

บทที่ 2

หลักการ ทฤษฎี และการทบทวนเอกสารวิชาการ

2.1 พอร์ซเลน

พอร์ซเลนเป็นเครื่องปั้นดินเผาสีขาว (Whiteware) มีสมบัติเนื้อละเอียด สีขาว มีเนื้อแก้วค่อนข้างสูง วัตถุดิบหลักในการผลิต ได้แก่ ดิน (Clay) หินฟันม้า (Feldspar) และควอตซ์ (Quartz) โดยมีธาตุอื่นๆ ที่ประกอบด้วยโลหะหนักชนิดหรือมากกว่า ร่วมกับอโลหะ ซึ่งโดยส่วนใหญ่เป็นออกซิเจน เมื่อผ่านกระบวนการเผาแล้วจะเกิดโครงสร้างพื้นฐานสองส่วน คือ ส่วนของเนื้อแก้ว (Glassy Matrix) และส่วนของผลึก (Crystalline Phase)^[15] พันธะที่เกิดขึ้นระหว่างอะตอมจะเป็นพันธะโควาเลนต์และไอออนิก ซึ่งทำให้เซรามิกมีความแข็งที่ผิวสูง มีความสามารถในการทนความร้อนและทนต่อปฏิกิริยาเคมีต่างๆ ได้ดี แต่มักทำให้วัสดุมีความเปราะ^[16]

“ไวท์แวร์” เป็นคำที่ใช้เรียกเครื่องปั้นดินเผาหรือเนื้อเซรามิกที่มีสีขาว ซึ่งผลิตภัณฑ์พอร์ซเลนถูกจำแนกอยู่ในผลิตภัณฑ์ประเภทไวท์แวร์ ซึ่งความหมายของผลิตภัณฑ์ไวท์แวร์ตามมาตรฐานอเมริกัน แบ่งตามชนิดของผลิตภัณฑ์^[17] มีดังนี้

1. พอร์ซเลน เป็นผลิตภัณฑ์ไวท์แวร์เซรามิกที่สุกตัว (Vitreous) โดยผ่านการเคลือบหรือไม่ก็ได้ ใช้สำหรับงานที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการทางไฟฟ้า ทางกล ทางเคมี และทางความร้อน
2. โบนไซนา เป็นผลิตภัณฑ์ไวท์แวร์เซรามิกที่สุกตัว โดยผ่านการเคลือบหรือไม่ก็ได้ เช่น ผลิตภัณฑ์บนโต๊ะอาหาร (Dinner Ware), เครื่องสุขภัณฑ์ (Sanitary Ware) เป็นต้น
3. สโตนแวร์ เป็นผลิตภัณฑ์ไวท์แวร์เซรามิกที่สุกตัวหรือกึ่งสุกตัว (Semi-vitreous) มีเนื้อละเอียด ทำจากดินที่ไม่ทนไฟ
4. เอิร์ทเทิร์นแวร์ เป็นผลิตภัณฑ์ไวท์แวร์เซรามิกที่มีการเคลือบหรือไม่ก็ได้ เป็นพวกไวท์แวร์ที่ไม่ค่อยสุกตัว (Non-Vitreous)

ผลิตภัณฑ์ประเภทไวท์แวร์ ส่วนใหญ่จะมีควอตซ์เป็นองค์ประกอบหลักในส่วนของผลึก^[18] และมีผลเสียต่อความแข็งแรงเชิงกลของพอร์ซเลน เนื่องมาจากการเกิด Inversion ของ Quartz ระหว่างการเย็นตัวหลังการเผา^[19] จึงได้มีการปรับปรุงสมบัติเชิงกลของเนื้อพอร์ซเลนด้วยการเติม Sericitic, Pyrophyllite, Kyanite, Bauxite และ Alumina แทนควอตซ์ เพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาของการ

เปลี่ยนเฟสของควอตซ์^[20] และด้วยการลดขนาดของควอตซ์และวัตถุดิบที่ไม่มีความเหนียวซึ่งจะทำให้พอร์ซเลนมีสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้น^[21]

2.1.1 ประวัติความเป็นมาของพอร์ซเลน^[22]

คำว่า พอร์ซเลน มีต้นกำเนิดมาจากภาษาอิตาเลียนว่า พอร์เซลลานา (Porcellana) ซึ่งแปลว่า หอยเบี้ย ซึ่งเปรียบเทียบกับความขาว ความเนียน และโปร่งแสงของเปลือกหอยนั่นเอง

จีนเป็นชาติแรกที่สามารถทำเครื่องปั้นดินเผาด้วยดินสีขาวเนื้อโปร่งคล้ายแก้วได้ตั้งแต่สมัยราชวงศ์ซ้อง พ.ศ. 1503-1822 ผลิตภัณฑ์พอร์ซเลนในสมัยนั้นใช้เนื้อดินและน้ำเคลือบสีขาวขุ่น ไม่มีการเขียนลวดลายด้วยสีครามได้เคลือบ ต่อมาในสมัยจักรพรรดิฮวงวู (Hung Wu) พ.ศ. 1912 (สมัยสุโขทัย) มองโกลเข้ามามีอำนาจในการปกครองจีน ได้นำลายเขียนสีฟ้าได้เคลือบอิทธิพลเปอร์เซียเข้ามาใช้ในการตกแต่งลวดลายบนผลิตภัณฑ์พอร์ซเลน และได้ตั้งเตาหลว่งขึ้นที่เมืองจิงเตอะเจิน (Ching-te-Chen) นับตั้งแต่นั้นมา เมืองนี้ก็กลายเป็นศูนย์กลางการทำเครื่องปั้นดินเผาเนื้อพอร์ซเลน

จนกระทั่งคริสต์ศตวรรษที่ 18 (พ.ศ. 2243-2343) เนื้อดินได้มีการพัฒนาจนมีความขาวบริสุทธิ์เหมือนหยก มีความบางเหมือนกระดาษ และมีเสียงไพเราะเหมือนเสียงระฆัง หลังสิ้นสงครามโลกครั้งที่ 2 เมืองจิงเตอะเจินถูกญี่ปุ่นทำลายโดยการทิ้งระเบิด ถูกไฟไหม้ครั้งใหญ่ ทำให้เมืองล่มสลาย และได้ถูกบูรณะขึ้นมาใหม่ในปี พ.ศ. 2492 และภายในระยะเวลาไม่ถึง 10 ปี เมืองจิงเตอะเจินได้กลับมาเป็นศูนย์กลางในการผลิตถ้วยชามพอร์ซเลนเหมือนเดิม ใน พ.ศ. 2498 พร้อมทั้งส่งไปจำหน่ายยังประเทศต่างๆ มาจนถึงปัจจุบัน

ในคริสต์ศตวรรษที่ 16 (พ.ศ. 2043-2143) ในยุโรปยังผลิตถ้วยชามเนื้อดินสีน้ำตาลทึบ เนื้อหนา เฝ้านุ่มเหนียว และยังมีนิยมนำมาเล่นแร่แปรธาตุ เมื่อมีพ่อค้าชาวอิตาลีนำเครื่องลายครามจากจีนไปขายในยุโรปเป็นครั้งแรก และขายในราคาที่แพงมาก และชาวยุโรปเองไม่เคยมีเครื่องปั้นดินเผาสีขาวโปร่งแสงมาก่อน จึงสันนิษฐานว่า ถ้วยชามพอร์ซเลนเหล่านี้ทำมาจากแร่ที่หายากซึ่งมีอยู่เฉพาะในประเทศจีนเท่านั้น

พ.ศ. 2222 มีหลักฐานว่า ฝรั่งเศสได้ผลิตเนื้อดินพอร์ซเลนโดยใช้ดินขาวผสมกับแก้วบดละเอียด เนื่องจากแก้วเป็นวัตถุดิบที่โปร่งแสงและดินขาวให้สีขาวบริสุทธิ์ ดังนั้น การผลิตพอร์ซเลนในยุคแรกๆ จึงพยายามใช้วัตถุดิบทั้งสองชนิดเป็นหลักในการผลิตและเผาแล้วได้สีขาวโปร่งแสงจริงและมีเนื้อแก้ว ต่อมาได้มีการพัฒนาเป็นฟริตพอร์ซเลนหรือพอร์ซเลนที่เผาที่อุณหภูมิต่ำ แต่เนื้อดินมีความแข็งแกร่งต่ำกว่าพอร์ซเลนที่เผาที่อุณหภูมิสูงของจีน

พ.ศ. 2253 เยอรมันได้ตั้งโรงงานผลิตพอร์ซเลนเผาที่อุณหภูมิสูงได้สำเร็จเป็นประเทศแรก ชื่อโรงงานไมเซน (Meissen) ที่เมืองเดรสเดน ช่างออกแบบพอร์ซเลนในยุคแรกๆ เป็นช่างเงิน

ช่างทอง ช่างเขียน และช่างปั้นในราชสำนัก จึงสามารถออกแบบได้วิจิตรพิสดาร ซึ่งได้รับอิทธิพลมาจากศิลปะของบารอกและโมรอกโค หลังจากนั้น อุตสาหกรรมพอร์ซเลนได้แพร่หลายในยุโรป ทั้งแถบสแกนดิเนเวีย สเปน โปรตุเกสและอังกฤษ วัตถุดิบทุกชนิดถูกนำมาค้นคว้าวิจัยจนทราบคุณสมบัติหลังเผา มีการคิดค้นกรรมวิธีการผลิตด้วยขามให้รวดเร็วขึ้น เครื่องจักรเกอร์ด้วยขาม การพิมพ์ลวดลายด้วยรูปลอก ซึ่งจัดเป็นระบบอุตสาหกรรมที่ไม่ได้ลอกเลียนจากจีนที่เขียนลายด้วยพู่กัน หลังสมัยปฏิวัติอุตสาหกรรม พ.ศ. 2303 ได้นำเครื่องจักรมาใช้แทนแรงงานคนเกือบทั้งหมด ผลิตภัณฑ์ด้วยขามราคาถูกลง แม้ชนชั้นกลางและชาวบ้านก็สามารถซื้อได้

คริสต์ศตวรรษที่ 18 ยุโรปก็สามารถผลิตพอร์ซเลนได้สวยงามตามแบบอย่างของศิลปะตะวันตก รวมทั้งความรู้ในแขนงวิชาเซรามิก ได้มีนักวิทยาศาสตร์หลายท่านช่วยวางรากฐาน เช่น บรอกนีอาร์ต (Brogniart) ชาวฝรั่งเศส ในสมัยพระเจ้าหลุยส์ที่ 16 (พ.ศ. 2313-2390) เป็นผู้อุปถัมภ์โรงงานแซฟว์ (Sevres) ได้คิดสูตรการคำนวณวัตถุดิบแห้งในน้ำดินหล่อ และเซเกอร์ (Segur) ชาวเยอรมัน (พ.ศ. 2382-2437) ได้จัดแบ่งกลุ่มวัตถุดิบในสูตรเคลือบ การคำนวณเคลือบ การทำโคน แหล่งวัตถุดิบต่างๆ ได้ถูกสำรวจและวิจัย มีการคิดค้นเทคนิคในการผลิตเครื่องปั้นดินเผาหลายประเภท หลายเนื้อดิน และหลายผลิตภัณฑ์ เช่น เครื่องถ้วยขาม เครื่องสุขภัณฑ์ กระเบื้องบุผนัง ลูกถ้วยไฟฟ้าและอื่นๆ เทคโนโลยีของเตาเผาที่ได้เจริญรุดหน้าไปพร้อมๆ กันกับปริมาณการผลิต มีการคิดเตาอุโมงค์เพื่อใช้เผาได้อย่างต่อเนื่อง ทำให้อุตสาหกรรมเครื่องปั้นดินเผาในยุโรปเจริญขึ้นอย่างรวดเร็ว ประเทศญี่ปุ่นได้รับการถ่ายทอดเทคโนโลยีทางด้านเครื่องจักรต่างๆ จากเยอรมันนี้ จึงเจริญรุดหน้าในการผลิตอุตสาหกรรมเซรามิกได้ทำเทียมกับประเทศทางยุโรปอย่างรวดเร็ว

2.1.2 ชนิดของพอร์ซเลน

(1) แบ่งตามเนื้อของพอร์ซเลน^[23] ได้แก่

1) ควอตซ์พอร์ซเลน (Quartz Porcelain)

ควอตซ์พอร์ซเลนเป็นผลิตภัณฑ์ไชน่าที่ใช้ในชีวิตประจำวัน พัฒนาโดยสถาบันวิจัยและออกแบบเซรามิกแชนโดง (Shandong Institute of Ceramics Research & Design) มีความแข็งแรงสูง เนื้อละเอียด โปร่งแสง มีความแข็งแรงตามขวางสูง และต้านทานการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิแบบลบล้วนได้ดี ทำมาจาก ควอตซ์ หินฟันม้า และแร่อื่นๆ ราคาของผลิตภัณฑ์ไชน่า High Quartz (High Quartz China) ต่ำกว่าโปไชน่า และมีกระบวนการผลิตที่เหมาะสม^[24]

ผลิตภัณฑ์ประเภทควอตซ์พอร์ซเลน^[25]

1. ฉนวนข้อต่อ (Insulation Segment)



รูปที่ 2.1 ผลิตภัณฑ์ประเภทควอตซ์พอร์ซเลนสำหรับทำฉนวนข้อต่อ^[25]

2. ขั้วหลอดไฟสำหรับงานวิศวกรรม (Ceramic Lamp Sockets for Lighting Engineering)



รูปที่ 2.2 ผลิตภัณฑ์ประเภทควอตซ์พอร์ซเลนสำหรับทำขั้วหลอดไฟ^[25]

ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบทางเคมีของพอร์ซเลนชนิดต่างๆ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)

องค์ประกอบทางเคมี (%)	Quartz Porcelain	Alumina Oxide Porcelain	Mullite Porous	Cordierite	
				Dense	Porous
SiO ₂	66.1	43.3	28.9	57.2	51.5
Al ₂ O ₃	30.4	52.0	68.3	25.5	36.4
MgO	0.13	0.1	0.2	7.9	8.5
Alkali	2.8	3.2	1.9	3.1	1.3

2) มัลไลต์พอร์ซเลน (Mullite Porcelain)

เป็นพอร์ซเลนที่พัฒนาส่วนผสมให้เกิดมัลไลต์ (Mullite, $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$) เป็นองค์ประกอบหลัก^[26] ในโครงสร้างเนื้อเซรามิกมัลไลต์พอร์ซเลน^[27]

เนื้อเซรามิกมัลไลต์พอร์ซเลน เป็นเนื้อเซรามิกที่มีสมบัติในการทนต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิแบบฉับพลันได้ดีกว่าเนื้อเซรามิกพอร์ซเลนธรรมดาทั่วไป และเป็นตัวนำความร้อนได้ดี

การใช้งานสามารถใช้งานที่อุณหภูมิสูงกว่า 1500 °C โดยสมบัติไม่เปลี่ยนแปลง และสามารถทนต่อการกัดกร่อนของเหล็ก และกากโลหะหลอม (Slags) ได้ดี ซึ่งเนื้อเซรามิกชนิดนี้ได้พัฒนามาจากเนื้อเซรามิกอะลูมินาสูง แต่มีวัตถุดิบจำพวก ดินดำ ดินขาว ควอตซ์ และหินฟีนมัว อยู่ในส่วนผสม โดยมีควอตซ์ ต่ำกว่าร้อยละ 10-15 เนื่องจากต้องควบคุมไม่ให้มีซิลิกาอิสระ ในเนื้อเซรามิกหลังเผา ไม่ว่าจะอยู่ในรูปของควอตซ์ คริสโตบาไลต์ หรือทริไลไมท์ นอกจากนี้จะเป็นอะลูมินา ที่อยู่ในรูปของซิลิมาไนท์ อะลูมิเนียมออกไซด์ หรือ ดินดำที่ผ่านการเผาแล้ว ซึ่งวัตถุดิบที่ใช้ต้องผ่านกระบวนการเตรียมอย่างดีนั้นคือ

1. ควอตซ์ต้องบด และผ่านตะแกรงกรองขนาด 200 - 250 เมช
2. ซิลิมาไนท์ และ อะลูมินา บด 120 ชั่วโมงในหม้อบดที่บุด้วยยาง (Rubber-lined Mills) ใช้ลูกบดชนิดอะลูมินาเผา (Sinter Alumina) หรือชนิดมัลไลต์พอร์ซเลน บดให้มีขนาดอนุภาคเล็กกว่า 6 ไมโครเมตร (μm)
3. ดินจะต้องบด ล้าง และแยกเหล็กออก อีกทั้งต้องผ่านการหมักนานกว่า 6 เดือน
4. วัตถุดิบอาจเพิ่มสเตียไทท์ ช่วยเป็นตัวลดอุณหภูมิการหลอม และเพิ่มแมกนีเซียมออกไซด์ ช่วยให้เกิดผลึกมัลไลต์

ตารางที่ 2.2 อัตราส่วนผสมของเนื้อเซรามิกมัลติโพรซเลน (ร้อยละโดยน้ำหนัก)

ที่	โคน	อะลูมินา	ดินขาว	ดินดำ	ดินเชื้อ	หินฟันม้า	สเต็มไทท์	อื่นๆ
1	10	Sillim. 30	-	55	-	-	-	-
2	18	-	50	-	50	15	-	Grog : Calc.A. 60 Feldspar 40
3	31/32	Cal A. 50	50	-	-	-	-	-
4	31-36	Cal A. 70	30	-	-	-	-	-
5	18	Cal A. 46.5	52	-	-	15	-	-
6	18	fused A 50	50	-	-	-	-	-
7	18	fused A 60	40	-	-	-	-	-
8	26/27	Kyan. 50	17	33	-	-	-	-
9	18	Cal A. 60	30	-	-	-	5	Dolomite 5
10	18	Cal A. 72	20	-	-	-	4	Dolomite 4
11	18	Cal A. 84	10	-	-	-	3	Dolomite 3

3) พอร์ซเลนอะลูมินาสูง (High Alumina Porcelain)

เซรามิกไวท์แวร์ที่มีผลึกของอะลูมินา (Alumina, Al_2O_3) ในส่วนผสม (Mixture)

สูง ใช้ในงานทางด้านเทคนิค (ASTM C 242)^[28]

เนื้อเซรามิกอะลูมินาสูง^[29]

เป็นเนื้อเซรามิกที่มีอะลูมินา ในอัตราส่วนผสมสูงกว่าร้อยละ 80 โดยใช้อะลูมินาในรูปของอะลูมินาที่ผ่านการเผาแล้ว และถ้าในอัตราส่วนผสมมีอะลูมินามากกว่าร้อยละ 92 จะเรียกว่า เนื้อเซรามิกซินเตอร์อะลูมินา (Sinter Alumina) และจัดอยู่ในพวกเนื้อเซรามิกจากออกไซด์ชนิดเดียว (Pure Oxide Bodies) นอกจากอะลูมินาแล้ว ในเนื้อเซรามิกอะลูมินาสูงจะประกอบด้วยวัตถุดิบอื่น ร้อยละ 8-16 ซึ่งได้แก่ หินสบู่ หินโคโลไมต์ หินปูน แบเรียมคาร์บอเนต ฟลูออรัสปาร์ (Fluorspar) โครเมียมออกไซด์ (Chromium Oxide, Cr_2O_3) เบอริลเลียม ซิลิเกต (Beryllium Silicate) และดิน แต่ ถ้าเป็นเนื้อเซรามิกซินเตอร์อะลูมินา จะมีวัตถุดิบอื่น ร้อยละ 1-3 คือโครเมียมออกไซด์ หรือ แมกนีเซียม ฟลูออไรด์ (Magnesium Fluoride, MgF_2) และตัวยึดเกาะได้แก่ เบนโทไนด์ หรือ สารอินทรีย์ต่าง ๆ (Organic Binders) เนื้อเซรามิกอะลูมินาสูง จะมีความแข็งแรงสูง รวมทั้งมีความ

แข็งสูง (Hardness) มีสมบัติคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงจนถึงอุณหภูมิ 2000 °C จึงใช้ในงานวิศวกรรม โดยนิยมใช้ทำผลิตภัณฑ์จำพวกเครื่องมือตัด ท่อหัวตัววัดอุณหภูมิ ถ้วยหลอม ลูกบิด ท่อพ่นทราย (Nozzles for Sandblasting Machines) ก่อนการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์จะต้องเตรียมวัตถุดิบ โดยเฉพาะอะลูมินาต้องผ่านการบดในหม้อเหล็ก (Steel Mill) หรือหม้อบดอะลูมินา บดนาน 50-75 ชั่วโมง ให้มีอนุภาค 12-15 μm และมีอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่า 5 μm ต่ำกว่าร้อยละ 65

ตารางที่ 2.3 อัตราส่วนผสมของเนื้อเซรามิกอะลูมินาสูง (ร้อยละโดยน้ำหนัก)

ที่	อะลูมินา	ดินขาว	หินสบู	อื่นๆ
1	(อะลูมินาเผา) 84	-	8	(โคโลไมต์) 8
2	(อะลูมินาเผา) 92.25	3.5	1.25	(ฟลูออรีสปาร์) 2 (โครเมียมออกไซด์) 1.0
3	(อะลูมินาเผา) 92.04	3.5	1.25	(หินปูน) 0.44 (แบเรียมคาร์บอเนต) 0.89 (โครเมียมออกไซด์) 1.0 (เบอร์รี่เรียม ซิลิเกต) 0.88
4	(อะลูมิเนียมออกไซด์) 95	-	1.5	(เซอร์โคเนียมไดออกไซด์ มีความ แข็งแรงกว่าเนื้อเซรามิกที่มีอะลูมินา ร้อยละ 100) 3.5

ตารางที่ 2.4 สมบัติของเซรามิกเนื้ออะลูมินาสูง

สมบัติ	ปริมาณอะลูมินาในส่วนผสม (%)		
	85	95	99.5
ความถ่วงจำเพาะ	3.4-3.5	3.6-3.8	3.8-3.97
การดูดซึมน้ำ (%)	0.00-0.02	0.00	0.00
อุณหภูมิการใช้งาน (°C)	1300-1500	1600-1700	1950
สัมประสิทธิ์การหด-ขยายตัวเมื่อได้รับความร้อน (Coefficient of Expansion ; 25-1000 °C)	$7.7-7.8 \times 10^{-6}$	$8.5-9.0 \times 10^{-6}$	8.4×10^{-6}

ตารางที่ 2.5 สมบัติของเซรามิกเนื้ออะลูมินาสูง^[30]

สมบัติ	Value in SI Unit		Value in US Unit	
	Value	Unit	Value	Unit
Density	2.45×10^3	kg/m^3	153.0	lb/ft^3
Flexural Strength	40	MPa	5800	psi
Compressive Strength	450	MPa	65300	psi
Thermal Expansion (20 °C)	5.2×10^{-6}	$^{\circ}\text{C}^{-1}$	2.9×10^{-6}	$\text{in}/(\text{in}^{\circ}\text{F})$
Thermal Conductivity	1.9	$\text{W}/(\text{m}^{\circ}\text{K})$	13.2	$\text{BTU}^{\circ}\text{in}/(\text{hr}^{\circ}\text{ft}^2^{\circ}\text{F})$
Dielectric Constant	6	-	6	-



รูปที่ 2.3 ผลิตภัณฑ์ประเภทอะลูมินาพอร์ซเลนสำหรับทำจนวนไฟฟ้าแบบต่างๆ^[30]



รูปที่ 2.4 ผลิตภัณฑ์ประเภทอะลูมินาพอร์ซเลนสำหรับทำ Sealing Ring^[30]



รูปที่ 2.5 ผลิตภัณฑ์ประเภทอะลูมินาพอร์ซเลนสำหรับทำ Ceramic Plate^[30]

4) เซอร์คอนพอร์ซเลน (Zircon Porcelain)

ผลิตภัณฑ์ไวท์แวร์ที่มีเซอร์คอน (Zircon, $\text{ZrO}_2 \cdot \text{SiO}_2$) เป็นวัตถุดิบในส่วนผสมและมีผลึกเซอร์คอนเป็นองค์ประกอบหลักในโครงสร้าง (ASTM C 242)^[31]

เซอร์คอนเป็นสารประกอบของเซอร์โคเนียมซิลิเกต (ZrSiO_4) พบตามธรรมชาติในรูปของทรายเซอร์คอน เซอร์คอนใช้ประโยชน์อย่างกว้างขวางในงานทางด้านวัสดุทนไฟ

เซอร์โคเนีย หรือเซอร์โคเนียออกไซด์ (ZrO_2) เป็นสารประกอบประเภททนไฟของเซอร์โคเนียมและออกซิเจน และอาจจะมียึดประกอบอื่นด้วย เช่น แคลเซียม (Calcium) แมกนีเซียม หรือแบเรียม (Magnesia or Baria) ในโครงสร้างแบบลูกบาศก์ (Cubic) เพื่อปรับปรุงลักษณะทางด้านไดอิเล็กทริก

การมีเซอร์โคเนียในโครงสร้างจะทำให้ลดการแตกร้าวและช่วยเพิ่มความแข็งแรงเชิงกลในระหว่างการให้ความร้อนและการเย็นตัว ภายใต้แรงกระทำจากภายนอก วัสดุเซอร์โคเนียจะมีความสามารถในการเปลี่ยนรูปแบบของโครงสร้างผลึกจากเตตระโกนอลไปเป็นโมนอกลิติกได้ (Tetragonal to Monoclinic Phase Change) และถูกใช้ในงานที่ต้องการปรับปรุงความเหนียวจากการแตกหักของวัสดุ (Fracture Toughness) และมีความแข็งแรงกระด้างมากกว่าอะลูมินาสามารถใช้แทนอะลูมินาได้ เพราะมีสมบัติเหนียวต่อสารเคมีและทนการกัดกร่อนที่อุณหภูมิสูงกว่าจุดหลอมเหลวของอะลูมินาได้อย่างดี และราคาถูกกว่าอะลูมินามาก นอกจากนั้นยังมีการนำความร้อนต่ำ และเป็นตัวนำไฟฟ้าที่อุณหภูมิสูงกว่า 800°C ใช้ในการผลิตตัวจับออกซิเจน (Oxygen Sensors) หรือผนังกั้นเซลล์เชื้อเพลิง (Fuel Cell Membranes) เนื่องจากมีความสามารถในการส่งผ่านออกซิเจนไอออนได้อย่างอิสระที่อุณหภูมิสูงกว่า 600°C ^[32]

ผลิตภัณฑ์ประเภทเซอร์โคเนียไม่ควรนำมาใช้งานร่วมกับอะลูมินาที่อุณหภูมิสูงกว่า 1600 °C ส่วนการนำมาผลิต Refractory Tubes, Industrial Crucibles, Analytical Labware, Sensors, Wear Components, Refractory Cements, Thermocouple Protection Tubes, Furnace Muffles, Liners และ High Temperature Heating Element Supports นั้น ขึ้นอยู่กับความบริสุทธิ์และความหนาแน่นของเซอร์โคเนียที่ใช้ในตัวทนไฟด้วย^[33]

เนื้อเซรามิกเซอร์คอน^[34]

เนื้อเซรามิกเซอร์คอน เป็นเนื้อเซรามิกที่มีวัตถุดิบหลักคือ แร่เซอร์คอน ผลิตภัณฑ์ที่นิยมผลิตจากเนื้อเซรามิกเซอร์คอน ได้แก่ ชิ้นส่วนของเครื่องยนต์ไอพ่นและจรวด ด้วยหลอมโลหะที่อุณหภูมิสูง กระเบื้องทนไฟสำหรับใช้ในห้องปฏิบัติการ อิฐทนไฟสำหรับเตาหลอมโลหะ ฉนวนกันไฟฟ้าแรงสูง วัสดุสำหรับทำไส้ตะเกียงก๊าซ ชิ้นส่วนของหัวเทียนรถยนต์และส่วนประกอบอิเล็กทรอนิกส์อื่นๆ เป็นต้น ทั้งนี้เนื่องจากเนื้อเซรามิกเซอร์คอน มีสมบัติเด่นหลายประการคือ สามารถทนความร้อนได้สูงถึง 2400 °C ทั้งในบรรยากาศเผาไหม้แบบสมบูรณ์ (Oxidation) และบรรยากาศเผาไหม้แบบไม่สมบูรณ์ (Reduction) ไม่นำไฟฟ้า ทนต่อการกัดกร่อนของสารเคมีได้อย่างดี ซึ่งเนื้อเซรามิกเซอร์คอน มีสมบัติแตกต่างกันไปตามปริมาณของแร่เซอร์คอนในส่วนผสม ได้แก่

1. เนื้อเซรามิกเซอร์คอนพอร์ซเลน (Zircon Porcelain) จะมีแร่เซอร์คอนในส่วนผสมมากกว่าร้อยละ 50 เซอร์โคเนียมีสมบัติทนความร้อนมากกว่าร้อยละ 30 และดินต่ำกว่าร้อยละ 30 ซึ่งเนื้อเซรามิกเซอร์คอนพอร์ซเลน นิยมใช้ทำวัสดุกรูหม้อบด ท่อพ่นทราย เป็นต้น หลังเผามีสีขาวหรือสีครีม แต่ถ้ามีเฟอร์ริกออกไซด์ และไทเทเนียมไดออกไซด์ เป็นมลทินในส่วนผสม อาจจะเป็นสีน้ำตาลแดง จนถึงสีเทาได้

2. เนื้อเซรามิกซินเตอร์เซอร์คอน (Sinter Zircon) ได้จากการนำเซอร์โคเนียไดออกไซด์มาเผาพร้อมกับออกไซด์ ของแมกนีเซียม หรือแคลเซียม โดยใช้ตัวยัดเกาะคืออลูมิเนียมคลอไรด์ (Aluminium Chloride) แมกนีเซียมคลอไรด์ (Magnesium Chloride) เซอร์โคเนียไฮดรอกไซด์ (Zirconium Hydroxide) เซอร์โคเนียคลอไรด์ (Zirconium Chloride) เดกซ์ตริน (Dextrin) และแป้ง (Starch) นอกจากนี้ การเติมเฟอร์ริกออกไซด์ (Fe_2O_3) ร้อยละ 1-4 ช่วยให้สามารถเผาเนื้อเซรามิกที่อุณหภูมิต่ำกว่า 1700 °C แต่ถ้าเป็นเนื้อเซรามิกที่ใช้ทำอิฐทนไฟ สำหรับใช้ในเตาหลอมโลหะที่อุณหภูมิสูง เช่น การหลอมทองคำขาวที่อุณหภูมิ 1900 °C เนื้อเซรามิกจะผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) ร้อยละ 0.2-1.0 จะทำให้ผลิตภัณฑ์ทนความร้อนได้สูงขึ้น หากใช้เนื้อเซรามิกซินเตอร์เซอร์คอนสำหรับทำอิฐทนไฟในเตาหลอมแก้ว การเติมอะลูมินา หรือ ฟอสฟอรัสเพนทอกไซด์ (Phosphorus Pentoxide, P_2O_5) เล็กน้อย จะช่วยให้เนื้อเซรามิกทนต่อการกัดกร่อนของแก้วได้ และมีอายุการใช้งานนานขึ้น

ตารางที่ 2.6 อัตราส่วนผสมของเนื้อเซรามิกเซอร์คอนพอร์ซเลน (ร้อยละโดยน้ำหนัก)

ที่	โคน	ดินดำ	แร่เซอร์คอน	แคลเซียมเซอร์โคเนียม ซิลิเกต	หินฟันม้า	หินสบู่
1	10-12	2	66.7	22.2	-	-
2	10-12	11.1	68.5	22.6	-	-
3	10-12	8.9	59.2	29.6	-	-
4	12	25	300 #55	-	13	2

การเตรียมวัตถุดิบในอัตราส่วนผสมของเนื้อเซรามิกเซอร์คอน เมื่อได้อัตราส่วนผสมตามที่กำหนดแล้ว นำมาบดให้ละเอียด และเตรียมเนื้อเซรามิกให้เหมาะสมสำหรับวิธีการขึ้นรูป หากขึ้นรูปด้วยการรีด จะใช้กรดผสมในอัตราส่วนผสม เพื่อช่วยในการขึ้นรูป แต่ถ้าเป็นการขึ้นรูปด้วยการอัดจะเติมน้ำ และสามารถใช้ได้ทั้งการขึ้นรูปด้วยการอัดแห้ง โดยใช้แรงอัด 422 kg/cm^2 หรือใช้การอัดด้วยความร้อน (Hot Pressing) นอกจากนี้ถ้าต้องการขึ้นรูปโดยการหล่อแบบ จะใช้น้ำร้อยละ 80 ผสมด้วยยีสต์เกาะ และปรับให้น้ำดินมีค่า pH 2 ส่วนการเผาขึ้น ที่อุณหภูมิ $1700-1750^\circ\text{C}$ เนื้อเซรามิกยังมีรูพรุนอยู่เล็กน้อย แต่ที่ 1800°C รูพรุนจะหมดไป จึงควรเผาช่วงนี้ช้า โดยการเผาแช่ไว้นาน 10 นาที หลังเผาผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีความแข็งแรงมากกว่าเนื้อเซรามิกซิลิกอนไนไตรด์ (Silicon Nitride, Si_3N_4) ถึง 1.5 เท่า มีความเหนียวมากกว่าเนื้อเซรามิกอะลูมินาสูง ถึง 3 เท่า จึงอาจกล่าวได้ว่าเนื้อเซรามิกเซอร์คอน สามารถใช้เป็นวัสดุแทนโลหะได้ เมื่อเทียบสมบัติบางประการกับเหล็กแล้ว เนื้อเซรามิกเซอร์คอน มีความแข็งแรงกว่าเหล็กไร้สนิม 5.7 เท่า สามารถทนการขัดสีได้ดีเยี่ยม และมีสมบัติหล่อขึ้นได้โดยไม่ต้องใช้น้ำมัน หรือสารหล่อลื่นอื่นใด ดังนั้นถ้ามีการเตรียมวัตถุดิบให้มีขนาดอนุภาคเล็กมาก คือประมาณ $1.2-1.3 \mu\text{m}$ และเผาด้วยความระมัดระวัง จะได้เนื้อวัสดุที่มีความหนาแน่นสูง ซึ่งสามารถนำไปใช้ทำไบมิดเซรามิกหรือกรรไกรเซรามิกได้ โดยผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีอายุการใช้งานที่นานกว่าเหล็ก และไม่เป็นสนิม นอกจากนี้ยังทนต่อสารเคมีทั้งกรดและด่างได้ดี มีน้ำหนักเบากว่าเหล็ก จึงเหมาะสมที่จะใช้เป็นวัสดุสำหรับทำเครื่องมือใช้งานเคมีและงานทันตกรรมได้

ลักษณะของผลิตภัณฑ์ประเภทเซอร์คอนพอร์ซเลน

ความหนาแน่นสูง แข็ง มีความทนแรงดัดและความเหนียวดี ทนต่อการขัดถู ทนต่อการกัด-ด่าง ส่วนมากใช้ในงานทางอิเล็กทรอนิกส์ ไฟฟ้า เซเมนต์ และอุตสาหกรรมสิ่งทอ



รูปที่ 2.6 ผลิตภัณฑ์ประเภทเซอ์คอนพอร์ซเลน^[35]

5) คอर्डีไรท์พอร์ซเลน (Cordierite Porcelain)

ผลิตภัณฑ์ไวท์แวร์ที่ใช้งานในทางเทคนิคซึ่งเนื้อเซรามิกประกอบด้วยผลึกของคอर्डีไรท์ ($2\text{MgO} \cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{SiO}_2$) เป็นองค์ประกอบหลัก (ASTM C 242)^[36]



รูปที่ 2.7 ผลิตภัณฑ์ประเภทคอर्डีไรท์พอร์ซเลน (Cordierite Porcelain)^[37]

ตารางที่ 2.7 สมบัติของเซรามิกเนื้อคอร์เดียไรท์

สมบัติ	Value in CI unit		Value in US unit	
	Value	Unit	Value	Unit
Density	2.1×10^3	kg/m^3	131.1	lb/ft^3
Flexural Strength	60	MPa	8700	psi
Thermal Expansion (20 °C)	2.0×10^{-6}	$^{\circ}\text{C}^{-1}$	1.1×10^{-6}	$\text{in}/(\text{in}^{\circ}\text{F})$
Thermal Conductivity	2.0	$\text{W}/(\text{m}^{\circ}\text{K})$	13.9	$\text{BTU}^{\circ}\text{in}/(\text{hr}^{\circ}\text{ft}^2^{\circ}\text{F})$
Dielectric Constant	6	-	6	-

คอร์เดียไรท์ ($2\text{MgO} \cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{SiO}_2$) หรือคอร์เดียไรท์พอร์ซเลน เป็นสารประกอบแมกนีเซียมอะลูมิเนียมซิลิเกต (Magnesium Aluminum Silicate) ที่ได้จากการหลอมของทัลค์ (Talc) ดิน (Clay) อะลูมินัมออกไซด์ (Aluminum Oxide) สารตั้งต้นของคอร์เดียไรท์ และแร่คอร์เดียไรท์ คือ แมกนีเซียมอะลูมิโนซิลิเกต (Magnesium-Alumino Silicate) ไดคโครไรท์ (Dichroite) และ ไอโอไลท์ (Iolite) คอร์เดียไรท์มีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องด้วยความร้อนต่ำ มีความแข็งแรงเชิงกลสูง ค่าไดอิเล็กทริกต่ำ เนื่องจากคอร์เดียไรท์มีสมบัติที่ดีทางด้านไดอิเล็กทริกจึงนิยมนำมาผลิตเป็นฉนวนไฟฟ้า (Insulator) หรือแผ่นฉนวนไฟฟ้า (Insulating Substrate) นอกจากนั้นยังมีความสามารถต้านทานการเปลี่ยนแปลงความร้อนแบบฉับพลันสูง (Thermal Shock Resistance) และ คอร์เดียไรท์ที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิสูง สามารถทนอุณหภูมิได้ตั้งแต่ 70-1800 °C ภายในเวลา 80 วินาที ภายใต้บรรยากาศของอุณหภูมิห้อง^[37]

6) สเตียไทท์พอร์ซเลน (Steatite Porcelain)

ผลิตภัณฑ์ไวท์แวร์ที่ใช้งานทางเทคนิค ซึ่งประกอบด้วยผลึกของแมกนีเซียม เมตาซิลิเกต ($\text{MgO} \cdot \text{SiO}_2$) เป็นองค์ประกอบหลักในโครงสร้าง (ASTM C 242)^[38] สเตียไทท์ หรือ สเตียไทท์พอร์ซเลน มีองค์ประกอบพื้นฐานเป็นไฮดรตแมกนีเซียมซิลิเกต ($3\text{MgO} \cdot 4\text{SiO}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$) ซึ่งมีองค์ประกอบเช่นเดียวกับหินสบู่ (Soapstone) หรือแร่ทัลค์ (Mineral Talc) และมีอะลูมินา แคลเซียม และเฟอรัสออกไซด์ รวมอยู่ด้วย นิยมใช้งานในทางไฟฟ้าและความถี่สูง ต้านทานความร้อน เป็นฉนวนไฟฟ้า เนื่องจากสเตียไทท์มีราคาไม่แพง ความทนไฟและความต้านทานไฟฟ้าสูงที่อุณหภูมิสูง

ตารางที่ 2.8 สมบัติของเซรามิกเนื้อสเดียไทท์

สมบัติ	Value in CI unit		Value in US unit	
	Value	Unit	Value	Unit
Density	2.7×10^3	kg/m^3	168.5	lb/ft^3
Modulus of Elasticity	110	GPa	15950	Ksi
Flexural Strength	140	MPa	20300	Psi
Compressive Strength	900	MPa	130500	Psi
Thermal Expansion (20°C)	7.0×10^{-6}	$^\circ\text{C}^{-1}$	3.9×10^{-6}	$\text{in}/(\text{in}^\circ\text{F})$
Thermal Conductivity	2.5	$\text{W}/(\text{m}^\circ\text{K})$	17.3	$\text{BTU}^\circ\text{in}/(\text{hr}^\circ\text{ft}^2^\circ\text{F})$
Dielectric Constant	6	-	6	-

รูปที่ 2.9 ผลิตภัณฑ์ประเภทสเดียไทท์พอร์ซเลน Lamp Base and Lamp Ceramic^[39]

สเดียไทท์และแร่สเดียไทท์ รู้จักกันในชื่อของหินสบู่ (Soapstone) แมสซีฟทัลค์ (Massive Talc) บล็อกสเดียไทท์ (Block Steatite) หินสบู่ซิลิเกต (Soapstone Silicate) สเดียไทท์เป็นต้นแบบสำหรับการใช้งานความถี่สูง มีการสูญเสียต่ำ และเป็นฉนวนไฟฟ้าแรงสูง (High Voltage Insulation) มีความแข็งแรงเชิงกลที่ดี มีการสูญเสียทางไฟฟ้าต่ำ เป็นต้นแบบของตัวต้านทาน (Resistor) ตัวเผาไหม้ (Igniters) Standoffs, Surge Arrestors, Coil Forms, Spacers, Spark Plugs เป็นต้น สเดียไทท์สามารถผลิตได้ง่าย มีความทนใกล้เคียงกับฉนวนไฟฟ้าอะลูมินา และมีราคาถูกกว่า^[39]

7) พอร์สเทอไรท์ฟอร์ซเลน (Forsterite Porcelain)

ผลิตภัณฑ์ไวท์แวร์ที่ใช้งานในทางเทคนิคซึ่งเนื้อเซรามิกประกอบด้วยผลึกของพอร์สเทอไรท์ ($2\text{MgO} \cdot \text{SiO}_2$) เป็นองค์ประกอบหลัก (ASTM C 242)^[40]

พอร์สเทอไรท์เป็นสารประกอบแมกนีเซียมออกซิไดด์ (Mg_2SiO_4) ผลิตขึ้นเพื่อใช้งานที่ต้องการค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องด้วยความร้อนสูง พอร์สเทอไรท์มีสมบัติเป็นฉนวนไฟฟ้าตามที่ต้องการ และใช้เป็นแผ่นกั้นบน Transformer Steel Sheets ซึ่งแผ่นกั้นนั้นขึ้นรูปจากปฏิกิริยาของแมกนีเซียมออกไซด์ (Magnesium Oxide) กับซิลิกอน ระหว่างการเย็นตัว และนอกจากนั้นยังใช้เป็นฉนวนไฟฟ้าสำหรับใช้ในเครื่องไมโครเวฟได้ด้วย^[41]

8) ไทเทเนียพอร์ซเลน (Titania Porcelain)

ผลิตภัณฑ์ไวท์แวร์ที่ใช้งานในทางเทคนิคซึ่งเนื้อเซรามิกประกอบด้วยผลึกของไทเทเนีย (TiO_2) เป็นองค์ประกอบหลัก (ASTM C 242)^[42]

ไททานีหรือแร่รูไทล์ เป็นสารประกอบที่ประกอบด้วยไทเทเนียม และออกซิเจน ไททานีต์ พร้อมด้วยธาตุอื่นๆ อีก ได้แก่ แบเรียม (Ba) อะลูมิเนียม (Al) สตรอนเชียม (Sr) และแคลเซียม (Ca) ตัวอย่างสารประกอบไททานีต์ เช่น BaTiO_3 สารประกอบไทเทเนียและสารประกอบไททานีต์มักใช้ในงานประเภทตัวทนไฟ ไดอิเล็กทริก (Dielectric) และพิโซอิเล็กทริก (Piezoelectric) เป็นต้น^[43]

(2) แบ่งตามลักษณะการใช้งาน^[44] ดังนี้ คือ

1) ฮาร์ดพอร์ซเลน (Hard Porcelain)^[22]

เป็นเนื้อดินขาว โปร่งแสงในยุคแรกของจีน ซึ่งเผาเนื้อดินและเคลือบให้สุกตัวพร้อมกันในอุณหภูมิสูงประมาณ 1350°C มีความแข็งแรงสูงกว่าพอร์ซเลนที่เผาที่อุณหภูมิต่ำ ผิวของเคลือบลื่นมือ ไม่มันวาวมาก คุณภาพของผลิตภัณฑ์แข็งแรง ทนทาน และมีความสวยงาม จึงเป็นที่นิยมของชาวยุโรปทางตอนเหนือ เช่น เยอรมัน ออสเตรีย นอร์เวย์ สวีเดน และเดนมาร์ก

ในยุโรปและอเมริกา นิยมใช้เนื้อดินฮาร์ดพอร์ซเลนในการผลิตอุปกรณ์เครื่องมือทางเคมี และใช้ในหัตถ์ปฏิบัติการต่างๆ มากกว่าใช้ในการผลิตถ้วยชาม ส่วนใหญ่เครื่องถ้วยชามพอร์ซเลนอุณหภูมิสูงจะถูกผลิตในประเทศญี่ปุ่น และส่งออกเป็นจำนวนมาก เนื่องจากเนื้อดินมีความแข็งแรงสูง ทนทานต่อการใช้งาน แต่ในการเผาที่อุณหภูมิสูงเนื้อดินจะเกิดการหดตัวมาก การควบคุมขนาดหลังการเผาของชิ้นงานต้องใช้ความชำนาญสูง

ตารางที่ 2.9 ส่วนผสมของเนื้อดินฮาร์ดพอร์ซเลนที่เผาที่อุณหภูมิต่างๆ

วัตถุดิบ (%)	อุณหภูมิในการเผา (°C)			
	1388	1424	1455	1455
ดินขาว	53	40	46	50
ดินดำ	5	-	-	-
ควอตซ์	34	29	21	24
หินฟันม้า	18	20	16	27
ผลิตภัณฑ์เผาดิบ	-	-	-	5

ส่วนผสมของเนื้อดิน

ส่วนผสมของฮาร์ดพอร์ซเลน ใช้วัตถุดิบเพียง 3 ชนิด ได้แก่ ดินขาวร้อยละ 50 ควอตซ์ร้อยละ 25 และหินฟันม้าร้อยละ 25 ในเนื้อพอร์ซเลนไม่นิยมใช้ดินดำเพื่อเพิ่มความเหนียว เพราะจะทำให้ความขาวและความโปร่งแสงของเนื้อดินลดลง ทำให้ผลิตภัณฑ์ระหว่างตากแห้งมีความแข็งแรงน้อย การเพิ่มตัวหลอมละลายจะทำให้เนื้อดินมีความโปร่งแสงมากขึ้น ผลิตภัณฑ์ฮาร์ดพอร์ซเลนโดยทั่วไป ได้แก่ ผลิตภัณฑ์ Table Ware, Art Ware และ Chemical Ware เป็นต้น

ตารางที่ 2.10 องค์ประกอบทางเคมีของเนื้อดินฮาร์ดพอร์ซเลนของประเทศต่างๆ

องค์ประกอบทางเคมี (%)	เนื้อดินฮาร์ดพอร์ซเลนของประเทศ				
	ฝรั่งเศส (Limoges)	ฝรั่งเศส (Sevres)	จีน	เยอรมัน (Berlin)	เยอรมัน (Nymphenburg)
ซิลิกา	70.2	70.8	0.5	66.6	72.8
อะลูมินา	24.0	22.6	0.7	28.0	18.4
เฟอร์ริก	0.7	-	0.8	0.7	2.5
แคลเซียม	0.7	1.1	0.5	0.3	3.3
แมกนีเซียม	0.1	0.5	0.1	0.6	0.3
โพแทสเซียม	4.3	2.3	-	3.4	0.7
โซเดียม	-	2.1	0.9	-	1.8

2) ซอฟท์พอร์ซเลน (Soft Porcelain)

เป็นผลิตภัณฑ์ที่มีเนื้อบาง แน่น โปร่งแสง แต่มีความแข็งแรงน้อยกว่าฮาร์ดพอร์ซเลน เนื่องจากการเผาที่อุณหภูมิต่ำ คือ อุณหภูมิไม่เกิน 1350°C นิยมนำมาทำผลิตภัณฑ์ Gift Ware, Table Ware เป็นต้น ปัจจุบันได้มีการนำมาประยุกต์ทำเป็นกระเบื้องเนื้อพอร์ซเลน เนื่องจากเนื้อพอร์ซเลนมีค่าความพรุนต่ำเข้าใกล้ศูนย์ แต่มักต้องการความโปร่งแสงจำนวนหนึ่ง

ซอฟท์พอร์ซเลน (Soft Porcelain) แบ่งออกเป็น^[22]

1. โบนไชน่า (Bone China)

ในคริสต์ศตวรรษที่ 18 อังกฤษเป็นประเทศแรกที่ผลิตพอร์ซเลนอุณหภูมิต่ำโดยใช้ดินขาว แก้ว ทราช และโพแทสเซียมคาร์บอเนตเป็นวัตถุดิบ เมื่อ พ.ศ. 2303 ได้มีผู้คิดค้นนำเถ้ากระดูกมาผสมในเนื้อดินขาว จนกระทั่งในปี พ.ศ. 2337 ซึ่งถือได้ว่าประเทศอังกฤษเป็นต้นกำเนิดของเนื้อดินโบนไชน่าที่มีสีขาว โปร่งแสง มีความสวยงาม เมื่อโจเซีย สโปด (Josiah Spode) ได้จัดตั้งโรงงานผลิตโบนไชน่า เป็นอุตสาหกรรมด้วยขนาดใหญ่อันจนถึงปัจจุบัน และมีหลายประเทศได้ทำการผลิตโบนไชน่าแข่งขันกับประเทศอังกฤษ

โบนไชน่า เป็นผลิตภัณฑ์เครื่องปั้นดินเผาประเภทถ้วยชาม มีคุณสมบัติพิเศษ คือ เนื้อดินมีความบาง มีความโปร่งแสงคล้ายแก้ว มีสีขาวบริสุทธิ์ เมื่อเคาะจะมีเสียงดังกังวานคล้ายระฆัง มีความแข็งแรงมาก

ส่วนผสมของเนื้อดิน

โดยทั่วไปประกอบด้วย เถ้ากระดูกร้อยละ 50 ดินขาวร้อยละ 25 และหินฟันม้าร้อยละ 25 ซึ่งแต่ละชนิดต้องมีความขาวบริสุทธิ์ภายหลังการเผา หากมีสิ่งเจือปนจะทำให้เนื้อดินมีสีคล้ำหลังการเผา บางครั้งมีการเติมดินดำ (Ball Clay) เพื่อเพิ่มความเหนียว แต่ถ้าใส่ในปริมาณมากจะทำให้ผลิตภัณฑ์ไม่ขาวและมีความโปร่งแสงต่ำ ดังนั้นจึงเลือกใช้วัตถุดิบที่มีความเหนียวแต่ไม่ให้สี เช่น ดินเบนโตไนท์ หรือกาโอลินทรีย์บางชนิด

วัตถุดิบ^[45]

1. ดินขาว ควรมีความละเอียดที่เหมาะสม ไม่มีเหล็ก (Fe) หรือไทเทเนียมออกไซด์ (TiO_2)
2. หินฟันม้า ควรเลือกที่มีความบริสุทธิ์สูง
3. เถ้ากระดูก ได้จากการนำกระดูกวัวมาทำความสะอาดด้วยไอน้ำ แล้วเผาที่ 1100°C แล้วบดผสมกับน้ำในหม้อบด แล้วจึงทำให้แห้ง เถ้ากระดูกต้องบดละเอียดจนมีขนาดเล็กกว่า $10\ \mu\text{m}$ ประมาณ 70-80 % ของเถ้ากระดูกทั้งหมด

ตารางที่ 2.11 ส่วนผสมของเนื้อดินบอนไซน้ำ

วัตถุดิบ (%)	สูตร 1	สูตร 2	สูตร 3
เถากระดุก	50	47	46.6
ดินขาว	25	30	28.7
หินสด (คอร์นิชสโตน)	25	-	24.1
หินฟืนม้า	-	14	-
ซิลิกา	-	8	-
ดินดำ	-	1	-
ดินเบนโตไนท์	-	-	0.6
กาว Gum Arabic	-	0.05	-

สูตร 1 เป็นเนื้อดินสูตรมาตรฐาน

2. พาเรียน (Parian ware)

ตารางที่ 2.12 ส่วนผสมของเนื้อดินพาเรียนแวร์ที่เผาที่อุณหภูมิต่างๆ ในบรรยากาศออกซิเดชัน

วัตถุดิบ (%)	อุณหภูมิในการเผา (°C)		
	1160-1170	1160-1170	1180-1200
คอร์นิชสโตน	3.47	-	-
ดินขาว	36	30	52
หินฟืนม้า	40	60	45
ซิลิกา	18	-	2
ดินดำ	-	10	-
หินปูน	-	-	1
โพแทสเซียม	2.53	-	-

เนื้อดินที่ใช้ทำผลิตภัณฑ์พาวรีน จัดเป็นฟริตพอร์ซเลนหรือพอร์ซเลนที่เผาที่อุณหภูมิต่ำ มีต้นกำเนิดในประเทศอังกฤษ โดย จอห์น กิบสัน (John Gibson) ประติมากรชาวอังกฤษได้ริเริ่มแกะสลักชิ้นงานต้นแบบจากปูนปลาสเตอร์ นำมาทำแบบพิมพ์ และขึ้นรูปด้วยวิธีการหล่อเนื้อดิน

ผลงานพาวรีนแวร์ได้รับอิทธิพลมาจากการแกะสลักหินอ่อน และพัฒนามาใช้กับอุตสาหกรรมเซรามิกในการผลิตด้วยเนื้อพอร์ซเลน ซึ่งมีสีขาว โปร่งแสง และมีผิวเรียบเนียนคล้ายหินอ่อน พาวรีนแวร์ เป็นผลิตภัณฑ์ประเภทรูปปั้นงานประติมากรรมสำหรับตั้งแสดงหรือประดับตกแต่งภายในบ้าน เนื้อดินมีลักษณะ โปร่งแสง มักขึ้นรูปด้วยวิธีการหล่อ ส่วนใหญ่จะเผาแกร่งโดยไม่มีเคลือบ เพราะต้องการให้เห็นเนื้อดินที่มีสีขาวโปร่ง แต่บางครั้งมีการพ่นเคลือบใสบางๆ ได้รับความนิยมในปลายคริสต์ศตวรรษที่ 19

3. โฮเต็ลไชน่า (Hotel China)

เป็นอุตสาหกรรมการผลิตถ้วยชามที่พัฒนาเพื่อต้องการความแข็งแรง สามารถใช้งานหนักตามร้านอาหาร โรงอาหาร หรือโรงแรมต่างๆ คำว่า ไชน่า (China) มีความหมายโดยรวม หมายถึงผลิตภัณฑ์ถ้วยชามที่มีเนื้อดินสีขาว โปร่งแสง เนื้อแกร่ง ไม่ดูดซึมน้ำ

ตารางที่ 2.13 ส่วนผสมของเนื้อดินโฮเต็ลไชน่าสำหรับผลิตถ้วยชามที่เผาที่อุณหภูมิต่างๆ

วัตถุดิบ (%)	อุณหภูมิในการเผา (°C)					
	1280	1280	1295	1320	1320	1320
ดินขาว	26	34	37	38.2	34	34
ดินดำ	9.5	9	8	6	7	9
ซิลิกา	35	37	35	36.3	22	19.5
หินฟันม้า	21	17	18	17.7	18	17
หินปูน	1.5	3	2	1.8	2	3
อะลูมินา	-	-	-	-	17	17.5

ส่วนผสมของเนื้อดิน

เนื้อดินโฮเต็ลไชน่าจะมีส่วนผสมของดินดำต่ำ เพื่อให้เนื้อดินหลังเผามีความขาว และบางครั้งจะเติมสีลงไป แต่จะทำความโปร่งแสงลดลง นิยมเผาที่อุณหภูมิ 1280-1300 °C เนื้อดินมีความ

แข็ง ดูดซึมน้ำไม่เกินร้อยละ 0.02 ในปัจจุบันนิยมใช้อะลูมินาแทนซิลิกา เพื่อให้มีความแข็งแรงมากขึ้น มีความบาง น้ำหนักเบา แต่ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีความโปร่งแสงลดลง

3) พอร์ซเลนไฟฟ้า (Electrical Porcelain)^[22, 46]

ผลิตภัณฑ์ประเภทพอร์ซเลนไฟฟ้า เริ่มมีการผลิตในสมัยศตวรรษที่ 20 ซึ่งการส่งกระแสไฟฟ้าแรงสูงในระยะทางไกลๆ เพิ่มมากขึ้น ทำให้ความต้องการทางด้าน High-tension Insulator เพิ่มมากขึ้น ซึ่งพวก High-tension Insulator นี้ นอกจากจะมีคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่ดีแล้ว จำเป็นที่จะต้องมีความแข็งแรงเชิงกลสูงด้วย เนื้อผลิตภัณฑ์ที่มีความเหนียวสำหรับการขึ้นรูปจะมีดินดำสูงถึงร้อยละ 30 ในขณะที่ผลิตภัณฑ์ที่ขึ้นรูปด้วยวิธีการหล่อแบบมีดินดำเพียงร้อยละ 20 ในเนื้อผลิตภัณฑ์จะมีหินฟันม้าโดยเฉลี่ยประมาณร้อยละ 35 เพื่อไม่ให้ความพรุนตัวในเนื้อผลิตภัณฑ์

ในปัจจุบัน การเผาผลิตภัณฑ์พวก High-tension Porcelain จะทำการเผาให้สุกในครั้งเดียว การทำให้ผลิตภัณฑ์มีความแข็งแรงสูงโดยการควบคุมขนาดอนุภาคของควอตซ์ให้อยู่ในช่วง 10 ถึง 30 ไมครอน แต่การผลิตในปัจจุบันได้ใช้อะลูมินา (Alumina) แทนควอตซ์ เพื่อเพิ่มความแข็งแรงขึ้นจากเดิมอีกร้อยละ 50-100

วัตถุนวนไฟฟ้า (Electrical Insulating Materials) เป็นวัตถุที่ไม่นำไฟฟ้า หรือนำไฟฟ้าได้ต่ำมาก ลักษณะของนวนไฟฟ้าที่ดีจะต้องมีความต้านทานมากกว่า 10^{21} เท่าของทองแดง เช่น อากาศ แก้ว น้ำมันพอร์ซเลน โพลีเอทิลีน เป็นต้น

พอร์ซเลนนวนไฟฟ้า (Electrical Porcelain Insulators) เป็นนวนไฟฟ้าที่ประกอบด้วยองค์ประกอบหลัก คือ ดินขาว ดินดำ ควอตซ์ หินฟันม้า และอื่นๆ สามารถเป็นนวนไฟฟ้าได้ดี และมีการใช้งานอย่างกว้างขวาง

พอร์ซเลนนวนไฟฟ้าแบ่งตามการใช้งานออกเป็น 2 ชนิด คือ

1. พอร์ซเลนนวนไฟฟ้าแรงสูง (High-tension Insulator)

พอร์ซเลนนวนไฟฟ้าแรงสูงเป็นเนื้อพอร์ซเลนที่เผาจนถึงจุดสุกตัว ไม่มีการดูดซึมน้ำ มีความแข็งแรง ทนทานต่อแรงกระแทกสูง มีค่าความทนไดอิเล็กทริก (Dielectric Strength) ระหว่าง 240-400 โวลต์ต่อมิลลิเมตร (Volt Per Millimeter, V/mm.) และลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น สภาพต้านทานไฟฟ้า (Resistivity) อยู่ในช่วง 10^{12} - 10^{14} โอห์ม-เซนติเมตร ($\Omega \cdot \text{cm}$) และอุณหภูมิที่ทำให้สภาพต้านทานไฟฟ้าลดลง 1 เมกกะโอห์ม-เซนติเมตร ($M\Omega \cdot \text{cm}$) อยู่ในช่วง 300-500 °C ถ้าไม่มีตัวช่วยหลอมละลาย อุณหภูมิที่ทำให้สภาพต้านทานไฟฟ้าลดลง 1 เมกกะโอห์ม-เซนติเมตร ($M\Omega \cdot \text{cm}$) จะเพิ่มขึ้นถึง 800 °C

อุปกรณ์ไฟฟ้าต่างๆ เพิ่งจะเริ่มมีการผลิตในต้นคริสต์ศตวรรษที่ 20 เนื่องจากการขยายเสาไฟฟ้าแรงสูงออกไปเพื่อส่งในระยะทางไกลๆ กระแสไฟฟ้าที่ส่งก็เพิ่มขึ้น จึงต้องใช้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณสมบัติเป็นฉนวนไฟฟ้าที่ดีขึ้น มีความแข็งแรงทนทานต่อการใช้งานของสายไฟฟ้าขนาดใหญ่ และทนต่อสภาพอากาศได้ดี

เนื้อดินพอร์ซเลนฉนวนไฟฟ้าแรงสูง

เนื้อดินที่ต้องใช้ความเหนียวในการขึ้นรูป เช่น การกลึงเป็นลูกถ้วยไฟฟ้า จะมีส่วนผสมของดินดำเนื้อละเอียดประมาณร้อยละ 30 เพื่อเพิ่มความเหนียว แต่เนื้อดินสำหรับการขึ้นรูปด้วยวิธีการหล่อ ไม่ต้องการความเหนียวมาก จะมีส่วนผสมของดินดำเพียงร้อยละ 20 หินฟันม้าร้อยละ 35 เพื่อช่วยให้เนื้อดินหลอมตัวเป็นเนื้อแก้วได้ดีและไม่มีการดูดซึมน้ำ อุปกรณ์ประเภทนี้ต้องมีค่าการดูดซึมน้ำเป็นศูนย์ เนื่องจากป้องกันการซึมของน้ำเข้าไปในอุปกรณ์ไฟฟ้า ซึ่งจะทำให้เกิดการลัดวงจรของกระแสไฟฟ้าได้ ถ้าต้องการเนื้อดินที่มีความแข็งแรงสูง จะต้องทำการควบคุมความละเอียดของควอตซ์หรือซิลิกาในเนื้อดิน ให้มีความละเอียดขนาด 10-30 ไมครอน ในปัจจุบันนิยมใช้อะลูมินาแทนควอตซ์ ซึ่งจะทำให้ความแข็งแรงของเนื้อผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้นอีกประมาณ 50-100 % เนื้อดินพอร์ซเลนฉนวนไฟฟ้าจะทำการเผาเพียงครั้งเดียวพร้อมเคลือบที่อุณหภูมิประมาณ 1280-1300 °C

ตารางที่ 2.14 เนื้อดินพอร์ซเลนสำหรับทำลูกถ้วยไฟฟ้าแรงสูง

วัตถุดิบ (%)	เนื้อพอร์ซเลนฉนวนไฟฟ้าแรงสูง	
	อะลูมินาสูง	อะลูมินาดำ
ดินขาว	15	20
ดินดำ	20	25
หินฟันม้า	25	35
อะลูมินา	40	20

2. พอร์ซเลนฉนวนไฟฟ้าแรงต่ำ (Low-tension Insulator)

พอร์ซเลนฉนวนไฟฟ้าแรงต่ำเป็นเนื้อพอร์ซเลนที่สุกตัวเกือบทั้งหมด ประกอบไปด้วยผลึกของมัลไลต์ (Mullite) และควอตซ์ (Quartz) มีค่าการดูดซึมน้ำ 0.5-2.0 % อาจจะเคลือบหรือไม่ก็ได้ มีความต่างศักย์ไฟฟ้าถึง 440 โวลต์ (Volt) ความทนไดอิเล็กทริก (Dielectric Strength) อยู่ในช่วง 40-100 โวลต์ต่อมิลลิเมตร (Volt Per Millimeter, V/mm.) และมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น สภาพต้านทานไฟฟ้าอยู่ในช่วง 10^{12} - 10^{14} โอห์ม-เซนติเมตร ($\Omega\cdot\text{cm}$) นิยมนำมาทำเป็นผลิตภัณฑ์หรือ

ชิ้นส่วนที่มีขนาดเล็ก ขึ้นรูปด้วยวิธีการอัดผงดิน และต้องทำการผลิตในปริมาณมากและให้ได้มาตรฐาน เพื่อนำไปประกอบและใช้งานกับอุปกรณ์ไฟฟ้าภายในบ้าน เช่น ฐานรองสวิตช์ไฟ ขั้วหลอดไฟ กล่องฟิวส์ และสะพานไฟ เป็นต้น

เนื้อดินพอร์ซเลนฉนวนไฟฟ้าแรงต่ำ

เนื้อดินเป็นแบบไตรแอกเซียล (Triaxial Porcelain) ประกอบด้วยวัตถุดิบหลัก 3 ชนิด คือ ดินขาว หินฟินม้า และควอตซ์ เเผาที่อุณหภูมิ 1280-1300 °C สมบัติของเนื้อผลิตภัณฑ์หลังเผาจะต้องมีความแข็งแกร่ง ไม่ดูดซึมน้ำ ลักษณะเนื้อดินคล้ายกับเนื้อดินพอร์ซเลนฉนวนไฟฟ้าแรงสูง แต่เตรียมโดยการนำผงดินมาพรมน้ำแล้วหมักทิ้งไว้เป็นเวลา 1 วัน เพื่อเพิ่มความเหนียวให้แก่เนื้อดิน การเตรียมดินในอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ จะนำส่วนผสมของดินที่บดละเอียดแล้ว มาทำให้แห้งเป็นผงโดยการพ่นละอองของน้ำดินในเครื่องสเปรย์ดรายเออร์ (Spray Drier) ให้ดินกลายเป็นผงละเอียดแล้วพรมน้ำให้มีความชื้นร้อยละ 8-12 อัตราความชื้นของเนื้อดินขึ้นอยู่กับขนาดและรูปทรงที่ซับซ้อนของชิ้นงาน ถ้ารูปทรงง่าย ดินที่ใช้ไม่จำเป็นต้องมีความเหนียวมาก สามารถผสมน้ำในอัตราส่วนที่น้อยลงได้

4) พอร์ซเลนทันตกรรม (Dental Porcelain)^[47]

บุคคลแรกที่คิดผงฟันพอร์ซเลน คือ Duchateau เมื่อ พ.ศ. 2317 แต่ไม่ประสบความสำเร็จในการผลิต เนื่องจากไม่สามารถแก้ปัญหาในการหดตัวและสีของเนื้อผลิตภัณฑ์ได้ แต่หลังจากได้รับความช่วยเหลือและร่วมมือกับ Nicholas Dubois de Chemant ก็สามารถผลิต ฟันพอร์ซเลนได้สำเร็จ เมื่อกิจการของ Duchateau ไม่สามารถดำเนินการต่อไปได้ Chemant จึงรับดำเนินงานต่อ และประสบความสำเร็จจนกระทั่งสามารถเสนอรายงานต่อ Royal Academy of Science ได้ในปี พ.ศ. 2332

ใน พ.ศ. 2351 Guiseangelo Fonzi ทันตแพทย์ชาวอิตาลี เป็นบุคคลแรกที่คิดผลิตฟันพอร์ซเลนซึ่งเรียกว่า ฟัน โดยมีเคลือบเคลือบด้านหลัง ต่อมา ในปี พ.ศ. 2360 A.A. Plantou ได้นำฟันพอร์ซเลนแบบต่างๆ ไปเผยแพร่ในสหรัฐอเมริกา และมีการผลิตเพื่อจำหน่ายมากมายหลายบริษัทจนถึงปัจจุบัน

ปัจจุบัน แนวโน้มของการใช้ฟันพอร์ซเลนมีมากขึ้น เนื่องจากพอร์ซเลนมีสีใกล้เคียงฟันธรรมชาติ ทำให้เกิดความสวยงามเมื่อใช้ แต่มีอายุการใช้งานได้ไม่นาน ซึ่งโดยทั่วไปแล้วฟันพอร์ซเลนที่ดีควรมีสมบัติสำคัญ ดังต่อไปนี้

1. มีความสวยงามใกล้เคียงกับฟันธรรมชาติ
2. มีความแข็งแรง ไม่เปราะและแตกง่าย

3. สามารถยึดติดกับฐานฟันปลอมหรือโครงเหล็กได้ดี
4. สามารถกรอแต่งให้เป็นรูปร่างต่างๆ ได้ง่าย
5. มีความสามารถต้านทานการสึกกร่อน (Abrasion Resistance) จากการใช้งานได้ดี
6. มีความสามารถต้านทานต่อการติดสี (Stain Resistance) ได้ดี
7. ไม่ทำอันตรายต่อฟันคู่สบ
8. ราคาไม่แพง

เนื้อดินของฟันพอร์ซเลน^[48]

พอร์ซเลนทางทันตกรรม เป็นเนื้อ Triaxial Porcelain ที่ประกอบด้วย ดินขาว ควอตซ์ และหินฟันม้า เมื่อเผาแล้วจะต้องประกอบด้วยองค์ประกอบหลักเป็นมัลโลท์ ควอตซ์ที่ตกค้าง (Free Silica) และเนื้อแก้ว (Glassy Phase) ซึ่งองค์ประกอบต่างๆ เหล่านี้มีค่าการหักเหแสงที่แตกต่างกัน ทำให้ความโปร่งแสงของพอร์ซเลนแตกต่างจากฟันธรรมชาติมาก การทำให้พอร์ซเลนมีความโปร่งแสงมากขึ้น จะต้องกำจัดเอามัลโลท์ออกไปและลดปริมาณของควอตซ์ที่ตกค้างลง ซึ่งสามารถทำได้โดยการลดปริมาณดินขาว หรือไม่ใช้เลย และลดปริมาณของควอตซ์ลงแต่เพิ่มปริมาณของหินฟันม้าแทน ซึ่งจะทำให้พอร์ซเลนที่ได้มีปริมาณของมัลโลท์ลดลงและมีลูซิไตต์ (Lucite) เพิ่มมากขึ้น ซึ่งผลึกของลูซิไตต์มีค่าดัชนีการหักเหแสงต่ำกว่าเนื้อแก้ว ทำให้แสงผ่านได้ดีกว่า ส่งผลให้ความโปร่งแสงเพิ่มขึ้น และทำให้มีความแข็งแรงสูงขึ้นด้วย และในกรณีการทำครอบฟันพอร์ซเลนเชื่อมกับโลหะ (Porcelain Fused to Metal) เนื่องจากลูซิไตต์มีการขยายตัวเนื่องด้วยความร้อนสูง การมีลูซิไตต์ในปริมาณมากจะทำให้การขยายโดยรวมเพิ่มขึ้นและสัมพันธ์กับการขยายตัวของโลหะที่รองรับพอร์ซเลนนั้น ทำให้สามารถลดการแตกร้าวของครอบฟันพอร์ซเลนได้

ประเภทของฟันพอร์ซเลน

1. แบ่งตามลักษณะการนำไปใช้^[47-48]

1.1 ฟันพอร์ซเลนสำเร็จรูป (Porcelain Artificial Teeth)

ผลิตแบบสำเร็จรูป ทั้งแบบเป็นชุดของฟันบนและฟันล่างทั้งปาก และเป็นฟันซี่เดี่ยวๆ สำหรับเป็นพอนติก (Pontic) ในสะพานฟัน เป็นฟันที่มีสีใกล้เคียงกับฟันธรรมชาติ มีให้เลือกมากมายตามสีฟัน ทนต่อการสึกกร่อนสูง ไม่ดูดซึมน้ำและกลืนจากอาหาร มีองค์ประกอบหลักเป็นหินฟันม้า ควอตซ์ ดินขาว และตัวช่วยหลอม พร้อมทั้งมีการเติมแป้ง (Starch) ยาง (Gum) ทรากาคานต์ (Tragacanth) หรือสารอินทรีย์อื่นๆ เพื่อให้ฟันทรงตัวอยู่ได้ ก่อนนำไปเผา

1.2 ผงฟันพอร์ซเลน (Fused Porcelain)

ผลิตเป็นผงสำหรับปั้นครอบฟันแจ็คเกต (Jacket Crown) และอินเลย์ (Inlay) โดยนำผงฟันพอร์ซเลนมาปั้นเป็นรูปตามต้องการแล้วจึงเผาด้วยไฟ

องค์ประกอบของครอบฟันแจ็คเกต

1. เนื้อของตัวฟัน แบ่งเป็น 3 ชนิดตามอุณหภูมิในการเผา ได้แก่

1.1 ผงพอร์ซเลนชนิดเผาที่อุณหภูมิสูง (High Temperature Maturing Porcelain) มีส่วนประกอบของหินฟันม้าร้อยละ 80 ควอตซ์ร้อยละ 15 และดินขาวร้อยละ 5 ทำเป็นผงขนาด 7-70 μm

1.2 ผงพอร์ซเลนชนิดเผาที่อุณหภูมิปานกลาง (Medium Temperature Maturing Porcelain) ประกอบด้วยหินฟันม้าร้อยละ 60 ควอตซ์ร้อยละ 25 และตัวช่วยหลอม (Fluxing Agent) เช่น K_2O (Potash), Na_2O (Soda), CaO (Lime) และกรดบอริก เพื่อช่วยทำให้ช่วงการหลอมตัวแคบลง สุกตัวที่อุณหภูมิปานกลางได้

1.3 ผงพอร์ซเลนชนิดเผาที่อุณหภูมิต่ำ (Low Temperature Maturing Porcelain) ใช้หลอมติดกับโลหะ (Porcelain to Metal) เป็นเคลือบโลหะ เพราะมีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องด้วยความร้อนต่ำกว่าชนิดที่หลอมที่อุณหภูมิสูง

วิธีการผลิต จะทำการผสมผงชนิดต่างๆ เข้าด้วยกัน แล้วหลอมให้เป็นเนื้อเดียวกันและจุ่มลงไปใต้น้ำเย็นทันที ของเหลวนั้นจะแตกออกเป็นเสี่ยงเล็กๆ เรียกว่า ฟริด (Frit) จากนั้นนำมาบดให้เป็นผงละเอียด แล้วจึงนำไปทำเป็นฟันพอร์ซเลนต่อไป

2. น้ำยาเคลือบ (Glaze) ประกอบด้วยซิลิกากับตัวช่วยหลอม มีคุณสมบัติเป็นเคลือบใส ไม่มีสี การมีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องด้วยความร้อนใกล้เคียงกับเนื้อฟัน แต่มีจุดหลอมเหลวต่ำกว่า เมื่อหลอมเหลวแล้วจะทำการฉาบบนพื้นผิวของส่วนเนื้อฟันพอร์ซเลนด้วยแผ่นฟิล์มไสบางๆ เพื่อปิดรูพรุนของเนื้อฟัน น้ำยาเคลือบจะช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้กับเนื้อฟัน

3. สี (Stain) เป็นสารอินทรีย์ที่ใส่ทั้งในหรือพื้นผิวของเนื้อฟัน หรือผสมกับน้ำยาเคลือบสีที่ใช้ผสมในฟันพอร์ซเลน ได้แก่ เหลือง ชมพู ขาว น้ำเงิน เทา และน้ำตาล ส่วนเคลือบที่บดแสงจะทำการเติม ฟลูออไรด์ ออกไซด์ของดีบุก โทเทเนียม หรือ เวอร์คโคเนียม เป็นต้น

1.3 ผงเคลือบโลหะ (Ceramic Enamel)

ครอบฟันแจ็คเกตที่ทำด้วยพอร์ซเลนล้วนๆ มักจะแตกหักได้ง่าย วิธีหนึ่งที่จะช่วยลดการแตกหัก คือ หลอมผงพอร์ซเลนบนครอบโลหะผสมที่ได้จากการหล่อ เพื่อทำเป็นปลอกสวมฟันหลัก ซึ่งเป็นฟันธรรมชาติ วัสดุที่ฉาบผิวของปลอกหรือผิวโลหะ เรียกว่า ผงเคลือบโลหะ ซึ่งทำหน้าที่คล้ายเคลือบฟัน (Enamel) ซึ่งประกอบด้วย

1. เคลือบชั้นใน (Ground Coat) เป็นส่วนที่ฉาบกับผิวโลหะ
2. เคลือบชั้นนอก (Over Coat) ได้แก่ น้ำยาเคลือบ
3. สีต่างๆ ที่ใช้ผสมกับเคลือบชั้นใน
4. เคลือบทึบแสง ใช้สำหรับฉาบระหว่างปลอกโลหะกับเคลือบชั้นใน

2. แบ่งตามอุณหภูมิในการเผาจนถึงจุดสุกตัว^[47, 49]

อุณหภูมิที่เผาจนถึงจุดสุกตัว คือ อุณหภูมิซึ่งเผาพอร์ซเลนให้ได้สมบัติทางกายภาพ และความสวยงามตามที่ต้องการ

- 2.1 อุณหภูมิเผาสูง (High Temperature Maturing Porcelain) 1288-1371 °C
- 2.2 อุณหภูมิเผปานกลาง (Medium Temperature Maturing Porcelain) 1093-1260 °C
- 2.3 อุณหภูมิเผต่ำ (Low Temperature Maturing Porcelain) 871-1066 °C

พอร์ซเลนที่มีช่วงอุณหภูมิการเผาสูง เนื่องมาจากการมีปริมาณโซเดียมและโพแทสเซียมต่ำ ทำให้การเชื่อมต่อของโครงข่ายซิลิกาภายในเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้พอร์ซเลนมีการละลายต่ำ (Low Solubility) ความแข็งแรงและความคงตัวสูงขึ้น (High Strength and Stability) สำหรับพอร์ซเลนที่มีช่วงอุณหภูมิการเผต่ำ มักจะนำมาใช้ทำครอบฟันพอร์ซเลนที่ยึดติดกับโลหะ ช่วงอุณหภูมิที่ต่ำ จะไม่ทำให้โลหะที่ใช้เป็นโครงของครอบฟันหลอมละลาย ซึ่งการที่จะทำให้ช่วงอุณหภูมิลดต่ำลงสามารถทำได้โดยการเพิ่มตัวช่วยหลอมลงไป ทำให้การเชื่อมต่อของโครงข่ายซิลิกาภายในลดลงจากการที่มีไอออนของโซเดียมและโพแทสเซียมแทรกเข้าไปอยู่ในโครงข่าย ส่งผลให้พอร์ซเลนมีความแข็งแรงและความคงตัวลดลงเล็กน้อย เมื่อเทียบกับพอร์ซเลนที่เผาที่อุณหภูมิสูง และพบว่าการละลายตัวในช่องปากเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเท่านั้น ส่วนในพอร์ซเลนที่เผาที่อุณหภูมิปานกลาง มักนำมาใช้ในกลุ่มของครอบฟันพอร์ซเลนล้วน ใช้ในฟันหน้า (Anterior Porcelain Jacket Crown) คุณสมบัติของพอร์ซเลนกลุ่มนี้จะอยู่ระหว่างพอร์ซเลนที่เผาอุณหภูมิสูงและต่ำ การขึ้นรูปเดนทอลพอร์ซเลนจำเป็นต้องขึ้นรูปในแบบที่เป็นโลหะ Platinum ซึ่งเนื้อผลิตภัณฑ์จะถูกผสมกับแป้ง หรือวัสดุประเภท Thermosetting Resin เพื่อทำให้มีความเหนียวมากพอที่จะสามารถขึ้นรูปได้ด้วยวิธีการอัดแบบด้วยมือ (Hand Pressing)

5) พอร์ซเลนเคมี (Chemical Porcelain)^[45]

เป็นพอร์ซเลนที่มีความทนต่อสารเคมีได้ดีและความแข็งเชิงกลสูง ไม่นิยมทำถ้วยชาม จึงใช้ผลิตภัณฑ์ชนิดนี้อย่างกว้างขวางในงานที่เกี่ยวข้องกับสารเคมี และงานที่ใช้ในช่วงอุณหภูมิสูง ปัจจุบันได้มีการนำผลิตภัณฑ์ประเภทมัลไท์พอร์ซเลน ซึ่งมีเนื้อแก้ว (Glassy Phase)

เพียงร้อยละ 5-10 มาใช้ในงานประเภทนี้มากขึ้น เช่น การผลิตเป็นเบ้าหลอม (Crucible) สำหรับใช้ในห้องปฏิบัติการเคมี เป็นต้น

ตารางที่ 2.15 ส่วนผสมของเนื้อดินพอร์ซเลนเคมีที่เผาที่อุณหภูมิต่างๆ

วัตถุดิบ (%)	อุณหภูมิในการเผา (°C)				
	1410	1435	1435	1455	1455
ดินขาว	52	36	50	50	46
ควอตซ์	30	33	2	24	21
หินฟันม้า	18	24	21	21	16
ผลิตภัณฑ์เผาดิบ	-	7	-	5	17

ตารางที่ 2.16 ชนิดของเนื้อพอร์ซเลนเคมีแบ่งตามลักษณะการใช้งาน^[50]

ชนิดของพอร์ซเลนเคมี	ตัวอย่างผลิตภัณฑ์	ประเภทเนื้อวัสดุ
Acid-proof Porcelain	Evaporating Dish Beaker Acid-proof Pump Reaction Chamber Electrolytic Cell	Silica Rich Porcelain หรือ Quartz Porcelain
Abrasion-proof Porcelain	Grinding Media Mortar Pot Mill Thread-guide	Alumina Porcelain และ Titania Porcelain
Heat-proof Porcelain (Refractory Porcelain)	Protecting Tube Combustion Boat Combustion Tube Burner Tip	Alumina Porcelain และ Mullite Porcelain

ส่วนผสมของเนื้อดินพอร์ซเลนเคมี

ส่วนผสมหลัก ได้แก่ ดินขาวร้อยละ 50 ควอตซ์ร้อยละ 25 และหินฟีนมาร้อยละ 25 ซึ่งวัตถุดิบในแต่ละแห่งมีความบริสุทธิ์แตกต่างกัน ส่วนผสมจึงอาจเปลี่ยนแปลงไปตามความเหมาะสม

พอร์ซเลนเคมี เป็นผลิตภัณฑ์ที่ผลิตขึ้นสำหรับใช้งานในทางเคมีและฟิสิกส์ที่ต้องการสมบัติที่ดีทางด้านความแข็งแรงเชิงกล ความต้านทานต่อสารเคมี ทนต่อความเปลี่ยนแปลงความร้อนและความเย็นแบบฉับพลันได้ดี ผลิตภัณฑ์นี้มีลักษณะเนื้อแน่น สีขาว มีความบริสุทธิ์สูง ไม่มีเหล็กเจือปนในส่วนผสม มีความทนทานต่อการกัดกร่อนของสารเคมีทุกชนิด ยกเว้น กรดไฮโดรฟลูออริก (Hydrofluoric Acid, HF)

ลักษณะของพอร์ซเลนเคมีแบ่งออกตามลักษณะการใช้งาน และชนิดของเนื้อผลิตภัณฑ์ที่เหมาะสมจะนำไปใช้งานออกเป็น 3 ชนิด คือ Acid-proof Porcelain, Heat-proof Porcelain และ Abrasion-proof Porcelain

1. Acid-proof Porcelain

เป็นผลิตภัณฑ์พอร์ซเลนที่ทนต่อการกัดกร่อนของสารเคมี นิยมใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมเคมีมากกว่าพอร์ซเลนประเภทอื่น มักใช้ทำเป็นวัสดุที่สำคัญในการผลิตเครื่องมือต่างๆ ของอุตสาหกรรมเคมี

สมบัติเฉพาะตัวของวัสดุที่นำมาใช้ในอุตสาหกรรมเคมี คือมีความต้านทานต่อการกัดกร่อนซึ่งพอร์ซเลนประเภท Acid-proof มีสมบัติทนต่อการกัดกร่อนของสารเคมีได้ทุกชนิด ยกเว้น กรดไฮโดรฟลูออริก (Hydrofluoric Acid) ส่วนวัสดุประเภทโลหะ แม้จะมีสมบัติในการต้านทานต่อการกัดกร่อนของสารเคมี แต่โลหะก็มีข้อจำกัดในการใช้งาน คือ ไม่สามารถทนต่อการกัดกร่อนของสารละลายที่มีคลอรีนเป็นองค์ประกอบได้ ส่วนสารอินทรีย์ ซึ่งเป็นสารอีกประเภทหนึ่งที่สามารถทนต่อการกัดกร่อนของกรดบางชนิดได้ แต่ไม่สามารถทนต่อการลุกติดไฟได้ นอกจากนั้นยังมีความแข็งแรงต่ำ ใช้งานที่อุณหภูมิสูงได้ไม่ดีเท่าที่ควร วัสดุอีกประเภทหนึ่งที่สามารถทนต่อการกัดกร่อนของสารเคมีได้ดีและมีสมบัติในการทนต่อความร้อนได้ดี คือ Fused Quartz แต่ไม่สามารถผลิตวัสดุประเภทนี้ให้มีขนาดใหญ่ตามที่ต้องการได้ และต้นทุนการผลิตค่อนข้างสูง ไม่เหมาะที่จะนำมาผลิตเป็นอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ ด้วยเหตุนี้ พอร์ซเลนประเภท Acid-proof จึงมีสมบัติที่ดีกว่าวัสดุประเภทที่ใช้งานในโรงงานอุตสาหกรรม ดังที่ได้กล่าวไว้แล้ว

แม้ว่าพอร์ซเลนประเภท Acid-proof จะมีสมบัติที่เหมาะสมในการใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมเคมี นอกจากไม่สามารถทนต่อการกัดกร่อนของกรดไฮโดรฟลูออริกแล้ว ข้อเสียของวัสดุประเภทนี้ อีกประการหนึ่ง คือ มีความเหนียวต่ำ วัสดุมีความแข็งแต่เปราะ เมื่อตกกระทบพื้น

หรือวัสดุที่แข็งแกร่งกว่าจะเกิดการแตกร้าว หรือหักได้ง่าย และโดยเฉพาะการกระทบกระแทกในระหว่างที่ทำให้ร้อนหรือเย็นตัว นอกจากนั้น ยังมีผลเสียจากการนำความร้อนของพอร์ซเลน ซึ่งมีค่าต่ำกว่าโลหะหรือสารอินทรีย์

สมบัติสำคัญของ Acid-proof Porcelain ได้แก่

1. มีลักษณะของเนื้อแน่น เพื่อป้องกันการผ่านเข้าออกของสารเคมี
2. มีความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อนของกรดได้ดี
3. มีความแข็งแรงเชิงกลสูง และทนต่อ Anti-shock สูง
4. มีความสามารถทนต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิฉับพลันได้ดีในอุณหภูมิที่ใช้งาน

ตารางที่ 2.17 คุณสมบัติของพอร์ซเลนประเภท Acid-proof (Acid-proof Porcelain)

สมบัติ		หน่วย
สี	ขาว	-
ความหนาแน่นปรากฏ	2.30	g/cm^3
การดูดซึมน้ำ	< 0.5	%
Transverse Rapture Strength	830	kg/mm^2
Thermal Expansion (0-800 °C)	0.42	%
COE. (0-800 °C)	5.4	$\times 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$
Rate of Acidic Resistance	0.12	-
Temperature Difference Resisted	170	$^{\circ}\text{C}$

2. Abrasion-proof Porcelain

เป็นผลิตภัณฑ์ที่ทนต่อการสึกกร่อนได้ดี (Wear Resistant) ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นเนื้อ Alumina Porcelain, Titanium Porcelain

ผลิตภัณฑ์ที่มีปริมาณอะลูมินาสูง ซึ่งจะมีความแข็งแกร่งใกล้เคียงกับพลอย สามารถทนต่อการสึกกร่อนได้สูง ดังนั้น จึงนิยมใช้ผลิตภัณฑ์พอร์ซเลนประเภทนี้สำหรับงานในอุตสาหกรรมต่างๆ อย่างกว้างขวาง เช่น การผลิต Sand-blast Nozzle, Ball Mill และ Grinding Media ส่วนในอุตสาหกรรมการผลิตเส้นใยสังเคราะห์ โดยใช้เป็น Thread Guides ที่มีกระแสไฟฟ้าสถิตเกิดขึ้น เพื่อป้องกันการกระจายของเส้นใยซึ่งเกิดจากการขัดสีระหว่างเส้นด้ายกับ Guide

สำหรับผลิตภัณฑ์พอร์ซเลนเนื้อ Titanium Porcelain มีสมบัติในการต้านทานการสึกกร่อน เทียบเท่าหรือมากกว่าพอร์ซเลนเนื้อ Alumina Porcelain และมีสัมประสิทธิ์การเสียดทานต่ำกว่า จึงนิยมนำมาใช้ผลิตเป็นตัวนำไฟฟ้า (Electric Conductive) และ Electric Conductive Thread Guide สำหรับป้องกันการกระจายของเส้นด้าย

3. Heat-proof Porcelain

ตารางที่ 2.18 คุณสมบัติของพอร์ซเลนประเภท Heat-proof เนื้อ Alumina Silicate

เนื้อวัสดุ	Alumina Silicate			หน่วย
สมบัติ	> 99% $3\text{Al}_2\text{O}_3$, Airtight and Excellent Heat Resistance	Strong against Erosion by Fusion of Pig Iron, Cast Iron, Carbon Steel etc.	Fit for General Refractory Articles	-
การใช้งาน	Protecting Tube, Heat- proof Tube	Combustion Boat	Kiln Wick Pipe, General Fire Proof Articles	-
สี	ขาว	ขาว	น้ำตาล	-
การดูดซึมน้ำ	0.00	0.00	14	%
ความหนาแน่นปรากฏ	3.80	2.40	3.00	kg/cm^3
ความทนแรงอัด (Compressive Strength)	1500	-	800	kg/cm^2
COE. (25-700 °C)	9.00	4.30	6.00	$\times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$
ความทนแรงดัด (Bending Strength)	3000	920	250	kg/cm^2
อัตราการนำความร้อน	0.04	0.004	-	cal/cm.sec

พอร์ซเลนประเภทนี้ โดยทั่วไปมักจะมีเนื้อแน่น สุกตัว ซึ่งจะทำให้มีความแข็งแรงและทนต่อการกัดกร่อนของสารเคมีได้ดี แต่สำหรับงานบางประเภทจะมีการใช้ผลิตภัณฑ์ที่มีรูพรุน เพื่อต้องการสมบัติการเป็นฉนวนที่ดี มีความทนต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิแบบฉับพลันได้ดี

พอร์ซเลนประเภท Heat-proof มีคุณสมบัติในการต้านทานความร้อน หรือเป็นวัสดุทนไฟ (Refractory) วัสดุจะมีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องด้วยความร้อนต่ำ มีความแข็งแรงเชิงกลสูง และมีคุณสมบัติทางด้านการนำความร้อนสูง

ผลิตภัณฑ์ประเภทนี้นิยมใช้ทั่วไปในโรงงานอุตสาหกรรมเคมี อุตสาหกรรมเหล็กและเหล็กกล้า ซึ่งมีสมบัติทนต่อการกัดกร่อนของสารเคมี หรือโลหะหลอมเหลวได้ดี มีความแข็งแรงสูง เนื่องจากวัสดุประเภทนี้สามารถใช้เป็นท่อสำหรับลวดความร้อน (Protecting Pipe of Thermoelectric Couple) ท่อสำหรับฉนวนกันความร้อน (Insulation Tube) และเครื่องมือวัดในทางอิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ ได้ดี ซึ่งบางครั้งจำเป็นต้องมีคุณสมบัติทางไฟฟ้าด้วย

ตารางที่ 2.19 คุณสมบัติของพอร์ซเลนประเภท Heat-proof เนื้อ Mullite

เนื้อวัสดุ	Mullite		หน่วย
สมบัติ	Airtight and Excellent Heat Resistance	Porous and Excellent Heat Resistance	-
การใช้งาน	Protecting Tube Combustion Tube	Outer Pipe of Double Protecting Tube	-
สี	ขาว	ขาว	-
การดูดซึมน้ำ	0.00	16.00	%
ความหนาแน่นปรากฏ	2.60	1.90	kg/cm ³
ความทนแรงอัด (Compressive Strength)	4500	2800	kg/cm ²
COE. (25-700 °C)	4.40	6.00	$\times 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$
ความทนแรงดัด (Bending Strength)	1400	760	kg/cm ²
อัตราการนำความร้อน	0.006	0.003	cal/cm.sec

นอกจากพอร์ซเลนเคมีทั้ง 3 ชนิดแล้ว ยังมีเนื้อดินแบบเทคนิคพิเศษพอร์ซเลน (Technical Vitreous Porcelain) ที่นิยมนำมาทำเป็นผลิตภัณฑ์ที่ใช้ในงานในทางเคมี เช่น เป้าหลอม อุปกรณ์ในห้องปฏิบัติการเคมี ถูกด และอิฐกรูภายในหม้ออบ เป็นต้น มีอัตราการดูดซึมน้ำร้อยละ 0-0.2 ผลิตภัณฑ์บางชนิดใช้วัตถุดิบสังเคราะห์ที่บริสุทธิ์ และเผาที่อุณหภูมิสูงกว่า 1600 °C และเผาในเตาเผาแบบพิเศษ

(3) แบ่งตามอุณหภูมิในการเผา^[22] ได้แก่

- 1) พอร์ซเลนอุณหภูมิต่ำ (Soft Porcelain) เป็นผลิตภัณฑ์เนื้อสีขาว โปร่งแสง เผาที่อุณหภูมิระหว่าง 1200-1280 °C ได้แก่ ผลิตภัณฑ์โบนไชน่า พาเรียน และโซเดิลไชน่า เป็นต้น
- 2) พอร์ซเลนอุณหภูมิสูง (Hard Porcelain) เป็นผลิตภัณฑ์เนื้อสีขาว โปร่งแสง เผาที่อุณหภูมิสูง 1300-1460 °C ได้แก่ พอร์ซเลนของยุโรปและจีน พอร์ซเลนประเภทนี้ นิยมใช้ทำอุปกรณ์ในห้องเคมีและลูกถ้วยไฟฟ้า เป็นต้น

2.1.3 วัตถุดิบหลักในการผลิตพอร์ซเลน^[44, 51-52]

องค์ประกอบหลักของเนื้อดินพอร์ซเลน ได้แก่ ดิน (Clays) ตัวหลอมละลาย (Fluxes) และตัวทนไฟ (Fillers)

(1) ดินขาว (Clays) หรือ ดินเกลิน

เป็นวัตถุดิบที่ให้ความเหนียว ทำหน้าที่เป็นตัวประสานส่วนประกอบอื่นๆ ให้จับตัวกัน ในขณะที่ทำการขึ้นรูป^[52] นอกจากนั้น ยังทำให้เกิดมลโลหะในโครงสร้างของผลิตภัณฑ์หลังเผา สร้างความแข็งแรงให้กับผลิตภัณฑ์

ดินเกลินถือเป็นแร่ชนิดหนึ่ง (Clay Mineral) ที่เกิดขึ้นเองในธรรมชาติ ประกอบด้วยผลึกของแร่เคโอลิไนต์ (Kaolinite, $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) มีปริมาณซิลิการ้อยละ 46 อะลูมินาร้อยละ 40 และน้ำร้อยละ 14 เมื่อบริสุทธิ์จะมีสีขาว แต่เมื่อมีสิ่งสกปรกเจือปนอาจจะมีสีต่างๆ ได้ เช่น สีเหลือง น้ำตาล และแดง ทั้งนี้ขึ้นกับปริมาณสิ่งสกปรกที่เจือปนอยู่ในเนื้อดิน

สมบัติทางกายภาพของดินขาว (Physical Properties of Kaolin)

1. ขนาดของอนุภาค (Particle Size)

ขนาดของอนุภาคดินจะมีผลต่อความเหนียว (Plasticity) และการหดตัวของเนื้อดินขึ้นเมื่อเกิดการแห้งตัว (Drying Shrinkage) ดินเม็ดที่ละเอียด จะให้ความเหนียวและมีการหดตัวเมื่อแห้งมากกว่าเม็ดดินที่หยาบ ดินขาวที่มีเม็ดหยาบจะมีความเหนียวน้อย (Low Plasticity)

2. รูปร่างของอนุภาค (Particle Shape)

รูปร่างของแร่เคโอลิไนท์ทั่วไป จะเป็นแผ่นหกเหลี่ยม (Hexagonal Plates) มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง ตั้งแต่ 0.05-10.00 ไมครอน

3. คุณสมบัติในการแลกเปลี่ยนอนุมูล (Base Exchange Capacity)

ปกติดินขาวที่บริสุทธิ์ จะไม่มีการแลกเปลี่ยนอนุมูล หรือดูดซับอนุภาค และ โมเลกุลอื่นๆ แต่ถ้าไม่บริสุทธิ์ จะเกิดการแลกเปลี่ยนอนุมูล หรือดูดซับเอาผลึกของแร่ที่มีขนาดเล็กไว้ที่ผิวผลึกเคโอลิไนท์ที่บริสุทธิ์ มีโครงสร้างผลึกที่แข็งแรง แร่ธาตุ และอินทรีย์สาร แทรกเข้าไปในโครงสร้างผลึกไม่ได้ จึงคงความบริสุทธิ์ได้ดี

4. คุณสมบัติเมื่อแห้ง (Drying Properties)

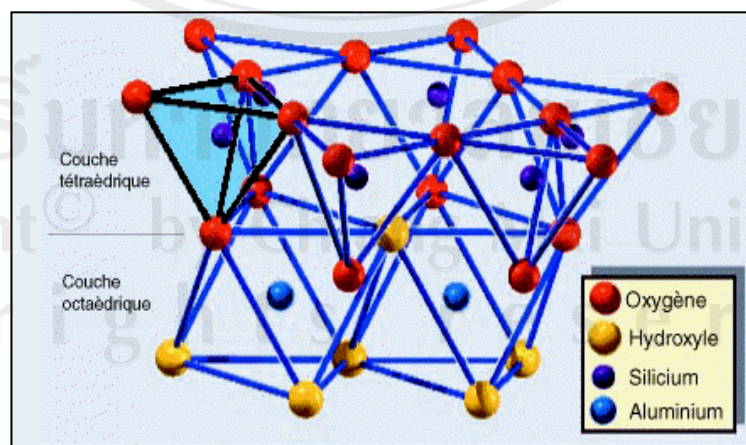
ดินขาวที่บริสุทธิ์ จะมีการหดตัวเมื่อแห้ง (Drying Shrinkage) ไม่สูงนัก ดินขาวที่มีเม็ดละเอียด จะมีค่าการหดตัวมากกว่าดินเม็ดหยาบ

5. ความแข็งแรงของเนื้อดินเมื่อแห้ง (Green Strength)

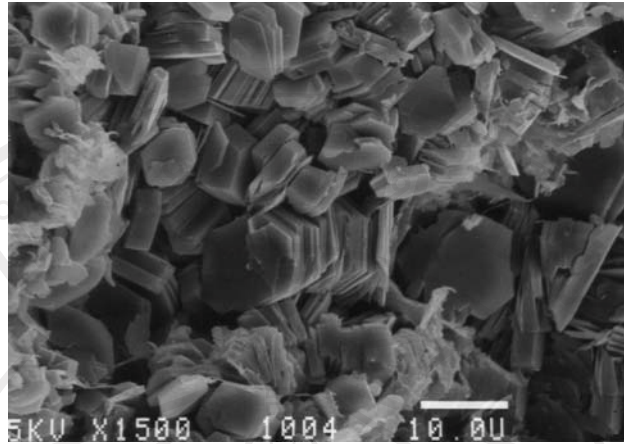
ดินขาวมีความแข็งแรงน้อย เปราะแตกได้ง่ายเมื่อแห้ง เพราะมีความเหนียวน้อย

6. สมบัติหลังจากการเผา (Firing Properties)

ดินขาวที่มีคุณภาพดี เผาแล้วควรจะได้สีขาว แต่ถ้าเป็นสีครีมหรือสีน้ำตาลอ่อน แสดงว่ามีแร่ธาตุเจือปนอยู่สูง ดินขาวที่มีการหดตัวเกินร้อยละ 20 หลังการเผา ไม่ควรใช้มากในเนื้อดินปั้น



รูปที่ 2.9 โครงสร้างของแร่เคโอลิไนท์ในดินกาแลน^[53]



รูปที่ 2.10 โครงสร้างทางจุลภาคของพอลิเอทิลีนไกลคอล [54]

ประโยชน์ของดินขาว

ดินขาวสามารถนำมาใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมเซรามิกและอุตสาหกรรมอื่นๆ ได้ดังนี้

1. ใช้ทำผลิตภัณฑ์เซรามิก เช่น ถ้วยชาม เครื่องสุขภัณฑ์ เครื่องประดับ
2. ทำผลิตภัณฑ์ก่อสร้าง เช่น อิฐก่อสร้าง อิฐปูพื้น ท่อระบายน้ำ กระเบื้องมุงหลังคา
3. ใช้ทำเป็นเบ้าหลอมในอุตสาหกรรมกลึงเหล็กและหล่อเหล็ก
4. ใช้ทำเครื่องกรองน้ำ (Water Filter)
5. ใช้ทำฉนวนไฟฟ้าที่ทนแรงดันไฟฟ้าได้สูง ทำฉนวนไฟฟ้า
6. ใช้ทำเครื่องมือวิทยาศาสตร์ เช่น เบ้าหลอม ผลิตเซรามิกกึ่งตัวนำ
7. ใช้ในอุตสาหกรรมกระดาษ โดยเติมลงไปในการกระดาษ ทำให้กระดาษ มีคุณสมบัติดูดซับน้ำได้ดี ช่วยให้ผิวหน้ากระดาษเรียบและมันเป็นเงา สีของกระดาษขาวขึ้น ช่วยเพิ่มน้ำหนักของกระดาษและทำให้กระดาษทึบแสง ทำให้ไม่เห็นตัวหนังสือ หรือลายพิมพ์อื่นๆ ในหน้าตรงข้าม
8. เป็นตัวฟอกสีและตัวเร่งปฏิกิริยา ในอุตสาหกรรมน้ำมันปิโตรเลียม
9. ใช้ในอุตสาหกรรมยาง โดยเติมลงไปในการยาง (Rubber Filler) ให้มีความแข็งแรงทนทาน
10. ใช้ผสมลงในของเหลว ที่ใช้ในการเจาะ (Drilling Fluid) สำหรับน้ำมันปิโตรเลียม
11. ใช้ในอุตสาหกรรมเกษตร เช่น เป็นส่วนผสมของยาฆ่าแมลงและปุ๋ย
12. ใช้ในอุตสาหกรรมพรมน้ำมัน ทอผ้า และพลาสติก
13. ใช้ในอุตสาหกรรมสี โดยใช้ผลิตสีขาว (White Pigment)

14. ใช้ในอุตสาหกรรมทำยารักษาโรค เครื่องสำอาง ทำฟันปลอม (Dental Porcelain)

(2) ตัวหลอมละลาย (Fluxes)

เป็นวัตถุดิบที่ไม่มีความเหนียว ทำหน้าที่เป็นตัวเริ่มก่อให้เกิดปฏิกิริยาการเกิดเนื้อแก้ว และทำให้เกิดการแน่นตัวขึ้นในผลิตภัณฑ์ จึงเป็นตัวที่ลดอุณหภูมิในการเผาได้ ในทางการค้านิยมใช้หินฟันม้า (Alkali Feldspar) เช่น เนฟลิิน ไชยาไนต์ (KAlSi_3O_8 และ $\text{Na}_3\text{KAl}_4\text{Si}_4\text{O}_{16}$) แร่หินฟันม้า แบ่งเป็น 3 ชนิด ได้แก่

(1) หินฟันม้าชนิดโปแตส (Potash Feldspar, KAlSi_3O_8) หรือแร่ Orthoclase ประกอบด้วย โพแทสเซียมออกไซด์ (K_2O) ร้อยละ 16.9 อะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) ร้อยละ 18.4 และซิลิกา (SiO_2) ร้อยละ 64.7 มีจุดหลอมตัวที่ประมาณ $1200-1250^\circ\text{C}$ ใช้ผสมในเนื้อดินปั้นและน้ำเคลือบ

(2) หินฟันม้าชนิดโซดา (Soda Feldspar, $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$) หรือแร่ Albite ประกอบด้วย โซเดียมออกไซด์ (Na_2O) ร้อยละ 11.8 อะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) ร้อยละ 19.5 และซิลิกา (SiO_2) ร้อยละ 68.7 มีจุดหลอมตัวเริ่มตั้งแต่ 1100°C ใช้ผสมในน้ำเคลือบ

(3) หินฟันม้าชนิดแคลเซียม (Calcium Feldspar, $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$) หรือแร่ Anorthite ประกอบด้วย แคลเซียมออกไซด์ (CaO) ร้อยละ 20.1 อะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) ร้อยละ 36.7 และซิลิกา (SiO_2) ร้อยละ 43.2 ใช้ผสมในน้ำเคลือบ

หินฟันม้าหรือเฟลด์สปาร์ เป็นสารประกอบอะลูมิโนซิลิเกต หรืออัลคาไลน์เอิร์ธ (ต่าง) ดังนั้น เฟลด์สปาร์จึงมีวัตถุดิบที่เป็นต่างคือตัวหลอมละลาย มีอะลูมินาเป็นตัวกลาง และมีซิลิกาซึ่งเป็นตัวทนไฟอยู่ด้วย จึงจัดเป็นวัตถุดิบที่ให้เคลือบได้ตามธรรมชาติ โดยปกติเฟลด์สปาร์จะเริ่มหลอมละลายเล็กน้อยที่อุณหภูมิประมาณ 1150°C โปแตสเฟลด์สปาร์หลอมละลายที่อุณหภูมิ 1220°C โซดาเฟลด์สปาร์หลอมละลายที่อุณหภูมิ $1170-1200^\circ\text{C}$ แคลเซียมเฟลด์สปาร์หลอมละลายที่อุณหภูมิ 1550°C และแบเรียมเฟลด์สปาร์หลอมละลายที่อุณหภูมิ 1715°C

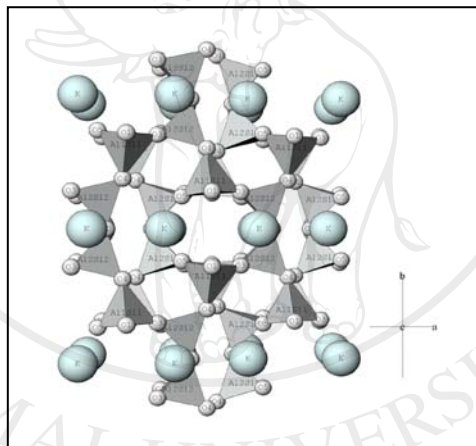
หน้าที่ของเฟลด์สปาร์ในเนื้อดิน

1. ลดความเหนียวของเนื้อดินก่อนเผา
2. เป็นตัวประสานให้ผลึกของดินหลอมตัวกันแน่น เนื้อดินหลอมเป็นแก้ว ลดการดูดซึมน้ำ
3. ลดอุณหภูมิในการเผา
4. เพิ่มความโปร่งแสงให้ผลิตภัณฑ์ภายหลังการเผา

นอกจากนี้ยังใช้เฟลด์สปาร์ในการเตรียมน้ำเคลือบ ซึ่งใช้ปริมาณร้อยละ 30-70 ในน้ำเคลือบอุณหภูมิสูงทุกชนิด และใช้เป็นส่วนผสม ในอุตสาหกรรมการผลิตแก้ว ซึ่งใช้ในอัตราส่วนประมาณร้อยละ 30-40



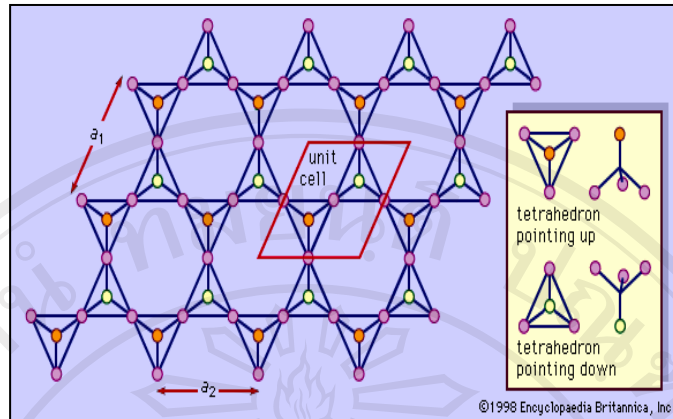
รูปที่ 2.11 ลักษณะของแร่หินฟันม้า^[55]



รูปที่ 2.12 โครงสร้างผลึกของแร่หินฟันม้า^[56]

(3) ตัวทนไฟ (Fillers)

วัตถุดิบในการเตรียมเนื้อดิน นอกจากจะมีดินและค่า หรือวัตถุดิบที่เป็นตัวหลอมละลายแล้ว ยังต้องมีวัตถุดิบกลุ่มที่ 3 ที่ไม่ใช่ค่า ทำหน้าที่เป็นตัวทนไฟในเนื้อดิน มีคุณสมบัติช่วยให้เนื้อดินมีความพรุนตัว ช่วยลดการหดตัวของเนื้อดินขณะผึ่งแห้ง และลดความเหนียวของเนื้อดินลงด้วย นอกจากนี้ตัวทนไฟยังทำหน้าที่เป็นโครงสร้างของเนื้อผลิตภัณฑ์ให้คงอยู่ในสภาพดี ไม่บิดเบี้ยว แตกร้าวหลังจากการเผา ทำให้เนื้อดินมีลักษณะพื้นผิวหยาบหรือละเอียดตามต้องการ และเพิ่มความแข็งแรงให้เนื้อดินหลังการเผา โดยทั่วไปนิยมใช้ควอตซ์และฟลินต์ (Flint) เป็นตัวเติมในเนื้อดิน ซึ่งประกอบด้วยซิลิกอน (Si) ร้อยละ 46.7 และออกซิเจน (O) ร้อยละ 53.3



รูปที่ 2.13 โครงสร้างของผลึกซิลิกา^[57]



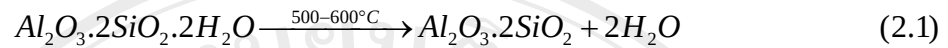
รูปที่ 2.14 โครงสร้างทางจุลภาคของผลึกซิลิกา^[58]

2.1.4 ปฏิกริยาที่เกิดขึ้นในเนื้อดินระหว่างการเผา^[45]

หลังจากการอบแห้ง ชื้นงานจะถูกเผา ในขั้นตอนนี้ต้องระวังเป็นพิเศษ เพราะอาจทำให้เกิดการแตกร้าวและเกิดตำหนิบนชิ้นงานได้ ปฏิกริยาที่เกิดขึ้นในระหว่างการเผาจะเกิดการเปลี่ยนแปลงทั้งทางเคมีและทางกายภาพ มีดังนี้

1. ช่วงอุณหภูมิ 100-200 °C จะเกิดการระเหยออกไปของน้ำที่อยู่บริเวณผิวของเนื้อดิน (Free Water)
2. ช่วงอุณหภูมิ 200-700 °C สารอินทรีย์ที่อยู่ในเนื้อดินจะถูกเผาให้ระเหยออกไป โดยเกิดปฏิกิริยา Dehydroxylation คือ เกิดการหลุดออกของ Hydroxyl Group (OH⁻) จากโครงสร้างผลึก

ของแร่เคโอลิไนท์ (Kaolinite, $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) ในดินเหนียว แล้วเปลี่ยนมาเป็น Meta-kaolin ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$) ที่อุณหภูมิประมาณ 450-550 °C ดังปฏิกิริยา

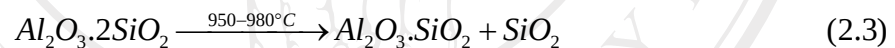


Meta-kaolin ที่เกิดขึ้นจะมีโครงสร้างผลึกที่ไม่เป็นระเบียบ ทำให้เกิดการหดตัวของดินและส่งผลให้เกิดรูพรุนขึ้นในโครงสร้าง

นอกจากนั้นแล้ว ที่อุณหภูมิ 573 °C จะเกิดการขยายตัวของ Quartz จาก Low-quartz (α -Quartz) ไปเป็น High-quartz (β -Quartz) ที่มีขนาดใหญ่ขึ้น



3. ช่วงอุณหภูมิ 950-980 °C โครงสร้างผลึกของ Meta-kaolin ที่เกิดขึ้น จะถูกทำลายลง และมีการหลุดออกของ SiO_2 เกิดเป็นสปิเนล (Spinel) ซึ่งเรียกปฏิกิริยานี้ว่า Desilication



4. อุณหภูมิประมาณ 985 °C ในขณะที่ดินมีการเปลี่ยนโครงสร้างจาก Meta-kaolin ไปเป็น Spinel นั้น จะมี Mullite ที่ขนาดเล็กเกิดรวมด้วยเล็กน้อย

5. อุณหภูมิประมาณ 1075 °C มัลไลต์ขนาดเล็กที่เกิดขึ้นในครั้งแรกจะมีขนาดใหญ่ขึ้น รวมทั้งผลึกที่ไม่เสถียรของ Spinel จะเปลี่ยนไปอยู่ในรูปของมัลไลต์ปฐมภูมิ (Primary Mullite) ที่มีผลึกแบบรูปเข็ม ซึ่งมัลไลต์ที่เกิดในขั้นตอนนี้ เกิดจากการสลายตัวของดินเหนียว ดังสมการ



6. อุณหภูมิประมาณ 1100 °C เกิดการหลอมละลายที่บริเวณผิวของหินฟืนม้าที่สัมผัสกับดิน ทำให้เริ่มเกิดเนื้อแก้วขึ้นรอบๆ อนุภาคของหินฟืนม้าก่อน และจะมีปริมาณมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น จากนั้นซิลิกาจะเริ่มเกิดการละลายในหินฟืนม้า จนกระทั่งกลายเป็นเนื้อแก้วในโครงสร้าง

7. ช่วงอุณหภูมิ 1150-1200 °C เมื่ออุณหภูมิของหินฟินม้าละลายได้มากขึ้น และอุณหภูมิอัลคาไลน์ที่ละลายออกมาจะแทรกเข้าไปในผลึกของ Primary Mullite อย่างช้าๆ และเกิดการตกผลึกซ้ำ ทำให้ Primary Mullite เกิดเป็นผลึกรูปแท่งที่มีขนาดใหญ่ขึ้น เรียกว่า มัลไลต์ทุติยภูมิ (Secondary Mullite) ซึ่ง Secondary Mullite ที่เกิดขึ้นนี้ จะเกิดมาจากการตกผลึกซ้ำในผลึกของ Primary Mullite ของหินฟินม้าเท่านั้น

8. อุณหภูมิประมาณ 1200-1250 °C ปฏิกริยาการหลอมละลายต่างๆ จะเกิดขึ้นจนกระทั่งสิ้นสุดการเผา แต่จะพบว่าเมื่อถึงอุณหภูมิที่สูงกว่าจุดหลอมตัวของสารต่างๆ ในเนื้อดินแล้ว ผลึกหรือโครงสร้างใหม่บางชนิดจะเกิดการหลอมละลายอีกครั้งหรือตกผลึกซ้ำ ซึ่งส่งผลให้โครงสร้างหลังจากการเย็นตัวลง จะมีผลึกของมัลไลต์ทั้งสองชนิด ซิลิกา เนื้อแก้ว และรูพรุนรวมอยู่ด้วย

อย่างไรก็ตาม ปฏิกริยาการเปลี่ยนแปลงต่างๆ ที่เกิดขึ้นนั้น ไม่สามารถแยกออกจากกันได้ อย่างชัดเจน ซึ่งระหว่างการเผานั้น การเปลี่ยนแปลงต่างๆ จะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของเนื้อดิน ขนาดอนุภาค อัตราการให้ความร้อน และปัจจัยอื่นๆ ทำให้ได้โครงสร้างที่เกิดขึ้นแตกต่างกันไป

ซึ่งโครงสร้างต่างๆ ที่เกิดขึ้นนั้น ส่งผลโดยตรงต่อสมบัติต่างๆ ของเซรามิก เช่น การมีโครงสร้างหลังเผาที่มีรูพรุนเปิดบริเวณผิวหน้ามาก จะทำให้เซรามิกนั้นมีการดูดซึมน้ำสูง ซึ่งสมบัติที่เกิดขึ้นนี้ จะมีทั้งผลดีและผลเสีย ซึ่งแตกต่างกันตามลักษณะการนำไปใช้งาน หรือการมีโครงสร้างที่มีผลึกของมัลไลต์มาก และมีปริมาณของควอตซ์ที่ไม่เกิดปฏิกริยาเหลืออยู่น้อย จะทำให้เซรามิกมีความแข็งแรงสูง เนื่องจากโครงสร้างผลึกของมัลไลต์ช่วยเสริมความแข็งแรง ซึ่งเหมาะกับงานที่ต้องการความแข็งแรงสูง เป็นต้น เพราะการนำเซรามิกไปใช้งานนั้น ต้องคำนึงถึงสมบัติที่มีว่ามีความเหมาะสมกับงานที่ต้องการนำไปใช้งานมากน้อยเพียงใด เนื่องจากเซรามิกแต่ละประเภท มีสมบัติแตกต่างกันไปตามโครงสร้างที่เกิดขึ้นหลังเผา ซึ่งเกิดเนื่องมาจากส่วนผสมในวัตถุดิบ การให้ความร้อนในการเผานั้น และปัจจัยอื่นๆ

2.1.5 การเกิดผลึกมัลไลต์ (Mullite Formation)^[52]

(1) มัลไลต์ปฐมภูมิ (Primary Mullite)

เมื่อเกิดการสลายตัวของดิน อนุภาคดินขนาดเล็กที่เหลืออยู่ในสภาพเดิมจะรวมตัวกัน เกิดเป็นผลึกรูปสี่เหลี่ยม ที่อุณหภูมิต่ำ เกิดเป็นมัลไลต์ปฐมภูมิ

ที่อุณหภูมิ 1100-1200 °C จะเกิดผลึกมัลไลต์รูปสี่เหลี่ยม ที่มีอัตราส่วนระหว่างอะลูมินาต่อซิลิกา ($\text{Al}_2\text{O}_3 : \text{SiO}_2$) เป็น 1-3 : 1 (Type I) เมื่อดินเผาเกิดแตกตัวเป็นเมตาเคอลิน (Meta-kaolin) ซึ่งอัตราส่วนระหว่าง $\text{Al}_2\text{O}_3 : \text{SiO}_2$ เป็น 1 : 2 และคาดว่าจะเกิดเป็นผลึกมัลไลต์ที่มีอัตราส่วนระหว่าง $\text{Al}_2\text{O}_3 : \text{SiO}_2$ เป็น 2 : 1 เนื่องจากพบว่ามีปริมาณของซิลิกาในเนื้อแก้วมาก

เมื่ออุณหภูมิสูงกว่า 1400 °C อัตราส่วนระหว่าง $\text{Al}_2\text{O}_3 : \text{SiO}_2$ จะมีอัตราส่วนเป็น 10 : 1 เนื่องจาก เนื้อแก้วที่มีซิลิกาสูงจะมีความหนืดสูง จึงไม่สามารถทำให้เกิดการเติบโตของผลึกได้ที่อุณหภูมิต่ำ จึงทำให้ได้ผลึกมัลไลต์ที่มีอัตราส่วนต่ำ เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจะเกิดการไหลตัวของดินหลอมเหลวได้ดีขึ้น ทำให้เกิดผลึกมัลไลต์ที่มีอัตราส่วนสูงขึ้นได้

(2) มัลไลต์ทุติยภูมิ (Secondary Mullite)

มัลไลต์ทุติยภูมิ เป็นผลึกรูปเข็ม เกิดจากการละลายของหินฟันม้าแทรกเข้าไปในอนุภาคดินที่เหลื่อ หรือ เนื้อดินผสมระหว่าง ดิน ควอตซ์และหินฟันม้า และไม่สามารถเกิดจากการสลายตัวของหินฟันม้าเพียงอย่างเดียวได้ ปฏิกิริยาของหินฟันม้ากับเมตาเกาลินในตอนต้นนั้น จะได้มัลไลต์ที่มีอัตราส่วนของ $\text{Al}_2\text{O}_3 : \text{SiO}_2$ เข้าใกล้ 3 : 2 เนื่องจากมีปริมาณของ Al_2O_3 ในดินมาก

เมื่อเกิดการละลายออกมาของด่าง (Alkali) มากขึ้น จะทำให้เกิดปฏิกิริยากับผลึกมัลไลต์ที่เกิดขึ้นก่อน ทำให้เกิดการขยายตัวของผลึกออกไปตามแนวยาว ให้มีขนาดโตขึ้น และยาวกว่ามัลไลต์ปฐมภูมิที่เกิดขึ้นที่อุณหภูมิเดียวกัน

อัตราส่วนของ $\text{Al}_2\text{O}_3 : \text{SiO}_2$ ในบริเวณที่เกิดจากเนื้อดินผสมระหว่างดิน ควอตซ์และหินฟันม้า จะมีอัตราส่วนเป็น 30-40 : 1 (Type II) แต่ในบริเวณที่เกิดจากการละลายของหินฟันม้าแทรกเข้าไปในอนุภาคดินที่เหลื่อ จะมีอัตราส่วนของ $\text{Al}_2\text{O}_3 : \text{SiO}_2$ เป็น 3-10 : 1 (Type III)

มัลไลต์ทุติยภูมิแบบ Type III เกิดในบริเวณที่มัลไลต์ทุติยภูมิแบบ Type II อยู่ในเนื้อแก้วที่หลอมเหลว (Fluid) ซึ่งของเหลวเหล่านี้จะเพิ่มมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูง หรือมีปริมาณตัวช่วยหลอมมาก (Flux) นั่นคือ โซเดียมเฟลด์สปาร์จะทำให้เกิดเนื้อแก้วหลอมเหลวได้มากกว่าโพแทสเซียมเฟลด์สปาร์ซึ่งส่งผลให้เกิดผลึกรูปเข็มขนาดใหญ่กว่า

การผสมเนื้อดินที่ดี เข้าเป็นเนื้อเดียวกัน หรือการมีปริมาณของตัวช่วยหลอมมาก จะทำให้เกิดเนื้อแก้วหลอมเหลวมาก ซึ่งสามารถทำนายได้ว่าจะทำให้เกิดผลึกมัลไลต์ทุติยภูมิ (Type II และ Type III) มากขึ้น

(3) มัลไลต์ตติยภูมิ (Tertiary Mullite)

จะพบในพอร์ซเลนที่ใช้อะลูมินาเป็นตัวเติม เกิดจากการตกผลึกจากอะลูมินาหลอมเหลว นอกจากนั้นแล้วยังพบว่าเกิดจากการตกผลึกซ้ำในดินที่มีส่วนผสมของดินเกาลินกับอะลูมินาด้วย

2.1.6 คุณสมบัติของผลิตภัณฑ์พอร์ซเลน^[59]

(1) เนื้อดิน Common Porcelain สำหรับทำผลิตภัณฑ์ประเภท Table Ware และ Electrical Parts

ตารางที่ 2.20 คุณสมบัติต่างๆ ของผลิตภัณฑ์เนื้อดิน Common Porcelain สำหรับทำผลิตภัณฑ์ประเภท Table Ware และ Electrical Parts

คุณสมบัติ	อุณหภูมิในการเผา (บรรยากาศในการเผา)		หน่วย
	1200 (OF)	1280 (RF)	
Total Shrinkage	10.50-12.50	12.00-14.00	%
Water Absorption	3.00-5.50	0.00-0.14	%
Fired Strength	370-600	650-800	kg/cm ²
Color	85.25-87.36	76.63-78.78	L*
	1.29-2.48	(-0.80, -0.30)	a*
	13.27-15.10	4.85-7.18	b*
COE. 25-500 °C	160-190	160-190	x 10 ⁻⁷ K ⁻¹
Expansion at 500 °C	0.25-0.30	0.25-0.30	%

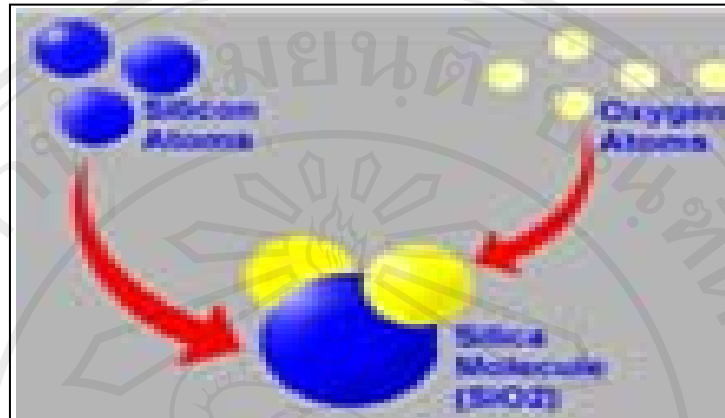
(2) เนื้อดิน Porcelain Body สำหรับทำผลิตภัณฑ์ประเภทชุด Table Ware และชุดถ้วยกาแฟ

ตารางที่ 2.21 คุณสมบัติต่างๆ ของผลิตภัณฑ์เนื้อดิน Porcelain Body สำหรับทำผลิตภัณฑ์ประเภท ชุด Table Ware และชุดถ้วยกาแฟ

คุณสมบัติ	อุณหภูมิในการเผา (บรรยากาศในการเผา)		หน่วย
	1200 (OF)	1280 (RF)	
Total Shrinkage	11.50-13.50	11.50-03.11	%
Water Absorption	0.40-0.80	0.00-0.14	%
Fired Strength	450-650	700-900	kg/cm ²
Color	78.80-84.74	75.37-77.21	L*
	2.05-3.87	(-0.78, -0.40)	a*
	12.06-15.71	2.50-3.32	b*
COE. 25-500 °C	170-200	160-190	x 10 ⁻⁷ K ⁻¹
Expansion at 500 °C	0.28-0.32	0.26-0.30	%

2.2 ซิลิกา (Silica)

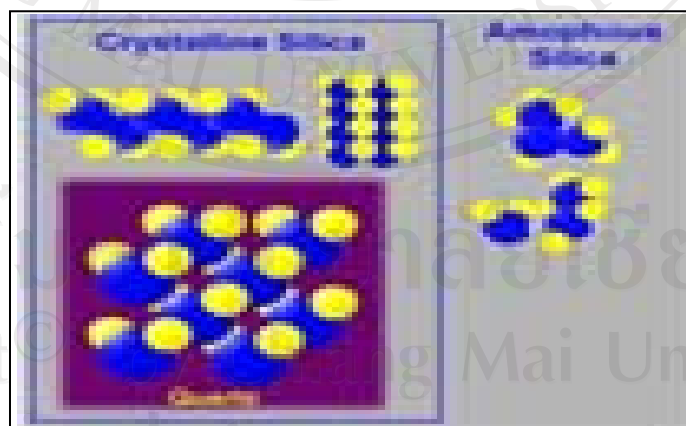
ซิลิกาหรือซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) เป็นของแข็ง ไม่มีสี พบทั้งรูปอสัณฐานและรูปผลึก



รูปที่ 2.15 การรวมตัวของอะตอมซิลิกอนกับอะตอมออกซิเจนเกิดเป็นโมเลกุลซิลิกา ^[60]

2.2.1 ซิลิกาอสัณฐาน (Amorphous Silica)

ซิลิกาอสัณฐานเกิดจากการรวมตัวกันระหว่างซิลิกอนและออกซิเจน อย่างไม่เป็นระเบียบ ประกอบด้วยอนุภาคนาขนาดเล็ก มีพื้นที่ผิวสูง ซึ่งมีชื่อในทางการค้าแตกต่างกันออกไป เช่น Silica Gel, Precipitated Silica, Silica Fume, Pyrogenic Silica และ Colloidal Silica เป็นต้น



รูปที่ 2.16 การจัดเรียงตัวของอะตอมภายในผลึกซิลิกา และซิลิกาอสัณฐาน ^[60]

1. Silica Gel ประกอบด้วยอนุภาคของซิลิกาที่รวมตัวกัน (Colloidal) เกิดเป็นโครงสร้างสามมิติ ซึ่งมีน้ำภายในโครงสร้างเป็นตัวกลางระหว่างอนุภาค เมื่อกำจัดน้ำออกจากโครงสร้าง จะทำให้เกิดการหดตัวอย่างรุนแรง และเรียก Silica Gel ที่ไม่มีน้ำในโครงสร้างว่า Xerogels
2. Precipitated Silica เป็นผงที่เกิดจากการรวมตัวกันของอนุภาคซิลิกา ที่ตกผลึกมาจากสารละลายประเภทซิลิเกต (Silicate Solution)
3. Silica Fume ประกอบด้วยอนุภาคเล็ก ละเอียด มีลักษณะใสคล้ายแก้ว มีพื้นที่ผิว $20 \text{ m}^2/\text{g}$ เป็นผลพลอยได้จากปฏิกิริยารีดักชันควอตซ์ที่มีความบริสุทธิ์สูงด้วยผงถ่านภายในเตาไฟฟ้า ซึ่งผลิตภัณฑ์หลักที่ได้ คือ ซิลิกอน (Silicon) และ เฟอร์โรซิลิกอน อัลลอยด์ (Ferrosilicon Alloys) และพบว่าผลิตภัณฑ์ ซิลิกอน อัลลอยด์ ประเภทอื่นเกิดขึ้นร่วมด้วย เช่น Ferrochromium, Ferromanganese, Ferromagnesium และ Calcium Silicon
4. Colloidal Silica อนุภาคของซิลิกามีขนาด 3-100 นาโนเมตร (nm) จะกระจายลอยตัวอยู่ในน้ำ มีพื้นที่ผิว 50-270 ตารางเมตรต่อกรัม (m^2/g) มีปริมาณซิลิการ้อยละ 15-50 โดยน้ำหนัก และมีสารช่วยกระจายตัว (Stabilizer, Na^+) ประมาณร้อยละ 1
5. โอปอล (Opal) เป็นซิลิกาอสัณฐานที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ มีการจัดเรียงตัวของอนุภาคซิลิกาแบบปกติและมีการแทนที่ด้วยน้ำในบางตำแหน่ง ไม่มีประโยชน์ในเชิงอุตสาหกรรม แต่นิยมใช้เป็นเครื่องประดับ เพชรพลอย เพราะมีสีสวยและสะท้อนแสงออกมาเป็นสีรุ้ง

2.2.2 ซิลิกาในรูปผลึก (Crystalline Silica)^[61]

ผลึกซิลิกาในธรรมชาติที่พบมากมี 3 รูปแบบ ได้แก่ ควอตซ์ (Quartz) ทริไคไมท์ (Tridymite) และคริสโตบาไลต์ (Cristobalite) ซึ่งมีโครงสร้างดังรูปที่ 2.17-2.19 ซึ่งรูปผลึกทั้ง 3 แบบนี้มีสูตรทางเคมีเป็นสูตรเดียวกันคือ SiO_2 แต่จะแตกต่างกันในตำแหน่งการจัดเรียงอะตอมของซิลิกอนและออกซิเจนที่อยู่ในโครงสร้าง กล่าวคือ ในรูปผลึกของคริสโตบาไลต์ และทริไคไมท์ นั้นอะตอมต่างๆ จะถูกจัดวางอยู่ในตำแหน่งที่ใกล้เคียงกันน้อยกว่าควอตซ์ จึงทำให้ทั้งคริสโตบาไลต์และทริไคไมท์ค่าความถ่วงจำเพาะที่ต่ำกว่า (ควอตซ์ 2.65, คริสโตบาไลต์ 2.33 และ ทริไคไมท์ 2.27)

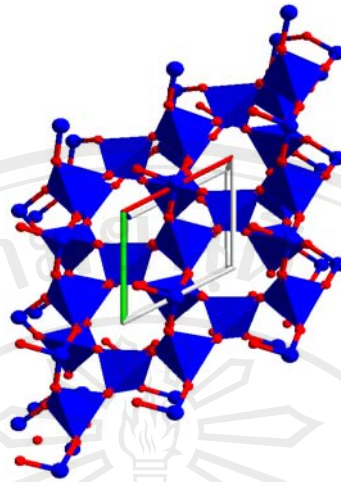
ทริไคไมท์และคริสโตบาไลต์เป็นรูปของซิลิกาซึ่งเกิดที่อุณหภูมิสูง ในขณะที่ควอตซ์เป็นรูปที่มีความเสถียรจนถึงอุณหภูมิ 870°C สำหรับช่วงอุณหภูมิที่ทริไคไมท์มีความเสถียรจะอยู่ในช่วง $870 - 1470^\circ\text{C}$ ส่วนคริสโตบาไลต์จะอยู่ในช่วง 1470°C จนถึงจุดหลอมตัวที่ 1710°C ซึ่งสูงกว่าอุณหภูมิที่ทำให้เกิด Silica Glass หรือ Fused Quartz ซึ่งเป็นซิลิกาที่ไม่ได้อยู่ในรูปผลึก

การเปลี่ยนแปลงรูปผลึกของซิลิกาจากรูปหนึ่งไปเป็นอีกรูปหนึ่งจะเป็นไปอย่างช้าๆ และเกิดการเปลี่ยนรูปกลับในขั้นตอนการทำให้เย็นตัว (Cooling) กล่าวคือ จากรูปของคริสโตบาไลต์

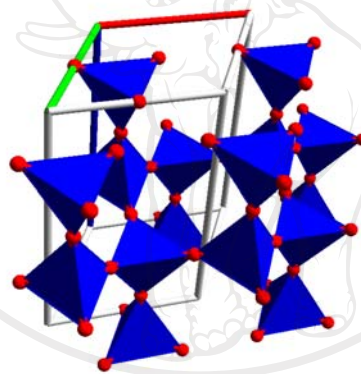
และทริโคไมท์กลับไปเป็นควอตซ์ จะเกิดขึ้นซ้ำๆ จนแทบไม่สังเกตเห็น การเปลี่ยนแปลงจากควอตซ์ไปเป็นทริโคไมท์ก็เกิดขึ้นซ้ำเช่นกัน และอาจจะไม่ได้เกิดขึ้นทั้งหมดโดยปราศจากการปลอมปนของสิ่งเจือปนต่างๆ อยู่ด้วย ในทางปฏิบัติแล้ว คริสโตบาไลต์ที่เกิดขึ้นในช่วงแรกจะเกิดจากการให้ความร้อนแก่ควอตซ์ไปจนถึงอุณหภูมิ 1470 °C หรือสูงกว่านั้น และในระหว่างขั้นตอนการทำให้เย็นตัวระหว่างช่วงอุณหภูมิ 870 -1470 °C จะเกิดซิลิกาในรูปของทริโคไมท์ขึ้น มีความเป็นไปได้ที่จะเร่งให้เกิดคริสโตบาไลต์และทริโคไมท์เร็วขึ้น โดยการเติมวัตถุเจือปนที่เรียกว่า Mineralisers ในปริมาณเล็กน้อยลงไป ดังนั้นการที่มีโลม์หรือแมกนีเซียปนอยู่ด้วยจะสามารถเร่งการเปลี่ยนรูปจากควอตซ์ไปเป็นคริสโตบาไลต์ได้เร็วขึ้น ขณะที่สารประกอบเหล็กจะช่วยเร่งการเกิดของทริโคไมท์ นอกจากนี้อัตราของการเปลี่ยนแปลงจากรูปหนึ่งไปเป็นอีกรูปหนึ่งจะเพิ่มขึ้นตามความละเอียดของวัตถุด้วย การเปลี่ยนแปลงดังกล่าวมานี้ เป็นการเปลี่ยนแปลงที่สำคัญภายในโครงสร้างอะตอม โดยจะเกิดการทำลายพันธะวาเลนซ์และมีการใช้พลังงานปริมาณมาก การเปลี่ยนแปลงดังกล่าวนี้เรียกว่า “Conversions”

นอกจากนี้ การเปลี่ยนแปลงจากรูปผลึกหนึ่งไปเป็นอีกรูปหนึ่งนั้น รูปผลึกแต่ละรูปอาจจะเกิดการเปลี่ยนแปลงเฟสเล็กน้อยภายในโครงสร้าง ที่เรียกว่า “Inversions” ได้ ซึ่งการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวจะเกิดขึ้นจากการหมุนตัว (Rotation) ของพันธะวาเลนซ์ระหว่างอะตอมของซิลิกอนและออกซิเจนเท่านั้น โดยจะมีปริมาณของพลังงานเข้ามาเกี่ยวข้องด้วยเพียงเล็กน้อย และโครงสร้างที่สำคัญๆ จะไม่มีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้น การเปลี่ยนแปลงในแต่ละกรณีดังกล่าว รูปผลึกที่อุณหภูมิต่ำกว่าเรียกว่าแอลฟา (Alpha Form) ส่วนรูปที่อุณหภูมิสูงเรียกว่าบีต้า (Beta Form) (รูปที่ 2.20)

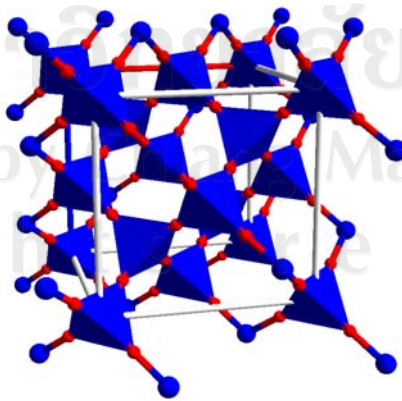
อย่างไรก็ตาม การเปลี่ยนแปลงภายในโครงสร้างจะเกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนเฟสของซิลิกาน้อยมาก โดยซิลิกาในรูปที่ต่างกันจะแสดงคุณสมบัติทางกายภาพที่ต่างกัน ซึ่งสิ่งที่สำคัญที่สุดของประเด็นดังกล่าวนี้สำหรับวัสดุเซรามิกก็คือจะส่งผลให้เกิดการขยายตัวทางความร้อนที่แตกต่างกัน เมื่อแอลฟาควอตซ์ (α -Quartz) เปลี่ยนไปเป็นบีต้าควอตซ์ (β -Quartz) จะเกิดการขยายตัวของปริมาตรเพิ่มขึ้น 1 % ในขณะที่การเปลี่ยนแปลงของคริสโตบาไลต์นั้นจะทำให้เกิดการขยายตัวเพิ่มขึ้น 3 % และการเปลี่ยนแปลงเฟสของทริโคไมท์จากแอลฟาไปเป็นเบต้า (α - β , Tridimite) จะเกิดการขยายตัวของปริมาตรเพิ่มขึ้น 0.3 % ซึ่งไม่เหมือนกันกับการเปลี่ยนรูป (Conversions) เพราะการเปลี่ยนแปลงเฟส (Inversions) จะเกิดขึ้นเกือบจะทันทีทันใด ดังนั้น ณ อุณหภูมิใดๆ ที่มีการเปลี่ยนแปลงเฟสเกิดขึ้น จะมีการเปลี่ยนแปลงของขนาดเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วมาก ซึ่งการเปลี่ยนแปลงของขนาดอย่างรวดเร็วเช่นนี้ จะนำไปสู่การแตกร้าวของชิ้นงานขณะทำการเผาได้ หากทำการเพิ่มหรือลดอุณหภูมิในช่วงที่เกิดการเปลี่ยนแปลงของเฟส (Inversion Temperature) เร็วเกินไป



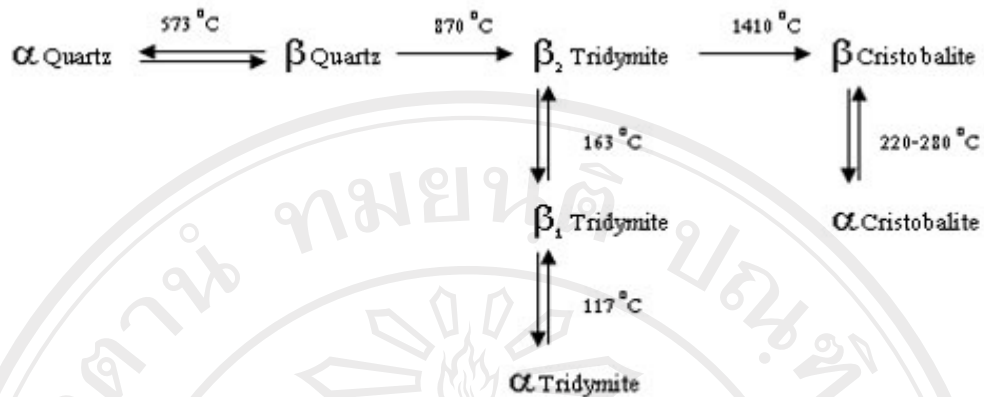
รูปที่ 2.17 โครงสร้างผลึกของซีลิกาในรูปของควอตซ์^[62]



รูปที่ 2.18 โครงสร้างผลึกของซีลิกาในรูปของทรีไคไมท์^[62]



รูปที่ 2.19 โครงสร้างผลึกของซีลิกาในรูปของคริสโตบาไลท์^[62]



รูปที่ 2.20 แผนภาพการเปลี่ยนเฟสของผลึกซิลิกา^[61]

ซิลิกาทำหน้าที่เป็นตัวช่วยเสริมความแข็งแรงให้กับโครงสร้างของผลิตภัณฑ์ มีสมบัติเป็นตัวทนไฟในเนื้อดิน ช่วยเปิดเนื้อดินให้มีความพรุนตัว ลดการหดตัวของเนื้อดินขณะผึ่งแห้ง และลดความเหนียวของเนื้อดิน นอกจากนี้ยังทำให้ผลิตภัณฑ์คงตัวอยู่ในสภาพที่ดี ไม่บิดเบี้ยวแตกร้าวหลังการเผา

ซิลิกาที่ได้จากเกลบจะอยู่ในรูปซิลิกาอสัณฐาน โครงสร้างคล้ายซิลิกาเจล มีลักษณะเป็นเม็ดเล็ก ใส มีสมบัติดูดความชื้น ซึ่งส่วนต่างๆ ของซิลิกาจะจับตัวอยู่กับน้ำตาลโมเลกุลใหญ่ (Polysaccharide) กลายเป็นพันธะระหว่างซิลิกอนกับสารประกอบอินทรีย์ พบในบริเวณชั้นเยื่อ Epidermis และระหว่างเนื้อเยื่อของเกลบขาว^[63] แต่เมื่อนำมาเผา จะพบว่าซิลิกาในเกลบจะมีซิลิกาที่อยู่ในรูปผลึกด้วย ซึ่งประเภทของผลึกนั้นขึ้นอยู่กับอุณหภูมิในการเผา คือ เมื่อเผาที่อุณหภูมิต่ำกว่า 800 °C จะได้ซิลิกาที่อยู่ในรูปของอสัณฐาน เมื่อเผาที่อุณหภูมิสูงขึ้น จะมีปริมาณของผลึกซิลิกาเพิ่มมากขึ้นตามลำดับ รวมทั้งการเร่งปฏิกิริยาหรือทำการเตรียมด้วยการเติมกรด จะทำให้ปริมาณของผลึกซิลิกาสูงขึ้นด้วย^[64]

2.3 การขึ้นรูปด้วยวิธีการอัด

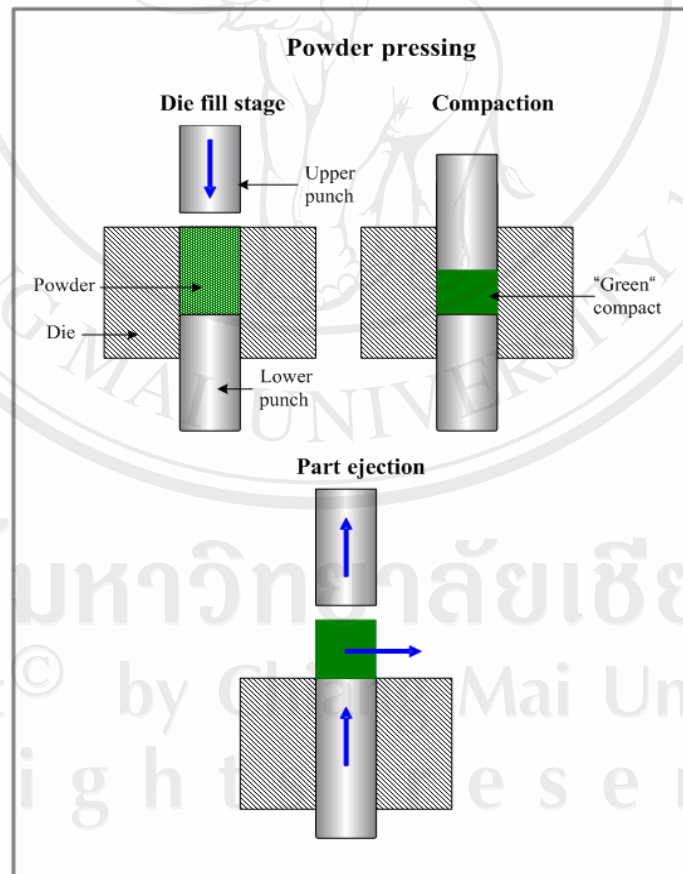
การอัด (Pressing) เป็นกระบวนการให้แรงดันเข้าไปอัดอนุภาคให้ได้รูปทรงตามแบบพิมพ์ที่ต้องการ ผลิตภัณฑ์ที่ขึ้นรูปด้วยการอัด ได้แก่ ภาชนะถ้วยจานชาม จานทรงเหลี่ยม และจานรูปไข่ที่มีขนาดใหญ่เกินกว่าจะขึ้นรูปด้วยวิธีหล่อน้ำดิน

Dry Pressing ใช้กับการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์เซรามิกที่เป็นงานแบบประยุกต์ เช่น ทางด้านอิเล็กทรอนิกส์และไฟฟ้า เป็นวิธีการอัดผงหรือ Granule ภายในแบบโลหะด้วยแรงอัดที่สูง

ความชื้นภายในผงเนื้อดินปั้นไม่เกิน 4 % มักมีการเติม Binder และ Additive เพื่อให้อนุภาคเกาะกันได้ดีและเมื่อถูกแรงอัดจะทำให้ชิ้นงานมีความแน่นตัวมากขึ้น

Uniaxial Pressing การอัดขึ้นรูปแบบทิศทางเดียวในกระบวนการขึ้นรูปเซรามิก ประกอบด้วย การอัดผงอนุภาค ซึ่งถูกบรรจุในช่องว่างโดยการให้ความดันทิศทางเดียว อาจใช้หัวกดตัวเดียวหรือหลายตัวก็ได้ สำหรับช่องว่างที่ใส่ผงจะถูกทำขึ้นจากฐานซึ่งเคลื่อนที่ได้ เรียกว่า Lower Punch และผนังที่สามารถเคลื่อนที่หรืออาจยึดติดกับแม่พิมพ์ (Mould Die) ไว้ การอัดขึ้นรูปมีความแตกต่างกันในด้านการเคลื่อนที่ของแม่พิมพ์ Upper Punch, Lower Punch และ Die และความดันที่ใช้ ขั้นตอนในกระบวนการอัดมี 3 ขั้นตอน ได้แก่

1. Die filling
2. Compaction
3. "Green" compact part ejection and removal



รูปที่ 2.21 วิธีการอัดขึ้นรูปแบบทิศทางเดียว (Uniaxial Pressing)^[65]

2.4 ความแข็งแรงของพอร์ซเลน^[66-67]

ความแข็งแรง (Strength) หมายถึง ความสามารถที่จะต้านทานแรงที่มากระทำโดยไม่เกิดการแตกหักจากแรงที่เกิดขึ้นภายในของวัสดุที่พยายามต้านทานแรงภายนอกที่มากระทำ เพื่อไม่ให้เกิดการเปลี่ยนแปลงขนาด และรูปร่าง เรียกว่า ความเค้น (Stress) วัดเป็นแรงต่อหน่วยพื้นที่ ส่วนอัตราส่วนระหว่างความยาวของวัสดุที่เปลี่ยนแปลงไปต่อความยาวเดิมก่อนถูกแรงมากระทำ เรียกว่า ความเครียด (Strain) ทั้งความเค้นและความเครียดมีผลต่อความแข็งแรง ทั้งนี้เพราะการวัดความแข็งแรงจะได้จากการหาค่าความเค้นสูงสุดที่ทำให้เกิดการแตกหัก เสียรูปทรง หรือจะออกมาในรูปของค่าโมดูลัสของการแตกหัก (Modulus of Rupture, MOR) หน่วยที่ใช้คือ ปอนด์ต่อตารางฟุต (lb/ft^2) หรือ psf ในระบบอังกฤษ และใช้นิวตันต่อตารางเมตร (N/m^2) หรือ ปาสคาล (Pascal, Pa) ในระบบสากล

ความทนแรงอัด (Compressive Strength) โดยทั่วไป ใช้สำหรับทดสอบวัสดุที่มีความเปราะ เช่น เหล็กหล่อ และคอนกรีต โดยเครื่องมือที่ใช้ทดสอบ มีลักษณะคล้ายการทดสอบแรงดึง แต่ใช้แรงอัดแทน หาค่าการหดตัวแทนค่าการยืดตัว ขึ้นทดสอบนิยมใช้เป็นแท่งรูปสี่เหลี่ยมหรือแท่งกลมทรงกระบอก มีความสูงมากกว่าความกว้างพอสมควร เพื่อลดการเสียความทนบนผิวสัมผัสของชิ้นทดสอบ โดยขนาดของชิ้นทดสอบจะแตกต่างกัน เช่น แท่งทรงกระบอกเส้นผ่าศูนย์กลาง 150 มิลลิเมตร สูง 300 มิลลิเมตร หรือเป็นแท่งสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ ขนาด 150 X 150 X 150 มิลลิเมตร เป็นต้น การทดสอบความทนแรงอัดจะใช้หลักการเพิ่มความเค้นอัดอย่างช้า ๆ และสม่ำเสมอ ซึ่งสามารถคำนวณได้ดังสมการ (2.5)

$$C = \frac{P}{A} \quad (2.5)$$

เมื่อ C = Compressive Strength (kg/cm^2)

P = Total Load on the Specimen of Failure (kg)

A = Calculated Area of the Bearing Surface of the Specimen (cm^2)

ข้อจำกัดของการทดสอบ คือ ผิวด้านข้างของชิ้นทดสอบจะต้องเรียบกลมสม่ำเสมอ และวางชิ้นทดสอบให้อยู่กึ่งกลางของตัวกดอัด วัสดุที่มีความเหนียวเมื่อถูกอัดจะเกิดรอยร้าวและพองออกด้านข้าง หากวัสดุมีความอ่อนจะถูกอัดแบนโดยไม่แตกหัก แต่หากวัสดุมีความเปราะจะแตกหักเป็นรูปกรวย

ความแข็งแรงของผลิตภัณฑ์พอร์ซเลน^[66] สามารถอธิบายได้จาก 3 สมมติฐาน ดังนี้

(1) สมมติฐานมัลไลท์ (Mullite Hypothesis)

เสนอว่า ความแข็งแรงของผลิตภัณฑ์พอร์ซเลน ขึ้นอยู่กับลักษณะที่สานกันคล้ายเนื้อผ้า (Felt-like Interlocking) ของผลึกรูปเข็มขนาดเล็กของมัลไลท์ที่เกิดขึ้นในเนื้อพอร์ซเลนเพียงอย่างเดียว การมีปริมาณมัลไลท์และ Felt-like Interlocking มาก จะทำให้พอร์ซเลน มีความแข็งแรงมากด้วย ดังนั้น ความแข็งแรงของพอร์ซเลนจึงขึ้นอยู่กับปริมาณและขนาดของผลึกมัลไลท์

(2) สมมติฐานการกระจายความแข็งแรง (Dispersion Strengthening Hypothesis)

สมมติฐานการกระจายความแข็งแรง เกี่ยวกับการกระจายตัวของอนุภาคต่างๆ ที่ฝังตัวอยู่ในเนื้อแก้ว เช่น ผลึกของควอตซ์และมัลไลท์ซึ่งเป็นโครงสร้างที่สามารถจำกัดขนาดของตำหนิที่เกิดขึ้นให้มีขนาดเล็กได้ ส่งผลให้ความแข็งแรงเพิ่มมากขึ้น

(3) สมมติฐานการเสริมแรง (Matrix Reinforcement Hypothesis)

เน้นไปในทางที่เกี่ยวกับการพัฒนาความเค้นอัดในเนื้อแก้ว (Compressive Stresses) ซึ่งเป็นผลจากความแตกต่างของค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องด้วยความร้อนของอนุภาค หรือผลึกต่างๆ ที่อยู่ในเนื้อแก้ว (ส่วนมาก ได้แก่ ควอตซ์) เมื่อมีความเค้นมาก พอร์ซเลนก็จะมีค่าความแข็งแรงสูงด้วยเช่นกัน ซึ่งเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า Pre-stressing Effect

2.5 สรุปสาระสำคัญจากเอกสารที่เกี่ยวข้อง

Della และคณะ^[68] ได้ทำการศึกษาวิธีการเตรียมและหาลักษณะเฉพาะของซิลิกาจากเถ้าแกลบด้วยการเผาในบรรยากาศที่มีออกซิเจนภายในเตาไฟฟ้า ที่อุณหภูมิ 400, 500, 600 และ 700 °C โดยมีอัตราการให้ความร้อน 10 °C ต่อนาที และขึ้นไฟ 1, 3 และ 6 ชั่วโมง จากนั้นทำการลดขนาดด้วยการบดเป็นเวลา 10, 40 และ 80 นาที แล้วจึงหาลักษณะเฉพาะ ได้แก่ การวิเคราะห์ทางเคมี การวิเคราะห์ทางแร่ พื้นที่ผิว การกระจายขนาด และปริมาณของคาร์บอน พบว่าเมื่อใช้เวลาและอุณหภูมิในการเผาเถ้าแกลบมากขึ้น ปริมาณของซิลิกาที่ได้จะเพิ่มขึ้น แต่ไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของซิลิกา และการเผาที่อุณหภูมิ 700 °C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง จะได้ปริมาณซิลิกามากถึงร้อยละ 95 และเมื่อทำการบด ซิลิกาจะมีพื้นที่ผิวเพิ่มจาก 54 เป็น 81 ตารางเมตรต่อกรัม

Shinohara และคณะ^[5] ศึกษาปริมาณของทรีไคไมท์ และคริสโตบาไลต์ในเถ้าแกลบ โดยเถ้าแกลบที่นำมาศึกษาจะทำการเตรียมจากการเผาเถ้าแกลบขาวที่อุณหภูมิ 450 °C แล้วจึงนำมาบด จากนั้นทำการเผาเถ้าแกลบที่อุณหภูมิต่างๆ กัน ตั้งแต่ 700-1350 °C เป็นเวลา 6 หรือ 24 ชั่วโมง พบว่า การเผาที่อุณหภูมิสูงกว่า 900 °C จะมีปริมาณของซิลิกาสูงถึงร้อยละ 93 และ K₂O ร้อยละ 2-3 และที่

อุณหภูมิ 900-1200 °C มีปริมาณของคริสโตบาลไลท์ร้อยละ 52-62 , ทริโคไมท์ร้อยละ 10-17 ในขณะที่การเผาที่อุณหภูมิมากกว่า 1100 °C จะให้ปริมาณของคริสโตบาลไลท์ร้อยละ 46-66 แต่มีปริมาณของทริโคไมท์เพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 37-16

Pinatti และคณะ^[69] ศึกษาผลของเถ้าจากเซลลูโลกนินเพื่อปรับปรุงลักษณะของกระเบื้องเซรามิก (Vitrified Ceramic Tile) ทำการเตรียมเถ้าด้วยกระบวนการเผาเซลลูโลกนินที่อุณหภูมิ 800 °C แล้วจึงหาลักษณะเฉพาะของเถ้า ก่อนนำมาผสมในเนื้อกระเบื้อง ทำการบดเซลลูโลกนินเป็นเวลา 1 ชั่วโมงก่อนนำมาผ่านตะแกรงร่อนขนาด 200 เมช โดยให้ความชื้นร้อยละ 8 จากนั้นทำการเผาที่อุณหภูมิ 1200 °C โดยมีอัตราการให้ความร้อน 2 ช่วง คือ ตั้งแต่เริ่มต้นจนกระทั่งอุณหภูมิ 600 °C อัตราการให้ความร้อน 4 °C ต่อนาที และหลังจากนั้น อัตราการให้ความร้อน 10 °C ต่อนาที และขึ้นไฟ 1 ชั่วโมง พบว่า ส่วนประกอบหลักของเถ้า คือ ควอตซ์ที่มีอนุภาคนาโน (Nanometric Particle Size) มีพื้นที่ผิวสูง ปริมาณต่างมาก ซึ่งสามารถนำไปใช้ในรูปของตัวช่วยหลอมได้ มีผลต่อการเกิดเนื้อแก้วของเนื้อดินหลังเผา และทำให้ความแข็งแรงเชิงกลเพิ่มขึ้น

Prasad และคณะ^[70] ศึกษาผลของเถ้าแกลบที่มีต่อสมบัติของผลิตภัณฑ์ประเภท Whiteware วัตถุดิบที่ใช้ ได้แก่ China Clay ร้อยละ 50 โพลเทสซีเมนต์เฟลด์สปาร์ ร้อยละ 25 ซึ่งกรองผ่านตะแกรงร่อนขนาด 300 เมช ใช้เถ้าแกลบที่ได้จากการเผาในบรรยากาศที่มีออกซิเจนและบดด้วยหม้อบดเนื้อพอร์ซเลนเป็นเวลา 35 ชั่วโมง ทำการเติมเถ้าแกลบลงไปในส่วนผสมแทนควอตซ์ในปริมาณร้อยละ 5-25 ของเนื้อดิน และเผาที่อุณหภูมิระหว่าง 1100-1300 °C ทุกๆ 50 °C ด้วยเตาไฟฟ้า อัตราการให้ความร้อน 3.5 °C ต่อนาที ขึ้นไฟ 1 ชั่วโมง พบว่าสมบัติก่อนเผาของเนื้อดินผสม (Plastic and Dry Properties) ได้แก่ Water of Plasticity, Dry Linear Shrinkage, Dry M.O.R and Bulk Density เปลี่ยนแปลงเล็กน้อย และเมื่ออัตราส่วนของเถ้าแกลบมากขึ้น อุณหภูมิที่ใช้ในการสุกตัว การดูดซึมน้ำ และการขยายตัวเนื่องด้วยความร้อนจะลดลง แต่มีความแข็งแรงของเนื้อดินหลังเผาเพิ่มมากขึ้น

Prasad และคณะ^[18] ศึกษาการใช้เถ้าแกลบกับ Silica Fume แทนควอตซ์ที่มีผลต่อสมบัติของ Whiteware ซึ่งวัตถุดิบที่ใช้ ได้แก่ China Clay ร้อยละ 50 หินฟีนมา ร้อยละ 25 กรองผ่านตะแกรงร่อนขนาด 300 เมช และใช้เถ้าแกลบที่ได้จากการเผาในบรรยากาศที่มีออกซิเจน และบดด้วยหม้อบดเนื้อพอร์ซเลนเป็นเวลา 35 ชั่วโมง เติมเถ้าแกลบลงไปในส่วนผสมแทนควอตซ์ในปริมาณร้อยละ 5-25 ของเนื้อดิน และเผาที่อุณหภูมิระหว่าง 1100-1300 °C ทุกๆ 50 °C ด้วยเตาไฟฟ้า อัตราการให้ความร้อน 3.5 °C ต่อนาที ขึ้นไฟ 1 ชั่วโมง พบว่า การใช้เถ้าแกลบกับ Silica Fume อัตราส่วน 1:1 สามารถลดอุณหภูมิในการสุกตัวได้ 50-100 °C มีค่าการขยายตัวเนื่องด้วยความร้อนลดลงร้อยละ 3.24-14.6 ที่อุณหภูมิ 600 °C และมีความแข็งแรงหลังเผาเพิ่มขึ้น ค่าการทดสอบความแกร่ง (MOR) เพิ่มขึ้นมากที่สุดถึงร้อยละ 20.8 ในส่วนผสมของเถ้าแกลบกับ Silica Fume อัตราส่วน 1:1 ร้อยละ

10 เมื่อใช้เถ้าแกลบกับ Silica Fume อัตราส่วน 1:1 ร้อยละ 25 พบว่าอุณหภูมิในการสุกตัวลดลง 100 °C มีความแข็งแรงและการหดตัวหลังเผาเพิ่มขึ้น

Braganca และคณะ^[71] ศึกษาขนาดของควอตซ์ที่มีผลต่อความแข็งแรง (Strength) และความเหนียว (Fracture Toughness) ของพอร์ซเลน วัตถุดิบที่ใช้ คือ ดินขาว ร้อยละ 50 หินฟันม้า ร้อยละ 25 และควอตซ์ ร้อยละ 25 โดยใช้ดินขาวและหินฟันม้าที่มีขนาดเฉลี่ย 100 ไมครอน และใช้ควอตซ์ที่มีขนาดแตกต่างกัน ด้วยวิธีการบดเปียก ทำการเผาที่อุณหภูมิ 1340 °C อัตราการให้ความร้อน 150 °C ต่อ นาที ขึ้นไฟ 30 นาที แล้วทำการหาความแข็งแรงและความเหนียวด้วยการวัดแบบ Four Point Bending พบว่า ความแข็งแรงและความเหนียวของพอร์ซเลนเพิ่มขึ้นเมื่อขนาดของควอตซ์เล็กลง

Hutchings และคณะ^[72] ทำการศึกษาผลของขนาดอนุภาคควอตซ์ต่อโครงสร้างทางจุลภาคของกระเบื้องพอร์ซเลน พบว่า ขนาดอนุภาคของควอตซ์มีผลอย่างมากต่อการละลายในระหว่างการเผานั้นคือ เมื่อใช้ควอตซ์ที่มีขนาดอนุภาคเล็กลง จะทำให้สามารถละลายได้ดีและเกิดเป็นเนื้อแก้วได้มากขึ้น ทำให้มีปริมาณของผลึกซิลิกาที่เหลืออยู่น้อยลงและมีขนาดเล็กกว่าการใช้ควอตซ์ที่มีขนาดใหญ่ และยังทำให้มีรูพรุนขนาดเล็กลงอีกด้วย นอกจากนั้นยังพบว่า ขนาดของเถ้าแกลบ ไม่มีผลต่อปริมาณของมลไท์ที่เกิดขึ้น