



ใบรับรองวิทยานิพนธ์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต (เทคโนโลยีและการจัดการสิ่งแวดล้อม)

ปริญญา

เทคโนโลยีและการจัดการสิ่งแวดล้อม

เทคโนโลยีและการจัดการสิ่งแวดล้อม

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง การพัฒนากระเบื้องเซรามิกด้วยการผสมของเถ้าแกลบและเถ้าลอยถ่านหิน

Development of Ceramic Tiles by Mixing Rice Husk Ash and Lignite Fly Ash

นามผู้วิจัย นายคณาธิป อิศระกุล

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์จักรกฤษณ์ มหัจฉริยวงศ์, Ph.D.)

หัวหน้าภาควิชา

(รองศาสตราจารย์ตุลวิทย์ สถาปนจารุ, Ph.D.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์กัญจนา วีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ เดือน พ.ศ.

สิงสิงห์ มหาวินยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การพัฒนากระเบื้องเซรามิกด้วยการผสมของเถ้าแกลบและเถ้าลอยลิกไนต์

Development of Ceramic Tiles by Mixing Rice Hush Ash and Lignite Fly Ash

โดย

นายคณาธิป อิศระกุล

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (เทคโนโลยีและการจัดการสิ่งแวดล้อม)

พ.ศ. 2557

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

คณาธิป อิศระกุล 2557: การพัฒนากระเบื้องเซรามิกด้วยการผสมของเถ้าแกลบและเถ้า
ลอยลิกไนต์ ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (เทคโนโลยีและการจัดการสิ่งแวดล้อม)
สาขาเทคโนโลยีและการจัดการสิ่งแวดล้อม ภาควิชาเทคโนโลยีและการจัดการสิ่งแวดล้อม
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผู้ช่วยศาสตราจารย์จักรกฤษณ์ มหัจฉริยวงศ์, Ph.D.
85 หน้า

งานวิจัยนี้เป็นการนำเถ้าแกลบและเถ้าลอยลิกไนต์ ซึ่ง เป็นของเหลือทิ้งที่เกิดจาก
อุตสาหกรรมสีข้าวและโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนจากถ่านหินซึ่งมีปริมาณสูงในแต่ละปีและต่างมี
ซิลิกาในปริมาณสูงมาใช้เป็นสารเสริมความแข็งแรงสำหรับปูนซีเมนต์และแผ่นซีลิกาชีพ
ในการศึกษานี้มีวัตถุประสงค์ในการใช้เถ้าทั้งสองเป็นส่วนผสมร่วมกับดินเซรามิกในการผลิต
กระเบื้องเซรามิกเพื่อลดอุณหภูมิในการเผาโดยรักษาสมบัติความแข็งแรงเทียบเท่ากระเบื้อง
เซรามิกดินทั่วไป เพื่อเป็นการลดการใช้พลังงานในการเผาจากการศึกษาผลิตกระเบื้องเซรามิกที่
ผสมเถ้าแกลบและเถ้าลอยลิกไนต์ในอัตราส่วน 10 30 และ 50% (w/w) ผสมกับดินสูตร W03 ทำ
การขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดไฮโดรลิกส์ที่ 200 bar แล้วนำไปเผาที่อุณหภูมิ 800 900 1,000 1,100 และ
1,200 °C นำแผ่นเซรามิกตัวอย่างที่ผลิตได้ไปตรวจสอบทางกายภาพและเชิงกลเมื่อเปรียบเทียบกับ
แผ่นเซรามิกมาตรฐาน พบว่ากระเบื้องเซรามิกที่มีส่วนผสมของเถ้าแกลบมีค่าการดูดซึมน้ำอยู่ใน
ในช่วง 21.60 - 59.16% และค่าโมดูลัสการแตกร้าว 2.05 - 48.76 Kgf/cm² กระเบื้องเซรามิกที่มี
ส่วนผสมของเถ้าลอยลิกไนต์มีการดูดซึมน้ำอยู่ในช่วง 2.18 - 23.70% และค่าโมดูลัสการแตกร้าว
10.00 - 178.74 Kgf/cm² โดยกระเบื้องเซรามิกที่มีส่วนผสมของเถ้าทั้งสองชนิดเพิ่มมากขึ้นทำให้ค่า
การดูดซึมน้ำเพิ่มสูงขึ้น แต่ค่าโมดูลัสการแตกร้าวต่ำลงและอุณหภูมิเผาที่ 1,200 °C ทำให้เกิดการ
โค้งงอ และหดตัวในขณะที่การเผา ณ อุณหภูมิต่ำทำให้กระเบื้องเซรามิกขยายตัวการเลือก
อัตราส่วนที่เหมาะสมสำหรับใช้เป็นกระเบื้อง เซรามิกปูพื้น คือ กระเบื้องเซรามิกที่มีส่วนผสมของเถ้า
ลอยลิกไนต์ที่ 10% อุณหภูมิเผา 1,200 °C และอัตราส่วนที่เหมาะสมสำหรับใช้เป็นกระเบื้อง เซรามิก
ปูผนัง คือ กระเบื้องเซรามิกที่มีส่วนผสมของเถ้าแกลบที่ 30% อุณหภูมิ 1,200 °C

ลายมือชื่อนิสิต

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

Kanatip Isarakul 2014: Development of Ceramic Tiles by Mixing Rice Husk Ash and Lignite Fly Ash. Master of Science (Environmental Technology and Management), Major Field: Environmental Technology and Management, Department of Environmental Technology and Management. Thesis Advisor: Assistant Professor Jukkrit Mahujchariyawong, Ph.D. 85 pages.

This research is use rice husk ash and lignite fly ash are wastes from processes of rice mill and power plant generating in high volume each year. According to properties of adhesion and high silica content, both are applied to be additive as reinforcement for cement and silica chip pads. This study aims to investigate the feasibility of two-type ash mixing in ceramic tile production and the optimal mixing ratio which can maintain for strength properties as same as conventional ceramic tiles, while reducing the energy consumption in burning process. In this study, ceramic tiles were prepared by mixing rice husk ash and lignite fly ash at ratio 10 30 and 50 % (W/W) within ceramic clay, formula W03. In forming process, hydraulic press was set at 200 bar and imported burn at different temperature; 800 900 1,000 1,100 and 1,200°C. The samples of ash mixing ceramic tiles were tested in physical and mechanical characteristics and compared with the control, non-ash mixing ceramic tiles .The result showed that ceramic tiles with rice husk ash mixture expressed water absorption in the range from 21.60 to 59.16 % and modulus of rupture was 2.05 - 48.76 Kgf/cm². While ceramic tiles with lignite fly ash mixture expressed water absorption in the range from 2.18 to 23.70 % and modulus of rupture was 10.00 - 178.74 Kgf/cm². When mixing ratio of both ash was higher, water absorption increased but modulus of rupture decreased. Burning temperature affected to the tiles, at 1,200°C tiles were bended and contracted, at low range temperature tiles were expanded. Therefore, the optimal condition for ceramic tile flooring was mixing of lignite fly ash at 10%and burning temperature at 1,200°C and optimal for ceramic tile wall was mixing of rice husk ash at 30% and burning temperature at 1,200°C

Student's signature

Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. จักรกฤษณ์ มหัจฉริยวงศ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่ได้ให้ความกรุณาเป็นอาจารย์ที่ปรึกษา คอยให้คำแนะนำ ให้คำปรึกษาอันเป็นประโยชน์ตลอดจนชี้แนะแนวทางการแก้ไขปัญหาดังกล่าว และให้ความช่วยเหลือตลอดระยะเวลาที่ทำงานวิจัย และตรวจแก้ไขข้อบกพร่องในการทำวิทยานิพนธ์

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนจากสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย และบริษัท ฮาโก้กรุ๊ป (1991) จำกัด ภายใต้โครงการพัฒนานักวิจัยและงานวิจัยเพื่ออุตสาหกรรม-พวอ. ระดับปริญญาโท และได้รับความเอื้อเฟื้อจาก โรงงานเอ็นพี.เซราไทล์ จังหวัดลำปาง สำหรับการผลิตกระเบื้องเซรามิก และศูนย์พัฒนาอุตสาหกรรมเซรามิก จังหวัด ลำปาง (CIDC) สำหรับการวิเคราะห์ตัวอย่าง กระเบื้องเซรามิก

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ตลอดจนเพื่อนๆ พี่ๆ และน้องๆ ที่ได้ให้ความช่วยเหลือ มอบความห่วงใยและคอยเป็นกำลังใจที่ดีตลอดมาแก่ผู้วิจัยจนสำเร็จการศึกษา และขอขอบพระคุณผู้ที่ให้ความช่วยเหลือ ในการทำวิทยานิพนธ์เล่มนี้ซึ่งมิได้เอ่ยนามในที่นี้ทุกๆ ท่าน ผู้วิจัยจึงขอขอบคุณมา ณ ที่นี้

คณาธิป อิศระกุล

ตุลาคม 2557

สารบัญ

หน้า

สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(3)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	3
การตรวจเอกสาร	4
อุปกรณ์และวิธีการ 39	
อุปกรณ์	39
วิธีการ	39
ผลและวิจารณ์	45
สรุปและข้อเสนอแนะ	61
สรุป	61
ข้อเสนอแนะ	63
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	64
ภาคผนวก	68
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	85

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1 องค์ประกอบทางเคมีของแก้วลอยลิกไนต์	32
2 องค์ประกอบทางเคมีของแก้วเคลือบ	35
3 อัตราส่วนผสมแก้วลอยลิกไนต์และแก้วเคลือบในกระเบื้องตัวอย่าง	41
4 ค่าโมดูลัสการแตกร้าวของกระเบื้องที่มีส่วนผสมของแก้วเคลือบ แก้วลอยลิกไนต์ และที่ไม่มีการผสมแก้วที่อุณหภูมิการเผา 800-1,200 °C	46
5 ค่าการดูดซึมน้ำของกระเบื้องที่มีส่วนผสมของแก้วเคลือบ แก้วลอยลิกไนต์ และที่ไม่มีการผสมแก้วที่อุณหภูมิการเผา 800-1,200 °C	46
6 ขนาดของกระเบื้องที่มีส่วนผสมของแก้วเคลือบ แก้วลอยลิกไนต์ และกระเบื้องเซรามิกที่ไม่ได้มีการผสมแก้ว	51
7 น้ำหนักของกระเบื้องที่มีส่วนผสมของแก้วเคลือบ แก้วลอยลิกไนต์ และกระเบื้องเซรามิกที่ไม่ได้มีการผสมแก้ว	51

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
1 กระบวนการผลิตกระเบื้องดินเผาในโรงงานผลิตกระเบื้องทั่วไป	18
2 การแยกสิ่งเจือปนที่ผสมมากับเถ้าแกลบ ด้วยตาข่ายพลาสติก	40
3 เถ้าแกลบที่ใช้เป็นส่วนผสมในเนื้อกระเบื้องเซรามิกตัวอย่าง	40
4 เถ้าลอยลิกไนต์จากโรงไฟฟ้า แม่เมาะ จังหวัดลำปาง	41
5 เครื่องอัดไฮโดรลิกส์ ที่ใช้ในการศึกษา	42
6 ค่าโมดูลัสการแตกร้าวของกระเบื้องที่มีส่วนผสมของ เถ้าแกลบ ที่ อุณหภูมิ 800-1,200 °C	47
7 ค่าโมดูลัสการแตกร้าวของกระเบื้องที่มีส่วนผสมของ เถ้าลอยลิกไนต์ ที่ อุณหภูมิ 800-1,200 °C	47
8 การเปรียบเทียบค่าโมดูลัสการแตกร้าวของกระเบื้องตัวอย่าง ผสมเถ้าแกลบ เถ้าลอยลิกไนต์ และ ไม่มีการผสมเถ้า ที่ อุณหภูมิ 800-1,200 °C	47
9 ค่าการดูดซึมน้ำของกระเบื้องที่มีส่วนผสมของ เถ้าแกลบ ที่ อุณหภูมิ 800-1,200 °C	48
10 ค่าการดูดซึมน้ำของกระเบื้องที่มีส่วนผสมของ เถ้าลอยลิกไนต์ ที่ อุณหภูมิ 800-1,200 °C	49
11 การเปรียบเทียบค่าการดูดซึมน้ำของกระเบื้องตัวอย่าง ผสมเถ้าแกลบ เถ้าลอยลิกไนต์ และ ไม่มีการผสมเถ้า ที่ อุณหภูมิ 800-1,200 °C	50
12 กระเบื้องเซรามิกในแต่ละอัตราส่วนผสมที่อุณหภูมิการเผา 800-1,200 °C	52
13 ลักษณะกระเบื้องที่มีส่วนผสมของเถ้าแกลบ เถ้าลอยลิกไนต์ ที่อุณหภูมิ 800 °C	53
14 ลักษณะกระเบื้องที่มีส่วนผสมของเถ้าแกลบ เถ้าลอยลิกไนต์ ที่อุณหภูมิ 900 °C	54
15 ลักษณะกระเบื้องที่มีส่วนผสมของเถ้าแกลบ เถ้าลอยลิกไนต์ ที่อุณหภูมิ 1,000 °C	55
16 ลักษณะกระเบื้องที่มีส่วนผสมของเถ้าแกลบ เถ้าลอยลิกไนต์ ที่อุณหภูมิ 1,100 °C	56
17 ลักษณะกระเบื้องที่มีส่วนผสมของเถ้าแกลบ เถ้าลอยลิกไนต์ ที่อุณหภูมิ 1,200 °C	57

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่	หน้า
1 ผลการวิเคราะห์ ทดสอบทางกายภาพ ค่าความต้านทานต่อการหัก	71
2 ผลการทดสอบ น้ำหนักแรงกด ความหนา และความกว้าง ของกระเบื้องตัวอย่าง	73
3 ผลการวิเคราะห์ ทดสอบทางกายภาพ ค่าการดูดซึมน้ำ	78
4 ผลการทดสอบ ความหนาแน่นปรากฏ และ เปอร์เซนต์ความพรุนปรากฏ	80

การพัฒนากระเบื้องเซรามิกด้วยการผสมของเถ้าแกลบและเถ้าลอยลิกไนต์

Development of Ceramic Tiles by Mixing Rice Husk Ash and Lignite Fly Ash

คำนำ

ในสมัยก่อน คำว่า เซรามิก คือ ศิลปะที่เกี่ยวข้องกับเครื่องปั้นดินเผา แต่ต่อมาได้มีการใช้ในความหมายที่กว้างมากขึ้น รวมไปถึงอุตสาหกรรมทั้งหลายที่ใช้สารประกอบพวกซิลิเกต (silicate) ในการผลิตผลิตภัณฑ์โดยการที่จะเป็น ผลิตภัณฑ์เซรามิกได้นั้นต้องมียอดประกอบ 2 ประการก็คือ ต้องเป็นผลิตภัณฑ์ที่ผ่านกรรมวิธีผลิตต้องผ่านการเผาที่อุณหภูมิสูง และ ผลิตภัณฑ์ซึ่งส่วนประกอบของผลิตภัณฑ์ทั้งหมดหรือส่วนใหญ่ผลิตจากวัตถุดิบที่มีอยู่ตามธรรมชาติบนเปลือกโลก

อุตสาหกรรมเซรามิกมักเป็นอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ และมีความสำคัญในทุกประเทศ สมบัติเฉพาะที่สำคัญของอุตสาหกรรมเซรามิก คือ เป็นอุตสาหกรรมพื้นฐานเพื่อรองรับอุตสาหกรรมอื่นๆ ตัวอย่างเช่น วัตถุดิบไฟ ชนิดต่างๆ เซรามิก เป็นวัสดุพื้นฐานของอุตสาหกรรม วัสดุขั้วดู สำหรับอุตสาหกรรมเครื่องจักร เครื่องมือ และอุตสาหกรรมเครื่องยนต์ สถาปัตยกรรม อิเล็กทรอนิกส์ ผลิตภัณฑ์เซรามิกเฉพาะตัวด้านไฟฟ้า และแม่เหล็ก ซึ่งมีความสำคัญต่อการพัฒนาเครื่องมืออิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ในการควบคุม ในคอมพิวเตอร์เป็นต้น เป็นความจริงที่สามารถพูดได้ว่า อุตสาหกรรม สำนักงานและบ้าน หนีไม่พ้นที่จะต้องมีผลิตภัณฑ์เซรามิกเข้าไปเกี่ยวข้อง แม้แต่เครื่องมือที่ทันสมัยก็เช่นกัน ก็หนีไม่พ้นที่จะต้องมีผลิตภัณฑ์เซรามิกเป็นส่วนประกอบ ทั้งนี้ เพราะว่าผลิตภัณฑ์เซรามิกมีสมบัติทั้งทางเคมี ไฟฟ้า กลศาสตร์ ความร้อน และ โครงสร้างที่เป็นประโยชน์ (ปรีดา, 2547)

ผลิตภัณฑ์เซรามิกมีการใช้ดินและส่วนผสมชนิดต่างๆ เช่นดินขาว ดินเหนียว หินฟันม้า เป็นส่วนผสมหลักในการผลิตขึ้นอยู่กับผลิตภัณฑ์ที่จะผลิตขึ้นด้วย ซึ่งจะแบ่งตามประเภทของ กระเบื้องของเนื้อดินหรือคุณสมบัติของกระเบื้องเซรามิก โดยแต่ละชนิดจะมีคุณสมบัติแตกต่างกัน ทั้งในเรื่องความแข็งแรง การซึมน้ำ ลวดลายสีสันทันและแตกต่างกันตามกระบวนการผลิต โดยสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ชนิดหลักๆ คือ Earthenware, Stoneware, Porcelain (วงพงษ์, 2555) กระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์เซรามิก โดยทั่วไปจะทำการผสม เนื้อดิน แร่ธาตุ น้ำ และขึ้นรูปบนแม่พิมพ์ในรูปแบบที่ต้องการ นำไปอบ ในอุณหภูมิสูง ตกแต่งลวดลายเคลือบด้วยวัสดุกันน้ำเพื่อความเหมาะสมในการ

ผลิตเซรามิกและวัสดุประสงค์ของการใช้งาน การเตรียมวัตถุดิบ ในการผลิตเซรามิกนั้นมีส่วนทำให้เกิดมลพิษที่เกิดจากการระเบิดภูเขาหินเพื่อนำแร่บางชนิดมาใช้ ปัจจุบันการรณรงค์เพื่อการรักษาสิ่งแวดล้อมมีสูงมากขึ้น กระบวนการผลิตเซรามิกที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม โดยการใช้วัสดุทดแทนการประหยัดพลังงาน และการลดการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่ทำให้เกิดภาวะโลกร้อน เป็นที่สนใจของผู้ประกอบการมากขึ้น การใช้วัสดุทดแทนจากของเหลือทิ้งบางชนิดที่มีองค์ประกอบเหมาะสมในการผลิตเซรามิกนอกจากช่วยให้ผลิตภัณฑ์มีคุณลักษณะพิเศษแล้ว ยังเป็นการใช้ทรัพยากรธรรมชาติอย่างมีประสิทธิภาพด้วย วัตถุดิบทางการเกษตรที่มีส่วนประกอบของซิลิกาในปริมาณสูงเมื่อทำการเผาจนเป็นเถ้าสามารถนำมาผสมกับดิน และผลิตเป็นเซรามิกได้เนื่องจาก เป็นวัตถุดิบที่มีซิลิกาเป็นองค์ประกอบสูง และ มีความละเอียดสูง สามารถจับเกาะกันได้แน่นและทำให้เกิดรูพรุนต่ำ

ปัจจุบันเถ้าแกลบและเถ้าลอยลิกไนต์เป็นวัตถุดิบที่ได้จากการเผาไหม้หลังนำพลังงานความร้อนไปใช้งานแล้วในกระบวนการผลิตไฟฟ้าและวัสดุประสงค์อื่นๆ สมบัติของเถ้าทั้งสองคือ มีปริมาณของซิลิกาสูงทำให้มีการยึดเกาะที่แน่น เป็นฝุ่นสีเทา เทาดำหรือ น้ำตาล มีลักษณะแห้งและเบา รูปร่างอนุภาคค่อนข้างกลมและผิวเรียบ มีความละเอียดซึ่งความละเอียดที่ได้จะขึ้นอยู่กับชนิดของการเผา สมบัติทางเคมีนั้นมีส่วนประกอบของออกไซด์ของธาตุซิลิกา อลูมินา และเหล็ก ซึ่งสามารถทำปฏิกิริยาปอซโซลานได้ดี (เจริญวุฒิ, 2546) จึงนิยมนำมาใช้เป็นส่วนประกอบสำคัญในการผลิตปูนซีเมนต์ คอนกรีต และวัสดุอุดซบ ซึ่งได้มีการศึกษาถึงการผสมเถ้าแกลบลงในคอนกรีตที่ 5-15% พบว่าเมื่อมีการเพิ่มปริมาณของแกลบที่ 10% จะทำให้เพิ่มความแข็งแรงของคอนกรีตได้ และ ในกรณีการศึกษามีการใช้เถ้าแกลบและเถ้าลอยลิกไนต์ผสมคอนกรีตที่ตั้งแต่ 0-27.5% พบว่า การผสมเถ้าลอยลิกไนต์ที่ 22.5% และ เถ้าแกลบ 7.5% จะทำให้คอนกรีตมีความแข็งแรงมากกว่าอัตราส่วน อื่นๆ (Sathawane *et al.*, 2013) ในกรณีการศึกษานี้เป็นการนำเถ้าสองชนิดนี้มาเป็นส่วนผสมในการผลิตเซรามิกเพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการพัฒนาคุณลักษณะบางประการโดยการประยุกต์ใช้กับการผลิตกระเบื้องเซรามิก

วัตถุประสงค์

1. ศึกษาความเป็นไปได้ในการนำเถ้าเคลือบและเถ้าลอยลิกไนต์มาเป็นส่วนผสมในการผลิตกระเบื้องเซรามิก
2. ศึกษาอัตราส่วนของเถ้าทั้งสองชนิดและอุณหภูมิเผาที่เหมาะสมในการผลิตกระเบื้องเซรามิก
3. ศึกษาสมบัติเชิงกลของกระเบื้องเซรามิก ที่มีส่วนผสมของเถ้าทั้งสองชนิด

ขอบเขตงานวิจัย

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นในการนำเถ้าลอยลิกไนต์และเถ้าเคลือบ มาเป็นส่วนผสมในกระเบื้อง เซรามิก โดยศึกษาถึงอัตราส่วน และอุณหภูมิ ในการเผา เพื่อให้กระเบื้อง ที่ได้มีสมบัติทางด้านกายภาพและเชิงกลที่เทียบเท่า หรือ สูงกว่ากระเบื้องเซรามิกที่ไม่มีการผสมของเถ้า เพื่อให้เหมาะสมในการนำมาใช้เป็นกระเบื้องเซรามิกปูพื้นที่ใช้ได้ทั้งภายในและภายนอกอาคาร

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. พัฒนาผลิตภัณฑ์กระเบื้องเซรามิกปูพื้นร่วมกับวัตถุดิบทดแทนดิน
2. นำของเสียมาใช้ประโยชน์ได้อย่างคุ้มค่า และเป็นการลดการใช้ทรัพยากรดิน
3. สร้างแนวทางการผลิตและบริโภคที่เน้นกระบวนการผลิตที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

การตรวจเอกสาร

1. เซรามิก (Ceramic)

การผลิตเซรามิกในประเทศเกือบทั้งหมดเป็นการผลิตเซรามิกเพื่ออุปโภคบริโภคเช่น ถ้วยจาน ชาม สุขภัณฑ์ และกระเบื้องเป็นต้น ผลิตภัณฑ์เหล่านี้ใช้ดินเป็นวัตถุดิบหลักโดยมักจะเผาที่อุณหภูมิไม่เกิน $1,250^{\circ}\text{C}$ และไม่จำเป็นต้องคำนึงถึงความแข็งแรงและความแม่นยำของขนาดผลิตภัณฑ์มากนัก อย่างไรก็ตาม ปัจจุบัน อุตสาหกรรมมีความต้องการวัสดุที่มีสมรรถนะการใช้งานสูงเรื่อยๆ ต้องสามารถทนต่อสภาวะการทำงานที่อุณหภูมิสูง ทนต่อการกัดกร่อนที่รุนแรง และคงสภาพการใช้งานได้ในสภาวะซึ่งมีการเสียดสีตลอดเวลา เป็นต้น ผลิตภัณฑ์ชิ้นส่วนที่ใช้ในอุตสาหกรรมสนับสนุน นอกจากจำเป็นต้องทนต่อการเสียดสีที่อุณหภูมิสูง มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างฉับพลัน (thermal shock) ต้องมีความแข็งแรงสูงแล้วยังต้องมีขนาดที่แน่นอน มีค่าพิถีความเพื่อ (tolerance) ในช่วงที่กำหนด (กุลจิรา, 2545)

1.1 เซรามิกสามารถแบ่งประเภทจากองค์ประกอบของเนื้อดินและอุณหภูมิในการเผาได้เป็น 3 ประเภทคือ

1.1.1 ผลิตภัณฑ์ประเภทเอิร์ทแวร์ (Eartheare) หมายถึง ผลิตภัณฑ์ที่ใช้เนื้อดินเป็นส่วนใหญ่เป็นดินเหนียวธรรมดา เป็นกระเบื้องที่ผลิตกันมากในประเทศไทย มีความแข็งแรงสูง แต่ยังคงมีความพรุนตัวอยู่เล็กน้อย มีส่วนผสมหลักเป็นดิน ขาวและดินเหนียว อุณหภูมิเผาไม่เกิน $1,100^{\circ}\text{C}$ เนื้อกระเบื้องละเอียด ส่วนมากนิยมใช้ดินท้องถิ่นขึ้นรูปเป็นภาชนะต่างๆ เช่น หม้อดิน กร ะถาง ดันไม้ โอ่งดิน อิฐก่อสร้าง กระเบื้องมุงหลังคา เป็นต้น ผลิตภัณฑ์เหล่านี้มีการพรุนตัว สามารถดูดซึมน้ำได้ เนื้อผลิตภัณฑ์หนาหยาบสีเนื้อดินเป็นสีน้ำตาล สีเทาอ่อนออกเหลือง เวลาเคาะเสียงไม่กังวานเหมือนผลิตภัณฑ์ชนิดอื่นๆ ผลิตภัณฑ์มีทั้งชนิดเคลือบและไม่เคลือบอุณหภูมิที่ใช้เผาประมาณ $900-1,000^{\circ}\text{C}$ (สมศักดิ์, 2549) ปัจจุบันได้มีการผสมเนื้อดินปั้นชนิดสีขาว มีน้ำหนักเบา ใช้อุณหภูมิเผาดำเรียกว่า ดินผสมโดโลไมต์ อุณหภูมิที่ใช้เผาเคลือบประมาณ $1,150^{\circ}\text{C}$ เนื้อดินประเภทนี้ มักใช้ผลิตของที่ระลึก ของชำร่วย

1.1.2 ผลิตภัณฑ์ประเภทสโตนแวร์ (Stoneware) หมายถึง ผลิตภัณฑ์ที่ผลิตขึ้นจากเนื้อดินธรรมชาติ หรือการผสมเนื้อดินชนิดใหม่ โดยมีส่วนผสมของดินทนไฟ (Fire Clays) อยู่ด้วยและ

มี ซิลิกาสูง เนื่องจากผลิตภัณฑ์ประเภทนี้เนื้อหยาบ แน่น และมีความแข็งแรงมาก เพลถึงจุดสุกตัว (Vitreousware) น้ำและของเหลวไม่สามารถซึมผ่านได้ ส่วนผลิตภัณฑ์สโตนแวร์ชนิดที่เตรียมดินจากธรรมชาตินำมาผลิตเป็นผลิตภัณฑ์โดยตรงก็มี เช่น ผลิตภัณฑ์โอ่งราชบุรี ศิลาดอนเชียงใหม่ และผลิตภัณฑ์สังคโลก เนื้อผลิตภัณฑ์ประเภทนี้จะไม่ขาว เนื้อดินจะมีหลายสีขึ้นอยู่กับแหล่งดิน ธรรมชาติและวัตถุดิบที่ผสม จะมีสีน้ำตาล หรือสีเทาอมเขียว ส่วนเนื้อดินปั้นที่เตรียมจากห้องปฏิบัติการสามารถควบคุมสมบัติของสีเนื้อดิน การดูดซึมน้ำ การหดตัวได้ จึงนำไปผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ภาชนะใส่อาหาร เช่น จาม ชาม ถ้วยกาแฟ เขือกน้ำ ซึ่งเป็นภาชนะที่มีลักษณะค่อนข้างหนา เนื้อหยาบแน่นทึบแสง อุณหภูมิที่ใช้เผาประมาณ 1,200-1,300 °C

1.1.3 ผลิตภัณฑ์ประเภทพอร์สเลนแวร์ (Porcelainware) หมายถึง ผลิตภัณฑ์ที่เตรียมเนื้อดินปั้นขึ้นเป็นพิเศษ โดยส่วนผสมของเนื้อดินปั้นประกอบไปด้วยหินเขียวหนุมาน (Quartz) หินฟันม้า (Feldspar) ดินขาว (Kaolin) ดินดำ (Ball Clay) และวัตถุดิบอื่นๆ อีกตามสัดส่วนที่เหมาะสม อุณหภูมิที่เผาประมาณ 1,250-1,450 °C เนื้อดินจะสุกตัวหลอมจนกลายเป็นแก้วแข็งแรง น้ำและของเหลวไม่สามารถซึมผ่านได้ (Vitreousware) ได้แก่ผลิตภัณฑ์เนื้อเนียนสีขาว (Whiteware) ถ้าส่วนผสมของเนื้อดินปั้นมีความบริสุทธิ์มากปราศจากการเจือปนของแร่ธาตุต่างๆ เมื่อเผาจนถึงจุดสุกตัวเนื้อดินจะมีความแข็งแรงและสามารถโปรงแสงได้ ผลิตภัณฑ์พอร์สเลนแวร์แบ่งตามอุณหภูมิในการเผา คือ พอร์สเลนชนิดไฟต่ำ (Soft Porcelain) เผาในอุณหภูมิประมาณ 1,250-1,285°C นิยมนำไปทำภาชนะใส่อาหาร (Tableware) และงานประเภทยุติศิลปะ (Artware) และพอร์สเลนชนิดไฟสูง (Hard Porcelain) เผาที่อุณหภูมิตั้งแต่ 1,285-1,450°C ผลิตภัณฑ์ประเภทนี้มีความแข็งแรงเป็นพิเศษ นิยมนำไปทำผลิตภัณฑ์ประเภทเครื่องฉนวนไฟฟ้า อุปกรณ์ไฟฟ้า เช่น ลูกถ้วยไฟฟ้า ส่วนที่เป็นฉนวนของสะพานไฟฟ้าส่วนที่เป็นฉนวนของหัวเทียนรถยนต์และภาชนะทดลองทางเคมี เป็นต้น

ส่วนผลิตภัณฑ์ชนิดที่เรียกว่า โบน ไชน่า (Bone china) ผลิตภัณฑ์ชนิดนี้จัดอยู่ในผลิตภัณฑ์ประเภทพอร์สเลนด้วย เพราะเนื้อดินปั้นทำมาจากวัตถุดิบประเภทเดียวกัน เพียงแต่มีส่วนผสมของซี่โครงกระดูกสัตว์อยู่ด้วย เนื้อผลิตภัณฑ์ประเภทนี้มีความบอบบางมาก แต่ความเป็นจริงผลิตภัณฑ์ประเภทนี้มีความแข็งแรงดี ทั้งๆ ที่อุณหภูมิเผาดำกว่าผลิตภัณฑ์พอร์สเลนชนิดทนไฟสูง และที่สำคัญเนื้อผลิตภัณฑ์ประเภทนี้จะโปรงแสง

ลักษณะทั่วไปของกระเบื้องเซรามิกมีรูปร่างสี่เหลี่ยมขนาดแตกต่างกัน เป็นแผ่นบางหนาประมาณ 2-5 mm มีเนื้อแน่น ผิวเรียบ ผิวมีลวดลาย มีทั้งเคลือบและไม่เคลือบ สามารถนำไปใช้งาน

ได้หลากหลาย เป็นต้น ในปัจจุบันได้มีการแบ่งชนิดของกระเบื้องเซรามิกให้ชัดเจนขึ้น เพื่อให้ง่ายต่อการใช้งานและการผลิต โดยกระเบื้องเซรามิกสามารถแบ่งได้ดังนี้ (วงพงษ์, 2555)

1.2 การแบ่งตามลักษณะการใช้งาน

1.2.1 กระเบื้องปูผนัง (Wall tile) กระเบื้องที่ต้องการความแข็งแรงไม่สูงมากนัก (น้อยกว่ากระเบื้องปูพื้น) เนื่องจากการนำไปปูผนังไม่ต้องรับน้ำหนักมาก พื้นผิวลื่น มันวาว มีสีสันทันและลวดลายที่หลากหลาย ทำให้มีราคาสูงขึ้น กระเบื้องปูผนังจึงเน้นด้านความสวยงามเป็นหลัก ผิวหน้าจะมีความมันวาวและมีการพิมพ์ลายหรือเล่นลวดลายให้สีเคลือบเกิดความสวยงาม มีค่าการดูดซึมน้ำประมาณ 14-16% และขนาดเท่ากันเกือบทุกแผ่น เนื่องจากเทคโนโลยีในการผลิตกระเบื้องมีการพัฒนาอยู่ตลอดเวลา สำหรับกระเบื้องปูผนังจะมีทั้งสีเคลือบจตุรัสหรือสีเคลือบผืนผ้า ขนาดที่ผลิตกัน เช่น 4x8 นิ้ว 8x8 นิ้ว 8x12 นิ้ว และ 12x12 นิ้ว เป็นต้น

1.2.2 กระเบื้องปูพื้น (Floor tile) กระเบื้องปูพื้นเป็นกระเบื้องที่ได้รับการออกแบบเพื่อนำมาใช้กับงานปูพื้นอาคารที่ต้องรองรับน้ำหนักและแรงกระแทก จึงแข็งแรงทนทานเป็นพิเศษ สำหรับการรับน้ำหนักจากการวางสิ่งของหรือของแข็งตกกระแทกพื้น พื้นผิวมักด้านหรือขรุขระเพื่อกันลื่น แต่กระเบื้องชนิดนี้จะมีสีและลวดลายไม่มากนัก ด้วยข้อจำกัดด้านวัตถุดิบที่ต้องเลือกสรรเพื่อสร้างความแข็งแรง คงทน นอกจากนั้นผิวเคลือบต้องทนแรงเสียดสีจากการใช้งานได้สูง ทำให้อายุการใช้งานยาวนาน ดังนั้น กระเบื้อง ปูพื้นโดยทั่วไปจะต้องมีการดูดซึมน้ำต่ำในช่วง 0-6% ขนาดที่นิยมผลิตกัน เช่น 4x4 นิ้ว 8x8 นิ้ว 12x12 นิ้ว และ 16x16 นิ้ว เป็นต้น

1.2.3 กระเบื้องมุงหลังคา (Roofing tile) เป็นกระเบื้องที่เนื้อแน่นไม่มีความพรุนและมีความแข็งแรงสูง เพื่อใช้งานสำหรับมุงหลังคาที่ต้องสัมผัสกับสภาวะอากาศที่เปลี่ยนแปลงตลอดเวลา เช่น ฝน ความร้อนจากแสงอาทิตย์ หรือวัตถุที่ตกกระแทกจากพื้นที่สูง ลมกรรโชก หรือพายุ เป็นต้น กระเบื้องมุงหลังคามีทั้งชนิดแผ่นเรียบ และแบบที่เป็นลอน เพื่อให้น้ำฝนไหลตัวได้ง่าย และจะต้องออกแบบตัวกระเบื้องให้มี ร่องค้ำน้ำฝน เพื่อไม่ให้น้ำฝนไหลย้อนหลังซึ่งจะทำให้น้ำรั่วเข้าไปในอาคารได้ ประการสำคัญกระเบื้องจะต้องไม่บิดเบี้ยวซึ่งจะเป็นต้นเหตุของการเกิดน้ำรั่วได้ กระเบื้องมุงหลังคาจะต้องมีการดูดซึมน้ำต่ำกว่า 2% เนื่องจากจะต้องถูกแดดและถูกฝน เกิดอาการร้อนและเย็นตลอดเวลา ถ้าหากกระเบื้องมีการดูดซึมน้ำสูง ตัวกระเบื้องจะดูดซึมน้ำได้มาก เมื่อ

กระเบื้องได้รับความร้อนจากแดดจะทำให้เกิดการขยายตัวและเวลากลางคืนก็จะยุบตัวหดตัว
ก่อให้เกิดการแตกร้าวได้

1.2.4 กระเบื้องปูถนน (Paving tile) เป็นกระเบื้องที่มีความแข็งแรง ไม่มีความพรุนตัว
สามารถทนต่อแรงกระแทกได้ดี สามารถนำไปใช้ปูถนนภายนอกที่ต้องสัมผัสกับสภาวะอากาศ
โดยตรง เช่น ความชื้นในดิน ในอากาศ ฝน ทนต่อการกระแทกจากการเดิน วิ่ง การเคลื่อนย้ายสิ่งของ
เป็นต้น กระเบื้องชนิดนี้สามารถทำได้หลายรูปทรง และมักจะไม่มีความหนาแน่นมากกว่ากระเบื้องเซรามิก
ทั่วไป มีทั้งแบบผิวเรียบและขรุขระ แต่มักจะไม่มีการเคลือบผิวกระเบื้อง เพื่อป้องกันการลื่นหรือ
การเกาะของน้ำ

1.2.5 กระเบื้องตกแต่ง (Decorative tile) เป็นกระเบื้องถูกออกแบบมาเพื่อสร้างความ
สวยงามโดยเฉพาะ มีหลายแบบให้เลือกทั้งที่เป็นแผ่นเดียวและแบบใช้หลายแผ่นประกอบตลอดลาย

1.3 แบ่งออกตามชนิดของผลิตภัณฑ์ได้เป็น 5 กลุ่มผลิตภัณฑ์ คือ

1.3.1 กระเบื้องเซรามิก (Tile)

1.3.2 เครื่องสุขภัณฑ์ (Sanitaryware)

1.3.3 เครื่องใช้บนโต๊ะอาหาร (Tableware)

1.3.4 ของขวัญและเครื่องประดับ (Giftware and Decorative Items)

1.3.5 ลูกถ้วยไฟฟ้า (Insulator) (ศูนย์ประสานการปรับโครงสร้างอุตสาหกรรม, 2544)

2. ดิน (Clay)

วัตถุดิบที่ใช้ในการเตรียมเนื้อดินเซรามิก มีหลากหลายชนิดขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ในการ
นำไปผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ชนิดนั้นๆ เช่น วัตถุดิบกลุ่มดิน เช่น ดินขาว ดินเหนียว ดินแดง รวมถึงแร่
ดินอื่นๆ เช่น เบนทอนาइट วัตถุดิบที่ใช้ในการเตรียมเคลือบก็จะคล้ายคลึงกับวัตถุดิบที่ใช้ในการ
เตรียมเนื้อดินเซรามิก แต่อาจจะมีการเติมสารประกอบออกไซด์อื่นๆ ลงไปเพิ่มเติมเพื่อให้เกิดสีหรือ
ลักษณะพิเศษขึ้น สารประกอบออกไซด์ที่เติม เช่น โคบอลต์ออกไซด์ คอปเปอร์ออกไซด์ แมงกานีส
ออกไซด์ เฟอริกออกไซด์ เป็นต้น (ปรีดา, 2547)

2.1 ดินขาว (kaolin) ดินเผาหินหรือดินขาว เป็นดินที่เกิดจากการสลายตัวของแร่เฟลด์สปาร์ หรือหินแกรนิต สิ่งที่จะช่วยให้เกิดการสลายตัวของหิน ได้แก่ น้ำ ลม และการเปลี่ยนแปลงตามธรรมชาติ ดินขาวเป็นดินที่มีความบริสุทธิ์สูง มีทั้งสีขาวเมื่ออบแห้งและเมื่อเผา เนื่องจากไม่มีสิ่งเจือปน (Impurities) คือ ออกไซด์ (Oxide) ของโลหะต่างๆ เช่น Fe_2O_3 ถึงแม้จะมีเจือปนอยู่แต่น้อยมาก มีองค์ประกอบหลักเป็นแร่เคโอลิไนต์ (kaolinite) แต่มักจะมีแร่อื่นๆ เช่น ควอตซ์ แอลคาไล เฟลด์สปาร์ หรือ ไมกา ปะปนอยู่ด้วย ผลึกของแร่เคโอลิไนต์ที่พบในดินขาวมักมีขนาดของอนุภาคใหญ่กว่าและมีพื้นที่ผิวจำเพาะ น้อยกว่าผลึกของแร่เคโอลิไนต์ที่พบในดินเหนียว ทำให้ดินขาวมีการดูดซึมน้ำได้น้อย ดินขาวนำไปใช้ประโยชน์ได้หลายทาง รวมทั้งเป็นส่วนประกอบที่สำคัญในเนื้อดินปั้น (Body) ของผลิตภัณฑ์ที่มีสีขาว (Whiteware) เช่น กระเบื้องขาว หรือพอร์ซเลน โบราณ ปกติเมื่อผสมกับเนื้อดินปั้น มักจะไม่ใช้ดินขาวอย่างเดียวโดยอาจมีการผสมกับดินเหนียวเล็กน้อย เพื่อเพิ่มความเหนียว ดินขาวมีอนุภาคของเม็ดดิน (Particle Size) ใหญ่และมีสารอินทรีย์ปนอยู่ด้วย มีความทนไฟสูง (High Refractoriness) เนื่องจากไม่มีตัวช่วยลดอุณหภูมิ (Flux) ที่เกิดจากสิ่งเจือปน (Impurities) เช่น โซเดียมออกไซด์ (Na_2O) และ โพแทสเซียมออกไซด์ (K_2O) ทำให้เผาแล้วแข็งตัวยาก (Vitreousware) ในทางกลับกันอาจใช้ดินขาวจำนวนเล็กน้อยผสมกับดินเหนียวเพื่อลดการหดตัวป้องกันการแตกร้าว

แหล่งของดินขาวที่สำคัญที่พบในประเทศไทย ได้แก่ จังหวัดลำปาง ระนอง นราธิวาส และมักเรียกชื่อดินตามแหล่งที่พบเช่น ดินขาวลำปาง แต่อย่างไรก็ตามดินขาวที่พบในประเทศไทยมีความแตกต่างกันบ้างในชนิดของแร่ดินขึ้นอยู่กับสถานที่ที่พบดินนั้นๆ

นอกจากนี้ยังมีดินขาวอีกประเภทหนึ่งที่พบในประเทศไทย มีลักษณะคล้ายๆ กับดินขาว (Kaolin) ดินขาวชนิดนี้เกิดจากการผุพังสลายตัวของหินปูน เรียกว่าดินสอพอง หรือ ดินมาร์ล (Marl) ซึ่งเป็นสารประกอบของแคลเซียมคาร์บอเนต (Calcium Carbonate) ดินขาวประเภทนี้ไม่สามารถนำมาใช้เป็นส่วนผสมของเนื้อดินปั้นได้ เนื่องจากเมื่อเผาแล้วจะแตกยุ่ย

2.1.1 ส่วนประกอบทางเคมีของดินขาว

ผลิตภัณฑ์ของดินขาวมีส่วนประกอบทางเคมีเป็น $(\text{OH})_4\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5$ หรือ $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Si}_2\text{O}_5 + \text{H}_2\text{O}$ หรือ 36.84% Al_2O_3 , 47.2% SiO_2 และ 13.9% H_2O ดินขาวที่พบตามแหล่งที่มีส่วนประกอบต่างกันไปด้วยเหตุผล 2 ประการ (Furlani and Mashio, 2013)

- 1) เนื่องจากในโครงสร้างของดินขาวมีการแทนที่ของโลหะที่มีประจุบวก
- 2) เนื่องจากมีสารประกอบอื่นปะปนอยู่ เช่น quartz, feldspar, rutile, pyrite, tourmaline, zircon, hematite, magnetite, fluorite และ muscovite เป็นต้น

2.1.2 สมบัติทางกายภาพของดินขาว

ส่วนประกอบทางเคมีหรือผลวิเคราะห์ทางเคมี มีความสำคัญเป็นตัวช่วยชี้บ่งคุณสมบัติทางฟิสิกส์ของดินขาวนั้น เช่น มีปริมาณ silica (SiO_2) มาก แสดงให้รู้ว่าจะทนไฟมาก เพราะวาซิลิกา มีจุดหลอมตัวประมาณ $1,700^\circ\text{C}$ หรือยังมีอะลูมินา (Al_2O_3) มาก ยิ่งน่าจะมีความทนไฟได้มากกว่า เพราะ อะลูมินามีจุดหลอมตัวสูงกว่า $2,000^\circ\text{C}$

2.1.3 ขนาดของอนุภาค (particle size)

สมบัตินี้มีความสำคัญมากอันหนึ่ง เพราะว่ามันเกี่ยวข้องกับสมบัติทางด้านความเหนียว (plastixity) ความแข็งแรงแห้ง (dry strenge) ความสามารถแลกเปลี่ยนอนุมูลและการหดตัวเมื่อแห้ง (drying shrinkage) กล่าวโดยทั่วไปดินละเอียด จะให้ความเหนียว การหดตัว และความแข็งแรง เมื่อแห้งมากกว่าดินหยาบ การหาความละเอียดของดินขาวควรหาลงไปถึงขนาด 1 ไมครอนเป็นอย่างน้อย

2.1.4 รูปร่าง (particle size) แร่ kaolinite อนุภาคของมันมีรูปร่างเป็นแผ่นหกเหลี่ยมมีขนาดจาก 0.05-10 ไมครอน โดยเฉลี่ยขนาดอยู่ระหว่าง 0.5 ไมครอน

2.1.5 สมบัติเมื่อแห้ง (drying properties)

การหดตัวเมื่อแห้งของแร่ดินล้วนๆ เราไม่ค่อยสนใจเพราะว่าเนื้อดินนั้นมักประกอบด้วยแร่หลายอย่าง แต่อาจกล่าวได้กว้างๆ ว่าดินขาวที่ละเอียดกว่ามีการหดตัวมากกว่าดินขาวหยาบเมื่อปล่อยให้แห้ง

2.1.6 ความแข็งแรงเมื่อแห้ง (green strength)

สมบัตินี้สำคัญมากโดยเฉพาะเมื่อนำดินขาวไปใช้ในเนื้อดินปั้นซึ่งไม่มี ดินเหนียวผสมอยู่ เพราะว่าดินขาวเท่านั้นที่จะเป็นตัวช่วยให้ผลิตภัณฑ์ดินมีความแข็งแรงมากน้อยเพียงไร ดินขาวละเอียดหรือดินขาวที่มีมอร์ริสโลไนต์จะให้ความแข็งแรงมากที่สุด

2.1.7 คุณสมบัติหลังการเผา (firing properties)

ดินขาวมีการหดตัวมากหลังการเผา ไม่ควรใช้ดินขาวล้วนเป็นเนื้อดินปั้น ดินขาวเมื่อเผาแล้วจะหดตัวประมาณ 20%

2.2 ดินเหนียว หรือดินดำ (Ball Clay)

ดินเหนียวเป็นดินที่พบได้ทั่วไป เกิดจากการตกตะกอนทับถมกันของดินขาวเกาลิน รวมกับ ซากพืช ซากสัตว์และแร่ธาตุอื่น ๆ ทำให้มีความบริสุทธิ์ต่ำ ซากพืช ซากสัตว์เหล่านี้เองที่ทำหน้าที่เป็นตัวประสานโดยธรรมชาติ ทำให้ดินมีความเหนียว ดินเหนียวอาจจะมีสีก่อนเผาได้ตั้งแต่สีดำ เทา เหลือง หรือน้ำตาล ขึ้นกับปริมาณของสารประกอบอินทรีย์ แร่เหล็กออกไซด์และแร่ไทเทเนียมออกไซด์ที่ปนเปื้อน องค์ประกอบหลักของดินเหนียวคือแร่เคโอลิไนต์เช่นกัน และมักจะพบอยู่รวมกับควอตซ์และแร่ในกลุ่มเฟลด์สปาร์อาจจะมีแร่อื่น ๆ ปะปนอยู่ด้วย เช่น โวลลาสโทไนต์ (CaSiO_3) สเตียไทต์ (MgSiO_4) หินปูน (CaCO_3) และแร่ดินอื่น เช่น มอนต์มอร์ริลโลไนต์ (Montmorillonite) เป็นต้น ดินเหนียวมีขนาดอนุภาคเล็กกว่าดินขาว มีพื้นที่ผิวสูงการดูดซึมน้ำจึงเกิดขึ้นได้ดีกว่าดินขาว และทำให้มีการหดตัวหลังเผาสูงด้วย ดินเหนียวบางชนิดสามารถนำมาขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ได้โดยไม่ต้องเติมองค์ประกอบอื่น ๆ เลย เนื่องจากมีปริมาณของแร่ดิน ควอตซ์ และฟลักซ์ อยู่ในปริมาณพอเหมาะ และมีความเป็นพลาสติกหรือความเหนียวโดยธรรมชาติในตัวเองอยู่แล้ว

ดินเหนียว อาจจะให้คำจำกัดความได้ว่า หมายถึง ดินที่มีสีขาวคล้ำจนถึงดำสนิทมีแหล่งสะสมที่ลุ่ม มีเม็ดละเอียด มีอินทรีย์สารเจือปน มีความเหนียวดี ในความแข็งแรงต่อผลิตภัณฑ์ก่อนเผาดีกว่าดินขาว มีช่วงอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงสภาพของเนื้อดิน ไปเป็นเนื้อแก้วค่อนข้างยาวหลังเผามีสีขาวหรือสีจาง ดินเหนียว มีการเปลี่ยนแปลงมากในแต่ละแหล่งหรือแม้แต่ในพื้นที่สะสมเดียวกัน

2.2.1 เหตุผลที่เราต้องนำดินเหนียว มาใช้ในอุตสาหกรรมเซรามิกมี 4 ประการ คือ

- 1) ช่วยพัฒนาความสามารถในการขึ้นรูปของเนื้อดินปั้นให้ดีขึ้น
- 2) พัฒนาผลิตภัณฑ์ก่อนเผาให้มีความแข็งแรงมากขึ้น ซึ่งเป็นผลทำให้สูญเสียเนื่องจากการแตกของผลิตภัณฑ์ที่ยังไม่เผาในขณะมีการเคลื่อนย้ายลดน้อยลง
- 3) ช่วยทำให้น้ำดินที่ใช้ในการหล่อแบบมีการไหลตัวดีขึ้น
- 4) ดินเหนียว บางชนิด มีความสามารถช่วยทำให้เกิดปฏิกิริยาระหว่างมวลสารในเนื้อดินปั้น ในขณะทำการเผา เป็นผลทำให้ผลิตภัณฑ์มีเนื้อแน่นเป็นเนื้อเดียวกันตลอด

2.2.2 การนำดินเหนียว มาใช้ในอุตสาหกรรมเซรามิก มีข้อเสียคือ

ในดินเหนียว มักมีสิ่งสกปรก เช่น Fe_2O_3 และ TiO_2 ซึ่งเป็นตัวทำให้ความขาวของเนื้อผลิตภัณฑ์เสียไป โดยเฉพาะ ถ้ามีปริมาณ TiO_2 ทำให้ความโปร่งแสงของผลิตภัณฑ์น้อยลง และ ดินเหนียว มีส่วนประกอบไม่แน่นอน ฉะนั้นทำให้เกิดความยุ่งยากในการควบคุมน้ำดินสำหรับหล่อแบบ

ดินเหนียว เมื่อแห้งมีความแข็งแรงสูง และมีการหดตัวสูงเช่นกัน ดินเหนียว หลายชนิดมีอุณหภูมิกว้างที่จะเกิดปฏิกิริยาเปลี่ยนไปเป็นแก้วซึ่งประโยชน์ คือ ช่วยปรับปรุงเนื้อผลิตภัณฑ์ หลังจากเผาแล้วให้ดีขึ้น ในประเทศไทยดินเหนียว ที่นำมาใช้ในอุตสาหกรรมเซรามิกมีหลายแหล่ง เช่น สุราษฎร์ธานี ปราจีนบุรี แม่เมาะ ลำปาง เชียงใหม่ เป็นต้น

2.2.3 ส่วนประกอบทางเคมีของดินเหนียว

ส่วนประกอบทางเคมีของดินเหนียว แตกต่างไปกันตามแหล่งที่สะสม ส่วนประกอบโดยประมาณอาจจำแนกได้ดังนี้

- SiO_2 อยู่ระหว่าง 40-60%
- Al_2O_3 ประมาณ 30%
- H_2O ในผลึกและอินทรีย์สาร 10%
- TiO_2 , Fe_2O_3 , CaO , MgO , K_2O , Na_2O เล็กน้อย

2.2.4 สมบัติทางกายภาพของดินเหนียว

ขนาดของอนุภาค ดินเหนียว มีขนาดของอนุภาคเล็กกว่าดินขาว ขนาดของอนุภาคดินเหนียว จะมีขนาดละเอียดแก่ไหนและมากน้อยเพียงใดจะเปลี่ยนไปตามแหล่งที่พบ คือ แหล่งดินที่ถูกพัดพาไปไกลจากแหล่งดินเดิมมาก จะมีการเสียดสีและการบดกันตามธรรมชาติมาก ขนาดของเม็ดดินจะละเอียดมากขึ้นตามลำดับ

ความเหนียว กล่าวโดยทั่วไปแล้ว ดินเหนียว มีความเหนียวดีกว่าดินขาว การผสมดินเหนียวไปในเนื้อดินปั้นจะช่วยทำให้การขึ้นรูปได้ดีขึ้น และเพิ่มความแข็งแรงของผลิตภัณฑ์ก่อนเผา

การหดตัวเมื่อแห้ง ดินเหนียว มีการหดตัวมากขึ้นแตกต่างไปตามแหล่งหรือชนิดของดินเหนียว นั้น เช่น ดินเหนียว ที่มี SiO_2 สูงแทบไม่มีการหดตัวเลย แต่ดินเหนียว ที่มีอินทรีย์สารสูงจะมีการหดตัวมากประมาณ 15% แต่อย่างไรก็ตามเราไม่ใช้ดินเหนียวอย่างเดียวในการผสมเนื้อดินปั้น เราสามารถที่จะทดลองผสมเนื้อดินปั้นขึ้นมาหาส่วนผสมของเนื้อดินปั้นที่มีการหดตัวที่เหมาะสมได้

ความแข็งแรงก่อนเผา ปกติดินเหนียว จะมีความแข็งแรงกว่าดินขาว ดินเหนียวที่มีความแข็งแรงสูง เมื่อผสมในเนื้อดินปั้นจะช่วยทำให้ผลิตภัณฑ์มีความแข็งแรงสูงตามด้วย

2.2.5 เหตุผลของการใช้ดินดำ หรือ ดินเหนียว (Ball Clay) ผสมลงในเนื้อปั้นของผลิตภัณฑ์ที่มีเนื้อดินปั้นสีขาว (Whiteware)

เพื่อเพิ่มความสามารถที่จะนำไปใช้งานได้ของเนื้อดินปั้น (body) เมื่อผสมน้ำแล้ว ให้เกิดความเหนียว โดยเฉพาะในการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์บนเป็นหมุน (Throwing Method) และ การขึ้นรูปด้วยมือ (Hand Forming Method)

เพิ่มความแข็งแรงของผลิตภัณฑ์ เมื่อแห้งช่วยลดในการสูญเสียในการจับต้องเคลื่อนย้ายไปมาช่วยเพิ่มการไหลตัว (Fluidity) ในเนื้อดินปั้นสำหรับการขึ้นรูปการหล่อด้วยน้ำดิน (Slip Casting)

ดินดำ หรือ ดินเหนียว (Ball Clay) มีสิ่งเจือปนได้แก่ วัตถุที่เป็นสารอินทรีย์ (Organic material) และตัวช่วยลดอุณหภูมิ (Flux) บางชนิดซึ่งช่วยลดอุณหภูมิในการเผาให้ต่ำลง เพื่อให้เนื้อดินนั้นสุกตัว

ลักษณะของดินเหนียวโดยทั่วไป ที่สำคัญ คือ มีเม็ดผลึก (Crystal Size) เล็กกว่าดินขาวมาก ทำให้เกิดการเกาะตัวระหว่างผลึกดีขึ้น ดินดำมีความเหนียวมาก แร่ธาตุอื่นๆ ซึ่งพบได้ในดินดำ เช่น หินเขียวหนุมาน (Quartz) ไมกา (Mica) และเหล็กซัลไฟด์ (Ferrous Sulphide, FeS) แต่จะมีหิน ฟันม้า (Feldspar) เจือปนน้อยมาก

2.3 ดินทนไฟ (Fire clay)

เป็นดินที่มีโครงสร้างหยาบสามารถทนต่ออุณหภูมิสูงได้ไม่ต่ำกว่า 1,500°C ดินทนไฟนี้บางแห่งจะเป็นดินที่มีความเหนียวสูง หรือความเหนียวต่ำ ลักษณะเป็นสีดำ เทา เหลือง น้ำตาล และขาว ซึ่งดินแต่ละที่จะแตกต่างกันไปโดยมีส่วนผสมของ ซิลิกา หรืออะลูมินาสูง จะทำให้ทนไฟได้สูงมากขึ้น เป็นดินที่เกิดจากการสลายตัวของเฟลด์สปาร์เช่นกัน เนื่องจากมีการพัดพาไปไกลจากแหล่งกำเนิดทำให้เกิดการชะล้างของธาตุในกลุ่มแอลคาไลออกไปจากโครงสร้าง จึงทำให้ดินชนิดนี้มีความทนไฟ มีจุดหลอมตัวสูง มีขนาดอนุภาคเล็ก ความเหนียวสูง และมีการปนเปื้อนสูงทำให้หลังการเผาอาจมีสีไม่ขาวนัก ดินนี้สำหรับการทำอิฐทนไฟ

2.4 ดินสำหรับทำอิฐเผา

มักจะประกอบด้วยแร่เคโอลิไนต์และแร่โอลไลต์ และมีการปนเปื้อนด้วยแร่เหล็กในปริมาณมาก นอกจากนี้ ยังอาจมีสารประกอบของแคลเซียมปะปนอยู่ด้วย อุณหภูมิที่ใช้ในการเผาประมาณ $1,000 - 1,200^{\circ}\text{C}$

2.5 ดินเบนโทไนต์ (Bentonite)

เป็นดินที่แตกต่างไปจากดินธรรมดา ใช้เพียงเล็กน้อยผสมในเนื้อดินปั้นเพื่อเพิ่มความเหนียว เนื่องจากดินชนิดนี้มีความเหนียวมาก คือ ความเหนียวของดินเบนโทไนต์ 1 ส่วนจะมีความเหนียวเท่ากับดินเหนียว (Ball Clay) ถึง 10 เท่า ดินเบนโทไนต์เกิดจากฝุ่นละอองที่พุ่งออกจากปล่องภูเขาไฟ เนื่องจากระเบิดของภูเขาไฟ ดินชนิดนี้ส่วนใหญ่จะประกอบด้วยซิลิกา (Silica) 1-3 % ผสมลงไปในสารเคลือบ ที่ไม่ใช่ดินผสมในสูตรเคลือบ เพื่อเป็นการช่วยให้น้ำเคลือบติดผลิตภัณฑ์ดีขึ้นโดยไม่เปลี่ยนแปลงคุณภาพของเคลือบ

2.6 ดินแดง (Red clay หรือ Surface clay)

เป็นดินที่มีความเหนียวมาก มีแร่เหล็กและแอลคาไลผสมอยู่ค่อนข้างสูง เนื้อดินสีเทาเข้ม สีนํ้าตาลเข้ม สีนํ้าตาลอ่อนมักนำไปทำกระเบื้องมุงหลังคาที่ทำให้มีสีแดงเข้ม นอกจากนี้ยังมีดินสีเทา หรือดินสโตนแวร์ (Stoneware clay) เป็นดินที่มีความเหนียว เนื้อดินเป็นสีเทาอ่อน สีเทาเข้ม หรือสีนํ้าตาลเข้ม เมื่อนำไปทำผลิตภัณฑ์สามารถขึ้นรูปได้ดี ทนความร้อนสูงในช่วง $1,200-1,500^{\circ}\text{C}$ ดินชนิดนี้ส่วนใหญ่ใช้ทำผลิตภัณฑ์ประเภทเผาที่อุณหภูมิและเคลือบไฟสูง

2.7 เฟลด์สปาร์ (Feldspar)

เป็นวัตถุดิบกลุ่มฟลักซ์ที่สำคัญและนิยมใช้เป็นส่วนผสมของเนื้อดินและเคลือบมากที่สุด บทบาทของเฟลด์สปาร์คือช่วยลดอุณหภูมิในการเผาและยังช่วยเพิ่มความแข็งแรงของผลิตภัณฑ์หลังเผาเนื่องจากการที่มีอะลูมิเนียมไอออน (Al^{3+}) อยู่อีกด้วย วัตถุดิบกลุ่มเฟลด์สปาร์ที่นิยมใช้กันมากได้แก่โพแทสเซียมเฟลด์สปาร์ (ชื่อแร่ : Orthoclase, $\text{K}(\text{AlSi}_3\text{O}_8)_2$ และโซเดียมเฟลด์สปาร์ (ชื่อแร่ : Albite, $\text{Na}(\text{AlSi}_3\text{O}_8)_2$) อย่างไรก็ตาม เรามักจะเห็นเฟลด์สปาร์ทั้งสองชนิดปะปน

อยู่ด้วยกัน นอกจากนี้ยังอาจจะมีควอตซ์ และแร่เหล็กออกไซด์ปะปนอยู่ด้วย โซเดียมเฟลด์สปาร์บริสุทธิ์มีจุดหลอมเหลวอยู่ที่ประมาณ $1,118^{\circ}\text{C}$ และเมื่อหลอมเหลว จะมีความหนืดต่ำกว่า โพแทสเซียมเฟลด์สปาร์ ซึ่งมีการสลายตัวที่ $1,150^{\circ}\text{C}$

ดังนั้นเมื่อมีหินพื้นมาอยู่ในส่วนผสมของเนื้อดินปั้นและน้ำเคลือบจะทำให้เนื้อดินและน้ำเคลือบนั้นมีอุณหภูมิในการเผาต่ำลงเนื่องจากหินพื้นมาหลอมตัวได้ง่าย เมื่อหลอมตัวแล้วมีลักษณะเป็นแก้ว และมีความแข็งแรงเพิ่มสูงขึ้น (Olguem *et al.*, 2005) เมื่อเผาจะเป็นของเหลว อุณหภูมิซึ่งหินพื้นมาอ่อนตัวและหลอมเหลวนั้นขึ้นอยู่กับสมบัติชนิด และปริมาณของสารจำพวกแอลคาไล (Alkalies) ได้แก่ โพแทสเซียม (K_2O) โซเดียมออกไซด์ (Na_2O) คุณสมบัติทั่วไปของหินพื้นมาเมื่อหลอมตัวแล้วจะมีสีคล้ายไข่มุก สีที่แตกต่างกันออกไปนั้นขึ้นอยู่กับสิ่งเจือปนอยู่

2.8 ควอตซ์ (Quartz)

เป็นแร่ที่มักจะพบปะปนอยู่ในดินเสมอ ควอตซ์มีโครงสร้างผลึกเป็นลักษณะของโครงตาข่ายของไอออนของซิลิคอน (Si^{4+}) ยึดจับกับไอออนของออกซิเจน (O_2) แบบทรงสี่หน้าด้วยพันธะผสมระหว่างไอออนและโควาเลนต์ ในการใช้งานอาจจะใช้ในรูปแบบของแร่ควอตซ์หรือทรายแก้วก็ได้ การที่ดินมีควอตซ์ปะปนอยู่เป็นจำนวนมากทำให้มีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงความร้อนสูงเนื่องจากควอตซ์มีการเปลี่ยนสถานะหลายครั้งในหลายช่วงอุณหภูมิ ระหว่างการเผาโดยการเปลี่ยนสถานะจะมีการขยายตัวร่วมด้วย

เติมควอตซ์ลงไปในเนื้อดินจะช่วยเป็นตัวเติม (Filler) เพื่อช่วยลดการแตกร้าวในระหว่างการอบแห้งและช่วยลดการบิดเบี้ยวเสียรูปทรงของผลิตภัณฑ์ระหว่างการเผา อย่างไรก็ตาม ถ้าหากขนาดอนุภาคของควอตซ์มีขนาดตั้งแต่ 10 ไมครอน ขึ้นไป จะทำให้เกิดรอยแตกขนาดเล็กขึ้นรอบ ๆ ผลึกของควอตซ์ (สามารถเห็นได้โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด) และทำให้ผลิตภัณฑ์มีความแข็งแรงต่ำลง นอกจากนี้ การเติมควอตซ์มากเกินไปอาจทำให้เนื้อดินเสียความเป็นพลาสติกไป การขึ้นรูปจะยากขึ้น

ปกติในเนื้อดินจะมีควอตซ์ผสมอยู่ระหว่าง 10-30% ควอตซ์ที่ใช้ผสมในการผลิตผลิตภัณฑ์ ควรมีปริมาณน้อย หากมีมากจะทำให้เกิดสีในเนื้อดิน

สมบัติโดยทั่วไปของควอตซ์ มีจุดหลอมตัวที่ประมาณ $1,710^{\circ}\text{C}$ ซึ่งเป็นวัตถุดิบที่ใช้เป็นส่วนผสมลงในเนื้อดินปั้น และน้ำเคลือบเพื่อช่วยให้เนื้อดินปั้นเกิดความแข็งแรงเพิ่มขึ้น มีความทนไฟสูง หดตัวน้อยลง ลดการบิดเบี้ยว และช่วยให้เกิดเป็นแก้วในเนื้อดินปั้นและน้ำเคลือบที่มีความโปร่งแสงทนต่อการกัดกร่อนได้ดี (วงพงษ์, 2555)

2.9 โดโลไมต์ (Dolomite)

มีสูตรทางเคมี ($\text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3$) เป็นสารประกอบคาร์บอเนตของแคลเซียมและแมกนีเซียมในอัตราส่วน 1:1 คือ ตามทฤษฎีโดโลไมต์จะมีสารประกอบดังนี้ มีแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) 54% แมกนีเซียม แมกนีเซียมคาร์บอเนต 46% มีจุดหลอมเหลวตัวที่อุณหภูมิประมาณ $1,000^{\circ}\text{C}$ โดโลไมต์เป็นวัตถุดิบที่ได้มาจากการเกิดการแปรสภาพของหินปูน (Lime Stone) นิยมนำมาใช้ผสมในเนื้อผลิตภัณฑ์โดโลไมต์ ผสมในเนื้อกระเบื้อง เครื่องสุขภัณฑ์เป็นส่วนผสมในการทำวัสดุทนไฟ เช่น อิฐทนไฟโดโลไมต์ และเป็นส่วนผสมในน้ำเคลือบเพื่อลดจุดหลอมละลาย ลดการพูนตัว มีความแข็งแรงเป็นต้น

2.10 อะลูมินา (Alumina)

มีสูตรทางเคมีคือ Al_2O_3 มีจุดหลอมตัวที่ประมาณ $2,050^{\circ}\text{C}$ ถ้าอยู่ในรูปของสารอิสระมีน้ำอยู่ด้วย เช่น ไดแอสพอไรต์ (Diaspore) สูตรทางเคมี คือ ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$) บอกไซต์ (Bauxite) สูตรทางเคมีคือ ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) และยิบบไซต์ (Gibbsite) สูตรทางเคมีคือ ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$) ถ้าเผาไล่น้ำออกและเพิ่มอุณหภูมิให้สูงพอที่จะไม่ทำให้เกิดการหดตัวอีกต่อไปใช้ทำวัสดุทนไฟที่มีอะลูมินาสูง อะลูมินาที่เกิดผลึก คือ คอรันดัม (Corundum) ใช้ทำผลิตภัณฑ์ที่ใช้ขัดหรือตัด (Abrasive) และอะลูมินาที่มีความบริสุทธิ์สูงใช้ทำผลิตภัณฑ์เซรามิกชนิดพิเศษ (Fine Ceramics)

2.11 หินปูน (CaCO_3) หรือ เรียกว่า Lime stone

เป็นวัตถุดิบที่สำคัญชนิดหนึ่งที่ใช้สำหรับอุตสาหกรรมเซรามิก แหล่งที่พบมากในประเทศไทย คือ แถบเทือกเขาหินปูน จังหวัดสระบุรี นครสวรรค์ กาญจนบุรี และนครศรีธรรมราช

หินปูนโดยทั่วไปมีโครงสร้างผลึกเป็น ไตรโกนอล (Trigonal) หรือที่เรียกว่าผลึกแคลไซต์ (Calcite Crystal)

หินปูนมักเติมในเนื้อดินสำหรับผลิตภัณฑ์ที่ต้องการรูพรุน (Porous) สูง น้ำหนักเบาแต่ไม่ต้องการความแข็งแรงที่สูงมากนัก เนื่องจากผลิตภัณฑ์เหล่านี้ มักจะมีเนื้อแก้ว (Glassy phase) อยู่ น้อยมาก โดย CaCO_3 จะเข้าไปทำปฏิกิริยากับ SiO_2 จะเกิดเป็นผลึกรูปเข็มของโวลลาสโตไนต์ (Wollastonite; CaSiO_3) ซึ่งผลึกรูปเข็มนี้จะสานกันเป็นเส้นใย และทำให้ผลิตภัณฑ์หลังเผามีน้ำหนักเบาแต่มีความแข็งแรงพอสมควรโดยไม่เกิดเนื้อแก้วขึ้น ในการใช้หินปูนในเนื้อกระเบื้องจะช่วยทำให้กระเบื้องมีน้ำหนักเบา โดยเฉพาะอย่างยิ่งการผลิตกระเบื้องบุผนัง แต่การใช้หินปูนจะต้องคำนึงถึงปริมาณ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ที่เกิดขึ้นหลังจากผ่านช่วงอุณหภูมิ $800-900^\circ\text{C}$ จะทำให้เกิดตำหนิประเภทรูเข็มที่ผิวเคลือบหรืออาจทำให้กระเบื้องร้าวได้ โดยเฉพาะกระเบื้องที่เผา ครั้งเดียว จะต้องกำหนดปริมาณของหินปูนให้แน่นอนและไม่สูงเกินไป

หินปูนยังเป็นส่วนผสมสำคัญในการเตรียมเคลือบ ซึ่งจะช่วยลดความหนืดของเคลือบระหว่างเผาสำหรับเคลือบที่มีปริมาณซิลิกาสูงช่วยเพิ่มความแข็งแรงของผิวเคลือบหลังเผาทำให้เคลือบทนการขัดสีดีขึ้น เพื่อป้องกันการเกิดการร้าวตัวขึ้นในภายหลัง แต่อาจส่งผลทำให้เกิดผิวเคลือบด้าน (Matt glaze) ขึ้นได้ในกรณีที่ใส่เข้าไปปริมาณมากเป็นผลจากการเคลือบไม่สุกตัว (Devitrification) อย่างไรก็ตามหินปูนสามารถใช้เป็นสารช่วยหลอมได้ที่อุณหภูมิสูงสำหรับเคลือบกระเบื้องไฟสูงตั้งแต่อุณหภูมิ $1,000^\circ\text{C}$ ขึ้นไป (Zimmer and Bergmann, 2007)

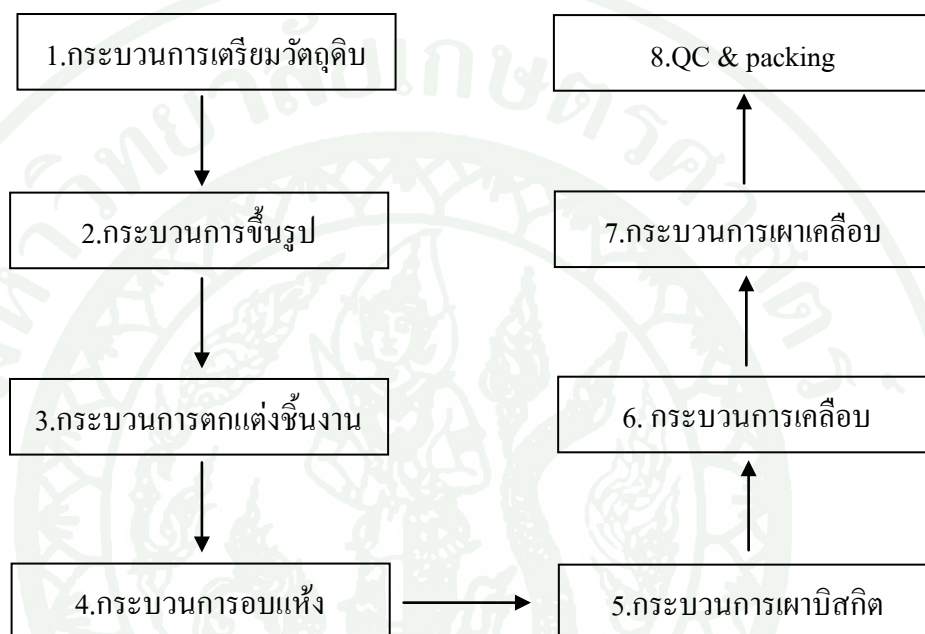
2.12 กลุ่มของสารเคมีจำพวกคาร์บอเนตและออกไซด์ ได้แก่ โคบอลต์ออกไซด์ คอปเปอร์ออกไซด์ เพอร์ริกออกไซด์ แมงกานีสออกไซด์ สารให้สี

2.12.1 ออกไซด์ให้สี (Color oxide) เป็นออกไซด์ที่ละลายในเคลือบในรูปของไอออนและให้สีต่างๆ เช่น เพอร์ริกไอออน (Fe^{3+}) ให้สีเหลืองอ่อน เพอร์รัสไอออน (Fe^{2+}) ให้สีเขียว คิวปริกไอออน (Cu^{2+}) ให้สีฟ้า นิกเกิลไอออน (Ni^{2+}) ให้สีน้ำตาล เป็นต้น

2.12.2 โซเดียมคาร์บอเนต หรือโซดาแอช สูตรเคมี คือ Na_2CO_3 มีลักษณะเป็นผงสีขาว ไม่มีกลิ่น สามารถดูดความชื้นจากอากาศได้ดี ละลายได้ในน้ำ มีฤทธิ์เป็นด่างแก่เมื่อละลายน้ำ มี

ความหนาแน่น 2.5 g/cm^3 มีจุดหลอมตัวค่อนข้างต่ำที่ 850°C ที่มักใช้เป็นส่วนผสมหลักในเคลือบ เพื่อลดจุดหลอมตัวของเคลือบและทำให้เคลือบมีความมันวาวและใสมากขึ้น

3. กระบวนการผลิต (Process)



ภาพที่ 1 กระบวนการผลิตกระเบื้องดินเผาในโรงงานผลิตกระเบื้องทั่วไป

ที่มา : คู่มือการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีสะอาดในการผลิตเซรามิก (2552)

การผลิตเซรามิกโดยการอัดแบบเป็นการอัดผงพร้อมๆกันกับการขึ้นรูปในแบบ อย่างไรก็ตาม การอัดแบบโดยใช้ผงวัตถุดิบเพียงอย่างเดียวสามารถทำได้ยาก เพราะถึงแม้ว่าผงวัตถุดิบซึ่งมีพื้นที่ผิวมากจะมีข้อดีคือ เมื่อได้รับความร้อนจะสามารถผนึกตัว (sinter) ได้ง่าย แล้วเกิดเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีเนื้อแน่นทั้งชิ้น แต่ก็มีข้อเสียคือ พื้นที่ผิวมาก มักทำให้อนุภาคมีแนวโน้มที่จะเกาะตัวเป็นกลุ่มก้อน (agglomerate) ได้มากเช่นกัน การเกิด agglomerate ที่มีขนาดใหญ่ทำให้เกิดรูพรุนขนาดใหญ่ซึ่งมีผลต่อกระบวนการเผา ทำให้เกิดปัญหาอื่นๆตามมาได้อีก

4. เทคโนโลยีที่ใช้ในการอัดแบบ (Compression technology)

การอัดขึ้นรูปผงเซรามิกในการผลิตทั่วไปมีทั้งแบบให้แรงอัดในทิศทางเดียว (uniaxial press) แบบให้แรงอัดในทุกทิศทางเท่าๆกัน (isostatic press) และแบบที่ให้แรงอัดและให้ความร้อนในเวลาเดียวกัน (hot press) การอัดขึ้นรูปผงเซรามิกในแนวดิ่ง เป็นวิธีการอัดขึ้นรูปเซรามิกให้ได้รูปร่างสม่ำเสมอในเวลารวดเร็ว การอัดที่ดีจะต้องทำให้ผงอัดตัวอย่างสม่ำเสมอทุกบริเวณ และไม่มีจุดบกพร่อง (defect) หรือรอยแตกร้าว (crack) อยู่ภายในชิ้นงาน ซึ่งการอัดขึ้นงานให้ได้ชิ้นงานที่มีความสม่ำเสมอ และมีรอยแตกร้าวน้อยนั้นขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น ความสามารถในการไหลตัวของผงเข้าเต็มในแบบก่อนที่จะถูกอัด การกระจายตัวของขนาดของผง การเติมสารเคมีลงในผงเพื่อช่วยลดแรงเสียดทานระหว่างผงและผนังแบบ ลักษณะของตัวแบบสำหรับอัดและเคลื่อนที่ของส่วนต่างๆ ของตัวแบบที่เอื้อให้ผงเคลื่อนที่ได้ดีในขณะอัด ลักษณะการให้แรงอัด และลักษณะหรือจังหวะการดันชิ้นงานออกจากแบบหลังการอัด โดยเครื่องอัดที่ใช้ ชนิดต่างๆจะออกแบบมาให้สามารถอัดขึ้นงานให้ได้ตามแบบที่กำหนด จิตความสามารถของแต่ละแบบก็แตกต่างกัน ความซับซ้อนของส่วนประกอบของตัวแบบสำหรับอัด และจังหวะการเคลื่อนที่ของประกอบแต่ละส่วนจะเป็นตัวกำหนดลักษณะความซับซ้อนของชิ้นงานที่สามารถจะทำได้ ส่วนขนาดแรงอัดจะเป็นตัวบอกถึงขนาดของชิ้นงานที่จะอัดได้

4.1 เครื่องอัดแบบ

เครื่องอัดสำหรับเซรามิกมีทั้งแบบขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้า และแบบที่ขับเคลื่อนด้วยระบบไฮดรอลิกส์

4.1.1 เครื่องอัดที่ขับเคลื่อนด้วยไฟฟ้า

เครื่องอัดที่ขับเคลื่อนด้วยไฟฟ้ามีความทนทาน อายุการใช้งาน และการบำรุงรักษาไม่ซับซ้อน สามารถอัดขึ้นงานได้ในปริมาณสั้นและมาก มีความทนทาน อายุการใช้งานและการบำรุงรักษาไม่ซับซ้อนสามารถอัดขึ้นงานได้มากในเวลาอันสั้น

4.1.2 เครื่องอัดที่ขับเคลื่อนด้วยระบบไฮดรอลิกส์

เครื่องอัดที่ขับเคลื่อนด้วยระบบไฮดรอลิกส์ สัมผัสได้เปรียบตรงที่สามารถอัดชิ้นงานที่มีความหนามากกว่าได้ และสามารถอัดค้ำที่ความดันที่ต้องการได้ ทำให้สามารถใช้กับผงที่มีการไหลตัวได้ไม่ดี แต่การบำรุงรักษาค่อนข้างยุ่งยากซับซ้อนกว่าแบบมีมอเตอร์ขับเคลื่อน ส่วนเครื่องอัดที่อัดด้วยแรงไฮดรอลิกส์สัมผัสได้เปรียบตรงที่สามารถอัดชิ้นงานที่มีความหนามากกว่าได้ และสามารถอัดค้ำที่ความดันที่ต้องการได้ ทำให้สามารถใช้กับผงที่มีการไหลตัวได้ไม่ดี แต่การบำรุงรักษาค่อนข้างยุ่งยากและซับซ้อนกว่าแบบที่ใช้มอเตอร์ขับเคลื่อน

การเลือกใช้งานนั้นขึ้นอยู่กับรูปแบบของผลิตภัณฑ์ และปริมาณของชิ้นงาน เปรียบเทียบจากการคิด ค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้นจากการผลิตชิ้นงานที่มีรูปร่างเรียบง่าย โดยพิจารณากระบวนการผลิต คือ การหล่อแบบ (slip casting) การฉีดแบบ (injection moulding) และการอัดแห้ง (dry pressing)

5. น้ำ (Water)

น้ำมีผลต่อการอ่อนตัวของเนื้อดิน ซึ่งคุณภาพของเนื้อดินและผลิตภัณฑ์ที่ได้ออกมาจากกระบวนการผลิตนั้นมีผลต่อคุณภาพกระเบื้อง เนื่องจาก หากมีปริมาณน้ำมากเกินไปก็จะทำให้เนื้อดินเหลวตัว ขึ้นรูปได้ยาก และคุณภาพของเนื้อดินหลังเผาจะทำให้เกิดรูพรุนที่สูง เกิดการหดตัวสูง ผลิตภัณฑ์ที่ได้ออกมาจะมีรูปร่างเปลี่ยนแปลงไป และอาจเกิดการแตกหักได้ง่าย และถ้ามีปริมาณของน้ำให้เนื้อดินต่ำ ก็จะทำให้ขึ้นรูปกระเบื้องได้ยาก เนื้อดินไม่เกาะติดกันเป็นรูปทรง ในธรรมชาติมักมีเกลือละลายอยู่ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง น้ำกระด้างมักมีเกลือของแมกนีเซียมหรือแคลเซียมละลายอยู่เล็กน้อยในรูปของ ซัลเฟต คาร์บอเนต หรือคลอไรด์ ในทางปฏิบัติพบว่าซัลเฟต มักมีผลให้ความหนืดเพิ่มสูงขึ้นเกิดเป็นผลิตภัณฑ์ที่อ่อนนุ่ม

6. การบ่ม (Aging)

เนื้อดินอาจเกิดการเปลี่ยนแปลงทั้งกายภาพและทางเคมีเมื่อผ่านการบ่ม (aging) ปัจจุบันเหล่านี้มีผลต่อการเปลี่ยนความหนืด ถ้าเนื้อดิน มีความหนืดมากขึ้น (softening) หลังจากเก็บไว้ อาจ

จำเป็นต้องเติมสารเพื่อให้เกิดการกระจายตัวมากขึ้น เหมือนตอนเตรียม เนื้อดิน ใหม่ๆ แต่ถ้าหากความชื้นลดลง ก็อาจจะต้องเก็บให้นานขึ้น

7. การอัดแบบ (Pressing)

เป็นกระบวนการซึ่งผงอนุภาควัตถุถูกบีบให้รวมเป็นเนื้อเดียวกันภายในช่องว่างที่กำหนดขนาดไว้ โดยการให้แรงดันในทิศทางเดียว (uniaxial pressing) ส่วนใหญ่มักเป็นแรงในแนวตั้งซึ่งควบคุมโดยการทำงานของเครื่องกระแทกแบบธรรมดา (mechanical ram) หรือแบบไฮดรอลิก ส์ (hydraulic ram) การอัดแบบเป็นกระบวนการที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรม เนื่องจากมีการผลิตที่ค่อนข้างสูง (productivity) และผลิตภัณฑ์ที่สามารถทำได้หลายรูปแบบและรูปร่าง โดยที่มีค่าพิถีพิถัน (tolerance) ที่สามารถยอมรับได้

Cooper & Eaton ได้สร้างแบบจำลอง อธิบายกลไกการอัด จัดเรียงตัวของเกรนูลไว้ว่า เป็นกลไกที่เกิดอย่างต่อเนื่อง เมื่อเติมเกรนูลที่ไหลตัวได้อย่างอิสระลงในแบบด้วยการใช้วงป้อนแบบเลื่อนได้ ซึ่งเป็นการควบคุมปริมาณเกรนูลไปในตัว เกรนูลจะจัดเรียงตัวกันแบบสม่ำเสมอ ลักษณะของเกรนูลที่จะทำให้เติมช่องว่างในแบบได้อย่างสม่ำเสมอและมีค่าความหนาแน่นบัลคซึ่งที่ ควร มีลักษณะเป็นทรงกลมเพื่อให้ไหลตัวได้อย่างอิสระ และไม่ควรมีขนาดละเอียดเกินไป ซึ่งจะทำให้การไหลตัวไม่ดี และเติมช่องแบบได้ไม่สม่ำเสมอในขณะที่เกรนูลที่มีขนาดใหญ่มากเกินไปถึงแม้จะไหลตัวได้ดี แต่ความหนาแน่นบัลคจะลดลง ต้องการแรงดันที่สูงขึ้น และจะได้ความหนาแน่นหลังเผาที่ต่ำกว่า

ค่าความหนาแน่นบัลคจึงเป็นตัวแปรที่สำคัญต่อการอัดแบบอัตโนมัติ เพราะเมื่อเติมลงในแบบ เกรนูลจะไหลอิสระ จนเต็มแบบ ภายใต้น้ำหนักของมันเอง ภายในเวลาที่กำหนดแต่ละรอบ 1-3 วินาที การเติมเกรนูลที่ดีจะทำให้ได้ปริมาณที่สม่ำเสมอ

การอัดที่ดี ไม่ควรใช้แรงดันที่มากเกินไป แต่ในขณะเดียวกันจะต้องมีแรงดันมากพอในการอัดชิ้นงานให้มีความหนาแน่นสูงและมีความสม่ำเสมอ ซึ่งช่วยให้เครื่องมือและชุดแบบอัดเกิดการสึกหรอ และเสียหายน้อยลง (Dessaiat *al.*, 2013) รวมทั้งต่อเครื่องอัดเองด้วย นอกจากนี้การใช้แรงดันไม่มาก ยังช่วยลดตำหนิในชิ้นงานโดยเฉพาะอย่างยิ่งการที่ปลายชิ้นงานหลุดออก (end-capping) คีริบ (finnig) และการแยก (delamination)

8. การเผา (Firing)

วัตถุประสงค์หลักของการเผาคือ การเพิ่มความหนาแน่นให้กับชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปแล้ว ส่งผลให้ชิ้นงานมีความแข็งแรงมากขึ้น มีความทนทาน แต่การเผาที่ไม่เหมาะสมก็ทำให้เกิดตำหนิบนผลิตภัณฑ์ หรือแม้กระทั่งทำให้เกิดการแตกร้าวและเสียหายได้ เช่นกัน การพิจารณาขั้นตอนการเผาจึงมีความจำเป็น ต้องเข้าใจเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้น เมื่อชิ้นงานได้รับความร้อนแล้วนำข้อควรระวังมาประกอบตารางผลิตภัณฑ์แต่ละชนิด ยกตัวอย่างเช่น การเผาชิ้นงานที่มีดินเป็นส่วนประกอบหลัก จะต้องคำนึงถึงอุณหภูมิของการระเหยน้ำที่เกาะอยู่ที่ผิว และของน้ำที่อยู่ในผลึกดิน และช่วงอุณหภูมิที่ 573°C ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่ควอตซ์อิสระในดินเกิดการเปลี่ยนเฟสส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนเฟสอย่างฉับพลัน ถ้าไม่ควบคุมอัตราการเพิ่มอุณหภูมิในช่วงนี้ให้เหมาะสม ชิ้นงานอาจเกิดการแตกร้าวได้

การวิเคราะห์หาโปรแกรมการเผาเบื้องต้น หรืออุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสมในการเผา ผลิตภัณฑ์แต่ละชนิด สามารถทำได้ผสมผสานเทคนิคการวิเคราะห์ทางความร้อน คือ การวิเคราะห์น้ำหนักที่เปลี่ยนไปเมื่อได้รับความร้อน (Thermogravimetric analysis, TGA) การวิเคราะห์ความร้อนที่เปลี่ยนไป (Differential thermal analysis, DTA) และการ วัดขนาดของชิ้นงานที่เปลี่ยนไป (Dilatometry)

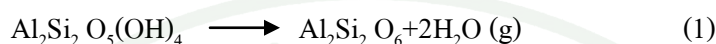
โดยทั่วไปอาจแบ่งขั้นตอนการเผาออกเป็น 3 ระยะคือ การเผาไหม้ของสารอินทรีย์ การสลายของสารอินทรีย์ และการเผาผนึก (sintering)

8.1 การเผาไหม้สารอินทรีย์

เป็นขั้นตอนที่สำคัญ เพราะ ถ้าเผาไหม้ไม่หมด หรือเกิดปฏิกิริยาในระหว่างการเผาไหม้โดยที่ไม่สามารถควบคุมได้ จะก่อให้เกิดตำหนิชนิดต่างๆ ขึ้นในผลิตภัณฑ์ พฤติกรรมการสลายสารอินทรีย์ขึ้นอยู่กับ ชนิด และปริมาณของสารเชื่อมประสาน หรือตัวเติมอื่นๆ ขนาดผลิตภัณฑ์ ลักษณะการวางชิ้นงานในเตา อัตราการให้ความร้อน และบรรยากาศในเตา เวลาใช้ในการเผาไหม้ขึ้นอยู่กับ ระยะทางที่ก๊าซจากปฏิกิริยาจะต้องแพร่ออกจากชิ้นงาน ดังนั้น การเลือกใช้สารเชื่อมประสานและการควบคุมอุณหภูมิและบรรยากาศการเผาให้เหมาะสมจึงเป็นสิ่งสำคัญ เพื่อให้ชิ้นงานไม่เกิดการเสียรูป (deformation) การบิดเบี้ยว (distortion) รอยแตก หรือรูพรุนที่ขยายตัวขึ้น

8.2 การสลายตัวของสารอนินทรีย์

ในชิ้นงานที่มีดินเป็นองค์ประกอบ น้ำให้ผลึกดินจะเริ่มสลายออกมาตั้งแต่ 450-700°C ดังสมการ



นอกจากนี้ยังมีสารอนินทรีย์อื่นที่สลายตัวได้ นอกจากนี้ คาร์บอนที่ยังหลงเหลืออยู่ในชิ้นงาน ถ้าไม่สามารถเผาไหม้ได้หมดในช่วงแรก หรือมีออกซิเจนไม่พออาจเกิดเป็นคาร์บอนมอนนอกไซด์ ซึ่งสามารถทำปฏิกิริยาต่อกับธาตุทรานซิชัน ทำให้เกิดดำหนิสีดำในเนื้อผลิตภัณฑ์ได้

9. เคล็ดลับการผลิต (Trick)

9.1 การผลิตให้ได้โครงสร้างจุลภาคที่มีเกรนขนาดละเอียดจะต้องใช้วัตถุดิบเริ่มต้นที่มีขนาดเล็ก มีรูปร่างค่อนข้างกลม และมีกระจายขนาดที่แคบ ไม่มี agglomerate

9.2 ถ้าต้องการผลิตภัณฑ์ที่มีความหนาแน่นสูง ต้องหลีกเลี่ยงการที่อนุภาคจะโตมีขนาดหยาบสามารถทำได้โดยการเติมสารช่วยปรับปรุงขนาด หรือควบคุมบรรยากาศการเผาเพื่อยับยั้งการเคลื่อนที่ของไอระเหยจากผิว

9.3 ผลิตภัณฑ์ที่มีความสม่ำเสมอ มีโครงสร้างจุลภาคที่สม่ำเสมอ ทำได้จากชิ้นงานก่อนเผาที่ไม่มีตำหนิและมีโครงสร้างสม่ำเสมอกันเท่านั้น ตำหนิที่เกิดขึ้นในชิ้นงานก่อนเผามักจะถูกทำให้ใหญ่ขึ้นในระหว่างการเผา

9.4 แกรนูลที่มีขนาดใหญ่เกินไป มักมีผลเสียต่อการเพิ่มความหนาแน่น การเลือกใช้สาร ได้ปบางตัวอาจทำได้โดยพิจารณาจาก ขนาดของไอออนที่ไม่พอดีกัน และประจุระหว่างสารได้ปกับเนื้องานเพื่อลดการโตขึ้นของเกรน

9.5 การเลือกใช้บรรยากาศการเผาที่เหมาะสม พิจารณาได้จากความสามารถในการละลายของก๊าซ (gas solubility) ปฏิกิริยาระหว่างบรรยากาศกับผงอัด และสารได้ป ก๊าซที่ละลายได้น้อยในเนื้อ

งานมักจะเหลือเป็นรูปพรุนอยู่ในชิ้นงานหลังเผาผลึก บรรยากาศอาจทำปฏิกิริยากับสารได้ไปแล้ว ระบายออกไป นอกจากนี้ stoichiometry และประจุของผงอาจเปลี่ยนไปเพราะบรรยากาศภายในเตา

10. ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในการเผาเนื้อดินเซรามิก (Reaction)

โครงสร้างเซรามิก (Ceramic structure) องค์ประกอบหลักของผลิตภัณฑ์เซรามิกประกอบด้วยสารประกอบอนินทรีย์ที่ยึดเกาะกันด้วยพันธะปฐมภูมิชนิดพันธะไอออนิกเป็นส่วนใหญ่ ตัวอย่างเช่น อะลูมินา (Al_2O_3), ซิลิกา (SiO_2), เซอร์โคเนีย (ZrO_2) เป็นต้น แต่สารประกอบเซรามิกอาจเกิดจากการยึดเกาะของพันธะปฐมภูมิชนิดโควาเลนต์ได้เช่นกัน ตัวอย่าง เช่น ซิลิคอนคาร์ไบด์ (SiC), ทังสเตนคาร์ไบด์ (WC) รวมทั้งวัสดุกึ่งตัวนำเช่น ซิลิคอน (Si) ดังนั้นการเกิดโครงสร้างของสารประกอบเซรามิกจึงเกิดจากการเกาะกันของพันธะต่างๆในเนื้อดิน ขึ้นอยู่กับสารประกอบแต่ละชนิด (นุชนภา, 2556)

เนื้อดินก่อนการเผา จะประกอบด้วยผลึกของ ควอตซ์และเฟลด์สปาร์ซึ่งมีขนาดใหญ่กระจายตัวอยู่ในผลึกของแร่ดินที่มีขนาดเล็กกว่าและทำหน้าที่เป็นเมทริกซ์ (matrix) ในการทำให้เกิดการอบผนึกของอนุภาคดินและให้ความแข็งแรงแก่เนื้อดิน จะต้องกำจัดรูปพรุนในเมทริกซ์ ซึ่งมีอยู่ประมาณ 20% เสียก่อน ซึ่งปกติจะเกิดขึ้นโดยการทำงานของเฟลด์สปาร์เมื่อมีการหลอมเหลวผ่านกระบวนการที่เรียกว่า การซิลเทอ์แบบการไหลของของเหลวที่หนืด หรือ Viscous flow sintering ในการเผาเนื้อดินเซรามิกไตรแอกเซียสนั้น องค์ประกอบต่างๆของเนื้อดินจะเกิดปฏิกิริยาทางความร้อนที่อุณหภูมิแตกต่างกันไป ซึ่งแต่ละปฏิกิริยานั้นอาจมีการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ เช่น การขยายตัวร่วมด้วย ฉะนั้นเพื่อให้เกิดความเข้าใจจึงขอกล่าวถึงการเปลี่ยนแปลงของเนื้อดินในช่วงอุณหภูมิสำคัญต่างๆ ดังนี้

ช่วงอุณหภูมิ 100-200 °C

ในช่วงนี้น้ำที่เกาะอยู่ที่ผิวของอนุภาคดินจะมีการระเหยกลายเป็นไอ ทำให้ดินมีการหดตัวเล็กน้อย ซึ่งการระเหยของน้ำจะเป็นปฏิกิริยาคูดความร้อน และเห็นได้อย่างชัดเจนในดินที่มีขนาดอนุภาคเล็ก การให้ความร้อนควรระมัดระวังการระเบิด ถ้าหากมีปริมาณความชื้นหลงเหลือในดินค่อนข้างมาก

ช่วงอุณหภูมิ 300-700 °C

อินทรีย์สารที่ปะปนอยู่ในดินจะเกิดการสลายตัวกลายเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และ ไอ น้ำ การเผาในช่วงนี้ถ้าหากว่าเร็วเกินไปหรือปริมาณออกซิเจนน้อยเกินไป อาจทำให้เกิดการเผาไหม้ ไม่สมบูรณ์และเกิดตำหนิที่เรียกว่าแกนดำ (Black coring) ได้ ในช่วงนี้เนื้อดินจะมีการหดตัว

ช่วงอุณหภูมิ 450-600 °C

เกิดปฏิกิริยาขจัดกลุ่มไฮดรอกซิล (Dehydroxylation) ของแร่เคโอลินไนต์ ซึ่งคือกระบวนการ ที่กลุ่มไฮดรอกซิล (hydroxyl group) หลุดออกไปในรูปไอน้ำ เคโอลินไนต์มีการเปลี่ยนโครงสร้าง กลายเป็นมีตาเคโอลินที่มีขนาดเล็กลง มีโครงสร้างแบบอสัณฐาน และดินมีการขยายตัวเนื่องจากเกิด โพรงอากาศขึ้น

ช่วงอุณหภูมิ 573 °C

แร่ควอตซ์ที่มีอยู่ในเนื้อดินจะมีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจาก แอลฟาเป็นบีตา และมีการ ขยายตัวของโครงผลึก ซึ่งในการเผาผลิตภัณฑ์จนถึงอุณหภูมิสูงสุดแล้วปล่อยให้ผลิตภัณฑ์เย็นตัวลง นั้น ถ้าหากปริมาณของควอตซ์มีอยู่มากและมีขนาดใหญ่อาจทำให้เกิดการแตกร้าวของผลิตภัณฑ์ได้ เนื่องจากการหดตัวจากการเปลี่ยนโครงสร้างของผลึกควอตซ์

ช่วงอุณหภูมิ 980 °C

มีตาเคโอลินเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างกลายเป็นสปิเนล และมีการปลดปล่อยซิลิกา รอสัญฐานออกมา ผลึกมีขนาดเล็กลง ไม่มีการสูญเสียมวล โดยทั่วไป ปฏิกิริยาเคมีที่เกิดหลังจาก อุณหภูมิ 900 °C จะเป็นแบบย้อนกลับไม่ได้ ในเนื้อดินบางชนิดมีสารทำให้เป็นฟลักซ์ เช่น แร่อัล ไคลด์ ปะปนอยู่เป็นปริมาณมากในเมทริกซ์ การเกิดการหนาแน่นอบพนิก (Densification) ของเนื้อดิน อาจเกิดขึ้นก่อนอุณหภูมิ 1,000 °C

ช่วงอุณหภูมิ 1,100-1,200 °C

สปีเนลมีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้าง เป็นมุลไลต์ และมี การปลดปล่อยซิลิกาออสัญฐานออกมา ผลึกของมุลไลต์ที่เกิดจากการสลายตัวของแร่เคโอลิไนต์ซึ่งพบได้ในรอยดิน โดยปกติจะเป็นผลึกที่มีขนาดเล็กและสั้น ในเอกสารอ้างอิงโดยมากจะเรียกผลึกมุลไลต์ชนิดนี้ว่ามุลไลต์ปฐมภูมิ เนื่องจากเป็นผลึกมุลไลต์ที่เกิดขึ้นเป็นอันดับแรก ในกรณีที่ดินนั้นมีสารที่มีการหลอมตัว การโตของผลึกมุลไลต์นี้จะเกิดขึ้นได้ ผลึกมุลไลต์เป็นส่วนสำคัญที่ทำให้เกิดความแข็งแรงของเนื้อดิน โดยเฉพาะอย่างยิ่งในเนื้อดินพอร์ซเลน

ช่วงอุณหภูมิ 1,150 °C

เฟลด์สปาร์เกิดการหลอมละลาย ทำปฏิกิริยากับซิลิกาออสัญฐานและผลึกขนาดเล็กของควอตซ์ แอลคาไลในเฟลด์สปาร์จะถูกกักไว้ในโครงสร้างจนกระทั่งเกิดการหลอมเหลวของเฟลด์สปาร์ ณ อุณหภูมินี้แอลคาไลสามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระ เมื่อแอลคาไลเคลื่อนที่ออกจากโครงสร้างของ เฟลด์สปาร์ เฟลด์สปาร์ จะมีองค์ประกอบทางเคมีคล้ายคลึงกับมุลไลต์ เมื่อปล่อยให้เย็นตัวลงผลึกของมุลไลต์นี้จะโตขึ้นและมีผลึกรูปเข็มขนาดยาว ในบางเอกสารอ้างอิงจะเรียกผลึกมุลไลต์ชนิดนี้ว่า มุลไลต์ชนิดทุติยภูมิ เนื่องจากเป็นผลึกมุลไลต์ที่เกิดขึ้นเป็นอันดับสอง และเนื่องจากของเหลวของเฟลด์สปาร์ที่หลอมตัวทำการ โตของผลึกมุลไลต์ชนิดนี้เกิดขึ้นได้ดีผลึกจึงมีขนาดใหญ่กว่ามุลไลต์ปฐมภูมิในงานวิจัยบางชิ้น

11. การทดสอบกระเบื้อง

11.1 ร้อยละการดูดซึมน้ำ (% Water absorption)

การดูดซึมน้ำใช้เป็นค่าบ่งบอกถึงความพรุนตัวของวัตถุดิบที่จะช่วยให้ทราบถึงอุณหภูมิเผาสุกตัว (Vitrification) ถ้าวัตถุดิบมีความพรุนตัวมากอาจไม่เหมาะในการทำกระเบื้องหรือเครื่องสุขภัณฑ์ที่ต้องการให้มีความพรุนตัวเป็นศูนย์ แต่ถ้าวัตถุดิบนั้นมีความพรุนตัวต่ำมากหลังจากการเผาที่อุณหภูมิต่ำกว่า 1,100°C อาจไม่เหมาะสมกับผลิตภัณฑ์ที่ต้องเผาอุณหภูมิสูง เนื่องจากเกิดการยุบตัวได้ง่าย เป็นต้น

การดูดซึมน้ำของวัสดุบิวิเคราะห์โดยนำวัสดุบิหลังขึ้นรูปและแห้งตัวแล้ว จากนั้นเผาที่อุณหภูมิ 1100°C ทำการชั่งน้ำหนัก (W_1) แล้วจึงนำไปต้มน้ำเดือด 5 ชั่วโมง และทิ้งไว้ในน้ำอีก 24 ชั่วโมงจึงนำออกมาชั่งน้ำหนักหลังต้ม (W_2) และหาค่าร้อยละการดูดซึมน้ำ (ASTM C 373 -88) ดังนี้

$$\text{ร้อยละการดูดซึมน้ำ} = \left(\frac{W_2 - W_1}{W_1} \right) \times 100 \quad (2)$$

W_1 = น้ำหนักก่อนต้ม (กรัม)

W_2 = น้ำหนักหลังต้ม (กรัม)

11.2 ค่าความแข็งแรง (Strength)

การทดสอบความแข็งแรง ต่อแรงดัดเป็นการตรวจสอบโดยการวัดความส การมารถในการต้านทานต่อแรงดัด (Bending Load) และรายงานค่าทดสอบเป็นค่าโมดูลัสของการแตกหัก (Modulus of rupture; MOR) วิธีหาความแข็งแรงต่อแรงดัดนี้ใช้กันมากในการควบคุมคุณภาพของน้ำดิน รวมถึงผลิตภัณฑ์เซรามิก ตั้งแต่ชิ้นงานดิบ ชิ้นงานหลังแห้ง และชิ้นงานหลังเผา

ค่าความแข็งแรงด้านการแตกหัก (ISO 10545-4) เป็นมาตรฐานการทดสอบสำหรับวัดค่าโมดูลัสของการแตกหัก (modulus of rupture - MOR) และค่าความแข็งแรงด้านการแตกหัก (breaking strength) ของ กระเบื้องเซรามิก โดยให้แรงกดที่แนวกึ่งกลางของกระเบื้อง ก่อนการทดสอบต้องทำความสะอาดกระเบื้องแล้วนำไปอบในเตาอุณหภูมิ 110±5 °C เพื่อไล่ความชื้นภายในแผ่นเซรามิก จากนั้นนำกระเบื้องเซรามิก ทดสอบไปวางบนแท่นรอง (cylindrical support rods) ทั้งสองแท่ง ถ้าเป็น กระเบื้องเซรามิก เคลือบให้เอาด้านที่เคลือบไว้ด้านบนโดยให้แท่งกด (central cylindrical rod) อยู่ในแนวกึ่งกลางด้านบนของ กระเบื้องเซรามิก แท่นรองและแท่งกดทั้งสามนี้ต้องหุ้มด้วยยางที่มีค่าความแข็งกับ 50±5 IRHD (The International Rubber Hardness Degrees) (ทดสอบตามมาตรฐาน ISO 48) โดยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและความหนาแน่นของชั้นยางที่หุ้มแท่นรองและแท่งกดจะขึ้นอยู่กับความกว้าง กระเบื้องเซรามิก ที่ใช้ทดสอบ จากนั้นใส่แรงกดลงบน กระเบื้องเซรามิก ด้วยอัตราเร็วที่ทำให้ความเค้นของ กระเบื้องเซรามิก เพิ่มขึ้นในอัตรา 1±0.2 นิวตันต่อตารางมิลลิเมตรต่อวินาที จน กระเบื้องเซรามิก แตกออกจากกัน (กนิษฐ์, 2551) ค่าความแข็งแรงด้านการแตกหัก (breaking strength) (3) และค่าโมดูลัสการแตกหัก (modulus of rupture - MOR) (4) สามารถคำนวณได้จาก

$$F_{bs} = \frac{F_{bt} l_2}{b} \quad (3)$$

$$\sigma F_{bl} = \frac{3F_{bs}}{bh^2} \quad (4)$$

โดยให้

F_{bs} คือ ค่าความแข็งแรงด้านการแตกหัก (breaking strength) (นิวตัน)

l_2 คือ ระยะห่างของแท่งรอง (มิลลิเมตร)

b คือ ความกว้างของกระเบื้องเซรามิก (มิลลิเมตร)

σF_{bl} คือ ค่าโมดูลัสการแตกร้าว (modulus of rupture-MOR) (นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร)

h คือ ความหนาตรงแนวหักของกระเบื้องเซรามิก (มิลลิเมตร)

จำนวนตัวอย่างที่ใช้ทดสอบกระเบื้องเซรามิกที่มีความยาว (L) $18 < L < 48$ มม. ใช้กระเบื้องจำนวน 10 ชิ้น ถ้าขนาด $L > 48$ มม. ใช้ 7 ชิ้น

12. วัสดุปอซโซลาน (Pozzolanic material)

วัสดุปอซโซลานเป็นวัสดุที่มีซิลิกาและอลูมินาเป็นองค์ประกอบหลัก โดยทั่วไปวัสดุปอซโซลานจะไม่มีสมบัติเชื่อมประสานแต่ถ้าวัสดุปอซโซลานมีน้ำหรือความชื้นที่เพียงพอจะสามารถทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่อุณหภูมิปกติได้สารที่มีสมบัติเชื่อมประสาน (ปริญญญาและชัย, 2553) วัสดุปอซโซลานที่นำมาใช้ประโยชน์มีแหล่งที่มาจาก 2 แหล่งได้แก่ปอซโซลานที่ได้จากธรรมชาติและปอซโซลานที่ได้จากอุตสาหกรรม

12.1 มาตรฐาน ASTM C618 แยกสารปอซโซลานออกเป็น 3 ประเภท คือ

12.1.1 Class N - วัสดุปอซโซลานธรรมชาติที่ต้องปรับปรุงหรือไม่ต้องปรับปรุงคุณภาพด้วยความร้อนเช่นหินพัมมิไซต์ (Pumicite) หินโอปอลไลน์ (Opaline) หินเชิร์ต (Cherts) และหินเชลล์ (Shales) และถ้าเขาไฟ วัสดุปอซโซลานธรรมชาติที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยความร้อนในช่วงอุณหภูมิ $500-1,100^{\circ}\text{C}$ เพื่อให้ได้สมบัติที่เหมาะสมเช่นดินบางชนิด

12.1.2 Class F - เกิดจากการเผาถ่านหินประเภทแอนทราไซต์ (Anthracite) หรือบิทูมินัส (Bituminous) มีปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์น้อยกว่า 5% มีคุณสมบัติการเป็นซีเมนต์อยู่น้อยแต่มีคุณสมบัติของวัสดุปอซโซลาน

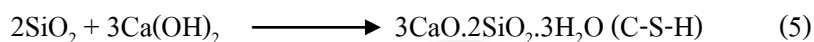
12.1.3 Class C - เกิดจากการเผาถ่านหินประเภทลิกไนต์ (Lignite) หรือซับบิทูมินัส (Subbituminous) มีปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์มากกว่า 10% มีคุณสมบัติของซีเมนต์และคุณสมบัติปอซโซลานในตัวเององค์ประกอบซิลิกาที่ไวต่อปฏิกิริยา (Reactive Silica) ของสารปอซโซลานสามารถทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ในซีเมนต์เพสต์และให้แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต ($\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$: C-S-H) ซึ่งมีคุณสมบัติเชื่อมประสานเพิ่มขึ้นอีกทั้งสารปอซโซลานยังช่วยลดความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชันและช่วยปรับปรุงความต้านทานต่อซัลเฟตรวมทั้งเพิ่มกำลังอัดประลัยด้วย (เจริญวุฒิ, 2546)

12.2 ปฏิกิริยาไฮเดรชันและปฏิกิริยาปอซโซลาน ปฏิกิริยาไฮเดรชัน เป็นปฏิกิริยาแรกที่เกิดขึ้นในคอนกรีตโดยมีสารตั้งต้นคือ $\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ และ H_2O เมื่อทำปฏิกิริยาแล้วจะได้สารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต C-S-H ซึ่งมีคุณสมบัติการเชื่อมประสานและสารประกอบแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ปฏิกิริยาปอซโซโลนิก (Pozzolanic Reaction) เป็นปฏิกิริยาขั้นที่ 2 มีสารตั้งต้นคือแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันเข้าทำปฏิกิริยากับซิลิกา (SiO_2) และอลูมินา (Al_2O_3) เกิดเป็นสาร C-S-H ซึ่งมีคุณสมบัติเชื่อมประสานเพิ่มขึ้น

ปริมาณ C-S-H ที่เพิ่มขึ้นนี้จะช่วยปรับปรุงโครงสร้างภายในให้มีความทึบแน่นมากขึ้น ทำให้มีความชื้นได้ต่ำลงและช่วยเพิ่มกำลังให้แก่คอนกรีตหรือมอร์ต้า ส่งผลถึงความทนทานของคอนกรีตด้วย

การเกิดปฏิกิริยา Pozzolanic เป็นปฏิกิริยาระหว่างปูนซีเมนต์และ Soil Silica หรือ Alumina เพื่อก่อให้เกิดการประสานตัวซึ่งกันและกัน ซึ่งเป็นส่วนประกอบสำคัญที่ทำให้กำลังของส่วนผสมดิน - ปูนซีเมนต์เพิ่มมากขึ้นเป็นส่วนหนึ่งของปฏิกิริยา Pozzolanic และที่สภาวะ pH ที่สูง การละลายตัว (Solubility) ของ Silica และ Alumina จะเพิ่มมากขึ้นด้วย ซึ่ง pH มีค่าเป็นด่างจะทำให้ Silica ที่ละลายตัวออกจากโครงสร้างของอนุภาคดินเหนียวมาทำปฏิกิริยากับ Ca^{2+} แล้วเกิดเป็นสารประกอบใหม่ซึ่งเป็นผลึกของ Calcium Silicate Hydrate (CSH) Dimond, White และ Dolch

(5)พบว่านอกจากจะได้สารประกอบประเภท CSH แล้ว ยังได้สารประกอบประเภท Calcium Aluminate Hydrate (CAH) อีกด้วย ดังสมการ (จตุรงค์ และ คณะ, 2553)



ปฏิกิริยา Aluminate โดยพื้นฐานแล้วจะเกิดทันทีและจะเกิดที่จุดต่อระหว่างขอบและผิวหน้าของดินเดิม สำหรับสารประกอบ Silicate จะเกิดปฏิกิริยาที่ช้ากว่าและแรงยึดเกาะซึ่งเกิดจากสารประกอบ Aluminate จะไม่มีความแข็งแรงเหมือนกับแรงยึดเกาะที่เกิดขึ้นอย่างช้าๆ ของสารประกอบ Silicate

13. เถ้าลอยลิกไนต์

เถ้าลอยลิกไนต์เป็นวัสดุเหลือใช้ที่เกิดขึ้นจากการเผาถ่านหินลิกไนต์ในกระบวนการผลิตพลังงานไฟฟ้า ถ่านหินที่พบในประเทศไทยเป็นถ่านหินประเภท Lignite ถึง Sub-bituminous มีค่าความร้อนตั้งแต่ 3,000-6,500 Kcal/g แหล่งที่พบสะสมตัวอยู่กระจายตามภาคต่างๆ ของประเทศไทย ซึ่งเกิดจากการกักที่เหลือจากการเผาไหม้ที่ได้จากการเผาถ่านหินใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับอุตสาหกรรม โดยเฉพาะอย่างยิ่งการผลิตกระแสไฟฟ้า โดยนำถ่านหินมาบดเป็นผงถ่านก่อนเข้าสู่กระบวนการเผาไหม้ในเตาเผา การเผาไหม้นั้นจะได้เถ้าลอยออกมาปริมาณ 80 % ส่วนเถ้าหนักประมาณ 20 % โดยเถ้าหนัก (Bottom Ash) มีขนาดค่อนข้างใหญ่ เนื่องจากอนุภาคที่มีสูงจะหลอม อนุภาคของเถ้าที่เหลือจากการเผาไหม้ เกิดการปะทะกันของอนุภาคเถ้าและบางส่วนจะปะทะกับผนังเตาเป็นก้อนที่ใหญ่ขึ้นเมื่อมีน้ำหนักรวมมากขึ้นก็จะตกลงสู่ก้นเตา และยังมีอนุภาคขนาดเล็กที่หลงเหลืออยู่ลอยขึ้นไปกับไอร้อน ไปยังบริเวณที่มีอนุภาคที่มีต่ำกว่า การลดอนุภาคอย่างรวดเร็ว ทำให้อนุภาคของเถ้าที่ใกล้จุดหลอมเหลวกลับเย็นตัวลงและรวมตัวกันเกิดเป็นอนุภาคทรงกลมในขนาดต่างๆ ที่เรียกว่า เถ้าลอย (Fly Ash) ซึ่งเถ้าลอยจะถูกดักจับด้วยระบบไฟฟ้าสถิต (Electrostatic Precipitator) เพื่อแยกเถ้าลอยไม่ให้ลอยปะปนไปสู่บรรยากาศ (สมชัย, 2537) โดยที่เถ้าลอยลิกไนต์เป็นเถ้าที่ถูกแยกออกจากลมร้อนที่พัดออกจากปล่องควันและถูกจับไว้โดย Electrostatic Precipitator เถ้าลอยลิกไนต์มีคุณสมบัติเป็นวัสดุ Pozzolan มีส่วนประกอบหลักคือ SiO_2 Al_2O_3 CaO เมื่อผสมกับน้ำ CaO ส่วนที่เป็น Free Lime จะทำปฏิกิริยากับน้ำเป็น Ca(OH)_2 ซึ่งทำปฏิกิริยากับ SiO_2 และ

Al_2O_3 เกิดเป็นสารประกอบ Calcium Silicate Hydrate และ Calcium Aluminate Hydrate ซึ่งมีคุณสมบัติประสาน (Cementitious)

13.1 ประเภทของเถ้าลอยลิกไนต์ แบ่งเถ้าลอยลิกไนต์เป็น 2 ประเภท(ปริญญา, 2549) ตามปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ได้แก่

เถ้าลอยลิกไนต์ที่ได้จากเผาถ่านหินพวกแอนทราไซต์บิทูมินัสซึ่งมีปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์น้อยกว่า 10%

เถ้าลอยที่ได้จากเผาถ่านหินพวกลิกไนต์บิทูมินัสซึ่งมีปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์อยู่ระหว่าง 15-35%

13.2 คุณสมบัติพื้นฐานเถ้าลอยลิกไนต์

เถ้าลอยลิกไนต์เกิดจากการนำถ่านหินลิกไนต์มาบดให้ละเอียดและส่งเข้าเตาเผาที่มีอากาศเพียงพอโดยเถ้าลอยลิกไนต์เป็นเถ้าที่ถูกแยกออกจากความร้อนที่พุดออกจากปล่องควันและถูกจับโดยเครื่อง Electrostatic Precipitator ที่ใช้ผลิตกระแสไฟฟ้าจากถ่านหินลิกไนต์การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (2541) ได้ทำการจำแนกคุณสมบัติเถ้าลอยลิกไนต์ ได้ดังนี้

13.3 คุณภาพทางกายภาพ

เถ้าลอยลิกไนต์ออกมาจากเตาเผาใหม่ๆเป็นผงมีสีแดงเมื่อปล่อยให้เย็นลงจะมีสีเทาเข้มขึ้นจากการวิเคราะห์เถ้าลอยลิกไนต์จากแม่เมาะโดยใช้กล้องจุลทรรศน์กำลังขยาย 100 เท่าพบว่ารูปร่างของเถ้าลอยลิกไนต์มีลักษณะค่อนข้างกลมและกลม (Sub-round toround) และมีขนาดตั้งแต่ 0.03 ถึง 0.42 mm จากการหาค่าความถ่วงจำเพาะของเถ้าลอยลิกไนต์พบว่าความถ่วงจำเพาะมีค่าอยู่ระหว่าง 2.23-2.48 g/cm^3 (การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย, 2541) เถ้าลอยลิกไนต์มีขนาดระหว่าง 0.001-1.000 mm โดยทั่วไปแต่ที่เก็บมาแล้วดูจากกล้องจุลทรรศน์มีขนาด 0.030-0.042 mm อนุภาคของเถ้าลอยลิกไนต์มีลักษณะเป็นทรงกลมผิวเรียบขนาดเล็กลงกว่า 1-7 ไมครอน (1 μ หรือ 0.001 มิลลิเมตร) และมีค่าความถ่วงจำเพาะของเถ้าลอยลิกไนต์อยู่ในช่วง 1.97 – 3.02 g/cm^3 และเถ้าลอยลิกไนต์มีส่วนประกอบของธาตุเหล็กสูงจึงทำให้ค่าความถ่วงจำเพาะมีค่าสูงตามไปด้วย (วิมณทนา, 2555)

13.4 คุณสมบัติทางเคมี

มีรายงานว่าเถ้าลอยลิกไนต์มีพีเอชอยู่ระหว่าง 8-12 จึงมีคุณสมบัติเป็นด่างมีส่วนประกอบหลักคือ SiO_2 , Al_2O_3 , CaO เถ้าลอยลิกไนต์มีสภาพเป็นผงเมื่อสัมผัสกับน้ำ CaO ส่วนที่เป็น Free Lime จะทำปฏิกิริยากับน้ำเป็น Ca(OH)_2 ซึ่งทำปฏิกิริยากับ SiO_2 และ Al_2O_3 เกิดเป็นสารประกอบใหม่คือ Calcium Silicate Hydrate และ Calcium Aluminate Hydrate ซึ่งมีคุณสมบัติซีดเกาะ (Cementitious) เพิ่มขึ้นตามเวลา (ชัย และคณะ, 2542)

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยลิกไนต์

เถ้าลอย	องค์ประกอบทางเคมี โดยน้ำหนัก %
Na_2O	0.87
MgO	2.37
Al_2O_3	18.46
SiO_2	35.35
P_2O_5	0.21
SO_3	4.01
K_2O	2.77
CaO	19.81
TiO_2	0.44
MnO_2	0.19
Fe_2O_3	15.51

ที่มา : ผลการวิเคราะห์เถ้าลอย (โรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง, 2555)

14. เถ้าแกลบ

ประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรมและการปลูกข้าวเป็นพืชเศรษฐกิจ เนื่องจากคนไทยบริโภคข้าวเป็นอาหารหลัก ทำให้ประเทศไทยมีการผลิตข้าวเป็นปริมาณสูง ซึ่งทำให้มีแกลบในปริมาณที่สูงด้วยเช่นกัน เพราะแกลบเป็นวัสดุเหลือใช้จากโรงสีข้าว ในปัจจุบัน ได้มีการนำแกลบมาเป็นวัตถุดิบเพื่อใช้เป็นเชื้อเพลิงในการต้มน้ำให้กลา ยเป็นไอน้ำในโรงผลิตกระแสไฟฟ้า เป็นการใช้ประโยชน์จากแกลบอย่างคุ้มค่า นอกจากนี้แล้วยังได้เถ้าแกลบ ซึ่งเป็นวัสดุเหลือใช้จากกระบวนการผลิตไฟฟ้าอีกด้วย ดังนั้น เถ้าแกลบ (Rice husk ash) จึงเป็นทางเลือกสำหรับใช้เป็นวัสดุทดแทน ในอุตสาหกรรม หรือ ผลิตภัณฑ์ เป็นองค์ประกอบหลัก ของ ซีเมนต์ คอนกรีต อิฐมวลเบา (Chandra *et al.*, 2008) นอกจากนี้ยังประกอบด้วยสารอนินทรีย์ เช่น ออกไซด์ของธาตุอัลคาไลด์ (K, Mg, Na, Ca)

โดยทั่วไปเถ้าแกลบมีซิลิกาเป็นองค์ประกอบหลักประมาณ 49-98% คาร์บอนที่เหลืออยู่ในเถ้าแกลบ ซึ่งไม่สามารถกำจัดออกได้ โดยคาร์บอนที่เหลืออยู่ถูกเคลือบด้วยซิลิกา หรือคาร์บอนนี้จะติดอยู่กับโครงสร้างของซิลิกา ซิลิกานั้นเป็นที่ทราบกันดีว่าเป็นสารที่มีฤทธิ์เป็นกรดและสามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนกับสารเคมีอื่นได้ สำหรับใน Rice husk ash นั้น ความเป็นกรดนี้จะปฏิกิริยาถึงความไม่บริสุทธิ์ของสารในส่วนที่เป็นโลหะออกไซด์ (เบญจรัตน์ และวิริยญา , 2550) เนื่องจากบนผิวของซิลิกามีหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) อยู่ในปริมาณมาก พื้นที่ผิวของซิลิกาจึงมีความเป็นขี้และมีความว่องไวต่อปฏิกิริยาเคมีต่างๆสูง ซึ่งปริมาณของซิลิกาและเขม่าดำนั้นขึ้นอยู่กับกระบวนการเผาไหม้ โดยเถ้าแกลบจะมี 2 เกรดคือ ส่วนที่เป็น White rice husk ash (WRHA) จะมีซิลิกาเป็นองค์ประกอบสูง และ Black rice husk ash (BRHA) เป็นเถ้าแกลบที่มีองค์ประกอบของซิลิกาต่ำ (Siqueiraat *al.*, 2009)

ปัจจุบันแกลบนำไปใช้ประโยชน์เป็นเชื้อเพลิงสำหรับทำให้เกิดพลังงานความร้อน ผสมกับวัสดุอื่นในการทำอิฐและวัสดุก่อสร้างอื่นๆและนำไปใช้ทำปุ๋ยในทางเกษตรกรรม สำหรับในอุตสาหกรรมเซรามิกแล้วมีการนำแกลบมาใช้สำหรับเป็นเชื้อเพลิงในการเผาอิฐแบบดั้งเดิมที่ต้องใช้เวลาในการเผานานหลายวัน นอกจากนี้ยังนำไปใช้บ้างในสูตรเคลือบที่เผาแบบรีดักชัน ซึ่งในความเป็นจริงแล้วแกลบมีประโยชน์มากกว่านั้นเยอะสำหรับอุตสาหกรรมเซรามิกและอุตสาหกรรมอื่นๆ เนื่องจากในแกลบนั้นเมื่อเผาแล้วจะได้ซิลิกาที่มีความบริสุทธิ์สูงและมีค่าพื้นที่ผิวจำเพาะสูงมาก ซึ่งซิลิกาก็คือองค์ประกอบสำคัญสำหรับอุตสาหกรรมเซรามิกนั่นเอง แกลบดิบที่ได้จากกระบวนการสีข้าว ซิลิกาที่อยู่ในแกลบนั้นเกิดขึ้นจากการดูดซึมธาตุอาหารของต้นข้าว โดยรากของข้าวก็จะทำการ

ดูดซึมธาตุอาหารต่างๆที่จำเป็นรวมทั้งธาตุซิลิคอน (Si) ด้วย จากนั้นสารละลายซิลิคอนก็จะมาถูกสะสมอยู่ที่บริเวณผิวด้านนอกของเปลือกเมล็ดข้าวและกลายเป็นซิลิกาที่รวมตัวกับเส้นใยประเภทเซลลูโลสและลิกนิน เกิดเป็นโครงสร้างที่แข็งแรงของเปลือกข้าวหรือที่เราเรียกกันว่าเกลบนั่นเอง

14.1 องค์ประกอบของเกลบ

ประกอบด้วยสารอนินทรีย์อยู่ประมาณ 20-25% เซลลูโลส 30-40% ลิกนิน 19-47% และน้ำตาลประมาณ 17-26% โดยในส่วนของสารอนินทรีย์นั้นองค์ประกอบหลักก็คือซิลิกา ซึ่งมีช่วงอยู่ตั้งแต่ 85-99% นอกจากนั้นยังมี Al_2O_3 , Na_2O , K_2O , CaO และอื่นๆซึ่งปริมาณซิลิกาและมลทินเหล่านี้ขึ้นอยู่กับแหล่งที่เพาะปลูกข้าว ชนิดของข้าวและปุ๋ยที่ใช้ด้วยซิลิกาที่ได้จากเกลบที่ผ่านกระบวนการล้างและเผาที่อุณหภูมิ $650^{\circ}C$ นั้นจะยังไม่มีรูปผลึกที่ชัดเจน เป็นอสัณฐานซิลิกา (Amorphous phase) มี % SiO_2 อยู่สูงมาก (>99%) มีค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ (Specific surface area) สูงมาก มีขนาดของอนุภาคที่ละเอียดมาก (ต่ำกว่า $5\ \mu m$) เมื่อเทียบกับซิลิกาที่ได้จากแหล่งวัตถุดิบอื่นๆเช่น ซิลิกาที่ได้จากการบดทราย Quartz Flint รวมทั้งเมื่อเทียบกับอสัณฐานซิลิกาที่เกิดจากสิ่งมีชีวิตเล็กๆพวกไดอะตอมที่ตายแล้วตกตะกอนทับถมกันมานานหลายร้อยล้านปี ซึ่งอสัณฐานซิลิกาเหล่านี้เราเรียกว่า ไดอะตอมไมท์ (Diatomite) เมื่อเปรียบเทียบกับ % ซิลิกาที่มีอยู่ในเกลบเทียบกับส่วนอื่นของต้นข้าวและพืชชนิดอื่นๆแล้ว เกลบก็ยังมีปริมาณของซิลิกาสูงกว่าพืชชนิดอื่นอยู่มาก โดยในฟางข้าวมี % ซิลิกาอยู่ 82 % เปลือกข้าวโพดมี % ซิลิกาอยู่ 54% ไม้ไผ่มีซิลิกาอยู่ 57% เป็นต้นกระบวนการสังเคราะห์ซิลิกาจากเกลบนั้นสามารถใช้เกลบดิบหรือเถ้าเกลบที่ผ่านการเผามาแล้วก็ได้ แต่การจะทำให้ได้ซิลิกาบริสุทธิ์จากเถ้าเกลบนั้นจะทำได้ยากกว่าและซิลิกาที่ได้จะมีค่าพื้นที่ผิวจำเพาะต่ำกว่าซิลิกาที่สังเคราะห์จากเกลบดิบมาก หลังจากผ่านขั้นตอนการล้างเพื่อกำจัดพวก alkali oxide ให้ออกไปจากเกลบแล้วก็นำเกลบไปอบแห้งและทำการเผา โดยอุณหภูมิในการเผาและเวลาในการเผาจะส่งผลต่อค่าพื้นที่ผิวจำเพาะด้วย เมื่อผ่านกระบวนการเผาแล้วก็จะได้ผงซิลิกาสีขาวที่มีความบริสุทธิ์สูงและมีค่าพื้นที่ผิวจำเพาะสูงมาก

พบว่า เถ้าเกลบประกอบด้วยสูงถึง 86.9-97.3 % ซึ่งคุณสมบัติของเถ้าแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและเวลาในการเผา เถ้าเกลบที่ได้จากการเผาที่อุณหภูมิต่ำจะมารอินทรีย์ที่ยังเผาไม่หมดเหลืออยู่มาก แต่ถ้าวเถ้าเกลบที่อุณหภูมิสูงเป็นเวลานานเพียงพอ จะได้ซิลิกาในรูปของผลึก (crystal) ซึ่งมีความเสถียรสูง แข็ง บดละเอียดได้ยาก และเนื่องต่อการทำปฏิกิริยา ดังนั้นอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการเผาเกลบนั่นจะทำให้ซิลิกา ออสัณฐาน (amorphous silica) ซึ่งมีความว่องไวต่อการทำ

ปฏิกิริยา นอกจากนี้ยังพบว่า ความว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาของเถ้าแกลบยังขึ้นอยู่กับขนาดของเถ้าแกลบ ซึ่งเถ้าแกลบที่ถูกลบละเอียดจะมีความว่องไวในการทำปฏิกิริยาสูงเนื่องจากมีพื้นที่ผิวในการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น

ตารางที่ 2 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าแกลบ

องค์ประกอบทางเคมี ของเถ้าแกลบ	%โดยน้ำหนัก
SiO ₂	78.12
Al ₂ O ₃	0.31
Fe ₂ O ₃	0.23
CaO	0.08
MgO	0.34
Na ₂ O	0.17
K ₂ O	0.82
TiO ₂	0.04
SO ₃	0.09
LOI	8.31

ที่มา : บัณฑิต และ ทวีพันธ์ (2545)

15. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องต้องมีการศึกษาในด้านสมบัติเพื่อที่สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ดังผลงานวิจัยต่อไปนี้

دنوفล และคณะ (2553) ศึกษาผลกระทบของการเติมเถ้าแกลบดำที่มีต่อสมบัติทางกายภาพและเชิงกลของกระเบื้องเซรามิกจากหินชนวน ตรวจสอบวัสดุดิบและพฤติกรรมในระหว่างกระบวนการอัดที่ กำหนดถึงความเหมาะสม สำหรับกระบวนการเทคโนโลยี อัดผง คุณลักษณะทางแร่ตรวจวิเคราะห์ ด้วยการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์รวมทั้ง วิเคราะห์เชิงความร้อนทำให้ได้ข้อมูลกระบวนการอบเผือก กระเบื้องมีขนาด 100 x100x 7 mm ขึ้นรูปด้วยแรงกดไฮโดรลิกที่ 10 MPa หลังจากนั้นเผาที่สาม

อุณหภูมิจาก 1,130 1,140 และ 1,150°C ได้ตรวจสอบสมบัติของกระเบื้องตัวอย่างที่อบขึ้นได้แก่ ความหนาแน่นรวม รูปทรงเปลี่ยนแปลง น้ำหนักสูญหาย การหดตัวความแข็งกระดอน กำลังคัด และการดูดซึมน้ำ ผลทดสอบการแสง ให้เห็นว่าแผ่นตัวอย่างหลอมเย็นมีความหนาแน่นและกำลังคัดเหมาะสมที่อัตราส่วนผสมเถ้าแกลบร้อยละ 30 และอุณหภูมิ 1,150°C สมบัติของแผ่นตัวอย่างเหมาะสมสำหรับกระเบื้องปูพื้น

รองรัตน์ (2553) ทำการศึกษาการพัฒนาสมบัติเชิงกลของกระเบื้องปูพื้นดินเผาจากเถ้าลอย ลิกไนต์ เพื่อลดปริมาณผลพลอยได้จากการเผาไหม้ของถ่านลิกไนต์ โดยทำการศึกษาการเติมเถ้าลอย ลิกไนต์ ที่ 5 10 15 20 25 30 35 40 45 และ 50 % (w/w) ทำการเติมน้ำ 40 % เผาที่อุณหภูมิ 900°C 1,000°C 1,150°C 1,200°C และ 1,230°C บรรยายภาพในการเผา แบบออกซิเจนมากเกินพอ และออกซิเจนไม่เพียงพอ แล้วนำไปตรวจสอบสมบัติเชิงกล และกายภาพ พบว่าการเติมเถ้าลอยลิกไนต์ ในอัตราส่วน 10-50% สามารถใช้เป็นส่วนผสมในเนื้อดินบ้านได้ โดยจะช่วยเพิ่มสมบัติทางกายภาพ และเชิงกลที่สูงขึ้น โดยเมื่อทำการเพิ่มอุณหภูมิการเผาให้สูงมากขึ้นก็จะทำให้ กระเบื้องมีการหดตัว และมีค่าความแกร่งที่สูงขึ้น

ณัฐพงษ์ (2557) ศึกษาถึงพฤติกรรมของคอนกรีตผสมเถ้าแกลบที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิสูง 200 300 และ 400 °C โดยทำการทดสอบค่ากำลังรับแรงอัดและค่าการซึมผ่านน้ำผ่านคอนกรีตผล จากการทดลองพบว่าค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่มีการแทนที่ด้วยเถ้าแกลบมีค่ามากขึ้นและมากกว่าคอนกรีตควบคุมในสภาวะปกติ และหลังจากผ่านการเผาที่อุณหภูมิต่างๆ ค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตผสมเถ้าแกลบมีค่าลดลงตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น อัตราการแทนที่ร้อยละ 10 พบว่ามีค่าการซึมผ่านน้ำน้อยที่สุดและมีค่าน้อยกว่าคอนกรีตควบคุมในสภาวะปกติและเมื่อผ่านการเผาที่อุณหภูมิต่างๆ ค่าการซึมผ่านน้ำมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิการเผาที่เพิ่มขึ้น

Kishore *et al.* (2011) ศึกษาการเติมเถ้าแกลบ ที่ 0 5 10 และ 15% ลงในเนื้อคอนกรีต สูตร M40 และ M50 เพื่อทำการเปรียบเทียบค่า ความแข็งแรง โดยทำการตรวจทุก 7 28 และ 56 วัน ผลการศึกษา เมื่อมีการเติมเถ้าแกลบ 15 % ทำให้ค่าความแข็งแรงลดลง ปริมาณการเติมเถ้าแกลบที่เหมาะสมที่สุดอยู่ที่ 10% โดยให้ค่าความแข็งแรงสูงสุด ในดินทั้ง 2 สูตรซึ่งมีค่าที่ไม่แตกต่างกัน

Madandoust *et al.* (2010) ศึกษาสมบัติของคอนกรีตที่เกิดจากกา รเติมเถ้าแกลบ ในอัตราส่วน 0-30% โดยศึกษาผลกระทบที่เกิดจากสภาพแวดล้อมทั่วไป เป็นระยะเวลา 11 เดือน โดย

ศึกษาถึงการลดแรงอัด โดยทำการเปรียบเทียบกับคอนกรีตทั่วไปที่ไม่ได้เติมเถ้าแกลบ ผลการศึกษาพบว่า เถ้าแกลบสามารถใช้เป็นวัสดุทดแทนเนื้อคอนกรีตได้ โดยเมื่อศึกษาจากกล้องขยาย พบว่า โครงสร้างเมื่อมีการเติมเถ้าแกลบ จะมีลักษณะยี่ ดเกาะแน่นกว่า คอนกรีตทั่วไป ก็ไม่ได้ทำให้ คอนกรีตมีค่าการทนต่อแรงอัดที่เพิ่มขึ้น

Sathawane *et al.* (2013) ศึกษาถึงผลที่เกิดจากการเติมเถ้าแกลบ และเถ้าลอยใน คอนกรีต 30% เพื่อเป็นวัสดุทดแทนปูนซีเมนต์ โดยศึกษาอัตราส่วนที่แตกต่างกัน ที่ เถ้าลอย ลิกไนต์ 30% เถ้าแกลบ 0% และทำการลดเถ้าลอย ลิกไนต์ 2.5 % แล้วเพิ่ม เถ้าแกลบ 2.5 % จนเถ้าลอย ลิกไนต์มี อัตราส่วนเหลือ 15 % โดยมีขนาด 150 x 150 x150 mm บ่มที่ 7 14 28 56 และ 90 วัน ทำการ เปรียบเทียบค่าความแข็งแรงต่อการอัด ความแข็งแรงต่อการโค้งงอ และค่ากำลังดึงแยก ของ คอนกรีตผลการศึกษาทำการเปรียบเทียบที่การบ่ม 28 วัน ของกระเบื้องที่มีส่วนผสมเถ้าลอย ลิกไนต์ 22.5% และเถ้าแกลบ 7.5% มีค่าความแข็งแรงต่อการแรงอัดเพิ่มขึ้น 30.15 % ความแข็งแรงต่อการ โค้งงอ เพิ่มขึ้น 4.57% มากกว่ากระเบื้องที่ไม่ได้ทำการผสมเถ้าทั้งสอง

Sokolar and Lenka (2010) ศึกษาสมบัติของกระเบื้องเซรามิกที่มีการเติมเถ้าลอย ลิกไนต์ จากการเผาไหม้ 70% (wt) และ ดินสโตนแวร์ 30 % ทำการเผาที่อุณหภูมิ 1,000-1,150 °C โดยแบ่งตัว อย่างกระเบื้องเป็น 2 ลักษณะคือ กระเบื้องที่เติมเถ้า ลอยลิกไนต์แบบไม่มีการบด และกระเบื้องที่มี การบดเถ้าลอย ลิกไนต์ ก่อนขึ้นรูปเป็นกระเบื้อง เพื่อศึกษาผลที่เกิดจากการบดเถ้าลอย ลิกไนต์ และ เพนทาโซเดียม ไตรฟอสเฟต ที่มีอยู่ในกระเบื้อง ขณะเผาปัสกิต กับตอนกระเบื้องเผาเสร็จแล้ว แล้ว นำมาทดสอบสมบัติกายภาพ และเชิงกล พบว่า กระเบื้องที่มีส่วนผสมของเถ้าลอย ลิกไนต์ ที่ทำการ บด ที่มีการเติม เพนทาโซเดียม ไตรฟอสเฟต ปริมาตร 1.3% ในกระเบื้อง ในทุกๆอุณหภูมิการเผาทำ ให้สมบัติของกระเบื้องดีขึ้น และ ทำให้กระเบื้องเผาปัสกิต มีความแข็งแรงเพิ่มมากขึ้น ปริมาณการ อุ่นน้ำในกระเบื้องลดต่ำลง ค่าการดูดซึมน้ำลดลง 10 % และโครงสร้างภายในกระเบื้องเกิดการ กระจายตัวได้ดี

Sutas *et al.* (2012) ทำการศึกษาผลที่เกิดจากการเติมเถ้าแกลบ และ แกลบ ลงในอิฐแล้วทำ การเปรียบเทียบกัน โดยใช้เป็นวัสดุฉนวนในการผสมที่อัตราส่วน 0-10% ผลการศึกษาพบว่า เมื่อมีการ เติม 2 % ของเถ้าแกลบให้ผลออกมาดีที่สุดโดย ความแข็งแรงต่อการโค้งงอ 6.20 MPa ความ หนาแน่น 1.68g/cm³ และมีค่าการดูดซึมน้ำ 15.20%

Tokaman *et al.*(2014) ศึกษาถึงการผลิตคอนกรีตบล็อก โดยมีการเติมขี้เถ้า เถ้าแกลบและ ปูนขาว เป็นส่วนผสมกับเนื้อดิน พื้ตแลนด์ และทราย เพื่อใช้เป็นวัสดุทดแทน คอนกรีต และเพิ่ม การใช้ทรัพยากรเหลือใช้ ในอัตราส่วน 0 25 และ 50 %จากนั้นทดสอบสมบัติค่าความแข็งแรง การ ดูดซึมน้ำ และค่าความหนาแน่น พบว่า คอนกรีตที่มีการใช้ เนื้อดินพื้ตแลนด์ 50 % ทราย 25% และ เถ้าแกลบ 25 % มีค่าใกล้เคียงกับ คอนกรีตบล็อกที่ไม่มีการผสม ซึ่งพบว่าเมื่อมีการเติมแกลบ เป็น ส่วนผสมจะทำให้ มีค่าการดูดซึมน้ำ และค่าความหนาแน่นต่ำลง



อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. วัสดุที่ใช้ในการศึกษา

- 1.1 แก้วลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ อำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง
- 1.2 แก้วแกลบ จากโรงสีข้าวในจังหวัดอุดรธานี
- 1.3 ดิน เนื้อดิน stoneware สูตร W03 จากโรงงานผลิตกระเบื้อง จังหวัดลำปาง

2. อุปกรณ์

- 2.1 แม่พิมพ์กระเบื้องขนาด 10x10 cm
- 2.2 เครื่องอัดแรงดันไฮดรอลิกส์กำลังอัด 15 Ton
- 2.3 เครื่องผสมดินมอเตอร์ 2 แรงม้า ขนาด 50 Kg
- 2.4 เตาเผากระเบื้อง พลังงานแก๊ส พื้นที่การเผา 1 ตรม.
- 2.5 เครื่องชั่งดิจิตอล 2 ตำแหน่ง Exacta รุ่น LFH-65108
- 2.6 เครื่องชั่งสปริง รุ่น MD-60 พิกัด 60 Kg
- 2.7 แปรงขัดฝุ่น
- 2.8 ตาชั่งร่อนขนาด 16 ตา
- 2.9 เครื่องวัดมิติกระเบื้อง (Micrometer Scaew Gauge)
- 2.10 เครื่องมือทดสอบแรงอัด (Universal Testing Machine-UTM)

วิธีการ

การเตรียมวัตถุดิบตัวอย่าง

ดินผสมสูตร W03 เป็นดินสำหรับการผลิตเซรามิกที่มีการผสมของดินขาวและดินเหนียวชนิดดิน stoneware โดยปกติจะใช้ผลิตกระเบื้องเซรามิกปูพื้น โดยการเผาที่อุณหภูมิ 1,200°C มีลักษณะสีขาว เหลืองนวล

ส่วนผสมเถ้าแกลบเป็นเถ้าจากโรงสีข้าวในจังหวัดอุดรดิตถ์ 500 กิโลกรัม มีลักษณะเบา สีขาวเทา ค่าความชื้นต่ำ ก่อนใช้งานนำมาตากแดดเป็นเวลา 48 ชั่วโมง แล้วร่อนด้วยตะแกรงร่อนเพื่อแยกวัสดุแปลกปลอมที่มีขนาดใหญ่ออก



ภาพที่ 2 การแยกสิ่งเจือปนที่ผสมมากับเถ้าแกลบ ด้วยตาข่ายพลาสติก



ภาพที่ 3 เถ้าแกลบที่ใช้เป็นส่วนผสมในเนื้อกระเบื้องเซรามิกตัวอย่าง



ภาพที่ 4 เถ้าลอยลิกไนต์จากโรงไฟฟ้า แม่เมาะ จังหวัดลำปาง

ที่มา : วิมลชนา (2555)

การผสมตัวอย่าง

บดดินเซรามิกให้ละเอียดผสมเถ้าแกลบและเถ้าลอยลิกไนต์ เติมน้ำ 200 ml อย่างละ 3 อัตราส่วนคือ 10 30 และ 50% (w/w) และดินที่ไม่มีการผสมเถ้า โดยแต่ละอัตราส่วนใช้น้ำหนักมวล โดยรวมเป็น 20 Kg เติมน้ำ 200 ml นำดินในแต่ละอัตราส่วนเข้าเครื่องกวนผสมเพื่อให้เถ้าและดินรวมตัวกันทิ้งไว้ 24 ชม.

ตารางที่ 3 อัตราส่วนผสมเถ้าลอยลิกไนต์และเถ้าแกลบในกระเบื้องตัวอย่าง

อุณหภูมิในการเผา (c°)	อัตราส่วนผสมในดินเซรามิก						ตัวควบคุม
	เถ้าแกลบ (%)			เถ้าลอยลิกไนต์ (%)			
800	10	30	50	10	30	50	ดินเซรามิก 100%
900							
1000							
1100							
1200							

การขึ้นรูปตัวอย่าง

อัดเนื้อดินที่ทำการผสมตามอัตราส่วนลงให้บดล็อกแม่พิมพ์ (mold) ขนาด 10x10 cm อัดด้วยเครื่องอัดแรงไฮดรอลิกส์ ที่ 200 bar เพื่อให้เนื้อดินแน่น และคงรูปตามแบบบล็อกแม่พิมพ์ได้



ภาพที่ 5 เครื่องอัดไฮดรอลิกส์ที่ใช้ในการศึกษา

การเผาตัวอย่าง

เผากระเบื้องที่ นำไปเผาที่อุณหภูมิ 800 900 1,000 1,100 และ 1,200 °C เป็นเวลา 13 ชั่วโมง แล้วทิ้งไว้ในเตาเผาต่อเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ให้กระเบื้องค่อยๆเย็นตัวลง จนถึงอุณหภูมิปกติ

วิธีการทดสอบ

ศึกษาอุณหภูมิที่เหมาะสมในการผลิตเพื่อให้ได้คุณสมบัติเชิงกลที่เหมาะสมที่สุด ทำการทดสอบตามมาตรฐานกระเบื้องเซรามิก การหาค่าการดูดซึมน้ำ การหาค่าโมดูลัสการแตกร้าว น้ำหนัก ขนาด การขยายตัว หดตัว และการโค้งงอของกระเบื้องเซรามิก

การหาค่าการดูดซึมน้ำ

การดูดซึมน้ำของวัสดุบิวิเคราะห์โดยนำวัสดุบิหลังขึ้นรูปและแห้งตัวแล้ว จากนั้นเผาที่อุณหภูมิ 1100°C ทำการชั่งน้ำหนัก (W_1) แล้วจึงนำไปต้มน้ำเดือด 5 ชั่วโมง และทิ้งไว้ในน้ำอีก 24 ชั่วโมงจึงนำออกมาชั่งน้ำหนักหลังต้ม (W_2) และหาค่าร้อยละการดูดซึมน้ำ ดังนี้

$$\text{ร้อยละการดูดซึมน้ำ} = \left(\frac{W_2 - W_1}{W_1} \right) \times 100 \quad (2)$$

W_1 = น้ำหนักก่อนต้ม (กรัม)

W_2 = น้ำหนักหลังต้ม (กรัม)

การหาค่าความแข็งแรง

เป็นการตรวจสอบโดยการวัดความสามารถในการต้านทานต่อแรงดัด (Bending Load) และหารายงานค่าทดสอบเป็นค่าโมดูลัสของการแตกหัก (Modulus of rupture; MOR) วิธีหาความแข็งแรงต่อแรงดัดนี้ใช้กันมากในการควบคุมคุณภาพของน้ำดิน รวมถึงผลิตภัณฑ์เซรามิก ตั้งแต่ชิ้นงานดิบ ชิ้นงานหลังแห้ง และชิ้นงานหลังเผา

โดยให้แรงกดที่แนวกึ่งกลางของกระเบื้อง ก่อนการทดสอบต้องทำความสะอาดกระเบื้อง แล้วนำไปอบในเตาอุณหภูมิ 110±5 °C เพื่อไล่ความชื้นภายในแผ่นเซรามิก จากนั้นนำกระเบื้องเซรามิกทดสอบไปวางบนแท่นรอง (cylindrical support rods) ทั้งสองแท่ง โดยให้แท่งกด (central cylindrical rod) อยู่ในแนวกึ่งกลางด้านบนของกระเบื้องเซรามิก จากนั้นใส่แรงกดลงบนกระเบื้องเซรามิก ด้วยอัตราเร็วที่ทำให้ความเค้นของกระเบื้องเซรามิกเพิ่มขึ้นในอัตรา $1 \pm 0.2 \text{ N/cm}^2/\text{s}$ จนกระเบื้องเซรามิกแตกเป็น 2 ส่วน จากนั้นนำค่าแรงกดสุดท้ายที่ได้ จำนวนสูตร

น้ำหนักของกระเบื้องตัวอย่าง

ชั่งบนเครื่องชั่ง ดิจิตอล ทศนิยม 2 ตำแหน่ง อัตราส่วนผสมละ 5 ตัวอย่าง จำนวนหาค่าเฉลี่ย

ตรวจวัดขนาดกระเบื้องตัวอย่าง

ใช้ไม้บรรทัดวัดขนาด กว้าง x ยาว อัตราส่วนผสมละ 5 ตัวอย่าง คำนวณหาค่าเฉลี่ย



ผลและวิจารณ์

ค่าโมดูลัสการแตกร้าว

แสดงในภาพที่ 6 ค่าโมดูลัสการแตกร้าวของกระเบื้องที่มีส่วนผสมของเถ้าแกลบ ที่ 10 30 และ 50% โดยทำการเผาที่อุณหภูมิตั้งแต่ 800-1,200 °C พบว่า กระเบื้องที่ผสมเถ้าแกลบ ปริมาณต่ำ 10% จะมีโมดูลัสการแตกร้าวของกระเบื้อง ที่สูงกว่า อัตราส่วนผสม 30 และ 50 % และเมื่อทำการเพิ่มอุณหภูมิในการเผาที่สูงขึ้น กระเบื้องในทุกๆอัตราส่วนผสม ก็จะมีค่าโมดูลัสการแตกร้าวเพิ่มสูงตามไปด้วย โดยกระเบื้องเซรามิกที่มีส่วนผสมของเถ้าแกลบมีค่าโมดูลัสการแตกร้าวที่ 2.05 – 48.76 Kgf/cm²

ค่าโมดูลัสการแตกร้าวของกระเบื้องที่มีส่วนผสมของ เถ้าลอยลิกไนต์ ที่ 10 30 และ 50% โดยทำการเผาที่อุณหภูมิตั้งแต่ 800-1,200 °C แสดงในภาพที่ 7 พบว่ากระเบื้องที่ผสมเถ้าลอยลิกไนต์ ปริมาณต่ำ 10% จะมีโมดูลัสการแตกร้าวของกระเบื้อง ที่สูงกว่า อัตราส่วนผสม 30 และ 50% และเมื่อทำการเพิ่มอุณหภูมิในการเผาที่สูงขึ้น กระเบื้องในทุกๆอัตราส่วนผสม ก็จะมีค่าโมดูลัสการแตกร้าวเพิ่มสูงตามไปด้วย โดยกระเบื้องเซรามิกที่มีส่วนผสมของเถ้าลอยลิกไนต์ มีค่าโมดูลัสการแตกร้าวที่ 10.00 – 178.74 Kgf/cm²

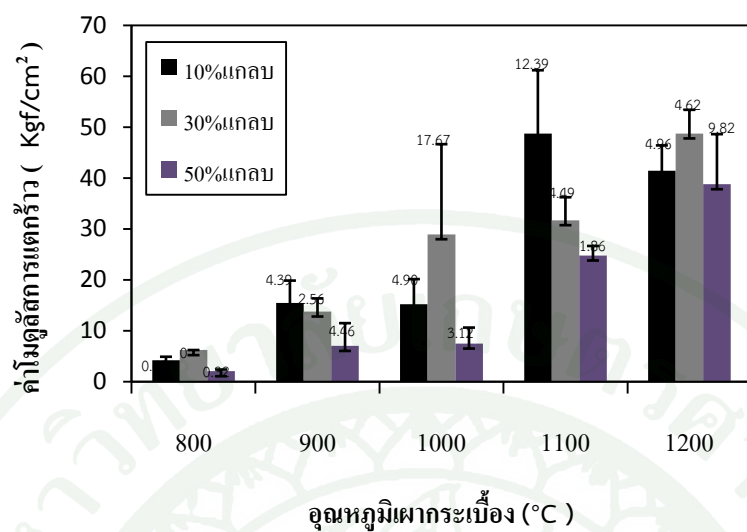
ตารางที่ 4 ค่าโมดูลัสการแตกร้าวของกระเบื้องที่มีส่วนผสมของเถ้าแกลบ เถ้าลอยลิกไนต์ และที่ไม่มีการผสมเถ้าที่อุณหภูมิการเผา 800-1,200 °C

อุณหภูมิเผา (°C)	ดิน+แกลบ (%)			ดิน+เถ้าลิกไนต์ (%)			ดินสูตร W03
	10%	30%	50%	10%	30%	50%	100%
800	4.2± 0.68	6.2± 0*	2.05± 0.32	12.51± 2.26	10± 5.92	13.37± 5.16	9.18± 2.93
900	15.45 ± 4.3	13.78 ± 2.56	7.02 ± 4.46	38.34 ± 2.72	19.01 ± 1.39	36.49 ± 6.19	24.28 ± 7.68
1000	15.23 ± 4.9	28.96 ± 17.98	7.49 ± 3.12	59.51 ± 9.14	23.39 ± 6.04	28.76 ± 8.05	64.85 ± 11.8
1100	48.76 ± 12.39	31.72 ± 4.49	24.78 ± 1.86	117.29 ± 35.74	110.26 ± 34.93	96.29 ± 22.39	65.53 ± 11.35
1200	41.43 ± 4.96	48.76 ± 4.62	38.78 ± 9.82	178.74 ± 40.05	145.75 ± 22.59	157.91 ± 25.4	128.96 ± 10.57

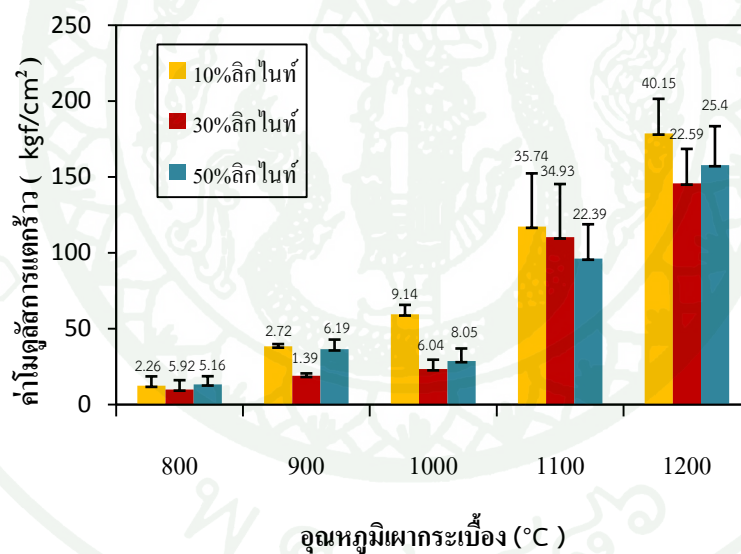
หมายเหตุ (*) กระเบื้องที่ใช้ทดสอบแตกหักระหว่างการขนส่ง นำไปทดสอบได้เพียง 1 ตัวอย่างค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานจึงมีค่าเป็น 0

ตารางที่ 5 ค่าการดูดซึมน้ำของกระเบื้องที่มีส่วนผสมของเถ้าแกลบ เถ้าลอยลิกไนต์ และที่ไม่มีการผสมเถ้าที่อุณหภูมิการเผา 800-1,200 °C

อุณหภูมิเผา (°C)	ดิน+แกลบ (%)			ดิน+เถ้าลิกไนต์ (%)			ดินสูตร W03
	10%	30%	50%	10%	30%	50%	100%
800	37.3 ± 0.99	59.16 ± 0.91	43.58 ± 1.11	23.7 ± 0.42	22.02 ± 0.4	21.46 ± 0.44	23.81 ± 1.11
900	35.03 ± 0.73	34.55 ± 2.56	43.65 ± 5.11	20.45 ± 2.15	23.38 ± 1.99	22.35 ± 0.97	21.17 ± 1
1000	31.62 ± 0.71	39.4 ± 1.9	42.56 ± 3.93	16.84 ± 1.33	21.84 ± 0.19	23.5 ± 0.28	17.45 ± 2.2
1100	27.21 ± 4.32	29.91 ± 0.5	32.16 ± 1.5	11.98 ± 0.77	16.83 ± 1.93	15.93 ± 3.34	17.3 ± 2.04
1200	29.82 ± 2.42	21.65 ± 1.83	24.42 ± 13.68	2.18 ± 0.64	9.16 ± 5.67	4.49 ± 0.64	6.71 ± 1.86

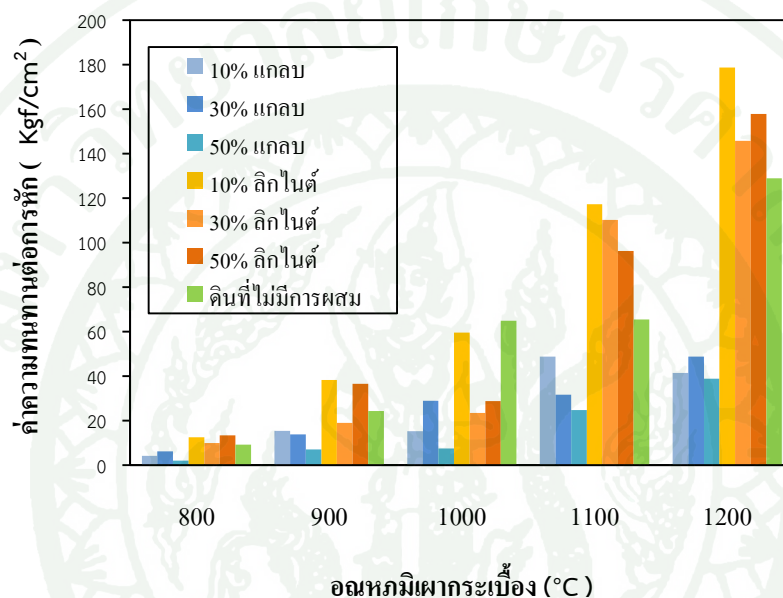


ภาพที่ 6 ค่าโมดูลัสการแตกร้าวของกระเบื้องที่มีส่วนผสมของ เถ้าแกลบ ที่ อุณหภูมิ 800-1,200 °C



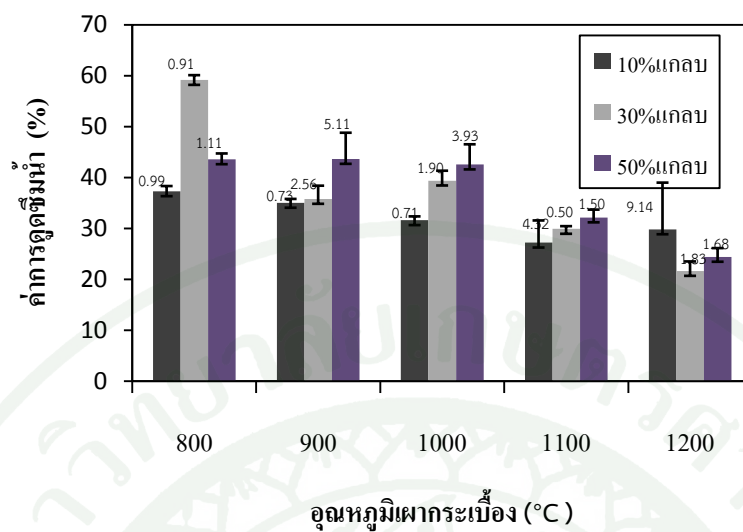
ภาพที่ 7 ค่าโมดูลัสการแตกร้าวของกระเบื้องที่มีส่วนผสมของ เถ้าลอยลิกไนต์ ที่ อุณหภูมิ 800-1,200 °C

เปรียบเทียบค่าโมดูลัสการแตกร้าวของกระเบื้องตัวอย่าง ระหว่างกระเบื้องเซรามิกที่มี ส่วนผสมของเถ้าแกลบ เถ้าลอยลิกไนต์ และกระเบื้องเซรามิกที่ไม่มีการผสมเถ้า พบว่า กระเบื้อง เซรามิกที่มีส่วนผสมของเถ้าลอยลิกไนต์มีค่าโมดูลัสการแตกร้าว สูงกว่า กระเบื้องเซรามิกที่มีการ ผสมแกลบ และกระเบื้องที่ไม่มีการผสมเถ้า ณ อุณหภูมิที่ 1,100-1,200 °C ในภาพที่8

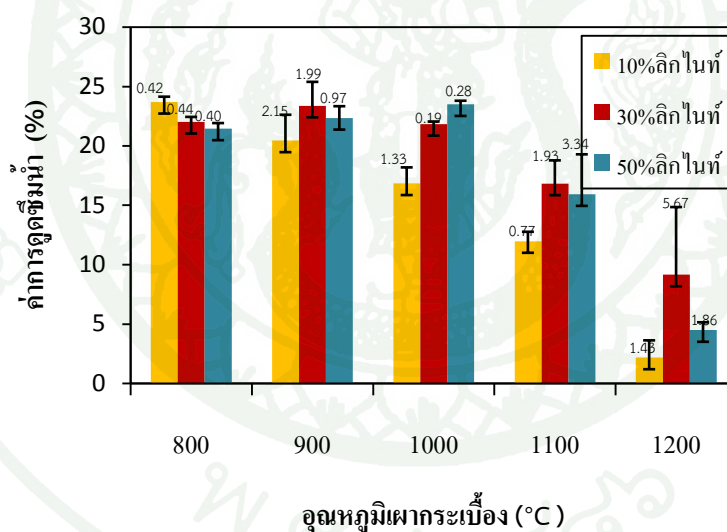


ภาพที่ 8 การ เปรียบเทียบค่าโมดูลัสการแตกร้าวของกระเบื้องตัวอย่างผสมเถ้าแกลบ เถ้าลอย ลิกไนต์ และไม่มีการผสมเถ้า ที่ อุณหภูมิ 800-1,200 °C

ที่อุณหภูมิ การเผา ต่ำกระเบื้องจะมีค่าโมดูลัสการแตกร้าวต่ำ แต่ที่อุณหภูมิ การเผา สูงค่า โมดูลัสการแตกร้าวจะสูง

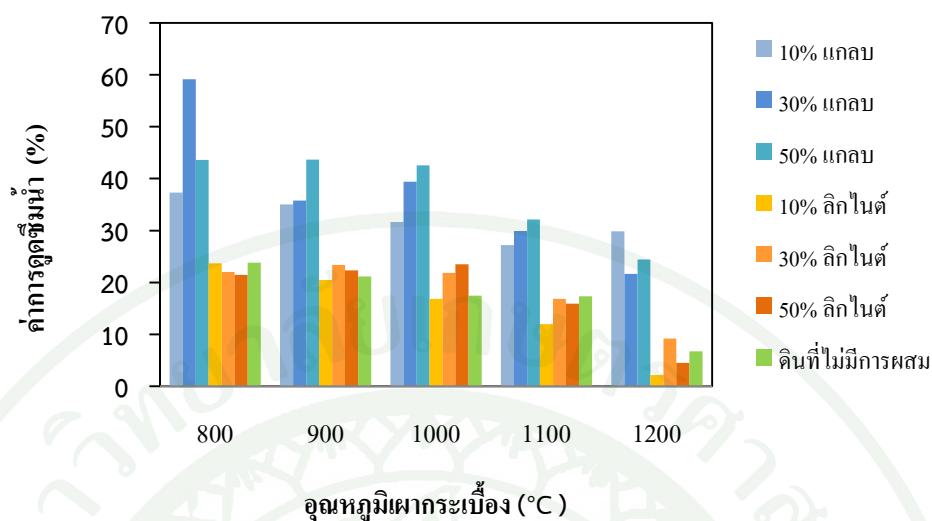


ภาพที่ 9 ค่าการดูดซึมน้ำของกระเบื้องที่มีส่วนผสมของ เถ้าแกลบ ที่ อุณหภูมิ 800-1,200 °C



ภาพที่ 10 ค่าการดูดซึมน้ำของกระเบื้องที่มีส่วนผสมของ เถ้าลอยลิกไนต์ ที่ อุณหภูมิ 800-1,200 °C

แสดงในภาพที่ 10 ค่าการดูดซึมน้ำของกระเบื้องที่มีส่วนผสมของ เถ้าลอยลิกไนต์ มีค่าการดูดซึมน้ำอยู่ที่ 2.18 - 23.70 % เมื่อเพิ่มอุณหภูมิการเผากระเบื้องเซรามิกที่ผสมเถ้าแกลบในทุกอัตราส่วนมีค่าการดูดซึมน้ำในทิศทางที่ต่ำลง



ภาพที่ 11 การเปรียบเทียบค่าการดูดซึมน้ำของกระเบื้องตัวอย่าง ผสมแก้ว แก้วลิเทียม และไม่มีส่วนผสมแก้ว ที่ อุณหภูมิ 800-1,200 °C

พบว่า กระเบื้องเซรามิกที่มีส่วนผสมของแก้วลิเทียมมีค่าการดูดซึมน้ำต่ำกว่ากระเบื้องที่มีส่วนผสมของแก้ว และมีความใกล้เคียงกับกระเบื้องเซรามิกที่ไม่มีส่วนผสมของแก้วทั้งสอง โดยที่อุณหภูมิ 1,200 °C กระเบื้องที่มีส่วนผสมของแก้วลิเทียมมีค่าการดูดซึมน้ำต่ำที่สุดที่ 2.18%

ตารางที่ 6 ขนาดของกระเบื้องที่มีส่วนผสมของเถ้าแกลบ เถ้าลอยลิกไนต์ และกระเบื้องเซรามิกที่ไม่ได้มีการผสมเถ้า (cm²)

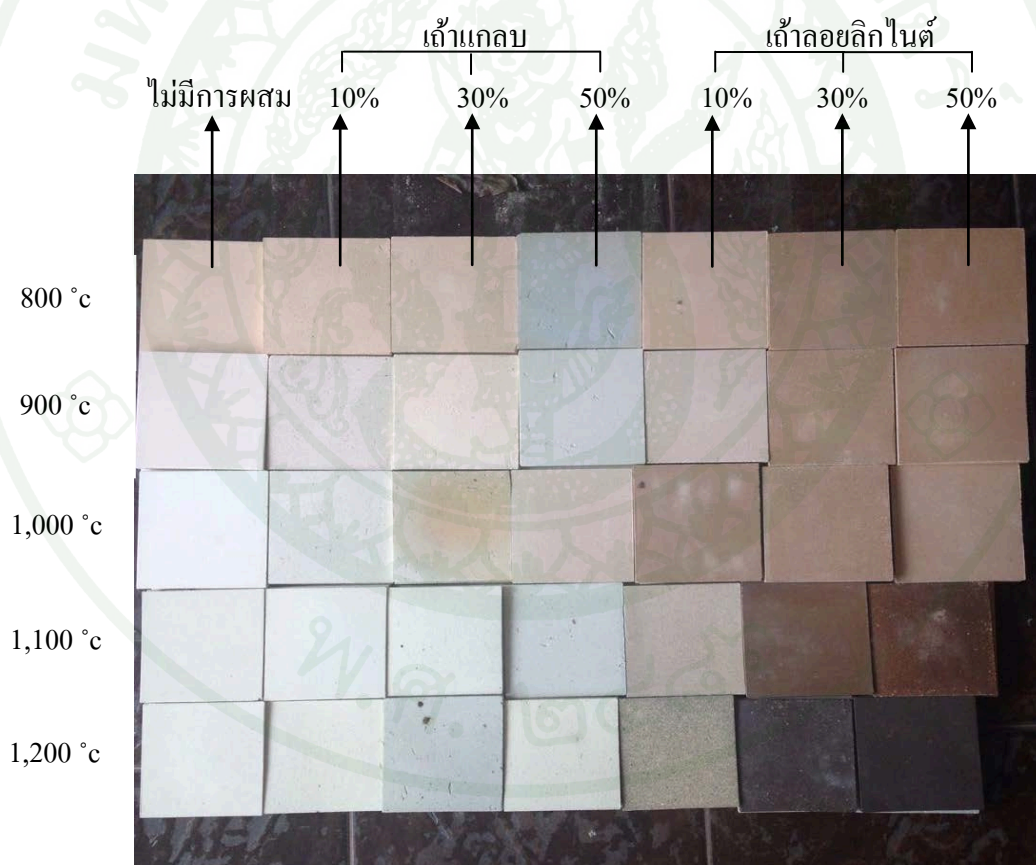
อุณหภูมิเผา (c°)	ดิน + เถ้าแกลบ(%)			ดิน + เถ้าลอยลิกไนต์(%)			ดินสูตร W03
	10%	30%	50%	10%	30%	50%	100%
800	10.66 ± 0.46	10.60 ± 0	10.64 ± 0.01	10.60 ± 0.25	10.54 ± 0.44	10.54 ± 0.44	10.64 ± 0.01
900	10.45 ± 0.05	10.15 ± 0.05	10.30 ± 0.15	10.34 ± 0.04	10.46 ± 0.02	10.46 ± 0.01	10.52 ± 0.19
1000	10.31 ± 0.05	10.0 ± 0.19	10.20 ± 0.16	10.10 ± 0.03	10.32 ± 0.02	10.45 ± 0.02	10.11 ± 0.05
1100	9.60 ± 0.10	10.0 ± 0.02	10.0 ± 0.19	9.92 ± 0.06	10.0 ± 0.13	9.85 ± 0.13	10.13 ± 0.07
1200	9.52 ± 0.03	9.84 ± 0.01	9.40 ± 0.24	9.60 ± 0.05	9.48 ± 0.01	9.75 ± 10	9.65 ± 0.04

ตารางที่ 7 น้ำหนักของกระเบื้องที่มีส่วนผสมของเถ้าแกลบ เถ้าลอยลิกไนต์ และกระเบื้องเซรามิกที่ไม่ได้มีการผสมเถ้า (g)

อุณหภูมิเผา (c°)	ดิน + เถ้าแกลบ(%)			ดิน + เถ้าลอยลิกไนต์(%)			ดินสูตร W03
	10%	30%	50%	10%	30%	50%	100%
800	124.6 ± 3.36	101.2 ± 5.14	116 ± 3.11	161 ± 9.01	165.2 ± 9.95	169.6 ± 2.16	153 ± 7.32
900	121.2 ± 2	119.8 ± 1.92	118 ± 3.43	165.4 ± 2.94	154.4 ± 6.20	166.6 ± 5.63	156 ± 5.02
1000	132.4 ± 5.76	102.8 ± 7.71	118.1 ± 7.68	163.4 ± 7.89	158.2 ± 3.91	156.6 ± 4.91	163.4 ± 4.47
1100	130 ± 5.41	135.6 ± 5.54	131.6 ± 2.54	155.6 ± 5.93	169.2 ± 7.85	157.2 ± 5.80	162.4 ± 6.94
1200	112.1 ± 14.67	115.8 ± 1.51	112.4 ± 3	165.2 ± 4.97	157 ± 7.46	162.2 ± 6.46	158.4 ± 7.43

จากตารางที่ 6 กระเบื้องในทุกอัตราส่วนการผสมที่อุณหภูมิ 800-900°C มีการขยายตัว (ในช่วง 10.5-10.6 cm) กระเบื้องในทุกอัตราส่วนการผสมที่อุณหภูมิ 1,100-1,200°C มีการหดตัว (ในช่วง 9.4-10.00cm) และที่อุณหภูมิ 1,000 °C กระเบื้องไม่ค่อยมีการเปลี่ยนแปลงขนาด

จากตารางที่ 7 แสดงถึงน้ำหนักของกระเบื้องในแต่ละอัตราส่วนการผสมของเถ้าแกลบ เถ้าลอยลิกไนต์ และกระเบื้องเซรามิกที่ไม่มีการผสมเถ้า พบว่า กระเบื้องเซรามิกที่ไม่มีการผสมเถ้าทั้งสองมีน้ำหนักมากกว่า กระเบื้องเซรามิกผสมเถ้าแกลบ แต่มีน้ำหนักน้อยกว่า กระเบื้องเซรามิกที่การผสมเถ้าลอยลิกไนต์ เถ้าแกลบ (101.2-135.6 g) < กระเบื้องที่ไม่ได้ผสมเถ้า (153-163.4 g) < กระเบื้องที่มีส่วนผสมของเถ้าลิกไนต์ (154.4-169.6 g)



ภาพที่ 12 กระเบื้องเซรามิกในแต่ละอัตราส่วนผสมที่อุณหภูมิการเผา 800-1,200 °C

จากภาพแสดงลักษณะของกระเบื้องตัวอย่าง ดินที่ไม่มีการผสม ,กระเบื้องเซรามิกผสมเถ้าแกลบ 10-30-50%, กระเบื้องเซรามิกผสมเถ้าลอยลิกไนต์ 10-30-50% ที่อุณหภูมิการเผา 800-1,200 °C

ภาพที่ 13 ลักษณะกระเบื้องที่มีส่วนผสมของเถ้าแกลบ เถ้าลอยลิกไนต์ ที่อุณหภูมิ 800 °C

	ลักษณะของแผ่นกระเบื้อง	ชนิดของเถ้าและปริมาณการผสม
		ไม่มีการผสมเถ้า
		เถ้าแกลบ 10%
		เถ้าแกลบ 30%
		เถ้าแกลบ 50%
		เถ้าลอยลิกไนต์ 10%
		เถ้าลอยลิกไนต์ 30%
		เถ้าลอยลิกไนต์ 50%

ภาพที่ 14 ลักษณะกระเบื้องที่มีส่วนผสมของเถ้าแกลบ เถ้าลอยลิกไนต์ ที่อุณหภูมิ 900 °C

	ลักษณะของแผ่นกระเบื้อง	ชนิดของเถ้าและปริมาณการผสม
		ไม่มีการผสมเถ้า
		เถ้าแกลบ 10%
		เถ้าแกลบ 30%
		เถ้าแกลบ 50%
		เถ้าลอยลิกไนต์ 10%
		เถ้าลอยลิกไนต์ 30%
		เถ้าลอยลิกไนต์ 50%

ภาพที่ 15 ลักษณะกระเบื้องที่มีส่วนผสมของเถ้าแกลบ เถ้าลอยลิกไนต์ ที่อุณหภูมิ 1,000 °C

	ลักษณะของแผ่นกระเบื้อง	ชนิดของเถ้าและปริมาณการผสม
		ไม่มีการผสมเถ้า
		เถ้าแกลบ 10%
		เถ้าแกลบ 30%
		เถ้าแกลบ 50%
		เถ้าลอยลิกไนต์ 10%
		เถ้าลอยลิกไนต์ 30%
		เถ้าลอยลิกไนต์ 50%

ภาพที่ 16 ลักษณะกระเบื้องที่มีส่วนผสมของเถ้าแกลบ เถ้าลอยลิกไนต์ ที่อุณหภูมิ 1,100 °C

	ลักษณะของแผ่นกระเบื้อง	ชนิดของเถ้าและปริมาณการผสม
		ไม่มีการผสมเถ้า
		เถ้าแกลบ 10%
		เถ้าแกลบ 30%
		เถ้าแกลบ 50%
		เถ้าลอยลิกไนต์ 10%
		เถ้าลอยลิกไนต์ 30%
		เถ้าลอยลิกไนต์ 50%

ภาพที่ 17 ลักษณะกระเบื้องที่มีส่วนผสมของเถ้าแกลบ เถ้าลอยลิกไนต์ ที่อุณหภูมิ 1,200 °C

	ลักษณะของแผ่นกระเบื้อง	ชนิดของเถ้าและปริมาณการผสม
		ไม่มีการผสมเถ้า
		เถ้าแกลบ 10%
		เถ้าแกลบ 30%
		เถ้าแกลบ 50%
		เถ้าลอยลิกไนต์ 10%
		เถ้าลอยลิกไนต์ 30%
		เถ้าลอยลิกไนต์ 50%

เมื่อทำการเปรียบเทียบกระเบื้องเซรามิกแสดงให้เห็นว่า

กระเบื้องเซรามิกที่มีการเติมเถ้าแกลบและเถ้าลอยลิกไนต์กับกระเบื้องเซรามิกปูพื้นดินเผาทั่วไป พบว่าการที่ใช้เถ้าแกลบในอัตราสูงขึ้นทำให้ค่าการดูดซึมน้ำเพิ่มขึ้น แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการเผาสามารถช่วยลดค่าการดูดซึมน้ำลงได้ ส่วนเถ้าลอยลิกไนต์มีผลกลับกันคือ การใช้เถ้าลอยลิกไนต์ในอัตราสูงขึ้นทำให้ค่าการดูดซึมน้ำลดลง และการเพิ่มอุณหภูมิในการเผาช่วยลดค่าการดูดซึมน้ำลงได้เช่นกัน ส่วนค่าโมดูลัสการแตกร้าวลดลงเมื่ออัตราส่วนผสมเถ้าแกลบสูงขึ้น แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการเผาสามารถช่วยเพิ่มค่าโมดูลัสการแตกร้าวขึ้นได้ และค่าโมดูลัสการแตกร้าวลดลงเช่นกันเมื่ออัตราส่วนผสมเถ้าลอยลิกไนต์สูงขึ้น

จากตารางที่ 1 และ 2 แสดงถึงองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยลิกไนต์และเถ้าแกลบ พบว่ามี CaO , Al_2O_3 , SiO_2 ที่ 19.81, 18.46, 35.35% และ 0.08, 0.31, 78.12% ตามลำดับ ซึ่งเมื่อเทียบกับ ปฏิกิริยาปอซโซลานิก จะพบว่าการจะเกิดโครงสร้างที่แข็งแรงได้ ต้องเกิดจากการทำปฏิกิริยาของ CaO 2 โมเลกุล กับ Al_2O_3 3 โมเลกุล และ CaO 2 โมเลกุล กับ SiO_2 3 โมเลกุล ซึ่งหมายความว่า เถ้าลอยลิกไนต์สามารถทำปฏิกิริยาได้มากกว่า เถ้าแกลบ เนื่องจากเถ้าแกลบมีปริมาณของ SiO_2 สูงกว่า CaO และ Al_2O_3 หลายเท่า ทำให้เกิดปฏิกิริยาได้น้อยกว่าในเถ้าลอยลิกไนต์ที่มี CaO , Al_2O_3 , SiO_2 ใกล้เคียงกัน จึงทำให้กระเบื้องเซรามิกที่ผลิตออกมามีค่าโมดูลัสการแตกร้าวที่สูงกว่า

แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการเผาสามารถช่วยเพิ่มค่าโมดูลัสการแตกร้าวขึ้นได้ กระเบื้องเซรามิกที่มีการเติมเถ้าลอยลิกไนต์ในช่วงอุณหภูมิ 1,100 – 1,200 °C พบว่ามีค่าการดูดซึมน้ำที่ต่ำกว่าดินที่ไม่มีการผสมเถ้า และมีค่าโมดูลัสการแตกร้าวสูงกว่าดินที่ไม่มีการเติมเถ้า ทั้งนี้เมื่อเพิ่มอุณหภูมิถึง 1,200 °C ทำให้กระเบื้องเซรามิกเกิดการโค้งงอและหดตัวลง ในทางกลับกันหากอุณหภูมิต่ำกว่ากระเบื้องเซรามิกมีการขยายตัว

จากตารางที่ 2 ปริมาณองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าแกลบ เป็นข้อมูลจากการศึกษาอื่น ใช้เป็นเพียงข้อมูลอ้างอิง เนื่องจากองค์ประกอบของเถ้าที่ขึ้นอยู่กับการเผาสารปศุสัตว์ สายพันธุ์ของข้าว และอุณหภูมิในการเผาเถ้าแกลบ

ปริมาณของน้ำที่ใช้ในกระบวนการผสมดินกับเถ้าทั้งสองชนิด เกิดจากเมื่อเริ่มทำการขึ้นรูปกระเบื้องเซรามิกในครั้งแรก ไม่ได้มีการเติมน้ำ ทำให้แผ่นกระเบื้องเซรามิกเมื่อนำออกจากแม่พิมพ์

ไม่สามารถจับตัวกันเป็นแผ่นได้ จึงได้ทำการเติมน้ำ เพื่อหาปริมาณที่เหมาะสมที่ทำให้เนื้อดินสามารถเกาะตัวกันได้

สีของกระเบื้องจากภาพที่ 12 มีลักษณะของสีที่แตกต่างกันเกิดจากปริมาณของสารอนินทรีย์ภายในเนื้อดิน เถ้าแกลบ และเถ้าลอยลิกไนต์ เมื่อมีการเผาที่อุณหภูมิที่สูงขึ้นก็ทำให้สารอนินทรีย์ที่ถึงจุดหลอมเหลว และเกิดสีที่กระเบื้องเซรามิก นอกจากนี้หากมีปริมาณของออกซิเจนไม่เพียงพอในการเผาไหม้ อาจเกิดคาร์บอนมอนนอกไซด์ ซึ่งสามารถทำปฏิกิริยากับธาตุทรานซิชัน ทำให้เกิดตำหนิสีดำนกระเบื้องเซรามิกได้

ขนาดของกระเบื้องที่เปลี่ยนแปลง พบว่าที่อุณหภูมิการเผา 800-1000 °C กระเบื้องมีการขยายตัว เนื่องจาก ที่อุณหภูมิการเผาที่ 450-700 °C น้ำที่อยู่ในผลึกดินจะเริ่มสลายออกมา และเกิดฟองอากาศทำให้กระเบื้องเกิดการขยายตัวและที่อุณหภูมิการเผาตั้งแต่ 1000 °C ขึ้นไป สารอนินทรีย์ในเนื้อดินเริ่มเกิดการหลอมตัวทำให้มีการจับตัวรวมกัน ฟองอากาศ และรูพรุนก็จะลดลง และทำให้ขนาดของกระเบื้องลดลง เป็นผลทำให้กระเบื้องเซรามิกที่เผาด้วยอุณหภูมิที่สูงมีค่าโมดูลัสการแตกร้าวเพิ่มขึ้น ค่าการดูดซึมน้ำลดลงเนื่องจาก รูพรุนที่ลดลง

น้ำหนักของแผ่นกระเบื้องเนื่องจากเถ้าแกลบมีความหนาแน่นต่ำกว่าเถ้าลอยลิกไนต์และดินทำให้เมื่อผสมเถ้าและอัดลงแม่พิมพ์ในขนาดที่เท่ากัน ทำให้น้ำหนักของกระเบื้องเซรามิกที่ผสมเถ้าแกลบมีน้ำหนักเบากว่ากระเบื้องที่ผสมเถ้าลอยลิกไนต์

ทำการเปรียบเทียบราคาค้นทุนวัตถุดิบ โดยในการผลิตกระเบื้องในแต่ละอัตราส่วนจะใช้ดิน 20 กิโลกรัม เพื่อผลิตกระเบื้อง 1 ตรม. โดยดินปกติราคา กิโลกรัมละ 8 บาท เท่ากับควบคุมใช้ต้นทุนวัตถุดิบ เท่ากับ 160 บาท/ตรม. แต่ถ้านำเถ้าแกลบราคา 1บาท/กิโลกรัม มาใช้แทนที่ดิน 50 % เท่ากับว่าใช้ดิน 10 กิโลกรัม/เถ้าแกลบ 10 กิโลกรัม รวมเป็นเงิน 90 บาท ทำให้ประหยัดค่าวัตถุดิบไปได้ 70บาท/ตรม. คิดเป็น 43.75% และถ้าหากใช้เถ้าลอยลิกไนต์ราคา 0.30บาท/กิโลกรัม แทนที่ดิน 50% เท่ากับว่าใช้ดิน 10 กิโลกรัม รวมเป็นเงิน 83 บาท/ตรม. ประหยัดค่าวัตถุดิบไปได้ 77 บาท คิดเป็น 48.12%

กระเบื้องที่มีส่วนผสมของเถ้าแกลบที่ 30% อุณหภูมิการเผา 1000 °C เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับกระเบื้องที่ไม่มีการผสมเถ้าทั้งสองที่อุณหภูมิเดียวกัน พบว่ามีค่าโมดูลัสการแตกร้าวที่ต่ำกว่า ค่า

การดูดซึมน้ำที่สูงกว่า มีขนาดเท่ากัน แต่มีน้ำหนักเบากว่า 50 กรัม เหมาะกับการนำมาเป็นกระเบื้องปูผนัง สามารถใช้เป็นกระเบื้องตกแต่ง ลดน้ำหนักที่ผนังหรือกำแพงแบกรับไว้ได้ และยังช่วยลดน้ำหนักในการขนส่งได้

กระเบื้องที่มีส่วนผสมของเถ้าลอยลิกไนต์ที่ 50% อุณหภูมิการเผาเหมาะแก่การนำมาใช้เป็นกระเบื้องปูพื้นเนื่องจากเป็นกระเบื้องที่มีการใช้เถ้าลอยลิกไนต์ที่สูง ใช้ดินน้อย มีค่าโมดูลัสที่สูง และค่าการดูดซึมน้ำต่ำกว่า กระเบื้องที่ไม่มีการผสมเถ้าที่อุณหภูมิเดียวกัน และสามารถลดต้นทุนด้านวัตถุดิบได้ถึง 48.12%

การเพิ่มปริมาณของเถ้าเคลบลงในกระเบื้องเซรามิก พบว่าเมื่อการเพิ่มปริมาณอัตราส่วนที่สูงขึ้นทำให้ค่า โมดูลัสการแตกร้าวเพิ่มสูงขึ้น แต่เมื่อเปรียบเทียบกับกระเบื้องที่ผสมเถ้าลอยลิกไนต์ก็ยังมีค่าที่ต่ำกว่า เนื่องจากเถ้าเคลบมีปริมาณของ ซิลิกาที่สูงมาก ซึ่งเมื่อใช้อุณหภูมิการเผาที่สูงขึ้นจะทำให้ซิลิกามีรูปร่างเป็นผลึกเกาะกันแน่นแต่ก็มีความเปราะสูงด้วยเช่นกัน

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

งานวิจัยนี้เป็นแนวทางหนึ่งเพื่อลดปริมาณขยะจากโรงงานสีข้าวและโรงงานผลิตไฟฟ้า โดยนำมาผลิตเป็นกระเบื้องเซรามิก เพื่อลดปริมาณการใช้ดิน และเพิ่มความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

พบว่า กระเบื้องเซรามิก ที่มีการผสมของเถ้าทั้งสองชนิดลงไป เมื่อมีการเติมปริมาณเถ้าสูงขึ้นจะทำให้ ค่าโมดูลัสการแตกร้าวลดลงเมื่อเทียบกับกระเบื้องที่ไม่มีการผสมของเถ้า และที่อุณหภูมิ 1,100 และ 1,200 °C ในทุกอัตราส่วนผสมของเถ้าลอยลิกไนต์มีค่าโมดูลัสการแตกร้าวสูงกว่ากระเบื้องเซรามิกที่ไม่มีการผสมของเถ้า ซึ่งกระเบื้องเซรามิก ที่มีส่วนผสมของเถ้าแกลบมีค่าโมดูลัสการแตกร้าว 2.05 – 48.76 Kgf/cm² กระเบื้องเซรามิก ที่มีส่วนผสมของเถ้าลอยลิกไนต์ มีค่าการทนต่อการหัก 10.00 – 178.74 Kgf/cm² โดย กระเบื้องเซรามิก ที่มีอัตราส่วนผสมของ เถ้าลอยลิกไนต์ 10% ที่ อุณหภูมิ 1,200 °C มีค่าโมดูลัสการแตกร้าวที่สูงสุด เท่ากับ 178.74 Kgf/cm²

กระเบื้องเซรามิก ที่มีการผสมของเถ้าแกลบ นั้นยังมีปริมาณอัตราส่วนผสมเพิ่มสูงขึ้น ก็ยังทำให้ การดูดซึมน้ำนั้น เพิ่มขึ้นไปด้วยซึ่งแสดงใน ตารางที่ 2 กระเบื้องเซรามิก ที่มีส่วนผสมของเถ้าแกลบมีการดูดซึมน้ำ อยู่ในช่วง 21.60 - 59.16 % ซึ่งมีลักษณะเป็นไปตามการศึกษาของ (Sutas *et al.*, 2012) ศึกษาถึงการใช้แกลบและเถ้าแกลบเป็นส่วนผสมในอิฐมวลเบาพบว่าเมื่อมีปริมาณของแกลบและเถ้าแกลบเพิ่มมากขึ้นจะทำให้มีรูพรุนสูงทำให้เกิดค่าการดูดซึมน้ำที่สูง กระเบื้องเซรามิก ที่มีส่วนผสมของเถ้าลอยลิกไนต์มีการดูดซึมน้ำ อยู่ในช่วง 2.18 - 23.70 % โดยแผ่นเซรามิกที่มีอัตราส่วนผสมของ เถ้าลอยลิกไนต์ 10% ที่ อุณหภูมิ 1,200 °C มีค่าการดูดซึมน้ำต่ำที่สุด เท่ากับ 2.18%

ขนาดของกระเบื้องเซรามิก เมื่อ ยังมีการใช้อุณหภูมิในการเผาสูงมากขึ้น จะทำให้มีการหดตัวของกระเบื้องเซรามิก เพิ่มสูงขึ้น ซึ่งในช่วงอุณหภูมิ 1,200 °C พบว่า แผ่นเซรามิกจะมีขนาดอยู่ในช่วง 9.4 – 9.9 cm ในเชิงกลับกัน ยังมีการใช้อุณหภูมิต่ำเท่าไร กระเบื้องเซรามิกก็จะขยายตัวขึ้นที่ อุณหภูมิ 800°C กระเบื้องเซรามิกมีขนาดอยู่ในช่วง 10.4-10.6 cm น้ำหนักของกระเบื้องเซรามิกทั้งสองชนิด พบว่า กระเบื้องเซรามิก ที่มีส่วนผสมของเถ้าแกลบจะมีน้ำหนักเบากว่า กระเบื้องเซรามิกที่มีส่วนผสมของเถ้าลอยลิกไนต์ และกระเบื้องเซรามิกดินที่ไม่มีการผสมเถ้าทั้งสอง

น้ำหนักของกระเบื้องเซรามิกที่มีการผสมเถ้าแกลบที่อัตราส่วนการผสม 10% จะมีน้ำหนักมากกว่าที่อัตราส่วนผสม 30% และ 50% โดยกระเบื้องเซรามิกที่มีส่วนผสมของเถ้าแกลบจะมีน้ำหนักเบาว่า กระเบื้องที่ไม่มีการผสมเถ้าทั้งสอง แต่ในกระเบื้องเซรามิกที่มีส่วนผสมของเถ้าลอยลิกไนต์ พบว่า ที่ อัตราส่วนผสมเถ้าลอยลิกไนต์ที่ 50% มีน้ำหนักมากกว่า 30% 10% และ กระเบื้องที่ไม่มีการผสมเถ้าทั้งสอง เมื่อทำการเปรียบเทียบ น้ำหนักของกระเบื้อง ทั้ง 3 อัตราส่วนการศึกษา กระเบื้องเซรามิกผสมเถ้าแกลบ < ไม่มีการผสม < เถ้าลอยลิกไนต์



ข้อเสนอแนะ

การศึกษาวิจัยในครั้งนี้เป็นข้อมูลพื้นฐานในการพัฒนากระเบื้องที่มีส่วนผสมของเถ้าแกลบ และเถ้าลอยไนต์ เพื่อลดปริมาณขยะ และการใช้ดิน มีการทดสอบค่าการดูดซึมน้ำ และ ค่าโมดูลัสกันแตกร้าว หากต้องการนำไปใช้ในวัตถุประสงค์อื่นจะต้องทำการตรวจวัดสมบัติตามวัตถุประสงค์การใช้งาน

กระเบื้องตัวอย่างในแต่ละอัตราส่วน มีสีที่แตกต่างกัน เป็นผลเนื่องมาจากการใช้ เตาเผาชนิดใช้แก๊สทำให้สีของกระเบื้องในอัตราส่วนผสมเดียวกันนั้นมีโทนสีที่แตกต่างกัน บ่งบอกถึงส่วนที่ได้รับความร้อน ไม่เท่ากัน หากเป็นการผลิตที่ต้องการควบคุมโทนสี ควรเลือกใช้เตาเผาในการเผากระเบื้องเป็นเตาเผาที่สามารถให้ความร้อนและรักษาอุณหภูมิได้อย่างสม่ำเสมอทั่วทั้งเตาเผา

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

กุลจิรา สุจิโรจน์, ผกามาศ แซ่หว่าง และ ดวงเดือน อาจองค์. 2545. การผลิตเซรามิกส์โดยการอัดแบบ. พิมพ์ครั้งที่ 1. ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ กระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม, กรุงเทพฯ.

จตุรงค์ เสาวภาคย์ไพบุลย์, เคนนิส ที เบอร์กาดา และ ชนวิทย์ กฤตภัทรพงษ์. 2553. การเพิ่มคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินลูกรังด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 และ น้ำยาโพลีเมอร์เคมีโรด. บทความทางวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 15. คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี, อุบลราชธานี.

เจริญวุฒิ ปัญญาสุรณกิจ. 2546. การปรับปรุงซีเมนต์มอร์ต้าโดยใช้ดินขาวสำหรับงานซ่อม. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ณัฐพงษ์ ลาตบัตร์, มณีนันท์ องค์กรวรรณดี และ สหलग หอมวุฒิวังศ์. 2557. กำลังอัดและการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตผสมเถ้าแกลบที่การเผา ณ อุณหภูมิต่างๆ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยมหาสารคาม.

คนุพล ตันนโยภาส, ธรณิศร จิตรพิศาล และ สุชาติ จันทรมณี. 2553. สมบัติของกระเบื้องเซรามิกที่ทำจากหินชนวนเดิมเถ้าแกลบดำ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

นุชนภา ตั้งบริบูรณ์. 2556. เซรามิกวิศวกรรม (Engineering Ceramics). พิมพ์ครั้งที่ 1. นักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

เบญจรัตน์ บุญเทพ และ วิริยญา แก้ววัฒนะ. 2550. อิทธิพลของขนาดอนุภาคและพื้นที่ผิวของเถ้าแกลบต่อคุณสมบัติทางกล การทนทานต่อความร้อนและสารเคมีของแผ่นยางปูพื้น. โครงการวิจัยทุนอุดหนุนวิจัย ปิงปประมาณ 2550, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

บุรณัฏฐ์ ฉัตรวีระ และ ทวีศักดิ์ คงทรัพย์. 2545. ความทนทานของคอนกรีตผสมเถ้าแกลบดำจากโรงสีข้าว. วารสารวิจัยและพัฒนา มจร. ปีที่ 25 ฉบับที่ 4 ตุลาคม-ธันวาคม 2545.

ปรีดา พิมพ์ขาวขำ. 2547. **ดินและแร่ดิน**. พิมพ์ครั้งที่ 5. สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ,
กรุงเทพฯ.

ปริญญญา จินดาประเสริฐ และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล. 2553. **ปูนซีเมนต์ ปอชโซลานและคอนกรีต**. พิมพ์
ครั้งที่ 6. สมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย, กรุงเทพฯ.

ปริญญญา จินดาประเสริฐ. 2549. **สารจีโอโพลิเมอร์:วัสดุเชื่อมประสานที่ไม่ใช้ปูนปูนซีเมนต์**. การ
ประชุมวิชาการเทคโนโลยีและนวัตกรรมสำหรับการพัฒนาอย่างยั่งยืน. คณะ
วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น, ขอนแก่น.

รองรัตน์ ระมิงค์วงศ์. 2553. **โครงการวิจัยและพัฒนาสมบัติเชิงกลของกระเบื้องปูพื้นดินเผาจากเถ้า
ลอยลิกไนต์**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท , มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนาเขตพื้นที่
ภาคพายัพ.

วรพงษ์ เทียมสอน. 2555. **เซรามิกเพื่อการก่อสร้างและเซรามิกเพื่องานเทคนิค** .พิมพ์ครั้งที่ 1.
สำนักพิมพ์โอเดียนสโตร์, กรุงเทพฯ.

วิมลธนา อนุอมกิจนุรักษ์. 2555. **การปรับปรุงกำลังอัด ของจีโอโพลิเมอร์ด้วยตะกอนดินจากระบบ
ผลิตน้ำ**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

สมศักดิ์ ขวาลาวัณย์. 2549. **เซรามิกส์ Ceramics**. พิมพ์ครั้งที่ 1. สำนักพิมพ์โอเดียนสโตร์ ,
กรุงเทพฯ.

สมาคมเซรามิกส์ไทย. 2551. **การทดสอบกระเบื้องเซรามิกส์ ตามมาตรฐาน ISO 10545**.

แหล่งที่มา : <http://www.thaiceramicsociety.or.th/pdf/Article/34.pdf>, 7 มกราคม 2557

ศูนย์วิจัยและฝึกอบรมด้านสิ่งแวดล้อม. 2552. **คู่มือการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีสะอาดในการผลิตเซรา
มิก**.กรมส่งเสริมคุณภาพสิ่งแวดล้อม กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม.

- Chandra, N., P. Sharma., G.L. Pashkov. and E.N. Voskresenskaya. 2008. Coal fly ash utilization: Low temperature sintering of wall tiles. **Waste Management** 28: 1993-2002.
- Dessai, R.R., J.A.E. Desa., D. Sen. and S. Mazumder. 2013. Effects of pressure and temperature on pore structure of ceramic synthesized from rice husk: A small angle neutron scattering investigation. **Journal of Alloys and Compounds** 564: 125-129.
- Furlani, E. and S. Mashio. 2013. Mechanical properties and microstructure of fast fired tiles made with blends of kaolin and olive powders. **Ceramics International** 39: 9391-9396.
- Kishore, R., V. Bhikshma and P.J.A. Prakash. 2011. Study on strength characteristics of high strength rice husk ash concrete. **Procedia Engineering** 14: 35-44.
- Madandoust, R., M.M. Ranjbar and H.A. Maghadam. 2010. Mechanical properties and durability assessment of rice husk ash concrete. **Biosystems Engineering** 110: 144-152.
- Olgum, A., Y. Erdogan., Y. Ayhan. and B. Zeybek. 2005. Development of ceramic tiles from coal fly ash and tincal ore waste. **Ceramics International** 31: 153-158.
- Sathawane, S.H., V.S. Vairagade and K.S. Kene. 2013. Combine effect of rice husk ash and fly ash on concrete by 30% cement replacement. **Procedia Engineering** 51: 35 – 44.
- Siqueira, E.J., I.V.P. Yoshida., L.C. Pardini. and M.A. Schiavon. 2009. Preparation and characterization of ceramic composites derived from rice husk ash and polysiloxane. **Ceramics International** 35: 213-220.
- Sokolar, R. and L. Smetanova. 2010. Dry pressed ceramic tiles based on fly ash–clay body influence of fly ash granulometry and pentasodium triphosphate addition. **Ceramics International** 36: 215-221.

Sutas, J., A. Mana and L. Pitak. 2012. Effect of rice husk and rice husk ash to properties of bricks. **Procedia Engineering** 32: 1061 – 106.

Torkaman, J., A. Ashori. and A.S. Momtazi. 2014. Using wood fiber waste, rice husk ash, and limestone powder waste as cement replacement materials for lightweight concrete blocks. **Construction and Building Materials** 50: 432–436.

Zimmer, A. and C.P. Bergmann. 2007. Fly ash of mineral coal as ceramic tiles raw material. **Waste Management** 27: 59-68.



ภาคผนวก



ที่ อก ๐๔๒๑ / ๒๕๖๓



ศูนย์พัฒนาอุตสาหกรรมเชรามิก
๔๒๔ หมู่ ๒ ตำบลศาลา อำเภอกะลา
จังหวัดลำปาง ๕๒๑๓๐

๒๕ พฤษภาคม ๒๕๕๗

เรื่อง ขอส่งรายงานการวิเคราะห์ทดสอบ

เรียน นายคณาธิป อิศระกุล

อ้างถึง แบบขอรับบริการเลขที่ Lb๒๑๔/๕๗

สิ่งที่ส่งมาด้วย รายงานผลการทดสอบทางกายภาพ จำนวน ๒ แผ่น

ตามที่อ้างถึง ท่านได้ขอรับบริการจากศูนย์พัฒนาอุตสาหกรรมเชรามิก กรมส่งเสริมอุตสาหกรรม
ในการทดสอบทางกายภาพตัวอย่างกระเบื้อง จำนวน ๓๕ ตัวอย่าง นั้น

บัดนี้ ศูนย์ ได้ดำเนินการเรียบร้อยแล้ว จึงขอส่งรายงานผลการทดสอบทางกายภาพ
ตามสิ่งที่ส่งมาด้วย

จึงเรียนมาเพื่อโปรดทราบ

ขอแสดงความนับถือ

(นางอรพรรณ ตันติวิรสุต)

ผู้อำนวยการศูนย์พัฒนาอุตสาหกรรมเชรามิก

ส่วนวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยี

โทรศัพท์ ๐ ๕๔๒๘ ๑๘๘๔ , ๐ ๕๔๒๘ ๒๓๗๖

โทรสาร ๐ ๕๔๒๘ ๑๘๘๕

ลำปาง นครแห่งความสุข
Lampang, The City of Happiness

*แอ่วลำปางบ่อบ่นแต่ชมฯ ปี ๕๘-๕๙

“กระทรวงอุตสาหกรรม เป็นที่พึ่งของผู้ประกอบการและประชาชนอย่างแท้จริง”



ศูนย์พัฒนาอุตสาหกรรมเซรามิก กรมส่งเสริมอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม
424 หมู่ 2 ถนนพหลโยธิน ตำบลศาลา อำเภอเกาะคา จังหวัดลำปาง 52130
โทร. 0 5428 1884, 0 5428 2376 โทรสาร 0 5428 1885

หน้าที 1 ของ 2

รายงานผลการวิเคราะห์/ทดสอบ
การทดสอบทางกายภาพ

เลขที่การขอรับบริการ: L279/57 วันที่ขอรับบริการ: 14 พฤษภาคม 2557 วันที่ออกรายงาน : 26 พฤษภาคม 2557
 บริษัท/ที่อยู่ : นายคนอัป อิสระกุล เลขที่ 180/27 ถ.งามวงศ์วาน บางเขน เมือง นนทบุรี 11000
 ชื่อตัวอย่าง : ตามผลการทดสอบ จำนวน: 35 ตัวอย่าง
 รายละเอียดตัวอย่าง : กระเบื้อง
 วิธีทดสอบ : การทดสอบค่าความทนทานต่อการหัก ตามเครื่อง Lloyd รุ่น LRX5K
 วันที่ทำการทดสอบ : 19-23 พฤษภาคม 2557
 ผลการทดสอบ :

ชื่อตัวอย่าง	ค่าความทนทานต่อการหัก (Kgf/cm ²)	ชื่อตัวอย่าง	ค่าความทนทานต่อการหัก (Kgf/cm ²)
ดิน 800	9.18	แกลบ 900/50	7.02
ดิน 900	24.28	แกลบ 1000/10	15.23
ดิน 1000	64.85	แกลบ 1000/30	28.96
ดิน 1100	68.53	แกลบ 1000/50	7.94
ดิน 1200	128.96	แกลบ 1100/10	48.76
แกลบ 800/10	4.20	แกลบ 1100/30	31.72
แกลบ 800/30	6.20	แกลบ 1100/50	24.78
แกลบ 800/50	2.05	แกลบ 1200/10	41.43
แกลบ 900/10	15.45	แกลบ 1200/30	48.76
แกลบ 900/30	13.78	แกลบ 1200/50	38.78

พ.ศ. ๒๕๕๖

หมายเหตุ : - รายงานผลการวิเคราะห์/ทดสอบนี้ รับรองเฉพาะตัวอย่างที่ได้รับเท่านั้น แต่ไม่รับรองถึงวัตถุที่มีตราหรือเครื่องหมายเดียวกับตัวอย่างนี้
 - ห้ามสำเนา รายงานผลการวิเคราะห์/ทดสอบเพียงบางส่วน โดยไม่ได้รับการอนุญาตเป็นลายลักษณ์อักษรจากห้องปฏิบัติการ
 (ยกเว้นสำเนารายงานทั้งฉบับ)

ภาพผนวกที่ 1 ผลการวิเคราะห์ ทดสอบทางกายภาพ ค่าความต้านทานต่อการหัก



ศูนย์พัฒนาอุตสาหกรรมเซรามิก กรมส่งเสริมอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม
425 หมู่ 2 ถนนพหลโยธิน ตำบลศาลา อำเภอเกาะคา จังหวัดลำปาง 52130
โทร. 0 5428 1884, 0 5428 2376 โทรสาร 0 5428 1885

รายงานผลการวิเคราะห์/ทดสอบ
การทดสอบทางกายภาพ

หน้าที่ 2 ของ 2

เลขที่การขอรับบริการ: L279/57 ต่อ
ผลการทดสอบ :

ชื่อตัวอย่าง	ค่าความทนทานต่อการหัก (Kgf/cm ²)	ชื่อตัวอย่าง	ค่าความทนทานต่อการหัก (Kgf/cm ²)
ลิกโนต์ 800/10	12.51	ลิกโนต์ 1100/10	117.29
ลิกโนต์ 800/30	10.00	ลิกโนต์ 1100/30	110.26
ลิกโนต์ 800/50	13.70	ลิกโนต์ 1100/50	96.29
ลิกโนต์ 900/10	38.34	ลิกโนต์ 1200/10	178.74
ลิกโนต์ 900/30	19.01	ลิกโนต์ 1200/30	145.75
ลิกโนต์ 900/50	36.49	ลิกโนต์ 1200/50	157.91
ลิกโนต์ 1000/10	59.51		
ลิกโนต์ 1000/30	25.39		
ลิกโนต์ 1000/50	28.76		

(นายสิงห์คำ อายะชู)

วิศวกรชำนาญการ รักษาการแทน
ผู้อำนวยการส่วนวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยี
ผู้รับรองการตรวจสอบรายงานผล

(นางอรพรรณ ตันศิริสุด)

ผู้อำนวยการศูนย์พัฒนาอุตสาหกรรมเซรามิก
ผู้อนุมัติรายงานผล

(นางสาวจิรประภา ขจรบุญ)

นักวิทยาศาสตร์ชำนาญการ รักษาการแทน
หัวหน้างานวิเคราะห์ทดสอบ
ผู้ตรวจสอบรายงานผล

หมายเหตุ : - รายงานผลการวิเคราะห์/ทดสอบนี้ รับรองเฉพาะตัวอย่างที่ได้รับเท่านั้น แต่ไม่รับรองถึงวัตถุที่มีตราหรือเครื่องหมายเดียวกับตัวอย่างนี้
- ห้ามสำเนา รายงานผลการวิเคราะห์/ทดสอบเพียงบางส่วน โดยไม่ได้รับการอนุญาตเป็นลายลักษณ์อักษรจากห้องปฏิบัติการ
(ยกเว้นสำเนารายงานทั้งฉบับ)

ภาพผนวกที่ 1 (ต่อ)

ชั้นทดสอบ	ที่	น้ำหนักกด(kg)	ความหนา (mm.)		ความกว้าง (mm.)		ความกว้างเฉลี่ย (cm)	ความหนาเฉลี่ย (cm)	MOR (kg/cm ²)	เฉลี่ย คำนวณผลมาตรฐาน
			ความหนา 1	ความหนา 2	ความกว้าง 1	ความกว้าง 2				
ดิน 800	1	12.670	9.990	9.930	106.190	106.080	10.614	0.996	10.83	9.18
	2	7.610	9.200	9.290	106.440	106.450	10.645	0.925	7.53	2.93
	3	6.550	10.430	9.880	106.470	106.900	10.669	1.016	5.36	
	4	9.720	9.410	9.480	106.480	106.510	10.650	0.945	9.21	
	5	13.040	9.300	9.140	106.450	106.400	10.643	0.922	12.97	
ดิน 900	1	33.630	9.030	9.120	104.990	104.990	10.494	0.908	35.02	24.28
	2	23.840	9.310	9.450	106.460	106.410	10.544	0.938	22.84	7.68
	3	22.400	10.580	10.910	106.060	106.250	10.516	1.075	16.61	
	4	22.930	10.300	10.520	106.320	106.340	10.533	1.041	18.08	
	5	25.000	8.450	8.770	106.140	106.220	10.518	0.861	28.86	
ดิน 1000	1	75.950	9.360	9.220	100.810	100.930	10.087	0.929	78.52	64.85
	2	56.400	9.590	9.520	101.680	101.790	10.174	0.956	54.65	11.80
	3	70.720	9.700	9.540	100.540	100.380	10.046	0.962	68.46	
	4	64.090	8.750	9.020	101.500	101.540	10.152	0.889	71.97	
	5	60.710	10.370	10.290	101.120	101.130	10.113	1.033	50.63	
ดิน 1100	1	66.880	10.070	10.240	101.300	101.830	10.157	1.016	66.61	68.53
	2	77.410	9.680	9.660	101.230	101.220	10.123	0.967	73.60	11.35
	3	70.760	9.670	10.010	101.000	101.090	10.105	0.984	65.09	
	4	87.460	9.560	9.530	100.970	100.980	10.098	0.955	85.56	
	5	66.630	9.820	9.670	102.140	102.210	10.218	0.975	61.80	
ดิน 1200	1	102.900	8.290	8.310	96.070	96.370	9.622	0.830	139.71	128.96
	2	104.300	8.630	8.580	97.330	96.820	9.708	0.861	130.59	10.57
	3	87.790	8.390	8.400	96.970	96.100	9.604	0.840	116.74	
	4	149.300	9.980	10.020	97.100	97.140	9.712	1.000	138.35	
	5	101.000	8.780	8.900	97.370	97.450	9.741	0.884	119.41	
แกลบ 800-10	1	3.720	9.400	9.400	107.030	106.930	10.698	0.940	3.54	4.20
	2	4.540	9.660	9.510	106.560	107.250	10.691	0.959	4.16	0.68
	3	4.270	8.560	8.630	106.090	106.220	10.616	0.859	4.91	
แกลบ 800-30	1	6.510	9.360	9.520	106.980	106.070	10.603	0.944	6.20	6.20
แกลบ 800-50	1	2.560	9.490	9.670	106.590	106.710	10.665	0.958	2.35	2.05
	2	2.380	9.710	9.910	106.420	106.430	10.643	0.981	2.09	0.32
	3	2.340	10.610	10.780	106.630	106.590	10.661	1.070	1.73	
	4	2.880	10.200	10.090	106.520	106.560	10.654	1.015	2.36	
	5	1.850	9.680	9.420	106.470	106.850	10.647	0.955	1.71	
แกลบ 900-10	1	14.690	9.320	9.390	104.830	104.860	10.485	0.936	14.41	15.45
	2	11.290	9.000	8.960	106.260	106.150	10.520	0.898	11.98	4.39
	3	17.330	8.250	8.350	103.990	103.970	10.398	0.830	21.77	
	4	17.110	9.700	9.700	103.970	104.030	10.400	0.910	17.88	
	5	10.540	8.770	9.170	106.110	106.100	10.511	0.897	11.22	
แกลบ 900-30	1	11.430	10.030	10.020	101.800	102.700	10.225	1.003	10.01	13.78
	2	14.670	9.150	9.230	101.530	101.540	10.154	0.919	15.40	2.56
	3	14.260	9.100	9.090	101.160	101.130	10.115	0.910	15.34	
	4	14.220	9.280	9.360	102.010	102.300	10.216	0.933	14.39	
แกลบ 900-50	1	3.170	9.530	9.480	101.710	101.650	10.168	0.961	3.11	7.02
	2	3.480	9.760	9.710	101.620	106.200	10.391	0.974	3.18	4.46
	3	10.600	8.380	8.680	101.780	101.830	10.181	0.853	12.88	
	4	9.050	8.620	8.770	102.020	101.900	10.196	0.870	10.57	
	5	5.940	9.670	9.760	106.000	106.040	10.502	0.972	5.39	
	1	22.850	10.640	10.440	102.630	102.630	10.263	1.054	18.04	15.23
	2	16.090	9.200	9.130	102.990	102.970	10.298	0.917	16.74	4.90

ภาพผนวกที่ 2 ผลการทดสอบ น้ำหนักแรงกด ความหนา และความกว้าง ของกระเบื้องตัวอย่าง

แถบ 1000/10	3	19.090	9.920	9.970	103.120	103.100	10.311	0.995	16.84	
	4	7.590	10.010	10.090	103.680	103.460	10.352	1.005	6.54	
	5	15.690	8.870	8.510	103.990	103.970	10.308	0.869	17.98	
แถบ 1000/30	1	16.910	8.660	9.210	99.230	99.220	9.923	0.894	19.21	28.96
	2	25.940	8.630	8.450	9.860	98.630	5.425	0.854	59.01	17.67
	3	23.300	9.480	9.510	98.890	98.890	9.889	0.950	23.52	
	4	28.730	9.530	9.570	97.850	97.800	9.783	0.955	28.98	
	5	10.030	8.070	8.030	99.010	98.630	9.882	0.805	14.10	
แถบ 1000/50	1	5.980	9.870	9.760	104.600	104.550	10.498	0.982	5.34	7.94
	2	9.340	9.140	9.140	104.480	104.500	10.449	0.914	9.63	3.12
	3	8.570	8.840	9.890	104.340	104.340	10.434	0.937	8.43	
	4	4.740	9.590	9.730	105.170	105.300	10.524	0.966	4.34	
	5	11.560	9.370	9.170	101.140	101.220	10.118	0.927	11.97	
แถบ 1100/10	1	28.670	9.180	9.120	98.210	98.120	9.817	0.915	31.40	48.76
	2	48.010	8.930	8.910	99.680	99.990	9.984	0.892	54.40	12.39
	3	34.930	8.990	8.780	96.940	96.970	9.696	0.889	41.07	
	4	53.430	8.820	8.890	98.090	98.060	9.808	0.886	62.53	
	5	50.130	9.160	9.200	98.430	98.400	9.842	0.918	54.40	
แถบ 1100/30	1	25.630	7.830	7.800	96.090	96.020	9.606	0.782	39.32	31.72
	2	20.350	8.110	8.000	96.080	96.110	9.610	0.806	29.37	4.49
	3	19.590	7.840	8.000	96.570	96.580	9.658	0.792	29.10	
	4	19.610	7.950	8.080	96.370	96.440	9.641	0.802	28.50	
	5	22.400	8.090	8.040	95.960	96.000	9.598	0.807	32.29	
แถบ 1100/50	1	23.680	9.490	9.500	101.730	101.740	10.174	0.950	23.24	24.78
	2	23.990	8.910	8.790	101.200	101.290	10.125	0.885	27.23	1.86
	3	19.780	8.850	8.750	101.380	101.570	10.148	0.880	22.65	
	4	25.190	9.410	9.470	101.470	101.270	10.137	0.944	25.10	
	5	29.280	10.060	10.050	101.590	101.470	10.153	1.006	25.67	
แถบ 1200/10	1	25.780	7.770	7.600	95.390	95.340	9.537	0.769	41.20	41.43
	2	25.780	8.340	8.370	95.120	95.190	9.516	0.836	34.93	4.96
	3	26.180	7.840	7.780	95.110	95.110	9.511	0.781	40.61	
	4	31.370	8.380	8.460	95.940	95.940	9.594	0.842	41.51	
	5	36.540	8.330	8.460	95.340	95.580	9.546	0.840	48.88	
แถบ 1200/30	1	28.810	7.440	7.680	98.440	98.480	9.846	0.756	46.08	48.76
	2	33.960	8.410	8.470	98.450	98.490	9.847	0.844	43.57	4.62
	3	45.430	8.940	8.350	98.530	98.530	9.853	0.865	55.52	
	4	42.090	8.610	8.770	98.600	98.580	9.859	0.860	50.88	
	5	47.260	9.480	9.530	98.640	98.650	9.865	0.951	47.73	
แถบ 1200/50	1	20.510	8.310	8.390	95.330	95.220	9.528	0.835	27.79	38.78
	2	22.870	8.080	7.990	95.160	95.140	9.515	0.804	33.51	9.82
	3	37.700	8.680	8.870	96.120	96.230	9.618	0.878	45.82	
	4	37.520	9.800	9.880	100.060	99.990	10.003	0.984	34.87	
	5	44.070	8.750	8.740	99.910	99.930	9.992	0.875	51.91	
ลิกไนท์ 800/10	1	12.960	10.410	10.340	106.380	106.300	10.634	1.038	10.19	12.51
	2	11.580	9.810	9.850	105.620	105.720	10.567	0.983	10.21	2.28
	3	16.720	10.290	10.240	106.940	105.930	10.594	1.027	13.48	
	4	14.550	9.580	9.720	105.800	105.830	10.582	0.995	13.29	
	5	17.270	9.820	9.710	105.890	105.980	10.594	0.977	15.39	
ลิกไนท์ 800/30	1	8.200	9.480	9.490	106.210	106.190	10.620	0.949	7.72	10.00
	2	23.010	9.970	9.680	105.140	105.150	10.515	0.983	20.40	5.92
	3	8.650	9.680	9.680	105.670	105.790	10.573	0.968	7.86	
	4	6.960	10.310	10.350	106.080	106.050	10.607	1.033	5.53	
	5	10.340	10.110	10.260	106.110	106.100	10.611	1.019	8.45	

ภาพผนวกที่ 2 (ต่อ)

ลิแกนด์ 800/50	1	21.380	9.600	9.350	105.000	104.990	10.500	0.948	20.41	13.70
	2	21.870	10.000	10.310	105.510	105.320	10.542	1.016	18.11	5.16
	3	11.310	9.590	9.770	105.090	105.190	10.514	0.958	10.33	
	4	11.230	9.400	9.810	105.760	105.030	10.590	0.961	10.35	
	5	9.660	9.480	9.320	105.950	105.800	10.588	0.940	9.29	
ลิแกนด์ 900/10	1	53.750	10.390	10.780	103.640	103.650	10.365	1.059	41.66	38.34
	2	50.030	10.540	10.470	103.440	103.380	10.341	1.051	39.46	2.72
	3	37.620	9.330	9.800	102.580	102.650	10.262	0.957	36.06	
	4	42.580	10.170	10.070	103.440	103.450	10.346	1.012	36.17	
ลิแกนด์ 900/30	1	25.590	10.250	10.240	104.990	104.560	10.478	1.025	20.92	19.01
	2	24.170	10.100	10.290	104.580	104.570	10.458	1.020	20.01	1.39
	3	19.670	9.890	9.890	104.560	104.700	10.463	0.979	17.65	
	4	21.930	10.180	10.070	104.950	105.080	10.502	1.013	18.33	
	5	22.090	10.190	10.290	104.710	104.690	10.470	1.024	18.11	
ลิแกนด์ 900/50	1	32.530	9.680	9.530	104.590	104.510	10.455	0.951	30.35	36.49
	2	51.680	10.220	10.310	104.580	104.510	10.455	1.027	42.22	6.19
	3	49.340	9.910	9.830	104.690	104.670	10.468	0.987	43.55	
	4	46.100	10.250	10.880	104.520	104.870	10.470	1.057	35.50	
	5	32.980	9.530	9.670	104.500	104.540	10.452	0.950	30.81	
ลิแกนด์ 1000/10	1	64.980	9.900	9.890	102.010	101.980	10.200	0.990	58.56	59.51
	2	62.280	9.100	9.300	102.030	102.230	10.213	0.920	54.84	9.14
	3	49.090	9.310	9.070	101.790	101.810	10.180	0.919	51.39	
	4	56.190	9.820	10.040	101.360	101.350	10.136	0.993	50.60	
	5	60.120	9.890	9.890	102.220	102.180	10.220	0.989	72.13	
ลิแกนด์ 1000/30	1	31.010	9.250	9.240	104.080	103.900	10.399	0.925	31.37	25.39
	2	29.660	9.600	9.710	103.690	103.740	10.372	0.955	27.61	6.04
	3	31.410	11.070	11.080	103.850	103.860	10.386	1.108	22.19	
	4	31.740	9.710	9.710	103.360	103.370	10.338	0.971	29.31	
	5	16.720	9.350	9.390	103.990	103.980	10.399	0.938	16.47	
ลิแกนด์ 1000/50	1	21.570	9.530	9.690	104.420	104.350	10.439	0.951	20.14	28.76
	2	27.360	9.620	9.850	105.070	104.850	10.496	0.974	24.75	8.05
	3	48.540	10.020	10.070	104.880	104.790	10.484	1.005	41.30	
	4	31.600	9.430	9.250	104.480	104.450	10.447	0.934	31.21	
	5	30.270	9.950	9.900	104.680	104.720	10.470	0.993	26.39	
ลิแกนด์ 1100/10	1	125.500	9.000	9.050	99.660	99.690	9.958	0.903	139.13	117.29
	2	90.430	9.230	9.220	98.910	98.900	9.892	0.923	96.68	35.74
	3	81.910	9.350	9.420	98.540	98.860	9.875	0.939	84.67	
	4	161.200	9.390	9.320	97.850	97.870	9.785	0.936	169.40	
	5	87.590	9.070	9.100	98.940	98.820	9.888	0.909	96.59	
ลิแกนด์ 1100/30	1	99.430	9.770	9.740	104.850	104.870	10.486	0.976	89.68	110.26
	2	65.410	9.440	9.680	104.530	104.660	10.460	0.956	61.58	34.93
	3	164.800	9.800	9.910	103.950	101.010	10.248	0.985	149.02	
	4	114.500	9.400	9.140	101.810	101.790	10.180	0.927	117.80	
	5	136.700	9.420	9.540	102.760	102.760	10.276	0.948	133.22	
ลิแกนด์ 1100/50	1	83.290	9.160	9.180	99.170	99.740	9.946	0.917	89.63	96.29
	2	134.800	9.610	9.610	100.170	100.150	10.016	0.961	131.16	22.39
	3	85.530	8.720	8.650	98.810	98.710	9.876	0.869	103.33	
	4	68.560	9.140	9.140	101.740	101.740	10.174	0.914	72.50	
	5	80.060	9.080	9.200	101.850	101.800	10.183	0.914	84.71	
ลิแกนด์ 1200/10	1	119.400	8.53	8.630	95.480	95.550	9.552	0.863	151.06	178.74
	2	115.100	9.090	9.090	95.500	95.480	9.549	0.908	131.72	40.05
	3	135.500	8.450	8.310	96.650	96.760	9.671	0.838	179.57	
	4	127.100	7.760	7.800	96.030	96.020	9.603	0.778	196.81	

ภาพผนวกที่ 2 (ต่อ)

	5	193.300	8.820	8.810	95.480	95.450	9.547	0.882	234.52	
สีก้นท์ 1200/30	1	135.600	8.800	8.760	96.480	96.470	9.648	0.878	164.10	145.75
	2	110.500	8.920	8.860	94.430	94.500	9.447	0.889	133.36	22.59
	3	129.200	8.410	8.690	94.570	94.660	9.462	0.865	168.12	
	4	94.580	8.830	8.960	94.810	94.650	9.473	0.890	113.57	
	5	125.500	8.930	8.950	94.460	94.450	9.446	0.894	149.62	
สีก้นท์ 1200/50	1	147.200	8.310	8.530	97.490	97.540	9.752	0.842	191.63	157.91
	2	129.800	8.890	8.860	97.770	97.760	9.777	0.888	151.70	25.40
	3	136.700	8.410	8.630	97.810	97.760	9.779	0.852	173.32	
	4	116.700	8.490	8.550	98.010	98.060	9.804	0.852	147.59	
	5	103.700	8.780	8.890	95.420	95.380	9.540	0.884	125.33	

ภาพผนวกที่ 2 (ต่อ)

ที่ อก ๐๔๒๑/๒๙๙



ศูนย์พัฒนาอุตสาหกรรมเซรามิก
๔๒๔ หมู่ ๒ ตำบลศาลา อำเภอกะลา
จังหวัดลำปาง ๕๒๑๓๐

๓๐ พฤษภาคม ๒๕๕๗

เรื่อง ขอส่งรายงานการวิเคราะห์ทดสอบ

เรียน นายคณาธิป อิศระกุล

อ้างถึง แบบขอรับบริการเลขที่ L๒๘๐/๕๗

สิ่งที่ส่งมาด้วย รายงานผลการทดสอบทางกายภาพ จำนวน ๒ แผ่น

ตามที่อ้างถึง ท่านได้ขอรับบริการจากศูนย์พัฒนาอุตสาหกรรมเซรามิก กรมส่งเสริมอุตสาหกรรม
ในการทดสอบทางกายภาพตัวอย่างกระเบื้อง จำนวน ๓๕ ตัวอย่าง นั้น

บัดนี้ ศูนย์ ได้ดำเนินการเรียบร้อยแล้ว จึงขอส่งรายงานผลการทดสอบทางกายภาพ
ตามสิ่งที่ส่งมาด้วย

จึงเรียนมาเพื่อโปรดทราบ

ขอแสดงความนับถือ

(นางอรพรรณ ดันติวีรสุต)

ผู้อำนวยการศูนย์พัฒนาอุตสาหกรรมเซรามิก

ส่วนวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยี

โทรศัพท์ ๐ ๕๔๒๘ ๑๘๘๔ , ๐ ๕๔๒๘ ๒๓๗๖

โทรสาร ๐ ๕๔๒๘ ๑๘๘๕



ศูนย์พัฒนาอุตสาหกรรมเซรามิก กรมส่งเสริมอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม
424 หมู่ 2 ถนนพหลโยธิน ตำบลศาลา อำเภอเกาะคา จังหวัดลำปาง 52130
โทร. 0 5428 1884, 0 5428 2376 โทรสาร 0 5428 1885

รายงานผลการวิเคราะห์/ทดสอบ

การทดสอบทางกายภาพ

หน้าที่ 1 ของ 2

เลขที่การขอรับบริการ: L280/57 วันที่ขอรับบริการ: 14 พฤษภาคม 2557 วันที่ออกรายงาน: 30 พฤษภาคม 2557

บริษัท/ที่อยู่: นายคณาธิป อีสระกุล

เลขที่ 180/27 ถ.งามวงศ์วาน บางเขน เมือง นนทบุรี 11000

ชื่อตัวอย่าง: ตามผลการทดสอบ จำนวน: 35 ตัวอย่าง

รายละเอียดตัวอย่าง: กระเบื้อง

วิธีทดสอบ: การทดสอบการดูดซึมน้ำอ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM C373-88

วันที่ทำการทดสอบ: 20-28 พฤษภาคม 2557

ผลการทดสอบ:

ชื่อตัวอย่าง	การดูดซึมน้ำ (ร้อยละ)	ชื่อตัวอย่าง	การดูดซึมน้ำ (ร้อยละ)
ดิน 800	23.81	แกลบ 900/50	43.65
ดิน 900	21.17	แกลบ 1000/10	31.62
ดิน 1000	17.45	แกลบ 1000/30	39.40
ดิน 1100	17.30	แกลบ 1000/50	42.56
ดิน 1200	6.71	แกลบ 1100/10	27.21
แกลบ 800/10	37.37	แกลบ 1100/30	29.91
แกลบ 800/30	59.16	แกลบ 1100/50	32.16
แกลบ 800/50	43.58	แกลบ 1200/10	29.82
แกลบ 900/10	35.03	แกลบ 1200/30	21.65
แกลบ 900/30	35.80	แกลบ 1200/50	24.42

หมายเหตุ :
- รายงานผลการวิเคราะห์/ทดสอบนี้ รับรองเฉพาะตัวอย่างที่ได้รับเท่านั้น แต่ไม่รับรองถึงวัตถุที่มีตราหรือเครื่องหมายเดียวกับตัวอย่างนี้
- ห้ามสำเนารายงานผลการวิเคราะห์/ทดสอบเพียงบางส่วน โดยไม่ได้รับการอนุญาตเป็นลายลักษณ์อักษรจากห้องปฏิบัติการ
(ยกเว้นสำเนารายงานทั้งฉบับ)

ภาพผนวกที่ 3 ผลการวิเคราะห์ ทดสอบทางกายภาพ ค่าการดูดซึมน้ำ



ศูนย์พัฒนาอุตสาหกรรมเซรามิก กรมส่งเสริมอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม
425 หมู่ 2 ถนนพหลโยธิน ตำบลศาลา อำเภอเกาะคา จังหวัดลำปาง 52130
โทร. 0 5428 1884, 0 5428 2376 โทรสาร 0 5428 1885

รายงานผลการวิเคราะห์/ทดสอบ
การทดสอบทางกายภาพ

หน้าที่ 2 ของ 2

เลขที่การขอรับบริการ: L280/57 ต่อ
ผลการทดสอบ :

ชื่อตัวอย่าง	การดูดซึมน้ำ (ร้อยละ)	ชื่อตัวอย่าง	การดูดซึมน้ำ (ร้อยละ)
ลิกไนต์ 800/10	23.70	ลิกไนต์ 1100/10	11.98
ลิกไนต์ 800/30	22.02	ลิกไนต์ 1100/30	16.83
ลิกไนต์ 800/50	21.46	ลิกไนต์ 1100/50	15.93
ลิกไนต์ 900/10	20.45	ลิกไนต์ 1200/10	2.18
ลิกไนต์ 900/30	23.38	ลิกไนต์ 1200/30	9.16
ลิกไนต์ 900/50	22.35	ลิกไนต์ 1200/50	4.49
ลิกไนต์ 1000/10	16.84		
ลิกไนต์ 1000/30	21.84		
ลิกไนต์ 1000/50	23.50		

(นายสิงห์คำ อายะชู)

วิศวกรชำนาญการ รักษาการแทน
ผู้อำนวยการส่วนวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยี
ผู้รับรองการตรวจสอบรายงานผล

(นางอรพรรณ ต้นดีวิรส)

ผู้อำนวยการศูนย์พัฒนาอุตสาหกรรมเซรามิก
ผู้อนุมัติรายงานผล

(นางสาวจิรประภา ชงบุญ)

นักวิทยาศาสตร์ชำนาญการ รักษาการแทน
หัวหน้างานวิเคราะห์ทดสอบ
ผู้ตรวจสอบรายงานผล

หมายเหตุ :
- รายงานผลการวิเคราะห์/ทดสอบนี้ รับรองเฉพาะตัวอย่างที่ได้รับเท่านั้น แต่ไม่รับรองถึงวัตถุที่มีตราหรือเครื่องหมายเดียวกับตัวอย่างนี้
- ห้ามสำเนารายงานผลการวิเคราะห์/ทดสอบเพียงบางส่วน โดยไม่ได้รับการอนุญาตเป็นลายลักษณ์อักษรจากห้องปฏิบัติการ
(ยกเว้นสำเนารายงานทั้งฉบับ)

ภาพผนวกที่ 3 (ต่อ)

ชนิดทดสอบ	ที่	น.แห้ง ๑๖ g	น.เปียก ๑๖ g	น.เปียกจริงในน้ำ g	ความพรุนด้วยปรอท %	การดูดซึมน้ำ %	ความหนาแน่นปรอท g/cm ³	ความหนาแน่นที่ก้น g/cm ³
ดิน 800	1	153.36	191.23		19.80	24.69	1.00	0.80
	2	145.56	180.80		19.49	24.21	1.00	0.81
	3	144.73	179.66		19.44	24.13	1.00	0.81
	4	154.93	189.31		18.16	22.19	1.00	0.82
	5	163.77	199.91		18.08	22.07	1.00	0.82
	เฉลี่ย				19.22	23.81	1.00	0.81
	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน				0.73	1.11	0.00	0.01
ดิน 900	1	166.60	202.43		17.70	21.51	1.00	0.82
	2	161.72	194.44		16.83	20.23	1.00	0.83
	3	155.04	189.67		18.26	22.34	1.00	0.82
	4	160.59	193.68		17.08	20.61	1.00	0.83
	5	160.03	191.02		16.22	19.37	1.00	0.84
	เฉลี่ย				17.47	21.17	1.00	0.83
	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน				0.64	0.94	0.00	0.01
ดิน 1000	1	161.55	194.11		16.77	20.15	1.00	0.83
	2	168.51	197.64		14.74	17.29	1.00	0.86
	3	153.93	181.01		14.96	17.59	1.00	0.85
	4	155.92	178.97		12.88	14.78	1.00	0.87
	5	155.59	181.81		14.42	16.85	1.00	0.86
	เฉลี่ย				14.84	17.45	1.00	0.85
	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน				1.59	2.20	0.00	0.02
ดิน 1100	1	169.07	195.86		13.68	15.85	1.00	0.86
	2	166.86	192.33		13.24	15.26	1.00	0.87
	3	163.16	193.75		15.79	18.75	1.00	0.84
	4	164.08	195.81		16.20	19.34	1.00	0.84
	5	163.82	197.60		17.10	20.62	1.00	0.83
	เฉลี่ย				14.73	17.30	1.00	0.85
	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน				1.48	2.04	0.00	0.01
ดิน 1200	1	158.82	170.71		6.97	7.49	1.00	0.93
	2	163.27	177.44		7.99	8.68	1.00	0.92
	3	163.56	170.62		4.14	4.32	1.00	0.96
	4	158.86	168.93		5.96	6.34	1.00	0.94
	5	158.68	169.74		6.52	6.97	1.00	0.93
	เฉลี่ย				6.26	6.71	1.00	0.94
	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน				1.64	1.86	0.00	0.02
แกลบ 800/10	1	122.17	166.57		26.66	36.34	1.00	0.73
	2	135.05	185.47		27.18	37.33	1.00	0.73
	3	124.66	170.88		27.05	37.08	1.00	0.73
	4	123.88	171.84		27.91	38.71	1.00	0.72
	5	132.89	181.23		26.67	36.38	1.00	0.73
	เฉลี่ย				27.20	37.37	1.00	0.73
	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน				0.52	0.99	0.00	0.01
แกลบ 800/30	1	93.01	149.12		37.63	60.33	1.00	0.62
	2	104.21	166.01		37.23	59.30	1.00	0.63
	3	100.77	160.06		37.04	58.84	1.00	0.63
	4	97.27	153.85		36.78	58.17	1.00	0.63
	5	97.07	152.17		36.21	56.76	1.00	0.64
	เฉลี่ย				37.17	59.16	1.00	0.63
	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน				0.36	0.91	0.00	0.00
แกลบ 800/50	1	120.55	174.44		30.89	44.70	1.00	0.69
	2	130.57	187.46		30.35	43.57	1.00	0.70
	3	109.06	175.41		-13.48	-11.88	1.00	1.13
	4	118.02	168.15		29.81	42.48	1.00	0.70
	5	121.69	172.89		29.61	42.07	1.00	0.70

ภาพผนวกที่ 4 ผลการทดสอบ ความหนาแน่น และ เปอร์เซนต์ความพรุนปรากฏ

					เฉลี่ย	19.39	43.58	1.00	0.81
					ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	21.02	28.72	0.00	0.22
แกลบ 900/10	1	124.19	168.51			26.30	35.69	1.00	0.74
	2	126.60	170.83			25.89	34.94	1.00	0.74
	3	123.59	167.40			26.17	35.45	1.00	0.74
	4	123.91	166.09			25.40	34.04	1.00	0.75
	5	118.27	161.92			26.96	36.91	1.00	0.73
					เฉลี่ย	25.94	35.03	1.00	0.74
					ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.40	0.73	0.00	0.00
แกลบ 900/30	1	93.92	144.80			35.14	54.17	1.00	0.65
	2	123.18	167.53			26.47	36.00	1.00	0.74
	3	120.39	164.15			26.66	36.35	1.00	0.73
	4	122.77	165.81			25.96	35.06	1.00	0.74
	5	130.10	170.17			23.55	30.80	1.00	0.76
					เฉลี่ย	28.56	40.40	1.00	0.71
					ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	4.40	9.20	0.00	0.04
แกลบ 900/50	1	103.27	156.05			33.82	51.11	1.00	0.66
	2	123.36	175.15			29.57	41.98	1.00	0.70
	3	123.24	175.02			29.59	42.02	1.00	0.70
	4	111.78	155.94			28.32	39.51	1.00	0.72
	5	128.00	182.32			29.79	42.44	1.00	0.70
					เฉลี่ย	30.32	43.65	1.00	0.70
					ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	2.41	5.11	0.00	0.02
แกลบ 1000/10	1	135.93	179.32			24.20	31.92	1.00	0.76
	2	132.41	173.43			23.65	30.98	1.00	0.76
	3	131.08	171.84			23.72	31.10	1.00	0.76
	4	124.20	164.54			24.52	32.48	1.00	0.75
	5	125.38	163.70			23.41	30.56	1.00	0.77
					เฉลี่ย	24.02	31.62	1.00	0.76
					ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.41	0.71	0.00	0.00
แกลบ 1000/30	1	106.98	151.16			29.23	41.30	1.00	0.71
	2	103.45	141.50			26.89	36.78	1.00	0.73
	3	105.03	146.58			28.35	39.56	1.00	0.72
	4	97.85	136.95			28.55	39.96	1.00	0.71
	5	99.47	134.44			26.01	35.16	1.00	0.74
					เฉลี่ย	28.25	39.40	1.00	0.72
					ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.98	1.90	0.00	0.01
แกลบ 1000/50	1	112.17	157.28			28.68	40.22	1.00	0.71
	2	114.14	161.88			29.49	41.83	1.00	0.71
	3	111.12	164.80			32.57	48.31	1.00	0.67
	4	127.36	178.14			28.51	39.87	1.00	0.71
	5	118.89	168.27			29.35	41.53	1.00	0.71
					เฉลี่ย	29.81	42.56	1.00	0.70
					ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	1.89	3.93	0.00	0.02
แกลบ 1100/10	1	129.33	156.53			17.38	21.03	1.00	0.83
	2	96.92	127.10			23.75	31.14	1.00	0.76
	3	87.36	112.13			22.09	28.35	1.00	0.78
	4	88.13	113.07			22.06	28.30	1.00	0.78
	5	87.96	114.07			22.89	29.68	1.00	0.77
					เฉลี่ย	21.32	27.21	1.00	0.79
					ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	2.74	4.32	0.00	0.03
แกลบ 1100/30	1	89.58	116.83			23.32	30.42	1.00	0.77
	2	93.40	121.66			23.23	30.26	1.00	0.77
	3	89.01	115.34			22.83	29.58	1.00	0.77
	4	95.20	123.18			22.71	29.39	1.00	0.77
	5	94.93	123.53			23.15	30.13	1.00	0.77
					เฉลี่ย	23.02	29.91	1.00	0.77

ภาพผนวกที่ 4 (ต่อ)

		ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน			0.30	0.50	0.00	0.00
แถบ 1100/50	1	130.67	170.13		23.19	30.20	1.00	0.77
	2	138.46	185.09		25.19	33.68	1.00	0.75
	3	121.11	159.71		24.17	31.87	1.00	0.76
	4	115.84	153.96		24.76	32.91	1.00	0.75
	5	115.74	151.03		23.37	30.49	1.00	0.77
	เฉลี่ย				24.33	32.16	1.00	0.76
	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน				0.87	1.50	0.00	0.01
แถบ 1200/10	1	98.28	130.22		24.53	32.50	1.00	0.75
	2	126.35	141.75		10.86	12.19	1.00	0.89
	3	93.22	118.05		21.03	26.64	1.00	0.79
	4	98.37	128.19		23.26	30.31	1.00	0.77
	5	90.53	117.92		23.23	30.26	1.00	0.77
	เฉลี่ย				19.02	25.41	1.00	0.80
	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน				6.21	9.14	0.00	0.06
แถบ 1200/30	1	111.89	138.56		19.25	23.84	1.00	0.81
	2	114.36	139.79		18.19	22.24	1.00	0.82
	3	119.21	142.50		16.34	19.54	1.00	0.84
	4	112.39	136.00		17.36	21.01	1.00	0.83
	5	116.55	142.04		17.95	21.87	1.00	0.82
	เฉลี่ย				17.79	21.65	1.00	0.82
	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน				1.23	1.83	0.00	0.01
แถบ 1200/50	1	121.15	151.50		20.03	25.05	1.00	0.80
	2	123.51	155.44		20.54	25.85	1.00	0.79
	3	110.99	138.50		19.86	24.79	1.00	0.80
	4	113.47	138.42		18.02	21.99	1.00	0.82
	5	119.42	154.00		22.50	29.03	1.00	0.78
	เฉลี่ย				19.62	24.42	1.00	0.80
	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน				1.10	1.68	0.00	0.01
ลิกไนต์ 800/10	1	160.94	199.66		19.39	24.06	1.00	0.81
	2	164.79	202.85		18.76	23.10	1.00	0.81
	3	167.09	206.75		19.18	23.74	1.00	0.81
	4	157.82	195.54		19.29	23.90	1.00	0.81
	5	168.07	208.73		19.48	24.19	1.00	0.81
	เฉลี่ย				19.16	23.70	1.00	0.81
	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน				0.28	0.42	0.00	0.00
ลิกไนต์ 800/30	1	163.46	200.14		18.33	22.44	1.00	0.82
	2	164.36	199.77		17.73	21.54	1.00	0.82
	3	177.70	216.50		17.92	21.83	1.00	0.82
	4	170.49	219.43		18.20	22.25	1.00	0.82
	5	165.55	200.64		17.49	21.20	1.00	0.83
	เฉลี่ย				18.04	22.02	1.00	0.82
	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน				0.27	0.40	0.00	0.00
ลิกไนต์ 800/50	1	165.97	201.90		17.80	21.65	1.00	0.82
	2	163.61	198.37		17.52	21.25	1.00	0.82
	3	162.46	198.16		18.02	21.97	1.00	0.82
	4	174.42	211.00		17.34	20.97	1.00	0.83
	5	174.92	214.28		18.37	22.50	1.00	0.82
	เฉลี่ย				17.67	21.46	1.00	0.82
	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน				0.30	0.44	0.00	0.00
ลิกไนต์ 900/10	1	173.21	207.58		16.56	19.84	1.00	0.83
	2	169.35	202.72		16.46	19.70	1.00	0.84
	3	178.03	211.28		15.74	18.68	1.00	0.84
	4	161.30	199.35		19.09	23.59	1.00	0.81
	5	163.90	199.56		17.87	21.76	1.00	0.82
	เฉลี่ย				16.96	20.45	1.00	0.83
	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน				1.46	2.15	0.00	0.01

ภาพผนวกที่ 4 (ต่อ)

ลิกไนต์ 900/30	1	176.82	214.90		17.72	21.54	1.00	0.82
	2	168.94	206.00		17.99	21.94	1.00	0.82
	3	156.25	196.46		20.47	25.73	1.00	0.80
	4	157.25	195.51		19.57	24.33	1.00	0.80
	5	157.21	194.97		19.37	24.02	1.00	0.81
	เฉลี่ย				18.94	23.38	1.00	0.81
	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน				1.31	1.99	0.00	0.01
ลิกไนต์ 900/50	1	164.49	199.58		17.58	21.33	1.00	0.82
	2	166.52	203.53		18.18	22.23	1.00	0.82
	3	155.81	192.69		19.14	23.67	1.00	0.81
	4	162.41	198.43		18.15	22.18	1.00	0.82
	5	173.33	211.24		17.95	21.87	1.00	0.82
	เฉลี่ย				18.26	22.35	1.00	0.82
	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน				0.65	0.97	0.00	0.01
ลิกไนต์ 1000/10	1	174.59	200.63		12.98	14.91	1.00	0.87
	2	171.59	201.66		14.91	17.52	1.00	0.85
	3	167.47	195.93		14.53	16.99	1.00	0.85
	4	165.18	194.76		15.19	17.91	1.00	0.85
	5	173.34	202.84		14.54	17.02	1.00	0.85
	เฉลี่ย				14.40	16.84	1.00	0.86
	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน				0.99	1.33	0.00	0.01
ลิกไนต์ 1000/30	1	159.33	193.85		17.81	21.67	1.00	0.82
	2	161.59	196.98		17.97	21.90	1.00	0.82
	3	162.73	198.67		18.09	22.09	1.00	0.82
	4	156.64	190.64		17.83	21.71	1.00	0.82
	5	160.84	195.49		17.72	21.54	1.00	0.82
	เฉลี่ย				17.92	21.84	1.00	0.82
	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน				0.13	0.19	0.00	0.00
ลิกไนต์ 1000/50	1	152.87	188.76		19.01	23.48	1.00	0.81
	2	165.00	204.11		19.16	23.70	1.00	0.81
	3	152.18	187.36		18.78	23.12	1.00	0.81
	4	161.72	200.08		19.17	23.72	1.00	0.81
	5	166.68	206.86		19.42	24.11	1.00	0.81
	เฉลี่ย				19.03	23.50	1.00	0.81
	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน				0.18	0.26	0.00	0.00
ลิกไนต์ 1100/10	1	150.76	169.11		10.85	12.17	1.00	0.89
	2	166.35	185.27		10.21	11.37	1.00	0.90
	3	163.20	181.77		10.22	11.38	1.00	0.90
	4	162.51	183.63		11.50	13.00	1.00	0.88
	5	164.71	188.31		12.53	14.33	1.00	0.87
	เฉลี่ย				10.70	11.98	1.00	0.89
	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน				0.62	0.77	0.00	0.01
ลิกไนต์ 1100/30	1	176.47	202.09		12.68	14.52	1.00	0.87
	2	163.30	189.75		13.94	16.20	1.00	0.86
	3	179.08	210.56		14.95	17.58	1.00	0.85
	4	182.52	217.27		15.99	19.04	1.00	0.84
	5	185.93	222.39		16.39	19.61	1.00	0.84
	เฉลี่ย				14.39	16.83	1.00	0.86
	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน				1.42	1.93	0.00	0.01
ลิกไนต์ 1100/50	1	161.69	182.02		11.17	12.57	1.00	0.89
	2	153.48	175.05		12.32	14.05	1.00	0.88
	3	157.31	183.99		14.50	16.96	1.00	0.85
	4	161.91	194.50		16.76	20.13	1.00	0.83
	5	150.97	179.55		15.92	18.93	1.00	0.84
	เฉลี่ย				13.69	15.93	1.00	0.86
	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน				2.47	3.34	0.00	0.02
รวมค่าเฉลี่ย ความหนาแน่น ความชื้น และค่าความร้อน					150.99	164.85		0.98
วันที่ 29/5/2014					2.49	2.56	1.00	0.98

ภาพผนวกที่ 4 (ต่อ)

ลิกไนต์ 1200/10	2	169.59	172.15		1.49	1.51	1.00	0.99
	3	162.12	163.19		0.66	0.66	1.00	0.99
	4	154.50	160.66		3.83	3.99	1.00	0.96
	5	154.97	160.75		3.60	3.73	1.00	0.96
	เฉลี่ย				2.12	2.18	1.00	0.98
	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน				1.37	1.43	0.00	0.01
ลิกไนต์ 1200/30	1	152.48	154.19		1.11	1.12	1.00	0.99
	2	164.80	186.31		11.55	13.05	1.00	0.88
	3	157.30	171.84		8.46	9.24	1.00	0.92
	4	169.04	191.42		11.69	13.24	1.00	0.88
	5	154.57	162.76		5.03	5.30	1.00	0.95
	เฉลี่ย				8.20	9.16	1.00	0.92
ลิกไนต์ 1200/50	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน				4.96	5.67	0.00	0.05
	1	158.22	166.69		5.08	5.35	1.00	0.95
	2	159.95	166.96		4.20	4.38	1.00	0.96
	3	155.35	162.18		4.21	4.40	1.00	0.96
	4	173.55	180.18		3.68	3.82	1.00	0.96
	5	160.02	167.93		4.71	4.94	1.00	0.95
	เฉลี่ย				4.29	4.49	1.00	0.96
	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน				0.58	0.64	0.00	0.01

ภาพผนวกที่ 4 (ต่อ)

ประวัติการศึกษาและการทำงาน

ชื่อ –นามสกุล	นายคณาธิป อีสระกุล
วัน เดือน ปี ที่เกิด	15 กันยายน 2532
สถานที่เกิด	กรุงเทพมหานคร
ประวัติการศึกษา	วท.บ. วิทยาศาสตร์บัณฑิต (เทคโนโลยีชีวภาพ) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนคร เหนือ
ตำแหน่งหน้าที่การงานปัจจุบัน	-
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	-
ผลงานดีเด่นและรางวัลทางวิชาการ	นำเสนอผลงานวิจัยในการประชุมวิชาการ “มหาวิทยาลัยมหาสารคามวิจัย ครั้งที่ 10 ” วันที่ 11-12 กันยายน 2557 ที่ คณะมนุษยศาสตร์และ สังคมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	โครงการพัฒนานักวิจัยและงานวิจัยเพื่อ อุตสาหกรรม-พออ. ระดับปริญญาโท