บทที่ 2
หลักการและทฤษฎี

2.1 ความรู้พื้นฐานทางเซรามิก

เซรามิก มีรากศัพท์มาจากภาษากรีกว่า Keramos มีความหมายว่า ไฟหรือความร้อน ดังนั้น เซรามิก จึงหมายถึง ผลิตภัณฑ์ที่ได้นำเอาวัตถุดิบหลัก ซึ่งได้แก่ ดิน ทราย แร่บางอย่าง มาผ่านกระบวนการขึ้นรูป เช่น การปั้น การหล่อ หรือการอัดเป็นแผ่น แล้วทำให้แข็งแรงโดยผ่านความร้อนที่อุณหภูมิสูงหลายร้อยองศาเซลเซียสหรือมากกว่าพันองศาเซลเซียส

2.1.1 ประเภทของเซรามิก

เราสามารถจำแนกผลิตภัณฑ์เซรามิก ตามคุณภาพเนื้อของผลิตภัณฑ์ ได้ดังนี้

1. พอร์ซเลน (Porcelain) เป็นเซรามิกที่มีเนื้อสีขาว เคลือบผิวเป็นมัน โปร่งแสง มีความแข็งแกร่งเหมือนแก้ว ไม่ดูดซึมน้ำ เคาะมีเสียงดังกังวาน ส่วนผสมของเนื้อดินที่ใช้ คือ ดินขาว ดินเหนียวหรือบอลเคลย์ หินไชน่าสโตน แร่ฟันม้าและแร่ควอรตซ์ ผลิตภัณฑ์พอร์ซเลนใช้ในงานได้หลากหลายทั้งในชีวิตประจำวันและงานอื่นๆ

2. โบนไชน่า (Bone China) เป็นเครื่องปั้นดินเผาชั้นดีที่สุด มีราคาแพงสุด มีความขาวและเคลือบเป็นมันวาวมาก เนื้อละเอียด บางเบา และโปร่งแสงมาก มีความแข็งแกร่งดีมาก ตัวอย่างผลิตภัณฑ์ประเภทนี้ได้แก่ ถ้วย ชาม เครื่องประดับ เป็นต้น

3. เอิร์ธเธินแวร์ (Earthenware) เป็นผลิตภัณฑ์เซรามิกเคลือบผิวทึบแสง มีความพรุน สามารถดูดซึมน้ำได้ เนื้อละเอียด สีไม่ขาวมาก ตัวอย่างผลิตภัณฑ์ ได้แก่ หม้อดินเผา คนโท กระถางต้นไม้ กระเบื้องมุงหลังคา

4. สโตนแวร์ (Stoneware) เป็นผลิตภัณฑ์ เซรามิกเคลือบผิว มีความพรุนตัวต่ำ ทึบแสง เนื้อแข็งแกร่งและหนากว่าพอร์ซเลน ตัวอย่างผลิตภัณฑ์ได้แก่ ถ้วย ชาม ที่มีเนื้อทึบแสง เครื่องสังคโลก โอ่งมังกร

5. เทอราคอตตา (Terra Cotta) เป็นผลิตภัณฑ์ที่มีดินเหนียว ผิวดินเผาแล้วมักมีสีแดง เนื้อไม่แกร่ง มีความพรุนตัวสูง มักไม่เคลือบผิว ส่วนมากผลิตเป็นวัสดุก่อสร้าง กระเบื้องมุงหลังคา หรือบุผนัง

6. แก้ว (Glass) เป็นเซรามิกที่โปร่งแสง บางชนิดขุ่น ตัวอย่างผลิตภัณฑ์ได้แก่ หลอดไฟ แก้วน้ำ ขวด กระจก

7. วัสดุทนไฟ (Refractory) เป็นวัสดุประเภทอนินทรีย์ พวกดิน หิน แร่ธาตุ ที่หลอมตัวได้ยากในอุณหภูมิสูง ตัวอย่างได้แก่ อิฐทนไฟ อิฐฉนวนทนไฟ

ผลิตภัณฑ์เซรามิกดิบ (Green ware) คือ ผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการขึ้นรูปแล้วแต่ยังไม่ได้ผ่านการเผาที่อุณหภูมิสูง ดังนั้นจึงยังคงมีความชื้นสูงตามแต่วิธีการขึ้นรูป ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ปริมาณความชื้นในเนื้อเซรามิกดิบ ด้วยวิธีการขึ้นรูปต่างๆ (Brosnan et al, 2003)

Forming type	Moisture content (%dry-basis)
Isostatically pressed	<0.1%
Dry-pressed refractory	~0.5 - 1.5%
Dry-pressed tile	~0.1 – 0.8%
Extruded brick	~14 – 18%
Molded brick	~22 – 25%
Tableware (jiggered)	~9 – 16%
Sanitary ware	~12 – 16%
Engobes	~16 – 20%

2.1.2 กระบวนการผลิตเซรามิก

กระบวนการผลิตเซรามิกโดยหลักๆ แล้วมีขั้นตอนดังนี้

วัตถุดิบทางเซรามิก (Ceramic raw materials)

⇩

คัดเลือกและทำความสะอาด (Screening & Cleaning)

⇩

บดเพื่อปรับลดขนาด (Crushing)

⇩

ผสมวัตถุดิบเข้าด้วยกัน (Blending)

⇩

ขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ (Forming)

รูปที่ 2.1 ขั้นตอนหลักในกระบวนการผลิตเซรามิก (ศักดิพล เทียนเสม, 2548)

2.2 ความรู้พื้นฐานการอบแห้ง

การอบแห้ง คือกระบวนการที่ความร้อนถูกถ่ายเทด้วยวิธีใดวิธีหนึ่ง เพื่อไล่ความชื้นออกโดยการระเหยน้ำ โดยอาศัยความร้อนที่ได้รับเป็นความร้อนแฝงของการระเหย สิ่งที่สำคัญที่สุดในการอบแห้งคือการถ่ายเทความร้อนไปยังวัสดุอบแห้งอย่างมีประสิทธิภาพที่สุด โดยทั่วไปการอบแห้งมักจะใช้อากาศร้อนเป็นตัวกลางในการอบแห้ง ความร้อนจะถ่ายเทไปยังผิววัสดุโดยส่วนใหญ่จะถูกนำไปใช้ในการระเหยน้ำ ซึ่งไอน้ำจะเคลื่อนที่จากผิววัสดุมายังกระแสอากาศ และถ้าผิววัสดุมีปริมาณน้ำอยู่มาก อุณหภูมิและความเข้มข้นของไอน้ำที่ผิวจะคงที่ ส่งผลให้อัตราการถ่ายเทความร้อนและอัตราการอบแห้งคงที่ด้วย ถ้าอุณหภูมิ ความชื้นและความเร็วของกระแสอากาศมีค่าคงที่ เมื่อผิววัสดุมีปริมาณน้ำลดลงเหลือน้อย อุณหภูมิและความเข้มข้นของไอน้ำที่ผิววัสดุย่อมเปลี่ยนแปลงไป โดยที่อุณหภูมิของวัสดุจะสูงขึ้นและความเข้มข้นของไอน้ำจะลดลง ส่งผลทำให้อัตราการอบแห้งลดลง ดังนั้นช่วงอัตราการอบแห้ง สามารถแบ่งได้เป็น 2 ช่วง คือ

1. ช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ (Constant drying rate)

ในการอบแห้งวัสดุที่มีความชื้นสูงๆ ในช่วงแรกของกระบวนการการอบแห้งจะอยู่ในช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ จะเกิดจากพื้นผิวของวัสดุมีการถ่ายเทมวลและความร้อนที่ผิวนอกของวัสดุอย่างเดียว พารามิเตอร์ของสิ่งแวดล้อมที่มีผลต่ออัตราการอบแห้งช่วงนี้ได้แก่ อุณหภูมิ ความเร็วลมและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ ช่วงอัตราการอบแห้งช่วงนี้จะสั้น

2. ช่วงอัตราการอบแห้งลดลง (Falling drying rate)

เมื่อปริมาณความชื้นของวัสดุมีค่าต่ำกว่าความชื้นวิกฤต การถ่ายเทความร้อนและมวลไม่ได้เกิดขึ้นเฉพาะที่ผิวของวัสดุเท่านั้น แต่จะเกิดภายในผิวและเนื้อวัสดุ การเคลื่อนที่ของน้ำในวัสดุมายังผิวจะช้ากว่าการพาความชื้นจากผิวไปยังอากาศทำให้อัตราการอบแห้งลดลง พารามิเตอร์ที่มีผลต่ออัตราการอบแห้งช่วงนี้คืออุณหภูมิของอากาศอบแห้งและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ ค่าสัดส่วนของความชื้นเริ่มต้นปกติจะน้อยกว่า สัดส่วนความชื้นวิกฤติ ดังนั้นการอบแห้งทั้งหมดจะเกิดขึ้นในช่วงอัตราการอบแห้งลดลง แม้ว่าช่วงอัตราการอบแห้งคงที่จะมีผลต่อการเริ่มต้นของการอบแห้งแต่มักถูกละเลยเพราะเป็นช่วงที่สั้นที่สุด และมีความชื้นจำนวนน้อยมากถูกพาออกไปก่อนจะเข้าสู่ช่วงอัตราการอบแห้งลดลง

ความชื้น คือ ตัวบ่งบอกปริมาณของน้ำที่มีในวัสดุ โดยเทียบกับมวลของวัสดุชื้นหรือแห้ง ดังสมการต่อไปนี้

ความชื้นมาตรฐานเปียก (Wet basis) $$M_w = \frac{(w-d)}{w} \quad (2.1)$$

ความชื้นมาตรฐานแห้ง (Dry basis) $$M_d = \frac{(w-d)}{d} \quad (2.2)$$

เมื่อ M_w คือ ความชื้นมาตรฐานเปียก (เศษส่วน)

M_d คือ ความชื้นมาตรฐานแห้ง (เศษส่วน)

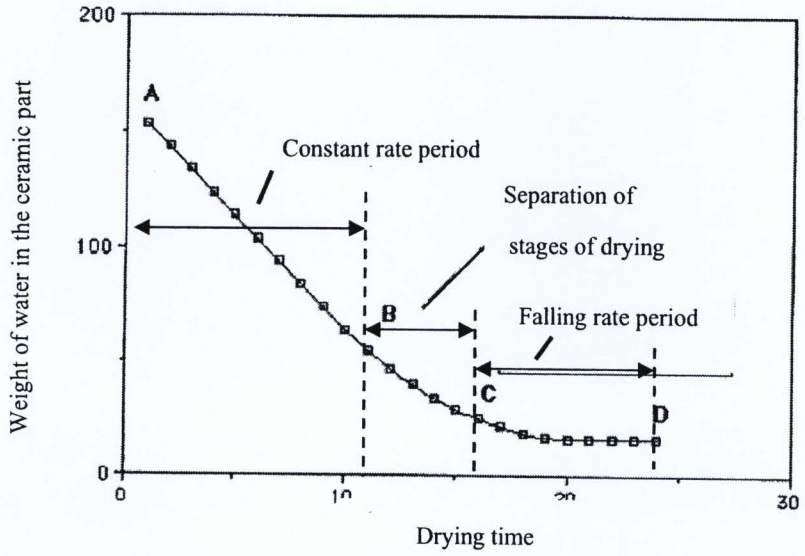
w คือ น้ำหนักเปียกของวัสดุ (kg)

d คือ น้ำหนักแห้งของวัสดุ (kg)

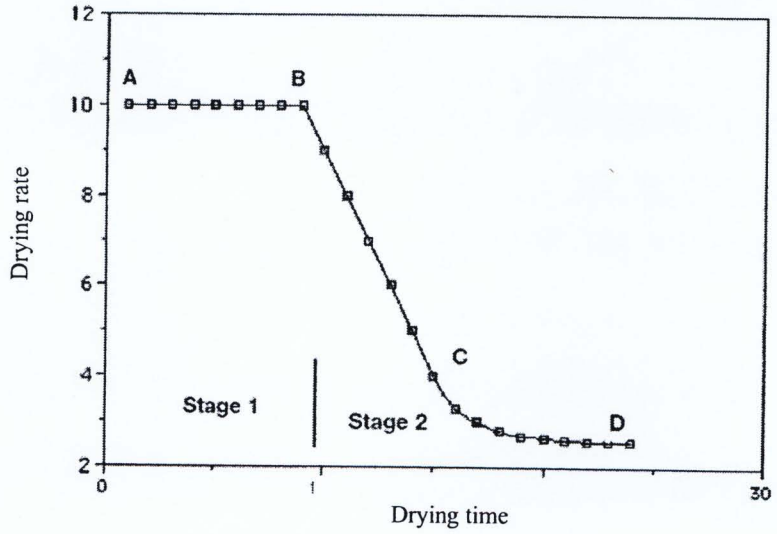
2.3 อัตราและขั้นตอนการอบแห้งเซรามิก

อัตราการอบแห้งสามารถหาได้จากการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของความชื้นในเนื้อเซรามิกต่อหน่วยเวลา โดยการพล๊อตกราฟระหว่าง น้ำหนักความชื้นในเนื้อเซรามิกต่อเวลา โดยค่าความชันของกราฟคืออัตราการอบแห้ง จากรูปที่ 2.2 จากจุด A ถึงจุด B เป็นช่วงต้นของการอบแห้ง เรียกว่าช่วงอัตราอบแห้งคงที่ (Constant rate period) เมื่อการอบแห้งดำเนินไปเรื่อยๆ จากจุด B จนถึงจุด C อัตราการอบแห้งจะเริ่มลดลงแบบคงที่ เรียกช่วงนี้ว่า ช่วงอัตราอบแห้งลดลงช่วงแรก (First falling

rate period) และในช่วงการอบจากจุด C จนถึงจุด D อัตราการอบแห้งลดลงมากขึ้น ซึ่งจะเรียกช่วงนี้ว่า ช่วงอัตราอบแห้งลดลงช่วงที่สอง (Second falling rate period)



รูปที่ 2.2 การเปลี่ยนแปลงความชื้นในเนื้อเซรามิกระหว่างการอบแห้ง (Brosnan et al, 2003)



รูปที่ 2.3 อัตราการอบแห้งเซรามิกกับเวลา (Brosnan et al, 2003)

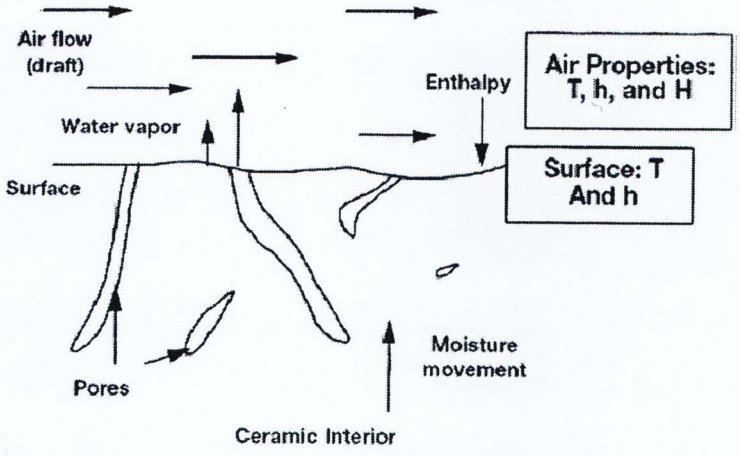
จากข้อมูลในรูปที่ 2.2 เมื่อทำการพล๊อตค่าระหว่างอัตราการอบแห้งกับเวลาจะได้ ดังรูปที่ 2.3 เริ่มต้นจากกระบวนการอบที่อัตราคงที่จากจุด A ถึงจุด B ถัดจากจุด B อัตราการอบแห้งเริ่มลดลง

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
ห้องสมุดงานวิจัย
วันที่ 22 ส.ค. 2555
เลขทะเบียน 248029
เลขเรียกหนังสือ

แบบคงที่จนถึงจุด C จากนั้นอัตราการอบแห้งก็เริ่มลดลงแบบช้าๆ จนสิ้นสุดกระบวนการอบแห้งที่จุด D โดยที่จุด B นั้นเป็นจุดสิ้นสุดของอัตราการอบแห้งคงที่ ซึ่งเรียกจุดนี้ว่า จุดความชื้นวิกฤต (Critical moisture content, M_c)

2.3.1 การอบแห้งช่วงที่ 1 (ช่วงอัตราอบแห้งคงที่)

กลไกของการอบแห้งในช่วงที่ 1 เกิดการระเหยที่ผิวและความชื้นเกิดการเคลื่อนที่โดยอาศัยแรงดูดซึม (Capillary force) แบบจำลองของกระบวนการนี้แสดงดังรูปที่ 2.4 ภาคตัดขวางของเซรามิกที่มีอากาศเคลื่อนที่ผ่านเกิดปฏิกิริยาที่ผิว และเกิดการถ่ายเทความร้อนที่ผิวของเซรามิกโดยการพาความร้อน



รูปที่ 2.4 แบบจำลองภาคตัดขวางของการอบเซรามิก (Brosnan et al, 2003)

- อุณหภูมิที่ผิว คืออุณหภูมิกระเปาะเปียกของอากาศที่เคลื่อนที่ผ่านเซรามิก
- เอนทาลปีที่ผิว คือเอนทาลปีที่ได้จากอุณหภูมิกระเปาะเปียก

การถ่ายเทมวลเกิดขึ้นเนื่องจากความแตกต่างของความเข้มข้นของไอน้ำที่ผิวของกระเปาะเปียกและที่อากาศรอบนอก

2.3.2 การอบแห้งช่วงที่ 2 (ช่วงอัตราอบแห้งลดลงช่วงแรก)

หลังจากน้ำที่ผิวถูกระเหยออกไปแล้ว ช่วงแรกของอัตราที่ลดลงเริ่มเกิดขึ้น โดยจะเริ่มเกิดการระเหยเกิดขึ้นที่ใต้ผิวเซรามิก กลไกการส่งผ่านที่สำคัญในขั้นตอนนี้คือแรงดูดซึม โดยแรงดึงนี้เกิดขึ้นมาจากการระเหยของน้ำที่ผิว ปัจจัยที่ควบคุมช่วงนี้คือ

- อุณหภูมิกระเปาะแห้งของการอบแห้งที่บรรยากาศ พร้อมกับอัตราการถ่ายเทความร้อน (Heat transfer rate)
- ความสามารถของเซรามิกที่จะไล่ไอน้ำออก (Rate of permeation of water vapor)

ผลของอุณหภูมิใช่วงอัตราอบแห้งลดลงช่วงแรก จะส่งผลทำให้อัตราการแทรกซึก (Permeation) และอัตราการแพร่ (Diffusion) ของไอน้ำผ่านช่องว่างในโครงสร้างผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้น

2.3.3 การอบแห้งช่วงที่ 3 (ช่วงอัตราอบแห้งลดลงช่วงที่สอง)

ในช่วงอัตราอบแห้งลดลงช่วงที่สอง น้ำที่ยังเหลือค้างในช่องว่างเล็กๆ และที่ผิวจะถูกกำจัดออก กลไกเริ่มต้นของการอบแห้งคือ การแพร่ของไอน้ำออกจากผลิตภัณฑ์ อุณหภูมิในเครื่องอบแห้งจะต้องทำการเปลี่ยนแปลง โดยจะต้องมีอุณหภูมิที่สูงสุดในระหว่างกระบวนการอบแห้งเพื่อเพิ่มอัตราการอบแห้ง

2.4 สมการจลนศาสตร์ของการอบแห้ง (Drying kinetic equation)

สมการจลนศาสตร์ของการอบแห้งในช่วงอัตราการอบแห้งลดลง สามารถแบ่งเป็นสมการการอบแห้งทางทฤษฎี สมการการอบแห้งกึ่งทฤษฎี และสมการการอบแห้งเอมไพริคัล แต่ละรูปแบบสมการมีรายละเอียดดังนี้

