บทที่ 3

ทบทวนเอกสาร

3.1 ซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว (Spent Silica-Alumina)

ซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วเป็นของเสียที่เกิดจากกระบวนการผลิตสารประกอบไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ซึ่งเป็นสารเคมีที่สำคัญในอุตสาหกรรมหลายประเภท เช่น โพลีเมอร์ เครื่องสำอาง เภสัชกรรม เป็นต้น ซึ่งกระบวนการผลิตนั้นเกิดจากก๊าซไฮโดรเจนและก๊าซ ออกซิเจนทำปฏิกิริยากันโดยมีสาร working solution ซึ่งเป็นสาร Ethyl tetrahydro anthraquinone (EQ) เป็นสารละลายที่เกิดจากสารประกอบในกลุ่มแอนทราควินโนน โดยที่สาร working solution เป็นสารที่ทำให้เกิดการรวมตัวของก๊าซทั้งสองชนิด ในขณะที่สาร working solution เมื่อใช้ครบ 1 รอบจะก่อให้เกิดความชื้นและสิ่งสกปรกจึงต้องใช้สารซิลิกา-อะลูมินาในการดูดความชื้นและสิ่งสกปรก ในกระบวนการนี้เองทำให้เกิดซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วขึ้น โดยปฏิกิริยาที่เกี่ยวข้องเป็นดังนี้

ปฏิกิริยาไฮโดรจิเนชั่น

$$EQ + H_2 \longrightarrow EQH$$

ปฏิกิริยาออกซิเดชั่น

$$EQH + O_2 \longrightarrow EQ + H_2O_2$$

ปฏิกิริยาที่เกิดซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว

$$EQ + \text{silica-alumina powder} \longrightarrow EQ + \text{spent silica-alumina}$$

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วที่เกิดขึ้นนี้มีส่วนประกอบและการกระจายขนาดดังแสดงในตารางที่3.1 และ3.2

ตารางที่ 3.1 แสดงส่วนประกอบของซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว (ข้อมูลจากโรงงานผลิตสารประกอบไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์)

ส่วนประกอบ	ปริมาณ	
	มิลลิกรัม/กรัม	%
Aluminium oxide	550-630	55.0-63.0
Silicium oxide	120-160	12.0-16.0
Water soluble salt	70-130	7.0-13.0
Humidity	100	10
Ethyl tetrahydro anthraquinone	23.08	2.31
Ethyl anthraquinone	9.85	0.99
Ethyl dihydroxy anthraquinone	6.61	0.66

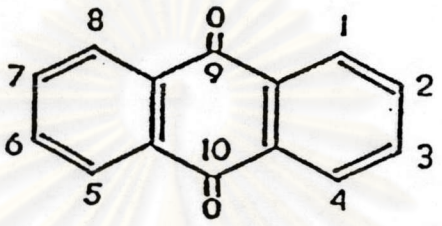
ตารางที่ 3.2 แสดงการกระจายขนาดของซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว

ขนาดของตะแกรงที่ค้างอยู่ NO.	ขนาดของอนุภาค มิลลิเมตร	ปริมาณซิลิกา-อะลูมินา %
8	2.38-4.76	0.039
16	1.19-2.38	63.84
20	0.84-1.19	3.17
30	0.59-0.84	0.18
40	0.42-0.59	0.3
50	0.297-0.42	5.41
100	0.149-0.297	24.03
ถาดรอง	>0.149	3.03

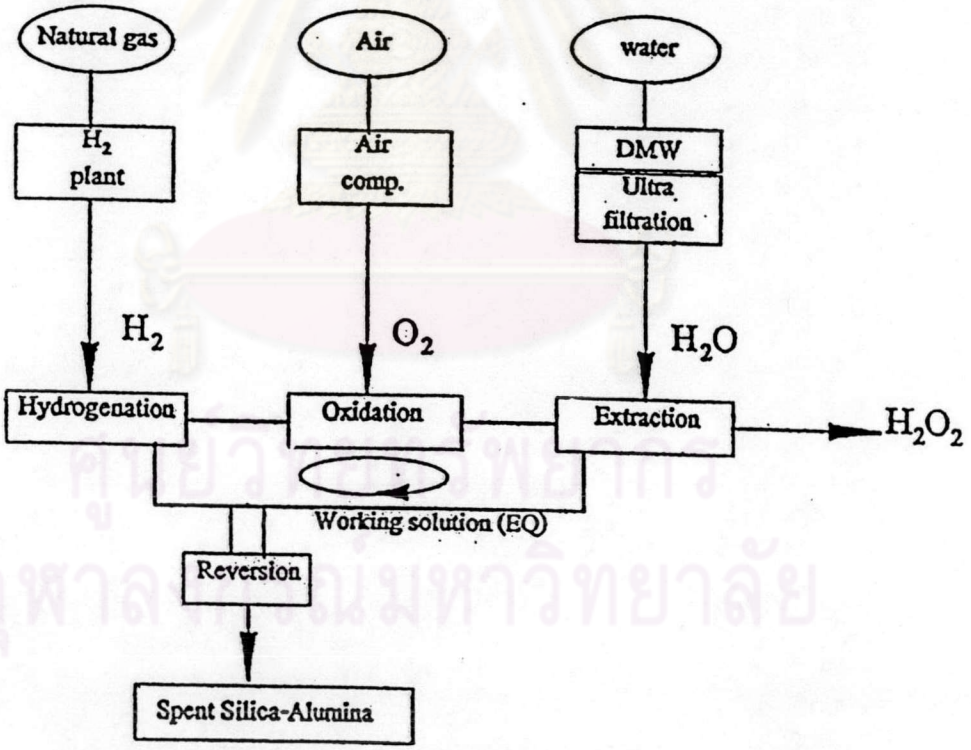
หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.1.1 **สารแอนทราควินโนน** (Anthraquinone)

สารแอนทราควินโนนมีสูตรทางเคมีทั่วไปคือ $C_{14}H_8O_2$ มีลักษณะเป็นผลึกรูปเข็ม มีจุดหลอมเหลวที่ 286 °C ถูกใช้ในการอุตสาหกรรมผลิตสีย้อมและเม็ดสี ใช้เป็นสารเพิ่ม(additive) ในการผลิตกระดาษ ใช้เป็นสารเร่งปฏิกิริยาในการผลิตน้ำมันพืช ใช้เป็นตัวเร่งในการเคลือบนิกเกิลด้วยไฟฟ้า และใช้เป็นสารไล่นก โดยมีสูตรโครงสร้างดังแสดงต่อไปนี้



รูปที่ 3.1 **แสดงสูตรโครงสร้างของสารแอนทราควินโนน** (Robinson, 1980)



รูปที่ 3.2 **กระบวนการผลิตสารประกอบไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์**
(ข้อมูลจากโรงงานผลิตสารประกอบไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์)

3.1.2 ความเป็นพิษของสารแอนทราควินโนน

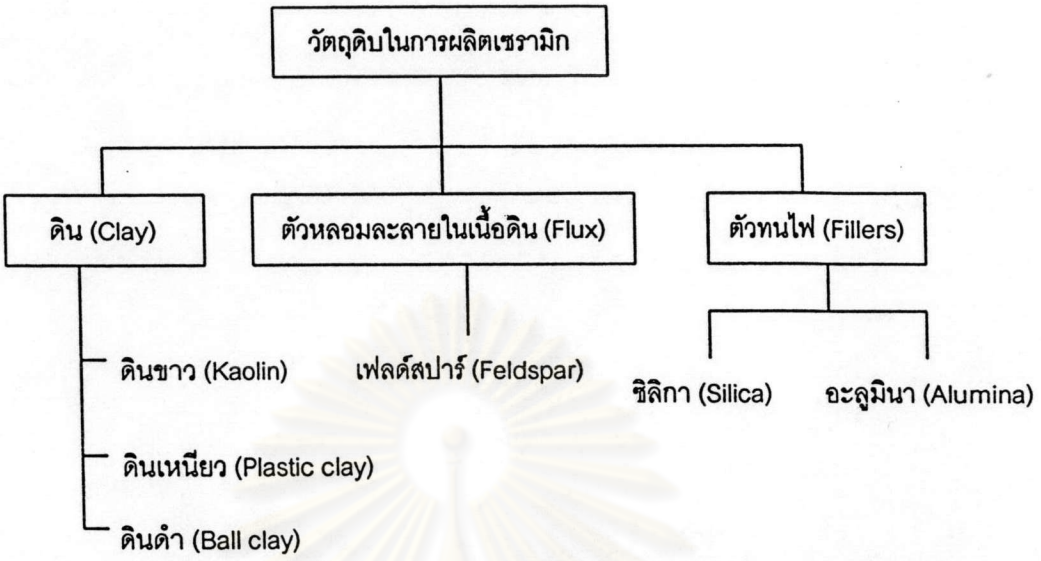
NTP Board of Scientific Counselor's Technical Report Review Subcommittee on May 21,1999 รายงานการศึกษาความเป็นพิษของแอนทราควินโนน โดยการนำสารแอนทราควินโนนให้หนูและลูกหนูทั้งเพศผู้และเพศเมียกินในปริมาณและระยะเวลาต่างๆ ซึ่งแบ่งออกเป็นการศึกษาในระยะเวลา14สัปดาห์ ใช้หนูและลูกหนูทั้งเพศผู้และเพศเมียอย่างละ 10 ตัว และการศึกษาในระยะเวลา 2 ปีใช้หนูและลูกหนูทั้งเพศผู้และเพศเมียอย่างละ 50 ตัว และ 60 ตัว แล้วศึกษาการรอดชีวิต น้ำหนักตัว และการกินอาหาร พบว่า หนูในชุดควบคุมและชุดทดลองให้ผลการทดลองที่คล้ายคลึงกัน หรืออาจกล่าวได้ว่าสารแอนทราควินโนนไม่มีความเป็นพิษ

3.2 เซรามิก

เซรามิก หมายถึง ผลิตภัณฑ์ซึ่งกรรมวิธีการผลิตต้องผ่านการเผาที่อุณหภูมิสูง หรือผลิตภัณฑ์ซึ่งส่วนประกอบของผลิตภัณฑ์ทั้งหมดหรือส่วนใหญ่ผลิตจากวัตถุดิบที่มีอยู่ตามธรรมชาติบนเปลือกโลก ได้แก่ เครื่องปั้นดินเผา ปอร์เซเลน วัตถุทนไฟ วัสดุก่อสร้างที่เป็นดินเผา วัสดุขัดถู โลหะเคลือบ ซีเมนต์ แก้ว วัสดุที่ใช้ในงานเกี่ยวข้องกับแม่เหล็กไฟฟ้า เฟอร์อิเล็กตริก ผลึกเดี่ยวๆ เป็นต้น

3.2.1 วัตถุดิบในการผลิตเซรามิก

วัตถุดิบที่ใช้ในอุตสาหกรรมเซรามิกบางอย่างได้มาจากสินแร่ตามธรรมชาติ เช่น ดินต่างๆ (clays) เฟลด์สปาร์ (feldspar) หินควอตซ์ (quartz) และทรายทะเล เป็นต้น นอกจากนี้วัตถุดิบบางอย่างได้จากการสะกัดจากสินแร่ตามธรรมชาติ และนำมาทำให้บริสุทธิ์ด้วยกระบวนการทางเคมี เช่น อะลูมินา (alumina) ซึ่งได้จากแร่บอกไซต์ (bauxite) ที่ได้จากการสังเคราะห์ นอกจากนี้ก็มีพวกเฟอไรต์ (ferrites) และสารอินทรีย์บางชนิดที่ใช้เป็นตัวช่วยในการขึ้นรูป ผลิตภัณฑ์เซรามิกสมัยใหม่ต้องการวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตมีเปอร์เซ็นต์ความบริสุทธิ์สูง เพราะสิ่งสกปรกเพียงเล็กน้อยซึ่งอาจจะน้อยกว่า 1% ก็มีอิทธิพลต่อโครงสร้างซึ่งเชื่อมโยงไปถึงคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์นั้นๆ ด้วย (ที่มา:ปรีดา พิมพ์ขาวขำ, 2539) ผลิตภัณฑ์เซรามิกทำมาจากวัตถุดิบทนไฟพวก อนินทรีย์สาร ซึ่งมีอยู่มากมายหลายชนิดตามอุณหภูมิการเผา สามารถเลือกใช้ให้เหมาะสมกับผลิตภัณฑ์ที่ผลิต ในระบบอุตสาหกรรมเครื่องปั้นดินเผา นิยมแบ่งวัตถุดิบในการผลิตเซรามิก ออกเป็น 3 กลุ่มคือ ดิน ตัวหลอมละลายในเนื้อดิน และ ตัวทนไฟ ดังแสดงในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 แสดงแผนผังวัตถุดิบบางชนิดในการผลิตเซรามิก

3.2.1.1 ดิน (Clays) ดินเป็นวัตถุดิบที่สำคัญในการผลิตผลิตภัณฑ์เซรามิก มีความเหนียวเมื่อถูกน้ำจะจับตัวเป็นก้อน สามารถนำมาปั้นเป็นรูปร่างต่างๆ ได้ง่าย ความเหนียวและสีของดินมีลักษณะแตกต่างกันไปในแต่ละแหล่ง ทั้งในด้านโครงสร้างผลึกของดิน และคุณสมบัติภายหลังการเผา เช่น สี การหดตัว ความแข็งแกร่ง และความทนไฟ เป็นต้น

แร่ดินที่ใช้เตรียมเนื้อดินในอุตสาหกรรมเซรามิกคือ

3.2.1.1.1ดินขาว (Kaolin, China clay) ดินขาวส่วนใหญ่เป็นดินที่เกิดอยู่ในแหล่งผุพังของหินเดิม (Residual clay) เป็นดินที่มีขนาดเม็ดหยาบจึงมีความเหนียวน้อย ประกอบด้วยแร่เกาลินไนท์ (Kaolinite) มากกว่าดินชนิดอื่นๆ ดินขาวที่พบตามแหล่งทีส่วนประกอบต่างกันด้วยเหตุผล 2 ประการ คือ เนื่องจากโครงสร้างของดินขาวมีการแทนที่กันของโลหะธาตุที่มีประจุบวก และเนื่องจากมีสารประกอบอื่นปะปนอยู่ ได้แก่ ควอตซ์ (quartz), เฟลด์สปาร์ (feldspar), ฮีมาไทท์ (hematite), ฟลูโอไรต์ (fluorite) เป็นต้น

ดินขาวที่ขุดขึ้นมาใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ มีอยู่ 3 ชนิด คือ

- ดินขาวที่มีความบริสุทธิ์และมีความทนไฟสูง สามารถนำมาใช้ทำผลิตภัณฑ์เครื่องปั้นดินเผาได้

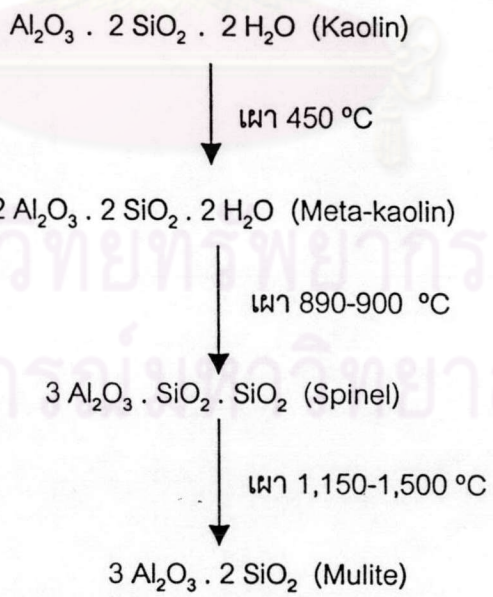
- ดินขาวที่เป็นเกรดของฟิลเลอร์ที่ใช้ในอุตสาหกรรมกระดาษ ทำสี ทำยาง ยาฆ่าแมลง ปุ๋ย และอื่นๆ โดยใช้ดินขาวที่มีเนื้อสีขาวบริสุทธิ์ตามผลวิเคราะห์ทางเคมี แต่ไม่ได้นำไปเผาผ่านความร้อนในกระบวนการผลิต

- ดินขาวซึ่งเป็นดินสอพองซึ่งไม่ใช่ดินขาว แต่เป็นปูนขาวชอล์ก (Chalk) หรือแคลเซียมคาร์บอเนต ($CaCO_3$) เกิดจากผลึกของหินปูนตามธรรมชาติที่มีลักษณะเป็นผลึกละเอียดสีขาว บางครั้งเป็นสีอมชมพูและน้ำตาลอ่อน ซึ่งใช้เป็นเนื้อดินปั้นขึ้นรูปไม่ได้ ใช้ผสมทำปูนซีเมนต์

ตารางที่ 3.3 แสดงสมบัติต่างๆ ของดินขาว (ไพจิตร อึ่งศิริวัฒน์, 2541)

สูตรดินขาว	Al_2O_3 . 2 SiO_2 . 2 H_2O
ส่วนประกอบ	39.5% 46.5% 14%
รูปผลึก	เป็นแผ่นหกเหลี่ยม เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.5 – 10.0 ไมครอน
ความเหนียว	ต่ำ
ความทนไฟ	1,750 – 1,770 °C
ความหดตัว	น้อย
ความแข็งแกร่งหลังเผา	สูง

สมบัติทางเคมีของดินขาว มีปฏิกิริยาแตกตัวในขั้นตอนการเผาดังแสดงในรูปที่3.4 ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงรูปแบบการเรียงตัวของผลึกในโครงสร้างตามอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไป ทำให้เกิดเป็นโครงสร้างที่มีความแข็งแรงมากขึ้น



รูปที่ 3.4 ปฏิกิริยาของดินขาว เมื่อผ่านอุณหภูมิต่างๆ และการเปลี่ยนแปลงผลึกทางโครงสร้างเคมี (ไพจิตร อึ่งศิริวัฒน์, 2541)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สมบัติทางกายภาพของดินขาว (Physical properties of kaolin)

- ขนาดของอนุภาค (Particle size) ขนาดของอนุภาคดินจะมีผลต่อความเหนียว (Plasticity) และการหดตัวของเนื้อดินปั้นเมื่อแห้ง (Drying shrinkage) ดินเม็ดละเอียดจะให้ความเหนียวและการหดตัวเมื่อแห้งมากกว่าเม็ดหยาบ ดินที่มีเม็ดหยาบจะมีความเหนียวน้อย (Low plasticity) ดินขาวมีเม็ดหยาบและมีความเหนียวน้อย

-. รูปร่างของอนุภาค (Particle shape) รูปร่างของแร่เกาลินไนท์ทั่วไป จะเป็นแผ่นหกเหลี่ยม (Hexagonal plates) มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่ 0.05 – 10.0 ไมครอน โดยเฉลี่ยขนาดอยู่ระหว่าง 0.5 ไมครอน

- คุณสมบัติในการแลกเปลี่ยนอนุมูล (Base exchange capacity) ปกติดินขาวที่บริสุทธิ์จะไม่มีการแลกเปลี่ยนอนุมูล หรือดูดซับอนุภาคและโมเลกุลอื่นๆ แต่ถ้าไม่บริสุทธิ์จะเกิดการแลกเปลี่ยนอนุมูล หรือดูดซับเอาผลึกของแร่ที่มีขนาดเล็กไว้ที่ผิวผลึกเกาลินไนท์บริสุทธิ์มีโครงสร้างผลึกที่แข็งแรง แร่ธาตุและอินทรีย์สารแทรกเข้าไปในโครงสร้างผลึกไม่ได้จึงคงความบริสุทธิ์ได้ดี

- คุณสมบัติเมื่อแห้ง (Drying properties) ดินขาวที่บริสุทธิ์จะมีการหดตัวเมื่อแห้ง (Drying shrinkage) ไม่สูงนัก ดินขาวที่มีเม็ดละเอียด (Fine grained) จะมีค่าการหดตัวมากกว่าดินเม็ดหยาบ

- ความแข็งแรงของเนื้อดินเมื่อแห้ง (Green strength) ดินขาวมีความแข็งแรงน้อยเปราะแตกได้ง่ายเมื่อแห้ง เพราะมีความเหนียวน้อย

- สมบัติหลังจากการเผา (Firing properties) ดินขาวที่มีคุณภาพดี เมื่อเผาแล้วควรจะได้สีขาว แต่ถ้าเป็นสีครีมหรือสีน้ำตาลอ่อน แสดงว่ามีแร่ธาตุเจือปนอยู่สูง ดินขาวที่มีการหดตัวเกิน 20 % หลังการเผา ไม่ควรใช้ดินขาวนั้นในเนื้อดินปั้นปริมาณมาก

3.2.1.1.2 ดินเหนียว (Plastic clay) ดินเหนียวคือดินเนื้อละเอียดที่มีแร่ธาตุเจือปนอยู่ตามธรรมชาติค่อนข้างสูง ไม่บริสุทธิ์เหมือนดินขาว เมื่อขุดพบมีสีต่างๆ สีเหลือง สีเทา สีดำ หรือสีส้มแดง หลังการเผาดินก็จะมีสีต่างๆ กันไป เช่น สีเทา สีน้ำตาล สีแดง หรือสีเหลืองอมเทา ดังนั้นดินเหนียวก็คือดินที่มีความเหนียวเนื้อละเอียดที่เป็นสีต่างๆ ภายหลังการเผา ดินดำ (Ball clay) จัดว่าเป็นดินเหนียวประเภทหนึ่งด้วย แต่ดินดำแตกต่างจากดินเหนียวคือดินดำมีแร่ธาตุเจือปนอยู่ในปริมาณต่ำ ค่อนข้างบริสุทธิ์ แต่มีอินทรีย์สารเจือปนอยู่สูง ดินดำบางชนิดมีความเหนียวน้อย บางชนิดมีความเหนียวมาก

3.2.1.1.3 ดินดำ (Ball clay) ซึ่งเป็นวัตถุดิบที่ใช้ในการวิจัยนี้ คือ ดินเหนียวขาวที่เกิดจากดินขาว ซึ่งย้ายถิ่นไปตกตะกอนสะสมในแหล่งใหม่ (Sedimentary clay) ดินดำเป็นดินที่มีขนาดผลึกเม็ดละเอียดมาก อนุภาคของดินยึดเกาะกันได้ดี มีอินทรีย์สารที่มีโครงสร้างคล้ายกับที่พบในถ่านหินลิกไนท์เจือปนอยู่ จึงช่วยให้ดินชนิดนี้มีความเหนียวและทำให้มีสีเปลี่ยนไปจากสีขาวกลายเป็นสีเทาจนถึงสีดำ แต่เมื่อนำไปเผาในอุณหภูมิสูงเนื้อดินจะมีสีขาวหรือสีครีม อินทรีย์สารต่างๆ จะถูกเผาไหม้หมดไปจากเนื้อดิน

ดินดำที่มีเนื้อละเอียดหลังการเผาเป็นสีขาว และมีความทนไฟ 1,300 ° C โดยไม่บิดเบี้ยวมักเป็นดินที่มีคุณภาพดี นิยมนำมาใช้ผสมในผลิตภัณฑ์สีขาว เช่น ปอร์ซเลน โบนไชน่า และไวท์เอิร์ทเทินแวร์ ส่วนดินดำทั่วไปที่คุณภาพปานกลางมีทรายเจือปนอยู่ค่อนข้างมาก ใช้ทำเนื้อดินขึ้นรูปด้วยแป้นหมุน ทำท่อน้ำดินเผา หรือผสมในเนื้อดินทำกระเบื้องปูพื้น

ส่วนประกอบทางเคมีของดินดำ (Chemical properties of Ball clay) ในดินดำประกอบด้วยแร่เกาลินไนท์เป็นส่วนใหญ่ เช่นเดียวกับดินขาว แต่เป็นผลึกเกาลินไนท์ชนิดไม่สมบูรณ์ (Disordered kaolinite) ในระหว่างผลึกมีแร่ธาตุและอินทรีย์สารแทรกอยู่โดยประมาณจะมีซิลิกา 40 – 60 % อะลูมินา 30 % น้ำผลึกและอินทรีย์สารประมาณ 10 % นอกจากนี้ยังมีแร่ธาตุอื่นๆ ปะปนอยู่ในดินด้วย เช่น ไทเทเนียม (TiO_2) เฟอร์ริก (Fe_2O_3) แคลเซียม (Cao) แมกนีเซียม (MgO) เหล็กซัลเฟต (FeS) โพแทสเซียม (K_2O) และ โซเดียม (Na_2O) เป็นต้น

ตารางที่ 3.4 แสดงสูตรเคมีของดินดำ(ไพจิตร อิ่งศิริวัฒน์, 2541)

ประเภทของดินดำ	สูตรเคมี
1. ดินดำทั่วไป (มีอะลูมินา 20 – 25% ตามผลวิเคราะห์ทางเคมี)	$Al_2O_3 . 4 SiO_2 . 2 H_2O . 0.1 K_2O$
2. ดินดำ-ดินเหนียวอุตสาหกรรม (มีอะลูมินา 30 – 38% ตามผลวิเคราะห์ทางเคมี)	$Al_2O_3 . 2 SiO_2 . 2 H_2O . 0.1 K_2O$
3. ดินดำปนทราย (มีซิลิกา 60 – 80% ตามผลวิเคราะห์ทางเคมี)	$Al_2O_3 . 9 SiO_2 . 2 H_2O . 0.2 K_2O$

สมบัติทางกายภาพของดินดำ (Physical properties of Ball clay)

- ขนาดของดินเหนียวจะมีผลึกละเอียดมากน้อยเพียงใด เปลี่ยนแปลงไปตามแหล่งที่พบเมื่อถูกพัดพาไปไกลจากแหล่งเดิมมาก ขนาดเม็ดอนุภาคจะละเอียดมากขึ้นตามลำดับ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 0.05 – 1.00 ไมโครเมตร

- ความเหนียว (plasticity) ดินเหนียวเป็นดินที่อมน้ำได้มาก ความเหนียวจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับชนิดของดิน ซึ่งประกอบด้วยหลักสำคัญคือ ปริมาณของอินทรีย์สาร ขนาดของเม็ดดิน และวัตถุดิบที่ให้ความเหนียว เช่น ดินเบนโตไนท์ เป็นต้น

- การหดตัวเมื่อแห้ง (drying shrinkage) ดินเหนียวที่มีทรายปนอยู่สูงแทบไม่มีการหดตัวเลย แต่ดินเหนียวที่มีอินทรีย์สารสูงจะมีการหดตัวมากประมาณ 13 – 17 %

- การหดตัวหลังเผา (firing shrinkage) มีการหดตัวสูงประมาณ 15% เนื่องจากดินเหนียวมีขนาดอนุภาคที่เล็กมาก

- ความแข็งแรงของดินเมื่อแห้งก่อนเผา (green strength) ดินเหนียวมีความแข็งแรง (strength) ประมาณ 100 – 1000 psi (ปอนด์ต่อตารางนิ้ว)

- สีหลังเผา เป็นสีขาวนวล

-. มีแร่ธาตุพวกด่างและไมกาในดินทำหน้าที่เป็นตัวหลอมละลาย ช่วยลดอุณหภูมิในการเผา

ตารางที่ 3.5 ข้อดีและข้อเสียของดินดำ(ไพจิตร อิ่งศิริวัฒน์, 2541)

ข้อดี	ข้อเสีย
1. เพิ่มความเหนียวของผลิตภัณฑ์ ทำให้เนื้อดินปั้นขึ้นรูปได้ดี 2. เพิ่มความแข็งแรงก่อนเผา ลดการสูญเสียจากการแตกหักก่อนเผาในขณะเคลื่อนย้าย 3. ทำให้น้ำดินหล่อที่ใช้ในการเทแบบไหลตัวดี 4. เสริมปฏิกิริยาระหว่างมวลสารในระหว่างการเผา ทำให้ดินสุกตัวเร็ว	1. มีสิ่งเจือปน (Impurity) สูง เช่น คาร์บอน เหล็ก ทำให้ผลิตภัณฑ์หลังการเผามีตำหนิ 2. ถ้าผสมในปริมาณมากเกินไป ทำให้ผลิตภัณฑ์ไม่ค่อยโปร่งแสง มีการหดตัวสูง 3. มีองค์ประกอบไม่แน่นอน ทำให้ควบคุมอัตราส่วนผสมได้ยาก

3.2.1.2 ตัวหลอมละลายในเนื้อดิน (Flux) คือวัตถุดิบที่ทำหน้าที่เป็นตัวหลอมละลายลดอุณหภูมิในการเผา การใช้ตัวหลอมละลายผสมในเนื้อดิน เพื่อให้เนื้อดินสุกตัวในอุณหภูมิที่ต้องการ ตัวหลอมละลายจะทำหน้าที่ประสานผลึกของวัตถุดิบต่างๆ ให้หลอมละลายเป็นเนื้อเดียวกัน ในขณะที่เนื้อดินถูกเผาผ่านความร้อน วัตถุดิบที่เป็นตัวหลอมละลายถูกบดละเอียดผสมอยู่ในเนื้อดินจะเริ่มเกิดการหลอมตัวก่อนแล้วดึงเอาวัตถุดิบทนไฟที่อยู่รอบๆ ผลึกมาหลอมเข้าด้วยกัน ทำให้ช่องว่างที่อยู่ระหว่างผลึกเม็ดดินหายไป และเนื้อดินเกิดการหดตัวรวมกัน หลอมจนเนื้อแน่นคล้ายแก้ว ในระหว่างที่เตาเผาเย็นตัวลง เนื้อดินก็จะค่อยๆ เย็นตัวกลายเป็นของแข็ง

ความพรุนตัวของดินหรือคุณสมบัติของดินภายหลังการเผาขึ้นอยู่กับปริมาณของวัตถุดิบที่เป็นตัวหลอมละลาย ถ้าใช้วัตถุดิบตัวหลอมละลายในปริมาณมากเกินไป ดินอาจยุบตัวภายหลังการเผา ดังนั้นหลักสำคัญในการผสมเนื้อดินปั้น ต้องพยายามให้เนื้อดินมีช่วงเผาสุกตัวยาว คือสามารถเผาให้สุกตัวได้ในอุณหภูมิที่มีความแตกต่างกัน ประมาณ 30 – 50 ° C เพื่อความปลอดภัยในการเผามากยิ่งขึ้น แม้ว่าจะเผาเกินอุณหภูมิไปบ้างเล็กน้อยในบางครั้งผลิตภัณฑ์ก็ไม่เกิดความเสียหาย

ตัวหลอมละลายที่ใช้ผสมในอุตสาหกรรมมีหลายชนิด เช่น หินฟันม้า (Feldspar) เนฟเฟลีนไซยาไนท์ (Nepheline Syenite) โบนแอซ (Bone Ash) ทัลค์ (Talc) หินปูน ($CaCO_3$) โดโลไมท์ (Dolomite) เป็นต้น แต่จะกล่าวถึงตัวหลอมละลายเฉพาะที่ใช้ในการวิจัยนี้ คือ หินฟันม้า หรือ เฟลด์สปาร์(Feldspar)

เฟลด์สปาร์ เป็นวัตถุดิบที่สำคัญในกลุ่มที่ให้ด่างหรือวัตถุดิบช่วยในการหลอมละลาย ด่างในแร่เฟลด์สปาร์อยู่ในรูปผลึกที่ไม่ละลายน้ำ จึงสะดวกในการนำมาใช้เป็นวัตถุดิบผสมในเนื้อดินและน้ำเคลือบได้โดยตรง ไม่ต้องนำมาหลอมเป็นฟริต (Frit) ก่อนใช้ เฟลด์สปาร์ใช้ผสมในเนื้อดินปอร์ซเลนและน้ำเคลือบอุณหภูมิสูง เพื่อลดจุดหลอมละลายในการเผา เป็นตัวเริ่มก่อให้เกิดปฏิกิริยาการเกิดเนื้อแก้วในดิน ปริมาณที่ใช้ในเนื้อดินปอร์ซเลนประมาณ 25 % ปริมาณที่ใช้เคลือบประมาณ 40 – 60 %

ตารางที่ 3.6 แสดงสมบัติทางกายภาพของเฟลด์สปาร์ (ไพจิตร อิ่งศิริวัฒน์, 2541)

ความถ่วงจำเพาะ	2.56 – 2.63
อุณหภูมิที่หลอมละลาย	1,150 – 1,532 ° C
ความแข็ง	6.0 – 6.5 โมห์สเกล

เฟลด์สปาร์เป็นสารประกอบของอะลูมิโนซิลิเกตและอัลคาไลหรืออัลคาไลเอิร์ท(ด่าง) ดังนั้นเฟลด์สปาร์จึงมีวัตถุดิบที่เป็นด่างคือตัวหลอมละลาย มีอะลูมินาเป็นตัวกลางและมีซิลิกา ซึ่งเป็นตัวทนไฟด้วย จึงจัดเป็นวัตถุดิบที่ให้เคลือบได้ตามธรรมชาติ เฟลด์สปาร์ทำหน้าที่ลดความเหนียวของเนื้อดินก่อนเผา เป็นตัวประสานให้ผลึกของดินหลอมตัวกันแน่น เนื้อดินหลอมเป็นแก้ว ลดการดูดซึมน้ำ ลดอุณหภูมิในการเผา เพิ่มความโปร่งแสงให้ผลิตภัณฑ์ภายหลังการเผา โดยปกติเฟลด์สปาร์จะเริ่มหลอมละลายเล็กน้อยที่อุณหภูมิประมาณ 1,150 ° C เฟลด์สปาร์สามารถแบ่งออกตามประเภทของสารประกอบได้หลายชนิดดังแสดงในตารางที่ 3.7

ตารางที่ 3.7 แสดงชนิดของเฟลด์สปาร์จำแนกตามสารประกอบ (ไพจิตร อิ่งศิริวัฒน์, 2541)

ประเภทของเฟลด์สปาร์	จุดหลอมละลาย	สูตรเคมี
1. โพแทสเฟลด์สปาร์ (Orthoclase)	1,220 ° C	$K_2O \cdot Al_2O_3 \cdot 6\,SiO_2$ (16.9 %) (18.3 %) (64.8 %)
2. โซดาเฟลด์สปาร์ (Albite)	1,170 – 1,200 ° C	$Na_2O \cdot Al_2O_3 \cdot 6\,SiO_2$ (11.8 %) (19.4 %) (68.8 %)
3. ไลม์เฟลด์สปาร์ (Anorthite)	1,550 ° C	$CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 2\,SiO_2$ (20.1 %) (36.6 %) (43.3 %)
4. แบเรียมเฟลด์สปาร์ (Celsian)	1,715 ° C	$BaO \cdot Al_2O_3 \cdot 2\,SiO_2$ (40.85 %) (27.15 %) (32.00 %)
5. ลิเทียมเฟลด์สปาร์ (Petalite)	1,200 ° C	$Li_2O \cdot Al_2O_3 \cdot 8\,SiO_2$
ลิเทียมเฟลด์สปาร์ (Spodumene)	1,250 ° C	$Li_2O \cdot Al_2O_3 \cdot 8\,SiO_2$
ลิเทียมเฟลด์สปาร์ (Lepidolite)	1,150 ° C	$Li_2O \cdot Al_2O_3 \cdot 8\,SiO_2$ (8.03 %) (27.40 %) (64.57 %)

นอกจากนี้ยังใช้เฟลด์สปาร์ในการเตรียมน้ำเคลือบ ซึ่งใช้ปริมาณ 30 – 70% ในน้ำเคลือบอุณหภูมิสูงทุกชนิด และใช้เป็นส่วนผสมในอุตสาหกรรมการผลิตแก้ว ซึ่งใช้ในอัตราส่วนประมาณ 30 – 40 %

3.2.1.3 ตัวทนไฟ (Fillers) มีคุณสมบัติช่วยเปิดเนื้อดินให้มีความพรุนตัว ช่วยลดการหดตัวของเนื้อดินขณะผึ่งแห้งและลดความเหนียวของเนื้อดินลงด้วย นอกจากนี้ตัวทนไฟยังทำหน้าที่เป็นโครงสร้างของเนื้อผลิตภัณฑ์ ให้คงอยู่ในสภาพดีไม่บิดเบี้ยวแตกร้าวหลังการเผา ทำให้เนื้อดินมีลักษณะพื้นผิวหยาบหรือละเอียดตามต้องการ และเพิ่มความแข็งแกร่งให้เนื้อดินหลังการเผา

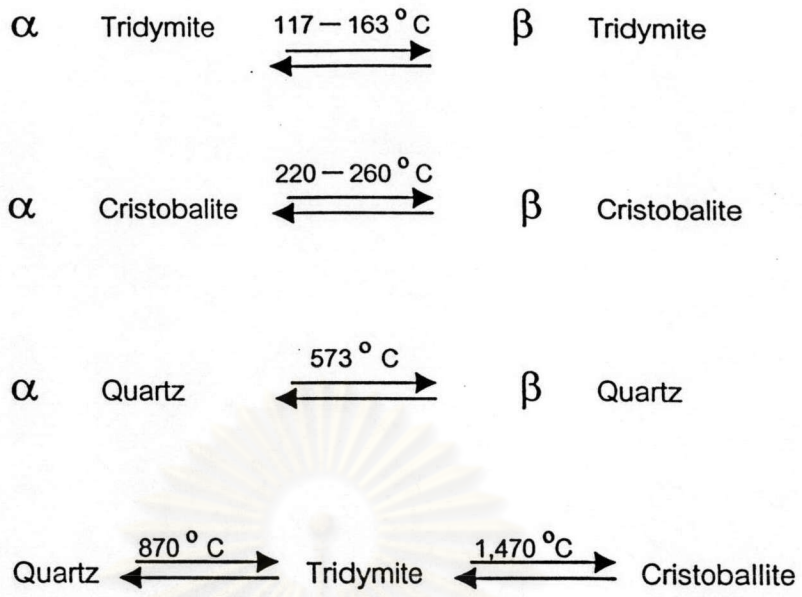
ตัวทนไฟที่ใช้ในการผลิตเซรามิก ได้แก่ ซิลิกา อะลูมินา วัตถุดิบกลุ่มซิลิมาไนท์ (Silimanite Group) คัลไซน์เคลย์ (Calcined clay) ไพโรฟิลไลท์ (Pyrophyllite) เซอร์คอน (Zircon) เป็นต้น ซึ่งในที่นี้จะกล่าวถึงเฉพาะซิลิกา และอะลูมินาซึ่งใช้ในการวิจัยนี้

3.2.1.3.1 ซิลิกา (Silica, SiO_2) โดยปกติในดินทุกชนิดและในเฟลด์สปาร์จะมีซิลิกาเป็นองค์ประกอบในสูตรเคมีอยู่แล้ว ในการเตรียมเนื้อดินนอกจากจะมีเฟลด์สปาร์ทำหน้าที่เป็นตัวหลอมละลาย มีซิลิกาอยู่ในสูตรดินด้วยอีกส่วนหนึ่งซึ่งเพิ่มเข้าไปโดยใช้ซิลิกาบดละเอียด ซิลิกาที่เพิ่มเข้าไปต่างหากนี้ เรียกว่า ซิลิกาอิสระ การเพิ่มซิลิกาอิสระนี้บางครั้งเป็นอันตรายหลังการเผามากเพราะทำให้เนื้อดินขยายตัวมากกว่าเคลือบ (Thermal expansion) โดยปกติแล้วเคลือบจะไม่ร้านตัว ถ้าเนื้อดินและเคลือบหดตัวในอัตราส่วนใกล้เคียงกัน ซิลิกาที่ประกอบอยู่ในเฟลด์สปาร์และเนื้อดินมีการขยายตัวและหดตัวน้อยกว่าซิลิกาอิสระที่เพิ่มเข้าไป ซิลิกาถูกนำมาใช้ประโยชน์ในการผลิต คือ ใช้เป็นส่วนผสมของเนื้อดินในการทำผลิตภัณฑ์เซรามิกใช้เป็นส่วนผสมของสารเคลือบ ใช้ในอุตสาหกรรมแก้ว และการก่อสร้าง ได้แก่ ทราย

ตารางที่ 3.8 แสดงสมบัติทางกายภาพของซิลิกา (ไพจิตร อึ่งศิริวัฒน์, 2541)

ความถ่วงจำเพาะ	2.65
ความแข็ง	7 โมห์สเกล
จุดหลอมละลาย	1,728 °C
โครงสร้างผลึก	รูปหกเหลี่ยมเป็นร่างสามมิติ

ซิลิกาเมื่อถูกเผาผ่านความร้อนจะเปลี่ยนโครงสร้างของรูปผลึกอยู่หลายช่วงอุณหภูมิของการเผา โดยอะตอมของรูปผลึกถูกจัดเรียงตัวใหม่จากรูปแบบหนึ่งเปลี่ยนแปลงเป็นอีกแบบหนึ่ง แต่ละแบบจะสามารถคงสภาพอยู่ได้ในช่วงอุณหภูมิหนึ่ง การเปลี่ยนแปลงรูปผลึกนี้เรียกว่า อินเวอร์ชัน (Inversion) การเปลี่ยนแปลงจะเกิดขึ้นเมื่อผลึกของซิลิกาถูกเผาผ่านความร้อน แต่เมื่อสิ้นสุดการเผา ซิลิกาจะเย็นตัวลง ผลึกต่างๆ จะย้อนกลับมาเป็นรูปเดิม เมื่อเย็นตัวลงถึงอุณหภูมิเดิมดังแสดงในรูปที่ 3.5 ซึ่งแสดงการเปลี่ยนแปลงเฟส (phase) ของซิลิกาที่อุณหภูมิต่างๆ



รูปที่ 3.5 แสดงปฏิกิริยาการเปลี่ยนแปลงของผลึกซิลิกาเมื่อได้รับความร้อน (ไพจิตร อิ่งศิริวัฒน์, 2541)

3.2.1.3.2 **อะลูมินา** (Alumina, Al_2O_3) อะลูมินา คือ อะลูมิเนียมออกไซด์ เรียกอีกชื่อหนึ่งว่า คอรันดัม (Corundum) ได้จากการเผาอะลูมินาไฮเดรต $Al(OH)_3$ ที่อุณหภูมิประมาณ 1000 องศาเซลเซียส เพื่อขจัด H_2Oออกไป อะลูมินาเป็นประโยชน์มากในอุตสาหกรรมวัสดุทนไฟ ถึงแม้ว่าอะลูมินาจะแพงกว่าเฟลด์สปาร์ แต่ในอุตสาหกรรมแก้วที่ต้องการแอลคาไลน์น้อยๆ จำเป็นต้องใช้อะลูมินา ข้อดีอีกประการหนึ่งของอะลูมินา คือ มีปริมาณเหล็กน้อย สารประกอบทั้งสองมีความบริสุทธิ์ค่อนข้างสูง โดยทั่วไปอะลูมินามักพบในรูปของไฮเดรท (Hydrate) คือผลึกของอะลูมินามีการรวมตัวทางเคมีกับน้ำ เช่น หินบอกไซท์ (Bauxite) ซึ่งประกอบด้วยแร่ที่สำคัญ 3 ชนิด ได้แก่ จิบไซท์ (Gibbsite, $Al_2O_3 . 3 H_2O$) ไดอะสปอร์ (Diaspore, $Al_2O_3 . H_2O$) โบห์ไมท์ (Boehmite, $Al_2O_3 . H_2O$)

ตารางที่ 3.9 แสดงสมบัติทางกายภาพของอะลูมินา (ไพจิตร อิ่งศิริวัฒน์, 2541)

ความถ่วงจำเพาะ	3.9 – 4.1
ความแข็ง	9 โมห์สเกล
จุดหลอมละลาย	2,050 ° C
จุดสุกตัวได้เนื้อแก้ว (Sintered alumina)	1,600 – 1,900 ° C
ความเป็นฉนวนไฟฟ้า	ดี

อะลูมินาเป็นวัตถุที่มีความทนไฟสูง มีความทนต่อการกัดกร่อนจากสารเคมี มีความแข็งแกร่งและมีคุณสมบัติเป็นฉนวนไฟฟ้าได้ดี ด้วยคุณสมบัติดังกล่าวนี้เอง อะลูมินาถูกนำมาใช้ในการผลิตวัตถุทนไฟ เบ้าหลอม หัวเทียน และแผ่นรองวงจรไฟฟ้า และได้มีการนำอะลูมินามาผสมในเนื้อดินทำถ้วยชามด้วย อย่างไรก็ตามการนำอะลูมินามาใช้ก็มีผลเสียในบางกรณีเช่น อัตราการขยายตัวของดินจะต่ำไม่เท่ากับอัตราการขยายตัวของเคลือบ เพราะผลึกอะลูมินาเมื่อเผาผ่านความร้อนไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปผลึกซับซ้อนเหมือนซิลิกา นอกจากนี้อะลูมินาเป็นวัตถุดิบที่มีค่าความถ่วงจำเพาะหนักถึง 3.95 ถ้าใช้ผสมเนื้อดินปริมาณ 35 % จะทำให้เนื้อดินหลังการเผามีน้ำหนักเพิ่มขึ้นถึง 20 % และอะลูมินามีค่าความแข็งสูงถึง 9 ซึ่งรองจากเพชรทำให้การบดย่อยให้เป็นผงละเอียดทำได้ช้าและค่อนข้างยาก

อะลูมินาถูกนำมาใช้ประโยชน์ในการผลิต คือ ใช้ผสมเนื้อดินปั้นชนิดปอร์ซเลน เรียกว่า อะลูมินาปอร์ซเลน (Alumina porcelain) และผลิตภัณฑ์ฉนวนไฟฟ้าแรงสูง เพื่อเพิ่มความแข็งแกร่ง ใช้ในอุตสาหกรรมที่จะต้องทนต่อการกัดกร่อนจากสารเคมี (Abrasion – resistance purposes) และใช้ทำวัสดุทนไฟในเตาเผา (Refractory purposes) ใช้ในอุตสาหกรรมทำอิฐทนไฟ (High alumina bricks) ใช้ในการเตรียมน้ำเคลือบ เป็นส่วนของน้ำเคลือบเกือบทุกชนิด และมีคุณสมบัติทำให้เคลือบด้านถ้าใช้ในปริมาณมาก

3.2.2 เนื้อดินอะลูมินาเอิร์ทเทินแวร์ (Alumina Earthenware) เป็นเนื้อดินที่ใช้ผลิตผลิตภัณฑ์ที่ต้องการความแข็งแกร่งสูง และมีคุณสมบัติเนื้อดินขยายตัวน้อย สีของเนื้อดินขึ้นอยู่กับความบริสุทธิ์ของแร่อะลูมินาที่ใช้ ถ้าใช้วัตถุดิบที่มีคุณภาพต่ำสีของเนื้อดินจะออกสีฟางข้าว แต่ถ้าอะลูมินาคุณภาพดีไม่มีมลทินเจือปนมีความบริสุทธิ์สูง เนื้อดินที่เผาจะมีสีขาวสะอาด

ผลิตภัณฑ์ที่ผลิตจากเนื้อดินอะลูมินาเอิร์ทเทินแวร์นอกจากจะมีความแข็งแกร่งสูงแล้วยังมีน้ำหนักมาก มีน้ำหนักมากกว่าผลิตภัณฑ์เอิร์ทเทินแวร์ธรรมดาถึง 26 %เนื่องจากวัตถุดิบอะลูมินามีความถ่วงจำเพาะสูง เนื้อดินแน่นไม่ดูดซึมน้ำและมีแรงต้านทานแรงกระแทกได้ดี

สูตรเนื้อดินอะลูมินาสีขาว 1,180 ° C Oxidation Firing (ระยะเวลาในการเผา 36 ชั่วโมง)

ดินดำ	40 %
อะลูมินา	35 %
เฟลด์สปาร์	25 %

สามารถเตรียมเป็นน้ำดินหล่อได้ โดยใช้โซดาแอช 1: 1 โซเดียมซิลิเกต

ตารางที่ 3.10 แสดงคุณสมบัติของเนื้อดินอะลูมินาเอิร์ทเทินแวร์
(ไพจิตร อิ่งศิริวัฒน์, 2541)

ความแข็งแกร่งของดินดิบ	28 กก./ซม^2.
การหดตัวของเนื้อดินหลังเผา	15 %
การยุบตัวหรือความโค้งงอของแท่งทดสอบ	20 %
ความแข็งแกร่งของเนื้อดินก่อนชุบเคลือบ	1,450 กก./ซม^2.
สีเนื้อดินหลังการเผา	สีขาวบริสุทธิ์
อุณหภูมิที่ใช้ในการเผา	1180 °C
ระยะเวลารวมที่ใช้ในการเผา	36 ชั่วโมง

3.2.3 กระบวนการผลิต

กระบวนการผลิตเซรามิกโดยทั่วไปมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. การเตรียมเนื้อดิน ทำการผสมส่วนผสมเนื้อดินตามสูตรโดยการร่อนผ่านตะแกรงให้ส่วนผสมเข้ากัน แล้วเติมน้ำให้มีความเหนียว ทำการนวดแล้วหมักโดยการห่อไว้ในถุงพลาสติกประมาณ 5 – 7 วัน ส่วนการเตรียมน้ำดินหล่อ ใช้เนื้อดินที่บดผสมตามสูตรผ่านเครื่องไล่อัดเอาน้ำออกแล้ว นำดินแผ่นที่มีความเหนียวพร้อมที่จะนำไปขึ้นรูปในระบบจิกเกอร์หรือโรลเลอร์แมชชีน โดยการกวนเนื้อดินในน้ำที่ผสมน้ำยากันดินตกตะกอนในปริมาณน้ำที่จำกัด หมักไว้ 2 วันก่อนใช้

2. นำไปทำการขึ้นรูป ซึ่งสามารถทำได้หลายวิธี เช่น การขึ้นรูปผลิตภัณฑ์รูปทรงแบน ใช้เครื่องจิกเกอร์หรือโรลเลอร์เฮด ส่วนผลิตภัณฑ์ที่รูปร่างสูงภายในกลวงใช้วิธีหล่อน้ำดิน

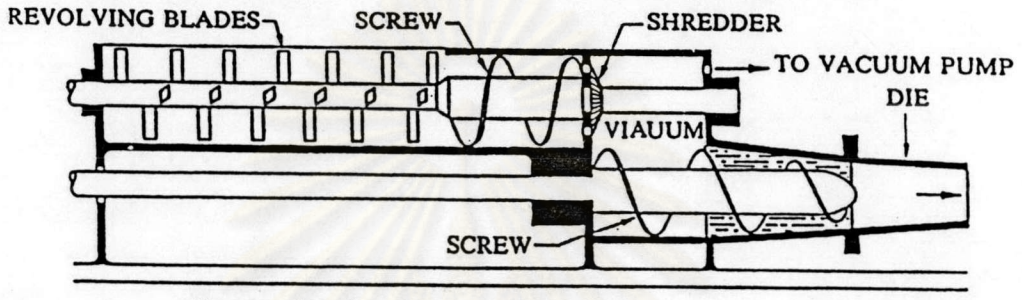
3. นำผลิตภัณฑ์ที่ขึ้นรูปเสร็จแล้วเข้าตู้อบ (Drier) ซึ่งทำให้ผลิตภัณฑ์แห้งสม่ำเสมอ ไม่บิดเบี้ยว และแห้งในเวลาสั้น

4. ทำการตกแต่งชิ้นงานก่อนเผา โดยทำการตัดแต่งส่วนที่เกินออก

5. การเผา ซึ่งใช้อุณหภูมิ ระยะเวลาและวิธีการแตกต่างกันไปตามแต่ชนิดของเนื้อดิน วัตถุประสงค์ในการเผา และรูปทรงของผลิตภัณฑ์ เช่น ภาชนะรูปทรงแบนๆ เรียงซ้อนกันได้โดยใส่ทรายเซอร์คอนหรือวัตถุดิบทนไฟรองไว้ที่ก้นหนา 1 ซม. ทุกชั้น เพื่อป้องกันการยุบตัว เผาจนเนื้อดินแกร่งไม่ดูดซึมน้ำที่ 1,180 ° C (ขึ้นอยู่กับสูตรเนื้อดิน) ในบรรยากาศสันดาปสมบูรณ์ ระยะเวลาในการเผาประมาณ 36 ชั่วโมง (ขึ้นอยู่กับขนาดของชิ้นงาน)

3.2.4 การขึ้นรูปโดยวิธีอัดเนื้อดินผ่านกระบอกสูบและหัวแบบ ซึ่งอยู่ตอนปลายของกระบอกสูบ (extrusion)

การขึ้นรูปโดยวิธีนี้ทำโดยอัดเนื้อดินซึ่งมีความเหนียวผ่านแผ่นโลหะซึ่งมีลักษณะคล้ายรวงผึ้ง จากนี้จึงอัดหลอดเนื้อดินผ่านกระบอกสูบ ซึ่งอาจมีการดูดอากาศออกด้วยและถ้าต้องการให้มีรูปร่างอย่างไร อาจใส่แบบไว้ที่ปลายกระบอกสูบ เมื่อเนื้อดินผ่านแบบออกมาจะได้ผลิตภัณฑ์รูปร่างตามแบบ หรืออาจให้เนื้อดินผ่านกระบอกสูบออกมาแล้วตัดแท่งดินเอาไว้ตามความเหมาะสมเพื่อใช้ในการขึ้นรูปต่อไป เครื่องมือที่ใช้ขึ้นรูปโดยวิธีนี้แสดงดังรูปที่ 3.6



Cross section of a vacuum auger.

รูปที่ 3.6 แสดงเครื่องมือนวดและรีดดิน(ปรีดา พิมพ์ขาวขำ,2539)

3.2.5 ตัวแปรเบื้องต้นที่มีผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์เซรามิก

- ความบริสุทธิ์ของวัตถุดิบ มีความสำคัญต่อคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์เป็นอย่างมาก เช่น ความแข็งแรง สีสัน และความเรียบของเนื้อผลิตภัณฑ์
- ส่วนผสมของเนื้อดิน ขึ้นอยู่กับสูตรที่ใช้ในการผลิตและชนิดของผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ
- ขนาดของวัตถุดิบ มีผลต่อความละเอียดของเนื้อผลิตภัณฑ์ ความเรียบเนียน รวมไปถึงวิธีการในการผลิต
- อุณหภูมิในการเผา ขึ้นอยู่กับเนื้อผลิตภัณฑ์ ความหนาบางของผลิตภัณฑ์

3.2.6 ค่าโมดูลัสการแตกหักหรือค่ากำลังรับแรงดัด (Modulus of Rupture, MOR)

เป็นค่าความแข็งแรงของเนื้อผลิตภัณฑ์เซรามิก ทนทานต่อแรงหักกลางแท่งโดยใช้แรงกดตรงส่วนกลางของแท่งเซรามิก ที่วางอยู่บนฐานรองรับทั้งสองข้าง โดยมีสูตรในการคำนวณดังนี้

สูตรสำหรับหาค่า MOR สำหรับแท่งทดลองทรงกระบอก

$$MOR = 8wl / \P d^3$$

สูตรสำหรับหาค่า MOR สำหรับแท่งทดสอบสี่เหลี่ยมผืนผ้า

$$MOR = 3wl / 2bh^2$$

w =	น้ำหนักที่กดจนแท่งทดสอบหัก	kg, lb
l =	ระยะระหว่างแขนรับแท่งทดลอง	cm, in
b =	ความกว้างของแท่งทดลอง	cm, in
h =	ความหนาของแท่งทดลอง	cm, in
d =	เส้นผ่านศูนย์กลางแท่งทดลองทรงกระบอก	cm, in
MOR มีหน่วยเป็น	น้ำหนักต่อพื้นที่	kg/cm^2, lb/in^2

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.3 การศึกษาที่เกี่ยวข้องกับการวิจัย

ประเสริฐ งามเลิศประเสริฐ (2541) ศึกษาการนำซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วและกากตะกอนปรอทซัลไฟด์มาทำให้เป็นก้อนด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ผลการศึกษาพบว่า อัตราส่วนของการเพิ่มปริมาณซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วต่อปูนซีเมนต์เป็น 10 20 30 และ 40 % ค่ากำลังรับแรงอัด ค่าความหนาแน่นลดลงเล็กน้อย ในส่วนของค่าพีเอช สภาพนำไฟฟ้า และความเป็นด่างมีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย ระยะเวลาในการบ่มเพิ่มขึ้นทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้น การชะละลายของโลหะหนักลดลงตามระยะเวลาบ่มที่เพิ่มขึ้น ค่าใช้จ่ายในการทำตะกอนโลหะหนักจากการบำบัดน้ำเสียซีโอดีให้เป็นก้อนมีค่าเท่ากับ 5,110 บาทต่อตันของตะกอนโลหะหนัก สำหรับการทำโลหะหนักจากการชะล้างกากหลอดฟลูออเรสเซนซ์ให้เป็นก้อนเท่ากับ 5,620 บาทต่อตัน

ปฏิภาณ ปัญญาพลกุล และ ชนาธิป ผาริโน (2541) ศึกษาปริมาณของเสียซิลิกา-อะลูมินาและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นวัสดุประสานในกระบวนการทำให้เป็นก้อนของโลหะหนักซัลไฟด์ และเปรียบเทียบวิธีการที่เหมาะสมในการชะละลายกากของเสียซิลิกา-อะลูมินาและโลหะหนักซัลไฟด์ที่ผ่านกระบวนการทำให้เป็นก้อน ผลการศึกษาพบว่า อัตราส่วนของเสียซิลิกา-อะลูมินาต่อปูนซีเมนต์ที่เหมาะสมเป็น 40% โดยใช้ปริมาณตะกอนโลหะหนักที่ได้จากน้ำเสียซีโอดี 0.25 เท่าของวัสดุประสาน ผสมกับสารละลายโซเดียมซัลไฟด์โดยใช้ค่า 1.75 เท่าของสตอยซิโอเมตริก และใช้น้ำ 0.5 เท่าโดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ผลการศึกษาการชะละลายพบว่า การชะละลายตามวิธีของกรมโรงงานที่มีการปรับค่า pH หลังจากปล่อยให้ชะละลายผ่านไป 1 ชั่วโมงและ 5 ชั่วโมง สามารถชะละลายโลหะหนักออกมาได้มากขึ้น โดยที่การปรับ pH หลังจากการสกัดผ่านไป 5 ชั่วโมง มีค่ามากกว่าและใช้สารเคมีมากที่สุด ส่วนวิธีการสกัดของกรมโรงงานที่ไม่มีการปรับค่า pH เทียบกับวิธีของ TCLP มีค่าใกล้เคียงกันแต่ วิธีของ TCLP ใช้เวลานานกว่า

ไลทิพย์ อภิธรรมวิริยะ (2542) ได้ทำการศึกษาโดยนำซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วมาใช้ประโยชน์ในการทำวัสดุปูพื้น ผลของการศึกษาอัตราส่วนของซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วต่อดินสำเร็จรูปในการทำกระเบื้องดินเผาปูพื้น โดยแปรค่าตั้งแต่ 0 0.25 0.50 0.75 และ 1.00 พบว่า อัตราส่วนของซิลิกา-อะลูมินาต่อดินสำเร็จรูปที่เหมาะสมเท่ากับ 0.25 เมื่อเผาที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส เนื่องจากให้ค่ากำลังรับแรงอัด ค่าความหนาแน่นสูงสุด การทนความรานและการการทนสารเคมีประเภทกรดและเบสผ่านเกณฑ์มาตรฐาน ค่าใช้จ่ายโดยประมาณเท่ากับ 7.29 บาทต่อกระเบื้อง 1 แผ่น ผลการศึกษาในเชิงเศรษฐศาสตร์ พบว่า อุณหภูมิที่

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เหมาะสมในการเผากระเบื้องคือ 800 องศาเซลเซียส โดยที่ค่าจากกาผลการทดสอบเป็นไปตามมาตรฐาน ค่าใช้จ่ายโดยประมาณเท่ากับ 7.19 บาทต่อกระเบื้อง 1 แผ่น

สุรศักดิ์ ไวทยวงศ์สกุล และคณะ (2542) ศึกษาการนำกากวัสดุอะลูมินาเซรามิกกลับมาใช้ใหม่ โดยศึกษาถึงวิธีการที่จะทำการบดกากวัสดุอลูมินาเซรามิกที่มีความแข็งแรงสูงเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ โดยใช้วิธีการทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็ว (Quenching) เพื่อทำให้เกิดรอยแตกในเนื้อวัสดุทำให้ความแข็งแรงลดลง ทำให้ทำการบดได้ง่ายขึ้น พบว่า การทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็วจากที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียสจนถึงอุณหภูมิห้องจะทำให้ชิ้นงานอลูมินาเซรามิกมีความแข็งแรงลดลงครึ่งหนึ่ง และพบว่า การเพิ่มปริมาณลูกบดจะช่วยลดขนาดของอนุภาคของวัสดุที่บดได้ลงได้เล็กน้อยและมีผลต่อลักษณะการกระจายขนาดอนุภาคน้อยมาก

Karamanov และคณะ (1999) ศึกษาการผลิต sintered glass ceramic จากจาโรไซต์ (jarosite) ซึ่งเป็นกากของเสียอันตรายจากโรงงานอุตสาหกรรม โดยนำไปเผาในขบวนการ high - iron - content glasses และทำการศึกษาเฟสที่เกิดขึ้น พบว่า จากกระบวนการเผาทำให้เกิด crystal phase 40% โดยน้ำหนัก แสดงให้เห็นว่า มีความเป็นไปได้ที่จะผลิตเครื่องแก้วเซรามิก (glass ceramic) จากกากของเสีย (จาโรไซต์) ซึ่งเป็นการทำให้กากของเสียมีค่าอีกครั้งโดยการนำมาใช้เป็นวัตถุดิบ

Barbieri และคณะ (2000) ศึกษาการสร้างผลึกของ CaO-Al_2O_3-SiO_2 glassy systems ใน aluminosilicate และ silicate glass ceramic โดยมีการใช้ Spanish และ Italian coal fly ash และตะกรันจากเตาเผาขยะชุมชนเป็นส่วนผสมโดยทำการศึกษากลไกและเฟสที่เกิดขึ้น พบว่า มีแนวโน้มในการสร้างผลึกที่ดีและพบว่า ค่า activitation energy ที่วัดได้มีค่าอยู่ในช่วงที่ใกล้เคียงกับค่าของ aluminosilicate glass ceramic ทั่วไป นอกจากนี้ ยังมีความเป็นไปได้ที่จะเกิดเป็นเนื้อแก้ว 100% โดยน้ำหนักของตะกรัน ซึ่งจัดเป็นวิธีการบำบัดของเสียที่ดีวิธีหนึ่ง

Joo-Hwa Tay และคณะ (2000) ศึกษาการนำสลัดจ์จากโรงบำบัดน้ำเสียของโรงงานรีไซเคิลตะกรันทองแดงมาผลิตเป็นมวลรวมที่เป็นเม็ดเพื่อใช้เป็นวัสดุมวลรวมในคอนกรีต โดยนำสลัดจ์มาทำการอบที่ 105 องศาเซลเซียส แล้วทำการบดจนมีขนาดเล็กกว่า 70 ไมครอน จากนั้นนำไปผสมน้ำปั้นเป็นเม็ดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 13 มิลลิเมตร จากนั้นนำไปทำการเผาที่อุณหภูมิ 1135 องศาเซลเซียส ผลการทดลองพบว่า มวลรวมที่ผลิตจากสลัดจ์มีค่าความถ่วงจำเพาะ 3.25 ค่าความพรุน 30.8% ค่าความหนาแน่น 2.25 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร และค่าการดูดซึมน้ำ 0.40% มวลรวมที่ผลิตจากสลัดจ์มีความแข็งแรงและความทนทานดีเมื่อเทียบกับมวลรวมหินแกรนิต โดยมีค่าความต้านทานแรงกระแทก 19.9% เทียบกับ 28.3% ของหินแกรนิต

เมื่อนำมวลรวมที่ผลิตจากสลัดจ์ไปผสมในคอนกรีตแล้ว พบว่าให้ค่ากำลังรับแรงอัดที่ 28 วันอยู่ในช่วง 24.5 ถึง 38.5 นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร ต่ำกว่ามวลรวมหินแกรนิตเล็กน้อย ผลการทดสอบการชะละลายก้อนทดสอบคอนกรีตให้ค่าที่น่าพอใจ อยู่ในเกณฑ์ที่ไม่ทำให้เกิดการปนเปื้อนน้ำใต้ดินและพื้นดิน

เปรมฤดี กาญจนปิยะ (2544) ได้ทำการศึกษาการนำซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วมาใช้ประโยชน์ในการเป็นวัตถุดิบผลิตปูนซีเมนต์อะลูมินาสูง (HAC) ร่วมกับหินปูนและตระกรันเหล็ก (GGBS) ซึ่งปูนซีเมนต์ที่ผลิตได้จะนำไปใช้ประโยชน์ในการทำเสถียรตะกอนโลหะหนักนิกเกิลให้เป็นก้อนแทนการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ผลการทดลองพบว่า สัดส่วนของปูนขาวต่อซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว อุณหภูมิและเวลาเผาที่เหมาะสมในการผลิต HAC และ HAC ผสม GGBS คือ 40/60 1300 องศาเซลเซียส และ 3.5 ชั่วโมง ตามลำดับ ค่ากำลังรับแรงอัดของ HAC ที่ผลิตได้มีค่าต่ำกว่ามาตรฐาน แต่ค่ากำลังรับแรงอัดของ HAC ผสม GGBS ที่ผลิตได้ มีการพัฒนาของกำลังรับแรงอัดซึ่งจะทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดที่ 60 วันมีค่าสูงกว่ามาตรฐาน ผลการทดลองจากการนำ HAC และ HAC ผสม GGBSที่ผลิตได้ไปทำการเสถียรตะกอนโลหะหนักนิกเกิล โดยใช้อัตราส่วนของตะกอนโลหะหนักต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 1.0 อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.65 พบว่า ค่ากำลังรับแรงอัด ค่าความหนาแน่น และการชะละลายมีค่าผ่านเกณฑ์มาตรฐานโดยมีประสิทธิภาพในการลดการชะละลายเท่ากับ 99.99%

เพ็ชรพร เชาวกิจเจริญ และ สาโรจน์ ปัชโชติพงษ์ (2545) ทำการศึกษาเบื้องต้นในการนำซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วมาใช้ประโยชน์เป็นวัตถุดิบโดยใช้แทนที่อะลูมินาบริสุทธิ์ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวทนไฟร่วมกับดินดำและหินฟันม้า โดยศึกษาถึงคุณสมบัติต่างๆของเนื้อดินและเซรามิกที่ผลิตได้จากการแปรค่าอัตราส่วนซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว ขนาด 150-200 เมช ที่ผสมในเนื้อดินซึ่งเป็นส่วนผสมของดินดำและหินฟันม้าโดยคงค่าอัตราส่วนระหว่างดินดำและหินฟันม้าที่อัตราส่วน 8 ต่อ 5 เผาที่อุณหภูมิ 1180 องศาเซลเซียส โดยแปรค่าอัตราส่วนของซิลิกา-อะลูมินาต่อส่วนผสมเป็น 30 35 40 และ 45 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ ผลการทดลองพบว่า อัตราส่วนของซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วต่อส่วนผสมที่เหมาะสมคือ 40 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งที่อัตราส่วนดังกล่าวมีค่าความเหนียวเท่ากับ 16.04 ค่าความหนาแน่นหลังอบแห้งของเนื้อดินเท่ากับ 1.48 กรัมต่อมิลลิลิตร เปอร์เซ็นต์การหดตัวก่อนเผาเท่ากับ 4.74 ค่ากำลังรับแรงดัดก่อนเผาเท่ากับ 116.15 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ซึ่งค่าจากการทดลองดังกล่าวจัดอยู่ในเกณฑ์ที่ใช้ได้ จากนั้นจึงนำวัสดุไปเผาที่อุณหภูมิที่ 1180 องศาเซลเซียส และภายหลังการเผาให้เป็นเซรามิก พบว่า เปอร์เซ็นต์การหดตัวหลังเผาเท่ากับ 15.58 เปอร์เซ็นต์ ค่าความหนาแน่นหลังเผาเท่ากับ 2.27 กรัมต่อมิลลิลิตร ค่าการดูดซึมของน้ำเท่ากับ 3.86 เปอร์เซ็นต์ ค่ากำลังรับแรงดัดหลังเผาเท่ากับ 285.01 กิโลกรัมต่อตาราง

เซนติเมตร ผลการวิจัยดังกล่าวสามารถสรุปได้ว่าซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วสามารถนำมาใช้ประโยชน์ในการเป็นวัตถุดิบในกระบวนการผลิตเซรามิกได้โดยใช้แทนอะลูมินาบริสุทธิ์ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวทนไฟร่วมกับดินดำและหินฟันม้า

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย