

# หลักการอบแห้งและตู้อบฮีทปั๊ม

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 เป็นการเพิ่มคุณภาพและเพิ่มช่องทางการจำหน่ายอีกด้วยในการเพิ่มประสิทธิภาพการอบแห้งด้วยตู้อบฮีทปั๊มจึงเป็นสิ่งที่สำคัญมาก

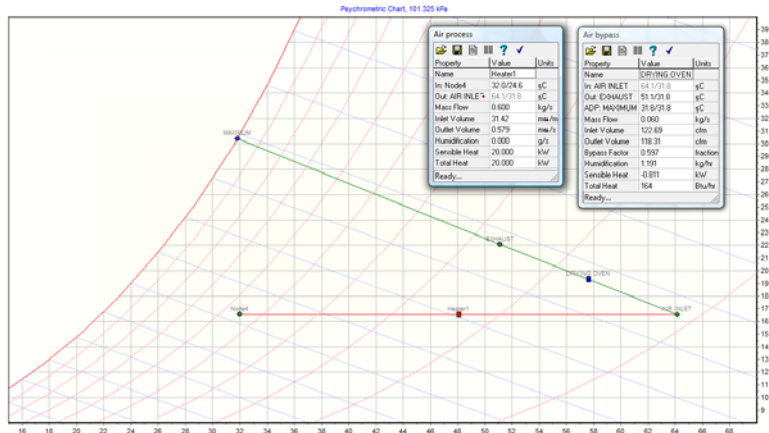
## ทฤษฎีการอบแห้ง

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

การอบแห้งเกิดขึ้นโดยการใช้ความร้อนแก่วัตถุดิบในกรณีที่ใช้อากาศร้อน ความร้อนจะถ่ายเทให้กับวัตถุดิบด้วยการพาความร้อนจากอากาศร้อนมาที่ผิว และการนำความร้อนผ่านผิวเข้าไปในเนื้อ น้ำในวัตถุดิบได้รับความร้อนทำให้มีระดับพลังงานสูงขึ้นและกลายเป็นไอน้ำเกิดความดันและผลักตัวผ่านผิวออกมาภายนอก เมื่อระยะเวลาการอบแห้งผ่านไประยะหนึ่ง คุณสมบัติทางกายภาพของวัตถุดิบเปลี่ยนไป ก็จะทำให้การคายน้ำเปลี่ยนไปด้วย

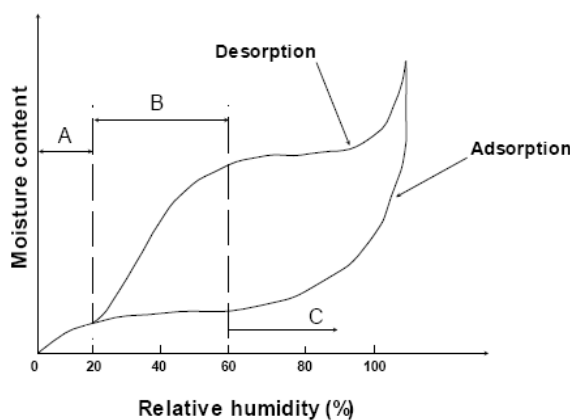
อากาศแห้งที่ใช้ในการอบแห้งหมายถึงอากาศที่มีความชื้นสัมพัทธ์น้อย อากาศภายนอกเมื่อได้รับความร้อนก็จะมีอุณหภูมิสูงขึ้น และขณะเดียวกันก็ทำให้ความชื้นสัมพัทธ์ต่ำลง โดยธรรมชาติ คุณสมบัติต่างๆของอากาศเกี่ยวกับอุณหภูมิ ความชื้น ค่าพลังงาน และอื่นๆ แสดงไว้ใน แผนภูมิไซโครเมตริก อากาศ

ร้อนจะคายความร้อนให้กับน้ำในวัตถุทำให้อากาศมีอุณหภูมิลดลงและรับความชื้นจากวัตถุทำให้  
อากาศมีความชื้นสัมพัทธ์สูงขึ้น

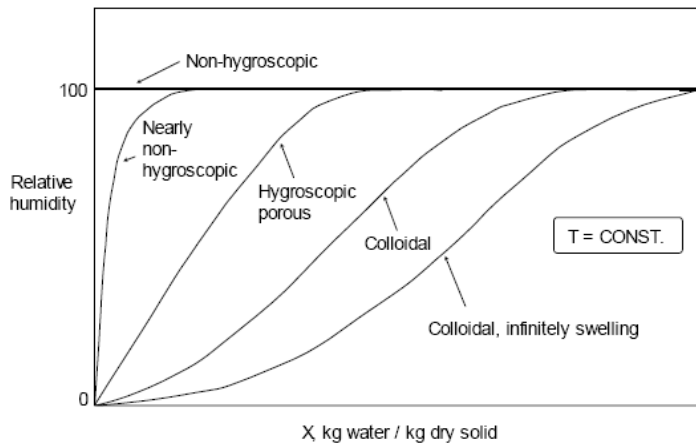


### สมดุลความชื้น(Equilibrium Moisture Content)

สมดุลความชื้นคือการที่อากาศและวัสดุที่มีความชื้นอยู่ในสภาวะสมดุลกันที่อุณหภูมิหนึ่งๆ  
ด้านล่างนี้เป็นแผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ของความชื้นในวัสดุกับความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ เมื่อเพิ่ม  
ความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศขึ้นเรื่อยๆ วัสดุจะรับความชื้นจากอากาศ(Adsorption)ทำให้วัสดุมีความชื้นสูงขึ้น  
และเมื่อลดความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศลง วัสดุก็จะคายความชื้นให้กับอากาศ(Desorption) ซึ่งเป็น  
ปรากฏการณ์ที่นำมาใช้ในการอบแห้ง จะเห็นว่าเส้นทั้งสองไม่ซ้ำแนวกัน ส่วนแรก(A)นั้นน้ำในวัสดุเสถียร  
จับตัวกันแน่น ส่วนที่สอง(B)น้ำในวัสดุจับตัวหลวมขึ้น ความดันไอน้ำในวัสดุต่ำกว่าความดันไอน้ำสมดุล  
ในอากาศที่อุณหภูมิเดียวกันเนื่องจากแรงคาปิลารีในวัสดุขนาดเล็ก ในส่วนCน้ำจับตัวกันหลวมมากขึ้น  
เนื่องจากคาปิลารีในวัสดุขนาดใหญ่

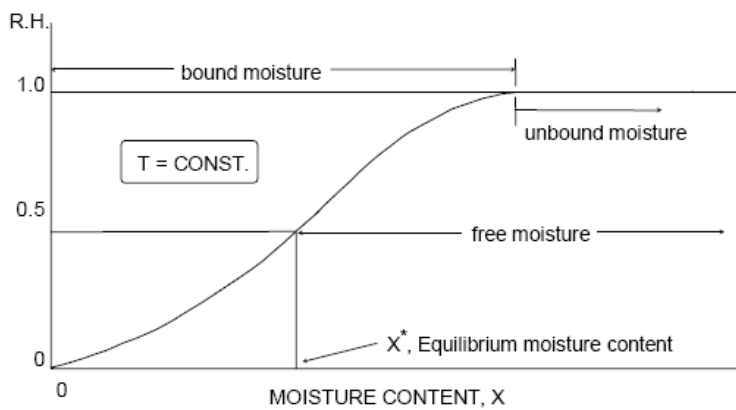


รูปด้านล่างแสดงเส้นความสัมพันธ์ของความชื้นสมดุลของวัสดุแบบต่างๆ จากวัสดุที่ไม่ดูดน้ำ ไปจนถึงวัสดุที่บวมน้ำ



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

$\Psi$  คือ ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ

$\alpha$  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  $\Delta H_w$  คือค่าพลังงานที่ดึงน้ำไว้ในวัสดุ เป็นสิ่งที่ลดความดันไอในวัสดุ

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

พลังงานที่ใช้ไล่น้ำออกจากวัสดุเท่ากับ ค่าความร้อนที่ใช้เปลี่ยนสถานะของน้ำรวมกับพลังงานที่ใช้ดึงน้ำ ซึ่งมีความเกี่ยวเนื่องกันทุกๆประเภทวัสดุ การดึงน้ำออกจากวัสดุจึงขึ้นกับอุณหภูมิ โครงสร้างของวัสดุ ทางกายภาพ(รู) และการเปลี่ยนแปลงทางเคมีระหว่างกรอบแห้ง ซึ่งจะทำการดึงน้ำในวัสดุเปลี่ยนไประหว่างการดึงน้ำ

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

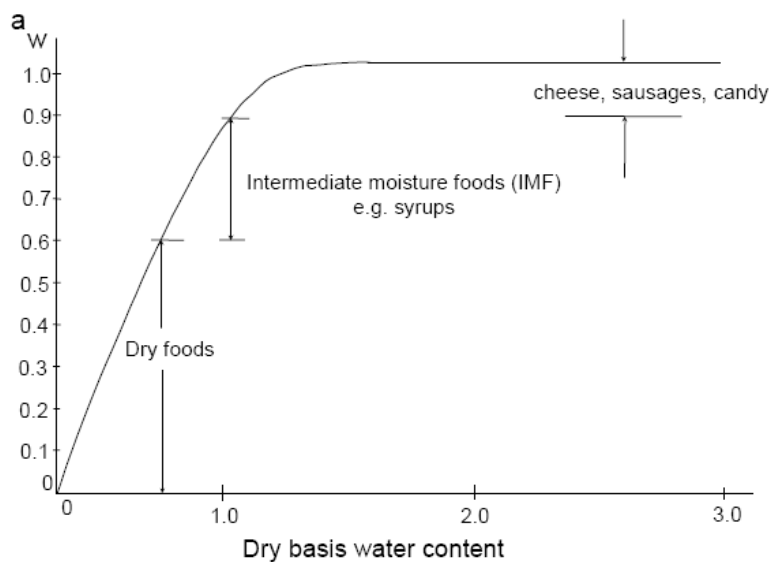
$$a_w = \frac{p}{p_w}$$

การป้องกันการเสื่อมสภาพของวัสดุทำการดึงน้ำที่เป็นต้นเหตุออกหรือการเติมสารได้แก่ 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)

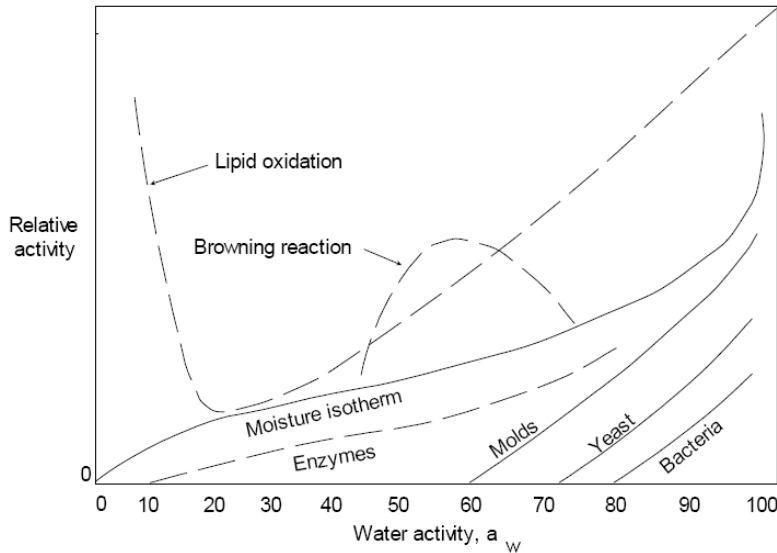
Micro-organism	Water activity
Organisms producing slime on meat	0.98
<i>Pseudomonas</i> , <i>Bacillus cereus</i> spores	0.97
<i>B. subtilis</i> , <i>C. botulinum</i> spores	0.95
<i>C. botulinum</i> , <i>Salmonella</i>	0.93
Most bacteria	0.91
Most yeast	0.88
<i>Aspergillus niger</i>	0.85
Most molds	0.80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

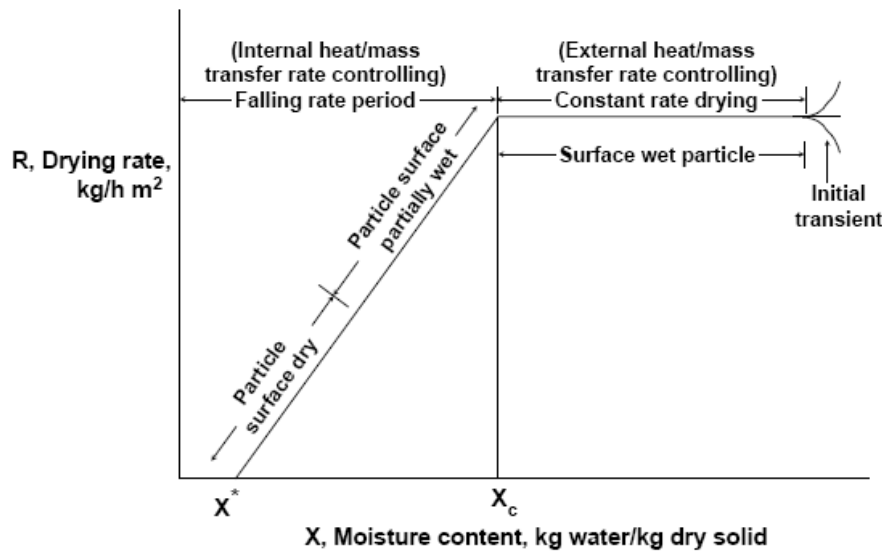
$$N = -\frac{M_s}{A} \frac{dX}{dt} \text{ or } -\frac{M_s}{A} \frac{dX_f}{dt}$$

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 <sub>2</sub> 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

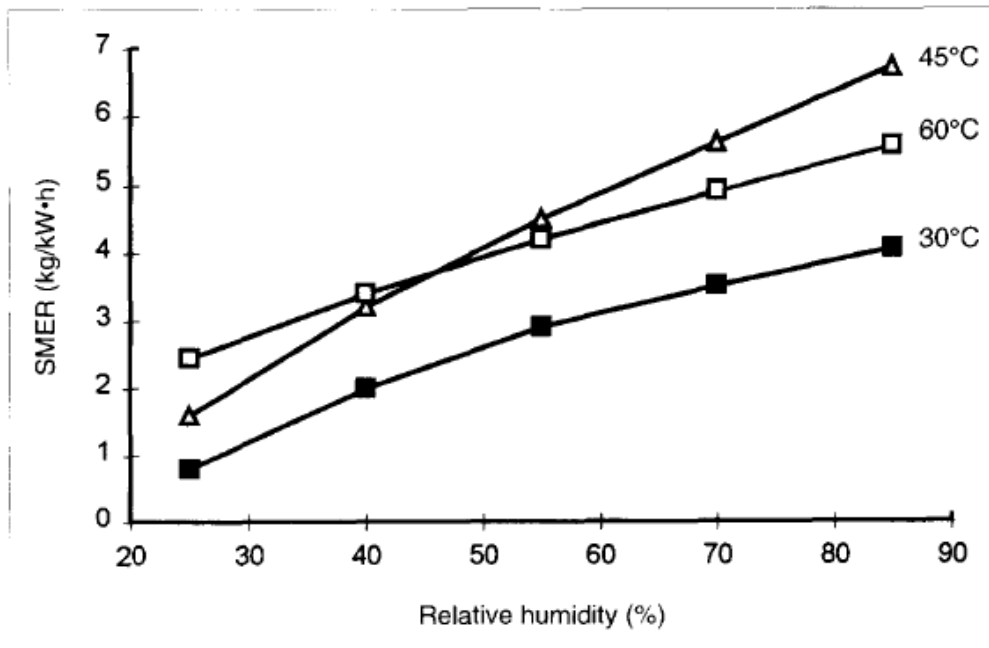
สัมประสิทธิ์การดึงน้ำ ( Specific Moisture Extraction Rate, SMER ) คือความสามารถของตู้อบที่สามารถดึงน้ำออกได้/หน่วยพลังงาน มีหน่วยเป็น กก.น้ำ/กิโลวัตต์.ชั่วโมง

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 องศาเซลเซียสก็ทำได้โดยไม่มีผลกระทบจากสภาวะอากาศ และความชื้นภายนอก

คุณภาพของผลิตภัณฑ์ ได้แก่ ปริมาณสารระเหย วิตามินที่ไวต่ออุณหภูมิการอบ และกลิ่นในผลิตภัณฑ์สูญเสียน้อยกว่าตู้อบแห้งแบบอื่นๆ เพราะสารระเหยอยู่ในตู้ปิดจึงมีความดันไอบนผิวภายนอกทำ ให้สารระเหยเป็นไอออกจากผลิตภัณฑ์ได้น้อยลง ยกตัวอย่างการอบแห้งขิงพบว่ามีสาร Gingerol 26% ในขณะที่การอบแห้งแบบเดิมมีเพียง 20%

แกนของแมกคาดาเมียนัทจะเปลี่ยนสีเมื่อใช้อุณหภูมิต่ำ แต่เมื่อใช้ตู้อบฮีทปั๊มจะไม่เปลี่ยนสีแม้ อุณหภูมิที่ใช้จะสูงถึง 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)