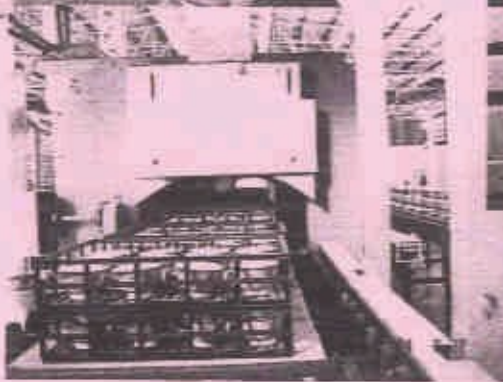




เอกสารคำสอน ภาควิชา 426405
เครื่องปั้นดินเผาขาว (Whitewares)

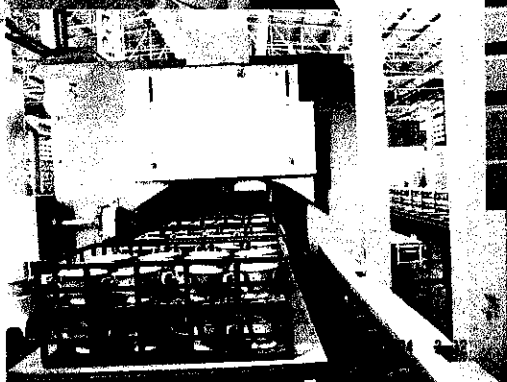
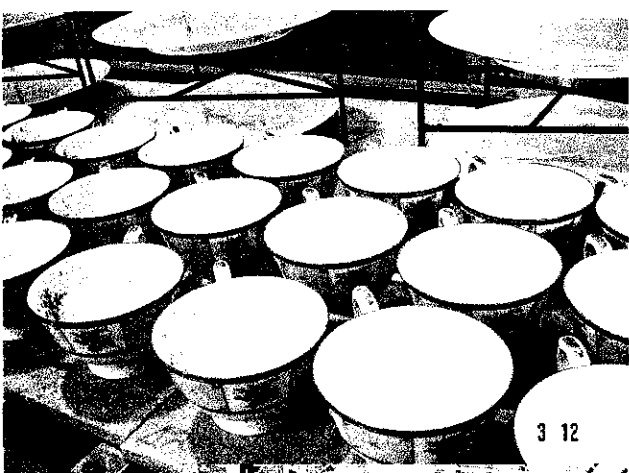


อศ.ดร. ศิริรัตน์ กำปงสุขเกษม รับผิดชอบ
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล สำนักวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ปรับปรุงเมื่อ พฤษภาคม 2550





เอกสารคำสอน รายวิชา 426405
เครื่องปั้นดินเผาขาว (Whitewares)



ผศ.ดร. ศิริรัตน์ กำปงสุขเกษม รัตนจันทร์
สาขาวิชาวิศวกรรมセラมิค สำนักวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปรับปรุงเมื่อ พฤศจิกายน 2550

Call No.
วัน เดือน ปี
เลขทะเบียน B5103408

สารบัญ

	หน้า
บทที่ 1 บทนำเกี่ยวกับไวท์แวร์ประเภทต่าง	1
- แบบฝึกหัดท้ายบท	10
บทที่ 2 วัตถุประสงค์สำหรับอุตสาหกรรมไวท์แวร์	11
- ดินต่างๆ	11
- หินพื้นม้าและวัตถุประสงค์ที่เป็นฟลักซ์	34
- ซิลิกา	35
- อะลูมิน่า	36
- วัตถุประสงค์อื่นๆ	37
- วัตถุประสงค์สำหรับเตรียมเคลือบและสีเซรามิก	38
- แบบฝึกหัดท้ายบท	39
บทที่ 3 การคำนวณและการออกแบบส่วนผสมของเนื้อผลิตภัณฑ์ไวท์แวร์	40
- การคำนวณย้อนกลับจากวัตถุประสงค์ส่วนผสมในเนื้อดินปั้นกลับไปหาสูตร	41
- การคำนวณส่วนผสมของเนื้อดินปั้นที่มีการเปลี่ยนวัตถุประสงค์บางชนิด	43
- แบบฝึกหัดท้ายบท	48
บทที่ 4 ขบวนการผลิตในอุตสาหกรรมผลิตไวท์แวร์	49
- การบดย่อยวัตถุประสงค์และการเตรียมเนื้อดิน	52
- กระบวนการขึ้นรูป	59
- แบบฝึกหัดท้ายบท	84
บทที่ 5 การอบแห้งและการเผาผลิตภัณฑ์ไวท์แวร์	85
- การอบแห้ง	86
- การเผา	92
- แบบฝึกหัดท้ายบท	109
บทที่ 6 เคลือบและสีสำหรับตกแต่งผลิตภัณฑ์	110
- เคลือบเซรามิก	111
- วัตถุประสงค์สำหรับเตรียมเคลือบและสีเซรามิก	114

- แบบฝึกหัดท้ายบท	135
บทที่ 7 การทดสอบและการวัดคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์ไวท์แวร์	136
- การทดสอบวัตถุดิบที่นำมาใช้ในการผลิตเซรามิก	136
- การทดสอบก่อนเผา	138
- การทดสอบคุณสมบัติการดูดซับหรือความทนไฟของเนื้อดิน	166
- การเข้ากันได้ระหว่างเนื้อดินและเคลือบ	172
- แบบฝึกหัดท้ายบท	181
บทที่ 8 การควบคุมคุณภาพและการลดของเสียในการผลิตไวท์แวร์	182
- การทดสอบดินและดินเหนียวตามมาตรฐานอุตสาหกรรม	182
- มาตรฐานอุตสาหกรรมของผลิตภัณฑ์ไวท์แวร์	183
- การบริหารระบบคุณภาพ ISO 9000:2000	195
- แบบฝึกหัดท้ายบท	201
ภาคผนวก	202
กิตติกรรมประกาศ	206
เอกสารอ้างอิง	207

บทที่ 1

บทนำเกี่ยวกับไวท์แวร์ประเภทต่างๆ

ในบทเรียนที่ 1 นี้เราจะได้รู้จักกับผลิตภัณฑ์เครื่องเคลือบดินเผาประเภทต่างๆ เราสามารถจำแนกออกได้เป็นหลายประเภท โดยทั่วไปลักษณะของเนื้อผลิตภัณฑ์แต่ละประเภทจะสามารถสังเกตได้จากลักษณะภายนอก เช่น ความขาวของเนื้อผลิตภัณฑ์ ความหนาบางของผลิตภัณฑ์ ความโปร่งแสง ลักษณะเสียงเคาะที่ดังกังวาน อย่างไรก็ตามเรามีวิธีในการจำแนกผลิตภัณฑ์ที่แตกต่างออกไป เช่น ถ้าเราจำแนกประเภทของเครื่องเคลือบดินเผาโดยใช้อุณหภูมิการเผา สามารถแบ่งออกได้เป็น 4 ประเภทดังนี้

- เนื้อดินเอิร์ทเทินแวร์ (Earthenware) $800-1150^{\circ}\text{C}$
- เนื้อดินสโตนแวร์ (Stoneware) $1250-1300^{\circ}\text{C}$
- เนื้อดินปอร์ซเลน (Porcelain) $1250-1400^{\circ}\text{C}$
- เนื้อดินโบนไชน่า (Bone china) $1250-1350^{\circ}\text{C}$

หรือถ้าแบ่งประเภทของเครื่องเคลือบดินเผาโดยพิจารณาจากรูพรุนของเนื้อผลิตภัณฑ์หลังเผา เราสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท

- เนื้อไวท์แวร์ที่มีรูพรุนแบบเปิด (open pores) ได้แก่เนื้อเอิร์ทเทินแวร์ (earthenware) ลักษณะสำคัญของเนื้อผลิตภัณฑ์แบบนี้สังเกตได้ง่ายๆ คือเมื่อเคาะแล้วเสียงจะไม่น่าคล้ายดังกังวานเหมือนเนื้อแก้ว
- เนื้อผลิตภัณฑ์ที่ไม่มีรูพรุนแบบเปิด เรียกว่า เนื้อแก้ว (Vitrified) ได้แก่ ลูกถ้วย ฉนวนไฟฟ้า เครื่องสุขภัณฑ์ พอร์ซเลน ไฟนไชน่า และโบนไชน่า ลักษณะเนื้อผลิตภัณฑ์แบบนี้โดยมากจะมีรูพรุนปิดอยู่ภายใน แต่เนื่องจากเนื้อผลิตภัณฑ์ที่มีรูพรุนต่ำมาก ดังนั้นเมื่อเคาะแล้วจะมีเสียงดังกังวานคล้ายแก้ว

หรือถ้าแบ่งตามประเภทของเครื่องเคลือบดินเผาโดยพิจารณาจากความทึบแสงหรือโปร่งแสงของผลิตภัณฑ์ เราสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทคือ

- เนื้อที่ทึบแสง ได้แก่ ลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้า เครื่องสุขภัณฑ์ สโตนแวร์
- เนื้อที่โปร่งแสง ได้แก่ พอร์ซเลน ไฟนไชน่า และโบนไชน่า

ความแตกต่างนี้เกิดจากการกระเจิงของแสง ซึ่งขึ้นอยู่กับ ค่า Refractive index ของลำแสงที่ตกกระทบที่บริเวณขอบเกรนในเนื้อไวท์แวร์ที่ผ่านการเผาแล้ว เมื่อมีรูพรุนมากขึ้น ก็จะมีการกระเจิงของแสงมากขึ้น และเมื่อมีขอบเกรนมากขึ้นก็จะมีการกระเจิงมากขึ้น ดังนั้น รูพรุนจำนวนมาก โดยเฉพาะรูพรุนที่มีขนาดเล็กและมีผลึกขนาดเล็ก ก็จะมีการกระเจิงของแสงมาก ทำให้มีความทึบแสง

1. Earthenware: ผลิตภัณฑ์ชนิดเคลือบและไม่เคลือบ มีความพรุนตัวปานกลางถึงสูง แบ่งออกเป็น

- Natural Earthenware ผลิตจากวัตถุดิบชนิดเดียวที่ยังไม่ได้ผ่านกระบวนการทำให้บริสุทธิ์
- Fine Earthenware ผลิตจากวัตถุดิบที่ผ่านกระบวนการทำให้บริสุทธิ์ เนื้อผลิตภัณฑ์มีเนื้อค่อนข้างขาวและเป็นเนื้อดินที่มีการผสมจากวัตถุดิบ 3 ชนิด (Triaxial body) เผาที่อุณหภูมิต่ำ 1140°C OF เนื้อดินปั้นประกอบด้วย

ดินดำ (Ball clay) 2-3 ชนิด	25%
ดินขาว 2 ชนิด	25%
ควอทซ์/ซิลิกา	35%
เฟลด์สปาร์/หินโซนาสโตน	15%
เผาเคลือบที่	1080°C
เผาตกแต่งที่	750°C
การดูดซึมน้ำ (Water absorption)	8%
ความพรุนตัว (Apparent porosity)	16%
การขยายตัวของเนื้อดินที่เผาแกร่ง 1140°C	= 0.36-0.38% at 500°C
การขยายตัวของเนื้อดินที่เผาเคลือบ 1080°C	= 0.30-0.32% at 500°C
ความแข็งแรง (Modulus of rupture)	492-633 kg/cm ²

การหดตัวหลังเผา	10-12%
การขยายตัวของผลิตภัณฑ์หลังเผา	0.06%
ความหนาของเคลือบ	1-1.5 มิลลิเมตร

- Talc Earthenware เนื้อดินมีส่วนผสมของ Talc

มีอัตราการขยายตัวของเนื้อดินต่ำกว่า 0.38% นิยมทำเป็นเนื้อกระเบื้องผนังที่เผาที่อุณหภูมิต่ำ เเผาที่ 1140°C OF เนื้อดินประกอบด้วย

ดินดำ (Ball clay) 2 ชนิด	27%
ดินขาว	16%
ทัลค์	37%
ซิลิกา	20%
เผาแกร่งที่	1140°C
เผาเคลือบที่	1080°C

การเติมทัลค์ >30% จะทำให้มีการขยายตัวต่ำ

ถ้าเผาเกิน 1220°C จะให้เนื้อคอร์เดียไรท์ ($2MgO \cdot 2Al_2O_3 \cdot 5SiO_2$)

ซึ่งจะทนไฟ และมีการขยายตัวต่ำ

- Semi-vitreous Earthenware: เนื้อดินเป็นส่วนผสมจากวัตถุดิบ 3 ชนิด (triaxial body) ได้แก่ ดิน หินฟันม้าและควอตซ์ เนื้อแน่นกึ่งแก้ว

- Vitreous earthenware: เนื้อแข็งแกร่ง ไม่ดูดซึมน้ำ เนื้อกึ่งแก้ว เเผาที่ 1180-1200°C

ตาราง 1.1 เนื้อดินปั้น Vitreous earthenware

	สูตรมาตรฐาน	สูตรโรงงาน
ดินดำ	25%	18.8%
ดินขาว	25%	24.8%
ซิลิกา	30%	44.7%
เฟลด์สปาร์	20%	-
เนฟเฟลีนไฮยาไนท์	-	11.7%

เผาดิบที่ 1180-1200°C

เผาเคลือบที่ 1080°C

การขยายตัวของเนื้อดิน	0.32% at 500°C
ความแกร่งของเนื้อดิน	703-844 Kg/cm ²
การดูดซึมน้ำ	< 1%
เคลือบเรียบ ไม่แตกราน	

- Alumina earthenware

มีความแข็งแรงสูง เนื้อดินมีการขยายตัวน้อย น้ำหนักมาก มากกว่าถ้วยชามเซิร์ทเทิน แวร์ธรรมดา 26% ไม่ดูดซึมน้ำ ทนแรงกระแทกได้ดี

เนื้อดินอะลูมินาสีเหลืองฟาง 1180°C OF

ดินดำ	40%
Bauxite	35%
Feldspar	15%
Petalite	10% (LiO ₂ .Al ₂ O ₃ .8SiO ₂)
เผาเคลือบที่	1080°C
ดูดซึมน้ำ	<1%
การหดตัวหลังการเผา	15%
ความแข็งแรงของเนื้อดิน	1689 Kg/cm ²
การขยายตัวของเนื้อดิน	0.28% at 500°C
ความแข็งแรงและทนต่อแรงกระแทกเรียงตามลำดับคือ	

Alumina earthenware > bone china > earthenware

2. Stoneware: ผลิตภัณฑ์ชนิดเคลือบและไม่เคลือบ มีความพรุนตัวต่ำ แต่ไม่โปร่งแสง เนื้อแกร่งเผาที่อุณหภูมิ 1230-1300°C เนื้อดินมีสีเทาอ่อนหรือน้ำตาล อ่อนทึบแสง ทนทานกว่า Earthenware ดูดซึมน้ำไม่เกิน 3% ขึ้นงานหนา เสี่ยงเคาะดังกังวานปานกลาง ทนต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ สีของเคลือบที่เผาในอุณหภูมิสูงเป็นสีขรึมๆ ได้แก่เครื่องสังคโลก โถงมังกร ถ้วยชามที่มีเนื้อดินทึบแสง เนื้อดินมีตัวช่วยในการหลอมปนอยู่ เนื้อดินเหนียว มีทรายปนอยู่มาก ปริมาณมาก ดินสไตรแวร์ที่ดีต้องมีช่วงการเผากว้าง สามารถเผาได้ทั้งครั้งได้โดยไม่ยุบตัว แบ่งออกเป็น

2.1 Natural Stoneware: ผลิตจากวัตถุดิบชนิดเดียวที่ยังไม่ได้ผ่านกระบวนการทำให้บริสุทธิ์

การดูดซึมน้ำน้อยกว่า 1% เมื่อเผาที่ 1280°C ปรกติจะเผาครั้งเดียว และเผาเคลือบที่อุณหภูมิ 1280°C

ส่วนประกอบทางเคมีของ Stoneware clay:

SiO ₂	61.9%
Al ₂ O ₃	22%
Fe ₂ O ₃	2.4%
TiO ₂	1.2%
CaO	0.5%
MgO	0.6%
K ₂ O	2.1%
Na ₂ O	1.1%
Loss of ignition	8.1%
การหดตัวก่อนเผา	8.2%
ความแข็งแรงหลังเผา	954 Kg/cm ²
การขยายตัวที่	500°C = 0.282%
	600°C = 0.351%
การดูดซึมน้ำ	1%

2.2 Fine Stoneware: เนื้อดินเป็นส่วนผสมของดินและพวกดินที่ไม่เหนียว (non-plastic raw material) ผลิตจากส่วนผสมของดินที่ผ่านการล้างมาแล้ว เช่น ดินดำ ดินขาว และ วัตถุดิบที่ไม่ให้ความเหนียว นิยมทำเป็นถ้วยชามบนโต๊ะอาหาร เคลือบสีลาดล ส่วนผสมของเนื้อดินปั้นได้แก่

ดินขาว + ดินดำ	30-70%
ซิลิกา	30-60%
เฟลด์สปาร์	5-25%

ถ้าผลิตภัณฑ์หนาและชิ้นใหญ่ ควรเติม Grog เพื่อป้องกันการหดตัวและการแตกร้าว

2.3 Technically vitreous stoneware: มีความพรุนตัวต่ำ มีความแกร่งสูง เนื้อคล้ายแก้ว ดูดซึมน้ำ (0-0.2%) สีค่อนข้างขาว สีขาวทึบแสง นิยมทำเครื่องสุขภัณฑ์ และอุปกรณ์ในห้องเคมี เคลือบด้วยสีทึบแสง มีความหนามากกว่าเครื่องนี้ จะผสมดินทนไฟลงไปด้วย เพื่อเพิ่มความแข็งแรงก่อนเผา ให้อยู่เป็นรูปทรง เคลื่อนย้ายง่าย

2.4 Sanitary ware bodies เนื้อดินเครื่องสุขภัณฑ์ ใช้ดินขาวและดินเหนียวคุณภาพดี น้ำดินมีความถ่วงจำเพาะ 1.80 เหมาะสำหรับขึ้นรูปโดย slip casting ประกอบด้วย

ดินดำ 23%

ดินขาว 27%

ควอทซ์ 30%

เฟลด์สปาร์ 20%

2.5 Jasper Stoneware: มีส่วนผสมของ Barium compound

2.6 Basalt Stoneware: มีส่วนผสมของ Iron oxide

3. Porcelain เป็นผลิตภัณฑ์ที่มีสีขาว โปร่งแสง เเผาที่ 1250-1400°C ประกอบด้วยดินขาวเทาลิน 50%:feldspar 30%:quartz 20% สามารถแบ่งออกได้เป็น Soft porcelain ซึ่งเผาที่อุณหภูมิ 1200-1280°C เช่น bone china, ผลิตภัณฑ์พาเรียน ไฮเดิลไชน่า และ Hard porcelain ซึ่งเผาที่อุณหภูมิ 1300-1460°C เช่น อุปกรณ์ห้องเคมี และปอร์ซเลนสำหรับลูกถ้วยไฟฟ้า

3.1 High tension electrical porcelain เป็นเนื้อดินปอร์ซเลนทนอุณหภูมิสูง เเผาที่อุณหภูมิ 1280-1300°C

ตาราง 1.2 ส่วนประกอบของเนื้อดินปั้นผลิตภัณฑ์ Electrical Porcelain

	เนื้อเหนียว	น้ำดิน	Al ₂ O ₃ สูง	Al ₂ O ₃ ต่ำ
ดินขาว	15	25	15	20
ดินดำ	30	20	20	25
เฟลด์สปาร์	35	35	25	35
ควอทซ์	20	20	-	-
อะลูมินา	-	-	40	20

น้ำเคลือบมักมีสีน้ำตาลเข้ม หดตัวมากกว่าเนื้อดินเล็กน้อย เพื่อป้องกันการร้าว

4. China ware: ผลิตภัณฑ์ที่มีความโปร่งแสง มีความพรุนตัวต่ำมากจนเกือบเป็นศูนย์ ผลิตภัณฑ์เคลือบที่ผ่านการเผา 2 ครั้ง คือเผาดิบและเผาเคลือบ

4.1 Hotel china: Triaxial body และมีปริมาณ lime เล็กน้อย มีความพรุนตัวต่ำ

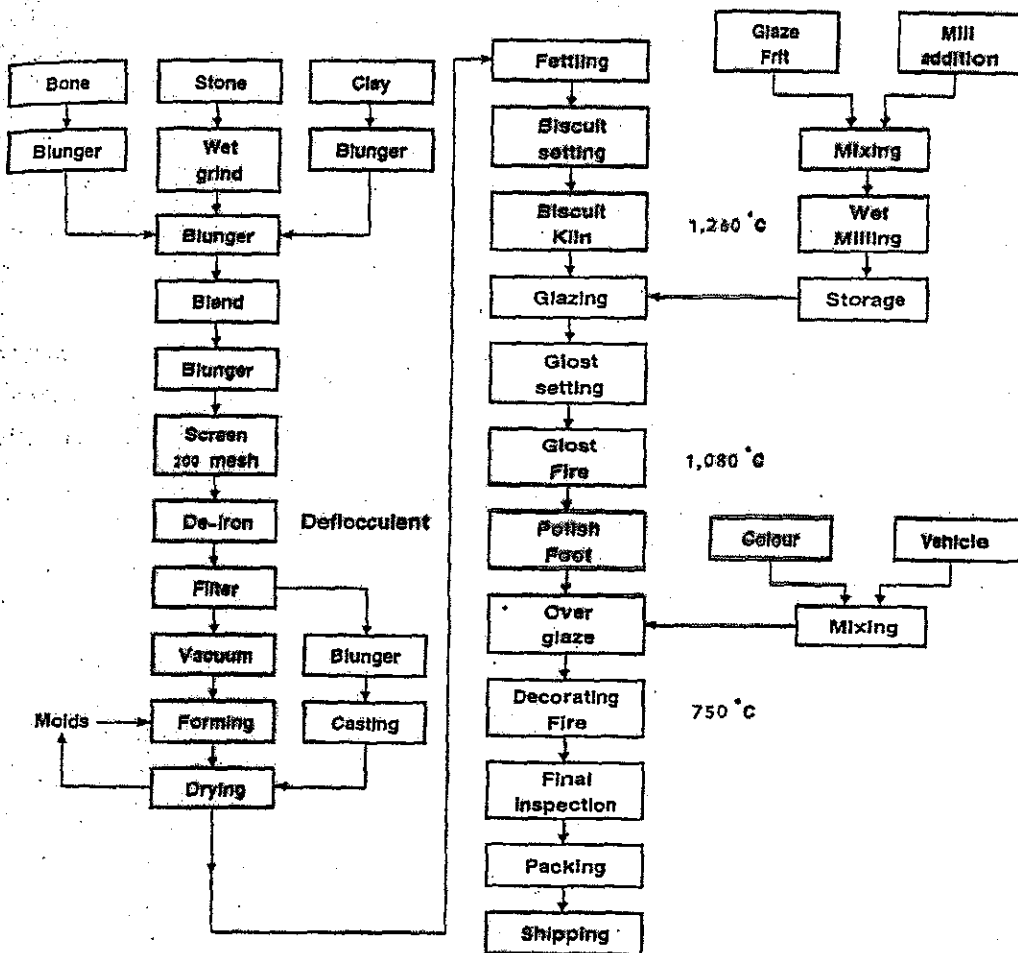
4.2 Household china

ตาราง 1.3 ส่วนประกอบของเนื้อดินปั้นประเภทโบนไชน่า

	สูตรมาตรฐาน	สูตรโรงงาน	สูตรปรับปรุง (เติม bentonite)
Bone ash	50	47	46.6
China clay	25	30	28.7
Stone	25	-	24.1
Feldspar	-	14	-
Flint	-	8	-
Ball clay	-	1	-
Bentonite	-	-	0.6

- Green strength 29.9 kg/cm²
- การหดตัวก่อนเผา 4.4%

- เเผาดิบที่ 1220°C และเผาเคลือบที่ 1080°C
- การดูดซึมน้ำ (water absorption) <1%
- Thermal Expansion at 500°C = 0.4%
- Modulus of rupture 1231 kg/cm²
- ความหนาของเคลือบ 0.01-0.015 เซนติเมตร
- การหดตัวหลังเผา 8.6%



รูป 1.1 แผนภาพการผลิตโบนีนา [1]

ผลิตภัณฑ์ Bone china จะประกอบด้วยดินขาว คอาร์ท หินฟันม้า และแก้วกระดูก

แก้วกระดูกเป็นส่วนประกอบของโบนีนาที่สำคัญเพราะเป็นส่วนประกอบมากถึง 50% ของเนื้อดินปั้น ดังนั้นคุณสมบัติของแก้วกระดูกที่นำมาใช้ผสมเป็นเนื้อดินปั้นจึงจำเป็นต้องมีการควบคุมคุณสมบัติต่างๆเช่น

- Particle size 70-80% ควรมีขนาดเล็กกว่า 10 μm

ถ้าขนาดเล็กกว่า 10 μm มีน้อยกว่า 70% จะทำให้เนื้อดินปั้นมีค่าความแข็งแรงหลังเผาต่ำ และสุกตัวไม่สมบูรณ์ แต่ถ้ามีขนาดเล็กมาก มากกว่า 80% จะทำให้หล่อแบบได้ช้าและมีช่วงการสุกตัวสั้น

- Loss on ignitionหรือน้ำหนักหลังเผา ประมาณ 1.8-2.0% น้ำหนักที่หายไปหลังเผาคือปริมาณของสารอินทรีย์ ที่สลายตัวไปหลังเผา ถ้า loss on ignition มากหมายถึงในแก้วกระดูกนั้นมีปริมาณสารอินทรีย์มาก สารอินทรีย์ที่มีอยู่ในแก้วกระดูกจะช่วยให้เนื้อดินปั้นโบนีนาที่มีความเหนียว ช่วยในการขึ้นรูปและทำให้มีความแข็งแรงก่อนเผาดี อย่างไรก็ตามปริมาณสารอินทรีย์ที่มีมากอาจจะทำให้อัตราการหล่อต่ำลงได้ ดังตาราง

ตาราง 1.4 เปอร์เซ็นต์สูญเสียหลังเผาของแก้วกระดูกที่มีความสัมพันธ์กับ MOR และอัตราการหล่อของผลิตภัณฑ์โบนีนา

Loss on ignition (%)	modulus of rupture (kg/cm ²)	Cast weight (g)
1.0	21.5	102
1.8	28.1	90
2.5	31.6	74

เนื้อผลิตภัณฑ์โบนีนาจะมีความโปร่งแสง ในการปรับปรุงให้มีความโปร่งแสงมากขึ้นสามารถทำได้โดย

- ลดความหนาของผลิตภัณฑ์ลง
- เพิ่มสัดส่วนของแก้วกระดูกและหินฟันม้า โดยใช้ปริมาณของดินขาวลดลงหรือคงที่
- ลดปริมาณดินดำในส่วนผสมของเนื้อดินปั้นลง
- ใช้ดินที่มีความละเอียดมาก ($\approx 1\mu\text{m}$), flux and filler ($< 10\mu\text{m}$) จะมีความโปร่งแสงมาก

แบบฝึกหัดท้ายบท

1. นักศึกษาสามารถจำแนกประเภทของผลิตภัณฑ์ไวท์แวร์ โดยการตรวจสอบคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์ด้านใดได้บ้าง
2. ผลิตภัณฑ์ประเภทใดบ้างที่จัดเป็นผลิตภัณฑ์ไวท์แวร์ ยกตัวอย่างประกอบ
3. ความแตกต่างระหว่างผลิตภัณฑ์ stoneware และ porcelain มีอะไรบ้าง

บทที่ 2

วัตถุดิบสำหรับอุตสาหกรรมไวท์แวร์

ในบทนี้จะได้กล่าวถึงวัตถุดิบประเภทต่างๆที่ใช้ในการผลิตไวท์แวร์ วัตถุดิบที่สำคัญในการผลิตเซรามิกประเภทไวท์แวร์ได้แก่ ดินขาว ดินเหนียว ทวายหรือซิลิกา และหินฟันม้า หน้าที่ของวัตถุดิบเหล่านี้ได้แก่

ดินขาวหรือ Kaolin (high quality)

- หลังเผามีสีขาวมาก
- ทำให้เนื้อผลิตภัณฑ์หลังเผามีความโปร่งแสง
- มีความบริสุทธิ์สูงมาก

ดินเหนียวหรือ Ball clay

- มีความเหนียว (Plasticity)
- ข้อเสียคือ มีปริมาณเหล็กออกไซด์มาก ทำให้ความขาวของผลิตภัณฑ์ลดลง

อะลูมินาที่ผ่านการแคลไซน์ (Calcined alumina)

- ช่วยปรับปรุงความขาวของเนื้อผลิตภัณฑ์
- ช่วยปรับปรุงความแข็งแรงของเนื้อผลิตภัณฑ์
- เพิ่มความทนไฟ ลดการทรุดตัวหลังเผา
- ข้อเสียคือ จะทำให้ความโปร่งแสงของเนื้อผลิตภัณฑ์ลดลง และลดความเหนียวของเนื้อดินปั้น

หินฟันม้า (Feldspar), Cornish stone, Nepheline syenite: ทำหน้าที่เป็นตัวลดจุดสุกตัวของผลิตภัณฑ์

ควอทซ์ (Quartz)

- ช่วยให้เกิดความแข็งแรง เป็นส่วนประกอบของโครงสร้างในเนื้อผลิตภัณฑ์
- ช่วยลดการบิดเบี้ยว
- ลดการขยายตัวเมื่อได้รับความร้อน

เบนโทไนต์ (Bentonite)

- ปรับปรุงความแข็งแรงก่อนเผา
- ช่วยเพิ่มความเหนียว

➤ ข้อเสียคือ อาจทำให้เกิดการแตกร้าวได้ง่าย หรือทำให้ควบคุมสมบัติของน้ำดินยาก และยังลดความขาวของเนื้อผลิตภัณฑ์ด้วย

เถ้ากระดูก (Bone ash)

- ให้เป็นตัวช่วยลดอุณหภูมิการหลอม
- ทำให้เกิดความโปร่งแสงของผลิตภัณฑ์
- ข้อเสียคือ จะทำให้เกิดการบิดเบี้ยวหลังเผาได้ง่าย

ดิน Pottery stone/sericites

- จัดเป็นตัวช่วยลดจุดหลอมตัวของผลิตภัณฑ์
- ให้ความเหนียวให้กับเนื้อดิน
- ต้องใช้อย่างระมัดระวัง ต้องมีการควบคุมในการนำมาใช้ในขบวนการผลิต

วัตถุดิบประเภทดินที่ใช้เตรียมเนื้อดินเซรามิกไวท์แวร์

1. ดินขาว (kaolin, china clay)
2. ดินเหนียว (plastic clay, Ball clay)
3. ดินเบนโทไนท์ (bentonite)

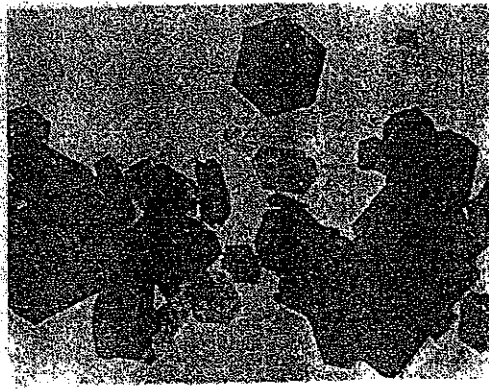
1. ดินขาวหรือ Kaolin ($Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$)

- ดินขาวเป็นดินที่ค่อนข้างบริสุทธิ์ มีสีขาวทั้งก่อนเผาและหลังเผา มีปริมาณการใช้เป็นส่วนผสมของเนื้อดินปั้นต่างๆดังนี้

- เนื้อดินปั้นสุกภัณฑ์ 20-30 เปอร์เซ็นต์
- เนื้อดินปั้นลูกถ้วยไฟฟ้า 17-39 เปอร์เซ็นต์
- เนื้อดินปั้นกระเบื้องฝาผนัง 0-47 เปอร์เซ็นต์
- เนื้อดินปั้นกระเบื้องปูพื้น 20-32 เปอร์เซ็นต์
- เนื้อดินปั้นถ้วยชาม 18-33 เปอร์เซ็นต์

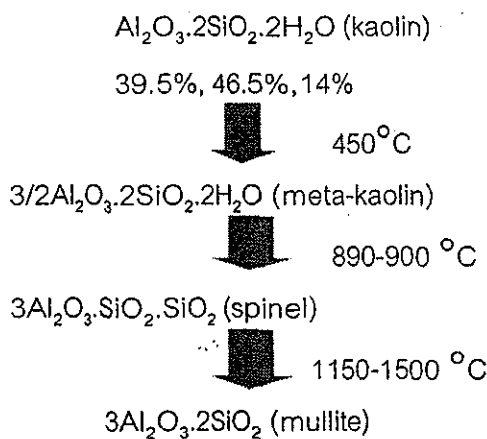
- ลักษณะโดยทั่วไปเป็นผลึกแบบ triclinic และเป็นแผ่นบางๆ เกิดจากการเรียงตัวเป็นชั้นๆ ของโครงสร้างแผ่น Si-O tetrahedral และ Al-OH octahedral sheet (TO sheet) โดยเรียงเป็นสองชั้นซ้ำๆ กัน)

- ขนาดอนุภาคเฉลี่ยประมาณ 0.7 μm และมีความหนาประมาณ 0.05 μm



รูป 2.1 ภาพถ่ายผลึกของ kaolin ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน TEM [1]

เมื่อดินกาอลินได้รับความร้อนจะเกิดการเปลี่ยนแปลงดังนี้



คุณสมบัติทางกายภาพของดินขาว

1. ขนาดของอนุภาค (particle size) ซึ่งเกี่ยวข้องกับสมบัติด้านความเหนียว (plasticity) ความแข็งแรงเมื่อแห้ง (dry strength) ความสามารถในการแลกเปลี่ยนอนุมูล (cation/base exchange capacity) การหดตัวเมื่อแห้ง (dry shrinkage) นั่นคือดินขาวที่มีขนาดอนุภาคเล็กจะมีคุณสมบัติเหล่านี้สูงด้วยรูปร่าง (particle shape) แร่เคโอลินที่มีรูปร่างเป็นแผ่นหกเหลี่ยมมีขนาดจาก 0.05 ถึง 10 ไมครอน โดยเฉลี่ยขนาดอยู่ระหว่าง 0.5 ไมครอน
2. ความสามารถในการแลกเปลี่ยนอนุมูล แร่เคโอลินที่มีสมบัติข้อนี้้น้อยมากเนื่องจากการแทนที่ของอนุมูลในโครงสร้างน้อยมาก
3. การหดตัวเมื่อแห้ง (drying shrinkage) ดินขาวมีความละเอียดกว่าจะมีการหดตัวมากกว่าดินหยาบ

ความแข็งแรงเมื่อแห้ง (Green strength) ในเนื้อดินปั้นที่ไม่มีดินเหนียวเป็นส่วนผสม จะใช้ดินขาวเป็นตัวช่วยให้ผลิตภัณฑ์มีความแข็งแรง ดินขาวละเอียด หรือที่มีมอนต์มอริลโลไนท์จะให้ความแข็งแรงมากที่สุด

4. การหดตัวหลังเผา (firing shrinkage) ดินขาวมีการหดตัวมากหลังจากเผา อาจหดตัวมากถึง 20%

คุณสมบัติทางเคมี

แร่ดินขาวมีหลายชนิดแตกต่างกันออกไปตามโครงสร้างและสูตรทางเคมี สูตรเคมีพื้นฐานของ Kaolinite คือ $Al_2(OH)_4(Si_2O_5)$

- Kaolinite แร่ดินที่พบได้มากที่สุด มีโครงสร้างประกอบเป็นชั้น ในหนึ่งหน่วยโครงสร้างจะประกอบด้วยชั้นของ Tetrahedral sheet และ Octahedral sheet มีโครงสร้างเป็น Triclinic

- Dickite มีการพบปะปนบ้าง แต่พบไม่มากเหมือนกับ Kaolinite ในการตรวจสอบหาแร่นี้ อาจจะทำได้ยาก ถ้ามีการเกิดปะปนกับแร่ kaolinite โครงสร้างเป็นแบบสองชั้น มีโครงสร้างเป็น Monoclinic

- Nacrite เป็นแร่ดินที่หายาก มีโครงสร้างเป็นแบบหกชั้นที่ซ้ำกัน และเป็นแบบ orthorhombic

- Halloysite เป็นแร่ดินที่มีไม่เป็นแผ่นเหมือนแร่ดินที่กล่าวมาแต่เป็นแผ่นม้วนเป็นหลอดเล็กๆ มีสูตรทางเคมีคือ $Al_2(OH)_4(Si_2O_5) \cdot 2 H_2O$ ซึ่งมีน้ำในโครงสร้างถ้าเปรียบเทียบกับดิน kaolinite น้ำในโครงสร้างนี้จะระเหยไปได้ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส และจะกลายเป็น Meta-halloysite

ส่วนประกอบทางเคมีของดินขาวควรจะมีการวิเคราะห์เนื่องจากทำให้ทราบสมบัติบางอย่างของดินนั้นได้ เช่น ถ้ามีส่วนผสมของมอนต์มอริลโลไนท์มากก็พอจะบอกได้ว่าดินนั้นน่าจะมี ความเหนียวมากและทำให้มีความแข็งแรงก่อนเผาดี ถ้ามีไมก้าหรือเฟลด์สปาร์เป็นส่วนผสม ก็พอที่จะประมาณได้ว่าดินนี้จะมีจุดสุกตัวลดลงได้ และถ้ามีปริมาณอินทรีย์สารมาก ก็จะช่วยเพิ่มความเหนียว ส่วนการที่มีควอตซ์มาก นอกจากจะลดความเหนียวแล้วยังช่วยเพิ่มความทนไฟอีกด้วย

ตาราง 2.1 แสดงการเปรียบเทียบผลวิเคราะห์ทางเคมีของดินขาวมาตรฐานในอังกฤษ กับดินขาวในประเทศไทย [2]

ผลวิเคราะห์ทางเคมีของดินขาว	ดินขาวตามสูตรเคมี	มาตรฐานดินขาวอังกฤษ	ดินขาวลำปาง	ดินขาวระนอง	ดินขาวนราธิวาส
SiO ₂	46	46-47	59.7	48.75	47.30
Al ₂ O ₃	39	37-39	27.6	34.58	35.72
Fe ₂ O ₃	-	0.4-1.0	0.84	0.71	0.38
TiO ₂	-	1	0.07	0.02	0.20
CaO	-	-	0.13	0.07	0.11
MgO	-	-	0.25	0.34	1.01
K ₂ O	-	1.0-2.0	5.85*	2.52	1.76
Na ₂ O	-	-	0.15	0.40	0.39
น้ำหนักที่หายไปหลังเผา (LOI)	14	12.5	5.39	10.66	12.99

จากตารางข้างต้นเนื่องจากดินขาวลำปางมีปริมาณโพแทสเซียมและโซเดียมออกไซด์รวมกันสูงกว่า 5% ขึ้นไป จะทำให้ดินไม่ทนไฟและหลอมตัวที่อุณหภูมิต่ำกว่าปรกติ หรือถ้าเผาที่ 1200°C ดินจะเริ่มหลอมละลายเป็นมัน ดังนั้นในการเลือกนำดินขาวจากแหล่งต่างๆมาใช้ผสมเป็นเนื้อดินปั้น จำเป็นต้องมีการตรวจสอบส่วนประกอบทางเคมีของดิน

ตาราง 2.2 แสดงผลวิเคราะห์ทางเคมีของดินขาวจากแหล่งต่างๆในประเทศไทย[2]

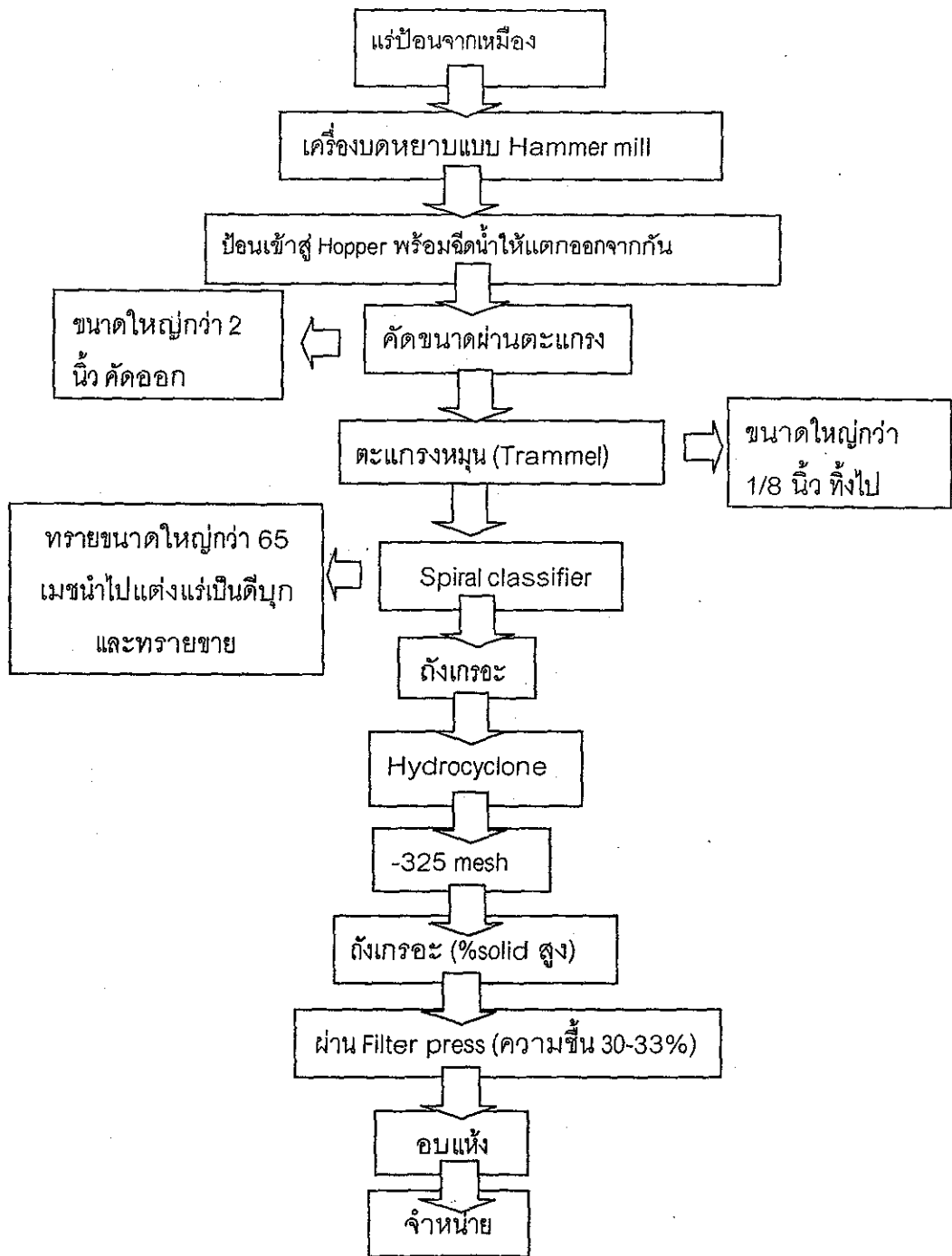
ผลวิเคราะห์ทางเคมี	ดินขาวระนอง	ดินขาวนราธิวาส	โคกไม้ลาย ปราจีนบุรี	บ้านไร่ อุทัยธานี	บ้านวังยาง อุดรดิตถ์	เวียงป่าเป้า เชียงราย	ปางค่า ลำปาง	ดินขาวระยอง
SiO ₂	48.75	47.30	48.10	65.93	68.56	44.50	59.70	51.85
Al ₂ O ₃	34.58	35.72	36.10	24.85	19.32	38.20	27.6	32.77
Fe ₂ O ₃	0.71	0.38	1.47	1.28	2.21	0.80	0.85	2.12
TiO ₂	0.02	0.20	0.79	0.05	0.21	0.20	0.07	0.53
CaO	0.07	0.11	0.20	0.15	0.05	0.10	0.13	0.02
MgO	0.34	1.01	0.14	0.45	0.53	-	0.25	0.18
K ₂ O	2.52	1.76	0.16	1.73	4.99	0.80	5.85	3.58
Na ₂ O	0.48	0.39	0.13	0.12	0.22	-	0.15	0.41
LOI	10.66	12.99	12.95	5.45	3.01	14.20	5.39	14.12

ในปัจจุบันดินที่นำมาใช้ในอุตสาหกรรมเซรามิกได้มีการผลิตออกมาจำหน่ายโดยการผสมดินจากแหล่งต่างๆ ออกมาเป็นดินสำเร็จรูปที่มีความเหมาะสมในการนำไปผสมเป็นเนื้อดินปั้นที่มีคุณภาพดี นอกจากนั้นยังช่วยลดเวลาในการเตรียมดินดิบเอง และลดค่าใช้จ่ายต่างๆที่จะเกิดขึ้น เนื่องจากการเตรียมวัตถุดิบของโรงงานเองด้วย

ตาราง 2.3 ส่วนประกอบทางเคมีและลักษณะเฉพาะของดินเผาดินของบ.คอมพาวด์เคลย์ จำกัด

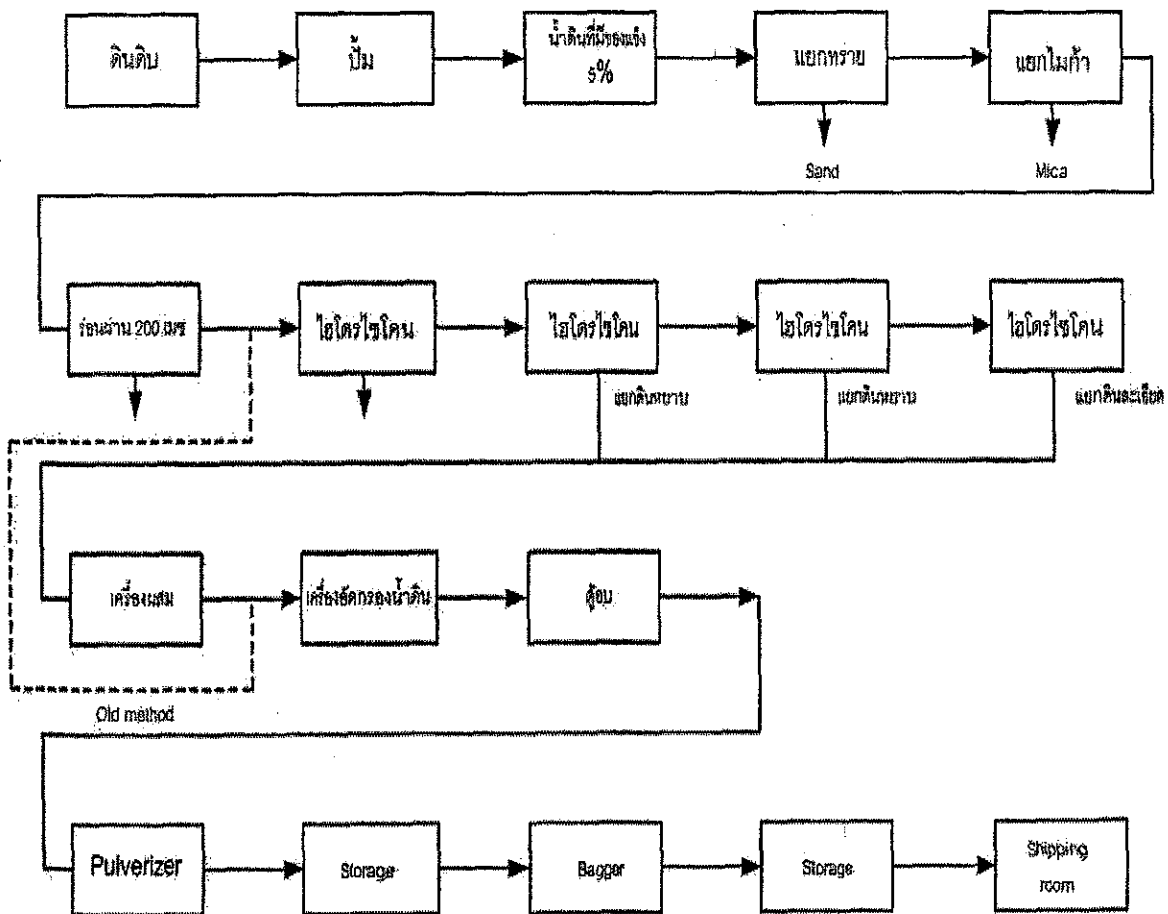
		MRD-Turbo-Cast	MRD-Cast	MRD-Plus	MRD-Standard	MRD-White	
Chemical composition	Typical Data						
	SiO ₂	Mass%	46.5	47.0	47.0	46.5	46.5
	Al ₂ O ₃		38.0	38.0	37.5	37.0	38.5
	Fe ₂ O ₃		0.70	0.70	0.85	1.10	0.60
	TiO ₂		0.03	0.03	0.03	0.05	0.03
	CaO		0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
	MgO		0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
	K ₂ O		1.20	1.25	1.30	1.55	1.10
	Na ₂ O		0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
	Loss on ignition		13.3	13.3	13.0	13.0	13.5
	Particle size distribution	>45 micron	Mass%	2.00	1.30	0.60	4.50
<10 micron			77	78	80	75	77
<5 micron			20	22	25	25	20
Deflocculant demand Cast thickness		Mass%	0.20	0.20	0.30	0.25	0.20
		mm/10 mins	12.5	10.5	8.0	8.0	9.0
Fired properties at 1250°C	Brightness		80.0	82.0	82.0	78.0	n/a
	Whiteness	(L*)	n/a	n/a	n/a	n/a	95
	Color (at 10)	(%)	6.0	7.0	7.5	7.0	6.5
	Absorption	(%)	20.0	19.0	18.5	18.0	20.0

ดินขาวที่นำมาใช้ในกระบวนการผลิตเซรามิก จะต้องผ่านกระบวนการทำให้บริสุทธิ์และขนาดอนุภาคที่เหมาะสมก่อนที่จะนำมาผสมเป็นเนื้อดินปั้น ดินที่คุณภาพที่ดีจึงต้องผ่านกระบวนการล้างดิน ดังแสดงในแผนภาพข้างล่างนี้



รูป 2.1 แผนภาพแสดงขบวนการล้างดินขาว

ขบวนการล้างดินขาวดังแผนภาพ 2.1 เป็นตัวอย่างขบวนการล้างดินขาว นอกจากนี้ขบวนการล้างดินขาวซึ่งเป็นขบวนการดั้งเดิม เริ่มด้วยการบ้อนดินขาวมาจากเหมืองและการล้างดินที่ใช้รางซีกแซก โดยการใช้แรงน้ำพาดินที่ขนาดอนุภาคต่างๆ ไปตามราง ซึ่งเป็นวิธีการคัดขนาดโดยธรรมชาติ ดินที่ผ่านรางซีกแซกจะมีขนาดอนุภาคที่ละเอียดมากขึ้น และจึงผ่านดินต่อไปยังบ่อกรองน้ำดิน แล้วจึงสูบเข้าเครื่องอัดดินแบบฟิลเตอร์เพรส ก่อนจะนำไปจำหน่ายออกไปเป็นแผ่นดิน ที่มีความชื้นประมาณ 20-22% คุณภาพของดินขาวขึ้นกับแหล่งวัตถุดิบ ขบวนการล้างดิน จากแผนภาพดังกล่าว ถ้าต้องการให้ดินขาวมีความละเอียดมากขึ้น ก็ทำได้โดยการผ่าน Hydrocyclone หลายครั้ง ก่อนจะมาผสมกันในถังกรองให้มีปริมาณของแข็งในถังกรองมากแล้วจึงนำไปผ่าน Filter press ก่อนส่งไปจำหน่ายต่อไป



รูป 2.2 แผนภาพการล้างดินขาวเก่าดินของประเทศอังกฤษ

ขบวนการล้างดิน 2.2 เป็นขบวนการล้างดินเกาหลีของประเทศอังกฤษ ซึ่งใช้การคัดแยกขนาดด้วยเครื่องไฮโดรไซโคลน ดินที่ผ่านการคัดแยกจะนำไปผสมแล้วผ่านเข้าเครื่องอัดรีดน้ำดินแล้วจึงนำไปอบ ดินที่ส่งขายจะมีความชื้นต่ำ หรือในบางโรงงานก็จะนำดินมาอบ แล้วทำให้เป็นเม็ดแกรนูลส่งจำหน่ายแก่ลูกค้าต่อไป

การทดสอบเพื่อใช้เป็นการควบคุมคุณภาพของดินขาวเพื่อใช้เป็นส่วนผสมในผลิตภัณฑ์ไวท์แวร์ เนื่องจากคุณภาพของดินขาวนั้นขึ้นอยู่กับสมบัติทางเคมีและทางกายภาพของดิน การควบคุมคุณภาพดินขาวมีดังนี้

1. กากค้างตะแกรงเบอร์ 100, 200 และ 325 เมช
2. การกระจายขนาดของอนุภาค 20, 10, 5, 2, 1 ไมครอน
3. ความสามารถดูดซับเมทิลีนบลู
4. ปริมาณการใช้สารช่วยกระจายลอยตัว
5. การหดตัว การดูดซึมน้ำเมื่อเผาที่ cone 9
6. ความเหมาะสมกับเคลือบ cone 9
7. สีและจุดต่างๆหลังเผา หรืออาจหาได้จากปริมาณ Fe_2O_3 และ TiO_2

ดินเหนียว (Ball clay)

ดินที่มีสีคล้ำจนถึงสีดำสนิท มีแหล่งสะสมในที่ลุ่ม เม็ดเล็กละเอียด มีอินทรีย์สารเจือปน มีความเหนียวดี จึงให้ความแข็งแรงก่อนเผาดีกว่าดินขาว ดินเหนียวจัดเป็นวัตถุดิบหลัก และใช้เป็นปริมาณสูงในเนื้อดินปั้นเซรามิก เมื่อผสมในเนื้อดินปั้นเซรามิก ทำให้ช่วงอุณหภูมิการเปลี่ยนแปลงสภาพของเนื้อดิน ไปเป็นเนื้อแก้วค่อนข้างยาว และสีหลังเผามีสีขาวหรือจางลง ดินเหนียวมีส่วนประกอบทางเคมีที่แตกต่างกันมากตามแต่แหล่งที่มีการสะสม ส่วนประกอบโดยประมาณคือ SiO_2 40-60%

Al_2O_3 ประมาณ 30%

H_2O ในผลึกและอินทรีย์สาร 10%

$TiO_2, Fe_2O_3, CaO, MgO, K_2O, Na_2O$ ปะปนเล็กน้อย

แร่ดิน และแร่ต่างๆ: kaolinite, montmorillonite, illite, quartz and mica

อินทรีย์สาร: linite, waxed, resins, lignin และ humus เกลือที่ละลายน้ำได้ เกลือซัลเฟตและเกลือคลอไรด์ของ Al, Fe, Ca, Mg, K, Na

คุณสมบัติทางกายภาพของดินเหนียว

1. ความสามารถในการแลกเปลี่ยนอนุมูลอยู่ระหว่าง 7-30 milliequivalents ต่อ 100 กรัมของดินแห้ง
2. ขนาดอนุภาค มีขนาดละเอียดกว่าดินขาว
3. ความเหนียว มีความเหนียวดีกว่าดินขาว การผสมดินบอลล์เคลย์ลงไปในเนื้อดินปั้นจะช่วยให้ขึ้นรูปได้ดีและเพิ่มความแข็งแรงของผลิตภัณฑ์ก่อนเผา
4. การหดตัวเมื่อแห้ง มีการหดตัวมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับแหล่งหรือชนิดของบอลล์เคลย์นั้น เช่น ถ้ามี SiO_2 สูงจะมีการหดตัวน้อย แต่ถ้าบอลล์เคลย์มีอินทรีย์สารสูงจะมีการหดตัวมากประมาณ 15%
5. ความแข็งแรงก่อนเผา จะให้ความแข็งแรงดีกว่าดินขาว บอลล์เคลย์ที่มีความแข็งแรงสูงเมื่อนำไปผสมเป็นเนื้อดินปั้นจะช่วยให้ผลิตภัณฑ์มีความแข็งแรงสูงตามไปด้วย คุณสมบัติหลังเผา โดยมากจะสนใจเมื่อนำบอลล์เคลย์นั้นไปผสมลงในเนื้อดินปั้น บอลล์เคลย์บางอย่างมี mica ปนอยู่ เมื่อเผา mica จะทำหน้าที่เป็นตัวเร่งให้เกิดปฏิกิริยาในเนื้อดินปั้น ทำให้เนื้อแน่นและเนียนมากขึ้น

ประโยชน์ของดินบอลล์เคลย์ คือ

1. ช่วยเพิ่มความเหนียว สามารถขึ้นรูปได้ดี
2. ทำให้ผลิตภัณฑ์ก่อนเผามีความแข็งแรงมากขึ้น ซึ่งจะลดการแตกหักของผลิตภัณฑ์ที่ยังไม่ได้เผาในขณะที่มีการเคลื่อนย้าย
3. ช่วยทำให้น้ำดินที่ใช้ในการหล่อแบบมีการไหลตัวดีขึ้น
4. บอลล์เคลย์บางชนิดช่วยทำให้เกิดปฏิกิริยาระหว่างมวลสารในเนื้อดินปั้นในขณะทำการเผา เป็นผลทำให้ผลิตภัณฑ์มีเนื้อแน่นเป็นเนื้อเดียวกัน

ข้อเสียของดินบอลล์เคลย์คือ

1. มักมีสิ่งสกปรกเจือปนมาก เช่น Fe_2O_3 , TiO_2 ที่จะทำให้ความขาวของเนื้อผลิตภัณฑ์เสียไป ทำให้ความโปร่งแสงของผลิตภัณฑ์น้อยลง
2. มีส่วนประกอบไม่แน่นอน ทำให้เกิดความยุ่งยากในการควบคุมน้ำดินสำหรับหล่อแบบ

ตาราง 2.4 ลักษณะเฉพาะของดินบอลลเคลย์จากแหล่งต่างๆในประเทศไทย [2]

ผลวิเคราะห์เคมี (%)	ดินเหนียวแม่ทาน	ดินแจ้คอน	ดินดำสุราษฎร์
SiO ₂	60.4	58.8	56.5
Al ₂ O ₃	25.4	23.6	28.4
Fe ₂ O ₃	1.2	5.6	1.88
TiO ₂	0.5	0.7	0.22
CaO	0.3	0.3	0.31
MgO	0.5	1.3	0.31
K ₂ O	2.4	2.4	2.28
Na ₂ O	0.3	0.8	0.16
LOI	9.0	6.4	9.9
วิเคราะห์แร่	Kaolinite Mica Quartz Organic	Kaolinite Mica Quartz Organic	Kaolinite Mica Quartz Organic
ความละเอียด			
-20 ไมครอน	94	99	93
-10 ไมครอน	95	98	84
-5 ไมครอน	92	97	79
-2 ไมครอน	76	94	73
-1 ไมครอน	57	83	69
-0.5 ไมครอน	42	69	66
MBI	7.5	13	7.0

ตาราง 2.5 เปรียบเทียบผลวิเคราะห์ทางเคมีของดินเหนียวเนื้อละเอียดและดินดำปนทรายของอังกฤษและไทย [2]

วัตถุดิบ	อังกฤษ		ไทย				
	South Devon (เนื้อละเอียด)	North Devon (ปนทราย)	บ้านนาสาร สุราษฎร์	ปากพลี ปราจีนบุรี	แม่หยวก เชียงใหม่	แม่ทาน ลำปาง	แจ้คอน ลำปาง
SiO ₂	49.0	64	50.94	52	59.2	59.92	56.2
Al ₂ O ₃	32	24	31.7	27.3	23.7	25.92	29.8
Fe ₂ O ₃	1.0	0.9	2.78	3.4	0.9	0.62	2.90
TiO ₂	0.9	1.4	0.88	-	0.34	0.70	0.63
CaO	0.2	0.2	0.34	1.3	0.37	0.08	0.4
MgO	0.4	0.4	0.46	2.0	0.39	0.45	0.74
K ₂ O	2.1	2.1	0.58	-	2.71	2.07	2.78
Na ₂ O	0.2	0.4	0.4	-	0.35	0.33	0.85
LOI	13.5	7.5	11.75	13.9	9.6	9.12	7.0

ตาราง 2.6 ดิน Fined Ball Clay จาก บ.คอมพาวส์เคลย์ จำกัด

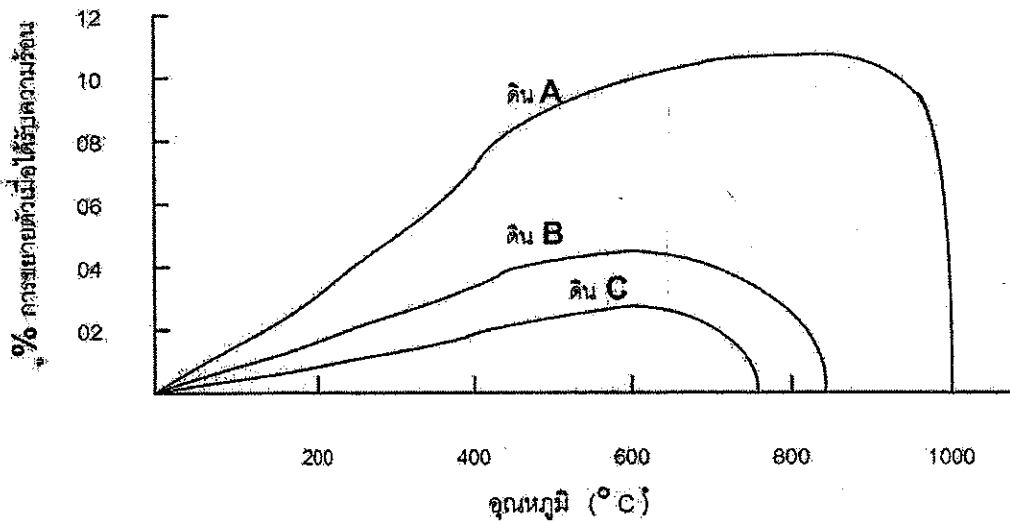
ดิน Refined Ball Clay		ความละเอียดของเม็ดดิน
ผลวิเคราะห์เคมี (%)		ขนาดต่ำกว่า 10 ไมครอน 77.7%
SiO ₂	51.00	ขนาดต่ำกว่า 5 ไมครอน 61.9%
Al ₂ O ₃	30.40	ขนาดต่ำกว่า 2 ไมครอน 42.4%
Fe ₂ O ₃	1.90	ขนาดต่ำกว่า 1 ไมครอน 30.6%
TiO ₂	0.04	ขนาดต่ำกว่า 0.5 ไมครอน 19.8%
CaO	0.40	
MgO	0.30	
K ₂ O	1.30	ความแข็งแกร่งหลังอบ 110°C
Na ₂ O	1.40	(modulus of rupture) 55.45 Kg/cm ²
LOI	12.80	การหดตัวหลังเผา
ปริมาณอินทรีย์คาร์บอน 3.24		1280°C OF. 13.5%
		1280°C RF. 14.0%
		การดูดซึมน้ำ
		RF. 0.18%
		OF. 0.48%

ในดินแต่ละแหล่งจะมีส่วนประกอบทางเคมีที่แตกต่างกันออกไป สิ่งที่อยู่ในดินจะทำให้คุณสมบัติต่างๆของดินแตกต่างกัน เช่น ซิลิกา ที่อยู่ในรูปซิลิกาอิสระ จะมีผลทำให้

1. ลดความเหนียวของเนื้อดิน
2. ลดการหดตัวระหว่างการอบแห้งและการเผา
3. ถ้าอนุภาคขนาดใหญ่ จะทำให้เนื้อดินทนไฟ แต่ถ้าอนุภาคขนาดเล็ก จะช่วยลดอุณหภูมิการสุกตัว

ปริมาณซิลิกาที่มีอยู่ในดินสามารถทำการตรวจสอบได้โดยการทดสอบทางความร้อนของดินโดย (Irreversible thermal expansion)

ในการทดสอบทางความร้อนของดินแต่ละชนิดจะให้ข้อมูลเกี่ยวกับส่วนประกอบทางเคมีและพฤติกรรมของดินนั้นเมื่อนำไปเผา จากรูป 2.3 แสดงการเปลี่ยนแปลงขนาดหรือความยาวของเนื้อดินเมื่อได้รับความร้อนที่อุณหภูมิต่างๆ ดินที่นำมาศึกษานี้มี 3 ชนิด ได้แก่ ดิน A,B และ C ซึ่งแสดงพฤติกรรมทางความร้อนที่แตกต่างกัน



รูป 2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวของเนื้อดินเมื่อได้รับความร้อนและอุณหภูมิ

ที่อุณหภูมิประมาณ 600°C เกิด α - β quartz inversion ที่ 540°C ซึ่งในเนื้อดินมีควอตซ์ปะปนอยู่ด้วยและที่ 700°C ถ้ามีปริมาณแร่ดินมากจะทำให้การขยายตัวที่อุณหภูมินี้ต่ำลง จากการศึกษาพฤติกรรมทางความร้อนของดิน 3 ชนิดนี้สามารถสรุปได้ว่า

Group A- จัดเป็นดินที่มีซิลิกาสูง: มีการขยายตัวประมาณ 1.0% ที่ 600°C ดังนั้นปริมาณซิลิกาน่าจะมากกว่า 60% และมีอนุภาคใหญ่ (free quartz) ทำให้สามารถเทแบบหล่อได้เร็ว

Group B- ดินที่มีสีเข้ม: มีการขยายตัวประมาณ 0.4% ที่ 600°C

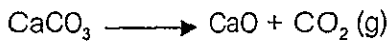
Group C- ดินที่มีความขาว: มีการขยายตัวประมาณ 0.2% ที่ 600°C เป็นดินที่มีความเหนียวสูงและให้ความแข็งแรงก่อนเผาแก่เนื้อดินปั้น

อลูมินา (Alumina) พบอยู่ในแร่ดิน เฟลด์สปาร์ ไมกา และอลูมิเนียมซิลิเกต และพบอาจในรูปอะลูมินาอิสระ มีผลต่อเนื้อดินคือ

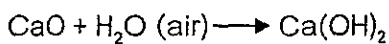
- ลดความเหนียวของเนื้อดิน
- ทำให้เนื้อดินมีความทนไฟมากขึ้น

Calcium compounds: แคลไซต์ แคลเซียมซิลิเกต ยิปซั่ม

- ช่วยลดอุณหภูมิการเผา เมื่อรวมตัวกับอะลูมินาและซิลิกา
- แคลไซต์เมื่อเผาที่อุณหภูมิ 900°C จะให้ CaO ดังสมการ



CaO จะดูดความชื้นในอากาศ ทำให้ผลิตภัณฑ์บวม เสียรูปทรงหรือสลายตัวเป็นผงได้



- แคลเซียมซิลเฟตทนต่อการเผาที่อุณหภูมิสูง ถ้าบดไม่ละเอียดทำให้เกิดรอยต่างในเนื้อดินหลังเผา หรือรวมตัวกับสารประกอบเหล็ก ทำให้สีหลังเผาอ่อนลง

Barium compounds คุณสมบัติคล้าย calcium compounds

Magnesium compounds: มักอยู่ในรูปแมกนีไซต์ แรโดโลไมท์ แมกนีเซียมซิลเฟต สารประกอบแมกนีเซียมจะช่วยลดอุณหภูมิ หรือลดความทนไฟ

Iron compounds: อยู่ในรูปเฟอร์ริกออกไซด์ เฟอร์ริสออกไซด์ เฟอร์ริกซิลิเกต เฟอร์ริกซัลไฟด์ สารประกอบเหล็กทำให้สีหลังเผามีสีเหลือง หรือเป็นจุดสีน้ำตาล

สารประกอบคาร์บอนอินทรีย์ (Carbonaceous matter) :

คาร์บอนในวัตถุดิบ CaCO_3 , MgCO_3 หรือพวกคาร์บอเนตและคาร์บอนจากอินทรีย์สาร สารประกอบคาร์บอนอินทรีย์จะทำให้เนื้อดินเหนียวก่อนเผามีสีเทาไปจนถึงสีดำ ขึ้นกับปริมาณที่มีอยู่ในเนื้อดินและทำให้เกิดการเผาแบบรีดิวซิง (reducing) ทำให้เกิดเขม่า คาร์บอนมีผลต่อสีและการสุกตัวของผลิตภัณฑ์ เมื่อเผาเร็วอาจทำให้ผลิตภัณฑ์เกิดรูพรุนเนื่องจากก๊าซคาร์บอน ถ้าเผาเร็วมากจะเกิดการไหม้เร่งให้อุณหภูมิในเตาสูงขึ้น จึงทำให้เกิดการเผาเกินจุดสุกตัว (over vitrification) และผลิตภัณฑ์ยุบตัวเกิดการบิดเบี้ยวเสียรูปทรง ถ้าสารประกอบคาร์บอนไม่สลายตัว จะทำให้เกิดแถบสีดำขึ้นในชั้นเนื้อดิน (Black core) ควรเผาช้าๆ ในช่วงอุณหภูมิ 24-900°C และยืดระยะเวลาอย่างต่ำ 5-6 ชม. ในผลิตภัณฑ์ที่มีดินดำผสม

สารประกอบของซัลเฟอร์ (sulfur):

- มาจากเหล็กซัลเฟตหรือไพไรท์ FeS_2 แคลเซียมซิลเฟต

- ไม่ควรมีเกิน 500 mg/g เพราะจะทำให้เนื้อผลิตภัณฑ์บวมหรือยุบตัวหลังเผา

สารประกอบอัลคาไลไลน์ (Alkali bearing materials)

พบในรูปของแร่หินพื้นผ้า ไมกา อาจอยู่ในรูปของเกลือที่ละลายน้ำได้ เช่น โพแทสเซียมซิลิเกต โซเดียมซิลิเกต โซเดียมคลอไรด์ สารประกอบอัลคาไลไลน์ลดจุดสุกตัวหรือความทนไฟ (vitrification temp.) เมื่อรวมตัวกับ Al_2O_3 และ SiO_2 จะหลอมตัวที่อุณหภูมิต่ำ สารประกอบอัลคาไลไลน์เมื่อหลอมรวมตัวจะกลายเป็นเนื้อแก้ว สารประกอบนี้ไม่มีความเหนียว จึงลดความเหนียวในเนื้อดิน และลดความแข็งแรงหลังแห้ง (green strength) ของเนื้อดิน โดยมากมักอยู่ในรูปที่ละลายน้ำได้ ไม่นิยมผสมในเนื้อดินและน้ำเคลือบ

นอกจากนี้ยังมีดินอื่นๆ ที่ใช้เป็นส่วนผสมของเนื้อดินปั้นได้แก่

1. Fireclays: มีส่วนประกอบของ kaolinite และจัดเป็นดินชนิด secondary clays ที่มีสิ่งเจือปนมาก
2. Stoneware clay: เป็นดินที่น้ำตาลถึงน้ำตาลเข้มที่มีความเหนียวมาก ซึ่งประกอบด้วย Flux เจือปนมาก
3. Bentonite: smectite group or montmorillonite: มีความเหนียวมาก จึงมักเติมลงในเนื้อดินปั้นที่ไม่มีความเหนียวไม่เกิน 1% และทำให้ดินปั้นมีความแข็งแรงก่อนเผาสูง
4. Pyrophyllite : คล้าย talc แต่ไม่มีความเหนียว ค่อนข้างคล้ายดินขาวแต่อัตราส่วนการหดตัวต่ำมาก ประกอบด้วย Al_2O_3 28.3%, SiO_2 66.7% และ H_2O 5.0% ใช้ผสมในเนื้อกระเบื้องเพื่อลดการหดตัว ใช้ทำฉนวนไฟฟ้าหรือแผงไฟฟ้า เป็นวัสดุทนไฟ

วิธีการคำนวณหาแร่ธาตุที่เป็นส่วนประกอบในดิน

1. คำนวณโดยคิดจาก Mica (mica convention techniques) ในกรณีที่มีผลวิเคราะห์ทางเคมีพบไมก้าเป็นส่วนผสม

ขั้นตอนการคำนวณ

1.1 คำนวณจาก K_2O ในรูปของ Muscovite mica ($K_2O \cdot 3Al_2O_3 \cdot 6SiO_2 \cdot 2H_2O$)

1.2 คำนวณจาก Na_2O ในรูป Paragonite mica ($Na_2O \cdot 3Al_2O_3 \cdot 6SiO_2 \cdot 2H_2O$)

1.3 หักปริมาณ Al_2O_3 , SiO_2 , H_2O

- 1.4 จากปริมาณ Al_2O_3 ที่เหลือ หาปริมาณของ Kaolinite ($Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$)
- 1.5 หักปริมาณ SiO_2, H_2O
- 1.6 จากปริมาณ SiO_2 หาออกมาเป็นปริมาณ free quartz
- 1.7 CaO และ MgO คำนวณออกมาเป็น $CaCO_3, MgCO_3$
- 1.8 CO_2 คำนวณเป็น Ignition loss

ตัวอย่างที่ 1 การคำนวณ ผลวิเคราะห์เคมีของดินมีดังนี้

SiO_2	48.08
Al_2O_3	36
Fe_2O_3	0.54
TiO_2	0.05
CaO	0.26
MgO	0.16
K_2O	1.70
Na_2O	0.36
LOI	12.85

วิธีการคำนวณ

1. หาปริมาณ Muscovite และ Paragonite

Muscovite ($K_2O \cdot 3Al_2O_3 \cdot 6SiO_2 \cdot 2H_2O$) ประกอบด้วย

K_2O	11.81%
Al_2O_3	38.44%
SiO_2	45.23%
H_2O	4.52%

Paragonite ($Na_2O \cdot 3Al_2O_3 \cdot 6SiO_2 \cdot 2H_2O$) ประกอบด้วย

Na_2O	8.12%
Al_2O_3	40.05%
SiO_2	47.12%

H₂O 4.71%

% muscovite = $(1.7 \times 100) / 11.81 = 14.39\%$ (คิดจากปริมาณของ K₂O)

% paragonite = $(0.36 \times 100) / 8.12 = 4.43\%$ (คิดจากปริมาณของ Na₂O)

ดังนั้น ปริมาณ Mica ทั้งหมดที่มีในเนื้อดิน = $14.39 + 4.43 = 18.82\%$

2. คำนวณหา Al₂O₃, SiO₂, ignition (H₂O) จาก mica

Al₂O₃ จาก muscovite = $(38.44 \times 14.39) / 100 = 5.53\%$

Al₂O₃ จาก paragonite = $(40.05 \times 4.43) / 100 = 1.77\%$

ดังนั้น มี Al₂O₃ ใน mica = $5.53 + 1.77 = 7.30\%$

Al₂O₃ เหลือ = $36 - 7.30 = 28.70\%$ (เป็นปริมาณ Al₂O₃ ใน kaolinite)

3. คำนวณหา SiO₂ จาก muscovite และ paragonite

SiO₂ ใน muscovite = $(45.23 \times 14.39) / 100 = 6.51\%$

SiO₂ ใน paragonite = $(47.12 \times 4.43) / 100 = 2.09\%$

ดังนั้น SiO₂ ใน mica = $6.51 + 2.09 = 8.60\%$

SiO₂ เหลือ = $48.08 - 8.60 = 39.48\%$ (เป็นปริมาณ SiO₂ ใน kaolinite และ free silica)

4. คำนวณหา H₂O จาก mica

H₂O ใน muscovite = $(4.52 \times 14.39) / 100 = 0.65\%$

H₂O ใน paragonite = $(4.71 \times 4.43) / 100 = 0.21\%$

ดังนั้น Ignition ใน mica = $0.65 + 0.21 = 0.86\%$

H₂O เหลือ = $12.85 - 0.86 = 11.99\%$ (เป็น ignition ใน kaolin และ organic matters)

5. Kaolinite (Al₂O₃ · 2SiO₂ · 2H₂O)

Al₂O₃ 39.53%

SiO₂ 46.51%

H₂O 13.96%

Kaolinite = $(28.70 \times 100) / 39.53 = 72.6\%$

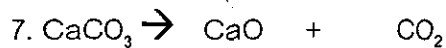
6. คำนวณหา SiO₂, H₂O จาก kaolinite

$$\text{SiO}_2 = (46.51 \times 72.6) / 100 = 33.77 \%$$

$$\text{Free SiO}_2 = 39.48 - 33.77 = 5.71\%$$

$$\text{H}_2\text{O ใน kaolin} = (13.96 \times 72.6) / 100 = 10.14\%$$

$$\text{ส่วนที่เหลือ (CaCO}_3, \text{MgCO}_3, \text{Lignite)} = 11.99 - 10.14 = 1.85\%$$



$$100 \quad 56 \quad 44$$



$$100 \quad 47.8 \quad 52.2$$

$$\text{CaCO}_3 = (100 \times 0.26) / 56 = 0.46\%$$

$$\text{ปริมาณ CO}_2 \text{ ที่เหลือ} = 0.46 - 0.26 = 0.20\%$$

$$\text{MgCO}_3 = (100 \times 0.16) / 47.8 = 0.33\%$$

$$\text{ปริมาณ CO}_2 \text{ ที่เหลือ} = 0.33 - 0.16 = 0.17\%$$

$$\text{Thus, CO}_2 \text{ ทั้งหมด} = 0.20 + 0.17 = 0.37\%$$

$$\text{Lignite} = 1.85 - 0.37 = 1.48\%$$

8. แร่ที่อาจปะปนอาจเป็น Ilmenite (Fe₂O₃, TiO₂)

$$67\% \text{ Fe}_2\text{O}_3 \quad , \quad 33\% \text{ TiO}_2$$

Ilmenite : TiO₂

$$100/33 : x / 0.05$$

$$\text{Thus, Ilmenite} = (100 \times 0.05) / 33 = 0.15\%$$

$$\text{Fe}_2\text{O}_3 \text{ ใน Ilmanite} = (67 \times 0.15) / 100 = 0.101\%$$

$$\text{Fe}_2\text{O}_3 = 0.54 - 0.101 = 0.439\%$$

ดังนั้นส่วนผสมของดิน

$$\text{Mica} \quad 18.82\%$$

$$\text{Clay} \quad 72.60\%$$

$$\text{Silica} \quad 5.67\%$$

CaCO ₃	0.46%
MgCO ₃	0.33%
Ilmanite	0.15%
Rutile	0.439%
Lignite(org.)	1.48%

2. คำนวณโดยคิดจาก Feldspar (feldspar convention techniques)

2.1 นิยมใช้กับดินที่มีผลวิเคราะห์เคมีของโพแทสและโซดา รวมกันแล้วมีค่าอยู่ในระหว่าง 2-4%

2.2 K₂O และ Na₂O ใน feldspar

1 molecule K₂O = 1 molecule potash feldspar

94 ส่วน K₂O = 556 ส่วน potash feldspar

1 ส่วน K₂O = 556 / 94 ส่วน potash feldspar
= 5.92 potash feldspar

Soda feldspar (Na₂O.Al₂O₃.6SiO₂)

1 ส่วน Na₂O = 8.45 soda feldspar

ตัวอย่างที่ 2 การคำนวณผลวิเคราะห์ทางเคมีของดินสโตรแวร์ จงคำนวณปริมาณแร่ที่มีอยู่

SiO ₂	66%
Al ₂ O ₃	20.1%
Fe ₂ O ₃	2.7%
TiO ₂	0.3%
CaO	0.34%
MgO	0.22%
K ₂ O	2.15%
Na ₂ O	0.8%
LOI	7.39%

1. หาปริมาณ Feldspar จาก K₂O, Na₂O

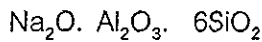
หาปริมาณโพแทสเทียมเฟลด์สปาร์จาก K₂O (น้ำหนักโมเลกุล 94 K₂O, 102 Al₂O₃, 360.6 SiO₂)

น้ำหนักโมเลกุลของ $K_2O \cdot Al_2O_3 \cdot 6SiO_2 = 556.6$

ดังนั้น K_2O 1 ส่วน มาจากโพแทสเซิลด์สปาร์ = $556.6 / 94 = 5.92$ ส่วน

ดังนั้นถ้าพบ K_2O 1 ส่วน ดินมีแร่ potash feldspar = 5.92 ส่วน

2. หาปริมาณโซดาเฟลด์สปาร์ จาก Na_2O



$$(62) \quad (102) \quad (360.6) = 524.6$$

Thus, Na_2O 1 ส่วน มาจาก soda feldspar = $524.6 / 62 = 8.46$ ส่วน

ดังนั้นถ้าพบ Na_2O 1 ส่วน ดินมีแร่ soda feldspar 8.46 ส่วน

โดยทั่วไปถ้าปริมาณ Alkali (K_2O , Na_2O) ต่ำประมาณ 2-4 % และปริมาณ $K_2O > Na_2O$ ประมาณ 2 เท่า ดังนั้นสามารถใช้ 5.92 potash feldspar ในการคำนวณหาค่าเฟลด์สปาร์รวมได้

$$\text{พบว่า } K_2O = 2.15$$

$$Na_2O = 0.80$$

ดังนั้น มีปริมาณแร่ Feldspar ในตัวอย่างดิน = $2.95 \times 5.92 = 17.46\%$

3. หา SiO_2 และ Al_2O_3 ใน feldspar

$$\text{Feldspar 1 ส่วน ประกอบด้วย } SiO_2 = 360.6 / 556.6 = 0.648 \text{ ส่วน}$$

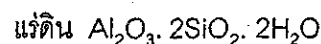
ดังนั้น ปริมาณ Feldspar ในดิน 17.46% มี $SiO_2 = 0.648 \times 17.46 = 11.31\%$

$$\text{Feldspar 1 ส่วน ประกอบด้วย } Al_2O_3 = 102/556.6 = 0.183 \text{ ส่วน}$$

ดังนั้นปริมาณ Feldspar ในดิน 17.46% มี $Al_2O_3 = 0.183 \times 17.46 = 3.195\%$

4. หาปริมาณแร่ดินจากอะลูมินา

$$Al_2O_3 \text{ เหลือ} = 20.1 - 3.19 = 16.91$$



$$(102) \quad (120.2) \quad (36) = 258.1$$

$$Al_2O_3 \text{ 1 ส่วน มาจากแร่ดิน } 258.1/102 = 2.53 \text{ ส่วน}$$

ดังนั้น Al_2O_3 16.91% แสดงว่าในดินมีแร่ดิน = $16.91 \times 2.53 = 42.78\%$

5. หาปริมาณ SiO₂ ในดินและ SiO₂ อีสระ

แร่ดิน 1 ส่วน ประกอบด้วย SiO₂ = $120.2/258.1 = 0.466$ ส่วน

ดังนั้น แร่ดิน 42.78% จะมีซิลิกา $42.78 \times 0.466 = 19.94\%$

ปริมาณ SiO₂ ในรูป quartz = $66 - (19.94 + 11.31) = 34.75\%$

6. หาค่า LOI

แร่ดิน 1 ส่วนมีน้ำ $36 / 258.1 = 0.140$ ส่วน

ปริมาณแร่ดิน 42.78% มีน้ำ $42.78 \times 0.140 = 5.99\%$

ปริมาณค่าที่หายไปหลังเผา LOI = 7.39%

หักค่าโมเลกุลน้ำในสูตรดิน = 5.99 %

คงเหลือปริมาณคาร์บอน และอินทรีย์สาร = 1.4%

■ เขียนสูตรส่วนผสมของแร่ธาตุในดิน

แร่ดิน	42.78%	
เฟลด์สปาร์	17.46%	
ควอทซ์	34.75%	
เหล็ก	2.7%	} หรือ illmenite 0.91%
ไทเทเนียม	0.3%	
แมกนีเซียม	0.22%	หรือ MgCO ₃ 0.46%
แคลเซียม	0.34%	หรือ CaCO ₃ 0.61%
อินทรีย์สาร	1.4%	

(หมายเหตุ ในตัวอย่างนี้ไม่ได้คำนวณหาปริมาณ CaCO₃, MgCO₃ หรือ Dolomite, Illite, Rutite ใดๆก็ตามในการหาปริมาณของส่วนผสมแร่ในดิน ควรจะดูจากผลวิเคราะห์ทางเคมีประกอบด้วย)

หินฟันม้าและวัตถุดิบที่เป็น Flux

มีหน้าที่ในเนื้อผลิตภัณฑ์ดังนี้

1. ช่วยลดอุณหภูมิในการหลอมให้ต่ำลง ได้แก่วัตถุดิบที่มีส่วนประกอบของ alkali or alkaline earth
2. มีขนาดอนุภาคเล็กๆ (55% of materials is less than 10 μ m)
3. ลดความเหนียวก่อนเผา
4. หินฟันม้าเป็นตัวประสานให้ผลึกของดินหลอมตัวกันแน่น เนื้อดินหลอมเป็นแก้ว ลดการดูดซึมน้ำ
5. เพิ่มความโปร่งแสงหลังเผา ใช้ผสมในน้ำเคลือบ 30-70% เพื่อให้เกิดการหลอมตัวได้ดี

ชนิดของหินฟันม้า

1. Potash feldspar (orthoclase) : $K_2O \cdot Al_2O_3 \cdot 6SiO_2$
2. Soda feldspar (Albite): $Na_2O \cdot Al_2O_3 \cdot 6SiO_2$ จะเป็นตัวลดจุดหลอมที่แรงมาก อาจทำให้ผลิตภัณฑ์เสียรูปขณะเผา
3. Lime feldspar (Anorthite): $CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$
4. Barium feldspar (Celsian): $BaO \cdot Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$
5. Cornish Stone: ไม่เป็น flux ที่รุนแรงเนื่องจากมีปริมาณอัลคาไลน์น้อย มักประกอบด้วย kaolin กับ feldspar มักมีสิ่งเจือปนมาก เช่น CaF_2 และอาจจะทำให้เกิดสีหลังเผา

Bone ash: ใช้สำหรับผสมในเนื้อ bone china ทำให้เนื้อมีความโปร่งแสง เนื่องจากเป็น calcium phosphate เมื่อหลอมรวมกับ china clay เกิดเป็น $CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$ ทำให้โปร่งแสง โดยการเผา กระตุกวัดความที่ 900 $^{\circ}$ C ปริมาณของอินทรีย์สารที่เหลืออยู่หลังจากเผาไปจะมีผลต่อความเหนียว ถ้ามีปริมาณอินทรีย์สารเหลืออยู่มากจะทำให้เกิดการบวม ดังนั้นจึงควรเช็คปริมาณของอินทรีย์สารที่มีอยู่ประมาณ 1.8-2.0% หลังเผาที่อุณหภูมิ 1000 $^{\circ}$ C

Talc : จัดเป็น magnesium silicate และอยู่ในกลุ่มของแร่ดิน smectite หรือ montmorillonite group. การเปลี่ยนแปลงของทัลก์ ($3MgO \cdot 4SiO_2 \cdot H_2O$) เมื่อได้รับความร้อนคือจะเกิดการเปลี่ยนแปลงเป็น Cordierite ($2MgO \cdot 2Al_2O_3 \cdot 5SiO_2$) ซึ่ง cordierite มีการขยายตัวต่ำ ทำให้มีความต้านทานต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิมาก แต่มีข้อเสียคือจะมีช่วงการเผาแคบและจะทรุดตัวง่ายขณะเผา เมื่อนำทัลก์

ผสมในเนื้อดินปั้นจะทำให้เนื้อผลิตภัณฑ์มีการขยายตัวเนื่องจากความชื้นน้อย ทำให้ทนต่อการแตก
รานได้ดี

Limestone: นิยมใส่ในเนื้อกระเบื้องเนื่องจากจะทำให้มีการขยายตัวเนื่องจากความชื้นต่ำ
วัตถุดิบที่มี Lithium oxide ได้แก่ Lepidolite, Spodumene or petalite ซึ่งจะมีการขยายตัวเนื่องจาก
ความร้อนต่ำ เมื่อผสมในเนื้อกระเบื้องประมาณ 10-12% จะช่วยลดปริมาณการเกิดเฟสของแก้วขณะ
เผาได้

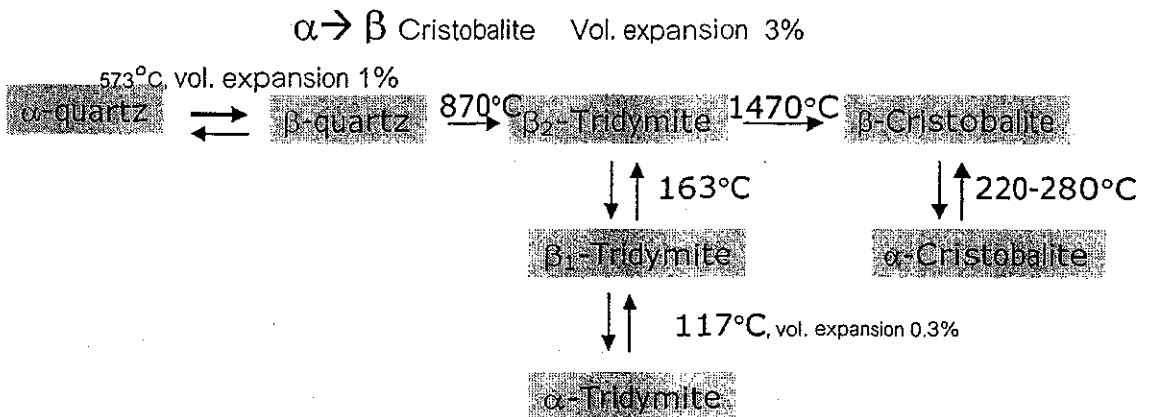
ซิลิกา (Silica)

- ในเนื้อ earthenware มี SiO_2 สูงถึง 72-76% ซึ่งจะส่วนผสมเป็น free silica (flint or sand) 35%
- มีผลต่อคุณสมบัติ thermal expansion ต่ำ เช่น เนื้อดินปั้นควรมีการขยายตัวเนื่องจากความร้อนสูงกว่าเคลือบเพื่อป้องกันการแตกรานของเคลือบ เมื่อในเนื้อส่วนผสมมีซิลิกามาก จะทำให้ทนไฟมาก
- ลดความเหนียวและความแข็งแรงก่อนเผาของเนื้อดินปั้น
- ลดการหดตัวก่อนเผา
- วัตถุดิบที่ให้ silica อาจอยู่ในรูป flint (water+interstitial amorphous silica) เมื่อเผาจะได้ cristobalite ในธรรมชาติ flint จะพบปะปนกับแหล่ง chalk ก่อนนำมาใช้ต้อง calcination ก่อนที่ 1100°C เพื่อไล่ organic และทำให้บดง่ายขึ้น
- วัตถุดิบที่อยู่ในรูปของ sand จะมี $\text{SiO}_2 > 99\%$ ซิลิกาที่นำมาผสมในเนื้อดินปั้นควรมี Fe_2O_3 , TiO_2 ต่ำ และมีขนาดอนุภาคเล็ก ดังนั้นก่อนการผสมจะต้องมีการบดให้ละเอียด แต่จะทำให้ราคาสูงตามไปด้วย
- Non-crystalline form of silica: fused silica (เกิดจากการเย็นตัวอย่างรวดเร็ว) มีการขยายตัวเนื่องจากความร้อนต่ำ และเพิ่มความทนไฟ
- Silica ที่อยู่ในเนื้อดินปั้น จะทำให้การขยายตัวสูงขึ้น (crystalline form) แต่ silica ที่อยู่ในเคลือบจะอยู่ในรูปของ amorphous ทำให้การขยายตัวลดลง
- ในเคลือบ porcelain จะมีส่วนประกอบของซิลิกาสูง ทำให้เผาเคลือบที่อุณหภูมิสูง

การเปลี่ยนแปลงเฟสของซิลิกาเมื่อได้รับความร้อน

- Quartz (stable form up to 870°C) มีความถ่วงจำเพาะ 2.65
- Tridymite มีความถ่วงจำเพาะ 2.32 เสถียรในช่วง 870-1470°C
- Cristobalite มีความถ่วงจำเพาะ 2.28 เสถียรที่อุณหภูมิ 1470°C
- อุณหภูมิหลอมที่ 1710°C

เฟส Tridymite และ Cristobalite จะมีโครงสร้างที่มีการเรียงตัวของอะตอมแบบหลวมๆเมื่อเทียบกับ การเรียงตัวใน quartz ดังนั้นจึงมีความหนาแน่นต่ำกว่า และเป็นเฟสที่เกิดที่อุณหภูมิสูง



- α -quartz \rightarrow β -quartz มีการขยายตัว 1.0%
- α -tridymite \rightarrow β -tridymite มีการขยายตัว 0.3%
- α -cristobalite \rightarrow β -cristobalite มีการขยายตัว 3%

การเปลี่ยนแปลงเฟสเมื่อได้รับความร้อนจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางปริมาตรด้วย ทำให้เกิดการแตกร้าวขณะเผาได้ง่าย ถ้าเผาในช่วงที่มีการเปลี่ยนแปลงเฟสเร็วเกินไป ดังนั้นต้องมีการควบคุมช่วงการเผา

อะลูมิน่า (Alumina)

- ใช้ผสมในเนื้อดินปั้นแทน ซิลิกาบางส่วน

- มีการขยายตัวเนื่องจากความร้อนต่ำกว่า crystalline silica
- ขณะเผาทำปฏิกิริยากับซิลิกา จะได้ silicate-aluminate glass ซึ่งมีการขยายตัวเนื่องจากความร้อนสูง อาจจะทำให้เกิดความแตกต่างเนื่องจากการขยายตัวที่ไม่เท่ากันระหว่างแก้วและsilica ทำให้เกิดการแตกร้าวได้ (ware crack or "dunt")
- Alumina ที่อยู่ในรูป bauxite (hydrated alumina) จะมีสิ่งเจือปนมาก

วัตถุดิบอื่น ๆ

- Plaster of Paris (calcium sulphate hemihydrate) $\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$
- $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O} = \text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O} + 1 \frac{1}{2} \text{H}_2\text{O}$
 Gypsum 160°C plaster water
- "Dead-burned" = anhydrous calcium sulphate (CaSO_4)
- Forms: β -form เตรียมจาก dry (no steam) และ α -form เตรียมจาก steam treatment ซึ่งจะมี ความแข็งแรงกว่า β -form และมีการดูดซึมน้ำน้อยกว่า
- Plaster เมื่อผสมกับน้ำจะเซตตัวได้ โดยมีผลึกเป็นแบบ interlocking mass of gypsum crystals
- ปริมาณน้ำมาก จะทำให้ plaster มีความพรุนตัวมาก จึงทำให้ความสามารถในการดูดน้ำของแบบมาก เช่น casting moulds มีสัดส่วน 100 plaster/80 water และ flatware moulds มีสัดส่วน 100 plaster/70 water
- คุณสมบัติของ plaster จะมีการเปลี่ยนแปลงได้ ขึ้นอยู่กับการเก็บรักษา การผสมและการเซตตัวของ plaster

ดินเชื้อคัลไซน์เคลย์ (Calcined clay)

ชามอต (Chamotte, grog) ดินที่ผ่านการเผาแล้ว นำมาผสมกับเนื้อดินช่วยลดการหดตัวของเนื้อดิน เพื่อเปิดเนื้อดินและเพิ่มความพรุนตัวให้เนื้อดินระหว่างอบแห้ง ลดปัญหาการผิ๊งแห้งและการเผา ลดการแตกร้าว เพิ่มสีและพื้นผิวในเนื้อดินหลังเผา เพิ่มความทนไฟ ไม่ทรุดตัวหลังเผา ทำให้ไม่บิดเบี้ยวเสียรูปทรงในการเผา แบ่งออกเป็น 2 ชนิด

1. ดินเชื้อเผาในอุณหภูมิต่ำกว่าเนื้อดินที่นำไปเผา (soft grog) เช่นดินเชื้อเผาที่ 1180-1200°C แล้วนำมาบดร่อน นำไปผสมกับดินเหนียวปั้น ช่วยให้เกิดเป็น โครงสร้างให้ช่วยต่อการขึ้นรูป เมื่อแห้งนำไปเผาที่ 1250°C
2. ดินเชื้อเผาในอุณหภูมิสูง 1300-1500°C ทำให้ไม่หดตัวลงไปอีกเมื่อนำไปผสมกับ เนื้อดินปั้น หลังจากนั้นนำไปผสมที่อุณหภูมิต่ำกว่า 1250°C จึงไม่เกิดการบิด เบี้ยวหลังการเผา

วัตถุดิบสำหรับเตรียมเคลือบและสีเซรามิก

เคลือบเซรามิกตามสูตร Segar เราสามารถจำแนกออกไซด์ออกได้เป็น 3 ประเภทคือ

1. Basic oxides: ได้แก่

- 1.1. K₂O: Pearl ash (K₂CO₃)
Potassium nitrate (KNO₃)
Potash feldspar (K₂O.Al₂O₃.6SiO₂)
- 1.2 Na₂O: Soda ash (Na₂CO₃)
Borax (Na₂B₄O₇.10H₂O)
Soda feldspar (Na₂O.Al₂O₃.6SiO₂)
- 1.3 CaO: Whiting (CaCO₃)
Fluorspar (CaF₂)
Colemanite (2 CaO.3B₂O₃.5H₂O)
- 1.4 BaO: Witherite (BaCO₃) or barytes (BaSO₄)
- 1.5 PbO: White lead (2PbCO₃. Pb(OH)₂)
Red lead (Pb₃O₄) Toxic

2. Amphoteric oxide: ได้แก่

- 2.1. Al₂O₃: China clay (Al₂O₃.2SiO₂.2H₂O)
Bauxite (Al₂O₃.2H₂O)
Feldspar

Nepheline syenite (K_2O/Na_2O สูง)

3. Acidic oxides:

- 3.1. SiO_2 : quartz, sand, flint, clay, feldspar
- 3.2. B_2O_3 : Borax ($Na_2B_4O_7 \cdot 10H_2O$)
Boric acid (H_3BO_3)
Colemanite ($2CaO \cdot 3B_2O_3 \cdot 5H_2O$)

วัตถุดิบอื่นๆ ที่เป็นสารอินทรีย์ (Organic)

1. สารอินทรีย์ให้ความเหนียว สามารถเผาแล้วสลายตัวหมดที่อุณหภูมิประมาณ $400-500^\circ C$ โดยต้องไม่ทำปฏิกิริยากับเนื้อดินภายหลังการเผา
2. สารอินทรีย์ชนิดที่ละลายน้ำได้ ใช้กับเนื้อดินที่ผสมน้ำ พอลิเมอร์ที่ขึ้นอยู่บ้างหรือผสมในน้ำดิน น้ำเคลือบ ทำให้ลอยตัวไม่ตกตะกอน เช่น Dextrin, gum Arabic, lignin extract, methyl cellulose, starch
3. สารอินทรีย์ชนิดที่ไม่ละลายน้ำ ใช้ผสมกับเนื้อดินที่ขึ้นรูปด้วยวิธีอัดผงแห้งด้วยแรงดันสูง หรือในเนื้อดินที่ไม่มีความเหนียว เช่น cellulose acetate, methyl ethyl cellulose, tannic acid, ceresin wax

สารที่ใช้หล่อสีระหว่างเนื้อดินและแบบพิมพ์ในการขึ้นรูปแบบอัด ควรจะมีคุณสมบัติดังนี้

1. ต้องไม่ทำลายเนื้อดิน
2. ไม่มีปฏิกิริยาเป็นตัวหลอมละลายหลังเผา
3. ไม่มีรอยต่างหรือเป็นรูหลังเผา

Lubricant ได้แก่ oil, paraffin emulsion, wax emulsion, cellulose acetate สำหรับขึ้นรูปโดยวิธีใช้ความร้อนและแรงดันสูง, กลุ่มสเตียเรท ใช้ผสมในเนื้อดินในรูปวัตถุดิบผง ไม่ละลายน้ำ เช่น magnesium stearate, zinc stearate, barium stearate, aluminium stearate

แบบฝึกหัดท้ายบท

1. ส่วนประกอบในดินต่อไปนี้ มีผลอย่างไรต่อคุณสมบัติทางกายภาพของดิน
 Al_2O_3 , SiO_2 , Na_2O and K_2O , CaO , Fe_2O_3
2. ดินเหนียวที่มีคุณสมบัติที่เหมาะสมในการนำมาผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ไวท์แวร์ควรมีคุณสมบัติอย่างไร

บทที่ 3

การคำนวณและการออกแบบส่วนผสมของเนื้อผลิตภัณฑ์ไวท์แวร์

จากบทที่ 1 เราได้รู้จักเนื้อดินปั้นผลิตภัณฑ์ไวท์แวร์ชนิดต่างๆ แล้ว คุณสมบัติของเนื้อดินปั้นต่างๆ ได้แก่ ความแข็งแรงก่อนเผาและหลังเผา การหดตัวของเนื้อดินปั้น อุณหภูมิในการเผาปิสกิตและเผาเคลือบ การดูดซึมน้ำ ดังแสดงในตาราง

ตาราง 3.1 คุณสมบัติของเนื้อดินประเภทต่างๆ

คุณสมบัติ	เนื้อที่มีรูพรุน	เนื้อกึ่งแก้ว				
	Earthenware	Stone ware	Porcelain hard	Porcelain alumina	Bone china	Vitreous china
ความแข็งแรงก่อนเผา	32-42	50-60	30	30	30	30
การหดตัวก่อนเผา	4.5-6	7	4	4	4.4	4.5
การหดตัวหลังเผา	6-7	8	9	9	8.5	8
ความแข็งแรงหลังเผา	570	950	1200	1400	1200	1100
อุณหภูมิที่เผาปิสกิต	1140	900	900	900	1240	1200
อุณหภูมิที่เผาเคลือบ	1080	1280	1350	1350	1080	1080
% การดูดซึมน้ำ	8	<1	<1	<1	<1	<1

ส่วนผสมของเนื้อดินปั้นแต่ละประเภทสามารถเขียนออกมาได้หลายรูปแบบคือ

1. สูตรผสมโดยน้ำหนัก ตัวอย่างเช่น

Kaolin 38.5%

Ball clay 22.2%

Feldspar 26.2%

Flint 13.1%

2. สูตรผสมโดยเปอร์เซ็นต์แร่ ตัวอย่างเช่น

Clay substance	43.04%
Quartz	26.46%
Feldspar	30.50%

3. สูตรผสมโดยส่วนผสมทางเคมี ตัวอย่างเช่น

SiO ₂	66.71%
Al ₂ O ₃	21.58%
Fe ₂ O ₃	0.47%

4. สูตรผสมโดยสูตร Seger เช่น

RO	R ₂ O ₃	RO ₂
0.36	1	5.24

ส่วนประกอบทางเคมีของเนื้อดินปั้นจะมีผลต่อคุณสมบัติต่างๆของผลิตภัณฑ์ไวท์แวร์ที่ได้ ซึ่งมีความจำเป็นต่อการออกแบบส่วนผสมของผลิตภัณฑ์ไวท์แวร์ เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบหา ส่วนประกอบของแร่ธาตุในเนื้อดินปั้นได้แก่

1. X-ray diffractometer เป็นเครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์หาเฟส ซึ่งเป็นส่วนประกอบในเนื้อดินปั้น
2. Differential thermal analysis-thermal gravitational analysis เป็นเครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์ ทากรเปลี่ยนแปลงของเนื้อดินเมื่อได้รับความร้อน ผลที่วิเคราะห์ได้จะทำให้ทราบพฤติกรรมของดินที่ เกิดขึ้นเมื่อนำไปเผา
3. Scanning electron microscope เป็นเครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์ดูโครงสร้างทางจุลภาคของเนื้อ ดินที่ผ่านการเผาแล้ว
4. Infrared spectroscopy เป็นเครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์หาส่วนประกอบทางเคมี

การคำนวณย้อนกลับจากวัตถุดิบส่วนผสมในเนื้อดินปั้นกลับไปหาสูตร

ตัวอย่างที่ 1 เนื้อดินปอร์ซเลนเผาที่อุณหภูมิ 1300°C มีส่วนผสมของวัตถุดิบดังนี้

Kaolin	50%
Potash feldspar	25%
Quartz	25%

1. น้ำหนักของวัตถุดิบหารด้วยน้ำหนักโมเลกุลของวัตถุดิบนั้น

โมเลกุลของ kaolin = $50 / 258 = 0.194$

โมเลกุลของ Potash feldspar = $25 / 556 = 0.045$

โมเลกุลของ Quartz = $25 / 60 = 0.416$

นำค่าที่คำนวณได้ของวัตถุดิบแต่ละชนิด มากระจายแล้วในตาราง แล้วรวมค่าน้ำหนักทุกตัว

วัตถุดิบ	K ₂ O	Al ₂ O ₃	SiO ₂	H ₂ O
0.1938 Al ₂ O ₃ ·2SiO ₂ ·2H ₂ O	-	0.1938	0.3876	0.3876
0.045 K ₂ O·Al ₂ O ₃ ·6SiO ₂	0.045	0.045	0.2700	-
0.4467 SiO ₂	-	-	0.4167	-
Oxide x M.W.	0.045 x 94	0.2388 x 102	1.0743 x 60	0.3876 x 18
Oxide	4.23	24.36	64.46	6.976

ทั้งหมด = 93.05 กรัม

หาอัตราส่วนร้อยละโดยน้ำหนัก

$$K_2O = (4.23 \times 100) / 93.05 = 4.55\%$$

$$Al_2O_3 = (24.36 \times 100) / 93.05 = 26.18\%$$

$$SiO_2 = (64.46 \times 100) / 93.05 = 69.27\%$$

ในการออกแบบส่วนผสมของเนื้อดินปั้นเซรามิก เราควรจะต้องทราบส่วนประกอบทางเคมีของเนื้อดินปั้น และทราบว่าเราจะใช้วัตถุดิบอะไรบ้าง นอกจากนี้เรายังต้องทราบผลวิเคราะห์ทางเคมีของวัตถุดิบที่เราจะนำมาใช้ผสมเป็นเนื้อดินปั้นด้วย ในการผลิตเซรามิกที่จะต้องปรับปรุงสมบัติของเนื้อผลิตภัณฑ์หรือในการเปลี่ยนวัตถุดิบบางชนิดในส่วนผสม เราต้องมีการคำนวณออกมาเป็นส่วนผสมของเนื้อดินใหม่

ตัวอย่างที่ 2 การคำนวณส่วนผสมของเนื้อดินปั้นที่มีการเปลี่ยนวัตถุดิบบางชนิด

ตาราง 3.2 ลักษณะเฉพาะของดินแหล่งต่างๆที่จะนำมาใช้เป็นเนื้อดินปั้นที่จะสร้างขึ้นใหม่

ส่วนประกอบทางเคมี	ดินเหนียว A	ดินเหนียว B	ดินขาว A	หินฟันม้า A	ฟรินท์ บด	หินฟันม้า B	ดินขาว B
SiO ₂	58.2	61.2	44.6	71.0	100.0	77.5	52.2
Al ₂ O ₃	26.4	24.6	39.1	16.9	-	13.7	35.1
Fe ₂ O ₃	0.98	0.80	0.44	0.08	-	0.25	0.20
TiO ₂	1.22	1.36	1.67	-	-	-	2.20
CaO	0.18	0.13	0.02	0.29	-	0.41	0.05
MgO	0.18	0.10	0.03	-	-	0.13	0.06
K ₂ O	1.10	1.59	0.10	10.03	-	0.18	-
Na ₂ O	0.24	0.35	0.05	2.89	-	6.78	-
LOI	10.98	9.38	13.71	0.29	-	1.27	13.05
% clay	54.6	44.8	97.5	-	-	-	88.8
quartz	27.2	27.4	-	14.8	100	39.6	11.0
Mica	12.3	17.8	1.4	-	-	-	-
Organic	2.8	2.3	-	-	-	-	-
ขนาดอนุภาค (%)							
< 20 μm	96	96	97	83	70	78	93
< 10 μm	88	87	90	63	41	52	87
< 5 μm	79	70	73	41	21	30	71
< 2 μm	60	46	48	21	5	11	49
< 1 μm	49	30	31	10	-	2	38
<0.5 μm	37	18	17	1	-	-	22
<0.2 μm	24	7	7	-	-	-	10
CEC (meq.MB/100g.)	7.9	5.4	2.3	-	-	-	2.5

ตาราง 3.3 ลักษณะเฉพาะของเนื้อดินปั้นมาตรฐานเดิม

ส่วนประกอบทางเคมี	ดินเหนียว A	ดินเหนียว B	ดินขาว A	หินฟันม้า A	พรินท์ บด	เนื้อดิน ปั้น
% wt	16.39	15.26	24.39	27.13	16.83	100.0
SiO ₂	9.6	9.3	10.9	19.3	16.8	65.8
Al ₂ O ₃	4.3	3.8	9.5	4.6	-	22.2
Fe ₂ O ₃	0.16	0.12	0.11	0.02	-	0.41
TiO ₂	0.20	0.21	0.41	-	-	0.82
CaO	0.03	0.02	-	0.08	-	0.13
MgO	0.03	0.02	-	-	-	0.05
K ₂ O	0.18	0.24	0.02	2.72	-	3.16
Na ₂ O	0.04	0.05	0.01	0.78	-	0.88
LOI	1.80	1.43	3.34	0.08	-	6.65
% clay	8.9	6.8	24.0	-	-	39.7
quartz	4.5	4.2	-	4.0	16.8	29.5
mica	2.0	2.7	0.3	-	-	5.0
Organic	0.5	0.4	-	-	-	0.9
ขนาดอนุภาค						
% < 20 μm	16	15	23	22	13	89
< 10 μm	14	13	22	17	9	75
< 5 μm	13	11	18	11	5	58
< 2 μm	10	7	12	6	2	37
< 1 μm	8	5	8	3	-	24
< 0.5 μm	6	5	4	-	-	15
< 0.2 μm	4	1	1	-	-	7
CEC (meq.MB/100g.)	1.3	0.8	0.6	-	-	2.7

ปัญหา 1: โรงงานผลิตไวท์แวร์ต้องการเปลี่ยนส่วนผสมของเนื้อดินปั้น จากตารางที่ 3.3 โดยการแทนที่ หินฟันม้า A ด้วยหินฟันม้า B เนื่องจากหินฟันม้า B ราคาถูกกว่า และโรงงานต้องการลดต้นทุนการผลิต (ส่วนประกอบทางเคมีของหินฟันม้า A และ B แสดงในตารางที่ 3.2 โดยให้ส่วนผสมทางเคมีของเนื้อดินปั้นไม่มีการเปลี่ยนแปลง

เฉลย:

ตาราง 3.4 ลักษณะเฉพาะของเนื้อดินปั้นเมื่อมีการแทนที่หินฟันม้า A ด้วยหินฟันม้า B

ส่วนประกอบทางเคมี	ดินทั้งหมด	หินฟันม้า B	ฟรินท์บด	เนื้อดินปั้น
% wt	55.72	35.28	8.84	99.9
SiO ₂	29.7	27.3	8.8	65.9
Al ₂ O ₃	17.6	4.8	-	22.4
Fe ₂ O ₃	0.39	0.09	-	0.48
TiO ₂	0.82	-	-	0.82
CaO	0.05	0.14	-	0.19
MgO	0.05	0.05	-	0.10
K ₂ O	0.44	0.06	-	0.50
Na ₂ O	0.10	2.39	-	2.49
LOI	6.57	0.45	-	7.02
% clay	39.5	-	-	39.5
quartz	8.7	13.9	8.8	31.4
mica	5.0	-	-	5.0
Organic	0.9	-	-	0.9
ขนาดอนุภาค				
% < 20 µm	55	27	6	88
< 10 µm	49	18	4	71
< 5 µm	42	11	2	55
< 2 µm	29	4	1	34
< 1 µm	21	1	-	22
< 0.5 µm	15	-	-	15
< 0.2 µm	7	-	-	7
CEC (meq.MB/100g.)	2.7	-	-	2.7

ปัญหา 2: จากเนื้อดินส่วนผสมใหม่ นำมาปรับส่วนผสมใหม่ โดยแทนดินขาว A ด้วยดินขาว B (จากตาราง 3.2)

ตาราง 3.5 แสดงการปรับปรุงเนื้อดินปั้นที่สร้างใหม่ โดยเปลี่ยนจากดินขาว A เป็นดินขาว B

การปรับ ลด/เพิ่ม	ปริมาตร ณที่ใช้	ส่วนประกอบทางเคมี			ส่วนประกอบทางแร่				< 1 µm	CEC
		SiO ₂	Al ₂ O ₃	KNaO	clay	Quartz	mica	Org.		
ดิน	+55.72	+29.7	+17.6	+0.54	+39.5	+8.7	+5.0	+0.9	21	2.7
1) ลดดินขาว A	-24.39	-10.9	-9.5	-0.03	-23.8	-	-0.3	-	-8	-0.6
เหลือ	31.33	18.8	8.1	0.46	15.7	8.7	4.7	0.9	13	2.1
2) เติมดินขาว B	+27.07	+14.1	+9.5	+0.05	+24.0	+3.0	-	-	10	0.7
เหลือ	58.4	32.9	17.6	0.51	39.7	11.7	4.7	0.9	23	2.8
3) ลดดินเหนียว B	-2.68	-1.7	-0.7	-0.05	-1.2	-0.7	-0.5	-0.1	-1	-0.1
เหลือ	55.72	31.2	16.9	0.46	38.5	11	4.2	0.8	22	2.7
4) ลดดินเหนียว A	-5.00	-2.9	-1.3	-0.06	-2.7	-1.4	-0.1	-0.1	-2	-0.4
เหลือ	50.72	28.3	15.6	0.4	35.8	9.6	4.1	0.7	20	2.3
5) เติมดินขาว B	+5.00	+2.6	+1.8	-	+4.4	+0.6	-	-	2	0.2
เหลือ	55.72	30.9	17.4	0.40	40.2	10.2	4.1	0.7	22	2.5
6) เติมหินฟันม้า	+44.06	+36.1	+4.8	+2.45	-	+22.7	-	-	-	-
เหลือ	99.78	67.0	22.2	2.85	40.2	32.9	4.1	0.7	22	2.5
7) ลดฟรินท์	-2.00	-2.0	-	-	-	-2.0	-	-	-	-
เหลือ	97.78	65.0	22.2	2.85	40.2	30.9	4.1	0.7	22	2.5
8) เติมดินเหนียว A เพื่อเพิ่มค่า CEC	+2.00	+1.1	+0.5	+0.03	+1.0	+0.5	+0.4	+0.1	1	0.2
เหลือ	99.78	66.1	22.7	2.88	41.2	31.4	4.5	0.8	23	2.7

หมายเหตุ เครื่องหมาย +/- หน้าตัวเลข หมายถึง การเพิ่ม / การลดปริมาณวัตถุดิบนั้นๆ ในส่วนผสมรวม

ตาราง 3.6 ส่วนผสมวัตถุดิบและลักษณะของเนื้อดินปั้นที่สร้างขึ้นใหม่

ส่วนประกอบทางเคมี	ดินเหนียว A	ดินเหนียว B	ดินขาว B	หินฟันม้า B	ฟรินท์	เนื้อดินปั้น
% wt	13.39	12.58	32.07	35.22	6.84	100.1
SiO ₂	7.8	7.7	16.7	27.3	6.8	66.3
Al ₂ O ₃	3.5	3.1	11.3	4.8	-	22.7
Fe ₂ O ₃	0.13	0.10	0.06	0.09	-	0.38
TiO ₂	0.16	0.17	0.71	-	-	1.04
CaO	0.02	0.02	0.02	0.14	-	0.20
MgO	0.02	0.01	0.02	0.05	-	0.10
K ₂ O	0.15	0.20	-	0.06	-	0.41
Na ₂ O	0.03	0.04	-	2.39	-	2.46
LOI	1.47	1.18	4.18	0.45	-	7.28
% clay	7.3	5.6	28.5	-	-	41.4
quartz	3.7	3.4	3.5	13.9	6.8	31.3
mica	1.8	2.4	-	-	-	4.2
Organic	0.4	0.3	-	-	-	0.7
ขนาดอนุภาค						
% < 20 μm	13	12	30	27	5	87
< 10 μm	12	11	29	18	3	73
< 5 μm	11	9	23	11	1	55
< 2 μm	8	6	16	4	-	34
< 1 μm	7	4	12	1	-	23
< 0.5 μm	5	2	7	-	-	14
< 0.2 μm	3	1	3	-	-	7
CEC (meq.MB/100g.)	1.1	0.7	0.8	-	-	2.6

แบบฝึกหัดท้ายบท

1. เนื้อดินนี้มีส่วนประกอบทางเคมีดังนี้

SiO₂ 68.2% Al₂O₃ 24.6% K₂O 1.8% Na₂O 1.8%

ให้คำนวณหาส่วนผสมของวัตถุดิบ วัตถุดิบที่มีคือ โฟแทสเฟดสปาร์ โซดาเฟดสปาร์ ดินขาว และ ฟรินต์ กำหนดให้ น้ำหนักโมเลกุลของสารประกอบคือ SiO₂ = 60, Al₂O₃ = 102, K₂O = 94,

Na₂O = 62, H₂O = 18, Fe₂O₃ = 160, TiO₂ = 80, MgO = 40, CaO = 56

2. ผลวิเคราะห์ทางเคมีของดินสำปามีดังนี้

SiO₂ 77.8%

Al₂O₃ 15%

CaO 0.1%

MgO 0.2%

K₂O 2.7%

Na₂O 0.4%

LOI 3.2%

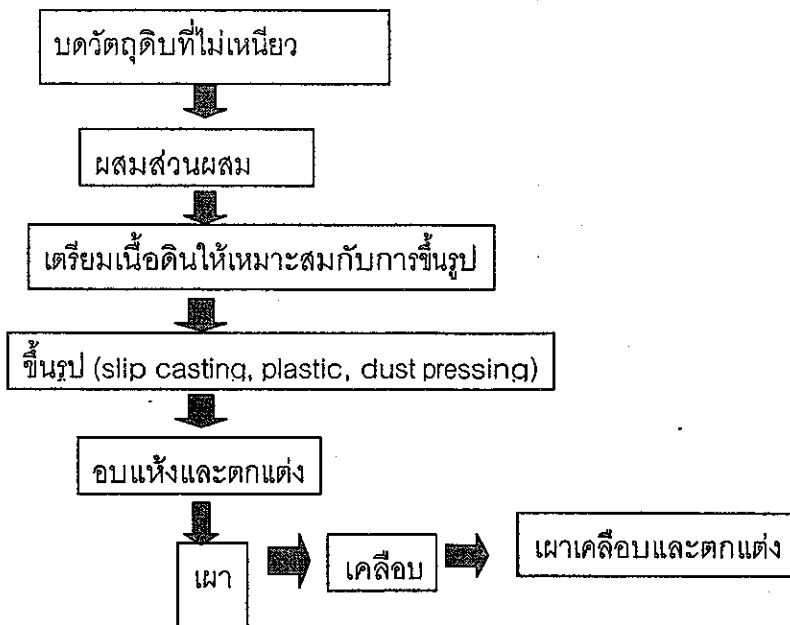
คำนวณหาปริมาณมวลโคไวท์ไม่ก้ำ , พาราโกไนท์, อัลไบต์ (Albite), Kaolinite และ quartz

บทที่ 4

ขบวนการผลิตในอุตสาหกรรมผลิตไวท์แวร์

ขั้นตอนการผลิตไวท์แวร์ สามารถแบ่งได้เป็นขั้นตอนใหญ่ๆ ได้ดังนี้

1. การเตรียมเนื้อดินเพื่อจะขึ้นรูป
2. การขึ้นรูปผลิตภัณฑ์เซรามิก
3. ขบวนการอบและการเผาผลิตภัณฑ์
4. การตกแต่งผลิตภัณฑ์

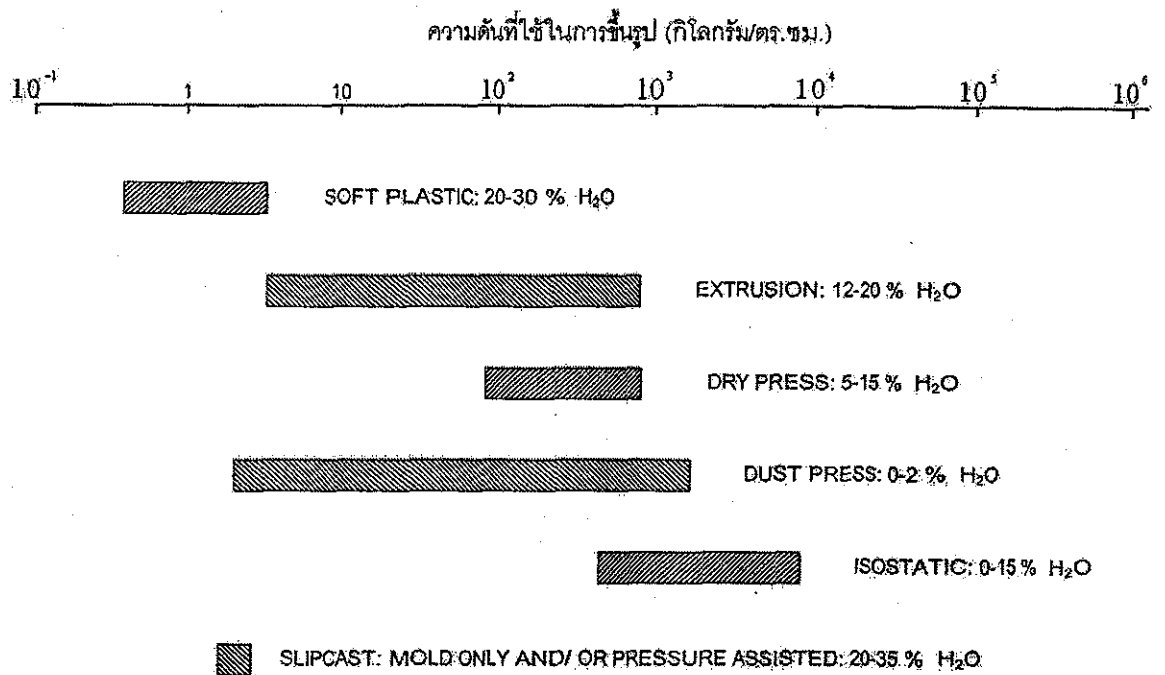


รูป 4.1 แผนภาพแสดงการผลิตไวท์แวร์

ก่อนที่จะผลิตไวท์แวร์ ต้องมีการพิจารณาว่าผลิตภัณฑ์ที่ต้องการมีรูปร่าง ขนาด อย่างไร ซึ่งจะ
ทำให้ขบวนการในขึ้นรูปผลิตภัณฑ์แตกต่างกัน ดังนั้นก่อนที่จะขึ้นรูปผลิตภัณฑ์เซรามิกจะต้องเตรียม
เนื้อดินให้เหมาะสมกับขบวนการขึ้นรูป ในการขึ้นรูปต้องคำนึงถึงความเหนียวของเนื้อดิน ความเหนียว