2.4.1 สมการอบแห้งทางทฤษฎี (Theoretical drying kinetic equation)

การอบแห้งในช่วงอัตราการอบแห้งลดลง การเคลื่อนที่ของน้ำส่วนมากจะอยู่ในรูปของเหลว ซึ่งเป็นผลมาจากความแตกต่างของความเข้มข้นของความชื้น (Vapor diffusion) ที่เป็นไปในลักษณะของการแพร่ของน้ำภายในวัสดุ การถ่ายเทมวลภายในอธิบายได้ด้วยสมการการแพร่ความชื้นที่อยู่บนพื้นฐานตามกฎข้อที่สองของ Fick

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \nabla^2 DM \tag{2.3}$$

เมื่อ M คือ ความชื้น (เศษส่วนมาตรฐานแห้ง)

D คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น (m^2/h)

t คือ เวลา (h)

ถ้าพิจารณาการถ่ายเทมวลในทิศทาง x, y, z ซึ่งตั้งฉากกันและกัน และตั้งสมมุติฐานว่าค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ไม่ขึ้นกับปริมาณความชื้นในวัสดุ (ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่คงที่) จะได้ว่า

$$\frac{\partial MR}{\partial t} = D\left(\frac{\partial^2 MR}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 MR}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 MR}{\partial z^2}\right) \tag{2.4}$$

โดยกำหนดให้ $MR = \dfrac{(M - M_{eq})}{(M_{in} - M_{eq})}$

เมื่อ MR คือ อัตราส่วนความชื้น

M_{in} คือ ความชื้นเริ่มต้น (เศษส่วนมาตรฐานแห้ง)

M_{eq} คือ ความชื้นสมดุล (เศษส่วนมาตรฐานแห้ง)

หาคำตอบของสมการ (2.4) โดยวิธีการแยกตัวแปร จะได้สมการการแพร่ของความชื้นในวัสดุแผ่นแบนซึ่งกว้างและยาวมาก (Infinite slab) คือ

$$MR = \frac{8}{\pi^2}\sum_{n=0}^{\infty}\left(\frac{1}{(2n+1)^2}\right)\exp\left(\frac{-(2n+1)^2 D\pi^2 t}{4l^2}\right) \tag{2.5}$$

เมื่อ l คือ ความหนาของวัสดุ (m)

t คือ เวลา (h)

n คือ จำนวนเต็มมีค่า 0, 1, 2, 3...

ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นโดยรวม เป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญในจลนศาสตร์ของการอบแห้ง ตามรูปแบบทางทฤษฎี ที่จะต้องนำมาใช้ในการจำลองสภาพการอบแห้ง นักวิจัยหลายท่านจะสมมติให้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นโดยรวม มีค่าคงที่ตลอดช่วงของการอบแห้ง (ไม่ขึ้นกับความชื้น) สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นโดยรวม จะมีค่ามากหรือน้อยขึ้นอยู่กับค่าความแตกต่างของความดันไอภายในและภายนอกวัสดุอุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งวัสดุจะทำให้ค่าความดันไอภายในและภายนอกแตกต่างกัน ซึ่งรูปแบบของสมการ Arrhenius เป็นที่นิยมในการนำมาใช้อย่างแพร่หลายเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การการแพร่ความชื้นโดยรวมกับอุณหภูมิอบแห้ง แสดงดังสมการ (2.6)

$$D = D_o \exp\left[\frac{-E_a}{RT_{abs}}\right] \tag{2.6}$$

เมื่อ D คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น (m^2/h)

D_o คือ อาร์ริเนียสเฟกเตอร์ (m^2/h)

E_a คือ พลังงานกระตุ้น (kJ/mol)

R คือ ค่าคงที่ของก๊าซ มีค่าเท่ากับ 8.314 kJ/mol-K

T_{abs} คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์ (K)

พฤกษ์ กาญจนาภา (2549) ได้ทำการศึกษาหาสมการสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นโดยรวมของการอบแห้งกระดาษสา ได้รูปแบบดังสมการ (2.7)

$$D = \left(1.886\exp\left(7.6362/RH\right)\exp\left(6.2059/T\right)\right)\times 10^{-8} \tag{2.7}$$

เมื่อ RH คือ ความชื้นสัมพัทธ์

Kiranoudis et al. (1992) ได้ทำการศึกษาหาสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นโดยรวม ของการอบแห้งแครอท ได้รูปแบบดังสมการ (2.8)

$$D = (2.17x10^{-7})\exp\left(-\frac{0.0744}{M}\right)\exp\left(-\frac{1527}{T_{abs}}\right) \tag{2.8}$$

เมื่อ M คือ ความชื้นวัสดุ (Dry-basis)

2.4.2 สมการอบแห้งกึ่งทฤษฎี (Semi-theoretical drying kinetic equation)

สมการจลศาสตร์ของการอบแห้งกึ่งทฤษฎี สามารถสร้างสมการง่ายๆ โดยการสมมติอัตราการอบแห้งภายใต้สภาวะคงที่ แปรผันเป็นสัดส่วนโดยตรงกับผลต่างของความชื้นของผลิตภัณฑ์และความชื้นสมดุล ข้อสมติฐานดังกล่าวคล้ายกับกฎการเย็นตัวของนิวตัน สมการดังกล่าวเขียนได้ดังนี้

$$\frac{dM}{dt}\alpha(M - M_{eq})$$

$$\frac{dM}{dt} = -k(M - M_{eq}) \tag{2.9}$$

สมการ (2.9) เป็นสมการอนุพันธ์ เนื่องจากแสดงความสัมพันธ์ระหว่างฟังก์ชันและอนุพันธ์ โดยแยกตัวแปรและย้ายความชื้นไปทางด้านซ้าย และย้ายเวลาไปด้านขวาจะได้สมการ (2.10)

$$\frac{dM}{(M - M_{eq})} = -kdt \tag{2.10}$$

เมื่อกำหนดเงื่อนไขเริ่มต้น $M(0) = M_{in}$ ทำการอินทริเกรทสมการที่ (2.10) จะได้

$$\ln\frac{(M - M_{eq})}{(M_{in} - M_{eq})} = -kt \tag{2.11}$$

$$MR = \frac{(M - M_{eq})}{(M_{in} - M_{eq})} = \exp(-kt) \tag{2.12}$$

เมื่อ k คือ ค่าคงที่ของการอบแห้ง (h^{-1})

ค่าคงที่ของการอบแห้ง (k) เป็นคุณสมบัติเฉพาะของผลิตภัณฑ์หนึ่งๆ ภายในช่วงสภาวะอากาศอบแห้งและวัสดุอบแห้งที่ทำการทดลองเท่านั้น สมการกึ่งทฤษฎีนี้จะสามารถใช้ได้ดีต่อเมื่อวัสดุอบแห้งมีลักษณะใกล้เคียงกับการทดลองเท่านั้น

พฤกษ์ กาญจนาภา (2549) ได้ทำการศึกษาค่าคงที่ของการอบแห้งกระดาษสาแบบกึ่งทฤษฎีและสร้างสมการความสัมพันธ์ดังสมการ (2.13)

$$k = 9.2588 - 0.426RH + 0.0077RH^2 - 0.0198T \tag{2.13}$$

เกยูร ช่ออัญชัญ (2551) ได้ทำการศึกษาค่าคงที่ของการอบแห้งไม้สักแปรรูปแบบกึ่งทฤษฎีและสร้างสมการความสัมพันธ์ดังสมการ (2.14)

$$k = \begin{pmatrix} 0.226 - 0.46RH + 0.177RH^2 - 0.0083T \\ +0.017T\,RH - 0.0074T\,RH^2 + 0.000088T^2 \\ -0.00018T^2RH + 0.000091T^2RH^2 \end{pmatrix} \quad (2.14)$$

Westerman et al. (1973) ทำการอบแห้งข้าวโพด และทำการเสนอค่าคงที่การอบแห้งเป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ ดังสมการ (2.15)

$$\ln(k) = 13.328 - 1.15RH - \frac{8255.9}{1.8T_{abs} + 491.67} \quad (2.15)$$

2.4.3 สมการอบแห้งเอมไพริคัล (Empirical drying kinetic equation)

สมการอบแห้งไพริคัล คือสมการที่สร้างจากแนวโน้มของข้อมูลการทดลองสำหรับวัสดุอบแห้งในช่วงอุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ และความเร็วของอากาศอบแห้งหนึ่งๆ ซึ่งพบว่าใช้ทำนายอัตราการอบแห้งได้ดี แต่มีข้อจำกัดในเรื่องเงื่อนไขการอบแห้งที่ต้องตรงกับสภาวะการทดลอง สำหรับจลนศาสตร์ของการอบแห้งเอมไพริคัลที่นิยมใช้คือ สมการของ Page (1949) มีรูปแบบสมการดังนี้

$$MR = \exp(-Ct^n) \quad (2.16)$$

และสมการของ Herderson & Pabis (1961)

$$MR = A\exp(-Bt) \quad (2.17)$$

เมื่อ C, B คือ ค่าคงที่ของการอบแห้ง (h^{-1})

A, n คือ ค่าคงที่

พฤกษ์ กาญจนาภา (2549) ได้ทำการศึกษาค่าคงที่ของการอบแห้งกระดาษสา ในสมการของ Herderson & Pabis (1961) และสร้างสมการความสัมพันธ์ดังสมการ (2.18)

$$\begin{aligned} B &= 9.4327 - 0.4344RH + 0.0075RH^2 - 0.0184T \\ A &= 1.0448 \end{aligned} \quad (2.18)$$

เกยูร ช่ออัญชัญ (2551) ได้ทำการศึกษาค่าคงที่ของการอบแห้งไม้สักแปรรูป ในสมการของ Herderson & Pabis (1961) และสร้างสมการความสัมพันธ์ดังสมการ (2.19)

$$\begin{aligned} B &= \left(0.105 + 0.105RH - 0.416RH^2\right) - 0.0046T \\ &+0.00016T\,RH + 0.0103T\,RH^2 + 0.000057T^2 \\ &-0.000054T^2RH - 0.000040T^2RH^2 \\ A &= 0.9451 \end{aligned} \tag{2.19}$$

2.5 ปัจจัยที่มีผลต่อการอบแห้ง

Nonhebl and Moss (1971) ได้กล่าวไว้ว่าในสภาวะการอบแห้งสามารถเปลี่ยนแปลงได้จากการควบคุม สภาวะภายนอกที่มีผลต่อการอบแห้งวัสดุ ได้แก่ อุณหภูมิของลมร้อน ความเร็วของลมร้อน ความชื้นสัมพัทธ์ของลมร้อนและน้ำหนักของวัสดุอบแห้งต่อหน่วยพื้นที่

2.5.1 อุณหภูมิของลมร้อน

โดยปกติการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งที่ความดันบรรยากาศ อุณหภูมิของการอบแห้งจะถูกควบคุมโดยเครื่องควบคุมอุณหภูมิ ในกรณีดังกล่าวถือว่าอุณหภูมิเป็นปัจจัยคงที่ ในกรณีที่มีการเพิ่มหรือลดอุณหภูมิในขณะอบแห้งจะถือว่าอุณหภูมิมีผลต่ออัตราอบแห้งเป็นอย่างมาก ในกรณีที่ใช้ความเร็วของลมร้อนคงที่ อัตราการอบแห้งจะขึ้นอยู่กับผลต่างของอุณหภูมิกระเปาะเปียกและกระเปาะแห้งของอากาศร้อนเท่านั้น ดังนั้นอัตราการอบแห้งจะมีค่าสูง เมื่ออุณหภูมิกระเปาะแห้งมีค่าสูงและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศมีค่าต่ำ ในช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ อัตราการอบแห้งจะขึ้นอยู่กับสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนและผลต่างของอุณหภูมิกระเปาะแห้งเท่านั้น ส่วนในช่วงอัตราการอบแห้งลดลง วัสดุอบแห้งมีแนวโน้มจะแห้งเร็วขึ้นถ้าอุณหภูมิในการอบแห้งเพิ่มขึ้น (Borgstorm, 1968)

2.5.2 ความเร็วของลมร้อน

ความเร็วของลมร้อนไม่ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของอากาศ อุณหภูมิและการนำอากาศที่ใช้แล้วมาผสมกับอากาศสิ่งแวดล้อม ถึงแม้ว่าจะทำให้องค์ประกอบและคุณสมบัติของอากาศเปลี่ยนแปลงไป แต่จะไม่มีผลต่อความเร็วของลมร้อน โดยปกติในการอบแห้งจะควบคุมความเร็วของลมร้อนให้คงที่ตลอดช่วงเวลาการอบแห้ง ในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงความเร็วของลมร้อน

ความเร็วของลมร้อนจะมีผลต่อสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ถ้าเพิ่มความเร็วของลมร้อนให้สูงขึ้น จะทำให้อัตราการอบแห้งดีขึ้น (Brennan et al, 1986)

2.5.3 ความชื้นของลมร้อน

ความชื้นจะขึ้นอยู่กับสัดส่วนของอากาศที่ใช้แล้วกับอากาศแวดล้อม รวมถึงอัตราการอบแห้งที่เวลาใดๆ หากลมร้อนมีความชื้นสูงจะทำให้ความสามารถของการดึงน้ำในวัสดุอบแห้งต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรของลมร้อนลดลง นั่นคืออัตราการอบแห้งจะลดลงด้วย และในทางทฤษฎีสามารถที่จะควบคุมความชื้นของลมร้อนได้ โดยการควบคุมการผสมของอากาศที่ใช้แล้วกับอากาศแวดล้อม ซึ่งหากเพิ่มการผสมของอากาศที่ใช้แล้วกับอากาศแวดล้อมมากขึ้นเท่าใด อัตราการอบแห้งจะลดลงมากขึ้นเท่านั้น ในทางปฏิบัติแล้วไม่สามารถควบคุมการผสมของอากาศที่ใช้แล้วกับอากาศแวดล้อมได้แน่นอน และวิธีที่นิยมทดลองกันก็คือ การหาความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นอัตราการอบแห้งขณะใดขณะหนึ่งและ สัดส่วนของการผสมของอากาศที่ใช้แล้วกับอากาศแวดล้อมโดยการสมดุลมวลสาร (Hield and Josly,1967)

2.5.4 น้ำหนักของวัสดุต่อหน่วยพื้นที่หรือความหนาของชิ้นวัสดุ

ในช่วงอัตราความแห้งคงที่ อัตราการอบแห้งจะขึ้นอยู่กับลักษณะของพื้นผิววัสดุเท่านั้น ดังนั้นความหนาของวัสดุไม่มีผลต่ออัตราการอบแห้งในช่วงนี้ แต่เมื่อถึงช่วงอัตราการอบแห้งลดลง การแพร่ของน้ำจากภายในออกมาสู่พื้นผิวของวัสดุซึ่งเกิดการระเหยจะเป็นตัวควบคุมอัตราการอบแห้งในช่วงนี้การเพิ่มความหนาของชั้นวัสดุจะทำให้อัตราการอบแห้งลดลง ดังนั้นจึงต้องกำหนดความหนาของชั้นวัสดุที่เหมาะสมด้วย (Somogyi and Lun, 1986)

2.6 การประเมินอัตราการใช้และสมดุลพลังงาน

พิจารณาองค์ประกอบที่สำคัญของการสูญเสียความร้อนของการอบแห้งเซรามิก ถ้าให้ตู้อบแห้งเป็นปริมาตรควบคุม (Control volume) จากกฎอนุรักษ์พลังงาน (พลังงานเข้าระบบ = พลังงานสะสมในระบบ + พลังงานออกจากระบบ) สามารถเขียนสมการสมดุลพลังงานของระบบได้ คือ

$$Q_{input} = Q_{useful} + Q_{loss} \qquad (2.20)$$

เมื่อ Q_{input} คือ พลังงานที่ระบบต้องการ เพื่อใช้ในการระเหยน้ำออกจากเซรามิกรวมกับการสูญเสียที่เกิดขึ้นในส่วนต่างๆ (MJ)

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ห้องสมุดงานวิจัย

Q_{useful} คือ พลังงานความร้อนที่ใช้ขับน้ำออกจากเซรามิกกับพลังงานความร้อนที่สะสมในมวลของเซรามิก (MJ)

Q_{loss} คือ พลังงานความร้อนที่สูญเสียออกจากระบบในกระบวนการอบแห้งเซรามิก (MJ)

2.6.1 พลังงานที่ใช้ในระบบ (Input heat, Q_{input})

คือพลังงานที่ระบบต้องการเพื่อใช้ในการระเหยน้ำออกจากเซรามิกรวมกับการสูญเสียที่เกิดขึ้นในส่วนต่างๆ ปกติพลังงานที่ให้กับระบบอยู่ในรูปแบบของความร้อน เช่น ความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้เชื้อเพลิงหรือความร้อนที่ได้จากฮีทเตอร์ไฟฟ้า

$$Q_{input} = m_{gas} HHV_{LPG} \tag{2.21}$$

เมื่อ m_{gas} คือ มวลของเชื้อเพลิงที่ใช้เผาไหม้ (kg)

HHV_{LPG} คือ ค่าความร้อนของก๊าซหุงต้ม (MJ/kg)

โดยที่ HHV_{LPG} = 49.731 MJ/kg (ที่มา: http://www.pttpl.com)

หรือ

$$Q_{input} = (P)(t)(3.6) \tag{2.22}$$

เมื่อ P คือ กำลังของขดลวดความร้อน (kW)

t คือ เวลาที่ขดลวดความร้อนทำงาน (h)

2.6.2 พลังงานที่ใช้ประโยชน์ (Useful heat, Q_{useful})

คือพลังงานความร้อนที่ใช้ขับน้ำออกจากเซรามิกกับพลังงานความร้อนที่สะสมในมวลของเซรามิก

$$Q_{useful} = (mh_{fg})_{water} + (mC_p \Delta T)_{ceramic} \tag{2.23}$$

เมื่อ m_{water} คือ มวลของน้ำที่ระเหยออกจากเซรามิก (kg)

$h_{fg,water}$ คือ ความร้อนแฝงของการระเหยน้ำออกจากเซรามิก (MJ/kg)

โดยที่ $h_{fg,water}$ = 2.27 MJ/kg

(ที่มา: http://www.theengineeringtoolbox.com)

$m_{ceramic}$ คือ มวลของเซรามิก (kg)

$C_{p,ceramic}$ คือ ค่าความจุความร้อนจำเพาะของเซรามิก (kJ/kg-°C)

โดยที่ $C_{p,ceramic}$ = 9.2 x 10^{-4} MJ/kg K

(ที่มา: http://www.theengineeringtoolbox.com)

$\Delta T_{ceramic}$ คือ ผลต่างของอุณหภูมิเซรามิก หลังอบแห้งกับก่อนอบแห้ง (°C)

2.6.3 พลังงานที่สูญเสีย (Heat Loss, Q_{loss})

สามารถหาได้จากสมการ (2.24)

$$Q_{loss} = Q_{input} - Q_{useful} \tag{2.24}$$

2.6.4 การวิเคราะห์ประสิทธิภาพเชิงความร้อน (η_{th}) ของเครื่องอบแห้ง

ในการวิเคราะห์ประสิทธิภาพของการอบแห้งซึ่งเป็นสัดส่วนของพลังงานความร้อนที่ใช้ในการอบแห้งเซรามิก (Q_{useful}) ต่อพลังงานความร้อนของเชื้อเพลิงที่ให้กับเครื่องอบแห้ง (Q_{input}) โดยเปอร์เซ็นต์ประสิทธิภาพทางความร้อนของเครื่องอบแห้งเซรามิกสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\eta_{th} = \frac{Q_{useful}}{Q_{input}} x100 \tag{2.25}$$