

หลักการอบแห้งและตู้อบฮีทปั้ม

นายปรเมธ ประเสริฐยิ่ง

วก.485

การอบแห้งคือการดึงน้ำจากวัตถุดิบโดยใช้ความร้อนทำให้น้ำในวัตถุดิบกลายเป็นไอ อังกฤษ อเมริกา แคนาดา และฝรั่งเศสใช้พลังงานในการอบแห้ง 10-15% ของพลังงานที่ใช้ในงานอุตสาหกรรม เดนมาร์กและเยอรมันใช้พลังงานสำหรับการอบแห้งในอุตสาหกรรม 20-25% ประเทศไทยยังไม่มีข้อมูลการใช้พลังงานในการอบแห้งเป็นทางการ แต่ถ้าใช้พลังงานสำหรับการอบแห้ง 15% จะเป็นเงินถึง 44,550 ล้านบาท/ปี (ข้อมูลการใช้พลังงาน 2548)

นอกจากงานอุตสาหกรรมแล้ว การอบแห้งยังมีความจำเป็นต่อผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร เพื่อมิให้เกิดความเสียหายแก่ผลผลิตสำหรับการจัดเก็บ เป็นการเพิ่มคุณภาพและเพิ่มช่องทางการจำหน่ายอีกด้วยในการเพิ่มประสิทธิภาพการอบแห้งด้วยตู้อบฮีทปั้มจึงเป็นสิ่งที่สำคัญมาก

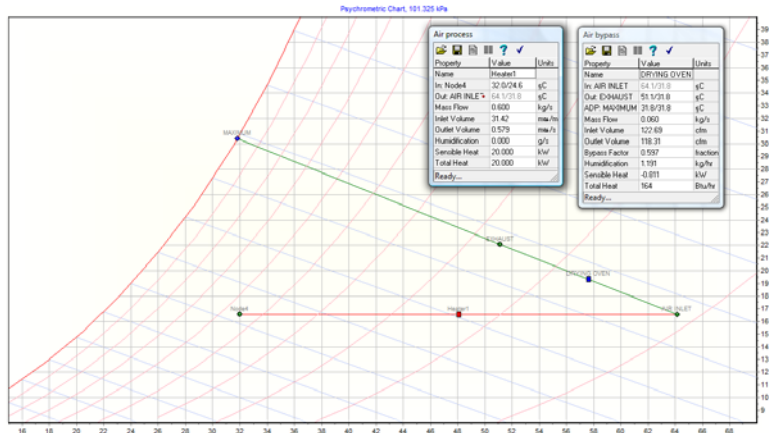
ทฤษฎีการอบแห้ง

การอบแห้งเป็นกระบวนการที่ซับซ้อน ประกอบด้วยกระบวนการถ่ายเทความร้อน กระบวนการถ่ายเทมวลของน้ำ ซึ่งทำให้เกิด การเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ ทางเคมี และทางชีวเคมีซึ่งจะมีผลต่อคุณภาพการอบแห้ง ได้แก่ การเปลี่ยนสี การหดตัว การเกิดผลึก ผิวขุ่น มีกลิ่น และอื่นๆ

การอบแห้งเกิดขึ้นโดยการใช้ความร้อนแก่วัตถุดิบในกรณีที่ใช้อากาศร้อน ความร้อนจะถ่ายเทให้กับวัตถุดิบด้วยการพาความร้อนจากอากาศร้อนมาที่ผิว และการนำความร้อนผ่านผิวเข้าไปในเนื้อ น้ำในวัตถุดิบได้รับความร้อนทำให้มีระดับพลังงานสูงขึ้นและกลายเป็นไอน้ำเกิดความดันและผลักตัวผ่านผิวออกมาภายนอก เมื่อระยะเวลาการอบแห้งผ่านไประยะหนึ่ง คุณสมบัติทางกายภาพของวัตถุดิบเปลี่ยนไป ก็จะทำให้การคายน้ำเปลี่ยนไปด้วย

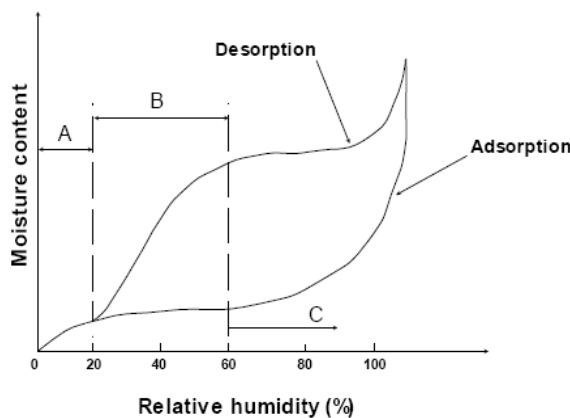
อากาศแห้งที่ใช้ในการอบแห้งหมายถึงอากาศที่มีความชื้นสัมพัทธ์น้อย อากาศภายนอกเมื่อได้รับความร้อนก็จะมีอุณหภูมิสูงขึ้น และขณะเดียวกันก็ทำให้ความชื้นสัมพัทธ์ต่ำลง โดยธรรมชาติ คุณสมบัติต่างๆของอากาศเกี่ยวกับอุณหภูมิ ความชื้น ค่าพลังงาน และอื่นๆ แสดงไว้ใน แผนภูมิไซโครเมตริก อากาศ

ร้อนจะคายความร้อนให้กับน้ำในวัตถุทำให้อากาศมีอุณหภูมิลดลงและรับความชื้นจากวัตถุทำให้
อากาศมีความชื้นสัมพัทธ์สูงขึ้น

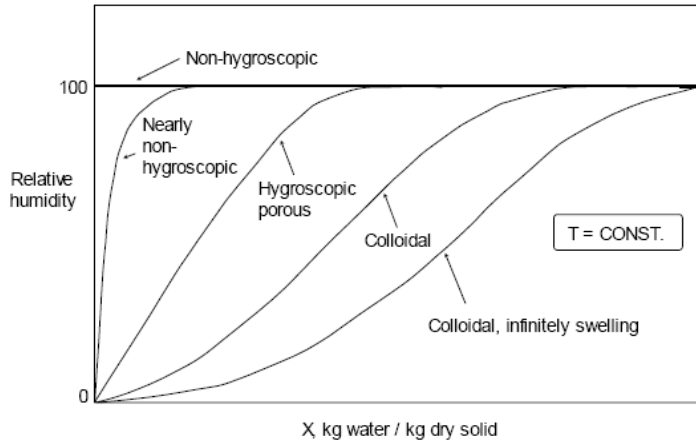


สมดุลความชื้น(Equilibrium Moisture Content)

สมดุลความชื้นคือการที่อากาศและวัสดุที่มีความชื้นอยู่ในสภาวะสมดุลกันที่อุณหภูมิหนึ่งๆ ด้านล่างนี้เป็นแผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ของความชื้นในวัสดุกับความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ เมื่อเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศขึ้นเรื่อยๆ วัสดุจะรับความชื้นจากอากาศ(Adsorption)ทำให้วัสดุมีความชื้นสูงขึ้น และเมื่อลดความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศลง วัสดุก็จะคายความชื้นให้กับอากาศ(Desorption) ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ที่นำมาใช้ในการอบแห้ง จะเห็นว่าเส้นทั้งสองไม่ซ้ำแนวกัน ส่วนแรก(A)นั้นน้ำในวัสดุเสถียรจับตัวกันแน่น ส่วนที่สอง(B)น้ำในวัสดุจับตัวหลวมขึ้น ความดันไอน้ำในวัสดุต่ำกว่าความดันไอน้ำสมดุลในอากาศที่อุณหภูมิเดียวกันเนื่องจากแรงคาปิลารีในวัสดุขนาดเล็ก ในส่วนCน้ำจับตัวกันหลวมมากขึ้นเนื่องจากคาปิลารีในวัสดุขนาดใหญ่

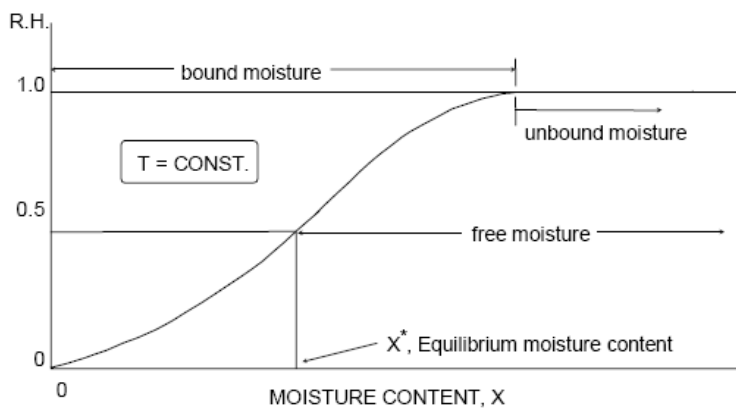


รูปด้านล่างแสดงเส้นความสัมพันธ์ของความชื้นสมดุลของวัสดุแบบต่างๆ จากวัสดุที่ไม่ดูดน้ำ ไปจนถึงวัสดุที่บวมน้ำ



Equilibrium moisture content curves for various types of solids

รูปต่อไปนี้แสดงสมดุลความชื้นของวัสดุ ความชื้นในวัสดุ (bound moisture) จะมีความดันไอน้ำน้อยกว่าความดันไอน้ำในอากาศที่อุณหภูมิเดียวกัน เมื่อความดันไอน้ำในวัสดุเท่ากับความดันไอน้ำในอากาศที่อุณหภูมิเดียวกัน ความชื้นก็จะออกจากวัสดุ



Various types of moisture content

ความสัมพันธ์ของความชื้นของวัสดุมีผลจากอุณหภูมิตามสมการต่อไปนี้

$$\left[\frac{\Delta X^*}{\Delta T} \right]_{\Psi = \text{constant}} = -\alpha X^*$$

เมื่อ X^* คือ ความชื้นสมดุลของวัสดุเทียบจากวัสดุแห้ง

T คือ อุณหภูมิ

Ψ คือ ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ

α คือ ค่าตัวแปรระหว่าง $0.005 - 0.01 \text{ K}^{-1}$

วัสดุที่ไม่ดูดน้ำจะมีน้ำอยู่น้อยกว่าน้ำในวัสดุที่มีพลังงานเท่ากับพลังงานที่ดึงน้ำไว้

$$\left. \frac{d(\ln \Psi)}{d(1/T)} \right|_{X=\text{constant}} = -\frac{\Delta H_w}{R_g T}$$

เมื่อ ΔH_w คือค่าพลังงานที่ดึงน้ำไว้ในวัสดุ เป็นสิ่งที่ลดความดันไอในวัสดุ

$$R_g = 8.314 \times 10^3 \text{ kg kgmol}^{-1} \text{ K}^{-1}$$

พลังงานที่ใช้ไล่น้ำออกจากวัสดุเท่ากับ ค่าความร้อนที่ใช้เปลี่ยนสถานะของน้ำรวมกับพลังงานที่ใช้ดึงน้ำ ซึ่งมีความเกี่ยวข้องกันทุกๆประเภทวัสดุ การดึงน้ำออกจากวัสดุจึงขึ้นกับอุณหภูมิ โครงสร้างของวัสดุ ทางกายภาพ(รู) และการเปลี่ยนแปลงทางเคมีระหว่างการอบแห้ง ซึ่งจะทำให้การดึงน้ำในวัสดุเปลี่ยนไประหว่างการดึงน้ำ

อาหาร ผลไม้ และอื่นๆ อาจมีการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ และปฏิกิริยาทางเคมีเนื่องจากน้ำในวัสดุ ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพหรือเสื่อมสภาพไปด้วย จึงได้ตั้งนิยามใหม่ Water Activity, a_w , เป็นอัตราส่วนของความดันไอน้ำต่อความดันไอสมดุลที่อุณหภูมิเดียวกันตามสมการข้างล่างนี้

$$a_w = \frac{p}{p_w}$$

การป้องกันการเสื่อมสภาพของวัสดุทำได้ด้วยการดึงน้ำที่เป็นต้นเหตุออกหรือการเติมสารได้แก่ น้ำตาล(แซอิม) เกลือ(การดอง) เพื่อลดค่า a_w ค่าในตารางต่อไปนี้เป็นค่า a_w ต่ำสุดที่จะทำให้เกิดการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์

Table Minimum water activity, a_w , for microbial growth and spore germination (adapted from Brockmann, 1973)

Micro-organism	Water activity
Organisms producing slime on meat	0.98
<i>Pseudomonas</i> , <i>Bacillus cereus</i> spores	0.97
<i>B. subtilis</i> , <i>C. botulinum</i> spores	0.95
<i>C. botulinum</i> , <i>Salmonella</i>	0.93
Most bacteria	0.91
Most yeast	0.88
<i>Aspergillus niger</i>	0.85
Most molds	0.80
Halophilic bacteria	0.75
Xerophilic fungi	0.65
Osmophilic yeast	0.62

รูปต่อไปนี้แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง a_w กับความชื้นในวัสดุประเภทต่างๆ

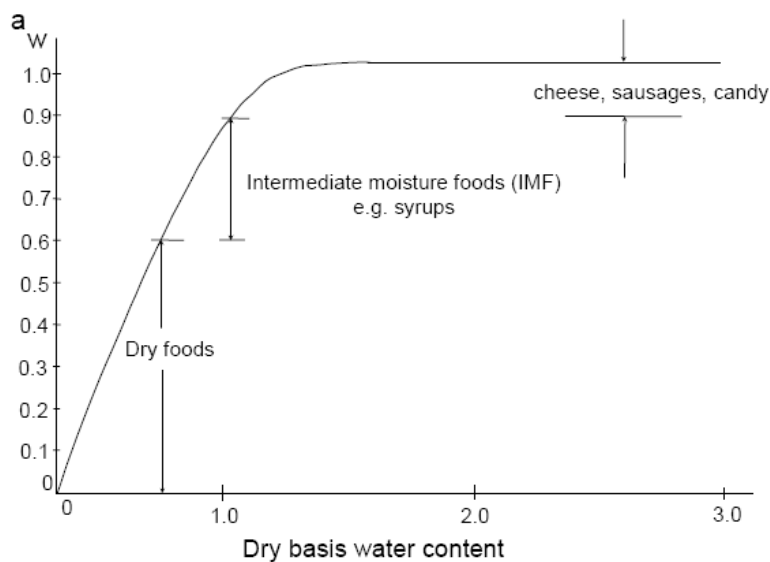


Figure Water activity versus moisture content plot for different types of food

รูปต่อไปนี้จะแสดงธรรมชาติของอัตราการเสื่อมสภาพของอาหารประเภทต่างๆกับค่า a_w การเสื่อมสภาพนอกจากจะเกิดจากจุลชีพที่ $a_w > 0.7$ แล้ว ยังสามารถเกิดจาก ออกซิเจน non-enzymatic browning และ enzymatic reaction ที่ a_w ต่ำได้อีกด้วย

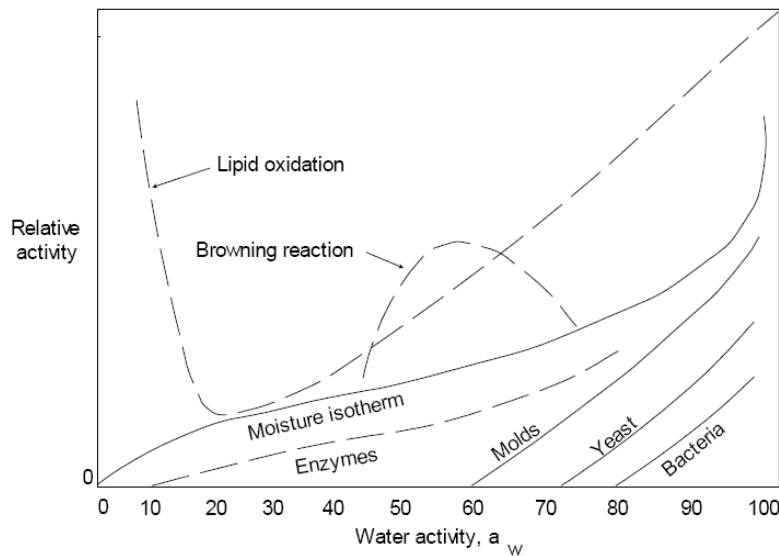


Figure Deterioration rates as a function of water activity for food systems

การอบแห้งโดยทั่วไปเมื่อเริ่มต้นจะเป็นช่วงที่ปรับตัวซึ่งความชื้นในวัสดุจะลดลงเป็นสัดส่วนเส้นตรงกับเวลา หลังจากนั้นจะมีความสัมพันธ์ไม่เป็นเส้นตรงซึ่งต้องใช้เวลานานมากจึงจะถึงจุดความชื้นสมดุลซึ่งไม่สามารถดึงน้ำได้อีก

$$N = -\frac{M_s}{A} \frac{dX}{dt} \text{ or } -\frac{M_s}{A} \frac{dX_f}{dt}$$

เมื่อ N คืออัตราการดึงน้ำออกจากวัสดุ

M_s คือน้ำหนักของวัสดุแห้ง ไม่มีน้ำอยู่เลย

X_f คือความชื้นอิสระ $X_f = (X - X^*)$

รูปต่อไปนี้จะแสดงการอบแห้ง ช่วงที่อัตราการดึงน้ำคงที่คือช่วงที่มีน้ำอิสระอยู่ที่ผิววัสดุ ช่วงนี้ไม่ขึ้นกับโครงสร้างของวัสดุ จนมาถึงจุดความชื้นวิกฤต X_c ช่วงต่อมาความชื้นในวัสดุเคลื่อนที่ไปที่ผิวได้สะดวกเนื่องจากโครงสร้างวัสดุและขบวนการอบแห้งจนถึงจุดความชื้นสมดุล

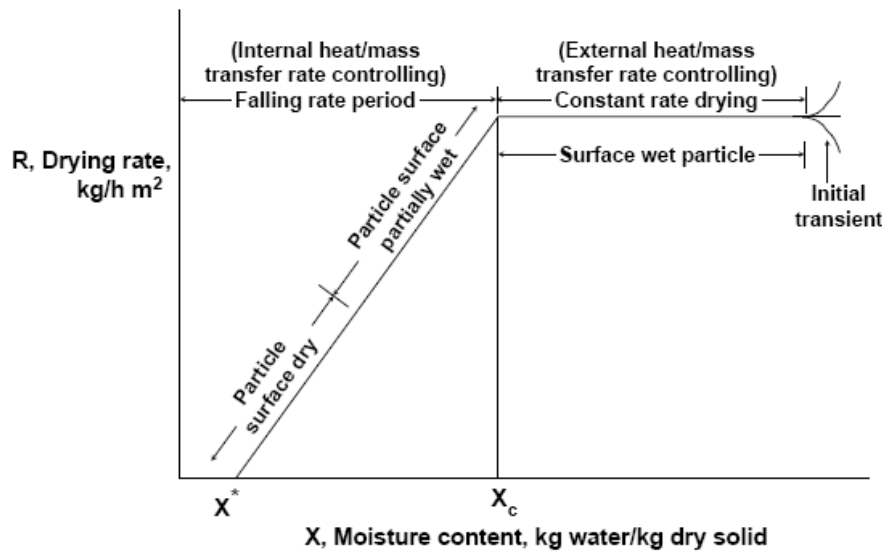


Figure Typical textbook batch drying rate curve under constant drying conditions

ตารางต่อไปนี้จะแสดงค่าความชื้นวิกฤตโดยประมาณของวัสดุต่างๆ

Table Approximate critical moisture contents for various materials

Material	Critical moisture content (kg water/kg dry solid)
Salt crystals, rock salt, sand, wool	0.05-0.10
Brick clay, kaolin, crushed sand	0.10-0.20
Pigments, paper, soil, worsted wool fabric	0.20-0.40
Several foods, copper carbonate, sludges	0.40-0.80
Chrome leather, vegetables, fruits, gelatin, gels	> 0.80

ตู้อบฮีทปั๊ม

ตู้อบฮีทปั๊มเหมาะสำหรับอบแห้งผลิตภัณฑ์อาหาร ได้แก่ ผลไม้ ผัก สมุนไพร และปลา ข้อดีของตู้อบฮีทปั๊มเทียบกับตู้อบแห้งอากาศร้อน (Hot Air Dryer) ได้แก่ ประสิทธิภาพสูงกว่า คุณภาพผลผลิตดีกว่า สามารถทำงานได้โดยไม่มีผลกระทบจากสภาพอากาศภายนอกตู้ ไม่มีการเผาไหม้ทำให้เกิดมลภาวะ สามารถเก็บน้ำจากการอบแห้งได้ซึ่งอาจเอาไปใช้หรือทิ้ง หรือนำไปสกัดสารระเหยได้ตามความต้องการ

ตู้อบแห้งอากาศร้อนใช้ความร้อนจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงทำให้อากาศภายนอกตู้อบมีอุณหภูมิสูงและความชื้นสัมพัทธ์ลดลงเพื่อส่งเข้าตู้อบเมื่ออากาศรับความชื้นจากผลิตภัณฑ์ แล้วจึงทิ้งไปจึงสูญเสียความร้อนมากและมีผลกระทบจากสภาพอากาศภายนอกโดยตรง

ตู้อบฮีทปั๊มประกอบด้วยเอ็กเปนด์ชั่นวาล์ว คอยล์เย็น คอมเพรสเซอร์และคอยล์ร้อน(คอนเดนเซอร์) และพัดลมเพื่อหมุนเวียนอากาศภายในตู้อบ ฮีทปั๊มให้ความร้อนแก่อากาศหมุนเวียนภายในตู้อบด้วยคอยล์ร้อน ทำให้อากาศมีอุณหภูมิสูงขึ้น และความชื้นสัมพัทธ์ลดลงเพื่อรับความชื้นจากผลิตภัณฑ์ จากนั้นอากาศบางส่วนจะผ่านคอยล์เย็นเพื่อดึงความร้อนและน้ำออก และเป็นการควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ภายในตู้อบ จากนั้นอากาศหมุนเวียนทั้งหมดจึงกลับมารับความร้อนที่คอยล์ร้อน วนเวียนตลอดการอบแห้ง

ความร้อนจากการดึงน้ำออกที่คอยล์เย็นจะเท่ากับความร้อนที่ให้อากาศที่คอยล์ร้อนหรืออีกนัยหนึ่งคือตู้อบฮีทปั๊มสามารถใช้ความร้อนวนเวียนได้ทำให้เป็นการอบแห้งที่มีประสิทธิภาพสูงมาก ความร้อนที่สูญเสียคือความร้อนที่ทิ้งไปกับน้ำและความร้อนส่วนเกินซึ่งประมาณเท่ากับพลังงานของคอมเพรสเซอร์ที่ใช้หมุนเวียนสารทำความเย็นในระบบเท่านั้น

	Hot-air drying	Vacuum drying	HPD drying
SMER (kg H ₂ O/kW•h)	0.12–1.28	0.72–1.2	1.0–4.0
Drying efficiency (%)	35–40	≤70	95
Operating temperature range (°C)	40–90	30–60	10–65
Operating % RH range	Variable	Low	10–65
Capital cost	Low	High	Moderate
Running cost	High	Very high	Low

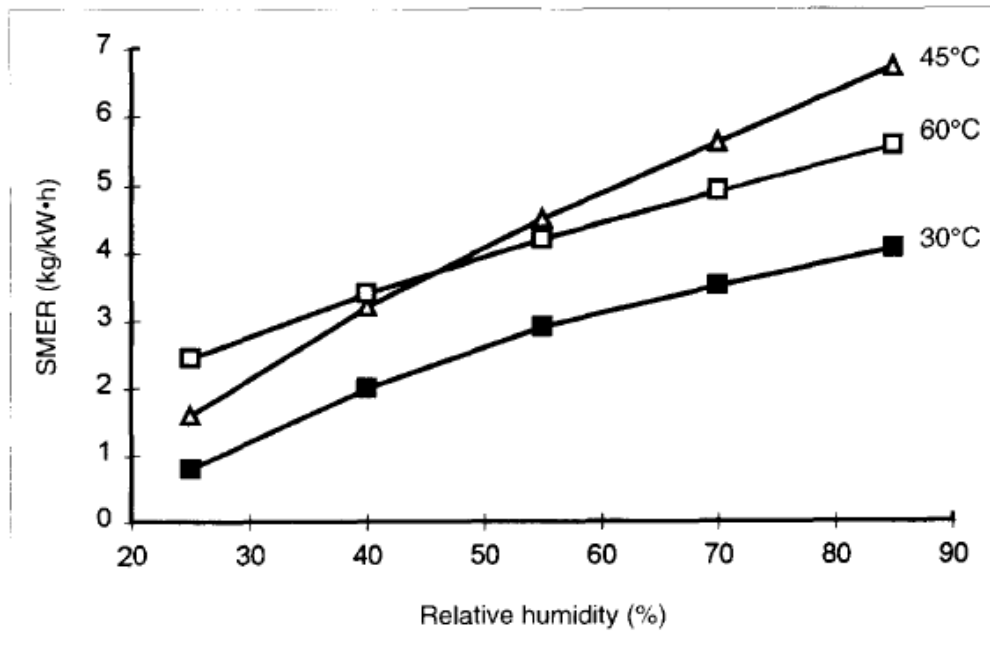
RH, Relative humidity
SMER, Specific moisture extraction rate

สัมประสิทธิ์การดึงน้ำ (Specific Moisture Extraction Rate, SMER) คือความสามารถของตู้อบที่สามารถดึงน้ำออกได้/หน่วยพลังงาน มีหน่วยเป็น กก.น้ำ/กิโลวัตต์.ชั่วโมง

สัมประสิทธิ์การใช้พลังงาน (Specific Power Consumption, SPC) คือพลังงานที่ใช้/หน่วยน้ำหนักน้ำที่ดึงออก มีหน่วยเป็น กิโลวัตต์.ชั่วโมง/กก.น้ำ)

ประสิทธิภาพการอบแห้ง (Drying Efficiency) คืออัตราส่วนพลังงานที่ใช้ในการเปลี่ยนสถานะของน้ำที่ดึงออก/พลังงานที่ใช้ทั้งหมด มีหน่วยเป็น %

จากตารางข้างต้นจะเห็นว่าตู้อบฮีทปั๊มดีกว่าตู้อบทุกแบบ แต่ราคาจะสูงกว่าตู้อบแห้งอากาศร้อนเท่านั้น



Specific moisture extraction rate (SMER) as a function of humidity and dry-bulb temperature

จากกราฟจะเห็นว่าตู้อบฮีทปั๊มมีค่าสัมประสิทธิ์การดึงน้ำสูงขึ้นเมื่อความชื้นสัมพัทธ์ในตู้อบสูงขึ้น การอบแห้งควรใช้อุณหภูมิไม่เกิน 60 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ 30% ขึ้นไปเพื่อไม่ให้ดึงน้ำเร็วเกินไป ซึ่งจะก่อให้เกิดผิวแข็ง เกิดน้ำตาลทำให้ผิวผลิตภัณฑ์เหนียว

การอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำ 10-45 องศาเซลเซียสก็ทำได้โดยไม่มีผลกระทบจากสภาวะอากาศและความชื้นภายนอก

คุณภาพของผลิตภัณฑ์ ได้แก่ ปริมาณสารระเหย วิตามินที่ไวต่ออุณหภูมิการอบ และกลิ่นในผลิตภัณฑ์สูญเสียน้อยกว่าตู้อบแห้งแบบอื่นๆ เพราะสารระเหยอยู่ในตู้ปิดจึงมีความดันไอบนผิวภายนอกทำให้ออกมาได้น้อยลง ยกตัวอย่างการอบแห้งขิงพบว่ามีสาร Gingerol 26% ในขณะที่การอบแห้งแบบเดิมมีเพียง 20%

แกนของแมกคาดาเมียมันจะเปลี่ยนสีเมื่อใช้อุณหภูมิอบสูง แต่เมื่อใช้ตู้อบฮีทปั๊มจะไม่เปลี่ยนสีแม้อุณหภูมิที่ใช้จะสูงถึง 50 องศาเซลเซียส เพราะสามารถอบแห้งได้เร็วกว่าและควบคุมความชื้นในตู้ได้

การเกิดสีน้ำตาลจากปฏิกิริยาที่ไม่ใช่เอนไซม์ จะเกิดขึ้นมากเมื่อความชื้นใกล้จุดที่ต้องการ เมื่ออัตรา
การอบแห้งแบบช้าๆ และอุณหภูมิผลิตภัณฑ์เข้าใกล้อุณหภูมิอากาศที่ใช้ออบ ซึ่งจะไม่เกิดขึ้นเมื่อใช้ตู้อบฮีท
ปั๊ม

สำหรับตู้อบแห้งอากาศร้อน เชื้อต่างๆส่วนใหญ่จะถูกทำลายที่อุณหภูมิ 60-80 องศาเซลเซียส ตู้อบฮีทปั๊มถึงจะใช้อุณหภูมิต่ำกว่าแต่ก็สามารถควบคุมให้ Water activity ที่ผิวของผลิตภัณฑ์มีค่าต่ำกว่า 0.6 ทำให้เชื้อต่างๆไม่มีการเจริญเติบโต (จากตาราง Water activity ของเชื้อต่างๆ)

บทส่งท้าย

ตู้อบฮีทปั๊มประหยัดพลังงานได้มากจึงช่วยลดต้นทุนการอบแห้งโดยตรง และช่วยลดปัญหาโลกร้อนด้วยการประหยัดพลังงานได้อีกส่วนหนึ่งด้วย ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการอบแห้งด้วยตู้อบฮีทปั๊มจะมีคุณภาพสูงกว่าการอบแห้งด้วยวิธีอื่น จึงเป็นเทคโนโลยีที่น่าสนใจเป็นอย่างยิ่ง

นอกเหนือจากการใช้ออบแห้งผลิตภัณฑ์อาหารแล้วยังสามารถที่จะใช้ในกระบวนการในอุตสาหกรรมได้อีกหลายประเภทได้แก่การการอบไม้ การกลั่นสุรา หรือเบียร์ เป็นต้น ซึ่งจะนำมาลงในฉบับต่อไป

เอกสารอ้างอิง

1. Arun S. Mujumdar and Sakamon Devahastin, Chapter 1, FUNDAMENTAL PRINCIPLES OF DRYING,
2. Conrad O.Perera and M.Shafier Rahman, Heat pump dehumidifier drying of food, Trends in Food Service & Technology March 1997(Vol.8)