ของเนื้อดินขึ้นอยู่กับปริมาณน้ำที่มีอยู่ในเนื้อดินปั้น ดังรูป 4.2 ในการเตรียมเนื้อดินเพื่อขึ้นรูปแบ่งออกได้เป็น

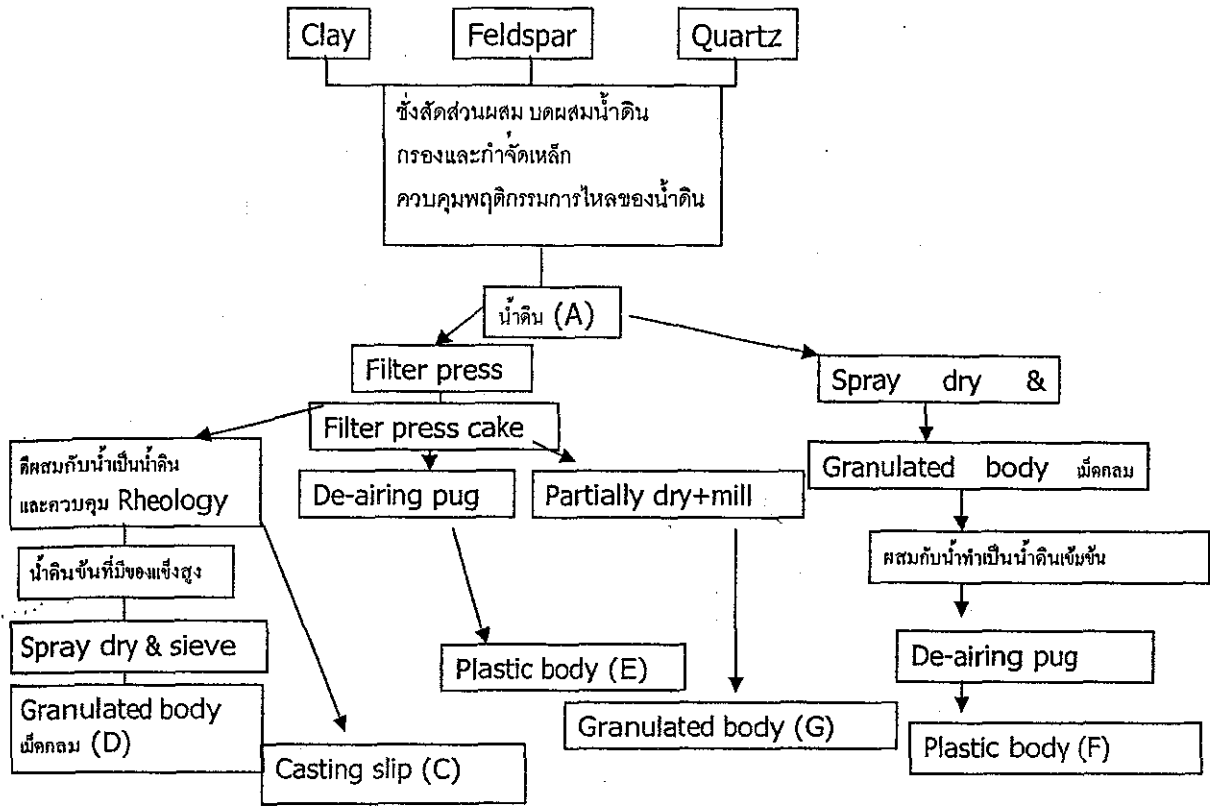
1. การขึ้นรูปโดยน้ำดินเหลว
2. การขึ้นรูปด้วยดินเหนียว
3. การขึ้นรูปด้วยดินผงชื้น
4. การขึ้นรูปด้วยผงดินแห้ง



รูป 4.2 วิธีการขึ้นรูปต่างๆ ที่ใช้ปริมาณน้ำและความดันที่แตกต่างกัน

ตาราง 4.1 การขึ้นรูปของเนื้อผลิตภัณฑ์ชนิดต่างๆ

กระบวนการขึ้นรูป	การขึ้นรูป	
	ความดัน (Kg/cm ²)	% น้ำ
Slip casting (sanitary wares, Hotel china)	Hydrostatic	25-30
Soft plastic (Hotel china)	0.35-3.5	12-25
Hard plastic (high MOR porcelain)	3.5-700	15-20
Dry press (Wall tile)	70-100	5-10



รูป 4.3 แผนภาพแสดงการเตรียมเนื้อดินสำหรับการขึ้นรูปด้วยวิธีต่างๆ

ตาราง 4.2 เนื้อดิน ขบวนการเตรียมเนื้อดิน และประเภทของผลิตภัณฑ์ จากรูป 4.3

เนื้อดิน	ขบวนการเตรียม	ผลิตภัณฑ์
สลิป	กรองแบบอัดและกวนผสม (C)	ถ้วยชามและสุขภัณฑ์
	เตรียมจากวัตถุดิบโดยตรง	สุขภัณฑ์
พลาสติก	กรองแบบอัดและ pug (E)	ถ้วยชามและฉนวนไฟฟ้าแรงสูง
	เตรียมโดยตรงจากวัตถุดิบที่บริสุทธิ์แล้ว	ถ้วยชาม
	แห้งสเปร์ย์ และผสมอย่างทั่วถึง (F)	ถ้วยชาม
เม็ดดิน	กรองแบบอัด ทำให้แห้งแล้วบด (G)	กระเบื้องและฉนวนไฟฟ้าแรงสูง
	ทำแห้งสเปร์ย์ (B)	ถ้วยชาม
	ทำแห้งสเปร์ย์ (D)	กระเบื้องและถ้วยชาม

ในการขึ้นรูปเพื่อผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ไวท์แวร์ นิยมทำการขึ้นรูปโดยการเทแบบหล่อ (slip casting) ขึ้นรูปโดยใช้ดินเหนียว หรือการขึ้นรูปโดย ram press ในการเตรียมเนื้อดิน มีขั้นตอนดังนี้

1. การบดย่อยวัตถุดิบ
2. การบดละเอียดวัตถุดิบ
3. การนำวัตถุดิบมาเตรียมเป็นเนื้อดินปั้นซึ่งขึ้นอยู่กับกระบวนการขึ้นรูป ได้แก่ การเตรียมเนื้อดินแบบแห้ง การเตรียมเนื้อดินแบบกึ่งเปียก ซึ่งเหมาะในการขึ้นรูปแบบ Plastic forming โดยใช้ Extrude, jigger, roller head, ram press การเตรียมเนื้อดินแบบเปียก การเตรียมผงดินโดยวิธี spray dryer

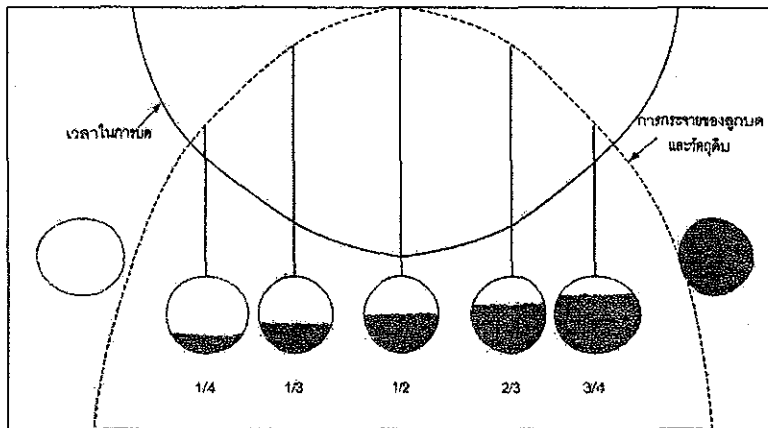
การบดย่อยวัตถุดิบ แบ่งออกเป็น

1. Primary crushing เป็นการบดแร่จากที่มีขนาดใหญ่ให้มีขนาดเล็กลงประมาณ 5 มิลลิเมตร เครื่องบดประเภทนี้ได้แก่ Jaw crusher, Cone crusher, Gyratory crusher, Hammer mill

2. Secondary crushing เป็นการบดต่อจากการบดย่อยขั้นตอนแรก ให้มีขนาดที่ละเอียดมากขึ้น เครื่องบดบางชนิดสามารถบดได้ละเอียดถึงเล็กกว่า 200 เมช เครื่องบดประเภทนี้ได้แก่ Muller mill/edge runner mill และ roller mill

Ball mill การบดที่เป็นการบดละเอียดมาก โดยขนาดอนุภาคที่ผ่านการบดผ่านตะแกรง 100 เมช และเป็นการผสมส่วนผสมต่างๆให้เข้าเป็นเนื้อเดียวกันได้ดีที่สุด ตัวแปรที่สำคัญของการบดด้วย Ball mill ได้แก่

1. ความเร็วของหม้อบด ลูกบดจะกลิ้งไปตามความเร็วของหม้อบด ทำให้เกิดการเสียดสีกับ วัสดุบดที่อยู่ภายใน ทำให้วัสดุบดถูกบดให้เล็กลง
2. ปริมาณของลูกบด ทำได้โดยการคำนวณจากปริมาณของหม้อบด จากการทดลองจะเห็นว่าช่วงที่มีระดับลูกบดเท่ากับครึ่งหนึ่งของปริมาณหม้อบด จะเป็นช่วงที่ใช้เวลาการบดน้อยที่สุด และให้การกระจายตัวดีที่สุด ดังนั้นปริมาตรลูกบดที่ใช้ควรอยู่ในช่วง 50-55 เปอร์เซ็นต์ ของปริมาณหม้อบด



รูป 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณลูกบดในหม้อบดต่อเวลาในการบดและการกระจายของวัสดุบด [3]

ลูกบดที่ใส่เท่ากับ 55% ของปริมาตรหม้อบด แต่ส่วนที่เป็นปริมาตรเฉพาะของลูกบดจะเป็น 60% ของปริมาตรที่ปรากฏ

** ปริมาตรของลูกบดที่อยู่ในหม้อบด = $0.55 \times 60\% = 33\%$

** ปริมาณการเติมลูกบด = ปริมาตรหม้อบด $\times 0.55 \times 60\% \times$ ความหนาแน่นของลูกบด

$$= \text{ปริมาณหม้อบด} \times 33\% \times \text{ความหนาแน่นของลูกบด}$$

ปริมาตรของช่องว่างระหว่างลูกบดในหม้อบด หาได้จากการหักลบปริมาตรที่ 55% ของปริมาตรหม้อบด กับปริมาตรของลูกบดที่อยู่ในหม้อบด = (55%- 33%) (Mill volume) = 22% mill volume

**ปริมาตรที่ใช้ในการบดผสม คือ ปริมาตรที่เป็นช่องว่างระหว่างลูกบดและส่วนที่เหลือ ที่สามารถจะใส่วัตถุดิบลงไปได้ แต่ต้องมีช่องว่างเพื่อให้เกิดการบด 25% ของปริมาตรหม้อบด = (22% + 25%)(mill volume) = 47% Mill volume

3. ขนาดและสัดส่วนของลูกบดเมื่อเทียบกับขนาดของหม้อบด

4. ชนิดของลูกบด ได้แก่ Pebble stone, Alumina ball, Porcelain ball, Steatite ball, Zirconia ball, Silicon nitride ball ดังแสดงในตาราง 4.3 ในการเลือกลูกบดให้เหมาะสมกับวัตถุดิบที่จะบด ควรคำนึงถึงความต้านทานต่อการสึกกร่อน ซึ่งจะทำให้เกิดการสึกหรอของหม้อบดและลูกบด และก่อให้เกิดการปนเปื้อนไปในส่วนผสมที่ทำการบดด้วย ความหนาแน่นของลูกบดมากจะทำให้มีประสิทธิภาพในการบดสูง แต่ลูกบดจะมีราคาแพง

ตาราง 4.3 เปรียบเทียบลูกบดชนิดต่างๆ

ชนิดของลูกบด	ความต้านทานต่อการสึกกร่อน	ราคา	ความหนาแน่น	ประสิทธิภาพการบด
Pebble	ต่ำ	ถูกมาก	2.6	ต่ำ
Alumina	สูง	แพง	3.8	สูง
Porcelain	ปานกลาง	ถูก	2.65	ต่ำ
Steatite	ปานกลางถึงสูง	ปานกลาง	2.8-2.9	ปานกลาง
zirconia	สูงมาก	แพงมาก	5.9-6.1	สูงมาก

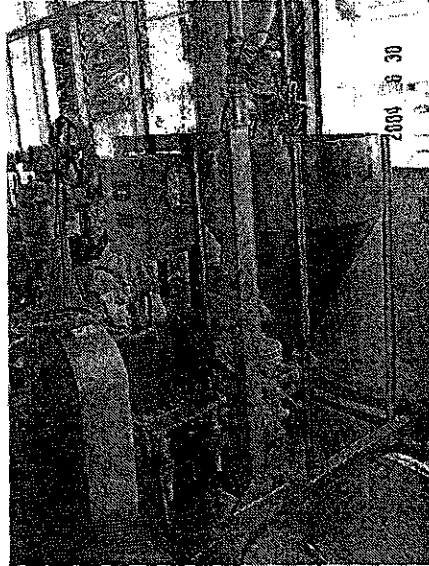
5. ชนิดของวัตถุดิบและตัวกลางที่ใช้บด

6. สัดส่วนของวัตถุดิบและตัวกลาง (Consistency of the material)

7. ขนาดอนุภาคเริ่มต้น และขนาดของอนุภาคที่ผ่านการบดแล้ว เช่น เกือบตัวอย่างของวัตถุบดที่ผ่านตะแกรง ซึ่งทรายและหินพื้นม้า ควรจะผ่าน 100 เมช ส่วนดินขาวล้างควรจะผ่าน 120 เมช ดินเหนียวขาวล้างควรจะผ่าน 200 เมช
8. ความหนืดและความต้วงจำเพาะของน้ำดิน ควรจะมีความเหมาะสม ความต้วงจำเพาะของดิน ในการบดนั้นจะบดให้มีความหนาแน่นสูงกว่าความหนาแน่นที่ต้องการใช้งานประมาณ 5-10% และหลังจากที่น้ำดินออกมาแล้วอาจมีการเติมน้ำลงไปบ้าง ความต้วงจำเพาะของน้ำดินนี้สัมพันธ์กับความหนืดด้วย
9. สารช่วยในการกระจายตัว (deflocculant) ในการบดผสมเพื่อให้การบดมีประสิทธิภาพมาก จะมีการเติมสารช่วยให้วัตถุบดต่างๆกระจายตัวได้ดี โดยสิ่งที่ต้องคำนึงถึงในการเลือกสารช่วยกระจายตัวได้แก่ ประสิทธิภาพของสาร ที่มีผลต่อการไหลตัวของน้ำสลิป เช่นความหนาแน่นและ thixotropy ราคาของสารเมื่อเทียบกับปริมาณที่เติมลงในสูตร ความสะดวกในการใช้งานและการเก็บรักษา ผลข้างเคียงที่ทำให้เกิดตำหนิในผลิตภัณฑ์
10. ปริมาณของวัตถุบดที่จะบด ซึ่งจะเป็นวิธีการในการขนส่งวัตถุบดเข้าสู่หม้อบด ได้แก่ Batch loading เป็นการผสมและบดเป็นครั้งๆ ซึ่งต้องคำนึงถึงลำดับในการเติมวัตถุบด สารช่วยกระจายตัวและน้ำ เพื่อให้มีประสิทธิภาพในการบดสูงสุด และ Continuous loading เป็นการบดผสมแบบต่อเนื่อง ใช้ในการบดวัตถุบดที่มีปริมาณมากๆ

จากแผนภาพในการเตรียมเนื้อดิน นอกจากการบดแล้ว ยังมีเครื่องมืออื่นๆ อีกที่ใช้ในการเตรียมเนื้อดิน เช่น

1. เครื่องแยกเหล็ก (magnetic separator) ใช้ในการแยกออกไซด์ของเหล็ก (Fe_2O_3) ที่ทำให้เกิดจุดดำหรือลดความขาวของผลิตภัณฑ์ได้
2. เครื่องไฮโดรไซโคลน (hydrocyclone) ใช้ในการแยกอนุภาคที่มีความละเอียดมากๆ โดยใช้หลักการแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง ขนาดของโคนมีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 6 นิ้ว โดยใช้ความดันในการอัดน้ำดินเข้าไปประมาณ 33 psi และสามารถแยกอนุภาคที่มีขนาดประมาณ 30-40 ไมครอนได้ ขนาดของโคนเล็กจะใช้ในการแยกอนุภาคที่มีขนาดเล็ก



รูป 4.5 เครื่องแยกขนาดอนุภาคไฮโดรไซโคลน



รูป 4.6 เครื่องกวนดิน (Blunger)



รูป 4.7 เครื่องกวนผสมเร็ว (rapid-mixer)

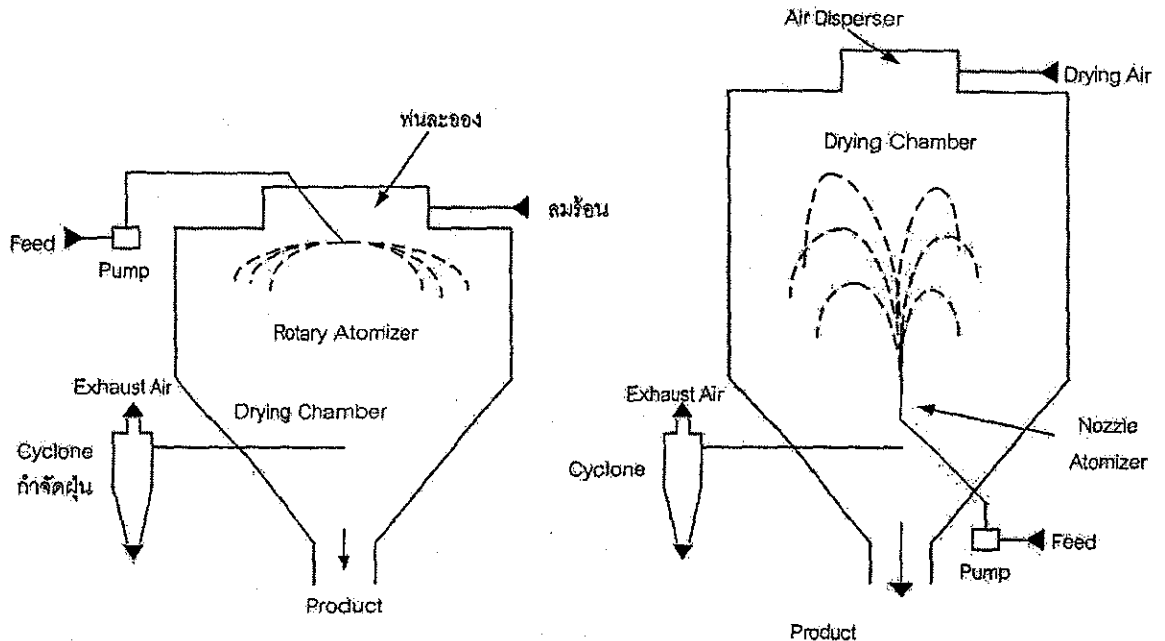
5. เครื่องอัดน้ำออกจากดิน (Filter press) ซึ่งเป็นเครื่องที่ทำให้ดินเหลวชั้นที่มีน้ำประมาณ 50% รีดน้ำออก แล้วนำไปผ่านเครื่องนวดดินแบบสุญญากาศ เพื่อนำไปขึ้นรูปต่อด้วยจิกเกอร์ริง



รูป 4.8 เครื่องรีดน้ำออกจากน้ำดิน (Filter Press)

6. เครื่องเตรียมเม็ดดิน (Spray drying) เป็นเครื่องที่ใช้ในการพ่นน้ำดินให้เป็นฝอย แล้วผ่านความร้อนสูงเพื่อให้น้ำระเหยออกไป แรงตึงผิวของน้ำจะดึงให้อนุภาคของดินจับตัวกันได้เป็นก้อนกลมเล็กๆ เพื่อนำไปขึ้นรูปต่อโดยการอัด เครื่อง spray dryer มีสองลักษณะคือ Counter-current flow: โดยการ

อัดน้ำดินด้วยความดันสูงผ่านรูเปิดเล็กๆเพื่อให้ น้ำดินแตกออกเป็นฝอยเล็กๆ โดยทิศทางของน้ำดินที่พ่นออกมาสวนทางกับลมร้อน และแบบ Co-current flow: เป็นเครื่องพ่นน้ำดินผ่านจานหมุนความเร็วสูงทำให้ น้ำดินกระจายออกเป็นฝอยเล็ก ๆ และทิศทางของน้ำดินที่พ่นออกมาจะไปในทิศทางเดียวกับลมร้อนที่พ่นลงมา ดังรูป



รูป 4.9 Spray Dryer

การเตรียมเนื้อดิน

ในการเตรียมเนื้อดิน วัตถุดิบที่นำมาผสมควรจะมีขนาดอนุภาคพอเหมาะ นั่นคือ

ควอทซ์หรือซิลิกา ผ่าน 300 เมช

เฟลด์สปาร์ ผ่าน 200 เมช

ดินที่ผ่านการล้าง ผ่าน 325 เมช

โดยทั่วไปวัตถุดิบที่นำมาผสม จะมีความชื้นอยู่ไม่แน่นอน ดังนั้นในการชั่งส่วนผสมจะต้องรู้ความชื้นของวัตถุดิบก่อน การหาค่าความชื้นของวัตถุดิบ คือ (น้ำหนักวัตถุดิบเปียก - น้ำหนักวัตถุดิบแห้ง) / น้ำหนักวัตถุดิบแห้ง x 100

ตัวอย่างการคำนวณ

วัตถุดิบตัวอย่าง 100 กรัม

อบแห้งที่	110-150°C
น้ำหนักแห้ง	88 กรัม

ดังนั้น ความชื้นของวัตถุดิบ = $(100-88)/88 \times 100 = 13.6\%$

หรือน้ำหนักวัตถุดิบแห้ง 1 กิโลกรัม ต้องชั่งวัตถุดิบมา 1.136 กรัม

ดังนั้นควรมีการตรวจสอบความชื้น เป็นระยะๆ ก่อนชั่งวัตถุดิบทุกครั้ง โดยทั่วไปโรงงานอาจซื้อวัตถุดิบสำเร็จรูปมา ซึ่งจะบรรจุในถุงพลาสติกมา ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการเช็คความชื้นเป็นระยะๆ ก่อนทั้งส่วนผสม

กระบวนการขึ้นรูป

1. การขึ้นรูปด้วยดินที่มีความเหนียว

1.1 การขึ้นรูปด้วยปั้นหมุน (wheel throwing)

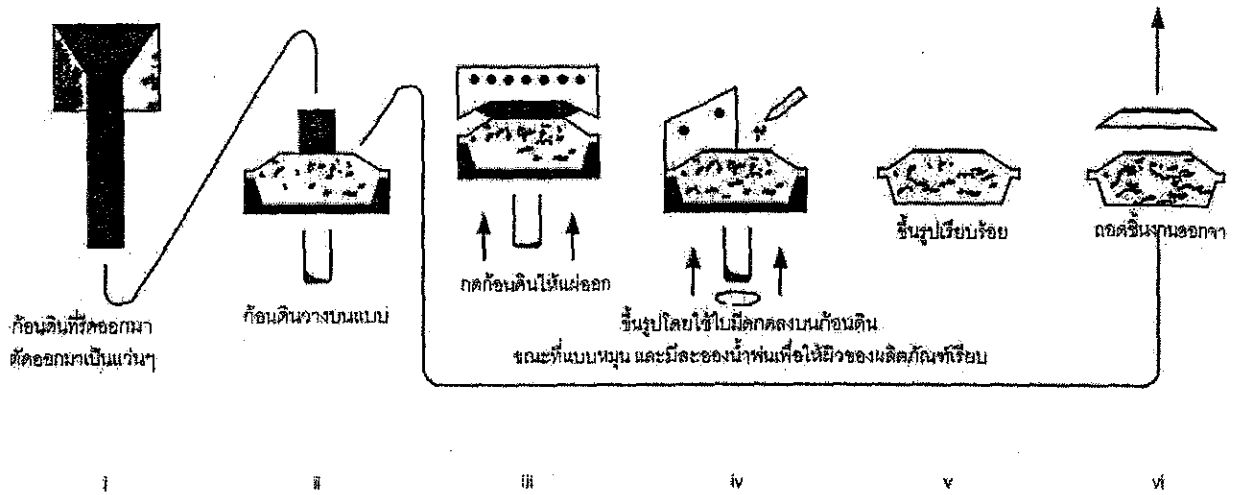
เป็นการขึ้นรูปโดยใช้ฝีมือช่างที่มีประสบการณ์ โดยกอบดินให้เป็นก้อน หรือเป็นขดแล้วนำมาต่อกัน แล้วจึงค่อยๆ ขึ้นรูปเป็นรูปทรงที่ต้องการโดยใช้ปั้นหมุน ปริมาณน้ำหรือความชื้นในดินประมาณ 22-25%

1.2 การขึ้นรูปโดยใช้จิกเกอร์และจอลลี่ (Jiggering and jollying)

จิกเกอร์เป็นการขึ้นรูปโดยใช้แบบพิมพ์ปูนปลาสเตอร์โค้งนูนเป็นรูปจานคว่ำ และใบมีดของแผ่นโลหะเป็นรูปด้านนอกของก้นจานหรือภาชนะนั้นๆ

จอลลี่เป็นการขึ้นรูปโดยใช้พิมพ์ปลาสเตอร์ที่เป็นพิมพ์เว้าลงลึก และใบมีดแผ่นโลหะ เป็นรูปตัดด้านใน เช่นถ้วยกาแฟ กระถาง ชามก้นลึก

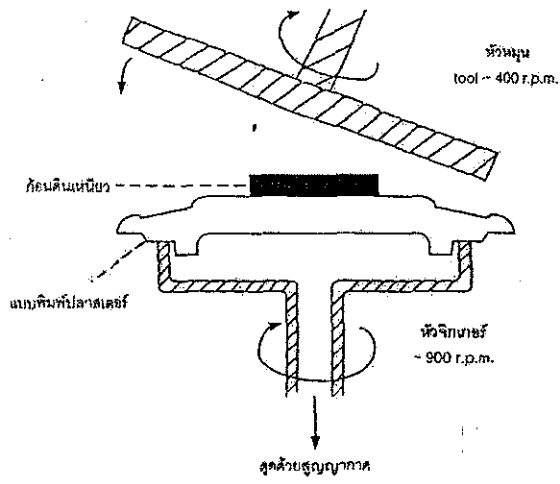
ในการขึ้นรูปแบบนี้จะมีดินส่วนเกินประมาณ 25% ของการขึ้นรูป จิกเกอร์และจอลลี่เป็นการขึ้นรูปโดยใช้มือออกแรงกดใบมีดที่มีพิมพ์ปลาสเตอร์หมุนด้วยความเร็วรอบ 300-400 รอบ/นาที อย่างไรก็ตามความเร็วรอบของจิกเกอร์ขึ้นอยู่กับความเหนียวของเนื้อดินและขนาดของชิ้นงาน แบบพิมพ์ปลาสเตอร์มีความพรุนตัวประมาณ 30% และมีการดูดซึมน้ำเท่ากันตลอดทั้งชิ้น เมื่อการดูดซึมน้ำไม่เท่ากันจะทำให้เกิดการแห้งของเนื้อดินไม่สม่ำเสมอและจะทำให้เกิดการโค้งงอ หรือบิดเบี้ยวของผลิตภัณฑ์ได้ เช่นที่ขอบจานแห้งเร็วกว่าส่วนกลางควบคุมได้โดยการทาน้ำมันที่พิมพ์ปลาสเตอร์บริเวณขอบจานเพื่อให้มีการดูดซึมน้ำน้อยลง แก้ปัญหาการบิดเบี้ยวหรือแตกร้าวที่ก้นจานได้ อายุการใช้งานของแบบประมาณ 190-200 ครั้ง



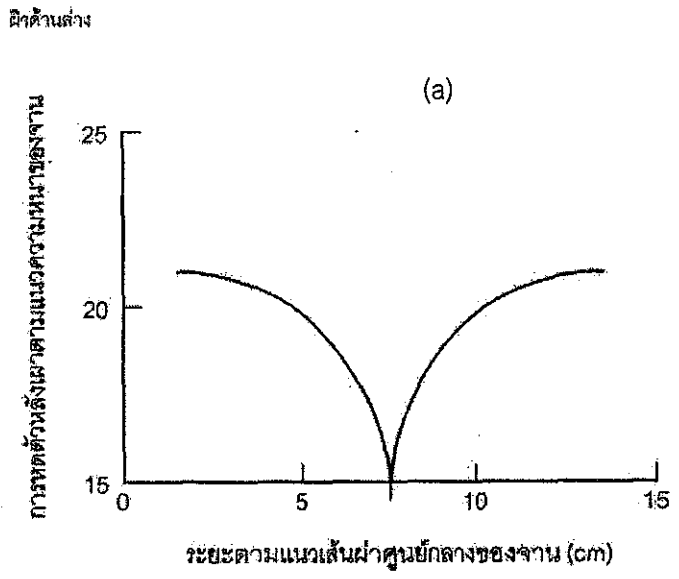
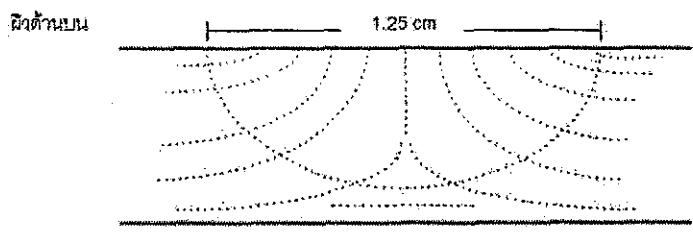
ลำดับขั้นตอนการขึ้นรูปด้วย Miller jigger
รูป 4.10 การขึ้นรูปด้วยจิกเกอร์

1.3 การขึ้นรูปด้วยโรลเลอร์แมนชีน (Roller machine)

เป็นกระบวนการขึ้นรูปเร็วกว่าจิกเกอร์ แม่พิมพ์ด้านล่างถูกดูดด้วยสุญญากาศ แม่พิมพ์จะหมุนด้วยความเร็วรอบประมาณ 500 รอบต่อนาที หัวโรลเลอร์มีรอบหมุนประมาณ 400 รอบต่อนาที โดยตั้งอุณหภูมิให้หัวหมุนร้อน 90-110 °C อุณหภูมิของหัวหมุนต้องควบคุมให้เท่ากัน โดยความเร็วรอบของหัวหมุนและแบบพิมพ์จะต้องมีความสัมพันธ์กัน แบบพิมพ์พลาสติกค่อนข้างแข็ง มีอัตราส่วนของน้ำน้อยกว่าพิมพ์จิกเกอร์ในการขึ้นรูปแบบนี้ใช้เนื้อดินมากกว่าน้ำหนักผลิตภัณฑ์ประมาณ 25% ของน้ำหนักผลิตภัณฑ์ เนื้อดินมีความละเอียดผ่านการบดและนวดด้วยเครื่องสุญญากาศมาแล้ว มีความละเอียดมากกว่าน้ำดินหล่อเพื่อเพิ่มความเหนียว และต้องมีการควบคุมความชื้นของดิน.



รูป 4.11 การขึ้นรูปด้วยโรลเลอร์แมชชีน



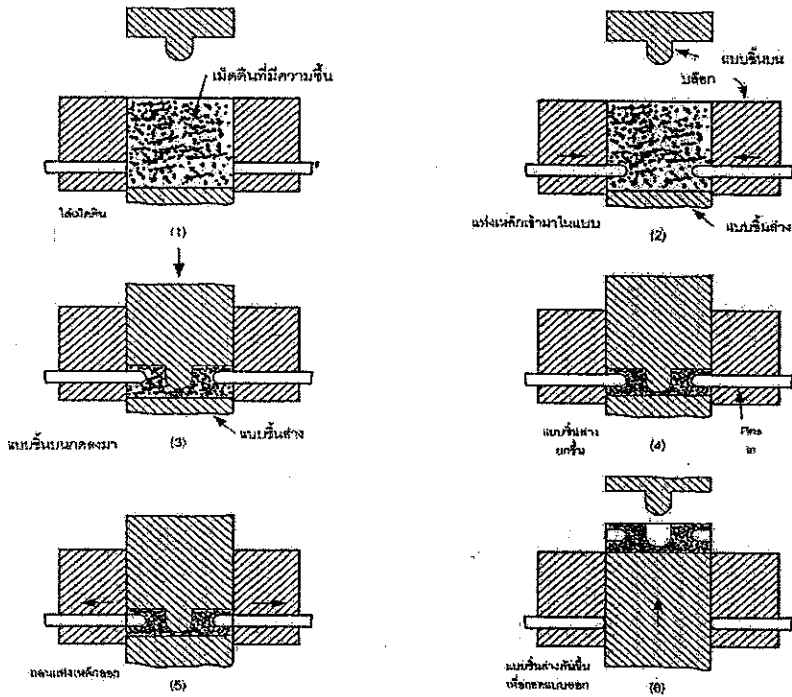
รูป 4.12 (a) ต่ำหนีแบบ center pip, (b) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวตามความหนาของจาน และระยะตามเส้นผ่านศูนย์กลางของจาน

ในการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ด้วยวิธีโรลเลอร์เฮด จะพบว่าผลิตภัณฑ์ที่ได้อาจมีรอยหยัก หรือรอย ร้าวที่ก้นผลิตภัณฑ์ได้ เราเรียกว่า Center pip fault (รูป 4.12(a)) ซึ่งเกิดจากการจัดเรียงตัวของเนื้อดิน ที่ไม่สม่ำเสมอ ทำให้เกิดการหดตัวไม่เท่ากัน จากรูป 4.12 (b) เป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างการ หดตัวตามความหนาของจาน และระยะตามเส้นผ่านศูนย์กลางของจาน พบว่าตรงกลางของจานมีการ หดตัวลดลงจากขอบและหดตัวน้อยที่สุดที่ตรงกลางของจาน เนื่องมาจากการเรียงตัวของอนุภาคดินที่ ไม่สม่ำเสมอ อนุภาคของดินมีลักษณะเป็นแผ่น และจะมีการจัดเรียงตัวตามทิศทางของแรงที่กระทำ ในการขึ้นรูปแบบนี้ดินจะถูกรีดออกจากตรงกลางโดยหัวหมุน และแผ่ออกเป็นวง ทำให้อนุภาคดินตรง กลางมีแนวโน้มที่จะตั้งฉากกับทิศทางของแรง ส่วนอนุภาคดินที่แผ่ออกไปจะมีทิศทางไปทางเดียวกับ ทิศทางของแรง การแก้ไขข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นนี้ ทำได้โดยออกแบบหัวหมุนให้มีความโค้งมน เพื่อรีดให้ เนื้อดินเรียงตัวราบไป และเกิดการจัดเรียงตัวดังรูปน้อยที่สุด

2. การขึ้นรูปถ้วยชามโดยวิธีการอัดผงดิน (Powder pressing)

เป็นกระบวนการขึ้นรูปโดยใช้เครื่องอัดไฮดรอลิกที่มีแรงอัดสูง แม่พิมพ์ทำจากเหล็กชุบแข็งหรือ ซีเมนต์คาร์ไบด์ พิมพ์ด้านล่างเคลือบทับด้วยโพลียูรีเทน ผลของอนุภาคดินส่วนที่ติดกับแผ่นเหล็กชุบ แข็ง จะมีผิวเรียบมาก และมีความหนาแน่นมากกว่าทำให้หดตัวน้อยกว่า การขึ้นรูปโดยวิธีนี้มีข้อดีเมื่อ เทียบกับโรลเลอร์เฮดดังนี้คือ เหมาะกับการขึ้นรูปจานชามทุกรูปทรง ไม่ต้องใช้แบบพิมพ์พลาสติก จำนวนมาก ประหยัดเนื้อที่ในการผลิต ไม่มีเศษดินเหลือจากการอัดขึ้นรูป ชิ้นงานแห้งหลังจากการอัด จึงไม่ต้องอบแห้งอีก ไม่มีการหดตัวก่อนเผา ไม่มีรอยตำหนิที่ต้องตกแต่งชิ้นงาน มีรูปทรงภายหลังการ เผาแน่นอนหดตัวน้อย สามารถเปลี่ยนพิมพ์ชุดใหม่ได้เร็ว

ข้อเสียของเครื่องอัดแบบไฮดรอลิกเมื่อเปรียบเทียบกับโรลเลอร์เฮดคือ ไม่สามารถขึ้นรูปงานที่ มีรอยหยัก หรืองานที่มีลวดลายละเอียด เนื้อดินมีความแข็งแก่ร่วนน้อย ยังมีรูพรุนของเนื้อดินอยู่บ้าง แต่ การลงทุนสูง



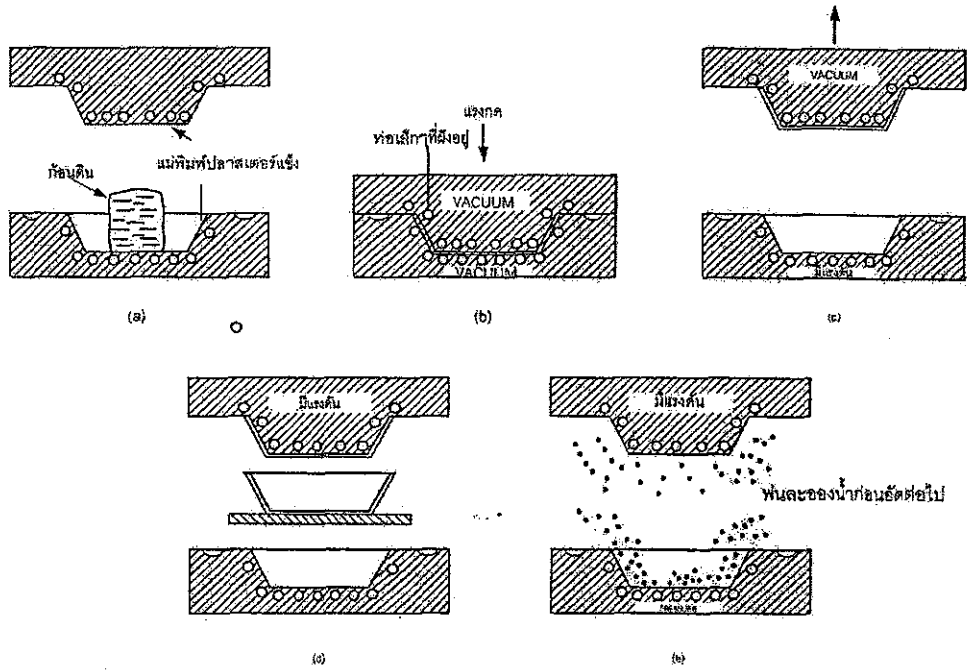
รูป 4.13 การขึ้นรูปด้วยการอัดผงดิน

เครื่องอัดด้วยขามอีกชนิดเป็นแบบดินฝุ่น Isostatic dry press ซึ่งมีแรงอัดรอบทิศทาง 5000-10000 psi มีการเตรียมวัตถุดิบเป็นเม็ดแกรนูล ใช้แบบพิมพ์โลหะ ดินผ่านการบดเปียกแล้วนำมาผสมใน ball mill เมื่อดินละเอียดดีแล้วจะเติมสารช่วยกระจายตัวให้น้ำดินมีความถ่วงจำเพาะมากกว่า 1.7 ขึ้นไป ก่อนนำไปทำเป็นเม็ดกลมโดยการผ่าน Spray drier เมื่อเม็ดดินที่ได้กลม ผิวเรียบ จะมีการไหลตัวได้ดี ทำให้เนื้อที่อัดได้แน่น และมีผิวเรียบสม่ำเสมอ

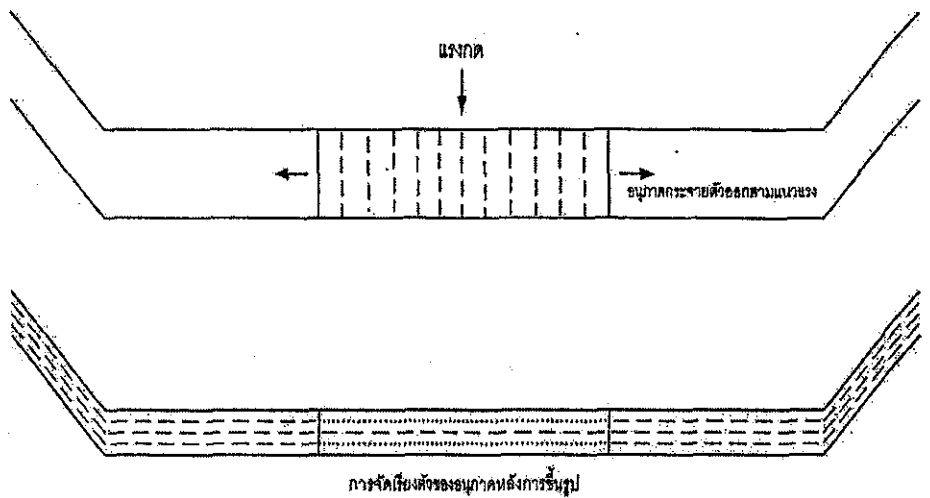
3. การขึ้นรูปด้วยวิธีอัดดินเหนียว (Plastic pressing)

เป็นวิธีการขึ้นรูปที่เป็นภาชนะด้วยขามที่ไม่ได้เป็นรูปทรงกลมที่มีขนาดใหญ่เกินกว่าจะขึ้นรูปด้วยวิธีการหล่อตัน ดินเหนียวจะถูกอัดด้วยเครื่องอัดไฮโดรลิกความดันสูง (Ram Press) โดยใช้แบบพิมพ์สองชิ้น ยึดกับแท่นอัดส่วนบนและส่วนล่าง (เป็นด้านในและด้านนอกของผลิตภัณฑ์) เครื่องนี้จะมีกำลังแรงอัดสูงกว่าเครื่องโรลเลอร์เฮด แต่ต่ำกว่าเครื่องอัดกระเบื้องที่อัดด้วยดินร่วนผง ดังนั้นแบบพิมพ์ต้องทนทานต่อแรงอัดของเครื่องได้ดี และดูดซึมน้ำจากเนื้อดินด้วย ภายในแบบพิมพ์จะมีท่อเล็กๆ จำนวนมากที่ฝังอยู่ในแบบพิมพ์ทั้งสอง ขณะที่เครื่องอัดทำงานจะฟลักของน้ำออกมาเคลือบบน

ผิวหน้าของแบบพิมพ์ ดินที่นำมาขึ้นรูปเป็นเนื้อละเอียดที่มีความเหนียว ความชื้นของเนื้อดินเท่ากับดินที่ขึ้นรูปด้วยโรลเลอร์เสด



รูป 4.14 เครื่องอัดขึ้นรูปแบบ Ram Press

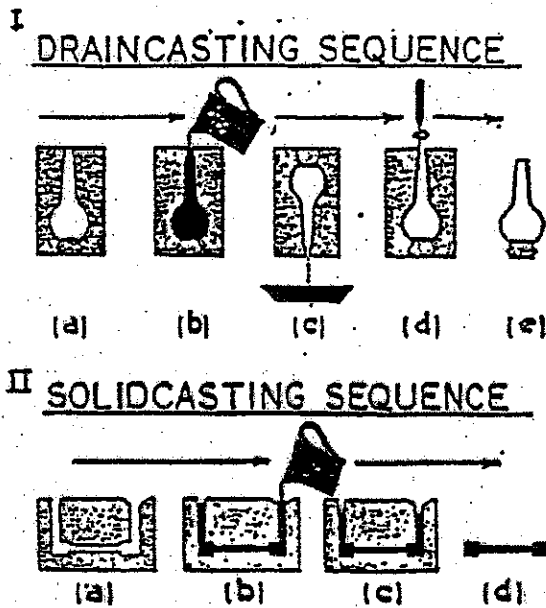


รูป 4.15 ตำแหน่งที่พบในการขึ้นรูปแบบ Ram press

- Surface makings on the ware or distortion จะเห็นเป็นลายเส้นที่ผิวงาน เนื่องมาจากการจัดเรียงตัวของอนุภาคดิน (เหนียว) ซึ่งจะมีการหดตัวน้อยที่ตรงกลางของงาน จะพบตำหนินี้มากขึ้นในงานที่มีรูปวงรี หรือ สีเหลี่ยม
- แก้ไขได้โดย การทำให้อนุภาคดินมีการแผ่กระจายออกไปในทิศทางเดียวกับแรงที่กระทำมากที่สุด นั่นคือ ใช้ก้อนดินที่จะนำมาอัด ที่ขนาดก่อนใหญ่ใกล้เคียงกับแบบ หรือ ใช้ก้อนดินที่มีรูปร่างคล้ายๆกับรูปร่างของงานที่จะอัด

4. การขึ้นรูปด้วยวิธีหล่อน้ำดิน (Slip casting)

วิธีหล่อน้ำดินใช้สำหรับผลิตชิ้นงานที่มีรายละเอียดมาก หรืองานที่ค่อนข้างซับซ้อน หรือรูปทรงอิสระ ชิ้นงานที่มีรูปทรงภายในกลวง การหล่อผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะกลวง เทหล่อจนได้ความหนาที่ต้องการ จึงเทน้ำดินส่วนที่ไม่แข็งออกเรียกว่า Drain casting ส่วนการเทแบบหล่อสำหรับผลิตภัณฑ์ที่ตัน และสามารถควบคุมความหนาบางของผลิตภัณฑ์ได้โดยการทำแบบพิมพ์ที่มีผิวด้านนอกและด้านในของผลิตภัณฑ์ โดยกำหนดความหนาในส่วนต่างๆ ของชิ้นงานไว้ด้วยช่องว่างสำหรับเทน้ำดินลงไป



รูป 4.16 การขึ้นรูปด้วยการเทแบบหล่อ I แบบหล่อกลวง, II แบบหล่อตัน [1]



รูป 4.17 การเทแบบหล่อชิ้นงานโดย Drain casting

การเทแบบหล่อชิ้นงานแบบหล่อตัน เป็นการหล่อโดยใช้ความดัน อัดน้ำดินเข้าสู่แบบ ทำให้เพิ่มปริมาณการผลิต ระยะเวลาในการหล่อสั้นลง สามารถฝั่งแห้งชิ้นงานได้เร็ว ชิ้นงานมีเนื้อดินแน่น และแกร่งก่อนเผา เนื้อดินมีการหดตัวน้อยลง ลดการบิดเบี้ยวหลังเผา เนื้อดินไม่มีฟองอากาศ ลดรูตามคบนผิวเคลือบ

เนื้อดินสำหรับงานหล่อ

1. เนื้อดินละเอียดผ่านการล้าง หรือดินที่ถูกอัดเป็นแผ่นจากเครื่อง Filter press โดยอัดเอาสารละลายในดินออกไปกับน้ำทิ้ง มีน้ำในส่วนผสมน้อยที่สุด (25-30%) เพื่อให้ถอดแบบพิมพ์เร็วที่สุด และเติมสารช่วยกระจายตัว เพื่อไม่ให้เนื้อดินตกตะกอนประมาณ 0.2% เนื้อดินมีส่วนผสมของดินขาว (kaolin, china clay) ที่บริสุทธิ์ มีสีขาวหลังเผา ทำให้น้ำหล่อแบบแห้งเร็ว ส่วนดินดำ (Ball clay) ให้ความเหนียว น้ำดินไหลตัวได้ดี ทำให้ส่วนผสมยึดเกาะกันได้ดี ผลิตภัณฑ์ที่แห้งมีความแข็งแรง เคลือบย้ายได้โดยไม่แตกหัก ส่วนซิลิกาหรือทราย (silica) เสริมความแข็งแรงให้ผลิตภัณฑ์ ทำให้ผลิตภัณฑ์มีความทนไฟ ไม่ทรุดตัวหลังเผา ฝั่งแห้งเร็วไม่แตกร้าว ส่วนหินฟันม้า (Feldspar) เป็นตัวประสานให้อณูภาคดินและทรายหลอมรวมกันเป็นเนื้อเดียวกัน ดินสุกตัวในช่วงอุณหภูมิที่ต้องการ ลดการดูดซึมน้ำของผลิตภัณฑ์หลังเผา เพิ่มความโปร่งแสงให้เนื้อ porcelain

2. สารที่ช่วยในการกระจายตัว (Deflocculant)

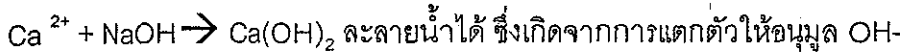
สารที่ช่วยในการกระจายตัวได้แก่ สารอินทรีย์ เช่นกรดต่างๆ กรดเทนนิค กรดฮิวมิก น้ำยาด่างหรือเกลือต่างๆ เช่น โซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3), โซเดียมคาร์บอเนต (Na_2CO_3), โซเดียมโพลีฟอสเฟต ($\text{Na}(\text{PO}_3)_n\text{Na}_2\text{O}$), โซเดียมโพลีอะครีเลต โซเดียมเฮกซามेटาฟอสเฟต (Calgon) หรือประเภทที่เป็น

สารประกอบของพอลิเมอร์หรือสารสังเคราะห์ ได้แก่ dispex (แอมโมเนียโพลีอะครีเลต), Davan 7 หรือ Colloid 211 (ชื่อการค้า) เป็นต้น

การกระจายตัวของเนื้อดินปั้นที่มีดินเป็นส่วนประกอบ

■ เนื่องจากอนุภาคของดินสามารถดูดซับอนุมูลต่างๆได้ เพราะพันธะที่ผิวของอนุภาคดินไม่สมบูรณ์ หรือมีการแทนที่กันของอนุมูลต่างๆ เช่น Al^{3+} แทนที่ Si^{4+} , Mg^{2+} เข้าแทนที่ Al^{3+} , Fe^{2+} แทนที่ Al^{3+} ดังนั้นทำให้อนุภาคของดินมีประจุเป็นลบ เมื่อผิวดินมีประจุที่ผิวและที่ขอบทำให้เกิดการเกาะตัวกัน และตกตะกอนลงมาได้ และทำให้ความหนืดของน้ำดินสูงขึ้นมากด้วย

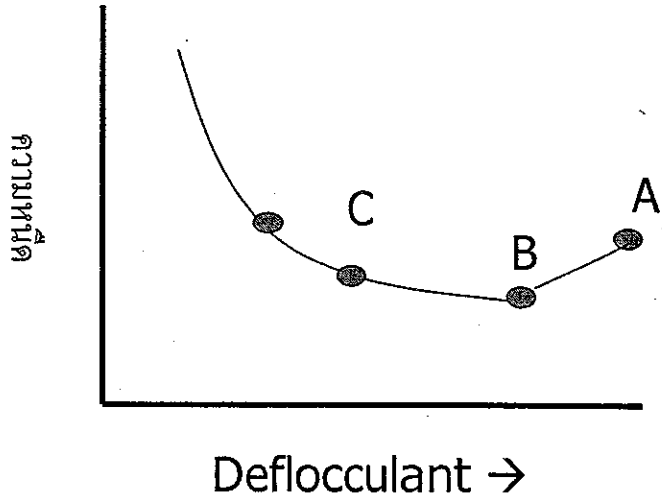
■ การทำให้น้ำดินมีความหนืดลดลง โดยการทำให้ดินมีอนุมูลเป็นบวกหนึ่ง และมีการแตกตัวในสารละลายไม่ควรให้อนุมูล OH เช่น



น้ำดินที่มีสภาพเป็นกรด \rightarrow อนุภาคเกาะกันและทำให้ตกจม ความหนืดสูง (flocculated)

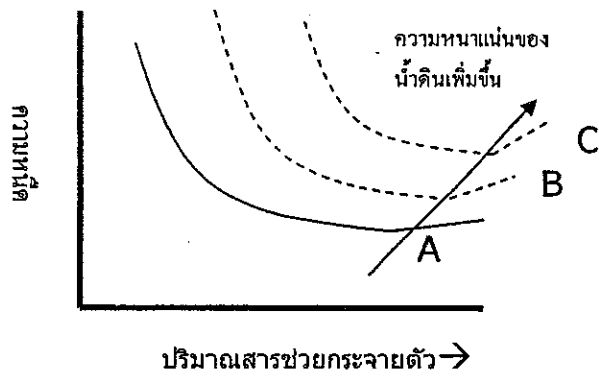
น้ำดินที่มีสภาพเป็นด่าง \rightarrow อนุภาคกระจายตัว ความหนืดต่ำ (deflocculated)

ในการเติมสารช่วยกระจายตัว ควรจะเติมในปริมาณที่เหมาะสม การเติมมากเกินไปจะทำให้ดินจะกลับมารวมตัวกันใหม่ ทำให้ความหนืดของน้ำดินกลับมาสูงขึ้นอีก ดังรูป 4.18 การหล่อทำได้ยากและน้ำดินอืดในแบบ พิมพ์ปูนพลาสติกที่ใช้หล่อแบบเสื่อมสภาพ ผลิตภัณฑ์มีรอยคราบน้ำยาผิวสีเหลืองขณะผึ่งแห้ง หลังเผาบริเวณนั้นจะเป็นมันวาว ดูซึมน้ำเคลือบได้น้อย และทำปฏิกิริยากับน้ำเคลือบเกิดรอยต่าง โดยจะใส่โซเดียมคาร์บอเนตในน้ำดินประมาณ 0.05-0.1% โดยอาจใช้ร่วมกับโซเดียมซิลิเกต 0.2%



รูป 4.18 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดและปริมาณสารช่วยกระจายตัว

- ปรับให้น้ำดินมีการกระจายลอยตัวที่ดี จะทำให้ความหนืดลดลง จุดที่เหมาะสมในการเติมสารช่วยกระจายลอยตัวคือ จุดที่มีความหนืดต่ำสุด (จุด B) และถ้าเติมสารช่วยกระจายตัวมากขึ้น จะทำให้ความหนืดกลับมาสูงขึ้นอีก (จุด A) เรียกว่าจุด Over deflocculant ผลของความหนาแน่นของน้ำดินต่อปริมาณสารช่วยกระจายตัว



รูป 4.19 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดและปริมาณสารช่วยกระจายตัว

- เมื่อความหนาแน่นของน้ำดินลดลงจะมีผลต่อ ปริมาณของสารช่วยกระจายที่ใช้ และความหนืดต่ำสุดของน้ำดิน

น้ำดินหล่อที่ตีควรรจะ

1. มีเนื้อดินมาก น้ำน้อย เพื่อให้เนื้อดินหดตัวน้อยและถอดแบบได้เร็ว
2. น้ำดินไหลตัวได้ดี เมื่อเทน้ำดินออก ก้นภาชนะด้านในเรียบและเก็บรายละเอียดของแบบพิมพ์ได้ดี
3. ทิ้งน้ำดินไว้นานๆ จะไม่เกิดการตกตะกอน หรือแข็งตัวเป็นก้อนในแบบ
4. เมื่อผลิตภัณฑ์หล่อเสร็จ ต้องไม่เปราะแตกง่าย หลังเผาต้องไม่บิดเบี้ยวเสียรูป
5. น้ำที่ใช้ต้องบริสุทธิ์ไม่มีอิมออนต่างๆ หรือหินปูน
6. เศษดินที่ผ่านการหล่อสามารถนำกลับมาผสมใหม่ได้ไม่เกิน 30% ของปริมาณทั้งหมด ถ้านำมาผสมทั้งหมดจะทำให้ น้ำดินอืดเนื่องจากมีน้ำผสมอยู่มากเกินไป

ปัญหาที่พบในการหล่อน้ำดิน

1. ผลิตภัณฑ์ที่หล่อแตกอยู่ในแบบพิมพ์ก่อนการแกะแบบ

สาเหตุ

- มีปริมาณน้ำในน้ำดินหล่อมกเกินไป
- มีปริมาณวัตถุดิบที่มีความเหนียวในเนื้อดินน้อยเกินไป
- วัตถุดิบบางอย่างในน้ำดินหล่อ บดไม่ละเอียดเพียงพอ เช่น เฟลด์สปาร์และซิลิกา ควรมีความละเอียด 8-10 ไมครอน อย่างน้อย 50% ก่อนนำมาเตรียมน้ำดินหล่อ
- ทิ้งผลิตภัณฑ์ในแบบพิมพ์นานเกินไป

2. ผลิตภัณฑ์ที่หล่อติดผิวแบบพิมพ์ไม่ร่อนออกมา

สาเหตุ

- พิมพ์ใหม่ที่แรกใช้ครั้งแรก อาจมีคราบไขมันหรือผลึกเกลือปิดรูพรุนของเนื้อปูนปลาสเตอร์
- น้ำดินหล่อมมีปริมาณของดินดำเนื้อละเอียดและเหนียวมากเกินไป
- น้ำดินหล่อมมีปริมาณของเศษดินเก่ามากเกินไป 15 เปอร์เซ็นต์ ทำให้ดินอืดและแห้งตัวในแบบพิมพ์ช้า เนื่องจากมีปริมาณของสารช่วยกระจายตัวมากเกินไป
- แบบพิมพ์ชื้นเกินไป ไม่ดูดน้ำจากน้ำดินหล่อ

3. รูตามคบนผิวผลิตภัณฑ์ก่อนเผาและหลังเผา

สาเหตุ

- ฟองอากาศในน้ำดินหล่อมมีปริมาณมาก เกิดจากเครื่องกวนน้ำดินหมุนเร็วเกินไป
- ระวังไม่ให้เศษดินแห้งลงไปปะปนในน้ำดินเป็นสาเหตุให้เกิดฟองอากาศ

- การเติมน้ำดินลงในแบบพิมพ์ควรทำอย่างช้าๆ เพื่อไม่ให้เกิดฟองอากาศในแบบพิมพ์ ฉีดน้ำดินให้ลึกลงไปในแบบพิมพ์และหมุนแบบพิมพ์เพื่อไล่ฟองอากาศออกมา
- น้ำดินหล่อมีความหนืดมากเกินไป

4. ผลิตรัณฑ์ปิดเบี้ยวหลังการเผา

สาเหตุ

- แกะผลิตรัณฑ์ออกจากแบบเร็วเกินไป จับแล้วดินยุบตัว ภายหลังการเผาก็ปรากฏรอยปิดเบี้ยวอยู่
- ดินหล่อดี้อัตราส่วนการหดตัวมากกว่า 16%
- เผาที่อุณหภูมิสูงเกินไป ทำให้ผลิตรัณฑ์ยุบตัว

การเตรียมน้ำดินสำหรับเทแบบหล่อ

1. เตรียมน้ำดินจากวัตถุดิบแห้ง

บดแล้วร่อนผ่าน 100 เมช วัตถุดิบแห้งสนิทก่อนนำมาชั่ง

ตัวอย่าง1 การคำนวณสูตรดินหล่อ 100 กิโลกรัม

ดินขาวล้าง 70 กิโลกรัม

ดินดำสุราษฎร์ล้าง 20 กิโลกรัม

ซิลิกา 10 กิโลกรัม

ปริมาณน้ำ 45 ลิตร : ดินแห้ง 100 กิโลกรัม

น้ำยาโซเดียมซิลิเกต 0.25 g : ดินแห้ง 100 g

คำนวณปริมาณน้ำยา = $(0.25 \times 100,000)/100 = 250 \text{ g}$

วิธีเตรียมน้ำดิน

- ชั่งวัตถุดิบ สารช่วยกระจายตัว และน้ำในส่วนผสม
- ใส่ น้ำ และ สารช่วยกระจายตัวละลายในน้ำ 3 ใน 4 ส่วน
- ใส่วัตถุดิบที่เหนียวก่อน และตามด้วยดินขาว
- กวนผสม ตรวจสอบการไหลตัว และความถ่วงจำเพาะ > 1.60
- ถ้าน้ำดินข้นมาก เติมน้ำยาเพิ่ม อาจทำการปรับใหม่ถ้าไม่ได้ความหนืดตามที่ต้องการ อาจจะเติมวัตถุดิบลงไป ถ้าน้ำดินเหลวเกินไป หมักไว้ 3 คืน แล้วกรองผ่าน 100 เมช ก่อนใช้เทแบบหล่อ

2. การเตรียมน้ำดินหล่อจากวัตถุดิบเปียก

- ชั่งน้ำหนักของวัตถุดิบตามส่วน หักค่าความชื้นออก เช่น ในเนื้อดินมีปริมาณความชื้น 20% ต้องหาน้ำหนักดินแห้งก่อน เพื่อคำนวณปริมาณสารช่วยกระจายตัว

ดิน 100 กิโลกรัม มีความชื้น 20 กิโลกรัม '

ดังนั้น ดินแห้ง = 80 kg

ดินแห้ง 100 กรัม ต้องการโซเดียมซิลิเกต 0.2 กรัม

ดินแห้ง 80,000 กรัม ใช้โซเดียมซิลิเกต = $(0.2 \times 80,000)/100 = 160$ กรัม

ในกรณีน้ำดินหล่อต้นครวมี ถ.พ. = 1.78-1.80

การปรับปรุงความหนาแน่นของน้ำดิน

น้ำดินสำหรับเทแบบหล่อต้องมีการควบคุมความหนาแน่น ดังนั้นจึงต้องมีการปรับน้ำดินที่มีความหนาแน่นที่ไม่เหมาะสม เช่นในกรณีที่ทราบความหนาแน่นของของเหลว และของแข็ง

ตัวอย่าง 2 การตรวจหาความหนาแน่นของเนื้อดินปั้น

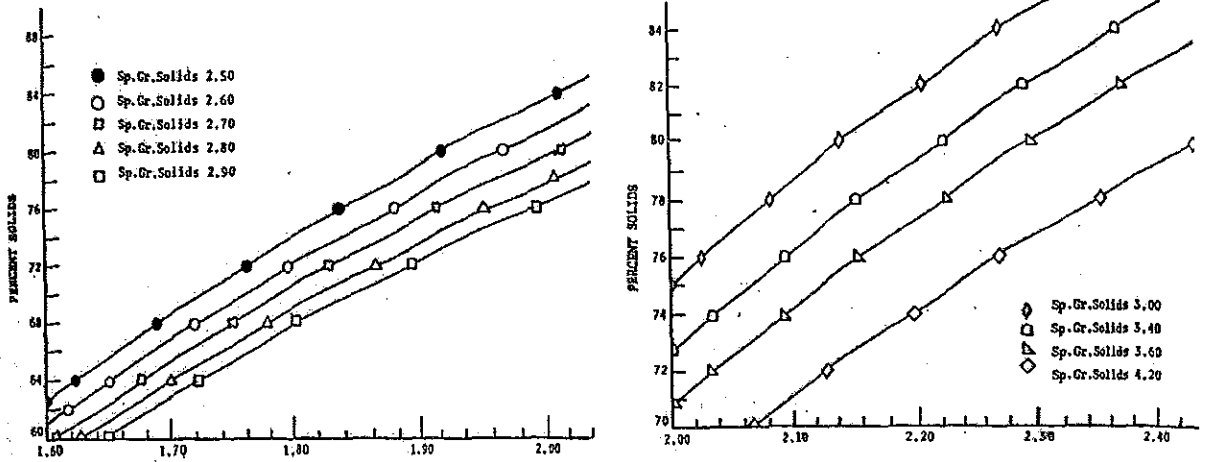
	%	ถ.พ.	เนื้อดินปั้น
ดินเหนียว	15	2.55	38.25
ดินขาว	30	2.62	78.6
หินฟันม้า	30	2.62	78.6
ซิลิกา	25	2.65	66.25

ความหนาแน่นของเนื้อดินปั้นรวม $261.7/100 = 2.617$

เมื่อทราบความหนาแน่นของเนื้อดินปั้น เราจะหาเปอร์เซ็นต์ของแข็งในน้ำดินจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง % ของแข็งในน้ำดินและความถ่วงจำเพาะของน้ำดิน

1. ทราบ ถ.พ. ของน้ำดิน และถ.พ. ของของแข็ง

- หา % ของแข็งจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ของแข็งและความถ่วงจำเพาะของน้ำดิน โดยลากเส้นตรงจากแกน ถ.พ.ของน้ำดิน ตั้งฉากขึ้นไปตัดเส้นกราฟ ถ.พ.ของแข็ง หลังจากนั้นลากเส้นขนานไปตัดแกนตั้ง จะได้ % ของแข็งในน้ำดิน



รูป 4.20 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ของแข็ง และความถ่วงจำเพาะของน้ำดิน [2]

การปรับน้ำดิน เมื่อน้ำดินข้นเกินไป

$$X = \text{ปริมาณน้ำที่ต้องเติม} = w \left[1 - \frac{P_d}{P_i} \right] / P_d - 1$$

เมื่อ w = น้ำหนักน้ำดินที่มี ถ.พ. P_i

P_d = ถ.พ. ที่ต้องการ

P_i = ถ.พ. ที่วัดได้

ในการปฏิบัติจริงสามารถใช้ตารางข้างล่างนี้เพื่อเตรียมน้ำดินให้ได้ความถ่วงจำเพาะตามต้องการ

ตาราง 4.1 ความถ่วงจำเพาะของน้ำดิน [2]

Specific Gravity of Aqueous Slips (grams/liter)

% Solids	Ratio of water	2.2	2.5	2.6	2.7	2.8	2.9	3.0	3.2	3.4	3.8	4.2	4.6	5.0	5.5	6.0
45	1: 1.22	1325	1370	1383	1395	1407	1418	1429	1448	1466	1496	1522	1544	1563	1583	1601
46	1: 1.17	1335	1381	1395	1408	1420	1431	1443	1463	1481	1513	1540	1563	1582	1605	1623
47	1: 1.13	1345	1393	1407	1420	1433	1445	1457	1477	1496	1530	1558	1582	1603	1623	1642
48	1: 1.08	1355	1405	1419	1433	1446	1459	1471	1493	1512	1547	1577	1602	1623	1648	1668
49	1: 1.04	1365	1416	1431	1446	1460	1473	1485	1508	1529	1565	1596	1622	1645	1669	1690
50	1: 1.00	1375	1429	1444	1459	1474	1487	1500	1524	1545	1583	1615	1643	1667	1692	1714
52	1: 0.92	1396	1454	1471	1487	1502	1517	1531	1556	1580	1621	1656	1686	1712	1742	1766
54	1: 0.85	1418	1479	1498	1515	1532	1548	1563	1590	1616	1661	1699	1732	1761	1793	1819
56	1: 0.79	1440	1506	1526	1545	1563	1580	1596	1626	1654	1703	1744	1780	1812	1842	1870
58	1: 0.72	1463	1534	1555	1575	1595	1613	1631	1663	1693	1746	1792	1831	1866	1907	1939
60	1: 0.67	1486	1563	1585	1607	1628	1648	1667	1702	1735	1792	1842	1885	1923	1960	1995
62	1: 0.61	1511	1592	1617	1640	1663	1684	1705	1743	1778	1841	1895	1943	1984	2033	2072
64	1: 0.56	1536	1623	1650	1675	1699	1722	1745	1786	1824	1892	1952	2003	2049	2102	2117
66	1: 0.52	1563	1656	1684	1711	1737	1762	1786	1831	1872	1947	2011	2068	2119	2165	2213
68	1: 0.47	1590	1689	1719	1749	1777	1803	1830	1878	1923	2004	2075	2138	2193	2255	2308
70	1: 0.43	1618	1724	1757	1788	1818	1847	1875	1928	1977	2065	2143	2212	2273	2337	2395
72	1: 0.39	1647	1761	1796	1829	1862	1893	1923	1980	2034	2130	2215	2291	2358	2430	2496
74	1: 0.35	1677	1799	1836	1872	1920	1941	1974	2036	2094	2199	2293	2376	2451	2538	2611
76	1: 0.32	1708	1838	1879	1917	1955	1992	2027	2094	2157	2273	2376	2468	2551	2629	2710
78	1: 0.28	1740	1879	1923	1965	2006	2045	2083	2156	2225	2352	2465	2567	2660	2771	2854
80	1: 0.25	1774	1923	1970	2015	2059	2101	2143	2222	2297	2436	2561	2674	2777	2894	2998
82	1: 0.22	1809	1969	2019	2067	2114	2160	2206	2293	2374	2527	2665	2791	2907	3035	3152
84	1: 0.19	1846	2016	2070	2123	2174	2223	2273	2367	2457	2624	2778	2919	3049	3199	3333
86	1: 0.16	1884	2066	2124	2181	2237	2297	2344	2447	2545	2730	2901	3058	3205	3391	3547
88	1: 0.14	1923	2118	2181	2243	2302	2365	2419	2532	2640	2844	3035	3212	3378	3540	3713
90	1: 0.11	1964	2174	2241	2308	2373	2439	2500	2623	2742	2969	3182	3382	3571	3801	4007

ในการควบคุมการเทแบบหล่อ สิ่งที่สำคัญคือการเตรียมน้ำดิน น้ำดินที่ดีจะทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่ดี และมีความสม่ำเสมอ ดังนั้นการปรับคุณสมบัติของน้ำดินจึงต้องพิจารณาความสมดุลระหว่างสมบัติของวัตถุดิบ และสมบัติของน้ำดินที่ได้ จึงจำเป็นต้องมีการควบคุมน้ำดินดังต่อไปนี้

➢ ความหนาแน่นของน้ำดิน Slip density เป็นคุณสมบัติที่สำคัญสำหรับน้ำดิน เพราะการเพิ่มความหนาแน่นของน้ำดินเมื่อน้ำดินที่มีการไหลตัวดีแล้ว เช่นการเติมเนื้อดินลงไป ทำให้ความหนาแน่นของเนื้อดินเพิ่มขึ้น จะมีผลทำให้

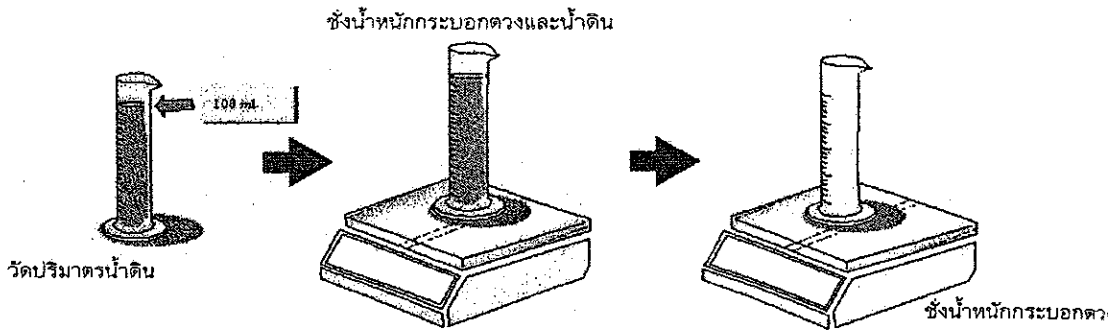
- เพิ่มความหนาแน่นของผลิตภัณฑ์หลังเทแบบหล่อ
- ทำให้ความชื้นของผลิตภัณฑ์ลดลง
- เพิ่มความแข็งแรงของผลิตภัณฑ์ที่เป็ยก เพราะมีเนื้อดินมากขึ้น
- ลดการหดตัวก่อนเผา
- มีการแตกร้าวของผลิตภัณฑ์น้อยลง

ดังนั้นน้ำดินที่ดี จึงควรปรับน้ำดินให้มีความหนาแน่นมากที่สุด โดยที่น้ำดินมีการไหลตัวที่เหมาะสม การหาความถ่วงจำเพาะของน้ำดินสามารถทำได้โดยการคำนวณความถ่วงจำเพาะเท่ากับ สัดส่วนของมวลน้ำหนัก (กรัม) ต่อ ปริมาตร (ลิตร)

ตัวอย่าง น้ำดิน 1 ลิตร (1000 cc.) มีน้ำหนัก 1700 กรัม

ความหนาแน่น = $1700/1000 = 1.7 \text{ g/cc}$.

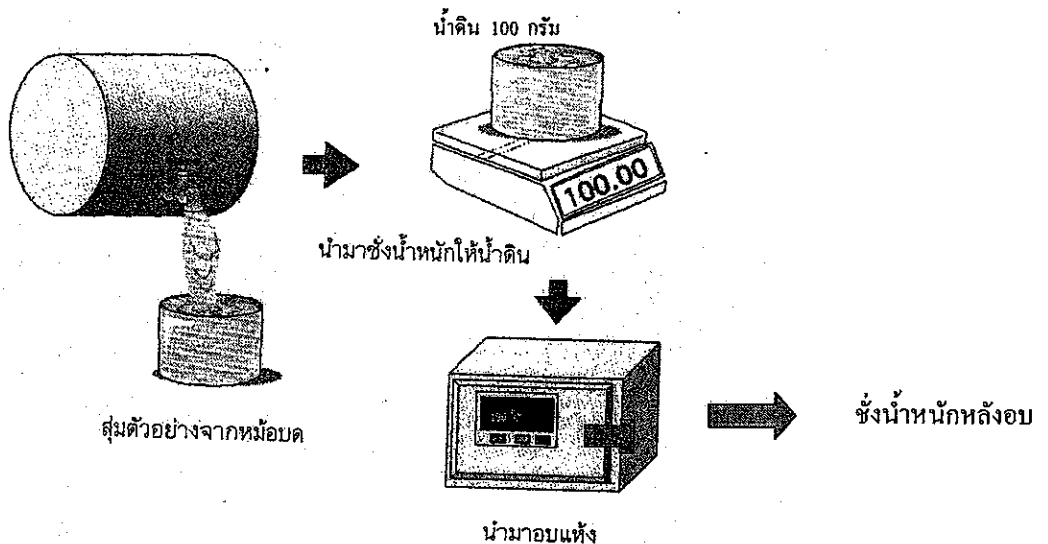
หรือการวัดโดยไฮโดรมิเตอร์ (หน่วยเป็น โบเม) หรือวัดโดยวิธีการชั่งน้ำหนัก ดังรูป โดยการตวงน้ำดินมา 1 ลิตร นำไปชั่งน้ำหนัก แล้วหารด้วย 1000 หรือใช้กระบอกลง 100 ml



รูป 4.21 การหาความถ่วงจำเพาะของน้ำดิน [4]

ความหนาแน่น = $(\text{น้ำหนักของน้ำดิน} / \text{ปริมาตรน้ำดิน}) \times 100$

การหาปริมาณของแข็งในน้ำดิน (% solid)



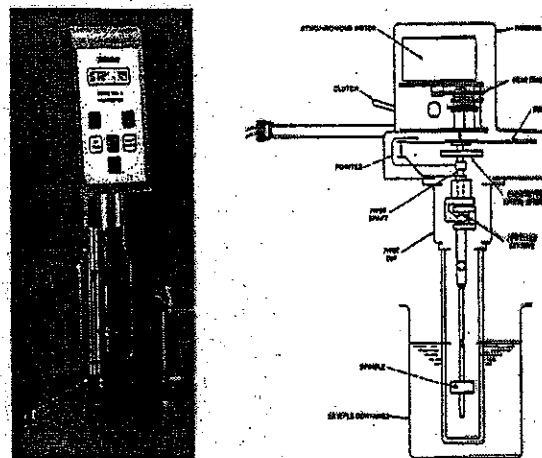
รูป 4.22 การหาปริมาณของแข็งในน้ำดิน [4]

ร้อยละของของแข็งในน้ำดิน = $(\text{น้ำหนักน้ำดินหลังอบ} / \text{น้ำหนักน้ำดิน}) \times 100$

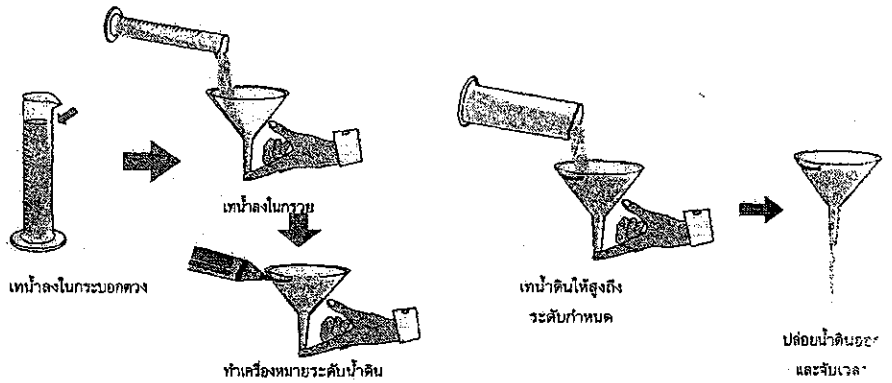
- ทริกไซโทรปี Thixotropy เป็นสภาพความเข้มข้นของน้ำดินที่จับตัวกันเป็นก้อน ความหนืดจะเปลี่ยนไปเมื่อตั้งน้ำดินทิ้งเอาไว้ คุณสมบัตินี้ช่วยให้น้ำดินแห้งตัวและถอดแบบพิมพ์ออกได้เร็ว ถ้ามีมากเกินไปจะทำให้เหนือน้ำดินออกยาก ขึ้นงานติดแบบและเสียรูปทรงง่าย

การวัดค่าทริกไซโทรปี ทำได้โดยใช้เครื่องมือวัดความหนืด โดยวัดการเปลี่ยนแปลงของความหนืด ทุก 5, 10, 15, 30, 60 นาที เป็นต้น หรือทดสอบโดยการเทน้ำดินลงในแบบพิมพ์ ตั้งทิ้งไว้ครึ่งชั่วโมง เทน้ำดินออก ถ้าไหลตัวออกดี ก็แสดงว่าน้ำดินที่ดี

- การไหลตัวของน้ำดินหรือความหนืด Fluidity การหาความหนืดทำได้โดยใช้ viscometer (รูป 4.23) ค่าที่อ่านได้เป็น poise หรือวัดโดยใช้เครื่อง over swing โดยการวัดองศาในการหมุนกลับมาของลูกตุ้มที่ด้านของเหลว นอกจากนี้การวัดความหนืดอาจดูจากการไหลตัวของน้ำดิน ดูจากปริมาณการไหลตัวของน้ำดินในปริมาณที่กำหนด โดยจับเวลาในการไหลตัวของน้ำดิน ดังรูป 4.24

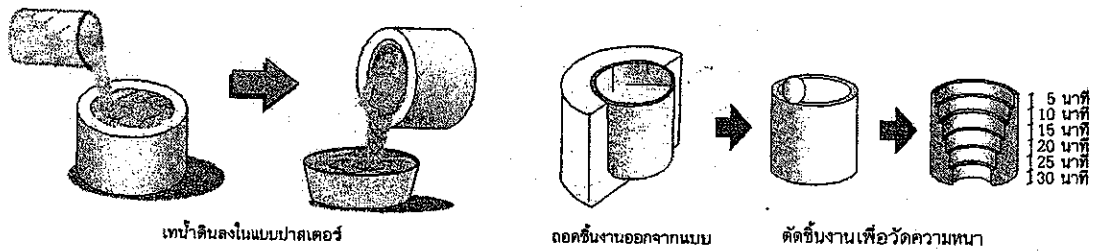


รูป 4.23 เครื่อง Brook field viscometer [7]



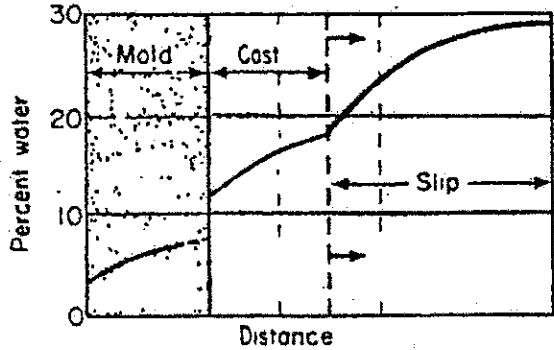
รูป 4.24 การวัดการไหลตัวของน้ำดิน (มิลลิเมตรต่อวินาที) [4]

- อัตราการหล่อ (casting rate) เป็นการตรวจดู เชื่คคุณภาพของน้ำดิน และเป็นการควบคุมการเทแบบหล่อ



รูป 4.25 การหาอัตราการเทแบบหล่อ [4]

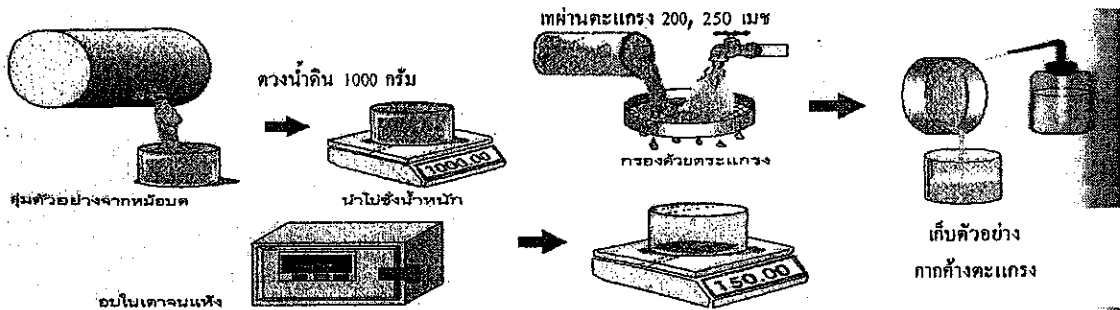
$$\text{อัตราการหล่อแบบ} = \frac{\text{ความหนา}}{\text{เวลาที่น้ำดินอยู่ในแบบ}} = \text{มม./นาที}$$



รูป 4.26 การกระจายความชื้นในแบบพิมพ์สำหรับการเทแบบหล่อ [1]

อัตราเร็วในการเทแบบหรืออัตราการเพิ่มความหนาของผนังผลิตภัณฑ์เริ่มลดลง เนื่องจากน้ำซึมผ่านเข้าแบบได้ยากขึ้น เพราะถูกผนังผลิตภัณฑ์ด้านเอาไว้ และแบบชื้นมากขึ้น ทำให้อัตราการดูดซึมน้ำลดลง

- การกระจายขนาดอนุภาค (Particle size) โดยการคำนวณกากค้างตะแกรง



$$\text{ปริมาณกากค้างตะแกรง} = \frac{\text{น้ำหนักของแข็งค้างตะแกรง}}{\text{ปริมาตรของแข็งในน้ำดิน 1000 กรัม}} \times 100$$

รูป 4.27 การหาปริมาณกากค้างตะแกรงของน้ำดิน [4]

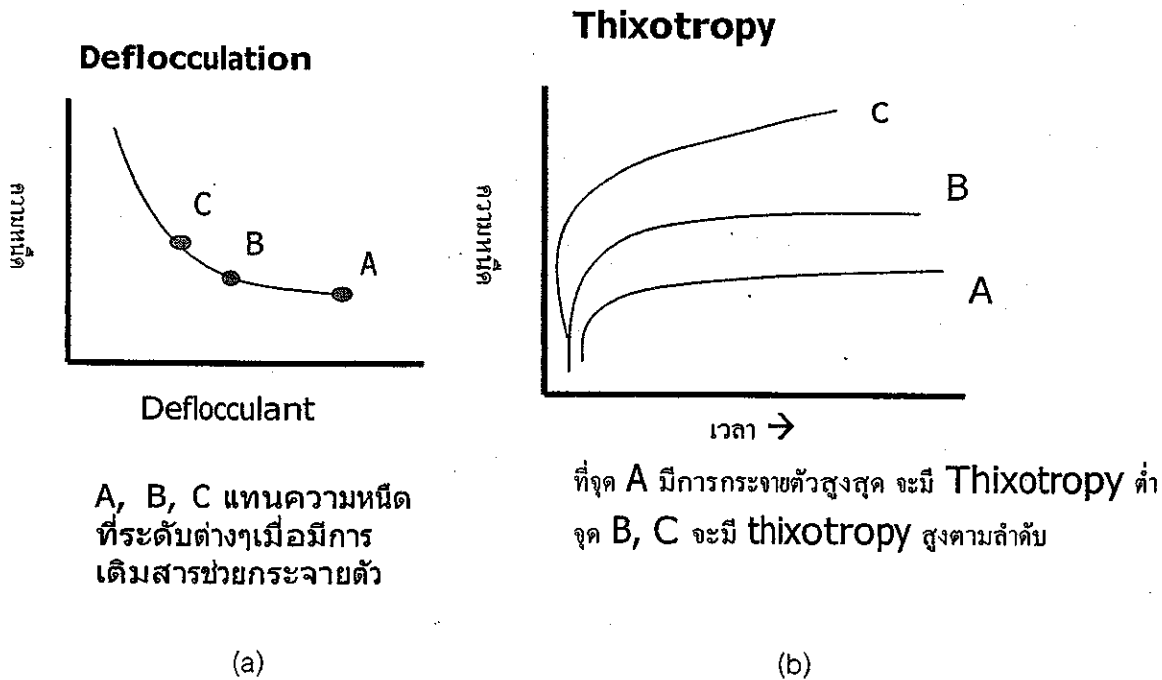
- การทดสอบค่าความเป็นกรดด่าง (pH testing) น้ำดินที่มีการไหลตัวดีจะมีคุณสมบัติเป็นด่างเล็กน้อย ซึ่งในการควบคุมคุณภาพของน้ำดิน ก็ทำได้โดยการควบคุม pH ของน้ำดิน

การทดสอบชิ้นงานที่ได้จากการหล่อ

- ความแข็งแรงของชิ้นงานเมื่อแห้ง (green strength) โดยการเตรียมชิ้นทดสอบที่เตรียมจากน้ำดินที่ต้องการตรวจสอบ ชิ้นงานอาจมีพื้นที่หน้าตัดกลมหรือสี่เหลี่ยม และมีขนาดที่เหมาะสมในการหาค่า MOR
- การหดตัวเมื่อแห้ง (Drying shrinkage)

ในทางปฏิบัติน้ำดินมีความหนืดที่เปลี่ยนไปและไม่เหมาะสมในการนำไปใช้เทแบบ วิธีการปรับความหนืดของน้ำดิน สามารถทำได้โดย การเติมสารช่วยกระจายตัวหรือการเติมน้ำลงไป ซึ่งจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความหนืดและทริกโซโทรปีของน้ำดินได้

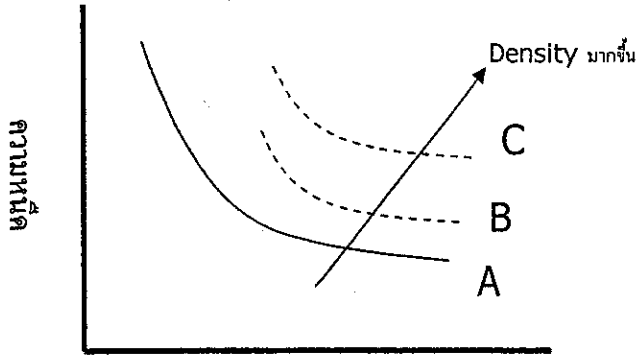
1. อิทธิพลของอัลคาไลน์ต่อความหนืดและทริกโซโทรปี



รูป 4.28 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง (a) ความหนืดและปริมาณสารช่วยกระจายตัว (b) ความหนืดและเวลา

2. อิทธิพลของน้ำต่อความหนืดและทริกโซโทรปี

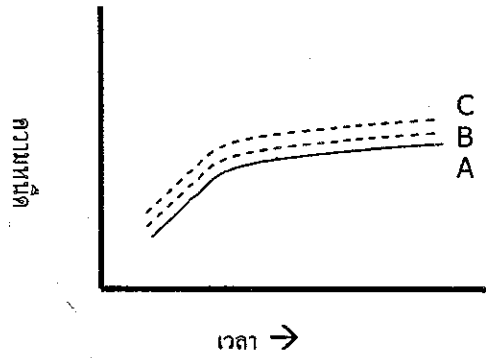
Deflocculation curve



Deflocculant →

(a)

Thixotropy curve



ผลต่อ Thixotropy น้อยมาก

(b)

รูป 4.29 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง (a) ความหนืดและปริมาณสารช่วยกระจายตัว (b) ความหนืดและเวลา

ตาราง 4.2 การปรับปรุงคุณภาพของน้ำดินหล่อ

วัตถุประสงค์	การไหลตัว	Thixotropy	ความต้งจำเพาะ
เติมน้ำยา	เพิ่ม	ลด	ลดลงเล็กน้อย
เติมน้ำ	เพิ่ม	ลดลงเล็กน้อย	ลด
เติมเนื้อดิน	ลด	เพิ่ม	เพิ่ม

- ค่าการไหลตัวสูง/thixotropy ต่ำ (น้ำมากเกินไป) : เทแบบหล่อได้ช้า ดินยุบตัวง่าย เพราะแตกหักง่ายขณะตากแห้ง
- ค่าการไหลตัวต่ำ/ thixotropy สูง (ดินและน้ำยามาก) : มีฟองอากาศในน้ำดิน เทน้ำดินออกได้ช้า ดินอืดและแห้งช้า

ตาราง 4.3 กรณีต่างๆในการปรับสมบัติของน้ำดินให้เหมาะสม

ความหนืด	Thixotropy	วิธีการปรับ	
		สารช่วยกระจาย	ความหนาแน่น
สูงเกินไป	สูงเกินไป เหมาะสม ต่ำเกินไป	เพิ่ม ----- ลด	----- ลด ลด
เหมาะสม	สูงเกินไป เหมาะสม ต่ำเกินไป	เพิ่ม ----- ลด	เพิ่ม ----- ลด
ต่ำเกินไป	สูงเกินไป เหมาะสม ต่ำเกินไป	เพิ่ม ----- ลด	เพิ่ม เพิ่ม -----

- คุณสมบัติของน้ำดินเช่น ความหนืดและทริโซโทรปี จะเป็นค่าที่เหมาะสมในการหล่อชิ้นงาน ทั้งนี้ค่าเหล่านี้จะแตกต่างกันในแต่ละโรงงานและแต่ละเนื้อดินปั้น
- ค่าทั่วไปคือ ความหนืดประมาณ 300 TTV, 35-45 TTV ใน 1.5 min thixotropy, 70/90 TTV ใน 5 min thixotropy และมีความหนาแน่นของน้ำดินขึ้นกับชิ้นงาน

การผลิตพิมพ์ปูนพลาสเตอร์

การออกแบบและการทำต้นแบบ

ในการออกแบบผลิตภัณฑ์เซรามิกที่ดีต้องคำนึงถึง

1. วัตถุประสงค์ในการผลิต เช่น เพื่อประโยชน์ใช้สอยหรือเพื่อประดับตกแต่ง
2. ความสวยงาม จินตนาการ เพื่อเป็นแรงดึงดูดให้ผู้ซื้อเลือกนำไปใช้ประโยชน์
3. ข้อจำกัดในการผลิต เช่น ข้อจำกัดในการเผา การหดตัวก่อนเผาและหลังเผา

4. อัตราการผลิตขึ้นอยู่กับว่าเป็นอุตสาหกรรมเซรามิกประเภทใด ถ้าเป็นงานฝีมือ มีจำนวนน้อย ก็สามารถทำการตกแต่งได้เต็มที่ แต่ถ้าเป็นการผลิตจำนวนมาก ก็ต้องคำนึงถึงต้นทุนด้วย

5. ตลาค ลูกค้ำ

ในการทำต้นแบบต้องมีการเขียนแบบออกมาก่อน โดยมีส่วนแปลน ภาพตัด ภาพด้านบน ด้านล่าง คำนวณการหดตัวของดิน

ตัวอย่างการคำนวณ เช่นการทำแจกันสูง 30 ซม. กว้าง 12 ซม. ดินมีการหดตัว 15 %
 ดังนั้นจะมีขนาดจริง $100 - 15 = 85$

ด้านความสูง

ผลิตภัณฑ์ที่มีความสูง 85 จะทำมาจากต้นแบบขนาด 100

ผลิตภัณฑ์ที่มีความสูง 30 ซม. ต้องทำมาจากต้นแบบ $(100 \times 30) / 85 = 32.29$ ซม.

ด้านกว้าง

ผลิตภัณฑ์ที่มีความกว้าง 85 จะทำมาจากต้นแบบขนาด 100

ผลิตภัณฑ์ที่มีความกว้าง 12 ซม. ทำมาจากต้นแบบ ขนาด $(100 \times 12) / 85 = 14.11$ ซม.

เมื่อได้ขนาดขยายแล้วก็ขึ้นรูปต้นแบบ ซึ่งอาจทำได้โดยการปั้น กลึง แกะ โดยจะใช้วัสดุที่ทำจากปูนพลาสเตอร์ ดิน หรือไม้

แม่พิมพ์มีหลายประเภท ได้แก่

1. แม่พิมพ์กด (Press mold)
2. แม่พิมพ์หล่อกลง (Drain casting mold)
3. แม่พิมพ์หล่อตัน (Solid casting mold)
4. แม่พิมพ์จิกเกอร์ (Jigger)
5. แม่พิมพ์โรลเลอร์เฮด (Roller head)

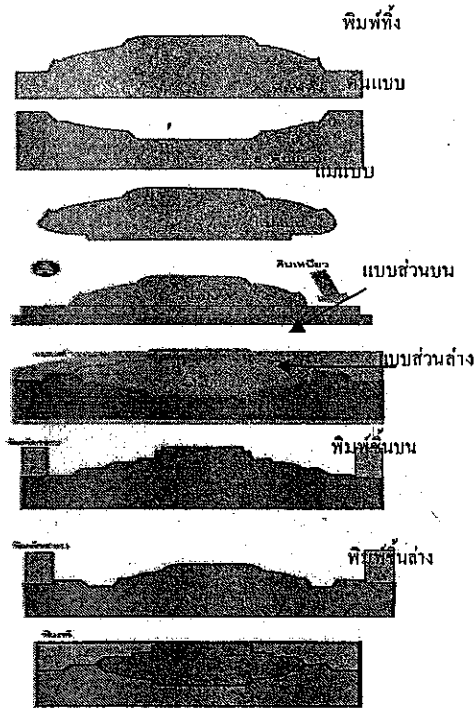
ลักษณะทางกายภาพของปูนพลาสเตอร์

ปัจจุบันมีโรงงานที่จำหน่ายปูนหลายโรงงาน ดังนั้นคุณสมบัติของปูนพลาสเตอร์จะมีความแตกต่างกัน ทำให้ในการนำมาใช้งานต้องมีการหามาตรฐานของปริมาณน้ำที่ใช้ในการ

ผสม เวลาในการคน ความแข็งของปูน การดูดซึมน้ำ ซึ่งปริมาณน้ำที่มากเกินไปจะทำให้เวลาในการคนนานขึ้น ความแข็งแก่่งน้อยลง แม้พิมพ์บิ่นหักง่าย ถึงแม้ว่าจะสามารถดูดซึมน้ำได้ดี แต่ถ้าปริมาณน้ำน้อยเกินไปก็จะใช้เวลาในการกวนสั้น เพราะปูนจะแข็งตัวเร็ว ปูนกับน้ำยังไม่เข้ากันดี ความแข็งแก่่งมีมากแต่การดูดซึมน้ำน้อย ทำให้รอบในการหล่อ น้อย อุณหภูมิของน้ำก็มีผลต่อเวลาในการกวนผสมและการหดตัว ดังนี้ น้ำที่อุ่นๆ อุณหภูมิประมาณ 25 เซลเซียสจะใช้เวลาในการกวนผสมสั้นลง ในการผสมปูน เราสามารถคำนวณหาปริมาณของปูนที่เหมาะสมกับขนาดของผลิตภัณฑ์ได้ โดยคำนวณจากปริมาตรของผลิตภัณฑ์ หรือแบบพิมพ์

แบบพิมพ์พลาสติกสำหรับเทแบบหล่อ

- Original model อาจทำด้วยพลาสติก ดินไม้ ขี้ผึ้งหรือโลหะ
- แบบซึ่งเหมือนกับแบบที่ใช้ในการเทแบบแต่ใช้เป็น case mold เรียกว่า block mold
- แบบซึ่งจะใช้สำหรับเทแบบพลาสติก เป็นส่วนใดส่วนหนึ่งของแบบพลาสติก ที่ใช้สำหรับขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ เรียกว่า case mold
- แบบที่ใช้ขึ้นรูป เรียก working mold ซึ่งจะเหมือนกับ block mold แต่ได้จากการเทแบบจาก case mold
- Consistency 60 = water 60 g / plaster 100 g
- Original molds and block molds ต้องการพลาสติกที่มีคุณสมบัติเกาะสลักได้ เรียบ แข็งตัวช้า สะดวกในการขึ้นรูป
- Case molds: ขยายตัวน้อย เพื่อกันการอัดแน่นหรือ ทำให้ block mold โค้งงอ มี consistency ต่ำ ผิวเรียบ แข็งแรง แต่ต้องไหลตัวดี เพื่อเก็บรายละเอียด ของแม่แบบไว้ได้



รูป 4.30 การผลิตพิมพ์พลาสติกสำหรับแหแบบหล่อ [6]

การควบคุมคุณภาพของแม่พิมพ์ปูนพลาสติก

คุณสมบัติของแม่พิมพ์พลาสติกที่ต้องการ

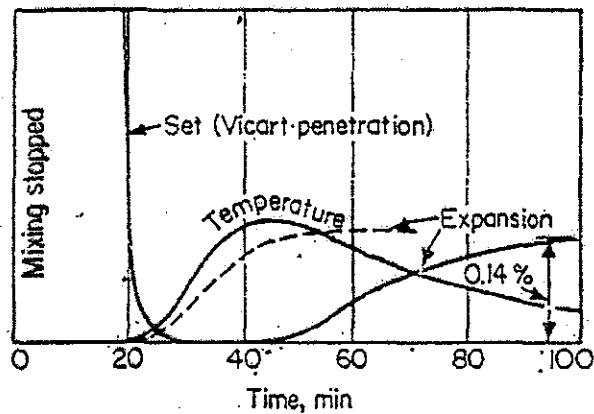
- การดูดซับน้ำของแบบพิมพ์ เพื่อควบคุมอัตราการหล่อ แม่พิมพ์พลาสติกที่มีการดูดซับน้ำมากจะทำให้อัตราการหล่อเร็ว เนื่องจากมีรูพรุนเล็กๆอยู่เป็นจำนวนมาก แต่อาจทำให้ความแข็งแรงของแม่พิมพ์ลดลง
- เวลาที่ใช้ในการเซตตัวคงที่
- การขยายตัวหลังจากปูนเซตตัวคงที่

การควบคุมการสร้างพิมพ์ปูนพลาสติก

- การควบคุมสต็อก
- การตวงที่แน่นอน
- ระยะเวลาการกวน

- การควบคุมน้ำ (คุณภาพของน้ำและอุณหภูมิ)
- การกำจัดฟอง

ในการเซ็ทตัวของพลาสติกอร์ ขณะที่พลาสติกอร์เซ็ทตัวจะมีความร้อนเกิดขึ้นและพลาสติกอร์มีการขยายตัว ดังรูป 4.31 ดังนั้นในการออกแบบแม่พิมพ์ต้องคำนึงถึงการขยายตัวของแบบด้วย



รูป 4.31 การเซ็ทตัวของปูนพลาสติกอร์ [1]

แบบฝึกหัดท้ายบท

1. เขียนแผนภาพแสดงการผลิตไวท์แวร์ โดยขึ้นรูปด้วยวิธี Roller head เริ่มตั้งแต่การเตรียมเนื้อดินจนกระทั่งได้ผลิตภัณฑ์
2. น้ำดินมีความถ่วงจำเพาะ 1.8 มีน้ำหนัก 100 กิโลกรัม นักศึกษาพบว่าน้ำดินมีความชื้นเกินไปทำให้เกิดปัญหาในการนำน้ำดินไปเทแบบหล่อ ถ้าต้องการปรับน้ำดินให้มีความถ่วงจำเพาะลดลง 1.7 ต้องเติมน้ำลงไปใต้น้ำดินเท่าไร

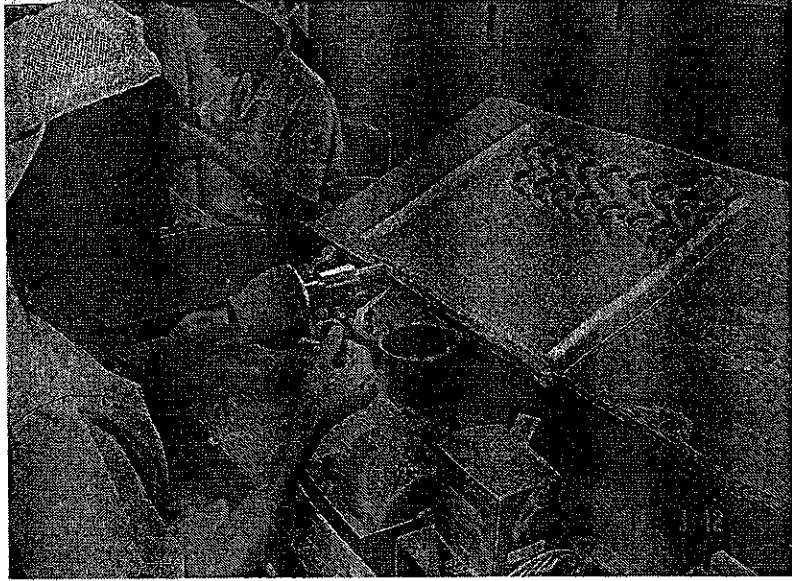
บทที่ 5 การอบแห้งและการเผาผลิตภัณฑ์ไวท์แวร์

ในกระบวนการผลิตเซรามิก ในบทที่ผ่านมาเราได้รู้จักกระบวนการขึ้นรูปแบบต่างๆและวิธีการควบคุม ในบทนี้เราจะได้เรียนรู้เกี่ยวกับการอบแห้งและการเผาไวท์แวร์ ก่อนจะนำชิ้นงานไปผ่านการอบ ผลิตภัณฑ์จะต้องนำมาตกแต่ง (Finishing, fettling) ซึ่งได้แก่

1. การตัดขอบและการแต่งรอยตะเข็บ (Cutting and trimming) ดังรูป 5.1
2. การชุบแต่งผิวผลิตภัณฑ์ด้วยวิธีการกลึง (turning)
3. การติดชิ้นส่วนประกอบของชิ้นงาน (Sticking up) ดังรูป 5.2
4. การขัดแต่งผิวด้วยแปรงและฟองน้ำ (Towing and sponging)



รูป 5.1 การตัดขอบและการแต่งรอยตะเข็บ



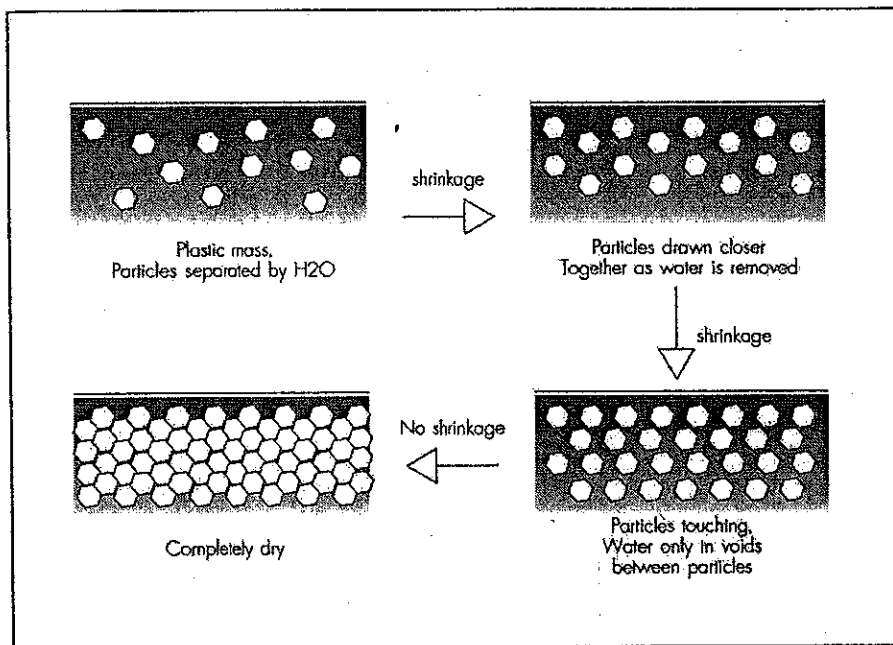
รูป 5.2 การติดยุด้วยกาแพ

การอบแห้ง (Drying)

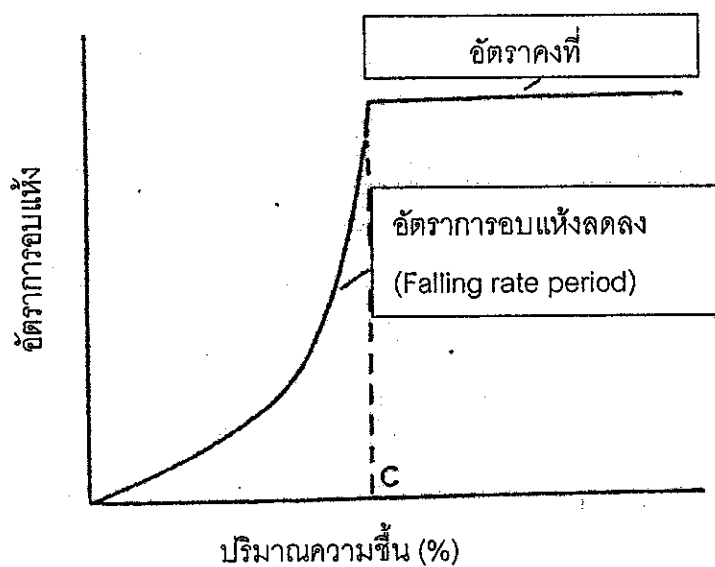
ในการอบแห้งขึ้นผลิตภัณฑ์ เป็นกระบวนการไล่น้ำออกจากผลิตภัณฑ์จนน้ำที่ผิวอนุภาคและรูพรุนระเหยออกไป ก่อนที่นำผลิตภัณฑ์ไปเผา ปัจจุบันที่มีผลต่อการอบแห้งได้แก่ ลม ความชื้น อุณหภูมิ การหดตัวของเนื้อดิน การระเหยน้ำด้วยพลังงานความร้อน ซึ่งได้แก่การพาหรือการแผ่รังสีความร้อน ปริมาณความร้อนที่ทำให้ความชื้นในผลิตภัณฑ์มีอุณหภูมิสูงขึ้นถึงจุดเดือดทำให้น้ำระเหยออกไป ปริมาณความร้อนที่ทำให้อุณหภูมิของผลิตภัณฑ์ ห่ออบและบรรยากาศภายในห้องอบร้อนถึงจุดสูงสุด รวมทั้งปริมาณความร้อนที่สูญเสียไปกับก๊าซที่ผ่านออกไปจากห้องอบ

กลไกในการอบแห้ง

น้ำหรือความชื้นที่อยู่ในเนื้อผลิตภัณฑ์หลังจากขึ้นรูปจะมีอยู่ตามผิวของอนุภาคหรือตามช่องว่าง รูพรุนที่มีอยู่ เมื่อนำไปอบที่อุณหภูมิที่น้ำระเหยออกไป ทำให้อนุภาคเข้ามาใกล้กันมากขึ้น และทำให้เกิดการหดตัวของผลิตภัณฑ์ ดังรูป อัตราการอบแห้ง (น้ำหนักของน้ำที่หายไปต่อนาที) กับปริมาณความชื้นในเนื้อผลิตภัณฑ์

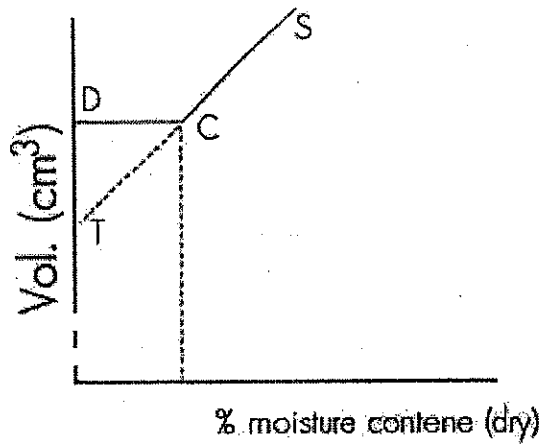


รูป 5.3 กลไกการอบแห้งเซรามิก



รูป 5.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการอบแห้ง และปริมาณความชื้นในผลิตภัณฑ์

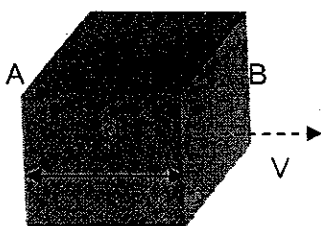
ในช่วงแรกของการอบแห้ง ความชื้นในผลิตภัณฑ์ลดลงด้วยอัตราคงที่ นั่นคือน้ำที่อยู่ระหว่างอนุภาคค่อยๆระเหยไป ในช่วงนี้อัตราการอบแห้งคงที่ขึ้นอยู่กับการระเหยของน้ำ เมื่อน้ำระเหยไปจนกระทั่งอนุภาคหดตัวเข้ามาใกล้กันมากขึ้น ที่จุด C ซึ่งพบว่าอัตราการอบแห้งลดลงเป็นเส้นโค้ง เรียกว่า falling rate period อัตราการอบแห้งในช่วงนี้ขึ้นอยู่กับการแพร่ของน้ำที่อยู่ในรูพรุน



รูป 5.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของผลิตภัณฑ์และเปอร์เซ็นต์ความชื้น

At moisture content (จุด C), อนุภาคเข้ามาใกล้กัน ยังคงมีน้ำอยู่ในช่องว่างระหว่างอนุภาค แต่การระเหยของน้ำภายหลังจุดนี้จะไม่ทำให้อนุภาคหดตัวอีก ซึ่งเรียกว่า Critical moisture content (CMC) ค่านี้เปลี่ยนแปลงไปขึ้นอยู่กับอัตราส่วนดินต่อวัตถุดิบที่ไม่เหนียว การกระจายของขนาดอนุภาค รูปร่างของอนุภาค ดังนั้นค่านี้จะทำให้เราสามารถหลีกเลี่ยงการแตกหรือการบิดเบี้ยวขณะอบแห้งได้ ซึ่งต้องให้การแห้งช้าๆ หลังจากนั้นก็สามารถจะเพิ่มอัตราการแห้งได้ เพราะจะไม่มี การหดตัวอีกต่อไป

การอบแห้งสามารถอธิบายได้โดยอัตราการไหลของความชื้นดังสมการ



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

$$\text{Or } \frac{dV}{dt} = \frac{k(B-A)}{d} \cdot \frac{p}{\eta}$$

Where dV/dt = volume rate of flow

A = the water concentration on the wetter face

B = the water concentration on the drier face

k = ค่าคงที่

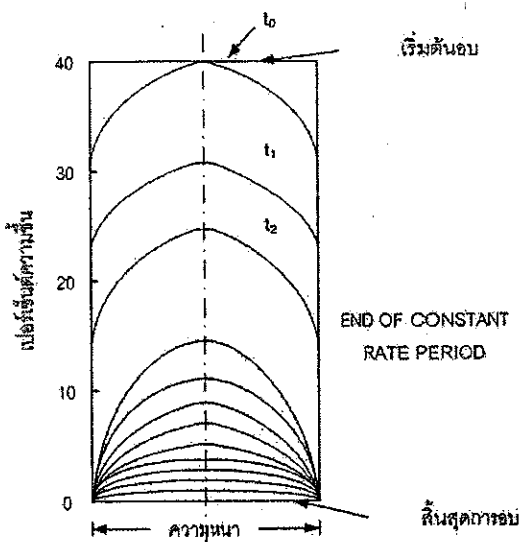
d = ระยะทางที่มีการไหล

p = permeability of body การซึมผ่านได้ในเนื้อวัตถุ

η = ความหนืดของน้ำ

ดังนั้นถ้าต้องการให้อัตราการไหลสูงขึ้น ทำได้โดยการเพิ่มการซึมผ่านได้ หรือเพิ่มความ

แตกต่างของความชื้นทั้งสองด้าน หรือลดความหนืดของน้ำ



รูป 5.6 แผนภาพการกระจายความชื้นภายในเนื้อเซรามิกตามความหนาของผลิตภัณฑ์

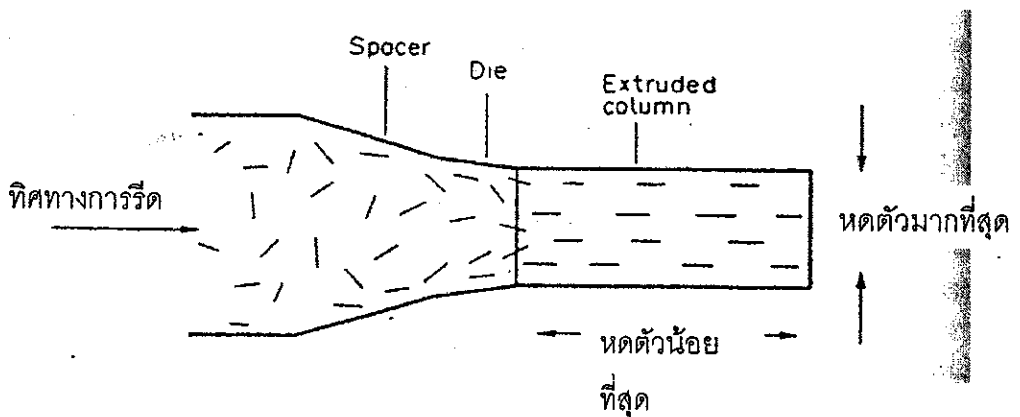
การกระจายความชื้นภายในเนื้อวัตถุ การแห้งจะเริ่มจากขอบหรือที่ผิวของวัตถุ ส่วนบริเวณตรงกลางจะแห้งช้าที่สุด ยิ่งการอบแห้งช้าเท่าไร ก็จะทำให้การกระจายความชื้นภายในกับภายนอกวัตถุไม่แตกต่างกันมากนัก จากรูป 5.6 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการกระจายความชื้นภายในเนื้อผลิตภัณฑ์ตามความหนา โดยแสดงว่าช่วงแรกของการอบ จะมีการระเหยของน้ำที่ผิวมากกว่าตรงกลาง เพราะเป็นช่วงที่น้ำเริ่มระเหยออกไป ในช่วงนี้จะต้องอบแห้งช้าๆมาก เพราะการกระจายความชื้นที่ขอบและตรงกลางมีความแตกต่างกันมาก อาจทำให้ผลิตภัณฑ์แตกร้าวได้

จนกระทั่งถึงจุดปลายของ Constant rate period ซึ่งผลิตภัณฑ์จะไม่มี การหดตัวอีก การกระจาย ความชื้นจะค่อยๆ สม่ำเสมอ นั่นคือเส้นกราฟการกระจายจะเป็นเส้นโค้งน้อยลง

วิธีการลดการหดตัวของเนื้อดินปั้นทำได้โดย

1. การเพิ่มปริมาณวัตถุดิบที่ไม่มีความเหนียวลงในเนื้อดินปั้น
2. วัตถุดิบที่นำมาผสมมีขนาดอนุภาคใหญ่
3. ใช้การขึ้นรูปโดยใช้ความดัน ในการขึ้นรูปแบบนี้จะเตรียมเนื้อดินที่มีความชื้นน้อย ทำให้ไม่มีการหดตัวมากนัก

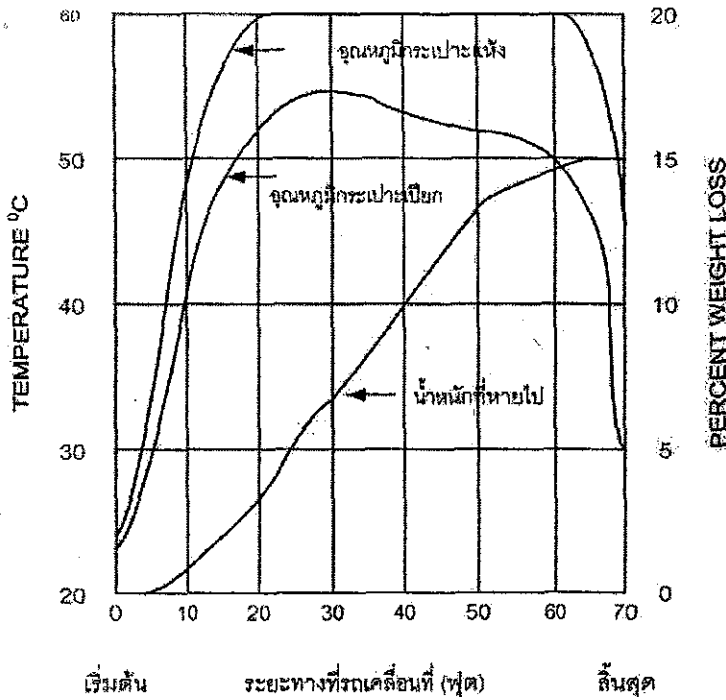
ในการอบแห้งผลิตภัณฑ์ อัตราการแห้งของผลิตภัณฑ์ขึ้นกับชนิดของเนื้อดิน รูปร่าง ขนาด ความหนาของผลิตภัณฑ์ อัตราส่วนของพื้นที่ผิวต่อปริมาตรของผลิตภัณฑ์มาก จะทำให้อบแห้งได้เร็ว กรณีมีความชื้นในพิมพ์พลาสติก 5-20% อุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งไม่ควรเกิน 105°C ถ้าพิมพ์แห้งไม่ควรให้อุณหภูมิเกิน 45°C การหดตัวของผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการขึ้นรูปโดยการรีดด้วย Extruder จะมีการหดตัวมากที่สุดในทิศทางตั้งฉากกับทิศทางการจัดเรียงตัวของอนุภาค และน้อยที่สุดในทิศทางการเรียงตัวของอนุภาค ดังรูป 5.7



รูป 5.7 การหดตัวของเนื้อผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการรีด

ในอุตสาหกรรม ต้องการผลิตรออกมาเป็นปริมาณมาก ดังนั้นการอบแห้งเร็วจะทำให้เพิ่มอัตราการผลิตได้ ในการเพิ่มอัตราการอบแห้ง อาจทำได้โดยการอบในบรรยากาศที่มีความชื้น (Humidity drying) ที่อุณหภูมิสูงน้ำจะมีความหนืดต่ำ ทำให้มีการระเหยของน้ำเร็วขึ้น ดังนั้นที่อุณหภูมิสูงน้ำจะระเหยออกไปเร็ว ทำให้เกิดการแตกร้าวได้ เพื่อลดการแตกร้าว จะอบชิ้นงานในบรรยากาศที่อึดตัวไปด้วยความชื้น

ในช่วงแรกๆของการอบและเมื่อชิ้นงานได้รับความร้อนเต็มที่แล้ว ความชื้นจะลดลงอย่างรวดเร็ว โดยไม่ให้เกิดความเครียด (stress) เกิดขึ้นในชิ้นงาน ดังรูป 5.8

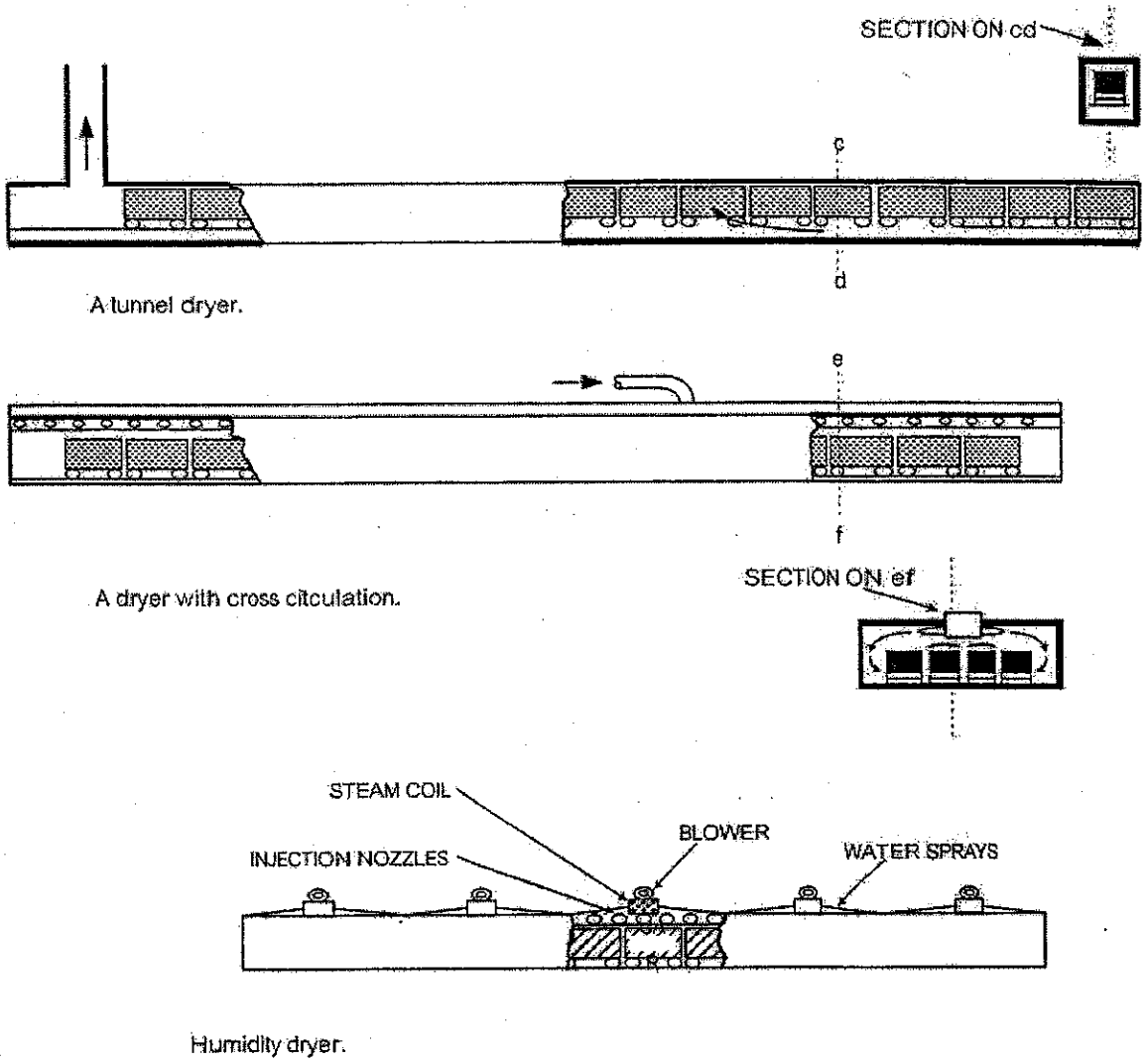


รูป 5.8 การอบแห้งภายใต้บรรยากาศที่ควบคุมความชื้น

ชนิดของตู้อบแห้งในอุตสาหกรรม

1. Tunnel dryer ผลิตภัณฑ์ที่วางบนรถและผ่านเข้าไปในตู้อบชิ้นๆ รถจะเคลื่อนไปตามความยาวของตู้อบ ความร้อนให้โดยขดลวดความร้อน หรือความร้อนที่ได้จากเตาเผา
2. Cross-circulation dryer: เป็นตู้อบที่มีการกระจายความร้อนโดยใช้การพาความร้อนจากพัดลมที่เป่าลมร้อนไปทั่วห้องอบ
3. Humidity dryer: คล้ายๆ tunnel dryer โดยจะแบ่งห้องอบออกเป็นส่วนๆ ผลิตภัณฑ์จะถูกให้ความร้อนอย่างรวดเร็วในบรรยากาศที่เต็มไปด้วยความชื้น เพื่อลดความเหนียวของน้ำ และอบที่อุณหภูมิคงที่ จากนั้นผลิตภัณฑ์จะถูกส่งไปยังห้องอบถัดไปที่มีความชื้นลดลง ทำให้สามารถอบแห้งได้เร็วโดยที่ผลิตภัณฑ์ไม่แตกร้าว

4. Tableware dryer: ตู้อบแห้งผลิตภัณฑ์ที่อยู่ในแบบ ซึ่งอุณหภูมิในการอบจะไม่เกิน 70°C



รูป 5.9 ห้องอบผลิตภัณฑ์ที่ใช้ในอุตสาหกรรม

การเผา (Firing)

การเผาผลิตภัณฑ์เซรามิกมี 3 ขั้นตอน

1. การเผาดิบ (biscuit firing)

ไล่ความชื้นและสารอินทรีย์ (OF)

24°C เพิ่มอุณหภูมิช้าๆ ไม่เกินชั่วโมงละ 100°C

100-250°C ระบายไอน้ำออกจากเตาเผา

230-573°C ผลึกควอทซ์มีการขยายตัว ไม่เกินชั่วโมงละ 100°C

600°C ช่วงเผาปลอดภัย ข.ม. ละ 150-200°C

750-800°C สิ้นสุดการเผาดิบ

ผลิตภัณฑ์ที่มีขนาดใหญ่ควรอุ่นที่ 60-80°C เป็นเวลา 2-4 hr. ห้ามเปิดเตาก่อนอุณหภูมิ 150°C

เพราะอาจทำให้ผลิตภัณฑ์เกิดการแตกร้าวเสียหายได้

2. เผาเคลือบ (Glost firing)

ช่วง 1 อุณหภูมิห้อง 24-950°C for 5-6 hrs.

ช่วง 2 950-1250°C OF for 3-4 hrs.

or 950-1250°C RF for 4-5 hrs.

ช่วง 3 Soaking 1250°C for 15 min or longer

คำนี้ถึง การให้ความร้อนและการเย็นตัวลง

การเผาไล่คาร์บอนให้หมดจากเนื้อดินที่มีเคลือบปิดทับอยู่

จุดศูนย์กลางของเคลือบและบรรยากาศในการเผา

3. เผาตกแต่ง (Decoration firing)

- ตกแต่งบนเคลือบ (Overglaze decoration): 650-850°C

- ตกแต่งสีเงินหรือสีทอง OF 750°C

- อุณหภูมิต่ำกว่าการเผาเคลือบ

- อุณหภูมิที่สีตกแต่งคงทน

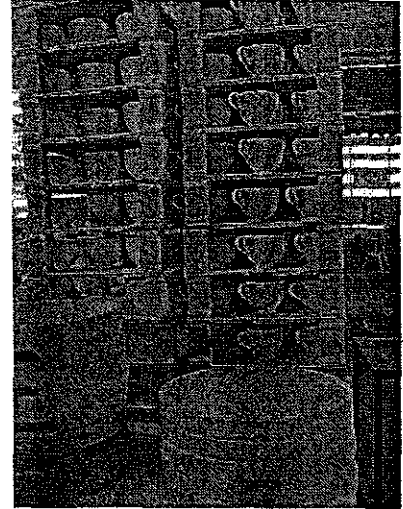
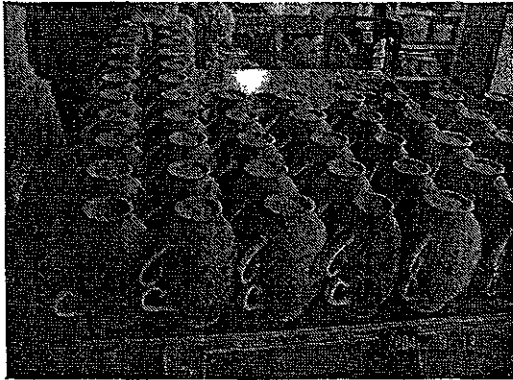
การเรียงผลิตภัณฑ์เพื่อเข้าเผาในเตา เป็นสิ่งสำคัญ ขึ้นอยู่กับขนาด รูปร่างของผลิตภัณฑ์ และ

ชนิดของผลิตภัณฑ์ เช่นการเผาบิสกิตที่ 800-900°C จะทำการเรียงเผาซ้อนกันได้ โดยการวาง

ผลิตภัณฑ์ให้ประหยัดเนื้อที่มากที่สุด เพื่อจะได้เผาปริมาณมาก การเรียงเผาที่ดีจะต้องสามารถ

ควบคุมรูปทรงของผลิตภัณฑ์ได้ เพราะในการเผาผลิตภัณฑ์จะมีการอ่อนตัวเสียรูปได้ อาจจะต้องมีชั้น

รองเพื่อไม่ให้ผลิตภัณฑ์บิดเบี้ยว หรือป้องกันการติดกันในกรณีที่เผาเคลือบ ดังรูป 5.10



รูป 5.10 การเรียงผลิตภัณฑ์ด้วยกาแฟ ในการเผาดิบและการเผาเคลือบ

ปัจจัยที่มีผลต่อการเผาผลิตภัณฑ์

1. ปัจจัยของส่วนประกอบเนื้อดิน
2. ปริมาณน้ำในเนื้อดิน
3. ไล่สิ่งเจือปน อินทรีย์สาร การไล่ sulphurous impurities
4. การเกิดปฏิกิริยาแบบ Reduction หรือ oxidation ของส่วนประกอบในเนื้อดินปั้น
5. การเปลี่ยนแปลงปริมาตรของเนื้อดิน อันเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของส่วนประกอบในเนื้อดินที่เกิดขึ้นในระหว่างการเผาหรือการเย็นตัว
6. อุณหภูมิ ณ จุดสุดท้าย

ปัจจัยจากการเตรียมเนื้อดินปั้น

1. ขนาดอนุภาค
2. รูปร่างและขนาดของชิ้นงาน
3. ความสามารถในการไล่ก๊าซและการนำความร้อน

การกำหนดอุณหภูมิและเวลาในการเผาผลิตภัณฑ์ สามารถทำได้ถ้าทราบปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในช่วงของอุณหภูมิการเผา รวมไปถึงการขยายตัวหรือหดตัวของชิ้นงานในระหว่างที่อยู่ภายในเตา

การเผาเร็ว จะช่วยลดปริมาณการใช้เชื้อเพลิง แต่ต้องคำนึงถึงการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างเล็กๆ และ ปฏิกิริยาเคมี เช่นจะเกิดการละลายของหินแก้วได้น้อย ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่น้อย การบดดินให้ละเอียด จะช่วยลดการสึกตัวได้

ตาราง 5.1 อุณหภูมิสุดท้ายของผลิตภัณฑ์ประเภทต่างๆ [1]

Product	Temperature, °C	
	Electric	Fuel
Artware talc body.....		1030
Tile wall.....		1080
Semivitreous table ware.....		1225
Stoneware.....	Heating wires	1225
Bone china.....		1250
Hotel china.....		1250
Vitreous plumbing fixtures.....		1270
Electrical porcelain.....		1300
Ferrites.....	Heating wires	1310
Hard porcelain.....		1320
Titanates.....		1330
98% Al ₂ O ₃		1750
99% Al ₂ O ₃		1800
99.9% Al ₂ O ₃		1900

การวัดอุณหภูมิด้วย pyrometric cone

ในการวัดอุณหภูมิในเตาเผาเซรามิกที่มีขนาดใหญ่ การกระจายความร้อนภายในเตาไม่สม่ำเสมอ จะมีผลทำให้ผลิตภัณฑ์หลังเผามีคุณสมบัติเปลี่ยนไปได้ ในการวัดอุณหภูมิในเตาวิธีหนึ่งที่สามารถวัดอุณหภูมิในบริเวณต่างๆภายในเตาได้ และมีราคาไม่แพง คือการใช้ Pyrometric cone ซึ่งเรียกว่า Seger cone และ Orton cone เป็นลักษณะโคนเอียง ในการใช้วัดอุณหภูมิในเตาจะปักโคนให้เอียงประมาณ 82±2° กับแนวนอน เบอร์และส่วนผสมของโคนบอกถึงจุดหลอมตัวหรือจุดที่อุณหภูมิภายในเตาพอดีที่จะทำให้โคนอ่อนตัวโค้งมาแตะฐาน การปักโคนจะใช้โคนสามเบอร์ โดยเรียงจากเบอร์ต่ำไปสูง ให้เบอร์ของโคนที่ใช้วัดอุณหภูมิอยู่ตรงกลาง ต้องระวังเรื่องอัตราการเพิ่มความร้อนภายในเตาบรรยากาศภายในเตา ความเร็วของแก๊ส อุณหภูมิของผนังเตา โคนเบอร์ที่ใช้วัดอุณหภูมิล้ม หมายถึงเคลือบนั้นสุกพอดี

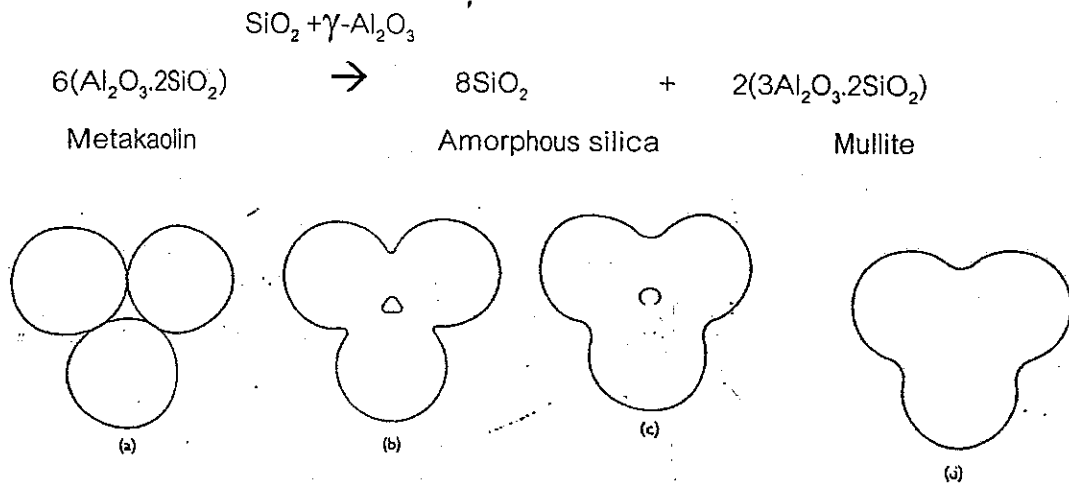
ตาราง 5.2 ข้อผิดพลาดหรือปัญหาที่เกิดจากการใช้โคน

พฤติกรรมของ Seger Cone	สาเหตุ	การแก้ไข
โคนล้มตัวในลักษณะที่ผิด	ฐานโคนไม่ดี มีส่วนผสมไม่ถูกต้อง ฐานโคนต้องไม่บิดเบี้ยว	สำหรับฐานปักโคนเบอร์ไม่เกิน SK20 จะใช้ดินผสมดินเผาแล้วเป็นส่วนผสมของฐานได้
โคนที่ใช้ล้มพร้อมๆกันหรือล้มตามกันเร็วมาก หรือล้มไม่เป็นระเบียบ	ปักโคนลึกเกินไปวางโคนในตำแหน่งที่ไม่ถูกต้อง	โคนมาตรฐานควรปักลึก 3-4 มิลลิเมตร โคนขนาดเล็กควรปักลึก 2-3 มิลลิเมตร โคนควรจะวางอยู่ในจุดที่ได้รับความร้อนโดยการแผ่รังสี
โคนพองตัวระหว่างการเผา การเผาจะล้มตัวช้ากว่าปกติ	เผาเร็วมากเกินไปทำให้คาร์บอนไม่สามารถเผาไหม้หมดไปก่อน	เผาช้าลงและให้มีอากาศมากเพียงพอ
หลังเผาผิวโคนขรุขระ เนื้อด้านในโคนมีการหลอม โคนไม่ล้มหรือล้มช้า	มีแก๊สหลายชนิด เช่น ไอน้ำ SO ₂ และอื่นๆ ทำปฏิกิริยาที่ผิวโคน แก๊สเหล่านี้มาจากจากการเผาไหม้ของสิ่งที่ไม่สะอาดในเตา โครงสร้างเตาหรือพื้นเตา	เนื่องจากไอและแก๊สต่างๆทำให้เกิดข้อบกพร่องในการเผาผลิตภัณฑ์ การทดสอบการหลอมตัวของโคนจะให้ข้อมูลที่มีความมากต่อคำานานที่เกิดจากการเผา
สีของโคนหายไปหรือผิดไปหลังเผา ปกติจะไม่มีผลต่อการล้มตัวของโคน	เนื่องจากซีเมนต์ที่เกิดจากการเผาไหม้ไปสะสมบนโคน	บ่อยครั้งการพบสิ่งเหล่านี้ให้ข้อมูลที่แสดงว่า เตาและผลิตภัณฑ์ที่เข้าเผาแห้งไม่เพียงพอ
หลังเผาสีของโคนมีลักษณะคล้ายเคลือบ ปกติจะไม่มีผลต่อการล้มตัวของโคน	มักเกิดในบรรยากาศที่มีตะกั่วออกไซด์ หรือบอริก ออกไซด์ ซึ่งอาจมาจากเคลือบที่ทำการเผา	
โคนเกิดรอยแตกระหว่างการเผา	ใส่โคนเข้าในเตาที่ร้อนอยู่แล้ว	

การเปลี่ยนแปลงของเนื้อผลิตภัณฑ์ระหว่างการเผา

ในการเผาผลิตภัณฑ์ประเภทต่างๆ สิ่งที่ต้องคำนึงถึงคือการเกิดการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพและทางเคมีของวัตถุดิบเมื่อได้รับความร้อน การศึกษาการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นระหว่างการเผา ทำให้เราสามารถควบคุมการเผาได้ ในการเผานั้นจะมีการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นทั้งทางกายภาพและทางเคมี การเปลี่ยนแปลงทางกายภาพคือ การลดพื้นที่ผิว ลดความพรุนตัว ทำให้เกิดการรวมตัวหลอมละลาย (Vitrification) หลังเผาเนื้อดินเปลี่ยนสภาพเป็นแก้ว 50-60% และผลึก mullite ($3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$)

และ Free quartz ในการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นขณะขึ้นเตาจริง ดังแสดงดังรูป อนุภาคที่อยู่ใกล้กันจะเกิดการแพร่เข้ามาใกล้กันมากขึ้นและเกิดเป็นคอรระหว่างอนุภาค ทำให้รูพรุนลดลง

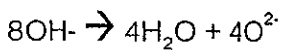


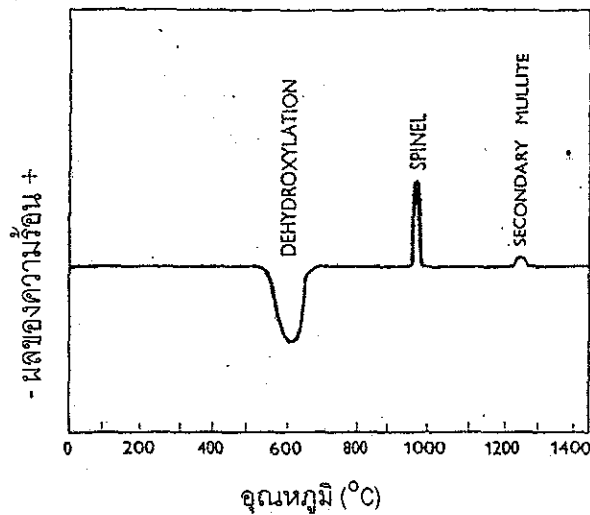
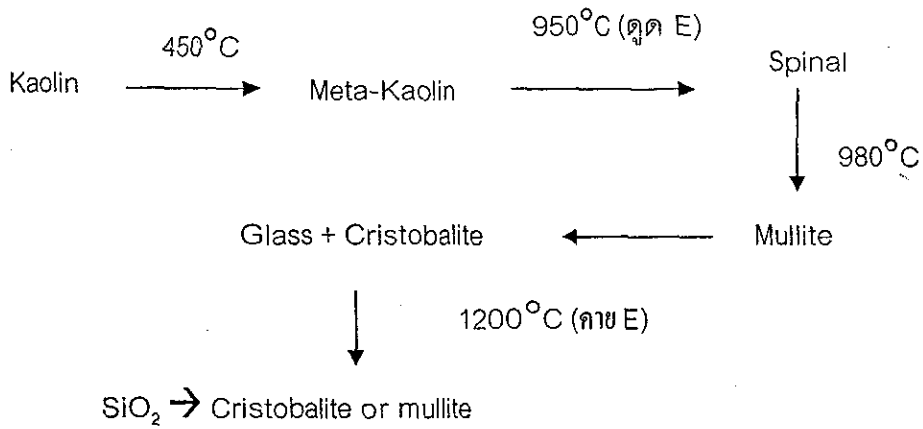
รูป 5.11 (a) Contacting spheres, (b) Necks built up at contact points, (c) Spherical pore remaining, (d) Pore closed

การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นทางเคมีสามารถตรวจสอบได้ด้วยเครื่องมือวิเคราะห์ต่างๆ เช่น การตรวจหาจุลโครงสร้าง โดยใช้ Optical microscope, SEM หรือ TEM การตรวจสอบเฟสที่เกิดขึ้นหลังเผาด้วย XRD การตรวจสอบการขยายตัวเมื่อได้รับความร้อน หรือการวิเคราะห์ด้วย Differential thermal analysis

อิทธิพลของพลังงานความร้อนที่มีต่อแร่ดิน kaolinite

1. การสูญเสียน้ำในโครงสร้างเมื่อ 450°C

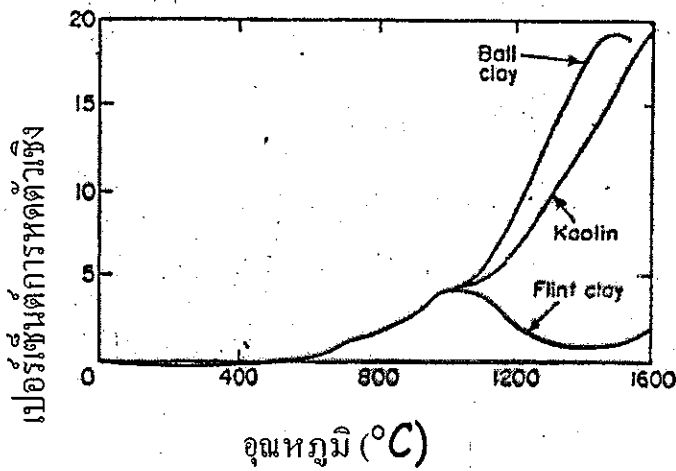




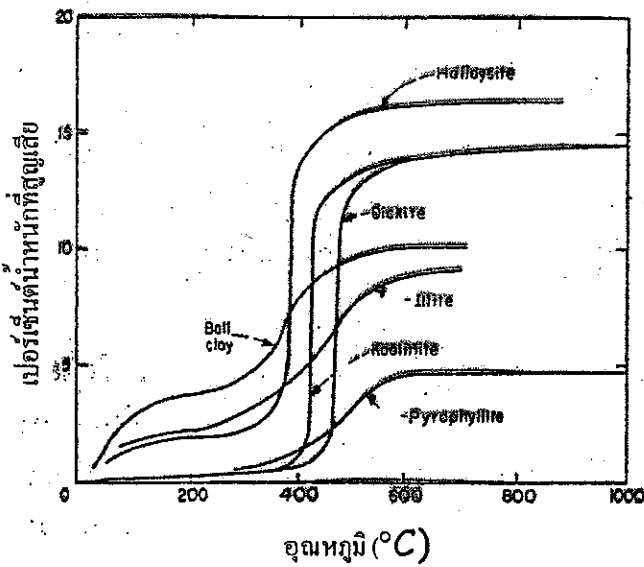
รูป 5.12 การเปลี่ยนแปลงทางความร้อนของดิน Kaolin โดย DTA [1]

อิทธิพลของพลังงานความร้อนต่อแร่มอริโดไนท์

- TOT sheet มีพื้นที่ผิวมากกว่า kaolin
- น้ำที่ดูดซับบนผิวของแร่ ระเหยไปที่ 100°C
- น้ำที่ล้อมรอบพวกอนุภาคที่ถูกดูดซับบนผิวแร่ ที่ 200°C
- ขจัดกลุ่ม OH- ที่ 600°C (weight loss)
- ตกผลึก (คายพลังงาน) ที่ 800°C เกิดเป็น spinel → glass → mullite



รูป 5.13 การหดตัวหลังเผาของดินสามชนิด [1]



รูป 5.14 น้ำหนักที่หายไปหลังเผาของดินชนิดต่างๆ [1]

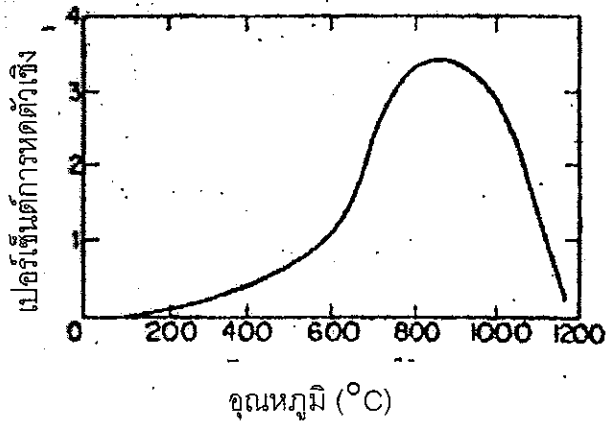
อิทธิพลของพลังงานความร้อนที่มีต่อไพโรฟิลไลต์

500 - 550°C สลายโครงสร้าง

1000-1100°C เกิด mullite and glass

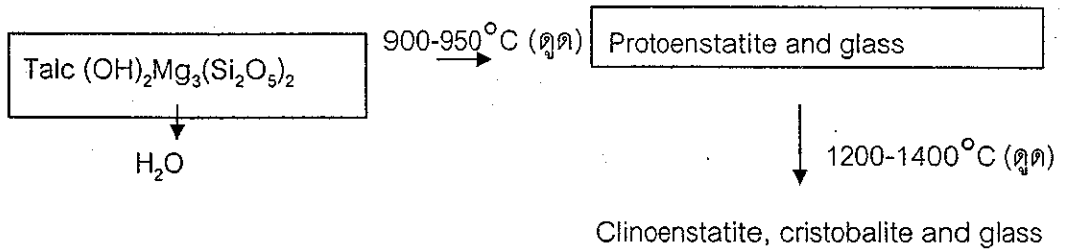
700°C expansion to 1200°C (dehydroxylation) และหดตัวอย่างรวดเร็วเนื่องจาก OH-group

หลุดออก



รูป 5.15 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง % การหดตัวเชิงเส้นและอุณหภูมิเผาของไฟโรฟิลไลต์ [1]

อิทธิพลของพลังงานความร้อนที่มีต่อทัลก์



อิทธิพลของพลังงานความร้อนที่มีต่อ Muscovite

- 940-980°C โครงสร้างแตกออก
- 1000°C เกิด muscovite, small mullite และ corundum
- 1100°C Mullite มีผลึกโตขึ้น
- 1200°C เกิด Mullite และ corundum

อิทธิพลของความร้อนที่มีต่อซิลิกา

Quartz Inversion

573°C

- low quartz (2.65) → high quartz (2.63)

117-163°C

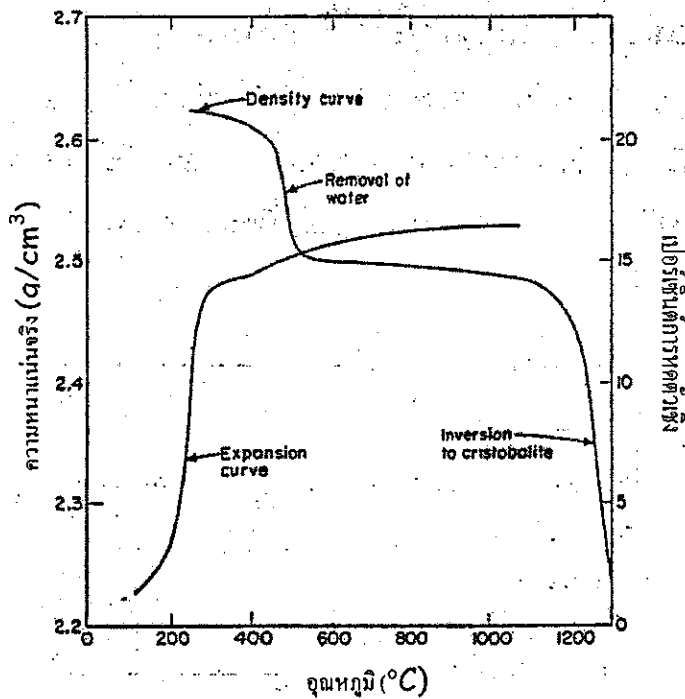
- Low tridymite (2.27) → high tridymite (2.26)

200-280°C

- Low cristobalite (2.33) → high cristobalite (2.29)

Flint (มีความหนาแน่น = 2.61)

- 250-300°C → กำจัด H₂O 50%
- 350-500°C → กำจัด H₂O 30%
- 1000°C → กำจัดน้ำทั้งหมด
- 1150-1200°C → flint → cristobalite สมบูรณ์ที่ 1250°C

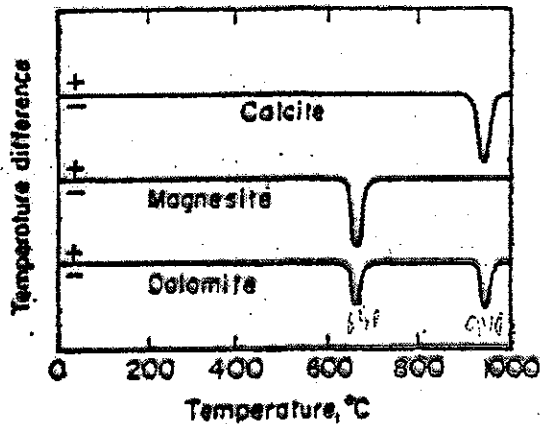


รูป 5.16 การเปลี่ยนแปลงของความหนาแน่นและ % การหดตัวเชิงเส้นของ Flint [1]

อิทธิพลของพลังงานความร้อนที่มีต่อ CaCO₃ และ MgCO₃

- แคลเซียมคาร์บอเนต แมกนีเซียมคาร์บอเนต และแรโดโลไมท์ (xCaCO₃.yMgCO₃)
- CaCO₃ → CaO + CO₂

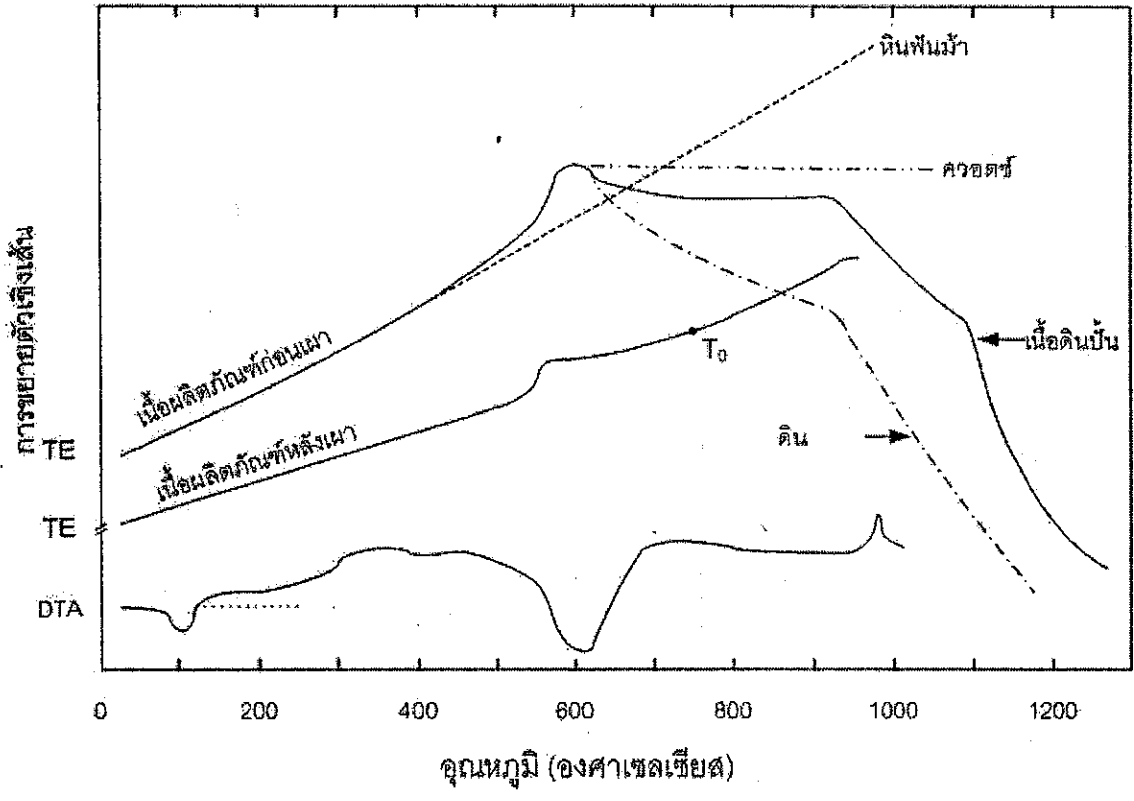
- $\text{MgCO}_3 \rightarrow \text{MgO} + \text{CO}_2$
- $\text{CaCO}_3, \text{MgCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{MgO} + 2 \text{CO}_2$



รูป 5.17 พฤติกรรมของ Dolomite, Magnesite, Calcite เมื่อได้รับความร้อน [1]

ผลิตภัณฑ์เซรามิกเมื่อเผาที่อุณหภูมิต่างๆ จะมีการเปลี่ยนแปลงดังนี้

- 100-200°C น้ำที่อยู่รอบๆอนุภาคดินระเหยออกเป็นไอ ถ้าเผาเร็วเกินไป ใอน้ำระเหยออกไม่ทัน ผลิตภัณฑ์จะระเบิดในเตา
- 450°C น้ำในสูตรเคมีของดินเริ่มระเหย $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
- 230-573°C ผลึกของซิลิกาหรือควอทซ์ เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปผลึก ทำให้ดินเกิดการขยายตัวอย่างรวดเร็ว ถ้าเผาเร็วในช่วงนี้ ผลิตภัณฑ์จะระเบิดในเตา
- 500-600°C น้ำที่เป็นส่วนประกอบทางเคมีของดินถูกเผาออกไปหมด อินทรีย์สารในดินถูกเผาไหม้
- 900-950°C กากดำถ่านของอินทรีย์สาร (Carbon) ในเนื้อดินถูกเผาไหม้หมดไป หินปูนสลายตัว ทำให้เกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ที่อุณหภูมิ 825°C
- 980°C ดินเปลี่ยนโครงสร้างเริ่มเกิดการหดตัว จากการหลอมละลายรวมตัวของวัตถุดิบ เกิดเป็นของเหลว
- 1050-1100°C เฟลตสปาร์ในเนื้อดินเริ่มหลอมละลาย เกิดโครงสร้างรูปเข็มประสานกันเป็นผลึกมัดไลท์ในดิน ช่วยให้เนื้อดินนั้นมีความแข็งแรง และการหดตัวยังเป็นไปอย่างต่อเนื่อง
- 1200°C ผลึกมัดไลท์มีมากขึ้น ดินหลอมละลายปิดรูพรุน เนื้อแน่นมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น



รูป 5.18 กราฟการขยายตัวเชิงเส้นเมื่อได้รับความร้อนของ และกราฟการเปลี่ยนแปลงทางความร้อนของเนื้อผลิตภัณฑ์ [9]

เมื่อเวลาในการเผายาวนานขึ้น จะทำให้ความหนาแน่นลดลงได้ เนื่องจากการขยายขนาดของรูพรุน หรือมีการบวมที่เกิดขึ้นเนื่องจากก๊าซที่เกิดจากปฏิกิริยาทางความร้อน ก๊าซที่ไม่ละลายได้ ได้แก่ N_2 , CO , CO_2 ซึ่งจะไปทำให้รูพรุนไม่หดตัว ถ้าช่วงที่รูพรุนปิด และรูพรุนมีขนาดใกล้เคียงกัน จะทำให้ก๊าซไม่แพร่ไป ทำให้เกิดรูพรุนปิดอยู่ภายใน และเกิดการบวมขึ้นได้ ทำให้ความหนาแน่นโดยรวมลดลง ดังรูป 5.21

ตัวอย่างการคำนวณ

ตัวอย่าง การคำนวณส่วนผสมของเนื้อดินปั้น ที่ประกอบด้วย 50% Kaolin, 25 %w potash feldspar, 25%w quartz ในเนื้อดินปั้น 100 กรัม จะประกอบด้วย

$$\text{Mols of Kaolin} = 50 / 258 = 0.1938$$

$$\text{Mols of potash feldspar} = 25 / 556 = 0.0450$$

$$\text{Mols of quartz} = 25 / 60 = 0.4167$$

	K_2O	Al_2O_3	SiO_2	H_2O
0.1938 $Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$	-	0.1938	0.3876	0.3876
0.0450 $K_2O \cdot Al_2O_3 \cdot 6SiO_2$	0.0450	0.0450	0.2700	-
0.4167 SiO_2	-	-	0.4167	-
คูณด้วยน้ำหนักโมเลกุล	0.0450 x 94	0.2388 x 102	1.0743 x 60	0.3876 x 18
รวม	4.23	24.36	64.46	6.976

รวม 93.05 กรัม

$$K_2O = (100/93.05) \times 4.23 = 4.55 \%w$$

$$Al_2O_3 = (100/93.05) \times 24.36 = 26.18 \%w$$

$$SiO_2 = (100/93.05) \times 64.46 = 69.27 \%w$$

หลังเผา ส่วนผสมข้างต้น จาก Phase diagram หลอมที่ $985^\circ C$ ซึ่งประกอบด้วยของเหลวที่มี 9.3 % K_2O , 10.9 % Al_2O_3 , 79.8 % SiO_2

$$\text{หาปริมาณของเฟสของเหลวที่เกิดขึ้นได้จาก } K_2O = 100 \times (K_A/K_L) = 100 \times (4.55/9.3) = 48.93 \%w$$

ปริมาณซิลิกาที่มีใน solid phase = $BA / BL = (S_A - S_B) / (S_L - S_B) = K_A / K_L$

$$0.4893 = (69.27 - S_B) / (79.8 - S_B)$$

$$S_B = 59.17 \% w$$

มี Al_2O_3 ใน Solid phase = $100 - 59.17 = 40.83 \% w$

ดังนั้นเกิด mullite = $40.83 \times (306 + 120) / 306 = 56.94 \% w$

ดังนั้น mullite ในเนื้อดินปั้นหลังเผา = $56.94 \times (1 - 0.4893) = 29.09 \% w$

Fired constitution : 29% mullite, 22% silica, 49% liquid

แบบฝึกหัดท้ายบท

1. ถ้าพบว่าผลิตภัณฑ์หลังอบมีการแตกร้าวมาก จะทำการตรวจสอบและแก้ไขอย่างไร
2. ถ้าต้องการอบผลิตภัณฑ์ให้แห้งเร็ว และไม่แตกร้าว จะออกแบบการอบอย่างไร
3. บัจฉัยใดบ้างที่ใช้ในการควบคุมการอบแห้งผลิตภัณฑ์เพื่อลดการแตกร้าวและบิดเบี้ยวก่อนเผา

บทที่ 6

เคลือบและสีสำหรับตกแต่งผลิตภัณฑ์

เคลือบเซรามิก คือ เนื้อแก้วที่เกิดจากการเย็นตัวของเหลวที่หลอมละลาย โดยเย็นตัวและกลายเป็นเนื้อแก้วบนผิวเซรามิก โครงสร้างของแก้วเป็นโครงสร้างที่ไม่มีความเป็นระเบียบ หรือเป็นระเบียบในระยะสั้นๆ ซึ่งเกิดโครงสร้างของ Glass former ที่เชื่อมต่อกันเป็น tetrahedral หรือ triangular กับออกซิเจนอะตอม ได้แก่ Si, B, P, As, Ge และอะตอมอื่นๆ ที่มีอัตราส่วนของวาเลนซ์ที่ต่อรัศมีของไอออน เท่ากับหรือมากกว่า 7 และมีอะตอมของธาตุอื่นๆ ที่เข้ามาอยู่โครงสร้างแก้ว ทำให้โครงสร้างของแก้วเปลี่ยนไป และคุณสมบัติทางกายภาพของแก้วเปลี่ยนไปด้วย ได้แก่ Na, K, Mg, Ba, Pb, Al, Zn, Li ซึ่งมีค่า Ionic potential น้อยกว่า 7 เนื่องจากโครงสร้างแก้วที่มีการจัดตัวไม่เป็นระเบียบ จึงไม่มีสูตรเคมีที่แน่นอนตายตัว โดยทั่วไปจะเขียนออกมาเป็นระบบของออกไซด์ หรือสูตร Segar formula

$1 R_2O, RO$	xR_2O_3	yRO_2
Basic oxides/	Amphoteric oxides/	Acidic oxides
Valency 1,2	3	4
Na_2O, K_2O, CaO	Al_2O_3, B_2O_3	SiO_2, TiO_2
ZnO, MgO, PbO	Fe_2O_3	$SnO_2, (B_2O_3)$

หน้าที่

ลดจุดหลอมตัว	ทำให้เกิดผลึก	เพิ่มความทนทาน
เพิ่มส.ป.ส.การขยายตัว	ทำให้ทนไฟ	เพิ่มความแข็ง
ลดความหนืด	หรือทำให้เกิดความมันวาว	ทำให้ความหนืดสูง (SiO_2)
ลดความแข็ง	เพิ่มความหนืด	

ประเภทของเคลือบเซรามิก

• Frit-free glazes

1. Porcelain glazes Cone 8-9 (1225-1250 °C)

Example: 0.3 K₂O 0.4Al₂O₃ 4.0SiO₂
 0.7 CaO

2. Bristol glazes: stoneware glazes Cone 3-4 (1145-1165 °C)

Example: 0.36 K₂O
 0.40 CaO 0.50Al₂O₃ 3.16SiO₂
 0.24 ZnO

3. เคลือบที่มีผลสมของตะกั่ว สำหรับงานศิลปะ

Cone 08-04 (950- 1050 °C)

Example: 0.6 PbO
 0.3 CaO 0.2Al₂O₃ 1.6SiO₂
 0.1 Na₂O

4. เคลือบที่ไม่มีส่วนผลสมของตะกั่ว (Leadless)

Cone 03 (1080 °C)

Example: 0.2 KNaO 0.3Al₂O₃ 3.0SiO₂
 0.3 SrO
 0.1 CaO
 0.4 BaO

ประเภทของเคลือบตามลักษณะของผิวเคลือบ

- เคลือบผิวมัน (gloss)
- เคลือบผิวด้าน (Mat) และกึ่งด้าน (Semimat)

Example: Tridymite or Cristobalite ตกผลึก %Al₂O₃ สูง หรือ anorthite or wallastonite ZnO,
 TiO₂

- เคลือบทึบ (Opaque glaze)

- ความทึบของเคลือบขึ้นกับขนาดและค่าดัชนีหักเหแสงที่ทำให้แสงมีการกระจัดกระจายที่ดี
 - ความทึบแสงของเคลือบขึ้นอยู่กับการขนาดอนุภาค ขนาดของผลึก เมื่ออนุภาคมีขนาดครึ่งหนึ่งของคลื่นแสงที่ตามองเห็น ($0.2\mu\text{m}$) จะทำให้เกิดการกระเจิงของแสงและมองเห็นเป็นสีทึบ
 - ดัชนีหักเหแสงระหว่างอนุภาคกับเนื้อแก้วต้องต่างกันมากๆ
- ตัวอย่างเช่น ($\text{ZrO}_2 + \text{SiO}_2 \rightarrow \text{ZrSiO}_4$)

- เคลือบผลึก (Crystalline glazes) มีลักษณะเป็นผลึกขนาดต่างๆกัน กระจายอยู่ในเนื้อเคลือบ Monoclinic or Hexagonal

Example: ผลึกของ willemite ($2\text{ZnO} \cdot \text{SiO}_2$)

0.256 K_2O		1.510 SiO_2
0.057 Na_2O	0.162 Al_2O_3	0.221 TiO_2
0.057 BaO		
0.630 ZnO		

- เคลือบที่แตกกระแหงเป็นร่างแห (Crackle glazes)
เคลือบที่มีลักษณะแตกกราน เนื่องจากเคลือบมีสัมประสิทธิ์การขยายตัวสูงและเกิดการร้าวตัวเพื่อปล่อยไอน้ำขึ้น ขนาดของร้าวขึ้นอยู่กับความแตกต่างระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวของเคลือบกับสัมประสิทธิ์การขยายตัวของเนื้อผลิตภัณฑ์

- เคลือบที่มีสัมประสิทธิ์การขยายตัวต่ำ
1.0 RO 0.6-0.7 Al_2O_3 9-11 SiO_2
- เคลือบที่มีคุณสมบัติกึ่งตัวนำไฟฟ้า
% Fe_2O_3 สูง, ZnCr_2O_4 เคลือบ spinal
- เคลือบเกลือ (Vapor glazes)
จากไอของเกลือบางชนิดไปทำปฏิกิริยากับผิวผลิตภัณฑ์

เคลือบฟritte (Fritted glaze)

จุดประสงค์ของการทำเคลือบฟritteคือ

- เพื่อนำวัตถุดิบที่ละลายน้ำมาใช้เป็นส่วนผสมของเคลือบ พวกที่ละลายน้ำ: เกลือของอัลคาไลด์ พวกคาร์บอเนตในเตรดและคลอไรด์ของโซเดียมและโปแตสเซียม สารประกอบของลิเทียม กรดบอริกและอัลคาไลด์โบเรต แคลเซียมคาร์บอเนตละลายน้ำได้บ้าง แมกนีเซียมออกไซด์และคาร์บอเนตละลายน้ำได้ดีกว่า แคลเซียมคาร์บอเนตใช้ได้ดีในการผลิตฟrit แต่แมกนีเซียมมีผลมากกว่าต่อความเหนียวของน้ำเคลือบ
- เพื่อทำให้วัตถุดิบที่เป็นพิษ → ปลดปล่อยต่อการใช้งานโดยการหลอมให้อยู่ในรูปเนื้อแก้ว ซึ่งไม่ละลายน้ำ
- สำหรับ lead frit ทำให้ตะกั่วในน้ำยาเคลือบละลายน้ำได้น้อยที่สุด จนไม่ละลายเลย ทำให้ไม่เป็นอันตราย
- สารบางชนิดที่ไม่ไวต่อการเกิดปฏิกิริยาที่อุณหภูมิต่ำ เช่นสารประกอบของ Ba เมื่อทำเป็นฟritจะเป็น flux ที่รุนแรง
- ทำให้น้ำยาเคลือบผสมเป็นเนื้อเดียวกันง่าย ป้องกันการแยกตัวออกจากกันของส่วนปรุงแต่งของน้ำยาเคลือบ
- ช่วยขจัดสารพวกคาร์บอเนตและก๊าซต่างๆ ออกไปจากเนื้อเคลือบได้ดี ช่วยป้องกันการเกิดฟองอากาศ
- ช่วยให้เคลือบหลอมตัวดี (Temp. สุกตัวต่ำ) ไหลตัวดี

ชนิดของเคลือบฟrit

- เคลือบฟritที่มีบอริกออกไซด์ (เนื่องจากละลายน้ำได้ดี)

Example: 0.69 CaO 0.37 Al₂O₃ 2.17 SiO₂
 0.19 Na₂O 1.16 B₂O₃
 0.12 K₂O

- เคลือบฟritที่มีตะกั่วเป็นส่วนประกอบ (PbO.2SiO₂)

Example: 0.94 PbO 0.07 Al₂O₃ 1.23 SiO₂
 0.03 Na₂O
 0.03 K₂O

- เคลือบฟritที่มีทั้งตะกั่วและบอริกออกไซด์

Example:	0.53 PbO		
	0.10 Na ₂ O	0.12Al ₂ O ₃	2.72 SiO ₂
	0.07 K ₂ O		0.69 B ₂ O ₃
	0.30 CaO		

การเตรียมฟrit มีหลักเกณฑ์ดังนี้

- อัตราส่วน RO : RO₂ ควรอยู่ระหว่าง 1:1 และ 1:3 (เพื่อให้เกิดการหลอมที่สมบูรณ์)
- อัตราส่วนระหว่าง Alkali กับส่วนที่เหลือในกลุ่ม RO ไม่ควรเกิน 1:1 (เพื่อจะได้ไม่ละลายน้ำ)
- B₂O₃:SiO₂ ไม่ควรมากกว่า 1:2 (เพื่อให้ฟritไม่ละลายน้ำ)
- Al₂O₃ ในฟritไม่ควรเกิน 0.2 โมเลกุล (ควรประมาณ 0.05 เพื่อช่วยในการหลอมฟritให้สมบูรณ์ขึ้น)

สารประกอบที่ควรนำมาหลอมทำฟrit ได้แก่

- พวกเกลือของแอลคาไลนทั้งหมดรวมทั้งหินฟันม้า
- กรดบอริกและบอแรกซ์ทั้งหมด
- ดินที่ใช้ทั้งหมด แต่เหลือไว้ 0.05 โมเลกุล เพื่อเติมในส่วน mill addition
- แคลเซียมออกไซด์ใช้ทั้งหมด แต่เหลือไว้ 0.01 โมเลกุล
- Free alumina ใช้ทั้งหมด
- ปริมาณของซิลิกาเพียงพอที่จะใช้ oxygen ratio ในฟritตามที่ต้องการ

สัดส่วนของฟritที่นำไปในน้ำเคลือบ

- ไม่ควรใช้ทำฟrit ต่ำกว่า 50% ของน้ำยาเคลือบทั้งหมด
- Oxygen ratio ในฟritควรจะเหมือนกับในน้ำเคลือบ

วัตถุดิบสำหรับเตรียมเคลือบและสีเซรามิก

- Basic Oxides ได้แก่ alkali oxides (ex. Na₂O, K₂O), alkaline earth (ex. CaO, PbO) ช่วยทำให้ดัชนีหักเหของเคลือบเพิ่มขึ้น เพิ่มความสุกใส ลดจุดหลอมตัว ทำให้เคลือบไหลตัวได้ดี, มีการขยายตัวสูง สำหรับ china และ earthenware glaze จะใช้สัดส่วน 1:1 ถึง 1:3

Na_2O : มีสัมประสิทธิ์การขยายตัวสูงกว่าอัลคาไลอื่นๆ และทำให้มีความทนทานต่อแรงดึงลดลง
จำกัดดินเหนือนั้นได้แก่

- NaCl
- Borax crystals, $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$
- Anhydrous borax, $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$
- Sada crystals, $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$
- Soda ash, Na_2CO_3
- Sodium nitrate, NaNO_3
- Soda spar or albite, $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{SiO}_2$ (insoluble)
- เศษแก้วละเอียด Cullet โดยทั่วไปได้แก่ Soda-lime glass ($0.5\text{Na}_2\text{O} \cdot 0.5\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$)
- ไครโอไลต์ (Na_3AlF_6) เกิดตามธรรมชาติเป็นทั้งตัวลดจุดหลอมและเป็นอาจทำให้เคลือบทึบ
แสง

K_2O : ทำให้เคลือบสุกใสมากกว่าใช้ Na, การไหลตัวของเคลือบน้อยลง และส.ป.ส.การขยายตัว
ของเคลือบลดลง

- Pearl ash, K_2CO_3 (soluble) หลอมง่าย
- KNO_3 (soluble) เป็นตัวออกซิไดส์
- Potash feldspar, $\text{K}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{SiO}_2$ (insoluble)

LiO_2 : อัลคาไลที่รุนแรง, มีน้ำหนักเบากว่าอัลคาไลตัวอื่นๆ (เมื่อใช้จำนวนสมมูลเท่ากัน)

- เลพิโดไลต์ ($\text{LiF} \cdot \text{KF} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{SiO}_2$) เรียกว่าลิเทียมไมก้า มักใช้ในอุตสาหกรรมแก้ว
- แอมปริโกไนต์ (LiAlFPO_4) เคลือบมีความมันสูงและใช้ทำให้เกิดเคลือบทึบ
- สปอดคูมิน ($\text{Li}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 4\text{SiO}_2$) มี Al_2O_3 ทำให้ทนไฟ
- ลิเทียมคาร์บอเนต (Li_2CO_3) ผลึกสีขาว ละลายน้ำได้บ้าง หลอมดีกว่าโซเดียมและ
โพแทสเซียม

CaO : ทำให้เคลือบมีความแข็งสูง ทนต่อการขีดขูด เพิ่มความทนทานต่อแรงดึงและลด ส.ป.ส.การ
ขยายตัว ทำให้เคลือบไหลตัวได้ดีเมื่อหลอมที่อุณหภูมิ ถ้าใช้มากจะเพิ่มความทนไฟ เกิดการตกผลึก
เล็กๆในเคลือบ ทำให้เคลือบด้านเกิดผลึกอะนอร์ไทต์หรือโวลสโตไนท์ ($\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$)

- Whiting CaCO_3 (ไม่ละลายน้ำ)
- Fluorspar (CaF_2) เป็นตัวลดจุดหลอมตัวที่รุนแรง ใช้ในเคลือบน้อย ที่อุณหภูมิต่ำจะรวมตัวกับ Si ให้ SiF_4 ซึ่งเป็นไอและทำให้เกิดฟองอากาศ
- Dolomite ($\text{CaCO}_3, \text{MgCO}_3$)
- Bone ash ($\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$)
- Wollastonite ($\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$)

สารประกอบ Mg: ที่อุณหภูมิต่ำเป็นวัตถุดิบไฟ แต่ที่อุณหภูมิสูงเป็นตัวลดจุดหลอมตัวของเคลือบที่รุนแรง ทำให้เคลือบไหลตัวได้ดี มีสัมประสิทธิ์การขยายตัวลดลง

- MgO ใช้ในการพัฒนาเคลือบสี
- MgCO_3 ละลายน้ำได้บ้าง มีความถ่วงจำเพาะต่ำ
- โดโลไมต์ ใช้แทน CaO ได้เล็กน้อย
- สตีไทต์และทัลก์ $3\text{MgO} \cdot 4\text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$

สารประกอบ Ba: ทำให้เคลือบมีดัชนีหักเหของแสงสูง ทำให้เคลือบสุกใสมากกว่า alkaline earth อื่นๆ

- BaCO_3 ใช้ในเคลือบน้อยมาก เพราะเกิดปฏิกิริยาได้ช้า ทนความร้อนสูง ทนไฟ และมักทำให้เกิดเคลือบด้าน นิยมทำให้อยู่ในรูปฟริต
- BaSO_4 แบไรต์

สารประกอบของ Zn: เป็นตัวลดจุดหลอม ทำให้เคลือบเป็นมันวาว ลดการรานตัว บางครั้งทำให้เกิดเคลือบทึบแสง ถ้าใช้มากจะทำให้ส่วนผสมของเคลือบติดทนไฟ ขึ้นและความมันลดลง

- ZnO อาจมีผลต่อเคลือบสี
- ถ้าใช้ ZnO มากพอทำให้เคลือบเกิดการตกผลึก

สารประกอบของ Pb:

- รวมตัวกับ SiO_2 และ B_2O_3 ได้ง่าย
- ทำให้เคลือบมีความสุกใสมากขึ้น
- ทำให้สัมประสิทธิ์การขยายตัวต่ำลง

- เนื้อเคลือบยึดหยุ่นดีกว่า
- ช่วยลดความหนืดของเคลือบขณะหลอม ไม่เกิดการตกผลึก ขณะเย็นตัว
- ทำให้ช่วงการสุกตัวของเคลือบกว้างขึ้น
- PbO ลดความตึงผิวของเคลือบขณะหลอม ทำให้ผิวเคลือบเรียบดี
- ข้อเสียคือ เป็นพิษ ความแข็งแรงลดลง ถูกกรดกัดได้ง่าย ทำให้มีสีเทาถึงสีดำ
- Litharge (PbO), Red lead (Pb₃O₄), White lead (2PbCO₃·Pb(OH)₂)
- Lead frits: PbO. 0.042Al₂O₃. 2SiO₂, PbO. 0.0861Al₂O₃. 1.79SiO₂

สารประกอบของ Boric oxides (B₂O₃):

- Borax crystals, Na₂B₄O₇·10H₂O 36.5%B₂O₃
- Anhydrous borax, Sodium baborate or Sodium tetraborate- Na₂B₄O₇ 69.2%B₂O₃
- Boric acid crystals, H₃BO₃ 56.3%B₂O₃

Silica (SiO₂) วัตถุดิบที่ให้ ซิลิกาได้แก่

- Feldspar
- China clay, sand

Al₂O₃: ทำให้เคลือบมีความหนืดสูงขึ้น เป็นตัวชะลอหรือขัดขวางการโตของผลึกขนาดใหญ่แต่เกิดเป็นผลึกเล็กๆ ทำให้ได้เคลือบด้าน ถ้าเป็นส่วนผสมของเคลือบมันวาว จะทำให้เคลือบไหลตัวดี ไม่ไหลไปสูงที่ต่ำ ทำให้เคลือบทนไฟ ดังนั้นใช้ไม่เกิน 0.05 โมลสมมูลสำหรับเคลือบที่มีจุดสุกตัวต่ำ และสำหรับ cone 14 อาจใช้ Al₂O₃ มากถึง 0.9 โมลสมมูล

- Al₂O₃:SiO₂ = 1:4 และ 1:20 ทั้งนี้ขึ้นกับชนิดและจุดสุกตัว
- เคลือบที่มีความมันวาว อัตราส่วน Al₂O₃:SiO₂ ควรอยู่ระหว่าง 1:7 ถึง 1:10
- เคลือบด้าน SiO₂ น้อยลง
- สำหรับเคลือบ porcelain มีจุดสุกตัวที่ cone 10-12:
Al₂O₃:SiO₂ = 1:7 หรือ 1:8
ถ้าเป็นเคลือบด้าน 1:3.2 ถึง 1:3.8

- ส่วนผสมของเคลือบ ใสดิน ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) ช่วยให้วัตถุดิบอื่นๆกระจายลอยตัวดี ทำให้เคลือบติดยึดเกาะผิวผลิตภัณฑ์ดี ช่วยควบคุมการหดตัวของเคลือบที่คลุมผิวผลิตภัณฑ์ที่ยังไม่เผา ดินควรมีความบริสุทธิ์สูง ไม่มีเหล็กหรือไทเทเนียมปน ใสในน้ำเคลือบ 0.05 โมลสมมูล แต่ไม่ควรเกิน 0.15 โมลสมมูล

การคำนวณส่วนผสมเคลือบ

1. คำนวณจาก Empirical formula เพื่อหาส่วนผสมสารที่ใช้เป็นวัตถุดิบ
2. คำนวณจากเปอร์เซ็นต์ส่วนผสมของวัตถุดิบเพื่อหาสูตร Empirical

การคำนวณจาก Empirical formula

- Step1 เขียนออกไซด์ของต่าง กลาง กรด จากซ้ายไปขวา แล้วใส่จำนวนสมมูลกำกับไว้
- Step2 เริ่มจากออกไซด์ของต่าง (K,Na,Ca) แทนที่ด้วยเฟลสปาร์หรือวัตถุดิบอื่นๆ เช่นหินปูน (CaCO_3), magnesite (MgCO_3) or dolomite (CaCO_3 and MgCO_3), Talc ($3\text{MgO} \cdot 4\text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$), kaolinite แต่ต้องควบคุมเปอร์เซ็นต์ของดิน หรือเติมดินที่เผาแล้วให้ Al_2O_3 ดินที่เผาแล้ว ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$), Flint (SiO_2)
- Step3 คำนวณหาน้ำหนักส่วนผสม (จำนวนสมมูล x น้ำหนักโมเลกุล) แล้วหาเปอร์เซ็นต์ส่วนผสม

ตัวอย่างที่ 1 จากสูตรเคลือบ Porcelain

0.33 K_2O

0.42 CaO

0.08 MgO

0.17 Na_2O

0.6 Al_2O_3

5.5 SiO_2

วัตถุดิบ	K ₂ O	CaO	MgO	Na ₂ O	Al ₂ O ₃	SiO ₂
	0.33	0.42	0.08	0.17	0.6	5.5
0.33(K ₂ O.Al ₂ O ₃ .6SiO ₂)	0.33	-	-	-	0.33	1.98
	-	0.42	0.08	0.17	0.27	3.52
0.17 (Na ₂ O.Al ₂ O ₃ .6SiO ₂)	-	-	-	0.17	0.17	1.02
	-	0.42	0.08	-	0.10	2.5
0.42(CaCO ₃)	-	0.42	-	-	-	-
	-	-	0.08	-	0.10	2.5
0.0267(3MgO.4SiO ₂ .H ₂ O)	-	-	0.08	-	-	0.1068
	-	-	-	-	0.10	2.39
0.1(Al ₂ O ₃ .2SiO ₂)	-	-	-	-	0.1	0.20
	-	-	-	-	-	2.19
2.19 (SiO ₂)	-	-	-	-	-	2.19
	-	-	-	-	-	-

วัตถุดิบ	สมมูล	น.น.โมเลกุล	น.น.	%
Potash feldspar	0.33	x 556 =	183.48	38.36
Soda feldspar	0.17	x 524.5 =	89.165	18.64
Whiting	0.42	x 100 =	42	8.78
Talc	0.0267	x 378 =	10.093	2.11
Calcined clay	0.10	x 222 =	22.20	4.64
Quartz	2.19	x 60 =	131.4	27.47
			478.338	100

การคำนวณหา % จากสูตร Empirical formula

- Step1 นำวัตถุดิบมาทดแทนออกไซด์ในปริมาณโมลที่เท่ากัน ทุกออกไซด์
- Step2 นำปริมาณโมลของวัตถุดิบมาคำนวณให้เป็นน้ำหนัก
- Step3 คำนวณเป็น %

ตัวอย่างที่ 2 เคลือบตะกั่วมีส่วนผสมวัตถุดิบดังนี้ (%)

ตะกั่วขาว	$2\text{PbCO}_3 \cdot \text{Pb}(\text{OH})_2$	47%
Feldspar	$\text{K}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{SiO}_2$	25%
Whiting	CaCO_3	7%
Kaolin	$\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$	4%
Silica	SiO_2	17%

วัตถุดิบ	%		น.น.สมมูล		จ.น.สมมูล
ตะกั่วขาว	47	/	775	=	0.061
Feldspar	25	/	556	=	0.045
Whiting	7	/	100	=	0.070
Kaolin	4	/	258	=	0.015
Silica	17	/	60	=	0.283

		PbO	K_2O	CaO	Al_2O_3	SiO_2
$2\text{PbCO}_3 \cdot \text{Pb}(\text{OH})_2$	0.061	0.183	-	-	-	-
$\text{K}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{SiO}_2$	0.045	-	0.045	-	0.045	0.27
CaCO_3	0.070	-	-	0.07	-	-
$\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	0.015	-	-	-	0.015	0.03
SiO_2	0.283	-	-	-	-	0.283
		<u>0.183</u>	<u>0.045</u>	<u>0.07</u>	<u>0.06</u>	<u>0.58</u>

RO and $\text{R}_2\text{O} = 0.298$

0.62 PbO

0.15 K_2O 0.22 Al_2O_3 1.95 SiO_2

0.23 CaO

การคำนวณสูตรเคลือบฟrit

ตัวอย่างที่ 3	0.30 Na ₂ O			
	0.50 CaO	0.25 Al ₂ O ₃	2.50 SiO ₂	
	0.20 BaO			

เคลือบนี้เป็นเคลือบฟrit เพราะปริมาณของ Na₂O มากกว่า Al₂O₃ จึงใช้หินฟันม้าแทนไม่ได้ (เนื่องจากหินฟันม้ามี Al₂O₃:Na₂O = 1:1)

ฟritที่ใช้ในเคลือบนี้จะต้องมีปริมาณ Na₂O และ CaO เท่ากัน และมีปริมาณ SiO₂ ไม่น้อยกว่าปริมาณ Na₂O และ CaO รวมกัน ถ้าในสูตรเคลือบนี้ใช้เศษแก้วเป็นส่วนผสม เศษแก้วต่างๆ มีสูตรพื้นฐานดังนี้

0.5 Na ₂ O		
0.5 CaO	2.50 SiO ₂	

ขั้นตอนการคำนวณโดยใช้เศษแก้วเป็นฟrit

วัตถุดิบ	Na ₂ O	CaO	BaO	Al ₂ O ₃	SiO ₂
สูตรเคลือบ	0.3	0.5	0.2	0.25	2.50
0.60 เศษแก้ว	0.3	0.3	-	-	1.5
เหลือ	-	0.2	0.2	0.25	1.0
0.20 CaCO ₃	-	0.2	-	-	-
เหลือ	-	-	0.2	0.25	1.0
0.20 BaCO ₃	-	-	0.2	-	-
เหลือ	-	-	-	0.25	1.00
0.25 kaolin	-	-	-	0.25	0.50
เหลือ	-	-	-	-	0.50
0.50 SiO ₂	-	-	-	-	0.50

นำจำนวนโมลของวัตถุดิบมาคูณน้ำหนักโมลจะได้ส่วนผสมของวัตถุดิบ

วัตถุดิบ	โมล×น้ำหนักโมล	ส่วนผสม	%ส่วนผสม
0.60 เศษแก้ว	0.60 × 209	125.4	44.90
0.2CaCO ₃	0.20 × 100	20.0	7.16
0.2 BaCO ₃	0.20 × 197	39.4	14.11
0.25 ดินขาว	0.25 × 258	64.5	23.09
0.50 SiO ₂	0.50 × 60	30.0	10.74
Total		279.3	100

โดยทั่วไปปริมาณดินขาวที่ผสมในเคลือบดินควรอยู่ระหว่าง 5-15% สำหรับเคลือบที่มีสารประกอบของตะกั่ว อาจใช้ดินขาวเพียง 5% และเคลือบ porcelain ควรมีดินขาวประมาณ 10% แต่ในสูตรเคลือบข้างต้น มีส่วนผสมของดินขาวสูงเกินไปถึง 22.32%

การแก้เมื่อส่วนผสมในเคลือบดินมีดินมากเกินไป ทำได้ 2 วิธีคือ

- วิธีที่ 1 นำดินขาวส่วนที่เกินพอไปเผา แล้วจึงนำมาผสมทำน้ำเคลือบ
- วิธีที่ 2 คำนวณส่วนผสมวัตถุดิบใหม่ โดยการใช้แร่หินพื้นมาเป็นวัตถุดิบที่ให้อะลูมิเนียมบางส่วน

วัตถุดิบ	Na ₂ O	CaO	BaO	Al ₂ O ₃	SiO ₂
สูตรเคลือบ	0.3	0.4	0.3	0.25	2.50
0.15 (Na ₂ O·Al ₂ O ₃ ·6SiO ₂)	0.15	-	-	0.15	0.90
เหลือ	0.15	0.40	0.30	0.10	1.60
0.30 เศษแก้ว	0.15	0.15	-	-	0.75
เหลือ	-	0.25	0.30	0.10	0.85
0.25 CaCO ₃	-	0.25	-	-	-
เหลือ	-	-	0.30	0.10	0.85

0.30 BaCO ₃	-	-	0.30	-	-
เหล็ลือ	-	-	-	0.10	0.85
0.10 kaolin	-	-	-	0.10	0.20
เหล็ลือ	-	-	-	-	0.65
0.65 SiO ₂	-	-	-	-	0.65

คำนวณส่วนผสมของเคลือบทั้งหมด

วัตถุดิบ	โมล x น้ำหนักโมล	ส่วนผสม	ร้อยละ
หินฟันม้า	0.15 x 524.5	78.7	27.11
เศษแก้ว	0.30 x 209	62.7	21.60
CaCO ₃	0.25 x 100	25.0	8.61
BaCO ₃	0.30 x 197	59.1	15.81
Kaolin	0.10 x 258	25.8	8.89
SiO ₂	0.65 x 60	39	13.43
Total		290.3	100

ปริมาณดินขาวในส่วนผสมเคลือบลดลงเป็น 8.89%

สภาพที่เหมาะสมของเคลือบ

เคลือบเป็นวัสดุที่เปราะ แต่เมื่อผลิตภัณฑ์หนากว่าชั้นเคลือบ เนื้อผลิตภัณฑ์จึงแข็งแรงและมีโอกาสแตกน้อยกว่า แต่ถ้าผลิตภัณฑ์อยู่ภายใต้แรงเค้นที่สูงพอ อาจทำให้ผลิตภัณฑ์โค้งงอหรือทำให้รอยต่อระหว่างผลิตภัณฑ์และเคลือบไม่ยึดเกาะกัน และอาจทำให้เกิดการแตกร้าวได้ การเกิดแรงเค้นในเคลือบเกิดจากการหดตัวของเคลือบและผลิตภัณฑ์ไม่เท่ากัน ถ้าเคลือบมีสัมประสิทธิ์การขยายตัวมากกว่าเนื้อผลิตภัณฑ์ ระหว่างการปล่อยให้ผลิตภัณฑ์เย็นตัวลง จะเกิดความเค้นเนื่องจากแรงดึงขึ้นในเคลือบและเคลือบซึ่งทนต่อแรงดึงได้ต่ำ จะทำให้เกิดการร้าวตัวได้

เอนโกบหรือสลิป (Engobes, Slips)

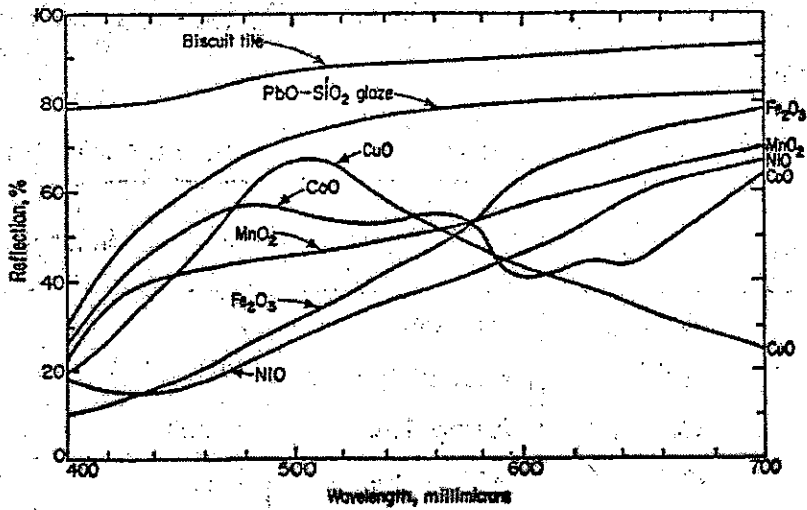
ผลิตภัณฑ์ที่มีสีหรือผิวไม่สวยงาม เนื้อหยาบ หรือมีตำหนิมาก อาจจะทำให้การตกแต่งให้มีราคา มากขึ้นได้ โดยการฉาบหรือตกแต่งด้วยของผสมจากดินที่มีตัวลดจุดหลอมตัว ซึ่งเราเรียกว่าเอนโกบ เอนโกบแตกต่างจากเคลือบคือ เคลือบมีเนื้อแก้วมากกว่าเอนโกบ ถ้าเคลือบทับเอนโกบอีกครั้งหนึ่ง เรียกเอนโกบนั่นว่า อันเดอร์สลิป (Underslip) อันเดอร์สลิปสีขาวจะช่วยให้เคลือบที่มาทับไม่ถูกรบกวน โดยสีที่แท้จริงของเนื้อผลิตภัณฑ์ คุณสมบัติของเอนโกบทั่วไปคล้ายๆกับน้ำสลิป ซึ่งประกอบด้วย อนุภาคที่มีขนาดเล็กกระจายอยู่ และสามารถยึดเกาะผิวผลิตภัณฑ์ได้ดี ส่วนประกอบของเอนโกบ ได้แก่ ดินที่มีการขจัดอนุภาคหยาบออกไป แล้วนำมาผสมกับตัวลดจุดหลอมตัว พวกวัตถุที่ไม่มี ความเหนียวและตัวทำให้เกิดสี ได้แก่ หินฟันม้า 0-50% ดินต่างๆ 25-55% หินแก้ว/ฟรินต์ 0-10% นำมาเตรียมเป็นน้ำดิน แล้วร่อนผ่านตะแกรง 80 เมช การผสมและการบดก็ใช้หม้อบดเหมือนการบด น้ำดินทั่วไป การหดตัวเมื่อแห้งและหลังเผาของเอนโกบไม่ควรมากเกินไป และเข้ากันได้กับเนื้อ ผลิตภัณฑ์

สีเซรามิกและสีอะคริลิก

การเกิดสีในเคลือบมีกลไกที่สำคัญคือ กลุ่มสีซึ่งสีเกิดจากการละลายของอนุภาคที่มีสี แล้ว กลายเป็นส่วนหนึ่งของโครงสร้างแก้ว หรือกลุ่มสีที่เกิดจากการกระจายตัวของคอลลอยด์ภายในเนื้อ แก้ว

- สีเคลือบเซรามิกส์ ได้แก่ กลุ่มธาตุทรานซิชัน
- Absorption, reflection, Emerging light (colored)
- อะตอมของธาตุทรานซิชัน ทั้งในโครงสร้างแก้วและใช้เป็นตัวปรับปรุงสมบัติของแก้ว

การเกิดสีในเคลือบเกิดจากการสะท้อนของแสงในช่วงความยาวคลื่นต่างๆดังรูป 6.1



รูป 6.1 การสะท้อนของสีต่างๆในช่วงความยาวคลื่นต่างๆ ของอิออนธาตุทรานซิชัน [1]

การเกิดสีในโครงสร้างแก้วเกิดจาก อนุมูลบวกบางตัว ซึ่งได้แก่ธาตุทรานซิชัน อนุมูลเหล่านี้สามารถปรับปรุงจำนวนอะตอมที่สามารถอยู่รอบๆ ตัวได้ ขึ้นอยู่กับขนาดและประจุของอนุมูลนั้นๆ ในสถานะที่เป็นของเหลว จำนวนออกซิเจนที่อยู่รวมกับอนุมูลที่ละลายได้ขึ้นอยู่กับส่วนผสมของแก้ว ความดันของออกซิเจน อุณหภูมิ และอัตราการเย็นตัว มีผลต่อสีที่เกิดขึ้น

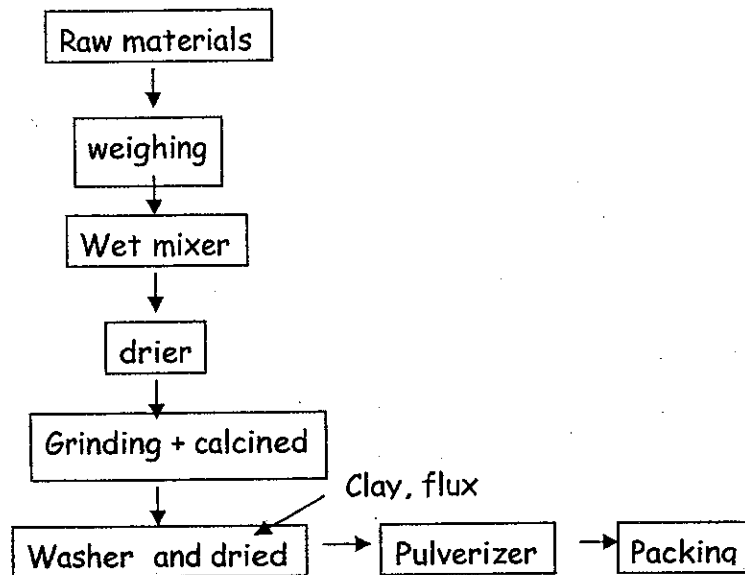
สีตะเอน

สีที่เกิดในรูปผลึกซึ่งมีธาตุทรานซิชันเป็นส่วนประกอบ ผู้ใช้สามารถนำมาใช้ได้โดยการผสมกับน้ำ

เคลือบได้โดยตรง เป็นสีที่มีความเสถียรมากกว่าสีจากออกไซด์

= spinel $RO \cdot R_2O_3$ สารประกอบ หรือ สารละลายของแข็ง

ขั้นตอนการเตรียมสະเตน



กลุ่มของสีสະเตนตามโครงสร้างแร่หลัก

- กลุ่มแบดเดไลต์ (Baddeleyite)

Zirconium vanadium yellow baddeleyite $(Zr,V)O_2$

- กลุ่มบอเรต (borate)

Cobalt magnesium red-blue borate $(Co,Mg)_2B_2O_5$

- กลุ่มคอร์ันดัม-ฮีมาไทต์ (Corundum-Hematite)

Chrome alumina pink corundum $(Al,Cr)_2O_3$

Manganese alumina pink corundum $(Al,Mn)_2O_3$

Iron brown hematite (Fe_2O_3)

- กลุ่มการ์เนต (Garnet)

Victoria green garnet $(3CaO.Cr_2O_3.3SiO_2)$

- กลุ่มโอลิวีน (Olivine)

Cobalt silicate blue olivine $(Co_2.SiO_4)$

Nickel silicate green olivine (Ni_2SiO_4)

สีแดงและสีชมพู

- สีแดงจากเหล็กออกไซด์ ($< 1000^\circ\text{C}$)

เกิดจากเฟอร์ริสซิลเฟตหรือ เฟอร์ริกออกไซด์ผสมกับเคลือบที่มีบอแรกซ์ อย่างไรก็ตามสีที่เกิดขึ้นเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิเผา

600 °C	ส้ม
700 °C	แดง
800 °C	แดงม่วง
900 °C	แดงม่วงเข้ม
1000 °C	เทา

$\text{Al}(\text{OH})_3$ 93.5%, Cr_2O_3 6.5% cone 20, CoO and MgO

- สีชมพู $\text{ZrO}_2\text{-Fe}_2\text{O}_3$ หรือจากโครเมียม ดิบุก

เช่น	SnO_2	50 ส่วน
	CaCO_3	25 ส่วน
	SiO_2	18 ส่วน
	$\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot x\text{H}_2\text{O}$	4 ส่วน
	K_2CrO_4	3 ส่วน

หรือ Cr_2O_3 5-15%, ZnO 10-40% , Al_2O_3 45-85%

สีส้มและสีเหลือง

- เหลืองจาก Fe^{2+} (+ CaO ได้สีเหลืองหรือสีฟ้า)
- เหลืองจาก $\text{PbO} \cdot \text{Sb}_2\text{O}_3$ ที่ 800°C จากโซเดียมแอนติโมนेट ตะกั่วไนเตรด อาจเติม ZnO ให้สีคงทน
- เหลืองจากแคดเมียม $\text{CdS} = \text{CdCO}_3 + \text{S}$ (840°C)
- เหลืองจากรูไทล์ (rutile): Rutile 68%, feldspar 21%, kaolin 11%

- เหลืองจากโครเมียมออกไซด์ Cr_2O_3

สีเขียว

- From Chromium oxide

โพแทสเซียมโครเมต	36
แคลเซียมคลอไรด์	12
หินแก้ว	20
แคลเซียมฟลูออไรด์	12

- จากทองแดง ในเคลือบตะกั่ว อาจใช้เป็นสีเขียวบนเคลือบ

Cu-V, Cu-Zr

- จากนิเกิล ประกอบด้วย NiO 25%, MgO 75% at 1250 °c
- เขียวจากวานาเดียม เซอร์โคเนียและซิลิกา

เซอร์โคเนีย	71.4%
ซิลิกา	23.8%
แอมโมเนียมเมตาวานาเดต	4.8%

สีน้ำเงิน จาก Co เช่น

- CoO 7%, SiO_2 73%, Na_2CO_3 10%, CaCO_3 10%
- CoO, ZnO, Al_2O_3
- Cu ในเคลือบตะกั่วและอะลูมินา

สีน้ำตาลจาก Fe_2O_3 , Cr_2O_3 , Al_2O_3 , ZnO cone 12 (1355 °c)

สีดำจาก CoO, Cr_2O_3 , Fe_2O_3 , MnO_2 , NiO_2

ตาราง 6.1 โทนสีน้ำตาล

ส่วนประกอบ (% w)	น้ำตาลเข้ม	น้ำตาลแดง	น้ำตาลอ่อน	น้ำตาลเหลือง
Fe ₂ O ₃	22.1	22.86	38.83	13.72
Cr ₂ O ₃	21.0	21.72	24.75	13.04
Al ₂ O ₃	56.9	—	24.76	17.67
ZnO	—	55.43	11.65	55.57

ตาราง 6.2 สีดำ

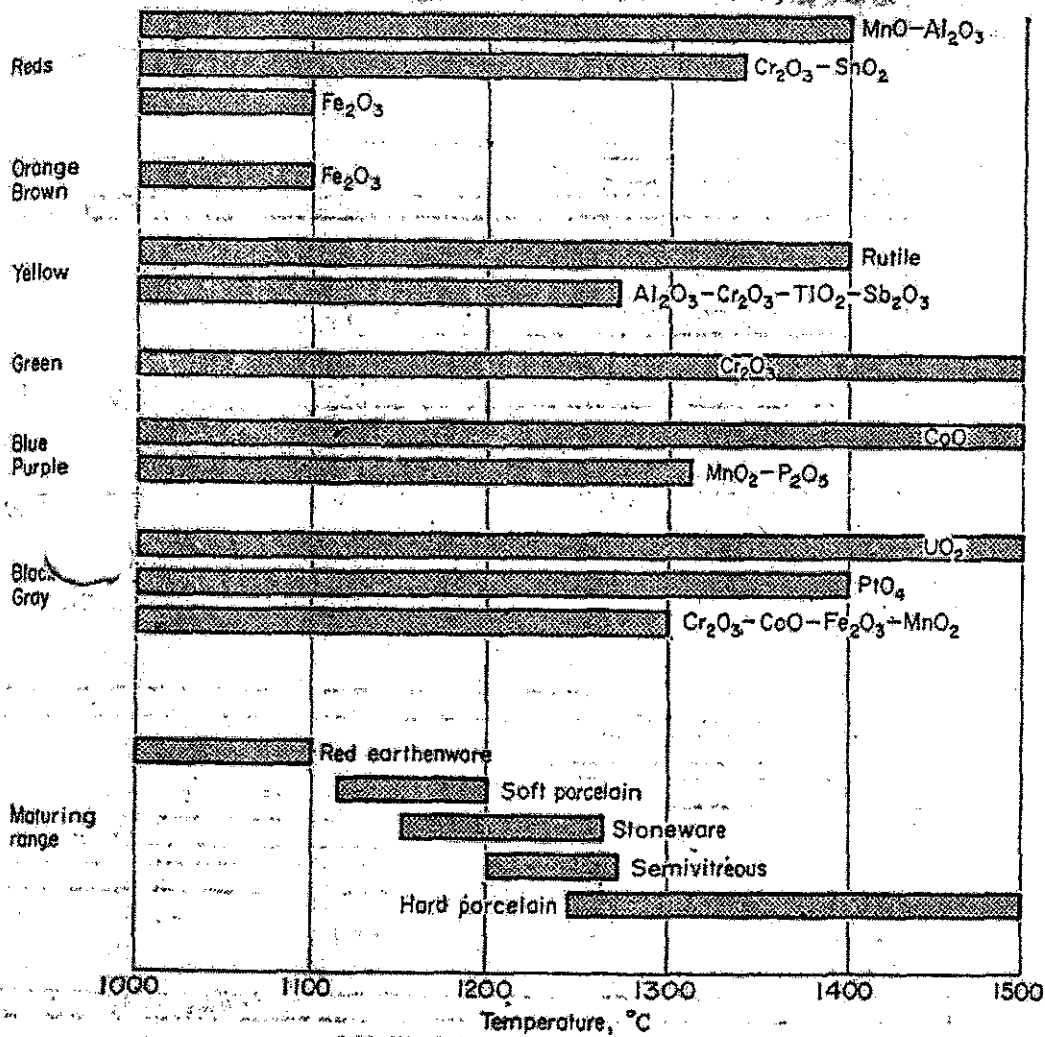
ส่วนประกอบ (%w)	สีดำ	น้ำตาล-ดำ	ดำ-เขียว	น้ำตาล-ดำ
CoO	31.31	15.83	—	—
Cr ₂ O ₃	7.07	15	65.52	48.72
Fe ₂ O ₃	36.36	47.5	34.48	51.28
MnO ₂	12.12	17.5	—	—
NiO	13.13	4.17	—	—

ออกไซด์ที่ทำให้เกิดสีในเคลือบ อาจจะทำให้สีที่แตกต่างกันได้ถ้าออกไซด์นั้นอยู่ในเคลือบที่ต่างกัน เช่น Co^{++} อีออน จะให้สีน้ำเงินในเคลือบที่มีตะกั่ว และจะให้สีม่วง (purple) ในเคลือบ Porcelain ผลของออกไซด์อื่น ได้สรุปในตาราง 6.3

ตาราง 6.3 ผลของออกไซด์ในเคลือบตะกั่วและเคลือบปอร์ซเลน [1]

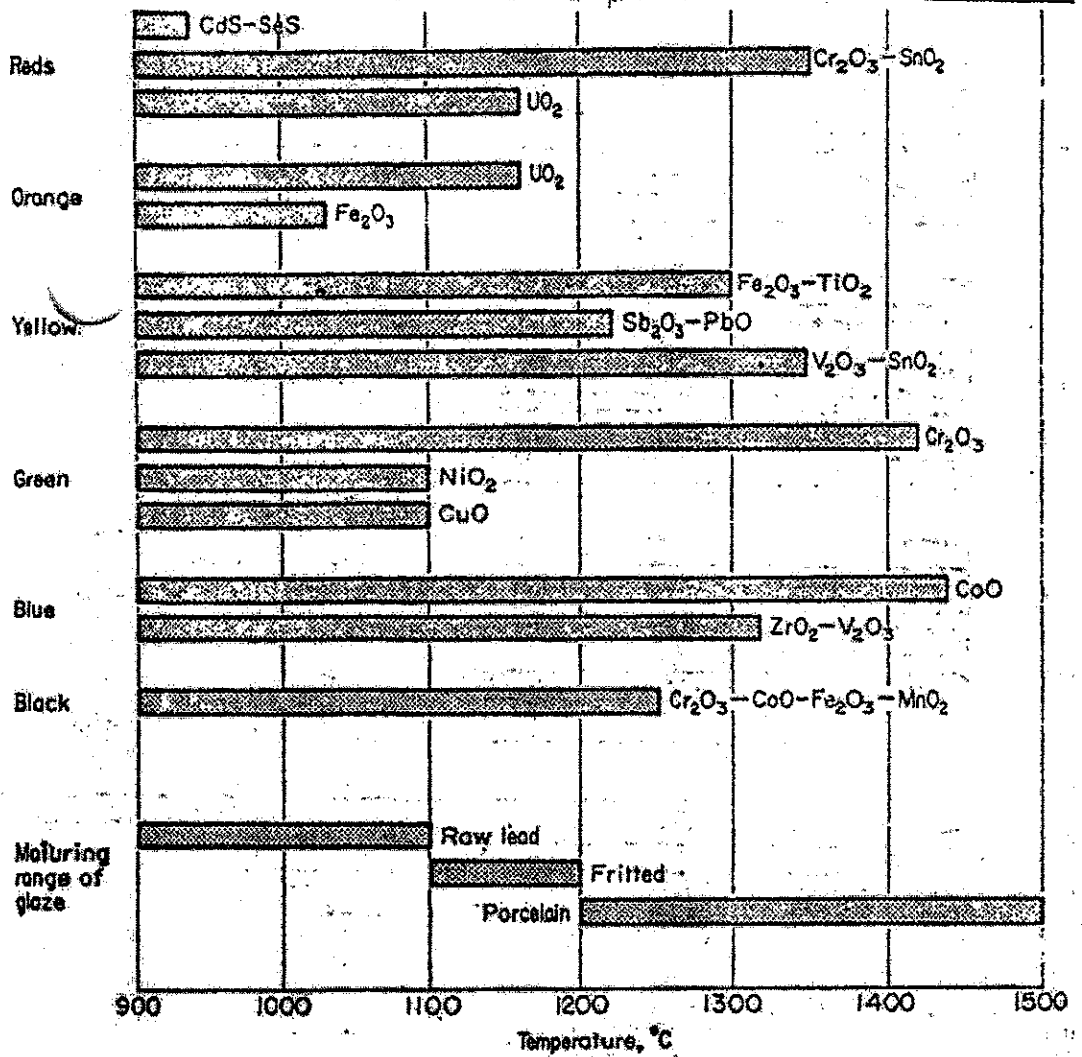
Ion	In lead glaze	In porcelain glaze
Ag^{++}	Pale green	
Au^{++}	Faint violet *	
Co^{++}	Intense blue	Purple
Cr^{6+}	Yellow orange	Green
Cu^{++}	Intense green	
Fe^{+++}	Yellow	Coral red
Mn^{+++}	Purple	
Mo^{++}	Faint green	
Ni^{++}	Yellow green	Olive brown
Pd^{++}	Gray-black *	
Pt^{++}	Gray-black *	
Ti^{++}	Faint yellow	
V^{4+}	Faint yellow	
V^{5+}	Intense orange	Black
W^{6+}	Pale yellow	

* Colloidal color

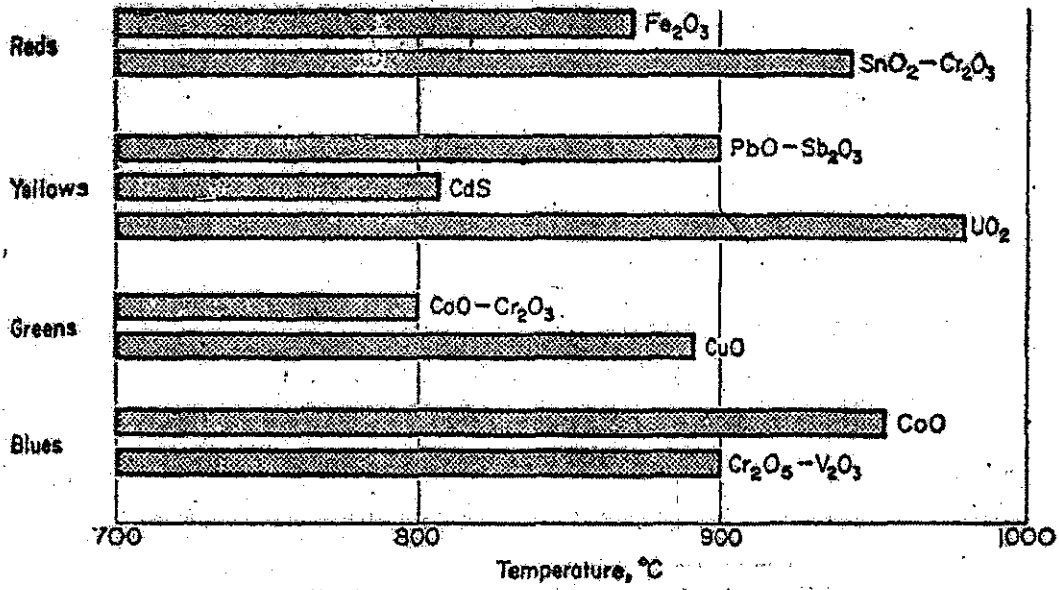


รูป 6.1 ช่วงอุณหภูมิที่สีสำหรับเนื้อดินปั้นมีความเสถียร [1]

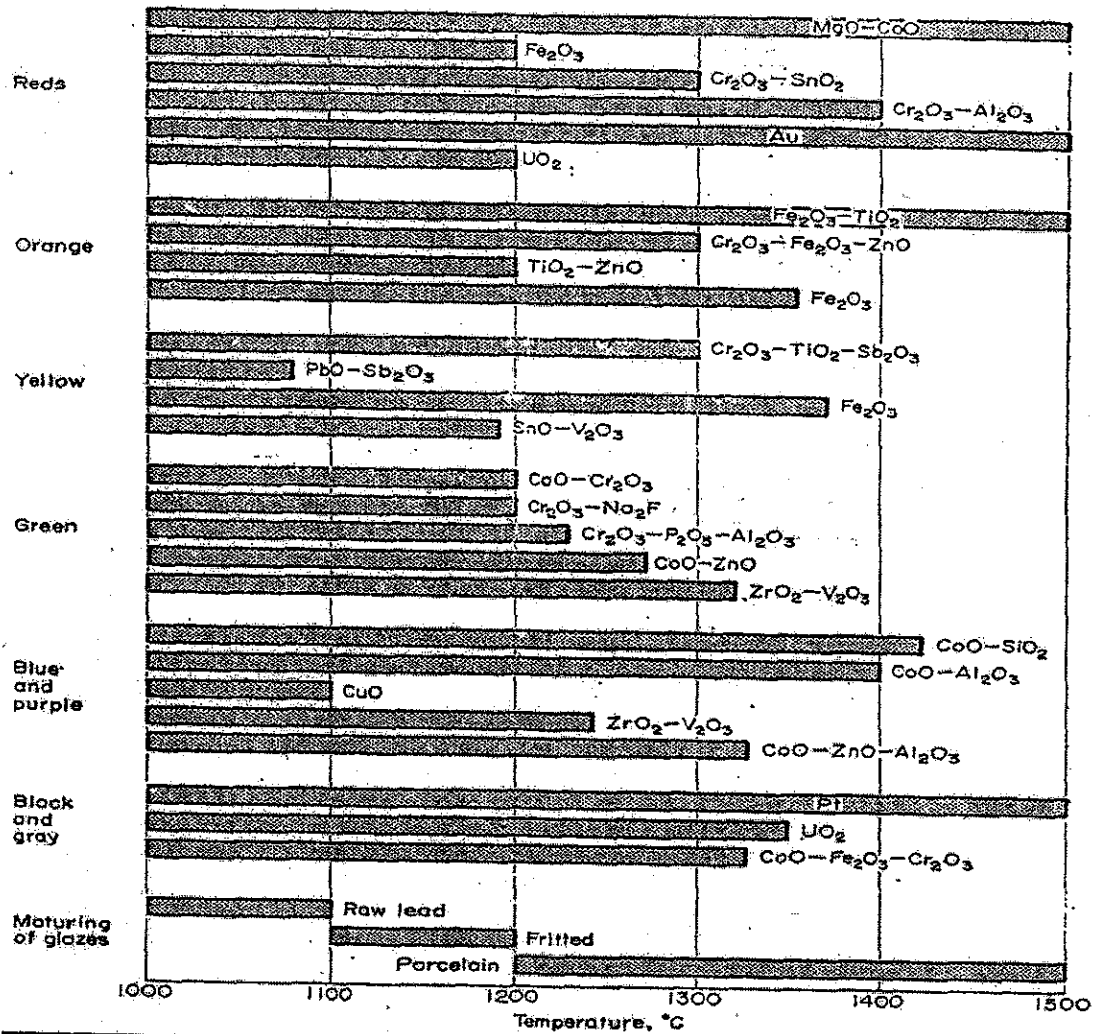
สีสะท้อนที่เกิดจากออกไซด์ของธาตุต่างๆ จะมีช่วงที่สีคงความเสถียรในช่วงอุณหภูมิค่อนข้างกว้างกว่าออกไซด์ของธาตุเดี่ยวๆ อย่างไรก็ตามสีสะท้อนเหล่านี้ก็มีช่วงอุณหภูมิเสถียร ดังรูป 6.1-6.4 ซึ่งในการเลือกใช้สีสะท้อนก็ต้องเลือกให้เหมาะสมกับอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาตกแต่งและเผาเคลือบด้วย



รูป 6.2 ช่วงอุณหภูมิที่ดีที่สุดสำหรับเคลือบมีความเสถียร [1]



รูป 6.3 ช่วงอุณหภูมิที่สีบนเคลือบมีความเสถียร [1]



รูป 6.4 ช่วงอุณหภูมิที่สีบนเคลือบมีความเสถียร [1]

แบบฝึกหัดท้ายบท

1. จากสูตรเคลือบหนึ่งพบว่ามีสารแตกกรานมาก ต้องทำการปรับลดปริมาณของ Na_2O และ K_2O ลงอย่างละ 0.1 โมลสมมูล ให้คำนวณส่วนผสมของเคลือบใหม่

จากสูตรผสมของเคลือบหนึ่ง (10)

โพแทสเซิลด์สปาร์	25 ส่วน
หินปูน	28 ส่วน
โดโลไมต์	3 ส่วน
ดินขาว	27 ส่วน
ซิลิกา	17 ส่วน

และออกไซด์ให้สี CuO 2% ของส่วนผสมเคลือบ

ชื่อวัตถุดิบ	สูตรเคมี	น้ำหนักโมเลกุล
หินปูน	CaCO_3	100.1
ดินขาว	$\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	258.1
ซิลิกา	SiO_2	60.1
โพแทสเซิลด์สปาร์	$\text{K}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{SiO}_2$	556.5
โดโลไมต์	$\text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3$	184.5
คอปเปอร์ออกไซด์	CuO	79.6

บทที่ 7

การทดสอบและการวัดคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์ไวท์แวร์

จุดประสงค์ของการทดสอบและวัดคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์

- เพื่อศึกษาคุณสมบัติของดินจากแหล่งที่ขุดพบใหม่
- เพื่อตรวจสอบคุณภาพ เพื่อเทียบกับมาตรฐาน
- เพื่อปรับปรุงคุณภาพ หรือพัฒนาผลิตภัณฑ์ใหม่
- เพื่อควบคุมการเตรียมผลิตภัณฑ์ ให้มีคุณภาพสม่ำเสมอเพื่อใช้ในการผลิต ลดการสูญเสีย

การทดสอบวัตถุดิบที่นำมาใช้ในการผลิตเซรามิก แบ่งออกเป็น

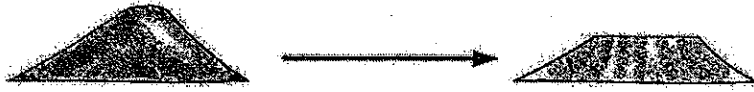
- การทดสอบทางกายภาพ(Physical Testing)
- การทดสอบทางเคมี (Chemical Testing)
- การทดสอบทางแร่ (Mineral Testing)

ขั้นตอนการทดสอบ

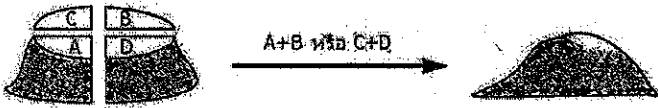
1. สุ่มตัวอย่าง
2. ทดสอบวัตถุดิบก่อนเผา (Before firing)
3. ทดสอบวัตถุดิบหลังเผา (After firing)
4. ทดสอบผลิตภัณฑ์

การสุ่มตัวอย่างด้วย Cone and quarter

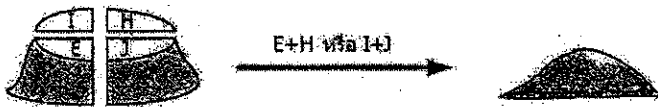
วัตถุดิบที่นำมาทำการตรวจสอบควรมาจากการสุ่มเก็บตัวอย่างจากกองวัตถุดิบที่มาจากแหล่งต่างๆ เพื่อให้ตัวอย่างที่นำมาทดสอบเป็นตัวแทนของตัวอย่างทั้งหมด วิธีการที่นิยมใช้เพื่อทำการสุ่มตัวอย่างคือ Cone and quarter ดังรูป 7.1



1. ผสมวัตถุดิบ หรือดิน ให้เข้ากันแล้วกองเป็นรูป CONE แล้วค่อยๆ กดให้แบน



2. แบ่งตัวอย่างออกเป็น 4 กอง ดังรูป แล้วเลือกตัวอย่าง 2 กอง ตามแนวเส้นทแยงมุม

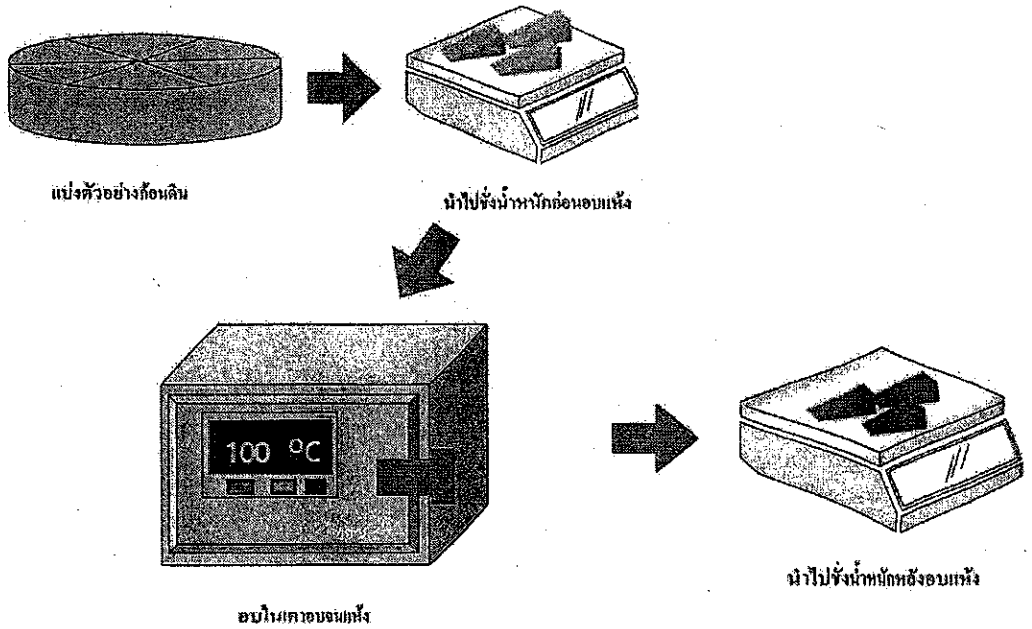


3. นำตัวอย่าง 2 กองที่เลือกไว้ผสมให้เข้ากันดี แล้วแบ่งออกเป็น 4 กอง

ทำซ้ำข้อ 1-3 ไปเรื่อยๆ จนกว่าจะได้ตัวอย่างจำนวนที่ต้องการ

รูป 7.1 การสุ่มตัวอย่างผง

การหาความชื้น (Moisture content)



$$\text{ปริมาณความชื้น(ร้อยละ)} = \frac{\text{น้ำหนักดินก่อนอบแห้ง} - \text{น้ำหนักดินแห้ง}}{\text{น้ำหนักดินก่อนอบแห้ง}} \times 100$$

รูป 7.2 การวัดปริมาณความชื้นในดิน [5]

การหาความละเอียดของอนุภาค สามารถทำได้หลายวิธี ซึ่งขึ้นอยู่กับช่วงขนาดของอนุภาคที่จะวัด

- Sieve test สำหรับ 30 micron diameter
- Sedimentation Methods
- Hydrometer Method สำหรับ 10 μm
- Andreasen Pipette สำหรับ 2 μm
- Centrifuge สำหรับอนุภาคเล็กจนถึง 0.1 μm

การวัดขนาดอนุภาคด้วยตะแกรง Sieve

- Mesh numbers: no. of apertures per linear inch
- British Standard Sieves: BS410:1976

- Institute of Mining and Metallurgy (IMM): UK diameter of wire should be equal to the width of the screen opening
- Tyler Standard Screens and US Standard

ตาราง 7.1 เบอร์ของตะแกรง (Sieve) และขนาดช่องเปิดของตะแกรงสำหรับมาตรฐานต่างๆ

Sieve No.	BSS (μm)	IMM (μm)	USS (μm)
8	2000	2380	1600
16	1000	1190	800
60	250	250	210
100	150	149	127
120	125	125	107
150	105	-	105
200	75	74	65
300	53	-	-

วิธีการหาค่าความละเอียดด้วยตะแกรงเบอร์เดียว

- วัสดุดิบ ~500 g ไปอบแห้งที่ 110 °c ประมาณ 4 ชม.
- ชั่งน.น. วัสดุดิบแห้ง
- นำดินมาผสมกับน้ำให้เป็นน้ำดินเหลวอัตราส่วน 1: 3 ตั้งทิ้งไว้ 24 ชม.
- กรองน้ำดินผ่านตะแกรงละเอียด เช่น 100 Mesh
- นำตะแกรงไปผ่านในก๊อคน้ำให้ไหลรินเบาๆ ล้างเอาดินออก นำตะแกรงไปอบแห้ง ชั่งน.น. ส่วนค้างตะแกรง

สูตร

$$\text{ปริมาณวัตถุที่ผ่านตะแกรง(\%)} = \frac{\text{ค่าน้ำหนักแห้ง} - \text{วัตถุที่ค้างตะแกรง}}{\text{ค่าน้ำหนักแห้ง}} \times 100$$

การหาความละเอียดของอนุภาคดินโดยการร่อนผ่านตะแกรงแบบเปียก

- ดินแห้ง 100 g. ต่อน้ำ 300 cc. กวน 30 นาที ตั้งทิ้งไว้ประมาณ 30 นาที
- กรองน้ำดินผ่านตะแกรงเส้นสะท้อน เบอร์ #60, 120, 200 และ 300 ถาดรองรับวัตถุที่ด้านล่าง
- นำตะแกรงไปผ่านก๊อกไหลรินเบาๆ แล้วนำไปอบแห้งที่วัตถุที่ค้างตะแกรงแต่ละขนาดไปข้าง
- คำนวณปริมาณของวัตถุที่ผ่านตะแกรงแต่ละขนาด

วิธีการวัดการกระจายขนาดของอนุภาคโดย Sedimentary method

- ขึ้นอยู่กับการตกจมของอนุภาคที่กระจายอยู่ในตัวกลางของเหลวด้วยแรงโน้มถ่วงของโลก
→ Stokes' Law.
- โดยหลักการนี้สามารถตรวจสอบด้วย Hydrometer and Andresen pipette (<10 μ m, non-plastic) (2 μ m, clays)

Stokes' Law

$$6\pi\eta v = \frac{4}{3}\pi r^3(\rho_1 - \rho_2)g$$

r = ขนาดของอนุภาค (radius of particles)

v = ความเร็วของอนุภาคที่ตกจมในของเหลว

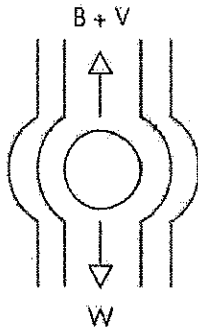
η = ความหนืดของของเหลว (coefficient of viscosity)

ρ_1 = ความถ่วงจำเพาะของอนุภาค

ρ_2 = ความถ่วงจำเพาะของของเหลว

g = ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก

ตามทฤษฎี



เมื่อ

W = แรงที่กระทำในทิศลง เนื่องจากน้ำหนักของอนุภาค

B = แรงที่กระทำในทิศขึ้น เนื่องจาก buoyancy effect of the fluid displaced

V = the viscous drag created in an upwards direction as it opposes the downwards motion of the particle

$$W = B + V$$

Force = Mass \times Acceleration

$$= \text{Volume} \times \text{Density} \times \text{Acceleration}$$

$$w = \left(\frac{4}{3}\pi r^3\right)\rho_1 g$$

$$\text{Buoyancy effect} = \left(\frac{4}{3}\pi r^3\right)\rho_2 g$$

$$\text{Viscous drag, } V = 6\pi r \eta v$$

$$w = B + V$$

$$6\pi r \eta v = \frac{4}{3}\pi r^3 (\rho_1 - \rho_2) g \rightarrow v = \frac{2r^2 g (\rho_1 - \rho_2)}{9\eta} = kr^2$$

ตามกฎ Stoke's law จะเป็นไปได้ก็ต่อเมื่อ

- สมมติให้อนุภาคที่พิจารณาเป็นทรงกลมที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางตามสมการ
- สมมติให้ความเร็วของการตกจมของอนุภาคที่พิจารณาเป็นความเร็วรวม (Terminal velocity) โดยไม่พิจารณาความเร่งในช่วงสั้นๆ

- จำกัดขนาดของภาชนะที่ใส่ของเหลว: เส้นผ่านศูนย์กลาง >3 cm. เพื่อละปัญหาที่เกิดจากแรงเสียดทานที่กระทำระหว่างผนังของภาชนะและอนุภาค ให้อนุภาคได้ตกอย่างอิสระ
- ไม่มีการเคลื่อนที่แบบ Turbulence: ความเร็วในการตกจมของอนุภาคต่ำ ไม่มีผลของ turbulence
- ให้มีการกระจายตัวมากที่สุด โดยมีการเติมสารช่วยกระจายตัว ในกรณีของอนุภาคดินที่มักจะจับตัวกันเกาะเป็นอนุภาคที่ใหญ่ขึ้น สารช่วยกระจายตัวที่สามารถเลือกใช้ได้ ได้แก่

วัตถุติดจำพวก Flint, Feldspar, Alumina ใช้สารช่วยกระจายตัว Water, Calgon or Sodium Oxalate, Dispex, Sodium Carbonate, Sodium Silicate.

Colours: Water, Potassium Citrate

Chalk: Isopropanol or Acetone

Silimanite: Methyl Alcohol

Clay: Water: Sodium Hydroxide, Calgon, Dispex and Sodium Silicate.

วิธี Andreasen Pipette

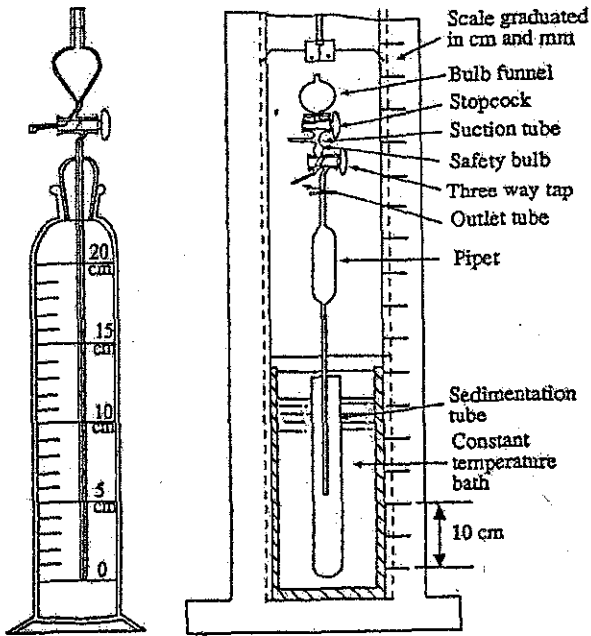
ใช้หลักการ Sedimentation เหมือนกัน แต่ใช้เปิดในการเก็บตัวอย่างที่ระดับความลึกจากผิวของของเหลว ใช้สมการ Stoke เช่นกัน

Theory $d = 14.29 \%$ (By Weight) of particles less than a given diameter
 $= (C_T/C_0) \times 100$

When $d =$ ขนาดของอนุภาค (μm)
 $L =$ ระดับความลึก (cm)
 $T =$ เวลาในการตกจม (settling time) (min)
 $C_T =$ ความเข้มข้นของของแข็งที่เวลา T
 $C_0 =$ ความเข้มข้นของของแข็งเริ่มต้น

โดยกำหนดให้อนุภาคที่ทำการวัดโดยวิธีนี้มีรูปร่างเป็นทรงกลม ที่มีการตกจมแบบอิสระภายในของเหลวนั้น โดยเป็นไปตาม Stokes' Law

$$6\pi\eta v = \frac{4}{3}\pi r^3(\rho_1 - \rho_2)g$$



รูป 7.3 Andreasen Pipette [7]

ถ้ากำหนดให้ d เป็นขนาดของอนุภาคที่เทียบเท่าทรงกลม

For conditions of the Andreasen test the following values are used:

$$d = \sqrt{\frac{18\eta v}{(\rho_1 - \rho_2)g}}$$

d = diameter of particles (μm)

η = viscosity of water 0.01002 poise at 20 °c

ρ_1 = density of particles 2.5 g/cm^3 (assumed for ceramic powder)

ρ_2 = density of water 1.0 g/cm^3

ความเร็วในการตกจม $V =$ ระดับความลึก (L, cm) / เวลาที่ปล่อยให้ตกจม (T, min)

เมื่อ $g = 980.7 \text{ cm}/\text{s}^2$

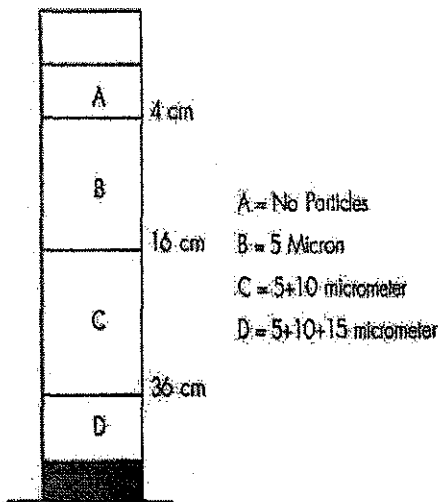
$$d = \sqrt{\frac{18 \times 0.0100 \times 10^3 \times L}{1.5 \times 9807 \times 60 \times T}}$$

ที่ 20 °c, $d = 14.29 \mu\text{m} \sqrt{\frac{L}{T}}$

- ที่ระดับความลึกที่วัด และปล่อยให้อนุภาคตกจมด้วยเวลา T ความเข้มข้นของของแข็งที่มีอนุภาคนั้น ๆ คือ C_T :

เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่าอนุภาคนั้น ๆ = $(C_T/C_0) \times 100$

ดังนั้นในการหาค่าเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของอนุภาคนั้น ๆ ทำได้โดยกระจายผงตัวอย่างในของเหลว และดูดเก็บตัวอย่างของแข็งที่ระดับความลึก L (cm) หลังจากที่ตั้งของเหลวนี้ไว้เป็นเวลา T (min)



วิธีการทดลองโดยการเปลี่ยนระดับความลึกในการเก็บตัวอย่าง

- ชั่งน้ำหนักผง 25 g. เติมน้ำ 100 ml ใน 600 ml beaker.
- นำไปต้มเพื่อไล่ฟองอากาศออกไป กวนแล้วร่อนผ่านตะแกรง # 200
- นำดินที่ร่อนผ่านไปอบให้แห้ง นำไปใส่ในระบบอกตวง 1 ลิตร โดยการเติม 40 ml of 4 % Calgon กวนเข้าด้วยกัน เก็บตัวอย่างโดยการใช้ปิเปตดูดขึ้นมาที่ระดับความลึก 10 และ 20 cm เพื่อจะทำการศึกษา % ของแข็งที่มีขนาด 10 และ 20 μm

การคำนวณผลการทดลอง

- คำนวณหาปริมาณ calgon ในการเก็บตัวอย่าง 20 ml (Deflocculation correction) ; 40 ml of 4% calgon in 1 l. of suspension

จาก 1000 ml contains 1.6 g calgon i.e. 20 ml contains 0.032 g calgon

- ขนาดอนุภาค = 10 μm ที่ระดับความลึก 10 cm จะต้องตั้งของเหลวทิ้งไว้ = 20 min 25 sec

ความเข้มข้นของของแข็ง 0.5771

deflocculant correction 0.0320

ดังนั้น $C_0 = \underline{0.5451}$

ที่ระดับความลึก 10 cm 0.2698

Deflocculant correction 0.0320

$C_T = \underline{0.2378}$

ที่ระดับความลึก 20 cm 0.4418

Deflocculant correction 0.0320

$C_T = \underline{0.4018}$

ดังนั้น $(0.2378/0.5451) \times 100 = 43.6\%$ มีอนุภาคขนาดเล็กกว่า 10 μm

$(0.4098/0.5451) \times 100 = 75.2\%$ มีอนุภาคขนาดเล็กกว่า 20 μm

วิธีการทดลองโดยระดับความลึกในการเก็บตัวอย่างคงที่

- เก็บตัวอย่าง 10 ml ที่ 20 cm
- ขนาดอนุภาค $d = 20 \mu\text{m}$ ที่ระดับความลึก 20 cm ตั้งของเหลวทิ้งไว้ 10 min 13 sec
- Temp = 20 °c
- Specific gravity of dry material = 2.5
- Vol. of sedimentation vessel = 630 ml.
- Deflocculant correction per 100 ml. pipette = 0.0127

ตาราง 7.2 ตัวอย่างการทดลอง

ความลึกในการเก็บตัวอย่าง (cm)	เวลาที่ตั้งไว้ (min.)	ขนาดอนุภาค (μm)	น้ำหนัก (g)	น้ำหนักสุทธิ (g)
20.0	0	-	0.2227	0.2100
19.6	0	-	0.2238	0.2111
19.2	9-48	20	0.1828	0.1701
18.8	38-23	10	0.1164	0.1037

ความเข้มข้นเริ่มต้นของของแข็ง = average 0.2100, 0.2111 \rightarrow = 0.2106

เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของอนุภาคที่มีขนาดน้อยกว่า 20 μm = $(0.1701/0.2106) \times 100 = 80.8 \%$

เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของอนุภาคที่มีขนาดน้อยกว่า 10 μm = $(0.1037/0.2106) \times 100 = 49.2 \%$

Hydrometer method

Calibration Procedure: ในการ calibration ทำได้โดยการหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าที่อ่านได้จาก Hydrometer (R) และค่า Effective depth (L, cm) ดังสมการนี้

$$L = H + (h/2) - (V/2A) - M$$

- $H + (h/2)$ คือค่าคงที่ คำนวณได้จาก Hydrometer
- $V/2A$ คือ Displacement correction ค่าที่ได้จากการแทนที่ Hydrometer ในกระบอกตวง (V คือปริมาตรของ hydrometer, A คือ พื้นที่หน้าตัดของกระบอกตวง)
- M = meniscus correction ~ 0.2 cm.

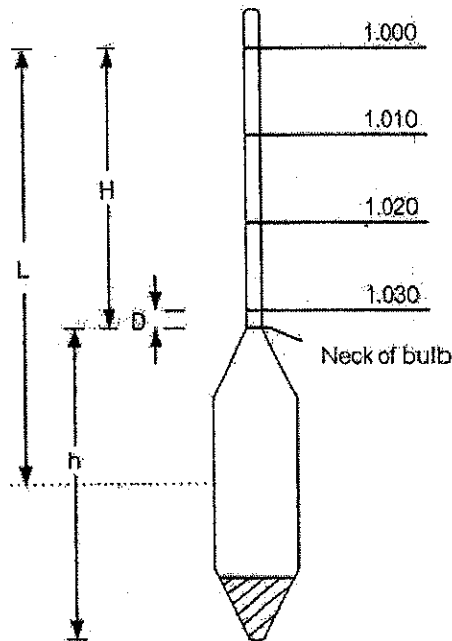
Note 1: Displacement correction ($V/2A$)

- ปริมาตรของน้ำดิน ถูกแทนที่บางส่วนด้วย Hydrometer ซึ่งเป็นฟังก์ชันของปริมาตรของ hydrometer ต่อพื้นที่หน้าตัดของกระบอกตวง ดังนั้นค่าที่ถูกต้องคือ $V/2A$ ในระดับความลึกจริงๆ

Note 2: Meniscus correction (M)

- ค่าที่ประมาณเพื่อให้ค่าที่อ่านได้จาก Hydrometer ถูกต้องมากยิ่งขึ้น เนื่องจากน้ำดินมีสีที่ขุ่น ทำให้การอ่านค่าผิดพลาดไปได้ จึงประมาณความผิดพลาดนี้ประมาณ 0.2 cm

Hydrometer calibration



รูป 7.4 Hydrometer

$$h/2 = 16.6/2 = 8.3 \text{ cm,}$$

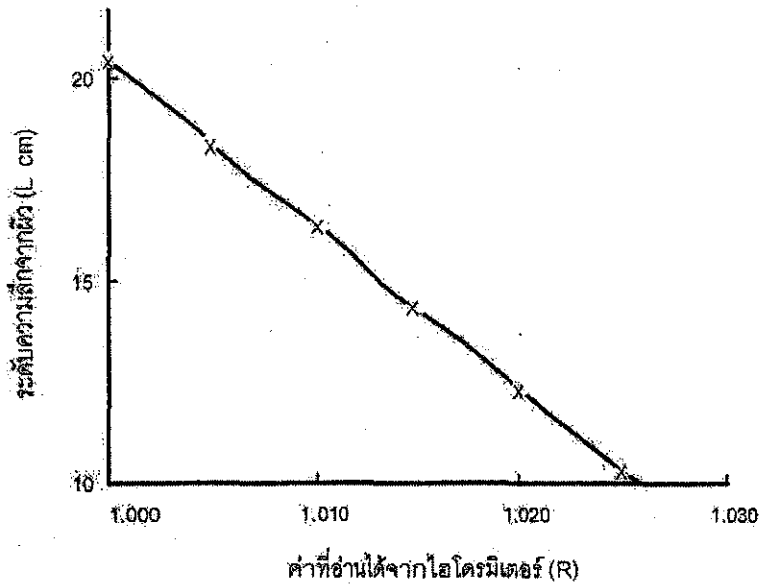
$$V/2A = 66.38/(2 \times 30.58) = 1.08 \text{ cm}$$

$$M = 0.2$$

$$L = H + (h/2) - (V/2A) - M = 7.02$$

ตาราง 7.3 ผลการ Calibration

ค่าที่อ่านได้ R	R ถึง 1.030 (cm)	D (cm)	H (cm)	$h/2 - V/2A - M$	L (cm)
1.000	12.10	1.5	13.60	7.02	20.62
1.005	10.05	1.5	11.55	7.02	18.57
1.010	8.00	1.5	9.50	7.02	16.52
1.015	6.00	1.5	7.50	7.02	14.52
1.020	3.95	1.5	5.45	7.02	12.47
1.025	1.90	1.5	3.40	7.02	10.42



รูป 7.5 กราฟระหว่าง Effective depth (L cm) & observed reading (R)

วิธีการทดลอง

BS 1377 (ใช้ Calgon - T. as deflocculant)

1. Sample of dry material

ผงตัวอย่าง 50 g (dry wt) กระจายตัวในน้ำ 200 ml กวนเข้าด้วยกัน ร่อนผ่าน sieve 200 เมช
 → นำน้ำดินไปใส่ในกระบอกตวง → เติม 4% calgon ลงไป 40 ml → กวนผสมกัน → ตั้งทิ้งไว้
 ตามเวลาที่กำหนด (16,25,36 min.) แล้วอ่านค่าที่สเกลของ Hydrometer (reading)

2. Sample of Slop Material หาน้ำหนักของผงตัวอย่าง

- ใช้ขวด pycnometer
- ชั่งน้ำหนัก น้ำดิน + ขวด
- ชั่งน้ำหนักน้ำเปล่า + ขวด

น้ำหนักของขวดใส่น้ำดิน - น้ำหนักของขวดใส่น้ำ = Z

$Z \approx 28\text{--}32$ g. เพื่อให้ได้ความเข้มข้นของน้ำดินที่เหมาะสมในการวัดการกระจายขนาด

$$Z \times (S/S-1) = W$$

เมื่อ S = ความถ่วงจำเพาะของของแข็ง หรือวัสดุดิบ

วิธีการคำนวณผลการทดลอง

จากค่าที่อ่านได้จาก hydrometer ที่เวลาต่างๆ นำไปอ่านค่า L จากกราฟรูป 7.5 และ
 คำนวณหาค่า d หรือขนาดของอนุภาคโดยใช้ Stokes' Law

$$d = 14.29 \sqrt{\frac{L}{T}}$$

- หาเปอร์เซ็นต์ (by wt) ของผงที่มีขนาดเล็กกว่าขนาด d นั้นๆ = $\frac{(R_c - 1) \times 100,000}{Z}$
- หาค่า R_c จากสมการ $R_c = R + C_c - C_0$

เมื่อ R = ค่าที่อ่านได้จาก hydrometer

R_c = corrected hydrometer reading

C_c = composite correction = 0.0022

C_0 = deflocculation correction = น้ำหนักของสารช่วยกระจายตัว เช่น ถ้าใช้ 4% calgon

ปริมาตร 40 ml จะมี calgon = $40 \times 4/100 = 0.0016$

จาก calibration graph ถ้า R = 1.0195 อ่านค่าได้ L (cm) = 12.70

จาก Stokes' Law

$$d = 14.29 \sqrt{\frac{L}{T}} = 14.29 \sqrt{(12.70/16)} = 12.73 \mu\text{m}$$

ถ้าค่า composite correction = $C_c = 0.0022$ และ

ค่า deflocculation correction = $C_d = 0.0016$

ดังนั้น $R_c = 1.0195 + 0.0022 - 0.0016 = 1.0201$

$W = 50$ g

$$\frac{(R_c - 1) \times 100,000}{W_x \frac{(S-1)}{S}} = \% \text{ undersize}$$

อนุภาคที่เล็กกว่า $12.73 \mu\text{m}$ มี = $(1.0157 - 1)100,000 / (50 \times 0.6) = 52.3 \%$

ตาราง 7.4 ผลการทดลองหาค่าการกระจายขนาดโดยวิธี Hydrometer

T(min)	R	L	d(μm)	R_c	% < d(μm)
16	1.0195	12.7	12.73	1.0203	67.7
25	1.0170	13.7	10.58	1.0176	59.3
36	1.0151	14.47	9.06	1.0157	53.0

หมายเหตุ Proof that "% (by wt) of particles < given diameter" = $\frac{(R_c - 1) \times 100,000}{Z}$

Brongniart's formula

$$W = (D-1) / (S/S-1)$$

เมื่อ $W =$ น้ำหนักของผงแห้งในน้ำดิน 1 ml

$D =$ ความหนาแน่นของน้ำดิน = R_c

$S =$ ความถ่วงจำเพาะของผงแห้ง

Weight in 1 ml = $(R_c - 1) / (S/S - 1)$

Weight in g/l = $1000 (R_c - 1) / (S/S - 1)$

$(C_T / C_0) \times 100 =$ % (wt) of particles less than a given diameter

C_0 คือความเข้มข้นของของแข็ง หน่วยเป็น g/l ก่อนการตั้งทิ้งไว้

C_T คือความเข้มข้นของของแข็งหลังจากตั้งทิ้งไว้เวลา T

$$C_T = 1000 (R_c - 1)(S/S - 1) \text{ and } C_0 = Z \times (S/S - 1)$$

Z = น้ำหนักขวดใสน้ำดิน - น้ำหนักขวดใสน้ำ

$$(C_T/C_0) \times 100 = \frac{1000 (R_c - 1) (S/S - 1)}{Z (S/S - 1)} \times 100 = \frac{(R_c - 1) 100,000}{Z}$$

วิธีการวัดการกระจายขนาดด้วย Centrifuge

Theory: force acting on a particle = mass \times acceleration

$$\text{Centifuge} = \text{mass} \times R\omega^2$$

where R = distance from centre of rotation

ω = angular velocity

Stokes' Law

$$6\pi r \eta \frac{dR}{dt} = \frac{4}{3} \pi r^3 (\rho_1 - \rho_2) R \omega^2$$

$$\frac{dR}{dt} \cdot \frac{1}{R} = \frac{2r^2 \omega^2 (\rho_1 - \rho_2)}{9\eta}$$

Integrating between R_2 and R_1 where

R_1 = distance from center of rotation to suspension surface

R_2 = distance from center of rotation to the bottom of centrifuge tube

$$\frac{1}{t} \ln \frac{R_2}{R_1} = \frac{2r^2 \omega^2 (\rho_1 - \rho_2)}{9\eta}$$

$$t = \frac{9\eta \ln \frac{R_2}{R_1}}{2r^2 \omega^2 (\rho_1 - \rho_2)} = \frac{k}{r^2}$$

- ขนาดของอนุภาค = calculated size of particle which is just completely sedimented under the given conditions.

