

การใช้ของเสียประเภทแก้ว และซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วทดแทนแร่เฟลด์สปาร์  
ในกระเบื้องเซรามิกแบบไม่เคลือบ

นางสาวพรทิพย์ วงศ์สายสุวรรณ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
ปีการศึกษา 2553  
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

UTILIZATION OF GLASS SCRAP AND SPENT SILICA-ALUMINA FOR FELDSPAR  
REPLACEMENT IN UNGLAZED CERAMIC TILE

Miss Porntip Wongsaisuwan

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 2010  
Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การใช้ของเสียประเภทแก้ว และซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว

โดย

ทดแทนแร่เฟลด์สปาร์ในกระเบื้องเซรามิกแบบไม่เคลือบ

สาขาวิชา

นางสาวพรทิพย์ วงศ์สายสุวรรณ

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

รองศาสตราจารย์ ดร. เพ็ชรพร เชาวกิจเจริญ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ศิริธันว์ เจียมศิริเลิศ

---

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็น  
ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทมหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(รองศาสตราจารย์ ดร. บุญสม เลิศหิรัญวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร. ฐเรศ ศรีสถิตย์)

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

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ศิริธันว์ เจียมศิริเลิศ)

..... กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วิบูลย์ ศรีเจริญชัยกุล)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย  
(อาจารย์ ดร. สุวิสา มหาสันทนะ)

พรทิพย์ วงศ์สายสุวรรณ : การใช้ของเสียประเภทแก้ว และซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว  
ทดแทนแร่เฟลด์สปาร์ในกระเบื้องเซรามิกแบบไม่เคลือบ(UTILIZATION OF GLASS  
SCRAP AND SPENT SILICA-ALUMINA FOR FELDSPAR REPLACEMENT IN  
UNGLAZED CERAMIC TILE) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รศ.ดร.เพ็ชรพร เซาวกิจ  
เจริญ, อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม: ผศ.ดร.ศิริพันธ์ุ เจียมศิริเลิศ, 133 หน้า.

งานวิจัยนี้ศึกษาการปรับอัตราส่วนผสมวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตกระเบื้องเซรามิกด้วยเศษ  
แก้วสีเขียวและซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วเพื่อทดแทนแร่เฟลด์สปาร์จากการหาองค์ประกอบทางเคมี  
ที่เหมาะสมในการผลิตกระเบื้องเซรามิกโดยมีอัตราส่วนผสมวัตถุดิบในการผลิตกระเบื้องเซรามิก  
คือ ดินดำต่อเศษแก้วสีเขียวและซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว 8 ต่อ 5 คิดเป็นร้อยละ 60 ของส่วนผสม  
ทั้งหมด รวมกับทรายแก้วอบแห้งร้อยละ 40 ผสมด้วยหม้อบดขึ้นรูปเป็นแผ่นกระเบื้องขนาด 4x4  
ตารางนิ้ว ด้วยความดันการอัดขึ้นรูป 100 บาร์ เผาที่อุณหภูมิ 1250, 1200, 1150 และ 1100  
องศาเซลเซียส นำตัวอย่างมาทดสอบคุณภาพทางกายภาพพบว่าทุกอัตราส่วนการทดแทนผ่าน  
การเผาที่อุณหภูมิ 1150 องศาเซลเซียสขึ้นไปผ่านมาตรฐานอุตสาหกรรมกระเบื้องปูพื้น (มอก.37-  
2529) และกระเบื้องบุผนัง(มอก.614-2529) โดยอัตราส่วนการทดแทนและอุณหภูมิที่เหมาะสม  
ในเชิงวิศวกรรมและเชิงเศรษฐศาสตร์เพื่อช่วยประหยัดพลังงานในกระบวนการผลิตคืออัตราส่วน  
การทดแทนแร่เฟลด์สปาร์ด้วยเศษแก้วสีเขียวและซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วเป็นร้อยละ 35:65 ผล  
การทดลองพบว่าตัวอย่างที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 1150 องศาเซลเซียสให้ค่ากำลังรับแรงดัด  
เท่ากับ 28.76 เมกกะปาสคาล ค่าการหดตัวร้อยละ 12.41 ค่าการดูดซึมน้ำร้อยละ 3.62 และ  
ผลการวิเคราะห์เฟสด้วยวิธีเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกชัน (XRD) พบเฟสซิลิเกต และการพิจารณาภาพ  
ขยายของเนื้อกระเบื้องพบการเกิดผลึกรูปเข็มของซิลิเกต ซึ่งช่วยทำให้เกิดความแข็งแรงใน  
กระเบื้องได้ จากการประมาณค่าใช้จ่ายเบื้องต้นของวัตถุดิบและพลังงานที่ใช้ในกระบวนการผลิต  
กระเบื้องที่ใช้อัตราส่วนการทดแทนมีค่าใช้จ่ายเท่ากับ 5.66 บาทต่อแผ่นเมื่อเปรียบเทียบกับ  
อัตราส่วนที่ไม่ใช้การทดแทนมีค่าใช้จ่ายเท่ากับ 5.75 บาทต่อแผ่น ซึ่งพบว่าการนำของเสียที่เป็น  
เศษแก้วสีเขียวและซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วมาทดแทนแร่เฟลด์สปาร์สามารถลดต้นทุนในการผลิต  
ลงได้ 0.1 บาทต่อแผ่น

|                              |  |
|------------------------------|--|
| ภาควิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม  | ลายมือชื่อ.....                            |
| สาขาวิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม | ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก..... |
| ปีการศึกษา 2553              | ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม..... |

# # 5270404021 : MAJOR ENVIRONMENTAL ENGINEERING

KEYWORDS : GLASS SCRAPS / SPENT SILICA-ALUMINA / CERAMIC TILE

PORNTIP WONGSAISUWAN : UTILIZATION OF GLASS SCRAP AND SPENT SILICA-ALUMINA FOR FELDSPAR REPLACEMENT IN UNGLAZED CERAMIC TILE. ADVISOR: ASSOC.PROF. PETCHPORN CHAWAKITCHAREON, Ph.D., CO-ADVISOR: ASST. PROF. SIRITHAN JIEMSIRILERS, Ph.D., 133 pp.

This research studied the adjustment of mixed ratio with replacement of feldspar by using green glass cullet and spent silica-alumina in ceramic tile body. The optimal mixed ratio of ball clay with green glass cullet and spent silica-alumina that used in this research was 8 to 5, equal to 60% of the totals. These are combined with silica sand 40% and pressed to ceramic tiles with size 4 x 4 squared inches by using pressure 100 bars and firing with ball mill at 1250, 1200, 1150 and 1100°C. The samples are tested Physical quality, founded that all replacement ratios with firing over 1150 °C passed The Thailand Industrial Standard of floor tile (TISI 37-2529) and wall tile (TISI 614-2529). The optimal temperature and percent ratio of mixed replacement which corresponded to engineering and economical for saving energy with replace feldspar by using percent ratio of green glass cullet and spent silica-alumina was at 35:65. The result indicated that samples with firing temperature at 1150°C, provided bending strength 28.76 MPa, the percentage of firing shrinkage was 12.4, the percentage of water absorption was 3.62. Moreover, the X-ray Diffractometer examination found the mullite phase occurred when zoom ceramic tile body found mullite needle crystals effect on strengthen of the ceramic tile. The cost estimation of raw material using replace ratio and energy expense was at 5.66 Baht per piece when compared to samples without replace ratio was at 5.75 Baht per piece. Therefor the result showed that replacement feldspar with using green glass cullet and spent silica-alumina could saving production cost 0.1 Baht per piece.

Department : Environmental Engineering Student's Signature .....

Field of Study : Environmental Engineering Advisor's Signature .....

Academic Year : 2010..... Co-advisor's Signature .....

## กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. เพ็ชรพร เชาวกิจเจริญ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศิริธันว์ เจียมศิริเลิศ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่กรุณาให้โอกาสในการดำเนินงานวิจัยครั้งนี้โดยให้คำปรึกษา ความรู้ คำอธิบายและช่วยอำนวยความสะดวกในการปฏิบัติงานวิจัยมาโดยตลอดจนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร. ธเรศ ศรีสถิตย์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วิบูลย์ ศรีเจริญชัยกุล และ อาจารย์ ดร. สุวิสา มหาสันทนะ ที่กรุณาเสียสละเวลาอันมีค่ามาให้ความรู้ คำชี้แนะ จนวิทยานิพนธ์สำเร็จไปได้ด้วยดี

คณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ทุกท่านที่ได้อบรมสั่งสอน ให้ความรู้ และคำปรึกษา

ขอขอบคุณบริษัท ซีเบลโก้ มิเนอรัลส์ (ประเทศไทย) จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์ ดินดำเฟลด์สปาร์ และทรายแก้วมาเป็นวัสดุดิบในงานวิจัย ขอขอบคุณโรงงานรีไซเคิลแก้วที่ได้อนุเคราะห์เศษแก้วมาเป็นวัสดุดิบในงานวิจัย และขอขอบคุณโรงงานผลิตสารประกอบไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ให้ความอนุเคราะห์ซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วมาเป็นวัสดุดิบในงานวิจัย

ขอขอบพระคุณ ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ และภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่เอื้อเฟื้อสถานที่ในการปฏิบัติงานวิจัย โดยเฉพาะครู สมคิด หัวหน้าฝ่ายปฏิบัติการประจำภาควิชาวัสดุศาสตร์ ที่ช่วยให้คำปรึกษา และคอยอำนวยความสะดวกในการใช้ห้องปฏิบัติการตลอดมา

วิทยานิพนธ์เล่มนี้ได้รับการสนับสนุนทุนวิจัยจาก “ทุน 90 ปี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย” กองทุนรัชดาภิเษกสมโภช รุ่นที่ 14 (1/2554) ผู้วิจัยจึงใคร่ขอแสดงความขอบคุณอย่างสูงมา ณ ที่นี้ด้วย

สุดท้ายนี้ ขอขอบคุณครอบครัวของผู้วิจัย ที่คอยสนับสนุนอยู่เบื้องหลังในทุกๆความสำเร็จ และขอบคุณทุกๆ คน ที่คอยให้ความรัก คำปรึกษาและความช่วยเหลือ คอยเป็นกำลังใจที่ดีให้เสมอมา

# สารบัญ

|   | หน้า     |
|---|----------|
| บทคัดย่อภาษาไทย.....                                | ง        |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....                             | จ        |
| กิตติกรรมประกาศ.....                                | ฉ        |
| สารบัญ.....   | ช        |
| สารบัญตาราง.....                                    | ฎ        |
| สารบัญภาพ.....                                      | ท        |
| คำนิยาม.....  | ด        |
| <b>บทที่ 1 บทนำ.....</b>                            | <b>1</b> |
| 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....             | 1        |
| 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....                    | 2        |
| 1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....                          | 2        |
| 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....                  | 2        |
| <b>บทที่ 2 เอกสาร และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....</b> | <b>3</b> |
| 2.1 เซรามิก.....                                    | 3        |
| 2.2 อุตสาหกรรมเซรามิกของไทย.....                    | 3        |
| 2.3 บทบาทและสถานะเศรษฐกิจอุตสาหกรรม.....            | 3        |
| 2.4 สถานภาพของผลิตภัณฑ์เซรามิกในประเทศไทย.....      | 4        |
| 2.5 โครงสร้างต้นทุนการผลิตอุตสาหกรรมเซรามิก.....    | 5        |
| 2.6 วัตถุดิบในการผลิตเซรามิก.....                   | 7        |
| 2.6.1 ดิน.....                                      | 8        |
| 2.6.2 ตัวหลอมละลายในเนื้อดิน.....                   | 12       |
| 2.6.3 ตัวทนไฟ.....                                  | 14       |
| 2.7 ทRAYแก้ว.....                                   | 17       |
| 2.8 แก้ว.....                                       | 18       |
| 2.9 ซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว.....                  | 22       |
| 2.10 กระเบื้องเซรามิก.....                          | 25       |

|  | หน้า      |
|--|-----------|
| 2.10.1 ความหมายของกระเบื้องตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม...  | 25        |
| 2.10.2 ชนิดของกระเบื้อง.....   | 25        |
| 2.10.3 กระบวนการผลิตกระเบื้องเซรามิก.....  | 26        |
| 2.10.4 การขึ้นรูปผลิตภัณฑ์เซรามิกโดยใช้แรงอัด.....   | 26        |
| 2.10.5 กลไกการอบผลิตภัณฑ์.....   | 28        |
| 2.10.6 ตัวแปรเบื้องต้นที่มีผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์เซรามิก.....   | 28        |
| 2.10.7 ปฏิกริยาที่เกิดขึ้นระหว่างการเผาผลิตภัณฑ์เซรามิก.....   | 29        |
| 2.10.8 จุดสุกตัวหรืออุณหภูมิสุกตัวของเนื้อดินปั้น.....   | 30        |
| 2.10.9 การควบคุมอุณหภูมิของเตาเผาในการเผากระเบื้องเซรามิก.....   | 30        |
| 2.11 ค่าโมดูลัสการแตกหัก หรือค่ากำลังรับแรงดัด.....  | 31        |
| 2.12 การศึกษาที่เกี่ยวข้องกับการวิจัย.....   | 32        |
| <b>บทที่ 3 แผนการทดลองและการดำเนินการวิจัย.....</b>  | <b>39</b> |
| 3.1 การเตรียมวัสดุดิบ และอุปกรณ์ในงานวิจัย.....  | 40        |
| 3.1.1 วัสดุดิบที่ใช้ในงานวิจัย.....  | 40        |
| 3.1.2 สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย.....   | 40        |
| 3.1.3 เครื่องมือ และอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย.....   | 40        |
| 3.2 วิธีการดำเนินการวิจัย.....   | 41        |
| <b>บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง.....</b>   | <b>48</b> |
| 4.1 ศึกษาองค์ประกอบทางเคมีด้วยเครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์และหาค่าการกระจายขนาดของวัสดุดิบ.....              | 48        |
| 4.2 ศึกษาการชะละลายของโลหะหนักในซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วโดยวิธี Waste Extraction Test (WET).....            | 53        |
| 4.3 การวิเคราะห์เฟสในเนื้อกระเบื้อง(XRD)และการวิเคราะห์ภาพขยายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน (SEM)..... | 53        |
| 4.3.1 การวิเคราะห์เฟสในเนื้อกระเบื้องด้วยวิธีเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน.....   | 53        |



|  |           |
|--|-----------|
| 4.3.2 เปรียบเทียบภาพขยายทางจุลภาคของกระเบื้องที่ผ่านมาตรฐาน<br>ผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม.....                            | 56        |
| 4.4 ผลการศึกษาคุณสมบัติต่อการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางกายภาพของ<br>กระเบื้อง.....                                    | 61        |
| 4.5 ศึกษาผลของอุณหภูมิที่เหมาะสมในการเผาขึ้นรูปกระเบื้อง.....  | 63        |
| 4.5.1 การทดสอบค่ากำลังรับแรงดัดของกระเบื้อง.....   | 63        |
| 4.5.2 การวิเคราะห์ค่าการหดตัว.....   | 66        |
| 4.5.3 การทดสอบค่าการดูดซึมน้ำ.....   | 67        |
| 4.5.4 การทดสอบการทนสารเคมี.....  | 69        |
| 4.5.5 ศึกษาผลของอุณหภูมิตั้งแต่ 1150 และ 1100 องศาเซลเซียส   | 70        |
| 4.6 ประเมินการค่าใช้จ่ายเบื้องต้นของผลงานวิจัย.....  | 71        |
| <b>บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ.....</b>   | <b>73</b> |
| 5.1 สรุปผลการวิจัย.....  | 73        |
| 5.2 ข้อเสนอแนะ.....  | 75        |
| <b>รายการอ้างอิง.....</b>  | <b>76</b> |
| <b>ภาคผนวก.....</b>  | <b>80</b> |
| ภาคผนวก ก. ข้อมูลผลการทดสอบกระเบื้องเซรามิกหลังการเผา.....   | 80        |
| ภาคผนวก ข. ข้อมูลผลการหาค่าความหนาแน่นของน้ำดินและน้ำหนักค้าง<br>บนตะแกรง.....                                     | 94        |
| ภาคผนวก ค. ข้อมูลผลการวิเคราะห์การกระจายขนาดของอนุภาควัตถุดิบ.....   | 98        |
| ภาคผนวก ง. ข้อมูลผลการวิเคราะห์เอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคชั่น (XRD).....  | 104       |
| ภาคผนวก จ. ข้อมูลผลการวิเคราะห์ภาพขยายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน<br>แบบสแกน.....                                 | 111       |
| ภาคผนวก ฉ. ภาพอุปกรณ์ และเครื่องมือในงานวิจัย.....   | 114       |
| ภาคผนวก ช. การแสดงวิธีคำนวณการหาผลองค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบ<br>และการหาองค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบหลังผสม..... | 119       |

|  |            |
|--|------------|
| ภาคผนวก ซ. ศึกษาการชะละลายของโลหะหนักในซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วโดย<br>วิธี Waste Extraction Test (WET)..... | 123        |
| ภาคผนวก ฉ. การแสดงวิธีคำนวณค่าใช้จ่ายเบื้องต้นในการผลิตกระเบื้องเซรามิก.....                                 | 125        |
| <b>ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....</b>   | <b>133</b> |

## สารบัญตาราง

|   | หน้า |
|---|------|
| ตารางที่ 2.1 โครงสร้างต้นทุนการผลิตผลิตภัณฑ์เซรามิก.....  | 5    |
| ตารางที่ 2.2 ปริมาณการผลิตเซรามิก ที่ใช้เป็นวัสดุก่อสร้าง.....  | 6    |
| ตารางที่ 2.3 สมบัติต่างๆ ของดินขาว.....   | 8    |
| ตารางที่ 2.4 สูตรเคมีของดินดำ.....  | 11   |
| ตารางที่ 2.5 ข้อดีและข้อเสียของดินดำ.....   | 12   |
| ตารางที่ 2.6 สมบัติทางกายภาพของเฟลด์สปาร์.....  | 13   |
| ตารางที่ 2.7 ชนิดของเฟลด์สปาร์จำแนกตามสารประกอบ.....  | 14   |
| ตารางที่ 2.8 สมบัติทางกายภาพของซิลิกา.....  | 15   |
| ตารางที่ 2.9 สมบัติทางกายภาพของอะลูมินา.....  | 16   |
| ตารางที่ 2.10 ส่วนประกอบซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว.....  | 24   |
| ตารางที่ 3.1 ส่วนผสมของกระเบื้องเซรามิกในงานวิจัย.....  | 43   |
| ตารางที่ 4.1 ผลวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบด้วยเครื่องเอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนซ์  | 49   |
| ตารางที่ 4.2 องค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบหลังผสมด้วยการคำนวณ.....   | 50   |
| ตารางที่ 4.3 ผลการวิเคราะห์การชะละลายของโลหะหนักในซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว.....  | 53   |
| ตารางที่ 4.4 แสดงค่ากำลังรับแรงดัด ค่าการดูดซึมน้ำ ค่าการหดตัว และการทนสารเคมี<br>ของกระเบื้องหลังเผาขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 1250 องศาเซลเซียส.....        | 63   |
| ตารางที่ 4.5 ค่ากำลังรับแรงดัดของกระเบื้องหลังเผา (เมกกะปาสคาล).....  | 65   |
| ตารางที่ 4.6 ค่าการหดตัวของกระเบื้องหลังเผา (ร้อยละ).....   | 66   |
| ตารางที่ 4.7 ค่าการดูดซึมน้ำของกระเบื้องหลังเผา (ร้อยละ).....   | 68   |
| ตารางที่ 4.8 ผลการทดสอบการทนสารเคมีของกระเบื้องที่อัตราส่วนทดแทนด้วยเศษแก้ว<br>สีเขียวและซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว โดยผ่านการเผาที่อุณหภูมิต่างๆ..... | 69   |
| ตารางที่ 4.9 แสดงลักษณะทางกายภาพของกระเบื้องหลังเผาที่อุณหภูมิ 1125<br>องศาเซลเซียส.....  | 70   |
| ตารางที่ 4.10 ค่าใช้จ่ายเบื้องต้นในการผลิตกระเบื้องของงานวิจัย.....   | 72   |
| ตารางที่ 4.11 เปรียบเทียบค่าใช้จ่ายเบื้องต้นในการผลิตกระเบื้องจากของเสียประเภทต่างๆ   | 72   |



|   |     |
|---|-----|
| ตารางที่ ผ15 ค่าความหนาแน่นของน้ำดินที่ทดแทนด้วยเศษแก้วสีเขียวและซิลิกา-<br>อะลูมินาที่ใช้แล้วตามอัตราส่วนต่างๆ เผาที่ 1200 องศาเซลเซียส.....   | 95  |
| ตารางที่ ผ16 ค่าความหนาแน่นของน้ำดินที่ทดแทนด้วยเศษแก้วสีเขียวและซิลิกา-<br>อะลูมินาที่ใช้แล้วตามอัตราส่วนต่างๆ เผาที่ 1250 องศาเซลเซียส.....   | 96  |
| ตารางที่ ผ17 น้ำหนักค้ำบนตะแกรงที่ทดแทนด้วยเศษแก้วสีเขียวและซิลิกา-<br>อะลูมินาที่ใช้แล้วตามอัตราส่วนต่างๆ เผาที่ 1100 องศาเซลเซียส.....  | 96  |
| ตารางที่ ผ18 น้ำหนักค้ำบนตะแกรงที่ทดแทนด้วยเศษแก้วสีเขียวและซิลิกา-<br>อะลูมินาที่ใช้แล้วตามอัตราส่วนต่างๆ เผาที่ 1150 องศาเซลเซียส.....  | 96  |
| ตารางที่ ผ19 น้ำหนักค้ำบนตะแกรงที่ทดแทนด้วยเศษแก้วสีเขียวและซิลิกา-<br>อะลูมินาที่ใช้แล้วตามอัตราส่วนต่างๆ เผาที่ 1200 องศาเซลเซียส.....  | 97  |
| ตารางที่ ผ20 น้ำหนักค้ำบนตะแกรงที่ทดแทนด้วยเศษแก้วสีเขียวและซิลิกา-<br>อะลูมินาที่ใช้แล้วตามอัตราส่วนต่างๆ เผาที่ 1250 องศาเซลเซียส.....  | 97  |
| ตารางที่ ผ21 ภาพขยาย 1500 เท่า ของกระเบื้องที่ผ่านมาตรฐานผลิตภัณฑ์กระเบื้องดิน<br>เผาปูพื้นและบุผนังจากการทดแทนด้วยเศษแก้วสีเขียวและซิลิกา-อะลูมินา<br>ที่ใช้แล้วตามอนุกรมการเผาต่างๆ.....  | 112 |
| ตารางที่ ผ22 ภาพขยาย 10000 เท่า ของกระเบื้องที่ผ่านมาตรฐานผลิตภัณฑ์กระเบื้องดิน<br>เผาปูพื้นและบุผนังจากการทดแทนด้วยเศษแก้วสีเขียวและซิลิกา-อะลูมินา<br>ที่ใช้แล้วตามอนุกรมการเผาต่างๆ..... | 113 |
| ตารางที่ ผ23 องค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบ ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่องเอกซเรย์<br>ฟลูออเรสเซนส์.....  | 120 |
| ตารางที่ ผ24 การปรับอัตราส่วนขององค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบให้เป็นร้อยละ 100.....  | 120 |
| ตารางที่ ผ25 ค่าใช้จ่ายเบื้องต้นของกระเบื้องโดยใช้เฟลด์สปาร์.....   | 126 |
| ตารางที่ ผ26 ค่าใช้จ่ายของกระเบื้องที่ทดแทนด้วยเศษแก้วสีเขียวและซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว   | 129 |

## สารบัญภาพ

|   | หน้า |
|---|------|
| ภาพที่ 2.1 แผนผังวัตถุดิบบางชนิดในการผลิตเซรามิก.....   | 7    |
| ภาพที่ 2.2 ปฏิบัติการเผาเซรามิก เมื่อผ่านอุณหภูมิต่างๆ และการเปลี่ยนแปลงผลิตภัณฑ์ทางโครงสร้างเคมี.....  | 9    |
| ภาพที่ 2.3 ปฏิบัติการของผลิตภัณฑ์ซีลิกาเมื่อได้รับความร้อน.....   | 16   |
| ภาพที่ 2.4 แสดงกระบวนการผลิตสารประกอบไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ).....   | 22   |
| ภาพที่ 2.5 แสดงสูตรโครงสร้างของสารแอนทราควิโนน.....   | 25   |
| ภาพที่ 3.1 แผนผังขั้นตอนการผลิตกระเบื้องเซรามิกในงานวิจัย.....  | 43   |
| ภาพที่ 3.2 แผนผังขั้นตอนการทดสอบค่ากำลังรับแรงดัด.....  | 45   |
| ภาพที่ 3.3 แผนผังขั้นตอนการทดสอบค่าการดูดซึมน้ำ.....  | 46   |
| ภาพที่ 3.4 แผนผังขั้นตอนการทดสอบค่าการทนกรด.....  | 47   |
| ภาพที่ 3.5 แผนผังขั้นตอนการทดสอบค่าการทนด่าง.....   | 47   |
| ภาพที่ 4.1 การกระจายขนาดของดินดำคัดผ่านตะแกรงเบอร์ 100.....   | 50   |
| ภาพที่ 4.2 การกระจายขนาดของเฟลด์สปาร์คัดผ่านตะแกรงเบอร์ 100.....  | 51   |
| ภาพที่ 4.3 การกระจายขนาดของทรายแก้วคัดผ่านตะแกรงเบอร์ 100.....  | 51   |
| ภาพที่ 4.4 การกระจายขนาดของเศษแก้วสีเขียวคัดผ่านตะแกรงเบอร์ 100.....  | 52   |
| ภาพที่ 4.5 การกระจายขนาดของซีลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วคัดผ่านตะแกรงเบอร์ 100.....   | 52   |
| ภาพที่ 4.6 กราฟเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกชันของกระเบื้องที่ทดแทนตามอัตราส่วนต่างๆ<br>เผาที่อุณหภูมิ 1250 องศาเซลเซียส.....                                       | 54   |
| ภาพที่ 4.7 กราฟเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกชันของกระเบื้องที่ทดแทนตามอัตราส่วนต่างๆ<br>เผาที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส.....                                       | 55   |
| ภาพที่ 4.8 กราฟเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกชันของกระเบื้องที่ทดแทนตามอัตราส่วนต่างๆ<br>เผาที่อุณหภูมิ 1150 องศาเซลเซียส.....                                       | 55   |
| ภาพที่ 4.9 ภาพขยาย 1500 เท่า ของกระเบื้องที่ทดแทนด้วยเศษแก้วและและซีลิกา-<br>อะลูมินาที่ใช้แล้ว (ก) 0:0 และ (ข) 15:85 เผาที่อุณหภูมิ 1250 องศาเซลเซียส  | 57   |
| ภาพที่ 4.10 ภาพขยาย 1500 เท่า ของกระเบื้องที่ทดแทนด้วยเศษแก้วและและซีลิกา-<br>อะลูมินาที่ใช้แล้ว (ก) 0:0 และ (ข) 35:65 เผาที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส | 58   |
| ภาพที่ 4.11 ภาพขยาย 1500 เท่า ของกระเบื้องที่ทดแทนด้วยเศษแก้วและและซีลิกา-<br>อะลูมินาที่ใช้แล้ว (ก) 0:0 และ (ข) 35:65 เผาที่อุณหภูมิ 1150 องศาเซลเซียส | 59   |

|  |     |
|--|-----|
| ภาพที่ 4.12 ภาพขยาย10000 เท่า แสดงผลึกมัลไลต์จากการทดแทนด้วยเศษแก้วและ<br>ซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วของอัตราส่วนต่างๆ เผาที่อุณหภูมิตั้งที่ 1250 (ข)<br>1200 และ(ค)1150 องศาเซลเซียส.....                               | 60  |
| ภาพที่ 4.13 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงดัดกับอัตราส่วนการ<br>ทดแทนเฟลด์สปาร์ด้วยเศษแก้วสีเขียวและซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วเมื่อเผา<br>ที่อุณหภูมิตั้งที่ 1100 1150 1200 และ 1250 องศาเซลเซียส..... | 65  |
| ภาพที่ 4.14 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างค่าการหดตัวกับอัตราส่วนการทดแทน<br>เฟลด์สปาร์ด้วยเศษแก้วสีเขียวและซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วเมื่อเผาที่อุณหภูมิตั้งที่<br>1100 1150 1200 และ 1250 องศาเซลเซียส.....        | 67  |
| ภาพที่ 4.15 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดซึมน้ำกับอัตราส่วนการ<br>ทดแทนเฟลด์สปาร์ด้วยเศษแก้วสีเขียวและซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วเมื่อเผา<br>ที่อุณหภูมิตั้งที่ 1100 1150 1200 และ 1250 องศาเซลเซียส.....   | 68  |
| ภาพที่ 4.16 กระเบื้องที่ผ่านการทดสอบการทนกรด และด่าง (แสดงเฉพาะกระเบื้องที่ผ่าน<br>การเผาที่อุณหภูมิตั้งที่ 1150 องศาเซลเซียส) ที่ทดแทนด้วยเศษแก้วสีเขียวและ<br>ซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว 35:65.....                   | 69  |
| ภาพที่ ผ1 ผลวิเคราะห์การกระจายขนาดอนุภาคดินดำ.....   | 99  |
| ภาพที่ ผ2 ผลวิเคราะห์การกระจายขนาดอนุภาคเฟลด์สปาร์.....  | 100 |
| ภาพที่ ผ3 ผลวิเคราะห์การกระจายขนาดอนุภาคทรายแก้ว.....  | 101 |
| ภาพที่ ผ4 ผลวิเคราะห์การกระจายขนาดอนุภาคเศษแก้วสีเขียว.....  | 102 |
| ภาพที่ ผ5 ผลวิเคราะห์การกระจายขนาดอนุภาคซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว.....   | 103 |
| ภาพที่ ผ6 กราฟเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกชันของกระเบื้องที่ทดแทนด้วยเศษแก้วสีเขียวและ<br>ซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว 0:0 เผาที่ 1150 องศาเซลเซียส.....   | 105 |
| ภาพที่ ผ7 กราฟเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกชันของกระเบื้องที่ทดแทนด้วยเศษแก้วสีเขียวและ<br>ซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว 15:85 เผาที่ 1150 องศาเซลเซียส.....   | 105 |
| ภาพที่ ผ8 กราฟเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกชันของกระเบื้องที่ทดแทนด้วยเศษแก้วสีเขียวและ<br>ซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว 25:75 เผาที่ 1150 องศาเซลเซียส.....   | 106 |
| ภาพที่ ผ9 กราฟเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกชันของกระเบื้องที่ทดแทนด้วยเศษแก้วสีเขียวและ<br>ซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว 35:65 เผาที่ 1150 องศาเซลเซียส.....   | 106 |

|  |     |
|--|-----|
| ภาพที่ ๘10 กราฟเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกชันของกระบี่องที่ทดแทนด้วยเศษแก้วสีเขียวและ<br>ซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว 0:0 เผาที่ 1200 องศาเซลเซียส .....  | 107 |
| ภาพที่ ๘11 กราฟเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกชันของกระบี่องที่ทดแทนด้วยเศษแก้วสีเขียวและ<br>ซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว 15:85 เผาที่ 1200 องศาเซลเซียส..... | 107 |
| ภาพที่ ๘12 กราฟเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกชันของกระบี่องที่ทดแทนด้วยเศษแก้วสีเขียวและ<br>ซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว 25:75 เผาที่ 1200 องศาเซลเซียส..... | 108 |
| ภาพที่ ๘13 กราฟเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกชันของกระบี่องที่ทดแทนด้วยเศษแก้วสีเขียวและ<br>ซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว 35:65 เผาที่ 1200 องศาเซลเซียส..... | 108 |
| ภาพที่ ๘14 กราฟเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกชันของกระบี่องที่ทดแทนด้วยเศษแก้วสีเขียวและ<br>ซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว 0:0 เผาที่ 1250 องศาเซลเซียส .....  | 109 |
| ภาพที่ ๘15 กราฟเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกชันของกระบี่องที่ทดแทนด้วยเศษแก้วสีเขียวและ<br>ซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว 15:85 เผาที่ 1250 องศาเซลเซียส..... | 109 |
| ภาพที่ ๘16 กราฟเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกชันของกระบี่องที่ทดแทนด้วยเศษแก้วสีเขียวและ<br>ซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว 25:75 เผาที่ 1250 องศาเซลเซียส..... | 110 |
| ภาพที่ ๘17 กราฟเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกชันของกระบี่องที่ทดแทนด้วยเศษแก้วสีเขียวและ<br>ซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว 35:65 เผาที่ 1250 องศาเซลเซียส..... | 110 |
| ภาพที่ ๘18 ทรายแก้ว.....   | 115 |
| ภาพที่ ๘19 เศษแก้วสีเขียว.....   | 115 |
| ภาพที่ ๘20 เฟลด์สปาร์.....   | 115 |
| ภาพที่ ๘21 ซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว.....  | 115 |
| ภาพที่ ๘22 ดินดำ.....  | 115 |
| ภาพที่ ๘23 วัดฤดูบหลังผสม(เฟลด์สปาร์) .....  | 115 |
| ภาพที่ ๘24 วัดฤดูบหลังผสม(เศษแก้วสีเขียวและซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว).....   | 115 |
| ภาพที่ ๘25 กระบี่องที่ทดแทนด้วยเศษแก้วสีเขียวและซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว<br>เผาที่ 1250 องศาเซลเซียส.....                                   | 116 |
| ภาพที่ ๘26 กระบี่องที่ทดแทนด้วยเศษแก้วสีเขียวและซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว<br>เผาที่ 1200 องศาเซลเซียส.....                                   | 116 |



|  |     |
|--|-----|
| ภาพที่ ๘27 กระเบื้องที่ทดแทนด้วยเศษแก้วสีเขียวและซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว<br>แผ่นที่ 1150 องศาเซลเซียส..... | 117 |
| ภาพที่ ๘28 กระเบื้องที่ทดแทนด้วยเศษแก้วสีเขียวและซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว<br>แผ่นที่ 1100 องศาเซลเซียส..... | 117 |
| ภาพที่ ๘29 เครื่องบดขนาดเล็ก (Tube Mill) .....   | 118 |
| ภาพที่ ๘30 เครื่องร่อนคัดขนาด.....   | 118 |
| ภาพที่ ๘31 หม้ออบผสมวัสดุดิบ.....  | 118 |
| ภาพที่ ๘32 เครื่องบดผสมวัสดุดิบ.....   | 118 |
| ภาพที่ ๘33 เครื่องอัดขึ้นรูปกระเบื้อง.....   | 118 |
| ภาพที่ ๘34 เตเผาไฟฟ้า.....   | 118 |

## คำนิยาม

|  |   |
|--|---|
| ค่ากำลังรับแรงดัด<br>(Bending strength)  | คือ ความต้านแรงดัด (ปรีดา พิมพ์ขาวขำ, 2547)   |
| ค่าการหดตัวหลังเผา<br>(Firing shrinkage) | คือ ค่าการหดตัวของแท่งทดลอง หรือผลิตภัณฑ์หลังการเผา (ปรีดา พิมพ์ขาวขำ, 2547)  |
| ค่าการดูดซึมน้ำ<br>(Water absorption)    | คือ ค่าปริมาณน้ำที่กระเบื้องดูดซึมเข้าไปหลังจากต้มในน้ำเดือด 2 ชั่วโมง และทิ้งไว้ให้เย็น แล้วนำขึ้นมาเช็ดด้วยผ้าหมาด แล้วนำไปชั่งน้ำหนัก เทียบกับน้ำหนักแห้ง (มอก.614-2529, 2529) |
| การทนสารเคมี<br>(Chemical durability)    | คือ การไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงบนผิว เมื่อแช่กระเบื้องในสารละลายกรด และด่าง เป็นเวลา 7 วัน (มอก.614-2529, 2529)  |

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

อุตสาหกรรมเซรามิกเป็นอุตสาหกรรมที่ทำรายได้ให้กับประเทศไทยเป็นจำนวนมาก ในปี 2553 มีการส่งออกผลิตภัณฑ์เซรามิกที่สำคัญ โดยเฉพาะเครื่องใช้บนโต๊ะอาหาร, กระเบื้องปูพื้น บุนนัง และเครื่องสุขภัณฑ์ เมื่อเทียบจากปีก่อนเพิ่มขึ้นในอัตราร้อยละ 12.55 (ภาวะเศรษฐกิจอุตสาหกรรม, 2553) ดังนั้นจึงมีการขยายตัวของภาคอุตสาหกรรมเพิ่มมากขึ้น สำหรับกระบวนการผลิตสารประกอบไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ทำให้เกิดซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วประมาณ 100 ตันต่อปี โดยการบำบัดซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วโดยศูนย์บริการบำบัดกากอุตสาหกรรมของรัฐบาลเสียค่าใช้จ่ายเฉลี่ย 12,000 บาทต่อตัน และสารประกอบไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เป็นสารเคมีที่สำคัญในอุตสาหกรรมหลายประเภท เช่น อุตสาหกรรมการผลิตเครื่องสำอาง อิเล็กทรอนิกส์เซมิคอนดักเตอร์ ฯลฯ นอกจากนี้ยังมีของเสียประเภทแก้วที่ไม่ถูกนำมารีไซเคิลใช้ใหม่ ประมาณ 40,000 ตันต่อปี ดังนั้นในอุตสาหกรรมการผลิตเซรามิกได้สังเกตเห็นถึงปัญหาสิ่งแวดล้อมทั้งการใช้ทรัพยากรธรรมชาติ และด้านเศรษฐกิจ จึงได้มีการสนับสนุนให้ใช้วัตถุดิบราคาถูกทดแทนโดยมีเทคโนโลยีทันสมัยที่จะตรวจสอบและควบคุมกระบวนการผลิตให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีมาตรฐานและมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้ยังมีการศึกษาถึงการหมุนเวียนวัตถุดิบที่ไม่ใช้แล้วจากกระบวนการผลิตหนึ่งมาเป็นวัตถุดิบเริ่มต้นของกระบวนการผลิตหนึ่งและการทดแทนวัตถุดิบจากวัสดุของเสียที่ไม่ใช้แล้วซึ่งช่วยลดของเสียหรือของเสียที่เป็นมลพิษลงได้

งานวิจัยนี้จึงเน้นศึกษาการปรับปรุงและพัฒนาการผลิตกระเบื้องเซรามิกโดยปรับแต่งอัตราส่วนผสมวัตถุดิบจากการนำของเสียที่เป็นเศษแก้วสีเขียวและซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วซึ่งผ่านการคัดขนาดมาทดแทนแร่เฟลด์สปาร์เพื่อให้องค์ประกอบทางเคมีที่ได้มีค่าใกล้เคียงกับองค์ประกอบของเฟลด์สปาร์มากขึ้นในกระบวนการผลิตกระเบื้องเซรามิก ซึ่งในงานวิจัยเดิมนั้นได้มีการนำเศษแก้วสีเขียวมาทดแทนแร่เฟลด์สปาร์ ส่งผลให้ปริมาณอะลูมินาและปริมาณซิลิกามีค่าลดลง สำหรับปริมาณโซเดียมออกไซด์และแคลเซียมออกไซด์มีค่าเพิ่มมากขึ้นซึ่งองค์ประกอบดังกล่าวมีความสัมพันธ์กับสมบัติทางกายภาพและชนิดของผลึกในกระเบื้องหลังเผา ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงศึกษาการปรับสัดส่วนองค์ประกอบทางเคมีให้เหมาะสมโดยการเพิ่มของเสียประเภทกากซิลิกา-อะลูมินาไม่ใช้แล้วเป็นวัตถุดิบทดแทนควบคู่กับการใช้เศษแก้วสีเขียวเพื่อส่งผลให้กระเบื้องเซรามิกที่ได้มีคุณภาพดีขึ้นรวมถึงศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่ใช้ในการเผากระเบื้องเซรามิกและการเกิดผลึกมัลไลต์ซึ่งสามารถช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้กับผลิตภัณฑ์ได้มากขึ้นเป็นต้น

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. ศึกษาอัตราส่วนผสมวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตกระเบื้องเซรามิก โดยใช้เศษแก้วสีเขียวและซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วทดแทนแร่เฟลด์สปาร์และเพื่อหาองค์ประกอบทางเคมีที่เหมาะสมในการผลิตกระเบื้องเซรามิก
2. ศึกษาอุณหภูมิที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพและโครงสร้างทางจุลภาคของผลิตภัณฑ์
3. ประเมินค่าใช้จ่ายเบื้องต้นในกระบวนการผลิตกระเบื้องเซรามิกจากของเสียที่เป็นเศษแก้วสีเขียวและซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว

## 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

งานวิจัยนี้ศึกษาการนำเศษแก้วรีไซเคิลสีเขียวจากโรงงานรีไซเคิลแก้ว และซิลิกา-อะลูมินาที่ไม่ใช้แล้วจากโรงงานผลิตสารประกอบไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ เพื่อนำไปทดแทนแร่เฟลด์สปาร์ในการผลิตกระเบื้องเซรามิก จึงศึกษาและวิเคราะห์สมบัติของกระเบื้องเซรามิก ดังนี้

1. วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบด้วยวิธีเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (XRF)
2. เปรียบเทียบเฟสที่เกิดขึ้นในเนื้อกระเบื้องเซรามิกด้วยวิธีเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน (XRD) และพิจารณาภาพขยายพื้นผิวด้วยการส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน (SEM)
3. เปรียบเทียบกระเบื้องเซรามิกที่เตรียมได้กับค่ามาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมกระเบื้องดินเผาบุผนัง (มอก.614-2529) และค่ามาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมกระเบื้องดินเผาปูพื้น (มอก.37-2529)
4. ประเมินการค่าใช้จ่ายเบื้องต้นของวัตถุดิบและพลังงานที่ใช้ในกระบวนการผลิตโดยไม่นับรวมค่าแรงงาน

## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถลดต้นทุนการผลิตกระเบื้องเซรามิกจากการใช้ของเสียที่เป็นเศษแก้วและซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วมาทดแทนแร่เฟลด์สปาร์
2. ช่วยลดของเสียประเภทแก้วและซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วในปัจจุบันได้
3. เป็นแนวทางหนึ่งในการพัฒนา และปรับปรุงคุณภาพของกระเบื้องเซรามิกที่ใช้เศษแก้วและซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วทดแทนได้
4. ใช้เป็นแนวทางเพื่อพิจารณาทดแทนการใช้วัตถุดิบจากของเสียอื่นๆ ได้ในการผลิตกระเบื้องเซรามิก

## บทที่ 2

### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 เซรามิก (ceramic)

เซรามิก หมายถึง ผลิตภัณฑ์ซึ่งกรรมวิธีการผลิตต้องผ่านการเผาที่อุณหภูมิสูงหรือผลิตภัณฑ์ซึ่งส่วนประกอบของผลิตภัณฑ์ทั้งหมด หรือส่วนใหญ่ผลิตจากวัตถุดิบที่มีอยู่ตามธรรมชาติบนเปลือกโลก ได้แก่ เครื่องปั้นดินเผา ปอร์เซเลน วัสดุทนไฟ วัสดุก่อสร้างที่เป็นดินเผา วัสดุขัดถู โลหะเคลือบ ซีเมนต์ แก้ว วัสดุที่ใช้ในงานเกี่ยวข้องกับแม่เหล็กไฟฟ้า เป็นต้น (ปรีดา พิมพ์ขาวขำ, 2547)

#### 2.2 อุตสาหกรรมเซรามิกของไทย

อุตสาหกรรมเซรามิก หมายถึง โรงงานผลิตผลิตภัณฑ์ซึ่งส่วนประกอบของผลิตภัณฑ์ทั้งหมดหรือส่วนใหญ่ผลิตจากวัตถุดิบที่มีอยู่ตามธรรมชาติบนเปลือกโลกซึ่งกรรมวิธีการผลิตต้องผ่านการเผาที่อุณหภูมิสูง (กรมทรัพยากรธรณี, 2544)

อุตสาหกรรมเซรามิกเป็นหนึ่งในอุตสาหกรรมพื้นฐานหลักของไทย โดยเฉพาะมีประวัติการผลิตและการพัฒนาที่ยาวนานมาตั้งแต่โบราณ ตั้งแต่ยุคบ้านเชียง อายุมากกว่า 4,500-5,600 ปีก่อนประวัติศาสตร์ เริ่มจากภาชนะปั้นดินเผารูปสัตว์ดินเผาโดยค่อยๆ มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องภายหลังเมื่อติดต่อกับชาวยุโรปกับชนชาติจีนในสมัยยุคสุโขทัยจึงได้รับการถ่ายทอดเทคโนโลยีการผลิตเครื่องปั้นดินเผาจากดินขาวแบบ “สังกะโลก” ซึ่งเป็นต้นแบบของผลิตภัณฑ์เซรามิกในประเทศไทยต่อมา เมื่อถึงยุครัตนโกสินทร์การผลิตภาชนะเครื่องปั้นดินเผาได้มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องโดยมีการทำขามกระเบื้องจากดินขาวที่จังหวัดลำปางและราชบุรีโดยชาวจีนที่อพยพเข้ามาอยู่ในประเทศไทย สำหรับอุตสาหกรรมแก้วนั้นเริ่มจากได้มีการนำเครื่องแก้วจากประเทศตะวันตกเข้ามาใช้ตอนปลายสมัยกรุงศรีอยุธยาจนกระทั่งหลังสงครามโลกครั้งที่ 2 จึงมีการสร้างโรงงานผลิตเครื่องแก้วขึ้นภายในประเทศเพื่อทดแทนการนำเข้าจากต่างประเทศ ภายหลังปี พ.ศ. 2500 อุตสาหกรรมเซรามิกได้ถูกพัฒนาขยายตัวเติบโตอย่างต่อเนื่องถึงปัจจุบัน (กรมทรัพยากรธรณี, 2544)

#### 2.3 บทบาทและสถานะเศรษฐกิจอุตสาหกรรม

อุตสาหกรรมเซรามิกเป็นอุตสาหกรรมที่มีผลิตภัณฑ์มากมายหลายชนิดเป็นอุตสาหกรรมพื้นฐานของอุตสาหกรรมอื่นๆ เช่น อุตสาหกรรมก่อสร้าง อุตสาหกรรมแก้ว อุตสาหกรรมไฟฟ้า อุตสาหกรรมรถยนต์ตลอดจนอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์เป็นอุตสาหกรรมที่สามารถทำรายได้จากการส่งออกถึงปีละประมาณหลายพันล้านบาท ปัจจุบันแนวโน้มการส่งออก

ได้เพิ่มขึ้นสูงมาก อุตสาหกรรมเซรามิก แบ่งกว้างๆ ได้ 2 ประเภท คือ เซรามิกดั้งเดิม และเซรามิกชั้นสูง (วิวรรณ เทียนศิริ, 2546)

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

**เซรามิกชั้นสูง (Advanced Ceramics)** แบ่งเป็น เซรามิกในงานโครงสร้าง เซรามิกในงานอิเล็กทรอนิกส์

เซรามิกในงานโครงสร้าง เป็นเซรามิกที่ต้องรับน้ำหนักที่อุณหภูมิสูง ได้แก่ อุปกรณ์ที่ใช้ในงานบาดและตัดสิ่งของ คาร์ไบด์ ไนไตรด์ โบไรด์ อะลูมินา เซอร์โคเนีย เส้นใยเซรามิก ชิ้นส่วนเซรามิกในเครื่องยนต์ ตัวต้านทานอุณหภูมิสูง และตัวต้านทานการสึกหรอ

เซรามิกพวกอิเล็กทรอนิกส์ ได้แก่ เพอร์ไรต์ ไบโอเซรามิก ตัวนำยิ่งยวด เซรามิกในโลหะที่มีอำนาจแม่เหล็ก (อย่างแรงและอย่างอ่อน) แบเรียมไททาเนต นิเวเคลียร์เซรามิก ตัวเก็บประจุ ที่เก็บชีพ ไอซี ซีพอสเตรท อุปกรณ์ผลิตไฟฟ้า (เกิดจากการกดดันทางกลไกที่มีต่อผลึกที่ไม่นำไฟฟ้า) เทอร์มิสเตอร์ วอร์ริสเตอร์ ตัวกำเนิดประกายไฟ ออปติคอล ไฟเบอร์ เซรามิกในเครื่องส่งสัญญาณ (เซนเซอร์) และคะตะลิสต์แครีเออร์

อุตสาหกรรมเซรามิกในประเทศไทยเกือบทั้งหมดเป็น เซรามิกดั้งเดิม กระจก เครื่องสุขภัณฑ์ และกระจกนั้นเป็นวัสดุตกแต่งที่การผลิตจะเน้นเพื่อตอบสนองต่ออัตราการเติบโตและความต้องการใช้ภายในประเทศ โดยเฉพาะธุรกิจอสังหาริมทรัพย์ ส่วนถ้วยชามเซรามิก เครื่องแก้ว ใช้บนโต๊ะอาหารการผลิตจะเน้นเพื่อการส่งออกบรรจุภัณฑ์แก้ว (ขวดแก้ว) เป็นสินค้าขนส่งที่ลำบากเพราะแตกหักง่ายและต้นทุนในการดูแลค่อนข้างสูงทำให้ผลผลิตที่ได้เกือบทั้งหมดสนองความต้องการภายในประเทศเป็นส่วนใหญ่ซึ่งจะมีการส่งออกบ้างในรูปของบรรจุภัณฑ์ที่ไปพร้อมๆ กับผลิตภัณฑ์ และในส่วนของลูกถ้วยไฟฟ้าจะผลิตเพื่อตอบสนองกิจการสาธารณูปโภค(ไฟฟ้า) เป็นสำคัญ

## 2.4 สถานภาพของผลิตภัณฑ์เซรามิกในประเทศไทย

อุตสาหกรรมเซรามิกในประเทศไทยเกือบทั้งหมดเป็นเซรามิกดั้งเดิม ดังนั้นผลิตภัณฑ์เซรามิกในภาพรวมที่จะนำเสนอต่อไปนี้มีอยู่ 5 ประเภทด้วยกัน คือ

1. กระจกเซรามิก เป็นผลิตภัณฑ์ที่ใช้สินค้าประเภทต้นทุนและเทคโนโลยีในการผลิตสูงมากโรงงานส่วนใหญ่จะเป็นโรงงานขนาดใหญ่ได้มาตรฐานสามารถขยายกำลังการผลิตเพิ่มขึ้นได้ตลอดเวลา

2. เครื่องสุขภัณฑ์ เป็นผลิตภัณฑ์ที่ใช้ต้นทุนและเทคโนโลยีการผลิตสูงโรงงานส่วนใหญ่ได้มาตรฐานมีการพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตอย่างต่อเนื่อง

3. ถ้วยชามเซรามิก เป็นอุตสาหกรรมที่เน้นแรงงานและความสามารถในการออกแบบมากครองตลาดทั้งในและต่างประเทศเป็นอุตสาหกรรมเซรามิกที่ทำรายได้สูงสุดจากการส่งออก

4. ของชำร่วยและเครื่องประดับ เป็นผลิตภัณฑ์ที่เน้นการออกแบบเป็นสำคัญ เป็นอุตสาหกรรมที่ใช้แรงงานมากช่วยสร้างงานในท้องถิ่น เป็นผลิตภัณฑ์ที่เคยสร้างรายได้เป็นอันดับสองจากการส่งออกรองจากถ้วยชามแต่ในสถานการณ์ปัจจุบันสูญเสียอันดับการครองตลาดให้กับสินค้าเครื่องสุขภัณฑ์

5. ลูกถ้วยไฟฟ้า เป็นผลิตภัณฑ์ที่ใช้เทคโนโลยีในการผลิตสูงมากตลาดขึ้นอยู่กับกิจการสาธารณูปโภค (ไฟฟ้า) เป็นสำคัญ

## 2.5 โครงสร้างต้นทุนการผลิตอุตสาหกรรมเซรามิก

อุตสาหกรรมเซรามิกเป็นอุตสาหกรรมหนึ่งที่มีความสำคัญต่อระบบเศรษฐกิจไทยที่รัฐให้การส่งเสริมเนื่องจากเป็นอุตสาหกรรมพื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับอุตสาหกรรมอื่นๆ มากมายในภาพรวมอุตสาหกรรมเซรามิกนั้นเป็นอุตสาหกรรมที่ใช้วัตถุดิบภายในประเทศเป็นส่วนใหญ่และพึ่งพาวัตถุดิบนำเข้า (สี สารเคมี สารเคลือบ) ในสัดส่วนที่น้อยแต่ใช้แรงงานมาก โดยเฉพาะด้านกำลังการผลิต และการจ้างงานอุตสาหกรรมเซรามิกไทยดังแสดงในตารางที่ 2.1 และพบว่าในปี 2553 เครื่องใช้บนโต๊ะอาหารในครัวและบ้านเรือน มีมูลค่าการส่งออกมากที่สุด เมื่อเทียบกับผลิตภัณฑ์ประเภทอื่นๆ โดยมีสัดส่วนการส่งออกร้อยละ 69.10 ของการส่งออกเซรามิกทั้ง 5 ประเภท รองลงมาคือ กระเบื้องปูพื้น บุนนังและโมเสค, เครื่องสุขภัณฑ์, ลูกถ้วยไฟฟ้า และของชำร่วย, เครื่องประดับ โดยมีสัดส่วนร้อยละ 13.87, 11.26, 3.38 และ 2.39 ตามลำดับ (อุตสาหกรรมเซรามิกของประเทศไทย, 2553)

ตารางที่ 2.1 การผลิต และการจ้างงานอุตสาหกรรมเซรามิกไทย ปี 2553

| ผลิตภัณฑ์                | กำลังการผลิตรวม    | จำนวนแรงงาน<br>(คน) | สัดส่วนการส่งออก<br>(ร้อยละ) |
|--------------------------|--------------------|---------------------|------------------------------|
| กระเบื้องเซรามิก         | 150 ล้านชิ้นต่อปี  | 10,000              | 13.87                        |
| เครื่องสุขภัณฑ์          | 13.5 ล้านชิ้นต่อปี | 8,000               | 11.26                        |
| เครื่องใช้บนโต๊ะอาหาร    | 250 ล้านชิ้นต่อปี  | 20,000              | 69.10                        |
| ของชำร่วย, เครื่องประดับ | 150,000 ตันต่อปี   | 35,000              | 2.39                         |
| ลูกถ้วยไฟฟ้า             | 10,000 ตันต่อปี    | 2,000               | 3.38                         |

ที่มา: แนวทางการส่งเสริมและสนับสนุนอุตสาหกรรมเซรามิก, กลุ่มอุตสาหกรรมเซรามิก  
สภาอุตสาหกรรมแห่งประเทศไทย

ตารางที่ 2.2 ปริมาณการผลิตเซรามิกที่ใช้เป็นวัสดุก่อสร้าง

| ผลิตภัณฑ์                          | ปี 2550     | ปี 2551     | ปี 2552     | ปี 2553     |
|------------------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| กระเบื้องปูพื้น บุผนัง (ตารางเมตร) | 135,828,958 | 142,332,582 | 142,000,000 | 142,000,000 |
| อัตราการเปลี่ยนแปลง (ร้อยละ)       | -5.56       | 4.79        | -1.67       | 14.81       |
| เครื่องสุขภัณฑ์ (ชิ้น)             | 8,197,938   | 8,592,122   | 5,810,000   | 7,100,000   |
| อัตราการเปลี่ยนแปลง (ร้อยละ)       | -0.98       | 4.81        | -30.08      | 21.01       |

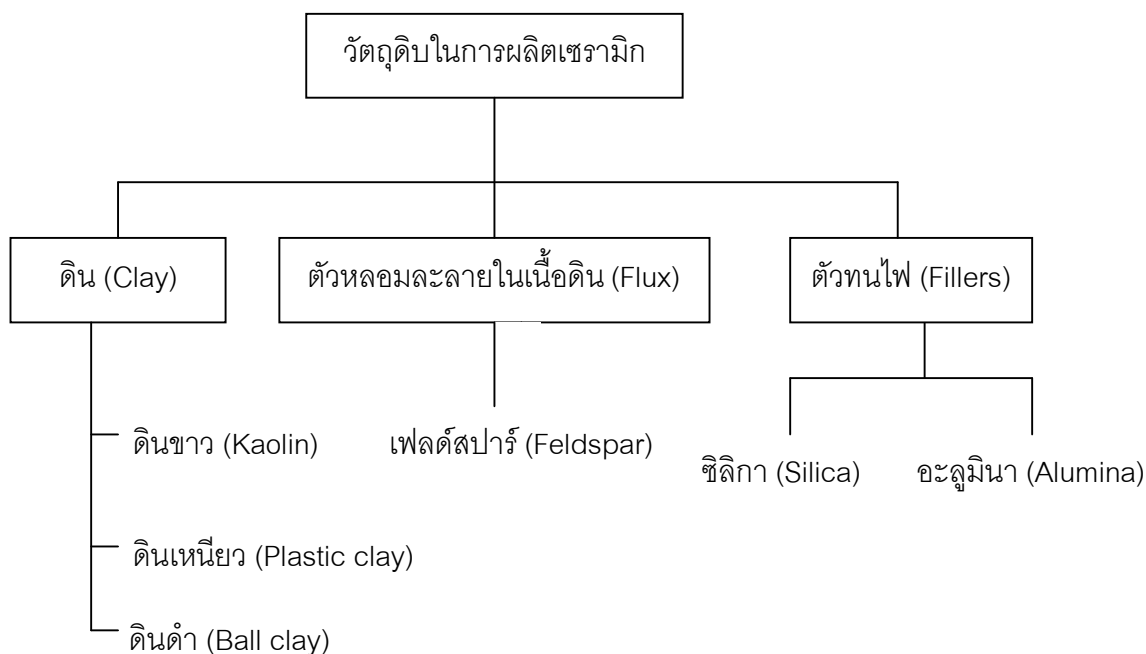
การผลิตเซรามิกที่ใช้เป็นวัสดุก่อสร้างทั้งกระเบื้องปูพื้น บุผนัง และเครื่องสุขภัณฑ์ ในปี 2551 การผลิตกระเบื้องปูพื้น บุผนังมีปริมาณ 142.33 ล้านตารางเมตรและเครื่องสุขภัณฑ์มีปริมาณ 8.59 ล้านชิ้นซึ่งมีอัตราการเติบโตเพิ่มขึ้นจากปี 2550 ในอัตราร้อยละ 4.79 และ 4.81 ตามลำดับ การผลิตกระเบื้องปูพื้น บุผนัง ในปี 2552 มีปริมาณ 142.00 ล้านตารางเมตร เมื่อเทียบกับปีก่อนเพิ่มขึ้นในอัตราร้อยละ 1.67 ซึ่งเป็นการเติบโตในอัตราที่ลดลงจากปีก่อน แม้ว่าการผลิตกระเบื้องปูพื้น บุผนัง จะได้รับผลกระทบจากการชบเซาของธุรกิจอสังหาริมทรัพย์ในประเทศบ้าง แต่การผลิตกระเบื้องปูพื้น บุผนัง จะอิงกับตลาดซ่อมแซมบ้านเก่าเป็นหลัก และบางส่วนเป็นการผลิตเพื่อขยายตลาดส่งออก จึงทำให้การผลิตกระเบื้องปูพื้น บุผนัง ในปีนี้ยังสามารถเติบโตเพิ่มขึ้น ในขณะที่การผลิตเครื่องสุขภัณฑ์ ในปี 2552 มีปริมาณ 5.81 ล้านชิ้นเมื่อเทียบกับปีก่อนลดลงร้อยละ 30.08 เนื่องจากการผลิตเครื่องสุขภัณฑ์จะอิงกับตลาดบ้านใหม่ที่ปัจจุบันอยู่ในภาวะชบเซาอย่างหนัก จึงได้รับผลกระทบโดยตรง ทำให้การผลิตเครื่องสุขภัณฑ์ลดลงอย่างเห็นได้ชัด (สำนักงานเศรษฐกิจอุตสาหกรรม, 2552)

สำหรับการผลิตและจำหน่ายเซรามิก ในปี 2553 มีการเติบโตเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดจากการปรับตัวของภาวะเศรษฐกิจในประเทศ และการฟื้นตัวของตลาดอสังหาริมทรัพย์ที่มีแนวโน้มดีขึ้น ประกอบกับมีการผลิตเพื่อรองรับการเร่งโอนกรรมสิทธิ์จำนวนมาก เพื่อให้ทันกับมาตรการกระตุ้นอสังหาริมทรัพย์ที่สิ้นสุดลงในเดือนมิถุนายน 2553 ทำให้มีการผลิตเซรามิกเพิ่มขึ้น โดยการผลิตกระเบื้องปูพื้น บุผนัง มีปริมาณ 162.76 ล้านตารางเมตร และการผลิตเครื่องสุขภัณฑ์ มีปริมาณ 7.10 ล้านชิ้น เมื่อเทียบกับปีก่อนเพิ่มขึ้นในอัตราร้อยละ 14.81 และ 21.01 ตามลำดับ สำหรับแนวโน้มในปี 2554 การผลิตและจำหน่ายเซรามิกจะขยายตัวเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย เนื่องจากในปี 2553 มีการเติบโตเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจากมาตรการกระตุ้นอสังหาริมทรัพย์ที่ได้สิ้นสุดลง และการปรับปรุงซ่อมแซมบ้านหลังน้ำลด ซึ่งความต้องการจากการปรับปรุงซ่อมแซมบ้านหลังน้ำลดอาจมีผลต่อเนื่องถึงต้นปี 2554 แต่ความต้องการอาจจะไม่สูงมากนักเมื่อเทียบกับปี 2553 (สำนักงานเศรษฐกิจอุตสาหกรรม, 2553)



## 2.6 วัตถุดิบในการผลิตเซรามิก

วัตถุดิบที่ใช้ในอุตสาหกรรมเซรามิกบางอย่างได้มาจากสินแร่ตามธรรมชาติ เช่น ดินต่างๆ (clays) เฟลด์สปาร์ (feldspar) หินควอตซ์ (quartz) และทรายทะเล เป็นต้น นอกจากนี้วัตถุดิบบางอย่างได้จากการสกัดจากสินแร่ตามธรรมชาติและนำมาทำให้บริสุทธิ์ด้วยกระบวนการทางเคมี เช่น อะลูมินา (alumina) ซึ่งได้จากแร่บอกไซต์ (bauxite) ที่ได้จากการสังเคราะห์ นอกจากนี้ก็มีพวกเฟอร์ไรต์ (ferrites) และสารอินทรีย์บางชนิดที่ใช้เป็นตัวช่วยในการขึ้นรูป ผลิตภัณฑ์เซรามิกสมัยใหม่ต้องการวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตที่มีเปอร์เซ็นต์ความบริสุทธิ์สูงเพราะสิ่งสกปรกเพียงเล็กน้อยซึ่งอาจจะน้อยกว่าร้อยละ 1 ก็มีอิทธิพลต่อโครงสร้างซึ่งเชื่อมโยงไปถึงคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์นั้นๆ ด้วย (ปรีดา พิมพ์ขาวขำ, 2547) ผลิตภัณฑ์เซรามิกทำมาจากวัตถุดิบทนไฟพวกอนินทรีย์สารซึ่งมีอยู่มากมายหลายชนิดตามคุณสมบัติการเผาสามารถเลือกใช้ให้เหมาะสมกับผลิตภัณฑ์ที่ผลิตในระบบอุตสาหกรรมเครื่องปั้นดินเผานิยมแบ่งวัตถุดิบในการผลิตเซรามิกออกเป็น 3 กลุ่มคือ ดิน ตัวหลอมละลายในเนื้อดิน และตัวทนไฟ(ไพจิตร อิงศิริวัฒน์, 2541) ดังแสดงในภาพที่ 2.1 ซึ่งการผลิตเซรามิกในอุตสาหกรรมมีอัตราส่วนผสมวัตถุดิบดินดำต่อเฟลด์สปาร์เท่ากับ 8 ต่อ 5 คิดเป็นร้อยละ 60 และทรายแก้วคิดเป็นร้อยละ 40 โดยในงานวิจัยนี้แปรอัตราส่วนของเศษแก้วสีเขียวและซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วเพื่อใช้แทนเฟลด์สปาร์ร้อยละ 100 จากร้อยละ 23.08 ของอัตราส่วนผสมวัตถุดิบทั้งหมด (ดินดำร้อยละ36.92 และทรายแก้วร้อยละ 40)



ภาพที่ 2.1 ผังวัตถุดิบบางชนิดในการผลิตเซรามิก (ไพจิตร อิงศิริวัฒน์, 2541)

### 2.6.1 ดิน (Clays)

ดินเป็นวัตถุดิบที่สำคัญในการผลิตผลิตภัณฑ์เซรามิกมีความเหนียวเมื่อถูกน้ำจะจับตัวเป็นก้อนสามารถนำมาปั้นเป็นรูปร่างต่างๆ ได้ง่าย ความเหนียวและสีของดินมีลักษณะแตกต่างกันไปในแต่ละแหล่งทั้งในด้านโครงสร้างผลึกของดินและคุณสมบัติภายหลังการเผา เช่น สี การหดตัว ความแข็งแกร่งและความทนไฟ เป็นต้น

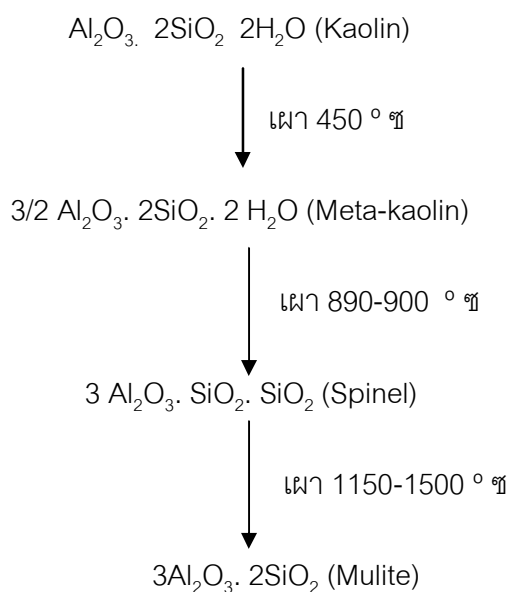
แร่ดินที่ใช้เตรียมเนื้อดินในอุตสาหกรรมเซรามิกได้แก่

2.6.1.1 ดินขาว (Kaolin, China clay) ดินขาวส่วนใหญ่เป็นดินที่เกิดอยู่ในแหล่งผุพังของหินเดิม (Residual clay) เป็นดินที่มีขนาดเม็ดหยาบจึงมีความเหนียวน้อยประกอบด้วยแร่กาอลินไนท์ (Kaolinite) มากกว่าดินชนิดอื่นๆ ดินขาวที่พบตามแหล่งที่ต่างกันมีส่วนประกอบต่างกันด้วยเหตุผล 2 ประการ คือ เนื่องจากโครงสร้างของดินขาวมีการแทนที่กันของโลหะธาตุที่มีประจุบวกและเนื่องจากมีสารประกอบอื่นปะปนอยู่ ได้แก่ ควอตซ์ (quartz) เฟลด์สปาร์ (feldspar) ฮีมาไทท์ (hematite) ฟลูออไรต์ (fluorite) เป็นต้น สมบัติต่างๆ ของดินขาวแสดงไว้ในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 สมบัติต่างๆ ของดินขาว (ไพจิตร อิงศิริวัฒน์, 2541)

|                      |  |
|----------------------|--|
| สูตรดินขาว           | $Al_2O_3 \cdot 2 SiO_2 \cdot 2 H_2O$                 |
| ส่วนประกอบ           | ร้อยละ39.5 ร้อยละ46.5 ร้อยละ14                       |
| รูปผลึก              | เป็นแผ่นหกเหลี่ยม เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.5 – 1.0 ไมครอน |
| ความเหนียว           | ต่ำ  |
| ความทนไฟ             | 1750 – 1770 °ซ                                       |
| ความหดตัว            | น้อย   |
| ความแข็งแกร่งหลังเผา | สูง  |

สมบัติทางเคมีของดินขาว มีปฏิกิริยาแตกตัวในขั้นตอนการเผาดังแสดงในภาพที่ 2.2 ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงรูปแบบการเรียงตัวของผลึกในโครงสร้างตามอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไปทำให้เกิดเป็นโครงสร้างที่มีความแข็งแรงมากขึ้น



ภาพที่ 2.2 ปฏิกริยาของดินขาว เมื่อผ่านอุณหภูมิต่างๆ และการเปลี่ยนแปลงผลึกทางโครงสร้างเคมี (ไพจิตร อิงศิริวัฒน์, 2541)

#### สมบัติทางกายภาพของดินขาว (Physical properties of kaolin)

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

- รูปร่างของอนุภาค (Particle shape) รูปร่างของแร่กาอลินไนท์ทั่วไปจะเป็นแผ่นหกเหลี่ยม (Hexagonal plates) มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่ 0.05 – 10.0 ไมครอนโดยเฉลี่ย ขนาดอยู่ระหว่าง 0.5 ไมครอน

- คุณสมบัติในการแลกเปลี่ยนอนุมูล (Base-exchange capacity) ปกติดินขาวที่บริสุทธิ์จะไม่มีการแลกเปลี่ยนอนุมูลหรือดูดซับอนุภาคและโมเลกุลอื่นๆ แต่ถ้าไม่บริสุทธิ์จะเกิดการแลกเปลี่ยนอนุมูลหรือดูดซับเอาผลึกของแร่ที่มีขนาดเล็กไว้ที่ผิวผลึกกาอลินไนท์บริสุทธิ์มีโครงสร้างผลึกที่แข็งแรง แร่ธาตุและอินทรีย์สารแทรกเข้าไปในโครงสร้างผลึกไม่ได้จึงคงความบริสุทธิ์ได้ดี

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

- ความแข็งแรงของเนื้อดินเมื่อแห้ง (Green strength) ดินขาวมีความแข็งแรงน้อยเพราะแตกได้ง่ายเมื่อแห้งเพราะมีความเหนียวน้อย

- สมบัติหลังจากการเผา (Firing properties) ดินขาวที่มีคุณภาพดี เมื่อเผาแล้วควรจะได้สีขาว แต่ถ้าเป็นสีครีมหรือสีน้ำตาลอ่อนแสดงว่ามีแร่ธาตุเจือปนอยู่สูงดินขาวที่มีการหดตัวเกินร้อยละ 20 หลังการเผาไม่ควรใช้ดินขาวนั้นในเนื้อดินปั้นปริมาณมาก

2.6.1.2 ดินเหนียว (Plastic clay) ดินเหนียวคือดินเนื้อละเอียดที่มีแร่ธาตุเจือปนอยู่ตามธรรมชาติค่อนข้างสูงไม่บริสุทธิ์เหมือนดินขาวเมื่อขุดพบมีสีต่างๆ สีเหลือง สีเทา สีดำ หรือสีส้มแดงหลังการเผาดินก็จะมีสีต่างๆ กันไป เช่น สีเทา สีน้ำตาล สีแดง หรือสีเหลืองอมเทา ดังนั้นดินเหนียวก็คือดินที่มีความเหนียวเนื้อละเอียดที่เป็นสีต่างๆ ภายหลังจากการเผาดินดำ (Ball clay) จัดว่าเป็นดินเหนียวประเภทหนึ่งด้วยแต่ดินดำแตกต่างจากดินเหนียวคือดินดำมีแร่ธาตุเจือปนอยู่ในปริมาณต่ำ ค่อนข้างบริสุทธิ์แต่มีอินทรีย์สารเจือปนอยู่สูงดินดำบางชนิดมีความเหนียวน้อยบางชนิดมีความเหนียวมาก

2.6.1.3 ดินดำ (Ball clay) ซึ่งเป็นวัตถุดิบที่ใช้ในการวิจัยนี้ คือ ดินเหนียวขาวที่เกิดจากดินขาวซึ่งย้ายถิ่นไปตกตะกอนสะสมในแหล่งใหม่ (Sedimentary clay) ดินดำเป็นดินที่มีขนาดผลึกเม็ดละเอียดมากอนุภาคของดินยึดเกาะกันได้ดีมีอินทรีย์สารที่มีโครงสร้างคล้ายกับที่พบในถ่านหินลิกไนท์เจือปนอยู่จึงช่วยให้ดินชนิดนี้มีความเหนียวและทำให้มีสีเปลี่ยนไปจากสีขาวกลายเป็นสีเทาจนถึงสีดำ แต่เมื่อนำไปเผาในอุณหภูมิสูงเนื้อดินจะมีสีขาวหรือสีครีมอินทรีย์สารต่างๆ จะถูกเผาไหม้หมดไปจากเนื้อดิน

ดินดำที่มีเนื้อละเอียดหลังการเผาเป็นสีขาวและมีความทนไฟ 1300 ° ซ โดยไม่บิดเบี้ยว มักเป็นดินที่มีคุณภาพดีนิยมนำมาใช้ผสมในผลิตภัณฑ์สีขาว เช่น ปอร์ซเลน โบนีไซนาและไวท์เอิร์ทเทินแวร์ ส่วนดินดำทั่วไปที่คุณภาพปานกลางมีทรายเจือปนอยู่ค่อนข้างมากใช้ทำเนื้อดินขึ้นรูปด้วยแป้นหมุนทำท่อน้ำดินเผาหรือผสมในเนื้อดินทำกระเบื้องปูพื้น

ส่วนประกอบทางเคมีของดินดำ (Chemical properties of Ball clay) ในดินดำประกอบด้วยแร่กาฬินไนท์เป็นส่วนใหญ่เช่นเดียวกับดินขาวแต่เป็นผลึกกาฬินไนท์ชนิดไม่สมบูรณ์ (Disordered kaolinite) ในระหว่างผลึกมีแร่ธาตุและอินทรีย์สารแทรกอยู่โดยประมาณจะมีซิลิการ้อยละ 40-60 อะลูมินาร้อยละ 30 น้ำผลึกและอินทรีย์สารประมาณร้อยละ 10 โดยมีส่วนประกอบหลักดังแสดงในตารางที่ 2.4 นอกจากนี้ยังมีแร่ธาตุอื่นๆ ปะปนอยู่ในดินด้วย เช่น ไทเทเนียมออกไซด์ ( $\text{TiO}_2$ ) เฟอริกออกไซด์ ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) แคลเซียมออกไซด์ ( $\text{CaO}$ ) แมกนีเซียมออกไซด์ ( $\text{MgO}$ ) เหล็กซัลเฟต ( $\text{FeS}$ ) โพแทสเซียมออกไซด์ ( $\text{K}_2\text{O}$ ) และโซเดียมออกไซด์ ( $\text{Na}_2\text{O}$ ) เป็นต้น

ตารางที่ 2.4 สูตรเคมีของดินดำ (ไพจิตร อิงศิริวัฒน์, 2541)

| ประเภทของดินดำ  | สูตรเคมี   |
|---|--|
| 1. ดินดำทั่วไป (มีอะลูมินาร้อยละ 20 – 25 ตามผลวิเคราะห์ทางเคมี)               | $Al_2O_3 \cdot 4SiO_2 \cdot 2H_2O \cdot 0.1K_2O$ |
| 2. ดินดำ-ดินเหนียวอุตสาหกรรม (มีอะลูมินาร้อยละ 30 – 38 ตามผลวิเคราะห์ทางเคมี) | $Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O \cdot 0.1K_2O$ |
| 3. ดินดำปนทราย (มีซิลิการ้อยละ 60 – 80 ตามผลวิเคราะห์ทางเคมี)                 | $Al_2O_3 \cdot 9SiO_2 \cdot 2H_2O \cdot 0.2K_2O$ |

สมบัติทางกายภาพของดินดำ (Physical properties of Ball clay)

- ขนาดของดินเหนียวจะมีผลึกละเอียดมากน้อยเพียงใด เปลี่ยนแปลงไปตามแหล่งที่พบ เมื่อถูกพัดพาไปไกลจากแหล่งเดิมมากขนาดเม็ดอนุภาคจะละเอียดมากขึ้นตามลำดับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 0.05 – 1.00 ไมโครเมตร

- ความเหนียว (plasticity) ดินเหนียวเป็นดินที่อมน้ำได้มาก ความเหนียวจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับชนิดของดินซึ่งประกอบด้วยหลักสำคัญ คือ ปริมาณของอินทรีย์สาร ขนาดของเม็ดดิน และวัตถุคิบที่ให้ความเหนียว เช่น ดินเบนโตไนท์ เป็นต้น

- การหดตัวก่อนเผา (Drying shrinkage) ดินเหนียวที่มีทรายปนอยู่สูงแทบไม่มีการหดตัวเลยแต่ดินเหนียวที่มีอินทรีย์สารสูงจะมีการหดตัวมากประมาณร้อยละ 13 – 17

- การหดตัวหลังเผา (firing shrinkage) มีการหดตัวสูงประมาณร้อยละ 15 เนื่องจากดินเหนียวมีขนาดอนุภาคที่เล็กมาก

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

- สีหลังเผา เป็นสีขาวนวล

- มีแร่ธาตุพวกต่างและไมกาในดินทำหน้าที่เป็นตัวหลอมละลายช่วยลดอุณหภูมิในการเผา (ตารางที่ 2.5)

ตารางที่ 2.5 ข้อดีและข้อเสียของดินดำ (ไพจิตร อิงศิริวัฒน์, 2541)

| ข้อดี   | ข้อเสีย  |
|---|--|
| 1. เพิ่มความเหนียวของผลิตภัณฑ์ ทำให้เนื้อดินปั้นขึ้นรูปได้ดี              | 1. มีสิ่งเจือปนสูง เช่น คาร์บอน เหล็ก ทำให้ผลิตภัณฑ์หลังการเผามีดำหนิ  |
| 2. เพิ่มความแข็งแรงก่อนเผา ลดการสูญเสียจากการแตกหักก่อนเผาในขณะเคลือบย้าย | 2. ถ้าผสมในปริมาณมากเกินไป ทำให้ผลิตภัณฑ์ไม่ค่อยโปร่งแสง มีการหดตัวสูง |
| 3. ทำให้น้ำดินหล่อที่ใช้ในการเทแบบไหลตัวดี                                | 3. มีองค์ประกอบไม่แน่นอน ทำให้ควบคุมอัตราส่วนผสมได้ยาก                 |
| 4. เสริมปฏิภานระหว่างมวลสารในระหว่างการเผา ทำให้ดินสุกตัวเร็ว             |  |

### 2.6.2 ตัวหลอมละลายในเนื้อดิน (Flux)

เป็นวัตถุดิบที่ทำหน้าที่เป็นตัวหลอมละลายลดอุณหภูมิในการเผาการใช้ตัวหลอมละลายผสมในเนื้อดินเพื่อให้เนื้อดินสุกตัวในอุณหภูมิที่ต้องการตัวหลอมละลายจะทำหน้าที่ประสานผลึกของวัตถุดิบต่างๆ ให้หลอมละลายเป็นเนื้อเดียวกันในขณะที่เนื้อดินถูกเผาผ่านความร้อน วัตถุดิบที่เป็นตัวหลอมละลายถูกบดละเอียดผสมอยู่ในเนื้อดินจะเริ่มเกิดการหลอมตัวก่อนแล้วดึงเอาวัตถุดิบทนไฟที่อยู่รอบๆ ผลึกมาหลอมเข้าด้วยกันทำให้ช่องว่างที่อยู่ระหว่างผลึกเม็ดดินหายไป และเนื้อดินเกิดการหดตัวรวมกันหลอมจนเนื้อแน่นคล้ายแก้ว ในระหว่างที่เตาเผาเย็นตัวลงเนื้อดินก็จะค่อยๆ เย็นตัวกลายเป็นของแข็ง

ความพรุนตัวของดินหรือคุณสมบัติของดินภายหลังการเผาขึ้นอยู่กับปริมาณของวัตถุดิบที่เป็นตัวหลอมละลาย ถ้าใช้วัตถุดิบตัวหลอมละลายในปริมาณมากเกินไปดินอาจยุบตัวภายหลังการเผาดังนั้นหลักสำคัญในการผสมเนื้อดินนั้นต้องพยายามให้เนื้อดินมีช่วงเผาสุกตัวยาว คือสามารถเผาให้สุกตัวได้ในอุณหภูมิที่มีความแตกต่างกันประมาณ 30 – 50 องศาเซลเซียสเพื่อความปลอดภัยในการเผามากยิ่งขึ้น แม้ว่าจะเผาเกินอุณหภูมิไปบ้างเล็กน้อยในบางครั้งผลิตภัณฑ์ก็ไม่เกิดความเสียหาย

ตัวหลอมละลายที่ใช้ผสมในอุตสาหกรรมมีหลายชนิด เช่น หินฟันม้า (Feldspar) เนฟเฟลีนไชนาไนท์ (Nepheline Syenite) โบนแอสช (Bone Ash) ทัลค์ (Talc) หินปูน ( $\text{CaCO}_3$ ) โดโลไมท์ (Dolomite) เป็นต้นแต่จะกล่าวถึงตัวหลอมละลายเฉพาะที่ใช้ในการวิจัยนี้ คือ หินฟันม้า หรือ เฟลด์สปาร์ (Feldspar)

เฟลด์สปาร์ เป็นวัตถุดิบที่สำคัญในกลุ่มที่ให้ต่างหรือวัตถุดิบช่วยในการหลอมละลายต่างในแร่เฟลด์สปาร์อยู่ในรูปผลึกที่ไม่ละลายน้ำจึงสะดวกในการนำมาใช้เป็นวัตถุดิบผสมในเนื้อดินและน้ำเคลือบได้โดยตรงไม่ต้องนำมาหลอมเป็นฟريت (Frit) ก่อนใช้เฟลด์สปาร์ใช้ผสมในเนื้อดินปอร์เซเลนและน้ำเคลือบอุณหภูมิสูงเพื่อลดจุดหลอมละลายในการเผาเป็นตัวเริ่มก่อให้เกิดปฏิกิริยาการเกิดเนื้อแก้วในดินมีสมบัติทางกายภาพ ดังแสดงในตารางที่ 2.6 ส่วนปริมาณที่ใช้ในเนื้อดินปอร์เซเลนประมาณร้อยละ 25 และปริมาณที่ใช้เคลือบร้อยละ 40 – 60 ซึ่งเฟลด์สปาร์ถูกใช้เป็นส่วนผสมร้อยละ 23.08 ของอัตราส่วนผสมวัตถุดิบทั้งหมด(ดินดำร้อยละ 36.92 และ ททรายแก้วร้อยละ 40 )

**ตารางที่ 2.6** สมบัติทางกายภาพของเฟลด์สปาร์ (ไพจิตร อิงศิริวัฒน์, 2541)

|                      |                    |
|----------------------|--------------------|
| ความถ่วงจำเพาะ       | 2.56 – 2.63        |
| อุณหภูมิที่หลอมละลาย | 1150 – 1532 ° ซ    |
| ความแข็ง             | 6.0 – 6.5 โมห์สเกล |

เฟลด์สปาร์เป็นสารประกอบของอะลูมิเนียมซิลิเกตและอัลคาไลหรืออัลคาไลเอิร์ท (ต่าง) ดังนั้นเฟลด์สปาร์จึงมีวัตถุดิบที่เป็นต่างคือตัวหลอมละลายมีอะลูมินาเป็นตัวกลางและมีซิลิกาซึ่งเป็นตัวทนไฟด้วยจึงจัดเป็นวัตถุดิบที่ให้เป็นตัวเคลือบได้ตามธรรมชาติเฟลด์สปาร์ทำหน้าที่ลดความเหนียวของเนื้อดินก่อนเผาเป็นตัวประสานให้ผลึกของดินหลอมตัวกันแน่นเนื้อดินหลอมเป็นแก้ว ลดการดูดซึมน้ำ ลดอุณหภูมิในการเผา เพิ่มความโปร่งแสงให้ผลิตภัณฑ์ภายหลังการเผาโดยปกติเฟลด์สปาร์จะเริ่มหลอมละลายเล็กน้อยที่อุณหภูมิประมาณ 1150 องศาเซลเซียส เฟลด์สปาร์สามารถแบ่งออกตามประเภทของสารประกอบได้หลายชนิดดังแสดงในตารางที่ 2.7

ตารางที่ 2.7 ชนิดของเฟลด์สปาร์จำแนกตามสารประกอบ (ไพจิตร อิงศิริวัฒน์, 2541)

| ประเภทของเฟลด์สปาร์             | จุดหลอมละลาย      | สูตรเคมี  |
|---------------------------------|-------------------|---|
| 1. โปแทสเฟลด์สปาร์ (Orthoclase) | 1,220 ° ซ         | $K_2O \cdot Al_2O_3 \cdot 6SiO_2$<br>(ร้อยละ16.9) (ร้อยละ18.3)<br>(ร้อยละ 64.8)     |
| 2. โซดาเฟลด์สปาร์ (Albite)      | 1,170 – 1,200 ° ซ | $Na_2O \cdot Al_2O_3 \cdot 6SiO_2$<br>(ร้อยละ11.8) (ร้อยละ19.4)<br>(ร้อยละ 68.8)    |
| 3. ไลม์เฟลด์สปาร์ (Anorthite)   | 1,550 ° ซ         | $CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$<br>(ร้อยละ20.1) (ร้อยละ36.6)<br>(ร้อยละ 43.3)      |
| 4. แบเรียมเฟลด์สปาร์ (Celsian)  | 1,715 ° ซ         | $BaO \cdot Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$<br>(ร้อยละ40.85) (ร้อยละ27.15)<br>(ร้อยละ32.00)    |
| 5. ลิเทียมเฟลด์สปาร์ (Petalite) | 1,200 ° ซ         | $Li_2O \cdot Al_2O_3 \cdot 8 SiO_2$   |
| ลิเทียมเฟลด์สปาร์ (Spodumene)   | 1,250 ° ซ         | $Li_2O \cdot Al_2O_3 \cdot 8 SiO_2$   |
| ลิเทียมเฟลด์สปาร์ (Lepidolite)  | 1,150 ° ซ         | $Li_2O \cdot Al_2O_3 \cdot 8 SiO_2$<br>(ร้อยละ8.03) (ร้อยละ27.40)<br>(ร้อยละ 64.57) |

นอกจากนี้ยังใช้เฟลด์สปาร์ในการเตรียมน้ำเคลือบซึ่งใช้ปริมาณร้อยละ 30 – 70 ในน้ำเคลือบอุณหภูมิสูงทุกชนิด และใช้เป็นส่วนผสมในอุตสาหกรรมการผลิตแก้วซึ่งใช้ในอัตราส่วนประมาณร้อยละ 30 – 40

### 2.6.3 ตัวทนไฟ (Fillers)

มีคุณสมบัติช่วยเปิดเนื้อดินให้มีความพรุนตัวช่วยลดการหดตัวของเนื้อดินขณะผึ่งแห้งและลดความเหนียวของเนื้อดินลงด้วย นอกจากนี้ตัวทนไฟยังทำหน้าที่เป็นโครงสร้างของเนื้อผลิตภัณฑ์ให้คงอยู่ในสภาพดีไม่บิดเบี้ยวแตกร้าวหลังการเผาทำให้เนื้อดินมีลักษณะพื้นผิวหยาบหรือละเอียดตามต้องการและเพิ่มความแข็งแรงให้เนื้อดินหลังการเผา



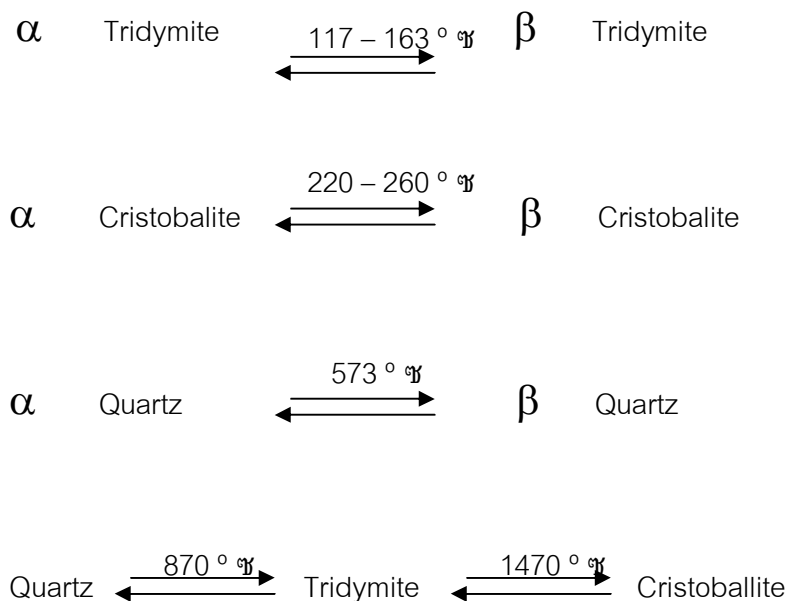
ตัวหนไฟที่ใช้ในการผลิตเซรามิก ได้แก่ ซิลิกา อะลูมินา วัตถุในกลุ่มซิลิมาไนท์ (Silimanite Group) คัลไซน์เคลย์ (Calcined clay) ไพโรไฟลไลท์ (Pyrophyllite) เซอร์คอน (Zircon) เป็นต้น ซึ่งในที่นี้จะกล่าวถึงเฉพาะซิลิกาและอะลูมินา

2.6.3.1 ซิลิกา (Silica,  $\text{SiO}_2$ ) โดยปกติในดินทุกชนิดและในเฟลด์สปาร์จะมีซิลิกาเป็นองค์ประกอบในสูตรเคมีอยู่แล้วในการเตรียมเนื้อดินนอกจากจะมีเฟลด์สปาร์ทำหน้าที่เป็นตัวหลอมละลายยังมีซิลิกาอยู่ในสูตรดินด้วยอีกส่วนหนึ่งซึ่งเพิ่มเข้าไปโดยใช้ซิลิกาบดละเอียด ซิลิกาที่เพิ่มเข้าไปต่างหากนี้เรียกว่า ซิลิกาอิสระ การเพิ่มซิลิกาอิสระนี้บางครั้งเป็นอันตรายหลังการเผาเพราะทำให้เนื้อดินขยายตัวมากกว่าสารเคลือบ (Thermal expansion) (โดยปกติแล้วสารเคลือบจะไม่รานตัวถ้าเนื้อดินและสารเคลือบหดตัวในอัตราส่วนใกล้เคียงกัน) ซิลิกาที่ประกอบอยู่ในเฟลด์สปาร์และเนื้อดินมีการขยายตัวและหดตัวน้อยกว่าซิลิกาอิสระที่เพิ่มเข้าไป ซิลิกาถูกนำมาใช้ประโยชน์ในการผลิต คือ ใช้เป็นส่วนผสมของเนื้อดินในการทำผลิตภัณฑ์เซรามิกใช้เป็นส่วนผสมของสารเคลือบใช้ในอุตสาหกรรมแก้วและการก่อสร้าง ได้แก่ ทราายโดยสมบัติทางกายภาพของซิลิกาแสดงในตารางที่ 2.8

ตารางที่ 2.8 สมบัติทางกายภาพของซิลิกา (ไพจิตร อิงศิริวัฒน์, 2541)

|                |                             |
|----------------|-----------------------------|
| ความถ่วงจำเพาะ | 2.65                        |
| ความแข็ง       | 7 โมห์สเกล                  |
| จุดหลอมละลาย   | 1728 °ซ                     |
| โครงสร้างผลึก  | รูปหกเหลี่ยมเป็นร่างสามมิติ |

ซิลิกาเมื่อถูกเผาผ่านความร้อนจะเปลี่ยนโครงสร้างของรูปผลึกอยู่หลายช่วงอุณหภูมิของการเผาโดยอะตอมของรูปผลึกถูกจัดเรียงตัวใหม่จากรูปแบบหนึ่งเปลี่ยนแปลงเป็นอีกแบบหนึ่ง แต่ละแบบจะสามารถคงสภาพอยู่ได้ในช่วงอุณหภูมิหนึ่งการเปลี่ยนแปลงรูปผลึกนี้ เรียกว่า อินเวอร์ชัน (Inversion) การเปลี่ยนแปลงจะเกิดขึ้นเมื่อผลึกของซิลิกาถูกเผาผ่านความร้อนแต่เมื่อสิ้นสุดการเผาซิลิกาจะเย็นตัวลงผลึกต่างๆ จะย้อนกลับมาเป็นรูปเดิมเมื่อเย็นตัวลงถึงอุณหภูมิเดิม ดังแสดงในภาพที่ 2.3 ซึ่งแสดงการเปลี่ยนแปลงเฟส (phase) ของซิลิกาที่อุณหภูมิต่างๆ



ภาพที่ 2.3 ปฏิกริยาการเปลี่ยนแปลงของผลึกซิลิกาเมื่อได้รับความร้อน (ไพจิตร อิงศิริวัฒน์, 2541)

2.6.3.2 อะลูมินา (Alumina, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) อะลูมินา คือ อะลูมิเนียมออกไซด์ เรียกอีกชื่อหนึ่งว่า คอร์รันดัม (Corundum) ได้จากการเผาอะลูมินาไฮดรต Al(OH)<sub>3</sub> ที่อุณหภูมิประมาณ 1000 องศาเซลเซียสเพื่อขจัดน้ำออกไปโดยสมบัติทางกายภาพของอะลูมินา แสดงในตารางที่ 2.9

อะลูมินาเป็นประโยชน์มากในอุตสาหกรรมวัสดุทนไฟถึงแม้ว่าอะลูมินาจะแพงกว่า เฟลด์สปาร์แต่ในอุตสาหกรรมแก้วที่ต้องการแอลคาไลต์น้อยๆ จำเป็นต้องใช้อะลูมินา ข้อดีอีกประการหนึ่งของอะลูมินา คือ มีปริมาณเหล็กน้อย สารประกอบทั้งสองมีความบริสุทธิ์ค่อนข้างสูง โดยทั่วไปอะลูมินามักพบในรูปของไฮดรต (Hydrate) คือ ผลึกของอะลูมินามีการรวมตัวทางเคมีกับน้ำ เช่น หินบอกไซต์ (Bauxite) ซึ่งประกอบด้วยแร่ที่สำคัญ 3 ชนิด ได้แก่ จิบไซต์ (Gibbsite, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> · 3H<sub>2</sub>O) ไดอะสปอร์ (Diaspore, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> · 2 H<sub>2</sub>O) โบฮีไมท์ (Boehmite, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> · H<sub>2</sub>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 มีความแข็งแรงและมีคุณสมบัติเป็นฉนวนไฟฟ้าได้ดีด้วยคุณสมบัติดังกล่าวนี้เองอะลูมินาถูกนำมาใช้ในการผลิตวัตถุนไฟ เบ้าหลอม หัวเทียน และแผ่นรองวงจรีไฟฟ้าและได้มีการนำอะลูมินามาผสมในเนื้อดินทำถ้วยชามด้วย อย่างไรก็ตามการนำอะลูมินามาใช้ก็ยังมีผลเสียในบางกรณีเช่น อัตราการขยายตัวของดินจะต่ำไม่เท่ากับอัตราการขยายตัวของเคลือบเพราะผลึกอะลูมินาเมื่อเผาผ่านความร้อนไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปผลึกซับซ้อนเหมือนซิลิกา นอกจากนี้อะลูมินาเป็นวัตถุดิบที่มีค่าความถ่วงจำเพาะหนักถึง 3.95 ถ้าใช้ผสมเนื้อดินปริมาณร้อยละ 35 จะทำให้เนื้อดินหลังการเผามีน้ำหนักเพิ่มขึ้นถึงร้อยละ 20 และอะลูมินามีค่าความแข็งแรงสูงถึง 9 ซึ่งรองจากเพชร (ค่าความแข็งแรงเท่ากับ 10) ทำให้การบดย่อยให้เป็นผงละเอียดทำได้ช้าและค่อนข้างยาก

อะลูมินาถูกนำมาใช้ประโยชน์ในการผลิต คือ ใช้ผสมเนื้อดินปั้นชนิดปอร์เซเลน เรียกว่า อะลูมินา ปอร์เซเลน (Alumina porcelain) และผลิตภัณฑ์ฉนวนไฟฟ้าแรงสูงเพื่อเพิ่มความแข็งแรงใช้ในอุตสาหกรรมที่จะต้องทนต่อการกัดกร่อนจากสารเคมี (Abrasion – resistance purposes) และใช้ทำวัสดุทนไฟในเตาเผา (Refractory purposes) ใช้ในอุตสาหกรรมทำอิฐทนไฟ (High alumina bricks) ใช้ในการเตรียมน้ำเคลือบเป็นส่วนของน้ำเคลือบเกือบทุกชนิดและมีคุณสมบัติทำให้น้ำเคลือบด้านถ้าใช้ในปริมาณมาก

## 2.7 ททรายแก้ว

ททราย (sand) ตามความหมายของวิชาตะกอนศาสตร์ (Sedimentology) หมายถึงเม็ดวัตถุตะกอนที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ตั้งแต่ 0.063-2.000 มิลลิเมตร ซึ่งประกอบด้วยวัตถุที่เป็นเศษหิน เศษแร่ ขนาดเล็ก มีลักษณะร่วนซุย ไม่เกาะติดกัน ได้แก่ แร่เขี้ยวหนุมาน (quartz) แร่ฟันม้า (feldspar) หินบะซอลต์ หินปูน หินภูเขาไฟ แร่ยิปซัม เป็นต้น ททรายเกิดตามธรรมชาติด้วยกระบวนการกัดกร่อนและผุสลายจากหินและแร่ที่เป็นต้นกำเนิด จากนั้นอาจถูกกระแส น้ำ คลื่น แรงโน้มถ่วง น้ำแข็งและลมนำพาไปสะสมอยู่ในบริเวณภูมิประเทศลักษณะต่างๆ มีทั้งททรายที่สะสมตัวบนบกโดยแม่น้ำลำธาร กระแสนลมและททรายที่สะสมในทะเลที่สัมพันธ์กับคลื่นกระแสน้ำสำหรับตะกอนกรวด (gravel) นั้นหมายถึงตะกอนที่มีขนาดใหญ่กว่า 2 มิลลิเมตรขึ้นไปลักษณะททรายจำแนกตามการใช้ประโยชน์หลักแบ่งเป็น

ททรายสำหรับงานด้านโยธาในอุตสาหกรรมการก่อสร้าง คือ วัตถุผสมละเอียดที่มีขนาดผ่านตะแกรงร่อน 4.75 มิลลิเมตรได้จะเป็นเศษหิน แร่ ก็ได้พบได้ทั่วไปมีความสะอาดระดับหนึ่งมีเม็ดททรายแข็งแรง ทนทาน มีแผลมคม ไม่ขยายตัวมาก มีสารประกอบอื่นเจือปนอยู่น้อย โดยททรายที่ใช้ผสมปูนซีเมนต์จะเรียกวัดผสมละเอียด (Fine aggregate) มีขนาด 0.07-4.75 มิลลิเมตรแยกการใช้งานตามขนาดของเม็ดททราย

ททรายละเอียด ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.5-1.5 มิลลิเมตร ใช้งานในปูนก่อ ปูนฉาบ

ทรายกลาง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1-3 มิลลิเมตร ใช้ในงานคอนกรีต ปูนก่อก่อที่ต้องรับแรงอัด ปูนฉาบผนังใต้ดิน พื้นคาน

ทรายหยาบ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2-4.75 มิลลิเมตร ใช้ในงานคอนกรีต เทพื้น ฐานราก และงานที่ต้องการแรงอัดมาก

ทรายอุตสาหกรรม ส่วนใหญ่จะหมายถึง ทรายแก้ว (Silica sand) คือทรายที่มีปริมาณซิลิกาไดออกไซด์ ( $\text{SiO}_2$ ) มากกว่าร้อยละ 95 และสารประกอบอื่นๆ เจือปนอยู่ได้ปริมาณเล็กน้อย

### 2.7.1 ทรายแก้วที่ใช้ในอุตสาหกรรมเซรามิก

ในอุตสาหกรรมเซรามิกทรายแก้วเป็นส่วนประกอบของเนื้อเซรามิกคุณภาพสูงสีขาวถึงร้อยละ 30 - 40 เพราะทรายแก้วเพิ่มความขาวให้กับผลิตภัณฑ์ ทำให้แกร่ง แข็งง่าย เพิ่มการยึดเกาะระหว่างเนื้อเซรามิกและตัวเคลือบคงทนต่อความร้อน และแตกยากโดยเฉพาะทรายแก้วจากฟลินท์และทรายแก้วที่เป็นผลพลอยได้จากการทำเหมืองซอล์ก

### 2.7.2 คุณสมบัติของทรายแก้วในอุตสาหกรรมเซรามิก ต้องมีองค์ประกอบสำคัญ ได้แก่

- ปริมาณซิลิกา ( $\text{Si}_2\text{O}$ ) ไม่น้อยกว่าร้อยละ 99
- ปริมาณเหล็ก ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) ไม่เกินร้อยละ 0.01
- ขนาดของเม็ดทรายละเอียด ขนาดน้อยกว่า 0.10 มิลลิเมตร (200 เมช)
- มีความชื้นในปริมาณที่กำหนด ไม่เกินร้อยละ 1
- ผ่านกระบวนการล้าง แต่งแร่เพื่อแยกเอาแร่เหล็ก และแร่หนักออก
- ผ่านกระบวนการคัดขนาดได้ทรายแก้วที่มีคุณภาพสม่ำเสมอ

## 2.8 แก้ว (Glass)

### 2.8.1 ลักษณะทั่วไปของแก้ว

โดยทั่วไปวัตถุดิบที่ใช้เป็นส่วนผสมในการผลิตแก้วหรือกระจกจะแตกต่างกันตรงสัดส่วนของส่วนผสมที่ใช้เพื่อให้ผลิตภัณฑ์มีคุณสมบัติแตกต่างกันไป

วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตแก้วประกอบด้วยวัตถุดิบที่เป็นองค์ประกอบหลักที่ทำให้เกิดโครงสร้างแห่งความเป็นแก้ว คือ ทรายแก้วหรือซิลิกา (Silica) ส่วนประกอบที่เสริมเข้าไปเพื่อให้เกิดการหลอมแก้วเป็นไปได้ง่ายขึ้นและมีสมบัติต่างๆ ตามความต้องการ เช่น อะลูมินา ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) ที่ช่วยเพิ่มสมบัติในด้านความคงทนทางเคมีของผิวแก้ว ตะกั่วออกไซด์ ( $\text{PbO}$ ) เพิ่มความหนาแน่นให้แก้วช่วยให้แก้วมีเสียงกังวานไพเราะ เนื้อแก้วเป็นประกาย โซดาแอช ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) เป็นตัวช่วยหลอมช่วยลดอุณหภูมิการหลอมให้ต่ำลง โบแรกซ์ ( $\text{B}_2\text{O}_3$ ) ช่วยให้แก้วมีประสิทธิภาพการขยายตัวต่ำ สามารถทนต่อความร้อนและการผุกร่อนทางเคมีช่วยให้มีคุณสมบัติทางไฟฟ้าได้ดี สารฟอกสี (Depolarizing Agent) เป็นพวกซิลิเนียมและโคบอลต์ (Selenium & Cobalt) เป็นสารที่ช่วยฟอกสี

เขียวที่เกิดจากออกไซด์ของเหล็กซึ่งมักมีเจือปนอยู่ นอกจากนี้อาจมีการเติมสารปรุงแต่งเพิ่มเติมตามความต้องการใช้งานของผลิตภัณฑ์ ขณะที่มีการเติมเศษแก้ว (Cullet) เพื่อช่วยลดต้นทุนการผลิตและทำหน้าที่เป็นตัวช่วยลดอุณหภูมิของการหลอม

หัวใจของกระบวนการผลิตแก้ว คือ เตาหลอมแก้วที่ใช้ในงานอุณหภูมิสูง ดังนั้นต้นทุนส่วนหนึ่งของการผลิตจึงมักอยู่ที่ค่าเชื้อเพลิง เทคโนโลยีของการหลอมแก้วจึงเน้นไปที่ประสิทธิภาพของการหลอมเพื่อประหยัดพลังงานและมีการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์

กลุ่มอุตสาหกรรมแก้วในประเทศ แบ่งออกเป็น 3 กลุ่ม ตามชนิดของผลิตภัณฑ์ ได้ดังนี้

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

## 2.8.2 กลุ่มผลิตภัณฑ์บรรจุภัณฑ์ขวดแก้ว

ในบรรดาผลิตภัณฑ์เครื่องแก้วชนิดต่างๆพบว่าร้อยละ 85 ของผลิตภัณฑ์ทั้งหมดเป็นผลิตภัณฑ์ภาชนะบรรจุภัณฑ์แก้วที่มีการใช้กันมานานและคาดว่าจะยังคงความสำคัญต่อไปในอนาคต เนื่องจากผลิตภัณฑ์คู่แข่งชนิดอื่นได้ก่อให้เกิดปัญหาต่อสิ่งแวดล้อมทำให้แก้วมีความสำคัญที่เด่นชัดและเป็นที่ต้องการของตลาดเนื่องจากแก้วเป็นวัสดุที่มีสมบัติดีนานปีการมีลักษณะของวัสดุที่มีความเฉื่อยในการทำปฏิกิริยากับผลิตภัณฑ์ที่บรรจุอยู่ภายใน มีความใสสะอาดมองเห็นผลิตภัณฑ์ภายในได้อย่างชัดเจน ทนต่อแรงกดและความดันได้ดี สามารถป้องกันผลิตภัณฑ์ให้เก็บรักษาไว้ได้นานและยังสามารถนำภาชนะแก้วกลับมาใช้ได้ใหม่หลายครั้ง อีกทั้งรูปทรงของการผลิตแก้วก็ยังสะดวกต่อการออกแบบให้หลากหลาย อย่างไรก็ตามต้นทุนการผลิตจะเป็นปัจจัยที่ทำให้แก้วมีราคาค่อนข้างสูงเมื่อเทียบกับบรรจุภัณฑ์ชนิดอื่น

บรรจุภัณฑ์แก้วโดยทั่วไปอาจแบ่งออกเป็นชนิดต่างตามรูปทรงแก้ว เช่น ขวดปากกว้าง ขวดปากแคบบางชนิดอาจแบ่งตามสมบัติของเนื้อแก้ว เช่น แก้วบอโรซิลิเกต หรือบางแห่งอาจแบ่งตามกระบวนการการเคลือบผิว (Surface Treatment) เช่น แก้วที่เคลือบซิลิโคน (Silicone Coating) เป็นต้น นอกจากนี้บรรจุภัณฑ์แก้วยังสามารถแบ่งออกเป็นกลุ่มตามความต้านทานความดันแบ่งเป็น 2 ประเภท คือ

1. ขวดแก้วที่ไม่จำเป็นต้องมีความต้านทานความดันมักเป็นขวดปากกว้างสำหรับนำกลับมาใช้ใหม่ได้หลายๆ ครั้ง เช่น ขวดอาหาร ขวดเครื่องสำอาง เป็นต้น
2. ขวดแก้วที่ต้องมีความต้านทานความดัน ขวดประเภทนี้มักเป็นขวดปากแคบและมีโอกาสที่จะแตกได้ง่ายหากนำกลับมาใช้เช่นเดิมอีก ดังนั้นการนำกลับมาใช้ใหม่จึงมักนิยมใช้บรรจุอย่างอื่นแทน ขวดดังกล่าวอาจได้แก่ ขวดเบียร์ ขวดน้ำอัดลม เป็นต้น

ผลิตภัณฑ์ภาชนะแก้วจะมีตั้งแต่ จาน ชาม ขวด โถ ไปจนถึงเครื่องแก้วชนิดต่างๆ โดยขวดแก้วจะมีส่วนแบ่งตลาดสูงที่สุด โดยนับตั้งแต่ขวดแก้วเพื่อใช้บรรจุเครื่องดื่มชูกำลัง ขวดเบียร์ ขวดสุรา ขวดยา และขวดอาหาร ขวดเครื่องดื่มเกลือแร่ ขวดน้ำอัดลม เป็นต้น อย่างไรก็ตาม ใ้ซึ่งก็มีส่วนความ ต้องการของขวดชนิดต่างๆ เท่าที่ผ่านมามีอยู่ในระดับที่ค่อนข้างคงที่ แม้ในบางครั้งจะมีเครื่องดื่มชนิดใหม่ๆ เข้าสู่ท้องตลาดบ้าง

### 2.8.3 เทคโนโลยีในการผลิต

วัตถุดิบต่างๆ จะผ่านการซัง กวนผสมให้เข้ากันแล้วลำเลียงป้อนเข้าสู่เตาหลอมพร้อมกับเศษแก้ว การหลอมอาจใช้อุณหภูมิสูงถึง 1600 องศาเซลเซียสซึ่งทำให้วัตถุดิบรวมทั้งเศษแก้วหลอมละลายเข้ากันเป็นน้ำแก้วปราศจากฟองอากาศ ไหลไปตามรางน้ำแก้ว พร้อมผลิตเป็นรูปขวดต่อไป

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  $\text{SiO}_2$  (ร้อยละ 55)
2. โซดาแอช  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  (ร้อยละ 20)
3. หินปูนบดละเอียด หรือโดโลไมท์  $\text{CaCO}_3$  หรือ  $\text{Ca.Mg (CO}_3)_2$  (ร้อยละ 15)
4. อะลูมินา  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (ร้อยละ 2)
5. อื่นๆ (สารเคมี เศษแก้วร้อยละ 8)

### 2.8.5 แก้วสีต่างๆ (Color Glasses)

ผลิตภัณฑ์ซึ่งมีสีต่างๆ ที่มีขายอยู่ตามท้องตลาดนั้นจะต้องใส่สารที่ให้สีโดยอาจจะใส่สารเคมีลงในขั้นตอนที่ 1 หรือขั้นตอนที่ 2 (ช่วงลดอุณหภูมิลงมาเหลือ 1200 องศาเซลเซียส) สารเคมีที่ทำให้เกิดสีในเนื้อแก้ว ได้แก่

|        |  |
|--------|--|
| สีชา   | ใช้ถ่าน + สนิมเหล็กแดง + โซเดียมซัลเฟต และ ยางสน |
| สีแดง  | ใช้แคดเมียมซัลไฟด์ + ซิลิเนียม คลอไรด์ของทอง     |
| สีชมพู | ใช้ซิลิเนียม                                     |
| สีฟ้า  | ใช้จุนสี (คอปเปอร์ซัลเฟต)                        |

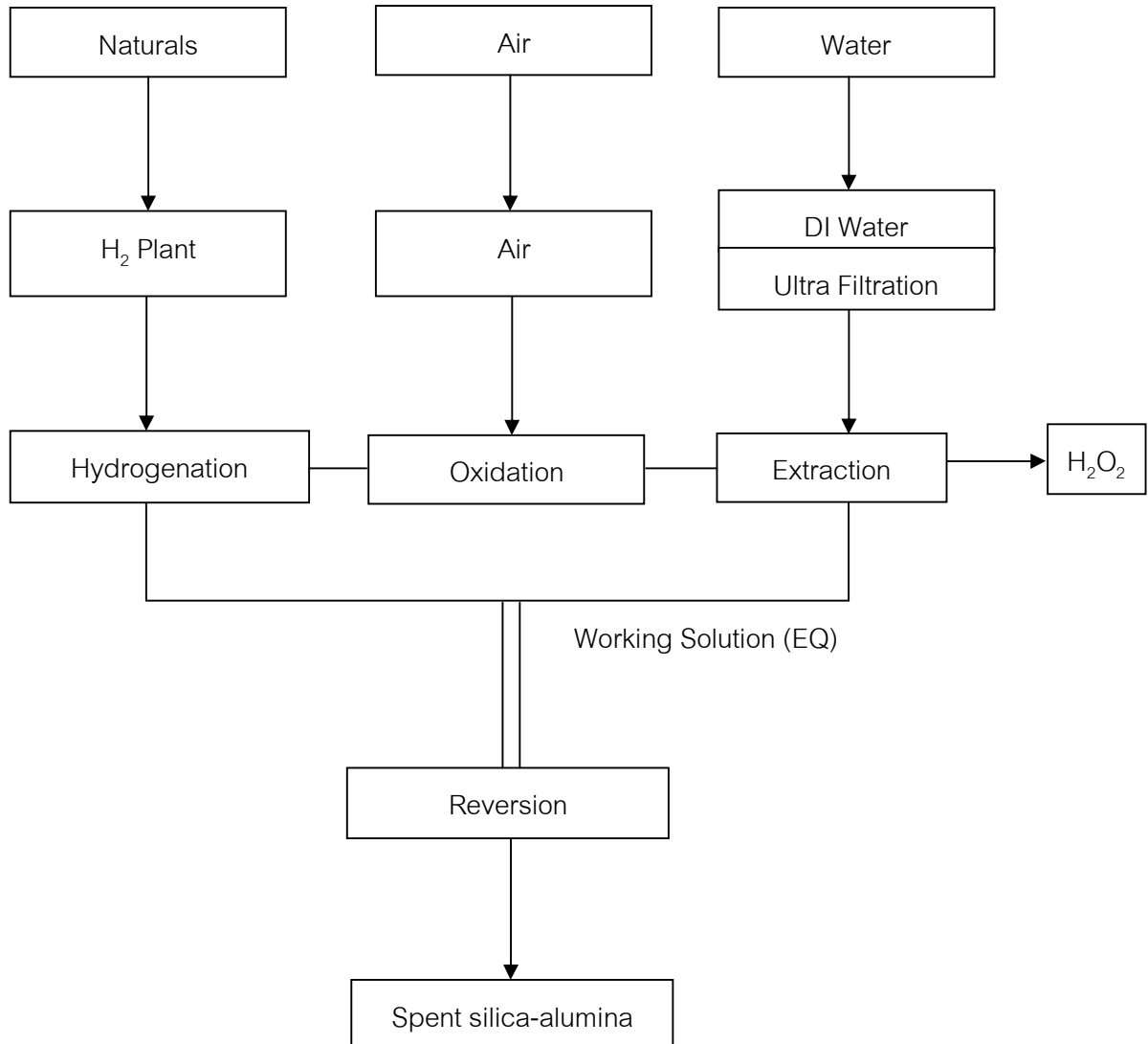
|             |  |
|-------------|--|
| สีน้ำเงิน   | ใช้โคบอลท์ออกไซด์  |
| สีเขียว     | ใช้เกลือของโครเมต เช่น โปแตสเซียมโครเมต โครเมียมออกไซด์  |
| สีดำ        | ใช้แมงกานีสออกไซด์ + โคบอลท์ + นิกเกิลออกไซด์            |
| สีเหลือง    | ใช้แคดเมียมซัลไฟด์                                       |
| สีเขียวยุติ | ใช้สนิมเหล็กแดง ( $\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{FeO}$ ) |

#### 2.8.6 ผู้ผลิตบรรจุภัณฑ์ขวดแก้วของประเทศไทย

ในปี 2553 โรงงานขนาดใหญ่ทั้ง 5 ราย ได้แก่ บริษัททำเครื่องแก้วไทย จำกัด(มหาชน) บริษัท บางกอกกกลาส จำกัด บริษัท สยามกกลาสอินดัสทรี จำกัด บริษัทบางนากกลาส จำกัด และ บริษัทโอเชียนกกลาส จำกัด( มหาชน) ซึ่งกำลังการผลิต โดยกว่าร้อยละ 80 เป็นกำลังการผลิตรวมของบริษัทผู้ผลิตรายใหญ่ จากข้อมูลของกระทรวงอุตสาหกรรมพบว่าในปี 2553 ผู้ผลิตรายใหญ่ที่สุด คือ บริษัทอุตสาหกรรมทำเครื่องแก้วไทย จำกัด มีกำลังการผลิต 1,200,000 ตัน/ปี และบริษัท บางกอกกกลาส จำกัด มีกำลังการผลิต 1,018,350 ตัน/ปี หรือประมาณ 4,000 ล้านขวดต่อปี บริษัท สยามกกลาสอินดัสทรี จำกัด มีกำลังผลิตทั้งสิ้น 600 ตันต่อวัน บริษัทบางนากกลาส จำกัดโดยมีกำลังผลิตถึง 250 ตัน/วัน และบริษัทโอเชียนกกลาส จำกัด( มหาชน) มียอดการผลิต 140 ล้านชิ้นต่อปี โดยอัตราการนำขวดแก้วและเศษแก้วกลับมาใช้ใหม่แบบหมุนเวียนนี้มีมากกว่า 90% ของขวดแก้วที่ผลิตอยู่ซึ่งขวดน้ำอัดลมที่ใช้แล้วคืนกลับโรงงานสามารถนำกลับมาใช้ได้ใหม่ได้ถึง 20 ครั้ง จากยอดจำหน่ายประมาณ 100 ล้านลัง หรือ 2,400 ล้านขวดต่อปี ก็จะประหยัดเงินได้ถึง 2,400 ล้านบาทต่อปี (บรรจุภัณฑ์ขวดแก้วของประเทศไทย, 2553)

## 2.9 ซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว

- กระบวนการเกิดกากซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว (ภาพที่ 2.4)



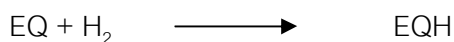
ภาพที่ 2.4 กระบวนการผลิตสารประกอบไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>)  
(ไคทิพย์ อภิธรรมวิริยะ, 2542)



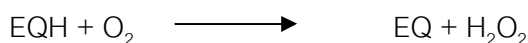
## ซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว

ซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วเป็นของเสียเศษที่เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิตสารประกอบไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ซึ่งเป็นสารเคมีที่สำคัญในอุตสาหกรรมหลายประเภท เช่น โพลีเมอร์ เครื่องสำอาง เกษษกรรม เป็นต้น ซึ่งกระบวนการผลิตนั้นเกิดจากก๊าซไฮโดรเจนและก๊าซออกซิเจนทำปฏิกิริยากันโดยมีสาร Working solution ซึ่งเป็นสาร Ethyl tetrahydro anthraquinone (EQ) เป็นสารที่ทำให้เกิดการรวมของก๊าซทั้งสอง โดยที่สาร working solution เป็นสารที่ทำให้เกิดการรวมตัวของก๊าซทั้งสองชนิด ในขณะที่สาร working solution เมื่อใช้ครบ 1 รอบการทำงานจะก่อให้เกิดความชื้นและสิ่งสกปรกปนเปื้อน จึงต้องใช้สารซิลิกา-อะลูมินาในการดูดความชื้นและสิ่งสกปรก ดังนั้นในกระบวนการนี้เองทำให้เกิดซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วขึ้น โดยปฏิกิริยาที่เกี่ยวข้องเป็นดังนี้

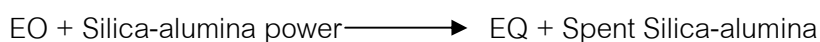
ปฏิกิริยาไฮโดรจิเนชัน



ปฏิกิริยาออกซิเดชัน



ปฏิกิริยาที่เกิดซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว



ซึ่งในกระบวนการนี้ จะก่อให้เกิดของเสียประเภทสารประกอบซิลิกา-อะลูมินาเป็นจำนวนมาก โดยประมาณการได้ว่าจะเกิดซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วเป็นจำนวนมากกว่า 100 ตันต่อปี ดังนั้นนอกจากจะทำให้เกิดของเสียซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วขึ้นมากมายแล้ว โรงงานอุตสาหกรรมที่ผลิตสารประกอบไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ยังต้องรับภาระค่าใช้จ่ายในการบำบัดซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วอีกด้วย

ตารางที่ 2.10 ส่วนประกอบซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว

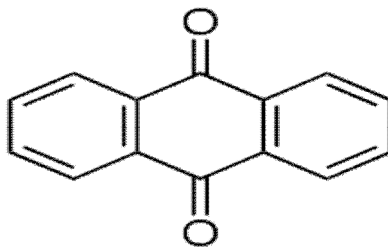
| ส่วนประกอบ  | ปริมาณ         |           |
|---|----------------|-----------|
|   | มิลลิกรัม/กรัม | ร้อยละ    |
| Aluminium Oxide (อะลูมิเนียมออกไซด์)                            | 550-630        | 55.0-63.0 |
| Silicium Oxide (ซิลิกอนออกไซด์)                                 | 120-160        | 12.0-16.0 |
| Water soluble salt (เกลือละลายน้ำ)                              | 70-130         | 7.0-13.0  |
| Humidity (ความชื้น)   | 100            | 10        |
| Ethyl tetrahydro anthraquinone<br>(เอทิลเทตระไฮโดรแอนทราควิโนน) | 23.08          | 2.31      |
| Ethyl anthraquinone<br>(เอทิลแอนทราควิโนน)                      | 9.85           | 0.99      |
| Ethyl dihydroxy anthraquinone<br>(เอทิลไดไฮดรอกซิลแอนทราควิโนน) | 6.61           | 0.66      |

ที่มา : ข้อมูลจากโรงงานผลิตสารประกอบไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ อ้างถึงในไลทิพย์ อภิธรรมวิริยะ, 2542

### สารแอนทราควิโนน (Anthraquinone)

แอนทราควิโนนเป็นสารประกอบจำพวกควิโนนที่พบมากที่สุดและมีความสำคัญที่สุด พบได้ทั้งในรูปอิสระและในรูปกลัยโคไซด์ และอาจพบในรูป Reduce forms เช่น Oxanthrones , Anthranols , Anthrones และ Dianthrones แอนทราควิโนนมีโครงสร้างพื้นฐานประกอบด้วย 3-ring system เป็นสารที่มีสีแดงส้ม แต่อาจพบได้ตั้งแต่สีเหลือง-น้ำตาล ส่วน aglycone ของแอนทราควิโนนละลายได้ดีในด่างให้สีชมพูแดง ละลายได้ใน organic solvent เช่น เบนซีน อีเทอร์ และคลอโรฟอร์ม เป็นต้น

สารแอนทราควิโนนมีสูตรทางเคมีทั่วไปคือ  $C_{14}H_{10}O_2$  มวลโมเลกุลเท่ากับ 208.21 กรัมต่อโมล มีลักษณะเป็นผลึกรูปเข็ม มีจุดหลอมเหลวที่ 286 องศาเซลเซียส จุดหลอมเหลวที่ 379.8 องศาเซลเซียส ถูกใช้ในการอุตสาหกรรมผลิตสีย้อมและเม็ดสี ใช้เป็นสารเพิ่ม (additive) ในการผลิตกระดาษ ใช้เป็นสารเร่งปฏิกิริยาในการผลิตน้ำมันพืช ใช้เป็นตัวเร่งในการเคลือบนิกเกิลด้วยไฟฟ้า และใช้เป็นสารไล่นก โดยมีสูตรโครงสร้างดังแสดงดังภาพที่ 2.5 ต่อไปนี้



ภาพที่ 2.5 สูตรโครงสร้างของสารแอนทราควิโนน (สาโรจน์ ปีชโชติพงษ์, 2545)

## 2.10 กระเบื้องเซรามิก

### 2.10.1 ความหมายของกระเบื้องตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม

กระเบื้อง หมายถึง ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการอัด (Pressing) หรืออัดรีด (extrusion) ดินและส่วนผสมอื่น เช่น หิน ททราย สี เป็นต้น แล้วเผาที่อุณหภูมิไม่น้อยกว่า 1,000 องศาเซลเซียสจนเนื้อกระเบื้องแข็งแรงมีอัตราการดูดซึมน้ำค่อนข้างต่ำสามารถทนต่อการเปลี่ยนอุณหภูมิโดยฉับพลันมีลักษณะเป็นแผ่นแต่ละแผ่นมีพื้นที่ไม่น้อยกว่า 90 ตารางเซนติเมตร มีสีและรูปร่างใดๆ ก็ได้มีทั้งประเภทเคลือบและไม่เคลือบ

### 2.10.2 ชนิดกระเบื้อง

กระเบื้องเซรามิกจะแบ่งออกเป็น 2 ชนิดใหญ่ๆ คือ กระเบื้องปูพื้นและกระเบื้องบุผนัง ทั้ง 2 ชนิดมีลักษณะที่คล้ายกันมากแต่มีรายละเอียดและคุณสมบัติบางประการที่ทำให้ทั้ง 2 ชนิดนี้ไม่เหมือนกัน

2.10.2.1 กระเบื้องปูพื้น เป็นกระเบื้องที่ต้องมีความแข็งแรงเป็นพิเศษ จึงต้องมีคุณสมบัติที่สามารถรับน้ำหนักได้ดี ทนทานต่อการขีดข่วน และมีการดูดซึมน้ำต่ำ ดังนั้นกระเบื้องปูพื้นจะถูกเผาแค่ครั้งเดียวกระเบื้องมีความแข็งแรงและสีเคลือบหลอมตัวเป็นเนื้อเดียวกับเนื้อกระเบื้องจึงทนทานไม่หลุดลอกง่ายแต่เรื่องความละเอียดอ่อนและความสวยงามของลวดลายจะมีความนุ่มนวลน้อยกว่ากระเบื้องบุผนัง (ค่ากำลังรับแรงดัดไม่น้อยกว่า 25 เมกกะปาสคาล ค่าการดูดซึมน้ำไม่เกินร้อยละ 6)

2.10.2.2 กระเบื้องบุผนัง ไม่จำเป็นต้องมีความทนทานเหมือนกระเบื้องปูพื้นจึงรับน้ำหนักและต้านทานการขีดข่วนน้อยกว่ารวมทั้งมีการดูดซึมน้ำที่มากกว่าเนื่องจากกระเบื้องบุผนังจะเน้นไปที่เรื่องของการตกแต่งจึงมีสีสันและลวดลายที่นุ่มนวล ละเอียดอ่อน สวยงามราคากระเบื้องจึงสูงกว่ากระเบื้องปูพื้น (ค่ากำลังรับแรงดัดไม่น้อยกว่า 20 เมกกะปาสคาล ค่าการดูดซึมน้ำไม่เกินร้อยละ 6)

### 2.10.3 กระบวนการผลิตกระเบื้องเซรามิกโดยทั่วไป มีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. การเตรียมเนื้อดิน ทำการผสมส่วนผสมเนื้อดินตามสูตรโดยการร่อนผ่านตะแกรงให้ส่วนผสมเข้ากันแล้วเติมน้ำให้มีความเหนียว
  2. นำไปทำการขึ้นรูป ซึ่งสามารถทำได้หลายวิธี เช่น การขึ้นรูปด้วยแรงอัดเป็นต้น
  3. นำผลิตภัณฑ์ที่ขึ้นรูปเสร็จแล้วเข้าตู้อบ (Drier) ซึ่งทำให้ผลิตภัณฑ์แห้งสม่ำเสมอไม่บิดเบี้ยวและแห้งในเวลาสั้น
  4. ทำการตกแต่งชิ้นงานก่อนเผาโดยการตัดแต่งส่วนที่เกินออก
  5. การเผาซึ่งใช้อุณหภูมิ ระยะเวลาและวิธีการแตกต่างกันไปตามแต่ชนิดของเนื้อดิน
- วัตถุประสงค์ในการเผาและรูปทรงของผลิตภัณฑ์

### 2.10.4 การขึ้นรูปผลิตภัณฑ์เซรามิกโดยใช้แรงอัด

การขึ้นรูปโดยวิธีการนี้ใช้แพร่หลายในการผลิตผลิตภัณฑ์วัตถุกันไฟ กระเบื้องและผลิตภัณฑ์เซรามิกชนิดพิเศษ แรงอัดจะอัดบนแบบที่มีผงเนื้อดินปั้นแห้ง ๆ หรือมีความชื้นเล็กน้อย อยู่ภายในแบบ แบบที่ใช้เป็นโลหะแข็ง

การขึ้นรูปโดยการอัดเนื้อดินปั้นแห้ง ๆ (Dry and Dust Pressing)

ผลิตภัณฑ์เซรามิกที่ใช้ในงานอิเล็กทรอนิกส์และงานด้านไฟฟ้ามีขนาดเล็ก ๆ บางชนิดมีรูปร่างง่าย ๆ แต่มีหลายชนิดที่มีรูปร่างซับซ้อน ผลิตภัณฑ์ทุกชนิดต้องการขนาดมาตรฐานถูกต้อง เพื่อจะได้ใช้แทนกันได้ ในวงจรของงานและต้องมีคุณสมบัติทางด้านไดอิเล็กตริก (Dielectric) คุณสมบัติทางกลศาสตร์สม่ำเสมอ

ในบางกรณีผลิตภัณฑ์เซรามิกเหล่านี้ใช้ร่วมกันหรือใช้แทนผลิตภัณฑ์ที่ทำจากพลาสติก ผลิตภัณฑ์พลาสติกมีข้อดีที่มีขนาดสามารถผลิตได้มาตรฐานแน่นอน ความแน่นอนของขนาด ผลิตภัณฑ์เซรามิกขึ้นอยู่กับองค์ประกอบหลายอย่าง เช่น การหดตัว ขนาดของอนุภาค และการกระจายของขนาดของอนุภาค ความหนาแน่นของผลิตภัณฑ์หลังจากขึ้นรูปและวิธีการเผา วิธีการที่สามารถทำให้ได้สิ่งต่างๆ เหล่านี้ที่จะเป็นวิธีการสามารถผลิตผลิตภัณฑ์ที่มีรูปร่างและขนาดต่างๆ ได้ เพราะว่าการปรับปรุงส่วนใดส่วนหนึ่ง ในวงจรการผลิตจะต้องมีการออกแบบใหม่เสมอ

การขึ้นรูปผลิตภัณฑ์เซรามิกโดยการอัดผงเนื้อดินปั้นในแบบโลหะเป็นวิธีการที่ทำให้ได้สิ่งต่างๆ ที่ต้องการเหล่านั้นและวิธีการขึ้นรูปโดยใช้แรงอัดโดยอัดโนมัติได้มีการพัฒนาขึ้นมาใช้กันอย่างกว้างขวาง การขึ้นรูปโดยการอัดผงเนื้อดินแห้ง ๆ (Dry pressing) ใช้กับการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์เซรามิกที่ใช้ในงานประยุกต์ทั้งทางด้านอิเล็กทรอนิกส์และไฟฟ้า เป็นวิธีการอัดผงกลมๆ ของเนื้อดินปั้นแห้งๆ ภายในโลหะด้วยแรงอัดที่สูง ความชื้นภายในผงเนื้อดินปั้นไม่เกินร้อยละ 4 ผงเนื้อดินปั้นกลมๆ เคลื่อนที่ได้อิสระแต่มีความเหนียวไม่ดีเท่าที่ควร แต่เมื่อถูกแรงอัดจะอัดตัวกันได้แน่น

วิธีการที่กล่าวมาแตกต่างไปจากการขึ้นรูปโดยการอัดผงกลมๆ ของเนื้อดินปั้นซึ่งเกือบแห้ง (semi dry หรือ dust press แต่บางครั้งก็เรียกรวมๆ กันว่า dry press) ซึ่งในอุตสาหกรรมกระเบื้องต่างๆ วิธีการหลังนี้เหมาะสำหรับการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์เซรามิก ซึ่งมีดินเป็นส่วนผสมในเนื้อดินปั้นเป็นปริมาณค่อนข้างสูง ซึ่งทำให้ผงเนื้อดินปั้นมีความเหนียวดี วิธีการนี้จะอัดผงเนื้อดินปั้นซึ่งมีความชื้นระหว่างร้อยละ 10 – 15 ภายในแบบโลหะแรงอัดที่ใช้ในการอัดไม่สูงมาก ข้อดีของวิธีการนี้ คือ แบบที่ใช้ชักแบบค่อนข้างง่าย แต่การดัดแปลงให้เข้ากับงานทำงานแบบอัตโนมัติไม่ค่อยดีนักและไม่สามารถทำให้ขนาดของผลิตภัณฑ์แตกต่างกันน้อยมากพอ และมักจะมีคราบเนื้อดินปั้นตามขอบผลิตภัณฑ์ซึ่งต้องปัดออกก่อนนำไปเผาการหดตัวด้วยการขึ้นรูปวิธีนี้อยู่ระหว่างร้อยละ 12-15

การเตรียมเนื้อดินปั้นสำหรับการขึ้นรูปโดยการอัดแห้ง มี 4 แนวทาง

แนวทางที่ 1 เป็นการเตรียมเนื้อดินปั้นที่มีความบริสุทธิ์ไม่สูงนัก เริ่มจากเติมน้ำจำนวนมากพอลงในถังกวน แล้วเติมวัตถุดิบ ลงไปกวนผสม เมื่อส่วนผสมเข้ากันดีแล้ว ส่งน้ำดินร้อนผ่านตะแกรง 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 แต่กลับเอาน้ำดินเข้าเครื่องสเปรย์ดรายเออร์ (Spray dryer) ซึ่งจะทำให้ผงเนื้อดินมีลักษณะเป็นทรงกลมเล็กๆ ซึ่งส่งผลให้เนื้อดินเคลื่อนตัวได้ดี และมีประโยชน์เช่นเดียวกับการทำให้เป็นเม็ดกลม วิธีนี้เป็นวิธีที่ใช้กันแพร่หลายในอุตสาหกรรมกระเบื้อง

สำหรับในงานวิจัยนี้ จะเตรียมเนื้อดินปั้นสำหรับการขึ้นรูปโดยการอัดแห้งตามแนวทางที่ 2 เท่านั้น ซึ่งระบุชื่อแนวทางตามงานวิจัยเป็นการเตรียมเนื้อดินโดยผสมเนื้อดินแบบเปียกด้วยหม้ออบผสม

### 2.10.5 กลไกการอบผลิตภัณฑ์

ในผลิตภัณฑ์ที่ขึ้นรูปเสร็จใหม่ๆ จะมีน้ำเป็นองค์ประกอบ อยู่ 4 รูปแบบ คือ

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

ผิวของแข็งทุกชนิดมีความสามารถในการดูดซึมน้ำ ซึ่งอาจมีความหนาเพียง 1 ไมเลกุล หรือมากกว่านั้น การสะสมน้ำในเนื้อของแข็งจะเป็นไปอย่างต่อเนื่องและอยู่ในรูปของหยดเล็กๆ ปริมาณของน้ำที่ถูกดูดซับขึ้นกับความดันไอของน้ำในบรรยากาศ ดังนั้นเนื้อผลิตภัณฑ์เมื่อแห้งจะค่อยๆดูดซับน้ำในบรรยากาศจนถึงจุดสมดุลพวกดินที่มีเม็ดหยาบจะดูดซึมน้ำได้น้อย

ปริมาณของน้ำที่ทำให้ผลิตภัณฑ์หดตัวเมื่ออบแห้งน้ำส่วนนี้เป็นน้ำที่แยกอนุภาคของดินออกจากกันในขณะที่ดินยังคงสภาพความเหนียวอยู่ น้ำปริมาณนี้จะมีจำนวนไมเลกุลอยู่ในช่วง 200 ไมเลกุล ดังนั้นเมื่อน้ำปริมาณนี้ถูกขจัดออกไป จะเป็นสาเหตุให้ผลิตภัณฑ์เกิดการหดตัว

น้ำที่ถูกขังอยู่ในช่องว่างผลิตภัณฑ์ น้ำปริมาณนี้จะมีน้อยหรือมากขึ้นกับขนาดอนุภาคของอนุภาคของวัตถุดิบว่ามีการกระจายตัวมากน้อยเพียงใด นอกจากนี้ขึ้นกับการอัดตัวกันของอนุภาคขนาดของวัตถุดิบที่มีขนาดใหญ่หรือหยาบโอกาสที่จะมีช่องว่างในเนื้อผลิตภัณฑ์ก็มีมากช่องว่างมีขนาดใหญ่ดังนั้นน้ำจึงมีโอกาสถูกขังในช่องว่างมาก

น้ำในผลึกของแร่ มักพบในแร่ที่หนึ่งเซลล์มีเนื้อเยื่อสามชั้นน้ำจะแทรกอยู่ระหว่างชั้นและเป็นเหตุให้แร่นั้นมีการขยายตัวตามแนวตั้งเมื่อน้ำส่วนนี้ถูกขจัดออกตอนอบจะทำให้ผลึกกลับคืนสู่ขนาดเดิม ซึ่งเป็นสาเหตุของการหดตัวนั่นเอง

### 2.10.6 ตัวแปรเบื้องต้นที่มีผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์เซรามิก

- ความบริสุทธิ์ของวัตถุดิบ มีความสำคัญต่อคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์เป็นอย่างมาก เช่น ความแข็งแรง สีสัณ และความเรียบของเนื้อผลิตภัณฑ์

- ส่วนผสมของเนื้อดิน ขึ้นอยู่กับสูตรที่ใช้ในการผลิตและชนิดของผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ

- ขนาดของวัตถุดิบ มีผลต่อความละเอียดของเนื้อผลิตภัณฑ์ ความเรียบเนียน รวมไปถึงถึงวิธีการในการผลิต การรวมตัวกันของเนื้อสารด้วยความร้อน (Sintering) การทำให้เนื้อผลิตภัณฑ์เซรามิกที่มีเนื้อแก้วเป็นส่วนประกอบมีความหนาแน่นสูง (Vitrification) ซึ่งเกิดขณะที่ทำการเผาผลิตภัณฑ์ และยังมีความสำคัญเกี่ยวกับปรากฏการณ์การเติบโตของอนุภาค อนุภาคที่ละเอียดมากๆ เมื่อเกิดความดันขึ้นที่ผิว จะทำให้กลายเป็นไอ หรือละลายได้ง่ายมากขึ้น ขนาดอันละเอียดของแร่ดินต่างๆมีส่วนทำให้การขึ้นรูปผลิตภัณฑ์โดยวิธีต่างๆเป็นไปได้ดี ดังนั้นวัตถุดิบที่มีความหยาบจึงต้องนำมาบด หรือทำให้วัตถุดิบเล็กเป็นไมครอนก่อนนำมาใช้

- อุณหภูมิในการเผา ขึ้นอยู่กับเนื้อผลิตภัณฑ์ ความหนาบางของผลิตภัณฑ์

#### 2.10.7 ปฏิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างการเผาผลิตภัณฑ์เซรามิก

การเผาเซรามิก คือการเพิ่มอุณหภูมิให้แก่ผลิตภัณฑ์เซรามิกในเตาภายใต้บรรยากาศที่เหมาะสมเพื่อเปลี่ยนสภาพวัตถุให้เป็นถาวรวัตถุที่มีความแข็งแรง คงทน และสวยงาม

กระบวนการเผาแยกออกได้หลายขั้นตอนตามอุณหภูมิต่างๆ แต่ระดับชั้นมักเกิดต่อเนื่องกันจนไม่สามารถแยกแต่ละชั้นออกได้อย่างเด่นชัด

- อุณหภูมิ 100-200 องศาเซลเซียส เป็นการอบแห้งที่สมบูรณ์ ผลิตภัณฑ์เกิดการหดตัว
- อุณหภูมิ 200-700 องศาเซลเซียส เกิดการเผาไหม้ของอินทรีย์สาร
- อุณหภูมิ 450-600 องศาเซลเซียส เป็นการเผาไหม้สารอินทรีย์ในเนื้อดิน มีการขจัดกลุ่มไฮดรอกไซด์ ออกจากผลึกเกาลินไนท์ของดินดำทำให้กลายเป็นเมตาเกาลินมีโครงสร้างการเรียงตัวไม่เป็นระเบียบทำให้เกิดรูพรุนและการหดตัว
- อุณหภูมิ 573 องศาเซลเซียส เกิดการเปลี่ยนแปลงของควอตซ์ คือ ขยายตัวขึ้นในช่วงนี้ถ้าเผาอย่างรวดเร็วเกินไปจะทำให้ผลิตภัณฑ์เกิดการแตกหัก
- อุณหภูมิ 950-980 องศาเซลเซียส เกิดผลึกในเนื้อดิน มีการจัดเรียงตัวใหม่โดยเปลี่ยนจากโครงสร้างเมตาเกาลินไปเป็นสพิแนลและในที่สุดเกิดเป็นโครงสร้างมัลไลต์ขนาดเล็กๆขึ้น
- อุณหภูมิ 1050-1150 องศาเซลเซียส การเกิดแก้ว เป็นอุณหภูมิที่เฟลด์สปาร์ จะทำปฏิริยากับ ควอตซ์ เกิดเป็นแก้วตามบริเวณรอบอนุภาคของเฟลด์สปาร์ ซึ่งสัมผัสกับเนื้อดินก่อน เมื่ออุณหภูมิเพิ่มมากขึ้น เฟลด์สปาร์จะหลอมตัวหมดและจะเกิดแก้วขึ้นในเนื้อดินควอตซ์ขนาดเล็กๆ จะละลายได้หมดที่อุณหภูมิที่สูงขึ้นถึงแม้อุณหภูมิตามทฤษฎีที่เกิดแก้ว คือ 1550 องศาเซลเซียส ทั้งนี้เนื่องจากมีสิ่งสกปรกเจือปนและนอกจากนี้ยังเกิดการแพร่ของพวกอัลคาไลที่อีกด้วย
- อุณหภูมิ 1100-1200 องศาเซลเซียส การหดตัว และการพูนตัวมีน้อยที่สุดและจะมีค่ามากขึ้นเนื่องจากการขยายตัวของรูพรุน รูพรุนนี้เกิดจากก๊าซซึ่งอาจมาจากน้ำคาร์บอนเนต และซัลเฟต หรือการเผาไหม้ของคาร์บอน
- อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส เกิดมัลไลต์ชั้นที่สองเป็นผลึกรูปเข็มสานกันไปมาช่วยเพิ่มความแข็งแรง ดังนั้นจึงควรให้เกิดผลึกมัลไลต์ในเนื้อผลิตภัณฑ์แต่ในขณะเดียวกันพวกอัลคาไลจะทำให้ผลึกมัลไลต์สลายตัวเป็นอะลูมินาและแก้ว

ปฏิกิริยานี้จะเริ่มที่ 1200 องศาเซลเซียส อย่างไรก็ตามปฏิกิริยาจะช้าลงหรือหยุดได้ถ้าเนื้อแก้วมีซิลิกาเพียงพอทั้งนี้เนื่องจากซิลิกาเป็นตัวทำให้เนื้อแก้วมีความหนืดสูง

- อุณหภูมิ 1250 องศาเซลเซียสจะเหลือเฟสของมัลไลท์ แก้ว และควอตซ์ ในเนื้อผลิตภัณฑ์ ก๊าซที่อยู่ในรูพรุนซึ่งเชื่อมโยงถึงข้างนอกจะถูกขจัดออกจากรูพรุนได้ง่าย โดยการเคลื่อนตัวออกตามรูพรุนส่วนก๊าซที่อยู่ในเนื้อผลิตภัณฑ์จะถูกขจัดออกมาได้โดยการแพร่ออกทางเนื้อแก้วเท่านั้น

อย่างไรก็ตามการเกิดปฏิกิริยาแต่ละขั้นตอนไม่สามารถแยกออกจากกันได้อย่างเด่นชัดในการควบคุมปฏิกิริยาที่จะเกิดขึ้นระหว่างการเผาจำเป็นต้องรู้ถึงองค์ประกอบอื่นที่มีผล ได้แก่ ธรรมชาติของดิน ธรรมชาติของซิลิกา ธรรมชาติของเฟลด์สปาร์ รวมถึงเวลา อุณหภูมิของการเผา และการปล่อยให้เย็นตัวลง (ปริดา พิมพ์ขาวขำ, 2547)

#### 2.10.8 จุดสุกตัว หรืออุณหภูมิสุกตัวของเนื้อดินปั้น (Firing Temperature)

สมบัติต่างๆ ของผลิตภัณฑ์สำเร็จ จะมีค่าต่างกันไปตามสภาวะการเผา ตัวอย่างเช่นผลิตภัณฑ์ชนิดเอเทนแวร์อาจใช้ส่วนผสมเดียวกับชนิดปอร์ซเลนแต่ใช้อุณหภูมิการเผาต่ำกว่า

เป็นที่ทราบกันดีว่า เมื่อส่วนผสมเนื้อดินปั้นมีแร่ดินขาวหรือฟรินต์สูงจุดสุกตัวจะสูงขึ้น แต่ถ้ามีเฟลด์สปาร์มากจุดสุกตัวก็จะต่ำลงอุณหภูมิการเผาที่มีผลต่อสมบัติของผลิตภัณฑ์กล่าวคือ เผาที่อุณหภูมิสูงจะได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพสูงเช่นมีความแข็งแรงสูงกว่า ดูดซึมน้ำต่ำกว่า แสงส่องผ่านได้ดีกว่า เป็นต้น

ความแข็งแรงของผลิตภัณฑ์เกิดจากการที่มีผลึกมัลไลท์ ซึ่งเป็นผลึกที่มีลักษณะเป็นรูปเข็ม และถ้ายังมีขนาดโตมากขึ้นความแข็งแรงก็จะมากขึ้น

การดูดซึมน้ำของผลิตภัณฑ์ เกิดจากมีรูพรุนในเนื้อผลิตภัณฑ์ การเผาที่อุณหภูมิสูง การหดตัวจะสูงกว่า รูพรุนจะมีปริมาณลดลง การเกิดเนื้อแก้วจะมีมากขึ้น การอุดรูพรุนจะเป็นได้มากกว่าทำให้ผลิตภัณฑ์ดูดซึมน้ำได้น้อยลง นอกจากนั้นเนื้อแก้วยังช่วยยึดจับผลึกต่างๆในเนื้อผลิตภัณฑ์ ทำให้ผลิตภัณฑ์มีความแข็งแรงขึ้น

#### 2.10.9 การควบคุมอุณหภูมิของเตาเผาในการเผากระเบื้องเซรามิก

การควบคุมอุณหภูมิการเผา เป็นสิ่งจำเป็นในการผลิตกระเบื้องเซรามิก การเผาแบ่งขั้นตอนเป็น 3 ตอน คือ การให้ความร้อนผลิตภัณฑ์ การเผาผลิตภัณฑ์ และการทำให้ผลิตภัณฑ์เย็นตัว ซึ่งในช่วงการเผาผลิตภัณฑ์ จะเป็นการเผาแบบแช่ไฟ (Soaking) โดยปัจจุบันพบว่าเวลาในช่วงนี้เพียง 1 ชั่วโมงก็เพียงพอที่จะทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีความแข็งแรงดี (ปริดา พิมพ์ขาวขำ, 2547)



การเผาจะทำให้ควอตซ์ละลายได้มากขึ้น และขณะเดียวกันก็เกิดผลึกมัลไลต์มากขึ้น และเกิดรูพรุนในเนื้อผลิตภัณฑ์มากขึ้น ส่วนการเผาเร็วจะเกิดผลตรงกันข้าม แต่นักเซรามิกบางคนให้เหตุผลว่า การเผาเร็วจะได้เนื้อแก้วที่ไหลตัวดี ซึ่งจะช่วยให้ผลิตภัณฑ์ที่มีความแข็งแรงมากขึ้นที่น่าสนใจอีกสิ่งหนึ่ง คือ การบดเนื้อดินปั้นให้ละเอียดมากๆ จะช่วยลดรูพรุนในเนื้อผลิตภัณฑ์ ซึ่งจะช่วยให้การเผาได้เร็วขึ้น

## 2.11 ค่าโมดูลัสการแตกหักหรือค่ากำลังรับแรงดัด (Modulus of Rupture, MOR)

เป็นค่าความแข็งแรงของเนื้อผลิตภัณฑ์เซรามิก ทนทานต่อแรงหักกลางแท่งโดยใช้แรงกดตรงส่วนกลางของแท่งเซรามิกที่วางอยู่บนฐานรองรับทั้งสองข้าง สำหรับงานวิจัยนี้จะทดสอบค่ากำลังรับแรงดัดของกระเบื้องปูพื้นและกระเบื้องบุผนัง โดยอ้างอิงภายใต้มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมกระเบื้องดินเผาปูพื้น มอก.37-2529 และมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมกระเบื้องดินเผาบุผนัง มอก.614-2529 ซึ่งระบุค่ากำลังรับแรงดัดไม่ต่ำกว่า 25 เมกกะปาสคาล (250 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร) และ 20 เมกกะปาสคาล (200 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร) ตามลำดับ โดยมีสูตรในการคำนวณดังนี้

สูตรสำหรับหาค่า MOR สำหรับแท่งทดลองทรงกระบอก

$$\text{MOR} = \frac{8wl}{\pi d^3}$$

สูตรสำหรับหาค่า MOR สำหรับแท่งทดสอบสี่เหลี่ยมผืนผ้า

$$\text{MOR} = \frac{3wl}{2bh^2}$$

w = น้ำหนักที่กดจนแผ่นกระเบื้องหัก (กิโลกรัม)

l = ระยะระหว่างแขนรับแผ่นกระเบื้อง 9 เซนติเมตร

b = ความกว้างของแผ่นกระเบื้อง (เซนติเมตร)

h = ความหนาของแผ่นกระเบื้อง (เซนติเมตร)

d = เส้นผ่านศูนย์กลางแท่งทดลองทรงกระบอก (เซนติเมตร)

MOR มีหน่วยเป็น น้ำหนักต่อพื้นที่ (กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร)

## 2.12 การศึกษาที่เกี่ยวข้องกับการวิจัย

Niemela (1995) ศึกษาการนำของเสียมาเป็นส่วนประกอบในกระเบื้องเซรามิกซึ่งสิ่งที้นำมาเป็นองค์ประกอบได้แก่ ตะกอนสลัดจ์จากโรงผลิตน้ำประปา ซึ่งได้ลอกจากโรงไฟฟ้า ตะกอนเศษหมึกพิมพ์จากโรงงานกระดาษ และเศษแก้ว โดยของเสียเหล่านี้นำมาใช้ผสมกับเนื้อดินในการผลิตเซรามิก กล่าวคือใช้ ของเสีย เป็นองค์ประกอบร้อยละ 80 และมีเนื้อดินร้อยละ 20 ผลที่ได้คือสามารถผลิตเซรามิกที่มีคุณภาพและเป็นการลดต้นทุนการผลิตมีผลทางบวกในด้านเศรษฐศาสตร์โดยของเสียทั้งหมดสามารถเป็นเนื้อดินในผลิตภัณฑ์เซรามิกได้เป็นอย่างดี นอกจากนี้ยังให้สีกับผลิตภัณฑ์อีกด้วยโดยเฉพาะเศษแก้วที่จะให้สีตามสีของแก้วที่นำมาเป็นวัตถุดิบ

**ประเสริฐ งามเลิศประเสริฐ (2541)** ศึกษาการทำเสถียรตะกอนโลหะหนักที่ได้จากการบำบัดน้ำเสียซีโอไซด์และกากฟลูออเรสเซนต์โดยการเติมโซเดียมซัลไฟด์และทำให้เป็นก้อนโดยใช้ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วเป็นวัสดุประสาน สรุปผลได้ว่าอัตราส่วนผสมของตะกอนโลหะหนักต่อวัสดุประสานที่เหมาะสมเท่ากับ 0.5 และอัตราส่วนซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.6 โดยอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.5 ปริมาณโซเดียมซัลไฟด์เท่ากับ 1.75 เท่าของปริมาณทางทฤษฎี ระยะเวลาบ่ม 7 วัน ประสิทธิภาพในการทำปรอทและโครเมียมให้คงตัวเท่ากับร้อยละ 88.39 และ 82.77 ตามลำดับ สำหรับการทำการทดสอบฟลูออเรสเซนต์ให้เป็นก้อน โดยใช้ซีเมนต์ผสมซิลิกา-อะลูมินาจะมีอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมเป็นดังนี้คือ อัตราส่วนผสมของตะกอนโลหะหนักต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.75 อัตราส่วนซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วต่อปูนซีเมนต์เท่ากับร้อยละ 50 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.5 ปริมาณโซเดียมซัลไฟด์เท่ากับ 1.75 เท่าของปริมาณทางทฤษฎี ที่ระยะเวลาการบ่ม 3 วัน มีประสิทธิภาพในการทำให้ปรอทคงตัวเท่ากับร้อยละ 82.17 ประสิทธิภาพในการลดการชะละลายของสารแอนทราควิโนนเท่ากับร้อยละ 60.56 ค่าใช้จ่ายในการบำบัดประมาณ 5,620 บาทต่อตันตะกอนแห้ง

**ไฉทิพย์ อภิธรรมวิริยะ (2542)** ทำการศึกษาโดยการนำซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วมาใช้ประโยชน์ในการทำวัสดุปูพื้น ผลของการศึกษาอัตราส่วนของซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วต่อดินสำเร็จรูปในการทำกระเบื้องดินเผาปูพื้น โดยแปรค่าตั้งแต่ 0, 0.25, 0.50, 0.75 และ 1.00 พบว่าอัตราส่วนของซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วต่อดินสำเร็จรูปที่เหมาะสมเท่ากับ 0.25 เมื่อเผาที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส เนื่องจากให้ค่ากำลังรับแรงอัดและค่าความหนาแน่นสูงสุด ความทนการร้าวและการทนสารเคมีประเภทกรดและด่างผ่านเกณฑ์มาตรฐาน ค่าใช้จ่ายโดยประมาณ 7.29 บาทต่อกระเบื้อง 1 แผ่น ผลการศึกษาในเชิงเศรษฐศาสตร์ อุณหภูมิที่เหมาะสมในการเผากระเบื้องคือ 800 องศาเซลเซียส โดยที่ค่าจากผลการทดสอบเป็นไปตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมกระเบื้องดินเผาปูพื้น (มอก.37-2529) ค่าใช้จ่ายโดยประมาณกับ 7.19 บาทต่อกระเบื้อง 1 แผ่น

Haun (2000) ศึกษาการนำของเสียประเภทแก้วมาใช้อุตสาหกรรมเซรามิกโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อต้องการลดต้นทุนการผลิตและช่วยประหยัดพลังงาน โดยพบว่าในช่วง 2-3 ปีที่ผ่านมาในประเทศสหรัฐอเมริกามีความต้องการกระเบื้องเซรามิกเพิ่มขึ้นร้อยละ 7 คิดเป็น 2.4 ล้านตารางฟุต การเพิ่มขึ้นนี้ทำให้ต้องเพิ่มพลังการผลิตมากขึ้น มีการใช้ทรัพยากรและพลังงานในการผลิตเพิ่มมากขึ้น จึงได้ทำการวิจัยโดยเลือกแก้วที่ยากต่อการนำกลับมาใช้ใหม่ (แก้วชนิดมีสี เช่น สีเขียว สีชา) มาผสมในเนื้อเซรามิก ผลพบว่าสามารถลดอุณหภูมิในการเผาได้ถึงร้อยละ 37 (โดยปกติอุณหภูมิที่ใช้ในการเผากระเบื้องเซรามิกทั่วไปอยู่ที่ 2200 องศาฟาเรนไฮต์แต่กระเบื้องที่นำแก้วมาผสมนี้สามารถเผาได้ที่อุณหภูมิประมาณ 1400 องศาฟาเรนไฮต์) ซึ่งเป็นการประหยัดพลังงานในการผลิต นอกจากนี้ยังพบว่าสามารถลดปริมาณดินและน้ำในวัตถุดิบได้อีกด้วย

Ghosh และคณะ (2002) ศึกษาการทำกระเบื้องเซรามิกโดยใช้การผสมของดินเหนียวและกากจากเตาถลุง (granulated blast furnace slag) ซึ่งใช้อัตราส่วนของแคลเซียมต่อซิลิกาที่แปรค่าตั้งแต่ 0.04 ถึง 0.86 แคลเซียมและซิลิกาเป็นองค์ประกอบของวอลลาสโตไนท์ซึ่งเป็นเฟสหลักในระหว่างการเผา โดยซิลิกามากเกินไปจะประกอบไปด้วย แมกนีเซียม เหล็กออกไซด์และอะลูมินาเพื่อจะรวมตัวไปเป็น เอนสตาไทต์ ฟายาไลต์ และอะลูมิโน-ซิลิเกตในระหว่างการเผาตามลำดับ องค์ประกอบที่เหมาะสมพบได้ในอัตราส่วนของช่วงแคลเซียมและซิลิกาเท่ากับ 0.1-0.3 ซึ่งมีกำลังรับแรงดัดและค่าการดูดซึมน้ำของตัวอย่างที่เผาแล้วเท่ากับ 28-38 เมกะปาสคาลและร้อยละ 2.5-0.1 ตามลำดับ ใช้การวิเคราะห์ด้วยวิธีเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์และส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนตามลำดับ

Haun (2002) ศึกษาถึงขนาดของผงแก้วต่อพฤติกรรมการอัดตัวก่อนและหลังขึ้นรูปพบว่า ผงแก้วที่มีขนาดเล็กกว่า 30 เมช เมื่อทำให้อิ่มตัวด้วยน้ำ แล้วนำมาอบให้แห้งจะได้ค่าความอัดตัวก่อนและหลังขึ้นรูป ที่ดีกว่าผงแก้วที่มีขนาดใหญ่กว่า 30 เมช และผลดังกล่าวทำให้สามารถศึกษาต่อถึงพลังงานที่ใช้ในการเผาขึ้นรูป คือ เมื่อผงแก้วที่มีขนาดเล็กกว่า 30 เมช สามารถอัดตัวได้ดีกว่า จึงสามารถลดอุณหภูมิที่ใช้ในการหลอมผงแก้วลงได้ คือ ใช้อุณหภูมิน้อยกว่า 800 องศาเซลเซียสในเวลา 5 นาทีเท่านั้น และศึกษา ถึงผลกระทบจากการปนเปื้อนของสารอินทรีย์ อาจเกิดขึ้นจากสภาวะใดๆ พบว่า ถ้ามีความปนเปื้อนตั้งแต่ร้อยละ 2-25 ขึ้นไป จะมีผลต่อการสามารถในการอัดตัวของผงแก้ว

วิวรรณ เทียนศิริ (2546) ได้ศึกษาการใช้ของเสียที่เป็นแก้วสีชา มาทดแทนวัตถุดิบในส่วนของตัวหลอมละลายในการผลิตกระเบื้องเซรามิก ผลของการศึกษาอัตราส่วนขวดแก้วสีชา บดละเอียด ต่อเฟลด์สปาร์ โดยงานวิจัยนี้ใช้ส่วนผสมอัตราส่วนดินดำต่อแร่เฟลด์สปาร์เท่ากับ 8 ต่อ 5 คิดเป็นร้อยละ 60 ของส่วนผสมทั้งหมดรวมกับทรายแก้วอบแห้งร้อยละ 40 แปรค่าอัตราส่วนการทดแทนแร่เฟลด์สปาร์ด้วยของเสียที่เป็นแก้วตั้งแต่ 0.00, 0.25, 0.50, 0.75 และ

1.00 ขึ้นรูปเป็นแผ่นกระเบื้องขนาด 4x4ตารางนิ้วด้วยความดันขึ้นรูป 200 บาร์ เเผาที่อุณหภูมิแปรค่าตั้งแต่ 1000 1100 และ 1200 องศาเซลเซียส พบว่าที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส สามารถทดแทนได้ในทุกอัตราส่วน โดยเป็นไปตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมกระเบื้องดินเผาปูพื้น (มอก.37-2529) จากผลดังกล่าว จึงสรุปได้ว่าสามารถใช้ของเสียที่เป็นแก้วสีขาดแทนแร่เฟลด์สปาร์ในกระบวนการผลิตกระเบื้องได้ร้อยละ 100 และจากงานวิจัยแสดงให้เห็นว่าสามารถนำของเสียประเภทแก้วมาทดแทนแร่เฟลด์สปาร์และยังช่วยลดต้นทุนการผลิตซึ่งเป็นทางเลือกที่เหมาะสมอีกทางที่ภาคอุตสาหกรรมจะนำไปพัฒนาต่อ

**หญิง อิตินันท์ (2546)** ศึกษาการนำซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วไปใช้ประโยชน์เพื่อการผลิตคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นโดยนำไปใช้เป็นวัสดุแทนที่ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ทำการแปรค่าสัดส่วนวัสดุผสมเป็น 2,3,5,8,10 และ 11 เท่าโดยน้ำหนักของวัสดุประสาน บ่มที่เวลา 7 และ 28 วันและแปรค่าอัตราส่วนซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วสถานะต่างๆ ต่อวัสดุประสานเป็น 0.05,0.10,0.15,0.25 และ 0.35 ที่ระยะเวลาบ่ม 7, 14, 21 และ 28 วันสรุปผลได้ว่าความสามารถทำงานได้ของคอนกรีตลดลงตามอัตราส่วนการเพิ่มขึ้นของวัสดุผสมและอัตราส่วนซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วต่อวัสดุประสาน การบดซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วให้มีขนาดเล็กกว่า 150 ไมครอนโดยไม่จำเป็นต้องเผาจะทำให้ได้วัสดุที่เหมาะสมที่สุด เนื่องจากสามารถแทนที่ซีเมนต์ได้ในปริมาณมากขึ้น และที่ขนาดดังกล่าวสามารถใช้ซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วทดแทนในอัตราส่วน 0.15 เท่าของวัสดุประสาน ทำให้คอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นมีสมบัติทางกายภาพด้วยระยะเวลาบ่ม 28 วันผ่านเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์คอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นของกระทรวงอุตสาหกรรม โดยคอนกรีตดังกล่าวข้างต้นมีราคา 2.74 บาท/ก้อนผลิตภัณฑ์น้ำหนัก 4.40 กิโลกรัม

**Tucci และคณะ (2004)** ทดแทนแร่เฟลด์สปาร์ ด้วยเศษแก้วโซดา-ไลม์ ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวหลอมละลายในการผลิตกระเบื้องเซรามิกชนิดปอไซเลนโดยเริ่มจากการทดแทนร้อยละ 5-20 ด้วยกระบวนการบดเปียกพบว่าเป็นการเพิ่มความเหนียวและลดความดันให้กับน้ำสลิป ซึ่งการทดแทนที่ร้อยละ 10 ที่อุณหภูมิการเผา 1220 องศาเซลเซียส จะได้ผลิตภัณฑ์ที่มีประสิทธิภาพทางกายภาพที่ดี มีความเป็นเนื้อเดียวกันซึ่งมีองค์ประกอบทางเคมีของอัตราส่วนวัตถุดิบหลังผสมที่สำคัญ ได้แก่  $\text{SiO}_2$  ร้อยละ 66.10  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ร้อยละ 21.20  $\text{CaO}$  ร้อยละ 0.99 และ  $\text{Na}_2\text{O}$  ร้อยละ 3.23 เป็นต้นนอกจากนี้ยังพบว่า การเพิ่มเศษแก้วทำให้เกิดการไล่ฟองแก๊สมากขึ้น และที่อุณหภูมิสูงจะทำให้เนื้อกระเบื้องพองขยายตัว

**ปารีย์ อรรถพิศาล (2548)** ได้ศึกษาการใช้ของเสียที่เป็นแก้วสีขา ร่วมกับซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วมาทดแทนแร่เฟลด์สปาร์ ซึ่งเป็นตัวหลอมละลายในกระบวนการผลิตเซรามิก โดยงานวิจัยนี้ใช้ส่วนผสมอัตราส่วนดินดำต่อของเสียทดแทนเท่ากับ 8 ต่อ 5 คิดเป็นร้อยละ 60 ของส่วนผสมทั้งหมดรวมกับทรายแก้วอบแห้งร้อยละ 40 ทำการแปรค่าอัตราส่วนการทดแทนเฟลด์สปาร์ด้วย

ของเสียที่เป็นแก้วสีชาต่อซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว เป็น 100:0, 80:20, 75:25 และ 70:30 ซึ่งรูปเป็นแผ่นกระเบื้องขนาด 4x4 ตารางนิ้ว ด้วยความดันขึ้นรูป 200 บาร์ เเผาที่อุณหภูมิแปรค่า ตั้งแต่ 1100, 1150 และ 1200 องศาเซลเซียส พบว่า ที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส สามารถทดแทนได้ในทุกอัตราส่วน โดยเป็นไปตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมกระเบื้องดินเผาปูพื้น (มอก.37-2529) ส่วนอัตราส่วนที่เหมาะสมในเชิงเศรษฐศาสตร์ คือ 80:20 เเผาที่อุณหภูมิ 1150 องศาเซลเซียส

**เพ็ชรพร เซวากิจเจริญ 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 ของส่วนผสมทั้งหมดรวมกับทรายแก้วอบแห้งร้อยละ 40 แปรค่าอัตราส่วนการทดแทนแร่เฟลด์สปาร์ด้วยของเสียที่เป็นแก้วร้อยละ 0 และร้อยละ 100 ของแร่เฟลด์สปาร์ที่ใช้ในส่วนผสม ทำการขึ้นรูปเป็นแผ่นกระเบื้องขนาด 4x4 ตารางนิ้ว ด้วยความดันขึ้นรูป 100 บาร์ เเผาที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส ซึ่งผ่านการทดสอบคุณภาพได้ตามมาตรฐานอุตสาหกรรม (มอก.37-2529) สำหรับกระเบื้องเซรามิก ที่มีส่วนผสมของเศษแก้วสีเขียว ซึ่งมีคุณภาพดีที่สุด ได้นำมาทำการแปรความดันขึ้นรูปและอุณหภูมิการเผา เป็น 200 บาร์ และ 1150 องศาเซลเซียส ตามลำดับเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมผลการทดสอบพบว่าที่ความดันขึ้นรูป 100 บาร์ เเผาที่อุณหภูมิ 1150 องศาเซลเซียสผ่านมาตรฐาน

**วรรณดา ต.แสงจันทร์ (2550)** ศึกษาการทำกระเบื้องจากเศษแก้วโดยนำเศษแก้วใสสีเขียว และสีชา มาบดและคัดขนาด ขึ้นรูปเป็นแผ่นกระเบื้องในแบบพิมพ์ดินเผา เเผาที่อุณหภูมิ 750-850 องศาเซลเซียส ยืนไฟ 30-90 นาที และศึกษาสมบัติการหดตัว การดูดซึมน้ำ ความหนาแน่น ความแข็งแรง และลักษณะผิวหน้า ซึ่งสามารถสรุปงานวิจัยได้ว่า เศษแก้ว สามารถนำมาใช้เป็นวัตถุดิบสำหรับทำกระเบื้องประดับตกแต่งได้โดยสามารถเลือกใช้แก้วขนาดหยาบนำมาขึ้นรูปเป็นแผ่นกระเบื้องเผาที่อุณหภูมิ 800-850 องศาเซลเซียส ยืนไฟ 30-90 นาที จะได้กระเบื้องที่มีเนื้อแกร่ง ไม่ยุบตัว ดูดซึมน้ำต่ำ ส่วนลักษณะผิวหน้าจะขรุขระหรือเรียบขึ้นกับขนาดความหยาบของเศษแก้วที่เลือกใช้

**Luz และ Ribeiro (2007)** ใช้ของเสียประเภทแก้วในส่วนผสมกระเบื้องเซรามิกชนิดปอไซเลนที่ด้วยกระบวนการบดเปียกโดยใช้อัตราส่วนผสมต่างๆ ของดิน เศษแก้ว เฟลด์สปาร์ และควอร์ต โดยทำการแปรค่าอุณหภูมิการเผาตั้งแต่ 1000-1250 องศาเซลเซียส แช่วไฟ 30 นาที จะพบว่าที่การทดแทนด้วยแก้วปริมาณน้อยจะสามารถผลิตกระเบื้องที่มีสมบัติทางกายภาพที่ดี และการแทนเฟลด์สปาร์ร้อยละ 25 และแก้วร้อยละ 5 จะได้กระเบื้องที่ผ่านเกณฑ์มาตรฐาน

**Rambaldi และคณะ (2007)** ศึกษาการนำกากไม้ใช้แล้วของเครื่องกระเบื้องจากหลุมฝังกลบมาทดแทนแร่เฟลด์สปาร์ในอัตราส่วนต่างๆ เพื่อผลิตกระเบื้องเซรามิก โดยผสมส่วนผสมต่างๆ ได้แก่ ดินดำ ททราย และแร่เฟลด์สปาร์ ในน้ำผ่านส่วนผสมหลังอบแห้งผ่านตะแกรง 125 ไมโครเมตร เพิ่มความชื้นร้อยละ 6 และอัดขึ้นรูปกระเบื้องก่อนเผาที่อุณหภูมิระหว่าง 1120-1180 องศาเซลเซียส พบว่ากระเบื้องที่เผาในช่วงอุณหภูมิ 1140-1160 มีคุณสมบัติทางกายภาพที่ดี และการทดแทนที่ร้อยละ 10 มีความเป็นไปได้ที่จะช่วยลดอุณหภูมิการเผา ซึ่งองค์ประกอบทางเคมีของอัตราส่วนวัตถุดิบหลังผสมที่สำคัญ ได้แก่  $\text{SiO}_2$  ร้อยละ 71.75  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ร้อยละ 17.02  $\text{CaO}$  ร้อยละ 0.69 และ  $\text{Na}_2\text{O}$  ร้อยละ 3.08 เป็นต้น

**Tucci และคณะ (2007)** ศึกษาการเพิ่มส่วนผสมในกระเบื้องโดยการเติมอะลูมินา 2 ชนิด คือ อะลูมินาบริสุทธิ์และแคลไซต์บอคาไซด์ อะลูมินาถูกนำมาใช้แทนที่ส่วนของฟลักซ์ซึ่งเอเจนต์ โซเดียมเฟลด์สปาร์ สามารถสรุปความเป็นไปได้ในการเพิ่มขึ้นของลักษณะเชิงกลในกระเบื้องโดยการเติมอนุภาคของอะลูมินาร่วมกับฟลักซ์เอเจนต์ เรียกว่า Spodumene (สปอดูมิน) ผลคือจะเกิดความทนทานของตัวช่วยหลอมของส่วนผสมอนุภาคเหล่านี้สูงมากกว่าเนื้อแก้ว นอกจากนี้ สปอดูมินที่เกิดขึ้นเนื่องมาจากความสามารถในการพัฒนาเฟสของเหลวให้มีความหนืดต่ำซึ่งลักษณะการเผาไหม้ของผลิตภัณฑ์เปลี่ยนแปลงแล้วลดความพรุนและทำให้เกิดผลึกที่น่าพึงพอใจที่แผ่ขยายออกไปเช่นเดียวกับมัลไลต์ ทำยสุดท้ายพบว่าสปอดูมินที่เกิดขึ้นสามารถลดการใช้อุณหภูมิและการหดตัวที่สูงๆได้ดีเป็นต้น

**Bernado และคณะ (2008)** ได้ศึกษาเกี่ยวกับการเกิดผลึกของผงแก้วโดยใช้ทดแทนแร่เฟลด์สปาร์ซึ่งเป็นแร่ที่หาได้ยากผ่านกระบวนการเผาที่ 750 องศาเซลเซียสที่เวลาจำกัด โดยใช้ส่วนผสมแก้วทดแทนที่ร้อยละ 5-15 และการเติม  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ลงในผงแก้วทำให้เพิ่มคุณสมบัติความแข็งแรงของเนื้อแก้ว-เซรามิก ทั้งด้านการรับแรงดัด (มากกว่า 100 เมกกะปาสคาล) การทนความแข็งแรงระดับจุดภาค (ประมาณ 9 กิโลปาสคาล) และความทนการแตกหัก (ประมาณ 2 เมกกะปาสคาล) ซึ่งงานวิจัยนี้ง่ายและช่วยลดค่าใช้จ่ายในกระบวนการผลิต ดังนั้นจึงสามารถประยุกต์ใช้กับงานอุตสาหกรรมก่อสร้าง

**Schneider และคณะ (2008)** ได้รวบรวมและศึกษาเกี่ยวกับโครงสร้างและคุณสมบัติของมัลไลต์ เนื่องจากมัลไลต์มีความสำคัญในด้านการทนไฟ และความคงทน ในอุตสาหกรรมเซรามิกประยุกต์ มัลไลต์มีองค์ประกอบสำคัญ คือ Si และ Al โดยมีอัตราส่วน  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ร้อยละ 55-90 โดยโมล หรือ ประมาณร้อยละ 72-78 โดยมวล ซึ่งการเกิดของมัลไลต์จะขึ้นกับอุณหภูมิและ

ความดันด้วยสามารถเกิดมลไลท์เมื่อมีธาตุอัลคาไลต์เอิร์ทเล็กน้อยแต่จะลดลงถ้ามีปริมาณธาตุอัลคาไลต์เอิร์ทเพิ่มขึ้นอาจเนื่องจากเกิดการหลอมละลายมากเกินไปการเกิดรูปผลึกจึงน้อยลง

**ฉัตรชัย พรฐิติโกศล (2552)** ศึกษาการนำเศษแก้วรีไซเคิลสีเขียว มาทดแทนเฟลด์สปาร์ในการผลิตกระเบื้องเซรามิก โดยใช้อัตราส่วนผสมดินดำต่อเศษแก้ว 8 ต่อ 5 คิดเป็นร้อยละ 60 ของส่วนผสมทั้งหมด รวมทั้งทรายแก้วอบแห้งร้อยละ 40 ความชื้นร้อยละ 10 ของส่วนผสมทั้งหมด แปรค่าขนาดเศษแก้วที่ใช้เป็นขนาดที่เล็กกว่า 0.295, 0.147, 0.104 และ 0.075 มิลลิเมตร ตามลำดับ ขึ้นรูปเป็นแผ่นกระเบื้องขนาด 4x4 ตารางนิ้ว ด้วยความดันการอัดขึ้นรูป 100 บาร์ เเผาที่ อุณหภูมิ 1200, 1150 และ 1100 ° C ตามลำดับ ทำการผสมวัตถุดิบแบบแห้งและแบบเปียกซึ่งพบว่าการผลิตแบบเปียกทำให้วัตถุดิบผสมเข้ากันได้ดีกว่า จากผลการทดลองพบว่าตัวอย่างกระเบื้องผ่านการเผาที่ 1200 องศาเซลเซียสสามารถผลิตกระเบื้องผ่านเกณฑ์มาตรฐานอุตสาหกรรมกระเบื้องปูพื้น (มอก.37-2529) และเมื่อเผาที่ 1150 องศาเซลเซียสสามารถผลิตกระเบื้องผ่านเกณฑ์มาตรฐานอุตสาหกรรมกระเบื้องบุผนัง (มอก.614-2529) จึงสรุปได้ว่าการใช้เศษแก้วทดแทนขนาดหยาบขึ้นในการผลิตกระเบื้อง สามารถช่วยลดค่าใช้จ่ายได้มากกว่าครั้งในการสูญเสียไปกับพลังงานการอบเศษแก้ว

**Brow และ Schmitt (2009)** ศึกษาและค้นคว้าเทคโนโลยีทางด้านแก้วเนื่องจากคุณสมบัติ และสถานะหลากหลายของแก้วทำให้แก้วเป็นวัตถุดิบที่มีความสำคัญ ทางด้านการผลิตพลังงานทดแทน และเทคโนโลยีด้านสิ่งแวดล้อม โดยการค้นคว้าวิจัยและพัฒนาวัตถุดิบใหม่ๆ ออกสู่ตลาด เช่น การประยุกต์งานด้านแก้วสำหรับพลังงานทดแทนจากแสงอาทิตย์ พลังงานจากลม พลังงานนิวเคลียร์ และการค้นคว้าในปัจจุบัน ได้แก่ การผลิตตัวจุไฟฟ้าประสิทธิภาพสูง และเครื่องผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยกรรมวิธีทางเคมี ซึ่งเป็นเรื่องที่สำคัญและควรผลักดันงานวิจัยด้านนี้ไปจนถึงปี 2020 เป็นต้น

**Martín-Márquez และคณะ (2010)** ศึกษาการพัฒนาโครงสร้างในกระเบื้องที่มีส่วนผสมคือ ดินขาวร้อยละ 50 เฟลด์สปาร์ร้อยละ 40 และควอตซ์ร้อยละ 10 โดยจะพิจารณาอัตราส่วนที่เปลี่ยนแปลงของผลึกมลไลท์ตอนเผาเร็วของอุณหภูมิต่างกัน (500-1400 องศาเซลเซียส) มีอัตราการเผาอย่างรวดเร็ว 50 องศาเซลเซียสต่อนาที สำหรับองค์ประกอบทางเคมีของอัตราส่วนวัตถุดิบหลังผสมที่สำคัญ ได้แก่  $\text{SiO}_2$  ร้อยละ 66.84  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ร้อยละ 20.49  $\text{CaO}$  ร้อยละ 0.22 และ  $\text{Na}_2\text{O}$  ร้อยละ 0.91 เป็นต้นจากผลการวิจัยพบว่า โครงสร้างแบบที่ 1 มลไลท์ขั้นต้นประกอบด้วยเกล็ดของผลึกเล็กๆ ซึ่งถูกพัฒนาในช่วงอุณหภูมิ 1200-1400 องศาเซลเซียส ขนาดของผลึกจะเพิ่มขึ้นจนเกือบถึงอัตราส่วนที่ 3:1 ที่อุณหภูมิ 1400 องศาเซลเซียส แบบที่ 2 และแบบที่ 3 ประกอบด้วยผลึกมลไลท์รูปเข็มที่ต้องการจากการเพิ่มอุณหภูมิทั้งจำนวนและความกว้างซึ่งนำไปสู่การเพิ่มอัตราส่วนจาก 5:1 ที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส จนถึงประมาณ 20:1 ในช่วงอุณหภูมิ 1260-

1400 องศาเซลเซียส ในแบบที่ 2 และจากประมาณ 33:1 ที่อุณหภูมิ 1250 องศาเซลเซียส ถึง 50:1 ในช่วงอุณหภูมิ 1300-1400 องศาเซลเซียส ในแบบที่ 3 ซึ่งพบมลิลท์เป็นเส้นใยโดยสังเกตได้ในตัวอย่างกระเบื้องที่เผาอย่างรวดเร็วในช่วง 1250-1280 องศาเซลเซียส

**Schwarz-Tatarin และคณะ (2010)** ศึกษาการรวมตัวของเฟสระหว่างการเผาไหม้และสมบัติที่เกิดขึ้นกับวัตุดิบระหว่างดินเหนียวและแก้ว 4 ชนิด (G1- แก้วรีไซเคิลจากแก้วบรรจุภัณฑ์ G2- แก้วรีไซเคิลจากกระจก G3- แก้วที่ไม่มีบอโรซิลิเกต และ G4- ผงแก้วได้มาจาก G2) โดยอัตราส่วนผสมดินเหนียว:ผงแก้วเป็นดังนี้คือ ร้อยละ 100:0 ร้อยละ 90:10 (แก้วทุกชนิด) ร้อยละ 75:25 (แก้วชนิด G1 และ G2) ร้อยละ 70:30 (แก้วทุกชนิด) ร้อยละ 50:50 (แก้วทุกชนิด) จากผลการวิจัยพบว่าปฏิกิริยาของเฟสระหว่างการเผากระเบื้องเซรามิกที่มีผงแก้วจะมีอิทธิพลอย่างสูงกับปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นในสภาวะยังไม่ถูกเผา ซึ่งขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของอนุภาคและความละเอียดของแก้วที่มีแร่ธาตุที่แตกต่างกันหลังจากการเผาแล้ว โดยมีอิทธิพลกับสมบัติทางกายภาพต่างๆ การหดตัว กำลังรับแรงดัด และการดูดซึมน้ำเป็นต้น



## บทที่ 3

### แผนการทดลองและการดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาถึงการปรับอัตราส่วนผสมวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตกระเบื้องเซรามิก ด้วยเศษแก้วสีเขียวและซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วเพื่อทดแทนแร่เฟลด์สปาร์จากการหาค่าประกอบทางเคมีที่เหมาะสมในการผลิตกระเบื้องเซรามิกแบบไม่เคลือบโดยการเตรียมเนื้อดินผ่านการผสมเปียกด้วยหม้อบดซึ่งยังคงใช้ส่วนผสมหลักในการผลิตกระเบื้องเซรามิก ได้แก่ ดินดำ เฟลด์สปาร์ทรายแก้ว เป็นต้น โดยแต่ละอัตราส่วนผสมวัตถุดิบที่ใช้ทดแทนแร่เฟลด์สปาร์ด้วยเศษแก้วสีเขียวและซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว ได้แก่ 0:0, 15:85, 25:75 และ 35:65 ซึ่งแปรอุณหภูมิในการเผา 4 อุณหภูมิ โดยแบ่งลำดับการวิจัยดังนี้

- ตอนที่ 1 ศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบด้วยเครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (XRF) และหาค่าการกระจายขนาดของวัตถุดิบ (Particle size distribution)
- ตอนที่ 2 ศึกษาการชะละลายของโลหะหนักในซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วโดยวิธี Waste Extraction Test (WET)
- ตอนที่ 3 วิเคราะห์เฟสโดยวิธีเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน (XRD) และเปรียบเทียบภาพขยายทางจุลภาค (SEM) ของกระเบื้องที่ผ่านมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมกระเบื้องดินเผาปูพื้น (มอก. 37-2529) และกระเบื้องดินเผาบุผนัง (มอก. 614-2529) จากการทดแทนแร่เฟลด์สปาร์ด้วยเศษแก้วสีเขียวและซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วด้วยอุณหภูมิการเผาต่างกัน
- ตอนที่ 4 ศึกษาผลของอุณหภูมิต่อการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางกายภาพของกระเบื้องเซรามิกเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอัตราการทดแทนด้วยของเสียที่เป็นเศษแก้วสีเขียวและซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว
- ตอนที่ 5 ศึกษาหาผลของอุณหภูมิที่เหมาะสมในการเผาขึ้นรูปกระเบื้อง
- ตอนที่ 6 ประเมินค่าใช้จ่ายเบื้องต้นในกระบวนการผลิตกระเบื้องเซรามิก

งานวิจัยนี้ทำการทดลองที่ห้องปฏิบัติการภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ และห้องปฏิบัติการภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### 3.1 การเตรียมวัตถุดิบและอุปกรณ์ในงานวิจัย

#### 3.1.1 วัตถุดิบที่ใช้ในงานวิจัย

- 1) ททรายแก้ว (จากบริษัท ซีเบลโก มินเนอร์รัลส์ (ประเทศไทย) จำกัด)  
(ภาพที่ ผ18)
- 2) เศษแก้วสีเขียว (จากโรงงานรีไซเคิลแก้ว) (ภาพที่ ผ19)
- 3) เฟลด์สปาร์ (จากบริษัท ซีเบลโก มินเนอร์รัลส์ (ประเทศไทย) จำกัด)  
(ภาพที่ ผ20)
- 4) ซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว (จากโรงงานผลิตสารประกอบไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์)  
(ภาพที่ ผ21)
- 5) ดินดำ (Ball Clay) (จากบริษัท ซีเบลโก มินเนอร์รัลส์ (ประเทศไทย) จำกัด)  
(ภาพที่ ผ22)
- 6) น้ำ

#### 3.1.2 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

- 1) สารละลายกรดไฮโดรคลอริก
- 2) สารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์

#### 3.1.3 เครื่องมือ และอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

##### 3.1.3.1 การบดและการคัดขนาดวัตถุดิบ

- 1) เครื่องบดขนาดเล็ก (Tube Mill) (ภาพที่ ผ29)
- 2) เครื่องร่อนคัดขนาด เบอร์ 50, 100, 150 และ 200 (ภาพที่ ผ30)

##### 3.1.3.2 การผสมวัตถุดิบแบบเปียกด้วยหม้อบดผสม

- 1) หม้อบดผสม (ภาพที่ ผ31)
- 2) เครื่องบดผสมวัตถุดิบ (ภาพที่ ผ32)
- 3) แท่งปูนปลาสเตอร์ (Plaster Mold) เพื่อคูดน้ำดินให้แห้ง
- 4) ฤงด้าพลาสติก สำหรับหมักวัตถุดิบ

##### 3.1.3.3 การทดลองขึ้นรูปกระเบื้องและการเผากระเบื้อง

- 1) เครื่องอัดขึ้นรูปกระเบื้อง (ภาพที่ ผ33)
- 2) เครื่องชั่งน้ำหนัก

### 3) เตาเผาอุณหภูมิสูง (แบบไฟฟ้า) (ภาพที่ ผ34)

#### 3.1.3.4 การทดสอบค่ารับกำลังแรงดัด (Bending strength test)

- 1) เครื่องทดสอบค่ารับกำลังแรงดัด

#### 3.1.3.5 การทดสอบค่าการดูดซึมน้ำ (Water absorption test)

- 1) เครื่องชั่งน้ำหนัก
- 2) เตาแก๊สสำหรับให้ความร้อน
- 3) ถาด/หม้อทนความร้อน

#### 3.1.3.6 การทดสอบการทนสารเคมี

- 1) อ่างสำหรับแช่ตัวอย่างกระเบื้อง

#### 3.1.3.7 การทดสอบการหดตัว (Firing shrinkage test)

- 1) เวอร์เนียคาลิเปอร์

## 3.2 วิธีการดำเนินการวิจัย

### 3.2.1 เตรียมวัตถุดิบและนำไปบดละเอียดด้วยหม้อบด (Tube Mill) ดังนี้

- 1) ใส่ซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วที่ต้องการบดลงในหม้อบด (Tube Mill) ประมาณ 1.5 กิโลกรัม ใช้เวลาการบดประมาณ 2.5 ชั่วโมงต่อการบด 1 ครั้ง
- 2) ใส่ดินดำที่ต้องการบดลงในหม้อบด (Tube Mill) ประมาณ 1.5 กิโลกรัม ใช้เวลาการบดประมาณ 2.5 ชั่วโมงต่อการบด 1 ครั้ง

### 3.2.2 นำวัตถุดิบต่างๆ มาคัดแยกขนาดด้วยตะแกรงกรองเบอร์ 100 และจัดเก็บวัตถุดิบ

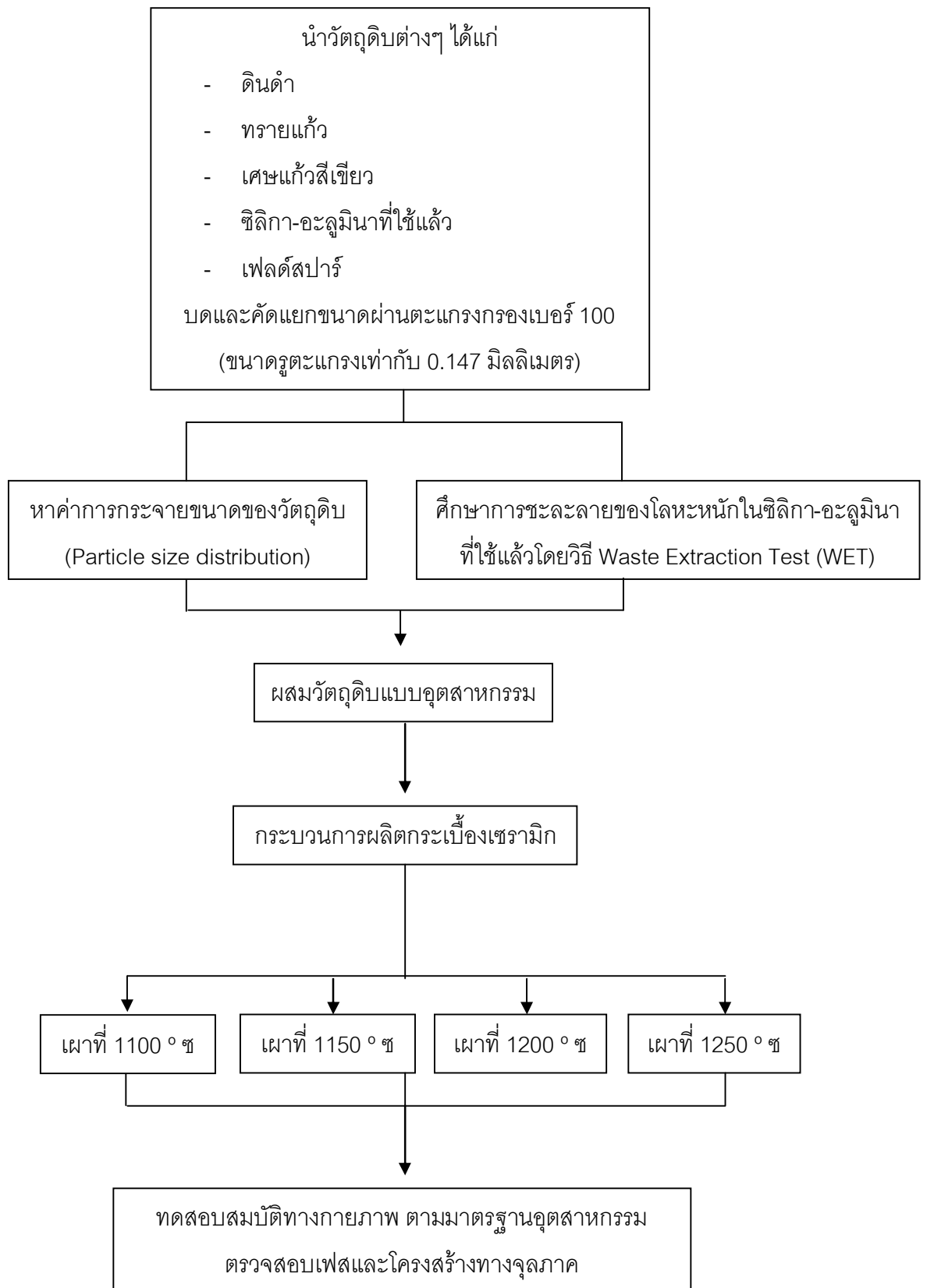
### 3.2.3 นำวัตถุดิบต่างๆ ได้แก่ ทราย ดินดำ เศษแก้วสีเขียว ซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วและเฟลด์สปาร์มาวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยด้วยเครื่อง XRF (รุ่น Philips model PW2400) และหาค่าการกระจายขนาดของวัตถุดิบ (Particle size distribution) ด้วยเครื่อง Mastersizer 2000

### 3.2.4 ศึกษาการชะละลายของโลหะหนักในกากซิลิกา-อะลูมินาโดยวิธี Waste extraction test (WET) ตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม พ.ศ. 2548 (ภาคผนวก ข)

### 3.2.5 เตรียมเนื้อดินโดยผสมเนื้อดินแบบเปียกด้วยหม้อบดผสมดังนี้

- 1) ใส่ส่วนผสมดินดำต่อเศษแก้วและซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วเท่ากับ 8 ต่อ 5 (คิดเป็นร้อยละ 60) ทรายแก้วร้อยละ 40 และน้ำร้อยละ 50 ลงในหม้อบดผสมวัตถุดิบ

- 2) ผสมน้ำดินจนได้น้ำดินที่เหลวหนืดเป็นเนื้อเดียวกัน
  - 3) เทน้ำดินออกจากหม้อบดผสมและผึ่งน้ำดินที่อ่างกรองจนน้ำดินแห้ง
  - 4) น้ำดินมาอบ 24 ชั่วโมง
  - 5) ตำเนื้อดินให้ละเอียด และคัดผ่านตะแกรงเบอร์ 80
  - 6) นำผงดินที่ได้มาเติมน้ำร้อยละ 10 ให้ผสมกันโดยทั่วและหมักทิ้งไว้ 3 วัน
- 3.2.6 นำวัตถุดิบที่ได้อ่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 20 ก่อนนำไปอัดขึ้นรูปเป็นแผ่นกระเบื้อง ขนาด 10x10x0.5 ซม. โดยใช้แรงอัดขึ้นรูปที่ 100 บาร์ (เพ็ชรพร เซวากิจเจริญ และคณะ, 2549)
- 3.2.7 นำแผ่นกระเบื้องที่ผ่านการขึ้นรูปแล้ว มาอบไล่ความชื้น ที่ 105 องศาเซลเซียส 6 ชั่วโมง
- 3.2.8 นำแผ่นกระเบื้องเข้าเตาเผาโดยทำการเผาที่อุณหภูมิ 1100 1150 1200 และ 1250 องศาเซลเซียส (อัตราการให้ความร้อน 3 องศาเซลเซียสต่อนาทีและเผาแช่ไฟนาน 15 นาที) (ภาพที่ 3.1)



ภาพที่ 3.1 แผนผังขั้นตอนการผลิตกระเบื้องเซรามิกในงานวิจัย

ตารางที่ 3.1 ส่วนผสมของกระเบื้องเซรามิกในงานวิจัย

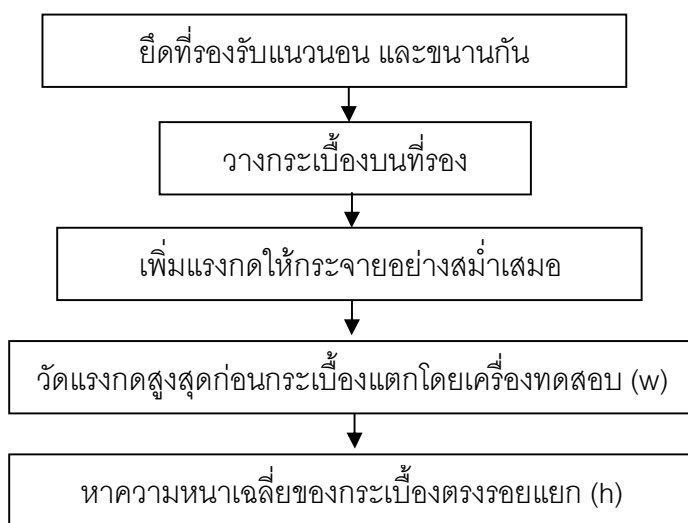
| ส่วนผสมวัตถุดิบ (ร้อยละ) |          |  |                           | อุณหภูมิที่ใช้ในการเผา<br>(องศาเซลเซียส) |             |             |             |
|--------------------------|----------|--|---------------------------|--|-------------|-------------|-------------|
| ดินดำแม่แซน              | ทรายแก้ว | ทดแทนเฟลด์สปาร์ร้อยละ 23.08<br>(ร้อยละ100) |                           |  |             |             |             |
|                          |          | แก้วเขียว                                  | ซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว | 1100                                     | 1150        | 1200        | 1250        |
| 36.92                    | 40       | 0  | 0                         | สูตร1,1100                               | สูตร 1,1150 | สูตร 1,1200 | สูตร 1,1250 |
| 36.92                    | 40       | 3.46 (ร้อยละ15)                            | 19.62 (ร้อยละ85)          | สูตร2,1100                               | สูตร 2,1150 | สูตร 2,1200 | สูตร 2,1250 |
| 36.92                    | 40       | 5.77 (ร้อยละ25)                            | 17.31 (ร้อยละ75)          | สูตร3,1100                               | สูตร 3,1150 | สูตร 3,1200 | สูตร 3,1250 |
| 36.92                    | 40       | 8.08 (ร้อยละ35)                            | 15.00 (ร้อยละ65)          | สูตร4,1100                               | สูตร 4,1150 | สูตร 4,1200 | สูตร 4,1250 |

หมายเหตุ : อัตราส่วนดินดำต่อเฟลด์สปาร์เท่ากับ 8 ต่อ 5 คิดเป็นร้อยละ 60 และทรายแก้ว คิดเป็นร้อยละ 40 โดยในงานวิจัยนี้แปรอัตราส่วนของเศษแก้วสีเขียวและซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว ดังตารางที่ 3.1 เพื่อใช้ทดแทนเฟลด์สปาร์ร้อยละ 100 จากร้อยละ 23.08 ของอัตราส่วนผสมวัตถุดิบทั้งหมด

3.2.9 นำแผ่นกระเบื้องที่ได้หลังจากการเผาไปทดสอบคุณภาพมาตรฐานด้านความแข็งแรงของกระเบื้องบุผนังและกระเบื้องปูพื้น (กระทรวงอุตสาหกรรม, มาตรฐานกระทรวงอุตสาหกรรม, 2529) ดังนี้

#### 3.2.9.1 การทดสอบค่ากำลังแรงดัด (Bending strength test)

นำแผ่นกระเบื้องที่ผลิตได้ 5 แผ่น มาทดสอบค่ากำลังรับแรงดัด โดยคำนวณกำลังดัดที่ได้ในหน่วย เมกกะปาสคาล เพื่อเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐาน โดยมีวิธีทดสอบดังนี้



ภาพที่ 3.2 แผนผังขั้นตอนการทดสอบค่ากำลังรับแรงดัด

#### การคำนวณ

สูตรสำหรับหาค่ากำลังรับแรงดัด (Modulus of Rupture, MOR)

$$\text{MOR} = 3wl / 2bh^2$$

w = น้ำหนักที่กดจนแผ่นกระเบื้องหัก (กิโลกรัม)

l = ระยะระหว่างแกนรับแผ่นกระเบื้อง 9 เซนติเมตร

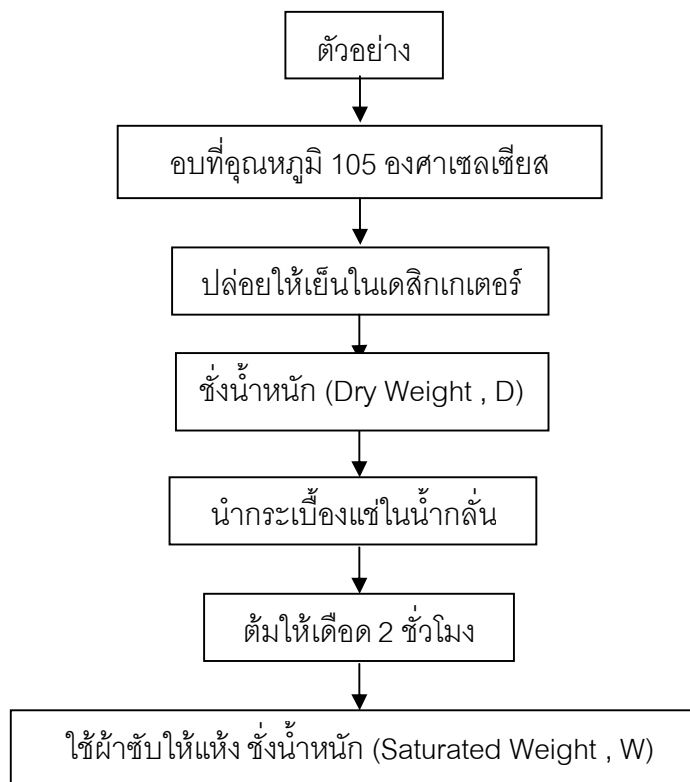
b = ความกว้างของแผ่นกระเบื้อง (เซนติเมตร)

h = ความหนาของแผ่นกระเบื้อง (เซนติเมตร)

MOR มีหน่วยเป็น น้ำหนักต่อพื้นที่ (กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร)

### 3.2.9.2 การทดสอบค่าการดูดซึมน้ำ (Water absorption test)

นำแผ่นกระเบื้องที่ผลิตได้ 5 แผ่น มาทดสอบค่าการดูดซึมน้ำ เพื่อเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐาน (ประเภทการดูดซึมน้ำ เป็นตัวกำหนดเกณฑ์มาตรฐานความต้านแรงดัดของกระเบื้อง โดยมีวิธีทดสอบดังนี้



ภาพที่ 3.3 แผนผังขั้นตอนการทดสอบค่าการดูดซึมน้ำ

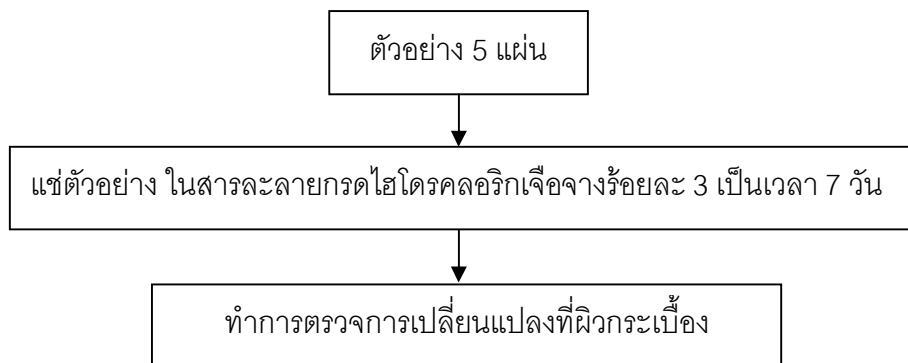
#### การคำนวณ

$$\text{เปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำ} = \frac{(W - D) \times 100}{D}$$

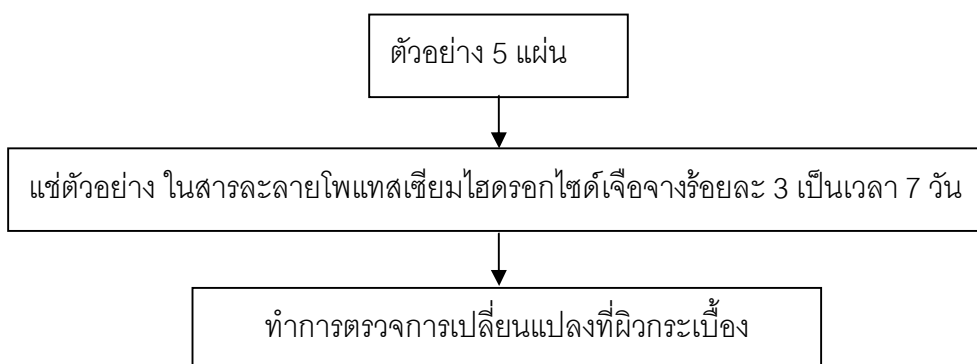
### 3.2.9.3 การทดสอบการทนสารเคมี (Chemical durability test)

นำกระเบื้องที่ผลิตได้อย่างละ 5 แผ่น มาทดสอบความทนกรด และนำกระเบื้องที่ผลิตได้อย่างละ 5 แผ่น มาทดสอบความทนด่าง โดยแผ่นกระเบื้องที่ผ่านการทดสอบ ต้องไม่ปรากฏรอยเสียหาย โดยมีวิธีทดสอบดังนี้





ภาพที่ 3.4 แผนผังขั้นตอนการทดสอบค่าการหด



ภาพที่ 3.5 แผนผังขั้นตอนการทดสอบค่าการหดต่าง

#### 3.2.9.4 การทดสอบค่าการหดตัว (Firing shrinkage test)

นำแผ่นกระเบื้องที่ผลิตได้มา 5 แผ่น มาวัดขนาดโดย เวอร์เนียร์คาลิเปอร์ โดยคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างระหว่างปริมาตร (กว้าง×ยาว×หนา) ของผลิตภัณฑ์ก่อนและหลังเผา

#### การคำนวณ

$$\text{เปอร์เซ็นต์การหดตัว} = \frac{(\text{ปริมาตรของผลิตภัณฑ์ก่อนเผา} - \text{ปริมาตรของผลิตภัณฑ์หลังเผา}) \times 100}{(\text{ปริมาตรของผลิตภัณฑ์ก่อนเผา})}$$

#### 3.2.10 การตรวจสอบ และศึกษาคุณสมบัติของเฟส

นำกระเบื้องที่ผ่านการพิจารณาค่ากำลังรับแรงดัด ค่าดูดซึมน้ำ และค่าการหดตัวของกระเบื้องหลังการเผาที่อุณหภูมิต่างๆ ไปวิเคราะห์ห้องปฏิบัติการทางเฟสด้วยวิธีเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน และพิจารณาภาพขยายพื้นผิวด้วยการส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน

3.2.11 การประมาณค่าใช้จ่ายเบื้องต้นของวัตถุดิบและพลังงานที่ใช้ในกระบวนการผลิต โดยไม่คำนวณค่าแรงงาน

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

#### 4.1 ศึกษาองค์ประกอบทางเคมีด้วยเครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์และหาค่าการกระจายขนาดของวัตถุดิบ

งานวิจัยนี้ใช้ส่วนผสมในการผลิตกระเบื้อง ได้แก่ เศษแก้วสีเขียว ได้รับจากโรงงานรีไซเคิลแก้ว ซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วได้รับจากโรงงานผลิตสารประกอบไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ดินดำ เฟลด์สปาร์ และทรายแก้วได้รับจาก บริษัท ซีเบลโก้ มินเนอร์รัลส์ (ประเทศไทย) จำกัด โดยองค์ประกอบหลักทางเคมีที่ช่วยให้เกิดความแข็งแรงของกระเบื้อง มีอยู่ 2 ตัว ได้แก่ ซิลิกา ( $\text{SiO}_2$ ) และ อะลูมินา ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) และองค์ประกอบหลักทางเคมีที่ช่วยในการหลอมเหลววัตถุดิบเข้าด้วยกัน ได้แก่ ธาตุในกลุ่มอัลคาไลต์ และอัลคาไลต์เอิร์ท (วิวรรธน์ เทียนศิริ, 2546) องค์ประกอบของวัตถุดิบทั้งหมดในงานวิจัยทำการวิเคราะห์ด้วยเครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ ดังแสดงในตารางที่ 4.1 พบว่าในดินดำ มีปริมาณองค์ประกอบของซิลิกา ( $\text{SiO}_2$ ) และ อะลูมินา ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) เป็นองค์ประกอบหลัก ทรายแก้ว มีองค์ประกอบของซิลิกา ( $\text{SiO}_2$ ) เป็นหลัก สำหรับเศษแก้วสีเขียวจะมีปริมาณองค์ประกอบของซิลิกา ( $\text{SiO}_2$ ) เทียบเท่ากับแร่เฟลด์สปาร์ แม้จะมีอะลูมินา ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) น้อยกว่าแร่เฟลด์สปาร์และองค์ประกอบดังกล่าวมีมากในซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว ซึ่งอาจทำให้ความแข็งแรงลดลง แต่เมื่อพิจารณาถึงปริมาณธาตุในกลุ่มอัลคาไลต์ และอัลคาไลต์เอิร์ท ได้แก่ โซเดียมออกไซด์ ( $\text{Na}_2\text{O}$ ) และแคลเซียมออกไซด์ ( $\text{CaO}$ ) ในเศษแก้วจะมีอยู่มากกว่าในเฟลด์สปาร์ ซึ่งมีสมบัติเป็นตัวช่วยหลอม จากงานวิจัยที่ผ่านมาของฉัตรชัย พรจิติโกศล, 2552 ได้มีการนำเศษแก้วสีเขียวมาทดแทนแร่เฟลด์สปาร์ พบว่าการทดแทนด้วยเศษแก้วสีเขียวส่งผลให้ปริมาณอะลูมินาและปริมาณซิลิกามีค่าลดลงสำหรับปริมาณโซเดียมออกไซด์ และแคลเซียมออกไซด์มีค่าเพิ่มขึ้นซึ่งองค์ประกอบดังกล่าวมีความสัมพันธ์กับสมบัติทางกายภาพของกระเบื้องและการเกิดผลิตภัณฑ์เป็นต้น ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงนำซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วเป็นวัตถุดิบทดแทนแร่เฟลด์สปาร์ควบคู่กับการใช้เศษแก้วสีเขียวเพื่อให้อัตราการผลิตมีสมบัติทางเคมีใกล้เคียงกับเฟลด์สปาร์มากขึ้นและเป็นการพัฒนาคุณภาพของกระเบื้องในด้านความแข็งแรงให้ดีขึ้น

ตารางที่ 4.1 ผลวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบด้วยเครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์

| วัตถุดิบ                  | องค์ประกอบทางเคมี (ร้อยละโดยน้ำหนัก) |                   |       |                                |      |                  |                                |                                |      |                  |
|---------------------------|--------------------------------------|-------------------|-------|--------------------------------|------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|------|------------------|
|                           | SiO <sub>2</sub>                     | Na <sub>2</sub> O | CaO   | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | MgO  | K <sub>2</sub> O | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | PbO  | TiO <sub>2</sub> |
| ดินดำ                     | 60.04                                | 0.31              | 0.26  | 23.32                          | 0.67 | 2.02             | 1.69                           | 0.00                           | 0.00 | 0.63             |
| ทรายแก้ว                  | 98.90                                | 0.02              | 0.03  | 0.45                           | 0.04 | 0.05             | 0.04                           | 0.00                           | 0.00 | 0.05             |
| เฟลด์สปาร์                | 72.16                                | 8.00              | 1.07  | 16.81                          | 0.21 | 1.01             | 0.22                           | 0.00                           | 0.00 | 0.21             |
| เศษแก้วสีเขียว            | 70.97                                | 15.12             | 10.87 | 1.21                           | 0.84 | 0.21             | 0.29                           | 0.24                           | 0.02 | 0.09             |
| ซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว | 11.7                                 | 3.17              | 0.42  | 54.02                          | 0.00 | 0.08             | 0.05                           | 0.00                           | 0.00 | 0.00             |

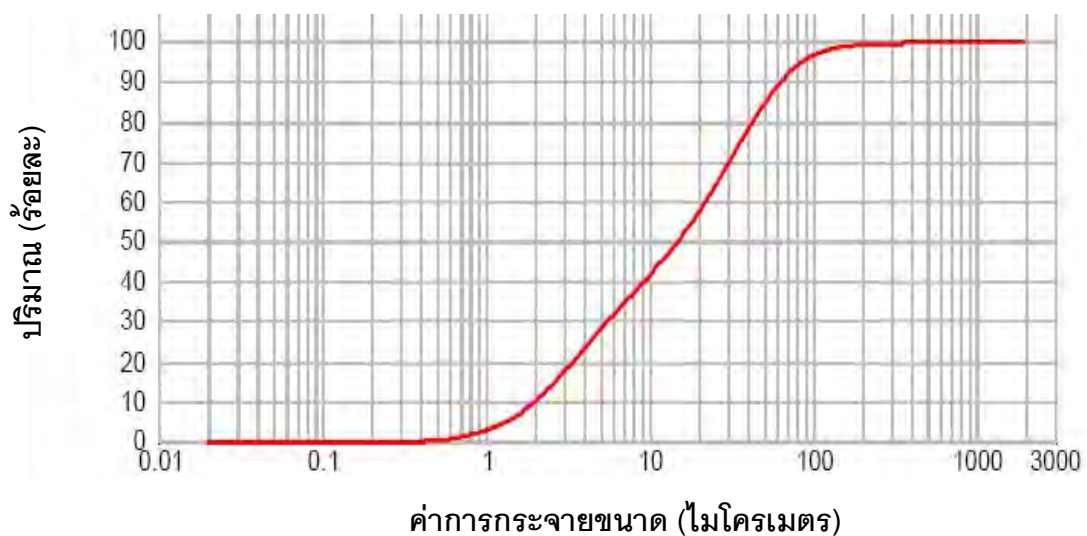
เนื่องจากคุณสมบัติในการเผาไม่มีผลต่อปริมาณองค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบ (ปารีย์ อรรถพิศาล, 2548) ดังนั้นองค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบก่อน และหลังเผาจะมีปริมาณใกล้เคียงกัน ดังนั้นจึงสามารถทำการคาดคะเนองค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบหลังผสมด้วยวิธีการคำนวณซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่องมือ (ฉัตรชัย พรจิวติโกคิน, 2552) โดยทำการแปรค่าอัตราส่วนการทดแทนด้วยเศษแก้วสีเขียวและซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วเพื่อให้วัตถุดิบทดแทนมีองค์ประกอบทางเคมีของอะลูมินาออกไซด์ใกล้เคียงกับเฟลด์สปาร์มากขึ้น และต้องไม่ทำให้ค่าของซิลิกาออกไซด์ลดลงมากเกินไป เนื่องจากองค์ประกอบทั้งสองเป็นองค์ประกอบทางเคมีที่สำคัญในด้านความแข็งแรงของกระเบื้องโดยองค์ประกอบหลักทางเคมีที่ช่วยในการหลอมเหลววัตถุดิบเข้าด้วยกัน ได้แก่ โซเดียมออกไซด์ (Na<sub>2</sub>O) ไม่ควรมีปริมาณเกินร้อยละ 2 และ แคลเซียมออกไซด์ (CaO) ไม่ควรมีปริมาณเกินร้อยละ 1 โดยสอดคล้องกับงานวิจัยของ Rambaldi และคณะ, 2007; Tucci และคณะ, 2004 ) เพื่อส่งผลให้สามารถเกิดผลึกมัลไลต์ที่สำคัญได้ง่าย และจากการคำนวณคาดคะเนองค์ประกอบทางเคมีหลังผสมจึงเลือกใช้อัตราส่วนการทดแทนทั้งหมด 4 อัตราส่วนดังแสดงในตารางที่ 4.2 ดังนี้คือ อัตราส่วนการทดแทนด้วยเศษแก้วสีเขียวและซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วเท่ากับ 0:0, 15:85, 25:75 และ 35:65 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.2 องค์ประกอบทางเคมีของวัตถุบดหลังผสมด้วยการคำนวณ

| วัตถุบดหลังผสม | องค์ประกอบทางเคมี (ร้อยละโดยน้ำหนัก) |                   |      |                                |      |                  |                                |                                |      |                  |
|----------------|--------------------------------------|-------------------|------|--------------------------------|------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|------|------------------|
|                | SiO <sub>2</sub>                     | Na <sub>2</sub> O | CaO  | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | MgO  | K <sub>2</sub> O | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | PbO  | TiO <sub>2</sub> |
| สูตร 1 (0:0)   | 81.36                                | 1.99              | 0.37 | 13.75                          | 0.34 | 1.08             | 0.77                           | 0.00                           | 0.00 | 0.03             |
| สูตร 2 (15:85) | 70.23                                | 1.50              | 0.61 | 24.25                          | 0.32 | 0.88             | 0.74                           | 0.01                           | 0.00 | 0.28             |
| สูตร 3 (25:75) | 71.50                                | 1.75              | 0.85 | 22.59                          | 0.34 | 0.88             | 0.75                           | 0.01                           | 0.00 | 0.29             |
| สูตร 4 (35:65) | 72.78                                | 2.00              | 1.08 | 20.93                          | 0.36 | 0.88             | 0.75                           | 0.02                           | 0.00 | 0.29             |

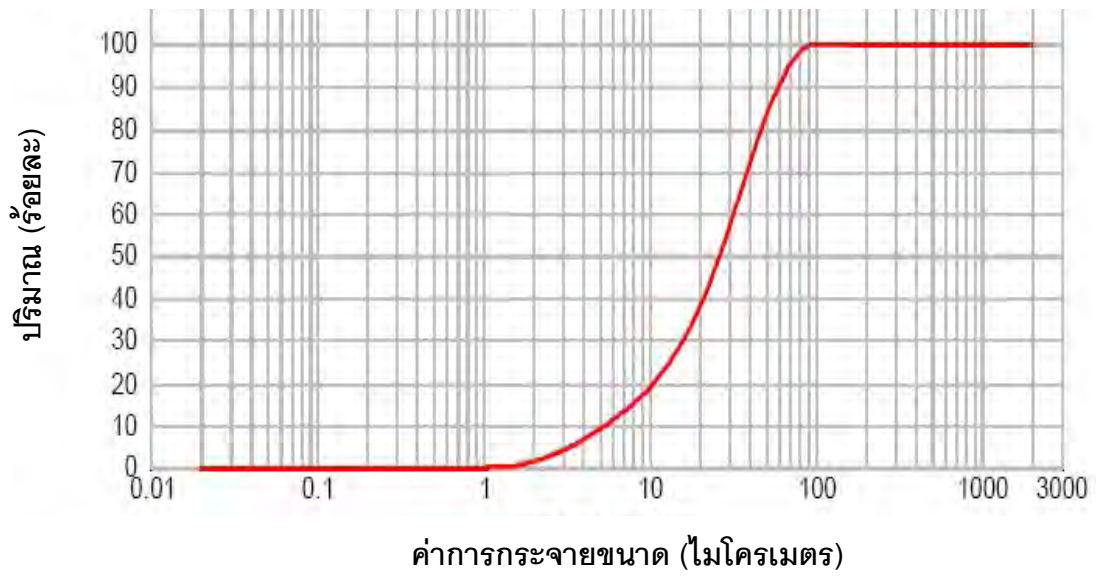
จากผลการวิเคราะห์การกระจายขนาดของอนุภาคดังแสดงในภาพที่ 4.1 ถึง 4.5 ตามลำดับการวิเคราะห์การกระจายขนาดของวัตถุบดหลังจากการคัดขนาดผ่านตะแกรงเบอร์ 100 สามารถหาค่าการกระจายขนาด (Particle size distribution) ของวัตถุบดดังกล่าวได้ดังนี้คือ ดินดำมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.015 มิลลิเมตร เฟลด์สปาร์มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.026 มิลลิเมตร ททรายแก้วมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.017 มิลลิเมตร เศษแก้วสีเขียวมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.127 มิลลิเมตรและซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.139 มิลลิเมตรตามลำดับ โดยงานวิจัยนี้ได้นำซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วบดละเอียดไปร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 100 (เพื่อให้ได้ขนาดเล็กลงว่า 0.147 มิลลิเมตร) เนื่องจากที่ขนาดดังกล่าวจะส่งเสริมให้ซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วเป็นวัสดุปอซโซลานมากขึ้นและมีค่าการกระจายตัวที่เหมาะสม (อ้างถึงในปาร์ย อรรถพิศาล. 2548)

- ดินดำค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.015 มิลลิเมตร



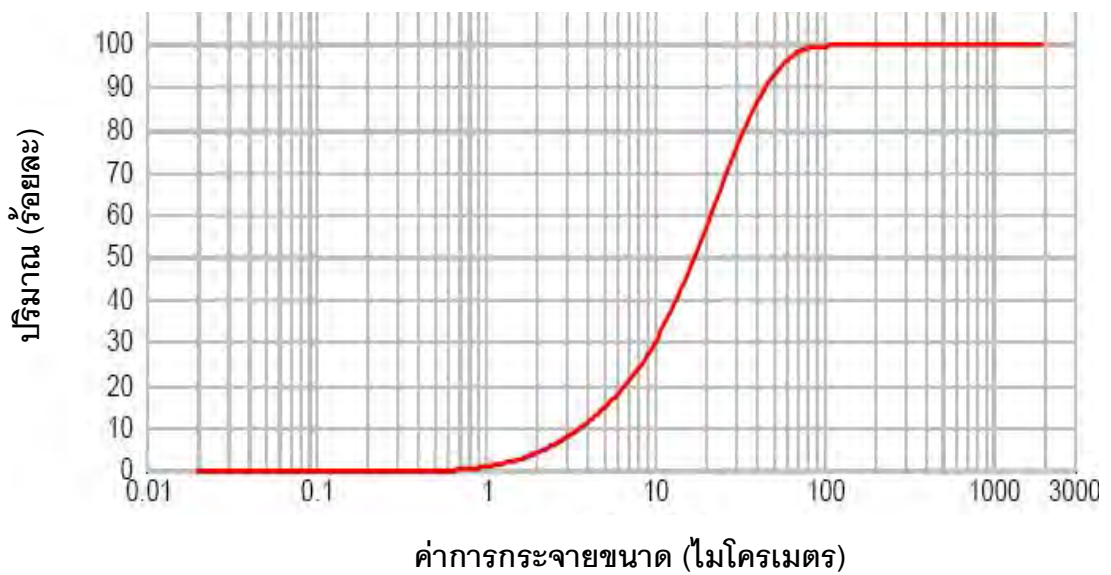
ภาพที่ 4.1 การกระจายขนาดของดินดำคัดผ่านตะแกรงเบอร์ 100

- เฟลด์สปาร์ค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.026 มิลลิเมตร



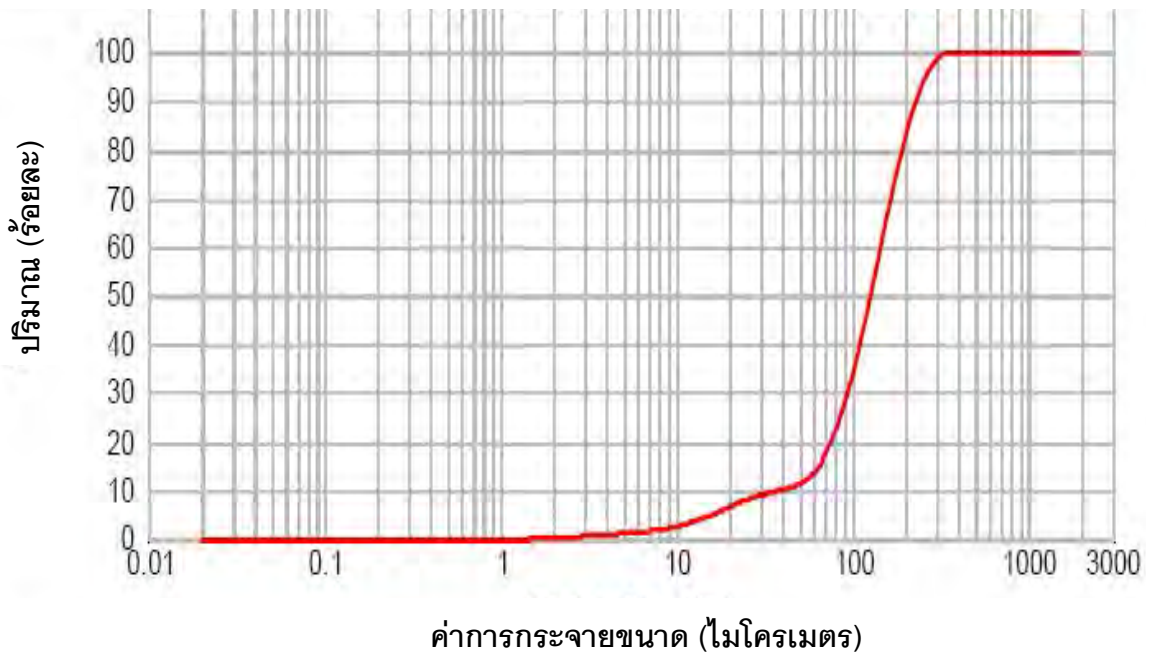
ภาพที่ 4.2 การกระจายขนาดของเฟลด์สปาร์คัดผ่านตะแกรงเบอร์ 100

- ททรายแก้วค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.017 มิลลิเมตร



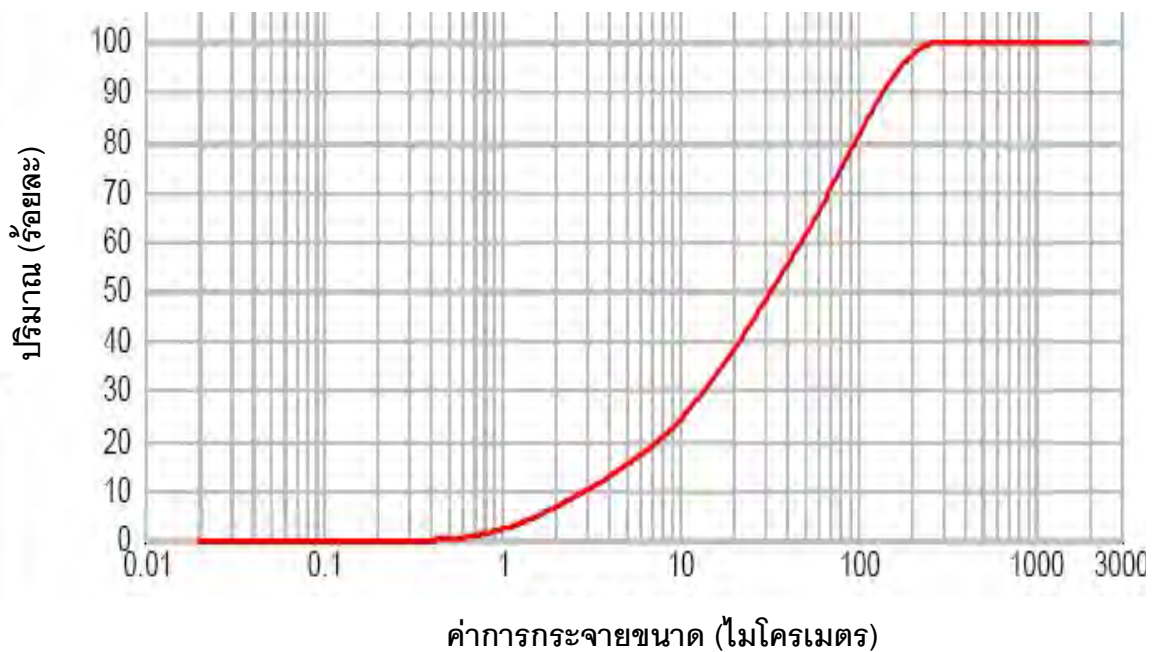
ภาพที่ 4.3 การกระจายขนาดของทรายแก้วคัดผ่านตะแกรงเบอร์ 100

- เศษแก้วสีเขียวค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.127 มิลลิเมตร



ภาพที่ 4.4 การกระจายขนาดของเศษแก้วสีเขียวคัดผ่านตะแกรงเบอร์ 100

- ซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.139 มิลลิเมตร



ภาพที่ 4.5 การกระจายขนาดของซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วคัดผ่านตะแกรงเบอร์ 100

## 4.2 ศึกษาการชะละลายของโลหะหนักในซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วโดยวิธี Waste Extraction Test (WET)

จากการศึกษาการชะละลายของโลหะหนักเพื่อทดสอบว่าซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วเป็นของเสียอันตรายหรือไม่ โดยทำการทดสอบตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่องการกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว พ.ศ. 2548 โดยใช้วิธีการ Waste Extraction Test (WET) จากผลการวิเคราะห์ตัวอย่างซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วเป็นของเสียที่เกิดจากระบวนการผลิตสารประกอบไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์โดยไม่จัดอยู่ในกลุ่มของเสียอันตรายตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม พ.ศ.2548 เนื่องจากเมื่อพิจารณาผลการทดสอบการชะละลายของโลหะหนักในซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ดังแสดงในตารางที่ 4.3 ผลการวิจัยพบว่าการวิเคราะห์การชะละลายของโลหะหนักในซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วผ่านเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนดดังนั้นจึงสามารถนำของเสียประเภทซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วไปประยุกต์เป็นวัตถุดิบทดแทนร่วมกับเศษแก้วสีเขียวเพื่อทดแทนแร่เฟลด์สปาร์ในกระบวนการผลิตกระเบื้องเซรามิกได้

ตารางที่ 4.3 ผลการวิเคราะห์การชะละลายของโลหะหนักในซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว

| โลหะหนัก      | ผลการวิเคราะห์*                  |   |
|---------------|----------------------------------|---|
|               | ความเข้มข้นของโลหะหนัก<br>(mg/l) | กำหนดค่า Threshold Limit<br>Concentration (STLC) (mg/l) |
| สังกะสี (Zn)  | 1.98                             | 250   |
| ทองแดง (Cu)   | 0.027                            | 25  |
| ตะกั่ว (Pb)   | < 0.09                           | 5.0   |
| โครเมียม (Cr) | 0.064                            | 5.0   |

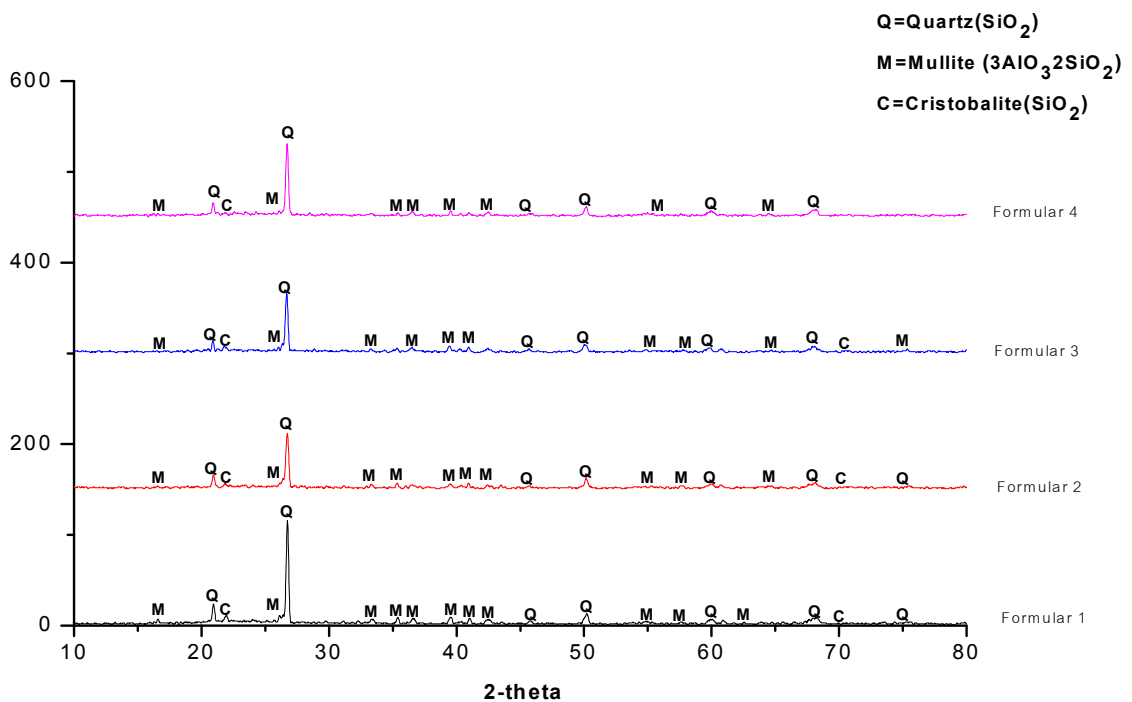
หมายเหตุ\*:ผลการวิเคราะห์ตัวอย่าง ณ ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (31/05/53)

## 4.3 การวิเคราะห์เฟสในเนื้อกระเบื้องและการวิเคราะห์ภาพขยายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน (SEM)

### 4.3.1 การวิเคราะห์เฟสในเนื้อกระเบื้องด้วยวิธีเอกซเรย์ดิฟแฟรคชัน (XRD)

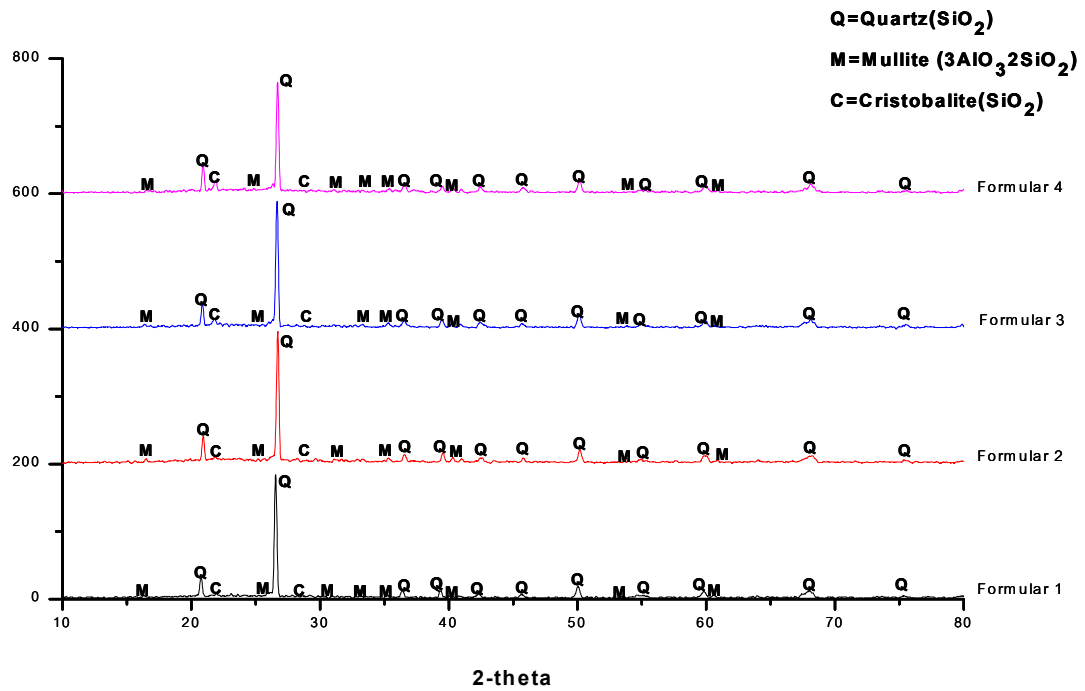
การวิเคราะห์เฟสที่เกิดขึ้นในเนื้อกระเบื้อง ได้แสดงเฉพาะอัตราส่วนการทดแทนด้วยเศษแก้วสีเขียวและซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว 0:0, 15:85, 25:75 และ 35:65 ของกระเบื้องหลังเผาที่อุณหภูมิ 1250 1200 และ 1150 องศาเซลเซียสซึ่งให้ค่าการทดสอบลักษณะทางกายภาพของกระเบื้องผ่านตามเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมกระเบื้องปูพื้น (มอก.37-2529)และ

กระเบื้องบุผนัง (มอก.614-2529) ดังแสดงในภาพที่ 4.6 ถึง 4.8 ตามลำดับ เมื่อพิจารณาจากผลการวิเคราะห์เฟสที่เกิดขึ้น พบว่ากระเบื้องหลังเผาในทุกอัตราส่วนการทดแทนและทุกอุณหภูมิในการเผาข้างต้นเกิดเฟสที่สำคัญคือ ควอตซ์ (Quartz,  $\text{SiO}_2$ ) และคริสโต-บัลไลท์ (Cristobalite,  $\text{SiO}_2$ ) และพบเฟสของมัลไลท์ (Mullite,  $3\text{AlO}_3\cdot 2\text{SiO}_2$ ) โดยกลไกการเกิดมัลไลท์นั้นเกิดจากเฟสส่วนใหญ่ที่เป็นซิลิกา ( $\text{SiO}_2$ ) จะหลอมรวมกับเฟสของอะลูมินา ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) และทำปฏิกิริยาเกิดเป็นเฟสของมัลไลท์ (Mullite,  $3\text{AlO}_3\cdot 2\text{SiO}_2$ ) ขึ้นอยู่ระหว่างเฟสทั้งสอง ซึ่งเฟสมัลไลท์เป็นเฟสที่ให้ความแข็งแรงสูง (Schneider และ คณะ, 2008) ในงานวิจัยนี้สรุปได้ว่าในทุกอัตราการทดแทนและทุกอุณหภูมิดังกล่าวนี้มีสัดส่วนขององค์ประกอบทางเคมีที่เหมาะสมที่จะเกิดผลึกมัลไลท์ได้ จึงทำให้เฟสอะลูมินา และเฟสซิลิกาเกิดการหลอมรวมติดเป็นเนื้อเดียวกัน ส่งผลให้ทำปฏิกิริยากันเกิดเป็นผลึกมัลไลท์ ดังแสดงในภาพที่ 4.9 ถึง 4.12 เพราะฉะนั้นจึงเป็นการยืนยันได้ว่ากระเบื้องหลังเผาที่พบเฟสมัลไลท์จะช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้กับกระเบื้องได้

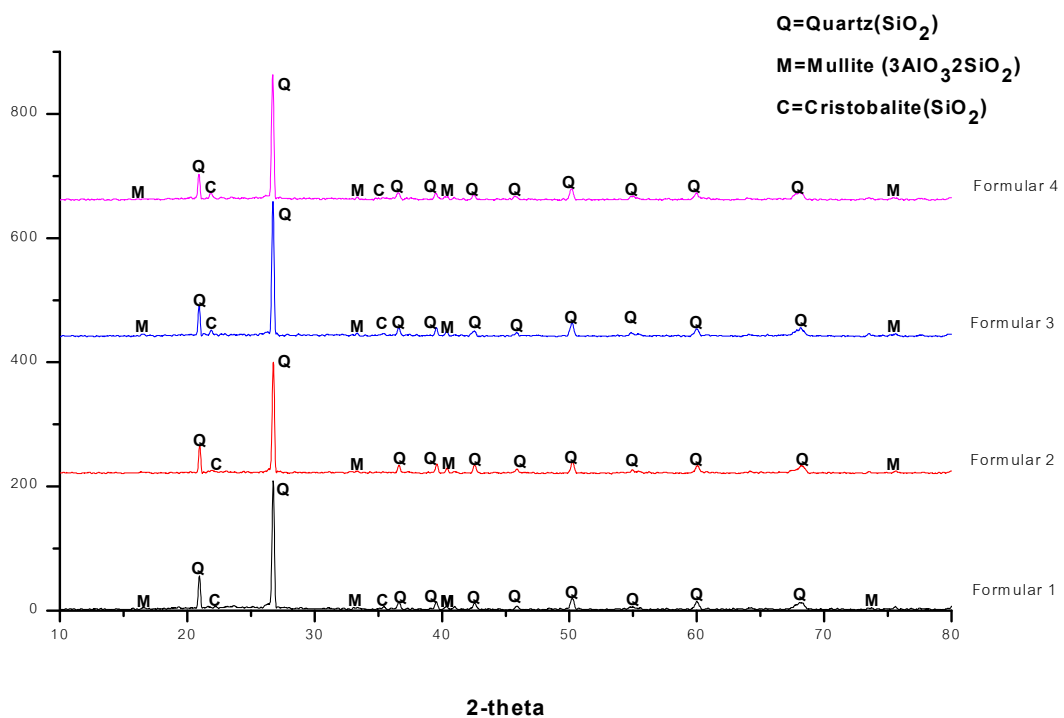


ภาพที่ 4.6 กราฟเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกชันของกระเบื้องที่ทดแทนตามอัตราส่วนต่างๆ เเผาที่อุณหภูมิ 1250 องศาเซลเซียส





ภาพที่ 4.7 กราฟเอ็กซเรย์ดิฟแฟรกชันของกระเบื้องที่ทดแทนตามอัตราส่วนต่างๆ เเผาที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส



ภาพที่ 4.8 กราฟเอ็กซเรย์ดิฟแฟรกชันของกระเบื้องที่ทดแทนตามอัตราส่วนต่างๆ เเผาที่อุณหภูมิ 1150 องศาเซลเซียส

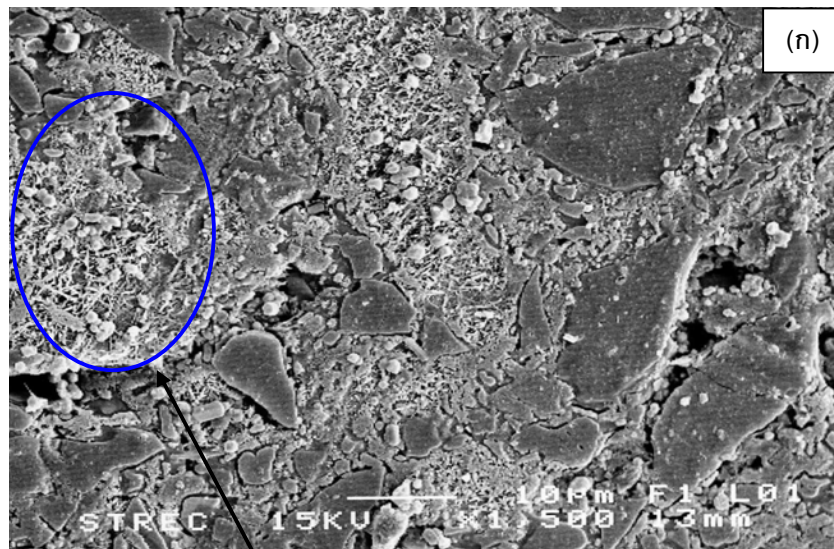
#### 4.3.2 เปรียบเทียบภาพขยายทางจุลภาคของกระเบื้องที่ผ่านมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม

เมื่อพิจารณาที่อุณหภูมิการเผาเท่ากันพบว่ากระเบื้องหลังเผาที่ผ่านมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมกระเบื้องดินเผาปูพื้นและบุผนังเมื่อพิจารณาภาพขยายของเนื้อกระเบื้องจากการเปรียบเทียบด้านกำลังรับแรงดัดมากที่สุดระหว่างกระเบื้องที่ทดแทนด้วยเศษแก้วสีเขียวและซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วกับกระเบื้องที่ไม่ใช้การทดแทน(ใช้เฟลด์สปาร์ร้อยละ 100) พบว่าที่อุณหภูมิ 1250 องศาเซลเซียสดังแสดงในภาพที่ 4.9 แสดงให้เห็นถึงการเจริญเติบโตของมัลไลท์จนได้ผลึกใหญ่ขึ้นจาก(ก)กระเบื้องที่ไม่ใช้การทดแทนและ(ข)กระเบื้องที่ทดแทนด้วยเศษแก้วสีเขียวและซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วซึ่งการละลายของดินและควอตซ์ในเนื้อแก้วจะเห็นได้ในภาพและถ้าควอตซ์มีขนาดเล็กอาจละลายได้หมดเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น (ปรีดา พิมพ์ขาวขำ, 2547)

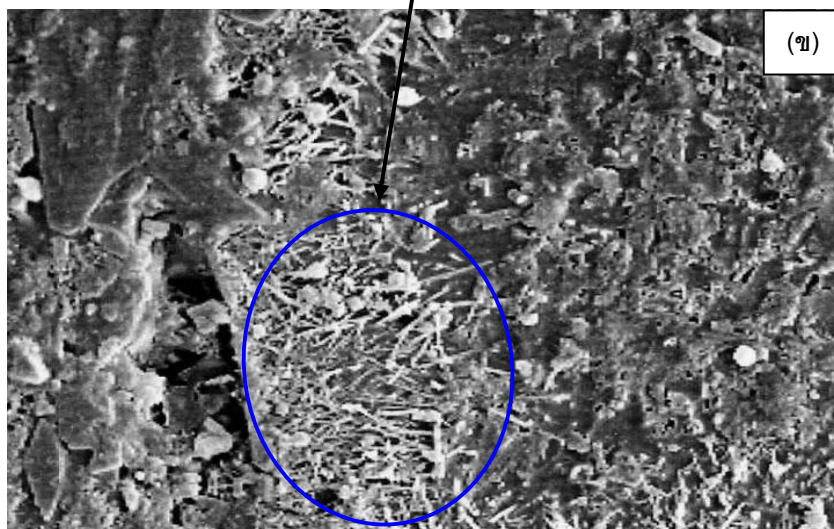
จากตัวอย่างเนื้อกระเบื้องหลังเผาที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียสดังแสดงในภาพที่ 4.10 (ก)และ (ข) แสดงให้เห็นผลึกเล็กๆ ของมัลไลท์ที่เกิดขึ้นในระยะแรกแล้วยังแสดงให้เห็นผลึกขนาดใหญ่ของมัลไลท์ที่เจริญเติบโตในระยะต่อมาทางด้านบนขวาของภาพ(ก)ด้วย ซึ่งเนื้อผลิตภัณฑ์ส่วนใหญ่เป็นเนื้อดินเชื่อมโยงถึงกันตลอด ส่วนเนื้อกระเบื้องหลังเผาที่อุณหภูมิ 1150 องศาเซลเซียส ดังแสดงในภาพที่ 4.11 (ก) และ(ข) พบลักษณะที่มีรูพรุนเกิดขึ้นเนื่องมาจากการหลอมให้เนื้อดินเป็นเนื้อเดียวกันได้มากขึ้นและพบการละลายของควอตซ์ในบางส่วน

เมื่อพิจารณาภาพที่ 4.12 (ก) (ข) และ(ค) แสดงผลึกมัลไลท์จากการทดแทนด้วยเศษแก้วและซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วของอัตราส่วนต่างๆ เปรียบเทียบระหว่างอุณหภูมิการเผา 1250 1200 และ 1150 องศาเซลเซียสตามลำดับ พบว่า อุณหภูมิที่ลดต่ำลงมีผลทำให้การหลอมละลายของวัสดุดิบลดลง ส่งผลต่อการเกิดผลึกมัลไลท์ที่ให้ความแข็งแรงน้อยลงไปด้วย แต่อย่างไรก็ตามที่อุณหภูมิ 1250 องศาเซลเซียสลงมายังให้ค่ากำลังรับแรงดัดที่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานอุตสาหกรรมได้เนื่องจากมัลไลท์จะเกิดเป็นผลึกรูปยาวคล้ายเข็มสานกันเมื่ออุณหภูมิ 1150-1250 องศาเซลเซียส

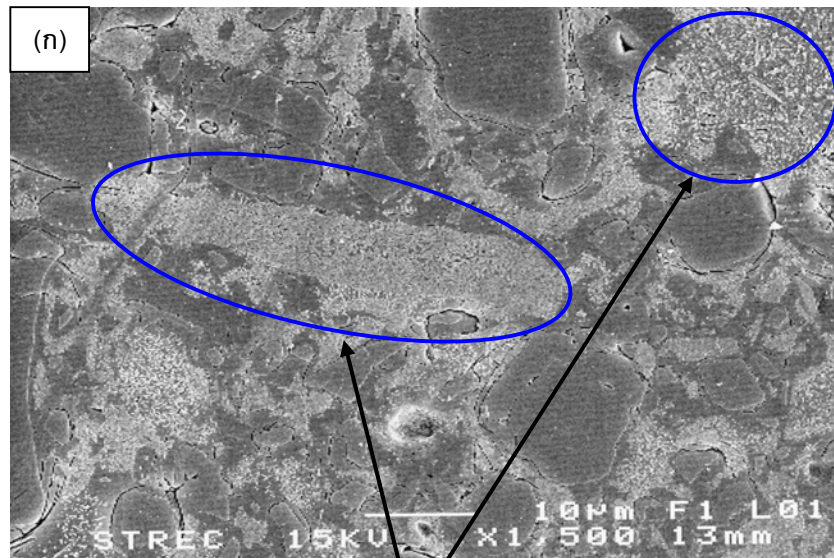
ดังนั้นในงานวิจัยนี้สามารถนำเศษแก้วสีเขียวและซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วมาทดแทนแร่เฟลด์สปาร์ได้โดยพบการเกิดผลึกรูปเข็มของมัลไลท์ในเนื้อกระเบื้องซึ่งมีส่วนช่วยทำให้ผลิตภัณฑ์มีความแข็งแรง ซึ่งผลึกรูปเข็มนี้จะทำหน้าที่เหมือนกับเหล็กเส้นในคอนกรีตเสริมเหล็ก เพราะฉะนั้นการพัฒนาผลึกมัลไลท์ให้เกิดขึ้นในเนื้อกระเบื้องจึงเป็นสิ่งที่จำเป็นอย่างหนึ่ง



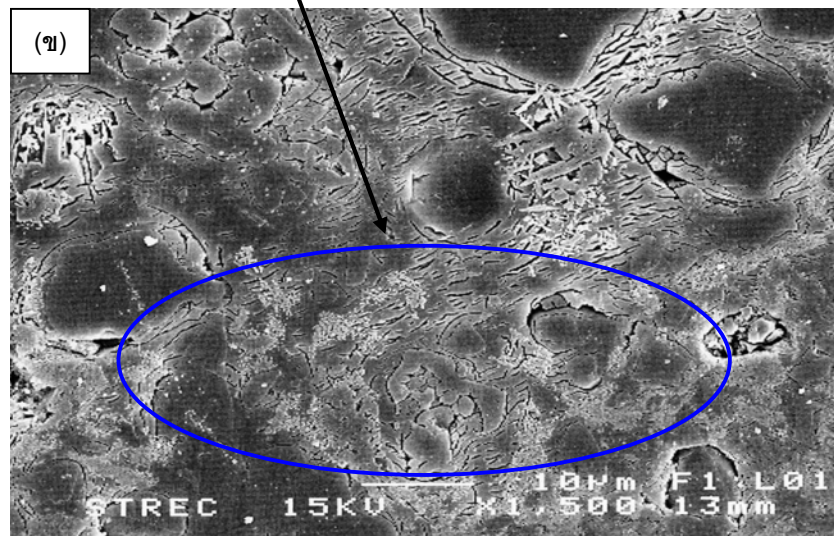
การสานตัวของมัดใยที่พบผลึกใหญ่ขึ้น



ภาพที่ 4.9 ภาพขยาย 1500 เท่า ของกระเบื้องที่ทดแทนด้วยเศษแก้วและละอองซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว (ก) 0:0 และ (ข) 15:85 เเผที่อุณหภูมิ 1250 องศาเซลเซียส

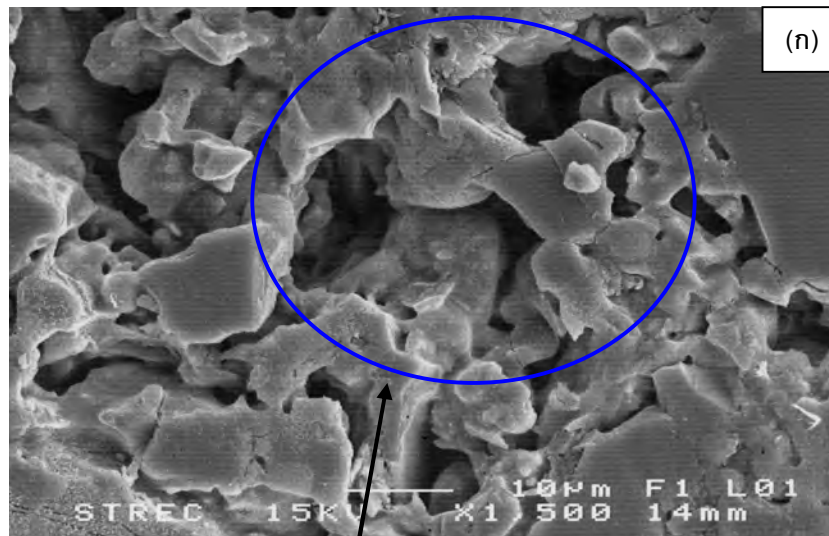


การเกิดมัลไลต์เริ่มแรกและการละลายของควอตซ์บางส่วน

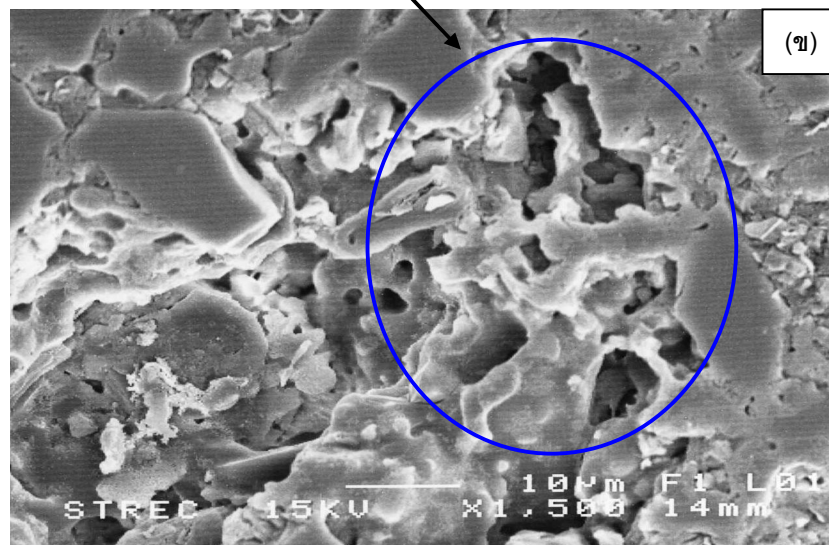


ภาพที่ 4.10 ภาพขยาย 1500 เท่า ของกระเบื้องที่ทดแทนด้วยเศษแก้วและอะลูมินา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว (ก) 0:0 และ (ข) 35:65 เเผที่อุณหภูมิตั้งที่ 1200 องศาเซลเซียส

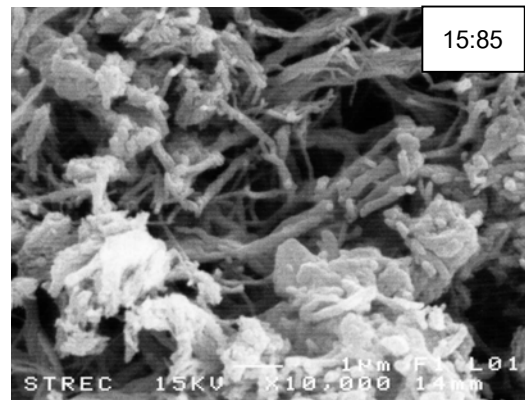
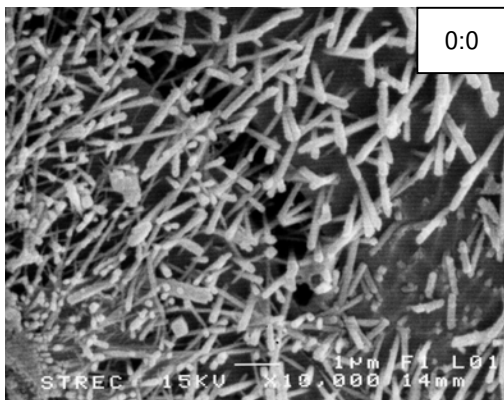




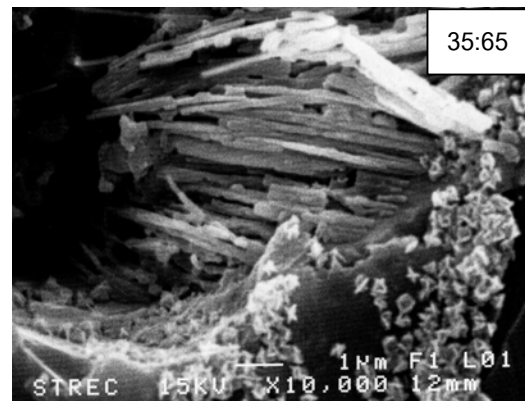
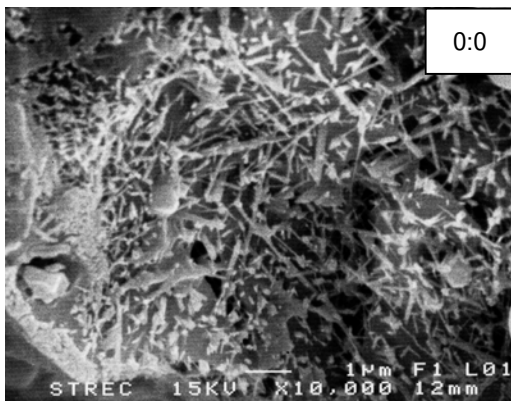
มีรูพรุนเกิดขึ้นจากการหลอมให้เนื้อดินเป็นเนื้อเดียวกัน  
มากขึ้นและพบการละลายของควอตซ์บางส่วน



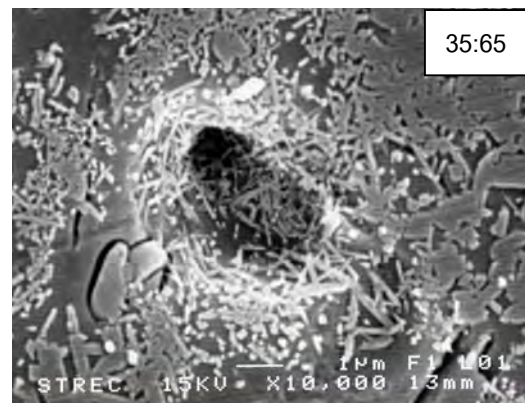
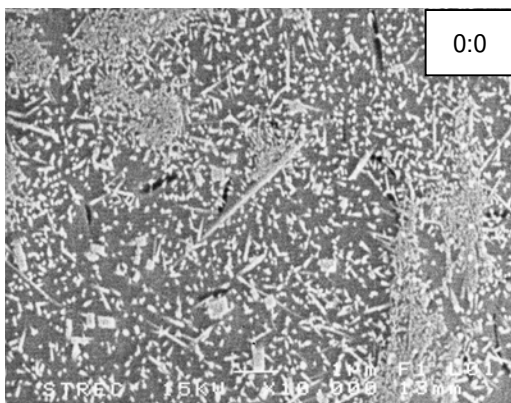
ภาพที่ 4.11 ภาพขยาย 1500 เท่า ของกระเบื้องที่ทดแทนด้วยเศษแก้วและและซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว (ก) 0:0 และ (ข) 35:65 เเผที่อุณหภูมิ 1150 องศาเซลเซียส



(ก) คุณหมุมิการเผา 1250 องศาเซลเซียส



(ข) คุณหมุมิการเผา 1200 องศาเซลเซียส



(ค) คุณหมุมิการเผา 1150 องศาเซลเซียส

ภาพที่ 4.12 ภาพขยาย 10000 เท่า แสดงผลึกมัดมัดไลต์จากการทดแทนด้วยเศษแก้วและซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วของอัตราส่วนต่างๆ เเผาที่อุณหภูมิ (ก) 1250 (ข) 1200 และ (ค) 1150 องศาเซลเซียส

#### 4.4 ผลการศึกษาอุณหภูมิต่อการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางกายภาพของกระเบื้อง

งานวิจัยนี้ได้นำซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วร่วมกับเศษแก้วสีเขียวเพื่อใช้ทดแทนแร่เฟลด์สปาร์ ในกระบวนการผลิตกระเบื้องเซรามิก ซึ่งทำการศึกษาหาอัตราส่วนการทดแทนที่เหมาะสมโดยทำการแปรค่าอัตราส่วนการทดแทนด้วยของเสียที่เป็นเศษแก้วสีเขียวและซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วเป็น 0:0, 15:85, 25:75 และ 35:65 (ใช้แทนเฟลด์สปาร์ร้อยละ 100 จากร้อยละ 23.08 ของอัตราส่วนผสมวัตถุดิบทั้งหมด) เเผาที่อุณหภูมิ 1250 องศาเซลเซียส ควบคุมการเผาแช่ไฟ (Soaking time) เป็นเวลานาน 15 นาที และนำไปทดสอบเทียบกับค่ามาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมกระเบื้องปูพื้น (มอก.37-2529) และกระเบื้องบุผนัง (มอก.614-2529) ได้แก่ ค่าความต้านแรงดัด ค่าการดูดซึมน้ำ ค่าการหดตัว และคุณสมบัติด้านการทนสารเคมี

##### 4.4.1 การทดสอบค่ากำลังรับแรงดัดของกระเบื้อง (Bending strength test)

เมื่อพิจารณาการทดสอบหาค่ากำลังรับแรงดัดดังแสดงในตารางที่ 4.4 กระเบื้องหลังเผาที่อุณหภูมิ 1250 องศาเซลเซียส จากการแปรอัตราส่วนการทดแทนเฟลด์สปาร์ด้วยของเสียที่เป็นเศษแก้วสีเขียวและซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วเป็น 0:0, 15:85, 25:75 และ 35:65 จากผลการวิจัยพบว่าให้ค่ากำลังรับแรงดัดเท่ากับ 37.24, 36.52, 35.41 และ 34.17 เมกกะปาสคาลตามลำดับ นั่นคือทุกอัตราส่วนการทดแทนให้ค่ากำลังรับแรงดัดผ่านตามเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมกระเบื้องปูพื้น (มอก.37-2529) และกระเบื้องบุผนัง (มอก.614-2529) ซึ่งอัตราส่วนการทดแทนด้วยเศษแก้วสีเขียวและซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว 0:0 (ใช้เฟลด์สปาร์ร้อยละ 100) พบว่าให้ค่ากำลังรับแรงดัดสูงสุดเมื่อเทียบกับอัตราส่วนการทดแทนอื่น แต่เมื่อเพิ่มอัตราการเติมเศษแก้วสีเขียวจะส่งผลให้ค่ากำลังรับแรงดัดที่ได้มีค่าลดลง อย่างไรก็ตามพบว่าผลการทดสอบกำลังรับแรงดัดในทุกอัตราส่วนการทดแทน ให้ค่าผ่านเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมกระเบื้องปูพื้น (มอก.37-2529) และกระเบื้องบุผนัง (มอก.614-2529) เพราะฉะนั้นจึงสามารถใช้ซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วร่วมกับของเสียที่เป็นแก้วสีเขียวเพื่อทดแทนแร่เฟลด์สปาร์ได้ในทุกอัตราส่วนเมื่อเผาขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 1250 องศาเซลเซียส

#### 4.4.2 การวิเคราะห์ค่าการหดตัว (Firing shrinkage test)

เมื่อพิจารณาค่าการหดตัว ดังแสดงในตารางที่ 4.4 พบว่ากระเบื้องหลังเผาที่อุณหภูมิ 1250 องศาเซลเซียส จากการแปรอัตราส่วนการทดแทนเฟลด์สปาร์ด้วยของเสี้ยวที่เป็นเป็นเศษแก้ว สีเขียวและซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วเป็น 0:0, 15:85, 25:75 และ 35:65 พบว่า ให้ค่าการหดตัว เท่ากับ ร้อยละ 25.12, 24.50, 23.17 และ 22.39 ตามลำดับ โดยอัตราส่วนการทดแทนที่มีเศษแก้ว สีเขียวเพิ่มขึ้นร้อยละ 15 25 และ 35 ในขณะเดียวกันจะมีซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วลดลงร้อยละ 85 75 และ 65 จะส่งผลให้ค่าการหดตัวมีแนวโน้มลดลงตามลำดับ

#### 4.4.3 การทดสอบค่าการดูดซึมน้ำ (Water absorption test)

เมื่อพิจารณาค่าการดูดซึมน้ำ ดังแสดงในตารางที่ 4.4 พบว่ากระเบื้องหลังเผาที่อุณหภูมิ 1250 องศาเซลเซียส จากการแปรอัตราส่วนการทดแทนเฟลด์สปาร์ด้วยเศษแก้วสีเขียวและซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วเป็น 0:0, 15:85, 25:75 และ 35:65 ให้ค่าการดูดซึมน้ำเท่ากับร้อยละ 0.39, 0.60, 1.33 และ 1.75 ตามลำดับ โดยทุกอัตราส่วนการทดแทนเฟลด์สปาร์ให้ค่าการดูดซึมน้ำผ่านเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมกระเบื้องปูพื้น (มอก.37-2529) และกระเบื้องบุผนัง (มอก.614-2529) ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าสามารถใช้ซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วร่วมกับของเสี้ยวที่เป็นแก้ว สีเขียวเพื่อทดแทนแร่เฟลด์สปาร์ได้ในทุกอัตราส่วนเมื่อเผาขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 1250 องศาเซลเซียสได้

#### 4.4.4 ผลการทดสอบการทนสารเคมี (Chemical durability)

จากการทดสอบการทนสารเคมีของกระเบื้องหลังการเผาที่อุณหภูมิ 1250 องศาเซลเซียส ดังแสดงในตารางที่ 4.4 พบว่ากระเบื้องทุกส่วนผสมสามารถทนกรด (สารละลายกรดไฮโดรคลอริก ร้อยละ 3 โดยปริมาตร) และทนด่าง (สารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก) ได้ กล่าวคือ เมื่อเวลาผ่านไป 7 วัน ทำการพิจารณาที่ผิวของกระเบื้องส่วนที่แช่ในสารเคมีกับส่วนที่ไม่ได้แช่พบว่าไม่พบความแตกต่างทำให้สรุปได้ว่ากระเบื้องทุกอัตราส่วนการทดแทนด้วยเศษแก้วสีเขียวและซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วมีคุณสมบัติในด้านการทนสารเคมี



**ตารางที่ 4.4** แสดงค่ากำลังรับแรงดัด ค่าการดูดซึมน้ำ ค่าการหดตัว และการทนสารเคมีของกระเบื้องหลังเผาขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 1250 องศาเซลเซียส

| สูตร<br>(ร้อยละเศษแก้วสีเขียว :<br>ซิลิกาอะลูมินาที่ใช้แล้ว) | ค่ากำลังรับแรงดัด<br>(เมกกะปาสคาล) | ค่าการหดตัว<br>(ร้อยละ) | ค่าการดูดซึมน้ำ<br>(ร้อยละ) | การทน<br>สารเคมี        |
|--|------------------------------------|-------------------------|-----------------------------|-------------------------|
| 1 (0:0)  | 37.24                              | 25.12                   | 0.39                        | ผ่าน                    |
| 2 (15:85)  | 36.52                              | 24.50                   | 0.60                        | ผ่าน                    |
| 3 (25:75)  | 35.41                              | 23.17                   | 1.33                        | ผ่าน                    |
| 4 (35:65)  | 34.17                              | 22.39                   | 1.75                        | ผ่าน                    |
| มอก. 37-2529   | ไม่ต่ำกว่า 25                      | ไม่กำหนด                | ไม่เกิน 6                   | ไม่มีการ<br>เปลี่ยนแปลง |
| มอก. 614-2529  | ไม่ต่ำกว่า 20                      | ไม่กำหนด                | ไม่เกิน 6                   | ไม่มีการ<br>เปลี่ยนแปลง |

#### 4.5 ศึกษาหาผลของอุณหภูมิที่เหมาะสมในการเผาขึ้นรูปกระเบื้อง

จากผลการวิจัยข้างต้นของกระเบื้องหลังเผาที่อุณหภูมิ 1250 องศาเซลเซียสซึ่งทดแทนด้วยเศษแก้วสีเขียวและซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วทุกอัตราส่วนพบว่าผ่านมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมกระเบื้องปูพื้น (มอก.37-2529) และกระเบื้องบุผนัง (มอก.614-2529) ดังนั้นเพื่อเป็นการประหยัดพลังงาน จึงได้ทำการวิจัยโดยลดอุณหภูมิในการเผาขึ้นรูปกระเบื้องที่ให้ค่าการทดสอบกำลังรับแรงดัดผ่านตามเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมลงจากอุณหภูมิ 1250 องศาเซลเซียสเป็น 1200 1150 และ 1100 องศาเซลเซียสตามลำดับ

##### 4.5.1 การทดสอบค่ากำลังรับแรงดัดของกระเบื้อง (Bending strength test)

จากผลการวิจัยการทดสอบค่ากำลังรับแรงดัดของกระเบื้องหลังเผาดังแสดงในภาพที่ 4.13 โดยอ้างอิงภายใต้มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมกระเบื้องดินเผาปูพื้น มอก.37-2529 และ มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมกระเบื้องดินเผาบุผนัง มอก.614-2529 ระบุค่ากำลังรับแรงดัดไม่ต่ำกว่า 25 และ 20 เมกกะปาสคาล ตามลำดับ

เมื่อพิจารณาการทดสอบหาค่ากำลังรับแรงดัดแสดงในตารางที่ 4.5 และภาพที่ 4.13 กล่าวคือเมื่อแปรอัตราส่วนการทดแทนเฟลด์สปาร์ด้วยของเสียที่เป็นเศษแก้วสีเขียวและซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วเป็น 0:0, 15:85, 25:75 และ 35:65 พบว่ากระเบื้องหลังเผาขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียสให้ค่ากำลังรับแรงดัดผ่านตามเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมกระเบื้องปูพื้น (มอก.37-2529) และกระเบื้องบุผนัง (มอก.614-2529) กล่าวคือ เมื่อเพิ่มร้อยละของการทดแทนเศษแก้วสีเขียวร้อยละ 15 25 และ 35 ส่งผลให้ค่ากำลังรับแรงดัดเพิ่มขึ้นโดยมีค่ากำลังรับแรงดัดเป็น 30.65, 30.74 และ 31.04 เมกกะปาสคาลตามลำดับ แต่อัตราการทดแทนด้วยเศษแก้วสีเขียวและซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วร้อยละ 35:65 มีค่ากำลังรับแรงดัดน้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอัตราการทดแทนร้อยละ 0:0 (ใช้เฟลด์สปาร์ร้อยละ 100) ที่มีค่ากำลังรับแรงดัดเป็น 32.19 เมกกะปาสคาล เนื่องมาจากอุณหภูมิดังกล่าวเป็นช่วงที่เฟลด์สปาร์หลอมละลายซึ่งเฟลด์สปาร์เป็นตัวหลอมละลายและเป็นตัวประสานวัสดุดิบเข้าด้วยกันได้ดีกว่าแก้วจึงทำให้คุณสมบัติด้านกำลังรับแรงดัดของกระเบื้องทุกอัตราการทดแทนมีค่ากำลังรับแรงดัดน้อยกว่าอัตราการทดแทนร้อยละ 0:0 (ใช้เฟลด์สปาร์ร้อยละ 100)

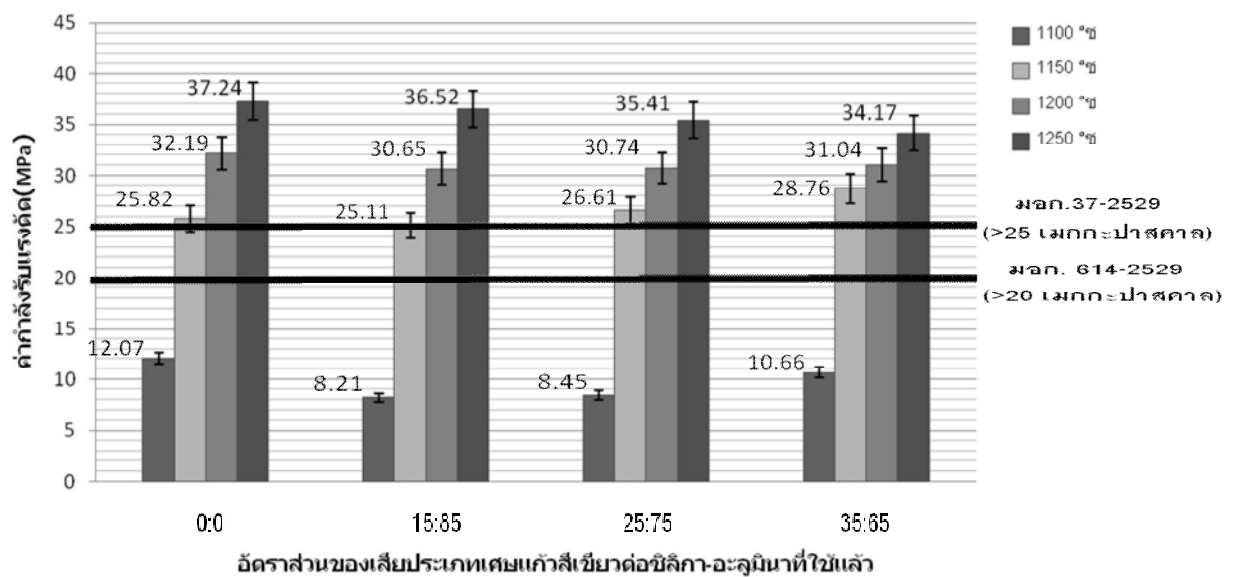
สำหรับการลดอุณหภูมิในการเผาขึ้นรูปเป็น 1150 องศาเซลเซียส พบว่า เมื่อเพิ่มร้อยละของการทดแทนเศษแก้วสีเขียวร้อยละ 15 25 และ 35 ส่งผลให้ค่ากำลังรับแรงดัดเพิ่มขึ้นโดยมีค่ากำลังรับแรงดัดเป็น 25.11 26.61 และ 28.76 เมกกะปาสคาล ตามลำดับ และอัตราการทดแทนด้วยเศษแก้วสีเขียวและซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วร้อยละ 35:65 มีค่ากำลังรับแรงดัดมากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอัตราการทดแทนร้อยละ 0:0 (ใช้เฟลด์สปาร์ร้อยละ 100) ที่มีค่ากำลังรับแรงดัดเป็น 25.82 เมกกะปาสคาล อาจเนื่องมาจากอุณหภูมิดังกล่าวเป็นช่วงที่แก้วหลอมตัวโดยทำหน้าที่เป็นตัวหลอมละลายและช่วยประสานวัสดุดิบเข้าด้วยกันได้ดีกว่า (เพชรพร และคณะ, 2549)

เมื่อลดอุณหภูมิในการเผาขึ้นรูปเป็น 1100 องศาเซลเซียส พบว่ากระเบื้องหลังเผาในทุกอัตราส่วนการทดแทนให้ค่ากำลังรับแรงดัดไม่ผ่านตามเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมกระเบื้องปูพื้น (มอก.37-2529) และกระเบื้องบุผนัง (มอก.614-2529) เนื่องจากอุณหภูมิที่ต่ำลงทำให้การหลอมละลายของวัสดุดิบลดลง ส่งผลต่อการเกิดผลึกสำคัญที่ให้ความแข็งแรงน้อยลงไปด้วยดังนั้นการทดแทนเฟลด์สปาร์ด้วยวัสดุดิบทดแทนในกรณีนี้พบว่าไม่ส่งผลให้ค่ากำลังรับแรงดัดที่ได้ดีขึ้น และพบว่ากระเบื้องที่ทดแทนด้วยเศษแก้วสีเขียวและซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว 0:0 (ใช้เฟลด์สปาร์ร้อยละ 100) เมื่อเผาขึ้นรูปที่อุณหภูมิเดียวกัน ยังคงให้ค่ากำลังรับแรงดัดสูงกว่า

อัตราส่วนที่มีการใช้วัสดุทดแทนร่วมระหว่างของเสียที่เป็นเศษแก้วสีเขียวและซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วทุกอัตราส่วนการทดแทน (15:85, 25:75 และ 35:65)

ตารางที่ 4.5 ค่ากำลังรับแรงดัดของกระเบื้องหลังคา (เมกกะปาสคาล)

| สูตร<br>(ร้อยละเศษแก้วสีเขียว : ซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว) | ค่ากำลังรับแรงดัด (เมกกะปาสคาล) |       |       |       |
|--|---------------------------------|-------|-------|-------|
|  | คุณสมบัติ (องศาเซลเซียส)        |       |       |       |
|  | 1100                            | 1150  | 1200  | 1250  |
| 1 (0:0)  | 12.07                           | 25.82 | 32.19 | 37.24 |
| 2 (15:85)  | 8.21                            | 25.11 | 30.65 | 36.52 |
| 3 (25:75)  | 8.45                            | 26.61 | 30.74 | 35.41 |
| 4 (35:65)  | 10.66                           | 28.76 | 31.04 | 34.17 |
| มอก. 37-2529   | ไม่ต่ำกว่า 25 เมกกะปาสคาล       |       |       |       |
| มอก. 614-2529  | ไม่ต่ำกว่า 20 เมกกะปาสคาล       |       |       |       |



ภาพที่ 4.13 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงดัดกับอัตราส่วนการทดแทนเฟลด์สปาร์ด้วยเศษแก้วสีเขียวและซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วเมื่อเผาที่อุณหภูมิต่างกัน

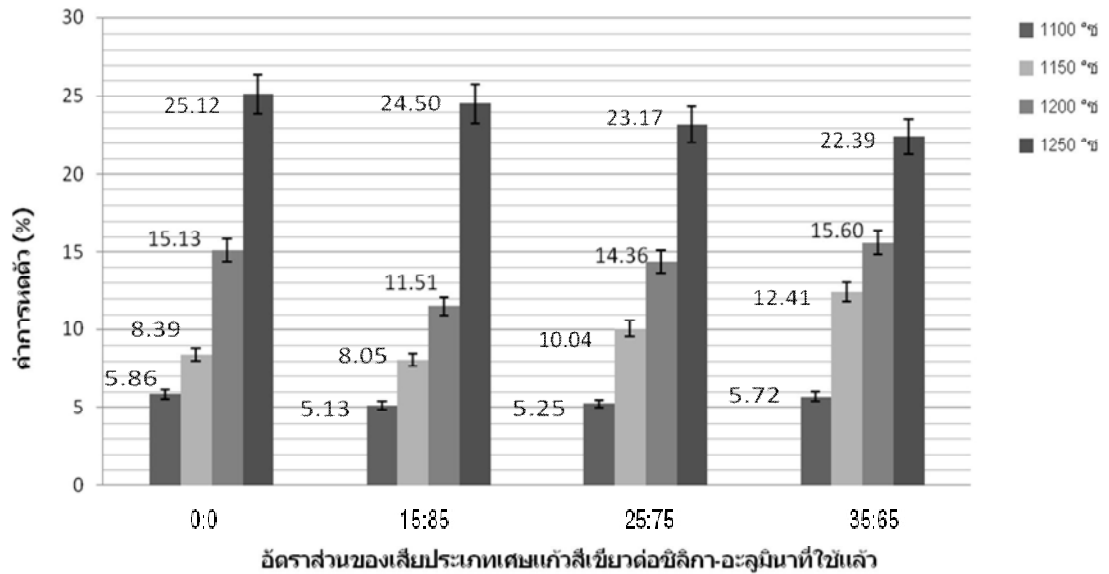
#### 4.5.2 การวิเคราะห์ค่าการหดตัว (Firing shrinkage test)

จากผลการวิเคราะห์ค่าการหดตัวของกระเบื้องหลังเผาแสดงในตารางที่ 4.6 และภาพที่ 4.14 โดยอ้างอิงภายใต้มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมกระเบื้องดินเผาปูพื้น มอก.37-2529 และมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมกระเบื้องดินเผาบุผนัง มอก.614-2529 ระบุการพิจารณาปริมาตร ของแผ่นกระเบื้องเปรียบเทียบก่อนและหลังเผาและคำนวณเป็นร้อยละของการหดตัว

จากผลการวิจัยเมื่อพิจารณาที่อุณหภูมิการเผาเดียวกันของกระเบื้องหลังเผาที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส พบว่า มีค่าการหดตัวหลังการเผาเพิ่มขึ้นเมื่อลดการทดแทนซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วเป็นร้อยละ 85 75 และ 65 ส่งผลให้ค่าการหดตัวเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 11.51 14.36 และ 15.60 ตามลำดับ โดยอัตราการทดแทนเป็น 35:65 มีค่าหดตัวมากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับอัตราการทดแทนเป็น 0:0 (ใช้เฟลด์สปาร์ร้อยละ 100) มีค่าหดตัวเท่ากับร้อยละ 15.12 ส่วนกระเบื้องหลังเผาที่อุณหภูมิ 1100 และ 1150 องศาเซลเซียสให้ค่าการหดตัวหลังการเผาเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกันโดยผลดังกล่าวจะแปรผันตามค่ากำลังรับแรงดัด กล่าวคือ ค่ากำลังรับแรงดัดเพิ่มขึ้น ค่าการหดตัวเพิ่มขึ้นเช่นกัน อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาที่อัตราส่วนการทดแทนเดียวกันเมื่ออุณหภูมิในการเผาสูงขึ้น ค่าการหดตัวจะมีแนวโน้มสูงขึ้นเนื่องจากที่อุณหภูมิสูงวัตถุดิบจะหลอมละลายมากขึ้นจากลักษณะวัตถุดิบที่เป็นของแข็งจะเปลี่ยนสภาพเป็นของเหลวที่อุณหภูมิสูงทำให้เกิดการหดตัวของตัวกระเบื้องดังนั้นอุณหภูมิจึงมีผลต่อการหดตัวหลังการเผาดังกล่าวซึ่งอีกปัจจัยหนึ่งของการหดตัวขึ้นกับปริมาณสารอินทรีย์ในวัตถุดิบ (ปรีดา พิมพ์ขาวขำ, 2547) ได้สอดคล้องกับงานวิจัยของ ปารีย์ อรรถพิศาล กล่าวคือ ซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วมีปริมาณสารอินทรีย์ปนเปื้อนมากกว่าของเสียที่เป็นแก้ว จะส่งผลให้มีการหดตัวลดลงเมื่อมีการเติมซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วที่มากขึ้น

**ตารางที่ 4.6** ค่าการหดตัวของกระเบื้องหลังเผา (ร้อยละ)

| สูตร<br>(ร้อยละเศษแก้วสีเขียว : ซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว) | ค่าการหดตัว (ร้อยละ)    |       |       |       |
|--|-------------------------|-------|-------|-------|
|  | อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส) |       |       |       |
|  | 1100                    | 1150  | 1200  | 1250  |
| 1 (0:0)  | 5.86                    | 8.39  | 15.13 | 25.12 |
| 2 (15:85)  | 5.13                    | 8.05  | 11.51 | 24.50 |
| 3 (25:75)  | 5.25                    | 10.04 | 14.36 | 23.17 |
| 4 (35:65)  | 5.72                    | 12.41 | 15.60 | 22.39 |
| มอก. 37-2529   | ไม่กำหนด                |       |       |       |
| มอก. 614-2529  | ไม่กำหนด                |       |       |       |



ภาพที่ 4.14 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดน้ำกับอัตราส่วนการทดแทนเฟลด์สปาร์ด้วยเศษแก้วสีเขียวและซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วเมื่อเผาที่อุณหภูมิต่างกัน

#### 4.5.3 การทดสอบค่าการดูดซึมน้ำ (Water absorption test)

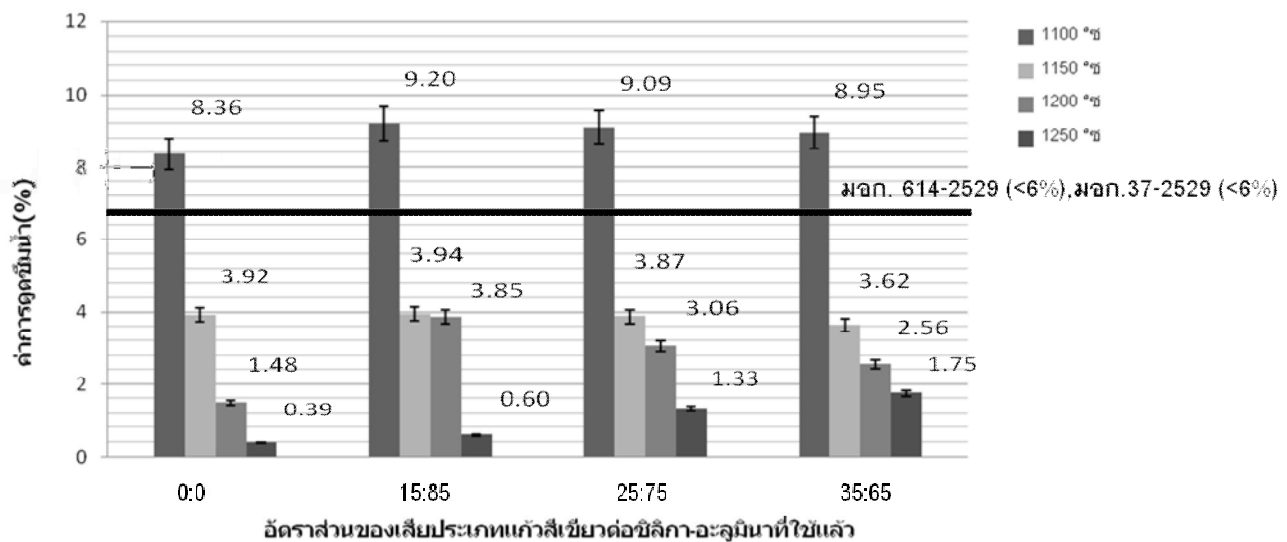
จากผลการทดสอบการดูดซึมน้ำของกระเบื้องหลังเผาแสดงในภาพที่ 4.15 โดยอ้างอิงภายใต้มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมกระเบื้องดินเผาปูพื้น มอก.37-2529 และ มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมกระเบื้องดินเผาบุผนัง มอก.614-2529 ระบุค่าดูดซึมน้ำไม่เกินร้อยละ 6

จากผลการวิจัยพบว่า ค่าการทดสอบดังแสดงในตารางที่ 4.7 และภาพที่ 4.15 เมื่อแปรอัตราส่วนการทดแทนเฟลด์สปาร์ด้วยของเสี้ยนที่เป็นเศษแก้วสีเขียวและซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วเป็น 15:85, 25:75 และ 35:65 พบว่ากระเบื้องหลังเผาขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 1200 และ 1150 องศาเซลเซียสเมื่อเพิ่มร้อยละของการทดแทนเศษแก้วสีเขียวและซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วให้ค่าการดูดซึมน้ำลดลงเช่นเดียวกันสำหรับกระเบื้องหลังเผาที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียสคือร้อยละ 3.85, 3.06 และ 2.56 ตามลำดับและกระเบื้องหลังเผาที่ 1150 องศาเซลเซียสให้ค่าการดูดซึมน้ำลดลงร้อยละ 3.92, 3.94, 3.87 และ 3.62 ตามลำดับ ซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับการทดสอบค่ากำลังรับแรงดัดและค่าการหดตัวข้างต้น กล่าวได้คือ กระเบื้องที่มีค่ากำลังรับแรงดัดสูง ค่าการหดตัวมากจะมีความแข็งแรง และค่าการดูดซึมน้ำจะมีค่าต่ำ โดยทุกอัตราส่วนการทดแทนให้ค่าผ่านตามเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมกระเบื้องปูพื้น (มอก.37-2529) และกระเบื้องบุผนัง (มอก.614-2529) จากผลดังกล่าวแสดงว่าสามารถใช้ซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วร่วมกับของเสี้ยนที่เป็นเศษแก้วสีเขียวเพื่อทดแทนเฟลด์สปาร์ได้ในทุกอัตราส่วนทั้งที่ผ่านการเผาขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 1200 และ 1150

องศาเซลเซียส เมื่อพิจารณาคุณสมบัติในด้านการดูดซึมน้ำของกระเบื้องหลังเผาที่อุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียส อุณหภูมิดังกล่าว ทำให้ค่าดูดซึมน้ำของกระเบื้องไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐาน เนื่องจาก การหลอมละลายเกิดขึ้นไม่มากพอ แม้จะทดแทนด้วยเศษแก้วสีเขียวและซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว ที่อัตราส่วนใดๆ

ตารางที่ 4.7 ค่าการดูดซึมน้ำของกระเบื้องหลังเผา (ร้อยละ)

| สูตร<br>(ร้อยละเศษแก้วสีเขียว : ซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว) | ค่าการดูดซึมน้ำ (ร้อยละ) |      |      |      |
|--|--------------------------|------|------|------|
|  | อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)  |      |      |      |
|  | 1100                     | 1150 | 1200 | 1250 |
| 1 (0:0)  | 8.36                     | 3.92 | 1.48 | 0.39 |
| 2 (15:85)  | 9.20                     | 3.94 | 3.85 | 0.60 |
| 3 (25:75)  | 9.09                     | 3.87 | 3.06 | 1.33 |
| 4 (35:65)  | 8.95                     | 3.62 | 2.56 | 1.75 |
| มอก. 37-2529   | ไม่เกินร้อยละ 6          |      |      |      |
| มอก. 614-2529  | ไม่เกินร้อยละ 6          |      |      |      |



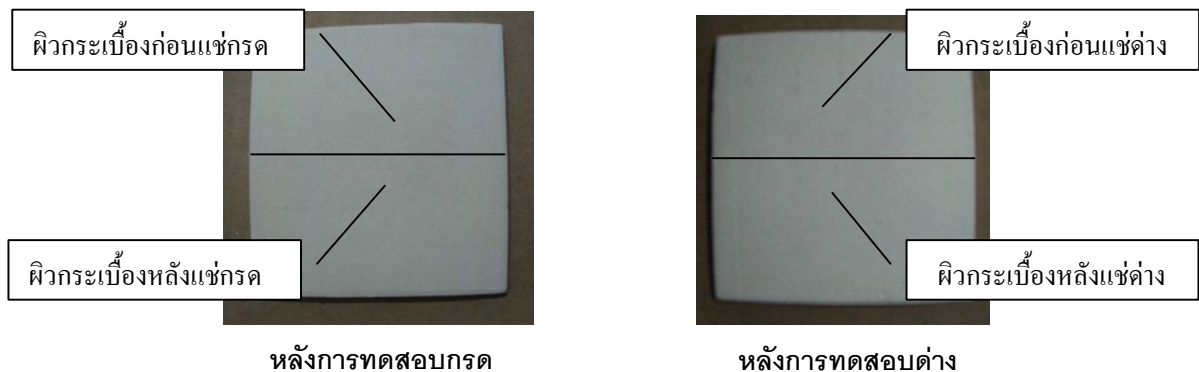
ภาพที่ 4.15 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดซึมน้ำกับอัตราส่วนการทดแทนเฟลด์สปาร์ด้วยเศษแก้วสีเขียวและซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วเมื่อเผาที่อุณหภูมิต่างกัน

4.5.4 การทดสอบการทนสารเคมี (Chemical durability test)

จากผลการทดสอบการทนสารเคมีของกระเบื้องดังแสดงในตารางที่ 4.8 โดยอ้างอิงภายใต้มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมกระเบื้องดินเผาปูพื้น มอก.37-2529 และมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมกระเบื้องดินเผาผนัง มอก.614-2529 ระบุกรณีผ่านการทดสอบ โดยพินิจผิวส่วนที่ทำการแช่ในกรด (สารละลายกรดไฮโดรคลอริกร้อยละ 3 โดยปริมาตร) หรือด่าง (สารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก) โดยต้องไม่มีการเปลี่ยนแปลงในด้านลักษณะผิวของกระเบื้องเมื่อเปรียบเทียบกับส่วนที่ไม่ได้แช่ ผลการทดลองพบว่ากระเบื้องทุกส่วนผสมสามารถทนกรดและด่างได้ กล่าวคือ เมื่อเวลาผ่านไป 7 วัน ทำการพิจารณาที่ผิวของกระเบื้องส่วนที่แช่ในสารเคมีกับส่วนที่ไม่ได้แช่พบว่าไม่พบความแตกต่างดังแสดงในภาพที่ 4.16 จึงสรุปได้ว่ากระเบื้องทุกอัตราส่วนการทดแทนด้วยเศษแก้วสีเขียวและซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วมีคุณสมบัติในการทนสารเคมี

ตารางที่ 4.8 ผลการทดสอบการทนสารเคมีของกระเบื้องที่อัตราส่วนทดแทนด้วยเศษแก้วสีเขียวและซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว โดยผ่านการเผาที่อุณหภูมิต่างๆ

| สูตร<br>(ร้อยละเศษแก้วสีเขียว : ซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว) | อุณหภูมิที่ใช้ในการเผา (องศาเซลเซียส) |      |      |      |
|--|---------------------------------------|------|------|------|
|  | 1100                                  | 1150 | 1200 | 1250 |
| สูตร 1 (0:0)   | ผ่าน                                  | ผ่าน | ผ่าน | ผ่าน |
| สูตร 2 (15:85)   | ผ่าน                                  | ผ่าน | ผ่าน | ผ่าน |
| สูตร 3 (25:75)   | ผ่าน                                  | ผ่าน | ผ่าน | ผ่าน |
| สูตร 4 (35:65)   | ผ่าน                                  | ผ่าน | ผ่าน | ผ่าน |



ภาพที่ 4.16 กระเบื้องที่ผ่านการทดสอบการทนกรด และด่าง (แสดงเฉพาะกระเบื้องที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 1150 องศาเซลเซียส) ที่ทดแทนด้วยเศษแก้วสีเขียวและซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว 35:65

#### 4.5.5 ศึกษาผลของอุณหภูมิระหว่าง 1150 และ 1100 องศาเซลเซียส

จากการพิจารณาเลือกอัตราส่วนที่เหมาะสมในงานวิจัยผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 1150 และ 1100 องศาเซลเซียสโดยพิจารณาได้จากค่ากำลังรับแรงดัด ค่าการดูดซึมน้ำ ค่าการหดตัว และการทนสารเคมี พบว่าอัตราส่วนที่เหมาะสมคืออัตราส่วนการทดแทนเฟลด์สปาร์ด้วยเศษแก้วสีเขียวและซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วเป็น 35:65 โดยกระเบื้องหลังเผาที่อุณหภูมิ 1150 องศาเซลเซียสผ่านเกณฑ์มาตรฐาน สำหรับกระเบื้องหลังเผาที่อุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียสยังมีค่าไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานดังนั้นจึงทำการศึกษาผลของอุณหภูมิระหว่าง 1150 และ 1100 องศาเซลเซียส โดยนำอัตราส่วนการทดแทนที่เหมาะสมข้างต้นและนำไปเผาที่อุณหภูมิ 1125 องศาเซลเซียส ซึ่งเมื่อพิจารณาการทดแทนที่อัตราส่วนดังกล่าวพบว่ามึลักษณะทางกายภาพของกระเบื้องหลังเผาดังแสดงในตารางที่ 4.9 ดังนี้คือ ค่ากำลังรับแรงดัดเท่ากับ 17.40 เมกกะปาสคาลและค่าการดูดซึมน้ำเท่ากับร้อยละ 6.48 พบว่าไม่ผ่านมาตรฐานเพียงเล็กน้อยเท่านั้น และคาดว่าเมื่อทำการศึกษาที่อุณหภูมิสูงขึ้น (อยู่ในช่วงอุณหภูมิ 1125 ถึง 1150 องศาเซลเซียส) ที่อัตราส่วนการทดแทนดังกล่าวมีแนวโน้มที่จะให้ค่ากำลังรับแรงดัดและค่าการดูดซึมน้ำที่ผ่านมาตรฐานได้

**ตารางที่ 4.9** แสดงลักษณะทางกายภาพของกระเบื้องหลังเผาที่อุณหภูมิ 1125 องศาเซลเซียส

| ร้อยละเศษแก้วสีเขียว:ซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว | ค่ากำลังรับแรงดัด<br>(เมกกะปาสคาล) | ค่าการดูดซึมน้ำ<br>(ร้อยละ) | ค่าการหดตัว<br>(ร้อยละ) | การทนสารเคมี          |
|--|------------------------------------|-----------------------------|-------------------------|-----------------------|
| 35:65  | 17.40                              | 6.48                        | 9.32                    | ผ่าน                  |
| มอก. 37-2529                                   | ไม่ต่ำกว่า 25                      | ไม่เกิน 6                   | ไม่กำหนด                | ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง |
| มอก. 614-2529                                  | ไม่ต่ำกว่า 20                      | ไม่เกิน 6                   | ไม่กำหนด                | ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง |



#### 4.6 ประเมินการค่าใช้จ่ายเบื้องต้นของผลงานวิจัย

จากตารางที่ 4.10 แสดงรายละเอียดค่าใช้จ่ายเบื้องต้นในการผลิตกระเบื้องโดยนำทุกอัตราส่วนการทดแทนที่ผ่านเกณฑ์ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 1150 1200 และ 1250 องศาเซลเซียส ซึ่งผ่านมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมกระเบื้องดินเผาปูพื้น มอก.37-2529 และมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมกระเบื้องดินเผาบุผนัง มอก.614-2529 สามารถคำนวณค่าใช้จ่ายได้ดังนี้ ราคาวัตถุดิบ คือ 0.14 บาท/แผ่น และราคาของพลังงานผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 1150 1200 และ 1250 องศาเซลเซียส คือ 5.52, 5.63 และ 5.74 บาท/แผ่นตามลำดับ โดยคิดเป็นราคากระเบื้องเท่ากับ 5.66, 5.77 และ 5.88 บาท/แผ่น ตามลำดับ สำหรับกระเบื้องที่ไม่ได้ใช้วัตถุดิบทดแทน(ใช้เฟลด์สปาร์ร้อยละ 100) คิดเป็นราคาวัตถุดิบ คือ 0.23 บาท/แผ่น และราคาของพลังงาน คือ 5.52, 5.63 และ 5.74 บาท/แผ่น ตามลำดับ โดยคิดเป็นราคากระเบื้องเท่ากับ 5.75, 5.86 และ 5.97 บาท/แผ่น ตามลำดับ ซึ่งเมื่อพิจารณากระเบื้องดังกล่าวข้างต้นพบว่าการนำของเสียที่เป็นเศษแก้ว สีเขียวและซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วมาทดแทนแร่เฟลด์สปาร์สามารถลดต้นทุนในการผลิตได้ 0.1 บาท/แผ่น และจากการเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายในการผลิตกระเบื้องจากของเสียประเภทต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 4.11 พบว่าการนำเศษแก้วสีชา, เศษแก้วสีชาและซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว กระเบื้องที่ผลิตได้มีราคาแผ่นละ 9.08 และ 8.61 บาท ตามลำดับ โดยมีราคาสูงกว่าในงานวิจัยนี้ ซึ่งใช้เศษแก้วสีเขียวและซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วกระเบื้องมีราคาแผ่นละ 5.66 บาทเนื่องจากการเผาแช่ไฟนาน 15 นาทีจะช่วยประหยัดพลังงานในกระบวนการผลิตจึงสามารถผลิตกระเบื้องที่มีราคาต่ำลงได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการนำของเสียดังกล่าวมาทดแทนเฟลด์สปาร์จะเป็นการลดการนำเฟลด์สปาร์ที่ได้จากการทำเหมืองแร่ ตามปกติการทำเหมืองแร่เฟลด์สปาร์มักจะเป็นเหมืองเปิด โดยการระเบิดย่อยให้ได้ขนาดเล็กลง เพื่อแยกเฟลด์สปาร์ออกจากแร่อื่นๆ วิธีการทำเหมืองแบบนี้ การสูญเสียแร่ค่อนข้างสูง

อย่างไรก็ตามการทำเหมืองแร่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมที่เกิดจากการดำเนินการ เช่น การเปิดหน้าดินก่อให้เกิดการชะล้างและพังทลาย น้ำขุ่นขึ้นในทะเลบริเวณใกล้เคียงกับการขุดแร่ในทะเล เป็นต้น การทำเหมืองแร่จึงเป็นอุปสรรคสำคัญในการอนุรักษ์ทรัพยากรอื่น ได้แก่ ทรัพยากรดิน เนื่องจากการขุดระเบิดหรือขุดน้ำเพื่อนำแร่ซึ่งมักอยู่ใต้ดินออกมา ดินที่เกิดจากการทำเหมืองแร่จะไหลลงไปพร้อมกับน้ำลงสู่แม่น้ำลำคลองทำให้ดินเกิดความสูญเสียความอุดมสมบูรณ์ ดินที่ผ่านการทำเหมืองแร่แล้ว จึงขาดความอุดมสมบูรณ์อย่างเด่นชัด นอกจากนี้พื้นที่ที่ผ่านการทำเหมืองแล้วจะเป็นหลุม เป็นบ่อ ไม่สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ ทรัพยากรน้ำและสัตว์น้ำ เนื่องจากน้ำขุ่นขึ้นจากการขุดน้ำแยกแร่ออกจากดินหรือโคลน เกิดจากการแพร่กระจายออกไป หากเป็นพื้นที่ในทะเลตะกอนขุ่นขึ้นจะกระจายไปตามอิทธิพลของกระแสน้ำ คลื่น และลม ซึ่งยากแก่การควบคุม ทำให้คุณภาพของน้ำทะเลเสียหาย นอกจากนี้ยังทำให้น้ำธรรมชาติเกิดการตื่นเงิน

มีผลต่อสัตว์น้ำ คือ ทำลายแหล่งวางไข่ แหล่งอาหาร ที่อยู่อาศัย *ทรัพยากรป่าไม้* การทำลาย ทรัพยากรป่าไม้เพื่อความสะดวกคล้องตัวตั้งแต่สำรวจจนกระทั่งชุดเจาะได้แล้วนำไปส่งยังผู้รับซื้อ ป่าจะถูกถากถางเพื่อการสำรวจ เมื่อพบแร่แล้วป่าจะถูกทำลายอย่างถาวร *ทรัพยากรอากาศ* การ ทำเหมืองแร่โดยเฉพาะเหมืองบนบกจะต้องมีการระเบิด ทบ บด หรือป่นหิน การขนส่งเสียงลำเลียง แร่จากเหมืองแร่ทำให้เกิดฝุ่นละอองมาก ฝุ่นเหล่านี้จะกระจายและถูกพัดพาไปในอากาศ ซึ่งอาจเป็น อันตรายต่อมนุษย์ สัตว์ และพืชที่อยู่ใกล้เคียงได้

ดังนั้นเพื่อลดปัญหาสิ่งแวดล้อมในด้านการใช้ทรัพยากรธรรมชาติ งานวิจัยนี้จึงได้ศึกษา การนำของเสียที่เป็นเศษแก้วสีเขียวและซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วมาใช้เป็นวัตถุดิบทดแทน เฟลด์สปาร์เพื่อผลิตกระเบื้องจากวัสดุของเสียที่ไม่ใช้แล้วนั้นสามารถช่วยลดของเสียดังกล่าว ลงได้ในขณะเดียวกันก็เป็นการนำของเสียกลับมาใช้ให้เกิดประโยชน์ได้อีกทางหนึ่งด้วย โดยเฉพาะอย่างยิ่งจะเป็นการลดภาวะสิ่งแวดล้อมในด้านการใช้ทรัพยากรธรรมชาติและรวมถึงลดการกำจัด ของเสียด้วยวิธีการฝังกลบเป็นต้น

**ตารางที่ 4.10** ค่าใช้จ่ายเบื้องต้นในการผลิตกระเบื้องของงานวิจัย

| ค่าใช้จ่าย           | เฟลด์สปาร์              | เศษแก้วสีเขียวและซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว |
|----------------------|-------------------------|--|
| ราคาค่าวัตถุดิบ/แผ่น | 0.23 บาท/แผ่น           | 0.14 บาท/แผ่น                              |
| ราคาของพลังงาน/แผ่น  | 5.52 บาท/แผ่น (1150 °ซ) | 5.52 บาท/แผ่น (1150 °ซ)                    |
|                      | 5.63 บาท/แผ่น (1200 °ซ) | 5.63 บาท/แผ่น (1200 °ซ)                    |
|                      | 5.74 บาท/แผ่น (1250 °ซ) | 5.74 บาท/แผ่น (1250 °ซ)                    |
| ราคากระเบื้อง/แผ่น   | 5.75 บาท/แผ่น (1150 °ซ) | 5.66 บาท/แผ่น (1150 °ซ)                    |
|                      | 5.86 บาท/แผ่น (1200 °ซ) | 5.77 บาท/แผ่น (1200 °ซ)                    |
|                      | 5.97 บาท/แผ่น (1250 °ซ) | 5.88 บาท/แผ่น (1250 °ซ)                    |

หมายเหตุ : ไม่ได้คำนวณราคาค่าขนส่งของวัตถุดิบ

**ตารางที่ 4.11** เปรียบเทียบค่าใช้จ่ายในการผลิตกระเบื้องจากของเสียประเภทต่างๆ

| งานวิจัย    | ประเภทของเสียเพื่อใช้ทดแทนเฟลด์สปาร์       | อุณหภูมิ ในการเผา | ราคากระเบื้อง บาทต่อแผ่น | เผาแซ่ไฟ  |
|-------------|--|-------------------|--------------------------|-----------|
| จิ๋ววรรณ    | เศษแก้วสีชา                                | 1200              | 9.08                     | 1 ชั่วโมง |
| ปารย์       | เศษแก้วสีชาและซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว    | 1150              | 8.61                     | 1 ชั่วโมง |
| งานวิจัยนี้ | เศษแก้วสีเขียวและซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว | 1150              | 5.66                     | 15 นาที   |

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

#### สรุปผลการวิจัย

จากผลการวิจัย เรื่อง การใช้ของเสียประเภทแก้วและซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วทดแทนแร่เฟลด์สปาร์ในกระเบื้องเซรามิกแบบไม่เคลือบโดยนำเศษแก้วรีไซเคิลสีเขียวจากโรงงานรีไซเคิลแก้วและซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วจากโรงงานผลิตสารประกอบไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ มาคัดขนาดที่เหมาะสม โดยมีดินดำและทรายแก้วเป็นวัตถุดิบร่วมในการผลิต สามารถสรุปผลการวิจัย ได้ดังนี้

1. จากการศึกษาลักษณะสมบัติทางเคมีของวัตถุดิบทดแทน องค์ประกอบที่มีความสำคัญในด้านของความแข็งแรง คือ ซิลิกาออกไซด์และอะลูมินาออกไซด์ ซึ่งพบในของเสียที่เป็นเศษแก้วสีเขียวเท่ากับร้อยละ 70.97 และ 1.21 ตามลำดับ และพบในซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วเท่ากับ 11.7 และร้อยละ 54.02 ตามลำดับ ซึ่งจากผลการวิจัยพบว่าสามารถนำซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วควบคู่กับเศษแก้วสีเขียวมาปรับสัดส่วนเพื่อให้มีองค์ประกอบทางเคมีดังกล่าวใกล้เคียงกับเฟลด์สปาร์มากขึ้นได้

2. ผลการทดสอบการชะละลายของโลหะหนักในซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม พ.ศ.2548 ผลการวิจัยพบว่า ซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วไม่จัดอยู่ในกลุ่มของเสียอันตรายตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม

3. จากการพิจารณาสมบัติด้านกำลังรับแรงดัด ค่าการดูดซึมน้ำ ค่าการหดตัว และความทนสารเคมี ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมกระเบื้อง จากการนำเศษแก้วสีเขียวและซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว เเผที่อุณหภูมิ 1250 1200 1150 องศาเซลเซียส พบว่าทุกอัตราส่วนการทดแทนสามารถผลิตกระเบื้องที่ผ่านมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมกระเบื้องดินเผาปูพื้น มอก.37-2529 และมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมกระเบื้องดินเผาบุผนัง มอก.614-2529

4. สภาวะที่เหมาะสมสำหรับงานวิจัยนี้คือ ส่วนผสมที่ทดแทนเฟลด์สปาร์ด้วยเศษแก้วสีเขียวและซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วร้อยละ 35:65 เเผที่อุณหภูมิ 1150 องศาเซลเซียส เนื่องจากให้ความแข็งแรงเชิงกลได้สูงสุดเมื่อเทียบกับอัตราการทดแทนอื่นๆ อีกทั้งยังสามารถประหยัดพลังงานในการเผาผลาญได้ ดังนั้นจึงเลือกอัตราส่วนการทดแทนดังกล่าวเป็นสภาวะที่เหมาะสมในงานวิจัยนี้ โดยพบว่า มีองค์ประกอบทางเคมีหลังผสมที่สำคัญได้แก่  $\text{SiO}_2$  ร้อยละ 72.78  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ร้อยละ 2.00  $\text{Na}_2\text{O}$  ร้อยละ 20.93 และ  $\text{CaO}$  ร้อยละ 1.08 ให้ค่ากำลังรับแรงดัดเท่ากับ 28.76 เมกกะปาสคาล ค่าการดูดซึมน้ำเท่ากับ ร้อยละ 3.62 ค่าการหดตัวเท่ากับร้อยละ 12.41 ผ่านการทดสอบการทนสารเคมี ซึ่งผ่านมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมกระเบื้องปูพื้น มอก.37-2529 และมาตรฐาน

ผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมกระเบื้องบุผนัง มอก.614-2529 นอกจากนี้ยังพบเฟสซิลิกา-อะลูมินาที่ช่วยให้ ความแข็งแรงในกระเบื้องที่ผลิตได้ จากผลการวิจัยดังกล่าวจึงสามารถใช้ซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว ร่วมกับเศษแก้วสีเขียวเพื่อทดแทนเฟลด์สปาร์ร้อยละ 100 ได้แล้วยังช่วยให้สามารถลดอุณหภูมิใน การเผาขึ้นรูปลงได้

5. ผลการตรวจสอบเฟสที่เกิดขึ้นในเนื้อกระเบื้องจากสภาวะที่เหมาะสมในงานวิจัยพบว่า กระเบื้องหลังเผาเกิดเฟสประกอบที่สำคัญ คือ ควอตซ์ ( $\text{Quartz}$ ,  $\text{SiO}_2$ ) คริสโตบัลไลต์ ( $\text{Cristobalite}$ ,  $\text{SiO}_2$ ) และมัลไลต์ ( $\text{Mullite}$ ,  $3\text{AlO}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ ) ซึ่งเป็นเฟสที่ทำให้เกิดความแข็งแรงใน กระเบื้องได้และจากการพิจารณาภาพขยายพื้นผิวของกระเบื้องหลังเผาที่สภาวะเหมาะสมใน งานวิจัยโดยการส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน (SEM) พบผลึกรูปเข็มของมัลไลต์ ทำให้เป็นข้อมูลยืนยันถึงความแข็งแรงของกระเบื้องจากการใช้เศษแก้วสีเขียวและซิลิกา-อะลูมินา ที่ใช้แล้วซึ่งสามารถนำมาใช้ทดแทนเฟลด์สปาร์ได้ร้อยละ 100

6. ประมาณการค่าใช้จ่ายเบื้องต้นจากงานวิจัย พบว่า ในการผลิตกระเบื้องโดยนำเศษแก้วสีเขียวและซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วมาทดแทนแร่เฟลด์สปาร์มีค่าใช้จ่ายเท่ากับ 6.68 บาท/แผ่น ในขณะที่กระเบื้องไม่ใช้วัตถุดิบทดแทนเลย (ใช้เฟลด์สปาร์ร้อยละ 100) มีค่าใช้จ่ายเท่ากับ 6.77 บาท/แผ่น เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้วัตถุดิบทดแทนรวมระหว่างเศษแก้วสีเขียวและซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วดังกล่าวสามารถลดต้นทุนในการผลิตลงได้ 0.1 บาท/แผ่น ซึ่งราคาของกระเบื้องจาก งานวิจัยนี้มีราคาสูง เนื่องจากค่าใช้จ่ายส่วนใหญ่เกิดจากค่าพลังงานที่ใช้ในการเผาซึ่งสามารถ ลดลงได้ในอุตสาหกรรมและสามารถลดต้นทุนในด้านวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตได้คือแร่เฟลด์สปาร์ โดยงานวิจัยนี้เป็นอีกทางเลือกหนึ่งในการบำบัดของเสียแล้วยังเป็นการทำให้ของเสียกลับมา มีมูลค่าซึ่งลดค่าใช้จ่ายในการผลิตได้ด้วย

## ข้อเสนอแนะ

จากการวิจัย เรื่อง การใช้ของเสียประเภทแก้วและซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วทดแทนแร่เฟลด์สปาร์ในกระเบื้องเซรามิกแบบไม่เคลือบ พบว่าควรเพิ่มเติมงานวิจัยดังนี้

1. ศึกษาหาวัตถุดิบทดแทนวัตถุดิบหลักเพิ่มเติม ยกตัวอย่างเช่น ในส่วนของเนื้อดินควรทำการศึกษาค้นหาแหล่งดินจากที่อื่น กล่าวคือ อาจนำดินตะกอนจากโรงผลิตน้ำประปา ตะกอนในระบบบำบัดน้ำเสีย หรือของเสียที่มาจากกระบวนการอื่นๆ นำกลับมาใช้ให้เกิดประโยชน์โดยนำมาศึกษาเปรียบเทียบกับดินดำที่ใช้ในงานด้านเซรามิก

2. จากผลการทดสอบกระเบื้องที่มีอัตราส่วนการทดแทนด้วยเศษแก้วสีเขียวและซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วร้อยละ 35:65 ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 1125 องศาเซลเซียสพบว่ากระเบื้องที่ได้มีแนวโน้มที่ดีเนื่องจากมีคุณสมบัติต่ำกว่ามาตรฐานเพียงเล็กน้อย ดังนั้นควรนำมาศึกษาเพิ่มเติมโดยทำการเผากระเบื้องในช่วงอุณหภูมิ 1150 ถึง 1125 องศาเซลเซียส ซึ่งหากผลที่ได้ผ่านมาตรฐานจะช่วยให้ลดอุณหภูมิในการผลิตจากเดิมที่ 1150 องศาเซลเซียสได้เพื่อช่วยประหยัดพลังงานในกระบวนการผลิตกระเบื้องอีกด้วย

3. ศึกษาถึงกรรมวิธีการเคลือบกระเบื้อง โดยนำกระเบื้องที่ได้มาทำการเคลือบและทดสอบคุณภาพ โดยการเคลือบจะทำให้กระเบื้องที่ได้มีความคงทนและสวยงามแล้วยังสามารถเพิ่มมูลค่าของกระเบื้องให้สูงขึ้นได้

4. กระเบื้องเซรามิกขนาด 10x10x0.5 เซนติเมตรที่ผลิตขึ้นมาสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการก่อสร้างได้ ซึ่งได้ให้ค่ากำลังรับแรงดัดผ่านเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมกระเบื้องดินเผาปูพื้นและบุผนัง

## รายการอ้างอิง

### ภาษาไทย

- การไฟฟ้านครหลวง, ฝ่ายเศรษฐกิจพลังงานไฟฟ้า. 2554. ค่าไฟฟ้า. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <http://www.mea.or.th/internet/Elecvalue/tarifftype2>. [2554, มีนาคม 19].
- กรมทรัพยากรธรณี, กองธรณีวิทยา คณะอนุกรรมการฝ่ายเอกสารข้อมูล. 2544. การสัมมนาเรื่อง เซรามิกและแก้วของไทย วัตถุประสงค์และแนวทางการพัฒนา. เอกสารเผยแพร่เศรษฐกิจธรณีวิทยา.
- ฉัตรชัย พรจิวติโกคิน. 2552. ผลของขนาดของเสียประเภทแก้วที่ใช้ทดแทนแร่เฟลด์สปาร์ในการผลิตกระเบื้องเซรามิก. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- บรรจุภัณฑ์ขวดแก้วของประเทศไทย. 2553. ข้อมูลผู้ผลิตบรรจุภัณฑ์ขวดแก้วของประเทศไทย. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา : <http://keline2.kimeng.co.th>. [2554, มีนาคม 20].
- ปาร්ය อรรถพิศาล. 2548. การพัฒนาคุณภาพของกระเบื้องเซรามิกที่ผลิตจากของเสียที่เป็นแก้ว. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ประเสริฐ งามเลิศประเสริฐ. 2541. การใช้ของเสียซิลิกา-อะลูมินาในการทำตะกอนปรอทซัลไฟต์ให้เป็นก้อน. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ปรีดา พิมพ์ขาวขำ. 2547. เซรามิกส์. พิมพ์ครั้งที่ 5. ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- เพชรพร ชาวกิจเจริญ, ชดชนก อัทธมพงศ์, อติสา วิเชียรเจริญ และ อัจฉราภรณ์ พรมนบุตร. การใช้ของเสียที่เป็นแก้วทดแทนแร่เฟลด์สปาร์ในการผลิตกระเบื้องเซรามิก. วารสารวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมไทย สมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย 20. (มกราคม-เมษายน 2549): 39-47.
- ไพจิตร อิงศิริวัฒน์. 2541. เนือดินเซรามิก. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์โอเดียนสโตร์.
- ภาวะเศรษฐกิจอุตสาหกรรม, สรุปภาวะเศรษฐกิจอุตสาหกรรม. 2553. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: [www.industry.go.th/ops/pio/kanchanaburi/Lists/News/.../2553-54.pdf](http://www.industry.go.th/ops/pio/kanchanaburi/Lists/News/.../2553-54.pdf). [2554, เมษายน 22].

- ไผทพิภย์ อภิศรรณวธิริยะ. 2542. การนำซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วมาใช้ประโยชน์ในการทำวัสดุปูพื้น.  
 วิทยานิพนธ์ปริญญาามหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์  
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- วรรณดา ต.แสงจันทร์. เทคโนโลยีการทำกระเบื้องประดับตกแต่งจากแก้ว. วารสารกรม  
วิทยาศาสตร์บริการ 55. (กันยายน 2550): 47-60.
- วิวรรณ เทียนศิริ. 2546. การใช้ของเสียที่เป็นแก้วเป็นวัตถุดิบในการผลิตกระเบื้องเซรามิก.  
 วิทยานิพนธ์ปริญญาามหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์  
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- สาโรจน์ ปัทโชติพงษ์. 2545. การนำซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วมาใช้ประโยชน์เป็นตัวทนไฟในการทำ  
เซรามิก. วิทยานิพนธ์ปริญญาามหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะ  
 วิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- สำนักงานเศรษฐกิจอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม. 2552. สรุปภาวะเศรษฐกิจอุตสาหกรรม  
ไทยปี 2551 และแนวโน้มปี 2552 (อุตสาหกรรมเซรามิก). [ออนไลน์]. แหล่งที่มา :  
[www.ryt9.com/s/oie/502140](http://www.ryt9.com/s/oie/502140). [2552, มกราคม 12].
- สำนักงานเศรษฐกิจอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม. 2553. สรุปภาวะเศรษฐกิจอุตสาหกรรม  
ไทยปี 2553 และแนวโน้มปี 2554 (อุตสาหกรรมเซรามิก). [ออนไลน์]. แหล่งที่มา :  
[www.ryt9.com/s/oie/1049895](http://www.ryt9.com/s/oie/1049895). [2554, มีนาคม 19].
- หฤษฎ์ อิตินันท์. 2546. การนำซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วไปใช้ประโยชน์เพื่อผลิตคอนกรีตบล็อก.  
 วิทยานิพนธ์ปริญญาามหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์  
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- อุตสาหกรรม, กระทรวง. 2529. มาตรฐานกระทรวงอุตสาหกรรม 37-2529 (พ.ศ. 2529). กำหนด  
 มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมกระเบื้องดินเผาปูพื้น.
- อุตสาหกรรม, กระทรวง. 2529. มาตรฐานกระทรวงอุตสาหกรรม 614-2529 (พ.ศ. 2529). กำหนด  
 มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมกระเบื้องดินเผาบุผนัง.
- อุตสาหกรรมเซรามิกของประเทศไทย. 2553. สถานการณ์อุตสาหกรรมเซรามิกของประเทศไทย.  
 [ออนไลน์]. แหล่งที่มา : <http://ceramiccenter.dip.go.th>. [2554, มีนาคม 19].

## ภาษาอังกฤษ

- Bernardo, E., Doyle, J., and Hampshire, S. 2008. Sintered feldspar glass–ceramics and glass–ceramic matrix composites. Ceramics International 34: 2037-2042.
- Brow, R.K., and Schmitt, M.L. 2009. A survey of energy and environmental applications of glass. Journal of European Ceramic Society 29: 1193-1201.
- Ghosh, S., Das, M., Chakrabarti, S., and Ghatak, S. 2002. Development of ceramic tiles from common clay and blast furnace slag. Ceramics International 28: 393–400.
- Huan, M.J. 2000. Energy Saving Method of Manufacturing Ceramic Product from Waste Glass. Glass Project Fact Sheet. [Online]. 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. [Online]. Available From: <http://www.nrel.gov/docs/fy01osti/28261.pdf>. [2008,November 20].
- Luz, A.P., and Ribeiro, S. 2007. Use of glass waste as raw material in porcelain stoneware tile mixtures. Ceramics International 33: 761-765.
- Martín-Márquez, J., Rincón, JMa., and Romero, M. 2010. Mullite development on firing in porcelain stoneware bodies. Journal of the European Ceramic Society 30: 1599–1607.
- 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.



- Schwarz-Tatarin, A., and Freyburg, S. 2010. Influence of scrap glass powders and the maturing process in the unfired state on the body properties of a kaolinitic clay after firing. Journal of the European Ceramic Society 30: 1619–1627.
- Tucci, A., Esposito, L., Rastelli, E., Palmonari, C., and Rambaldi, E. 2004. Use of soda lime scrap glass as a fluxing agent in a porcelain stoneware tile mix. Journal of the European Ceramic Society 24: 83-92.
- Tucci, A., Esposito, L., Malmusi, L., and Rambaldi, E. 2007. New body mixes for porcelain stoneware tiles with improved mechanical characteristics. Journal of the European Ceramic Society 27: 1875–1881.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก  
ข้อมูลผลการทดสอบกระเบื้องเซรามิกหลังการเผา

ตารางที่ ๗1 ค่ากำลังรับแรงดัดของกระเบื้องที่ทดแทนด้วยเศษแก้วสีเขียวและซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วตาม  
อัตราส่วนต่างๆ เเผที่ 1100 องศาเซลเซียส

| เศษแก้วสีเขียว : ซิลิกา<br>อะลูมินาที่ใช้แล้ว | W<br>(กก.) | กว้าง<br>(ซม.) | หนา<br>(ซม.) | ระยะห่าง<br>จุดรองรับ<br>(ซม.) | กำลังรับแรงดัด<br>(กก./ซม. <sup>2</sup> ) | กำลังรับแรงดัด<br>(เมกกะปาสคาล) | เฉลี่ย             |
|---|------------|----------------|--------------|--------------------------------|---|---------------------------------|--------------------|
| 0:0   | 22.18      | 10.35          | 0.49         | 9.00                           | 120.49                                    | 12.05                           | 12.07<br>±<br>0.22 |
|   | 21.95      | 10.34          | 0.49         | 9.00                           | 119.36                                    | 11.94                           |                    |
|   | 21.66      | 10.32          | 0.49         | 9.00                           | 118.01                                    | 11.80                           |                    |
|   | 22.51      | 10.29          | 0.49         | 9.00                           | 123.00                                    | 12.30                           |                    |
|   | 22.67      | 10.38          | 0.49         | 9.00                           | 122.80                                    | 12.28                           |                    |
| 15:85   | 15.03      | 10.27          | 0.50         | 9.00                           | 79.03                                     | 7.90                            | 8.21<br>±<br>0.30  |
|   | 15.19      | 10.22          | 0.50         | 9.00                           | 80.26                                     | 8.03                            |                    |
|   | 16.48      | 10.23          | 0.50         | 9.00                           | 86.99                                     | 8.70                            |                    |
|   | 15.71      | 10.31          | 0.50         | 9.00                           | 82.28                                     | 8.23                            |                    |
|   | 15.62      | 10.30          | 0.50         | 9.00                           | 81.89                                     | 8.19                            |                    |
| 25:75   | 15.32      | 10.30          | 0.50         | 9.00                           | 80.32                                     | 8.03                            | 8.45<br>±<br>0.34  |
|   | 16.56      | 10.33          | 0.50         | 9.00                           | 86.57                                     | 8.66                            |                    |
|   | 15.51      | 10.28          | 0.50         | 9.00                           | 81.47                                     | 8.15                            |                    |
|   | 16.64      | 10.33          | 0.50         | 9.00                           | 86.99                                     | 8.70                            |                    |
|   | 16.74      | 10.35          | 0.50         | 9.00                           | 87.34                                     | 8.73                            |                    |
| 35:65   | 19.36      | 10.28          | 0.50         | 9.00                           | 101.70                                    | 10.17                           | 10.66<br>±<br>0.45 |
|   | 19.61      | 10.26          | 0.50         | 9.00                           | 103.21                                    | 10.32                           |                    |
|   | 21.33      | 10.27          | 0.50         | 9.00                           | 112.15                                    | 11.22                           |                    |
|   | 20.18      | 10.28          | 0.49         | 9.00                           | 110.37                                    | 11.04                           |                    |
|   | 19.29      | 10.29          | 0.49         | 9.00                           | 105.40                                    | 10.54                           |                    |

W = น้ำหนักที่กดจนแผ่นกระเบื้องหัก (กิโลกรัม)

ตารางที่ ๗2 ค่ากำลังรับแรงดัดของกระเบื้องที่ทดแทนด้วยเศษแก้วสีเขียวและซีลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วตาม  
อัตราส่วนต่างๆ เเผที่ 1150 องศาเซลเซียส

| เศษแก้วสีเขียว : ซีลิกา<br>อะลูมินาที่ใช้แล้ว | W<br>(กก.) | กว้าง<br>(ซม.) | หนา<br>(ซม.) | ระยะห่าง<br>จุดรองรับ<br>(ซม.) | กำลังรับแรงดัด<br>(กก./ซม. <sup>2</sup> ) | กำลังรับแรงดัด<br>(เมกกะปาสคาล) | เฉลี่ย             |
|---|------------|----------------|--------------|--------------------------------|---|---------------------------------|--------------------|
| 0:0   | 46.95      | 10.16          | 0.49         | 9.00                           | 259.83                                    | 25.98                           | 25.82<br>±<br>0.62 |
|   | 47.33      | 10.15          | 0.50         | 9.00                           | 251.80                                    | 25.18                           |                    |
|   | 47.26      | 10.15          | 0.49         | 9.00                           | 261.80                                    | 26.18                           |                    |
|   | 48.14      | 10.18          | 0.49         | 9.00                           | 265.89                                    | 26.59                           |                    |
|   | 47.43      | 10.17          | 0.50         | 9.00                           | 251.84                                    | 25.18                           |                    |
| 15:85   | 47.11      | 10.20          | 0.50         | 9.00                           | 249.41                                    | 24.94                           | 25.11<br>±<br>0.44 |
|   | 46.30      | 10.14          | 0.50         | 9.00                           | 246.57                                    | 24.66                           |                    |
|   | 46.89      | 10.16          | 0.50         | 9.00                           | 249.22                                    | 24.92                           |                    |
|   | 47.53      | 10.18          | 0.50         | 9.00                           | 252.12                                    | 25.21                           |                    |
|   | 46.84      | 10.20          | 0.49         | 9.00                           | 258.20                                    | 25.82                           |                    |
| 25:75   | 49.31      | 10.08          | 0.49         | 9.00                           | 275.05                                    | 27.51                           | 26.61<br>±<br>0.69 |
|   | 48.42      | 10.14          | 0.49         | 9.00                           | 268.49                                    | 26.85                           |                    |
|   | 49.34      | 10.10          | 0.50         | 9.00                           | 263.80                                    | 26.38                           |                    |
|   | 48.05      | 10.12          | 0.49         | 9.00                           | 266.97                                    | 26.70                           |                    |
|   | 48.15      | 10.15          | 0.50         | 9.00                           | 256.17                                    | 25.62                           |                    |
| 35:65   | 50.43      | 10.02          | 0.49         | 9.00                           | 282.98                                    | 28.30                           | 28.76<br>±<br>0.84 |
|   | 50.26      | 10.03          | 0.48         | 9.00                           | 293.61                                    | 29.36                           |                    |
|   | 50.61      | 9.99           | 0.49         | 9.00                           | 284.85                                    | 28.48                           |                    |
|   | 49.65      | 10.05          | 0.49         | 9.00                           | 277.78                                    | 27.78                           |                    |
|   | 51.26      | 10.06          | 0.48         | 9.00                           | 298.56                                    | 29.86                           |                    |

W = น้ำหนักที่กดจนแผ่นกระเบื้องหัก (กิโลกรัม)

ตารางที่ ๓3 ค่ากำลังรับแรงดัดของกระเบื้องที่ทดแทนด้วยเศษแก้วสีเขียวและซีลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วตาม อัตราส่วนต่างๆ เเผที่ 1200 องศาเซลเซียส

| เศษแก้วสีเขียว : ซีลิกา<br>อะลูมินาที่ใช้แล้ว | W<br>(กก.) | กว้าง<br>(ซม.) | หนา<br>(ซม.) | ระยะห่าง<br>จุดรองรับ<br>(ซม.) | กำลังรับแรงดัด<br>(กก./ซม. <sup>2</sup> ) | กำลังรับแรงดัด<br>(เมกกะปาสคาล) | เฉลี่ย             |
|---|------------|----------------|--------------|--------------------------------|---|---------------------------------|--------------------|
| 0:0   | 53.77      | 10.01          | 0.47         | 9.00                           | 328.28                                    | 32.83                           | 32.19<br>±<br>0.76 |
|   | 52.95      | 9.95           | 0.47         | 9.00                           | 325.22                                    | 32.52                           |                    |
|   | 53.29      | 10.08          | 0.47         | 9.00                           | 323.09                                    | 32.31                           |                    |
|   | 52.69      | 10.00          | 0.48         | 9.00                           | 308.73                                    | 30.87                           |                    |
|   | 54.68      | 9.89           | 0.48         | 9.00                           | 323.95                                    | 32.40                           |                    |
| 15:85   | 54.71      | 10.08          | 0.48         | 9.00                           | 318.02                                    | 31.80                           | 30.65<br>±<br>0.90 |
|   | 60.25      | 10.05          | 0.51         | 9.00                           | 311.16                                    | 31.12                           |                    |
|   | 52.13      | 10.06          | 0.48         | 9.00                           | 303.63                                    | 30.36                           |                    |
|   | 56.75      | 10.02          | 0.51         | 9.00                           | 293.96                                    | 29.40                           |                    |
|   | 56.46      | 9.97           | 0.50         | 9.00                           | 305.80                                    | 30.58                           |                    |
| 25:75   | 57.13      | 9.88           | 0.50         | 9.00                           | 312.25                                    | 31.22                           | 30.74<br>±<br>0.82 |
|   | 58.08      | 10.03          | 0.50         | 9.00                           | 312.69                                    | 31.27                           |                    |
|   | 56.04      | 10.07          | 0.49         | 9.00                           | 312.90                                    | 31.29                           |                    |
|   | 54.61      | 10.04          | 0.50         | 9.00                           | 293.72                                    | 29.37                           |                    |
|   | 54.74      | 10.07          | 0.49         | 9.00                           | 305.64                                    | 30.56                           |                    |
| 35:65   | 54.68      | 10.00          | 0.49         | 9.00                           | 307.45                                    | 30.74                           | 31.04<br>±<br>0.47 |
|   | 53.05      | 9.86           | 0.48         | 9.00                           | 315.25                                    | 31.53                           |                    |
|   | 54.16      | 9.93           | 0.49         | 9.00                           | 306.67                                    | 30.67                           |                    |
|   | 51.58      | 9.85           | 0.48         | 9.00                           | 306.83                                    | 30.68                           |                    |
|   | 53.27      | 9.88           | 0.48         | 9.00                           | 315.92                                    | 31.59                           |                    |

W = น้ำหนักที่กดจนแผ่นกระเบื้องหัก (กิโลกรัม)

ตารางที่ ๔4 ค่ากำลังรับแรงดัดของกระเบื้องที่ทดแทนด้วยเศษแก้วสีเขียวและซีลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วตาม อัตราส่วนต่างๆ เเผที่ 1250 องศาเซลเซียส

| เศษแก้วสีเขียว : ซีลิกา<br>อะลูมินาที่ใช้แล้ว | W<br>(กก.) | กว้าง<br>(ซม.) | หนา<br>(ซม.) | ระยะห่าง<br>จุดรองรับ<br>(ซม.) | กำลังรับแรงดัด<br>(กก./ซม. <sup>2</sup> ) | กำลังรับแรงดัด<br>(เมกกะปาสคาล) | เฉลี่ย             |
|---|------------|----------------|--------------|--------------------------------|---|---------------------------------|--------------------|
| 0:0   | 55.84      | 9.60           | 0.46         | 9.00                           | 371.10                                    | 37.11                           | 37.24<br>±<br>0.31 |
|   | 53.54      | 9.64           | 0.45         | 9.00                           | 370.26                                    | 37.03                           |                    |
|   | 53.87      | 9.58           | 0.45         | 9.00                           | 374.88                                    | 37.49                           |                    |
|   | 53.12      | 9.59           | 0.45         | 9.00                           | 369.27                                    | 36.93                           |                    |
|   | 53.96      | 9.56           | 0.45         | 9.00                           | 376.29                                    | 37.63                           |                    |
| 15:85   | 52.32      | 9.57           | 0.46         | 9.00                           | 348.80                                    | 34.88                           | 36.52<br>±<br>1.07 |
|   | 54.09      | 9.68           | 0.45         | 9.00                           | 372.52                                    | 37.25                           |                    |
|   | 52.33      | 9.65           | 0.45         | 9.00                           | 361.52                                    | 36.15                           |                    |
|   | 53.52      | 9.72           | 0.45         | 9.00                           | 367.08                                    | 36.71                           |                    |
|   | 51.99      | 9.64           | 0.44         | 9.00                           | 376.07                                    | 37.61                           |                    |
| 25:75   | 54.29      | 9.64           | 0.46         | 9.00                           | 359.30                                    | 35.93                           | 35.41<br>±<br>0.59 |
|   | 52.92      | 9.77           | 0.46         | 9.00                           | 345.58                                    | 34.56                           |                    |
|   | 54.10      | 9.68           | 0.46         | 9.00                           | 356.57                                    | 35.66                           |                    |
|   | 53.26      | 9.69           | 0.46         | 9.00                           | 350.67                                    | 35.07                           |                    |
|   | 52.33      | 9.73           | 0.45         | 9.00                           | 358.55                                    | 35.85                           |                    |
| 35:65   | 52.40      | 9.76           | 0.46         | 9.00                           | 342.53                                    | 34.25                           | 34.17<br>±<br>0.32 |
|   | 52.55      | 9.74           | 0.46         | 9.00                           | 344.22                                    | 34.42                           |                    |
|   | 52.18      | 9.70           | 0.46         | 9.00                           | 343.20                                    | 34.32                           |                    |
|   | 51.42      | 9.76           | 0.46         | 9.00                           | 336.12                                    | 33.61                           |                    |
|   | 52.19      | 9.72           | 0.46         | 9.00                           | 342.56                                    | 34.26                           |                    |

W = น้ำหนักที่กดจนแผ่นกระเบื้องหัก (กิโลกรัม)

ตารางที่ ๗5 ค่าการหดตัวของกระเบื้องที่ทดแทนด้วยเศษแก้วสีเขียวและซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วตามอัตราส่วนต่างๆ เเผที่ 1100 องศาเซลเซียส

| เศษแก้วสีเขียว : ซิลิกา<br>อะลูมินาที่ใช้แล้ว | มิติก่อนเผา(ซม.) |       |      | มิติหลังเผา(ซม.) |       |      | ค่าการหดตัว<br>(%) | เฉลี่ย            |
|---|------------------|-------|------|------------------|-------|------|--------------------|-------------------|
|   | กว้าง            | ยาว   | หนา  | กว้าง            | ยาว   | หนา  |                    |                   |
| 0:0   | 10.55            | 10.55 | 0.50 | 10.35            | 10.37 | 0.49 | 5.50               | 5.86<br>±<br>0.55 |
|   | 10.54            | 10.54 | 0.50 | 10.34            | 10.29 | 0.49 | 6.14               |                   |
|   | 10.54            | 10.53 | 0.50 | 10.32            | 10.35 | 0.49 | 5.69               |                   |
|   | 10.54            | 10.54 | 0.50 | 10.29            | 10.28 | 0.49 | 6.68               |                   |
|   | 10.55            | 10.55 | 0.50 | 10.38            | 10.36 | 0.49 | 5.32               |                   |
| 15:85   | 10.55            | 10.53 | 0.50 | 10.27            | 10.23 | 0.50 | 5.43               | 5.13<br>±<br>0.60 |
|   | 10.55            | 10.53 | 0.50 | 10.22            | 10.28 | 0.50 | 5.43               |                   |
|   | 10.55            | 10.54 | 0.50 | 10.23            | 10.24 | 0.50 | 5.79               |                   |
|   | 10.55            | 10.55 | 0.50 | 10.31            | 10.32 | 0.50 | 4.41               |                   |
|   | 10.55            | 10.55 | 0.50 | 10.30            | 10.31 | 0.50 | 4.59               |                   |
| 25:75   | 10.55            | 10.54 | 0.51 | 10.30            | 10.30 | 0.50 | 6.46               | 5.25<br>±<br>1.03 |
|   | 10.55            | 10.54 | 0.50 | 10.33            | 10.28 | 0.50 | 4.50               |                   |
|   | 10.55            | 10.55 | 0.50 | 10.28            | 10.27 | 0.50 | 5.15               |                   |
|   | 10.55            | 10.55 | 0.51 | 10.33            | 10.32 | 0.50 | 6.10               |                   |
|   | 10.54            | 10.55 | 0.50 | 10.35            | 10.31 | 0.50 | 4.04               |                   |
| 35:65   | 10.55            | 10.55 | 0.50 | 10.28            | 10.27 | 0.50 | 5.15               | 5.72<br>±<br>0.88 |
|   | 10.54            | 10.54 | 0.50 | 10.26            | 10.28 | 0.50 | 5.06               |                   |
|   | 10.55            | 10.55 | 0.50 | 10.27            | 10.29 | 0.50 | 5.05               |                   |
|   | 10.55            | 10.55 | 0.50 | 10.28            | 10.29 | 0.49 | 6.86               |                   |
|   | 10.55            | 10.55 | 0.50 | 10.29            | 10.32 | 0.49 | 6.50               |                   |



ตารางที่ ๘6 ค่าการหดตัวของกระเบื้องที่ทดแทนด้วยเศษแก้วสีเขียวและซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วตามอัตราส่วนต่างๆ เเผที่ 1150 องศาเซลเซียส

| เศษแก้วสีเขียว : ซิลิกา<br>อะลูมินาที่ใช้แล้ว | มิติก่อนเผา(ซม.) |       |      | มิติหลังเผา(ซม.) |       |      | ค่าการหดตัว<br>(%) | เฉลี่ย             |
|---|------------------|-------|------|------------------|-------|------|--------------------|--------------------|
|   | กว้าง            | ยาว   | หนา  | กว้าง            | ยาว   | หนา  |                    |                    |
| 0:0   | 10.55            | 10.55 | 0.50 | 10.16            | 10.14 | 0.49 | 9.29               | 8.39<br>±<br>0.99  |
|   | 10.53            | 10.53 | 0.50 | 10.15            | 10.14 | 0.50 | 7.18               |                    |
|   | 10.54            | 10.54 | 0.49 | 10.15            | 10.13 | 0.49 | 7.45               |                    |
|   | 10.55            | 10.55 | 0.50 | 10.18            | 10.16 | 0.49 | 8.93               |                    |
|   | 10.54            | 10.54 | 0.51 | 10.17            | 10.13 | 0.50 | 9.08               |                    |
| 15:85   | 10.54            | 10.54 | 0.51 | 10.20            | 10.16 | 0.50 | 8.54               | 8.05<br>±<br>0.91  |
|   | 10.54            | 10.54 | 0.51 | 10.14            | 10.15 | 0.50 | 9.17               |                    |
|   | 10.55            | 10.54 | 0.50 | 10.16            | 10.15 | 0.50 | 7.26               |                    |
|   | 10.55            | 10.54 | 0.50 | 10.18            | 10.16 | 0.50 | 6.99               |                    |
|   | 10.54            | 10.55 | 0.50 | 10.20            | 10.20 | 0.49 | 8.31               |                    |
| 25:75   | 10.54            | 10.54 | 0.50 | 10.08            | 10.10 | 0.49 | 10.19              | 10.04<br>±<br>0.80 |
|   | 10.55            | 10.55 | 0.50 | 10.14            | 10.15 | 0.49 | 9.38               |                    |
|   | 10.54            | 10.54 | 0.52 | 10.10            | 10.14 | 0.50 | 11.36              |                    |
|   | 10.55            | 10.55 | 0.50 | 10.12            | 10.14 | 0.49 | 9.65               |                    |
|   | 10.55            | 10.55 | 0.51 | 10.15            | 10.11 | 0.50 | 9.61               |                    |
| 35:65   | 10.55            | 10.55 | 0.50 | 10.02            | 10.09 | 0.49 | 10.98              | 12.41<br>±<br>0.89 |
|   | 10.54            | 10.55 | 0.50 | 10.03            | 10.05 | 0.48 | 12.97              |                    |
|   | 10.54            | 10.53 | 0.50 | 9.99             | 9.96  | 0.49 | 12.14              |                    |
|   | 10.55            | 10.54 | 0.51 | 10.05            | 10.00 | 0.49 | 13.16              |                    |
|   | 10.55            | 10.55 | 0.50 | 10.06            | 10.05 | 0.48 | 12.80              |                    |

ตารางที่ ๗7 ค่าการหดตัวของกระเบื้องที่ทดแทนด้วยเศษแก้วสีเขียวและซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วตามอัตราส่วนต่างๆ เเผที่ 1200 องศาเซลเซียส

| เศษแก้วสีเขียว : ซิลิกา<br>อะลูมินาที่ใช้แล้ว | มิติก่อนเผา(ซม.) |       |      | มิติหลังเผา(ซม.) |       |      | ค่าการหดตัว<br>(%) | เฉลี่ย             |
|---|------------------|-------|------|------------------|-------|------|--------------------|--------------------|
|   | กว้าง            | ยาว   | หนา  | กว้าง            | ยาว   | หนา  |                    |                    |
| 0:0   | 10.55            | 10.55 | 0.50 | 10.01            | 10.02 | 0.47 | 15.29              | 15.12<br>±<br>0.90 |
|   | 10.54            | 10.55 | 0.50 | 9.95             | 10.03 | 0.47 | 15.64              |                    |
|   | 10.55            | 10.54 | 0.50 | 10.08            | 10.04 | 0.47 | 14.45              |                    |
|   | 10.54            | 10.55 | 0.50 | 10.00            | 9.96  | 0.48 | 14.01              |                    |
|   | 10.55            | 10.55 | 0.50 | 9.89             | 9.82  | 0.48 | 16.23              |                    |
| 15:85   | 10.53            | 10.54 | 0.50 | 10.08            | 10.06 | 0.48 | 12.29              | 11.51<br>±<br>0.84 |
|   | 10.53            | 10.52 | 0.52 | 10.05            | 9.94  | 0.51 | 11.55              |                    |
|   | 10.53            | 10.53 | 0.50 | 10.06            | 10.09 | 0.48 | 12.12              |                    |
|   | 10.54            | 10.54 | 0.52 | 10.02            | 10.01 | 0.51 | 11.45              |                    |
|   | 10.54            | 10.54 | 0.50 | 9.97             | 10.01 | 0.50 | 10.16              |                    |
| 25:75   | 10.55            | 10.55 | 0.52 | 9.88             | 9.87  | 0.50 | 15.76              | 14.36<br>±<br>0.99 |
|   | 10.55            | 10.55 | 0.52 | 10.03            | 9.98  | 0.50 | 13.52              |                    |
|   | 10.55            | 10.55 | 0.52 | 10.07            | 10.05 | 0.49 | 14.32              |                    |
|   | 10.55            | 10.56 | 0.52 | 10.04            | 10.00 | 0.50 | 13.35              |                    |
|   | 10.55            | 10.55 | 0.52 | 10.07            | 9.99  | 0.49 | 14.83              |                    |
| 35:65   | 10.55            | 10.55 | 0.51 | 10.00            | 9.95  | 0.49 | 14.11              | 15.60<br>±<br>0.96 |
|   | 10.55            | 10.55 | 0.50 | 9.86             | 9.88  | 0.48 | 15.98              |                    |
|   | 10.54            | 10.55 | 0.51 | 9.93             | 9.88  | 0.49 | 15.23              |                    |
|   | 10.54            | 10.55 | 0.50 | 9.85             | 9.86  | 0.48 | 16.15              |                    |
|   | 10.55            | 10.55 | 0.51 | 9.88             | 9.99  | 0.48 | 16.54              |                    |

ตารางที่ ๘8 ค่าการหดตัวของกระเบื้องที่ทดแทนด้วยเศษแก้วสีเขียวและซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วตามอัตราส่วนต่างๆ เเผที่ 1250 องศาเซลเซียส

| เศษแก้วสีเขียว : ซิลิกา<br>อะลูมินาที่ใช้แล้ว | มิติก่อนเผา(ซม.) |       |      | มิติหลังเผา(ซม.) |      |      | ค่าการหดตัว<br>(%) | เฉลี่ย             |
|---|------------------|-------|------|------------------|------|------|--------------------|--------------------|
|   | กว้าง            | ยาว   | หนา  | กว้าง            | ยาว  | หนา  |                    |                    |
| 0:0   | 10.55            | 10.55 | 0.50 | 9.60             | 9.64 | 0.46 | 23.51              | 25.12<br>±<br>0.98 |
|   | 10.55            | 10.55 | 0.50 | 9.64             | 9.63 | 0.45 | 24.93              |                    |
|   | 10.54            | 10.54 | 0.50 | 9.58             | 9.60 | 0.45 | 25.49              |                    |
|   | 10.55            | 10.55 | 0.50 | 9.59             | 9.54 | 0.45 | 26.02              |                    |
|   | 10.54            | 10.54 | 0.50 | 9.56             | 9.60 | 0.45 | 25.65              |                    |
| 15:85   | 10.54            | 10.54 | 0.50 | 9.57             | 9.56 | 0.46 | 24.23              | 24.50<br>±<br>1.00 |
|   | 10.54            | 10.54 | 0.50 | 9.68             | 9.70 | 0.45 | 23.93              |                    |
|   | 10.55            | 10.55 | 0.50 | 9.65             | 9.70 | 0.45 | 24.31              |                    |
|   | 10.55            | 10.54 | 0.50 | 9.72             | 9.69 | 0.45 | 23.77              |                    |
|   | 10.54            | 10.54 | 0.50 | 9.64             | 9.66 | 0.44 | 26.23              |                    |
| 25:75   | 10.55            | 10.55 | 0.50 | 9.64             | 9.65 | 0.46 | 23.11              | 23.17<br>±<br>0.44 |
|   | 10.55            | 10.55 | 0.51 | 9.77             | 9.74 | 0.46 | 22.89              |                    |
|   | 10.54            | 10.54 | 0.51 | 9.68             | 9.72 | 0.46 | 23.61              |                    |
|   | 10.55            | 10.55 | 0.50 | 9.69             | 9.66 | 0.46 | 22.63              |                    |
|   | 10.55            | 10.55 | 0.50 | 9.73             | 9.71 | 0.45 | 23.60              |                    |
| 35:65   | 10.55            | 10.55 | 0.51 | 9.76             | 9.78 | 0.46 | 22.65              | 22.39<br>±<br>0.70 |
|   | 10.55            | 10.55 | 0.51 | 9.74             | 9.71 | 0.46 | 23.36              |                    |
|   | 10.55            | 10.55 | 0.50 | 9.70             | 9.68 | 0.46 | 22.39              |                    |
|   | 10.54            | 10.55 | 0.50 | 9.76             | 9.73 | 0.46 | 21.43              |                    |
|   | 10.55            | 10.55 | 0.50 | 9.72             | 9.69 | 0.46 | 22.15              |                    |

ตารางที่ ๘9 ค่าการดูดซึมน้ำของกระเบื้องที่ทดแทนด้วยเศษแก้วสีเขียวและซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วตามอัตราส่วนต่างๆ เเผที่ 1100 องศาเซลเซียส

| เศษแก้วสีเขียว : ซิลิกา<br>อะลูมินาที่ใช้แล้ว | น้ำหนักก่อน<br>ทดสอบ(กรัม) | น้ำหนักหลัง<br>ทดสอบ(กรัม) | ค่าการดูดซึมน้ำ<br>(%) | เฉลี่ย            |
|---|----------------------------|----------------------------|------------------------|-------------------|
| 0:0   | 97.96                      | 105.22                     | 7.4112                 | 8.36<br>±<br>0.67 |
|   | 98.05                      | 106.13                     | 8.2407                 |                   |
|   | 97.64                      | 105.85                     | 8.4084                 |                   |
|   | 98.13                      | 106.44                     | 8.4684                 |                   |
|   | 97.68                      | 106.75                     | 9.2854                 |                   |
| 15:85   | 96.18                      | 105.87                     | 10.0749                | 9.20<br>±<br>0.92 |
|   | 99.01                      | 107.31                     | 8.3830                 |                   |
|   | 98.67                      | 106.62                     | 8.0572                 |                   |
|   | 96.86                      | 106.50                     | 9.9525                 |                   |
|   | 96.41                      | 105.59                     | 9.5218                 |                   |
| 25:75   | 98.49                      | 107.57                     | 9.2192                 | 9.09<br>±<br>0.93 |
|   | 98.72                      | 107.68                     | 9.0762                 |                   |
|   | 97.97                      | 105.70                     | 7.8902                 |                   |
|   | 98.65                      | 107.35                     | 8.8191                 |                   |
|   | 97.42                      | 107.62                     | 10.4701                |                   |
| 35:65   | 97.32                      | 106.32                     | 9.2478                 | 8.95<br>±<br>0.39 |
|   | 98.09                      | 106.51                     | 8.5840                 |                   |
|   | 97.22                      | 106.29                     | 9.3294                 |                   |
|   | 97.95                      | 106.85                     | 9.0863                 |                   |
|   | 99.10                      | 107.51                     | 8.4864                 |                   |

ตารางที่ ๑๐ ค่าการดูดซึมน้ำของกระเบื้องที่ทดแทนด้วยเศษแก้วสีเขียวและซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วตามอัตราส่วนต่างๆ เเผที่ 1150 องศาเซลเซียส

| เศษแก้วสีเขียว : ซิลิกา<br>อะลูมินาที่ใช้แล้ว | น้ำหนักก่อน<br>ทดสอบ(กรัม) | น้ำหนักหลัง<br>ทดสอบ(กรัม) | ค่าการดูดซึมน้ำ<br>(%) | เฉลี่ย            |
|---|----------------------------|----------------------------|------------------------|-------------------|
| 0:0   | 91.79                      | 95.39                      | 3.9220                 | 3.92<br>±<br>0.68 |
|   | 94.15                      | 97.18                      | 3.2183                 |                   |
|   | 91.13                      | 95.33                      | 4.6088                 |                   |
|   | 92.56                      | 95.59                      | 3.2736                 |                   |
|   | 93.62                      | 97.92                      | 4.5930                 |                   |
| 15:85   | 94.67                      | 98.55                      | 4.0984                 | 3.94<br>±<br>0.52 |
|   | 94.64                      | 98.84                      | 4.4379                 |                   |
|   | 93.58                      | 97.39                      | 4.0714                 |                   |
|   | 93.67                      | 97.44                      | 4.0248                 |                   |
|   | 93.74                      | 96.60                      | 3.0510                 |                   |
| 25:75   | 94.45                      | 97.68                      | 3.4198                 | 3.87<br>±<br>0.61 |
|   | 94.29                      | 97.46                      | 3.3620                 |                   |
|   | 93.55                      | 96.84                      | 3.5168                 |                   |
|   | 93.50                      | 97.86                      | 4.6631                 |                   |
|   | 94.16                      | 98.31                      | 4.4074                 |                   |
| 35:65   | 94.21                      | 97.42                      | 3.4073                 | 3.62<br>±<br>0.33 |
|   | 93.54                      | 97.36                      | 4.0838                 |                   |
|   | 93.71                      | 96.83                      | 3.3294                 |                   |
|   | 93.64                      | 96.85                      | 3.4280                 |                   |
|   | 93.78                      | 97.41                      | 3.8708                 |                   |

ตารางที่ ๘11 ค่าการดูดซึมน้ำของกระเบื้องที่ทดแทนด้วยเศษแก้วสีเขียวและซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วตามอัตราส่วนต่างๆ เเผที่ 1200 องศาเซลเซียส

| เศษแก้วสีเขียว : ซิลิกา<br>อะลูมินาที่ใช้แล้ว | น้ำหนักก่อน<br>ทดสอบ(กรัม) | น้ำหนักหลัง<br>ทดสอบ(กรัม) | ค่าการดูดซึมน้ำ<br>(%) | เฉลี่ย            |
|---|----------------------------|----------------------------|------------------------|-------------------|
| 0:0   | 98.13                      | 99.65                      | 1.5490                 | 1.48<br>±<br>0.69 |
|   | 98.48                      | 99.98                      | 1.5232                 |                   |
|   | 98.36                      | 99.77                      | 1.4335                 |                   |
|   | 98.47                      | 98.94                      | 0.4773                 |                   |
|   | 98.63                      | 101.02                     | 2.4232                 |                   |
| 15:85   | 98.92                      | 101.89                     | 3.0024                 | 3.85<br>±<br>0.72 |
|   | 98.49                      | 103.01                     | 4.5893                 |                   |
|   | 96.15                      | 99.20                      | 3.1721                 |                   |
|   | 96.82                      | 101.08                     | 4.3999                 |                   |
|   | 98.34                      | 102.35                     | 4.0777                 |                   |
| 25:75   | 97.80                      | 101.19                     | 3.4663                 | 3.06<br>±<br>0.78 |
|   | 99.51                      | 101.62                     | 2.1204                 |                   |
|   | 100.12                     | 102.80                     | 2.6768                 |                   |
|   | 98.47                      | 101.29                     | 2.8638                 |                   |
|   | 98.19                      | 102.28                     | 4.1654                 |                   |
| 35:65   | 99.41                      | 101.40                     | 2.0018                 | 2.56<br>±<br>0.50 |
|   | 98.39                      | 101.12                     | 2.7747                 |                   |
|   | 99.53                      | 102.81                     | 3.2955                 |                   |
|   | 97.63                      | 99.86                      | 2.2841                 |                   |
|   | 98.74                      | 101.17                     | 2.4610                 |                   |

ตารางที่ ๑๒ ค่าการดูดซึมน้ำของกระเบื้องที่ทดแทนด้วยเศษแก้วสีเขียวและซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วตามอัตราส่วนต่างๆ เเผที่ 1250 องศาเซลเซียส

| เศษแก้วสีเขียว : ซิลิกา<br>อะลูมินาที่ใช้แล้ว | น้ำหนักก่อน<br>ทดสอบ(กรัม) | น้ำหนักหลัง<br>ทดสอบ(กรัม) | ค่าการดูดซึมน้ำ<br>(%) | เฉลี่ย |
|---|----------------------------|----------------------------|------------------------|--------|
| 0:0   | 98.83                      | 98.88                      | 0.0506                 | 0.39   |
|   | 98.35                      | 98.48                      | 0.1322                 |        |
|   | 97.94                      | 98.62                      | 0.6943                 | ±      |
|   | 98.66                      | 99.39                      | 0.7399                 | 0.32   |
|   | 98.15                      | 98.46                      | 0.3158                 |        |
| 15:85   | 98.36                      | 98.84                      | 0.4880                 | 0.60   |
|   | 98.21                      | 98.57                      | 0.3666                 |        |
|   | 99.17                      | 100.33                     | 1.1697                 | ±      |
|   | 98.98                      | 99.87                      | 0.8992                 | 0.43   |
|   | 99.76                      | 99.85                      | 0.0902                 |        |
| 25:75   | 98.39                      | 99.59                      | 1.2196                 | 1.33   |
|   | 99.32                      | 100.62                     | 1.3089                 |        |
|   | 98.47                      | 99.94                      | 1.4928                 | ±      |
|   | 98.90                      | 100.30                     | 1.4156                 | 0.13   |
|   | 98.78                      | 99.96                      | 1.1946                 |        |
| 35:65   | 98.30                      | 99.47                      | 1.1902                 | 1.75   |
|   | 98.31                      | 99.69                      | 1.4037                 |        |
|   | 98.26                      | 100.42                     | 2.1982                 | ±      |
|   | 98.44                      | 100.75                     | 2.3466                 | 0.50   |
|   | 99.65                      | 101.24                     | 1.5956                 |        |

ภาคผนวก ข

ข้อมูลผลการหาค่าความหนาแน่นของน้ำดินและน้ำหนักค้ำบนตะแกรง



ตารางที่ ๘13 ค่าความหนาแน่นของน้ำดินที่ทดแทนด้วยเศษแก้วสีเขียวและซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วตาม อัตราส่วนต่างๆ เผาที่ 1100 องศาเซลเซียส

| เศษแก้วสีเขียว : ซิลิกา<br>อะลูมินาที่ใช้แล้ว | น้ำหนักก่อน<br>ทดสอบ(กรัม) | น้ำหนักหลัง<br>ทดสอบ(กรัม) | ปริมาตร<br>(ลบ.ซม.) | ความหนาแน่น<br>ของน้ำดิน |
|---|----------------------------|----------------------------|---------------------|--------------------------|
| 0:0   | 199.97                     | 365.97                     | 100                 | 1.66                     |
| 15:85   | 200.01                     | 362.01                     | 100                 | 1.62                     |
| 25:75   | 199.99                     | 362.99                     | 100                 | 1.63                     |
| 35:65   | 199.97                     | 364.97                     | 100                 | 1.65                     |

ตารางที่ ๘14 ค่าความหนาแน่นของน้ำดินที่ทดแทนด้วยเศษแก้วสีเขียวและซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วตาม อัตราส่วนต่างๆ เผาที่ 1150 องศาเซลเซียส

| เศษแก้วสีเขียว : ซิลิกา<br>อะลูมินาที่ใช้แล้ว | น้ำหนักก่อน<br>ทดสอบ(กรัม) | น้ำหนักหลัง<br>ทดสอบ(กรัม) | ปริมาตร<br>(ลบ.ซม.) | ความหนาแน่น<br>ของน้ำดิน |
|---|----------------------------|----------------------------|---------------------|--------------------------|
| 0:0   | 199.95                     | 362.46                     | 100                 | 1.63                     |
| 15:85   | 199.97                     | 360.44                     | 100                 | 1.60                     |
| 25:75   | 199.98                     | 360.14                     | 100                 | 1.60                     |
| 35:65   | 200.01                     | 361.51                     | 100                 | 1.62                     |

ตารางที่ ๘15 ค่าความหนาแน่นของน้ำดินที่ทดแทนด้วยเศษแก้วสีเขียวและซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วตาม อัตราส่วนต่างๆ เผาที่ 1200 องศาเซลเซียส

| เศษแก้วสีเขียว : ซิลิกา<br>อะลูมินาที่ใช้แล้ว | น้ำหนักก่อน<br>ทดสอบ(กรัม) | น้ำหนักหลัง<br>ทดสอบ(กรัม) | ปริมาตร<br>(ลบ.ซม.) | ความหนาแน่น<br>ของน้ำดิน |
|---|----------------------------|----------------------------|---------------------|--------------------------|
| 0:0   | 199.95                     | 362.76                     | 100                 | 1.62                     |
| 15:85   | 199.98                     | 361.08                     | 100                 | 1.61                     |
| 25:75   | 199.98                     | 360.41                     | 100                 | 1.60                     |
| 35:65   | 199.95                     | 363.43                     | 100                 | 1.63                     |

ตารางที่ ๑16 ค่าความหนาแน่นของน้ำดินที่ทดแทนด้วยเศษแก้วสีเขียวและซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วตามอัตราส่วนต่างๆ เเผที่ 1250 องศาเซลเซียส

| เศษแก้วสีเขียว : ซิลิกา<br>อะลูมินาที่ใช้แล้ว | น้ำหนักก่อน<br>ทดสอบ(กรัม) | น้ำหนักหลัง<br>ทดสอบ(กรัม) | ปริมาตร<br>(ลบ.ซม.) | ความหนาแน่น<br>ของน้ำดิน |
|---|----------------------------|----------------------------|---------------------|--------------------------|
| 0:0   | 199.99                     | 369.41                     | 100                 | 1.69                     |
| 15:85   | 200.00                     | 359.19                     | 100                 | 1.59                     |
| 25:75   | 199.98                     | 360.58                     | 100                 | 1.61                     |
| 35:65   | 200.01                     | 364.62                     | 100                 | 1.65                     |

ตารางที่ ๑17 น้ำหนักค้ำบนตะแกรงที่ทดแทนด้วยเศษแก้วสีเขียวและซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วตามอัตราส่วนต่างๆ เเผที่ 1100 องศาเซลเซียส

| เศษแก้วสีเขียว : ซิลิกา<br>อะลูมินาที่ใช้แล้ว | น้ำหนักก่อน<br>ทดสอบ(กรัม) | น้ำหนักหลัง<br>ทดสอบ(กรัม) | น้ำหนักค้ำบนตะแกรง<br>(กรัม) |
|---|----------------------------|----------------------------|------------------------------|
| 0:0   | 304.90                     | 307.02                     | 2.12                         |
| 15:85   | 304.90                     | 306.90                     | 2.00                         |
| 25:75   | 304.89                     | 306.94                     | 2.05                         |
| 35:65   | 304.93                     | 306.99                     | 2.06                         |

ตารางที่ ๑18 น้ำหนักค้ำบนตะแกรงที่ทดแทนด้วยเศษแก้วสีเขียวและซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วตามอัตราส่วนต่างๆ เเผที่ 1150 องศาเซลเซียส

| เศษแก้วสีเขียว : ซิลิกา<br>อะลูมินาที่ใช้แล้ว | น้ำหนักก่อน<br>ทดสอบ(กรัม) | น้ำหนักหลัง<br>ทดสอบ(กรัม) | น้ำหนักค้ำบนตะแกรง<br>(กรัม) |
|---|----------------------------|----------------------------|------------------------------|
| 0:0   | 304.91                     | 306.95                     | 2.04                         |
| 15:85   | 304.95                     | 306.98                     | 2.03                         |
| 25:75   | 304.93                     | 306.95                     | 2.02                         |
| 35:65   | 304.89                     | 306.95                     | 2.06                         |

ตารางที่ ๑๙ น้ำหนักค้ำบนตะแกรงที่ทดแทนด้วยเศษแก้วสีเขียวและซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วตามอัตราส่วนต่างๆ เเผที่ 1200 องศาเซลเซียส

| เศษแก้วสีเขียว : ซิลิกา<br>อะลูมินาที่ใช้แล้ว | น้ำหนักก่อน<br>ทดสอบ(กรัม) | น้ำหนักหลัง<br>ทดสอบ(กรัม) | น้ำหนักค้ำบนตะแกรง<br>(กรัม) |
|---|----------------------------|----------------------------|------------------------------|
| 0:0   | 304.89                     | 306.91                     | 2.02                         |
| 15:85   | 305.02                     | 309.52                     | 4.50                         |
| 25:75   | 304.93                     | 306.92                     | 1.99                         |
| 35:65   | 304.90                     | 306.95                     | 2.05                         |

ตารางที่ ๒๐ น้ำหนักค้ำบนตะแกรงที่ทดแทนด้วยเศษแก้วสีเขียวและซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วตามอัตราส่วนต่างๆ เเผที่ 1250 องศาเซลเซียส

| เศษแก้วสีเขียว : ซิลิกา<br>อะลูมินาที่ใช้แล้ว | น้ำหนักก่อน<br>ทดสอบ(กรัม) | น้ำหนักหลัง<br>ทดสอบ(กรัม) | น้ำหนักค้ำบนตะแกรง<br>(กรัม) |
|---|----------------------------|----------------------------|------------------------------|
| 0:0   | 304.91                     | 306.83                     | 1.92                         |
| 15:85   | 304.90                     | 306.92                     | 2.02                         |
| 25:75   | 304.90                     | 306.99                     | 2.09                         |
| 35:65   | 304.91                     | 307.02                     | 2.11                         |

หมายเหตุ : ความหนาแน่นของน้ำดิน = น้ำหนัก (กรัม) / ปริมาตร (ลบ.ซม.)

ส่วนที่ค้ำบนตะแกรง(กรัม) = น้ำหนักตะแกรงหลังอบ(กรัม) - น้ำหนักตะแกรงก่อนอบ(กรัม)

### ภาคผนวก ค

ข้อมูลผลการวิเคราะห์การกระจายขนาดของอนุภาควัดทุติย



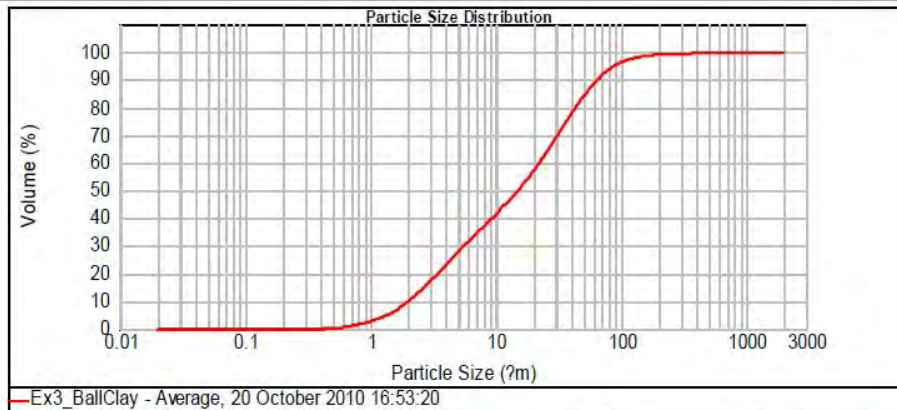
### Result Analysis Report

**Sample Name:** Ex3\_BallClay - Average      **SOP Name:**      **Measured:** 20 October 2010 16:53:20  
**Sample Source & type:**      **Measured by:** User      **Analysed:** 20 October 2010 16:53:21  
**Sample bulk lot ref:**      **Result Source:** Averaged

**Particle Name:** china clay (hi)      **Accessory Name:** Hydro 2000SM (A)      **Analysis model:** General purpose      **Sensitivity:** Normal  
**Particle RI:** 1.577      **Absorption:** 0.1      **Size range:** 0.020 to 2000.000 um      **Obscuration:** 16.77 %  
**Dispersant Name:** Water      **Dispersant RI:** 1.330      **Weighted Residual:** 1.075 %      **Result Emulation:** Off

**Concentration:** 0.0128 %Vol      **Span :** 4.125      **Uniformity:** 1.48      **Result units:** Volume  
**Specific Surface Area:** 1.13 m<sup>2</sup>/g      **Surface Weighted Mean D[3,2]:** 5.322 um      **Vol. Weighted Mean D[4,3]:** 27.737 um

**d(0.1):** 2.010 um      **d(0.5):** 15.002 um      **d(0.9):** 63.897 um



| Size (µm) | Volume In % | Size (µm) | Volume In % | Size (µm) | Volume In % | Size (µm) | Volume In % | Size (µm) | Volume In % | Size (µm) | Volume In % |
|-----------|-------------|-----------|-------------|-----------|-------------|-----------|-------------|-----------|-------------|-----------|-------------|
| 0.010     | 0.00        | 0.105     | 0.00        | 1.096     | 1.05        | 11.482    | 2.84        | 120.226   | 0.65        | 1258.025  | 0.00        |
| 0.011     | 0.00        | 0.120     | 0.00        | 1.259     | 1.28        | 13.183    | 3.04        | 138.038   | 0.42        | 1445.440  | 0.00        |
| 0.013     | 0.00        | 0.138     | 0.00        | 1.445     | 1.56        | 15.136    | 3.59        | 158.489   | 0.25        | 1650.587  | 0.00        |
| 0.015     | 0.00        | 0.156     | 0.00        | 1.660     | 1.87        | 17.378    | 3.88        | 181.970   | 0.15        | 1905.461  | 0.00        |
| 0.017     | 0.00        | 0.182     | 0.00        | 1.905     | 2.17        | 19.953    | 4.13        | 208.930   | 0.10        | 2187.762  | 0.00        |
| 0.020     | 0.00        | 0.209     | 0.00        | 2.188     | 2.45        | 22.909    | 4.30        | 239.883   | 0.09        | 2511.880  | 0.00        |
| 0.023     | 0.00        | 0.240     | 0.00        | 2.512     | 2.67        | 26.303    | 4.24        | 275.423   | 0.11        | 2894.032  | 0.00        |
| 0.028     | 0.00        | 0.275     | 0.00        | 2.884     | 2.82        | 30.200    | 4.24        | 316.228   | 0.14        | 3311.311  | 0.00        |
| 0.030     | 0.00        | 0.316     | 0.00        | 3.311     | 2.90        | 34.674    | 4.00        | 363.078   | 0.17        | 3801.894  | 0.00        |
| 0.035     | 0.00        | 0.363     | 0.00        | 3.802     | 2.92        | 39.811    | 3.63        | 418.869   | 0.15        | 4365.158  | 0.00        |
| 0.040     | 0.00        | 0.417     | 0.00        | 4.385     | 2.89        | 45.709    | 3.19        | 478.630   | 0.09        | 5011.872  | 0.00        |
| 0.046     | 0.00        | 0.479     | 0.24        | 5.012     | 2.83        | 52.481    | 2.89        | 549.941   | 0.01        | 5754.389  | 0.00        |
| 0.052     | 0.00        | 0.550     | 0.38        | 5.754     | 2.75        | 60.256    | 2.69        | 630.957   | 0.00        | 6606.934  | 0.00        |
| 0.060     | 0.00        | 0.631     | 0.50        | 6.607     | 2.69        | 69.183    | 2.20        | 724.436   | 0.00        | 7585.776  | 0.00        |
| 0.069     | 0.00        | 0.724     | 0.61        | 7.588     | 2.65        | 79.433    | 1.73        | 831.764   | 0.00        | 8709.636  | 0.00        |
| 0.079     | 0.00        | 0.832     | 0.73        | 8.710     | 2.65        | 91.201    | 1.31        | 954.983   | 0.00        | 10000.000 | 0.00        |
| 0.091     | 0.00        | 0.955     | 0.87        | 10.000    | 2.71        | 104.713   | 0.95        | 1098.478  | 0.00        |           |             |
| 0.105     | 0.00        | 1.096     | 0.87        | 11.482    | 2.71        | 120.226   | 0.95        | 1258.025  | 0.00        |           |             |

ภาพที่ ผ1 ผลวิเคราะห์การกระจายขนาดอนุภาคดินค้ำ

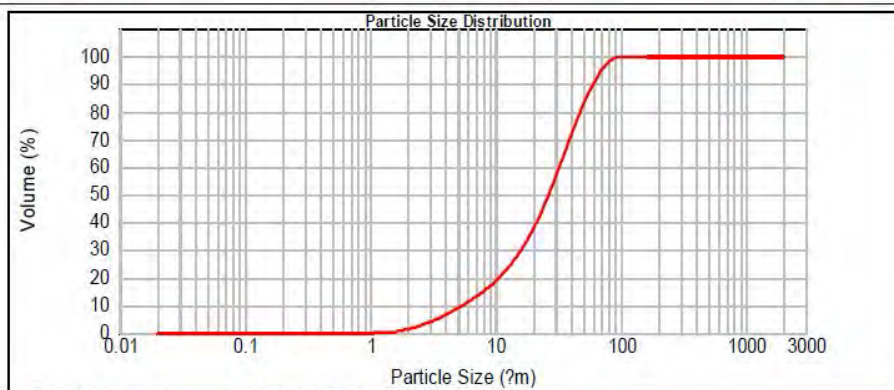


### Result Analysis Report

**Sample Name:** Ex1\_Feldspar - Average  
**Sample Source & type:** User  
**Sample bulk lot ref:** Averaged  
**SOP Name:** Hydro 2000SM (A)  
**Measured by:** User  
**Result Source:** Averaged  
**Measured:** 20 October 2010 16:37:19  
**Analysed:** 20 October 2010 16:37:20

|  |   |  |                                 |
|--|---|--|---------------------------------|
| <b>Particle Name:</b><br>Silica 0.001                    | <b>Accessory Name:</b><br>Hydro 2000SM (A)        | <b>Analysis model:</b><br>General purpose      | <b>Sensitivity:</b><br>Normal   |
| <b>Particle RI:</b><br>1.544                             | <b>Absorption:</b><br>0.001                       | <b>Size range:</b><br>0.020 to 2000.000 um     | <b>Obscuration:</b><br>15.43 %  |
| <b>Dispersant Name:</b><br>Water                         | <b>Dispersant RI:</b><br>1.330                    | <b>Weighted Residual:</b><br>0.572 %           | <b>Result Emulation:</b><br>Off |
| <b>Concentration:</b><br>0.0266 %Vol                     | <b>Span :</b><br>2.042                            | <b>Uniformity:</b><br>0.622                    | <b>Result units:</b><br>Volume  |
| <b>Specific Surface Area:</b><br>0.458 m <sup>2</sup> /g | <b>Surface Weighted Mean D[3,2]:</b><br>13.103 um | <b>Vol. Weighted Mean D[4,3]:</b><br>29.913 um |                                 |

d(0.1): 5.408 um      d(0.5): 26.456 um      d(0.9): 59.428 um



Ex1\_Feldspar - Average, 20 October 2010 16:37:19

| Size (µm) | Volume In % | Size (µm) | Volume In % | Size (µm) | Volume In % | Size (µm) | Volume In % | Size (µm) | Volume In % | Size (µm) | Volume In % |
|-----------|-------------|-----------|-------------|-----------|-------------|-----------|-------------|-----------|-------------|-----------|-------------|
| 0.010     | 0.00        | 0.105     | 0.00        | 1.096     | 0.08        | 11.482    | 3.07        | 120.226   | 0.00        | 1258.925  | 0.00        |
| 0.011     | 0.00        | 0.120     | 0.00        | 1.259     | 0.22        | 13.183    | 3.61        | 136.038   | 0.00        | 1445.440  | 0.00        |
| 0.013     | 0.00        | 0.138     | 0.00        | 1.445     | 0.34        | 15.136    | 4.25        | 156.489   | 0.00        | 1659.567  | 0.00        |
| 0.015     | 0.00        | 0.158     | 0.00        | 1.660     | 0.50        | 17.378    | 4.96        | 181.970   | 0.00        | 1905.461  | 0.00        |
| 0.017     | 0.00        | 0.182     | 0.00        | 1.905     | 0.67        | 19.953    | 5.75        | 208.630   | 0.00        | 2187.762  | 0.00        |
| 0.020     | 0.00        | 0.209     | 0.00        | 2.188     | 0.84        | 22.909    | 6.47        | 239.883   | 0.00        | 2511.886  | 0.00        |
| 0.023     | 0.00        | 0.240     | 0.00        | 2.512     | 1.00        | 26.303    | 7.05        | 275.423   | 0.00        | 2894.032  | 0.00        |
| 0.026     | 0.00        | 0.275     | 0.00        | 2.884     | 1.15        | 30.200    | 7.43        | 316.228   | 0.00        | 3311.311  | 0.00        |
| 0.030     | 0.00        | 0.316     | 0.00        | 3.311     | 1.30        | 34.674    | 7.43        | 363.078   | 0.00        | 3801.894  | 0.00        |
| 0.035     | 0.00        | 0.363     | 0.00        | 3.802     | 1.43        | 39.811    | 7.09        | 416.869   | 0.00        | 4365.158  | 0.00        |
| 0.040     | 0.00        | 0.417     | 0.00        | 4.365     | 1.55        | 45.709    | 6.40        | 478.630   | 0.00        | 5011.872  | 0.00        |
| 0.046     | 0.00        | 0.479     | 0.00        | 5.012     | 1.66        | 52.481    | 5.40        | 549.541   | 0.00        | 5754.369  | 0.00        |
| 0.052     | 0.00        | 0.550     | 0.00        | 5.754     | 1.79        | 60.256    | 4.23        | 630.957   | 0.00        | 6606.634  | 0.00        |
| 0.060     | 0.00        | 0.631     | 0.00        | 6.607     | 1.92        | 69.183    | 2.99        | 724.436   | 0.00        | 7585.776  | 0.00        |
| 0.069     | 0.00        | 0.724     | 0.00        | 7.588     | 2.10        | 79.433    | 1.89        | 831.764   | 0.00        | 8709.638  | 0.00        |
| 0.079     | 0.00        | 0.832     | 0.00        | 8.710     | 2.34        | 91.201    | 0.40        | 954.963   | 0.00        | 10000.000 | 0.00        |
| 0.091     | 0.00        | 0.955     | 0.02        | 10.000    | 2.66        | 104.713   | 0.00        | 1096.478  | 0.00        |           |             |
| 0.105     | 0.00        | 1.096     | 0.02        | 11.482    | 2.86        | 120.226   | 0.00        | 1258.925  | 0.00        |           |             |

ภาพที่ ๗2 ผลวิเคราะห์การกระจายขนาดอนุภาคเฟลด์สปาร์



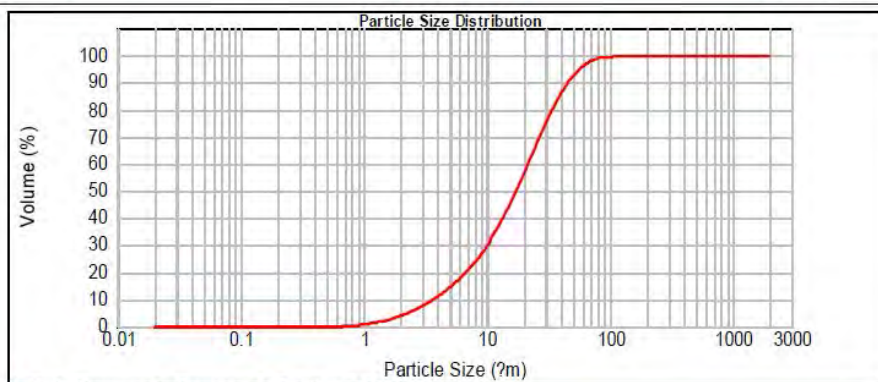


### Result Analysis Report

**Sample Name:** Ex4\_Glass sand - Average  
**Sample Source & type:**  
**Sample bulk lot ref:**  
**SOP Name:**  
**Measured by:** User  
**Result Source:** Averaged  
**Measured:** 20 October 2010 15:26:48  
**Analysed:** 20 October 2010 15:26:49

|  |  |  |                                 |
|--|--|--|---------------------------------|
| <b>Particle Name:</b><br>Silica 0.01                     | <b>Accessory Name:</b><br>Hydro 2000SM (A)       | <b>Analysis model:</b><br>General purpose      | <b>Sensitivity:</b><br>Normal   |
| <b>Particle RI:</b><br>1.544                             | <b>Absorption:</b><br>0.01                       | <b>Size range:</b><br>0.020 to 2000.000 um     | <b>Obscuration:</b><br>8.14 %   |
| <b>Dispersant Name:</b><br>Water                         | <b>Dispersant RI:</b><br>1.330                   | <b>Weighted Residual:</b><br>0.842 %           | <b>Result Emulation:</b><br>Off |
| <b>Concentration:</b><br>0.0089 %Vol                     | <b>Span :</b><br>2.395                           | <b>Uniformity:</b><br>0.793                    | <b>Result units:</b><br>Volume  |
| <b>Specific Surface Area:</b><br>0.705 m <sup>2</sup> /g | <b>Surface Weighted Mean D[3,2]:</b><br>8.510 um | <b>Vol. Weighted Mean D[4,3]:</b><br>22.286 um |                                 |

d(0.1): 3.652 um      d(0.5): 17.293 um      d(0.9): 45.069 um



-Ex4\_Glass sand - Average, 20 October 2010 15:26:48

| Size (µm) | Volume In % | Size (µm) | Volume In % | Size (µm) | Volume In % | Size (µm) | Volume In % | Size (µm) | Volume In % | Size (µm) | Volume In % |
|-----------|-------------|-----------|-------------|-----------|-------------|-----------|-------------|-----------|-------------|-----------|-------------|
| 0.010     | 0.00        | 0.106     | 0.00        | 1.096     | 0.48        | 11.482    | 4.83        | 120.226   | 0.04        | 1258.825  | 0.00        |
| 0.011     | 0.00        | 0.120     | 0.00        | 1.259     | 0.56        | 13.183    | 5.35        | 138.038   | 0.02        | 1445.440  | 0.00        |
| 0.013     | 0.00        | 0.138     | 0.00        | 1.445     | 0.66        | 15.130    | 5.82        | 158.469   | 0.02        | 1659.567  | 0.00        |
| 0.015     | 0.00        | 0.158     | 0.00        | 1.660     | 0.83        | 17.378    | 6.19        | 181.970   | 0.03        | 1905.461  | 0.00        |
| 0.017     | 0.00        | 0.182     | 0.00        | 1.905     | 1.01        | 19.953    | 6.40        | 208.930   | 0.03        | 2187.762  | 0.00        |
| 0.020     | 0.00        | 0.209     | 0.00        | 2.188     | 1.19        | 22.909    | 6.41        | 239.883   | 0.04        | 2511.886  | 0.00        |
| 0.023     | 0.00        | 0.240     | 0.00        | 2.512     | 1.38        | 26.303    | 6.18        | 275.423   | 0.05        | 2884.032  | 0.00        |
| 0.026     | 0.00        | 0.275     | 0.00        | 2.884     | 1.57        | 30.200    | 5.72        | 316.228   | 0.05        | 3311.311  | 0.00        |
| 0.030     | 0.00        | 0.316     | 0.00        | 3.311     | 1.76        | 34.674    | 5.05        | 363.078   | 0.05        | 3801.894  | 0.00        |
| 0.035     | 0.00        | 0.363     | 0.00        | 3.802     | 1.95        | 39.811    | 4.23        | 416.869   | 0.05        | 4385.158  | 0.00        |
| 0.040     | 0.00        | 0.417     | 0.00        | 4.395     | 2.16        | 45.709    | 3.35        | 478.630   | 0.01        | 5011.872  | 0.00        |
| 0.046     | 0.00        | 0.479     | 0.00        | 5.012     | 2.40        | 52.451    | 2.47        | 549.541   | 0.00        | 5754.369  | 0.00        |
| 0.052     | 0.00        | 0.550     | 0.00        | 5.754     | 2.67        | 60.256    | 1.69        | 630.957   | 0.00        | 6606.934  | 0.00        |
| 0.060     | 0.00        | 0.631     | 0.10        | 6.607     | 3.00        | 69.183    | 1.00        | 724.436   | 0.00        | 7585.776  | 0.00        |
| 0.069     | 0.00        | 0.724     | 0.22        | 7.586     | 3.38        | 79.433    | 0.45        | 831.704   | 0.00        | 8709.636  | 0.00        |
| 0.079     | 0.00        | 0.832     | 0.34        | 8.710     | 3.82        | 91.201    | 0.18        | 954.963   | 0.00        | 10000.000 | 0.00        |
| 0.091     | 0.00        | 0.955     | 0.41        | 10.000    | 4.31        | 104.713   | 0.09        | 1096.478  | 0.00        |           |             |
| 0.105     | 0.00        | 1.096     | 0.41        | 11.482    | 4.83        | 120.226   | 0.09        | 1258.825  | 0.00        |           |             |

ภาพที่ ๓3 ผลวิเคราะห์การกระจายขนาดอนุภาคทรายแก้ว

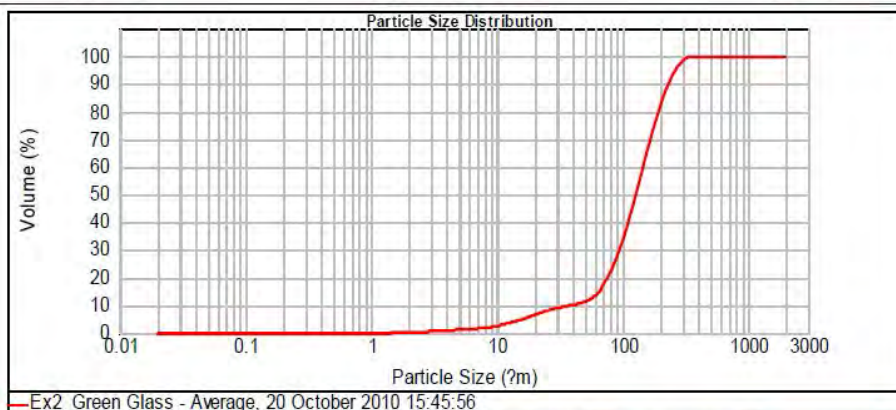


### Result Analysis Report

**Sample Name:** Ex2\_Green Glass - Average  
**Sample Source & type:**  
**Sample bulk lot ref:**  
**SOP Name:**  
**Measured by:** User  
**Result Source:** Averaged  
**Measured:** 20 October 2010 15:45:56  
**Analysed:** 20 October 2010 15:45:57

|  |   |   |                                 |
|--|---|---|---------------------------------|
| <b>Particle Name:</b><br>Silica 0.01                     | <b>Accessory Name:</b><br>Hydro 2000SM (A)        | <b>Analysis model:</b><br>General purpose       | <b>Sensitivity:</b><br>Normal   |
| <b>Particle RI:</b><br>1.544                             | <b>Absorption:</b><br>0.01                        | <b>Size range:</b><br>0.020 to 2000.000 um      | <b>Obscuration:</b><br>8.27 %   |
| <b>Dispersant Name:</b><br>Water                         | <b>Dispersant RI:</b><br>1.330                    | <b>Weighted Residual:</b><br>1.000 %            | <b>Result Emulation:</b><br>Off |
| <b>Concentration:</b><br>0.0618 %Vol                     | <b>Span :</b><br>1.501                            | <b>Uniformity:</b><br>0.439                     | <b>Result units:</b><br>Volume  |
| <b>Specific Surface Area:</b><br>0.107 m <sup>2</sup> /g | <b>Surface Weighted Mean D[3,2]:</b><br>56.120 um | <b>Vol. Weighted Mean D[4,3]:</b><br>132.747 um |                                 |

d(0.1): 38.036 um      d(0.5): 126.971 um      d(0.9): 228.651 um



Ex2\_Green Glass - Average, 20 October 2010 15:45:56

| Size (µm) | Volume In % | Size (µm) | Volume In % | Size (µm) | Volume In % | Size (µm) | Volume In % | Size (µm) | Volume In % | Size (µm) | Volume In % |
|-----------|-------------|-----------|-------------|-----------|-------------|-----------|-------------|-----------|-------------|-----------|-------------|
| 0.010     | 0.00        | 0.106     | 0.00        | 1.096     | 0.00        | 11.482    | 0.71        | 120.226   | 10.47       | 1258.925  | 0.00        |
| 0.011     | 0.00        | 0.120     | 0.00        | 1.259     | 0.01        | 13.183    | 0.84        | 138.038   | 10.58       | 1445.440  | 0.00        |
| 0.013     | 0.00        | 0.138     | 0.00        | 1.445     | 0.08        | 15.136    | 0.93        | 156.489   | 9.90        | 1659.587  | 0.00        |
| 0.015     | 0.00        | 0.158     | 0.00        | 1.660     | 0.09        | 17.378    | 0.98        | 181.970   | 8.52        | 1905.461  | 0.00        |
| 0.017     | 0.00        | 0.182     | 0.00        | 1.905     | 0.11        | 19.953    | 0.95        | 208.630   | 6.70        | 2187.762  | 0.00        |
| 0.020     | 0.00        | 0.209     | 0.00        | 2.188     | 0.13        | 22.909    | 0.85        | 239.883   | 4.88        | 2511.886  | 0.00        |
| 0.023     | 0.00        | 0.240     | 0.00        | 2.512     | 0.14        | 26.303    | 0.70        | 275.423   | 2.73        | 2884.032  | 0.00        |
| 0.026     | 0.00        | 0.275     | 0.00        | 2.884     | 0.15        | 30.200    | 0.50        | 316.228   | 0.00        | 3311.311  | 0.00        |
| 0.030     | 0.00        | 0.316     | 0.00        | 3.311     | 0.15        | 34.674    | 0.64        | 363.078   | 0.00        | 3801.894  | 0.00        |
| 0.035     | 0.00        | 0.363     | 0.00        | 3.802     | 0.15        | 39.811    | 1.08        | 416.869   | 0.00        | 4365.158  | 0.00        |
| 0.040     | 0.00        | 0.417     | 0.00        | 4.365     | 0.16        | 45.709    | 1.90        | 478.630   | 0.00        | 5011.872  | 0.00        |
| 0.046     | 0.00        | 0.479     | 0.00        | 5.012     | 0.17        | 52.481    | 3.13        | 549.541   | 0.00        | 5754.306  | 0.00        |
| 0.052     | 0.00        | 0.550     | 0.00        | 5.754     | 0.20        | 60.256    | 4.70        | 630.957   | 0.00        | 6606.934  | 0.00        |
| 0.060     | 0.00        | 0.631     | 0.00        | 6.607     | 0.25        | 68.183    | 6.48        | 724.436   | 0.00        | 7565.776  | 0.00        |
| 0.069     | 0.00        | 0.724     | 0.00        | 7.588     | 0.33        | 78.433    | 8.20        | 831.764   | 0.00        | 8709.636  | 0.00        |
| 0.079     | 0.00        | 0.832     | 0.00        | 8.710     | 0.44        | 91.201    | 9.63        | 954.963   | 0.00        | 10000.000 | 0.00        |
| 0.091     | 0.00        | 0.955     | 0.00        | 10.000    | 0.57        | 104.713   |             | 1096.478  | 0.00        |           |             |
| 0.105     | 0.00        | 1.096     | 0.00        | 11.482    |             | 120.226   |             | 1258.925  | 0.00        |           |             |

ภาพที่ ๔๔ ผลวิเคราะห์การกระจายขนาดอนุภาคเศษแก้วสีเขียว



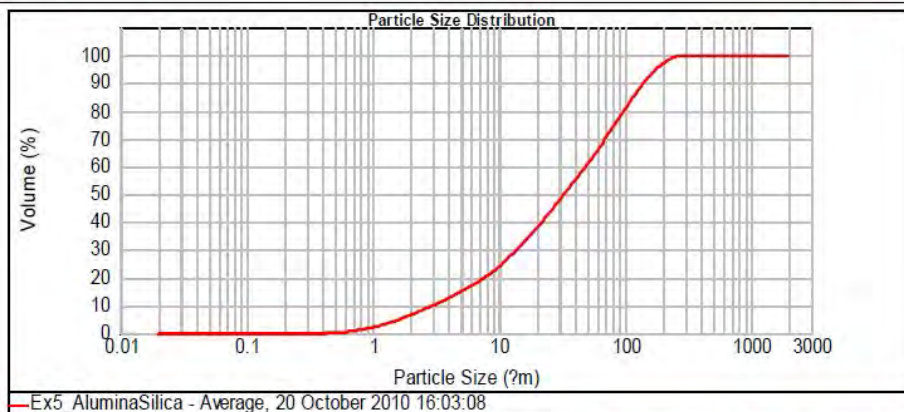


### Result Analysis Report

**Sample Name:** Ex5\_AluminaSilica - Average  
**Sample Source & type:**  
**Sample bulk lot ref:**  
**SOP Name:**  
**Measured:** 20 October 2010 16:03:08  
**Measured by:** User  
**Analysed:** 20 October 2010 16:03:09  
**Result Source:** Averaged

|  |  |  |                                 |
|--|--|--|---------------------------------|
| <b>Particle Name:</b><br>Alumina                         | <b>Accessory Name:</b><br>Hydro 2000SM (A)       | <b>Analysis model:</b><br>General purpose      | <b>Sensitivity:</b><br>Normal   |
| <b>Particle RI:</b><br>1.780                             | <b>Absorption:</b><br>0.1                        | <b>Size range:</b><br>0.020 to 2000.000 um     | <b>Obscuration:</b><br>9.18 %   |
| <b>Dispersant Name:</b><br>Water                         | <b>Dispersant RI:</b><br>1.330                   | <b>Weighted Residual:</b><br>0.631 %           | <b>Result Emulation:</b><br>Off |
| <b>Concentration:</b><br>0.0092 %Vol                     | <b>Span :</b><br>4.196                           | <b>Uniformity:</b><br>1.29                     | <b>Result units:</b><br>Volume  |
| <b>Specific Surface Area:</b><br>0.736 m <sup>2</sup> /g | <b>Surface Weighted Mean D[3,2]:</b><br>8.153 um | <b>Vol. Weighted Mean D[4,3]:</b><br>54.276 um |                                 |

d(0.1): 3.008 um      d(0.5): 32.500 um      d(0.9): 139.376 um



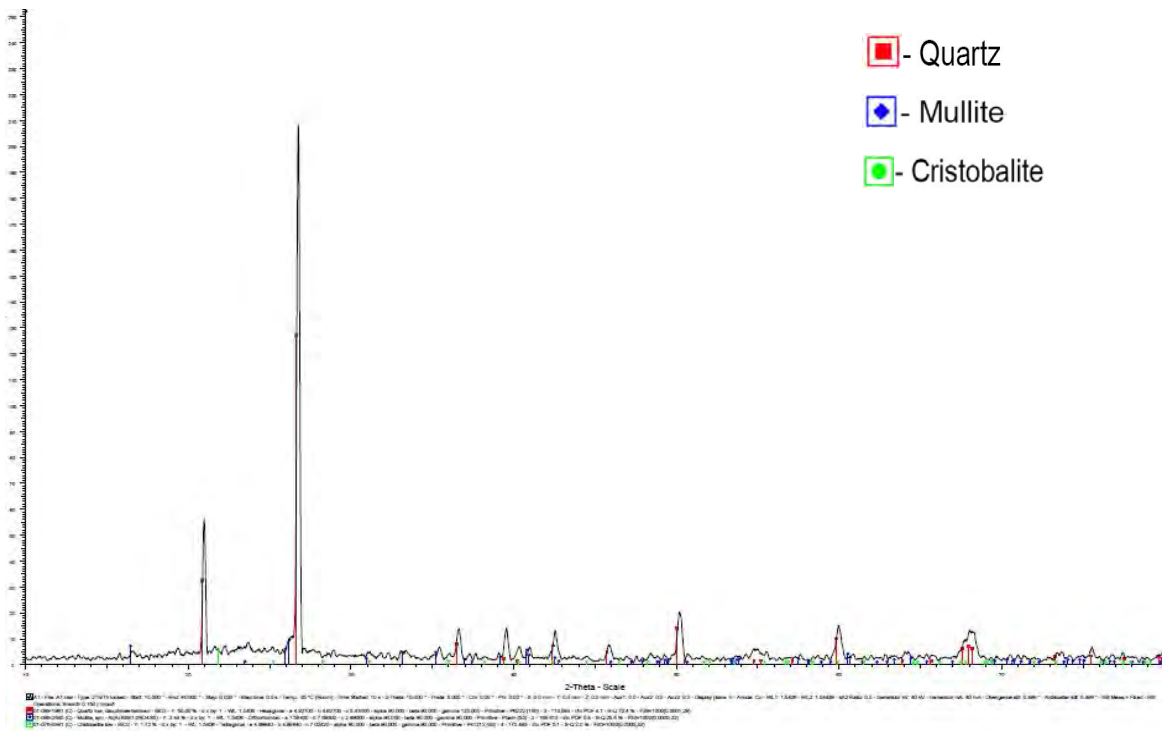
Ex5\_AluminaSilica - Average, 20 October 2010 16:03:08

| Size (µm) | Volume In % | Size (µm) | Volume In % | Size (µm) | Volume In % | Size (µm) | Volume In % | Size (µm) | Volume In % | Size (µm) | Volume In % |
|-----------|-------------|-----------|-------------|-----------|-------------|-----------|-------------|-----------|-------------|-----------|-------------|
| 0.010     | 0.00        | 0.105     | 0.00        | 1.096     | 0.76        | 11.482    | 2.54        | 120.226   | 3.74        | 1258.925  | 0.00        |
| 0.011     | 0.00        | 0.120     | 0.00        | 1.259     | 0.84        | 13.183    | 2.76        | 138.038   | 3.29        | 1445.440  | 0.00        |
| 0.013     | 0.00        | 0.138     | 0.00        | 1.445     | 0.93        | 15.136    | 2.97        | 156.489   | 2.71        | 1659.587  | 0.00        |
| 0.015     | 0.00        | 0.158     | 0.00        | 1.660     | 1.01        | 17.378    | 3.16        | 181.970   | 2.05        | 1905.461  | 0.00        |
| 0.017     | 0.00        | 0.182     | 0.00        | 1.905     | 1.08        | 19.963    | 3.32        | 208.930   | 1.41        | 2187.762  | 0.00        |
| 0.020     | 0.00        | 0.209     | 0.00        | 2.188     | 1.14        | 22.909    | 3.43        | 236.883   | 0.77        | 2511.886  | 0.00        |
| 0.023     | 0.00        | 0.240     | 0.00        | 2.512     | 1.20        | 26.303    | 3.60        | 275.423   | 0.02        | 2884.032  | 0.00        |
| 0.028     | 0.00        | 0.275     | 0.00        | 2.884     | 1.25        | 30.200    | 3.53        | 316.228   | 0.00        | 3311.311  | 0.00        |
| 0.030     | 0.00        | 0.316     | 0.00        | 3.311     | 1.31        | 34.674    | 3.54        | 363.078   | 0.00        | 3801.894  | 0.00        |
| 0.035     | 0.00        | 0.363     | 0.00        | 3.802     | 1.38        | 39.811    | 3.55        | 418.869   | 0.00        | 4365.158  | 0.00        |
| 0.040     | 0.00        | 0.417     | 0.00        | 4.365     | 1.45        | 45.709    | 3.60        | 478.630   | 0.00        | 5011.872  | 0.00        |
| 0.046     | 0.00        | 0.479     | 0.00        | 5.012     | 1.55        | 52.481    | 3.69        | 549.541   | 0.00        | 5754.369  | 0.00        |
| 0.052     | 0.00        | 0.550     | 0.00        | 5.754     | 1.66        | 60.256    | 3.82        | 630.957   | 0.00        | 6606.934  | 0.00        |
| 0.060     | 0.00        | 0.631     | 0.00        | 6.607     | 1.80        | 69.183    | 3.97        | 724.436   | 0.00        | 7585.778  | 0.00        |
| 0.069     | 0.00        | 0.724     | 0.00        | 7.589     | 1.96        | 79.433    | 4.09        | 831.764   | 0.00        | 8709.636  | 0.00        |
| 0.079     | 0.00        | 0.832     | 0.00        | 8.710     | 2.13        | 91.201    | 4.12        | 954.963   | 0.00        | 10000.000 | 0.00        |
| 0.091     | 0.00        | 0.955     | 0.00        | 10.000    | 2.33        | 104.713   | 4.01        | 1098.478  | 0.00        |           |             |
| 0.105     | 0.00        | 1.096     | 0.00        | 11.482    | 2.54        | 120.226   | 3.74        | 1258.925  | 0.00        |           |             |

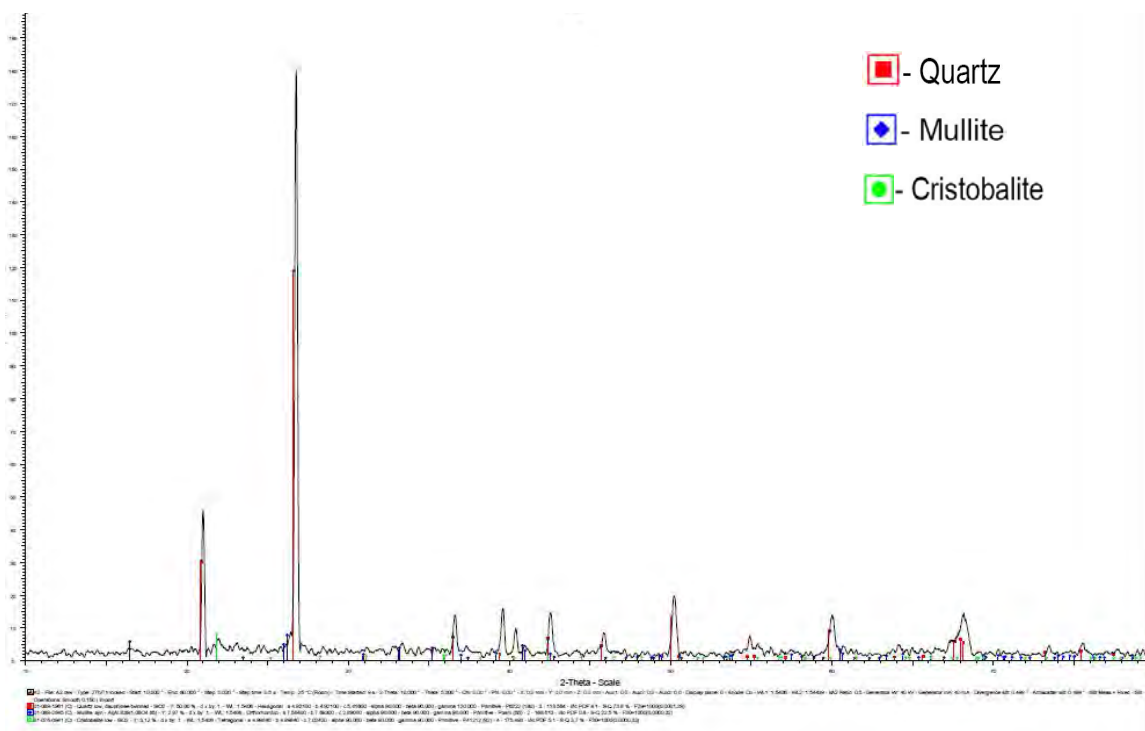
ภาพที่ ผ5 ผลวิเคราะห์การกระจายขนาดอนุภาคซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว

ภาคผนวก ง

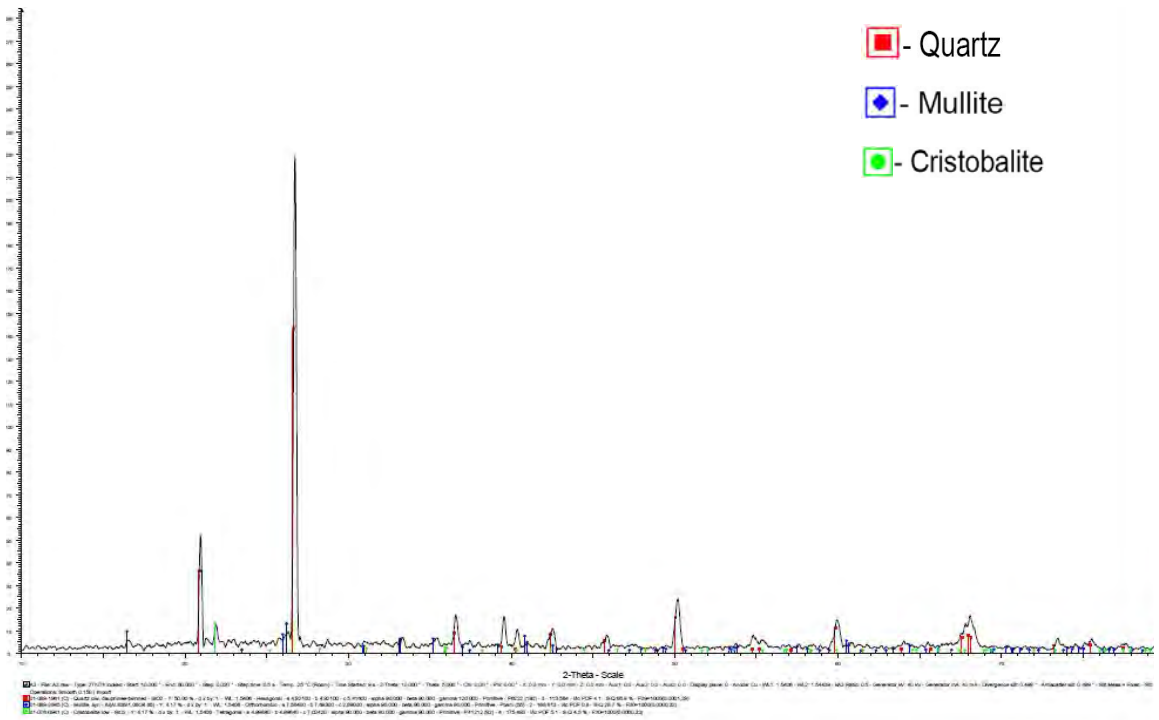
ข้อมูลผลการวิเคราะห์เอ็กซเรย์ดิฟแฟรคชั่น (XRD)



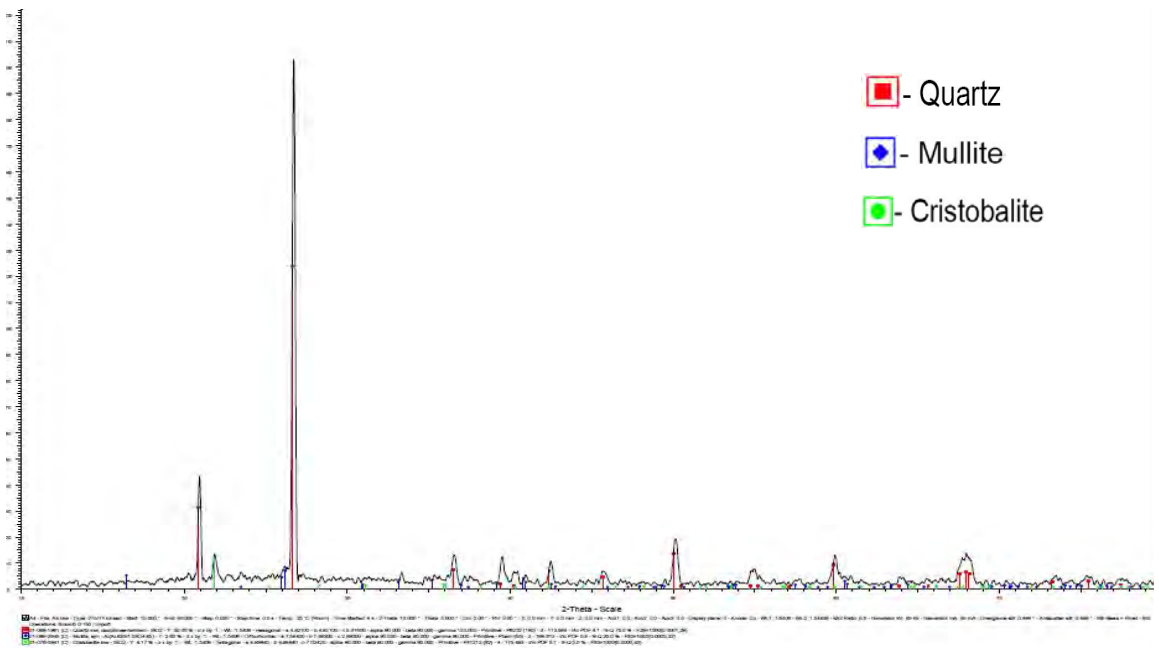
ภาพที่ ๖6 กราฟเอ็กซเรย์ดิฟแฟรกชันของกระเบื้องที่ทดแทนด้วยเศษแก้วสีเขียวและซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว 0:0 เผาที่ 1150 องศาเซลเซียส



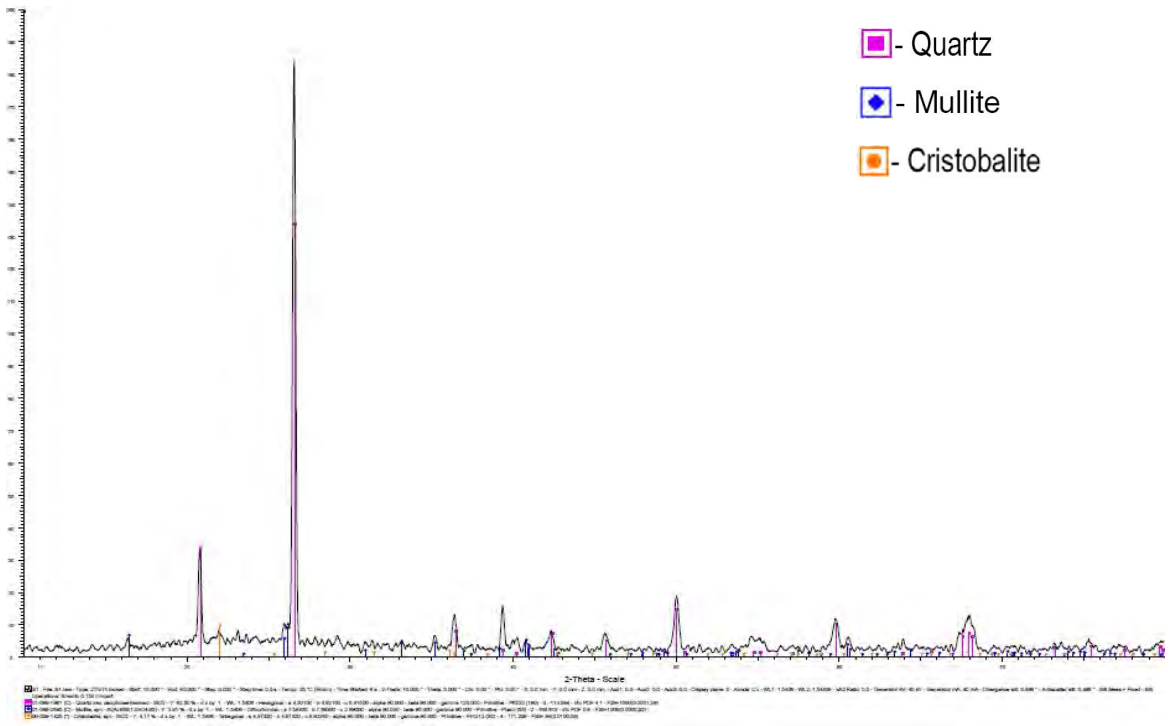
ภาพที่ ๖7 กราฟเอ็กซเรย์ดิฟแฟรกชันของกระเบื้องที่ทดแทนด้วยเศษแก้วสีเขียวและซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว 15:85 เผาที่ 1150 องศาเซลเซียส



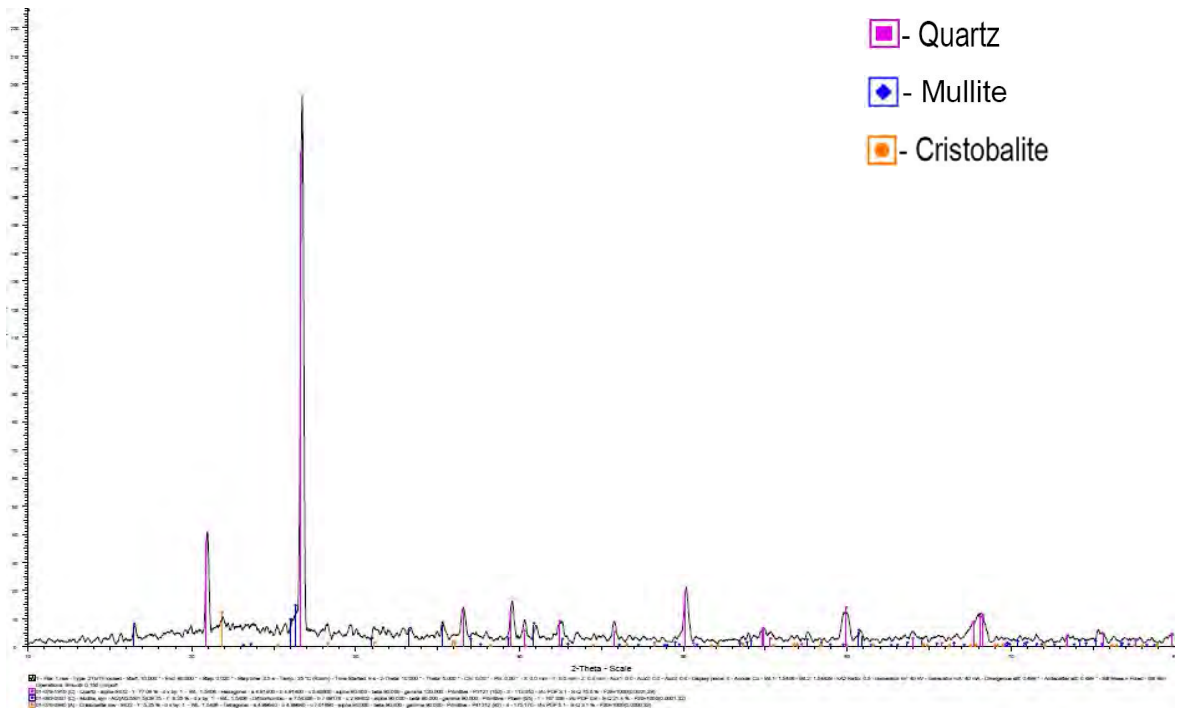
ภาพที่ ๘8 กราฟเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกชันของกระเบื้องที่ทดแทนด้วยเศษแก้วสีเขียวและซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว 25:75 เวกที่ 1150 องศาเซลเซียส



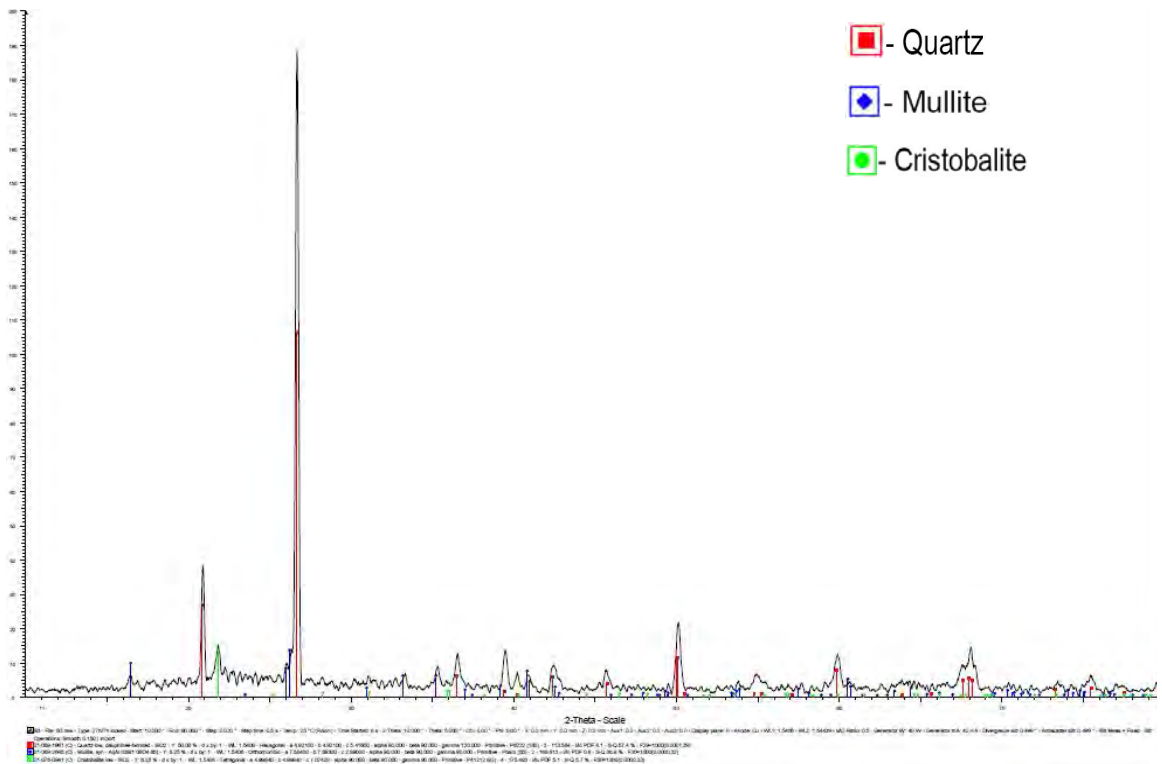
ภาพที่ ๘9 กราฟเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกชันของกระเบื้องที่ทดแทนด้วยเศษแก้วสีเขียวและซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว 35:65 เวกที่ 1150 องศาเซลเซียส



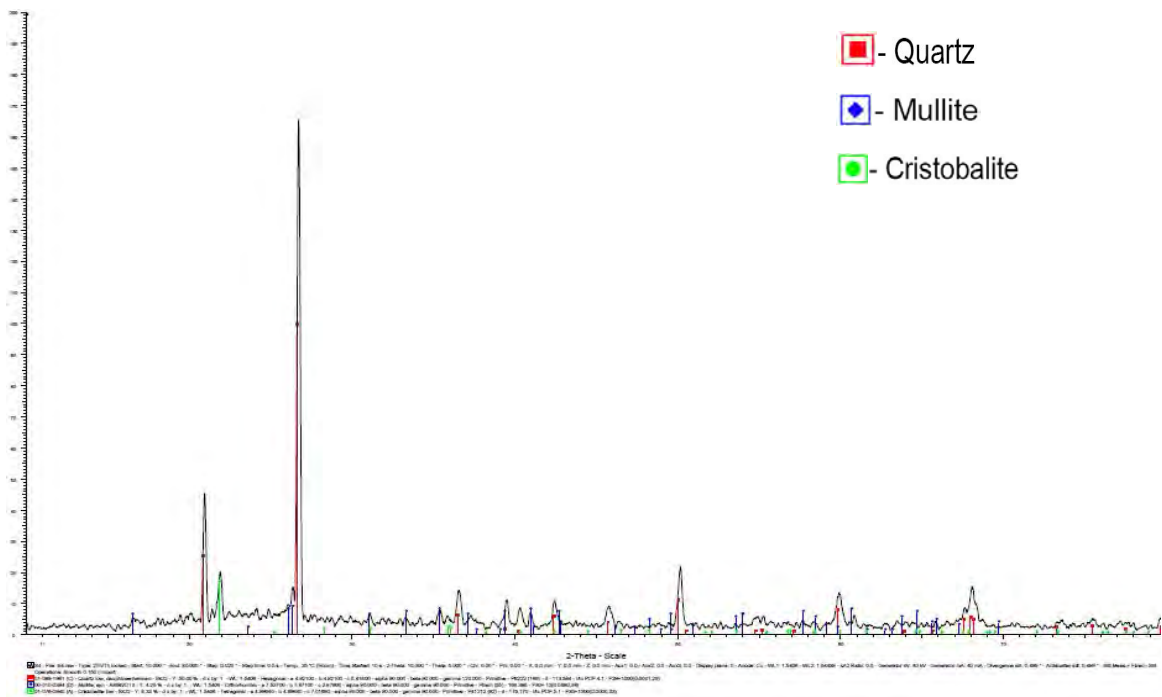
ภาพที่ ๑๑0 กราฟเอกซเรย์ดิฟแฟรคชั่นของกระเบื้องที่ทดแทนด้วยเศษแก้วสีเขียวและซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว 0:0 เเผาที่ 1200 องศาเซลเซียส



ภาพที่ ๑๑๑ กราฟเอกซเรย์ดิฟแฟรคชั่นของกระเบื้องที่ทดแทนด้วยเศษแก้วสีเขียวและซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว 15:85 เเผาที่ 1200 องศาเซลเซียส

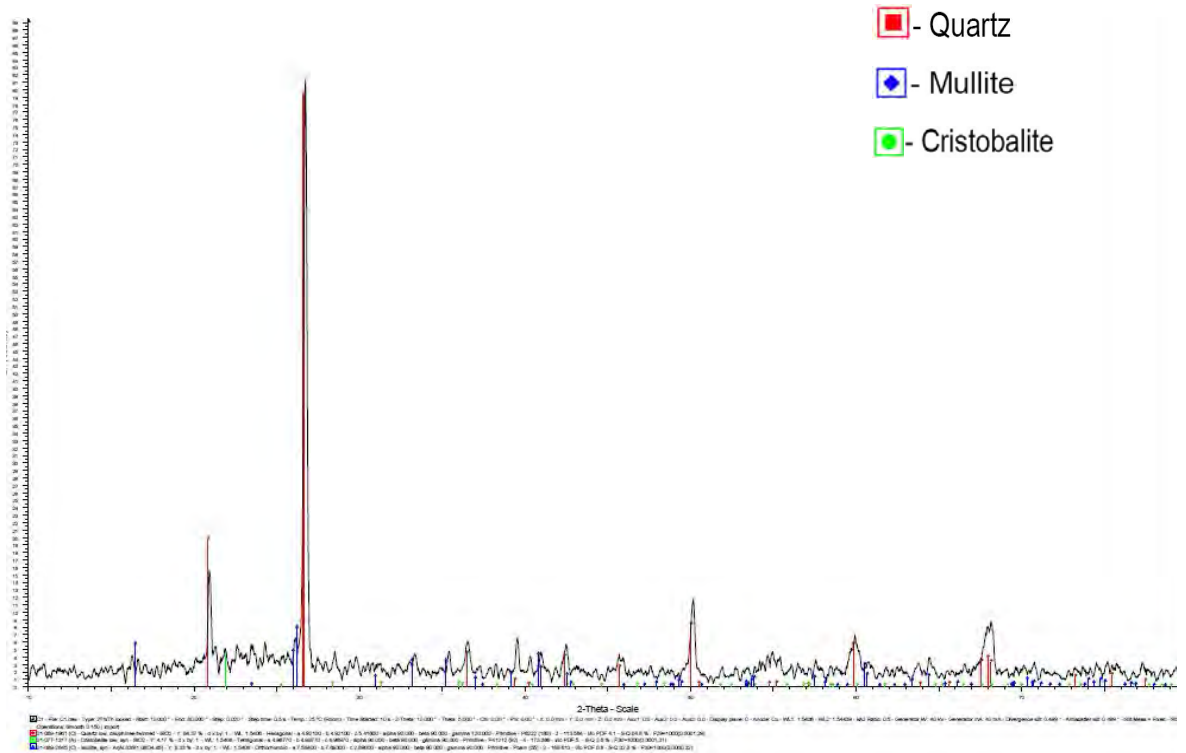


ภาพที่ ๑๒ กราฟเอ็กซเรย์ดิฟแฟรคชั่นของกระเบื้องที่ทดแทนด้วยเศษแก้วสีเขียวและซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว 25:75 เเผที่ 1200 องศาเซลเซียส

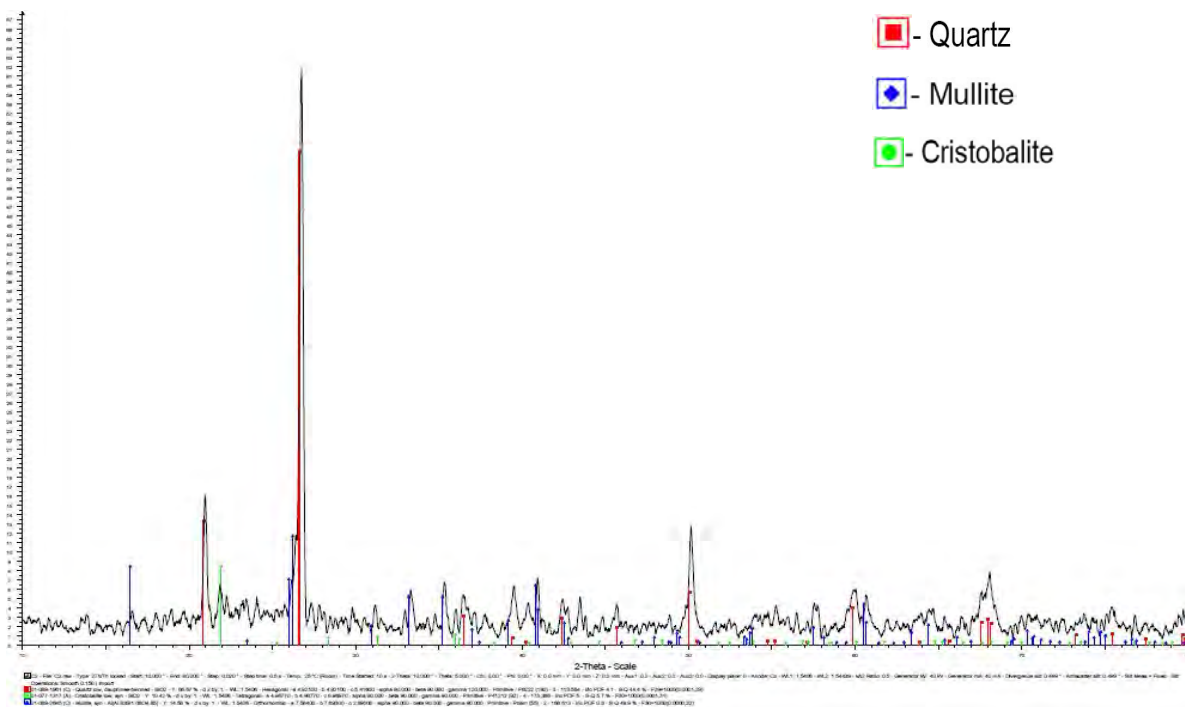


ภาพที่ ๑๓ กราฟเอ็กซเรย์ดิฟแฟรคชั่นของกระเบื้องที่ทดแทนด้วยเศษแก้วสีเขียวและซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว 35:65 เเผที่ 1200 องศาเซลเซียส

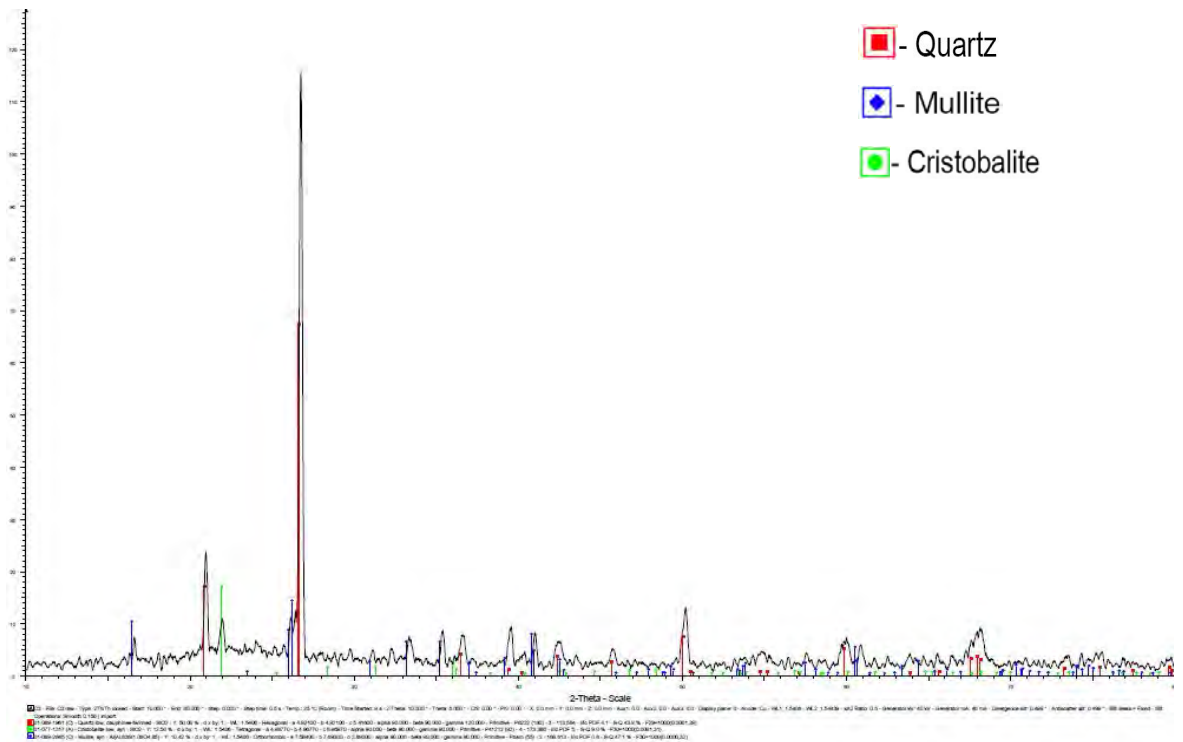




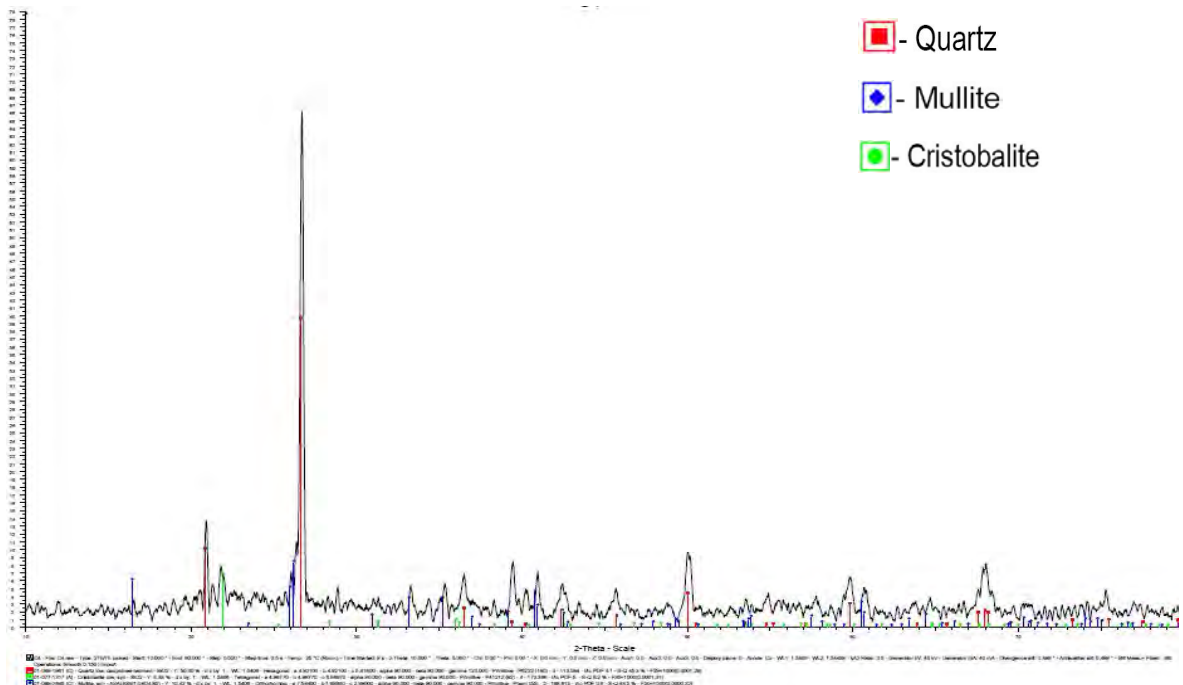
ภาพที่ ๑14 กราฟเอกซเรย์ดิฟแฟรกชันของกระเบื้องที่ทดแทนด้วยเศษแก้วสีเขียวและซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว 0:00 เฉากที่ 1250 องศาเซลเซียส



ภาพที่ ๑15 กราฟเอกซเรย์ดิฟแฟรกชันของกระเบื้องที่ทดแทนด้วยเศษแก้วสีเขียวและซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว 15:85 เฉากที่ 1250 องศาเซลเซียส



ภาพที่ ๑16 กราฟเอกซเรย์ดิฟแฟรคชันของกระเบื้องที่ทดแทนด้วยเศษแก้วสีเขียวและซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว  
 25:75 เพาที่ 1250 องศาเซลเซียส



ภาพที่ ๑17 กราฟเอกซเรย์ดิฟแฟรคชันของกระเบื้องที่ทดแทนด้วยเศษแก้วสีเขียวและซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว  
 35:65 เพาที่ 1250 องศาเซลเซียส



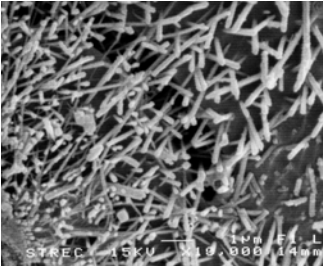
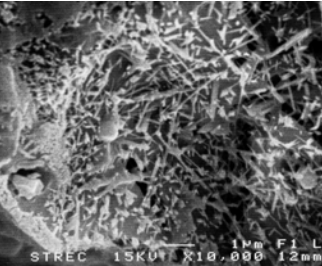
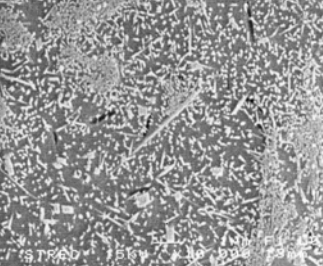
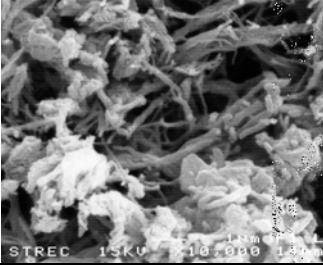

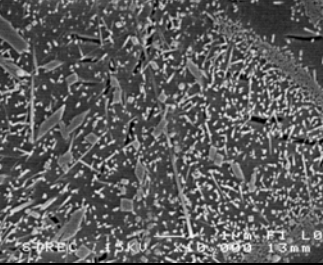
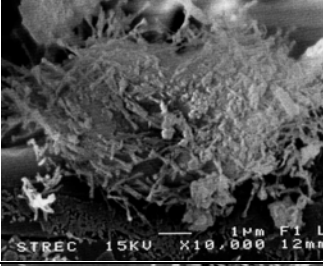
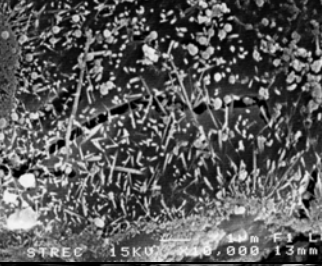
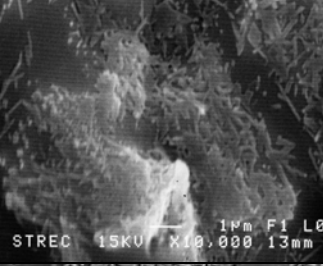
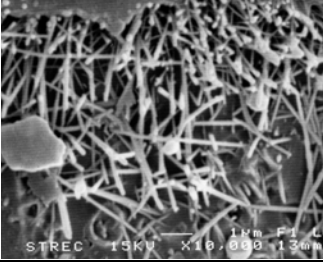

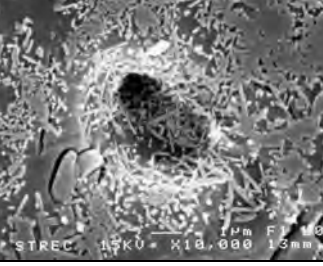
#### ภาคผนวก จ

ข้อมูลผลการวิเคราะห์ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน

ตารางที่ ๒21 ภาพขยาย 1500 เท่า ของกระเบื้องที่ผ่านมาตรฐานผลิตภัณฑ์กระเบื้องดินเผาปูพื้นและบุผนัง จากการทดแทนด้วยเศษแก้วสีเขียวและซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วตามอุณหภูมิการเผาต่างๆ

| อัตราส่วนการ<br>ทดแทน<br>เศษแก้วสีเขียว:<br>ซิลิกาอะลู<br>มินา<br>ที่ใช้แล้ว | อุณหภูมิในการเผา(องศาเซลเซียส) |      |      |
|--|--------------------------------|------|------|
|  | 1250                           | 1200 | 1150 |
| 0:0  |                                |      |      |
| 15:85  |                                |      |      |
| 25:75  |                                |      |      |
| 35:65  |                                |      |      |

ตารางที่ ๒๒ ภาพขยาย 10000 เท่า ของกระเบื้องที่ผ่านมาตรฐานผลิตภัณฑ์กระเบื้องดินเผาปูพื้นและบุผนัง จากการทดแทนด้วยเศษแก้วสีเขียวและซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วตามอุณหภูมิการเผาต่างๆ

| อัตราส่วนการ<br>ทดแทน<br>เศษแก้วสีเขียว:<br>ซิลิกาอะลู<br>มินา<br>ที่ใช้แล้ว | อุณหภูมิในการเผา(องศาเซลเซียส)  |  |   |
|--|---|--|---|
|  | 1250  | 1200   | 1150  |
| 0:0  |    |    |    |
| 15:85  |   |   |   |
| 25:75  |  |  |  |
| 35:65  |  |  |  |

ภาคผนวก จ  
ภาพอุปกรณ์ และเครื่องมือในงานวิจัย



ภาพที่ ผ18 ททรายแก้ว



ภาพที่ ผ19 เศษแก้วสีเขียว



ภาพที่ ผ20 เฟลด์สปาร์



ภาพที่ ผ21 ซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว



ภาพที่ ผ22 ดินดำ



ภาพที่ ผ23 วัสดุดิบหลังผสม(เฟลด์สปาร์)



ภาพที่ ผ24 วัสดุดิบหลังผสม  
(เศษแก้วสีเขียวและซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว)





(ก) เศษแก้วสีเขียว:ซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว 0:0



(ข) เศษแก้วสีเขียว:ซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว 15:85

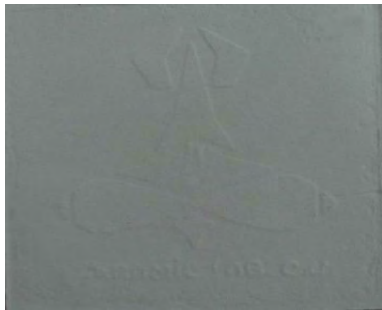


(ค) เศษแก้วสีเขียว:ซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว 25:75

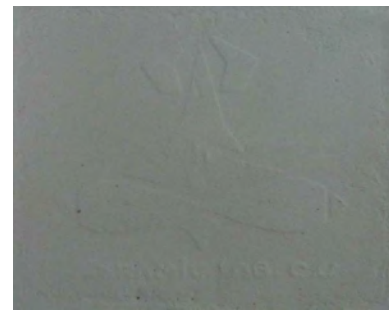


(ง) เศษแก้วสีเขียว:ซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว 35:65

ภาพที่ ๒๕ กระจกเบี่ยงที่ทดแทนด้วยเศษแก้วสีเขียวและซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว เเผที่ 1250 องศาเซลเซียส



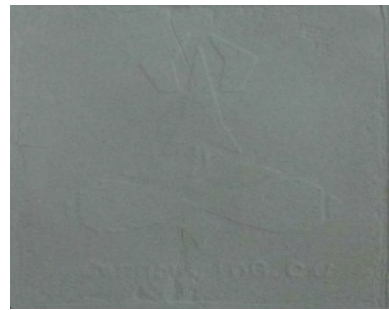
(ก) เศษแก้วสีเขียว:ซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว 0:0



(ข) เศษแก้วสีเขียว:ซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว 15:85



(ค) เศษแก้วสีเขียว:ซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว 25:75



(ง) เศษแก้วสีเขียว:ซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว 35:65

ภาพที่ ๒๖ กระจกเบี่ยงที่ทดแทนด้วยเศษแก้วสีเขียวและซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว เเผที่ 1200 องศาเซลเซียส



(ก) เศษแก้วสีเขียว:ชิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว 0:0



(ข) เศษแก้วสีเขียว:ชิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว 15:85



(ค) เศษแก้วสีเขียว:ชิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว 25:75

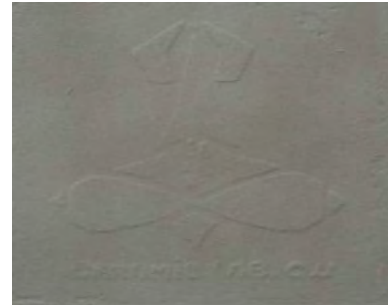


(ง) เศษแก้วสีเขียว:ชิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว 35:65

ภาพที่ ๘27 กระเบื้องที่ทดแทนด้วยเศษแก้วสีเขียวและชิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว เเผที่ 1150 องศาเซลเซียส



(ก) เศษแก้วสีเขียว:ชิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว 0:0



(ข) เศษแก้วสีเขียว:ชิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว 15:85



(ค) เศษแก้วสีเขียว:ชิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว 25:75



(ง) เศษแก้วสีเขียว:ชิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว 35:65

ภาพที่ ๘28 กระเบื้องที่ทดแทนด้วยเศษแก้วสีเขียวและชิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว เเผที่ 1100 องศาเซลเซียส



ภาพที่ ผ29 เครื่องบดขนาดเล็ก (Tube Mill)



ภาพที่ ผ30 เครื่องร่อนคัดขนาด



ภาพที่ ผ31 หม้อบดผสมวัสดุดิบ



ภาพที่ ผ32 เครื่องบดผสมวัสดุดิบ



ภาพที่ ผ33 เครื่องอัดขึ้นรูปกระเบื้อง



ภาพที่ ผ34 เตาเผาไฟฟ้า



### ภาคผนวก ช

การแสดงวิธีคำนวณการหาผลองค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบ  
และการหาองค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบหลังผสม

### การแสดงวิธีคำนวณการหาผลองค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบ

ตารางที่ ๒๒๓ องค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบ ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์

| องค์ประกอบทางเคมี              | ดินดำแม่แซน | ทรายแก้ว | เฟลด์สปาร์ | แก้วสีเขียว | ซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว |
|--------------------------------|-------------|----------|------------|-------------|---------------------------|
| SiO <sub>2</sub>               | 60.04       | 98.90    | 72.16      | 70.97       | 11.70                     |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 23.32       | 0.45     | 16.81      | 1.21        | 54.02                     |
| Na <sub>2</sub> O              | 0.31        | 0.02     | 8.00       | 15.12       | 3.17                      |
| CaO                            | 0.26        | 0.03     | 1.07       | 10.87       | 0.42                      |
| MgO                            | 0.67        | 0.04     | 0.21       | 0.84        |                           |
| K <sub>2</sub> O               | 2.02        | 0.03     | 1.01       | 0.21        | 0.08                      |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 1.69        | 0.04     | 0.22       | 0.29        | 0.05                      |
| Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | -           | -        | 0.00       | 0.24        | -                         |
| PbO                            | -           | -        | -          | 0.02        | -                         |
| TiO <sub>2</sub>               | 0.63        | 0.05     | 0.21       | 0.09        | -                         |
| SO <sub>3</sub>                | -           | -        | 0.00       | -           | 4.41                      |
| %                              | 88.94       | 99.56    | 99.69      | 99.86       | 73.85                     |

ตารางที่ ๒๒๔ การปรับอัตราส่วนองค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบให้เป็นร้อยละ 100

| องค์ประกอบทางเคมี              | ดินดำแม่แซน | ทรายแก้ว | เฟลด์สปาร์ | แก้วสีเขียว | ซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว |
|--------------------------------|-------------|----------|------------|-------------|---------------------------|
| SiO <sub>2</sub>               | 67.51       | 99.34    | 72.38      | 71.07       | 15.84                     |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 26.22       | 0.45     | 16.86      | 1.21        | 73.15                     |
| Na <sub>2</sub> O              | 0.35        | 0.02     | 8.02       | 15.14       | 4.29                      |
| CaO                            | 0.29        | 0.03     | 1.07       | 10.89       | 0.57                      |
| MgO                            | 0.75        | 0.04     | 0.21       | 0.84        | 0.00                      |
| K <sub>2</sub> O               | 2.27        | 0.03     | 1.01       | 0.21        | 0.11                      |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 1.90        | 0.04     | 0.22       | 0.29        | 0.07                      |
| Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0.00        | 0.00     | 0.00       | 0.24        | 0.00                      |
| PbO                            | 0.00        | 0.00     | 0.00       | 0.02        | 0.00                      |
| TiO <sub>2</sub>               | 0.71        | 0.05     | 0.21       | 0.09        | 0.00                      |
| SO <sub>3</sub>                | 0.00        | 0.00     | 0.00       | 0.00        | 5.97                      |
| %                              | 100         | 100      | 100        | 100         | 100                       |

### การหาค่าประกอบทางเคมีของวัสดุดิบหลังผสมแสดงเฉพาะปริมาณของ SiO<sub>2</sub>

เนื่องจากในงานวิจัยนี้ใช้อัตราส่วนดินดำต่อเฟลด์สปาร์เท่ากับ 8 ต่อ 5 คิดเป็นร้อยละ 60 และทรายแก้วคิดเป็นร้อยละ 40

$$\begin{aligned}
 \text{จะได้ ทรายแก้วคิดเป็น} &= 40 \% \\
 \text{ดินดำคิดเป็น} &= (8 \times 60) / 13 \\
 &= 36.92 \% \\
 \text{เฟลด์สปาร์คิดเป็น} &= (5 \times 60) / 13 \\
 &= 23.08 \%
 \end{aligned}$$

ตัวอย่าง : จากอัตราการผลิตแทนเฟลด์สปาร์ด้วยเศษแก้วสีเขียวและซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว 15:85

$$\begin{aligned}
 \text{ดังนั้น เศษแก้วสีเขียวคิดเป็น} &= (15 \times 23.08) / 100 \\
 &= 3.46 \% \\
 \text{ซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วคิดเป็น} &= (85 \times 23.08) / 100 \\
 &= 19.62 \%
 \end{aligned}$$

1. จากส่วนผสมวัสดุดิบใช้แก้ว 3.46 % และในแก้วมีองค์ประกอบทางเคมีของ SiO<sub>2</sub> 71.07%

$$\begin{aligned}
 \text{ดังนั้น คิดเป็น SiO}_2 \text{ ที่มาจากแก้ว} &= (3.46 \times 71.07) / 100 \\
 &= 2.46 \%
 \end{aligned}$$

2. จากส่วนผสมวัสดุดิบใช้ซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว 19.62 % และในซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว มีองค์ประกอบทางเคมีของ SiO<sub>2</sub> 15.84%

$$\begin{aligned}
 \text{ดังนั้น คิดเป็น SiO}_2 \text{ ที่มาจากซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว} &= (19.62 \times 15.84) / 100 \\
 &= 3.11 \%
 \end{aligned}$$

3. จากส่วนผสมวัตถุดิบใช้ดินดำแม่แซน 36.92 % และในดินดำแม่แซน มีองค์ประกอบทางเคมีของ  $\text{SiO}_2$  67.51%

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

4. จากส่วนผสมวัตถุดิบ ใช้ทรายแก้ว 40 % และในทรายแก้วมีองค์ประกอบทางเคมีของ  $\text{SiO}_2$  99.34%

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

$$\begin{aligned} \text{5. ผลรวมของ } \text{SiO}_2 \text{ ที่ได้จากวัตถุดิบทั้ง 3 ชนิด} &= 2.46 + 3.11 + 24.92 + 39.73 \\ &= 70.23 \% \end{aligned}$$

6. องค์ประกอบทางเคมีตัวอื่น ใช้หลักการเดียวกันในการคำนวณ

จากตารางที่ 4.2 องค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบหลังผสมด้วยการคำนวณ

| วัตถุดิบหลังผสม | องค์ประกอบทางเคมี (ร้อยละโดยน้ำหนัก) |                       |              |                         |              |                      |                         |                         |              |                |
|-----------------|--------------------------------------|-----------------------|--------------|-------------------------|--------------|----------------------|-------------------------|-------------------------|--------------|----------------|
|                 | $\text{SiO}_2$                       | $\text{Na}_2\text{O}$ | $\text{CaO}$ | $\text{Al}_2\text{O}_3$ | $\text{MgO}$ | $\text{K}_2\text{O}$ | $\text{Fe}_2\text{O}_3$ | $\text{Cr}_2\text{O}_3$ | $\text{PbO}$ | $\text{TiO}_2$ |
| สูตร 1 (0:0)    | 81.36                                | 1.99                  | 0.37         | 13.75                   | 0.34         | 1.08                 | 0.77                    | 0.00                    | 0.00         | 0.03           |
| สูตร 2 (15:85)  | 70.23                                | 1.50                  | 0.61         | 24.25                   | 0.32         | 0.88                 | 0.74                    | 0.01                    | 0.00         | 0.28           |
| สูตร 3 (25:75)  | 71.50                                | 1.75                  | 0.85         | 22.59                   | 0.34         | 0.88                 | 0.75                    | 0.01                    | 0.00         | 0.29           |
| สูตร 4 (35:65)  | 72.78                                | 2.00                  | 1.08         | 20.93                   | 0.36         | 0.88                 | 0.75                    | 0.02                    | 0.00         | 0.29           |

ภาคผนวก ซ  
ศึกษาการชะละลายของโลหะหนักในซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว  
โดยวิธี Waste Extraction Test (WET)

## การทดสอบการชะละลายของโลหะหนักในซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วโดยวิธี Waste Extraction Test (WET)

อ้างอิงตามมาตรฐาน ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม พ.ศ. 2548

### ขั้นตอนการทดลอง

#### 1. การเตรียมน้ำสกัด

ใช้สารละลาย 0.2 โมล โซเดียมซัลเฟตที่พีเอช  $5.0 \pm 0.1$  เป็นน้ำสกัดที่ใช้ใน วิธี WET (WET extraction solution) ซึ่งเตรียมจากการนำสารละลายกรดซัลฟิวริกละลายในน้ำปราศจากไอออน ปริมาณที่เหมาะสมปรับพีเอชให้เป็น 5 ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 4 นอร์มัลแล้วใส่ลงในขวด

#### 2. การสกัดด้วยวิธี Waste Extraction Test (WET) มีขั้นตอนดังนี้

2.1) นำตัวอย่าง 50 กรัมใส่ลงในภาชนะที่ทำจากแก้วหรือพลาสติกประเภทโพลีเอทิลีน

2.2) เติม 500 มิลลิลิตรของน้ำสกัดลงในตัวอย่าง จากนั้นนำของผสมไปได้ อากาศด้วยก๊าซไนโตรเจน เป็นเวลา 15 นาที และนำไปเขย่าบนเครื่องเขย่า (table shaker) เป็นเวลา 48 ชั่วโมง

2.3) นำของผสมมารองผ่านแผ่นกรองเมมเบรนที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางของรูกรอง 0.45 ไมครอน โดยใช้การดูดจากฟลาส (suction flask) ที่สะอาด

2.4) นำตัวอย่างจากข้อ 2.3 ถ่ายสารละลายที่กรองได้ลงในขวดโพลีเอทิลีนโดยนำไป ตรวจวิเคราะห์หาปริมาณโลหะหนัก

### ภาคผนวก ฅ

การแสดงวิธีคำนวณค่าใช้จ่ายเบื้องต้นในการผลิตกระเบื้องเซรามิก

## การแสดงวิธีคำนวณค่าใช้จ่ายเบื้องต้นในการผลิตกระเบื้องเซรามิก

ตารางที่ ๒25 ค่าใช้จ่ายเบื้องต้นของกระเบื้องโดยใช้เฟลด์สปาร์

| ค่าใช้จ่าย   | ราคาต่อหน่วย            | เฟลด์สปาร์  |                                      |
|--|-------------------------|-------------|--------------------------------------|
|  |                         | จำนวนที่ใช้ | ราคา                                 |
| ดินดำ  | 2.50 บาท/กก. [a]        | 900 กรัม    | 2.25 บาท/กก.                         |
| เฟลด์สปาร์   | 3.60 บาท/กก. [b]        | 562.5 กรัม  | 2.03 บาท/กก.                         |
| ทรายอบแห้ง   | 0.65 บาท/กก. [c]        | 975 กรัม    | 0.63 บาท/กก.                         |
| รวมค่าใช้จ่ายของวัตถุดิบ                                       | -                       | -           | 4.91 บาท/กก.                         |
| ราคาค่าวัตถุดิบ/แผ่น   | -                       | -           | 0.23 บาท/แผ่น                        |
| *ค่าพลังงานที่ใช้ในการอบ<br>(กำลังไฟฟ้า = 1.50 กิโลวัตต์)      | 2.7 บาท/ชม. [d]         | 13 ชม.      | 13 ชม. x 2.7 บาท/ชม. = 35.1 บาท      |
| *ค่าพลังงานที่ใช้ในเตาอบ<br>(กำลังไฟฟ้า = 3.00 กิโลวัตต์)      | 5.4 บาท/ชม. [e]         | 36 ชม.      | 36 ชม. x 5.4 บาท/ชม. = 194.4 บาท     |
| *ค่าพลังงานที่ใช้ในการขึ้นรูป<br>(กำลังไฟฟ้า = 3.10 กิโลวัตต์) | 5.58 บาท/ชม. [f]        | 5.30 ชม.    | 5.30 ชม. x 5.58 บาท/ชม. = 29.57บาท   |
| *เตาเผาไฟฟ้า 1150 °ซ<br>(กำลังไฟฟ้า = 5.71 กิโลวัตต์)          | 10.28 บาท/ชม. [g]       | 6.64 ชม.    | 6.64 ชม. x 10.28 บาท/ชม. = 68.26บาท  |
| *เตาเผาไฟฟ้า 1200 °ซ<br>(กำลังไฟฟ้า = 5.73 กิโลวัตต์)          | 10.31 บาท/ชม. [h]       | 6.92 ชม.    | 6.92 ชม. x 10.31 บาท/ชม. = 71.35 บาท |
| *เตาเผาไฟฟ้า 1250 °ซ<br>(กำลังไฟฟ้า = 5.75 กิโลวัตต์)          | 10.35 บาท/ชม. [i]       | 7.19 ชม.    | 7.19 ชม x 10.35 บาท/ชม. = 74.42 บาท  |
| ราคาของพลังงาน/แผ่น  | 5.52 บาท/แผ่น (1150 °ซ) |             |                                      |
|  | 5.63 บาท/แผ่น (1200 °ซ) |             |                                      |
|  | 5.74 บาท/แผ่น (1250 °ซ) |             |                                      |
| ราคากระเบื้อง/แผ่น   | 5.75 บาท/แผ่น (1150 °ซ) |             |                                      |
|  | 5.86 บาท/แผ่น (1200 °ซ) |             |                                      |
|  | 5.97 บาท/แผ่น (1250 °ซ) |             |                                      |

หมายเหตุ : ไม่ได้คำนวณราคาค่าขนส่งของวัตถุดิบ ได้แก่ ดินดำ เฟลด์สปาร์ และทรายอบแห้ง

: \*เตาเผาไฟฟ้า ใช้เป็นเตาเผาสำหรับการทดลองในงานวิจัยนี้



### การคำนวณค่าใช้จ่ายเบื้องต้นของกระเบื้องโดยใช้เฟลด์สปาร์

$$\begin{aligned}
 \text{ราคาตัววัตถุดิบ/แผ่น} &= \{[a]*\text{จำนวนที่ใช้} + [b]*\text{จำนวนที่ใช้} + [c]*\text{จำนวนที่ใช้}\} / 21(\text{แผ่น}) \\
 &= [2.50 \text{ บาท/กก.}] * [900 \text{ กรัม}/1000 \text{ กรัม}] + [3.60 \text{ บาท/กก.}] * [562.5 \\
 &\quad \text{กรัม}/1000 \text{ กรัม}] + [0.65 \text{ บาท/กก.}] * [975 \text{ กรัม}/1000 \text{ กรัม}] \\
 &= \{2.25 + 2.03 + 0.63\} / 21(\text{แผ่น}) \\
 &= 4.91 / 21(\text{แผ่น}) \\
 &= 0.23 \text{ บาท/แผ่น}
 \end{aligned}$$

หน่วยค่าไฟฟ้า(Unit) = กิโลวัตต์-ชั่วโมง (kW-hr), ค่าไฟฟ้าคิดราคาเท่ากับ 1.8 บาทต่อหน่วย (อ้างอิงข้อมูลจากการไฟฟ้านครหลวง, 2554)

\*ค่าพลังงานที่ใช้ในการบด (กำลังไฟฟ้า = 1.50 กิโลวัตต์), จำนวนที่ใช้ 13 ชม.

$$\begin{aligned}
 \text{ราคาต่อหน่วย} &= 1.8 \text{ บาทต่อกิโลวัตต์-ชั่วโมง} \times 1.50 \text{ กิโลวัตต์} \\
 &= 2.7 \text{ บาท/ชม.} \\
 &= 13 \text{ ชม.} \times 2.7 \text{ บาท/ชม.}
 \end{aligned}$$

$$\text{ดังนั้น ค่าพลังงานที่ใช้ในการบด} = 35.10 \text{ บาท}$$

\*ค่าพลังงานที่ใช้ในเตาอบ (กำลังไฟฟ้า = 3.00 กิโลวัตต์), 36 ชม.

$$\begin{aligned}
 \text{ราคาต่อหน่วย} &= 1.8 \text{ บาทต่อกิโลวัตต์-ชั่วโมง} \times 3.00 \text{ กิโลวัตต์} \\
 &= 5.4 \text{ บาท/ชม.} \\
 &= 36 \text{ ชม.} \times 5.4 \text{ บาท/ชม.}
 \end{aligned}$$

$$\text{ดังนั้น ค่าพลังงานที่ใช้ในเตาอบ} = 194.4 \text{ บาท}$$

\*ค่าพลังงานที่ใช้ในการขึ้นรูป (กำลังไฟฟ้า = 3.10 กิโลวัตต์), 5.30 ชม.

$$\begin{aligned}
 \text{ราคาต่อหน่วย} &= 1.8 \text{ บาทต่อกิโลวัตต์-ชั่วโมง} \times 3.10 \text{ กิโลวัตต์} \\
 &= 5.58 \text{ บาท/ชม.} \\
 &= 5.30 \text{ ชม.} \times 5.58 \text{ บาท/ชม.}
 \end{aligned}$$

$$\text{ดังนั้น ค่าพลังงานที่ใช้ในการขึ้นรูป} = 29.57 \text{ บาท}$$

\*เตาเผาไฟฟ้า 1150 °ซ (กำลังไฟฟ้า = 5.71 กิโลวัตต์), 6.64 ชม.

$$\begin{aligned}
 \text{ราคาต่อหน่วย} &= 1.8 \text{ บาทต่อกิโลวัตต์-ชั่วโมง} \times 5.71 \text{ กิโลวัตต์} \\
 &= 10.28 \text{ บาท/ชม.} \\
 &= 6.64 \text{ ชม.} \times 10.28 \text{ บาท/ชม.}
 \end{aligned}$$

$$\text{ดังนั้น ค่าพลังงานของเตาเผาไฟฟ้า 1150 °ซ} = 68.26 \text{ บาท}$$

\*เตาเผาไฟฟ้า 1200 °ซ (กำลังไฟฟ้า = 5.73 กิโลวัตต์), 6.92 ชม.

$$\begin{aligned} \text{ราคาต่อหน่วย} &= 1.8 \text{ บาทต่อกิโลวัตต์-ชั่วโมง} \times 5.73 \text{ กิโลวัตต์} \\ &= 10.31 \text{ บาท/ชม.} \\ &= 6.92 \text{ ชม.} \times 10.31 \text{ บาท/ชม.} \end{aligned}$$

$$\text{ดังนั้น ค่าพลังงานของเตาเผาไฟฟ้า 1200 °ซ} = 71.35 \text{ บาท}$$

\*เตาเผาไฟฟ้า 1250 °ซ (กำลังไฟฟ้า = 5.75 กิโลวัตต์), 7.19 ชม.

$$\begin{aligned} \text{ราคาต่อหน่วย} &= 1.8 \text{ บาทต่อกิโลวัตต์-ชั่วโมง} \times 5.75 \text{ กิโลวัตต์} \\ &= 10.35 \text{ บาท/ชม.} \\ &= 7.19 \text{ ชม.} \times 10.35 \text{ บาท/ชม.} \end{aligned}$$

$$\text{ดังนั้น ค่าพลังงานของเตาเผาไฟฟ้า 1250 °ซ} = 74.42 \text{ บาท}$$

$$\begin{aligned} \text{ราคาของพลังงาน/แผ่น (1150 °ซ)} &= \{[d]^* \text{จำนวนชั่วโมงทำงาน} + [e]^* \text{จำนวนชั่วโมงทำงาน} + [f]^* \\ &\quad \text{จำนวนชั่วโมงทำงาน}\}/84(\text{แผ่น}) + \{[g]^* \text{จำนวนที่ใช้}/28 \\ &\quad (\text{แผ่น})\} \end{aligned}$$

$$= \{(13 \times 2.7) + (36 \times 5.4) + (5.30 \times 5.58)\}/84(\text{แผ่น}) + (6.64 \times 10.28)/28(\text{แผ่น}) = 5.52 \text{ บาท/แผ่น}$$

$$\text{ราคากระเบื้อง/แผ่น (1150 °ซ)} = 0.23 + 5.52 = 5.75 \text{ บาท/แผ่น}$$

$$\begin{aligned} \text{ราคาของพลังงาน/แผ่น (1200 °ซ)} &= \{[d]^* \text{จำนวนชั่วโมงทำงาน} + [e]^* \text{จำนวนชั่วโมงทำงาน} + [f]^* \\ &\quad \text{จำนวนชั่วโมงทำงาน}\}/84(\text{แผ่น}) + \{[h]^* \text{จำนวนที่ใช้}/28 \\ &\quad (\text{แผ่น})\} \end{aligned}$$

$$= \{(13 \times 2.7) + (36 \times 5.4) + (5.30 \times 5.58)\}/84(\text{แผ่น}) + (6.64 \times 10.31)/28(\text{แผ่น}) = 5.63 \text{ บาท/แผ่น}$$

$$\text{ราคากระเบื้อง/แผ่น (1200 °ซ)} = 0.23 + 5.63 = 5.86 \text{ บาท/แผ่น}$$

$$\begin{aligned} \text{ราคาของพลังงาน/แผ่น (1250 °ซ)} &= \{[d]^* \text{จำนวนชั่วโมงทำงาน} + [e]^* \text{จำนวนชั่วโมงทำงาน} + [f]^* \\ &\quad \text{จำนวนชั่วโมงทำงาน}\}/84(\text{แผ่น}) + \{[i]^* \text{จำนวนที่ใช้}/28 \\ &\quad (\text{แผ่น})\} \end{aligned}$$

$$= \{(13 \times 2.7) + (36 \times 5.4) + (5.30 \times 5.58)\}/84(\text{แผ่น}) + (6.64 \times 10.35)/28(\text{แผ่น}) = 5.74 \text{ บาท/แผ่น}$$

$$\text{ราคากระเบื้อง/แผ่น (1250 °ซ)} = 0.23 + 5.74 = 5.97 \text{ บาท/แผ่น}$$

ตารางที่ ๒๒๖ ค่าใช้จ่ายของกระเบื้องที่ทดแทนด้วยเศษแก้วสีเขียวและซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว

| ค่าใช้จ่าย   | ราคาต่อหน่วย            | เศษแก้วสีเขียวและซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว |                                      |
|--|-------------------------|--|--------------------------------------|
|  |                         | จำนวนที่ใช้                                | ราคา                                 |
| ดินดำ  | 2.50 บาท/กก. [a]        | 2700 กรัม                                  | 6.75 บาท/กก.                         |
| ทรายอบแห้ง   | 0.65 บาท/กก. [b]        | 2925 กรัม                                  | 1.90 บาท/กก.                         |
| เศษแก้วสีเขียว   | 0.63 บาท/กก. [c]        | 421.89 กรัม                                | 0.27 บาท/กก.                         |
| ซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว                                      | -                       | 1265.61 กรัม                               | -                                    |
| รวมค่าใช้จ่ายของวัตถุดิบ                                       | -                       | -  | 8.92 บาท/กก.                         |
| ราคาค่าวัตถุดิบ/แผ่น   | -                       | -  | 0.14 บาท/แผ่น                        |
| *ค่าพลังงานที่ใช้ในการอบ<br>(กำลังไฟฟ้า = 1.50 กิโลวัตต์)      | 2.7 บาท/ชม.             | 13 ชม.                                     | 13 ชม. x 2.7 บาท/ชม. = 35.1 บาท      |
| *ค่าพลังงานที่ใช้ในเตาอบ<br>(กำลังไฟฟ้า = 3.00 กิโลวัตต์)      | 5.4 บาท/ชม.             | 36 ชม.                                     | 36 ชม. x 5.4 บาท/ชม. = 194.4 บาท     |
| *ค่าพลังงานที่ใช้ในการขึ้นรูป<br>(กำลังไฟฟ้า = 3.10 กิโลวัตต์) | 5.58 บาท/ชม.            | 5.30 ชม.                                   | 5.30 ชม. x 5.58 บาท/ชม. = 29.57บาท   |
| *เตาเผาไฟฟ้า 1150 °ซ<br>(กำลังไฟฟ้า = 5.71 กิโลวัตต์)          | 10.28 บาท/ชม.           | 6.64 ชม.                                   | 6.64 ชม. x 10.28 บาท/ชม. = 68.26 บาท |
| *เตาเผาไฟฟ้า 1200 °ซ<br>(กำลังไฟฟ้า = 5.73 กิโลวัตต์)          | 10.31 บาท/ชม.           | 6.92 ชม.                                   | 6.92 ชม. x 10.31 บาท/ชม. = 71.35 บาท |
| *เตาเผาไฟฟ้า 1250 °ซ<br>(กำลังไฟฟ้า = 5.75 กิโลวัตต์)          | 10.35 บาท/ชม.           | 7.19 ชม.                                   | 7.19 ชม x 10.35 บาท/ชม. = 74.42 บาท  |
| ราคาของพลังงาน/แผ่น  | 5.52 บาท/แผ่น (1150 °ซ) |  |                                      |
|  | 5.63 บาท/แผ่น (1200 °ซ) |  |                                      |
|  | 5.74 บาท/แผ่น (1250 °ซ) |  |                                      |
| ราคากะเบื้อง/แผ่น  | 5.66 บาท/แผ่น (1150 °ซ) |  |                                      |
|  | 5.77 บาท/แผ่น (1200 °ซ) |  |                                      |
|  | 5.88 บาท/แผ่น (1250 °ซ) |  |                                      |

หมายเหตุ : ไม่ได้คำนวณราคาค่าขนส่งของวัตถุดิบ ได้แก่ ดินดำ เฟลด์สปาร์ และทรายอบแห้ง

: \*เตาเผาไฟฟ้า ใช้เป็นเตาเผาสำหรับการทดลองในงานวิจัยนี้

### การคำนวณค่าใช้จ่ายเบื้องต้นของกระเบื้องที่ทดแทนด้วยเศษแก้วสีเขียวและซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว

$$\begin{aligned}
 \text{ราคาค่าวัสดุดิบ/แผ่น} &= \{[a]*\text{จำนวนที่ใช้} + [b]*\text{จำนวนที่ใช้} + [c]*\text{จำนวนที่ใช้}\} / 63(\text{แผ่น}) \\
 &= [2.50 \text{ บาท/กก.}] * [2700 \text{ กรัม}/1000 \text{ กรัม}] + [0.65 \text{ บาท/กก.}] * [2925 \\
 &\quad \text{กรัม}/1000 \text{ กรัม}] + [0.63 \text{ บาท/กก.}] * [421.89 \text{ กรัม}/1000 \text{ กรัม}] \\
 &= \{6.75 + 1.90 + 0.27\} / 63(\text{แผ่น}) \\
 &= 8.92 / 63(\text{แผ่น}) \\
 &= 0.14 \text{ บาท/แผ่น}
 \end{aligned}$$

หน่วยค่าไฟฟ้า(Unit) = กิโลวัตต์-ชั่วโมง (kW-hr), ค่าไฟฟ้าคิดราคาเท่ากับ 1.8 บาทต่อหน่วย (อ้างอิงข้อมูลจากการไฟฟ้านครหลวง, 2554)

\*ค่าพลังงานที่ใช้ในการอบ (กำลังไฟฟ้า = 1.50 กิโลวัตต์), จำนวนที่ใช้ 13 ชม.

$$\begin{aligned}
 \text{ราคาต่อหน่วย} &= 1.8 \text{ บาทต่อกิโลวัตต์-ชั่วโมง} \times 1.50 \text{ กิโลวัตต์} \\
 &= 2.7 \text{ บาท/ชม.} \\
 &= 13 \text{ ชม.} \times 2.7 \text{ บาท/ชม.}
 \end{aligned}$$

$$\text{ดังนั้น ค่าพลังงานที่ใช้ในการอบ} = 35.10 \text{ บาท}$$

\*ค่าพลังงานที่ใช้ในเตาอบ (กำลังไฟฟ้า = 3.00 กิโลวัตต์), 36 ชม.

$$\begin{aligned}
 \text{ราคาต่อหน่วย} &= 1.8 \text{ บาทต่อกิโลวัตต์-ชั่วโมง} \times 3.00 \text{ กิโลวัตต์} \\
 &= 5.4 \text{ บาท/ชม.} \\
 &= 36 \text{ ชม.} \times 5.4 \text{ บาท/ชม.}
 \end{aligned}$$

$$\text{ดังนั้น ค่าพลังงานที่ใช้ในเตาอบ} = 194.4 \text{ บาท}$$

\*ค่าพลังงานที่ใช้ในการขึ้นรูป (กำลังไฟฟ้า = 3.10 กิโลวัตต์), 5.30 ชม.

$$\begin{aligned}
 \text{ราคาต่อหน่วย} &= 1.8 \text{ บาทต่อกิโลวัตต์-ชั่วโมง} \times 3.10 \text{ กิโลวัตต์} \\
 &= 5.58 \text{ บาท/ชม.} \\
 &= 5.30 \text{ ชม.} \times 5.58 \text{ บาท/ชม.}
 \end{aligned}$$

$$\text{ดังนั้น ค่าพลังงานที่ใช้ในการขึ้นรูป} = 29.57 \text{ บาท}$$

\*เตาเผาไฟฟ้า 1150 °ซ (กำลังไฟฟ้า = 5.71 กิโลวัตต์), 6.64 ชม.

$$\begin{aligned} \text{ราคาต่อหน่วย} &= 1.8 \text{ บาทต่อกิโลวัตต์-ชั่วโมง} \times 5.71 \text{ กิโลวัตต์} \\ &= 10.28 \text{ บาท/ชม.} \\ &= 6.64 \text{ ชม.} \times 10.28 \text{ บาท/ชม.} \end{aligned}$$

$$\text{ดังนั้น ค่าพลังงานของเตาเผาไฟฟ้า 1150 °ซ} = 68.26 \text{ บาท}$$

\*เตาเผาไฟฟ้า 1200 °ซ (กำลังไฟฟ้า = 5.73 กิโลวัตต์), 6.92 ชม.

$$\begin{aligned} \text{ราคาต่อหน่วย} &= 1.8 \text{ บาทต่อกิโลวัตต์-ชั่วโมง} \times 5.73 \text{ กิโลวัตต์} \\ &= 10.31 \text{ บาท/ชม.} \\ &= 6.92 \text{ ชม.} \times 10.31 \text{ บาท/ชม.} \end{aligned}$$

$$\text{ดังนั้น ค่าพลังงานของเตาเผาไฟฟ้า 1200 °ซ} = 71.35 \text{ บาท}$$

\*เตาเผาไฟฟ้า 1250 °ซ (กำลังไฟฟ้า = 5.75 กิโลวัตต์), 7.19 ชม.

$$\begin{aligned} \text{ราคาต่อหน่วย} &= 1.8 \text{ บาทต่อกิโลวัตต์-ชั่วโมง} \times 5.75 \text{ กิโลวัตต์} \\ &= 10.35 \text{ บาท/ชม.} \\ &= 7.19 \text{ ชม.} \times 10.35 \text{ บาท/ชม.} \end{aligned}$$

$$\text{ดังนั้น ค่าพลังงานของเตาเผาไฟฟ้า 1250 °ซ} = 74.42 \text{ บาท}$$

$$\begin{aligned} \text{ราคาของพลังงาน/แผ่น (1150 °ซ)} &= \{[d]^* \text{จำนวนชั่วโมงทำงาน} + [e]^* \text{จำนวนชั่วโมงทำงาน} + [f]^* \\ &\quad \text{จำนวนชั่วโมงทำงาน}\} / 84 (\text{แผ่น}) + \{[g]^* \text{จำนวนที่ใช้} / 28 \\ &\quad (\text{แผ่น})\} \\ &= \{(13 \times 2.7) + (36 \times 5.4) + (5.30 \times 5.58)\} / 84 (\text{แผ่น}) + (6.64 \\ &\quad \times 10.28) / 28 (\text{แผ่น}) = 5.52 \text{ บาท/แผ่น} \end{aligned}$$

$$\text{ราคากระเบื้อง/แผ่น (1150 °ซ)} = 0.14 + 5.52 = 5.66 \text{ บาท/แผ่น}$$

$$\begin{aligned} \text{ราคาของพลังงาน/แผ่น (1200 °ซ)} &= \{[d]^* \text{จำนวนชั่วโมงทำงาน} + [e]^* \text{จำนวนชั่วโมงทำงาน} + [f]^* \\ &\quad \text{จำนวนชั่วโมงทำงาน}\} / 84 (\text{แผ่น}) + \{[h]^* \text{จำนวนที่ใช้} / 28 \\ &\quad (\text{แผ่น})\} \\ &= \{(13 \times 2.7) + (36 \times 5.4) + (5.30 \times 5.58)\} / 84 (\text{แผ่น}) + (6.64 \\ &\quad \times 10.31) / 28 (\text{แผ่น}) = 5.63 \text{ บาท/แผ่น} \end{aligned}$$

$$\text{ราคากระเบื้อง/แผ่น (1200 °ซ)} = 0.14 + 5.63 = 5.77 \text{ บาท/แผ่น}$$

$$\begin{aligned}
 \text{ราคาของพลังงาน/แผ่น (1250 °ซ)} &= \{[d]*\text{จำนวนชั่วโมงทำงาน} + [e]*\text{จำนวนชั่วโมงทำงาน} + [f]* \\
 &\quad \text{จำนวนชั่วโมงทำงาน}/84(\text{แผ่น}) + \{[i]*\text{จำนวนที่ใช้}/28 \\
 &\quad (\text{แผ่น})\} \\
 &= \{(13 \times 2.7) + (36 \times 5.4) + (5.30 \times 5.58)\}/84(\text{แผ่น}) + (6.64 \\
 &\quad \times 10.35)/28 (\text{แผ่น}) = 5.74 \text{ บาท/แผ่น} \\
 \text{ราคากระเบื้อง/แผ่น (1250 °ซ)} &= 0.14 + 5.74 = 5.88 \text{ บาท/แผ่น}
 \end{aligned}$$

## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวพรทิพย์ วงศ์สายสุวรรณ อายุ 23 ปี เกิดวันที่ 11 ตุลาคม 2530 สำเร็จการศึกษาหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม (เกียรตินิยมอันดับ2) คณะวิทยาศาสตร์ประยุกต์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ในปีการศึกษา 2551 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยเมื่อปี พ.ศ.2552

### การเผยแพร่วิทยานิพนธ์

- [1] Porntip Wongsaisuwan, Chatchai Pronthitipokin, Petchporn Chawakitchareon and Sirithan Jiemsirilers. "Utilization of Glass Scrap and Spent Silica-Alumina for Feldspar Replacement in Unglazed Ceramic Tile". The Proceedings of The 4<sup>th</sup> International Workshop and Conference on Earth Resource Technology, Phuket, Thailand. 11-13 May, 2010: Paper No.80.
- [2] พรทิพย์ วงศ์สายสุวรรณ เพ็ชรพร ชาวกิจเจริญ และ ศิริธันว์ เจียมศิริเลิศ "การใช้เศษแก้วสีเขียวและซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วทดแทนเฟลด์สปาร์ในการผลิตกระเบื้องเซรามิกแบบไม่เคลือบด้วยหม้ออบต" เอกสารการประชุมเสนอผลงานวิจัยระดับบัณฑิตศึกษาแห่งชาติ ครั้งที่ 20. วันที่ 2-3 กุมภาพันธ์ 2554 บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยมหิดล ศาลายา จังหวัดนครปฐม: บทความเลขที่ O-ST040.
- [3] พรทิพย์ วงศ์สายสุวรรณ เพ็ชรพร ชาวกิจเจริญ และ ศิริธันว์ เจียมศิริเลิศ "ผลของอุณหภูมิในการผลิตกระเบื้องเซรามิกแบบไม่เคลือบจากการทดแทนแร่เฟลด์สปาร์ด้วยเศษแก้วสีเขียวและซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว" เอกสารประกอบการประชุมวิชาการวิทยาศาสตร์ วิศวกรรม และการจัดการสิ่งแวดล้อม ครั้งที่ 3. วันที่ 14-15 มีนาคม 2554 ณ อาคารมหามกุฏ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย: หน้า 61.