

เอกสารประกอบการสอนวิชา 506303 Drying and Firing

เรื่อง Drying of Ceramics

ภาคการศึกษาที่ 1/2543

โดย

อาจารย์สุธรรม ศรีห่มสัก



มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สาขาวิชาวิศวกรรมเซรามิก
สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สงวนลิขสิทธิ์

คำนำ

หนังสือเล่มนี้จัดทำจากเอกสารประกอบการสอนวิชา 560303 Drying and Firing ที่มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีเป็นเวลา 3 ปี ได้จัดทำเป็นรูปเล่มขึ้นเพื่อความสะดวกแก่นักศึกษาและผู้สนใจ เนื้อหาในหนังสือเล่มนี้มีแต่ส่วนที่เป็นเรื่อง Drying เพราะผู้เขียนสอนแต่เฉพาะเรื่องนี้

เนื่องจากมีประสบการณ์การสอนน้อยปีและไม่มีประสบการณ์ในโรงงานเซรามิกหนังสือจึงอาจจะมีข้อผิดพลาดบ้าง ผู้เขียนต้องขออภัยในที่นี้และขอน้อมรับข้อเสนอแนะต่างๆ ด้วยความยินดีเพื่อจะได้นำไปปรับปรุงแก้ไขในการพิมพ์ครั้งต่อไป

ผู้เขียนขอขอบพระคุณผู้มีพระคุณทุกท่านต่อไปนี้

- 1) พี่ๆ ของผู้เขียน ได้แก่ พี่นันทรา, พี่วรุฒ และพี่สุธีร์ ศรีหล่มสัก ที่มีพระคุณช่วยเหลือผู้เขียนและกรุณาทำงานในกิจการบริษัทฯ ของครอบครัวแทนผู้เขียน
- 2) รองศาสตราจารย์ ดร. จรัสศรี และอาจารย์ ดร. วีระยุทธ ลอประยูร ผู้ให้คำแนะนำ, ตอบข้อซักถาม และเอื้อเฟื้อข้อมูล ท่านทั้งสองเป็นทั้งครูและผู้บังคับบัญชาที่ทำให้การช่วยเหลือผู้เขียนเสมอ
- 3) คณะเจ้าหน้าที่พิมพ์ดีดกลาง มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ช่วยจัดพิมพ์ฉบับร่าง

ผู้เขียนหวังว่าหนังสือเล่มนี้จะเป็นประโยชน์แก่นักศึกษาและผู้สนใจทุกท่าน และขอขอบคุณความดีทั้งหลายที่มีในหนังสือเล่มนี้แก่พี่นันทรา, พี่วรุฒ, พี่สุธีร์ ศรีหล่มสัก, รองศาสตราจารย์ ดร.จรัสศรี และ อาจารย์ ดร.วีระยุทธ ลอประยูร ผู้มีพระคุณกับผู้เขียนอย่างสูง

สุธรรม ศรีหล่มสัก
สาขาวิชาวิศวกรรมเซรามิก
สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
มิถุนายน 2543

สงวนลิขสิทธิ์

สารบัญ

คำนำ.....	I
บทที่ 1 Nature of Clay	1
บทที่ 2 Drying Clay Ware.....	16
บทที่ 3 Water Removal from Clay.....	27
บทที่ 4 Dryer Operation.....	36
บทที่ 5 Dryer Problems	46
บทที่ 6 Special Drying Technique.....	55
หนังสืออ้างอิง.....	83



มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทที่ 1 Nature of Clay

Introduction

Clay เป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติพิเศษ คือ เมื่อรวมกับน้ำจะมีความเหนียว (Plasticity) สามารถนำมาขึ้นรูปให้เป็นรูปต่าง ๆ ได้ และเมื่ออบแห้งก็จะมี Strength สูง สามารถรักษารูปทรงที่ขึ้นรูปไว้ก่อนได้

นักเคมีนิยามของ Clay ว่า “Clay is hydrated aluminosilicate” แต่นักเซรามิกนิยาม Clay ว่า “Clay is a fine grain rock which, when suitable crushed and pulverized, becomes plastic when wet, leather hard when dried and, on fired, is converted to a permanent rock-like mass”

Classification of Clay Minerals

นักวิจัยจำแนกประเภทของ Clay ตาม Crystal Structure ออกเป็น 2 กลุ่มใหญ่ คือ

1. Amorphous และ 2. Crystalline แต่ละกลุ่มใหญ่ยังแบ่งต่อไปอีกเป็นกลุ่มย่อย ดังแสดงในตารางที่ 1.1

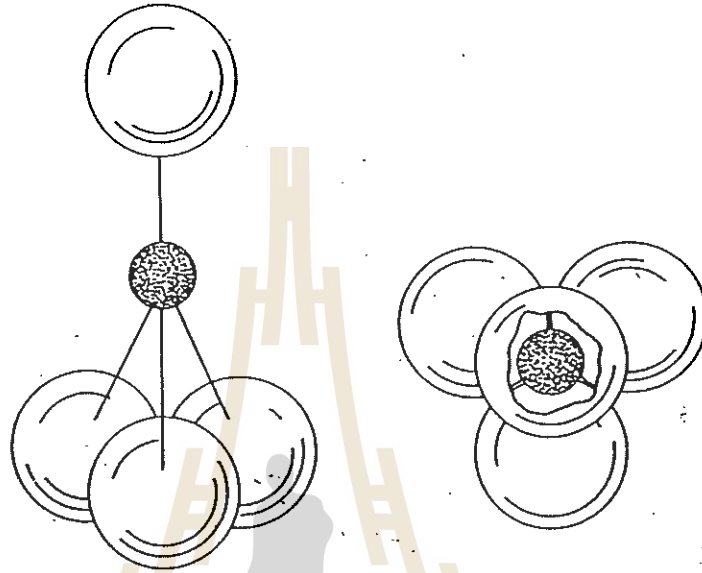
Table 1.1 Classification of the Clay Minerals (จาก Ref.1 หน้า 1)

- I. Amorphous
 - Allophane Group
- II. Crystalline
 - A. Two layer type (sheet structures composed of units of one layer of silica tetrahedrons and one layer of alumina octahedrons)
 1. Equidimensional
Kaolinite Group
Kaolinite, nacrite, etc.
 2. Elongate
Halloysite Group
 - B. Three-layer types (sheet structures composed of two layers of silica-tetrahedrons and one central dioctahedral or trioctahedral layers)
 1. Expanding Lattice
 - a. Equidimensional
Montmorillonite Group
Montmorillonite, sauconite, etc.
 - b. Elongate
Montmorillonite Group
Nontronite, saponite, hectorite
 2. Nonexpanding Lattice
Illite Group
 - C. Regular mixed-layer types (ordered stacking of alternate layers of different types)
Chlorite Group
 - D. Chain-structure type (hornblende-like chains of silica tetrahedrons linked together by octahedral groups of oxygens or hydroxyls containing Al and Mg atoms)
 - Attapulgite
 - Sepiolite
 - Palygorskite

Crystal structure of Clay Minerals

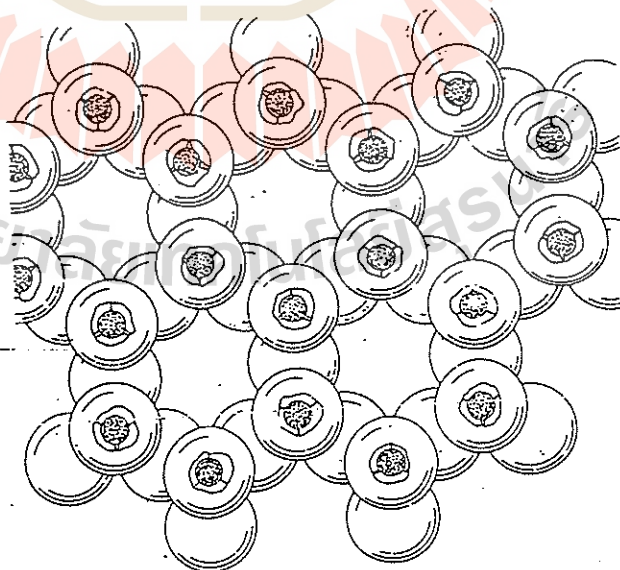
Clay กลุ่มที่สำคัญที่สุดสำหรับนักเซรามิก คือ Kaolinite มี Crystal แบบ Two layers type structure ซึ่งประกอบด้วย layer ของ Silica Tetrahedron กับ layer ของ Alumina Octahedron

Silica Tetrahedron layer : เรียกอีกอย่างว่า disilicate sheet ใน sheet ชนิดนี้ อะตอม Si ทุกตัวจะถูกล้อมรอบด้วยอะตอมของ O จำนวน 4 ตัวเป็นรูป Tetrahedron ดังภาพที่ 1.1 เรียกว่า “Silica Tetrahedron”



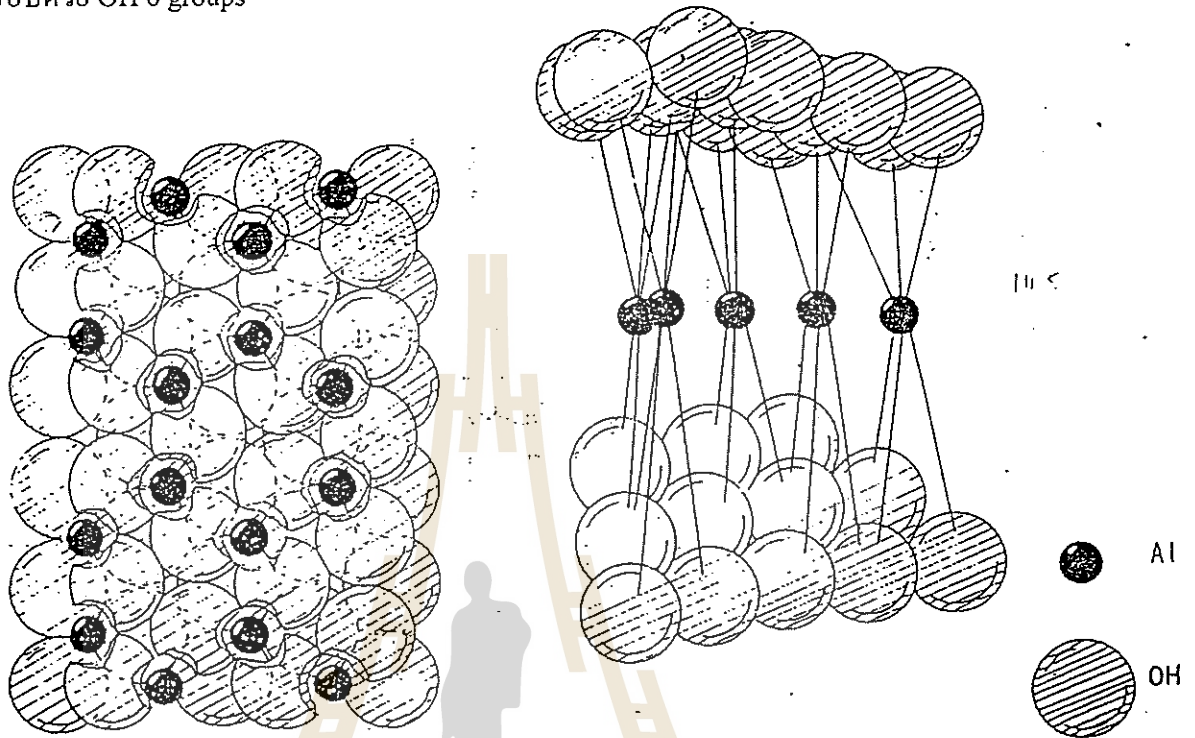
ภาพที่ 1.1 $(\text{SiO}_4)^{4-}$ orthosilicate unit, perspective (left) and cutaway view (right). (จาก Ref. 1 หน้า 3)

Silica Tetrahedron แต่ละ Tetrahedron จะ Share Oxygen 3 ตัว กับ Silica Tetrahedron อื่นอีก 3 Tetrahedron ได้โครงสร้างเป็น 2 dimension sheet structure ดังภาพที่ 1.2 Oxygen ที่เหลือ 1 ตัวที่ยังไม่ได้ share กับใครจะ form bond กับ Al หรือ Mg atom ใน Octahedral layer ต่อไป



ภาพที่ 1.2 Disilicate Sheet or Layer Structure. $(\text{Si}_2\text{O}_5)^{2-}$. (จาก Ref.1 หน้า 4)

Alumina Octahedral layer: ใน layer นี้ Al อะตอม ถูกล้อมรอบด้วย OH 6 groups เป็นรูป Octahedron จากนั้นแต่ละ Octahedron จะ share edge กันต่อเนื่องออกไปเป็น Alumina Octahedral layer $Al(OH)_3$ ดังภาพที่ 1.3 โครงสร้างนี้เหมือนกับโครงสร้างของแร่ Gibbsite ซึ่ง Al ในโครงสร้างถูกล้อมรอบด้วย OH 6 groups



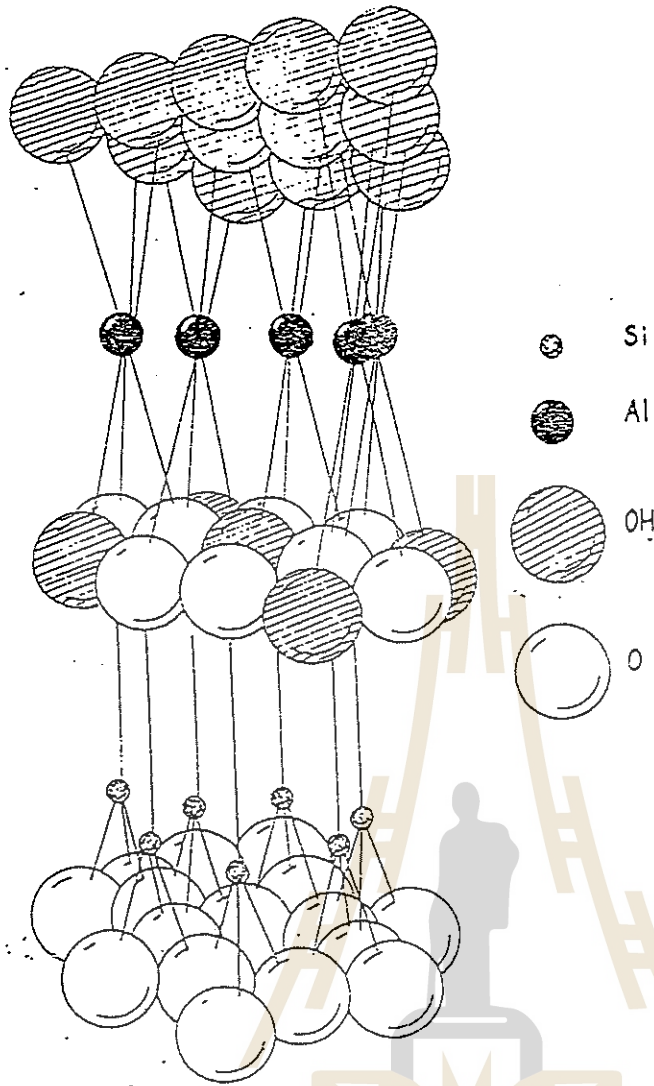
ภาพที่ 1.3 Gibbsite Structure, $Al(OH)_3$, large ions are $(OH)^-$ and small ions are Al^{+3} .
Cutaway view (left), perspective exploded in Z direction (right). (จาก Ref. 1 หน้า 5)

ในแร่ Brucite ($Mg(OH)_2$) Mg ก็จับกับ OH เป็นโครงสร้างคล้าย ๆ Gibbsite structure ของ $Al(OH)_3$ ดังที่กล่าวก่อนหน้านี้คือ Mg แต่ละอะตอมจะมี OH 6 groups ล้อมรอบเป็น Octahedron แล้ว Octahedron จะ Share edge กันต่อไปเป็น sheet เรียก sheet structure แบบนี้ว่า “Brucite structure”

ข้อแตกต่างระหว่าง Gibbsite กับ Brucite structure คือ 1 unit cell ของ Gibbsite จะประกอบด้วย Al 4 อะตอม แต่ 1 unit cell ของ Brucite จะประกอบด้วย Mg อะตอมถึง 6 อะตอม

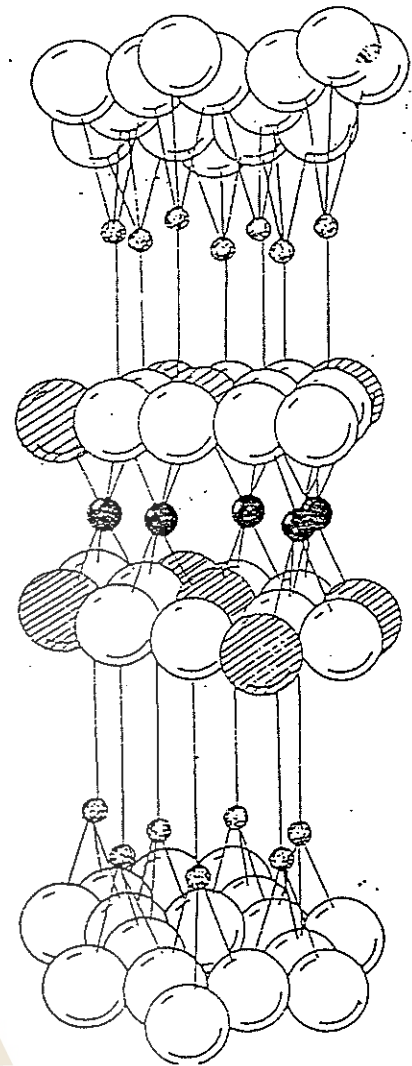
แร่ Kaolinite ($Al_2Si_2O_5(OH)_4$) เกิดจาก Si-tetrahedral layer (T) กับ Al – octahedral layer (O) มาจับเป็นคู่กันเป็นคู่ ๆ เป็น [TO] จากนั้นแต่ละคู่ก็วางซ้อนกันในแกน Z ดังภาพที่ 1.4 จากภาพจะเห็นว่า อะตอม Si ถูกล้อมรอบโดย O เป็นรูป Tetrahedron 4 อะตอม ส่วนอะตอม Al ถูกล้อมโดย OH 4 groups และ O 2 อะตอม เป็นรูป Octahedron

แร่ดินกลุ่มพวก Montmorillonite (หรือ Smectite หรือ Bentonite) เกิดจาก Tetrahedral layer 2 layers จับกับ Octahedral layer 1 layer เกิดเป็นโครงสร้างแบบ Sandwich structure [TOT] ดังภาพที่ 1.5 อนึ่งภาพ 1.5 เป็นภาพ Structure ของแร่ดินใน Group Montmorillonite ตัวที่ชื่อว่า Pyrophyllite ($Al_2(Si_2O_5)_2(OH)_2$) ถ้าเปลี่ยน Al^{+3} ในโครงสร้างด้วย Mg^{2+} จะเป็นแร่ Talc ($Mg_3Si_4O_{10}(OH)_2$)



ภาพที่ 1.4 Kaolinite Structure, $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$
perspective exploded in Z direction

(จาก Ref. 1 หน้า 8)



ภาพที่ 1.5 Pyrophyllite Structure, $\text{Al}_2(\text{Si}_2\text{O}_5)_2(\text{OH})_2$
perspective exploded in Z direction

(จาก Ref. 1 หน้า 9)

โครงสร้างแบบ Sheet ของ Kaolinite และ Montmorillonite ยึดต่อกันแข็งแรงแผ่ออกในทิศทาง X, Y แต่ไม่จับตัวกันแข็งแรง-ต่อเนื่องในทิศทางแกน Z ระหว่าง layers ของ [TO] กับ [TO] ของ Kaolinite หรือ [TOT] กับ [TOT] ของ Montmorillonite บริสุทธิ์ยังยึดกันด้วย bond อ่อนๆ พวก Van der Waal Bond ดังนั้น Kaolinite จึงมีโครงสร้างแบบแบนๆ (Plate like structure) สามารถลอกออกเป็นแผ่นๆ ได้ ส่วน Montmorillonite จึงเป็นแร่ที่คุณสมบัติลื่น (Soap like) ใช้ทำแป้งผัดหน้าได้

Clay properties

ดินเป็นแร่ที่มีคุณสมบัติเด่นพิเศษต่างจากแร่ชนิดอื่นๆ 3 ประการ คือ

1. Small particle size
2. Base Exchange Properties
3. Plasticity

1). **Small particle size:** คือมี particle เล็ก โดยทั่วไป Kaolinite จะมี diameter ของ particle ในช่วง 0.1 – 100 μm และ Bentonite มี diameter ของ particle ในช่วง 0.01 – 10 μm

ตารางที่ 1.2 เป็นตารางแสดงขนาดของ Particle ชนิดต่าง ๆ ที่มีอยู่ตามธรรมชาติ ที่มีขนาดตั้งแต่ 1 ซม. เช่น ถั่ว ไปจนถึงที่มีขนาดจิ๋ว เช่น Colloid particle และ Molecule ใหญ่ ๆ เมื่อเปรียบเทียบขนาดของ Kaolinite กับอนุภาคจากตารางจะเห็นได้ว่า Kaolinite ที่มีขนาดใหญ่ (100 μm) ก็ยังมี Particle เล็กกว่า Amoebae ถึง 10 เท่า และสำหรับ Bentonite ที่มีขนาดเล็ก ๆ (0.01 μm) ก็จะมีอนุภาคเล็กพอๆ กับอนุภาคที่เป็น Molecule ที่เดียว นักวิจัยพบว่าสำหรับ Bentonite ที่มี Particle ขนาดเล็กๆ เพียง 2.61 gm ก็จะมีพื้นที่ผิวเท่ากับ 6,000 ตารางฟุต เพราะฉะนั้น Bentonite ชนิดนี้ก็ถือโลกรัมถึงจะมี surface area เท่ากับมหาวิทยาลัยของเรา 7,000 ไร่? ตอบ _____

จากข้างต้นจะเห็นว่าดินเป็นแร่ที่มี surface area เล็กจริงๆ Surface area จึงมีผลต่อทั้ง Physical & Chemical properties ของดิน ซึ่งจะได้กล่าวรายละเอียดในตอนต่อไป

Table 1.2 Particle size of some Materials. (จาก Ref. 1 หน้า 15)

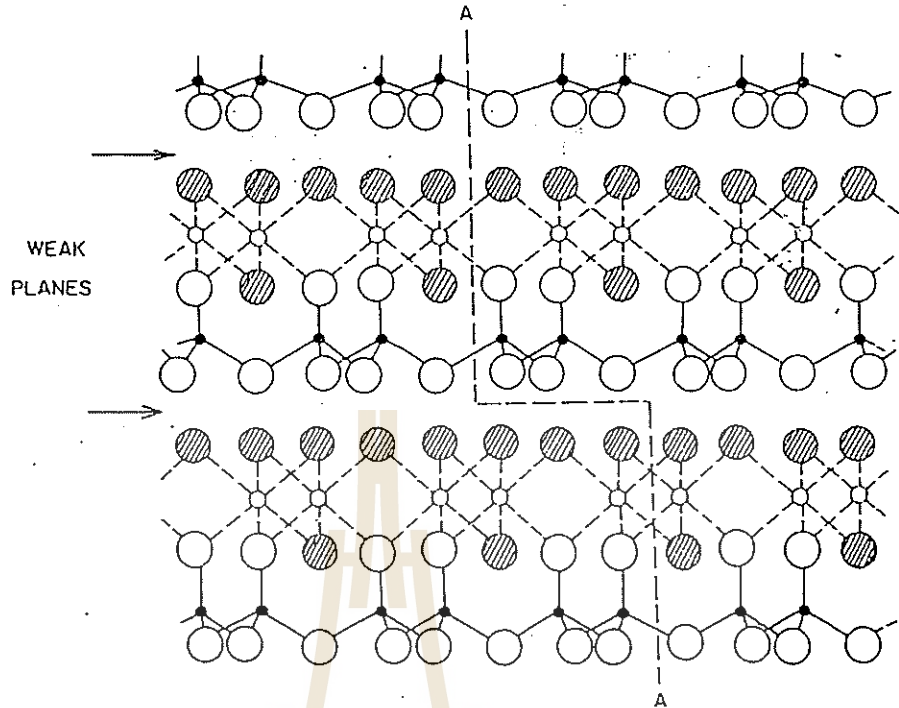
<u>Length of edge</u>	<u>Typical object</u>	<u>Number of cubes</u>	<u>Total surface</u>
1 cm = 0.3937 in.	Small peas	1	0.93 sq. in.
1 mm = 0.0394 in.	Fine shot	10^3	9.3 sq. in.
0.1 mm = 0.0039 in.	Talcum powder	10^6	93 sq. in.
0.01 mm = 0.0004 in.	Amoeba	10^9	6.46 sq. ft.
1 μ = 0.001 mm	Small bacteria	10^{12}	64.5 sq. ft.
0.1 μ = 0.0001 mm	Large colloid particle	10^{15}	645.8 sq. ft.
0.01 μ = 0.00001 mm	Large molecule	10^{18}	6458.3 sq. ft.

2). **Base Exchange Properties:** เมื่อนำ Particles ของดินใส่ลงไปในการละลายจะพบว่าอนุภาคของดินสามารถดูดซับ ion+ รวมทั้งสีย้อม (dyes) จากสารละลายได้ เรียกความสามารถในการดูดซับเอาอนุภาค ion + ชนิดต่าง ๆ เช่น Na^+ , Ca^{2+} , Al^{3+} , H^+ หรือ Polar Molecule ของดิน 1 กรัม ว่า “Base Exchange Capacity”

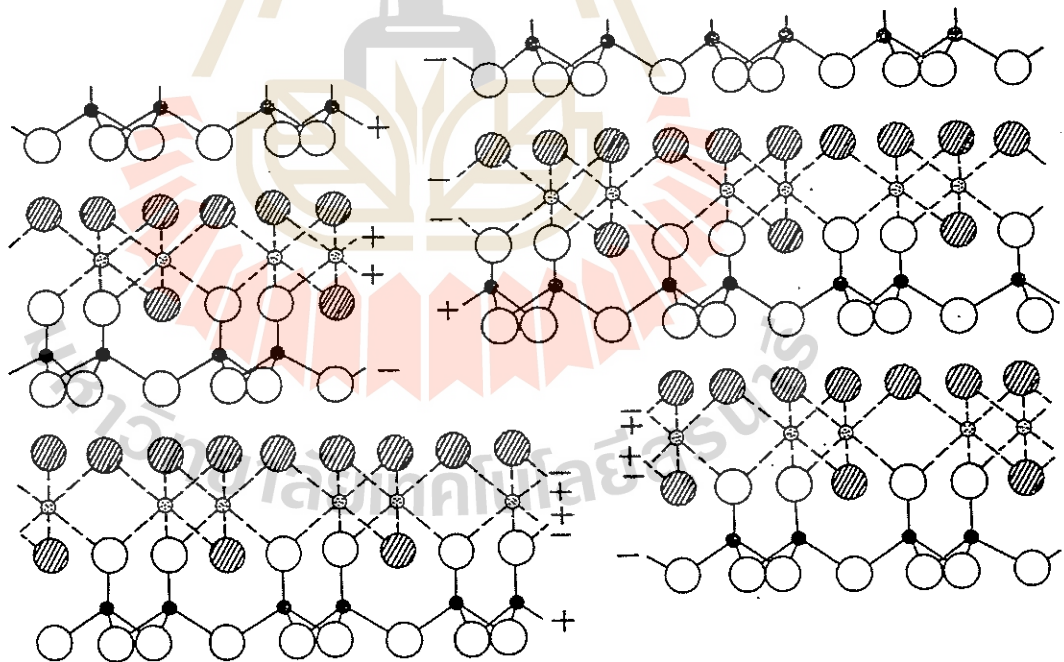
ที่จริงแล้วดินที่บริสุทธิ์จริงๆ จะไม่มีประจุไฟฟ้าที่ผิว เพราะว่าประจุระหว่าง Al^{3+} , Si^{4+} , O^{2-} และ OH^- ในทั้ง tetrahedral และ octahedral sheets จะbalance กันพอดี ทำให้ดินที่บริสุทธิ์จริงๆ ไม่สามารถดูดซับอนุภาคหรือ Molecule ได้ แต่ทว่าดินที่พบในธรรมชาติไม่มีความบริสุทธิ์เท่าที่ควร และมีประจุไฟฟ้าเป็นลบชนิดๆ ที่ผิวทั้งนี้เพราะว่า

๑) เกิดจาก Substitute ของ Ion ที่มี Valency ไม่เท่ากันในโครงสร้าง เช่น มีการแทนที่ Al^{3+} ใน Gibbsite sheet ด้วย Mg^{2+} หรือมีการแทนที่ Si^{4+} tetrahedral sheet ด้วย Al^{3+} การแทนที่แบบนี้ทำให้ประจุในโครงสร้างไม่ balance อนุภาคดินที่มีอยู่ในธรรมชาติจึงมีประจุเป็น “ลบ” นิดๆ

๒) เกิด Broken bond ที่ขอบของ Si_2O_5 (Tetrahedron sheet) กับ Gibbsite sheet ดังแสดงด้วยภาพที่ 1.6 –1.7



ภาพที่ 1.6 Structure of Kaolinite. Shows weak planes between O^2-OH^- and OH^- layers where fracture results in no broken bonds. Fracture along line A-A produces active surface. (See figure 1.7).
(จาก Ref. 1 หน้า 21)



ภาพที่ 1.7 Kaolinite crystal fractured parallel to the Z axis. Equal number of positive and negative sites formed which are available as exchange sites to adsorb other ions. (จาก Ref. 1 หน้า 22)

การที่อนุภาคดินที่พบอยู่ในธรรมชาติซึ่งมีประจุเป็นลบทำให้อนุภาคดินมีความสามารถที่จะดูดซับเอาประจุบวกจากภายนอก ชนิดประจุบวกที่ Clay Particles ดูดซับเอาไว้จะมีผลต่อคุณสมบัติดิน กล่าวคือถ้าดินดูดซับเอาอนุภาค 1+ เช่น Li^+ , Na^+ , K^+ และ NH_4^+ เข้าไว้ที่ผิวของอนุภาคดินจะทำให้ดินมีประจุที่ผิวไม่ balance คือ net charge ยังคงเป็นลบ ทั้งนี้เนื่องจากอนุภาค 1+ มีขนาดใหญ่มาก เมื่อดูดซับไปไม่กี่อนุภาคก็เต็มพื้นที่ผิวของอนุภาคดินหมดแล้ว การที่อนุภาคดินมี Charge ที่ผิวอยู่เช่นนี้ทำให้อนุภาคดินผลักซึ่งกันและกัน อนุภาคดินที่ดูดซับอนุภาคที่มีประจุ 1+ จึงแขวนลอยได้ดีในน้ำ (Well disperse) และน้ำดินจะมี Viscosity ต่ำ เรียกสภาพนี้ว่า “Deflocculation”

ในทางตรงกันข้ามหากดินดูดซับเอาอนุภาคที่มีประจุ 2+ หรือ 3+ เข้าไปที่ผิวจะทำให้ดินมีประจุที่ผิว balance (Net Charge = 0) เนื่องจากอนุภาค 2+ หรือ 3+ มีประจุมากกว่าและขนาดเล็ก สภาพเช่นนี้ทำให้อนุภาคดินไม่ผลักซึ่งกันและกัน อนุภาคดินจึงตกตะกอนเรียกสภาพนี้ว่า “Flocculation”

ดินแต่ละชนิดจะมีความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุแตกต่างกัน ตารางที่ 1.3 แสดง Cation Exchange Capacity ของดินชนิดต่างๆ โดยทั่วไปแล้วดินที่มี Particle size เล็กจะมีความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุมากกว่าที่มี Particle ใหญ่

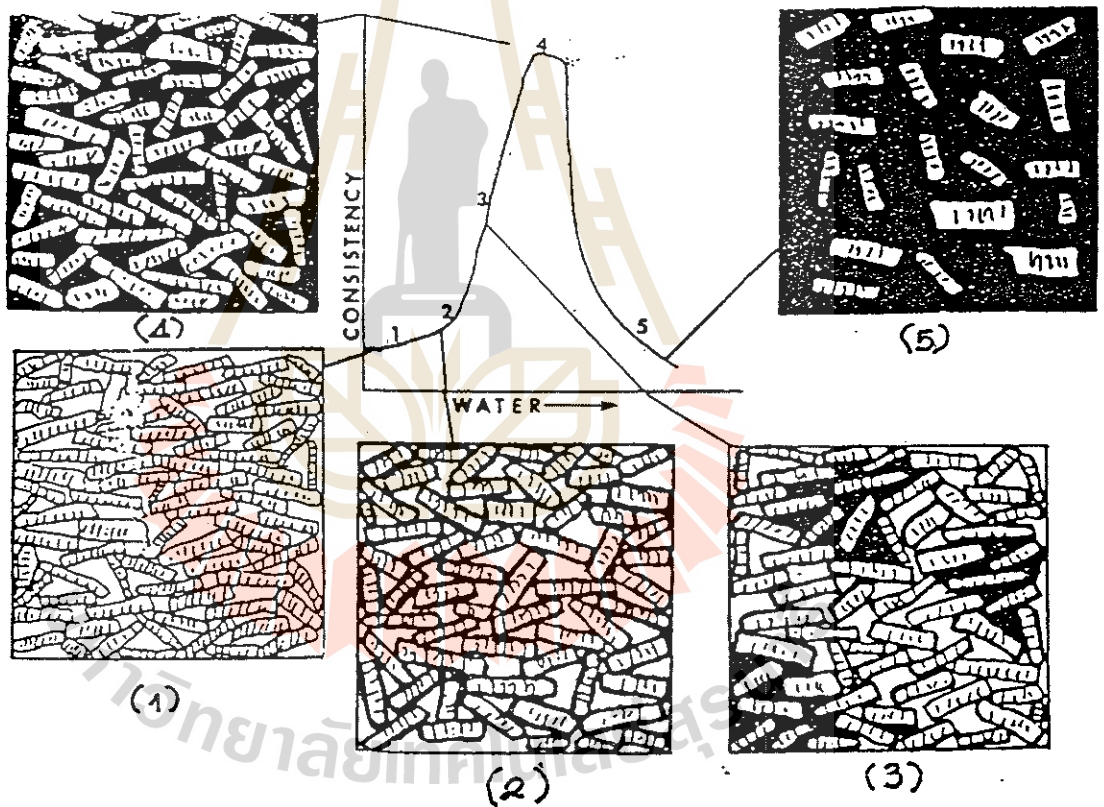
Table 1.3 Cation-Exchange Capacity of Clay Mineral in Milliequivalents per 100 grams. (จาก Ref. 1 หน้า 23)

Kaolinite	3 - 15
Halloysite $2\text{H}_2\text{O}$	5 - 10
Halloysite $4\text{H}_2\text{O}$	40 - 50
Montmorillonite	80 - 150
Illite	10 - 40
Vermiculite	100 - 150
Chlorite	10 - 40

3. **Plasticity:** คือความสามารถที่ดินจะ deform เมื่อถูกกระทำจากแรงภายนอก และความสามารถที่ดินจะรักษารูปทรงนั้น ๆ ได้เมื่อหยุด apply แรง; Plasticity มีความสัมพันธ์โดยตรงระหว่างดินและน้ำที่อยู่ในดิน แบ่งน้ำที่อยู่ในดินออกเป็น 3 ชนิดคือ

- ก) Adsorbed water film ได้แก่ น้ำที่เคลือบเกาะอยู่รอบ ๆ อนุภาคดิน
- ข) Pore water คือน้ำที่แทรกอยู่ระหว่างช่องว่างระหว่างอนุภาคดิน โดยไม่ทำให้ช่องว่างระหว่างอนุภาคดินขยายตัวใหญ่ขึ้น
- ค) Free water คือน้ำที่อยู่ระหว่างอนุภาคดิน

เพื่อให้เห็นภาพพจน์ของน้ำทั้ง 3 ชนิดได้ชัดเจนยิ่งขึ้น มาดูกันว่าเมื่อเติมน้ำเข้าไปในดินจะเกิดอะไรขึ้น เริ่มจากดินแห้งๆ ที่ไม่มีน้ำอยู่ เมื่อเติมน้ำลงไป Particles ของดินจะ adsorb โมเลกุลของน้ำไปเคลือบรอบๆ ผิวของดินเป็น film บางๆ เนื่องจากตามธรรมชาติแล้ว โครงสร้างของดินจะมีประจุที่ผิว ดังนั้นอนุภาคดินจึงสามารถ adsorb โมเลกุลของน้ำได้ film ของน้ำที่ผิวดินมีความหนาประมาณ 8–100 Å น้ำที่ถูกจับยึดที่ผิวดิน จะมี density & viscosity สูงกว่าน้ำที่อยู่ตามธรรมชาติมาก เรียกน้ำที่เคลือบเป็น film บางๆ รอบๆ อนุภาคของดินว่า “Adsorbed water film” ภาพที่ 1.8 ถ้าให้ก้อนหลายๆ ในภาพแทนอนุภาคของดิน และสีดำแทนน้ำ เราอาจจะแสดงอนุภาคของดินในสภาพแห้งสุดที่ได้เป็นภาพที่ 1.8-1 และอาจจะแสดงภาพน้ำส่วนแรกที่เติมลงไปบนดินซึ่งจะเกาะเป็น film เคลือบรอบๆ อนุภาคดินได้ดังภาพที่ 1.8-2 ในสภาพนี้จะมีแรง Cohesive forces ยึดเหนี่ยวระหว่าง particles ของดิน ดังนั้น grain ของดินจึงยังคงเกาะติดกันแน่นดี



ภาพที่ 1.8 Relationship between water constant and consistency. (จาก Ref. 1 หน้า 25)

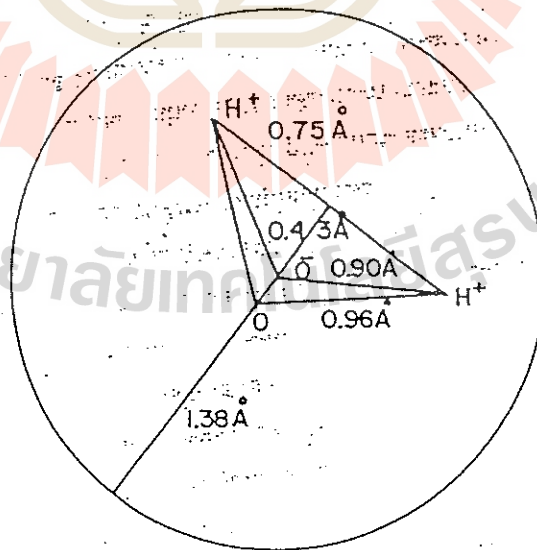
- 1 - Dry particles.
- 2 - Water films around each particle
- 3 - Water films with isolated areas containing pore water.
- 4 - Pores filled with water with particles still in contact.
- 5 - Free water with particles separated.

เมื่อน้ำเกาะเป็น film รอบๆ อนุภาคดินทุกอนุภาคแล้ว ถ้าเติมน้ำลงไปอีกน้ำส่วนต่อมาจะไปอยู่ใน Pore ที่อยู่รอบๆ particles ของดินดังภาพที่ 1.8-3 เรียกน้ำส่วนนี้ว่า “Pore water” ซึ่งจะสังเกตได้จากดินบางส่วนเริ่มจับตัวกันเป็นก้อนๆ (balling up หรือ clump) (เนื่องจากแรงยึดระหว่าง particles ของดินที่มีน้ำแทรกตัวอยู่ตาม pore สูงกว่าแรงยึดระหว่าง particles ของดินที่ไม่มีน้ำแทรกตัวอยู่ตาม pore) ดินเหล่านี้คือดินที่มีน้ำไปแทรกตัวในช่องว่างระหว่าง particle แล้ว ที่สำคัญคือน้ำที่แทรกตัวอยู่ตาม pore ระหว่าง particles ไม่ได้ทำให้อนุภาคดินแยกตัวออกจากกันเลย อนุภาคดินยังคง contact กันเท่าเดิม ต่อมาเมื่อเติมน้ำลงไปอีกน้ำส่วนที่เติมเข้าไปใหม่เข้าไปอยู่ใน pore ระหว่าง particles อีกอีกต่อไป Consistency และความเหนียว (Plasticity) ของก้อนดินจะมากขึ้นเรื่อยๆ จนกระทั่งน้ำที่เติมเข้าไปอยู่ระหว่าง pore เต็มครบทุก pore ดังแสดงโดยภาพที่ 1.8-4 ณ จุดนี้ Consistency และ Plasticity ของดินจะสูงสุด ถือได้ว่าจุดนี้เป็นจุด Critical Point ที่มีความหมายว่า “ถ้าเติมน้ำมากหรือน้อยกว่านี้ Plasticity ของดินจะลดลง”

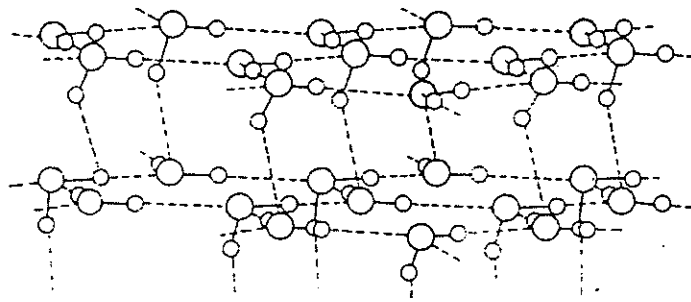
ถ้าเติมน้ำต่อลงไปอีกน้ำที่เติมลงไปใหม่ จะไปทำให้อนุภาคดินแยกจากกันทำให้แรงยึดเหนียวระหว่าง Particles (Cohesive force) ลดลง Plasticity ก็จะลดลงไปด้วย ดิน+น้ำก็ค่อยๆ เปลี่ยนสภาพไปเป็นน้ำดิน (slip) มากขึ้นๆ ทุกที ดังภาพที่ 1.8-5 เรียกน้ำที่เติมลงไปที่ทำให้อนุภาคดินแยกจากกันนี้ว่า “free water”

Rigidity and Thickness of the Adsorbed Water Film

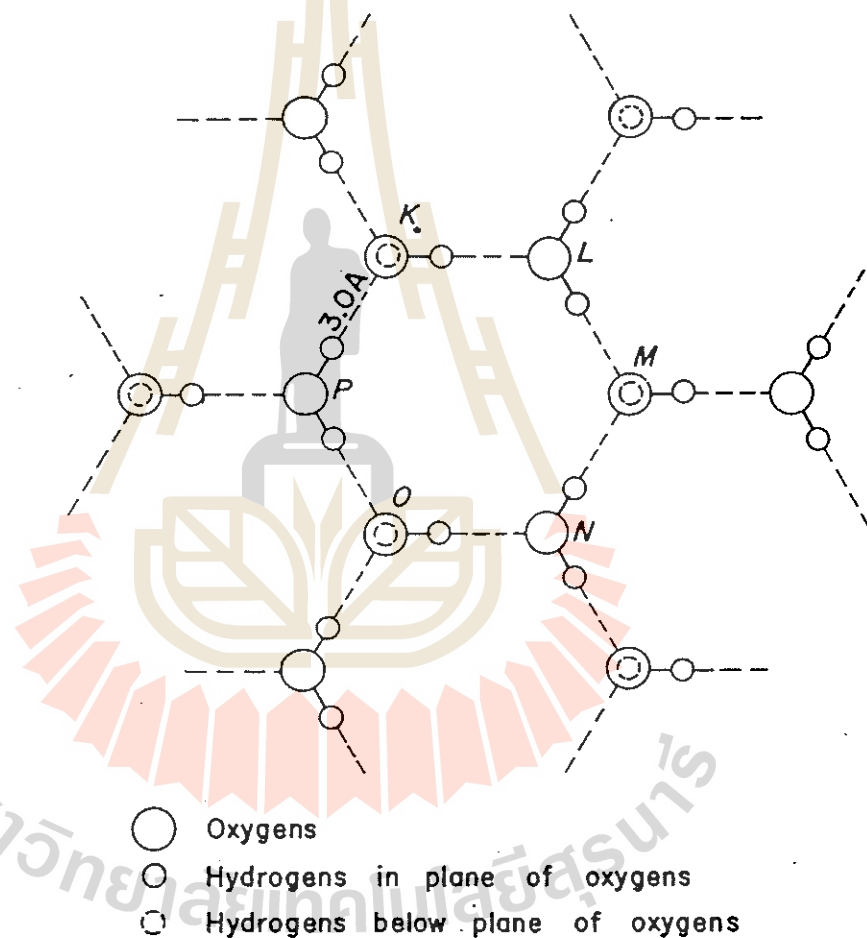
โมเลกุลน้ำเป็น Dipole molecule ดังแสดงโดยภาพที่ 1.9 นักวิจัยเชื่อกันว่า เมื่อน้ำ particles ของแข็งที่มีประจุที่ผิวเช่น clay ไล่ลงไปใต้น้ำ โมเลกุลน้ำซึ่งเป็น Polar molecule จะเข้าไปจับที่ผิวของ particles เป็น film เคลือบรอบๆ particles นั้น Hendrick & Jack เสนอน้ำที่เคลือบรอบ Particles จะจับตัวเป็น “Ordinary Water net Structure” ดังภาพที่ 1.10–1.11 ยิ่งห่างออกไปจากผิวของ particles มากขึ้นเท่าไร ความเป็นระเบียบของ Water net Structure นี้ก็จะน้อยลงเท่านั้น



ภาพที่ 1.9 Structure of the H_2O molecule. H^+ are the hydrogen nuclei, O the oxygen nucleus and O^- the center of negative charge of the molecule. (จาก Ref. 1 หน้า 30)



ภาพที่ 1.10 Configuration of water adsorbed directly adjacent to basal plane surfaces of clay minerals. (จาก Ref. 1 หน้า 31)



ภาพที่ 1.11 Arrangement of oxygen and hydrogen in water net. (จาก Ref. 1 หน้า 32)

ความหนาของ Water film ที่เคลือบรอบ particles มีผลต่อคุณสมบัติเชิงกล เช่นความเหนียวของดิน ยิ่ง film หนามากขึ้นความเหนียว และ green strength ของดินก็จะมากขึ้นตามไปด้วย

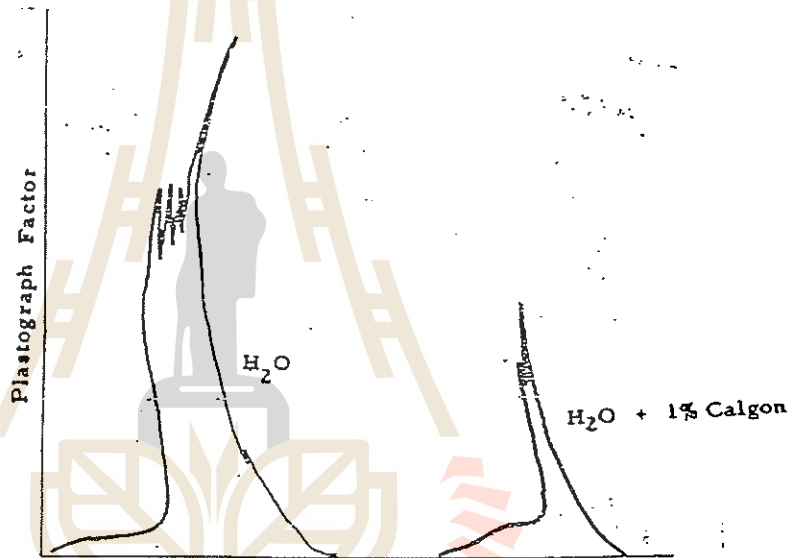
มีปัจจัยหลายอย่างที่มีผลต่อคุณสมบัติของ “ดิน + น้ำ” ที่สำคัญได้แก่

- ๑) Charge ของ Ion แลกเปลี่ยนที่ถูกดูดซับไว้ที่ผิวดิน
- ๒) Surface Tension ของน้ำ
- ๓) Temperature ของ “ดิน + น้ำ”
- ๔) Particle size ของดิน

Effect of Charge: จากการศึกษา Plasticity และ Yield Strength ของดินที่ดูดซับเอา Ion แปลกปลอมภายนอกชนิดต่าง ๆ เข้าไปไว้ที่ผิวกับของดินที่ไม่ได้ดูดซับเอา Ion แปลกปลอมพบว่า Plasticity และ Yield Strength เรียงจากมากไปน้อยดังนี้

ดินบริสุทธิ์ > ดินที่มี H^+ > ดินที่มี Al^{3+} > ดินที่มี Ca^{2+} > ดินที่มี Na^+

สาเหตุที่ดินบริสุทธิ์มี Plasticity สูงกว่าดินที่มี Ion แปลกปลอมยึดเกาะที่ผิวเพราะว่า ดินบริสุทธิ์ไม่มีประจุที่ particles ทำให้อนุภาคดินมีการผลักกันน้อยมาก ดังนั้นหากดินบริสุทธิ์จึงมีแรงยึดเหนี่ยวระหว่าง particles มากที่สุด Plasticity จึงสูงที่สุด ดังจะเห็นได้จากกราฟ Plot ระหว่าง Consistency ของ “ดินบริสุทธิ์ + น้ำ” เทียบกับ “ดินบริสุทธิ์ + น้ำ + Calgon” ในภาพที่ 1.12 จะเห็นว่า “ดินบริสุทธิ์ + น้ำ” มี Consistency สูงกว่าจึงมี Plasticity สูงกว่าไปด้วย (Calgon คือ Sodium Polyphosphate (Na_2PO_3)_n) ที่ใช้เดิมเป็น deflocculant ในอุตสาหกรรมเซรามิก)



ภาพที่ 1.12 Comparison of consistency of a Kaolin with water and water plus Calgon addition. (จาก Ref. 1 หน้า 27)

สาเหตุที่ทำให้ดินที่มี ion ที่มีประจุ $3+$ มี Plasticity มากกว่าดินที่มี ion $2+$ และที่ดินมี ion $2+$ มี Plasticity มากกว่าดินที่มี ion $1+$ เป็นเพราะว่า ion $3+$ ซึ่งมีขนาดเล็กกว่าและประจุมากกว่า ion $2+$; ion $2+$ ก็มีขนาดเล็กกว่าและประจุมากกว่าดินที่มี ion $1+$ ดังนั้นดินที่ดูดซับ ion $3+$ จึง balance ประจุที่มีอยู่บนผิวดินได้ดีกว่าดินที่ดูด ion $2+$ ทำนองเดียวกันดินที่ดูด ion $2+$ ก็ balance ประจุที่ผิวได้ดีกว่าดินที่ดูดซับ ion $1+$ อาจจะสามารถได้ว่าดินที่ดูดเอา ion $3+$ ไว้ที่ผิวจะมีประจุที่ผิวน้อยกว่าดินที่ดูดซับ ion $2+$ และดินที่ดูด ion $2+$ จะมีประจุที่ผิวผิวน้อยกว่าดินที่ดูด ion $1+$

“Net Charge ของดินที่ดูด Ion $3+$ < ดินที่ดูด Ion $2+$ < ดินที่ดูด Ion $1+$ ”

ดังนั้น Particles ของดินที่ดูด ion $3+$ จึงผลักกันน้อยที่สุด ดินที่ดูดซับเอา ion ชนิดนี้เข้าไปจึงมี Plasticity สูงสุดและดินที่ดูดซับเอา ion $1+$ เข้าไปจึงมี Plasticity น้อยที่สุด

นักวิจัยบางคนอธิบายเรื่องข้างต้นว่า ion แปรลกปดอมประเกทที่มีประจุ 1+ เช่น Na^+ , K^+ , Rb^+ และ Cs^+ จะทำให้โครงสร้างของ Water net Structure ยุ่งเหยิง ซึ่งจะส่งผลทำให้คุณสมบัติเชิงกล Plasticity ของดินลดลงขณะที่พวกที่มีประจุ 2+ และ 3+ เช่น Ca^{2+} , Mg^{2+} , Al^{3+} ไม่มีผลทำลาย Water net Structure เพราะฉะนั้น Plasticity จึงไม่ลดลง คำอธิบายแบบหลังยังช่วยอธิบายสาเหตุที่อนุภาคดินที่ดูดซับ H^+ ion มี Plasticity และ Yield Structure สูงกว่า ดินที่ดูด ion 3+ และ ion 2+ ได้อีกด้วย โดยอธิบายว่า H^+ ion ทำให้ Water net Structure มีความยุ่งน้อยกว่า ion 3^+ และ ion 2^+

Effect of Surface Tension of Water: surface tension ของน้ำเป็นแรงที่ยึดเหนี่ยวอนุภาคของดินเข้าไว้ด้วยกัน ดังนั้นหากน้ำมี Surface Tension มาก “ดิน + น้ำ” ก็จะมี Plasticity มากตามไปด้วย

Temperature Effect: อุณหภูมิมีผลต่อคุณสมบัติของ “ดิน + น้ำ” เพราะว่าการเพิ่มอุณหภูมิจะ

- 1) Reduce the rigidity of the adsorbed water film
- 2) Increase charge on the particles
- 3) Decrease surface tension of coater

ดังนั้นการเพิ่มอุณหภูมิจะทำให้ Plasticity ของดินมากขึ้นหรือน้อยลง? ตอบ

Particle size Effect: เนื่องจากแรง Capillary Pressure ที่ยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคดินเข้าใกล้กันมีค่า

$P = 2\gamma/r$ เมื่อ $r = \text{capillaries radii}$ และยิ่ง Clay มี particle size เล็กลงเท่าใด r ยิ่งจะมีค่าน้อยลงไปตามเท่านั้น ดังนั้นยิ่ง Clay มี particle size เล็กลงแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคก็จะมากขึ้น และถ้ายังมีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคมากขึ้นเท่าใด Plasticity ก็จะมากขึ้นเท่านั้น ดังนั้นสรุปได้ว่า “ยิ่ง Clay มี Particle size เล็กลงเท่าใด Plasticity ของ clay ก็จะมากขึ้นเท่านั้น”

Dry Strength of Clay

ในหัวข้อที่แล้วได้กล่าวว่แบ่งน้ำที่อยู่ในดินออกได้เป็น 3 ประเภทคือ

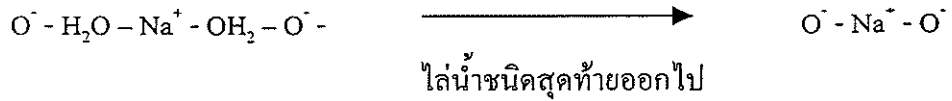
- (1) Free Water
- (2) Pore Water
- (3) Adsorbed Water film

เมื่อนำผลิตภัณฑ์ Greenware มาอบแห้งไต้่น้ำ น้ำส่วนแรกที่ถูกขับออกไปคือ Free water บางทีเรียกว่า “Unbound water” เป็นน้ำที่ไม่ถูกยึดเกาะในโครงสร้างจึงหลุดออกได้ง่ายที่สุด เมื่อน้ำชนิดนี้หลุดออกไป particles ของดินก็จะขยับเข้ามาหากัน “ปริมาณน้ำที่หลุดออกไป = ปริมาตร ware ที่ shrink” เมื่อน้ำชนิดนี้หลุดออกไปหมด Particles ของดินก็จะขยับมาชิดกันพอดี ดังนั้นการอบต่อไปถึงเมื่อน้ำที่เหลือจะหลุดออกไปอีก แต่ชิ้นงานก็จะไม่ shrink อีก เรียกจุดนี้ว่า “Critical Point”

เมื่ออบต่อไปอีก Pore water ก็จะหลุดตามออกไป จนกระทั่ง Pore water หลุดออกไปจนหมด เหลือแต่ Adsorbed water film (โดยทั่วไปเมื่อพูดถึง Drying strength ของ clay จะหมายถึง Strength ณ จุดนี้ซึ่งเป็นจุดที่ ware มีแต่น้ำประเภท adsorbed water film รอบๆ อนุภาคดินเท่านั้น)

ณ จุดนี้ถ้าในน้ำมี ion อยู่ด้วย เช่น Na^+ ion จะถูกโมเลกุลของน้ำล้อมรอบอยู่ในสภาพ Hydrate เช่น $(\text{Na}(\text{OH})_2)_n$ จากการศึกษพบว่าถ้าอบไต้่น้ำ ชนิดสุดท้ายนี้ออกไปจากดินจะทำให้ Dry Strength ของดินเพิ่มขึ้น 2 เท่า เพราะว่าการไต้่น้ำชนิดสุดท้ายนี้ออกไปจะทำให้ น้ำที่เคยเกาะรอบๆ Cation หลุดออก

ไปจึงทำให้ Cation ไปจับกับ Oxygen ของ Sheet Structure ของดินแทน ผลจึงทำให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่าง Particles ดินมากขึ้นดังแสดงโดยภาพ



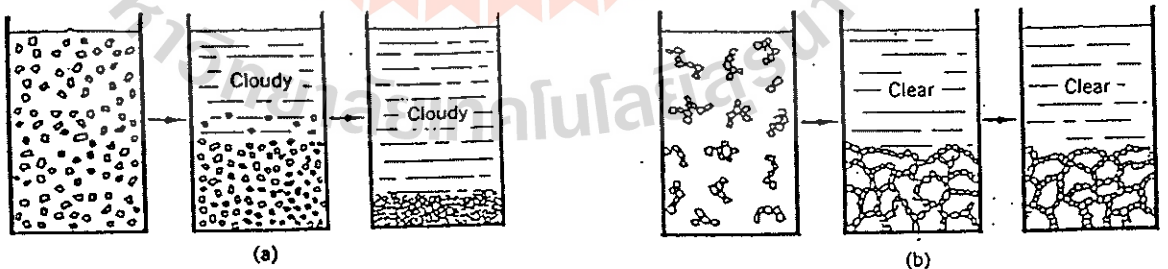
แต่คำอธิบายข้างต้นไม่สามารถอธิบายว่าทำไมดินที่มี Na^+ (deflocculant) จึงมี Drying Strength สูงกว่าดินที่มี Ca^{2+} หรือ Al^{3+} (flocculant) นักวิจัยจึงได้ศึกษาต่อไปและพบว่า “ดินที่มี Na^+ เมื่อ Set ตัวอนุภาคของดินเข้ามาอยู่ชิดกันมากกว่าดินที่มี Ca^{2+} หรือ Al^{3+} ดังภาพ 1.13 จากภาพจะเห็นว่าดินที่เติม deflocculant (ion ที่มีประจุ 1+) เมื่อ set ตัวจะจัดเรียงเป็น Card Pack Arrangement (ภาพที่ 1.13a) ขณะที่ดินที่เติม flocculant (ion ที่มีประจุ 2+ และ 3+) เมื่อ set ตัวจะจัดเรียงตัวแบบ Card House Arrangement ซึ่งเป็นโครงสร้างที่หลวมๆ ไม่แน่น ดังนั้น Drying Strength จึงต่ำ



(A) Card pack arrangement (B) Card house arrangement

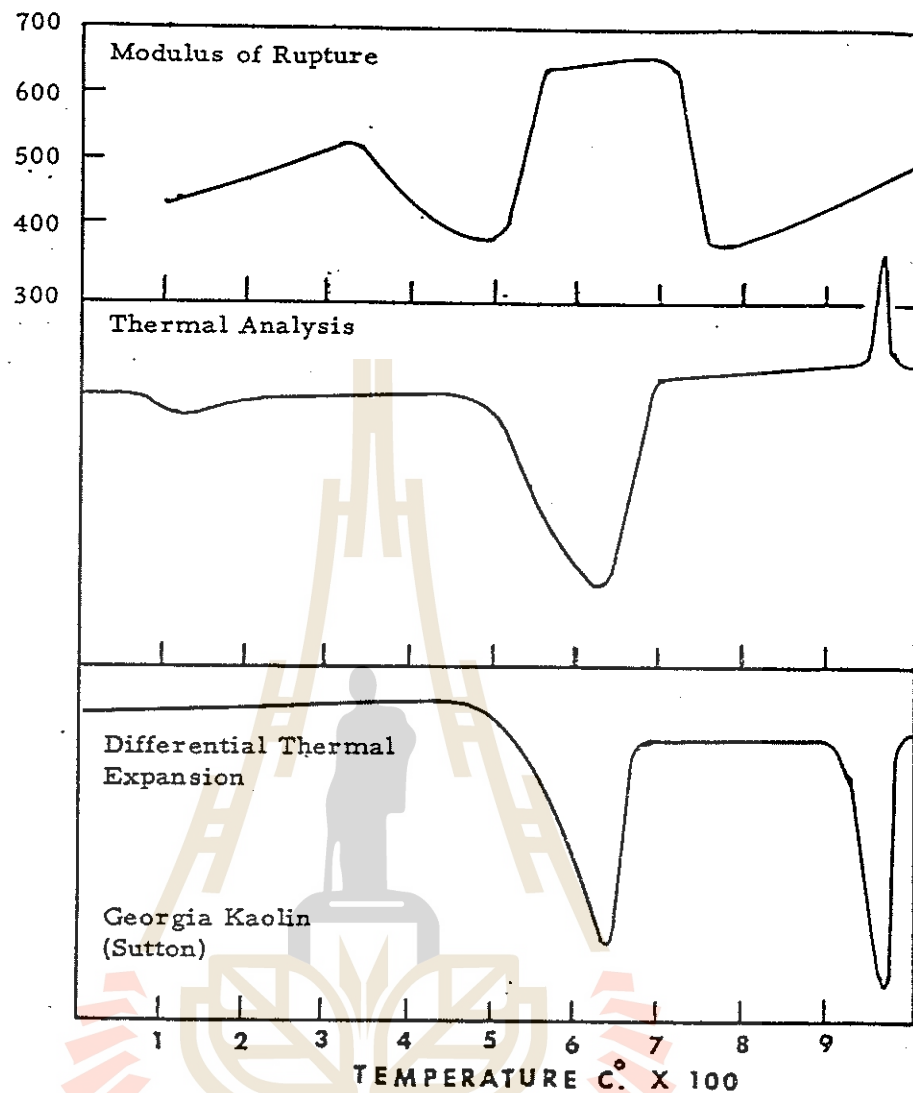
ภาพที่ 1.13 Arrangement of particles in deflocculated (A) and flocculated system (B). (จาก Ref. 1 หน้า 38)

เรื่องนี้อาจจะยืนยันได้ หากสังเกตการ set ตัวของน้ำ Slip ที่ใส่ flocculant กับ deflocculant จะแตกต่างกัน น้ำ Slip ที่เติม deflocculant จะ set ตัวช้าแต่เมื่อ set แล้วจะได้ตะกอนที่เกาะกันแน่นดังภาพ 1.14a ขณะที่น้ำ Slip ที่เติม flocculant จะ set ตัวเร็ว แต่เมื่อ set ตัวแล้วจะได้ตะกอนที่เกาะกันหลวมดังภาพ 1.14b



ภาพที่ 1.14 Sedimentation behavior for (a) deflocculated and (b) coagulated suspensions. (จาก Ref. 3 หน้า 167)

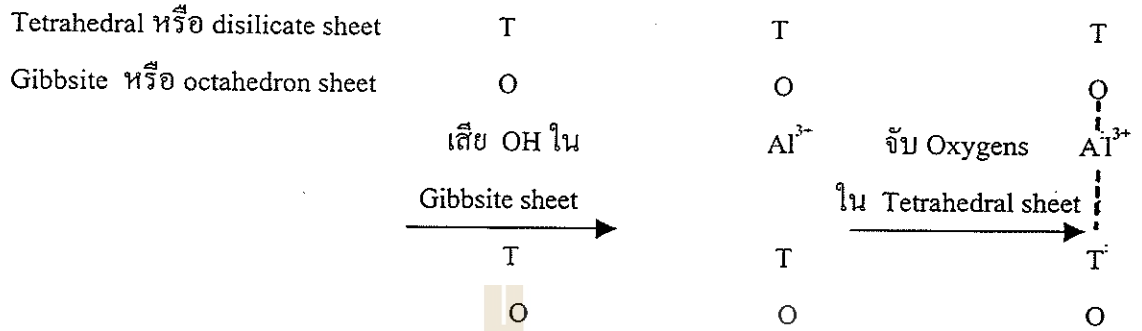
Sutton ได้ศึกษา Modulus of Rupture; Thermal Analysis และ Differential Thermal Expansion ของ Kaolin จากแหล่งที่ Georgia ในช่วง Temp 100 – 800 °C ได้ผลการทดลองดังภาพ 1.15



ภาพที่ 1.15 Modulus of Rupture, thermal analysis and differential thermal expansion of a Georgia kaolin. (จาก Ref. 1 หน้า 39)

จากภาพจะเห็นว่า MOR เพิ่มขึ้นเล็กน้อยระหว่างอุณหภูมิ 110–300 °C และจะเพิ่มขึ้นมากในช่วง 500 – 550 °C; การเพิ่ม Strength ครั้งแรกในช่วง 110 – 300 °C เกิดจากการไล่น้ำทุกชนิดที่อยู่รอบ ๆ Particles ดินออกไปได้แก่ Free water (หรือ Unbound water), Pore water และ Adsorbed water film; การเพิ่ม strength ครั้งที่สองเกิดจากการไล่น้ำที่อยู่ในโครงสร้างผลึกของดินในรูป OH ในสูตร $Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$ น้ำชนิดนี้เรียกว่า “Structural water” ซึ่งจะเริ่มหลุดออกจากโครงสร้าง ดินที่ 475 °C จากกราฟ Differential Thermal Expansion จะเห็นว่าดินที่ถูกเผาจะเริ่มหดตัวที่อุณหภูมินี้ และจะหดตัวมากที่สุดที่ อุณหภูมิ 650 °C จากนั้นอัตราการหดตัวจะลดลง (กราฟ Differential Thermal Expansion เริ่มวกกลับขึ้น) ดินที่สูญเสีย OH- group ในโครงสร้างไปเรียกว่า meta-Kaolin การสูญเสีย OH- group ใน

Gibbsite sheet ทำให้ Al^{3+} ใน Gibbsite sheet เปลี่ยนไปจับกับ O ของ Tetrahedral sheet ที่อยู่ถัดไป ทำให้ Structure แข็งแรงขึ้น ดังแผนภาพต่อไปนี้



สาเหตุที่ MOR ลดลงเมื่อ heat ขึ้นไปถึง 750 °C ยังไม่ชัดเจน



บทที่ 2 Drying Clay Ware

Introduction

โดยทั่วไปคนมักไม่ค่อยให้ความสนใจเรื่องการอบ clay ware เพราะ

1. คิดว่ากลไกต่างๆ ในการอบ clay ware เป็นเรื่องง่ายๆ ไม่มีอะไรมาก
2. เมื่อเห็นผลิตภัณฑ์เผาแล้วแตก มักคิดว่าการแตกมาเกิดจากสาเหตุอื่นๆ ที่ไม่เกี่ยวกับการอบ เช่น คิดว่าแตกเนื่องจากการขึ้นรูป (fabrication) มาไม่ดี หรือแตกเนื่องจากการสะท้อนระหว่งการลำเลียง หรือ ขนส่ง เป็นต้น

3. รอยแตกบน clay ware ที่เกิดจากการอบมักไม่ค่อยปรากฏให้เห็นเมื่ออบเสร็จ แต่มักจะปรากฏให้เห็นต่อเมื่อเผาแล้ว คนส่วนใหญ่เลยเข้าใจผิดคิดว่าแตกจากการเผา (firing)

4. โดยส่วนใหญ่แล้วเตาอบ (Drier) มักจะเป็นตู้ปิดที่มองไม่เห็นข้างใน และเตาอบจำนวนมากที่ไม่ได้ติดตั้งอุปกรณ์วัดต่างๆ ไว้เพียงพอที่จะเก็บบันทึกหรือแสดงข้อมูลการอบให้ทราบ แต่นักเซรามิกที่เรียนเรื่อง Drying มาแล้วจะเข้าใจและเห็นความสำคัญของการอบ

Clay ware Properties Influencing Drying Rate

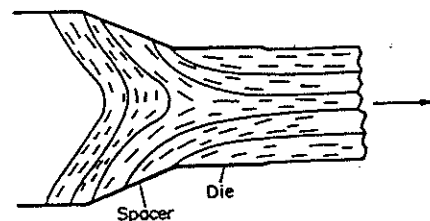
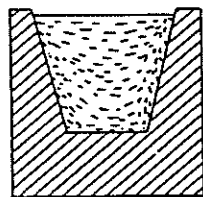
แบ่งคุณสมบัติของ clay ware ที่มีผลต่อ rate การอบ ออกเป็น 3 ข้อคือ

- 1) Forming imperfections of the clay ware คือ ตำหนิที่เกิดจากการขึ้นรูป clay ware
- 2) Moisture content of the clay ware คือ ความชื้นในชิ้น clay ware
- 3) Water permeability of the clay water paste คือ ความสามารถในการให้น้ำซึมผ่าน

1) **Forming imperfections of the clay ware** คือ ตำหนิที่มีอยู่แล้วใน clay ware ก่อนนำมาอบ ซึ่งอาจจะเป็นตำหนิที่เกิดจากการขึ้นรูป ทำให้ต้องอบ clayware ด้วย rate ที่ช้ากว่าปกติ มิฉะนั้นจะทำให้ clay ware แตกเสียหายมาก

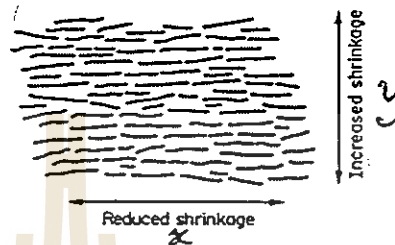
สาเหตุของการเกิดตำหนิในระหว่างการ forming clay ware มี 3 ประการใหญ่ๆ คือ a) Particle Orientation b) Differential Water และ c) Lamination

a) **Particle Orientation**; คือ การจัดเรียงตัวของอนุภาคดินไปในทิศทางใดทิศทางหนึ่งเป็นพิเศษ ดังภาพที่ 2.1a-b ซึ่งเกิดจากการที่อนุภาคดินซึ่งมีรูปร่างแบบ platelike structure ซึ่งจะเรียงตัวในทิศทางที่ลู่ไปตามทิศทางที่แรงภายนอกเข้ามากระทำ



ภาพที่ 2.1 Preferred orientation (a) in a slip-casting article (b) during extrusion arrow shows the direction of flow (จาก Ref 2 หน้า 50-51)

การเรียงตัวไปในทิศทางใดทิศทางหนึ่งเป็นพิเศษข้างต้น ทำให้เมื่อนำผลิตไปอบจะเกิดการหดตัวไม่เท่ากับทุกทิศทุกทาง ซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้ชิ้นงานเกิด crack แตกได้ สาเหตุที่ผลิตภัณฑ์หดตัวไม่เท่ากันทุกทิศทุกทางเพราะว่าชั้นของฟิล์มน้ำที่อยู่ระหว่างอนุภาคดินไม่เท่ากัน อธิบาย โดยภาพที่ 2.2 จากภาพชั้นของฟิล์มของน้ำในทิศทางแกน Y จะมากกว่าฟิล์มของน้ำในทิศทางแกน X ดังนั้นเมื่ออบ ชิ้นงานจะหดตัวในแกน Y มากกว่าแกน X



ภาพที่ 2.2 Preferred orientation and directional shrinkage (จาก Ref2 หน้า 50)

b) *Differential Water*; คือ การที่ชิ้นงานมีความชื้นไม่สม่ำเสมอเท่ากัน ซึ่งเกิดได้หลายสาเหตุ เช่น ก) ชิ้นงานที่ extruded ออกมาได้จะมีความชื้นที่ผิวต่ำกว่าตรงกลาง เนื่องจาก friction ระหว่างดินกับ die (หัวแบบ) รายละเอียดจะได้กล่าวในวิชา 506206 Ceramic fabrication เรื่อง Extrusion

ข) ชิ้นงานที่ได้จาก Slip casting โดยทั่วไปส่วนของชิ้นงานที่เกิดจากการเทแบบก่อนจะมีความชื้นต่ำกว่าส่วนของชิ้นงานที่เทแบบทีหลัง ทั้งนี้เพราะว่าส่วนที่เทแบบก่อนจะถูกพลาสติกที่แห้งกว่าดูดซับน้ำออกไปจึงมีความชื้นต่ำกว่า ในทางตรงกันข้ามส่วนของชิ้นงานที่ถูกเทแบบทีหลังจะมีความชื้นสูงกว่าเพราะถูกพลาสติกที่มีความชื้นมากกว่าดูดซับน้ำ ชิ้นงานส่วนที่เทแบบทีหลังจึงถูกดูดความชื้นออกไปได้น้อยกว่า จึงมีความชื้นสูงกว่า เรื่องนี้เป็นปัญหามากโดยเฉพาะอย่างยิ่งในชิ้นงานที่มีขนาดใหญ่ๆ ส่วนของชิ้นงานที่มีความชื้นไม่เท่ากันจะหดตัวไม่เท่ากัน จึงต้องอบด้วย rate ที่ช้าๆ ไม่เช่นนั้นจะทำให้เกิด Drying crack ได้

c) *Lamination*; คือ คำหนึ่งที่เนื้อดินใน clay ware มีลักษณะเป็นการแยกหรือแตกออกเป็นชั้นๆ ดังภาพที่ 2.3 เกิดจากหลายสาเหตุ สาเหตุสำคัญประการหนึ่งของ lamination crack เกิดจากการ Extrusion จะต้องอบชิ้นงานที่มี lamination crack อย่างช้าๆ กว่าปกติ ไม่เช่นนั้น crack จะขยายตัวออกไปจนทำให้ clay ware แตกหายได้



ภาพที่ 2.3 Lamination crack in longitudinal (left) and transverse section (right). (จาก Ref. 10 หน้า 394)

2. Moisture Content of Clayware: ความชื้นของ clay ware เป็นคุณสมบัติข้อที่สองที่ควบคุม rate ของการอบ เมื่ออบ clay ware ที่มีความชื้นสูง น้ำประเภทแรกที่หลุดออกไปจะทำให้ ware หดตัว จึงเรียกน้ำประเภทนี้ว่า “Shrinkage water” ซึ่งเป็นน้ำประเภทเดียวกันกับ Free water ในบพที่แล้ว

Shrinkage water ที่อยู่ที่ผิวของชิ้นงานสามารถหลุดออกไปจากชิ้นงานได้ง่ายกว่า shrinkage water ที่อยู่ตอนกลางของชิ้นงาน เพราะ shrinkage water ที่อยู่ตอนกลางๆ ของชิ้นงานจะต้องเคลื่อนที่ไปที่ผิวก่อนแล้วค่อย evaporate ออกไป ดังนั้นถ้าไม่ควบคุม rate ของการอบให้ดีปล่อยให้ shrinkage water ที่ผิวออกกระเหยออกไปอย่างรวดเร็วเกินไป จะทำให้เกิด Moisture gradient (ความแตกต่าง Moisture content) ระหว่างบริเวณที่ผิวกับตรงกลางของชิ้นงาน ซึ่งเป็นสาเหตุให้การหดตัวที่ผิวและตรงกลางของชิ้นงานไม่เท่ากัน จึงเป็นสาเหตุให้เกิด crack ได้

นักเซรามิกที่รู้เรื่องนี้จะ “Condition” ชิ้นงานก่อนอบ โดยการ heat ให้ชิ้นงานมีอุณหภูมิสูงขึ้นในบรรยากาศที่มีความชื้นสัมพัทธ์สูง เพื่อกันไม่ให้ความชื้นออกไปจากชิ้นงานเร็วเกินไป อาจจะสามารถได้ว่า “การ Condition เป็นการปลูกให้ทุกส่วนของชิ้นงานต้นขึ้นเพื่อจะได้ลดความชื้นออกไปพร้อมๆ กัน เพื่อจะได้ไม่เกิด Moisture gradient เมื่ออบ” ในทางทฤษฎีแล้วการ Condition จะทำให้:

a) ความร้อนซึมเข้าไปในกลางชิ้นงาน ทำให้อุณหภูมิที่ผิวและตรงกลางของชิ้นงานเท่ากันก่อนที่น้ำจะเริ่มระเหยออกไปจากชิ้นงาน

b) ลด Viscosity ของน้ำ (เนื่องจาก Viscosity ของน้ำจะลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น) เมื่อ Viscosity ของน้ำลดลงก็จะทำให้น้ำจากตรงกลางชิ้นงานซึมมายังที่ผิวของชิ้นงานได้สะดวกขึ้น ซึ่งจะทำให้อบชิ้นงานให้แห้งได้เร็วขึ้น โดยไม่เกิด crack ที่เกิดเนื่องจาก Moisture gradient

c) ขยายรูเปิด (Pore) ระหว่าง particles ของดิน เพราะอุณหภูมิสูงขึ้นทำให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคดินน้อยลง การที่รูเปิดขยายใหญ่ขึ้นจะส่งผลต่อไปทำให้น้ำสามารถซึมจากข้างในออกมาที่ผิวได้เร็วขึ้น ทำให้อบชิ้นงานให้แห้งได้เร็วขึ้น โดยไม่ต้องเสี่ยงต่อการเกิด crack จาก Moisture gradient

หลังจาก Condition แล้วจึงลดความชื้นสัมพัทธ์ในบรรยากาศลง ซึ่งน้ำประเภท Shrinkage water ออกไปเป็นลำดับแรก Mechanism ที่ควบคุม rate ของการอบช่วงแรกนี้ คือ Surface evaporation

เมื่อน้ำประเภท Shrinkage water หรือ Free water ออกไปหมด particles ของดินก็จะเคลื่อนที่มาชิดกัน ดังนั้นชิ้นงานจะหยุด shrink ต่อจากนั้นน้ำที่จะหลุดออกไป คือ Pore water ขั้นตอนการหลุดออกไปของน้ำชนิดนี้ คือ

- 1) เปลี่ยนจาก Liquid เป็น Vapor
- 2) Vapor diffuse จากภายในออกมาสู่ภายนอก

Mechanism ที่ควบคุม rate ของการอบช่วงนี้ คือ Vapor diffusion ตรงนี้อาจจะเพิ่ม rate การอบได้แล้ว เพราะชิ้นงานหยุดหดตัวแล้ว เมื่ออบต่อไปจึงไม่เกิด Stress จากการหดตัว อย่างไรก็ตามยังต้องใช้ความระมัดระวังในการเร่ง speed ของการอบในช่วงนี้อยู่ เพราะถ้าใช้อุณหภูมิสูงไปอาจจะทำให้เกิดไอน้ำ (Vapor) มากเกินไปจน diffuse ออกไปไม่ทัน จนในที่สุดก็จะระเบิดทำให้ชิ้นงานเสียหายได้

สังเกตว่าในช่วงต้นๆ ของการอบ ตรงกลางชิ้นงานจะมีอุณหภูมิต่ำกว่าที่ผิวชิ้นงาน ทั้งนี้เพราะ

- a) ที่ผิวชิ้นงานได้รับความร้อนโดยตรงจากห้องอบ
- b) Liquid water ที่อยู่ตรงกลางชิ้นงานจะดูดพลังงานความร้อนเพื่อเปลี่ยนสถานะจาก Liquid ไปเป็น Vapor water

ดังนั้นช่วงนี้ถ้าใช้ความร้อนมากเกินไปจะทำให้ Thermal expansion ที่ผิวของ ware มากกว่า Thermal expansion ที่ใจกลางของ ware มาก ซึ่งอาจจะทำให้เกิด Tension crack ที่ตรงกลางของ ware ได้

3. Water Permeability of the Clay Water Paste; คือความสามารถที่น้ำจะซึมผ่านเนื้อดินได้ เป็นคุณสมบัติประการที่ 3 ที่มีอิทธิพลต่อ drying rate ปัจจัยภายนอกที่มีผลต่อคุณสมบัติข้อนี้คือ

- a) ความละเอียดของอนุภาคดิน (Fineness of clay particle)
- b) สัดส่วนของ pore ในเนื้อดิน (Amount of pore fraction in the mass)
- c) ความหนืดของน้ำ (Viscosity of water) ซึ่งจะหนืดน้อยลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น
- d) ชนิดของ ion ที่มีอยู่ในน้ำ (Type and amount of ions present)

a) **Fineness of clay particle;** Clay ที่มี particle เล็กๆ เช่น Ball clay จะยอมให้น้ำซึมผ่านได้ช้า เนื่องจาก pore จะมีขนาดเล็ก ดังนั้นจึงอาจจะเปรียบเทียบกับว่า clay ใดมี particle size ละเอียดกว่ากัน โดยวิธีง่ายๆ คือ นำดินไปผสมน้ำ แล้วนำไปกรองผ่านกระดาษกรอง ถ้าน้ำซึมสามารถผ่าน clay ใดได้ช้ากว่า แสดงว่า clay นั้นละเอียดกว่า อย่างไรก็ตาม ควรหมัก (Aged) ดิน + น้ำ ที่จะนำมาทดลองแบบนี้ไว้อย่างน้อย 12 ชม. ก่อนทำการทดสอบเพราะคุณสมบัตินี้เปลี่ยนไปได้มากหลังจากการหมัก ดิน + น้ำ ไว้

b) **Amount of pore;** ยังมี pore มาก permeability ยิ่งมาก ดังนั้น Drying rate ยิ่งเร็วขึ้นไปด้วย

c) **Viscosity of water;** ยังมี Viscosity สูง permeability ยิ่งต่ำ ดังนั้น Drying rate ยิ่งช้าลง

d) **Type and amount of ions present;** ได้กล่าวไปแล้วว่าการเติม deflocculant เช่น K^+ , Na^+ ทำให้ clay particles เรียงตัวกันเป็น card pack ดังนั้น Permeability ของ ware ยิ่งจะต่ำลงทำให้อบได้ยากขึ้น อย่างไรก็ตามการเติม ion ชนิดนี้ลงไปในการ extrusion จะช่วยลด pressure ที่ต้องใช้ในการ extrude ได้ และยังช่วยลดปริมาณ Shrinkage water (หรือ Free water) ได้อีกด้วย (เพราะ particles pack กันแบบ card pack) ซึ่งจะส่งผลให้ชิ้นงานหดตัวหลังอบน้อยลงอีกด้วย แต่เนื่องจากสารพวกนี้ทำให้ permeability ต่ำจึงทำให้อบได้ยากขึ้น จึงต้องควบคุมปริมาณการใช้ในปริมาณที่เหมาะสมไม่ใช่มากเกินไป

ในทางตรงข้ามนักเซรามิกนิยมเติม Flocculant เช่น Ca^{2+} , Mg^{2+} หรือ Al^{3+} ลงไป การใช้ Filter press น้ำดินเพื่อเตรียมวัตถุดิบในการปั้นหรือขึ้นรูป Whiteware เพราะ ions เหล่านี้จะทำให้ particles ของดิน pack ตัวหลวมๆ (แบบ card house structure) ดังนั้น permeability จึงมากขึ้น ทำให้ช่วยประหยัดเวลาในการทำ filter press ชิ้นงาน อย่างไรก็ตามต้องเติม ions เหล่านี้ลงไปปริมาณที่เหมาะสมไม่มากเกินไป เพราะถ้าเติมลงไปมากเกินไปจะทำให้มี pore ในชิ้นงานมาก (เพราะ particle pack กันหลวม) ซึ่งทำให้ drying shrinkage มาก อีกทั้ง Green strength ของชิ้นงานก็จะต่ำด้วย

Drier Conditions Influencing Drying

สถานะของเตาอบที่มีผลต่อการอบแห้งมี 4 อย่าง คือ

- 1) อุณหภูมิในเตาอบ (Air Temperature)

- 2) ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศในเตาอบ (Relative Humidity)
- 3) ความเร็วของกระแสอากาศในเตาอบ (Air Velocity)
- 4) มุมตกกระทบของกระแสอากาศ (Angle of Impingement of air flow)

อุณหภูมิในเตาอบ; ยิ่งอุณหภูมิสูง ความหนืดของน้ำยิ่งต่ำ ทำให้น้ำยิ่งกลายเป็นไอได้มาก อบชิ้นงานแห้งเร็ว

ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศในเตาอบ; เป็นค่าที่บอกว่าในอากาศขณะนั้น มีน้ำอยู่ที่ % เมื่อเทียบกับปริมาณน้ำที่อากาศขณะนั้นสามารถมีได้สูงสุด อากาศที่อุณหภูมิแตกต่างกันจะอุ้มน้ำได้ไม่เท่ากัน อากาศที่มีอุณหภูมิสูงจะอุ้มน้ำได้มากกว่าอากาศที่อุณหภูมิต่ำ เพราะฉะนั้นตอนเช้าๆ อากาศเย็นๆ อากาศอุ้มน้ำได้น้อย น้ำส่วนเกินที่อากาศอุ้มไม่ไหวจึงเกาะเป็นหยดๆ บนใบไม้ เป็นน้ำค้าง แต่พอสายมาอากาศอุ่นขึ้นจึงอุ้มน้ำได้มากขึ้น น้ำค้างที่เกาะบนใบไม้ระเหยไปอยู่ในอากาศตามเดิม

ในเตาอบที่มีความชื้นสัมพัทธ์น้อย (อากาศแห้ง) น้ำจะระเหยออกจาก clay ware ได้มาก ดังนั้น ware จะแห้งได้เร็ว แต่ในทางตรงข้ามในเตาอบมีความชื้นสัมพัทธ์มาก (อึดตัวด้วยไอน้ำ) น้ำจะระเหยออกจาก clay ware ได้น้อย ดังนั้น ware จะเห็นได้ช้า

ความเร็วกระแสอากาศ; กระแสอากาศจะมีผลในการ Transfer heat ไปยัง ware และเป็นตัวกลางพาอากาศที่มีความชื้นต่ำไปยัง ware พร้อมกับพาเอาอากาศที่มีความชื้นสูงออกไปจาก ware ด้วย นักวิจัยพบว่า ware ที่อบในเตาที่มีกระแสอากาศที่เคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 250 ft/นาทิจะแห้งเร็วกว่า ware ที่อบในเตาที่ไม่มีกระแสอากาศเคลื่อนที่เลย และถ้าเพิ่มความเร็วกระแสอากาศในเตาอบเป็น 500 ft/นาทิจะแห้งเร็วขึ้นถึง 3 เท่า เมื่อสภาวะอย่างอื่นของการอบเหมือนกัน

แบ่งการอบออกเป็น 3 Stages คือ

Stage ที่ 1 การ Condition จุดประสงค์ของ Stage นี้เพียงเพื่อให้บริเวณภายนอกและภายในของชิ้นงานมีอุณหภูมิเท่ากัน ซึ่งทำได้โดยควบคุมให้ภายในเตาอบมีทั้งอุณหภูมิและความชื้นสูงด้วยกัน อย่างไรก็ตามจะต้องควบคุมให้ภายในเตามีความชื้นไม่สูงเกินไปจนทำให้ไอน้ำ condense (กลั่นตัวเป็นหยดน้ำ) เพราะหาก condense จะทำให้มีน้ำเกาะที่ผิวของชิ้นงาน ทำให้ที่ผิวชิ้นงานมีความชื้นสูงกว่าตรงกลางซึ่งจะทำให้ชิ้นงาน crack ได้ ดังนั้นในช่วงนี้ต้องคอยควบคุมให้อุณหภูมิในเตาสูงกว่า dew point temperature และจัดให้มีกระแสอากาศความเร็วต่ำๆ พาเอาความชื้นที่ระเหยออกไปจากชิ้นงาน

Stage ที่ 2 เป็นการไล่น้ำประเภท Shrinkage water ออกจากชิ้นงาน ช่วงนี้จะเพิ่มอุณหภูมิและความเร็วกระแสอากาศ แต่จะลดความชื้นสัมพัทธ์ในห้องอบ เพื่อให้ น้ำหลุดออกจากชิ้นงานได้เร็วขึ้น แต่ก็ต้องไม่เร็วเกินไปจนเกิด moisture gradient จนเกิด crack ได้ ปกติแล้วช่วงนี้จะไล่น้ำออกจากชิ้นงานได้ 10 – 15 % ; ชิ้นงานที่ผ่านการอบ stage นี้แล้วจะมีความชื้นเหลือประมาณ 10 %

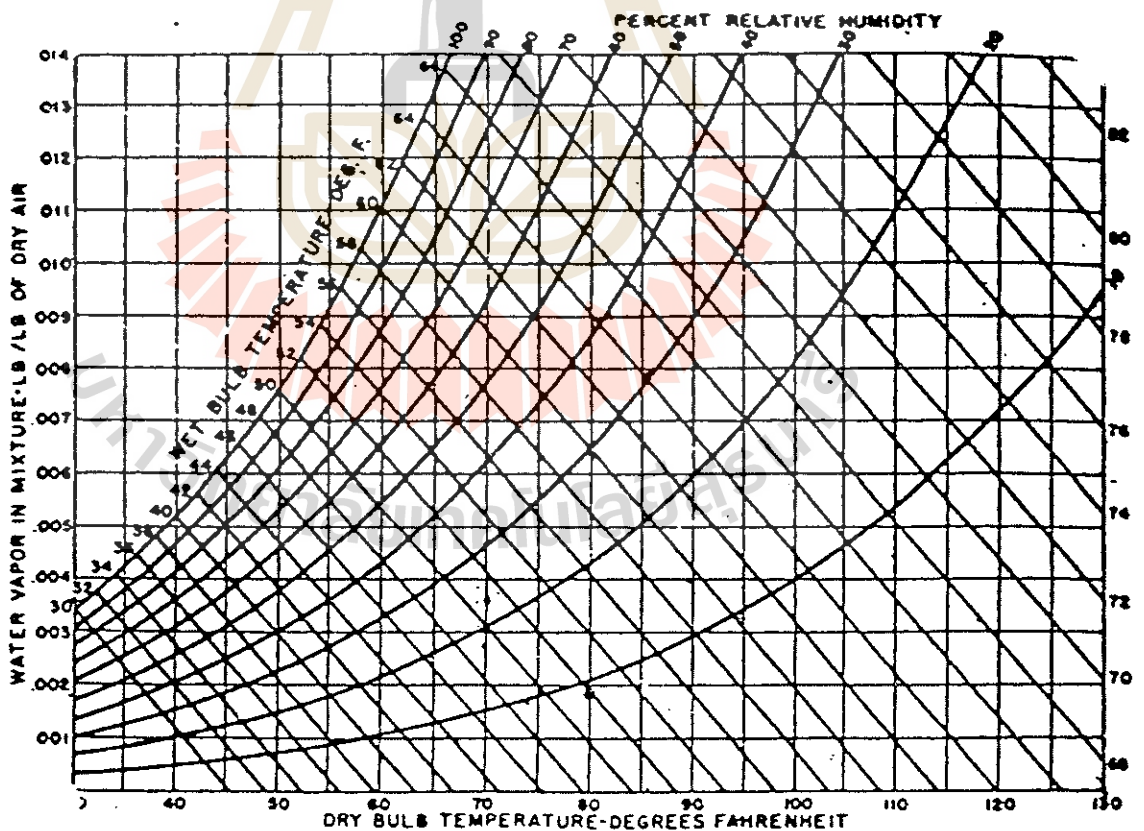
Stage ที่ 3 Final stage of Drying เป็นช่วงที่ชิ้นงานผ่านจุด Critical point แล้ว เมื่ออบต่อไปชิ้นงานจะไม่หดตัวอีก จึงมีความเสี่ยงต่อการแตกจากการหดตัวน้อยลง จึงสามารถเพิ่ม rate ของการอบโดยเพิ่มอุณหภูมิและลด relative humidity ได้อีก แต่ต้องระวังอย่าเพิ่ม rate มากเกินไป

Laboratory Drying Experiments

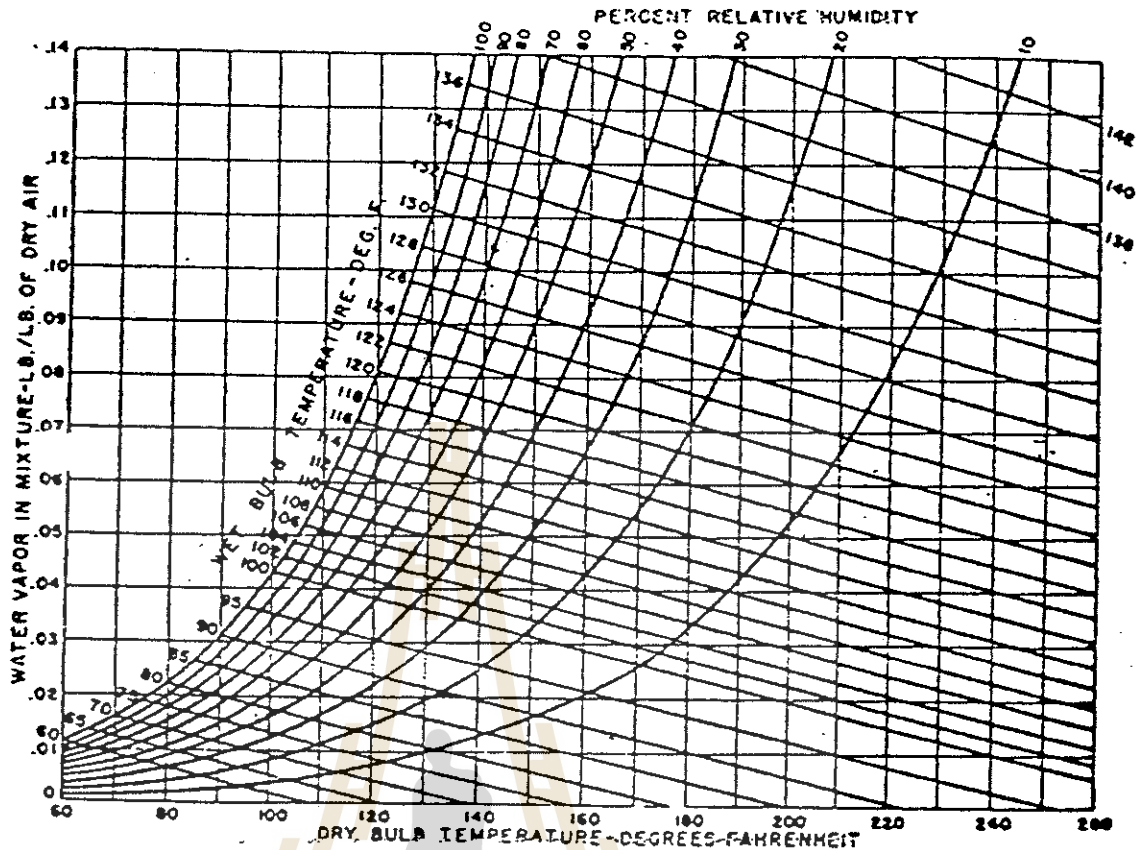
ในการควบคุมเตาอบเราต้องควบคุมอุณหภูมิและ Relative humidity ในเตาอบ สำหรับอุณหภูมิ อาจจะใช้วัดด้วยเครื่องมือวัดหลายอย่าง เช่น Thermometer, Thermocouple etc ซึ่งรายละเอียดจะได้เรียนในเรื่อง Firing ส่วน Humidity ก็อาจตรวจวัดด้วยเครื่องมือวัดหลายอย่าง เครื่องมือที่เก่าแต่ใช้ง่ายและแม่นยำคือ Hygrometer ซึ่งทำจาก Thermometer 2 อัน อันหนึ่งจะมีผ้าต่อจากกระเปาะเปียกมาหุ้มใช้อ่าน Wet bulb temperature (WB) ส่วนอีกอันหนึ่งวางไว้เฉยๆ ใกล้เคียงๆ กับอันแรกใช้อ่าน Dry bulb temperature (DB) อุณหภูมิที่อ่านจาก Wet bulb จะต่ำกว่า Dry bulb เสมอ เนื่องจากน้ำที่อยู่บนผ้าที่หุ้มรอบกระเปาะเปียกต้องดูดความร้อนจากตัวกระเปาะเปียกเพื่อทำให้ตัวเองกลายเป็นไอ (Wet bulb ต้องเสียความร้อนจากตัวเองส่วนหนึ่งให้กับน้ำที่ติดบนผ้าที่หุ้มรอบตัวเอง เพื่อให้ไอน้ำระเหยออกไป)

ถ้าอากาศในเตาอบมีความชื้นมาก น้ำจะระเหยออกไปจากผ้าที่หุ้มรอบ Wet bulb ได้น้อย ทำให้ Wet bulb สูญเสียความร้อนน้อย ดังนั้นอุณหภูมิของ Wet bulb จึงต่ำกว่าอุณหภูมิของ Dry bulb ไม่มาก ดังนั้น $Dry\ bulb\ Temp - Wet\ bulb\ Temp$ มีค่าน้อย ; แต่ถ้าอากาศในเตาอบมีความชื้นน้อย น้ำจะระเหยออกไปจากผ้าที่หุ้มรอบ Wet bulb ได้มาก ทำให้ Wet bulb สูญเสียความร้อนมาก ดังนั้นอุณหภูมิของ Wet bulb จึงต่ำกว่าอุณหภูมิของ Dry bulb มาก ดังนั้น $Dry\ bulb\ Temp - Wet\ bulb\ Temp$ มีค่ามาก

ภาพที่ 2.4-2.5 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Percent Relative Humidity (RH), WB Temp และ DB Temp เรียกว่า "Psychrometric chart" นักศึกษาต้องศึกษาวิธีอ่าน chart นี้ให้เป็น



ภาพที่ 2.4 Psychrometric chart, 20 to 130°F range. Moisture content and relative humidity of air-vapor mixture for dry and wet bulb temperatures. (จาก Ref. 1 หน้า 50)



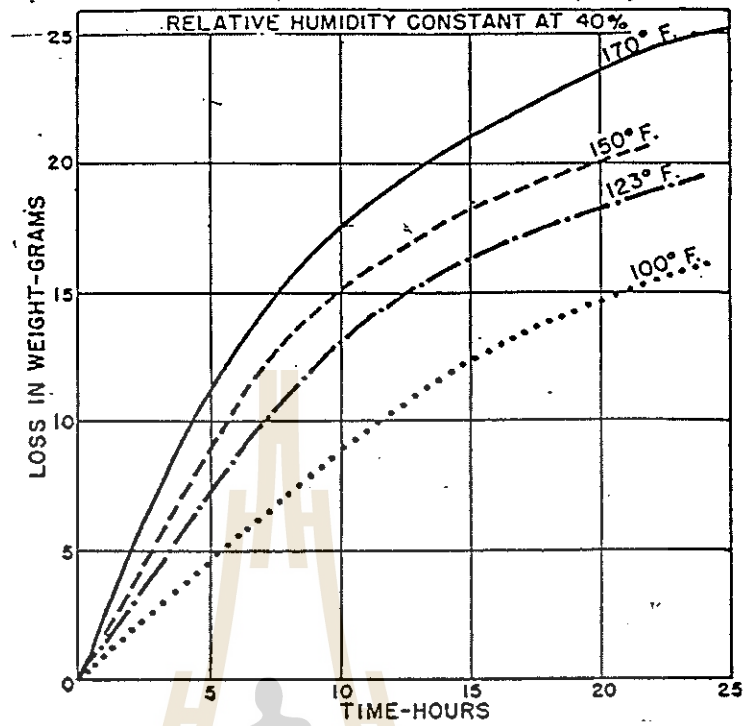
ภาพที่ 2.5 Psychrometric chart, 60 to 260^oF range. Moisture content and relative humidity of air-vapor mixture for dry and wet bulb temperatures. (จาก Ref. 1 หน้า 50)

Professor Hush ได้ศึกษาถึงความสัมพันธ์ระหว่าง Loss in Weight ของชิ้นงานต่อเวลาในการอบ ที่อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ต่างๆ กัน แล้วสรุปได้เป็นกราฟที่ 2.6-2.7 กราฟที่ 2.6 แสดง Loss in Weight ต่อ Time สำหรับการอบที่ vary อุณหภูมิแต่ fix ความชื้นสัมพัทธ์ที่ 40% ส่วนกราฟที่ 2.7 แสดง Loss in Weight ต่อ Time ของการอบที่ fix อุณหภูมิที่ 150^oF แต่ vary ความชื้นสัมพัทธ์ในเตาอบ จากภาพทั้งสองสรุปได้ว่า

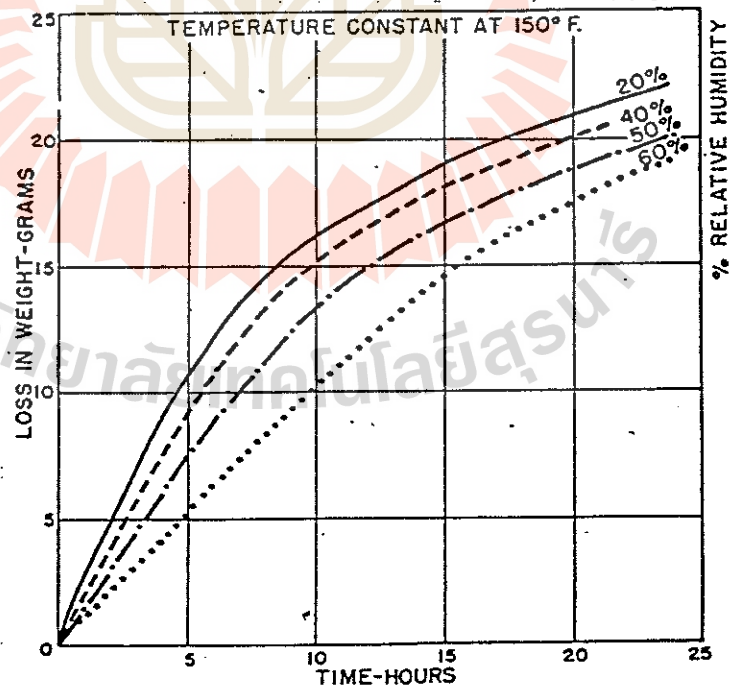
- 1) ยิ่งใช้อุณหภูมิในการอบสูงขึ้นเท่าใดชิ้นงานจะยิ่งแห้งได้เร็วขึ้นเท่านั้น
- 2) ยิ่งใช้ความชื้นสัมพัทธ์ต่ำลงเท่าใดชิ้นงานจะยิ่งแห้งเร็วขึ้นเท่านั้น

นอกจากนี้เขายังได้ทดลองอบอิฐ 2 วิธี คือ a) Moderate Drying และ b) Rapid Drying แล้วแสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Weight Loss, Brick Temp, and Shrinkage และ rate of Weight Loss ต่อเวลาในการอบอิฐ ทั้งสองวิธี ดังภาพที่ 2.8-2.9

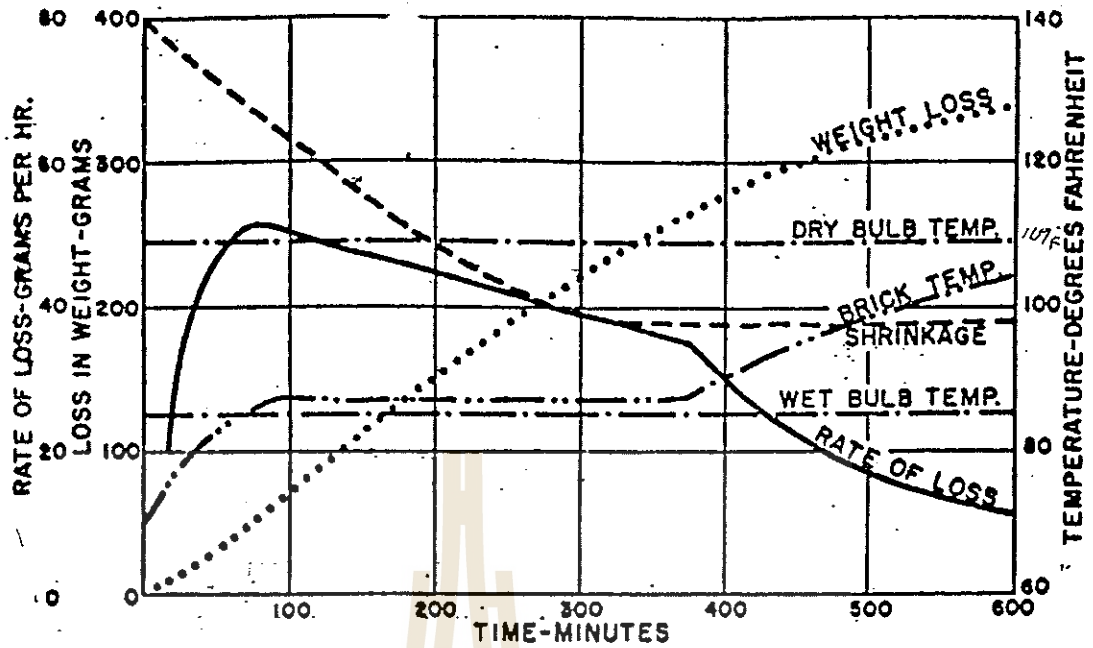
ภาพที่ 2.8 เป็นภาพความสัมพันธ์ระหว่าง Weight loss, Brick temp, and Shrinkage และ Rate of weight loss ต่อเวลาของการอบแบบ Moderate drying ซึ่งอบโดย fix DB ที่ 109^oF และ WB ที่ 85^oF ที่สภาวะดังกล่าวจะมี RH 39 % จากภาพจะเห็นว่าสามารถแบ่งการอบตาม Rate of weight loss และ Brick temp ออกได้เป็น 3 ช่วง คือ



ภาพที่ 2.6 Influence of temperature in drying of clay bars under constant atmospheric condition. (จาก Ref. 1 หน้า 52)



ภาพที่ 2.7 Influence of humidity in drying of clay bars under constant atmospheric condition. (จาก Ref. 1 หน้า 52)

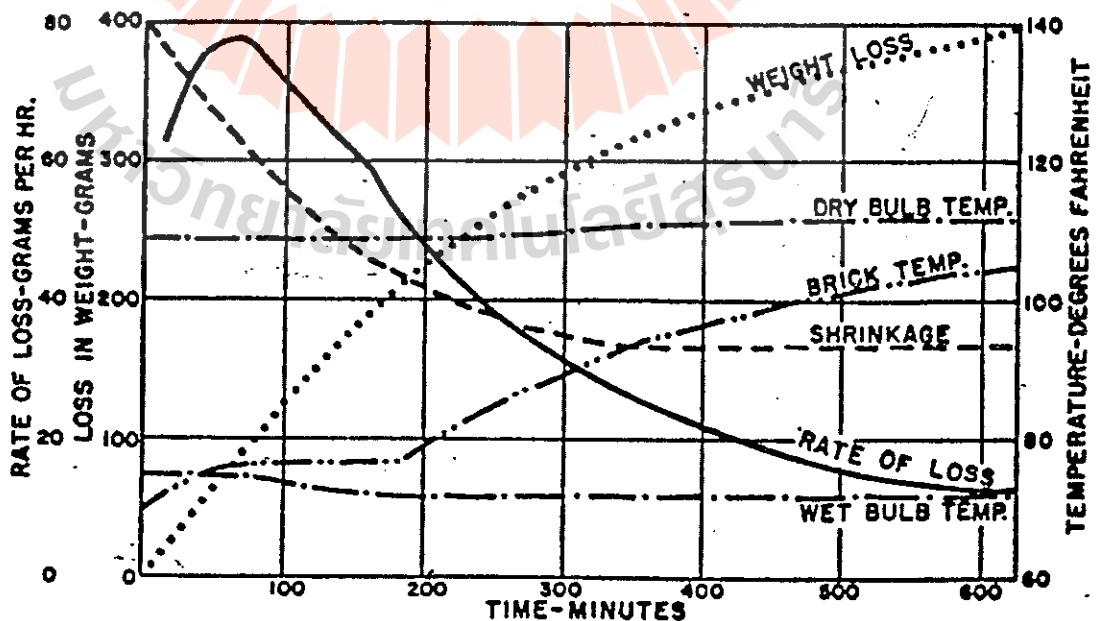


ภาพที่ 2.8 Moderate Drying of brick with continuously maintained atmospheric condition, 109°F and 39 %RH. (จาก Ref. 1 หน้า 53)

ช่วงที่ 1 ตั้งแต่เริ่มอบจนกระทั่งถึงจุดที่ Rate of weight loss สูงสุด จากกราฟจะเห็นว่าใน Stage นี้ Rate of weight loss และ Brick temp จะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นจนกระทั่งมีค่าสูงสุดที่ตอนท้ายของช่วงการอบนี้ ที่นาทีที่ 90 น้ำที่ออกใน stage นี้คือ น้ำที่อยู่ตามผิวของอิฐที่นำมาอบ

ช่วงที่ 2 ช่วงนี้เส้นกราฟ Rate of loss จะลดลงอย่างช้า ๆ เป็นเส้นตรง ส่วน Brick temp จะคงที่อยู่ที่ ใกล้เคียง ๆ Wet bulb temp แสดงว่าน้ำที่ออกไปในช่วงนี้ออกไปโดยขบวนการ evaporation จากที่ผิวอิฐ

ช่วงที่ 3 เป็นช่วงที่น้ำใน pore ออกไปโดยขบวนการ diffusion ปฏิกิริยาการนี้ที่แสดงจุดเริ่มต้นของช่วงนี้คือ Brick temp จะเพิ่มขึ้นอีกครั้งหนึ่ง



ภาพที่ 2.9 Rapid Drying of brick with continuously maintained atmospheric condition. (จาก Ref. 1)

ภาพที่ 2.9 เป็นภาพของความสัมพันธ์ระหว่าง Weight loss, Brick temp, and Shrinkage และ Rate of weight loss ต่อเวลา กรณีการอบแบบ Rapid drying ซึ่งอบ โดย fix DB ที่ 109°F ; WB ที่ 73°F ที่สภาวะดังกล่าวจะมีอากาศจะมี RH 20 % เมื่อเทียบกับภาพที่ 2.8 แล้วจะเห็นว่า การอบแบบนี้ Rate of loss จะสูงขึ้นมาก เนื่องจากในเตามี %RH ต่ำ อากาศจึงดูดซับเอาไอน้ำเข้าไปได้มาก อย่างไรก็ตามยังคงแบ่งการอบตาม Rate of weight loss และ Brick temp ได้เป็น 3 ช่วงเหมือนกรณี Moderate drying คือ

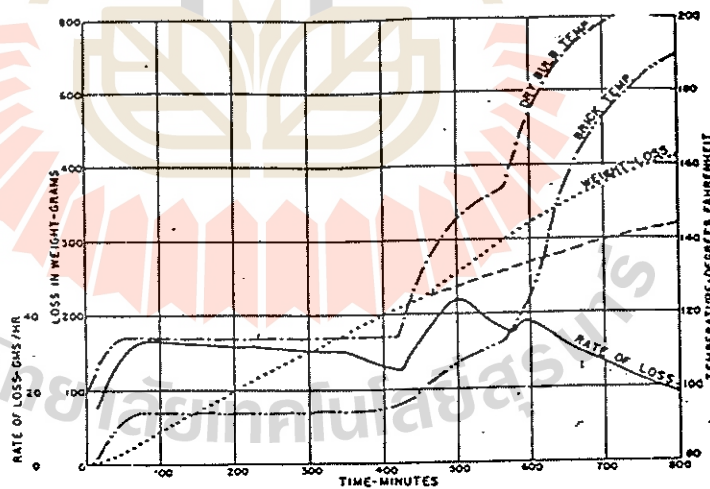
ช่วงที่ 1 เกิดที่นาที่ที่ 0 ถึง 70 คือตั้งแต่เริ่มต้นอบจนถึง Rate of loss สูงสุด

ช่วงที่ 2 เริ่มจากตอนที่ Rate of loss สูงสุดและ Brick temp คงที่ไปจนถึงตอนที่ Brick temp เปลี่ยน เกิดในช่วงนาที่ที่ 70 – 190 กินเวลา 120 นาที ช่วงนี้ Rate of loss จะลดลงเป็นเส้นตรง

ช่วงที่ 3 เกิดหลังนาที่ที่ 190 ไปแล้วในช่วงนี้จะเห็นว่า Rate of loss จะลดลงเป็นเส้นโค้ง และ Brick temp จะเริ่มขยับตัวสูงขึ้น

การอบด้วยสภาวะนี้ถือได้ว่ารุนแรง ทำให้น้ำออกไปจากผิวชิ้นงานอย่างรวดเร็วจนน้ำภายใน (Internal) ซึมออกแทนที่ไม่ทัน ทำให้ที่ผิวชิ้นงานแห้งอย่างรวดเร็วและเกิด shrinkage มาก ขณะที่ภายในซึ่งความชื้นออกไปได้ช้ากว่ามากมี shrinkage น้อยกว่า จึงเกิด stress ซึ่งอาจจะทำให้ชิ้นงาน crack ได้ จึงถือได้ว่าการอบด้วยสภาวะเช่นนี้ถึงแม้จะอบได้เร็วกว่าแบบ Moderate drying แต่ก็เป็น การอบเร็วแบบผิดวิธี

การอบเร็วแบบถูกวิธีทำได้โดยเพิ่มความเร็วจนหลังจากที่ได้อบผ่านช่วงที่ 2 ของการอบไปแล้ว ดังภาพที่ 2.10 ซึ่งอบในช่วงที่ 1 และ 2 โดย fix อุณหภูมิ DB ไว้ที่ 114°F และควบคุม RH ไว้ที่ 70%

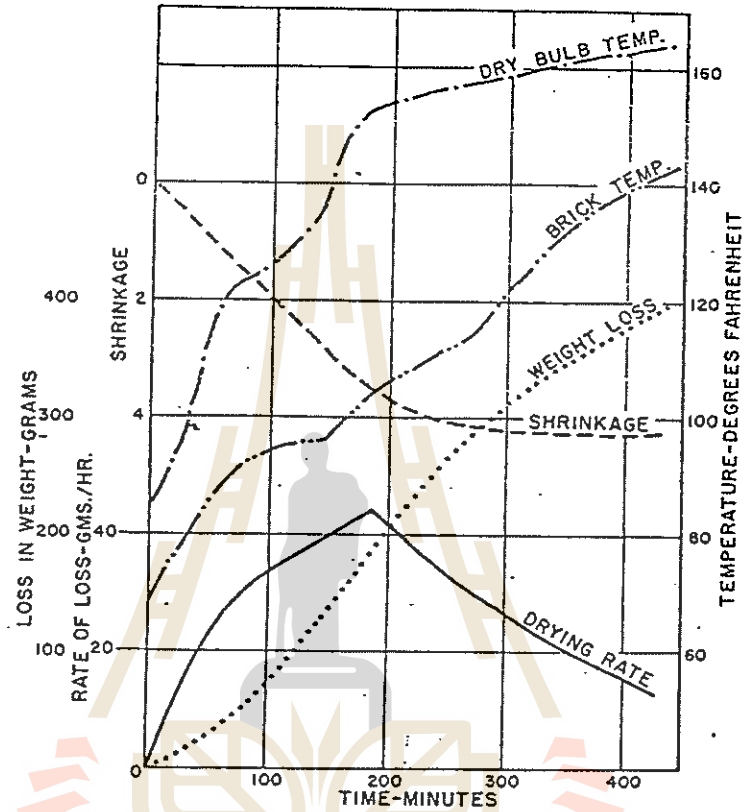


ภาพที่ 2.10 Effect of increasing temperature after completion of shrinkage in drying brick. (จา Ref. 1 หน้า 54)

และเมื่อเข้าสู่ช่วงที่ 3 แล้ว (Rate of loss ช้าลงแบบเส้นโค้ง) ก็ยังคงควบคุม DB และ RH เท่าเดิมต่อไปสักระยะหนึ่ง จน Brick temp เพิ่มขึ้น ทำให้แน่ใจได้ว่าเข้าสู่ช่วงที่ 3 แล้ว จึงเพิ่ม DB ขึ้นไปอีกทำให้ Rate of loss เพิ่มขึ้น ยิ่งความชื้นในชิ้นงานลดเหลือน้อยเท่าไร โอกาสเกิด Drying crack ก็จะน้อยลงเท่านั้น จึงให้

เพิ่ม DB temp มากขึ้นไปด้วย

อนึ่งในทางปฏิบัติอาจจะเริ่มอบจากขณะที่ DB ต่ำๆ จากนั้นจึงค่อยๆ เพิ่ม DB และลด %RH ไปเรื่อยๆ ตาม Stage ของการอบ โดยยังคงยึดหลักให้ช่วงต้นยังคงควบคุมให้ Weight loss ช้าๆ จนกระทั่งพ้น critical point แล้วจึงเพิ่ม DB และลด %RH เพื่อให้ให้น้ำออกไปได้เร็วขึ้น ดังภาพที่ 2.11



ภาพที่ 2.11 Drying of brick with progressive increasing air temperature. (จาก Ref. 1 หน้า 54)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทที่ 3 Water Removal From Clay

Introduction

Drying is exposing the material to a quantity of either cold or warm air, which is sufficient to absorb and carry off the water, heating material so as to convert water into steam, which then escapes into atmosphere, or by means of a dehydrating or desiccating agent, such as sulfuric acid which absorbs moisture from the atmosphere surrounding material to be dried.

The drying process is an important step in the manufacture of many ceramic articles. Although the dictates of economy require the fastest possible drying, too fast a schedule causes differential shrinkage of such magnitude as to produce cracking. In this chapter the principles of the drying of porous solid will be discussed

Internal flow of moisture

Internal flow เป็นที่ทราบดีแล้วว่าใน clay ware ประกอบด้วย pore เป็นจำนวนมากเชื่อมต่อกันเป็น Interconnecting channel ดังภาพที่ 3.1 เมื่อนำ ware มาอบ rate ของการ flow ของน้ำผ่าน channel ข้างต้นหาได้จาก

$$\text{Volume rate of flow} = k \frac{\text{driving force}}{\text{flow resistance}}$$

$$\frac{dV}{dt} = \frac{k(C_2 - C_1) p}{l \eta}$$

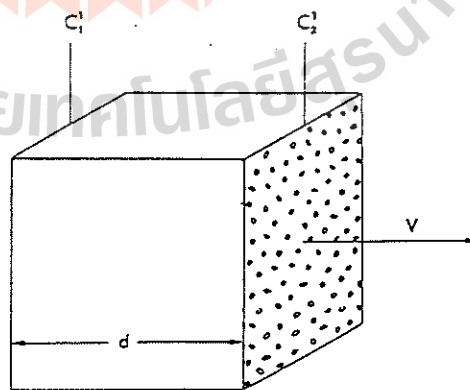
เมื่อ dV/dt คือ Volume rate of flow l คือ Length path

C_2 คือ Water concentration ด้านที่แห้งกว่า p คือ Permeability ของ body

C_1 คือ Water concentration ด้านที่ชื้นกว่า η คือ Viscosity ของน้ำ k คือ ค่าคงที่

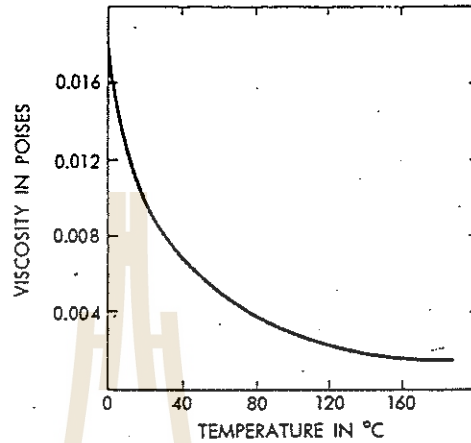
จากสมการข้างต้นจะเห็นว่าเราสามารถเพิ่ม rate ของการ flow ของน้ำผ่าน ware โดย 3 วิธีคือ

- 1) เพิ่ม Permeability
- 2) เพิ่ม Moisture gradient
- 3) ลด Viscosity ของน้ำ



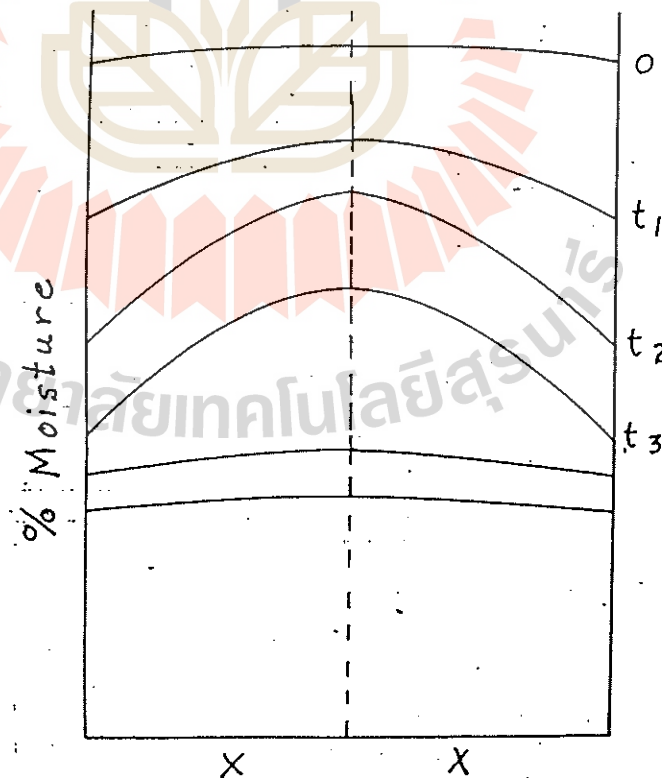
ภาพที่ 3.1 Movement of moisture through a porous medium with a moisture gradient of $(C_2 - C_1)/d$ (จาก Ref 12 หน้า 115)

ได้กล่าวแล้วในบทที่แล้วว่าการเพิ่ม Moisture gradient มีข้อจำกัดไม่สามารถเพิ่มมากเกินไป เพราะจะทำให้เกิด stress จนทำให้ ware แตกได้ การลด Viscosity ของน้ำสามารถทำได้โดยเพิ่มอุณหภูมิของน้ำ เพราะ Viscosity ของน้ำลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นดังภาพที่ 3.2 และการเพิ่ม Permeability ของ ware ทำได้หลายวิธี วิธีที่ง่าย ๆ และนิยมมากที่สุดคือใช้ raw material ที่มีขนาดอนุภาค โตขึ้น



ภาพที่ 3.2 Viscosity of water at various temperature (จาก Ref 12 หน้า 115)

Moisture distribution นักวิจัยพบว่าการกระจายตัวของความชื้น (Moisture distribution) ในชิ้น clay ware ที่มีลักษณะเป็นแผ่นๆ (slab) ที่นำมาอบ โดยคุมให้ความชื้นออกไปทาง faces ของแผ่นเท่านั้น (ไม่ให้ความชื้นออกไปทาง edge) จะมีลักษณะดังภาพที่ 3.3



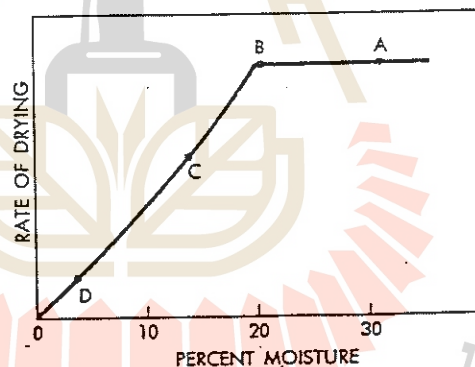
ภาพที่ 3.3 Moisture distribution in a slab of drying clay (จาก Ref 1 หน้า 60)

จากภาพจะเห็นว่าตอนแรกๆ ที่เริ่มอบ ($t = 0$) ความชื้นที่ด้าน face ทั้งสองของแผ่น slab เท่ากับความชื้นตรงกลางแผ่น แต่ต่อมาเมื่ออบต่อไปจนถึงจุดที่ $t = t_1$ จะเกิด moisture gradient ขึ้นเนื่องจากที่ผิวของ slab แห้งเร็วกว่าตรงกลาง ปรากฏการณ์ดังกล่าวยังคงเกิดต่อไปเรื่อยๆ เมื่ออบต่อไปอีกถึงจุดที่ $t = t_2$ ซึ่งหากสังเกตจะเห็นว่า moisture gradient จะมากกว่าที่ $t = t_1$ เสียอีก แต่เมื่ออบต่อไปถึงจุดที่ $t = t_3$ จะพบว่า moisture gradient กลับจะน้อยลง ทั้งนี้เนื่องจากที่ $t > t_2$ ที่ผิวมีความชื้นต่ำกว่า critical point แล้ว ดังนั้นที่ผิวจึงแห้งได้ช้าลงกว่าตรงกลางจึงทำให้ moisture gradient น้อยลง เมื่ออบต่อไปอีก moisture gradient ก็จะน้อยลงๆ ไปเรื่อยๆ จนกระทั่งที่ผิวมีความชื้นเหลือเท่า final moisture แล้ว ความชื้นจะหยุดเปลี่ยนแปลง แต่ตรงกลางยังคงมีความชื้นลดลงเรื่อยๆ จนเท่ากับที่ผิว moisture gradient ก็จะหมดไปในที่สุด

Surface Evaporation

ได้กล่าวแล้ว Evaporation from a free water surface อัตราการระเหยของน้ำออกจากชั้นงานขึ้นกับปัจจัยหลายอย่าง ที่สำคัญคือ อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ ความเร็วกระแสอากาศ และมุมตกกระทบ

Drying rate of ceramic bodies เมื่อนำชิ้นงานเข้าอบแล้ว plot กราฟน้ำหนักของ clay ware ต่อเวลา จะได้กราฟเส้นโค้งที่ยังไม่มีอะไรที่แปลกประหลาดมากนัก อย่างไรก็ตามหาก plot กราฟระหว่าง Rate of drying ต่อ % moisture content ของ ware (= slope of weight loss curve) จะได้กราฟที่น่าสนใจดังภาพที่ 3.4

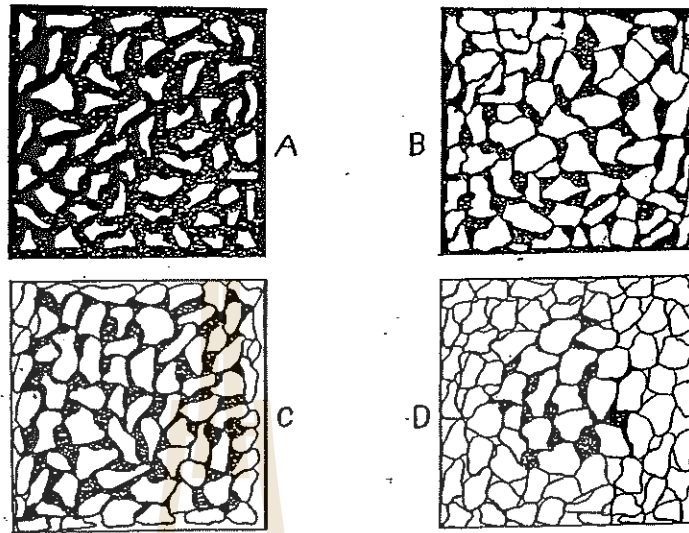


ภาพที่ 3.4 Rate of water loss in drying moist clay (จาก Ref 12 หน้า 116)

จุด A เป็นจุด start ของการอบ จะเห็นได้ว่าช่วงแรกๆ (A-B) ชิ้นงานมี rate of drying จะคงที่ จนกระทั่งถึงจุด B rate of drying จะช้าลงเรื่อยๆ จากภาพอาจจะแบ่งการอบตาม rate of drying ได้เป็น 2 stages คือ

1) Initial or Early Stage of Drying ก่อนอบอนุภาคดินในชิ้นงาน มีการเรียงตัว ตามภาพที่ 3.5A เมื่อเริ่มอบ free water ที่อยู่ตามผิวของชิ้นงานจะ evaporate ออกไปก่อน จากนั้น free water ที่อยู่ภายในชิ้นงานก็จะเคลื่อนที่มาแทนที่ แล้วระเหยตามออกไป ในช่วงนี้น้ำจะระเหยออกจาก mass อย่างง่ายดายเนื่องจากน้ำเหล่านี้ไม่ได้ถูกยึดเกาะได้ด้วยแรงที่แข็งแกร่งมากนัก และในช่วงนี้เอง particles จะขยับตัวเข้าใกล้กันมากขึ้นๆ เนื่องจากสูญเสียน้ำระหว่าง particles จนกระทั่ง particles ชิดกันดังภาพ 3.5B ต่อจากนี้น้ำที่อยู่ในชิ้นงานจะไม่ได้อยู่ในสภาพ continuous unbound film อีกต่อไป ถือเป็นจุดสิ้นสุดของ

การอบ stage นี้ เนื่องจาก stage นี้ (ช่วง A-B ในภาพที่ 3.4) rate of drying คงที่ จึงเรียกการอบใน stage นี้ อีกอย่างว่า “Constant Rate Period of Drying” และเนื่องจาก rate ของการ shrink จะเท่ากับ rate ของการ เสียน้ำ ดังนั้น rate ของการ shrink จึง constant ด้วย



ภาพที่ 3.5 Stage in the Drying of an Aggregated Paste Mass. (จาก Ref. 1 หน้า 56)

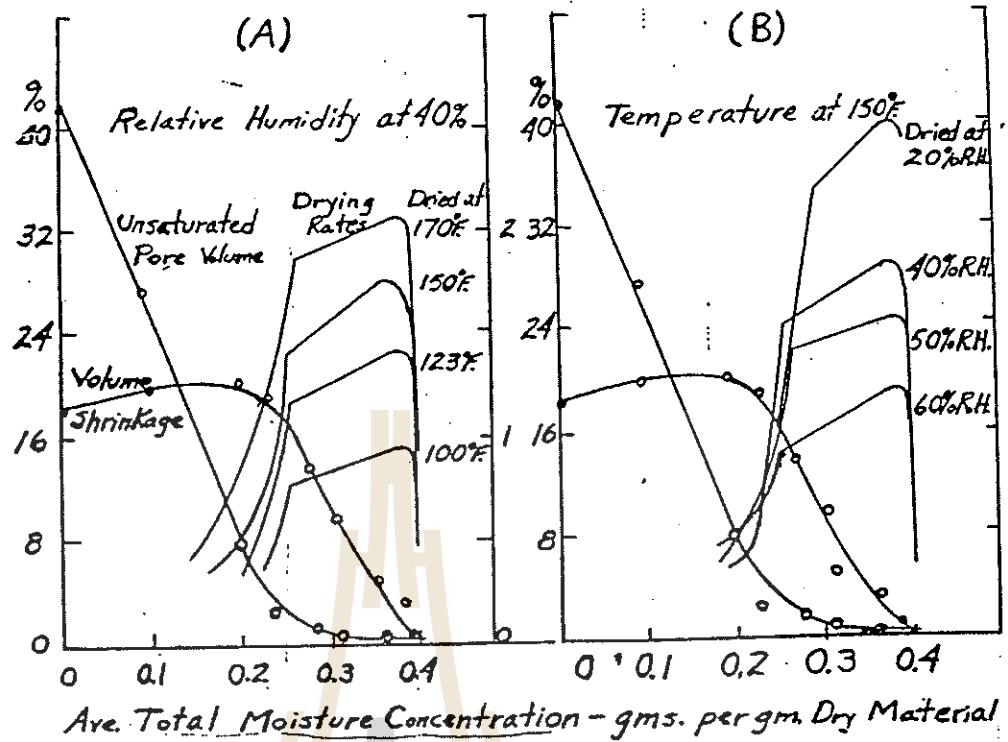
2) **Second Stage of Drying** stage นี้เริ่มขึ้นเมื่อ particle ของดินแตะกัน ซึ่งจะเริ่มมีโพรงที่ผิว ของ Mass เรียกโพรงนี้ว่า capillary ดังภาพ 3.5C น้ำที่ผิวของ mass ไม่ได้อยู่ในสภาพ continuous film เหมือนใน stage ก่อนนี้ ใน stage นี้จึงต้องใช้ทั้ง surface tension (แรงดึงผิวของน้ำ) และ capillary force ในการดูดเอาน้ำที่อยู่ในสภาพ liquid และ vapor ออกจาก pore ไปยัง surface ของ mass จากนั้นน้ำจึงจะ evaporate แล้วถูกกระแสอากาศพัดพาออกไปจากชิ้นงาน

Drying rate ใน stage นี้ (ช่วงที่ B-D ในภาพที่ 3.4) จะช้ากว่าใน Initial stage มาก เนื่องจาก Mechanism ของการ dry เปลี่ยนไป ดังนั้นจึงเรียก stage นี้ อีกอย่างว่า “Falling Rate Period of Drying” จุด B ในภาพที่ 3.4 เป็นจุดเปลี่ยนแปลง (Critical Point) จาก Initial stage ไปเป็น Second stage สังเกตว่า Drying rate ที่จุดนี้จะลดลงอย่างรวดเร็วทันทีทันใด และเมื่ออบต่อไปเรื่อยๆ จากจุดนี้ไปจุด D Drying rate ก็จะมีลดลงไปตาม เพราะ pore ยิ่งอยู่ลึกลงไปอีก

ในที่สุดเมื่อเข้ามาถึงตอนท้ายๆ ของ stage นี้จะมีน้ำเหลืออยู่ในชิ้นงานอยู่ในลักษณะเป็นหย่อม ๆ (Isolated pocket) ดังภาพ 3.5D ณ จุดนี้อัตราการ evaporation จะลดลงเหลือเกือบเป็น “ศูนย์” ต้องเพิ่ม อุณหภูมิหรือลดความชื้นสัมพัทธ์อีกไม่เช่นนั้นจะไม่สามารถทำให้ความชื้นลดต่อไปอีก ได้

นักวิจัยได้ศึกษา Rate of drying หรือ Drying rate ต่อ % moisture content ของ ware เมื่ออบด้วย condition ต่างๆ กัน ได้ผลดังภาพที่ 3.6 A และ 3.6B

ภาพที่ 3.6A แสดง Drying rate ต่อ % moisture content กรณีอบที่ Relative humidity (RH) 40 % แต่ใช้อุณหภูมิในเตาอบ (Dry bulb temperature; DB) ต่างๆ กัน ส่วนภาพที่ 3.2B แสดงกรณีอบที่ อุณหภูมิ DB 150 °F แต่ใช้ RH ต่างๆ กัน จากภาพจะเห็นว่าไม่ว่าจะอบที่อุณหภูมิและ RH เท่าใด ยังคง แบ่งการอบตาม Rate of drying ออกเป็น 2 stages ตามเดิม



ภาพที่ 3.6 A-B Relation Between Drying Rates, Volume Shrinkage, Volume of Unsaturated Pores, and Average Total Moisture Concentration for an Aggregated Paste Dried at (A) Different Temperature (B) Different Humidities. (จาก Ref. 1 หน้า 58)

ใน stage ที่ 1 ของการอบ Drying rate จะมีค่าค่อนข้างคงที่ กราฟ Drying rate : moisture content เป็นเส้นตรง slope ต่ำๆ อย่างไรก็ตามเมื่ออบไปถึงจุด critical point แล้ว Drying rate จะลดลงอย่างรวดเร็วอย่างทันทีทันใด เส้นกราฟ Drying rate เปลี่ยน slope อย่างทันที ถือได้ว่าจุดนี้เป็นจุดสิ้นสุด stage ที่ 1 และเข้าสู่ stage ที่ 2 ของการอบแล้ว เรียก Moisture content ของชิ้นงานที่จุดนี้ว่า “Critical Moisture Content” หากสังเกตภาพที่ 3.6 A, B ต่อไปอีกจะเห็นสิ่งที่น่าสนใจคือ ไม่ว่าจะอบด้วย condition ใดๆ Critical moisture content จะมีค่าเท่าๆ เดิม คือประมาณ 25% จากการศึกษาพบว่า Critical moisture content เป็นคุณสมบัติเฉพาะตัวของ clay ware ขึ้นกับวัตถุดิบที่นำมาใช้ทำ clay ware ยิ่งใช้วัตถุดิบที่มี particle size เล็กเท่าใด Critical moisture content จะมีค่ามากขึ้นเท่านั้น สำหรับ clay ware ที่ทำจากวัตถุดิบที่มี non-plastic sand ผสมอยู่เป็นจำนวนมาก Critical moisture content อาจจะมีค่าเพียง 4% ก็ได้

ในภาพที่ 3.6 A เส้น Drying rate แสดงให้เห็นว่าหากควบคุม RH ให้คงที่เท่าเดิมแต่ใช้ อุณหภูมิภายในเตา (DB) ต่างกัน ยิ่งใช้ DB สูงขึ้นเท่าใด Drying rate จะยิ่งมากขึ้นเท่านั้น; เส้น Unsaturated pore volume แสดงปริมาณ pore ที่มีน้ำ fill ไม่เต็ม จากภาพจะเห็นว่าก่อน Critical point Pore ชนิดนี้มีปริมาณน้อยมากคือเกือบ = 0% แต่เมื่อผ่านจุด Critical point ไปแล้วปริมาณ pore ชนิดนี้จะมากขึ้นเรื่อยๆ เส้นสุดท้าย Volume shrinkage แสดงปริมาณการหดตัวของชิ้นงาน จากภาพจะเห็นว่าเมื่ออบผ่านจุด Critical point ไปแล้ว ชิ้นงานจะหยุดหดตัว (shrinkage คงที่อยู่ที่ 18% ไม่ shrinkage ต่อไปอีก)

ในภาพที่ 3.6B เส้น Unsaturated pore volume และเส้น Volume shrinkage แสดงสิ่งเดียวกันกับที่อธิบายในภาพที่ 3.6A ส่วนเส้น Drying rate แสดงให้เห็นว่ายิ่งอบที่ RH ต่ำลงเท่าใด Drying rate ยิ่งจะมากขึ้นเท่านั้น ดังนั้นหากบรรยากาศในเตาอบมี RH = 100 % แสดงว่าในเตาอบอุ้มน้ำไว้เต็มที่แล้ว น้ำที่ผิวของชิ้นงานจึง evaporate ออกไปไม่ได้ Drying rate จะเป็นศูนย์ แต่ถ้าบรรยากาศในเตาอบมี RH น้อยกว่า 100 % น้ำที่ผิวของชิ้นงานจะระเหยออกไปได้เรื่อยๆ อัตราการระเหยเร็วยิ่งขึ้นเมื่อ 1) อุณหภูมิของเตาเพิ่มขึ้น 2) ความชื้นในเตาต่ำลง 3) ความเร็วกระแสอากาศเพิ่มขึ้น

Reduce Drying Crack

การที่ Drying rate เพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิในเตาเพิ่มขึ้น ไม่ใช่เพราะว่าที่อุณหภูมิสูง น้ำระเหยออกไปได้ง่ายขึ้นแต่เพียงอย่างเดียว แต่เป็นเพราะว่าที่อุณหภูมิสูงอากาศสามารถอุ้มน้ำได้มากขึ้นด้วย ดังนั้นถ้าต้องการ Drying rate มากขึ้นก็เพิ่มอุณหภูมิในเตาอบ แต่ต้องเพิ่มอย่างระมัดระวัง

เมื่ออบจนผิวของชิ้นงานถึง Critical moisture content แล้วผิวของชิ้นงานจะหยุด shrink และเริ่มแข็งตัว plasticity กำลังจะหมดไป ดังนั้นผิวชิ้นงานจึงเปราะและไม่สามารถ absorb stress ได้มาก ถ้าอบโดยไม่ควบคุมให้ดีปล่อยให้ที่ผิวและตรงกลางชิ้นงานมี MC ต่างกันมาก ก็จะเกิด stress ขึ้นซึ่งอาจจะทำให้ชิ้นงาน crack ได้ ทางแก้ไข คือ 1) Reducing Drying Shrinkage 2) Reducing Moisture Gradient

Reducing Drying Shrinkage คือลดการหดตัวของชิ้นงาน อาจทำได้โดย

- ควบคุมการใช้น้ำในการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ให้น้อยลง
- ใช้สัดส่วน raw material ที่มี grain ใหญ่ในปริมาณมากขึ้น
- ใช้สารเคมีพวก deflocculant (1+) ช่วย
- ลดสัดส่วน raw material ที่มีคุณสมบัติ colloidal ให้เหลือน้อยลง

Reducing Moisture Gradient ทำได้โดย

- ลด Drying rate ให้ช้าลงโดยการควบคุม RH และอุณหภูมิ (DB) ในเตาอบ
- ปรับปรุงให้ mass มีคุณสมบัติ permeability มากขึ้น
- ควบคุมให้ rate การ evaporate ของน้ำจากทุก ๆ ส่วนของ mass เท่ากัน

Evaporation rate ของน้ำจะขึ้นกับ DB และ RH ของเตา ถ้าอุณหภูมิของชิ้นงานเท่ากันตลอดทั่วทั้ง mass น้ำที่อยู่ผิวของ mass (exterior) จะ evaporate ออกไปได้เร็วกว่าน้ำที่อยู่ภายใน (interior) ของ mass แต่ถ้าควบคุมให้ interior mass มีอุณหภูมิสูงกว่า exterior mass น้ำก็จะทำให้ evaporation จาก interior เกิดได้เร็วขึ้นซึ่งจะทำให้ moisture gradient ลดลง

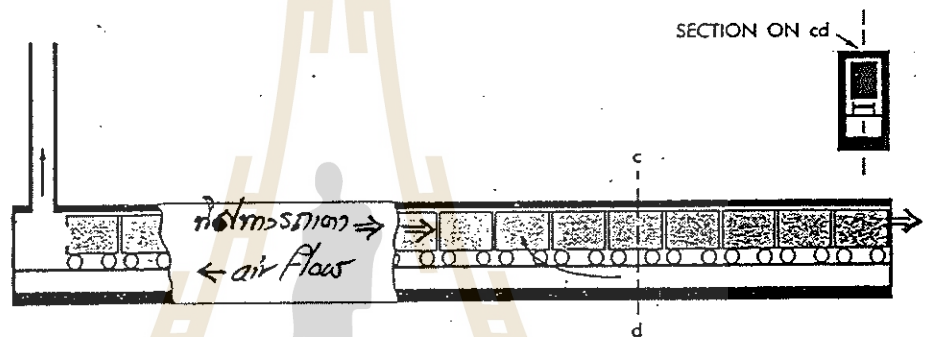
วิธีการที่จะทำให้ interior มีอุณหภูมิสูงกว่า exterior ทำได้โดย แรกสุดให้ heat mass ขึ้นไปให้ที่อุณหภูมิสูงและ soak ไว้ที่อุณหภูมินั้นให้อุณหภูมิของ mass ทั้งที่ interior และ exterior uniform เท่ากัน จากนั้นก็ cool exterior ซึ่งก็จะทำให้ interior มีอุณหภูมิสูงกว่า exterior โดยอัตโนมัติ แต่สิ่งสำคัญที่ต้องทำควบคู่กันในตอน that heat mass ขึ้นไปคือ จะต้องป้องกันไม่ให้น้ำใน mass ระเหยออกไปด้วย มิฉะนั้นจะทำให้เกิด moisture gradient อนึ่งการ heat mass ขึ้นไปโดยไม่สูญเสียน้ำออกไปจะทำได้โดยการควบคุม RH ในเตาให้สูง ๆ (Saturated with water vapor) ขณะ heat วิธีการดังกล่าวคือการ condition นั้นเอง

ชนิดของเตาอบ

แบ่งเตาอบที่ใช้อบผลิตภัณฑ์เซรามิกตามการเคลื่อนที่ของผลิตภัณฑ์ในขณะที่อบออกเป็น 2 ชนิด คือ 1) Tunnel dryer และ 2) Stationary dryer

Tunnel Dryer เป็นเตาที่มีรูปทรงแบบอุโมงค์ ซึ่งงานมีการเคลื่อนที่เข้าด้านไปในเตาอบทางปากอุโมงค์ และเคลื่อนที่เข้าไปเรื่อยๆ ตามความยาวของเตาอบ แล้วออกจากเตาอบที่ด้านท้ายอุโมงค์ แบ่งเตาชนิดต่อไปตามการ flow ของ air และการควบคุมอุณหภูมิในเตาเป็น 4 ชนิด คือ

1) *Counter flow tunnel dryer* เป็นเตาอบแบบอุโมงค์ที่มีระบบการไหลเวียนอากาศแบบ อากาศวิ่งสวนทางกับชิ้นงาน (Counter flow) กล่าวคือชิ้นงานซึ่งวางอยู่บนรถเตาจะถูกลำเลียงเข้าทางด้านหน้าของอุโมงค์ ส่วนอากาศที่ร้อนและแห้ง (Dry & Warm air) จะถูกป้อนเข้าในทางด้านตรงข้ามคือท้ายอุโมงค์ ดังภาพที่ 3.7



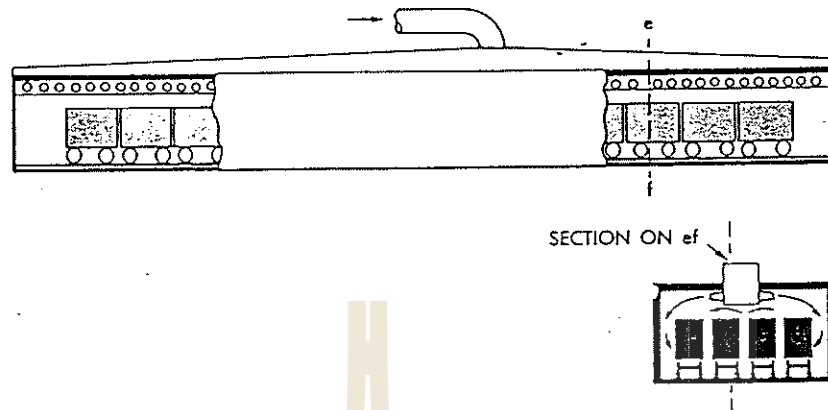
ภาพที่ 3.7 A Counter flow tunnel dryer (จาก Ref 12 หน้า 123)

ขณะที่อากาศซึ่งร้อนและแห้งวิ่งผ่านชิ้นงานพวกที่อยู่ท้ายๆ ของอุโมงค์ อากาศก็จะรับเอาความชื้นที่ระเหยออกจากชิ้นงานเหล่านั้นเอาไว้ ทำให้ความชื้นของอากาศมากขึ้นๆ จนกระทั่งเมื่อไปถึงด้านหน้าของอุโมงค์อากาศจะเปลี่ยนสภาพเป็นอากาศที่ร้อนและชื้น (Saturated & Warm air) ดังนั้นชิ้นงานที่ถูก feed เข้ามาในเตาทางด้านหน้าอุโมงค์จึงได้สัมผัสกับบรรยากาศที่ Wet & Warm ทำให้ความชื้นออกไปจากชิ้นงานได้ช้าๆ ตามหลักของการ Condition ต่อจากนั้นชิ้นงานค่อยๆ เคลื่อนที่ลึกเข้าไปในเตามากขึ้นๆ ชิ้นงานก็จะสัมผัสกับอากาศที่ร้อนและแห้งขึ้นๆ ความชื้นจึงระเหยออกจากชิ้นงานได้มากขึ้นๆ อนึ่งอากาศที่ถูก feed เข้ามาในเตาอาจจะได้รับความร้อนจากท่อไอน้ำ (steam coil) หรือ heater อื่นๆ หรืออาจจะนำ Waste air จากเตาเผา (Kiln) มาเป็นอากาศที่ป้อนเข้าไปก็ได้ การนำเอา Waste air จาก Kiln มาใช้ป้อนเข้าไปในเตาอบมีข้อดีคือเป็นการนำเอาอากาศร้อนที่จะทิ้งแล้วกลับมาใช้ใหม่จึงเป็นวิธีที่ประหยัดพลังงานความร้อนให้โรงงานได้มาก แต่มีข้อเสียคือควบคุมอุณหภูมิและความชื้นของอากาศที่ feed เข้ามายาก และอาจจะพาเอา gas sulfur และสิ่งสกปรกมาปนเปื้อนไปตกบนผิว ware ที่กำลังอบทำให้เกิดปัญหาภายหลังได้

เตาอุโมงค์ชนิดนี้สร้างได้ง่ายและไม่มีความซับซ้อน อย่างไรก็ตามชิ้นงานที่อบได้จะมีความชื้นแตกต่างกันมาก ถึงแม้จะอยู่บนรถเตาคันเดียวกันก็ตาม

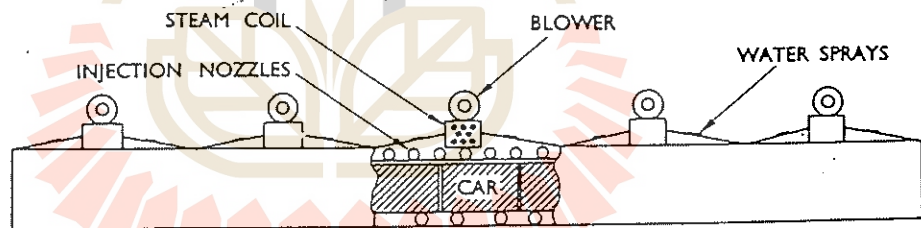
2) *Cross circulation tunnel dryer* เป็นเตาอบแบบอุโมงค์ที่มีระบบพัดลมช่วยทำให้เกิดการ

หมุนเวียนของอากาศตามแนวขวางของเตาด้วยดังภาพที่ 3.8 วิธีนี้ชิ้นงานที่อบได้จะมีความชื้นสม่ำเสมอเท่าๆ กัน ดีกว่าที่อบจากเตาแบบก่อน

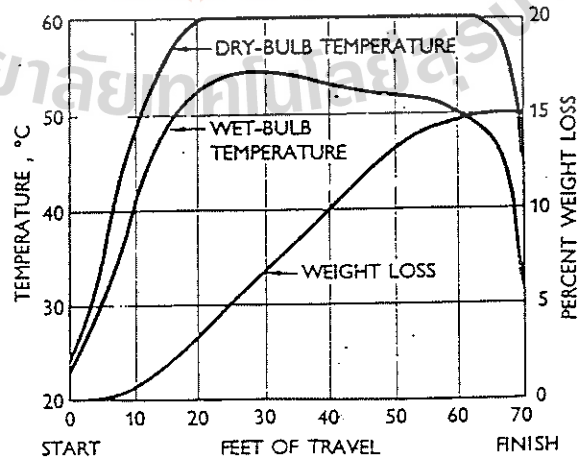


ภาพที่ 3.8 A Cross circulation tunnel dryer (จาก Ref 12 หน้า 123)

3) *Humidity tunnel dryer* เป็นเตาอบแบบอุโมงค์ที่มีในเตาแบ่งออกเป็นหลายๆ sections ดังภาพที่ 3.9 แต่ละ section สามารถควบคุมอุณหภูมิและ RH ได้อย่างอิสระจากกัน ทำให้สามารถควบคุม schedule การอบได้ตรงตามต้องการได้ ภาพที่ 3.10 แสดงตัวอย่าง Drying schedule ของเตาชนิดนี้ จะเห็นว่าในช่วงแรกๆ จะควบคุมให้ DB และ WB มีอุณหภูมิต่างกันไม่มาก เพื่อให้ความชื้นระเหยออกจากชิ้นงานอย่างช้าๆ ต่อจากนั้นจึงเพิ่ม DB ขึ้นไปอีกและลด WB ลงมาด้วย ทำให้ RH ในเตาต่ำลงชิ้นงานจะแห้งได้เร็วขึ้น

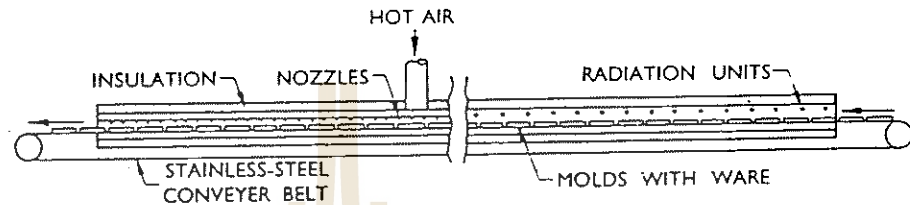


ภาพที่ 3.9 A Humidity tunnel dryer (จาก Ref 12 หน้า 123)



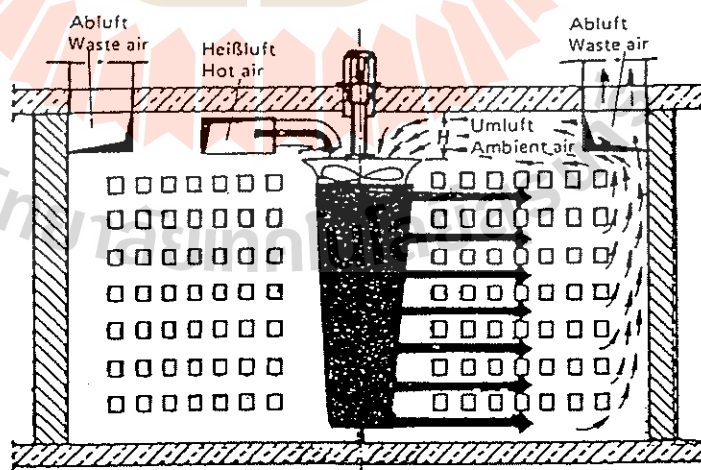
ภาพที่ 3.10 Typical conditions in a humidity dryer (จาก Ref 12 หน้า 121)

4) *Tableware tunnel dryer* เป็นเตาอบแบบอุโมงค์ที่ใช้ในการอบ tableware ที่ได้จากการขึ้นรูปโดยวิธีการ Jigger หรือ Roller head ดังภาพที่ 3.11 ชิ้นงานที่ขึ้นรูปเสร็จซึ่งยังติดอยู่บนแบบ Plaster จะถูกลำเลียงโดยสายพานลำเลียงเข้าไปในเตา แล้วตอนแรกๆ ชิ้นงานจะถูก heat ด้วย infrared radiation ต่อจากนั้นจะถูกลมร้อน (high velocity jets of hot air) พ่นใส่ทำให้ชิ้นงานที่นำเข้าอบมีความชื้นลดลงจาก 25% เหลือเพียง 5% ภายในเวลา 10-15 นาที ซึ่งเร็วกว่าการอบแบบวิธีเก่าๆ มาก หนึ่งที่สำคัญคือต้องควบคุมไม่ให้อุณหภูมิในสูงเกิน 70°C เพราะจะทำให้แบบ plaster เสียได้



ภาพที่ 3.11 Tableware tunnel dryer จาก Ref 12 หน้า 124

Stationary Humidity Drier เป็นเตาที่วางชิ้นงานอยู่กับที่แล้วค่อยๆ heat อากาศในเตาขึ้นพร้อมกับควบคุมอุณหภูมิและความชื้นให้เหมาะสมกับ stage ของการอบเช่น ใน Initial stage ก็จะใช้ feed อากาศร้อนและชื้นเข้าไป ควบคุมให้ความชื้นออกจากชิ้นงานอย่างช้าๆ จนกระทั่งผ่าน critical point แล้วจึง feed อากาศที่ร้อนและแห้งเข้าไปเพื่อเร่งให้อบได้เร็วขึ้น เมื่อชิ้นงานแห้งดีแล้วลดอุณหภูมิเตาอบลงแล้วจึงลำเลียงออกจากเตาอบ และนำชิ้นงาน lot ใหม่เข้ามาอบอีก ภาพที่ 3.12 แสดงตัวอย่างของเตาอบชนิดนี้ที่ใช้ในการอบอิฐ หนึ่งอาจจะวางชิ้นงานที่เข้าอบไว้บนรถเข็นก็ได้เพื่อสะดวกในการลำเลียงชิ้นงานเข้าออกเตา



ภาพที่ 3.12 แสดง Stationary dryer (จาก Ref 13 หน้า 25)

บทที่ 4 Dryer Operation

บทนำ

จุดประสงค์ของการอบ คือ

1. เพื่อให้ผลิตภัณฑ์มีความแข็งแรงมี Green strength เพียงพอต่อการ Handling เคลื่อนย้าย
2. ลดเวลาและค่าใช้จ่ายในการเผา
3. เพื่อให้ผลิตภัณฑ์มีความชื้นต่ำจะได้ลดปัญหาในการเผา

การอบพอเป็นพิธีหรือการไม่อบเลยโดยคิดว่าเมื่อนำชิ้นงานไปเข้าเตาเผา (Kiln) อย่างไรเสียมันก็จะแห้งไปเองอยู่แล้ว “เป็นความคิดที่โง่ที่สุด” เพราะเตาเผาที่เป็นเตาเผา เตาเผาไม่ใช่ Efficient Dryer การนำ ware ที่มีความชื้นสูง ๆ เข้าไปเผาโดยไม่อบให้แห้งเสียก่อนอาจจะนำความเสียหายอย่างใหญ่หลวงที่ไม่มีใครอยากเห็นให้เกิดขึ้น เช่น ชิ้นงานที่เผาออกมาได้เกิด defect พวก Loss of strength, Breakage, Scumming, หรือ Efflorescence (คล้าย ๆ กับตกสะเก็ดเป็นเม็ดเกลือที่ผิว) หรือ ชิ้นงานบางชิ้นอาจจะระเบิดเมื่อเผาเพราะระบายความชื้นออกไปไม่ทันทำให้ Heating Element หรือ ชิ้นงานชิ้นอื่น พลายเสียหายไปด้วย

การอบที่ดี

การอบที่ดีไม่ใช่อบแล้วผลิตภัณฑ์มีความชื้นเป็น “ศูนย์” และไม่จำเป็นต้องอบให้ได้มากและเร็วที่สุด แต่การอบที่ดีคือการอบให้ผลิตภัณฑ์มีความชื้นที่เหมาะสม (Optimum) และสม่ำเสมอ (Uniform) ที่สุด การอบที่ดีต้องใช้พลังงานและเวลาในการอบน้อยที่สุด และประการสุดท้ายการอบที่ดีจะต้องทำให้เกิด defect น้อยที่สุดด้วย

อาจจะเปรียบเทียบการอบเหมือนกับการหุงข้าว “ใครๆ ก็หุงข้าวให้สุกได้ แต่คนที่หุงให้ข้าวขึ้นหม้อรสชาติอร่อยนั้นต้องเป็นแม่บ้านผู้เก่งในงานครัวเท่านั้น” การอบก็เช่นกันดูเหมือนว่าง่าย ๆ ไม่มีอะไร “ใครๆ ก็อบได้แต่คนที่หุงให้ ware มีความชื้นที่เหมาะสม (Optimum) และสม่ำเสมอ (Uniform); ใช้พลังงานและเวลาน้อยที่สุด และมี defect น้อยสุดต้องเป็นนักเซรามิกฝีมือดีเท่านั้น”

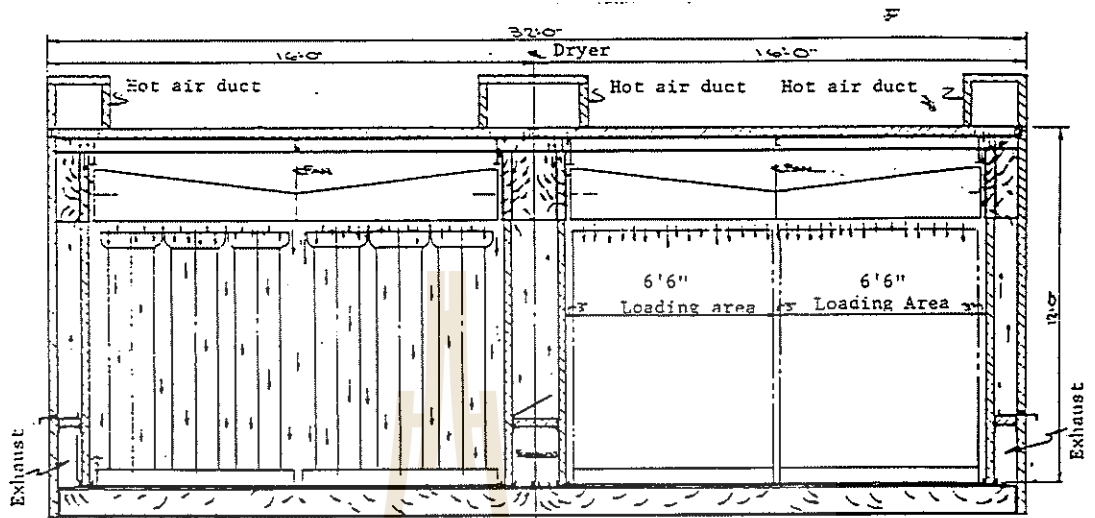
ชนิดของเตาอบ Type of Dryers

แบ่ง Dryer ออกตามลักษณะการป้อนชิ้นงานเข้าเตาออกเป็น 2 ชนิดคือ

- 1) Periodic Dryer
- 2) Continuous Dryer

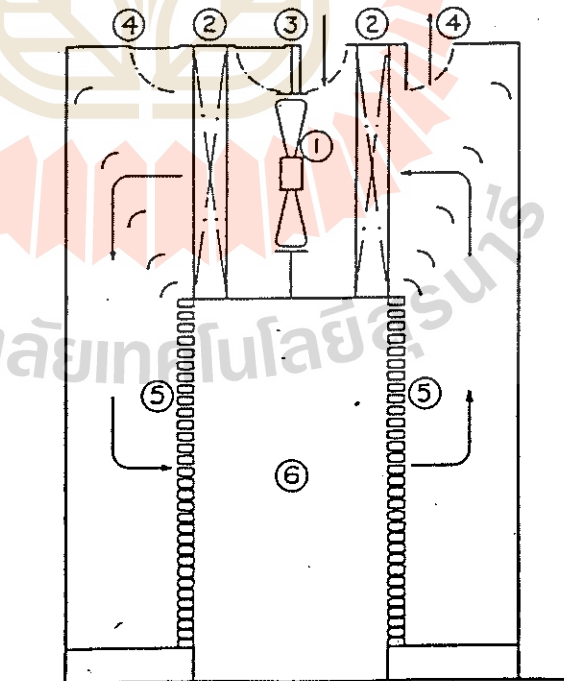
Periodic Dryer คือ เตาอบที่อบเป็น batch ไม่ต่อเนื่อง ชิ้นงานจะถูกป้อนเข้าเตาเมื่อเต็มเตาแล้วจึงอบ เมื่ออบได้ความชื้นตามต้องการแล้วจะปล่อยให้เตาเย็นจนได้ทีก็จะลำเลียงชิ้นงานออก แล้วป้อนชิ้นงานเข้าไปใหม่ทำเช่นนี้เรื่อยไป ภาพที่ 4.1 แสดงตัวอย่างของ Periodic Dryer ที่ใช้ในการอบท่อน้ำที่ทำจากดิน จะเห็นได้ว่าประกอบด้วย 1) Fan ช่วยพัดให้ลมร้อนที่เข้ามากระจายตัวไปทุกส่วนของเตาให้ร้อนเท่ากันอย่างสม่ำเสมอ ลมร้อนเหล่านี้จะพัดพาเอาความร้อนสู่ชิ้นงานในเตาและพาเอาความชื้นออกจากชิ้นงาน เสร็จแล้วจึงระบายออกไปทางช่อง Exhaust 2) Hot air duct คือ ช่องที่อากาศร้อนและแห้งจากภายนอกถูกดูดเข้าไปในเตา 3) Exhaust คือช่องทางที่อากาศเย็นและชื้นจากข้างในเตาจะถูกระบายออก

ไปนอกเตา ตามภาพไม่มี Heater แสดงว่าเตานี้อาศัยแหล่งพลังงานความร้อนจากภายนอกอีกที่ซึ่งแหล่งความร้อนภายนอกอาจจะมาจาก Heater ที่ใช้ไฟฟ้า, gas หรือ น้ำมันหรือ ไม้ฟืนเป็นเชื้อเพลิง หรืออาจจะใช้ Exhaust air จาก Kiln มาป้อนเข้าไปในเตาก็ได้



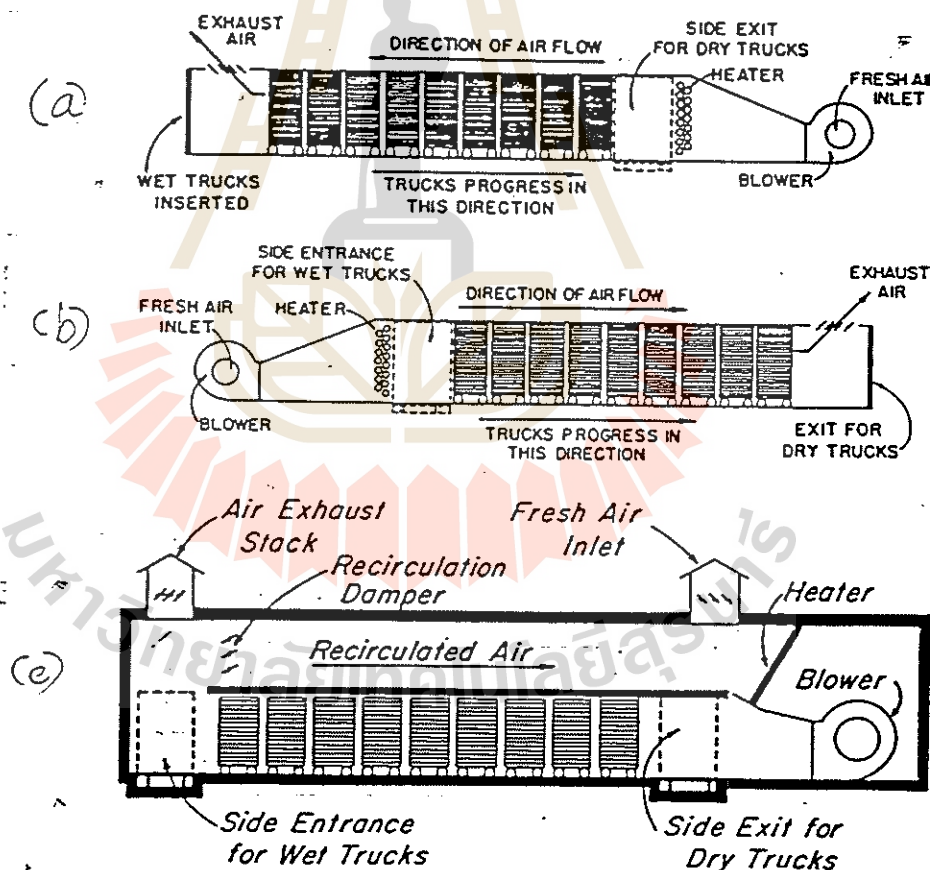
ภาพที่ 4.1 Schematic of periodic drier for sewer pipe. (จาก Ref. 9 หน้า 71)

เตาบางชนิดอาจจะถูกออกแบบให้มีลักษณะดังภาพที่ 4.2 จากภาพจะเห็นว่าเตาประกอบด้วย (1) พัดลมช่วยกระจายอากาศ (2) Heater batteries ซึ่งอาจจะทำมาจากท่อเหล็กที่ถูกเชื่อมด้วยแผ่นเหล็กเป็นครีป fin เมื่อ Operate ก็จะปล่อยให้ไอน้ำหรืออากาศร้อนวิ่งเข้าไปในท่อ heat ให้ท่อร้อนแล้วความร้อนจะระบายออกทางครีปให้แก่อากาศในเตาอบ (3) ช่องอากาศเข้า (4) ช่องอากาศออก (5) บานเกล็ด เพื่อให้ความร้อนกระจายจากข้างบนมายังข้างล่างเตาทุกส่วนเท่าๆ กัน (6) ช่องใส่รถใส่ผลิตภัณฑ์เข้าอบ



ภาพที่ 4.2 Cabinet dryer 1, circulating fan, fully reversible; 2, heater batteries; 3, vented air inlet ports; 4, vented air exhausts ports; 5, adjustable louver walls; 6, truck space. (จาก Ref. 6 หน้า 607)

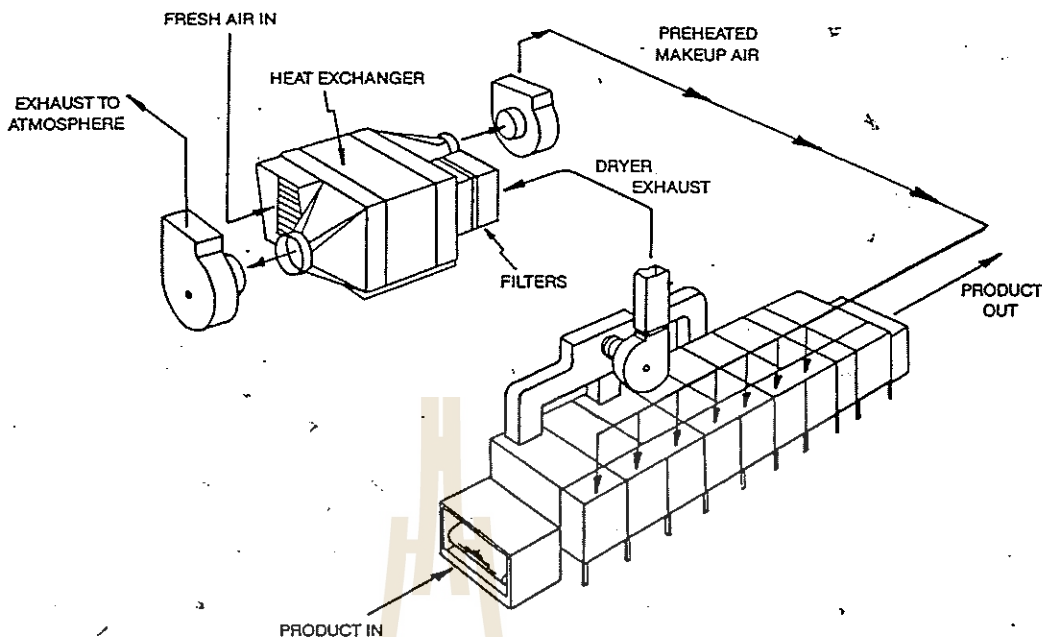
Continuous Dryer คือ เตอบที่ป้อนชิ้นงานเข้าเตาแบบต่อเนื่อง ส่วนใหญ่แล้วตัวเตาจะถูกออกแบบให้มีลักษณะเป็นอุโมงค์ และชิ้นงานมักจะถูกรีดยอยู่บนรถเตาแล้วเดินเข้าไปในเตาดังภาพที่ 4.3 จากภาพจะเห็นว่าเตาชนิดนี้มีหลายแบบ อย่างไรก็ตามแต่ละแบบจะมีส่วนประกอบที่สำคัญเหมือนกันคือ ๑) พัดลม (Blower) ๒) Heater ๓) Entrance เป็นทางเข้าของผลิตภัณฑ์ที่เข้าอบ และ ๔) Exit เป็นทางออกของผลิตภัณฑ์ที่อบเสร็จแล้ว เตอบแบบ a) เป็นเตาที่ทิศทางของ air flow สวนทางกับทิศทางการเคลื่อนที่ของชิ้นงาน เตอบแบบ b) เป็นเตาที่ทิศทางของ air flow มีทิศทางเดียวกันกับทิศทางการเคลื่อนที่ของชิ้นงาน เตอบแบบ c) เป็นเตาที่ เตอบแบบที่ออกแบบระบบ flow ของอากาศเป็น 2 ชั้น อากาศแห้งจากภายนอกจะถูกพัดลมดูดเข้าทาง Fresh Air Inlet ผ่าน heater ทำให้ร้อนแล้ววิ่งสวนเข้าไปในแถวของรถบรรทุกชิ้นงานกลายเป็นอากาศเย็นและชื้น แล้ววิ่งไปกระทบผนังเตาแล้วอากาศบางส่วนจะถูกดูดออกไปทางปล่อง Air Exhaust Stack ส่วนที่เหลือจะถูก Recirculate กลับมาใช้ใหม่ สัดส่วนอากาศที่ถูกปล่อยออกไปทางปล่องระบายกับที่ถูก recirculated มาใช้ใหม่จะขึ้นกับการควบคุมของ Damper หนึ่งใบบางที่จะใช้รถบรรทุกชิ้นงานเข้าเตาอบเป็นชนิดเดียวกันกับรถบรรทุกชิ้นงานเข้าเตา ทั้งนี้เพื่อความสะดวกจะได้ไม่ต้องเสียเวลาและค่าแรงในการ unload ชิ้นงานออกจาก Dryer cars ไปขึ้นบน Kiln cars



ภาพที่ 4.3 Schematic illustrations of tunnel dryers. (จาก Ref. 6 หน้า 608)

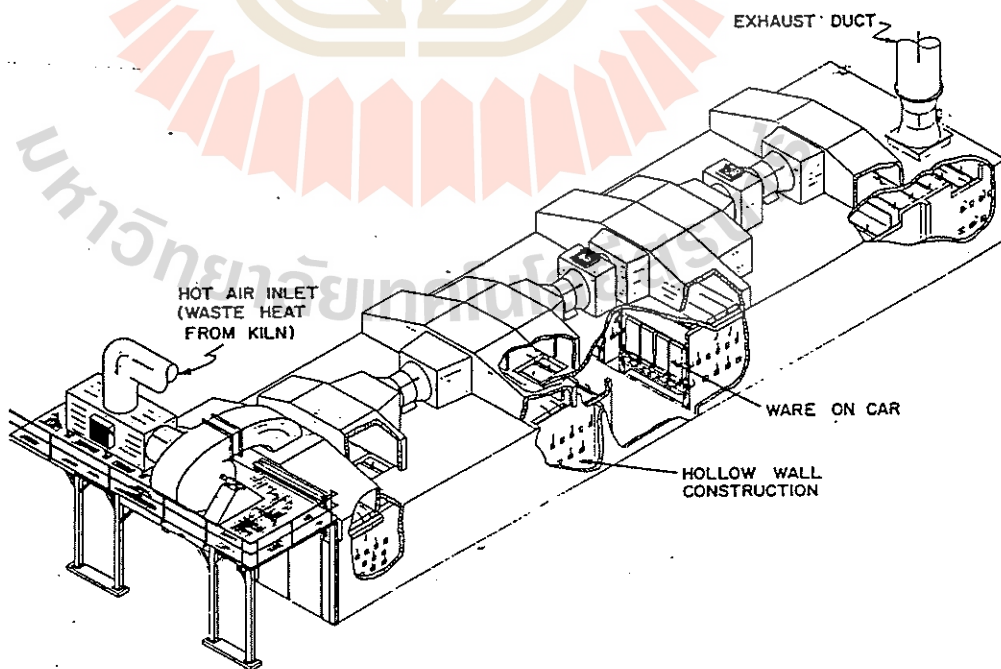
ถ้าที่ชิ้นงานมีน้ำหนักไม่มากอาจจะลำเลียงชิ้นงานเข้า-ออกเตาโดยสายพานลำเลียง (Conveyor) และอาจจะเอาความร้อนของ Exhaust air ที่ปล่อยออกจากปล่องเตามา preheat Fresh air ที่กำลังจะเข้าเตา

ก็ได้ ดังภาพที่ 4.4 จะทำให้ประหยัดพลังงานความร้อนได้มาก



ภาพที่ 4.4 Typical conveyor dryer heat recovery system.(จาก Ref. 6 หน้า 536)

การอบด้วยเตาอบแบบ Stationary หรือ Periodic Dryer จะมีข้อดีกว่าการอบด้วยเตาอบแบบ Continuous Dryer ตรงที่ผู้อบจะควบคุม Condition ในการอบได้ง่ายกว่าเพราะในเตา Continuous dryer ชิ้นงานมีการเคลื่อนที่จากบริเวณหนึ่ง ไปบริเวณหนึ่งและอากาศที่ Feed เข้า-ออกเตาจะต้องมีการเคลื่อนที่จากปลายข้างหนึ่ง ไปถึงปลายอีกข้างหนึ่งของเตาทำให้ควบคุม Condition ได้ยาก อย่างไรก็ตามเตาอบแบบ Continuous ที่ดี จะถูกออกแบบให้ตัวเตาแบ่งออกเป็นหลายๆ Zones ดังภาพที่ 4.5 แล้วควบคุม DB และ RH ของแต่ละ Zone ให้เหมาะสมกับความชื้นของชิ้นงานคล้ายๆ กับที่ control ในเตา Periodic ก็ได้



ภาพที่ 4.5 Tunnel drier, having several zones of controlled humidity and temp. (จาก Ref. 9 หน้า 72)

Relative Humidity

ในบรรดาปัจจัยที่มีผลต่อการอบทั้งหมด RH มีความสำคัญเป็นอันดับต้นๆ ความชื้นสัมพัทธ์ (Relative Humidity) เป็นค่าเปรียบเทียบระหว่างความชื้นที่อากาศกำลังอุ้มไว้ขณะนั้นกับความชื้นที่อากาศขณะนั้นสามารถอุ้มได้

$$\text{Relative Humidity} = \frac{\% \text{Moisture content contain by air}}{\% \text{Moisture content which air can fully contain}}$$

หากบอกว่าอากาศขณะนั้นมี RH = 80% ก็หมายความว่าอากาศขณะนั้นอุ้มน้ำไว้ 80% ของน้ำที่มันสามารถอุ้มไว้ได้ ดังนั้นอากาศขณะนั้นจึงจะสามารถดูดเอาไอน้ำเข้ามาได้อีก 20% และขณะใดถ้าอากาศในเตาอบมี RH เท่ากับ 100% แสดงว่าขณะนั้นชิ้นงานจะไม่สามารถคายความชื้นออกไปจากตัวได้เลยเพราะอากาศได้อุ้มน้ำไว้เต็มความสามารถที่มันอุ้มได้แล้ว

ที่สำคัญคืออากาศที่อุณหภูมิแตกต่างกันจะสามารถอุ้มน้ำได้ไม่เท่ากัน “ยิ่งอุณหภูมิสูงเท่าไรอากาศจะยังสามารถอุ้มน้ำจะมากขึ้นเท่านั้น” การที่เมฆกระทบความเย็นจะกลั่นตัวเป็นหยดน้ำ เพราะอากาศเย็นอุ้มน้ำได้น้อยกว่าอากาศร้อนนั่นเอง

เครื่องมือและอุปกรณ์ในการควบคุมเตาอบ

เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ช่วยในการควบคุมและ Operate เตาอบให้มีประสิทธิภาพสูงสุด มีหลายชนิด เครื่องมือและอุปกรณ์ของแต่ละแบบไม่เหมือนกัน เตาบางแบบอาจจะมีอุปกรณ์ครบทุกรายการ เตาบางแบบอาจจะมีไม่ครบก็ได้ เครื่องมือและอุปกรณ์ที่สำคัญในการควบคุมเตาอบได้แก่

- 1) Damper มีไว้เพื่อควบคุมการระบายอากาศออกจากเตาอบ ถ้าเปิด damper ให้อากาศระบายออกไปได้มากจะทำให้ RH ในเตาลดลง แต่ถ้าปิด damper ชังให้อากาศระบายออกจากเตาได้น้อย RH ในเตาจะเพิ่มขึ้นเพราะความชื้นถูกระบายออกไปได้น้อย
- 2) Heater (แหล่งพลังงานความร้อน) มีไว้เพื่อเพิ่มหรือลดอุณหภูมิในเตาให้เป็นไปตามต้องการ ปรับ DB จะมีผลต่อ RH ด้วย
- 3) Blower หรือ Fan มีเพื่อควบคุมปริมาณและความเร็วลมที่หมุนเวียนภายในเตาอบ ทั้งยังช่วยพาความร้อนไปยังชิ้นงานและนำความชื้นออกมาจากชิ้นงานด้วย เตาบางแบบจะออกแบบให้ปรับ speed ของ Blower ได้ บางชนิดจะออกแบบให้ใบพัดสามารถหมุนได้ 2 ทิศ reversible คือหมุนได้ทั้งตามและทวนเข็มนาฬิกา เพื่อให้แน่ใจว่าลมตกกระทบชิ้นงานอย่างทั่วถึงทุกทิศทาง
- 4) หัวฉีดสเปรย์ เตาบางชนิดจะถูกออกแบบเป็นพิเศษให้มีหัวฉีด Spray ใช้พ่นไอน้ำเข้าไปในเตาเพื่อปรับ RH ให้สูงขึ้นในช่วงของการอบ
- 5) Hygrometer เป็นเครื่องมือที่ประกอบด้วย Dry bulb และ Wet bulb ใช้วัด RH ของอากาศ ควรจะติดตั้ง Hygrometer อย่างน้อย 1 ตัวต่อเตาอบ 1 ลูก เพื่อที่จะคอยบอกสถานะในห้อง อบให้ Operator ทราบ เพื่อ Operator จะได้ปรับ Damper และ Heater ให้ RH ในเตาให้เหมาะสมที่สุดในการอบ และหากสามารถติดตั้ง Hygrometer อีกตัวติดตั้งไว้ที่บริเวณ Exhaust air Outlet ด้วยจะดีมาก Hygrometer ตัวหลังจะเป็นตัวบอกว่า RH อากาศที่ออกมาจากปล่องเป็นเท่าไร? หาก RH ของ Exhaust air ดำเกินไป (<50%)

2990 ชั้นที่เหลือ ชั่งน้ำหนักก่อนอบแล้วนำชิ้นตัวอย่างทั้ง 10 ไปเข้าอบในเตาไฟฟ้าในข้อ 6 อบด้วย rate เร็วๆ เมื่อแห้งแล้วนำมาชั่งน้ำหนัก แล้วคำนวณหาความชื้นสมมุติว่าคำนวณได้ความชื้นเท่ากับ 30 % เนื่องจากถือว่าทั้ง 10 เป็นตัวแทนของชิ้นงานที่เหลือ จึงถือได้ว่าชิ้นงานที่เหลือ 2990 ชั้นมีความชื้นเริ่มต้นก่อนอบ (Initial Moisture Content) $MC_i = 30\%$

2.2) ถามตัวเองว่า ขณะที่อบชิ้นงานที่เหลือ 2990 ชั้น ต้องการเช็คความชื้นบ่อยแค่ไหน? สมมุติว่าจะเช็คความชื้น 3 ครั้ง คือเช็ค ณ ชั่วโมงที่ 5, 10 และ 15 ของการอบ

2.3) ถามตัวเองอีกว่าในการเช็คความชื้นแต่ละครั้งต้องการสุ่มตัวอย่างมาเช็คครั้งละกี่ชิ้น สมมุติว่าจะเช็คครั้งละ 3 ชิ้น จากข้อ 2.2 จะได้ว่าต้องใช้ชิ้นตัวอย่างในการเช็คความชื้นขณะอบ = $3 \times 3 = 9$ ชิ้น

2.4) ทำตามข้อ 2.3 คือสุ่มชิ้นงาน 9 ชิ้น (จากชิ้นงานที่เหลือ 2990 ชั้นที่จะนำเข้าอบ) มาทำเป็นชิ้นตัวอย่างที่จะใช้เช็คความชื้นขณะอบ mark เครื่องหมายบนชิ้นตัวอย่าง สมมุติว่าตัวอย่างชุดที่จะใช้ดูว่าหลังอบ 5 ชม. มีความชื้นเท่าไร mark ว่า "A" มี 3 ชิ้นก็ mark เป็น A1, A2 และ A3 ตามลำดับ ส่วนตัวอย่างชุดที่จะใช้ดูว่าหลังอบ 10 ชั่วโมง มีความชื้นเหลือเท่าไร mark ว่า B1, B2 และ B3 ชุดทำตัวอย่างชุดที่จะใช้ดูว่าหลังอบ 15 ชั่วโมง มีความชื้นเหลือเท่าไร mark ว่า C1, C2 และ C3 ตามลำดับ

2.5) นำตัวอย่างทั้ง 9 ชิ้นที่ mark เบลอร์แล้วไปชั่งน้ำหนักก่อนอบ (Wet weight) ไว้ สมมุติได้ดังนี้

Sample	A1	A2	A3	B1	B2	B3	C1	C2	C3
Wet Weight (WW) g at t = 0 hr	101	102	103	98	99	100	98	100	102

นำชิ้นงานทั้ง 2981 ชั้นที่เหลือและชิ้นตัวอย่างที่ mark แล้ว 9 ชิ้นเข้าอบ อย่าลืมวางชิ้นตัวอย่างทั้ง 9 ไว้ใกล้ๆ ช่องเก็บชิ้นตัวอย่างเพื่อจะเก็บออกมาง่ายๆ เมื่อถึงเวลาที่กำหนดไว้

2.6) คำนวณว่าเมื่ออบจนแห้งสนิทแล้ว (Bone dry weight ; DW) ชิ้นตัวอย่างทั้ง 9 จะมีน้ำหนักเท่าใด โดยวิธีการดังนี้

จากสูตรคำนวณความชื้น

$$\%MC = \frac{(WW - DW)}{DW} \times 100$$

ปรับสมการใหม่ได้ว่า

$$DW = \frac{100WW}{(100 + \%MC)}$$

จากข้อ 2.1 ถือว่าชิ้นตัวอย่างทั้ง 9 มีความชื้นเท่ากับ $MC_i = 30\%$ แทนค่า $\%MC$ ในสมการข้างบนด้วย $MC_i = 30\%$ และแทนค่า WW จาก 2.5) ลงไปในสมการคำนวณหา DW ของชิ้นตัวอย่างทั้ง 9 ที่ละตัวจะ DW ของชิ้นตัวอย่างทั้ง 9 ได้เท่ากับ

Sample	A1	A2	A3	B1	B2	B3	C1	C2	C3
Dry Weight (DW) g	77.69	78.46	79.23	75.38	76.15	76.92	75.38	76.92	78.46

2.7) เมื่ออบจนถึงเวลาที่กำหนด 5 ชั่วโมงนำชิ้นตัวอย่าง A1-A3 ออกมาชั่งน้ำหนัก สมมุติว่าได้ค่าดังตารางข้างล่าง แล้วคำนวณความชื้นโดยสมการ $\%MC$ ในข้อ 2.6 จะได้ว่า $\%MC$ ของ A1-A3 ดังนี้

Sample	A1	A2	A3
หลังจากอบแล้ว 5 ชม. WW g.	98	99	100
%MC หลังจากอบแล้ว 5 ชม.	26.14	26.18	26.21

นำค่า %MC ของทั้ง 3 มาเฉลี่ยกันจะได้ 26.18% เนื่องจากถือว่า A1-A3 เป็นเสมือนตัวแทนชิ้นงานที่เหลือทั้งหมดในเตาอบ จึงถือได้ว่าหลังจากอบ 5 ชม. ชิ้นงานในเตามีความชื้นเฉลี่ย 26.18 %

2.8) เมื่อถึงกำหนด 10 และ 15 ชั่วโมง ชิ้นตัวอย่างชุด B และ C ออกมาชั่งน้ำหนักแล้วคำนวณความชื้นเหมือนกับข้อ 2.7) เมื่อทราบความชื้นของชิ้นงานก็จะสามารถปรับ DB และ RH ให้เป็นไปตามที่ต้องการได้ และถ้าชิ้นงานมีความชื้นสุดท้ายเท่าที่ต้องการก็ Off ระบบ ปล่อยให้เตาเย็นแล้วก็ unload ของออกมาจากเตาได้

การบ้าน ก) จงคำนวณ %MC หลังอบ 10 ชั่วโมง ถ้ากำหนดให้ WW หลังอบ 10 ชั่วโมงของชิ้นตัวอย่างชุด B มีค่าดังต่อไปนี้

Sample	B1	B2	B3
หลังจากอบแล้ว 10 ชม. WW g.	90	91	92
%MC หลังจากอบแล้ว ชม.	19.40	19.50	19.60

ข) ถ้าต้องการอบให้ชิ้นงานที่อบมีความชื้นเหลือ 3.0% ถามว่าต้องอบจนชิ้นตัวอย่าง C1, C2 และ C3 มีน้ำหนักเหลือเท่าไร ?

ตอบ C1 = 77.64 g C2 = 79.23 g C3 = 80.81 g

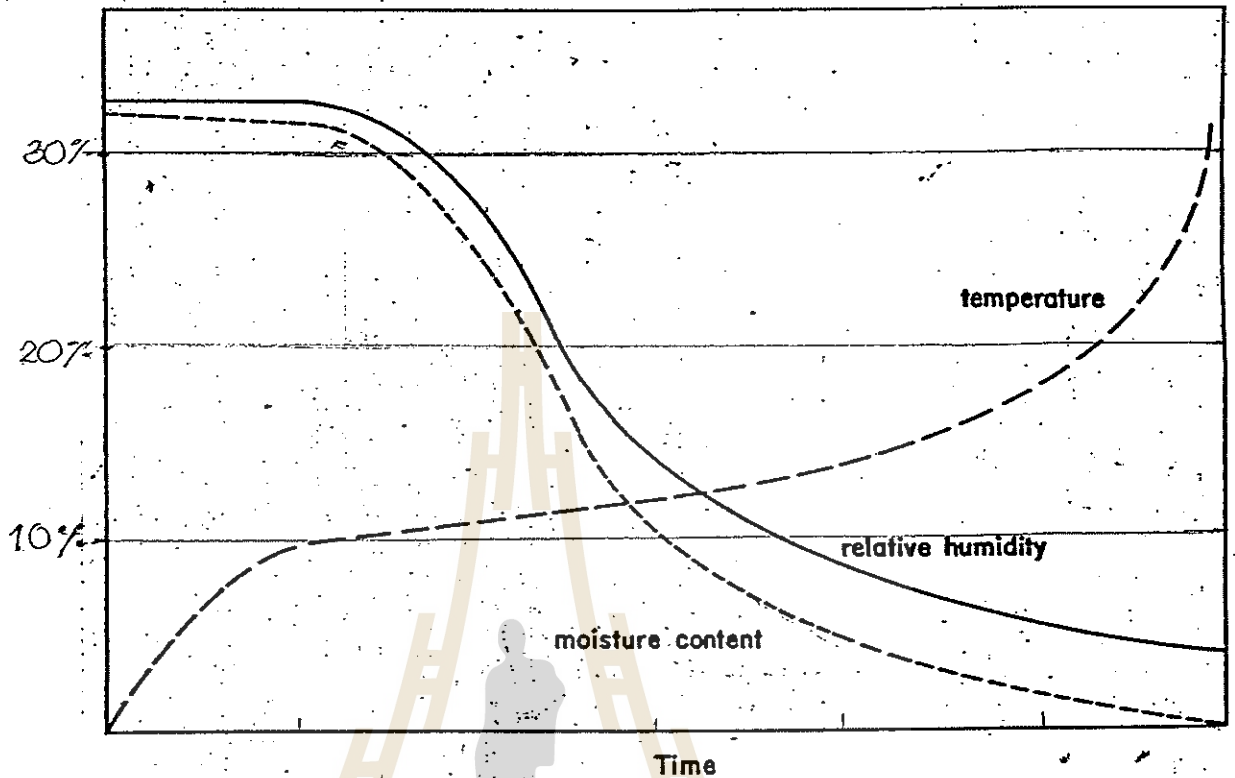
หมายเหตุ ควรรีบชั่งน้ำหนักชิ้นตัวอย่างที่ A1- C3 ทันทีที่นำออกมาจากเตา อย่าปล่อยให้ไว้นานๆ แล้วจึงชั่งน้ำหนัก จะได้ค่าที่ผิดพลาดมากเพราะความชื้นจะระเหยออกไปจากชิ้นงานขณะที่รออยู่ ดังนั้นหากทิ้งไว้นานๆ จะทำให้น้ำหนักที่ชั่งได้เบาลงไปมาก ความชื้นของชิ้นที่คำนวณได้ก็ผิดพลาดมากไปด้วย

The basic step in Periodic direr operation

เป็นที่ทราบกันแล้วว่ในผลิตภัณฑ์เซรามิกมีหลายชนิด การอบไล่น้ำแต่ละชนิดออกไปต้องใช้ความระมัดระวังไม่เหมือนกัน Dryer operator ที่ดีจะต้องคอยตรวจสอบความชื้นของชิ้นงานในเตาอบเป็นระยะๆ เพื่อจะได้มาปรับ Condition (DB, RH, Wind Velocity) ในเตาให้เหมาะสมที่สุดในการอบ ขณะนั้นๆ ไม่ใช่อบแบบคนซื้อตั้งอุณหภูมิ DB และคุม RH ให้คงที่ตั้งแต่เริ่มต้นจนถึงช่วงสุดท้ายของการอบ

ก่อนลงมืออบ Dryer operator ต้องตรวจสอบว่าชิ้นงานมีความชื้นเท่าไร? มี Shrinkage water มากน้อยเพียงใด? ถ้ามีมากก็จำเป็นที่จะต้องเริ่มอบโดยการ Condition ก่อน โดยการเพิ่ม DB และ RH พร้อมๆ กัน แล้วจึงค่อยๆ ลด RH แต่คง DB เอาไว้ ในระหว่างนี้ก็คอยตรวจสอบ %MC ของชิ้นงาน เมื่อเห็นว่าความชื้นออกไปมากพอสมควรแล้วจึงปรับค่า DB ขึ้น อุณหภูมิและ RH ที่ควรจะใช้ นั้นไม่แน่นอนตายตัวแต่จะขึ้นกับลักษณะและขนาดของชิ้นงานและสภาพเตาอบ ซึ่งแต่ละเตาอาจจะแตกต่างกันมากจึงไม่สามารถกำหนดให้เป็นค่าตายตัวลงไปได้ อย่างไรก็ตามเพื่อให้เห็นภาพพจน์ของการ Operate

เตาอบจริง ๆ จะขอยกตัวอย่าง Typical dryer operation ตามภาพที่ 4.6 พร้อมๆ กับอธิบาย step คร่าวๆ ของการ operate เตาอบแบบ Periodic ให้เห็นดังต่อไปนี้



ภาพที่ 4.6 Typical Drier Operation. (จาก Ref. 1 หน้า 76)

- 1) Load ชิ้นงานเข้าไปในเตาเผา
- 2) ปิดประตูเตาค่อยๆ เพิ่มอุณหภูมิในเตาจากอุณหภูมิห้องขึ้นไปอยู่ที่ 54 – 71 °C โดยที่ยังปิดปล่องหรือช่องระบายความชื้นเพื่อรักษาให้ RH ในเตาอยู่ที่ประมาณ 90 % จุดประสงค์ในช่วงนี้เพียงเพื่อเพิ่มอุณหภูมิเท่านั้น ไม่ต้องการให้ชิ้นงานสูญเสียความชื้น
- 3) ค่อยๆ เปิดปล่องระบายความชื้นในห้องอบให้ความชื้นลดลงช้าๆ ขณะเดียวกันก็จ่ายความร้อนเพิ่มเข้าไปในเตาเพื่อรักษาระดับ DB ให้คงที่อยู่เท่าเดิม ขั้นตอนนี้เป็นการไล่น้ำประเภท Shrinkage water โดยไม่ทำให้เกิด stress ในผลิตภัณฑ์ เมื่อพบว่าความชื้นของชิ้นงานลดลงช้ากว่าเดิมมาก (สังเกตว่าเส้น MC เริ่มลงมาถึงจุดโค้งที่สุดขาลงแล้ว แสดงว่า Shrinkage water หหมดไปแล้ว น้ำที่เหลือต่อไปนี้เป็นพวก Bound water ที่ถูกยึดไว้ระหว่าง particles หลุดออกไปได้ยาก ตอนนี้เป็นสัญญาณให้เพิ่ม DB ขึ้นไปได้ พร้อมกันนี้ให้รักษา RH ให้มีค่าต่ำเอาไว้ สังเกตว่าถึงแม้จะเพิ่ม DB ขึ้นและลด RH ลงแล้วแต่ Drying rate ก็ทำได้เพิ่มขึ้น ไม่กลับลดลง เสียด้วยซ้ำ
- 4) ถ้าไม่นำชิ้นงานที่อบเสร็จแล้วเข้าเตาเผาทันทีก็ไม่จำเป็นต้องอบจนชิ้นงานมี MC < 3–5% เพราะระหว่างที่รอเข้าเตาเผาอยู่ข้างนอก ชิ้นงานที่อบเสร็จแล้วจะดูดความชื้นจากบรรยากาศ

เข้าไปทำให้ตัวมันมีความชื้นกลับเป็น 3 – 5% ภายใน 2 – 3 วัน อนึ่งความชื้นที่ชิ้นงานสามารถดูดกลับเข้าไปจะมากหรือน้อย เร็วหรือช้าขึ้นกับธรรมชาติของ clay กรณีที่อบในเตาอุโมงค์ซึ่งปกติแล้วจะ feed รถบรรทุกชิ้นงานเข้าไปในเตาด้วย rate คงที่ อาจจะแทนค่าแกน X ในภาพที่ 4.6 ด้วยความยาวของตัวเตาก็ได้



บทที่ 5 Dryer Problems

Introduction

แบ่ง Dryer Problems ออกได้เป็น 6 ชนิด คือ 1) Crack 2) Checking 3) Warping 4) Slumping 5) Scumming 6) Low Strength

Crack is a linear defect opening appearing on the surface of ware and reaching at least one edge of the ware (คือตำหนิที่มีลักษณะเป็นเส้นค่อนข้างตรงปรากฏให้เห็นบนผิวของผลิตภัณฑ์ โดยทั่วไปจะยาวไปจนถึงขอบใดขอบหนึ่งของ ware)

Checking is a physical breakdown of the continuous structure of the ware but which cannot be classified as a crack. Checking occurs inside the ware as well as on the outside. (คือตำหนิที่มีลักษณะเป็นรอยแตกหรือรอยร้าวที่ไม่จัดว่าเป็น crack; Checking เกิดได้ทั้งภายในเนื้อและที่ผิวของ ware)

Warping is an undesirable distortion of the ware caused by a difference in shrinkage between two or more faces of a piece of ware (คือตำหนิที่มีลักษณะบิดเบี้ยวเกิดจากการหดตัวของส่วนต่างๆ ของ ware ไม่เท่ากัน)

Slumping is an undesirable distortion of ware caused by the presence of too much moisture in the load bearing portion of a piece of undried ware. (คือ ตำหนิที่มีลักษณะบิดเบี้ยวเกิดจากการยุบตัวของ ware ในส่วนที่มีน้ำหนักมากเนื่องจากมี moisture มากเกินไป)

Scumming is the deposition or development of a salt on the surface of ware during the drying operation (คือตำหนิที่มีลักษณะคล้ายๆ เกล็ดเกลือบนผิวของ ware)

Low Strength is an order of strength appreciable below what would be termed normal for the ware. (คือ การที่ ware มี strength ต่ำกว่าปกติ)

วิศวกรเซรามิกทุกคนต้องพร้อมที่จะเผชิญกับปัญหาเหล่านี้ เมื่อเกิดปัญหาคงต้องทำการศึกษาให้รู้ให้แน่ชัดว่าปัญหาคืออะไร? มีสาเหตุจากอะไร? วิศวกรที่ฉลาดจะเก็บข้อมูลการอบไว้แล้วตั้งแต่ว่ายังไม่เกิดปัญหา เช่นเก็บ Conditions และ Parameters ต่าง ๆ ที่เคยใช้ในการอบตามปกติ และควรเก็บข้อมูลของแผนกอื่นๆ ที่เกี่ยวข้องตั้งแต่เตรียมวัตถุดิบจนมาถึงเตาอบและต่อเนื่องไปถึงเผาเอาได้ด้วย เพื่อจะได้ทราบว่าปกติขณะยังไม่เกิดปัญหา Parameters และ Conditions ทุกอย่างเป็นอย่างไร? และเมื่อเกิดปัญหาขึ้นมาจะได้ไล่เช็คดูได้ง่ายว่ามี Conditions หรือ Parameters อะไรเปลี่ยนแปลงได้แก้ปัญหารวดเร็วขึ้น

เมื่อเกิดปัญหาก็เช็คดูที่แผนกเตาอบก่อน โดยประชุมพนักงานในแผนกเตาอบให้ช่วยกัน หากหาสาเหตุไม่พบก็อาจจะต้องไปเช็คที่แผนกอื่นตั้งแต่เตรียมวัตถุดิบ การชนัดวัตถุดิบที่ใช้ การบด (Crushing & grinding) การผสม (mixing) การหมัก (tempering) แล้วต่อไปถึงการขึ้นรูป (shaping & cutting) และการเผา (firing) รวมจนกระทั่งสิ่งแวดล้อมต่างๆ ที่เปลี่ยน เช่นอุณหภูมิ ความชื้นของอากาศ เป็นต้น

เป็นการยากที่จะพูดถึงปัญหา Drying ให้ cover ทุกๆ โรงงานได้หมด เพราะแต่ละโรงงานก็มีวิธีการผลิตไม่เหมือนกัน ในที่นี้จึงขอสรุปเป็น fact เกี่ยวกับการอบเซรามิก 36 ข้อ ให้เลือกนำไปประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาของแต่ละโรงงานเอาเอง ดังนี้ :-

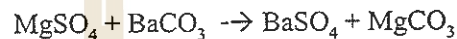
1. Drying ได้เริ่มเกิดขึ้น (โดยธรรมชาติ) ตั้งแต่เมื่อหยุคเดิมน้ำลงไปใน mix
2. น้ำส่วนใหญ่ (most water) ออกไปจาก ware โดยการ Evaporation ที่ surface; Rate ของการ remove น้ำออกจาก surface จะขึ้นกับอุณหภูมิ, ความชื้น, และกระแสอากาศ
3. น้ำภายในผิวของ ware ส่วนใหญ่เคลื่อนที่มาที่ผิวของ ware โดย capillary action
4. Drying shrinkage ส่วนใหญ่เกิดขึ้นในขณะที่ interior water เคลื่อนที่ไปยัง exterior โดย capillary action
5. ในช่วงเริ่มอบแรก ๆ (early stage of drying) ซึ่งน้ำกำลังเคลื่อนที่จาก interior ไป exterior โดย capillary movement และน้ำที่ surface กำลัง evaporate ออกไป ควรอย่างยิ่งที่จะอบ โดย uniform rate
6. อัตราเร็วของการเคลื่อนที่แบบ capillary movement ขึ้นกับ Density ของ ware และ Density ของ ware จะเปลี่ยนแปลงตามระยะเวลาของการอบ (เพราะว่าเกิด shrinkage และ loss water weight)
7. จากข้อ 6 จึงต้อง set rate การอบให้เหมาะสมตามความก้าวหน้าของการอบ
8. เมื่อ ware หยุค shrink ก็จะมีแข็ง (Rigid) และเปราะซึ่งง่ายต่อการเกิด crack หรือ checking
9. เมื่ออบผ่าน initial stage of drying แล้วชิ้นงานก็จะหยุค shrink อุณหภูมิของชิ้นงานจะเพิ่มขึ้น น้ำจะ evaporate ออกไปอีก ware ก็แข็ง
10. Clay เป็นวัตถุดิบที่มีผลต่อการอบแห้ง ware มากที่สุดในบรรดาส่วนผสมของเนื้อดินปั้นที่ใช้ทำ ware การเปลี่ยนแปลงชนิดและปริมาณ clay จะมีผลต่อการ drying อย่างเห็นได้ชัด
11. เกลือละลายน้ำ (Soluble salt) ที่อยู่ในเนื้อดินปั้นจะเคลื่อนที่ออกจาก interior ของ ware โดยละลายมากับน้ำที่ออกมาโดย capillary action มาตกตะกอน deposit ที่ผิวของ ware
12. โดยมากแล้วปัญหา Warping ผิวส่วนของ ware เกิดจากอบเร็วเกินไป (Too rapid drying)
13. การจัดเรียงผลิตภัณฑ์เข้าเตาอบไม่ดี คือเรียงแล้วเกิด stress ที่ตัวชิ้นงาน จะทำให้ชิ้นงานเกิด warp หรือ crack ได้ง่าย
14. Stress ที่อยู่ในตัวชิ้นงานก่อนอบ (ไม่ว่าจะเกิดจากการขึ้นรูปหรือการจัดเรียง) จะทำให้เกิด defect หรือ ปัญหาต่างๆ ในการอบ
15. ความชื้นที่สะสมอยู่ใกล้ๆ บริเวณที่รับ load ของ ware เป็นสาเหตุทำให้เกิด slumping
16. การอบให้ ware มีความชื้นเหลือ 0% ทำได้ยาก เนื่องจากแรงยึดเหนี่ยวระหว่าง Clay กับ H₂O ที่ % ใดๆ สูงมาก
17. การอบ ware ให้แห้งจะทำให้ยากขึ้นมาก ถ้า clay particles บนผิวของ ware จัดเรียงตัวแนวนอนราบอย่างต่อเนื่องจนเป็นลักษณะคล้ายๆ กับเคลือบบนผิวของ ware
18. Internal defect เช่น lamination ทำให้เกิดปัญหาในการอบได้

19. Physical properties ของ ware ที่ dryer operator จะต้องสนใจขณะอบคือ
1. % Moisture content ขณะใดๆ และ Critical moisture content ของ ware
 2. Amount of shrinkage (ปริมาณการหดตัว)
 3. Variation of shrinkage (ความแตกต่างของ shrinkage ที่ส่วนต่างๆ ของ ware)
20. ความแตกต่างของ Shrinkage ที่คนละส่วนของ ware ขึ้นเดียวกันจะทำให้เกิด warping , cracking, checking หรือ low strength ได้
21. เมื่อทิ้ง ware ให้ออบแห้งแล้วไว้ในบริเวณที่มีความชื้นสูง ware ก็จะสามารถดูดความชื้นจากอากาศกลับเข้ามาที่ ware ได้ ซึ่งปรากฏการณ์นี้จะทำให้ clay ขยายตัวแล้วเกิด checking ได้
22. การเปลี่ยนแปลง grain size สัณฐานของ non-plastic หรือ character อื่นๆ ของ raw materials จะมีผลต่อการอบแห้ง ware
23. ผลิตภัณฑ์ที่ขึ้นรูป (fabrication) ด้วยวิธี Dry press, HIP เสริมใหม่ๆ จะมีอุณหภูมิสูงมาก อาจจะมีผลต่อการอบแห้งได้
24. ผลิตภัณฑ์ที่ขึ้นรูปเสริมใหม่ๆ กับผลิตภัณฑ์ที่ขึ้นรูปเสร็จที่ตั้งทิ้งไว้ภายนอกหรือเข้าอบหลายชั่วโมงจะมีความชื้นไม่เท่ากัน ดังนั้นจึงจะมี drying character ไม่เหมือนกัน การอบผลิตภัณฑ์พวกนี้ให้ตั้ง parameters และ set conditions ตามผลิตภัณฑ์ที่มีความชื้นมากกว่าเป็นเกณฑ์
25. การอบอย่างช้าๆ ไม่เร่งรีบจะทำให้เกิด defect น้อยกว่าการอบเร็ว (เทวดาอบดีกว่ามนุษย์อบ)
26. อุณหภูมิและความชื้นของอากาศในบริเวณโรงงานมีผลต่อการอบแห้ง
27. ความชื้นสามารถ deposit ที่ผิวของ ware ที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า dew point ได้ ซึ่งอาจจะทำให้ ware ขยายตัวแล้วเกิด Crack หรือ Check ได้
28. การใช้ High pressure หรือการใช้ส่วนผสมที่มี Plasticity สูงเกินไปในการขึ้นรูปแบบ dry press อาจจะเป็นสาเหตุให้เกิด checking ได้
29. การหดตัวของ Clay ที่อยู่รอบๆ non-plastic particle จะทำให้เกิด checking ได้
30. Body ของ ware ที่มีรูพรุนมากเกินไป (too open body) จะทำให้น้ำ drain ไปที่ส่วนล่างของ ware ซึ่งจะทำให้ ware มีโอกาสเกิด Slumping ได้
31. การจัดเรียง ware เย็นๆ ลงบนรถบรรทุกชิ้นงานเข้าเตาอบที่ยังร้อนๆ อยู่ อาจจะทำให้เกิดปัญหาได้
32. การอบจะทำให้ ware เปลี่ยนจาก plastic mass เป็น rigid mass
33. Drying shrinkage เกิดจากการเคลื่อนที่ของ particles เข้าหากัน และ shrinkage นี้เองเป็นสาเหตุหลักของ Cracking, Checking, Warping และ Low strength
34. แรงดึงดูดที่ Particles ของ Clay ดูดยึดน้ำเอาไว้จะมีค่ามากยิ่งขึ้น เมื่อปริมาณน้ำที่เหลือใน mass น้อยลง
35. ไม่ควรวางน้ำหนักใดๆ กดบน ware ที่อยู่ระหว่างการอบ (เพราะ ware ยังไม่แข็งแรงพอที่จะรับแรงกดใดๆ ได้)

36. การอบด้วย rate ที่เร็วเกินไปจะทำให้ น้ำออกไปจากผิวมากกว่าตรงกลาง ware และเมื่อน้ำออกไปจากผิวมากพอที่จะทำให้ผิวเกิด shrinkage ทำให้รูเปิดที่ผิว ware ปิดตัวลงและอุดตันทางเดินน้ำที่จะออกมาจากตรงกลาง ware ตอนแรกๆ พอทนได้ก็จะยังไม่เกิดอะไรขึ้น แต่เมื่อปล่อยให้ไว้นานและอุณหภูมิสูงขึ้นมากพอจนน้ำที่ตรงกลาง ware เดือดก็จะขยายตัวมากทำให้ ware ระเบิดออกทำให้เกิดความเสียหายในเตาได้

Tricks ในการอบจากอาจารย์ ดร.วีระยุทธ

1. ทางแก้ Scumming ที่เกิดจาก $MgSO_4$ ทำได้โดยการเติม $BaCO_3$ ลงไป โดยที่ $BaCO_3$ จะไปทำปฏิกิริยากับ $MgSO_4$ ดังนี้



เนื่องจาก products ทั้ง 2 ตัวไม่ละลายน้ำ จึงไม่เกาะติดกับน้ำออกมาที่ผิว ware ทำให้ปัญหา Scumming หดไป

2. ในบางกรณี (กรณีพิเศษจริงๆ) ที่ต้องอบผลิตภัณฑ์บางชนิดที่อบแห้งยากๆ อาจจะต้องเติม Drying Aids ลงไปช่วย ที่มีการใช้กันเช่น a) Ammonium Carbonate $(NH_4)_2CO_3 \cdot H_2O$; b) Ammonium Bicarbonate NH_4HCO_3 สารประกอบพวกนี้จะ decompose ที่อุณหภูมิต่ำๆ { a). ที่ $58^\circ C$ b). ที่ $40-80^\circ C$ แล้วหลุดออกไปจาก body ของ ware ทำให้ ware มีความพรุนตัว น้ำใน ware จึงระเหยออกไปได้ง่าย แต่จะใช้สารพวกนี้ได้ในปริมาณไม่มาก เพราะจะระเหยเป็นไอมีกลิ่นเป็น Pollution ต่อสิ่งแวดล้อมได้

Assignment พิเศษ

ให้อ่านบทความเรื่อง Operating the Dryer เขียนโดย G. A. Kirkendale คัดจาก Ref 1

OPERATING THE DRYER

G. A. Kirkendale

The drying of ceramic ware is not an operation that can stand by itself in the manufacturing process. Successful and economical drying is dependent upon each preceding operation from mining of raw material to the setting of the dryer car. For this reason, if for no other, a well defined and rigidly adhered to quality control program is invaluable.

When trouble develops in the dryer or drying operation the operator is faced with one of the most complex problems that a factory can have. Solving this problem can be immeasurably easier for him if he has access to reliable quality control records. These will enable him to check all processes up to the dryer for deviations from the acceptable normal.

To solve a problem involving defective ware coming from the dryer the operator must be familiar with all the possible factors that may contribute to the defect that is occurring in the ware. These may be categorized in two general classes: (1) changes in the body composition and (2) improper dryer operation.

Changes may occur in the composition of the body either intentionally or unintentionally. Deliberate changes in body composition should always be tested out in the laboratory and pilot plant so that the dryer operator can be furnished with a data sheet that will permit him to adjust his dryer controls to meet the conditions of the new body.

Sometimes, however, body changes occur unintentionally and without the knowledge of the factory superintendent. A brick company, for example, may encounter subtle changes in the nature of the clay at different locations in the pit. These changes may be undetected by the naked eye but will be very apparent to the sensitive treatment in the dryer. Changing one brand of feldspar for another, or one type of kaolin or ball clay for another, can result in changes in drying behavior and cause trouble.

Let us examine in detail some of the changes that might occur in raw materials and see what effect these changes have on the drying operation.

1. Changes in the ratio of plastic to non-plastic material. An increase in non-plastic material may weaken the body and reduce shrinkage. This can make the body either more difficult or easier to dry. A reduction in the tendency of the body to shrink could reduce its tendency to crack on drying. On the other hand a weaker body may crack more easily.
2. Changes in the grain size distribution or the ratio of small to intermediate to large grain sizes. It has been previously pointed out that various sizes of the non-plastic grains in a body along with their quantity ratios has an important effect on the porosity, pore sizes and capillary pattern of the body structure. This body structure, on the other hand, will make the removal of water either easy or very difficult. If many of the pores are closed and capillary passages are devious then drying can be accomplished only with great care and over a prolonged period of time.
3. A variation in the minerals present in the clay. Clay minerals react differently in the presence of water. Some are not very easily wet while others soak up water like a sponge. Bentonitic clays and montmorillonites will readily take on water and will swell up often several times their original size. Some clay minerals adsorb water by chemically attracting a thin film layer to their surfaces, while other minerals are platy, like a stack of cards, and water penetrates between the plates. It is apparent, therefore, that any change in the nature of the clay minerals that make up the ceramic body can cause a different drying behavior which may lead to trouble.
4. Soluble salts. If abnormal amounts of soluble salts suddenly appear in the raw clay trouble may be encountered in the dryer. Fortunately the presence of soluble salts is easily detected in the form of a white scum on the face of bricks or other structural clay products after they come from the dryer. On white clay bodies the scum cannot be so easily seen but, on the other hand, it is not as frequently encountered in these bodies. These salts, in solution, migrate with the water to the surface of the ware and as the water evaporates the salts are precipitated on the surface where they can clog the pores and retard the orderly flow of water from the interior to the surface.

Changes in the nature of the raw material can and often do occur after the clay has left the pit. For example, changes in grain sizes and ratios discussed above in (2) may be caused by improper grinding, worn mullers, hammers, rolls and other equipment. Careless operation of ball mills will produce a wide variation in grain sizes from day to day. Screening is also a very important operation. Worn screens permit

large particles to pass through and become a part of the body composition. (Blinded and plugged screens cause a high circulating load. Unnecessary material returns to the grinder several times and there is a tendency for the final material to contain too high a percentage of fines. A consistency in the rate of feed of material to the screen is highly desirable. A heavy rate of feed results in finer particles while a light feed will produce more coarser particles.

If all of the above factors have been checked out and none have been found responsible for the dryer trouble then the operator must look to the dryer operation itself as a possible source of trouble. Here there are many variables that can change the effectiveness and economy of drying. It is imperative that these variables be kept under strict control at all times. To do this the operator must rely on instruments, check points and frequent recordings that will inform him of any changes in any of the following conditions.

1. Volume of air entering the dryer. Since air is used both for carrying heat to the ware and removing moisture from the dryer it is important that the correct calculated volume be maintained within reasonable limits.
2. Temperature of the air entering the dryer. Drying depends upon heat. Heat, as previously stated, is transferred through the dryer by air. If the air entering the dryer is below the required temperature then the drying will be either markedly slowed down or will be incomplete. If the air is above the required temperature there will be a waste of heat and the cost of drying will be high. Also too high a temperature can result in too rapid drying which may cause cracking, warping, and other defects in the ware.
3. Relative humidity of the air entering the dryer. This is a very important factor in drying. The relative humidity of the air determines how much moisture the air can pick up from the ware and carry out of the dryer. The relative humidity of the air can be regulated by adding moisture if necessary. Most dryers are designed so this will not have to be done but different relative humidities are necessary at different stages of drying or at different locations in the dryer in most cases. Therefore, it is most important that strict control be maintained at all times over the relative humidity of the drying air. Remember that air with a high relative humidity will do little or no drying while air with a low relative humidity may dry so rapidly that the ware will crack and

warp excessively. Bear in mind also that the relative humidity of the air will vary with its temperature. For any given moisture content the lower the temperature the higher will be the relative humidity. Also for any given moisture content, and as temperature is lowered, there will be a temperature at which the dew point will be reached and the relative humidity will be 100%. At this point there is danger of water entering the ware instead of being removed from it. So it is apparent that condition 2, temperature, and condition 3, humidity, are closely related and that these properties of the air entering the dryer constitute an important quality control point.

4. Velocity of the air travelling through the dryer. Once the proper velocity of the air travelling through and around the ware in the dryer has been established it should be carefully maintained. Too slow a velocity will greatly slow up the drying process and too high a velocity will be likely to damage the ware and will certainly increase the cost and lower the efficiency of the drying operation.
5. Temperature of the air leaving the dryer. So far we have been concerned with conditions at the entrance to the dryer. It is equally important to place instruments at the exit end of the dryer to tell us what is going on there.
6. Relative humidity of the air leaving the dryer. Since we have agreed that relative humidity and temperature are closely related we will discuss them together. The ideal situation would be to have the air leaving the dryer at 100% relative humidity and at as low a temperature as would be necessary for a given volume of air to carry away all of the moisture removed from the ware. However these conditions are not economically attainable and so we must arrive at a temperature and relative humidity that will provide the most economical operation in terms of drying time and volume of ware through the dryer. Once these conditions have been established any change will result in insufficient drying or costly operation. If the air leaving the dryer has a higher relative humidity than it should have then there is a possibility that the ware is not well dried. If the relative humidity is lower than it should be it would indicate that an excess volume of air is being used and heat is being wasted.
7. Relative humidity of the outside atmosphere. If atmospheric air is heated and introduced into the dryer it will carry moisture with it. The amount of moisture it will carry will depend upon its relative humidity and its temperature. The day to day changes in relative humidity of the outside atmosphere should be noted and compensated for by changes in volume of air fed to the dryer or by changes in air temperature.

8. Volume of ware entering the dryer. It is obvious that if 25% more ware than usual is placed on a dryer car then 25% more moisture must be removed. But unless dryer conditions are altered to take care of this increase in moisture the ware will not be properly dried. It is not wise to attempt to "cram" heavier loads through the dryer without first determining what changes must be made in the volume of air required to do the job.
9. Temperature of the ware entering the dryer. When clayware enters a dryer, particularly thick pieces, it should first be heated to an almost even temperature throughout before any water is removed. This, you have been told, is accomplished by means of using high humidity drying air at the beginning. The temperature at which the ware enters the dryer will influence the amount of preliminary heating required. Therefore to maintain balanced conditions in the dryer the temperature of the entering ware should vary as little as possible from day to day.
10. Moisture content of the ware entering the dryer. Although this should normally not change from day to day it sometimes does. The pug mill operator often finds that he can control the flow of clay through the die by adjusting the water for plasticity. This can cause trouble in the dryer. If the clay body being dried contains more than the normal amount of water the whole balance of the dryer is upset and defective ware may result. A change in the clay in the pit or a change in a whiteware body composition may demand an increase in water for plasticity. If this happens the dryer operator should be notified well in advance so that he can compensate for the extra water by adjusting his dryer controls.
11. The setting pattern of the ware on the dryer car. If for any reason the setting pattern of the ware is changed, made either more open or more closed, the dryer conditions may have to be changed also. It is obvious that a change in setting pattern can increase or decrease the weight of ware on a car and this means either more water or less water to be removed. There is another factor, also, involved in a change of setting pattern. This is the ease with which the drying air can come in contact with all parts of the ware. An open pattern permits more contact between the surface areas of the ware and the drying air, and a closed pattern permits less. The setting pattern should not be changed without recognizing that this will upset the balance of the dryer.

12. The velocity of travel of the ware through the dryer. The rate of travel of ware through the dryer is tied closely to all other factors involved in drying. Increasing the capacity of the dryer by increasing the rate of travel of the cars should be approached carefully and experimentally. If this can be done without wet or damaged ware coming from the dryer, well and good, but it is not wise to operate a dryer with little or no margin between damaged ware and a trouble free operation.

A word of caution should be injected here for those factories using waste heat, from kilns or other types of furnaces, in their dryers. Waste heat can introduce into the dryer products of combustion, in the form of harmful gases. Sulphur gases in particular, are responsible for the formation of scum on the dried ware. If hot air is drawn directly from the kiln and fed to the dryer it should be analyzed frequently for sulphur or other harmful gases. It is much safer to use a heat exchanger whereby the heat in the kiln gases is transferred to clean air before it enters the dryer.

These then are the check points that a dryer operator must be familiar with. When trouble starts an experienced dryer man will instinctively know where to start looking for the source. An inexperienced dryer operator, and sometimes also an experienced one, will simply have to check out individually, one at a time, the possible sources of trouble that have been enumerated above. A complete record under which the dryer operates successfully will be of invaluable assistance to him.

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทที่ 6 Special Drying Techniques

Introduction

ในบทนี้จะกล่าวถึงเทคนิคการอบแบบใหม่ๆ ซึ่งได้ถูกพัฒนาขึ้นมาและเริ่มมีการนำมาใช้ในอุตสาหกรรมเซรามิกบางประเภทแล้ว ซึ่งเป็นไปได้ว่าในอนาคตอาจจะใช้กันอย่างแพร่หลายขึ้นทดแทนเตาอบแบบ Conventional ที่ใช้กันเป็นส่วนมากในปัจจุบัน

แบ่งเทคนิคการอบแบบใหม่ๆ ที่สำคัญออกเป็น 3 เทคนิคคือ

- I) Airless Drying
- II) Microwave and Dielectric Drying
- II) Infrared Drying

I) Airless Drying (จาก Ref 4 เขียนโดย Thomas และ Bill Aston)

ในเตาอบระบบ Conventional drying ช่วง Initial stage จะต้องใช้ High RH, Low DB เพื่อให้ความชื้นระเหยออกไปอย่างช้าๆ โดยปกติแล้วจะเริ่มอบที่อุณหภูมิไม่เกิน 60°C (140°F) การใช้อุณหภูมิต่ำๆ เช่นนี้ทำให้ความร้อนซึมจากผิวเข้าไปใน interior ของชิ้นงานได้อย่างช้าๆ จึงต้องใช้เวลานานมากกว่าที่ความร้อนจะเข้าไปใน interior มากพอจนทำให้น้ำที่ interior ร้อนจนระเหยออกไปได้ และเมื่อน้ำดังกล่าวระเหยแล้วก็ยังต้องรออากาศมาพัดพาให้มันหลุดออกไปจาก pore อีก เพราะฉะนั้นอาจจะสรุปลักษณะประจำตัว (Character) ของการอบแบบ Conventional ว่า **High RH, Low dryer Temperature** และ **Evaporation fairly even** นอกจากนี้ในระหว่างการอบยังจะ feed อากาศจำนวนมากเข้าไปในเตาเพื่อดูดซับเอาความชื้นในเตาออกไป ซึ่งส่งผลให้ต้องระบายอากาศในปริมาณเท่ากันออกไปนอกเตา อากาศที่ถูกระบายออกไปนอกเตาจะพาความร้อนออกไปด้วย ดังนั้นจึงเป็นการสูญเสียพลังงานเป็นจำนวนมากและถือว่าการอบแบบนี้ **Substantial Energy Input** เพราะต้อง feed พลังงานเข้าไปมาก

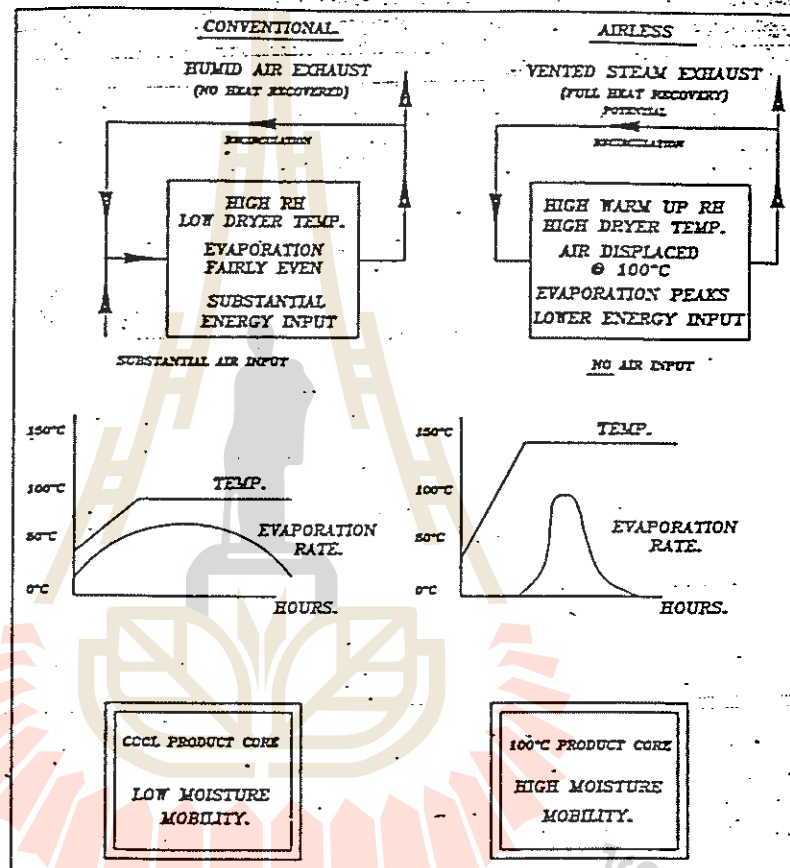
ส่วนกรณี Airless drying เขาจะ heat เตาชั้นไปที่อุณหภูมิสูงๆ ($\cong 130^{\circ}\text{C}$) อย่างรวดเร็วขณะที่ยังคงควบคุม RH ให้สูงๆ เอาไว้เพื่อให้ความชื้นออกไปในอัตราที่เหมาะสม และที่สำคัญคือจะควบคุมไม่ให้อากาศเข้า-ออกเตา การใช้อุณหภูมิสูงๆ เช่นนี้ทำให้ Surface Tension และ Viscosity ของน้ำลดลงมาก ความชื้นที่อยู่ใน interior ของชิ้นงานจึงระเหยออกไปจากชิ้นงานได้รวดเร็วพอๆ กับความชื้นที่ผิวด้วยเหตุนี้จึงไม่ทำให้เกิด Stress และ Crack และชิ้นงานเองก็หดตัวลงไปเรื่อยๆ จน shrink water หมดไปก็จะหยุดหด ณ จุดนี้ชิ้นงานซึ่งมีอุณหภูมิสูงประมาณ 100°C น้ำที่เหลือในชิ้นงานจึงยังระเหยออกไปจากชิ้นงานได้อย่างรวดเร็ว เพราะการที่น้ำ (liquid) กลายเป็นไอ (vapor) จะมีปริมาตรเพิ่มขึ้นถึง 1670 เท่า ไอน้ำเหล่านี้จะออกไปตาม Pore ที่เกิดขึ้นในช่วงต้นๆ ของการอบ ดังนั้นชิ้นงาน จึงไม่ทำให้เกิด Crack

อาจจะบรรยายลักษณะการอบแบบ Airless ได้ว่า **High Warm Up RH, High dryer Temp**, (คือใช้ DB ประมาณ 130°C เพื่อให้ชิ้นงานมีอุณหภูมิ 100°C), **Air displaced @ 100°C** , **Evaporation Peak** (คือน้ำกลายเป็นไอได้อย่างเต็มที่) และ **Lower Energy Input** (เพราะแทบจะไม่มี การ feed อากาศจากภายนอกเข้าไปและปล่อยอากาศจากภายในออกมาเลย)

ภาพที่ 6.1 แสดง Character ของ Conventional dryer เทียบกับของ Airless dryer ที่กล่าวมาแล้ว

ไว้ในกรอบสี่เหลี่ยม เหนือกรอบสี่เหลี่ยมขึ้นมาเป็นการเปรียบเทียบระบบ Exhaust ว่ากรณี Conventional dryer จะเป็น Humid Air Exhaust แต่ Airless dryer เป็น Vented Steam Exhaust ; กรณี Airless dryer แทบจะไม่มี การ Exhaust เลย ถ้า Exhaust ก็ Exhaust ออกมาในรูป steam เพราะใช้ อุณหภูมิสูงมากจนน้ำ เป็นไอและระบบ Airless จะ Full heat recovery ด้วยเพราะเป็นระบบ No air input

ได้กรอบสี่เหลี่ยมลงไปเป็นกราฟแสดง Temp และ Evaporation rate ของ Conventional dryer และ Airless dryer จากกราฟจะเห็นว่า Airless dryer ใช้ อุณหภูมิสูงกว่าและ Evaporation rate ก็สูงกว่า แต่จะใช้เวลาอบน้อยกว่า



ภาพที่ 6.1 Comparison of Conventional and Airless Drying. (จาก Ref. 4 หน้า 43)

มีการทดลองนำระบบอบนี้ไปอบสุกภัณฑ์, อิฐ, อิฐทนไฟ ฯลฯ พบว่าสามารถประหยัดเวลาในการอบได้ถึง 80 % ทั้งยังประหยัดพลังงานในการอบด้วย หัวใจของการประหยัดพลังงานของเตาอบระบบนี้อยู่ที่ (1) การไม่ feed อากาศใหม่เข้าไป แต่จะใช้อากาศเก่าที่อยู่ในเตาหมุนเวียนกลับมาใช้ อาศัยหลักที่ว่าที่อุณหภูมิสูงอากาศสามารถอุ้มไอน้ำได้มากกว่าอุณหภูมิต่ำ (2) การใช้อุณหภูมิสูง ซึ่งเป็นผลให้น้ำระเหยได้เร็วทำให้เตาอบชนิดนี้สามารถอบได้เร็วมาก

เตาอบชนิดนี้มีข้อเสียดตรงที่จะต้องทำเป็นระบบ Batch Process การทำเป็นระบบ Continuous จะมีปัญหาตรงที่ต้อง feed ชิ้นงานที่อุณหภูมิต่ำเข้าไปในเตาที่อุณหภูมิสูงและชื้นอย่างทันทีทันใด ชิ้นงานที่ feed เข้าไปจะมีอุณหภูมิต่ำกว่า Dew point temp ในเตา จึงจะเกิดปัญหาไอน้ำควบแน่นที่ผิวชิ้นงานได้

Airless Dryer เตาอบชนิด Airless มีความพิเศษกว่าเตาอบแบบทั่วไปหลายประการคือ

1) เตาแบบ Airless จะต้องมีผนังและประตูเตาที่ seal สนิท ไม่มีรอยร้าวปล่อยให้อากาศถ่ายเทเข้า-ออกได้ (completely airtight inner shell)

2) เตาชนิดนี้ต้องมี Heater ที่มีประสิทธิภาพสูงสามารถ heat อากาศขึ้นไปรวดเร็วพอที่จะให้ความร้อนในเตาไม่เป็นอันตรายต่อชิ้นงานได้ กล่าวคือเมื่อชิ้นงานคายความร้อนออกมาเรื่อยๆ ถ้า heat อากาศในเตาให้ร้อนขึ้นไปไม่ทันอากาศก็จะอุ้มน้ำที่ออกมาจากชิ้นงานไม่ไหว น้ำก็จะกลั่นตัวเป็นหยดน้ำเกาะที่ผิวชิ้นงานทำให้ชิ้นงานเสียหายได้ เพราะฉะนั้นต้องมี heater ที่ดีพอที่จะ heat อากาศขึ้นไปและรักษาอุณหภูมิสูงๆ ได้ตามต้องการ

3) เนื่องจากน้ำระเหยออกจากชิ้นงานได้รวดเร็วมากจึงต้องมีระบบพัดลม (Blower) ที่มีประสิทธิภาพสูงพอที่จะหมุนเวียนอากาศร้อนจาก Heater ไปสู่ผลิตภัณฑ์และหมุนเวียนเอาไอน้ำที่ระเหยจากผิวผลิตภัณฑ์ออกไปได้ทัน

4) ชุด Seal ต่างๆ พัดลม และอุปกรณ์ต่างๆ ต้องทนอุณหภูมิสูงกว่า 150 °C ได้

5) มีฉนวนความร้อนที่ดีพอเพื่อจะได้ไม่สูญเสียความร้อนออกไปทางผนัง ประตูและหลังคาเตา

6) มีระบบ Steam vent ระบายไอน้ำออกจากเตา เมื่อต้องการลด RH และ DB ในเตา

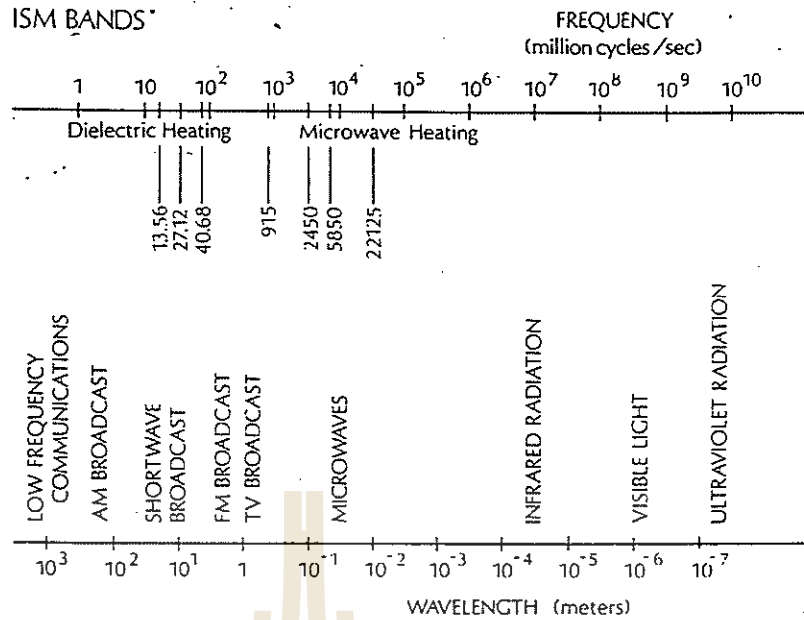
นอกจากประหยัดพลังงานและเวลาแล้วปรากฏว่าระบบ Airless ยังช่วยลดค่าใช้จ่ายในการระบาย Volatile Materials ที่เติมลงไปช่วยในการผลิตด้วย เช่น ในอุตสาหกรรมทำวัสดุขัดถู (Abrasive sector) ซึ่งมักจะผสม particles ของ Naphthalene ลงไปใน Slurry ที่จะนำไป cast เป็น grinding wheel (เพื่อเพิ่ม porosity) และเมื่อ cast เสร็จแล้วจะต้องกำจัด Naphthalene ที่ใส่ลงไปโดยนำแผ่น grinding wheel ไปทำ Dry & Steam treatment ก่อนเผาใน Kiln ซึ่งต้องใช้ค่าแรงงานสูงมากในการ treatment dryer และ kiln เพื่อป้องกันไม่ให้ไอรระเหยของ Naphthalene หลุดออกไปสู่อากาศแวดล้อม แต่ปรากฏว่า Airless Dryer สามารถไล่ Naphthalene ออกจาก wheel ได้มากกว่าวิธี dryer & steam treatment เสียอีก ปัจจุบันนี้โรงงานที่ต้องเติมพวก Volatile material ลงไปในการผลิตก็จึงสนใจ Airless dryer กันมากขึ้น

โรงงานผลิตภัณฑ์อื่นๆ ก็เช่นกัน ขณะนี้บริษัทผู้ผลิตเตาอบระบบนี้อ้างว่าได้รับคำสั่งซื้อจากโรงงานเซรามิกทั้งใน USA และ UK จำนวนมาก สั่งซื้อเตาอบระบบนี้เพื่อนำไปอบอิฐ กระเบื้อง สุขภัณฑ์ และอื่นๆ

II) Microwave and Dielectric drying (จาก Ref 6 บทที่ 11 เขียน โดย Robert F. Schiffmann)

1. Background

Dielectric heating หมายถึง การอบด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความถี่ในช่วง 1-300 MHz ซึ่งยังแบ่งย่อยต่อไปอีกได้เป็น 2 กลุ่ม คือพวก HF ซึ่งมีความถี่ในช่วง 3-30 MHz กับ พวก VHF ที่มีความถี่ในช่วง 30-300 MHz จากภาพที่ 6.2 จะเห็นว่าคลื่นชนิดนี้มีความถี่ครอบคลุมไปถึงคลื่นวิทยุด้วย อย่างไรก็ตามคลื่น Dielectric heating ที่นำมาใช้ในการอบชิ้นงาน มีความถี่ในช่วง 1-100 MHz ซึ่งมีความยาวคลื่นในช่วง 10-1000 เมตร



ภาพที่ 6.2 The electromagnetic spectrum. (จาก Ref. 6 หน้า 347)

Microwave heating เป็นการอบโดยใช้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความถี่ในช่วง 300-300,000 MHz ซึ่งมีความยาวคลื่น 1 ม.ม. - 1 เมตร ในทางปฏิบัติจะมีข้อกำหนดระหว่างประเทศ และภายในประเทศว่า จะอนุญาตให้ผู้ใช้คลื่นที่มีความถี่เท่าใดได้ ซึ่งแต่ละประเทศอาจจะกำหนดไว้แตกต่างกัน โดยทั่วไปแล้ว มักจะนิยมให้ใช้คลื่น Dielectric & Microwave ที่มีความถี่ต่อไปนี้ในการ heating

- 1) Dielectric heating ใช้ที่ความถี่ = 13.56, 27.12 และ 40.68 MHz
- 2) Microwave heating ใช้ที่ความถี่ = 915, 2450 และ 5850 MHz

ถึงแม้ว่าหลักพื้นฐานของ Dielectric กับ Microwave heating เหมือนกันแต่วิธีการ Generate wave และ Equipments แตกต่างกัน ซึ่งจะได้กล่าวถึงในรายละเอียดต่อไป

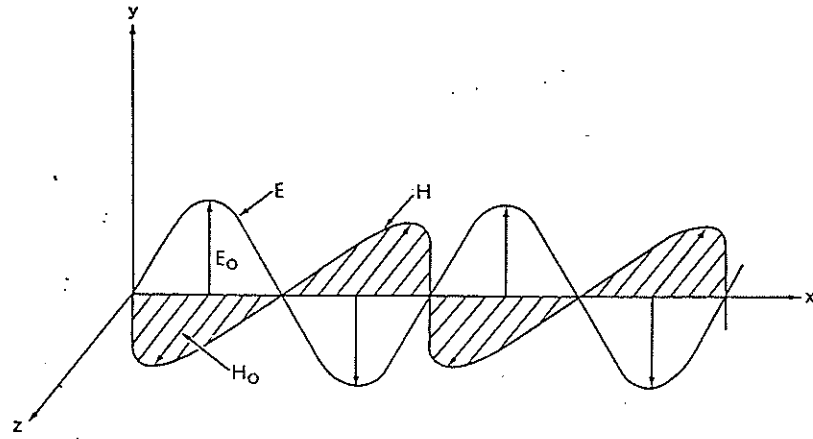
2. Fundamentals of Microwave and Dielectric Heating

2.1 Electromagnetic Waves ทุกวันนี้รอบๆ ตัวของเราเต็มไปด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า เช่น แสง, ริงดี X, TV, AM or FM radiowave, Ultraviolet, Infrared และ Microwave รวมกระทั่งตัวคนเราเมื่อเคลื่อนที่ก็เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าอย่างหนึ่ง แบ่งคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าออกเป็นชนิดตามย่านความถี่ของมันดังในภาพที่ 6.2 และอาจจะเขียนภาพแสดงลักษณะคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าด้วยภาพที่ 6.3 จากภาพจะเห็นว่าคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นคลื่นเกิดจากการผสมกันของคลื่น 2 ชนิดคือ คลื่นแม่เหล็ก (H) กับคลื่นไฟฟ้า (E) สังเกตว่าทั้ง E และ H มีการเคลื่อนที่ในทิศทางที่ตั้งฉากกับทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ไปในอากาศหรือสุญญากาศจะมีความเร็วเท่ากับความเร็วแสง ($C = 3 \times 10^8$ m/s) แต่เมื่อคลื่นเคลื่อนที่ผ่านตัวกลางที่เป็นเทหวัตถุความเร็วของคลื่นจะลดลงเหลือ V_p ซึ่งหาจาก

$$V_p = \frac{C}{\sqrt{\epsilon'}}$$

เมื่อ V_p = the velocity of propagation ; ϵ' = dielectric constant ของวัตถุ



ภาพที่ 6.3 Diagrammatic illustration of a plane electromagnetic wave. E and H represent the electrical and magnetic components of the wave; E_0 and H_0 are their respective amplitudes. (จาก Ref. 6 หน้า 348)

ความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่น λ ต่อความถี่คลื่น (f) หาได้จาก

$$f = \frac{V_p}{\lambda}$$

ขณะที่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเคลื่อนที่ผ่านวัตถุ f จะเท่าเดิม แต่ λ จะเปลี่ยนไปซึ่งจะมีผลต่อ depth of penetration ซึ่งจะกล่าวถึงอีกต่อไป

กลับมาดูภาพคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (ภาพที่ 6.3) อีกที ถ้าดูที่ตำแหน่ง X ใด ๆ ขณะที่คลื่นเคลื่อนที่ไปข้างหน้า Amplitude ของคลื่นจะเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา เช่นค่อย ๆ เพิ่มขึ้นจนถึงจุดสูงสุด แล้วค่อย ๆ ลดลงจนถึงศูนย์แล้วติดลบจนลบต่ำสุด แล้วกลับค่อย ๆ เพิ่มขึ้นจนเป็นศูนย์เป็นเช่นนี้เรื่อยไป การเปลี่ยนแปลงเช่นนี้เองทำให้เกิด stress บน ions หรือ โมเลกุลที่ถูกคลื่นกระทบเหมือนกับถูกแรงกระทำทำให้ ions บิดไปบิดมาตามทิศทางสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่มากกระทำ ฉะนั้น ions หรือ โมเลกุลเหล่านั้นจึงต้อง release stress ออกไปในรูปของความร้อนซึ่งเป็นผลให้วัสดุที่ถูกคลื่นนี้กระทบจึงร้อนขึ้นด้วย

2.2 Heating Mechanism จากที่ผ่านมามาดูเห็นว่าคลื่น Dielectric หรือ Microwave ไม่ใช่คลื่นความร้อน แต่เป็นคลื่นพลังงานที่ไปทำให้อนุภาค ions, atoms หรือ molecules ของวัสดุ heat ตัววัสดุเอง โดยการเคลื่อนไหวของอนุภาคเหล่านั้น ข้อนี้เองเป็นสาเหตุที่การ heat ด้วย Dielectric หรือ Microwave เป็นการ heat แบบประหยัดพลังงาน เพราะว่าเป็นการ heat เฉพาะที่ตัววัสดุไม่ต้องเสียพลังงานไป heat สิ่งแวดล้อมรอบๆ ตัววัสดุด้วย

ตารางที่ 6.1 แสดง Mechanism ของการแปลงพลังงานของคลื่น Microwave หรือ Dielectric ไปเป็นพลังงานความร้อน รายละเอียดขอให้ผู้สนใจไปอ่านเอาเองจาก Ref 6

2.3) Interaction of Electromagnetic Fields with Materials แบ่งวัสดุตาม interaction ระหว่างวัสดุกับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าออกเป็น 4 กลุ่ม คือ 1) Conductor 2) Insulator 3) Dielectric และ 4) Magnetic Compound

1) **Conductor** คือวัสดุที่มี free electron เช่น โลหะ วัสดุพวกนี้จะสะท้อนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าได้ดี เหมือนกับกระจกเงาสท้อนแสง ดังนั้นจึงไม่สามารถใช้วัสดุพวกนี้เป็นภาชนะใส่ของเข้าเตาไมโครเวฟ

ตารางที่ 6.1 Partial List of Energy Conversion Mechanism*. (จาก Ref. 6 หน้า 349)

Ionic conduction
 Dipole rotation
 Entire molecule quantized
 Twist
 Bend
 Interface polarization
 Dipole stretching
 Ferroelectric hysteresis
 Electric domain wall resonance
 Electrostriction
 Piezoelectricity
 Nuclear magnetic resonance
 Ferromagnetic resonance
 Ferrimagnetic resonance

*It is the first two with which we are primarily interested in dielectric heating phenomena.

เพราะว่ามันจะสะท้อนคลื่นไมโครเวฟออกไปหมดไม่ยอมให้คลื่นเข้าไปถึงน้ำแข็งที่เราจะอุ่น

2) Insulator คือวัสดุที่ไม่นำไฟฟ้า เช่น พลาสติก แก้ว เซรามิก, อากาศ วัสดุเหล่านี้จะ transparent to the wave คือให้คลื่นผ่านได้เกือบ 100% มีการ reflect และ absorb wave น้อยมาก จึงใช้วัสดุพวกนี้ทำภาชนะใส่ของเข้าอบ สายพานลำเลียงของเข้า-ออก เตาอบ microwave บางที่เรียกวัสดุพวกนี้ว่า “Nonlossy Dielectric”

3) Dielectric คือวัสดุที่มีคุณสมบัติอยู่ตรงกลางระหว่าง conductor กับ insulator วัสดุพวกนี้จะ absorb คลื่นแล้วเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อน ตัวอย่างวัสดุเหล่านี้ได้แก่ น้ำมัน น้ำ ไม้ หรือ วัสดุอื่นๆ ที่มี ความชื้นในตัวเรียกวัสดุพวกนี้อีกอย่างว่า “Lossy Dielectric”

4) Magnetic Compound คือวัสดุที่ interact กับ magnetic component ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าแล้วเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อน มักใช้วัสดุพวกนี้ shield หรืออุดตามส่วนต่างๆ เพื่อกันไม่ให้คลื่น leak หรืออาจจะใช้สำหรับ heating ในบางกรณี

วัสดุใดจะถูก heat โดย Dielectric หรือ Microwave ได้มากน้อยเพียงใดขึ้นกับคุณสมบัติของวัสดุ 3 ประการ คือ

- 1) Dielectric constant (ϵ')
- 2) Loss tangent or Dissipation factor ($\tan \delta$) = ϵ''/ϵ'
- 3) Loss factor (ϵ'')

Dielectric constant เป็นตัวบอกว่า Electric field จะ buildup ในตัวของวัสดุได้มากน้อยเพียงใดเมื่อ apply คลื่นเข้าไปในวัสดุ

Loss tangent เป็นตัวบอกว่า Electric field ที่ build up จะเปลี่ยนไปความร้อนได้มากน้อยเพียงใด ถ้ามีค่าต่ำแสดงว่า Electric field จะเปลี่ยนเป็นความร้อนได้น้อย

ϵ' , ϵ'' และ $\tan \delta$ ของวัสดุก็ไม่ได้มีค่าคงที่ แต่จะเปลี่ยนแปลงไปตามปัจจัยภายนอก 7 ประการดังนี้

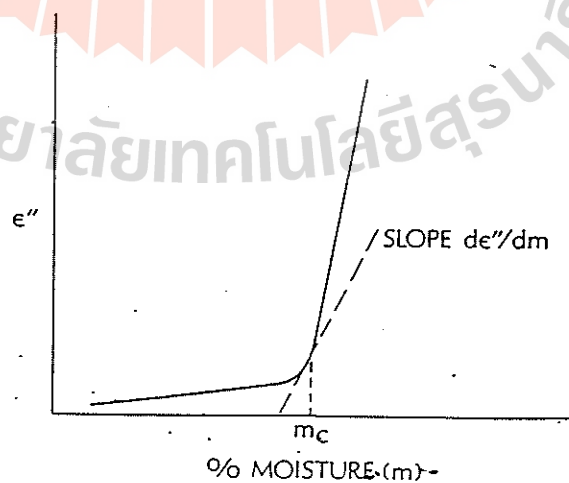
a) Moisture Content (MC) น้ำที่อุณหภูมิต่ำมี $\epsilon' = 78$ วัสดุอื่นทั่วไป (จากตารางที่ 6.2) มีค่า $\epsilon' < 10$ ดังนั้นยิ่งวัสดุมี MC มากขึ้นเท่าใด dielectric constant เฉลี่ยของวัสดุก็ยิ่งจะมากขึ้นด้วย

ดังนั้นยิ่ง MC ของวัสดุย่อยลงไปเท่าใด ก็จะยิ่งอบวัสดุด้วย Dielectric หรือ Microwave ได้ยากขึ้นเท่านั้น ในทางปฏิบัติวัสดุจะมี minimum MC ค่าหนึ่งที่การอบด้วย wave ไม่ได้เลยเพราะ $\tan \delta$ หรือ ϵ'' จะต่ำลงมากๆ (การ convert wave energy เป็น heat เกิดน้อย) ภาพที่ 6.4 แสดง Loss tangent (ϵ'') ต่อ MC ของวัสดุ จากภาพจะเห็นว่าที่ MC สูงๆ Loss tangent มีค่ามากแสดงว่าวัสดุสามารถเปลี่ยน wave energy เป็น heat energy ได้มาก แต่ ϵ'' จะมีค่าน้อยลงเมื่อ MC น้อยลง และ ϵ'' มีค่าลดลงเกือบต่ำสุดที่ critical moisture content (m_c) เพราะน้ำที่เหลือใน ware หลังจากนั้นเป็น bound water

Table 6.2 Relative Dielectric Constants. (จาก Ref. 14 หน้า 475)

MATERIAL	AT 60 Hz	AT 10 ⁶ Hz
Soda-lime glass	7	7
Pyrex glass	4.3	4
"E" glass	4.2	4
Fused silica	4	3.8
Porcelain	6	5
Alumina	9	9
TiO ₂ (film)		20-50
ZrO ₂		12
BaTiO ₃ (max)		5000+
Nylon 6/6	4	3.5
Polyethylene $(-C_2H_4-)_n$	2.3	2.3
Teflon, $(-C_2F_4-)_n$	2.1	2.1
Polystyrene, PS	2.5	2.5
Polyvinyl chloride, PVC plasticized ($T_g \approx 0^\circ C$)	7.0	3.4
rigid ($T_g = 85^\circ C$)	3.4	3.4
Rubber (12 w/o S, $T_g \approx 0^\circ C$)		
-25 $^\circ C$	2.6	2.6
+25 $^\circ C$	4.0	2.7
+50 $^\circ C$	3.8	3.2

* 20 $^\circ C$, unless stated otherwise.



ภาพที่ 6.4 The critical moisture content m_c . The dielectric loss factor is ϵ'' . The region below m_c is indicative of bound water, whereas above free water is more easily removed. (จาก Ref. 6 หน้า 353)

ตารางที่ 6.3 แสดง Heating properties ของ Waves ทั้ง 2 บนวัสดุชนิดต่างๆ

Table 6.3 Heating Properties of Various Materials. (จาก Ref. 6 หน้า 353)

Heat well	Heat poorly
Water	Hydrocarbons
Acid anhydrides	Halogenated hydrocarbons
Alcohols	(symmetrical)
Aldehydes	Alkali halides (e.g., salt)
Ketones	Inorganic oxides (e.g.,
Amides	alumina)
Amines	Some elements (e.g., sulfur)
Nitrates	Boron nitride
Cyanides	Mica
Proteins	
Halogenated hydrocarbons	
(unsymmetrical)	
Ferrites	
Ferroelectrics	
Ionic solutions	

b) Density เนื่องจาก Air มี $\epsilon' = 1$ ดังนั้นวัสดุที่มี Density ต่ำๆ (มี Pore มาก) จึงมี dielectric constant ต่ำลงไปด้วย การ heat วัสดุพวกนี้โดย wave จึงทำได้ยากขึ้น

c) Temperature ที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า freezing point วัสดุแทบทุกชนิดจะมี ϵ' และ ϵ'' ต่ำ ดังนั้นการ heat วัสดุที่อุณหภูมิต่ำกว่า freezing point จึงมี efficiency ต่ำ แต่ที่เหนือ freezing point ขึ้นมา effect ของอุณหภูมิต่อ ϵ' หรือ ϵ'' ไม่แน่นอนขึ้นกับชนิดวัสดุ วัสดุบางชนิดเช่นไม้ จะมี positive temp coefficient กล่าวคือยิ่งอุณหภูมิสูงขึ้น Dielectric loss ($\tan \delta$) ยิ่งมากขึ้น ดังนั้นการใช้ wave อบวัสดุพวกนี้อาจจะก่อให้เกิดไฟไหม้ได้ง่าย ต้องระวังอย่างมาก

d) Frequency เนื่องจากในทางปฏิบัติ มีการจำกัดความถี่ของ waves ที่รับอนุญาตให้ใช้ จึง vary frequency ได้น้อยมาก

e) Conductivity เมื่ออบต่อเนื่องไปนานๆ น้ำในโครงสร้างจะน้อยลง ทำให้ความสามารถในการนำไฟฟ้าน้อยลงและปริมาณ ion ที่ละลายในน้ำจึงมี concentration มากขึ้น ซึ่งจึงอาจจะมีผลทำให้ ϵ' , ϵ'' และ $\tan \delta$ เปลี่ยนไปด้วย

f) Thermal Conductivity เนื่องจาก Wave heating เป็นวิธี heat ที่สามารถ heat เข้าไปใน interior ของวัสดุได้ ดังนั้นดูเหมือนๆ อาจจะทำให้การนำความร้อน (Thermal conductivity) ไม่ค่อยสำคัญใน Wave heating อย่างไรก็ตามสำหรับวัสดุที่ซึ่ง wave มีความสามารถในการซึมผ่าน (Penetration depth) ต่ำๆ Thermal Conductivity ก็จะมีผลสำคัญในการส่งผ่านความร้อนไปข้างใน (interior) ทำให้วัสดุ uniformly heat ได้

g) Penetration Depth (D_p) คือความสามารถที่คลื่นจะซึมทะลุเข้าไปในเนื้อวัสดุที่อบได้มากน้อยเพียงใด เป็นคุณสมบัติที่สำคัญปกติแล้ว D_p ขึ้นกับ Wavelength, Dielectric constant และ Loss factor ตามสมการ

$$D_p = \frac{\lambda_0}{2\pi\sqrt{\epsilon' \tan \delta}} = \frac{\lambda_0}{2\pi\epsilon''}$$

เมื่อ λ_0 = free space wave length

จากสมการจะเห็นว่ายิ่ง Loss factor (ϵ'') มากขึ้น D_p ยิ่งจะลดลง; ยิ่งความยาวคลื่นมากขึ้น D_p จะยิ่งมากขึ้น; และยิ่ง Frequency มากขึ้น D_p จะยิ่งน้อยลงดังแสดงในตารางที่ 6.4

Table.6.4 Wavelength and Depth of Penetration in Douglas Fir at Various Frequencies. (จาก Ref. 6 หน้า 355)

	Frequency (MHz)					
	5.0	13.56	27.12	40.0	915	2450
Wavelength						
Meters	60.0	22.1	11.1	7.5	0.328	0.122
Feet	196.9	72.6	36.3	24.6	1.07	0.400
Depth of penetration						
Meters	23.9	8.8	4.4	3.0	0.130	0.049
Feet	78.4	28.9	14.4	9.8	0.425	0.158

3. Process Advantage of Microwave and Dielectric Systems

3.1 Advantages of Microwave and Dielectric Heating

การ heat แบบ conventional เป็นการ heat จาก surface เข้าไป interior ของ วัสดุ ความร้อนจะถูกส่งผ่านจะข้างนอกเข้าไปข้างในชั้นงาน ส่วนการ heat แบบ wave เป็น bulk heating เพราะจะถ่ายเทพลังงานให้แก่วัสดุทั้งก้อนพร้อมๆ กัน อาจจะสรุปข้อดีของ Microwaves & Dielectric heating ได้ดังนี้

1 “Process speed is increased” เนื่องจาก waves ถ่ายเทพลังงานให้แก่ mass ทั้งหมดทันที จึงสามารถ heat ได้อย่างรวดเร็ว สามารถ heat ได้ถึง 100°C ภายในเวลา 3 millisc (=30,000°C ต่อวินาที) ทั้งนี้การถ่ายเทพลังงานจะเร็วหรือช้าขึ้นกับ mass ของ materials ; specific heat; dielectric properties ; geometry ; heat loss mechanism ; coupling efficiency ; power generated in the material และ output power of microwave-dielectric heating system

2 “Uniform heating may occur throughout the material” ถึงแม้จะไม่ 100% uniform แต่อย่างน้อยก็เป็น bulk heating จึงสม่ำเสมอว่าการ heat แบบ conventional มาก

3 “Efficiency of energy conversion” เนื่องจากการ heating ชนิดนี้พลังงานจะถูกถ่ายทอดไป heat วัสดุโดยตรงไม่ต้องเสียพลังงานไป heat air, wall หรือ conveyor

4 “Better and more rapid process control” คือสามารถให้หรือหยุดให้พลังงานได้อย่างทันทีทันใด (instantaneous on-off) อีกทั้งสามารถควบคุมปริมาณพลังงานที่จะถ่ายเทไปให้โดย control output power ของ microwave generator ทำให้สามารถควบคุมการให้ความร้อนได้ดีกว่า conventional heating

5 “Floor space requirements is usually less” เนื่องจาก heating วิธีนี้สามารถ heat ได้เร็วกว่า เพราะฉะนั้นจึงประหยัดเนื้อที่ที่ต้องใช้ในการเก็บชิ้นงานก่อนอบและหลังอบ

6 “Product quality may be improved” เนื่องจากการ heat วิธีนี้ไม่ได้ heat จาก surface ผ่านไปยัง interior แต่เป็นการ heat ทุกส่วนพร้อมกัน ดังนั้นถ้า heat ขนบ ขนบก็จะสุกพร้อมกันทีเดียวทุกส่วน แต่ถ้าเป็นวิธี conventional ผิวขนบอาจจะแข็งกรอบ (case hardening) ก่อนที่ข้างในจะสุกก็ได้

3.2 Advantages of Microwave and Dielectric Drying ใน conventional drying น้ำที่อยู่ผิวของวัสดุจะระเหยออกไปก่อน จากนั้นน้ำที่อยู่ภายในวัสดุจะ diffuse ออกมาที่ผิวแล้วจึงระเหยตามออกไป แต่ระบบ Wave heating คลื่นจะถ่ายเทพลังงานทำให้น้ำภายในวัสดุระเหยเป็นไออย่างรวดเร็ว (rapid vapor generate) จากนั้นไอน้ำที่มีแรงดันสูงจะหลุดออกไปจากวัสดุอย่างรวดเร็วภายใต้แรงดัน (under influence of pressure gradient) หลักการนี้เหมือนกับมี pump มาดูดเอาไอน้ำออกไปจาก mass อย่างรวดเร็ว ด้วยหลักการนี้เอง wave dryer จึงอบผลิตภัณฑ์ให้แห้งได้อย่างรวดเร็วกว่า conventional dryer หลายเท่า และดังนั้น wave dryer อาจจะใช้อุณหภูมิในการอบต่ำกว่า conventional drying จึงเป็นการประหยัดพลังงานได้อีกโสดหนึ่ง

ตารางที่ 6.5 แสดงข้อดีของ Microwave และ Dielectric Drying

Table 6.5 Advantage of Microwave and Dielectric Drying. (จาก Ref. 6 หน้า 357)

Efficiency: in most cases, the energy couples into the solvent, not the substrate
Nondestructive: drying can be done at low ambient temperatures; no need to maintain high surface temperatures, leading to lower thermal profiles
Reduction of migration: solvent often mobilized as a vapor; therefore does not transfer other materials to the surface
Leveling effects: coupling tends toward the wetter areas
Speed: drying times can be shortened by 50% or more
Uniformity of drying: by a combination of more uniform thermal profiles and leveling
Conveyorized systems: less floor space, reduced-handling
Product improvement in some cases: eliminates case hardening, internal stresses, and other problems

ที่พูดมาทั้งหมดชี้ว่า Conventional drying จะไม่ดีเสียเลย ความจริงแล้วระบบ hot air conventional drying สามารถไล่ free water ออกไปจาก surface ได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด ดังนั้นในทางปฏิบัติอาจจะนำทั้ง conventional drying และ waves drying มารวมกัน เพื่อให้การอบแห้งเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพสูงสุดใช้เวลาและพลังงานน้อยที่สุด ซึ่งอาจจะรวมกันได้ 3 วิธี ดังภาพที่ 6.5 คือ

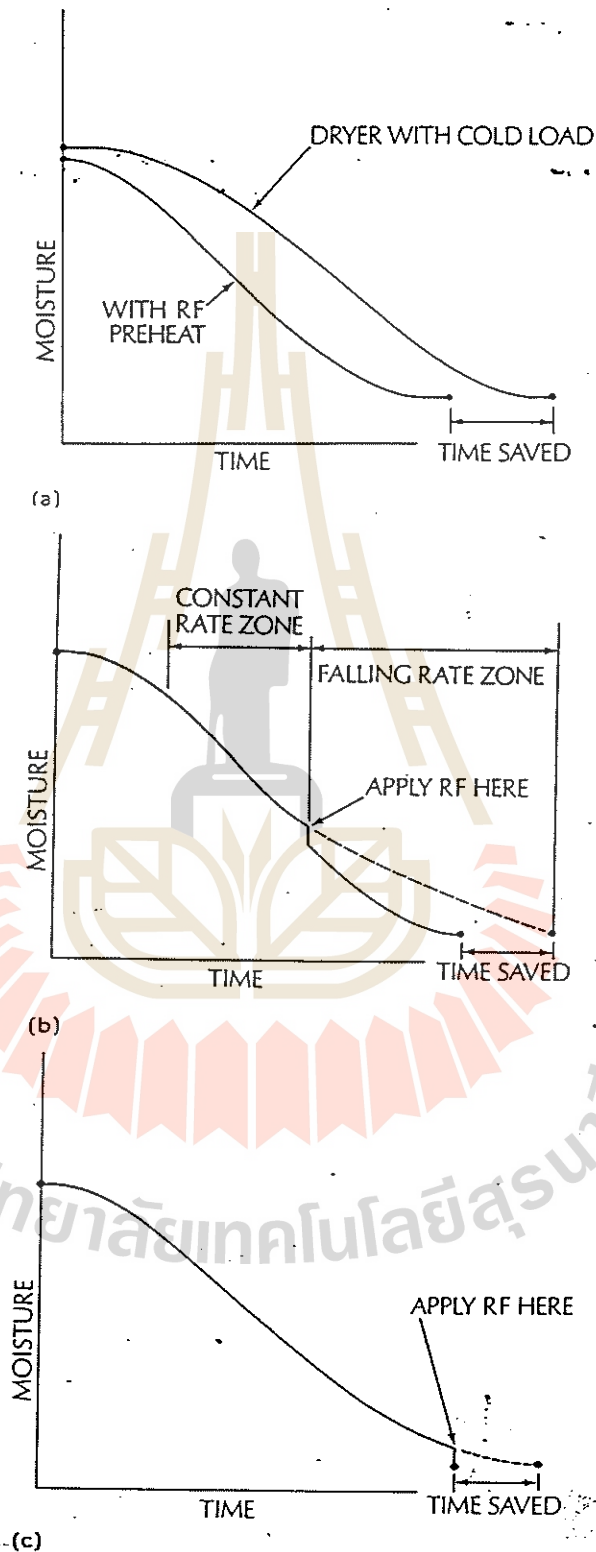
1) **รวมแบบ Preheating** (ภาพที่ 6.5a) เป็นการนำ Microwave & Dielectric drying มาช่วยในการ preheat โดยวางเครื่อง wave dryer ไว้ที่ปากทางเข้า conventional dryer เพื่อให้ wave heat ด้าน interior ของชิ้นงานทำให้ความชื้นภายในถูกดันออกไปที่ surface อย่างรวดเร็วจากนั้นก็ปล่อยให้พื้นผิวที่ของ conventional dryer อบอุ่น วิธีนี้จะ save เวลาในการอบได้ดังแสดงในภาพ

2) **รวมแบบ Booster Drying** (ภาพที่ 6.5b) วิธีนี้แรกๆ จะอบด้วย conventional dryer จนกระทั่งเข้าสู่ช่วง falling rate ก็จะ apply wave เข้าไปช่วยทำให้ตรงกลางของชิ้นงานร้อนและความชื้นกลายเป็นไอก็หลุดออกไปที่ surface ได้เร็วขึ้น วิธีนี้เหมาะกับวัสดุที่หนาและแข็ง

3) **รวมแบบ Finish Drying** (ภาพที่ 6.5c) วิธีนี้จะ apply wave เข้าไปช่วยในช่วงท้ายๆ ของการอบเมื่อ conventional drying ผ่านแล้ว ความชื้นออกไปได้ช้าจึง apply wave เข้าไปช่วย การรวมวิธี

นี้จะช่วย control final moisture content ของชิ้นงานให้ได้ตามที่ต้องการด้วย

โดยทั่วไปนิยมใช้วิธี Booster Drying และ Finish Drying มากกว่า อนึ่งถึงแม้ว่าค่าไฟฟ้าของการใช้ wave จะแพงกว่าค่าพลังงานที่ใช้ใน conventional drying แต่เนื่องจากการใช้ wave เป็นการประหยัดเวลาในการอบจึงคุ้มทุน



ภาพที่ 6.5 Typical drying curves for microwave and dielectric drying systems; (a) preheating with microwave or dielectrics; (b) booster drying; (c) finish drying. (จาก Ref. 6 หน้า 357-358)

4. Equipment for Microwave and Dielectric Heating and Drying

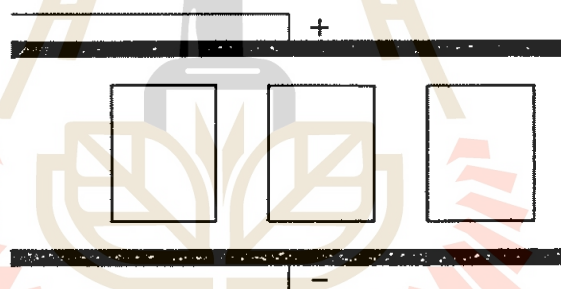
แบ่งเครื่องมือในงาน waves drying ตามหน้าที่ออกเป็น 2 ส่วนดังนี้

1. Generator ทำหน้าที่ generate waves ออกมา
2. Applicator ทำหน้าที่ apply wave ลงบนชิ้นงาน

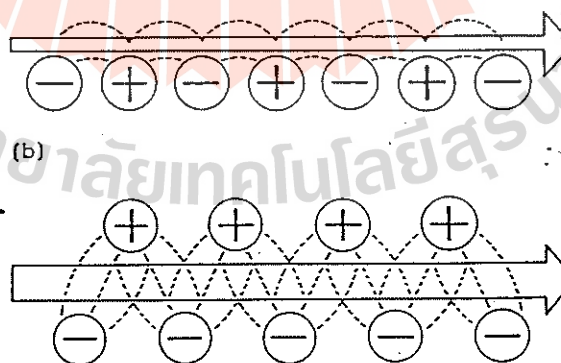
4.1) Generator หน้าที่หลักของ generator คือ แปลงไฟฟ้ากระแสสลับ (AC) ความถี่ 50-60 Hz ให้เป็นคลื่นที่มีความถี่ตามกำหนด กรณี Dielectric heating จะใช้หลอด Dielectric tube ทำหน้าที่แปลง AC เป็นคลื่นที่มีความถี่ 3-150 MHz ส่วนกรณี Microwave heating จะใช้หลอด Magnetron หรือ Klystron แปลง AC เป็นคลื่นที่มีความถี่ 915-2450 MHz หลอดเหล่านี้มีอายุใช้งาน 5000-10000 ชม.

4.2) Applicator ทำหน้าที่ในการส่งถ่ายคลื่นไปยังชิ้นงานที่ต้องการอบ วิธีส่งผ่านคลื่นของ Dielectric dryer กับ Microwave dryer แตกต่างกันมาก กล่าวคือ กรณี Dielectric dryer จะส่งคลื่นผ่านระหว่าง electrode ขั้ว (+) ไป (-) ส่วน Microwave dryer จะส่งคลื่นผ่าน free space ไปยังชิ้นงาน แบ่งวิธีส่งคลื่นไปยังชิ้นงานของระบบ Dielectric system ได้เป็น 3 วิธีคือ

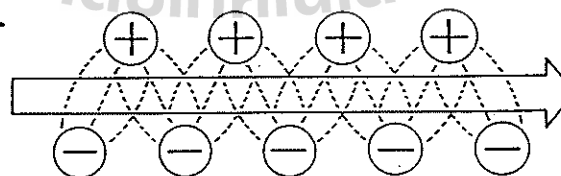
1) *Two flat metal plates system* ดังแสดงโดยภาพ 6.6a วิธีนี้มีข้อดีคือสามารถใช้กับชิ้นงานที่มีขนาดใหญ่และหนามากได้ แต่ก็มีข้อเสียที่ถ้า electrodes ทั้ง 2 ห่างกันมากจะต้อง apply สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่มีความเข้มข้นสูงมาก ซึ่งการทำอย่างนี้อาจจะทำให้ชิ้นงานที่นำมาอบไหม้ได้



(a)



(b)



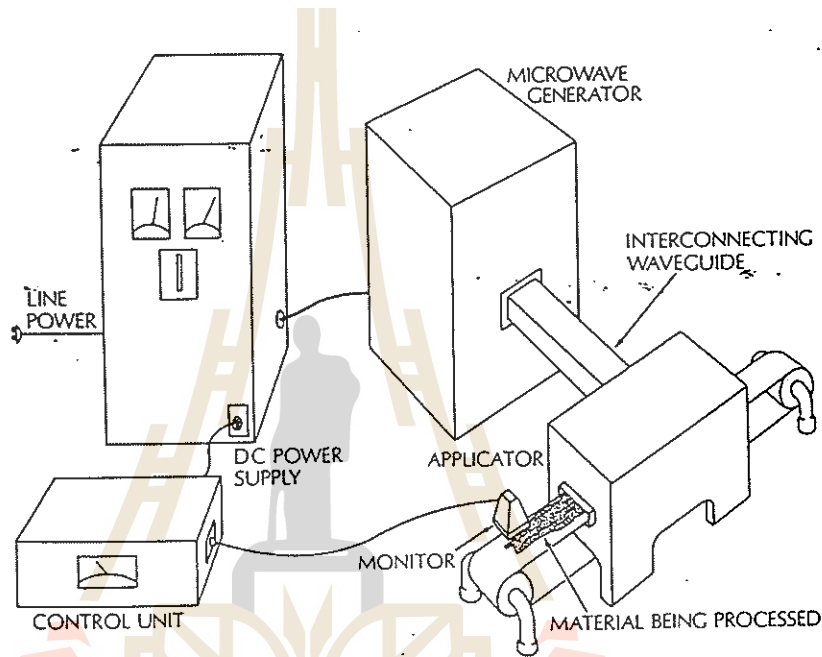
(c)

ภาพที่ 6.6 Electrode configurations for dielectric heating systems; (a) platen type for bulk objects; (b) stray field type for thin webs; (c) staggered type for thick webs or board. (จาก Ref. 6 หน้า 361)

2) *Stray field electrode systems* ใช้ข้อขึ้นงานที่มีลักษณะเป็นแผ่นๆ หนาไม่เกิน 10 มม. คลื่นจะวิ่งจาก electrode ขั้วหนึ่ง ไปยัง electrode อีกขั้วหนึ่งที่อยู่ถัดไป ดังภาพ 6.6b system นี้อาศัยหลักว่าขึ้นงานที่ถูกนำมาอบมี electric resistance ต่ำสุด wave จึงเคลื่อนที่ผ่านได้มากทำให้ขึ้นงานเกิดความร้อน

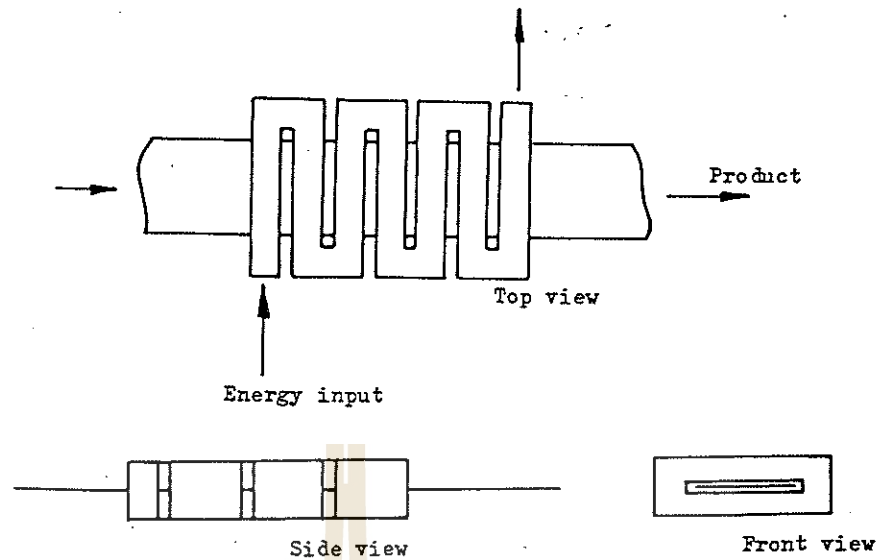
3) *Staggered through-field electrode system* เป็นวิธีที่วาง electrode สลับกันบน-ล่างขึ้นงาน ดังภาพที่ 6.6c ใช้ข้อขึ้นงานที่มีลักษณะเป็น sheet ยาวและหนาเกินกว่าที่ควรจะอบด้วยวิธีที่ 2 วิธีนี้ wave จะวิ่งสลับไปมาจาก electrode (+) ไป (-) และ (-) ไป (+) เช่นนี้เรื่อยไปทำให้ขึ้นงานมีอุณหภูมิสูงขึ้น

ส่วน Microwave system จะส่งคลื่นที่ generate ออกมาไปตาม Wave-guide หรือ Coaxial cable ไปยัง Applicator ดังภาพ 6.7 บางครั้งก็ใช้ Wave-guide เป็น Applicator เลย

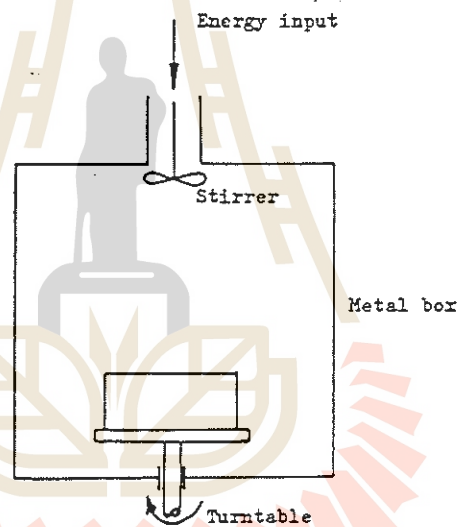


ภาพที่ 6.7 A typical microwave heating system utilizing a conveyerized cavity applicator. A feed back system monitors the heated material and automatically adjusts the output power of the magnetron to control the final moisture. (จาก Ref. 6 หน้า 362)

โดยทั่วไป Wave guide ทำมาจากโลหะ โดยทำเป็นท่อสี่เหลี่ยมกลวง ขนาดของท่อต้องคำนวณให้เหมาะสมกับ wave ที่จะเคลื่อนที่ผ่าน สนามไฟฟ้าตรงกลางของ wave guide จะมีความเข้มข้นสูงสุด ส่วน Applicator ก็ทำจากโลหะเช่นกัน ในกรณีที่ขึ้นงานมีลักษณะเป็นเส้นยาวๆ อาจจะออกแบบให้ Applicator เคลื่อนที่ไปตามขึ้นงานก็ได้ ดังภาพ ที่ 6.8 เรียก Applicator ชนิดนี้ว่า “Traveling Wave Applicator” ส่วนในกรณีที่ขึ้นงานมีขนาดเล็กพอที่เอาเข้าไปอบในห้องอบได้ ก็จะใช้ Applicator แบบ Cavity applicator มีลักษณะเป็นกล่องโลหะ ดังรูป 6.9 ซึ่งเป็นคล้ายกับเตาอบ Microwave ที่ใช้ตามครัวเรือน แต่สำหรับงานอุตสาหกรรมอาจจะออกแบบให้วางที่ขึ้นงานบนสายพานลำเลียงแบบ continuous dryer เรียก Applicator แบบนี้ว่า “Conveyerized cavity applicator” ดังภาพ 6.7



ภาพที่ 6.8 A travelling wave applicator. (จาก Ref. 5 หน้า 240)



ภาพที่ 6.9 A cavity applicator (จาก Ref. 5 หน้า 241)

Cavity applicator ที่ดีควรมีสิ่งต่อไปนี้ เพื่อที่จะทำให้คลื่นไมโครเวฟ เข้าไปในชิ้นงานได้อย่างทั่วถึง (uniformly)

1. Moving or rotating the load by mean of conveyors or turntable
2. Installing mode stirrer (คือให้ติดตั้งพัดลมที่หมุนช้า ๆ)
3. Using multiple sources with slightly different frequency
4. Using multiple ports to input the microwave energy
5. เลือกขนาดของ Cavity ที่เหมาะสม

นอกจากนี้ในระบบ Dielectric และ Microwave dryer จะต้องมีระบบป้องกันไม่ให้ radiation leak ด้วยเพื่อความปลอดภัยแก่ผู้ใช้งาน

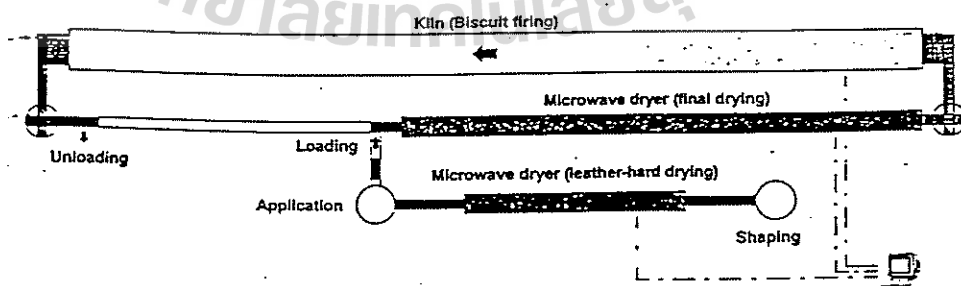
บางครั้งจะเรียกระบบ Dielectric heating ว่าระบบ Radio Frequency (RF) หากเปรียบเทียบระหว่างระบบ RF กับระบบ Microwave อาจจะสรุปได้ดังนี้

- ระบบ RF เหมาะกับชิ้นงานที่มีขนาดใหญ่กว่าเพราะว่า Penetration depth มากกว่า
- ระบบ RF ใช้กับชิ้นงานที่มีรูปร่างแน่นอน regular shape เพราะว่าจะต้องส่งคลื่นผ่าน electrode ที่วางเรียงตัวเป็นระเบียบ
- ระบบ Microwave เหมาะกับงานที่ต้องใช้กำลังในการอบสูง (คือ Specific power input (Watt/m^2) สูง) และ Loss factor ต่ำๆ เพราะถ้าใช้ RF อาจจะทำให้เกิด arcing burning ได้ เช่นในการอบกระดาษบางชนิด ถ้าอบด้วยระบบ Microwave จะอบจนกระดาษมีความชื้น 0% ได้แต่ถ้าใช้ระบบ RF จะไม่สามารถอบจนกระดาษมีความชื้นต่ำกว่า 5%
- ระบบ RF จะประหยัดพลังงานมากกว่าโดยเฉพาะเมื่อต้องใช้พลังงานมากเพราะว่า 1) RF มีความถี่น้อยกว่า 2) RF มี penetration depth มากกว่า
- กรณี Load ชิ้นงานเข้าเตาอบไม่สม่ำเสมอ (fluctuate) เดี่ยวมากเดี่ยวน้อยใช้ RF จะดีกว่า
- ถ้าจำเป็นต้องใช้สายพานลำเลียงที่ทำจากโลหะในเตาอบเลือกใช้ระบบ RF ได้เท่านั้น

5. Industrial Application of Microwave and Dielectric Drying

Dielectric Drying มีการนำ Dielectric drying มาอบชิ้นงานเซรามิกที่มีขนาดใหญ่กว่า 10 นิ้ว แล้วพบว่าประสบความสำเร็จมาสามารถลดเวลาในการอบจาก 24 ชม.(อบด้วยวิธี Conventional) เหลือเพียง 22 นาที (60 เท่า!) ซึ่งวิธีการดังกล่าวเป็นการประหยัดพลังงานและเวลาในการอบเป็นอย่างมาก

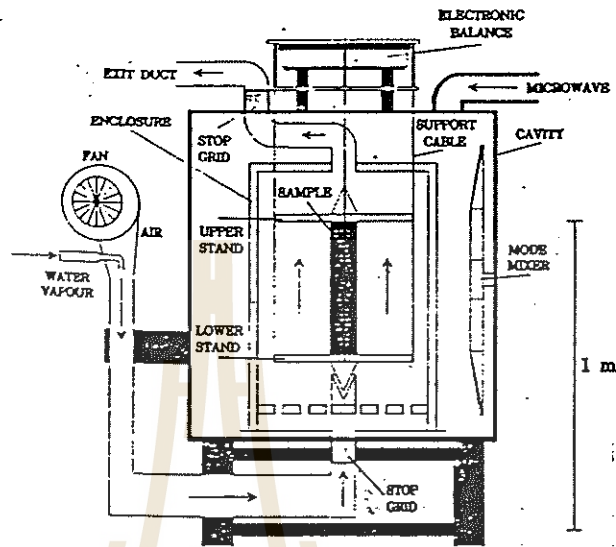
Microwave Drying มีการพัฒนา microwave drying มาอบเซรามิกหลายปีมาแล้วแต่การพัฒนาเป็นอย่างดีค่อยเป็นค่อยไป แต่ใน 2-3 ปี ที่ผ่านมามีบริษัทผู้ผลิตเตาอบแบบนี้ออกมาออกขายกันมากกว่าประสบความสำเร็จในการนำเทคโนโลยีชนิดนี้มาใช้ในอุตสาหกรรมเซรามิกแล้ว ส่วนใหญ่จะใช้ Microwave ที่มีความถี่ 2.45 GHz ซึ่งเป็นย่านความถี่ที่โมเลกุลของน้ำเริ่ม Vibrate มีการออกข่าวว่า Microwave dryer สามารถลดเวลาในการอบได้ 10-20 เท่า สามารถใช้อบชิ้นงานเซรามิกที่เป็นพวก cup และ plate เสร็จภายในระยะเวลาไม่กี่นาที โดยไม่มีการแตกหักเสียหายเลย ในทางปฏิบัติเพื่อให้การผลิตเป็น continuous production line จะพ่วงระบบ conveyor เข้าไปในเตาอบ microwave ด้วย ซึ่งจะช่วยให้ประสิทธิภาพของเตาอบระบบดีขึ้น ดังภาพ 6.10



ภาพที่ 6.10 Production line for hollowware with integrated microwave dryer. (Ref. 7 หน้า 149)

ภาพ 6.11 แสดงภายในห้องอบ Microwave แบบหนึ่งจากภาพจะเห็นว่าอากาศเข้าจากด้านล่าง

แล้วจะวิ่งไปผ่านชั้นงานแล้วเข้าไปออกที่ Exit duct ส่วนคลื่น Microwave วิ่งเข้ามาตาม Wave guide ด้านบน และในห้องอบจะมี Mode Mixer ช่วยกระจายคลื่นให้ทั่วถึง และที่ทางเข้า-ออกของอากาศมี stop grid เพื่อป้องกัน microwave leak ด้วย



ภาพที่ 6.11 Schematic of the drying apparatus. (จาก Ref. 8 หน้า 145)

นอกจากนำมาอบ ceramic ware แล้วยังมีการนำ Microwave drying มาอบ Plaster mold ซึ่งก็ประหยัดเวลาในการอบ ทำให้หมุนเวียน mold กลับมาใช้ได้รวดเร็วยิ่งขึ้น ปัจจุบันในเมืองไทยก็มีการนำเข้าระบบนี้มาอบ Plaster mold บ้างแล้ว

สรุปว่าวิธีอบแบบ Dielectric และ Microwave drying เป็นวิธีที่น่าสนใจและอาจจะนำมาใช้ในเชิงอุตสาหกรรมในเมืองไทยในอนาคตได้ เพราะประหยัดทั้งเวลาและพลังงานถึงแม้ว่าค่าใช้จ่ายในการลงทุน (Capital cost) จะสูง แต่ใน long run แล้วก็อาจจะคุ้มค่า

III) Infrared Drying

1) Introduction

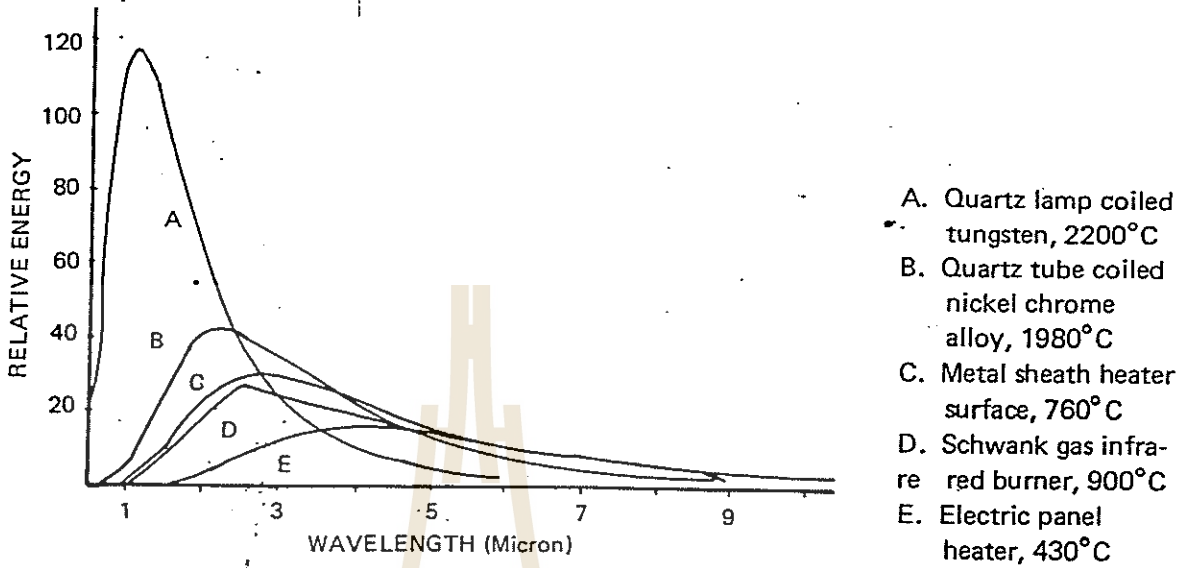
รังสี Infrared คือ คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดหนึ่งที่มีความยาวคลื่นในช่วง $0.1 - 1000 \mu\text{m}$ เนื่องจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าใน range นี้มีความร้อนด้วย บางครั้งจึงเรียกคลื่นชนิดนี้ว่า "Thermal radiation" ที่จริงรังสีชนิดนี้ไม่ใช่ของแปลกใหม่อะไรเลย วัตถุทุกชนิดไม่ว่าจะเป็นของแข็งหรือของเหลวที่มีอุณหภูมิสูงกว่า $0^\circ \text{K} (-273^\circ \text{C})$ ล้วนแต่กำลังแผ่รังสี (Emission) ชนิดนี้ออกมาทั้งนั้น เพื่อนๆ ที่นั่งใกล้ๆ คุณก็กำลังแผ่รังสีชนิดนี้ใส่คุณอยู่ (ดังนั้นระวังนะ! อย่างนั่งใกล้มาก เดี่ยวถูกรังสี) ปกติแล้วรังสีที่วัตถุใดๆ แผ่ออกมาจะประกอบด้วยคลื่นหลายความถี่เรียกว่าแถบ "Spectrum"

ความสามารถในการแผ่รังสีของวัตถุใดๆ จะขึ้นกับคุณสมบัติของวัตถุ 3 ประการ

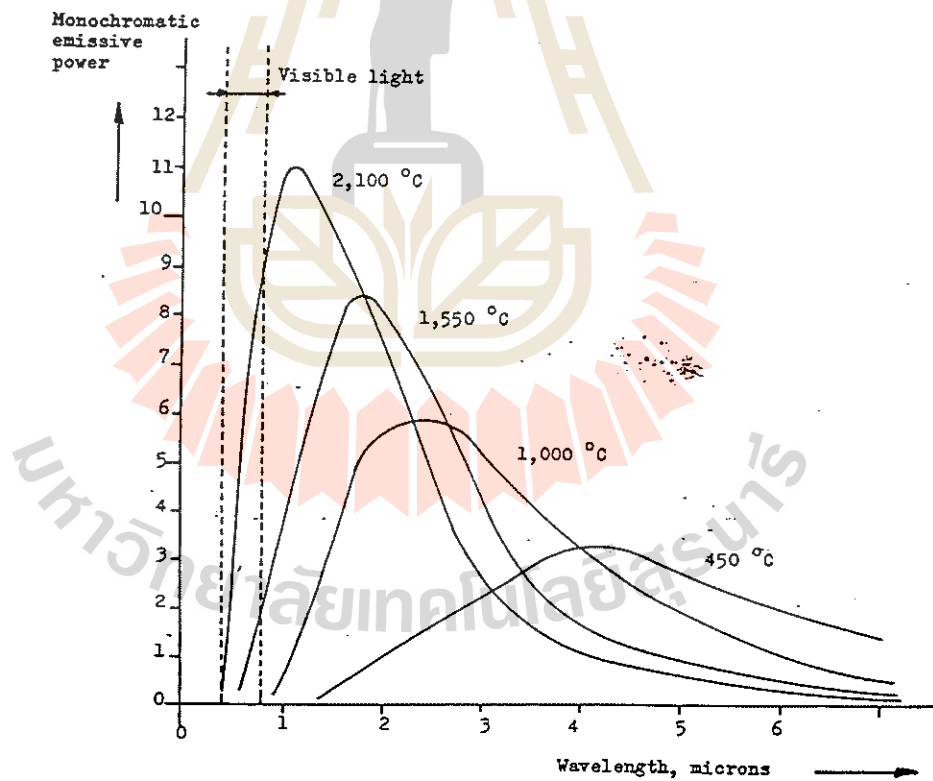
1. ความสามารถในการสะท้อนรังสี [Reflectivity (ρ)]
2. ความสามารถในการดูดกลืน [Absorptivity (α)]
3. ความสามารถในการปล่อยรังสีผ่านตัวไป [Transmissivity (τ)]

ตามหลักพลังงานไม่สูญหาย $\rho + \alpha + \tau = 1$ คุณสมบัติทั้ง 3 ของวัตถุใดๆ จะขึ้นกับ

- (1) ธรรมชาติของวัตถุเอง ดังแสดงโดยภาพ 6.12
- (2) อุณหภูมิของวัตถุนั้น ดังแสดงโดยภาพ 6.13



ภาพที่ 6.12 Spectral energy distribution of infrared heat sources. (จาก Ref. 11 หน้า 667)



ภาพที่ 6.13 Emission spectra of black body. (จาก Ref. 5 หน้า 246)

วัตถุร้อนๆ ไม่ได้กำลังแผ่รังสีอย่างเดียว ที่จริงมันดูดกลืนรังสีไปในตัวด้วย นักวิจัยพบว่าวัตถุที่ดูดกลืนรังสีได้ดีมักจะเป็นวัตถุที่แผ่รังสีได้ดีด้วย เช่น วัตถุดำ Black body ซึ่งวัตถุที่ดูดกลืนรังสีได้ดีที่สุดจะเป็นวัตถุที่แผ่รังสี (emission) ที่ดีที่สุดด้วย

อย่างไรก็ตามวัตถุในธรรมชาติ โดยส่วนใหญ่เป็น Grey body (ไม่จำเป็นต้องมีสีเทา) กล่าวคือ วัตถุจะสามารถ Reflect, Absorb และ Transmit คลื่นบางความถี่ได้ดีมากน้อยไม่เท่ากันขึ้นกับธรรมชาติของมัน เช่น มะเขือเทศสีแดง ที่เห็นเป็นสีแดงเพราะมัน absorb รังสีในช่วงความถี่ที่อื่นเอาไว้ แล้ว reflect รังสีคลื่นช่วงสีแดงออกมาจึงเห็นเป็นสีแดง

Key ในการทำให้ IR dryer ประหยัดพลังงานมากที่สุดคือ “จะต้องใช้ source ที่แผ่รังสีที่มีความยาวคลื่นในช่วงที่ ware ที่นำมาอบ absorb ได้ดีที่สุด” เพื่อว่ารังสี IR ที่ source generate ออกมาจะได้ถูก ware ดูดซับไว้มากที่สุดเท่าที่จะทำได้ ภาพที่ 6.12 แสดง Infrared heat source ชนิดต่างๆ และ λ ของคลื่นที่มัน generate ออกมา

2) IR Dryer

ตารางที่ 6.6 แสดง λ และความถี่ของ IR เทียบกับ Microwave และ RF dryer จะเห็นว่า IR เป็นคลื่นที่มีความถี่มากที่สุด และ λ น้อยสุด อนึ่งความยาวคลื่นของ IR ที่นำมาใช้ใน IR dryer ส่วนใหญ่มีค่าในช่วง 1-10 μm

Table 6.6 Frequency and Wavelength Ranges of Radiative Dryers (จาก Ref 11 หน้า 667)

Dryer type	Wavelength range		Frequency range (MHz)	
	Overall	Typical ^a	Overall	Typical ^a
Infrared	1–1000 μm	1–10 μm		10^7
Microwave	1–100 cm	10–70 cm	400–5000	900–2450
Radiofrequency	1–100 m	7–22 m	1–100	10–40

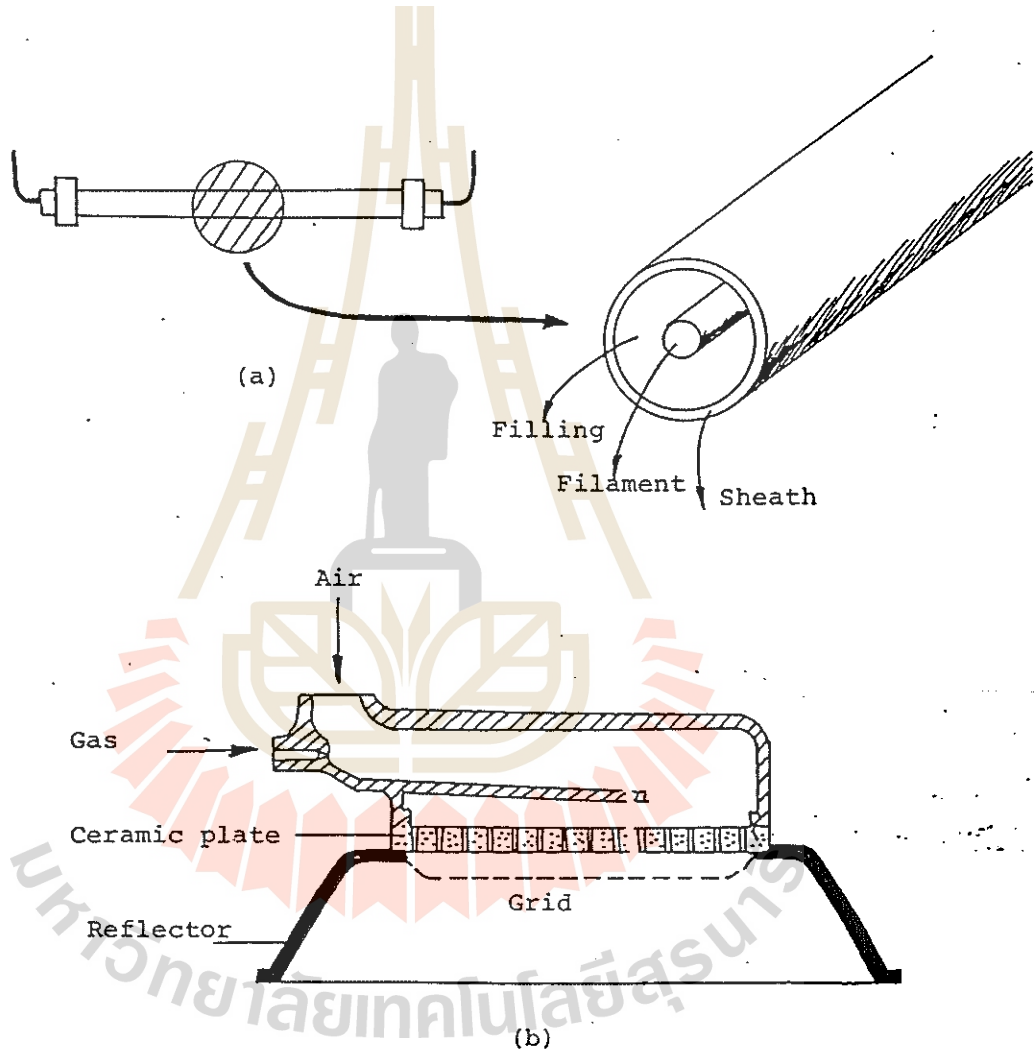
เนื่องจาก wave ที่มีความถี่สูงและ λ สั้นมีจะ Penetration depth ต่ำ ดังนั้นหากเปรียบเทียบความสามารถในการทะลุเข้าไปในผิว ware ของคลื่นทั้ง 3 ชนิด IR จึงทะลุเข้าไปใน ware ได้น้อยที่สุด จึงใช้ IR dryer ในการอบงานที่บางๆ เช่นนำไปอบเคลือบที่เคลือบบนแผ่นกระเบื้องเซรามิกก่อนที่จะนำเข้าเตาเผา ระบบ Fast Firing ถึงแม้จะค่าใช้จ่ายในการอบด้วย IR dryer จะแพงกว่า แต่ก็ยังเป็นวิธีอบที่สะอาด เพราะแทบจะไม่ต้องผ่านอากาศไปในห้องอบมากนักเพราะการอบด้วยวิธีนี้จะส่งผ่านความร้อนโดยวิธีการแผ่รังสีความร้อน (Radiation) มากกว่าที่จะใช้วิธีการพาความร้อน (Convection) ซึ่งใช้กันใน Conventional dryer ดังนั้นการอบวิธีนี้จึงปลอดภัยกว่ากับทั้ง IR source ที่จะ emit IR wave ก็มีราคาถูก มีอายุใช้งานยาวนานและบำรุงรักษาง่ายกว่า source ที่ใช้ emit RF และ Microwave ด้วย ประการสุดท้ายเครื่องมือและอุปกรณ์อื่นๆ ของระบบ IR dryer ก็ simple และ control ได้ง่ายกว่า

3) IR Equipments

แบ่ง IR heater หรือ source ที่ใช้ในการผลิต รังสี IR ตามพลังงานที่ใช้ในการ generate IR ได้เป็น 2 ชนิดคือ

1. Electric Infrared Source
2. Gas Infrared Source

Electric Infrared Source คือ IR source ที่ผลิต IR โดยการ ใช้ไฟฟ้าเผาหลอด (filament) ให้ร้อน แล้วหลอดก็จะแผ่รังสีออกมา เพราะฉะนั้นหลอดไฟฟ้าแบบกลมที่ใช้ตามบ้านและหลอด spot light ก็ถือว่าเป็น Electric IR source ได้แต่ในงานอุตสาหกรรมจะใช้หลอดที่ถูกผลิตขึ้นมาให้ เป็น IR source โดยตรง เลย ซึ่งมีรูปดังภาพ 6.14a หลอดพวกนี้ยังแบ่งเป็นหลายชนิดดังแสดงในตาราง 6.7 จากตารางจะเห็นว่า หลอดแต่ละชนิดจะผลิต IR ที่มี λ แตกต่างกันออกมา หลอดที่ใช้หลอดถูก heat ขึ้นไปที่อุณหภูมิสูงกว่า จะผลิต IR ที่มีควมถี่มากกว่าและ % พลังงานที่อยู่ในรูปของ radiation จะมากกว่า จึงจำเป็นต้องใช้อากาศ เพื่อช่วยในการ convection (พาความร้อน) ไปยังชิ้นงานน้อยกว่า และมีความเร็วในการ Heatup-Cooldown สูงกว่า แต่ก็จะมีควมทนทานในการใช้งานน้อยกว่า



ภาพที่ 6.14 Types of radiators; (a) sketch of an electric infrared radiation source;
(b) sketch of a gas-fired infrared radiation source. (จาก Ref. 6 หน้า 580)

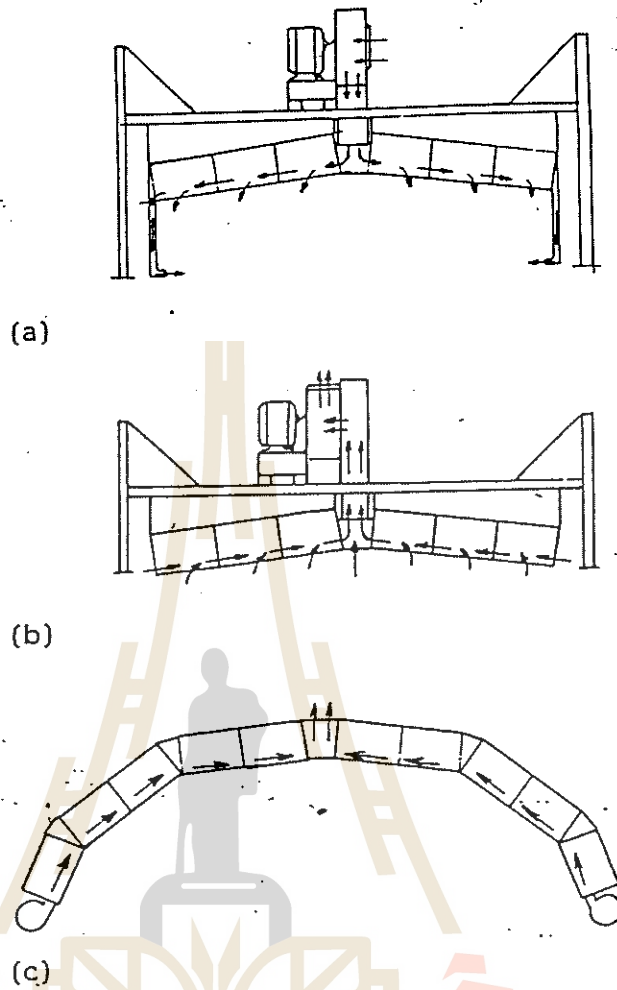
Gas Infrared Source มีส่วนประกอบดังรูป 6.14b มีส่วนประกอบคือ แผ่นสะท้อน (Reflector) ช่องอากาศเข้า ช่อง gas เข้า และแผ่น Ceramic plate เวลาใช้งานเขาจะผ่าน gas กับอากาศเข้ามาเผาไหม้ในช่อง ทำให้แผ่น ceramic ร้อนแล้วแผ่รังสีออกมา Source ชนิดนี้มีข้อดีตรงที่ค่าเชื้อเพลิงถูกเพราะใช้ gas เป็นเชื้อเพลิง

Table 6.7 Characteristics of Commercially Used Infrared Heat Sources (จาก Ref 11 หน้า 669-670)

Characteristics	Tungsten filament wire		Nickel chrome alloy spiral winding		Low temperature panel heater, buried nickel chrome alloy, metallic salt
	Glass bulb	T3 quartz lamp	Quartz tube	Metal sheath	
Source temperature (°C)					
Normal maximum	2200	2200	870	650	315-430
Usual range	1650-2200	1650-2200	760-980	540-760	205-590
Brightness	Bright white heat	Bright white heat	Cherry red	Dull red	Non visible light
Usual size	G-30 lamp	3/8" diameter tube	3/8 or 5/8" diameter tube		Flat panels, various
Wavelength at energy peak (μm)					
Normal maximum	1.15	1.15	2.6	3.1	~ 4-5
Usual range	1.15-1.5	1.15-1.5	2.6-2.8	2.8-3.6	3.2-6
Relative energy distribution (%)					
Normal maximum radiation	80	86	55	50 ^a	40-30 ^a
Usual range convection and conduction radiation	35-20	28-14	45	50 ^a	60-70 ^a
Degree of heat penetration	65-80	72-86	55-45	53-45 ^a	50-20 ^a
Relative response to Heatup	Seconds	Seconds	Minutes	Minutes	Scores of minutes
Cooldown	Seconds	Seconds	Seconds	Minutes	Scores of minutes
Color sensitivity	Bodies of different colors can be heated at more nearly the same rate by infrared radiation with long wavelengths than they can by short-wavelength infrared radiation				
Ruggedness					
Mechanical shock	Poor	Good	Good	Excellent	Varies with panel
Thermal shock	Poor	Excellent	Excellent	Excellent	Design could be quite good

^a Relative energy distribution will vary with amount of convective cooling, which can vary with position of heater and volume of air moving by among other factors.

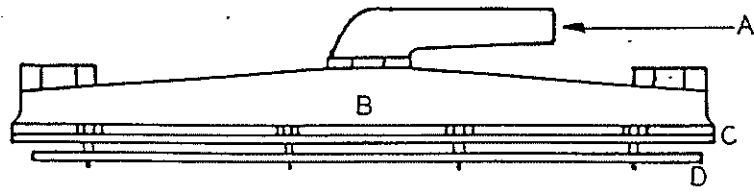
ในทางปฏิบัติจะใช้ IR source เป็น unit เล็กๆ หลาย unit มาเรียงต่อกันใน chamber ที่เตาอบ วิธี การเรียงต่อกันทำได้หลายวิธี ดังภาพที่ 6.15



ภาพที่ 6.15 Infrared designs, (a) oven with pressurized sections to introduce heated air, (b) oven with pressurized sections for cooling and ventilation, (c) different design of an oven with pressurized sections for cooling and ventilation. (จาก Ref. 11 หน้า 671)

การใช้ IR มาอบวัสดุใหม่ไฟจะต้องระมัดระวังมาก เช่น นำมาอบกระดาษถ้าเกิดข้อขัดข้องทำให้กระดาษหยุดเคลื่อนที่ติดอยู่ในเตาอบเพียง 2 นาที อาจจะติดไฟในเตาอบได้ จึงต้องมีการออกแบบให้หยุดจ่ายไฟฟ้าเข้าหลอด IR หรือหยุดจ่าย gas ทันทีและสามารถดึงกระดาษออกจากเครื่องได้อย่างรวดเร็ว นอกจากนี้การนำ IR ไปอบสีที่มีไอระเหยของสารติดไฟก็ต้องจัดระบบระบายอากาศให้เพียงพอ ไม่งั้นอาจจะเกิดการติดไฟของไอระเหยได้ ปัญหาอีกอย่างคือไอระเหยจากของที่นำมาอบมักไปเกาะที่ผิวของ IR source ทำให้อายุ source ต่ำลง จึงควรมี special screen grid ดังแสดงในภาพ 6.16 ซึ่งนอกจากป้องกันไม่ให้ไอระเหยขึ้นไปถูก IR source แล้วยังจะช่วยป้องกันไม่ให้เศษสกปรกจาก perforated ceramic tile ตกลง ไปบนชิ้นงานที่นำมาอบได้อีกด้วย

ปัจจุบันเริ่มมีการนำเอาเตาอบระบบนี้มาใช้ประโยชน์ในการอบเซรามิก โดยผู้ผลิตเตาอ้างว่าถึงแม้จะเทียบกับเตาอบ Conventional แล้วเตาชนิดนี้จะมีราคาแพงกว่า แต่เตาระบบนี้จะช่วยลดเวลาและ



ภาพที่ 6.16 Surface-type gas infrared burner. (A) Premix gas and air, (B) Chamber, (C) perforated ceramic tile, (D) special alloy screen grid. (จาก Ref. 11 หน้า 671)

ประหยัดพลังงานในการอบได้มากกว่า ภาพที่ 6.17, 6.18 และ 6.19 (ได้จากแผ่นใสของ อ.ดร.วีระยุทธ ไม่ทราบว่ามีมาจากหนังสืออะไร) เป็นภาพเปรียบเทียบระหว่างเตาอบ IR กับ Conventional dryer ที่ใช้ในการอบ Floor และ Wall Tile ซึ่งสรุปได้ดังตารางต่อไปนี้

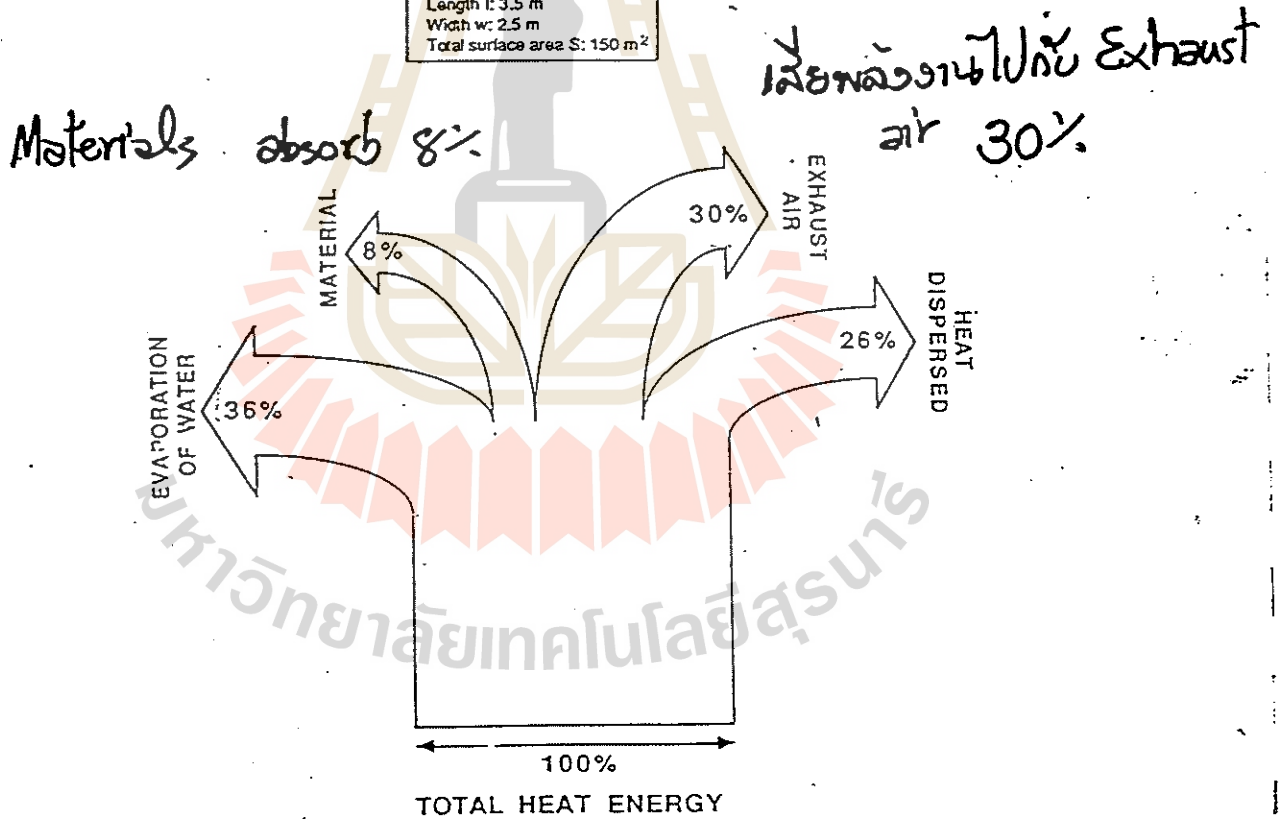
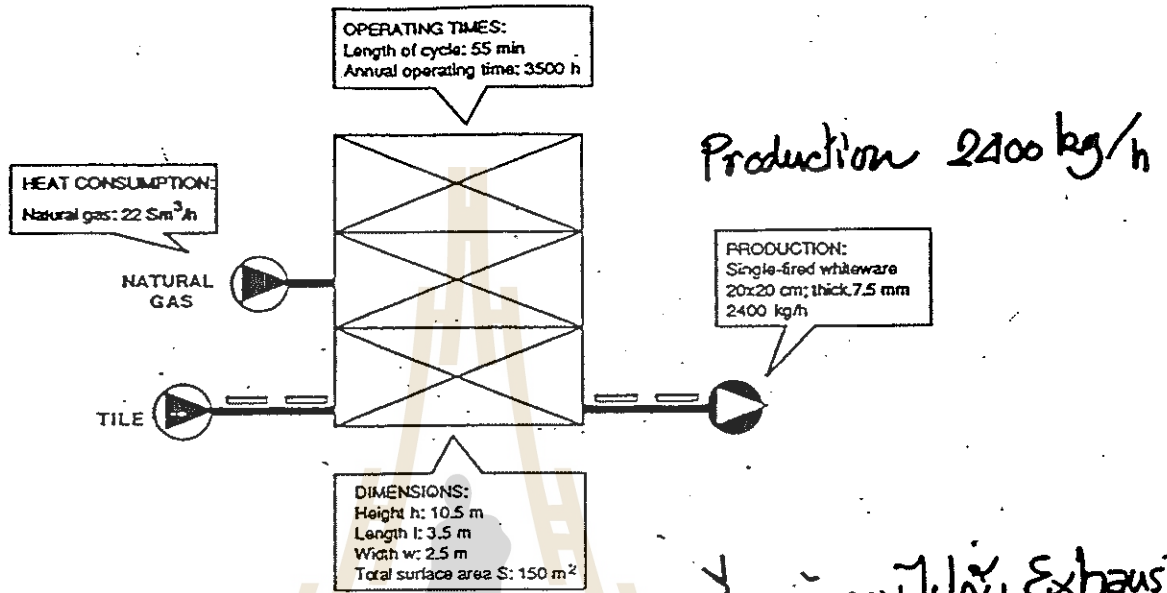
Dryer System	Production Capacity	Operating time	Total Heat Energy			
			Evap of Water	Material absorb	Exhaust air	Heat dispersed
IR	2890 kg/hr	9 min 35 sec	35%	33%	14%	18%
Conventional	2400 kg/hr	55 minute	36%	8%	30%	26%

จะเห็นได้ว่า % Heat ที่ material absorb ใน IR dryer สูงถึง 33 % ขณะที่ Conventional dryer material จะ absorb เพียง 8% นอกจากนั้น heat ที่เสียไปกับ Exhaust air ของ IR dryer เสียเพียง 14% แต่ของ Conventional dryer เสียถึง 30% และประการสุดท้าย IR Dryer ใช้เวลาในการอบเพียง 9.5 นาที แต่ Conventional dryer ใช้เวลาอบนานถึง 55 นาที

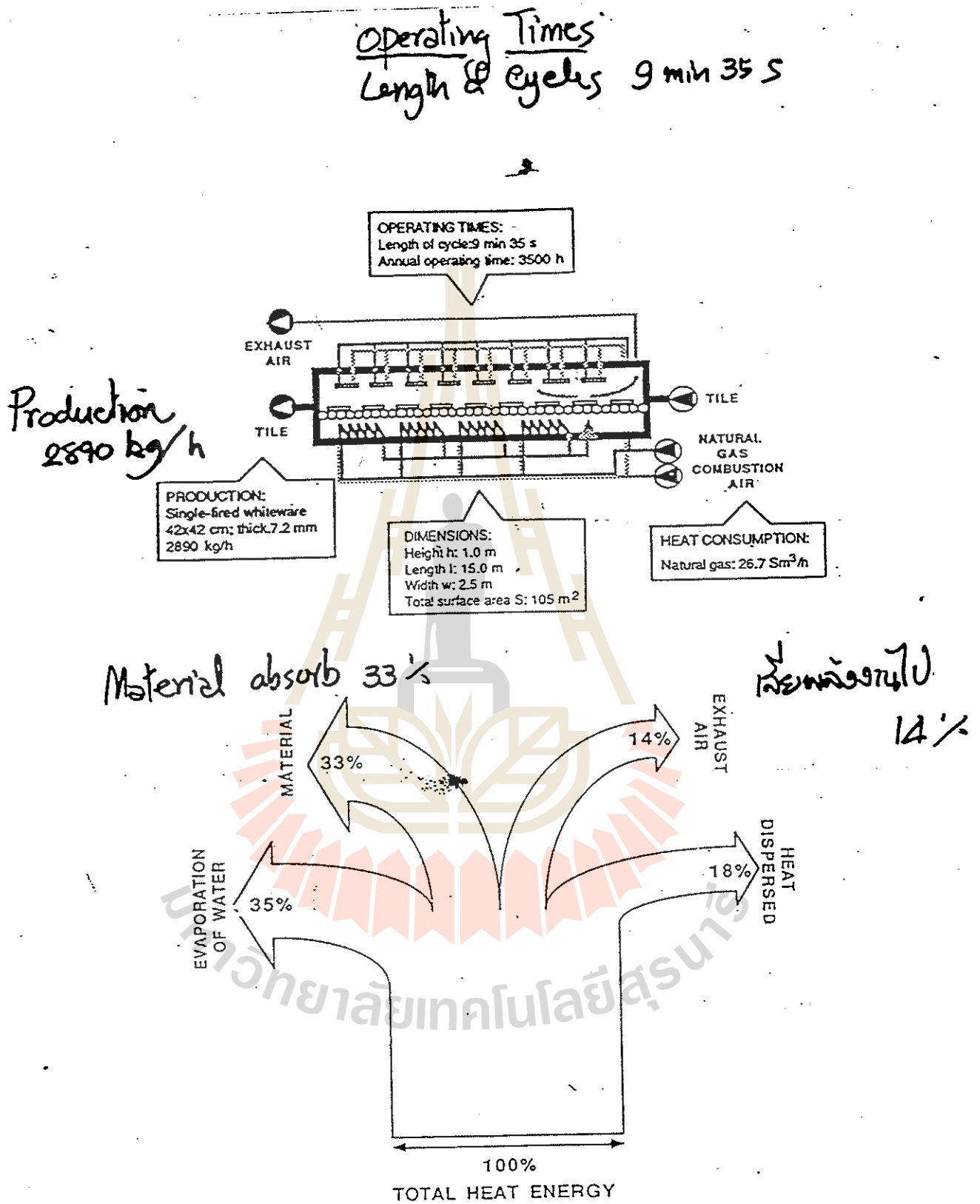
Assignment พิเศษให้อ่านบทความเรื่อง “อินฟราเรด”

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

Operating Time:
Length of cycle 55 min



ภาพที่ 6.18 Conventional fast drier. Relative heat consumption for the various items in the energy balance.



ภาพที่ 6.19 Infrared drier. Relative heat consumption for the various items in the energy balance.

อินฟราเรด

ปัจจุบันระบบการแผ่รังสี (RADIANTS) เข้ามาเกี่ยวข้องกับอุตสาหกรรมเซรามิกประมาณ 3 ปี คณะกรรมการค้นคว้าและพัฒนาแห่งชาติ ประเทศอิตาลี (E.NEA) แนะนำให้ใช้ระบบอินฟราเรดช่วงคลื่นยาว ทำการอบผลิตภัณฑ์เซรามิก เช่น ถ้วยชาม และเครื่องปั้นต่าง ๆ

บริษัท TE.CO.MA รับรู้และทำการวิจัยเป็นการส่วนตัวกว่า 1 ปี เพื่อพัฒนาระบบให้สามารถนำมาใช้งานแก่ผู้ผลิตกระเบื้องเซรามิกด้วยกัน 3 รูปแบบคือ

1. การอบ (DRYING)
2. การเผา (FIRING)
3. การเผาบิสกิต (BISCUITING)

การอบ (DRYING)

กระเบื้องเมื่ออยู่ภายใต้รังสี (RADIANTS ACTION) เป็นเวลา 3 นาที จะทำให้มีอุณหภูมิสูงขึ้นถึง 120 °C โดยประมาณ หลังจากนั้นผ่านลมร้อนปริมาณมากซึ่งร้อน 200 °C ด้วยเหตุนี้ทำให้ไอน้ำระเหยออกจากตัวกระเบื้องอย่างรวดเร็ว เนื่องจากรังสีเข้าไปทำให้ช่องว่าง (รู) ภายในตัวกระเบื้องขยายตัวเปิดกว้างขึ้น

ขบวนการระเหยของน้ำ

การระเหยของน้ำจากภายในตัวกระเบื้องจะขึ้นอยู่กับความแตกต่างระหว่างความชื้นที่ผิวหน้ากับความชื้นภายในของกระเบื้อง

สมมุติว่า กระเบื้องอยู่ภายใต้ขบวนการอบ

ที่ U₁ เป็นความชื้นที่ผิวหน้า

U₂ เป็นความชื้นภายใน

U₂ > U₁ เนื่องจากความชื้นภายในมากกว่าความชื้นที่ผิวหน้า ทำให้น้ำจากภายในเคลื่อนออกมาที่บริเวณผิวหน้ากระเบื้อง

ปริมาณของน้ำที่ระเหยออกมาจะเป็นไปตามสมการ

$$\frac{dv}{dt} = \frac{K(U_2 - U_1) \times P}{dn}$$

$$\frac{dv}{dt} = \text{ปริมาณน้ำที่ระเหยออกจากเนื้อกระเบื้อง}$$

$$U_2 - U_1 = DU \text{ ผลต่างระหว่างความชื้นภายนอกกับภายใน}$$

$$K = \text{ค่าคงที่}$$

$$d = \text{ระยะทางระหว่างผิวหน้ากับ } U_2$$

$$n = \text{ความหนืดของน้ำ}$$

สมการนี้จะแสดงความสัมพันธ์ความเร็วการเคลื่อนตัวของน้ำออกจากภายในของกระเบื้องของแต่ละชั้น จะเห็นว่า ความเร็วการระเหยขึ้น กับผลต่างระหว่างความชื้นของภายในและผิวหน้ากระเบื้อง U2-U1 อีกตัวแปรที่ต้องพิจารณาคือ "การซึมผ่าน" ของบดี้ที่แห้งก็จะเป็นผลโดยตรงกับการเคลื่อนที่ของน้ำ "การซึมผ่าน" จะมากขึ้นเมื่อเพรสเชอร์ที่ใช้ในการบีบสูงขึ้น

ตัวแปรตัวสุดท้ายที่ต้องคำนึงถึงคือ "ความหนืดของน้ำ" ซึ่งจะเป็นส่วนกลับของอุณหภูมิตั้ง

เมื่อน้ำภายในเคลื่อนมาอยู่บริเวณผิวหน้ากระเบื้องแล้วการระเหยจึงจะเริ่มขึ้น จะขึ้นกับพื้นที่หน้าตัดและแรงยึดเกาะของไอน้ำ ซึ่งทำให้ลดลงได้โดยผ่านลมร้อน

การอบกระเบื้องจะขึ้นกับขบวนการหลัก ๆ 2 อย่าง คือ

1. การเคลื่อนย้ายของน้ำ (WATER MIGRATION)
2. การระเหยเป็นไอ (EVAPORATION)

การที่จะทำให้ น้ำเคลื่อนที่จากภายในมาอยู่ที่ผิวหน้าและระเหยออกจนหมดคอนดิชันที่เหมาะสม ก็ต่อเมื่ออัตราความเร็วของขบวนการทั้ง 2 เท่ากันเป็นที่ทราบกันอย่างชัดเจนแล้วว่าขบวนการเคลื่อนย้ายของน้ำ (MIGRATION) จะช้าที่สุด ดังนั้น เวลาการอบ ส่วนใหญ่จะเป็นการไว้สำหรับการเคลื่อนย้าย MIGRATION ของขบวนการที่ 1

ขบวนการอบขึ้นตอนที่ 1 จะมีการเปลี่ยนแปลงขนาดของกระเบื้องเกิดขึ้น เป็นขั้นตอนที่วิกฤตที่สุด เราจะต้องกำหนดอัตราความเร็วการอบเพื่อที่จะควบคุมไม่ให้เสี่ยงต่อการแตกร้าว เนื่องจากการหดตัว อุณหภูมิจะค่อนข้างต่ำ แนนอนอัตราการระเหยกลายเป็นไอก็จะช้าด้วย เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดผิวหน้าบิดเนื่องจากเกิด "ซูเปอร์ฟิเซียล เลเยอ" ที่ผิวหน้ากระเบื้อง ซึ่งจะปิดกั้นทางออกน้ำจากในมาที่ผิวหน้า ทำให้เกิดการแตกร้าวขึ้น

การทำงานของเรเดียเตอร์ ที่ช่วงคลื่นความยาว 3/6 ไมครอน/ม. ในอากาศจะทำให้กระเบื้องมีอุณหภูมิสูงขึ้นโดยปราศจากการระเหย เป็นการลดความเสี่ยงเหลือศูนย์

ประสิทธิภาพ หมายถึง ความเร็ว

ตัวแปรที่สำคัญคือ "เวลา" สำหรับขบวนการผลิตอย่างต่อเนื่อง "เตาอบชนิดโรลเลอร์" จึงเข้ามามีบทบาท (ROLLER FAST DRYER) ด้วยระบบการ "พาความร้อน" (CONVECTION) แบบธรรมชาติ เวลาที่จะอบให้กระเบื้องร้อน 120 °C อย่างน้อยต้องใช้เวลา 12 นาที และใช้ลมร้อนที่ 180 °C ถ้าเตาอบโรลเลอร์มีความเร็ว 2 เมตร/นาที เตาอบจะต้องมีความยาวอย่างน้อย 24 เมตร แนนอนเป็นไปไม่ได้ที่จะสร้างเตาอบโรลเลอร์ยาวขนาดนี้ เนื่องจากกินสถานที่มากเกินไป หรือการที่จะไปสร้างเตาอบเป็น 2-3 ชั้น ค่าใช้จ่ายก็จะสูงมากเนื่องจากเพิ่มเครื่องจักรบ่อนกระเบื้องเข้าและนำกระเบื้องออกหลายชุด อีกทั้งยังเป็นปัญหามานการทางานอีก

ด้วยเหตุนี้ เคาอบแบบเรเดียนส์ (RADIANTS) จึงเข้ามามีบทบาทอย่างสูง ซึ่งเคาอบแบบพาความร้อน (CONVECTION) ไม่สามารถทำได้

ด้วยเวลาสั้นเพียง 3 นาที เคาอบแบบเรเดียนส์ (การแผ่รังสี) สามารถเพิ่มอุณหภูมิกระเบื้องจาก 20 °C เป็น 120 °C และด้วยความเร็วของเคาอบเท่ากัน จะใช้เคาอบยาวแค่ 6 เมตร เท่านั้น ก็จะได้อุณหภูมิที่ต้องการ

นั่นก็หมายความว่า หลังจาก 3 นาที เราจะได้ความชื้นมาอยู่ที่ผิวหน้าของกระเบื้อง และอีก 3 นาที โดยการผ่านลมร้อนที่ 180 °C ให้กับกระเบื้อง ก็จะสามารถอบกระเบื้องให้แห้งสนิทได้ นั่นก็หมายความว่า เราจะต้องการเคาอบแบบโรลเลอร์ยาวเพียงแค่ 12 เมตร เท่านั้นก็สามารถให้กำลังผลิตรได้มากกว่า 200 ตร.ม/ชม.

ประสิทธิภาพ

ปริมาณความร้อนที่ต้องการในการอบกระเบื้อง 1 กก. จาก 20 °C —> 120 °C คือ

$$Q = Kg' \times Cp \times Dt = 1 \times 0.24 \times (120-20) = 24 \text{ Kcal/Kg'}$$

ปริมาณความร้อนในการเปลี่ยนน้ำ 1 กก. ให้กลายเป็นไอ , ความทฤษฎี 540 Kcal

สมมุติว่า เรามีผงดินความชื้น 6 % ดังนั้น กระเบื้อง 1 กก. จะมีน้ำอยู่ 60 กรัม ที่ต้องการกำจัดออก

$$\frac{1,000}{540} = \frac{60}{X}$$

$$X = \frac{540 \times 60}{1,000} = 32.4 \text{ Kcal/Kg' กระเบื้อง}$$

ด้วยเคาเรเดียนส์ที่ความถี่ 3/6 ไมโคร/เมตร ประสิทธิภาพ 90 % เราจะได้

$$Q.t = \frac{24 + 32.4}{0.9} = 62.6 \text{ Kcal/Kg'}$$

ไม่มีระบบใดสามารถทำได้เร็วและถูกเช่นนี้ !!!

หนังสืออ้างอิง

- 1) George A. Kirkendale, editor, "Drying Claywares," 2nd printing, Alfred University, USA., 1972
- 2) R.W. Ford, "Ceramics Drying," Pergamon Press, Oxford, UK., 1986.
- 3) Jame S. Reed, "Principles of Ceramics Processing," John Wiley & Sons, Inc., New York, USA., 1994.
- 4) Thomas Stubbing and Bill Aston, "Airless Drying and Airless Dryer," Global Ceramic Review, Vol 2, pp42-43, 1996.
- 5) C.M. Vant Land, "Industrial Drying Equipment Selection and Application,," Marcel Dekker Inc., 1991.
- 6) Aruns Mujumdar editor, "Handbook of Industrial Drying," 2nd Edition Volume 1, Marcel Dekker, 1995.
- 7) Interceram, Vol. 45, No 3, pp149-150, 1996.
- 8) D. Vileneuve, R. Girard, M. Giroux, and J. Kendall, "Microwave Characterization of a Ceramic Green Body for an Industrial Drying Process," Interceram, Vol 41, No.3, pp 143-147, 1992.
- 9) J.T. Jones and M.F. Berard, "Ceramics Industrial Processing and Testing," 5th Printing, The Iowa State University Press, Ames, Iowa, 1985.
- 10) G.Y. Onoda Jr. and L.L. Hench, "Ceramic Processing Before Firing," John Wiley and Sons, 1978.
- 11) Aruns Mujumdar editor, "Handbook of Industrial Drying," Marcel Decker Inc., 1987.
- 12) F.H. Norton, "Elements of Ceramics," Addison Wesley Publishing Company, India, 1970.
- 13) Karl Thoma, "New Development and Prospects in Drying Technology-Part 1," 1992.
- 14) Lawrence H. Van Vlack, "Elements of Materials Science and Engineering," 6th Edition, Addison-Wesley Publishing Company, USA., 1989.