จากการทดลองพล็อตกราฟระหว่าง % sedimentation และ critical radius รูป 7.6 อนุภาคที่ตกตะกอนลงมาเป็นอนุภาคที่มีขนาดใหญ่กว่า critical radius

- The accumulation size distribution (% undersize) หาได้โดยจากกราฟนี้ (รูป 7.6) โดยการลากเส้นตรงที่ส่วนโค้งจากจุด r และจากเส้นตรงนี้ขนาดอนุภาคจริงคือ $3/2r$ โดยลากเส้นตรงจากจุด $3/2r$ ไปและไปจรดลงแกน y จะได้จุด P (% Undersize)

วิธีการทดลองวัดการกระจายขนาดโดย Centrifuge

- ดินตัวอย่างร่อนผ่านตะแกรง 100 และ 200 เมช
- นำดินที่ร่อนผ่านมาเตรียมเป็นน้ำดิน และเก็บตัวอย่างดินโดยใช้ปิเปตดูดมา 25 ml
- นำน้ำดิน 25 ml มาใส่ในหลอดทดลอง (หลอดละ 25 ml)
- นำน้ำดินในหลอดทดลองไปเข้าเครื่องเหวี่ยง ตามเวลา และความเร็วในการหมุนที่ต้องการ
- เมื่อได้เวลาที่กำหนด นำน้ำดินออกมาจากเครื่อง แยกส่วนที่ไม่ได้ตกตะกอนออก
- นำส่วนที่ตกตะกอนไปอบ แล้วชั่งหาน้ำหนักที่แน่นอนหลังอบ น้ำหนักของตะกอนที่ได้ บวกกับน้ำหนักของผงที่อยู่ในส่วนแขวนลอย ควรจะเท่ากับน้ำหนักของของแข็งที่อยู่ในน้ำดิน 25 ml
- นำผลการทดลองมาคำนวณหาขนาดอนุภาค

การคำนวณผลการทดลอง

ตาราง 7.5 ผลการทดลองด้วย Centrifuge

	น้ำหนักหลัง อบ	น.น. ผงตัวอย่าง ทั้งหมด	น้ำหนักสุทธิ	% ส่วนที่ตกตะกอน
ส่วนที่ แขวนลอย	0.4360	0.6301	0.6026	32.21
ส่วนที่ ตกตะกอน	0.1941			

ปริมาณสารช่วยกระจายตัวที่ใช้

$$\left. \begin{array}{l} 25 \text{ ml of } 4\% \text{ calgon} \\ 25 \text{ ml of } 0.1 \text{ M NaOH} \end{array} \right\} 1 \text{ litre, } 25 \text{ ml suspension} = 0.0250 \text{ g calgon} + 0.0025 \text{ g NaOH}$$

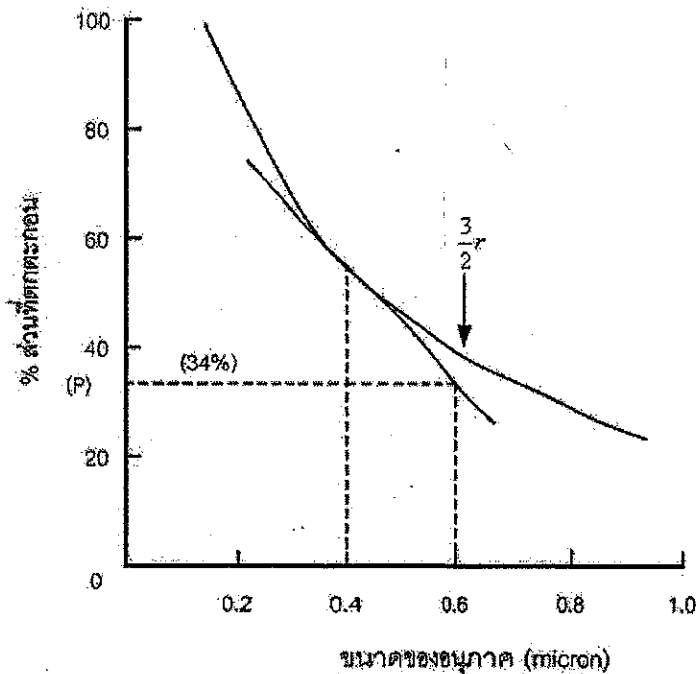
ปริมาณของสารช่วยกระจายตัวในน้ำดินตัวอย่าง 0.0275 g

% ส่วนที่ตกตะกอน = $(0.1941 \times 100) / 0.6026 = 32.21\%$

จากกราฟระหว่าง % sediment & Critical radius (micron) รูป 7.6

$P =$ % อนุภาคที่มีขนาดใหญ่กว่า $0.4 \mu\text{m} = 34\%$

$100 - P = 66\%$ อนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่า $0.4 \mu\text{m}$



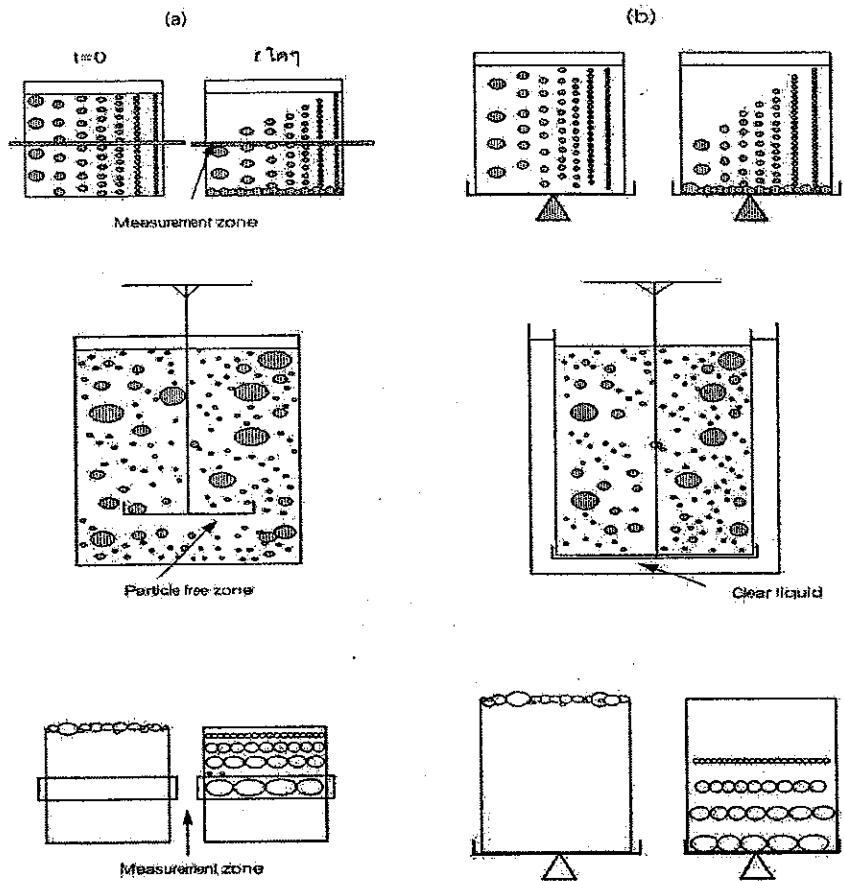
รูป 7.6 Graph of % sediment and critical radius

วิธีการวัดการกระจายขนาดโดยใช้เทคนิคอื่นๆ

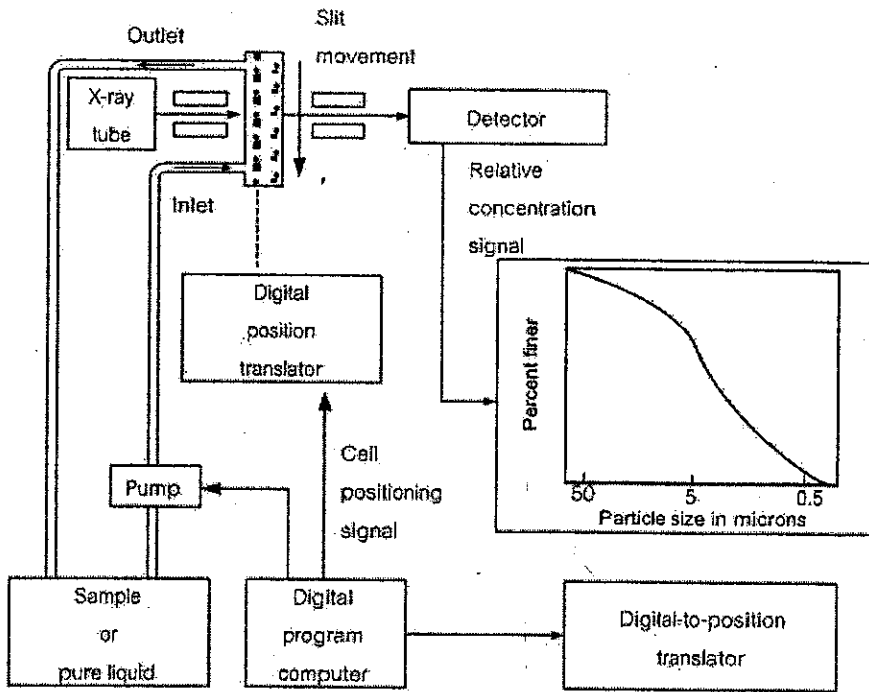
- Micromeritics Sedigraph Particle size Analyser:

เป็นการวัดอัตราการตกตะกอนของอนุภาค และแสดงผลออกมาเป็น Cumulative undersize distribution curve (ขนาดของอนุภาค (d) & % ปริมาณอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่าอนุภาคนั้นๆ)

โดยการใช้ x-ray หาความเข้มข้นของอนุภาคที่กระจายตัวในตัวอย่างที่มีความลึกต่างๆ เป็นฟังก์ชันของเวลา ค่า Logarithm of the transmitted X-ray intensity ถูกคำนวณออกมาและประมวลผลออกมาเป็น " Cumulative Mass Percent Finer".



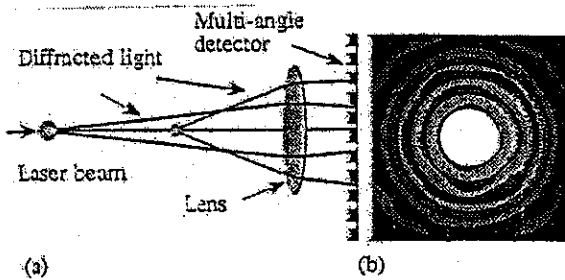
รูป 7.7 เปรียบเทียบการวัดการกระจายขนาดของอนุภาคโดย (a) การวัดโดยให้ระดับความลึกคงที่ (b) การวัดโดยหาจากอนุภาคที่ตกจมลงโดยน้ำหนัก (มวล)



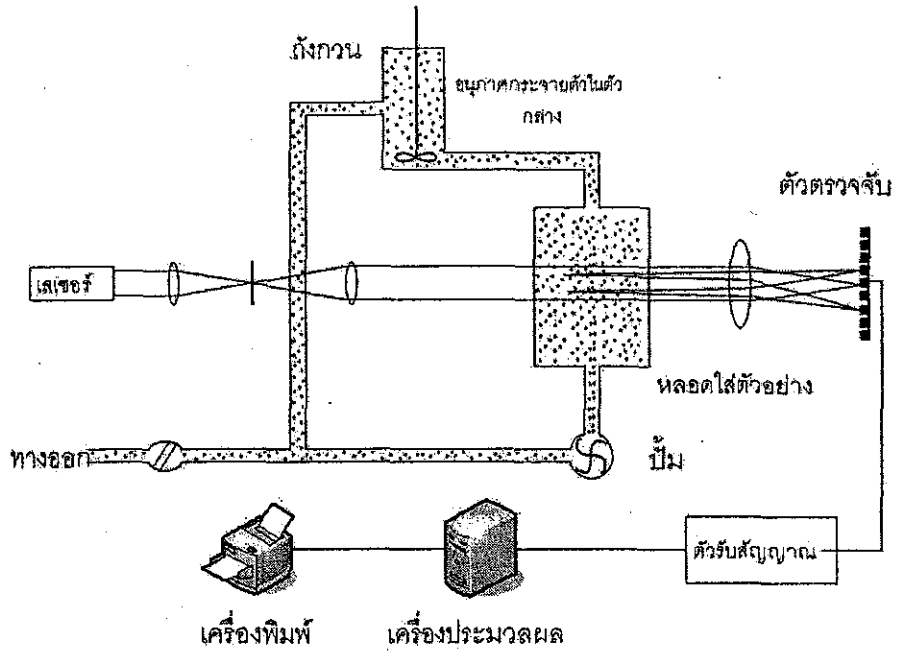
รูป 7.8 Sedigraph by X-ray

Laser diffraction particle size analysis

- เมื่อลำแสงกระทบกับอนุภาคที่มีขนาดต่างๆ จะเกิดการกระเจิงแสงออกมา จากนั้นตัวตรวจจับการกระเจิงจะตรวจจับและส่งผลเข้าสู่คอมพิวเตอร์เพื่อประมวลผลออกมาเป็นการกระจายขนาด



รูป 7.9 แสดงการแทรกสอดที่เกิดจากการกระเจิงของแสงเมื่อตกกระทบกับอนุภาค [11]

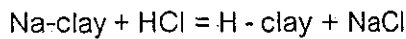
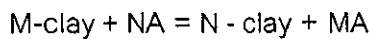


รูป 7.10 ส่วนประกอบและการทำงานของ Laser diffraction particle size analysis

การวัด Cation exchange capacity

- ประจุดินมีประจุเป็นลบเนื่องจากการเกิดการแทนที่ของอิออนที่มี charge/size ratio ใกล้เคียงกัน

ตัวอย่าง การแทนที่ Al^{3+} for Si^{4+} → ทำให้เกิดการบิดเบี้ยวของโครงสร้าง และลดความเสถียรของโครงสร้าง หรือเกิดจากการแตกพันธะทำให้เกิดด้านที่เป็นประจุบวกและลบที่ขอบของโครงสร้างผลึกของแร่ดิน หรือเกิดจากการดูดซับหรือการแลกเปลี่ยนอิออนกับสารอิเล็กโทรไลต์ที่อื่นๆ ดังสมการ ดินที่มีประจุ M เกาะอยู่ที่ผิวจะเกิดการแลกเปลี่ยนกับอิออน N ในตัวกลาง ทำให้ได้ดินที่มีประจุ N ล้อมรอบหรือถูกดูดซับที่ผิว



ความสามารถในการแลกเปลี่ยนอิออนของดินเป็นลักษณะเฉพาะของดิน ซึ่งมีผลต่อคุณสมบัติด้านอื่นๆของดินด้วยเช่น

- Plasticity
- Drying shrinkage

- Viscosity
- Deflocculated/flocculated

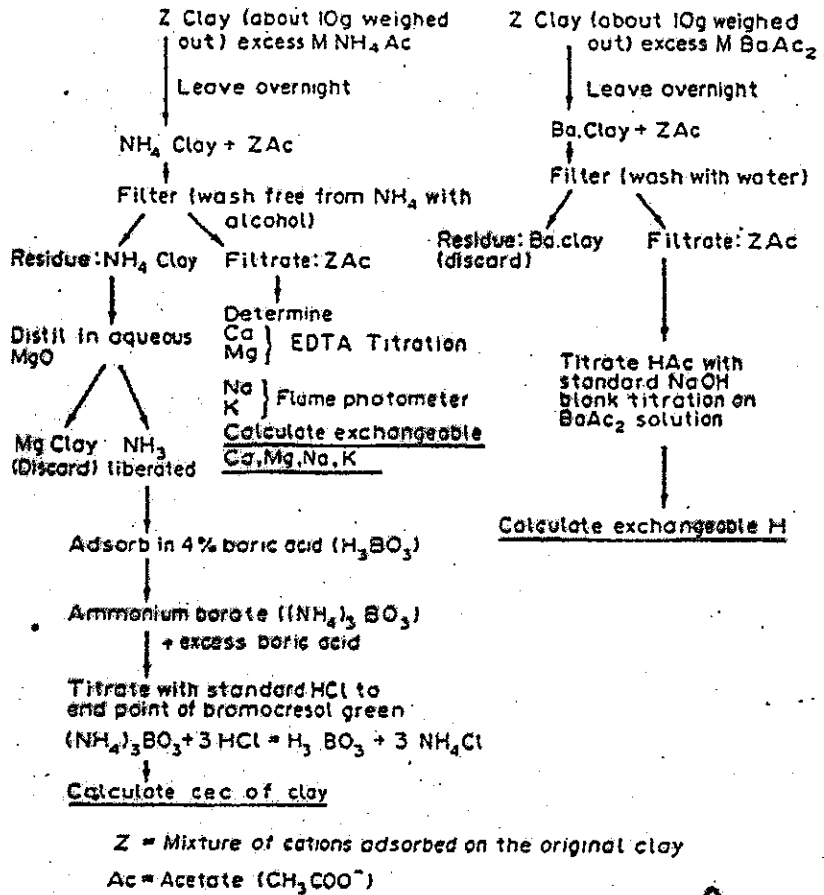
ค่า Cation (or base) exchange capacity: ค่าปริมาณอิออนบวก (milli-equivalents) ที่สามารถจะเกิดการดูดซับได้ ต่อดินแห้ง 100 g

- ถ้าดินมีค่า CEC สูง แสดงว่าดินชนิดนั้นมีความสามารถในการดูดซับอิออนได้ดี ซึ่งนั่นคือโครงสร้างของดินนั้นจะไม่เป็นระเบียบมาก
- จากค่า CEC จะทำให้เราทราบคุณสมบัติด้านต่างๆของดิน รวมทั้งปริมาณสารช่วยกระจายตัวที่ต้องใช้ด้วย

Ex. China clay: จัดเป็นดินที่มีโครงสร้างที่เป็นระเบียบ มีค่า CEC = 3-6 meq/100 g

Ball clay, Fireclays: เป็น Disordered kaolinite มีค่า CEC = 15-40 meq/100 g

Smectite: Highly disorder, montmorillonite มีค่า CEC = 70-150 meq/100 g



รูป 7.11 แผนภาพการหาค่า CEC และไอออนที่มีการแลกเปลี่ยนที่ผิวดิน [7]

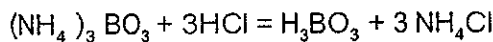
วิธีการทดลองและคำนวณหา CEC

(ammonium acetate)



การคำนวณหาค่า CEC

- NH₄ Clay: ammonium borate in excess boric acid solution after the distillation stage.



- ปริมาณของ HCl ที่ใช้ในการไตเตรดเท่ากับปริมาณของ ammonium ion ที่ถูกแทนที่

เช่น 10 g of clay + 15 ml of 0.107 N HCl (107 milli-equivalents HCl ต่อลิตร หรือ 0.107 milli-equivalents ต่อลบ.ซม.)

ดังนั้น 1.605 milli-equivalents = 0.107×15 (หมายถึงกรด 1 milli-equivalents ทำปฏิกิริยากับ 1 milli-equivalents ของ $(\text{NH}_4)_3 \text{BO}_3$)

→ ดิน 100 g จะดูดซับ ได้ 16.05 milli-equivalents.

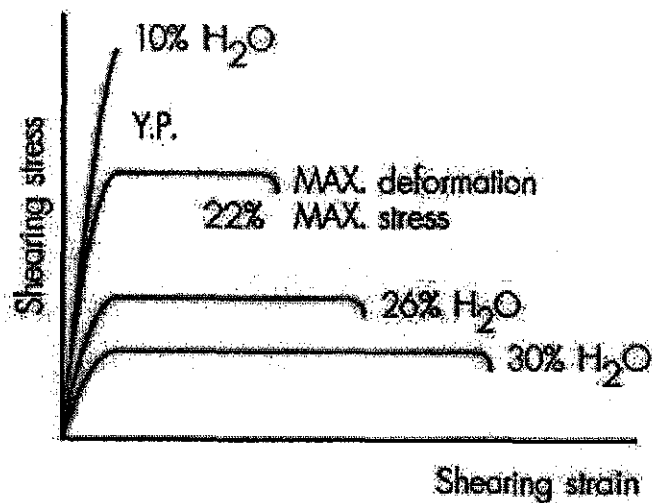
- ดังนั้น CEC = 16.05 milli-equivalents ต่อ 100 g. ของดินแห้ง

ความเหนียวของเนื้อดิน (Plasticity)

- เมื่อให้แรงกระทำกับดิน ดินจะเปลี่ยนรูปร่างไป ถ้าดินมีความเหนียวมากดินก็จะยังคงรูปร่างอยู่ได้ นั่นคือสามารถปั้นหรือขึ้นรูปได้ และไม่เกิดการแตกแยกออกจากกัน
- ความหมายของ plasticity ในทางกลหมายถึง Stress = Force/Area in Tensile, Compressive, Shear force

Strain = Deformation of the body = dL/L

$K = \text{stress/strain} = \text{Modulus of elasticity or Young's modulus}$



รูป 7.12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดและความเค้นที่เกิดจากแรงเฉือนที่กระทำต่อดินที่มีปริมาณน้ำในเนื้อดินต่างกัน

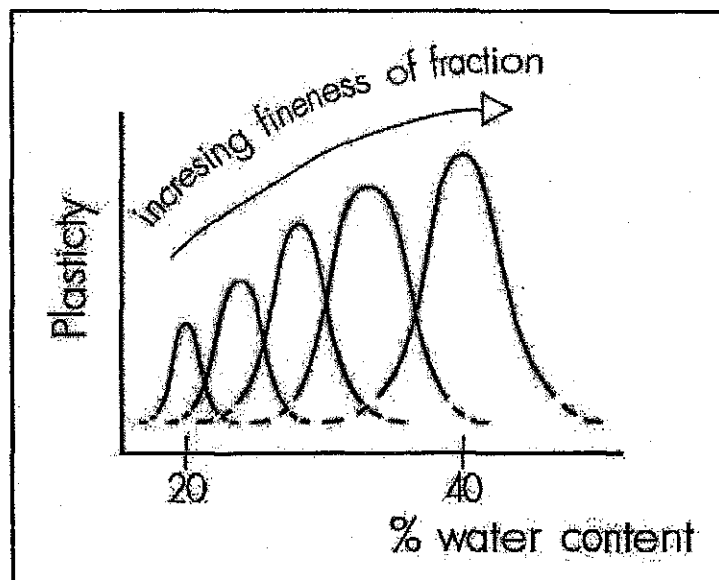
The yield point: จุดที่เริ่มเกิด plastic deformation นั่นคือจุดที่ดินได้รับแรงกระทำแล้วเสียรูปไปอย่างถาวร

Max Deformation or Total Stress: การเปลี่ยนรูปมากที่สุดก่อนที่ดินจะเกิดการแยก หรือแตกออกจากกัน

Max Stress: แรงสูงสุดที่ใช้ในการขึ้นรูปดินนั้นๆ แล้วดินยังคงสภาพเดิมได้

ปัจจัยที่มีผลต่อความเหนียว

- ความละเอียดของเนื้อดิน ดินที่มีความละเอียดมาก จะเหนียวมาก และต้องการปริมาณน้ำมากเพื่อให้ดินเหนียวสามารถขึ้นรูปได้ และจะมีช่วงปริมาณน้ำที่ต้องการกว้างกว่าเพื่อให้ดินมีความเหนียว



รูป 7.13 ความสัมพันธ์ระหว่างความเหนียวกับปริมาณน้ำในเนื้อดิน

- ปริมาณน้ำที่ดูดซับอยู่
ปริมาณน้ำที่ดูดซับอยู่จะเป็นฟิล์มอยู่ที่ผิวอนุภาคดิน ซึ่งจะทำให้เกิดการลื่น ดังนั้นจึงทำให้ความเหนียวเพิ่มขึ้น เนื่องจากชั้นดินมีการเลื่อนและดึงดูดกันอยู่โดยไม่แตกออกจากกัน
- ผลของอิออนต่างๆ

ดินที่จับกันเป็นก้อน หรือ Flocculated clay: อนุภาคที่จับตัวกันจะทำให้เกิดการเรียงตัวกันอย่างหลวมๆ ทำให้เกิดช่องว่างระหว่างอนุภาคมาก ดังนั้นจะต้องการปริมาณน้ำมากในการเพิ่มความเหนียว รุพุนที่เกิดขึ้นนี้จะทำให้ความแข็งแรงก่อนเผาลดลงอย่างมาก ดังนั้นถ้าดินที่เป็น flocculated clay ต้องการมี Moisture Content สูง จะมีผลทำให้ความเหนียว (Plasticity Index) สูง, Stiffness Index สูง, Unfired Strength ต่ำ

วิธีการตรวจสอบความเหนียว

- ทดลองนำดินนั้นมาปั้นเป็นแท่งยาวๆ แล้วนำมาขดเป็นวง ใช้ความรู้สึกในการตัดสินว่าดินนี้ไม่แตกออกจากกัน (ควบคุมปริมาณความชื้น)
- วัดความแข็งแรงของแท่งดินก่อนเผา ถ้ามีค่าสูง ความเหนียวของดินนั้นจะสูงด้วย
- วัดความเหนียวโดยการดูลักษณะการเกาะกันของดิน Measurement of Binding: โดยการผสมดินกับทราย และดูว่าถ้าปริมาณของทรายที่ใช้ในการขึ้นรูปมาก ก็แสดงว่าดินนั้นมีความเหนียวมาก
- ทำการทดสอบโดยการวัดปริมาณความชื้น สภาพ Flocculation จะทำให้ดินมีความเหนียวเพิ่มขึ้นได้ เพราะดินที่เป็น flocculation จะต้องการน้ำปริมาณมากในการทำให้ดินมีความเหนียวเพิ่มขึ้น

การหดตัวของเนื้อดิน

การหดตัวของเนื้อดินมีความสำคัญต่อการผลิตเซรามิก เพราะผลิตภัณฑ์รวมจะหดตัวลงหลังเผา ทำให้ไม่ได้ขนาดตามต้องการ อีกทั้งการหดตัวที่มากเกินไปจะทำให้เกิดการแตกร้าวได้ง่ายทั้งก่อนเผาและหลังเผา

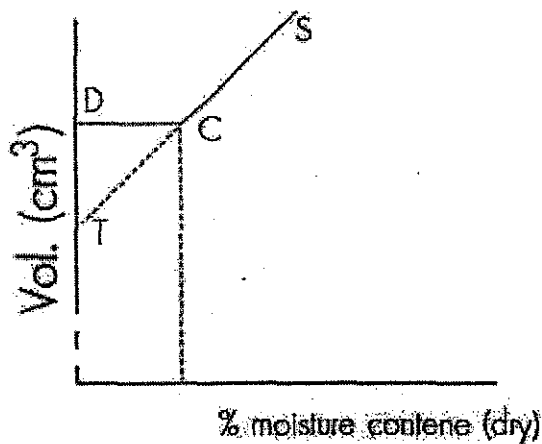
- การหดตัวของเนื้อดินหลังอบแห้ง (จากความชื้นหลังขึ้นรูป) Wet-to-Dry
- การหดตัวของเนื้อดินหลังอบถึงหลังเผา (Dry-to-Fired shrinkage)
- การหดตัวของเนื้อดินหลังขึ้นรูปถึงหลังเผา (Wet-to-Fired shrinkage) หรือการหดตัวทั้งหมด การหดตัวเชิงเส้นหรือการหดตัวเชิงปริมาตร (Linear or volume shrinkage) ซึ่งธรรมชาติของดิน จะมีการจัดเรียงตัวตามแรงที่กระทำ ดังนั้นเมื่อดินแห้งจะทำให้เกิดการหดตัวในทิศทางต่างๆที่

แตกต่างกัน จึงมีการตรวจสอบการหดตัวเชิงเส้นในแนว ยาว หรือในแนวเส้นผ่านศูนย์กลางของผลิตภัณฑ์ด้วย

กลไกการแห้งของเนื้อดิน

เมื่อดินเริ่มแห้ง น้ำจะระเหยออกไป ทำให้ดินหดตัวลงมา ที่จุด C บนกราฟรูป 7.14 แสดงให้เห็นว่าอนุภาคแต่ละอนุภาคมาสัมผัสกัน น้ำยังคงอยู่ในช่องว่างระหว่างอนุภาคนั้น
Critical Moisture Content (CMC) "leather-hard condition"

ค่านี้ขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของ clay / non-plastic, ขนาดอนุภาค, รูปร่างของอนุภาคและการกระจายขนาด. ที่ความชื้นของดินสูงกว่าที่ CMC น้ำจะระเหยออกไปด้วยอัตราคงที่ เรียกว่าช่วง constant rate period



รูป 7.14 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของเนื้อดินที่ความชื้นต่างๆ

สูตรการคำนวณหาการหดตัว

- Wet-to-Dry linear shrinkage (wet basis)
= (ความยาวของชิ้นงานหลังขึ้นรูปใหม่ - ความยาวของชิ้นงานหลังอบ) / ความยาวของชิ้นงานหลังขึ้นรูปใหม่ x 100

- Dry-to-Fired Contraction: ขึ้นอยู่กับส่วนผสมของเนื้อดิน

% dry-to-fired linear shrinkage (dry basis)

= (ความยาวของชิ้นงานหลังอบ - ความยาวของชิ้นงานหลังเผา) / ความยาวของชิ้นงานหลังอบแห้ง x 100

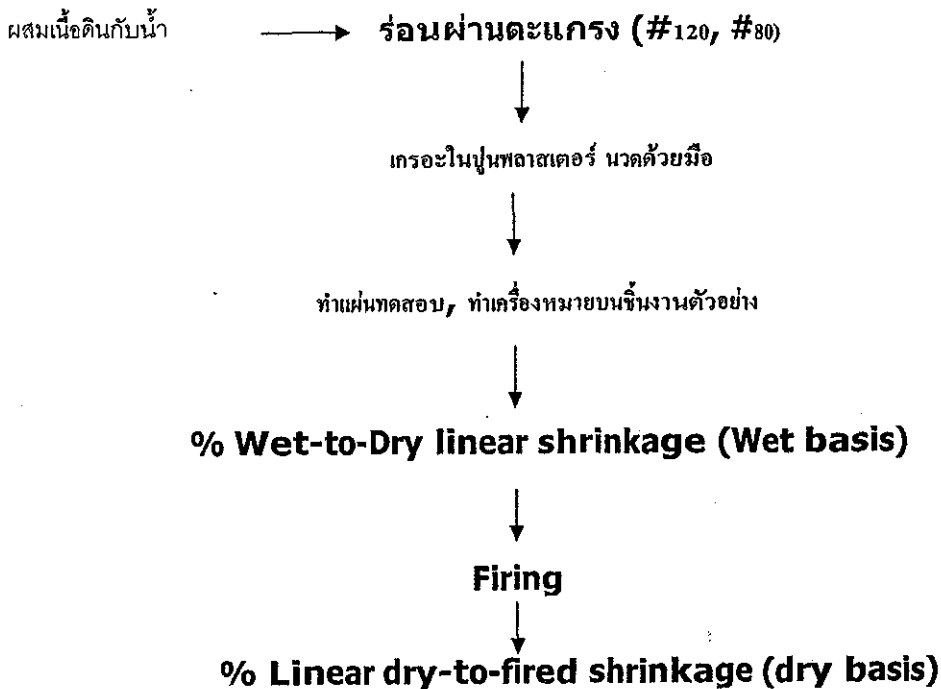
- Wet-to-Fired Shrinkage

เป็นการวัดการหดตัวโดยรวมของชิ้นงานหลังเผา ซึ่งจะทำให้เราออกแบบแม่พิมพ์ที่มีขนาดใหญ่เพื่อเผื่อระยะหดตัวหลังเผา โดยคำนวณเทียบกับความยาวของชิ้นงานหลังขึ้นรูปใหม่ๆ

- Wet-to-fired linear shrinkage (wet basis)

= (Wet length - Fired length) / Wet length x 100

วิธีการตรวจสอบการหดตัวของเนื้อดิน



การหาค่าความแข็งแรงของชิ้นงานเซรามิก (Modulus of rupture)

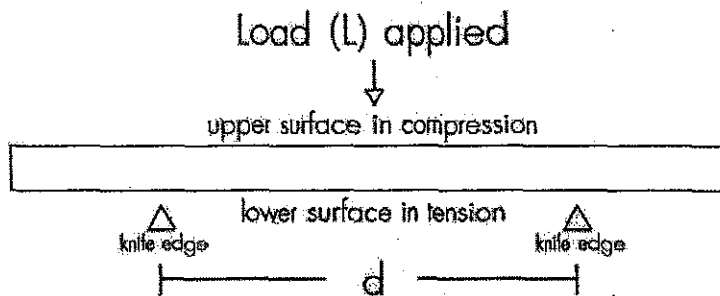
- Clays: ขึ้นอยู่กับชนิดของดิน

- Body (Unfired): ขึ้นอยู่กับความเหนียวและปริมาณของวัตถุดิบที่ใช้เป็นส่วนผสม
- Body (Fired): ขึ้นอยู่กับความพรุนตัว ขบวนการในการอบ การเตรียมน้ำดิน และอุณหภูมิที่ใช้เผาขึ้นงาน

วิธีการทดสอบความต้านทานต่อการแตกหัก

- เตรียมตัวอย่างเหมือนกรรมวิธีการผลิต
- กำหนดหาความแกร่งของแท่งทดสอบกลม, สี่เหลี่ยม

$$\text{MOR} = \frac{8LD}{\pi d^3} + \frac{3LD}{2bd^2} \quad \text{kg/cm}^2$$



รูป 7.15 การทดสอบ MOR โดย 3-point bending

L = แรงที่กระทำให้ขึ้นงานหัก; kg

D = ระยะระหว่าง support; cm

b = ความกว้างของแผ่นทดสอบ; cm

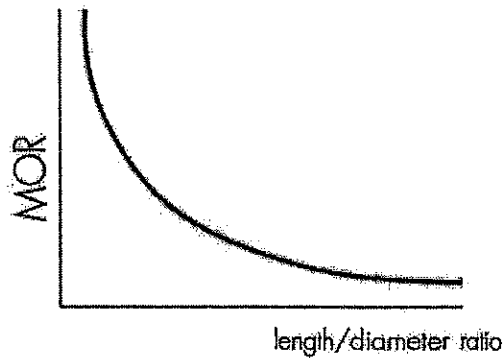
d = ความหนาของแผ่นทดสอบหรือเส้นผ่าศูนย์กลางกลางของชิ้นทดสอบ; cm

- กำหนดหาค่าเฉลี่ยในการทดสอบ 10 ตัวอย่าง

ข้อผิดพลาดที่เกิดขึ้นได้จากการทดสอบความต้านทานต่อการแตกหัก

- ผิวขึ้นงานเรียบไม่มีรอยแตก รอยร้าว

- อัตราส่วน length/diameter ratio ควรจะมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 6/1 เพื่อหลีกเลี่ยงความผิดพลาดเนื่องมาจากขนาดของชิ้นตัวอย่าง



รูป 7.16 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง MOR และอัตราส่วนของความยาวต่ออัตราส่วนของชิ้นทดสอบ

ถ้าค่า length/diameter ratio มีค่ามาก การเปลี่ยนแปลงความแข็งแรงของชิ้นงานจะมีผลน้อย ในขณะที่ถ้าค่าอัตราส่วนนี้มีค่าน้อยจะมีผลต่อค่าความแข็งแรงของชิ้นงานมาก ดังรูป 7.16

- ในการอบแห้งชิ้นงาน ถ้าอบแห้งเร็วเกินไปจะทำให้เกิดการโค้งงอ หรืออาจจะเกิดรอยแตก ร้าวเนื่องจากการหดตัวเร็วมากเกินไป และจะไปทำให้ค่าความแข็งแรงที่วัดได้มีค่าลดลง
- ค่าอัตราแรงกดมาก จะทำให้มีค่าความแข็งแรงของชิ้นงานมาก
- ในการทดสอบความแข็งแรงของชิ้นงานก่อนเผา ควรจะเตรียมชิ้นงานให้เหมือนกับชิ้นงานที่ใช้งานจริง เช่น ถ้าในการอบชิ้นงานในโรงงานจริง ทำการอบที่ 80 % relative humidity ซึ่งค่าความแข็งแรงที่วัดได้จะมีค่ามากกว่าชิ้นงานที่อบที่ 110°C

วิธีการทดสอบและควบคุมคุณภาพของพลาสติกสำหรับแบบพิมพ์

ในการขึ้นรูปแบบหล่อหรือแบบโรตเตอร์เฮด จำเป็นต้องใช้แบบพิมพ์ที่ทำจากพลาสติกจำนวนมาก ดังนั้นในอุตสาหกรรมต้องมีการควบคุมคุณภาพของพลาสติกที่ใช้ทำแบบพิมพ์ดังนี้

- เวลาในการผสมพลาสติกกับน้ำ (Blending time)
- เวลาในการเซตตัว (Setting time)

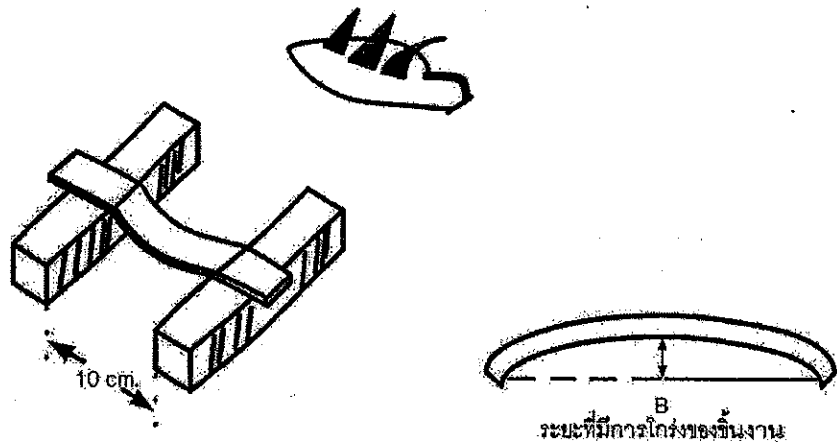
- ความแข็งแรงของแบบ (Strength , modulus of rupture)
- ความพรุนตัว (Porosity, water absorption)
- ความแข็ง (Hardness), loss on heating to 200°c (degree of calcination). ความทนทานต่อการสึกหรอ (Abrasion test) ได้แก่ลักษณะผิวของแบบ (surface texture) และอายุการใช้งาน (mould life)

วิธีการทดสอบ

- นำพลาสติกอร์มาผสมน้ำในอัตราส่วนที่เหมาะสม
- Blending time: ช่วงเวลาที่ผสมพลาสติกอร์กับน้ำ
- Setting time: เวลาที่วัดตั้งเตรินพลาสติกอร์ลงสู่แบบจนกระทั่งเริ่มเซตตัว

การทดสอบอุณหภูมิการสุกตัว หรือ ความทนไฟของเนื้อดินหลังเผา (Softening point)

- ตรวจสอบช่วงการเผา
- ทดสอบหาค่าการยุบตัว
- สามารถเปรียบเทียบค่าการทนไฟของดินต่าง ๆ ได้



รูป 7.17 การหาค่าการยุบตัวของชิ้นทดสอบที่ผ่านการเผา

การทดสอบการหลอมละลายและการสุกตัว (Vitrification)

ได้แก่ Density , Porosity , and water absorption

- " Vitreous " : เนื้อเซรามิกหลังเผาที่มีการดูดซึมน้ำน้อยกว่า 1 %
- " Porous " : เนื้อเซรามิกหลังเผาที่มีค่าการดูดซึมน้ำอยู่ในช่วง 1 % - 15%
- " open pores " : รูพรุนแบบเปิด ที่น้ำหรือของเหลวภายนอกสามารถซึมผ่านได้
- " Sealed pores or close pores " : รูพรุนแบบปิด จะเกิดจากฟองก๊าซที่เกิดขึ้นขณะเผา เมื่อเกิดก๊าซขึ้นและเกิดการเย็นตัวเป็นเนื้อแก้วทำให้เกิดเป็นโพรงอากาศอยู่ภายใน

ความหนาแน่นของเนื้อผลิตภัณฑ์

ความหนาแน่น = มวล / ปริมาตร

- For a vitreous object: Mass / Vol.
- For a porous solid :

Apparent Volume (Bulk Volume) = ปริมาตรของของแข็งที่รวมรูพรุนแบบเปิดและแบบปิดด้วย
สามารถหาได้จาก

- วัดคุณสมบัติทางกายภาพของชิ้นตัวอย่าง
- ใช้การวัดโดยการแทนที่ปรอท (a mercury displacement method) , e.g. a Volumeter
- วัดจากความแตกต่างระหว่างน้ำหนักของชิ้นงานที่อ้อมตัวไปด้วยน้ำ และน้ำหนักที่ชิ้นงานแขวนลอยในน้ำ

True Volume = ปริมาตรของของแข็งอย่างเดียวเท่านั้น ในทางปฏิบัติทำได้โดยการทุบ บดของแข็งให้เป็นอนุภาคเล็กๆเพื่อทำละลายรูพรุนต่างๆ วัดได้โดยใช้ขวดปริมาตร หรือ pycnometer

Apparent solid Volume = ปริมาตรของของแข็งและรูพรุนแบบปิด = ความแตกต่างระหว่างน้ำหนักแห้ง (dry weight (D)) และน้ำหนักที่แขวนลอยในน้ำ (immersed weight (I))

- $S - I = \text{volume of open pores} + \text{sealed pores} + \text{solid}$
- $S - D = \text{Vol. open pores}$
- $D - I = \text{Vol. of sealed pore} + \text{solid}$

Apparent (or bulk) density

$$\frac{\text{Weight}}{\text{App. Vol.}} = \frac{D}{S - I}$$

True density = $\frac{\text{Weight}}{\text{True Vol.}}$

Apparent solid density = $\frac{\text{Weight}}{\text{App. - solid Vol.}} = \frac{D}{D - I}$

Where $D =$ น้ำหนักของชิ้นงานแห้ง (g)
 $S =$ น้ำหนักของชิ้นงานที่จุ่มตัวด้วยน้ำ (g)
 $I =$ น้ำหนักของชิ้นงานที่จุ่มตัวด้วยน้ำแขวนลอยในน้ำ (g)

ความพรุนตัว

รูพรุนเป็นค่าเปรียบเทียบปริมาตรของรูพรุนด้วยปริมาตรหรือน้ำหนักของชิ้นตัวอย่างเอง

Apparent Porosity = Ratio of open pore volume to total volume

$$\begin{aligned} \% \text{ App. Porosity} &= \frac{\text{open pore vol.}}{\text{Total vol.}} \times 100 \\ &= \frac{S - D}{S - I} \times 100 \end{aligned}$$

Water absorption = Ratio of open poer vol . to weight of the test piece

$$\begin{aligned} \% \text{ Water absorption} &= \frac{\text{open pore vol.}}{\text{wt.}} \times 100 \\ &= \frac{S - D}{D} \times 100 \end{aligned}$$

ตัวอย่างการคำนวณ

ความแตกต่างระหว่าง Absorption per unit volume (App. Porosity) และ absorption per unit weight (Water absorption)

ชิ้นงานแห้งหนัก 210 g หลังจากแช่ในน้ำจนอิ่มตัว ชั่งน้ำหนักได้ 250 g และเมื่อแขวนลอยในน้ำหนัก 150 g

$$\text{Solv. : \% App. Porosity} = \frac{S - D}{S - I} \times 100 = \frac{250 - 210}{250 - 150} \times 100 = 40 \%$$

$$\% \text{ Water absorption} = \frac{S - D}{D} \times 100 = \frac{250 - 210}{210} \times 100 = 19 \%$$

For most whiteware materials, the apparent porosity is approximately twice the value of the water absorption

(Based on)

Apparent porosity → ปริมาตรที่ปรากฏ (apparent volume)
 Water absorption → น้ำหนักของชิ้นงาน (wt. Of material)

Apparent porosity : Value of the "open pores per unit volume " → glaze " pick up "

การทดสอบหลังเผา

1. เผาชิ้นทดสอบที่อุณหภูมิต่างๆ
2. วัดขนาดของแผ่นทดสอบหลังเผา
3. ชั่งน้ำหนักแผ่นทดสอบเมื่อแห้ง อบที่ 110 ° C
4. ชั่งน้ำหนักเปียกโดย ต้มชิ้นทดสอบเป็นเวลา 2-3 ชม. แช่น้ำไว้ 24 ชม. ชั่งน้ำหนักที่ผิวออก
5. ชั่งนน. แผ่นทดสอบเปียกโดยวัดค่าการลอยตัวของน้ำ
6. คำนวณ หาอัตราส่วนการดูดซึมน้ำ = $\frac{\text{น.น. เปียก} - \text{น.น. แห้ง}}{\text{น.น. แห้ง}} \times 100$

$$7. \text{ คำนวณ หาค่าตราส่วนการหดตัว} = \frac{\text{ความยาวเดิม} - \text{ความยาวใหม่}}{\text{ความยาวเดิม}} \times 100$$

$$8. \text{ Apparent density} = \frac{\text{น.น. แห้ง}}{\text{น.น. แห้ง} - \text{น.น. ในน้ำ}}$$

$$9. \text{ Bulk density} = \frac{\text{น.น. แห้ง}}{\text{น.น. เปียก} - \text{น.น. ในน้ำ}}$$

$$10. \text{ Apparent Porosity} = \frac{\text{น.น. เปียก} - \text{น.น. แห้ง}}{\text{น.น. เปียก} - \text{น.น. ในน้ำ}} \times 100$$

ตาราง 7.6 ตัวอย่างการทดสอบแรงดันเซอร์ไพซท์หลังการเผาในอุณหภูมิต่างๆ (ศูนย์พัฒนาอุตสาหกรรมเครื่องเคลือบดินเผา ภาคเหนือ)

อุณหภูมิ เผา (°C)	ขนาด (มม.)	น้ำหนัก แห้ง (กรัม)	น้ำหนัก อิมตัด ด้วยน้ำ (กรัม)	น้ำหนัก แขวนลอย ในน้ำ (กรัม)	การ ดูดซึม น้ำ (%)	การ หดตัว (%)	App. Density	Bulk density	App. porosity
980	50	23.96	30.10	14.38	25.63	0.00	2.50	1.52	39.06
1000	49.80	24.31	29.15	15.00	19.91	0.40	2.61	1.72	34.20
1050	48.20	24.26	27.93	14.54	15.13	3.60	2.50	1.81	27.41
1100	47.45	24.27	26.90	14.74	10.84	5.10	2.55	2.00	21.63
1200	46.40	24.24	25.99	14.57	7.22	7.20	2.51	2.12	15.32
1250	45.00	24.21	24.46	14.14	1.03	10.00	2.40	2.35	2.42
1280	44.75	24.31	24.37	14.03	0.25	10.50	2.36	2.35	0.58

การหาพรุนตามจริง (True porosity)

All the pores (open and sealed)

$$\% \text{ True Porosity} = \frac{\text{Volume of all pores}}{\text{Total vol. of the test piece}} \times 100$$

$$= \frac{\text{App. Vol} - \text{True vol.}}{\text{App. Vol.}} \times 100$$

$$= 1 - \frac{\text{True Vol.}}{\text{App. Vol.}} \times 100$$

$$\text{True Vol./App. Vol.} = \frac{\frac{\text{weight}}{D_t}}{\frac{\text{weight}}{D_a}} = \frac{D_a}{D_t} = \left(1 - \frac{D_a}{D_t}\right) \times 100$$

where D_a = Apparent density = $\frac{\text{weight}}{\text{App. Vol.}}$

D_t = True density = $\frac{\text{weight}}{\text{True. Vol.}}$

$$\% \text{ True porosity} = 1 - \frac{S_a}{S_t} \times 100$$

Where S_a = Apparent specific gravity

S_t = True specific gravity

Sealed Pores

$\% \text{ Sealed Pores} = \% \text{ true porosity} - \% \text{ App. Porosity Volume}$

True Density

Powder \rightarrow a specific gravity bottle

- ขวดปริมาตรที่มีปริมาตรแน่นอนและคงที่
- ไม่มีฟองอากาศ
- ชั่งน้ำหนักที่อุณหภูมิคงที่

m_1 = weight of bottle

m_2 = weight of bottle and solid

m_3 = weight of bottle and solid and paraffin

m_4 = weight of bottle and paraffin

P_0 = density of paraffin (at 20 ° C is 0.78 g / ml) ในกรณีนี้ใช้ paraffin แทนน้ำ

Density = $\frac{\text{Mass}}{\text{Volume}}$

X = weight of paraffin required of fill the bottle = $(m_4 - m_1)$

Y = weight of paraffin required of fill the bottle above the powder solid = $(m_3 - m_2)$

$(X - Y)$ = weight of paraffin occupying the same volume as the solid sample

$$\begin{aligned} \text{True density (g/ml)} &= \frac{\frac{(m_2 - m_1)}{(x - y)}}{1/P_0} \\ &= \frac{(m_2 - m_1)P_0}{(x - y)} \end{aligned}$$

Apparent density or bulk density = mass / App. Vol. = S - I

ความเข้ากันได้ระหว่างเนื้อดินและเคลือบ (Body-glaze fit)

- Thermal expansion Tests เป็นการทดสอบการขยายตัวเมื่อได้รับความร้อนของชิ้นตัวอย่างแยกกัน คือ แ่งตัวอย่างเนื้อดินและแ่งตัวอย่างเคลือบ
- Autoclave Test เป็นการวัดความเข้ากันได้กับเคลือบและเนื้อดินโดยทดสอบจากชิ้นตัวอย่างที่ผ่านการเคลือบมาแล้ว และทดสอบในหม้ออัดความดันที่ 50 lb / in² (0.34 MN / m²)

การหาความเครียดที่เกิดขึ้นระหว่างเนื้อดินและเคลือบ ทำได้หลายวิธีดังนี้

- Deflection of glazed bars : Stager

Glazing one side of a bar and heating it to 800° C. The stresses resulting from differences in expansion of glaze and bar cause the bar to deflect.

- Flat Plate Test : Schofield

Flat plate or tile 4 x 2 x 3 / 16 inch . ถ้าด้านที่เคลือบมีการโค้งงอ โดยเป็นแบบเว้าเข้าด้านใน (Concave) เคลือบจะเป็นแรงดึง (tension) และอาจจะเกิดการแตกรานได้ (crazing)

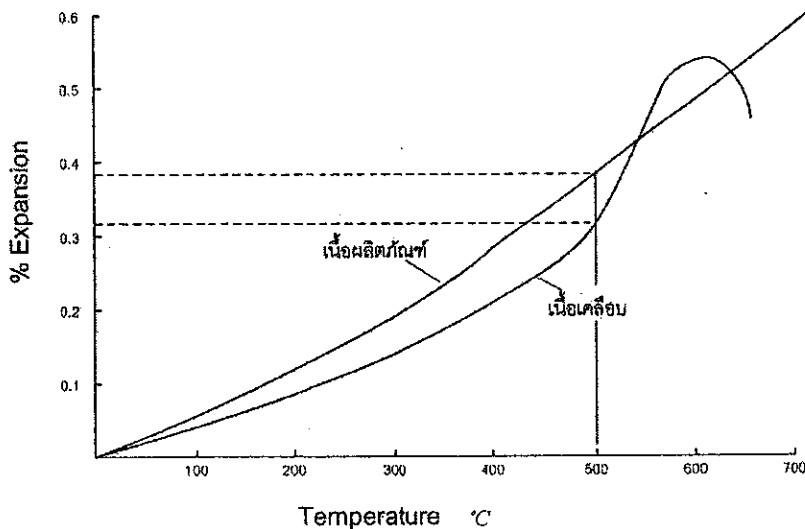
ถ้าด้านที่เคลือบเกิดเป็นโค้งออก (Convex) เคลือบจะอยู่ภายใต้แรงกด ทำให้เกิดการกระเทาะหลุดร่อนได้ (shiver or peel)

การขยายตัวเมื่อได้รับความร้อนของเนื้อดินและเคลือบ

- เคลือบที่มีการขยายตัวมากกว่าเนื้อดิน เคลือบจะมีการหดตัวมากกว่าเนื้อดินด้วยเมื่อเย็นตัวลง ดังนั้นจะเกิดแรงดึงขึ้นที่ผิวเคลือบ ทำให้เคลือบแตกราน (craze)
- เคลือบและเนื้อดินมีการขยายตัวเมื่อได้รับความร้อนใกล้เคียงกัน

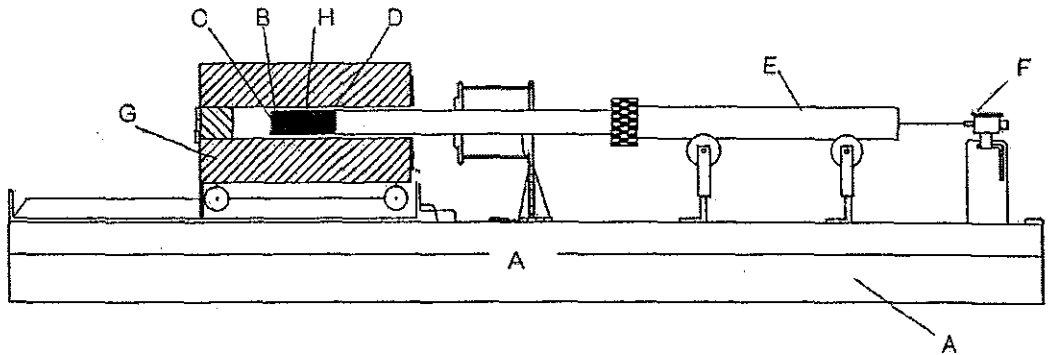
ควรมีการทดสอบ " moisture expansion " ทำได้โดยการทดสอบโดยใช้แรงดันไอน้ำ steam pressure of 50 lb / in² สำหรับ 1 ชั่วโมง ถ้าขึ้นทดสอบทนได้โดยไม่แตกภายใน 10 รอบของการทดสอบ เป็นการประกันว่าผลิตภัณฑ์จะไม่เกิดการแตกรานขณะใช้งานประจำวัน

- ถ้าเคลือบมีการขยายตัวเมื่อได้รับความร้อนน้อยกว่าเนื้อดิน เมื่อเย็นตัวลงเนื้อดินจะหดตัวมากกว่าเคลือบทำให้ผิวเคลือบอยู่ในสภาพแรงกด ทำให้เกิดการหลุดกระเทาะออกมา (peel)



รูป 7.18 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง % การขยายตัวของเนื้อดินและเคลือบกับอุณหภูมิ

ที่ 500°C, เนื้อดินมีการขยายตัว 0.38% และเคลือบมีการขยายตัว 0.32% จึงทำให้มีความแตกต่างระหว่างเคลือบและเนื้อดิน 0.06% ซึ่งพบว่าเหมาะสมสำหรับผลิตภัณฑ์ earthenware ในการวัดการขยายตัวเมื่อได้รับความร้อน เราจะเตรียมชิ้นงานและวัดด้วย Dilatometer



- | | |
|---------------------|------------------------|
| A. Slate base | E. Invar extension rod |
| B. Silica tube | F. Dial gauge |
| C. Stopping disc | G. Furnace |
| D. Fused silica rod | H. Test specimen |

รูป 7.19 Dilatometer

วิธีการคำนวณการขยายตัวเมื่อได้รับความร้อน

$$l_T = l_0 (1 + \alpha T)$$

$$\alpha = (l_T - l_0) / l_0 T$$

Where l_0 = original length of test piece

l_T = length of test piece at temp. (T)

α = Coefficient of linear expansion

T = rise in Temperature (°C)

- The Coefficient of fused silica = 0.55×10^{-6}
- The silica correction = $l_0 \times 0.55 \times 10^{-6} \times T$

ตาราง 7.7 ผลการทดลองวัดการขยายตัวเมื่อได้รับความร้อนโดย Dilatometer

อุณหภูมิ(°C)	ค่าที่อ่านได้ 1 ช่อง = 0.001 นิ้ว	การขยายตัว (นิ้ว)	การขยายตัวของซิลิกา	การขยายตัวทั้งหมด	% การขยายตัว
20	0.0	-	-	-	-
50	1.7	0.00017	0.000051	0.000221	0.007
80	6.9	0.00069	0.000102	0.000792	0.026
110	13.4	0.00134	0.000153	0.001493	0.048

ชิ้นทดสอบมีความยาว = 3.104 in

Silica expansion between 20°C and 50 °C = 3.104 x 0.55 x 10⁻⁶ x 30 = 0.000051

ดังนั้นซิลิกายขยายตัว = 0.000051 for each 30° increment in Temp.

การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเมื่อได้รับความร้อน

% Expansion = Total expansion/ Length of test piece x 100

If expansion from 20°C to 500°C = 0.418%

$$(0.418/100) \times (1/480) = 8.7 \times 10^{-6}$$

Then coefficient of expansion = 8.7 x 10⁻⁶

Note: %expansion and coefficient of expansion should always be quoted with reference to the temperature range over which they were measured.

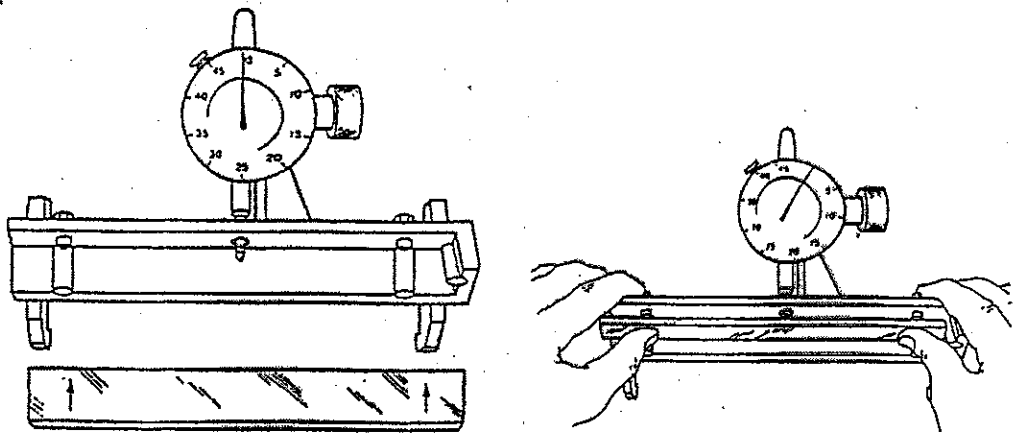
ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเมื่อได้รับความร้อนของเนื้อดินและเคลือบ

- Thermal expansion of body must be higher than that of the glaze.
- Bruce and Wilkinson suggest that the difference should be 0.4 to 1.0 x 10⁻⁶ at 500°C.
- Ex. %expansion = 0.4x 10⁻⁶ x100x480 = 0.02% at 20 to 500°C
- Ware with a high porosity (ex. 8 % water absorption) would require a glaze with an expansion of 0.04% to 0.06% less than that of body.

- Vitreous ware (low moisture expansion) could use a glaze with differential expansion of 0.02.

การหาความเข้ากันได้ของเคลือบและเนื้อดินด้วย Glaze Fit Instrument

- Based on the differential curvature measurement between bisque and glazed bars.
- Bar tests 18.7 x 2.4x 0.43 cm
- After measuring the curvature of the bisque bars, glaze is applied to one surface only and fired glost. Note. The bisque side of bar contacts the shaft of the dial gauge.



รูป 7.20 Malkin's body/glaze fit instrument [7]

ตาราง 7.8 ตัวอย่างการวัดความเข้ากันได้ของเคลือบกับเนื้อดิน

เคลือบ (%expansion at 500°C)	ค่าความโค้งงอเฉลี่ย (1/1000 นิ้ว)
0.283	7.1
0.307	4.2
0.331	0.6

ตาราง 7.9 การวัดการโค้งงอเมื่อใช้เคลือบที่มีการขยายตัว 0.283%

A	B	A-B (1/1000 นิ้ว)
2.0100	2.0030	7.0
2.0154	2.0076	7.8
2.0309	2.0249	6.0
2.0022	1.9958	6.4
2.0217	2.0136	8.1
2.0040	1.9968	7.2
2.0033	1.9977	5.6
1.9879	1.9799	8.0
1.9934	1.9852	8.2

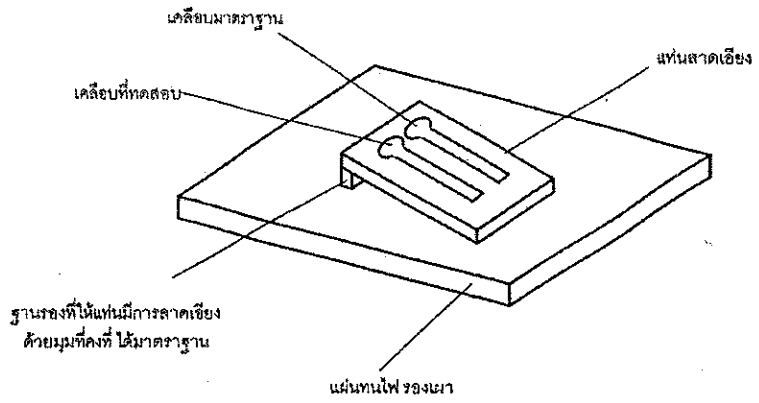
A = curvature of cast bisque bars fired to 1160°C

B = glost bar fired to 1080°C using glaze with a thermal expansion of 0.283% at 500°C

A-B = differential curvature

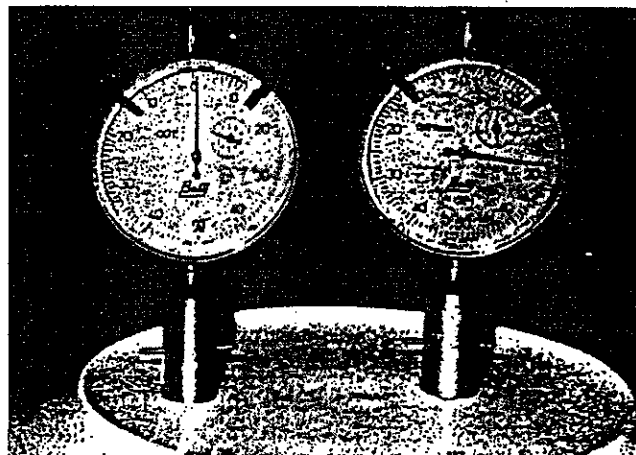
การทดสอบสำหรับเคลือบที่ยังไม่เผา

- Particle size: hydrometer (ex. Sanitary ware glaze maybe ground to a specification of 73-77% less than 10 micron)
- Inclined Flow Test
- Glaze thickness: penetrometer (unfired glaze thickness are 0.02 to 0.03 in for sanitary and 0.006-0.008 in for tableware)



Inclined flow plane

รูป 7.21 การทดสอบการไหลตัวของเคลือบ



รูป 7.22 การวัดความหนาของเคลือบ [7]

การหาค่าการละลายของโลหะออกจากเคลือบ ได้แก่การละลายของตะกั่ว

- Lead in glazes and colours
- Lead release in coloured glazed

- Atomic Absorption Spectrophotometry

การทดสอบความต้านทานต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างรวดเร็ว

- When specimens are exposed to sudden temperature changes a sharp thermal gradient results, which introduces volume changes producing large stresses within specimen
- Low thermal expansion \longrightarrow high thermal shock resistance
- Modulus of elasticity
- Strength
- Thermal diffusivity
- Thermal shock resistance $\propto ST / E\alpha$

where S = strength

E = Modulus of elasticity

T = Temperature of diffusivity

α = Coef. Thermal expansion

การปรับปรุงเพื่อให้มีความทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิได้ดีขึ้น ทำได้โดย

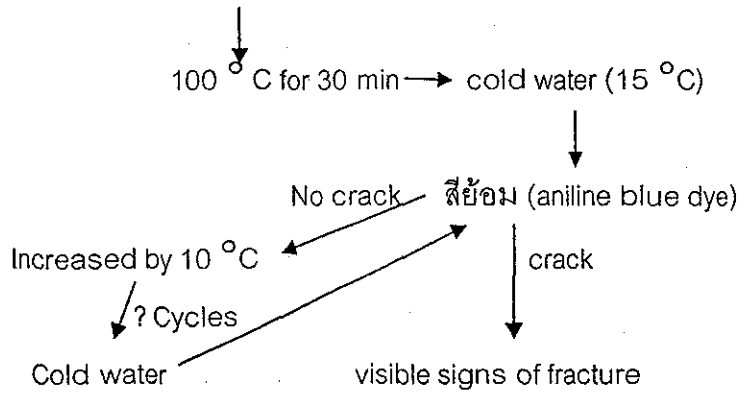
- Strength \longrightarrow Thermal shock resistance
- Elasticity \longrightarrow Thermal shock resistance (low Modulus of elasticity)

วิธีการทดสอบ

- quenching cylindrical rods from a given temp. and subsequently examining for cracks after immersion in a suitable dye. Temperature on quenching is quoted as the thermal shock result , when the modulus of rupture decreases to half its original value.

Cylindrical Rod test

12 rods 1 / 2 inch diameter and 6 inch long no. crack



วิธีการคำนวณ

The mean temp. of failure = temp.x no. of rods failed at that temp.

The sum of products is divided by the total no. of rods used in the experiment

For earthenware

160° C	4 rods	160 x 4 = 640
170° C	6 rods	170 x 6 = 1020
180° C	2 rods	180 x 2 = 360
		= 2020

$2020 / 12 = 168$ (Thermal shock resistance)

ASTM:

- C 554-88 Glazed whitewares
- C 385-58 (1986) Porcelain enamels utensils
- C 484-66(1981) Glazed ceramic tile

แบบฝึกหัดท้ายบท

1. An earthenware body and high alumina tableware body have the same water absorption but the apparent porosities are entirely different. What are % apparent porosity of an earthenware body and high alumina body?

- Both have water absorption of 8 %
- Bulk density of earthenware = 2.05 g / ml
- Alumina body = 3.25 g / ml

บทที่ 8

การควบคุมคุณภาพและการลดของเสียในการผลิตไวท์แวร์

ในอุตสาหกรรมการผลิตไวท์แวร์ ต้องมีการควบคุมคุณภาพของผลิตภัณฑ์และเพื่อลดของเสีย ลดต้นทุนการผลิต ดังนั้นจึงมีฝ่ายหรือหน่วยงานที่ทำหน้าที่ในการตรวจสอบและควบคุมคุณภาพ (Quality control, QC and Quality assurance, QA) ซึ่งข้อมูลในการควบคุมคุณภาพนั้นจะได้จาก ห้องทดสอบหรือห้องปฏิบัติการเพื่อใช้เป็นข้อมูลในการตรวจสอบและจัดการในโรงงาน

การทดสอบดินและดินเหนียวตามมาตรฐานอุตสาหกรรม

การทดสอบวัตถุดิบประเภทดินและดินเหนียว จะมีการตรวจสอบก่อนนำวัตถุดิบป้อนเข้าสู่โรงงานเพื่อเป็นการยืนยันคุณสมบัติว่าไม่เปลี่ยนแปลงไปจากเดิม หรือแม้มีการเปลี่ยนแปลงก็จะทำให้ทราบว่าการเปลี่ยนแปลงไปมาน้อยเพียงใด การทดสอบมีดังนี้

1. ความชื้นในเนื้อดินก่อนนำมาผสมในส่วนผสมของเนื้อผลิตภัณฑ์
2. กากที่ค้างตะแกรง
3. การหดตัวเชิงเส้นหลังอบแห้ง
4. การหดตัวเชิงเส้นทั้งหมด (หลังอบแห้งและหลังเผา)

ส่วนเกณฑ์ในการตรวจสอบผลิตภัณฑ์เครื่องใช้บนโต๊ะอาหารเพื่อเป็นมาตรฐานอุตสาหกรรม มีดังนี้

1. ขอบบิดงอและเอียง
2. ความราบเรียบ
3. ทดสอบข้อบกพร่อง หาดำหนิ
4. การทดสอบหาความคงทนต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิโดยฉับพลัน
5. การทดสอบการดูดซึมน้ำ
6. การทดสอบความทนต่อการร้าว

มาตรฐานอุตสาหกรรมของผลิตภัณฑ์ไวร์แวร์

เพื่อให้ผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมเซรามิกมีคุณภาพ เป็นที่เชื่อถือของผู้บริโภค สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม จึงได้กำหนดมาตรฐานทั่วไปของผลิตภัณฑ์เซรามิกจำพวกภาชนะไว้ดังนี้

มอก. 564-2546 ภาชนะเซรามิกที่ใช้กับอาหาร สำหรับพอร์ซเลน

มอก. 601-2546 ภาชนะเซรามิกที่ใช้กับอาหาร สำหรับเอร์เทนแวร์

มอก. 602-2546 ภาชนะเซรามิกที่ใช้กับอาหาร สำหรับสโตนแวร์

มาตรฐานภาชนะชนิดปอร์ซเลน

ขนาดและเกณฑ์ความคลาดเคลื่อน

1. ขนาด ให้เป็นไปตามแบบของผู้ผลิต โดยให้มีเกณฑ์การคลาดเคลื่อนดังนี้

1.1 เส้นผ่านศูนย์กลาง ความกว้างและความยาว จะมีเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนได้ไม่เกินร้อยละ 5

ละ 5

1.2 ความจุจะมีเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนได้ไม่เกินร้อยละ 15 เมื่อบรรจุน้ำถึงขอบบนสุดโดยไม่ล้นที่อุณหภูมิห้อง

2. ความเบี้ยว

ถ้าเป็นภาชนะแบบแบน เส้นตรงที่ลากจากจุดศูนย์กลาง (จุดตัดของแกนยาวและแกนสั้น ในกรณีวงรี) ไปยังขอบภาชนะทั้งสองข้างที่อยู่ตรงข้ามจะต่างกันไม่เกิน 2 มิลลิเมตร

ถ้าเป็นภาชนะแบบลึก เส้นตรงที่ลากจากจุดศูนย์กลาง ไปยังขอบภาชนะทั้งสองข้างที่อยู่ตรงข้ามจะต่างกันได้ไม่เกิน 3 มิลลิเมตร

3. ขอบบิดงอและเอียง

จะมีขอบบิดงอได้ไม่เกิน 2 มิลลิเมตร และเอียงได้ไม่เกิน 2 องศา เมื่อวัดตาม มอก. 564

4. ความราบเรียบ

พื้นงานจะต้องราบเรียบและเมื่อวัดตาม มอก. 564 แล้วค่าที่วัดตรงส่วนที่สูงสุดและต่ำสุดจะต่างกันได้ไม่เกิน 2 มิลลิเมตร

5. วัสดุและการผลิต

ภาชนะปอร์ซเลนโดยทั่วไปทำจากดินขาว ดินเหนียว หินฟันม้า ทรายแก้ว ซึ่งเป็นส่วนผสมหลักขึ้นรูปเป็นภาชนะเคลือบผิวและเผาที่อุณหภูมิสูงจนถึงขั้นวิเทรียส

6. คุณลักษณะที่ต้องการ

6.1 ลักษณะทั่วไป

- 6.1.1. ภาชนะปอร์ซเลนทุกใบในชุดเดียวกัน ต้องมีแบบ สี และการตกแต่งที่กลมกลืนเข้ากันได้
- 6.1.2. ถ้วยต้องวางตรงกลางรองได้สนิท ไม่โคลงเคลงหรือหมุนได้
- 6.1.3. ภูเขาชนะ (ถ้ามี) ต้องอยู่ในตำแหน่งที่ถูกต้อง
- 6.1.4. ปากหรือพวย (ถ้ามี) ต้องมีลักษณะที่ยกขึ้นรินแล้วไม่ทำให้ของเหลวไหลย่อยลงไปตามภาชนะ
- 6.1.5. ฝา (ถ้ามี) ต้องปิดได้พอดี ไม่โคลงเคลงและไม่หลุดจากตัวภาชนะที่มีปากหรือพวย เมื่อรินของเหลวออกโดยภาชนะเฉียงไม่เกิน 60 องศาจากแนวตั้ง
- 6.1.6. เนื้อในของผลิตภัณฑ์เมื่อทำให้ภาชนะแตกหลังจากผ่านการทดสอบความทนแรงกระแทกแล้ว เนื้อในต้องมีสีขาว (ถ้าไม่เติมสี) เนื้อแน่นและละเอียดเป็นเนื้อเดียวกัน

6.2 ขอบกพร่อง

ภาชนะปอร์ซเลน เมื่อทดสอบตาม มอก. 564 แล้วต้องไม่มีข้อบกพร่องสำคัญ แต่อาจมีข้อบกพร่องย่อยได้ไม่เกิน 3 ข้อ

- 6.2.1 ภาชนะแบบลึก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่ 130 มิลลิเมตร ขึ้นไปและภาชนะแบบแบน

(1) ข้อบกพร่องสำคัญ

- (1.1) จุดขนาดตั้งแต่ 0.5 มิลลิเมตรขึ้นไปทางด้านในภาชนะ
- (1.2) จุดขนาด 0.25 มิลลิเมตร แต่ไม่ถึง 0.5 มิลลิเมตร ตั้งแต่ 4 จุดขึ้นไปทางด้านในภาชนะ
- (1.3) รุขิมขนาดตั้งแต่ 0.8 มิลลิเมตรขึ้นไป
- (1.4) รุขิมขนาดตั้งแต่ 0.25 มิลลิเมตร แต่ไม่ถึง 0.5 มิลลิเมตร ตั้งแต่ 4 รูขึ้นไปทางด้านในภาชนะ
- (1.5) ฝุ่นหรือเศษวัสดุฝังในขนาดตั้งแต่ 1 มิลลิเมตรขึ้นไป
- (1.6) รอยร้าว ราน
- (1.7) รอยเปื้อนเนื่องจากการตกแต่ง

(1.8) สීමิตมาตรฐานจากผู้ทำกำหนด

(1.9) การตกแต่งผัดที่หริอไม่สมบูรณ์

(1.10) รอยบิ่น ยกเว้นรอยบิ่นของเนื้อขนาดเล็กกว่า 1.5 มิลลิเมตรที่ขอบ และเล็กกว่า 3.0 มิลลิเมตรที่ก้นภาชนะด้านที่สัมผัสกับพื้น แต่ได้ผ่านการเคลือบแล้ว

(1.11) จุดที่เคลือบไม่ติด ยกเว้นจุดที่เกิดจากเครื่องยึดภาชนะในการพ่นเคลือบและจุดที่รองรับภาชนะในการเผาเคลือบ

(1.12) รอยนูน (Blister)

(1.13) ผิวเคลือบหนาจนมีโพรงอากาศ

(2) ข้อบกพร่องย่อย

(2.1) จุดขนาดเล็กกว่า 0.5 มิลลิเมตร ตั้งแต่ 4 จุดขึ้นไปทางด้านนอกภาชนะ

(2.2) รุขิมขนาดเล็กกว่า 0.5 มิลลิเมตร ตั้งแต่ 4 รุขิมขึ้นไปทางด้านนอกภาชนะ

(2.3) ผุ่น เศษวัสดุฝังในหรือรอยขีดข่วนที่เคลือบขนาดเล็กกว่า 1 มิลลิเมตร ตั้งแต่ 4 แห่งขึ้นไปทางด้านในภาชนะ และ 5 แห่งขึ้นไปทางด้านนอกภาชนะ

(2.4) ข้อบกพร่องตามข้อ (2.2) และข้อ (2.3) รวมกันตั้งแต่ 4 แห่งขึ้นไปทางด้านนอกภาชนะ

(2.5) ผิวเคลือบบางต่างจากส่วนอื่นจนเห็นได้ชัด

6.2.2 ภาชนะแบบลึกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยกว่า 130 มิลลิเมตร

(1) ข้อบกพร่องสำคัญ

(1.1) จุดขนาดตั้งแต่ 0.5 มิลลิเมตรขึ้นไปทางด้านนอกภาชนะ

(1.2) จุดขนาด 0.25 มิลลิเมตร แต่ไม่ถึง 0.5 มิลลิเมตร ตั้งแต่ 4 จุดขึ้นไปทางด้านนอกภาชนะ

(1.3) รุขิมขนาดตั้งแต่ 0.5 มิลลิเมตรขึ้นไป

(1.4) รุขิมขนาดตั้งแต่ 0.25 มิลลิเมตร แต่ไม่ถึง 0.5 มิลลิเมตร ตั้งแต่ 4 รุขิมขึ้นไปด้านนอก

ภาชนะ

(1.5) ผุ่นหรือเศษวัสดุฝังในขนาดตั้งแต่ 1 มิลลิเมตรขึ้นไป

(1.6) รอยร้าว ราน

(1.7) รอยเปื้อนเนื่องจากการตกแต่ง

(1.8) สීමิตมาตรฐานจากผู้ทำกำหนด

(1.9) การตกแต่งผัดที่หริอไม่สมบูรณ์

(1.10) รอยบิ่น ยกเว้นรอยบิ่นของเนื้อขนาดเล็กกว่า 1.5 มิลลิเมตรที่ชอบ และเล็กกว่า 3.0 มิลลิเมตรที่ก้นภาชนะด้านที่สัมผัสกับพื้น แต่ได้ผ่านการเคลือบแล้ว

(1.11) จุดเคลือบไม่ติด ยกเว้นจุดที่เกิดจากเครื่องยึดภาชนะในการพ่นเคลือบและจุดที่รองรับภาชนะในการเผาเคลือบ

(1.12) รอยนูน

(1.13) ผิวเคลือบหนาจนมีโพรงอากาศ

(2) ข้อบกพร่องย่อย

(2.1) จุดขนาดเล็กกว่า 0.5 มิลลิเมตร ตั้งแต่ 4 จุดขึ้นไปทางด้านนอกภาชนะ

(2.2) รูเข็มขนาดเล็กกว่า 0.5 มิลลิเมตร ตั้งแต่ 4 รูขึ้นไปทางด้านนอกภาชนะ

(2.3) ผุ่น เศษวัสดุฝังในหรือรอยขีดข่วนที่เคลือบขนาดเล็กกว่า 1 มิลลิเมตร ตั้งแต่ 4 แห่งขึ้นไปทางด้านในภาชนะ และ 5 แห่งขึ้นไปทางด้านนอกภาชนะ

(2.4) ข้อบกพร่อง ตามข้อ (2.2) และข้อ (2.3) รวมกันตั้งแต่ 4 แห่งขึ้นไปทางด้านนอกภาชนะ

(2.5) ผิวเคลือบบางต่างจากส่วนอื่นจนเห็นได้ชัด

6.3 ปริมาณตะกั่วและแคดเมียม

เมื่อวิเคราะห์ตาม มอก. 32 ปริมาณตะกั่วและแคดเมียมที่สกัดออกมาจากภาชนะสโตนแวร์ และต้องไม่เกินเกณฑ์ที่กำหนดในตาราง

ตาราง 8.1 เกณฑ์กำหนดปริมาณตะกั่วและแคดเมียมที่สกัดออกมาจากภาชนะปอร์ซเลน

ผลิตภัณฑ์	เกณฑ์ที่กำหนดไม่เกิน	
	ตะกั่ว	แคดเมียม
ภาชนะแบบแบน (มิลลิกรัมต่อ ล.บ.เดซิเมตร)	3.0	0.50
ภาชนะแบบลึกขนาดเล็ก (มิลลิกรัมต่อล.บ.เดซิเมตร)	2.0	0.50
ภาชนะแบบลึก ขนาดใหญ่ (มิลลิกรัมต่อล.บ.เดซิเมตร)	1.0	0.25

6.4 ความทนต่อการเปลี่ยนอุณหภูมิโดยฉับพลัน

ภาษาชนะปอร์ชเลนต้องทนต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิโดยฉับพลัน ที่แตกต่างกัน 120 องศาเซลเซียส โดยเมื่อทดสอบตาม มอก. 564 แล้วต้องไม่แตก ร้าว และผิวเคลือบต้องไม่มีรอยร้าว

6.5 การดูดซึมน้ำ

เมื่อทดสอบตาม มอก. 564 แล้วค่าเฉลี่ยการดูดน้ำต้องไม่เกินร้อยละ 0.2

6.6 ความเปื่อย

ภาษาชนะสโตนแวร์ที่เป็นจาน เมื่อนำมาทำความสะอาดด้วยสาลีสบูบเฮทานอลและทำให้แห้ง แล้วจุ่มลงในน้ำสะอาด ผิวจานส่วนที่ทำความสะอาดแล้วต้องเปื่อยน้ำสม่ำเสมอ

6.7 ความทนต่อการร้าว

เมื่อทดสอบตาม มอก. 564 แล้วผิวเคลือบต้องไม่มีรอยแยกหรือรอยร้าว

6.8 ความทนต่อการกระแทก

เมื่อทดสอบตาม มอก. 564 ภาษาชนะสโตนแวร์ต้องมีความทนต่อแรงกระแทก ไม่น้อยกว่าในตารางที่กำหนด โดยไม่เกิดรอยร้าวที่ริม หรือเป็นรูทะลุสำหรับภาษาชนะแบบแบน และไม่เกิดรอยร้าวถึงก้นภาษาชนะ หรือมีส่วนใดส่วนหนึ่งบิ่นออกสำหรับถ้วยและชาม

6.9 ความทนต่อแรงกระทบที่ขอบ (เฉพาะภาษาชนะแบบแบน)

เมื่อทดสอบตาม มอก. 564 ภาษาชนะต้องมีความทนต่อแรงกระทบที่ขอบไม่น้อยกว่าเกณฑ์ที่กำหนดในตาราง โดยที่ผิวเคลือบไม่หลุดออกหรือภาษาชนะไม่แตก

ตาราง 8.2 ความทนต่อแรงกระแทก และทนแรงกระทบที่ขอบ

รายการ ที่	ชนิดของภาษาชนะ ปอร์ชเลน	ความทนแรงกระแทก (นิวตันเมตร)		ความทนแรงกระทบที่ขอบ (นิวตันเมตร)	
		ประเภทใน ครัวเรือน	ประเภทใช้ใน โรงแรม	ประเภทใช้ใน ครัวเรือน	ประเภทใช้ใน โรงแรม
1	ชาม	0.05	0.07	-	-
2	ถ้วยชาหรือกาแฟ	0.03	0.04	-	-
3	จานรอง	0.04	0.06	0.01	0.08

ในการผลิตไวท์แวร์สำหรับเครื่องใช้บนโต๊ะอาหาร ได้มีการแบ่งออกเป็นแผนกต่างๆ เพื่อใช้ในการควบคุมขบวนการผลิตให้ได้ตามมาตรฐานและสามารถทำการตรวจสอบได้ง่าย แผนกต่างๆ ได้แก่

1. ส่วนเตรียมเนื้อดิน (Clay production)

- 1.1 ตรวจเช็คความหนาแน่นของน้ำดิน
- 1.2 ตรวจเช็คความเป็นสุญญากาศของ pugmill
- 1.3 ตรวจสอบและบันทึกความชื้นในเนื้อดิน

มีปัจจัยสำคัญในการควบคุมคุณภาพของวัตถุดิบได้แก่

- การควบคุมขนาด และการกระจายขนาดของอนุภาค (PSD)
- การควบคุมส่วนประกอบทางเคมี (Chemical analysis)
- การควบคุมความต้านทานต่อการแตกร้าว (MOR)

2. ส่วนขึ้นรูป (Making operation)

- 2.1 โดยการเปรียบเทียบน้ำหนักของผลิตภัณฑ์ที่ผลิตได้เทียบกับน้ำหนักมาตรฐาน
- 2.2 ตรวจสอบขอบและผิวหน้าของผลิตภัณฑ์ที่ขึ้นรูปได้ว่ามีตำหนิหรือไม่
- 2.3 ตรวจสอบรอยแตกหรือตำหนิที่เกิดขึ้นหลังการขึ้นรูป
- 2.4 ตรวจสอบความชื้นของเนื้อดิน ในกรณีถ้วยกาแฟที่มีหูจับ โดยความชื้นควรอยู่ที่

ประมาณ 12% ส่วนในขบวนการผลิตได้แก่

- Degree of extrusion
- Degree of milling
- Use of additives

3. ส่วนเตรียมแม่พิมพ์ (Mould making)

- 3.1 วัสดุควรจัดเก็บในที่ที่แห้ง ปราศจากความชื้น
- 3.2 อัตราส่วนวัสดุต่อน้ำเหมาะสม
- 3.3 เวลาในการผสมและบ่ม
- 3.4 ความสะอาด
- 3.5 รูปทรงและความแข็งแรงของวัสดุ
- 3.4 อายุการใช้งานของแบบ

4. ส่วนการผลิตผลิตภัณฑ์ (Cast-ware production)

- 4.1 ความหนาแน่นของน้ำดิน Slop density
- 4.2 การไหลตัวหรือความหนืด Fluidity
- 4.3 Thixotropy

5. ส่วนตกแต่งเคลือบและเผา (Glaze application and firing)

ในแต่ละส่วนของการผลิตจะมีการสูญเสียเกิดขึ้นได้ การสูญเสียผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นได้แก่ ขั้นตอนการเตรียมเนื้อดิน สูญเสียในขั้นตอนการเผาบิสกิต และสูญเสียในขั้นตอนการเคลือบ ในการควบคุมคุณภาพของผลิตภัณฑ์ไวท์แวร์บนโต๊ะอาหารได้แก่

- ความขาว (Whiteness): ความขาวของผลิตภัณฑ์จะเป็นสิ่งแรกที่มองเห็นได้ และเป็นตัวกำหนดหรือเพิ่มมูลค่าให้กับผลิตภัณฑ์นั้นๆได้ ซึ่งการควบคุมความขาวคือการควบคุมปริมาณของเหล็กออกไซด์และ โททาเนียมออกไซด์ในส่วนผสมของเนื้อดินนั้น และการควบคุมค่าการดูดซึมน้ำหลังเผา
- ความโปร่งแสงของผลิตภัณฑ์
- ขนาดที่ถูกต้อง (Dimensional consistency) ซึ่งเป็นการควบคุมการหดตัวก่อนเผาและหลังเผา
- ความแข็งแรง ความทนทานต่อการแตกหัก
- ความทนทานต่อการกระแทกที่ขอบหรือมุม (Good edge chip resistance)
- ความทนทานต่อการเกิดรอยขีดข่วนได้ดี (Good metal marking resistance)

คุณสมบัติที่ต้องการตรวจสอบสำหรับขบวนการผลิตไวท์แวร์ในอุตสาหกรรม

- Clay
 - * SIEVE TEST - 80 , 120 #
 - * MOR
 - Wet to dry contraction
 - Moisture content as delivered
 - Particle size -> 0.5 um
 - Rheological properties
 - Thermal gradient test

- Non - plastic
 - * button test - thermal gradient
(Sand , Flint , stone feldspar) or production kiln
 - * Particle size - % less than 10 um
 - Free lime (Flint only)
 - Specific gravity (Flint only)

- Body unfired
 - * Moisture content of plastic clay
 - * Clay Hardness
 - * Wet to dry shrinkage
 - MOR

- Body Fired
 - * Dry to Fired shrinkage
 - * Water absorption
 - * Thermal expansion
 - * MOR
 - Vitrification - thermal gradient kiln
 - Translucency

- Casting slip
 - * Slip density
 - * Fluidity
 - * Thixotropy

- Glazes
 - * Dipping thickness
 - * Fluidity
 - * Slip density
 - * Thermal expansion
 - Particle size - % less than 10 um
 - Maturing range - thermal gradient kiln
 - Flow test - inclined plane
 - Color measurement

- Glost ware
 - * Crazing test or Body/Glaze
 - Fit test

* Metal Release

Durability of on-glaze decoration

Modulus of rupture - glost specimens

Fired glaze thickness

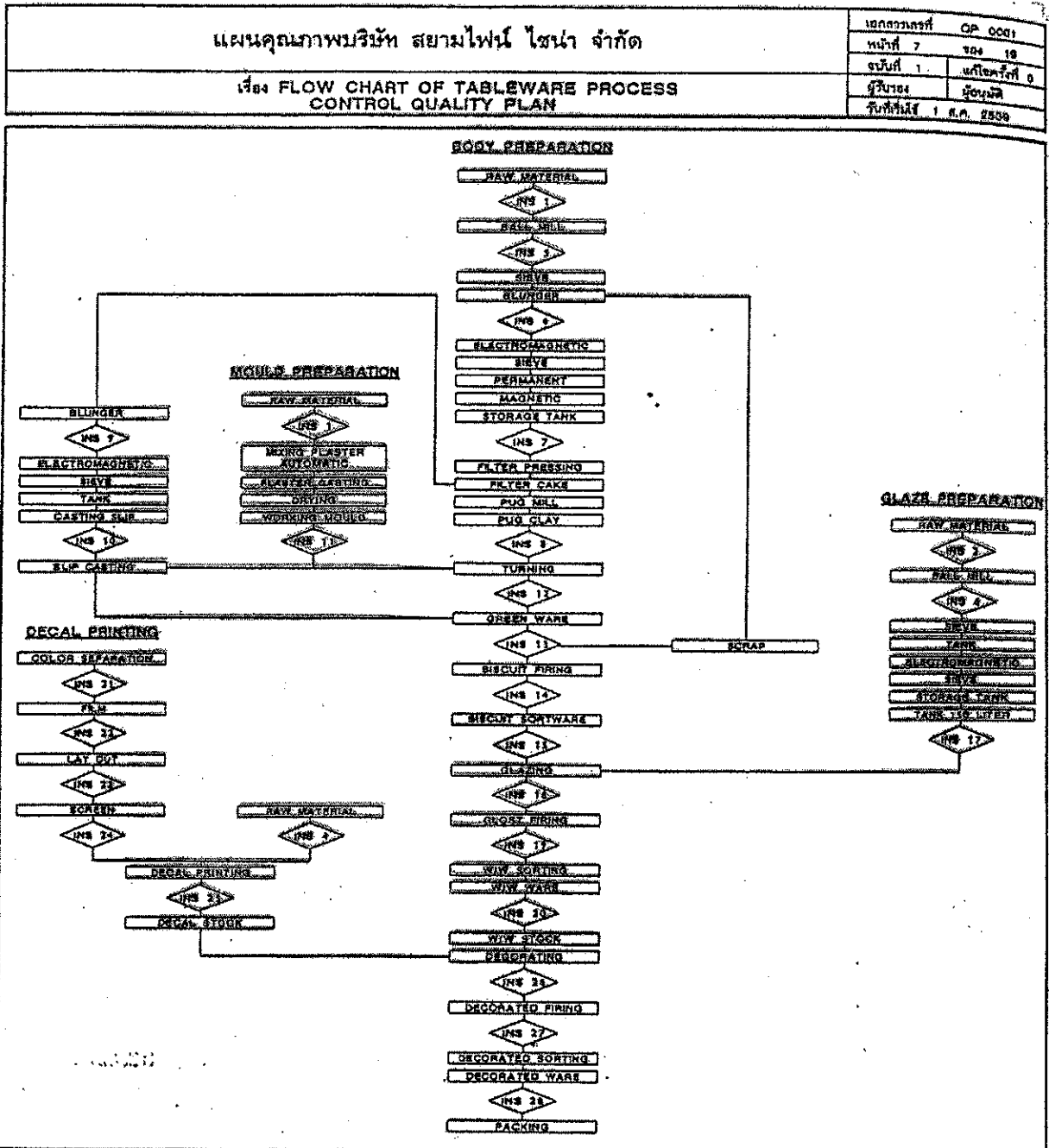
Cup handle strength

Edge chipping test

การควบคุมคุณภาพ

เนื่องจากปัจจุบันมีการแข่งขันในด้านการผลิตมากขึ้น ดังนั้นจึงต้องมีการพัฒนาปรับปรุงมาตรฐานสินค้า เพื่อตอบสนองต่อสังคมให้เหมาะสมกับสภาพเศรษฐกิจที่สุด ในการควบคุมคุณภาพไม่ได้หมายถึงการศึกษาข้อมูลเชิงสถิติหรือการเตรียมแผนภูมิการควบคุมเท่านั้น สิ่งที่สำคัญของการควบคุมคุณภาพคือ การทำให้สภาวะเศรษฐกิจของประเทศมีความเข้มแข็ง โดยการส่งออกสินค้าที่มีคุณภาพ ทั่วโลกยอมรับ ออกไปในปริมาณมากๆ ในราคาที่เป็นเหตุเป็นผล และรักษาเสถียรภาพทางเศรษฐกิจให้มั่นคงเพื่ออนาคต นอกจากนี้จุดประสงค์ในการควบคุมคุณภาพคือ การที่บริษัทมีการแบ่งผลกำไรบางส่วนให้แก่ลูกค้า ลูกจ้าง และผู้ถือหุ้นอย่างยุติธรรม เพื่อเพิ่มมาตรฐานการครองชีพของประเทศและสร้างคุณภาพชีวิตให้ดีขึ้น

การควบคุมคุณภาพจะประสบความสำเร็จหรือไม่ จำเป็นต้องอาศัยความร่วมมือและการประสานงานของผู้ร่วมงานทุกคน ทุกฝ่าย



รูป 8.1 แผนควบคุมคุณภาพผลิตภัณฑ์บนโต๊ะอาหารของ สยามไฟน์ ไชนา

มีคำถามมากมายในการเก็บข้อมูลในโรงงาน ซึ่งจะต้องนำข้อมูลเหล่านั้นมาประกอบการพิจารณาปรับปรุงและควบคุมคุณภาพของผลิตภัณฑ์

- What is the single "best" value that describes this property?
- How much variation can be expected among individual items being produced and tested?
- Is the current production run producing items that are similar to or different from previous production run?
- Is the overall production process operating under control, or has some important unexpected change occurred?

เนื่องจากมีข้อมูลจำนวนมาก ดังนั้นการเก็บข้อมูลและการจัดการข้อมูลจึงต้องใช้หลักทางสถิติเข้ามาช่วย

Statistical assessment of observed data

- Mean value:

if $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ are the values of "n" separate observations, then

$$\bar{x} = \frac{X_1 + X_2 + X_3 + \dots + X_n}{n} = \Sigma x / n$$

\bar{x} = mean value

Σ is "the sum of"

Σx is "the sum of all the separate values of x"

Example:

If crack resistance test, six pieces craze as follows:

Cycles	no. crazed
4	1
5	1
6	2
7	0
8	2

$$\text{Mean } \bar{x} = \sum x/n = (4+5+(6*2)+(8*2))/6 = 37/6 = 6.2 \text{ cycles.}$$

การกระจายของข้อมูล

■ The difference between the highest and the lowest = range (for small groups)

■ Standard deviation (σ)

Root mean square (RMS)

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum D^2}{n}}$$

D = deviation = $(x - \bar{x})$

N = no. of individual items

x	D = $(x - \bar{x})$	D ² (cm ²)
46.5	-13.5	182.3
59.2	-0.8	0.6
74.3	+14.3	204.5
		387.4

$$\sum D^2 = 387.4$$

$$\sum D^2/n = 387.4 / 3 = 129.1 \text{ cm}^2$$

$$\sigma = \sqrt{129.1} = 11.36$$

Coefficient of variation = $(\sigma / \bar{x}) \times 100 = \text{relative variation}$

สาเหตุที่ต้องการในการบริหารงานในอุตสาหกรรมเซรามิกให้มีคุณภาพ

- การปรับปรุงงานเกิดขึ้นเป็นจุดๆ และไม่สอดคล้องกัน
- มีผลก็จริงแต่ว่าขึ้นๆลงๆ
- ขาดทักษะในการวิเคราะห์ปัญหา

- สภาวะกดดันจากภายนอก
- สินค้าไม่ตอบสนองต่อความต้องการของลูกค้า
- คุณภาพของสินค้าต่ำกว่าคู่แข่ง
- ต้นทุนการผลิตสูงขึ้น
- สินค้าที่ผลิตอยู่นี้อยู่ในตลาดที่มีการอิ่มตัวแล้ว (ศักยภาพต่ำ)

การบริหารระดับคุณภาพ

- การกำหนดเป้าหมายและวัตถุประสงค์
- การวางแผน
- การปฏิบัติตามแผนงาน
- การติดตามและประเมินผล

การบริหารระบบคุณภาพ ISO 9000:2000 [10]

ประโยชน์ที่ได้รับจากการบริหารระบบคุณภาพ



- มีการพัฒนาระบบเอกสารที่ดี
- เกิดความใส่ใจในคุณภาพ
- เพิ่มประสิทธิภาพและประสิทธิผลในการดำเนินการ
- ลดรายจ่ายที่เกิดจากของเสียหาย
- เป็นงานในการพัฒนาคุณภาพ
- ลูกค้าตระหนักถึงคุณภาพขององค์กร
- ตอบสนองความพึงพอใจของลูกค้า
- เพิ่มความน่าเชื่อถือ
- เพิ่มความสามารถในการแข่งขัน
- สามารถเข้าสู่ตลาดใหม่ได้เร็ว
- สร้างโอกาสในการส่งออก

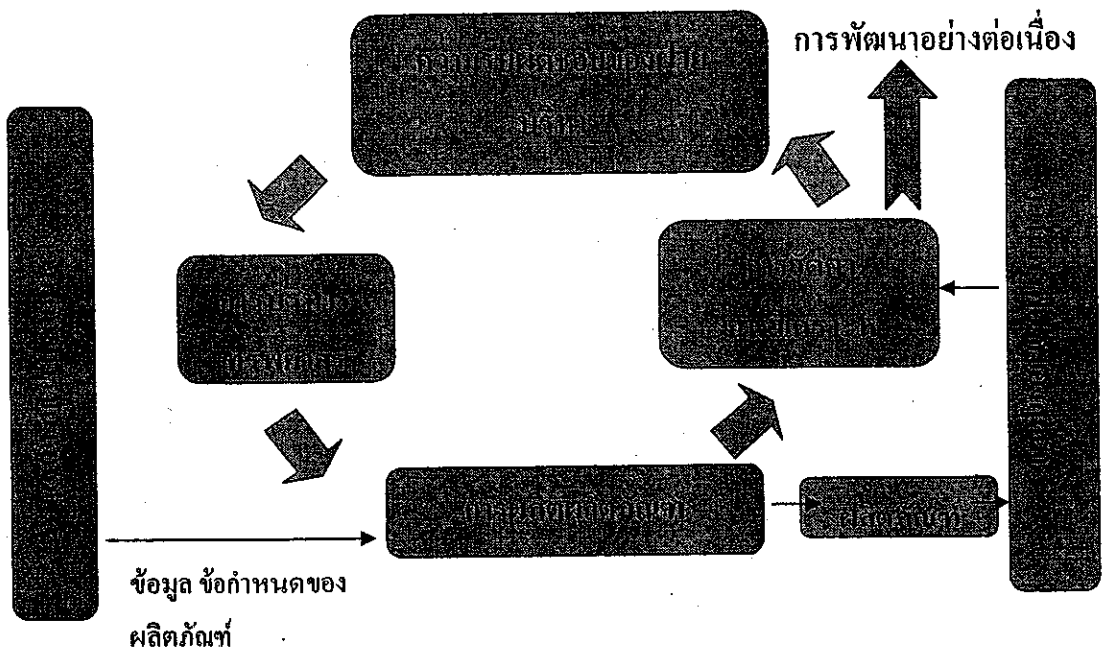
คุณลักษณะ ISO 9000:2000

- เน้นกระบวนการ (Process approach) 1994 เน้นข้อกำหนด
- เน้นให้องค์กรมีระบบบริหารเพื่อการปรับปรุงอย่างต่อเนื่อง (Continual Improvement)
- รูปแบบและแนวคิด ใกล้เคียงกับการบริหารโดยองค์รวม (Total quality management, TQM)

- สามารถใช้ได้กับการบริหารทั้งภาคการผลิตและการบริหารจัดการ

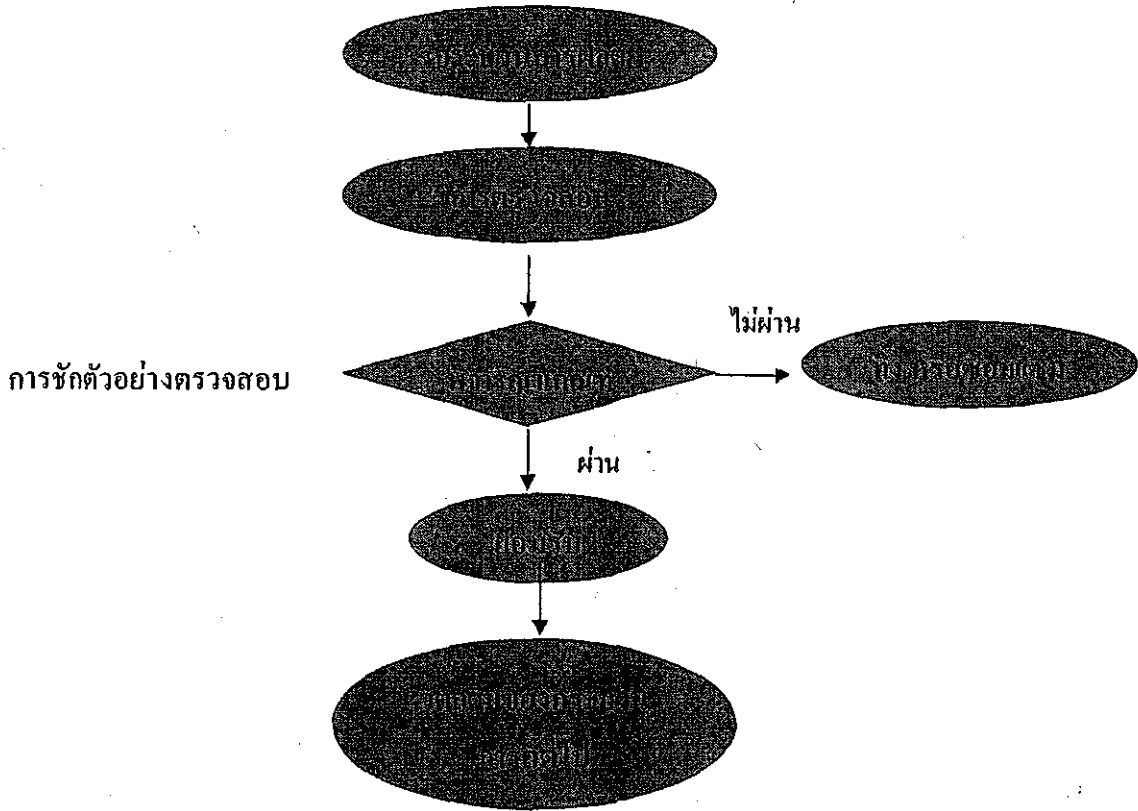
รูปแบบการบริหารเชิงกระบวนการของระบบบริหารคุณภาพ

ในการบริหารเพื่อควบคุมคุณภาพของผลิตภัณฑ์เพื่อเป็นตามความต้องการของลูกค้า เกิดจากความร่วมมือจากหลายฝ่าย โดยมีระบบดังแผนภาพนี้



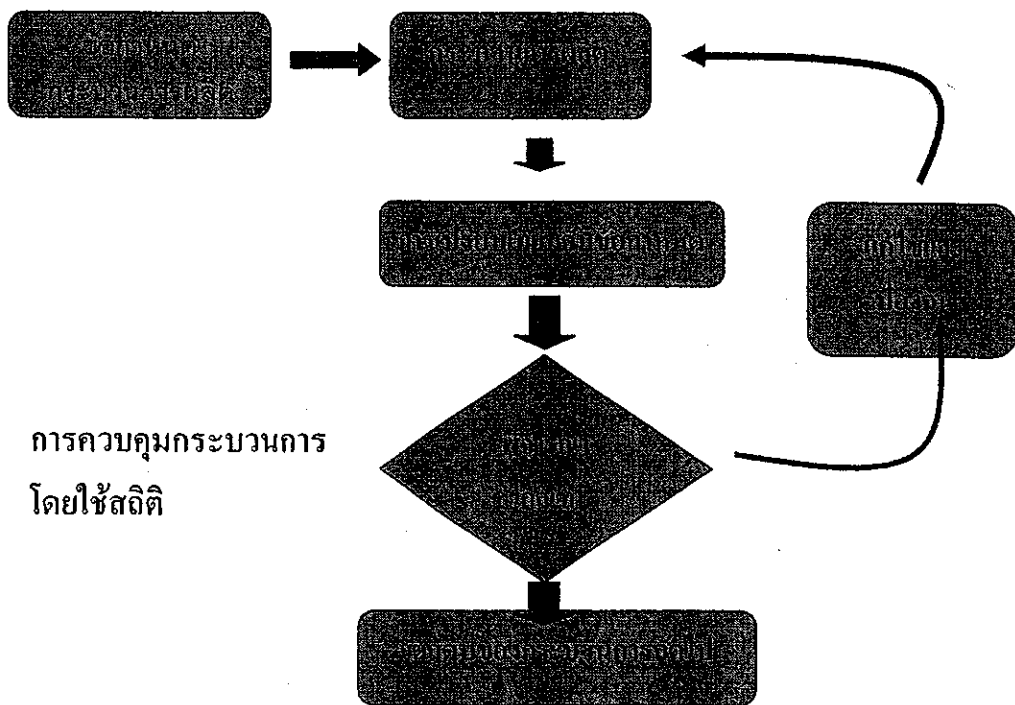
รูป 8.2 การบริหารเชิงกระบวนการของระบบบริหารคุณภาพ [10]

รูปแบบการยอมรับการตรวจสอบ (Inspection Model)



รูป 8.3 แผนภาพการตรวจสอบผลิตภัณฑ์ [10]

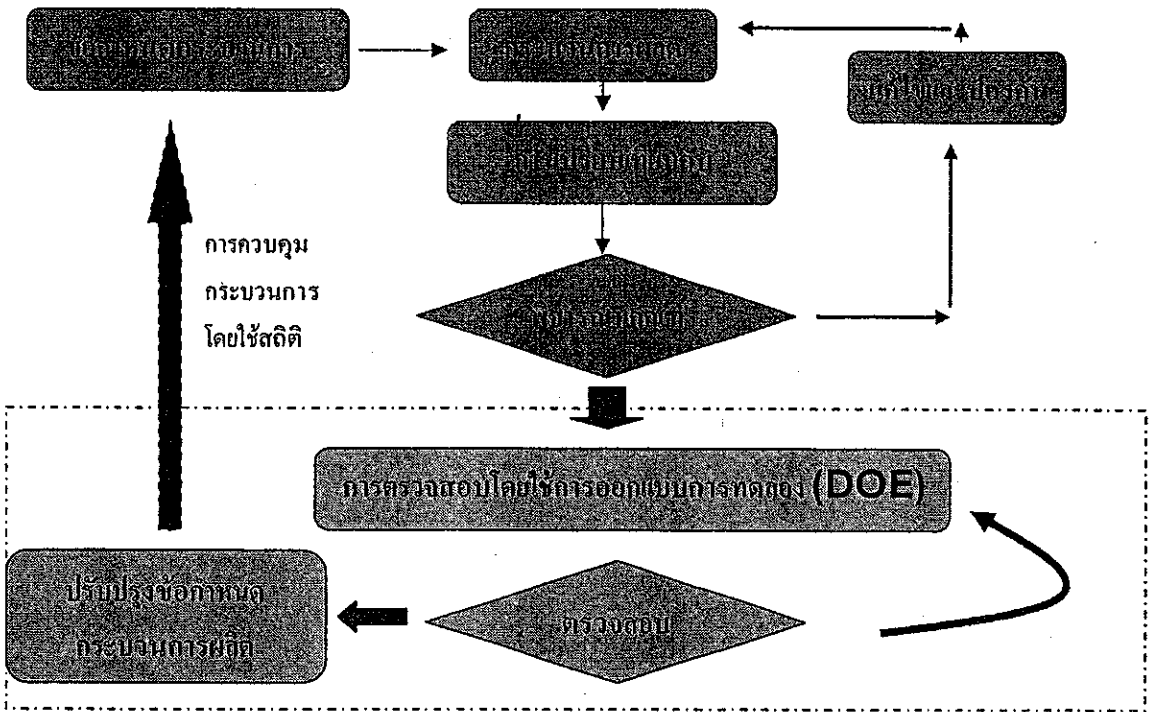
รูปแบบการควบคุมคุณภาพ (Quality Control Model)



การควบคุมกระบวนการ
โดยใช้สถิติ

รูป 8.4 Quality control [10]

รูปแบบการประกันคุณภาพ (Quality Assurance Model)



รูป 8.4 Quality assurance [10]

Process Orientation

คือ การควบคุมคุณภาพของผลิตภัณฑ์โดยเน้นที่การควบคุมกระบวนการ (Process) แทนที่จะไปเน้นที่ การตรวจสอบครั้งสุดท้าย (Inspection) แต่เพียงอย่างเดียว หากกระบวนการ อยู่ภายใต้สภาพเงื่อนไข ถูกต้องเหมาะสมแล้ว กระบวนการนั้นก็จะได้ผลผลิตที่ดีและถูกต้องออกมา

การบริหารเชิงกระบวนการ (Process approach)



ระบบที่มีความสัมพันธ์ระหว่างกระบวนการต่างๆ
การจัดการกระบวนการ

ตาราง 8.3 ตัวอย่างแบบแผนคุณภาพสำหรับขบวนการผลิต

ผังกระบวนการ	จุดควบคุม	เกณฑ์ควบคุม	เครื่องมือตรวจวัด/ทดสอบ	ความถี่การสุ่ม/ทดสอบ	ผู้รับผิดชอบ	เอกสารที่เกี่ยวข้อง	แผนตอบโต้

การรับแร่วัตถุดิบ/ขบวนการก่อนการผลิต

- ตรวจสอบคุณภาพและเก็บตัวอย่าง
- จัดเก็บชั้นคุณภาพและบ่งชี้
- เตรียมแร่วัตถุดิบป้อนสายผลิตตามข้อกำหนดคุณภาพ
- ตรวจสอบคุณภาพเป็นระยะๆ

คุณภาพสม่ำเสมอจะทำให้คุณภาพเป็นไปตามข้อกำหนดของลูกค้า

กระบวนการระหว่างการผลิต

- ทวนสอบเกณฑ์ควบคุม ณ จุดกำหนดควบคุม
- จัดเก็บตัวอย่างและเฝ้าติดตามและตรวจวัดคุณภาพเปรียบเทียบกับเกณฑ์
- เฝ้าติดตามและตรวจวัดปัจจัยของเครื่องจักร อุปกรณ์ที่ใช้ในกระบวนการผลิตเป็นไปตามกำหนด
- เก็บบันทึกเพื่อยืนยันผลลัพธ์ สำเร็จตามแผนที่วางไว้

คุณภาพผลิตภัณฑ์สม่ำเสมอ จะทำให้คุณภาพตรงตามข้อกำหนดของลูกค้า

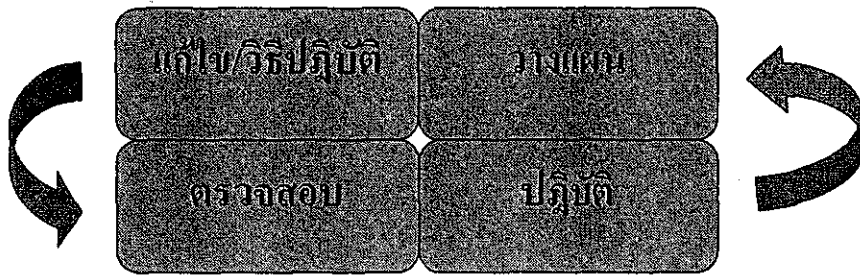
ผลิตภัณฑ์ก่อนตรวจปล่อยไปสู่ลูกค้า

- ทวนสอบเกณฑ์ควบคุม ณ จุดกำหนดควบคุม
- เก็บตัวอย่างและตรวจวัดชั้นคุณภาพอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับ
- จัดเก็บ ถนอมรักษาให้คงไว้ของคุณภาพตามข้อกำหนดของลูกค้า
- สามารถบ่งชี้และสอบกลับได้เมื่อเกิดปัญหา และเก็บบันทึกเพื่อยืนยันผลสำเร็จ

คุณภาพผลิตภัณฑ์สม่ำเสมอจะทำให้คุณภาพตรงตามข้อกำหนดของลูกค้า

การปรับปรุงอย่างต่อเนื่องในทิศทางที่ดีขึ้น (Continuous incremental improvement)

ในขบวนการผลิตเพื่อให้ได้คุณภาพที่เป็นไปตามความต้องการของลูกค้า จำเป็นต้องมีการพัฒนาอย่างเป็นระบบและมีการปรับปรุงอย่างต่อเนื่องดังแผนภาพ



รูป 8.5 การทำงานที่มีการปรับปรุงอย่างต่อเนื่อง [10]

แบบฝึกหัดท้ายบท

1. นักศึกษาในฐานะวิศวกรเซรามิกผู้ทำงานในระบบควบคุมคุณภาพ จงออกแบบการควบคุมคุณภาพในโรงงาน โดยเขียนเป็นแผนผังขั้นตอนในการตรวจสอบคุณภาพทั้งโรงงาน

ภาคผนวก

ส่วนประกอบทางเคมีของวัตถุดิบเซรามิก

ชื่อวัตถุดิบ	สูตรเคมี	น.น. โมเลกุล	ออกไซด์ที่เป็น ส่วนประกอบ	น.น.โมเลกุล ของออกไซด์	Conversion factor
Albite	$\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{SiO}_2$	524	Na_2O	62	0.118
			Al_2O_3	102	0.195
			6SiO_2	60x6	0.687
Alumina	Al_2O_3	102	Al_2O_3	102	1.00
Aluminium hydroxide	$\text{Al}_2(\text{OH})_6$	156	Al_2O_3	102	0.654
Antimony oxide	Sb_2O_3	292	Sb_2O_3	292	1.0
Arsenic oxide	As_2O_3	198	As_2O_3	198	1.00
Barium carbonate	BaCO_3	197	BaO	153	0.777
Barium chloride	BaCl_2	208	BaO	153	0.736
Barium chromate	BaCrO_4	253	BaO	153	0.605
			Cr_2O_3	152	0.30
Barium hydroxide	$\text{Ba}(\text{OH})_2$	171	BaO	153	0.895
Barium oxide	BaO	153	BaO	153	1.00
Barium sulphate	BaSO_4	233	BaO	153	0.658
Bismuth oxide	Bi_2O_3	464	Bi_2O_3	464	1.0
Bone ash	$\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$	310	3CaO	56x3	0.542
			P_2O_5	142	0.458
Boric acid	$\text{B}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$	124	B_2O_3	70	0.565
Borax	$\text{Na}_2\text{O} \cdot 2\text{B}_2\text{O}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$	382	Na_2O	62	0.162
			$2\text{B}_2\text{O}_3$	70 x 2	0.366
			$10\text{H}_2\text{O}$	18 x 10	0.472
Borax (melted)	$\text{Na}_2\text{O} \cdot 2\text{B}_2\text{O}_3$	202	Na_2O	62	0.307
			$2\text{B}_2\text{O}_3$	70 x 2	0.693
Boric oxide	B_2O_3	70	B_2O_3	70	1.00
Calcium borate	$2\text{CaO} \cdot 3\text{B}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	412	2CaO	56 x 2	0.272
			$3\text{B}_2\text{O}_3$	70 x 3	0.51
Calcium carbonate	CaCO_3	100	CaO	56	0.56
Calcium chloride	CaCl_2	111	CaO	56	0.495

ชื่อวัตถุดิบ	สูตรเคมี	น.น. โมเลกุล	ออกไซด์ที่เป็น ส่วนประกอบ	น.น.โมเลกุล ของออกไซด์	Conversion factor
Calcium fluoride (Fluorspar)	CaF_2	78	CaO	56	0.718
Calcium hydroxide	Ca(OH)_2	74	CaO	56	0.758
Calcium oxide	CaO	56	CaO	56	1.00
Calcium phosphate	$\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$	310	3CaO	56	0.542
			P_2O_5	142	0.458
China clay (kaolin)	$\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	258	Al_2O_3	102	0.395
			2SiO_2	60	0.465
Chromium oxide	Cr_2O_3	152	Cr_2O_3	152	1.0
Cobalt oxide (cobaltic)	Co_2O_3	166	CoO	75	0.903
			Co_3O_4	241	0.934
Dolomite	$\text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3$	184	CaO	56	0.304
			MgO	40	0.218
Potash feldspar	$\text{K}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{SiO}_2$	556	K_2O	90	0.169
			Al_2O_3	102	0.183
			SiO_2	60	0.648
Soda feldspar	$\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{SiO}_2$	524	Na_2O	62	0.119
			Al_2O_3	102	0.195
			SiO_2	60	0.686
Lime feldspar	$\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$	278	CaO	56	0.205
			Al_2O_3	102	0.365
			SiO_2	60	0.431
Ferric oxide	Fe_2O_3	160	Fe_2O_3	160	1.0
Ferrous oxide	FeO	72	Fe_2O_3	160	1.13
Flint	SiO_2	60	SiO_2	60	1.0
Gypsum	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	172	CaO	56	0.326
Lead oxide (white lead)	$2\text{PbCO}_3 \cdot \text{Pb(OH)}_2$	775	PbO	223	0.863
Lead oxide (litharge)	PbO	223	PbO	223	1.0

ชื่อวัตถุดิบ	สูตรเคมี	น.น. โมเลกุล	ออกไซด์ที่เป็น ส่วนประกอบ	น.น.โมเลกุล ของออกไซด์	Conversion factor
Lead oxide (red lead)	Pb_3O_4	685	PbO	223	0.975
Pearl ash	K_2CO_3	138	K_2O	94	0.68
Whiting	$CaCO_3$	100	CaO	56	0.56
Zinc oxide	ZnO	81	ZnO	81	1.0
Zirconium oxide	ZrO_2	123	ZrO_2	123	1.0

กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณ อ.ดร.วีระยุทธ ลอประยูร และ รศ.ดร.จรัสศรี ลอประยูร ในการสนับสนุน และให้คำปรึกษาที่เป็นประโยชน์ในการทำให้หนังสือประกอบการเรียนการสอนเล่มนี้ได้พิมพ์ออกมา เพื่อเป็นประโยชน์ต่อการเรียนของนักศึกษาและผู้สนใจทั่วไป นอกจากนี้ขอขอบคุณคุณเกียรติ ในการสร้างรูปภาพต่างๆที่ใช้ประกอบในหนังสือ เพื่อให้หนังสือเล่มนี้มีความสมบูรณ์แบบมากยิ่งขึ้น

เอกสารอ้างอิง

1. F.H. Norton,(1970) Fine Ceramics Technology and Applications, McGRAW-HILL, Inc.
2. ปรีดา พิมพ์ขาวขำ (2535), เซรามิกส์, สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
3. คชินท์ สายอินทวงศ์ (2548), การเตรียมเนื้อดินสำหรับการขึ้นรูปแบบต่างๆ และทฤษฎีการบด, สัมมนาเรื่อง เทคโนโลยีการเตรียมเนื้อดิน และเครื่องมือ/อุปกรณ์, สมาคมเซรามิกส์ไทยและหน่วยปฏิบัติการเซรามิกชั้นสูง วัสดุศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
4. ชูติมา เขี่ยมโชติชวลิต (2546) ผลิตเซรามิกอย่างไรให้มีคุณภาพสม่ำเสมอ น้ำดินดีมีคุณภาพ, วารสารเซรามิก 7(16), หน้า 62-65
5. ชูติมา เขี่ยมโชติชวลิต (2546) ผลิตเซรามิกอย่างไรให้มีคุณภาพสม่ำเสมอ บันดินให้เป็นดาว, วารสารเซรามิก 7(17), หน้า 64-67
6. ยาชูธิไร่ ฮายาคาว่า (2540) วิธีการสร้างแม่พิมพ์และปูนปลาสเตอร์, วารสารเซรามิก 3(8), หน้า 76-79
7. W. Ryan and C. Radford (1987), Whitewares: Production, Testing and Quality Control, Pergamon Press
8. F.H. Norton (1970), Elements of Ceramics, Addison-Wesley Publishing Company
9. รศ.ดร.จรัสศรี ลอประยูร, รศ.ดร. สุพัตรา จินาวัฒน์, ผศ. อำพน วัฒนรังสรรค์, รศ. ดนัย อารยะพงษ์, ดร.สุทิน คูหาเรืองรอง, สุจาริณี คชวัฒน์, อุไรวรรณ สีสลาติศร (2540) , อบรมวิชาการเซรามิกส์เบื้องต้น ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
10. ดร.สุทธิผล ชิวสาธน์ (2548), การบริหารงานระบบประกันคุณภาพสำหรับวัตถุดิบเซรามิก ในการสัมมนาเรื่อง เทคโนโลยีการเตรียมเนื้อดิน และเครื่องมือ/อุปกรณ์, สมาคมเซรามิกส์ไทยและหน่วยปฏิบัติการเซรามิกชั้นสูง วัสดุศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
11. Malvern Instrumentals Ltd., Man 0101 Getting started, Spring Lane South, Malvern, U.K., 1995-1997
12. รศ.ปรีดา พิมพ์ขาวขำ (2530) เคลือบเซรามิกส์ สำนักพิมพ์อักษรเจริญทัศน์ กรุงเทพฯ
13. ไพจิตร อิงศิริวัฒน์ (2546) สีเซรามิก สำนักพิมพ์ไอเดียนส์ไตร์ กรุงเทพฯ
14. F. Singer and W.L. German (1960) , Ceramic Glazes, Borax Consolidated Limited
15. F. Singer and S.S. Singer (1963), Industrial Ceramics, Chapman and Hall

16. Hiroaki Yanagida, Kunihiko Koumoto, Masaru Miyayama and Hisao Yamada (1996), The Chemistry of Ceramics, John Wiley & Sons
17. ไพจิตร อังศิริวัฒน์ (2541), เนื้อดินเซรามิก, สำนักพิมพ์โอเดียนสโตร์
18. Gary Lymath and Bubpachart Meecharoen (2548), Melting body requirements, สัมมนา เรื่อง เทคโนโลยีการเตรียมเนื้อดิน และเครื่องมือ/อุปกรณ์, สมาคมเซรามิกส์ไทยและหน่วยปฏิบัติการเซรามิกชั้นสูง วัสดุศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
Suranaree University of Technology



31051001294749

จัดทำขึ้นมาโดย : ฝ่ายบริการสื่อการศึกษา
ศูนย์บรรณสารและสื่อการศึกษา
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี