

## บทที่ 2

### เซรามิกส์และผลิตภัณฑ์พอร์ซเลน

เซรามิกส์ เดิมผลิตภัณฑ์เซรามิกส์เป็นผลผลิตจากดินที่ทำเป็นรูปร่างและเผาที่อุณหภูมิสูง พอที่จะได้ความแข็ง ซึ่งจริง ๆ แล้วไม่ถูกต้องเพราะต้องรวมผลิตภัณฑ์ที่ผลิตจากแก้วและซิเมนต์ด้วยต่อมาเมื่อมีความก้าวหน้าทางการพัฒนาผลิตภัณฑ์และการให้ความสำคัญต่อผลิตภัณฑ์ชนิด non-clay ceramics ทำให้ความหมายของเซรามิกส์เปลี่ยนเป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากวัสดุหรือสารผสมที่ได้กระบวนการบำบัดด้วยความร้อน แต่อย่างไรก็ตามปริมาณการผลิตของเซรามิกส์ที่เป็นชนิดที่มีดินเป็นวัตถุดิบหลัก (clay-based ceramics) มีมากกว่าชนิดที่วัตถุดิบหลักไม่ใช่ดิน (non-clay ceramics) ดังนั้นดินยังคงเป็นวัสดุหลักที่สำคัญของเซรามิกส์

ชนิดของผลิตภัณฑ์เซรามิกส์ มีมากมาย เช่น

- เครื่องถ้วยชาม
- เครื่องปั้นดินเผา
- แก้ว
- เครื่องสุขภัณฑ์
- เครื่องเคลือบทนต่อกรดสำหรับกระบวนการผลิตทางเคมี
- เตาเผาอุณหภูมิสูง

คุณสมบัติผลิตภัณฑ์ขึ้นอยู่กับ

- ชนิด ความบริสุทธิ์ และปริมาณของส่วนผสม
- วิธีการและสภาวะในการผลิต

ซึ่งทั้งสองประการนี้ต้องควบคู่กันไป เพราะชนิดหรือปริมาณของส่วนผสมจะเป็นตัวกำหนดสภาวะและวิธีการผลิต

#### 2.1. พอร์ซเลน

ผลิตภัณฑ์พอร์ซเลนเป็นผลิตภัณฑ์ที่ประกอบด้วยองค์ประกอบ 2 ส่วนที่สำคัญคือเนื้อดินปั้นชนิดพอร์ซเลนและเคลือบ

##### 2.1.1 เนื้อดินปั้นชนิดพอร์ซเลน

จัดเป็นเนื้อดินปั้นชนิดที่ประกอบด้วยวัตถุดิบ 3 ชนิด (triaxial) ผสมกันคือดิน ทราช และเฟลด์สปาร์ วัตถุดิบทั้ง 3 ชนิดนี้เป็นสินแร่ที่ได้จากธรรมชาติที่หาได้ง่ายและมีราคาถูก แต่ส่วนมากแล้วมักไม่ค่อยบริสุทธิ์ คือมีสารเจือปนด้วยซึ่งจะมีผลต่อโครงสร้างของผลิตภัณฑ์พอร์ซเลนและส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติด้วย เช่น ดินขาวซึ่งโดยปกติถ้าบริสุทธิ์จะประกอบด้วย ซิลิกา อะลูมินา และน้ำเท่านั้น แต่โดยทั่วไปมักจะพบว่ามีธาตุเหล็ก แคลเซียม และแมกเนเซียมปนอยู่ด้วย

## วัตถุดิบ

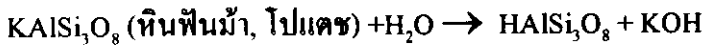
(1). ดิน เป็นวัตถุดิบที่สำคัญในการผลิตผลิตภัณฑ์พอร์ซเลนชนิดที่ใช้เป็นภาชนะรองรับอาหาร หรือกระเบื้องดินมีหลายชนิดแตกต่างกันในคุณสมบัติทางกายภาพเช่นมีความเหนียวต่างกัน สีต่างกัน และมีความแตกต่างกันทางด้านคุณสมบัติทางเคมี ดินที่ใช้เป็นวัตถุดิบของผลิตภัณฑ์พอร์ซเลนมี 2 ชนิดคือ

-ดินขาว (Kaolin , China clay) หมายถึง ดินที่มีสีขาวหรือสีซีดจาง แหล่งที่พบดินขาวมี 2 แหล่ง คือ

แหล่งต้นกำเนิด (residual deposit)

ดินเหล่านี้มักพบในลักษณะเป็นภูเขา หรือที่ราบซึ่งเดิมเป็นแหล่งหินฟีนมา สภาพธรรมชาติโดยบรรยากาศรอบๆ ทำให้เกิดการสลายตัวเป็นดินขาว โดยปฏิกิริยาแสดงขั้นตอนการเปลี่ยนแปลง ดังนี้

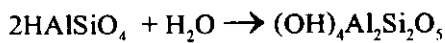
-ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (hydrolysis)



-ปฏิกิริยาการสลายตัวให้ซิลิกา (desilication)



-ปฏิกิริยาการรวมตัวกับน้ำ (hydration) ได้ดินขาว



สิ่งเจือปนที่พบในดินขาวอาจเป็นสิ่งเจือปนที่มากับหินฟีนมา หรือเป็นผลิตภัณฑ์อื่น ๆ ที่ยังไม่เปลี่ยนแปลงเนื่องจากปฏิกิริยายังไม่สมบูรณ์ สิ่งสกปรกที่พบเสมอในดินเหล่านี้ คือ ซิลิกา ( $\text{SiO}_2$ ) และหินฟีนมา

แหล่งสะสมที่ลุ่ม เป็นแหล่งดินขาวที่เกิดจากดินขาวจากแหล่งแรก ถูกกระแสน้ำพัดพาไปสะสมในที่ลุ่มแหล่งที่พบดินขาวประเภทนี้ในประเทศไทย มีหลายจังหวัด เช่น ที่ลำปาง อุตรดิตถ์ ปราจีนบุรี ระนอง นครศรีธรรมราช สุราษฎร์ธานี เป็นต้น

ส่วนประกอบทางเคมี

แร่ดินขาวมีหลายอย่างแตกต่างกันไปตามโครงสร้าง และสูตรทางเคมี สูตรเคมีพื้นฐานของผลิตภัณฑ์พอร์ซเลนของดินขาวมีส่วนประกอบเป็น  $(\text{OH})_4\text{Al}_2(\text{Si}_2\text{O}_5)_2$  หรือ  $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  ซึ่งมีส่วนประกอบ

$\text{Al}_2\text{O}_3$	ร้อยละ	39.8
$\text{SiO}_2$	ร้อยละ	46.3
$\text{H}_2\text{O}$	ร้อยละ	13.9

แร่ดินขาวที่พบมากที่สุดคือ Kaolinite ซึ่งมีโครงสร้างที่ประกอบด้วย หนึ่ง layer ในหนึ่งเซลล์ที่เกิดจากการจับตัวของ tetrahedral sheet กับ octahedral sheet โดยโครงสร้างของมันเป็น triclinic แร่ดิน

ชาวชนิดอื่น ๆ ซึ่งมีความแตกต่างกันในส่วนโครงสร้าง ที่พบบ้าง ได้แก่ Dickite, Nacrite, Halloysite Anauseite

### คุณสมบัติทางกายภาพ

การทราบคุณสมบัติทางกายภาพของดินขาว (Kaolinite) จะช่วยให้เราสามารถทำนายถึงคุณสมบัติของเนื้อดินปั้น ที่มีดินขาวนั้นผสมอยู่ด้วย คุณสมบัติที่ควรศึกษา คือ

- รูปร่าง (shape) อนุภาคดินขาวชนิด Kaolinite จะมีรูปร่างเป็นแผ่น หกเหลี่ยม มีขนาดตั้งแต่ 0.05 ถึง 10 ไมครอน หรือ ขนาดเฉลี่ย 0.5 ไมครอน

- ขนาด (size) อนุภาคที่มีขนาดต่าง ๆ กัน จะมีคุณสมบัติในเรื่องความเหนียว (plasticity) และการหดตัวเมื่อแห้ง (drying shrinkage) ต่างกัน โดยทั่วไปดินที่มีเม็ดละเอียดจะให้ความเหนียวและหดตัวมากกว่าดินหยาบ

- ความสามารถในการแลกเปลี่ยนอนุมูล (base exchange capacity) แร่ชนิด kaolinite จะมีการแทนที่กันของพวกอนุมูลบวก ในโครงสร้างน้อยมาก โดยเฉพาะผลึกที่บริสุทธิ์จะไม่มีความสามารถในการแลกเปลี่ยนอนุมูลเลย จะมีการแลกเปลี่ยนได้เมื่อเป็นผลึกที่ไม่สมบูรณ์ หรืออาจมีการดูดเอาผลึกขนาดเล็กของแร่ที่เป็นพวก three layer เข้าไว้ที่ว่าง โดยความสามารถในการแลกเปลี่ยนอนุมูลของดินขาว แหล่งต่าง ๆ อยู่ในช่วง 1-10 มิลลิสมมูลย์ / 100 กรัมของดินขาว

- ความแข็งแรงก่อนเผา (green strength) คุณสมบัติข้อนี้มีความสำคัญมากในกรณีที่ใช้ แร่ดินขาว ในเนื้อดินที่ไม่มีดินเหนียว (ball clay) อยู่เลย เพราะดินขาวจะเป็นตัวกำหนดความแข็งแรงของผลิตภัณฑ์ดิน

- คุณสมบัติเมื่อแห้ง (drying properties) เช่น การหดตัวมักไม่พิจารณาเป็นตัวแปรที่สำคัญ เพราะ โดยทั่วไปไม่ได้ใช้ดินขาวล้วน ๆ เป็นเนื้อดินปั้น การหดตัวอยู่ในช่วง 1-10 %

- คุณสมบัติ หลังเผา (firing properties) เนื้อดินขาวล้วน ๆ จะมีการหดตัวภายหลังการเผาถึง 20% จึงไม่ควรใช้เนื้อดินขาวล้วน ในการทำดินปั้น

### -ดินค้ำเหนียว (ball clay)

นอกเหนือจากดินขาวที่ใช้มากในอุตสาหกรรมเซรามิกส์ ดินค้ำเหนียวก็เป็นวัตถุดิบที่มีความสำคัญยิ่งเช่นกัน โดยที่ถ้าเปรียบดินขาวกับดินค้ำเหนียวแล้ว ดินขาวเป็นส่วนที่ให้ความแข็งแรงในโครงสร้าง เปรียบเสมือนกระดูกสันหลัง ส่วนดินค้ำเหนียวนั้นจะให้ความแข็งแรงในส่วนที่เปรียบเสมือนเนื้อ การที่เนื้อดินปั้นมีดินค้ำเหนียวผสม กันจะทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ยังไม่เผา มีความแข็งแรงมากกว่าดินขาว

ดินค้ำเหนียวเป็นดินที่มีสีขาวคล้ำจนถึงดำสนิท มีเม็ดละเอียด มีสารอินทรีย์เจือปน โดยสารอินทรีย์นี้มีส่วนประกอบคล้ายลิกไนต์ มาก มีความเหนียวดีที่ช่วยการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในการเปลี่ยนสภาพเนื้อดิน ไปเป็นแก้วค่อนข้างกว้าง คุณสมบัติเหล่านี้จะมีการเปลี่ยนแปลงแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับแหล่งที่มา ภายหลังการเผาดินค้ำเหนียว จะมีสีขาว หรือสีซีดจาง

### ส่วนประกอบทางเคมี

ดินค้ำเหนียวเมื่อแห้ง มีความแข็งแรงและมีการหดตัวสูง แร่ที่มักพบในดินค้ำเหนียวเสมอเช่น ไมกา หินเขียวหนุมาน เหล็กซัลไฟด์ ส่วนประกอบทางเคมี มีความแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับแหล่งที่พบ โดยมีส่วนประกอบ โดยประมาณ ดังนี้

-SiO <sub>2</sub>	ร้อยละ	40-60
-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	ร้อยละ	30
-H <sub>2</sub> O ในผลึกอินทรีย์สาร	ร้อยละ	30
-TiO <sub>2</sub> , Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , MgO, K <sub>2</sub> O และ Na <sub>2</sub> O เล็กน้อย		

### คุณสมบัติทางกายภาพ

- ขนาด ดินค้ำเหนียวมีขนาดอนุภาคเล็กกว่าดินขาว ส่วนจะมีขนาดเล็กมากน้อยเท่าใดขึ้นอยู่กับแหล่งที่พบ
- ความเหนียว มีความเหนียวมากกว่าดินขาว ทำให้การปั้นรูปดีขึ้นและช่วยรักษาสภาพรูปร่างของเนื้อดินปั้น ภายหลังจากปั้นรูปให้คงสภาพอยู่ได้
- การหดตัวเมื่อแห้ง ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของดินค้ำเหนียวดินค้ำเหนียวบางแหล่งมีสารอินทรีย์สูง การหดตัวจะมาก ถึงร้อยละ 15 แต่ถ้ามีซิลิกาเป็นปริมาณมาก ก็จะไม่มีการหดตัว
- ความแข็งแรงก่อนเผา มีความแข็งแรงมากกว่าดินขาว
- คุณสมบัติหลังเผา เนื่องจากดินค้ำเหนียวมีส่วนประกอบของไมกาอยู่ด้วย เมื่อเผาเนื้อดินปั้น ไมกาจะทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ทำให้ผลิตภัณฑ์มีความแน่นและเนียนมากขึ้น

### (2).กลุ่มวัตถุดิบที่มีคุณสมบัติทางเคมีเป็นค่า ใช้ในการวิจัย คือ

- เฟลด์สปาร์ (Feldspar) เฟลด์สปาร์เป็นสาร ประกอบอะลูมิเนียมซิลิเกตของ อัลคาไลด์และอัลคาไลด์เออร์ทาในธรรมชาติเฟลด์สปาร์จะอยู่ในรูปอะลูมิเนียมซิลิเกตของโซเดียม (Sodium) , โพแทสเซียม (Potassium), แคลเซียม (Calcium), ลิเทียม (Lithium)และสารประกอบของแบเรียมและแคลเซียมแต่จะพบมากในธรรมชาติจะเป็นสารประกอบของโซเดียม โพแทสเซียมและแคลเซียมซึ่งสารประกอบเหล่านี้จะใช้ในอุตสาหกรรมเครื่องปั้นดินเผา

เฟลด์สปาร์ที่พบมากมี 3 ชนิด คือ

Na <sub>2</sub> O.Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .6SiO <sub>2</sub>	โซเดียมเฟลด์สปาร์ หรือ albite
K <sub>2</sub> O.Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .6SiO <sub>2</sub>	โพแทสเซียมเฟลด์สปาร์ หรือ orthoclase
CaO.Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .2SiO <sub>2</sub>	แคลเซียมเฟลด์สปาร์ หรือ anorthite

โครงสร้างของเฟลด์สปาร์เป็นร่างแห 3 มิติ เกิดจากการโยงกันของออกซิเจนทั้ง 4 อะตอม ของ oxygen-silicon tetrahedron นอกจากนี้ Al<sup>3+</sup> ยังไปแทนที่ Si<sup>4+</sup> บางส่วน และช่องว่างในโครงสร้างร่างแห

ยังถูก  $K^+$ ,  $Na^+$ ,  $Ca^{+2}$  เข้าไปอยู่ขนาดของอนุภาค  $Na^+$  เท่ากับ  $0.94^{\circ}A$ ,  $Ca^{+2}$  เท่ากับ  $1.066^{\circ}A$ , และ  $K^+$  เท่ากับ  $1.33^{\circ}A$  เนื่องจากขนาดของ  $Na^+$  และ  $Ca^{+2}$  มีขนาดใกล้เคียงกัน สารประกอบเหล่านี้จึงละลายกันได้ดี ส่วน  $K^+$  มีขนาดใหญ่มาก สารประกอบของ  $K^+$  จึงละลายเข้ากับสารประกอบของ  $Na^+$  และ  $Ca^{+2}$  ได้เพียงบางส่วน คุณสมบัติต่าง ๆ ของเฟลด์สปาร์แสดงไว้ในตาราง 2.1

ตาราง 2.1 คุณสมบัติต่าง ๆ ของเฟลด์สปาร์

แร่ธาตุ	สูตรและองค์ประกอบ(ร้อยละ)	ความถ่วงจำเพาะ	ความแข็ง (hardness)	รูปผลึกสี
โปแตสเซียมเฟลด์สปาร์ microcline potash	$K_2O \cdot Al_2O_3 \cdot 6SiO_2$ 16.9 18.3 64.8	2.56	6	โมโนคลินิก ไม่มีสี, สีขาว, แดงสด, เหลืองอ่อน, และสีเทา
	$K_2O \cdot Al_2O_3 \cdot 6SiO_2$ 16.9 18.3 64.8	2.54 - 2.57	6.0-6.5	ไตรคลินิก สีขาว แกมเหลือง เทา เขียว หรือแดง
โซเดียมเฟลด์สปาร์ หรือ albite anorthite lime spar	$Na_2O \cdot Al_2O_3 \cdot 6SiO_2$ 11.8 19.4 68.8	2.61 - 2.64 2.70 - 2.76	6.0-6.5 6.0 6.5	ไตรคลินิก สีเทา ไตรคลินิก ไม่มีสี สีขาวหรือเทา
	$CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$ 20.1 36.6 43.			สีขาวหรือสีเทา

ที่มา: Norton, F.H., 1970 : p.78

### ส่วนประกอบทางเคมี ประกอบด้วย

ส่วนประกอบทางเคมีของเฟลด์สปาร์ที่เป็นสารประกอบอื่น นอกเหนือจากโซเดียมจะมีอัตราส่วนที่คงที่พอสมควร ออกไซด์ และโปแตสเซียมออกไซด์ เฟลด์สปาร์ที่มีปริมาณโซเดียมออกไซด์ สูงใช้ในการผลิตแก้วและเคลือบ ส่วนเฟลด์สปาร์ที่มีปริมาณโปแตสเซียมออกไซด์สูงใช้ในการ ผลิตเนื้อดินปั้น

โปแตสเซียมออกไซด์	ระหว่าง ร้อยละ	3.3 - 13.1
โซเดียมออกไซด์	ระหว่าง ร้อยละ	1.9 - 12.9
เหล็กออกไซด์	ระหว่าง ร้อยละ	0.02 - 0.4

## การเตรียมเนื้อดินปั้น

เนื้อดินปั้นเซรามิกส์ ชนิดพอร์ซเลนจัดเป็นเนื้อดินปั้นที่มีดินเป็นส่วนประกอบ การวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพ และทางเคมีของวัตถุดิบเป็นสิ่งที่จำเป็นเพื่อความสะดวกต่อการเตรียมเนื้อดินปั้น เมื่อจำเป็นจะต้องใช้วัตถุดิบใหม่ ๆ แทนวัตถุดิบเก่าทั้งนี้เนื่องมาจาก วัตถุดิบอาจเกิดการขาดแคลนหรือเพื่อการประหยัดลดต้นทุนการผลิตทำให้สามารถสร้างเนื้อดินปั้นจากวัตถุดิบใหม่ให้มีคุณสมบัติเหมือนกับเนื้อดินปั้นเดิมทั้งก่อนและหลังการเผา ซึ่งเท่ากับเป็นการควบคุมคุณภาพระหว่างการผลิตผลิตภัณฑ์

ขั้นตอนการเตรียมเนื้อดินปั้น : แบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอน คือ

### (1). การบดขยี้วัตถุดิบให้มีขนาดเล็กลง

วัตถุดิบเซรามิกส์ส่วนใหญ่มีอยู่ในเปลือกโลก ซึ่งหลังจากทำเหมืองวัตถุดิบแล้ว จำเป็นต้องบดขยี้ให้มีขนาดเล็กลง คัดขนาดและขนส่งไปยังโรงงานต่อไป และที่โรงงานยังจะต้องนำวัตถุดิบมาบดขยี้ และคัดขนาดอีกครั้งเพื่อให้ได้ขนาดวัตถุดิบที่เหมาะสมกับการนำไปขึ้นรูป ในงานวิจัยนี้ใช้เครื่องบดชนิด Jar mill และ Jaw crusher เป็นตัวลดขนาดวัตถุดิบให้เหมาะสมกับการใช้งาน

### (2). การล้างเนื้อดินที่เป็นวัตถุดิบ

เป็นการชำระล้างสิ่งเจือปนในวัตถุดิบโดยนำวัตถุดิบมาละลายน้ำ ให้น้ำเป็นตัวชะล้างสิ่งเจือปนต่าง ๆ ออก แล้วทำการกรองแบบอัดความดัน (filter press) วัตถุดิบที่ผ่านการล้างแล้วจะค้างอยู่บนผ้ากรอง ซึ่งจะนำไปทำการทดลองต่อไป

### (3). การเตรียมน้ำ slip

ในการเตรียมเนื้อดินปั้นสำหรับการขึ้นรูปแบบเทแบบ (slip casting) ซึ่งเตรียมโดยใช้วัตถุดิบที่เตรียมไว้ ผสมกันตามสัดส่วนที่คำนวณได้ในหม้อบด จากนั้นจึงเติมน้ำแล้วทำการบดเพื่อทำให้วัตถุดิบเข้ากันได้ทั่วถึงเป็นเนื้อเดียวกัน จนวัตถุดิบกลายเป็นน้ำ slip ซึ่งมีลักษณะเป็นเนื้อดินปั้นข้น ๆ โดยมีน้ำอยู่ประมาณ 25 % แต่ไม่เกิน 80% น้ำ slip ต้องมีความเหนียวพอดีไม่เหลวหรือข้นเกินไป ควรมีความถ่วงจำเพาะ และความหนืดที่เหมาะสมสำหรับการเทแบบ แต่ละวิธีคือ

สำหรับการเทแบบที่มีการเหนี่ยวน้ำดินที่เหลือทิ้ง ควรมี ถ.พ. ระหว่าง 1.15 - 1.80

ความหนืดระหว่าง 1 - 5 poises

สำหรับการเทแบบที่ปล่อยให้น้ำดินแข็งในแบบควรมี ถ.พ. ระหว่าง 1.75 - 1.95

ความหนืดระหว่าง 5 - 10 poises

## การขึ้นรูปผลิตภัณฑ์เนื้อดินปั้น

ในโรงงานอุตสาหกรรม อาจแบ่งการขึ้นรูปได้ 6 วิธี ดังนี้

(1). การขึ้นรูปโดยการเทแบบ (slip casting) มี 2 ชนิด คือ

การเทแบบโดยใช้น้ำดินแข็งตัวอยู่ในแบบเลย เรียกว่า solid casting ซึ่งเหมาะกับการเทแบบผลิตภัณฑ์ที่มีความหนา และ รูปร่างแปลก ๆ

การเทแบบโดยการเทน้ำดินที่เหลือทิ้ง เรียกว่า drain casting ซึ่งเหมาะกับการผลิตภัณฑ์ที่ต้องการผนังบางและต้องการหนาสม่ำเสมอ ส่วนแบบที่ใช้ในการขึ้นรูป วิธีนี้เป็นแบบปลาสเตอร์ (Plaster Mold) ซึ่งเป็นแบบที่มีคุณสมบัติในการดูดซึมน้ำได้ดี เหมาะกับการขึ้นรูปแบบเทแบบ น้ำดินที่เทลงในแบบประกอบด้วยน้ำประมาณ 25% น้ำในน้ำดินจะถูกปลาสเตอร์ดูดด้วยแรงที่เกิดจากรูพรุนในแบบ น้ำดินบริเวณผิวแบบจะเข้มข้นขึ้นเรื่อย ๆ จนในที่สุดก็จะเหลือแต่เนื้อดินสะสมที่ผิวแบบ กลายเป็นผนังของผลิตภัณฑ์ ผนังของผลิตภัณฑ์จะหนามากขึ้นตามเวลาที่ผ่านไป

## (2). การขึ้นรูปโดยอาศัยความเหนียว แบ่งเป็น

การขึ้นรูปโดยอาศัยเป็นหมุน (throwing) การขึ้นรูปวิธีนี้ต้องอาศัยความชำนาญเป็นพิเศษใช้กับการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ง่าย ๆ เช่น แจกันและผลิตภัณฑ์ฉนวนไฟฟ้าแรงสูงบางชิ้น

การขึ้นรูปโดยอาศัยเครื่อง jig (jiggering) วิธีนี้ดัดแปลงมาจากการขึ้นรูปโดยเป็นหมุน คือ วางเนื้อดินปั้นบนแบบปลาสเตอร์ ซึ่งติดอยู่กับเป็นหมุน แล้วกดแม่แบบอีกอันหนึ่งเนื้อดินปั้น ก็จะได้ผลิตภัณฑ์ซึ่งด้านหนึ่งจะเหมือนแบบปลาสเตอร์ ส่วนอีกด้านหนึ่งจะเหมือนแม่แบบที่กดลงบนเนื้อดินปั้น การขึ้นรูปวิธีนี้นิยมใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมมาก

## (3). การขึ้นรูปโดยการอัดเนื้อดินปั้นเป็นฝุ่น (dust pressing)

วิธีนี้ใช้อัดเนื้อดินปั้นที่เป็นฝุ่นซึ่งมีน้ำประมาณ 5 - 10 % ในแบบโลหะด้วยความดันสูง วิธีนี้ใช้ขึ้นรูปพวกกระเบื้อง และผลิตภัณฑ์ฉนวนไฟฟ้า บางชนิด โดยมีการเตรียมเนื้อดินปั้น 3 วิธีดังนี้

บดส่วนผสมโดยบดเปียกผ่านตะแกรงร่อน 325 mesh ผ่านเครื่องดูดเอาสารเหล็กออกก่อน แล้วอัดเพื่อขจัดน้ำ เอาแผ่นดินที่ได้ไปตากแห้ง เหลือน้ำระหว่าง 5 - 10 % แล้วบดให้เป็นฝุ่นและเก็บไว้ใช้ขึ้นรูปต่อไป

เตรียมคล้ายวิธีแรก แทนที่จะเข้าเครื่องกรอง แล้วอัดเป็นแผ่นดินแต่เราจะให้น้ำดินผ่านเครื่องอบแห้งแบบสเปรย์ (spray dryer) ได้ส่วนผสมที่เป็นฝุ่น

เตรียมโดยผสมวัตถุดิบต่าง ๆ ที่แห้งและละเอียดเป็นฝุ่นดีแล้วกับน้ำในปริมาณที่เหมาะสม

(4). การขึ้นรูปโดยอัดเนื้อดินปั้นผ่านหัวแบบ (extension) ทำโดยอัดเนื้อดินปั้นซึ่งมีความเหนียวผ่านแผ่นโลหะที่มีลักษณะคล้ายรวงผึ้ง จากนั้นจึงอัดเนื้อดินปั้นผ่านกระบอกสูบ ซึ่งอาจมีการดูดอากาศออกด้วย และถ้าต้องการให้มีรูปร่างอย่างไรก็ทำให้ใส่แบบไว้ที่ปลายกระบอกสูบ แล้วส่งแรงอัดก็จะได้ผลิตภัณฑ์ออกมา

(5). การขึ้นรูปโดยอัดเนื้อดินปั้นที่แห้ง (dry pressing) วิธีการนี้คล้ายวิธีการอัดเนื้อดินปั้นที่เป็นฝุ่นต่างกันตรงที่ % น้ำในเนื้อดินปั้น มีเพียง 1.5 % หรือน้อยกว่า นอกจากนี้ยังมีการผสมสารที่ช่วยให้เกิดความเหนียว ช่วยในการขึ้นรูป

(6). การขึ้นรูปโดยวิธี ไอโซสแตติกเพรสซิ่ง (isostatic pressing) ทำโดยการอัดเนื้อดินปั้นลงในแบบที่ยึดหยุ่นได้โดยแรงอัดชนิด isostatic ข้อดีวิธีนี้คือ ผลิตภัณฑ์ทุกส่วนจะมีความหนาใกล้เคียงกันมาก ทำให้ไม่โค้งงอเวลาเผา และสามารถใช้ความดันสูง ๆ ได้ โดยไม่มีปัญหาเรื่องการแตก แต่มีข้อเสียคือรูปร่างภายนอกของผลิตภัณฑ์ไม่ได้รูปร่างที่ถูกต้อง

### 2.1.2 เคลือบพอร์ซเลน

เคลือบ คือชั้นของแก้วหรือ ชั้นของแก้วซึ่งมีผลึกปนอยู่ ฉาบอยู่บนผลิตภัณฑ์เซรามิกส์ซึ่งเกิดจากน้ำเคลือบที่เป็นสารประกอบของ silicate ผสมกับสารประกอบอย่างอื่นที่เป็นตัวช่วยหลอมละลาย ซึ่งเราเรียกว่าฟลักซ์ (flux) อาจจะมีออกไซด์ของโลหะผสมลงไปด้วย เพื่อทำให้เกิดสีและทึบในเคลือบ เมื่อเผาส่วนผสมของน้ำเคลือบถึงอุณหภูมิที่ทำให้หลอมละลายแล้ว น้ำเคลือบจะรวมตัวเป็นเนื้อเดียวกัน และเมื่อทิ้งไว้ให้เย็นจะมีลักษณะเหมือนแก้วบาง ๆ ฉาบติดอยู่กับผิวผลิตภัณฑ์

#### วัตถุประสงค์ของการเคลือบผลิตภัณฑ์

ผลิตภัณฑ์เครื่องปั้นดินเผาบางอย่างอาจจะไม่มีการเคลือบก็ได้ เช่น กระจาดต้นไม้ อิฐ เป็นต้น แต่ผลิตภัณฑ์บางชนิดต้องการเคลือบ โดยมีวัตถุประสงค์แตกต่างกันไปตามลักษณะการใช้งานหรือตามความต้องการของผู้ใช้ วัตถุประสงค์โดยทั่วไป ของการเคลือบผลิตภัณฑ์มีดังนี้

1. เพื่อป้องกันการซึมผ่านของแก๊สและน้ำ
2. เพื่อให้ได้ความแข็งแรงทนทานต่อการกัดกร่อนต่าง ๆ
3. เพื่อให้มีความสวยงามน่าใช้
4. เพื่อป้องกันไม่ให้สกปรกง่าย และสะดวกในการทำทำความสะอาด
5. เพื่อให้มีความทนทานต่อการกระแทก เสียสีได้ดี

#### วัตถุประสงค์ที่ใช้ในการทำน้ำเคลือบ

วัตถุประสงค์ที่ใช้ในการทำน้ำเคลือบเซรามิกส์ มักจะเป็นสารประกอบที่ซับซ้อนและมักมีสิ่งสกปรกเจือปนนอกเหนือจากส่วนประกอบหลัก เราสามารถแบ่งวัตถุประสงค์ตามคุณสมบัติทางเคมีได้ 3 กลุ่มคือ

(1). กลุ่มวัตถุประสงค์ที่มีคุณสมบัติเป็นด่าง (base group) ช่วยลดอุณหภูมิในการหลอมละลาย (fluxing agent) เช่นตะกั่วออกไซด์ ( $PbO$ )สังกะสีออกไซด์ ( $ZnO$ )โซเดียมออกไซด์ ( $Na_2O$ ) โพแทสเซียมออกไซด์ ( $K_2O$ ) เป็นต้น สัญลักษณ์ทางเซรามิกส์ที่ใช้แทนวัตถุประสงค์กลุ่มนี้ได้แก่ RO และ  $R_2O$

แอลคาไลน์ (alkaline) มีคุณสมบัติเป็นตัวช่วยหลอมละลายที่ดี (strong flux) เพิ่มการไหลของตัวเคลือบ (fluidity) และความมันวาว (luster) ในน้ำเคลือบมักจะละลายในน้ำได้ ด่างพวกนี้ได้แก่



- โซเดียมออกไซด์ (sodium oxide) สูตรเคมีคือ  $\text{Na}_2\text{O}$  เป็นอุณหภูมิที่นิยมใช้กันมาก มีสัมประสิทธิ์การขยายตัวสูงกว่าพวกต่างด้วยกัน ทำให้เคลือบไม่ทนต่อการกัดกร่อน ลดแรงดึง (tensile strength) และมีความยืดหยุ่น (elasticity) สูงกว่าฟลักซ์อื่น ๆ สารที่ให้  $\text{Na}_2\text{O}$  ได้แก่

- โซเดียมคาร์บอเนต (sodium carbonate) :  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  เป็นฟลักซ์ที่ละลายน้ำได้
- โซเดียมไนเตรท (sodium nitrate) :  $\text{NaNO}_3$  เป็น oxidizing agent ที่ละลายน้ำได้ดี
- บอแรกซ์ (borax) :  $\text{Na}_2\text{O} \cdot 2\text{B}_2\text{O}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$  หรือ  $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$  เป็นตัวช่วยหลอมละลายที่ดี (strong flux) ที่ temperature ต่ำ ช่วยลดความหนืด (viscosity) ในเคลือบ แต่ถ้าใช้มากเกินไปจะทำให้เกิดรอยดำหนึบในผิวเคลือบได้
- เศษแก้ว (cullet) :  $0.5 \text{Na}_2\text{O} \cdot 0.5 \text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$
- โซเดียมเฟลด์สปาร์หรืออัลไบต์ (soda feldspar or albite) :  $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{SiO}_2$  เหมาะสำหรับทำน้ำเคลือบ เป็นฟลักซ์สำหรับเคลือบไฟสูงไม่ละลายน้ำและราคาถูก มีองค์ประกอบทางเคมีตามทฤษฎีดังนี้ silica 68.7 % , alumina 19.5 % , soda 11.8 %
- ไครโอไลต์ (Cryolite) :  $\text{Na}_3\text{AlF}_6$  ช่วยหลอมละลายทำให้เกิดความทึบในเคลือบ (opaque)

ในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้โซเดียมออกไซด์ ( $\text{Na}_2\text{O}$ ) ที่ได้มาจากโซดาเฟลด์สปาร์ หรืออัลไบต์ (soda feldspar or albite) จากอำเภอท่าศาลา จังหวัดนครศรีธรรมราช ใช้ทำเนื้อผลิตภัณฑ์ มีองค์ประกอบทางเคมี ดังนี้

L.O.I	1.19%
$\text{SiO}_2$	70.67%
$\text{Al}_2\text{O}_3$	20.00%
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	0.09%
$\text{Na}_2\text{O}$	7.55%

ส่วนโซดาเฟลด์สปาร์ที่ใช้ทำน้ำเคลือบมีองค์ประกอบทางเคมี ดังนี้

$\text{Na}_2\text{O}$	7.34%
$\text{Al}_2\text{O}_3$	24.55%
$\text{SiO}_2$	56.51%

เฟลด์สปาร์ที่มีปริมาณของเหล็กออกไซด์ต่ำ เหมาะสำหรับใช้ในการเคลือบที่ ต้องการความขาวไม่ต้องการให้มีสี และใช้ในการผลิตแก้ว

ข้อดีในการใช้โซเดียมเฟลด์สปาร์ในเคลือบ (ให้โซเดียมออกไซด์) คือ

1. เป็นตัวลดจุดหลอมเหลวในเคลือบ (strong flux)
2. ช่วยเพิ่มการไหลตัวของเคลือบ (fluidity)
3. ช่วยทำให้เคลือบมันวาว (luster)
4. ทนทานต่อแรงดึง

5. ลดความยืดหยุ่นของเคลือบ
6. เป็นแหล่งให้อะลูมินาและซิลิกาแก่เคลือบ
7. ราคาถูก
8. เป็นสารประกอบอัลคาไลน์ที่ไม่ละลายน้ำ

โปแตสเซียมออกไซด์ (potassium oxide) :  $K_2O$  มีคุณสมบัติและหน้าที่คล้ายกับโซเดียม แต่ทำให้ผิวเคลือบทนต่อการขีดข่วนได้ดีกว่าการใช้โซเดียม และมีราคาแพงกว่า สารที่ให้  $K_2O$  ได้แก่

- โปแตสเซียมคาร์บอเนต (potassium carbonate) :  $K_2CO_3$
- โปแตสเซียมไนเตรท (potassium nitrate) :  $KNO_3$
- โปแตสเซฟลด์สปาร์ (potass feldspar) :  $K_2O \cdot Al_2O_3 \cdot 6SiO_2$  จุดหลอมเหลวประมาณ  $1200^\circ C - 1250^\circ C$  ใช้ผสมได้ทั้งในเคลือบและเนื้อดินปั้น มีองค์ประกอบทางเคมีตามทฤษฎีดังนี้ : Silica 65.7% , alumina 18.4 % และ Potassium 16.9 %

ข้อดีในการใช้โปแตสเซียมเฟลด์สปาร์ในเคลือบ (ให้โปแตสเซียมออกไซด์) คือ

1. เป็นตัวลดจุดหลอมเหลวในเคลือบ (strong flux)
2. ลดการไหลตัวของเคลือบ (fluidity)
3. ทนทานต่อการขีดข่วนได้ดีกว่าการใช้โซเดียมเฟลด์สปาร์
4. เป็นแหล่งให้อะลูมินาและซิลิกาแก่เคลือบ
5. ราคาถูก
6. เป็นสารประกอบอัลคาไลน์ที่ไม่ละลายน้ำ

ลิเทียมออกไซด์ (lithium oxide) :  $Li_2O$  มีคุณสมบัติคล้าย  $Na_2O$  และ  $K_2O$  แต่มีผลที่แรงกว่ามาก ใช้แทน  $Na_2O$  และ  $K_2O$  ได้ในอัตราส่วน 6.94 Li : 23Na : 39K หรือประมาณ 1:3:5 สารที่ให้  $Li_2O$  ได้แก่

- ลิเทียมคาร์บอเนต (lithium carbonate) :  $Li_2CO_3$
- เลพิโดไลต์ (lepidolite) :  $Li \cdot KF \cdot Al_2O_3 \cdot 3SiO_2$
- สปอดูมิน (spodumene) :  $Li_2O \cdot Al_2O_3 \cdot 4SiO_2$
- เพทาลิต (petalite) :  $Li_2O \cdot Al_2O_3 \cdot 8SiO_2$

แอลคาไลน์เอิร์ท (alkaline earths) มีคุณสมบัติต่างกับพวกแอลคาไลต์ (Alkalines) คือไม่ละลายน้ำ ได้แก่  $CaO$ ,  $BaO$ ,  $MgO$ ,  $PbO$ ,  $SrO$  และ  $ZnO$

แบเรียมออกไซด์ (barium oxide) :  $BaO$  เป็นฟลักซ์อุณหภูมิสูงดีกว่าแคลเซียม , แมกนีเซียม และสตรอนเทียม เมื่อผสมในเคลือบจะทำให้เคลือบมีความแวววาว แต่ไม่ทำตะกั่วสารให้แบเรียมออกไซด์ได้แก่

- แบเรียมคาร์บอเนต (barium carbonate) :  $BaCO_3$  วัตถุประสงค์ที่ให้สารประกอบแบเรียมออกไซด์ คือ แบเรียมคาร์บอเนต มีสูตรทางเคมี  $BaCO_3$  เป็นแร่ที่เกิดตามธรรมชาติ โดยมากใช้ร่วมกับฟลักซ์ ตัวอื่น ๆ

เพราะว่าที่อุณหภูมิต่ำจะมีปฏิกิริยาช้ามาก ถ้าใช้ผสมลงในเคลือบไฟสูงจะทำปฏิกิริยาเป็น ฟลักซ์ ที่ดีการใช้แบเรียมออกไซด์ผสมลงในเคลือบจะทำให้เคลือบมีความมันวาว (แต่ไม่เท่าตะกั่ว) เพราะมีดัชนีการหักเหของแสงสูง มีการขยายตัวเนื่องจากความร้อนน้อยกว่าพวกอัลคาร์ไลด์

- แบเรียมโครเมต (barium chromate) :  $\text{BaCrO}_4$

แคลเซียมออกไซด์ (calcium oxide) :  $\text{CaO}$  เมื่อผสมในเคลือบจะทำให้เคลือบมีความแข็งแรงดีขึ้น ทนต่อการขีดข่วนได้ดีกว่าโซเดียม โปแทสเซียม และลิเทียม ทนต่อการกัดกร่อนของกรดและด่าง สารที่ให้  $\text{CaO}$  ได้แก่

- ไวทิง (whiting) คือ แคลเซียมคาร์บอเนตที่บริสุทธิ์บดละเอียด และกำหนดขนาดของความละเอียดด้วยตะแกรงร่อน มีคุณสมบัติไม่ละลายในน้ำ

- โดโลไมต์ มีสูตรทางเคมี คือ  $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$  ใช้ผสมในเคลือบเพื่อให้ แคลเซียมออกไซด์และแมกนีเซียมออกไซด์ ซึ่งให้คุณสมบัติ เหมือนกับแคลเซียมออกไซด์และแมกนีเซียมออกไซด์รวมกัน มีคุณสมบัติไม่ละลายน้ำ

- แคลเซียมฟลูออไรด์ (calcium fluoride) :  $\text{CaF}_2$

- แคลเซียมบอเรต (calcium borate) :  $2\text{CaO} \cdot 3\text{B}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$

- แคลเซียมเฟลด์สปาร์ (calcium feldspar) :  $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{SiO}_2$

การใช้แคลเซียมออกไซด์ในส่วนผสมวัสดุที่ใช้ผลิตเคลือบ ภายได้ส่วนผสมที่แน่นอนจะเกิดปฏิกิริยาอย่างรุนแรงกับดินและซิลิกาหรือทรายที่อุณหภูมิประมาณ  $800^\circ\text{C}$  แต่เป็นตัวเลขจุดหลอมเหลวที่อุณหภูมิสูงขึ้น คืออุณหภูมิ  $550^\circ\text{C}$  ขึ้นไป ความหนืดของเคลือบขณะหลอมตัวเปลี่ยนแปลงไป เคลือบจะเคลื่อนตัวได้ดียิ่งขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น การใช้แคลเซียมออกไซด์มากเกินไปจะทำให้จุดศูนย์กลางของเคลือบสูงขึ้น คือ ทนไฟมากขึ้น และจะเกิดการแตกผกเล็ก ๆ ในเคลือบ (เป็นวิธีการผลิตเคลือบด้าน) ผลึกนี้คือ อะนอร์ไทต์ หรือแคลเซียมเฟลด์สปาร์ และอาจจะเป็นผลึกโวลลาสโทไนต์ ( $\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ ) ก็ได้

แคลเซียมออกไซด์เป็นองค์ประกอบที่สำคัญของเคลือบ เกือบทุกชนิดที่มีจุดหลอมตัวสูง สำหรับเคลือบพอร์ซเลนที่มีจุดหลอมตัวที่อุณหภูมิ จะมีแคลเซียมออกไซด์เป็นองค์ประกอบที่มีฤทธิ์เป็นด่างมากกว่าอัลคาไลน์อื่น ๆ สารประกอบแคลเซียมออกไซด์ใช้กันมาก เนื่องจากมีปริมาณมาก หาได้ง่าย ราคาถูก และมีความบริสุทธิ์ค่อนข้างสูง เช่น สารประกอบคาร์บอเนต (ความถ่วงจำเพาะต่ำ กระจายลอยตัวได้ดีในน้ำ และช่วยพยุงสารที่หนักให้ลอยตัว) ไวทิง (whiting) โดโลไมต์ ( $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ) แคลเซียมฟอสเฟต ( $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ ) แคลเซียมฟลูออไรด์ ( $\text{CaF}_2$ ) แคลเซียมคลอไรด์ แคลเซียมซิลิเกต เป็นต้น

ข้อดีในการใช้แคลเซียมออกไซด์ในเคลือบ

1. ช่วยลดจุดหลอมเหลวของเคลือบ
2. ทำให้เคลือบมีความแข็งแรงมากขึ้น (tensile strength)
3. ทำให้เคลือบทนต่อการขีดข่วนได้ดีกว่า โซเดียมและโปแตสเซียม
4. ทนต่อการกัดกร่อนของกรดและด่าง

5. เพิ่มความทนทานต่อแรงดึง และลดสัมประสิทธิ์ การขยายตัวเนื่องจากความร้อน เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้สารประกอบอัลคาไลน์ อื่น ๆ

#### 6. ทำให้เคลือบมันวาว

แมกนีเซียมออกไซด์ (magnesium oxide) :  $MgO$  เพิ่มความมันวาวในผิวเคลือบ สารที่ให้  $MgO$  ได้แก่

- แมกนีเซียมคาร์บอเนต (magnesium carbonate) :  $MgCO_3$

- โดโลไมต์ (dolomite) : มีสูตรทางเคมี  $CaMg(CO_3)_2$  ใช้ผสมในเคลือบ เพื่อที่จะให้แคลเซียมออกไซด์และแมกนีเซียมออกไซด์ ซึ่งให้คุณสมบัติเหมือนกับแคลเซียมออกไซด์ และ แมกนีเซียมออกไซด์ รวมกัน มีคุณสมบัติไม่ละลายน้ำ

- ทัลก์ (Talc) :  $3MgO \cdot 4SiO_2 \cdot H_2O$  หรือ  $4MgO \cdot 5SiO_2 \cdot H_2O$

แมกนีเซียมออกไซด์เป็นธาตุที่กระจายทั่วไปในธรรมชาติ มักพบเป็นองค์ประกอบของหินปูน และวัสดุอื่น ๆ ที่ใช้เป็นส่วนผสมของเคลือบเสมอ

ข้อดีในการใช้แมกนีเซียมออกไซด์ในเคลือบ

1. เป็นตัวลดจุดหลอมเหลวในเคลือบ
2. ทำให้เคลือบไหลได้ดีมาก
3. สัมประสิทธิ์การขยายตัวลดลงมากกว่า อัลคาไลน์ตัวอื่น
4. ทำให้เคลือบมันวาว

ตะกั่วออกไซด์ (lead oxide) :  $PbO$  ช่วยลดจุดหลอมละลาย (flux) ง่ายและราคาไม่แพงนัก เมื่อใช้ผสมในน้ำเคลือบจะทำให้ผิวเคลือบมีความแวววาวมากกว่าต่างด้วยกัน เพิ่มการไหลตัวให้แก่เคลือบ ทำให้ผิวเคลือบเรียบสวยมักไม่ค่อยมีตำหนิ แต่ตะกั่วเป็นสารมีพิษ จึงต้องหลอมเป็นฟลิต (frit) เสียก่อน นอกจากนี้ผิวเคลือบที่มีตะกั่วผสมอยู่จะไม่คงทนต่อการขีดข่วน การกัดกร่อนของกรดและด่าง สารที่ให้  $PbO$  ได้แก่

- กาลีนา (galena) :  $PbS$

- ตะกั่วขาว (white lead) :  $2PbCO_3, Pb(OH)_2$

- ตะกั่วเหลือง (litharge) :  $PbO$

- ตะกั่วแดง (red lead)

- ฟริตตะกั่ว (lead silicate)

สตรอนเทียมออกไซด์ (strontium oxide) :  $SrO$  มีราคาแพงใช้แทน  $CaO$  และ  $MgO$  ได้โดยใช้ในรูปของ Strontium Carbonate ( $SrCO_3$ )

สังกะสีออกไซด์ (zinc oxide) :  $ZnO$  เมื่อผสมลงไปเคลือบ จะทำให้เคลือบเป็นเงาดีขึ้น ถ้าใช้ในปริมาณน้อย ๆ จะช่วยลดจุดหลอมละลาย แต่ถ้าใช้ในปริมาณมาก ๆ จะทำหน้าที่เป็นตัวทึบไฟ และทำให้เกิดทึบในเคลือบ (opacity)

ซิงค์ออกไซด์ เป็นองค์ประกอบที่สำคัญของเคลือบหลาย ๆ ชนิด

ข้อดีในการใช้ซิงค์ออกไซด์ในเคลือบ

1. เป็นตัวลดจุดหลอมเหลวในเคลือบ
2. ทำให้เคลือบมันวาวยิ่งขึ้น
3. ถ้าใช้ในปริมาณมากจะทำให้เกิดเคลือบทึบ (opacity)
4. ถ้าใช้มากเกินไป จะทำให้เกิดเคลือบผลึก (crystalline glazes)

ข้อเสียในการใช้ซิงค์ออกไซด์มากเกินไปในเคลือบ

1. ส่วนผสมของเคลือบคืบทนไฟมากขึ้น
2. เคลือบขุ่นมากขึ้น
3. ทำให้ความมันลดลง

(2). กลุ่มวัตถุดิบที่มีคุณสมบัติเป็นกลาง (intermediates group) หรือ RO กรุ๊ป สารเคมีที่จัดอยู่ในกลุ่มนี้ได้แก่

อะลูมินา (alumina) สูตรทางเคมี คือ  $Al_2O_3$  เป็นตัวช่วยปรับการไหลตัวของน้ำเคลือบถ้าใช้ในปริมาณมากขึ้น ความหนืดของน้ำเคลือบก็จะเพิ่มขึ้นด้วยแต่ถ้าหากใช้มากเกินไปจะมีผลทำให้เคลือบมีลักษณะด้าน และด้านทางการตกผลึกในเคลือบนอกจากนี้อะลูมินา ยังเป็นตัวเพิ่มความแข็งแกร่งให้เคลือบใช้แก้ปัญหาการด้านของเคลือบได้ และมีผลต่อสีในเคลือบ สารที่ให้  $Al_2O_3$  มีดังนี้

- อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ (aluminium hydrate) :  $Al(OH)_3$
- หินฟันม้า (feldspar)
- ดิน (clay) :  $Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$
- ไครโอไลต์ (cryolite) :  $Na_3AlF_6$
- เบนทอนไนต์ (bentonite) :  $Al_2O_3 \cdot 4SiO_2 \cdot 9H_2O$

โบรอนออกไซด์ (Boron Oxide) :  $B_2O_3$  หลอมละลายง่ายและเป็นเนื้อเดียวกับซิลิกา เพิ่มความมันวาว (glossy) ในเคลือบ เป็นตัวละลายพวกสารให้สี (coloring oxide) ลดการไหลตัวของเคลือบที่อุณหภูมิต่ำ และไหลตัวได้ดีในอุณหภูมิสูง ขัดขวางการตกผลึกของสาร สารที่ให้  $B_2O_3$  ได้แก่

- กรดบอริก (boric acid) :  $B_2O_3 \cdot 3H_2O$
- บอแรกซ์ (borax) :  $Na_2O \cdot 2B_2O_3 \cdot 10H_2O$
- โคลีมาไนต์ (colemanite) :  $2CaO \cdot 3B_2O_3$

แอนติโมนีออกไซด์ (antimony oxide) สูตรทางเคมีคือ  $Sb_2O_3$  ละลายน้ำได้เล็กน้อย ได้จาก

- เนเปิลส์เยลโลว์ (naples yellow) :  $Pb_3(SbO_4)_2$
- โซเดียมแอนติโมนาต (sodium antimonate) :  $2NaSbO_3 \cdot 7H_2O$

**โครมิกออกไซด์ (chromic oxide) :  $\text{Cr}_2\text{O}_3$**  เป็นสารให้สีในเคลือบ

**เหล็กออกไซด์ (ferric oxide) :  $\text{Fe}_2\text{O}_3$**  เป็นสารให้สีน้ำตาลแดง (brownish red) และใช้

การดัดแปลงสีของทองแดง (copper) และ โคบอลต์ (cobalt) ด้วย

งานวิจัยนี้ใช้อลูมินา ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) ที่ได้จากดิน (clay) เป็นดินขาวจากจังหวัดระนอง มีองค์ประกอบทางเคมีดังนี้

L.O.I.	14.64%
$\text{SiO}_2$	43.25%
$\text{Al}_2\text{O}_3$	38.80%
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	0.42%

ดินเป็นส่วนประกอบที่สำคัญในน้ำเคลือบเพราะ

- ช่วยทำให้น้ำเคลือบไม่ตกตะกอนได้ง่าย
- ช่วยทำให้น้ำเคลือบเกาะติดผิวผลิตภัณฑ์ได้ดี คือ เป็นตัว binder
- ช่วยควบคุมการหดตัวของน้ำเคลือบบนผลิตภัณฑ์ที่ยังไม่ได้เผา
- ให้  $\text{Al}_2\text{O}_3$  และ  $\text{SiO}_2$

นอกจากนี้  $\text{Al}_2\text{O}_3$  บางส่วนมีอยู่ในโซดาเฟลด์สปาร์ด้วย

(3) วัสดุที่มีคุณสมบัติเป็นกรด (acid dioxide) :  $\text{RO}_2$  group ได้แก่

**ซิลิกอนไดออกไซด์ (silicon dioxide) :  $\text{SiO}_2$**  มีทั้งในน้ำเคลือบและเนื้อดินปั้น และมีมากกว่า 50% เมื่อผสมในเคลือบ จะเพิ่มจุดหลอมละลายของเคลือบให้สูงขึ้น ลดการไหล (fluidity) ของเคลือบที่จุดหลอมละลาย เพิ่มความคงทนต่อการกัดกร่อนของสารละลาย และทำปฏิกิริยาได้ดีกับพวกต่าง (base) แล้วหลอมตัวกลายเป็นแก้ว สารที่ให้  $\text{SiO}_2$  ได้แก่

- หินเขี้ยวหนูมาน หรือ หินแก้ว (quartz) :  $\text{SiO}_2$  เกิดอยู่ในธรรมชาติเป็นรูปของผลึกมีความบริสุทธิ์สูง

- ฟลินต์ (flint) :  $\text{SiO}_2$  เป็นซิลิกาที่มีรูปผลึกเล็กมากได้จากการเผาและบดพวกหินควอทซ์หรือทราย

- หินทราย (sand stone) :  $\text{SiO}_2$  เป็นซิลิกาที่เกิดในลักษณะของหินทราย

- ดิน (clay) :  $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$

- หินฟันม้า (feldspar) :  $\text{KNaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{SiO}_2$

- สปอดูมิน (spodumene) :  $\text{Li}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 4\text{SiO}_2$

- เลพิโดไลต์ (lepidolite) :  $\text{LiF} \cdot \text{KF} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{SiO}_2$

- คอร์นวอลล์สโตน (cornwall Stone) :  $1\text{RO} \cdot 2.5\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 20\text{SiO}_2$

**ดีบุกออกไซด์ (tin oxide) :  $\text{SnO}_2$**  มีราคาแพงเป็นตัวทำให้เกิดทึบแสงในเคลือบดีกว่าสารทึบแสงชนิดอื่น ๆ อย่างมาก มักใช้ประมาณ 5 - 7 % ถ้าใช้มากจะทำให้เคลือบด้าน

ไทเทเนียมไดออกไซด์ (titanium dioxide) :  $TiO_2$  ใช้ผสมในเคลือบเพื่อให้สีาง และช่วยให้ทินในเคลือบ และถ้าใส่ 5 - 10 % จะทำให้เกิดความมันวาวอีกด้วย ใช้ซิลิกอนไดออกไซด์ ( $SiO_2$ ) ซึ่งได้มาจากหินทราย (sand stone) นอกจากนี้  $SiO_2$  บางส่วนมีอยู่ในโซเดียมเฟลด์สปาร์ และในดินขาวด้วย

ทรายแก้วหรือทรายขาว คือทรายบริสุทธิ์ที่มีซิลิกาสูงกว่าร้อยละ 95 มี เหล็กออกไซด์ ตลอดจนสารอื่น ๆ เจือปนเล็กน้อย ทรายละเอียดนี้เหมาะในการทำแก้วและกระจกต่าง ๆ ซึ่งขนาดเม็ดทรายควรมีขนาดใกล้เคียงกัน ไม่ควรใหญ่กว่า 20 เมช (0.84 มม) และ ไม่ควรเล็กกว่า 100-120 เมช

ข้อดีในการใช้ทรายแก้วในเคลือบ

1. ลดการไหล (fluidity) ของเคลือบที่จุดหลอมเหลว
2. เพื่อความคงทนต่อการกัดกร่อนของสารละลาย
3. ลดสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อน (coefficients of thermal expansion)
4. เพิ่มความแข็งแรงให้แก่เคลือบ (tensile strength)
5. ทำปฏิกิริยาได้อย่างดีกับพวกค้างแก้วหลอมตัวกลายเป็นแก้ว (glossy silicates)

ข้อดีในการใช้ดินขาวและดินดำเหนียวเคลือบ (เป็นแหล่งให้อะลูมินา)

1. ควบคุมการไหลตัวของเคลือบเหลวให้เป็นไปอย่างคงที่และสม่ำเสมอที่อุณหภูมิสูงตัวของเคลือบ
2. ช่วยให้วัตถุอื่น ๆ ในน้ำเคลือบกระจายตัวได้ดี
3. ช่วยให้เคลือบดินยึดเกาะผิวผลิตภัณฑ์ได้ดีขึ้น
4. เป็นตัวกลางที่ควบคุมการหดตัวของเคลือบดิน ที่อุณหภูมิผลิตภัณฑ์ที่ยังไม่เผา
5. ราคาถูก
6. เป็นแหล่งให้ซิลิกาแก่เคลือบ
7. เป็นสารไม่ละลายน้ำ

ข้อเสียในการใช้ดินขาวและดินดำเหนียวในเคลือบ

1. ถ้าใช้มากเกินไปจะทำให้จุดหลอมตัวสูงขึ้น
2. มักมีสิ่งสกปรกที่ติดในดินปนเปื้อนในเคลือบ
3. มีผลกระทบต่อสี

การจำแนกชนิดของน้ำเคลือบ

น้ำยาเคลือบสามารถนำมาจัดเป็นหมวดหมู่ เพื่อให้ง่ายต่อความเข้าใจในชนิดของเคลือบ เช่น

(1). แบ่งตามส่วนผสมของเคลือบ (mixture)

- เคลือบใต้ตะกั่ว (lead glaze)
  - เคลือบไม่ใต้ตะกั่ว (leadless glaze)
  - เคลือบเกลือ (salt glaze)
- (2). แบ่งตามอุณหภูมิของเคลือบ (temperature)
- เคลือบไฟต่ำ (low temperature glaze) 800 - 1000°C
  - เคลือบไฟปานกลาง (medium temperature glaze) 1000 - 1150°C
  - เคลือบไฟสูง (high temperature) 1150 - 1450°C
- (3). แบ่งตามวิธีผสมเคลือบ (processing)
- เคลือบคิน (raw glaze)
  - เคลือบฟริต (fritted glaze)
- (4). แบ่งตามลักษณะของเคลือบ
- เคลือบใส (transparent glaze)
  - เคลือบทึบ (opaque glaze)
  - เคลือบสี (color glaze)
  - เคลือบด้าน (matte glaze)
  - เคลือบราน (crackle glaze)
  - เคลือบผลึก (crystalline glaze)
  - เคลือบมันหรือเคลือบประกายมุก (luster glaze)
- (5). แบ่งตามวัตถุดิบที่ใช้
- เคลือบตะกั่ว (lead glaze)
  - เคลือบเกลือ (salt glaze)
  - เคลือบบอแรกซ์ (borosilicate glaze)
  - เคลือบขี้เถ้า (ash glaze)
  - เคลือบเฟลด์สปาร์ (feldspar glaze)

### การเตรียมน้ำเคลือบ

ขั้นตอนในการเตรียมน้ำเคลือบพอจะสรุปได้เป็นขั้น ๆ ได้ดังนี้

(1). การเตรียมวัตถุดิบ

(2). การชั่งส่วนผสม ต้องชั่งให้ถูกต้องแน่นอนตรงตามสูตร

(3). การบดผสม ถ้าเตรียมเคลือบจำนวนน้อย ๆ ควรใช้โกร่งบดผสม แต่ถ้าต้องการเตรียม

จำนวนมากควรใช้หม้อบด เวลาในการบดขึ้นอยู่กับส่วนผสมหรือชนิดของน้ำเคลือบ



การบดน้ำเคลือบควรรีบน้ำประมาณ 30 - 40% ของน้ำหนักรสผสมเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพในการบดสูงสุคน้ำที่ใช้ในการผสมน้ำเคลือบ จะต้องสะอาดปราศจากตะกอน และมีสภาพเป็นกลาง

(4). การกรอง กรองด้วยตะแกรง (sieve) เพื่อให้ได้ความละเอียดตามต้องการ

### วิธีเคลือบผลิตภัณฑ์ (glazing method)

(1). สภาวะของผลิตภัณฑ์ที่จะนำไปเคลือบ

-ผลิตภัณฑ์ที่อยู่ในภาวะดินดิบ (greenware) การเคลือบผลิตภัณฑ์ที่อยู่ในภาวะดินดิบนี้ต้องใช้ความระมัดระวังเป็นพิเศษ เพราะผลิตภัณฑ์มีลักษณะเปราะ บิ่น หักง่าย โดยเฉพาะการเคลือบแบบจุ่มต้องใช้ความชำนาญพิเศษ เพราะถ้าจุ่มเคลือบไม่ดีอาจจะทำให้เนื้อผลิตภัณฑ์ขูดเสียหายได้ แต่โดยมากมักจะเคลือบโดยวิธีพ่น โดยเฉพาะเครื่องสุญญากาศนิยมใช้สภาวะนี้

-ผลิตภัณฑ์ที่อยู่ในสภาวะเผาดิบ (biscuitware) ซึ่งจะเผาที่อุณหภูมิประมาณ 800 - 900°C ซึ่งดินจะแข็งตัวและหยาบได้สะดวก เนื้อผลิตภัณฑ์มีความพรุนตัวพอเหมาะที่จะดูดซับน้ำได้ดี ถ้าเผาที่อุณหภูมิสูงเกินไปจะมีผลทำให้เคลือบไม่ค่อยติด เพราะเนื้อผลิตภัณฑ์มีความพรุนตัว น้อยเกินไป และถ้าเผาที่อุณหภูมิต่ำเกินไปก็จะมีผลทำให้เกิดตำหนิที่ผิวเคลือบได้ เนื่องจากความพรุนตัวของเนื้อผลิตภัณฑ์มีมาก ทำให้ดูดน้ำเคลือบเข้าไปมากเกินไป และอาจเป็นเหตุให้ผิวเคลือบขรุขระหรือผลิตภัณฑ์แตกได้

(2). การเตรียมผลิตภัณฑ์ก่อนนำไปเคลือบ

ผลิตภัณฑ์ก่อนนำไปเคลือบต้องผ่านการขจัดฝุ่นละอองออกให้หมดก่อน เพราะถ้าหากว่ามีผิวผลิตภัณฑ์มีฝุ่นละอองอยู่จะทำให้เคลือบร่อนหลุดจากผิวผลิตภัณฑ์ การทำความสะอาด ผลิตภัณฑ์อาจจะใช้ฟองน้ำจุ่มน้ำหมาด ๆ แล้วเช็ด หรือใช้ผ้าทำเป็นริ้ว ๆ มัดเป็นพู่แล้วใช้ปิด หรือลมเป่าก็ได้ แต่ต้องระมัดระวังเรื่องฝุ่นเข้าจมูกด้วย

การเคลือบผลิตภัณฑ์ควรเลือกวิธีที่เหมาะสมคือ ทำได้รวดเร็ว สะดวกและได้ผลดี เหมาะกับขนาดของผลิตภัณฑ์

(1). เคลือบด้วยวิธีจุ่มหรือจุ่ม (dipping) คือการเอาผลิตภัณฑ์จุ่มลงในน้ำเคลือบที่เตรียมไว้แล้ว ซึ่งน้ำเคลือบจะต้องมีจำนวนมากพอที่จะจุ่มผลิตภัณฑ์ทั้งชิ้นได้ การเคลือบวิธีนี้ทำได้รวดเร็วและง่ายกว่าวิธีอื่น น้ำยาเคลือบต้องมากพอ ที่จะจุ่มผลิตภัณฑ์ทั้งชิ้นได้ การเคลือบวิธีนี้เป็นวิธีการประหยัดและนิยมใช้เหมาะกับผลิตภัณฑ์ที่มีขนาดเล็ก จำนวนมาก

(2). เคลือบด้วยวิธีเทราด (pouring) เป็นวิธีการเอาผลิตภัณฑ์วางบนปากอ่างน้ำเคลือบที่มีไม้วางพาดอยู่ แล้วใช้ภาชนะตักน้ำเคลือบราดให้ทั่วผิวผลิตภัณฑ์ วิธีนี้ส่วนมากใช้กับผลิตภัณฑ์ที่มีขนาดใหญ่ เช่น โถง ซึ่งไม่สามารถจุ่มลงในน้ำเคลือบได้ หรือน้ำเคลือบมีปริมาณ น้อย ผิวเคลือบที่ได้มักจะ ไม่ค่อยเรียบนัก เนื่องจากรอยต่อระหว่างการเทราดแต่ละครั้ง

(3). เคลือบด้วยวิธีการทา (painting) ใช้แปรงหรือพู่กันทามักใช้กับผลิตภัณฑ์ทางศิลปะ (artware) ที่ต้องการหลาย ๆ สี ) แปรงหรือพู่กันที่ใช้ทาน้ำเคลือบควรจะมีขนยาว นุ่ม เพื่อที่จะได้ยูนน้ำเคลือบไว้ได้มาก

(4). เคลือบด้วยวิธีพ่น (spraying) วิธีนี้เหมาะสำหรับผลิตภัณฑ์ที่มีขนาดใหญ่ หรือผลิตภัณฑ์ที่ต้องการเผาครั้งเดียวคือ อยู่ในลักษณะผลิตภัณฑ์ดินดิบ แต่สิ้นเปลืองน้ำเคลือบ เป็นวิธีที่ทำให้ได้เคลือบสม่ำเสมอ (เหมาะสำหรับช่างผู้ชำนาญงาน) น้ำเคลือบที่ใช้เคลือบต้องผสมให้ใสกว่าการเคลือบด้วย 3 วิธีแรก เพื่อสะดวกในการพ่น ถ้าน้ำเคลือบมีความเข้มข้นมากจะทำให้พ่นไม่ออก เวลาพ่นควรพ่นในตู้พ่นเพื่อป้องกันไม่ให้ฝุ่นฟุ้งกระจาย วิธีนี้สิ้นเปลืองน้ำเคลือบมากที่สุด

## 2.2 กระบวนการทางความร้อนในการผลิตเซรามิกส์

การใช้อุณหภูมิสูงเป็นส่วนสำคัญที่สุดในการผลิตเซรามิกส์ โดยจะใช้ความร้อนเพื่อวัตถุประสงค์ต่างๆ คือ การทำให้แห้ง ทำให้เกิดการประสานกันของเนื้อวัตถุดิบ ลดรูปทรง เพื่อลด residual stress และเพื่อทำให้เกิดการตกผลึกของวัตถุดิบ

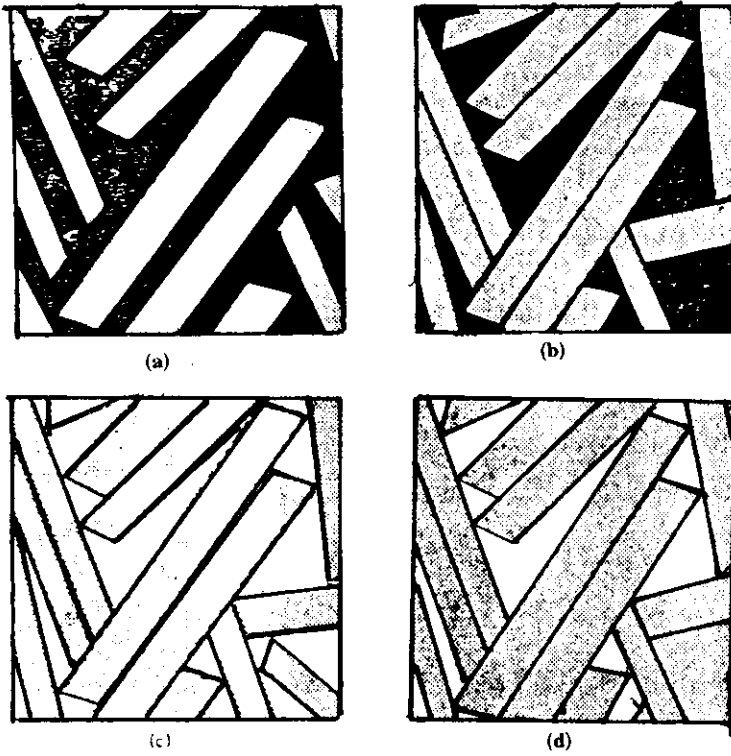
การกระทำทางความร้อนเป็นผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้น เช่น การเปลี่ยนแปลงน้ำหนัก : ปริมาตร, การเคลื่อนที่ของอะตอม, ความพรุนและคุณสมบัติอื่นๆ อีก

### 2.2.1 การอบผลิตภัณฑ์ให้แห้ง

การอบผลิตภัณฑ์ให้แห้ง มีความจำเป็นอย่างยิ่งก่อนการนำผลิตภัณฑ์เข้าเตาเผา เพราะการเผาเป็นการจำกัดน้ำในเนื้อเซรามิกส์อย่างรวดเร็ว ดังนั้นจึงต้องมีการจำกัดน้ำออกส่วนหนึ่งก่อน โดยการอบแห้งเพื่อให้เหลือน้ำในผลิตภัณฑ์น้อยลง เพื่อให้เนื้อผลิตภัณฑ์มีสภาพเหมาะต่อการเผา ซึ่งถ้าไม่ได้ผ่านการอบแห้ง น้ำที่อยู่ในปริมาณมากในเนื้อผลิตภัณฑ์ จะทำให้เกิดความดันภายในเนื้อผลิตภัณฑ์มากเกินไป จนทำให้เกิดการโค้งงอ และแตกหักได้ ดังนั้นต้องมีการอบแห้งก่อนการเผา เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพนั่นเอง โดยปกติผลิตภัณฑ์ที่ทำการขึ้นรูปแล้วจะมีน้ำอยู่ 4 แบบคือ

น้ำที่ถูกดูดซับอยู่บนผิววัตถุดิบ (adsorbed water) เป็นน้ำที่อยู่บนผิวโดยแรงแวนเดอร์วาลส์ ผิวของแข็งทุกชนิดมีความสามารถดูดซึมน้ำ ซึ่งอาจมีความหนาเพียง 1 โมเลกุล หรือมากกว่าปริมาณน้ำที่ถูกดูดซับขึ้นอยู่กับความดันไอ และความชื้นของสิ่งแวดล้อม

น้ำซึ่งประกอบในโครงสร้างผลึกวัตถุดิบ (crystal lattice water) จะแทรกอยู่ระหว่างชั้นของเนื้อเยื่อภายในผลึก เป็นเหตุให้ผลึกมีการขยายตัว เมื่อน้ำถูกขจัดออกจะทำให้ผลึกกลับคืนสู่สภาพเดิมและเกิดการหดตัว



รูปที่ 2.1 แสดงลักษณะของน้ำที่อยู่ในผลิตภัณฑ์ (9)

- (a) pore water and shrinkage water      (b) pore water  
(c) adsorbed water      (d) dry clay

น้ำซึ่งแทรกตัวอยู่ระหว่างอนุภาค เป็นสาเหตุให้ผลิตภัณฑ์เกิดการหดตัวเมื่อแห้ง (interparticle water of shrinkage water) เป็นปริมาณน้ำที่แยกอนุภาคของดินออกจากกัน เมื่อน้ำถูกขจัดออกอนุภาคจะเคลื่อนตัวมาปิดช่องว่างนั้น ปริมาณของการหดตัวจะเท่ากับปริมาตรของน้ำที่ถูกขจัดออกไป

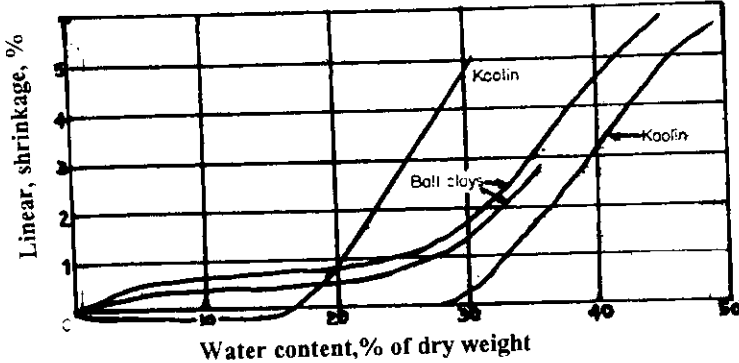
น้ำที่ถูกขังอยู่ในช่องว่างของผลิตภัณฑ์ (pore water) จะมีมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับขนาดอนุภาคของวัตถุดิบที่มีการกระจายตัวดีแค่ไหน และประสิทธิภาพในการอัดตัวของวัตถุดิบ

วิธีการอบแห้งอย่างง่าย จะเป็นการระเหยน้ำด้วยความร้อน โดยจะผ่านอากาศร้อนไปยังผลิตภัณฑ์ และอากาศจะเป็นตัวพาความชื้นออกจากผลิตภัณฑ์ ซึ่งอุณหภูมิเตาอบที่ใช้ประมาณ 70-80 °C

#### กลไกการอบผลิตภัณฑ์ให้แห้ง

- การหดตัวของผลิตภัณฑ์ การหดตัวของผลิตภัณฑ์จะเกิดขึ้นสูงสุดในช่วงที่ interparticle water ถูกขจัดออก ลักษณะการหดตัวของผลิตภัณฑ์มีประโยชน์ต่อการวางแผนการอบแห้ง เพราะเมื่อถึงจุด

ที่ไม่มีการหดตัวน้ำที่เหลือนจะสามารถจัดออกได้อย่างรวดเร็ว สุดท้ายอาจจะต้องใช้อุณหภูมิที่เกิน 100°C หากต้องการกำจัด lattice water หรือ adsorbed water



รูปที่ 2.2 แสดงการหดตัวของดินชนิดต่าง ๆ (9)

เนื้อผลิตภัณฑ์ขี้เถ้าอบแห้ง มีการหดตัวน้อยกว่าดินล้วน ๆ เพราะมีวัสดุบางชนิดที่ไม่มีความเหนียว และหยากกว่าดินซึ่งมีส่วนทำให้ดูดซับน้ำได้น้อยลง และมีผลทำให้ความพรุนตัวต่ำเมื่อแห้ง

- การระเหยของน้ำที่ผิวผลิตภัณฑ์ อัตราเร็วของการระเหยน้ำที่ผิวมีค่าเท่ากับครึ่งหนึ่งของ อัตราเร็วของการระเหยน้ำจากผิวน้ำด้วยกัน องค์ประกอบที่มีผลคือ อุณหภูมิ ความดันไอ และความเร็วของ อากาศที่ผ่าน

- การเคลื่อนตัวของน้ำตามรูพรุน เมื่อน้ำที่ผิวดินระเหยไป น้ำในรูพรุนในเนื้อดินจะเคลื่อน ตัวเข้ามาแทนที่ กระบวนการนี้เป็นอย่างต่อเนื่อง อาจจะอธิบายกลไกของปรากฏการณ์ได้ 2 กรณี คือ กรณี แรก เมื่อรูพรุนในเนื้อดินมีน้ำอยู่เต็มจะมีแรงสองแรงมากระทำ แรงหนึ่งเป็นแรงไฮโดรสแตติก ดันน้ำจาก ภายในรูพรุนให้ออกมาจนเกิดการสมดุล อีกแรงหนึ่งเกิดจากความต่างศักย์ของความชื้น ซึ่งจะเป็น้ำที่ บริเวณที่ชื้นกว่าออกมายังผิวที่แห้งกว่า สำหรับกรณีที่สอง น้ำในรูพรุนมีไม่มาก การเคลื่อนตัวของน้ำในรู พรุนเป็นแบบการระเหย ซึ่งขึ้นกับแรงดันเนื่องจากความต่างศักย์ของความดันไอในรูพรุนซึ่งต่อเนื่องกัน

พลังงานความร้อนที่ใช้

- ปริมาณความร้อน ที่ทำให้น้ำมีอุณหภูมิสูงจนกระทั่งเดือด
- ปริมาณความร้อน ที่ทำให้อุณหภูมิของผลิตภัณฑ์ หีบอบ และบรรยากาศ ร้อน
- ปริมาณความร้อน ที่ทำให้น้ำเกิดการระเหย
- ปริมาณความร้อน ที่สูญเสียไปกับการผ่านออกไปจากหีบอบ

การเปลี่ยนแปลงของผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นระหว่างการอบแห้ง ซึ่งมีขั้นตอนดังนี้

1. การหดตัวของดินและผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ ซึ่งสาเหตุเกิดจากการระเหยของน้ำในเนื้อผลิตภัณฑ์ ซึ่งแต่ละผลิตภัณฑ์จะมีการหดตัวไม่เท่ากัน ขึ้นอยู่กับวัตถุดิบที่ใช้ อาทิเช่น ดินเหนียวจะหดตัวได้มากกว่าดินขาว เนื่องจากอนุภาคดินเหนียวเล็กกว่าจึงดูดซับน้ำได้ดีกว่าอนุภาคดินขาว ซึ่งมีขนาดใหญ่มากกว่านั่นเอง

2. การโค้งงอของผลิตภัณฑ์ (warding) การโค้งงอเป็นปัญหาสำคัญซึ่งพอสรูปสาเหตุได้ดังนี้

2.1 ความไม่สม่ำเสมอของความชื้นในเนื้อผลิตภัณฑ์ ตัวอย่าง เช่น การอัดแผ่นกระเบื้องลงบนแบบ เมื่อแผ่นกระเบื้องแห้ง ด้านที่ชื้นมากกว่าจะหดตัวมากกว่าด้านที่ชื้นน้อยกว่า

2.2 การแยกตัวออกมาของส่วนผสมบางตัว ซึ่งสาเหตุนี้ค่อนข้างเกิดได้ยาก กรณีที่จะเกิดก็เช่น น้ำ slip ที่ค่อนข้างใส จะเกิดการจมตัวของวัตถุดิบไม่พร้อมกัน ทำให้เกิดการแยกตัวของวัตถุดิบออกมาได้

2.3 ความหนาแน่นไม่สม่ำเสมอ ซึ่งจะเกิดปัญหาในช่วงการขึ้นรูปของผลิตภัณฑ์

2.4 การอบแห้งไม่สม่ำเสมอ ซึ่งถ้าส่วนใดส่วนหนึ่งอบแห้งได้เร็วกว่า ก็จะเกิดการหดตัวได้เร็วและเกิดการโค้งงอได้

### 2.2.2 การเผาผลิตภัณฑ์ (firing)

ในอุตสาหกรรมเซรามิกส์ ขั้นตอนการเผาผลิตภัณฑ์เซรามิกส์เป็นขั้นตอนที่สำคัญมาก เพราะผลิตภัณฑ์ที่ได้จากส่วนผสมของวัตถุดิบ ในอัตราส่วนหนึ่ง ๆ จะมีอุณหภูมิที่ทำให้เนื้อดินปั้นเกิดการหลอมละลายได้ เรียกว่า จุดหลอมละลาย (melting point) โดยศึกษาได้จาก triangle phase diagram ซึ่งเป็นอุณหภูมิเฉพาะของผลิตภัณฑ์นั้น ๆ เมื่อผลิตภัณฑ์มีอัตราส่วนของวัตถุดิบเปลี่ยนไป จุดหลอมละลายก็จะมีค่าเปลี่ยนไปดังนั้นในการเผาผลิตภัณฑ์จึงต้องควบคุมไม่ให้อุณหภูมิสูงเกินอุณหภูมิที่เนื้อดินปั้นจะหลอมละลาย ปัญหาที่พบได้จากการเผา คือ การแตก (cracking) ของผลิตภัณฑ์จากการเพิ่มอุณหภูมิและการลดอุณหภูมิในการเผาอย่างรวดเร็ว

การตกแต่งผลิตภัณฑ์ก่อนเผาก็มีความสำคัญมากโดยถ้าเป็นผลิตภัณฑ์ แห้ง ควรใช้กระดาษทรายหรือแปรงที่ขนค่อนข้างแข็งซึ่งก็ต้องระมัดระวัง ความเสียหายด้วย

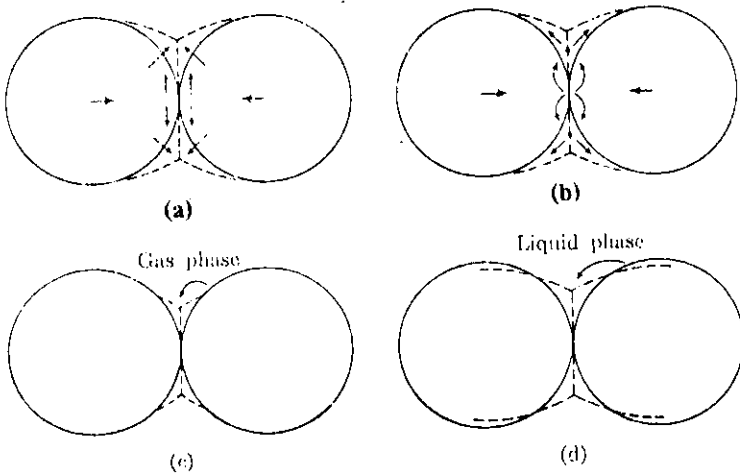
ส่วน การตกแต่งผลิตภัณฑ์ขณะมีความชื้นควรทำด้วยฟองน้ำ หรือแปรงชนิดขนอ่อนนุ่ม

ขั้นตอนในการเผา มี 3 ลักษณะคือ การเผาครั้งแรก เรียกว่า การเผาดิบ (biscuit firing) การเผาครั้งที่สองเรียกว่า การเผาเคลือบ (glaze firing) และการเผาครั้งที่สามเป็นการเผาเพื่อตกแต่งให้สวยงาม เรียกว่า overglaze firing

### การเผาตบ (biscuit firing)

ขั้นตอนในการเผาตบก็เพื่อต้องการให้อุณหภูมิที่เกาะกันอยู่เปลี่ยนแปลงไปเป็นมวลที่เกาะกันอย่างดี โดยการประสานกันเนื่องจากความร้อน การประสานหรือเชื่อมกันของวัตถุดิบในการเผาจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงบางส่วน ขั้นตอนในการประสานตัวกันของเนื้อผลิตภัณฑ์ จะเกิดขึ้นโดยอาศัยกลไกของการถ่ายเทมวล 4 ข้อ คือ

1. การประสานกันเนื่องจากการเชื่อมตัวเข้าหากันของสาร(viscous flow)
2. เกิดการกระจายและการเรียงตัวใหม่ของสารบางตัว (diffusion)
3. มีการระเหยของสาร เช่น น้ำ
4. การประสานตัวอย่างสมบูรณ์ในวัฏภาคของของเหลว



รูปที่ 2.3 การประสานตัวของเนื้อผลิตภัณฑ์ในการเผา (9)

หลักทั่วไปในการเผา จะเพิ่มอุณหภูมิในการเผาอย่างช้า ๆ โดยจะเพิ่มอุณหภูมิชั่วโมงละ  $100^{\circ}\text{C}$  และเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจนใกล้จุดหลอมละลาย จะเพิ่มอุณหภูมิชั่วโมงละ  $50^{\circ}\text{C}$  จนถึงจุดก่อนการเกิดหลอมละลายของเนื้อดินปั้น โดยทั่วไปประมาณ  $900$  ถึง  $1000^{\circ}\text{C}$  ก็จะเริ่มทำการลดอุณหภูมิให้เย็นลงอย่างช้า ๆ เพื่อป้องกันการ cracking ของผลิตภัณฑ์ ซึ่งสามารถแสดงอุณหภูมิในการเผาได้ด้วย firing schedule

ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในเนื้อดินปั้นชนิด triaxial ในขั้นตอนการเผาตบ

- การอบแห้งที่สมบูรณ์ จะเป็นขั้นตอนการขจัดความชื้นที่ถูกดูดซับอยู่ที่ผิวของอนุภาค ผลิตภัณฑ์จะแห้งสนิทที่อุณหภูมิ  $200^{\circ}\text{C}$

- การเผาไหม้พวกอินทรีย์สาร ดินเหนียวทุกชนิดจะมีอินทรีย์เจือปนอยู่ในรูปของลิกไนท์เสมอ ซึ่งเกิดการเผาไหม้รวมตัวกับออกซิเจนตั้งแต่อุณหภูมิ  $200 - 700^{\circ}\text{C}$  การเผาไหม้จะเกิดขึ้นได้ดีถ้าใช้อากาศ

- การขจัดกลุ่ม  $\text{OH}^-$  ออกจากดิน ซึ่งประกอบไปด้วยการแยกสลายผลึก ของดินเป็นโครงสร้างที่ไม่เป็นระเบียบ เป็นผลให้เกิดการหดตัวพร้อมทั้งเกิดรูพรุนในเนื้อผลิตภัณฑ์
- การเกิดผลึกในเนื้อดิน ที่อุณหภูมิประมาณ  $990^\circ\text{C}$  ในเนื้อดินป็นจะมีการจัดการเรียงตัวใหม่เกิด spinel และในที่สุดเกิด mullite ขนาดเล็ก ๆ ขึ้น
- การเกิดแก้ว หินฟีนม้าทั้งชนิด โซดาและโปแตช เมื่อเผาถึงอุณหภูมิ  $1,100^\circ\text{C}$  จะมีแก้วเกิดขึ้นตามบริเวณรอบอนุภาคของหินฟีนม้าซึ่งสัมผัสกับเนื้อดิน เมื่ออุณหภูมิสูงมากขึ้นหินฟีนม้าจะหลอมตัวหมดแต่ยังคงอนุภาคเดิมอยู่ ในขณะที่เดียวกันจะเกิดแก้วขึ้นในเนื้อดินด้วย
- การละลายของดินและหินแก้ว ในเนื้อดินหินแก้วขนาดเล็กจะสามารถละลายได้หมดที่อุณหภูมิสูง
- การเกิดมุลไลท์ มุลไลท์มีผลึกรูปเข็ม เกิดได้สองกรณี คือ อาจเกิดจากดินซึ่งจะมีขนาดเล็กมาก

ตารางที่ 2.2 แสดงส่วนประกอบของเนื้อดินป็น ชนิด triaxial ที่อุณหภูมิต่าง ๆ

temperture (C)	glass (%)	mullite (%)	quartz (%)
56	56	19	25
62	62	22	16
68	68	22	10

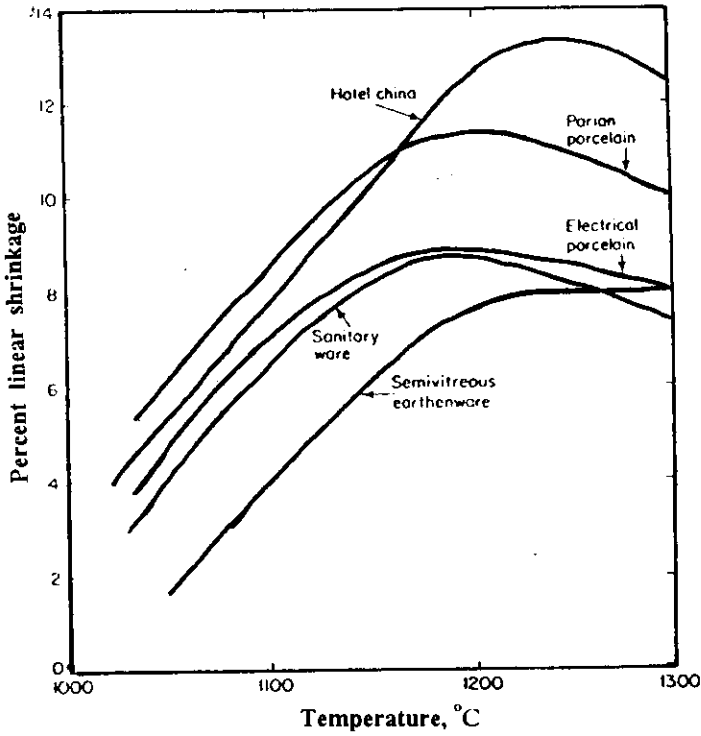
อีกทางหนึ่งคือเกิดโดยการตกผลึกออกมาจากหินฟีนม้า หรือเนื้อแก้วส่วนอื่น ๆ มุลไลท์จะละลายได้ดีในเนื้อแก้วที่มี  $\text{SiO}_2$  สูง

การเกิดผลึกรูปเข็มของมุลไลท์ในเนื้อผลิตภัณฑ์ที่มีส่วนช่วยทำให้ผลิตภัณฑ์มีความแข็งแรง ผลึกจะฝังตัวอยู่ในเนื้อแก้ว ประพกติตัวเหมือนกับเหล็กเส้นในคอนกรีต อัลคาไลน์จะทำให้มุลไลท์เกิดการขยายตัว โดยปฏิกิริยาจะเริ่มที่อุณหภูมิสูงประมาณ  $1,200^\circ\text{C}$  และจะเกิดขึ้นรวดเร็วที่  $1,400^\circ\text{C}$  แต่อาจจะทำให้หยุดได้เมื่อมี  $\text{SiO}_2$  มากเกินไป

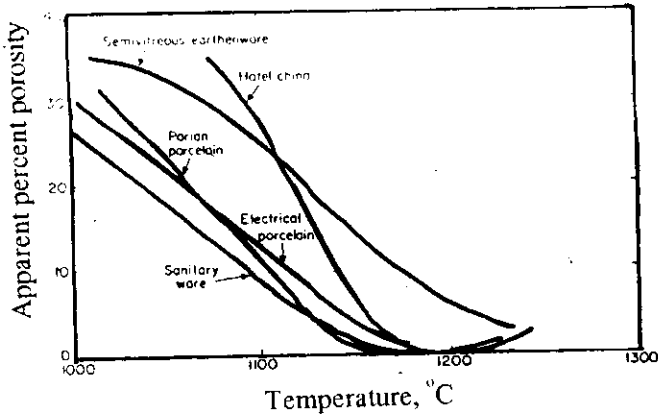
- การเปลี่ยน แปลงของหินแก้ว ไปเป็น cristobalite
- การหดตัวและการรัดตัวให้แน่นในเนื้อผลิตภัณฑ์ ดังรูปที่ 2.4 และ รูปที่ 2.5

ความพรุนตัวของผลิตภัณฑ์ มีน้อยที่สุดที่อุณหภูมิระหว่าง  $1,100 - 1,200^\circ\text{C}$  และจะมีค่ามากขึ้นเนื่องจากการขยายตัวของรูพรุนซึ่งเกิดมาจากน้ำ หรือ ก๊าซอื่น ๆ การทำให้ผลิตภัณฑ์ประสานตัวเป็นเนื้อเดียวกันมีองค์ประกอบหลายอย่างเกี่ยวข้องที่สำคัญคือ แรงดึงผิวของแก้ว ซึ่งมีผลให้มีพื้นที่ผิวน้อยที่สุดด้วยสาเหตุจากการรัดตัวทำให้มวลทั้งหมดมีขนาดเล็กลงเนื่องจากมีเนื้อแก้วเกิดขึ้นและเกิดจากการหดตัวของรูพรุน

- การทำให้เสีรูปร่างระหว่างการเผา ผลิตภัณฑ์ที่ใกล้จะเป็นแก้ว ซึ่งมีเปอร์เซ็นต์เนื้อแก้วสูงจะเสีรูปร่างได้ง่ายในขณะที่ทำการเผาที่จุดสุกตัว เนื่องมาจากน้ำหนักตัวของผลิตภัณฑ์เอง แก้ปัญหาได้โดยการรองรับผลิตภัณฑ์ให้ดีก่อนเข้าเตาเผา



รูปที่ 2.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวของผลิตภัณฑ์ชนิดต่าง ๆ กับอุณหภูมิการเผา (9)



รูปที่ 2.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความพรุนตัวของผลิตภัณฑ์ชนิดต่าง ๆ กับอุณหภูมิการเผา (9)

**อิทธิพลของพลังงานความร้อนที่มีต่อวัตถุดิบพื้นฐาน**

ผลิตภัณฑ์เซรามิกส์ปกติจะประกอบด้วยดิน หินแก้ว และหินพื้นน้ำ ซึ่งต้องผ่านขั้นตอนการเผา โดยการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในวัตถุดิบเหล่านี้ระหว่างที่วัตถุดิบถูกเผาด้วยอุณหภูมิที่สูงขึ้นไปเรื่อย ๆ จะเป็นข้อมูลพื้นฐานที่สำคัญต่อการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์



### -อิทธิพลของพลังงานความร้อนที่มีผลต่อดินขาว (kaolinite)

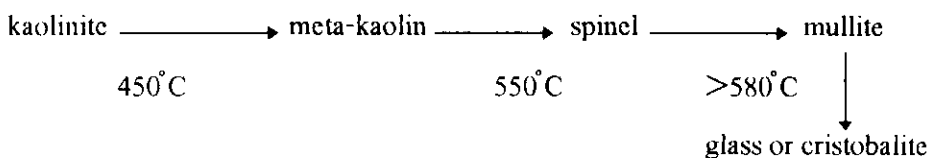
ผลของพลังงานความร้อนที่มีต่อความชื้นที่ถูกดูดซับไว้ที่ผิวของดินขาว (kaolinite) ที่ผิวของดินขาวจะมีพันธะไม่อิ่มตัว ซึ่งสามารถทำให้ดูดซับอนุโมลซึ่งอาจชุ่มไปด้วยโมเลกุลของน้ำหรือน้ำอาจจะถูกดูดซับที่ผิวของดินขาวโดยตรงก็เป็นได้

- เมื่อดินขาวถูกเผาหรือได้รับพลังงานความร้อน จะทำให้พันธะที่อ่อนแอของกลุ่มโมเลกุลของน้ำแตกออก เมื่อให้พลังงานความร้อนมากขึ้นน้ำจะระเหยกลายเป็นไอ มากขึ้นน้ำที่ถูกดูดซับอยู่บนผิวดินขาวจะถูกขจัดออกได้หมดเมื่ออุณหภูมิสูงถึง  $1000^{\circ}\text{C}$  หรือ มากกว่านั้น

ปริมาณของน้ำที่ถูกดูดซับจะมากหรือน้อยขึ้นกับพื้นที่ผิวของแร่ดินขาวและธรรมชาติของอนุโมลที่ถูกดูดซับก็จะมีผลกระทบต่อปริมาณความร้อน ที่ต้องใช้ในการระเหยน้ำด้วยเช่นกัน

- การสูญเสียน้ำในโครงสร้างเมื่อ kaolinite ถูกเผาสูงถึง  $450^{\circ}\text{C}$  กลุ่ม  $\text{OH}^-$  ในโครงสร้างจะถูกขจัดออกไป การสูญเสียกลุ่ม  $\text{OH}^-$  จะทำให้โครงสร้างมีรูพรุน รูพรุนจะค่อย ๆ ลดลงเนื่องจากการเรียงตัวใหม่ของอะตอม ซึ่งจะได้รูปร่างเดิมแต่มีขนาดเล็กลง

- ปฏิกริยาที่เกิดขึ้นที่อุณหภูมิ  $980^{\circ}\text{C}$  เมื่อ kaolinite ถูกเผาพบว่าเกิด meta-kaolin มากขึ้น โครงสร้างจะเปลี่ยนแปลงไม่เป็นระเบียบ และในขณะเดียวกัน  $\text{Al}_2\text{O}_3$  หรือ Spinel จะตกผลึกออกมาและแตกตัวเป็น mullite ซึ่งมีลักษณะเป็นลูกโซ่ พร้อมกับมีการจัดระเบียบใหม่ ขณะเดียวกันก็คาย  $\text{SiO}_2$  ออกมาในรูป cristobalite ซึ่งอาจเขียนปฏิกิริยาได้ดังนี้



- การเปลี่ยนแปลงที่อุณหภูมิสูงกว่า  $980^{\circ}\text{C}$  ผลึก mullite จะมีขนาดใหญ่ขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงและฝังตัวอยู่ในเนื้อแก้วของซิลิกา เมื่ออุณหภูมิสูงถึง  $1200^{\circ}\text{C}$  ปฏิกริยาจะคงดำเนินต่อไปในรูปแบบการผสมเนื้อเข้าด้วยกัน ซึ่งเป็นผลทำให้รูพรุนลดน้อยลง

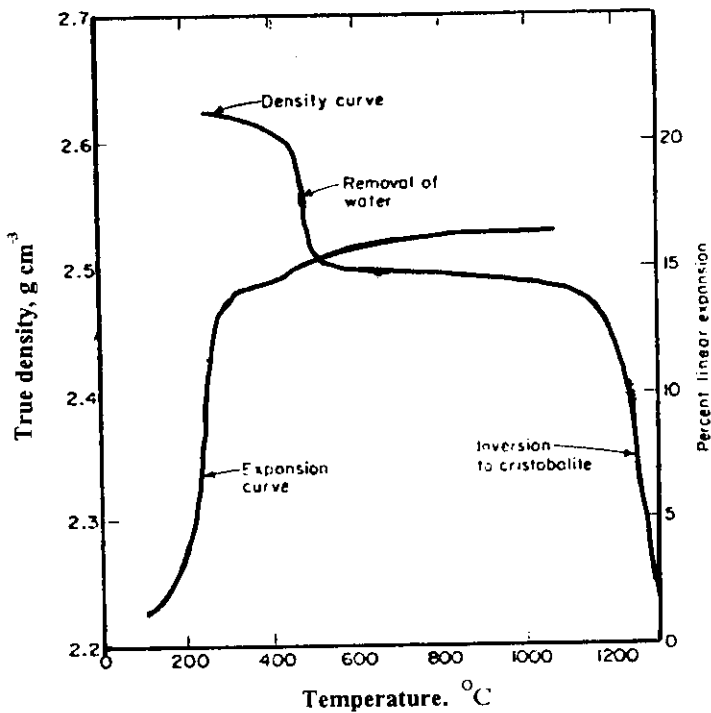
### -อิทธิพลของพลังงานความร้อนที่มีผลต่อซิลิกา ( $\text{SiO}_2$ ) ในรูปของหินแก้ว

รูปร่างของหินแก้วที่อุณหภูมิต่ำมีโครงสร้างของอะตอมประกอบด้วยเกลียวซึ่งเกิดจากการจับกันทุกมุมของปิรามิดฐานสามเหลี่ยมของ Si เมื่อหินแก้วถูกเผาสู่อุณหภูมิ  $573^{\circ}\text{C}$  จะมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างเป็นรูปร่างที่อุณหภูมิสูง ซึ่งมีความหนาแน่นน้อยกว่าจึงทำให้เกิดการขยายตัว

trydynite เป็นอีกรูปหนึ่งของหินแก้ว มีโครงสร้างที่หลวม มีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างที่สองอุณหภูมิคือ  $117$  และ  $163^{\circ}\text{C}$

หินเหล็กไฟ (flint) เป็นอีกรูปหนึ่งของหินแก้ว ประกอบด้วยผลึกเล็กๆ และมีน้ำอยู่ในโครงสร้างประมาณ 1% ถ้าเผาหินเหล็กไฟ จะพบรอยแตกเล็กๆ ระหว่างอุณหภูมิ 250 - 350 °C ซึ่งเกิดเนื่องจากความดันไอน้ำในโครงสร้างที่ถูกขจัด ออกมาในช่วงนี้น้ำจะถูกขจัดออกมา 50 % และจะถูกขจัดออกมาอีก 30% ในช่วง 350 - 500°C น้ำที่เหลือจะถูกขจัดออกไปที่ประมาณ 1,000°C และที่อุณหภูมิ 1,150 - 1,200°C หินแก้วจะถูกเปลี่ยนเป็น cristobalite ความหนาแน่นจะลดลงและเกิดการขยายตัว

cristobalite เป็นอีกรูปร่างหนึ่งของหินแก้ว ผลิตได้โดยการทำให้หินแก้วเปลี่ยนแปลงอย่างรุนแรง มีโครงสร้างหลวม จะมีการเปลี่ยนแปลงจากรูปร่างที่อุณหภูมิต่ำ ไปเป็นรูปร่างที่อุณหภูมิสูงที่ 200 - 280 °C

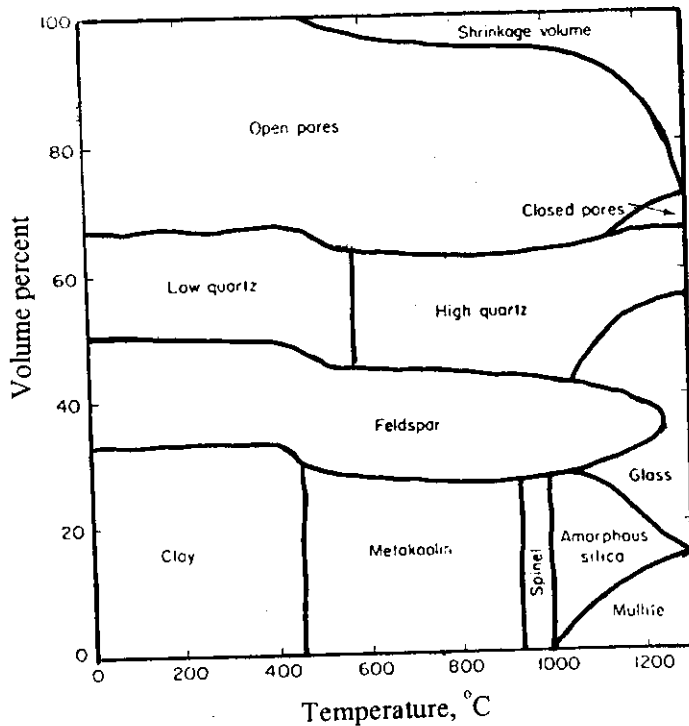


รูปที่ 2.6 แสดงการเปลี่ยนแปลง ความหนาแน่น และความพูน ของ flint ที่อุณหภูมิต่างๆ (9)

#### - อิทธิพลของพลังงานความร้อนที่มีต่อหินฟันม้า

หินฟันม้าชนิดโปแตชจะสลายตัวให้ (KAlSiO) และแก้วที่อุณหภูมิ 1,100 องศาเซลเซียส และลิโวไซท์ยังสามารถทนความร้อนได้ถึง 1,500°C แต่หินฟันม้าชนิดโซดาจะหลอมเหลวที่อุณหภูมิ 1,100°C

ในการเผาผลิตภัณฑ์ การให้ความร้อนและการเปลี่ยนแปลงปริมาณความร้อนที่ละน้อย ควรให้ระยะการเผาเป็นไปอย่างช้า ๆ สม่ำเสมอ การวางแผนทางการเผา หรือ firing schedule ในขั้นต้นใช้ความร้อนแบบไฟอ่อน ๆ (preheating) และการควบคุมอุณหภูมิ ควรขึ้นกับขนาด และผลิตภัณฑ์ที่จะเผา อุณหภูมิสูงสุดในการเผาจะขึ้นอยู่กับจุดสุกตัว และจุดหลอมเหลวของผลิตภัณฑ์แต่ละชนิด การใช้อุณหภูมิในการเผาจึงทำให้มีผลต่อสมบัติของผลิตภัณฑ์

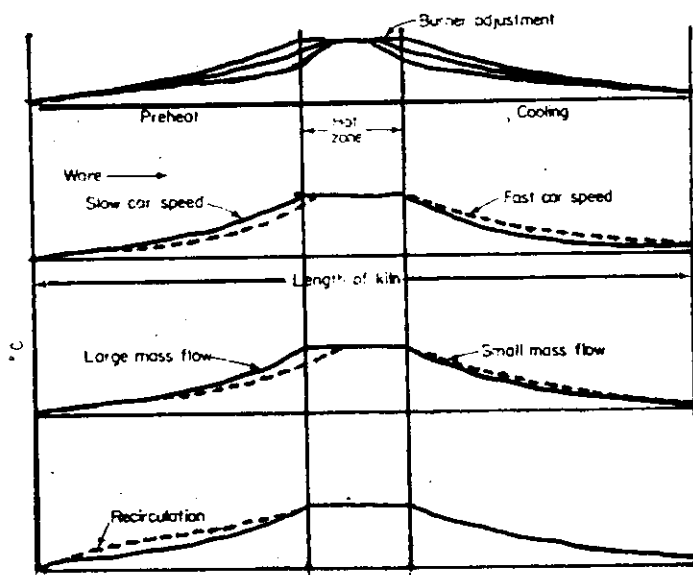


รูปที่ 2.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเนื้อสารที่เกิดขึ้นโดยปริมาตรของผลิตภัณฑ์ Triaxial (9)

การปล่อยให้เตาเย็นตัว (cooling rate) ควรให้เป็นไปอย่างช้า ๆ มิฉะนั้นอาจทำให้เกิดการ cracking ดังเช่น ในการเผาเซรามิกส์โดยใช้เตาอุโมงค์ในอุตสาหกรรม จะมีการกำหนดช่วงของเตาให้มีอุณหภูมิต่าง ๆ กันตามความยาวของเตา ดังรูปที่ 2.8 การดำเนินการที่ทำการเคลื่อนผลิตภัณฑ์ที่ต้องการเผาผ่านเตาเข้าไป เป็นการค่อย ๆ เพิ่มอุณหภูมิและคงไว้ที่อุณหภูมิหนึ่ง แล้วต่อมาที่ลดอุณหภูมิลงตามลำดับ

การใช้อุณหภูมิสูงสุดในการเผาเซรามิกส์ ที่แตกต่างกัน จะทำให้วัตถุของผลิตภัณฑ์มีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างหรือสมบัติเมื่อได้รับความร้อนที่ต่าง ๆ กัน ดังนั้นสมบัติโดยรวมของผลิตภัณฑ์เซรามิกส์ที่ทำการเผาด้วยอุณหภูมิที่ต่างกันจึงเป็นสิ่งที่น่าสนใจในการพัฒนา

หลังจากที่ผลิตภัณฑ์เซรามิกส์ได้รับการเผา thermal stress ที่เกิดขึ้นในระหว่างการเผายังมีอยู่ เช่น เกิดจากการขยายตัวเนื่องมาจากความร้อน ที่แตกต่างกันของวัตถุดิบแต่ละชนิด การอบก่อนหรือรักษาอุณหภูมิหลังการเผาให้ค่อย ๆ ต่ำลง จะเป็นการควบคุมและกำจัดค่าความเค้น เพื่อลดการแตกหักในผลิตภัณฑ์



รูปที่ 2.8 แสดงถึงการควบคุมอุณหภูมิ ตามความยาวของเตา (9)

ผลกระทบของการกำหนดอุณหภูมิหลังการเผา มีความสำคัญเนื่องจากอาจทำให้เกิดค่าความเค้นกดขึ้นที่ผิวภายนอกของผลิตภัณฑ์ และจะทำให้นำไปสู่การแตกร้าวได้อย่างไรก็ตามการปล่อยให้เย็นลงโดยวิธีใดก็มีข้อจำกัด เช่น การทำให้เย็นลงจากอุณหภูมิสูงอย่างรวดเร็วก็จะทำให้เกิดการแตกร้าวได้ง่าย

องค์ประกอบที่มีผลต่อการสุกตัวของเนื้อผลิตภัณฑ์

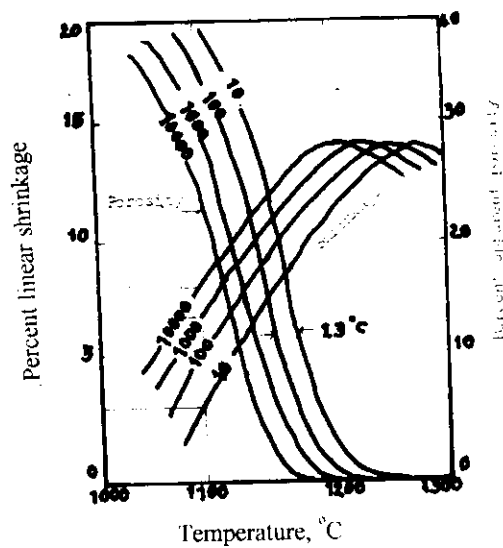
1. ธรรมชาติของเนื้อดิน ในดินเหนียวจะมีพวกอินทรีย์สารปนอยู่ จึงจำเป็นจะต้องมีการเผาไหม้ให้หมดก่อนที่รูปทรงจะถูกซ่อนไว้ในเนื้อดิน หรืออาจเกิดการบวม หรือแกนดำขึ้นได้ที่อุณหภูมิสูง ชนิดของ

ดินมีความสำคัญมาก เพราะสิ่งเจือปนมีผลต่อปริมาณและชนิดของแก้วที่จะเกิดขึ้นเช่น ดินขาวที่มี mica ซึ่งมีโปแตสเซียมมากจะทำให้เกิดแก้วขึ้นมากกว่าดินขาวที่มี mica น้อย

2 ธรรมชาติของซิลิกา การใช้หินแก้วที่บดละเอียดจะทำให้ผลิตภัณฑ์มีความโปร่งแสงมากกว่าใช้ทรายละเอียดหรือหินเหล็กไฟ

3 ธรรมชาติของหินฟีนมา การใช้หินฟีนมาทั้งสองชนิดไม่มีผลแตกต่างในพฤติกรรมการเผา แต่ถ้าใช้โปแตช ต่อโซดาสูง จะช่วยทำให้ผลิตภัณฑ์มีความโปร่งแสงมากขึ้นและกลายเป็นแก้วได้มากกว่า

4 อุณหภูมิและเวลา แสดงผลต่อการหดตัวและพูนตัวของผลิตภัณฑ์ จากการศึกษาของ Norton โดยการทำการเผาผลิตภัณฑ์ที่หลาย ๆ อุณหภูมิและนำผลมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การหดตัว และความพูน สัมพันธ์กับอุณหภูมิและเวลาได้ดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 แสดงอิทธิพลของอุณหภูมิและเวลาในการเผาเซรามิกส์ต่อ ความพูนและเปอร์เซ็นต์การหดตัว (9)

จะเห็นได้ว่าในการทำการเผาที่อุณหภูมิและเวลาต่าง ๆ กันจะได้ผลผลิตที่มีคุณสมบัติต่าง ๆ กัน ในปัจจุบันอุตสาหกรรมต้องการวงจรการเผาที่รวดเร็ว โดยไม่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสมบัติส่วนใหญ่มากนัก จากการศึกษาของ Norton พบว่าการเผาช้าจะทำให้หินแก้วละลายได้มาก ขณะเดียวกันก็จะทำให้เกิด

การ mullite มากขึ้นด้วย แต่การทำกรเผาเร็วก็จะทำให้เนื้อแก้วเกิดการไหลตัวดีผลิตภัณฑ์แข็งแรงขึ้นและมีรูพรุนเกิดขึ้นสูง

5 การปล่อยให้ผลิตภัณฑ์เย็นตัวลงหรือการรักษาอุณหภูมิหลังการเผา

### การเผาเคลือบ (glaze firing)

ช่วงอุณหภูมิของการเผาเคลือบ การเผาเคลือบในอุณหภูมิต่ำกว่าจุดหลอมละลายของเคลือบ เคลือบจะไม่ละลายเรียกว่าเผา underfiring ถ้าเผาในอุณหภูมิที่สูงกว่า firing range ของเคลือบ เคลือบจะไหลลงมาอยู่ตอนล่างของผลิตภัณฑ์เรียกว่าเผา overfiring

Underfiring -----> firing range -----> Overfiring

น้ำยาเคลือบทุกชนิดมีช่วงของอุณหภูมิที่หลอมละลายก่อนจะไหลลงมาสู่ตอนล่างของผลิตภัณฑ์ ถ้าเป็นเคลือบไฟต่ำและไฟกลาง (low and medium temperature range) ช่วงของอุณหภูมิจะสั้นต้องคอยระวังเป็นพิเศษ แต่ถ้าเป็นเคลือบไฟสูงช่วงของอุณหภูมิจะกว้าง

low temp. glaze	medium temp. glaze	high temp. glaze
780 - 800°C	1000 - 1050°C	1200 - 1300°C
850 - 900°C	1050 - 1100°C	1250 - 1350°C

น้ำยาเคลือบแต่ละชนิดจะมีหลักการเผาคล้ายคลึงกันมาก อย่างไรก็ตามมีเคลือบบางชนิดที่ต้องเผาด้วยความระมัดระวังเป็นพิเศษ เช่น เคลือบตะกั่ว และเคลือบฟลัก เป็นต้น

### การเตรียมผลิตภัณฑ์ก่อนการเผา

หลังจากผลิตภัณฑ์ผ่านการชุบเคลือบเรียบร้อยแล้ว ก่อนนำไปเผาควรตรวจให้เรียบร้อยก่อนคือ

1. ขจัดสิ่งสกปรก เช่น ฝุ่นหรือไขมันออกจากผิวเคลือบให้หมดเสียก่อน
2. ตกแต่งผิวเคลือบให้เรียบร้อย โดยตรวจสอบความเรียบร้อยของเคลือบถ้าเคลือบไม่เรียบสม่ำเสมอก็ป้ายน้ำเคลือบให้สม่ำเสมอ
3. ขูดหรือเช็ดน้ำเคลือบส่วนที่จะต้องวางสัมผัสกับพื้นออกให้หมด เพื่อป้องกันการติดกับพื้นรองในขณะเผา เนื่องจากการหลอมละลายของน้ำเคลือบ
4. ทิ้งไว้ให้ผิวผลิตภัณฑ์แห้ง
5. ตรวจสอบและแก้ไขรอยตำหนิหรือข้อบกพร่องที่ผิวเคลือบ เช่น มีผิวเคลือบมีรูเล็ก ๆ ก็ใช้มือลูบเบา ๆ ผงเคลือบก็จะลงไปอุดในรูจนเรียบ

## 6. จัดเรียงผลิตภัณฑ์เข้าเตาเผา

### การควบคุมอุณหภูมิ

ในขณะที่เผาผลิตภัณฑ์จะต้องมีการควบคุมอุณหภูมิ เพื่อที่จะให้อุณหภูมิในเตาคงที่ตลอดเวลา และสม่ำเสมอ

การวัดและการควบคุมอุณหภูมิจะใช้ thermocouple ติดตั้งตามจุดต่าง ๆ ตลอดความยาวเตา และต่อสายจาก thermocouple เข้าเครื่องรายงานอุณหภูมิซึ่งอาจจะเป็นเครื่องบันทึกหรือเครื่องบอกอุณหภูมิโดยตรง

ในกรณีที่ไม่มี thermocouple หรือเครื่องวัดอุณหภูมิอาจใช้ pyrometric cone (เป็นผลิตภัณฑ์เซรามิกส์ซึ่งมีรูปร่างแบบโคน ซึ่งมีคุณสมบัติจะยุบตัวเมื่อเผาถึงอุณหภูมิเฉพาะของโคนเบอร์หนึ่ง ๆ) แทนก็ได้

### ลักษณะที่เป็นข้อตำหนิของเคลือบ

-การร้าว (crazing) มีลักษณะเป็นลายเส้นตาข่าย มีสาเหตุมาจากเนื้อเคลือบและเนื้อดินปั้นมีการหดตัวหรือขยายตัวไม่เท่ากัน สามารถแก้ไขได้หลายวิธี เช่น

1. แก้ที่ส่วนผสมของน้ำเคลือบหรือเนื้อดินนั้น โดยการเพิ่มหรือลดปริมาณของฟลักซ์ (flux) และเพิ่มปริมาณของซิลิกา หรืออะลูมินาออกไซด์
2. เพิ่มเวลาในการเผาออกไปเพื่อเปิดโอกาสให้เคลือบละลายโดยทั่วกัน โดยจะเพิ่มเวลาขึ้นประมาณ 30 - 60 นาที หลังจากเผาเคลือบสุดท้ายดีแล้ว
3. เพิ่มอุณหภูมิการเผาโดยไม่ต้องขึ้นไฟ แต่ต้องไม่เกิดช่วงหลอมละลาย (firing range) ของน้ำเคลือบ เช่น การหลอมละลายของเคลือบสูตร 1 อยู่ในช่วง  $1150^{\circ}\text{C} - 1200^{\circ}\text{C}$  แทนที่เราจะเผาแค่  $1150^{\circ}\text{C}$  เราสามารถที่จะเผาได้ถึง  $1200^{\circ}\text{C}$  เคลือบก็ยังไม่ไหลลงมาอยู่ด้านล่างของผลิตภัณฑ์
4. เมื่อเผาเคลือบเสร็จแล้วทิ้งผลิตภัณฑ์ให้เย็นในเตา อย่างเอาผลิตภัณฑ์ออกในขณะที่ยังร้อนจัดอยู่ คืออุณหภูมิไม่ควรเกิน  $100^{\circ}\text{C}$

-การเกิดรูเข็ม (pinholes) มีลักษณะเป็นรูเล็ก ๆ ที่เกิดขึ้นในผิวเคลือบ ถ้ามีขนาดใหญ่เรียกว่า blisters รูเข็ม นี้เกิดจากสาเหตุหลายประการด้วยกัน คือ

1. เนื้อดินปั้นมีความพรุนตัวมาก (porous) เนื่องจากการนวดดิน (wedging) ไม่ดีพอ
2. ใช้น้ำผสมในเนื้อดินมากเกินไป
3. มีสารซัลเฟตในเนื้อดินมากเกินไป แก้ไขโดยการเติมสารแบเรียมคาร์บอเนต ( $\text{BaCO}_3$ ) ในเนื้อดินประมาณ 2% และเผาโดยวิธีลดออกซิเจน (reduction) คือเผาให้เกิดควันไปจนถึงจุดที่เคลือบเริ่มหลอมละลาย
4. การสันดาปของสิ่งเจือปนในเนื้อดิน จึงควรล้างดินให้สะอาดก่อนนำมาใช้งาน

5. ปูนพลาสติกที่ใช้ในการหล่อแบบเก่าหรือเสื่อมคุณภาพ

6. เก็บน้ำเคลือบไว้นานเกินไป แก้ไขโดยเติมสารฟอร์มาลดีไฮด์ (formaldehyde) ลงใน

เคลือบหรืออาจจะเก็บน้ำเคลือบไว้ในลักษณะที่แห้ง

7. การแตกสลายของสารที่ใช้ทำน้ำเคลือบ เช่น พวกหินปูน ( $\text{CaCO}_3$ ) ควรใช้เวลา

เผาออกไปโดยอุณหภูมิคงที่ (soaking)

8. ผิวผลิตภัณฑ์ที่ฟูนเกาะ เนื่องมาจากไม่ทำความสะอาดก่อนนำไปเคลือบ

9. การสันดาปของสิ่งแปลกปลอมในน้ำเคลือบ ยึดเวลาการเผาออกไปโดยอุณหภูมิคงที่

- ผิวผลิตภัณฑ์ถูกเคลือบเป็นหย่อม ๆ (crawling) และเกิดรอยว่างไม่มีเคลือบติด ซึ่งมีสาเหตุมาจาก น้ำเคลือบมีการหดตัวมากเกินไป หรือเคลือบหนาเกินไป วิธีการที่อาจจะช่วยแก้ไขได้ก็คือ อย่าเคลือบหนาเกินไป หรืออย่าบดส่วนผสมของเคลือบให้ละเอียดเกินไปและอย่าใช้ดินผสมลงไปมาก ซึ่งจะ ทำให้การหดตัวของชั้นเคลือบในระหว่างการเผาลดลง

- ผิวเคลือบที่เป็นคลื่น (waviness) เกิดจากการชุบเคลือบไม่ดีพอคือการชุบเคลือบหนาไม่เท่ากัน ควรตรวจสอบการชุบเคลือบให้มีความหนาสม่ำเสมอ

- การร่อนจากเนื้อดินปั้น (peeling) เป็นปรากฏการณ์ที่เคลือบร่อนหลุดออกมาเป็นแผ่น ๆ แยกตัวออกจากเนื้อดินปั้น มีสาเหตุจากผลิตภัณฑ์สกปรกเนื่องจากสิ่งสกปรก เช่น มีฝุ่นหรือไขมันเกาะอยู่ วิธีแก้ไขคือ ทำความสะอาดผลิตภัณฑ์ก่อนนำไปเคลือบ

ผิวเคลือบด้าน (dry surface) ไม่ตรงตามต้องการ มีสาเหตุจากเคลือบบางเกินไปหรือเผาไม่ถึงจุดหลอมละลาย

### การตรวจสอบคุณสมบัติของเคลือบ

1. การตรวจสอบความต้านทานต่อรอยขีดขีดของเคลือบ มีหลายวิธี ที่นิยมใช้กันมากได้แก่ แชนด์บลาสท์เทสต์ ทดสอบโดยใช้หินทดลองเป็นแผ่นเช่นแผ่นกระเบื้องตั้งทำมุม  $70^\circ\text{C}$  แล้วพ่นทรายขนาด 80 เมช ด้วยความดัน 1 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ใช้ทรายครั้งละ 800 กรัม ค่าความต้านทานต่อรอยขีดขีดวัดโดยใช้ปริมาณของเคลือบที่หลุดออกมา

2. การทดสอบความทนทานต่อสารเคมี

2.1 การทดสอบความทนทานต่อกรด

นำชิ้นทดสอบมาแช่ผิวให้สะอาด แล้วจุ่มลงในกรดเกลือ ( $\text{HCl}$ ) ความเข้มข้น 3% ตั้งทิ้งไว้ 7 วัน ยกชิ้นงานออกแล้ววัดปริมาณของเคลือบที่หลุดออกมาโดยนำไปเปรียบเทียบกับส่วนที่เหลือ คัดออกมาเป็นเปอร์เซ็นต์ที่หลุดออก

2.2 การทดสอบความทนทานต่อเบส ใช้วิธีการเดียวกับความทดสอบความทนทานต่อกรด แต่เปลี่ยนสารเคมีเป็นโซดาไฟ ( $\text{NaOH}$ ) ความเข้มข้น 3%

3. การทดสอบการรานตัวของเคลือบ



### 3.1 การทดสอบการรานตัวเนื่องจากการกระทำทางความร้อน

ผลิตภัณฑ์ที่ใช้ภายใต้อิทธิพลของความร้อน โดยไม่เกิดการรานตัว จะต้องผ่านการทดสอบ 10 ครั้ง โดยไม่เกิดการรานตัว

วิธีการทดสอบทำโดย ทำผลิตภัณฑ์ให้ร้อนถึง  $120^{\circ}\text{C}$  โดยใช้เตาอบแล้วจุ่มลงในน้ำเย็น อุณหภูมิ  $20^{\circ}\text{C}$  ทันที

### 3.2 การทดสอบด้วยออดิโอเคลฟ

ผลิตภัณฑ์ที่มีความพรุนตัวอาจตกอยู่ใต้อิทธิพล ของการขยายตัวเนื่องจากความชื้น ผลิตภัณฑ์เช่นนี้เมื่อใช้งานที่มีความชื้นมาก จะมีการรานตัว ควรทดสอบการรานตัวที่ใช้การทดสอบด้วยออดิโอเคลฟ

วิธีการทดสอบทำโดย วางชิ้นทดสอบในออดิโอเคลฟเหนือน้ำ ใช้ความดัน 10 กิโลกรัม ต่อ ตารางเซนติเมตร ควบคุมไว้ที่ความดันนี้เป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้วค่อย ๆ ลดความดันลงช้า ๆ ใช้เวลาประมาณ 10 ถึง 30 นาที

## 4. การทดสอบความแข็งแรง

ถ้าเคลือบตกอยู่ใต้ความเครียด จะมีผลอย่างยิ่งต่อการทนทานแรงกดที่มีต่อการโค้งงอของเนื้อผลิตภัณฑ์เซรามิกส์นั้น ถ้าผลิตภัณฑ์อยู่ภายใต้ความเครียดความแข็งแรงของเนื้อผลิตภัณฑ์จะลดลง เหลือประมาณ 25 % ของความแข็งแรงของเนื้อผลิตภัณฑ์ที่ไม่ได้เคลือบ เคลือบที่ตกอยู่ภายใต้แรงอัดจะทำให้ผลิตภัณฑ์เคลือบมีความเครียดของแรงอัดเพิ่มขึ้น และจะเพิ่มมากขึ้นถึงจุดหนึ่ง ถ้าความเครียดของแรงอัดมากเกินไป จะทำให้ผลิตภัณฑ์เสียหาย คือ อาจแตกกระเทาะได้ ผลิตภัณฑ์ฉนวนไฟฟ้าจะให้ความสำคัญเป็นอย่างมากต่อผลที่แรงกดของเคลือบที่มีผลต่อความแข็งแรงของผลิตภัณฑ์

เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบความแข็งแรงของเคลือบคือ ไโคอะมอนด์พีรามิดฮาร์ดเนส (diamond pyramid hardness) ซึ่งเคลือบมีความไวต่อการทดสอบชนิดนี้มาก ถ้าน้ำหนักที่กดบนเคลือบด้วยอัตราที่เหมาะสมและน้ำหนักที่ใช้ไม่มากพอที่จะทำให้เกิด ค่าความแข็งแรงซึ่งมีหน่วยเป็นคnoop (knoop) จะไม่ขึ้นตรงต่อน้ำหนักที่กด

## 5. ความสุกใสเป็นเงามัน

ผิวผลิตภัณฑ์ที่สำเร็จเรียบร้อยดีแล้ว จะทำหน้าที่ที่สำคัญให้แก่ผิวผลิตภัณฑ์ สองประการ คือ การสงวนรักษาสภาพของผิวผลิตภัณฑ์ในการรักษาสภาพที่ปรากฏของผลิตภัณฑ์ ลักษณะสภาพที่ปรากฏของผิวผลิตภัณฑ์ที่ระมัดระวัง ได้แก่ สีและความสุกใสเป็นเงามัน ความสุกใสเป็นเงามันไม่สามารถวัดได้ แต่เราสามารถวัดความสามารถในการสะท้อนแสงของผิวผลิตภัณฑ์ได้

คุณสมบัติโดยเฉพาะความสามารถในการสะท้อนแสงของผิวผลิตภัณฑ์ จะเปลี่ยนแปลงไปตามมุมตกและมุมสะท้อน และอื่น ๆ ที่อยู่ในระบบซึ่งเรื่องที่เกี่ยวข้องข้างต้น เครื่องมือ

ที่ใช้วัดความสุกใสเป็นเงามันจะผูกพันกับทิศทางเรขาคณิตของแรงสะท้อน เครื่องมือจะให้ค่าของตัวเลขซึ่งมีความสัมพันธ์กับความสุกใสเป็นเงามันที่ปรากฏของผิววัสดุที่มีคุณสมบัติเฉพาะ

#### 6. การทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าของเคลือบ

ความรู้เรื่องคุณสมบัติทางไฟฟ้าของเคลือบยังจำกัดอยู่ในวงแคบมาก เพราะนักเซรามิกส์ได้สันนิษฐานไว้ตามพฤติกรรมของแก้วต่าง ๆ เนื่องจากแก้วต่าง ๆ อาจแตกตัวเป็นอนุภาคนวกลบได้ การทดสอบคุณภาพทางไฟฟ้าของเคลือบจะเป็นการวัดสภาพการนำไฟฟ้าที่ผิวเคลือบ ซึ่งเป็นการวัดปริมาณของกระแสที่เคลื่อนตัวผ่านผิวเคลือบไปเป็นระยะ 1 หน่วย ความยาวและหนึ่งหน่วยความกว้าง ผลการใช้อัลคาไลน์ และค่าอื่น ๆ แทนที่กันในส่วนประกอบของเคลือบ ซึ่งมีผลต่อสภาพการนำไฟฟ้าที่ผิวเคลือบดังนี้ การใช้อัลคาไลน์ เช่น  $\text{Na}_2\text{K}$  โดยเฉพาะ  $\text{Na}$  จะทำให้สภาพการนำไฟฟ้าของผิวเคลือบสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว การเพิ่มปริมาณ  $\text{CaO}$  เพียงเล็กน้อยในส่วนผสมของเคลือบ จะทำให้สภาพการนำไฟฟ้าของเคลือบลดลงอย่างรวดเร็วและจะไปหยุดที่จุด ๆ หนึ่งและถ้าเติม  $\text{CaO}$  ลงไปมากกว่าปริมาณนั้นสภาพการนำไฟฟ้าของเคลือบจะสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว

### 2.3. สมดุลระหว่างวัฏภาค

สถานะสมดุลและปฏิกิริยาเคมีกายภาพ (The equilibrium state and physicochemical reactions)

สถานะสมดุลที่เกิดขึ้นในระบบหนึ่งๆ จะเปลี่ยนแปลงตามสัดส่วนองค์ประกอบ อุณหภูมิและความดัน การเปลี่ยนแปลงตัวแปรใดๆเหล่านี้จะส่งผลต่อการเปลี่ยนสมดุลจากจุดหนึ่งไปยังสถานะสมดุลอีกสถานะหนึ่ง โดยการเปลี่ยนแปลงไปสู่สถานะสมดุลใหม่นี้มีได้ 2 ชนิด คือ

- การเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ เป็นการเปลี่ยนแปลงที่ส่งผลต่อคุณสมบัติทางกายภาพขององค์ประกอบ เช่น การเปลี่ยนวัฏภาค การเปลี่ยนความหนืด, การเปลี่ยนรูปร่างของผลึก เช่น หินเขียวหนุมานเปลี่ยนเป็นคริสโตบาไลต์ ((crystalite) หรือ iridymite กระบวนการที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ ได้แก่ การแข็งตัว, การหลอมตัว, การกลายเป็นไอ โดยการระเหิด หรือการระเหย การตกผลึก เป็นต้น

- การเปลี่ยนแปลงทางเคมี เป็นการเปลี่ยนแปลงที่ส่งผลต่อการเกิดปฏิกิริยาเคมี ทำให้ได้องค์ประกอบที่เปลี่ยนไปเป็นผลิตภัณฑ์ใหม่ที่แตกต่างจากสารเริ่มต้น เช่น การเผาหินปูน ( $\text{CaCO}_3$ ) ให้ได้ปูนขาว ( $\text{CaO}$ ) เป็นต้น

บางครั้งความแตกต่างของการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพและทางเคมีจะแยกออกจากกันได้ยาก เช่น ในกระบวนการตกผลึก ถ้าเป็นสารบริสุทธิ์ที่หลอมตัวแล้วทิ้งไว้ให้เย็นตกผลึก จะเป็นการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ แต่ในทางคานเซรามิกส์ การตกผลึกจากการหลอมตัวของสารประกอบที่ไม่ใช่สารบริสุทธิ์ จะได้ผลิตภัณฑ์สุดท้ายที่แตกต่างกันทั้งทางด้านรูปร่างผลึกและองค์ประกอบ ดังนั้น จึงเกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงทางเคมีด้วย

## สมดุลระหว่างวัฏภาค (phase equilibrium)

เมื่อสารสองชนิดหรือมากกว่าถูกนำมาผสมกัน อาจมีปฏิกิริยาเกิดขึ้นซึ่งผลที่ได้จะมีความแตกต่างกันทางด้านเคมีอย่างแท้จริง ผลิตภัณฑ์สุดท้ายจะขึ้นอยู่กับตัวแปรหลายอย่าง เช่น ความเข้มข้นและการผสมสารตั้งต้นให้เป็นเนื้อเดียวกัน อุณหภูมิที่เกิดปฏิกิริยา เป็นต้น

กระบวนการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพและทางเคมี เกิดขึ้นด้วยอัตราที่แน่นอน และจะเข้าสู่สถานะสมดุล ภายใต้อุณหภูมิเฉพาะ

เพื่อความสะดวกในการใช้งาน จึงได้มีการระบุแผนภาพสมดุลระหว่างวัฏภาค (phase equilibrium diagram) ด้วยวิธีกราฟ โดยจะใช้เป็นเครื่องมือที่จะหาจุดสมดุลและบอกลักษณะของเซรามิกส์ ซึ่งได้จากการบันทึกส่วนประกอบ แต่ละวัฏภาค และจำนวนของวัฏภาค ที่แสดงที่จุดสมดุล

เวลาที่ใช้งานจากจุดเริ่มต้นถึงจุดสมดุลใด จะมีการเปลี่ยนแปลง ซึ่งจะขึ้นอยู่กับค่าอื่นๆมากกว่าที่จะขึ้นกับจุดสมดุลสุดท้ายของปฏิกิริยา โดยเฉพาะอย่างยิ่งระบบที่มีซิลิกาสูง จะมีความหนืดของวัฏภาคของเหลวสูง ซึ่งจะทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาช้าลง และใช้เวลานานก่อนที่จะเข้าสู่จุดสมดุล และโดยส่วนใหญ่แล้วจะไม่เข้าสู่จุดสมดุล สำหรับระบบอื่นๆ (ยกเว้นซิลิกา) จะเป็นสมดุลแบบกึ่งคงที่ (metastable)

ในการพัฒนาเซรามิกส์ ต้องวิเคราะห์ควบคุมและปรับปรุง ส่วนประกอบทางเคมี เพื่อให้ได้ประโยชน์สูงสุด แผนภาพวัฏภาคจะใช้ประโยชน์ดังนี้

1. กำหนดวัฏภาคของสาร
2. กำหนดส่วนประกอบของแต่ละวัฏภาค
3. กำหนดค่าพลังงานความร้อนที่ใช้ในการเกิดผลึก และการตกตะกอน
4. กำหนดแผนที่จะหาส่วนประกอบใหม่
5. กำหนดอุณหภูมิของแต่ละวัฏภาค

เนื่องจากในงานวิจัยนี้เกี่ยวข้องกับการเตรียมเนื้อดินปั้นพอร์ซเลน ซึ่งมีองค์ประกอบหลักประกอบด้วยสาร 3 ชนิด คือ  $K_2O$ ,  $Al_2O_3$  และ  $SiO_2$  และอีกประการหนึ่งคือ น้ำเคลือบ ซึ่งมีองค์ประกอบหลัก  $Na_2O$ ,  $Al_2O_3$ ,  $SiO_2$  ดังนั้น ในที่นี้จึงแสดงระบบสมดุลระหว่างวัฏภาคของส่วนผสมทั้ง 2 ระบบ

### -ระบบโปแตสเซียมออกไซด์-อะลูมินา-ซิลิกา (potash-alumina-silica)

ศึกษาโดย Schairer Bowen<sup>1</sup> แสดงในภาพประกอบ 2.11 สารประกอบที่มี  $K_2O \cdot Al_2O_3 \cdot 3SiO_2$  (orthoclase feldspar) มักจะไม่หลอมเหลวเข้าด้วยกัน (เว้นแต่จะอยู่ในขีดจำกัดของส่วนประกอบนอกจากนี้ สารประกอบ  $K_2O \cdot Al_2O_3 \cdot 3SiO_2$  (leucite) มักจะเกิดขึ้นเสมอและหลอมเหลวเข้ากันได้ ที่อุณหภูมิ 1,600°C.

และอุณหภูมิที่ต่ำสุดที่คงสถานะของเหลวอยู่ได้ คือ  $695^{\circ}\text{C}$ . ซึ่งจะประกอบด้วยโปแตสเซียมออกไซด์ 30 ส่วน อะลูมินา 4 ส่วน ซิลิกา 66 ส่วน

### -ระบบโซเดียมออกไซด์-อะลูมินา-ซิลิกา (soda-alumina-silica)

ศึกษาโดย Schairer และ Bowen<sup>1</sup> แสดงด้วยสามเหลี่ยม ดังภาพประกอบ 2.11 มีสารประกอบต่างๆ ดังนี้

สารที่มี 2 องค์ประกอบ (binary compounds)

$2\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{SiO}_2$  การหลอมตัวจะไม่เข้ากัน ซึ่งจะแยกจากกันที่  $1,400^{\circ}\text{C}$ .

$\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{SiO}_2$  จุดหลอมตัวที่  $1,089^{\circ}\text{C}$ . การหลอมเหลวเข้ากันได้

$\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{SiO}_2$  จุดหลอมตัวที่  $874^{\circ}\text{C}$ . การหลอมเหลวเข้ากันได้

$3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$  การหลอมเหลวจะไม่เข้ากัน ซึ่งจะแยกจากกันที่  $1,810^{\circ}\text{C}$ .

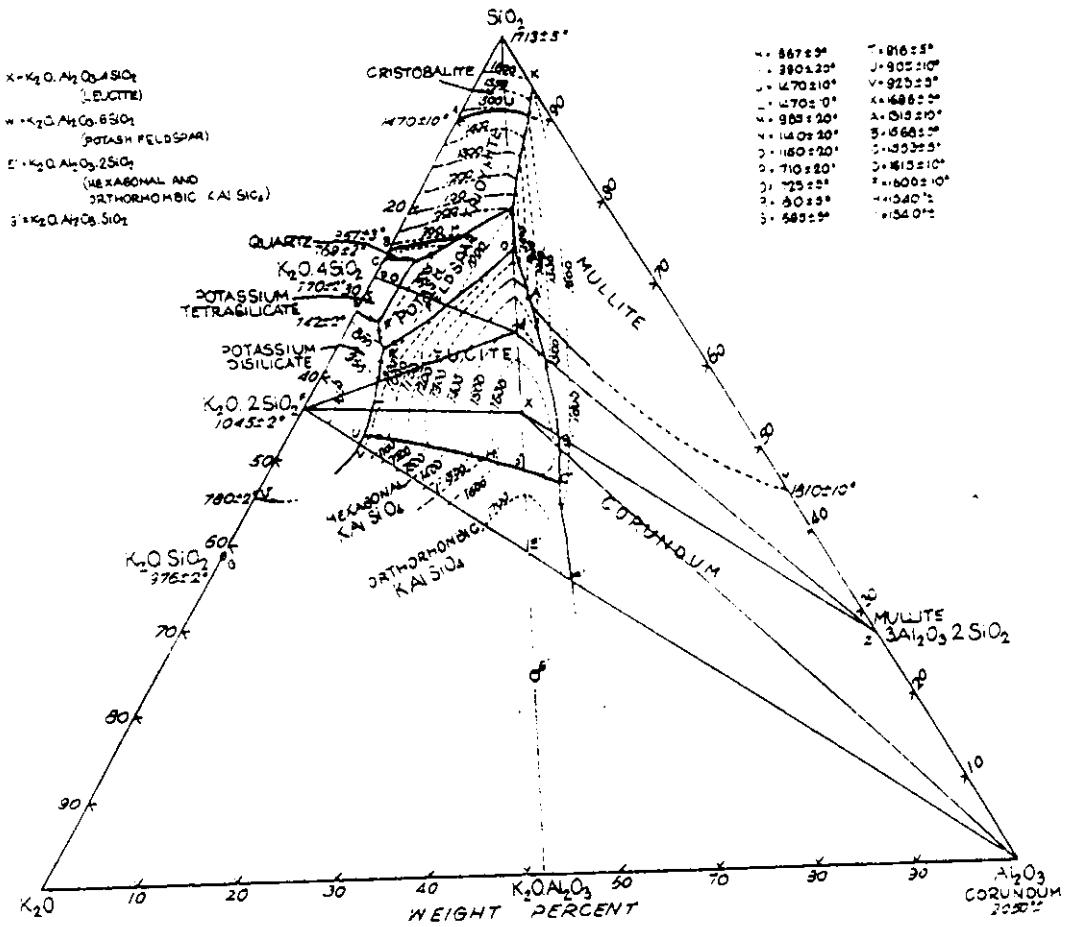
$\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$  ไม่มีการทดสอบ

สารที่มี 3 องค์ประกอบ (ternary compounds)

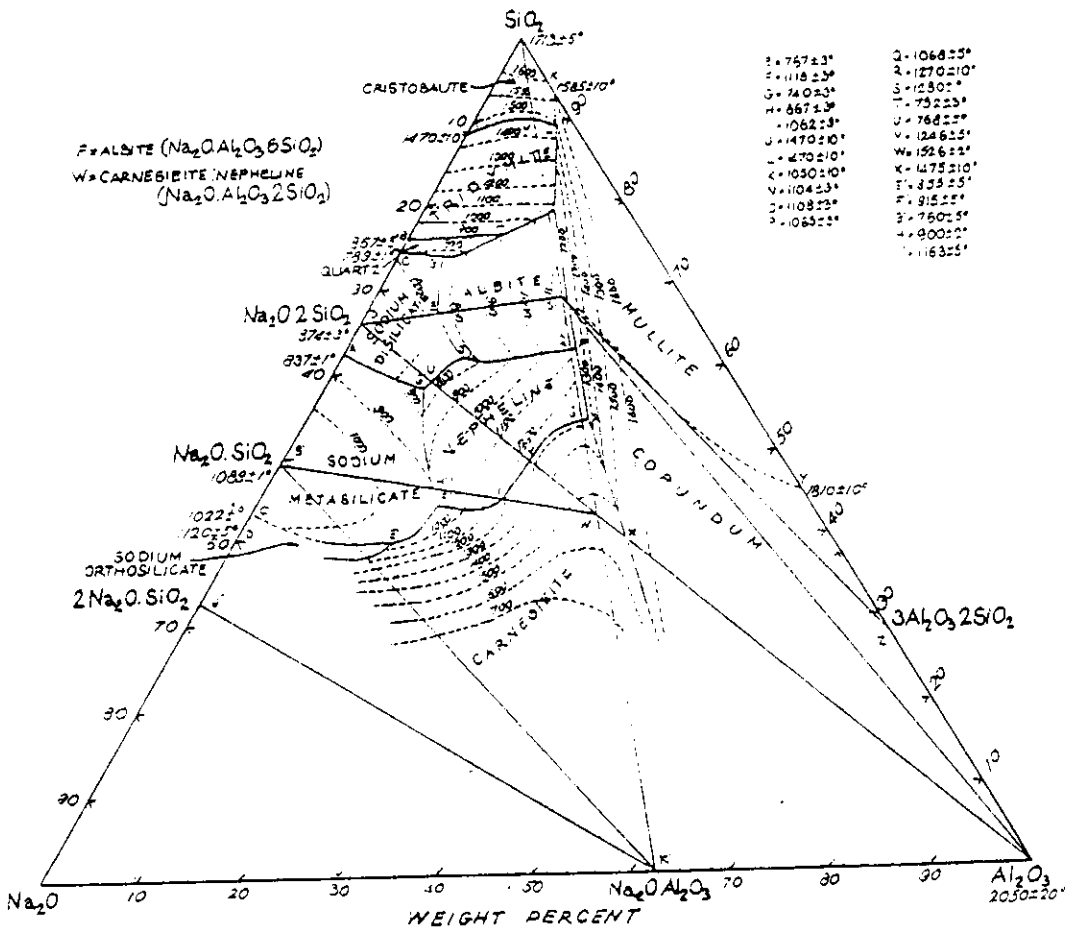
$\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$  จุดหลอมตัว  $1,526^{\circ}\text{C}$ . อาจหลอมเหลวเข้ากัน  
(carnegieite nephelite)

$\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$  จุดหลอมตัวที่  $1,188^{\circ}\text{C}$ . หลอมเหลวเข้ากันได้  
(albite)

และอุณหภูมิที่ต่ำสุดของของเหลวที่ยังคงสถานะอยู่ได้ คือ  $732^{\circ}\text{C}$ . ประกอบด้วยโซเดียมออกไซด์ 26 ส่วน อะลูมินา 13 ส่วน ซิลิกา 61 ส่วน



รูปที่ 2.10 ระบบสมดุลระหว่างวัฏภาคของส่วนผสม  $K_2O$ ,  $Al_2O_3$  และ  $SiO_2$

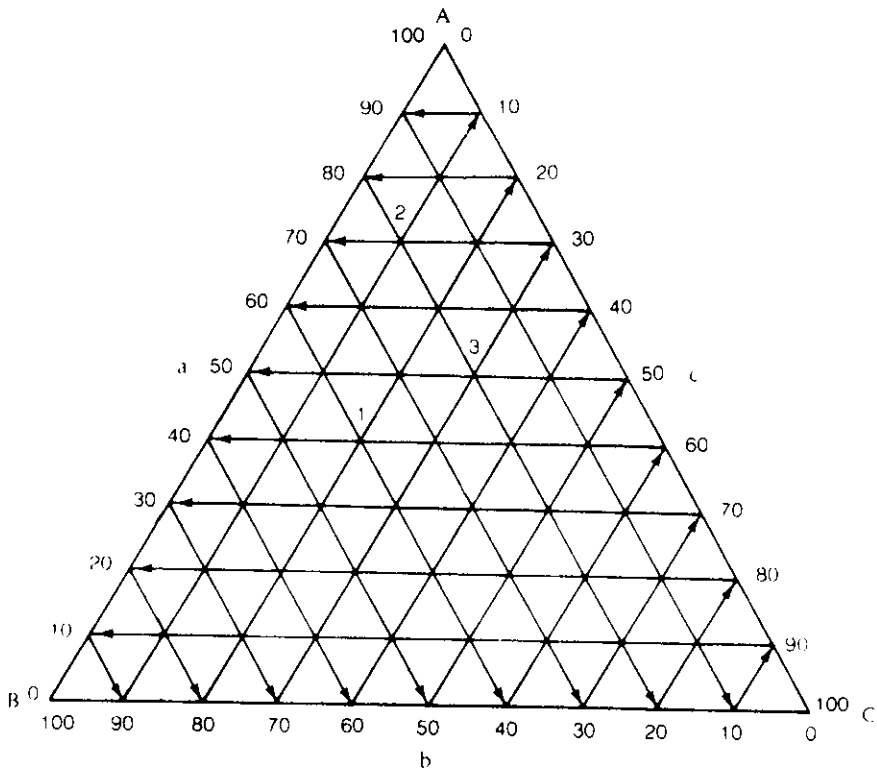


รูปที่ 2.11 ระบบสมดุลระหว่างวิภาคของส่วนผสม  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  และ  $\text{SiO}_2$

## 2.4. การกำหนดสูตรเนื้อดินปั้น

ในการวิเคราะห์หาอัตราส่วนของวัตถุดิบที่จะใช้ทำน้ำ slip ในการขึ้นรูป โดยอาศัยข้อมูลจาก triangle phase diagram ซึ่งมีวิธีการคิดดังนี้ คือ

เมื่อกำหนดจุดลงใน phase diagram เราจะทราบถึง % โดยน้ำหนักของส่วนประกอบทั้ง 3 สารประกอบใน diagram ได้ดังรูป 2.12



ที่ จุด 1 วัตถุดิบ A= 40, B= 40, C= 20

ที่ จุด 2 วัตถุดิบ A= 40, B= 40, C= 20

ที่ จุด 3 วัตถุดิบ A= 40, B= 40, C= 20

รูป 2.12 การกำหนดสูตรเนื้อดินปั้น

ขั้นที่ 1 เปลี่ยนจากองค์ประกอบโดยน้ำหนักให้เป็นจำนวนโมล

สารประกอบ	% by weight	basis 1000g	จำนวนโมล
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.2	200	1.961
K <sub>2</sub> O	0.3	300	3.185
SiO <sub>2</sub>	0.5	500	8.325

ขั้นที่ 2 วิเคราะห์คุณสมบัติของวัตถุดิบ

วัตถุดิบ	% wt		
	Si O <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O
Potash feldsper	46.20	13.09	12.09
Kaolin	43.25	38.80	nil
Ball clay	66.92	21.62	nil

ขั้นที่ 3 เขียนตารางโดยให้ K<sub>2</sub>O เป็นตัวแรก และ SiO<sub>2</sub> อยู่หลังสุด โดยมี Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> อยู่ตรงกลาง แล้วจึงคำนวณปริมาณวัตถุดิบโดยเริ่มจากเฟลสปาร์ แล้วถึงจะเป็นดินขาวและดินดำ ที่เหลือสุดท้ายเป็น flint หรือ quartz

ขั้นตอนหาอัตราส่วนของวัตถุดิบ :

วัตถุดิบ	K <sub>2</sub> O	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>
	3.185	1.961	8.325
Potash feldsper	3.185	3.185	19.11
Kaolin	-	-1.224	-10.785
Ball clay	-	-	-

ซึ่งจะเห็นว่าอัตราส่วนนี้ไม่เหมาะในการนำมาทำเนื้อดินปั้น เนื่องจากอัตราส่วนไม่ได้สัดส่วนพอดีกัน จึงต้องหาส่วนประกอบใหม่ได้ดังนี้



สารประกอบ	% by weight	Basis 1000 g	จำนวนโมล
SiO <sub>2</sub>	0.75	750	12.488
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.15	150	1.471
K <sub>2</sub> O	0.10	100	1.062

วัตถุดิบ	K <sub>2</sub> O	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>
	1.062	1.471	12.488
Potash feldspar	1.062	1.062	6.372
	-	0.409	6.116
Kaolin	-	0.1023	0.1939
	-	0.3067	5.9221
Ball clay	-	0.3067	1.6138
	-	-	4.3083
Flint	-	-	4.3083

จากตารางจะได้ Potash feldspar : 1.062 mole

Kaolin : 0.1023 mole

Ball clay : 0.3067 mole

Flint : 4.3083 mole

จากจำนวนโมลของวัตถุดิบที่คำนวณได้ เราสามารถนำไปหาอัตราส่วนโดยน้ำหนัก

วัตถุดิบ	mole * M.W.	weight ratio	% composition
Potash feldspar	1.062 * 556	590.472	62.07
Kaolin	0.1023 * 222.1	22.721	2.39
Ball clay	0.3067 * 258.1	79.159	8.32
Flint	4.3083 * 60.1	258.929	27.22
		951.281	100

นั่นคือ ในเนื้อวัตถุดิบทั้งหมด 100 กรัม จะประกอบด้วย

Potash feldspar : 62.07 กรัม

Kaolin	: 2.39 กรัม
Ball clay	: 8.32 กรัม
Flint	: 27.32 กรัม

## 2.5.การวิเคราะห์หาอัตราส่วนของวัตถุดิบที่จะใช้ในการเคลือบ

ในการวิเคราะห์หาอัตราส่วนของวัตถุดิบที่ใช้ในการเคลือบผลิตภัณฑ์สามารถหาได้โดยอาศัย triangle phase diagram เช่นเดียวกับการหาอัตราส่วนวัตถุดิบของเนื้อดินปั้น แต่ triangle phase diagram ของการเคลือบจะใช้ sodium feldspar แทน potash feldspar ทั้งนี้เนื่องจาก Sodium feldspar มี viscosity ต่ำกว่า Potash feldspar และมีคุณสมบัติในการเกิดเป็น glaze ได้ดีอีกด้วย

ขั้นตอนในการคำนวณหาอัตราส่วนของวัตถุดิบที่จะใช้ในการเคลือบสามารถคำนวณโดยใช้วิธีการเดียวกันกับการหาอัตราส่วนของเนื้อดินปั้น

### การคำนวณเกี่ยวกับน้ำเคลือบ

ชนิดของสูตรน้ำเคลือบ สูตรน้ำเคลือบที่พบอยู่เสมอและใช้กันทั่วไป มีหลายรูปแบบได้แก่

#### 1. สูตรที่บอกเป็นร้อยละของส่วนผสม เช่น

โพแทชเฟลด์สปาร์ (potash feldspar)	33.87%
หินปูน (limestone)	13.37%
ดินขาว (kaolin)	9.40%
ควอตซ์ (quartz)	39.36%
สังกะสีออกไซด์ (Zinc Oxide)	4.00%
	<u>100.00%</u>

สูตรที่มีลักษณะนำมาใช้ได้เลย แต่อาจจะได้ผลผลิตที่แตกต่างกันสำหรับการผลิตแต่ละครั้ง เนื่องจากวัตถุดิบมาจากแหล่งที่ต่างกัน สูตรน้ำเคลือบทั่ว ๆ ไป มักคำนวณออกมาเป็น ร้อยละเพื่อสะดวกในการเทียบอัตราส่วนในการเตรียม

#### 2. สูตรที่บอกเป็นส่วนผสมเช่น

โพแทชเฟลด์สปาร์ (Potash Feldspar)	172.6 กรัม
ไวทิง (Whiting)	29.4 กรัม
แมกนีเซียมคาร์บอเนต (Magnesium Carbonate)	16.0 กรัม
แบเรียมคาร์บอเนต (Barium Carbonate)	38.8 กรัม
ดินขาว (Kaolin)	18.6 กรัม
ฟลินท์ (Flint)	96.6 กรัม
	<u>345.0 กรัม</u>

### 3. สูตรที่บอกเป็นเอมพิริคัล (empirical formula) เช่น

0.20  $K_2O$

0.70  $CaO$

0.42  $Al_2O_3$

3.50  $SiO_2$

0.10  $MgO$

ซึ่งสูตรที่บอกเป็นเอมพิริคัลนี้ จะบอกจำนวนโมเลกุลของออกไซด์ต่าง ๆ ที่ใช้เป็นส่วนผสมเพื่อโอกาสให้ผู้นำไปใช้สามารถหาวัตถุดิบได้อย่างอิสระหรือเท่าที่มีอยู่ ซึ่งไม่จำกัดเหมือน 2 วิธีแรก เพียงแต่ให้มีส่วนประกอบทางเคมีครบก็ใช้ได้

การเขียนสูตรเอมพิริคัลจะเขียนเป็น 3 สูตรด้วยกัน คือ

กลุ่มแรก : จะเป็นพวกที่มีคุณสมบัติเป็นด่าง ( $RO, R_2O$  Group) จำนวนโมเลกุลของสารในกลุ่มนี้รวมกันแล้วจะมีค่าเท่ากับ 1.00 เสมอ เพื่อสะดวกในการเทียบอัตราส่วน

กลุ่มกลาง : จะเป็นสารพวกที่มีคุณสมบัติเป็นกลาง ( $R_2O_3$  Group)

กลุ่มหลัง : จะเป็นสารพวกที่มีคุณสมบัติเป็นกรด ( $RO_2$  Group)

การคำนวณส่วนผสมวัตถุดิบเป็นเอมพิริคัล

ตัวอย่าง ให้คำนวณหาสูตรเอมพิริคัลจากส่วนผสมของเคลือบต่อไปนี้

Potash Feldspar	174.3
Whiting	29.5
Magnesium Carbonate	16.1
Barium Carbonate	39.4
Kaolin	18.8
Quartz	69.4

แบ่งวิธีการคำนวณเป็น 3 ขั้นตอน คือ

ขั้นที่ 1 เปลี่ยนจากน้ำหนักส่วนผสมให้เป็นโมเลกุล

วัตถุดิบ (raw material)	น้ำหนักส่วนผสม (recipe wt.)	น้ำหนักโมเลกุล (mole wt.)	จำนวนโมล (mole no.)
Potash Feldspar	174.3	557.0	0.313
Whiting	29.5	100.0	0.295
Magnesium Carbonate	16.1	84.0	0.192
Barium Carbonate	39.4	197.0	0.200
Kaolin	18.8	258.0	0.073
Quartz	69.4	60.0	1.157

ขั้นที่ 2 แยกคว้าวัตถุดิบแต่ละตัวประกอบด้วยสารอะไรบ้าง จำนวนเท่าไร โดยดูจากสูตรของ  
วัตถุดิบนั้น ๆ ดังต่อไปนี้

จำนวนโมเลกุล (Mole No.)	วัตถุดิบ (Raw Material)	K <sub>2</sub> O	CaO	MgO	BaO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>
0.313	Potash Feldspar	.313		-	-	.313	1.878
0.295	Whiting	-		-	-	-	-
0.192	Magnesium Carbonate	-		.192	-	-	-
0.200	Barium Carbonate	-		-	.200	-	-
0.073	Kaolin	-		-	-	.073	0.146
0.157	Quartz	-		-	-	-	1.157
	รวม (Total)	.313		.192	.200	.386	3.181

ขั้นที่ 3 นำมาเขียนเรียงใหม่ให้อยู่ในรูปของสูตรเคมี

0.313 K<sub>2</sub>O

0.295 CaO                      0.386 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>                      3.181 SiO<sub>2</sub>

0.192 MgO

0.200 BaO

จะเห็นว่า กลุ่ม RO และ RO<sub>2</sub> เมื่อรวมกันแล้วได้ 1.00 พอดี

การคำนวณสูตรเคมีเป็นน้ำหนักส่วนผสมของวัตถุดิบ

ตัวอย่าง จากสูตรเคมีต่อไปนี้ จะคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ของส่วนผสม

0.3 K<sub>2</sub>O              0.5 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>              4.0 SiO<sub>2</sub>              0.7CaO

เทคนิคการนำวัตถุดิบมาใช้ มีดังนี้

1. ถ้ามีฟลักซ์ พวกอัลคาไลน์ (Na<sub>2</sub>O หรือ K<sub>2</sub>O) อยู่ด้วย พยายามใช้ในรูปแบบของโซดา

เฟลตสปาร์หรือโพแทชเฟลตสปาร์ ให้มากที่สุดเพราะสารชนิดนี้มีราคาถูกไม่ละลายน้ำและทำเคลือบได้ดี

2. การใช้ออกไซด์เดี่ยวอื่น ๆ ซึ่งส่วนมากนิยมใช้ในรูปแบบของคาร์บอเนตเช่น CaCO<sub>3</sub>

,MgCO<sub>3</sub> , BaCO<sub>3</sub> เป็นต้น เพราะมีราคาถูกกว่าออกไซด์บริสุทธิ์ แต่เมื่อผ่านการเผาจนแตกตัวแล้วก็จะมีผล

เท่ากัน เช่น CaCO<sub>3</sub> เมื่อผ่านการเผาที่อุณหภูมิประมาณ 895 °C จะแตกตัวเป็น CaO+CO<sub>2</sub> ซึ่ง CO<sub>2</sub> จะ

ระเหยไป ในที่สุดจะเหลือ CaO ซึ่งมีค่าเท่ากับใช้ CaO บริสุทธิ์

3. ถ้าใช้สูตรอะลูมินาออกไซด์ และซิลิกาออกไซด์อยู่ ให้ใช้ในรูปของดิน (Clay) ที่เหลือ จึงใช้ออกไซด์เดี่ยว ๆ

ในส่วนประกอบของดิน นอกจากจะใช้อะลูมินา ( $Al_2O_3$ ) และซิลิกา ( $SiO_2$ ) ในเคลือบแล้ว ยังมีผล ให้เคลือบมีความเกาะตัวดีขึ้นด้วย

4. เวลาวางรูปแบบในการคำนวณ พยายามวางให้ซิลิกายู่หลังสุดและรองสุดท้ายควรจะเป็นอะลูมินา และใช้อะลูมินาในรูปของสารประกอบอื่นเสียก่อน เช่น clay, feldspar เป็นต้นที่เหลือจึงใช้ quartz หรือ flint

ในสูตรเคลือบทุกสูตรจะต้องมีปริมาณซิลิกาค่อนข้างมากเพราะ ซิลิกาเป็นตัวทำให้เกิด แก้วในเคลือบ

5. ส่วนประกอบของวัตถุดิบที่เป็นน้ำไม่ต้องนำมาคิด เพราะเวลาเผา น้ำระเหยไปหมด และไม่มีผลต่อเคลือบ

เมื่อทราบวิธีการนำวัตถุดิบไปใช้แล้ว ต่อไปเขียนตารางขึ้นดังต่อไปนี้

วัตถุดิบ (Raw Material)	$K_2O$	$CaO$	$Al_2O_3$	$SiO_2$
0.3 Potash Feldspar	0.3	0.7	0.5	4.0
0.7 Limestone	-	0.7	-	-
0.2 Kaolin	-	-	0.2	0.4
1.8 Quartz	-	-	-	1.8

เราได้วัตถุดิบที่ใช้ในการทำเคลือบแล้ว แต่ยังไม่ทราบอัตราส่วนน้ำหนักจึงต้อง นำผลที่ได้นี้ไปคำนวณอีกดังนี้

วัตถุดิบ (Raw Material)	จำนวนโมเลกุล (Mole No.)	น.น. โมเลกุล (Mole wt.)	น.น. ส่วนผสม (Recipe wt.)	ส่วนผสมเป็นร้อยละ (Percent)
Potash Feldspar	0.3	557	167.1	42.12
Limestone	0.7	100	70.0	17.65
Kaolin	0.2	258	51.6	13.01
Quartz	1.8	60	108.0	27.22
				100.00