

บทที่ 2

หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 เซรามิก

เซรามิก หมายถึง ผลิตภัณฑ์ซึ่งกรรมวิธีการผลิตต้องผ่านการเผาที่อุณหภูมิสูง หรือ ผลิตภัณฑ์ซึ่งส่วนประกอบของผลิตภัณฑ์ทั้งหมด หรือส่วนใหญ่ ผลิตจากวัตถุดิบที่มีอยู่ตามธรรมชาติบนเปลือกโลก [6]

การแยกชนิดของผลิตภัณฑ์เซรามิกโดยทั่วไปแล้วจะใช้สี ลักษณะผิวงาน และรูปทรงเป็นตัวแยก แต่ในเชิงวิทยาศาสตร์แล้วจะใช้ส่วนประกอบ โครงสร้าง ปฏิกริยาของวัตถุดิบ และอุณหภูมิเผา มาช่วยในการจำแนกชนิดของผลิตภัณฑ์ ดังนี้ [1, 7]

- เอิร์ทเทนแวร์ (Earthenware) ได้แก่ ผลิตภัณฑ์เซรามิกมีทั้งชนิดเคลือบ และไม่เคลือบ มีการดูดซึมน้ำปานกลางถึงสูงสุดประมาณ 10 – 15% จึงมีความพรุนตัวสูง โดยเผาในอุณหภูมิต่ำประมาณ 800 – 1,150 °ซ. ผลิตภัณฑ์ประเภทเอิร์ทเทนแวร์ เช่น กระจาดดิน ไม้ กระจเบื้องมุงหลังคา กระจเบื้องปูพื้น อิฐมอญ เป็นต้น

- สโตนแวร์ (Stoneware) ได้แก่ ผลิตภัณฑ์ที่มีทั้งชนิดเคลือบ และไม่เคลือบ ส่วนใหญ่ทำมาจากดินประเภทสโตนแวร์ และเผาให้มีการดูดซึมน้ำต่ำ 10 – 15% แต่เนื้อดินยังไม่โปร่งแสง เผาที่อุณหภูมิสูง 1,220 – 1,260 °ซ. มีความแข็งแรงทนทานกว่าเอิร์ทเทนแวร์ ผลิตภัณฑ์สโตนแวร์ เช่น ถ้วย จาน ชาม เครื่องสังคโลก โอ่งมังกร สุขภัณฑ์ เป็นต้น

- ผลิตภัณฑ์ขาวโปร่งแสง (Bone china) ได้แก่ ผลิตภัณฑ์ที่มีความโปร่งแสง มีค่าของการดูดซึมน้ำต่ำ หรือใกล้ถึงศูนย์ประมาณ 0 – 1% อาจจะชุบเคลือบเผาเคลือบในครั้งแรก หรือเผาเคลือบในครั้งที่สอง เผาที่อุณหภูมิสูง 1,250 – 1,280 °ซ. ผลิตภัณฑ์ประเภทโบนไชนา เช่น ชุดถ้วยกาแฟ ถ้วย จาน ชาม เครื่องประดับตกแต่ง เป็นต้น

- ปอร์ซเลน (Porcelain) ได้แก่ ผลิตภัณฑ์ที่เนื้อดินเกิดจากตารางสามเหลี่ยมเผาดิบที่อุณหภูมิต่ำ หรือเผาเคลือบที่อุณหภูมิสูง หรืออาจจะเผาเพียงครั้งเดียวจนเนื้อแกร่ง ไม่ดูดซึมน้ำ เน้นความโปร่งแสงของเนื้อดิน ชิ้นงานมีความขาวและความแข็งแรงสูง โดยเผาที่อุณหภูมิประมาณ 1,300 – 1,460 °ซ. ผลิตภัณฑ์ประเภทปอร์ซเลน เช่น เครื่องลายคราม งานปั้น ตุ๊กตาประดับตกแต่ง จาน ชาม เป็นต้น

กระเบื้องเซรามิก [1, 8 – 11]

กระเบื้องเซรามิกถูกพบในซากปรักหักพังมีอายุมากกว่า 6,000 ปี ตั้งแต่สมัยอียิปต์ โดยพบว่ากระเบื้องถูกนำมาใช้ในการตกแต่งบ้าน และในปิรามิดของอียิปต์ เริ่มแรกกระเบื้องทำจากดินเหนียวที่พบทั่วไป และใช้มือในการปั้นเป็นก้อน หรือกดลงในแม่พิมพ์ จากนั้นถูกทำให้แห้งภายใต้แสงอาทิตย์ หรือการอบ ต่อมาจึงมีการพัฒนาโดยการให้ความร้อนด้วยการเผา และประดับตกแต่งกระเบื้องด้วยการเคลือบ หรือการตกแต่งด้วยแก้วสีต่างๆ เพื่อให้มีลวดลายสวยงาม และมีการพัฒนาขึ้นเรื่อยๆ โดยในปัจจุบันสามารถทนสารเคมี ทนความร้อนสูงได้ เป็นต้น

ในประเทศไทยมีประวัติการผลิตเซรามิก และการพัฒนาที่ยาวนานมาแต่โบราณ ตั้งแต่ยุคบ้านเชียง อายุมากกว่า 4,500 – 5,600 ปี เริ่มจากภาชนะปั้นดินเผาจากดิน และค่อยๆ มีการพัฒนาผลิตภัณฑ์อย่างต่อเนื่อง ภายหลังเมื่อมีการติดต่อด้านขายกับชนชาติจีนในสมัยยุคสุโขทัย จึงได้รับการถ่ายทอดเทคโนโลยีการผลิตเครื่องปั้นดินเผาคุณภาพดี ซึ่งเป็นต้นแบบของผลิตภัณฑ์เซรามิกในประเทศไทยต่อมา ทำให้เกิดผลิตภัณฑ์จากเซรามิกหลายอย่าง เช่น ในสมัยสุโขทัยได้เริ่มมีการมุงหลังคาด้วยกระเบื้องเซรามิกที่ทำจากดิน และมีการเคลือบด้วยสีต่างๆ

การผลิตกระเบื้องปูพื้น และกระเบื้องบุผนัง ในปัจจุบันส่วนใหญ่เป็นการผลิตในโรงงานอุตสาหกรรมขนาดเล็ก และขนาดกลาง นิยมผลิตกันมากในภาคกลาง และภาคเหนือ เพราะใกล้แหล่งวัตถุดิบ ซึ่งได้แก่ ดินขาว (Kaolin) ดินเหนียวขาว (Ball clay) หินฟันม้า (Feldspar) หินควอตซ์ (Quartz) ทัลก์ (Talc) และหินปูน (Limestone) แต่เดิมผลิตด้วยมือโดยใช้ไม้เป็นแบบ ปัจจุบันใช้เครื่องอัดแรง และนิยมเผาที่อุณหภูมิไม่เกิน 1,200 °ซ. ทั้งนี้แล้วแต่สูตรของเนื้อดิน และน้ำเคลือบ และใช้วิธีเผาเร็ว ทำให้จะต้องมีปริมาณของคาร์บอนต่ำ เพราะคาร์บอนในดินจะทำให้เผาไม่สุกเป็นรอยดำ หรืออาจเกิดการบวมในเนื้อดินได้ง่าย ดินที่นำมาใช้ทำผลิตภัณฑ์ประเภทกระเบื้องส่วนใหญ่ไม่จำเป็นต้องเป็นดินขาวที่บริสุทธิ์ปราศจากแร่เหล็ก สามารถใช้ดินเกรดต่ำลงมาซึ่งมีปริมาณของแร่เหล็กเจือปนอยู่บ้าง ปริมาณของแร่ธาตุในเนื้อดินมีประโยชน์ต่อการเผาเนื้อกระเบื้องที่ต้องการให้ดินสุกตัวแกร่งในอุณหภูมิปานกลาง เพราะไม่ต้องเติมปริมาณตัวหลอมละลายในเนื้อดินมากนัก เนื้อดินทำกระเบื้องควรมีค่าความหดตัวต่ำ วัตถุดิบที่เหมาะสมสำหรับใช้ทำกระเบื้อง เช่น ดินเชื้อ กากดินขาวต่ำปาง ดินเหนียวที่มีปริมาณคาร์บอนต่ำ เพราะกระเบื้องในปัจจุบันนิยมเผาครั้งเดียว ถ้ามีการเผาติดก่อนหุบเคลือบปริมาณของคาร์บอน ในเนื้อดินเหนียวก็ไม่ก่อให้เกิดปัญหาเกี่ยวกับชิ้นงาน ซึ่งโรงงานผลิตกระเบื้องขนาดเล็กยังคงเผา 2 ครั้ง

2.1.1 วัสดุเคลือบเซรามิก [1, 6, 7]

วัสดุเคลือบ หมายถึง แร่ธาตุที่นำมาผสมกันในสัดส่วนต่างๆ เพื่อสร้างเนื้อผลิตภัณฑ์เคลือบเซรามิก สามารถจำแนกออกเป็นกลุ่มๆ ตามคุณสมบัติของวัสดุเคลือบ โดยทั่วไปจะใช้ความเหนียว (Plasticity) เป็นตัวแบ่งกลุ่มของวัสดุเคลือบ ดังนี้

1) วัสดุเคลือบที่มีความเหนียว (Plastic material) สำหรับวัสดุเคลือบที่มีความเหนียวนั้น โดยมากทางเคลือบเซรามิกจะ หมายถึง พวกดินชนิดต่างๆ เช่น ดินขาว ดินดำ เป็นต้น โดยในงานวิจัยนี้ได้ใช้ดินดำเป็นวัสดุเคลือบในการทำกระเบื้องเคลือบเซรามิก

องค์ประกอบที่มีอิทธิพลต่อความเหนียว

- ขนาด และรูปร่างของอนุภาค อนุภาคละเอียดมีความเหนียวดีกว่าอนุภาคหยาบ อนุภาคที่มีรูปร่างไม่เป็นระเบียบมีความเหนียวดีกว่ารูปร่างเป็นลูกบาศก์ หรือทรงกลม เพราะจะมีเนื้อที่ที่สัมผัสกันมากกว่า จึงมีแรงดึงดูดซึ่งกันและกันมากกว่า

- การใช้ของเหลวที่มีประจุ และมีความหนืดมาผสมจะช่วยปรับปรุงให้ความเหนียวดีขึ้น

- ชนิด และปริมาณของอนุมูลที่ถูกดูดซับบนผิวของเนื้อดินก็มีส่วนทำให้ความเหนียวต่างกัน เช่น เนื้อดินที่มี H^+ อยู่บนผิวจะมีความเหนียวดีกว่าเนื้อดินที่มี Na^+ อยู่บนผิว เป็นต้น

- สารอินทรีย์ช่วยทำให้ความเหนียวดีขึ้น เช่น ดินดำมีความเหนียวดีกว่าดินขาวเพราะว่าดินดำมีอินทรีย์สารปนอยู่

- การหมัก และการนวดจะช่วยทำให้ความเหนียวดีขึ้น เนื่องจากการหมักทำให้เนื้อดินกับน้ำรวมตัวกันได้ดี และทั่วถึง รวมทั้งการกระทำของแบคทีเรียก็มีส่วนช่วยทำให้มีความเหนียวดีขึ้น

ดินดำ (Ball clay)

ดินดำ หรือดินเหนียวขาวซึ่งย้ายถิ่นไปตกตะกอนสะสมในแหล่งใหม่ ดินดำเป็นดินที่มีขนาดผลึกเม็ดละเอียดมาก อนุภาคของดินยึดเกาะกัน ได้ดี มีอินทรีย์สารที่มีโครงสร้างคล้ายกับที่พบในถ่านหินลิกไนต์เจือปนอยู่จึงช่วยให้ดินชนิดนี้มีความเหนียว และทำให้มีสีเปลี่ยนไปจากสีขาวกลายเป็นสีเทาจนถึงสีดำ แต่เมื่อนำไปเผาในอุณหภูมิสูงเนื้อดินจะมีสีขาว หรือสีครีม อินทรีย์สารต่างๆ จะถูกเผาไหม้หมดไปจากเนื้อดิน

ดินดำที่มีเนื้อละเอียดหลังการเผาเป็นสีขาว และมีความทนไป $1,300^{\circ}C$. โดยไม่บิดเบี้ยว มักเป็นดินที่มีคุณภาพดี นิยมนำมาใช้เป็นส่วนผสมในผลิตภัณฑ์สีขาว เช่น ปอร์ซเลน โบนไซนา และไวท์เอิร์ทเทินแวร์ ส่วนดินดำทั่วไปที่คุณภาพปานกลางมีทรายเจือปนอยู่ค่อนข้างมาก ใช้ทำเนื้อดินขึ้นรูปด้วยแป้นหมุน ทำท่อน้ำดินเผา หรือผสมในเนื้อดินทำกระเบื้องปูพื้น

ส่วนประกอบทางเคมีของดินค้ำ (Chemical properties of ball clay) ประกอบด้วยแร่เคลโอไลต์เป็นส่วนใหญ่ เช่นเดียวกับดินขาว แต่เป็นผลึกเคลโอไลต์ไม่สมบูรณ์ คือ มีแร่ธาตุ และสิ่งเจือปนแทรกอยู่ ทั้งนี้เนื่องจากการเกิด หรือแหล่งของดินที่ทับถมแตกต่างกันไป ส่วนประกอบทางเคมีโดยประมาณได้แก่ซิลิกา (SiO_2) 40 – 60% อะลูมินา (Al_2O_3) 30% น้ำ และอินทรีย์สารประมาณ 10% นอกจากนี้ยังมีแร่ธาตุอื่นๆ ปะปนอยู่ในดินด้วย เช่น ไทเทเนียม (TiO_2) เฟอริก (Fe_2O_3) แคลเซียม (CaO) แมกนีเซียม (MgO) เหล็กซัลเฟต (FeS) โพแทสเซียม (K_2O) และโซเดียม (Na_2O) เป็นต้น

สูตรเคมีของดินค้ำ

ดินค้ำทั่วไป $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 4 \text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O} \cdot 0.1 \text{K}_2\text{O}$

(มีอะลูมินา 20 – 25% ตามผลวิเคราะห์ทางเคมี)

ดินค้ำ – ดินเหนียวอุตสาหกรรม $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2 \text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O} \cdot 0.1 \text{K}_2\text{O}$

(มีอะลูมินา 30 – 38% ตามผลวิเคราะห์ทางเคมี)

ดินค้ำปนทราย $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 9 \text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O} \cdot 0.2 \text{K}_2\text{O}$

(มีซิลิกา 60 – 80% ตามผลวิเคราะห์ทางเคมี)

สมบัติทางกายภาพของดินค้ำ (Physical properties of ball clay)

1. ขนาดของดินเหนียวจะมีผลึกละเอียดมากน้อยเพียงใดเปลี่ยนแปลงไปตามแหล่งที่พบ เมื่อถูกพัดพาไปไกลจากแหล่งเดิมมาก ขนาดเม็ดอนุภาคจะละเอียดมากขึ้นตามลำดับ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 0.05 – 1.00 ไมโครเมตร

2. ความเหนียว (Plasticity) ดินเหนียวเป็นดินที่สามารถอมน้ำได้มาก ความเหนียวจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับชนิดของดิน ซึ่งประกอบด้วยหลักสำคัญ คือ ปริมาณของอินทรีย์สาร ขนาดของเม็ดดิน และวัตถุดิบที่ให้ความเหนียว เช่น ดินเบนโตไนต์

3. การหดตัวเมื่อแห้ง (Drying shrinkage) ดินเหนียวที่มีทรายปนสูงแทบไม่มีการหดตัว แต่ดินเหนียวที่มีอินทรีย์สารสูงจะมีการหดตัวมากประมาณ 13 – 17%

4. การหดตัวหลังเผา (Firing shrinkage) มีการหดตัวสูงประมาณ 15% ทั้งนี้เนื่องจากดินเหนียว มีขนาดอนุภาคที่เล็กมาก

5. ความแข็งแรงของดินเมื่อแห้งก่อนเผา (Green strength) ดินเหนียวมีความต้านทานแรงอัดสูง (Strength) ประมาณ 100 – 1000 ปอนด์/ตารางนิ้ว

6. สีหลังเผาเป็นสีขาวจนถึงสีครีม

7. มีแร่ธาตุพวกต่าง และไมกาในดินทำหน้าที่เป็นตัวช่วยหลอมละลาย ช่วยลดอุณหภูมิในการเผา

ประโยชน์ของดินดำ ดินดำใช้กันมากในอุตสาหกรรมถ้วยชาม และสุขภัณฑ์โดยนำไปผสมกับดินขาว ประโยชน์ของดินดำ ได้แก่

1. ช่วยเพิ่มความเหนียวของผลิตภัณฑ์ ทำให้เนื้อดินปั้นขึ้นรูปได้ดี ผสมในเนื้อดินอัตราส่วน 20 – 50%
2. ทำให้ผลิตภัณฑ์มีความแข็งแรงก่อนเผา ลดการสูญเสียจากการแตกหักก่อนเผา ในขณะที่เคลื่อนย้ายผลิตภัณฑ์ไม่เปราะ หรือแตกหักง่าย
3. ทำให้น้ำดินที่ใช้ในการเทแบบไหลตัวดี
4. ทำหน้าที่เสริมปฏิภานระหว่างมวลสารในระหว่างการเผา ทำให้ดินสุกตัวได้เร็ว ประหยัดเวลาในการเผา ช่วยในการหลอมละลาย

ข้อเสีย อย่างไรก็ตามดินดำบางชนิดอาจสร้างปัญหาในการผลิตเซรามิก คือ

1. ในดินดำมีสิ่งเจือปนอื่นๆ (Impurity) สูง เช่น คาร์บอน แร่เหล็ก แร่ไทเทเนียม ซึ่งทำให้ผลิตภัณฑ์หลังเผามีตำหนิ และความขาวของเนื้อดินเสียไปด้วย
2. ถ้าใช้ดินดำผสมในปริมาณมากเกินไป ทำให้ผลิตภัณฑ์ไม่ค่อยโปร่งแสง มีการหดตัวสูง ทำให้บิดเบี้ยว และแตกร้าวหลังการเผา
3. เนื่องจากดินดำมีองค์ประกอบในเนื้อดินไม่แน่นอน จึงยุ่งยากในการควบคุมอัตราส่วนผสมทั้งเนื้อดินปั้น และการหล่อแบบ

2) วัสดุคิบที่ไม่มี ความเหนียว (Non plastic material) การทำเซรามิกในบางครั้งจำเป็นต้องอาศัยวัสดุคิบที่ไม่มี ความเหนียวเข้ามาผสมด้วยเนื่องจากบางครั้งในการใช้ดินที่มีความเหนียวมากๆ มีแนวโน้มทำให้ผลิตภัณฑ์มีการบิดเบี้ยวได้ง่ายระหว่างการแห้ง และการเผาเนื่องจากความละเอียดของเนื้อดิน การเติมวัสดุคิบที่ไม่มี ความเหนียว เช่น ททรายสามารถช่วยลดปัญหาดังกล่าวได้ และวัสดุคิบที่ไม่มี ความเหนียวบางตัวช่วยทำให้จุดสุกตัวของเนื้อดินมีค่าลดลง พอที่จะกล่าวได้ว่าดินยังมีความบริสุทธิ์สูงมากเท่าไร ก็ยังจำเป็นต้องผสมวัสดุคิบที่ไม่มี ความเหนียวมาช่วยตัวอย่างเช่น

ซิลิกา (Silica) เป็นออกไซด์ที่พบมากที่สุด ในธรรมชาติ และสามารถที่จะจับตัวกับออกไซด์อื่นๆ ที่สำคัญทางเซรามิก เช่น หินฟันม้า ดิน ทัลค์ เป็นต้น ซิลิกาจะมีผลทำให้

- ลดความเหนียวของเนื้อดิน
- ลดการหดตัวในระหว่างการทำให้แห้ง และการเผา
- ถ้าขนาดของเม็ดซิลิกาที่ปะปนมีขนาดใหญ่จะลดความแกร่ง และความคงทนของดิน

นอกจากนี้พบว่าเม็ดซิลิกา ถ้ามีขนาดเล็กมากมักจะทำปฏิกิริยาเป็นตัวลดอุณหภูมิ ถ้ามีขนาดใหญ่จะเพิ่มความทนไฟของเนื้อดิน

อะลูมินา (Alumina) นอกจากจะพบอยู่ในตัวแร่ดินแล้ว ยังพบในหินฟันม้า ไม้กา และ อะลูมิโนซิลิเกตอื่นๆ มีผลทำให้

- ลดความเหนียวของเนื้อดินเพราะสารประกอบอะลูมินาไม่มีความเหนียว
- เนื้อดินมีความทนไฟมากขึ้น เมื่อใช้อะลูมินาไฮดรอกไซด์ผสม
- ทำให้เนื้อดินหลังเผามีน้ำหนักมากขึ้น เนื่องจากมีความถ่วงจำเพาะมากกว่าดิน

สารประกอบอัลคาไล (Alkali bearing minerals) ที่สำคัญพบในดินค้ำ คือ หินฟันม้า ไม้กา เป็นสารที่ดูดเก็บสารละลาย (Absorbed cation) ที่เกาะอยู่บริเวณผิวผลึกของแร่ดินเหนียว และพวกเกลือที่ละลายน้ำได้ เช่น โพแทสเซียมซัลเฟต โซเดียมซัลเฟต โซเดียมคลอไรด์ ฯลฯ สารประกอบอัลคาไลจะมีผลทำให้

- ลดจุดสุกตัว หรือความทนไฟของเนื้อดิน สารประกอบอัลคาไลถ้ารวมตัวกับอะลูมินา และซิลิกา จะหลอมตัวที่อุณหภูมิต่ำ ดังนั้นจึงเรียกสารนี้ว่าเป็นตัวลดอุณหภูมิ สารประกอบอัลคาไล เมื่อหลอมรวมตัวแล้วเวลาปล่อยให้เย็นจะไม่ตกผลึกแต่เกิดเป็นแก้ว

- สารประกอบอัลคาไลส่วนมากมักไม่มีความเหนียว ดังนั้นมักจะไปลดความเหนียวตอนเป็ยกของเนื้อดิน และลดค่าความต้านทานแรงอัดตอนแห้ง แต่สารประกอบอัลคาไลที่ละลายน้ำ ไม่นิยมนำมาผสมเนื้อดิน และน้ำเคลือบ

สารประกอบเหล็ก (Iron compounds) ที่ปะปนอยู่ในเนื้อดินมีหลายตัวด้วยกัน เช่น เฟอร์ริกออกไซด์ เฟอร์ริกซิลิเกต ฯลฯ มีผลต่อผลิตภัณฑ์คือ

- สารประกอบของเหล็กที่ละลายน้ำได้จะทำให้ผลิตภัณฑ์มีสีฟ้าอ่อนเมื่อแห้ง ถ้านำไปเผา ทำให้มีสีน้ำตาลหรือดำต่างๆ ไม่เป็นที่ต้องการของตลาด

- สีผลิตภัณฑ์เปลี่ยนไป เช่น ก่อนเผามีสีออกขาว หลังเผาแล้วจะมีสีเหลือง เป็นต้น

สารประกอบแคลเซียม (Calcium compounds) ที่ปะปนอยู่ในเนื้อดิน เช่น แคลไซต์ แคลเซียมซิลิเกต อีปซั่ม หินปูน หินอ่อน ฯลฯ ผลที่มีต่อผลิตภัณฑ์

- เป็นตัวช่วยลดอุณหภูมิการเผา เช่น เมื่อรวมตัวกับอะลูมินาและซิลิกา จะหลอมตัวที่อุณหภูมิต่ำ ทำให้จุดสุกตัว และความทนไฟของเนื้อดินลดลง

- สารประกอบแคลเซียมพวกแคลไซต์ เมื่อเผาที่อุณหภูมิประมาณ 900 °ซ. จะเปลี่ยนเป็น ปูนขาว (CaO) เมื่อเย็นตัวลงจะดูดความชื้นในอากาศ ทำให้ผลิตภัณฑ์เกิดการบวมตัวเสียรูปทรง หรือสลายตัวเป็นผุยผง แต่เมื่อเผาผลิตภัณฑ์จนร้อนแดง สารประกอบพวกแคลเซียมจะรวมตัวกับ สารประกอบเหล็ก มีผลทำให้สีที่เกิดจากสารประกอบเหล็กมีสีซีดจางลงกลายเป็นสีครีม หรือสีเนื้อแทนที่จะเป็นสีแดง

- แคลเซียมซัลเฟตทนต่อการเผาในอุณหภูมิสูง ทำให้เกิดรอยค่างในเนื้อดินหลังการเผาถ้า
 บดไม่ละเอียด หรือถ้ารวมตัวกับสารประกอบหลักก็มีผลทำให้สีดินอ่อนลง

สารประกอบคาร์บอนอินทรีย์ (Carbonaceous matter) พบได้ทั้งคาร์บอนในวัตถุดิบ
 พวกคาร์บอนเนต และคาร์บอนจากอินทรีย์สาร ถ้ามีจะทำให้

- ดินเหนียวก่อนเผามีสีเทาไปจนสีดำ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับปริมาณสารประกอบคาร์บอนว่ามีอยู่
 มากน้อยเพียงไร

- ทำให้เกิดการเผาแบบรีดิวซิง (Reducing) เป็นเขม่าและควันซึ่งมีผลต่อสี และจุดสุกตัว
 ของผลิตภัณฑ์ ถ้าเผาไม่ถูกต้องหรือไม่ชำนาญ

- เมื่อเผาแล้วทำให้ผลิตภัณฑ์เกิดรูพรุนจากอินทรีย์สาร และก๊าซคาร์บอน

- คาร์บอนจากอินทรีย์สารจะถูกเผาอย่างรวดเร็วในเตาเผาเกิดการลุกไหม้ ทำให้อุณหภูมิ
 ในเตาเผาสูงขึ้นเร็วเกิดไป มีผลทำให้การเผาเกินจุดสุกตัว และมีผลทำให้ผลิตภัณฑ์ยุบตัวบิดเบี้ยว
 เสียรูปทรงได้

- ถ้าสารประกอบคาร์บอนไม่สลายตัว เนื่องจากเผาเร็วเกินไป จะเกิดเป็นแถบสีดำขึ้นใน
 ชั้นของเนื้อดิน ดังนั้นการเผาไหม้คาร์บอนให้หมดไปจากเนื้อดินต้องเผาช้าๆ ในช่วงอุณหภูมิตั้งแต่
 24 – 900 °ซ. จึงต้องยืดระยะเวลาอย่างต่ำ 5 – 6 ชั่วโมง ในผลิตภัณฑ์ที่มีเนื้อดินค้ำผสม

สารประกอบของซัลเฟอร์ (Sulfer) หรือ กำมะถัน มักจะพบในดินค้ำที่ติดอยู่ใกล้กับชั้น
 ของถ่านหิน ซึ่งมีทั้งซัลเฟอร์ที่เป็นอินทรีย์สาร และอนินทรีย์สารที่เกิดจากการสลายตัวของ
 ออกไซด์ของโลหะ เช่น เหล็กซัลเฟต แคลเซียมซัลเฟต เป็นต้น ถ้ามีอยู่ปริมาณมากจะทำให้
 ผลิตภัณฑ์ บิดเบี้ยว บวม และยุบตัวหลอมละลายในเตาเผา

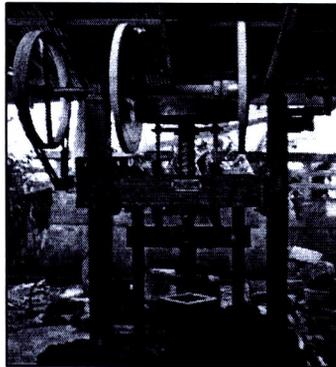
2.1.2 วิธีการทำกระเบื้องเซรามิก [1, 12]

การผลิตกระเบื้องเซรามิก มีวัตถุดิบหลักที่นำมาผลิต คือ ดินขาว (Kaolin) ดินเหนียวขาว
 (Ball clay) หินฟันม้า (Feldspar) หินควอตซ์ (Quartz) ทัลก์ (Talc) และหินปูน (Limestone)
 ส่วนผสมขึ้นอยู่กับชนิดและความเหมาะสมในการใช้งาน ผลิตโดยวิธีการอัดแรง (Press) สำหรับ
 การเผานิยมเผา 2 ครั้ง ได้แก่ เผาคิบ (Biscuit firing) คือ การเผาโดยที่ยังไม่ได้ชุบน้ำเคลือบ และ
 เผาเคลือบ (Gloss firing) โดยใช้ฟีนหรือแก๊สเป็นเชื้อเพลิง ซึ่งการเผาอาจเผาเคลือบหรือไม่ก็ได้

การขึ้นรูปกระเบื้องเซรามิกมีหลายวิธี ดังนี้

1. การขึ้นรูปแบบอัด (Press method)
2. การขึ้นรูปแบบรีด (Extusion method)
3. การขึ้นรูปแบบอิสระ (Free form method)
4. การขึ้นรูปแบบแผ่น (Slab method)
5. การขึ้นรูปแบบใช้พิมพ์กด (Hand press method)

ในงานวิจัยนี้ใช้การขึ้นรูปแบบอัดดินเหนียว (Plastic pressing) ดังรูป 2.1



รูปที่ 2.1 เครื่องอัด (Double action pressing) ที่ใช้ในการขึ้นรูปแบบอัดดินเหนียว

แม่พิมพ์ของเครื่องอัดกระเบื้อง ลักษณะของแม่พิมพ์โลหะที่ใช้อัดกระเบื้องจะมีตัวพิมพ์ประกอบกันอยู่ 3 ชั้น ดังนี้

- 1) แบบพิมพ์ชั้นบนเป็นตัวกด
- 2) แบบพิมพ์ชั้นล่างเป็นแท่นรับซึ่งฝังออกในกรอบโลหะ

3) กรอบโลหะที่มีรูปทรงตามเส้นรอบนอกของกระเบื้อง กรอบโลหะนี้มีความหนาพอสมควรสามารถปรับตั้งความลึกของพิมพ์ชั้นบน และพิมพ์ชั้นล่าง ให้สัมพันธ์กันในขณะกดอัดชิ้นงาน กรอบโลหะนี้จะเกิดการสึกกร่อนหลังจากการใช้งานระยะยาว ขณะที่เครื่องอัดกระเบื้องทำงานพิมพ์ส่วนล่างจะมีแท่นรองรับอยู่ข้างใต้ไม่ให้เลื่อนลงด้านล่าง เมื่ออัดชิ้นงานเสร็จเรียบร้อยแล้วพิมพ์ส่วนล่างจะทำหน้าที่ดันชิ้นงานขึ้นมาเพื่อให้พ้นกรอบแบบพิมพ์โลหะ การติดตั้งแม่พิมพ์และการทดสอบแม่พิมพ์ก่อนการใช้งาน จะต้องแน่ใจว่าแม่พิมพ์ส่วนบนและส่วนล่างได้จากกัน

แรงอัดที่ใช้ผลิตกระเบื้อง

กำลังแรงอัดของเครื่องขึ้นอยู่กับปริมาณความชื้นของดินที่ใช้ในการอัด โดยดินชื้นมากจะใช้แรงอัดน้อยกว่าดินที่แห้งเป็นฝุ่น ดังนี้

ดินฝุ่นแห้ง	ความชื้น 2 – 7%	ใช้แรงอัด 300 – 500 กก./ตร.ซม.
ดินฝุ่นกึ่งแห้ง	ความชื้น 9 – 12%	ใช้แรงอัด 100 – 250 กก./ตร.ซม.
ดินเหนียว	ความชื้น 15 – 20%	ใช้แรงอัด 100 – 150 กก./ตร.ซม.

อัตราส่วนของน้ำในเนื้อดินที่ใช้ขึ้นรูปต้องมีความชื้นเท่ากันทุกครั้ง เป็นมาตรฐานของผลิตภัณฑ์แต่ละประเภท เพื่อควบคุมอัตราส่วนการหดตัวของเนื้อดินให้มีคุณภาพสม่ำเสมอ เครื่องอัดกระเบื้องขนาดธรรมดาที่นิยมใช้กัน จะมีแรงอัดประมาณ 40 – 80 ตัน

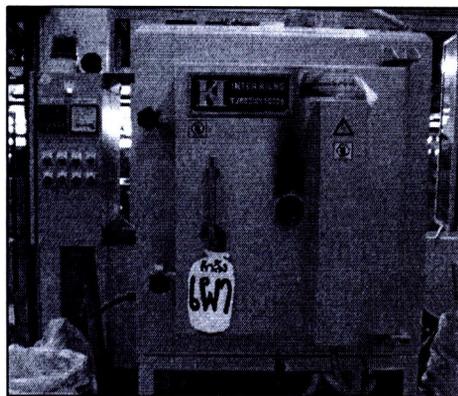
ในการอัดกระเบื้องหรือผลิตภัณฑ์ใดๆ สิ่งที่สำคัญ คือ จะต้องทำให้ผลิตภัณฑ์นั้นมีความหนาแน่นสม่ำเสมอ เพราะจะเป็นเหตุให้ผลิตภัณฑ์โค้งงอ และมีการหดตัวไม่เท่ากันเมื่อเผา การอัดผลิตภัณฑ์ขนาดเล็กมีความอัดแน่นสม่ำเสมอมากกว่าผลิตภัณฑ์ขนาดใหญ่ เนื่องจากมีแรงเสียดสีผนังแบบน้อยกว่าการอัดทั้งด้านบน และด้านล่าง จะช่วยให้ความหนาแน่นสม่ำเสมอมากกว่าอัดเพียงด้านเดียว การใช้วัสดุหล่อลื่นเข้าช่วยจะทำให้ความหนาแน่นสม่ำเสมอดีขึ้น การใช้แรงอัดสูงมากๆ จะช่วยให้ผลิตภัณฑ์หลังการเผามีความพรุนตัว และการหดตัวน้อย แต่แรงที่ใช้ต้องไม่มากเกินไปให้เกิดการแตก การแตกจะมีลักษณะเป็นแผ่นกลางแผ่นในทิศทางตั้งฉากกับแนวของแรงที่กด สาเหตุที่ทำให้แตก คือ อากาศที่อยู่ในดินขยายตัวซึ่งทำให้เกิดแรงมากกว่าแรงที่ยึดกันระหว่างเนื้อดิน อีกสาเหตุหนึ่งก็คือขณะยกตัวอัดขึ้นมาเกิดแรงคูกระหว่างผิวแบบที่อัด และผิวหน้าผลิตภัณฑ์มากพอที่จะแยกผลิตภัณฑ์ออกเป็นสองส่วน

การเผา (Firing) ในทางเซรามิก คือ การเพิ่มอุณหภูมิให้แก่ผลิตภัณฑ์เซรามิกในเตาดังในรูป 2.2 ภายใต้บรรยากาศที่เหมาะสม เพื่อเปลี่ยนสภาพดินให้กลายเป็นถาวรวัตถุที่มีความแข็งแรงเหมือนหิน ช่วยให้ผลิตภัณฑ์เกิดความคงทนถาวร และสวยงาม โดยอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาขึ้นอยู่กับวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตซึ่งจะสัมพันธ์กับอุณหภูมิที่ใช้ในการเผา ดังตาราง 2.1



ตารางที่ 2.1 อุณหภูมิที่ใช้ในการเผาวัตถุดิบแต่ละชนิด

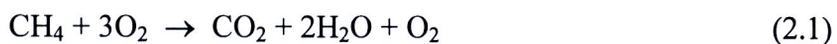
อุณหภูมิที่ใช้ในการเผา	ช่วงอุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	วัตถุดิบ
อุณหภูมิต่ำ (Low temperature)	780 – 900	ดินเหนียว ทราย
อุณหภูมิปานกลาง (Medium temperature)	1,000 – 1,100	ดินเหนียว ดินขาว หินบดย่อย
อุณหภูมิสูง (High temperature)	1,200 – 1,350	ดินขาว ดินขาวเหนียว หินบดย่อย



รูปที่ 2.2 เตาเผาไฟฟ้า

บรรยากาศที่ใช้ในการเผา ได้แก่

1. บรรยากาศออกซิเดชัน (Oxidation firing) เป็นการเผาที่มีการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์ และใช้ออกซิเจนมากเกินไป ซึ่งเมื่อเกิดการเผาไหม้แล้ว จะมีออกซิเจนเหลืออยู่ ดังสมการ 2.1



2. บรรยากาศรีดักชัน (Reduction firing) เป็นการเผาที่มีการเผาไหม้อย่างไม่สมบูรณ์ ในเตาเผาใช้ออกซิเจนไม่เพียงพอ ซึ่งเมื่อเกิดการเผาไหม้แล้ว จะมีคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) เหลืออยู่ ดังสมการ 2.2



การเผาเซรามิก มี 3 ขั้นตอน ดังนี้ โดยจะเกิดการเปลี่ยนแปลงดังตารางที่ 2.2

1) การเผาดิบ (Biscuit firing) คือ การเผาครั้งที่หนึ่งโดยยังไม่ได้ชุบน้ำเคลือบสามารถที่จะเผาในอุณหภูมิต่ำ หรืออุณหภูมิสูงก็ได้ ผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการเผาดิบแล้วความพรุนตัวสูง ทำให้ผลิตภัณฑ์สามารถดูดซึมน้ำเคลือบได้ดี เนื่องจากการเผาดิบเผาในอุณหภูมิ 750 – 800 °ซ. ชิ้นงานที่ผ่านการเผาแล้วยังคงมีความชื้น และสารอินทรีย์อยู่ในชิ้นงาน การเผาไล่ความชื้น และสารอินทรีย์ก่อนนำไปชุบน้ำเคลือบเป็นสิ่งจำเป็น เนื่องจากช่วยลดปริมาณน้ำในชิ้นงาน ซึ่งเป็นตัวการทำให้เกิดแรงดันจนชิ้นงานอาจจะระเบิด ในการเผาเคลือบถ้าชิ้นงานถูกเผาดิบมาก่อนการเคลือบจะชุบได้ง่าย เมื่อชุบเสร็จสามารถนำผลิตภัณฑ์ไปล้างเคลือบออก ผึ่งให้แห้งแล้วนำมาเคลือบใหม่ บรรยากาศของการเผา คือ บรรยากาศออกซิเดชัน ที่เผาบรรยากาศนี้เพื่อเปลี่ยนเหล็กออกไซด์ในชิ้นงานให้อยู่ในรูปของสารประกอบของเฟอร์ริกออกไซด์

2) การเผาเคลือบ (Glost firing) คือ การเผาชิ้นงานที่ถูกนำมาชุบน้ำเคลือบเพื่อให้เคลือบหลอมเป็นแก้วติดแน่นอยู่บนผิวชิ้นงาน การเผาเคลือบจะเผาที่อุณหภูมิเท่าใดภายในบรรยากาศใด ขึ้นอยู่กับชนิดของผลิตภัณฑ์ และวัตถุดิบที่ใช้ทำน้ำเคลือบ ส่วนใหญ่จะใช้อุณหภูมิระหว่าง 700 – 900 °ซ. การวางผลิตภัณฑ์ทุกชิ้นจะต้องวางห่างกันเล็กน้อย เพื่อไม่ให้น้ำเคลือบสัมผัสกันเพราะเคลือบจะหลอมติดกันเมื่อเผาที่อุณหภูมิสูง ผลิตภัณฑ์ในเตาแก๊สควรวางห่างจากบริเวณหัวพ่นเล็กน้อย เพราะถ้าผลิตภัณฑ์โดนเปลวไฟเลียเคลือบจะต่าง ดังนั้นในเตาไฟฟ้าไม่ควรวางผลิตภัณฑ์ชิดชิดมากเกินไป ผลิตภัณฑ์เคลือบจะไหลติดชิดชิดเสียหายได้ ผลิตภัณฑ์ใหญ่ควรวางไว้กึ่งกลางเตาเพื่อให้ได้รับความร้อนอย่างสม่ำเสมอ ลดความบิดเบี้ยวหลังการเผา

ปัจจุบันการเผาดิบ และเผาเคลือบนิยมเผาเพียงครั้งเดียว โดยการพ่นน้ำเคลือบลงที่แผ่นกระเบื้องแล้วนำไปเผา น้ำเคลือบที่ใช้จะเป็นเคลือบไฟสูงอุณหภูมิเผาระหว่าง 1,150 – 1,280 °ซ.

3) การเผาตกแต่ง (Decoration firing) คือ การตกแต่งด้วยสี หรือดีครูปลอก (Decal) ที่ทำขึ้นเพื่อตกแต่งชิ้นงานที่เผาเคลือบแล้ว และนำไปเผาเพื่อให้สิ่งตกแต่งติดทนกับชิ้นงาน อุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับเผาตกแต่งบนเคลือบประมาณ 650 – 850 °ซ. ขึ้นอยู่กับชนิดสี หรือประเภทวัตถุดิบที่นำมาทำสีว่าจะสูงที่อุณหภูมิใด การเผาสีตกแต่งลอยสีเงิน และสีทอง จะต้องเผาในบรรยากาศที่สันดาปสมบูรณ์ตลอดการเผา จากอุณหภูมิห้องถึง 750 °ซ. และในเตาเผาไม่ควรมีความชื้นอยู่ เพราะถ้าหากเตาเผามีความชื้น เมื่อนำสีทองเผาต่อ สีทองจะหมองเนื่องจากไม่ชอบความชื้น และสีเขียนก็จะพอง เพราะมีความชื้นในเตาเผาเกินไป ดังนั้นถึงแม้ว่าอุณหภูมิในการเผาสีตกแต่งจะใกล้เคียงกับการเผาดิบก็ไม่ควรเอาชิ้นงานเขียนสี และดีครูปลอกเข้าเตาเผาในการเผาดิบ เพราะชิ้นงานที่ออกมาจะมีตำหนิไม่ได้มาตรฐาน สีหมองคล้ำ หรือเปลี่ยนแปลงไปจากเดิม



ตารางที่ 2.2 ผลึกภัณฑ์เซรามิกเมื่อโดนเผาผ่านความร้อนในอุณหภูมิต่างๆ

ผลึกภัณฑ์เซรามิกเมื่อโดนเผาผ่านความร้อนในอุณหภูมิต่างๆ	
100 – 200 °ซ.	น้ำที่อยู่รอบๆ เม็ดดินระเหยกลายเป็นไอออกจากรูเตาเผา ถ้าเผาเร็วเกินไป ใอน้ำระเหยออกไม่ทันผลึกภัณฑ์จะแตกหรือระเบิดในเตา
450 °ซ.	น้ำในสูตรเคมีของดินเริ่มระเหย $Al_2O_3 \cdot 4 SiO_2 \cdot 2H_2O$
230 – 573 °ซ.	ผลึกของซิลิกา หรือควอทซ์ เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปผลึก ทำให้ดินเกิดการขยายตัวอย่างรวดเร็ว เรียกว่าช่วงวิกฤต (Critical temperature) ถ้าเผาเร็วในช่วงนี้ผลึกภัณฑ์จะแตก หรือระเบิดในเตา โดยต้องควบคุมไม่เกิน ชั่วโมงละ 100 °ซ.
500 – 600 °ซ.	น้ำที่เป็นส่วนประกอบทางเคมีของดินถูกเผาหมดไป ดินเริ่มเปลี่ยนสภาพเป็นหิน อินทรีย์สารในดินถูกเผาไหม้
600 °ซ.	เป็นช่วงการเผาที่ปลอดภัย เพิ่มอุณหภูมิการเผาให้เร็วขึ้นได้ชั่วโมงละ 150 – 200 °ซ.
900 – 950 °ซ.	เศษซากเก่าแก่ของอินทรีย์สาร (Carbon) ในเนื้อดินถูกเผาไหม้หมดไป หินปูนสลายตัวทำให้เกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิ 825 °ซ.
980 °ซ.	ดินเปลี่ยน โครงสร้างเริ่มเกิดการหดตัว จากการหลอมละลายรวมตัวของ วัสดุคิบ
1,050 – 1,100 °ซ.	เฟลด์สปาร์ในเนื้อดินเริ่มหลอมละลาย เกิด โครงสร้างรูปเข็มประสานกัน จากผลึกมัลไลต์ในเนื้อดิน ช่วยให้ดินมีความแข็งแรง และการหดตัวยังเป็นไปอย่างต่อเนื่อง
1,200 °ซ.	ผลึกมัลไลต์มีมากขึ้น ดินหลอมละลายปึกูพรุน เนื้อแน่น มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น
1,250 °ซ.	เนื้อดิน และน้ำเคลือบสุกตัวหลอมละลาย โครงสร้างของผลึกดินเปลี่ยน เป็นแก้ว 60% มัลไลต์ 21% และควอทซ์ 19%

2.2 ถ่านหิน [13, 14, 15]

ถ่านหิน หมายถึง ถ่านหินที่เกิดจากการสะสมตัวของซากพืชตามธรรมชาติ เมื่อมีปฏิกิริยาทางชีววิทยา และทางเคมีภายใต้ความกดดันสูง จะทำให้ซากพืชเหล่านั้นเปลี่ยนแปลงไปเป็นสารประกอบคาร์บอน ซึ่งมีคาร์บอนตั้งแต่ร้อยละ 50 – 70 ขึ้นไปโดยน้ำหนัก มีความชื้นอยู่บ้าง การแบ่งชนิด และคุณภาพของถ่านหินโดยทั่วไปขึ้นอยู่กับปริมาณคาร์บอน ค่าความร้อนเมื่อเผา และลำดับการเปลี่ยนแปลง แร่ หิน และเชื้อเพลิงธรรมชาติ จึงสามารถจำแนกชนิดของถ่านหินได้ 5 ประเภท ดังนี้

พีต (Peat) เป็นลำดับเริ่มต้นของกระบวนการเกิดถ่านหิน เกิดจากการที่ซากพืชจำพวก ตะไคร้ มอสส์ และพืชอื่นๆ ที่ยังไม่แข็งตัวสะสมในที่ลุ่ม หรือที่ลุ่มชื้นแฉะ ภายหลังถูกแบคทีเรีย และเชื้อราแปรสภาพเป็นอินทรีย์วัตถุ และก๊าซมีเทน มีคาร์บอนประกอบอยู่ประมาณร้อยละ 60 ออกซิเจนประมาณร้อยละ 30 มีความชื้นสูง แต่เมื่อแห้งจะติดไฟดี

ลิกไนต์ (Lignite) เป็นถ่านหินที่มีคุณภาพต่ำ สีน้ำตาลเข้มจนถึงดำ เนื้อแข็ง มีความชื้นต่ำ ไม่ค่อยมีโครงสร้างของพืชเหลืออยู่ มีคาร์บอนประกอบร้อยละ 55 – 65 เมื่อเผาจะให้ค่าความร้อนน้อยกว่า 8,300 บีทียูต่อปอนด์ แหล่งที่มีการผลิต เช่น ที่เหมืองแม่เมาะ จังหวัดลำปาง

ซับบิทูมินัส (Sub – bituminous) เป็นถ่านหินที่ลำดับการแปรสภาพสูงกว่าลิกไนต์แต่ต่ำกว่าชนิดบิทูมินัส มีคาร์บอนร้อยละ 65 – 80 มีความชื้นต่ำกว่า เมื่อเผาจะให้ค่าความร้อนระหว่าง 8,300 – 13,000 บีทียูต่อปอนด์ แหล่งที่มีการผลิต เช่น แหล่งที่ตำบลแม่ตึบ อำเภอจาง ในจังหวัดลำปาง ที่ตำบลลี่ และตำบลดงคำ อำเภอลี้ จังหวัดลำพูน

บิทูมินัส (Bituminous) เป็นถ่านหินที่มีลำดับการแปรสภาพสูงกว่าซับบิทูมินัส สีน้ำตาลถึงดำ มีคาร์บอนร้อยละ 80 – 90 มีความชื้นต่ำ แต่มีสารระเหิด (Volatile matter) ประกอบอยู่ด้วย ทำให้เมื่อเผาจะให้ควันมาก แต่จะให้ค่าความร้อนสูง คือ ตั้งแต่ 10,500 บีทียูต่อปอนด์ขึ้นไป แหล่งที่มีการผลิต เช่น ที่ตำบลดงคำ อำเภอลี้ จังหวัดลำพูน

แอนทราไซต์ (Antracite) เป็นถ่านหินชนิดที่มีการแปรสภาพสูงที่สุด มีสีดำ เนื้อแข็ง มีความวาวแบบกึ่งโลหะ มักแตกแบบก้นหอย ประกอบด้วยคาร์บอนตั้งแต่ร้อยละ 86 ขึ้นไป ติดไฟยาก เมื่อไหม้ให้เปลวไฟสีน้ำเงิน ไม่มีควัน ให้ค่าความร้อนสูงที่สุดในบรรดาถ่านหินทั้งหมดถึง 15,500 บีทียูต่อปอนด์ แหล่งที่มีการผลิต คือ ที่ตำบลนาด้วง กิ่งอำเภอนาด้วง จังหวัดเลย

แหล่งแร่ถ่านหินในประเทศไทยส่วนใหญ่เป็นถ่านหินชนิดลิกไนต์ ที่อำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง ก็เช่นเดียวกัน ซึ่งพบว่าถ่านหินลิกไนต์แม่เมาะมีการสะสมตัวอยู่ภายในหุบเขา โดยได้รับอิทธิพลจากสภาพแวดล้อมที่เปลี่ยนแปลงไป เช่น การเคลื่อนไหวของพื้นผิวโลกจนเกิดแรงอัด ทำให้การสะสมของถ่านหินจมลงไปยังล่าง จากอิทธิพลดังกล่าวทำให้คุณภาพของถ่านหิน

ความหนาของชั้นหิน ขนาด และปริมาณของถ่านหินในแต่ละพื้นที่แตกต่างกัน ในการผลิตกระแสไฟฟ้าถ่านหินจะถูกย่อย และบดจนป่นแล้วส่งเข้าเตาเผาเป็นเชื้อเพลิงค้ำน้ำให้กลายเป็นไอน้ำไปหมุนเครื่องกังหันไอน้ำ ทำให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าหมุนตามเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า กำลังการผลิตของโรงไฟฟ้าแม่เมาะเท่ากับ 2,025,000 กิโลวัตต์ ซึ่งจะต้องใช้ถ่านหินลิกไนต์ปริมาณ 45,000 ตันต่อวัน เป็นผลทำให้เกิดขี้เถ้าเหลือจากการเผาไหม้ถ่านหินประมาณ 13,400 ตันต่อวัน โดยจะแยกเป็น 2 ส่วนคือ

- ถ่านหนัก (Bottom ash) จะตกลงสู่ก้นเตา และถูกลำเลียงออกจากเตาโดยสายพานเหล็ก
- ถ่านลอย (Fly ash) จะปะปนไปกับแก๊สร้อนออกสู่ปล่องควัน และดักจับโดยใช้เครื่อง

ดักจับแบบไฟฟ้าสถิต

2.2.1 ถ่านหนัก [3, 4, 5, 9]

ถ่านหนัก คือ ถ่านที่ได้หลังจากการเผาถ่านหินลิกไนต์เพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า ซึ่งเป็นส่วนที่ไม่สามารถถูกเผาไหม้ออกไปได้ โดยเกิดจากการประทุของถ่านหินบริเวณที่เกิดการสันดาปในอุณหภูมิสูง ที่บริเวณนั้นจะหลอมอนุภาคของถ่านหินที่เหลือจากการเผาไหม้ให้ปะทะกันเป็นเม็ดหรือเป็นก้อนที่โตขึ้น ทำให้มีน้ำหนักมากและตกลงสู่ก้นเตา นอกจากนั้นยังมีบางส่วนของถ่านซึ่งปะทะกับผนังเตา และหลอมติดกันสะสมเป็นก้อนใหญ่เรียกว่า ตะกรัน (Slag) เมื่อรับน้ำหนักไม่ไหวก็จะหลุดลงสู่ก้นเตาจึงเรียกว่า ถ่านก้นเตา หรือถ่านหนัก ซึ่งมีประมาณร้อยละ 20 ของถ่านหินทั้งหมด

1. สมบัติทางกายภาพของถ่านหนัก

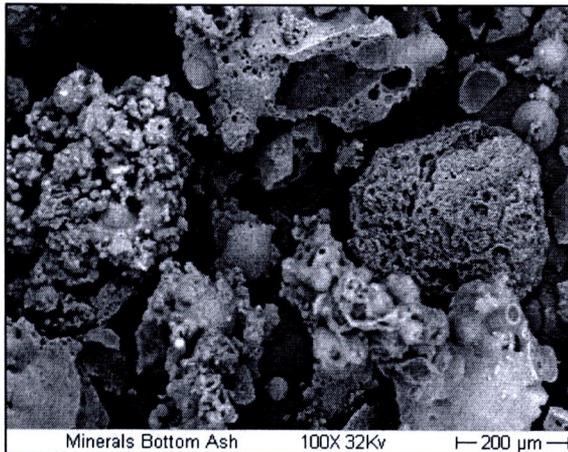
ลักษณะโดยทั่วไปของถ่านหนักนั้นจะมีสีดำ เป็นเม็ดรูปร่างไม่แน่นอน คล้ายกรวด และทราย เนื้อหยาบ โครงสร้างมีรูพรุน มีความเปราะ น้ำหนักเบา มีความชื้นสูงมาก เนื่องจากก้นเตามีน้ำหล่อเย็นสำหรับเตาเผา รูปร่างไม่แน่นอน ขนาดส่วนใหญ่จะอยู่ในช่วงของกรวดละเอียด (Fine gravel: 2.00 – 8.00 มม.) ไปจนถึงทรายละเอียด (Fine sand: 0.50 – 1.50 มม.) ซึ่งส่วนมากมีการกระจายของขนาดอนุภาคอยู่ในช่วงของเม็ดทราย (Sand sized: 0.06 – 2.00 มม.) มีค่าความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity) อยู่ระหว่าง 2.1 – 2.7 โครงสร้างจุลภาคมีลักษณะเป็นก้อนขรุขระ ดังรูปที่ 2.3 สำหรับถ่านหนักจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะมีถ่านหินที่ยังไม่ถูกเผาปนอยู่ประมาณร้อยละ 15 – 25 โดยที่ร้อยละ 80 – 85 สามารถร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 8, ร้อยละ 67 – 73 สามารถร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 16, ร้อยละ 49 – 58 จะสามารถร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 30, ร้อยละ 26 – 40 สามารถร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 50 และร้อยละ 7 – 15 สามารถร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 100 ซึ่งมีค่าการดูดซึมน้ำ 1.2%

2. สมบัติทางเคมีของเถ้าหนัก

องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าหนักแปรผันได้มาก ขึ้นอยู่กับแหล่งที่มาของถ่านหิน และชนิดของถ่านหิน รวมทั้งวิธีการเผาไหม้ และประสิทธิภาพของเครื่องในการผลิตกระแสไฟฟ้า องค์ประกอบหลักทางเคมีของเถ้าหนักประกอบด้วยธาตุโลหะ ได้แก่ Si, Fe, Ca, Al, Na, K, และ C ร้อยละ 80 – 90 โดยน้ำหนัก เถ้าหนักจากถ่านหินดำของโรงไฟฟ้าแม่เมาะส่วนใหญ่ประกอบด้วย SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO , MgO , Na_2O , K_2O , และอื่นๆ ดังแสดงไว้ในตารางที่ 2.3 จากการที่เถ้าหนักประกอบไปด้วยธาตุโลหะเป็นส่วนใหญ่ อาจทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงปริมาตรอย่างไม่แน่นอนเนื่องจากเจลอะลูมินัม หรือ H_2 และเกิดการกัดกร่อนต่อวัสดุอื่นๆ จากส่วนประกอบที่เป็นเกลือ หรือสภาวะความเป็นกรดจากสารประกอบโลหะ

ตารางที่ 2.3 องค์ประกอบทางแร่ของเถ้าหนักตั้งแต่ มกราคมถึงเมษายน 2553 [16]

องค์ประกอบทางเคมี	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด
SiO_2	37.87	3.53	29.35	47.74
Al_2O_3	19.48	2.04	14.50	24.56
TiO_2	0.39	0.03	0.33	0.49
Fe_2O_3	14.22	1.33	10.55	17.01
CaO	19.30	3.37	10.64	27.53
MgO	2.66	0.31	1.80	3.83
Na_2O	1.05	0.15	0.67	1.55
K_2O	2.39	0.27	1.79	2.91
P_2O_5	0.21	0.03	0.14	0.28
MnO_2	0.16	0.03	0.10	0.22
SO_3	2.26	1.17	0.41	5.29
Moisture content	21.51	4.72	12.23	32.54
Loss on ignition (LOI)	3.01	2.50	0.56	11.92



รูปที่ 2.3 โครงสร้างทางจุลภาคของเถ้าหนัก [17]

2.2.2 เถ้าลอย [2, 3, 18, 19]

เถ้าลอยเป็นผลพลอยได้จากการเผาถ่านหินเช่นเดียวกับเถ้าหนัก โดยเถ้าลอยเป็นเถ้าของถ่านหินที่มีขนาดเล็กกว่า 1 ไมโครเมตร จนถึง 200 ไมโครเมตร ซึ่งจะลอยตัวปะปนพร้อมกับไอร้อน และถูกดักจับโดยใช้เครื่องดักจับแบบไฟฟ้าสถิต เพื่อไม่ให้ปนไปกับอากาศร้อน ต่อจากนั้น จะถูกรวบรวมไว้ในที่เก็บเถ้า อนุภาคขนาดเล็กเหล่านี้จึงถูกเรียกว่า เถ้าลอย ซึ่งมีประมาณร้อยละ 80 ของเถ้าถ่านหินทั้งหมด

1. สมบัติทางกายภาพของเถ้าลอย

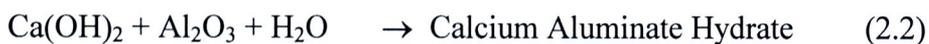
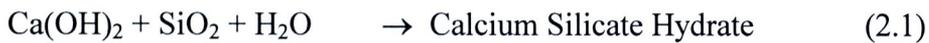
เถ้าลอยเมื่ออยู่ในสภาพแห้งมีลักษณะเป็นผงฝุ่นสีเทา หรือสีเทาปนน้ำตาล แล้วแต่แหล่งที่มา มีน้ำหนักเบา ไม่มีสมบัติการเชื่อมเกาะระหว่างอนุภาคจึงทำให้เกิดการฟุ้งกระจายได้ดี ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 15 – 16 ไมโครเมตร ในเถ้าลอยจะประกอบด้วยส่วนที่มีความเป็นผลึกผสมอยู่ กับส่วนที่ไม่เป็นผลึก โดยอาจมีขนาด และรูปทรงแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับแหล่งของที่มาของถ่านหิน ความละเอียดของถ่านหินก่อนเผา ระดับอุณหภูมิ และปริมาณออกซิเจนขณะเผา รวมทั้งวิธีดักจับเถ้าลอย รูปร่างส่วนใหญ่ของเถ้าลอยค่อนข้างกลม ซึ่งอาจตันหรือกลวง หรืออาจพบในลักษณะมีรูปร่างไม่แน่นอน และมีรูพรุน ดังรูปที่ 2.4 ความถ่วงจำเพาะประมาณ 1.9 – 2.9

2. สมบัติทางเคมีของเถ้าลอย

องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่างเหมือนเถ้าหนัก ประกอบด้วยส่วนที่ไม่เป็นผลึก หรืออยู่ในสถานะแก้ว (Glassy phase) ร้อยละ 60 – 90 เถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะส่วนใหญ่ประกอบด้วย SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO , MgO , Na_2O , K_2O , และอื่นๆ ดังแสดงในตารางที่ 2.4 เถ้าลอยสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภท โดยใช้องค์ประกอบทางเคมีที่ได้หลังจากการเผาถ่านหิน ได้แก่ ประเภท F และประเภท C คือ

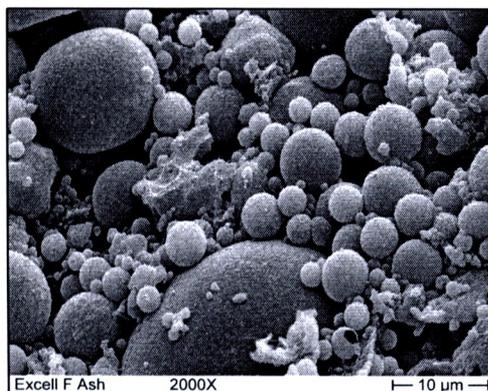
1) เถ้าลอยประเภท F เป็นเถ้าลอยที่ได้จากการเผาหินประเภทแอนทราไซต์และบิทูมินัส มีผลรวมของซิลิกา เฟอริกออกไซด์ และอะลูมินา มากกว่าร้อยละ 70 โดยน้ำหนัก และมีปริมาณแคลเซียมออกไซด์น้อยกว่าร้อยละ 5 หรือเรียกว่าเถ้าลอยที่มีแคลเซียมต่ำ แต่ยังมีคุณสมบัติของวัสดุพอลิเมอร์ ทำให้มีคุณสมบัติการเป็นซีเมนต์อยู่

คุณสมบัติการเป็นวัสดุพอลิเมอร์ กล่าวคือ เป็นวัสดุที่มีซิลิกา หรือซิลิกา และอะลูมินา เป็นองค์ประกอบหลักซึ่งอยู่ในรูปอสัณฐาน โดยทั่วไปแล้ววัสดุพอลิเมอร์จะไม่มีคุณสมบัติในการเชื่อมประสาน แต่ถ้าวัสดุพอลิเมอร์มีความละเอียดมาก และมีน้ำหรือความชื้นเพียงพอจะสามารถทำปฏิกิริยาเคมี โดยเมื่อนำเถ้าลอยผสมกับน้ำ แคลเซียมออกไซด์ (CaO) ที่พบอยู่ในเถ้าลอยจะทำปฏิกิริยากับน้ำเกิดเป็นสารแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)₂) ซึ่งจะเข้าทำปฏิกิริยาพอลิเมอร์ในระหว่าง ซิลิกา และอะลูมินา ที่อุณหภูมิปกติเกิดเป็นสารประกอบใหม่คือ แคลเซียม – ซิลิเกตไฮเดรต และแคลเซียมอะลูมิเนตไฮเดรต ที่มีคุณสมบัติในการเชื่อมประสาน (Cementation) ดังสมการ 2.1 และ 2.2



โดยทั่วไปเถ้าหนักจะเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ในอัตราที่ต่ำกว่าเถ้าลอยมาก เนื่องจากมีขนาดอนุภาคใหญ่กว่า และมีสารที่สำคัญต่อการเกิดปฏิกิริยาต่ำกว่า เช่น CaO

2) เถ้าลอยประเภท C เป็นเถ้าลอยที่ได้จากการเผาหินประเภทลิกไนต์ และซับบิทูมินัส มีผลรวมของซิลิกา เฟอริกออกไซด์ และอะลูมินา ร้อยละ 50 – 70 โดยน้ำหนัก และมีปริมาณของแคลเซียมออกไซด์น้อยกว่าร้อยละ 15 – 23 หรือเรียกว่าเป็นเถ้าลอยที่มีแคลเซียมสูง ซึ่งเถ้าลอยนี้มีสมบัติของซีเมนต์ และเป็นพอลิเมอร์



รูปที่ 2.4 โครงสร้างทางจุลภาคของเถ้าลอย [20]

ตารางที่ 2.4 องค์ประกอบทางแร่ของเถ้าลอยตั้งแต่ มกราคมถึงพฤษภาคม 2553 [16]

องค์ประกอบทางเคมี	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด
SiO ₂	36.26	4.61	24.71	49.57
Al ₂ O ₃	18.68	2.19	12.36	23.27
TiO ₂	0.37	0.04	0.28	0.47
Fe ₂ O ₃	14.48	1.88	9.92	18.36
CaO	19.85	4.13	8.84	30.15
MgO	2.63	0.35	1.79	3.57
Na ₂ O	1.38	0.27	0.74	1.91
K ₂ O	2.56	0.32	0.72	3.45
P ₂ O ₅	0.20	0.03	0.12	0.29
MnO ₂	0.17	0.03	0.09	0.24
SO ₃	3.39	1.22	1.07	7.94
Moisture content	0.07	0.09	0.00	0.64
Loss on ignition (LOI)	0.04	0.05	0.00	0.34

จากข้อมูลในตารางที่ 2.4 เถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะจึงถูกจัดเป็นเถ้าลอยประเภท C เนื่องจากผลรวมของซิลิกา เพอร์ริกออกไซด์ และอะลูมินา น้อยกว่าร้อยละ 70 โดยน้ำหนัก และมีปริมาณแคลเซียมออกไซด์ 19.85 จึงมีคุณสมบัติของซีเมนต์ และวัสดุพอลิโพรพิลีน

2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.3.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการนำเถ้าหนักมาทำเซรามิก

C.R. Cheeseman และคณะ ได้ศึกษาการทำเซรามิกจากเถ้าหนัก ซึ่งผลจากการศึกษาองค์ประกอบทางแร่ของเถ้าหนักพบว่าส่วนใหญ่ประกอบไปด้วย Quartz, Calcite (CaCO₃), Gehlenite (Ca₂Al(AlSi)O₇), และ Hematite (Fe₂O₃) การทดลองได้ใช้เถ้าหนักขนาดน้อยกว่า 8 มม. นำมาบดด้วย Ball mill นาน 8 ชั่วโมง จากนั้นจึงขึ้นรูปด้วยวิธีการอัด และเผาที่อุณหภูมิ 1,080, 1,090, 1,100, 1,110, และที่ 1,115 °ซ. ซึ่งพบว่าเมื่อนำมาเผาที่อุณหภูมิ 1,110 °ซ. จะเห็นความแตกต่างชัดเจนในด้าน ความหนาแน่น การหดตัว และการดูดซึมน้ำ โดยถ้าเผาที่อุณหภูมิต่ำมากกว่านี้สมบัติที่ได้จะแตกต่างกันมาก แต่ถ้าเผาที่อุณหภูมิสูง คือ 1,115 °ซ. ชิ้นงานที่ได้จะไม่เป็น

รูปร่างที่ต้องการ จากการศึกษาการเผาที่อุณหภูมิ 1,110 °ซ. จะเกิด Wollastonite (CaSiO_3) และ Diopside ($\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$) ซึ่งเป็นแร่ที่มี Silicon, Calcium และเป็นกลุ่มแร่ Pyroxenoid เกิดจากการรวมตัวของ Calcite และ Quartz ผ่านการเผาที่อุณหภูมิสูงกว่า 600 – 700 °ซ. ทำให้กลายเป็นเนื้อแก้ว พบว่าสมบัติของเก้าหนักคล้ายดินที่เป็นวัตถุดิบหลักของเซรามิก จึงสามารถใช้เก้าหนักในการทำกระเบื้อง บุผนัง พื้น และหลังคา โดยมีคุณภาพไม่สูงมากนักได้ [21]

S. Bethanis และคณะ ศึกษาลักษณะ และโครงสร้างของเก้าหนักเมื่อถูกเผาเป็นเซรามิก โดยใช้เก้าหนักขนาดน้อยกว่า 8 มม. แล้วนำมาบดด้วย Ball mill นาน 2, 8, และ 16 ชั่วโมง จากนั้นจึงนำไปขึ้นรูปด้วยการอัด และเผาที่อุณหภูมิ 1,020, 1,040, 1,050, 1,060, 1,070, 1,080, 1,090, และ 1,100 °ซ. พบว่าขนาดของเก้าหนักมีผลต่อชิ้นงาน โดยความหนาแน่น และการหดตัวของชิ้นงานจากเก้าหนักที่บดนาน 8 และ 16 ชั่วโมง จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิการเผาจนถึง 1,080 °ซ. และเมื่อเผาด้วยอุณหภูมิสูงกว่านี้ ชิ้นงานจากเก้าหนักที่มีขนาดเล็กจะเกิดการขยายตัว ทำให้ความหนาแน่นลดลงอย่างรวดเร็ว การดูดซึมน้ำมีค่าลดลงตามการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิการเผา โดยเฉพาะเก้าหนักที่ผ่านการบดเป็นเวลานานจะมีค่าลดลงอย่างรวดเร็ว แต่เมื่อเผาอุณหภูมิสูงกว่า 1,080 °ซ. จะมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก ทดลองต่อโดยนำเก้าหนักที่บดนาน 16 ชั่วโมง มาขึ้นรูปโดยการอัดด้วยความดัน 4, 8, 16, 32, และ 64 เมกะปาสกาล พบว่าความหนาแน่นเกิดการเปลี่ยนแปลงน้อย แต่ค่าการหดตัวมีค่าลดลงเมื่อใช้ความดันเพิ่มขึ้น นำชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยความดัน 32 เมกะปาสกาล มาศึกษาโครงสร้างจุลภาคด้วยเครื่อง SEM พบว่าอุณหภูมิ 1,020 °ซ. มีรูพรุนมาก แต่อุณหภูมิ 1,080 °ซ. มีผิวหน้าเรียบ มีบางส่วนเป็นหลุมเล็กน้อย และที่อุณหภูมิเผา 1,100 °ซ. เกิดหลุมครึ่งวงกลมขนาดใหญ่บริเวณผิวหน้าของชิ้นงาน เนื่องจากก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) ในการสลายตัวของพวกโลหะ Alkaline sulphates จึงสรุปได้ว่าเก้าหนักสามารถนำไปผลิตเซรามิกตามกระบวนการปกติได้โดยต้องควบคุมขนาด และอุณหภูมิการเผา [22]

J.M. Chimenos และคณะ ได้ศึกษาลักษณะของเก้าหนัก พบว่าเก้าหนักเป็นวัตถุที่เป็นปัญหาต่อสิ่งแวดล้อม แต่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ โดยเก้าหนักมีองค์ประกอบหลักของ คือ Glass มากกว่าร้อยละ 50, Magnetic metals ร้อยละ 6, Minerals มากกว่าร้อยละ 8, Synthetic ceramics มากกว่าร้อยละ 26, Paramagnetic metals และ Unburned organic matter ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก นอกจากนี้เก้าหนักยังมีขนาดไม่แน่นอนแตกต่างกัน โดยส่วนใหญ่ประมาณร้อยละ 50 มีขนาด 4 – 25 มม. [23]

2.3.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการนำเถ้าลอยมาทำเซรามิก

A. Zimmer และคณะ ศึกษาการใช้เถ้าลอยเป็นวัตถุดิบในการทำกระเบื้องเซรามิก โดยใช้เถ้าลอยผสมกับดินในอัตราส่วนร้อยละ 20, 40, 60, และ 80 โดยน้ำหนัก เเผาที่อุณหภูมิ 1,125, 1,150, และ 1,175 °ซ. พบว่าค่าความต้านทานแรงอัดจะลดลงเมื่อเพิ่มสัดส่วนของเถ้าลอย ยกเว้นอัตราส่วนร้อยละ 80 เมื่อนำหินปูน (Limestone) มาผสมเพิ่มในอัตราส่วนของ หินปูน:เถ้าลอย:ดิน เป็นร้อยละ 10:50:40, 20:40:40, และ 30:30:40 โดยน้ำหนัก เเผาที่อุณหภูมิ 1,150 °ซ. พบว่าค่าความต้านทานแรงอัดจะลดลงเมื่อเพิ่มสัดส่วนของหินปูน ค่าการดูดซึมน้ำ ความพรุน จะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มสัดส่วนของหินปูน และเมื่อนำแร่ฟันม้า (Feldspar) มาผสมเพิ่มในอัตราส่วนของ แร่ฟันม้า:เถ้าลอย:ดิน เป็นร้อยละ 10:50:40, 20:40:40, และ 30:30:40 โดยน้ำหนัก พบว่าความต้านทานแรงอัดจะเพิ่มขึ้น ค่าการดูดซึมน้ำ ความพรุน จะลดลงเมื่อเพิ่มสัดส่วนของแร่ฟันม้า [24]

V. Adell และคณะ ศึกษาสมบัติและโครงสร้างของเถ้าลอยที่ถูกเผาด้วยการขึ้นไฟเร็วและช้า โดยนำเถ้าลอยมาเผาที่อุณหภูมิ 1,050, 1,100, 1,150, 1,200, 1,250, และ 1,300 °ซ. ด้วยอัตราการขึ้นไฟปกติคือ 20 °ซ./นาทิจ และเมื่อเผาเสร็จลดอุณหภูมิ 10 °ซ./นาทิจ จนถึงอุณหภูมิห้องเปรียบเทียบกับ การเผาเร็วด้วยการตั้งเวลาการเผาให้เร็วขึ้นจากระยะเวลาปกติ พบว่าที่อุณหภูมิเผาต่ำกว่า 1,150 °ซ. มีความแตกต่างกันน้อยมาก และเมื่อเผาที่อุณหภูมิสูงขึ้นพบว่าการขึ้นไฟปกติจะมีค่าการหดตัว และความหนาแน่นสูงกว่าการขึ้นไฟเร็ว ค่าการดูดซึมน้ำต่ำกว่าการขึ้นไฟเร็ว เลือกพิจารณาเผาที่อุณหภูมิ 1,250 °ซ. ทุกๆ 10 นาที จนถึงนาทีที่ 60 พบว่าความหนาแน่น การดูดซึมน้ำ การหดตัว กราฟมีรูปร่างคล้ายกันทั้งสองอัตราการขึ้นไฟ แต่มีค่าแตกต่างกันดังกล่าวข้างต้น และพบว่าในเถ้าลอยที่เผาเร็วจะมีคาร์บอนเหลืออยู่มาก จากสมบัติของเถ้าลอยที่ผ่านการเผาเร็วจึงพบว่าเถ้าลอยเหมาะสำหรับใช้ทำมวลรวมเบา (Lightweight aggregate) [25]

M. Erol และคณะ ศึกษาลักษณะของเถ้าลอยเมื่อถูกเผา โดยนำเถ้าลอยมาจากโรงไฟฟ้าขึ้นรูปด้วยการอัด แล้วนำไปเผาที่อุณหภูมิ 300 °ซ. เป็นเวลา 60 นาที เพื่อไล่น้ำและแก๊ส จากนั้นเผาต่อด้วยอัตรา 10 °ซ./นาทิจ จนถึงอุณหภูมิที่ต้องการ เเผาแซ่วอีก 120 นาที เมื่อเสร็จงานชิ้นงานที่ได้ไปทดสอบ ความแข็ง (Hardness) ความหนาแน่น ความพรุน และการดูดซึมน้ำ พบว่าเถ้าลอยจากแหล่งที่มีแร่ SiO₂ และ Al₂O₃ ปนอยู่มาก เมื่อผ่านการเผาจะให้คุณสมบัติที่ดีใกล้เคียงวัตถุดิบสำหรับทำเซรามิก โดยผ่านการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C – 20 และ ASTM E – 18 [26]

I. Queralt และคณะ ได้ศึกษาการใช้เถ้าลอยเพื่อทำกระเบื้องเซรามิก ซึ่งจากการศึกษาองค์ประกอบหลักของเถ้าลอยพบว่าประกอบด้วย SiO₂, Al₂O₃, CaO, และ Fe₂O₃ เป็นส่วนใหญ่ จึงผสมเถ้าลอย และดิน ในอัตราส่วนร้อยละ 40:60 โดยน้ำหนัก แล้วนำไปเผาที่อุณหภูมิ 900, 950, 1,000, 1,050, 1,100, 1,150, และ 1,200 °ซ. พบว่าเมื่อใช้อุณหภูมิการเผาต่ำกว่า 1,000 °ซ. มีค่า

การดูดซึมน้ำมีค่าลดลงอย่างรวดเร็ว แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิการเผาสูงขึ้น การดูดซึมน้ำจะมีค่าลดลงอย่างช้าๆ เนื่องจากการเผาที่อุณหภูมิ 1,000 – 1,050 °ซ. ชี้นงานเกิดการเปลี่ยนแปลงเป็นเนื้อแก้ว และมีมัลไลต์ (Mullite) และคริสโตบาไลต์ (Cristobalite) เพิ่มขึ้น เมื่อเผาที่ 1,100 – 1,200 °ซ. มีการหดตัวอย่างรวดเร็วเนื่องจากเกิดการเปลี่ยนแปลงของมัลไลต์ จึงพบว่าการใช้เถ้าลอยเป็นส่วนผสมในกระเบื้องเซรามิกมีส่วนดี คือ 1) ประหยัดค่าใช้จ่ายในการบด หากใช้เถ้าลอยขนาดเล็กมากกว่า 200 ไมโครเมตร 2) ใช้อุณหภูมิในการเผาน้อย เมื่อเทียบกับการเผาโดยใช้ดินตามปกติ 3) ช่วยลดการแตกเนื่องจากการเย็นตัว เพราะมีการกระจายตัวของเนื้อแก้วมากขึ้น ทำให้ช่วยลดความพรุน และการดูดซึมน้ำ แต่อย่างไรก็ตามเนื่องจากองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยค่อนข้างไม่คงที่ และมีเหล็กออกไซด์ หรือ โลหะผสมอยู่มาก อาจทำให้เกิดปัญหาเกี่ยวกับชี้นงานได้ [27]

Z. Haiying และคณะ ศึกษาการใช้เถ้าลอยในการทำกระเบื้องเซรามิก ซึ่งจากการศึกษาพบว่าองค์ประกอบส่วนใหญ่ของเถ้าลอยประกอบด้วย SiO_2 , Al_2O_3 , และ CaO ซึ่งคล้ายกับดิน จึงสามารถใช้แทนดินเป็นวัตถุดิบทำกระเบื้องเซรามิกได้ จากนั้นจึงทำการทดลองโดยใช้ดินในอัตราส่วนคงที่ร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก และใช้ ดิน:หินปูน ในอัตราส่วนคงที่ร้อยละ 30:10 โดยน้ำหนัก ผสมกับ Cream colored – clay:เถ้าลอย ในอัตราส่วนร้อยละ 55:5, 50:10, 45:15, 40:20, 35:25, และ 30:30 โดยน้ำหนัก พบว่าเมื่อผสมหินปูนอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาสามารถลดจากเดิม 1,000 °ซ. เป็น 960 °ซ. โดยกระเบื้องยังคงมีลักษณะที่ดี จึงเลือกใช้ส่วนผสมที่มีหินปูนเป็นส่วนประกอบเพื่อศึกษาต่อไป โดยนำไปเผาที่อุณหภูมิ 920, 940, 960, 980, 1,000, 1,020, 1,040, 1,060, และ 1,080 °ซ. จะได้ว่าค่าความต้านทานแรงอัดจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิการเผา โดยจะเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ ที่อุณหภูมิการเผาสูงกว่า 1,000 °ซ. ยกเว้นตัวอย่างที่ผสมเถ้าลอยตั้งแต่ร้อยละ 25 ขึ้นไป เมื่อเผาที่อุณหภูมิมากกว่า 1,000 °ซ. ค่าความต้านทานแรงอัดจะลดลง ในส่วนการดูดซึมน้ำพบว่าลดลงเมื่อเพิ่มอุณหภูมิการเผา โดยจะลดลงแตกต่างกันไม่มากที่อุณหภูมิการเผาสูงกว่า 1,020 °ซ. ยกเว้นตัวอย่างที่ผสมเถ้าลอยตั้งแต่ 25% ขึ้นไป เมื่อเผาอุณหภูมิมากกว่า 980 °ซ. ค่าการดูดซึมน้ำจะเพิ่มขึ้น จึงสรุปว่าสามารถใช้เถ้าลอยในอุตสาหกรรมทำกระเบื้องเซรามิก โดยต้องเลือกใช้ในส่วนที่เหมาะสม [28]

R.C.C. Monteiro และคณะ ศึกษาสมบัติเชิงกลของเซรามิกที่ผสมเถ้าลอยโดยใช้เถ้าลอยผสมกับดินในอัตราส่วนร้อยละ 10, 25, และ 50 โดยน้ำหนัก และเผาที่อุณหภูมิ 880, 930, 980, 1,030, 1,080, และ 1,130 °ซ. ผลการทดลองพบว่าจะมีจุดสีด้าเกิดขึ้นบนชี้นงานเมื่อเพิ่มอุณหภูมิการเผา ซึ่งเกิดจากเฟอร์ริกออกไซด์ (Fe_2O_3) ความหนาแน่นจะเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ ตามการเพิ่มอุณหภูมิการเผาจนถึงอุณหภูมิ 1,080 °ซ. จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว และเถ้าลอยในอัตราส่วนร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก มีความหนาแน่นใกล้เคียงกับดิน 100% ส่วนของเถ้าลอยผสมกับดินในอัตราส่วน

ร้อยละ 25 และ 50 จะมีความหนาแน่นลดลงตามสัดส่วนแก้วลอยที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากในแก้วลอยมีการบอบนอยู่มาก ทำให้เกิดแก๊สระหว่างกระบวนการเผาส่งผลให้ชิ้นงานมีรูพรุน ในส่วนความพรุนและการดูดซึมน้ำจะลดลงอย่างช้าๆ ตามการเพิ่มอุณหภูมิการเผาจนถึงที่ 1,080 °ซ. จะลดลงอย่างรวดเร็วสัมพันธ์กับค่าความหนาแน่น และเผาอุณหภูมิ 1,130 °ซ. ความพรุน และการดูดซึมน้ำของแก้วลอย 50% ค่าใกล้เคียงกับดิน 100% สัมพันธ์กับการทดสอบด้วย XRD พบว่าเกิดการกลายเป็นเนื้อแก้วมากขึ้นตามการเพิ่มอัตราส่วนของแก้วลอย ค่าความต้านทานแรงอัดจะลดลงเมื่อเพิ่มอัตราส่วนของแก้วลอย แต่เมื่อเผาด้วยอุณหภูมิ 1,130 °ซ. อัตราส่วนของแก้วลอยที่ร้อยละ 25 และ 50 มีค่าความต้านทานแรงอัดใกล้เคียงกัน และมีสมบัติเชิงกลเหมือนกับดินที่ใช้ทำกระเบื้องเซรามิกสำหรับปูพื้น หรือผนัง และสามารถใช้ในงานอื่นๆ ที่มีลักษณะคล้ายกันได้ นอกจากนี้องค์ประกอบของวัตถุดิบที่ใช้ทำเซรามิกส่วนใหญ่ประกอบด้วย SiO_2 , Al_2O_3 , CaO , และ Fe_2O_3 คล้ายกับของแก้วลอย [29]

M. Erol และคณะ ศึกษาลักษณะของ Glass, Glass – ceramic, และเซรามิกจากการใช้แก้วลอยเป็นวัตถุดิบ โดยในส่วนของเซรามิกนั้นใช้แก้วลอยมาขึ้นรูปด้วยการอัด แล้วนำไปเผาที่อุณหภูมิ 300 °ซ. เป็นเวลา 60 นาที เพื่อไล่น้ำและแก๊ส จากนั้นเผาต่อด้วยอัตราการเผา 10 °ซ./นาที จนถึงอุณหภูมิที่ต้องการ คือ 1,125, 1,150, 1,175, และ 1,200 °ซ. เผาแซ่วไว้อีก 120 นาที พบว่าผิวของเซรามิกจะเรียบมากขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิการเผา เนื่องจากเนื้อของชิ้นงานกลายเป็นเนื้อแก้วมากขึ้น และพบว่าจะมีผลึกที่บริเวณผิวของชิ้นงานมากขึ้น แต่ขนาดผลึกเล็กลงเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการเผา ความแข็ง (Hardness) และความหนาแน่น เพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิการเผา ค่าความพรุน และการดูดซึมน้ำ ลดลงเมื่ออุณหภูมิการเผาเพิ่มขึ้น โดยผ่านการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C – 20 และ ASTM E – 18 [30]