

ผลของขนาดของเสียประเภทแก้วที่ใช้ทดแทนแร่เฟลด์สปาร์ในการผลิตกระเบื้องเซรามิก

นายฉัตรชัย พรสูติโกคิน

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2552

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

EFFECTS OF GLASS SCRAP SIZE FOR FELDSPAR REPLACEMENT
IN CERAMIC TILE PRODUCTION

Mr. Chatchai Pronthitipokin

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering Program in Environmental Engineering

Department of Environmental Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2009

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ผลของขนาดของเสียประเภทแก้วที่ใช้ทดแทนแร่เฟลด์สปาร์ ในการผลิตกระเบื้องเซรามิก
โดย	นายฉัตรชัย พรฐิติโกศล
สาขาวิชา	วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร.เพ็ชรพร เชาวกิจเจริญ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศิริพันธ์ุ เจียมศิริเลิศ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัย
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญสม เลิศธีรวัฒน์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.ชวลิต รัตนธรรมสกุล)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร.เพ็ชรพร เชาวกิจเจริญ)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศิริพันธ์ุ เจียมศิริเลิศ)

..... กรรมการ
(อาจารย์ ดร.ชัยพร ภูประเสริฐ)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธัชวีร์ ลีละวัฒน์)

ฉัตรชัย พรจิทธิโกติน : ผลของขนาดของเสียประเภทแก้วที่ใช้ทดแทนแร่เฟลด์สปาร์ใน
การผลิตกระเบื้องเซรามิก (EFFECTS OF GLASS SCRAP SIZE FOR FELDSPAR
REPLACEMENT IN CERAMIC TILE PRODUCTION) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก:
รศ.ดร.เพ็ชรพร เซาวกิจเจริญ, อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม: ผศ.ดร.ศิริพันธ์ เจียมศิริเลิศ,
114 หน้า.

งานวิจัยนี้นำเศษแก้วรีไซเคิลสีเขียวจาก โรงงาน บางกอกกล๊าส มาทดแทนเฟลด์สปาร์
ในการผลิตกระเบื้องเซรามิก โดยใช้อัตราส่วนผสมดินดำต่อเศษแก้ว 8 ต่อ 5 คิดเป็นร้อยละ 60
ของส่วนผสมทั้งหมด รวมกับทรายแก้วอบแห้งร้อยละ 40 ความชื้นร้อยละ 10 ของส่วนผสม
ทั้งหมด แปรค่าขนาดเศษแก้วที่ใช้ เป็น ขนาดที่เล็กกว่า 0.295, 0.147, 0.104 และ 0.075
มิลลิเมตร ตามลำดับ ขึ้นรูปเป็นแผ่นกระเบื้องขนาด 4x4 ตารางนิ้ว ด้วยความดันการอัดขึ้นรูป
100 บาร์ เเผาที่ อุณหภูมิ 1200, 1150 และ 1100 ° ซ ตามลำดับ สำหรับการผสมวัตถุดิบแบบแห้ง
พบว่าเศษแก้วขนาด 0.295 มิลลิเมตร เนื้อวัตถุดิบผสมกันอย่างไม่ทั่วถึง ทำให้กระเบื้องหลังเผา
แตกหักง่าย ส่วนการแทนด้วยขนาดเศษแก้วที่เล็กกว่า 0.147, 0.104 และ 0.075 มิลลิเมตร เมื่อ
นำมาทดสอบคุณภาพทางกายภาพ ตามมาตรฐานอุตสาหกรรมกระเบื้องปูพื้น พบว่า ขนาดแก้ว
ทดแทนระหว่าง 0.075-0.104 มิลลิเมตร สามารถผลิตกระเบื้องที่มีจุดศูนย์กลางของเนื้อกระเบื้อง
ประมาณ 1150-1200 ° ซ นอกจากนั้นการใช้แก้วขนาดเล็กกว่า 0.104 มิลลิเมตร โดยการผสม
วัตถุดิบแบบเปียก เมื่อเผาที่ 1200 องศาเซลเซียสสามารถผลิตกระเบื้องผ่านเกณฑ์มาตรฐาน
อุตสาหกรรมกระเบื้องปูพื้น (มอก.37-2529) และเมื่อเผาที่ 1150 องศาเซลเซียสสามารถผลิต
กระเบื้องผ่านเกณฑ์มาตรฐานอุตสาหกรรมกระเบื้องบุผนัง (มอก.614-2529) ดังนั้นในการใช้เศษ
แก้วทดแทนขนาดหยาบขึ้นในการผลิตกระเบื้องเซรามิก จะช่วยลดค่าใช้จ่ายมากกว่าครึ่งจากการ
สูญเสียไปกับพลังงานการอบเศษแก้ว

ภาควิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
สาขาวิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
ปีการศึกษา...2552

ลายมือชื่อ.....
ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....
ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม.....

5170270021 : MAJOR ENVIRONMENTAL ENGINEERING

KEYWORDS : GREEN RECYCLED GLASS SCRAPS/FELDSPAR/CERAMIC

TILE/FIRING TEMPERATURE/PHYSICAL PROPERTY

CHATCHAI PRONTHITIPOKIN : EFFECTS OF GLASS SCRAP SIZE FOR
 FELDSPAR REPLACEMENT IN CERAMIC TILE PRODUCTION

THESIS ADVISOR: ASSOC.PROF. PETCHPORN CHAWAKITCHAREON,
 Ph.D., THESIS CO-ADVISOR ASSIT. PROF. SIRITHAN JIEMSIRILERS, Ph.D.,
 114 pp.

The objective of this research was to replace feldspar by glass cullet with various sizes in ceramic tile body. The ratio of ball clay and glass scraps used in this research was 8 to 5 which is 60% of the total composition and mixed with 40% of silica sand. Glass scraps was ground and sieved for various sizes smaller than 0.295, 0.147, 0.104 and 0.075 mm respectively. The mixtures were pressed to tiles with the size of 4 x 4 squared inches using pressure of 100 bars and firing at 1200, 1150, and 1100 °C respectively. The dry mixing process has found that replacement of feldspar by using 0.295 mm. glass scraps does not provide homogeneously mixture of raw materials which results in the easily broken tiles. For the replacement of glass scrap by varying sizes at 0.147, 0.104 and 0.075 mm, the physical properties of fired tiles were analyzed by following the Thailand Industrial Standard of floor tiles. The results indicated that the ceramic tile body using glass scraps with the size between 0.075-0.104 mm had a firing temperature around 1150-1200 °C. Moreover, the ceramic tile body using glass scraps with the size smaller than 0.104 mm. by the wet mixing process has found that provide a good physical property ceramic tiles by fired at 1200°C that passes the industrial standard of floor tiles (TISI 37-2529) and fired at 1150°C that passes the industrial standard of wall tiles (TISI 614-2529). Therefore, if non-delicate glass scraps are able to use in the production, the energy cost in crushing process will be reduced.

Department : Environmental Engineering Student's Signature

Field of Study : Environmental Engineering Advisor's Signature

Academic Year : 2009 Co-Advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. เพ็ชรพร เชาวกิจเจริญ อาจารย์ที่
ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศิริฉวีณี เจียมศิริเลิศ อาจารย์ที่ปรึกษา
วิทยานิพนธ์ร่วม ที่กรุณาให้ความรู้ คำอธิบาย และช่วยอำนวยความสะดวกในเรื่องการปฏิบัติ
งานวิจัย มาโดยตลอด

ขอขอบพระคุณท่านประธาน และกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาเสียสละ
เวลาอันมีค่า มาให้ความรู้ คำชี้แนะ และทำให้งานวิจัยนี้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณบริษัท ซีเบลโก้ มิเนอรัลส์ (ประเทศไทย) จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์
ดินดำ และทรายแก้ว มาเป็นวัตถุดิบในงานวิจัย และขอขอบคุณโรงงานบางกอกกล๊าส จำกัด ที่ได้
อนุเคราะห์ เศษแก้ว มาเป็นวัตถุดิบในงานวิจัย รวมทั้งการอำนวยความสะดวกในการติดต่อ
ประสานงานของทุกฝ่ายที่เกี่ยวข้อง

ขอขอบพระคุณ ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ และ
ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่เอื้อเฟื้อสถานที่ในการปฏิบัติ
งานวิจัย โดยเฉพาะครู สมคิด หัวหน้าฝ่ายปฏิบัติการประจำภาควิชาวัสดุศาสตร์ ที่ช่วยให้
คำปรึกษา และคอยอำนวยความสะดวกในการใช้ห้องปฏิบัติการตลอดมา

สุดท้ายนี้ ขอขอบคุณครอบครัวของผู้วิจัย ที่คอยสนับสนุนอยู่เบื้องหลังในทุกๆ
ความสำเร็จ และขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ ทุกๆ คนที่คอยช่วยเหลือ และมีความปรารถนาดีมอบ
ให้เสมอมา

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฐ
คำนิยาม.....	ด
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	1
1.2 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
บทที่ 2 เอกสาร และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1 เซรามิก.....	3
2.2 อุตสาหกรรมเซรามิกของไทย.....	3
2.3 บทบาทและสภาวะเศรษฐกิจอุตสาหกรรม.....	3
2.4 สถานภาพของผลิตภัณฑ์เซรามิกในประเทศไทย.....	4
2.5 โครงสร้างต้นทุนการผลิตอุตสาหกรรมเซรามิก.....	5
2.6 วัตถุดิบในการผลิตเซรามิก.....	6
2.6.1 ดิน.....	7
2.6.2 ตัวหลอมละลายในเนื้อดิน.....	10
2.6.3 ตัวทนไฟ.....	12
2.7 ทRAY แก้ว.....	15
2.8 แก้ว.....	16
2.8.1 ลักษณะทั่วไปของแก้ว.....	16
2.8.2 กลุ่มผลิตภัณฑ์บรรจุภัณฑ์ขวดแก้ว.....	17
2.8.3 เทคโนโลยีในการผลิต.....	18
2.8.4 วัตถุดิบที่ใช้ในการหลอมแก้ว.....	18

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.8.5 แก้วสีต่างๆ.....	18
2.8.6 ผู้ผลิตบรรจุภัณฑ์ขวดแก้วของประเทศไทย.....	19
2.9 กระเบื้องเซรามิก.....	19
2.9.1 ความหมายของกระเบื้องตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม....	19
2.9.2 ชนิดของกระเบื้อง.....	19
2.9.3 กระบวนการผลิตกระเบื้องเซรามิกโดยทั่วไป.....	20
2.9.4 การขึ้นรูปผลิตภัณฑ์เซรามิกโดยใช้แรงอัด.....	20
2.9.5 กลไกการอบผลิตภัณฑ์.....	22
2.9.6 ตัวแปรเบื้องต้นที่มีผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์เซรามิก.....	22
2.9.7 ปฏิกริยาที่เกิดขึ้นระหว่างการเผาผลิตภัณฑ์เซรามิก.....	23
2.9.8 จุดสุกตัว หรืออุณหภูมิสุกตัวของเนื้อดินปั้น.....	24
2.9.9 การควบคุมอุณหภูมิของเตาเผาในการเผากระเบื้องเซรามิก.....	24
2.9.10 การโค้งงอของผลิตภัณฑ์.....	25
2.10 ค่าโมดูลัสการแตกหักหรือค่ากำลังรับแรงดัด.....	25
2.11 การวิเคราะห์ด้วยวิธีเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน (XRD)	26
2.12 การวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน (SEM)	26
2.13 การศึกษาที่เกี่ยวข้องกับการวิจัย.....	26
บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย.....	33
3.1 การเตรียมวัตถุดิบ และอุปกรณ์ในงานวิจัย.....	33
3.1.1 วัตถุดิบที่ใช้ในงานวิจัย.....	33
3.1.2 สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย.....	34
3.1.3 เครื่องมือ และอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย.....	34
3.2 การดำเนินการวิจัย.....	35
บทที่ 4 ผลการวิจัย และวิจารณ์ผลการวิจัย.....	41
4.1 ผลการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบ ด้วยเครื่องเอ็กซ์เรย์- ฟลูออเรสเซนซ์ (XRF) และหาค่าการกระจายขนาดของเศษแก้ว.....	41
4.2 เปรียบเทียบภาพขยายทางจุลภาคของกระเบื้องที่ทดแทนด้วยเศษแก้ว ขนาดต่างกัน และที่อุณหภูมิการเผาต่างกัน และตรวจสอบการเกิดเฟส.....	44

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.2.1 การวิเคราะห์ภาพขยาย ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน	44
4.2.2 การวิเคราะห์เฟส โดยวิธีเอ็กซเรย์ดิฟแฟรกชัน.....	49
4.3 ผลการศึกษาผลของขนาด และอุณหภูมิ ต่อการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทาง กายภาพของกระเบื้องเซรามิกเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงขนาดของเศษแก้วใน กระบวนการผลิต.....	50
4.3.1 ผลการพิจารณาความเป็นเนื้อเดียวกันของผลิตภัณฑ์กระเบื้อง.....	50
4.3.2 การทดสอบค่ากำลังรับแรงดัดของกระเบื้อง.....	52
4.3.3 การทดสอบค่าการดูดซึมน้ำ.....	53
4.3.4 การวิเคราะห์ค่าการหดตัว.....	54
4.3.5 การทดสอบการทนสารเคมี.....	55
4.4 ผลการพัฒนาสมบัติทางกายภาพของกระเบื้อง โดยเปลี่ยนกระบวนการผลิต กระเบื้องจาก แบบเตรียมเนื้อดินโดยการผสมแห้งเป็นแบบการผสมเปียก.....	56
4.5 การศึกษาหาอุณหภูมิสุกตัวของเนื้อกระเบื้อง.....	60
4.6 การประเมินความคุ้มค่าจากผลงานวิจัย.....	61
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ.....	63
รายการอ้างอิง.....	65
บรรณานุกรม.....	68
ภาคผนวก.....	57
ภาคผนวก ก. ข้อมูลผลการทดสอบกระเบื้องเซรามิกหลังการเผา.....	70
ภาคผนวก ข. ข้อมูลผลการวิเคราะห์เอ็กซเรย์ดิฟแฟรกชัน.....	91
ภาคผนวก ค. ข้อมูลผลการวิเคราะห์ภาพขยายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน แบบสแกน.....	99
ภาคผนวก ง. ภาพอุปกรณ์ และเครื่องมือในงานวิจัย.....	103
ภาคผนวก จ. ข้อมูลวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบ และการแสดง วิธีการคำนวณหาผลองค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบ.....	108
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	114

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 โครงสร้างต้นทุนการผลิตผลิตภัณฑ์เซรามิก.....	5
ตารางที่ 2.2 ปริมาณการผลิตเซรามิก ที่ใช้เป็นวัสดุก่อสร้าง.....	6
ตารางที่ 2.3 สมบัติต่างๆ ของดินขาว.....	7
ตารางที่ 2.4 สูตรเคมีของดินดำ.....	9
ตารางที่ 2.5 ข้อดีและข้อเสียของดินดำ.....	10
ตารางที่ 2.6 สมบัติทางกายภาพของเฟลด์สปาร์.....	11
ตารางที่ 2.7 ชนิดของเฟลด์สปาร์จำแนกตามสารประกอบ.....	12
ตารางที่ 2.8 สมบัติทางกายภาพของซิลิกา.....	13
ตารางที่ 2.9 สมบัติทางกายภาพของอะลูมินา.....	14
ตารางที่ 3.1 ส่วนผสมของกระเบื้องเซรามิกในงานวิจัย.....	37
ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบแต่ละชนิด.....	41
ตารางที่ 4.2 องค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบหลังผสม.....	42
ตารางที่ 4.3 องค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบหลังผสมด้วยการคำนวณ.....	42
ตารางที่ 4.4 ความเป็นเนื้อเดียวกันของเนื้อกระเบื้องที่ผ่านการเตรียมเนื้อดินแบบแห้ง โดยใช้เศษแก้วขนาดต่างๆ ทดแทน.....	51
ตารางที่ 4.5 ความเป็นเนื้อเดียวกันของเนื้อกระเบื้องที่ผ่านการเตรียมเนื้อดินแบบเปียก โดยใช้เศษแก้วขนาดต่างๆ ทดแทน.....	52
ตารางที่ 4.6 ผลการทดสอบการทนสารเคมีของกระเบื้องที่ผ่านการเตรียมเนื้อดิน แบบแห้ง โดยใช้เศษแก้วขนาดต่างๆ ทดแทน.....	55
ตารางที่ 4.7 ผลการทดสอบการทนสารเคมีของกระเบื้องที่ผ่านการเตรียมเนื้อดิน แบบเปียก โดยใช้เศษแก้วขนาดต่างๆ ทดแทน.....	60
ตารางที่ 4.8 ปริมาณเศษแก้วผ่านการคัดขนาด หลังจากผ่านการบดด้วยระยะเวลาต่างๆ	61
ตารางที่ ผ1 ค่ากำลังรับแรงดัด (MOR) ของกระเบื้องที่ทดแทนด้วยเศษแก้วขนาด ต่างๆ ผ่านกระบวนการผสมวัตถุดิบแบบแห้ง เเผที่ 1100 องศาเซลเซียส.....	71
ตารางที่ ผ2 ค่ากำลังรับแรงดัด (MOR) ของกระเบื้องที่ทดแทนด้วยเศษแก้วขนาด ต่างๆ ผ่านกระบวนการผสมวัตถุดิบแบบแห้ง เเผที่ 1150 องศาเซลเซียส.....	72

สารบัญตาราง (ต่อ)

	หน้า
ตารางที่ ๘16 ค่าการหดตัวของกระเบื้องที่ทดแทนด้วยเศษแก้วขนาดต่างๆ ผ่าน กระบวนการผสมวัสดุดิบแบบเปียก เเผที่ 1100 องศาเซลเซียส.....	86
ตารางที่ ๘17 ค่าการหดตัวของกระเบื้องที่ทดแทนด้วยเศษแก้วขนาดต่างๆ ผ่าน กระบวนการผสมวัสดุดิบแบบเปียก เเผที่ 1150 องศาเซลเซียส.....	87
ตารางที่ ๘18 ค่าการหดตัวของกระเบื้องที่ทดแทนด้วยเศษแก้วขนาดต่างๆ ผ่าน กระบวนการผสมวัสดุดิบแบบเปียก เเผที่ 1200 องศาเซลเซียส.....	88
ตารางที่ ๘19 ค่ากำลังรับแรงดัด (MOR) ของกระเบื้องที่ทดแทนด้วยเศษแก้วขนาด ต่างๆ ผ่านกระบวนการผสมวัสดุดิบแบบเปียก เเผที่ 1250 องศาเซลเซียส...	89
ตารางที่ ๘20 ค่าการดูดซึมน้ำ ของกระเบื้องที่ทดแทนด้วยเศษแก้วขนาดต่างๆ ผ่าน กระบวนการผสมวัสดุดิบแบบเปียก เเผที่ 1250 องศาเซลเซียส.....	89
ตารางที่ ๘21 ค่าการหดตัว ของกระเบื้องที่ทดแทนด้วยเศษแก้วขนาดต่างๆ ผ่าน กระบวนการผสมวัสดุดิบแบบเปียก เเผที่ 1250 องศาเซลเซียส.....	90
ตารางที่ ๘22 องค์ประกอบทางเคมีของเศษแก้วสีเขียว.....	109
ตารางที่ ๘23 องค์ประกอบทางเคมีของดินดำ.....	110
ตารางที่ ๘24 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุดิบหลังผสม.....	111
ตารางที่ ๘.25 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุดิบ ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง เอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนส์.....	112
ตารางที่ ๘.26 การปรับอัตราส่วนองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุดิบให้เป็น ร้อยละ100.....	112

สารบัญภาพ

	หน้า
ภาพที่ 2.1 แผนผังวัตถุดิบบางชนิดในการผลิตเซรามิก.....	6
ภาพที่ 2.2 ปฏิบัติการเผาเซรามิก เมื่อผ่านอุณหภูมิต่างๆ และการเปลี่ยนแปลง ผลึกทางโครงสร้างเคมี.....	7
ภาพที่ 2.3 ปฏิบัติการของผลึกซิลิกาเมื่อได้รับความร้อน.....	14
ภาพที่ 3.1 แผนผังขั้นตอนการผลิตกระเบื้องเซรามิกในงานวิจัย.....	36
ภาพที่ 3.2 การวางกระเบื้องในการทดสอบค่ากำลังรับแรงดัด.....	38
ภาพที่ 3.3 การแช่กระเบื้องในสารละลายกรด หรือด่าง.....	39
ภาพที่ 4.1 การกระจายขนาดของเศษแก้วขนาดในช่วง 0.147-0.295 มิลลิเมตร.....	42
ภาพที่ 4.2 การกระจายขนาดของเศษแก้วขนาดในช่วง 0.104-0.147 มิลลิเมตร.....	43
ภาพที่ 4.3 การกระจายขนาดของเศษแก้วขนาดในช่วง 0.075-0.104 มิลลิเมตร.....	43
ภาพที่ 4.4 การกระจายขนาดของเศษแก้วขนาดเล็กกว่า 0.075 มิลลิเมตร.....	44
ภาพที่ 4.5 ภาพขยาย 5000 และ 15000 เท่า ของกระเบื้องที่ทดแทนด้วยเศษแก้วขนาด ต่างๆ ผ่าน กระบวนการผสมวัตถุดิบแบบแห้ง เผาที่ 1200 องศาเซลเซียส.....	45
ภาพที่ 4.6 ภาพขยาย 5000 และ 15000 เท่า ของกระเบื้องที่ทดแทนด้วยเศษแก้วขนาด ในช่วง 0.075-0.104 มิลลิเมตร (ผ่าน 150 เมช ค้าง 200 เมช) ผ่าน กระบวนการผสมวัตถุดิบแบบแห้ง เผาที่อุณหภูมิต่างๆ.....	46
ภาพที่ 4.7 ภาพขยาย 5000 และ 15000 เท่า ของกระเบื้องที่ใช้เศษแก้วขนาดเล็กกว่า 0.104 มิลลิเมตร (ผ่าน 150 เมช) เผาที่ 1150 องศาเซลเซียส เปรียบเทียบการ เตรียมเนื้อดินแบบแห้ง และแบบเปียก.....	47
ภาพที่ 4.8 ภาพขยาย 5000 และ 15000 เท่า ของกระเบื้องที่ทดแทนด้วยเศษแก้วขนาด ต่างๆ ผ่าน กระบวนการผสมวัตถุดิบแบบเปียก เผาที่ 1200 องศาเซลเซียส.....	48
ภาพที่ 4.9 ภาพขยาย 5000 และ 15000 เท่า ของกระเบื้องที่ทดแทนด้วยเศษแก้วขนาด เล็กกว่า 0.104 มิลลิเมตร (ผ่าน 150 เมช) ผ่านกระบวนการผสมวัตถุดิบแบบ เปียก เผาที่อุณหภูมิต่างๆ.....	48

สารบัญภาพ(ต่อ)

	หน้า
ภาพที่ 4.10 กราฟเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคชั่นของกระเบื้องที่ทดแทนด้วยเศษแก้วขนาดเล็กกว่า 0.104 มิลลิเมตร (ผ่าน 150 เมช) ผ่านกระบวนการผสมวัสดุดิบแบบแห้ง เเผาที่ 1150 องศาเซลเซียส.....	49
ภาพที่ 4.11 กลไกการเกิดเฟสมลัลไลท์ โดยการรวมตัวกันระหว่างเฟลชซิลิกา กับอะลูมินา	50
ภาพที่ 4.12 ค่ากำลังรับแรงดัดของกระเบื้องที่ผ่านการเตรียมเนื้อดินแบบแห้ง โดยใช้เศษแก้วขนาดต่างๆ ทดแทน.....	53
ภาพที่ 4.13 ค่าการดูดซึมน้ำของกระเบื้องที่ผ่านการเตรียมเนื้อดินแบบแห้ง โดยใช้เศษแก้วขนาดต่างๆ ทดแทน.....	54
ภาพที่ 4.14 ค่าการหดตัวของกระเบื้องที่ผ่านการเตรียมเนื้อดินแบบแห้งโดยใช้เศษแก้วขนาดต่างๆ ทดแทน.....	55
ภาพที่ 4.15 กระเบื้องที่ผ่านการทดสอบการทนกรด และด่าง (แสดงเฉพาะกระเบื้องที่ผ่านการเตรียมเนื้อดินแบบแห้ง โดยใช้เศษแก้วขนาด 0.075- 0.104 มิลลิเมตร เเผาที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส).....	56
ภาพที่ 4.16 ค่ากำลังรับแรงดัดของกระเบื้องที่ผ่านการเตรียมเนื้อดินแบบเปียก โดยใช้เศษแก้วขนาดต่างๆ ทดแทน.....	57
ภาพที่ 4.17 ค่าการดูดซึมน้ำของกระเบื้องผ่านการเตรียมเนื้อดินแบบ เปียก โดยใช้เศษแก้วขนาดต่างๆ ทดแทน.....	58
ภาพที่ 4.18 ค่าการหดตัวของกระเบื้องผ่านการเตรียมเนื้อดินแบบเปียก โดยใช้เศษแก้วขนาดต่างๆ ทดแทน.....	59
ภาพที่ 4.19 อุณหภูมิช่วงสุกตัวของกระเบื้องผ่านการเตรียมเนื้อดิน แบบเปียก โดยใช้เศษแก้ว ขนาดเล็กกว่า 0.104 มิลลิเมตร (ผ่าน 150 เมช) ทดแทน.....	60
ภาพที่ 4.20 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาในการบด กับปริมาณเศษแก้วขนาดต่างๆ ที่ได้ ของเครื่องบดขนาดเล็กในงานวิจัย.....	61

สารบัญภาพ (ต่อ)

	หน้า
ภาพที่ ๘10 กราฟเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกชันของกระเบื้องที่ทดแทนด้วยเศษแก้วขนาด เล็กกว่า 0.104 มิลลิเมตร ผ่านกระบวนการผสมวัสดุดิบแบบเปียก เเผที่ 1150 องศาเซลเซียส.....	96
ภาพที่ ๘11 กราฟเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกชันของกระเบื้องที่ทดแทนด้วยเศษแก้วขนาด เล็กกว่า 0.104 มิลลิเมตร ผ่านกระบวนการผสมวัสดุดิบแบบเปียก เเผที่ 1200 องศาเซลเซียส	97
ภาพที่ ๘12 กราฟเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกชันของกระเบื้องที่ทดแทนด้วยเศษแก้วขนาด เล็กกว่า 0.075 มิลลิเมตร ผ่านกระบวนการผสมวัสดุดิบแบบเปียก เเผที่ 1150 องศาเซลเซียส	97
ภาพที่ ๘13 กราฟเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกชันของกระเบื้องที่ทดแทนด้วยเศษแก้วขนาด เล็กกว่า 0.075 มิลลิเมตร ผ่านกระบวนการผสมวัสดุดิบแบบเปียก เเผที่ 1200 องศาเซลเซียส	98
ภาพที่ ๘14 กราฟเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกชันของกระเบื้องที่ทดแทนด้วยเศษแก้วขนาด เล็กกว่า 0.104 มิลลิเมตร ผ่านกระบวนการผสมวัสดุดิบแบบเปียก เเผที่ 1250 องศาเซลเซียส	98
ภาพที่ ๘15 ภาพขยาย 500 เท่า ของกระเบื้องที่ทดแทนด้วยเศษแก้วขนาดต่างๆ ผ่าน กระบวนการผสมวัสดุดิบแบบแห้ง (ก-ข) เปรียบเทียบกับแบบเปียก (ง-จ) เเผ ที่ 1200 องศาเซลเซียส.....	100
ภาพที่ ๘16 ภาพขยาย 500 เท่า ของกระเบื้องที่ทดแทนด้วยเศษแก้วขนาดต่างๆ ผ่าน กระบวนการผสมวัสดุดิบแบบแห้ง (ก-ข) เปรียบเทียบกับแบบเปียก (ง-จ) เเผ ที่ 1150 องศาเซลเซียส.....	101
ภาพที่ ๘17 ภาพขยาย 500 เท่า ของกระเบื้องที่ทดแทนด้วยเศษแก้วขนาดต่างๆ ผ่านกระบวนการผสมวัสดุดิบแบบแห้ง เเผที่ 1100 องศาเซลเซียส	102
ภาพที่ ๘18 ทRAYแก้ว.....	104
ภาพที่ ๘19 เศษแก้วสี่เหลี่ยม (ขนาด 4 มิลลิเมตร จากโรงงาน).....	104
ภาพที่ ๘20 ดินดำ.....	104
ภาพที่ ๘21 วัสดุดิบหลังผสม.....	104

สารบัญภาพ (ต่อ)

	หน้า
ภาพที่ ผ22 กระเบื้องที่ทดแทนด้วยเศษแก้วขนาดต่างๆ ผ่านกระบวนการผสมวัตุดิบ แบบแห้ง เเผาที่ 1200 องศาเซลเซียส.....	104
ภาพที่ ผ23 กระเบื้องที่ทดแทนด้วยเศษแก้วขนาดต่างๆ ผ่านกระบวนการผสมวัตุดิบ แบบแห้ง เเผาที่ 1150 องศาเซลเซียส.....	105
ภาพที่ ผ24 กระเบื้องที่ทดแทนด้วยเศษแก้วขนาดต่างๆ ผ่านกระบวนการผสมวัตุดิบ แบบแห้ง เเผาที่ 1100 องศาเซลเซียส.....	105
ภาพที่ ผ25 กระเบื้องที่ทดแทนด้วยเศษแก้วขนาดต่างๆ ผ่านกระบวนการผสมวัตุดิบ แบบเปียก เเผาที่ 1200 องศาเซลเซียส.....	106
ภาพที่ ผ26 กระเบื้องที่ทดแทนด้วยเศษแก้วขนาดต่างๆ ผ่านกระบวนการผสมวัตุดิบ แบบเปียก เเผาที่ 1150 องศาเซลเซียส.....	106
ภาพที่ ผ27 กระเบื้องที่ทดแทนด้วยเศษแก้วขนาดต่างๆ ผ่านกระบวนการผสมวัตุดิบ แบบเปียก เเผาที่ 1100 องศาเซลเซียส.....	106
ภาพที่ ผ28 เครื่องบดขนาดเล็ก.....	107
ภาพที่ ผ29 เครื่องร่อนคัดขนาด.....	107
ภาพที่ ผ30 เครื่องปั่นผสมวัตุดิบแบบแห้ง.....	107
ภาพที่ ผ31 เครื่องปั่นน้ำดิน.....	107
ภาพที่ ผ32 เตาเผาอุณหภูมิสูง (แบบไฟฟ้า).....	107
ภาพที่ ผ33 เครื่องอัดขึ้นรูปกระเบื้อง.....	107

คำนิยาม

อุณหภูมิสุกตัวของเนื้อกระเบื้อง (Firing Temperature)

ค่ากำลังรับแรงดัด (Bending strength) (ปรีดา พิมพ์ขาวขำ, 2547)

ค่าการหดตัวหลังเผา (Firing shrinkage) คือ ค่าการหดตัวของแท่งทดลอง หรือผลิตภัณฑ์ หลังการเผา (ปรีดา พิมพ์ขาวขำ, 2547)

ค่าการดูดซึมน้ำ (Water absorption) คือ ค่าปริมาณน้ำที่กระเบื้องดูดซึมเข้าไปหลังจากต้มในน้ำเดือด 2 ชั่วโมง และทิ้งไว้ให้เย็น แล้วนำขึ้นมาเช็ดด้วยผ้าหมาด แล้วนำไปชั่งน้ำหนักเทียบกับน้ำหนักแห้ง (มอก.614-2529, 2529)

การทนสารเคมี (Chemical durability) คือ การไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงบนผิว เมื่อแช่กระเบื้องในสารละลายกรด และด่าง เป็นเวลา 7 วัน (มอก.614-2529, 2529)

บทที่ 1

บทนำ

ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันประเทศไทยมีการพัฒนาเศรษฐกิจทางภาคอุตสาหกรรมเป็นอย่างมาก ซึ่งส่งผลให้มีความต้องการวัตถุดิบเพื่อผลิตสินค้าเพิ่มมากขึ้นทั้งวัตถุดิบภายในประเทศและวัตถุดิบที่ได้นำเข้าจากต่างประเทศ โดยอุตสาหกรรมเซรามิกเป็นอีกหนึ่งอุตสาหกรรมที่มีการใช้วัตถุดิบในการผลิตจำนวนมาก เมื่อพิจารณาถึงต้นทุนในการผลิตจึงพบว่า นอกจากจะมีต้นทุนการผลิตด้านพลังงานที่สูงแล้ว ยังมีต้นทุนค่าวัตถุดิบที่สูงอีกด้วย

อุตสาหกรรมเซรามิกเป็นอุตสาหกรรมที่ทำรายได้ให้กับประเทศไทยเป็นจำนวนมาก โดยมีกำลังการผลิตกระเบื้องเซรามิกเป็นอันดับ 11 ของโลก ดังนั้นจึงมีการขยายตัวของภาคอุตสาหกรรมเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้เกิดของเสียจากกระบวนการผลิตเพิ่มมากขึ้นตามมา ดังนั้นในอุตสาหกรรมการผลิตเซรามิกได้เล็งเห็นถึงปัญหาสิ่งแวดล้อม ทั้งการใช้ทรัพยากรธรรมชาติ และด้านเศรษฐกิจ จึงได้มีการสนับสนุนให้ใช้วัตถุดิบราคาถูกทดแทน โดยมีเทคโนโลยีทันสมัยที่จะตรวจสอบและควบคุมกระบวนการผลิตให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีมาตรฐานและมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้ยังมีการศึกษาถึงการหมุนเวียนวัตถุดิบที่ไม่ใช่แล้ว จากกระบวนการผลิตหนึ่งมาเป็นวัตถุดิบเริ่มต้นของกระบวนการผลิตหนึ่ง และการทดแทนวัตถุดิบจากวัสดุของเสียที่ไม่ใช่แล้ว ซึ่งก็สามารถช่วยลดของเสียหรือของเสียที่เป็นมลพิษลงได้

งานวิจัยนี้จึงเน้นศึกษาการนำของเสียประเภทแก้วที่ผ่านการคัดขนาดมาทดแทนแร่เฟลด์สปาร์ในกระบวนการผลิตกระเบื้องเซรามิก เนื่องจากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า ของเสียประเภทแก้วสามารถนำมาใช้ทดแทนวัตถุดิบในการผลิตกระเบื้องเซรามิกได้เป็นอย่างดี ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเน้นการศึกษาผลของขนาดเศษแก้วที่ใช้ทดแทน เนื่องจากปัจจุบันการบดเศษแก้วในภาคอุตสาหกรรมต้องสิ้นเปลืองพลังงานสูง อีกทั้งผู้วิจัยยังต้องการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่ใช้ในการเผากระเบื้องเซรามิก กับขนาดของเศษแก้วที่ใช้ในทางหนึ่ง

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อปรับปรุงและพัฒนาวิธีการทดแทนแร่เฟลด์สปาร์ในการผลิตกระเบื้องเซรามิกโดยหาขนาดเศษแก้วที่เหมาะสมเพื่อใช้ในการทดแทนแร่เฟลด์สปาร์
2. ศึกษาผลของขนาด และอุณหภูมิที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพ และโครงสร้างทางจุลภาคของผลิตภัณฑ์ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงขนาดของเศษแก้วในกระบวนการผลิตกระเบื้องเซรามิก

3. ศึกษาอุณหภูมิช่วงสุดท้ายของกระเบื้อง หรืออุณหภูมิในการเผาวัตถุดิบผลิตกระเบื้องเซรามิก เมื่อใช้ขนาดของเศษแก้วที่เหมาะสม ในกระบวนการผลิตกระเบื้องเซรามิก
4. ประเมินความคุ้มค่าจากผลที่ได้จากงานวิจัย ในการผลิตกระเบื้องเซรามิกจากเศษแก้ว

ขอบเขตของการวิจัย

งานวิจัยนี้ศึกษาการนำเศษแก้วที่ไม่ใช้แล้วจากโรงงานบางกอกกล๊าสเพื่อนำไปทดแทนแร่เฟลด์สปาร์ในการผลิตกระเบื้องเซรามิก โดยศึกษาผลของผลิตภัณฑ์กระเบื้องเซรามิก ดังนี้

1. เปรียบเทียบผลิตภัณฑ์กับค่ามาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมกระเบื้องดินเผา
2. เปรียบเทียบเฟสที่เกิดขึ้นในเนื้อผลิตภัณฑ์ ด้วยวิธีเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน (XRD) และพิจารณาภาพขยายพื้นผิวด้วยการส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน (SEM)
3. วิเคราะห์ผลองค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบ ด้วยวิธีเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (XRF)

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถลดต้นทุนการผลิตกระเบื้องเซรามิกที่ใช้เศษแก้วทดแทนได้
2. เป็นแนวทางในการพัฒนา และปรับปรุงคุณภาพของกระเบื้องเซรามิกที่ใช้เศษแก้วทดแทน
3. เป็นแนวทางหนึ่งในการช่วยประหยัดพลังงาน และลดของเสียประเภทแก้ว
4. เป็นการรวบรวมข้อมูลความรู้ทางวิชาการด้านสิ่งแวดล้อมที่ประยุกต์ใช้กับงานวิชาการด้านวัสดุศาสตร์ ว่าเป็นทางเลือกหนึ่งในการพัฒนางานอุตสาหกรรมเซรามิก

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1.1 เซรามิก (ceramic)

เซรามิก หมายถึง ผลิตภัณฑ์ซึ่งกรรมวิธีการผลิตต้องผ่านการเผาที่อุณหภูมิสูง หรือผลิตภัณฑ์ซึ่งส่วนประกอบของผลิตภัณฑ์ทั้งหมด หรือส่วนใหญ่ผลิตจากวัตถุดิบที่มีอยู่ตามธรรมชาติบนเปลือกโลก ได้แก่ เครื่องปั้นดินเผา ปอร์เซเลน วัตถุทนไฟ วัสดุก่อสร้างที่เป็นดินเผา วัสดุขัดถู โลหะเคลือบ ซีเมนต์ แก้ว วัสดุที่ใช้ในงานเกี่ยวข้องกับแม่เหล็กไฟฟ้า เป็นต้น (ปรีดา พิมพ์ขาวขำ, 2547)

2.2 อุตสาหกรรมเซรามิกของไทย

อุตสาหกรรมเซรามิก หมายถึง โรงงานผลิตผลิตภัณฑ์ซึ่งส่วนประกอบของผลิตภัณฑ์ทั้งหมดหรือส่วนใหญ่ ผลิตจากวัตถุดิบที่มีอยู่ตามธรรมชาติบนเปลือกโลก ซึ่งกรรมวิธีการผลิตต้องผ่านการเผาที่อุณหภูมิสูง (กรมทรัพยากรธรณี, 2544)

อุตสาหกรรมเซรามิกเป็นหนึ่งในอุตสาหกรรมพื้นฐานหลักของไทย โดยเฉพาะมีประวัติการผลิตและการพัฒนาที่ยาวนานมาตั้งแต่โบราณ ตั้งแต่ยุคบ้านเชียง อายุมากกว่า 4,500-5,600 ปี เริ่มจากภาชนะปั้นดินเผา รูปสัตว์ดินเผาโดยค่อยๆ มีการพัฒนามาอย่างต่อเนื่อง ภายหลังเมื่อติดต่อกับชาวยุโรปกับชนชาติจีนในสมัยยุคสุโขทัย จึงได้รับการถ่ายทอดเทคโนโลยีการผลิตเครื่องปั้นดินเผาจากดินขาวแบบ “สังกะโลก” ซึ่งเป็นต้นแบบของผลิตภัณฑ์เซรามิกในประเทศไทย ต่อมา เมื่อถึงยุครัตนโกสินทร์การผลิตภาชนะเครื่องปั้นดินเผาได้มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง โดยมีการทำขามกระเบื้องจากดินขาวที่จังหวัดลำปาง และราชบุรี โดยชาวจีนที่อพยพเข้ามาอยู่ในประเทศไทย สำหรับอุตสาหกรรมแก้วนั้นเริ่มจากได้มีการนำเครื่องแก้วจากประเทศตะวันตกเข้ามาใช้ตอนปลายสมัยกรุงศรีอยุธยา จนกระทั่งหลังสงครามโลกครั้งที่ 2 จึงมีการสร้างโรงงานผลิตเครื่องแก้วขึ้นภายในประเทศ เพื่อทดแทนการนำเข้าจากต่างประเทศ ภายหลังปี พ.ศ. 2500 อุตสาหกรรมเซรามิก ได้ถูกพัฒนาขยายตัวเติบโตอย่างต่อเนื่องถึงปัจจุบัน (กรมทรัพยากรธรณี, 2544)

2.3 บทบาทและสถานะเศรษฐกิจอุตสาหกรรม

อุตสาหกรรมเซรามิกเป็นอุตสาหกรรมที่มีผลิตภัณฑ์มากมายหลายชนิด เป็นอุตสาหกรรมพื้นฐานของอุตสาหกรรมอื่นๆ เช่น อุตสาหกรรมก่อสร้าง อุตสาหกรรมแก้ว อุตสาหกรรมไฟฟ้า อุตสาหกรรมรถยนต์ ตลอดจนอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ และคอมพิวเตอร์ เป็นอุตสาหกรรมที่สามารถทำรายได้จากการส่งออกถึงปีละประมาณหลายพันล้านบาท ปัจจุบันแนวโน้มการส่งออก

ได้เพิ่มขึ้นสูงมาก อุตสาหกรรมเซรามิก แบ่งกว้างๆ ได้ 2 ประเภท คือ เซรามิกดั้งเดิม และเซรามิกชั้นสูง (กรมทรัพยากรธรณี, 2544)

เซรามิกชนิดดั้งเดิม (Conventional Ceramics) ได้แก่ กระจก เบื้อง เครื่องสุขภัณฑ์ ถ้วยชาม ของชำร่วย เครื่องประดับ และลูกถ้วยไฟฟ้า

เซรามิกชั้นสูง (Advanced Ceramics) แบ่งเป็น เซรามิกในงานโครงสร้าง เซรามิกในงานอิเล็กทรอนิกส์

เซรามิกในงานโครงสร้าง เป็นเซรามิกที่ต้องรับน้ำหนักที่อุณหภูมิสูง ได้แก่ อุปกรณ์ที่ใช้ในงานบาดและตัดสิ่งของ คาร์ไบด์ ไนไตรต์ โบโรไซด์ อะลูมินา เซอร์โคเนีย เส้นใยเซรามิก รวมถึงชิ้นส่วนเซรามิกในเครื่องยนต์ ตัวต้านทานอุณหภูมิสูง และ ตัวต้านทานการสึกหรอ

เซรามิกพวกอิเล็กทรอนิกส์ ได้แก่ เพอร์ไรต์ ไบโอเซรามิก ตัวนำยิ่งยวด เซรามิกในโลหะที่มีอำนาจแม่เหล็ก (อย่างแรงและอย่างอ่อน) แบเรียมไททาเนต นิเวเคลียร์เซรามิก ตัวเก็บประจุ ที่เก็บชีพ ไอซี ซีพอสเตรท อุปกรณ์ผลิตไฟฟ้า (เกิดจากการกดดันทางกลไกที่มีต่อผลึกที่ไม่นำไฟฟ้า) เทอร์มิสเตอร์ แวริสเตอร์ ตัวกำเนิดประกายไฟ ออปติคอล ไฟเบอร์ เซรามิกในเครื่องส่งสัญญาณ (เช่นเซอร์) และ คะตะลิสต์แคโรเซอร์

อุตสาหกรรมเซรามิกในประเทศไทยเกือบทั้งหมดเป็น เซรามิกดั้งเดิม กระจก เบื้อง เครื่องสุขภัณฑ์ และกระจกนั้น เป็นวัสดุตกแต่งที่การผลิตจะเน้นเพื่อตอบสนองต่ออัตราการเติบโตและความต้องการใช้ภายในประเทศ โดยเฉพาะธุรกิจอสังหาริมทรัพย์ ส่วนถ้วยชามเซรามิก เครื่องแก้ว ใช้บนโต๊ะอาหาร การผลิตจะเน้นเพื่อการส่งออก บรรจุภัณฑ์แก้ว (ขวดแก้ว) เป็นสินค้าขนส่งที่ลำบากเพราะแตกหักง่าย และต้นทุนในการดูแลค่อนข้างสูง ทำให้ผลผลิตที่ได้เกือบทั้งหมดสนองความต้องการภายในประเทศเป็นส่วนใหญ่ ซึ่งจะมีการส่งออกบ้างในรูปของบรรจุภัณฑ์ที่ไปพร้อมๆกับผลิตภัณฑ์ และในส่วนของลูกถ้วยไฟฟ้า จะผลิตเพื่อตอบสนองกิจการสาธารณูปโภค (ไฟฟ้า) เป็นสำคัญ

2.4 สถานภาพของผลิตภัณฑ์เซรามิกในประเทศไทย

อุตสาหกรรมเซรามิกในประเทศไทยเกือบทั้งหมดเป็นเซรามิกดั้งเดิมดังนั้นผลิตภัณฑ์เซรามิกในภาพรวมที่จะนำเสนอต่อไปนี้มีอยู่ 5 ประเภทด้วยกัน คือ

1. กระจกเซรามิก เป็นผลิตภัณฑ์ที่ใช้สินค้าประเภททุนและเทคโนโลยีในการผลิตสูงมาก โรงงานส่วนใหญ่จะเป็นโรงงานขนาดใหญ่ ได้มาตรฐาน สามารถขยายกำลังการผลิตเพิ่มขึ้นได้ตลอดเวลา

2. เครื่องสุขภัณฑ์ เป็นผลิตภัณฑ์ที่ใช้ต้นทุน และเทคโนโลยีการผลิตสูง โรงงานส่วนใหญ่ได้มาตรฐาน มีการพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตอย่างต่อเนื่อง

3. ถ้วยชามเซรามิก เป็นอุตสาหกรรมที่เน้นแรงงานและความสามารถในการออกแบบมาก ครอบคลุมทั้งในและต่างประเทศ เป็นอุตสาหกรรมเซรามิกที่ทำรายได้สูงสุดจากการส่งออก

4. ของชำร่วยและเครื่องประดับ เป็นผลิตภัณฑ์ที่เน้นการออกแบบเป็นสำคัญ เป็นอุตสาหกรรมที่ใช้แรงงานมากช่วยสร้างงานในท้องถิ่น เป็นผลิตภัณฑ์ที่เคยสร้างรายได้เป็นอันดับสอง จากการส่งออกรองจากถ้วยชาม แต่ในสถานการณ์ปัจจุบันสูญเสียอันดับการครอบครองให้กับสินค้าเครื่องสุขภัณฑ์

5. ลูกถ้วยไฟฟ้า เป็นผลิตภัณฑ์ที่ใช้เทคโนโลยีในการผลิตสูงมากตลาดขึ้นอยู่กับกิจการสาธารณูปโภค (ไฟฟ้า) เป็นสำคัญ

2.5 โครงสร้างต้นทุนการผลิตอุตสาหกรรมเซรามิก

ในภาพรวมอุตสาหกรรมเซรามิก เป็นอุตสาหกรรมที่ใช้วัตถุดิบภายในประเทศเป็นส่วนใหญ่ และพึ่งพาวัตถุดิบนำเข้า (สี สารเคมี สารเคลือบ) ในสัดส่วนที่น้อย แต่ใช้แรงงานมาก สำหรับผลิตภัณฑ์เซรามิก ประเภทกระเบื้องปูพื้น บุผนัง โมเสก เครื่องสุขภัณฑ์ และถ้วยชามมีโครงสร้างต้นทุน การผลิตโดยประมาณ ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 โครงสร้างต้นทุนการผลิตผลิตภัณฑ์เซรามิก

(สำนักนโยบายอุตสาหกรรมรายสาขา 2, 2547)

องค์ประกอบของต้นทุนการผลิต		กระเบื้องปูพื้นบุผนัง โมเสก (ร้อยละ)	สุขภัณฑ์ (ร้อยละ)	ถ้วยชา (ร้อยละ)
ต้นทุนคงที่	ค่าโสหุ้ยโรงงาน	30.96	15	36.54
	ค่าเสื่อมราคา	8.77	20	9.19
ต้นทุนผันแปร	วัตถุดิบ	44.01	17	20.85
	พลังงาน - ก๊าซธรรมชาติ	6.67	6	7.85
	- ไฟฟ้า	6.00	4	5.17
	ค่าแรงงานทางตรง	2.43	25	13.58
	อื่น ๆ	1.16	13	6.82
รวม		100.00	100.00	100.00

ปริมาณการผลิตผลิตภัณฑ์เซรามิก ที่ใช้เป็นวัสดุก่อสร้าง ดังตารางที่ 2.2 พบว่าการผลิตกระเบื้องปูพื้น บุผนัง ในปี 2551 มีปริมาณ 139.7 ล้าน ตารางเมตร ส่วนในปี 2552 มีปริมาณเพิ่มขึ้นเป็น 142 ล้าน ตารางเมตร ในขณะที่การผลิตเครื่องสุขภัณฑ์ ในปี 2551 มีปริมาณ 8.40 ล้าน ชิ้น ส่วนในปี 2552 มีปริมาณลดลงเหลือ 5.81 ล้านชิ้น

สำหรับการผลิตและจำหน่ายเซรามิก ในปี 2553 มีแนวโน้มจะขยายตัวเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย จากสถานการณ์เศรษฐกิจในประเทศที่อยู่ในระยะเริ่มฟื้นตัว ประกอบกับในปี 2553 เป็นช่วงที่งบประมาณกระตุ้นเศรษฐกิจของรัฐบาลตามโครงการไทยเข้มแข็งน่าจะเริ่มเกิดผลในทางปฏิบัติซึ่งจะก่อให้เกิดการหมุนเวียนในระบบเศรษฐกิจมากขึ้น และทำให้ประชาชนมีกำลังซื้อเพิ่มมากขึ้น

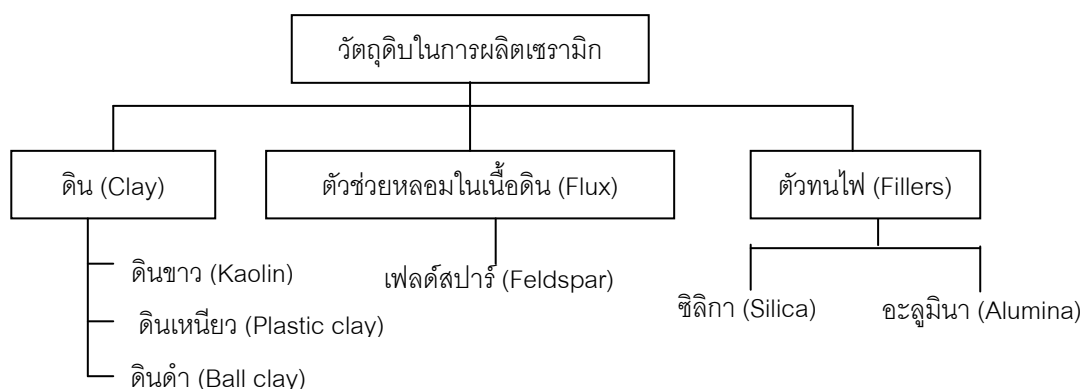
ตารางที่ 2.2 ปริมาณการผลิตเซรามิก ที่ใช้เป็นวัสดุก่อสร้าง

(สำนักงานเศรษฐกิจอุตสาหกรรม, 2552)

ผลิตภัณฑ์	ปี 2551(ล้าน)	ปี 2552 (ล้าน)
กระเบื้องปูพื้น บุผนัง (ตารางเมตร)	139.7	142
เครื่องสุขภัณฑ์ (ชิ้น)	8.40	5.81

2.6 วัตถุดิบในการผลิตเซรามิก

วัตถุดิบที่ใช้ในอุตสาหกรรมเซรามิกบางอย่างได้มาจากสินแร่ตามธรรมชาติ เช่น ดินต่างๆ (Clays) เฟลด์สปาร์ (Feldspar) หินควอตซ์ (Quartz) และทรายทะเล เป็นต้น นอกจากนี้วัตถุดิบบางอย่างได้จากการสกัดจากสินแร่ตามธรรมชาติ และนำมาทำให้บริสุทธิ์ด้วยกระบวนการทางเคมี เช่น อะลูมินา (Alumina) ซึ่งได้จากแร่บอกไซต์ (Bauxite) ที่ได้จากการสังเคราะห์ ผลิตภัณฑ์เซรามิกสมัยใหม่ต้องการวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตที่มีเปอร์เซ็นต์ความบริสุทธิ์สูง เพราะสิ่งสกปรกเพียงเล็กน้อยซึ่งอาจจะน้อยกว่าร้อยละ 1 ก็มีอิทธิพลต่อโครงสร้างซึ่งเชื่อมโยงไปถึงคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์นั้นๆ ด้วย (ปริดา พิมพ์ขาวขำ, 2547) ผลิตภัณฑ์เซรามิกทำมาจากวัตถุดิบทนไฟพวก อนินทรีย์สาร ซึ่งมีอยู่มากมายหลายชนิดตามอนุกรมการเผา สามารถเลือกใช้ให้เหมาะสมกับผลิตภัณฑ์ที่ผลิต นิยมแบ่งวัตถุดิบในการผลิตเซรามิก ออกเป็น 3 กลุ่มคือ ดิน ตัวหลอมละลายในเนื้อดิน และ ตัวทนไฟ (ไพจิตร อิงศิริวัฒน์, 2541) ดังแสดงในภาพที่ 2.1



ภาพที่ 2.1 แผนผังวัตถุดิบบางชนิดในการผลิตเซรามิก (ไพจิตร อิงศิริวัฒน์, 2541)

2.6.1 ดิน (Clays)

ดินเป็นวัตถุดิบที่สำคัญในการผลิตผลิตภัณฑ์เซรามิก มีความเหนียว เมื่อถูกน้ำจะจับตัวเป็นก้อน สามารถนำมาปั้นเป็นรูปร่างต่างๆ ได้ง่าย ความเหนียวและสีของดินมีลักษณะแตกต่างกันไปในแต่ละแหล่ง ทั้งในด้านโครงสร้างผลึกของดิน และคุณสมบัติภายหลังการเผา เช่น สี การหดตัว ความแข็งแรง และความทนไฟ เป็นต้น

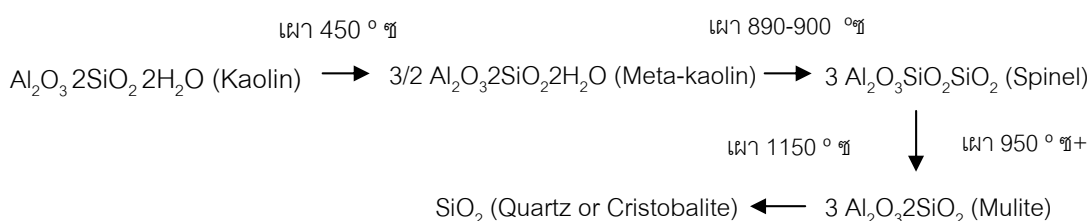
แร่ดินที่ใช้เตรียมเนื้อดินในอุตสาหกรรมเซรามิกได้แก่

2.6.1.1 ดินขาว (Kaolin, China clay) ดินขาวส่วนใหญ่เป็นดินที่เกิดในแหล่งพุพังของหินเดิม (Residual clay) เป็นดินที่มีขนาดเม็ดหยาบจึงมีความเหนียวน้อย ประกอบด้วยแร่กาอลินไนท์ (Kaolinite) มากกว่าดินชนิดอื่นๆ ดินขาวที่พบตามแหล่งที่ส่วนประกอบต่างกันด้วยเหตุผล 2 ประการ คือ เนื่องจากโครงสร้างของดินขาวมีการแทนที่กันของโลหะธาตุที่มีประจุบวก และเนื่องจากมีสารประกอบอื่นปะปนอยู่ ได้แก่ ควอตซ์ (Quartz) เฟลด์สปาร์ (Feldspar) ฮีมาไทท์ (Hematite) ฟลูออไรต์ (Fluorite) เป็นต้น สมบัติต่างๆ ของดินขาวแสดงในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 สมบัติต่างๆ ของดินขาว (ไพจิตร อิงศิริวัฒน์, 2541)

สูตรดินขาว	$\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
ส่วนประกอบ $\text{Al}_2\text{O}_3 / \text{SiO}_2 / \text{H}_2\text{O}$	ร้อยละ 39.5 ร้อยละ 46.5 ร้อยละ 14
รูปผลึก	เป็นแผ่นหกเหลี่ยม เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.5 – 10.0 ไมครอน
ความเหนียว	ต่ำ
ความทนไฟ	1,750 – 1,770 องศาเซลเซียส
ความหดตัว	น้อย
ความแข็งแรงหลังเผา	สูง

สมบัติทางเคมีของดินขาว มีปฏิกิริยาแตกตัวในขั้นตอนการเผาดังแสดงในภาพที่ 2.2 ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงรูปแบบการเรียงตัวของผลึกในโครงสร้างตามอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไป ทำให้เกิดเป็นโครงสร้างผลึกมัลไลต์ ที่มีความแข็งแรงมากขึ้น



ภาพที่ 2.2 ปฏิกิริยาการเผาเซรามิก เมื่อผ่านอุณหภูมิต่างๆ และการเปลี่ยนแปลงผลึกทางโครงสร้างเคมี (ปรีดา พิมพ์ขาวขำ, 2547)

การเปลี่ยนแปลงที่อุณหภูมิสูงกว่า 980 องศาเซลเซียส ผลึกมัลไลท์ จะมีขนาดใหญ่ขึ้น และจะฝังตัวอยู่ในเนื้อแก้วซิลิกา แต่ที่อุณหภูมิ 1150 องศาเซลเซียส แก้วซิลิกาบางส่วนจะตกผลึก กลับเป็นคลิสโตบาไลท์ ถ้าผลึกเกิดในที่ไม่บริสุทธิ์

สมบัติทางกายภาพของดินขาว (Physical properties of kaolin)

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

- รูปร่างของอนุภาค (Particle shape) รูปร่างของแร่กาอลินไนท์ทั่วไป จะเป็นแผ่นหกเหลี่ยม (Hexagonal plates) มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่ 0.05 – 10.0 ไมครอน โดยเฉลี่ย ขนาดอยู่ระหว่าง 0.5 ไมครอน

- คุณสมบัติในการแลกเปลี่ยนอนุมูล (Base-exchange capacity) ปกติดินขาวที่บริสุทธิ์จะไม่มีแลกเปลี่ยนอนุมูล หรือดูดซับอนุภาคและโมเลกุลอื่นๆ แต่ถ้าไม่บริสุทธิ์จะเกิดการแลกเปลี่ยนอนุมูล หรือดูดซับเอาผลึกของแร่ที่มีขนาดเล็กไว้ที่ผิวผลึกกาอลินไนท์บริสุทธิ์มีโครงสร้างผลึกที่แข็งแรง แร่ธาตุและอินทรีย์สารแทรกเข้าไปในโครงสร้างผลึกไม่ได้จึงคงความบริสุทธิ์ได้ดี

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

- ความแข็งแรงของเนื้อดินเมื่อแห้ง (Green strength) ดินขาวมีความแข็งแรงน้อยเพราะแตกได้ง่ายเมื่อแห้ง เพราะมีความเหนียวน้อย

- สมบัติหลังจากการเผา (Firing properties) ดินขาวที่มีคุณภาพดี เมื่อเผาแล้วควรจะได้สีขาว แต่ถ้าเป็นสีครีมหรือน้ำตาลอ่อน แสดงว่ามีแร่ธาตุเจือปนอยู่สูง ดินขาวที่มีการหดตัวเกินร้อยละ 20 หลังการเผา ไม่ควรใช้ดินขาวนั้นในเนื้อดินปั้นปริมาณมาก

2.6.1.2 ดินเหนียว (Plastic clay) ดินเหนียวคือดินเนื้อละเอียดที่มีแร่ธาตุเจือปนอยู่ตามธรรมชาติค่อนข้างสูง ไม่บริสุทธิ์เหมือนดินขาว เมื่อขุดพบมีสีต่างๆ สีเหลือง สีเทา สีดำ หรือสีส้มแดง หลังการเผาดินก็จะมีสีต่างๆ กันไป เช่น สีเทา สีน้ำตาล สีแดง หรือสีเหลืองอมเทา ดังนั้นดินเหนียวก็คือดินที่มีความเหนียวเนื้อละเอียดที่เป็นสีต่างๆ ภายหลังการเผา ดินดำ (Ball clay) จัดว่าเป็นดินเหนียวประเภทหนึ่งด้วย แต่ดินดำแตกต่างจากดินเหนียวคือดินดำมีแร่

ธาตุเจือปนอยู่ในปริมาณต่ำ ค่อนข้างบริสุทธิ์ แต่มีอินทรีย์สารเจือปนอยู่สูง ดินดำบางชนิดมีความเหนียวน้อย บางชนิดมีความเหนียวมาก

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

ดินดำที่มีเนื้อละเอียดหลังการเผาเป็นสีขาว และมีความทนไฟ 1300 องศาเซลเซียส โดยไม่บิดเบี้ยวมักเป็นดินที่มีคุณภาพดี นิยมนำมาใช้ผสมในผลิตภัณฑ์สีขาว เช่น ปอร์ซเลน โบนไซน่า และไวท์เอิร์ทเทินแวร์ ส่วนดินดำทั่วไปที่คุณภาพปานกลางมีทรายเจือปนอยู่ค่อนข้างมาก ใช้ทำเนื้อดินขึ้นรูปด้วยแป้นหมุน ทำท่อน้ำดินเผา หรือผสมในเนื้อดินทำกระเบื้องปูพื้น

ส่วนประกอบทางเคมีของดินดำ (Chemical properties of Ball clay) ในดินดำประกอบด้วยแร่กาอลินไนท์เป็นส่วนใหญ่ เช่นเดียวกับดินขาว แต่เป็นผลึกกาอลินไนท์ชนิดไม่สมบูรณ์ (Disordered kaolinite) ในระหว่างผลึกมีแร่ธาตุและอินทรีย์สารแทรกอยู่โดยประมาณ จะมีซิลิกา ร้อยละ 40 – 60 อะลูมินา ร้อยละ 30 น้ำผลึกและอินทรีย์สารประมาณร้อยละ 10 โดยมีส่วนประกอบหลักดังแสดงในตารางที่ 2.4 นอกจากนี้ยังมีแร่ธาตุอื่นๆ เจือปนอยู่ในดินด้วย เช่น ไทเทเนียมออกไซด์ (TiO_2) เฟอริกออกไซด์ (Fe_2O_3) แคลเซียมออกไซด์ (CaO) แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) เหล็กซัลเฟต (FeS) โพแทสเซียมออกไซด์ (K_2O) และ โซเดียมออกไซด์ (Na_2O) เป็นต้น

ตารางที่ 2.4 สูตรเคมีของดินดำ (ไพจิตร อิงศิริวัฒน์, 2541)

ประเภทของดินดำ	สูตรเคมี
1. ดินดำทั่วไป (มีอะลูมินาร้อยละ 20 – 25 ตามผลวิเคราะห์ทางเคมี)	$\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 4\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O} \cdot 0.1\text{K}_2\text{O}$
2. ดินดำ-ดินเหนียวอุตสาหกรรม (มีอะลูมินาร้อยละ 30 – 38 ตามผลวิเคราะห์ทางเคมี)	$\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O} \cdot 0.1\text{K}_2\text{O}$
3. ดินดำปนทราย (มีซิลิการ้อยละ 60 – 80 ตามผลวิเคราะห์ทางเคมี)	$\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 9\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O} \cdot 0.2\text{K}_2\text{O}$

สมบัติทางกายภาพของดินดำ (Physical properties of Ball clay)

- ขนาดของดินเหนียวจะมีผลึกละเอียดมากน้อยเพียงใด เปลี่ยนแปลงไปตามแหล่งที่พบ เมื่อถูกพัดพาไปไกลจากแหล่งเดิมมาก ขนาดเม็ดอนุภาคจะละเอียดมากขึ้นตามลำดับ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 0.05 – 1.00 ไมโครเมตร

- ความเหนียว (Plasticity) ดินเหนียวเป็นดินที่อมน้ำได้มาก ความเหนียวจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับชนิดของดิน ซึ่งประกอบด้วยหลักสำคัญคือ ปริมาณของอินทรีย์สาร ขนาดของเม็ดดิน และวัตถุดิบที่ทำให้ความเหนียว เช่น ดินเบนโตไนท์ เป็นต้น

- การหดตัวเมื่อแห้ง (Drying shrinkage) ดินเหนียวที่มีทรายปนอยู่สูงแทบไม่มีการหดตัวเลย แต่ดินเหนียวที่มีอินทรีย์สารสูงจะมีการหดตัวมากประมาณร้อยละ 13 – 17

- การหดตัวหลังเผา (Firing shrinkage) มีการหดตัวสูงประมาณร้อยละ 15 เนื่องจากดินเหนียวมีขนาดอนุภาคที่เล็กมาก

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

- สีหลังเผา เป็นสีขาวนวล

- มีแร่ธาตุพวกต่างและไมกาในดินทำหน้าที่เป็นตัวหลอมละลาย ช่วยลดอุณหภูมิในการเผา

ตารางที่ 2.5 ข้อดีและข้อเสียของดินดำ (ไพจิตร อิงศิริวัฒน์, 2541)

ข้อดี	ข้อเสีย
1. เพิ่มความเหนียวของผลิตภัณฑ์ ทำให้เนื้อดินปั้นขึ้นรูปได้ดี	1. มีสิ่งเจือปนสูง เช่น คาร์บอน เหล็ก ทำให้ผลิตภัณฑ์หลังการเผามีตำหนิ
2. เพิ่มความแข็งแรงก่อนเผา ลดการสูญเสียจากการแตกหักก่อนเผาในขณะเคลื่อนย้าย	2. ถ้าผสมในปริมาณมากเกินไป ทำให้ผลิตภัณฑ์ไม่ค่อยโปร่งแสง มีการหดตัวสูง
3. ทำให้น้ำดินหล่อที่ใช้ในการเทแบบไหลตัวดี	3. มีองค์ประกอบไม่แน่นอน ทำให้ควบคุมอัตราส่วนผสมได้ยาก
4. เสริมปฏิกริยาระหว่างมวลสารในระหว่างการเผา ทำให้ดินสุกตัวเร็ว	

2.6.2 ตัวหลอมละลายในเนื้อดิน (Flux)

คือวัตถุดิบที่ทำหน้าที่เป็นตัวหลอมละลายลดอุณหภูมิในการเผา การใช้ตัวหลอมละลายผสมในเนื้อดิน เพื่อให้เนื้อดินสุกตัวในอุณหภูมิที่ต้องการ ตัวหลอมละลายจะทำหน้าที่ประสานผลึกของวัตถุดิบต่างๆ ให้หลอมละลายเป็นเนื้อเดียวกัน ในขณะที่เนื้อดินถูกเผาผ่าน

ความร้อน วัสดุที่เป็นตัวหลอมละลายถูกบดละเอียดผสมอยู่ในเนื้อดินจะเริ่มเกิดการหลอมตัวก่อนแล้วดึงเอาวัสดุที่ทนไฟที่อยู่รอบๆ ผลึกมาหลอมเข้าด้วยกัน ทำให้ช่องว่างที่อยู่ระหว่างผลึกเม็ดดินหายไป และเนื้อดินเกิดการหดตัวรวมกันหลอมจนเนื้อแน่นคล้ายแก้ว ในระหว่างที่เตาเผาเย็นตัวลง เนื้อดินก็จะค่อยๆ เย็นตัวกลายเป็นของแข็ง

ความพรุนตัวของดินหรือคุณสมบัติของดินภายหลังการเผาขึ้นอยู่กับปริมาณของวัสดุที่เป็นตัวหลอมละลาย ถ้าใช้วัสดุที่เป็นตัวหลอมละลายในปริมาณมากเกินไป ดินอาจยุบตัวภายหลังการเผา ดังนั้นหลักสำคัญในการผสมเนื้อดินนั้น ต้องพยายามให้เนื้อดินมีช่วงเผาสุกตัวยาว คือสามารถเผาให้สุกตัวได้ในอุณหภูมิที่มีความแตกต่างกัน ประมาณ 30 – 50 องศาเซลเซียส เพื่อความปลอดภัยในการเผามากยิ่งขึ้น แม้ว่าจะเผาเกินอุณหภูมิไปบ้างเล็กน้อยในบางครั้ง ผลกระทบก็ไม่เกิดความเสียหาย

ตัวหลอมละลายที่ใช้ผสมในอุตสาหกรรมมีหลายชนิด เช่น หินฟันม้า (Feldspar) เนฟเฟลีนไซยาไนท์ (Nepheline Syenite) โบนแอส (Bone Ash) ทัลค์ (Talc) หินปูน (CaCO₃) โดโลไมท์ (Dolomite) เป็นต้น แต่จะกล่าวถึงตัวหลอมละลายเฉพาะที่ใช้ในการวิจัยนี้คือ หินฟันม้า หรือ เฟลด์สปาร์ (Feldspar)

เฟลด์สปาร์ เป็นวัสดุที่สำคัญในกลุ่มที่ให้ต่างหรือวัสดุที่ช่วยในการหลอมละลายต่างในแร่เฟลด์สปาร์อยู่ในรูปผลึกที่ไม่ละลายน้ำ จึงสะดวกในการนำมาใช้เป็นวัสดุผสมในเนื้อดินและน้ำเคลือบได้โดยตรง ไม่ต้องนำมาหลอมเป็นฟريت (Frit) ก่อนใช้ เฟลด์สปาร์ใช้ผสมในเนื้อดินปอร์เซเลนและน้ำเคลือบอุณหภูมิสูง เพื่อลดจุดหลอมละลายในการเผา เป็นตัวเริ่มก่อให้เกิดปฏิกิริยาการเกิดเนื้อแก้วในดิน มีสมบัติทางกายภาพ ดังแสดงในตารางที่ 2.6 ส่วนปริมาณที่ใช้ในเนื้อดินปอร์เซเลนประมาณร้อยละ 25 และปริมาณที่ใช้เคลือบร้อยละ 40 – 60

ตารางที่ 2.6 สมบัติทางกายภาพของเฟลด์สปาร์ (ไพจิตร อิงศิริวัฒน์, 2541)

ความถ่วงจำเพาะ	2.56 – 2.63
อุณหภูมิที่หลอมละลาย	1150 – 1532 องศาเซลเซียส
ความแข็ง	6.0 – 6.5 โมห์สเกล

เฟลด์สปาร์เป็นสารประกอบของอะลูมิเนียมซิลิเกตและอัลคาไลหรืออัลคาไลเอิร์ท (ต่าง) ดังนั้นเฟลด์สปาร์จึงมีวัสดุที่เป็นต่างคือตัวหลอมละลาย มีอะลูมินาเป็นตัวกลางและมีซิลิกาซึ่งเป็นตัวทนไฟด้วย จึงจัดเป็นวัสดุที่ใช้เป็นตัวเคลือบได้ตามธรรมชาติ เฟลด์สปาร์ทำหน้าที่ลดความเหนียวของเนื้อดินก่อนเผา เป็นตัวประสานให้ผลึกของดินหลอมตัวกันแน่น เนื้อดินหลอมเป็นแก้ว ลดการดูดซึมน้ำ ลดอุณหภูมิในการเผา เพิ่มความโปร่งแสงให้ผลิตภัณฑ์ภายหลังการ

เผาโดยปกติเฟลด์สปาร์จะเริ่มหลอมละลายเล็กน้อยที่อุณหภูมิประมาณ 1150 องศาเซลเซียส เฟลด์สปาร์สามารถแบ่งออกตามประเภทของสารประกอบได้หลายชนิดดังแสดงในตารางที่ 2.7

ตารางที่ 2.7 ชนิดของเฟลด์สปาร์จำแนกตามสารประกอบ (ไฟจิตร อิงศิริวัฒน์, 2541)

ประเภทของเฟลด์สปาร์	จุดหลอมละลาย	สูตรเคมี
1. โปแทสเฟลด์สปาร์ (Orthoclase)	1220 องศาเซลเซียส	$K_2O Al_2O_3 6SiO_2$ (16.9 %) (18.3 %) (64.8 %)
2. โซดาเฟลด์สปาร์ (Albite)	1170 – 1200 องศาเซลเซียส	$Na_2O Al_2O_3 6SiO_2$ (11.8 %) (19.4 %) (68.8 %)
3. ไลม์เฟลด์สปาร์ (Anorthite)	1550 องศาเซลเซียส	$CaO Al_2O_3 2SiO_2$ (20.1 %) (36.6 %) (43.3 %)
4. แบเรียมเฟลด์สปาร์ (Celsian)	1715 องศาเซลเซียส	$BaO Al_2O_3 2SiO_2$ (40.85 %) (27.15 %) (32.00 %)
5. ลิเทียมเฟลด์สปาร์ (Petalite) ลิเทียมเฟลด์สปาร์ (Spodumene) ลิเทียมเฟลด์สปาร์ (Lepidolite)	1200 องศาเซลเซียส 1250 องศาเซลเซียส 1150 องศาเซลเซียส	$Li_2O Al_2O_3 8SiO_2$ $Li_2O Al_2O_3 8SiO_2$ $Li_2O Al_2O_3 8SiO_2$ (8.03 %) (27.40 %) (64.57 %)

นอกจากนี้ยังใช้เฟลด์สปาร์ในการเตรียมน้ำเคลือบ ซึ่งใช้ปริมาณร้อยละ 30 – 70 ในน้ำเคลือบอุณหภูมิสูงทุกชนิด และใช้เป็นส่วนผสมในอุตสาหกรรมการผลิตแก้ว ซึ่งใช้ในอัตราส่วนประมาณร้อยละ 30 – 40

2.6.3 ดัชนีไฟ (Refractory)

มีคุณสมบัติช่วยเปิดเนื้อดินให้มีความพรุนตัว ช่วยลดการหดตัวของเนื้อดินขณะผึ่งแห้ง และลดความเหนียวของเนื้อดินลงด้วย นอกจากนี้ดัชนีไฟยังทำหน้าที่เป็นโครงสร้างของเนื้อผลิตภัณฑ์ ให้คงอยู่ในสภาพดีไม่บิดเบี้ยวแตกร้าวหลังการเผา ทำให้เนื้อดินมีลักษณะพื้นผิวหยาบหรือละเอียดตามต้องการ และเพิ่มความแข็งแกร่งให้เนื้อดินหลังการเผา

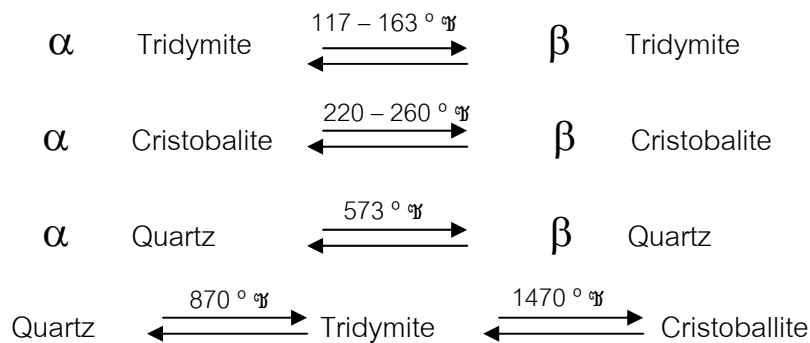
ตัวทนไฟที่ใช้ในการผลิตเซรามิก ได้แก่ ซิลิกา อะลูมินา วัตถุประสงค์กลุ่มซิลิมาไนท์ (Silimanite Group) คัลไซน์เคลย์ (Calcined clay) ไพโรฟิลไลต์ (Pyrophyllite) เซอร์คอน (Zircon) เป็นต้น ซึ่งในที่นี้จะกล่าวถึงเฉพาะซิลิกา และอะลูมินาซึ่งใช้ในการวิจัยนี้

2.6.3.1 ซิลิกา (Silica, SiO_2) โดยปกติในดินทุกชนิดและในเฟลด์สปาร์จะมีซิลิกาเป็นองค์ประกอบในสูตรเคมีอยู่แล้ว ในการเตรียมเนื้อดินนอกจากจะมีเฟลด์สปาร์ทำหน้าที่เป็นตัวหลอมละลาย ยังมีซิลิกาอยู่ในสูตรดินด้วยอีกส่วนหนึ่งซึ่งเพิ่มเข้าไปโดยใช้ซิลิกาบดละเอียด ซิลิกาที่เพิ่มเข้าไปต่างหากนี้ เรียกว่า ซิลิกาอิสระ การเพิ่มซิลิกาอิสระนี้บางครั้งเป็นอันตรายหลังการเผาไหม้เพราะทำให้เนื้อดินขยายตัวมากกว่าสารเคลือบ (Thermal expansion) (โดยปกติแล้วสารเคลือบจะไม่ร่นตัว(ลักษณะการแตกกระแหง) ถ้าเนื้อดินและสารเคลือบหดตัวในอัตราส่วนใกล้เคียงกัน) ซิลิกาที่ประกอบอยู่ในเฟลด์สปาร์และเนื้อดินมีการขยายตัวและหดตัวน้อยกว่าซิลิกาอิสระที่เพิ่มเข้าไป ซิลิกาถูกนำมาใช้ประโยชน์ในการผลิต คือ ใช้เป็นส่วนผสมของเนื้อดินในการทำผลิตภัณฑ์เซรามิกใช้เป็นส่วนผสมของสารเคลือบ ใช้ในอุตสาหกรรมแก้ว และการก่อสร้าง ได้แก่ ทราซ โดยสมบัติทางกายภาพของซิลิกา แสดงในตารางที่ 2.8

ตารางที่ 2.8 สมบัติทางกายภาพของซิลิกา (ไพจิตร อิงศิริวัฒน์, 2541)

ความถ่วงจำเพาะ	2.65
ความแข็ง	7 โมห์สเกล
จุดหลอมละลาย	1728 องศาเซลเซียส
โครงสร้างผลึก	รูปหกเหลี่ยมเป็นร่างสามมิติ

ซิลิกาเมื่อถูกเผาผ่านความร้อนจะเปลี่ยนโครงสร้างของรูปผลึกอยู่หลายช่วงอุณหภูมิของการเผา โดยอะตอมของรูปผลึกถูกจัดเรียงตัวใหม่จากรูปแบบหนึ่งเปลี่ยนแปลงเป็นอีกแบบหนึ่ง แต่ละแบบจะสามารถคงสภาพอยู่ได้ในช่วงอุณหภูมิหนึ่ง การเปลี่ยนแปลงรูปผลึกนี้ เรียกว่า อินเวอร์ชัน (Inversion) การเปลี่ยนแปลงจะเกิดขึ้นเมื่อผลึกของซิลิกาถูกเผาผ่านความร้อน แต่เมื่อสิ้นสุดการเผา ซิลิกาจะเย็นตัวลง ผลึกต่างๆ จะย้อนกลับมาเป็นรูปเดิม เมื่อเย็นตัวลงถึงอุณหภูมิเดิมดังแสดงในภาพที่ 2.3 ซึ่งแสดงการเปลี่ยนแปลงเฟส (phase) ของซิลิกาที่อุณหภูมิต่างๆ



ภาพที่ 2.3 ปฏิกริยาของผลึกซิลิกาเมื่อได้รับความร้อน (ไพจิตร อิงศิริวัฒน์, 2541)

2.6.3.2 อะลูมินา (Alumina, Al_2O_3) อะลูมินา คือ อะลูมิเนียมออกไซด์ เรียกอีกชื่อหนึ่งว่า คอร์รันดัม (Corundum) ได้จากการเผาอะลูมินาไฮดรต $\text{Al}(\text{OH})_3$ ที่อุณหภูมิประมาณ 1000 องศาเซลเซียส เพื่อขจัดน้ำออกไป โดยสมบัติทางกายภาพของอะลูมินา แสดงในตารางที่ 2.9

อะลูมินาเป็นประโยชน์มากในอุตสาหกรรมวัสดุทนไฟ ถึงแม้ว่าอะลูมินาจะแพงกว่าเฟลด์สปาร์ แต่ในอุตสาหกรรมแก้วที่ต้องการอัลคาไลที่น้อยๆ จำเป็นต้องใช้อะลูมินา ข้อดีอีกประการหนึ่งของอะลูมินา คือ มีปริมาณเหล็กน้อย สารประกอบทั้งสองมีความบริสุทธิ์ค่อนข้างสูง โดยทั่วไปอะลูมินามักพบในรูปของไฮดรต (Hydrate) คือผลึกของอะลูมินามีการรวมตัวทางเคมีกับน้ำ เช่น หินบอกไซต์ (Bauxite) ซึ่งประกอบด้วยแร่ที่สำคัญ 3 ชนิด ได้แก่ จิบไซต์ (Gibbsite, $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$) ไดอะสปอร์ (Diaspore, $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) โบฮีไมท์ (Boehmite, $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$)

ตารางที่ 2.9 สมบัติทางกายภาพของอะลูมินา (ไพจิตร อิงศิริวัฒน์, 2541)

ความถ่วงจำเพาะ	3.9 – 4.1
ความแข็ง	9 โมห์สเกล
จุดหลอมละลาย	2050 องศาเซลเซียส
จุดสุกตัวได้เนื้อแก้ว(Sintered alumina)	1600 – 1900 องศาเซลเซียส
ความเป็นฉนวนไฟฟ้า	ดี

อะลูมินาเป็นวัสดุที่มีความทนไฟสูง มีความทนต่อการกัดกร่อนจากสารเคมี มีความแข็งแรงและมีคุณสมบัติเป็นฉนวนไฟฟ้าได้ดี ด้วยคุณสมบัติดังกล่าวนี้เอง อะลูมินาถูกนำมาใช้ในการผลิตวัสดุทนไฟ เบ้าหลอม หัวเทียน และแผ่นรองวงจรไฟฟ้า และได้มีการนำอะลูมินามาผสมในเนื้อดินทำถ้วยชามด้วย อย่างไรก็ตามการนำอะลูมินามาใช้ก็มีผลเสียในบางกรณีเช่นอัตราการขยายตัวของดินจะต่ำไม่เท่ากับอัตราการขยายตัวของเคลือบ เพราะผลึกอะลูมินาเมื่อเผาผ่านความร้อนไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปผลึกซับซ้อนเหมือนซิลิกา นอกจากนี้ อะลูมินาเป็นวัสดุดิบที่มีค่าความถ่วงจำเพาะหนักถึง 3.95 ถ้าใช้ผสมเนื้อดินปริมาณร้อยละ 35 จะ

ทำให้เนื้อดินหลังการเผามีน้ำหนักเพิ่มขึ้นถึง ร้อยละ 20 และอะลูมินามีค่าความแข็งสูงถึง 9 โมห์สเกลซึ่งรองจากเพชร ซึ่งเท่ากับ 10 โมห์สเกล ทำให้การบดย่อยให้เป็นผงละเอียดทำได้ยาก

อะลูมินาถูกนำมาใช้ประโยชน์ในการผลิต คือ ใช้ผสมเนื้อดินปั้นชนิดปอร์เซเลน เรียกว่า อะลูมินา ปอร์เซเลน (Alumina porcelain) และผลิตภัณฑ์ฉนวนไฟฟ้าแรงสูง เพื่อเพิ่มความแข็งแรง ใช้ในอุตสาหกรรมที่จะต้องทนต่อการกัดกร่อนจากสารเคมี (Abrasion – resistance purposes) และใช้ทำวัสดุทนไฟในเตาเผา (Refractory purposes) ใช้ในอุตสาหกรรมทำอิฐทนไฟ (High alumina bricks) ใช้ในการเตรียมน้ำเคลือบ เป็นส่วนของน้ำเคลือบเกือบทุกชนิด และมีคุณสมบัติทำให้เคลือบด้านถ้าใช้ในปริมาณมาก

2.7 ทรายแก้ว

ทราย (sand) ตามความหมายของวิชาตะกอนศาสตร์ (Sedimentology) หมายถึงเม็ดวัตถุตะกอนที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ตั้งแต่ 0.063-2.000 มิลลิเมตร ซึ่งประกอบด้วยวัตถุที่เป็นเศษหิน เศษแร่ ขนาดเล็ก มีลักษณะระ่วนซุย ไม่เกาะติดกัน ได้แก่ แร่เขี้ยวหนุมาน หรือควอตซ์ (Quartz) แร่ฟันม้า หรือแร่เฟลด์สปาร์ (Feldspar) หินบะซอลต์ หินปูน หินภูเขาไฟ แร่ยิปซัม เป็นต้น ทรายเกิดตามธรรมชาติด้วยกระบวนการกัดกร่อนและผุสลายจากหินและแร่ที่เป็นต้นกำเนิด จากนั้นอาจถูกกระแสน้ำ คลื่น แรงโน้มถ่วง น้ำแข็งและลม นำพาไปสะสมอยู่ในบริเวณภูมิประเทศลักษณะต่างๆ มีทั้งทรายที่สะสมตัวบนบกโดยแม่น้ำลำธาร กระแสลมและทรายที่สะสมในทะเลที่สัมพันธ์กับคลื่นกระแสน้ำ สำหรับตะกอนกรวด (Gravel) นั้น หมายถึงตะกอนที่มีขนาดใหญ่กว่า 2 มิลลิเมตร ขึ้นไป ลักษณะทรายจำแนกตามการใช้ประโยชน์หลักแบ่งเป็น

ทรายสำหรับงานด้านโยธาในอุตสาหกรรมการก่อสร้าง คือ วัสดุผสมละเอียดที่มีขนาดผ่านตะแกรงร่อน 4.75 มิลลิเมตรได้ จะเป็นเศษหิน แร่ ก็ได้ พบได้ทั่วไปมีความสะอาดระดับหนึ่งมีเม็ดทรายแข็งแรง ทนทาน มีแผลมคม ไม่ขยายตัวมาก มีสารประกอบอื่นเจือปนอยู่น้อย โดยทรายที่ใช้ผสมปูนซีเมนต์จะเรียกวัดผสมละเอียด (Fine aggregate) มีขนาด 0.07-4.75 มิลลิเมตร แยกการใช้งานตามขนาดของเม็ดทราย

ทรายละเอียด ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.5-1.5 มิลลิเมตร ใช้ในงานในปูนก่อ ปูนฉาบ

ทรายกลาง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1-3 มิลลิเมตร ใช้ในงานคอนกรีต ปูนก่อที่ต้องรับแรงอัด ปูนฉาบผนังใต้ดิน พื้นคาน

ทรายหยาบ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2-4.75 มิลลิเมตร ใช้ในงานคอนกรีต เทพื้น ฐานราก และงานที่ต้องการแรงอัดมาก

ทรายอุตสาหกรรม ส่วนใหญ่จะหมายถึง ทรายแก้ว (Silica sand) คือ ทรายที่มีปริมาณซิลิกาไดออกไซด์ (SiO_2) มากกว่าร้อยละ 95 และสารประกอบอื่นๆ เจือปนอยู่ได้ปริมาณเล็กน้อย

2.7.1 ทราวยแก้วที่ใช้ในอุตสาหกรรมเซรามิก

ในอุตสาหกรรมเซรามิก ทราวยแก้วเป็นส่วนประกอบของเนื้อเซรามิกคุณภาพสูงสีขาวถึงร้อยละ 30 - 40 เพราะทราวยแก้วเพิ่มความขาวให้กับผลิตภัณฑ์ ทำให้แกร่ง แข็งง่าย เพิ่มการยึดเกาะระหว่างเนื้อเซรามิก และตัวเคลือบคงทนต่อความร้อน และแตกยากโดยเฉพาะทราวยแก้วจากฟลินท์ และทราวยแก้วที่เป็นผลพลอยได้ จากการทำเหมืองซอลท์

2.7.2 คุณสมบัติของทราวยแก้วในอุตสาหกรรมเซรามิก ต้องมีองค์ประกอบสำคัญ ได้แก่

- ปริมาณซิลิกา (Si_2O) ไม่น้อยกว่าร้อยละ 99
- ปริมาณเหล็ก (Fe_2O_3) ไม่เกินร้อยละ 0.01
- ขนาดของเม็ดทรายละเอียด ขนาดน้อยกว่า 0.10 มิลลิเมตร (200 เมช)
- มีความชื้นในปริมาณที่กำหนด ไม่เกินร้อยละ 1
- ผ่านกระบวนการล้าง แต่งแร่เพื่อแยกเอาแร่เหล็ก และแร่หนักออก
- ผ่านกระบวนการคัดขนาดได้ทราวยแก้วที่มีคุณภาพสม่ำเสมอ

2.8 แก้ว (Glass)

2.8.1 ลักษณะทั่วไปของแก้ว

โดยทั่วไปวัตถุดิบที่ใช้เป็นส่วนผสมในการผลิตแก้ว หรือกระจกจะแตกต่างกันตรงสัดส่วนของส่วนผสมที่ใช้ เพื่อให้ผลิตภัณฑ์มีคุณสมบัติแตกต่างกันไป

วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตแก้วประกอบด้วยวัตถุดิบที่เป็นองค์ประกอบหลักที่ทำให้เกิดโครงสร้างแห่งความเป็นแก้ว คือ ทราวยแก้วหรือซิลิกา (Silica) ส่วนประกอบที่เสริมเข้าไปเพื่อให้เกิดการหลอมแก้วเป็นไปได้ง่ายขึ้น และมีสมบัติต่างๆตามความต้องการ เช่น อะลูมินา (Al_2O_3) ที่ช่วยเพิ่มสมบัติในด้านความคงทนทางเคมีของผิวแก้ว ตะกั่วออกไซด์ (PbO) เพิ่มความหนาแน่นให้แก้ว ช่วยให้แก้วมีเสียงกังวานไพเราะ เนื้อแก้วเป็นประกาย โซดาแอช (Na_2CO_3) เป็นตัวช่วยหลอม ช่วยลดอุณหภูมิการหลอมให้ต่ำลง โบแรกซ์ (B_2O_3) ช่วยให้แก้วมีประสิทธิภาพการขยายตัวต่ำ สามารถทนต่อความร้อนและการผุกร่อนทางเคมี ช่วยให้มีความทนทานทางไฟฟ้าได้ดี สารฟอกสี (Depolarizing Agent) เป็นพวกซิลิเนียมและโคบอลท์ (Selenium & Cobalt) เป็นสารที่ช่วยฟอกสีเขียวที่เกิดจากออกไซด์ของเหล็กซึ่งมักมีเจือปนอยู่ นอกจากนี้อาจมีการเติมสารปรุงแต่ง เพิ่มเติมตามความต้องการใช้งานของผลิตภัณฑ์ ขณะที่มีการเติมเศษแก้ว (Cullet) เพื่อช่วยลดต้นทุนการผลิตและทำหน้าที่เป็นตัวช่วยลดอุณหภูมิของการหลอม หัวใจของกระบวนการผลิตแก้ว คือ เตาหลอมแก้วที่ใช้ในงานอุณหภูมิสูง ดังนั้นต้นทุน ส่วนหนึ่งของการผลิตจึงมักอยู่ที่ค่าเชื้อเพลิง เทคโนโลยีของการหลอมแก้วจึงเน้นไปที่ประสิทธิภาพของการหลอม เพื่อประหยัดพลังงานและมีการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์

กลุ่มอุตสาหกรรมแก้วในประเทศ แบ่งออกเป็น 3 กลุ่ม ตามชนิดของผลิตภัณฑ์ได้ดังนี้

1. กลุ่มผลิตภัณฑ์บรรจุภัณฑ์แก้ว (Glass Ware)
2. กลุ่มผลิตภัณฑ์กระจกแผ่น (Flat Glass)
3. กลุ่มเส้นใยแก้ว และผลิตภัณฑ์อื่น (Glass Fiber and Other Product)

2.8.2 กลุ่มผลิตภัณฑ์บรรจุภัณฑ์ขวดแก้ว

ในบรรดาผลิตภัณฑ์เครื่องแก้วชนิดต่างๆ พบว่าร้อยละ 85 ของผลิตภัณฑ์ทั้งหมดเป็นผลิตภัณฑ์ภาชนะบรรจุภัณฑ์แก้ว ที่มีการใช้กันมานาน และคาดว่าจะยังคงความสำคัญต่อไปในอนาคต เนื่องจากผลิตภัณฑ์คู่แข่งชนิดอื่นได้ก่อให้เกิดปัญหาต่อสิ่งแวดล้อม ทำให้แก้วมีความสำคัญที่เด่นชัดและเป็นที่ต้องการของตลาด เนื่องจากแก้วเป็นวัสดุที่มีสมบัติดีนานับการ มีลักษณะของวัสดุที่มีความเฉื่อยในการทำปฏิกิริยากับผลิตภัณฑ์ที่บรรจุอยู่ภายใน มีความใสสะอาดมองเห็นผลิตภัณฑ์ภายในได้อย่างชัดเจน ทนต่อแรงกดและความดันได้ดี สามารถป้องกันผลิตภัณฑ์ให้เก็บรักษาไว้ได้นานและยังสามารถนำภาชนะแก้วกลับมาใช้ใหม่หลายครั้ง อีกทั้งรูปทรงของการผลิตแก้วก็ยังสะดวกต่อการออกแบบให้หลากหลาย อย่างไรก็ตาม ต้นทุนการผลิตดูจะเป็นปัจจัยที่ทำให้แก้วมีราคาค่อนข้างสูง เมื่อเทียบกับบรรจุภัณฑ์ชนิดอื่น

บรรจุภัณฑ์แก้วโดยทั่วไปอาจแบ่งออกเป็นชนิดต่างตามรูปทรงแก้ว เช่น ขวดปากกว้าง ขวดปากแคบบางชนิดอาจแบ่งตามสมบัติของเนื้อแก้ว เช่น แก้วบอโรซิลิเกต หรือบางแห่งอาจแบ่งตามกระบวนการการเคลือบผิว (Surface Treatment) เช่น แก้วที่เคลือบซิลิโคน (Silicone Coating) เป็นต้น นอกจากนี้บรรจุภัณฑ์แก้ว ยังสามารถแบ่งออกเป็นกลุ่ม ตามความต้านทานความดัน แบ่งเป็น 2 ประเภท คือ

1. ขวดแก้วที่ไม่จำเป็นต้องมีความต้านทานความดัน มักเป็นขวดปากกว้าง สำหรับนำกลับมาใช้ใหม่ได้หลายครั้ง เช่น ขวดอาหาร ขวดเครื่องสำอาง เป็นต้น
2. ขวดแก้วที่ต้องมีความต้านทานความดัน ขวดประเภทนี้มักเป็นขวดปากแคบ และมีโอกาสที่จะแตกได้ง่ายหากนำกลับมาใช้เช่นเดิมอีก ดังนั้นการนำกลับมาใช้ใหม่จึงมักนิยมใช้ บรรจุอย่างอื่นแทน ขวดดังกล่าวอาจได้แก่ ขวดเบียร์ ขวดน้ำอัดลม เป็นต้น

ผลิตภัณฑ์ภาชนะแก้วจะมีตั้งแต่ จาน ชาม ขวด โถ ไปจนถึงเครื่องแก้วชนิดต่างๆ โดยขวดแก้วจะมีส่วนแบ่งตลาดสูงที่สุด โดยนับตั้งแต่ขวดแก้วเพื่อใช้บรรจุเครื่องดื่มชูกำลัง ขวดเบียร์ ขวดสุรา ขวดยา และขวดอาหาร ขวดเครื่องดื่มเกลือแร่ ขวดน้ำอัดลม เป็นต้น อย่างไรก็ตาม สัดส่วนความต้องการของขวดชนิดต่างๆ เทาที่ผ่านมาอยู่ในระดับที่ค่อนข้างคงที่ แม้ในบางครั้งจะมีเครื่องดื่มชนิดใหม่ๆ เข้าสู่ท้องตลาดบ้าง

2.8.3 เทคโนโลยีในการผลิต

วัตถุดิบต่างๆ จะผ่านการซัง กวนผสมให้เข้ากันแล้วลำเลียงบ่อนเข้าสู่เตาหลอมพร้อมๆ กับเศษแก้ว การหลอมอาจใช้อุณหภูมิสูงถึง 1600 องศาเซลเซียส ซึ่งทำให้วัตถุดิบรวมทั้งเศษแก้ว หลอมละลายเข้ากันเป็นน้ำแก้วปราศจากฟองอากาศ ไหลไปตามรางน้ำแก้ว พร้อมผลิตเป็นรูป ขวดต่อไป

ขั้นตอนการผลิตประกอบด้วย 6 ขั้นตอน คือ

1. การเตรียมวัตถุดิบ (Raw Material & Mixing)
2. การหลอม(Melting)
3. การขึ้นรูป (Forming)
4. การอบ (Annealing)
5. การตรวจสอบและคัดเลือก (Inspection & Selecting)
6. การตกแต่ง (Decorating)

2.8.4 วัตถุดิบที่ใช้ในการหลอมแก้ว

1. ททรายแก้ว SiO_2 (ร้อยละ 55)
2. โซดาแอช NaCO_3 (ร้อยละ 20)
3. หินปูนบดละเอียด หรือโดโลไมท์ CaCO_3 หรือ $\text{Ca.Mg(CO}_3)_2$ (ร้อยละ 15)
4. อะลูมินา Al_2O_3 (ร้อยละ 2)
5. อื่นๆ (สารเคมี เศษแก้วร้อยละ 8)

2.8.5 แก้วสีต่างๆ (Color Glasses)

ผลิตภัณฑ์ที่มีสีต่างๆ ที่มีขายอยู่ตามท้องตลาดนั้น จะต้องใส่สารที่ให้สี โดยอาจจะใส่ สารเคมี ลงในขั้นตอนที่ 1 หรือขั้นตอนที่ 2 (ช่วงลดอุณหภูมิลงมาเหลือ 1200 องศาเซลเซียส) สารเคมีที่ทำให้เกิดสีในเนื้อแก้ว ได้แก่

สีชา	ใช้ถ่าน + สนิมเหล็กแดง + โซเดียมซิลเฟต และ ยางสน
สีแดง	ใช้แคดเมียมซิลไฟด์ + ซิลิเนียม คลอไรด์ของทอง
สีชมพู	ใช้ซิลิเนียม
สีฟ้า	ใช้จุนสี (คอปเปอร์ซิลเฟต)
สีน้ำเงิน	ใช้โคบอลท์ออกไซด์
สีเขียว	ใช้เกลือของโครเมต เช่น โบแตสเซียมโครเมต โครเมียมออกไซด์
สีดำ	ใช้แมงกานีสออกไซด์ + โคบอลท์ + นิเกิลออกไซด์
สีเหลือง	ใช้แคดเมียมซิลไฟด์
สีเขียวใส	ใช้สนิมเหล็กแดง ($\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{FeO}$)

2.8.6 ผู้ผลิตบรรจุภัณฑ์ขวดแก้วของประเทศไทย

ปัจจุบันโรงงานขนาดใหญ่มีอยู่รวมกัน 5 ราย ได้แก่ บริษัททำเครื่องแก้วไทย จำกัด (มหาชน) บริษัท บางกอกกกลาส จำกัด บริษัท สยามกกลาสอินดัสทรี จำกัด องค์การแก้ว และบริษัท แก้วปรากการ จำกัด กำลังการผลิตรวม 943,708 ตัน/ปี โดยกว่าร้อยละ 80 เป็นกำลังการผลิตรวมของบริษัทผู้ผลิตรายใหญ่ จากข้อมูลของกระทรวงอุตสาหกรรมพบว่าในปี 2537 ผู้ผลิตรายใหญ่ที่สุด คือ บริษัทอุตสาหกรรมทำเครื่องแก้วไทย จำกัด มีกำลังการผลิต 401,500 ตัน/ปี และบริษัท บางกอกกกลาส จำกัด มีกำลังการผลิต 365,250 ตัน/ปี โดยอัตราการนำขวดแก้วและเศษแก้วกลับมาใช้ใหม่ มีจำนวนร้อยละ 19 ที่ผู้ผลิตเรียกคืนเพื่อนำกลับไปใช้ใหม่ และมีเพียงร้อยละ 34 ที่มีการนำกลับไปใช้ในกระบวนการผลิตใหม่ (พีชพร เซาวกิจเจริญ และ วิวรรณ เทียนศิริ, 2548)

2.9 กระเบื้องเซรามิก

2.9.1 ความหมายของกระเบื้องตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม

กระเบื้อง หมายถึง ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการอัด (Pressing) หรือการอัดรีด (Extrusion) ดินและส่วนผสมอื่น เช่น หิน ททราย สี เป็นต้น แล้วเผาที่อุณหภูมิไม่น้อยกว่า 1000 องศาเซลเซียส จนเนื้อกระเบื้องแข็งแกร่งมีอัตราการดูดซึมน้ำค่อนข้างต่ำ สามารถทนต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิโดยฉับพลัน มีลักษณะเป็นแผ่น แต่ละแผ่นมีพื้นที่ไม่น้อยกว่า 90 ตารางเซนติเมตร มีสีและรูปร่างใดๆ ก็ได้ มีทั้งประเภทเคลือบและไม่เคลือบ

2.9.2 ชนิดของกระเบื้อง

กระเบื้องเซรามิก จะแบ่งออกเป็น 2 ชนิดใหญ่ๆ คือ กระเบื้องปูพื้น และกระเบื้องบุผนัง ทั้ง 2 ชนิดมีลักษณะที่คล้ายกันมาก แต่มีรายละเอียดและคุณสมบัติ บางประการที่ทำให้ทั้ง 2 ชนิดนี้ไม่เหมือนกัน

2.9.2.1 กระเบื้องปูพื้น เป็นกระเบื้องที่ต้องมีความแข็งแรงเป็นพิเศษ จึงต้องมีคุณสมบัติที่สามารถรับน้ำหนักได้ดี ทนทานต่อการขีดข่วน และมีการดูดซึมน้ำต่ำ ดังนั้น กระเบื้องปูพื้นจะถูกเผาแค่ครั้งเดียวกระเบื้องมีความแข็งแรง และสีเคลือบหลอมตัวเป็นเนื้อเดียวกับเนื้อกระเบื้อง จึงทนทานไม่หลุดลอกง่าย แต่เรื่องความละเอียดอ่อนและความสวยงามของลวดลาย จะมีความนุ่มนวล น้อยกว่ากระเบื้องบุผนัง (ค่ากำลังรับแรงดัดไม่น้อยกว่า 25 เมกกะปาสคาล ค่าการดูดซึมน้ำไม่เกินร้อยละ 3)

2.9.2.2 กระเบื้องบุผนัง ไม่จำเป็นต้องมีความทนทานเหมือนกระเบื้องปูพื้น จึงรับน้ำหนักและต้านทานการขีดข่วนน้อยกว่า รวมทั้งมีการดูดซึมน้ำที่มากกว่า เนื่องจากกระเบื้องบุผนัง จะเน้นไปที่เรื่องของการตกแต่ง จึงมีสีสันและลวดลายที่นุ่มนวล ละเอียดอ่อน สวยงาม ราคากระเบื้อง

จึงสูงกว่ากระเบื้องปูพื้น (ค่ากำลังรับแรงดัดไม่น้อยกว่า 20 เมกกะปาสคาล ค่าการดูดซึมน้ำไม่เกินร้อยละ 6)

2.9.3 กระบวนการผลิตกระเบื้องเซรามิกโดยทั่วไป มีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. การเตรียมเนื้อดิน ทำการผสมส่วนผสมเนื้อดินตามสูตรโดยการร่อนผ่านตะแกรงให้ส่วนผสมเข้ากัน แล้วเติมน้ำให้มีความเหนียว
2. นำไปทำการขึ้นรูป ซึ่งสามารถทำได้หลายวิธี เช่น การขึ้นรูปด้วยแรงอัด เป็นต้น
3. นำผลิตภัณฑ์ที่ขึ้นรูปเสร็จแล้วเข้าตู้อบ (Drier) ซึ่งทำให้ผลิตภัณฑ์แห้งสม่ำเสมอไม่บิดเบี้ยว และแห้งในเวลาสั้น
4. ทำการตกแต่งชิ้นงานก่อนเผา โดยทำการตัดแต่งส่วนที่เกินออก
5. การเผา ซึ่งใช้อุณหภูมิ ระยะเวลาและวิธีการแตกต่างกันไปตามแต่ชนิดของเนื้อดิน วัตถุประสงค์ในการเผา และรูปทรงของผลิตภัณฑ์

2.9.4 การขึ้นรูปผลิตภัณฑ์เซรามิกโดยใช้แรงอัด

การขึ้นรูปโดยวิธีการนี้ใช้แพร่หลายในการผลิตผลิตภัณฑ์วัตถุกันไฟ กระเบื้องและผลิตภัณฑ์เซรามิกชนิดพิเศษ แรงอัดจะอัดบนแบบที่มีผงเนื้อดินปั้นแห้ง ๆ หรือมีความชื้นเล็กน้อย อยู่ภายในแบบ แบบที่ใช้เป็นโลหะแข็ง

2.9.4.1 การขึ้นรูปโดยการอัดเนื้อดินปั้นแห้งๆ (Dry and Dust Pressing)

ผลิตภัณฑ์เซรามิกที่ใช้ในงานอิเล็กทรอนิกส์และงานด้านไฟฟ้า มีขนาดเล็ก ๆ บางชนิดมีรูปร่างง่าย ๆ แต่มีหลายชนิดที่มีรูปร่างซับซ้อน ผลิตภัณฑ์ทุกชนิดต้องการขนาดมาตรฐานถูกต้อง เพื่อจะได้ใช้แทนกันได้ ในวงจรของงานและต้องมีคุณสมบัติทางด้านไดอิเล็กตริก (Dielectric) คุณสมบัติทางกลศาสตร์สม่ำเสมอ

ในบางกรณีผลิตภัณฑ์เซรามิกเหล่านี้ใช้ร่วมกันหรือใช้แทนผลิตภัณฑ์ที่ทำจากพลาสติก ผลิตภัณฑ์พลาสติกมีข้อดี คือ มีขนาดที่สามารถผลิตได้มาตรฐานแน่นอน ความแน่นอนของขนาด ผลิตภัณฑ์เซรามิกขึ้นอยู่กับองค์ประกอบหลายอย่าง เช่น การหดตัว ขนาดของอนุภาค และการกระจายของขนาดของอนุภาค ความหนาแน่นของผลิตภัณฑ์หลังจากขึ้นรูปและวิธีการเผา วิธีการที่สามารถทำให้ได้สิ่งต่างๆ เหล่านี้ที่จะเป็นวิธีการสามารถผลิตผลิตภัณฑ์ที่มีรูปร่างและขนาดต่างๆ ได้ เพราะว่าการปรับปรุงส่วนใดส่วนหนึ่ง ในวงจรการผลิตจะต้องมีการออกแบบใหม่เสมอ

การขึ้นรูปผลิตภัณฑ์เซรามิกโดยการอัดผงเนื้อดินปั้นในแบบโลหะเป็นวิธีการที่ทำให้ได้สิ่งต่างๆ ที่ต้องการเหล่านั้น และวิธีการขึ้นรูปโดยใช้แรงอัดโดยอัตโนมัติได้มีการพัฒนาขึ้นมาใช้กันอย่างกว้างขวาง การขึ้นรูปโดยการอัดผงเนื้อดินแห้ง ๆ (Dry pressing) ใช้กับการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์เซรามิกที่ใช้ในงานประยุกต์ทั้งทางด้านอิเล็กทรอนิกส์และไฟฟ้า เป็นวิธีการอัดผงกลมๆ ของเนื้อ

ดินปั้นแห้งๆ ภายในโลหะด้วยแรงอัดที่สูง ความชื้นภายในผงเนื้อดินปั้นไม่เกินร้อยละ 4 ผงเนื้อดินปั้นกลมๆ เคลื่อนที่ได้อิสระแต่มีความเหนียวไม่ดีเท่าที่ควร แต่เมื่อถูกแรงอัดจะอัดตัวกันได้แน่น

วิธีการที่กล่าวมาแตกต่างไปจากการขึ้นรูปโดยการอัดผงกลมๆ ของเนื้อดินปั้นซึ่งเกือบแห้ง (semi dry หรือ dust press แต่บางครั้งก็เรียกรวมๆ กันว่า dry press) ซึ่งในอุตสาหกรรมกระเบื้องต่างๆ วิธีการหลังนี้เหมาะสำหรับการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์เซรามิก ซึ่งมีดินเป็นส่วนผสมในเนื้อดินปั้นเป็นปริมาณค่อนข้างสูง ซึ่งทำให้ผงเนื้อดินปั้นมีความเหนียวดี วิธีการนี้จะอัด ผงเนื้อดินปั้นซึ่งมีความชื้นระหว่างร้อยละ 10-15 ภายในแบบโลหะ แรงอัดที่ใช้ในการอัดไม่สูงมาก ข้อดีของวิธีการนี้ คือ แบบที่ใช้ออกแบบค่อนข้างง่าย แต่การตัดแปลงให้เข้ากับงานทำงานแบบอัตโนมัติไม่ค่อยดีนักและไม่สามารถทำให้ขนาดของผลิตภัณฑ์แตกต่างกันน้อยมากพอ และมักจะมีคราบเนื้อดินปั้นตามขอบผลิตภัณฑ์ซึ่งต้องปัดออกก่อนนำไปเผา การหดตัวด้วยการขึ้นรูปวิธีนี้อยู่ระหว่าง ร้อยละ 12-15

การเตรียมเนื้อดินปั้นสำหรับการขึ้นรูปโดยการอัดแห้ง มี 4 แนวทาง

แนวทางที่ 1 เป็นการเตรียมเนื้อดินปั้นที่มีความบริสุทธิ์ไม่สูงนัก เริ่มจากเติมน้ำจำนวนมากพอลงในถังกวน แล้วเติมวัตถุดิบ ลงไปกวนผสม เมื่อส่วนผสมเข้ากันดีแล้ว ให้นำดินร้อนผ่านตะแกรง แล้วผ่านแม่เหล็ก และเข้าเครื่องอัดกรอง เพื่อรีดน้ำออก จากนั้นนำมาทำเป็นผงดิน ร้อน ผงดินผ่านตะแกรงเบอร์ 14 หรือไม่เกิน 20 ขนาดที่ใหญ่กว่านำกลับเข้าเครื่องทำผงใหม่

แนวทางที่ 2 เป็นการเตรียมเนื้อดินที่วัตถุดิบผ่านการเตรียมเป็นผงดินปั้นมาแล้ว คือ มีความบริสุทธิ์สูง และมีความละเอียดดีแล้ว จะผสมกันโดยเครื่องผสม และเติมน้ำประมาณร้อยละ 5-10 เมื่อผสมเข้ากันดีแล้วจึงร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 14 หรือ ไม่เกิน 20 จะได้ผงเนื้อดินที่สามารถนำไปเข้าเครื่องอัดขึ้นรูปต่อไป

แนวทางที่ 3 คล้ายแนวทางที่ 2 ต่างกันที่ หลังจากผสมแล้ว ทำให้ผงที่ผสมได้ให้เป็นเม็ดกลมก่อน แล้วจึงร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 14 หรือไม่เกิน 20 การทำให้เป็นเม็ดกลม จะช่วยให้การเคลื่อนตัว และการอัดตัวในแบบดีกว่าผงทั่วไป ทำให้เนื้อดิน และความหนาแน่นมีความกระจายสม่ำเสมอ ทำให้โอกาสการโค้งงอเกิดได้น้อยกว่า

แนวทางที่ 4 คล้ายแนวทางที่ 1 ต่างกันที่ แทนที่จะเข้าเครื่องอัดกรองเอาน้ำออก แต่กลับเอาน้ำดินเข้าเครื่องสเปรดรายเออร์ (Spray dryer) ซึ่งจะทำให้ผงเนื้อดินมีลักษณะเป็นทรงกลมเล็กๆ ซึ่งส่งผลให้เนื้อดินเคลื่อนตัวได้ดี และมีประโยชน์เช่นเดียวกับการทำให้เป็นเม็ดกลม วิธีนี้เป็นวิธีที่ใช้กันแพร่หลายในอุตสาหกรรมกระเบื้อง

สำหรับในงานวิจัยนี้ จะเตรียมเนื้อดินปั้นสำหรับการขึ้นรูปโดยการอัดแห้ง ตามแนวทางที่ 1 และ 2 เท่านั้น ซึ่งระบุชื่อแนวทางตามงานวิจัยเป็น การเตรียมเนื้อดินปั้นแบบเปียก และแบบแห้งตามลำดับ

2.9.5 กลไกการอบผลิตภัณฑ์

ในผลิตภัณฑ์ที่ขึ้นรูปเสร็จใหม่ ๆ จะมีน้ำเป็นองค์ประกอบ อยู่ 4 รูปแบบ คือ

1. น้ำที่ถูกดูดซับอยู่ที่ผิวของอนุภาคของวัตถุดิบ
2. น้ำที่เป็นสาเหตุให้ผลิตภัณฑ์หดตัวเมื่ออบแห้ง
3. น้ำที่ถูกขังอยู่ในช่องว่างผลิตภัณฑ์
4. น้ำซึ่งประกอบอยู่ในโครงสร้างของผลิตภัณฑ์

ผิวของแข็งทุกชนิดมีความสามารถในการดูดซึมน้ำ ซึ่งอาจมีความหนาเพียง 1 ไมโครเมตร หรือมากกว่านั้น การสะสมน้ำในเนื้อของแข็งจะเป็นไปอย่างต่อเนื่อง และอยู่ในรูปของหยดเล็กๆ ปริมาณของน้ำที่ถูกดูดซับขึ้นกับความดันไอของน้ำในบรรยากาศ ดังนั้นเนื้อผลิตภัณฑ์เมื่อแห้งจะค่อยๆ ดูดซับน้ำในบรรยากาศจนถึงจุดสมดุลพวกดินที่มีเม็ดหยาบจะดูดซึมน้ำได้น้อย

ปริมาณของน้ำที่ทำให้ผลิตภัณฑ์หดตัวเมื่ออบแห้ง น้ำส่วนนี้เป็นน้ำที่แยกอนุภาคของดินออกจากกันในขณะที่ดินยังคงสภาพความเหนียวอยู่ น้ำปริมาณนี้จะมีจำนวนไมโครเมตรอยู่ในช่วง 200 ไมโครเมตร ดังนั้นเมื่อน้ำปริมาณนี้ถูกขจัดออกไป จะเป็นสาเหตุให้ผลิตภัณฑ์เกิดการหดตัว

น้ำที่ถูกขังอยู่ในช่องว่างผลิตภัณฑ์ น้ำปริมาณนี้จะมีน้อย หรือมากขึ้นกับขนาดอนุภาคของอนุภาคของวัตถุดิบว่ามีการกระจายตัวมากน้อยเพียงใด นอกจากนี้ขึ้นกับการอัดตัวกันของอนุภาค ขนาดของวัตถุดิบที่มีขนาดใหญ่ หรือหยาบ โอกาสที่จะมีช่องว่างในเนื้อผลิตภัณฑ์ก็มีมาก ช่องว่างมีขนาดใหญ่ ดังนั้นน้ำจึงมีโอกาสถูกขังในช่องว่างมาก

น้ำในผลิตภัณฑ์ของแร่ มักพบในแร่ที่หนึ่งเซลล์มีเนื้อเยื่อสามชั้น น้ำจะแทรกอยู่ระหว่างชั้น และเป็นเหตุให้แร่นั้นมีการขยายตัวตามแนวตั้ง เมื่อน้ำส่วนนี้ถูกขจัดออกตอนอบ จะทำให้ผลิตภัณฑ์กลับคืนสู่ขนาดเดิม ซึ่งเป็นสาเหตุของการหดตัวนั่นเอง

2.9.6 ตัวแปรเบื้องต้นที่มีผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์เซรามิก

- ความบริสุทธิ์ของวัตถุดิบ มีความสำคัญต่อคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์เป็นอย่างมาก เช่น ความแข็งแรง สีสัณ และความเร็วของเนื้อผลิตภัณฑ์
- ส่วนผสมของเนื้อดิน ขึ้นอยู่กับสูตรที่ใช้ในการผลิตและชนิดของผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ
- ขนาดของวัตถุดิบ มีผลต่อความละเอียดของเนื้อผลิตภัณฑ์ ความเรียบเนียน รวมไปถึงวิธีการในการผลิต การรวมตัวกันของเนื้อสารด้วยความร้อน (Sintering) การทำให้เนื้อผลิตภัณฑ์เซรามิกที่มีเนื้อแก้วเป็นส่วนประกอบมีความหนาแน่นสูง ซึ่งเกิดขณะที่ทำการเผาผลิตภัณฑ์ และยังมีความสำคัญเกี่ยวกับปรากฏการณ์การเติบโตของอนุภาค อนุภาคที่ละเอียดมากๆ เมื่อเกิดความดันขึ้นที่ผิว จะทำให้กลายเป็นไอ หรือละลายได้ง่ายมากขึ้น ขนาดอันละเอียดของแร่ดินต่างๆ มีส่วนทำให้การขึ้นรูปผลิตภัณฑ์โดยวิธีต่างๆ เป็นไปได้ดี ดังนั้นวัตถุดิบที่มีความหยาบจึงต้องนำมาบด หรือทำให้วัตถุดิบเล็กเป็นไมครอนก่อนนำมาใช้

- อุณหภูมิในการเผา ขึ้นอยู่กับเนื้อผลิตภัณฑ์ ความหนาบางของผลิตภัณฑ์

2.9.7 ปฏิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างการเผาผลิตภัณฑ์เซรามิก

การเผาเซรามิก คือการเพิ่มอุณหภูมิให้แก่ผลิตภัณฑ์เซรามิกในเตา ภายใต้บรรยากาศที่เหมาะสม เพื่อเปลี่ยนสภาพวัตถุดิบให้เป็นถาวรวัตถุที่มีความแข็งแรง คงทน และสวยงาม

กระบวนการเผาแยกออกได้หลายขั้นตอนตามอุณหภูมิต่างๆ แต่จะขึ้นมักเกิดต่อเนื่องกันจนไม่สามารถแยกแต่ละขั้นออกได้อย่างเด่นชัด

- อุณหภูมิ 100-200 องศาเซลเซียส เป็นการอบแห้งที่สมบูรณ์ ผลิตภัณฑ์เกิดการหดตัว
- อุณหภูมิ 200-700 องศาเซลเซียส เกิดการเผาไหม้ของอินทรีย์สาร
- อุณหภูมิ 450-600 องศาเซลเซียส เป็นการเผาไหม้สารอินทรีย์ในเนื้อดิน มีการขจัดกลุ่มไฮดรอกไซด์ ออกจากผลึกเกาหลินไนท์ของดินดำ ทำให้กลายเป็นเมตาเกาหลิน มีโครงสร้างการเรียงตัวไม่เป็นระเบียบ ทำให้เกิดรูพรุน และการหดตัว
- อุณหภูมิ 573 องศาเซลเซียส เกิดการเปลี่ยนแปลงของ ควอตซ์ คือ ขยายตัวขึ้นในช่วงนี้ถ้าเผาอย่างรวดเร็วเกินไปจะทำให้ผลิตภัณฑ์เกิดการแตกหัก
- อุณหภูมิ 950-980 องศาเซลเซียส เกิดผลึกในเนื้อดิน มีการจัดเรียงตัวใหม่ โดยเปลี่ยนจากโครงสร้างเมตาเกาหลินไปเป็นสฟิแนล และในที่สุดเกิดเป็นโครงสร้างมัลไลท์ขนาดเล็กๆ ขึ้น
- อุณหภูมิ 1050-1150 องศาเซลเซียส การเกิดแก้ว เป็นอุณหภูมิที่เฟลด์สปาร์ จะทำปฏิริยากับ ควอตซ์ เกิดเป็นแก้วตามบริเวณรอบอนุภาคของเฟลด์สปาร์ ซึ่งสัมผัสกับเนื้อดินก่อน เมื่ออุณหภูมิเพิ่มมากขึ้น เฟลด์สปาร์จะหลอมตัวหมด และจะเกิดแก้วขึ้นในเนื้อดิน ควอตซ์ขนาดเล็กๆ จะละลายได้หมดที่อุณหภูมิที่สูงขึ้น ถึงแม้อุณหภูมิตามทฤษฎีที่เกิดแก้ว คือ 1550 องศาเซลเซียส ทั้งนี้เนื่องจากมีสิ่งสกปรกเจือปน และนอกจากนี้ยังเกิดการแพร่ของพวกอัลคาไลที่อีกด้วย
- อุณหภูมิ 1100-1200 องศาเซลเซียส การหดตัว และการพูนตัวมีน้อยที่สุด และจะมีความมากขึ้นเนื่องจากการขยายตัวของรูพรุน รูพรุนนี้เกิดจากก๊าซซึ่งอาจมาจากน้ำคาร์บอนเนต และซัลเฟต หรือการเผาไหม้ของคาร์บอน
- อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส เกิดมัลไลท์ขั้นที่สอง เป็นผลึกรูปเข็มสานกันไปมา ช่วยเพิ่มความแข็งแรง ดังนั้นจึงควรให้เกิดผลึกมัลไลท์ในเนื้อผลิตภัณฑ์ แต่ใน

ขณะเดียวกัน พวกอัลคาไลต์จะทำให้ผลึกมัลไลต์สลายตัวเป็น อะลูมินา และแก้ว ปฏิริยานี้จะเริ่มที่ 1200 องศาเซลเซียส อย่างไรก็ตามปฏิริยาจะช้าลง หรือหยุดได้ ถ้าเนื้อแก้วมีซิลิกาเพียงพอ ทั้งนี้เนื่องจากซิลิกาเป็นตัวทำให้เนื้อแก้วมีความหนืดสูง

- อุณหภูมิ 1250 องศาเซลเซียส จะเหลือเฟสของมัลไลต์ แก้ว และควอตซ์ ในเนื้อผลิตภัณฑ์ ก๊าซที่อยู่ในรูพรุนซึ่งเชื่อมโยงถึงข้างนอก จะถูกขจัดออกจากรูพรุนได้ง่าย โดยการเคลื่อนตัวออกตามรูพรุน ส่วนก๊าซที่อยู่ในเนื้อผลิตภัณฑ์ จะถูกขจัดออกมาได้ โดยการแพร่ออกทางเนื้อแก้วเท่านั้น

อย่างไรก็ตามการเกิดปฏิริยาแต่ละขั้นตอนไม่สามารถแยกออกจากกันได้อย่างเด่นชัด ในการควบคุมปฏิริยาที่จะเกิดขึ้นระหว่างการเผา จำเป็นต้องรู้ถึงองค์ประกอบอื่นที่มีผล ได้แก่ ธรรมชาติของดิน ธรรมชาติของซิลิกา ธรรมชาติของเฟลด์สปาร์ รวมถึง เวลา อุณหภูมิของการเผา และการปล่อยให้เย็นตัวลง (ปรีดา พิมพ์ขาวขำ, 2547)

2.9.8 จุดสุกตัว หรืออุณหภูมิสุกตัวของเนื้อดินปั้น (Firing Temperature)

สมบัติต่างๆ ของผลิตภัณฑ์สำเร็จ จะมีค่าต่างกันไปตามสภาวะการเผา ตัวอย่างเช่น ผลิตภัณฑ์ชนิดเอเทนแวร์ อาจใช้ส่วนผสมเดียวกับชนิดปอร์ซเลน แต่ใช้อุณหภูมิการเผาต่ำกว่า เป็นที่ทราบกันดีว่า เมื่อส่วนผสมเนื้อดินปั้นมีแร่ดินขาว หรือฟรินต์สูง จุดสุกตัวจะสูงขึ้น แต่ถ้ามีเฟลด์สปาร์มากจุดสุกตัวก็จะต่ำลง อุณหภูมิการเผาที่มีผลต่อสมบัติของผลิตภัณฑ์ กล่าวคือ เผาที่อุณหภูมิสูง จะได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพสูง เช่นมีความแข็งแรงสูงกว่า ดูดซึมน้ำต่ำกว่า แสงส่องผ่านได้ดีกว่า เป็นต้น

ความแข็งแรงของผลิตภัณฑ์เกิดจากการที่มีผลึกมัลไลต์ ซึ่งเป็นผลึกที่มีลักษณะเป็นรูปเข็ม และถ้ายังมีขนาดโตมากขึ้นความแข็งแรงก็จะมากขึ้น

การดูดซึมน้ำของผลิตภัณฑ์ เกิดจากมีรูพรุนในเนื้อผลิตภัณฑ์ การเผาที่อุณหภูมิสูง การหดตัวจะสูงกว่า รูพรุนจะมีปริมาณลดลง การเกิดเนื้อแก้วจะมีมากขึ้น การอุดรูพรุนจะเป็นได้มากกว่า ทำให้ผลิตภัณฑ์ดูดซึมน้ำได้น้อยลง นอกจากนั้นเนื้อแก้วยังช่วยยึดจับผลึกต่างๆ ในเนื้อผลิตภัณฑ์ ทำให้ผลิตภัณฑ์มีความแข็งแรงขึ้น

2.9.9 การควบคุมอุณหภูมิของเตาเผาในการเผากระเบื้องเซรามิก

การควบคุมอุณหภูมิการเผา เป็นสิ่งจำเป็นในการผลิตกระเบื้องเซรามิก การเผาแบ่งขั้นตอนเป็น 3 ตอน คือ การให้ความร้อนผลิตภัณฑ์ การเผาผลิตภัณฑ์ และการทำให้ผลิตภัณฑ์เย็นตัว ซึ่งในช่วงการเผาผลิตภัณฑ์ จะเป็นการเผาแบบแช่ไฟ (Soaking)

การเผาจะทำให้ควอร์ตละลายได้มากขึ้น และขณะเดียวกันก็เกิดผลึกมลิลท์มากขึ้น และเกิดรูพรุนในเนื้อผลิตภัณฑ์มากขึ้น ส่วนการเผาเร็วจะเกิดผลตรงกันข้าม แต่นักเซรามิกบางคนให้เหตุผลว่า การเผาเร็วจะได้เนื้อแก้วที่ไหลตัวดี ซึ่งจะช่วยให้ผลิตภัณฑ์มีความแข็งแรงมากขึ้นที่น่าสนใจอีกสิ่งหนึ่ง คือ การบดเนื้อดินปั้นให้ละเอียดมากๆ จะช่วยลดรูพรุนในเนื้อผลิตภัณฑ์ ซึ่งจะช่วยให้การเผาได้เร็วขึ้น

2.9.10 การโค้งงอของผลิตภัณฑ์

ปัญหาการโค้งงอของผลิตภัณฑ์เซรามิก เป็นปัญหาใหญ่ เกิดขึ้นได้ตลอดเวลา โดยไม่มีสาเหตุปรากฏให้เห็น การศึกษาให้รู้ปัญหาขั้นมูลฐานจะช่วยป้องกัน และแก้ไข สาเหตุหนึ่งที่ทำให้เกิดการโค้งงอ ได้แก่ ความไม่สม่ำเสมอของความชื้นในเนื้อผลิตภัณฑ์ แผ่นกระเบื้องด้านที่ขึ้นกว่าจะหดตัวได้มากกว่าด้านที่แห้งกว่า ดังนั้นกระเบื้องจะโค้งงอเป็นส่วนของวงกลม

การแยกตัวออกมาของส่วนผสมบางตัว ก็เป็นสาเหตุหนึ่งในการทำให้ผลิตภัณฑ์โค้งงอ แต่สาเหตุนี้เกิดขึ้นได้ยาก เพราะว่าเนื้อดินปั้นที่เป็นผงละเอียดจะแยกตัวออกจากกันได้ยาก แผ่นกระเบื้องที่ได้จากการผสมน้ำดินที่ค่อนข้างใส จะเกิดการแยกตัวได้ เนื่องจากการจมตัวของวัตถุดิบไม่พร้อมกัน ในกรณีนี้จะมีเนื้อดินน้อยในผิวหน้าที่ติดกับแบบ และจะหดตัวน้อยกว่าผิวหน้าอีกด้าน ซึ่งเป็นผลให้เกิดการโค้งงอ อีกสาเหตุหนึ่งที่สามารถเกิดขึ้นได้ คือ การเรียงตัวของอนุภาคของวัตถุดิบไม่สม่ำเสมอ (ปริดา พิมพ์ขาวขำ, 2547)

2.10 ค่าโมดูลัสการแตกหักหรือค่ากำลังรับแรงดัด (Modulus of Rupture, MOR)

เป็นค่าความแข็งแรงของเนื้อผลิตภัณฑ์เซรามิก ทนทานต่อแรงหักกลางแท่ง โดยใช้แรงกดตรงส่วนกลางของแท่งเซรามิก ที่วางอยู่บนฐานรองรับทั้งสองข้าง โดยมีสูตรในการคำนวณดังนี้

สูตรสำหรับหาค่า MOR สำหรับแท่งทดลองทรงกระบอก

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

สูตรสำหรับหาค่า MOR สำหรับแท่งทดสอบสี่เหลี่ยมผืนผ้า

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

$$w = \text{น้ำหนักที่กดจนแผ่นกระเบื้องหัก (กิโลกรัม)}$$

$$l = \text{ระยะระหว่างแขนรับแผ่นกระเบื้อง (เซนติเมตร)}$$

$$b = \text{ความกว้างของแผ่นกระเบื้อง (เซนติเมตร)}$$

$$h = \text{ความหนาของแผ่นกระเบื้อง (เซนติเมตร)}$$

$$d = \text{เส้นผ่านศูนย์กลางแท่งทดลองทรงกระบอก (เซนติเมตร)}$$

MOR มีหน่วยเป็น น้ำหนักต่อพื้นที่ (กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร)

2.11 การวิเคราะห์ด้วยวิธีเอกซเรย์ดิฟแฟรคชัน (XRD)

โครงสร้างแลตทิซสามารถตรวจสอบด้วยการวิเคราะห์โดยรังสีเอกซ์ ซึ่งเป็นรังสีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีพลังงานสูง และความยาวคลื่นที่สั้น โดยมีความยาวคลื่นในลำดับเดียวกันกับระยะทางระหว่างอะตอมของวัสดุที่เป็นของแข็ง (0.05-0.25 มิลลิเมตร) และเมื่อรังสีเอกซ์กระทบกับวัสดุของแข็งจะเกิดการกระเจิงในทุกทิศทาง เนื่องจากอิเล็คตรอนของอะตอม หรือไอออนที่อยู่ในทางเดินของรังสี ซึ่งรังสีที่กระเจิงส่วนใหญ่จะถูกหักล้างด้วยรังสีที่กระเจิงจากอะตอมอื่นๆ อย่างไรก็ตาม เมื่อรังสีเอกซ์ที่มีความยาวคลื่นเดี่ยวตกลงบนระนาบของผลึกด้วยมุมซึ่งทำให้อิเล็คตรอนกระเจิงออกมาเกิดการเสริมกันมากกว่าการหักล้างกัน จะเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า การเลี้ยวเบน โดยผลึกที่มีการจัดเรียงระนาบทำมุมกับรังสี รังสีที่เลี้ยวเบนนี้จะตกกระทบทำมุม 2 เท่ากับทิศทางที่รังสีตกกระทบ และถูกตรวจจับความเข้ม และขนาดของมุมเลี้ยวเบน โดยเครื่องมือดิฟแฟรคโตมิเตอร์ (ปัทมา แจ้งกระจ่าง และ สุทธิมา ศรีประเสริฐสุข, 2551)

2.12 การวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็คตรอนแบบสแกน (SEM)

กล้องจุลทรรศน์อิเล็คตรอนแบบสแกน ต้องการคุณสมบัติของของชิ้นงานที่นำไฟฟ้าได้ เนื่องจากใช้หลักการของอิเล็คตรอนในการขยายขนาดภาพแทนที่จะใช้แสง ทำให้ภาพที่ได้เป็นสีขาวดำ แต่ประสิทธิภาพการขยายดีกว่ากล้องที่ใช้แสงทั่วไปมาก ต้องเตรียมตัวอย่างให้มีการทนต่อแรงสุญญากาศในคอลัมน์สุญญากาศ เครื่องยิงอิเล็คตรอนพลังงานสูงถูกยิงผ่านชุดเลนส์แม่เหล็กไฟฟ้าที่ออกแบบมาให้สามารถบังคับทิศทาง และโฟกัสให้ตกลงไปรวมเป็นจุดที่มีความละเอียดสูง ในส่วนท้ายของคอลัมน์มีกลุ่มของขดลวดที่ใช้สำหรับการสแกน ทำหน้าที่เคลื่อนย้ายอิเล็คตรอนที่ผ่านการโฟกัสแล้วไปตามผิวของตัวอย่าง เมื่ออิเล็คตรอนตกกระทบผิว อิเล็คตรอนชุดที่สองจะถูกกระแทกออกจากผิวของวัตถุตัวอย่าง และถูกตรวจจับ และส่งสัญญาณผ่านชุดขยายสัญญาณ แสดงเป็นภาพขยายของวัตถุ (ปัทมา แจ้งกระจ่าง และ สุทธิมา ศรีประเสริฐสุข, 2551)

2.13 การศึกษาที่เกี่ยวข้องกับการวิจัย

2.11.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการนำของเสียมาใช้ประโยชน์

Niemela (1995) ศึกษาการนำของเสียมาเป็นส่วนประกอบในกระเบื้องเซรามิกซึ่งสิ่งให้นำมาเป็นองค์ประกอบได้แก่ ตะกอนสลัดจ์จากโรงผลิตน้ำประปา ขี้เถ้าลอยจากโรงไฟฟ้า ตะกอนเศษหมึกพิมพ์จากโรงงานกระดาษ และเศษแก้ว โดยของเสียเหล่านี้นำมาใช้ผสมกับเนื้อดินในการผลิตเซรามิก กล่าวคือใช้ ของเสีย เป็นองค์ประกอบร้อยละ 80 และมีเนื้อดินร้อยละ 20 ผลที่ได้คือสามารถผลิตเซรามิกที่มีคุณภาพและเป็นการลดต้นทุนการผลิตมีผลทางบวกในด้านเศรษฐศาสตร์โดยของเสียทั้งหมดสามารถเป็นเนื้อดินในผลิตภัณฑ์เซรามิกได้เป็นอย่างดี

นอกจากนี้ยังให้สีกับผลิตภัณฑ์อีกด้วยโดยเฉพาะเศษแก้วที่จะให้สีตามสีของแก้วที่นำมาเป็นวัตถุดิบ

สาโรจน์ ปรัชิตพิพงษ์ (2545) ทำการศึกษาเบื้องต้นในการนำซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วมาใช้ประโยชน์เป็นวัตถุดิบโดยใช้แทนที่อะลูมินาบริสุทธิ์ โดยศึกษาถึงคุณสมบัติต่างๆ ของเนื้อดินและเซรามิกที่ผลิตได้จากการแปรค่าอัตราส่วนซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว ขนาด 150-200 เมช ที่ผสมในเนื้อดินซึ่งเป็นส่วนผสมของดินดำและหินฟันม้าโดยคงค่าอัตราส่วนระหว่างดินดำและหินฟันม้าที่อัตราส่วน 8 ต่อ 5 เเผที่อุณหภูมิ 1180 องศาเซลเซียส โดยแปรค่าอัตราส่วนของซิลิกา-อะลูมินาต่อส่วนผสม ผลการทดลองพบว่า อัตราส่วนของซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วต่อส่วนผสมที่เหมาะสมคือ 40 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งที่อัตราส่วนดังกล่าวมีค่าความเหนียวเท่ากับ 16.04 ค่าความหนาแน่นหลังอบแห้งของเนื้อดินเท่ากับ 1.48 กรัมต่อมิลลิเมตร เปอร์เซ็นต์การหดตัวก่อนเผาเท่ากับ 4.74 ค่ากำลังรับแรงดัดก่อนเผาเท่ากับ 116.15 กิโลกรัมต่อตาราง จากนั้นจึงนำวัสดุไปเผาที่อุณหภูมิที่ 1180 องศาเซลเซียส และภายหลังการเผาให้เป็นเซรามิก พบว่า เปอร์เซ็นต์การหดตัวหลังเผาเท่ากับ 15.58 เปอร์เซ็นต์ ค่าความหนาแน่นหลังเผาเท่ากับ 2.27 กรัมต่อมิลลิเมตร ค่าการดูดซึมน้ำเท่ากับ 3.86 เปอร์เซ็นต์ ค่ากำลังรับแรงดัดหลังเผาเท่ากับ 285.01 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

ผลการวิจัยดังกล่าวสามารถสรุปได้ว่าซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วสามารถนำมาใช้ประโยชน์ในการเป็นวัตถุดิบในกระบวนการผลิตเซรามิกได้โดยใช้แทนอะลูมินาบริสุทธิ์ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวทนไฟร่วมกับดินดำและหินฟันม้า แต่อย่างไรก็ตามควรศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับองค์ประกอบทางเคมีที่เหมาะสมของผลิตภัณฑ์กระเบื้องด้วย

Rambaldi และคณะ (2007) ศึกษาการนำกากไม้ใช้แล้วของเครื่องกระเบื้อง จากหลุมฝังกลบมาทดแทนแร่เฟลด์สปาร์ในอัตราส่วนต่างๆ เพื่อผลิตกระเบื้องเซรามิก โดยผสมส่วนผสมต่างๆ ได้แก่ ดินดำ ททราย และแร่เฟลด์สปาร์ ในน้ำ ผ่านส่วนผสมหลังอบแห้งผ่านตะแกรง 125 ไมโครเมตร เพิ่มความชื้นร้อยละ 6 และอัดขึ้นรูปกระเบื้อง ก่อนเผาที่อุณหภูมิระหว่าง 1120-1180 องศาเซลเซียส ผลการวิจัย พบว่ากระเบื้องที่เผาในช่วงอุณหภูมิ 1140-1160 มีคุณสมบัติทางกายภาพที่ดี และการทดแทนที่ร้อยละ 10 มีความเป็นไปได้ที่จะช่วยลดอุณหภูมิการเผา ซึ่งจากการศึกษาบทความ สรุปได้ว่าอุณหภูมิที่สามารถลดลงได้นั้น อาจเกิดจากตัวช่วยหลอม ที่เป็นส่วนผสมในกากไม้ใช้แล้วของกระเบื้อง

2.11.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการใช้เศษแก้วทดแทน

Haun (2000-2002) ศึกษาการนำของเสียประเภทแก้วมาใช้อุตสาหกรรมเซรามิกโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อต้องการลดต้นทุนการผลิตและช่วยประหยัดพลังงาน โดยพบว่าในช่วง 2-3 ปีที่ผ่านมาในประเทศสหรัฐอเมริกามีความต้องการกระเบื้องเซรามิกเพิ่มขึ้นร้อยละ 7 คิดเป็น 2.4 ล้านตารางฟุต การเพิ่มขึ้นนี้ทำให้ต้องเพิ่มพลังการผลิตมากขึ้น มีการใช้ทรัพยากรและพลังงานในการผลิตเพิ่มมากขึ้น จึงได้ทำการวิจัยโดยเลือกแก้วที่ยากต่อการนำกลับมาใช้ใหม่ (แก้วชนิดมีสี เช่น สีเขียว สีชา) มาผสมในเนื้อเซรามิก ผลพบว่าสามารถลดอุณหภูมิในการเผาได้ถึงร้อยละ 37 (โดยปกติอุณหภูมิที่ใช้ในการเผากระเบื้องเซรามิกทั่วไปอยู่ที่ 2200 องศาฟาเรนไฮต์แต่กระเบื้องที่นำแก้วมาผสมนี้สามารถเผาได้ที่อุณหภูมิประมาณ 1400 ฟาเรนไฮต์) ซึ่งเป็นการประหยัดพลังงานในการผลิต นอกจากนี้ยังพบว่าสามารถลดปริมาณดินและน้ำในวัตถุดิบได้อีกด้วย และใน 2 ปีต่อมา Haun ได้ศึกษาถึงขนาดของผงแก้วต่อพฤติกรรมการอัดตัวก่อนและหลังขึ้นรูป พบว่า ผงแก้วที่มีขนาดเล็กกว่า 30 เมช เมื่อทำให้อัดตัวด้วยน้ำ แล้วนำมาอบให้แห้งจะได้ค่าความอัดตัวก่อนและหลังขึ้นรูป ที่ดีกว่าผงแก้วที่มีขนาดใหญ่กว่า 30 เมช และผลดังกล่าวทำให้สามารถศึกษาต่อถึงพลังงานที่ใช้ในการเผาขึ้นรูป คือ เมื่อผงแก้วที่มีขนาดเล็กกว่า 30 เมช สามารถอัดตัวได้ดีกว่า จึงสามารถลดอุณหภูมิที่ใช้ในการหลอมผงแก้วลงได้ คือ ใช้อุณหภูมิน้อยกว่า 800 องศาเซลเซียส ในเวลา 5 นาทีเท่านั้น และศึกษา ถึงผลกระทบจากการปนเปื้อนของสารอนินทรีย์อาจเกิดขึ้นจากสภาวะใดๆ พบว่า ถ้ามีความปนเปื้อนตั้งแต่ร้อยละ 2-25 ขึ้นไป จะมีผลต่อการสามารถในการอัดตัวของผงแก้ว ซึ่งในงานวิจัยของ Haun สามารถสรุปได้ว่าเศษแก้วสามารถช่วยลดอุณหภูมิการเผาได้ เนื่องจากองค์ประกอบทางเคมีที่มีธาตุอัลคาไลท์อยู่มาก และขนาดเศษแก้วอาจมีผลต่อการยึดเกาะกันของวัตถุดิบขณะอัดขึ้นรูป ขนาดเล็กอาจมีการยึดเกาะได้ดีกว่า

Tucci และ คณะ (2004) แทนแร่เฟลด์สปาร์ ด้วยเศษแก้ว โซดา – โดม ที่ทำหน้าที่เป็นตัวหลอมละลายในการผลิตกระเบื้องเซรามิกชนิดปอไซเลน เริ่มจากการทดแทนร้อยละ 5-20 ด้วยกระบวนการบดเปียก พบว่าการเพิ่มความหนืด และลดความดันให้กับน้ำสลิบ และการทดแทนที่ร้อยละ 10 ที่อุณหภูมิการเผา 1220 องศาเซลเซียส จะได้ผลิตภัณฑ์ที่มีประสิทธิภาพทางกายภาพที่ดี มีความเป็นเนื้อเดียวกัน และยังพบว่า การเพิ่มเศษแก้วทำให้สมบัติทางกายภาพแย่งลง ทำให้เกิดการไล่ฟองแก๊สมากขึ้นทำให้เกิดรูพรุน และที่อุณหภูมิสูง จะทำให้เนื้อกระเบื้องพองขยายตัวเนื่องจากการเดือดของเนื้อแก้ว ซึ่งจากงานวิจัยนี้สามารถนำไปอธิบายเกี่ยวกับสมบัติทางกายภาพของกระเบื้องที่อุณหภูมิสูง และเป็นแนวทางในการพัฒนากระบวนการผลิตโดยเพิ่มการเตรียมเนื้อดินแบบเปียก เพื่อให้ผลิตภัณฑ์มีความเป็นเนื้อเดียวกันก่อนเผา

ปารีย์ อรรถพิศาล (2548) ได้ศึกษาการใช้ของเสียที่เป็นแก้วสีชา ร่วมกับซิลิกา-อะลูมินา ที่ใช้แล้ว มาทดแทนแร่เฟลด์สปาร์ ซึ่งเป็นตัวหลอมละลายในกระบวนการผลิตเซรามิก โดย

งานวิจัยนี้ใช้ส่วนผสมอัตราส่วนดินดำต่อของเสียทดแทนเท่ากับ 8 ต่อ 5 คิดเป็นร้อยละ 60 ของส่วนผสมทั้งหมดรวมกับทรายแก้วอบแห้งร้อยละ 40 ทำการแปรค่าอัตราส่วนการทดแทนเฟลด์สปาร์ ด้วยของเสียที่เป็นแก้วสีชาบดละเอียดผ่านตะแกรงเบอร์ 200 (ขนาดเล็กกว่า 0.075 ไมโครเมตร) ต่อ ซิลิกา-อะลูมินา ที่ใช้แล้ว เป็น 100 ต่อ 0, 80 ต่อ 20, 75 ต่อ 25 และ 70 ต่อ 30 ขึ้นรูปเป็นแผ่นกระเบื้องขนาด 4x4 ตารางนิ้ว ด้วยความดันขึ้นรูป 200 บาร์ เเผาที่อุณหภูมิแปรค่าตั้งแต่ 1100, 1150 และ 1200 องศาเซลเซียส พบว่า ที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส สามารถทดแทนได้ในทุกอัตราส่วน โดยเป็นไปตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมกระเบื้องดินเผาปูพื้น (มอก.37-2529) ส่วนอัตราส่วนที่เหมาะสมในเชิงเศรษฐศาสตร์ คือ 80 ต่อ 20 เเผาที่อุณหภูมิ 1150 องศาเซลเซียส ซึ่งจากงานวิจัยพยายามทดแทนองค์ประกอบทางเคมีที่เศษแก้วสีชาไม่มี แต่ในแร่เฟลด์สปาร์มี ได้แก่ อะลูมินา ดังนั้นหากซิลิกา-อะลูมินาจึงถูกนำมาใช้ร่วมกับเศษแก้ว

Luz และ Ribeiro (2007) ได้ของเสียประเภทแก้วในส่วนผสมกระเบื้องเซรามิก ชนิดปอไซเลนท์ (Porcelain) ด้วยกระบวนการบดเปียก โดยใช้อัตราส่วนผสมต่างๆ ของดิน เศษแก้ว เฟลด์สปาร์ และควอร์ต และทำการแปรค่าอุณหภูมิการเผา ตั้งแต่ 1000-1250 องศาเซลเซียส แช่ไฟ 30 นาที พบว่าที่การแทนด้วยแก้วปริมาณน้อยจะสามารถผลิตกระเบื้องที่มีสมบัติทางกายภาพที่ดี และการแทน เฟลด์สปาร์ร้อยละ 25 และแก้วร้อยละ 5 จะได้กระเบื้องที่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้ชนิดของวัตถุดิบใกล้เคียงกับงานวิจัยข้างต้น แต่มีสัดส่วนผสมต่างกัน ดังนั้นจึงใช้เป็นแนวทางในการค้นคว้าเพิ่มเติมเกี่ยวกับองค์ประกอบทางเคมีของผลิตภัณฑ์ที่เหมาะสมในการผลิตกระเบื้องเซรามิก ซึ่งจากการศึกษาเพิ่มเติม พบว่า โดยทั่วไปองค์ประกอบทางเคมีของผลิตภัณฑ์กระเบื้องที่ได้มาตรฐาน จะมีอัตราส่วนของ ซิลิกา/อะลูมินา ประมาณ 70/20 และ ควอร์ตปริมาณ แคลเซียมออกไซด์ไม่เกินร้อยละ 1 ขององค์ประกอบทั้งหมด

เพชรพร ชาวกิจเจริญ และ วิวรรณ เทียนศิริ (2548) ได้ศึกษาการใช้ของเสียที่เป็นแก้วสีชา มาทดแทนวัตถุดิบในส่วนของตัวหลอมละลายในการผลิตกระเบื้องเซรามิก ผลของการศึกษาอัตราส่วนขวดแก้วสีชาบดละเอียดผ่านตะแกรงเบอร์ 200 (ขนาดเล็กกว่า 0.075 ไมโครเมตร) ต่อเฟลด์สปาร์ โดยงานวิจัยนี้ใช้ส่วนผสมอัตราส่วนดินดำต่อแร่เฟลด์สปาร์เท่ากับ 8 ต่อ 5 คิดเป็นร้อยละ 60 ของส่วนผสมทั้งหมดรวมกับทรายแก้วอบแห้งร้อยละ 40 แปรค่าอัตราส่วนการทดแทนแร่เฟลด์สปาร์ด้วยของเสียที่เป็นแก้วตั้งแต่ 0.00, 0.25, 0.50, 0.75 และ 1.00 ขึ้นรูปเป็นแผ่นกระเบื้องขนาด 4x4 ตารางนิ้ว ด้วยความดันขึ้นรูป 200 บาร์ เเผาที่อุณหภูมิแปรค่า ตั้งแต่ 1000 1100 และ 1200 องศาเซลเซียส พบว่า ที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส สามารถทดแทนได้ในทุกอัตราส่วน โดยเป็นไปตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมกระเบื้องดินเผาปูพื้น (มอก.37-2529) จากผลดังกล่าว จึงสรุปได้ว่า สามารถใช้ของเสียที่เป็นแก้วสีชา ทดแทนแร่เฟลด์สปาร์ในกระบวนการผลิตกระเบื้อง ได้ร้อยละ 100

จากงานวิจัยแสดงให้เห็นว่า สามารถนำของเสียประเภทแก้วมาทดแทนแร่เฟลด์สปาร์ และยังช่วยลดต้นทุนการผลิต ซึ่งเป็นทางเลือกที่เหมาะสมอีกทางที่ภาคอุตสาหกรรมจะนำไปพัฒนาต่อ และเป็นปัจจัยหนึ่งในการริเริ่มเลือกใช้เศษแก้วสีแทนแร่เฟลด์สปาร์ ร้อยละ 100 โดยกระบวนการผลิตจะถูกอ้างอิงจากงานวิจัยนี้เป็นส่วนใหญ่

เพ็ชรพร เชาวกิจเจริญ และคณะ (2549) ได้ศึกษาการนำของเสียที่เป็นแก้วชนิดต่างๆ มาเป็นวัตถุดิบเพื่อทดแทนแร่เฟลด์สปาร์ ซึ่งเป็นตัวหลอมละลายในการผลิตกระเบื้องเซรามิก ของเสียที่เป็นแก้วที่ใช้มี 3 ชนิด ได้แก่ เศษขวดแก้วสีชา เศษขวดแก้วสีเขียว และเศษกระจกใสที่ใช้แล้ว โดยงานวิจัยนี้ใช้ เศษแก้วทั้ง 3 ชนิดผ่านการบดละเอียดขนาด 200 เมช (ประมาณ 0.1 มิลลิเมตร) โดยใช้ส่วนผสมอัตราส่วนดินดำต่อแร่เฟลด์สปาร์เท่ากับ 8 ต่อ 5 คิดเป็นร้อยละ 60 ของส่วนผสม ทั้งหมดรวมกับทรายแก้วอบแห้งร้อยละ 40 แปรค่าอัตราส่วนการทดแทนแร่เฟลด์สปาร์ด้วยของเสียที่เป็นแก้วร้อยละ 0 และร้อยละ 100 ของแร่เฟลด์สปาร์ที่ใช้ในส่วนผสม ทำการขึ้นรูปเป็นแผ่นกระเบื้องขนาด 4x4 ตารางนิ้ว ด้วยความดันขึ้นรูป 100 บาร์ เเผาที่อุณหภูมิ 1,200 องศาเซลเซียส ซึ่งผ่านการทดสอบคุณภาพได้ตามมาตรฐานอุตสาหกรรม (มอก.37-2529) สำหรับกระเบื้องเซรามิก ที่มีส่วนผสมของเศษแก้วสีเขียว ซึ่งมีคุณภาพดีที่สุด ได้นำมาทำการแปรความดันขึ้นรูปและอุณหภูมิการเผา เป็น 200 บาร์ และ 1150 องศาเซลเซียส ตามลำดับ เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสม ผลการทดสอบพบว่าที่ ความดันขึ้นรูป 100 บาร์ เเผาที่อุณหภูมิ 1150 องศาเซลเซียส ผ่านมาตรฐาน

จากงานวิจัยพบว่าเศษแก้วสีเขียวก็สามารถทดแทนแร่เฟลด์สปาร์ในการผลิตกระเบื้องร้อยละ 100 และยังพบว่าความดันขึ้นรูปเพียง 100 บาร์ (จากงานวิจัยเก่า 200 บาร์) ก็เพียงพอที่จะทำให้กระเบื้องอัดตัวกันได้ดี

วรรณภา ต.แสงจันทร์ (2550) ศึกษาการทำกระเบื้องจากเศษแก้ว โดยนำเศษแก้วใส สีเขียว และสีชา มาบดและคัดขนาด ขึ้นรูปเป็นแผ่นกระเบื้องในแบบพิมพ์ดินเผา เเผาที่อุณหภูมิ 750-850 องศาเซลเซียส ยืนไฟ 30-90 นาที และศึกษาสมบัติการหดตัว การดูดซึมน้ำ ความหนาแน่น ความแข็งแรง และลักษณะผิวหน้า ซึ่งสามารถสรุปงานวิจัยได้ว่า เศษแก้ว สามารถนำมาใช้เป็นวัตถุดิบสำหรับทำกระเบื้องประดับตกแต่งได้ โดยสามารถเลือกใช้แก้วขนาดหยาบ นำมาขึ้นรูปเป็นแผ่นกระเบื้องเผาที่อุณหภูมิ 800-850 องศาเซลเซียส ยืนไฟ 30-90 นาที จะได้กระเบื้องที่มีเนื้อแกร่ง ไม่ยุบตัว ดูดซึมน้ำต่ำ ส่วนลักษณะผิวหน้าจะขรุขระ หรือ เรียบ ขึ้นกับขนาดความหยาบของเศษแก้วที่ใช้

Brow และ Schmitt (2008) รวบรวม ศึกษา และค้นคว้าเทคโนโลยีทางด้านแก้ว เนื่องจากคุณสมบัติ และสถานะที่หลากหลายของแก้ว ทำให้แก้วเป็นวัตถุดิบที่มีความสำคัญทางด้านการผลิตพลังงานทดแทน และเทคโนโลยีด้านสิ่งแวดล้อม โดยการค้นคว้าวิจัยร่วมกับ

ความร่วมมือของนักวิทยาศาสตร์ด้านแก้ว จะสนับสนุนให้ผู้ผลิตขนาดใหญ่ได้มีโอกาสพัฒนา วัสดุใหม่ ๆ ออกสู่ตลาดปัจจุบัน เช่น การประยุกต์งานด้านแก้วสำหรับพลังงานทดแทนจาก แสงอาทิตย์ พลังงานจากลม พลังงานนิวเคลียร์ รวมถึงการค้นคว้าในปัจจุบัน ได้แก่ การผลิตตัวจุ ไฟฟ้าประสิทธิภาพสูง และเครื่องผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยกรรมวิธีทางเคมี ล้วนเป็นเรื่องที่สำคัญและ จำเป็นต้องผลักดันงานวิจัยด้านนี้ไปจนถึง ปี 2020

Ismail และ Al-Hashmi (2008) ศึกษาการใช้เศษแก้วทดแทนปริมาณทรายในการผลิต คอนกรีต โดยทำการศึกษาและรวบรวมข้อมูลอย่างละเอียดเกี่ยวกับคุณสมบัติในการรองรับของ เสียประเภทแก้วของงานด้านคอนกรีต รวมทั้งการวิเคราะห์ความแข็งแรงและการกระจายตัวของ งานที่ได้จากของเสียที่เป็นแก้ว งานวิจัยนี้ใช้เศษแก้วบดละเอียดทดแทน ปริมาณทราย ที่ร้อยละ 10, 15 และ 20 ของส่วนผสมของคอนกรีต ผลพิสูจน์พบว่า ที่ส่วนผสมเศษแก้วร้อยละ 20 ผ่าน มาตรฐานทางวัสดุ (มาตรฐาน ปอร์ไซเลน ASTM C618-03 ที่ 28 วัน) โดยมีความแข็งแรงด้านความ ยืดหยุ่นและการทนแรงกดอัดของตัวอย่าง คือร้อยละ 10.99 และ 4.23 ตามลำดับ และการทดสอบ ด้วยการอัดแท่ง นั้นแสดงให้เห็นว่า ส่วนผสมที่มีเศษแก้วบดละเอียดผสมอยู่ ช่วยลดการขยายตัว ลงร้อยละ 66 เมื่อเทียบกับแบบที่ควบคุมส่วนผสมปกติ

2.11.3 งานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับการเกิดผลึก

Bernado และคณะ (2008) ได้ศึกษาเกี่ยวกับการเกิดผลึกของผงแก้วโดยใช้ทดแทนแร่ เฟลด์สปาร์ซึ่งเป็นแร่ที่หายาก ผ่านกระบวนการเผาที่ 750 องศาเซลเซียส ที่เวลาจำกัด โดยใช้ ส่วนผสมแก้ว ทดแทนที่ร้อยละ 5-15 และการเติมอะลูมินา (Al_2O_3) ลงในผงแก้ว ทำให้เพิ่ม คุณสมบัติความแข็งแรงของเนื้อแก้ว- เซรามิก ทั้งด้าน การรับแรงดัด (มากกว่า 100 เมกกะ ปาสคาล) การทนความแข็งแรงระดับจุลภาค (ประมาณ 9 กิโลปาสคาล) และความทนการแตกหัก (ประมาณ 2 เมกกะปาสคาล) ซึ่งงานวิจัยนี้ง่ายและช่วยลดค่าใช้จ่ายในกระบวนการผลิต ดังนั้นจึง สามารถประยุกต์ใช้กับงานอุตสาหกรรมก่อสร้าง ซึ่งจากงานวิจัยสรุปได้ว่าอะลูมินา เป็น องค์ประกอบสำคัญที่จะช่วยเพิ่มความแข็งแรงคงทนให้กับผลิตภัณฑ์

Schneider และคณะ (2008) ได้รวบรวม และศึกษาเกี่ยวกับโครงสร้าง และคุณสมบัติ ของมัลไลต์ เนื่องจากมัลไลต์มีความสำคัญในด้านการทนไฟ และความคงทน ซึ่งในอุตสาหกรรม เซรามิกประยุกต์ มัลไลต์มีองค์ประกอบสำคัญ คือ Si และ Al โดยมีอัตราส่วน Al_2O_3 ร้อยละ 55-90 โดยโมล หรือ ประมาณร้อยละ 72-78 โดยมวล ซึ่งจากงานวิจัยสรุปได้ว่า การเกิดของมัลไลต์จะ ขึ้นกับอุณหภูมิ และความดัน สามารถเกิดมัลไลต์ เมื่อมีธาตุอัลคาไลต์เอิร์ท เล็กน้อย แต่จะลดลง ถ้ามีปริมาณธาตุอัลคาไลต์เอิร์ทเพิ่มขึ้น อาจเนื่องจากการหลอมละลายมากเกินไป การเกิดรูป

ผลึกจึงน้อยลง ซึ่งปรากฏการณ์ดังกล่าวสามารถใช้อธิบายการเกิดผลึกของผลิตภัณฑ์ โดยพิจารณาจากองค์ประกอบทางเคมีเป็นหลัก

2.11.4 สรุปภาพรวมที่มาของงานวิจัย

จากการทบทวนงานวิจัยเกี่ยวกับ คุณสมบัติ และสถานะที่หลากหลายของแก้ว ทำให้แก้วเป็นวัสดุที่มีความสำคัญ ทางด้านการผลิตพลังงานทดแทน เทคโนโลยีด้านสิ่งแวดล้อม และเป็นตัวช่วยสนับสนุน และผลักดันให้เกิดงานวิจัยเกี่ยวกับแก้วมากมาย ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่กำลังศึกษาอยู่ในปัจจุบัน โดยการนำของเสียประเภทแก้วมาใช้อุตสาหกรรมเซรามิก มีวัตถุประสงค์เพื่อต้องการลดต้นทุนการผลิตและช่วยประหยัดพลังงาน ผลจากการใช้เศษแก้วมาทดแทนวัตถุดิบในส่วนของตัวหลอมละลายในการผลิตกระเบื้องเซรามิก พบว่า ของเสียประเภทแก้วสามารถนำมาใช้ทดแทนวัตถุดิบในการผลิตกระเบื้องเซรามิกได้เป็นอย่างดี รวมทั้งปัจจุบันการขาดแคลนแก้ว ในภาคอุตสาหกรรมต้องสิ้นเปลืองพลังงานสูง อีกทั้งผู้วิจัยยังต้องการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่ใช้ในการเผากระเบื้องเซรามิก กับขนาดของเศษแก้วที่ใช้ในทางหนึ่ง จึงทำให้เกิดงานวิจัยพัฒนาต่อเนื่องขึ้น โดยงานวิจัยนี้เน้นศึกษาผลที่มีต่อสมบัติทางกายภาพของกระเบื้องเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิการเผา และขนาดของเศษแก้วสีเขียวที่ใช้ทดแทนแร่เฟลด์สปาร์ในการผลิตกระเบื้องเซรามิก

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้ศึกษาผลของขนาดของเสียประเภทแก้วที่ใช้ทดแทนแร่เฟลด์สปาร์ในกระบวนการผลิตกระเบื้องเซรามิก โดยแบ่งการเตรียมเนื้อดินเซรามิกออกเป็น แบบเตรียมเนื้อดิน โดยผ่านการผสมแห้ง และผ่านการผสมเปียก เพื่อทำการเปรียบเทียบกระบวนการผลิตทั้ง 2 แบบ ซึ่งยังคงใช้ส่วนผสมหลักในการผลิตกระเบื้องเซรามิก ได้แก่ ดินดำ ททรายแก้ว เป็นต้น โดยแต่ละตัวแปรของขนาดเศษแก้วที่ใช้ทดแทนแร่เฟลด์สปาร์ในกระบวนการผลิตจะผลิตทีละ 5 ก้อน แบบเตรียมเนื้อดินโดยการผสมแห้ง มีการแบ่งตัวแปร 4 ขนาด แต่ละขนาดแปรอุณหภูมิการเผา 3 อุณหภูมิ และแบบเตรียมเนื้อดินโดยการผสมเปียก มีการแบ่งตัวแปร 2 ขนาด แต่ละขนาดแปรอุณหภูมิการเผา 3 อุณหภูมิ ดังนั้นในงานวิจัยนี้ผลิตกระเบื้องประมาณ 80 ก้อน โดยแบ่งลำดับการวิจัย ดังนี้

- ตอนที่ 1 ศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบ ด้วยเครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (XRF) และหาค่าการกระจายขนาดของเศษแก้ว (Particle size distribution)
- ตอนที่ 2 เปรียบเทียบภาพขยายทางจุลภาคของกระเบื้องที่ทดแทนด้วยเศษแก้วขนาดต่างกัน และที่อุณหภูมิการเผาต่างกัน และตรวจสอบการเกิดเฟสด้วยวิธีเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน
- ตอนที่ 3 ศึกษาผลของขนาด และอุณหภูมิต่อการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางกายภาพของกระเบื้องเซรามิก เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงขนาดของเศษแก้วในกระบวนการผลิต
- ตอนที่ 4 พัฒนাসمบัติทางกายภาพของกระเบื้อง โดยเปลี่ยนกระบวนการผลิตกระเบื้องจากแบบเตรียมเนื้อดินโดยการผสมแห้งเป็นแบบการผสมเปียก
- ตอนที่ 5 ศึกษาอุณหภูมิช่วงสุกตัวของกระเบื้อง ที่ใช้เศษแก้วทดแทนแร่เฟลด์สปาร์
- ตอนที่ 6 ประเมินความคุ้มค่าจากผลการวิจัย

3.1 การเตรียมวัตถุดิบ และอุปกรณ์ในงานวิจัย

3.1.1 วัตถุดิบที่ใช้ในงานวิจัย

- 1) ททรายแก้วบดละเอียดจากโรงงาน (ภาพที่ ฅ18)
- 2) เศษแก้วสีเขียว (ภาพที่ ฅ19) ขนาดของแก้วที่ทดแทนเฟลด์สปาร์ คือ

- ขนาดในช่วง 0.147-0.295 มิลลิเมตร (ขนาดจากการคัดผ่านตะแกรงเบอร์ 50 โดยเฉพาะแก้วผ่านตะแกรงเบอร์ 50 ค้างตะแกรงเบอร์ 100)
- ขนาดในช่วง 0.104-0.147 มิลลิเมตร (ขนาดจากการคัดผ่านตะแกรงเบอร์ 100 โดยเฉพาะแก้วผ่านตะแกรงเบอร์ 100 ค้างตะแกรงเบอร์ 150)
- ขนาดในช่วง 0.075-0.104 มิลลิเมตร (ขนาดจากการคัดผ่านตะแกรงเบอร์ 150 โดยเฉพาะแก้วผ่านตะแกรงเบอร์ 150 ค้างตะแกรงเบอร์ 200)
- ขนาดเล็กกว่า 0.075 มิลลิเมตร (ขนาดจากการคัดผ่านตะแกรงเบอร์ 200 เท่านั้น)

3) ดินดำบดละเอียดจากโรงงาน (Ball Clay) (ภาพที่ ๘20)

4) น้ำ

3.1.2 สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

- 1) สารละลายกรดไฮโดรคลอริก
- 2) สารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์

3.1.3 เครื่องมือ และอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

3.1.3.1 การบดและการคัดขนาดเศษแก้ว

- 1) เครื่องบดขนาดเล็ก (Tube Mill) (ภาพที่ ๘28)
- 2) เครื่องร่อนคัดเศษแก้ว เบอร์ 50 100 150 และ 200 (ภาพที่ ๘29)

3.1.3.2 การผสมวัตถุดิบแบบแห้ง และแบบเปียก

- 1) เครื่องปั่นผสมวัตถุดิบแบบแห้ง (ภาพที่ ๘30)
- 2) เครื่องปั่นน้ำดิน (ภาพที่ ๘31)
- 3) แท่งปูนปลาสเตอร์ (Plaster Mold) เพื่อคูดน้ำดินให้แห้ง
- 4) ถังดำพลาสติก สำหรับหมักวัตถุดิบ

3.1.3.3 การทดลองขึ้นรูปกระเบื้องและการเผากระเบื้อง

- 1) เตาเผาอุณหภูมิสูง (แบบไฟฟ้า)
- 2) เครื่องผสมวัตถุดิบ
- 3) เครื่องชั่งน้ำหนัก

4) เครื่องอัดขึ้นรูปกระเบื้อง

3.1.3.4 การทดสอบค่ารับกำลังแรงดัด (Bending strength test)

1) เครื่องทดสอบค่ารับกำลังแรงดัด

3.1.3.5 การทดสอบค่าการดูดซึมน้ำ (Water absorption test)

1) เครื่องชั่งน้ำหนัก

2) เตาสำหรับให้ความร้อน

3) ถาดทนความร้อน

3.1.3.6 การทดสอบการทนสารเคมี

1) อ่างสำหรับแช่ตัวอย่างกระเบื้อง

3.1.3.7 การวัดค่าการหดตัว (Firing shrinkage test)

1) เวอร์เนียคาลิเปอร์

3.2 การดำเนินการวิจัย

3.2.1 คัดแยก และทำความสะอาดเศษแก้ว และนำไปบดละเอียดด้วยเครื่องบด ดังนี้

1) ใส่เศษแก้วที่ต้องการบดลงในหม้อบด (Tube Mill) ประมาณ 1.5 กิโลกรัม

2) ใช้เวลาการบดประมาณ 3 ชั่วโมงต่อการบด 1 ครั้ง

3.2.2 นำเศษแก้วมาคัดแยกขนาดด้วยตะแกรงกรองเบอร์ต่างๆ และจัดเก็บวัตถุดิบที่ได้แยกตามขนาด และหาค่าการกระจายขนาดของเศษแก้ว (Particle size distribution) ด้วยเครื่อง Mastersizer 2000

3.2.3 นำวัตถุดิบต่างๆ ได้แก่ ทราย ดินดำ และเศษแก้วสีเขียว มาวิเคราะห์หาองค์ประกอบทางเคมี ด้วยเครื่อง XRF (รุ่น Philips model PW2400)

3.2.4 การเตรียมเนื้อดิน

1) การผสมเนื้อดินแบบแห้ง

1.1) ผสมส่วนผสมดินดำต่อเศษแก้ว เท่ากับ 8 ต่อ 5

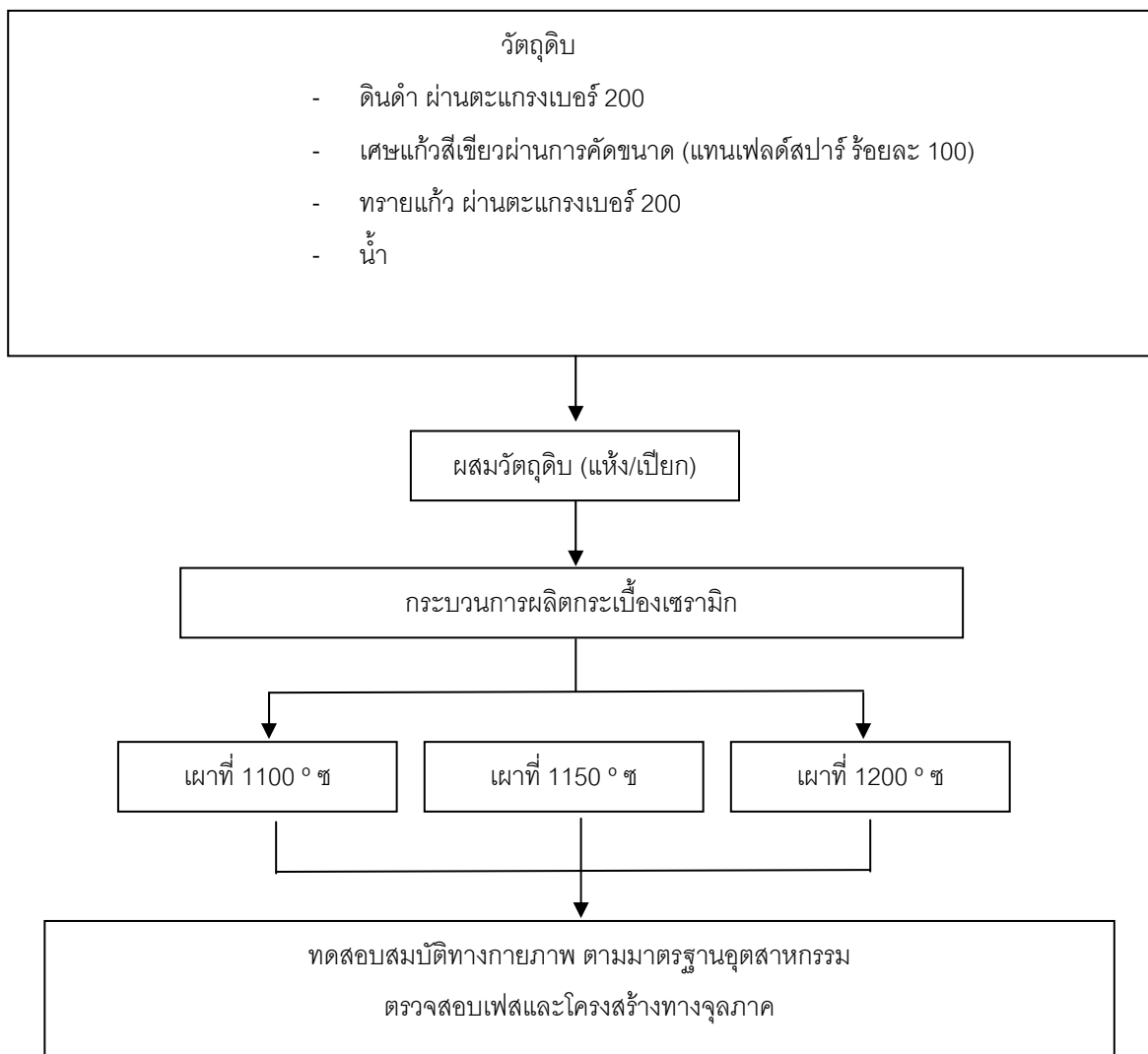
1.2) นำทรายแก้วมาผสม จำนวนร้อยละ 40 คลุกเคล้าให้เข้ากันด้วยเครื่องผสม

1.3) ค่อยๆ เติมน้ำร้อยละ 10 ให้ผสมกันโดยทั่ว และหมักทิ้งไว้ 3 วัน

2) การผสมเนื้อดินแบบเปียก

2.1) ผสมวัตถุดิบตามอัตราส่วนเดิม แต่ให้ผสมโดยใช้น้ำร้อยละ 50

- 2.2) ปั่นผสมน้ำดินจนได้น้ำดินที่เหลวหนืด เป็นเนื้อเดียวกัน
- 2.3) ผึ่งน้ำดินที่แบ่งปูนปลาสเตอร์ เพื่อให้แบ่งปูนดูดซึมน้ำจนน้ำดินแห้ง
- 2.4) นำดินมาอบ 24 ชั่วโมง
- 2.5) ตำเนื้อดินให้ละเอียด และคัดผ่านตะแกรงเบอร์ 80
- 2.6) นำผงดินที่ได้ มาเติมน้ำร้อยละ 10 ให้ผสมกันโดยทั่ว และหมักทิ้งไว้ 3 วัน
- 3.2.5 นำวัตถุดิบที่ได้ร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 20 ก่อนนำไปอัดขึ้นรูปเป็นแผ่นกระเบื้อง ขนาด 10x10x0.5 ซม. โดยใช้แรงอัดขึ้นรูปที่ 100 บาร์ (เพ็ชรพร เซาวกิจเจริญ และคณะ, 2549)
- 3.2.6 นำแผ่นกระเบื้องที่ผ่านการขึ้นรูปแล้ว มาอบไล่ความชื้น ที่ 105 องศาเซลเซียส 6 ชั่วโมง
- 3.2.7 นำแผ่นกระเบื้องเข้าเตาเผา โดยทำการเผาที่อุณหภูมิระหว่าง 1100-1200 องศาเซลเซียส



ภาพที่ 3.1 แผนผังขั้นตอนการผลิตกระเบื้องเซรามิกในงานวิจัย

ตารางที่ 3.1 ส่วนผสมของกระเบื้องเซรามิกในงานวิจัย
(เพชรพร เขาวกิจเจริญ และ วิวรรณ เทียนศิริ, 2548)

วัตถุดิบ	อัตราส่วนวัตถุดิบ (ร้อยละ)
แก้วเขียว	23.08
ดินดำ	36.92
ทรายแก้ว	40

3.2.8 การตรวจสอบและศึกษาคุณสมบัติของเฟส

นำแผ่นกระเบื้องที่ผลิตได้มาบด และนำไปตรวจสอบเฟสที่เกิด และวิเคราะห์ภาพขยาย โดยเครื่อง XRD (รุ่น Bruker AXS) และ SEM (รุ่น JEOL JSM 6400) ตามลำดับ

3.2.9 นำแผ่นกระเบื้องที่ได้หลังจากการเผา ไปทดสอบคุณภาพมาตรฐานของกระเบื้องปูพื้น (กระทรวงอุตสาหกรรม, มาตรฐานกระทรวงอุตสาหกรรม, 2529)

3.2.9.1 การทดสอบค่ากำลังรับแรงดัด (Bending strength test)

นำแผ่นกระเบื้องที่ผลิตได้ 5 แผ่น มาทดสอบค่ากำลังรับแรงดัด โดยคำนวณกำลังดัดที่ได้ ในหน่วย เมกกะปาสคาล เพื่อเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐาน โดยมีวิธีทดสอบ ดังนี้

- 1) ยึดที่รองรับซึ่งเป็นแท่งเหล็กขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางไม่น้อยกว่า 9 มิลลิเมตร 2 แท่ง ให้มั่นคงอยู่ในแนวนอน และขนานกันโดยให้แนวแกนของแท่งเหล็กทั้งสองห่างกันไม่น้อยกว่า 90 มิลลิเมตร
- 2) วางกระเบื้องที่รองรับให้ด้านยาวตั้งฉากกับแนวแกนของที่รองรับ และจัดวางแท่งเหล็กขนาดเดียวกับแท่งเหล็กรองรับซึ่งใช้เป็นที่ใช้แรงกดให้อยู่กึ่งกลางระหว่างที่รองรับ ดังภาพที่ 3.2
- 3) ที่จุดรองรับ และที่จุดรับแรงกดของกระเบื้อง ให้รองด้วยแผ่นยางที่มีความแข็ง 60 ถึง 70 IRHD (หน่วยความแข็งของยาง) หนาประมาณ 3 มิลลิเมตร ยาวตลอดแผ่นกระเบื้องเพื่อให้เกิดการกระจายแรงอย่างสม่ำเสมอ
- 4) ในกรณีที่เป็นกระเบื้องรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส ถ้าทราบแกนที่เป็นจุดอ่อน ให้ใช้แกนนั้นเป็นแกนทดสอบ
- 5) เพิ่มแรงลงบนที่กดให้แรงกระจายอย่างสม่ำเสมอตลอดแกนของที่กดนั้น โดยควบคุมอัตราการเพิ่มแรงให้ได้ประมาณ 60 นิวตันต่อตารางเซนติเมตร ภายใน 30 วินาที

- 6) วัดแรงกดสูงสุดก่อนกระเบื้องแตก
- 7) หาความหนาเฉลี่ยของกระเบื้องตรงรอยแตก การวัดต้องกระทำไม่น้อยกว่า 2 จุด
- 8) คำนวณค่ากำลังรับแรงดัด จากสูตร

$$B = 3PL/2a^2b$$

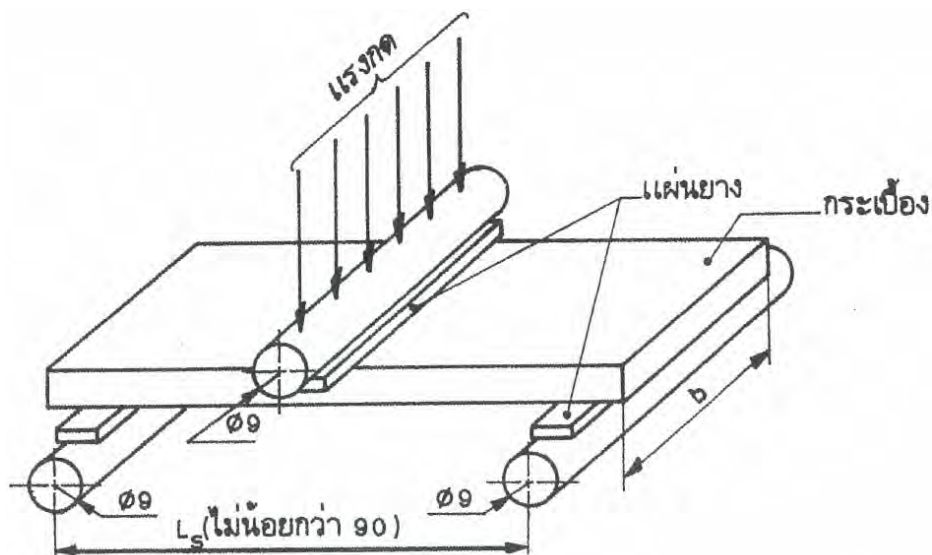
B คือ กำลังรับแรงดัด เป็นเมกะปาสคาล

P คือ แรงกดสูงสุด เป็นนิวตัน

L คือ ระยะห่างของแนวแกนที่รองรับ เป็นมิลลิเมตร

a คือ ความหนาตรงรอยแตกกระเบื้อง เป็นมิลลิเมตร

b คือ ความกว้าง หรือความยาวกระเบื้อง เป็นมิลลิเมตร



ภาพที่ 3.2 การวางกระเบื้องในการทดสอบค่ากำลังรับแรงดัด

(กระทรวงอุตสาหกรรม, มาตรฐานกระทรวงอุตสาหกรรม, 2529)

3.2.9.2 การทดสอบค่าการดูดซึมน้ำ (Water absorption test)

นำแผ่นกระเบื้องที่ผลิตได้ 5 แผ่น มาทดสอบค่าการดูดซึมน้ำ เพื่อเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐาน (กระทรวงอุตสาหกรรม, มาตรฐานกระทรวงอุตสาหกรรม, 2529) โดยมีวิธีทดสอบ ดังนี้

- 1) ทำเครื่องหมายไว้บนกระเบื้องแต่ละแผ่น แล้วอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส จนน้ำหนักคงที่ ปล่อยให้เย็นในเดสิกเกตเตอร์
- 2) รีบนำมาแยกชิ้นทีละแผ่น ให้ละเอียดถึง 0.1 กรัม น้ำหนักกระเบื้องที่ชั่งได้นี้ ให้ถือว่าเป็นน้ำหนักกระเบื้องแห้ง

- 3) แช่กระเบื้องเหล่านี้ให้จมอยู่ในน้ำกลั่น ต้มให้เดือดอย่างน้อย 2 ชั่วโมง โดยให้น้ำกลั่นท่วมกระเบื้องตลอดเวลา แล้วปล่อยให้ 24 ชั่วโมงที่อุณหภูมิห้อง
- 4) นำชิ้นซึบน้ำที่เกาะติดอยู่ด้วยผ้าหมาดที่สะอาดแล้ว รีบชั่งทันที ที่ละแผ่นให้ละเอียดถึง 0.1 กรัม น้ำหนักกระเบื้องที่ชั่งได้ถือเป็นกระเบื้องหลังจากแช่น้ำ
- 5) คำนวณการดูดซึมน้ำจากสูตร

$$\text{ร้อยละการดูดซึมน้ำ} = ((W_w - W_d) / W_d) \times 100$$

W_w คือ น้ำหนักกระเบื้องหลังจากแช่น้ำ เป็นกรัม

W_d คือ น้ำหนักกระเบื้องแห้ง เป็นกรัม

3.2.9.3 การทดสอบการทนสารเคมี (Chemical durability test)

นำกระเบื้องที่ผลิตได้อย่างละ 5 แผ่น มาทดสอบความทนกรด และนำกระเบื้องอย่างละ 5 แผ่น มาทดสอบความทนด่าง โดยแผ่นกระเบื้องที่ผ่านการทดสอบ ต้องไม่ปรากฏรอยเสียหาย

1) วิธีการเตรียมสารละลาย

- 1.1) สารละลายกรดไฮโดรคลอริก ร้อยละ 3 โดยปริมาตร เจือจางกรดเข้มข้น 30 ลูกบาศก์เซนติเมตร ด้วยน้ำกลั่นจนมีปริมาตร 1000 ลูกบาศก์เซนติเมตร
- 1.2) สารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก โดยละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 30 กรัม ในน้ำกลั่นจำนวนเล็กน้อย แล้วเติมน้ำกลั่นอีกจนมีปริมาตร 1000 ลูกบาศก์เซนติเมตร

2) วิธีทดสอบ

- 2.1) เช็ดผิวตัวอย่างให้สะอาด
- 2.2) แช่ตัวอย่าง 2 ใน 3 ของผิวจมในสารละลายกรดไฮโดรคลอริก หรือ สารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ เป็นเวลา 7 วัน
- 2.3) เมื่อครบกำหนดแล้วให้ยกตัวอย่างออก และตรวจพินิจความเปลี่ยนแปลงที่ผิว โดยเปรียบเทียบกับผิวส่วนที่ไม่ได้แช่



ภาพที่ 3.3 การแช่กระเบื้องในสารละลายกรด หรือสารละลายด่าง

3.2.9.4 การวัดค่าการหดตัว (Firing shrinkage test)

นำแผ่นกระเบื้องที่ผลิตได้มา 5 แผ่น มาวัดขนาดโดย เวอร์เนียร์คาลิเปอร์ โดยคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของขนาดของผลิตภัณฑ์ก่อนและหลังเผา (อ้างอิงวิธีการวัดจากกระทรวงอุตสาหกรรม, มาตรฐานกระทรวงอุตสาหกรรม, 2529) โดยมีขั้นตอนปฏิบัติ ดังนี้

- 1) การวัดขนาดความกว้าง ความยาว หรือมิติในแนวแกนหลังสองแกน ใช้เครื่องวัดเวอร์เนียร์คาลิเปอร์ วัดกระเบื้อง ณ แนวที่ขนาน และห่างจากขอบกระเบื้องประมาณ 5 มิลลิเมตร
- 2) ความหนา ใช้เวอร์เนียร์คาลิเปอร์ วัดกระเบื้อง ณ จุดซึ่งห่างจากขอบไม่น้อยกว่า 10 มิลลิเมตร รวม 4 ตำแหน่ง ตรงส่วนที่ขากระเบื้อง แล้วรายงานค่าเฉลี่ย
- 3) นำค่าที่วัดได้มาคำนวณปริมาตรของกระเบื้องมาคำนวณร้อยละการหดตัว ดังนี้

$$\text{ร้อยละการหดตัว} = ((V_b - V_a)/V_b) \times 100$$

V_b คือ ปริมาตรกระเบื้องก่อนเผา เป็นลูกบาศก์เซนติเมตร

($V_b =$ ความกว้าง \times ความยาว \times ความหนา ของกระเบื้องก่อนเผา)

V_a คือ ปริมาตรกระเบื้องหลังเผา เป็นลูกบาศก์เซนติเมตร

($V_a =$ ความกว้าง \times ความยาว \times ความหนา ของกระเบื้องหลังเผา)

3.2.10 การศึกษาอุณหภูมิช่วงสุกตัวของกระเบื้อง

นำกระเบื้องที่ผ่านการเตรียมเนื้อดินแบบเปียก โดยใช้เศษแก้วขนาดเล็กกว่า 0.104

ไมโครเมตร (ผ่าน 150 เมช) มาพิจารณาค่ากำลังรับแรงดัด ค่าดูดซึมน้ำ และค่าการหดตัวของกระเบื้องหลังการเผา ที่ต่างๆ

3.2.11 การประมาณค่าใช้จ่ายเบื้องต้นในกระบวนการผลิตและประเมินความคุ้มค่า

บทที่ 4

ผลการวิจัย และวิจารณ์ผลการวิจัย

4.1 ผลการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบ ด้วยเครื่องเอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนซ์ และหาค่าการกระจายขนาดของเศษแก้ว

ส่วนผสมในการผลิตกระเบื้องเซรามิกในงานวิจัยนี้ ได้แก่ เศษแก้วรีไซเคิลสีเขียว ได้รับจาก โรงงานบางกอกกล๊าส ดินดำ และทรายแก้วได้รับจาก บริษัท ซีเบลโก้ มิเนอร์รัลส์ (ประเทศไทย) จำกัด โดยเศษแก้วสีเขียวจะใช้ทดแทนแร่เฟลด์สปาร์ซึ่งเป็นวัตถุดิบที่มีคุณสมบัติช่วยในการหลอมละลาย ซึ่งองค์ประกอบหลักทางเคมีที่ช่วยให้เกิดความแข็งแรงของกระเบื้อง มีอยู่ 2 ตัว ได้แก่ ซิลิกา (SiO_2) และ อะลูมินา (Al_2O_3) และองค์ประกอบหลักทางเคมีที่ช่วยในการหลอมเหลว วัตถุดิบเข้าด้วยกัน ได้แก่ ธาตุในกลุ่มอัลคาไลต์ และอัลคาไลต์เอิร์ท องค์ประกอบของวัตถุดิบทั้งหมดในงานวิจัยทำการวิเคราะห์ด้วยเครื่องเอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนซ์ แสดงไว้ในตารางที่ 4.1 พบว่าในดินดำ มีปริมาณองค์ประกอบของซิลิกา (SiO_2) และ อะลูมินา (Al_2O_3) เป็นองค์ประกอบหลัก ส่วนเศษแก้วมีปริมาณองค์ประกอบของซิลิกา (SiO_2) เทียบเท่ากับแร่เฟลด์สปาร์ แม้จะมีอะลูมินา (Al_2O_3) น้อยกว่าแร่เฟลด์สปาร์ ซึ่งอาจทำให้ความแข็งแรงลดลง แต่เมื่อพิจารณาถึงปริมาณธาตุในกลุ่มอัลคาไลต์ และอัลคาไลต์เอิร์ท ได้แก่ โซเดียมออกไซด์ (Na_2O) และแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ในเศษแก้วจะมีอยู่มากกว่าในเฟลด์สปาร์ ซึ่งมีสมบัติตัวช่วยหลอม ในงานวิจัยจะใช้เศษแก้วแทนเฟลด์สปาร์ทั้งหมด

ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบแต่ละชนิด ด้วยเครื่องเอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนซ์

ตัวอย่าง วัตถุดิบ	องค์ประกอบทางเคมี (ร้อยละโดยน้ำหนัก)							
	SiO_2	Al_2O_3	Na_2O	CaO	MgO	K_2O	Fe_2O_3	TiO_2
ดินดำ	60.04	23.32	0.31	0.26	0.67	2.02	1.69	0.63
ทรายแก้ว	98.9	0.45	0.02	0.03	0.04	0.03	0.04	0.05
เศษแก้วสีเขียว	70.97	1.21	15.12	10.87	0.84	0.21	0.29	0.09
แร่เฟลด์สปาร์	72.16	16.81	8.00	1.07	0.21	1.01	0.22	0.21

ตารางที่ 4.2 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบหลังผสม ซึ่งพบว่า คุณภูมิในการเผาไม่มีผลต่อปริมาณองค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบ (ปารีย์ อรรถพิศาล, 2548) เพราะฉะนั้น องค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบก่อน และหลังเผาจะมีปริมาณใกล้เคียงกัน ซึ่งวัตถุดิบหลังผสม

จะมีลักษณะเป็นผงดินมีความชื้นเล็กน้อย และจากการคาดคะเนองค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบหลังผสม ด้วยวิธีการคำนวณ (วิธีคำนวณแสดงในภาคผนวก) ดังแสดงไว้ในตารางที่ 4.3 พบว่ามีค่าใกล้เคียงกับ ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่องมือ

ตารางที่ 4.2 องค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบหลังผสมด้วยเครื่องเอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนซ์

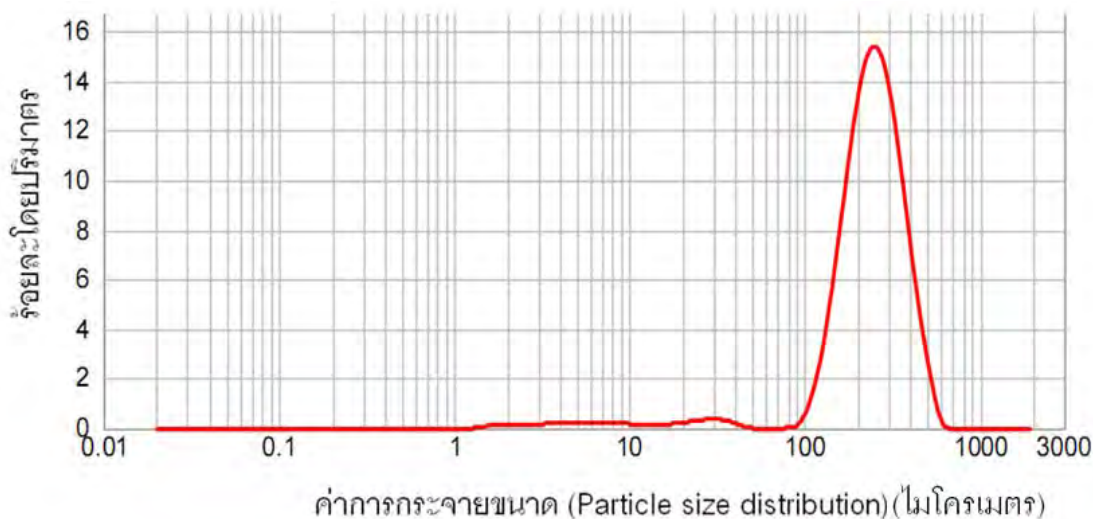
วัตถุดิบหลังผสม	องค์ประกอบทางเคมี (ร้อยละโดยน้ำหนัก)							
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Na ₂ O	CaO	MgO	K ₂ O	Fe ₂ O ₃	TiO ₂
	72.54	10.07	3.70	2.84	0.46	1.30	0.92	0.3

ตารางที่ 4.3 องค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบหลังผสมด้วยการคำนวณ (วิธีคำนวณแสดงไว้ในภาคผนวก)

วัตถุดิบหลังผสม	องค์ประกอบทางเคมี (ร้อยละโดยน้ำหนัก)							
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Na ₂ O	CaO	MgO	K ₂ O	Fe ₂ O ₃	TiO ₂
	81.06	10.41	3.63	2.63	0.49	0.90	0.78	0.3

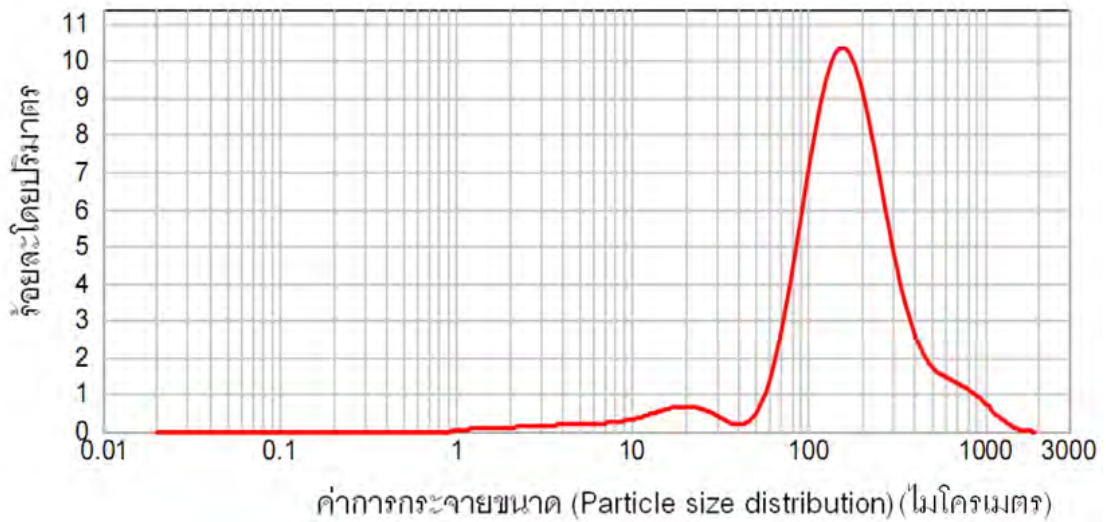
โดยเฉพาะแก้วหลังจากการคัดขนาดผ่านตะแกรงเบอร์ต่างๆ สามารถหาค่าการกระจายขนาด (Particle size distribution) ของเศษแก้ว ได้ดังนี้

- ขนาดในช่วง 0.147-0.295 มิลลิเมตร (ขนาดจากการคัดผ่านตะแกรงเบอร์ 50 โดยเฉพาะแก้วผ่านตะแกรงเบอร์ 50 ค้างตะแกรงเบอร์ 100) ค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.249 มิลลิเมตร



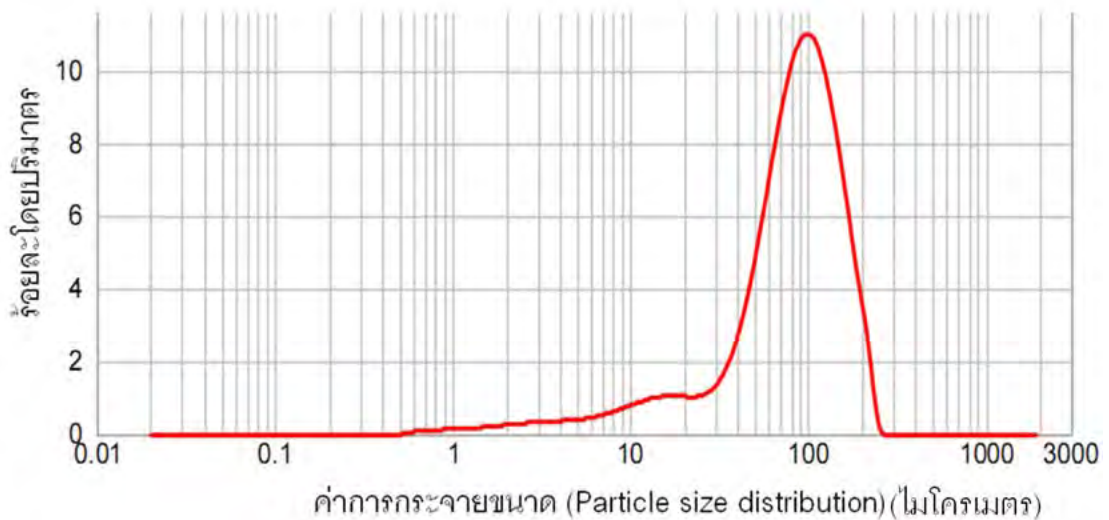
ภาพที่ 4.1 การกระจายขนาดของเศษแก้วขนาดในช่วง 0.147-0.295 มิลลิเมตร

- ขนาดในช่วง 0.104-0.147 มิลลิเมตร (ขนาดจากการคัดผ่านตะแกรงเบอร์ 100 โดยเศษแก้วผ่านตะแกรงเบอร์ 100 ค้างตะแกรงเบอร์ 150) ค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.210 มิลลิเมตร



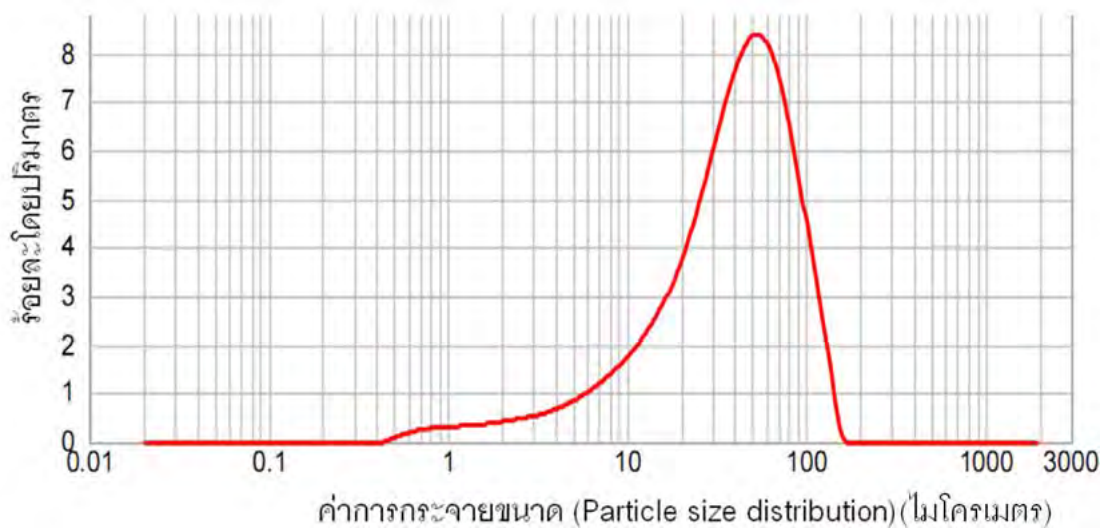
ภาพที่ 4.2 การกระจายขนาดของเศษแก้วขนาดในช่วง 0.104-0.147 มิลลิเมตร

- ขนาดในช่วง 0.075-0.104 มิลลิเมตร (ขนาดจากการคัดผ่านตะแกรงเบอร์ 150 โดยเศษแก้วผ่านตะแกรงเบอร์ 150 ค้างตะแกรงเบอร์ 200) ค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.089 มิลลิเมตร



ภาพที่ 4.3 การกระจายขนาดของเศษแก้วขนาดในช่วง 0.075-0.104 มิลลิเมตร

- ขนาดเล็กกว่า 0.075 มิลลิเมตร (ขนาดจากการคัดผ่านตะแกรงเบอร์ 200 โดยเศษแก้วผ่านตะแกรงเบอร์ 200 เท่านั้น) ค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.045 มิลลิเมตร

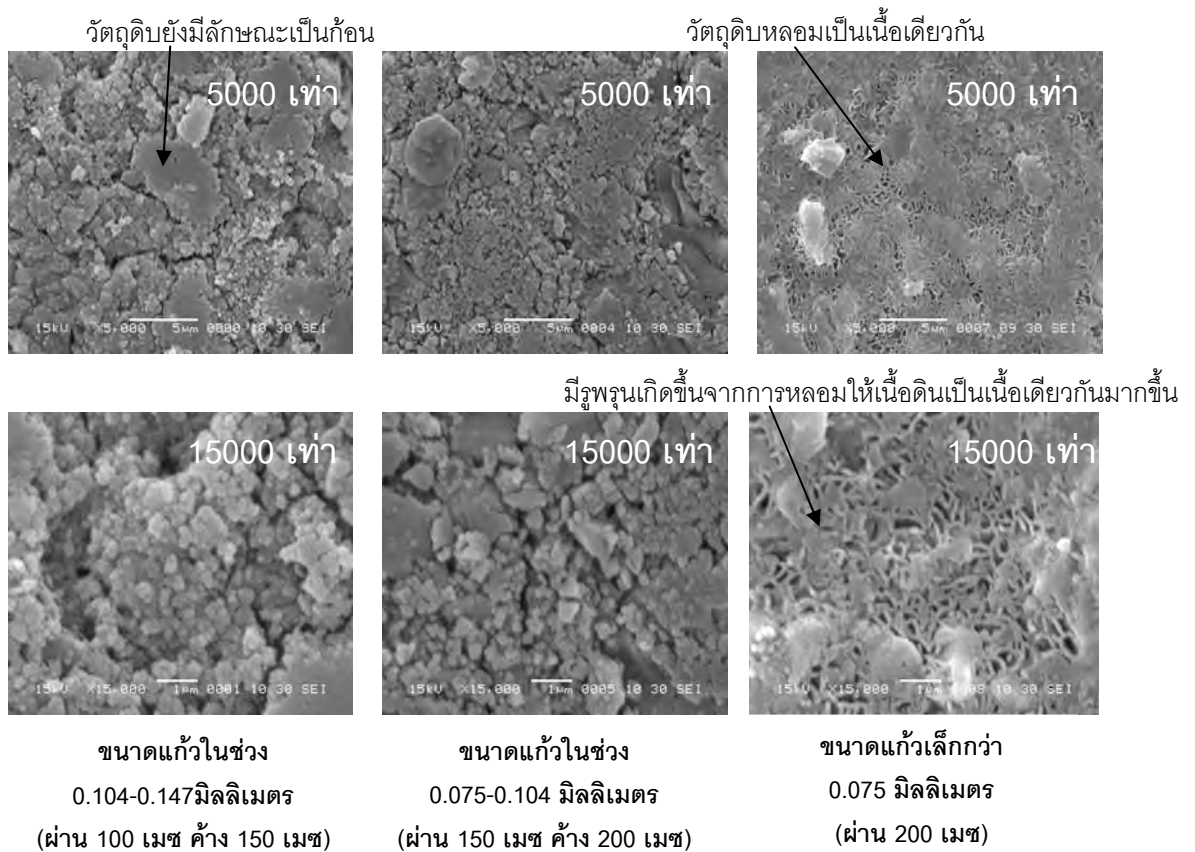


ภาพที่ 4.4 การกระจายขนาดของเศษแก้วขนาดเล็กกว่า 0.075 มิลลิเมตร

4.2 เปรียบเทียบภาพขยายทางจุลภาคของกระเบื้องที่ทดแทนด้วยเศษแก้วขนาดต่างกัน และที่อุณหภูมิการเผาต่างกัน และตรวจสอบการเกิดเฟส

4.2.1 การวิเคราะห์ภาพขยาย ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน (SEM)

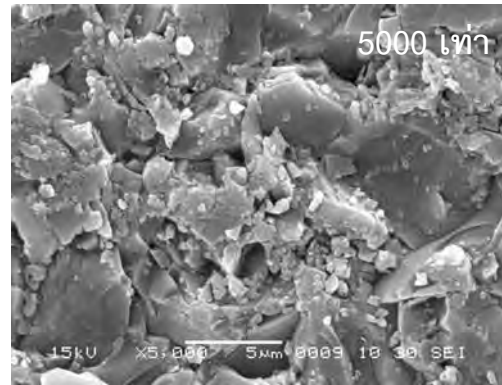
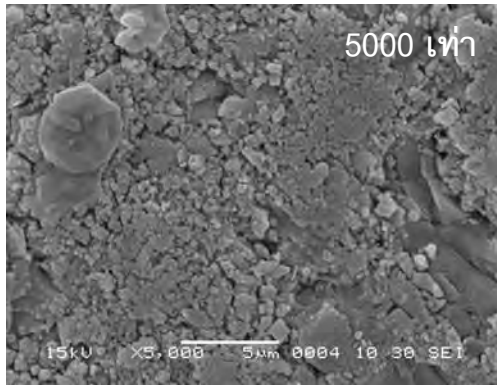
การพิจารณาภาพขยายของเนื้อกระเบื้องที่ผ่านการเตรียมเนื้อดินแบบแห้ง พบว่า ที่อุณหภูมิการเผาเท่ากัน การใช้เศษแก้วขนาดละเอียดกว่า จะทำให้การหลอมให้เนื้อดินเป็นเนื้อเดียวกันเป็นไปได้มากกว่าเศษแก้วขนาดหยาบ สังเกตจากลักษณะของวัตถุบหลอมตัวเป็นเนื้อเดียวกันได้ดีในเนื้อกระเบื้องที่แทนด้วยเศษแก้วขนาดละเอียด (ขนาดแก้วเล็กกว่า 0.075 มิลลิเมตร) หรือพิจารณาจากวัตถุบที่ยังมีลักษณะเป็นก้อน ไม่หลอมเป็นเนื้อเดียวกันในกระเบื้องที่แทนด้วยเศษแก้วขนาดหยาบกว่า (ขนาดแก้วในช่วง 0.075-0.104 มิลลิเมตร) ดังแสดงในภาพที่ 4.5 ลักษณะเช่นนี้ แสดงให้เห็นว่าเศษแก้วขนาดหยาบ นอกจากจะทำให้การกระจายตัวไม่ทั่วถึงแล้ว ยังเกิดการหลอมละลายได้ยากกว่าเศษแก้วขนาดละเอียด อย่างไรก็ตามถ้าใช้เศษแก้วละเอียดมากย่อมต้องเสียค่าใช้จ่ายในการบดมากตามไปด้วย



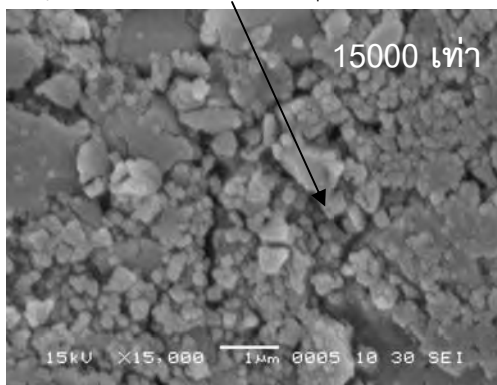
ภาพที่ 4.5 ภาพขยาย 5000 และ 15000 เท่า ของกระเบื้องที่ทดแทนด้วยเศษแก้วขนาดต่างๆ ผ่าน กระบวนการผสมวัสดุแบบแห้ง เเผาที่ 1200 องศาเซลเซียส

การพิจารณาภาพขยายของเนื้อกระเบื้องที่ใช้เศษแก้วทดแทนขนาดเท่ากัน แต่เผาที่อุณหภูมิการเผาต่างกัน พบว่า อุณหภูมิการเผา 1200 องศาเซลเซียส ทำให้วัสดุที่หลอมให้เนื้อดินเป็นเนื้อเดียวกันได้มากกว่าการเผาวัสดุที่อุณหภูมิ 1150 องศาเซลเซียส สืบเนื่องจากขนาดของก้อนวัสดุที่ต่างกัน เนื่องมาจากความสามารถในการหลอมต่างกัน กล่าวคือ ที่อุณหภูมิการเผาที่สูงกว่า จะทำให้วัสดุที่หลอมให้เนื้อดินเป็นเนื้อเดียวกันได้มากกว่า ขนาดวัสดุจึงมีขนาดเล็กกว่า ดังแสดงในภาพที่ 4.6

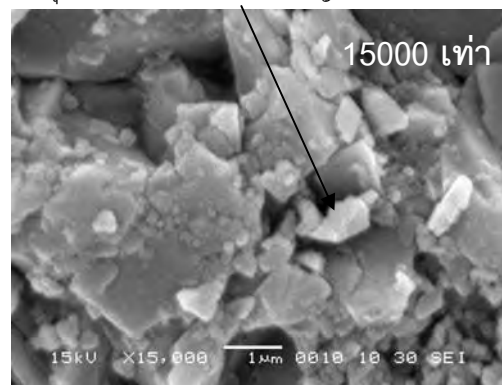
อย่างไรก็ตาม ในการเผาที่อุณหภูมิสูงเกินไป จะทำให้เกิดการหลอมของตัวช่วยหลอมในเนื้อแก้วมากเกินไป นอกจากจะทำให้เกิดผลึกสำคัญได้ยากแล้ว ในการจัดฟองก๊าซโดยการแพร่ออกทางเนื้อแก้ว ยังส่งผลให้เกิดรูพรุนมากขึ้น การดูดซึมน้ำจึงเพิ่มมากขึ้น ความแข็งแรงลดลง คล้ายลักษณะกระเบื้องที่เกินจุดสุกตัว



วัตถุติบ มีลักษณะเป็นเม็ดเล็กๆ



วัตถุติบ มีลักษณะเป็นก้อนใหญ่

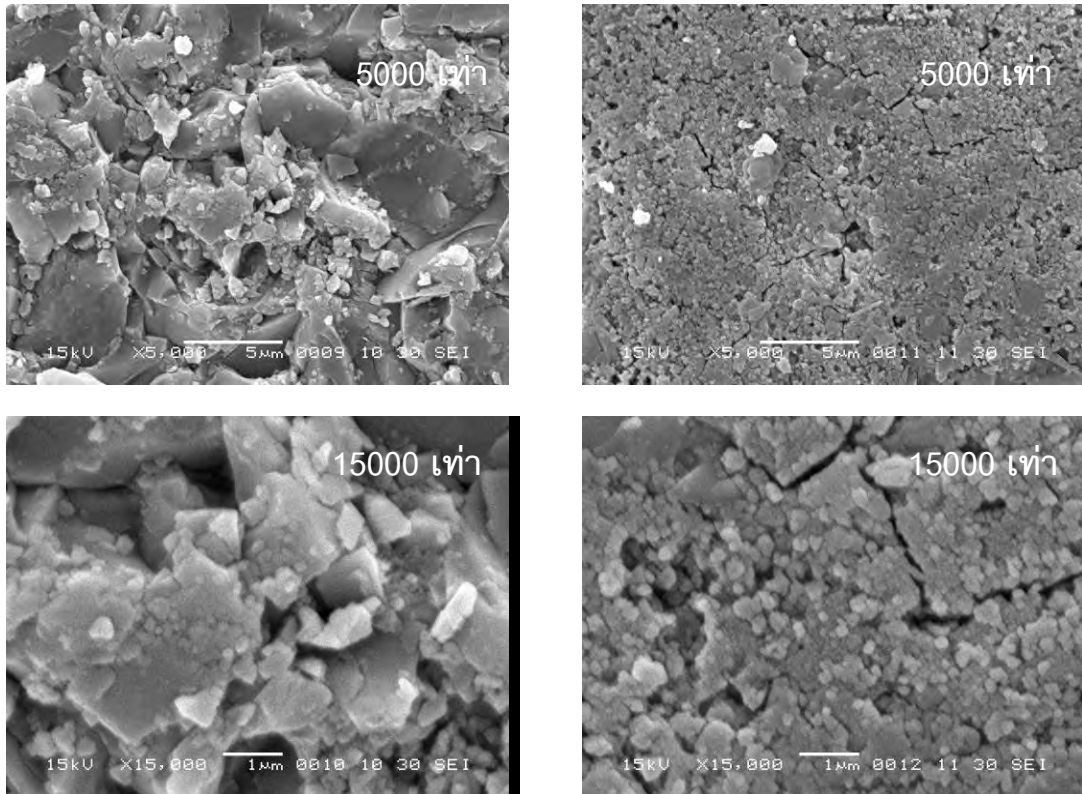


อุณหภูมิการเผา
1200 องศาเซลเซียส

อุณหภูมิการเผา
1150 องศาเซลเซียส

ภาพที่ 4.6 ภาพขยาย 5000 และ 15000 เท่า ของกระเบื้องที่ทดแทนด้วยเศษแก้วขนาดในช่วง 0.075-0.104 มิลลิเมตร (ผ่าน 150 เมช ค้าง 200 เมช) ผ่านกระบวนการผสมวัตถุติบแบบแห้ง เเผา ที่อุณหภูมิต่างๆ

ในการเปรียบเทียบภาพขยายของเนื้อกระเบื้องที่ทดแทนด้วยเศษแก้วขนาดเดียวกัน เเผาที่อุณหภูมิเดียวกัน แต่ผ่านการเตรียมเนื้อดินต่างกัน คือการเตรียมเนื้อดินโดยการผสมแบบแห้ง และแบบเปียก พบว่า การเตรียมเนื้อดินแบบเปียก ทำให้วัตถุติบมีการกระจายตัวผสมกันได้ดีกว่า การเตรียมเนื้อดินแบบแห้ง ดังนั้นทำให้วัตถุติบมีการสัมผัสกับตัวหลอมให้เนื้อดินเป็นเนื้อเดียวกันอย่างทั่วถึง ส่งผลให้ในขณะเผา มีการหลอมละลายรวมเป็นเนื้อเดียวกันได้มากกว่า ดังแสดงในภาพที่ 4.7 กระบวนการเตรียมเนื้อดินจึงมีความสำคัญ ดังนั้นสำหรับวัตถุติบที่ไม่ละเอียดมากนัก ควรเลือกการเตรียมเนื้อดินแบบเปียก เพื่อให้วัตถุติบผสมกันอย่างทั่วถึง



การเตรียมเนื้อดินโดยการผสม
วัตถุดิบแบบแห้ง

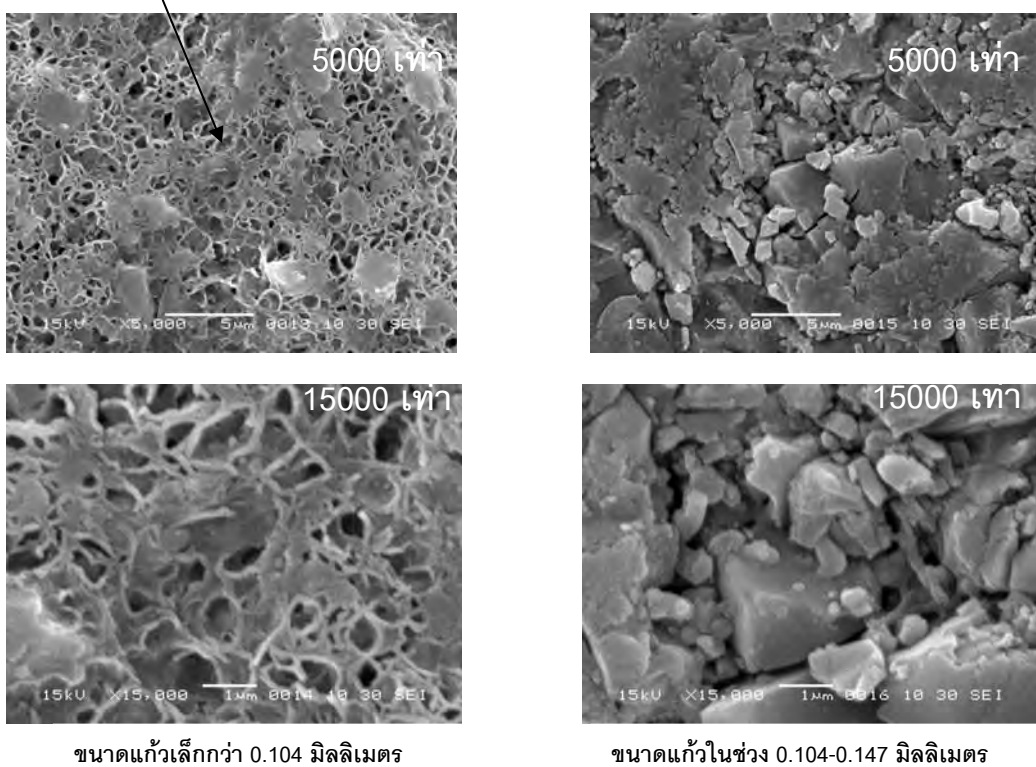
การเตรียมเนื้อดินโดยการผสม
วัตถุดิบแบบเปียก

ภาพที่ 4.7 ภาพขยาย 5000 และ 15000 เท่า ของกระเบื้องที่ใช้เศษแก้วขนาดเล็กกว่า 0.104 มิลลิเมตร (ผ่าน 150 เมช) เเผที่ 1150 องศาเซลเซียส เปรียบเทียบการเตรียมเนื้อดินแบบแห้ง และแบบเปียก

การพิจารณาภาพขยายของเนื้อกระเบื้องที่ผ่านการเตรียมเนื้อดินแบบเปียก สามารถวิเคราะห์ได้เช่นเดียวกับภาพขยายของเนื้อกระเบื้องที่ผ่านการเตรียมเนื้อดินแบบแห้ง กล่าวคือ ที่อุณหภูมิเดียวกัน ขนาดเศษแก้วที่ละเอียดกว่า (ขนาดเล็กกว่า 0.104 มิลลิเมตร) จะมีการหลอมให้เนื้อดินเป็นเนื้อเดียวกันของวัตถุดิบได้ดีกว่า ส่วนเศษแก้วขนาดใหญ่ (ขนาดแก้วในช่วง 0.104-0.147) จะหลอมได้น้อยกว่า วัตถุดิบจึงยังมีลักษณะเป็นก้อน สามารถพิจารณาได้จากภาพที่ 4.8

ส่วนผลของอุณหภูมิที่มีต่อเนื้อกระเบื้องที่ผ่านการเตรียมเนื้อดินแบบเปียก ที่การใช้เศษแก้วขนาดเดียวกัน พบว่า ที่อุณหภูมิการเผา 1200 องศาเซลเซียส เนื้อกระเบื้องมีการหลอมให้เนื้อดินเป็นเนื้อเดียวกันเป็นไปได้อย่างมากการเผาที่อุณหภูมิการเผา 1150 องศาเซลเซียส ซึ่งที่อุณหภูมิสูงกว่า จะเกิดการไหลฟองก๊าซมากขึ้น ทำให้สังเกตเห็นรูพรุนเกิดขึ้นมากขึ้นด้วย สามารถพิจารณาได้จากภาพที่ 4.9

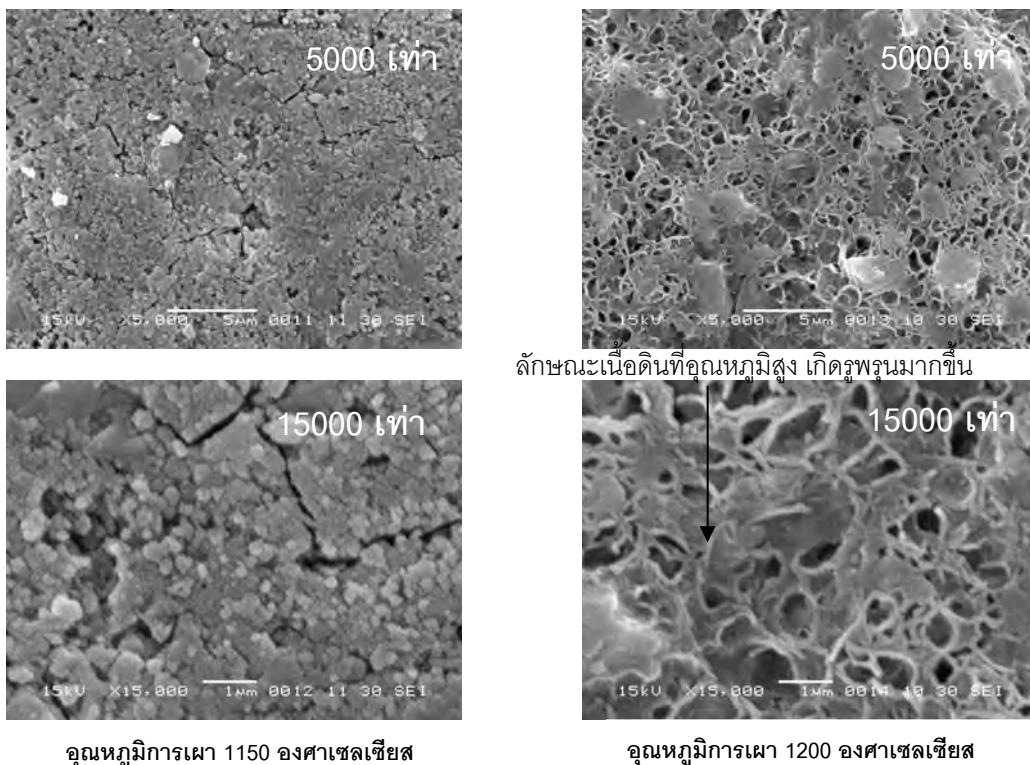
มีรูพรุนเกิดขึ้น เนื่องจากเกิดการหลอมให้เนื้อดินเป็นเนื้อเดียวกันมากขึ้น



ขนาดแก้วเล็กกว่า 0.104 มิลลิเมตร

ขนาดแก้วในช่วง 0.104-0.147 มิลลิเมตร

ภาพที่ 4.8 ภาพขยาย 5000 และ 15000 เท่า ของกระเบื้องที่ทดแทนด้วยเศษแก้วขนาดต่างๆ ผ่าน กระบวนการผสมวัสดุดิบแบบเปียก เเผที่ 1200 องศาเซลเซียส



อุณหภูมิการเผา 1150 องศาเซลเซียส

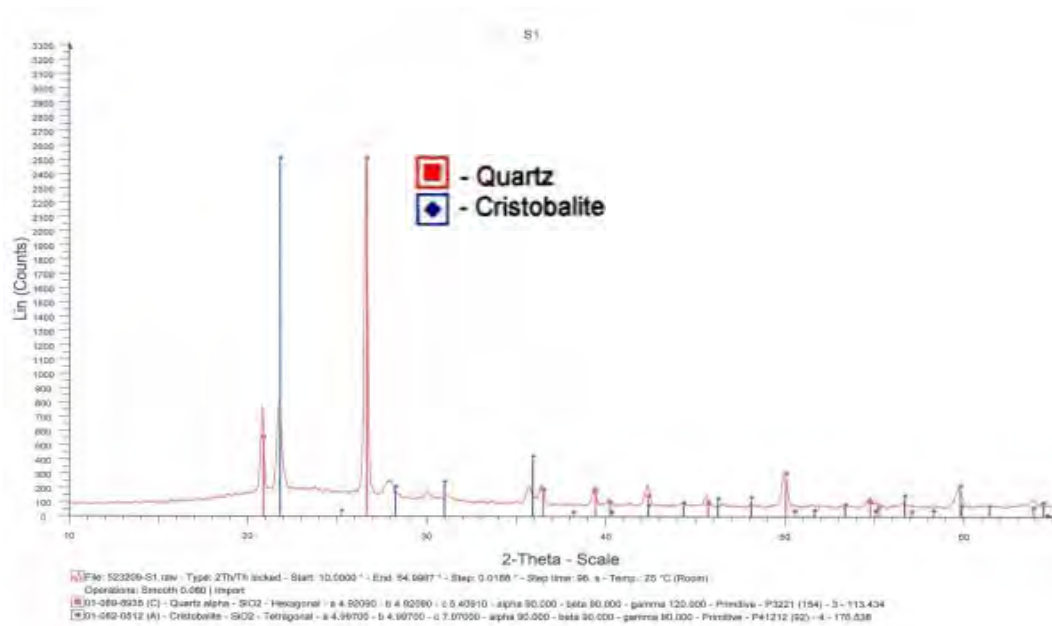
อุณหภูมิการเผา 1200 องศาเซลเซียส

ลักษณะเนื้อดินที่อุณหภูมิสูง เกิดรูพรุนมากขึ้น

ภาพที่ 4.9 ภาพขยาย 5000 และ 15000 เท่า ของกระเบื้องที่ทดแทนด้วยเศษแก้วขนาดเล็กกว่า 0.104 มิลลิเมตร (ผ่าน 150 เมช) ผ่านกระบวนการผสมวัสดุดิบแบบเปียก เเผที่อุณหภูมิต่างๆ

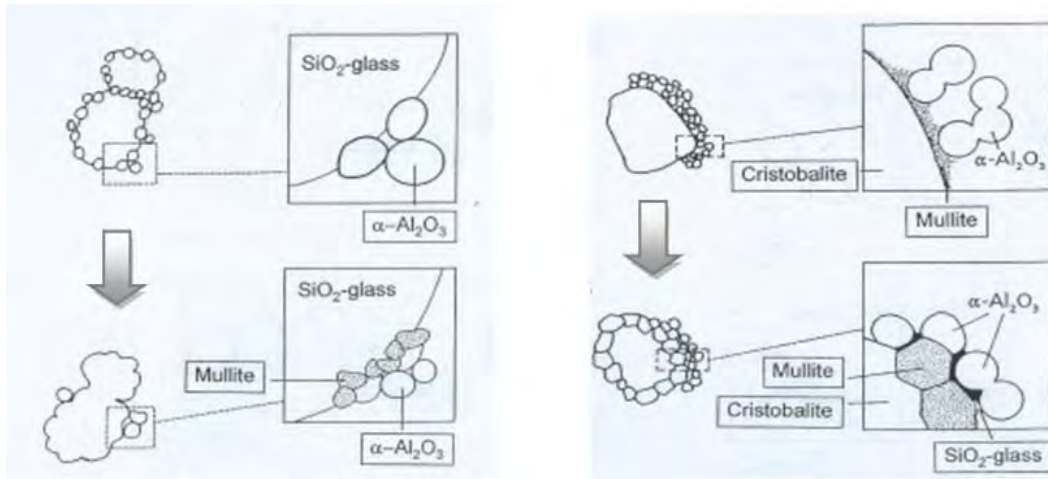
4.2.2 การวิเคราะห์เฟส โดยวิธีเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน (XRD)

การวิเคราะห์เฟสที่เกิดขึ้นในเนื้อกระเบื้อง กราฟแสดงผลวิเคราะห์ ดังแสดงไว้ในภาพที่ 4.10 พบว่า กระจกเบื้องหลังเผาเกิดเฟสประกอบที่สำคัญ คือ ควอตซ์ (Quartz, SiO_2) และคริสโตบัลไลต์ (Cristobalite, SiO_2) แต่ไม่พบเฟสของมัลไลต์ (Mullite, $3\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 2\text{SiO}_2$) ซึ่งเป็นเฟสที่ให้ความแข็งแรงสูง



ภาพที่ 4.10 กราฟเอกซเรย์ดิฟแฟรกชันของกระเบื้องที่ทดแทนด้วยเศษแก้วขนาดเล็กกว่า 0.104 มิลลิเมตร (ผ่าน 150 เมช) ผ่านกระบวนการผสมวัสดุแบบแห้ง เเผาที่ 1150 องศาเซลเซียส

ภาพที่ 4.11 แสดงกลไกการเกิดมัลไลต์ที่อุณหภูมิสูง เฟสส่วนใหญ่ที่เป็นซิลิกา (SiO_2) จะหลอมรวมกับ เฟสของอะลูมินา (Al_2O_3) และทำปฏิกิริยาเกิดเป็นเฟสของมัลไลต์ (Mullite, $3\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 2\text{SiO}_2$) ขึ้นอยู่ระหว่างเฟสทั้งสอง ซึ่งเฟสมัลไลต์เป็นเฟสที่ให้ความแข็งแรงสูง แต่เนื่องจากในองค์ประกอบทางเคมีของเศษแก้วนั้น มีธาตุในกลุ่มอัลคาไลต์ และอัลคาไลต์เอิร์ท อยู่ค่อนข้างมาก ทำให้วัสดุหลังผสมมีตัวหลอมละลายเหล่านี้อยู่มาก ซึ่งเป็นสาเหตุให้มีสัดส่วนขององค์ประกอบไม่เหมาะสมที่จะเกิดผลึกมัลไลต์ นอกจากนั้นสภาวะที่มีตัวหลอมละลายมากเกินไปทำให้เฟสอะลูมินา และเฟสซิลิกาไม่เกิดการหลอมรวมติดเป็นเนื้อเดียวกัน ส่งผลให้ไม่ทำปฏิกิริยากันเป็นผลึกมัลไลต์



ภาพที่ 4.11 กลไกการเกิดเฟสมัลไลต์ โดยการรวมตัวกันระหว่างเฟสซิลิกา กับเฟสอะลูมินา (Schneider และ Komarneni, 2007)

การพัฒนางานวิจัยในส่วนนี้ นอกจากการหาขนาดของเศษแก้วที่เหมาะสมเพื่อให้ส่วนผสมกระจายตัวอย่างทั่วถึงแล้ว ควรต้องปรับสัดส่วนให้มีธาตุในกลุ่มอัลคาไลต์ และอัลคาไลต์เอิร์ทพอเหมาะ เพื่อให้เนื้อกระเบื้องเกิดผลึกมัลไลต์ นอกจากนี้ยังต้องปรับให้มีซิลิกาที่เพียงพอ เพราะซิลิกาเป็นตัวควบคุมให้เนื้อแก้วมีความหนืดสูง (Schneider และ Komarneni, 2007) ส่งผลให้ผลึกสำคัญเกิดได้ง่าย

4.3 ผลการศึกษาผลของขนาด และอุณหภูมิ ต่อการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางกายภาพของกระเบื้องเซรามิกเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงขนาดของเศษแก้วในกระบวนการผลิต

งานวิจัยนี้ได้ผ่านกระบวนการผลิตกระเบื้องเซรามิก โดยมีเศษแก้วขนาดต่างๆเป็นตัวแปร ในช่วงแรกจะพิจารณาคูณสมบัติกระเบื้องที่ได้จากการเตรียมเนื้อดินโดยการผสมเนื้อดินแบบแห้ง และแบบเปียก การควบคุมอุณหภูมิของการเผากระเบื้องที่อุณหภูมิระหว่าง 1100-1200 องศาเซลเซียส ที่อัตราให้ความร้อน 3 องศาเซลเซียสต่อนาที (Heating rate) เผาแช่ไฟ 1 ชั่วโมง (Soaking time) (เพ็ชรพร เชาวกิจเจริญ และ วิวรรณ เทียนศิริ, 2548)

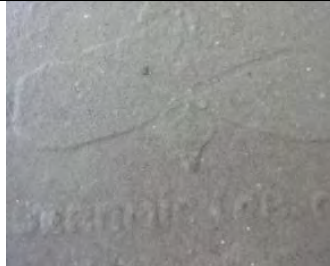



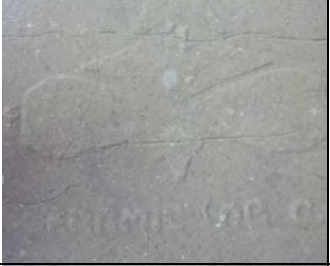
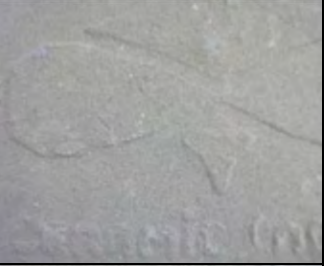
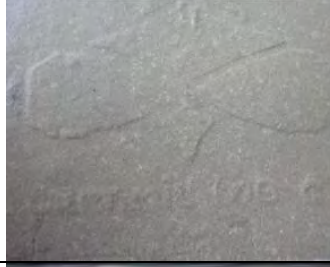
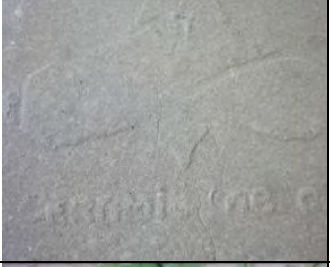
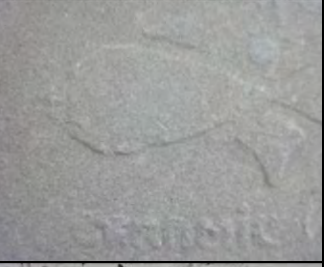

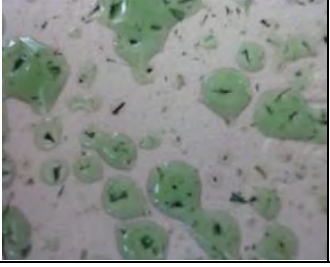

4.3.1 ผลการพิจารณาความเป็นเนื้อเดียวกันของผลิตภัณฑ์กระเบื้อง

เนื้อกระเบื้องที่ได้จากการเตรียมเนื้อดินโดยการผสมเนื้อดินแบบแห้งหลังการเผาแสดงในตารางที่ 4.4 จากการพิจารณาลักษณะภายนอก พบว่าขนาดเศษแก้วในช่วง 0.147-0.295 มิลลิเมตร เนื้อกระเบื้องไม่เป็นเนื้อเดียวกัน ที่อุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียส พบเศษแก้วกระจาย

อยู่ทั่วไป และที่อุณหภูมิสูงขึ้น เศษแก้วเกิดการหลอมละลายล้นออกมาที่ผิวหน้ากระเบื้อง นอกจากนี้กระเบื้องดังกล่าว ยังเกิดการแตกหักเสียหายได้ง่าย ไม่เหมาะกับการนำมาใช้


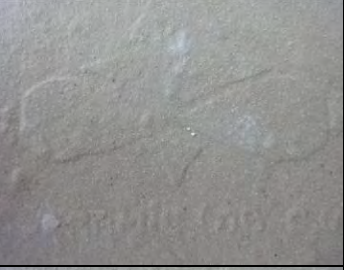


ส่วนขนาดเศษแก้วที่เล็กกว่า 0.147 มิลลิเมตรลงมา พบว่าได้กระเบื้องที่มีเนื้อเดียวกัน เนื่องจากการผสมของเศษแก้วกับวัตถุดิบอื่นเข้ากันได้ดี เพราะฉะนั้นจะทำการวิจัยศึกษาสมบัติทางกายภาพต่อสำหรับกระเบื้องที่ใช้เศษแก้วขนาดเล็กกว่า 0.147 มิลลิเมตรลงมา

ตารางที่ 4.4 ความเป็นเนื้อเดียวกันของเนื้อกระเบื้องที่ผ่านการเตรียมเนื้อดินแบบแห้ง โดยใช้เศษแก้วขนาดต่างๆ ทดแทน

ขนาดเศษแก้ว (มิลลิเมตร)	อุณหภูมิในการเผา(องศาเซลเซียส)		
	1200	1150	1100
< 0.075 (ผ่าน 200 เมช)			
0.075 - 0.104 (ผ่าน 150 เมช ค้ำ 200 เมช)			
0.104 - 0.147 (ผ่าน 100 เมช ค้ำ 150 เมช)			
0.147 - 0.295 (ผ่าน 50 เมช ค้ำ 100 เมช)			

เนื้อกระเบื้องที่ได้จากการเตรียมเนื้อดินโดยการผสมเนื้อดินแบบเปียกหลังการเผาแสดงในตารางที่ 4.5 พบว่าขนาดเศษแก้วในช่วง 0.104-0.147 มิลลิเมตร และขนาดเศษแก้วเล็กกว่า 0.140 มิลลิเมตร สามารถผลิตกระเบื้องที่มีเนื้อเดียวกัน การผสมของเศษแก้วกับวัตถุดิบอื่นเข้ากันได้ดี ซึ่งการผสมเนื้อดินแบบเปียกนั้น จะช่วยให้วัตถุดิบที่มีขนาดต่างกัน ผสมกันได้ดียิ่งขึ้น เนื่องจากการเติมน้ำ มาเป็นตัวช่วยในการผสมนั่นเอง

ตารางที่ 4.5 ความเป็นเนื้อเดียวกันของเนื้อกระเบื้องที่ผ่านการเตรียมเนื้อดินแบบเปียกโดยใช้เศษแก้วขนาดต่างๆ ทดแทน

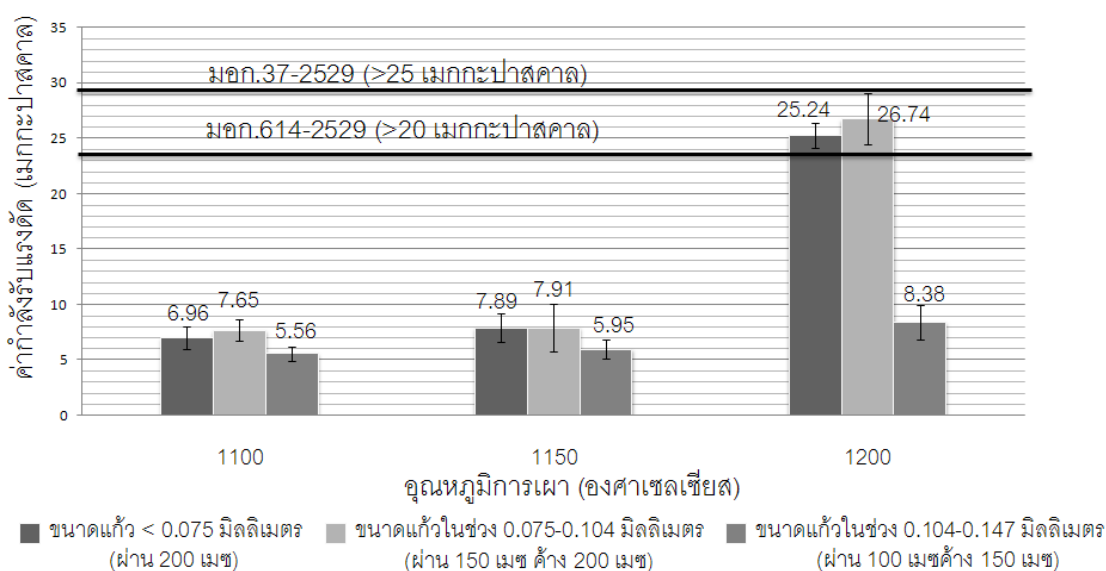
ขนาดเศษแก้ว (มิลลิเมตร)	อุณหภูมิในการเผา(องศาเซลเซียส)	
	1200	1150
< 0.104 (ผ่าน 150)		
0.104-0.147 (ผ่าน 100 เมช ค้ำง 150 เมช)		

4.3.2 การทดสอบค่ากำลังรับแรงดัดของกระเบื้อง (Bending strength test)

ผลการทดสอบสมบัติทางกายภาพของกระเบื้องหลังเผาแสดงในภาพที่ 4.12 โดยอ้างอิงภายใต้มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมกระเบื้องดินเผาปูพื้น มอก.37-2529 และ มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมกระเบื้องดินเผาบุผนัง มอก.614-2529 ระบุค่ากำลังรับแรงดัดไม่ต่ำกว่า 25 และ 20 เมกกะปาสคาล ตามลำดับ

จากผลการวิจัย พบว่า ที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส ค่ากำลังรับแรงดัดผ่านมาตรฐานกระเบื้องดินเผาปูพื้น และมาตรฐานกระเบื้องดินเผาบุผนัง ที่ 25.24 เมกกะปาสคาล และ 26.74 เมกกะปาสคาล เมื่อใช้เศษแก้วขนาดเล็กกว่า 0.075 มิลลิเมตร และขนาดเศษแก้วในช่วง 0.075-0.104 มิลลิเมตร ตามลำดับ ส่วนขนาดเศษแก้วในช่วง 0.104-0.147 มิลลิเมตร จะเหลือค่ากำลัง

รับแรงดัดเพียง 8.35 เมกกะปาสคาลเท่านั้น เนื่องจากเศษแก้ว 2 ขนาดแรก เป็นขนาดที่เหมาะสม ทั้งการผสมกันอย่างทั่วถึงของวัสดุดิบ และการหลอมละลายรวมกันระหว่างเศษแก้ว กับวัสดุดิบ เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้เศษแก้วขนาดใหญ่กว่า ซึ่งสามารถพิจารณาได้จากภาพขยาย ดังภาพที่ 4.5 จึงส่งผลให้สมบัติทางกายภาพของกระเบื้องมีแนวโน้มลดลงเมื่อใช้เศษแก้วที่มีขนาดใหญ่ขึ้น และเมื่อพิจารณาอุณหภูมิ พบว่า ที่อุณหภูมิ 1150 องศาเซลเซียสลงมา ค่ากำลังรับแรงดัดไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐาน แม้จะแทนด้วยเศษแก้วขนาดใดก็ตาม เนื่องจากอุณหภูมิที่ต่ำลง ทำให้การหลอมละลายของวัสดุดิบลดลง ส่งผลต่อการเกิดผลึกสำคัญที่ให้ความแข็งแรงน้อยลงไปด้วย พิจารณาได้จากภาพขยาย ดังภาพที่ 4.6 ที่แสดงถึงลักษณะการหลอมละลายของวัสดุดิบ เปรียบเทียบระหว่างอุณหภูมิการเผา 1200 และ 1150 องศาเซลเซียส



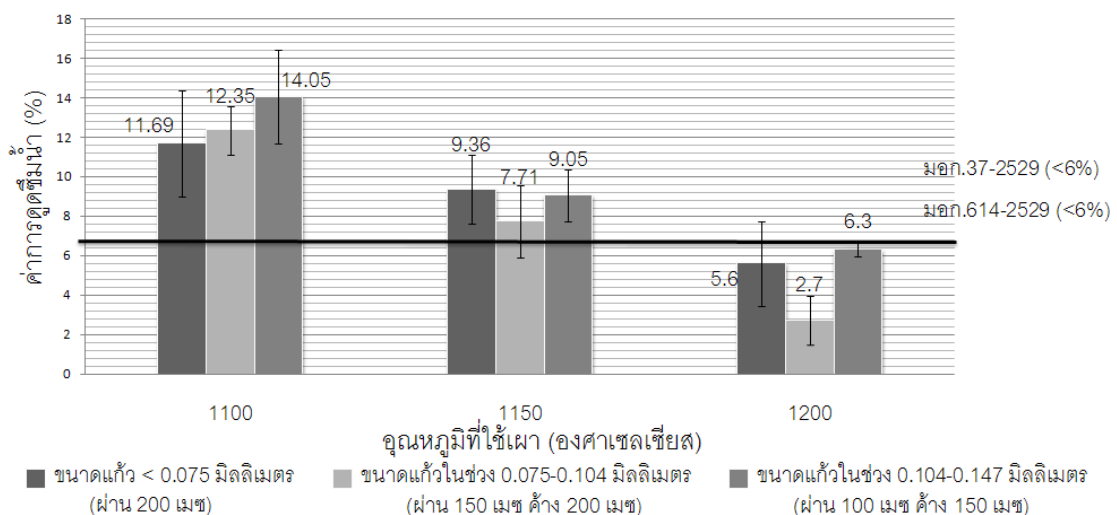
ภาพที่ 4.12 ค่ากำลังรับแรงดัดของกระเบื้องที่ผ่านการเตรียมเนื้อดินแบบแห้ง โดยใช้เศษแก้วขนาดต่างๆ ทดแทน

4.3.3 การทดสอบค่าการดูดซึมน้ำ (Water absorption test)

ผลการทดสอบการดูดซึมน้ำของกระเบื้องหลังเผาแสดงในภาพที่ 4.13 โดยอ้างอิงภายใต้มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมกระเบื้องดินเผาปูพื้น มอก.37-2529 และ มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมกระเบื้องดินเผาบุผนัง มอก.614-2529 ระบุค่าดูดซึมน้ำไม่เกินร้อยละ 6

จากผลการวิจัยพบว่า ที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส ค่าการดูดซึมน้ำผ่านมาตรฐานกระเบื้องดินเผาปูพื้น และมาตรฐานกระเบื้องดินเผาบุผนัง ที่ร้อยละ 5.6 และร้อยละ 2.7 เมื่อใช้

เศษแก้วขนาดเล็กกว่า 0.075 มิลลิเมตร และขนาดเศษแก้วในช่วง 0.075-0.104 มิลลิเมตร ตามลำดับ จากการวิเคราะห์ผลของการใช้เศษแก้วขนาดเล็กกว่า 0.075 มิลลิเมตร ที่กลับได้ค่าการดูดซึมน้ำสูงกว่าการใช้ขนาดเศษแก้วในช่วง 0.075-0.104 มิลลิเมตร เนื่องจาก เศษแก้วขนาดเล็กจะละเอียดกว่า จะทำให้วัสดุดิบเกิดการหลอมละลายได้ดีกว่า เมื่อพิจารณาภาพขยายที่ 4.5 จะสังเกตเห็นว่า สาเหตุดังกล่าวจะทำให้เกิดรูพรุนขึ้นมากด้วย ส่วนขนาดเศษแก้วในช่วง 0.104-0.147 มิลลิเมตร ได้ค่าการดูดซึมน้ำสูงเกินไป และไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐาน เนื่องจากเศษแก้วขนาดใหญ่ทำให้การหลอมละลายไม่ดี วัสดุดิบไม่หลอมรวมเป็นเนื้อเดียวกัน ทำให้มีช่องว่างระหว่างวัสดุดิบต่างๆ อยู่มาก เหตุผลเดียวกันนี้สามารถอธิบายผล ที่เกิดกับการเผาที่อุณหภูมิ 1150 และ 1100 องศาเซลเซียส อุณหภูมิดังกล่าว ทำให้ค่าดูดซึมน้ำของกระเบื้องไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐาน เนื่องจากการหลอมละลายเกิดขึ้นไม่มากพอ ไม่ว่าจะแทนด้วยเศษแก้วใดก็ตาม



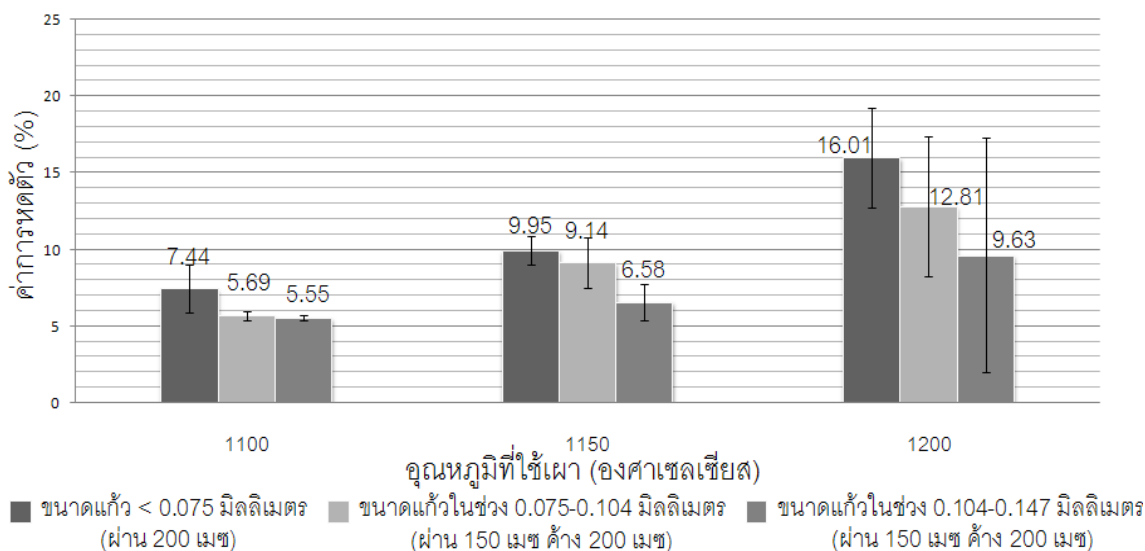
ภาพที่ 4.13 ค่าการดูดซึมน้ำของกระเบื้องที่ผ่านการเตรียมเนื้อดินแบบแห้ง โดยใช้เศษแก้วขนาดต่างๆ ทดแทน

4.3.4 การวิเคราะห์ค่าการหดตัว (Firing shrinkage test)

ค่าการหดตัวของกระเบื้องแสดงในภาพที่ 4.14 พิจารณาปริมาตร ของแผ่นกระเบื้อง ซึ่งเป็นการเปรียบเทียบก่อน และหลังเผาว่ามีการหดตัว หรือขยายตัวมากน้อยเพียงใด โดยคำนวณเป็นค่าร้อยละของการหดตัว

จากผลการวิจัย พบว่า เมื่อเปรียบเทียบขนาดเศษแก้วเดียวกัน ยังใช้อุณหภูมิในการเผาสูงขึ้น ค่าการหดตัวจะมีแนวโน้มสูงขึ้น เนื่องจากที่อุณหภูมิสูง วัสดุดิบหลอมละลายมากขึ้น จากลักษณะวัสดุดิบที่เป็นของแข็ง เปลี่ยนสภาพการเป็นของเหลวที่อุณหภูมิสูง ทำให้เกิดการหดตัว

ของตัวกระเบื้อง และเมื่อพิจารณาที่อุณหภูมิการเผาเดียวกัน พบว่า เศษแก้วขนาดละเอียดจะทำให้ค่าการหดตัวสูงกว่าขนาดเศษแก้วที่หยาบ เนื่องจากเศษแก้วขนาดละเอียด สามารถหลอมละลายได้ดีกว่าเศษแก้วขนาดหยาบ ซึ่งสามารถพิจารณาจากการเปรียบเทียบภาพขยาย ของการใช้เศษแก้วขนาดต่างๆ ในการผลิตกระเบื้องข้างต้น



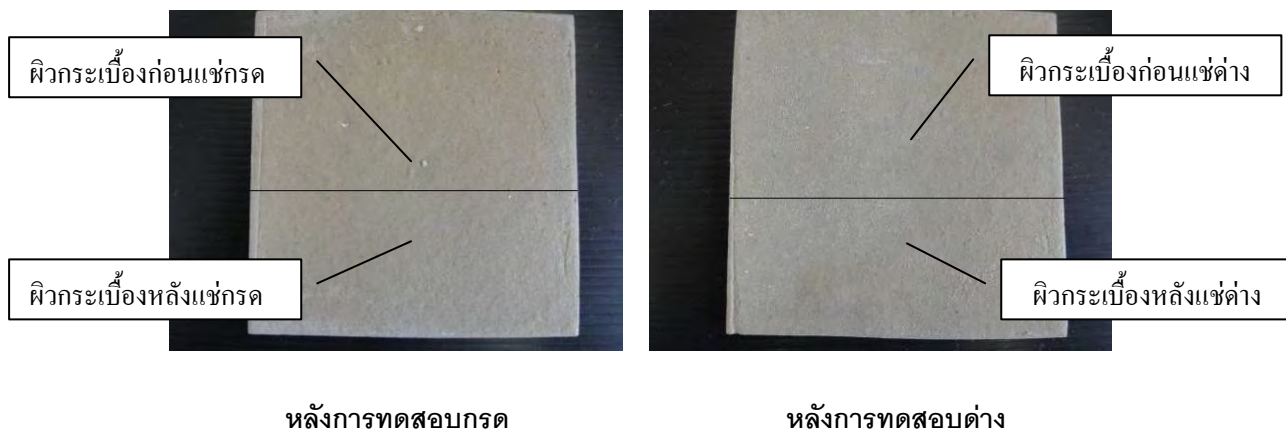
ภาพที่ 4.14 ค่าการหดตัวของกระเบื้องที่ผ่านการเตรียมเนื้อดินแบบแห้งโดยใช้เศษแก้วขนาดต่างๆ ทดแทน

4.3.5 การทดสอบการทนสารเคมี (Chemical durability test)

ผลการทดสอบการทนสารเคมีของกระเบื้องแสดงในตารางที่ 4.6 โดยอ้างอิงภายใต้มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมกระเบื้องดินเผาปูพื้น มอก.37-2529 และ มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมกระเบื้องดินเผาบุผนัง มอก.614-2529 ระบุกรณีผ่านการทดสอบ โดยพินิจผิวส่วนที่ทำการแช่ในกรด หรือด่าง ต้องไม่มีการเปลี่ยนแปลงในด้านลักษณะผิวของกระเบื้อง เมื่อเปรียบเทียบกับส่วนที่ไม่ได้แช่

ตารางที่ 4.6 ผลการทดสอบการทนสารเคมีของกระเบื้องที่ผ่านการเตรียมเนื้อดินแบบแห้ง โดยใช้เศษแก้วขนาดต่างๆ ทดแทน

ขนาดของเศษแก้ว (มิลลิเมตร)	อุณหภูมิที่ใช้ในการเผา (องศาเซลเซียส)		
	1100	1150	1200
<math>< 0.075</math> (ผ่าน 200 เมช)	ผ่าน	ผ่าน	ผ่าน
0.075-0.104 (ผ่าน 150 เมช ค้าง 200 เมช)	ผ่าน	ผ่าน	ผ่าน
0.104-0.147 (ผ่าน 100 เมช ค้าง 150 เมช)	ผ่าน	ผ่าน	ผ่าน



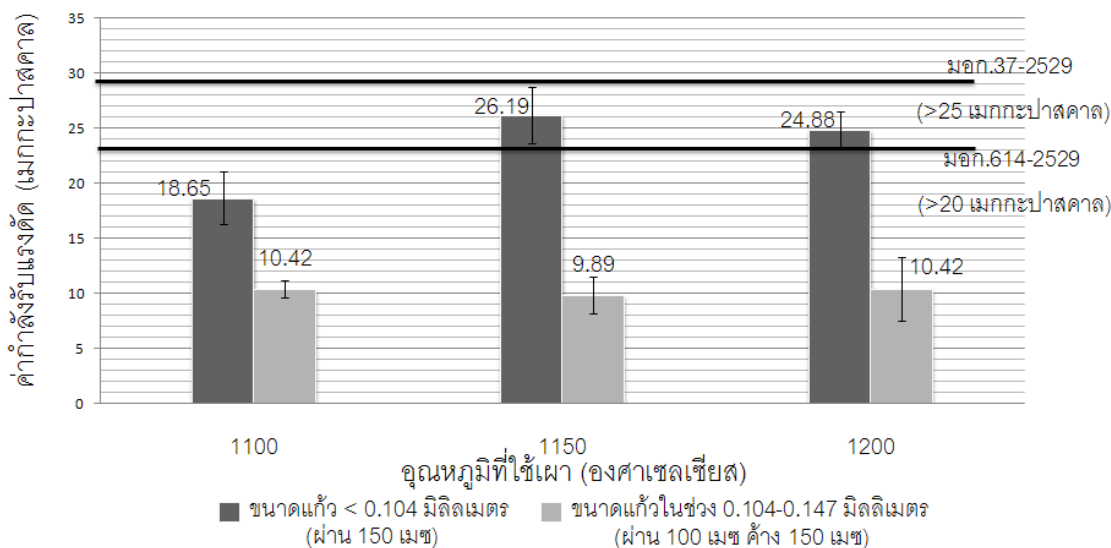
ภาพที่ 4.15 กระเบื้องที่ผ่านการทดสอบการทนกรด และด่าง (แสดงเฉพาะกระเบื้องที่ผ่านการเตรียมเนื้อดินแบบแห้ง โดยใช้เศษแก้วขนาด 0.075-0.104 เมลที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส)

4.4 ผลการพัฒนาสมบัติทางกายภาพของกระเบื้อง โดยเปลี่ยนกระบวนการผลิต กระเบื้องจาก แบบเตรียมเนื้อดินโดยการผสมแห้งเป็นแบบการผสมเปียก

จากการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางกายภาพ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงขนาดของเศษแก้วในการผลิตกระเบื้องเซรามิก พบว่าขนาดแก้วในช่วง 0.075-0.104 มิลลิเมตร เป็นขนาดที่สามารถนำมาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตกระเบื้องเซรามิก ได้สมบัติทางกายภาพใกล้เคียงกับเศษแก้วขนาดเล็กกว่า ดังนั้นในการศึกษาสมบัติทางกายภาพของกระเบื้องที่ได้จากการเตรียมเนื้อดินโดยการผสมเปียก จึงใช้ตัวแปรเศษแก้ว 2 ช่วงขนาด ได้แก่ ขนาดแก้วในช่วง 0.104-0.147 มิลลิเมตร และขนาดแก้วเล็กกว่า 0.104 มิลลิเมตร

4.4.1 การทดสอบค่ากำลังรับแรงดัดของกระเบื้อง (Bending strength test)

ผลการทดสอบสมบัติทางกายภาพของกระเบื้องหลังเผาแสดงในภาพที่ 4.16 โดยอ้างอิงภายใต้มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมกระเบื้องดินเผาปูพื้น มอก.37-2529 และ มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมกระเบื้องดินเผาบุผนัง มอก.614-2529 ระบุค่ากำลังรับแรงดัดไม่ต่ำกว่า 25 และ 20 เมกกะปาสคาล ตามลำดับ



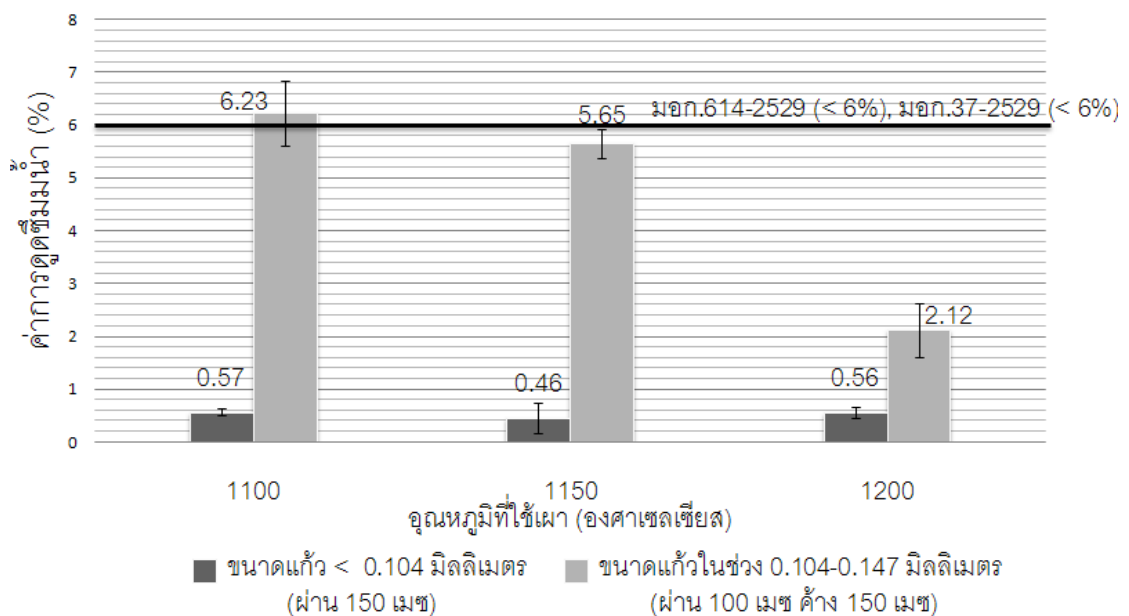
ภาพที่ 4.16 ค่ากำลังรับแรงดัดของกระเบื้องที่ผ่านการเตรียมเนื้อดินแบบเปียก โดยใช้เข็มขนาดต่างๆ ทดแทน

จากผลการวิจัย พบว่า ที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส ค่ากำลังรับแรงดัดผ่านมาตรฐานกระเบื้องดินเผาปูพื้น และมาตรฐานกระเบื้องดินเผาบุผนัง ที่ 26.19 เมกกะปาสคาล เมื่อใช้เข็มขนาดเล็กกว่า 0.104 มิลลิเมตร และที่อุณหภูมิ 1150 องศาเซลเซียส ค่ากำลังรับแรงดัดผ่านมาตรฐานกระเบื้องดินเผาบุผนัง ที่ 23.41 เมกกะปาสคาล เมื่อใช้เข็มขนาดเล็กกว่า 0.104 มิลลิเมตร จากการวิเคราะห์พบว่า การเตรียมเนื้อดินโดยการผสมเปียกส่งผลให้ค่ากำลังรับแรงดัดของกระเบื้องที่เผาที่อุณหภูมิ 1150 องศาเซลเซียสเพิ่มขึ้นจนผ่านเกณฑ์มาตรฐานกระเบื้องดินเผาบุผนัง เนื่องจาก การผสมเนื้อดินแบบเปียก สามารถทำให้การกระจายตัวของวัสดุดีขึ้นพิจารณาได้จาก ภาพขยายที่ 4.7 ส่งผลให้วัสดุมีการกระจายตัว และได้สัมผัสกับตัวหลอมละลายอย่างทั่วถึง ทำให้การหลอมละลายเป็นไปได้ดีขึ้น แต่อย่างไรก็ตาม อุณหภูมิการเผาที่ต่ำกว่า 1150 องศาเซลเซียส และการใช้เข็มขนาดเล็กที่หยาบกว่า 0.104 มิลลิเมตร ได้ค่ากำลังรับแรงดัดของกระเบื้องไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐาน เนื่องจาก อุณหภูมิที่ต่ำเกินไป หรือการใช้เข็มขนาดใหญ่เกินไป จะทำให้การหลอมละลายได้ไม่ดี สังเกตจากลักษณะวัสดุที่ยังเป็นก้อน ซึ่งสามารถพิจารณาจากภาพขยายที่ 4.8 และ 4.9

4.4.2 การทดสอบค่าการดูดซึมน้ำ (Water absorption test)

ผลการทดสอบการดูดซึมน้ำของกระเบื้องหลังเผาแสดงในภาพที่ 4.17 โดยอ้างอิงภายใต้มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมกระเบื้องดินเผาปูพื้น มอก.37-2529 และ มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมกระเบื้องดินเผาบุผนัง มอก.614-2529 ระบุค่าดูดซึมน้ำไม่เกินร้อยละ 6

จากผลการวิจัย พบว่า ที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส ค่าการดูดซึมน้ำผ่านมาตรฐานกระเบื้องดินเผาปูพื้น และมาตรฐานกระเบื้องดินเผาบุผนัง ที่ร้อยละ 0.56 เมื่อใช้เศษแก้วขนาดเล็กกว่า 0.104 มิลลิเมตร และที่อุณหภูมิ 1150 องศาเซลเซียส ค่าการดูดซึมน้ำผ่านมาตรฐานกระเบื้องดินเผาปูพื้น และมาตรฐานกระเบื้องดินเผาบุผนัง ที่ร้อยละ 0.46 เมื่อใช้เศษแก้วขนาดเล็กกว่า 0.104 มิลลิเมตร ซึ่งการเผาที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส มีค่าการดูดซึมน้ำสูงกว่าเล็กน้อย เนื่องจาก เกิดการหลอมละลายขึ้นมากกว่า และส่งผลให้เกิดรูพรุนขึ้นมากกว่าด้วย ส่วนขนาดเศษแก้วในช่วง 0.104-0.147 มิลลิเมตร ค่าการดูดซึมน้ำสูงขึ้น เนื่องจากการหลอมละลายรวมกันของเศษแก้วขนาดใหญ่กับวัตถุดิบต่างๆ ยังเป็นไปได้น้อยมากพอ และทำให้การดูดซึมน้ำระหว่างวัตถุดิบเกิดขึ้นน้อยลง แม้ผลจะผ่านเกณฑ์มาตรฐานการดูดซึมน้ำ ที่อุณหภูมิการเผา 1200 และ 1150 องศาเซลเซียส แต่อย่างไรก็ตามเมื่อค่ากำลังรับแรงดัดไม่ผ่านเกณฑ์ที่อุณหภูมิดังกล่าว ก็ถือว่ากระเบื้องไม่ได้มาตรฐาน

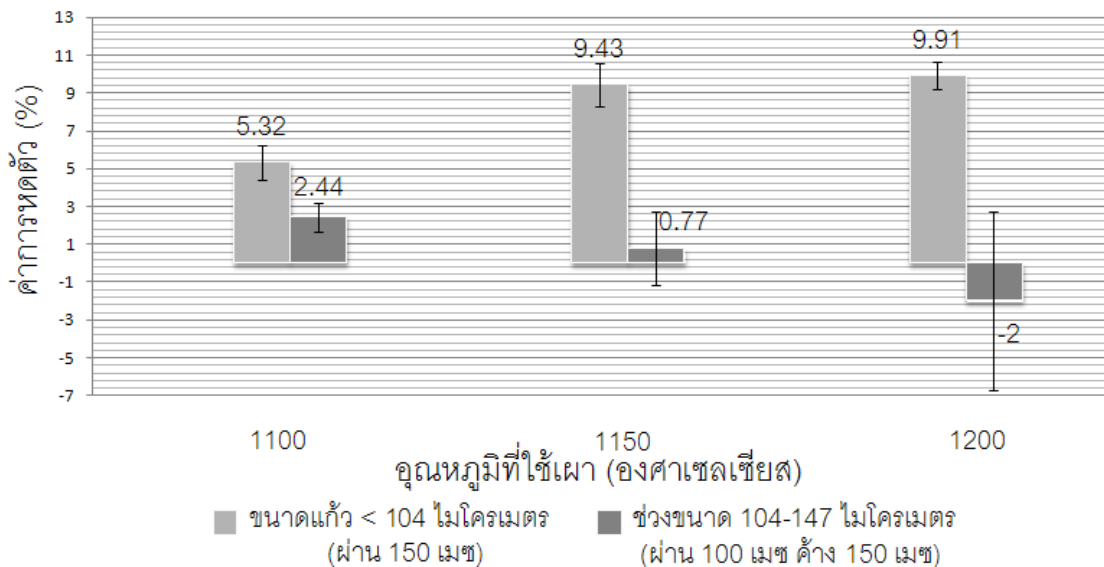


ภาพที่ 4.17 ค่าการดูดซึมน้ำของกระเบื้องผ่านการเตรียมเนื้อดินแบบ เปียก โดยใช้เศษแก้วขนาดต่างๆ ทดแทน

4.4.3 การวัดค่าการหดตัว (Firing shrinkage test)

ค่าการหดตัวของกระเบื้องแสดงในภาพที่ 4.18 พิจารณาปริมาณ ของแผ่นกระเบื้อง ซึ่งเป็นการเปรียบเทียบก่อน และหลังเผาว่ามีการหดตัว หรือขยายตัวมากน้อยเพียงใด โดยคำนวณเป็นค่าร้อยละของการหดตัว

จากผลการวิจัย พบว่า ยิ่งใช้อุณหภูมิในการเผาสูงขึ้น ค่าการหดตัวจะมีแนวโน้มสูงขึ้น เช่นเดียวกับการเตรียมเนื้อดินโดยการผสมแห้ง และเมื่อพิจารณาขนาดเศษแก้วที่ใช้ พบว่า เศษแก้วขนาดในช่วง 0.104-0.147 มิลลิเมตร (ขนาดหยาบ) ค่าการหดตัวร้อยละ -2 (ภาพที่ 4.18) หมายความว่าเนื้อกระเบื้องเริ่มมีการขยายตัวที่อุณหภูมิสูง แสดงถึงลักษณะของการเผากระเบื้องเกินจุดสุกตัว เป็นผลให้เนื้อผลิตภัณฑ์พองตัว และทำให้สมบัติทางกายภาพเริ่มผันกลับ นั่นคือ ค่ากำลังรับแรงดัดน้อยลง ค่าการดูดซึมน้ำเพิ่มขึ้น และเกิดการพองของเนื้อกระเบื้อง ซึ่งในหัวข้อการศึกษาอุณหภูมิสุกตัวของเนื้อกระเบื้อง จะมีผลวิจัยที่อธิบายปรากฏการณ์นี้ได้ชัดเจนมากขึ้น



ภาพที่ 4.18 ค่าการหดตัวของกระเบื้องผ่านการเตรียมเนื้อดินแบบเปียก โดยใช้เศษแก้วขนาดต่างๆทดแทน

4.4.4 การทดสอบการทนสารเคมี (Chemical durability test)

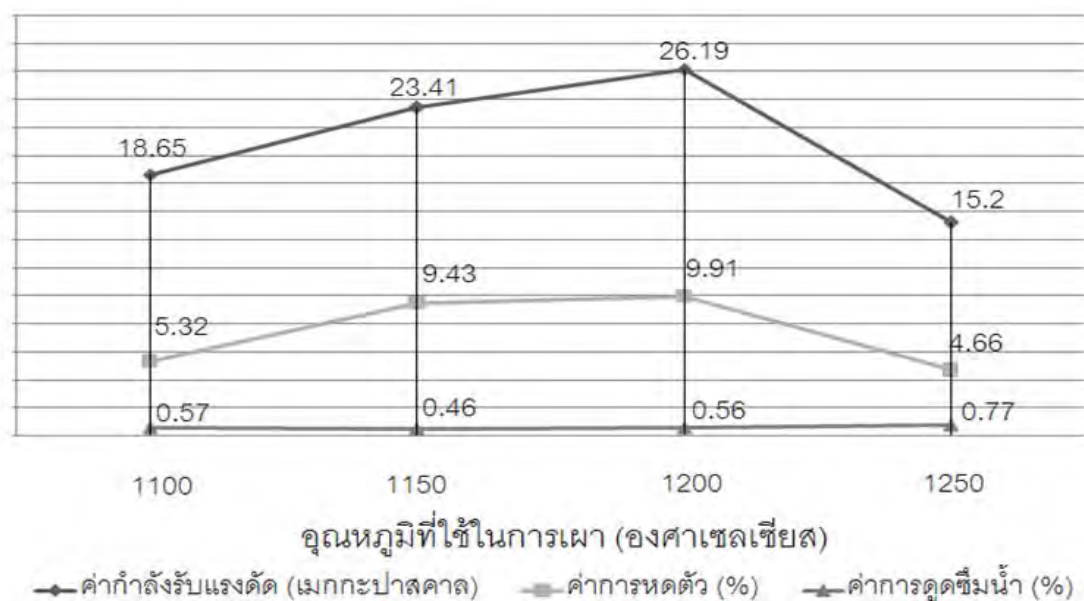
ผลการทดสอบการทนสารเคมีของกระเบื้อง ดังแสดงในตารางที่ 4.7 โดยอ้างอิงภายใต้มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมกระเบื้องดินเผาปูพื้น มอก.37-2529 และ มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมกระเบื้องดินเผาบุผนัง มอก.614-2529 ระบุกรณีผ่านการทดสอบ ผิวส่วนที่ทำการแช่ในกรด หรือด่าง ต้องไม่มีการเปลี่ยนแปลงเช่นกัน เมื่อเปรียบเทียบกับส่วนที่ไม่ได้แช่

ตารางที่ 4.7 ผลการทดสอบการทนสารเคมีของกระเบื้องที่ผ่านการเตรียมเนื้อดินแบบเปียก โดยใช้เศษแก้วขนาดต่างๆ ทดแทน

ขนาดของเศษแก้ว (มิลลิเมตร)	อุณหภูมิที่ใช้ในการเผา (องศาเซลเซียส)		
	1100	1150	1200
< 0.104 (ผ่าน 150 เมช)	ผ่าน	ผ่าน	ผ่าน
0.104-0.147 (ผ่าน 100 เมช ค้าง 150 เมช)	ผ่าน	ผ่าน	ผ่าน

4.5 การศึกษาหาอุณหภูมิสูงสุด (Firing Temperature) ของเนื้อกระเบื้อง

สมบัติต่างๆ ของผลิตภัณฑ์สำเร็จ จะมีค่าต่างกันไปตามสภาวะการเผา อุณหภูมิการเผา มีผลต่อสมบัติของผลิตภัณฑ์ กล่าวคือ เเผาที่อุณหภูมิสูง จะได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพสูง เช่น มีความแข็งแรงสูงกว่า ดูดซึมน้ำต่ำกว่า แสงส่องผ่านได้ดีกว่า เป็นต้น และเป็นที่ยอมรับกันดีว่า ถ้ามีเฟลด์สปาร์มากจุดสุกตัวก็จะต่ำลง ซึ่งในงานวิจัยได้ศึกษาช่วงสุกตัวของกระเบื้องที่ใช้เศษแก้วสีเขียวทดแทน แสดงไว้ในภาพที่ 4.19



ภาพที่ 4.19 อุณหภูมิช่วงสุกตัวของกระเบื้องผ่านการเตรียมเนื้อดินแบบเปียก โดยใช้เศษแก้วขนาดเล็กกว่า 0.104 มิลลิเมตร (ผ่าน 150 เมช) ทดแทน

พิจารณาผลการวิจัย พบว่าเมื่อเข้าสู่ช่วงอุณหภูมิสุกตัว ในช่วง 1150-1200 องศาเซลเซียส สมบัติทางกายภาพของกระเบื้องจะดีขึ้น เนื่องจากการเกิดเนื้อแก้วจะมีมากขึ้น เนื้อแก้วจะช่วยยึดจับผลึกต่างๆ ในเนื้อผลิตภัณฑ์ ทำให้ผลิตภัณฑ์มีความแข็งแรงขึ้น การดูดรูพรุนจะเป็นได้มากขึ้น ทำให้ผลิตภัณฑ์ดูดซึมน้ำได้น้อยลง แต่เมื่อเผาที่อุณหภูมิ 1250 องศาเซลเซียส จะได้สมบัติทาง

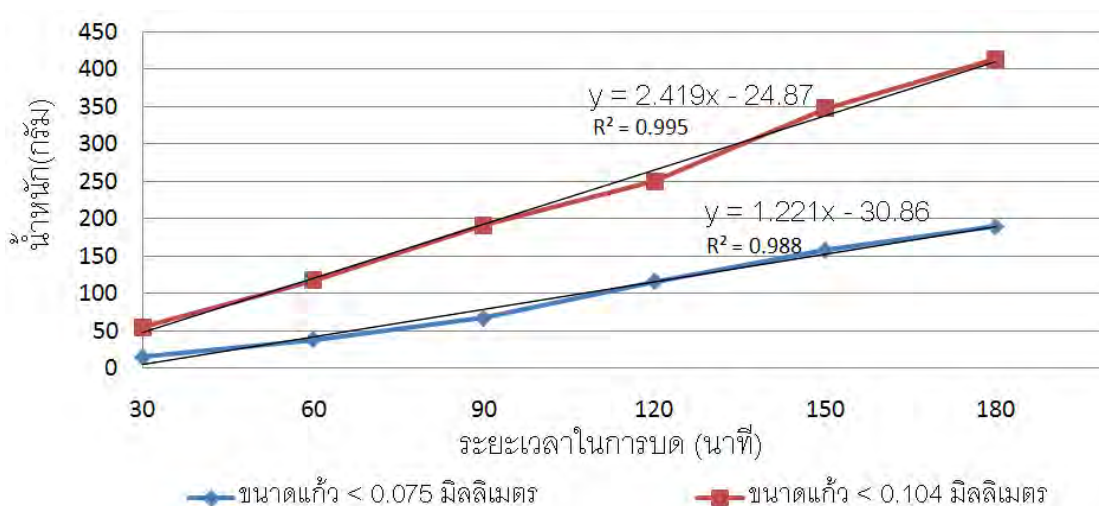
กายภาพผันกลับ นั่นคือ ความแข็งแรงน้อยลงเนื่องจากผลึกที่ให้ความแข็งแรงถูกหลอมละลาย การดูดซึมน้ำมากขึ้นเนื่องจากเกิดการไต่ฟองแก๊สมากขึ้นทำให้เกิดรูพรุน และเริ่มมีการพอง หรือขยายตัวเนื่องจากการเดือดของตัวหลอมละลาย ซึ่งในที่นี้คือ เศษแก้ว (Tucci และคณะ, 2004)

4.6 การประเมินความคุ้มค่าจากผลงานวิจัย

ในการบดเศษแก้วในงานวิจัย ใช้เครื่องบดขนาดเล็ก บดเศษแก้วขนาด 4 มิลลิเมตร ปริมาณ 1.5 กิโลกรัมต่อการบดหนึ่งครั้ง ได้ปริมาณเศษแก้วขนาดต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.8 ปริมาณเศษแก้วผ่านการคัดขนาด หลังจากผ่านการบดด้วยระยะเวลาต่างๆ

เวลาที่ใช้บด (นาที)	น้ำหนักเศษแก้ว (กรัม)		
	ขนาดแก้วเล็กกว่า 0.075 มิลลิเมตร (ผ่าน 200 เมช)	ขนาดแก้วในช่วง 0.075-0.104 มิลลิเมตร (ผ่าน 150 เมช ค้าง 200 เมช)	ขนาดแก้วเล็กกว่า 0.104 มิลลิเมตร (ผ่าน 150 เมช)
30	15.4	39.7	55.1
60	37.76	79.98	117.7
90	67.38	123.67	191.1
120	115.55	134.5	250.1
150	158.2	189.6	347.8
180	190	223.4	413.4



ภาพที่ 4.20 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาในการบด กับปริมาณเศษแก้ว ขนาดต่างๆ ที่ได้ ของเครื่องบดขนาดเล็กในงานวิจัย

จากสมการของการอบที่แสดงใน ภาพที่ 4.20 ใช้ในการประเมินความคุ้มค่าของผลงานวิจัย เมื่อ สามารถใช้เศษแก้วขนาดเล็กกว่า 0.104 มิลลิเมตร (ผ่าน 150 เมช) แทนเศษแก้วขนาดเล็กกว่า 0.075 มิลลิเมตร (ผ่าน 200 เมช) ได้ เนื่องจากในการอบเศษแก้วขนาดเล็กกว่า 0.104 มิลลิเมตร ให้ได้ปริมาณ 200 กรัม ใช้เวลาน้อยกว่าการอบเศษแก้วขนาดเล็กกว่า 0.075 มิลลิเมตร ให้ได้ปริมาณ 200 กรัม ซึ่งสามารถพิจารณาการคำนวณได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \text{อัตรากำลังไฟฟ้าของเครื่องอบ (1.50 กิโลวัตต์)} &= 4.5 \text{ บาท/ชั่วโมง} \\ \text{อัตราการใช้เศษแก้ว ต่อการผลิตกระเบื้อง 5 แผ่น} &= 200 \text{ กรัม} \end{aligned}$$

การคำนวณ

$$\begin{aligned} \text{เศษแก้วขนาด เล็กกว่า 0.075 มิลลิเมตร ใช้เวลาอบ} &= (200+30.86)/1.221 \\ &= 189.07 \text{ นาที หรือ } 3.15 \text{ ชั่วโมง} \\ \text{คิดเป็นค่าใช้จ่ายกำลังไฟฟ้าในการอบ} &= 14.2 \text{ บาท} \\ \text{เศษแก้วขนาด เล็กกว่า 0.104 มิลลิเมตร ใช้เวลาอบ} &= (200+24.87)/2.419 \\ &= 92.96 \text{ นาที หรือ } 1.55 \text{ ชั่วโมง} \\ \text{คิดเป็นค่าใช้จ่ายกำลังไฟฟ้าในการอบ} &= 6.97 \text{ บาท} \end{aligned}$$

ซึ่งจากงานวิจัยเก่าใช้เศษแก้วขนาดเล็กกว่า 0.075 ไมโครเมตร (ผ่าน 200 เมช) เท่านั้น ในการผลิตกระเบื้องเซรามิก (เพ็ชรพร เซวากิจเจริญ และ วิวรรณ เทียนศิริ, 2548) ดังนั้น ในงานวิจัยนี้สามารถใช้เศษแก้วขนาดเล็กกว่า 0.104 มิลลิเมตร ในการผลิตกระเบื้องเซรามิก จึงสามารถลดต้นทุนเฉพาะค่ากำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการอบประมาณ 7 บาทต่อการผลิตกระเบื้อง 5 แผ่น

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

สรุปผลการวิจัย

จากผลการวิจัย เรื่อง ผลของขนาดของเสียประเภทแก้วที่ใช้ทดแทนแร่เฟลด์สปาร์ในการผลิตกระเบื้องเซรามิก โดยนำของเสียประเภทแก้วสีเขียวจากโรงงานบางกอกกล๊าส มาคัดหาขนาดที่เหมาะสม ผสมกับดินดำ และทรายแก้ว จากนั้นผ่านกระบวนการผลิตกระเบื้องเซรามิก ที่มีการศึกษารูปแบบการผสมเนื้อดินทั้งแบบแห้ง และแบบเปียกร่วมด้วย สามารถสรุปผลการวิจัย ได้ดังนี้

1. พิจารณา สมบัติด้านกำลังรับแรงดัด ค่าการดูดซึมน้ำ ค่าการหดตัว และความทนสารเคมี ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมกระเบื้อง จากการผสมเนื้อดินแบบแห้ง พบว่า กระเบื้องที่แทนด้วยเศษแก้วขนาดเล็กกว่า 0.075 มิลลิเมตร และขนาดในช่วง 0.075-0.104 มิลลิเมตร เผาที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส สามารถผลิตกระเบื้องเซรามิกที่ผ่านมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมกระเบื้องดินเผาปูพื้น มอก.37-2529 และมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมกระเบื้องดินเผาผนัง มอก.614-2529

2. พิจารณาสมบัติด้านกำลังรับแรงดัด ค่าการดูดซึมน้ำ ค่าการหดตัว และความทนสารเคมี ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมกระเบื้อง จากการผสมเนื้อดินแบบเปียก พบว่า กระเบื้องที่แทนด้วยเศษแก้วขนาดเล็กกว่า 0.104 มิลลิเมตร ผ่านการผสมเนื้อดินแบบเปียก เผาที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียสสามารถผลิตกระเบื้องเซรามิกที่ผ่านมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมกระเบื้องดินเผาปูพื้น มอก.37-2529 ส่วนกระเบื้องที่แทนด้วยเศษแก้วขนาดเล็กกว่า 0.104 มิลลิเมตร เผาที่อุณหภูมิ 1150 องศาเซลเซียสสามารถผลิตกระเบื้องเซรามิกที่ผ่านมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมกระเบื้องดินเผาผนัง มอก.614-2529

3. สภาพที่เหมาะสมที่สุดสำหรับในงานวิจัยนี้ คือการทดแทนด้วยเศษแก้วขนาดเล็กกว่า 0.104 มิลลิเมตร ผ่านการผสมเนื้อดินแบบเปียก เผาที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียสสามารถผลิตกระเบื้องที่มีค่ากำลังรับแรงดัด 26.19 เมกกะปาสคาล ค่าดูดซึมน้ำร้อยละ 0.56 ค่าการหดตัวร้อยละ 9.91 และผ่านการทดสอบการทนสารเคมี ผ่านมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมกระเบื้องดินเผาปูพื้น มอก.37-2529 ส่วนกระเบื้องที่แทนด้วยเศษแก้วขนาดเล็กกว่า 0.104 มิลลิเมตร ผ่านการผสมเนื้อดินแบบเปียก เผาที่อุณหภูมิ 1150 องศาเซลเซียสสามารถผลิตกระเบื้อง ที่มีค่ากำลังรับแรงดัด 23.41 เมกกะปาสคาล ค่าดูดซึมน้ำร้อยละ 0.46 ค่าการหดตัวร้อยละ 9.43 และผ่านการทดสอบการทนสารเคมีผ่านมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมกระเบื้องดินเผาผนัง มอก.614-2529

4. ผลการตรวจสอบเฟส พบว่ากระเบื้องหลังเผาเกิดเฟสประกอบที่สำคัญ คือ ควอตซ์ (Quartz, SiO_2) และคริสโตบัลไลท์ (Cristobalite, SiO_2) ซึ่งเป็นเฟสเบื้องต้นของการเกิดเฟสมัลไลท์ (Mullite, $3\text{AlO}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$)

5. ผลการศึกษาจุดสุกตัวของกระเบื้องที่ทดแทนแร่เฟลด์สปาร์ด้วยเศษแก้วขนาดเล็กกว่า 0.104 มิลลิเมตร ผ่านการผสมเนื้อดินแบบเปียก พบว่า มีช่วงสุกตัวอยู่ประมาณ 1150-1200 องศาเซลเซียส ส่วนที่อุณหภูมิ 1250 องศาเซลเซียส เป็นอุณหภูมิที่กระเบื้องเริ่มเกินจุดสุกตัวทำให้มีความแข็งแรงน้อยลง มีการดูดซึมน้ำมากขึ้น และเริ่มมีการบวมพอง

6. การประเมินความคุ้มค่าสำหรับผลที่ได้จากงานวิจัย พบว่า ในการบดเศษแก้วเพื่อนำมาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตกระเบื้องเซรามิก โดยบดให้ละเอียดเล็กกว่า 0.075 มิลลิเมตร ต้องเสียเวลาในการบดประมาณ 3 ชั่วโมง คิดเป็นค่าใช้จ่ายที่สูญเสียไปกับกำลังไฟฟ้า 14.2 บาทต่อกระเบื้อง 5 แผ่น ในขณะที่การบดให้ละเอียดเล็กกว่า 0.104 มิลลิเมตร เสียเวลาในการบดประมาณ 1.5 ชั่วโมง คิดเป็นค่าใช้จ่ายที่สูญเสียไปกับกำลังไฟฟ้า 6.97 บาทต่อกระเบื้อง 5 แผ่น แสดงว่า สามารถลดค่าใช้จ่ายในการบดลงได้มากกว่าครึ่งหนึ่งของค่าใช้จ่ายเดิม

ข้อเสนอแนะ

จากการวิจัย เรื่อง ผลของขนาดของเสียประเภทแก้วที่ใช้ทดแทนแร่เฟลด์สปาร์ในการผลิตกระเบื้องเซรามิก พบว่าควรเพิ่มเติมงานวิจัย ดังนี้

1. การนำเศษแก้วสีเขียวมาทดแทนแร่เฟลด์สปาร์ ส่งผลให้ปริมาณอะลูมินา และซิลิกา มีค่าลดลง และปริมาณโซเดียมออกไซด์ และแคลเซียมออกไซด์ มีค่าเพิ่มมากขึ้น ซึ่งองค์ประกอบทั้งหมดมีความสัมพันธ์กับสมบัติทางกายภาพของกระเบื้อง และการเกิดผลึกมัลไลท์ ดังนั้นจึงควรปรับสัดส่วนองค์ประกอบทางเคมีให้เหมาะสม โดยอาจเพิ่มของเสียประเภท กากอะลูมินา-ซิลิกา ไม่ใช่แล้วเป็นวัตถุดิบทดแทนควบคู่กับการใช้เศษแก้วสีเขียว

2. การผลิตกระเบื้องเซรามิก ที่ใช้วัตถุดิบประเภทของเสีย ทดแทนวัตถุดิบหลัก นอกจากการตรวจสอบสมบัติความแข็งแรงคงทนของกระเบื้องแล้ว ควรเพิ่มเติมการวัดความบิดเบี้ยวหลังเผาของผลิตภัณฑ์ เนื่องจากการเผาที่อุณหภูมิสูงเกินไป จะทำให้กระเบื้องขยาย หรือยุบตัว เป็นลักษณะของกระเบื้องที่เผาเกินจุดสุกตัว

3. การหาวัตถุดิบทดแทนวัตถุดิบหลัก โดยเฉพาะการใช้วัตถุดิบทดแทนที่เป็นของเสียไม่ใช่แล้วนั้น เป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับขยะ และยังเป็นการอนุรักษ์สิ่งแวดล้อมทางหนึ่ง ดังนั้นจึงควรศึกษาหาวัตถุดิบทดแทนเพิ่มเติม เช่น กากตะกอนในระบบบำบัดน้ำเสีย อาจสามารถนำมาทดแทนในส่วน of เนื้อดินที่ใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตกระเบื้องเซรามิก เนื่องจาก ดินตะกอนมีลักษณะทางกายภาพ และทางเคมี คล้ายคลึงกับ ดินดำที่ใช้ในงานวิจัย

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

- กรมทรัพยากรธรณี, กองธรณีวิทยา คณะอนุกรรมการฝ่ายเอกสารข้อมูล, 2544. การสัมมนาเรื่อง เซรามิกและแก้วของไทย วัตถุประสงค์และแนวทางการพัฒนา. เอกสารเผยแพร่เศรษฐกิจ ธรณีวิทยา.
- ปรีดา พิมพ์ขาวขำ. 2547. เซรามิกส์ พิมพ์ครั้งที่ 5. ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- เพชรพร เซาวกิจเจริญ, ชดชนก อัทธพงษ์ อลิสสา วิเชียรเจริญ และอัจฉราภรณ์ พรหมบุตร. การใช้ของเสียที่เป็นแก้วทดแทนแร่เฟลด์สปาร์ในการผลิตกระเบื้องเซรามิก. วารสารวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมไทย สมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย 20. (มกราคม-เมษายน 2549): 39-47.
- เพชรพร เซาวกิจเจริญ และ วิวรรธน์ เทียนศิริ. การใช้ของเสียที่เป็นแก้วเป็นวัตถุดิบในการผลิตกระเบื้องเซรามิก. วารสารวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมไทย สมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย 19. (มกราคม-เมษายน 2548): 103-112.
- ไพจิตร อิงศิริวัฒน์. 2541. เนื้อดินเซรามิก. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์โอเดียนสโตร์.
- ปาร්ය อรรถพิศาล. 2548. การพัฒนาคุณภาพของกระเบื้องเซรามิกที่ผลิตจากของเสียที่เป็นแก้ว. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ปัทมา แจ้งกระจ่าง และ สุทธิมา ศรีประเสริฐสุข. 2551. การใช้เศษแก้วเข้ามาแทนที่หินฟันม้าในผลิตภัณฑ์อิเทรียสไซนา โดยการหล่อแบบ. โครงการการเรียนการสอนเพื่อเสริมประสบการณ์. คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- วรรณดา ต.แสงจันทร์. เทคโนโลยีการทำกระเบื้องประดับตกแต่งจากแก้ว. วารสารกรมวิทยาศาสตร์บริการ 55. (กันยายน 2550): 47-60
- สาโรจน์ ปัสโชติพงษ์. 2545. การนำซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วมาใช้ประโยชน์เป็นตัวทนไฟในการทำเซรามิก. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- สำนักนโยบายอุตสาหกรรมรายสาขา 2. 2547. อุตสาหกรรมเซรามิก. แหล่งที่มา : www.oie.go.th/industrystatus2/96.doc. [12/4/52]

สำนักงานเศรษฐกิจอุตสาหกรรม. 2552. สรุปภาวะเศรษฐกิจอุตสาหกรรมไทยปี 2552 และแนวโน้มปี 2553. แหล่งที่มา : [http://www.ryt9.com/s/oie/780761.\[18/4/53\]](http://www.ryt9.com/s/oie/780761.[18/4/53])

อุตสาหกรรม, กระทรวง. 2529. มาตรฐานกระทรวงอุตสาหกรรม 37-2529 (พ.ศ. 2529). กำหนดมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมกระบี่องดินเผาปูพื้น.

อุตสาหกรรม, กระทรวง. 2529. มาตรฐานกระทรวงอุตสาหกรรม 614-2529 (พ.ศ. 2529). กำหนดมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมกระบี่องดินเผาบุผนัง.

ภาษาอังกฤษ

- Brow, R. K., and Schmitt, M. L. 2008. A survey of energy and environmental applications of glass. Journal of European Ceramic Society.
- Bernardo, E., Doyle, J., and Hampshire, S. 2008. Sintered feldspar glass–ceramics and glass–ceramic matrix composites. Ceramic International. 34: 2037-2042.
- Huan, M.J. 2000. Energy Saving Method of Manufacturing Ceramic Product from Waste Glass. Glass Project Fact Sheet. Available From: <http://www.osti.gov/bridge/servlets/purl/850486-dxScR0/850486.pdf> [2008, November 20].
- Huan, M.J. 2002. Energy Saving Method of Manufacturing Ceramic Product from Fiber Glass Waste. Information Bridge:DOE Scientific and Technical Information Available From : <http://www.nrel.gov/docs/fy01osti/28261.pdf> [2008,November 20].
- Ismail, Z. Z., and Al-hashmi, E. A. 2008. Recycle of waste glass as a partial replacement for fine aggregate in concrete. Waste management.
- Luz, A.P. ,and Ribeiro, S. 2007. Use of glass waste as raw material in porcelain stoneware tile mixtures. Ceramic International, 33: 761-765.
- Niemela, M. 1995. Tiles from Waste Materials. Research Material Sciences and Production Techniques. University of Art and Design Helsinki (UIAH).
- Rambaldi, E., Esposito, L., Tucci, A. ,and Timellini, G. 2007. Recycling of polishing porcelain stoneware residues in ceramic tiles. Journal of the European Ceramic Society. 27:3509-3515.
- Schneider, H., Schreuer, J. ,and Hildmann, B. 2008. Structure and properties of mullite. Journal of the European Ceramic Society. 28:329-344.
- Schneider, H., and Komarneni, S. 2007. Mullite. Germany : Strauss GmbH, Morlenbach.
- Wei, M.S., and Huang, H.K. 2001. Recycling and reuse of industrial waste in Taiwan. Waste Management. 21:93-97.
- Tucci, A., Esposito, L., Rastelli, E., Palmonari, C. ,and Rambaldi, E. 2004. Use of so lime scrap glass as a fluxing agent in a porcelain stoneware tile mix. Journal of the European Ceramic Society. 24:83-92

บรรณานุกรม

ภาษาอังกฤษ

- Alvarez-Mendez, A., Torres-Gonzalez, L. C., Alvarez, N., and Torres-Martinez, L. M. 2003. Kinetic thermal analysis of glass ceramics from industrial wastes. Journal of Non-Crystalline Solids. 329:73-76.
- Bacon, D.H., and McGrail, B. P. 2003 Lessons learned from reactive transport modeling of a low-activity wastes glass disposal system. Computer & Geosciences. 29:361-370.
- Bernardo, E. 2008. Fast sinter-crystallization of glass from waste materials. Journal of Non-Crystalline Solids. 354:3486-3490.
- Francisco, J.T., Esther, R.S., and Javier, A. 2005. Effect of boron oxide on the microstructure of mullite-based glass-ceramic glazes for floor-tiles in the CaO-MgO-Al₂O₃-SiO₂ system. Journal of European Ceramic Society. 26:2285-2292.
- Romero, M., Rincon, J. M., and Acosta, A. 2003. Crystallisation of zirconium-based glaze for ceramic tile coating. Journal of European Ceramic Society. 23:1629-1635.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

ข้อมูลผลการทดสอบกระเบื้องเซรามิกหลังการเผา

ตารางที่ ๗1 ค่ากำลังรับแรงดัดของกระเบื้องที่ทดแทนด้วยเศษแก้วขนาดต่างๆ ผ่านกระบวนการผสมวัสดุดิบแบบแห้ง เเผที่ 1100 องศาเซลเซียส

ขนาดเศษแก้ว < 75 ไมโครเมตร							
แผ่นที่	W (กก.)	ความกว้าง (ซม.)	ความหนา (ซม.)	ระยะห่างจุดรองรับ (ซม.)	กำลังรับแรงดัด (กก./ซม. ²)	กำลังรับแรงดัด (เมกกะปาสคาล)	เฉลี่ย
1	17.57	10.21	0.55	9.00	76.80	7.68	6.96 ± 1.01
2	15.38	10.18	0.54	9.00	69.94	6.99	
3	16.37	10.19	0.54	9.00	74.37	7.44	
4	11.17	10.20	0.53	9.00	52.63	5.26	
5	16.11	10.18	0.53	9.00	76.06	7.61	
ขนาดเศษแก้ว < 104 ไมโครเมตร							
แผ่นที่	W (กก.)	ความกว้าง (ซม.)	ความหนา (ซม.)	ระยะห่างจุดรองรับ (ซม.)	กำลังรับแรงดัด (กก./ซม. ²)	กำลังรับแรงดัด (เมกกะปาสคาล)	เฉลี่ย
1	18.91	10.25	0.57	9.00	76.66	7.67	7.65 ± 0.97
2	14.89	10.24	0.54	9.00	67.32	6.73	
3	18.67	10.24	0.54	9.00	84.41	8.44	
4	15.26	10.25	0.55	9.00	66.44	6.64	
5	17.93	10.20	0.52	9.00	87.76	8.78	
ขนาดเศษแก้ว < 147 ไมโครเมตร							
แผ่นที่	W (กก.)	ความกว้าง (ซม.)	ความหนา (ซม.)	ระยะห่างจุดรองรับ (ซม.)	กำลังรับแรงดัด (กก./ซม. ²)	กำลังรับแรงดัด (เมกกะปาสคาล)	เฉลี่ย
1	11.85	10.25	0.53	9.00	55.56	5.56	5.56 ± 0.64
2	12.31	10.24	0.53	9.00	57.78	5.78	
3	14.08	10.32	0.61	9.00	49.50	4.95	
4	14.08	10.26	0.61	9.00	49.79	4.98	
5	12.35	10.24	0.50	9.00	65.13	6.51	

W = น้ำหนักที่กดจนแผ่นกระเบื้องหัก (กิโลกรัม)

ตารางที่ ๒2 ค่ากำลังรับแรงดัด ของกระเบื้องที่ทดแทนด้วยเศษแก้วขนาดต่างๆ ผ่านกระบวนการผสมวัสดุดิบแบบแห้ง เเผที่ 1150 องศาเซลเซียส

ขนาดเศษแก้ว < 75 ไมโครเมตร							
แผ่นที่	W (กก.)	ความกว้าง (ซม.)	ความหนา (ซม.)	ระยะห่างจุดรองรับ (ซม.)	กำลังรับแรงดัด (กก./ซม. ²)	กำลังรับแรงดัด (เมกกะปาสคาล)	เฉลี่ย
1	15.05	10.10	0.47	9.00	91.07	9.11	7.89 ± 1.33
2	14.26	10.10	0.56	9.00	60.78	6.08	
3	19.78	9.96	0.55	9.00	88.63	8.86	
4	13.38	10.10	0.51	9.00	68.76	6.88	
5	18.48	10.04	0.54	9.00	85.21	8.52	
ขนาดเศษแก้ว < 104 ไมโครเมตร							
แผ่นที่	W (กก.)	ความกว้าง (ซม.)	ความหนา (ซม.)	ระยะห่างจุดรองรับ (ซม.)	กำลังรับแรงดัด (กก./ซม. ²)	กำลังรับแรงดัด (เมกกะปาสคาล)	เฉลี่ย
1	10.88	10.07	0.52	9.00	53.94	5.39	7.91 ± 2.16
2	20.83	10.13	0.50	9.00	111.04	11.10	
3	17.12	10.03	0.51	9.00	88.59	8.86	
4	13.18	10.08	0.50	9.00	70.61	7.06	
5	10.34	10.09	0.44	9.00	71.46	7.15	
ขนาดเศษแก้ว < 147 ไมโครเมตร							
แผ่นที่	W (กก.)	ความกว้าง (ซม.)	ความหนา (ซม.)	ระยะห่างจุดรองรับ (ซม.)	กำลังรับแรงดัด (กก./ซม. ²)	กำลังรับแรงดัด (เมกกะปาสคาล)	เฉลี่ย
1	13.31	10.17	0.55	9.00	58.41	5.84	5.95 ± 0.88
2	15.07	10.20	0.56	9.00	63.60	6.36	
3	11.28	10.24	0.53	9.00	52.94	5.29	
4	9.09	10.16	0.49	9.00	50.31	5.03	
5	16.54	10.20	0.55	9.00	72.37	7.24	

ตารางที่ ๓3 ค่ากำลังรับแรงดัดของกระเบื้องที่ทดแทนด้วยเศษแก้วขนาดต่างๆ ผ่านกระบวนการผสมวัสดุดิบแบบแห้ง เเผที่ 1200 องศาเซลเซียส

ขนาดเศษแก้ว < 75 ไมโครเมตร							
แผ่นที่	W (กก.)	ความกว้าง (ซม.)	ความหนา (ซม.)	ระยะห่างจุดรองรับ (ซม.)	กำลังรับแรงดัด (กก./ซม. ²)	กำลังรับแรงดัด (เมกกะปาสคาล)	เฉลี่ย
1	63.90	9.72	0.57	8.00	242.81	24.28	25.24 ± 1.15
2	63.53	9.86	0.57	8.00	236.30	23.79	
3	66.17	9.90	0.56	8.00	255.76	25.58	
4	72.02	9.75	0.58	8.00	263.50	26.35	
5	65.98	9.87	0.55	8.00	265.18	26.18	
ขนาดเศษแก้ว < 104 ไมโครเมตร							
แผ่นที่	W (กก.)	ความกว้าง (ซม.)	ความหนา (ซม.)	ระยะห่างจุดรองรับ (ซม.)	กำลังรับแรงดัด (กก./ซม. ²)	กำลังรับแรงดัด (เมกกะปาสคาล)	เฉลี่ย
1	69.94	9.95	0.54	8	289.27	28.93	26.74 ± 2.29
2	65.76	9.78	0.53	8	287.24	28.72	
3	67.04	10.06	0.54	8	274.24	27.42	
4	62.34	9.94	0.56	8	239.99	24.00	
5	73.32	9.92	0.6	8	246.37	24.64	
ขนาดเศษแก้ว < 147 ไมโครเมตร							
แผ่นที่	W (กก.)	ความกว้าง (ซม.)	ความหนา (ซม.)	ระยะห่างจุดรองรับ (ซม.)	กำลังรับแรงดัด (กก./ซม. ²)	กำลังรับแรงดัด (เมกกะปาสคาล)	เฉลี่ย
1	16.32	10.08	0.59	9.00	62.78	6.28	8.38 ± 1.52
2	20.26	10.20	0.55	8.00	78.79	7.88	
3	21.82	10.05	0.60	9.00	81.40	8.14	
4	28.48	10.10	0.64	9.00	92.92	9.29	
5	24.57	10.2	0.56	9.00	103.70	10.3	

ตารางที่ ๔4 ค่าการดูดซึมน้ำของกระเบื้องที่ทดแทนด้วยเศษแก้วขนาดต่างๆ ผ่านกระบวนการผสม
วัตถุดิบแบบแห้ง เเผที่ 1100 องศาเซลเซียส

ขนาดเศษแก้ว < 75 ไมโครเมตร (ผ่าน 200 เมช)			
น้ำหนักก่อนทดสอบ(กรัม)	น้ำหนักหลังทดสอบ(กรัม)	ค่าการดูดซึมน้ำ(%)	เฉลี่ย
100.9	112.7	11.69	11.69 ± 2.7
96.7	108.2	11.89	
98.2	107.5	9.47	
102.7	112.3	9.35	
99.8	115.8	16.03	
ขนาดเศษแก้ว < 104 ไมโครเมตร (ผ่าน 150 เมช)			
น้ำหนักก่อนทดสอบ(กรัม)	น้ำหนักหลังทดสอบ(กรัม)	ค่าการดูดซึมน้ำ(%)	เฉลี่ย
108.1	120.2	11.19	12.35 ± 1.22
106.9	119.1	11.41	
100.5	114.7	14.13	
112.7	126.2	11.98	
103.7	117.2	13.02	
ขนาดเศษแก้ว < 147 ไมโครเมตร (ผ่าน 100 เมช)			
น้ำหนักก่อนทดสอบ(กรัม)	น้ำหนักหลังทดสอบ(กรัม)	ค่าการดูดซึมน้ำ(%)	เฉลี่ย
110.1	127.9	16.17	14.05 ± 2.35
115.8	130.1	12.35	
114.6	130.6	13.96	
118.2	131.4	11.17	
99.5	116	16.58	

ตารางที่ ๗5 ค่าการดูดซึมน้ำของกระเบื้องที่ทดแทนด้วยเศษแก้วขนาดต่างๆ ผ่านกระบวนการผสม
วัตถุดิบแบบแห้ง เเผที่ 1150 องศาเซลเซียส

ขนาดเศษแก้ว < 75 ไมโครเมตร (ผ่าน 200 เมช)			
น้ำหนักก่อนทดสอบ(กรัม)	น้ำหนักหลังทดสอบ(กรัม)	ค่าการดูดซึมน้ำ(%)	เฉลี่ย
101.6	110.5	8.76	9.36 ± 1.75
102.3	113	10.46	
109.3	117.1	7.14	
107.8	120.4	11.69	
100.1	108.9	8.79	
ขนาดเศษแก้ว < 104 ไมโครเมตร (ผ่าน 150 เมช)			
น้ำหนักก่อนทดสอบ(กรัม)	น้ำหนักหลังทดสอบ(กรัม)	ค่าการดูดซึมน้ำ(%)	เฉลี่ย
95.4	105.3	10.38	7.71 ± 1.83
98.6	106.2	7.71	
93.6	99.5	6.30	
95.1	103.1	8.41	
93.8	99.2	5.76	
ขนาดเศษแก้ว < 147 ไมโครเมตร (ผ่าน 100 เมช)			
น้ำหนักก่อนทดสอบ(กรัม)	น้ำหนักหลังทดสอบ(กรัม)	ค่าการดูดซึมน้ำ(%)	เฉลี่ย
102.4	113.4	10.74	9.05 ± 1.30
102.4	111.6	8.98	
101.5	111.6	9.95	
100.2	108.2	7.98	
106.2	114.3	7.63	

ตารางที่ ๖6 ค่าการดูดซึมน้ำของกระเบื้องที่ทดแทนด้วยเศษแก้วขนาดต่างๆ ผ่านกระบวนการผสม
วัตถุดิบแบบแห้ง เเผาที่ 1200 องศาเซลเซียส

ขนาดเศษแก้ว < 75 ไมโครเมตร (ผ่าน 200 เมช)			
น้ำหนักก่อนทดสอบ(กรัม)	น้ำหนักหลังทดสอบ(กรัม)	ค่าการดูดซึมน้ำ(%)	เฉลี่ย
111.8	118.1	5.56	5.65 ± 2.13
123.1	127.2	3.29	
101.4	108.9	7.35	
103.0	111.5	8.21	
106.3	110.4	3.86	
ขนาดเศษแก้ว < 104 ไมโครเมตร (ผ่าน 150 เมช)			
น้ำหนักก่อนทดสอบ(กรัม)	น้ำหนักหลังทดสอบ(กรัม)	ค่าการดูดซึมน้ำ(%)	เฉลี่ย
105.6	109.8	3.98	2.69 ± 1.23
104.1	108.1	3.84	
108.1	109.2	1.02	
107.8	110.2	2.23	
108.6	111.2	2.39	
ขนาดเศษแก้ว < 147 ไมโครเมตร (ผ่าน 100 เมช)			
น้ำหนักก่อนทดสอบ(กรัม)	น้ำหนักหลังทดสอบ(กรัม)	ค่าการดูดซึมน้ำ(%)	เฉลี่ย
110.2	116.8	5.99	6.25 ± 0.35
102.3	108.6	6.16	
103.2	109.8	6.40	
101.2	107.2	5.93	
100.1	106.9	6.79	

ตารางที่ ๗ ค่าการหดตัวของกระเบื้องที่ทดแทนด้วยเศษแก้วขนาดต่างๆ ผ่านกระบวนการผสม วัสดุดิบแบบแห้ง เเผที่ 1100 องศาเซลเซียส

ขนาดเศษแก้ว < 75 ไมโครเมตร (ผ่าน 200 เมช)								
แผ่นที่	มิติก่อนเผา(ซม.)			มิติหลังเผา(ซม.)			ค่าการหดตัว(%)	ค่าเฉลี่ย
	กว้าง	ยาว	หนา	กว้าง	ยาว	หนา		
1	10.54	10.54	0.55	10.21	10.21	0.55	6.16	7.44 ± 1.55
2	10.53	10.53	0.54	10.18	10.18	0.54	6.54	
3	10.54	10.54	0.56	10.19	10.19	0.54	9.87	
4	10.54	10.54	0.54	10.20	10.20	0.53	8.08	
5	10.53	10.53	0.53	10.18	10.18	0.53	6.54	

ขนาดเศษแก้ว < 104 ไมโครเมตร (ผ่าน 150 เมช)								
แผ่นที่	มิติก่อนเผา(ซม.)			มิติหลังเผา(ซม.)			ค่าการหดตัว(%)	ค่าเฉลี่ย
	กว้าง	ยาว	หนา	กว้าง	ยาว	หนา		
1	10.54	10.54	0.58	10.25	10.25	0.58	5.43	5.69 ± 0.28
2	10.54	10.54	0.54	10.24	10.24	0.54	5.61	
3	10.54	10.54	0.54	10.24	10.24	0.54	5.61	
4	10.55	10.55	0.55	10.25	10.25	0.55	5.61	
5	10.53	10.53	0.53	10.20	10.20	0.53	6.17	

ขนาดเศษแก้ว < 147 ไมโครเมตร (ผ่าน 100 เมช)								
แผ่นที่	มิติก่อนเผา(ซม.)			มิติหลังเผา(ซม.)			ค่าการหดตัว(%)	ค่าเฉลี่ย
	กว้าง	ยาว	หนา	กว้าง	ยาว	หนา		
1	10.54	10.54	0.55	10.25	10.25	0.55	5.43	5.55 ± 0.17
2	10.54	10.54	0.52	10.25	10.25	0.52	5.43	
3	10.54	10.54	0.62	10.32	10.32	0.61	5.68	
4	10.55	10.55	0.62	10.26	10.26	0.62	5.42	
5	10.55	10.55	0.50	10.24	10.24	0.50	5.79	

ตารางที่ ๘ ค่าการหดตัวของกระเบื้องที่ทดแทนด้วยเศษแก้วขนาดต่างๆ ผ่านกระบวนการผสม วัสดุดิบแบบแห้ง เเผที่ 1150 องศาเซลเซียส

ขนาดเศษแก้ว < 75 ไมโครเมตร (ผ่าน 200 เมช)								
แผ่นที่	มิตีก่อนเผา(ซม.)			มิติหลังเผา(ซม.)			ค่าการหดตัว(%)	ค่าเฉลี่ย
	กว้าง	ยาว	หนา	กว้าง	ยาว	หนา		
1	10.54	10.54	0.48	10.09	10.09	0.47	10.27	9.95 ± 0.94
2	10.55	10.55	0.56	10.10	10.10	0.56	8.35	
3	10.53	10.53	0.58	9.96	9.96	0.58	10.53	
4	10.54	10.54	0.52	10.10	10.10	0.51	9.94	
5	10.53	10.53	0.58	10.04	10.04	0.57	10.66	

ขนาดเศษแก้ว < 104 ไมโครเมตร (ผ่าน 150 เมช)								
แผ่นที่	มิตีก่อนเผา(ซม.)			มิติหลังเผา(ซม.)			ค่าการหดตัว(%)	ค่าเฉลี่ย
	กว้าง	ยาว	หนา	กว้าง	ยาว	หนา		
1	10.53	10.53	0.52	10.07	10.07	0.52	8.55	9.14 ± 1.63
2	10.55	10.55	0.50	10.13	10.13	0.50	7.80	
3	10.53	10.53	0.51	10.03	10.03	0.51	9.27	
4	10.53	10.53	0.52	10.08	10.08	0.50	11.89	
5	10.53	10.53	0.44	10.09	10.09	0.44	8.18	

ขนาดเศษแก้ว < 147 ไมโครเมตร (ผ่าน 100 เมช)								
แผ่นที่	มิตีก่อนเผา(ซม.)			มิติหลังเผา(ซม.)			ค่าการหดตัว(%)	ค่าเฉลี่ย
	กว้าง	ยาว	หนา	กว้าง	ยาว	หนา		
1	10.53	10.53	0.55	10.17	10.17	0.55	6.72	6.58 ± 1.21
2	10.53	10.53	0.56	10.20	10.20	0.56	6.17	
3	10.53	10.53	0.53	10.24	10.24	0.53	5.43	
4	10.52	10.52	0.50	10.16	10.16	0.49	8.59	
5	10.52	10.52	0.55	10.20	10.20	0.55	5.99	

ตารางที่ ๑๑ ค่าการหดตัวของกระเบื้องที่ทดแทนด้วยเศษแก้วขนาดต่างๆ ผ่านกระบวนการผสม วัสดุดิบแบบแห้ง เเผที่ 1200 องศาเซลเซียส

ขนาดเศษแก้ว < 75 ไมโครเมตร (ผ่าน 200 เมช)								ค่าเฉลี่ย
แผ่นที่	มิตีก่อนเผา(ซม.)			มิติหลังเผา(ซม.)			ค่าการหดตัว(%)	
	กว้าง	ยาว	หนา	กว้าง	ยาว	หนา		
1	10.56	10.56	0.57	9.72	9.72	0.57	15.28	16.01 ± 3.25
2	10.52	10.52	0.58	9.86	9.86	0.57	13.67	
3	10.53	10.53	0.59	9.90	9.90	0.56	16.10	
4	10.51	10.51	0.58	9.75	9.75	0.58	13.94	
5	10.52	10.52	0.62	9.87	9.90	0.55	21.68	

ขนาดเศษแก้ว < 104 ไมโครเมตร (ผ่าน 150 เมช)								ค่าเฉลี่ย
แผ่นที่	มิตีก่อนเผา(ซม.)			มิติหลังเผา(ซม.)			ค่าการหดตัว(%)	
	กว้าง	ยาว	หนา	กว้าง	ยาว	หนา		
1	10.52	10.52	0.58	9.93	9.93	0.54	17.05	12.81 ± 4.54*
2	10.52	10.52	0.60	9.92	9.92	0.53	21.46	
3	10.55	10.55	0.57	10.06	9.96	0.54	14.72	
4	10.51	10.51	0.56	9.94	9.94	0.56	10.55	
5	10.51	10.51	0.56	9.92	9.97	0.56	10.91	

ขนาดเศษแก้ว < 147 ไมโครเมตร (ผ่าน 100 เมช)								ค่าเฉลี่ย
แผ่นที่	มิตีก่อนเผา(ซม.)			มิติหลังเผา(ซม.)			ค่าการหดตัว(%)	
	กว้าง	ยาว	หนา	กว้าง	ยาว	หนา		
1	10.50	10.52	0.55	10.08	10.10	0.59	1.13	4.56 ± 7.63*
2	10.51	10.51	0.60	10.20	10.15	0.55	14.08	
3	10.50	10.52	0.62	10.05	10.06	0.60	11.42	
4	10.50	10.50	0.58	10.10	10.04	0.64	-1.49	
5	10.52	10.52	0.51	10.21	10.10	0.56	-2.31	

*จากผล พบความเบี่ยงเบนสูง เนื่องจากการหดตัวด้านความหนาของแผ่นกระเบื้องต่างกันมาก โดยสังเกตได้ว่า กระเบื้องบางก้อน มีการขยายตัวด้านความหนา ซึ่งเกิดจากการพองตัวในบางจุดของกระเบื้องไม่เท่ากัน สาเหตุมาจาก ขนาดเศษแก้ว < 104 ไมโครเมตร (ผ่าน 150 เมช) และขนาดเศษแก้ว < 147 ไมโครเมตร (ผ่าน 100 เมช) มีขนาดใหญ่เกินไป เกิดการผสมไม่ทั่วถึง และสามารถเกิดการพองตัวในบางจุด ไม่เหมาะสมในการผลิตกระเบื้อง

ตารางที่ ๑๑ ค่ากำลังรับแรงดัดของกระเบื้องที่ทดแทนด้วยเศษแก้วขนาดต่างๆ ผ่านกระบวนการผสมวัสดุดิบแบบเปียก เเผที่ 1100 องศาเซลเซียส

ขนาดเศษแก้ว < 104 ไมโครเมตร							
แผ่นที่	W (กก.)	ความกว้าง (ซม.)	ความหนา (ซม.)	ระยะห่างจุดรองรับ (ซม.)	กำลังรับแรงดัด (กก./ซม. ²)	กำลังรับแรงดัด (เมกกะปาสคาล)	เฉลี่ย
1	49.87	10.13	0.58	9.00	197.56	19.76	18.65 ± 2.39
2	34.34	10.2	0.54	9.00	155.86	15.59	
3	37.77	10.23	0.54	9.00	170.93	17.09	
4	43.68	10.23	0.55	9.00	190.55	19.06	
5	46.22	10.2	0.53	9.00	217.78	21.78	
ขนาดเศษแก้ว < 147 ไมโครเมตร							
แผ่นที่	W (กก.)	ความกว้าง (ซม.)	ความหนา (ซม.)	ระยะห่างจุดรองรับ (ซม.)	กำลังรับแรงดัด (กก./ซม. ²)	กำลังรับแรงดัด (เมกกะปาสคาล)	เฉลี่ย
1	21.21	10.43	0.54	9.00	94.15	9.41	10.42 ± 0.76
2	21.3	10.45	0.53	9.00	97.96	9.80	
3	16.3	10.4	0.44	9.00	109.29	10.93	
4	16.83	10.36	0.45	9.00	108.30	10.83	
5	17.98	10.32	0.46	9.00	111.15	11.12	

ตารางที่ ๗11 ค่ากำลังรับแรงดัดของกระเบื้องที่ทดแทนด้วยเศษแก้วขนาดต่างๆ ผ่านกระบวนการผสมวัสดุดิบแบบเปียก เเผที่ 1150 องศาเซลเซียส

ขนาดเศษแก้ว < 104 ไมโครเมตร							
แผ่นที่	W (กก.)	ความกว้าง (ซม.)	ความหนา (ซม.)	ระยะห่างจุดรองรับ (ซม.)	กำลังรับแรงดัด (กก./ซม. ²)	กำลังรับแรงดัด (เมกกะปาสคาล)	เฉลี่ย
1	40.22	9.92	0.52	9.00	202.42	20.24	23.41 ± 2.16
2	35.78	10.07	0.45	9.00	236.88	23.69	
3	37.77	10.04	0.44	9.00	262.33	26.23	
4	53.23	10.02	0.56	9.00	228.69	22.87	
5	50.23	10.05	0.53	9.00	240.20	24.02	
ขนาดเศษแก้ว < 147 ไมโครเมตร							
แผ่นที่	W (กก.)	ความกว้าง (ซม.)	ความหนา (ซม.)	ระยะห่างจุดรองรับ (ซม.)	กำลังรับแรงดัด (กก./ซม. ²)	กำลังรับแรงดัด (เมกกะปาสคาล)	เฉลี่ย
1	21.21	10.35	0.53	9.00	98.49	9.85	10.97 ± 1.68
2	22.3	10.23	0.5	9.00	117.71	11.77	
3	21.66	10.21	0.46	9.00	135.35	13.53	
4	15.83	10.26	0.47	9.00	94.29	9.43	
5	17.98	10.24	0.48	9.00	102.88	10.29	

ตารางที่ ๑12 ค่ากำลังรับแรงดัดของกระเบื้องที่ทดแทนด้วยเศษแก้วขนาดต่างๆ ผ่านกระบวนการผสมวัสดุดิบแบบเปียก เเผที่ 1200 องศาเซลเซียส

ขนาดเศษแก้ว < 104 ไมโครเมตร							
แผ่นที่	W (กก.)	ความกว้าง (ซม.)	ความหนา (ซม.)	ระยะห่างจุดรองรับ (ซม.)	กำลังรับแรงดัด (กก./ซม. ²)	กำลังรับแรงดัด (เมกกะปาสคาล)	เฉลี่ย
1	39.92	9.93	0.47	9.00	245.69	24.57	26.19 ± 1.69
2	57.95	9.97	0.54	9.00	269.09	26.91	
3	52.13	9.88	0.53	9.00	253.58	25.36	
4	53.21	9.98	0.5	9.00	287.91	28.79	
5	67.40	10	0.6	9.00	252.75	25.28	
ขนาดเศษแก้ว < 147 ไมโครเมตร							
แผ่นที่	W (กก.)	ความกว้าง (ซม.)	ความหนา (ซม.)	ระยะห่างจุดรองรับ (ซม.)	กำลังรับแรงดัด (กก./ซม. ²)	กำลังรับแรงดัด (เมกกะปาสคาล)	เฉลี่ย
1	20.12	10.09	0.48	9.00	116.84	11.68	9.89 ± 2.89*
2	18.34	10.22	0.63	9.00	61.04	6.10	
3	15.39	10.24	0.47	9.00	91.85	9.18	
4	21.81	10.19	0.46	9.00	136.55	13.66	
5	20.55	10.05	0.56	9.00	88.02	8.80	

*จากผล พบความเบี่ยงเบนสูง เนื่องจากขนาดเศษแก้ว < 147 ไมโครเมตร (ผ่าน 100 เมช) มีขนาดใหญ่เกินไปเกิดการผสมไม่ทั่วถึง ทำให้กระเบื้องมีการสุกตัวไม่เท่ากัน ส่งผลให้กระเบื้องบางก้อนมีความแข็งแรงมาก น้อย ต่างกัน ดังนั้นขนาดเศษแก้ว < 147 ไมโครเมตร (ผ่าน 100 เมช) จึงไม่เหมาะสมในการผลิตกระเบื้อง

ตารางที่ ๑๓ ค่าการดูดซึมน้ำ ของกระเบื้องที่ทดแทนด้วยเศษแก้วขนาดต่างๆ
ผ่านกระบวนการผสมวัสดุแบบเปียก เเผที่ 1100 องศาเซลเซียส

ขนาดเศษแก้ว < 104 ไมโครเมตร (ผ่าน 150 เมช)			
น้ำหนักก่อนทดสอบ(กรัม)	น้ำหนักหลังทดสอบ(กรัม)	ค่าการดูดซึมน้ำ(%)	เฉลี่ย
102.3	102.88	0.57	0.57 ± 0.07
98.21	98.65	0.45	
99.56	100.14	0.58	
100.24	100.87	0.63	
98.23	98.86	0.64	
ขนาดเศษแก้ว < 147 ไมโครเมตร (ผ่าน 100 เมช)			
น้ำหนักก่อนทดสอบ(กรัม)	น้ำหนักหลังทดสอบ(กรัม)	ค่าการดูดซึมน้ำ(%)	เฉลี่ย
101.5	106.98	5.39	6.23 ± 0.61
100.5	107.4	6.86	
99.21	105.42	6.25	
98.91	104.74	5.89	
98.76	105.45	6.77	

ตารางที่ ๑๑ ค่าการดูดซึมน้ำ ของกระเบื้องที่ทดแทนด้วยเศษแก้วขนาดต่างๆ
ผ่านกระบวนการผสมวัสดุแบบเปียก เเผที่ 1150 องศาเซลเซียส

ขนาดเศษแก้ว < 104 ไมโครเมตร (ผ่าน 150 เมช)			
น้ำหนักก่อนทดสอบ(กรัม)	น้ำหนักหลังทดสอบ(กรัม)	ค่าการดูดซึมน้ำ(%)	เฉลี่ย
99.25	100.13	0.89	0.46 ± 0.29
87.1	87.65	0.63	
91.63	91.88	0.27	
101.23	101.43	0.20	
99.44	99.75	0.31	
ขนาดเศษแก้ว < 147 ไมโครเมตร (ผ่าน 100 เมช)			
น้ำหนักก่อนทดสอบ(กรัม)	น้ำหนักหลังทดสอบ(กรัม)	ค่าการดูดซึมน้ำ(%)	เฉลี่ย
97.05	102.59	5.71	5.65 ± 0.28
97.13	102.77	5.81	
87.2	92.23	5.77	
87.37	91.89	5.17	
91.23	96.55	5.83	

ตารางที่ ๘15 ค่าการดูดซึมน้ำ ของกระเบื้องที่ทดแทนด้วยเศษแก้วขนาดต่างๆ
ผ่านกระบวนการผสมวัสดุแบบเปียก เเผที่ 1200 องศาเซลเซียส

ขนาดเศษแก้ว < 104 ไมโครเมตร (ผ่าน 150 เมช)			
น้ำหนักก่อนทดสอบ(กรัม)	น้ำหนักหลังทดสอบ(กรัม)	ค่าการดูดซึมน้ำ(%)	เฉลี่ย
88.44	89.01	0.64	0.56 ± 0.10
106.62	107.1	0.45	
101.27	101.76	0.48	
101.64	102.21	0.56	
104.1	104.82	0.69	
ขนาดเศษแก้ว < 147 ไมโครเมตร (ผ่าน 100 เมช)			
น้ำหนักก่อนทดสอบ(กรัม)	น้ำหนักหลังทดสอบ(กรัม)	ค่าการดูดซึมน้ำ(%)	เฉลี่ย
82.19	84.07	2.29	2.12 ± 0.50
112.92	114.81	1.67	
82.62	84.93	2.80	
80.14	82.09	2.43	
104.1	105.82	1.65	

ตารางที่ 16 ค่าการหดตัวของกระเบื้องที่ทดแทนด้วยเศษแก้วขนาดต่างๆ ผ่านกระบวนการผสม
วัตถุดิบแบบเปียก เเผที่ 1100 องศาเซลเซียส

ขนาดเศษแก้ว < 104 ไมโครเมตร (ผ่าน 150 เมช)								ค่าการหดตัว(%)	ค่าเฉลี่ย
แผ่นที่	มิตีก่อนเผา(ซม.)			มิติหลังเผา(ซม.)					
	กว้าง	ยาว	หนา	กว้าง	ยาว	หนา			
1	10.55	10.54	0.57	10.13	10.13	0.58	6.10	5.32 ± 0.89	
2	10.54	10.54	0.53	10.2	10.21	0.54	4.49		
3	10.55	10.5	0.54	10.23	10.24	0.54	5.43		
4	10.55	10.55	0.54	10.23	10.22	0.55	4.33		
5	10.53	10.53	0.53	10.2	10.19	0.53	6.26		

ขนาดเศษแก้ว < 147 ไมโครเมตร (ผ่าน 100 เมช)								ค่าการหดตัว(%)	ค่าเฉลี่ย
แผ่นที่	มิตีก่อนเผา(ซม.)			มิติหลังเผา(ซม.)					
	กว้าง	ยาว	หนา	กว้าง	ยาว	หนา			
1	10.53	10.53	0.54	10.43	10.43	0.54	1.89	2.44 ± 0.75	
2	10.54	10.54	0.53	10.45	10.45	0.53	1.70		
3	10.52	10.52	0.44	10.40	10.40	0.44	2.27		
4	10.51	10.51	0.45	10.36	10.37	0.45	2.74		
5	10.51	10.51	0.46	10.32	10.32	0.46	3.58		

ตารางที่ ๑๗ ค่าการหดตัวของกระเบื้องที่ทดแทนด้วยเศษแก้วขนาดต่างๆ ผ่านกระบวนการผสม
วัตถุดิบแบบเปียก เเผที่ 1150 องศาเซลเซียส

ขนาดเศษแก้ว < 104 ไมโครเมตร (ผ่าน 150 เมช)								ค่าการหดตัว(%)	ค่าเฉลี่ย
แผ่นที่	มิติก่อนเผา(ซม.)			มิติหลังเผา(ซม.)					
	กว้าง	ยาว	หนา	กว้าง	ยาว	หนา			
1	10.53	10.53	0.52	9.92	9.93	0.52	11.16	9.43 ± 1.12	
2	10.53	10.53	0.45	10.07	10.07	0.45	8.55		
3	10.53	10.53	0.44	10.04	10.04	0.44	9.09		
4	10.55	10.55	0.56	10.02	10.01	0.56	9.89		
5	10.53	10.53	0.53	10.05	10.10	0.53	8.46		

ขนาดเศษแก้ว < 147 ไมโครเมตร (ผ่าน 100 เมช)								ค่าการหดตัว(%)	ค่าเฉลี่ย
แผ่นที่	มิติก่อนเผา(ซม.)			มิติหลังเผา(ซม.)					
	กว้าง	ยาว	หนา	กว้าง	ยาว	หนา			
1	10.53	10.53	0.50	10.35	10.35	0.53	-2.41	0.77 ± 1.93*	
2	10.53	10.53	0.48	10.23	10.23	0.50	1.68		
3	10.52	10.52	0.44	10.21	10.21	0.46	1.53		
4	10.51	10.51	0.45	10.26	10.26	0.47	0.47		
5	10.49	10.49	0.47	10.24	10.25	0.48	2.59		

*จากผล พบความเบี่ยงเบนสูง เนื่องจากการหดตัวด้านความหนาของแผ่นกระเบื้องต่างกันมาก โดยสังเกตได้ว่า กระเบื้องบางก้อน มีการขยายตัวด้านความหนา ซึ่งเกิดจากการพองตัวในบางจุดของกระเบื้องไม่เท่ากัน สาเหตุมาจาก ขนาดเศษแก้ว < 147 ไมโครเมตร (ผ่าน 100 เมช) มีขนาดใหญ่เกินไป เกิดการผสมไม่ทั่วถึง และสามารถเกิดการพองตัวในบางจุด ไม่เหมาะสมในการผลิตกระเบื้อง

มิติด้านความหนา แม้มีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย ก็ทำให้ร้อยละการหดตัวเปลี่ยนแปลงได้มาก ส่งผลให้ในการวัดผล มีค่าความเบี่ยงเบนสูง

ตารางที่ ๑๘ ค่าการหดตัวของกระเบื้องที่ทดแทนด้วยเศษแก้วขนาดต่างๆ ผ่านกระบวนการผสม
วัตถุดิบแบบเปียก เเผที่ 1200 องศาเซลเซียส

ขนาดเศษแก้ว < 104 ไมโครเมตร (ผ่าน 150 เมช)								ค่าเฉลี่ย
แผ่นที่	มิตีก่อนเผา(ซม.)			มิติหลังเผา(ซม.)			ค่าการหดตัว(%)	
	กว้าง	ยาว	หนา	กว้าง	ยาว	หนา		
1	10.53	10.53	0.46	9.93	9.93	0.47	9.14	9.91 ± 0.71
2	10.55	10.55	0.54	9.97	10.03	0.54	10.16	
3	10.54	10.52	0.52	9.88	9.88	0.53	10.27	
4	10.47	10.47	0.50	9.98	9.80	0.50	10.78	
5	10.49	10.48	0.60	10.00	9.98	0.60	9.22	

ขนาดเศษแก้ว < 147 ไมโครเมตร (ผ่าน 100 เมช)								ค่าเฉลี่ย
แผ่นที่	มิตีก่อนเผา(ซม.)			มิติหลังเผา(ซม.)			ค่าการหดตัว(%)	
	กว้าง	ยาว	หนา	กว้าง	ยาว	หนา		
1	10.52	10.52	0.42	10.09	10.08	0.48	-5.03	-2.00 ± 4.75*
2	10.52	10.52	0.56	10.22	10.22	0.63	-6.18	
3	10.52	10.52	0.46	10.24	10.24	0.47	3.19	
4	10.52	10.52	0.41	10.19	10.19	0.46	-5.27	
5	10.50	10.50	0.53	10.05	10.06	0.56	3.11	

*จากผล พบความเบี่ยงเบนสูง เนื่องจากการหดตัวด้านความหนาของแผ่นกระเบื้องต่างกันมาก โดยสังเกตได้ว่า กระเบื้องบางก้อน มีการขยายตัวด้านความหนา ซึ่งเกิดจากการพองตัวในบางจุดของกระเบื้องไม่เท่ากัน สาเหตุมาจาก ขนาดเศษแก้ว < 147 ไมโครเมตร (ผ่าน 100 เมช) มีขนาดใหญ่เกินไป เกิดการผสมไม่ทั่วถึง และสามารถเกิดการพองตัวในบางจุด ไม่เหมาะสมในการผลิตกระเบื้อง

มิติด้านความหนา แม้มีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย ก็ทำให้อัตราการหดตัวเปลี่ยนแปลงได้มาก ส่งผลให้ในการวัดผล มีค่าความเบี่ยงเบนสูง

ตารางที่ ๑๙ ค่ากำลังรับแรงดัดของกระเบื้องที่ทดแทนด้วยเศษแก้วขนาดต่างๆ ผ่านกระบวนการผสมวัสดุดิบแบบเปียก เเผที่ 1250 องศาเซลเซียส

ขนาดเศษแก้ว < 104 ไมโครเมตร							
แผ่นที่	W (กก.)	ความกว้าง (ซม.)	ความหนา (ซม.)	ระยะห่างจุดรองรับ (ซม.)	กำลังรับแรงดัด (กก./ซม. ²)	กำลังรับแรงดัด (เมกกะปาสคาล)	เฉลี่ย
1	31.46	10.06	0.57	9.00	129.94	12.99	15.2 ± 3.00
2	40.64	9.93	0.55	9.00	182.65	18.26	
3	26.13	10	0.55	9.00	116.61	11.66	
4	38.15	10.08	0.53	9.00	181.89	18.19	
5	27.45	9.95	0.5	9.00	148.97	14.90	

ตารางที่ ๒๐ ค่าการดูดซึมน้ำ ของกระเบื้องที่ทดแทนด้วยเศษแก้วขนาดต่างๆ ผ่านกระบวนการผสมวัสดุดิบแบบเปียก เเผที่ 1250 องศาเซลเซียส

ขนาดเศษแก้ว < 104 ไมโครเมตร (ผ่าน 150 เมช)			
น้ำหนักก่อนทดสอบ(กรัม)	น้ำหนักหลังทดสอบ(กรัม)	ค่าการดูดซึมน้ำ(%)	เฉลี่ย
99.23	99.96	0.74	0.77 ± 0.18
80.20	80.95	0.93	
99.58	100.15	0.57	
106.79	107.83	0.97	
103.20	103.85	0.63	

ตารางที่ ๒21 ค่าการหดตัว ของกระเบื้องที่ทดแทนด้วยเศษแก้วขนาดต่างๆ ผ่านกระบวนการผสม วัสดุดิบแบบเปียก เเผที่ 1250 องศาเซลเซียส

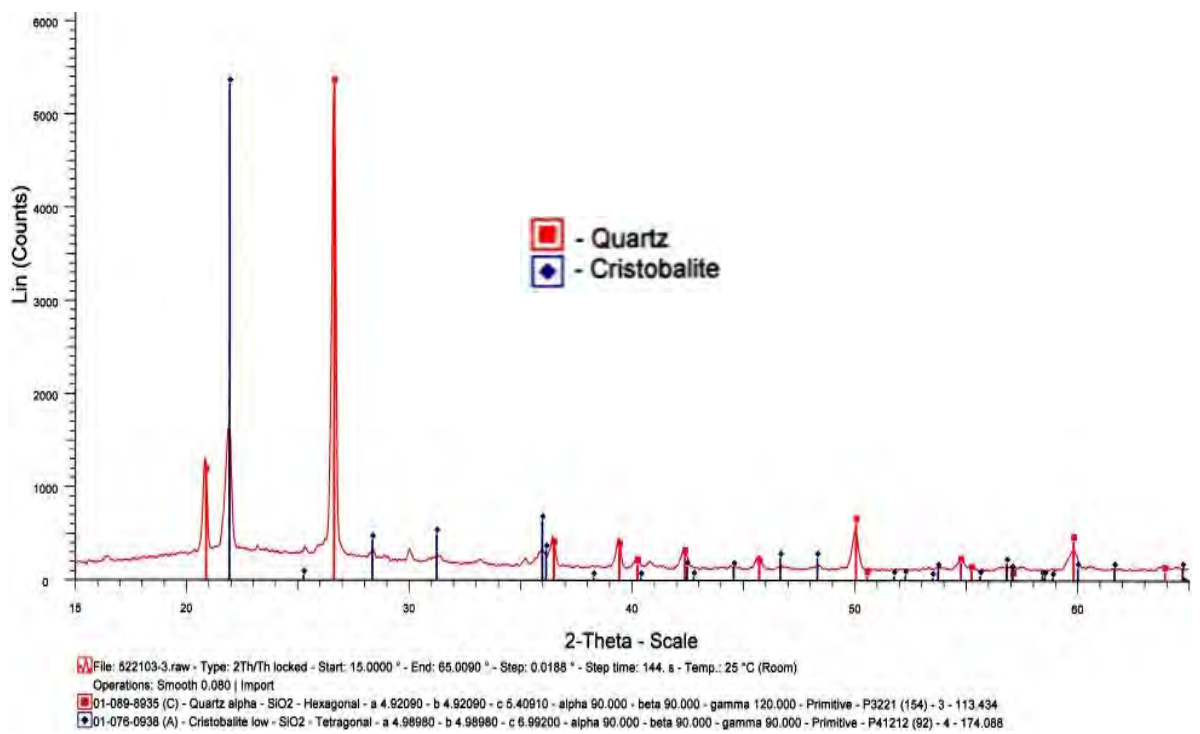
ขนาดเศษแก้ว < 104 ไมโครเมตร (ผ่าน 150 เมช)								
แผ่นที่	มิติก่อนเผา(ซม.)			มิติหลังเผา(ซม.)			ค่าการหดตัว(%)	ค่าเฉลี่ย
	กว้าง	ยาว	หนา	กว้าง	ยาว	หนา		
1	10.51	10.51	0.51	10.06	10.06	0.57	-2.40	4.66 ± 4.29*
2	10.51	10.51	0.41	10.04	10.04	0.42	6.52	
3	10.51	10.51	0.51	9.93	9.94	0.55	3.63	
4	10.50	10.50	0.54	10.00	10.01	0.55	7.52	
5	10.51	10.51	0.53	10.08	10.08	0.53	8.02	

*จากผล พบความเบี่ยงเบนสูง เนื่องจากการอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาสูงเกินจุดสุกตัวของกระเบื้อง ทำให้กระเบื้องเกิดการขยายตัวด้านความหนา หรือพองตัวในบางจุดไม่เท่ากัน ดังนั้นอุณหภูมิดังกล่าว ไม่เหมาะสมในการเผากระเบื้อง (สำหรับในงานวิจัยนี้ ใช้อุณหภูมิ 1250 องศาเซลเซียส เนื่องจากต้องการพิจารณาอุณหภูมิจุดสุกตัวของกระเบื้องเท่านั้น)

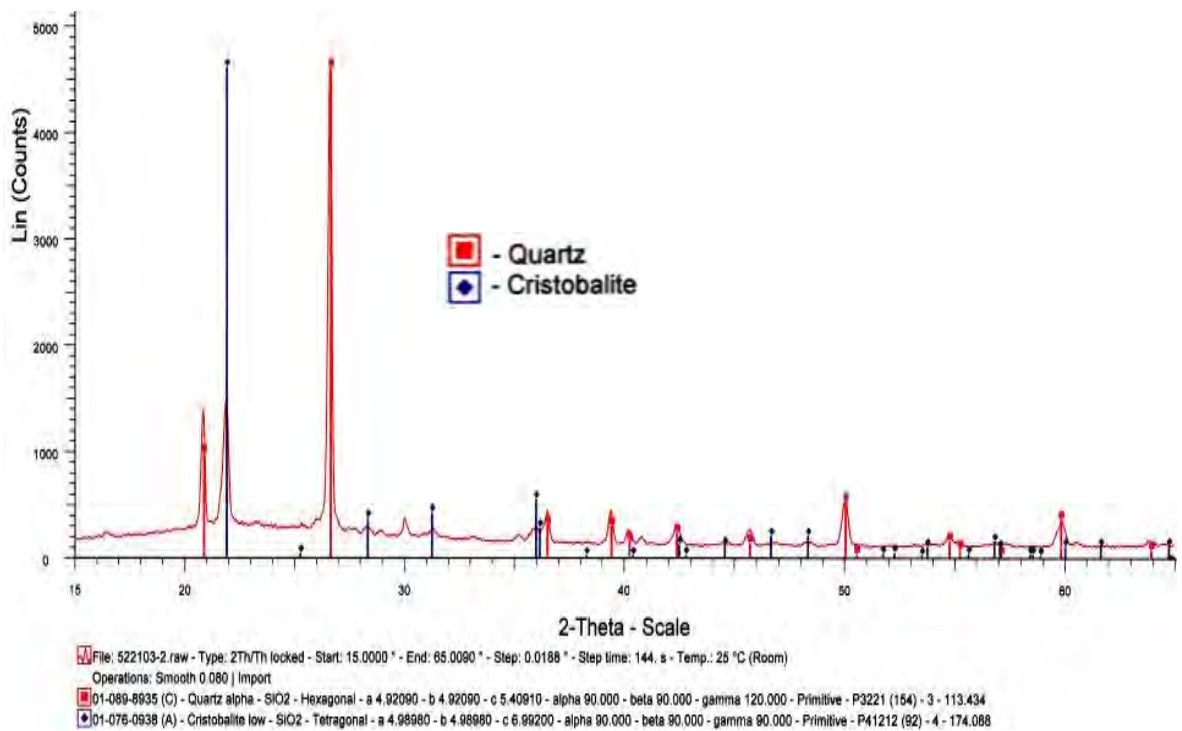
มิติด้านความหนา แม้มีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย ก็ทำให้ร้อยละการหดตัวเปลี่ยนแปลงได้มาก ส่งผลให้ในการวัดผล มีค่าความเบี่ยงเบนสูง

ภาคผนวก ข

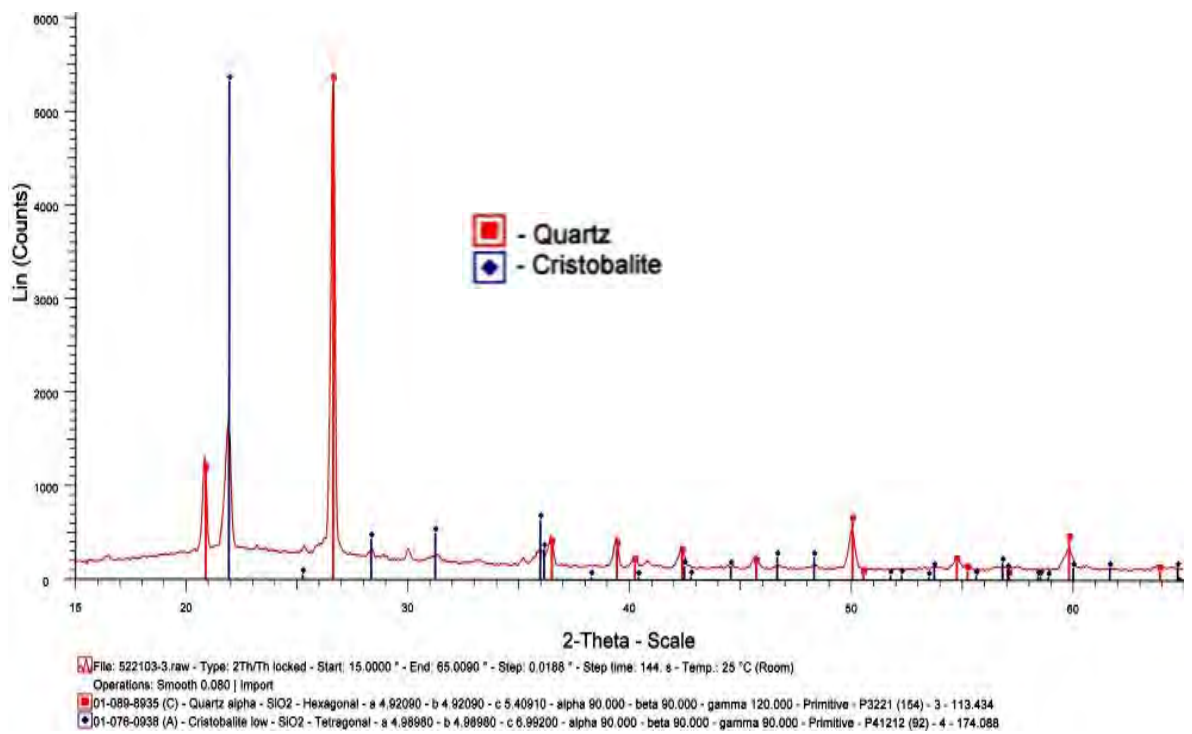
ข้อมูลผลการวิเคราะห์เอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกชัน (XRD)



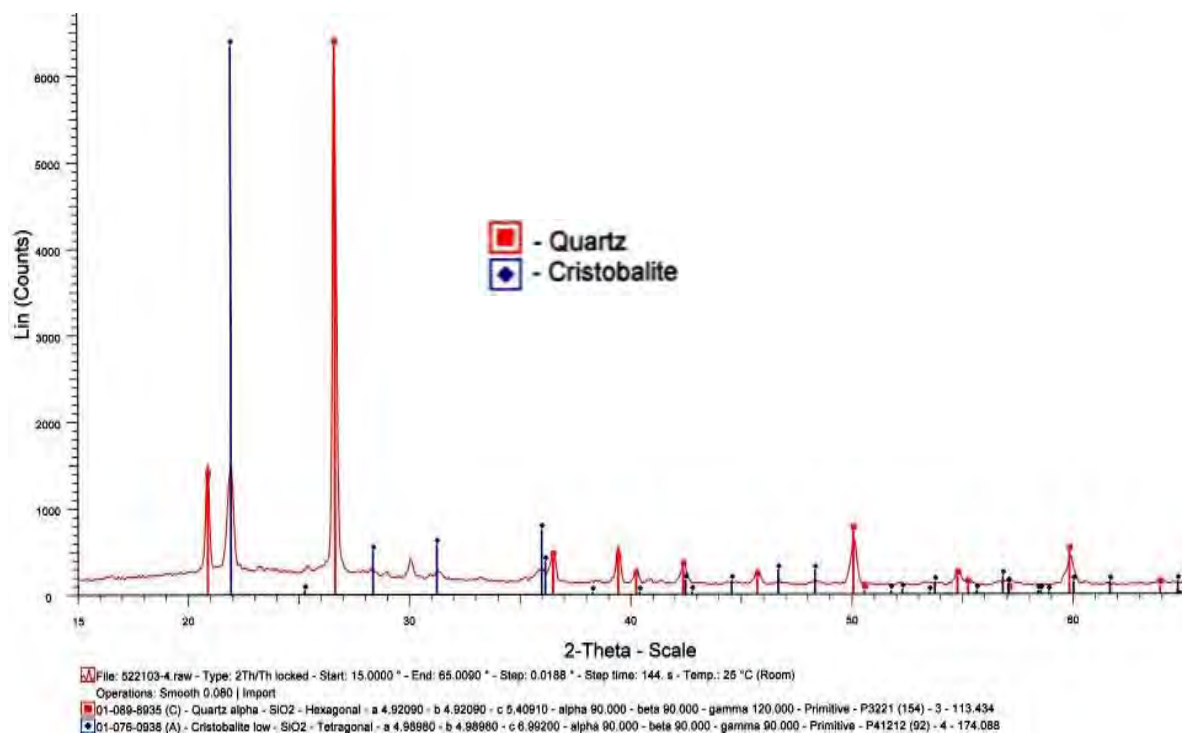
ภาพที่ ๘1 กราฟเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคชั่นของกระเบื้องที่ทดแทนด้วยเศษแก้วขนาดในช่วง 0.147 มิลลิเมตร ผ่านกระบวนการผสมวัสดุดิบแบบแห้ง เเผาที่ 1100 องศาเซลเซียส



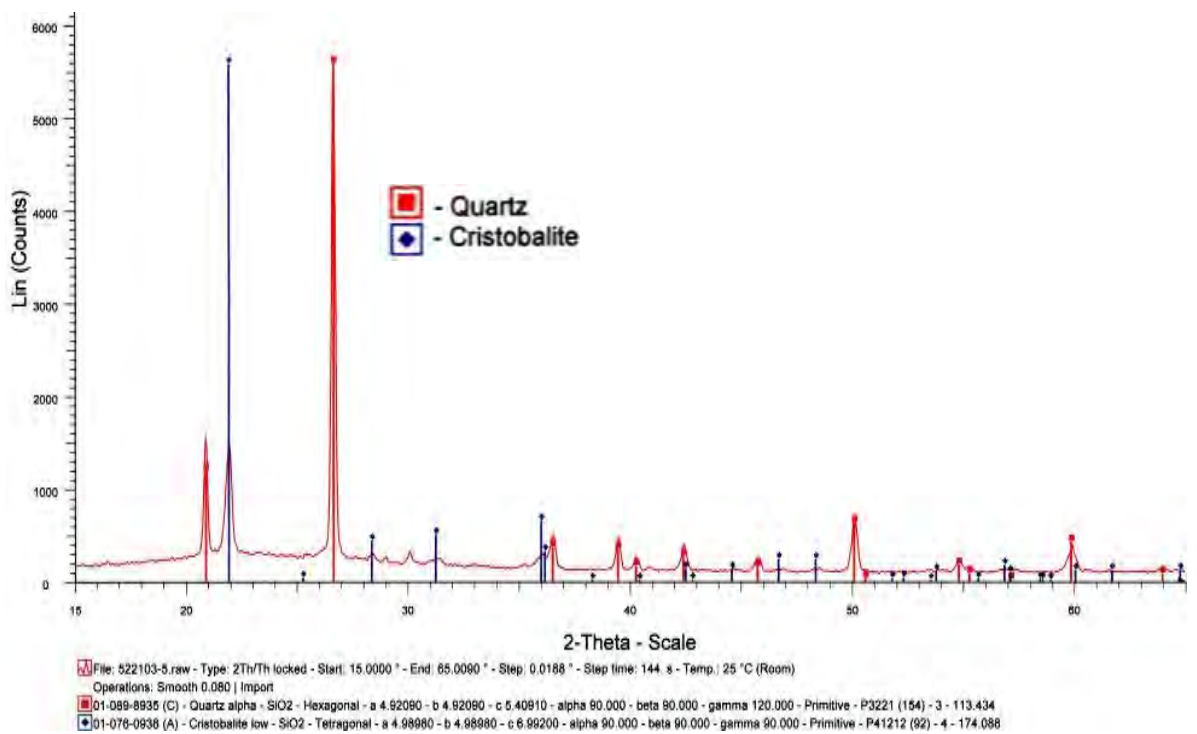
ภาพที่ ๘2 กราฟเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคชั่นของกระเบื้องที่ทดแทนด้วยเศษแก้วขนาดในช่วง 0.147 มิลลิเมตร ผ่านกระบวนการผสมวัสดุดิบแบบแห้ง เเผาที่ 1150 องศาเซลเซียส



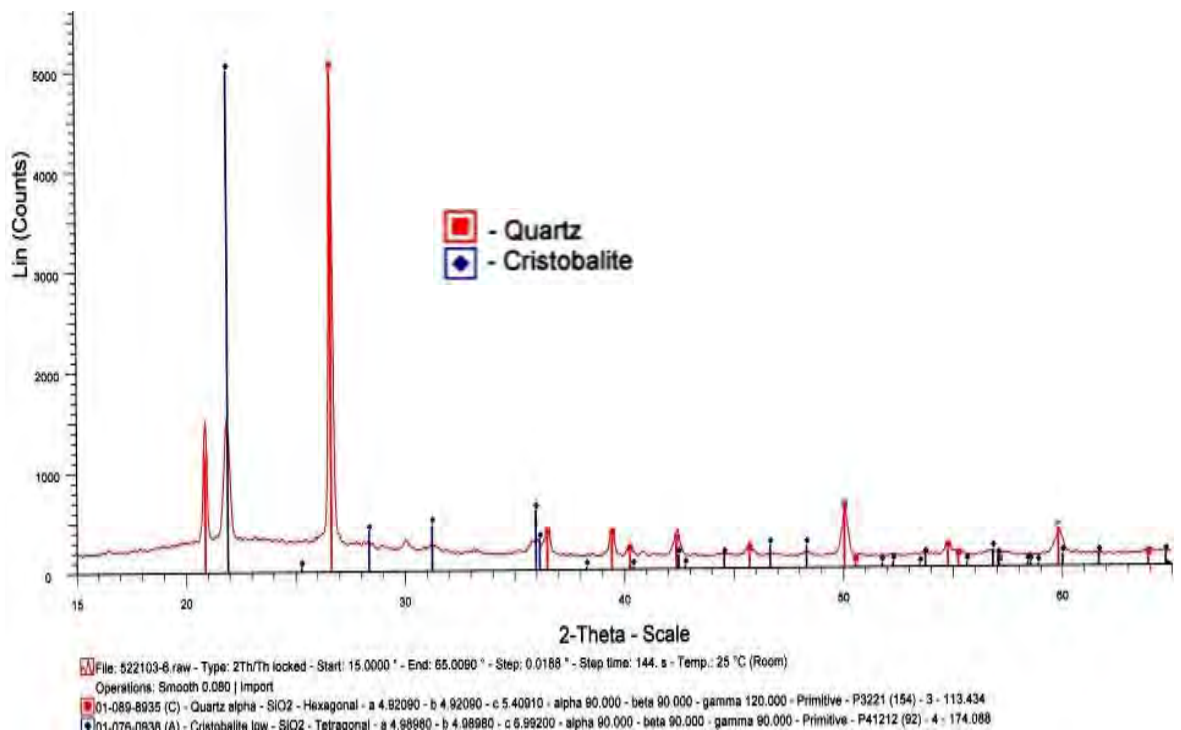
ภาพที่ ๘3 กราฟเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกชันของกระเบื้องที่ทดแทนด้วยเศษแก้วขนาดในช่วง 0.147 มิลลิเมตร ผ่านกระบวนการผสมวัตถุดิบแบบแห้ง เเผที่ 1200 องศาเซลเซียส



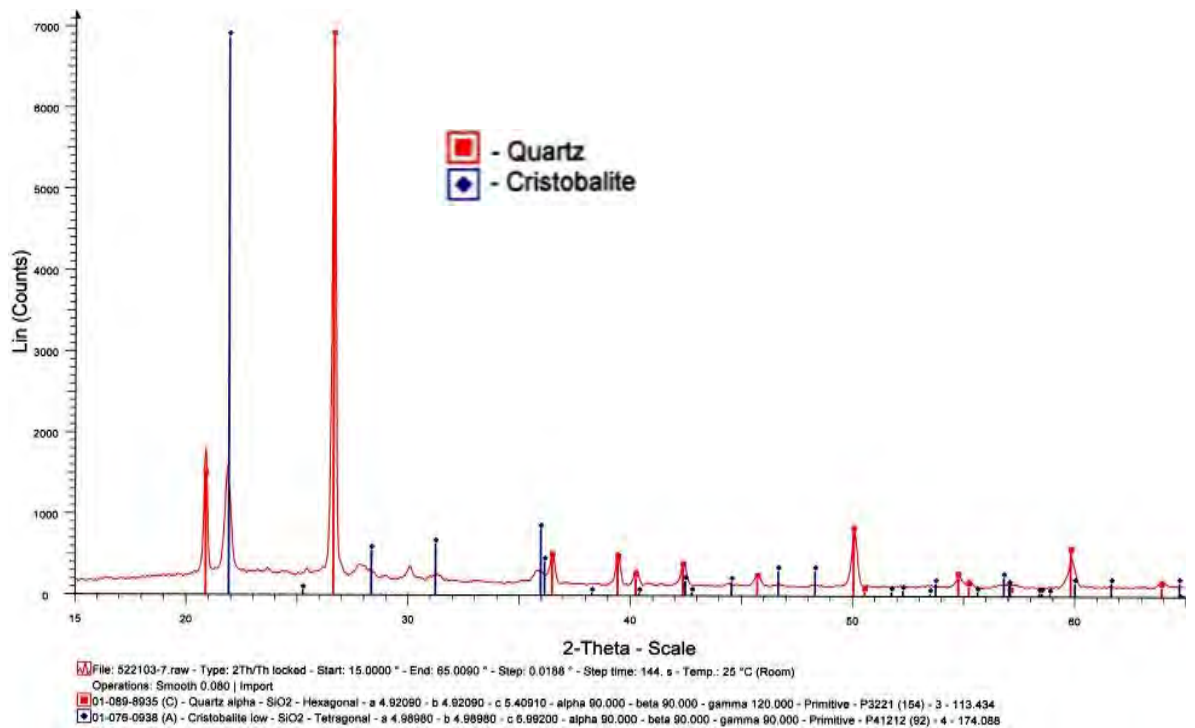
ภาพที่ ๘4 กราฟเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกชันของกระเบื้องที่ทดแทนด้วยเศษแก้วขนาดในช่วง 0.104 มิลลิเมตร ผ่านกระบวนการผสมวัตถุดิบแบบแห้ง เเผที่ 1100 องศาเซลเซียส



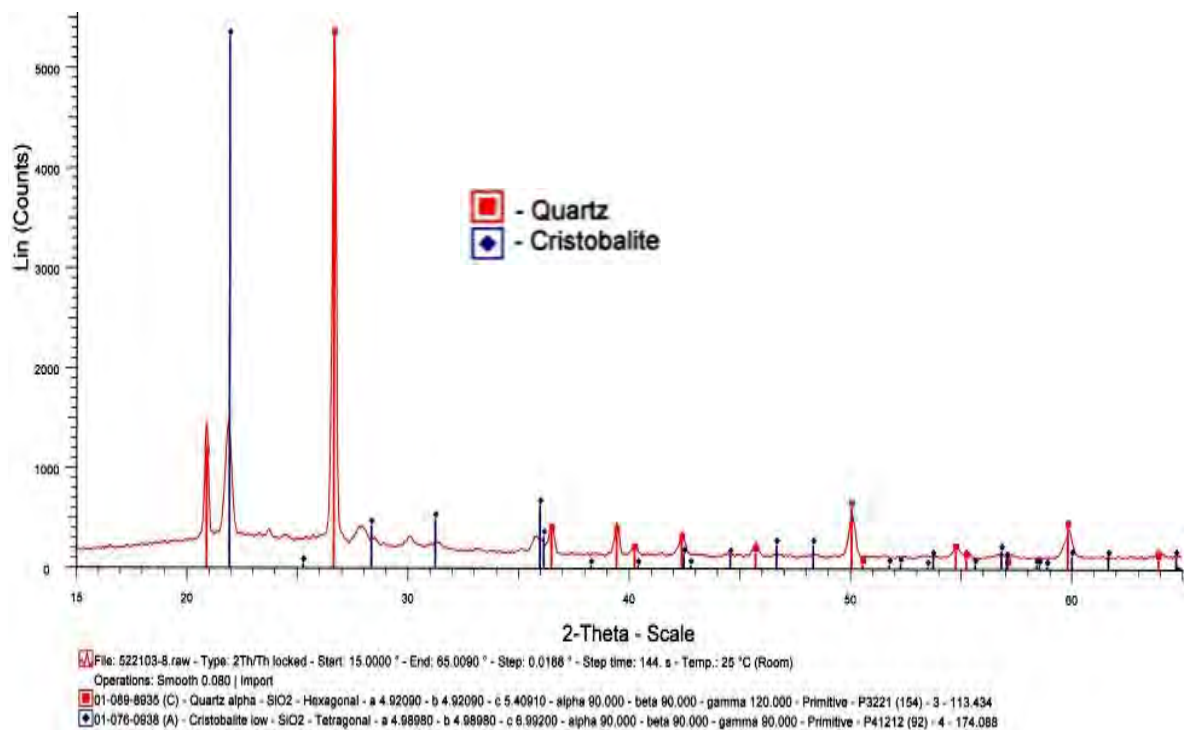
ภาพที่ ๕5 กราฟเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคชั่นของกระเบื้องที่ทดแทนด้วยเศษแก้วขนาดในช่วง 0.104 มิลลิเมตร ผ่านกระบวนการผสมวัสดุดิบแบบแห้ง เเผาที่ 1150 องศาเซลเซียส



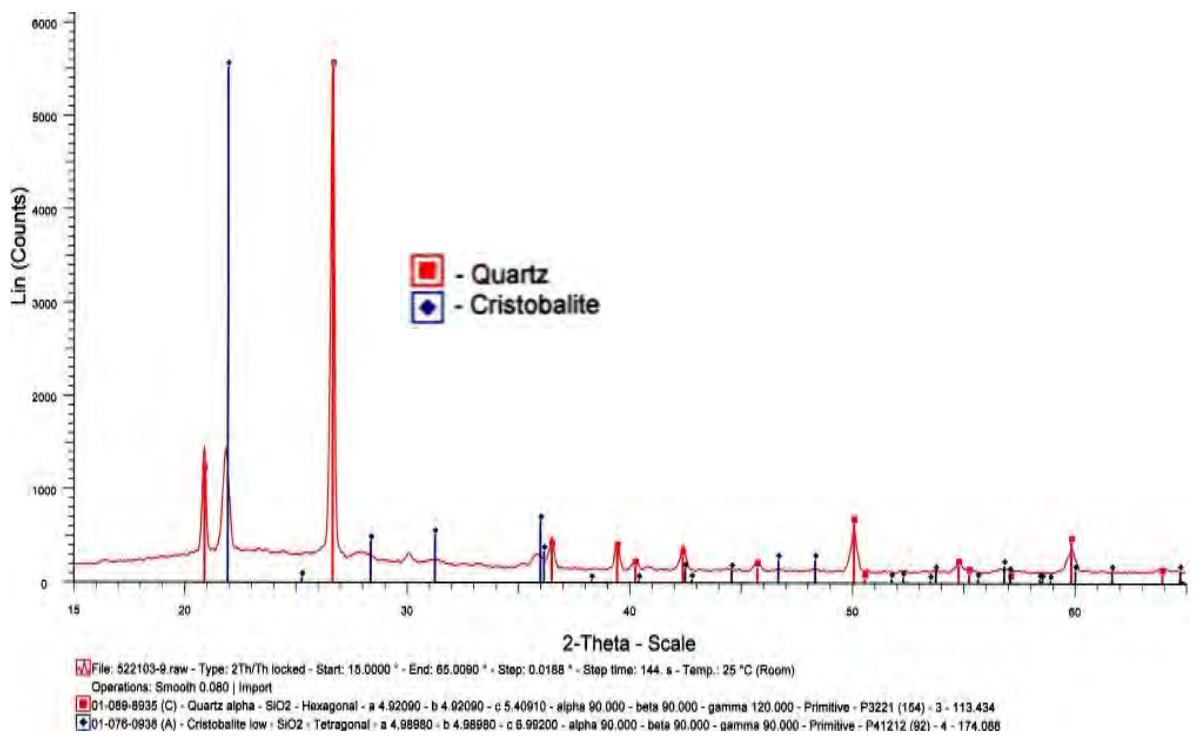
ภาพที่ ๕6 กราฟเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคชั่นของกระเบื้องที่ทดแทนด้วยเศษแก้วขนาดในช่วง 0.104 มิลลิเมตร ผ่านกระบวนการผสมวัสดุดิบแบบแห้ง เเผาที่ 1200 องศาเซลเซียส



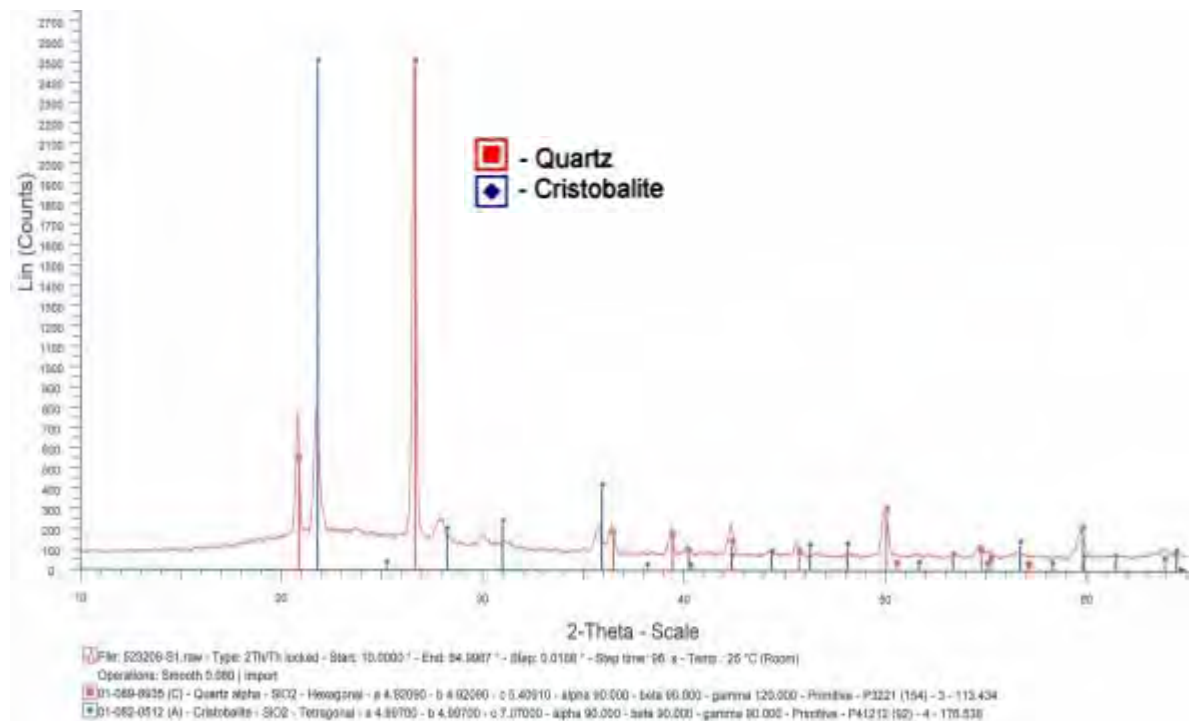
ภาพที่ ๗7 กราฟเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคชั่นของกระเบื้องที่ทดแทนด้วยเศษแก้วขนาดในช่วง 0.075 มิลลิเมตร ผ่านกระบวนการผสมวัสดุแบบแห้ง เเผที่ 1100 องศาเซลเซียส



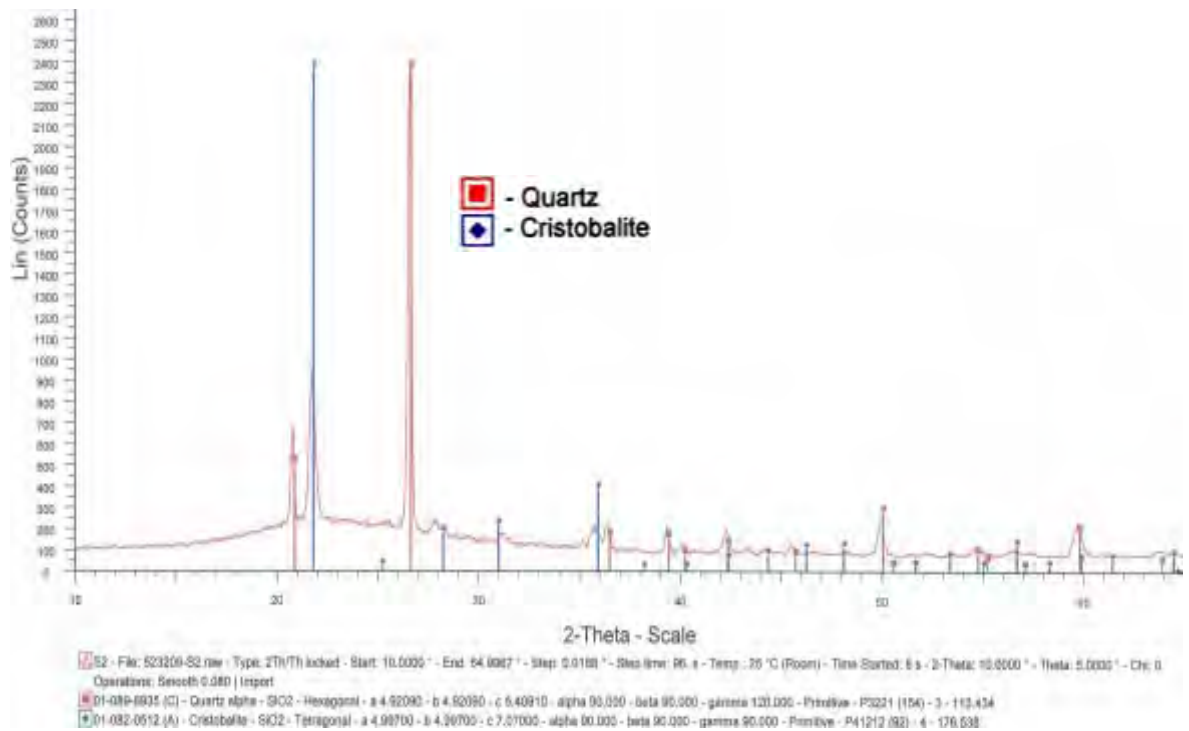
ภาพที่ ๗8 กราฟเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคชั่นของกระเบื้องที่ทดแทนด้วยเศษแก้วขนาดในช่วง 0.075 มิลลิเมตร ผ่านกระบวนการผสมวัสดุแบบแห้ง เเผที่ 1150 องศาเซลเซียส



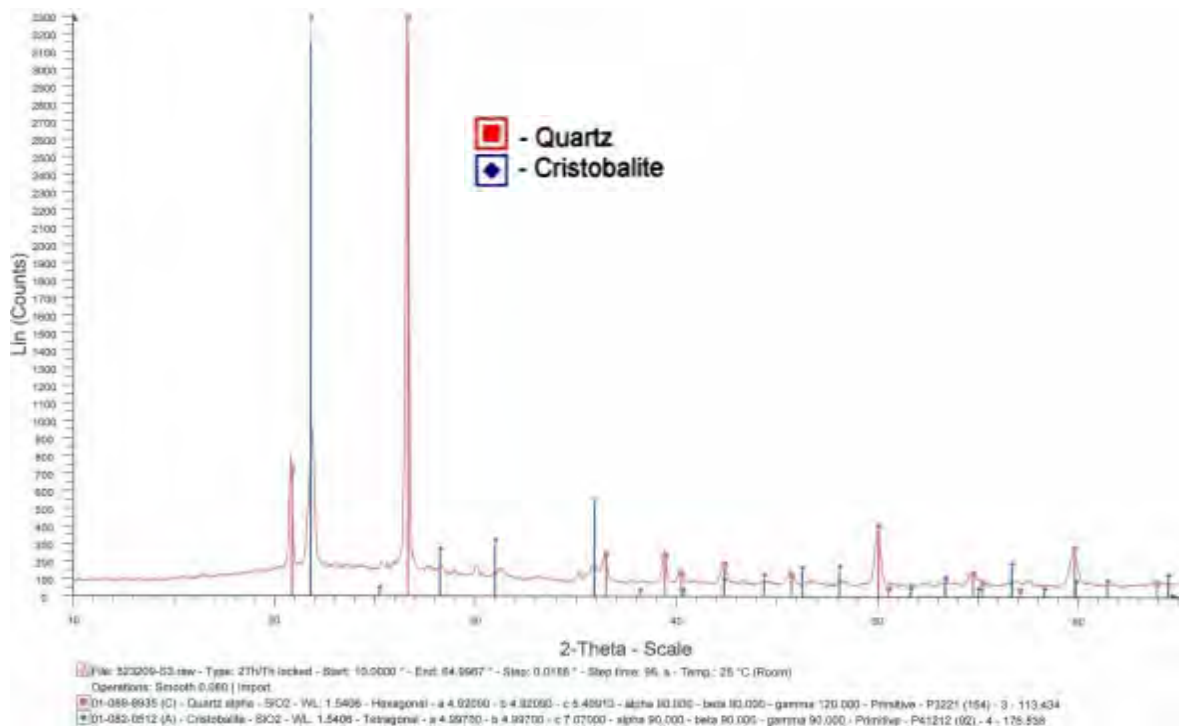
ภาพที่ ๘9 กราฟเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกชันของกระเบื้องที่ทดแทนด้วยเศษแก้วขนาดในช่วง 0.075 มิลลิเมตร ผ่านกระบวนการผสมวัสดุแบบแห้ง เเผที่ 1200 องศาเซลเซียส



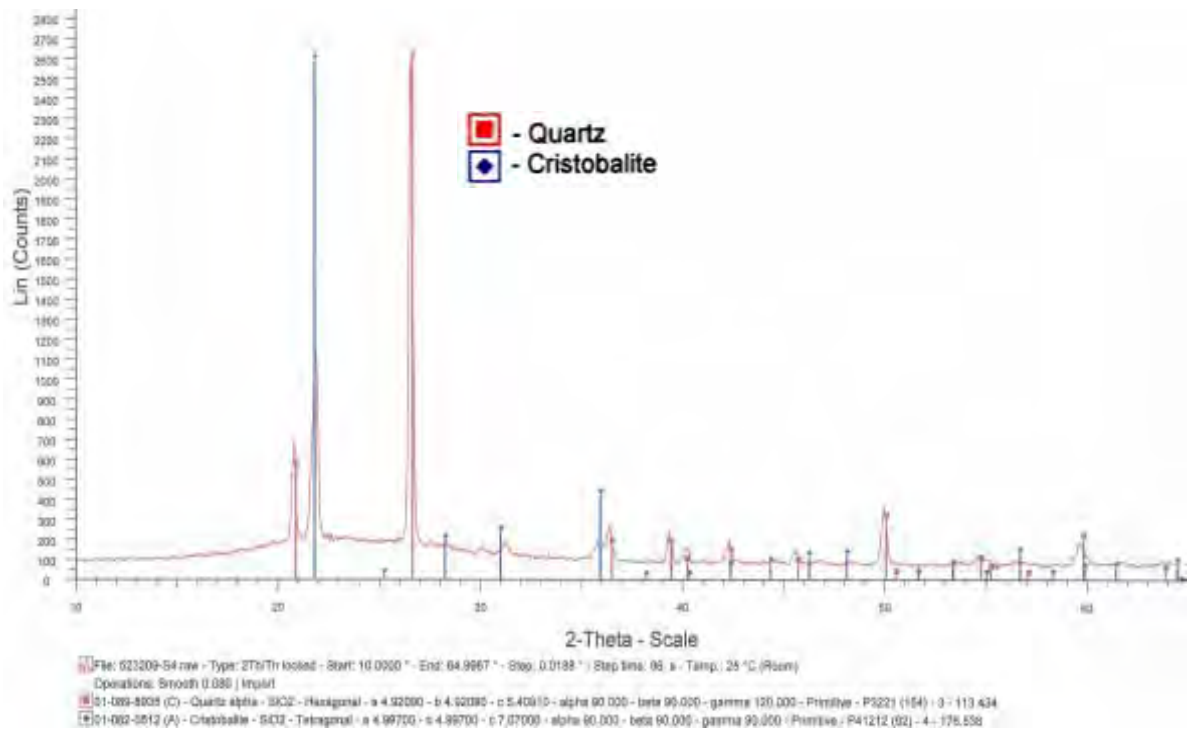
ภาพที่ ๘10 กราฟเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกชันของกระเบื้องที่ทดแทนด้วยเศษแก้วขนาดในช่วง 0.104 มิลลิเมตร ผ่านกระบวนการผสมวัสดุแบบเปียก เเผที่ 1150 องศาเซลเซียส



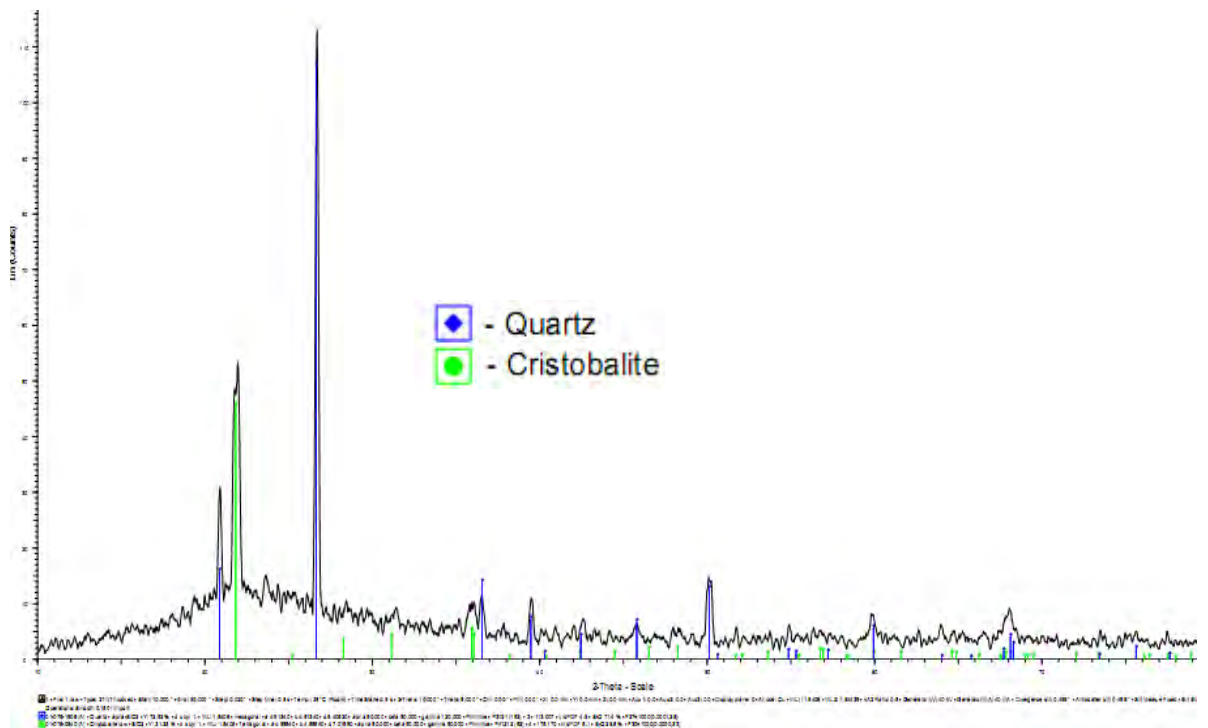
ภาพที่ ๘11 กราฟเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคชั่นของกระเบื้องที่ทดแทนด้วยเศษแก้วขนาดในช่วง 0.104 มิลลิเมตร ผ่านกระบวนการผสมวัสดุแบบเปียก เเผที่ 1200 องศาเซลเซียส



ภาพที่ ๘12 กราฟเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคชั่นของกระเบื้องที่ทดแทนด้วยเศษแก้วขนาดในช่วง 0.075 มิลลิเมตร ผ่านกระบวนการผสมวัสดุแบบเปียก เเผที่ 1150 องศาเซลเซียส



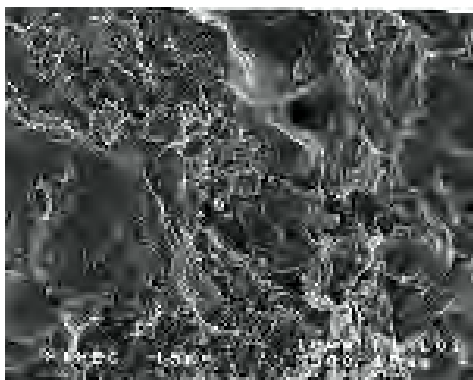
ภาพที่ ๑13 กราฟเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคชั่นของกระเบื้องที่ทดแทนด้วยเศษแก้วขนาดในช่วง 0.075 มิลลิเมตร ผ่านกระบวนการผสมวัสดุแบบเปียก เเผที่ 1200 องศาเซลเซียส



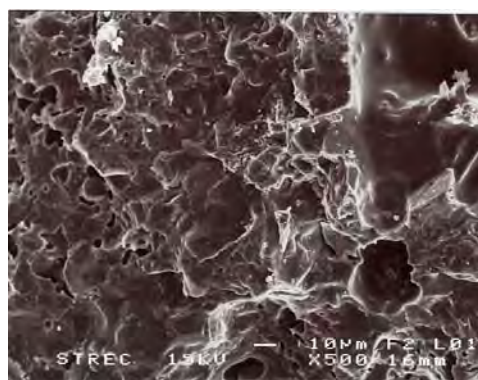
ภาพที่ ๑14 กราฟเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคชั่นของกระเบื้องที่ทดแทนด้วยเศษแก้วขนาดในช่วง 0.104 มิลลิเมตร ผ่านกระบวนการผสมวัสดุแบบเปียก เเผที่ 1250 องศาเซลเซียส

ภาคผนวก ค

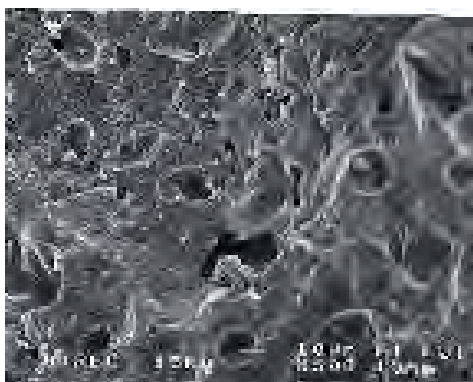
ข้อมูลผลการวิเคราะห์ภาพขยายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน



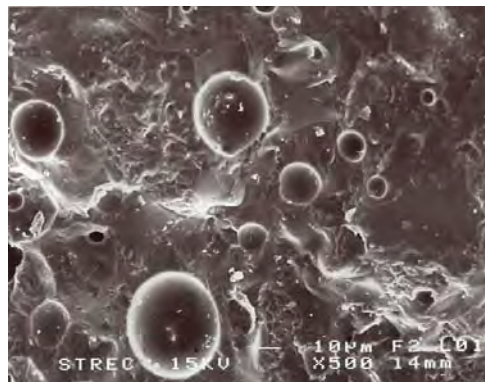
(ก) เศษแก้วขนาดเล็กกว่า 0.147 มิลลิเมตร



(ง) เศษแก้วขนาดเล็กกว่า 0.147 มิลลิเมตร



(ข) เศษแก้วขนาดเล็กกว่า 0.104 มิลลิเมตร



(จ) เศษแก้วขนาดเล็กกว่า 0.104 มิลลิเมตร

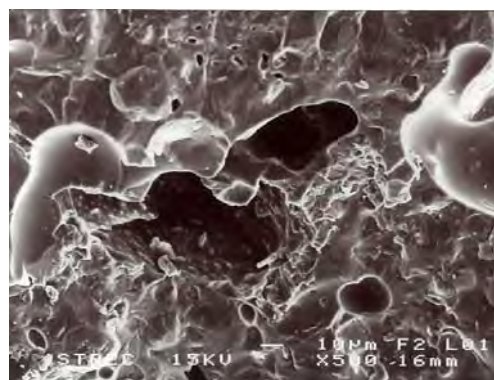


(ค) เศษแก้วขนาดเล็กกว่า 0.075 มิลลิเมตร

ภาพที่ ๑๕ ภาพขยาย 500 เท่า ของกระเบื้องที่ทดแทนด้วยเศษแก้วขนาดต่างๆ ผ่านกระบวนการผสมวัสดุแบบแห้ง (ก-ข) เปรียบเทียบกับแบบเปียก (ง-จ) เเผที่ 1200 องศาเซลเซียส



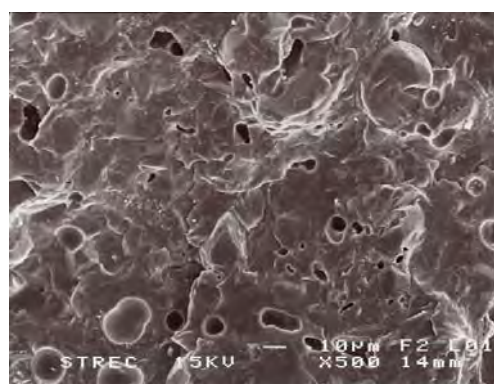
(ก) เส้นใยเส้นผ่าศูนย์กลางน้อยกว่า 0.147 ไมครอน



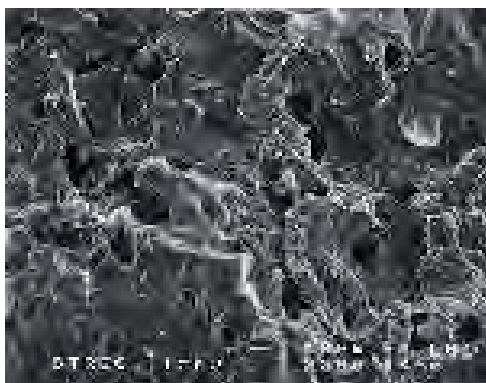
(ง) เส้นใยเส้นผ่าศูนย์กลางน้อยกว่า 0.147 ไมครอน



(ข) เส้นใยเส้นผ่าศูนย์กลางน้อยกว่า 0.104 ไมครอน



(จ) เส้นใยเส้นผ่าศูนย์กลางน้อยกว่า 0.104 ไมครอน



(ค) เส้นใยเส้นผ่าศูนย์กลางน้อยกว่า 0.075 ไมครอน

ภาพที่ ๑๖ ภาพขยาย 500 เท่า ของกระเบื้องที่ทดแทนด้วยเส้นใยขนาดต่างๆ ผ่านกระบวนการผสมวัสดุดิบแบบแห้ง (ก-ข) เปรียบเทียบกับแบบเปียก (ง-จ) เเผที่ 1150 องศาเซลเซียส



(ก) เศษแก้วขนาดเล็กกว่า 0.147 มิลลิเมตร



(ข) เศษแก้วขนาดเล็กกว่า 0.104 มิลลิเมตร



(ค) เศษแก้วขนาดเล็กกว่า 0.075 มิลลิเมตร

ภาพที่ ๘17 ภาพขยาย 500 เท่า ของกระเบื้องที่ทดแทนด้วยเศษแก้วขนาดต่างๆ ผ่านกระบวนการผสมวัสดุดิบแบบแห้ง เเผที่ 1100 องศาเซลเซียส

ภาคผนวก ง
ภาพอุปกรณ์ และเครื่องมือในงานวิจัย



ภาพที่ ผ18 ทรายแก้ว



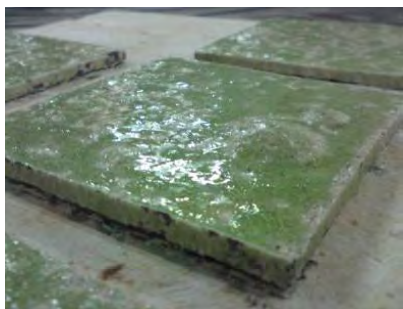
ภาพที่ ผ19 เศษแก้วสีเขียว (ขนาด 4 มิลลิเมตรจากโรงงาน)



ภาพที่ ผ20 ดินดำ (Ball Clay)



ภาพที่ ผ21 วัตุดิบหลังผสม



(ก) เศษแก้วขนาดเล็กกว่า 0.295 มิลลิเมตร



(ข) เศษแก้วขนาดเล็กกว่า 0.147 มิลลิเมตร

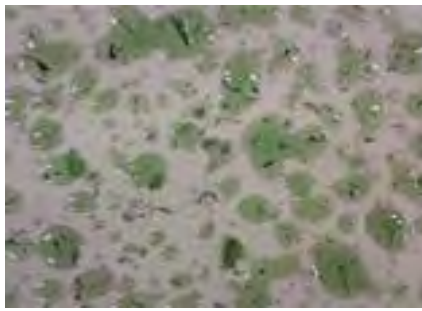


(ค) เศษแก้วขนาดเล็กกว่า 0.104 มิลลิเมตร



(ง) เศษแก้วขนาดเล็กกว่า 0.075 มิลลิเมตร

ภาพที่ ผ22 กระเบื้องที่ทดแทนด้วยเศษแก้วขนาดต่างๆ ผ่านกระบวนการผสมวัตุดิบแบบแห้ง เเผที่ 1200 องศาเซลเซียส



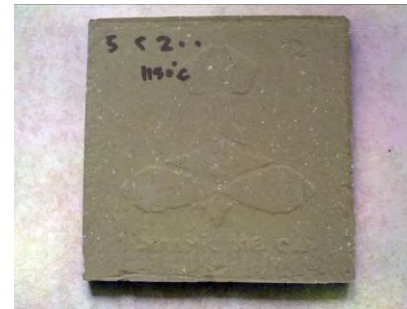
(ก) เศษแก้วขนาดเล็กกว่า 0.295 มิลลิเมตร



(ข) เศษแก้วขนาดเล็กกว่า 0.147 มิลลิเมตร



(ค) เศษแก้วขนาดเล็กกว่า 0.104 มิลลิเมตร

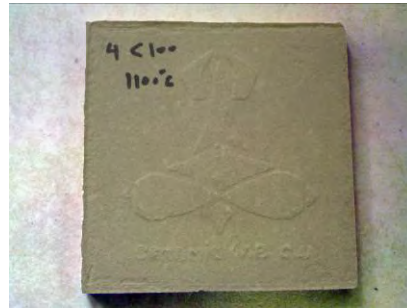


(ง) เศษแก้วขนาดเล็กกว่า 0.075 มิลลิเมตร

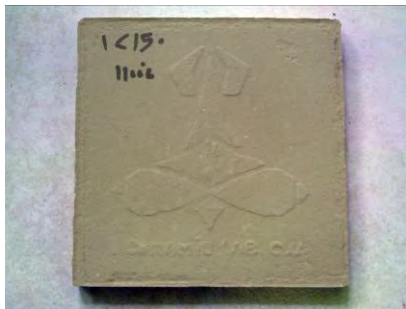
ภาพที่ ๒๓ กระเบื้องที่ทดแทนด้วยเศษแก้วขนาดต่างๆ ผ่านกระบวนการผสมวัสดุดิบแบบแห้ง เเผที่ 1150 องศาเซลเซียส



(ก) เศษแก้วขนาดเล็กกว่า 0.295 มิลลิเมตร



(ข) เศษแก้วขนาดเล็กกว่า 0.147 มิลลิเมตร



(ค) เศษแก้วขนาดเล็กกว่า 0.104 มิลลิเมตร



(ง) เศษแก้วขนาดเล็กกว่า 0.075 มิลลิเมตร

ภาพที่ ๒๔ กระเบื้องที่ทดแทนด้วยเศษแก้วขนาดต่างๆ ผ่านกระบวนการผสมวัสดุดิบแบบแห้ง เเผที่ 1100 องศาเซลเซียส



(ก) เศษแก้วขนาดเล็กกว่า 0.147 มิลลิเมตร



(ข) เศษแก้วขนาดเล็กกว่า 0.104 มิลลิเมตร

ภาพที่ ๒๕ กระเบื้องที่ทดแทนด้วยเศษแก้วขนาดต่างๆ ผ่านกระบวนการผสมวัสดุแบบเปียก เเผที่ 1200 องศาเซลเซียส



(ก) เศษแก้วขนาดเล็กกว่า 0.147 มิลลิเมตร



(ข) เศษแก้วขนาดเล็กกว่า 0.104 มิลลิเมตร

ภาพที่ ๒๖ กระเบื้องที่ทดแทนด้วยเศษแก้วขนาดต่างๆ ผ่านกระบวนการผสมวัสดุแบบเปียก เเผที่ 1150 องศาเซลเซียส



(ก) เศษแก้วขนาดเล็กกว่า 0.147 มิลลิเมตร



(ข) เศษแก้วขนาดเล็กกว่า 0.104 มิลลิเมตร

ภาพที่ ๒๗ กระเบื้องที่ทดแทนด้วยเศษแก้วขนาดต่างๆ ผ่านกระบวนการผสมวัสดุแบบเปียก เเผที่ 1100 องศาเซลเซียส



ภาพที่ ๒๘ เครื่องบดขนาดเล็ก (Tube Mill)



ภาพที่ ๒๙ เครื่องร่อนคัดขนาด



ภาพที่ ๓๐ เครื่องบดผสมวัตถุดิบแบบแห้ง



ภาพที่ ๓๑ เครื่องบดน้ำดิน



ภาพที่ ๓๒ เตาเผาอุณหภูมิสูง (แบบไฟฟ้า)



ภาพที่ ๓๓ เครื่องอัดขึ้นรูปกระเบื้อง

ภาคผนวก จ

ข้อมูลวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบ
และการแสดงวิธีคำนวณการหาผลองค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบ

ตารางที่ ๗22 องค์ประกอบทางเคมีของเศษแก้วสีเขียว

Chulalongkorn University

Quantified peaks in c:\superq\data\1376n2_.pks

Summary of results

Sample:	1376N2
Measured:	5/23/08 04:46
Quantified:	5/23/08 13:11
Sum:	100. %
RMS:	0.000
Used lines:	14
Traces:	
Qual. program:	SemIQ2004

Concentrations

Analyte	Type	Calibration status	Compound	Concentration (%)	Calculation method
	Binder	Not matched	H3BO3	8.434	Fixed
Na	Sample	Calibrated	Na2O	15.124	Calculate
Mg	Sample	Calibrated	MgO	0.843	Calculate
Al	Sample	Calibrated	Al2O3	1.205	Calculate
Si	Sample	Calibrated	SiO2	70.974	Calculate
P	Sample	Calibrated	P2O5	0.02	Calculate
S	Sample	Calibrated	SO3	0.063	Calculate
Cl	Sample	Calibrated	Cl	0.035	Calculate
K	Sample	Calibrated	K2O	0.206	Calculate
Ca	Sample	Calibrated	CaO	10.865	Calculate
Ti	Sample	Calibrated	TiO2	0.094	Calculate
Cr	Sample	Calibrated	Cr2O3	0.238	Calculate
Fe	Sample	Calibrated	Fe2O3	0.288	Calculate
Sr	Sample	Calibrated	SrO	0.007	Calculate
Zr	Sample	Calibrated	ZrO2	0.015	Calculate
Pb	Sample	Manually added	PbO	0.023	Fixed

Sample preparation

Sample type:	Powder (binder: H3BO3)
Initial weight:	4.52 g
Final weight:	4.90 g
Area ratio:	1.08
Additive/sample:	0.08
Film:	None
Normalise:	to 100.0%
X-ray path:	Vacuum

Quantify parameters

Recipe:	c:\superq\data\new.rcp
Spectrometer resp. file:	c:\superq\data\semiq.sti
Use compound list:	c:\superq\example\semiq.cpl
Apply drift corr.:	No
Disall. elem. set:	None
Disall. lines set:	None
Error weighting:	Root
Max. Flow detector intensity:	2000 kcps
Max. Sealed detector intensity:	1000 kcps
Max. Scint detector intensity:	1000 kcps
Max. Duplex detector intensity:	3000 kcps

Disallowed elements

No elements disallowed

ตารางที่ ผ23 องค์ประกอบทางเคมีของดินดำ

SIBELCO THAILAND

Technical Data

MAE SAN / P

<u>Chemical Analysis By X-Ray Fluorescence</u>		<u>Mineralogy by X-Ray Diffraction</u>	
SiO ₂	60.04	Medium Disordered Kaolinite.....	57%
TiO ₂	0.63	Quartz.....	30%
Al ₂ O ₃	23.32	Poorly Crystalline Muscovite Mica....	3%
Fe ₂ O ₃	1.69	Orthoclase.....	7%
CaO.....	0.26	Carbon Content	1.48%
MgO.....	0.67		
K ₂ O.....	2.02		
Na ₂ O.....	0.31		
LOI.....	8.90		
<u>P.S.D.(Sedigraph)</u>			
%Cumulative Mass Finer Than			
< 10 microns	96.2%	125 micron	0.00%
< 2 micron	72.0%	75 micron	0.07%
< 1 micron	59.8%	45 micron	0.70%
<u>Fired Properties</u>		<u>Modulus of Rupture (Dried at 110°C)</u>	
Liner Firing Shrinkage,1200°C	12.45%	1438 psi	
Fire Color,1150°C	(L) 84.97		
	(a) 3.25		
COMMENTS:			
A blended ball clay designed to yield rheological stable for casting large sanitaryware piece. A modified version of its precedent Mea San, Mea San Powder is available in powder form with very low residue. It will be ideal to those plant with pneumatic conveyor system with subsequent less blunging and screening time. Its properties include moderate thixotropy, high casting rate, high strength; and excellent cast workability.			

Products are available in shredded form.

ที่มา: บริษัท ซิเบลโก มิเนอร์รัลส์ (ประเทศไทย) จำกัด จังหวัดปทุมธานี

ตารางที่ ผ24 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุดิบหลังผสม

รายงานผลการวิเคราะห์

ตัวอย่าง : ผง
 เจ้าของตัวอย่าง : นายฉัตรชัย พรฐิติโกศล
 ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
 วัตถุประสงค์ : เพื่อวิเคราะห์หาปริมาณธาตุ
 วิธีวิเคราะห์ : Wavelength dispersive X-ray fluorescence spectrometry
 เครื่องมือวิเคราะห์ : X-ray fluorescence spectrometer, Philips model PW2400
 ผู้วิเคราะห์ : นายสมบูรณ์ เจริญภูมิการกิจ
 วันที่วิเคราะห์ : 2 กรกฎาคม 2552
ผลการวิเคราะห์

ตัวอย่าง	ปริมาณธาตุ (ร้อยละ โดยน้ำหนัก)*															
	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃	Cl	K ₂ O	CaO	TiO ₂	Cr ₂ O ₃	MnO ₂	Fe ₂ O ₃	ZnO	ZrO ₂	BaO
No.1	3.70	0.46	10.07	72.54	0.02	0.21	<0.01	1.30	2.84	0.30	0.09	<0.01	0.92	0.01	<0.01	<0.01

- * 1. ปริมาณธาตุหาโดยวิธี Theoretical formulas, "fundamental parameter calculations"
 2. ปริมาณธาตุที่วิเคราะห์ได้คำนวณค่าให้อยู่ในรูป oxide ของธาตุนั้นๆ

ตารางที่ ผ.25 องค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบ ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่องเอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนส์

องค์ประกอบทางเคมี	แก้วสีเขียว	ดินดำแม่แซน	ทรายแก้ว
SiO ₂	70.97	60.04	98.9
Al ₂ O ₃	1.21	23.32	0.45
Na ₂ O	15.12	0.31	0.02
CaO	10.87	0.26	0.03
MgO	0.84	0.67	0.04
K ₂ O	0.21	2.02	0.03
Fe ₂ O ₃	0.29	1.69	0.04
Cr ₂ O ₃	0.24		
PbO	0.02		
TiO ₂	0.09	0.63	0.05
SO ₃			
%	99.86	88.94	99.56

ตารางที่ ผ.26 การปรับอัตราส่วนองค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบให้เป็น ร้อยละ 100

องค์ประกอบทางเคมี	แก้วสีเขียว	ดินดำแม่แซน	ทรายแก้ว
SiO ₂	71.07	67.51	99.34
Al ₂ O ₃	1.21	26.22	0.45
Na ₂ O	15.14	0.35	0.02
CaO	10.89	0.29	0.03
MgO	0.84	0.75	0.04
K ₂ O	0.21	2.27	0.03
Fe ₂ O ₃	0.29	1.90	0.04
Cr ₂ O ₃	0.24	0.00	0.00
PbO	0.02	0.00	0.00
TiO ₂	0.09	0.71	0.05
SO ₃	0.00	0.00	0.00
%	100	100	100

การหาองค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบหลังผสม แสดงเฉพาะปริมาณของ SiO₂

1. จากส่วนผสมวัตถุดิบ ใช้แก้ว 23.08 % และในแก้วมีองค์ประกอบทางเคมีของ SiO_2 71.07%

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้น คิดเป็น } \text{SiO}_2 \text{ ที่มาจากแก้ว} &= (23.08 \times 71.07) / 100 \\ &= 16.40 \% \end{aligned}$$

2. จากส่วนผสมวัตถุดิบ ใช้ดินดำแม่แซน 36.92 % และในดินดำแม่แซน มีองค์ประกอบทางเคมีของ SiO_2 67.51%

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้น คิดเป็น } \text{SiO}_2 \text{ ที่มาจากดินดำ} &= (36.92 \times 67.51) / 100 \\ &= 24.92 \% \end{aligned}$$

3. จากส่วนผสมวัตถุดิบ ใช้ทรายแก้ว 40 % และในทรายแก้วมีองค์ประกอบทางเคมีของ SiO_2 99.34%

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้น คิดเป็น } \text{SiO}_2 \text{ ที่มาจากดินดำ} &= (40 \times 99.34) / 100 \\ &= 39.73 \% \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{4. ผลรวมของ } \text{SiO}_2 \text{ ที่ได้จากวัตถุดิบทั้ง 3 ชนิด} &= 16.40 + 24.92 + 39.73 \\ &= 81.06\% \end{aligned}$$

5. องค์ประกอบทางเคมีตัวอื่น ใช้หลักการเดียวกันในการคำนวณ

จากตารางที่ 4.3 องค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบหลังผสมด้วยการคำนวณ

วัตถุดิบหลังผสม	องค์ประกอบทางเคมี (ร้อยละโดยน้ำหนัก)							
	SiO_2	Al_2O_3	Na_2O	CaO	MgO	K_2O	Fe_2O_3	TiO_2
	81.06	10.41	3.63	2.63	0.49	0.90	0.78	0.3

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นาย ฉัตรชัย พรุทธิโกคิน อายุ 24 ปี เกิดวันที่ 21 ธันวาคม 2528 สำเร็จการศึกษา
หลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
เมื่อปี 2551 และเข้าศึกษาต่อหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรม-
สิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีเดียวกัน