อเสียคุณภาพและคุณค่าทางอาหารของอาหารที่นำมาทำแห้ง เนื่องจากผลของความร้อน

2.2.2 ความชื้นสัมพัทธ์ (relative humidity) คือ อัตราส่วนระหว่างปริมาณไอน้ำในความชื้นต่อปริมาณไอน้ำสูงสุดที่อากาศนั้นจะสามารถรับได้ที่อุณหภูมิและความดันเดียวกัน นอกจากนี้ยังหมายถึงความดันของอากาศต่อความดันอิ่มตัวในขณะนั้นที่อุณหภูมิหนึ่ง ๆ ค่าความชื้นสัมพัทธ์จะมีค่าอยู่ระหว่าง 0 — 1 หรือรายงานในรูปร้อยละ 0 — 100 ก็ได้ อากาศที่ใช้ทำแห้งอาหารควรจะมีค่าความชื้นสัมพัทธ์ต่ำ เพื่อจะดึงน้ำออกมาได้มาก ขณะเดียวกันการเก็บรักษาผักผลไม้บางชนิดจำเป็นต้องควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ ให้มีค่าสูง ๆ เพื่อป้องกันมิให้น้ำในผักถูกดึงออกมากจนทำให้ผลิตผลเสื่อมคุณภาพ ความชื้นสัมพัทธ์ เป็นปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่ออัตราการทำแห้ง ไม่ว่าจะเป็นความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศใน

บรรยากาศขณะทำแห้งอาหารด้วยการตากแดดหรือความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศในเครื่องทำแห้งแบบต่าง ๆ เช่น ในเครื่องทำแห้งแบบตู้ เครื่องทำแห้งแบบอุโมงค์ เครื่องทำแห้งแบบพ่นฝอย เป็นต้น ถ้าความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศขณะทำแห้งมีค่าสูง จะมีผลทำให้การเคลื่อนที่ของน้ำและการระเหยของไอน้ำออกจากชิ้นอาหารมาสู่อากาศโดยรอบนั้นเป็นไปได้ยากขึ้น เนื่องจากอากาศภายนอกนั้นมีปริมาณน้ำสูงอยู่แล้ว โดยทั่วไปจึงเป็นผลให้อัตราการทำแห้งช้าลง ดังตัวอย่างเช่น กรณีการตากกล้วยโดยการตากแดดในวันที่อากาศมีความชื้นสัมพัทธ์สูง จะพบว่ากล้วยตากจะแห้งช้า เป็นต้น

2.3 การอบแห้งช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ [3]

การถ่ายเทความร้อน และมวลระหว่างวัสดุและอากาศ เหมือนกับการถ่ายเทความร้อนและมวลที่เกิดขึ้นที่กระเปาะเปียกของเทอร์โมมิเตอร์ การถ่ายเทความร้อนและมวลจะเกิดขึ้นที่ผิวนอกของวัสดุเท่านั้น น้ำจะเกาะที่ผิวของวัสดุเป็นจำนวนมาก เมื่อเพิ่มความเร็วลมที่ไหลผ่านวัสดุจะทำให้ฟิล์มอากาศนิ่งมีความหนาลดลง เป็นผลให้ความต้านทานต่อการไหลของความร้อนและมวลลดลงด้วย เมื่อเพิ่มอุณหภูมิของการอบแห้ง จะทำให้ความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างที่ผิววัสดุและของกระแสอากาศที่ไหลอย่างอิสระมีมากขึ้น เป็นผลให้การถ่ายเทความร้อนและมวลดีขึ้นและเมื่อลดค่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศอบแห้ง จะเป็นผลให้ความแตกต่างระหว่างอัตราส่วนความชื้นอิ่มตัวที่ผิววัสดุและอัตราส่วนความชื้นของกระแสอากาศที่ไหลอย่างอิสระมีมากขึ้น เป็นผลให้การถ่ายเทความร้อนและมวลดีขึ้นและเมื่อลดค่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศอบแห้ง จะเป็นผลให้ความแตกต่างระหว่างอัตราส่วนความชื้นอิ่มตัวที่ผิววัสดุและอัตราส่วนความชื้นของกระแสอากาศที่ไหลอย่างอิสระมีมากขึ้นทำให้เกิดการถ่ายเทมวลดีขึ้น ตัวแปรสำคัญที่มีผลต่อช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ คือ อุณหภูมิความชื้นสัมพัทธ์ และความเร็วลม

2.4 การอบแห้งช่วงอัตราการอบแห้งลดลง

ในช่วงอัตราการอบแห้งลดลง ความชื้นของวัสดุมีค่าต่ำกว่าความชื้นวิกฤต การถ่ายเทความร้อนและมวลมิได้เกิดขึ้นเฉพาะที่ผิววัสดุเท่านั้น แต่เกิดภายในเนื้อของวัสดุด้วย การเคลื่อนที่ของน้ำจากภายในวัสดุมายังผิวช้ากว่าการพาความชื้นจากผิววัสดุไปยังอากาศ ทำให้อัตราการอบแห้งลดลง อัตราการระเหยน้ำจะถูกควบคุมโดยความต้านทานต่อการเคลื่อนที่ของโมเลกุลของน้ำในวัสดุ ในขณะนั้นอุณหภูมิของวัสดุมีค่าสูงขึ้น และสูงกว่าอุณหภูมิกระเปาะเปียก เมื่อลดค่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศอบแห้ง จะเป็นผลให้เกิดความแตกต่างระหว่างอัตราส่วนความชื้นเพิ่มขึ้น และมีผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นเพิ่มขึ้นด้วย ดังนั้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิหรือลดความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศแล้ว จะเป็นผลให้การถ่ายเทความร้อนและมวลดีขึ้น

2.5 การอบแห้งความชื้นสมดุล

ความชื้นสมดุลของวัสดุมีความสำคัญต่อกระบวนการอบแห้งเพราะเมื่อทำการอบแห้งวัสดุโดยใช้อากาศที่สภาวะคงที่ (อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์คงที่) ความชื้นของวัสดุจะลดลงต่ำจนถึงจุด ๆ หนึ่ง ซึ่งไม่เปลี่ยนแปลง ในขณะนั้นความชื้นในวัสดุมีความดันไอเท่ากับความดันไอของบรรยากาศที่อยู่รอบ ๆ และอุณหภูมิของวัสดุก็เท่ากับอุณหภูมิของอากาศรอบ ๆ ด้วย ซึ่งเรียกชื้นในขณะนั้นว่าความชื้นสมดุล

ความชื้นสมดุล ค่าความชื้นสมดุลขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุ อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ หรือกล่าวอีกนัยหนึ่ง ความชื้นสมดุลขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุ อุณหภูมิ และ Water Activity ของวัสดุนั้น ค่า Water Activity หรือ ความชื้นสัมพัทธ์สมดุล (Equilibrium Relative Humidity, ERH) ของวัสดุจะมีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 [4]

ความชื้นสัมพัทธ์สมดุล (ERH) = $\left(100 \times P_w / P_{wo}\right)$

P_w = ความดันไอของน้ำที่สมดุลกับวัสดุ (Pa)

P_{wo} = ความดันไอของน้ำบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิเดียวกัน (Pa)

ความชื้นในวัสดุ เป็นตัวบอกปริมาณน้ำที่มีอยู่ในวัสดุมักจะถูกนิยามให้อยู่ในรูปของอัตราส่วนเทียบกับมวลวัสดุ นิยมบอกในรูปของเปอร์เซ็นต์ (%) ซึ่งสามารถแยกได้เป็น 2 แบบ [3] คือ

ความชื้นมาตรฐานเปียก, M_w (Wet Basis)

จะใช้น้ำหนักของวัสดุชื้น (ก่อนการทำการไล่ความชื้นออก) เป็นมาตรฐานของการคำนวณ

$$M_w = \left[(w - d)/w\right] \times 100 \quad (1)$$

ความชื้นมาตรฐานแห้ง, M_d (Dry Basis)

ในกระบวนการอบแห้ง น้ำหนักของวัสดุเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา เพื่อความสะดวกจะใช้น้ำหนักของวัสดุแห้งเป็นมาตรฐานการคำนวณ

$$M_d = \left[(w - d)/d\right] \times 100 \quad (2)$$

เมื่อ M_w หมายถึง ความชื้นมาตรฐานเปียก (%)

M_d หมายถึง ความชื้นมาตรฐานแห้ง (%)

w หมายถึง น้ำหนักสดของวัสดุ (kg)

d หมายถึง น้ำหนักของวัสดุแห้ง (ไม่มีความชื้น) (kg)

จากสมการ (1) และ (2) ทำให้ทราบว่าความชื้นมาตรฐานเปียกนั้น จะมีค่าไม่เกิน 1 หรือ 100% ส่วนความชื้นมาตรฐานแห้งนั้นอาจมีค่าเกิน 100% ก็ได้

สำหรับความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นทั้ง 2 มาตรฐาน มีดังนี้

$$M_w = \left(100 \times M_d\right)/\left(100 + M_d\right) \text{ หรือ} \quad (3)$$

$$M_d = \left(100 \times M_w\right)/\left(100 - M_d\right) \quad (4)$$

ในการลดปริมาณความชื้นออกจากผลิตผล ก็คือการกำจัดน้ำออกจากผลิตผลนั่นเอง ซึ่งสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$d = [w \times (100 - \mathrm{M}_i)]/(100 - \mathrm{M}_f) \quad (5)$$

โดยที่ M_i หมายถึง ปริมาณความชื้นมาตรฐานเปียกเริ่มต้น (%)

M_f หมายถึง ปริมาณความชื้นมาตรฐานเปียกสุดท้าย (%)

สำหรับปริมาณน้ำที่ต้องกำจัดออกไป มีค่าดังสมการ

$$W_w = w - d \quad (6)$$

โดยที่ W_w = หมายถึง น้ำหนักของน้ำที่ถูกกำจัดออก (kg)

2.6 อัตราการอบแห้ง

คือ การนำความชื้นสมดุลมาเปรียบเทียบกับเวลาเพื่อหาเวลาที่เหมาะสมในการอบแห้งโดยสมการดังนี้

$$\mathrm{M}R = \frac{\mathrm{M}_{(t)} - \mathrm{M}_{dw}}{\mathrm{M}_{in} - \mathrm{M}_{dw}} \quad (7)$$

$\mathrm{M}R$ = อัตราการอบแห้ง

$\mathrm{M}_{(t)}$ = น้ำหนักของเม็ดปุ๋ยที่เวลาใดๆ (kg)

M_{in} = น้ำหนักก่อนอบ (kg)

M_{dw} = น้ำหนักของเม็ดปุ๋ยที่ความชื้นสมดุล (kg)

2.7 หลักถ่ายเทความร้อนของฉนวนของฉนวนความร้อน [5]

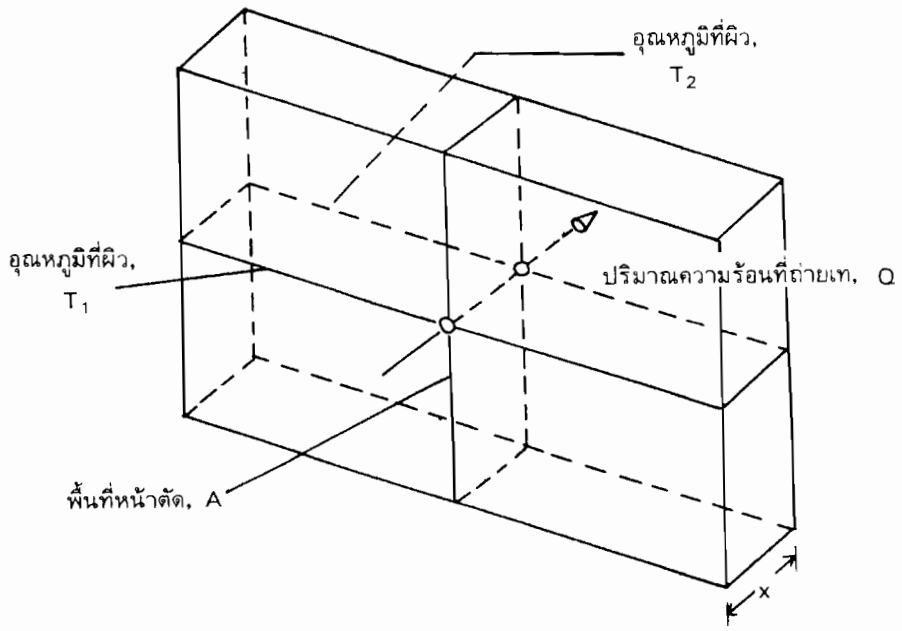
การถ่ายเทความร้อน โดยธรรมชาติจะเคลื่อนที่จากบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงไปยังบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำ เช่นเดียวกับน้ำที่ไหลจากที่สูงไปยังที่ต่ำ วิธีการถ่ายเทความร้อน แบ่งออกเป็น 3 วิธีหลักๆ คือ การนำความร้อน (Conduction) การพาความร้อน (Convection) และการแผ่รังสีความร้อน (Thermal radiation) การนำความร้อน คือ ปรากฏการณ์ที่พลังงานความร้อนถ่ายเทภายในวัตถุหนึ่งๆ หรือระยะวัตถุที่สัมผัสกัน ส่วนการพาความร้อน คือ ปรากฏการณ์ที่พลังงานความร้อนถ่ายเทพลังงานโดยอาศัยการเคลื่อนที่ของมวลสารของของไหล หรือก๊าซ ที่มีพลังงานบรรจุอยู่จากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่ง สำหรับการแผ่รังสีความร้อน คือ ถ่ายเทความร้อนโดยอาศัยสเปคตรัมการแผ่รังสี คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เปล่งออกมาจากพื้นผิวของวัตถุที่ถูกกระตุ้นทางความร้อน รังสีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้านี้ (ซึ่งรวมแสงที่ตามองเห็น คลื่นวิทยุ และรังสีเอ็กซ์) จะกระจายออกทุกทิศทุกทาง และเมื่อรังสีนี้ไปกระทบอีกวัตถุหนึ่ง บางส่วนอาจสะท้อนกลับ บางส่วนอาจส่งผ่านทะลุไป และบางส่วนอาจถูกดูดกลืน

ไว้ ถ้ารังสีที่ตกกระทบคือ รังสีความร้อน รังสีที่ถูกดูดกลืนไว้จะปรากฏเป็นความร้อนภายในวัตถุที่ดูดกลืนรังสีนั้นไว้

2.8 การนำความร้อน

การนำความร้อนจริงๆแล้วเป็นกระบวนการ ซึ่งเกิดขึ้นบนชั้นอะตอมของอนุภาคพบว่าในโลหะ การนำความร้อนเป็นผลมาจากการเคลื่อนที่ของอิเลคตรอนอิสระ(คล้ายการนำไฟฟ้า)ในของเหลวและของแข็งที่มีสภาพนำความร้อนต่ำ การสั่นของโมเลกุลข้างเคียงคิดว่าจะเป็นสาเหตุให้เกิดนำความร้อนขึ้น ส่วนในก๊าซการนำความร้อนเกิดขึ้นผ่านการสั่นระหว่างโมเลกุล อย่างไรก็ตาม ผลของการถ่ายเทความร้อนด้วยการนำที่เกิดขึ้นทั้งหมดจะอธิบายในลักษณะผลที่เกิดขึ้นกับวัตถุทั้งระบบ ไม่ได้เจาะลึกถึงระดับโมเลกุล ซึ่งจากการทดลองพบว่า อัตราการถ่ายเทความร้อนโดยการนำความร้อนเป็นสัดส่วนตรงกับผลต่างของอุณหภูมิคร่อมผิววัตถุ (ด้านอุณหภูมิสูงและอุณหภูมิต่ำ) และพื้นที่ผิวที่ความร้อนไหลผ่าน (ตั้งฉากกับทิศทางการไหลของความร้อน) แต่จะเป็นสัดส่วนกลับกับความหนาของวัตถุนั้น (ระยะทางที่ความร้อนถ่ายเท) ดังนั้น สำหรับแผ่นราบ ดังรูปที่ 2.2 การนำความร้อนของแผ่นราบสามารถคำนวณได้ โดยใช้สมการ (8) ดังนี้

$$Q = \frac{KA(T_1 - T_2)}{X}$$



รูปที่ 2.2 การนำความร้อนของแผ่นราบ

เมื่อ Q = ปริมาณความร้อนที่ถ่ายเทต่อ 1 วินาที , W

K = สภาพการนำความร้อน (Thermal conductivity) , W / m.k

A = พื้นที่หน้าตัดที่ความร้อนไหลผ่าน , m^2

T1 , T2 = อุณหภูมิสูงและต่ำที่ผิวแต่ละด้านตามลำดับ , K

X = ความหนาของแผ่นราบ , m

ในสมการนี้สภาพการนำความร้อน K เป็นตัวคงที่ขึ้นอยู่กับวัสดุแต่ละชนิด ดังแสดงในตาราง 2.1 ซึ่งเป็นค่าสภาพนำความร้อนของวัสดุบางชนิด อย่างไรก็ตาม ปกติค่า K จะขึ้นกับอุณหภูมิแต่หากอุณหภูมิไม่แตกต่างกันมากนักสามารถใช้ค่าที่สมมุติว่าค่า K คงที่ตลอดช่วงอุณหภูมิได้ ดังค่าในตาราง 2.1 เป็นต้น

ตาราง 2.1 สภาพนำความร้อนของวัสดุบางชนิด ที่ 27 องศาเซลเซียส

วัสดุ	**สภาพนำความร้อน** , k (w/m.K)
ทองแดง	386
อะลูมิเนียม	204
เหล็กคาร์บอน	54
หินอ่อน	2.1-2.94
หินทราย	1.85
กระจก	0.25-0.8
ขี้เลื่อย	0.06
ใยแก้ว	0.04
พลาสติกใส	0.2-0.3
น้ำ	0.6
อากาศ	0.026

2.9 ระบบฉนวนอุปกรณ์เชิงกล

ระบบฉนวนทางอุตสาหกรรม มีข้อแตกต่างหลักจากระบบฉนวนภายในอาคาร คือการเลือกใช้ฉนวนจะยึดหลักพื้นฐานที่อุณหภูมิการใช้งานฉนวนที่เหมาะสมกับงานที่ใช้หุ้ม หรือบุในแต่ละลักษณะงาน เนื่องจากความสามารถในการใช้งานฉนวนแต่ละชนิดมีข้อจำกัดโดยทั่วไปที่อุณหภูมิสูงสุดหรือต่ำสุดตามสภาพของฉนวน ซึ่งหากใช้งานเกินข้อจำกัดของอุณหภูมิ โครงสร้างฉนวนจะไม่มีเสถียรภาพหรือไม่มีสภาพเป็นฉนวนอีกต่อไป ซึ่งโดยทั่วไปสเกลช่วงอุณหภูมิที่ใช้ในการแบ่งเพื่อช่วยในการบ่งชี้ชนิดของฉนวนที่เหมาะกับการใช้งาน พอจะแบ่งได้ดังนี้

(1) ช่วงอุณหภูมิต่ำมาก หรือไครโอเจนนิค (Cryogenic) : -270 °c ถึง -100 °c

(2) ช่วงอุณหภูมิต่ำ : -100 °c ถึง 100 °c

(3) ช่วงอุณหภูมิปานกลาง : 100 °c ถึง 500 °c

(4) ช่วงอุณหภูมิสูง : มากกว่า 500 °c

และจากช่วงอุณหภูมิที่แบ่งดังกล่าว พอจะจัดลักษณะฉนวนที่ใช้ตามช่วงอุณหภูมิได้ดังนี้

2.9.1 ช่วงอุณหภูมิต่ำมาก และอุณหภูมิต่ำ ประเภทของฉนวนที่ใช้คือ
แบบถ่ายอากาศออก (Evacuated) ได้แก่ ใช้แผ่นบางหลายชั้น (Multifoil) ใช้ผงทึบบรรจุ เป็นต้น
แบบมวล ได้แก่ โฟมแก้ว โฟมสารอินทรีย์ ใยแก้ว ลูสฟิลล์ ไม้สน

2.9.2 ช่วงอุณหภูมิกลาง ฉนวนที่ใช้คือ สารพวกอนินทรีย์ทั้งหมด ได้แก่ เพอร์ไลต์ แคลเซียมซิลิเกต โฟมแก้ว ใยแร่ ฉนวนผิวสะท้อนรังสี ลูสฟิลล์ ฉนวนอิฐทนไฟ

2.9.3 ช่วงอุณหภูมิสูง ฉนวนที่ใช้คือ สารพวกอนินทรีย์ทั้งหมด คาร์บอน หรือโลหะ ได้แก่ ลูสฟิลล์ ฉนวนผิวสะท้อนรังสี ฉนวนอิฐทนไฟ โฟมเซรามิค ใยเซรามิค ไพโรไลติกคาร์บอน คาร์บอนไฟเบอร์

2.10 ฉนวนใยแก้ว (Glass Fiber)

ฉนวนใยแก้วผลิตขึ้นมาจากการฟั่นก้อนแก้วแข็ง ด้วยการปั่นจนเป็นเส้นเกลียวบาง ฉนวนชนิดนี้ที่ทำออกมามีทั้งลักษณะแบบลูสฟิลล์แบบแผ่นอัด (Boards) และเส้นใยอัดเป็นแผ่นหรือแบบคลุมหรือห่ม

ฉนวนแบบเส้นใยอัดเป็นแผ่นหรือแบบคลุม หรือ ห่มโดยทั่วไปจะมีความหนาแน่นอยู่ระหว่าง 9.61 ถึง 16.02 kg/m^3 และจากผลของเส้นใยที่ยาว วัสดุชนิดนี้จึงมีแนวโน้มที่จะคืนสภาพความหนาออกแบบใหม่ได้ภายหลังการบรรจุ เมื่อใช้ในลักษณะเส้นใยอัดเป็นแผ่นหรือแบบห่มคลุมนี้ ฉนวนใยแก้วจะมีสภาพต้านทานความร้อนประมาณ 24.4 m.k/w

สำหรับใยแก้วแบบลูสฟิลล์ทำได้ด้วยการโม่ใยแก้วอัดเป็นแผ่น ซึ่งทำให้ฉนวนแบบลูสฟิลล์ที่ได้มีสภาพต้านทานความร้อนประมาณ 19.84 m.k/w และทั้งแบบลูสฟิลล์และแบบอัดเป็นแผ่นหรือคลุมของฉนวนใยแก้ว น้ำสามารถจะซึมเข้าไปได้เป็นจำนวนมากกว่า 180 perm-cm แต่การดูดซับน้ำไว้กับน้อยไม่เกิน 1 เปอร์เซ็นต์

เนื่องจากใยแก้วด้วยตนเองเป็นสารอนินทรีย์ จึงเป็นวัสดุที่ไม่ลุกไหม้อย่างไรก็ตามตัวประสานอินทรีย์ ที่ใช้ในการประสานเป็นฉนวนแบบเส้นใยอัดเป็นแผ่นสามารถลุกไหม้ได้ ฉะนั้นวัสดุที่ใช้เป็นตัวประสาน ASTM E-84 จึงกำหนดให้มีคุณสมบัติโดยประมาณดังนี้ : ระดับการกระจายของเปลวไฟ 15-20 ระดับการมีส่วนเป็นเชื้อเพลิง 5-15 และระดับการเกิดควัน 0-20 สำหรับผิวหน้าของฉนวนใยแก้วที่ใช้กับอาคารโดยปกติจะประกอบด้วยกระดาษเคลือบแอสฟัลต์ หรือกระดาษแผ่นบางซ้อนทับกัน และเนื่องจากผิวหน้าเป็นผิวที่สามารถลุกไหม้ได้ จึงไม่สามารถใช้ในลักษณะหันเข้าหาเปลวไฟหรืออุณหภูมิเกินกว่า 80 องศาเซลเซียส ซึ่งการเกิดการลุกไหม้ของผิวหน้า หรือตัวประสานอินทรีย์สามารถทำให้เกิดควันที่เป็นอันตรายได้

ฉนวนใยแก้วแบบเส้นใยอัดเป็นแผ่นไม่ปรากฏว่ามีการยุบตัว หรือ หดตัวตามอายุการใช้งาน อย่างไรก็ตาม ลูสฟิลล์อาจมีการยุบตัวหากใช้ฉนวนที่ความหนาแน่นต่ำกว่าข้อกำหนดของบริษัทผู้ผลิต ส่วนคุณสมบัติของวัสดุด้านอื่นๆ เช่น สมรรถนะทางความร้อน และสภาพต้านทานไฟไหม้ ไม่ปรากฏว่ามีผลกระทบเนื่องจากอายุการใช้งานและอุณหภูมิที่เป็นวัฏจักร ณ สภาวะอุณหภูมิที่ติดตั้งปกติ นอกจากนี้ฉนวนใยแก้วไม่ทำให้แบคทีเรียหรือฝังใจเจริญเติบโต และไม่เป็นอาหารของสัตว์ใดๆรวมทั้งไม่มีสภาวะกัดกร่อนวัสดุที่หุ้ม และไม่มีกลิ่นเป็นที่น่ารังเกียจ

สำหรับฉนวนใยแก้วแบบแผ่นอัด ที่ผลิตขึ้นมามีหลากหลายคุณสมบัติ ขึ้นอยู่กับวัสดุที่ใช้เป็นรากฐานและเปอร์เซ็นต์ของใยแก้วที่ผสมอยู่ สำหรับชนิดที่มีความหนาแน่นประมาณ 64.0 kg/m^3 จะมีสภาพต้านทานความร้อนในระดับชั้น 27.8 m.k/w

การประยุกต์ใช้งานฉนวนใยแก้วโดยทั่วไปจะใช้งานเป็นฉนวนหลังคาอาคาร ผนัง พื้น ห้องใต้ถุนตึก และกับระบบท่อ นอกจากนี้ยังใช้งานด้านอุตสาหกรรม เช่น เป็นฉนวนหุ้มถังเก็บ ระบบเชิงกล และท่อส่งลม เป็นต้น

สำหรับคุณสมบัติโดยสรุปดังแสดงในตาราง 2.2

ตาราง 2.2 คุณสมบัติของฉนวนใยแก้ว

คุณสมบัติ	แบบเส้นใยอัดเป็นแผ่น	แบบลูสฟิลล์	แบบแผ่นหนา
สภาพนำความร้อนปรากฏ (k) , W/m.k	0.045	0.05	0.036
สภาพต้านทานความร้อนปรากฏ (R) , m.k/W	22.4	20	27.78
ความหนาแน่นของวัสดุ p , kg/m^3	16.02	16.02	64.0
ความร้อนจำเพาะ (Cp) , kJ/kg $^{\circ}c$	0.84	0.84	1.256
สภาพแพร่กระจายความร้อน α, m^2/s	0.33×10^{-5}	0.38×10^{-5}	0.04×10^{-5}
อุณหภูมิใช้งานสูงสุด , $^{\circ}c$	190	540	205
สัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน , m/m $^{\circ}c$	-	-	-
ความจุของเซลล์ที่ชิดกัน , เปอร์เซ็นต์	-	-	-
ค่าแทรกซึม ความชื้น , perm-cm	180	180	180
ค่าดูดซึมน้ำ , เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก	1	1	1
การกัดกร่อนวัสดุที่ถูกฉนวนหุ้ม	ไม่มี	ไม่มี	ไม่มี
สภาพการติดไฟ			
ระดับการกระจายของเปลวไฟ	15-20	15-20	15-20
ระดับการมีส่วนเป็นเชื้อเพลิง	5-15	5-15	5-15
ระดับการเกิดควัน	0-20	0-20	0-20
การเสื่อมสภาพลงจากผลของ :			
อุณหภูมิที่เป็นวัฏจักร	ไม่มี	ไม่มี	ไม่มี
สัตว์จำพวก หนู หมัด ไส้เดือน นก ฯลฯ	ไม่มี	ไม่มี	ไม่มี
ความชื้น	ชั่วคราว	ชั่วคราว	ชั่วคราว
ฟังไจ/แบคทีเรีย	ไม่มี	ไม่มี	ไม่มี
สภาพอากาศ	ไม่มี	ไม่มี	ไม่มี
ลม	ปานกลาง	พอสมควร	น้อย

ตาราง 2.2 (ต่อ)

คุณสมบัติ	แบบเส้นใยอัดเป็นแผ่น	แบบลูสฟิลล์	แบบแผ่นหนา
ปัจจัยที่กระทบต่อคน			
การเป็นพิษ	ไม่มี	ไม่มี	ไม่มี
กลิ่น	ไม่มี	ไม่มี	ไม่มี
การดูดซับเสียง	ดี	ดี	ดี
ผลกระทบของอายุต่อ :			
เสถียรภาพของขนาด	ไม่มี	จะยุบตัว	ไม่มี
สมรรถนะทางความร้อน	ไม่มี	การยุบตัวเป็นสาเหตุให้เสื่อมสภาพลงบ้าง	
สภาพการติดไฟ	ไม่มี	ไม่มี	ไม่มี