

การใช้ของเสียที่เป็นแก้วเป็นวัตถุดิบในการผลิตกระเบื้องเซรามิก



นายวิวรรณ เทียนศิริ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2546

ISBN 974-17-4132-4

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# UTILIZATION OF GLASS SCRAP AS RAW MATERIAL FOR CERAMIC TILE PRODUCTION

Mr. Wiwat Tiansiri

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

Department of Environmental Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

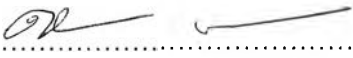
Academic Year 2003

ISBN 974-17-4132-4

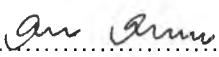
หัวข้อวิทยานิพนธ์                      การใช้ของเสียที่เป็นแก้วเป็นวัตถุดิบในการผลิตกระเบื้องเซรามิก  
โดย    นายวิวัฒน์ เทียนศิริ  
สาขาวิชา                                    วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม  
อาจารย์ที่ปรึกษา                         รองศาสตราจารย์ ดร. เพ็ชรพร เชาวกิจเจริญ

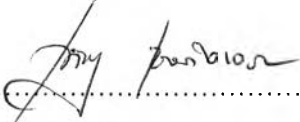
---

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็น  
ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

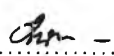
  
.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(ศาสตราจารย์ ดร. ดิเรก ลาวณิชย์ศิริ)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

  
.....ประธานกรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ วงศ์พันธ์ ลิ้มปเสนีย์)

  
.....อาจารย์ที่ปรึกษา  
(รองศาสตราจารย์ ดร. เพ็ชรพร เชาวกิจเจริญ)

  
.....กรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร. ดาวิทย์ วิวรรณะเดช)

  
..... กรรมการ  
(อาจารย์ ดร. มนัสกร ราชกรกิจ)

จิวรรณ เทียนศิริ : การใช้ของเสียที่เป็นแก้วเป็นวัตถุดิบในการผลิตกระเบื้องเซรามิก (UTILIZATION OF GLASS SCRAP AS RAW MATERIAL FOR CERAMIC TILE PRODUCTION) อาจารย์ที่ปรึกษา: รองศาสตราจารย์ ดร. เพ็ชรพร เชาวกิจเจริญ, 94 หน้า. ISBN 974-17-4132-4

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของการนำของเสียที่เป็นแก้ว ประเภทขวดแก้วสีชาที่ใช้แล้วมาใช้เป็นวัตถุดิบเพื่อทดแทนแร่เฟลด์สปาร์ ซึ่งเป็นตัวหลอมละลายในผลิตภัณฑ์เซรามิก โดยงานวิจัยนี้ใช้ส่วนผสมอัตราส่วนดินดำต่อแร่เฟลด์สปาร์เท่ากับ 8 ต่อ 5 ซึ่งคิดเป็น 60% ของส่วนผสมทั้งหมด รวมกับทรายแก้วอบแห้ง 40% โดยแปรค่าอัตราส่วนการทดแทนแร่เฟลด์สปาร์ด้วยขวดแก้วสีชาที่ผ่านการบดละเอียดขนาด 200 เมช (ประมาณ 0.10 มม.) เป็น 0% 25% 50% 75% และ 100% ของแร่เฟลด์สปาร์ที่ใช้ในส่วนผสม ขึ้นรูปเป็นแผ่นกระเบื้องขนาด 4x4 นิ้ว และแปรค่าอุณหภูมิที่ใช้ในงานวิจัยโดยเผาที่อุณหภูมิ 1000 1100 และ 1200 องศาเซลเซียส ทดสอบคุณภาพในด้านค่ากำลังรับแรงดัด ค่าการหดตัว ค่าการดูดซึมน้ำ การทนสารเคมี และความทนการร้าว ตามมาตรฐานอุตสาหกรรม ผลการวิจัยพบว่ากระเบื้องทุกส่วนผสมผ่านเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมกระเบื้องดินเผาบุผนัง (มอก.36-2516) นอกจากนี้ส่วนผสมที่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมกระเบื้องดินเผาปูพื้น (มอก.37-2529) คือ ส่วนผสมที่ใช้ขวดแก้วสีชาทดแทนแร่เฟลด์สปาร์ 100% ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส ซึ่งมีคุณสมบัติในด้านกำลังรับแรงดัดเท่ากับ 33.50 เมกกะปาสคาล ค่าการหดตัวเท่ากับ 7.76% ค่าการดูดซึมน้ำเท่ากับ 5.83% มีความสามารถทนสารเคมีและทนการร้าวได้ การวิเคราะห์เฟสด้วยวิธีเอกซเรย์ดิฟแฟรกชันพบเฟสของมัลไลท์ ( $3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$ ) ซึ่งเป็นส่วนที่ให้ความแข็งแรงสูงในผลิตภัณฑ์เซรามิก ค่าใช้จ่ายเบื้องต้นของกระเบื้องเซรามิกนี้เท่ากับ 9.08 บาทต่อแผ่น

ภาควิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

ลายมือชื่อนิสิต

สาขาวิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา

ปีการศึกษา 2546



##4570542921: MAJOR ENVIRONMENTAL ENGINEERING

KEYWORD: GLASS SCRAP / CERAMIC TILE / BROWN GLASS SCRAP BOTTLES

WIWAT TIANSIRI: UTILIZATION OF GLASS SCRAP AS RAW MATERIAL FOR CERAMIC TILE PRODUCTION. THESIS ADVISOR: ASSOC.PROF. PETCHPORN CHAWAKITCHAREON, Ph.D., 94 pp. ISBN 974-17-4132-4.

This research investigated the utilization of brown glass scrap bottles as the raw materials instead of using feldspar, which is flux of ceramic product. 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 of used brown glass scrap bottles (grinded to 200 mesh; 0.1 mm.) at 0% 25% 50% 75% and 100% of feldspar in the mixture then pressing to 4x4 inch tile in size and varying of temperature at 1000, 1100 and 1200°C. The quality tests of bending strength, firing shrinkage, water absorption, chemical durability and crazing durability were performed according to the Industrial Standard. The results indicated that all mixtures could pass Thai Industrial Standard for ceramic wall tile (TIS.36-2516). Moreover, the mixture that could pass Thai Industrial Standard for ceramic floor tile (TIS.37-2529) was composed of brown glass scrap bottles instead of feldspar 100% and burned at 1200°C. This mixture had the quality of bending strength equal to 33.50 MPa., firing shrinkage equal to 7.76%, water absorption equal to 5.83% and it also had the capacity of chemical durability and crazing durability. The phase analysis by x-ray diffraction found mullite phase (3Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.2SiO<sub>2</sub>) which provides the high strength for ceramic product. The cost estimation for the product revealed a cost of 9.08 baht/piece of ceramic tile.

Department Environmental Engineering

Student's signature

Wiwat

Field of study Environmental Engineering

Advisor's signature

Petchporn

Academic year 2003

## กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร. เพ็ชรพร เชาวกิจเจริญ เป็นอย่างสูง ที่เมตตาและให้โอกาสแก่ผู้วิจัยในการดำเนินงานวิจัยครั้งนี้ ให้ความกรุณาอบรมสั่งสอนให้ความรู้ รวมถึงให้แง่คิดในการทำงานอย่างมีประสิทธิภาพและแนะนำให้คำปรึกษาในงานวิจัยจนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์และคณาจารย์ทุกท่านที่ประสิทธิ์ประสาทถ่ายทอดวิชาความรู้ทางวิชาการ

ขอขอบพระคุณบิดามารดาและทุกๆ คนในครอบครัวที่สนับสนุนและเป็นกำลังใจแก่ผู้วิจัยมาโดยตลอด

ขอขอบคุณภาควิชาชีพวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย คุณสมคิดหัวหน้าห้องปฏิบัติการเซรามิก ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย คุณศรีไฉล เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการสถาบันวิจัยโลหะและวัสดุศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เจ้าหน้าที่ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการของเสียอันตราย ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้การช่วยเหลือควบคุมการดำเนินการวิจัย ขอขอบพระคุณบริษัท เคลย์แอนด์มินเนอรัล จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์ดินดำแม่แซน เฟลด์สปาร์และทรายอบแห้งเป็นวัสดุในงานวิจัย

ขอขอบพระคุณบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และเงินทุน ดร.เพ็ชรพร เชาวกิจเจริญ ที่มอบทุนสนับสนุนงานวิจัย

ท้ายนี้ขอขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ และเจ้าหน้าที่ฝ่ายธุรการทุกท่านในภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความรัก คำปรึกษา และความช่วยเหลือขณะที่ศึกษาและทำงานวิจัยเป็นอย่างดี

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฎ
สารบัญรูป.....	ฐ
คำนิยาม.....	ณ
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 อุตสาหกรรมเซรามิกของไทย.....	4
3.3 บทบาทและสถานะเศรษฐกิจอุตสาหกรรม.....	4
3.4 สถานภาพทั่วไปของผลิตภัณฑ์เซรามิก.....	5
3.5 โครงสร้างต้นทุนการผลิตอุตสาหกรรมเซรามิก.....	6
3.6 วัตถุดิบในการผลิต.....	6
3.6.1 ดิน.....	8
3.6.1.1 ดินขาว.....	8
3.6.1.2 ดินเหนียว.....	10
3.6.1.3 ดินดำ.....	10
3.6.2 ตัวหลอมละลายในเนื้อดิน.....	13
3.6.3 ตัวทนไฟ.....	15
3.6.3.1 ซิลิกา.....	15
3.6.3.2 อะลูมินา.....	16
3.7 ทRAYแก้ว.....	17
3.7.1 ทRAYแก้วที่ใช้ในอุตสาหกรรมเซรามิก.....	18

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.7.2 คุณสมบัติของทรายแก้วในอุตสาหกรรมเซรามิก.....	18
3.8 แก้ว.....	18
3.8.1 ลักษณะทั่วไปของแก้ว.....	18
3.8.2 กลุ่มผลิตภัณฑ์บรรจุภัณฑ์ขวดแก้ว.....	19
3.8.3 เทคโนโลยีการผลิต.....	20
3.8.4 วัตถุประสงค์ที่ใช้ในการหลอมแก้ว.....	20
3.8.5 แก้วสีต่างๆ.....	20
3.8.6 ผู้ผลิตบรรจุภัณฑ์ขวดแก้วของประเทศไทย.....	21
3.8.7 ภาวะและกลไกทางการตลาดของอุตสาหกรรมขวดแก้ว และกรรมวิธีการผลิตในปัจจุบัน.....	22
3.9 กระเบื้องเซรามิก.....	23
3.9.1 ความหมายของกระเบื้องตามมาตรฐานอุตสาหกรรม.....	23
3.9.2 ชนิดกระเบื้อง.....	24
3.9.2.1 กระเบื้องปูพื้น.....	24
3.9.2.2 กระเบื้องบุผนัง.....	24
3.9.3 กระบวนการผลิตกระเบื้องเซรามิกโดยทั่วไป.....	24
3.9.4 การขึ้นรูปเซรามิกโดยใช้แรงอัด.....	24
3.9.4.1 การขึ้นรูปโดยการอัดเนื้อดินปั้นแห้งๆ.....	24
3.9.5 ตัวแปรเบื้องต้นที่มีผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์เซรามิก.....	25
3.9.6 ปฏิกริยาที่เกิดขึ้นระหว่างการเผา.....	26
3.9.7 การควบคุมอุณหภูมิของเตาเผาในการเผาผลิตภัณฑ์เซรามิก.....	27
3.9.8 การตรวจสอบโครงสร้างที่เพิ่มความแข็งแรงให้ผลิตภัณฑ์.....	27
3.9.9 การนำของเสียที่เป็นแก้วทดแทนเฟลด์สปาร์ในผลิตภัณฑ์เซรามิก.....	28
3.9.10 ของเสียที่เป็นแก้ว (ขวดแก้วสีชา).....	28
3.10 มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม.....	28
3.10.1 มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมกระเบื้องดินเผาบุผนัง มอก. 36-2516.....	28
3.10.2 มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมกระเบื้องดินเผาปูพื้น มอก. 37-2529.....	29



## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.11 การศึกษาที่เกี่ยวข้องกับการวิจัย.....	30
บทที่ 4 แผนการทดลองและการดำเนินการวิจัย.....	34
4.1 การเตรียมวัสดุสำหรับทำวิจัย.....	34
4.1.1 วัตถุประสงค์.....	34
4.1.2 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง.....	34
4.1.3 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย.....	34
4.1.3.1 การทดลองขึ้นรูปกระเบื้องและเผากระเบื้อง.....	34
4.1.3.2 การทดสอบค่ากำลังรับแรงดัด.....	35
4.1.3.3 การทดสอบค่าการดูดซึมน้ำ.....	35
4.1.3.4 การทดสอบความทนการรราน.....	35
4.1.3.5 การทดสอบการทนสารเคมี (กรดและด่าง).....	35
4.1.3.6 การทดสอบค่าการหดตัว.....	35
4.1.3.7 การทดสอบคุณสมบัติทางเคมี.....	35
4.1.3.8 การตรวจสอบเฟสที่เกิดขึ้นของผลิตภัณฑ์.....	35
4.2 การดำเนินการวิจัย.....	35
4.2.1 การวิจัยเบื้องต้น.....	35
4.2.2 การทดลอง.....	36
4.2.3 การทดสอบคุณภาพตามมาตรฐานกระทรวงอุตสาหกรรม.....	37
4.2.3.1 การทดสอบความแข็งแรงเชิงกล (Mechanical strength test).....	37
4.2.3.2 การทดสอบค่าการดูดซึมน้ำ (Water absorption test).....	38
4.2.3.3 การทดสอบค่าการหดตัว (Firing shrinkage test).....	39
4.2.3.4 การทดสอบความทนการรราน (Crazing durability test).....	39
4.2.3.5 การทดสอบการทนสารเคมี (Chemical durability test).....	40
4.2.4 การตรวจสอบและศึกษาคุณสมบัติทางเคมีขององค์ประกอบ.....	40
4.2.5 การตรวจสอบเฟสที่เกิดขึ้น.....	40
4.2.6 ประมาณการค่าใช้จ่ายเบื้องต้นในกระบวนการผลิต และประเมินความคุ้มค่าในการผลิต.....	41
บทที่ 5 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง.....	42

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

5.1 การศึกษาการนำของเสียที่เป็นแก้วแทนวัสดุดิบในกระบวนการผลิต กระเบื้องเซรามิก.....	42
5.1.1 การทดสอบความแข็งแรงเชิงกล (Mechanical strength test).....	43
5.1.2 การทดสอบค่าการดูดซึมน้ำ (Water absorption test).....	46
5.1.3 การทดสอบค่าการหดตัว (Firing shrinkage test).....	49
5.1.4 การทดสอบการทนสารเคมี (Chemical durability test).....	49
5.1.5 การทดสอบความทนการร้าว (Crazing durability test).....	52
5.2 คุณสมบัติทางเคมีขององค์ประกอบ.....	53
5.3 เฟสที่เกิดขึ้นในผลิตภัณฑ์.....	54
5.4 การประมาณค่าใช้จ่ายเบื้องต้น.....	56
บทที่ 6 สรุปผลการทดลอง.....	58
บทที่ 7 ข้อเสนอแนะเชิงวิศวกรรม.....	59
รายการอ้างอิง.....	60
บรรณานุกรม.....	62
ภาคผนวก.....	63
ภาคผนวก ก. ข้อมูลผลการทดสอบกระเบื้องเซรามิกหลังการเผา.....	64
ภาคผนวก ข. รูปวัสดุดิบ อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย.....	74
ภาคผนวก ค. ข้อมูลการวิเคราะห์เอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกชัน และ ข้อมูลการวิเคราะห์เอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนซ์.....	81
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	94

## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 3.1 สมบัติต่างๆ ของดินขาว.....	9
ตารางที่ 3.2 สูตรเคมีของดินดำ.....	11
ตารางที่ 3.3 ข้อดีและข้อเสียของดินดำ.....	12
ตารางที่ 3.4 สมบัติทางกายภาพของเฟลด์สปาร์.....	13
ตารางที่ 3.5 ชนิดของเฟลด์สปาร์จำแนกตามสารประกอบ.....	14
ตารางที่ 3.6 สมบัติทางกายภาพของซิลิกา.....	15
ตารางที่ 3.7 สมบัติทางกายภาพของอะลูมินา.....	16
ตารางที่ 3.8 กำลังการผลิตบรรจุภัณฑ์ขวดแก้วของประเทศไทย พ.ศ.2533-2537.....	21
ตารางที่ 4.1 อัตราส่วนผสมระหว่างเฟลด์สปาร์และขวดแก้วดละเอียด.....	36
ตารางที่ 4.2 แผนการทดลองส่วนผสมของวัตถุดิบในการวิจัยการผลิตกระเบื้อง เซรามิกที่มีของเสียที่เป็นแก้วเป็นองค์ประกอบ.....	37
ตารางที่ 5.1 ค่ากำลังรับแรงดัด (เมกกะปาสคาล) ของกระเบื้องหลังการเผา.....	44
ตารางที่ 5.2 ค่าการดูดซึมน้ำ (%) ของกระเบื้องหลังการเผา.....	47
ตารางที่ 5.3 ค่าการหดตัว (%) ของกระเบื้องหลังการเผา.....	50
ตารางที่ 5.4 ผลการทนสารเคมีของกระเบื้องหลังการเผา.....	50
ตารางที่ 5.5 ผลความทนการรานของกระเบื้องหลังการเผา.....	53
ตารางที่ 5.6 ผลวิเคราะห์ทางเคมีของวัตถุดิบด้วยวิธีเอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (XRF).....	53
ตารางที่ 5.7 ผลวิเคราะห์ทางเคมีของกระเบื้องเซรามิกด้วยวิธีเอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (XRF).....	54
ตารางที่ 5.8 ค่าใช้จ่ายเบื้องต้นในการผลิตกระเบื้องเซรามิกจำนวนกระเบื้อง 80 แผ่น.....	57
ตารางที่ ๕1 ผลทดสอบค่ากำลังรับแรงดัดของกระเบื้องที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส.....	65
ตารางที่ ๕2 ผลทดสอบค่ากำลังรับแรงดัดของกระเบื้องที่อุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียส.....	66
ตารางที่ ๕3 ผลทดสอบค่ากำลังรับแรงดัดของกระเบื้องที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส.....	67
ตารางที่ ๕4 ผลทดสอบค่าการดูดซึมน้ำของกระเบื้องที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส.....	68
ตารางที่ ๕5 ผลทดสอบค่าการดูดซึมน้ำของกระเบื้องที่อุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียส.....	69
ตารางที่ ๕6 ผลทดสอบค่าการดูดซึมน้ำของกระเบื้องที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส.....	70
ตารางที่ ๕7 ผลทดสอบค่าการหดตัวของกระเบื้องที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส.....	71
ตารางที่ ๕8 ผลทดสอบค่าการหดตัวของกระเบื้องที่อุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียส.....	72
ตารางที่ ๕9 ผลทดสอบค่าการหดตัวของกระเบื้องที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส.....	73

## สารบัญตาราง (ต่อ)

หน้า

ตารางที่ ๘10	ข้อมูลการวิเคราะห์จากเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรกโตมิเตอร์ของกระเบื้อง ส่วนผสม (แก้ว 100% เเผที่ 1100 องศาเซลเซียส).....	83
ตารางที่ ๘11	ข้อมูลการวิเคราะห์จากเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรกโตมิเตอร์ของกระเบื้อง ส่วนผสม (แก้ว 0% เเผที่ 1200 องศาเซลเซียส).....	85
ตารางที่ ๘12	ข้อมูลการวิเคราะห์จากเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรกโตมิเตอร์ของกระเบื้อง ส่วนผสม (แก้ว 100% เเผที่ 1200 องศาเซลเซียส).....	87
ตารางที่ ๘13	ข้อมูลการวิเคราะห์เฟสของควอตซ์ (Quartz, SiO <sub>2</sub> ) จากเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรกโตมิเตอร์.....	88
ตารางที่ ๘14	ข้อมูลการวิเคราะห์เฟสของคริสโตบาไลท์ (Cristobalite, SiO <sub>2</sub> ) จากเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรกโตมิเตอร์.....	89
ตารางที่ ๘15	ข้อมูลการวิเคราะห์เฟสของมัลไลท์ (Mullite, SiO <sub>2</sub> .Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) จากเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรกโตมิเตอร์.....	90
ตารางที่ ๘16	ข้อมูลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของขวดแก้วสีชา จากเครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนส์เปกโตรมิเตอร์.....	91
ตารางที่ ๘17	ข้อมูลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของกระเบื้องส่วนผสม (แก้ว 0% เเผที่ 1100 องศาเซลเซียส) จากเครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนส์เปกโตรมิเตอร์.....	91
ตารางที่ ๘18	ข้อมูลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของกระเบื้องส่วนผสม (แก้ว 100% เเผที่ 1100 องศาเซลเซียส) จากเครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนส์เปกโตรมิเตอร์.....	92
ตารางที่ ๘19	ข้อมูลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของกระเบื้องส่วนผสม (แก้ว 0% เเผที่ 1200 องศาเซลเซียส) จากเครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนส์เปกโตรมิเตอร์.....	92
ตารางที่ ๘20	ข้อมูลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของกระเบื้องส่วนผสม (แก้ว 100% เเผที่ 1200 องศาเซลเซียส) จากเครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนส์เปกโตรมิเตอร์.....	93

## สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 3.1 โครงสร้างต้นทุนการผลิตของอุตสาหกรรมเซรามิก.....	7
รูปที่ 3.2 สัดส่วนการใช้วัตถุดิบในประเทศและวัตถุดิบจากต่างประเทศ.....	7
รูปที่ 3.3 แผนผังวัตถุดิบบางชนิดในการผลิตเซรามิก.....	8
รูปที่ 3.4 ปฏิกริยาของดินขาวเมื่อผ่านอุณหภูมิต่างๆ และการเปลี่ยนแปลงผลึก ทางโครงสร้างเคมี.....	9
รูปที่ 3.5 ปฏิกริยาการเปลี่ยนแปลงของผลึกซิลิกาเมื่อได้รับความร้อน.....	16
รูปที่ 3.6 การควบคุมอุณหภูมิในการเผาผลิตภัณฑ์เซรามิก.....	27
รูปที่ 5.1 ช่วงเวลาในการเผากระเบื้องที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส.....	42
รูปที่ 5.2 ช่วงเวลาในการเผากระเบื้องที่อุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียส.....	42
รูปที่ 5.3 ช่วงเวลาในการเผากระเบื้องที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส.....	43
รูปที่ 5.4 ความสัมพันธ์ระหว่างการทดแทนเฟลด์สปาร์ด้วยของเสี้ยวที่เป็นแก้ว (%) กับค่ากำลังรับแรงดัดหลังเผาที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส.....	44
รูปที่ 5.5 ความสัมพันธ์ระหว่างการทดแทนเฟลด์สปาร์ด้วยของเสี้ยวที่เป็นแก้ว (%) กับค่ากำลังรับแรงดัดหลังเผาที่อุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียส.....	45
รูปที่ 5.6 ความสัมพันธ์ระหว่างการทดแทนเฟลด์สปาร์ด้วยของเสี้ยวที่เป็นแก้ว (%) กับค่ากำลังรับแรงดัดหลังเผาที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส.....	45
รูปที่ 5.7 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงดัด (เมกกะปาสคาล) กับการทดแทนเฟลด์สปาร์ด้วยของเสี้ยวที่เป็นแก้ว (%) ที่อุณหภูมิ 1000 1100 และ 1200 องศาเซลเซียส.....	46
รูปที่ 5.8 ความสัมพันธ์ระหว่างการทดแทนเฟลด์สปาร์ด้วยของเสี้ยวที่เป็นแก้ว (%) กับค่าการดูดซึมน้ำหลังเผาที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส.....	47
รูปที่ 5.9 ความสัมพันธ์ระหว่างการทดแทนเฟลด์สปาร์ด้วยของเสี้ยวที่เป็นแก้ว (%) กับค่าการดูดซึมน้ำหลังเผาที่อุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียส.....	48
รูปที่ 5.10 ความสัมพันธ์ระหว่างการทดแทนเฟลด์สปาร์ด้วยของเสี้ยวที่เป็นแก้ว (%) กับค่าการดูดซึมน้ำหลังเผาที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส.....	48
รูปที่ 5.11 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดซึมน้ำ (%) กับการทดแทนเฟลด์สปาร์ด้วยของเสี้ยวที่เป็นแก้ว (%) ที่อุณหภูมิ 1000 1100 และ 1200 องศาเซลเซียส.....	49

## สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 5.12 ความสัมพันธ์ระหว่างการทดแทนเฟลด์สปาร์ด้วยของเสียที่เป็นแก้ว (%) กับค่าการหดตัว (%) ที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส.....	51
รูปที่ 5.13 ความสัมพันธ์ระหว่างการทดแทนเฟลด์สปาร์ด้วยของเสียที่เป็นแก้ว (%) กับค่าการหดตัว (%) ที่อุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียส.....	51
รูปที่ 5.14 ความสัมพันธ์ระหว่างการทดแทนเฟลด์สปาร์ด้วยของเสียที่เป็นแก้ว (%) กับค่าการหดตัว (%) ที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส.....	52
รูปที่ 5.15 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างค่าการหดตัว (%) กับการทดแทนเฟลด์สปาร์ด้วยของเสียที่เป็นแก้ว (%) ที่อุณหภูมิ 1000 1100 และ 1200 องศาเซลเซียส.....	52
รูปที่ 5.16 ผลการวิเคราะห์เอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกชัน (XRD) ของกระเบื้องส่วนผสม (แก้ว 100% เเผาที่ 1100 องศาเซลเซียส).....	55
รูปที่ 5.17 ผลการวิเคราะห์เอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกชัน (XRD) ของกระเบื้องส่วนผสม (แก้ว 0% เเผาที่ 1200 องศาเซลเซียส).....	55
รูปที่ 5.18 ผลการวิเคราะห์เอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกชัน (XRD) ของกระเบื้องส่วนผสม (แก้ว 100% เเผาที่ 1200 องศาเซลเซียส).....	56
รูปที่ ๘1 ดินดำ (Ball Clay) ขนาด 200 เมช (0.10 มม.).....	75
รูปที่ ๘2 เฟลด์สปาร์ (Feldspar) ขนาด 200 เมช (0.10 มม.).....	75
รูปที่ ๘3 ทราายแก้วอบแห้งบดละเอียด ขนาด 200 เมช (0.10 มม.).....	75
รูปที่ ๘4 ขวดแก้วสีขาบดละเอียด ขนาด 200 เมช (0.10 มม.).....	75
รูปที่ ๘5 เครื่องทดสอบกำลังรับแรงดัด.....	76
รูปที่ ๘6 เครื่องอัดขึ้นรูปกระเบื้อง.....	76
รูปที่ ๘7 กระเบื้องที่ผ่านการขึ้นรูป (ก่อนเผา).....	77
รูปที่ ๘8 กระเบื้องหลังการเผาที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส.....	78
รูปที่ ๘9 กระเบื้องหลังการเผาที่อุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียส.....	79
รูปที่ ๘10 กระเบื้องหลังการเผาที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส.....	80
รูปที่ ๘11 รายละเอียดการวิเคราะห์เอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกชัน (XRD) ของกระเบื้องส่วนผสม (แก้ว 100% เเผาที่ 1100 องศาเซลเซียส).....	82
รูปที่ ๘12 รายละเอียดการวิเคราะห์เอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกชัน (XRD) ของกระเบื้องส่วนผสม (แก้ว 0% เเผาที่ 1200 องศาเซลเซียส).....	84

### สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ ๘13 รายละเอียดการวิเคราะห์เอ็กซเรย์ดิฟแฟรคชั่น (XRD) ของกระเบื้องส่วนผสม (แก้ว 100% เเผที่ 1200 องศาเซลเซียส).....	86
--	----

## คำนิยาม

ค่าความแข็งแรงภายใต้กำลังรับแรงดัด (Modulus of Rupture, MOR) (มอก.37-2529, 2539)

กำลังรับแรงดัด (Bending strength) (ปรีดา พิมพ์ขาวขำ, 2539)

ค่าการหดตัว (Firing shrinkage) คือ ค่าการหดตัวของแท่งทดลองหรือผลิตภัณฑ์ดิบหลังการเผา (ปรีดา พิมพ์ขาวขำ, 2539)

ค่าการดูดซึมน้ำ (Water absorption) คือ ค่าปริมาณน้ำที่แผ่นกระเบื้องดูดซึมเข้าไปหลังจากต้มในน้ำเดือด 2 ชั่วโมง และทิ้งไว้ให้เย็นแล้วนำขึ้นมาเช็ดด้วยผ้าหมาดแล้วนำไปชั่งน้ำหนักเทียบกับน้ำหนักแห้ง (มอก.37-2529, 2529)

การราน (Crazing) คือ การเกิดรอยร้าวบนผิว (มอก.37-2529, 2529)

การทนสารเคมี (Chemical durability) คือ การไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงบนผิวเมื่อแช่กระเบื้องในสารละลายกรดและด่างเป็นเวลา 7 วัน (มอก.37-2529, 2529)