

การพัฒนาคุณภาพของกระเบื้องเซรามิกที่ผลิตจากของเสียที่เป็นแก้ว



นางสาวปาร්ය อรรถพิศาล

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2548

ISBN 974-53-2527-9

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

QUALITY DEVELOPMENT OF CERAMIC TILE PRODUCED USING GLASS WASTE



Miss. Py Attpisarn

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
A Thesis Submitted in Partial Fullfillment of the Requirments
for the Degree of Master of Engineering Program in Environmental Engineering
Department of Environmental Engineering

Faculty of Engineering
Chulalongkorn University

Academic Year 2005

ISBN 974-53-2527-9

ปารัย อรรถพิศาล : การพัฒนาคุณภาพของกระเบื้องเซรามิกที่ผลิตจากของเสียที่เป็นแก้ว.
(QUALITY DEVELOPMENT OF CERAMIC TILE PRODUCED USING GLASS WASTE)
อ.ที่ปรึกษา : รศ. ดร.เพชรพร เขาวกิจเจริญ, 100หน้า. ISBN 974-53-2527-9.

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาคุณภาพของกระเบื้องเซรามิกที่มีการใช้ของเสียที่เป็นแก้ว สีขามาทดแทนเฟลด์สปาร์ซึ่งเป็นตัวหลอมละลายในกระบวนการผลิตกระเบื้องเซรามิก โดยนำซิลิกา อะลูมินาที่ใช้แล้วมาใช้ร่วมกับของเสียที่เป็นแก้วสีขา เพื่อให้เกิดองค์ประกอบทางเคมีที่ใกล้เคียงกับเฟลด์สปาร์มากขึ้น โดยงานวิจัยนี้คงอัตราการใช้ส่วนผสมดินดำต่อเฟลด์สปาร์เท่ากับ 8 ต่อ 5 ซึ่งคิดเป็น 60 เปอร์เซ็นต์ของส่วนผสมทั้งหมด รวมกับทรายแก้วอบแห้ง 40 เปอร์เซ็นต์ ทำการแปรค่าอัตราส่วนการทดแทนเฟลด์สปาร์ด้วยของเสียที่เป็นแก้วสีขาต่อซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วเป็น 100:0, 80:20, 75:25 และ 70:30 ของเฟลด์สปาร์ที่ใช้ในส่วนผสม ขึ้นรูปเป็นแผ่นกระเบื้องขนาด 4x4 นิ้ว และแปรค่าอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 1200, 1150, และ 1100 องศาเซลเซียส ทดสอบคุณภาพของกระเบื้องในด้านกำลังรับแรงดัด การหดตัว การดูดซึมน้ำ การทนสารเคมี และความทนการราน ผลการศึกษาพบว่า ทุกอัตราส่วนของการทดแทนที่เผาขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส ให้ค่าการทดสอบเป็นไปตามเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมกระเบื้องดินเผาปูพื้น (มอก.37-2529) ส่วนกระเบื้องที่เหมาะสมในเชิงเศรษฐศาสตร์คือ กระเบื้องที่ผ่านการเผาขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 1150 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราส่วนการทดแทนเฟลด์สปาร์ด้วยของเสียที่เป็นแก้วสีขาต่อซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วเท่ากับ 80:20 ซึ่งมีคุณสมบัติในด้านกำลังรับแรงดัดเท่ากับ 27.46 เมกกะปาสคาล ค่าการหดตัวเท่ากับ 4.89 เปอร์เซ็นต์ ค่าการดูดซึมน้ำเท่ากับ 1.93 เปอร์เซ็นต์ มีความสามารถการทนสารเคมีและความทนการรานได้ ผลการวิเคราะห์เฟสด้วยวิธีเอ็กซเรย์ดิฟแฟรกชัน พบว่าเกิดเฟสของควอตซ์และคริสโตบัลไลต์ซึ่งเป็นเฟสเบื้องต้นของการเกิดเฟสมัลไลต์ซึ่งเป็นเฟสที่ทำให้เกิดความแข็งแรงในกระเบื้องเซรามิก และจากการประมาณค่าใช้จ่ายเบื้องต้นของกระเบื้องเซรามิกที่อัตราส่วนนี้พบว่ามีค่าใช้จ่ายเท่ากับ 8.61 บาทต่อแผ่นกระเบื้องเซรามิก และเมื่อเทียบกับอัตราส่วนที่ไม่ใช้วัตถุดิบทดแทนที่ผ่านการเผาขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส พบว่าสามารถลดค่าใช้จ่ายลงได้ 2.98 บาทต่อแผ่นกระเบื้องเซรามิก

ภาควิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
สาขาวิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
ปีการศึกษา 2548

ลายมือชื่อนิสิต
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา

ปารัย อรรถพิศาล
เพชรพร

4770428221 : MAJOR ENVIRONMENTAL ENGINEERING

KEY WORD: CERAMIC TILE / BROWN GLASS SCRAP BOTTLES / SPENT SILICA-ALUMINA

PY ATPISARN: QUALITY DEVELOPMENT OF CERAMIC TILE PRODUCED USING

GLASS WASTE. THESIS ADVISOR: ASSOC.PROF. PETCHPORN

CHAWAKITCHAREON, Ph.D., 100 pp. ISBN 974-53-2527-9.

This research aimed to develop the utilization of brown glass scrap bottles as raw materials instead of using feldspar, which is flux of ceramic product, by adding spent silica-alumina. The experiment was performed using the ratio of ball clay to feldspar equal to 8 : 5, which is 60% of whole mixture, plus 40% of milled sand. A series of experiments was carried out by varying the ratio of brown glass scrap bottles:spent silica-alumina at 100:0, 80:20, 75:25 and 70:30 of feldspar in the mixture then pressing to 4x4 inch² tile in size and varying of temperature at 1200, 1150 and 1100°C. The quality tests of ceramic tile such as bending strength, firing shrinkage, water absorption, chemical durability and crazing durability were performed according to the Industrial Standards. The results indicated that all mixtures, which were burned at 1200°C, passed Thai Industrial Standard for ceramic floor tile (TIS.37-2529). According to the economic analysis, the mixture at the ratio of brown glass scrap bottles:spent silica-alumina at 80:20 and burned at 1150°C could pass Thai Industrial Standard for ceramic floor tile (TIS.37-2529). This mixture had the quality of bending strength equal to 27.46 MPa., firing shrinkage equal to 4.89%, water absorption equal to 1.93% and it also had the capacity of chemical durability and crazing durability. The phase analysis by x-ray diffraction found quartz and cristobalite phase, the basic form of mullite phase, which provides the high strength for ceramic product. The cost estimation for the product revealed a cost of 8.61 baht/piece of ceramic tile. Comparing to the original process which burned at 1200°C, this research revealed a save of 2.98 bath/piece of ceramic tile.

Department Environmental Engineering Student's signature
 Field of study Environmental Engineering Advisor's signature
 Academic year 2005

พริศ อรรถวิเชียร
 Petchporn C.

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร. เพ็ชรพร เชาวกิจเจริญ เป็นอย่างสูง ที่ให้โอกาสแก่ผู้วิจัยในการดำเนินงานครั้งนี้ อีกทั้งให้คำแนะนำและคำปรึกษาในงานวิจัย รวมถึงให้แง่คิดในการทำงานอย่างมีประสิทธิภาพจนงานวิจัยสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์และคณาจารย์ทุกท่านที่ประสิทธิ์ประสาทถ่ายทอดวิชาความรู้ทางวิชาการ

ขอขอบพระคุณบิดามารดาและทุกๆ คนในครอบครัวที่สนับสนุน เป็นกำลังใจ และคอยให้ความช่วยเหลือแก่ผู้วิจัยมาโดยตลอด

ขอขอบพระคุณภาคีวิชาชีพวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย คุณสมคิด หัวหน้าห้องปฏิบัติการเซรามิก ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย คุณศรีไฉล เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการ สถาบันวิจัยโลหะและวัสดุศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย คุณมานพ เจ้าหน้าที่ดูแลเครื่องมือวิเคราะห์ ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ห้องปฏิบัติการของเสียอันตราย ภาควิชาชีพวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความช่วยเหลือ ควบคุมดูแลการดำเนินการวิจัย ขอขอบคุณบริษัท ซีเบลโก้ มีเนอรัลล์ (ประเทศไทย) จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์ดินดำแม่แซน และทรายอบแห้งเป็นวัสดุในงานวิจัย

ขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และสมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทยที่มอบทุนสนับสนุนบางส่วนของงานวิจัยในครั้งนี้

ทำนี่ยังขอขอบคุณ พี่ๆ น้องๆ และเจ้าหน้าที่ฝ่ายธุรการทุกท่านในภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความรัก คำปรึกษา และความช่วยเหลือ ขณะที่ศึกษาและทำงานวิจัยเป็นอย่างดี

คำนิยาม

กำลังรับแรงดัด	คือ ความต้านแรงดัด (มอก.37-2529, 2539) หาได้จาก ค่าความแข็งแรงภายใต้กำลังรับแรงดัด (Modulus of Rupture, MOR)
ค่าการหดตัวหลังเผา (Burning shrinkage)	คือ ค่าการหดตัวของผลิตภัณฑ์ดิบหลังการเผา (ปรีดา พิมพ์ขาวขำ, 2547)
ค่าการดูดซึมน้ำ (Water absorption)	คือ ค่าปริมาณน้ำที่แผ่นกระเบื้องดูดซึมเข้าไปหลังจากต้มน้ำให้เดือด 2 ชั่วโมง และทิ้งไว้ให้เย็น แล้วนำขึ้นมาเช็ดด้วยผ้าหมาดแล้วนำไปชั่งน้ำหนักเทียบกับน้ำหนักแห้ง (มอก.37-2529, 2529)
การร้าว (Crazing)	คือ การเกิดรอยร้าวบนผิว (มอก.37-2529, 2529)
การทนสารเคมี (Chemical durability)	คือ การไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงบนผิวเมื่อแช่กระเบื้องในสารละลายกรดและด่างเป็นเวลา 7 วัน (มอก.37-2529, 2529)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญตาราง	ฎ
สารบัญรูป	ฐ
คำนิยาม	ฒ
บทที่ 1 บทนำ	1
บทที่ 2 วัตถุประสงค์และขอบเขตการวิจัย.....	2
2.1 วัตถุประสงค์.....	2
2.2 ขอบเขตของการวิจัย	2
2.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 3 ทบทวนเอกสาร	4
3.1 เซรามิก	4
3.2 อุตสาหกรรมเซรามิก	4
3.3 อุตสาหกรรมเซรามิกของไทย	4
3.3.1 อัตราการขยายตัวของอุตสาหกรรมเซรามิกในประเทศไทย	5
3.4 วัตถุดิบในการผลิตเซรามิก	5
3.4.1 ดิน	6
3.4.1.1 ดินขาว	6
3.4.1.2 ดินเหนียว	8
3.4.1.3 ดินดำ	8
3.4.2 ตัวหลอมละลายในเนื้อดิน	10
3.4.2.1 เฟลด์สปาร์	11
3.4.3 ตัวทนไฟ	13
3.4.3.1 ซิลิกา	13
3.4.3.2 อะลูมินา	14
3.4.3.3 ทราายแก้ว	15

3.4.3.3.1	ทรายแก้วที่ใช้ในอุตสาหกรรมเซรามิก	16
3.4.4.3.2	คุณสมบัติของทรายแก้วในอุตสาหกรรมเซรามิก	16
3.5	แก้ว	16
3.5.1	ลักษณะทั่วไปของแก้ว	17
3.5.2	อุตสาหกรรมแก้ว	18
3.5.3	กลุ่มผลิตภัณฑ์บรรจุภัณฑ์แก้ว	18
3.5.4	เทคโนโลยีการผลิตแก้ว	19
3.5.4.1	วัตถุดิบที่ใช้ในการหลอมแก้ว	19
3.5.4.2	สีของผลิตภัณฑ์แก้ว	19
3.5.5	ผู้ผลิตบรรจุภัณฑ์ขวดแก้วของประเทศไทย	20
3.5.6	ภาพรวมอุตสาหกรรมบรรจุภัณฑ์แก้วของประเทศไทย	21
3.6	ซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว	22
3.7	กระเบื้องเซรามิก	24
3.7.1	ความหมายของกระเบื้องตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม	24
3.7.2	ชนิดกระเบื้อง	25
3.7.2.1	กระเบื้องปูพื้น	25
3.7.2.2	กระเบื้องปูผนัง	25
3.7.3	กระบวนการผลิตกระเบื้องเซรามิก	25
3.7.3.1	การขึ้นรูปผลิตภัณฑ์เซรามิกโดยใช้แรงอัด	25
3.7.3.2	การอบผลิตภัณฑ์ให้แห้ง	26
3.7.3.2.1	การระเหยของน้ำที่ผิวผลิตภัณฑ์	27
3.7.3.2.2	การเคลื่อนตัวของน้ำภายในเนื้อดิน	27
3.7.3.2.3	การโค้งงอของผลิตภัณฑ์ระหว่างทำการอบผลิตภัณฑ์	27
3.7.3.3	การเผาขึ้นรูปผลิตภัณฑ์	28
3.7.3.4	อิทธิพลความร้อนที่มีต่อเนื้อดินปั้นผลิตภัณฑ์เซรามิก	28
3.7.3.4.1	โครงสร้างเนื้อดินปั้นก่อนถูกเผา	28
3.7.3.4.2	ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในเนื้อดินปั้นเมื่อถูกเผา	29
3.7.3.5	อิทธิพลของพลังงานความร้อนที่มีต่อซิลิกา	31

3.7.3.5.1	คริสโตบัลไลท์	31
3.7.3.5.2	ทริติไมท์	31
3.7.3.5.3	ฟลินต์	31
3.7.3.6	อิทธิพลของพลังงานความร้อนที่มีต่อเฟลด์สปาร์	32
3.7.3.7	การหดตัวและพฤติกรรมระหว่างการเผา	32
3.7.3.8	ตัวแปรเบื้องต้นที่มีผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์เซรามิก	32
3.8	เตาเผากระเบื้องดินเผา	33
3.9	มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม	33
3.9.1	มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมกระเบื้องดินเผาบุผนัง (มอก.36-2516)	33
3.9.2	มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมกระเบื้องดินเผาปูพื้น (มอก.37-2529)	33
3.10	การศึกษาที่เกี่ยวข้องกับการวิจัย	34
บทที่ 4	แผนการทดลองและดำเนินการวิจัย	41
4.1	การเตรียมวัสดุดิบสำหรับทำวิจัย	41
4.1.1	วัสดุดิบ	41
4.1.2	สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย	41
4.1.3	เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย	41
4.1.3.1	การทดลองขึ้นรูปกระเบื้องและเผากระเบื้อง	41
4.1.3.2	การทดสอบกำลังรับแรงดัด	43
4.1.3.3	การทดสอบการดูดซึมน้ำ	43
4.1.3.4	การทดสอบความทนการร้าว	43
4.1.3.5	การทดสอบการทนสารเคมี (กรดและด่าง)	43
4.1.3.6	การทดสอบการหดตัว	43
4.1.3.7	การตรวจสอบคุณสมบัติทางเคมี	43
4.1.3.8	การตรวจสอบเฟสที่เกิดขึ้นของผลิตภัณฑ์	43
4.2	การดำเนินการวิจัย	43
4.2.1	การวิจัยเบื้องต้น	43
4.2.2	การทดลอง	43
4.2.3	การทดสอบคุณภาพตามมาตรฐานกระทรวงอุตสาหกรรม	45

	หน้า
4.2.3.1 การทดสอบกำลังรับแรงดัด	45
4.2.3.2 การทดสอบการดูดซึมน้ำ	46
4.2.3.3 การทดสอบความทนการรราน	46
4.2.3.4 การทดสอบการทนสารเคมี	47
4.2.4 การตรวจสอบเฟสที่เกิดขึ้นในเนื้อผลิตภัณฑ์	47
4.2.5 ประมาณค่าใช้จ่ายเบื้องต้นในกระบวนการผลิต และประเมินความคุ้มค่าในการผลิต	48
บทที่ 5 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง	49
5.1 ศึกษาคุณสมบัติทางเคมีขององค์ประกอบ	49
5.2 ศึกษาถึงการนำซิลิกา-อะลูมินาที่เข้แล้วมาใช้ร่วมกับของเสียที่เป็นแก้วสีชา ในการทดแทนวัตถุดิบในกระบวนการผลิตกระเบื้องเซรามิก	50
5.2.1 การทดสอบกำลังรับแรงดัด	50
5.2.2 การทดสอบการดูดซึมน้ำ	51
5.2.3 การทดสอบการหดตัว	51
5.2.4 การทดสอบการทนสารเคมี	52
5.2.5 การทดสอบความทนการรราน	52
5.3 ศึกษาหาผลของอุณหภูมิที่เหมาะสมในการเผาขึ้นรูปกระเบื้อง	53
5.3.1 การทดสอบกำลังรับแรงดัด	53
5.3.2 การทดสอบการดูดซึมน้ำ	55
5.3.3 การทดสอบการหดตัว	55
5.3.4 การทดสอบการทนสารเคมี	55
5.3.5 การทดสอบความทนการรราน	55
5.4 การตรวจสอบเฟสที่เกิดขึ้นในเนื้อผลิตภัณฑ์	59
5.5 การประมาณค่าใช้จ่ายเบื้องต้นในกระบวนการผลิตและ ประเมินความคุ้มค่าในการผลิต	62
บทที่ 6 สรุปผลการทดลอง	64
บทที่ 7 ข้อเสนอแนะเชิงวิศวกรรม	66

	หน้า
รายการอ้างอิง	67
บรรณานุกรม	70
ภาคผนวก.....	71
ภาคผนวก ก. ข้อมูลผลการทดสอบกระเบื้องเซรามิกหลังการเผา	72
ภาคผนวก ข. รูปอุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย	82
ภาคผนวก ค. ข้อมูลการวิเคราะห์เอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกชัน และ ข้อมูลการวิเคราะห์เอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนซ์	87
ประวัติผู้เขียน.....	100



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 3.1 สมบัติต่างๆ ของดินขาว	7
ตารางที่ 3.2 สูตรเคมีของดินดำ	9
ตารางที่ 3.3 ข้อดีและข้อเสียของดินดำ	10
ตารางที่ 3.4 สมบัติทางกายภาพของเฟลด์สปาร์	12
ตารางที่ 3.5 ส่วนประกอบทางเคมีของเฟลด์สปาร์	12
ตารางที่ 3.6 ส่วนประกอบทางกายภาพของซิลิกา	13
ตารางที่ 3.7 สมบัติทางกายภาพของอะลูมินา	14
ตารางที่ 3.8 กำลังการผลิตบรรจุภัณฑ์ขวดแก้วของประเทศไทย	21
ตารางที่ 3.9 แสดงส่วนประกอบซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว	23
ตารางที่ 3.10 แสดงการกระจายขนาดของซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว	24
ตารางที่ 3.11 แสดงส่วนประกอบในเนื้อผลิตภัณฑ์ที่สุกตัวที่อุณหภูมิต่างๆ	30
ตารางที่ 4.1 อัตราส่วนผสมระหว่างของเสียที่เป็นแก้วสีชาและซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว	44
ตารางที่ 5.1 ผลการวิเคราะห์ทางเคมีของวัตถุดิบด้วยวิธีเอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนส์	49
ตารางที่ 5.2 ผลการคำนวณองค์ประกอบทางเคมีของของเสียที่เป็นแก้วสีชาและ ซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วเพื่อใช้ทดแทนเฟลด์สปาร์.....	50
ตารางที่ 5.3 แสดงค่ากำลังรับแรงดัด ค่าการดูดซึมน้ำ ค่าการหดตัว ค่าการทนสารเคมี และ ความทนการร่อนของกระเบื้องหลังเผาขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส	52
ตารางที่ 5.4 ค่ากำลังรับแรงดัดของกระเบื้องหลังเผา.....	54
ตารางที่ 5.5 ค่าการดูดซึมน้ำของกระเบื้องหลังเผา	56
ตารางที่ 5.6 ค่าการหดตัวของกระเบื้องหลังเผา	57
ตารางที่ 5.7 ผลการทนสารเคมีของกระเบื้องหลังเผา	58
ตารางที่ 5.8 ผลความทนการร่อนของกระเบื้องหลังเผา	58
ตารางที่ 5.9 อัตราส่วนที่นำไปทำการวิเคราะห์หาเฟสที่เกิดขึ้นในเนื้อผลิตภัณฑ์.....	59
ตารางที่ 5.10 ค่าใช้จ่ายเบื้องต้นในการผลิตกระเบื้องเซรามิกต่อจำนวนกระเบื้อง 80 แผ่น	63
ตารางที่ ๗1 ผลการทดสอบกำลังรับแรงดัดของกระเบื้องที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส.....	73
ตารางที่ ๗2 ผลการทดสอบกำลังรับแรงดัดของกระเบื้องที่อุณหภูมิ 1150 องศาเซลเซียส.....	74
ตารางที่ ๗3 ผลการทดสอบกำลังรับแรงดัดของกระเบื้องที่อุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียส.....	75
ตารางที่ ๗4 ผลการทดสอบการดูดซึมน้ำของกระเบื้องที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส.....	76

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ ผ5 ผลการทดสอบการดูดซึมน้ำของกระเบื้องที่อุณหภูมิ 1150 องศาเซลเซียส.....	77
ตารางที่ ผ6 ผลการทดสอบการดูดซึมน้ำของกระเบื้องที่อุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียส.....	78
ตารางที่ ผ7 ผลการทดสอบการหดตัวของกระเบื้องที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส.....	79
ตารางที่ ผ8 ผลการทดสอบการหดตัวของกระเบื้องที่อุณหภูมิ 1150 องศาเซลเซียส	80
ตารางที่ ผ9 ผลการทดสอบการหดตัวของกระเบื้องที่อุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียส	81
ตารางที่ ผ10 ข้อมูลการวิเคราะห์จากเครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกโตมิเตอร์ของกระเบื้อง ส่วนผสมของเสียที่เป็นแก้วสีชา : ซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว เท่ากับ 80:20 เผาขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส	88
ตารางที่ ผ11 ข้อมูลการวิเคราะห์จากเครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกโตมิเตอร์ของกระเบื้อง ส่วนผสมของเสียที่เป็นแก้วสีชา : ซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว เท่ากับ 75:25 เผาขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส	90
ตารางที่ ผ12 ข้อมูลการวิเคราะห์จากเครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกโตมิเตอร์ของกระเบื้อง ส่วนผสมของเสียที่เป็นแก้วสีชา : ซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว เท่ากับ 100:0 เผาขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 1150 องศาเซลเซียส	92
ตารางที่ ผ13 ข้อมูลการวิเคราะห์จากเครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกโตมิเตอร์ของกระเบื้อง ส่วนผสมของเสียที่เป็นแก้วสีชา : ซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว เท่ากับ 80:20 เผาขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 1150 องศาเซลเซียส	94
ตารางที่ ผ14 ข้อมูลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของขวดแก้วสีชา 1 (กระทิงแดง) ด้วยเครื่องเอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนส์สเปกโตรมิเตอร์	96
ตารางที่ ผ15 ข้อมูลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของขวดแก้วสีชา 2 (M150) ด้วยเครื่องเอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนส์สเปกโตรมิเตอร์	97
ตารางที่ ผ16 รายละเอียดข้อมูลทางเทคนิคของดินดำแม่แซน	98
ตารางที่ ผ17 รายละเอียดข้อมูลทางเทคนิคของทรายละเอียด	99

รูปที่ 3.1	แผนผังวัตถุดิบบางชนิดในการผลิตเซรามิก	6
รูปที่ 3.2	ปฏิกิริยาของดินขาว เมื่อผ่านอุณหภูมิต่างๆ และการเปลี่ยนแปลงผลึกทางโครงสร้างเคมี	7
รูปที่ 3.3	ปฏิกิริยาการเปลี่ยนแปลงของผลึกซิลิกาเมื่อได้รับความร้อน	14
รูปที่ 4.1	ดินดำ (Ball Clay) ขนาด 200 เมช (0.10 มม.)	42
รูปที่ 4.2	ทรายละเอียด (Mill Sand) ขนาด 200 เมช (0.10 มม.)	42
รูปที่ 4.3	ของเสียที่เป็นแก้วสีขาวบดละเอียด ขนาด 200 เมช (0.10 มม.)	42
รูปที่ 4.4	ซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วบด ขนาด 100 เมช (0.15 มม.)	42
รูปที่ 5.1	การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงดัดกับอัตราส่วนการทดแทน เฟลด์สปาร์ด้วยของเสียที่เป็นแก้วสีขาวร่วมกับซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วเมื่อ เผาขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 1100, 1150 และ 1200 องศาเซลเซียส	54
รูปที่ 5.2	การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดซึมน้ำกับอัตราส่วนการทดแทน เฟลด์สปาร์ด้วยของเสียที่เป็นแก้วสีขาวร่วมกับซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วเมื่อ เผาขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 1100, 1150 และ 1200 องศาเซลเซียส	56
รูปที่ 5.3	การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างค่าการหดตัวกับอัตราส่วนการทดแทน เฟลด์สปาร์ด้วยของเสียที่เป็นแก้วสีขาวร่วมกับซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วเมื่อ เผาขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 1100, 1150 และ 1200 องศาเซลเซียส	57
รูปที่ 5.4	ผลการวิเคราะห์เอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกชัน (XRD) ของกระเบื้องส่วนผสม (ของเสียที่เป็นแก้วสีขาวต่อซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วเท่ากับ 80:20 เผาที่ 1200 องศาเซลเซียส)	60
รูปที่ 5.5	ผลการวิเคราะห์เอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกชัน (XRD) ของกระเบื้องส่วนผสม (ของเสียที่เป็นแก้วสีขาวต่อซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วเท่ากับ 75:25 เผาที่ 1200 องศาเซลเซียส)	60
รูปที่ 5.6	ผลการวิเคราะห์เอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกชัน (XRD) ของกระเบื้องส่วนผสม (ของเสียที่เป็นแก้วสีขาวต่อซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วเท่ากับ 100:0 เผาที่ 1150 องศาเซลเซียส)	61
รูปที่ 5.7	ผลการวิเคราะห์เอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกชัน (XRD) ของกระเบื้องส่วนผสม (ของเสียที่เป็นแก้วสีขาวต่อซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วเท่ากับ 80:20 เผาที่ 1150 องศาเซลเซียส)	61

รูปที่ ผ1 เตาเผาที่อุณหภูมิสูง.....	83
รูปที่ ผ2 เครื่องอัดขึ้นรูป	83
รูปที่ ผ3 เครื่องทดสอบค่ากำลังรับแรงดัด	83
รูปที่ ผ4 เครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์	83
รูปที่ ผ5 กระบี่องหลังการเผาที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส	84
รูปที่ ผ6 กระบี่องหลังการเผาที่อุณหภูมิ 1150 องศาเซลเซียส	85
รูปที่ ผ7 กระบี่องหลังการเผาที่อุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียส	86
รูปที่ ผ8 รายละเอียดการวิเคราะห์เอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคชั่น (XRD) ของกระบี่องส่วนผสม ของเสียที่เป็นแก้วสีชา : ซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว เท่ากับ 80:20 เผาขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส	87
รูปที่ ผ9 รายละเอียดการวิเคราะห์เอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคชั่น (XRD) ของกระบี่องส่วนผสม ของเสียที่เป็นแก้วสีชา : ซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว เท่ากับ 75:25 เผาขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส	89
รูปที่ ผ10 รายละเอียดการวิเคราะห์เอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคชั่น (XRD) ของกระบี่องส่วนผสม ของเสียที่เป็นแก้วสีชา : ซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว เท่ากับ 100:0 เผาขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 1150 องศาเซลเซียส.....	91
รูปที่ ผ11 รายละเอียดการวิเคราะห์เอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคชั่น (XRD) ของกระบี่องส่วนผสม ของเสียที่เป็นแก้วสีชา : ซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว เท่ากับ 80:20 เผาขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 1150 องศาเซลเซียส	93

บทที่ 1

บทนำ

เนื่องจากประเทศไทยเป็นประเทศกำลังพัฒนา ดังนั้นการขยายตัวทางภาคอุตสาหกรรม จึงเกิดขึ้นเป็นอย่างมาก ส่งผลให้มีความต้องการวัตถุดิบในกระบวนการผลิตมากขึ้น และส่งผลให้เกิดของเสียอันเนื่องมาจากกระบวนการผลิตมากขึ้นตามไปด้วย ซึ่งปัญหาดังกล่าวล้วนส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมเป็นอย่างมาก ปัจจุบันมีการส่งเสริมให้มีการนำกลับมาใช้ใหม่ของของที่อาจพิจารณาว่าเป็นของเสียจากกระบวนการผลิตหนึ่งไปใช้เป็นวัตถุดิบเริ่มต้นของอีกกระบวนการผลิตหนึ่ง

อุตสาหกรรมเซรามิกเป็นอุตสาหกรรมที่มีการใช้วัตถุดิบในการผลิตเป็นจำนวนมาก ซึ่งเมื่อพิจารณาถึงต้นทุนการผลิตพบว่า ต้นทุนค่าวัตถุดิบสูงเป็นอันดับหนึ่ง โดยที่ต้นทุนค่าพลังงาน ต้นทุนค่าแรง และค่าเสื่อมราคามีมูลค่าลดลงตามลำดับ แต่อุตสาหกรรมเซรามิกก็ยังคงทำรายได้ให้กับประเทศไทยเป็นจำนวนมาก อุตสาหกรรมประเภทที่ใช้สารประกอบไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ เช่น อุตสาหกรรมการผลิตเครื่องสำอาง อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์เซมิคอนดักเตอร์ อุตสาหกรรมโพลีเมอร์และอุตสาหกรรมสิ่งทอ เป็นต้น ทำให้เกิดสารประกอบซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วเกิดขึ้นประมาณ 100 ตันต่อปี ซึ่งในการบำบัดซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วโดยศูนย์บริการบำบัดกาก อุตสาหกรรมของรัฐบาลเสียค่าใช้จ่ายเฉลี่ย 12,000 บาทต่อตัน ซึ่งจะเห็นได้ว่าไม่คุ้มทุนในเชิงเศรษฐศาสตร์

งานวิจัยนี้จึงเน้นศึกษาการปรับปรุงและพัฒนาการผลิตกระเบื้องเซรามิก โดยปรับแต่งองค์ประกอบทางเคมีของของเสียที่เป็นแก้วสีชาที่ใช้ในการทดแทนเฟลด์สปาร์ในกระบวนการผลิตกระเบื้องเซรามิก โดยประยุกต์ใช้ของเสียที่เป็นแก้วสีชาพร้อมกับซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วเพื่อให้องค์ประกอบทางเคมีที่ได้มีค่าใกล้เคียงกับองค์ประกอบของเฟลด์สปาร์มากขึ้น เพื่อส่งผลให้กระเบื้องเซรามิกที่ได้มีคุณภาพดีขึ้น ทั้งยังเป็นการบำบัดและลดปริมาณของเสียประเภทสารประกอบซิลิกา-อะลูมินา และเพื่อเพิ่มทางเลือกให้กับภาคอุตสาหกรรม โดยเป็นการลดต้นทุนการผลิตอีกทางหนึ่งด้วย

บทที่ 2

วัตถุประสงค์และขอบเขตการวิจัย

2.1 วัตถุประสงค์

1. เพื่อปรับปรุง พัฒนา และหาอัตราส่วนที่สภาวะที่เหมาะสมในการนำของเสียที่เป็นแก้วสีชาและซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วมาทดแทนวัตถุดิบในกระบวนการผลิตกระเบื้องเซรามิก
2. ศึกษาถึงปัจจัยที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางเคมี ทางกายภาพและโครงสร้างทางจุลภาคของผลิตภัณฑ์ เมื่อมีการนำของเสียที่เป็นแก้วสีชาและซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วมาทดแทนวัตถุดิบในกระบวนการผลิตกระเบื้องเซรามิก
3. ประเมินการค่าใช้จ่ายเบื้องต้นและประเมินความคุ้มค่าในกระบวนการผลิต

2.2 ขอบเขตของการวิจัย

การวิจัยนี้เป็นการนำซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วมาใช้เติมแต่งในส่วนหนึ่งของของเสียที่เป็นแก้วสีชาเพื่อทดแทนแร่เฟลด์สปาร์ (ส่วนที่เป็นตัวหลอมละลาย) ในกระบวนการผลิตกระเบื้องเซรามิก ดังนั้นจึงมีการศึกษาตัวแปรที่เกี่ยวข้อง ดังนี้

1. งานวิจัยอัตราส่วนของของเสียที่เป็นแก้วสีชาต่อซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วที่เหมาะสม
 - เปรียบเทียบผลวิเคราะห์ทางเคมีของวัตถุดิบด้วยวิธีเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (XRF)
 - เปรียบเทียบค่าทดสอบผลิตภัณฑ์เทียบกับค่ามาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมกระเบื้องดินเผาปูพื้น (มอก.37-2529) (ค่ากำลังรับแรงดัด ค่าการหดตัว ค่าการดูดซึมน้ำ การทนสารเคมี และความทนการร้าว)
 - เปรียบเทียบเฟสที่เกิดขึ้นในเนื้อผลิตภัณฑ์ด้วยวิธีเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน (XRD)
2. งานวิจัยอุณหภูมิที่ใช้ในการเผากระเบื้องที่เหมาะสม เพื่อช่วยลดการใช้พลังงาน

โดยทดลองแปรค่าอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาเป็น 1200, 1150 และ 1100 องศาเซลเซียส ทำการทดสอบเทียบกับค่ามาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมกระเบื้องดินเผาปูพื้น (มอก. 37-2529) พร้อมทั้งประเมินค่าใช้จ่ายเบื้องต้นและประเมินความคุ้มค่าการผลิต

2.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. เป็นการปรับปรุงและพัฒนาคุณภาพของกระเบื้องเซรามิกที่ใช้ของเสียที่เป็นแก้วสีชาทดแทนเฟลด์สปาร์โดยการประยุกต์ใช้ซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วเป็นวัตถุดิบทดแทนร่วม
2. เป็นอีกทางเลือกหนึ่งสำหรับการจัดการของเสียอุตสาหกรรมประเภทซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วซึ่งต้องเสียค่าใช้จ่ายเป็นจำนวนมากในการจัดการของเสียดังกล่าว
3. เป็นการลดต้นทุนในการผลิตและใช้ทรัพยากรที่มีอยู่อย่างคุ้มค่า



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

ทบทวนเอกสาร

3.1 เซรามิก

ในสมัยแรกเป็นที่เข้าใจกันว่า คำว่า เซรามิก (Ceramic) หมายถึง ศิลปะที่เกี่ยวข้องกับเครื่องปั้นดินเผา ต่อมาได้มีการใช้ในความหมายกว้างขึ้น คือรวมถึงอุตสาหกรรมทั้งหลายที่ใช้สารประกอบพวกซิลิเกต (Silicate) ในการผลิตผลิตภัณฑ์ คำว่า “เซรามิก” มีรากศัพท์มาจากภาษากรีก “เครามอส” (Keramos) และมีรากศัพท์มาจากภาษาสันสกฤต (Sanskrit) ซึ่งมีความหมายว่า “เผา” ปัจจุบันเซรามิกมีความหมาย 2 ประการ คือ ประการแรก หมายถึงผลิตภัณฑ์ซึ่งกรรมวิธีการผลิตต้องผ่านการเผาที่อุณหภูมิสูง ส่วนประการที่สอง หมายถึงผลิตภัณฑ์ซึ่งส่วนประกอบของผลิตภัณฑ์ทั้งหมดหรือส่วนใหญ่ผลิตจากวัตถุดิบที่มีอยู่ตามธรรมชาติบนเปลือกโลก (ปรีดา พิมพ์ขาวขำ, 2547)

3.2 อุตสาหกรรมเซรามิก

อุตสาหกรรมเซรามิกมักเป็นอุตสาหกรรมขนาดใหญ่และมีความสำคัญในทุกประเทศ สมบัติเฉพาะที่สำคัญของอุตสาหกรรมเซรามิกคือ เป็นอุตสาหกรรมพื้นฐานรองรับอุตสาหกรรมอื่นๆ ตัวอย่างเช่น วัตถุดิบไฟซินิดต่างๆ เป็นวัสดุพื้นฐานของอุตสาหกรรมถลุงและผลิตโลหะต่างๆ วัสดุขั้วถั่ว ก็เป็นสิ่งจำเป็นสำหรับอุตสาหกรรมเครื่องจักร เครื่องมือ และอุตสาหกรรมการผลิตรถยนต์ ผลิตภัณฑ์แก้วมีความสำคัญต่ออุตสาหกรรมผลิตรถยนต์ สถาปัตยกรรม อิเล็กทรอนิกส์ และไฟฟ้า ซีเมนต์มีความสำคัญต่อสถาปัตยกรรมและการก่อสร้าง เป็นต้น ทั้งนี้เพราะว่าผลิตภัณฑ์เซรามิกมีสมบัติทั้งทางเคมี ไฟฟ้า กลศาสตร์ ความร้อน และโครงสร้างที่เป็นประโยชน์

3.3 อุตสาหกรรมเซรามิกของไทย

การผลิตเซรามิกในประเทศไทยแบ่งออกเป็น 2 ประเภทใหญ่ คือ เซรามิกแบบดั้งเดิม (Traditional ceramics) และเซรามิกยุคใหม่ (New ceramics) โดยในส่วนของเซรามิกแบบดั้งเดิมนั้น เป็นกลุ่มของเซรามิกที่เน้นการใช้แรงงานในการผลิตค่อนข้างมาก และสามารถพึ่งตนเองได้เป็นส่วนใหญ่ทั้งในเรื่องของวัตถุดิบและเทคโนโลยีการผลิต ประกอบด้วยผลิตภัณฑ์ 5 ประเภทหลักได้แก่ เครื่องสุขภัณฑ์ กระเบื้องเซรามิก เครื่องใช้บนโต๊ะอาหาร ของชำร่วยและเครื่องประดับ และลูกถ้วยไฟฟ้า ส่วนผลิตภัณฑ์เซรามิกยุคใหม่เป็นผลิตภัณฑ์ที่ไทยยังขาดเทคโนโลยีและปริมาณการใช้ในประเทศยังไม่มีมากนัก ดังนั้นจึงไม่มีการพัฒนาไปสู่การผลิตที่ใช้เทคโนโลยีในขั้นที่สูงขึ้นได้ เซรามิกประเภทนี้จะใช้ในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์คอมพิวเตอร์ และเป็นเครื่องมือในการแพทย์ เช่น คาปาซิเตอร์เซรามิก และหม้อแปลงไฟฟ้าเซรามิก เป็นต้น

อุตสาหกรรมเซรามิกเป็นอีกหนึ่งในอุตสาหกรรมพื้นฐานหลัก เป็นอุตสาหกรรมที่สนองนโยบายของรัฐบาลในการสร้างงานและกระจายรายได้ไปสู่ภูมิภาค จึงนับว่าเป็นอุตสาหกรรมที่มีความสำคัญอีกอุตสาหกรรมหนึ่ง

3.3.1 อัตราการขยายตัวของอุตสาหกรรมเซรามิกในประเทศไทย

การผลิตเซรามิก ไตรมาสที่ 3 ปี 2548 กระเบื้องปูพื้น บุผนัง มีปริมาณ 40.88 ล้านตารางเมตร เมื่อเทียบกับไตรมาสก่อน และเทียบกับระยะเดียวกันของปีก่อน มีอัตราการขยายตัวเพิ่มขึ้นร้อยละ 4.6 และ 12.98 ตามลำดับ การจำหน่ายเซรามิกในระยะเวลาเดียวกันของกระเบื้องปูพื้น บุผนัง มีปริมาณ 39.84 ล้านตารางเมตร ซึ่งมีปริมาณลดลงเมื่อเทียบกับไตรมาสก่อนเนื่องจากความต้องการใช้เซรามิกลดลงจากการชะลอตัวของธุรกิจอสังหาริมทรัพย์ในประเทศ และเป็นช่วงหน้าฝนที่ไม่ใช่ฤดูกาลขาย แต่เมื่อเทียบกับระยะเดียวกันของปีก่อน การจำหน่ายกระเบื้องปูพื้น บุผนัง ยังคงมีการขยายตัวเพิ่มขึ้นแม้จะไม่เท่ากับปีที่ผ่านมา ซึ่งมีอัตราการขยายตัวเพิ่มขึ้น ร้อยละ 8.72 การส่งออกผลิตภัณฑ์เซรามิกในช่วงระยะเวลาดังกล่าวมีมูลค่ารวม 171.7 ล้านดอลลาร์สหรัฐ เมื่อเทียบกับไตรมาสก่อน และเทียบกับระยะเดียวกันของปีก่อน มีอัตราการขยายตัวเพิ่มขึ้นร้อยละ 0.47 และ 22.29 ตามลำดับ ในส่วนของการนำเข้าผลิตภัณฑ์เซรามิกส่วนใหญ่จะนำเข้าจากประเทศญี่ปุ่น มาเลเซีย อิตาลี อินโดนีเซีย และจีน โดยการนำเข้าผลิตภัณฑ์เซรามิกมีมูลค่า 45.2 ล้านดอลลาร์สหรัฐ เมื่อเทียบกับไตรมาสก่อน และเทียบกับระยะเดียวกันของปีก่อนมีอัตราการขยายตัวเพิ่มขึ้นร้อยละ 9.71 และ 18.64 ตามลำดับ ซึ่งการนำเข้าผลิตภัณฑ์เซรามิกสำหรับใช้ตามห้องปฏิบัติการต้องนำเข้าสินค้าคุณภาพสูงจากญี่ปุ่น มาเลเซีย และอิตาลี และการนำเข้าผลิตภัณฑ์เซรามิกอื่นส่วนใหญ่จะเป็นการนำเข้ากระเบื้อง ปูพื้น บุผนัง ที่มีราคาถูกจากจีน (ศูนย์สารสนเทศเศรษฐกิจอุตสาหกรรม สำนักงานเศรษฐกิจอุตสาหกรรม, 2548)

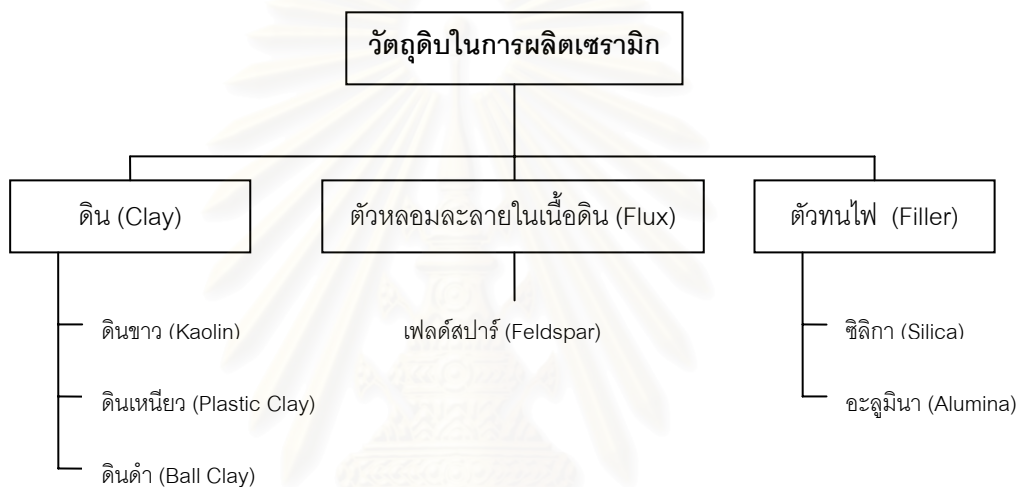
3.4 วัตถุดิบในการผลิตเซรามิก

วัตถุดิบที่ใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตเซรามิกบางอย่างได้มาจากสินแร่ตามธรรมชาติ เช่น ดินต่างๆ (Clays) เฟลด์สปาร์ (Feldspar) หินควอตซ์ (Quartz) และทรายทะเล เป็นต้น นอกจากนี้วัตถุดิบบางอย่างได้จากการสกัดจากสินแร่ตามธรรมชาติ และนำมาทำให้บริสุทธิ์ด้วยกระบวนการทางเคมี เช่น อะลูมินา (Alumina) ซึ่งได้จากแร่บอกไซต์ (Bauxite) ที่ได้จากการสังเคราะห์ นอกจากนี้ยังมีเฟอร์ไรต์ (Ferrites) และสารอินทรีย์บางชนิดที่ใช้เป็นตัวช่วยในการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์เซรามิกสมัยใหม่ต้องการวัตถุดิบที่ใช้ในกระบวนการผลิตที่มีเปอร์เซ็นต์ความบริสุทธิ์สูง เพราะสิ่งสกปรกเพียงเล็กน้อย ซึ่งอาจน้อยกว่า 1 เปอร์เซ็นต์ ก็มีอิทธิพลต่อโครงสร้างซึ่งเชื่อมโยงไปถึงคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์นั้นๆ ด้วย (ทีมา:ปริดา พิมพ์ขาว, 2539) ผลิตภัณฑ์เซรามิกทำมาจากวัตถุดิบทนไฟพวกอนินทรีย์สาร ซึ่งมีอยู่มากมายหลายชนิดตามอนุกรมการเผา สามารถ

เลือกใช้ให้เหมาะสมกับผลิตภัณฑ์ ในระบบอุตสาหกรรมเครื่องปั้นดินเผา นิยมแบ่งวัตถุดิบในการผลิตเซรามิกออกเป็น 3 กลุ่ม คือ ดิน ตัวหลอมละลายในเนื้อดิน และตัวทนไฟ ดังแสดงในรูปที่ 3.1

3.4.1 ดิน (Clays)

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



รูปที่ 3.1 แผนผังวัตถุดิบบางชนิดในการผลิตเซรามิก (ไพจิตร อิงศิริวัฒน์, 2541)

แร่ดินที่ใช้เตรียมเนื้อดินในอุตสาหกรรมเซรามิก ได้แก่

3.4.1.1 ดินขาว (Kaolin, China clay) ดินขาวส่วนใหญ่เป็นดินที่เกิดอยู่ในแหล่งผุพังของหินเดิม (Residual clay) เป็นดินที่มีขนาดเม็ดหยาบจึงมีความเหนียวน้อย ประกอบด้วยแร่กาโอลินไนท์ (Kaolinite) มากกว่าดินชนิดอื่นๆ ดินขาวที่พบตามแหล่งที่ส่วนประกอบต่างกันด้วยเหตุผล 2 ประการ คือ เนื่องจากโครงสร้างของดินขาวมีการแทนที่กันของโลหะธาตุที่มีประจุบวก และเนื่องจากมีสารประกอบอื่นปะปนอยู่ ได้แก่ ควอตซ์ (Quartz) เฟลด์สปาร์ (Feldspar) ฮีมาไทท์ (Hematite) และ ฟลูออไรต์ (Fluorite) เป็นต้น

ดินขาวที่ขุดขึ้นมาใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ มีอยู่ 3 ชนิด คือ

- ดินขาวที่มีความบริสุทธิ์และความทนไฟสูง สามารถนำมาใช้ทำผลิตภัณฑ์เครื่องปั้นดินเผาได้

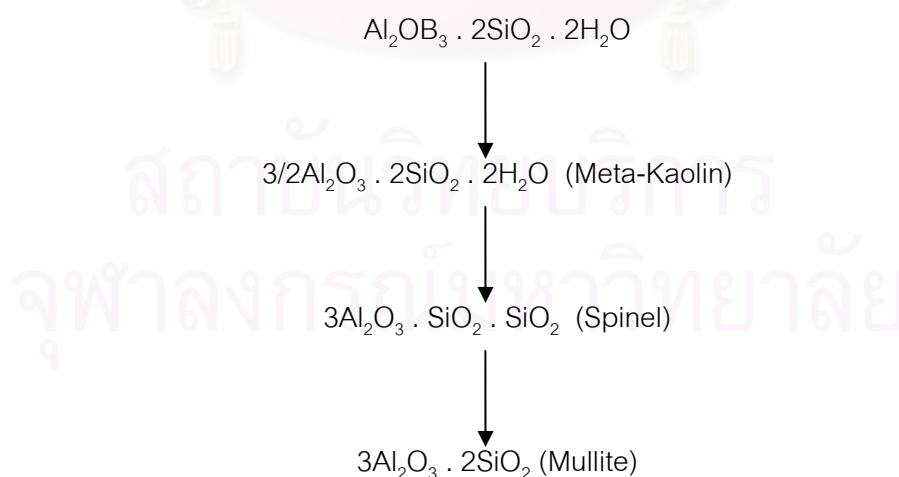
- ดินขาวที่เป็นเกรดของฟิลเลอร์ที่ใช้ในอุตสาหกรรมกระดาษ ทำสี ทำยาง ยาฆ่าแมลง ปุ๋ย และอื่นๆ โดยใช้ดินขาวที่มีเนื้อสีขาวบริสุทธิ์ตามผลการวิเคราะห์ทางเคมี แต่ไม่ได้นำไปเผาผ่านความร้อนในกระบวนการผลิต

- ดินขาวซึ่งเป็นดินสอพองซึ่งไม่ใช่ดินขาว แต่เป็นปูนขาวซอล์ก (Chalk) หรือแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) เกิดจากผลึกของหินปูนตามธรรมชาติที่มีลักษณะเป็นผลึกละเอียดสีขาว บางครั้งสีอมชมพูและน้ำตาลอ่อน ซึ่งใช้เป็นเนื้อดินปั้นขึ้นรูป ไม่ได้ใช้ผสมทำปูนซีเมนต์

ตารางที่ 3.1 สมบัติต่างๆ ของดินขาว (ไพจิตร อังศิริวัฒน์, 2541)

สูตรดินขาว	$\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
ส่วนประกอบ	39.5% 46.5% 14%
รูปผลึก	เป็นแผ่นหกเหลี่ยม เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.5-10.0 ไมครอน
ความเหนียว	ต่ำ
ความทนไฟ	1750-1770 °ซ
ความหดตัว	น้อย
ความแข็งแกร่งหลังเผา	สูง

สมบัติทางเคมีของดินขาว มีการเปลี่ยนแปลงรูปแบบการเรียงตัวของผลึกในโครงสร้างตามอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไป ดังแสดงในรูปที่ 3.2 ทำให้เกิดเป็นโครงสร้างที่มีความแข็งแรงขึ้น



รูปที่ 3.2 ปฏิกริยาของดินขาว เมื่อผ่านอุณหภูมิต่างๆ และการเปลี่ยนแปลงผลึกทางโครงสร้างเคมี (ไพจิตร อังศิริวัฒน์, 2541)

สมบัติทางกายภาพของดินขาว (Physical properties of kaolin)

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

- รูปร่างของอนุภาค (Particle shape) รูปร่างของแร่กาอลินในทั่วไปจะเป็นแผ่นหกเหลี่ยม (Hexagonal plates) มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่ 0.05-10.0 ไมครอน โดยเฉลี่ยขนาดอยู่ระหว่าง 0.5 ไมครอน

- คุณสมบัติในการแลกเปลี่ยนอนุภาค (Base exchange capacity) ปกติดินขาวที่บริสุทธิ์จะไม่มีแลกเปลี่ยนอนุภาค หรือดูดซับอนุภาคและโมเลกุลอื่นๆ แต่ถ้าไม่บริสุทธิ์จะเกิดการแลกเปลี่ยนอนุภาค หรือดูดซับเอาผลึกของแร่ที่มีขนาดเล็กไว้ที่ผิว ผลึกกาอลินในทบริสุทธิ์มีโครงสร้างผลึกที่แข็งแรง แร่ธาตุและอินทรีย์สารแทรกเข้าไปในโครงสร้างผลึกไม่ได้จึงคงความบริสุทธิ์ได้ดี

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

- ความแข็งแรงของเนื้อดินก่อนเผา (Green strength) ดินขาวมีความแข็งแรงน้อย เพราะแตกง่ายเมื่อแห้ง เพราะมีความเหนียวน้อย

- สมบัติหลังจากการเผา (Firing properties) ดินขาวที่มีคุณภาพดี เมื่อเผาแล้วควรจะได้สีขาว แต่ถ้าเป็นสีครีมหรือน้ำตาลอ่อน แสดงว่ามีแร่ธาตุเจือปนอยู่สูง ดินขาวที่มีการหดตัวเกิน 20 เปอร์เซ็นต์ หลังการเผาไม่ควรใช้ดินขาวนั้นในเนื้อดินปั้นปริมาณมาก

3.4.1.2 ดินเหนียว (Plastic clay) ดินเหนียวคือดินเนื้อละเอียดที่มีแร่ธาตุเจือปนอยู่ตามธรรมชาติค่อนข้างสูง ไม่บริสุทธิ์เหมือนดินขาว เมื่อขุดพบมีสีต่างๆ เช่น สีเหลือง สีเทา สีดำ หรือสีส้มแดง หลังการเผาดินก็จะมีสีต่างๆ เช่น สีเทา สีน้ำตาล สีแดง สีดำ หรือสีเหลืองอมเทา ดังนั้นดินเหนียวก็คือดินที่มีความเหนียวเนื้อละเอียดที่เป็นสีต่างๆ ภายหลังการเผา ดินดำ (Ball clay) จัดว่าเป็นดินเหนียวประเภทหนึ่งด้วย แต่ดินดำแตกต่างจากดินเหนียวคือ ดินดำมีแร่ธาตุเจือปนอยู่ในปริมาณต่ำ ค่อนข้างบริสุทธิ์ แต่มีอินทรีย์สารเจือปนอยู่สูง ดินดำบางชนิดมีความเหนียวน้อย บางชนิดมีความเหนียวมาก

3.4.1.3 ดินดำ (Ball clay) ซึ่งเป็นวัตถุดิบที่ใช้ในการวิจัยนี้ คือ ดินเหนียวขาวที่เกิดจากดินขาว ซึ่งย้ายถิ่นไปตกตะกอนสะสมในแหล่งใหม่ (Sedimentary clay) ดินดำเป็นดินที่มีขนาดผลึกเม็ดละเอียดมาก อนุภาคของดินยึดเกาะกันได้ดี มีอินทรีย์สารที่มีโครงสร้างคล้ายกับที่

พบในถ่านหินลิกไนท์เจือปนอยู่ แต่เมื่อนำไปเผาที่อุณหภูมิสูงเนื้อดินจะมีสีขาวหรือสีครีม อินทรีย์สารต่างๆ จะถูกเผาไหม้หมดไปจากเนื้อดิน

ดินดำที่มีเนื้อละเอียดหลังการเผาเป็นสีขาว และมีความทนไฟ 1300 องศาเซลเซียส โดยไม่บิดเบี้ยวมักเป็นดินที่มีคุณภาพดี นิยมใช้ผสมในผลิตภัณฑ์สีขาว เช่น ปอร์ซเลน โบนไซนาและไวท์เอร์เทินแวร์ ส่วนดินดำทั่วไปที่คุณภาพปานกลางมีทรายเจือปนอยู่มากใช้ทำเนื้อดินขึ้นรูปด้วยแป้นหมุน ทำท่อน้ำดินเผา หรือผสมในเนื้อดินทำกระเบื้องปูพื้น

ส่วนประกอบทางเคมีของดินดำ (Chemical properties of ball clay)

ในดินดำประกอบด้วยแร่กาอลินไนท์เป็นส่วนใหญ่ เช่นเดียวกับดินขาว แต่เป็นผลึกกาอลินไนท์ ชนิดไม่สมบูรณ์ (Disordered kaolinite) ในระหว่างผลึกมีแร่ธาตุและอินทรีย์สารแทรกอยู่โดยประมาณ จะมีซิลิกา 40-60 เปอร์เซ็นต์ อะลูมินา 30 เปอร์เซ็นต์ น้ำผลึกและอินทรีย์สารประมาณ 10 เปอร์เซ็นต์ นอกจากนี้ยังมีแร่ธาตุอื่นๆ ปะปนอยู่ในดินด้วย เช่น ไทเทเนียม (TiO_2) เฟอร์ริก (Fe_2O_3) แคลเซียม (CaO) แมกนีเซียม (MgO) เหล็กซัลเฟต (FeS) โพแทสเซียม (K_2O) และ โซเดียม (Na_2O) เป็นต้น

ตารางที่ 3.2 สูตรเคมีของดินดำ (ไพจิตร อังศิริวัฒน์, 2541)

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

สมบัติทางกายภาพของดินดำ (Physical properties of Ball clay)

- ขนาดของดินดำจะมีผลึกละเอียดมากน้อยเพียงใด เปลี่ยนแปลงไปตามแหล่งที่พบ เมื่อถูกพัดพาไปไกลจากแหล่งกำเนิดเดิมมาก ขนาดเม็ดอนุภาคจะละเอียดมากขึ้นตามลำดับ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 0.05-1.0 ไมโครเมตร

- ความเหนียว (Plasticity) ดินดำเป็นดินที่อมน้ำได้มาก ความเหนียวจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับชนิดของดิน ซึ่งประกอบด้วยหลักสำคัญคือ ปริมาณอินทรีย์สาร ขนาดของเม็ดดิน และ วัสดุที่ทำให้ความเหนียว เช่น ดินเบนโตไนท์ เป็นต้น

- การหดตัวเมื่อแห้ง (Drying shrinkage) ดินดำที่มีทรายปนอยู่สูงแทบไม่มีการหดตัวเลย แต่ดินดำที่มีอินทรีย์สารสูงจะมีการหดตัวมากประมาณ 13-17 เปอร์เซ็นต์

- การหดตัวหลังเผา (Firing shrinkage) มีการหดตัวสูงประมาณ 15 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากดินดำมีขนาดอนุภาคที่เล็กมาก

- ความแข็งแรงของดินเมื่อแห้งก่อนเผา (Green strength) โดยเนื้อดินจะมีความแข็งแรง (Strength) ประมาณ 100-1000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว

- สีหลังเผา เป็นสีขาวนวล

- มีแร่ธาตุต่างและไมก้า ทำหน้าที่เป็นตัวหลอมละลายช่วยลดอุณหภูมิในการเผา

ตารางที่ 3.3 ข้อดีและข้อเสียของดินดำ (ไพจิตร อังศิริวัฒน์, 2541)

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

3.4.2 ตัวหลอมละลายในเนื้อดิน (Flux)

คือวัตถุดิบที่ทำหน้าที่เป็นตัวหลอมละลายลดอุณหภูมิในการเผา การใช้ตัวหลอมละลายผสมในเนื้อดิน เพื่อให้เนื้อดินสุกตัวในอุณหภูมิที่ต้องการ ตัวหลอมละลายจะทำหน้าที่ประสานผลึกของวัตถุดิบต่างๆ ให้หลอมละลายเป็นเนื้อเดียวกัน ในขณะที่เนื้อดินถูกเผาผ่านความร้อน วัตถุดิบที่เป็นตัวหลอมละลายที่ถูกบดละเอียดผสมอยู่ในเนื้อดินจะเริ่มเกิดการหลอมตัวก่อน แล้วจึงดึงเอาวัตถุดิบทนไฟที่อยู่รอบๆ ผลึกมาหลอมเข้าด้วยกัน ทำให้ช่องว่างที่อยู่ระหว่างผลึกเม็ดดินหายไป และเนื้อดินเกิดการหดตัวรวมกันหลอมจนเป็นเนื้อแน่นคล้ายแก้ว ในระหว่างที่เตาเผาเย็นตัวลง เนื้อดินก็จะค่อยๆ เย็นตัวกลายเป็นของแข็ง

ความพรุนตัวของดินหรือคุณสมบัติของดินภายหลังการเผาขึ้นอยู่กับปริมาณของวัตถุดิบที่เป็นตัวหลอมละลาย ถ้าใช้วัตถุดิบตัวหลอมละลายในปริมาณมากเกินไปดินอาจยุบตัวภายหลังการเผา ดังนั้นหลักสำคัญในการผสมเนื้อดินนั้นต้องพยายามให้เนื้อดินมีช่วงเผาสุกตัวยาว คือสามารถเผาให้สุกตัวได้ในอุณหภูมิที่มีความแตกต่างกัน ประมาณ 30-50 องศาเซลเซียสเพื่อความ

ปลอดภัยในการเผามากยิ่งขึ้น แม้ว่า จะเผาเกินอุณหภูมิไปบ้างเล็กน้อยผลิตภัณฑ์ก็ไม่เกิดความเสียหาย

ตัวหลอมละลายที่ใช้ผสมในอุตสาหกรรมมีหลายชนิด เช่น หินฟันม้า (Feldspar) เนฟเฟลีนไชนาไนท์ (Nepheline syenite) ทัลค์ (Talc) หินปูน (CaCO_3) โดโลไมท์ (Dolomite) เป็นต้น แต่จะกล่าวถึงตัวหลอมละลายที่จะถูกแทนที่ในการวิจัยนี้คือ หินฟันม้า หรือ เฟลด์สปาร์ (Feldspar)

3.4.2.1 เฟลด์สปาร์ (Feldspar)

ในเนื้อดินบ้นต้องการตัวลดจุดหลอมตัวเพื่อทำให้เกิดเนื้อแก้ว (Glassy phase) ขึ้น ปริมาณหนึ่งในระหว่างการเผา ซึ่งจะทำให้เนื้อผลิตภัณฑ์แข็งแกร่ง และโปร่งใส ตัวลดจุดหลอมตัวที่นิยมใช้มาก ได้แก่ เฟลด์สปาร์ เฟลด์สปาร์เป็นวัตถุดิบที่สำคัญในกลุ่มที่ให้ค่าหรือวัตถุดิบช่วยในการหลอมละลาย ต่างในแร่เฟลด์สปาร์อยู่ในรูปผลึกที่ไม่ละลายน้ำ จึงสะดวกในการนำมาใช้เป็นวัตถุดิบผสมในเนื้อดินและน้ำเคลือบได้โดยตรง ไม่ต้องนำมาหลอมเป็นฟริต (Frit) ก่อนใช้ เฟลด์สปาร์ใช้ผสมในเนื้อดินและน้ำเคลือบอุณหภูมิสูง เพื่อลดจุดหลอมละลายในการเผา เป็นตัวเริ่มก่อให้เกิดปฏิกิริยาการเกิดเนื้อแก้วในดิน ปริมาณที่ใช้ในเนื้อดินประมาณ 15 เปอร์เซ็นต์ ปริมาณที่ใช้ในเคลือบประมาณ 40-60 เปอร์เซ็นต์

เฟลด์สปาร์เป็นสารประกอบอะลูมิเนียมซิลิเกตของอัลคาไลและอัลคาไลเอิร์ท โดยเฉพาะสารประกอบของ Na K Ca พบมากและใช้มากในอุตสาหกรรมเซรามิก สารประกอบบริสุทธิ์ของ Na K Ca หาได้ยาก ในเฟลด์สปาร์จะมีทั้ง Na K Ca ซึ่งจะมีอัตราส่วนแตกต่างกันไปเนื่องจากสารประกอบทั้งสามตัวนี้มีการละลายซึ่งกันและกันในขณะที่เป็นของแข็ง เฟลด์สปาร์ใช้ในอุตสาหกรรมเซรามิกเพื่อเป็นตัวเริ่มก่อให้เกิดปฏิกิริยาการเกิดเนื้อแก้วในเนื้อผลิตภัณฑ์ ดังนั้นเฟลด์สปาร์จึงเป็นตัวส่งเสริมให้มีการเกิดการเปลี่ยนแปลงไปเป็นแก้ว และช่วยส่งเสริมให้ผลิตภัณฑ์มีสมบัติโปร่งแสงดีขึ้น เฟลด์สปาร์เป็นแหล่งให้อัลคาไลและให้อะลูมินาแก่เคลือบ ข้อดีที่ทำให้อุตสาหกรรมเซรามิกนำเฟลด์สปาร์มาใช้คือ เฟลด์สปาร์เป็นอัลคาไลที่ไม่ละลายน้ำ

เฟลด์สปาร์ที่พบมากมี 3 ชนิด คือ ออร์โทเคลส แอลไบต์ และ อะนอร์ไทต์ โครงสร้างเป็นร่างแห 3 มิติ เกิดจากการเชื่อมโยงกันของออกซิเจน ทั้ง 4 อะตอมของ oxygen-silicon tetrahedron นอกจากนี้ Al^{+3} ยังเข้าไปแทนที่ Si^{+4} บางส่วน และช่องว่างในโครงสร้างร่างแหยังถูก K^+ Na^+ Ca^{+2} เข้าไปอยู่ ขนาดของอนุภาค Na^+ เท่ากับ 0.98° Ca^{+2} เท่ากับ 1.06° K^+ เท่ากับ 1.33° เนื่องจาก Na^+ และ Ca^{+2} มีขนาดใกล้เคียงกัน สารประกอบทั้งสองจึงมีการละลายกันดี ส่วน K^+ มีขนาดใหญ่มาก จึงละลายกับสารประกอบ Na^+ และ Ca^{+2} ได้เพียงบางส่วน เฟลด์สปาร์ที่มี Na^+ และ Ca^{+2} เป็นส่วนประกอบที่มีโครงสร้างเป็นไตรคลินิก (triclinic) และเฟลด์สปาร์ที่มี K^+ เป็นส่วนประกอบมีโครงสร้างเป็นโมโนคลินิก (monoclinic) โครงสร้างของเฟลด์สปาร์เปลี่ยนแปลงไป

ตามอนุกรมวิธานที่สูงขึ้น ในประเทศไทยมีเฟลด์สปาร์หลายแหล่ง เช่น ที่จังหวัดตาก อุทัยธานี ราชบุรี นครศรีธรรมราช เชียงใหม่ ลำพูน สุโขทัย และ กาญจนบุรี

ตารางที่ 3.4 สมบัติทางกายภาพของเฟลด์สปาร์ (ไพจิตร อังศิริวัฒน์, 2541)

ความถ่วงจำเพาะ	2.56-2.63
อุณหภูมิที่หลอมเหลว	1150-1530 องศาเซลเซียส
ความแข็ง	6.0-6.5 โมห์สเกล

ส่วนประกอบทางเคมีของเฟลด์สปาร์

เฟลด์สปาร์บางแห่งมี SiO₂ 70 เปอร์เซ็นต์ Al₂O₃ 18 เปอร์เซ็นต์ Fe₂O₃ 0.1 เปอร์เซ็นต์ CaO 1.1 เปอร์เซ็นต์ K₂O 6.0 เปอร์เซ็นต์ และ Na₂O 5.0 เปอร์เซ็นต์ น้ำหนักหายไปหลังเผา 0.3 เปอร์เซ็นต์ บางแหล่งพบว่า มีเฟลด์สปาร์หลายชนิดผสมกันอยู่ เช่น โฟแทสเฟลด์สปาร์ 47.9 เปอร์เซ็นต์ โซดาเฟลด์สปาร์ 30.6 เปอร์เซ็นต์ ไลม์เฟลด์สปาร์ 4 เปอร์เซ็นต์ ควอตซ์ 14.1 เปอร์เซ็นต์ และอื่นๆ 3.4 เปอร์เซ็นต์ ในประเทศไทยมีการผลิตเฟลด์สปาร์ทั้งชนิดโฟแทสและโซดาเฟลด์สปาร์ ซึ่งมีส่วนประกอบทางเคมีดังนี้

ตารางที่ 3.5 ส่วนประกอบทางเคมีของเฟลด์สปาร์ (ปรีดา พิมพ์ขาวขำ, 2547)

	โซดาเฟลด์สปาร์	โฟแทสเฟลด์สปาร์
SiO ₂	67.2	67.7
Al ₂ O ₃	19.4	18.1
Fe ₂ O ₃	0.2	0.2
CaO	0.4	0.6
MgO	0.6	0.3
Na ₂ O	10.4	6.6
K ₂ O	0.4	4.9
Loss	0.8	0.8

3.4.3 ตัวหนไฟ (Filler)

มีคุณสมบัติช่วยเปิดเนื้อดินให้มีความพรุนตัว ช่วยลดการหดตัวของเนื้อดินขณะผึ่งแห้ง และลดความเหนียวของเนื้อดินลงด้วย นอกจากนี้ตัวหนไฟยังทำหน้าที่เป็นโครงสร้างของเนื้อผลิตภัณฑ์ ให้คงอยู่ในสภาพดีไม่บิดเบี้ยวแตกร้าวหลังการเผา ทำให้เนื้อดินมีลักษณะพื้นผิวหยาบหรือละเอียดตามความต้องการ และเพิ่มความแข็งแรงให้เนื้อดินหลังการเผา

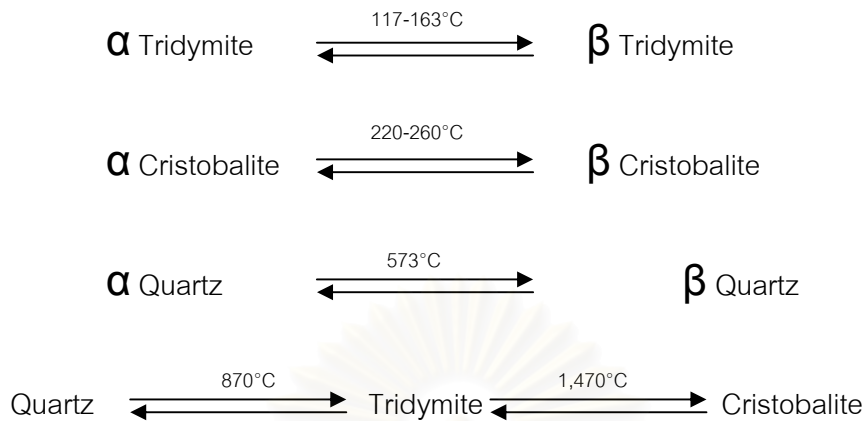
ตัวหนไฟที่ใช้ในการผลิตเซรามิก ได้แก่ ซิลิกา อะลูมินา วัตถุในกลุ่มซิลิมาไนท์ (Silimanite group) คัลไซน์เคลย์ (Calcined clay) ไพโรฟิลไลต์ (Pyrophyllite) เซอร์คอน (Zircon) เป็นต้น ซึ่งในที่นี้จะกล่าวถึงเฉพาะซิลิกา และอะลูมินาซึ่งใช้ในการวิจัยนี้

3.4.3.1 ซิลิกา (Silica, SiO_2) โดยปกติในดินทุกชนิดและในเฟลด์สปาร์จะมีซิลิกาเป็นองค์ประกอบในสูตรเคมีอยู่แล้ว ในการเตรียมเนื้อดินจะมีการเพิ่มซิลิกาเข้าไปในสูตรดินด้วยอีกส่วนหนึ่งโดยใช้ซิลิกาบดละเอียด ซิลิกาที่เพิ่มเข้าไปต่างหากนี้ เรียกว่า ซิลิกาอิสระ การเพิ่มซิลิกาอิสระนี้บางครั้งเป็นอันตรายหลังการเผาเพราะทำให้เนื้อดินขยายตัวมากกว่าสารเคลือบ (Thermal expansion) โดยปกติแล้วสารเคลือบจะไม่ร่นตัว ถ้าเนื้อดินและสารเคลือบหดตัวในอัตราส่วนใกล้เคียงกัน (ซิลิกาที่ประกอบอยู่ในเฟลด์สปาร์และเนื้อดินมีการขยายตัวและหดตัวน้อยกว่าซิลิกาอิสระที่เติมเข้าไป) ซิลิกาถูกนำมาใช้ประโยชน์ในการผลิต คือ ใช้เป็นส่วนผสมของเนื้อดินในการทำผลิตภัณฑ์เซรามิก ใช้เป็นส่วนผสมของสารเคลือบ ใช้ในอุตสาหกรรมแก้วและการก่อสร้าง ได้แก่ ทราาย

ตารางที่ 3.6 สมบัติทางกายภาพของซิลิกา (ไพจิตร อังศิริวัฒน์, 2541)

ความถ่วงจำเพาะ	2.65
ความแข็ง	7 โมห์สเกล
จุดหลอมละลาย	1728 องศาเซลเซียส
โครงสร้างผลึก	รูปหกเหลี่ยมเป็นร่างสามมิติ

ซิลิกาเมื่อถูกเผาผ่านความร้อนจะเปลี่ยนโครงสร้างของรูปผลึกอยู่หลายช่วง อุณหภูมิของการเผา โดยอะตอมของรูปผลึกถูกจัดเรียงตัวใหม่จากรูปแบบหนึ่งเปลี่ยนแปลงเป็นอีกแบบหนึ่ง แต่ระเบียบจะสามารถคงสภาพอยู่ได้ในช่วงอุณหภูมิหนึ่ง การเปลี่ยนแปลงรูปผลึกนี้เรียกว่า อินเวอร์ชัน (Inversion) การเปลี่ยนแปลงจะเกิดขึ้นเมื่อผลึกของซิลิกาถูกเผาผ่านความร้อน แต่เมื่อสิ้นสุดการเผา ซิลิกาจะเย็นตัวลง ผลึกต่างๆ จะย้อนกลับมาเป็นรูปเดิม เมื่อเย็นตัวลงถึงอุณหภูมิเดิมดังแสดงในรูปที่ 3.3 ซึ่งแสดงการเปลี่ยนแปลงเฟสของซิลิกาที่อุณหภูมิต่างๆ



รูปที่ 3.3 ปฏิกริยาการเปลี่ยนแปลงของผลึกซิลิกาเมื่อได้รับความร้อน (ไพจิตร อิงศิริวัฒน์, 2541)

3.4.3.2 อะลูมินา (Alumina, Al_2O_3) คือ อะลูมิเนียมออกไซด์ เรียกอีกชื่อหนึ่งว่า คอร์รันดัม (Corundum) ได้จากการเผาอะลูมินาไฮดรต ($\text{Al}(\text{OH})_3$) ที่อุณหภูมิประมาณ 1000 องศาเซลเซียส เพื่อขจัดน้ำออกไป อะลูมินาเป็นประโยชน์มากในอุตสาหกรรมวัสดุทนไฟถึงแม้ว่า อะลูมินาจะแพงกว่าเฟลด์สปาร์ แต่ในอุตสาหกรรมแก้วที่ต้องการอัลคาไลน์น้อยๆ จำเป็นต้องใช้ อะลูมินา ข้อดีอีกประการหนึ่งของอะลูมินา คือ มีปริมาณเหล็กน้อย สารประกอบมีความบริสุทธิ์ ค่อนข้างสูง โดยทั่วไปอะลูมินามักพบในรูปของไฮดรต (Hydrate) คือผลึกของอะลูมินามีการ รวมตัวทางเคมีกับน้ำ เช่น หินบอกไซต์ (Bauxite) ซึ่งประกอบด้วยแร่ที่สำคัญ 3 ชนิด ได้แก่ กิบบ์ ไซต์ (Gibbsite, $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$) ไดอะพอร์ (Diapore, $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) โบห์ไมท์ (Boehmite, $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$)

ตารางที่ 3.7 สมบัติทางกายภาพของอะลูมินา (ไพจิตร อิงศิริวัฒน์, 2541)

ความถ่วงจำเพาะ	3.9-4.1
ความแข็ง	9 โมห์สเกล
จุดหลอมละลาย	2050 °ซ
จุดสุกตัวได้เนื้อแก้ว (Sintered alumina)	1600-1900 °ซ
ความเป็นฉนวนไฟฟ้า	ดี

อะลูมินาเป็นวัสดุที่มีความทนไฟสูง มีความทนต่อการกัดกร่อนจากสารเคมี มีความแข็งแรงและมีคุณสมบัติเป็นฉนวนไฟฟ้าได้ดี ด้วยคุณสมบัตินี้เอง อะลูมินาถูกนำมาใช้ในการผลิตวัตถุดิบไฟ เบ้าหลอม หัวเทียน และแผ่นรองวงจรไฟฟ้า อย่างไรก็ตามการนำอะลูมินามาใช้ก็มีความเสี่ยงในบางกรณี เช่น ทำให้อัตราการขยายตัวของดินต่ำ ไม่เท่ากับอัตราการขยายตัวของเคลือบ เพราะผลึกอะลูมินาเมื่อเผาผ่านความร้อนไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปผลึกซับซ้อนเหมือนซิลิกา นอกจากนี้อะลูมินาเป็นวัสดุที่มีค่าความถ่วงจำเพาะหนักถึง 3.95 ถ้าใช้ผสมเนื้อดินปริมาณ 35 เปอร์เซ็นต์ จะทำให้เนื้อดินหลังการเผาหนักเพิ่มขึ้นถึงร้อยละ 20 และอะลูมินามีค่าความแข็งแรงสูงถึง 9 ซึ่งรองจากเพชร (ค่าความแข็งแรงเท่ากับ 10) ทำให้การบดย่อยให้เป็นผงละเอียดทำได้ช้าและค่อนข้างยาก

อะลูมินาถูกนำมาใช้ประโยชน์ในการผลิต คือ ใช้ผสมเนื้อดินปั้นชนิดปอร์เซเลน เรียกว่า อะลูมินาปอร์เซเลน (Alumina porcelain) และผลิตภัณฑ์ชนวนไฟฟ้าแรงสูง เพื่อเพิ่มความแข็งแรง ใช้ในอุตสาหกรรมที่จะต้องทนต่อการกัดกร่อนจากสารเคมี (Abrasion-resistance purposes) และใช้ทำวัสดุทนไฟในเตาเผา (Refractory purposes) ใช้ในอุตสาหกรรมอิฐทนไฟ (High alumina bricks) ใช้ในการเตรียมน้ำเคลือบ เป็นส่วนของน้ำเคลือบเกือบทุกชนิด และมีคุณสมบัติทำให้เคลือบด้านถ้าใช้ในปริมาณมาก

3.4.3.3 ททรายแก้ว

ทราย (Sand) ตามความหมายของวิชาตะกอนศาสตร์ (Sedimentology) หมายถึงเม็ดวัตถุตะกอนที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่ 0.063-2.000 มิลลิเมตร ซึ่งประกอบด้วยวัตถุที่เป็นเศษหิน เศษแร่ ขนาดเล็ก ที่มีลักษณะร่วนซุย ไม่เกาะติดกัน ได้แก่ แร่ควอตซ์ (Quartz) แร่ฟีนixa (Feldspar) หินบะซอลต์ หินปูน หินภูเขา แร่ยิปซัม เป็นต้น ทรายเกิดตามธรรมชาติด้วยกระบวนการกัดกร่อนและผุสลายจากหินและแร่ที่เป็นต้นกำเนิด จากนั้นอาจถูกกระแส น้ำ คลื่น แรงโน้มถ่วง น้ำแข็งและลม นำพาไปสะสมอยู่ในบริเวณภูมิประเทศลักษณะต่างๆ มีทั้งทรายที่สะสมตัวบนบกโดยแม่น้ำลำธาร กระแสน้ำและทรายที่สะสมในทะเลที่สัมพันธ์กับคลื่นกระแส น้ำ สำหรับตะกอนกรวด (Gravel) นั้น หมายถึงตะกอนที่มีขนาดใหญ่กว่า 2 มิลลิเมตรขึ้นไป ลักษณะทรายจำแนกตามการใช้ประโยชน์หลักแบ่งเป็น

ทรายสำหรับงานด้านโยธาในอุตสาหกรรมก่อสร้าง คือ วัสดุผสมละเอียดที่มีขนาดผ่านตะแกรงร่อน 4.75 มิลลิเมตรได้ จะเป็น เศษหิน แร่ ก็ได้ พบได้ทั่วไป มีความสะอาดระดับหนึ่ง มีเม็ดทรายแข็งแรง ทนทาน ไม่ขยายตัวมาก มีสารประกอบอินทรีย์ปนอยู่น้อย โดยทรายที่ใช้ผสมปูนซีเมนต์จะเรียกว่าวัสดุผสมละเอียด (Fine aggregate) จะมีขนาดประมาณ 0.07-4.75 มิลลิเมตร แยกการใช้งานตามขนาดของเม็ดทราย

ทรายละเอียด ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.5-1.5 มิลลิเมตร ใช้งานในปูนก่อ ปูนฉาบ

ทรายกลาง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1-3 มิลลิเมตร ใช้ในงานคอนกรีต ปูนก่อก่อที่ต้องรับแรงอัด ปูนฉาบผนังได้ดิน พื้นคาน

ทรายหยาบ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2-4.75 มิลลิเมตร ใช้ในงานคอนกรีต เทพื้น ฐานราก และงานที่ต้องการแรงอัดมาก

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

3.4.3.3.1 ทรายแก้วที่ใช้ในอุตสาหกรรมเซรามิก

ในอุตสาหกรรมเซรามิก ทรายแก้วเป็นส่วนประกอบของเนื้อเซรามิกคุณภาพสูงสีขาวถึง 30-40 เปอร์เซ็นต์ เพราะทรายแก้วเพิ่มความขาวให้กับผลิตภัณฑ์ ทำให้แกร่ง แข็งง่าย เพิ่มการยึดเกาะ ระหว่างเนื้อเซรามิกและตัวเคลือบ คงทนต่อความร้อน แตกยาก โดยเฉพาะ ทรายแก้วจากพลินท์ และทรายแก้วที่เป็นผลพลอยได้ จากการทำเหมืองซอลท์

3.4.3.3.2 คุณสมบัติของทรายแก้วในอุตสาหกรรมเซรามิก ต้องมีองค์ประกอบสำคัญ ได้แก่

- ปริมาณซิลิกา (SiO_2) ไม่น้อยกว่า 99 เปอร์เซ็นต์
- ปริมาณเหล็ก (Fe_2O_3) ไม่เกิน 0.01 เปอร์เซ็นต์
- ขนาดของเม็ดทรายละเอียด ขนาดน้อยกว่า 0.1 มิลลิเมตร (200 เมช)
- มีความชื้นในปริมาณที่กำหนด ไม่เกิน 1 เปอร์เซ็นต์
- ผ่านกระบวนการล้าง แต่งแร่เพื่อแยกเอาแร่เหล็ก และแร่หนักออก
- ผ่านกระบวนการคัดขนาดได้ทรายแก้วที่มีคุณภาพสม่ำเสมอ

3.5 แก้ว (Glass)

แก้ว หมายถึง สารประกอบซับซ้อนของอะลูมิเนียมซิลิเกตกับอัลคาไลต่างๆ ซึ่งเป็นของแข็ง อาจมีสีหรือไม่มีสี อาจโปร่งแสงหรืออาจโปร่งใส มีจุดหลอมตัวสูง ขณะเป็นของเหลวมีความหนืดสูง จึงมีช่วงการเย็นตัวยาวนาน สมบัตินี้เป็นข้อดีที่ทำให้รูปร่างที่ทำให้การแปรรูปร่างผลิตภัณฑ์แก้วได้สะดวกขึ้น ในเนื้อแก้วบางชนิดการควบคุมอุณหภูมิของแก้วที่จุดใดจุดหนึ่งนานๆ จะทำให้เกิดการตกผลึกเล็กๆ

แก้วประกอบด้วยออกไซด์ต่างๆ 3 ชนิด

1. ออกไซด์ที่เป็นตัวสร้างโครงสร้างของแก้ว ออกไซด์พวกนี้สามารถสร้างโครงสร้างของแก้วด้วยตนเอง ออกไซด์ที่จะสร้างโครงสร้างของแก้วได้ ออกไซด์พวกนี้ได้แก่ SiO_2 , B_2O_3 และ P_2O_5 เป็นต้น

2. ออกไซด์ที่เป็นตัวปรับปรุงสมบัติของแก้ว ออกไซด์พวกนี้จะเข้าไปแทรกตัวอยู่ตามช่องว่างภายในร่างแหของโครงสร้างของแก้ว และเป็นตัวทำให้พันธะร่างแหอ่อนแอ ออกไซด์พวกนี้มีปริมาณจำกัด ถ้ามีมากเกินไป คือมีปริมาณมากกว่าช่องว่างในร่างแหของโครงสร้างของแก้วแล้ว โครงสร้างของแก้วจะสลายกลายเป็นสารประกอบที่มีโครงสร้างเป็นผลึก ออกไซด์พวกนี้ได้แก่ Na_2O K_2O CaO MgO และ PbO เป็นต้น นอกจากนี้ ออกไซด์พวกนี้ยังมีมากจะทำให้แก้วมีความหนืดและความต้านทานต่อการกัดกร่อนของสารเคมีลดลง

3. ออกไซด์ที่มีสมบัติอยู่ระหว่างออกไซด์ 2 พวกที่กล่าวมา ออกไซด์พวกนี้ไม่สามารถสร้างโครงสร้างของแก้วได้เอง แต่สามารถแทรกเข้าไปในโครงสร้างแก้วได้โดยการแทนที่พวก Si^{+4} และ B^{+3} และในบางกรณีจะสร้างโครงสร้างของแก้วเองต่อเมื่อมีออกไซด์ที่เป็นตัวปรับปรุงสมบัติของแก้วที่แน่นอน เช่น ในระบบ $\text{MgO-CaO-Al}_2\text{O}_3$ หรือ $\text{K}_2\text{O-CaO-Al}_2\text{O}_3$ ออกไซด์พวกนี้ได้แก่ Al_2O_3 ZnO ZrO_2 และ CdO เป็นต้น

ความแข็งแรงของพันธะที่เกิดขึ้นในโครงสร้างของแก้วเนื่องจากออกไซด์ทั้งสามชนิดนี้เรียงจากมากไปน้อย คือ ออกไซด์ที่เป็นตัวโครงสร้างของแก้ว ออกไซด์ที่เป็นตัวปรับปรุงสมบัติของแก้ว และออกไซด์ที่มีสมบัติอยู่ระหว่างออกไซด์สองพวกแรก

3.5.1 ลักษณะทั่วไปของแก้ว

โดยทั่วไปวัตถุดิบที่ใช้เป็นส่วนผสมในการผลิตแก้ว หรือกระจกจะแตกต่างกันตรงสัดส่วนของส่วนผสมที่ใช้ เพื่อให้ผลิตภัณฑ์มีคุณสมบัติแตกต่างกันไป

วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตแก้วประกอบด้วย วัตถุดิบที่เป็นองค์ประกอบหลักที่ทำให้เกิดโครงสร้างแห่งความเป็นแก้ว คือ ททรายแก้วหรือซิลิกา (Silica) ส่วนประกอบที่เสริมเข้าไปเพื่อให้การหลอมแก้วเป็นไปได้ง่ายขึ้น และมีสมบัติต่างๆ ตามความต้องการ เช่น อะลูมินา (Al_2O_3) ที่ช่วยเพิ่มสมบัติทางด้านความคงทนทางเคมีของผิวแก้ว ตะกั่วออกไซด์ (PbO) เพิ่มความหนาแน่นให้แก้ว ช่วยให้แก้วมีเสียงกังวานไพเราะ เนื้อแก้วเป็นประกาย โซดาแอช (Na_2CO_3) เป็นตัวช่วยหลอม ช่วยลดอุณหภูมิการหลอมให้ต่ำลง โบแรกซ์ (B_2O_3) ช่วยให้แก้วมีประสิทธิภาพการขยายตัวต่ำ สามารถทนต่อความร้อนและการผุกร่อนทางเคมี ช่วยให้มีความต้านทานไฟฟ้าได้ดี สารฟอกสี (Depolarizing agent) เป็นพวกซิลิเนียมและโคบอลต์ (Selenium & Cobalt) เป็นสารที่ช่วยฟอกสีเขียวที่เกิดจากออกไซด์ของเหล็กซึ่งมักมีเจือปนอยู่ นอกจากนี้อาจมีการเติมสารปรุงแต่งเพิ่มเติมตามความต้องการการใช้งานของผลิตภัณฑ์ ขณะที่มีการเติมเศษแก้ว (Cullet) เพื่อช่วยลดต้นทุนการผลิตและทำหน้าที่เป็นตัวช่วยลดอุณหภูมิของการหลอม

หัวใจของกระบวนการผลิตแก้ว คือ เตาหลอมแก้วที่ใช้ในงานอุณหภูมิสูง ดังนั้นต้นทุนส่วนหนึ่งของการผลิตจึงมักอยู่ที่ค่าเชื้อเพลิงเป็นสำคัญ โดยเทคโนโลยีของการหลอมแก้วจึงเน้นไปที่ประสิทธิภาพของการหลอม เพื่อประหยัดพลังงานและการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์

3.5.2 อุตสาหกรรมแก้ว

ผลิตภัณฑ์ภาชนะแก้วจะมีตั้งแต่ จาน ชาม ขวด โถ ไปจนถึงเครื่องแก้วชนิดต่างๆ โดยขวดแก้วจะมีส่วนแบ่งตลาดสูงที่สุด โดยนับตั้งแต่ขวดแก้วเพื่อใช้บรรจุเครื่องดื่มชูกำลัง ขวดเบียร์ ขวดสุรา ขวดยา และขวดอาหาร ขวดเครื่องดื่มเกลือแร่ ขวดน้ำอัดลม เป็นต้น อย่างไรก็ตาม วัสดุที่มีความต้องการของขวดชนิดต่างๆ เท่าที่ผ่านมามีอยู่ในระดับที่ค่อนข้างคงที่ แม้ในบางครั้งจะมีเครื่องดื่มชนิดใหม่ๆ เข้าสู่ท้องตลาดบ้างก็ตาม ในบรรดาการผลิตเครื่องแก้วชนิดต่างๆ พบว่า 85 เปอร์เซ็นต์ของผลิตภัณฑ์ทั้งหมดเป็นผลิตภัณฑ์บรรจุภัณฑ์แก้วที่มีการใช้มานาน และคาดว่าจะยังคงมีความสำคัญต่อไปในอนาคต เนื่องจากผลิตภัณฑ์คู่แข่งชนิดอื่นได้ก่อให้เกิดปัญหาต่อสิ่งแวดล้อม ทำให้แก้วมีความสำคัญที่เด่นชัดและเป็นที่ต้องการของตลาด เนื่องจากแก้วเป็นวัสดุที่มีสมบัติดีนานัปการ มีลักษณะของวัสดุที่มีความเฉื่อยในการทำปฏิกิริยากับผลิตภัณฑ์ที่บรรจุอยู่ภายใน มีความใสสะอาดมองเห็นผลิตภัณฑ์ภายในได้อย่างชัดเจน ทนต่อแรงกดและความดันได้ดี สามารถป้องกันผลิตภัณฑ์ให้เก็บรักษาไว้ได้นาน และยังสามารถนำภาชนะแก้วกลับมาใช้ได้ใหม่หลายครั้ง อีกทั้งรูปทรงของการผลิตแก้วก็ยังสะดวกต่อการออกแบบให้หลากหลาย อย่างไรก็ตามต้นทุนการผลิตจะเป็นปัจจัยที่ทำให้แก้วมีราคาสูง เมื่อเทียบกับบรรจุภัณฑ์ชนิดอื่น

กลุ่มอุตสาหกรรมแก้ว แบ่งออกเป็น 3 กลุ่มตามชนิดของผลิตภัณฑ์ คือ

1. กลุ่มผลิตภัณฑ์บรรจุภัณฑ์แก้ว (Glass ware)
2. กลุ่มผลิตภัณฑ์กระจกแผ่น (Flat glass)
3. กลุ่มผลิตภัณฑ์อื่น (Glass fiber and other product)

3.5.3 กลุ่มผลิตภัณฑ์บรรจุภัณฑ์แก้ว

บรรจุภัณฑ์แก้วโดยทั่วไปอาจแบ่งออกเป็นชนิดตามรูปทรงของแก้ว เช่น ขวดปากกว้าง ขวดปากแคบ บางชนิดอาจแบ่งตามสมบัติของเนื้อแก้ว เช่น แก้วบอโรซิลิเกต หรือบางแห่งอาจแบ่งตามกระบวนการของการเคลือบผิว (Surface treatment) เช่น แก้วที่เคลือบซิลิโคน (Silicone coating) เป็นต้น นอกจากนี้บรรจุภัณฑ์แก้วยังสามารถแบ่งออกเป็นกลุ่มตามความต้านทานความดัน แบ่งออก 2 ประเภท คือ

- ขวดแก้วที่ไม่จำเป็นต้องมีความต้านทานความดัน มักเป็นขวดปากกว้าง สำหรับนำกลับมาใช้หลายๆ ครั้ง เช่น ขวดอาหาร ขวดเครื่องสำอาง เป็นต้น

- ขวดแก้วที่ต้องมีความต้านทานความดัน ขวดประเภทนี้มักเป็นขวดปากแคบ และมีโอกาสที่จะแตกได้ง่ายหากนำกลับมาใช้เช่นเดิมอีก ดังนั้นการนำกลับมาใช้ใหม่ จึงมักนิยมใช้บรรจุอย่างอื่นแทน ขวดดังกล่าวอาจได้แก่ ขวดเบียร์ ขวดน้ำอัดลม เป็นต้น

สำหรับขวดแก้วในปัจจุบัน แบ่งออกเป็น 3 ชนิด คือ

- ขวดแก้ว (Crystal) มีลักษณะใส แข็งแรง คงทน และมีความแวววาวสูง จึงเหมาะที่จะนำมาทำเครื่องประดับ
- ขวดหลอด (Tube) มีลักษณะสำคัญ คือ มีความสามารถที่จะทนต่อสารเคมี และความร้อนได้เป็นอย่างดี ส่วนมากจะใช้ในอุตสาหกรรมหลอดฉีดยา
- ขวดแก้วทั่วไป คือ ขวดแก้วที่เกิดจากการหลอมเนื้อแก้วด้วยความร้อนสูง (1200 องศาเซลเซียส) แล้วนำน้ำแก้วที่หลอมได้ มาเป่าขึ้นรูปแบบของแม่พิมพ์ที่เตรียมไว้ โดยคุณสมบัติของแก้วชนิดนี้ จะด้อยกว่า 2 ชนิดแรกซึ่งมีราคาที่สูงกว่า

3.5.4 เทคโนโลยีการผลิตแก้ว

วัตถุดิบต่างๆ จะผ่านการซึ่ง กวนผสมให้เข้ากันแล้วลำเลียงป้อนเข้าสู่เตาหลอมพร้อมกับเศษแก้ว การหลอมอาจใช้อุณหภูมิสูงถึง 1600 องศาเซลเซียส ซึ่งทำให้วัตถุดิบรวมทั้งเศษแก้วหลอมละลายเข้ากันได้เป็นน้ำแก้วปราศจากฟองอากาศ ไหลไปตามรางน้ำแก้ว พร้อมผลิตเป็นรูปขวดต่อไป

ขั้นตอนการผลิตผลิตภัณฑ์แก้ว ประกอบด้วย 6 ขั้นตอน คือ

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

3.5.4.1 วัตถุดิบที่ใช้ในการหลอมแก้ว

1. ททรายแก้ว SiO_2 (55 เปอร์เซ็นต์)
2. โซดาแอช NaCO_3 (20เปอร์เซ็นต์)
3. หินปูนบดละเอียด หรือ โดโลไมท์ CaCO_3 หรือ $\text{Ca.Mg(CO}_3)_2$ (15 เปอร์เซ็นต์)
4. อะลูมินา Al_2O_3 (2 เปอร์เซ็นต์)

5. อื่นๆ (สารเคมี เศษแก้ว 8 เปอร์เซ็นต์)

3.5.4.2 สีของผลิตภัณฑ์แก้ว (Color glasses)

สีต่างๆ ที่เกิดขึ้นในเนื้อแก้วนั้นเกิดจากการเติมสารให้สี โดยอาจใส่สารดังกล่าวลงในช่วงของการลดอุณหภูมิ (ที่ประมาณ 1200 องศาเซลเซียส) สารเคมีที่ทำให้เกิดสีในเนื้อแก้ว ได้แก่

สีชา	ใช้ถ่าน + สนิมเหล็กแดง + โซเดียมซิลเฟต และ ยางสน
สีแดง	ใช้แคดเมียมซิลไฟด์ + ซิลิเนียม คลอไรด์ของทอง
สีชมพู	ใช้ซิลิเนียม
สีฟ้า	ใช้จูนสี (คอปเปอร์ซิลเฟต)
สีน้ำเงิน	ใช้โคบอลท์ออกไซด์
สีเขียว	ใช้เกลือของโครเมต เช่น โบแตสเซียมโครเมต โครเมียมออกไซด์
สีดำ	ใช้แมงกานีสออกไซด์ + โคบอลท์ + นิกเกิลออกไซด์
สีเหลือง	ใช้แคดเมียมซิลไฟด์

3.5.5 ผู้ผลิตบรรจุภัณฑ์ขวดแก้วของประเทศไทย

โรงงานที่ทำการผลิตขวดแก้วมักเป็นโรงงานที่มีขนาดใหญ่ และมีกำลังการผลิตมาก แต่ละโรงงานมีการปรับปรุงประสิทธิภาพการผลิต โดยเฉพาะการปรับปรุงเตาหลอมให้ทันสมัยและมีกำลังการผลิตแก้วได้มากขึ้น ขณะเดียวกันปริมาณการใช้น้ำมันเตาเป็นเชื้อเพลิงก็ลดลงจากเตาหลอมสมัยก่อน ซึ่งช่วยลดต้นทุนการผลิต นอกจากนี้สิ่งที่มีการปรับปรุงมากที่สุดในแต่ละโรงงานคือ การนำเอาเศษแก้วกลับมาเป็นวัตถุดิบในการผลิต (Recycle) มากขึ้น ซึ่งโดยปกติแล้วทางโรงงานอุตสาหกรรม ต้องการนำเอาเศษแก้วเก่ามาหลอมผสมกับแก้วใหม่อยู่แล้ว โดยใช้เศษแก้วเก่าในอัตรา 30-40 เปอร์เซ็นต์ เพราะนอกจากจะลดต้นทุนการผลิตแล้วยังช่วยให้น้ำแก้วหลอมเหลวดีขึ้น ใช้อุณหภูมิต่ำลง ทำให้การสึกกร่อนของเตาลดลงทำให้ช่วยยืดอายุการใช้งานของเตาหลอม ส่งผลให้ช่วยลดต้นทุนการผลิต นอกจากนั้นการใช้เศษแก้วเพิ่มขึ้น 10 เปอร์เซ็นต์ จะช่วยประหยัดพลังงานได้ประมาณ 1 เปอร์เซ็นต์ โดยที่คุณภาพของแก้วที่ได้ยังคงทนต่อการกระแทกและใช้งานได้ดีเหมือนเดิมทุกประการ ปัจจุบันมีผู้ผลิตเพียงประมาณ 19 เปอร์เซ็นต์ ที่มีการนำขวดแก้วกลับมาใช้ใหม่ และมีเพียง 34 เปอร์เซ็นต์ ที่มีการนำกลับไปใช้ในกระบวนการผลิตใหม่ ปัจจุบันโรงงานผู้ผลิตบรรจุภัณฑ์ขวดแก้วขนาดใหญ่ในประเทศไทยมีอยู่ประมาณ 5 รายด้วยกัน โดยกำลังการผลิตรวมเท่ากับ 1,270,000 ตันผลิตภัณฑ์/ปี โดยกว่า 80 เปอร์เซ็นต์ เป็นกำลังการผลิตของผู้ผลิตรายใหญ่ จากตารางที่ 3.8 พบว่า ผู้ผลิตรายใหญ่ที่สุดคือ บริษัท

อุตสาหกรรมทำเครื่องแก้วไทย จำกัด โดยที่บริษัทอุตสาหกรรมทำเครื่องแก้วไทย จำกัด และ บริษัทอุตสาหกรรมบางกอกกلاس จำกัด มีกำลังการผลิตเพิ่มขึ้นทุกปี

ตารางที่ 3.8 กำลังการผลิตบรรจุภัณฑ์ขวดแก้วของประเทศไทย

พ.ศ. 2533 – 2537 (กระทรวงอุตสาหกรรม, 2541)

ผู้ผลิต	กำลังการผลิต (หน่วย/ตัน)				
	2533	2534	2535	2536	2537
บริษัท ทำเครื่องแก้วไทย จำกัด (มหาชน)	214,500	240,000	305,250	317,550	401,500
บริษัท บางกอกกلاس จำกัด	190,000	200,000	274,500	284,980	365,250
บริษัท สยามกลาสอินดัสทรี จำกัด	45,000	55,000	80,000	90,000	90,000
องค์การแก้ว	64,000	64,000	64,000	64,000	64,000
บริษัท แก้วปรากการ จำกัด	11,000	11,000	11,000	11,000	11,000
รวม	524,500	570,000	734,750	767,530	942,708

3.5.6 ภาพรวมอุตสาหกรรมบรรจุภัณฑ์แก้วของประเทศไทย (สถาบันพัฒนาวิสาหกิจ ขนาดกลางและขนาดย่อม, 2548)

ในปี 2548 พบว่าปริมาณการใช้ขวดแก้วในอุตสาหกรรมเบียร์และสุรามีสัดส่วนร้อยละ 30 อุตสาหกรรมเครื่องดื่มชูกำลังร้อยละ 27 น้ำอัดลมร้อยละ 10 อุตสาหกรรมอาหารและยาร้อยละ 11 เครื่องดื่มเกลือแร่ร้อยละ 9 และอุตสาหกรรมอื่นๆ ร้อยละ 13 ในอนาคตคาดว่าจะมีความต้องการใช้ขวดแก้วยังมีอยู่สูง โดยคาดว่าจะเพิ่มขึ้นประมาณร้อยละ 10-12 ต่อปี แนวโน้มการผลิตขวดแก้วจะผลิตเพื่อจำหน่ายแก่ผู้ใช้ภายในประเทศเป็นส่วนใหญ่ ผู้ประกอบการส่วนใหญ่ คาดว่าการผลิตขวดแก้วยังคงมีการขยายตัวเพิ่มขึ้นในอัตราประมาณร้อยละ 10 ต่อปี โดยเติบโตควบคู่ไปกับการขยายตัวของอุตสาหกรรมน้ำอัดลม เบียร์ สุรา และเครื่องดื่มอื่นๆ ประกอบกับการตื่นตัวในเรื่องสิ่งแวดล้อม ทำให้ผู้บริโภคหันมานิยมใช้บรรจุภัณฑ์ที่เป็นขวดแก้วมากขึ้น และจากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่า ในปี 2542 เมืองไทยมีความต้องการบริโภคขวดแก้วประมาณ 1.17 ล้านตัน/ปี (ประมาณ 4,000 ล้านขวด/ปี) นำกลับมารีไซเคิลได้ 0.47 ล้านตัน/ปี (ประมาณ 1,600 ล้านขวด/ปี) และมีการนำกลับมาใช้ซ้ำอีกประมาณ 0.35 ล้านตัน/ปี (ประมาณ 1,200 ล้านขวด/ปี) ส่วนที่คงเหลือตกค้างเป็นขยะถึง 0.35 ล้านตัน/ปี (ประมาณ 1,200 ล้านขวด/ปี) คิดเป็น 30 เปอร์เซ็นต์ ของปริมาณขวดแก้วที่ใช้บริโภค และคิดเป็น 5-8 เปอร์เซ็นต์ของปริมาณขยะทั้งหมดซึ่งมีปัญหาในการจัดการมาก ไม่สามารถทำลาย ย่อยสลายหรือลดปริมาณได้ เมื่อเกิดการแตกหักจะก่อให้เกิดอันตราย และชาเลนจ์ยังไม่นิยมรับซื้อแก้วหลายชนิด ซึ่งในการผลิตแก้ว 1 ตัน ต้องใช้วัตถุดิบที่มาจากทรัพยากรธรรมชาติ (ทราย แก้ว หินฟินม้า ไซดาแอช ฯลฯ) ประมาณ 1.2 ตัน โดย

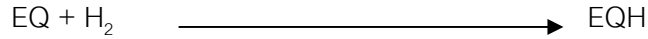
วัตถุดิบ 0.2 ตันที่หายไปจะเสียไปในรูปของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ และ ออกไซด์ของไนโตรเจน ดังนั้นการใช้เศษแก้ว จะสามารถลดการใช้ทรัพยากรธรรมชาติ ลดมลภาวะ และที่สำคัญสามารถลดการใช้พลังงาน เนื่องจากเศษแก้วมีจุดหลอมเหลวประมาณ 900 องศาเซลเซียส แต่วัตถุดิบมีจุดหลอมเหลวประมาณ 1450-1600 องศาเซลเซียส ดังนั้นการใช้เศษแก้ว แทนวัตถุดิบ จึงสามารถลดพลังงาน คือ ปริมาณน้ำมันเตาที่ใช้เมื่อปริมาณน้ำมันเตาลดลง ปริมาณแก๊สพิษที่เกิดจากน้ำมันเตาก็ลดลงด้วย และยังลดการเสียดุลทางการค้ากับต่างประเทศได้ เนื่องจากน้ำมันเตาและวัตถุดิบบางตัว เราต้องสั่งซื้อเข้ามาจากต่างประเทศ การแยกแก้วเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่สามารถทำได้ 2 วิธี โดยขบวนการที่ดีจะนำไปบรรจุสินค้าใหม่ (Reuse) ส่วนขวดแตกและ เศษแก้วจะนำไปแปรรูปเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ (Recycle) ขวดแตกหรือเศษแก้วสามารถใช้แทน วัตถุดิบในการผลิตขวดแก้วได้สูงถึงประมาณ 95 เปอร์เซ็นต์ จากบทเรียนในสหรัฐอเมริกาพบว่า การผลิตแก้ว 3.5 ล้านขวด (1,000 ตัน) เมื่อใช้เศษแก้วเพิ่มขึ้นจาก 15 เปอร์เซ็นต์ เป็น 60 เปอร์เซ็นต์ จะสามารถลดการใช้วัตถุดิบบริสุทธิ์ได้ถึง 600 ตัน ประหยัดน้ำได้ประมาณ 400 ลูกบาศก์เมตร ลดการใช้พลังงานประมาณ 1 ล้านจูลน์ ลดปริมาณอากาศเสียประมาณ 3 ตัน และ ปริมาณกากของเสียจากกระบวนการผลิต 80 ตัน ซึ่งนอกจากจะเป็นการลดขยะแล้ว ยังสามารถ ลดการใช้พลังงาน ทรัพยากรธรรมชาติ และมลภาวะที่เกิดจากกระบวนการผลิตได้ถึง 100 เปอร์เซ็นต์ การลดปริมาณขวดแก้วที่ใช้แล้วจึงเป็นเรื่องสำคัญของสังคมปัจจุบัน เราสามารถมีส่วนร่วมโดยการนำขวดแก้วกลับมาใช้ใหม่ หรือนำเข้ากระบวนการแปรรูปไม่จำกัดจำนวนครั้ง ผลิตภัณฑ์ที่ผลิตขึ้นมาใหม่นี้ยังคงมีคุณสมบัติคงเดิม เป็นการลดการใช้พลังงานทรัพยากร ธรรมชาติ ลดปริมาณขยะ และลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ซึ่งสอดคล้องกับแผนพัฒนาเศรษฐกิจ และสังคมแห่งชาติฉบับที่ 8 (2540-2544) โดยระบุไว้ในแนวทางการฟื้นฟูบูรณะ ทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อมด้านการกำจัดกากของเสีย และลดปริมาณมูลฝอย ให้มีการลด ปริมาณกากของเสียและการใช้ประโยชน์ของของเสีย ตลอดจนการนำกลับมาใช้ใหม่อย่าง เหมาะสม

3.6 ซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว

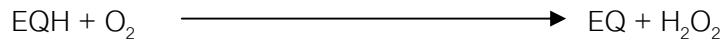
ซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วเป็นของเสียที่เกิดจากกระบวนการผลิตสารประกอบไฮโดรเจน เปอร์ออกไซด์ซึ่งเป็นสารเคมีที่สำคัญในอุตสาหกรรมหลายประเภท เช่น โพลีเมอร์ เครื่องสำอาง แกล็คซกรรม เป็นต้น ซึ่งกระบวนการผลิตนั้นเกิดจากก๊าซไฮโดรเจนและก๊าซออกซิเจนทำปฏิกิริยากัน โดยมีสาร Working solution ซึ่งเป็นสาร Ethyl tetrahydro anthraquinone (EQ) เป็นสารละลายที่เกิดจากสารประกอบในกลุ่มแอนทราควิโนน โดยที่สาร Working solution เป็นสารที่ทำให้เกิดการรวมตัวของก๊าซทั้งสอง โดยที่สาร Working solution เป็นสารที่ทำให้เกิดการรวมตัวของก๊าซทั้งสอง ชนิด ในขณะที่สาร Working solution เมื่อใช้ครบ 1 รอบการทำงาน จะก่อเกิดความขึ้นและสิ่ง

สภปรกปนเปื้อน จึงต้องใช้สารซิลิกา-อะลูมินาในการดูดความชื้นและสิ่งสกปรก ดังนั้นในกระบวนการนี้เองทำให้เกิดซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วขึ้น โดยปฏิกิริยาที่เกี่ยวข้องเป็นดังนี้

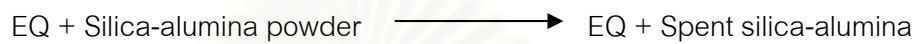
ปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชัน



ปฏิกิริยาออกซิเดชัน



ปฏิกิริยาที่เกิดซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว



โดยที่ซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วที่เกิดขึ้นนี้ มีส่วนประกอบและการกระจายขนาดดังแสดงในตารางที่ 3.9 และ 3.10 ตามลำดับ

ตารางที่ 3.9 แสดงส่วนประกอบซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว (สารโรจน์ ปัสโซติพงษ์, 2545)

ส่วนประกอบ	ปริมาณโดยน้ำหนัก	
	มก./ก.	เปอร์เซ็นต์
Aluminium Oxide	550-630	55.00-63.00
Silicium Oxide	120-160	12.00-16.00
Water soluble salt	70-130	7.00-13.00
Moisture content	100	10.00
Ethyl tetrahydro anthraquinone	23.08	2.31
Ethyl anthraquinone	9.85	0.99
Ethyl dihydroxy anthraquinone	6.61	0.66

NTP Board of Scientific Counselor's Technical Report Review Subcommittee on May 21, 1999 รายงานการศึกษาความเป็นพิษของสารแอนทราควิโนน โดยการใช้หนูทดลองทั้งเพศผู้และเพศเมียกินในปริมาณและระยะเวลาต่างๆ กันแบ่งออกเป็นการศึกษาระยะเวลา 14 สัปดาห์ พบว่า หนูในชุดควบคุมและและชุดทดลองให้ผลการทดลองที่คล้ายคลึงกัน หรืออาจกล่าวได้ว่าสารแอนทราควิโนนไม่มีความเป็นพิษ

ตารางที่ 3.10 แสดงการกระจายขนาดของซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว

(สารโรจน์ ปัจโชติพงษ์, 2545)

ขนาดของตะแกรงที่ค้ำอยู่ (เบอร์)	ขนาดของอนุภาค (มิลลิเมตร)	ปริมาณซิลิกา-อะลูมินา (เปอร์เซ็นต์)
8	2.38-4.76	0.039
16	1.19-2.38	63.84
20	0.84-1.19	3.17
30	0.59-0.84	0.18
40	0.42-0.59	0.3
50	0.297-0.42	5.41
100	0.149-0.297	24.03
ถาดรอง	>0.149	3.03

3.7 กระเบื้องเซรามิก

เซรามิกที่มีองค์ประกอบที่สลับซับซ้อนที่สุดคือ กระเบื้องเซรามิก ซึ่งเกิดจากการประสานผลึกตามธรรมชาติของเซรามิกด้วยแก้ว ทำให้ผลิตภัณฑ์มีคุณสมบัติเป็นเลิศในการใช้งาน เนื่องจากกระเบื้องเซรามิกมีคุณสมบัติคล้ายคลึงกับผลิตภัณฑ์ที่ทำมาจากแก้ว คุณสมบัตินี้จะทำให้ความสามารถในการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์มีความถูกต้องเหมือนผลิตภัณฑ์ที่ทำมาจากแก้ว และสามารถขึ้นรูปต่างๆ ตามความต้องการในตลาด การควบคุมอุณหภูมิการเผาอย่างมีประสิทธิภาพทำให้ส่วนประกอบที่มีคุณลักษณะของแก้วมากกว่า 90 เปอร์เซ็นต์ตกผลึก โดยขนาดของผลึกอยู่ระหว่าง 0.1-1 ไมครอน ส่วนแก้วที่เหลืออยู่ในปริมาณน้อยจะเต็มรอบผลึกอย่างมีประสิทธิภาพทำให้เกิดโครงสร้างที่ไม่มีรูพรุน กระเบื้องเซรามิกจะมีคุณสมบัติทางกลศาสตร์และการต้านทานความร้อนสูงกว่าเซรามิกทั่วไป

3.7.1 ความหมายของกระเบื้องตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม

กระเบื้อง หมายถึง ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการอัด (Pressing) หรืออัดรีด (Extrusion) ดินและส่วนผสมอื่น เช่น หิน ททราย สี เป็นต้น แล้วเผาที่อุณหภูมิไม่น้อยกว่า 1000 องศาเซลเซียส จนเนื้อกระเบื้องแข็งแกร่งมีอัตราดูดซึมน้ำค่อนข้างต่ำ สามารถทนต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิโดย

ฉับพลัน มีลักษณะเป็นแผ่น แต่ละแผ่นมีพื้นที่ไม่น้อยกว่า 90 ตารางเซนติเมตร มีสีและรูปร่างใด ๆ ก็ได้ มีทั้งประเภทเคลือบและไม่เคลือบ

3.7.2 ชนิดกระเบื้อง

กระเบื้องเซรามิกแบ่งเป็น 2 ประเภท คือ กระเบื้องปูพื้น และกระเบื้องบุผนัง ทั้งสองชนิดมีลักษณะที่คล้ายกันมาก แต่มีรายละเอียดและคุณสมบัติบางประการที่ทำให้กระเบื้องทั้งสองชนิดนี้ต่างกัน มีทั้งชนิดไม่เคลือบและชนิดเคลือบ (เคลือบมันและเคลือบด้าน)

3.7.2.1. กระเบื้องปูพื้น จะมีเนื้อที่แข็งแกร่งกว่ากระเบื้องบุผนัง เพื่อให้สามารถรับน้ำหนักที่กดลงบนตัวกระเบื้อง ต้องไม่มีการดูดซึมน้ำ และทนการขีดข่วน ส่วนใหญ่ผิวหน้าจะไม่มันเพื่อกันลื่น บางชนิดมีลักษณะพื้นผิวต่างๆ ไป แต่เรื่องความละเอียดอ่อนและความสวยงามของลวดลายจะมีความนุ่มนวลน้อยกว่ากระเบื้องบุผนัง โดยทั่วไปจะมีการระบุชนิดของกระเบื้องไว้ที่ด้านหลังหรือที่กล่อง

3.7.2.2. กระเบื้องบุผนัง มักจะมีผิวมัน ไม่จำเป็นต้องมีความทนทานเหมือนกระเบื้องปูพื้นจึงรับน้ำหนักและต้านทานการขีดข่วนน้อยกว่า รวมทั้งมีการดูดซึมน้ำที่มากกว่า เนื่องจากกระเบื้องบุผนังจะเน้นไปที่เรื่องของการตกแต่ง จึงมีสีสันทันและลวดลายที่นุ่มนวลละเอียดอ่อน สวยงาม ทำให้ราคากระเบื้องบุผนังสูงกว่ากระเบื้องปูพื้น

3.7.3 กระบวนการผลิตกระเบื้องเซรามิก

โดยทั่วไปมีขั้นตอนดังนี้

1. การเตรียมเนื้อดิน ทำการผสมส่วนผสมเนื้อดินตามสูตรโดยการร่อนผ่านตะแกรงให้ส่วนผสมเข้ากันแล้วเติมน้ำให้มีความเหนียว
2. นำไปทำการขึ้นรูป ซึ่งสามารถทำได้หลายวิธี เช่น การหล่อแบบ การอัดและรีดเนื้อดินป้อนผ่านหัวแบบ การอัดขึ้นรูปเนื้อดินปั้นที่เป็นฝุ่น และการอัดขึ้นรูปเนื้อดินปั้นแห้งซึ่งใช้ในงานวิจัยนี้ ดังจะได้กล่าวอย่างละเอียดในหัวข้อย่อยถัดไป
3. นำผลิตภัณฑ์ที่ขึ้นรูปเสร็จแล้วเข้าตู้อบไล่ความชื้น ซึ่งทำให้ผลิตภัณฑ์แห้งสม่ำเสมอ ไม่บิดเบี้ยวและแห้งในเวลาสั้น
4. ทำการตกแต่งชิ้นงานก่อนเผา โดยทำการตัดแต่งส่วนที่เกินออก
5. การเผา ซึ่งจะต้องใช้อุณหภูมิ ระยะเวลา และวิธีการแตกต่างกันไปตามแต่ชนิดของเนื้อดิน วัตถุประสงค์ในการเผา และรูปทรงของผลิตภัณฑ์

3.7.3.1 การขึ้นรูปผลิตภัณฑ์เซรามิกโดยใช้แรงอัด

การขึ้นรูปโดยวิธีนี้ใช้แพร่หลายในการผลิตผลิตภัณฑ์วัตถุทนไฟ กระเบื้องและผลิตภัณฑ์เซรามิกชนิดพิเศษ แรงอัดจะอัดบนแบบที่มีผงเนื้อดินปั้นแห้ง หรือมีความชื้นเล็กน้อยอยู่ภายใน

แบบ แบบที่ใช้เป็นโลหะแข็ง วิธีการอัดผงเนื้อผลิตภัณฑ์อาจอัดด้วยเครื่องอัดชนิดต่างๆ ซึ่งมีแรงอัดต่างกันไป ในการอัดแผ่นกระเบื้องหรือผลิตภัณฑ์ใดๆ สิ่งสำคัญคือ จะต้องทำให้ผลิตภัณฑ์มีความหนาแน่นสม่ำเสมอ ถ้าผลิตภัณฑ์ที่มีความหนาแน่นไม่สม่ำเสมอจะเป็นเหตุทำให้ผลิตภัณฑ์โค้งงอและมีการหดตัวไม่เท่ากันเมื่อเผา การเคลื่อนตัวของฝุ่นได้ดีจะช่วยทำให้การอัดได้ผลิตภัณฑ์ที่มีความหนาแน่นสม่ำเสมอ การอัดผลิตภัณฑ์ขนาดเล็กความหนาแน่นจะสม่ำเสมอมากกว่าผลิตภัณฑ์ขนาดใหญ่ เนื่องจากมีแรงเสียดสีผนังแบบน้อยกว่า การอัดทั้งด้านบนและด้านล่างจะให้ความหนาแน่นสม่ำเสมอมากกว่าอัดเพียงด้านเดียว การใช้แรงอัดสูงมากๆ จะช่วยยให้ผลิตภัณฑ์หลังเผามีความพูนตัวและมีความหดตัวน้อย แต่แรงที่ใช้ต้องไม่มากเกินไปจนทำให้เกิดการแตก การแตกจะมีลักษณะเป็นแผ่นบริเวณกลางแผ่นในทิศทางตั้งฉากกับแนวของแรงที่กด สาเหตุที่ทำให้แตกคือ อากาศที่อยู่ในดินขยายตัวทำให้เกิดแรงซึ่งมากกว่าแรงยึดกันระหว่างเนื้อดิน อีกสาเหตุหนึ่งก็คือ ขณะยกแบบที่เป็นตัวอัดขึ้นเกิดแรงดูระหว่างผิวแบบที่อัดและผิวหน้าผลิตภัณฑ์มากพอที่จะแยกผลิตภัณฑ์ออกเป็นสองส่วน

การกระจายขนาดของอนุภาคในเนื้อดินปั้น มีความสำคัญต่อการอัดตัวกันของอนุภาคหลังจากขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ เพราะการหดตัวของผลิตภัณฑ์หลังจากเผาจนเนื้อดินแน่นจะต้องเท่ากับปริมาณของรูพูนที่มีตั้งแต่เริ่มขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ การอัดตัวกันของอนุภาคที่มีรูปร่างต่างกันแต่มีขนาดเท่ากันจะมีความพูนตัวแต่ละรูปคือ รูปร่างลูกบาศก์เกิดที่ความพูนตัว 47.64 เปอร์เซ็นต์ รูปร่างพีระมิดหรือเตตระฮีดรอลเกิดที่ความพูนตัว 25.95 เปอร์เซ็นต์ ความพูนตัวจะลดลง เมื่ออนุภาคที่อัดตัวกันมีการกระจายขนาดของอนุภาคมากกว่าหนึ่งขนาด โดยปกติการผนึกอนุภาคเข้าด้วยกันโดยอาศัยความร้อน และสมบัติเฉพาะตัวของผลิตภัณฑ์หลังจากเผาขึ้นกับขนาดของความพูนตัวมากกว่าขึ้นกับขนาดของอนุภาค ส่วนผสมของเนื้อดินปั้นที่มีอนุภาคทั้งหยาบและละเอียด จะทำให้ได้เนื้อผลิตภัณฑ์ที่มีเนื้อแน่นมากและผลิตภัณฑ์มีการหดตัวน้อย

3.7.3.2 การอบผลิตภัณฑ์ให้แห้ง

การอบผลิตภัณฑ์ให้แห้ง เป็นขั้นตอนที่สำคัญขั้นตอนหนึ่ง คือจะต้องขจัดน้ำในผลิตภัณฑ์ได้เร็ว และต้องไม่ทำให้เกิดความดันในผลิตภัณฑ์จนเป็นสาเหตุให้โค้งงอและแตก โดยที่กลไกการอบผลิตภัณฑ์ให้แห้ง ในผลิตภัณฑ์ที่ขึ้นรูปเสร็จใหม่ๆ จะมีน้ำประกอบอยู่ 4 รูปแบบด้วยกัน คือ

1. น้ำที่ถูกดูดซับอยู่ที่ผิวของอนุภาควัดฤติบ (Absorbed water)
2. น้ำที่เป็นสาเหตุทำให้ผลิตภัณฑ์หดตัวเมื่ออบแห้ง (Shrinkage water)
3. น้ำซึ่งถูกขังอยู่ในช่องว่างในผลิตภัณฑ์ (Pore water)
4. น้ำซึ่งประกอบอยู่ในโครงสร้างของผลึกวัดฤติบ (Crystal lattice water)

ผิวของแข็งทุกชนิดมีความสามารถในการดูดซับน้ำ ซึ่งอาจมีความหนาแน่นเพียงหนึ่ง

โมเลกุลหรือมากกว่า และการสะสมน้ำในเนื้อของแข็งจะเป็นไปอย่างต่อเนื่อง และอยู่ในรูปของ หลอดเล็กๆ ปริมาณของน้ำที่ถูกดูดซับขึ้นอยู่กับความดันไอของน้ำในบรรยากาศ ดังนั้นเนื้อ ผลิตภัณฑ์เมื่อแห้งจะค่อยๆ ดูดซับน้ำในบรรยากาศจนถึงจุดสมดุล ดินขาวซึ่งมีเม็ดละเอียดมากกว่า ใต้น้อย พวกบอลล์เคลย์จะดูดซับความชื้นได้มากกว่าดินขาวเนื่องจากมีเม็ดละเอียดมากกว่า ปริมาณของน้ำที่ทำให้ผลิตภัณฑ์หดตัวเมื่ออบผลิตภัณฑ์ให้แห้ง น้ำปริมาณนี้เป็นน้ำส่วนที่แยก อณูภาคของดินออกจากกันในขณะที่ดินนั้นยังคงสภาพความเหนียวอยู่ น้ำปริมาณนี้จะมีจำนวน โมเลกุลอยู่ในช่วง 200 โมเลกุล ดังนั้นเมื่อน้ำปริมาณนี้ถูกกำจัดออกไปในระหว่างการอบแห้ง จะ เป็นสาเหตุทำให้ผลิตภัณฑ์มีการหดตัว น้ำที่ถูกขังอยู่ภายในช่องว่างของผลิตภัณฑ์นี้จะมีมากหรือ น้อยขึ้นกับการกระจายตัวของขนาดของอนุภาคของวัตถุดิบ นอกจากนี้ยังขึ้นกับการอัดตัวกันของ อนุภาควัตถุดิบ ขนาดของอนุภาคของวัตถุดิบถ้าใหญ่หรือหยาบโอกาสที่จะมีช่องว่างในผลิตภัณฑ์ ก็มีมากและช่องว่างมีขนาดใหญ่ ฉะนั้นน้ำจึงมีโอกาสขังอยู่ในช่องว่างมากตามไปด้วย อนุภาค ขนาดเล็กหรือละเอียดก็ให้ผลที่ตรงข้าม

3.7.3.2.1 การระเหยของน้ำที่ผิวผลิตภัณฑ์

อัตราการระเหยของการระเหยของน้ำที่ผิวผลิตภัณฑ์ มีค่าประมาณครึ่งหนึ่งของอัตราการระเหยของ การระเหยของน้ำจากผิวน้ำด้วยกัน องค์ประกอบที่มีอิทธิพลต่อการระเหยของน้ำ ได้แก่ อุณหภูมิ ความดันไอน้ำในอากาศ และความเร็วลม

3.7.3.2.2 การเคลื่อนตัวของน้ำภายในเนื้อดิน

เมื่อน้ำที่ผิวของเนื้อดินระเหยไป น้ำในรูพรุนในเนื้อดินจะเคลื่อนตัวมาแทนที่ กระบวนการ นี้เป็นไปอย่างต่อเนื่อง กลไกของปรากฏการณ์นี้อธิบายได้ 2 กรณีด้วยกัน กรณีแรกคือเมื่อรูพรุนใน เนื้อดินมีน้ำอยู่เต็ม จะมีแรงสองแรงมากระทำแรงหนึ่งเป็นแรงไฮโดรสแตติกดันน้ำภายในรูพรุนให้ ออกมาที่ผิวจนกว่าจะเกิดการสมดุล ส่วนอีกกรณีหนึ่งเกิดจากความต่างศักย์ของความชื้น ซึ่งจะ ขับน้ำบริเวณที่ชื้นมากกว่าภายในเนื้อดินออกมายังผิวซึ่งแห้งกว่า ในกรณีที่รูพรุนในเนื้อดินมีน้ำไม่ มากนักคือเกือบแห้ง การเคลื่อนตัวของน้ำในรูพรุนเป็นแบบการระเหยซึ่งขึ้นกับแรงขับเคลื่อน เนื่องจากความต่างศักย์ของความดันในรูพรุนซึ่งต่อเนื่องกันแบบเป็นหลอดขนาดเล็ก

3.7.3.2.3 การโค้งงอของผลิตภัณฑ์ระหว่างทำการอบผลิตภัณฑ์

ปัญหาการโค้งงอของผลิตภัณฑ์เซรามิกเป็นปัญหาใหญ่ เกิดขึ้นได้ตลอดเวลาโดยไม่มี สาเหตุปรากฏให้เห็นอย่างชัดเจน มีสาเหตุมากมายที่ทำให้ผลิตภัณฑ์เซรามิกเกิดการโค้งงอ ระหว่างการอบให้แห้ง และสาเหตุเกี่ยวข้องกัน ยากที่จะแยกได้ สาเหตุอันหนึ่งที่ทำให้เกิดการโค้ง งอ ได้แก่ ความไม่สม่ำเสมอของความชื้นในเนื้อผลิตภัณฑ์ ตัวอย่างเช่น การอัดแผ่นกระเบื้องลง บนแบบ เมื่อแผ่นกระเบื้องแห้ง ด้านที่ชื้นมากกว่าจะหดตัวมากกว่าด้านที่แห้ง ดังนั้นแผ่นกระเบื้อง

จะโค้งงอเป็นส่วนของวงกลม การแยกตัวออกมาของส่วนผสมบางตัวก็เป็นสาเหตุหนึ่งในการทำให้ผลิตภัณฑ์โค้งงอ แต่สาเหตุนี้ไม่ใช่สาเหตุที่จะเกิดขึ้นได้ง่าย เพราะเนื้อดินปั้นเป็นผงละเอียด การแยกตัวออกมาจากกันเกิดขึ้นได้ยาก อีกสาเหตุหนึ่งที่เกิดขึ้นได้ง่ายที่จะทำให้เกิดการโค้งงอ คือการเรียงตัวของอนุภาคของวัตถุบิไม่สม่ำเสมอ สาเหตุนี้เกิดได้ทั้งในการขึ้นรูปโดยการอัดผ่านหัวแบบ การหล่อแบบ ความหนาแน่นไม่สม่ำเสมอก็เป็นอีกสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เกิดการโค้งงอและมักเกิดขึ้นเสมอในการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์โดยการอัดผงเนื้อดินซึ่งมีเปอร์เซ็นต์ความชื้นระหว่าง 5-10 เปอร์เซ็นต์ เหตุที่เกิดเนื่องจากเกิดความผิดระหว่างผนังของแบบที่อัด หรือเกิดการกระจายของเนื้อดินที่ไม่สม่ำเสมอ การอัดทั้งด้านบนและด้านล่างจะช่วยให้เกิดความสม่ำเสมอมากขึ้น ซึ่งจะช่วยให้เรื่องความโค้งงอของผลิตภัณฑ์จากการอบแห้งได้

3.7.3.3 การเผาขึ้นรูปผลิตภัณฑ์

ปัจจุบันในอุตสาหกรรมเซรามิกต้องการวงจรการเผาที่รวดเร็ว แต่ต้องไม่ส่งผลกระทบต่อ การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างเล็กๆ และสมบัติส่วนใหญ่ของผลิตภัณฑ์ และจากการศึกษาพบว่า การเผาช้าจะทำให้ควอตซ์ละลายได้มากและขณะเดียวกันก็เกิดผลึกรูปเข็มของมัลไลต์ขึ้นมากเช่นกัน ส่วนการเผาที่เร็วเกินไปจะส่งผลในทางตรงกันข้าม นอกจากนี้นักเซรามิกบางคนให้เหตุผลว่า การเผาเร็วขึ้นจะได้เนื้อแก้วที่ไหลตัวดี ซึ่งจะมีผลช่วยทำให้ผลิตภัณฑ์มีความแข็งแรงดีขึ้น และ ขณะเดียวกันการเผาเร็วก็จะได้รูพรุนที่ซ่อนอยู่ในเนื้อผลิตภัณฑ์มากขึ้น อย่างไรก็ตามพบว่าการควบคุมผลิตภัณฑ์เผาที่จุดสุดท้ายเพียง 1 ชั่วโมง ก็เป็นการเพียงพอที่จะทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีความแข็งแรงดี

3.7.3.4 อิทธิพลความร้อนที่มีต่อเนื้อดินปั้นผลิตภัณฑ์เซรามิก

3.7.3.4.1 โครงสร้างเนื้อดินปั้นก่อนถูกเผา

ส่วนผสมของเนื้อดินปั้น เนื้อดินปั้นที่ประกอบด้วยดิน 50 เปอร์เซ็นต์ ควอตซ์ 25 เปอร์เซ็นต์ และเฟลด์สปาร์ชนิดโซดา 25 เปอร์เซ็นต์โดยประมาณ ในส่วนของเนื้อดินอาจจะประกอบด้วยดินหลายชนิด เป็นต้นว่า ดินขาว และบอลล์เคลย์ การเปลี่ยนแปลงส่วนผสมไปเล็กน้อยจะไม่มีผลกระทบต่อโครงสร้างเล็กๆ ในเนื้อผลิตภัณฑ์ ขนาดของวัตถุบิที่ค้าขายกันในท้องตลาด ควอตซ์และเฟลด์สปาร์มีขนาดเฉลี่ย 40 ไมครอน ดินขาว 2 ไมครอน และบอลล์เคลย์ประมาณ 0.5 ไมครอน ขนาดดังกล่าวนี้ทำให้การอัดตัวกันของอนุภาคทั้งสามชนิดในเนื้อดินปั้นแน่นดีมาก รูปร่างของอนุภาค อนุภาคของดินส่วนใหญ่มีรูปร่างเป็นแผ่น ของเฟลด์สปาร์เป็นรูปปริซึมยาว ส่วนของควอตซ์มีรูปร่างไม่แน่นอน การอัดตัวกันของอนุภาค ในเนื้อดินปั้นที่ขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์และยังไม่ได้เผา การอัดตัวกันของขนาดอนุภาคทั้งสามชนิดนี้จะมีรูพรุนอยู่ประมาณ 35-40 เปอร์เซ็นต์ของปริมาตรทั้งหมด รูพรุนจะมีปริมาตรเปลี่ยนแปลงไปเล็กน้อยเมื่อ

วิธีการขึ้นรูปต่างกันไป แม้ว่าเราจะควบคุมขนาดของอนุภาคของวัตถุดิบทั้งสามชนิดอย่างดี เราก็ไม่สามารถลดรูปพุนลงไปได้น้อยกว่า 28 เปอร์เซ็นต์ ผลิตภัณฑ์ที่ยังไม่ได้เผามีรูปพุนน้อย จะทำให้การหดตัวของผลิตภัณฑ์ที่เผาเสร็จแล้วน้อยตามไปด้วย

3.7.3.4.2 ปฏิริยาที่เกิดขึ้นในเนื้อดินปั้นเมื่อถูกเผา

กระบวนการเผาอาจแยกได้หลายขั้นตอนตามอุณหภูมิต่างๆ แต่แต่ละขั้นตอนเกิดต่อเนื่องกันจนไม่สามารถแยกแต่ละขั้นให้เด่นชัดได้

1. การอบแห้งที่สมบูรณ์ ขั้นตอนนี้จะเป็นการจัดความชื้นที่ถูกดูดซับอยู่บนผิวของอนุภาคซึ่งยังคงเหลืออยู่หลังจากการปล่อยหรืออบผลิตภัณฑ์ที่ขึ้นรูปใหม่ๆ ให้แห้ง ผลิตภัณฑ์จะแห้งสนิทที่อุณหภูมิประมาณ 200 องศาเซลเซียส
2. การเผาไหม้พวกอินทรีย์สาร บอลล์เคลย์ทุกชนิดจะมีอินทรีย์สารเจือปนอยู่ในรูปของลิกไนท์เสมอ อินทรีย์สารเหล่านี้จะเกิดการเผาไหม้รวมตัวกับออกซิเจนตั้งแต่อุณหภูมิ 200-700 องศาเซลเซียส การเผาไหม้จะเกิดได้ดีถ้าเราใช้อากาศขึ้น
3. การขจัดกลุ่ม OH⁻ ออกจากดิน ขั้นนี้ประกอบด้วยการแยกสลายผลึกของดินออกเป็นโครงสร้างที่ไม่เป็นระเบียบ การเปลี่ยนแปลงนี้เป็นผลทำให้เกิดการหดตัวพร้อมกับเกิดรูปพุนในเนื้อผลิตภัณฑ์
4. การเปลี่ยนแปลงของควอตซ์ ควอตซ์ที่อุณหภูมิปกติจะเปลี่ยนไปเป็นควอตซ์ที่อุณหภูมิสูงประมาณ 573 องศาเซลเซียส คือ มีขนาดใหญ่ขึ้น ซึ่งมีส่วนทำให้เกิดผลิตภัณฑ์เกิดการขยายตัว
5. การเกิดผลึกในเนื้อดิน ที่อุณหภูมิประมาณ 980 องศาเซลเซียส ในเนื้อดินจะมีการจัดเรียงตัวใหม่เกิดสไปเนล และในที่สุดเกิดมัลไลต์ขนาดเล็กๆ ขึ้น
6. การเกิดแก้ว แร่ฟันม้าทั้งชนิดโซดาและโพแทชเมื่อเผาถึงอุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียส จะมีแก้วเกิดขึ้น แก้วนี้จะเกิดขึ้นบริเวณรอบอนุภาคของแร่ฟันม้าซึ่งสัมผัสกับเนื้อดิน นอกจากนี้แก้วอาจเกิดจากการหลอมตัวของไมกาซึ่งเจือปนมากับดินก็ได้ เมื่อเผาสูงขึ้นไปอีกเนื้อแก้วก็เพิ่มปริมาณมากขึ้น แร่ฟันม้าจะไม่หลอมตัวเฉพาะผิวของมันเท่านั้น แต่จะหลอมบริเวณที่มีขอบพร่อง เช่น รอยแตกด้วย ดังนั้นแร่ฟันม้าที่เป็นของแข็งก็จะเล็กลง เมื่ออุณหภูมิสูงมากขึ้นแร่ฟันม้าจะหลอมตัวหมด แต่จะยังคงรูปร่างของอนุภาคเดิมอยู่ ในขณะเดียวกันจะเกิดแก้วขึ้นในเนื้อดิน ถึงแม้ว่าอุณหภูมิตามทฤษฎีที่เกิดแก้วคือ 1550 องศาเซลเซียส ทั้งนี้เพราะว่ามีสิ่งสกปรกเจือปน และนอกจากนี้ยังเกิดการแพร่ของพวกอัลคาไลอีกด้วย ตารางที่ 3.1 แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างจุดสุกตัวหรืออุณหภูมิสูงสุดของการเผาผลิตภัณฑ์ที่เปอร์เซ็นต์การเกิด แก้ว มัลไลต์ และควอตซ์ในเนื้อผลิตภัณฑ์

7. การละลายของดินและควอตซ์ในเนื้อแก้ว การละลายของเนื้อดินบางส่วนและบางส่วนของควอตซ์ในเนื้อแก้ว ถ้าควอตซ์มีขนาดเล็กอาจจะละลายได้หมดเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น
8. การเกิดมลิลไลท์ มลิลไลท์มีผลึกรูปเข็มเกิดขึ้นในสองกรณี คือ เกิดจากดิน มลิลไลท์ที่เกิดโดยการแยกผลึกออกมาจากดินนี้จะมีขนาดผลึกเล็กมาก และอีกทางหนึ่งคือ เกิดโดยการตกผลึกออกมาจากแร่พื้นน้ำหรือเนื้อแก้วส่วนอื่น มลิลไลท์ละลายได้ดีในเนื้อแก้วที่มี SiO_2 สูง และจะเจริญเติบโตได้ดีในเนื้อแก้วที่มี SiO_2 ต่ำ การเกิดผลึกรูปเข็มของมลิลไลท์ในเนื้อผลิตรกัณฑ์มีส่วนช่วยทำให้ผลิตรกัณฑ์มีความแข็งแรง ผลึกรูปเข็มนี้จะฝังตัวอยู่ในเนื้อแก้ว ประพฤติตัวเหมือนกับเหล็กเส้นในคอนกรีตเสริมเหล็ก
9. การเปลี่ยนแปลงของควอตซ์ไปเป็นคริสโตบัลไลท์ ในเนื้อผลิตรกัณฑ์เซรามิกที่มีสีขาวหลายอย่างแทบจะไม่พบคริสโตบัลไลท์หรือพบน้อยมาก แต่ในผลิตรกัณฑ์อื่นที่เผาสูงกว่าจะพบการเปลี่ยนแปลงของควอตซ์ไปเป็นคริสโตบัลไลท์ ยิ่งในเนื้อแก้วที่ใสหรือมีความหนืดต่ำยิ่งเร่งให้มีการเปลี่ยนแปลงเร็วขึ้น
10. การหดตัวของผลิตรกัณฑ์ ความพรุนตัวของผลิตรกัณฑ์มีน้อยที่สุดที่อุณหภูมิระหว่าง 1100-1200 องศาเซลเซียส และจะมีค่ามากขึ้นเนื่องจากการขยายตัวของรูพรุน รูพรุนนี้เกิดจากก๊าซซึ่งอาจมาจากน้ำ คาร์บอนเตต และซัลเฟต หรือเกิดจากการเผาไหม้ของคาร์บอน รูพรุนที่กล่าวนี้ซ่อนตัวอยู่ในเนื้อผลิตรกัณฑ์ที่ไม่เชื่อมต่อกับภายนอก ส่วนรูพรุนอีกชนิดหนึ่งจะเชื่อมต่อกับภายนอก รูพรุนชนิดนี้เกิดจากพวกฟองอากาศที่ถูกกักอยู่ในผลิตรกัณฑ์ที่ปั้นเสร็จใหม่ๆ และในระหว่างการเผาที่ไม่สามารถเชื่อมโยงรูพรุนเหล่านี้ให้ปิดสนิทได้ อย่างไรก็ตามสามารถลดรูพรุนเหล่านี้ได้หรือทำให้หมดไปด้วยการคุมสภาวะการเผาให้เหมาะสม แต่ไม่สามารถลดรูพรุนที่ซ่อนภายในเนื้อผลิตรกัณฑ์ได้

ตารางที่ 3.11 แสดงส่วนประกอบในเนื้อผลิตรกัณฑ์ที่สุกตัวที่อุณหภูมิต่างๆ (ปรีดา พิมพ์ขาวขำ, 2547)

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	เนื้อแก้ว (เปอร์เซ็นต์)	มลิลไลท์ (เปอร์เซ็นต์)	ควอตซ์ (เปอร์เซ็นต์)
1200	56	19	25
1300	62	22	16
1400	68	22	10

3.7.3.5 อิทธิพลของพลังงานความร้อนที่มีต่อซิลิกา (SiO₂)

ซิลิกาในรูปของควอตซ์เราจะพบมากมายในธรรมชาติ แสดงให้เห็นรูปผลึกอย่างสมบูรณ์ และมีความบริสุทธิ์สูง ผลึกหลายชนิดเมื่อได้รับพลังงานความร้อน มีสมบัติที่จะเกิดการเปลี่ยนแปลงจัดเรียงอะตอมจากรูปร่างหนึ่งไปเป็นอีกรูปร่างหนึ่ง รูปร่างแต่ละแบบจะสามารถคงสภาพอยู่ได้ในช่วงอุณหภูมิหนึ่ง การเปลี่ยนแปลงเช่นนี้เรียกว่าเกิดอินเวอร์ชัน (Inversion) การเกิดอินเวอร์ชันนี้มี 2 แบบ คือ แบบหนึ่งเกิดการเปลี่ยนแปลงแบบเรียงอะตอมใหม่อย่างมากมาย หรืออาจเรียกว่าการเปลี่ยนแปลงอย่างรุนแรง ส่วนแบบสองเป็นแบบเกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว เพียงมีการกระทบกระเทือนพื้นระเพียงเล็กน้อยก็เกิดการเปลี่ยนแปลง การเปลี่ยนแปลงแบบสองนี้สามารถทำให้กลับคืนสภาพเดิมได้ง่าย (พร้อมที่จะคืนสภาพเหมือนเดิม) แต่การเปลี่ยนแปลงแบบแรกจะกลับคืนสู่สภาพเดิมได้ต้องมีการกระทำที่รุนแรง รูปร่างของควอตซ์ที่อุณหภูมิต่ำ มีโครงสร้างของอะตอมจับกันเป็นเกลียวซึ่งเกิดจากการจับกันทุกมุมของพีระมิดฐานสามเหลี่ยมยอดแหลมของซิลิกอนและออกซิเจน (Silicon-oxygen tetrahedron) เมื่อควอตซ์ถูกเผาถึงอุณหภูมิ 573 องศาเซลเซียส ควอตซ์จะเปลี่ยนรูปร่างต่อไปเป็นรูปร่างที่อุณหภูมิที่สูงมีขนาดใหญ่ขึ้น คือ เกิดการขยายตัวนั่นเอง

3.7.3.5.1 คริสโตบัลไลต์ (Cristobalite) เป็นรูปร่างหนึ่งของควอตซ์ผลิตได้โดยการทำให้ควอตซ์เกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างรุนแรง คริสโตบัลไลต์มีโครงสร้างหลวมกว่าควอตซ์ จึงมีความหนาแน่นน้อยกว่าควอตซ์ คริสโตบัลไลต์ผลิตได้โดยเผาควอตซ์กับสารประกอบที่เป็นตัวช่วยเร่งปฏิกิริยาเป็นของเหลวที่อุณหภูมิต่ำ สารนี้มักใช้ 2 เปอร์เซนต์ของ CaO คริสโตบัลไลต์ที่อุณหภูมิต่ำจะเปลี่ยนรูปร่างไปเป็นคริสโตบัลไลต์ที่อุณหภูมิสูงในช่วงอุณหภูมิ 200 ถึง 280 องศาเซลเซียส ที่อุณหภูมิสูงมีรูปร่างที่หลวมกว่าจึงมีความหนาแน่นน้อยกว่า คริสโตบัลไลต์ที่อุณหภูมิต่ำ หรืออาจกล่าวได้ง่ายๆ ว่า คริสโตบัลไลต์เมื่อถูกเผาถึงอุณหภูมิระหว่าง 200 ถึง 280 องศาเซลเซียส จะเกิดการขยายตัว

3.7.3.5.2 ทริดีไมท์ (Tridymite) เป็นอีกรูปแบบหนึ่งของควอตซ์ ซึ่งสามารถผลิตได้จากควอตซ์ที่มีสิ่งสกปรกเจือปน และใช้สารประกอบที่ทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาการกลายเป็นแก้วเข้าช่วยเร่งอีกด้วย ทริดีไมท์มีโครงสร้างหลวมกว่าควอตซ์มาก แร่นี้เปลี่ยนแปลงโครงสร้างที่อุณหภูมิสูงที่สองอุณหภูมิคือ 117 องศาเซลเซียส และ 163 องศาเซลเซียส ในบางกรณีจะพบการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นที่ 400 องศาเซลเซียส และ 500 องศาเซลเซียส

3.7.3.5.3 ฟลินต์ (Flint) เป็นรูปร่างหนึ่งของควอตซ์ใช้มากในยุโรป ประกอบด้วยผลึกเล็กๆ ของควอตซ์ และมีน้ำอยู่ในโครงสร้างประมาณ 1 เปอร์เซนต์ ถ้าเราเผา

พินต์ระหว่างอุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส ถึง 350 องศาเซลเซียส เราจะพบรอบแตกเล็กๆ ซึ่งเกิดเนื่องจากความดันของไอน้ำในโครงสร้างที่ถูกขจัดออกไป ในช่วงนี้ น้ำจะถูกขจัดออกมาประมาณ 50 เปอร์เซ็นต์ และน้ำจะถูกขจัดออกมาอีก 30 เปอร์เซ็นต์ ในช่วง 350 องศาเซลเซียส ถึง 500 องศาเซลเซียส น้ำที่เหลือจะถูกขจัดออกไปที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส และที่อุณหภูมิ 1150 องศาเซลเซียส ถึง 1200 องศาเซลเซียส ควอตซ์จะถูกเปลี่ยนไปเป็นคริสโตบัลไลท์

3.7.3.6 อิทธิพลของพลังงานความร้อนที่มีต่อเฟลด์สปาร์

ในอุตสาหกรรมผลิตถ้วยชามชั้นดี จะใช้เฟลด์สปาร์เป็นตัวเริ่มและเร่งปฏิกิริยาการกลายเป็นแก้วดังนั้นผลอันเนื่องมาจากพลังงานความร้อนมีต่อเฟลด์สปาร์ล้วนๆ จึงไม่ค่อยมีคนสนใจ เฟลด์สปาร์ชนิดโพแทสจะสลายตัวให้ลิวไซต์ (Leucite, $KAlSi_3O_8$) และแก้วที่อุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียส และลิวไซต์ยังสามารถทนความร้อนได้ถึงอุณหภูมิ 1500 องศาเซลเซียส เมื่อเปรียบเทียบเฟลด์สปาร์ชนิดโซดาและเฟลด์สปาร์ชนิดโพแทสพบว่า เฟลด์สปาร์ชนิดโซดาจะมีความเหนียวหรือมีการเคลื่อนไหวดีกว่า

3.7.3.7 การหดตัวและพฤติกรรมระหว่างการเผา

เมื่อแท่งทดลองหรือผลิตภัณฑ์ดิบถูกเผาจะเกิดการหดตัวเรียกว่าการหดตัวหลังเผา เหมือนการหดตัวเมื่อแห้ง การหดตัวหลังเผามีค่าเปลี่ยนแปลงค่อนข้างกว้าง ขึ้นกับองค์ประกอบหลายประการ เช่น ชนิดของดินที่ประกอบอยู่ ความละเอียดของดิน ปริมาณสารอินทรีย์ที่ปะปนอยู่ และวิธีการขึ้นรูปของแท่งทดลองหรือผลิตภัณฑ์และอุณหภูมิที่เผา ปกติดินเหนียวหดตัวมากทั้งขณะแห้งและหลังจากเผามากกว่าดินที่ปราศจากความเหนียว สารอินทรีย์ในดินทำให้ดินหลังเผามีการหดตัวมากขึ้น การหดตัวของดินจะหดตัวมากขึ้นเมื่อมีการเผาสูงขึ้น แต่ก็มีข้อจำกัดกล่าวคือ จะหดตัวน้อยลงหรือไม่หดตัวอีก เมื่อเผาถึงจุดหลอมหรือจุดสลายตัว เราไม่สามารถทำนายการหดตัวได้อย่างถูกต้องโดยไม่มี การทดสอบ ดินต่างๆ เมื่อการเปลี่ยนแปลงค่อนข้างกว้างเมื่อถูกเผา ดินบางชนิดมีการหดตัวมากที่สุด ดินบางชนิดอาจสุกตัวที่อุณหภูมิสูง และมีการหดตัวน้อยกว่าดินบางชนิดที่มีจุดสุกตัวต่ำกว่า การหดตัวหลังเผาค้ำยกับการหดตัวเมื่อแห้ง เป็นสมบัติที่สำคัญของดิน เพราะว่าถ้ามีค่ามากเกินไปจะเป็นเหตุให้ผลิตภัณฑ์บิดเบี้ยว โค้งงอ และแตก เป็นเรื่องจำเป็นที่จะต้องรู้การหดตัวหลังเผา เพื่อจะได้มีความสามารถควบคุมขนาดของผลิตภัณฑ์สำเร็จ ไม่ว่าจะ เป็นดินเพียงอย่างเดียว หรือจะเป็นส่วนผสมในเนื้อดินปั้นซึ่งมีดินผสมอยู่ด้วย

3.7.3.8 ตัวแปรเบื้องต้นที่มีผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์เซรามิก

- ความบริสุทธิ์ของวัตถุดิบ ซึ่งมีความสำคัญต่อคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์เป็นอย่างมาก เช่น ความแข็งแรง สีส้น และความเรียบของเนื้อผลิตภัณฑ์
- ส่วนผสมของเนื้อดิน ขึ้นอยู่กับสูตรที่ใช้ในการผลิตและชนิดของผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ

- ขนาดของวัตถุดิบ มีผลต่อความละเอียดของเนื้อผลิตภัณฑ์ ความเรียบเนียน รวมไปถึงวิธีการในการผลิต

- อุณหภูมิในการเผา ซึ่งขึ้นอยู่กับเนื้อผลิตภัณฑ์ ความหนาบางของผลิตภัณฑ์

3.8 เตาเผากระเบื้องดินเผา

เตาเผากระเบื้องดินเผามีหลายชนิดด้วยกัน แยกออกตามประเภทดังนี้

1. เตาเผาชั่วคราว ใช้อิฐธรรมดาหรือกระเบื้องธรรมดา โดยนำกระเบื้องดินมาวางเรียงเป็นชั้นสูง 40 ชั้น เรียงโดยให้ไฟซึ่งใส่ไว้ข้างล่างผ่านพุ่งไปได้ตลอด แล้วทำกำแพงชั่วคราว

2. เตาฟืนไฟขึ้น (Up-draft Kiln) เตาเผาชนิดนี้ใส่ไฟเฉพาะไม่ปนกับกระเบื้องดิน เพียงแต่ให้ลมร้อนจากเตาผ่านกระเบื้องดินขึ้นไปข้างบน ซึ่งใช้ในงานวิจัยนี้

3. เตาฟืนไฟลง (Down-draft Kiln) เตาชนิดนี้ทำข้างบนมีหลังคามิดชิดไฟจึงออกข้างบน ไม่ได้ต้องทวนกลับลงมาอีกทีแล้วไปสู่ปล่องระบายจึงได้ความร้อนสูงจัด

3.9 มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม

เพื่อให้ผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมเซรามิกมีคุณภาพ เป็นที่เชื่อถือของผู้บริโภค สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม จึงได้กำหนดมาตรฐานทั่วไปของผลิตภัณฑ์เซรามิกไว้ดังนี้

3.9.1 มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมกระเบื้องดินเผาบุผนัง (มอก.36-2516)

คุณลักษณะที่ต้องการ

1. ความต้านแรงดัด ไม่ระบุในมาตรฐาน
2. การดูดซึมน้ำ ไม่เกิน 18 เปอร์เซ็นต์
3. ความทนทานต่อการร้าว ต้องไม่ปรากฏการร้าว
4. ความทนทานต่อสารเคมี ต้องไม่ปรากฏรอยเสียหาย

3.9.2 มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมกระเบื้องดินเผาปูพื้น (มอก.37-2529)

คุณลักษณะที่ต้องการ

1. ความต้านแรงดัด
 - กระเบื้องประเภทดูดซึมน้ำต่ำและประเภทดูดซึมน้ำปานกลางค่อนข้างต่ำ ต้องมีความต้านแรงดัดไม่น้อยกว่า 25.0 เมกกะปาสคาล
 - กระเบื้องประเภทดูดซึมน้ำปานกลางและประเภทดูดซึมน้ำสูง ต้องมีความต้านแรงดัดไม่น้อยกว่า 17.5 เมกกะปาสคาล
2. การดูดซึมน้ำ
 - กระเบื้องประเภทดูดซึมน้ำต่ำ (ทั้งชนิดเคลือบและไม่เคลือบ)

- การดูดซึมน้ำต้องไม่เกิน 3 เปอร์เซ็นต์
- กระเบื้องประเภทดูดซึมน้ำปานกลางค่อนข้างต่ำ (ทั้งชนิดเคลือบและไม่เคลือบ)
 - การดูดซึมน้ำต้องไม่เกิน 6 เปอร์เซ็นต์
 - กระเบื้องประเภทการดูดซึมน้ำปานกลาง (ต้องเป็นชนิดเคลือบอย่างเดียว)
 - การดูดซึมน้ำต้องไม่เกิน 10 เปอร์เซ็นต์
 - กระเบื้องประเภทดูดซึมน้ำสูง (ต้องเป็นชนิดเคลือบอย่างเดียว)
 - การดูดซึมน้ำต้องไม่เกิน 16 เปอร์เซ็นต์
- 3. ความทนทานต่อการร้าว ต้องไม่ปรากฏการร้าว
- 4. ความทนทานต่อสารเคมี ต้องไม่ปรากฏรอยเสียหาย

3.10 การศึกษาที่เกี่ยวข้องกับการวิจัย

Zhang และ Malhotra (1995) ได้ศึกษาสมบัติทางกายภาพและเคมีของวัสดุที่เรียกว่า Thermally activated alumina-silicate ต่อสมบัติของคอนกรีตสด (ความสามารถทำงานได้ การเอี่ยม ระยะเวลาการก่อตัว และความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน) และคอนกรีตที่แข็งตัวแล้วกับสัดส่วนควบคุม และกับคอนกรีตที่ใช้กับซิลิกาฟูม วัสดุดังกล่าวเป็นผงสีขาว มีส่วนประกอบหลักเป็น SiO_2 ซึ่งมีค่าเป็น 51.34 เปอร์เซ็นต์ และ Al_2O_3 41.95 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ขนาดโดยเฉลี่ยเท่ากับ 1.3 ไมครอน และมีองค์ประกอบส่วนใหญ่เป็น Amorphous โดยมีส่วนที่เป็นผลึก (Crystallized phase) เพียงเล็กน้อย ผลการศึกษาพบว่า วัสดุดังกล่าวมีความเป็นปอซโซลานสูง และสามารถใช้เป็นวัสดุประสานในการผลิตคอนกรีตกำลังสูงได้ การแทนที่ในสัดส่วน 10 เปอร์เซ็นต์ จะให้ค่ากำลังรับแรงอัดสูงกว่าสัดส่วนควบคุมในทุกระยะเวลาการบ่มยาวนานไปจนถึง 180 วัน และยังสามารถพัฒนาค่ากำลังรับแรงอัดในช่วงต้นได้เร็วกว่าคอนกรีตที่แทนที่ซีเมนต์ด้วยซิลิกาฟูม เนื่องจากอัตราการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันที่เร็วกว่า สังเกตได้จากอุณหภูมิในคอนกรีตสดที่เพิ่มขึ้นสูงกว่า ที่ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน คอนกรีตแทนที่ซีเมนต์ด้วย Thermally activated alumina-silicate จะมีสมบัติโดยทั่วไปดีกว่าสัดส่วนควบคุมและคอนกรีตแทนที่ซีเมนต์ด้วยซิลิกาฟูม

ประเสริฐ งามเลิศประเสริฐ (2541) ศึกษาการทำเสถียรตะกอนโลหะหนักที่ได้จากการบำบัดน้ำเสียซีโอดีและกากฟลูออเรสเซนซ์โดยการเติมโซเดียมซิลไฟด์ และทำให้เป็นก้อนโดยใช้ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วเป็นวัสดุประสาน ผลการทดลองพบว่าการทำตะกอนโลหะหนักจากน้ำเสียซีโอดีให้เป็นก้อนโดยใช้ซีเมนต์ผสมซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว มีอัตราส่วนผสมของตะกอนโลหะหนักต่อวัสดุประสานที่เหมาะสมเท่ากับ 0.5 และอัตราส่วนซิลิกา

อะลูมินาที่ใช้แล้วต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.6 โดยอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.5 ปริมาณไฮเดียมซัลไฟด์เท่ากับ 1.75 เท่าของปริมาณทางทฤษฎี ระยะเวลาบ่ม 7 วัน ประสิทธิภาพในการทำปอร์ตและโครเมียมให้คงตัวเท่ากับ 88.39 และ 82.77 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ส่วนการทำกาหลงพลูออเรสเซนตีให้เป็นก้อน โดยใช้ซีเมนต์ผสมซิลิกา-อะลูมินาจะมีอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมคือ อัตราส่วนผสมของตะกอนโลหะหนักต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.75 อัตราส่วนซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 50 เปอร์เซ็นต์ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.5 ปริมาณไฮเดียมซัลไฟด์เท่ากับ 1.75 เท่าของปริมาณทางทฤษฎี ที่ระยะเวลาการบ่ม 3 วัน มีประสิทธิภาพในการทำให้ปอร์ตคงตัวเท่ากับ 82.17 เปอร์เซ็นต์ ประสิทธิภาพในการลดการชะละลายของสารแอนทราควิโนนเท่ากับ 60.56 เปอร์เซ็นต์ ค่าใช้จ่ายในการบำบัดประมาณ 5,620 บาทต่อตันตะกอนแห้ง

Karamanov และคณะ (1999) ศึกษาการผลิตเซรามิกที่มีแก้วเป็นส่วนประกอบจากจาโรไซต์ (Jarosite) ซึ่งเป็นกากของเสียอันตรายจากโรงงานอุตสาหกรรม โดยนำไปเผาในกระบวนการหลอมแก้วในเซรามิกที่อุณหภูมิสูง และทำการศึกษาเฟสที่เกิดขึ้น พบว่า กระบวนการเผาทำให้เกิด ผลึกเฟส 40 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก แสดงให้เห็นว่า มีความเป็นไปได้ที่จะผลิตเครื่องแก้วเซรามิก (glass ceramic) จากกากของเสีย (จาโรไซต์) ซึ่งเป็นการทำให้กากของเสียมีค่าอีกครั้งโดยการนำมาใช้เป็นวัตถุดิบ

Berbieri และคณะ (2000) ศึกษาการสร้างผลึกของ $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ ที่มีระบบโครงสร้างคล้ายแก้ว ในอะลูมิโนซิลิเกตและในเซรามิกที่มีแก้วและซิลิเกตเป็นองค์ประกอบ โดยมีการใช้ซีเมนต์จากสเปนและอิตาลี ตะกอนจากเตาเผาขยะชุมชนเป็นส่วนผสมโดยทำการศึกษากลไกและเฟสที่เกิดขึ้นพบว่า มีแนวโน้มในการสร้างผลึกที่ดีและพบว่า ค่าพลังงานกระตุ้นที่วัดได้มีค่าอยู่ในช่วงที่ใกล้เคียงกับค่าพลังงานกระตุ้นในเซรามิกที่มีองค์ประกอบทั่วไปเป็น แก้วและอะลูมิโนซิลิเกต นอกจากนี้ยังมีความเป็นไปได้ที่จะเกิดเป็นเนื้อแก้ว 100 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของตะกอน

Cimdins และคณะ (2000) พื้นที่ส่วนใหญ่ของประเทศลัตเวียมีการปนเปื้อนของของเสียอุตสาหกรรมประเภท กากโลหะ ซีเมนต์ล้อย เศษวัสดุที่เหลือจากการพิมพ์ด้วยแม่พิมพ์โลหะ ซีเมนต์ของถ่านหินเลนและถ่านหิน รวมถึงของเสียประเภทแก้วที่บรรจุวัตถุดิบอันตราย ในเป้าหมายทางสิ่งแวดล้อมของเสียเหล่านี้จะต้องผ่านกระบวนการทำให้เป็นกลาง อย่างไรก็ตามของเสียเหล่านี้มีองค์ประกอบทางเคมีที่สำคัญ ซึ่งสามารถนำมาพิจารณาใช้เป็นวัตถุดิบสำหรับการผลิตวัสดุขึ้นมาใหม่ได้ โดยวิธีการหนึ่งของการนำมาใช้ประโยชน์คือการนำมารีไซเคิลเพื่อผลิตวัสดุ เช่น แผ่นเหล็ก

ปูพื้นถนน กระเบื้องประเภทสวายงามหรือกระเบื้องประเภทปูพื้น กลาสเซรามิกที่มีวัตุดิบเป็นของเสียอุตสาหกรรมนี้ ภายหลังจากเผามีเปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำ 0.34-3.23 เปอร์เซ็นต์ ความหนาแน่น 2.93-3.05 กรัม/ลบ.ซม. กำลังรับแรงดัด 80-96 เมกกะปาสคาล สำหรับด้านการทนสารเคมีได้มีการเติมดินลงไปเป็นวัตุดิบ โดยพบว่าวัสดุที่มีของเสียอุตสาหกรรมเป็นวัตุดิบเพียงอย่างเดียว สุกุญเสียมวล 3.02 เปอร์เซ็นต์ ในกรดไฮโดรคลอริก 0.1 นอร์มัล ในขณะที่วัสดุมีการเติมดินลงไป จะมีการสุกุญเสียมวล 0.2 เปอร์เซ็นต์ ในกรดไฮโดรคลอริก 0.1 นอร์มัล

Haun (2000) ศึกษาการนำของเสียประเภทแก้วมาใช้ในอุตสาหกรรมเซรามิก เพื่อต้องการลดต้นทุนการผลิตและช่วยประหยัดพลังงานโดยพบว่าในช่วง 2-3 ปีที่ผ่านมาในประเทศสหรัฐอเมริกามีความต้องการกระเบื้องเซรามิกเพิ่มขึ้น 7 เปอร์เซ็นต์ คิดเป็น 2.4 ล้านตารางฟุต การเพิ่มขึ้นนี้ทำให้ต้องเพิ่มกำลังการผลิตมากขึ้น มีการใช้ทรัพยากรและพลังงานในการผลิตเพิ่มมากขึ้น จึงได้ทำการวิจัยโดยเลือกแก้วที่ยากต่อการนำกลับมาใช้ใหม่ (แก้วชนิดมีสี เช่น แก้วสีเขียว แก้วสีชา) มาผสมในเนื้อเซรามิก พบว่าสามารถลดอุณหภูมิในการเผาได้ถึง 37 เปอร์เซ็นต์ซึ่งมีการประหยัดพลังงานในการผลิต นอกจากนี้ยังพบว่าสามารถลดปริมาณดินและน้ำในวัตุดิบได้อีกด้วย

Haun (2002) ศึกษาถึงขนาดของผงแก้วต่อพฤติกรรมการอัดตัวก่อนและหลังขึ้นรูปแล้ว พบว่า ที่ผงแก้วที่มีขนาดเล็กกว่า 30 เมช เมื่อทำให้อิ่มตัวด้วยน้ำแล้วนำมาอบให้แห้งจะได้ค่าความอัดตัวทั้งก่อนและหลังขึ้นรูปที่ดีกว่าผงแก้วที่มีขนาดใหญ่กว่า 30 เมช และผลดังกล่าวทำให้สามารถศึกษาต่อถึงพลังงานที่ใช้ในการเผาขึ้นรูป คือ เมื่อผงแก้วที่มีขนาดเล็กกว่า 30 เมช สามารถอัดตัวได้ดีกว่า จึงสามารถลดอุณหภูมิที่ใช้ในการหลอมผงแก้วลงได้คือ ใช้อุณหภูมิน้อยกว่า 800 องศาเซลเซียสในเวลา 5 นาทีเท่านั้น และศึกษาถึงผลกระทบจากการปนเปื้อนของสารอนินทรีย์ที่อาจเกิดขึ้นจากสภาวะใดๆ พบว่า ถ้ามีความปนเปื้อนตั้งแต่ 2-25 เปอร์เซ็นต์ขึ้นไป จะมีผลต่อความสามารถในการอัดตัวของผงแก้ว

โลหิพย์ อภิธรรมวิริยะ (2542) ได้ทำการศึกษาโดยการนำซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วมาใช้ประโยชน์ในการทำวัสดุปูพื้น ผลของการศึกษาอัตราส่วนของซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วต่อดินสำเร็จรูปในการทำกระเบื้องดินเผาปูพื้น โดยแปรค่าตั้งแต่ 0, 0.25, 0.50, 0.75 และ 1.00 พบว่าอัตราส่วนของซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วต่อดินสำเร็จรูปที่เหมาะสมเท่ากับ 0.25 เมื่อเผาที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส เนื่องจากให้ค่ากำลังรับแรงอัดและค่าความหนาแน่นสูงสุด ความทนการรานและการทนสารเคมีประเภทกรดและด่างผ่านเกณฑ์มาตรฐาน ค่าใช้จ่ายโดยประมาณ 7.29 บาทต่อกระเบื้อง 1 แผ่น ผลการศึกษาในเชิงเศรษฐศาสตร์ อุณหภูมิที่เหมาะสมในการเผากระเบื้อง คือ

800 องศาเซลเซียส โดยที่ค่าจากผลการทดสอบเป็นไปตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม กระเบื้องดินเผาปูพื้น (มอก.37-2529) ค่าใช้จ่ายโดยประมาณกับ 7.19 บาทต่อกระเบื้อง 1 แผ่น

สุรศักดิ์ ไวทยวงศ์สกุล และคณะ (2542) ศึกษาการนำกากวัสดุอะลูมินาเซรามิกกลับมาใช้ใหม่ โดยศึกษาถึงวิธีการที่จะทำการบดกากวัสดุอะลูมินาเซรามิกที่มีความแข็งแรงสูงเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ โดยวิธีการทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็ว (Quenching) เพื่อทำให้เกิดรอยแตกแยกในเนื้อวัสดุทำให้ความแข็งแรงลดลง ทำให้ทำการบดได้ง่ายขึ้น พบว่า การทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็วจากอุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส จนถึงอุณหภูมิห้องจะทำให้ชิ้นงานอะลูมินาเซรามิกมีความแข็งแรงลดลงครึ่งหนึ่ง และพบว่าการเพิ่มปริมาณลูกบดจะช่วยลดขนาดของอนุภาคของวัสดุที่บดลงได้เล็กน้อยและมีผลต่อลักษณะการกระจายขนาดอนุภาคน้อยมาก

เปรมฤดี กาญจนปิยะ (2544) ทำการศึกษาการนำซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วมาใช้ประโยชน์ในการเป็นวัตถุดิบผลิตปูนซีเมนต์อะลูมินาสูง (HAC) ร่วมกับหินปูนและตะกอนเหล็ก (GGBS) ซึ่งปูนซีเมนต์ที่ผลิตได้จะนำไปใช้ประโยชน์ในการเสถียรทำตะกอนโลหะหนักนิกเกิลให้ เป็นก้อนแทนการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ผลการทดลองพบว่า สัดส่วนของปูนขาวต่อซิลิกาอะลูมินาที่ใช้แล้ว อุณหภูมิและเวลาเผาที่เหมาะสมในการผลิต HAC และ HAC ผสม GGBS คือ 40/60 1300 องศาเซลเซียส และ 3.5 ชั่วโมง ตามลำดับ ค่ากำลังรับแรงอัดของ HAC ที่ผลิตได้มีค่าต่ำกว่ามาตรฐาน แต่ค่ากำลังรับแรงอัดของ HAC ผสม GGBS ที่ผลิตได้ มีการพัฒนาของกำลังรับแรงอัดซึ่งจะทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดที่ 60 วัน มีค่าสูงกว่ามาตรฐาน ผลการทดลองจากการนำ HAC และ HAC ผสม GGBS ที่ผลิตได้ไปทำการเสถียรตะกอนโลหะหนักนิกเกิล โดยใช้อัตราส่วนของตะกอนโลหะหนักต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 1.0 อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.65 พบว่า ค่ากำลังรับแรงอัด ค่าความหนาแน่นและการชะละลายมีค่าผ่านเกณฑ์มาตรฐานโดยมีประสิทธิภาพในการลดการชะละลายเท่ากับ 99.99 เปอร์เซ็นต์

อภิรัฐ อธิภาพพิเศษพงษ์ และ ชาญ จรรย์วานิชย์ (2545) ได้ทำการศึกษานำตะกอนดินจากโรงผลิตน้ำประปาบางเขน มาเป็นวัตถุดิบในการผลิตเซรามิก โดยทำการวิเคราะห์แร่ที่เป็นองค์ประกอบพบว่ามีแร่ดังต่อไปนี้ ควอตซ์ เฟลด์สปาร์ชนิดไมโครไคลน์ ไมก้าชนิดมัสโคไวท์ ดินชนิดเกาลินไนท์ และมอนต์-มอริลโลไนท์ ซึ่งการผลวิเคราะห์ตะกอนทางเคมี พบว่ามี ส่วนประกอบ (%โดยน้ำหนัก) คือ SiO₂ 57.00%, TiO₂ 0.83%, Al₂O₃ 24.80%, Fe₂O₃ 8.55%, CaO 2.01%, MgO 1.27%, K₂O 1.94%, Na₂O 0.07% และ SO₃ 0.19% ผลการศึกษาที่ได้พบว่า ตะกอนจากการผลิตน้ำประปาของโรงงานผลิตน้ำประปาบางเขน สามารถนำมาใช้ทดแทนดินเหนียวในอุตสาหกรรมเซรามิกได้ การใช้ของเสียเป็นวัตถุดิบในอุตสาหกรรมเซรามิกนี้จะช่วยลด

มลภาวะที่เกิดขึ้นเป็นการอนุรักษ์วัตถุดิบที่มีในปัจจุบัน ช่วยลดปริมาณการทำเหมืองแร่ ลดมลภาวะที่อาจเกิดขึ้นและเป็นการเพิ่มคุณค่าของวัตถุดิบให้เกิดประโยชน์สูงสุด

สุจิตรา กัญยาวิลาศ (2545) ศึกษาการทำตะกอนนิกเกิลไฮดรอกไซด์ให้เป็นก้อนด้วยการใช้ซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วร่วมกับปูนขาว และซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ โดยการหาอัตราส่วนที่เหมาะสมระหว่าง ซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วต่อปูนขาว และซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วต่อซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ พิจารณาจากสมบัติทางกายภาพได้แก่ ค่ากำลังรับแรงอัด และประสิทธิภาพในการลดการชะละลาย ผลการทดลองสรุปว่า อัตราส่วนวัสดุประสานต่อตะกอนที่เหมาะสมคือ 0.25 อัตราส่วนซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วที่ผ่านการบดให้ผลการทำก้อนแข็งตะกอนนิกเกิลไฮดรอกไซด์ได้ดีกว่าวัสดุที่ไม่ผ่านการบด

สาโรจน์ ปัทมพิชญ์ (2545) ศึกษาการนำซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วมาใช้ประโยชน์เป็นวัตถุดิบโดยใช้แทนที่อะลูมินาบริสุทธิ์ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวทนไฟ ร่วมกับดินดำและหินพื้นม้าโดยศึกษาคุณสมบัติของเนื้อดินและเซรามิกที่ผลิตได้จากการแปรค่าอัตราส่วน ซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วผสมในเนื้อดิน โดยคงค่าอัตราส่วนผสมระหว่างดินดำและหินพื้นม้าที่อัตราส่วน 8 ต่อ 5 เผาที่อุณหภูมิ 1180 องศาเซลเซียส โดยแปรค่าอัตราส่วนของซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วต่อส่วนผสมเป็น 30, 35, 40 และ 45 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ ผลการทดลองพบว่า อัตราส่วนของซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วต่อส่วนผสมที่เหมาะสมคือ 40 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งอัตราส่วนดังกล่าวมี เปอร์เซ็นต์การหดตัวหลังเผาเท่ากับ 15.58 เปอร์เซ็นต์ ค่าความหนาแน่นหลังเผาเท่ากับ 2.27 กรัม/มิลลิเมตร ค่าการดูดซึมน้ำเท่ากับ 3.86 เปอร์เซ็นต์ ค่ากำลังรับแรงดัดหลังเผาเท่ากับ 285.01 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร จากผลการวิจัยดังกล่าว สามารถสรุปได้ว่าซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วสามารถนำมาใช้ประโยชน์เป็นวัตถุดิบในกระบวนการผลิตเซรามิกได้โดยใช้แทนอะลูมินาบริสุทธิ์ ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวทนไฟร่วมกับดินดำและหินพื้นม้า

Park และคณะ (2002) ได้ทำการศึกษานำเถ้าลอยจากเตาเผาขยะในเมืองปูซาน ประเทศเกาหลีใต้ มาผสมกับ SiO_2 , MgO และ TiO_2 เพื่อนำมาทำกลาสเซรามิก ผลการศึกษาหาสัดส่วนที่เหมาะสม พบว่าสูตรทางเคมีที่เหมาะสมในงานวิจัยคือ $20\text{SiO}_2\text{-}5\text{MgO-}75\text{fly ash-}2\text{TiO}_2$ เผาที่อุณหภูมิ 870 องศาเซลเซียส กลาสเซรามิกที่ได้มีค่ากำลังแรงดัด 127 เมกกะปาสคาล จากการศึกษาเบื้องต้น พบว่าปริมาณโลหะหนักจากการทดสอบการชะละลายของซีเถ้าลอยนี้มีค่าเกินมาตรฐานของประเทศเกาหลีใต้ กล่าวคือมีค่าแคดเมียมเท่ากับ 25.49 ส่วนในล้านส่วน ทองแดง 24.02 ส่วนในล้านส่วน ตะกั่ว 9.74 ส่วนในล้านส่วน และสังกะสี 362.10 ส่วนในล้านส่วน แต่หลังจากทำเป็นกลาสเซรามิกตามสัดส่วนที่เหมาะสมแล้ว พบว่าปริมาณโลหะหนักหลังการ

ทดสอบการชะละลายต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานคือ มีค่าแคดเมียมต่ำกว่า 0.1 ส่วนในล้านส่วนของแดงต่ำกว่า 3.0 ส่วนในล้านส่วน ตะกั่วต่ำกว่า 1.0 ส่วนในล้านส่วน และสังกะสีต่ำกว่า 5.0 ส่วนในล้านส่วน ซึ่งนอกจากจะได้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มาจากของเสียแล้วยังเป็นอีกทางเลือกหนึ่งของการจัดการของเสียอันตราย

ทฤษฎี ธิตินันท์ (2546) ศึกษาถึงการนำซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วไปใช้ประโยชน์เพื่อการผลิตคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นโดยนำไปใช้เป็นวัสดุแทนที่ในซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ทำการแปรค่าสัดส่วนวัสดุผสมเป็น 2, 3, 5, 8, 10 และ 11 เท่าโดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ป่มที่เวลา 7 และ 28 วัน และแปรค่าอัตราส่วนซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วสถานะต่างๆ ต่อวัสดุประสานเป็น 0.05, 0.10, 0.15, 0.25 และ 0.35 ที่ระยะเวลาป่ม 7, 14, 21 และ 28 วัน ผลพบว่าความสามารถทำงานได้ของคอนกรีตลดลงตามอัตราส่วนการเพิ่มขึ้นของวัสดุผสมและอัตราส่วนซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วต่อวัสดุประสาน การบดซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วให้มีขนาดเล็กกว่า 150 ไมครอนโดยไม่จำเป็นต้องเผาจะทำให้ได้วัสดุที่เหมาะสมที่สุด เนื่องจากสามารถแทนที่ซีเมนต์ได้ในปริมาณมากขึ้น และที่ขนาดดังกล่าวสามารถใช้ซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วทดแทนในอัตราส่วน 0.15 เท่าของวัสดุประสาน ทำให้คอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นมีสมบัติทางกายภาพด้วยระยะเวลาป่ม 28 วัน ผ่านเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์คอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นของกระทรวงอุตสาหกรรม โดยคอนกรีตดังกล่าวข้างต้นมีราคา 2.74 บาท/ก้อนผลิตภัณฑ์น้ำหนัก 4.40 กิโลกรัม

เพ็ชรพร เขาวกิจเจริญ และ วิวรรณ เทียนศิริ (2548) ได้ศึกษาถึงการใช้ของเสียที่เป็นแก้วสีขามาทดแทนวัสดุดิบในส่วนของตัวหลอมละลายในการผลิตกระเบื้องเซรามิก ผลของการศึกษาอัตราส่วนขวดแก้วสีขาที่ใช้แล้วบดละเอียดต่อเฟลด์สปาร์ โดยแปรค่าตั้งแต่ 0.00, 0.25, 0.50, 0.75 และ 1.00 ที่อุณหภูมิแปรค่าตั้งแต่ 1000, 1100 และ 1200 องศาเซลเซียส พบว่าทุกอัตราส่วนการทดแทนเฟลด์สปาร์สามารถใช้ได้เมื่อเผาที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส เนื่องจากให้ค่ากำลังรับแรงอัดได้สูงถึง 48.11, 42.29, 36.65, 35.15 และ 33.50 เมกกะปาสคาล ตามลำดับ ซึ่งสูงกว่าค่ามาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมกระเบื้องดินเผาปูพื้น (มอก.37-2529) คือ ไม่น้อยกว่า 25 เมกกะปาสคาล จากผลดังกล่าวแสดงว่าสามารถใช้ของเสียที่เป็นแก้วสีขาทดแทนเฟลด์สปาร์ในกระบวนการผลิตกระเบื้องได้ 100 เปอร์เซ็นต์ และยังมีค่าทดสอบการดูดซึมน้ำ การหดตัว การทนสารเคมี (ประเภทกรดและด่าง) และความทนการรานซึ่งให้ค่าทดสอบเป็นไปตามเกณฑ์มาตรฐาน และเมื่อคิดราคาของกระเบื้องต่อแผ่น พบว่าราคาของส่วนผสมที่มีแก้ว 100 เปอร์เซ็นต์ เผาที่ 1200 องศาเซลเซียส เท่ากับ 9.08 บาท ในขณะที่ส่วนผสมที่ไม่มีแก้ว เผาที่ 1200 องศาเซลเซียส เท่ากับ 11.18 บาท ซึ่งสามารถลดต้นทุนในการผลิตลงได้ 2.11 บาทต่อแผ่น และเมื่อพิจารณากระเบื้องที่มีความคุ้มค่าในเชิงเศรษฐศาสตร์พบว่า คือ กระเบื้องที่มีการทดแทน

เฟลด์สปาร์ด้วยของเสียที่เป็นแก้ว 100 เปอร์เซ็นต์ เฝ้าขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียส คือให้ค่าการทดสอบกำลังรับแรงดัดเท่ากับ 24.55 เมกกะปาสคาล ค่าการดูดซึมน้ำ 13.77 เปอร์เซ็นต์ ค่าการหดตัว 5.08 เปอร์เซ็นต์ มีคุณสมบัติในการทนการร้าวและความทนสารเคมี ซึ่งจากผลดังกล่าวพบว่าให้ค่ากำลังรับแรงดัดต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมกระเบื้องดินเผาปูพื้นที่กำหนดให้กระเบื้องปูพื้นต้องมีค่ากำลังรับแรงดัดมากกว่า 25 เมกกะปาสคาลเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

เพ็ชรพร เชาวกิจเจริญ ชดชนก อัทธมพงศ์ อลิสา วิเชียรเจริญ และ อัจฉราภรณ์ พรหมบุตร (2549) ศึกษาถึงการนำของเสียประเภทแก้วมีสีที่ใช้โดยทั่วไป ได้แก่ เศษแก้วสีชา เศษแก้วสีเขียว เศษกระจกใสที่ใช้แล้ว มาเป็นวัตถุดิบทดแทนเฟลด์สปาร์ในกระบวนการผลิตกระเบื้องเซรามิก ผลการศึกษาพบว่ากระเบื้องเซรามิกที่มีสภาวะที่เหมาะสมในกระบวนการผลิตคือกระเบื้องเซรามิกที่มีส่วนผสมของเศษแก้วสีเขียว 100 เปอร์เซ็นต์ ขึ้นรูปที่ความดัน 100 บาร์ เฝ้าที่อุณหภูมิ 1150 องศาเซลเซียส คือให้ค่ากำลังรับแรงดัดเท่ากับ 28.86 เมกกะปาสคาล ค่าการหดตัวหลังการเผาและค่าการดูดซึมน้ำ เท่ากับ 14.83 และ 3.93 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ การทดสอบความทนสารเคมีและความทนการร้าวไม่ปรากฏรอยเสียหาย

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4

แผนการทดลองและการดำเนินการวิจัย

การวิจัยนี้เป็นศึกษาถึงการปรับปรุงและพัฒนาคุณภาพของกระเบื้องเซรามิก โดยหาสภาวะที่เหมาะสมในการใช้วัตถุดิบทดแทนร่วมระหว่างของเสียที่เป็นแก้วสีชาและซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วเพื่อใช้ทดแทนเฟลด์สปาร์ (ตัวหลอมละลาย) ในกระบวนการผลิตกระเบื้องเซรามิกโดยยังคงใช้ดินดำเป็นตัวเหนียวดิน และใช้ทรายอบแห้งเป็นตัวทนไฟในเนื้อผลิตภัณฑ์กระเบื้องเซรามิก งานวิจัยนี้ทำการทดลองที่ห้องปฏิบัติการภาควิชาชีพวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ห้องปฏิบัติการของเสียอันตรายภาควิชาชีพวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ห้องปฏิบัติการภาควิชาชีพวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ ห้องปฏิบัติการภาควิชาชีพวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ และห้องปฏิบัติการสถาบันวิจัยโลหะและวัสดุ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.1 การเตรียมวัสดุสำหรับทำวิจัย

4.1.1 วัตถุดิบ (รูปที่ 4.1 4.2 4.3 และ 4.4)

- 1.) ดินดำ (รายละเอียดแสดงในตารางที่ ๘16)
- 2.) ของเสียที่เป็นแก้วสีชาบดละเอียด (ใช้ขวดแก้วสีชาประเภทเครื่องดื่มชูกำลัง)
- 3.) ซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว
(จากโรงงานผลิตสารประกอบไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ จังหวัดระยอง)
- 4.) ทรายอบแห้งบดละเอียด (รายละเอียดแสดงในตารางที่ ๘17)
- 5.) น้ำ

4.1.2 สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

- 1.) สารละลายกรดไฮโดรคลอริก 3 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร
- 2.) สารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก
- 3.) เมธิลีนบลู 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

4.1.3 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

4.1.3.1 การทดลองขึ้นรูปกระเบื้องและเผากระเบื้อง

- 1.) เตาเผาที่อุณหภูมิสูง
- 2.) เครื่องผสม (อ่างผสมและใบพาย)
- 3.) เครื่องชั่งน้ำหนัก
- 4.) เครื่องอัดขึ้นรูปกระเบื้อง
- 5.) เครื่องบดวัสดุ



รูปที่ 4.1 ดินดำ (Ball Clay)
ขนาด 200 เมช (0.075 มม.)



รูปที่ 4.2 ททรายละเอียด (Mill Sand)
ขนาด 200 เมช (0.075 มม.)



รูปที่ 4.3 ของเสียนที่เป็นแก้วสีขาบละเอียด
ขนาด 200 เมช (0.075 มม.)



รูปที่ 4.4 ซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วบด
ขนาด 100 เมช (0.15 มม.)

4.1.3.2 การทดสอบกำลังรับแรงดัด

- 1.) เครื่องทดสอบกำลังรับแรงดัด ยี่ห้อ ALFRED J. รุ่น No.5572

4.1.3.3 การทดสอบการดูดซึมน้ำ

- 1.) เครื่องชั่งน้ำหนัก
- 2.) เครื่องอ่างน้ำ (Water bath)
- 3.) เติสเคเตอร์ (Desiccator)

4.1.3.4 การทดสอบความทนการร้าว

- 1.) หม้อนึ่งอัดไอน้ำ (Autoclave)

4.1.3.5 การทดสอบการทนสารเคมี (กรดและด่าง)

- 1.) อ่างสำหรับแช่ตัวอย่างกระเบื้อง

4.1.3.6 การทดสอบการหดตัว

- 1.) เครื่องมือวัดละเอียด (เวอร์เนียคาลิเปอร์)

4.1.3.7 การตรวจสอบคุณสมบัติทางเคมี

- 1.) เครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนส์สเปกโตรมิเตอร์

(X-Ray fluorescence spectrometer) ยี่ห้อ PHILIPS รุ่น PW 2510

4.1.3.8 การตรวจสอบเฟสที่เกิดขึ้นของผลิตภัณฑ์

- 1.) เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์

(X-Ray diffractometer) ยี่ห้อ BRUKER AXS รุ่น D8 DISCOVER

4.2 การดำเนินการวิจัย

4.2.1 การวิจัยเบื้องต้น

- การตรวจสอบและวิเคราะห์หาลักษณะคุณสมบัติและปริมาณองค์ประกอบทางเคมีของเสียที่เป็นแก้วสีชาและซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วโดยใช้เครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนส์

4.2.2 การทดลอง

การทดลองนี้ประกอบด้วยทดลอง 2 ชุดด้วยกันคือ

การทดลองที่ 1 ศึกษาหาอัตราส่วนที่เหมาะสมของของเสียที่เป็นแก้วสีชาต่อซิลิกาอะลูมินาที่ใช้แล้ว

1. เก็บรวบรวมของเสียที่เป็นแก้วสีชาจากแหล่งต่างๆ พร้อมทำความสะอาดและนำไปทำการบดละเอียดด้วยเครื่องบดหยาบ (Jaw crusher) และเครื่องบดละเอียด (Mill crusher) บดย่อยขนาดซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วด้วยเครื่องบด (Ball mill)
2. นำดินดำ ททรายแก้ว ของเสียที่เป็นแก้วสีชาบดละเอียดไปร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 200 (0.075 มิลลิเมตร) เพื่อแยกส่วนที่จับตัวเป็นก้อนและสิ่งสกปรกขนาดเล็กที่อาจปนเปื้อน
3. นำซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วบดละเอียดไปร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 100 เมช (เพื่อให้ได้ขนาด 0.15 มิลลิเมตร) เนื่องจากที่ขนาดดังกล่าวส่งเสริมให้ซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วเป็นวัสดุปอซโซลานมากขึ้นและมีค่าการกระจายตัวที่เหมาะสม (สาโรจน์ ปัทยพิงษ์, 2545)
4. นำของเสียที่เป็นแก้วสีชาและซิลิกา-อะลูมินาที่เตรียมไว้ มาผสมกันโดยใช้เครื่องผสมเพื่อทดแทนเฟลด์สปาร์ โดยเลือกอัตราส่วนดังนี้

ตารางที่ 4.1 อัตราส่วนผสมระหว่างของเสียที่เป็นแก้วสีชาและซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว

สูตรที่	ของเสียที่เป็นแก้วสีชา (เปอร์เซ็นต์)	ซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว (เปอร์เซ็นต์)
1 (อ้างอิง)	100	0
2	80	20
3	75	25
4	70	30

5. จากข้อ 4. นำแต่ละอัตราส่วนมาผสมกับดินดำ โดยผสมในอัตราส่วน ดินดำ : (ของเสียที่เป็นแก้วสีชาและซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วบดละเอียด) เท่ากับ 8:5 และคิดเป็น 60 เปอร์เซ็นต์

6. นำทรายแก้วมาผสมกับในข้อ 5 จำนวน 40 เปอร์เซ็นต์ ส่วนผสมดังกล่าวคิดเป็น 90 เปอร์เซ็นต์ คลุกเคล้าให้เข้ากันด้วยเครื่องผสม จากนั้นเติมน้ำลงในส่วนผสม 10 เปอร์เซ็นต์ ทำการผสมวัสดุบดบด หมักทิ้งไว้ในถุงพลาสติกประมาณ 3 วันเพื่อให้ส่วนผสมมีความชื้นทั่วกัน ก่อนการนำไปขึ้นรูป

7. หลังจากหมักทิ้งไว้ 3 วันแล้ว นำวัสดุบดบดไปขึ้นรูปเป็นแผ่นกระเบื้อง โดยการวิจัยนี้ทำการขึ้นรูปเป็นแผ่นกระเบื้องขนาด 4x4 ตร.นิ้ว (10 x 10 x 0.5 ลบ.ซม.) โดยใช้แรงอัดขึ้นรูปที่ 200 บาร์ 2 จังหวะ คืออัดกระเบื้องให้เต็มแรงอัดของเครื่องครั้งหนึ่งเพื่อไล่อากาศ จากนั้นผ่อนแรงลง

และอัดกระเบื้องให้เต็มแรงอีกครั้งหนึ่ง คือเป็นระดับที่เหมาะสมในการทำการทดลองระดับห้องปฏิบัติการ (วิวรรณ เวียนศิริ, 2546)

8. นำแผ่นกระเบื้องที่ผ่านการขึ้นรูปมาอบเพื่อให้น้ำระเหยออกจากตัวผลิตภัณฑ์ที่อุณหภูมิ 105 ± 5 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง เพื่อป้องกันการเกิดการแตกร้าวและการโค้งงอของตัวเนื้อผลิตภัณฑ์เนื่องจากตัวผลิตภัณฑ์มีความชื้นไม่สม่ำเสมอ

9. หลังจากผ่านการอบเพื่อลดความชื้นแล้ว นำกระเบื้องที่อัตราส่วนการทดแทนต่างๆ เข้าเผาขึ้นรูปที่เตาเผาอุณหภูมิสูง โดยทำการเผาที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส (ใช้ระยะเวลาในการเผาอุณหภูมิเป็นเวลา 2 ชั่วโมง และเผาแซ่ไฟที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส 1 ชั่วโมง)

10. ทดสอบคุณภาพตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมกระเบื้องดินเผาปูพื้น (มอก. 37-2529) ค่ากำลังรับแรงดัด ค่าการหดตัว ค่าการดูดซึ่ม การทนสารเคมี และความทนการรราน

การทดลองที่ 2 ศึกษาถึงผลของอุณหภูมิที่เหมาะสมในการเผาขึ้นรูปกระเบื้อง

1. เลือกผลิตภัณฑ์กระเบื้องที่แปรอัตราส่วนของเสียที่เป็นแก้วสีชาต่อซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วสูตรที่ให้ค่าทดสอบผ่านตามเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมจากการทดลองที่ 1 มาทำการแปรอุณหภูมิในการเผาขึ้นรูปจาก 1200 เป็น 1150 และ 1100 องศาเซลเซียส ตามลำดับดังนี้

2. ทดสอบคุณภาพตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมกระเบื้องดินเผาปูพื้น (มอก. 37-2529) อีกครั้งเพื่อตรวจสอบหากระเบื้องสูตรที่มีคุณภาพตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมกำหนด

4.2.3 การทดสอบคุณภาพตามมาตรฐานกระทรวงอุตสาหกรรม

4.2.3.1 การทดสอบกำลังรับแรงดัด

โดยทั่วไปการทดสอบความแข็งแรงประเภทนี้ สามารถทำได้โดยการทดสอบหาค่าความแข็งแรงภายใต้กำลังรับแรงดัดของผลิตภัณฑ์กระเบื้องหลังเผา ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่สำคัญและเป็นตัวควบคุมคุณภาพอย่างหนึ่ง เพราะมีอิทธิพลต่อการใช้ประโยชน์ของผลิตภัณฑ์และมีอิทธิพลต่อกรรมวิธีการผลิตผลิตภัณฑ์ ทั้งนี้เพราะผลิตภัณฑ์ดิบที่ไม่แข็งแรงทำให้ลำบากต่อการขนย้ายและการเผาต้องมีความระมัดระวังมาก

วิธีการทดสอบ

1. เตรียมชิ้นงานหลังเผาที่ผ่านการอัดขึ้นรูป เพื่อนำไปอัดให้หักโดยเครื่องมือทดสอบด้วยแรงกดประมาณ 45 กิโลกรัมต่อหน้าที จนถึงแรงกดที่ทำให้ชิ้นงานนั้นหัก แล้วนำไปคำนวณค่าความแข็งแรง

การคำนวณ

ความแข็งแรงภายใต้กำลังรับแรงดัด (Modulus of Rupture, MOR) ได้จากสูตร

$$MOR = (3PL)/(2bd^2)$$

โดยที่ P คือ แรงกดที่ทำให้แผ่นกระเบื้องหัก หน่วย กิโลกรัม

L คือ ระยะห่างของจุดรองรับ (ไม่น้อยกว่า 9 เซนติเมตร)

b คือ ความกว้างของแผ่นกระเบื้อง หน่วย เซนติเมตร

d คือ ความหนาของแผ่นกระเบื้อง หน่วย เซนติเมตร

2.พล็อตกราฟระหว่าง อัตราส่วนของเสียที่เป็นแก้วสีชาต่อซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วแต่ละอัตราส่วนกับค่ากำลังรับแรงดัดที่ได้ในแต่ละอุณหภูมิที่ทำการวิจัยเพื่อหาจุดที่เหมาะสมของสภาวะที่ดีที่สุดสำหรับส่วนประกอบของผลิตภัณฑ์ ในด้านกำลังรับแรงดัด

4.2.3.2 การทดสอบการดูดซึมน้ำ (Water absorption test)

คือการวัดปริมาณรูพรุนเปิดที่เชื่อมกับผิวของผลิตภัณฑ์โดยเป็นค่าที่แสดงให้เห็นถึงความสามารถในการอัดตัวของผลิตภัณฑ์

วิธีการทดสอบ

1. นำแผ่นกระเบื้องที่ผ่านการเผามาอบที่อุณหภูมิ 105±5 องศาเซลเซียสเพื่อกำจัดน้ำในผลิตภัณฑ์ ปล่อยให้เย็นในเดสิเคเตอร์ ทำการชั่งน้ำหนัก (Dry weight, D)

2. นำแผ่นกระเบื้องวางลงในเครื่องอั่งน้ำ โดยให้น้ำท่วมทั้งแผ่น ต้มน้ำให้เดือดเป็นเวลา 2 ชั่วโมง และทิ้งไว้ให้น้ำเย็น

3. นำแผ่นกระเบื้องที่ทดสอบขึ้นจากน้ำและเช็ดผิวให้แห้งด้วยผ้าหมาดๆ ทำการชั่งน้ำหนัก (Saturated weight, W)

การคำนวณ

$$\text{ค่าการดูดซึมน้ำ (เปอร์เซ็นต์)} = (W-D) \times (100/D)$$

4.พล็อตกราฟระหว่าง อัตราส่วนของเสียที่เป็นแก้วสีชาต่อซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วแต่ละอัตราส่วนกับค่าการดูดซึมน้ำที่ได้ของแต่ละอุณหภูมิที่ทำการวิจัยเพื่อหาจุดที่เหมาะสมของสภาวะที่ดีที่สุดสำหรับส่วนประกอบของผลิตภัณฑ์ในด้านการหดตัว

4.2.3.3 การทดสอบความทนการราน (Crazing durability test)

วิธีการทดสอบ

ใส่น้ำลงในหม้อหนึ่งอัดไอน้ำให้มากพอที่จะใช้ตลอดการทดสอบนี้ วางกระเบื้องบนขาตั้ง (Supporter) ที่สูงพื้นระดับน้ำ ปิดฝาให้แน่นแล้วเริ่มต้นโดยเปิดลิ้นท่อไอน้ำออกจนกระทั่งน้ำเดือดเพื่อให้ไอน้ำไล่อากาศภายในหม้อหนึ่งอัดออกหมด แล้วจึงปิด ปล่อยให้

น้ำเดือดต่อไปให้ความดันไอลดลงๆ เพิ่มขึ้นด้วยอัตราเร็วสม่ำเสมอจนมีความดันประมาณ 100 กิโลปาสคาล ในเวลา 1 ชั่วโมง ปรับความร้อนให้พอเพียงเพื่อรักษาความดันไอนี้คงที่ที่ 102 ± 2 กิโลปาสคาล รักษาความดันนี้ไว้เป็นเวลา 1 ชั่วโมงแล้วจึงดับไฟ และค่อยๆ ระบายความดันออกทีละน้อยจนหมด หลังจากทิ้งให้กระเบื้องเย็นในหม้อหนึ่งอัดไอน้ำจนถึงอุณหภูมิห้องแล้ว จึงนำกระเบื้องออกมาล้อมด้วยสารละลายของสีย้อมอินทรีย์ (เมทิลีนบลู) 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักบนผิวกระเบื้อง สังเกตและบันทึก ตรวจสอบลายเส้นที่ปรากฏ

4.2.3.4 การทดสอบการทนสารเคมี (Chemical durability test)

สารละลายและวิธีเตรียม

-สารละลายกรดไฮโดรคลอริก 3 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร เตรียมโดยเจือจางกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น (ความหนาแน่นสัมพัทธ์ 1.18) 30 ลูกบาศก์เซนติเมตร ด้วยน้ำกลั่นจนปริมาตรเป็น 1,000 ลูกบาศก์เซนติเมตร

-สารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เตรียมโดยละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 30 กรัม ในน้ำกลั่นจำนวนเล็กน้อย แล้วเติมน้ำกลั่นอีกจนปริมาตรเป็น 1,000 ลูกบาศก์เซนติเมตร

วิธีการทดสอบการทนกรด

ขีดผิวแผ่นกระเบื้องให้สะอาด แล้วแช่แผ่นตัวอย่างให้ 2 ใน 3 ของผิวกระเบื้องจมในสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเป็นเวลา 7 วัน โดยใช้วิธีการที่เหมาะสมในการควบคุมความเข้มข้นของสารละลายให้คงที่ตลอดระยะเวลาการทดสอบ เมื่อครบกำหนดแล้วยกตัวอย่างออกและตรวจพินิจความเปลี่ยนแปลงที่ผิวโดยเปรียบเทียบกับผิวของกระเบื้องส่วนที่ไม่ได้แช่

วิธีการทดสอบการทนด่าง

ทดสอบเช่นเดียวกับการทนกรดแต่ให้แช่ในสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ตรวจพินิจความเปลี่ยนแปลงที่ผิวโดยเปรียบเทียบกับผิวของกระเบื้องส่วนที่ไม่ได้แช่

4.2.4 การตรวจสอบเฟสที่เกิดขึ้นในเนื้อผลิตภัณฑ์

เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟร็กโตมิเตอร์เป็นเครื่องมือวิเคราะห์วัสดุพื้นฐาน ชนิดการวิเคราะห์แบบไม่ทำลาย (Non-destructive analysis) เพื่อศึกษาเกี่ยวกับโครงสร้างของผลึก (Crystal structure) การจัดเรียงตัวของอะตอมในโมเลกุลของสารประกอบประเภทต่างๆ ทั้งในเชิงคุณภาพ (Qualitative) และเชิงปริมาณ (Quantitative) โดยอาศัยหลักการเลี้ยวเบนและการกระเจิงของรังสีเอกซ์ และความรู้เกี่ยวกับวิชาการระบบโครงสร้างระบบ (Crystallography) ซึ่งเครื่องมือชนิดนี้มี

ความสำคัญมากในกระบวนการควบคุมคุณภาพการผลิตสำหรับตรวจสอบสมบัติของวัสดุและผลิตภัณฑ์

วิธีการทดสอบ

1. นำแผ่นกระเบื้องที่ผ่านการทดสอบ ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม กระเบื้องดินเผาปูพื้น (มอก.37-2529) มาพิจารณาเพื่อเลือกส่วนผสมที่มีแนวโน้มที่เป็นประโยชน์ต่อการวิจัยมาวิเคราะห์หาเฟสที่เกิดขึ้น โดยมุ่งเน้นศึกษาเปรียบเทียบกระเบื้องที่มีการใช้วัสดุทดแทนร่วมระหว่างของเสียที่เป็นแก้วและซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว และกระเบื้องที่ไม่มีการใช้ซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วเป็นวัสดุทดแทนร่วม

2. นำแผ่นกระเบื้องที่เลือกแล้วมาบดให้ละเอียดขนาด 250 เมช (0.065 มม.) และนำไปอัดลงในแบบของเครื่อง

3. นำตัวอย่างที่เตรียมไว้นี้เข้าเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ ทำการตั้งให้มีมุมดิฟแฟรคชัน ตั้งแต่ 15-65 องศา ความเร็วในการวิเคราะห์ 2 องศาต่อนาที

4. นำกราฟที่ได้มาตรวจสอบว่ามีเฟสอะไรเกิดขึ้นบ้าง บันทึกและวิเคราะห์ผล

4.2.5 การประมาณค่าใช้จ่ายเบื้องต้นในกระบวนการผลิตและประเมินความคุ้มค่าในการผลิต เช่น ค่าวัสดุ ค่าพลังงานที่ใช้ในการบด ค่าพลังงานที่ใช้จากเตาอบ ค่าพลังงานที่ใช้ในการขึ้นรูป และค่าพลังงานที่ใช้จากเตาเผา

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 5

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

5.1 ศึกษาคุณสมบัติทางเคมีขององค์ประกอบ

คุณสมบัติทางด้านเคมีที่สำคัญที่ส่งผลให้เกิดความแข็งแรงในผลิตภัณฑ์กระเบื้องเซรามิก ซึ่งถือว่าเป็นปัจจัยหลักของคุณภาพของกระเบื้องจะพิจารณาจากแร่ธาตุที่สำคัญอยู่ 2 ธาตุ คือ SiO_2 และ Al_2O_3 (ปรีดา พิมพ์ขาวขำ, 2539) ซึ่งทั้งสองธาตุเป็นองค์ประกอบหลักของเฟลด์สปาร์ งานวิจัยนี้ได้พัฒนาการนำของเสียที่เป็นแก้วสีชาเพื่อใช้ทดแทนเฟลด์สปาร์ โดยการเติมซิลิกา อะลูมินาที่เข้าแล้วร่วมกับของเสียที่เป็นแก้วสีชา เนื่องจากของเสียที่เป็นแก้วสีชามีองค์ประกอบทางเคมีในส่วนของ Al_2O_3 ค่อนข้างต่ำกว่าในเฟลด์สปาร์มาก และองค์ประกอบดังกล่าวมีมากในซิลิกา-อะลูมินาที่เข้าแล้ว กล่าวคือ เพื่อให้วัตถุดิบทดแทนมีคุณสมบัติทางเคมีใกล้เคียงกับคุณสมบัติทางเคมีของเฟลด์สปาร์มากขึ้น และเพื่อให้ส่งผลต่อคุณภาพของกระเบื้องในด้านความแข็งแรง แต่ทั้งนี้ต้องขึ้นอยู่กับปริมาณที่นำมาใช้ทดแทนด้วย รายละเอียดการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบดังแสดงในตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 ผลวิเคราะห์ทางเคมีของวัตถุดิบด้วยวิธีเอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (XRF)

ตัวอย่าง	ปริมาณสารประกอบ (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)							
	Na_2O	Al_2O_3	SiO_2	CaO	K_2O	TiO_2	Fe_2O_3	MgO
แก้วสีชา 1 (ขวดกระทิงแดง)	19.06	1.18	65.90	11.31	0.18	0.06	0.28	1.60
แก้วสีชา 2 (ขวดM150)	18.85	1.08	65.89	11.70	0.13	0.09	0.31	1.77
ซิลิกา-อะลูมินาที่เข้าแล้ว	12.92	67.27	16.12	0.46	trace	trace	-	-
เฟลด์สปาร์	8.00	16.81	72.16	1.07	1.01	0.21	0.22	0.21
ดินดำ	0.31	23.32	60.04	0.26	2.02	0.63	1.69	0.67
ทรายบดละเอียด	0.02	0.40	99.44	0.01	0.04	0.03	0.04	0.02

และจากผลการวิเคราะห์ของทั้งสาขาโรจน์ ปัสโชติพงษ์, 2545 และ วิวรรณ เทียนศิริ, 2546 ต่างพบว่าอุณหภูมิในการเผาไม่มีผลต่อองค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบ ดังนั้นจึงทำการคาดคะเนอัตราส่วนการทดแทนด้วยวิธีการคำนวณ ดังแสดงในตารางที่ 5.2 ซึ่งทำการแปรค่าอัตราส่วนการทดแทน เพื่อให้วัตถุดิบทดแทนมีองค์ประกอบของอะลูมินาออกไซด์ใกล้เคียงกับเฟลด์สปาร์มากขึ้น โดยที่ไม่ทำให้ค่าของซิลิกาออกไซด์ลดลงมากเกินไป เพราะองค์ประกอบทั้งสองเป็นองค์ประกอบทางเคมีที่สำคัญในด้านของความแข็งแรงของผลิตภัณฑ์กระเบื้องเซรามิก

ตารางที่ 5.2 ผลการคำนวณองค์ประกอบทางเคมีของของเสียที่เป็นแก้วสีชาและซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วเพื่อใช้ทดแทนเฟลด์สปาร์

ของเสียที่เป็นแก้วสีชา (เปอร์เซ็นต์)	ซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว (เปอร์เซ็นต์)	Al ₂ O ₃ เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก	SiO ₂ เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก
100.00	0.00	1.13	65.90
90.00	10.00	7.79	60.92
85.00	15.00	11.09	58.43
80.00	20.00	14.40	55.94
75.00	25.00	17.70	53.45
70.00	30.00	21.00	50.96
เฟลด์สปาร์		16.81	72.16

โดยจากการคำนวณคาดคะเน จึงเลือกใช้อัตราส่วนทดแทนที่ 4 อัตราส่วนด้วยกัน คือ ที่อัตราส่วนของเสียที่เป็นแก้วสีชาต่อซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วเท่ากับ 100:0 (ข้างอิง), 80:20, 75:25 และ 70:30 ซึ่งจะให้องค์ประกอบในส่วนของอะลูมินาออกไซด์และซิลิกาออกไซด์ดังแสดงในตารางที่ 5.2

5.2 ศึกษาถึงการนำซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วมาใช้ร่วมกับของเสียที่เป็นแก้วสีชาในการทดแทนวัตถุดิบในกระบวนการผลิตกระเบื้องเซรามิก

การทดลองนี้ได้นำเอาซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว มาเติมแต่งในส่วนหนึ่งของของเสียที่เป็นแก้วสีชาเพื่อใช้ทดแทนเฟลด์สปาร์ (ตัวหลอมละลาย) ในกระบวนการผลิตกระเบื้องเซรามิก ทำการศึกษาหาอัตราส่วนการทดแทนที่เหมาะสม โดยทำการแปรค่าอัตราส่วนการทดแทนเฟลด์สปาร์ด้วยของเสียที่เป็นแก้วสีชาต่อซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วเป็น 0:100, 20:80, 25:75 และ 30:70 (ในวัตถุดิบคงอัตราส่วนดินดำต่อเฟลด์สปาร์ เท่ากับ 8:5 คิดเป็น 60 เปอร์เซ็นต์ ร่วมกับทรายอบแห้ง 40 เปอร์เซ็นต์) ใช้อุณหภูมิในการเผาขึ้นรูปที่ 1200 องศาเซลเซียส ควบคุมการเผาแช่ไฟ (Soaking time) เป็นเวลา 1 ชั่วโมง และพิจารณาค่าที่เหมาะสมจากค่าทดสอบเทียบกับค่ามาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมกระเบื้องดินเผาปูพื้น (มอก.37-2529) คือ ค่าความต้านแรงดัด ค่าการดูดซึมน้ำ ค่าการหดตัว รวมถึงพิจารณาคุณสมบัติด้านการทนสารเคมีและความทนการร้าว

5.2.1 การทดสอบกำลังรับแรงดัด

เป็นการทดสอบหาค่ากำลังรับแรงดัดดังตารางที่ 5.3 เมื่อพิจารณาค่ากำลังรับแรงดัดของกระเบื้องที่เผาขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส แปรอัตราส่วนการทดแทนเฟลด์สปาร์ด้วยของเสียที่เป็นแก้วสีชาต่อซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว เป็น 0:100, 20:80, 25:75 และ 30:70 ปรากฏ

ว่าให้ค่ากำลังรับแรงดัดเท่ากับ 27.74, 27.98, 28.08 และ 25.35 เมกะปาสคาลตามลำดับ นั่นคือทุกอัตราส่วนการทดแทนให้ค่ากำลังรับแรงดัดผ่านตามเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมกระเบื้องดินเผาปูพื้น (มอก.37-2529) และเมื่อพิจารณาที่อัตราส่วนการทดแทนที่มีซิลิกาอะลูมินาที่ใช้แล้วร้อยละ 20 และ 25 พบว่า ให้ค่ากำลังรับแรงดัดสูงขึ้นเมื่อเทียบกับอัตราส่วนการทดแทนที่ไม่มีการเติมซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว (อัตราส่วนของเสียที่เป็นแก้วสีชาต่อซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วเท่ากับ 100:0) แต่เมื่อมีการเติมซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วสูงขึ้นถึงร้อยละ 30 พบว่าส่งผลให้ค่ากำลังรับแรงดัดที่ได้มีค่าลดลงเมื่อเทียบกับอัตราส่วนการทดแทนที่ต่ำกว่า แต่อย่างไรก็ตามพบว่า ผลการทดสอบกำลังรับแรงดัดในทุกอัตราส่วนการทดแทน ให้ค่าผ่านตามเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมกระเบื้องดินเผาปูพื้น (มอก.37-2529) จากผลดังกล่าวแสดงว่าสามารถใช้ซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วร่วมกับของเสียที่เป็นแก้วสีชาเพื่อทดแทนเฟลด์สปาร์ได้ในทุกอัตราส่วนเมื่อเผาขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส

5.2.2 การทดสอบการดูดซึมน้ำ

เมื่อพิจารณาค่าการดูดซึมน้ำ ดังตารางที่ 5.3 พบว่ากระเบื้องที่ผ่านการเผาขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส แปรอัตราส่วนการทดแทนเฟลด์สปาร์ด้วยของเสียที่เป็นแก้วสีชาต่อซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วเป็น 0:100, 20:80, 25:75 และ 30:70 ให้ค่าการดูดซึมน้ำเท่ากับ 2.45, 2.91, 2.27 และ 2.59 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ พบว่าที่ทุกอัตราส่วนการทดแทนเฟลด์สปาร์ให้ค่าการดูดซึมน้ำผ่านตามเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมกระเบื้องดินเผาปูพื้น (มอก.37-2529) จากผลดังกล่าวแสดงว่าสามารถใช้ซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วร่วมกับของเสียที่เป็นแก้วสีชาเพื่อทดแทนเฟลด์สปาร์ได้ในทุกอัตราส่วนเมื่อเผาขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส

5.2.3 การทดสอบการหดตัว

เมื่อพิจารณาค่าการหดตัว ดังตารางที่ 5.3 พบว่ากระเบื้องที่ผ่านการเผาขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส แปรอัตราส่วนการทดแทนเฟลด์สปาร์ด้วยของเสียที่เป็นแก้วสีชาต่อซิลิกาอะลูมินาที่ใช้แล้วเป็น 0:100, 20:80, 25:75 และ 30:70 ให้ค่าการหดตัวเท่ากับ 16.31, 16.18, 14.45 และ 13.58 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ ซึ่งพบว่าที่อัตราส่วนการทดแทนที่มีซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วสูงขึ้นส่งผลให้ค่าการหดตัวลดลงตามลำดับ ซึ่งปัจจัยหนึ่งของการหดตัวขึ้นกับปริมาณสารอินทรีย์ในวัตถุดิบ (ปริดา พิมพ์ขาวขำ, 2539) ดังนั้นจึงอาจเป็นไปได้ว่าซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วมีปริมาณสารอินทรีย์ปนเปื้อนมากกว่าของเสียที่เป็นแก้วสีชา ส่งผลให้มีการหดตัวลดลงเมื่อมีการเติมซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วที่มากขึ้นตามลำดับ

5.2.4 การทดสอบการทนสารเคมี

จากการทดสอบการทนสารเคมีของกระเบื้องเซรามิกหลังการเผา ดังตารางที่ 5.3 พบว่า กระเบื้องทุกส่วนผสมสามารถทนกรด (สารละลายกรดไฮโดรคลอริก 3 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร) และทนด่าง (สารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) ได้ คือเมื่อเวลาผ่านไป 7 วัน ทำการพิจารณาที่ผิวของกระเบื้องส่วนที่แช่ในสารเคมีกับส่วนที่ไม่ได้แช่พบว่าไม่พบความแตกต่าง ทำให้สรุปได้ว่ากระเบื้องในงานวิจัยนี้มีคุณสมบัติในด้านการทนสารเคมี

5.2.5 การทดสอบความทนการราน

จากการทดสอบความทนการรานของกระเบื้องหลังเผาดังตารางที่ 5.3 พบว่าเมื่อพิจารณาที่ผิวของกระเบื้องหลังการทดสอบกรดและด่าง 1 เปอร์เซ็นต์ ไม่พบรอยเส้นของการราน ทำให้สรุปได้ว่ากระเบื้องในงานวิจัยนี้มีคุณสมบัติด้านความทนการราน

ตารางที่ 5.3 แสดงค่ากำลังรับแรงดัด ค่าดูดซึมน้ำ ค่าการหดตัว การทนสารเคมี และ ความทนการรานของกระเบื้องหลังเผาขึ้นรูปที่ 1200 องศาเซลเซียส

อัตราส่วนของเสียที่เป็นแก้ว สีชาต่อซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว	ค่ากำลัง รับแรงดัด (เมกกะปาสคาล)	ค่าการดูด ซึมน้ำ (เปอร์เซ็นต์)	ค่าการ หดตัว (เปอร์เซ็นต์)	การทน สารเคมี	ความทน การราน
100 ต่อ 0	27.74	2.45	16.31	ผ่าน	ผ่าน
80 ต่อ 20	27.98	2.91	16.18	ผ่าน	ผ่าน
75 ต่อ 25	28.08	2.27	14.45	ผ่าน	ผ่าน
70 ต่อ 30	25.35	2.59	13.58	ผ่าน	ผ่าน
มาตรฐาน ผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม กระเบื้องดินเผาปูพื้น (มอก.37-2529)	ไม่ต่ำกว่า 25	ไม่เกิน 6	ไม่กำหนด	ไม่เกิดการ เปลี่ยนแปลง	ไม่ปรากฏ รอยเสียหาย

5.3 ศึกษาหาผลของอุณหภูมิที่เหมาะสมในการเผาขึ้นรูปกระเบื้อง

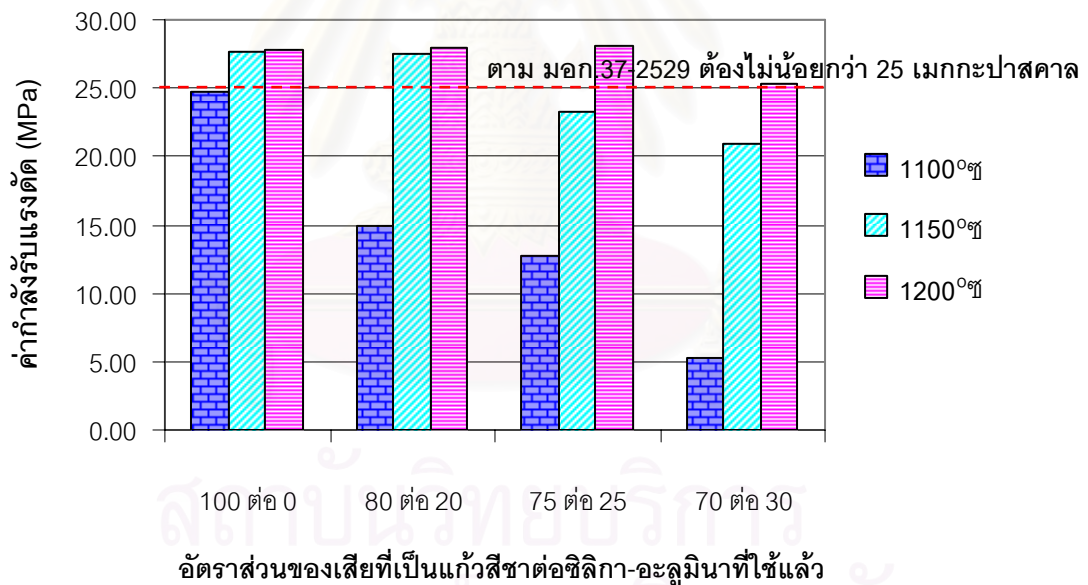
เพื่อเป็นการประหยัดพลังงาน จึงทำการทดลองลดอุณหภูมิในการเผาขึ้นรูปกระเบื้องที่หาค่าการทดสอบกำลังรับแรงดัดผ่านตามเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมมาจาก 1200 องศาเซลเซียส เป็น 1150 และ 1100 องศาเซลเซียส ตามลำดับ

5.3.1 การทดสอบกำลังรับแรงดัด

เป็นการทดสอบหาค่ากำลังรับแรงดัดดังตารางที่ 5.4 และ รูปที่ 5.1 คือเมื่อแปรอัตราส่วนการทดแทนเฟลด์สปาร์ด้วยของเสียที่เป็นแก้วสีชาต่อซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วเป็น 0:100, 20:80, 25:75 และ 30:70 พบว่ากระเบื้องที่เผาขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 1150 องศาเซลเซียส ให้ค่ากำลังรับแรงดัดเท่ากับ 27.62, 27.46, 23.25 และ 21.00 เมกกะปาสคาล ตามลำดับ นั่นคือมีเพียงอัตราส่วนการทดแทนเฟลด์สปาร์ด้วยของเสียที่เป็นแก้วสีชาต่อซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วเท่ากับ 100:0 และ 80:20 ที่ให้ค่ากำลังรับแรงดัดผ่านตามเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมกระเบื้องดินเผาปูพื้น (มอก.37-2529) คือให้ค่ากำลังรับแรงดัดเท่ากับ 27.62 และ 27.46 เมกกะปาสคาลตามลำดับ ส่วนการลดอุณหภูมิในการเผาขึ้นรูปเป็น 1100 องศาเซลเซียส พบว่ากระเบื้องที่มีการทดแทนเฟลด์สปาร์ในทุกอัตราส่วนการทดแทน ให้ค่ากำลังรับแรงดัดไม่ผ่านตามเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมกระเบื้องดินเผาปูพื้น (มอก.37-2529) และให้ค่ากำลังรับแรงดัดลดลงตามอัตราส่วนการทดแทนเฟลด์สปาร์ที่มากขึ้นด้วย ดังนั้นการทดแทนเฟลด์สปาร์ด้วยวัสดุดิบทดแทนในกรณีนี้พบว่าไม่ส่งผลให้ค่ากำลังรับแรงดัดที่ได้ดีขึ้น แต่พบว่ากระเบื้องที่มีการใช้วัสดุดิบทดแทนร่วมระหว่างของเสียที่เป็นแก้วสีชาต่อซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วที่อัตราส่วน 80:20 และ 75:25 เผาขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียส ยังคงให้ค่ากำลังรับแรงดัดสูงกว่าอัตราส่วนที่ไม่มีการใช้วัสดุดิบทดแทนเลยเมื่อเผาขึ้นรูปที่อุณหภูมิเดียวกัน (ใช้เฟลด์สปาร์ 100 เปอร์เซ็นต์เผาขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียส) ซึ่งให้ค่ากำลังรับแรงดัดเท่ากับ 5.85 เมกกะปาสคาล (วิวรรณ เทียนศิริ, 2546)

ตารางที่ 5.4 ค่ากำลังรับแรงดัดของกระเบื้องหลังเผา (เมกกะปาสคาล)

อัตราส่วนของเสี้ยนที่เป็นแก้วสีชาต่อซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว	อุณหภูมิที่ใช้ในการเผา (องศาเซลเซียส)		
	1100	1150	1200
100:0	24.77	27.62	27.74
80:20	14.99	27.46	27.98
75:25	12.72	23.25	28.08
70:30	5.32	21.00	25.35
มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมกระเบื้องดินเผาปูพื้น (มอก.37-2529)	ไม่น้อยกว่า 25 MPa		



รูปที่ 5.1 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงดัดกับอัตราส่วนการทดแทนเฟลด์สปาร์ด้วยของเสี้ยนที่เป็นแก้วสีชาพร้อมกับซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว เมื่อเผาขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 1100, 1150 และ 1200 องศาเซลเซียส

5.3.2 การทดสอบการดูดซึมน้ำ

ค่าการทดสอบดังแสดงในตารางที่ 5.5 และ รูปที่ 5.2 เมื่อแปรอัตราส่วนการทดแทนเฟลด์สปาร์ด้วยของเสียที่เป็นแก้วสีชาต่อซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วเป็น 0:100, 20:80, 25:75 และ 30:70 พบว่ากระเบื้องที่ผ่านการเผาขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 1150 องศาเซลเซียส ให้ค่าการดูดซึมน้ำเท่ากับ 2.58, 1.93, 1.78 และ 1.32 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ และกระเบื้องที่ผ่านการเผาขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียส ให้ค่าการดูดซึมน้ำเท่ากับ 5.71, 2.79, 2.47 และ 2.17 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ ซึ่งพบว่าทุกอัตราส่วนการทดแทนเฟลด์สปาร์ให้ค่าผ่านตามเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมกระเบื้องดินเผาปูพื้น (มอก.37-2529) จากผลดังกล่าวแสดงว่าสามารถใช้ซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วร่วมกับของเสียที่เป็นแก้วสีชาเพื่อทดแทนเฟลด์สปาร์ได้ในทุกอัตราส่วนทั้งที่ผ่านการเผาขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 1150 และ 1100 องศาเซลเซียส เมื่อพิจารณาคุณสมบัติในด้านการดูดซึมน้ำ

5.3.3 การทดสอบการหดตัว

ค่าการหดตัวดังแสดงในตารางที่ 5.6 และ รูปที่ 5.3 เมื่อแปรอัตราส่วนการทดแทนเฟลด์สปาร์ด้วยของเสียที่เป็นแก้วสีชาต่อซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วเป็น 0:100, 20:80, 25:75 และ 30:70 พบว่ากระเบื้องที่ผ่านการเผาขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 1150 องศาเซลเซียส ให้ค่าการหดตัวเท่ากับ 7.34, 4.89, 2.21 และ 1.87 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และกระเบื้องที่ผ่านการเผาขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียส ให้ค่าการหดตัวเท่ากับ 4.79, 2.60, 2.40 และ 1.88 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ ซึ่งพบว่าที่อัตราส่วนการทดแทนที่มีซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วสูงขึ้น ส่งผลให้ค่าการหดตัวลดลงอย่างมาก ซึ่งอาจเป็นผลเนื่องมาจากอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาขึ้นรูปที่ลดลงยังไม่ถึงจุดสุกตัวของวัตถุดิบทดแทนและปัจจัยในส่วนของคุณสมบัติของปริมาตรอินทรีย์ปนเปื้อนในวัตถุดิบดังกล่าวในหัวข้อ 5.2.3

5.3.4 การทดสอบการทนสารเคมี

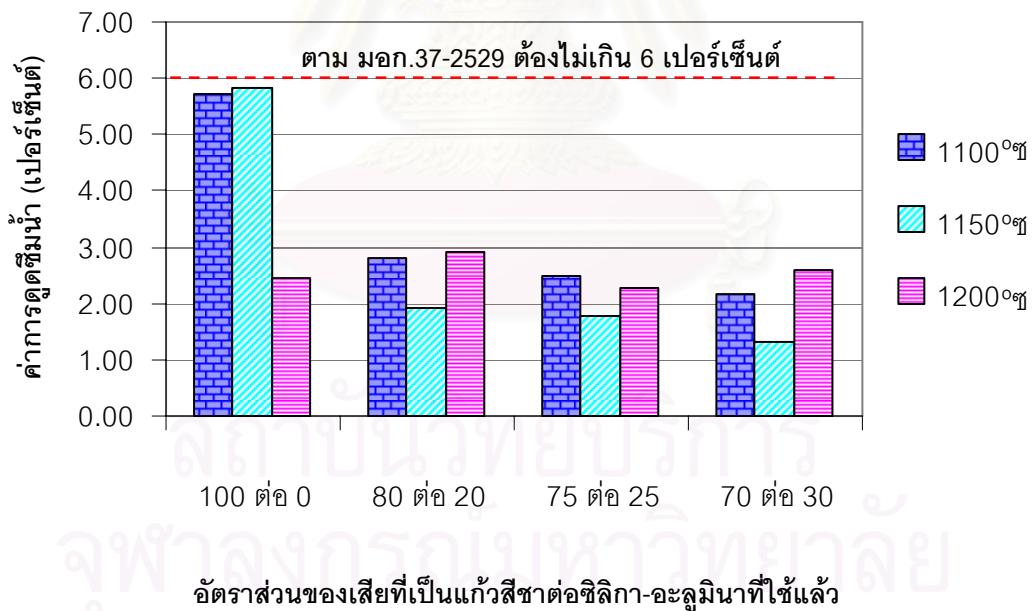
ค่าการทดสอบดังแสดงในตารางที่ 5.7 และ รูปที่ 5.4 พบว่ากระเบื้องทุกส่วนผสมสามารถทนกรด (สารละลายกรดไฮโดรคลอริก 3 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร) และทนด่าง (สารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) ได้ เมื่อเวลาผ่านไป 7 วัน ทำการพิจารณาที่ผิวของกระเบื้องส่วนที่แช่ในสารเคมีกับบริเวณที่ไม่ได้แช่พบว่าไม่พบความแตกต่าง ทำให้สรุปได้ว่ากระเบื้องในงานวิจัยนี้มีคุณสมบัติในด้านการทนสารเคมี

5.3.5 การทดสอบความทนการราน

จากการทดสอบความทนการรานของกระเบื้องหลังเผาดังตารางที่ 5.5 พบว่าเมื่อพิจารณาที่ผิวของกระเบื้องหลังการทดสอบเมธิลีนบลู 1 เปอร์เซ็นต์ ไม่พบรอยเส้นของการราน ทำให้สรุปได้ว่ากระเบื้องในงานวิจัยนี้มีคุณสมบัติด้านความทนการราน

ตารางที่ 5.5 ค่าการดูดซึมน้ำของกระเบื้องหลังเผา (เปอร์เซ็นต์)

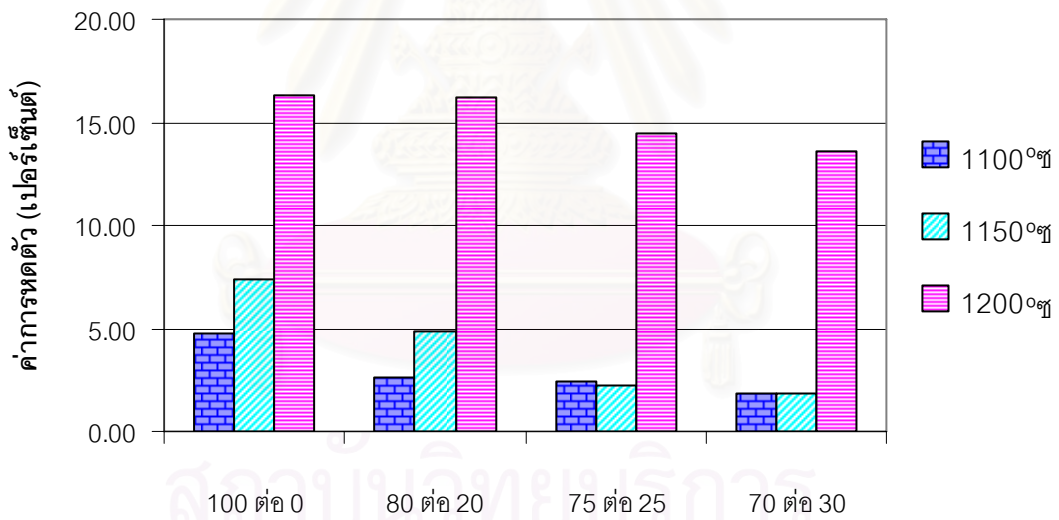
อัตราส่วนของเสี้ยนที่เป็นแก้วสีชาต่อซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว	อุณหภูมิที่ใช้ในการเผา (องศาเซลเซียส)		
	1100	1150	1200
100:0	5.71	5.84	2.45
80:20	2.79	1.93	2.91
75:25	2.47	1.78	2.27
70:30	2.17	1.32	2.59
มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมกระเบื้องดินเผาปูพื้น (มอก.37-2529)	ไม่เกินร้อยละ 6		



รูปที่ 5.2 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดซึมน้ำกับอัตราส่วนการทดแทนเฟลด์สปาร์ด้วยของเสี้ยนที่เป็นแก้วสีชาพร้อมกับซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว เมื่อเผาขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 1100, 1150 และ 1200 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 5.6 ค่าการหดตัวของกระเบื้องหลังเผา (เปอร์เซ็นต์)

อัตราส่วนของเสียที่เป็นแก้วสีชาต่อซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว	อุณหภูมิที่ใช้ในการเผา (องศาเซลเซียส)		
	1100	1150	1200
100:0	4.79	7.34	16.31
80:20	2.60	4.89	16.18
75:25	2.40	2.21	14.45
70:30	1.88	1.87	13.58
มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมกระเบื้องดินเผาปูพื้น (มอก.37-2529)	ไม่กำหนด		



อัตราส่วนของเสียที่เป็นแก้วสีชาต่อซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว

รูปที่ 5.3 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างค่าการหดตัวกับอัตราส่วนการทดแทนเฟลด์สปาร์ด้วยของเสียที่เป็นแก้วสีชาร่วมกับซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว เมื่อเผาขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 1100, 1150 และ 1200 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 5.7 ผลการทดสอบสารเคมีของกระเบื้องหลังเผา

อัตราส่วนของเสียดที่เป็นแก้วสีชาต่อซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว	คุณสมบัติที่ใช้ในการเผา (องศาเซลเซียส)		
	1100	1150	1200
100:0	ผ่าน	ผ่าน	ผ่าน
80:20	ผ่าน	ผ่าน	ผ่าน
75:25	ผ่าน	ผ่าน	ผ่าน
70:30	ผ่าน	ผ่าน	ผ่าน
มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมกระเบื้องดินเผาปูพื้น (มอก.37-2529)	ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง		

ตารางที่ 5.8 ผลความทนการรานของกระเบื้องหลังเผา

อัตราส่วนของเสียดที่เป็นแก้วสีชาต่อซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว	คุณสมบัติที่ใช้ในการเผา (องศาเซลเซียส)		
	1100	1150	1200
100:0	ผ่าน	ผ่าน	ผ่าน
80:20	ผ่าน	ผ่าน	ผ่าน
75:25	ผ่าน	ผ่าน	ผ่าน
70:30	ผ่าน	ผ่าน	ผ่าน
มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมกระเบื้องดินเผาปูพื้น (มอก.37-2529)	ไม่ปรากฏรอยร้าวบนผิว		

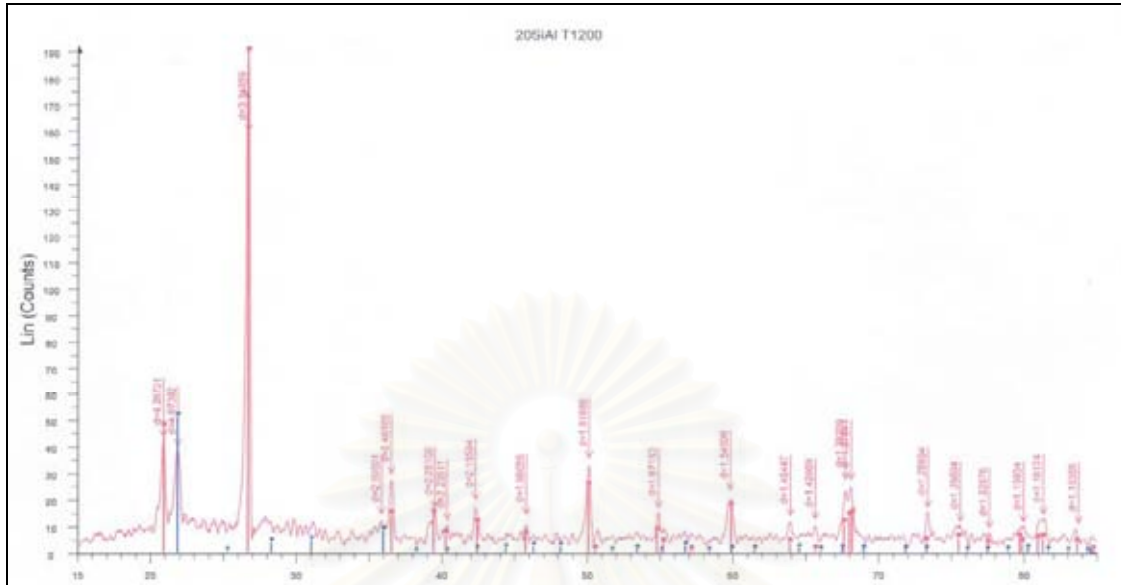
5.4 การตรวจสอบเฟสที่เกิดขึ้นในเนื้อผลิตภัณฑ์

ในการวิเคราะห์เฟสที่เกิดขึ้นในเนื้อของผลิตภัณฑ์ ได้เลือกผลิตภัณฑ์ที่ให้ค่าการทดสอบที่ผ่านตามเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์กระเบื้องดินเผาปูพื้น (มอก.37-2529) ดังแสดงในตารางที่ 5.9 คืออัตราส่วนของเสี้ยนที่เป็นแก้วสีชาต่อซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วเท่ากับ 80:20 และ 75:25 เผาขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส และอัตราส่วนของเสี้ยนที่เป็นแก้วสีชาต่อซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วเท่ากับ 100:0 และ 80:20 เผาขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 1150 องศาเซลเซียส มาทำการวิเคราะห์หาเฟสที่เกิดขึ้นในเนื้อผลิตภัณฑ์ดังกล่าว

ตารางที่ 5.9 อัตราส่วนที่นำไปทำการวิเคราะห์หาเฟสที่เกิดขึ้นในเนื้อผลิตภัณฑ์

อัตราส่วนของเสี้ยนที่เป็นแก้วสีชาต่อซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว	อุณหภูมิที่ใช้ในการเผา (องศาเซลเซียส)		
	1100	1150	1200
100:0	24.77	27.62	27.74
80:20	14.99	27.46	27.98
75:25	12.72	23.25	28.08
70:30	5.32	21.00	25.35
มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมกระเบื้องดินเผาปูพื้น (มอก.37-2529)	ไม่น้อยกว่า 25 MPa		

จากผลการวิเคราะห์หาเฟสที่เกิดขึ้นในเนื้อผลิตภัณฑ์โดยวิธีวิเคราะห์เอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน (XRD) พบว่ากระเบื้องหลังเผาในทุกอัตราส่วนและทุกอุณหภูมิในการเผาขึ้นรูป เกิดเฟสของสารประกอบที่สำคัญคือ ควอตซ์ (Quartz, SiO₂) และคริสโตบัลไลต์ (Cristobalite, SiO₂) ดังแสดงในรูปที่ 5.4, 5.5, 5.6 และ 5.7 ซึ่งคริสโตบัลไลต์เป็นรูปร่างหนึ่งของควอตซ์ ผลิตได้โดยการทำให้ควอตซ์เกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างรุนแรง (ปรีดา พิมพ์ขาวขำ, 2547) แต่ไม่พบเฟสของมัลไลต์ (Mullite, 3Al₂O₃.2SiO₂) ซึ่งเป็นเฟสที่ให้ความแข็งแรงสูงในผลิตภัณฑ์เซรามิกเอิร์ทเทินแวร์ เนื่องจากมัลไลต์จะเริ่มเกิดเป็นผลึกเล็กๆ ที่อุณหภูมิประมาณ 1000 องศาเซลเซียส และจะเกิดเป็นผลึกรูปยาวคล้ายเข็มสานกันขนาดใหญ่เมื่ออุณหภูมิ 1150-1250 องศาเซลเซียส ซึ่งอุณหภูมิที่ใช้ในการทดลองไม่สูงพอ แต่ถึงอย่างไรเฟสของควอตซ์และคริสโตบัลไลต์ที่เกิดขึ้นก็สามารถแสดงได้ถึงแนวโน้มที่จะมีการเกิดมัลไลต์ต่อไปเมื่อมีการเผาที่อุณหภูมิสูงขึ้นและการเกิดของเฟสต่างๆ นั้นขึ้นอยู่กับระยะเวลาที่ใช้ในการเผาขึ้นรูปด้วย



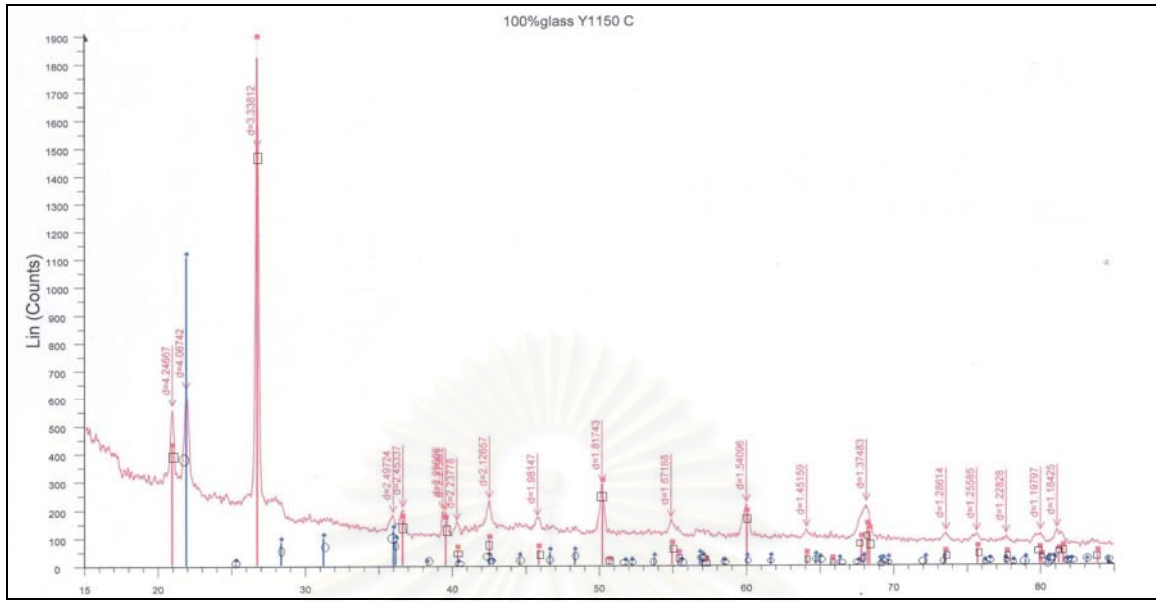
หมายเหตุ ■ คือ เฟสของ Quartz ■ คือ เฟสของ Cristobalite

รูปที่ 5.4 ผลการวิเคราะห์เอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกชัน (XRD) ของกระเบื้องส่วนผสม (ของเสียที่เป็นแก้วสีชาต่อซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วเท่ากับ 80:20 เเผที่ 1200 องศาเซลเซียส)



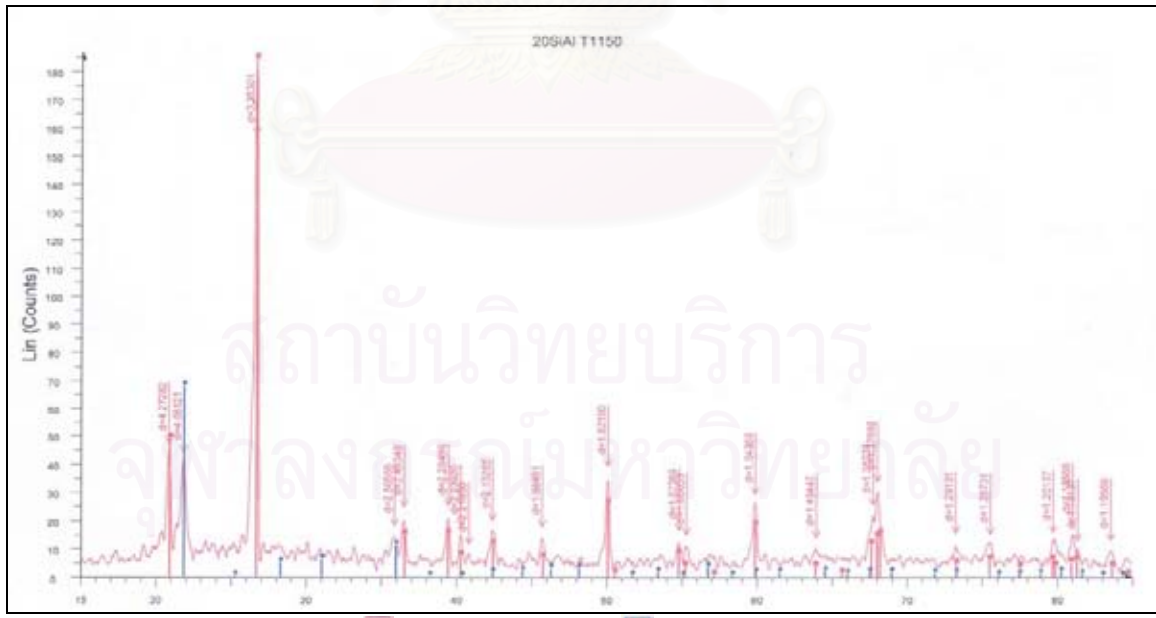
หมายเหตุ ■ คือ เฟสของ Quartz ■ คือ เฟสของ Cristobalite

รูปที่ 5.5 ผลการวิเคราะห์เอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกชัน (XRD) ของกระเบื้องส่วนผสม (ของเสียที่เป็นแก้วสีชาต่อซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วเท่ากับ 75:25 เเผที่ 1200 องศาเซลเซียส)



หมายเหตุ ■ คือ เฟสของ Quartz ■ คือ เฟสของ Cristobalite

รูปที่ 5.6 ผลการวิเคราะห์เอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกชัน (XRD) ของกระเบื้องส่วนผสม (ของเสียที่เป็นแก้วสีชาต่อซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วเท่ากับ 100:0) เเผที่ 1150 องศาเซลเซียส



หมายเหตุ ■ คือ เฟสของ Quartz ■ คือ เฟสของ Cristobalite

รูปที่ 5.7 ผลการวิเคราะห์เอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกชัน (XRD) ของกระเบื้องส่วนผสม (ของเสียที่เป็นแก้วสีชาต่อซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วเท่ากับ 80:20) เเผที่ 1150 องศาเซลเซียส

5.5 การประมาณค่าใช้จ่ายเบื้องต้นในกระบวนการผลิตและประเมินความคุ้มค่าในการผลิต

จากตารางที่ 5.10 แสดงรายละเอียดค่าใช้จ่ายเบื้องต้นในการผลิตกระเบื้องเซรามิกโดยนำสัดส่วนที่ให้ค่าการทดสอบผ่านตามเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมกระเบื้องดินเผาปูพื้น (มอก.37-2529) ที่สภาวะที่เหมาะสม (อัตราส่วนของเสียที่เป็นแก้วสีชาต่อซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว 80:20 เผาขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 1150 องศาเซลเซียส) มาเปรียบเทียบกับอัตราส่วนที่มีการทดแทนแร่เฟลด์สปาร์ด้วยของเสียที่เป็นแก้วสีชาเพียงอย่างเดียว (อัตราส่วนของเสียที่เป็นแก้วสีชาต่อซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว 100:0 เผาขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส) และอัตราส่วนที่ไม่มีการทดแทนเฟลด์สปาร์ (ใช้เฟลด์สปาร์ 100 เปอร์เซ็นต์ เผาขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส) เมื่อคิดราคาของกระเบื้องต่อ 1 แผ่น พบว่าราคาของส่วนผสม (อัตราส่วนของเสียที่เป็นแก้วสีชาต่อซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว 80:20 เผาขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 1150 องศาเซลเซียส) คือ 8.61 บาท ในขณะที่ส่วนผสม (อัตราส่วนของเสียที่เป็นแก้วสีชาต่อซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว 100:0 เผาขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส) คือ 9.49 บาท และส่วนผสม (อัตราส่วนเฟลด์สปาร์ 100 เปอร์เซ็นต์ เผาขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส) คือ 11.59 บาท ซึ่งเมื่อพิจารณากระเบื้องทั้ง 3 ส่วนผสม พบว่าการใช้วัตถุดิบทดแทนร่วมระหว่างของเสียที่เป็นแก้วสีชาและซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วที่อัตราส่วน 80:20 สามารถช่วยลดอุณหภูมิในการเผาขึ้นรูปลงได้ถึง 50 องศาเซลเซียส ซึ่งจะทำให้ค่าใช้จ่ายลดลงถึงแผ่นละ 2.98 บาทเมื่อเทียบกับอัตราส่วนที่ไม่มีการทดแทนเฟลด์สปาร์เลย เผาขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส (อัตราส่วนดั้งเดิม) และช่วยลดค่าใช้จ่ายเท่ากับ 0.88 บาทเมื่อเทียบกับอัตราส่วนที่มีการทดแทนเฟลด์สปาร์ด้วยของเสียที่เป็นแก้วสีชา 100 เปอร์เซ็นต์ เผาขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส และถึงแม้ว่าผลการเปรียบเทียบจะสามารถลดค่าใช้จ่ายลงไม่มากนักในระดับห้องปฏิบัติการ แต่ในกระบวนการผลิตจริงมีปริมาณการใช้วัตถุดิบทดแทนที่สูงขึ้นทำให้สามารถประหยัดค่าใช้จ่ายได้มากขึ้น อีกทั้งยังสามารถช่วยกำจัดของเสียประเภทสารประกอบซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วลงได้อีกทางหนึ่งและยังสามารถช่วยลดค่าใช้จ่ายซึ่งเกิดจากการจัดการของเสียดังกล่าวไปพร้อมกันด้วย

ตารางที่ 5.10 ค่าใช้จ่ายเบื้องต้นในการผลิตกระเบื้องเซรามิกต่อจำนวนกระเบื้อง 80 แผ่น

ค่าใช้จ่าย	ราคาต่อหน่วย	**เฟลด์สปาร์ 100%		แก้ว 100%		แก้ว 80% ซิลิกา-อะลูมินา 20%	
		1200 องศาเซลเซียส		1200 องศาเซลเซียส		1150 องศาเซลเซียส	
		จำนวนที่ใช้	ราคา (บาท)	จำนวนที่ใช้	ราคา (บาท)	จำนวนที่ใช้	ราคา (บาท)
ดินดำ	50.00 บาท/กก.[a]	4.81	240.50	4.81	240.50	4.81	240.50
เฟลด์สปาร์	58.00 บาท/กก.[b]	2.99	173.42	-	-	-	-
ทรายอบแห้ง	37.00 บาท/กก.[c]	5.20	192.40	5.20	192.40	5.20	192.40
ของเสียที่เป็นแก้วสีชา	0.25 บาท/แผ่น[d]	-	-	2.99	0.75	2.39	0.60
ซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว	-	-	-	-	-	0.60	-
*ค่าพลังงานที่ใช้ในการอบ	4.50 บาท/ชม.[e]	-	-	2 ชม.	9.00	2 ชม.	9.00
*ค่าพลังงานที่ใช้ในเตาอบ	9.00 บาท/ชม.[f]	2 ชม.	18.00	2 ชม.	18.00	2 ชม.	18.00
*ค่าพลังงานที่ใช้ในการขึ้นรูป	9.30 บาท/ชม.[g]	2.5 ชม.	23.25	2 ชม.	18.60	2 ชม.	18.60
***ค่าแก๊สที่ใช้ในการเผา	840.00 บาท/ถัง[h]	1/3 ถัง	280.00	1/3 ถัง	280.00	1/4 ถัง	210.00
รวม	-	-	927.57	-	759.25	-	689.10
ราคากระเบื้อง/แผ่น	-	-	11.59	-	9.49	-	8.61

*กำลังไฟฟ้าของเครื่องอบ = 1.50 กิโลวัตต์ *กำลังไฟฟ้าของเตาอบ = 3.00 กิโลวัตต์ *กำลังไฟฟ้าของเครื่องอัดขึ้นรูป = 3.10 กิโลวัตต์

**ที่เฟลด์สปาร์ 100 เปอร์เซ็นต์ อ้างอิงจาก วิศวกรรม เทียนศิริ, 2546

***ค่าแก๊ส คิดเทียบที่ราคาแก๊สที่เพิ่มขึ้นเท่ากับ 840 บาท/ถัง

การคำนวณ : ราคารวม = [a]*จำนวนที่ใช้ + [b]*จำนวนที่ใช้ + [c]*จำนวนที่ใช้ + [d]*จำนวนที่ใช้ + [e]*จำนวนชั่วโมงทำงาน + [f]*จำนวนชั่วโมงทำงาน + [g]*จำนวนชั่วโมงทำงาน + [h]*จำนวนที่ใช้

หน่วยค่าไฟฟ้า (Unit) = กิโลวัตต์-ชั่วโมง (kW-hr), ค่าไฟฟ้าคิดราคาเฉลี่ย 3 บาทต่อหน่วย (อ้างอิงข้อมูลจากการไฟฟ้านครหลวง)

บทที่ 6

สรุปผลการทดลอง

จากผลการทดลองการใช้ของเสียที่เป็นแก้วสีชาพร้อมกับซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วเป็นวัตถุดิบทดแทนเฟลด์สปาร์ในการผลิตกระเบื้องเซรามิก โดยมีดินดำและทรายอบแห้งเป็นวัตถุดิบร่วมในการผลิต สามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

1. จากการศึกษาคุณสมบัติทางเคมีของวัตถุดิบทดแทน องค์ประกอบที่มีความสำคัญในด้านของความแข็งแรงคือ ซิลิกาออกไซด์และอะลูมินาออกไซด์ ซึ่งพบในของเสียที่เป็นแก้วสีชาประมาณ 67 และ 1.13 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ และพบในซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วประมาณ 16.12 และ 67.27 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ ซึ่งจากการทดลองพบว่าสามารถนำซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วมาเติมแต่งในส่วนหนึ่งของของเสียที่เป็นแก้วสีชาเพื่อให้องค์ประกอบในส่วนของอะลูมินาออกไซด์ใกล้เคียงกับเฟลด์สปาร์มากขึ้นได้

2. จากการศึกษาถึงการนำซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว มาใช้เป็นวัตถุดิบทดแทนร่วมกับของเสียที่เป็นแก้วสีชา เมื่อเผาขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส พบว่าทุกอัตราส่วนการทดแทนซึ่งเกิดจากการตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีและการคาดคะเน ให้ค่าการทดสอบผ่านตามเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมกระเบื้องดินเผาปูพื้น (มอก. 37-2529) คือ เมื่อแปรอัตราส่วนทดแทน ของเสียที่เป็นแก้วสีชาต่อซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วเป็น 100:0, 80:20, 75:25 และ 70:30 พบว่าให้ค่ากำลังรับแรงดัดเท่ากับ 27.74, 27.98, 28.08 และ 25.35 เมกกะปาสคาลตามลำดับ ให้ค่าการดูดซึมน้ำเท่ากับ 2.45, 2.91, 2.27 และ 2.59 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ ให้ค่าการหดตัวเท่ากับ 16.31, 16.18, 14.45 และ 13.58 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ ซึ่งทุกอัตราส่วนการทดแทนมีคุณสมบัติด้านการทนสารเคมีและความทนการร่อน (ไม่ปรากฏรอยเสียหายและไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงบนผิวของผลิตภัณฑ์)

3. จากการศึกษาถึงอุณหภูมิที่เหมาะสมในการทดลอง พบว่าสภาวะที่เหมาะสมสำหรับงานวิจัยนี้คือ ส่วนผสมที่ทดแทนเฟลด์สปาร์ด้วยของเสียที่เป็นแก้วสีชาต่อซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วที่อัตราส่วน 80:20 เผาขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 1150 องศาเซลเซียส คือให้ค่ากำลังรับแรงดัดเท่ากับ 27.46 เมกกะปาสคาล ค่าการดูดซึมน้ำเท่ากับ 1.93 เปอร์เซ็นต์ ค่าการหดตัวเท่ากับ 4.89 เปอร์เซ็นต์ ผ่านการทดสอบการทนสารเคมีและความทนการร่อน (ไม่ปรากฏรอยเสียหายและไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงบนผิวของผลิตภัณฑ์) จากผลดังกล่าวทำให้ทราบว่า สามารถใช้ซิลิกา

อะลูมินาที่ใช้แล้วร่วมกับของเสียที่เป็นแก้วสีชาเพื่อทดแทนเฟลด์สปาร์ได้ 100 เปอร์เซ็นต์ ทั้งยังช่วยให้สามารถลดอุณหภูมิในการเผาขึ้นรูปลงได้ถึง 50 องศาเซลเซียส

4. ผลการตรวจสอบลักษณะของเฟสที่เกิดขึ้นในเนื้อผลิตภัณฑ์กระเบื้องเซรามิกที่สภาวะที่เหมาะสมในงานวิจัยโดยใช้เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟร็กโตมิเตอร์ พบว่าเกิดเฟสของควอตซ์และคริสโตบัลไลต์ซึ่งเป็นเฟสเบื้องต้นของการเกิดเฟสมัลไลต์ซึ่งเป็นเฟสที่ให้ความแข็งแรงในเนื้อผลิตภัณฑ์

5. การประมาณค่าใช้จ่ายในเบื้องต้นพบว่าในการผลิตกระเบื้องเซรามิกที่มีการนำของเสียที่เป็นแก้วสีชาและซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วมาทดแทนเฟลด์สปาร์ ที่อัตราส่วนของเสียที่เป็นแก้วสีชาต่อซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วเท่ากับ 80:20 เผาขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 1150 องศาเซลเซียส มีค่าใช้จ่ายเท่ากับ 8.61 บาท/แผ่น ในขณะที่กระเบื้องที่มีการทดแทนด้วยของเสียที่เป็นแก้วสีชาเพียงอย่างเดียว และกระเบื้องที่ไม่มีใช้วัตถุดิบทดแทนเลย (ใช้เฟลด์สปาร์ 100 เปอร์เซ็นต์) เผาขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส มีค่าใช้จ่ายเท่ากับ 9.49 และ 11.59 บาท/แผ่น ตามลำดับ ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้วัตถุดิบทดแทนร่วมระหว่างของเสียที่เป็นแก้วสีชาและซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วดังกล่าวสามารถลดต้นทุนในการผลิตลงได้ถึง 0.88 และ 2.98 บาท/แผ่น ตามลำดับ



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 7

ข้อเสนอแนะเชิงวิศวกรรม

จากการทดลองการนำของเสียที่เป็นซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วมาใช้เป็นวัตถุดิบทดแทนร่วมกับของเสียที่เป็นแก้วสีชาในการทดแทนเฟลด์สปาร์ พบว่าควรทำการวิจัยเพิ่มเติมดังนี้คือ

1. จากการทดลองแปรอัตราส่วนของการใช้ของเสียที่เป็นแก้วสีชาร่วมกับซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วพบว่า เมื่อมีการใช้ซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วเพิ่มขึ้นทำให้องค์ประกอบในส่วนของซิลิกาออกไซด์ลดลง ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อคุณภาพด้านความแข็งแรงของผลิตภัณฑ์ได้ จึงควรศึกษาหาวัตถุดิบทดแทนอื่นเพื่อนำมาประยุกต์ใช้เป็นวัตถุดิบทดแทนร่วมเพิ่มเติม

2. จากการศึกษาที่ผ่านมาของ หฤษฎ์ ธิติพันธ์ (2546) พบว่าขนาดของซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วมีผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์อิฐบล็อก จึงควรทำการศึกษาเพิ่มเติมในส่วนของ การแปรขนาดของซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วในการนำมาใช้เป็นวัตถุดิบทดแทนร่วมกับของเสียที่เป็นแก้วสีชาเพื่อทดแทนเฟลด์สปาร์สำหรับการผลิตกระเบื้องเซรามิก เพื่อศึกษาถึงแนวโน้มที่มีต่อคุณภาพของกระเบื้องเซรามิกที่ดีขึ้น

3. เนื่องจากการในนำของเสียที่เป็นแก้วสีชามาใช้ทดแทนเฟลด์สปาร์ในกระบวนการผลิตกระเบื้องเซรามิกต้องมีการคัดขนาด ทำให้คงเหลือของเสียที่เป็นแก้วสีชาที่ไม่ผ่านการคัดขนาดเกิดขึ้น จึงควรทำการศึกษาถึงการนำไปใช้ประโยชน์ในด้านอื่นๆ ต่อไปของของเสียที่เป็นแก้วสีชาที่ไม่ผ่านการคัดขนาด เช่น นำไปใช้เป็นเคลือบของตัวผลิตภัณฑ์เอง

4. จากการศึกษาที่ผ่านมาของ สาโรจน์ ปรัชิตพงษ์ (2545) พบว่า สามารถใช้ซิลิกาอะลูมินาที่ใช้แล้วแทนที่อะลูมินาบริสุทธิ์ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวทนไฟในการผลิตกระเบื้องเซรามิกได้ ดังนั้นจึงควรทำการศึกษาต่อในส่วนของการนำซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วมาใช้เป็นวัตถุดิบทดแทนในส่วนของตัวทนไฟพร้อมกับการใช้เป็นวัตถุดิบทดแทนร่วมในส่วนของเฟลด์สปาร์

5. ศึกษาหาวัตถุดิบทดแทนเพิ่มเติมในส่วนของเนื้อดิน เช่น ตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสีย ของเสียหรือของที่อาจพิจารณาว่าเป็นของเสียจากกระบวนการอื่นๆ เพื่อนำมาใช้เป็นวัตถุดิบทดแทนเพิ่มเติมในการผลิตกระเบื้องเซรามิก

บรรณานุกรม

ภาษาไทย

- ปรีดา พิมพ์ขาวขำ. 2539. เซรามิกส์. ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- พิภพ สุนทรสมัย. 2530. วัสดุวิศวกรรมการก่อสร้าง. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร: โครงการสนับสนุนเทคนิคอุตสาหกรรม สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น).
- มณฑิธร กังศิเทียม. 2537. กลศาสตร์ของดินด้านวิศวกรรม. กองวิจัยและทดลอง กรมชลประทาน สมาคมศิษย์เก่าวิศวกรรมชลประทานในพระบรมราชูปถัมภ์.

ภาษาอังกฤษ

- Bickey G.R., Jr. 1994. Advanced Series in Ceramic –Vol.2 FIRING CERAMIC. World Scientific.
- Krockel H., Merz M. and Biest O.V.D. 1984. Ceramics in advanced energy technologies. Boston: Reider
- Hlavac J. 1983. The technology of glass and ceramics. Glass Science and Technology. Elsevier Scientific.
- Joseph A. Pask and Anthony G. Evans. 1987. Ceramics microstructures'86: role of the interfaces. New York: Plenum Press.
- Richard M. Fulrath and Joseph A. Pask. 1986. Ceramic microstructures: their analysis, significance, and production. New York: Krieger.
- Davidge R. W. 1979. Mechanical Behaviour of Ceramics. Cambridge Solid State Science Series. Cambridge University Press. Cambridge London: New York: Melbourne.
- Ryan W. 1978. Properties of Ceramic Raw Materials (2nd Edition in SI/Metric Units). Pergamon Press.
- Shigeyuki S. 1980. Advanced Ceramics II. London: Elseier Applied Science.

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

- ประเสริฐ งามเลิศประเสริฐ. 2541. การใช้ของเสียซิลิกา-อะลูมินาในการทำตะกอนปรอทซัลไฟต์ให้
เป็นก้อน. วิทยานิพนธ์ปริญญาามหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะ
วิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ปรีดา พิมพ์ขาวขำ. 2547. เซรามิกส์. ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์-
มหาวิทยาลัย.
- เปรมฤดี กาญจนปิยะ. 2544. การศึกษาการผลิตปูนซีเมนต์อะลูมินาสูงจากซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้
แล้ว. วิทยานิพนธ์ปริญญาามหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ไพจิตร อิงศิริวัฒน์. 2541. เนื้อดินเซรามิก. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์โอเดียนสโตร์.
- เพชรพร ชาวกิจเจริญ และ วิวรรณ เทียนศิริ. 2548. การใช้ของเสียที่เป็นแก้วเป็นวัตถุดิบในการ
ผลิตกระเบื้องเซรามิก. วารสารวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมไทย สมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่ง
ประเทศไทย 19, 1 (มกราคม-เมษายน) :103-112.
- เพชรพร ชาวกิจเจริญ ชดชนก อัทธมพงศ์ อลิสา วิเชียรเจริญ และ อัจฉราภรณ์ พรหมบุตร. 2549.
การใช้ของเสียที่เป็นแก้วทดแทนแร่เฟลด์สปาร์ในการผลิตกระเบื้องเซรามิก. วารสาร
วิศวกรรมสิ่งแวดล้อมไทย สมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย 20, 1 (มกราคม-
เมษายน)
- ไฉติพย์ อภิธรรมวิริยะ. 2542. การนำซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วมาใช้ประโยชน์ในการทำวัสดุปูพื้น.
วิทยานิพนธ์ปริญญาามหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- วิวรรณ เทียนศิริ. 2546. การนำของเสียที่เป็นแก้วมาเป็นวัตถุดิบในการผลิตกระเบื้องเซรามิก.
วิทยานิพนธ์ปริญญาามหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- หุษาญ ธิตินันท์. 2546. การนำซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วไปใช้ประโยชน์เพื่อผลิตคอนกรีตบล็อก.
วิทยานิพนธ์ปริญญาามหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

สถาบันพัฒนาวิสาหกิจขนาดกลางและขนาดย่อม. 2548. ภาพรวมอุตสาหกรรมบรรจุภัณฑ์แก้ว
ของประเทศไทย. แหล่งที่มา: <http://www.dft.moc.go.th/eximcentre/technical/pack.htm>
[ข้อมูล ณ วันที่ 3 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2549]

สาริโรจน์ ปัทโชติพงษ์. 2545. การนำซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วมาใช้ประโยชน์เป็นตัวทนไฟในการทำ
เซรามิก. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะ
วิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

สุรศักดิ์ ไททองศรีสกุล, ปราณี รัตนวลิตโรจน์, สวลี เสนาพิทักษ์ และ ศรีใจ ชุนทด. 2542.
การศึกษาการนำกากวัสดุอะลูมินาเซรามิกกลับมาใช้ใหม่. รายงานฉบับสมบูรณ์ ปีที่ 1
สถาบันวิจัยโลหะและวัสดุ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

สุจิตรา กัญญาวิลาศ. 2545. การทำตะกอนนิกเกิลไฮดรอกไซด์ให้เป็นก้อนด้วยการใช้ซิลิกา-อะลูมินา
ที่ใช้แล้ว ปูนขาว และปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสาน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

สำนักงานเศรษฐกิจอุตสาหกรรม. 2548. อัตราการขยายตัวของอุตสาหกรรมเซรามิกในประเทศไทย
ไทย. แหล่งที่มา: http://www.oie.go.th/industrystatus21_th.asp?ind=08 [ข้อมูล ณ วันที่
20 มกราคม พ.ศ. 2549]

อภิรัฐ ธีรภาพพิเศษพงศ์ และ ชาญ จรรยาวิชย์. 2545. การใช้ของเสียเป็นวัตถุดิบในอุตสาหกรรม
เซรามิก. เอกสารประกอบการสัมมนา.

อุตสาหกรรม, กระทรวง. 2516. มาตรฐานกระทรวงอุตสาหกรรม 36-2516 (พ.ศ.2516). กำหนด
มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมกระเบื้องดินเผาปูผนัง.

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

สำนักงานส่งเสริมการค้า
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

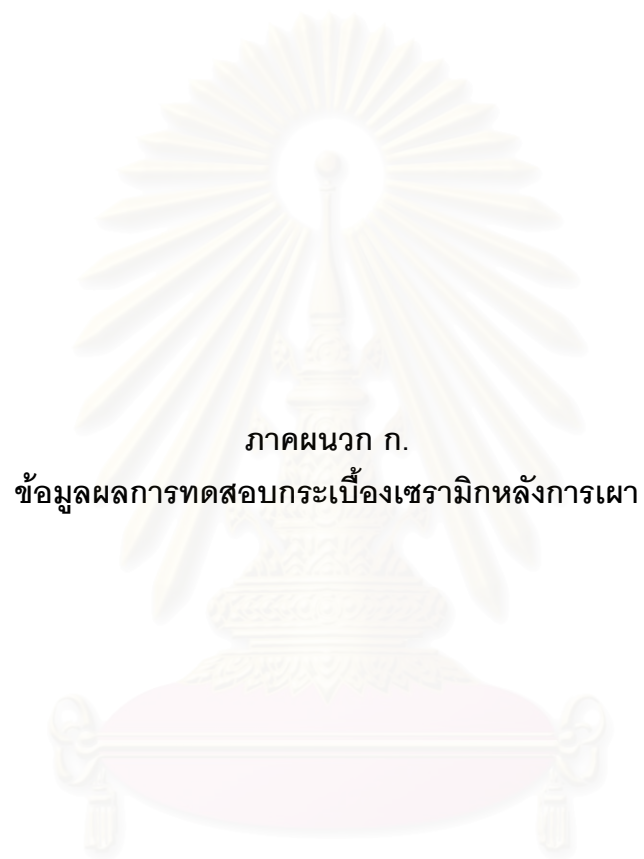
ภาษาอังกฤษ

- Barbieri L., Ferrari A.M., Lancelotti I., Leonelli C., Rincon J.M. and Romeo M. 2000 (October). Crystallization of (Na₂O-MgO)-CaO-Al₂O₃-SiO₂ Glassy Systems Formulated from Waste Products. Journal of American Ceramic Society, vol. 83, no.10. Available From: <http://www.acers.org/secure/pubs/journal/journalorder.asp>
- Cimdins, R., Rozenstrauha, I., Berzina, L., Bossert, J., and Bucker, M. 2000. Glassceramics obtained from industrial waste. Resource, Conservation and Recycling. 29: 285-290. Available From: <http://www.elsevier.com/locate/resconrec>
- Haun M.J. 2000 Energy Saving Method of Manufacturing Ceramic Product from Waste Glass. Glass Project Fact Sheet. Available From: <http://www.haunlabs.com>
- Haun M.J. 2002 Energy Saving Method of Manufacturing Ceramic Product from Fiber Glass Waste. Inventions&Innovation Project. Available From: <http://www.haunlabs.com>
- Karamanov A., Taglieri G., and Pelino M. 1999. Iron-Rich Sintered Glass Ceramics from Industrial waste. Journal of the American Ceramic Society. 8, 11 (November) Available From: <http://www.acers.org/secure/pubs/journal/journalorder.asp>
- Park, Y.J., and Heo. J. 2002. Conversion to glass-ceramics from glasses made by MSW incinerator fly ash for recycling. Ceramics International. 28:689-694
- Zhang M. H., and Malhotra, V.M. 1995. Characteristic of thermally activated aluminosilicate pozzolanic material and its use in concrete. Cement and Concrete Research. 25, 8 (December) : 1713-1725.



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก ก.

ข้อมูลผลการทดสอบกระเบื้องเซรามิกหลังการเผา

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ๘1 ผลการทดสอบกำลังรับแรงดัดของกระเบื้องที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส

ส่วนผสมที่มี ซิลิกา-อะลูมินา ที่ใช้แล้ว (เปอร์เซ็นต์)	P (กก.)	L (ซม.)	b (ซม.)	d (ซม.)	d ² (ซม. ²)	ค่ากำลังรับ แรงดัด (กก./ซม. ²)	ค่ากำลัง รับแรงดัด (เมกกะปาสคาล)	ค่าเฉลี่ย	ค่า เบี่ยงเบน มาตรฐาน
0	47	9	9.90	0.48	0.23	278.17	28.38	27.74	1.36
	45	9	9.97	0.48	0.23	264.47	26.99		
	47	9	9.98	0.47	0.22	287.81	29.37		
	43	9	9.95	0.48	0.23	253.22	25.84		
	45	9	9.98	0.47	0.22	275.56	28.12		
20	45	9	9.89	0.48	0.23	266.60	27.20	27.98	0.86
	46	9	9.95	0.47	0.22	282.54	28.83		
	46	9	9.97	0.47	0.22	281.97	28.77		
	45	9	9.97	0.48	0.23	264.47	26.99		
	45	9	9.98	0.47	0.22	275.56	28.12		
25	47	9	9.88	0.48	0.23	278.74	28.44	28.08	1.38
	48	9	9.95	0.48	0.23	282.66	28.84		
	47	9	9.92	0.47	0.22	289.55	29.55		
	42	9	9.90	0.46	0.21	270.67	27.62		
	43	9	9.91	0.48	0.23	254.24	25.94		
30	40	9	9.92	0.48	0.23	236.27	24.11	25.35	1.25
	43	9	9.90	0.48	0.23	254.50	25.97		
	42	9	9.90	0.48	0.23	248.58	25.37		
	42	9	9.95	0.49	0.24	237.34	24.22		
	43	9	9.89	0.47	0.22	265.71	27.11		

P = แรงกดที่ทำให้กระเบื้องหัก (กก.)

L = ระยะห่างของจุดรองรับ (ซม.)

b = ความกว้างของแผ่นกระเบื้อง (ซม.)

d = ความหนาของแผ่นกระเบื้อง (ซม.)

ตารางที่ ๘2 ผลการทดสอบกำลังรับแรงดัดของกระเบื้องที่อุณหภูมิ 1150 องศาเซลเซียส

ส่วนผสมที่มี ซิลิกา-อะลูมินา ที่ใช้แล้ว (เปอร์เซ็นต์)	P (กก.)	L (ซม.)	b (ซม.)	d (ซม.)	d ² (ซม. ²)	ค่ากำลังรับ แรงดัด (กก./ซม. ²)	ค่ากำลัง รับแรงดัด (เมกกะปาสคาล)	ค่าเฉลี่ย	ค่า เบี่ยงเบน มาตรฐาน
0	59	9	10.62	0.52	0.27	277.37	28.30	27.62	0.94
	59	9	10.65	0.52	0.27	276.59	28.22		
	58	9	10.58	0.53	0.28	263.47	26.88		
	57	9	10.61	0.53	0.28	258.19	26.35		
	59	9	10.60	0.52	0.27	277.89	28.36		
20	70	9	10.57	0.58	0.34	265.77	27.12	27.46	1.94
	65	9	10.56	0.57	0.32	255.76	26.10		
	68	9	10.58	0.58	0.34	257.93	26.32		
	67	9	10.56	0.57	0.32	263.63	26.90		
	80	9	10.62	0.58	0.34	302.30	30.85		
25	62	9	11.12	0.58	0.34	223.75	22.83	23.15	0.34
	64	9	11.00	0.59	0.35	225.64	23.02		
	67	9	11.25	0.59	0.35	230.97	23.57		
	64	9	11.18	0.58	0.34	229.73	23.44		
	65	9	11.24	0.59	0.35	224.27	22.88		
30	57	9	11.39	0.60	0.36	187.66	19.15	21.00	1.91
	65	9	11.34	0.58	0.34	230.03	23.47		
	55	9	11.36	0.58	0.34	194.30	19.83		
	67	9	11.34	0.60	0.36	221.56	22.61		
	57	9	11.32	0.59	0.35	195.28	19.93		

P = แรงกดที่ทำให้กระเบื้องหัก (กก.)

L = ระยะห่างของจุดรองรับ (ซม.)

b = ความกว้างของแผ่นกระเบื้อง (ซม.)

d = ความหนาของแผ่นกระเบื้อง (ซม.)

ตารางที่ ผ3 ผลการทดสอบกำลังรับแรงดัดของกระเบื้องที่อุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียส

ส่วนผสมที่มี ซิลิกา-อะลูมินา ที่ใช้แล้ว (เปอร์เซ็นต์)	P (กก.)	L (ซม.)	b (ซม.)	d (ซม.)	d ² (ซม. ²)	ค่ากำลังรับ แรงดัด (กก./ซม. ²)	ค่ากำลัง รับแรงดัด (เมกกะปาสคาล)	ค่าเฉลี่ย	ค่า เบี่ยงเบน มาตรฐาน
0	43	9	10.23	0.49	0.24	236.34	24.12	24.77	1.84
	45	9	10.25	0.47	0.22	268.30	27.38		
	42	9	10.10	0.48	0.23	243.66	24.86		
	45	9	10.24	0.49	0.24	247.09	25.21		
	40	9	10.29	0.49	0.24	218.57	22.30		
20	40	9	11.00	0.59	0.35	141.03	14.39	14.99	0.68
	42	9	11.35	0.59	0.35	143.51	14.64		
	42	9	11.34	0.57	0.32	153.89	15.70		
	40	9	11.32	0.58	0.34	141.80	14.47		
	42	9	11.30	0.57	0.32	154.44	15.76		
25	38	9	11.45	0.61	0.37	120.41	12.29	12.72	0.92
	37	9	11.46	0.59	0.35	125.21	12.78		
	34	9	11.45	0.59	0.35	115.16	11.75		
	35	9	11.40	0.58	0.34	123.21	12.57		
	38	9	11.34	0.57	0.32	139.24	14.21		
30	15	9	11.42	0.62	0.38	46.13	4.71	5.32	0.40
	17	9	11.30	0.60	0.36	56.42	5.76		
	16	9	11.40	0.59	0.35	54.43	5.55		
	15	9	11.10	0.60	0.36	50.68	5.17		
	17	9	11.30	0.62	0.38	52.83	5.39		

P = แรงกดที่ทำให้กระเบื้องหัก (กก.)

L = ระยะห่างของจุดรองรับ (ซม.)

b = ความกว้างของแผ่นกระเบื้อง (ซม.)

d = ความหนาของแผ่นกระเบื้อง (ซม.)

ตารางที่ ผ4 ผลการทดสอบการดูดซึมน้ำของกระเบื้องที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส

ส่วนผสมที่มีซิลิกา อะลูมินาที่ใช้แล้ว (เปอร์เซ็นต์)	น้ำหนักก่อน ทดสอบ (กรัม)	น้ำหนักหลัง ทดสอบ (กรัม)	ค่าการดูดซึมน้ำ (เปอร์เซ็นต์)	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน
0	130	134	3.08	2.45	0.63
	131	133	1.53		
	129	132	2.33		
	130	133	2.31		
	132	136	3.03		
20	130	135	3.85	2.91	1.03
	134	136	1.49		
	129	134	3.88		
	132	136	3.03		
	131	134	2.29		
25	134	137	2.24	2.27	0.96
	130	135	3.85		
	134	136	1.49		
	132	134	1.52		
	133	136	2.26		
30	130	134	3.08	2.59	0.45
	132	135	2.27		
	133	136	2.26		
	133	136	2.26		
	130	134	3.08		

ตารางที่ ผ5 ผลการทดสอบการดูดซึมน้ำของกระเบื้องที่อุณหภูมิ 1150 องศาเซลเซียส

ส่วนผสมที่มีซิลิกา อะลูมินาที่ใช้แล้ว (เปอร์เซ็นต์)	น้ำหนักก่อน ทดสอบ (กรัม)	น้ำหนักหลัง ทดสอบ (กรัม)	ค่าการดูดซึมน้ำ (เปอร์เซ็นต์)	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน
0	130	138	6.15	5.84	0.68
	131	139	6.11		
	131	139	6.11		
	129	137	6.20		
	130	136	4.62		
20	134	137	2.24	1.93	0.41
	135	138	2.22		
	134	136	1.49		
	135	138	2.22		
	136	138	1.47		
25	134	137	2.24	1.78	0.41
	135	137	1.48		
	135	137	1.48		
	137	139	1.46		
	135	138	2.22		
30	138	139	0.72	1.32	0.62
	137	139	1.46		
	137	138	0.73		
	135	137	1.48		
	135	138	2.22		

ตารางที่ ผ6 ผลการทดสอบการดูดซึมน้ำของกระเบื้องที่อุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียส

ส่วนผสมที่มีซิลิกา อะลูมินาที่ใช่แล้ว (เปอร์เซ็นต์)	น้ำหนักก่อน ทดสอบ (กรัม)	น้ำหนักหลัง ทดสอบ (กรัม)	ค่าการดูดซึมน้ำ (เปอร์เซ็นต์)	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน
0	129	137	6.20	5.71	0.68
	129	135	4.65		
	130	137	5.38		
	131	139	6.11		
	129	137	6.20		
20	135	139	2.96	2.79	0.64
	136	140	2.94		
	135	140	3.70		
	138	141	2.17		
	137	140	2.19		
25	137	142	3.65	2.47	0.83
	138	141	2.17		
	137	139	1.46		
	138	141	2.17		
	139	143	2.88		
30	137	140	2.19	2.17	0.02
	138	141	2.17		
	140	143	2.14		
	139	142	2.16		
	138	141	2.17		

ตารางที่ ๗7 ผลการทดสอบการหดตัวของกระเบื้องที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส

ส่วนผสมที่มีซิลิกา อะลูมินาที่ใช้แล้ว (เปอร์เซ็นต์)	มิตีก่อนเผา (ซม.)			มิติหลังเผา (ซม.)			ค่าการหดตัว (เปอร์เซ็นต์)	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน
	กว้าง	ยาว	หนา	กว้าง	ยาว	หนา			
0	10.31	10.33	0.49	9.71	9.72	0.48	13.19	16.31	2.52
	10.33	10.30	0.47	9.63	9.65	0.43	20.09		
	10.33	10.32	0.48	9.68	9.70	0.46	15.59		
	10.30	10.33	0.47	9.69	9.67	0.45	15.68		
	10.31	10.31	0.49	9.70	9.69	0.46	16.99		
20	10.31	10.31	0.46	9.66	9.65	0.45	14.21	16.18	1.38
	10.31	10.31	0.46	9.65	9.64	0.44	16.29		
	10.33	10.32	0.46	9.65	9.65	0.44	16.45		
	10.30	10.30	0.47	9.65	9.66	0.45	15.87		
	10.31	10.31	0.47	9.65	9.64	0.44	18.07		
25	10.31	10.32	0.46	9.66	9.65	0.45	14.29	14.45	0.76
	10.32	10.32	0.46	9.69	9.68	0.45	13.84		
	10.31	10.31	0.46	9.67	9.68	0.44	15.77		
	10.33	10.31	0.47	9.65	9.67	0.46	14.25		
	10.33	10.32	0.46	9.67	9.68	0.45	14.10		
30	10.30	10.31	0.46	9.67	9.65	0.45	12.13	13.58	1.53
	10.31	10.31	0.45	9.64	9.68	0.45	14.12		
	10.30	10.31	0.46	9.67	9.67	0.45	15.69		
	10.30	10.30	0.47	9.65	9.67	0.46	13.91		
	10.31	10.30	0.47	9.65	9.68	0.47	12.04		

ตารางที่ ๘8 ผลการทดสอบการหดตัวของกระเบื้องที่อุณหภูมิ 1150 องศาเซลเซียส

ส่วนผสมที่มีซิลิกา อะลูมินาที่ใช้แล้ว (เปอร์เซ็นต์)	มิติก่อนเผา (ซม.)			มิติหลังเผา (ซม.)			ค่าการหดตัว (เปอร์เซ็นต์)	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน
	กว้าง	ยาว	หนา	กว้าง	ยาว	หนา			
0	11.00	11.10	0.57	10.65	10.70	0.55	9.95	7.34	1.76
	11.10	11.00	0.57	10.70	10.65	0.56	8.31		
	10.85	10.90	0.59	10.60	10.65	0.58	6.16		
	10.95	11.00	0.57	10.70	10.70	0.56	6.62		
	10.90	11.00	0.59	10.75	10.70	0.58	5.69		
20	10.85	10.80	0.58	10.65	10.58	0.58	3.84	4.89	0.71
	10.86	10.88	0.58	10.67	10.65	0.57	5.48		
	10.85	10.83	0.58	10.57	10.58	0.58	4.83		
	10.75	10.78	0.58	10.56	10.54	0.57	5.61		
	10.79	10.82	0.58	10.55	10.55	0.58	4.66		
25	11.18	11.19	0.59	11.14	11.12	0.58	2.66	2.21	0.36
	11.18	11.15	0.59	11.12	11.00	0.59	1.87		
	11.25	11.29	0.60	11.23	11.25	0.59	2.19		
	11.28	11.21	0.59	11.22	11.18	0.58	2.48		
	11.25	11.26	0.59	11.25	11.24	0.59	1.84		
30	11.40	11.42	0.60	11.28	11.39	0.60	1.31	1.87	1.46
	11.36	11.39	0.60	11.31	11.34	0.58	2.56		
	11.39	11.40	0.59	11.34	11.36	0.58	4.10		
	11.35	11.38	0.60	11.31	11.34	0.60	0.70		
	11.38	11.37	0.59	11.35	11.32	0.59	0.70		

ตารางที่ ๘9 ผลการทดสอบการหดตัวของกระเบื้องที่อุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียส

ส่วนผสมที่มีซิลิกา อะลูมินาที่ใช้แล้ว (เปอร์เซ็นต์)	มิติก่อนเผา (ซม.)			มิติหลังเผา (ซม.)			ค่าการหดตัว (เปอร์เซ็นต์)	ค่าเฉลี่ย	ค่า เบี่ยงเบน มาตรฐาน
	กว้าง	ยาว	หนา	กว้าง	ยาว	หนา			
0	10.50	10.49	0.52	10.46	10.45	0.50	4.58	4.79	0.86
	10.51	10.50	0.52	10.48	10.47	0.49	6.31		
	10.52	10.52	0.51	10.48	10.50	0.49	4.47		
	10.52	10.52	0.52	10.50	10.49	0.50	4.30		
	10.51	10.52	0.51	10.49	10.50	0.49	4.29		
20	10.93	11.15	0.59	10.89	11.00	0.59	1.71	2.60	0.96
	11.35	11.37	0.60	11.10	11.35	0.59	4.00		
	11.34	11.35	0.58	11.20	11.34	0.57	3.02		
	11.39	11.38	0.58	11.25	11.32	0.58	1.75		
	11.33	11.34	0.58	11.28	11.30	0.57	2.50		
25	11.46	11.45	0.62	11.45	11.45	0.61	1.70	2.40	3.40
	11.44	11.47	0.60	11.44	11.46	0.59	1.75		
	11.45	11.46	0.59	11.44	11.45	0.59	0.17		
	11.41	11.41	0.58	11.41	11.40	0.58	0.09		
	11.35	11.35	0.57	11.33	11.34	0.57	8.31		
30	11.43	11.42	0.62	11.42	11.42	0.62	0.09	1.88	1.90
	11.35	11.37	0.60	11.32	11.30	0.60	0.88		
	11.40	11.41	0.60	11.37	11.40	0.59	2.01		
	11.38	11.35	0.60	11.05	11.10	0.60	5.04		
	11.37	11.40	0.62	11.31	11.30	0.62	1.40		



ภาคผนวก ข.
รูปอุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ ผ1 เตาเผาที่อุณหภูมิสูง



รูปที่ ผ2 เครื่องอัดขึ้นรูป



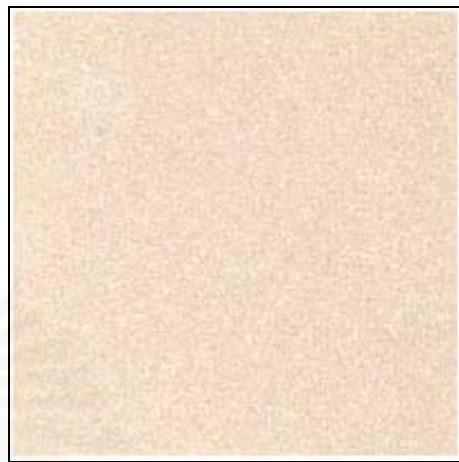
รูปที่ ผ3 เครื่องทดสอบกำลังรับแรงดัด



รูปที่ ผ4 เครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกโตมิเตอร์



(ก) ซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว 0 เปอร์เซ็นต์



(ข) ซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว 20 เปอร์เซ็นต์



(ค) ซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว 25 เปอร์เซ็นต์



(ง) ซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว 30 เปอร์เซ็นต์

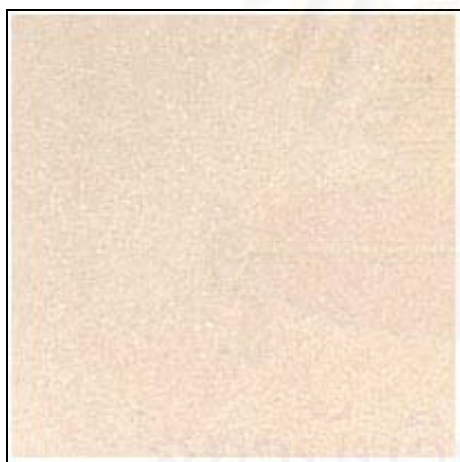
รูปที่ ๘5 กระเบื้องหลังการเผาที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส



(ก) ซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว 0 เปอร์เซ็นต์



(ข) ซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว 20 เปอร์เซ็นต์



(ค) ซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว 25 เปอร์เซ็นต์



(ง) ซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว 30 เปอร์เซ็นต์

รูปที่ ๘6 กระเบื้องหลังการเผาที่อุณหภูมิ 1150 องศาเซลเซียส



(ก) ซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว 0 เปอร์เซ็นต์



(ข) ซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว 20 เปอร์เซ็นต์

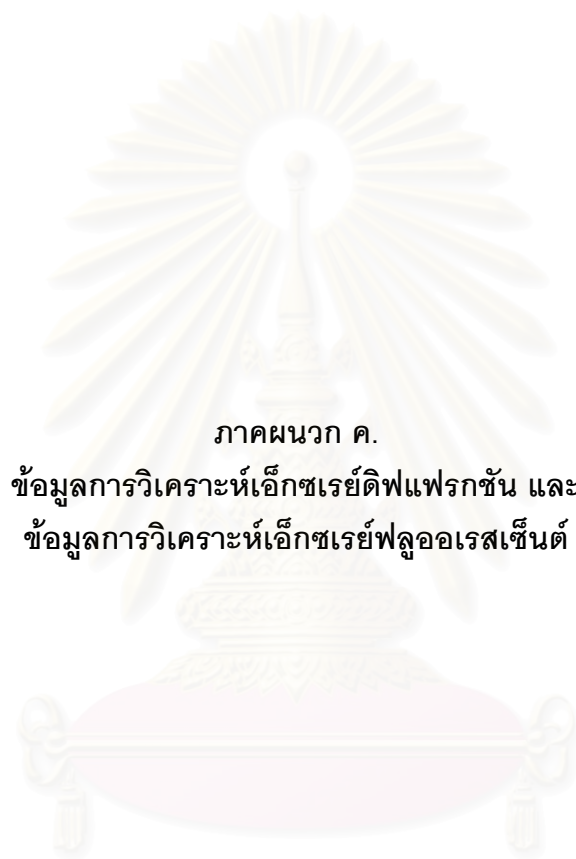


(ค) ซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว 25 เปอร์เซ็นต์



(ง) ซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว 30 เปอร์เซ็นต์

รูปที่ ๗7 กระเบื้องหลังการเผาที่อุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียส



ภาคผนวก ค.

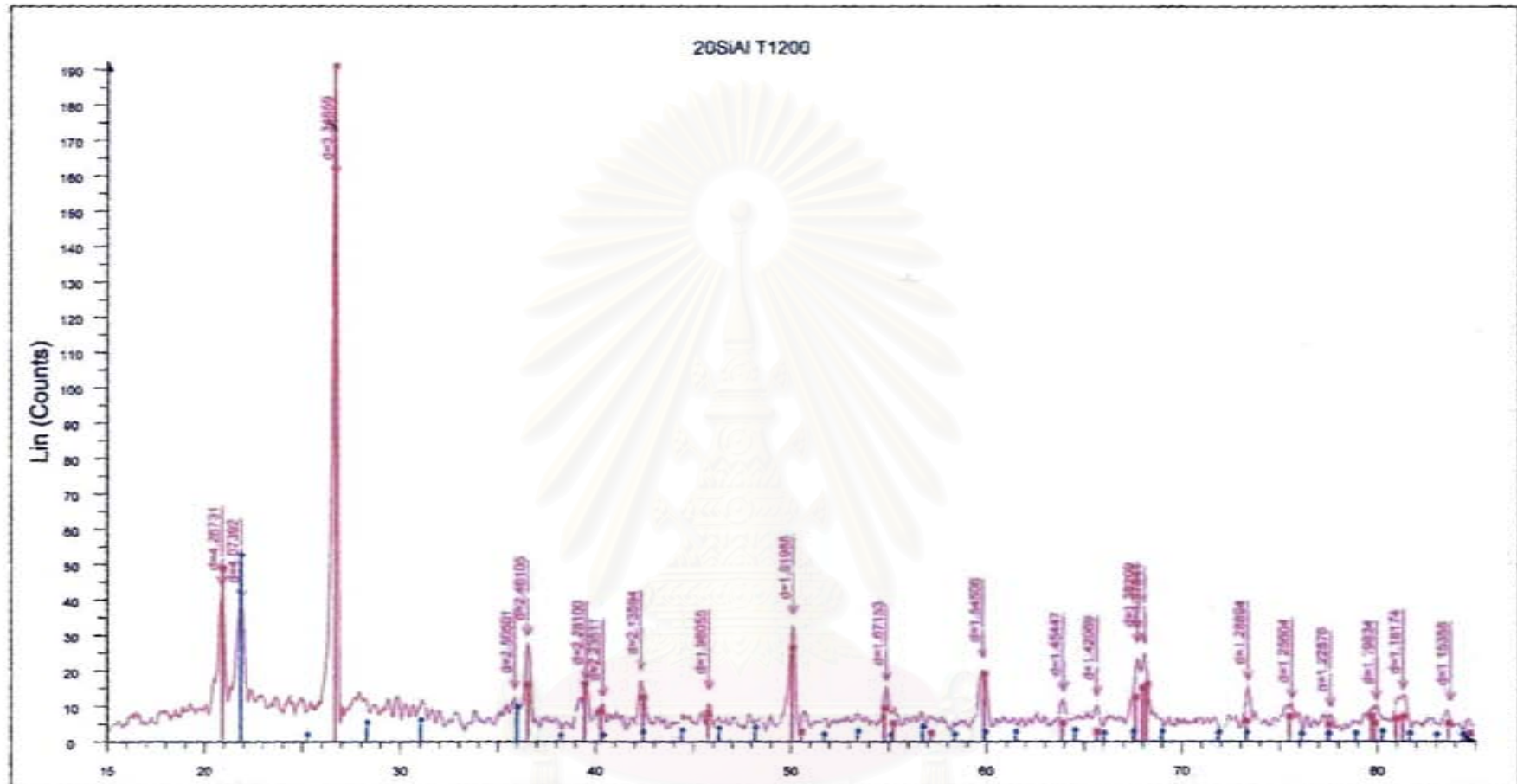
ข้อมูลการวิเคราะห์เอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกชัน และ
ข้อมูลการวิเคราะห์เอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนซ์

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ๘10 ข้อมูลการวิเคราะห์จากเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรกโตมิเตอร์ของกระเบื้อง
 ส่วนผสมของเสียที่เป็นแก้วสีชา : ซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว เท่ากับ 80:20
 เผาขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส

Date	: 6/1/2006
Sample	: 20SIAI T1200
Instrument	: X-Ray Diffractometer ; Bruker AXS Model D8 Discover
Condition	: Target Cu
	Voltage 40 kV
	Current 40 mA
	Angle 15-90 degree
	Increment 0.04 degree
	Scan speed 1 sec/step
	Detector Scintillation detector
Operator	: Manop Tirattanasompot
Memo	:

Angle 2-Theta °	d value Angstrom	Intensity Count	Intensity % %
20.79914	4.26731	43.9	27.4
21.79831	4.07392	40.3	25.1
26.59851	3.34859	160.0	100.0
35.81766	2.50501	14.7	9.1
36.47982	2.46105	29.7	18.5
39.47396	2.281	17.1	10.7
40.31915	2.23511	12.5	7.8
42.27875	2.13594	20.0	12.5
45.77621	1.98055	14.5	9.0
50.08250	1.81988	35.6	22.2
54.88187	1.67153	16.9	10.5
59.80900	1.54506	23.4	14.6
63.95827	1.45447	13.9	8.7
65.66711	1.42069	12.6	7.9
67.74451	1.38209	27.7	17.3
68.11866	1.37541	27.5	17.2
73.39946	1.28894	17.1	10.7
75.65369	1.25604	11.9	7.4
77.64270	1.22876	9.4	5.9
80.00302	1.19834	11.5	7.2
81.35999	1.18174	14.4	9.0
83.78706	1.15358	11.1	6.9



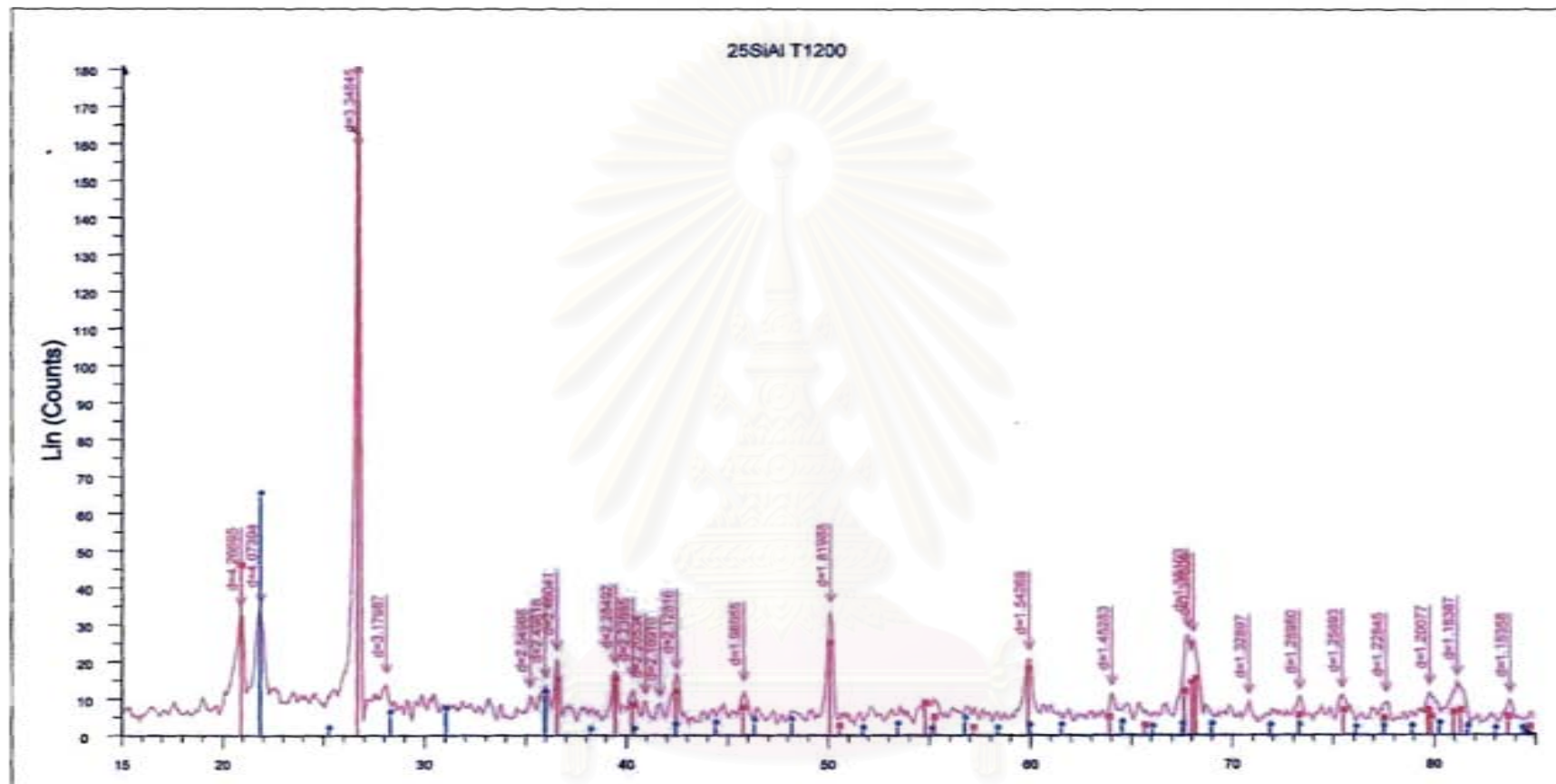
หมายเหตุ ■ คือ เฟสของ Quartz ■ คือ เฟสของ Cristobalite

รูปที่ ๘8 รายละเอียดการวิเคราะห์เอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกชัน (XRD) ของกระบือองส่วนผสม
ของเสียที่เป็นแก้วสีชา : ซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว เท่ากับ 80:20 เผาขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส

ตารางที่ ๘11 ข้อมูลการวิเคราะห์จากเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ของกระเบื้อง
 ส่วนผสมของเสียที่เป็นแก้วสีชา : ซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว เท่ากับ 75:25
 เเผ่ขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส

Date	: 6/1/2006
Sample	: 25SIAI T1200
Instrument	: X-Ray Diffractometer ; Bruker AXS Model D8 Discover
Condition	: Target Cu
	Voltage 40 kV
	Current 40 mA
	Angle 15-90 degree
	Increment 0.04 degree
	Scan speed 1 sec/step
	Detector Scintillation detector
Operator	: Manop Tirarattanasompot
Memo	:

Angle 2-Theta °	d value Angstrom	Intensity Count	Intensity % %
20.80094	4.26695	34.8	21.8
21.79819	4.07394	35.7	22.4
26.59963	3.34845	159.0	100.0
28.03785	3.17987	16.6	10.4
35.16953	2.54968	12.7	8.0
35.91924	2.49816	15.3	9.6
36.48963	2.46041	22.7	14.3
39.40338	2.28492	19.1	12.0
40.24890	2.23885	15.6	9.8
40.88763	2.20534	11.0	6.9
41.60204	2.16910	10.3	6.5
42.44073	2.12816	17.6	11.1
45.77621	1.98055	14.5	9.1
50.08250	1.81988	35.6	22.4
59.91081	1.54268	22.7	14.3
64.03899	1.45283	13.2	8.3
67.80367	1.38103	28.8	18.1
68.08037	1.37609	27.6	17.3
70.84817	1.32897	10.8	6.8
73.34256	1.28980	12.0	7.6
75.44948	1.25893	12.3	7.7
77.66537	1.22845	11.3	7.1
79.80862	1.20077	13.3	8.4
81.18347	1.18387	15.6	9.8
83.78706	1.15358	11.1	7.0



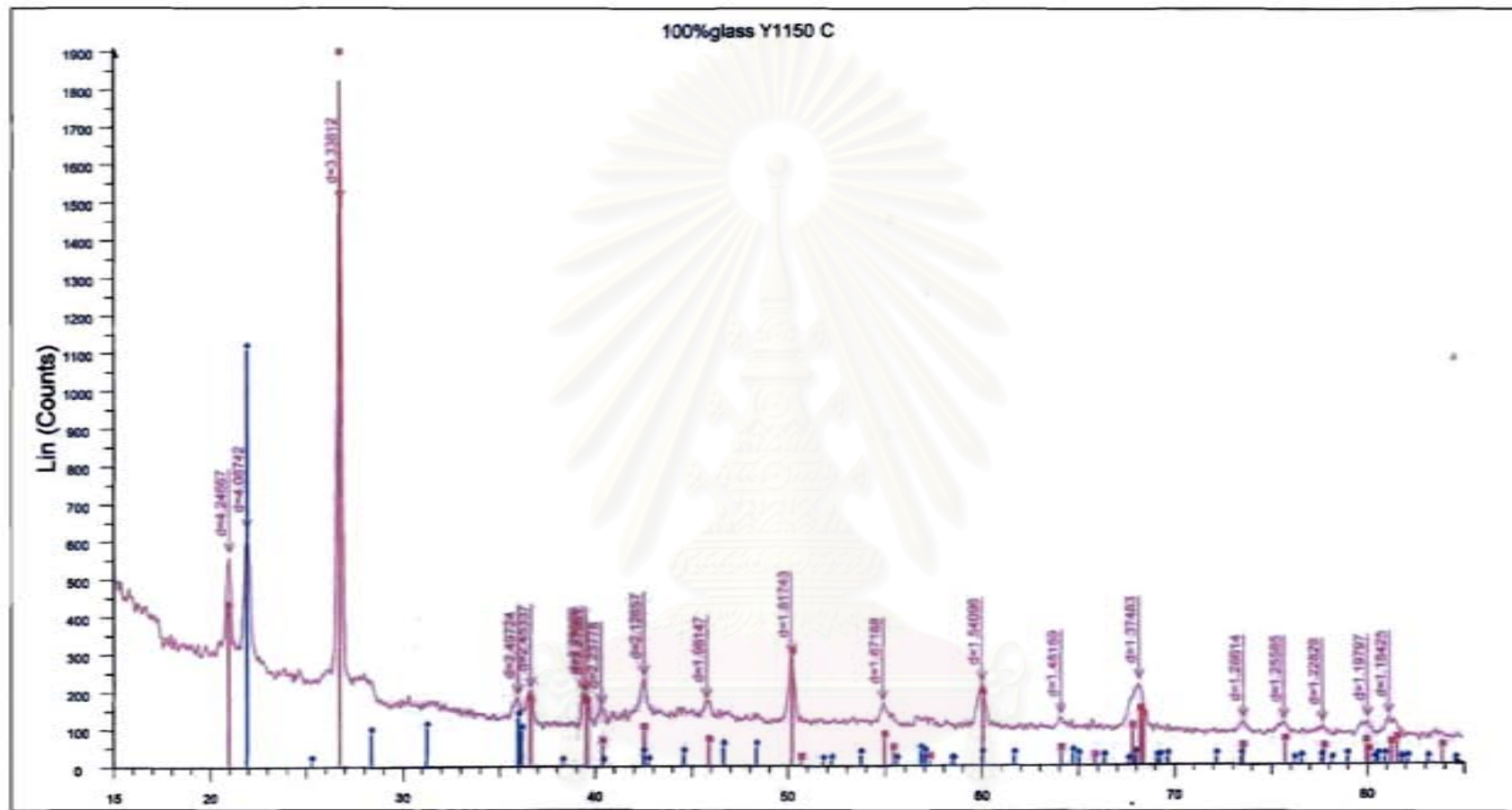
หมายเหตุ ■ คือ เฟสของ Quartz ■ คือ เฟสของ Cristobalite

รูปที่ ๘9 รายละเอียดการวิเคราะห์เอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน (XRD) ของกระเบื้องส่วนผสมของเล็ทที่เป็นแก้วสีชา : ซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว เท่ากับ 75:25 เผาขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส

ตารางที่ ผ12 ข้อมูลการวิเคราะห์จากเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ของกระเบื้อง
 ส่วนผสมของเสียที่เป็นแก้วสีชา : ซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว เท่ากับ 100:0
 เผาขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 1150 องศาเซลเซียส

Date	: 30/01/06		
Sample	: 100%glass Y1150 C		
Instrument	: X-Ray Diffractometer ; Bruker AXS Model D8 Discover		
Condition	Target	Cu	
	Voltage	40	kV
	Current	40	mA
	Angle	15-85	degree
	Increment	0.02	degree
	Scan speed	0.1	sec/step
	Detector	VANTEC-1 Detector (Super Speed Detector)	
Operator	: Manop Tirattanasompot		
Memo	:		

Angle 2-Theta °	d value Angstrom	Intensity Count	Intensity % %
20.90136	4.24667	572.0	37.9
21.83354	4.06742	635.0	42.1
26.68344	3.33812	1508.0	100.0
35.93292	2.49724	190.0	12.6
36.59811	2.45337	209.0	13.9
39.31125	2.29006	201.0	13.3
39.49911	2.27961	198.0	13.1
40.26901	2.23778	162.0	10.7
42.47401	2.12657	239	15.8
45.75380	1.98147	177.0	11.7
50.15457	1.81743	296.0	19.6
54.86945	1.67188	171	11.3
59.98469	1.54096	222	14.7
64.09987	1.45159	134.0	8.9
68.15153	1.37483	225.0	14.9
73.58557	1.28614	121.0	8
75.66740	1.25585	118.0	7.8
77.67812	1.22828	110.0	7.3
80.03249	1.19797	121.0	8.0
81.15200	1.18425	130.0	8.6



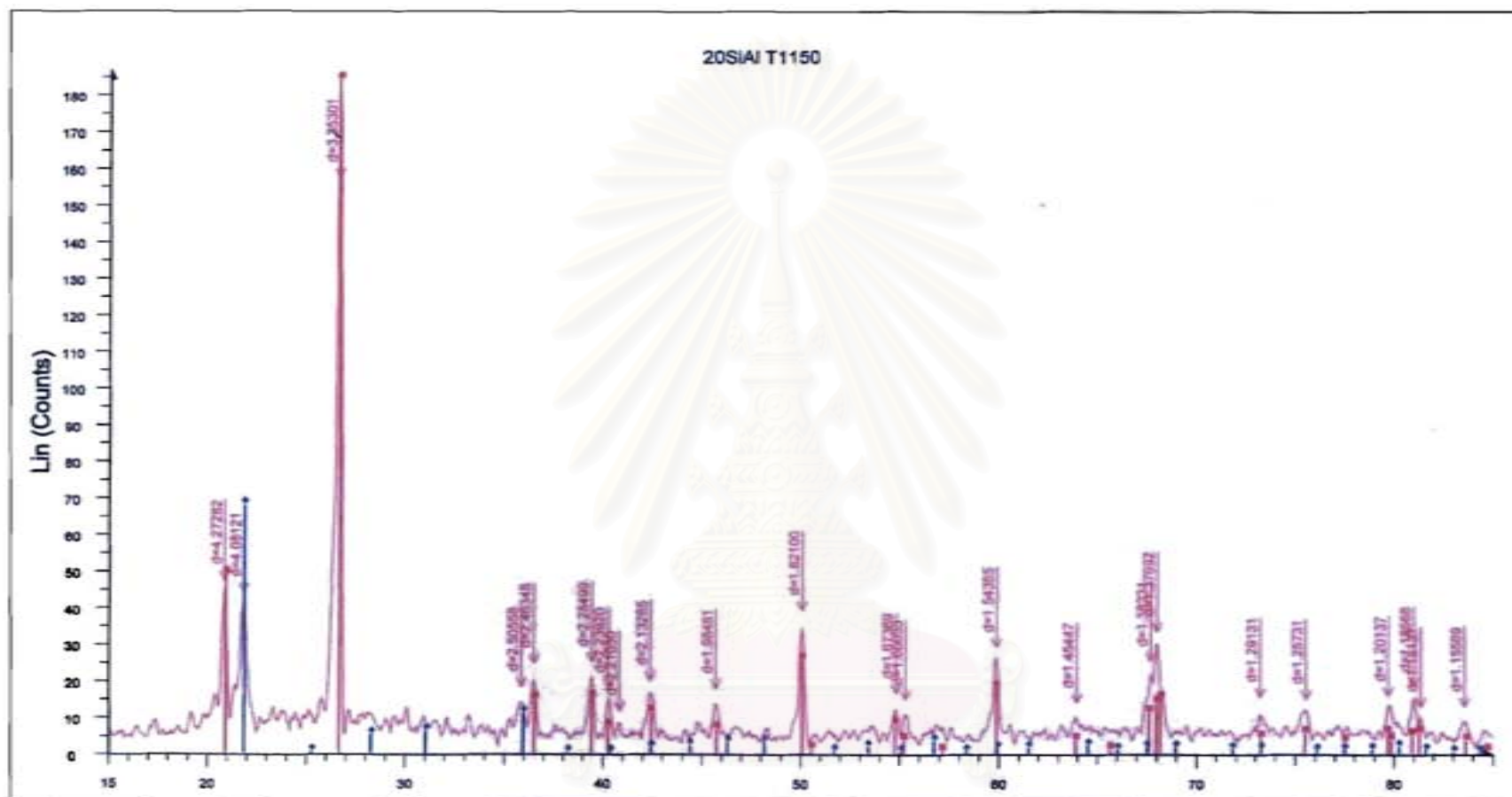
หมายเหตุ ■ คือ เฟสของ Quartz ■ คือ เฟสของ Cristobalite

รูปที่ ๘10 รายละเอียดการวิเคราะห์เอ็กซเรย์ดิฟแฟรกชัน (XRD) ของกระเบื้องส่วนผสม
ของเสี้ยนที่เป็นแก้วสีชา : ซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว เท่ากับ 100:0 เผาขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 1150 องศาเซลเซียส

ตารางที่ ผ13 ข้อมูลการวิเคราะห์จากเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรกโตมิเตอร์ของกระเบื้อง
 ส่วนผสมของเสียที่เป็นแก้วสีชา : ซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว เท่ากับ 80:20
 เผาขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 1150 องศาเซลเซียส

Date	: 6/1/2006
Sample	: 20SIAI T1150
Instrument	: X-Ray Diffractometer ; Bruker AXS Model D8 Discover
Condition	: Target Cu
	Voltage 40 kV
	Current 40 mA
	Angle 15-90 degree
	Increment 0.04 degree
	Scan speed 1 sec/step
	Detector Scintillation detector
Operator	: Manop Tirarattanasompot
Memo	:

Angle 2-Theta °	d value Angstrom	Intensity Count	Intensity % %
20.77205	4.27282	47.4	30.1
21.75888	4.08121	44.1	28.0
26.56282	3.35301	158.0	100.0
35.80933	2.50558	18.2	11.6
36.44262	2.46348	24.7	15.6
39.40218	2.28499	25.1	15.9
40.24239	2.23920	17.9	11.3
40.78790	2.21050	11.6	7.3
42.34291	2.13285	19.9	12.6
45.67241	1.98481	17.7	11.2
50.04947	1.82100	39.2	24.8
54.80508	1.67369	16.5	10.5
55.28363	1.66033	14.7	9.3
59.86944	1.54365	29.2	18.5
63.95827	1.45447	13.9	8.8
67.73222	1.38231	25.4	16.1
68.03383	1.37692	33.6	21.3
73.24282	1.29131	15.5	9.8
75.56361	1.25731	14.9	9.5
79.76044	1.20137	15.8	10.0
81.03330	1.18568	18.4	11.7
81.39114	1.18137	12.8	8.1
83.59945	1.15569	12.9	8.2



หมายเหตุ ■ คือ เฟสของ Quartz ● คือ เฟสของ Cristobalite

รูปที่ ๑11 รายละเอียดการวิเคราะห์เอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกชัน (XRD) ของกระเบื้องส่วนผสม
ของเสี้ยนที่เป็นแก้วสีชา : ซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว เท่ากับ 80:20 เผาขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 1150 องศาเซลเซียส

ตารางที่ ฌ14 ข้อมูลการวิเคราะห์ห้องค้ประกอบทางเคมีของขวดแก้วสีชา 1 (ขวดกระทิงแดง)
ด้วยเครื่องเอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนส์เปกโตรมิเตอร์

Chulalongkorn University

Quantified peaks in c:\superq\data\480845_b.pks

Summary of results

Sample:	480845 B	Red
Measured:	3/17/05 17:12	
Quantified:	3/18/05 09:13	
Sum:	100.0%	
RMS:	0.000	
Used lines:	12	
Traces:	P	
Qual. Program:	SemIQ2004	

Sample preparation

Sample type:	Powder (binder: H3BO3)
Initial weight:	7.04 g
Final weight:	7.75 g
Area ratio	1.12
Additive/sample:	0.1
Normalise:	to 100.0%
X-ray path:	Vacuum

Concentrations

Analyte	Type	Calibration status	Compound	Concentration (%)	Calculation method
	Binder	Not matched	H3BO3	10.059	Fixed
Na	Sample	Calibrated	Na2O	19.359	Calculate
Mg	Sample	Calibrated	MgO	1.598	Calculate
Al	Sample	Calibrated	Al2O3	1.177	Calculate
Si	Sample	Calibrated	SiO2	65.904	Calculate
S	Sample	Calibrated	SO3	0.056	Calculate
Cl	Sample	Calibrated	Cl	0.033	Calculate
K	Sample	Calibrated	K2O	0.184	Calculate
Ca	Sample	Calibrated	CaO	11.314	Calculate
Ti	Sample	Calibrated	TiO2	0.065	Calculate
Fe	Sample	Calibrated	Fe2O3	0.282	Calculate
Sr	Sample	Calibrated	SrO	0.012	Calculate
Zr	Sample	Calibrated	ZrO2	0.017	Calculate

Quantify parameters

Recipe:	c:\superq\data\new.rcp
Spectrometer resp. file:	c:\superq\data\semlq.sti
Use compound list:	c:\superq\exam\semlq.cpl
Error weighting:	Root
Max. Flow detector intensity:	2000 kcps
Max. Scaled detector intensity:	1000 kcps
Max. Scint detector intensity:	1000 kcps
Max. Duplex detector intensity:	3000 kcps

ตารางที่ ฌ15 ข้อมูลการวิเคราะห์ห้องค้ประกอบทางเคมีของขวดแก้วสีชา 2 (ขวดM150)
ด้วยเครื่องเอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนส์เปกโตรมิเตอร์

Chulalongkorn University

Quantified peaks in c:\superq\data\480845_b.pks

Summary of results

Sample:	480845 A	M150
Measured:	3/17/05 16:49	
Quantified:	3/18/05 09:10	
Sum:	100.0%	
RMS:	0.000	
Used lines:	13	
Traces:		
Qual. Program:	SemIQ2004	

Sample preparation

Sample type:	Powder (binder: H3BO3)
Initial weight:	7.043g
Final weight:	7.74 g
Area ratio	1.12
Additive/sample:	0.1
Normalise:	to 100.0%
X-ray path:	Vacuum

Concentrations

Analyte	Type	Calibration status	Compound	Concentration (%)	Calculation method
	Binder	Not matched	H3BO3	10.068	Fixed
Na	Sample	Calibrated	Na2O	18.848	Calculate
Mg	Sample	Calibrated	MgO	1.766	Calculate
Al	Sample	Calibrated	Al2O3	1.082	Calculate
Si	Sample	Calibrated	SiO2	65.891	Calculate
S	Sample	Calibrated	SO3	0.024	Calculate
P	Sample	Calibrated	P2O5	0.057	Calculate
Cl	Sample	Calibrated	Cl	0.061	Calculate
K	Sample	Calibrated	K2O	0.133	Calculate
Ca	Sample	Calibrated	CaO	11.7	Calculate
Ti	Sample	Calibrated	TiO2	0.093	Calculate
Fe	Sample	Calibrated	Fe2O3	0.313	Calculate
Sr	Sample	Calibrated	SrO	0.009	Calculate
Zr	Sample	Calibrated	ZrO2	0.023	Calculate

Quantify parameters

Recipe:	c:\superq\data\new.rcp
Spectrometer resp. file:	c:\superq\data\semiq.sti
Use compound list:	c:\superq\exam\semiq.cpl
Error weighting:	Root
Max. Flow detector intensity:	2000 kcps
Max. Scaled detector intensity:	1000 kcps
Max. Scint detector intensity:	1000 kcps
Max. Duplex detector intensity:	3000 kcps

ตารางที่ ฌ16 รายละเอียดข้อมูลทางเทคนิคของดินด้าแม่แซน

SIBELCO THAILAND

Technical Data

MAE SAN / P

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

Products are available in shredded form.

ที่มา: บริษัท ซิเบลโก มีเนอรัลล์ (ประเทศไทย) จำกัด จังหวัดปทุมธานี (ปี 2547)

ตารางที่ ผ17 รายละเอียดข้อมูลทางเทคนิคของทรายละเอียด

SIBELCO THAILAND

Technical Data

MILLED SAND #3

Chemical Analysis By X-Ray Fluorescence		Mineralogy by X-Ray Diffraction	
SiO ₂	99.44		
TiO ₂	0.03	Quartz.....	100.00%
Al ₂ O ₃	0.40		
Fe ₂ O ₃	0.04		
CaO.....	0.01		
MgO.....	0.02		
K ₂ O.....	0.04		
Na ₂ O.....	0.02		
LOI.....	0.14		
P.S.D.(Sedigraph)		Residue on	
%Cumulative Mass Finer Than			
< 20 microns	80.1%	45 micron	1.57%
< 10 microns	49.1%	Fired Properties	
< 5 microns	25.9%	Fired Color, 1220°C	
< 2 micron	10.5%	Brightness	84.82
< 1 micron	5.3%	(L)	95.30
< 0 microns	2.3%	(a)	1.09
		(b)	3.08
COMMENTS:			
Dry milled in alumina-lined ball mills.			

Products are available in powder form.

ที่มา: บริษัท ซิเบลโก มินอรัลส์ (ประเทศไทย) จำกัด จังหวัดปทุมธานี (ปี 2547)

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวปารีย์ อรรถพิศาล เกิดวันที่ 21 ตุลาคม พ.ศ. 2523 สำเร็จการศึกษาปริญญา
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในปี
การศึกษา 2546 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรม
สิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อ พ.ศ. 2547



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย