

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การดำเนินงานวิจัยครั้งนี้ ได้ค้นคว้าข้อมูลต่างๆ ที่เกี่ยวข้องจากเอกสาร ตำรา ตลอดจนงานวิจัยที่ผ่านมา เพื่อให้งานวิจัยบรรลุวัตถุประสงค์ตามที่ตั้งไว้ โดยจำแนกเป็นหัวข้อดังนี้

- 2.1 วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตเซรามิก
- 2.2 ประเภทของเนื้อดิน
- 2.3 การขึ้นรูปผลิตภัณฑ์เซรามิกโดยวิธีหล่อเนื้อดิน
- 2.4 การทดสอบและวิเคราะห์สมบัติของเนื้อดิน
- 2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
- 2.6 กรอบแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย

2.1 วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตเซรามิก

วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตเซรามิกทุกชนิดมีแหล่งกำเนิดจากหินต้นกำเนิด (Mother rock) อาทิ หินอัคนี (Igneous rock) หินตะกอน (Sedimentary rock) และหินแปร (Metamorphic rock) ที่สลายตัวตามธรรมชาติเนื่องจากน้ำพุร้อน (Hydrothermal alteration) หรือการสลาย (Weathering) ในอัตราการสลายที่แตกต่างกัน ส่งผลให้วัตถุดิบแต่ละชนิดมีสมบัติทางเคมี สมบัติทางกายภาพ และสมบัติทางแร่แตกต่างกัน วัตถุดิบที่สลายตัวในบริเวณแหล่งกำเนิดเดิมเรียกว่า วัตถุดิบปฐมภูมิ (Primary หรือ Residual matter) ส่วนวัตถุดิบที่เกิดการเคลื่อนย้ายไปรวมกันยังแหล่งอื่นที่ห่างไกลแหล่งกำเนิดเดิมเรียกว่า วัตถุดิบทุติยภูมิ (Secondary หรือ Sedimentary matter) วัตถุดิบเซรามิกสามารถจำแนกตามลักษณะความเหนียว (Plasticity) ออกเป็น 2 กลุ่ม ประกอบด้วย วัตถุดิบที่มีความเหนียว (Plastic raw materials) อาทิ หินผุ ดิน และวัตถุดิบที่ไม่มีความเหนียว (Non-plastic raw materials) อาทิ ทราย หินปูน (สูตรพล ปลิ้มใจ, 2547 : 1) สำหรับผลิตภัณฑ์ไวท์แวร์ (White ware) จะจำแนกวัตถุดิบออกเป็น 3 กลุ่ม ได้แก่ วัตถุดิบประเภทดิน (Clays) เป็นส่วนเพิ่มความเหนียวและความสามารถในการขึ้นรูป วัตถุดิบประเภทฟลักซ์ (Fluxes) เป็นส่วนช่วยลดอุณหภูมิที่ใช้ในการเผา และวัตถุดิบประเภทฟิลเลอร์ (Fillers) เป็นส่วนควบคุมการขยายตัวเนื่องจากความร้อนภายหลังการเผา (วัชรีย์ ประภาชี, 2550)

2.1.1 คุณสมบัติทั่วไปของแกรนิต

2.1.1.1 การเกิดของแกรนิต (Origin granite)

แกรนิต จัดเป็นหินอัคนีชนิดหนึ่ง หินอัคนีหมายถึง หินที่เกิดจากการเย็นตัวและตกผลึกของหินหนืด (Magma) ซึ่งอาจจะเกิดขึ้นใต้พื้นผิวโลกหรือเกิดขึ้นบนพื้นผิวโลก หินอัคนีที่เกิดขึ้นใต้ผิวโลกเรียกว่า Intrusive rock หรือ Plutonic rock เป็นหินอัคนีที่มีลักษณะผลึกแร่หยาบและเป็นเหลี่ยมเกาะประสานตัวกันแน่น

2.1.1.2 องค์ประกอบของแร่ (Mineral composition)

แกรนิตเป็นหินที่ประกอบไปด้วยแร่ที่เป็นองค์ประกอบส่วนใหญ่หรือส่วนสำคัญอยู่ 2 ชนิด คือ

- 1) แร่ควอทซ์ (Quartz) ซึ่งจะต้องมีปริมาณมากกว่า 10 % ขึ้นไปในเนื้อหิน
- 2) แร่เฟลด์สปาร์ (Feldspars) ซึ่งประกอบด้วย Alkali feldspar และ Plagioclase feldspar ต้องเป็นพวกที่เป็น Alkali feldspar มีปริมาณมากกว่า 2/3 ของปริมาณแร่ Feldspar และมีพวกแร่ Mica เล็กน้อย

2.1.1.3 ลักษณะของเนื้อแกรนิต (Texture)

หมายถึงขนาดและการเรียงตัวของเม็ดแร่ในเนื้อแกรนิตซึ่งเป็นผลึกของแร่ที่ยึดเกี่ยวกันเป็นเนื้อหิน ลักษณะของเนื้อแกรนิตที่พบมีดังนี้

- 1) เนื้อผลึกหยาบ (Phaneritic texture) เป็นลักษณะที่เนื้อหินประกอบไปด้วยแร่ที่มีขนาดใกล้เคียงกันและมีขนาดใหญ่พอที่จะมองเห็นผลึกแร่ได้ด้วยตาเปล่า
- 2) เนื้อผลึกสองขนาด (Porphyritic texture) เป็นลักษณะเนื้อหินที่ประกอบไปด้วยขนาดของแร่ที่เป็นเนื้อหิน 2 ขนาด คือส่วนที่มีขนาดเล็กเรียกว่า Ground mass และส่วนที่เป็นแร่ที่มีขนาดใหญ่ เรียกว่า Phenocryst
- 3) เนื้อผลึกที่มีการเรียงตัวของแร่ (Foliated texture) คือเนื้อหินซึ่งแร่ที่เป็นองค์ประกอบมีลักษณะการเรียงตัวเป็นแผ่นหรือแนวขนานกันเห็นได้ชัดเจนในพวก Platy minerals เช่น Mica ซึ่งเป็น Plane of weakness ในเนื้อหิน หินสามารถแตกแยกออกตามแนวเรียงตัวนี้

2.1.1.4 การผุกร่อนของแกรนิต (Weathering of granite)

แกรนิตที่มีอยู่บนผิวโลกย่อมจะเกิดขบวนการผุกร่อนทำลายทำให้หินแตกหักและสลายตัวกลายเป็นดินทับถมอยู่บนผิวโลก ขบวนการผุกร่อนทำลายของหินจะเกิดขึ้นเร็วหรือช้าขึ้นอยู่กับชนิดของหิน ซึ่งรวมถึงชนิดของแร่ที่เป็นองค์ประกอบหิน ลักษณะการแตกหักที่เกิดขึ้นในหิน (Joints of fracture) มากหรือน้อยเพียงใด นอกจากนี้ยังขึ้นอยู่กับ ภูมิอากาศ และสภาพภูมิประเทศในท้องถิ่นๆ ด้วย เนื่องจากประเทศไทยเป็นประเทศที่มีภูมิอากาศแบบฝนตกชุกและอุณหภูมิสูงการ Weathering ในหินจึงเกิดขึ้นได้รวดเร็วและมาก ขบวนการผุกร่อนของแกรนิตสามารถจะสรุปเป็นขั้นตอนได้ดังต่อไปนี้

2.1.1.5 ขบวนการผุกร่อนของแกรนิต (Weathering process of granite)

ขบวนการผุกร่อนทำลายที่เกิดขึ้นในหิน มี 2 ขบวนการ คือ

- 1) การผุกร่อนทำลายทางกายภาพ (Physical weathering) ซึ่งขบวนการที่หินแตกหักออกเป็นชิ้นเล็กชิ้นน้อย เนื่องจากมีแรงจากภายนอกในโลกมากระทำแกรนิต จะมีแนวแตกหักเกิดขึ้นในเนื้อหิน (Jointing and fracturing)
- 2) การผุกร่อนทำลายทางเคมี (Chemical weathering) เป็นขบวนการการผุกร่อนทำลายที่เกิดขึ้นกับแร่ที่เป็นองค์ประกอบในหิน ทำให้แร่ในหินเปลี่ยนแปลงไป แกรนิตที่แนวแตก (Joints) เมื่อฝนตกน้ำฝนสามารถซึมผ่านลงไปเนื้อหินตามแนวแตกเหล่านี้ ทำให้แร่ที่เป็นองค์ประกอบในหินเกิดเปลี่ยนแปลงไป โดยแร่ Feldspars จะมีลักษณะอ่อนนุ่มและถูกเปลี่ยนเป็น

Clay mineral (Kaolinite) โดยขบวนการ Hydrolysis แร่ Biotite จะมีลักษณะสีซีดจางลงและถูกเปลี่ยนไปเป็นแร่ Chlorite และ Clay minerals โดยขบวนการ Oxidation ในลักษณะคราบสนิมเหล็ก (น้ำตาลแดง) เคลือบตามเนื้อหิน จากนั้นเม็ดแร่ในหินจะมีแนวโน้มที่จะหลุดแยกจากกันไม่เกาะกันแน่นเหมือนเดิม แร่ Quartz เป็นแร่ที่ไม่ถูกเปลี่ยนแปลงเลยเป็นแร่ที่คงทนต่อการผุกร่อนทำลายจะเป็นผลเหลือจากการ Weathering

2.1.1.6 แนวแกรนิตในประเทศไทย

แกรนิต สามารถจำแนกออกเป็น 3 โซน ตามลักษณะภูมิศาสตร์ เนื้อหิน ธรณีเคมีของหิน แร่ประกอบหิน อายุหินและการกำเนิดหิน ได้แก่

1) แกรนิตโซนตะวันออก เป็นกลุ่มแกรนิตที่พบในบริเวณขอบด้านตะวันออกของที่ราบสูงโคราช ตั้งแต่จังหวัดเชียงราย น่าน แพร่ ตาก เลย เพชรบูรณ์ นครสวรรค์ อุทัยธานี นครราชสีมา ปราจีนบุรี ตรวต แกรนิต โซนตะวันออกนี้ จะประกอบด้วย แกรนิต แกรไนต์ ไดออไรต์ แกบโบร และโทนาลิต์ และมักมีหินภูเขาไฟ เช่น ไรโอไลต์ แอนดีไซต์ รวมอยู่ด้วย แร่ประกอบหินจะเป็นแร่ควอทซ์ เฟลด์สปาร์ ไบโอไทต์ ฮอร์นเบลนด์ และไพรอกซีน

2) แกรนิตโซนกลาง เป็นโซนที่แกรนิตปรากฏให้เห็นมากที่สุด พบตั้งแต่จังหวัดแม่ฮ่องสอน เชียงราย เชียงใหม่ ลำพูน ลำปาง ตาก กำแพงเพชร อุทัยธานี สุพรรณบุรี กาญจนบุรี ชลบุรี ประจวบคีรีขันธ์ ต่อไปทางใต้ผ่านจังหวัด นครศรีธรรมราช สงขลา ตรัง สตูล และยะลา ต่อเข้าไปในประเทศมาเลเซีย แร่ประกอบหิน ได้แก่ ควอทซ์ เฟลสปาร์ และไบโอไทต์ นอกจากนั้นก็พบแร่มีสโคไวต์ และทัวร์มาลีน ส่วนแร่ฮอร์นเบลนด์พบน้อยมาก โดยทั่วไปมักจะมีสายหินแพกมาไทต์ แอไพลต์ดินแทรกเข้ามา

3) แกรนิตโซนตะวันตก เป็นโซนแคบๆ พบตั้งแต่หมู่เหมืองแม่ลามา อำเภอมะละเรียงชายแดนไทย-พม่า ผ่านจังหวัดกาญจนบุรี ราชบุรี ชุมพร ระนอง พังงา และภูเก็ต ลักษณะหินโดยทั่วไปคล้ายหินในโซนกลาง แร่ควอทซ์ เฟลด์สปาร์ และไบโอไทต์ เป็นแร่หลัก และมักพบแร่มีสโคไวต์เกิดอยู่ด้วย หินแพกมาไทต์ แอไพลต์ พบดินแทรกขึ้นมามาก เช่น ในพื้นที่เกาะภูเก็ต พังงา ส่วนที่แตกต่างจากหินโซนกลาง คือ ไม่ปรากฏหินในส้อยในโซนนี้ มีหินลักษณะที่คล้ายกับหินโซนตะวันออก 2 บริเวณ คือ เขาประทิว จังหวัดภูเก็ต และเขาพนมเบญจา จังหวัดกระบี่ (ไพศาลสุวรรณรักษ์, 2543 : 3-8)

2.1.1.7 การสลายตัวและลำดับขั้นการสลายตัวของแร่บางชนิดที่เป็นองค์ประกอบที่สำคัญในแกรนิต

1) ควอทซ์ เป็นแร่ที่มีความทนทานต่อการผุพังอยู่กับที่มากที่สุดทั้งทางกายภาพและทางเคมี ในการสลายตัวผุพังอยู่กับที่ของแร่ควอทซ์ กระบวนการสลายตัวทางกายภาพจะมีความสำคัญและปรากฏให้เห็นได้เด่นชัดกว่า การสลายตัวทางเคมี กระบวนการสลายตัวทางกายภาพ จะทำให้ควอทซ์เปลี่ยนแปลงรูปร่าง ขนาด และพื้นที่ผิว เมื่อเกิดการผุพังอยู่กับที่เป็นเวลานานๆ อนุภาคของแร่ควอทซ์จะค่อยๆ เล็กลงและมีความกลมมนมากขึ้น โดยมีบางส่วนที่ผิวหน้าของแร่จะเกิดการละลายไปได้บ้าง การผุพังอยู่กับที่ทางเคมีจะเกิดขึ้นในที่ที่มีการชะล้างสูง โดยซิลิกาในควอทซ์และในแร่ดินเหนียว จะละลายได้ 7-10 ส่วนใน 1 ล้านส่วน (ppm) และ 10-30 ส่วนใน 1 ล้านส่วน ที่ 25 องศาเซลเซียส ตามลำดับ

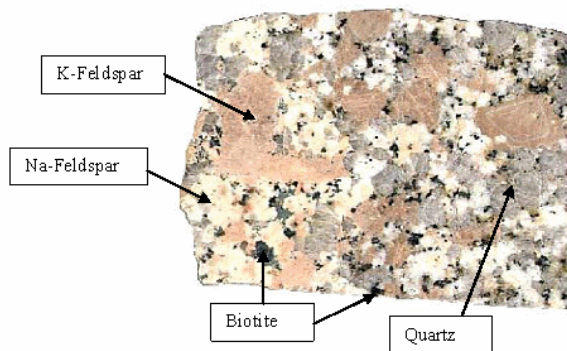
2) เฟลด์สปาร์ แบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ คือ โฟแทชเฟลด์สปาร์ และโซดาไลม์เฟลด์สปาร์ พวกโฟแทชเฟลด์สปาร์ ได้แก่ แร่ไมโครไคลน์ (Microcline) และออร์โทเคลส (Orthoclase) พวกโซดาไลม์เฟลด์สปาร์ ได้แก่ แร่ในกลุ่มพลาจิโอเคลส (Plagioclase) ซึ่งเป็นแร่ที่มีส่วนประกอบเป็นอนุกรมต่อเนื่องกันระหว่างธาตุโซเดียมและแคลเซียม โดยมีแร่ตั้งแต่แอลไบต์ (Albite) ซึ่งมีโซเดียมอย่างเดียว จนถึงอะนอร์ไทต์ (Anorthite) ซึ่งมีแคลเซียมอย่างเดียว แร่ระหว่างแอลไบต์กับอะนอร์ไทต์จะมีร้อยละของโซเดียมและแคลเซียมลดหลั่นกันไปและมีชื่อเรียกแตกต่างกัน

3) ไบโอไทต์ เป็นแร่ที่สลายตัวได้ง่ายเนื่องจากมีรอยแตกธรรมชาติ ซึ่งจะเปราะจนทำให้สามารถเข้าไปทำให้เกิดการผุพังอยู่กับที่ได้ง่ายขึ้น เช่นเดียวกับเฟลด์สปาร์ แต่ไบโอไทต์จะสลายตัวได้ง่ายกว่าเฟลด์สปาร์ เพราะว่าเป็นแร่ที่อ่อนกว่าเฟลด์สปาร์และเนื่องจากไบโอไทต์มีเหล็กเป็นองค์ประกอบ จึงทำให้ออกซิเจนจากอากาศทำปฏิกิริยากับเหล็กได้ง่าย เป็นเหตุให้ไบโอไทต์สลายตัวได้ง่ายกว่าเฟลด์สปาร์ ส่วนผลลัพท์ที่เกิดขึ้นจากการสลายตัวของแร่ไบโอไทต์จะได้แร่ดินเหนียวชนิดต่างๆ กันขึ้นกับสภาพแวดล้อมในการสลายตัวที่มีลักษณะต่างๆ กัน โดยในสภาพการระบายน้ำดี มีความเป็นกรดรุนแรง และมีการชะล้างสูง ไบโอไทต์จะสลายตัวไปเป็นแร่เคโอลิไนต์ ในสภาพที่มีการระบายน้ำเลวจะสลายตัวไปเป็นแร่สะเมกไทต์ และเวอร์มิคิวไลต์ (Vermiculite) ในสภาพชุ่มชื้นจะสลายตัวไปเป็นแร่เวอร์มิคิวไลต์ หรือไมก็เคโอลิไนต์เพียงอย่างเดียว หรือทั้งสองอย่าง ในเขตร้อนจะสลายตัวไปเป็นแร่ฮาโลยไซด์และเกอไทต์ (Goethite) ในเขตอบอุ่นจะสลายตัวเป็นแร่เวอร์มิคิวไลต์

4) แมกนีไทต์ เป็นแร่ที่สลายตัวได้ง่าย เพราะว่ามีเหล็กเป็นองค์ประกอบ ซึ่งจะทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในอากาศได้ง่าย แมกนีไทต์จะสลายตัวเปลี่ยนไปเป็นแร่ฮีมาไทต์ (Haematite) ได้โดยตรง โดยไม่จำเป็นต้องผ่านไปเป็นแร่แมกฮีไมต์ (Magnetite) ก่อน แมกนีไทต์จะสลายตัวไปเป็นแร่เกอไทต์ และไลโมนิต์ (Limonite) ทั้งนี้แมกนีไทต์ที่มีผลึกขนาดเล็ก (Microcrystalline) จะสลายตัวไปเป็นแร่แมกฮีไมต์และฮีมาไทต์ แมกนีไทต์ที่มีผลึกขนาดใหญ่กว่าจะสลายตัวไปเป็นแร่ฮีมาไทต์เพียงอย่างเดียว (สารคาม แก้วทาสี, 2528 : 4-8)

2.1.1.8 การผุพังอยู่กับที่

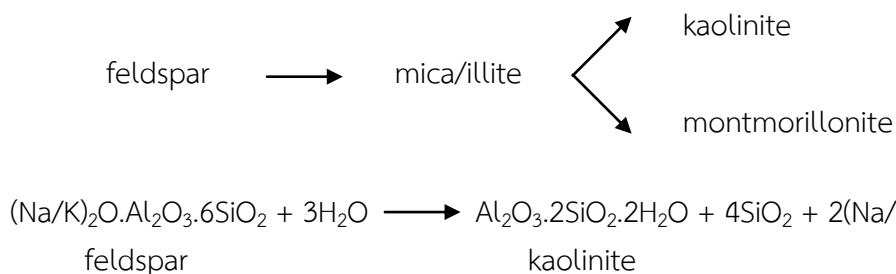
หมายถึง การผุพังลงด้วยกรรมวิธีทางเคมีจากลมฟ้าอากาศกับน้ำฝน และรวมทั้งการกระทำของต้นไม้กับแบคทีเรีย ตลอดจนการแตกตัวทางกลศาสตร์ มีการเพิ่มอุณหภูมิและลดอุณหภูมิสลับกัน การผุพังมีทั้งทางเคมี ทางกายภาพ และทางชีวภาพ ซึ่งการผุพังทางกายภาพเป็นการผุพังอยู่กับที่โดยเฉพาะและเป็นตัวส่งเสริมการผุพังทางเคมีเพราะเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวให้มากขึ้น การผุพังทางเคมีในแถบที่มีอากาศร้อนชื้น (Humid tropics) จะมีอิทธิพลและความรุนแรงมากกว่าการผุพังทางกายภาพ จากศึกษาการผุพังของหิน พบว่า เมื่อหินสลายตัวลงจะทำให้องค์ประกอบทางเคมีเปลี่ยนแปลงไปทั้งปริมาณและน้ำหนัก โดย SiO_2 , MgO , CaO , Na_2O , K_2O จะมีน้ำหนักลดลง ส่วน Al_2O_3 , Fe_2O_3 จะมีน้ำหนักเพิ่มขึ้น แร่ควอตซ์มีปริมาตรลดลงเล็กน้อย ส่วนแร่โฟแทชเฟลด์สปาร์ แพลจิโอเคลสไบโอไทต์ ฮอร์นเบลนด์ มีปริมาตรลดลงอย่างมาก แร่เคโอลิไนต์ซึ่งเป็นแร่ทุติยภูมิจากไม่มีเลยจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว (อุดม พูลสวัสดิ์, 2529 : 9)



ภาพประกอบที่ 2.1 แกรนิต
ที่มา: Granite (2557)

2.1.2 ดิน (Clays)

ดินเกิดจากการผุพังสลายตัวของแกรนิต (Granite rock) ผ่านกระบวนการผุพังตามธรรมชาติ โดยการสลายตัวครั้งแรกแกรนิตจะสลายตัวเป็นเฟลด์สปาร์ และการสลายตัวครั้ง ถัดมาเฟลด์สปาร์จะสลายตัวเป็นไมกาหรืออิลไลต์และกลายเป็นเกาลินไนต์หรือมอนต์มอริลโลไนต์ (Worrall, 1986 : 56) เรียกปฏิกิริยาเกาลินไนต์เซชัน (Kaolinitisation) ดังสมการ



ดินแบ่งเป็น 2 ประเภท ตามลักษณะการผุพังสลายตัว ประกอบด้วย ดินปฐมภูมิ (Primary หรือ Residual clay) คือ ดินที่ผุพังสลายตัวจากหินโดยตรงและทับถมกันอยู่ที่แหล่งเดิม และดินทุติยภูมิ (Secondary หรือ Sedimentary clay) คือ ดินปฐมภูมิที่ถูกกระแสน้ำหรือกระแสนม นำพาจากแหล่งเดิมไปตกตะกอนสะสมในบริเวณน้ำนิ่งหรือที่ราบในแหล่งอื่น ดินที่ใช้เป็นวัตถุดิบ สำคัญในงานเซรามิก มีดังนี้

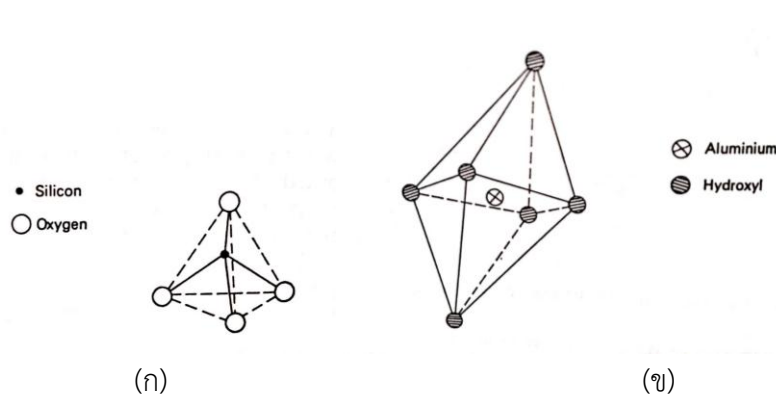
2.1.2.1 เกาลิน (Kaolin หรือ China clay)

เกาลิน แปลว่า ภูเขาสูง ซึ่งเป็นแหล่งกำเนิดของดินในประเทศจีน (ไพจิตร อังศิริวัฒน์, 2541 : 41) เกาลินหรือดินขาวเป็นดินที่เกิดอยู่ในแหล่งผุพังของหินเดิม จึงมีขนาดอนุภาค ค่อนข้างใหญ่ มีความเหนียวน้อย มีความแข็งแรงก่อนการเผาต่ำ และเนื่องจากมีสิ่งเจือปนอยู่น้อย ทำให้มีสมบัติหลังการเผาที่ดี คือ มีสีหลังการเผาที่ขาวมาก (วัชร ประกาย, 2550)



ภาพประกอบที่ 2.2 ดินขาว
ที่มา: Kaolin Mining (2556)

โครงสร้างผลึก (Structure layer) ของเกาลินประกอบด้วยชั้นซิลิกา (Silica layer) ซึ่งมีอะตอมของซิลิกอน (Si) และออกซิเจน (O) จัดเรียงในรูปแบบเตตระฮีดรอน (Tetrahedron) และชั้นกิบbsite (Gibbsite layer) ที่มีอะตอมของอลูมิเนียม (Al) และกลุ่มไฮดรอกซิล (Hydroxyl groups) จัดเรียงในรูปแบบออกตะฮีดรอน (Octahedron) โดยภายในชั้นยึดเหนี่ยวกันด้วยพันธะไอออนิก (Ionic bond) ส่วนระหว่างชั้นยึดเหนี่ยวกันด้วยพันธะไฮโดรเจน (Hydrogen Bond) และแรงแวนเดอร์วาลส์ (Van Der Waals force) เกิดเป็นโครงสร้างผลึกรวมแบบแผ่นเฮกซะโกนอล (Hexagonal sheet) ซึ่งเป็นรูปแบบโครงสร้างผลึกพื้นฐานของแร่เกาลินไนต์ (Ryan, 1978 : 44-49)



ภาพประกอบที่ 2.3 โครงสร้างผลึกของดินขาว (ก) เตตระฮีดรอน (ข) ออกตะฮีดรอน
ที่มา: Ryan (1978 : 44, 46)

ตารางที่ 2.1 ผลวิเคราะห์ทางเคมีของดินขาวบางชนิด

ผลวิเคราะห์ทางเคมี	ดินขาวมาตรฐาน ตามทฤษฎี	ดินขาวอังกฤษ	ดินขาว ลำปาง	ดินขาว ระนอง	ดินขาว นราธิวาส
SiO ₂	46	46-47	59.70	48.75	47.30
Al ₂ O ₃	39	37-39	27.60	34.58	35.72
Fe ₂ O ₃	-	0.4-1.0	0.84	0.71	0.38
TiO ₂	-	1	0.07	0.02	0.20
CaO	-	-	0.13	0.07	0.11
MgO	-	-	0.25	0.34	1.01
K ₂ O	-	-	5.85	2.52	1.76
Na ₂ O	-	1.0-2.0	0.15	0.40	0.39
น้ำหนักที่หายไป หลังการเผา	14	12.5	5.39	10.66	12.99

(LOI: Loss on Ignition)

ที่มา: ไพจิตร อังศิริวัฒน์ (2541 : 44)

สารประกอบ Fe₂O₃ และ TiO₂ ที่ปรากฏในองค์ประกอบทางเคมีนั้น เป็นส่วนที่มีผลทำให้สีหลังการเผาของดินไม่ขาว โดยทั่วไปดินที่จะให้สีหลังการเผาเป็นสีขาวจะต้องมีสารประกอบออกไซด์ที่ให้สีเป็นส่วนประกอบอยู่ไม่เกิน ร้อยละ 0.75 และถึงแม้ว่าการมีอนุภาคขนาดใหญ่จะมีความเหนียวและความแข็งแรงก่อนการเผาของดินมีค่าต่ำ แต่ก็ส่งผลให้เนื้อดินมีการหดตัวเมื่อแห้งที่ต่ำลงด้วย โดยทั่วไปการหดตัวเมื่อแห้งของดินขาวจะมีค่าระหว่าง ร้อยละ 3-5 (วัชรีย์ ประภาชี, 2550)

2.1.2.2 บอลเคลย์ (Ball clay)

บอลเคลย์ มีที่มาจากคำว่า Cubes หรือ Balls ซึ่งเป็นลักษณะของก้อนดินเหนียวที่ถูกตัดออกมาจากเหมืองดินในประเทศอังกฤษ โดยบอลเคลย์หรือดินเหนียวจะมีวัตถุดิบที่ไม่มีความเหนียวเจือปนในระหว่างการถูกพัฒนาที่บดไปพร้อมกันและมีขนาดละเอียดมาก ดินเหนียวมักจะถูกอธิบายลักษณะด้วยสีของดินก่อนการเผา ในบางครั้งจึงอาจเรียกชื่อตามสีของดิน อาทิ ดินดำ (Black ball clay) ดินสีน้ำเงิน (Blue ball clay) หรือดินสีงาช้าง (Ivory ball clay) โดยสีของดินก่อนการเผานี้ไม่สามารถใช้ในการบ่งชี้สีของดินหลังการเผาได้ เนื่องจากเป็นสีที่เกิดจากสารประกอบอินทรีย์ (Organic matter) ที่ปะปนอยู่ในดิน ซึ่งจะถูกกำจัดออกไปเกือบหมดในกระบวนการเผา เหลือไว้เพียงสีขาวนวลของดิน และเนื่องจากดินเหนียวมีสารประกอบอินทรีย์เจือปนอยู่มากจึงมีสมบัติบางประการที่แตกต่างจากดินขาวที่ไม่มีสารประกอบอินทรีย์เจือปน (เจือปนอยู่น้อย) อาทิ สภาพการกระจายตัว (Deflocculation) กล่าวคือ ในสภาวะความเป็นด่าง (Basic) อนุภาคของสารประกอบอินทรีย์จะช่วยให้ดินมีสภาวะการกระจายตัวที่ดี ส่วนปัญหาสำคัญในการใช้งานของดินเหนียว คือ

ความยากในการตีผสมกับน้ำ เนื่องจากดินเหนียวมีอนุภาคละเอียดมาก ทำให้น้ำไม่สามารถแทรกซึมผ่านระหว่างอนุภาคของดินที่จับตัวกันเป็นก้อนขนาดใหญ่ได้ในทันที ต้องใช้เวลาในการตีผสมกับน้ำค่อนข้างนานเพื่อให้แน่ใจว่าดินเหนียวมีการกระจายตัวที่ดีพอก่อนที่จะนำไปผสมกับวัตถุดิบอื่น อย่างไรก็ตามในปัจจุบันดินเหนียวจะถูกย่อยให้มีขนาดเล็ก ประมาณ 0.5-2 นิ้ว ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของการผสมดินเหนียวกับวัตถุดิบอื่นให้ดีขึ้น นอกจากนี้ดินเหนียวยังถูกผลิตจำหน่ายในรูปของดินท่อน (Extruded) และดินโคลน (Slop) ซึ่งช่วยลดปัญหาในการตีผสมกับน้ำในการผลิตได้เป็นอย่างดี (วัชรวิ ประภาชี, 2550)



ภาพประกอบที่ 2.4 ดินดำ

ที่มา: Ball clay (2556)

ตารางที่ 2.2 ผลวิเคราะห์ทางเคมีของดินเหนียวบางชนิด

ผลวิเคราะห์ทางเคมี	Black ball clay	Blue ball clay	Siliceous ball clay
SiO ₂	48	52	74
TiO ₂	0.8	0.9	1.5
Al ₂ O ₃	33	31	15
Fe ₂ O ₃	1.0	1.5	0.8
MgO	0.3	0.5	0.3
CaO	0.2	0.3	0.1
K ₂ O	1.8	3.1	1.6
Na ₂ O	0.3	0.4	0.3
น้ำหนักที่หายไป			
หลังการเผา	15	9.5	5
(LOI: Loss on Ignition)			

ที่มา: วัชรวิ ประภาชี (2550)

ตารางที่ 2.3 ผลวิเคราะห์การกระจายอนุภาคและความแข็งแรงก่อนการเผาของดินเหนียวบางชนิด

ดินเหนียว	ผลวิเคราะห์การกระจายอนุภาค (μm)					ความแข็งแรงก่อนการเผา Lb/in^2 (kg/cm^2)
	10	5	2	1	0.5	
Black ball clay	-	-	82	74	60	750 (53)
Blue ball clay	-	96	-	79	62	1150 (81)
Siliceous ball clay	-	55	-	38	32	500 (35)

ที่มา: วัชรวิ ประชาชี (2550)

ดินดำประกอบด้วยแร่กาเลสินไนต์เป็นส่วนใหญ่เช่นเดียวกับดินขาว แต่เป็นผลึกกาเลสินไนต์ไม่สมบูรณ์ ในระหว่างผลึกมีแร่และสารอินทรีย์แทรกอยู่ ส่วนประกอบทางเคมี ประกอบด้วยซิลิกา ร้อยละ 40-60 อลูมินา ร้อยละ 30 น้ำและสารอินทรีย์ประมาณ ร้อยละ 10 นอกจากนี้ยังมีสารประกอบอื่นปะปนอยู่ อาทิ ไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) เพอร์ริก (Fe_2O_3) แคลไซด์ (CaO) แมกนีเซีย (MgO) เหล็กซัลเฟต (FeS) โพแทส (K_2O) และโซดา (Na_2O) ดินดำที่มีทรายปนอยู่สูงแทบไม่มีการหดตัว แต่ดินดำที่มีอินทรีย์สารสูงจะมีการหดตัวเมื่อแห้ง ร้อยละ 13-17 และการหดตัวหลังการเผาประมาณ ร้อยละ 15 แหล่งดินดำในประเทศไทย ได้แก่ จังหวัดเชียงใหม่ จังหวัดเชียงราย จังหวัดลำปาง จังหวัดปราจีนบุรี จังหวัดสุราษฎร์ธานี และจังหวัดนครศรีธรรมราช การผสมดินดำในสัดส่วน ร้อยละ 20-50 จะเพิ่มความแข็งแรงก่อนการเผา ลดการแตกหักก่อนการเผา ในขณะที่เคลือบย่าย เพิ่มการไหลตัวของน้ำดินที่ใช้ในการหล่อ อย่างไรก็ตามสิ่งเจือปนในดินดำ จะทำให้ผลิตภัณฑ์มีตำหนิ หากผสมดินดำในปริมาณมากเกินไป จะทำให้ผลิตภัณฑ์ไม่โปร่งแสง มีการหดตัวสูง บิดเบี้ยว และแตกร้าวหลังการเผา (ไพจิตร อิงศิริวัฒน์. 2541 : 44)

2.1.3 เฟลด์สปาร์ (Feldspar)

เฟลด์สปาร์ มีรากศัพท์มาจากภาษาเยอรมันว่า Feldspat เกิดจากแมกมา (Magma) ที่อยู่ภายใต้ผิวโลกถูกดันขึ้นมาเหนือผิวโลกแล้วแปรสภาพเป็นหินอัคนีและสลายตัวต่อมาเป็น หินเฟลด์สปาร์ติก (Feldspatic rock) ซึ่งมีความชื้นและมัสโคไวต์ (Muscovite) ปะปนอยู่ด้วย ประเภทของเฟลด์สปาร์จำแนกตามองค์ประกอบของธาตุอัลคาไลน์ (Alkali) มีดังนี้

2.1.3.1 โพแทสเซียมเฟลด์สปาร์ (Potassium feldspar) หรือโพแทสเฟลด์สปาร์ มีโพแทสเซียมออกไซด์เป็นองค์ประกอบหลัก สูตรเคมี $\text{K}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{SiO}_2$ โครงสร้างผลึกของโพแทสเฟลด์สปาร์มี 2 ลักษณะ ได้แก่

- 1) โครงสร้างผลึกแบบโมโนคลินิก (Monoclinic) มีชื่อทางแร่ว่า ออร์โทเคลส (Orthoclase) พบในธรรมชาติมากกว่า
- 2) โครงสร้างผลึกแบบไตรคลินิก (Triclinic) มีชื่อทางแร่ว่า ไมโครไคลน์ (Microcline)

2.1.3.2 โซเดียมเฟลด์สปาร์ (Sodium feldspar) หรือโซดาเฟลด์สปาร์ มีโซเดียมออกไซด์เป็นองค์ประกอบหลัก สูตรเคมี $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{SiO}_2$ มีโครงสร้างผลึกแบบไตรคลินิก มีชื่อทางแร่ว่าอัลไบต์ (Albite)

2.1.3.3 แคลเซียมเฟลด์สปาร์ (Calcium feldspar) มีแคลเซียมออกไซด์เป็นองค์ประกอบหลัก สูตรเคมี $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ มีโครงสร้างผลึกแบบไตรคลินิก มีชื่อทางแร่ว่าอะนอร์ไทต์ (Anorthite)

โดยปกติในธรรมชาติจะพบเฟลด์สปาร์ทั้งสามชนิดอยู่ร่วมกันในลักษณะโซลิดโซลูชัน (Solid Solution) โดยเฉพาะอัลไบต์และอะนอร์ไทต์ เนื่องจากโซเดียมไอออน (Na^+) และแคลเซียมไอออน (Ca^{2+}) มีขนาดใกล้เคียงกัน มีชื่อเรียกทางแร่ว่า แพล็กจิโอเคลส (Plagioclase) นอกจากนี้ยังมีชื่อทางแร่ที่ใช้เรียกเฟลด์สปาร์ตามสัดส่วนของ อัลไบต์:อะนอร์ไทต์ ได้แก่ สัดส่วน 7:1 เรียกโอลิโกเคลส (Oligoclase) สัดส่วน 2:1 เรียก แอนดีไซต์ (Andesite) สัดส่วน 1:2 เรียก ลาบราโดไรต์ (Labradorite) และสัดส่วน 1:7 เรียก บิตโทรวไนต์ (Bytownite) และในกรณีที่พบอโรเคลสละลายอยู่ร่วมกับอัลไบต์ในสัดส่วนประมาณ 1:3 จะมีชื่อเรียกทางแร่ว่า เนฟลินไฮไนต์ (Nepheline Syenite)

2.1.3.4 ลิเทียมเฟลด์สปาร์ (Lithium feldspar) มีลิเทียมออกไซด์เป็นองค์ประกอบหลัก โดยสูตรเคมี $\text{Li}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 4\text{SiO}_2$ จะมีชื่อเรียกทางแร่ว่า สปอร์ดูเมน (Spodumene) หากสูตรเคมี $\text{Li}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 8\text{SiO}_2$ จะมีชื่อเรียกทางแร่ว่า เพทาลิต (Petalite) โดยทั่วไปจะใช้งานลิเทียมเฟลด์สปาร์ในน้ำเคลือบมากกว่าในเนื้อดิน

เฟลด์สปาร์หรือหินฟีนมาเป็นแร่ที่พบได้ทั่วโลก แหล่งเฟลด์สปาร์คุณภาพดี ได้แก่ ประเทศในแถบสแกนดิเนเวีย ยูเครน อิตาลี ฝรั่งเศส อเมริกา และอินเดีย ส่วนเนฟลินไฮไนต์จะพบในแถบไซบีเรีย แคนาดา ฟินแลนด์ บราซิล และอเมริกา

แหล่งเฟลด์สปาร์ในประเทศไทย มีดังนี้

- 1) แหล่งโพแทสเฟลด์สปาร์ ได้แก่ จังหวัดราชบุรี และจังหวัดเชียงใหม่
- 2) แหล่งโซดาเฟลด์สปาร์ ได้แก่ จังหวัดตาก จังหวัดกาญจนบุรี จังหวัดราชบุรี และจังหวัดนครศรีธรรมราช

การใช้งานเฟลด์สปาร์ในอุตสาหกรรมเซรามิก มีดังนี้

1) โพแทสเฟลด์สปาร์มีจุดหลอมละลาย (Melting point) สูงกว่าโซดาเฟลด์สปาร์ แต่มีช่วงการหลอมละลาย (Firing range) ที่กว้างกว่า จึงนิยมใช้เป็นตัวช่วยลดจุดหลอมละลายหรือฟลักซ์ (Flux) ของเนื้อดินในผลิตภัณฑ์พอร์ซเลน ฉนวน กระเบื้องแกรนิต และสุขภัณฑ์ เนื่องจากต้องการเผาที่อุณหภูมิสูง ซึ่งอาจเกิดการหดตัวหรือบิดเบี้ยวในขณะเผา ส่วนในน้ำเคลือบไม่พบการใช้งานมากนัก แต่การใช้โพแทสเฟลด์สปาร์ในเคลือบมีข้อดี คือ ผิวเคลือบจะมีความทนการขูดขีด (Abrasion) ที่ดีขึ้น และสีของเคลือบจะสดกว่า เนื่องจากโพแทสเฟลด์สปาร์มีปริมาณเฟอร์ริกออกไซด์ (Fe_2O_3) และไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) ต่ำกว่าโซดาเฟลด์สปาร์

2) โซดาเฟลด์สปาร์ ใช้เป็นฟลักซ์ที่อุณหภูมิต่ำกว่าโพแทสเฟลด์สปาร์ แต่มีช่วงการเผาที่แคบกว่า ใช้ในเคลือบผลิตภัณฑ์สโตนแวร์ กระเบื้องปูพื้น พอร์ซเลน และสุขภัณฑ์ ช่วยให้เคลือบสุกตัวที่อุณหภูมิต่ำ ส่วนใหญ่จะใช้ในรูปแร่ลอย (Floated feldspar) บดละเอียดขนาด

ต่ำกว่า 200 เมช (Mesh) หรือใช้ผสมในเนื้อดินที่มีอุณหภูมิการเผาไม่เกิน 1200 องศาเซลเซียส โดยเฉพาะการเผาแบบรวดเร็ว (Fast firing) อย่างไรก็ตามเฟลด์สปาร์ที่ใช้ทั่วไปมักเป็นแร่กระเทย คือมีส่วนผสมของทั้งโพแทสและโซดา และบางครั้งมีการใช้เฟลด์สปาร์ร่วมกับฟลักซ์อื่น อาทิ บอแรกซ์ (Borax) และโซดาแอช (Soda ash)

3) เนฟลินไซไนต์ ใช้ในการผลิตสี เนื่องจากเป็นฟลักซ์ที่มีความรุนแรงมากกว่าโซดาเฟลด์สปาร์ มีปริมาณอัลคาไลน์สูงกว่า และมีซิลิกาในปริมาณต่ำ มีความบริสุทธิ์สูง ช่วยลดอุณหภูมิการเผาได้ดี แต่มีราคาแพงเพราะต้องนำเข้าจากต่างประเทศ

4) เพทาไลต์ ใช้ผสมในสี ช่วยปรับค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อน (Coefficient of thermal expansion) ให้สัมพันธ์กันระหว่างเคลือบและเนื้อดิน โดยเฉพาะในผลิตภัณฑ์กระเบื้อง ป้องกันปัญหาการร้าวตัวผดเวลา (Delay crazing)

นอกจากการเลือกใช้งานเฟลด์สปาร์แล้วยังต้องคำนึงถึงการควบคุมคุณภาพ อาทิ ปริมาณมลทิน (Impurity) สัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน จุดหลอมละลาย สีภายหลังการเผา และปริมาณคาร์บอเนต (Carbonate) เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพดี (คชินทร์ สายอินทวงศ์, 2551)

โดยปกติเฟลด์สปาร์จะเริ่มหลอมเล็กน้อยที่อุณหภูมิ ประมาณ 1150 องศาเซลเซียส โพแทสเฟลด์สปาร์ หลอมละลายที่ 1220 องศาเซลเซียส โซดาเฟลด์สปาร์หลอมละลายที่ 1170-1200 องศาเซลเซียส แคลเซียมเฟลด์สปาร์หลอมละลายที่ 1550 องศาเซลเซียส และแบเรียมเฟลด์สปาร์ หลอมละลายที่ 1715 องศาเซลเซียส (ไพจิตร อังศิริวัฒน์, 2541 : 40-89)



ภาพประกอบที่ 2.5 เฟลด์สปาร์

ที่มา: Feldspar (2556)

2.1.4 ซิลิกา (Silica)

ซิลิกา ควอทซ์ หินแก้ว หินเขี้ยวหนุมาน หินเหล็กไฟ หรือฟลินท์ (Flint) มีสูตรทางเคมี SiO_2 ความถ่วงจำเพาะ 2.65 ความแข็ง 7 โมห์สเกล จุดหลอมละลาย 1728 องศาเซลเซียส (ไพจิตร อังศิริวัฒน์, 2541 : 76) โดยปกติในดินและเฟลด์สปาร์มีซิลิกาเป็นองค์ประกอบในรูปของสารประกอบซิลิเกต (Silicate) แต่ไม่เพียงพอต่อการควบคุมการขยายตัวทางความร้อนของเนื้อดิน จำเป็นต้องเติม

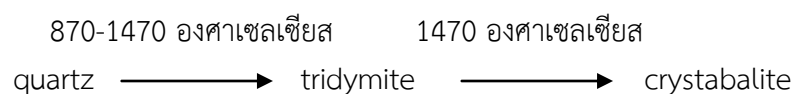
ซิลิกาอิสระ (Free silica) ซึ่งเป็นวัตถุดิบประเภทฟิลเลอร์หรือตัวเติมเพิ่มเข้าไปในเนื้อดิน การขยายตัวทางความร้อนและความต้านทานต่อการร้าว (Crazing resistance) ของเนื้อดิน จะขึ้นอยู่กับปริมาณของซิลิกาอิสระนี้ เนื่องจากซิลิกาอิสระมีค่าการขยายตัวทางความร้อนสูงกว่า ซิลิกาที่อยู่ในรูปองค์ประกอบของวัตถุดิบ เนื้อดินที่ดีจะต้องมีการขยายตัวทางความร้อนมากกว่า เคลือบเพื่อให้มั่นใจว่าจะสามารถต้านทานต่อการร้าวได้เป็นอย่างดี ซิลิกาเป็นวัตถุดิบที่ราคาถูก และมีประสิทธิภาพในการทำให้เนื้อดินมีค่าการขยายตัวทางความร้อนตามที่ต้องการ อย่างไรก็ตามการเติมซิลิกาจะมีผลให้ความแข็งแรงเมื่อแห้งและความเหนียวของเนื้อดินลดลง แต่จะทำให้เนื้อดินแห้งตัว ได้ง่ายและมีการหดตัวเมื่อแห้งลดลง (วัชร ภาณุ, 2550)



ภาพประกอบที่ 2.6 ควอทซ์

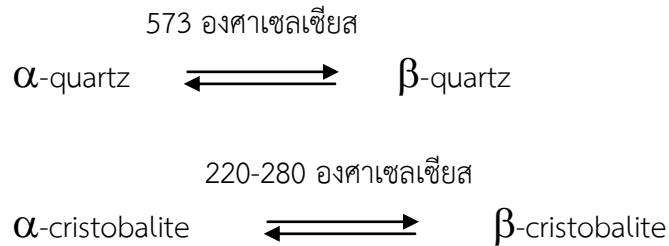
ที่มา: Quartz (2556)

ซิลิกาเป็นวัตถุดิบที่มีหลายรูปผลึก (Polymorphic substance) โดยมีสูตรเคมี เช่นเดียวกัน แตกต่างกันที่การจัดเรียงอะตอมในโครงสร้างผลึก (Crystal arrangement) ประกอบด้วย ควอทซ์ คริสโตบาไลต์ (Cristobalite) และไตรไคไมต์ (Tridymite) การเปลี่ยนแปลง รูปผลึกจะเกิดขึ้นเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลง ที่อุณหภูมิระหว่าง 870-1470 องศาเซลเซียส พันธะ ระหว่างซิลิกอนและออกซิเจนจะถูกทำลาย ควอทซ์จะเปลี่ยนแปลงไปเป็นไตรไคไมต์ และเมื่ออุณหภูมิ สูงกว่า 1470 โครงสร้างผลึกจะเปลี่ยนเป็นคริสโตบาไลต์ เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า คอนเวอร์ชัน (Conversions) โครงสร้างดังกล่าวเป็นโครงสร้างที่ไม่มีความแน่นอนขึ้นกับส่วนประกอบทางเคมีของ วัตถุดิบอื่น อาทิ ไอออน (Ion) ของแคลเซียม แบเรียม และแมกนีเซียม สามารถเกิดปฏิกิริยาทางเคมี และเปลี่ยนแปลงรูปแบบโครงสร้างผลึกดังกล่าวได้ คอนเวอร์ชันของควอทซ์แสดงได้ด้วยสมการ ดังนี้

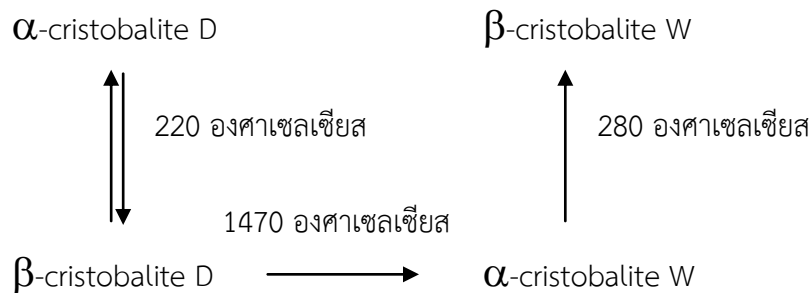


โครงสร้างผลึกทั้งสามรูปแบบของควอทซ์สามารถเปลี่ยนแปลงได้ในสองทิศทาง ทั้งเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นและเมื่ออุณหภูมิลดลง เรียก อินเวอร์ชัน (Inversion) ที่อุณหภูมิปกติควอทซ์

จะมีรูปแบบผลึกอัลฟา (α -form) และเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นเป็น 573 องศาเซลเซียส โครงสร้างผลึกจะเปลี่ยนรูปแบบเป็นเบตา (β -form) เช่นเดียวกับคริสโตบาไลต์เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นเป็น 220-280 องศาเซลเซียส ปฏิกริยาที่เกิดขึ้นเป็นปฏิกริยาแบบผันกลับได้ (Reversible) เมื่ออุณหภูมิลดลงต่ำกว่าอุณหภูมิอินเวอร์ชัน ดังสมการ



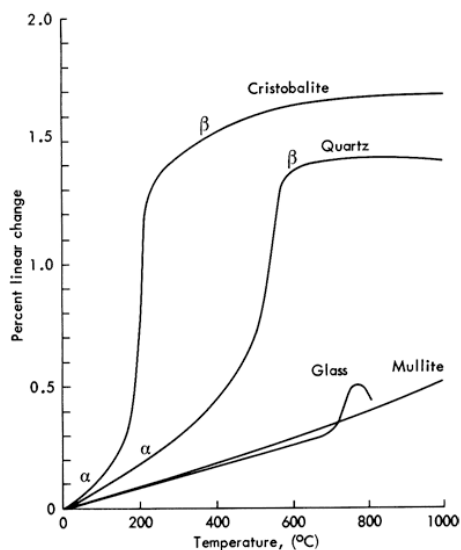
อินเวอร์ชันของคริสโตบาไลต์อุณหภูมิต่ำจะสร้างรูปแบบผลึกแบบไม่เป็นระเบียบ (Disordered) ส่วนอินเวอร์ชันที่อุณหภูมิสูงจะสร้างรูปแบบผลึกที่มีความเป็นระเบียบดีขึ้น (Well crystallised) เป็นผลจากการกระบวนการปรับปรุงด้วยความร้อน (Heat treatment) ดังสมการ



อินเวอร์ชันสำหรับไตรไดไมต์เกิดขึ้นหลายช่วงอุณหภูมิ สามารถจำแนกได้ 2 ลักษณะสำคัญ คือ S และ M ซึ่งไตรไดไมต์-S จะเกิดอินเวอร์ชันที่อุณหภูมิ 64, 117, 163, 210 และ 475 องศาเซลเซียส แต่มีความไม่เสถียร ส่วนปฏิกริยาอินเวอร์ชันของไตรไดไมต์-M ดังสมการ



ทั้งนี้ไตรไดไมต์จะเกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างสมบูรณ์ที่อุณหภูมิระหว่าง 870-1470 องศาเซลเซียส โดยมีเวลาที่เพียงพอต่อการเกิดปฏิกริยา (Worrall, 1986 : 14-20)



ภาพประกอบที่ 2.7 Thermal expansion of the principal forms of silica
ที่มา: Worrall (1986 : 23)

2.2 ประเภทของเนื้อดิน

2.2.1 แบ่งตามลักษณะสมบัติทางกายภาพ

2.2.1.1 เนื้อดินเอิร์ทเธนแวร์ (Earthen ware)

เอิร์ทเธนแวร์ หมายถึง เนื้อดินที่เผาในอุณหภูมิต่ำ เนื้อดินยังดูดซึมน้ำได้ปานกลางถึงสูง มีทั้งชนิดเคลือบและไม่เคลือบ บางชนิดเผาจนดินแกร่งไม่ดูดซึมน้ำ เป็นผลิตภัณฑ์ที่เผาในอุณหภูมิต่ำประมาณ 800-1050 องศาเซลเซียส เนื้อค่อนข้างหนา เนื้อดินมีความพรุนตัวสูง เปราะ แตกหัก หรือบิ่นได้ง่ายเมื่อกระทบกัน ผลิตภัณฑ์ที่เผาในอุณหภูมิต่ำดูดซึมน้ำได้สูง ร้อยละ 10-15 (ไพจิตร อังศิริวัฒน์, 2541 : 146) ทั้งนี้มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมสำหรับภาชนะเซรามิกประเภทเอิร์ทเธนแวร์ (มอก.601-2546 : 5) กำหนดไว้ไม่เกิน ร้อยละ 8



ภาพประกอบที่ 2.8 ผลิตภัณฑ์เนื้อดินเอิร์ทเธนแวร์

ที่มา: ภควดี ศิริหาล้า (2557 : 19 อ้างจาก ภควดี ศิริหาล้า และคณะ, 2551 : 43)

2.2.1.2 เนื้อดินสโตนแวร์ (Stone ware)

ดินสโตนแวร์ หมายถึง ดินที่ขุดพบในแหล่งธรรมชาติที่มีความทนไฟสูง 1200 องศาเซลเซียส ดินสโตนแวร์เป็นดินสำเร็จรูปเผาในอุณหภูมิสูงในที่ผสมไว้โดยธรรมชาติ คือ มีวัตถุดิบที่เป็นตัวหลอมละลายปนอยู่ในดินปริมาณเพียงพอ เนื้อดินมีความเหนียวและมีทรายปนอยู่ในปริมาณมาก จึงเป็นดินที่มีส่วนประกอบของวัตถุดิบทั้ง 3 ชนิดครบ ต่าง กลาง และกรด ไม่ต้องผสมวัตถุดิบชนิดอื่นเพิ่มก็สามารถนำมาขึ้นรูปได้ทันที เหมาะสำหรับการเผาในอุณหภูมิสูง ดินแต่ละแหล่งแตกต่างกันไป บางชนิดเหนียวมาก บางชนิดเหนียวน้อย เมื่อเผาแกร่งถึงจุดสุกตัวแล้ว ดูดซึมน้ำต่ำไม่เกิน ร้อยละ 3 เนื้อดินที่บดแสงมีสีต่างกันตั้งแต่สีขาวอมเหลือง สีเทา และสีน้ำตาล บางครั้งมีจุดสีดำในเนื้อดินทำให้ดูแปลกกว่าเนื้อดินชนิดอื่น ใช้น้ำเคลือบที่เผาในอุณหภูมิสูงสุกตัวพร้อมกับเนื้อดิน ผิวเคลือบมีความแข็งแรงทนทาน ทำให้เนื้อดินแข็งแกร่งมากยิ่งขึ้น ผลิตภัณฑ์มีทั้งชนิดเคลือบและชนิดไม่เคลือบ ดินสโตนแวร์ที่ดีต้องมีช่วงการเผายาว และสามารถเผาแบบสันดาป ไม่สมบูรณ์หรือรูดกชั้นได้โดยไม่ยุบตัว (ไพจิตร อังศิริวัฒน์, 2541 : 145-173) ทั้งนี้มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมสำหรับภาชนะเซรามิกประเภทสโตนแวร์ (มอก.602-2546 : 5) กำหนดค่าการดูดซึมน้ำไว้ไม่เกิน ร้อยละ 3



ภาพประกอบที่ 2.9 ผลิตภัณฑ์เนื้อดินสโตนแวร์

ที่มา: ภควดี ศิริห্লা (2557 : 20 อ้างจาก ภควดี ศิริห্লা และคณะ, 2551 : 45)

2.2.1.3 เนื้อดินพอร์ซเลน (Porcelain)

เนื้อดินสีขาวโปร่งแสงเผาในอุณหภูมิสูง 1250-1400 องศาเซลเซียส เนื้อดินประกอบด้วยดินขาวเกาลิน เฟลด์สปาร์ และควอทซ์ ในอัตราส่วนประมาณ 50:30:20 ตามลำดับ นอกจากนี้อาจมีการเติมดินดำ เพื่อเพิ่มความเหนียวในการขึ้นรูป เนื้อดินพอร์ซเลนมีความแข็งแรงมากกว่าเนื้อดินเอิร์ทเทินแวร์ และเนื้อดินสโตนแวร์ ทั้งนี้มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมสำหรับภาชนะเซรามิกประเภทพอร์ซเลน (มอก.564-2546 : 4) กำหนดค่าการดูดซึมน้ำไว้ไม่เกิน ร้อยละ 0.2



ภาพประกอบที่ 2.10 ผลิตภัณฑ์เนื้อดินพอร์ซเลน

ที่มา: ภควดี ศิริหาล้า (2557 : 21 อ้างจาก ภควดี ศิริหาล้า และคณะ, 2551 : 44)

2.2.2 แบ่งตามลักษณะการเกิดเฟสแก้ว

2.2.2.1 เนื้อดินมัลไลต์ (Mullite)

เนื้อดินดั้งเดิมในแบบตารางสามเหลี่ยม (Triaxial diagram) จะเกิดผลึกมัลไลต์ ($3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$) ซึ่งเป็นส่วนให้ความแข็งแรงในผลิตภัณฑ์ (พัฒนาอุตสาหกรรมเครื่องเคลือบดินเผาภาคเหนือ, ศุภย์, 2538 : 98)

2.2.2.2 เนื้อดินวิเทรียสไชน่า (Vitreous china)

ลักษณะทางกายภาพของเนื้อดินวิเทรียสไชน่า คือ การหดตัวหลังการเผาไม่เกินร้อยละ 11.7 (ไพจิตร อังศิริวัฒน์. 2541 : 166) มีคุณภาพสูงและแข็งแรง ลักษณะเนื้อใสเหมือนแก้ว การดูดซึมน้ำเฉลี่ยไม่เกินร้อยละ 0.5 ของน้ำหนักแห้ง เมื่อผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 1200-1250 องศาเซลเซียส (นพพร กิรติบรรหาร. 2540 : 11)

2.2.2.3 เนื้อดินคอร์เดียไรต์ (Cordierite)

เนื้อดินที่มีแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ จะเกิดผลึกคอร์เดียไรต์ ($2\text{MgO} \cdot 5\text{SiO}_2$) ซึ่งมีประโยชน์อย่างมาก ในผลิตภัณฑ์ประเภทหุงต้ม (Cooking ware) เนื่องจากสามารถทนการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิได้อย่างฉับพลันได้ดี เพราะมีค่าการขยายตัวทางความร้อนต่ำ (พัฒนาอุตสาหกรรมเครื่องเคลือบดินเผาภาคเหนือ, ศุภย์. 2538 : 100)

2.2.3 แบ่งตามลักษณะส่วนผสม

2.2.3.1 เนื้อดินที่มีดินเป็นส่วนประกอบ

ดินบางส่วนอาจผ่านการเผามาแล้วและอาจมีวัสดุอื่นๆ ผสมอยู่ด้วย เช่น เฟลด์สปาร์ ซิลิกา และทอลค์

2.2.3.2 เนื้อดินที่เป็นออกไซด์ (Oxide)

เช่น Al_2O_3 , Fe_2O_3 , Cr_2O_3 , MgO , BeO , SiO_2 และ SnO_2

2.2.3.3 เนื้อดินที่ไม่ใช่ออกไซด์ (Non-oxide)

ได้แก่ บอไรด์ (Boride) เช่น TiB_2 และ ZrB_2 คาร์ไบด์ (Carbide) เช่น WC, TiC , B_4C_3 และ SiC และไนไตรด์ (Nitride) เช่น Si_3N_4 และ BN (ปรีดา พิมพ์ขาวขำ. 2547 : 93)

2.2.4 เนื้อดินไตรแอกเซียล (Triaxial body)

เนื้อดินสำหรับผลิตภัณฑ์เซรามิกส่วนใหญ่เป็นชนิดไตรแอกเซียล ซึ่งหมายความว่า ส่วนผสมเนื้อดินประกอบด้วยวัตถุดิบ 3 ชนิด คือ ดิน ซิลิกา และเฟลด์สปาร์ วัตถุดิบทั้ง 3 ชนิดนี้เป็นสินแร่ตามธรรมชาติที่หาได้ง่ายและราคาถูก เมื่อผสมกันในอัตราส่วนที่เหมาะสมจะทำการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ได้ง่าย และสิ่งสำคัญ คือ สามารถที่จะเผาให้ได้โครงสร้างตามต้องการ การกล่าวถึงส่วนผสมเนื้อดินสามารถกล่าวถึง 4 วิธี ได้แก่

การกล่าวถึงหรือเขียนเป็นเปอร์เซ็นต์วัตถุดิบ

ดินขาว	35	%
บอลเคลย์	25	%
ซิลิกา	13	%
เฟลด์สปาร์	27	%

การกล่าวถึงหรือเขียนเป็นเปอร์เซ็นต์ออกไซด์

SiO_2	66.7	%
Al_2O_3	21.6	%
Fe_2O_3	0.5	%
CaO	0.6	%
MgO	0.4	%
K_2O , Na_2O	4.5	%
loss	5.7	%

การกล่าวถึงหรือเขียนเป็นเปอร์เซ็นต์แร่

แร่ดิน	50	%
แร่ควอตซ์	25	%
แร่เฟลด์สปาร์	25	%

การกล่าวถึงหรือเขียนเป็นสูตรทั่วไป

RO , R_2O	R_2O_3	RO_2
0.36	1	5.24

RO , R_2O หมายถึง ออกไซด์ของโลหะ ซึ่งมีวาเลนซ์ 2 และ 1 เช่น CaO, MgO, K_2O , Na_2O

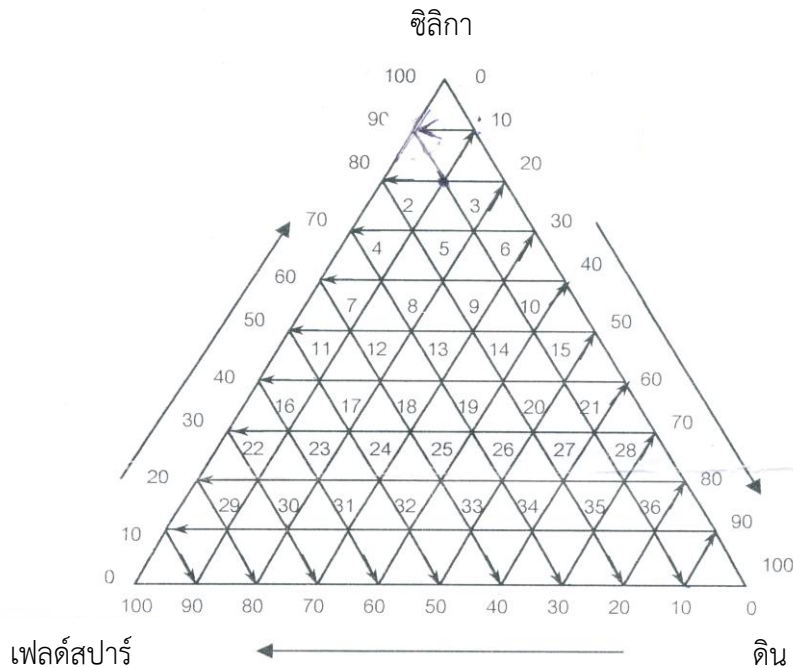
R_2O_3 หมายถึง ออกไซด์ของโลหะ ซึ่งมีวาเลนซ์ 3 เช่น Al_2O_3 , Fe_2O_3

RO_2 หมายถึง ออกไซด์ของโลหะ ซึ่งมีวาเลนซ์ 4 เช่น SiO_2 , SnO_2 , TiO_2

การกล่าวถึงส่วนผสมเนื้อดินในแบบที่ 1 มีประโยชน์สำหรับการเตรียมเนื้อดิน โดยเฉพาะ ไม่สามารถเปรียบเทียบเนื้อดินที่ได้จากส่วนผสมที่ต่างกันได้ ซึ่งส่วนผสมเนื้อดินที่ได้จากวัตถุดิบต่างกัน ผลสุดท้ายเมื่อเป็นเนื้อผลิตภัณฑ์อาจเป็นเนื้อชนิดเดียวกัน การกล่าวถึงเนื้อดินแบบที่ 2 และ 4 จะทำให้รู้ปริมาณ K_2O , Na_2O , CaO, MgO และ Fe_2O_3 ในเนื้อดิน ส่วนการกล่าวถึง

เนื้อดินแบบที่ 3 จะช่วยทำนายสมบัติของเนื้อดิน อาทิ เนื้อดินที่มีแร่ดินมากจะมีความเหนียวดี ผลิตรากก่อนเผามีความแข็งแรงมาก โอกาสแตกเสียหายในกระบวนการผลิตจะน้อย เนื้อดินที่มีแร่เฟลด์สปาร์มากจะมีจุดสุกตัวต่ำ เนื้อดินที่มีควอตซ์และเฟลด์สปาร์มากจะมีความเหนียวน้อย ต้องการน้ำเพื่อทำให้เกิดความเหนียวหรือใช้เตรียมน้ำดินสำหรับหล่อแบบน้อย หล่อแบบได้เร็ว การหดตัวเมื่อแห้งและความแข็งแรงเมื่อแห้งจะน้อย เป็นต้น

หลักการผสมวัตถุดิบเนื้อดิน 3 ชนิดเข้าหากันในสัดส่วนต่างๆ นิยมใช้แผนภาพสามเหลี่ยมหรือไตรแอกเซียลไดอะแกรม (Triaxial diagram) ซึ่งมุมทั้งสามจะแสดงสัดส่วนของดิน ซิลิกา และเฟลด์สปาร์ (พัฒนาอุตสาหกรรมเครื่องเคลือบดินเผาภาคเหนือ, ศูนย์, 2538 : 32) จากภาพประกอบที่ 2.11 แสดงส่วนผสมของเนื้อดินจำนวน 36 ส่วนผสม โดยส่วนผสมที่ 1 มีสัดส่วนวัตถุดิบประกอบด้วย ดิน ร้อยละ 10 ซิลิกา ร้อยละ 80 และ เฟลด์สปาร์ ร้อยละ 10



ภาพประกอบที่ 2.11 ตารางสามเหลี่ยมเนื้อดินหรือไตรแอกเซียล

ที่มา: พัฒนาอุตสาหกรรมเครื่องเคลือบดินเผาภาคเหนือ, ศูนย์ (2538 : 32) และ อิศรา ดาทองอน (2552 : 22)

2.2.5 จุดสุกตัวหรืออุณหภูมิสุกตัวของเนื้อดิน

สมบัติต่างๆ ของผลิตภัณฑ์สำเร็จจะมีค่าต่างกันไปตามสภาวะการเผา ตัวอย่างเช่น ผลิตภัณฑ์เอิร์ทเรนแวร์อาจใช้ส่วนผสมเดียวกันกับผลิตภัณฑ์พอร์ซเลนแต่ใช้อุณหภูมิการเผาต่ำกว่า เป็นที่ทราบกันดีว่าเมื่อส่วนผสมเนื้อดินมีแร่ดินขาวหรือฟลินต์สูงขึ้นจุดสุกตัวจะสูงขึ้น และเมื่อมีเฟลด์สปาร์มากขึ้นจุดสุกตัวจะลดลง อุณหภูมิการเผาผลิตภัณฑ์มีผลต่อสมบัติผลิตภัณฑ์ กล่าวคือ การเผาผลิตภัณฑ์ที่อุณหภูมิสูงจะได้ผลิตภัณฑ์คุณภาพสูง เช่น มีความแข็งแรงสูง ดูดซึมน้ำน้อย

แสงส่องผ่านได้ดี เป็นต้น ความแข็งแรงของผลิตภัณฑ์เกิดจากการมีมลโธด์เกิดขึ้นในเนื้อผลิตภัณฑ์ การดูดซึมน้ำของผลิตภัณฑ์เกิดจากมีรูพรุนในเนื้อผลิตภัณฑ์ การเผาที่อุณหภูมิสูงเนื้อผลิตภัณฑ์จะมีการหดตัวสูงกว่า รูพรุนจะมีปริมาณลดลง เกิดเนื้อแก้วได้มากกว่า การอุดรูพรุนเป็นไปได้ดีกว่า ทำให้ผลิตภัณฑ์ดูดซึมน้ำได้น้อยลง นอกจากนี้เนื้อแก้วยังช่วยยึดจับผลึกต่างๆ ในเนื้อผลิตภัณฑ์ทำให้ผลิตภัณฑ์มีความแข็งแรงมากขึ้น การเกิดเนื้อแก้วมากแสงสามารถส่องผ่านได้มาก (ปริดา พิมพ์ขาวขำ, 2547 : 94-96)

ตารางที่ 2.4 ช่วงอุณหภูมิในการเผาเนื้อดินไตรแอกเซียล

ชนิดของเนื้อดิน	ไพโรเมตริกโคน (Pyrometric Cone)	ช่วงอุณหภูมิ (°C)
1. พาเรียน	3-4	1145-1165
2. เซมิวิเทรียสแวร์	2-6	1135-1190
3. สโตนแวร์	6-10	1190-1260
4. เนื้อดินสุกัณห์	8-12	1225-1310
5. อิเล็กตริกคอลฟอร์ซเลน	8-12	1225-1310
6. ไฮเทลโซนา	10-13	1310-1350
7. ฮาร์ดฟอร์ซเลน	10-18	1310-1500

ที่มา: ปริดา พิมพ์ขาวขำ (2547 : 96)

2.3 การขึ้นรูปผลิตภัณฑ์เซรามิกโดยวิธีการหล่อ

การขึ้นรูปด้วยการหล่อ (Casting) หมายถึง การขึ้นรูปผลิตภัณฑ์เซรามิกโดยการเทน้ำดินลงไปแม่พิมพ์พลาสติก เนื้อพลาสติกมีรูเล็กๆ สามารถดูดซึมน้ำได้ดี รองจนกระทั่งแม่พิมพ์พลาสติกดูดซึมน้ำออกจากน้ำดินและเกิดการจับตัวกันของเนื้อดินที่ผิวด้านในของแม่พิมพ์จึงเทน้ำดินส่วนที่เหลือออกจากแม่พิมพ์ การหล่อขึ้นรูปมีหลายวิธีแตกต่างกันขึ้นอยู่กับชนิดและรูปร่างของผลิตภัณฑ์ นอกจากนี้ยังต้องคำนึงถึงคุณภาพและสมบัติของชิ้นงาน

น้ำดิน (Slip) หมายถึง ส่วนผสมของดินกับน้ำในปริมาณที่เหมาะสม คือ จำกัดปริมาณของน้ำให้น้อยที่สุด โดยเติมสารเคมีบางชนิดเพื่อช่วยให้ดินกระจายตัว อาทิ โซเดียมซิลิเกตและโซเดียมคาร์บอเนต (ปริดา พิมพ์ขาวขำ, 2547 : 115) ทำให้น้ำดินไหลตัวดีและไม่ตกตะกอน

การหล่อแบ่งออกได้เป็น 3 วิธี ดังนี้

2.3.1 การหล่อแบบเท (Drain casting)

ใช้ในการหล่อผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะกลวงโดยการเติมน้ำดินลงไปแม่พิมพ์ปูนพลาสติกที่แห้งสนิท บริเวณผิวพิมพ์และเนื้อปูนพลาสติก จะมีรูเล็กๆ ทำหน้าที่ดูดซึมน้ำได้ดี เมื่อเทน้ำดินลงไปแม่พิมพ์จะดูดซึมน้ำดินตรงบริเวณผิวที่มีน้ำดินไหลหล่ออยู่ กระบวนการดูดน้ำของแม่พิมพ์เป็นไปอย่างต่อเนื่องและช้าๆ ความชื้นของน้ำจะถูกเก็บไว้ในแม่พิมพ์

ขึ้นไปเรื่อยๆ การจับตัวของชั้นดินตรงบริเวณผิวปูนปลาสเตอร์จะเริ่มขึ้นและชั้นดินจะหนาขึ้นทีละน้อย เมื่อได้ความหนาที่ต้องการจึงเทน้ำดินส่วนที่ไม่แข็งออก ทั้งผลิตภัณฑ์ไวโนแม่พิมพ์เพื่อปูนปลาสเตอร์ ทำหน้าที่ดูดซับน้ำออกจากดินต่อไปจนกระทั่งชั้นของดินเริ่มแข็งตัวหรือหดตัวลงเล็กน้อย รอยร้าวที่เนื้อดินแข็งตัวพอสมควรสามารถยับยั้งได้ โดยไม่ยุบเสียรูปทรงจึงแกะพิมพ์ออก ชิ้นงานจะมีความหนาสม่ำเสมอหมด

2.3.2 การหล่อแบบตัน (Solid casting)

เป็นการหล่อชิ้นงานที่สามารถควบคุมขนาดความหนาบางของชิ้นงานได้ โดยการสร้างแม่พิมพ์ที่ผิวด้านนอกและผิวผลิตภัณฑ์ที่จะผลิต ซึ่งได้กำหนดความหนาของส่วนต่างๆ ของชิ้นงานไว้ในช่องว่างสำหรับน้ำดินเข้าไป แม่พิมพ์ด้านนอกและด้านในหรือด้านบนและด้านล่างจะถูกประกบกันให้แน่นแล้วเทน้ำดินหรือฉีบน้ำดินด้วยแรงอัดเข้าไปจนเต็ม และไม่มีการเทออกอีก กระบวนการหล่อน้ำดินแบบตันเกิดขึ้นเมื่อผิวแม่พิมพ์ด้านในทั้งสองชั้นมีการดูดน้ำออกจากน้ำดินพร้อมๆ กัน

2.3.3 การหล่อแบบผสม (Double casting)

เป็นการหล่อโดยใช้เทคนิคแบบผสมในชั้นเดียวกัน คล้ายเทคนิคการหล่อตัน แต่ช่องว่างภายในแม่พิมพ์มีความหนามากกว่า เมื่อเทน้ำดินออกมาระยะหนึ่ง ชิ้นงานมีความหนาตามที่ต้องการจึงเทน้ำดินที่เหลือออกจากพิมพ์ นิยมใช้หล่อผลิตภัณฑ์อ่างล้างหน้าและสุขภัณฑ์ต่างๆ ที่มีขนาดใหญ่ซึ่งต้องการความหนาบางไม่เท่ากัน (ไพจิตร อังศิริวัฒน์, 2541 : 227)

สมบัติของน้ำดินที่ดี มีดังนี้

- 1) มีดินมาก มีอัตราส่วนของน้ำน้อย ถอดจากแม่พิมพ์ได้เร็ว
- 2) น้ำดินต้องไหลตัวดี ไหลได้เป็นสายไม่ขาดตอน เมื่อเทน้ำดินออกจากแม่พิมพ์ ภายในก้นภาชนะเรียบ
- 3) ไม่มีตำหนิของน้ำดินตกตะกอนและเก็บรายละเอียดของแม่พิมพ์ได้ดี
- 4) ทั้งไว้นานน้ำดินจะต้องไม่ตกตะกอน หรือแข็งตัวเป็นวุ้นในแม่พิมพ์ทำให้เทน้ำที่เหลือออกจากพิมพ์ได้

5) เมื่อผลิตภัณฑ์หล่อเสร็จแล้วหรือขณะตกแต่ง ไม่เปราะแตกง่าย

การควบคุมคุณภาพน้ำดินที่ใช้งานได้ดีมี 3 ประการ คือ

- 1) การไหลตัว (Fluidity)
- 2) ความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity)
- 3) ความข้น (Thixotropy)

น้ำดินที่ใช้ในการเทแบบชนิดมีน้ำดินเหลือทิ้ง ควรมีความถ่วงจำเพาะระหว่าง 1.65-1.80 หรือมีความหนืดระหว่าง 1-5 poises ส่วนน้ำดินที่มีการเทแบบชนิดให้น้ำดินแข็งอยู่ข้างใน ควรมีความถ่วงจำเพาะระหว่าง 1.75-1.95 หรือมีความหนืดระหว่าง 5-50 poises (ปรีดา พิมพ์ขาวขำ, 2547 : 117) ปริมาณน้ำที่เหมาะสมในการเตรียมน้ำดินประมาณ ร้อยละ 35-50 (ทวี พรหมพฤกษ์, 2523 : 86) หากน้ำดินที่ผสมได้มีความถ่วงจำเพาะไม่ถึงเป้าหมายที่ต้องการ น้ำดินจะไหลตัวไม่ดี หรือน้ำดินมีค่าความแข็งตัวเป็นวุ้นเร็วเกินไป ต้องปรับปรุงโดยเติมสารเคมี น้ำ หรือเนื้อดินตามความเหมาะสม เพื่อปรับปรุงคุณภาพน้ำดิน

ตารางที่ 2.5 ปฏิกริยาของน้ำดินเมื่อเติมวัตถุดิบในการปรับปรุงคุณภาพ

เติมวัตถุดิบ	การไหลตัว	ความถ่วงจำเพาะ	ความชื้น
น้ำยา	เพิ่มขึ้น	ลดลงเล็กน้อย	ลดลง
น้ำ	เพิ่มขึ้น	ลดลง	ลดลงเล็กน้อย
เนื้อดิน	ลดลง	เพิ่มขึ้น	เพิ่มขึ้น

ที่มา: ไพจิตร อังศิริวัฒน์ (2541 : 241)

2.4 การทดสอบและวิเคราะห์สมบัติของเนื้อดิน

2.4.1 สมบัติทางกายภาพ

2.4.1.1 การหดตัวเมื่อแห้ง (Drying shrinkage)

การหดตัวเมื่อแห้ง หมายถึง ค่าของขนาดที่เล็กลงจากเดิมของดินที่เปียกจนถึงแห้งสนิท ปกติจะใช้ความร้อนประมาณอุณหภูมิ 64-76 องศาเซลเซียส ช่วยทำให้ดินนั้นแห้ง แต่ตัวอย่างของดินที่สุ่มมาจะต้องมีขนาดที่แน่นอน โดยทั่วไปจะวัดการหดตัวตามเส้น (Linear Shrinkage) และการหดตัวตามปริมาตร (Volume shrinkage) ในการปฏิบัติจะนิยมหาค่าร้อยละการหดตัวตามเส้นเพียงอย่างเดียว โดยใช้การวัดขนาดความยาวของดินเมื่อเปียกเปรียบเทียบกับความยาวเมื่อแห้งของแท่งทดลอง (ทวี พรหมพฤกษ์, 2523 : 54)

2.4.1.2 การหดตัวหลังการเผา (Firing shrinkage)

การหดตัวหลังการเผา ใช้วิธีการเช่นเดียวกันกับการหดตัวเมื่อแห้ง ทั้งหดตัวเมื่อแห้ง หดตัวตามปริมาตร และหดตัวตามเส้น เป็นวิธีที่จะช่วยให้เราทราบว่า ควรจะสร้างต้นแบบของผลิตภัณฑ์เท่าใดจึงจะได้ขนาดหลังการเผาตามที่ต้องการ (นิวัตร พัฒนา, 2548 : 72)

2.4.1.3 ความต้านทานแรงดัด (Bending strength)

ความแข็งแรง (Strength) หมายถึงความสามารถในการรับแรงในขณะที่เกิดความเค้น (Stress) ขึ้นภายในวัสดุ การศึกษาเกี่ยวกับความแข็งแรงของวัสดุจะศึกษาเกี่ยวกับแรงภายในวัสดุกับการเปลี่ยนแปลงรูปร่างและขนาดของวัสดุนั้น (วีระพันธ์ สิทธิพงศ์, 2534 : 1 อ้างถึงใน ความต้านทานแรงดัด, 2556) หรืออาจกล่าวได้ว่าความแข็งแรงคือความสามารถในการต้านทานแรงที่มากระทำโดยไม่เกิดการแตกหัก (เสาวรจน์ ช่วยจุลจิตร, 2543 : 7 อ้างถึงใน ความต้านทานแรงดัด, 2556) การวัดความแข็งแรงจะวัดจากค่าความเค้นสูงสุดที่ทำให้เกิดการแตกหักเสียรูปทรง หรือ ค่าโมดูลัสของการแตกหัก (Modulus of Rupture: MOR) มีหน่วย ปอนด์ต่อตารางฟุต (lb/ft^2) หรือ psf ในระบบอังกฤษ และมีหน่วย นิวตันต่อตารางเมตร (N/m^2) หรือ Pa ในระบบสากล การทดสอบความต้านทานแรงดัดจึงเป็นการตรวจสอบความสามารถในการต้านทานแรงดัด (Bending load) และรายงานผลการทดสอบเป็นค่า MOR

2.4.1.4 การดูดซึมน้ำ (Water absorption)

เป็นสมบัติที่ช่วยให้เราทราบว่า เนื้อดินที่เรานำมาใช้นั้นเผาจนถึงจุดสุกตัวหรือยัง (ทวิ พรหมพฤกษ์, 2523 : 52) หรือทำให้เราพิจารณาได้ง่ายขึ้นว่าวัตถุนั้นมีจุดสุกตัวสูงหรือต่ำเพียงใด เหมาะที่จะนำมาใช้ได้หรือไม่ (วิจัยและพัฒนาอุตสาหกรรมเครื่องปั้นดินเผา, ศูนย์, 2529 : 150) ทำให้สามารถเลือกดินที่มีความเหมาะสมต่อการผลิตเครื่องปั้นดินเผาชนิดต่างๆ ซึ่งมีอุณหภูมิสูง การดูดซึมน้ำจะลดลง ทั้งนี้เพราะมีอุณหภูมิในการเผาสูง จะทำให้ความแน่นของเนื้อดินเพิ่มขึ้น ซึ่งทำให้รูพรุนต่างๆ ในเนื้อดินลดลง น้ำจะไหลผ่านเข้าสู่เนื้อดินได้ยาก

2.4.1.5 การเปลี่ยนแปลงไพโรพลาสติก (Pyroplastic deformation)

เป็นพฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงสภาพคงทนไปสู่สภาพอ่อนตัวในขณะเผา โดยเนื้อดินจะปรากฏการดัดโค้ง (Bending) เนื่องจากแรงโน้มถ่วง ทั้งนี้เมื่อเนื้อดินถูกเผาจะเกิดเฟสของเหลว (Liquid phase) เพิ่มมากขึ้น และเป็นสาเหตุที่ทำให้ความหนืดลดลง เนื้อดินไม่สามารถคงสภาพอยู่ได้จึงเกิดการดัดโค้งในที่สุด (Bernardin and others, 2006 : 316)

2.4.2 สมบัติในการขึ้นรูปโดยวิธีหล่อเนื้อดิน

2.4.2.1 ความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity)

ใช้สัญลักษณ์ S หรือ S.G. หรือ Sp.G. หรือ Sp.Gr. หรือ ถพ. เรียกอีกอย่างหนึ่งว่า ความหนาแน่นสัมพัทธ์ (Relative density) หมายถึง สัดส่วนระหว่างความหนาแน่นของวัตถุกับความหนาแน่นของของไหลมาตรฐาน (สำหรับของเหลว คือ น้ำ) หรือกรณีที่วัตถุและน้ำมีปริมาตรเท่ากัน จะพิจารณาสัดส่วนระหว่างมวลของวัตถุต่อมวลของน้ำ (เล็ก สีคง, 2548)

2.4.2.2 ความหนืด (Viscosity)

เป็นพฤติกรรมการต้านทานต่อการไหลของของเหลว ซึ่งสามารถวัดความหนืดได้หลายวิธี เครื่องมือที่ใช้สำหรับวัดความหนืดเรียกว่า มาตรการความหนืด (Viscometer) ในการวัดความหนืดไม่ว่าจะโดยวิธีใดก็ตาม อุณหภูมิมาตรฐานที่กำหนดให้ใช้คือ 25 องศาเซลเซียส เพราะอุณหภูมิจะมีผลต่อความหนืด โดยความหนืดของของเหลวทุกชนิดจะมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น (เล็ก สีคง, 2548 อ้างอิงจาก ชัยสวัสดิ์ เทียนวิบูลย์, ม.ป.ป. : 11-14)

2.4.2.3 ความข้น (Thixotropy)

เป็นสมบัติที่แสดงให้เห็นถึงคุณภาพของน้ำดินที่มีผลต่อการหล่อแบบ นั่นคือ หากความข้นสูง จะทำให้มีอัตราการหล่อแบบที่รวดเร็ว แต่การเทน้ำดินออกจากแบบพิมพ์ทำได้ยาก ผิวผลิตภัณฑ์ด้านในจะไม่เรียบ ความข้นสะสมในผลิตภัณฑ์จะมีมาก ทำให้แห้งช้าและผลิตภัณฑ์อ่อนแอ หากความข้นต่ำ อัตราการหล่อแบบจะช้า และผลิตภัณฑ์มีโอกาสที่จะยุบลงขณะเทน้ำดินออก เพราะบริเวณผิวนอกแห้งตัวเร็วหลุดจากแม่พิมพ์ (เล็ก สีคง, 2548)

2.4.3 การทดสอบสมบัติทางกายภาพ

2.4.3.1 การทดสอบการหดตัว (Shrinkage testing)

การทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C326-09 กำหนดให้ใช้แท่งทดสอบรูปทรงกระบอก ความยาวประมาณ 5 นิ้ว (127 มิลลิเมตร) และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 0.75 นิ้ว (19 มิลลิเมตร) สำหรับการหดตัวเมื่อแห้ง ทำการอบแห้งทดสอบที่อุณหภูมิ 100-110 องศา

เซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นคำนวณขนาดที่ลดลงภายหลังการอบแห้ง ส่วนการหัดตัวหลังการเผา ทำการเผาแห้งทดสอบที่อุณหภูมิที่กำหนด จากนั้นคำนวณขนาดที่ลดลงภายหลังการเผา (ASTM C326-09. 2010 : 1)

2.4.3.2 การทดสอบการดูดซึมน้ำ (Water absorption testing)

การทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C373-88 กำหนดให้ใช้แท่งทดสอบที่มีน้ำหนักแห้งไม่ต่ำกว่า 50 กรัม ต้มในน้ำอุณหภูมิ 150 ± 5 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 ชั่วโมง และแช่ทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง จากนั้นคำนวณน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นภายหลังการต้ม (ASTM C373-88. 2010 : 1)

2.4.3.3 การทดสอบความต้านทานแรงดัด (Flexural properties testing)

การทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C674-88 กำหนดให้ใช้แท่งทดสอบมีขนาดหน้าตัดไม่ต่ำกว่า 1×0.5 นิ้ว (25.4×12.7 มิลลิเมตร) ความยาวไม่น้อยกว่า 4.5 นิ้ว (114 มิลลิเมตร) วางบนแท่นรองรับมีดทดสอบให้มีระยะคงเหลือไม่ต่ำกว่า 0.25 นิ้ว (6.4 มิลลิเมตร) ของชิ้นทดสอบทั้ง 2 ด้าน ออกแรงกดบริเวณกึ่งกลางชิ้นทดสอบจนหัก จากนั้นคำนวณแรงกดต่อพื้นที่รองรับแรง (ASTM C674-88. 2010 : 1-3)

2.4.3.4 การตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงไพโรพลาสติก (Pyroplastic deformation measurement)

โดยวางแท่งทดสอบลงบนอุปกรณ์ทนไฟรองรับการดัดโค้ง ทำการเผาแท่งทดสอบที่อุณหภูมิที่กำหนด จากนั้นวัดระยะการดัดโค้งของแท่งทดสอบที่เกิดจากแรงโน้มถ่วงภายหลังการเผา จากตำแหน่งกึ่งกลางของแท่งทดสอบถึงพื้นระนาบ (Bernardin and others, 2006 : 316)

2.4.4 การทดสอบสมบัติในการขึ้นรูปโดยวิธีหล่ออัดดิน

2.4.4.1 การทดสอบความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity testing)

การทดสอบความถ่วงจำเพาะทำได้หลายวิธี ซึ่งงานวิจัยนี้จะใช้การชั่งน้ำหนักของเหลว โดยชั่งน้ำหนักน้ำดินในภาชนะที่รู้ปริมาตร จากนั้นนำมาคำนวณความหนาแน่นและเปรียบเทียบกับสัดส่วนกับความหนาแน่นของน้ำ ซึ่งน้ำ 1 กรัม มีปริมาตร 1 ลูกบาศก์เซนติเมตร ดังนั้นความถ่วงจำเพาะของน้ำดินจึงจะมีค่าเท่ากับค่าความหนาแน่นของน้ำดิน (เล็ก สีคง, 2548)

2.4.4.2 การทดสอบความหนืด (Viscosity testing)

การทดสอบความหนืดทำได้หลายวิธี ซึ่งงานวิจัยนี้จะใช้มาตรวัดความหนืดแบบเกลเลนแคมป์ (Gallenkamp torsion viscometer) ซึ่งเป็นมาตรวัดความหนืดที่ใช้หลักการต้านทานการไหลอย่างอิสระของน้ำดินด้วยการหมุนทวนเข็มนาฬิกา โดยเครื่องทดสอบจะประกอบด้วยหลอดที่แขวนมาจากด้านบน ที่ปลายด้านล่างมีโลหะทรงกระบอก (Cylinder) ซึ่งหมุนได้อย่างอิสระไปพร้อมกับแกน การวัดจะทำการหมุนโลหะทรงกระบอกให้ครบ 360 องศา แล้วปล่อยให้หมุนกลับในภาชนะ ค่ามุมที่หมุนกลับจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของตัวอย่าง ความหนืดพิจารณาจากองศาการหมุนและนำมาเปรียบเทียบกับ (เล็ก สีคง, 2548)

2.4.4.3 การทดสอบความข้น (Thixotropy testing)

ทดสอบเช่นเดียวกับความหนืด โดยการวัดความหนืดที่เวลาเริ่มต้น (ภายหลังการกวน) และวัดค่าความหนืดอีกครั้งเมื่อตั้งน้ำดินทิ้งไว้โดยไม่รบกวนตามเวลาที่กำหนด (5 นาที) ค่าความหนืดที่วัดได้ครั้งที่สองจะแสดงความข้น และผลต่างระหว่างค่าความหนืดทั้งสองครั้ง จะแสดงค่าการเปลี่ยนแปลงความข้นเหลวของน้ำดิน (เล็ก สีคง, 2548)

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Hojamberdiev and other (2011) ศึกษาผลการใช้เศษแกรนิตชนิดมัสโคไวต์ ที่มีต่อสมบัติทางกายภาพและสมบัติทางกลของกระเบื้องปูพื้นและกระเบื้องบุผนัง โดยบดผสมเศษแกรนิตชนิดมัสโคไวต์ เกล็ด เศษดินเผา (Grog) และเบนโทไนต์ ควบคุมขนาดอนุภาค 63 ไมครอน (μ) ขึ้นรูปขึ้นทดสอบด้วยการอัดผง แรงดัน 30 เมกกะปาสกาล (MPa) เเผที่อุณหภูมิ 800-1150 องศาเซลเซียส อัตราการเพิ่มและอุณหภูมิเท่ากับ 5 องศาเซลเซียสต่ออนาที ผลการศึกษา พบว่า (1) กระเบื้องปูพื้นที่มีปริมาณเศษแกรนิตชนิดมัสโคไวต์ ร้อยละ 30 (FloCT3) มีสมบัติดีที่สุด กล่าวคือ มีค่าการดูดซึมน้ำลดลงจาก ร้อยละ 20.11 ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นร้อยละ 3.66 ที่อุณหภูมิ 1150 องศาเซลเซียส และมีค่า ความต้านทานแรงดัด (bending strength) สูงสุด 32.04 เมกกะปาสกาล ที่อุณหภูมิ 1150 องศาเซลเซียส (2) กระเบื้องบุผนังที่มีปริมาณเศษแกรนิตชนิดมัสโคไวต์ ร้อยละ 20 (FacCT1) มีสมบัติดีที่สุด กล่าวคือ มีค่าการดูดซึมน้ำลดลง จากร้อยละ 1050 องศาเซลเซียส และมีค่า ความต้านทานแรงดัดสูงสุด 26.80 เมกกะปาสกาล ที่อุณหภูมิ 1050 องศาเซลเซียส (3) โครงสร้างจุลภาคของกระเบื้องปูพื้น (FloCT3) ประกอบด้วย ผลึกมัลไลต์ (mullite) ขนาดเล็กและเกรนของควอทซ์ขนาดใหญ่ กระจายในพื้นเฟสแก้ว (Glassy phase matrix) ส่วนกระเบื้องบุผนัง (FacCT1) ประกอบด้วยผลึกวอลาสโตไนต์ (Wollastonite) ร่วมกับเกรนของควอทซ์คงเหลือ (residual) และ (4) โครงสร้างผลึกของกระเบื้องทั้ง 2 ชนิด ปรากฏมัลไลต์อะนอร์ไทต์ (Anorthite) และวอลลาสโตไนต์ ซึ่งเป็นเหตุผลหลักในการเพิ่มขึ้นของความต้านทานแรง (Strength)

El-Maghraby and other (2011) ทดลองใช้แกรนิตเป็นฟลักซ์ (Flux) ในการผลิตกระเบื้องสโตนแวร์ โดยการปรับเปลี่ยนสัดส่วนวัตถุดิบ จำนวน 2 ชนิด คือ แกรนิต (ร้อยละ 20-35) และดิน Kalabsha (ร้อยละ 65-80) ที่ผ่านการบดผสมให้มีอนุภาคต่ำกว่า 63 ไมครอน ขึ้นรูปด้วยวิธีอัดผง ควบคุมความชื้น ร้อยละ 6 แรงดัน 40 เมกกะปาสกาล และเผที่อุณหภูมิ 1220 องศาเซลเซียส ผลการทดลอง พบว่า (1) ปริมาณแกรนิตที่เพิ่มขึ้นส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของฟลักซ์ไอออน (ion) โดยมีส่วนต่อการลดลงของอุณหภูมิการเปลี่ยนเฟส (Phase transformation) จาก ซิลิกาเกต (SiO_4) ไปเป็น สปิเนล (Al-Si spinel) จากอุณหภูมิ 1281 องศาเซลเซียส (S4) (2) การดูดซึมน้ำของกระเบื้องมีค่าลดลง เมื่อปริมาณแกรนิต เพิ่มขึ้นจากร้อยละ 5.10 (S1) ลดลงเหลือ ร้อยละ 2.47 (S4) (3) ค่าความต้านทานแรงดัดสูงสุดของกระเบื้อง (S4) มีค่าเท่ากับ 31.81 เมกกะปาสกาล (4) กระเบื้องสโตนแวร์ จากการทดลอง สามารถจำแนกได้ 2 ประเภท ได้แก่ B II a (สำหรับ S1, S2 และ S3) และ B I b (S4) โดยใช้เกณฑ์การดูดซึมน้ำ กล่าวคือ $3\% \leq WA \leq 3\%$ และ ความต้านทานแรงดัดกล่าวคือ $BS > 22 \text{ MPa}$ และ $BS > 30 \text{ MPa}$ ตามลำดับ และ (5) กระเบื้องที่มีปริมาณดินมาก (S1)

จะปรากฏโครงสร้างมัลไลต์ปฐมภูมิส่วนกระเบื้องที่มีปริมาณแกรนิตมาก (S4) จะปรากฏโครงสร้างมัลไลต์ทุติยภูมิ ทั้งนี้ขนาดและปริมาณมัลไลต์ทุติยภูมิจะเป็นส่วนควบคุมความต้านทานแรงของเนื้อดิน

Torres and other (2009) ทำการทดลองผลิตกระเบื้องมุงหลังคาจากส่วนผสมของเศษแกรนิตจากกระบวนการตัดและขัด โดยการผสมวัตถุดิบ 4 ชนิด ได้แก่ ดินแดง-1 (ร้อยละ 40) ดินแดง-2 (ร้อยละ 20-40) เศษทรายล้าง (ร้อยละ 10-40) และเศษแกรนิต (ร้อยละ 10-30) ควบคุมปริมาณความชื้น ร้อยละ 14-18 โดยน้ำหนักขึ้นรูปด้วยวิธีอัดรีดเป็นรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร เผาที่อุณหภูมิ 950-1050 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการเพิ่มและลดอุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส ต่อนาที ในเตาเผาแบบอุโมงค์ (Tunnel kiln) ผลการทดลอง พบว่า สัดส่วนวัตถุดิบที่เหมาะสมในการผลิต คือ สูตรที่ 2 (ดินแดง-1 ร้อยละ 40 ดินแดง-2 ร้อยละ 40 เศษทรายล้าง ร้อยละ 10 เศษแกรนิต ร้อยละ 10) และสูตรที่ 3 (ดินแดง-1 ร้อยละ 40 ดินแดง-2 ร้อยละ 30 เศษทรายล้าง ร้อยละ 30) โดยมีสมบัติขึ้นรูปที่ดี กล่าวคือ มีดัชนีความเป็นพลาสติก (Plastic index) ร้อยละ 32.7 (สูตรที่ 2) และร้อยละ 34.8 (สูตรที่ 3) มีสมบัติทางเทคนิคที่ดี กล่าวคือ มีค่าการดูดซึมน้ำลดลงจากมากกว่าร้อยละ 6 (อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส) เป็นน้อยกว่าร้อยละ 2 (อุณหภูมิ 1050 องศาเซลเซียส) และมีค่าความต้านทานแรงดัดสูงกว่า 40 เมกะปาสคาล ที่อุณหภูมิ 1050 องศาเซลเซียส ทั้งสูตรที่ 2 และ 3 เมื่อวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยเทคนิค SEM/EDS พบว่า สูตรที่ 2 ปรากฏ อนุภาคของเหล็ก (Iron) กระจายทั่วพื้นที่ ซึ่งเป็นไปได้ เนื่องจากองค์ประกอบของเศษแกรนิตที่มีสิ่งเจือปนจากกระบวนการผลิต อาทิ เศษเหล็กจากการเจียรนัย และอื่นๆ เมื่อเปรียบเทียบความเรียบผิวของชิ้นงานดิบ พบว่า สูตรที่ 3 มีความเรียบผิวที่ดีกว่าเล็กน้อย การทดลองผลิตสรุปได้ว่า สามารถนำเศษแกรนิตมาใช้ทดแทนวัตถุดิบกลุ่มที่ไม่มีความเหนียว (Non-plastic materials) อาทิ ควอทซ์ อัลไบต์ ไมโครไคลน์ และอิลไลต์ ทั้งนี้การผลิตระดับอุตสาหกรรมต้องอาศัยกระบวนการจัดการเศษวัสดุเหลือทิ้งที่มีคุณภาพดี เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์กระเบื้องที่มีสมบัติที่ดีเทียบเท่าวัตถุดิบที่ใช้ในอุตสาหกรรม

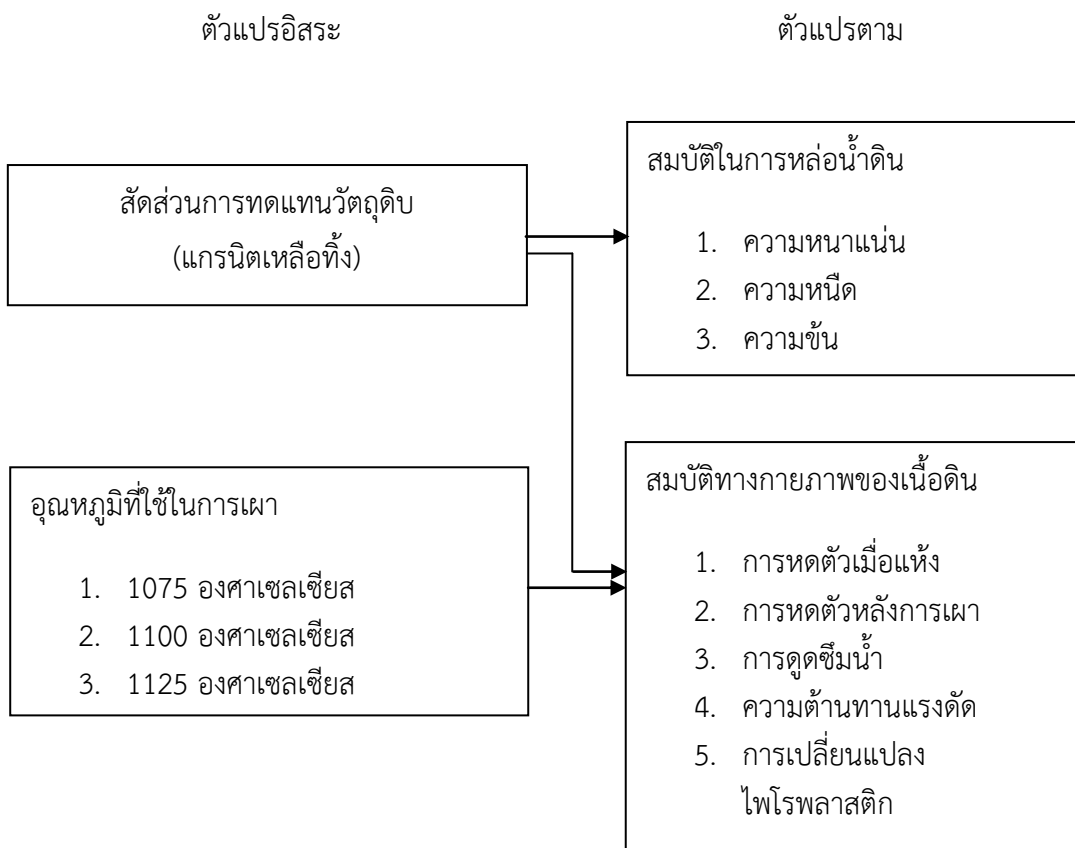
Torres, P. and other (2007) ทำการพัฒนากระเบื้องปูพื้นจากส่วนผสมของโคลนของเสีย (Sludge) ที่ได้จากกระบวนการเปลี่ยนแปลงหินควอทซ์และแกรนิตในโรงงานอุตสาหกรรม โดยผสมวัตถุดิบ 3 ชนิด ได้แก่ ดินแดง (ร้อยละ 30-40) โคลนหินควอทซ์ (ร้อยละ 35-70) และโคลนแกรนิต (ร้อยละ 35-70) ควบคุมปริมาณความชื้น ร้อยละ 16-19 โดยน้ำหนัก ขึ้นรูปด้วยวิธีอัดรีด (Extrusion) เป็นรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร และเผาที่อุณหภูมิ 1100-1200 องศาเซลเซียส จากนั้นทดสอบและวิเคราะห์ สมบัติทางเทคนิคที่เกี่ยวข้องผลการพัฒนา พบว่า กระเบื้องปูพื้นที่ใช้โคลนแกรนิตเป็นส่วนผสม (สูตรที่ 4-6) มีสมบัติทางเทคนิคดีกว่ากระเบื้องปูพื้นที่ใช้โคลนหินควอทซ์เป็นส่วนผสม (สูตรที่ 1-3) และกระเบื้องปูพื้นที่ใช้ทั้งโคลนแกรนิตร่วมกับโคลนหินควอทซ์เป็นส่วนผสม (สูตรที่ 7) โดยมีค่าการดูดซึมน้ำต่ำสุด ต่ำกว่าร้อยละ 0.5 และค่าความต้านทานแรงดัดสูงสุด สูงกว่า 60 เมกะปาสคาล สำหรับสูตรที่ 6 (ดินแดง ร้อยละ 40 และ โคลนแกรนิต ร้อยละ 60) ภายหลังการเผาที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส โครงสร้างผลึกปรากฏมัลไลต์ และฮีมาไทต์ ภายหลังการเผา ปริมาณฟลักซ์ (ไมโครไคลน์และอัลไบต์) ลดลงเมื่ออุณหภูมิการเผาเพิ่มขึ้น ในขณะที่ควอทซ์ ถูกทำลายในเฟสแก้ว และเฟสวิเทรียส (Vitreous) จะมีปริมาณเพิ่มขึ้นภายหลังกระบวนการเผา

อบผนึก (Densification or sintering) โคลนแกรนิต ซึ่งประกอบด้วยฟลักซ์ในปริมาณสูง สามารถใช้เป็นวัตถุดิบ ในการผลิตกระเบื้องปูพื้นที่มีสมบัติทางเทคนิค เทียบเคียงกับวัตถุดิบที่ใช้ในอุตสาหกรรมจริงตามมาตรฐาน ISO 13006

Tuncel and Ozel (2012) ศึกษาเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงไพโรพลาสติก (Pyroplastic) ในเนื้อดินสุกภัณฑ์ฟอร์ซเลน ที่มีสัดส่วน $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ และ $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ แตกต่างกัน โดยควบคุมปริมาณ $\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3$ ให้อยู่ในช่วง 18.44-23.45 ภายหลังการเผาที่อุณหภูมิ 1250 องศาเซลเซียส พบว่า เนื้อดินที่มีองค์ประกอบของ $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ เท่ากับ 5 และ $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ เท่ากับ 4 มีค่าการดูดซึมน้ำต่ำใกล้เคียง ร้อยละ 0 และมีค่าไพโรพลาสติกอินเดกซ์ (Pyroplastic Index; PI) ต่ำประมาณ 1.06-1.52 เมื่อเปรียบเทียบกับเนื้อดินมาตรฐานที่มีค่าประมาณ 2.85

2.6 กรอบแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย

จากทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องจึงสังเคราะห์เป็นกรอบแนวคิดในการวิจัย ดังนี้



ภาพประกอบที่ 2.12 กรอบแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย