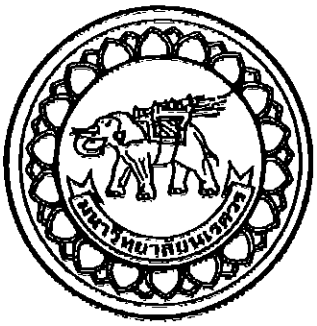


ผลกระทบของอัตราส่วนผสมของเศษแก้วเหลือทิ้งที่มีผลต่ออุณหภูมิในการเผา สมบัติทางกายภาพ และทางกลของกระเบื้องดินเซรามิก

EFFECT OF RATIO OF GLASS POWDER ON FIRING TEMPERATURE, PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES FOR CERAMIC TILES

นายเกษมสันต์ จางตระกูล รหัส 50360586
นายสถาพร ทองย้อย รหัส 50365581

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร
ปีการศึกษา 2553

ห้องสมุดคณะวิศวกรรมศาสตร์
วันที่รับ 10 ก.ค. 2555
เลขทะเบียน 15905126
เลขเรียกหนังสือ วร.
มหาวิทยาลัยนเรศวร TA 413 ง 2553

ใบรับรองปริญญานิพนธ์

ชื่อหัวข้อโครงงาน ผลกระทบของอัตราส่วนผสมของเศษแก้วเหลือทิ้งที่มีผลต่ออุณหภูมิในการเผา สมบัติทางกายภาพ และทางกลของกระเบื้องดินเซรามิก

ผู้ดำเนินโครงงาน นายเกษมสันต์ จางตระกูล รหัส 50360586
นายสถาพร ทองย้อย รหัส 50365581

ที่ปรึกษาโครงงาน อาจารย์ธณิกานต์ ธงชัย

สาขาวิชา วิศวกรรมวัสดุ

ภาควิชา วิศวกรรมอุตสาหการ

ปีการศึกษา 2553

.....

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร อนุมัติให้ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุ

.....ที่ปรึกษาโครงงาน
(อาจารย์ธณิกานต์ ธงชัย)

.....ประธานกรรมการ
(อาจารย์ปิยนันท์ บุญพยัคฆ์)

..... กรรมการ
(อาจารย์มานะ วีรวิกรม)

..... กรรมการ
(อาจารย์ชุลีพรย์ ป่าไร่)

..... กรรมการ
(อาจารย์กฤษณา พูลสวัสดิ์)

..... กรรมการ
(อาจารย์ศิริกาญจน์ ขันสัมฤทธิ์)

ชื่อหัวข้อโครงงาน	ผลกระทบของอัตราส่วนผสมของเศษแก้วเหลือทิ้งที่มีผลต่ออุณหภูมิในการเผา สมบัติทางกายภาพ และทางกลของกระเบื้องดินเซรามิก		
ผู้ดำเนินโครงงาน	นายเกษมสันต์	จางตระกูล	รหัส 50360586
	นายสถาพร	ทองย้อย	รหัส 50365581
ที่ปรึกษาโครงงาน	อาจารย์ธณิกานต์	ธงชัย	
สาขาวิชา	วิศวกรรมวัสดุ		
ภาควิชา	วิศวกรรมอุตสาหการ		
ปีการศึกษา	2553		

.....

บทคัดย่อ

โครงงานนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อผลิตกระเบื้องดินเซรามิก โดยนำเศษแก้วสีชามาผสมกับดินเพื่อลดอุณหภูมิในการเผา ทดสอบสมบัติทางกายภาพ และทางกล โดยทำการแปรค่าอัตราส่วนผสมระหว่างดินดำต่อเศษแก้วสีชา และอัตราส่วนผสมระหว่างดินขาวต่อเศษแก้วสีชาเป็น 100 : 0, 80 : 20, 70 : 30, 60 : 40, 50 : 50 และ 40 : 60 ขึ้นรูปเป็นแผ่นกระเบื้องขนาด 25.75 × 152.75 × 35 ลูกบาศก์มิลลิเมตร และแปรค่าอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 900, 1000, 1100 และ 1200 องศาเซลเซียส โดยทดสอบคุณภาพของกระเบื้องในด้านสีของกระเบื้องหลังเผา ค่าความหนาแน่น ค่าร้อยละการดูดซึมน้ำ ค่าการหดตัวหลังเผา และค่ากำลังรับแรงดัด ผลการศึกษาพบว่าปริมาณเศษแก้วสีชาที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้กระเบื้องดินเซรามิกมีสีกระเบื้องหลังเผาที่แตกต่างกัน ค่าความหนาแน่นเพิ่มขึ้น ค่าร้อยละการดูดซึมน้ำลดลง ค่าการหดตัวหลังเผาเพิ่มขึ้น และค่ากำลังรับแรงดัดเพิ่มขึ้น โดยกระเบื้องดินเซรามิกที่ผลิตจากดินดำ และเศษแก้วสีชา เผาที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส ที่อัตราส่วนระหว่างดินดำต่อเศษแก้วสีชาเท่ากับ 50 : 50 และ 40 : 60 ให้ค่ากำลังรับแรงดัดผ่านมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมกระเบื้องดินเผาปูพื้น (มอก.37-2529) และกระเบื้องดินเซรามิกที่ผลิตจากดินขาว และเศษแก้วสีชา เผาที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส ที่อัตราส่วนระหว่างดินขาวต่อเศษแก้วสีชาเท่ากับ 70 : 30, 60 : 40, 50 : 50 และ 40 : 60 ให้ค่ากำลังรับแรงดัดผ่านมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมกระเบื้องดินเผาปูพื้น (มอก.37-2529) ในขณะที่กระเบื้องดินเซรามิกทุกอัตราส่วน ให้ค่าร้อยละการดูดซึมน้ำผ่านมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมกระเบื้องดินเผาปูพื้น (มอก.37-2529) จึงพบว่าสามารถใช้เศษแก้วสีชามาเป็นส่วนผสมในการผลิตกระเบื้องดินเซรามิก เพื่อลดจุดสุกตัว ทำให้เนื้อดินสุกตัวเร็วขึ้น ทั้งยังช่วยให้สามารถลดอุณหภูมิในการเผาขึ้นรูปลงได้

กิตติกรรมประกาศ

โครงงานนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของ อาจารย์ ธณิกานต์ ธงชัย อาจารย์ที่ปรึกษาโครงงานผู้ซึ่งให้ความรู้ ให้คำปรึกษา รวมทั้งข้อแนะนำเกี่ยวกับการค้นหาข้อมูล และแนวทางการปฏิบัติการดำเนินโครงงาน การวิเคราะห์ต่างๆ ตลอดจนสละเวลาให้คำแนะนำทั้งภาคทฤษฎี และภาคปฏิบัติ ผู้จัดทำรู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์ที่ดีเยี่ยม และขอกราบขอบพระคุณอย่างสูงยิ่ง

ขอขอบพระคุณ อาจารย์ปิยนันท์ บุญพยัคฆ์ อาจารย์ชุลีพรย์ ป่าไร่ อาจารย์มานะ วีรวิกรม อาจารย์ศิริกาญจน์ ขันสัมฤทธิ์ และอาจารย์กฤษณา พูลสวัสดิ์ ที่เสียสละเวลา ประสิทธิ์ประสาทวิชา และความรู้อันสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการดำเนินโครงงานได้จนสำเร็จ อีกทั้งให้คำแนะนำ และข้อเสนอแนะในการปรับปรุงแก้ไขโครงงานครั้งนี้

ขอขอบพระคุณครูช่าง ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร ที่ให้ความช่วยเหลือ และให้คำปรึกษาด้านเครื่องมือ และอุปกรณ์ที่ใช้ในการปฏิบัติการ

ขอขอบพระคุณฝ่ายนวัตกรรมวัสดุ สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์ และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องไฮโดรลิกเพลสเพื่อขึ้นรูปกระเบื้องดินเซรามิก

ขอขอบพระคุณ บิดา มารดา และครอบครัว ที่ให้กำลังใจ และคอยให้ความช่วยเหลือ ทำให้โครงงานวิจัยสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบคุณเพื่อนทุกคนที่คอยให้ความช่วยเหลือ ให้กำลังใจ และให้คำปรึกษาในการทำโครงงานนี้จนลุล่วงได้เป็นอย่างดี

ผู้ดำเนินโครงงาน
เกษมสันต์ จางตระกูล
สถาพร ทองย้อย

เมษายน 2554

สารบัญ

หน้า

ใบรับรองปริญญานิพนธ์.....ก
บทคัดย่อภาษาไทย.....ข
กิตติกรรมประกาศ.....ค
สารบัญ.....ง
สารบัญตาราง.....ฉ
สารบัญรูป.....ญ
สารบัญสัญลักษณ์ และอักษรย่อ.....ฏ

บทที่ 1 บทนำ.....1
1.1 ความเป็นมา และความสำคัญของโครงงาน.....1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงงาน.....2
1.3 เกณฑ์ชี้วัดผลงาน (Output).....2
1.4 เกณฑ์ชี้วัดผลสำเร็จ (Outcome).....2
1.5 ขอบเขตในการดำเนินโครงงาน.....2
1.6 สถานที่ในการดำเนินโครงงาน.....3
1.7 ระยะเวลาในการดำเนินโครงงาน.....3
1.8 ขั้นตอน และแผนการดำเนินโครงงาน.....3

บทที่ 2 หลักการ และทฤษฎีเบื้องต้น.....6
2.1 กระเบื้องเซรามิก.....6
2.2 ชนิดของกระเบื้องเซรามิก.....6
2.3 วัตถุดิบในการผลิตกระเบื้องเซรามิก.....8
2.4 การขึ้นรูปผลิตภัณฑ์เซรามิก.....20
2.5 ผลิตภัณฑ์เซรามิกเมื่อเผาที่อุณหภูมิต่างๆ และการเผาซินเตอร์.....21
2.6 การทดสอบ.....23
2.7 มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม.....25
2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....35

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

บทที่ 3 วิธีการดำเนินโครงงาน....39

3.1 ขั้นตอน และระเบียบวิธีวิจัยที่ใช้ในการทำโครงงาน....39

3.2 วัตถุดิบ และอุปกรณ์....40

3.3 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย....40

3.4 วิเคราะห์ และสรุปผลการทดลอง....42

3.5 จัดทำรูปเล่มรายงาน....42

บทที่ 4 ผลการทดลอง และการวิเคราะห์....43

4.1 ศึกษาผลของอัตราส่วนของเศษแก้วเหลือทิ้งผสมกับดินที่มีผลต่อสมบัติทางกายภาพ และทางกลของกระเบื้องดินเซรามิก....43

4.2 ศึกษาผลของอุณหภูมิในการเผาที่มีผลต่อสมบัติทางกายภาพ และทางกลของกระเบื้องดินเซรามิก....54

บทที่ 5 บทสรุป และข้อเสนอแนะ....70

5.1 สรุปผลการทดลอง....70

5.2 ข้อเสนอแนะ และการพัฒนา....71

5.3 ปัญหาที่พบ และแนวทางการแก้ปัญหา....71

เอกสารอ้างอิง....72

ภาคผนวก ก....74

ประวัติผู้ดำเนินโครงงาน....107

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

1.1 ขั้นตอนการวิจัยดำเนินงาน 3

2.1 ขนาด และเกณฑ์ความคลาดเคลื่อน 30

2.2 พื้นที่ของรอยบิ่นต่อ 1 จุด 31

2.3 ความบิดเบี้ยว 31

2.4 แผนการชักตัวอย่างสำหรับการทดสอบขนาด และคุณลักษณะที่ต้องการ 34

2.5 รายการทดสอบ 35

3.1 อัตราส่วนผสมระหว่างดินดำต่อเศษแก้วสีชา 41

3.2 อัตราส่วนผสมระหว่างดินขาวต่อเศษแก้วสีชา 41

4.1 สีกระเบื้องดินดำหลังเผา ค่าเฉลี่ยความหนาแน่น ค่าเฉลี่ยร้อยละการดูดซึมน้ำ ค่าเฉลี่ยการหดตัวหลังเผา และค่าเฉลี่ยกำลังรับแรงดัดของกระเบื้องหลังเผาขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส 43

4.2 สีกระเบื้องดินขาวหลังเผา ค่าเฉลี่ยความหนาแน่น ค่าเฉลี่ยร้อยละการดูดซึมน้ำ ค่าเฉลี่ยการหดตัวหลังเผา และค่าเฉลี่ยกำลังรับแรงดัดของกระเบื้องหลังเผาขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส 48

4.3 สีของกระเบื้องดินดำหลังเผาขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 900, 1000, 1100 และ 1200 องศาเซลเซียส 55

4.4 ค่าเฉลี่ยความหนาแน่นของกระเบื้องดินดำหลังเผาที่อุณหภูมิต่างๆ 56

4.5 ค่าเฉลี่ยร้อยละการดูดซึมน้ำของกระเบื้องดินดำหลังเผาที่อุณหภูมิต่างๆ 58

4.6 ค่าเฉลี่ยการหดตัวหลังเผาของกระเบื้องดินดำหลังเผาที่อุณหภูมิต่างๆ 59

4.7 ค่าเฉลี่ยกำลังรับแรงดัดของกระเบื้องดินดำหลังเผาที่อุณหภูมิต่างๆ 60

4.8 สีของกระเบื้องดินขาวหลังเผาขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 900, 1000, 1100 และ 1200 องศาเซลเซียส 61

4.9 ค่าเฉลี่ยความหนาแน่นของกระเบื้องดินขาวหลังเผาที่อุณหภูมิต่างๆ 64

4.10 ค่าเฉลี่ยร้อยละการดูดซึมน้ำของกระเบื้องดินขาวหลังเผาที่อุณหภูมิต่างๆ 65

4.11 ค่าเฉลี่ยการหดตัวหลังเผาของกระเบื้องดินขาวหลังเผาที่อุณหภูมิต่างๆ 67

4.12 ค่าเฉลี่ยกำลังรับแรงดัดของกระเบื้องดินขาวหลังเผาที่อุณหภูมิต่างๆ 68

ก.1 ผลการทดสอบความหนาแน่นของกระเบื้องที่ผลิตจากดินดำ เผาที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส 75

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่ หน้า

ก.2 ผลการทดสอบความหนาแน่นของกระเบื้องที่ผลิตจากดินดำ เผาที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส 76

ก.3 ผลการทดสอบความหนาแน่นของกระเบื้องที่ผลิตจากดินดำ เผาที่อุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียส 77

ก.4 ผลการทดสอบความหนาแน่นของกระเบื้องที่ผลิตจากดินดำ เผาที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส 78

ก.5 ผลการทดสอบความหนาแน่นของกระเบื้องที่ผลิตจากดินขาว เผาที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส 79

ก.6 ผลการทดสอบความหนาแน่นของกระเบื้องที่ผลิตจากดินขาว เผาที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส 80

ก.7 ผลการทดสอบความหนาแน่นของกระเบื้องที่ผลิตจากดินขาว เผาที่อุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียส 81

ก.8 ผลการทดสอบความหนาแน่นของกระเบื้องที่ผลิตจากดินขาว เผาที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส 82

ก.9 ผลการทดสอบร้อยละการดูดซึมน้ำของกระเบื้องที่ผลิตจากดินดำ เผาที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส 83

ก.10 ผลการทดสอบร้อยละการดูดซึมน้ำของกระเบื้องที่ผลิตจากดินดำ เผาที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส 84

ก.11 ผลการทดสอบร้อยละการดูดซึมน้ำของกระเบื้องที่ผลิตจากดินดำ เผาที่อุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียส 85

ก.12 ผลการทดสอบร้อยละการดูดซึมน้ำของกระเบื้องที่ผลิตจากดินดำ เผาที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส 86

ก.13 ผลการทดสอบร้อยละการดูดซึมน้ำของกระเบื้องที่ผลิตจากดินขาว เผาที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส 87

ก.14 ผลการทดสอบร้อยละการดูดซึมน้ำของกระเบื้องที่ผลิตจากดินขาว เผาที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส 88

ก.15 ผลการทดสอบร้อยละการดูดซึมน้ำของกระเบื้องที่ผลิตจากดินขาว เผาที่อุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียส 89

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่ หน้า

ก.16 ผลการทดสอบร้อยละการดูดซึมน้ำของกระเบื้องที่ผลิตจากดินขาว เผาที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส....90
ก.17 ผลการทดสอบการหดตัวหลังเผาของกระเบื้องที่ผลิตจากดินดำ เผาที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส....91
ก.18 ผลการทดสอบการหดตัวหลังเผาของกระเบื้องที่ผลิตจากดินดำ เผาที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส....92
ก.19 ผลการทดสอบการหดตัวหลังเผาของกระเบื้องที่ผลิตจากดินดำ เผาที่อุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียส....93
ก.20 ผลการทดสอบการหดตัวหลังเผาของกระเบื้องที่ผลิตจากดินดำ เผาที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส....94
ก.21 ผลการทดสอบการหดตัวหลังเผาของกระเบื้องที่ผลิตจากดินขาว เผาที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส....95
ก.22 ผลการทดสอบการหดตัวหลังเผาของกระเบื้องที่ผลิตจากดินขาว เผาที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส....96
ก.23 ผลการทดสอบการหดตัวหลังเผาของกระเบื้องที่ผลิตจากดินขาว เผาที่อุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียส....97
ก.24 ผลการทดสอบการหดตัวหลังเผาของกระเบื้องที่ผลิตจากดินขาว เผาที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส....98
ก.25 ผลการทดสอบกำลังรับแรงดัดของกระเบื้องที่ผลิตจากดินดำ เผาที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส....99
ก.26 ผลการทดสอบกำลังรับแรงดัดของกระเบื้องที่ผลิตจากดินดำ เผาที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส....100
ก.27 ผลการทดสอบกำลังรับแรงดัดของกระเบื้องที่ผลิตจากดินดำ เผาที่อุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียส....101
ก.28 ผลการทดสอบกำลังรับแรงดัดของกระเบื้องที่ผลิตจากดินดำ เผาที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส....102
ก.29 ผลการทดสอบกำลังรับแรงดัดของกระเบื้องที่ผลิตจากดินขาว เผาที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส....103

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่ หน้า

ก.30 ผลการทดสอบกำลังรับแรงดัดของกระเบื้องที่ผลิตจากดินขาว เผาที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส 104

ก.31 ผลการทดสอบกำลังรับแรงดัดของกระเบื้องที่ผลิตจากดินขาว เผาที่อุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียส 105

ก.32 ผลการทดสอบกำลังรับแรงดัดของกระเบื้องที่ผลิตจากดินขาว เผาที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส 106

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	ปฏิกิริยาของดินขาวเมื่อผ่านอุณหภูมิต่างๆ และการเปลี่ยนแปลงรูปผลึกทางโครงสร้างเคมี	11
2.2	แก้วโซดาไลม์	15
2.3	แก้วบอโรซิลิเกต	15
2.4	แก้วตะกั่ว	16
2.5	แก้วโอปอล	16
2.6	แก้วอลูมิโนซิลิเกต	17
2.7	แก้วอัลคาไลน์-เอิร์ท อลูมิโนซิลิเกต	17
2.8	กลาส-เซรามิกส์	17
2.9	การเปลี่ยนแปลงของความหนาแน่นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น เปรียบเทียบกันระหว่างวัสดุแก้วกับผลึก	18
2.10	กลไกการรวมกันของอนุภาคในระหว่างกระบวนการซินเตอร์	22
2.11	การราน	27
2.12	รูเข็ม	27
2.13	รอยพอง	27
2.14	หลุม	27
2.15	รอยบิ่น	28
2.16	การหดตัวของเคลือบ	28
2.17	โค้งออก และเว้าเข้า	28
2.18	นูนขึ้น	29
2.19	แอ่นลง	29
3.1	ขั้นตอนการดำเนินงาน	39
4.1	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยความหนาแน่นกับร้อยละของเศษแก้วสีชาผสมดินดำเผาขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส	45
4.2	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยร้อยละการดูดซึมน้ำกับร้อยละของเศษแก้วสีชาผสมดินดำเผาขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส	46
4.3	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยการหดตัวหลังเผากับร้อยละของเศษแก้วสีชาผสมดินดำเผาขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส	47
4.4	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยกำลังรับแรงดัดกับร้อยละของเศษแก้วสีชาผสมดินดำเผาขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส	48

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยความหนาแน่นกับร้อยละของเศษแก้วสีชาผสมดินขาว เผาขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส 51

4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยร้อยละการดูดซึมน้ำกับร้อยละของเศษแก้วสีชาผสมดินขาว เผาขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส 52

4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยการหดตัวหลังเผากับร้อยละของเศษแก้วสีชาผสมดินขาว เผาขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส 53

4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยกำลังรับแรงดัดกับร้อยละของเศษแก้วสีชาผสมดินขาว เผาขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส 54

4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยความหนาแน่นกับอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาขึ้นรูป 57

4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยร้อยละการดูดซึมน้ำกับอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาขึ้นรูป 58

4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยการหดตัวหลังเผากับอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาขึ้นรูป 59

4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยกำลังรับแรงดัดกับอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาขึ้นรูป 61

4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยความหนาแน่นกับอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาขึ้นรูป 64

4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยร้อยละการดูดซึมน้ำกับอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาขึ้นรูป 66

4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยการหดตัวหลังเผากับอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาขึ้นรูป 67

4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยกำลังรับแรงดัดกับอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาขึ้นรูป 69

สารบัญสัญลักษณ์ และอักษรย่อ

ASTM	=	American Society for the Testing of Materials
T_m	=	Melting Temperature
T_g	=	Glass Transition Temperature
MPa	=	เมกะปาสคาล
ksc	=	Kilogram per Square Centimeter
g/cm^3	=	กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร
g	=	กรัม
cm^3	=	ลูกบาศก์เซนติเมตร
cm	=	เซนติเมตร
mm	=	มิลลิเมตร
kg	=	กิโลกรัม
°C	=	องศาเซลเซียส
°F	=	องศาฟาเรนไฮต์

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมา และความสำคัญของโครงงาน

ปัจจุบันประเทศไทยถือเป็นประเทศกำลังพัฒนา ดังนั้นจะเห็นได้ว่าทางภาครัฐ และภาคเอกชนมีความพยายามที่จะผลักดันประเทศให้ก้าวหน้าทั้งทางด้านสังคม และทางด้านเศรษฐกิจ การขยายตัวทางภาคอุตสาหกรรมจึงเกิดขึ้นรุดหน้าเป็นอย่างมาก เนื่องจากภาคอุตสาหกรรมนั้นเป็นส่วนสำคัญอีกส่วนหนึ่งในการขับเคลื่อนเศรษฐกิจของประเทศ ส่งผลให้อุตสาหกรรมด้านต่างๆ เกิดขึ้นมากมายเพื่อตอบสนองความต้องการในปัจจัยด้านต่างๆ ของมนุษย์ ปัญหาที่ตามมา พบว่าความรุดหน้าของอุตสาหกรรมนั้น ส่งผลให้เกิดของเสียอันเนื่องมาจากกระบวนการผลิตมากขึ้นตามไปด้วย ซึ่งปัญหาดังกล่าวล้วนส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของประเทศเป็นอย่างมาก ดังนั้นปัจจุบันจึงมีการส่งเสริมให้มีการนำกลับมาใช้ใหม่ของของที่อาจพิจารณาว่าเป็นของเสียจากกระบวนการหนึ่งเพื่อนำไปใช้เป็นวัตถุดิบเริ่มต้นของอีกกระบวนการหนึ่ง

อุตสาหกรรมการผลิตกระเบื้องเป็นอุตสาหกรรมหนึ่งที่สำคัญในประเทศไทย เนื่องมาจากโดยพื้นฐานแล้วแทบทุกครัวเรือนต่างก็มีความจำเป็นในการนำมาใช้งานทั้งสิ้น อีกทั้งยังเป็นที่ต้องการของตลาดในปัจจุบันที่นิยมใช้กระเบื้องในงานที่หลากหลายมากยิ่งขึ้น และอุตสาหกรรมนี้ยังเป็นอุตสาหกรรมที่มีต้นทุนการผลิตสูง ทั้งในด้านวัตถุดิบของส่วนผสมในการผลิต เครื่องมือในการขึ้นรูปในกระบวนการผลิต จากแนวทางในการต้องการลดปัญหาที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ด้วยการลดขยะจากการนำกลับมาใช้ใหม่ และพยายามรวมถึงต้นทุนทางด้านพลังงานในการเผาผลิตภัณฑ์ แต่อุตสาหกรรมนี้ก็ยังคงทำรายได้ให้กับประเทศไทยเป็นจำนวนมาก โดยการผลิตจะนำส่วนผสมต่างๆ มาทำการผสมเพื่อลดอุณหภูมิในการเผากระเบื้อง จึงเลือกผลิตภัณฑ์แก้วมาปรับปรุงในส่วนผสมของกระเบื้อง ซึ่งแก้วเป็นวัสดุที่นิยมใช้ในงานอุตสาหกรรม เพื่อผลิตเป็นบรรจุภัณฑ์ของสินค้าหลากชนิด เช่น เครื่องดื่มชูกำลัง เครื่องดื่มแอลกอฮอล์ เป็นต้น ในประเทศไทยมีเศษแก้วเหลือทิ้งเป็นจำนวนมาก ซึ่งเป็นปัญหาทางมลภาวะที่สำคัญของประเทศ หากสามารถนำเศษแก้วเหลือทิ้งกลับมาใช้ใหม่ จะเป็นการลดปริมาณขยะลงได้ เนื่องจากเศษแก้วมีองค์ประกอบหลักทางเคมี คือ แคลเซียม โซเดียม และซิลิกา ซึ่งใกล้เคียงกับวัตถุดิบที่ใช้ในงานเซรามิก ซึ่งเป็นอุตสาหกรรมที่มีการใช้ต้นทุนในการผลิตเป็นจำนวนมาก ไม่ว่าจะเป็นวัตถุดิบ หรือพลังงานในการเผาผลิตภัณฑ์ ดังที่กล่าวว่าแก้วเป็นวัตถุดิบที่มีศักยภาพในการนำกลับมาใช้ในการผลิตเซรามิก แต่ในปัจจุบันมีการนำเศษแก้วมาใช้ในงานตกแต่งหรือผลิตน้ำยาเคลือบเซรามิก แต่ยังไม่มีการใช้เศษแก้วในเนื้อดินเพื่อผลิตกระเบื้องเป็นที่แพร่หลาย

ดังนั้นในการทำโครงงานครั้งนี้จึงศึกษาผลของเศษแก้วในเนื้อดิน เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาการใช้ประโยชน์จากเศษแก้วในการปรับปรุงสมบัติของกระเบื้องดินเซรามิก หรือช่วยลดอุณหภูมิในกระบวนการเผาอีกด้วย

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงงาน

1.2.1 ศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมของเศษแก้วเหลือทิ้งผสมกับดิน ที่สามารถลดอุณหภูมิการเผากระเบื้องดินเซรามิก

1.2.2 ศึกษาผลของอัตราส่วนของเศษแก้วเหลือทิ้งผสมกับดิน ณ อุณหภูมิเผาที่ 900, 1000, 1100 และ 1200 องศาเซลเซียส ที่มีผลต่อสมบัติทางกายภาพ และทางกลของกระเบื้องดินเซรามิก

1.3 เกณฑ์ชี้วัดผลงาน (Output)

ผลของอุณหภูมิในการเผา สมบัติทางกายภาพ และทางกลของกระเบื้องดินเซรามิกที่ขึ้นรูปด้วยวิธีอัด

1.4 เกณฑ์ชี้วัดผลสำเร็จ (Outcome)

อัตราส่วนผสมของเศษแก้วเหลือทิ้งที่มีผลต่ออุณหภูมิในการเผา สมบัติทางกายภาพ และทางกล

1.5 ขอบเขตในการดำเนินโครงงาน

1.5.1 ใช้ดินดำจากจังหวัดสุราษฎร์ธานี และดินขาวจากจังหวัดระนอง

1.5.2 ใช้เศษแก้วสีชา

1.5.3 ศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมในการทำกระเบื้องดินเซรามิก โดยใช้ดินดำจังหวัดสุราษฎร์ธานีต่อเศษแก้วสีชา ในอัตราส่วน 100 : 0, 80 : 20, 70 : 30, 60 : 40, 50 : 50 และ 40 : 60 ตามลำดับ และใช้ดินขาวจังหวัดระนองต่อเศษแก้วสีชา ในอัตราส่วน 100 : 0, 80 : 20, 70 : 30, 60 : 40, 50 : 50 และ 40 : 60 ตามลำดับ

1.5.4 อุณหภูมิการเผากระเบื้องดินเซรามิก ได้แก่ 900, 1000, 1100 และ 1200 องศาเซลเซียส

1.5.5 ศึกษาสมบัติทางกายภาพ ได้แก่ สีของกระเบื้องหลังเผา ค่าความหนาแน่น ค่าร้อยละการดูดซึมน้ำ ค่าการหดตัวหลังเผา และค่ากำลังรับแรงดัด

1.5.6 น้ำใช้น้ำประปา

1.6 สถานที่ในการดำเนินโครงงาน

1.6.1 อาคารปฏิบัติการ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

1.6.2 อาคารปฏิบัติการ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

1.6.3 หอสมุด มหาวิทยาลัยนเรศวร

1.6.4 สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์ และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย

1.7 ระยะเวลาในการดำเนินโครงงาน

สิงหาคม 2553 – เมษายน 2554

1.8 ขั้นตอน และแผนการดำเนินโครงงาน

ตารางที่ 1.1 ขั้นตอนการวิจัยดำเนินงาน

ลำดับ	การดำเนินงาน	2553					2554			
		ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.
1	รวบรวมเอกสาร และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	←	→							
2	2.1 เก็บรวบรวมขวดเบียร์สีชา แล้วนำไปทุบด้วยค้อนให้เป็นเศษแก้ว แล้วนำมาบดด้วยเครื่องบดละเอียด และนำเศษแก้วบดละเอียดไปร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 200 เมช 2.2 นำดินเป็นก้อนมาบดให้ละเอียด		←	→						

ตารางที่ 1.1 (ต่อ) ขั้นตอนการวิจัยดำเนินงาน

ลำดับ	การดำเนินงาน	2553					2554			
		ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.
3	3.1 บดเปียกส่วนผสม นำส่วนผสมที่ผ่านการบดเปียกมาอบเผื่อไล่ความชื้นแล้วทำการบดแห้ง 3.2 นำส่วนผสมที่ผ่านการบดแห้งแล้วมาร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 50 เมช				←	→				
4	4.1 นำวัตถุดิบไปขึ้นรูปเป็นแผ่นกระเบื้องขนาด 25.75 x 152.75 x 35 ลูกบาศก์มิลลิเมตร 4.2 ทำการเผาที่อุณหภูมิ 900, 1000, 1100 และ 1200 องศาเซลเซียส ตามลำดับ 4.3 ทำการทดสอบสีกระเบื้องหลังเผา ค่าความหนาแน่น ค่าร้อยละการดูด-ซึมน้ำ ค่าการหดตัวหลังเผา และค่ากำลังรับแรงดัด						←		→	

ตารางที่ 1.1 (ต่อ) ขั้นตอนการวิจัยดำเนินงาน

ลำดับ	การดำเนินงาน	2553					2554			
		ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.
5	วิเคราะห์ สรุปผล และจัดทำรูปเล่ม									⟷

บทที่ 2
หลักการ และทฤษฎีเบื้องต้น

2.1 กระเบื้องเซรามิก

กระเบื้องดินเซรามิก หมายถึง ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการอัด (Pressing) หรืออัดรีด (Extrusion) ดิน และส่วนผสมอื่น เช่น หิน ทราย สี เป็นต้น แล้วเผาที่อุณหภูมิไม่น้อยกว่า 1000 องศาเซลเซียส จนเนื้อกระเบื้องแข็งแกร่ง มีอัตราดูดซึมน้ำค่อนข้างต่ำ สามารถทนต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิโดยฉับพลัน มีลักษณะเป็นแผ่น มีสี และรูปร่างใดๆ ก็ได้ มีทั้งประเภทเคลือบ และไม่เคลือบ (ปาร์ย, 2548)

2.2 ชนิดของกระเบื้องเซรามิก

2.2.1 กระเบื้องบุผนัง

กระเบื้องประเภทนี้จะออกแบบให้นำไปใช้สำหรับการบุผนังเท่านั้น เพราะสีเคลือบตัวเนื้อกระเบื้องจะมีความแข็งแกร่งไม่มากนัก แต่ก็มีความแข็งแรงเพียงพอกับการนำไปใช้งาน เนื่องจากการนำไปบุผนังไม่ต้องรับน้ำหนักมาก หรือรองรับแรงเสียดสีจากการใช้งานเหมือนกระเบื้องปูพื้น กระเบื้องบุผนังจึงเน้นด้านความสวยงามเป็นหลัก ผิวหน้าจะมีความมันวาว และมีการพิมพ์ลวดลายหรือเล่นลวดลายให้สีเคลือบเกิดความสวยงาม การเผากระเบื้องชนิดนี้ ส่วนใหญ่จะเป็นการเผา 2 ครั้ง ลักษณะที่โดดเด่นคือ มีการดูดซึมน้ำประมาณร้อยละ 14-16 และขนาดเท่ากันเกือบทุกแผ่น ฉะนั้นในปัจจุบันจึงมีการผลิตกระเบื้องบุผนังที่เผาครั้งเดียว เพื่อประหยัดเงินลงทุน และเป็นการลดต้นทุนการผลิตด้วย โดยที่คุณภาพยังดีเหมือนเดิมทุกประการ ขนาดสำหรับกระเบื้องบุผนังจะมีทั้งสี่เหลี่ยมจัตุรัสหรือสี่เหลี่ยมผืนผ้า ขนาดที่ผลิตกัน ได้แก่ 41/4 x 41/4 ตารางนิ้ว, 4 x 8 ตารางนิ้ว, 8 x 8 ตารางนิ้ว, 8 x 12 ตารางนิ้ว และ 12 x 12 ตารางนิ้ว เป็นต้น

2.2.2 กระเบื้องปูพื้น

กระเบื้องปูพื้นเป็นกระเบื้องที่ได้รับการออกแบบเพื่อนำมาใช้กับงานปูพื้นอาคาร หรือทางเดินสาธารณะ ลักษณะของกระเบื้องปูพื้นจึงมักจะต้องมีผิวหน้าของสีเคลือบด้าน หรือขรุขระเล็กน้อย เพื่อป้องกันมิให้เกิดการลื่นไถลเวลาเดิน ขณะเดียวกันตัวกระเบื้องจะต้องมีความแข็งแกร่งเพราะพื้นอาคารจะต้องมีการรับน้ำหนักจากการวางสิ่งของ หรือมีของแข็งตกกระแทกพื้น นอกจากนั้นผิวเคลือบจะต้องทนแรงเสียดสีจากการใช้งานได้สูง ทำให้อายุการใช้งานยาวนาน ดังนั้นกระเบื้องปูพื้นโดยทั่วไปจะต้องมีการดูดซึมน้ำต่ำระหว่างร้อยละ 0-6 ขึ้นอยู่กับชั้นคุณภาพของกระเบื้องที่ได้กำหนดไว้ในมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม ขนาดที่นิยมผลิตกันคือ 1 x 6 ตารางนิ้ว, 4 x 8 ตารางนิ้ว, 8 x 8 ตารางนิ้ว, 12 x 12 ตารางนิ้ว, 16 x 16 ตารางนิ้ว และ 20 x 20 ตารางนิ้ว

ที่กล่าวมาข้างต้นนี้เป็นกระเบื้องปูพื้นชนิดเคลือบ เรายังมีกระเบื้องปูพื้นชนิดไม่เคลือบ แต่ก็สามารถให้สีสันเหมือนชนิดเคลือบ รวมทั้งสามารถผลิตให้มีสีสันคล้ายกับลายหินอ่อน หรือลายหินแกรนิตธรรมชาติ กระเบื้องปูพื้นชนิดไม่เคลือบนี้ แม้ว่าจะไม่ได้เคลือบสีให้ผิวหน้ามันวาวแต่ก็สามารถทำให้ผิวหน้ามันวาวได้ โดยใช้เทคโนโลยีในการขัด ขัดผิวหน้าให้มันวาวได้ด้วยเครื่องขัดผิวเหมือนกับสารขัดผิวหินอ่อน และหินแกรนิตธรรมชาติขนาดที่ผลิตจะเหมือนกับกระเบื้องปูพื้นชนิดเคลือบสี

2.2.3 กระเบื้องโมเสก

กระเบื้องโมเสก หมายถึง กระเบื้องปูพื้นแผ่นเล็กๆ ตั้งแต่ขนาด 4 x 4 ตารางนิ้ว ลงมาจนถึงขนาด 3/4 x 3/4 ตารางนิ้ว ลักษณะสำคัญของกระเบื้องโมเสกคือ จะมีการดูดซึมน้ำต่ำกว่าร้อยละ 1 ลงมา และจะต้องนำกระเบื้องแผ่นเล็กๆ นี้มาเรียงกันเป็นแผงบนตาข่ายพลาสติก และติดด้วยกาวที่ด้านหลังของกระเบื้องขนาดของแผงโมเสกจะโตประมาณ 1 ตารางฟุต บางครั้งการเรียงติดกระเบื้องโมเสกเป็นแผงจะใช้กระดาษกาวทับลงไปบนหน้ากระเบื้อง การนำกระเบื้องโมเสกไปติดตั้งไม่ว่าชนิดที่ติดด้วย ตาข่ายพลาสติก หรือกระดาษ จะต้องนำไปติดทั้งแผงคือ 1 ตารางฟุต ถ้าเป็นตาข่ายจะวางทับลงบนกาวซีเมนต์ หากเป็นกระดาษเมื่อติดตั้งเสร็จแล้ว จะต้องลอกเอากระดาษออกเพื่อให้เห็นสีสันของกระเบื้องโดยลักษณะของโมเสกที่มีการดูดซึมน้ำต่ำ และมีความแข็งแกร่งสูงจะสามารถนำไปใช้ ปูพื้น บุผนังภายใน หรือภายนอกอาคารได้โดยไม่มีปัญหา ทนต่อการใช้งานได้ทุกสภาพอากาศ ขนาดที่นิยมผลิตกันก็คือ 1 x 1 ตารางนิ้ว, 2 x 2 ตารางนิ้ว, 3 x 3 ตารางนิ้ว, 4 x 4 ตารางนิ้ว, 3/4 x 3/4 ตารางนิ้ว และ 21/4 x 21/4 ตารางนิ้ว

2.2.4 กระเบื้องบุผนังภายนอกอาคาร

กระเบื้องบุผนังภายนอกอาคาร หมายถึง กระเบื้องปูพื้น หรือกระเบื้องโมเสกนั่นเองเพียงแต่นำไปติดตั้งภายนอกอาคารแทนการทาสี เพราะมีความคงทนต่อสภาพแวดล้อมมากกว่าสีที่ใช้ทา อีกทั้งไม่เกิดการหลุดล่อนเมื่อใช้งานไประยะเวลาหนึ่ง กระเบื้องบุผนังภายนอกอาคารมีลักษณะพิเศษแตกต่างกับกระเบื้องปูพื้นโดยทั่วไปคือ จะต้องมีการดูดซึมน้ำต่ำกว่าร้อยละ 2 ลงมา เพื่อป้องกันมิให้สีเคลือบหลุดล่อนจากตัวกระเบื้อง เนื่องจากกระเบื้องจะถูกแดด และถูกฝน เกิดอาการร้อน และเย็นตลอดเวลา ถ้าหากกระเบื้องมีการดูดซึมตัวสูง ตัวกระเบื้องจะดูดน้ำเข้าไปได้มาก เมื่อกระเบื้องได้รับความร้อนจากแสงแดดจะทำให้เกิดการขยายตัว และเวลากลางคืนก็จะยุบหดตัวก่อให้เกิดแรงเครียดขึ้นที่รอยต่อระหว่างสีเคลือบกับตัวกระเบื้อง ปฏิกิริยาอันนี้เมื่อเกิดซ้ำๆ กันเป็นเวลาหลายๆ ปี จะมีผลให้สีเคลือบหลุดล่อนออกมาได้ลักษณะพิเศษอีกประการหนึ่งของกระเบื้องบุผนังภายนอกอาคาร ก็คือ ด้านหลังกระเบื้องไม่ว่าจะเป็นโมเสก หรือกระเบื้องปูพื้นจะต้องออกแบบให้เป็นลิ่ม เพื่อให้สามารถยึดเกาะติดกับผนังอาคารให้มั่นคงไม่หลุดออกได้ง่าย เพราะอาจเกิดอันตรายกับผู้ที่สัญจรผ่านอาคารสูงได้

2.2.5 กระเบื้องหลังคา

กระเบื้องหลังคาเซรามิกเป็นกระเบื้องหลังคาดินเผา ที่มักจะพบเห็นกันอยู่ทั่วไปตามหลังคาโบสถ์ หรือวัด ซึ่งจะมีชนิดที่เคลือบสี และไม่เคลือบสี รูปแบบที่ผลิตใช้กันอาจจะเป็นรูปกาบกล้วย หรือเป็นลอน สำหรับกระเบื้องหลังคาเซรามิกที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบันจะมีผลิตในลักษณะอุตสาหกรรมในครัวเรือน หรือโรงงานเล็กๆ การผลิตไม่ได้มาตรฐาน กระเบื้องหลังคาที่นำมาใช้มุงในประเทศไทยจะต้องออกแบบตัวกระเบื้องให้มีล่องดักน้ำฝนเพื่อมิให้น้ำฝนย้อนหลัง ซึ่งจะทำให้น้ำรั่วเข้าไปในอาคารได้ ประการสำคัญกระเบื้องจะต้องไม่บิดเบี้ยวซึ่งจะเป็นต้นเหตุให้เกิดน้ำรั่ววิธีการที่จะป้องกันมิให้เกิดการรั่วซึมในการใช้กระเบื้องเซรามิกมุงหลังคาคือ จะต้องมีการมุงหลังคากันฝนไว้ก่อน (Sub-Roof) เนื่องจากบ้านเรามีพายุฝนที่ค่อนข้างรุนแรงมาก หลังจากนั้นค่อยนำกระเบื้องเซรามิกมามุงทับให้เกิดความสวยงามอีกครั้งหนึ่ง (The Thai Ceramic Society, 2538)

2.3 วัตถุดิบในการผลิตกระเบื้องเซรามิก

ดินเป็นวัตถุดิบที่สำคัญในกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์เซรามิกที่มีความเหนียว เมื่อโดนน้ำจะจับตัวเป็นก้อน สามารถนำมาปั้นเป็นรูปร่างต่างๆ ได้ง่าย ความเหนียว และสีของดิน มีลักษณะแตกต่างกันไป ทั้งในด้านโครงสร้างผลึกของดิน และสมบัติภายหลังการเผา เช่น สี การหดตัว ความแข็งแกร่งและความทนไฟ ซึ่งในการผลิตเซรามิก นอกจากดินแล้วยังมีวัตถุดิบในการนำมาเป็นส่วนประกอบในการผลิตผลิตภัณฑ์เซรามิกอีก เช่น เศษแก้ว ทรายแก้ว เฟลสปาร์ ซึ่งเป็นวัตถุดิบที่ทำหน้าที่เป็นตัวหลอมละลายลดอุณหภูมิในการเผา

2.3.1 ดินดำ

ดินดำ หรือดินเหนียวขาว เกิดจากการสะสมตัวโดยการตกตะกอนในสภาวะที่มีอินทรีย์สารอยู่มาก ดินดำเป็นดินที่มีขนาดผลึกเม็ดละเอียดมาก อนุภาคของดินยึดเกาะกันได้ดี มีอินทรีย์สารที่มีโครงสร้างคล้ายกับที่พบในถ่านหินลิกไนท์เจือปนอยู่ จึงช่วยให้ดินชนิดนี้มีความเหนียว และทำให้มีสีเปลี่ยนไปจากสีขาวกลายเป็นสีเทาจนถึงสีดำ

ดินดำที่มีเนื้อละเอียด หลังการเผาเป็นสีขาว และมีความทนไฟ 1300 องศาเซลเซียส โดยไม่บิดเบี้ยวมักเป็นดินที่มีคุณภาพดี นิยมนำมาใช้ผสมในผลิตภัณฑ์สีขาว เช่น พอร์ซเลน โบนไชน่า และไวท์เอิร์ธเธินแวร์ ส่วนดินดำทั่วไปที่มีคุณภาพปานกลาง มีทรายเจือปนอยู่ค่อนข้างมาก ใช้ทำเนื้อดินขึ้นรูปด้วยแป้นหมุน ทำท่อน้ำดินเผา หรือผสมในเนื้อดินทำกระเบื้องปูพื้น

ชื่อเรียกดินดำว่า บอลเคลย์ (Ball Clay) ได้มาจากวิธีขุดดินจากเหมืองในประเทศอังกฤษ เพื่อสะดวกในการลำเลียง และการขนส่ง ดินดำถูกตัดเป็นก้อนสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ มีน้ำหนักโดยประมาณก้อนละ 30-35 ปอนด์ (13-15 กิโลกรัม) เมื่อลำเลียงขึ้นรถคนงานจะใช้วิธีโยนรับส่งทีละก้อนแบบโยนลูกบอล (ลูกแตงโม) ส่งต่อกัน ซึ่งการขนถ่ายลงจากรถก็ใช้วิธีเดียวกัน ดินเหนียวจึงถูก

ขนานนามว่า บอลเคลย์ (Ball Clay) แต่ถ้าจะแปลตามศัพท์แล้ว ควรจะเรียกดินเหนียวว่า พลาสติกเคลย์ (Plastic Clay) ซึ่งแปลว่า ดินที่มีความเหนียว

2.3.1.1 ส่วนประกอบทางเคมีของดินดำ (Chemical Properties of Ball Clay)

ก. ในดินดำประกอบด้วย แร่เกาลินไนท์เป็นส่วนใหญ่ เช่นเดียวกับดินขาว แต่เป็นผลึกเกาลินไนท์ชนิดไม่สมบูรณ์ (Disordered Kaolinite) ในระหว่างผลึกมีแร่ธาตุ และอินทรีย์สารแทรกอยู่

ข. ส่วนประกอบทางเคมี โดยประมาณจะมีซิลิการ้อยละ 40-60 อะลูมินาร้อยละ 30 น้ำ และอินทรีย์สารประมาณร้อยละ 10 นอกจากนี้ยังมีแร่ธาตุอื่นๆ ปะปนอยู่ในดินด้วย เช่น ไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) เหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3) แคลเซียมออกไซด์ (CaO) แมกนีเซียม-ออกไซด์ (MgO) เหล็กซัลเฟต (FeS) โพแทสเซียมออกไซด์ (K_2O) และโซดียมออกไซด์ (Na_2O) เป็นต้น

2.3.1.2 สูตรเคมีของดินดำ

ก. ดินดำทั่วไป $Al_2O_3 \cdot 4\ SiO_2 \cdot 2\ H_2O \cdot 0.1\ K_2O$ (มีอะลูมินาร้อยละ 20 - 25 ตามผลวิเคราะห์ทางเคมี)

ข. ดินดำ-ดินเหนียวอุตสาหกรรม $Al_2O_3 \cdot 2\ SiO_2 \cdot 2\ H_2O \cdot 0.1\ K_2O$ (มีอะลูมินาร้อยละ 30-38 ตามผลวิเคราะห์ทางเคมี)

ค. ดินดำปนทราย $Al_2O_3 \cdot 9\ SiO_2 \cdot 2\ H_2O \cdot 0.2\ K_2O$ (มีซิลิการ้อยละ 60 - 80 ตามผลวิเคราะห์ทางเคมี)

2.3.1.3 สมบัติทางกายภาพของดินดำ (Physical Properties of Ball Clay)

ก. ขนาดของดินเหนียว จะมีผลึกละเอียดมากน้อยเพียงใด เปลี่ยนแปลงไปตามแหล่งที่พบเมื่อถูกพัดพาไปไกลจากแหล่งเดิมมากขนาดเม็ดอนุภาคจะละเอียดมากขึ้น ตามลำดับขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 0.05-1.00 ไมโครเมตร (μm)

ข. ความเหนียว (Plasticity) ดินเหนียวเป็นดินที่อมน้ำได้มาก ความเหนียวจะมาก หรือน้อยขึ้นอยู่กับชนิดของดิน ซึ่งประกอบด้วยหลักสำคัญคือ ปริมาณของอินทรีย์สาร ขนาดของเม็ดดิน และวัตถุดิบที่ให้ความเหนียว เช่น ดินเบนโตไนท์

ค. การหดตัวเมื่อแห้ง (Drying Shrinkage) ดินเหนียวที่มีทรายปนอยู่สูงแทบไม่มีการหดตัวเลย แต่ดินเหนียวที่มีอินทรีย์สารสูงจะมีการหดตัวมาก ประมาณร้อยละ 13-17

ง. การหดตัวหลังเผา (Firing Shrinkage) มีการหดตัวสูงประมาณร้อยละ 15 เนื่องจากดินเหนียวมีขนาดอนุภาคที่เล็กมาก

จ. ความแข็งแรงของดินเมื่อแห้งก่อนเผา (Green Strength) ดินเหนียวความแข็งแรงสูง ประมาณ 100-1000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว

ฉ. มีแร่ธาตุพวกด่าง และไมกาในดิน ทำหน้าที่เป็นตัวหลอมละลาย ช่วยลดอุณหภูมิในการเผา

ช. สีหลังเผา เป็นสีขาวนวลถึงครีม

2.3.1.4 แหล่งดินดำในประเทศไทย

ก. ดินดำแม่หยวก อ.เมือง จ.เชียงใหม่

ข. ดินดำ อ.พาน จ.เชียงราย

ค. ดินเหนียวแม่ทาน อ.แม่ทะ จ.ลำปาง

ง. ดินเหนียวแจ้คอน อ.แจ้ห่ม จ.ลำปาง

จ. ดินดำปากพลี จ.ปราจีนบุรี

ฉ. ดินดำบ้านนาสาร และพลุพลี จ.สุราษฎร์ธานี

2.3.1.5 ประโยชน์ของดินดำ (Ball Clay)

ดินดำใช้กันมากในอุตสาหกรรมถ้วยชาม และสุขภัณฑ์ โดยนำไปผสมกับดินขาว ประโยชน์ของดินดำได้แก่

ก. ช่วยเพิ่มความเหนียวของผลิตภัณฑ์ ทำให้เนื้อดินปั้นขึ้นรูปได้ดี ผสมในเนื้อดินอัตราส่วนร้อยละ 20-50 โดยน้ำหนัก

ข. ทำให้ผลิตภัณฑ์มีความแข็งแรงก่อนเผา (Green Strength) ลดการสูญเสียจากการแตกหักก่อนเผาในขณะที่เคลื่อนย้าย ผลิตภัณฑ์ไม่เปราะ หรือแตกหักง่าย

ค. ทำให้น้ำดินหล่อที่ใช้ในการเทแบบไหลตัวดี

ง. ทำหน้าที่เสริมปฏิกิริยาระหว่างมวลสารในระหว่างการเผา ทำให้ดินสุกตัวได้เร็ว ประหยัดเวลาในการเผา ช่วยในการหลอมละลาย

2.3.2 ดินขาว

ดินขาว หมายถึง ดินที่มีสีขาว หรือสีซีดจาง ทั้งในสภาพที่ยังไม่ได้เผา และเผาแล้ว ดินขาวเป็นดินปฐมภูมิ มีอินทรีย์วัตถุ และออกไซด์ของโลหะต่างๆ อันเป็นตัวทำให้ดินเกิดสีในจำนวนที่ต่ำมาก โดยทั่วไปมีพวกเหล็กออกไซด์ ไลด์ แมกนีเซีย และไททาเนียมออกไซด์อยู่เพียงเล็กน้อย คำว่า เกาลิน มาจากภาษาจีนแปลว่า ภูเขาสูง ซึ่งเป็นแหล่งเกิดของดินขาวในประเทศจีน

ดินขาวที่ขุดขึ้นมา ใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ มีอยู่ 3 ชนิด คือ

- ดินขาวที่มีความบริสุทธิ์ สามารถนำมาใช้ทำผลิตภัณฑ์เครื่องปั้นดินเผาได้
- ดินขาวอีกชนิดหนึ่ง เป็นเกรดของฟิลเลอร์ ที่ใช้ในอุตสาหกรรม กระดาษ ทำสี ยาง ยาฆ่าแมลง ปุ๋ย และอื่นๆ โดยใช้ดินขาวที่มีเนื้อสีขาวบริสุทธิ์ ตามผลวิเคราะห์ทางเคมีแต่ไม่ได้นำไปเผาผ่านความร้อนในกระบวนการผลิต

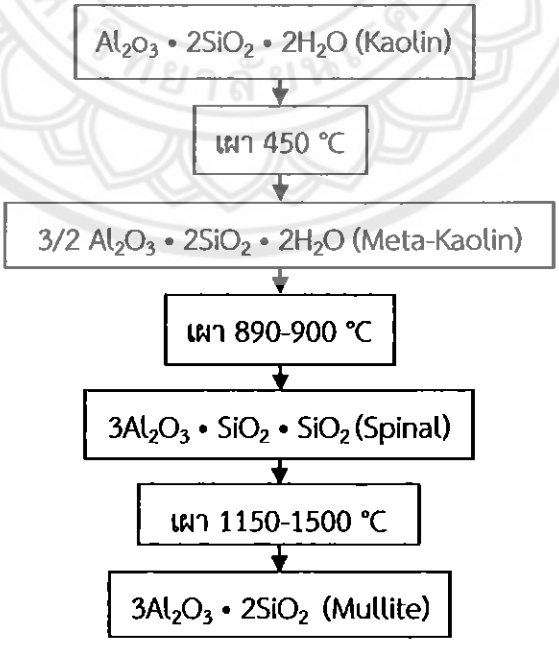
- ดินขาวที่เป็นดินสอพองซึ่งไม่ใช่ดินขาว แต่เป็นปูนขาวชอล์ก (Chalk) หรือแคลเซียม-คาร์บอเนต ($CaCo_3$) เกิดจากผลึกของหินปูนตามธรรมชาติ ที่มีลักษณะเป็นผลึกละเอียดสีขาว บางครั้งเป็นสีอมชมพู และน้ำตาลอ่อน ซึ่งใช้เป็นเนื้อดินปั้นขึ้นรูปไม่ได้ ใช้ผสมทำปูนซีเมนต์

ดินขาวที่มีความบริสุทธิ์สูง เผาแล้วได้สีขาวบริสุทธิ์ นิยมนำมาทำผลิตภัณฑ์พอร์ซเลน โบนไชน่า และผลิตภัณฑ์เซรามิกที่มีเนื้อสีขาวทุกชนิด ดังนั้นสีดินภายหลังการเผาเป็นสิ่งสำคัญมาก ขณะที่โรงงานผลิตกระเบื้องปูพื้น สนใจดินที่มีราคาถูก หดตัวน้อย และมีปริมาณคาร์บอนต่ำ สามารถอัดเป็นแผ่นได้ง่ายโดยไม่บิ่น หรือแตกร้าว สีดินจะเป็นสีเหลืองนวล ไม่เป็นปัญหา ส่วนโรงงานสุขภัณฑ์ที่ขึ้นรูปด้วยการหล่อน้ำดิน จะเลือกใช้ดินคุณภาพดี เพื่อผสมน้ำดินหล่อสำหรับผลิตภัณฑ์ขนาดใหญ่ๆ ให้ถอดพิมพ์ได้ง่าย มีออกไซด์ของเหล็ก และไทเทเนียมอยู่ในปริมาณน้อย

มีดินขาวแหล่งต่างๆ หลายแหล่งในประเทศไทยเช่นที่ เชียงราย ลำปาง อุตรดิตถ์ ปราจีนบุรี ระนอง ชุมพร และนราธิวาส ดินขาวมีหลายเกรดหลายคุณภาพ บางแหล่งไม่สามารถนำมาทำเซรามิกได้ แหล่งดินขาวที่ใช้ทำในอุตสาหกรรมเซรามิก ได้แก่ ดินขาวระนอง ชุมพร และนราธิวาส เป็นดินขาวคุณภาพปานกลาง ซึ่งเป็นแร่เกาลินไนท์ (Medium Ordered Kaolinite) มีความบริสุทธิ์และมีความขาวมากกว่าดินขาวลำปาง

2.3.2.1 สมบัติต่างๆ ของดินขาว (Kaolin)

- สูตรดินขาว $Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$
- ส่วนประกอบร้อยละ 39.5 ร้อยละ 46.5 และร้อยละ 14.0
- สมบัติทางเคมี ดินเกาลินมีปฏิกิริยาแตกตัวในขั้นตอนการเผาดังนี้



รูปที่ 2.1 ปฏิกิริยาของดินขาวเมื่อผ่านอุณหภูมิต่างๆ และการเปลี่ยนแปลงรูปผลึกทางโครงสร้างเคมี

ที่มา: Engineering Ceramics (2546)

2.3.2.2 สมบัติทางกายภาพของดินขาว (Physical Properties of Kaolin)

การศึกษาถึงสมบัติทางกายภาพของดินขาว ทำให้เราสามารถนำดินขาวไปใช้ประโยชน์ได้ สมบัติทางกายภาพของดินขาว ที่ควรศึกษาก่อนนำไปใช้ประโยชน์ในด้านต่างๆ มีดังนี้ คือ

ก. ขนาดของอนุภาค (Particle Size) ขนาดของอนุภาคดินจะมีผลต่อความเหนียว (Plasticity) และการหดตัวของเนื้อดินปั้นเมื่อแห้ง (Drying Shrinkage) ดินเม็ดละเอียดจะให้ความเหนียว และการหดตัวเมื่อแห้งมากกว่าเม็ดหยาบ ดินที่มีเม็ดหยาบจะมีความเหนียวน้อย (Low Plasticity) ดินขาวมีเม็ดหยาบ และความเหนียวน้อย

ข. รูปร่างของอนุภาค (Particle Shape) รูปร่างของแร่เกาลินไนท์ทั่วไปจะเป็นแผ่นหกเหลี่ยม (Hexagonal Plates) มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง ตั้งแต่ 0.05-10.0 ไมครอน

ค. สมบัติในการแลกเปลี่ยนอนุมูล (Base Exchange Capacity) ปกติดินขาวที่บริสุทธิ์ จะไม่มีการแลกเปลี่ยนอนุมูล หรือดูดซับอนุภาค และโมเลกุลอื่นๆ แต่ถ้าไม่บริสุทธิ์ จะเกิดการแลกเปลี่ยนอนุมูล หรือดูดซับเอาผลึกของแร่ที่มีขนาดเล็กไว้ที่ผิวผลึก เกาลินไนท์ที่บริสุทธิ์ มีโครงสร้างผลึกที่แข็งแรง แร่ธาตุ และอินทรีย์สารแทรกเข้าไปในโครงสร้างผลึกไม่ได้ จึงคงความบริสุทธิ์ได้ดี

ง. สมบัติเมื่อแห้ง (Drying Properties) ดินขาวที่บริสุทธิ์จะมีการหดตัวเมื่อแห้ง (Drying Shrinkage) ไม่สูงนัก ดินขาวที่มีเม็ดละเอียดจะมีค่าการหดตัวมากกว่าดินเม็ดหยาบ

จ. ความแข็งแรงของเนื้อดินเมื่อแห้ง (Green Strength) ดินขาวมีความแข็งแรงน้อย เปราะแตกได้ง่ายเมื่อแห้ง เพราะมีความเหนียวน้อย

ฉ. สมบัติหลังจากการเผา (Firing Properties) ดินขาวที่มีคุณภาพดี เผาแล้วควรจะได้สีขาว แต่ถ้าเป็นสีครีม หรือสีน้ำตาลอ่อน แสดงว่ามีแร่ธาตุเจือปนอยู่สูง ดินขาวที่มีการหดตัวเกินร้อยละ 20 หลังการเผาไม่ควรใช้ดินขาวนั้นในเนื้อดินปั้นปริมาณมาก

2.3.2.3 ประโยชน์ของดินขาว

ดินขาวสามารถนำมาใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมเซรามิก และอุตสาหกรรมอื่นๆ ดังนี้

ก. ใช้ทำผลิตภัณฑ์เซรามิก เช่น เครื่องสุขภัณฑ์ เครื่องประดับ เป็นต้น

ข. ทำผลิตภัณฑ์ก่อสร้าง เช่น อิฐก่อสร้าง อิฐปูพื้น กระเบื้อง เป็นต้น

ค. ใช้ทำเป็นเบ้าหลอมในอุตสาหกรรมถลุงเหล็ก และหล่อเหล็ก

ง. ใช้ทำเครื่องกรองน้ำ (Water Filter)

จ. ใช้ในอุตสาหกรรมเกษตร เช่น เป็นส่วนผสมของยาฆ่าแมลง ปุ๋ย เป็นต้น

ฉ. ใช้ในอุตสาหกรรมพรมน้ำมัน ทอผ้า และพลาสติก

ช. ใช้ในอุตสาหกรรมสี โดยใช้ผลิตสีขาว (White Pigment) (Engineering Ceramics, 2546)

2.3.3 แก้ว

"แก้ว" มาจากภาษาอังกฤษว่า "Glass" เป็นวัตถุโปร่งใส เนื้อใสสะอาด มีความเป็นมันแววววาวสุกใส แก้วเป็นสารประกอบของซิลิกากับสารโลหะออกไซด์มีลักษณะโปร่งตา และมีความเปราะในตัวเอง ตาม American Society for the Testing of Materials (ASTM) กล่าวว่า แก้ว คือ วัสดุที่เป็นสารอนินทรีย์ต่างๆ มาเผาให้ถึงจุดละลายที่อุณหภูมิสูง และเมื่อเวลาเย็นตัวลงมาจะกลายเป็นของแข็งโดยไม่ตกผลึก

แก้ว หมายถึง วัสดุแข็งที่มีรูปลักษณะอยู่ตัว และเป็นเนื้อเดียว โดยปกติแล้วเกิดจากการเย็นตัวลงอย่างฉับพลันของวัสดุหลอมหนืด ซึ่งทำให้การแข็งตัวนั้นไม่ก่อผลึก ตัวอย่างเช่น น้ำตาลซึ่งหลอมละลาย และถูกทำให้แข็งตัวอย่างรวดเร็ว อาจด้วยการหยดลงบนผิวเย็น น้ำตาลที่แข็งตัวนี้จะมีลักษณะเป็นเนื้อเดียวไม่แสดงให้เห็นถึงลักษณะที่เป็นผลึก ซึ่งสามารถสังเกตได้จากรอยแตกหักซึ่งมีลักษณะละเอียด (Conchoidal Fracture)

จากคำนิยามดังกล่าวจะเห็นว่าแก้วมีลักษณะที่เหมือนกับเซรามิก คือ

- แก้วประกอบขึ้นจากสารอนินทรีย์เหมือนกัน
- แก้วต้องผ่านการใช้อุณหภูมิสูงจึงทำให้เรามักจะพูดกันว่าแก้วเป็นวัสดุในกลุ่มเดียวกับเซรามิก

แต่สิ่งที่ต่างกันระหว่างแก้วกับเซรามิกก็มีเหมือนกัน นั่นคือ

- แก้วต้องมีการหลอมตัวก่อนที่จะขึ้นรูปในขณะที่เซรามิกต้องขึ้นรูปก่อน
- แก้วจะแข็งตัวโดยไม่มีการตกผลึก

แก้วสามารถที่จะเกิดได้หลากหลายวิธี โดยการที่จะเลือกวัตถุดิบในการผลิต จะต้องมีการคำนวณเพื่อหาปริมาณสารที่ต้องการใช้ใน Batch เนื่องจากสารที่ต้องการใช้ใน Batch จะได้มาจากปฏิกิริยาของวัตถุดิบ โดยในระหว่างการหลอมวัตถุดิบจะเกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมี และโครงสร้าง โดยจะทำให้เกิดฟองอากาศที่ต้องกำจัดออกไป โดยในผลิตภัณฑ์เชิงพาณิชย์ที่ต้องการขึ้นรูปทรงที่เฉพาะ จะทำโดยมีการใช้กระบวนการทางความร้อนเข้าช่วย เพื่อกำจัด Stress ที่เกิดขึ้นเนื่องจากการเย็นตัวลงอย่างรวดเร็ว และการปรับปรุงให้แก้วมีความแข็งแกร่งขึ้นโดยการอบเทมเปอร์ (Temper)

แก้วโดยทั่วไปนั้นทำจาก ซิลิคอนไดออกไซด์ (Silicon Dioxide; SiO_2) ซึ่งอาจอยู่ในรูปของสารประกอบทางเคมีในแร่ควอตซ์ (Quartz) หรือในรูป Polycrystalline ของทรายซิลิกาบริสุทธิ์ มีจุดหลอมเหลวที่ 2000 องศาเซลเซียส (3632 °F) เพื่อความสะดวกในกระบวนการผลิต จะมีการผสมสาร 2 ชนิดลงไปด้วย ชนิดแรกคือ โซดาแอช (Soda Ash) ซึ่งมีองค์ประกอบหลักคือ โซเดียม-คาร์บอเนต (Sodium Carbonate; Na_2CO_3) หรือสารประกอบโปตัสเซียม เช่น โปตัสเซียม-

คาร์บอเนต เพื่อช่วยให้อุณหภูมิในการหลอมเหลวนั้นต่ำลงอยู่ที่ประมาณ 1000 - 1500 องศา-เซลเซียส แต่อย่างไรก็ตามสารนี้จะส่งผลข้างเคียงทำให้แก้วนั้นละลายน้ำได้ จึงต้องมีการเติมสารอีกชนิดคือ หินปูน ซึ่งมีองค์ประกอบหลักคือ แคลเซียมคาร์บอเนต (Calcium Carbonate; $CaCO_3$) (เมื่ออยู่ในเนื้อแก้วจะกลายเป็น Calcium Oxide; CaO) เพื่อทำให้แก้วนั้นไม่ละลายน้ำ

องค์ประกอบของแก้วที่ใช้ทำภาชนะใช้งานโดยทั่วไป เช่น แก้วน้ำ หรือกระจกใส จะมีองค์ประกอบแต่ละตัวโดยประมาณดังนี้

- SiO_2 ร้อยละ 70 โดยน้ำหนัก
- Na_2O ร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก
- CaO ร้อยละ 8 โดยน้ำหนัก

และองค์ประกอบอื่นๆ อีกเล็กน้อย เช่น MgO, Al_2O_3, K_2O เป็นต้น

2.3.3.1 วัตถุดิบในการหลอมแก้ว

องค์ประกอบทางเคมีของแก้วจะมีผลต่อคุณสมบัติของแก้ว ดังต่อไปนี้

ก. SiO_2 แก้วที่มีปริมาณของ SiO_2 สูง จะทำให้แก้วนั้นมีโครงสร้างที่แข็งแรงทนต่อความร้อน และสารเคมี แต่ทำการผลิตได้ยากเนื่องจากต้องใช้การหลอมเหลวที่อุณหภูมิสูงขึ้นและขึ้นรูปได้ยากเนื่องจากมีความหนืดสูง

ข. Na_2O แก้วที่มีปริมาณ Na_2O สูงจะหลอมเหลวที่อุณหภูมิต่ำ เปราะแตกง่าย และไม่ทนต่อสารเคมี ถ้ามีปริมาณ Na_2O สูงมากๆ จะสามารถละลายน้ำได้

ค. K_2O ช่วยให้การตกผลึกเป็นไปอย่างช้าๆ ทำให้การเรียงตัวของผลึกออกมาสวยงาม

ง. CaO, MgO หรือ BaO จะช่วยในการขึ้นรูปทำให้แก้วคงตัว (Set) เร็วขึ้นเมื่อเย็นลง และเพิ่มความทนต่อสารเคมี แก้วที่มีปริมาณ MgO มากกว่า CaO จะทำให้ให้การตกผลึกเป็นไปอย่างช้าๆ ทำให้การเรียงตัวของผลึกออกมาสวยงาม

จ. Al_2O_3 แก้วที่มีปริมาณ Al_2O_3 สูง จะทำให้แก้วนั้นมีความทนทานต่อการสึกกร่อน และสารเคมีได้ดีขึ้น

ฉ. B_2O_3 แก้วที่มีสารประกอบพวก Boron เป็นองค์ประกอบ (Borosilicate) จะมีความคงทนต่อกรด-ด่าง และทนต่อความร้อนเนื่องจากจะทำให้สัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนลดลง แก้วประเภทนี้เป็นแก้วที่ใช้ในอุปกรณ์วิทยาศาสตร์ และเป็นแก้วประเภทที่สามารถใช้ในเตาไมโครเวฟได้

ช. PbO แก้วที่มีตะกั่วเป็นองค์ประกอบ (Lead Glass) เนื้อแก้วใสวาว เนื่องจากมีค่าดัชนีหักเหสูง มีความอ่อน (Soft) ไม่แข็งกระด้าง ง่ายต่อการเจียระไน เวลาเคาะมีเสียงกังวาน

ซ. Fe_2O_3 ช่วยประหยัดเชื้อเพลิงในขณะหลอม แต่จะทำให้เนื้อกระจกใส มีสีค่อนไปทางเขียว

2.3.3.2 ชนิดของแก้ว

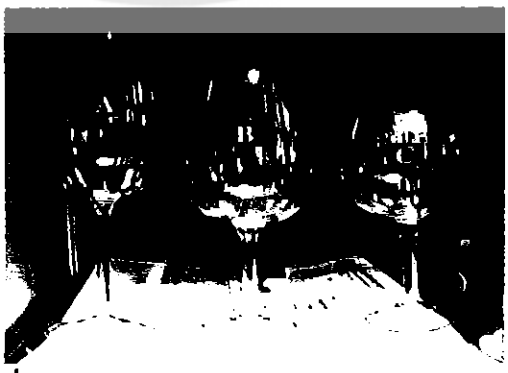
การแบ่งประเภทของแก้ว สามารถแบ่งได้หลายแบบ เช่น แบ่งตามกรรมวิธีการผลิต แบ่งองค์ประกอบทางเคมี หรือแบ่งตามการใช้งาน แต่โดยส่วนใหญ่เรามักจะบอกประเภทของแก้วตามองค์ประกอบได้ดังนี้

ก. แก้วโซดาไลม์ (Soda – Lime Glass) ผลิตจากวัตถุดิบหลักคือ ทราย โซดาแอช หินปูน เป็นแก้วที่พบเห็นได้โดยทั่วไป ได้แก่ แก้วที่เป็นขวด แก้วน้ำ กระจก เป็นต้น สามารถทำให้เกิดสีต่างๆ ได้โดยการเติมออกไซด์ที่มีสีลงไป

รูปที่ 2.2 แก้วโซดาไลม์ (Soda-Lime Glass)

ที่มา: บริการข้อมูลวิทยาศาสตร์ และเทคโนโลยีวัสดุแก้ว (2539)

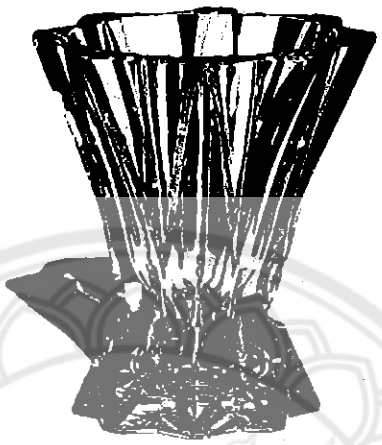
ข. แก้วบอโรซิลิเกต (Borosilicate Glass) หรือ Pyrex เป็นแก้วที่มีการเติมบอริคออกไซด์ลงไป ทำให้มีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนต่ำ และทนต่อการเปลี่ยนแปลงความร้อน แก้วที่ได้สามารถนำไปใช้ทำเครื่องแก้ววิทยาศาสตร์ ทำภาชนะแก้วสำหรับใช้ในเตาไมโครเวฟ เป็นต้น



รูปที่ 2.3 แก้วบอโรซิลิเกต (Borosilicate Glass)

ที่มา: บริการข้อมูลวิทยาศาสตร์ และเทคโนโลยีวัสดุแก้ว (2539)

ค. แก้วตะกั่ว (Lead Glass) หรือแก้วคริสตัล เป็นแก้วที่มีสารผสมของตะกั่วออกไซด์อยู่มากกว่าร้อยละ 24 โดยน้ำหนัก จะเป็นแก้วที่มีดัชนีหักเหสูงมากกว่าแก้วชนิดอื่น ทำให้มีประกายแวววาวสวยงาม และแกะสลักเป็นลวดลายต่างๆ ได้ ใช้ทำเครื่องแก้วที่มีราคาแพง

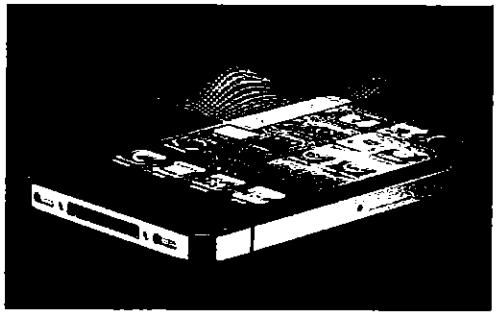


รูปที่ 2.4 แก้วตะกั่ว (Lead Glass)
ที่มา: บริการข้อมูลวิทยาศาสตร์ และเทคโนโลยีวัสดุแก้ว (2539)

ง. แก้วโอปอล (Opal Glass) เป็นแก้วที่มีการเติมสารบางตัว เช่น โซเดียมฟลูออไรด์ หรือแคลเซียมฟลูออไรด์ ทำให้มีการตกผลึก หรือการแยกเฟสขึ้นในเนื้อแก้ว ทำให้แก้วชนิดนี้มีความขุ่น หรือโปร่งแสง เนื่องจากสามารถหลอม และขึ้นรูปได้ง่ายจึงมีต้นทุนการผลิตต่ำ

รูปที่ 2.5 แก้วโอปอล (Opal Glass)
ที่มา: บริการข้อมูลวิทยาศาสตร์ และเทคโนโลยีวัสดุแก้ว (2539)

จ. แก้วอะลูมิโนซิลิเกต (Alumino Silicate Glass) มีอะลูมินา และซิลิกาเป็นส่วนผสมหลัก มีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัว เนื่องจากความร้อนต่ำ และมีจุดอ่อนตัวของแก้ว (Softening Point) สูงพอที่จะป้องกันการเสียรูปทรงเมื่อทำการอบ เพื่อเพิ่มความแข็งแรงให้แก่ผลิตภัณฑ์

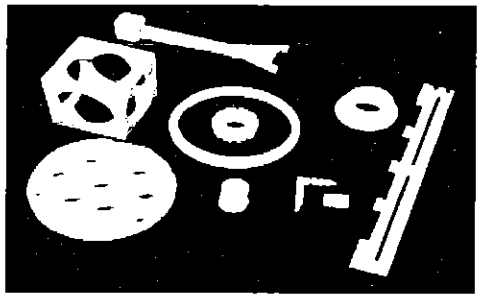


รูปที่ 2.6 แก้วอะลูมิโนซิลิเกต (Alumino Silicate Glass)
ที่มา: บริการข้อมูลวิทยาศาสตร์ และเทคโนโลยีวัสดุแก้ว (2539)

ฉ. แก้วอัลคาไลน์-เอิร์ท อะลูมิโนซิลิเกต (Alkaline-Earth Alumino Silicate) มีส่วนผสมของแคลเซียมออกไซด์ หรือแบเรียมออกไซด์ ทำให้มีค่าดัชนีหักเหใกล้เคียงกับแก้วตะกั่ว แต่ผลิตง่ายกว่า และมีความทนทานต่อกรด และด่างมากกว่าแก้วตะกั่วเล็กน้อย

รูปที่ 2.7 แก้วอัลคาไลน์-เอิร์ท อะลูมิโนซิลิเกต (Alkaline-Earth Alumino Silicate)
ที่มา: บริการข้อมูลวิทยาศาสตร์ และเทคโนโลยีวัสดุแก้ว (2539)

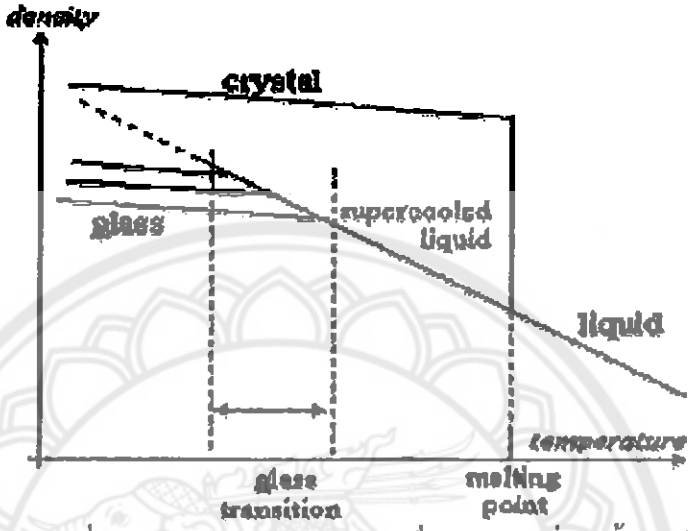
ช. กลาส-เซรามิกส์ (Glass-Ceramics) เป็นแก้วลิเธียมอะลูมิโนซิลิเกตที่มี TiO_2 ผสมอยู่เล็กน้อยซึ่งจะทำให้เกิดผลึกในเนื้อแก้ว และมีสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนต่ำมาก



รูปที่ 2.8 กลาส-เซรามิกส์ (Glass-Ceramics)
ที่มา: บริการข้อมูลวิทยาศาสตร์ และเทคโนโลยีวัสดุแก้ว (2539)

2.3.3.3 สมบัติของวัสดุแก้ว

สมบัติพื้นฐานที่สำคัญของวัสดุอสัณฐาน หรือแก้วคือ Glass Transition Temperature หรือ T_g จึงเป็นสมบัติที่สำคัญอันหนึ่งที่จะบอกว่าวัสดุนั้นเป็นวัสดุอสัณฐาน หรือแก้วหรือไม่



รูปที่ 2.9 การเปลี่ยนแปลงของความหนาแน่นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น เปรียบเทียบกันระหว่างวัสดุแก้วกับผลึก

ที่มา: บริการข้อมูลวิทยาศาสตร์ และเทคโนโลยีวัสดุแก้ว (2539)

จากกราฟการเปลี่ยนแปลงของความหนาแน่นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น เปรียบเทียบกันระหว่างวัสดุแก้วกับผลึกสำหรับผลึกนั้นเมื่อเราเพิ่มอุณหภูมิให้สูงขึ้นจนถึงจุดหนึ่งจะมีการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของมันอย่างรวดเร็ว นั่นคือเกิดการหลอมละลายกลายเป็นของเหลวที่จุดหลอมเหลว หรือ T_m แต่สำหรับแก้วแล้วจะเกิดการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นเพียงเล็กน้อยที่ Glass Transition Temperature หรือ T_g กลายเป็นของเหลวที่มีความหนืดสูงมาก เรียกว่า Supercooled Liquid ก่อนที่จะหลอมเหลวเป็นของเหลวต่อไป เนื่องจากแก้วเกิดจากของเหลวที่ถูกทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็วโดยไม่มีการตกผลึก แก้วจึงมีพฤติกรรมเหมือนของเหลวที่หนืดมาก สามารถเปลี่ยนแปลงรูปร่างไปตามแรงกระทำจากภายนอกได้ แต่ในความเป็นจริงการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นเพียงเล็กน้อย และจะเกิดขึ้นช้ามากจนไม่อาจสังเกตได้ สมบัติของวัสดุแก้วนั้นมักจะขึ้นอยู่กับสารชนิดต่างๆ ที่เป็นองค์ประกอบในแก้ว ทำให้ลักษณะพันธะในแก้วเปลี่ยนแปลงไปซึ่งจะส่งผลไปยังลักษณะทางเคมี และกายภาพของแก้วนั้น

2.3.3.4 การใช้งานในวัสดุแก้ว

วัสดุศาสตร์จะแบ่งชนิดของแก้วตามประเภทของการใช้งาน ดังต่อไปนี้

ก. แก้วในงานก่อสร้าง (Constructions) เช่น กระจกแผ่น กระจกลาย อิฐแก้ว (Glass Brock) เป็นต้น ต้องมีความแข็งแรง ความโปร่งใสสูง สามารถผลิตในปริมาณมากเพื่อให้คุ้มกับการลงทุน

ข. แก้วบรรจุภัณฑ์ (Containers) เช่น ขวด แก้วน้ำ และภาชนะต่างๆ ควรจะมีความทนทานทางกายภาพ และทางเคมีระดับในระดับหนึ่ง และควรสามารถนำกลับมาล้างใช้ได้ใหม่อย่างน้อย 50 ครั้ง

ค. แก้วที่ผ่านการแปรรูป (Specialty Glass) เช่น กระจกนิรภัยชนิดต่างๆ กระจกฉนวน กระจกเสริมลวด เป็นการนำกระจกแผ่นแบบ Float มาอบ ดัด ตัดแต่ง ซึ่งจะทำให้ได้กระจกที่มีรูปร่างตามที่ต้องการ มีความทนทานมากขึ้น กระจกนิรภัยจะช่วยป้องกันอันตรายที่เกิดจากการแตกได้

ง. แก้วในงานทางแสง (Optical Glass) เช่น หลอดไฟ ต้องมีทนต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ และการใช้งานที่อุณหภูมิสูง ทนต่อสภาพดินฟ้าอากาศ ส่วนเลนส์ใยแก้วนำแสงต้องใช้วัตถุดิบที่มีความบริสุทธิ์สูง

แก้วโซดาไลม์ มีองค์ประกอบหลักเป็นซิลิกาประมาณร้อยละ 71-75 โซเดียมออกไซด์ร้อยละ 12-16 แคลเซียมออกไซด์ร้อยละ 10-15 โดยมวล แก้วชนิดนี้ไม่ทนต่อสภาพความเป็นกรด-เบส แตกง่ายเมื่อได้รับความร้อน นอกจากนี้ยังสามารถทำให้แก้วมีสีต่างๆ ได้ โดยการเติมออกไซด์ของสารบางชนิดลงไป เช่น เติมออกไซด์ของแมงกานีสจะได้แก้วสีชา หรือสีน้ำตาล เติมออกไซด์ของคอปเปอร์ หรือโครเมียมจะได้แก้วสีเขียว เติมออกไซด์ของโคบอลต์ได้แก้วสีน้ำเงิน แก้วโซดาไลม์มีราคาถูก หลอมละลายง่าย ถูกใช้ทำขวดน้ำขนาดต่างๆ ทั้งชนิดใส และมีสี ซึ่งเราสามารถพบเห็นได้ทั่วไป และใช้ทำกระจกแผ่น กระจกหน้าต่าง และลูกถ้วยไฟฟ้า สมบัติทางเคมี และกายภาพของแก้วโซดาไลม์ทำให้แก้วชนิดนี้ถูกนำไปใช้อย่างกว้างขวาง และในการทำขวดน้ำ หรือภาชนะที่ทำจากแก้วชนิดนี้ ทำความสะอาดได้ง่าย ภาชนะจากแก้วโซดาไลม์ใส่น้ำ เครื่องดื่ม อาหารโดยรสชาติไม่เปลี่ยนแปลง และไม่มีสิ่งอันตรายใดๆ ปนเปื้อน ปริมาณของอัลคาไลด์ที่สูงมากในแก้วทำให้จุดหลอมเหลวของแก้วลดต่ำลง มีจุดหลอมเหลวประมาณ 650-700 องศาเซลเซียส แต่จะเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน (Thermal Expansion Coefficient; a) ลงประมาณ 20 เท่า จาก ~ 0.5 x 10^{-6} (K^{-1}) ถึง 9 x 10^{-6} (K^{-1}) ซึ่งแก้วโซดาไลม์เป็นแก้วชนิด Soft Glass (แก้วที่มีค่า a ต่ำกว่า 6 x 10^{-6} (K^{-1}) จะเรียกว่า Hard Glass) เพราะมีค่า Thermal Expansion สูง ความต้านทานต่ออุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงอย่างฉับพลันย่อมมีค่าน้อย ดังนั้นต้องดูแลอย่างมากในขณะใช้งาน (บริการข้อมูลวิทยาศาสตร์ และเทคโนโลยีวัสดุแก้ว, 2539)

2.4 การขึ้นรูปผลิตภัณฑ์เซรามิก

การขึ้นรูปผลิตภัณฑ์เซรามิกมีอยู่หลายวิธี ซึ่งแต่ละวิธีมีข้อแตกต่างกัน ทั้งในการเตรียมเนื้อดินปั้น และอุปกรณ์เครื่องมือเครื่องใช้ รวมถึงรูปลักษณะของผลิตภัณฑ์ที่สามารถขึ้นรูปได้ โดยทั่วไปแล้วสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 กลุ่มใหญ่ๆ คือ

2.4.1 การขึ้นรูปโดยอาศัยความเหนียว (Plastic Forming)

เป็นวิธีการขึ้นรูปที่เก่าแก่ที่สุด การเตรียมเนื้อดินปั้นจะกระทำโดยการผสมดินกับวัตถุดิบอื่นๆ และนวดให้เข้ากันดี หรืออาจผสมในรูปของน้ำดินแล้วนำไปกรองให้เป็นแผ่น จากนั้นจึงนำไปขึ้นรูป ซึ่งอาจแบ่งได้เป็นอีกหลายวิธีย่อยๆ เช่น

2.4.1.1 การปั้นด้วยมือ (Hand Forming) เป็นวิธีขึ้นรูปที่อิสระที่สุด ผู้ปั้นจะใช้มือ และอุปกรณ์ต่างๆ เข้าช่วยในการปั้นดินให้เป็นรูปร่างตามต้องการ วิธีนี้สามารถปั้นผลิตภัณฑ์ได้ทุกรูปร่าง แต่มีขนาดไม่แน่นอน และต้องอาศัยใช้เวลา และความชำนาญของผู้ปั้นมาก จึงมักใช้กับงานศิลปะหรืองานหัตถกรรมพื้นบ้านที่ไม่ต้องการกำลังผลิตสูงนัก

2.4.1.2 จิกเกอริ่ง (Jiggering) เป็นวิธีที่ใช้ในอุตสาหกรรม โดยนำแผ่นเนื้อดินมาวางบนแบบปูนปลาสเตอร์ แล้วใช้ใบมีดกรีดให้เนื้อดินได้รูปร่างตามต้องการ ใช้กับผลิตภัณฑ์ที่มีรูปกลม และแบน เช่น จานชนิดต่างๆ เป็นต้น

2.4.1.3 การรีด (Extrude) วิธีนี้จะนำดินมาผ่านเข้าเครื่องรีดให้ออกมาเป็นแท่งยาวๆ ซึ่งมีรูปหน้าตัดตามที่ออกแบบไว้ มักใช้กับผลิตภัณฑ์ที่มีรูปเป็นแท่งยาวๆ เช่น ท่อ (Tube) เป็นต้น

2.4.2 การเทแบบ (Casting)

วิธีนี้จะเตรียมเนื้อดินปั้นให้อยู่ในรูปน้ำดินข้นๆ (Slip) ที่ไหลตัวได้ดี จากนั้นจึงเทลงในแบบปูนปลาสเตอร์ ปูนจะดูดน้ำ และทำให้เนื้อดินเกาะติดกับผนังแบบ ได้เป็นผลิตภัณฑ์ตามต้องการ วิธีนี้สามารถขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ได้หลากหลายรูปทรง แต่ต้องใช้น้ำในการขึ้นรูปมาก ทำให้การหดตัวหลังอบแห้งสูง ซึ่งอาจเกิดการแตก หรือบิดเบี้ยวได้ง่าย

2.4.3 การอัด (Pressing)

วิธีนี้จะเตรียมเนื้อดินปั้นให้อยู่ในรูปของผงกลมๆ ที่ไหลตัวได้ดี จากนั้นจึงนำไปอัดด้วยเครื่องอัดแรงดันสูงเพื่อให้เกาะติดกันเป็นแผ่น วิธีนี้จะใช้น้ำในการขึ้นรูปน้อยที่สุด ทำให้ผลิตภัณฑ์หลังอบแห้ง มีการหดตัวน้อยกว่าวิธีอื่นๆ แต่รูปทรงผลิตภัณฑ์ที่สามารถขึ้นรูปได้จำกัดกว่าตัวอย่างของผลิตภัณฑ์ที่ขึ้นรูปด้วยวิธีนี้ ได้แก่ กระเบื้องชนิดต่างๆ เป็นต้น ซึ่งการขึ้นรูปโดยวิธีอัดใช้แพร่หลายในการผลิตผลิตภัณฑ์วัตถุทนไฟ กระเบื้อง และผลิตภัณฑ์เซรามิกชนิดพิเศษ แรงอัดจะอัดบนแบบที่มีผงเนื้อดินปั้นแห้ง หรือมีความชื้นเล็กน้อยอยู่ภายในแบบ แบบที่ใช้เป็นโลหะแข็ง วิธีการอัดผงเนื้อผลิตภัณฑ์อาจอัดด้วยเครื่องอัดชนิดต่างๆ ซึ่งมีแรงอัดต่างกันไป ในการอัดแผ่นกระเบื้อง หรือ

ผลิตภัณฑ์ใดๆ สิ่งสำคัญคือ จะต้องทำให้ผลิตภัณฑ์มีความหนาแน่นสม่ำเสมอ ถ้าผลิตภัณฑ์มีความหนาแน่นไม่สม่ำเสมอจะเป็นเหตุทำให้ผลิตภัณฑ์โค้งงอ และมีการหดตัวไม่เท่ากัน การอัดผลิตภัณฑ์ขนาดเล็กความหนาแน่นจะสม่ำเสมอมากกว่าผลิตภัณฑ์ขนาดใหญ่ เนื่องจากมีแรงเสียดสีผนังแบบน้อยกว่า (ปรีดา, 2532)

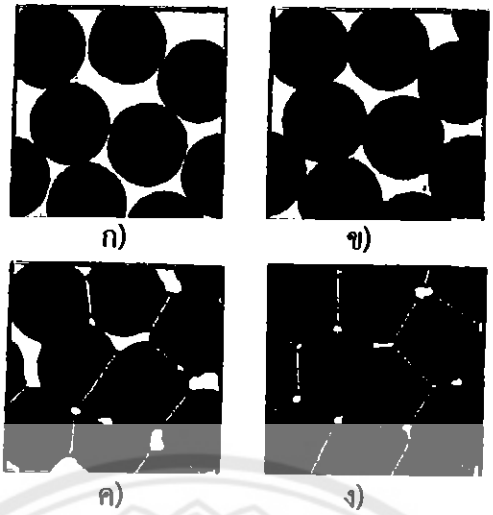
2.5 ผลิตภัณฑ์เซรามิกเมื่อเผาที่อุณหภูมิต่างๆ และการเผาซินเตอร์

100 – 200 องศาเซลเซียส	น้ำที่อยู่รอบๆ อนุภาคดินจะระเหยกลายเป็นไอ
450 องศาเซลเซียส	น้ำในโครงสร้างโมเลกุลเริ่มระเหย
230 – 573 องศาเซลเซียส	ผลึกของซิลิกาของควอทซ์ ขยายตัวเนื่องจากการเปลี่ยนรูปผลึก
500 – 600 องศาเซลเซียส	น้ำในโมเลกุลจะหมดไป และสารอินทรีย์ในดินจะถูกเผาไหม้
825 องศาเซลเซียส	หินปูนจะสลายตัวทำให้เกิดคาร์บอนไดออกไซด์
900 – 950 องศาเซลเซียส	เถ้าถ่านของสารอินทรีย์จะถูกเผาไหม้หมดไป
980 องศาเซลเซียส	โครงสร้างดินหดตัว เนื่องจากการหลอมรวมตัวของวัตถุดิบ
1050 – 1100 องศาเซลเซียส	เฟลด์สปาร์ในเนื้อดินเริ่มหลอมละลาย เกิดโครงสร้างรูปเข็มประสานกันจากผลึกมัลไลท์ในเนื้อดิน ทำให้เนื้อดินแข็งแรง
1200 องศาเซลเซียส	ผลึกมัลไลท์เพิ่มมากขึ้น ดินหลอมละลายปิดรูพรุนทำให้ความแข็งแกร่งเพิ่มขึ้น

การเผาซินเตอร์

กระบวนการซินเตอร์เป็นกระบวนการที่ทำให้ผงสารที่ผ่านการอัดขึ้นรูปเกิดกระบวนการแน่นตัวแล้วกลายเป็นเซรามิกที่มีความแข็งแรงพอที่จะคงรูปร่างที่ได้ทำการขึ้นรูปไว้ได้ ซึ่งจะเป็นกระบวนการที่มีการใช้อุณหภูมิสูง เพื่อให้อะตอมของสารเกิดการแพร่เข้าไปยึดเกาะกันแน่นมากยิ่งขึ้น โดยการใช้พลังงานความร้อนไปกระตุ้นให้อะตอมของสารเกิดการแพร่ (Diffusion) เข้าหากัน ทำให้เกิดจุดสัมผัสระหว่างอนุภาคผงที่อยู่ติดกันมากขึ้น ที่เรียกว่า คอ (Neck) มีความหนาแน่นเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ โดยกระบวนการเผาซินเตอร์ที่เป็นแบบที่มีเพียงสถานะของแข็ง (Solid State Sintering) นั้น จะสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ระยะด้วยกัน คือ

- ระยะแรก (Initial State) เป็นช่วงที่มีการเกิดคอขึ้นมาระหว่างอนุภาคที่อยู่ชิดติดกัน
- ระยะกลาง (Intermediate Stage) เป็นช่วงที่มีการกำจัดโพรงแบบเปิด โดยในระยะกลางนี้คอจะมีขนาดใหญ่ขึ้นทำให้เกิดการเชื่อมต่อกันของอนุภาคผงมากยิ่งขึ้น
- ระยะสุดท้าย (Final Stage) เป็นระยะที่มีการกำจัดโพรงแบบปิด (Closed Pore) ซึ่งจะมีผลให้สารนั้นมีการหดตัว และทำให้มีความหนาแน่นเพิ่มขึ้น



รูปที่ 2.10 กลไกการรวมกันของอนุภาคในระหว่างกระบวนการซินเตอร์

ที่มา: ไพจิตร (2541)

Liquid Phase Sintering

Liquid Phase Sintering คือ การ Sintering ที่เนื้อสาร Sinter บางส่วน หรือทั้งหมดอยู่ในสภาวะของเหลว Liquid Phase Sintering เป็น Sintering Mechanism ที่สำคัญในการ Sinter สารประกอบ Silicate เกือบทุกชนิดดังนั้นผลิตภัณฑ์พวก Conventional Ceramic เกือบทุกชนิด เช่น กระเบื้อง, จาน, ชาม, สุขภัณฑ์ เป็นต้น จึงถูก Sinter ด้วย Mechanism นี้

ขณะการเกิด Liquid Phase Sintering ซึ่งอยู่ระหว่าง Grains จะช่วยให้เกิด Rearrange ของอนุภาคในช่วงต้นของการ Sinter เกิดได้อย่างง่ายดายยิ่งขึ้น ทำให้เนื้อสารเกิด Neck Growth ได้ง่าย ส่งผลให้ Particles ยึดตัวกันได้แน่น

ข้อดีของ Liquid Phase Sintering

ช่วยให้ Sinter ได้เร็วขึ้น ใช้อุณหภูมิต่ำลง แต่กลับได้ Density สูงขึ้น ทำให้ประหยัดเวลา และพลังงาน ทั้งยังช่วย Sinter สารประกอบเซรามิกบางชนิดที่ Sinter ยากๆ $Al_2O_3.ZrO_2$ ให้ Sinter ได้ง่ายขึ้นด้วย อย่างไรก็ตาม Liquid Phase Sintering ก็มีข้อเสียเช่นกัน กล่าวคือการ Sinter แบบนี้จะทำให้เกิด Glassy Grain Boundary ซึ่งไม่มีความทนไฟ และไม่ทน Creep เท่าเนื้อวัสดุส่วนที่เป็น Grains ดังนั้น Liquid Phase Sintering จึงทำให้คุณสมบัติทางกล ความทนไฟ ตลอดจนสมบัติทางไฟฟ้าบางอย่างของ Bulk ทั้งก้อนด้อยลง

สำหรับสารประกอบ Silicate ซิลิเกตเหลวหนืด (Viscous Liquid Silicate) ที่เกิดระหว่าง Sinter จะช่วยเชื่อมยึดประสานให้ Particles ในชิ้นงานเกาะกันเป็นเนื้อเดียว อย่างไรก็ตามเราจะต้องควบคุมอุณหภูมิ และเวลาในการ Sinter ให้เหมาะสมด้วย เพื่อให้ทั้งปริมาณ และความหนืดของ Viscous Liquid อยู่ในช่วงที่เหมาะสม (ไพจิตร, 2541)

2.6 การทดสอบ

2.6.1 การทดสอบกำลังรับแรงดัด

โดยทั่วไปการทดสอบความแข็งประเภทนี้ สามารถทำได้โดยการทดสอบหาค่าความแข็งแรงภายใต้กำลังรับแรงดัดของผลิตภัณฑ์กระเบื้องหลังเผา ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่สำคัญ และเป็นตัวควบคุมคุณภาพอย่างหนึ่ง เพราะมีอิทธิพลต่อการใช้ประโยชน์ของผลิตภัณฑ์ และมีอิทธิพลต่อกรรมวิธีการผลิตผลิตภัณฑ์ ทั้งนี้เพราะผลิตภัณฑ์ดิบที่ไม่แข็งแรงทำให้ลำบากต่อการขนย้าย และการเผาต้องมีความระมัดระวังมาก

วิธีการทดสอบ

เตรียมชิ้นงานหลังเผาที่ผ่านการอัดขึ้นรูป เพื่อนำไปอัดให้หักโดยเครื่องมือทดสอบด้วยแรงกด จนถึงแรงกดที่ทำให้ชิ้นงานนั้นหักแล้วนำไปคำนวณค่าความแข็งแรง

การคำนวณ

ความแข็งแรงภายใต้กำลังรับแรงดัด (Modulus of Rupture; MOR) ได้จากสูตร

$$MOR = \frac{3PL}{2bd^2} \qquad (2.1)$$

เมื่อ P = แรงกดที่ทำให้แผ่นกระเบื้องหัก หน่วย กิโลกรัม
L = ระยะห่างของจุดรองรับ หน่วย เซนติเมตร
b = ความกว้างของแผ่นกระเบื้อง หน่วย เซนติเมตร
d = ความหนาของแผ่นกระเบื้อง หน่วย เซนติเมตร

2.6.2 ความหนาแน่น และร้อยละการดูดซึมน้ำ

ความหนาแน่น เป็นสมบัติเฉพาะของวัสดุแต่ละชนิดที่อาจแปรผันได้ตามปัจจัยต่างๆ เช่น ของไหลจะมีความหนาแน่นเปลี่ยนไปเมื่ออุณหภูมิ และความดันเปลี่ยนแปลงส่วนของแข็งชนิดเดียวกัน จะมีความหนาแน่นต่างกันได้ตามสภาพของโครงสร้าง มลทิน และรูพรุนในเนื้อของวัสดุนั้นๆ ในงานเซรามิกจำเป็นต้องศึกษาเรื่องความหนาแน่นของวัตถุดิบ เนื่องจากความหนาแน่นของวัตถุดิบไม่ว่าจะเป็นวัสดุเซรามิก เช่น ดิน หิน แร่ต่างๆ หรือวัตถุดิบเพื่อการขึ้นรูป ได้แก่ น้ำดิน รวมถึงความหนาแน่นของน้ำเคลือบ ที่ใช้ตกแต่งผลิตภัณฑ์ล้วนมีผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์

วิธีการทดสอบ

- อบชิ้นงานให้แห้ง ชั่งน้ำหนัก บันทึกเป็นค่า D ซึ่งเป็นน้ำหนักชิ้นงานแห้งก่อนต้ม
- ต้มชิ้นงานในน้ำกลั่นให้เดือดนาน 5 ชั่วโมง และแช่ไว้อีกนาน 24 ชั่วโมง
- ชั่งน้ำหนักชิ้นงานในน้ำ บันทึกเป็นค่า S ซึ่งเป็นน้ำหนักชิ้นงานหลังต้มชั่งในน้ำ

- เช็ดผิวชิ้นงาน ชั่งน้ำหนัก บันทึกเป็นค่า W ซึ่งเป็นน้ำหนักชิ้นงานหลังต้มชั่งในอากาศ
- นำค่าจากการทดสอบมาคำนวณตามสูตร

การคำนวณ

- ปริมาตรของชิ้นงาน (Exterior Volume) = $\frac{W-S}{d}$ (2.2)

- ปริมาตรของรูพรุนเปิด (Volume of Open Pores) = $\frac{W-D}{d}$ (2.3)

- ร้อยละของความพรุนตัวปรากฏ (Apparent Porosity) = $\frac{W-D}{V}\times 100$ (2.4)

- ความหนาแน่นของชิ้นงาน (Bulk Density) = $\frac{D}{V}$ (2.5)

- ร้อยละของการดูดซึมน้ำ (Water Absorption) = $\frac{W-D}{D}\times 100$ (2.6)

เมื่อ d หมายถึง ความหนาแน่นของน้ำ (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)
D หมายถึง น้ำหนักชิ้นงานแห้งก่อนต้ม (กรัม)
S หมายถึง น้ำหนักชิ้นงานหลังต้มชั่งในน้ำ (กรัม)
W หมายถึง น้ำหนักชิ้นงานหลังต้มชั่งในอากาศ (กรัม)
V หมายถึง ปริมาตรของชิ้นงาน (ลูกบาศก์เซนติเมตร)

2.6.3 การหดตัว

ผลิตภัณฑ์เซรามิก ส่วนมากมีดินในอัตราส่วนผสมเพื่อให้เกิดความเหนียว **รวมทั้งใช้น้ำเพื่อช่วยเพิ่มความเหนียว ไม่ว่าจะเป็นน้ำดิน ดินเหนียว หรือแม้กระทั่งดินผง ก็จะต้องมีความชื้นมากน้อยแตกต่างกัน เมื่อน้ำที่ใช้เพื่อช่วยสำหรับการขึ้นรูปนี้ระเหยออกจากผลิตภัณฑ์ ทำให้อนุภาคของวัตถุดิบเข้ามาใกล้ชิดกัน เป็นผลให้ขนาดของผลิตภัณฑ์เล็กลง หรือผลิตภัณฑ์หดตัว ดังนั้นผู้ปฏิบัติงานจึงจำเป็นต้องมีความรู้เกี่ยวกับทฤษฎี และปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการแห้งตัว และสามารถทดสอบเพื่อหาค่าการหดตัวได้** (Engineering Ceramics, 2546)

การคำนวณ

2.6.3.1 **การหดตัวเมื่อแห้ง** (Drying Shrinkage) **เป็นการวัดการหดตัว ตั้งแต่หลังขึ้นรูปเสร็จจนแห้งสนิท** (Wet to Dry)

การหดตัวเมื่อแห้งเชิงเส้น (Drying Linear Shrinkage; D.L.S.)

$$\text{ร้อยละการหดตัวเมื่อแห้งเชิงเส้น} = \frac{L_p - L_d}{L_p} \times 100 \qquad (2.7)$$

2.6.3.2 **การหดตัวหลังเผา** (Firing Shrinkage) **เป็นการวัดการหดตัว ตั้งแต่ผลิตภัณฑ์แห้งสนิทจนถึงหลังเผา** (Dry to Fire)

การหดตัวหลังเผาเชิงเส้น (Firing Linear Shrinkage; F.L.S.)

$$\text{ร้อยละการหดตัวหลังเผาเชิงเส้น} = \frac{L_d - L_f}{L_d} \times 100 \qquad (2.8)$$

2.6.3.3 การหดตัวรวม (Total Shrinkage) วัดการหดตัวตั้งแต่หลัง**ขึ้นรูป จนกระทั่งหลังเผา** (Wet to Fire)

การหดตัวรวมเชิงเส้น (Total Linear Shrinkage; T.L.S.)

$$\text{ร้อยละการหดตัวรวมเชิงเส้น} = \frac{L_p - L_f}{L_p} \times 100 \qquad (2.9)$$

เมื่อ L_p หมายถึง ความยาวของแท่งทดสอบหลังขึ้นรูป (เซนติเมตร)

L_d หมายถึง ความยาวของแท่งทดสอบเมื่อแห้ง (เซนติเมตร)

L_f หมายถึง ความยาวของแท่งทดสอบหลังเผา (เซนติเมตร)

2.7 มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม

เพื่อให้ผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมเซรามิกมีคุณภาพ เป็นที่เชื่อถือของผู้บริโภค สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม จึงได้กำหนดมาตรฐานของผลิตภัณฑ์เซรามิกไว้ดังนี้ (สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม, 2529)

1590526
ว5
ท 8134
2553

2.7.1 ขอบข่าย

มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมนี้กำหนด ประเภท ชนิด และชั้นคุณภาพ ขนาด และเกณฑ์ความคลาดเคลื่อน ลักษณะที่ต้องการ การบรรจุเครื่องหมาย และฉลาก การชักตัวอย่าง และการทดสอบกระเบื้องดินเผาปูพื้น และกระเบื้องเสริมประกอบ

2.7.2 บทนิยาม

ความหมายของคำที่ใช้ในมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมนี้ มีดังต่อไปนี้

2.7.2.1 กระเบื้องดินเผาปูพื้น ซึ่งต่อไปในมาตรฐานนี้จะเรียกว่า "กระเบื้อง" หมายถึง ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการอัด (Pressing) ดิน และส่วนผสมอื่น เช่น หิน ทราย สี เป็นต้น แล้วเผาที่อุณหภูมิไม่น้อยกว่า 1000 องศาเซลเซียส มีลักษณะเป็นแผ่น

2.7.2.2 การล่อนตัว (Peeling) หมายถึง การแยกตัวระหว่างเคลือบกับเนื้อกระเบื้อง

2.7.2.3 การราน (Crazing) หมายถึง การเกิดรอยร้าวบนผิวเคลือบ (ดูรูปที่ 2.11)

2.7.2.4 รอยร้าว (Crack) หมายถึง รอยแตกที่ลึกถึงเนื้อกระเบื้อง

2.7.2.5 รูเข็ม (Pinhole) หมายถึง รูเล็กๆ ที่ปรากฏบนผิวเคลือบ (ดูรูปที่ 2.12)

2.7.2.6 รอยพอง (Blister) หมายถึง รอยนูนที่ผิวกระเบื้องซึ่งเกิดจากการขยายตัวของก๊าซ หรือฟองอากาศที่อยู่ภายใน (ดูรูปที่ 2.13)

2.7.2.7 หลุม (Pitting) หมายถึง การเกิดหลุมเล็กๆ ที่ผิวหน้ากระเบื้องซึ่งมีความลึกเท่ากับ หรือน้อยกว่าความกว้าง (ดูรูปที่ 2.14)

2.7.2.8 รอยบิ่น (Chip) หมายถึง รอยตามแนวขอบ หรือตามมุมของกระเบื้องซึ่งเกิดจากเนื้อกระเบื้องแตกหลุดออกไป (ดูรูปที่ 2.15)

2.7.2.9 การหดตัวของเคลือบ (Glaze Crawling) หมายถึง การที่เคลือบหดตัวจนเนื้อของกระเบื้องบางส่วนไม่มีเคลือบฉาบอยู่ (ดูรูปที่ 2.16)

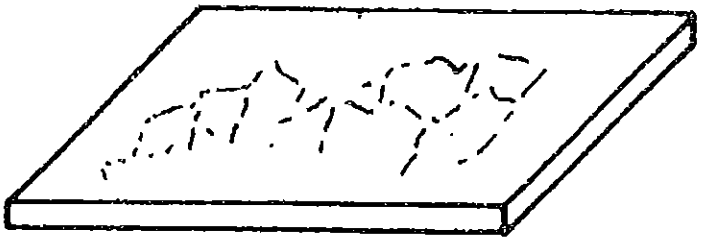
2.7.2.10 ความบิดเบี้ยว (Warpage) หมายถึง ความบิดเบี้ยวจากรูปร่างของกระเบื้องที่กำหนดเนื่องจากกรรมวิธีผลิต

2.7.2.11 โค้งออก หมายถึง ความบิดเบี้ยวในลักษณะที่ส่วนกลางของขอบกระเบื้องโค้งออก (ดูรูปที่ 2.17)

2.7.2.12 เว้าเข้า หมายถึง ความบิดเบี้ยวในลักษณะที่ส่วนกลางของขอบกระเบื้องเว้าเข้า (ดูรูปที่ 2.17)

2.7.2.13 นูนขึ้น (Convex) หมายถึง ความบิดเบี้ยวไปจากแนวระนาบของผิวหน้ากระเบื้อง เนื่องจากส่วนกลางตามแนวเส้นทแยงมุมของกระเบื้องสูงขึ้น (ดูรูปที่ 2.18)

2.7.2.14 แอ่นลง (Concave) หมายถึง ความบิดเบี้ยวไปจากแนวระนาบของผิวหน้ากระเบื้อง เนื่องจากส่วนกลางตามแนวเส้นทแยงมุมของกระเบื้องต่ำลง (ดูรูปที่ 2.19)



รูปที่ 2.11 การราน

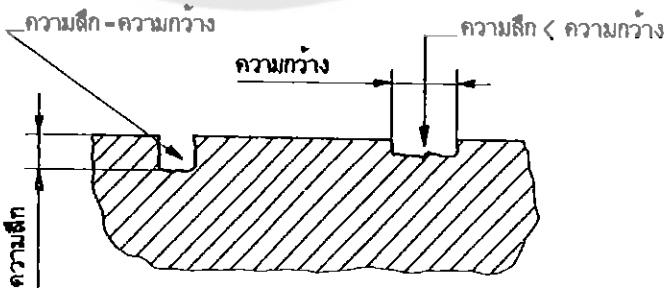
ที่มา: สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม (2529)

รูปที่ 2.12 รูเข็ม

ที่มา: สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม (2529)

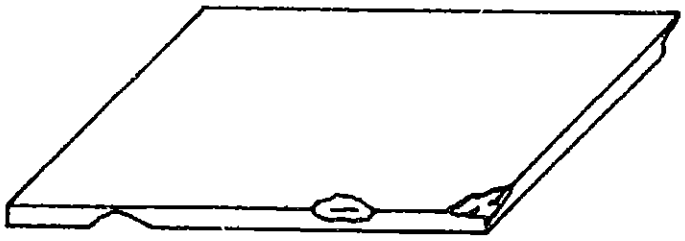
รูปที่ 2.13 รอยพอง

ที่มา: สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม (2529)



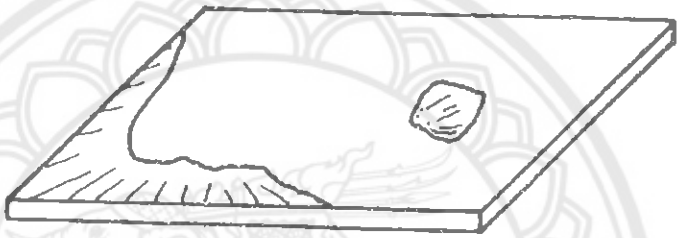
รูปที่ 2.14 หลุม

ที่มา: สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม (2529)



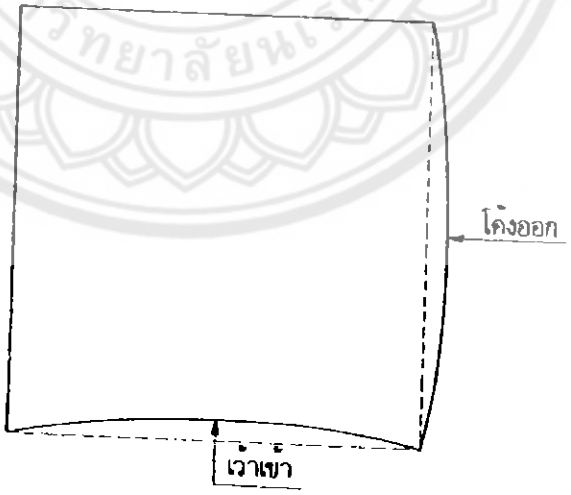
รูปที่ 2.15 รอยบิ่น

ที่มา: สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม (2529)



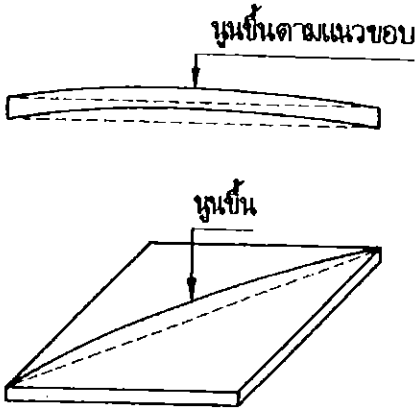
รูปที่ 2.16 การหดตัวของเคลือบ

ที่มา: สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม (2529)



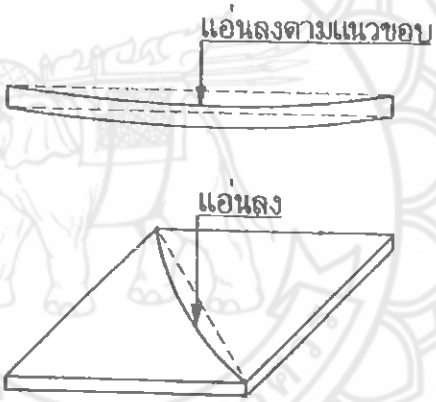
รูปที่ 2.17 โค้งออก และเว้าเข้า

ที่มา: สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม (2529)



รูปที่ 2.18 นูนขึ้น

ที่มา: สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม (2529)



รูปที่ 2.19 แอ่นลง

ที่มา: สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม (2529)

2.7.3 ประเภท ชนิด และชั้นคุณภาพ

2.7.3.1 กระเบื้อง แบ่งออกเป็น 4 ประเภท คือ

ก. ประเภทดูดซึมน้ำต่ำ (Low Water Absorption; ใช้สัญลักษณ์ LF) เหมาะสำหรับใช้ทั้งภายใน และภายนอกอาคาร

ข. ประเภทดูดซึมน้ำปานกลางค่อนข้างต่ำ (Low Medium Water Absorption; ใช้สัญลักษณ์ LMF) เหมาะสำหรับใช้ทั้งภายใน และภายนอกอาคาร

ค. ประเภทดูดซึมน้ำปานกลาง (Medium Water Absorption; ใช้สัญลักษณ์ MF) เหมาะสำหรับใช้ภายในอาคาร

ง. ประเภทดูดซึมน้ำสูง (High Water Absorption; ใช้สัญลักษณ์ HF) เหมาะสำหรับใช้ภายในอาคาร

2.7.3.2 กระเบื้อง แบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ

ก. ชนิดเคลือบ

ข. ชนิดไม่เคลือบ

2.7.4 ขนาด และเกณฑ์ความคลาดเคลื่อน

ขนาด และเกณฑ์ความคลาดเคลื่อน ให้เป็นไปตามตารางที่ 2.1 การวัดให้ปฏิบัติตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมกระเบื้องดินเผาบุผนังภายนอก มาตรฐานเลขที่ มอก. 614

ตารางที่ 2.1 ขนาด และเกณฑ์ความคลาดเคลื่อน

มิติ	ขนาด	เกณฑ์ความคลาดเคลื่อน
ความกว้าง และความยาว หรือมิติในแนวแกนหลักสองแกน	เป็นไปตามที่ระบุไว้ที่ฉลาก	ไม่เกิน ± ร้อยละ 0.6 ของค่าที่ระบุไว้ที่ฉลาก
ความหนา	เป็นไปตามที่ระบุไว้ที่ฉลาก	ไม่เกิน ± ร้อยละ 5 ของค่าที่ระบุไว้ที่ฉลาก

ที่มา: สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม (2529)

2.7.5 คุณลักษณะที่ต้องการ

2.7.5.1 ลักษณะทั่วไป

ก. ชั้นคุณภาพที่ 1

ก.1 ชนิดเคลือบ

กระเบื้องต้องไม่มีการล่อนตัว การแยกชั้นในเนื้อกระเบื้องการรานและการแตกหัก และเมื่อตรวจสอบมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมกระเบื้องดินเผาเคลือบบุผนังภายในมาตรฐานเลขที่ มอก. 613 แล้ว ต้องไม่เห็นรอยร้าว รูเข็ม รอยพอง รอยบิ่น และการหดตัวของเคลือบ

ก.2 ชนิดไม่เคลือบ

กระเบื้องต้องไม่มีการแยกชั้นในกระเบื้อง หรือการแตกหัก และเมื่อตรวจสอบตาม มอก. 613 แล้ว ต้องไม่เห็นรอยร้าว รูเข็ม รอยพอง และรอยบิ่น

ข. ชั้นคุณภาพที่ 2

ข.1 จุดด่าง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางไม่เกิน 1 มิลลิเมตร ได้ไม่เกิน 3 จุด

ข.2 ความบกพร่องของผิวเคลือบต่างๆ รวมกันได้ไม่เกิน 5 ตาราง มิลลิเมตร

ข.3 พื้นที่ของรอยบิ่นที่มุม หรือขอบ เมื่อทดสอบตาม มอก. 613 ได้ไม่เกินที่กำหนดไว้ในตารางที่ 2.2 แต่ทั้งนี้ในกระเบื้องแผ่นเดียวกัน จะมีรอยบิ่นที่มุม และขอบรวมกันได้ไม่เกิน 3 จุด

ตารางที่ 2.2 พื้นที่ของรอยบิ่นต่อ 1 จุด

มิติ มิลลิเมตร	บิ่นที่มุม หรือขอบ ตารางมิลลิเมตร ไม่เกิน
ไม่เกิน 100	2
เกิน 100 ถึง 200	3
เกิน 200 ถึง 300	4
เกิน 300	5

ที่มา: สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม (2529)

2.7.5.2 ความบิดเบี้ยว

ไม่เกินที่กำหนดในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 ความบิดเบี้ยว

มิติ มิลลิเมตร	ความบิดเบี้ยวตามแนวขอบ				ความบิดเบี้ยวตามแนวเส้นทแยงมุม		ความเบี่ยงเบนจากความได้ฉาก
	โค้งออก	เว้าเข้า	นูนขึ้น	แอ่นลง	นูนขึ้น	แอ่นลง	
ไม่เกิน 200	ร้อยละ 0.75	ร้อยละ 0.75	ร้อยละ 1.5	ร้อยละ 1.5	ร้อยละ 0.75	ร้อยละ 0.75	ร้อยละ 0.5 ของความยาวด้านที่วัด
เกิน 200 ถึง 300	1.5 มิลลิเมตร	1.5 มิลลิเมตร	3 มิลลิเมตร	3 มิลลิเมตร	1.5 มิลลิเมตร	1.5 มิลลิเมตร	

ตารางที่ 2.3 (ต่อ) ความบิดเบี้ยว

มิติ มิลลิเมตร	ความบิดเบี้ยวตามแนวขอบ				ความบิดเบี้ยวตามแนวเส้นทแยงมุม		ความเบี่ยงเบนจากความได้ฉาก
	โค้งออก	เว้าเข้า	นูนขึ้น	แอ่นลง	นูนขึ้น	แอ่นลง	
เกิน 300 ถึง 500	ร้อยละ 0.5	ร้อยละ 0.5	3 มิลลิเมตร	3 มิลลิเมตร	1.5 มิลลิเมตร	1.5 มิลลิเมตร	ร้อยละ 0.5 ของความยาวด้านที่วัด
เกิน 500	2.5 มิลลิเมตร	2.5 มิลลิเมตร	3 มิลลิเมตร	3 มิลลิเมตร	1.5 มิลลิเมตร	1.5 มิลลิเมตร	

ที่มา: สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม (2529)

2.7.5.3 การดูดซึมน้ำ

ก. กระเบื้องประเภทดูดซึมน้ำต่ำ (ทั้งชนิดเคลือบ และไม่เคลือบ) การดูดซึมน้ำต้องไม่เกินร้อยละ 3

ข. กระเบื้องประเภทดูดซึมน้ำปานกลางค่อนข้างต่ำ (ทั้งชนิดเคลือบ และไม่เคลือบ) การดูดซึมน้ำต้องไม่เกินร้อยละ 6

ค. กระเบื้องประเภทดูดซึมน้ำปานกลาง (ต้องเป็นชนิดเคลือบอย่างเดียว) การดูดซึมน้ำต้องไม่เกินร้อยละ 10

ง. กระเบื้องประเภทดูดซึมน้ำสูง (ต้องเป็นชนิดเคลือบอย่างเดียว) การดูดซึมน้ำต้องไม่เกินร้อยละ 16

2.7.5.4 ความทนสารเคมี

เมื่อทดสอบตาม มอก. 613 แล้ว กระเบื้องไม่ปรากฏการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากสารเคมี

2.7.5.5 ความทนการราน

เมื่อทดสอบตาม มอก. 614 แล้ว ผิวเคลือบของกระเบื้องต้องไม่ราน

2.7.5.6 ความต้านแรงดัด

ก. กระเบื้องประเภทดูดซึมน้ำต่ำ และประเภทดูดซึมน้ำปานกลางค่อนข้างต่ำ ต้องมีความต้านแรงดัดไม่น้อยกว่า 25.0 เมกะปาสคาล

ข. กระเบื้องประเภทดูดซึมน้ำปานกลาง และประเภทดูดซึมน้ำสูง ต้องมีความต้านแรงดัดไม่น้อยกว่า 17.5 เมกะปาสคาล

2.7.5.7 ความทนการขัดสี

เมื่อทดสอบตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม กระเบื้องดินเผาโมเสก มาตรฐานเลขที่ มอก. 38 แล้ว น้ำหนักของกระเบื้องที่หายไปต้องไม่เกิน 0.1 กรัม

2.7.6 การบรรจุ

ให้บรรจุกระเบื้องในกล่อง หรือภาชนะบรรจุอื่นให้เรียบร้อย และแข็งแรง

2.7.7 เครื่องหมาย และฉลาก

2.7.7.1 ที่กระเบื้องทุกแผ่นอย่างน้อยต้องมีเลข อักษร หรือเครื่องหมาย แจ้งรายละเอียดต่อไปนี้ให้เห็นได้ง่าย ชัดเจน และถาวร

ก. ประเภท หรือสัญลักษณ์ของประเภท

ข. ชั้นคุณภาพ (โดยใช้สีดำขีดเป็นเส้นด้านหลังกระเบื้องสำหรับชั้นคุณภาพที่ 2)

ค. ชื่อผู้ทำ หรือโรงงานที่ทำ หรือเครื่องหมายการค้า หรือชื่อผู้จัดจำหน่าย

2.7.7.2 ที่กล่อง หรือภาชนะบรรจุกระเบื้องทุกหน่วย อย่างน้อยต้องมีเลข อักษร หรือเครื่องหมาย แจ้งรายละเอียดต่อไปนี้ให้เห็นได้ง่ายขึ้น ชัดเจน

ก. คำว่า "กระเบื้องดินเผาปูพื้น"

ข. ประเภท หรือสัญลักษณ์ของประเภท

ค. ชนิด

ง. ชั้นคุณภาพ

จ. สี หรือลวดลาย

ฉ. รูปร่าง

ช. ขนาดเป็นมิลลิเมตร และจำนวนแผ่น

ซ. วัน เดือน ปีที่ทำ

ฌ. ชื่อผู้ทำหรือโรงงานที่ทำ หรือเครื่องหมายการค้าหรือชื่อผู้จัดจำหน่าย พร้อมสถานที่ตั้ง

ญ. ประเทศที่ทำ

หมายเหตุ ข้อ ค. จ. และ ฉ. ให้ระบุเฉพาะเมื่อบรรจุในกล่อง หรือภาชะบรรจุที่มิดชิด

2.7.7.3 ในกรณีที่ใช้ภาษาต่างประเทศ ต้องมีความหมายตรงกับภาษาไทยที่ใช้กำหนดไว้ข้างต้น

2.7.7.4 ผู้ทำผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมที่เป็นไปตามมาตรฐานนี้ จะแสดงเครื่องหมายมาตรฐานกับผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมนั้นได้ ต่อเมื่อได้รับใบอนุญาตจากคณะกรรมการมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมแล้ว

2.7.8 การชักตัวอย่าง และเกณฑ์ตัดสิน

2.7.8.1 รุ่น ในที่นี้ หมายถึง กระเบื้องประเภท ชนิด ชั้นคุณภาพ ขนาด รูปร่าง และสีเดียวกัน ทำโดยกรรมวิธีเดียวกัน ที่ทำ หรือส่งมอบ หรือซื้อขายในระยะเวลาเดียวกัน

2.7.8.2 การชักตัวอย่าง และการยอมรับ ให้เป็นไปตามแผนการชักตัวอย่างที่กำหนดต่อไปนี้ หรืออาจใช้แผนการชักตัวอย่างอื่นที่เพียบเท่ากันทางวิชาการกับแผนที่กำหนดไว้

- การชักตัวอย่าง และการยอมรับสำหรับการทดสอบขนาด และคุณลักษณะที่ต้องการ

ให้ชักตัวอย่างกระเบื้องโดยวิธีสุ่มจากรุ่นเดียวกันตามจำนวนที่กำหนดในตารางที่ 2.4 แต่ละชุดตัวอย่าง ให้นำไปทดสอบตามรายการในตารางที่ 2.5 รายการที่ 1 ถึง 4 ก่อน แล้วจึงใช้ตัวอย่างในชุดเดียวกันนี้ไปทดสอบตามรายการที่ 5 ถึง 8

ตารางที่ 2.4 แผนการชักตัวอย่างสำหรับการทดสอบขนาด และคุณลักษณะที่ต้องการ

ขนาดรุ่น (แผ่น)	ขนาดตัวอย่าง (แผ่น)
ไม่เกิน 10000	25
10001 ถึง 35000	50
เกิน 35000	75

หมายเหตุ: กระเบื้องจำนวน 25 แผ่น ให้ถือเป็น 1 ชุดตัวอย่าง

ที่มา: สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม (2529)

จำนวนตัวอย่างกระเบื้องที่ไม่เป็นไปตามข้อ 2.7.4 และข้อ 2.7.5 รายการใดรายการหนึ่งในแต่ละชุดตัวอย่าง ต้องไม่เกินเลขจำนวนที่ยอมรับในตารางที่ 2.5 จึงถือว่ากระเบื้องรุ่นนั้นเป็นไปตามเกณฑ์ที่กำหนด

ตารางที่ 2.5 รายการทดสอบ

รายการทดสอบ	ทดสอบตาม	ขนาดตัวอย่าง (แผ่น)	เลขจำนวนที่ยอมรับ (แผ่น)
ลักษณะทั่วไป	มอก. 613	25	2
ขนาด	มอก. 614	10	0
ความบิดเบี้ยว	มอก. 614	10	0
การดูดซึมน้ำ	มอก. 613	3	0
ความทนสารเคมี	มอก. 613	6	0
ความทนการราน	มอก. 614	3	0
ความต้านแรงดัด	มอก. 614	10	0
ความทนการขัดสี	มอก. 38	3	0

ที่มา: สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม (2529)

2.7.8.3 เกณฑ์ตัดสิน

ตัวอย่างกระเบื้องต้องเป็นไปตามข้อ ก.2 จึงจะถือว่ากระเบื้องรุ่นนั้นเป็นไปตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมนี้

2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ปาร์ย อรรถพิสาล (2548) ศึกษาการนำของเสียที่เป็นแก้วสีชามาทดแทนเฟลด์สปาร์ โดยนำซิลิกาอะลูมินาที่ใช้แล้วมาใช้ร่วมกับของเสียที่เป็นแก้วสีชา เพื่อให้เกิดองค์ประกอบใกล้เคียงกับเฟลด์สปาร์มากขึ้น โดยงานวิจัยนี้คงอัตราส่วนผสมดินดำต่อเฟลด์สปาร์เท่ากับ 8 : 5 ซึ่งคิดเป็นร้อยละ 60 ของส่วนผสมทั้งหมด รวมกับทรายแก้วอบแห้งร้อยละ 40 ทำการแปรค่าอัตราส่วนการทดแทนเฟลด์สปาร์ด้วยของเสียที่เป็นแก้วสีชาต่อซิลิกา-อะลูมินา และการแปรค่าอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาขึ้นรูปทดสอบคุณภาพของกระเบื้องในด้านกำลังแรงดัด การหดตัว การดูดซึมน้ำ การทนสารเคมี และความทนการราน ผลศึกษาพบว่าทุกอัตราส่วนการทดแทนที่เผาขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียสให้ค่าการทดสอบเป็นไปตามเกณฑ์มาตรฐานผลิตอุตสาหกรรมกระเบื้องดินเผาปูพื้น (มอก.37-2529) ส่วนกระเบื้องที่เหมาะสมในทางเศรษฐศาสตร์คือ กระเบื้องที่เผาขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 1150 องศาเซลเซียสด้วยอัตราการทดแทนเฟลด์สปาร์ด้วยของเสียที่เป็นแก้วต่อซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วเท่ากับ 80 : 20 ซึ่งมีสมบัติในการการรับแรงดัดเท่ากับ 27.46 เมกะปาสคาล ค่าการหดตัวเท่ากับร้อยละ 4.89 ค่าการดูดซึมน้ำเท่ากับร้อยละ 1.93 มีความสามารถในการทนสารเคมี และความทนการรานได้

เพ็ชรพร เชาวกิจเจริญ และวิวรรธน์ เทียนศิริ (2548) ได้ศึกษาการใช้ของเสียที่เป็นแก้วสีชามาทดแทนวัตถุดิบในส่วนของตัวหลอมละลายในการผลิตกระเบื้องดินเซรามิก ผลในการศึกษาอัตราส่วนขวดแก้วสีชาที่ใช้บดละเอียดต่อเฟลด์สปาร์ โดยแปรค่าตั้งแต่ 0.00, 0.25, 0.50, 0.75 และ 1.00 ที่อุณหภูมิที่แปรค่าตั้งแต่ 1000, 1100 และ 1200 องศาเซลเซียส พบว่าทุกอัตราส่วนการทดแทนเฟลด์สปาร์สามารถใช้ได้เมื่อเผาที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส เนื่องจากให้ค่าแรงอัดได้สูงถึง 48.11, 42.29, 36.51, 35.51 และ 33.50 เมกะปาสคาล ตามลำดับ ซึ่งสูงกว่าค่ามาตรฐานผลิตภัณฑ์กระเบื้องดินเผาปูพื้น (มอก.37-2539) คือ ไม่น้อยกว่า 25 เมกะปาสคาล จากผลการศึกษาดังกล่าวแสดงว่าสามารถใช้ของเสียที่เป็นแก้วสีชามาทดแทนการผลิตเฟลด์สปาร์ในกระบวนการผลิตกระเบื้องได้ร้อยละ 100 และยังมีค่าการดูดซึมน้ำ การหดตัว การทนต่อสารเคมี (ประเภทกรด-ด่าง) และการทนรานซึ่งให้ค่าการทดสอบเป็นไปตามเกณฑ์มาตรฐาน นอกจากนี้พบว่ากระเบื้องที่มีการทดแทนเฟลด์สปาร์ด้วยของเสียที่เป็นแก้วร้อยละ 100 เผาขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียสคือการให้ค่าการทดสอบกำลังรับแรงดัดเท่ากับ 24.55 เมกะปาสคาล ค่าการดูดซึม-น้ำร้อยละ 13.77 ค่าการหดตัวเท่ากับร้อยละ 5.08 มีสมบัติในการทนการราน และการทนต่อสารเคมี ซึ่งผลดังกล่าวพบว่าให้ค่าแรงดัดต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานอุตสาหกรรมกระเบื้องดินเผาปูพื้น ที่กำหนดให้กระเบื้องปูพื้นต้องมีค่ากำลังแรงดัดมากกว่า 25 เมกะปาสคาลเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

เพ็ชรพร เชาวกิจเจริญ และคณะ (2549) ศึกษาการนำกลับของเสียประเภทแก้วมีสีที่ใช้โดยทั่วไป เศษแก้วสีชา เศษแก้วสีเขียว เศษกระจกใสที่ใช้แล้วมาเป็นวัตถุดิบแทนเฟลด์สปาร์ ผลการศึกษา พบว่ากระเบื้องดินเซรามิกที่มีสภาวะเหมาะสมในการผลิตคือ กระเบื้องดินเซรามิกที่มีส่วนผสมของเศษแก้วสีเขียวร้อยละ 100 ขึ้นรูปด้วยความดัน 100 บาร์ เผาที่อุณหภูมิ 1150 องศาเซลเซียสให้ค่ารับแรงดัดเท่ากับ 28.86 เมกะปาสคาล ค่าการหดตัวหลังการเผา และการดูดซึมน้ำเท่ากับร้อยละ 14.83 และ 3.93 ตามลำดับ การทดสอบความทนต่อสารเคมี และความทนการรานไม่ปรากฏรอยเสียหาย

สุกาญจน์ น้อยเจริญ (2549) ศึกษาสมบัติทางกายภาพ และทางกลของแผ่นกระเบื้องดินซีเมนต์ สมบัติของกระเบื้องที่ทำการศึกษา ได้แก่ กำลังดัด ความหนาแน่น และการดูดซึมน้ำของกระเบื้อง ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาคือ ปริมาณซีเมนต์ ปริมาณทราย และปริมาณน้ำ ผลการศึกษาพบว่ากระเบื้องดินซีเมนต์ที่ผลิตขึ้นมีค่าความหนาแน่นอยู่ระหว่าง 1.85-2.03 กรัมต่อลูกบาศก์-เซนติเมตร สมบัติการดูดซึมน้ำแยกเป็นการดูดซึมน้ำในสภาพชื้น มีค่าการดูดซึมน้ำร้อยละ 7.29-14.17 การดูดซึมน้ำในสภาพแห้ง มีค่าการดูดซึมน้ำร้อยละ 9.98-16.18 และสมบัติการรับกำลังดัดมีค่าการรับกำลังดัดอยู่ระหว่าง 40.47-52.47 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

สุรศักดิ์ ไวทยวงศ์สกุล และคณะ (2542) ศึกษาการนำกากอะลูมินาเซรามิกกลับมาใช้ใหม่โดยศึกษาวิธีการที่จะทำการบดกากวัสดุอะลูมินาเซรามิกที่มีความแข็งแรงสูง เพื่อนำกลับมาใช้ใหม่โดยวิธีการทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็ว (Quenching) เพื่อทำให้เกิดรอยแตกแยกในเนื้อวัสดุทำให้ความ

แข็งแรงลดลงทำให้การบดได้ง่ายขึ้น พบว่าการทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็วจากอุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส จนถึงอุณหภูมิห้องจะทำให้ชิ้นงานอะลูมินาเซรามิกมีความแข็งแรงลดลงครึ่งหนึ่ง และพบว่าการเพิ่มปริมาณลูกบดจะช่วยลดขนาดของอนุภาควัสดุที่บดลงได้เล็กน้อย และมีผลต่อลักษณะการกระจายขนาดของอนุภาคน้อยมาก

A.P.Luz และ S. Ribeiro (2007) การศึกษาใช้ของเสียที่เป็นแก้วเป็นวัตถุดิบในเครื่องลายครามในการทดลองเตรียมส่วนผสม เศษแก้ว เฟลด์สปาร์ และควอตซ์ โดยทำการเลือกอุณหภูมิที่แตกต่างกันในช่วง 1000-1250 องศาเซลเซียส โดยเลือกเวลาที่เวลา 30 นาที โดยผลการศึกษาผงแก้วที่ทำการบดละเอียดจะทำหน้าที่เป็นตัวแทน Fluxing ที่มีประสิทธิภาพเมื่อใช้เป็นสารเติมแต่งในวัสดุผสมเซรามิก และผลที่ได้ยังพบอีกว่าขนาดของรูพรุน และการดูดซึมน้ำมีการลดลง และนอกจากนี้ปริมาณเฟลด์สปาร์ที่ใช้มีจำนวนที่น้อยลงเพราะถูกแทนที่โดยการใช้ผงแก้วบดละเอียดแทนโดยการทดสอบค่ามาตรฐานต่างๆ ของกระเบื้องหินลายครามก็ยังเป็นไปตามมาตรฐาน

Francisco Jose Torres และ Javier Alarcon (2003) การศึกษาผลของสารเติมแต่งสำหรับกระเบื้องปูพื้นผลของสารต่างๆ เช่น ฟลักซ์ หรือ Nucleants ที่มีอยู่ในกระจกที่มีส่วนประกอบหลักคือ CaO - MgO - SiO_2 - Al_2O_3 ได้ทำการตรวจสอบพฤติกรรมการตกผลึก และโครงสร้างทางจุลภาคของแก้ว การวิเคราะห์ทางความร้อน ผลของ X – ray ผลที่ได้แสดงความเป็นไปได้ของการแสดงแนวทางพัฒนาเพื่อให้ได้ Cordieritebased ที่ดีในกระจกเคลือบเซรามิกแก้ว โดยการเติม B_2O_3 เป็นฟลักซ์ และ TiO_2 เป็น Nucleant

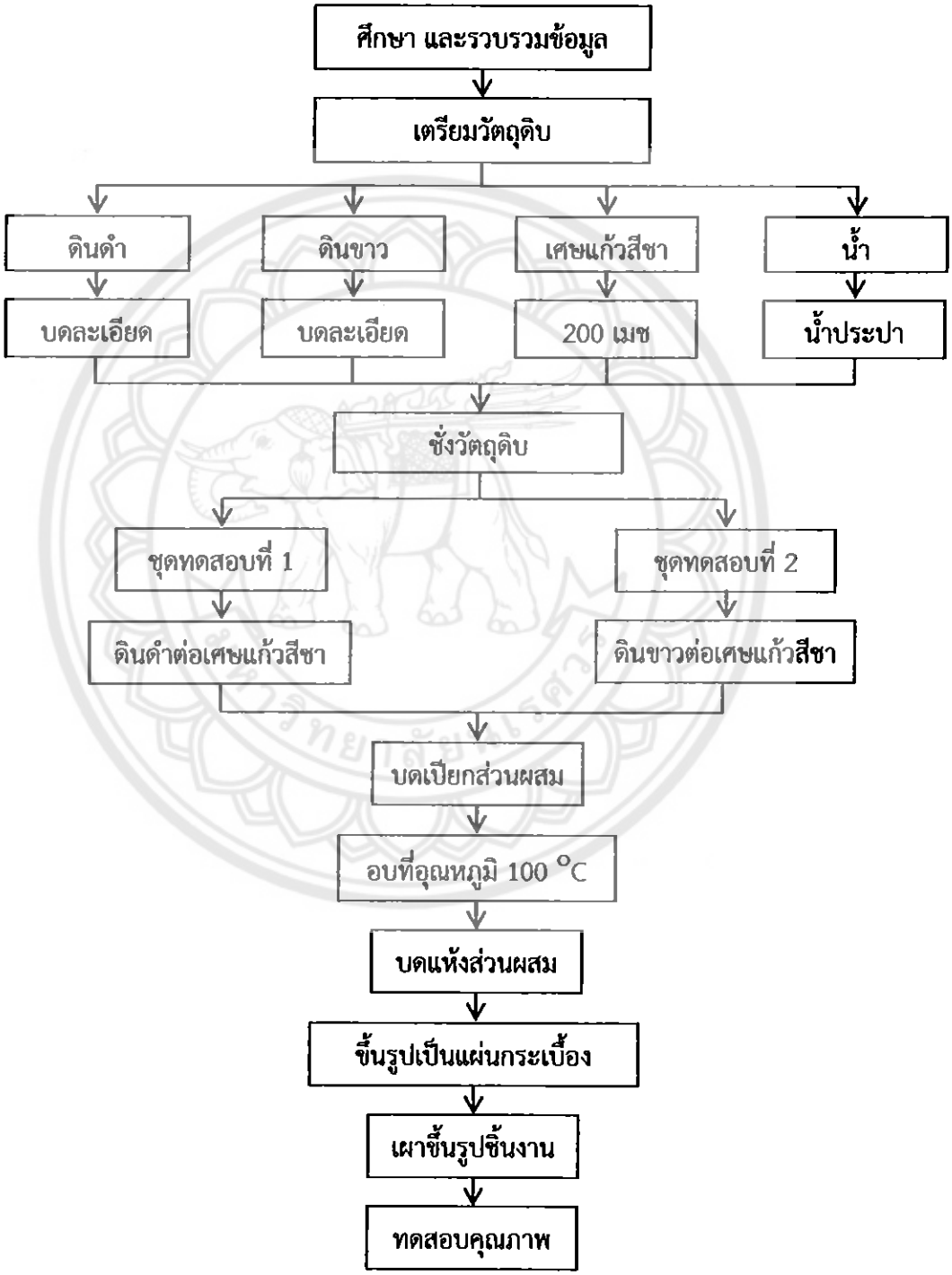
Haun (2000) ศึกษาการนำของเสียประเภทแก้วมาใช้ในอุตสาหกรรมเซรามิกเพื่อต้องการลดต้นทุนการผลิต และช่วยประหยัดพลังงานโดยพบว่าในช่วง 2-3 ปีที่ผ่านมาประเทศสหรัฐอเมริกามีความต้องการกระเบื้องดินเซรามิกเพิ่มมากขึ้นร้อยละ 7 คิดเป็น 2.4 ล้านตารางฟุต การเพิ่มขึ้นนี้ทำให้ต้องเพิ่มกำลังการผลิตมากขึ้น มีการใช้ทรัพยากร และพลังงานการผลิตมากขึ้นจึงทำการวิจัยโดยเลือกแก้วที่ยากต่อการนำกลับมาใช้ใหม่ (แก้วชนิดที่มีสี เช่น แก้วสีเขียว แก้วสีชา) มาผสมในเนื้อเซรามิก พบว่าสามารถลดอุณหภูมิในการเผาลงได้ร้อยละ 37 ซึ่งมีการประหยัดพลังงานในการผลิต นอกจากนี้ยัง พบว่าสามารถลดปริมาณดิน และน้ำในวัตถุดิบได้อีกด้วย

Haun (2002) ศึกษาขนาดของผงแก้วต่อพฤติกรรมการอัดตัวก่อน และหลังขึ้นรูปแล้ว พบว่าที่ผงแก้วมีขนาดเล็กกว่า 30 เมช เมื่อทำให้อิ่มตัวด้วยน้ำแล้วนำมาอบให้แห้งจะได้ค่าการอัดตัวก่อนและหลังขึ้นรูปที่ดีกว่าผงแก้วที่มีขนาดใหญ่กว่า 30 เมช และผลดังกล่าวทำให้ผลการศึกษาต่อถึงพลังงานที่ใช้ในการเผาการขึ้นรูปคือ เมื่อผงแก้วที่มีขนาดเล็กกว่า 30 เมช สามารถอัดตัวได้ดีกว่า จึงสามารถลดอุณหภูมิที่ใช้ในการหลอมผงแก้วลงได้คือ ใช้อุณหภูมิน้อยกว่า 800 องศาเซลเซียส ในเวลา 5 นาทีเท่านั้น และศึกษาถึงผลกระทบจากการปนเปื้อนของสารอนินทรีย์ที่อาจเกิดขึ้นจากสภาวะใดๆ พบว่ามีความปนเปื้อนตั้งแต่ร้อยละ 2-25 ขึ้นไปจะมีผลต่อความสามารถต่อการอัดตัวของผงแก้ว

M. Dondi และคณะ (2009) การศึกษาการรีไซเคิลคอมพิวเตอร์ และโทรทัศน์นั้นมีส่วนผสมของตะกั่ว แบเรียม และเซอร์โคเนียมทำให้ไม่เหมาะสมในการนำกลับมาผลิตเป็นแก้วใหม่อีกครั้งจึงนำกลับมาใช้เป็นส่วนผสมในอิฐกระเบื้องมุงหลังคา ความเป็นไปได้ของการศึกษานี้ได้ถูกประเมินในกระบวนการ Brickmaking และลักษณะของผลิตภัณฑ์โดยการศึกษา พบว่าขนาดของอนุภาคที่บดได้จากหน้าจอคอมพิวเตอร์ และหน้าจอโทรทัศน์ต้องมีขนาดอยู่ในช่วง (0.8-0.1 mm) และใช้ที่ร้อยละ 2 โดยน้ำหนักของแก้ว หากใช้แก้วที่ได้จากการบดมากเกินไปอาจส่งผลต่อสมบัติเชิงกลโดยความแข็งแรงขึ้นอยู่กับชนิดของแก้ว และชนิดของดินที่ใช้

บทที่ 3
วิธีการดำเนินโครงงาน

3.1 ขั้นตอน และระเบียบวิธีวิจัยที่ใช้ในการทำโครงงาน



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการดำเนินงาน

3.2 วัตถุดิบ และอุปกรณ์

3.2.1 วัตถุดิบที่ใช้ในการทำโครงงาน

3.2.1.1 ดินดำจังหวัดสุราษฎร์ธานี

3.2.1.2 ดินขาวจังหวัดระนอง

3.2.1.3 เศษแก้วสีชาบดละเอียด

3.2.1.4 น้ำ

3.2.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทำโครงงาน

3.2.2.1 เตาเผาอุณหภูมิสูง

3.2.2.2 หม้อบด และลูกบด

3.2.2.3 เครื่องชั่งน้ำหนัก

3.2.2.4 เครื่องอัดขึ้นรูปกระเบื้อง

3.2.2.5 ตะแกรงร่อนขนาด 50 และ 200 เมช

3.2.2.6 เครื่องทดสอบกำลังรับแรงดัด

3.2.2.7 เครื่องให้ความร้อน

3.2.2.8 บีกเกอร์

3.2.2.9 เวอร์เนียร์คาลิเปอร์

3.3 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

3.3.1 ศึกษา และรวบรวมข้อมูล

ศึกษาผลกระทบของอัตราส่วนผสมของเศษแก้วเหลือทิ้งที่มีผลต่ออุณหภูมิในการเผา สมบัติทางกายภาพ และทางกลของกระเบื้องดินเซรามิก รวบรวมข้อมูลเอกสาร และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

3.3.2 กรรมวิธีการผลิต

3.3.2.1 เก็บรวบรวมขวดแก้วสีชาที่เหลือทิ้ง มาทำความสะอาดแล้วนำไปทุบด้วยค้อนให้เป็นเศษแก้ว และนำมาบดด้วยเครื่องบดละเอียด (Ball Mill) อีกครั้ง

3.3.2.2 นำเศษแก้วบดละเอียดไปร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 200 เมช

3.3.2.3 นำดินที่เป็นก้อนมาบดให้ละเอียด

3.3.2.4 ชั่งเศษแก้วสีชา และดิน โดยมีอัตราส่วนดังนี้

ตารางที่ 3.1 อัตราส่วนผสมระหว่างดินดำต่อเศษแก้วสีชา

อัตราส่วนผสม (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	
ดินดำ	เศษแก้วสีชา
100	0
80	20
70	30
60	40
50	50
40	60

ตารางที่ 3.2 อัตราส่วนผสมระหว่างดินขาวต่อเศษแก้วสีชา

อัตราส่วนผสม (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	
ดินขาว	เศษแก้วสีชา
100	0
80	20
70	30
60	40
50	50
40	60

3.3.2.5 ทำการบดเปียกส่วนผสมดังกล่าว เป็นเวลา 8 ชั่วโมง

3.3.2.6 นำส่วนผสมที่ผ่านการบดเปียกมาแล้วเป็นเวลา 8 ชั่วโมง อบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง

3.3.2.7 นำส่วนผสมที่ผ่านการอบแล้วมาบดแห้งอีกครั้ง

3.3.2.8 นำส่วนผสมที่ผ่านการบดแห้งแล้วมาร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 50 เมช

3.3.2.9 นำวัตถุดิบไปขึ้นรูปเป็นแผ่นกระเบื้อง โดยทำการขึ้นรูปเป็นแผ่นกระเบื้องขนาด 25.75 × 152.75 × 35 ลูกบาศก์มิลลิเมตร และใช้แรงอัดขึ้นรูปที่ 200 บาร์

3.3.2.10 ทำการเผาที่อุณหภูมิ 900, 1000, 1100 และ 1200 องศาเซลเซียส ตามลำดับ

3.3.2.11 ทดสอบคุณภาพตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมกระเบื้องดินเผาปูพื้น (มอก.37-2529) (สีกระเบื้องหลังเผา ค่าความหนาแน่น ค่าร้อยละการดูดซึมน้ำ ค่าการหดตัวหลังเผา และค่ากำลังรับแรงดัด)

3.3.3 ทดสอบคุณภาพตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมกระเบื้องดินเผาปูพื้น

3.3.3.1 ค่ากำลังรับแรงดัด

เตรียมชิ้นงานขนาด 25.75 x 152.75 x 35 ลูกบาศก์มิลลิเมตร โดยกดแบบ 3 Pointbending ใช้ Span Length เท่ากับ 100 มิลลิเมตร และใช้อัตราเร็วในการกดเท่ากับ 0.1 มิลลิเมตรต่อนาที แล้วทำการกดโดยเครื่อง UTM จนถึงแรงกดที่ทำให้ชิ้นงานนั้นหักแล้วนำไปคำนวณค่าความแข็งแรงภายใต้กำลังรับแรงดัด (Modulus of Rupture; MOR) ได้ดังสมการที่ 2.1

3.3.3.2 ความหนาแน่น และร้อยละการดูดซึมน้ำ

ก. อบชิ้นงานให้แห้ง ชั่งน้ำหนัก บันทึกค่า D ซึ่งเป็นน้ำหนักชิ้นงานแห้งก่อนต้ม

ข. ต้มชิ้นงานในน้ำกลั่นให้เดือดนาน 5 ชั่วโมง และแช่ไว้อีกนาน 24 ชั่วโมง

ค. ชั่งน้ำหนักชิ้นงานในน้ำ บันทึกเป็นค่า S ซึ่งเป็นน้ำหนักชิ้นงานหลังต้มชั่งในน้ำ

ง. เช็ดผิวชิ้นงาน ชั่งน้ำหนัก บันทึกเป็นค่า W ซึ่งเป็นน้ำหนักชิ้นงานหลังต้มชั่งในอากาศ

ซึ่งความหนาแน่น และร้อยละการดูดซึมน้ำ สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 2.2, 2.5 และ 2.6

3.3.3.3 การหดตัวหลังเผา

การหดตัวหลังเผา (Firing Shrinkage) เป็นการวัดการหดตัว ตั้งแต่ผลิตภัณฑ์แห้งสนิท จนถึงหลังเผา (Dry to Fire) สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 2.8

3.4 วิเคราะห์ และสรุปผลการทดลอง

3.4.1 วิเคราะห์อัตราส่วนผสมของเศษแก้วเหลือทิ้งผสมกับดิน ที่มีผลต่อสมบัติทางกายภาพและทางกล

3.4.2 วิเคราะห์ผลของอุณหภูมิในการเผาที่มีผลต่อสมบัติทางกายภาพ และทางกลของกระเบื้องดินเซรามิก

3.4.3 สรุปผลการทดลองจากการศึกษาผลกระทบของอัตราส่วนผสมของเศษแก้วเหลือทิ้งที่มีผลต่ออุณหภูมิในการเผา สมบัติทางกายภาพ และทางกลของกระเบื้องดินเซรามิก

3.5 จัดทำรูปเล่มรายงาน

นำข้อมูลทั้งหมด และผลการทดลองมาจัดทำรูปเล่มรายงาน

บทที่ 4
ผลการทดลอง และการวิเคราะห์

4.1 ศึกษาผลของอัตราส่วนของเศษแก้วเหลือทิ้งผสมกับดินที่มีผลต่อสมบัติทางกายภาพ และทางกลของกระเบื้องดินเซรามิก

การศึกษาผลของอัตราส่วนของเศษแก้วเหลือทิ้งผสมกับดินที่มีผลต่อสมบัติทางกายภาพ และทางกลของกระเบื้องดินเซรามิก โดยนำเอาเศษแก้วเหลือทิ้งผสมกับดินแล้วทำการแปรค่าอัตราส่วนผสมระหว่างดินดำต่อเศษแก้วสีชาเป็น 100 : 0, 80 : 20, 70 : 30, 60 : 40, 50 : 50 และ 40 : 60 ตามลำดับ แปรค่าอัตราส่วนผสมระหว่างดินขาวต่อเศษแก้วสีชาเป็น 100 : 0, 80 : 20, 70 : 30, 60 : 40, 50 : 50 และ 40 : 60 ตามลำดับ ใช้อุณหภูมิในการเผาขึ้นรูปที่ 900 องศาเซลเซียส และพิจารณาค่าที่เหมาะสมจากค่าทดสอบเทียบกับค่ามาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมกระเบื้องดินเผาปูพื้น (มอก.37-2529) ได้แก่ สีของกระเบื้องหลังเผา ค่าความหนาแน่น ค่าร้อยละการดูดซึมน้ำ ค่าการหดตัวหลังเผา และค่ากำลังรับแรงดัด

4.1.1 อัตราส่วนผสมระหว่างดินดำต่อเศษแก้วสีชา

ตารางที่ 4.1 สีกระเบื้องดินดำหลังเผา ค่าเฉลี่ยความหนาแน่น ค่าเฉลี่ยร้อยละการดูดซึมน้ำ ค่าเฉลี่ยการหดตัวหลังเผา และค่าเฉลี่ยกำลังรับแรงดัดของกระเบื้องหลังเผาขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส

อัตราส่วนผสมระหว่างดินดำต่อเศษแก้วสีชา	สีกระเบื้องดินดำหลังเผา	ค่าเฉลี่ยความหนาแน่น (g/cm^3)	ค่าเฉลี่ยร้อยละการดูดซึมน้ำ (ร้อยละ)	ค่าเฉลี่ยการหดตัวหลังเผา (ร้อยละ)	ค่าเฉลี่ยกำลังรับแรงดัด (MPa)
100 : 0		1.99	5.37	1.84	1.01
80 : 20		2.03	5.20	4.06	4.51

ตารางที่ 4.1 (ต่อ) สีกระเบื้องดินดำหลังเผา ค่าเฉลี่ยความหนาแน่น ค่าเฉลี่ยร้อยละการดูดซึมน้ำ ค่าเฉลี่ยการหดตัวหลังเผา และค่าเฉลี่ยกำลังรับแรงดัดของกระเบื้องหลังเผาขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส

อัตราส่วนผสมระหว่างดินดำต่อเศษแก้วสีชา	สีกระเบื้องดินดำหลังเผา	ค่าเฉลี่ยความหนาแน่น (g/cm^3)	ค่าเฉลี่ยร้อยละการดูดซึมน้ำ (ร้อยละ)	ค่าเฉลี่ยการหดตัวหลังเผา (ร้อยละ)	ค่าเฉลี่ยกำลังรับแรงดัด (MPa)
70 : 30		2.06	5.15	4.60	8.20
60 : 40		2.08	5.11	7.24	9.73
50 : 50		2.11	5.05	8.02	14.91
40 : 60		2.13	4.71	8.71	21.62
มาตรฐานอุตสาหกรรมกระเบื้องดินเผาปูพื้น (มอก.37-2529)	ไม่กำหนด	ไม่กำหนด	ไม่เกินร้อยละ 6	ไม่กำหนด	ไม่ต่ำกว่า 25 MPa

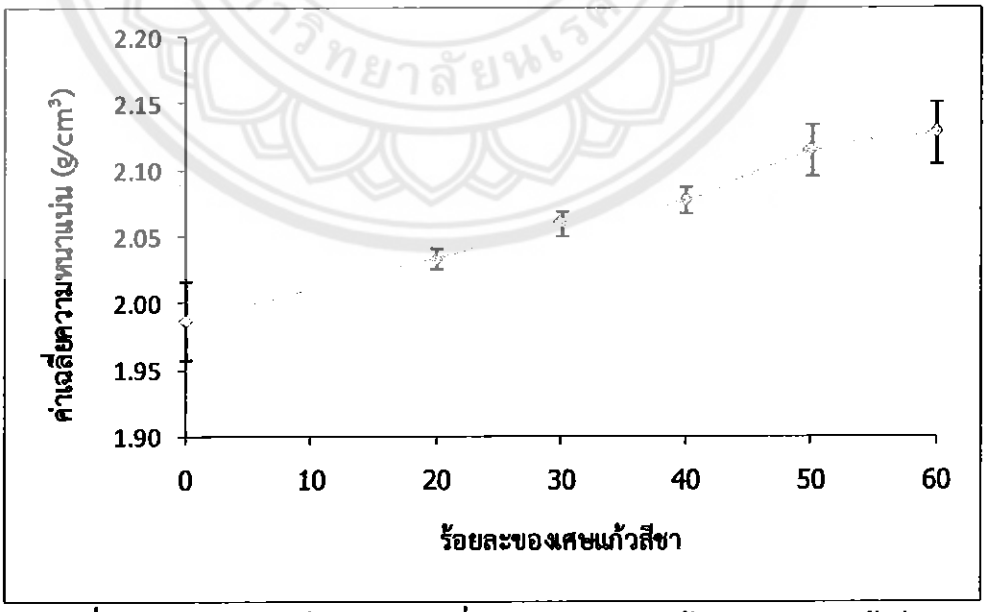
4.1.1.1 สีกระเบื้องหลังเผา

เมื่อเพิ่มปริมาณของเศษแก้วสีชาลงในดินดำแล้วเผาที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส พบว่ากระเบื้องให้สีแตกต่างกัน เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของปริมาณเศษแก้วสีชาทำให้

กระเบื้องหลังเผามีสีเข้มขึ้น เนื่องจากโดยปกติในการผลิตแก้วจะมีการเติมออกไซด์ซึ่งให้สีต่างๆ เพื่อให้แก้วเกิดสีขึ้น เช่นเดียวกับแก้วสีชาที่มีการเติมออกไซด์ของแมงกานีสลงไปซึ่งออกไซด์ของแมงกานีสนี้จะให้สีชา นอกจากนี้ยังมีดินดำซึ่งเป็นดินทุติยภูมิ ซึ่งเกิดจากการสะสมตัวโดยการตกตะกอนในสภาวะที่มีอินทรีย์สารอยู่มาก เมื่อผ่านการเผาให้ความร้อนปริมาณอินทรีย์สารในเนื้อดินดำผสมรวมกับเศษแก้วสีชา ส่งผลให้กระเบื้องหลังเผามีสีที่เข้มขึ้น

4.1.1.2 การทดสอบความหนาแน่น

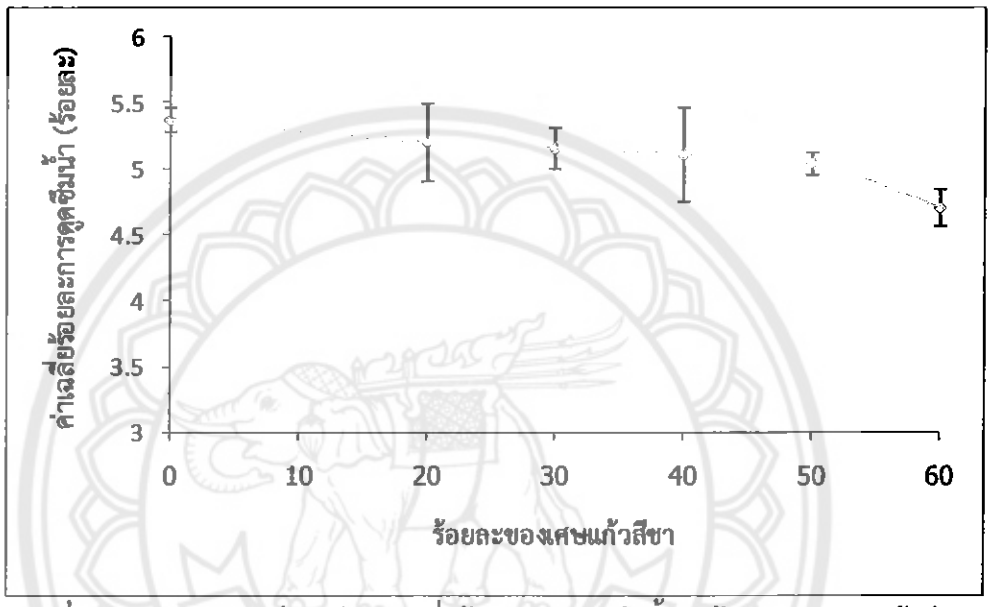
อิทธิพลของอัตราส่วนของเศษแก้วสีชากับดิน ที่มีต่อค่าการทดสอบค่าเฉลี่ยความหนาแน่นของกระเบื้องดินเซรามิก ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.1 นั่นคือ เมื่อนำกระเบื้องไปผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส พบว่าค่าเฉลี่ยความหนาแน่นหลังเผาเพิ่มขึ้น เนื่องจากการเพิ่มปริมาณเศษแก้วสีชาลงในอัตราส่วนผสมจะช่วยให้เกิด Liquid Phase Sintering ได้ง่าย เนื่องจากแก้วมีจุดเริ่มหลอมตัวที่อุณหภูมิประมาณ 650 - 700 องศาเซลเซียส เมื่อเติมเศษแก้วสีชาลงไปในส่วนผสมจะทำให้เกิด Liquid Phase Sintering ที่จะช่วยให้เนื้อสารซึ่งในที่นี้คือดินดำเกิดการ Sinter ได้ง่าย ซึ่ง Liquid Phase Sintering นี้เป็น Sintering Mechanism ที่สำคัญในการประกอบ Silicate เกือบทุกชนิด ดังนั้นผลิตภัณฑ์ในกลุ่ม Conventional Ceramic เช่น กระเบื้อง จาน ชาม จึงถูก Sinter ด้วย Mechanism นี้ การเติมเศษแก้วลงไปจึงเปรียบเสมือนการเติม Liquid Phase Sintering ให้กับเนื้อดิน ทำให้อนุภาคของเนื้อดินเกิด Neck Growth ได้ง่ายและรวดเร็ว ส่งผลให้อนุภาคยึดตัวกันได้แน่นจึงทำให้กระเบื้องหลังเผามีค่าเฉลี่ยความหนาแน่นเพิ่มมากขึ้น



รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยความหนาแน่นกับร้อยละของเศษแก้วสีชาผสมดินดำ เผาขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส

4.1.1.3 การทดสอบร้อยละการดูดซึมน้ำ

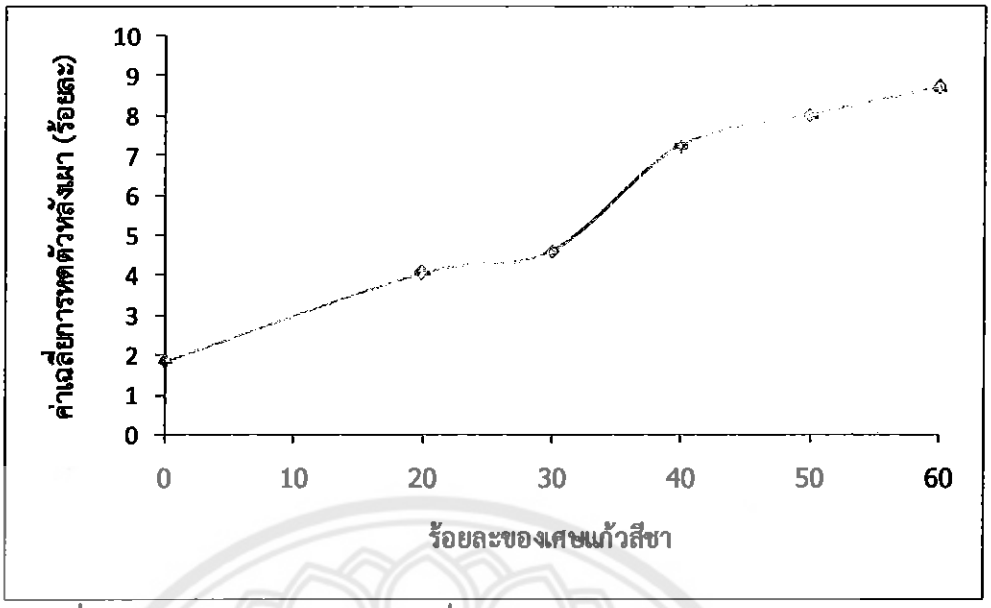
อิทธิพลของอัตราส่วนของเศษแก้วสีชากับดิน ที่มีต่อค่าการทดสอบค่าเฉลี่ยร้อยละการดูดซึมน้ำของกระเบื้องดินเซรามิก ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.2 นั่นคือ เมื่อนำกระเบื้องไปผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส พบว่าค่าเฉลี่ยร้อยละการดูดซึมน้ำมีค่าลดลง ทั้งนี้เป็นไปดังคำอธิบายในหัวข้อ 4.1.1.2 สอดคล้องกับการทดสอบค่าเฉลี่ยความหนาแน่นที่พบว่าเมื่อค่าเฉลี่ยความหนาแน่นเพิ่มมากขึ้น จะส่งผลให้ค่าเฉลี่ยร้อยละการดูดซึมน้ำมีค่าลดลง



รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยร้อยละการดูดซึมน้ำกับร้อยละของเศษแก้วสีชาผสมดินดำ เผาขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส

4.1.1.4 การทดสอบการหดตัวหลังเผา

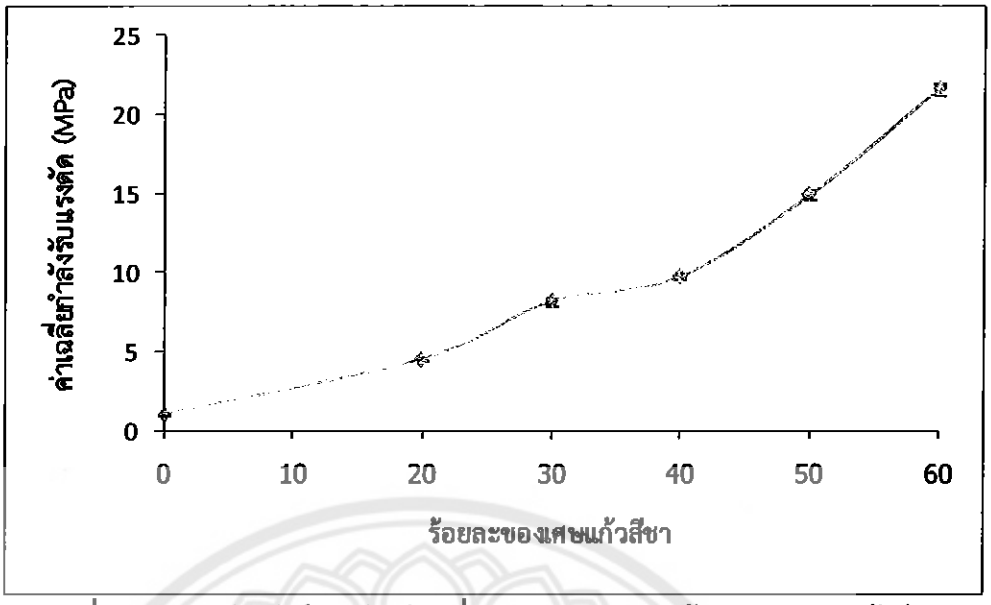
อิทธิพลของอัตราส่วนของเศษแก้วสีชากับดิน ที่มีต่อค่าการทดสอบค่าเฉลี่ยการหดตัวหลังเผาของกระเบื้องดินเซรามิก ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.3 นั่นคือ เมื่อนำกระเบื้องไปผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส พบว่าค่าเฉลี่ยการหดตัวหลังเผามีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากการเพิ่มปริมาณเศษแก้วสีชาลงในอัตราส่วนผสม จะช่วยให้เกิด Liquid Phase Sintering ได้ง่าย ความร้อนจาก Liquid Phase Sintering จะไปช่วยหลอมรวมอนุภาคระหว่างเนื้อดิน ทำให้ดินเกิด Neck Growth ได้ง่าย และรวดเร็ว ทำให้เนื้อดินเกิดการหดตัวรวมกัน อีกทั้งดินดำเป็นดินทุติยภูมิ ซึ่งมีลักษณะเป็นดินที่มีเม็ดละเอียด มีความเหนียวมาก และมีการหดตัวสูง ดังนั้นเมื่อดินดำหลอมรวมกับเศษแก้วสีชาที่มีปริมาณมากขึ้น ส่งผลให้ค่าเฉลี่ยการหดตัวหลังเผาสูงขึ้นตามไปด้วย



รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยการหดตัวหลังเผากับร้อยละของเศษแก้วสีชาผสมดินดำ เผาขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส

4.1.1.5 การทดสอบกำลังรับแรงดัด

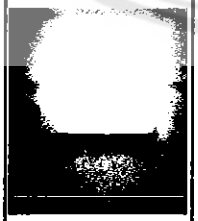
อิทธิพลของอัตราส่วนของเศษแก้วสีชากับดิน ที่มีต่อค่าการทดสอบค่าเฉลี่ยกำลังรับแรงดัดของกระเบื้องดินเซรามิก ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.4 นั่นคือ เมื่อนำกระเบื้องไปผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส พบว่าค่าเฉลี่ยกำลังรับแรงดัดหลังเผามีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากการเพิ่มปริมาณเศษแก้วสีชาลงในอัตราส่วนผสม จะช่วยให้เกิด Liquid Phase Sintering อันเป็น Sintering Mechanism ที่สำคัญของกระเบื้องดินที่มีองค์ประกอบภายในคือ Silicate ดังนั้นดินดำที่เป็นดินที่มีอนุภาคขนาดเล็ก มีพื้นผิวสัมผัสระหว่างอนุภาคมาก เมื่อปริมาณ Liquid Phase Sintering มากขึ้น จึงไปช่วยเร่งการหลอมรวมอนุภาคระหว่างเนื้อดิน ทำให้เนื้อดินเกิด Neck Growth ได้ง่าย และรวดเร็ว อนุภาคของเนื้อดินจึงยึดเกาะกันได้แน่น มีความแข็งแกร่งมากขึ้น ส่งผลให้ค่าเฉลี่ยกำลังรับแรงดัดมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบค่าเฉลี่ยความหนาแน่นที่เพิ่มขึ้น และค่าเฉลี่ยร้อยละการดูดซึมน้ำที่ลดลง



รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยกำลังรับแรงดัดกับร้อยละของเศษแก้วสีชาผสมดินดำ เผาขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส

4.1.2 อัตราส่วนผสมระหว่างดินขาวต่อเศษแก้วสีชา

ตารางที่ 4.2 สีกระเบื้องดินขาวหลังเผา ค่าเฉลี่ยความหนาแน่น ค่าเฉลี่ยร้อยละการดูดซึมน้ำ ค่าเฉลี่ยการหดตัวหลังเผา และค่าเฉลี่ยกำลังรับแรงดัดของกระเบื้องหลังเผาขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส

อัตราส่วนผสมระหว่างดินขาวต่อเศษแก้วสีชา	สีกระเบื้องดินขาวหลังเผา	ค่าเฉลี่ยความหนาแน่น (g/cm^3)	ค่าเฉลี่ยร้อยละการดูดซึมน้ำ (ร้อยละ)	ค่าเฉลี่ยการหดตัวหลังเผา (ร้อยละ)	ค่าเฉลี่ยกำลังรับแรงดัด (MPa)
100 : 0		2.04	5.22	1.29	1.49
80 : 20		2.07	5.10	1.88	4.68

ตารางที่ 4.2 (ต่อ) สีกระเบื้องดินขาวหลังเผา ค่าเฉลี่ยความหนาแน่น ค่าเฉลี่ยร้อยละการดูด-ซึมน้ำ ค่าเฉลี่ยการหดตัวหลังเผา และค่าเฉลี่ยกำลังรับแรงดัดของกระเบื้องหลังเผาขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส

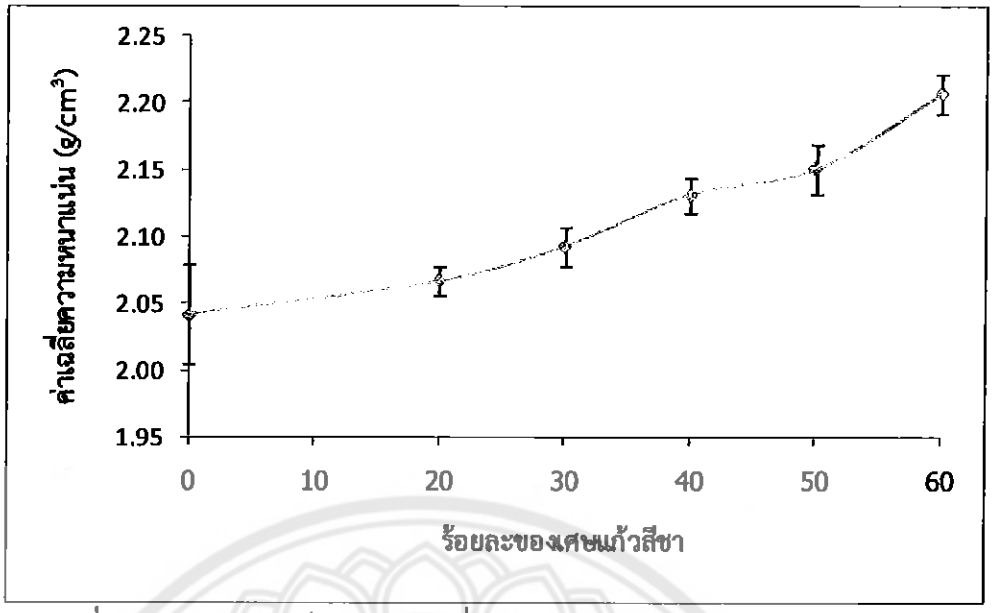
อัตราส่วนผสมระหว่างดินขาวต่อเศษแก้วสีชา	สีกระเบื้องดินขาวหลังเผา	ค่าเฉลี่ยความหนาแน่น (g/cm^3)	ค่าเฉลี่ยร้อยละการดูดซึมน้ำ (ร้อยละ)	ค่าเฉลี่ยการหดตัวหลังเผา (ร้อยละ)	ค่าเฉลี่ยกำลังรับแรงดัด (MPa)
70 : 30		2.09	5.02	3.99	8.97
60 : 40		2.13	4.94	4.69	10.02
50 : 50		2.15	4.87	5.71	16.74
40 : 60		2.21	4.66	8.35	23.07
มาตรฐานอุตสาหกรรมกระเบื้องดินเผาปูพื้น (มอก.37-2529)	ไม่กำหนด	ไม่กำหนด	ไม่เกินร้อยละ 6	ไม่กำหนด	ไม่ต่ำกว่า 25 MPa

4.1.2.1 สีกระเบื้องหลังเผา

เมื่อเพิ่มปริมาณเศษแก้วสีชาลงในดินขาวแล้วทำการเผาที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส พบว่าการเพิ่มขึ้นของปริมาณเศษแก้วสีชาที่ผสมลงในดินขาวนั้น จะให้สีกระเบื้องหลังเผาที่แตกต่างกัน แต่แตกต่างกันไม่มากนัก เนื่องจากดินขาวเป็นดินปฐมภูมิ มีอินทรียวัตถุ และออกไซด์ของโลหะต่างๆ อันเป็นตัวทำให้ดินเกิดสีในจำนวนที่ต่ำมาก โดยทั่วไปมีพวกเหล็กออกไซด์ ไลด์ แมกนีเซีย และไททาเนียมออกไซด์อยู่เพียงเล็กน้อย ทำให้เมื่อดินขาวผสมรวมกับเศษแก้วสีชาแล้วผ่านการเผาขึ้นรูป ส่งผลให้กระเบื้องหลังเผามีสีที่แตกต่างกันไม่มากนัก นอกจากนี้พบว่าการเพิ่มขึ้นของปริมาณเศษแก้วสีชาในดินดำ และดินขาวนั้น ดินดำจะให้สีของกระเบื้องหลังเผาที่มีความแตกต่างกันมากกว่า เนื่องจากดินดำเป็นดินทุติยภูมิ เกิดจากการสะสมตัวโดยการตกตะกอนในสภาวะที่มีอินทรีย์สารอยู่มาก บางครั้งพบชั้นถ่านหินเกิดร่วม ทำให้เมื่อปริมาณอินทรีย์สารในเนื้อดินดำผสมรวมกับเศษแก้วสีชาที่มีออกไซด์ให้สีชาของแมงกานีสอยู่แล้วผ่านการเผาขึ้นรูป ส่งผลให้กระเบื้องที่ผลิตจากดินดำมีสีหลังเผาที่เข้มกว่ากระเบื้องที่ผลิตจากดินขาว

4.1.2.2 การทดสอบความหนาแน่น

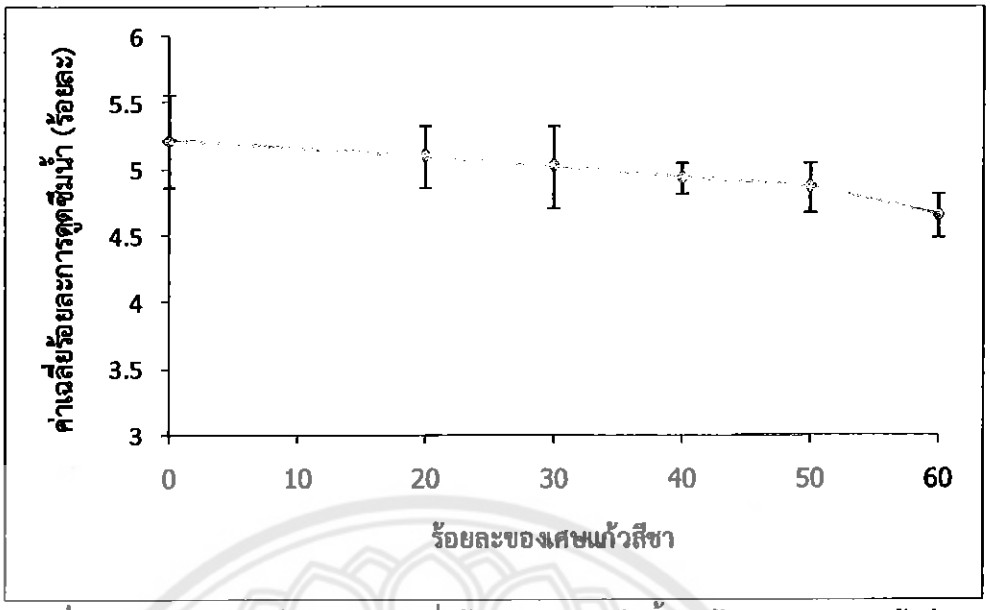
อิทธิพลของอัตราส่วนของเศษแก้วสีชากับดิน ที่มีต่อค่าการทดสอบค่าเฉลี่ยความหนาแน่นของกระเบื้องดินเซรามิก ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4.2 และรูปที่ 4.5 นั่นคือ เมื่อนำกระเบื้องไปผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส พบว่าค่าเฉลี่ยความหนาแน่นหลังเผามีค่าเพิ่มขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบกับกระเบื้องที่ผลิตจากดินดำ พบว่ากระเบื้องที่ผลิตจากดินขาวมีค่าเฉลี่ยความหนาแน่นหลังเผาที่สูงกว่า เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของเศษแก้วสีชาจะช่วยเพิ่มปริมาณ Liquid Phase Sintering ให้กับอนุภาคของเนื้อดิน ทำให้เนื้อดินเมื่อได้รับความร้อนจะเกิด Neck Growth ได้ง่าย และรวดเร็ว นอกจากนี้ดินขาวซึ่งเป็นดินปฐมภูมิ มีอนุภาคขนาดใหญ่จะทำให้เกิดช่องว่างระหว่างอนุภาคของเนื้อดินมากกว่าดินดำซึ่งเป็นดินทุติยภูมิ ส่งผลให้นอกจาก Liquid Phase Sintering จะเข้าไปช่วยเร่งการเกิด Neck Growth ระหว่างอนุภาคของเนื้อดินแล้ว ยังเข้าไปเติมเต็มช่องว่างระหว่างอนุภาคของเนื้อดินได้มากกว่าดินดำ



รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยความหนาแน่นกับร้อยละของเศษแก้วสีชาผสมดินขาว เผาขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส

4.1.2.3 การทดสอบร้อยละการดูดซึมน้ำ

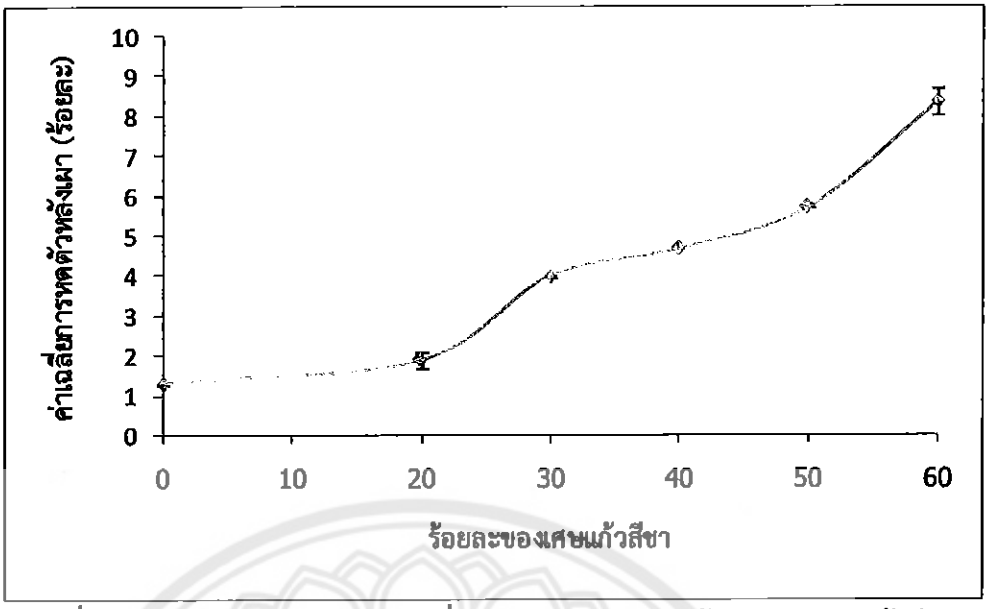
อิทธิพลของอัตราส่วนของเศษแก้วสีชากับดิน ที่มีต่อค่าการทดสอบค่าเฉลี่ยร้อยละการดูดซึมน้ำของกระเบื้องดินเซรามิก ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4.2 และรูปที่ 4.6 นั่นคือ เมื่อนำกระเบื้องไปผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส พบว่าการเพิ่มอัตราส่วนของเศษแก้วสีชาจะส่งผลให้ค่าเฉลี่ยร้อยละการดูดซึมน้ำมีค่าลดลง และค่าเฉลี่ยร้อยละการดูดซึมน้ำของดินขาวมีค่าต่ำกว่าของดินดำ เนื่องจากดินขาวเป็นดินปฐมภูมิ มีขนาดของอนุภาคที่ใหญ่กว่าดินดำ เมื่อเพิ่มปริมาณของเศษแก้วสีชาในอัตราส่วนผสม การเกิด Liquid Phase Sintering ของดินขาวจะเข้าไปอยู่ในช่องว่างระหว่างเนื้อดิน รวมทั้งช่วยให้เกิด Neck Growth ระหว่างอนุภาคของเนื้อดิน ในขณะที่ดินดำเป็นดินทุติยภูมิการเกิด Liquid Phase Sintering แม้จะช่วยให้เกิด Neck Growth ระหว่างอนุภาคของเนื้อดิน แต่จะเข้าไปอยู่ในช่องว่างระหว่างอนุภาคของเนื้อดินได้น้อยกว่าดินขาว ส่งผลให้กระเบื้องที่ผลิตจากดินขาวมีค่าเฉลี่ยร้อยละการดูดซึมน้ำที่ต่ำกว่ากระเบื้องที่ผลิตจากดินดำ และสอดคล้องกับค่าเฉลี่ยความหนาแน่น ที่พบว่าเมื่อค่าเฉลี่ยความหนาแน่นเพิ่มขึ้น จะส่งผลให้ค่าเฉลี่ยร้อยละการดูดซึมน้ำมีค่าลดลง



รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยร้อยละการดูดซึมน้ำกับร้อยละของเศษแก้วสีชาผสมดินขาว เผาขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส

4.1.2.4 การทดสอบการหดตัวหลังเผา

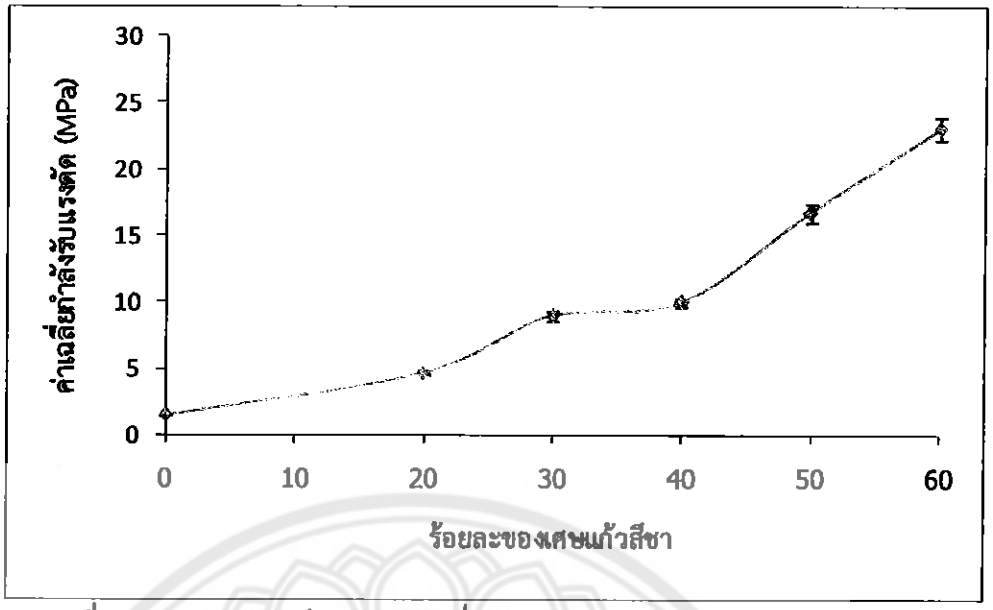
อิทธิพลของอัตราส่วนของเศษแก้วสีชากับดิน ที่มีต่อค่าการทดสอบค่าเฉลี่ยการหดตัวหลังเผาของกระเบื้องดินเซรามิก ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4.2 และรูปที่ 4.7 นั่นคือ เมื่อนำกระเบื้องไปผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส พบว่าค่าเฉลี่ยการหดตัวหลังเผามีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากการเพิ่มปริมาณเศษแก้วสีชาลงในอัตราส่วนผสม จะช่วยให้เกิด Liquid Phase Sintering ทำให้อนุภาคระหว่างเนื้อดินเกิด Neck Growth ได้ง่าย และรวดเร็ว ส่งผลให้เนื้อดินเกิดการหดตัวรวมกัน นอกจากนี้พบว่ากระเบื้องที่ผลิตจากดินดำมีค่าเฉลี่ยการหดตัวหลังเผาที่สูงกว่ากระเบื้องที่ผลิตจากดินขาว เนื่องจากดินดำเป็นดินทุติยภูมิ มีขนาดของอนุภาคที่เล็กกว่า และมีการหดตัวหลังเผาสูงกว่าดินขาวซึ่งเป็นดินปฐมภูมิ ทำให้เมื่อดินดำหลอมรวมกับเศษแก้วสีชาในอัตราส่วนที่มากขึ้น ส่งผลให้ค่าเฉลี่ยการหดตัวหลังเผาของกระเบื้องที่ผลิตจากดินดำสูงกว่ากระเบื้องที่ผลิตจากดินขาว



รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยการหดตัวหลังเผากับร้อยละของเศษแก้วสีชาผสมดินขาว เผาขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส

4.1.2.5 การทดสอบกำลังรับแรงดัด

อิทธิพลของอัตราส่วนของเศษแก้วสีชากับดิน ที่มีต่อค่าการทดสอบค่าเฉลี่ยกำลังรับแรงดัดของกระเบื้องดินเซรามิก ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4.2 และรูปที่ 4.8 นั่นคือ เมื่อนำกระเบื้องไปผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส พบว่าค่าเฉลี่ยกำลังรับแรงดัดมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากการเพิ่มปริมาณเศษแก้วสีชาลงในอัตราส่วนผสมจะช่วยให้เกิด Liquid Phase Sintering ได้ง่าย ส่งผลให้อนุภาคของเนื้อดินยึดติดกันได้แน่น มีความแข็งแกร่งเพิ่มขึ้น จึงทำให้กระเบื้องหลังเผามีค่าเฉลี่ยกำลังรับแรงดัดเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่ากระเบื้องที่ผลิตจากดินขาวมีค่าเฉลี่ยกำลังรับแรงดัดที่สูงกว่ากระเบื้องที่ผลิตจากดินดำ เนื่องจากดินขาวมีขนาดของอนุภาคที่ใหญ่กว่าดินดำ การเกิด Liquid Phase Sintering ที่เกิดขึ้น จะเข้าไปแทรกตัวอยู่ในช่องว่างระหว่างอนุภาคของเนื้อดิน อีกทั้งช่วยเร่งการเกิด Neck Growth จึงทำให้เนื้อดินยึดตัวกันแน่นกว่าดินดำ ซึ่งดินดำมีอนุภาคที่เล็กกว่า ดังนั้นการเกิด Liquid Phase Sintering แม้จะช่วยให้เกิด Neck Growth ระหว่างอนุภาคของเนื้อดิน แต่จะเข้าไปอยู่ในช่องว่างระหว่างเนื้อดินได้น้อยกว่า ส่งผลให้กระเบื้องที่ผลิตจากดินขาวมีค่าเฉลี่ยกำลังรับแรงดัดสูงกว่ากระเบื้องที่ผลิตจากดินดำ



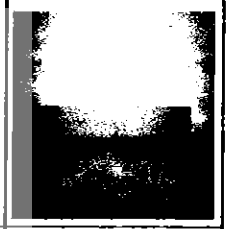
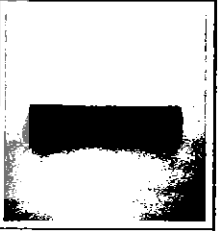
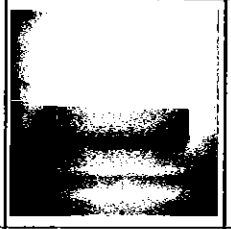
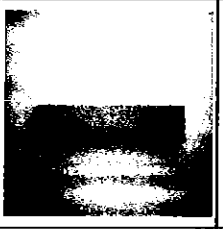
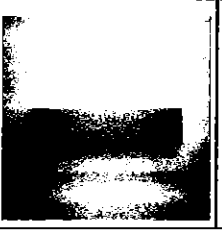
รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยกำลังรับแรงดัดกับร้อยละของเศษแก้วสีชาผสมดินขาว เผาขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส

4.2 ศึกษาผลของอุณหภูมิในการเผาที่มีผลต่อสมบัติทางกายภาพ และทางกลของกระเบื้องดินเซรามิก

การศึกษาผลของอุณหภูมิในการเผาที่มีผลต่อสมบัติทางกายภาพ และทางกล ได้นำเอาเศษแก้วเหลือทิ้งผสมกับดิน โดยทำการแปรค่าอัตราส่วนผสมระหว่างดินดำต่อเศษแก้วสีชาเป็น 100 : 0, 80 : 20, 70 : 30, 60 : 40, 50 : 50 และ 40 : 60 ตามลำดับ แปรค่าอัตราส่วนผสมระหว่างดินขาวต่อเศษแก้วสีชาเป็น 100 : 0, 80 : 20, 70 : 30, 60 : 40, 50 : 50 และ 40 : 60 ตามลำดับ ใช้อุณหภูมิในการเผาขึ้นรูปที่ 900, 1000, 1100 และ 1200 องศาเซลเซียส และพิจารณาค่าที่เหมาะสมจากค่าทดสอบเทียบกับค่ามาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมกระเบื้องดินเผาปูพื้น (มอก.37-2529) ได้แก่ สีของกระเบื้องหลังเผา ค่าความหนาแน่น ค่าร้อยละการดูดซึมน้ำ ค่าการหดตัวหลังเผา และค่ากำลังรับแรงดัด

4.2.1 ผลของอุณหภูมิในการเผาที่มีต่อสมบัติทางกายภาพ และทางกลของกระเบื้องดินเซรามิกที่ผลิตจากดินดำผสมกับเศษแก้วสีชา

ตารางที่ 4.3 สีของกระเบื้องดินดำหลังเผาขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 900, 1000, 1100 และ 1200 องศาเซลเซียส

อัตราส่วนผสมระหว่างดินดำต่อเศษแก้วสีชา	อุณหภูมิในการเผา (°C)			
	900	1000	1100	1200
100 : 0				
80 : 20				
70 : 30				
60 : 40				
50 : 50			-	-
40 : 60			-	-

4.2.1.1 สีกระเบื้องหลังเผา

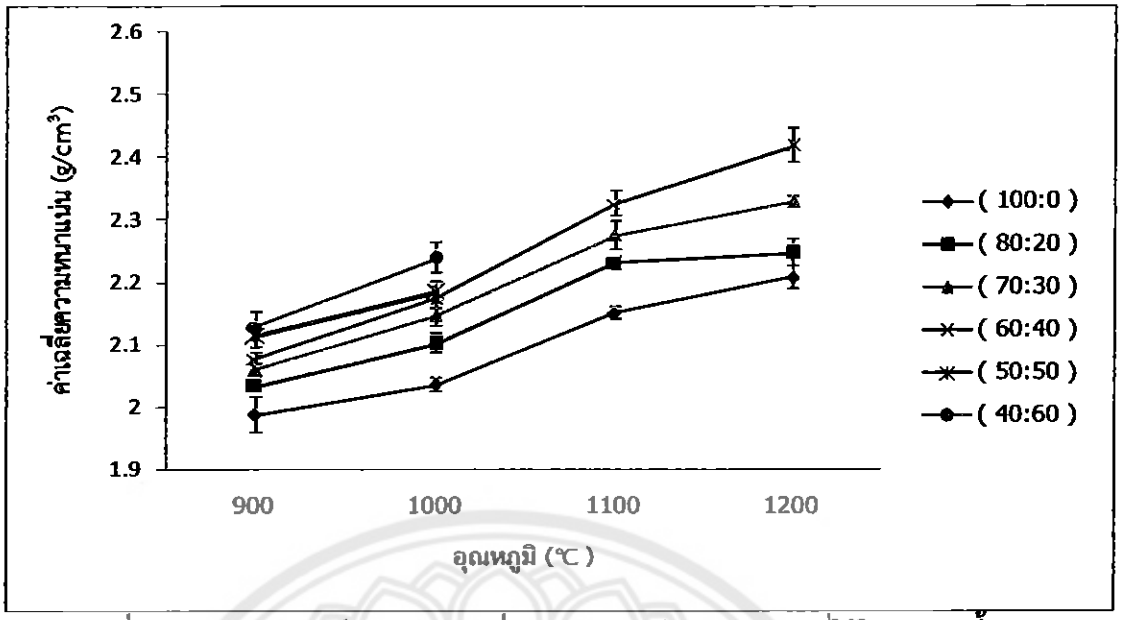
สีกระเบื้องหลังเผาดังแสดงในตารางที่ 4.3 เมื่อแปรค่าอัตราส่วนผสมระหว่างดินดำต่อเศษแก้วสีชาเป็น 100 : 0, 80 : 20, 70 : 30, 60 : 40, 50 : 50 และ 40 : 60 ตามลำดับ พบว่าการเพิ่มของอุณหภูมิ ส่งผลให้สีของกระเบื้องมีความแตกต่างกัน เนื่องจากเศษแก้วสีชามีออกไซด์ของแมงกานีสผสมอยู่ นอกจากนี้ดินดำเป็นดินทุติยภูมิ มีอินทรีย์สารอยู่มาก ทำให้เมื่อปริมาณอินทรีย์สารในเนื้อดินดำผสมรวมกับเศษแก้วสีชาแล้วเผาที่อุณหภูมิสูงขึ้น ทำให้ดินดำเกิดการสุกตัวมากขึ้น จึงส่งผลให้กระเบื้องหลังเผามีสีที่แตกต่างกัน

4.2.1.2 การทดสอบความหนาแน่น

ค่าเฉลี่ยความหนาแน่นดังแสดงในตารางที่ 4.4 และรูปที่ 4.9 เมื่อแปรค่าอัตราส่วนผสมระหว่างดินดำต่อเศษแก้วสีชาเป็น 100 : 0, 80 : 20, 70 : 30, 60 : 40, 50 : 50 และ 40 : 60 ตามลำดับ แล้วนำกระเบื้องไปผ่านการเผาขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 900, 1000, 1100 และ 1200 องศาเซลเซียส ตามลำดับ พบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการเผา ค่าเฉลี่ยความหนาแน่นก็จะสูงขึ้นตามไปด้วย เนื่องจากการเพิ่มอุณหภูมิในการเผากระเบื้อง จะเร่งการเกิด Liquid Phase Sintering ทำให้เนื้อดินเกิด Neck Growth ได้ง่าย และรวดเร็ว ส่งผลให้อนุภาคของเนื้อดินยึดตัวกันได้แน่น จึงทำให้กระเบื้องหลังเผามีค่าเฉลี่ยความหนาแน่นเพิ่มมากขึ้น ในขณะที่กระเบื้องที่ผ่านการเผาขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 1100 และ 1200 องศาเซลเซียส ที่อัตราส่วนผสมระหว่างดินดำต่อเศษแก้วสีชาเท่ากับ 50 : 50 และ 40 : 60 กระเบื้องหลังเผาเกิดการหลอมเหลวติดกันทุกชิ้น ไม่สามารถนำมาทดสอบหาค่าเฉลี่ยความหนาแน่นได้ เนื่องจากดินดำมีอนุภาคขนาดเล็ก มีพื้นผิวสัมผัสระหว่างอนุภาคมาก ทำให้เมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการเผา จะเกิดการสะสมความร้อนบริเวณคอคอด (Neck Growth) มากขึ้น ส่งผลทำให้กระเบื้องหลังเผาเกิดการหลอมเหลวได้ง่าย

ตารางที่ 4.4 ค่าเฉลี่ยความหนาแน่นของกระเบื้องดินดำหลังเผาที่อุณหภูมิต่างๆ

อัตราส่วนผสมระหว่างดินดำต่อเศษแก้วสีชา	ค่าเฉลี่ยความหนาแน่น (g/cm^3)			
	900 °C	1000 °C	1100 °C	1200 °C
100 : 0	1.99	2.04	2.15	2.21
80 : 20	2.03	2.10	2.23	2.25
70 : 30	2.06	2.15	2.27	2.33
60 : 40	2.08	2.17	2.33	2.42
50 : 50	2.11	2.18	-	-
40 : 60	2.13	2.24	-	-
มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมกระเบื้องดินเผาปูพื้น (มอก.37-2529)	ไม่กำหนด			



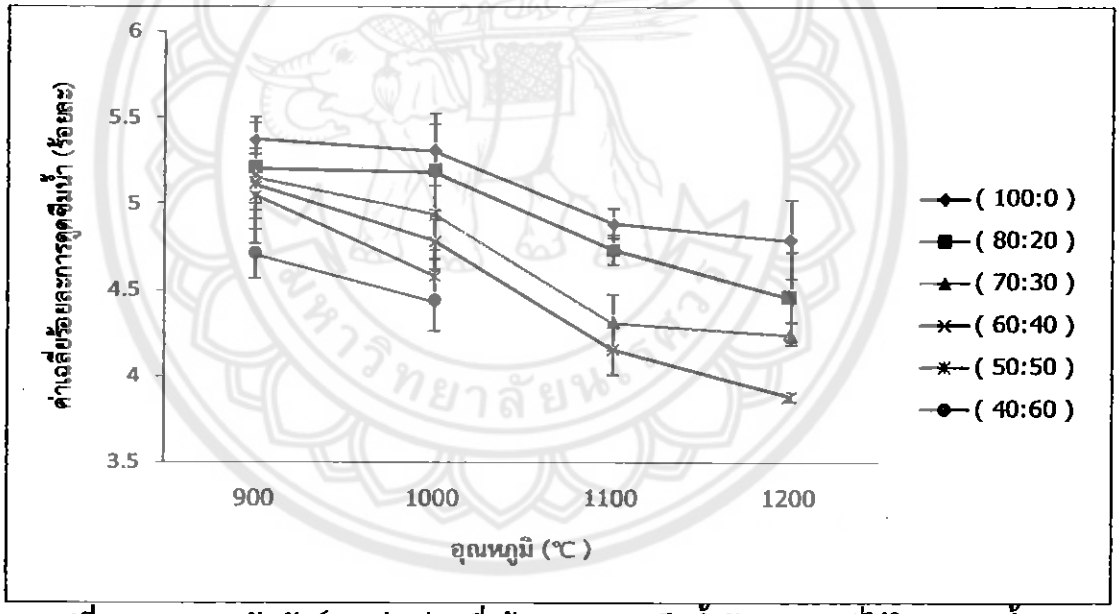
รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยความหนาแน่นกับอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาขึ้นรูป

4.2.1.3 การทดสอบร้อยละการดูดซึมน้ำ

ค่าเฉลี่ยร้อยละการดูดซึมน้ำดังแสดงในตารางที่ 4.5 และรูปที่ 4.10 เมื่อแปรค่าอัตราส่วนผสมระหว่างดินดำต่อเศษแก้วสีชาเป็น 100 : 0, 80 : 20, 70 : 30, 60 : 40, 50 : 50 และ 40 : 60 ตามลำดับ แล้วนำกระเบื้องไปผ่านการเผาขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 900, 1000, 1100 และ 1200 องศาเซลเซียส ตามลำดับ พบว่าทุกอัตราส่วนผสมระหว่างดินดำต่อเศษแก้วสีชา ให้ค่าผ่านตามเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมกระเบื้องดินเผาปูพื้น (มอก.37-2529) และพบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการเผา ค่าเฉลี่ยร้อยละการดูดซึมน้ำจะลดลงตามไปด้วย สอดคล้องกับค่าเฉลี่ยความหนาแน่น ในหัวข้อ 4.2.1.2 ที่พบว่าค่าเฉลี่ยความหนาแน่นเพิ่มขึ้น เมื่ออุณหภูมิการเผาเพิ่มสูงขึ้น จึงส่งผลให้ค่าเฉลี่ยร้อยละการดูดซึมน้ำมีค่าลดลง ในขณะที่กระเบื้องที่ผ่านการเผาขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 1100 และ 1200 องศาเซลเซียส ที่อัตราส่วนผสมระหว่างดินดำต่อเศษแก้วสีชาเท่ากับ 50 : 50 และ 40 : 60 กระเบื้องหลังเผาเกิดการหลอมเหลวติดกันทุกชิ้น ไม่สามารถนำมาทดสอบหาค่าเฉลี่ยร้อยละการดูดซึมน้ำได้ เนื่องจากดินดำมีอนุภาคขนาดเล็ก มีพื้นผิวสัมผัสระหว่างอนุภาคมาก ทำให้เมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการเผา จะเกิดการสะสมความร้อนบริเวณคอคอด (Neck Growth) มากขึ้น ส่งผลทำให้กระเบื้องหลังเผาเกิดการหลอมเหลวได้ง่าย

ตารางที่ 4.5 ค่าเฉลี่ยร้อยละการดูดซึมน้ำของกระเบื้องดินดำหลังเผาที่อุณหภูมิต่างๆ

อัตราส่วนผสมระหว่างดินดำต่อเศษแก้วสีชา	ค่าเฉลี่ยร้อยละการดูดซึมน้ำ (ร้อยละ)			
	900 ℃	1000 ℃	1100 ℃	1200 ℃
100 : 0	5.37	5.31	4.89	4.79
80 : 20	5.20	5.19	4.73	4.45
70 : 30	5.15	4.94	4.31	4.24
60 : 40	5.11	4.79	4.15	3.88
50 : 50	5.05	4.58	-	-
40 : 60	4.71	4.43	-	-
มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมกระเบื้องดินเผาปูพื้น (มอก.37-2529)	ไม่เกินร้อยละ 6			



รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยร้อยละการดูดซึมน้ำกับอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาขึ้นรูป

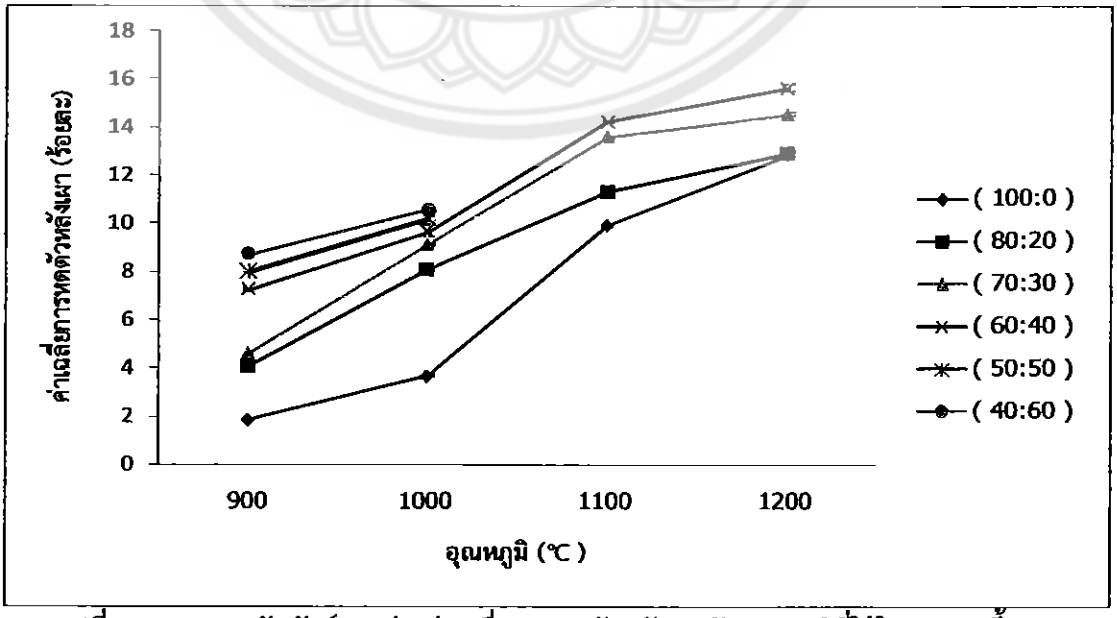
4.2.1.4 การทดสอบการหดตัวหลังเผา

ค่าเฉลี่ยการหดตัวหลังเผาดังแสดงในตารางที่ 4.6 และรูปที่ 4.11 เมื่อแปรค่าอัตราส่วนผสมระหว่างดินดำต่อเศษแก้วสีชาเป็น 100 : 0, 80 : 20, 70 : 30, 60 : 40, 50 : 50 และ 40 : 60 ตามลำดับ แล้วนำกระเบื้องไปผ่านการเผาขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 900, 1000, 1100 และ 1200 องศาเซลเซียส ตามลำดับ พบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการเผา ค่าเฉลี่ยการหดตัวหลังเผาจะสูงขึ้นตามไปด้วย เนื่องจากดินดำมีขนาดอนุภาคเล็ก ดังนั้นการเพิ่มอุณหภูมิการเผา จะส่งผลให้เกิด Liquid

Phase Sintering ได้มากขึ้น ซึ่งจะไปช่วยการหลอมตัวระหว่างอนุภาคเนื้อดิน ทำให้อนุภาคของเนื้อดินหดตัว และเกิด Neck Growth ได้มากขึ้น ส่งผลให้ค่าเฉลี่ยการหดตัวหลังเผามีค่าเพิ่มขึ้น ในขณะที่กระเบื้องที่ผ่านการเผาขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 1100 และ 1200 องศาเซลเซียส ที่อัตราส่วนผสมระหว่างดินดำต่อเศษแก้วสีชาเท่ากับ 50 : 50 และ 40 : 60 กระเบื้องหลังเผาเกิดการหลอมเหลวติดกันทุกชิ้น ไม่สามารถนำมาทดสอบหาค่าเฉลี่ยการหดตัวหลังเผาได้ เนื่องจากดินดำมีอนุภาคขนาดเล็ก มีพื้นผิวสัมผัสระหว่างอนุภาคมาก ทำให้เมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการเผา จะเกิดการสะสมความร้อนบริเวณคอคอด (Neck Growth) มากขึ้น ส่งผลทำให้กระเบื้องหลังเผาเกิดการหลอมเหลวได้ง่าย

ตารางที่ 4.6 ค่าเฉลี่ยการหดตัวหลังเผาของกระเบื้องดินดำหลังเผาที่อุณหภูมิต่างๆ

อัตราส่วนผสมระหว่างดินดำต่อเศษแก้วสีชา	ค่าเฉลี่ยการหดตัวหลังเผา (ร้อยละ)			
	900 ℃	1000 ℃	1100 ℃	1200 ℃
100 : 0	1.84	3.66	9.93	12.87
80 : 20	4.06	8.08	11.27	12.91
70 : 30	4.60	9.11	13.61	14.53
60 : 40	7.24	9.67	14.23	15.63
50 : 50	8.02	10.20	-	-
40 : 60	8.71	10.60	-	-
มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมกระเบื้องดินเผาปูพื้น (มอก.37-2529)	ไม่กำหนด			



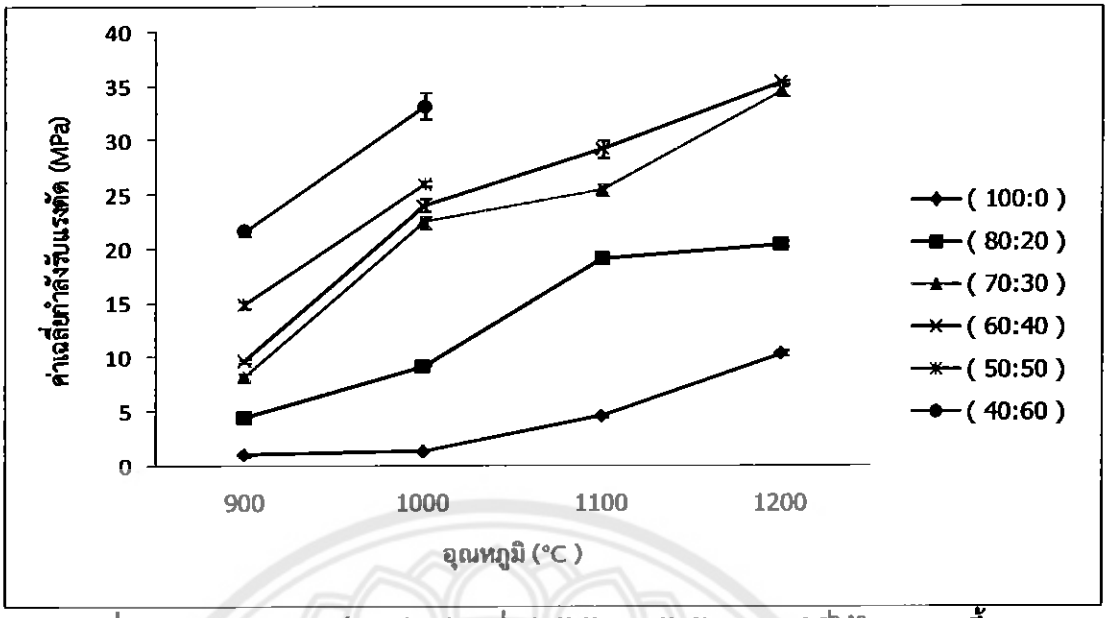
รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยการหดตัวหลังเผากับอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาขึ้นรูป

4.2.1.5 การทดสอบกำลังรับแรงดัด

ค่าเฉลี่ยกำลังรับแรงดัดดังแสดงในตารางที่ 4.7 และรูปที่ 4.12 เมื่อแปรค่าอัตราส่วนผสมระหว่างดินดำต่อเศษแก้วสีชาเป็น 100 : 0, 80 : 20, 70 : 30, 60 : 40, 50 : 50, 40 : 60 ตามลำดับ แล้วนำกระเบื้องไปผ่านการเผาขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 900, 1000, 1100 และ 1200 องศาเซลเซียส ตามลำดับ พบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการเผา ค่าเฉลี่ยกำลังรับแรงดัดจะสูงขึ้นตามไปด้วย เนื่องจากการเพิ่มอุณหภูมิในการเผากระเบื้องทำให้เกิด Liquid Phase Sintering ได้ง่าย ส่งผลให้อนุภาคของเนื้อดินเกิดการหดตัวติดกันได้มากขึ้น อนุภาคของเนื้อดินยึดตัวกันได้แน่น มีช่องว่างระหว่างเนื้อดินน้อยลง และเนื้อดินสุกตัวเร็วขึ้น จึงทำให้กระเบื้องหลังเผามีค่าเฉลี่ยกำลังรับแรงดัดเพิ่มขึ้น ซึ่งผลจากการทดสอบค่าเฉลี่ยกำลังรับแรงดัดสอดคล้องกับผลการทดสอบค่าเฉลี่ยความหนาแน่น และค่าเฉลี่ยร้อยละการดูดซึมน้ำ ที่พบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการเผา ส่งผลให้ค่าเฉลี่ยความหนาแน่นเพิ่มขึ้น ค่าเฉลี่ยร้อยละการดูดซึมน้ำลดลง จึงทำให้ค่าเฉลี่ยกำลังรับแรงดัดมีค่าเพิ่มมากขึ้น ในขณะที่กระเบื้องที่ผ่านการเผาขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 1100 และ 1200 องศาเซลเซียส ที่อัตราส่วนผสมระหว่างดินดำต่อเศษแก้วสีชาเท่ากับ 50 : 50 และ 40 : 60 กระเบื้องหลังเผาเกิดการหลอมเหลวติดกันทุกชิ้น ไม่สามารถนำมาทดสอบหาค่าเฉลี่ยกำลังรับแรงดัดได้ เนื่องจากดินดำมีอนุภาคขนาดเล็กมีพื้นผิวสัมผัสระหว่างอนุภาคมาก ทำให้เมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการเผา จะเกิดการสะสมความร้อนบริเวณคอคอด (Neck Growth) มากขึ้น ส่งผลทำให้กระเบื้องหลังเผาเกิดการหลอมเหลวได้ง่าย

ตารางที่ 4.7 ค่าเฉลี่ยกำลังรับแรงดัดของกระเบื้องดินดำหลังเผาที่อุณหภูมิต่างๆ

อัตราส่วนผสมระหว่างดินดำต่อเศษแก้วสีชา	ค่าเฉลี่ยกำลังรับแรงดัด (MPa)			
	900 ℃	1000 ℃	1100 ℃	1200 ℃
100 : 0	1.01	1.32	4.60	10.41
80 : 20	4.51	9.25	19.14	20.50
70 : 30	8.20	22.49	25.48	34.64
60 : 40	9.73	24.08	29.20	35.41
50 : 50	14.91	26.04	-	-
40 : 60	21.62	33.16	-	-
มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมกระเบื้องดินเผาปูพื้น (มอก.37-2529)	ไม่น้อยกว่า 25 เมกะปาสคาล			



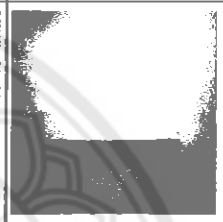
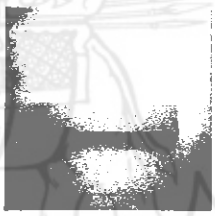
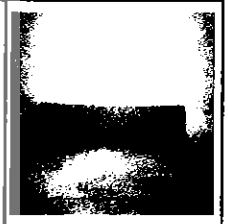
รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยกำลังรับแรงดัดกับอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาขึ้นรูป

4.2.2 ผลของอุณหภูมิในการเผาที่มีต่อสมบัติทางกายภาพ และทางกลของกระเบื้องดินเซรามิกที่ผลิตจากดินขาวผสมกับเศษแก้วสีชา

ตารางที่ 4.8 สีของกระเบื้องดินขาวหลังเผาขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 900, 1000, 1100 และ 1200 องศาเซลเซียส

อัตราส่วนผสมระหว่างดินขาวต่อเศษแก้วสีชา	อุณหภูมิในการเผา (°C)			
	900	1000	1100	1200
100 : 0				
80 : 20				

ตารางที่ 4.8 (ต่อ) สีของกระเบื้องดินขาวหลังเผาขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 900, 1000, 1100 และ 1200 องศาเซลเซียส

อัตราส่วนผสมระหว่างดินขาวต่อเศษแก้วสีชา	อุณหภูมิในการเผา (°C)			
	900	1000	1100	1200
70 : 30				
60 : 40				
50 : 50				
40 : 60				-

4.2.2.1 สีกระเบื้องหลังเผา

สีกระเบื้องหลังเผาดังแสดงในตารางที่ 4.8 เมื่อแปรค่าอัตราส่วนผสมระหว่างดินขาวต่อเศษแก้วสีชาเป็น 100 : 0, 80 : 20, 70 : 30, 60 : 40, 50 : 50 และ 40 : 60 ตามลำดับ แล้วทำการเผาที่อุณหภูมิ 900, 1000, 1100 และ 1200 องศาเซลเซียส ตามลำดับ พบว่าการเพิ่มของอุณหภูมิ ส่งผลให้สีกระเบื้องหลังเผามีความแตกต่างกัน แต่มีความแตกต่างกันไม่มากนัก เนื่องจากดินขาวเป็นดินปฐมภูมิ มีอินทรียวัตถุ และออกไซด์ของโลหะต่างๆ อันเป็นตัวทำให้ดินเกิดสีในจำนวนที่ต่ำมาก โดยทั่วไปมีพวกเหล็กออกไซด์ ไลด์ แมกนีเซีย และไททาเนียมออกไซด์อยู่เพียงเล็กน้อย ทำให้เมื่อผ่านการเผาที่อุณหภูมิสูงขึ้น สีของกระเบื้องจึงมีความแตกต่างกันไม่มากนัก นอกจากนี้พบว่าการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิในการเผา ดินดำจะให้สีกระเบื้องหลังเผาที่มีความแตกต่างกันมากกว่า

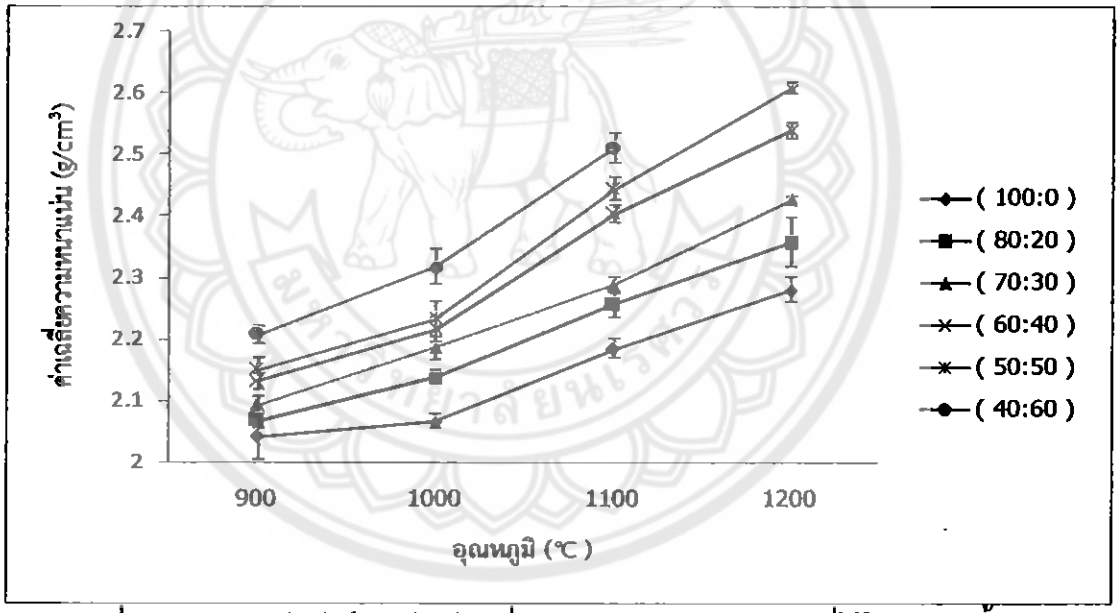
เนื่องจากดินดำเป็นดินทุติยภูมิ เกิดจากการสะสมตัวโดยการตกตะกอนในสภาวะที่มีอินทรีย์สารอยู่มาก ทำให้เมื่อปริมาณอินทรีย์สารในเนื้อดินดำผสมรวมกับเศษแก้วสีชาแล้วผ่านการเผาที่อุณหภูมิสูงขึ้น ส่งผลให้กระเบื้องที่ผลิตจากดินดำมีสีหลังเผาที่เข้มกว่ากระเบื้องที่ผลิตจากดินขาว

4.2.2.2 การทดสอบความหนาแน่น

ค่าเฉลี่ยความหนาแน่นดังแสดงในตารางที่ 4.9 และรูปที่ 4.13 เมื่อแปรค่าอัตราส่วนผสมระหว่างดินขาวต่อเศษแก้วสีชาเป็น 100 : 0, 80 : 20, 70 : 30, 60 : 40, 50 : 50 และ 40 : 60 ตามลำดับ แล้วนำกระเบื้องไปผ่านการเผาขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 900, 1000, 1100 และ 1200 องศาเซลเซียส ตามลำดับ พบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการเผา ค่าเฉลี่ยความหนาแน่นจะสูงขึ้นตามไปด้วย เนื่องจากการเพิ่มอุณหภูมิในการเผากระเบื้องจะเร่งการเกิด Liquid Phase Sintering ส่งผลให้อนุภาคของเนื้อดินเกิดการหดตัวติดกันได้ง่ายขึ้น จึงทำให้กระเบื้องหลังเผามีค่าเฉลี่ยความหนาแน่นเพิ่มขึ้น นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบกับกระเบื้องที่ผลิตจากดินดำ พบว่าค่าเฉลี่ยความหนาแน่นของกระเบื้องที่ผลิตจากดินขาวมีค่าสูงกว่ากระเบื้องที่ผลิตจากดินดำ เนื่องจากดินขาวเป็นดินปฐมภูมิ มีขนาดของอนุภาคที่ใหญ่กว่าดินดำ เมื่อเพิ่มปริมาณของเศษแก้วสีชาในอัตราส่วนผสม การเกิด Liquid Phase Sintering ของดินขาวจะเข้าไปอยู่ในช่องว่างระหว่างเนื้อดิน รวมทั้งช่วยให้เกิด Neck Growth ระหว่างอนุภาคของเนื้อดิน ในขณะที่ดินดำเป็นดินทุติยภูมิ การเกิด Liquid Phase Sintering แม้จะช่วยให้เกิด Neck Growth ระหว่างอนุภาคของเนื้อดิน แต่จะเข้าไปอยู่ในช่องว่างระหว่างอนุภาคของเนื้อดินได้น้อยกว่าดินขาว ส่งผลให้กระเบื้องที่ผลิตจากดินขาวมีค่าเฉลี่ยความหนาแน่นที่สูงกว่ากระเบื้องที่ผลิตจากดินดำ ในขณะที่กระเบื้องที่ผ่านการเผาขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 1100 และ 1200 องศาเซลเซียส ที่อัตราส่วนผสมระหว่างดินดำต่อเศษแก้วสีชาเท่ากับ 50 : 50 และ 40 : 60 และกระเบื้องที่ผ่านการเผาขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส มีเพียงอัตราส่วนผสมระหว่างดินขาวต่อเศษแก้วสีชาเท่ากับ 40 : 60 ซึ่งกระเบื้องหลังเผาเกิดการหลอมเหลวติดกันทุกชิ้น ไม่สามารถนำมาทดสอบหาค่าเฉลี่ยความหนาแน่นได้ เนื่องจากดินดำมีอนุภาคที่เล็กกว่าดินขาว มีพื้นผิวสัมผัสระหว่างอนุภาคมากกว่า ทำให้เมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการเผา ดินดำจะเกิดการสะสมความร้อนบริเวณคอคอด (Neck Growth) ได้มากกว่าดินขาว ส่งผลทำให้กระเบื้องที่ผลิตจากดินดำเกิดการหลอมเหลวได้ดีกว่ากระเบื้องที่ผลิตจากดินขาว

ตารางที่ 4.9 ค่าเฉลี่ยความหนาแน่นของกระเบื้องดินขาวหลังเผาที่อุณหภูมิต่างๆ

อัตราส่วนผสมระหว่างดินขาวต่อเศษแก้วสีชา	ค่าเฉลี่ยความหนาแน่น (g/cm^3)			
	900 ℃	1000 ℃	1100 ℃	1200 ℃
100 : 0	2.04	2.07	2.18	2.28
80 : 20	2.07	2.14	2.26	2.36
70 : 30	2.09	2.19	2.29	2.43
60 : 40	2.13	2.21	2.40	2.54
50 : 50	2.15	2.23	2.44	2.61
40 : 60	2.21	2.32	2.51	-
มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมกระเบื้องดินเผาปูพื้น (มอก.37-2529)	ไม่กำหนด			



รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยความหนาแน่นกับอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาขึ้นรูป

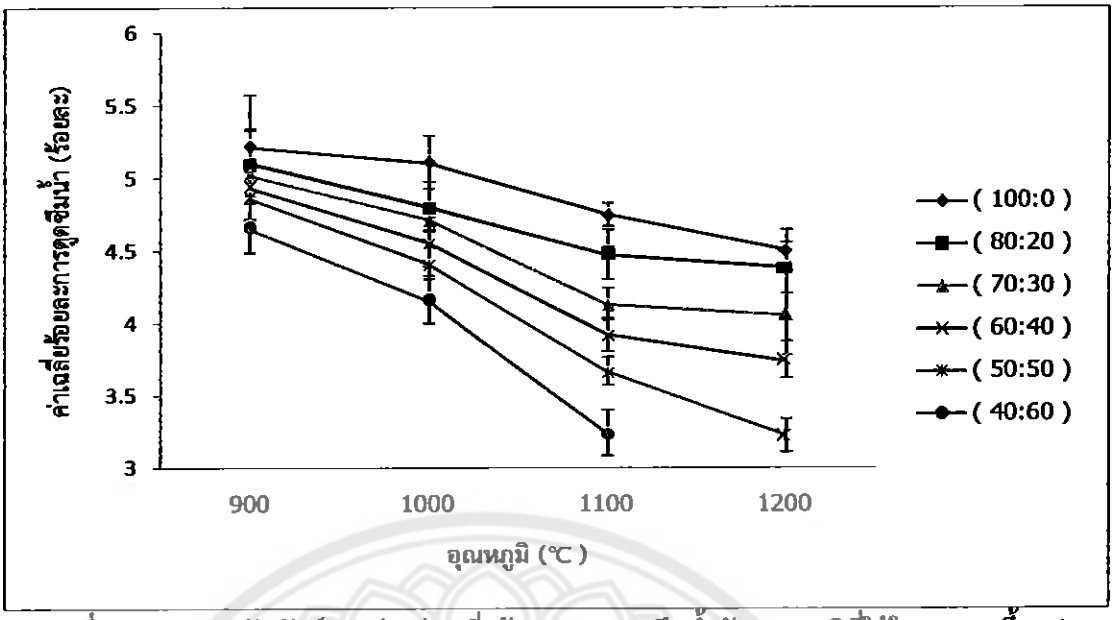
4.2.2.3 การทดสอบร้อยละการดูดซึมน้ำ

ค่าเฉลี่ยร้อยละการดูดซึมน้ำดังแสดงในตารางที่ 4.10 และรูปที่ 4.14 เมื่อแปรค่าอัตราส่วนผสมระหว่างดินขาวต่อเศษแก้วสีชาเป็น 100 : 0, 80 : 20, 70 : 30, 60 : 40, 50 : 50 และ 40 : 60 ตามลำดับ แล้วนำกระเบื้องไปผ่านการเผาขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 900, 1000, 1100 และ 1200 องศาเซลเซียส ตามลำดับ พบว่าทุกอัตราส่วนผสมระหว่างดินขาวต่อเศษแก้วสีชา ให้ค่าผ่านตามเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมกระเบื้องดินเผาปูพื้น (มอก.37-2529) และพบว่าเมื่อเพิ่ม

อุณหภูมิในการเผา ค่าเฉลี่ยร้อยละการดูดซึมน้ำจะลดลง นอกจากนี้พบว่าค่าเฉลี่ยร้อยละการดูดซึมน้ำของกระเบื้องที่ผลิตจากดินขาวมีค่าต่ำกว่ากระเบื้องที่ผลิตจากดินดำ ทั้งนี้เป็นไปดังคำอธิบายในหัวข้อ 4.2.2.2 และสอดคล้องกับค่าเฉลี่ยความหนาแน่นที่พบว่าเมื่อค่าเฉลี่ยความหนาแน่นเพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าเฉลี่ยร้อยละการดูดซึมน้ำมีค่าลดลง ในขณะที่กระเบื้องที่ผ่านการเผาขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 1100 และ 1200 องศาเซลเซียส ที่อัตราส่วนผสมระหว่างดินดำต่อเศษแก้วสีชาเท่ากับ 50 : 50 และ 40 : 60 และกระเบื้องที่ผ่านการเผาขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส มีเพียงอัตราส่วนผสมระหว่างดินขาวต่อเศษแก้วสีชาเท่ากับ 40 : 60 ซึ่งกระเบื้องหลังเผาเกิดการหลอมเหลวติดกันทุกชิ้น ไม่สามารถนำมาทดสอบหาค่าเฉลี่ยร้อยละการดูดซึมน้ำได้ เนื่องจากดินดำมีอนุภาคที่เล็กกว่าดินขาว มีพื้นผิวสัมผัสระหว่างอนุภาคมากกว่า ทำให้เมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการเผา ดินดำจะเกิดการสะสมความร้อนบริเวณคอคอด (Neck Growth) ได้มากกว่าดินขาว ส่งผลทำให้กระเบื้องที่ผลิตจากดินดำเกิดการหลอมเหลวได้ดีกว่ากระเบื้องที่ผลิตจากดินขาว

ตารางที่ 4.10 ค่าเฉลี่ยร้อยละการดูดซึมน้ำของกระเบื้องดินขาวหลังเผาที่อุณหภูมิต่างๆ

อัตราส่วนผสมระหว่างดินขาวต่อเศษแก้วสีชา	ค่าเฉลี่ยร้อยละการดูดซึมน้ำ (ร้อยละ)			
	900 ℃	1000 ℃	1100 ℃	1200 ℃
100 : 0	5.22	5.11	4.75	4.51
80 : 20	5.10	4.80	4.47	4.38
70 : 30	5.02	4.71	4.13	4.06
60 : 40	4.94	4.55	3.92	3.74
50 : 50	4.87	4.41	3.66	3.22
40 : 60	4.66	4.16	3.23	-
มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมกระเบื้องดินเผาปูพื้น (มอก.37-2529)	ไม่เกินร้อยละ 6			



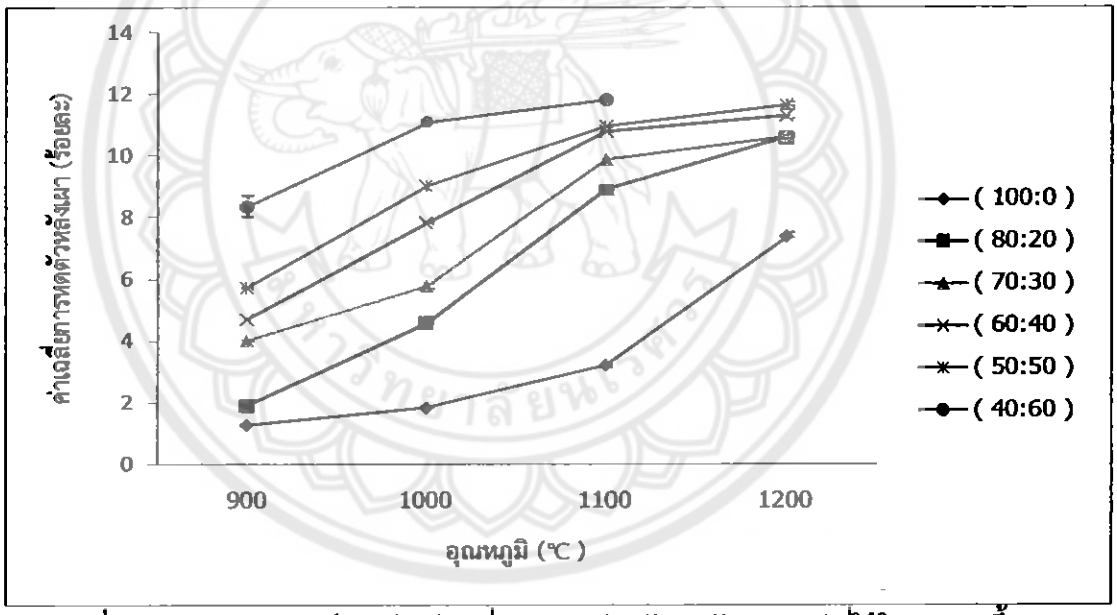
รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยร้อยละการดูดซึมน้ำกับอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาขึ้นรูป

4.2.2.4 การทดสอบการหดตัวหลังเผา

ค่าเฉลี่ยการหดตัวหลังเผาดังแสดงในตารางที่ 4.11 และรูปที่ 4.15 เมื่อแปรค่าอัตราส่วนผสมระหว่างดินขาวต่อเศษแก้วสีชาเป็น 100 : 0, 80 : 20, 70 : 30, 60 : 40, 50 : 50 และ 40 : 60 ตามลำดับ แล้วนำกระเบื้องไปผ่านการเผาขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 900, 1000, 1100 และ 1200 องศาเซลเซียส พบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการเผา ค่าเฉลี่ยการหดตัวหลังเผาจะสูงขึ้นตามไปด้วย เนื่องจากการเพิ่มอุณหภูมิในการเผากระเบื้องจะเร่งการเกิด Liquid Phase Sintering ส่งผลให้อนุภาคของเนื้อดินเกิดการหดตัวรวมกัน อนุภาคของเนื้อดินยึดติดกันมากขึ้น จึงทำให้กระเบื้องหลังเผา มีค่าเฉลี่ยการหดตัวหลังเผาสูงขึ้น นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบกับกระเบื้องที่ผลิตจากดินดำ พบว่าค่าเฉลี่ยการหดตัวหลังเผาของกระเบื้องที่ผลิตจากดินขาวมีค่าต่ำกว่ากระเบื้องที่ผลิตจากดินดำ เนื่องจากดินขาวเป็นดินที่มีเม็ดหยาบ มีความเหนียวน้อย ในขณะเดียวกันดินดำเป็นดินที่มีเม็ดละเอียด มีความเหนียวสูง ทำให้เมื่อผ่านการเผาที่อุณหภูมิสูงขึ้น ส่งผลให้กระเบื้องที่ผลิตจากดินดำมีค่าเฉลี่ยการหดตัวหลังเผาที่สูงกว่ากระเบื้องที่ผลิตจากดินขาว ในขณะที่กระเบื้องที่ผ่านการเผาขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 1100 และ 1200 องศาเซลเซียส ที่อัตราส่วนผสมระหว่างดินดำต่อเศษแก้วสีชาเท่ากับ 50 : 50 และ 40 : 60 และกระเบื้องที่ผ่านการเผาขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส มีเพียงอัตราส่วนผสมระหว่างดินขาวต่อเศษแก้วสีชาเท่ากับ 40 : 60 ซึ่งกระเบื้องหลังเผาเกิดการหลอมเหลวติดกันทุกชิ้น ไม่สามารถนำมาทดสอบหาค่าเฉลี่ยการหดตัวหลังเผาได้ เนื่องจากดินดำมีอนุภาคที่เล็กกว่าดินขาว มีพื้นผิวสัมผัสระหว่างอนุภาคมากกว่า ทำให้เมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการเผา ดินดำจะเกิดการสะสมความร้อนบริเวณคอคอด (Neck Growth) ได้มากกว่าดินขาว ส่งผลทำให้กระเบื้องที่ผลิตจากดินดำเกิดการหลอมเหลวได้ดีกว่ากระเบื้องที่ผลิตจากดินขาว

ตารางที่ 4.11 ค่าเฉลี่ยการหดตัวหลังเผาของกระเบื้องดินขาวหลังเผาที่อุณหภูมิต่างๆ

อัตราส่วนผสมระหว่างดินขาวต่อเศษแก้วสีชา	ค่าเฉลี่ยการหดตัวหลังเผา (ร้อยละ)			
	900 ℃	1000 ℃	1100 ℃	1200 ℃
100 : 0	1.29	1.84	3.23	7.40
80 : 20	1.88	4.59	8.91	10.61
70 : 30	3.99	5.76	9.85	10.61
60 : 40	4.69	7.82	10.79	11.33
50 : 50	5.71	9.02	10.95	11.64
40 : 60	8.35	11.11	11.82	-
มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมกระเบื้องดินเผาปูพื้น (มอก.37-2529)	ไม่กำหนด			



รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยการหดตัวหลังเผากับอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาขึ้นรูป

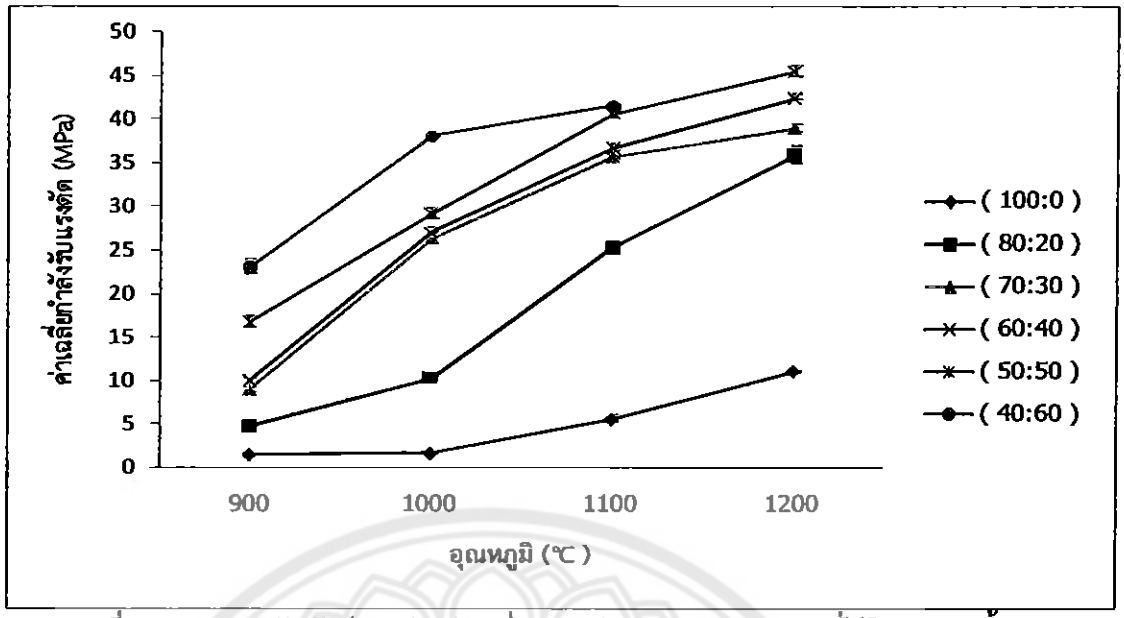
4.2.2.5 การทดสอบกำลังรับแรงดัด

ค่าเฉลี่ยกำลังรับแรงดัดดังแสดงในตารางที่ 4.12 และรูปที่ 4.16 เมื่อแปรค่าอัตราส่วนผสมระหว่างดินขาวต่อเศษแก้วสีชาเป็น 100 : 0, 80 : 20, 70 : 30, 60 : 40, 50 : 50 และ 40 : 60 ตามลำดับ พบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการเผา ค่าเฉลี่ยกำลังรับแรงดัดจะสูงขึ้นตามไปด้วย เนื่องจากเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการเผา ทำให้เกิด Liquid Phase Sintering ได้ง่าย ส่งผลให้อนุภาคของเนื้อดินเกิดการหดตัวติดกันได้ง่ายขึ้น อนุภาคยึดตัวกันได้แน่น มีช่องว่างระหว่างเนื้อดินน้อยลง และเนื้อดินสุกตัวเร็วขึ้น จึงทำให้กระเบื้องหลังเผามีค่าเฉลี่ยกำลังรับแรงดัดเพิ่มขึ้น นอกจากนี้เมื่อ

เปรียบเทียบกับกระเบื้องที่ผลิตจากดินดำ พบว่าค่าเฉลี่ยกำลังรับแรงดัดของกระเบื้องที่ผลิตจากดินขาวมีค่าสูงกว่ากระเบื้องที่ผลิตจากดินดำ เป็นไปดังคำอธิบายในหัวข้อ 4.1.2.5 ซึ่งผลจากการทดสอบค่าเฉลี่ยกำลังรับแรงดัดสอดคล้องกับผลการทดสอบค่าเฉลี่ยความหนาแน่น และค่าเฉลี่ยร้อยละการดูดซึมน้ำ ที่พบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการเผา ส่งผลให้ค่าเฉลี่ยความหนาแน่นเพิ่มขึ้น ค่าเฉลี่ยร้อยละการดูดซึมน้ำลดลง จึงทำให้ค่าเฉลี่ยกำลังรับแรงดัดมีค่าเพิ่มมากขึ้น ในขณะที่กระเบื้องที่ผ่านการเผาขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 1100 และ 1200 องศาเซลเซียส ที่อัตราส่วนผสมระหว่างดินดำต่อเศษแก้วสีชาเท่ากับ 50 : 50 และ 40 : 60 และกระเบื้องที่ผ่านการเผาขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส มีเพียงอัตราส่วนผสมระหว่างดินขาวต่อเศษแก้วสีชาเท่ากับ 40 : 60 ซึ่งกระเบื้องหลังเผาเกิดการหลอมเหลวติดกันทุกชิ้น ไม่สามารถนำมาทดสอบหาค่าเฉลี่ยกำลังรับแรงดัดได้ เนื่องจากดินดำมีอนุภาคที่เล็กกว่าดินขาว มีพื้นผิวสัมผัสระหว่างอนุภาคมากกว่า ทำให้เมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการเผาดินดำจะเกิดการสะสมความร้อนบริเวณคอคอด (Neck Growth) ได้มากกว่าดินขาว ส่งผลทำให้กระเบื้องที่ผลิตจากดินดำเกิดการหลอมเหลวได้ดีกว่ากระเบื้องที่ผลิตจากดินขาว

ตารางที่ 4.12 ค่าเฉลี่ยกำลังรับแรงดัดของกระเบื้องดินขาวหลังเผาที่อุณหภูมิต่างๆ

อัตราส่วนผสมระหว่างดินขาวต่อเศษแก้วสีชา	ค่าเฉลี่ยกำลังรับแรงดัด (MPa)			
	900 ℃	1000 ℃	1100 ℃	1200 ℃
100 : 0	1.49	1.62	5.56	11.05
80 : 20	4.68	10.28	25.30	35.87
70 : 30	8.97	26.33	35.71	38.95
60 : 40	10.02	27.11	36.79	42.52
50 : 50	16.74	29.25	40.66	45.45
40 : 60	23.07	38.13	41.52	-
มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมกระเบื้องดินเผาปูพื้น (มอก.37-2529)	ไม่น้อยกว่า 25 เมกะปาสคาล			



รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยกำลังรับแรงดัดกับอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาขึ้นรูป

บทที่ 5
บทสรุป และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการทำการทดลองศึกษาอัตราส่วนผสมของเศษแก้วเหลือทิ้งผสมกับดิน และอุณหภูมิในการเผาที่มีผลต่อสมบัติทางกายภาพ และทางกลของกระเบื้องดินเซรามิก และอัตราส่วนที่เหมาะสมของเศษแก้วเหลือทิ้งผสมกับดิน ที่สามารถลดอุณหภูมิการเผากระเบื้องดินเซรามิก สามารถวิเคราะห์ และสรุปผลในเรื่องการทดสอบสมบัติทางกายภาพ และทางกล ได้แก่ สีของกระเบื้องหลังเผา ค่าความหนาแน่น ค่าร้อยละการดูดซึมน้ำ ค่าการหดตัวหลังเผา และค่ากำลังรับแรงดัด ได้ดังนี้

5.1.1 อัตราส่วนของเศษแก้วเหลือทิ้งผสมกับดิน และอุณหภูมิในการเผาที่มีผลต่อสมบัติทางกายภาพ และทางกลของกระเบื้องดินเซรามิก

การเพิ่มขึ้นของปริมาณเศษแก้วสีชา รวมถึงอุณหภูมิในการเผาที่สูงขึ้น ส่งผลให้กระเบื้องดินเซรามิกมีสีกระเบื้องหลังเผาที่แตกต่างกัน ค่าเฉลี่ยความหนาแน่นเพิ่มขึ้น ค่าเฉลี่ยร้อยละการดูดซึมน้ำลดลง ค่าเฉลี่ยการหดตัวหลังเผาเพิ่มขึ้น และค่าเฉลี่ยกำลังรับแรงดัดเพิ่มขึ้น โดยพบว่า กระเบื้องที่ผลิตจากดินขาวมีสมบัติทางกายภาพ และทางกลดีกว่ากระเบื้องที่ผลิตจากดินดำ

5.1.2 อัตราส่วนที่เหมาะสมของเศษแก้วเหลือทิ้งผสมกับดิน ที่สามารถลดอุณหภูมิการเผากระเบื้องดินเซรามิก

อัตราส่วนที่เหมาะสมของเศษแก้วเหลือทิ้งผสมกับดิน ได้แก่ กระเบื้องดินเซรามิกที่ผลิตจากดินดำที่อัตราส่วนผสมระหว่างดินดำต่อเศษแก้วสีชาเท่ากับ 50 : 50 และ 40 : 60 เผาขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส ให้ค่าเฉลี่ยกำลังรับแรงดัดผ่านมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมกระเบื้องดินเผาปูพื้น (มอก.37-2529) คือ ให้ค่าเฉลี่ยกำลังรับแรงดัดเท่ากับ 26.04 และ 33.16 เมกะปาสคาล และกระเบื้องดินเซรามิกที่ผลิตจากดินขาวที่อัตราส่วนผสมระหว่างดินขาวต่อเศษแก้วสีชาเท่ากับ 70 : 30, 60 : 40, 50 : 50 และ 40 : 60 เผาขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส ให้ค่าเฉลี่ยกำลังรับแรงดัดผ่านมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมกระเบื้องดินเผาปูพื้น (มอก.37-2529) คือ ให้ค่าเฉลี่ยกำลังรับแรงดัดเท่ากับ 26.33, 27.11, 29.25 และ 38.13 เมกะปาสคาล และทุกอัตราส่วนผสม ให้ค่าเฉลี่ยร้อยละการดูดซึมน้ำผ่านมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมกระเบื้องดินเผาปูพื้น (มอก.37-2529) จากผลดังกล่าวทำให้ทราบว่า สามารถใช้เศษแก้วสีชามาเป็นส่วนผสมเพื่อลดจุดสุกตัว ทำให้เนื้อดินสุกตัวเร็วขึ้นในการผลิตกระเบื้องดินเซรามิก ทั้งยังช่วยให้สามารถลดอุณหภูมิในการเผาขึ้นรูปลงได้

5.2 ข้อเสนอแนะ และการพัฒนา

5.2.1 ใช้ดินตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสีย หรือของเสียที่อาจพิจารณาว่าเป็นของเสียจากกระบวนการอื่นๆ เพื่อนำมาใช้เป็นวัตถุดิบทดแทนเพิ่มเติมในการผลิตกระเบื้องดินเซรามิก

5.2.2 ปรับเปลี่ยนใช้เศษแก้วชนิดอื่น หรือของเสียเหลือทิ้งชนิดอื่น เพื่อลดของเสียที่อาจส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมได้

5.3 ปัญหาที่พบ และแนวทางการแก้ปัญหา

5.3.1 ในขณะปฏิบัติงาน อุปกรณ์บางชิ้นเกิดความเสียหาย ส่งผลให้เกิดความล่าช้าในระหว่างการปฏิบัติงาน ดังนั้นในระหว่างการปฏิบัติงาน ควรระมัดระวังเกี่ยวกับการใช้อุปกรณ์ เพื่อไม่ให้อุปกรณ์นั้นเกิดความเสียหายเกิดขึ้น

5.3.2 ในการบดดินให้มีความละเอียด และการร่อนเศษแก้วผ่านตะแกรงเบอร์ 200 เมช อาจเกิดการฟุ้งกระจายของดิน และเศษแก้ว เนื่องจากดิน และเศษแก้วมีอนุภาคขนาดเล็ก ส่งผลให้เกิดการระคายเคืองในตา และเมื่อหายใจเข้าไปจะทำให้เป็นอันตรายต่อระบบทางเดินหายใจ ดังนั้นจึงควรสวมแว่นตา และผ้าปิดจมูก

5.3.3 อุปกรณ์ และเครื่องมือในห้องปฏิบัติการมีไม่เพียงพอ จึงจำเป็นต้องเดินทางไปขึ้นรูปกระเบื้องดินเซรามิก ณ ฝ่ายนวัตกรรมวัสดุ สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์ และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย

เอกสารอ้างอิง

บริการข้อมูลวิทยาศาสตร์ และเทคโนโลยีวัสดุแก้ว. (2539). **สมบัติของวัสดุแก้ว.** สืบค้นเมื่อ 31 ตุลาคม 2553, จาก http://www2.mtac.or.th/research/GSAT/glassweb/define.html.

ปาร์ย อรรถพิสาล. (2548). **การพัฒนาคุณภาพของกระเบื้องเซรามิกที่ผลิตจากของเสียที่เป็นเศษแก้ว. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสมหาบบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.**

ปรีดา พิมพ์ขาวขำ. (2532). **เซรามิก. ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์** มหาวิทยาลัย.

เพ็ชรพร เชาวกิจเจริญ และวิวรรธน์ เทียนศิริ. (มกราคม-เมษายน 2548). **การใช้ของเสียที่เป็นแก้ว เป็นวัตถุดิบในการผลิตกระเบื้องเซรามิก.** วารสารวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม สมาคมวิศวกรรม สิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย 19, 1 : 103-112.

เพ็ชรพร เชาวกิจเจริญ, ชดชนก อัทฒพงศ์, อลิสา วิเชียรเจริญ และอัจฉราภรณ์ **พรมบุตร.** (มกราคม-เมษายน 2549). **การใช้ของเสียที่เป็นแก้วทดแทนแร่เฟลด์สปาร์ในการผลิต กระเบื้องเซรามิก.** วารสารวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมไทย สมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม 20, 1.

ไพจิตร อิ่งศิริวัฒน์. (2541). **เนื้อดินเซรามิก.** กรุงเทพมหานคร : สำนักพิมพ์โอเดียนสโตร์

สุกาญจน์ น้อยเจริญ. (2549). **การพัฒนากระเบื้องดินเซรามิก.** วิทยานิพนธ์ปริญญาครุศาสตร์ อุตสาหกรรมมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรมมหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

สุรศักดิ์ ไวทยวงศ์สกุล, ปราณี รัตนวลีดิโรจน์, สวลี เสนาพิทักษ์ และศรีไฉล ขุนทด. (2542). การศึกษาการนำกากวัสดุอะลูมินาเซรามิกกลับมาใช้ใหม่. รายงานฉบับสมบูรณ์ปีที่ 1 สถาบันวิจัยโลหะ และวัสดุ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม. (2529). มาตรฐา**นอุตสาหกรรม** กระเบื้องดินเผาปูพื้น (มอก. 37 – 2529).

A.P. Luz, S. Ribeiro. (2007). **Ceramics International.** Faculty of Chemical Engineering of Lorena (FAENQUIL), Department of Materials Engineering (DEMAR),Polo Urbo Industrial, Gleba Al6, CP 116, 12600-970 Lorena, SP, Brazil

Engineering Ceramics. (2546). **ประเภทของดิน และการทดสอบทางเซรามิก. สืบค้นเมื่อ** 20 ธันวาคม 2553, จาก http://www.mne.eng.psu.ac.th/staff/lek_files/ceramic/u 21- 4.htmfiles/ceramic/u21-4.htm.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

Francisco Jose Torres, Javier Alarcon. (2003). **Journal of the European Ceramic Society**. Department of Inorganic Chemistry, University of Valencia : Calle Dr. Moliner 50, 46100 Burjasot, Valencia, Spain.

Haun. (2000). **Energy Saving Method of Manufacturing Ceramic Product from Waste Glass.** Glass Project Fact Sheet. http://www.haunlabs.com

Haun. (2002). **Energy Saving Method of Manufacturing Ceramic Product from Fiber Glass Waste.** Inventions&Innovation Project. http://www.haunlabs.com

M. Dondi ,G. Guarini, M. Raimondo, C. Zanelli. (2009). **Waste Management.** ISTEC-CNR, Institute of Science and Technology for Ceramics, Via Granarolo 64, 48018 Faenza, Italy.

The Thai Ceramic Society. (2538). **ชนิดของกระเบื้อง. สืบค้นเมื่อ** 5 มกราคม 2554, **จาก** http://www.thaiceramicsociety.or.th/krabuang_htdoc/krabuang.html.

ภาคผนวก ก

ข้อมูลผลการทดสอบกระเบื้องดินเซรามิกหลังเผาขึ้นรูป

ตารางที่ ก.1 ผลการทดสอบความหนาแน่นของกระเบื้องที่ผลิตจากดินดำ เผาที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส

อัตราส่วนผสมระหว่างดินดำต่อเศษแก้วสีชา	น้ำหนักแห้งก่อนต้ม (g)	น้ำหนักหลังต้มชั่งในน้ำ (g)	น้ำหนักหลังต้มชั่งในอากาศ (g)	ปริมาตร (cm^3)	ค่าความหนาแน่น (g/cm^3)	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
100 : 0	51.3	28.6	53.9	25.3	2.03	1.99	0.07
	51.6	27.4	54.3	26.9	1.92		
	51.2	27.1	54.1	27.0	1.90		
	51.3	29.2	54.1	24.9	2.06		
	51.4	28.9	54.2	25.3	2.03		
80 : 20	52.3	29.4	54.9	25.5	2.05	2.03	0.02
	52.3	28.9	54.7	25.8	2.03		
	52.2	29.2	54.6	25.4	2.06		
	52.3	29.4	55.2	25.8	2.03		
	52.2	29.5	55.5	26.0	2.01		
70 : 30	51.1	29.1	53.6	24.5	2.09	2.06	0.02
	50.8	28.8	53.7	24.9	2.04		
	51.1	28.5	53.5	25.0	2.04		
	50.7	28.6	53.4	24.8	2.04		
	50.5	28.9	53.1	24.2	2.09		
60 : 40	53.8	31	56.9	25.9	2.08	2.08	0.02
	54.5	30.5	56.5	26.0	2.10		
	53.2	30.3	55.8	25.5	2.09		
	53.4	30.9	56.4	25.5	2.09		
	53.3	30.1	56.3	26.2	2.03		
50 : 50	53.7	31.2	56.5	25.3	2.12	2.11	0.04
	53.3	31.5	55.8	24.3	2.19		
	53.7	30.5	56.5	26.0	2.07		
	53.2	30.7	55.9	25.2	2.11		
	53.5	30.5	56.2	25.7	2.08		
40 : 60	55.9	31.6	58.4	26.8	2.09	2.13	0.05
	55.4	32.3	58.1	25.8	2.15		
	55.6	31.4	58.5	27.1	2.05		
	55.9	32.8	58.3	25.5	2.19		
	55.5	32.5	58.1	25.6	2.17		

ตารางที่ ก.2 ผลการทดสอบความหนาแน่นของกระเบื้องที่ผลิตจากดินดำ เผาที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส

อัตราส่วนผสมระหว่างดินดำต่อเศษแก้วสีชา	น้ำหนักแห้งก่อนต้ม (g)	น้ำหนักหลังต้มชั่งในน้ำ (g)	น้ำหนักหลังต้มชั่งในอากาศ (g)	ปริมาตร (cm^3)	ค่าความหนาแน่น (g/cm^3)	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
100 : 0	51.1	28.5	53.6	25.1	2.04	2.04	0.02
	51.2	28.9	53.9	25.0	2.05		
	51.1	28.3	53.5	25.2	2.03		
	49.9	28.7	52.8	24.1	2.07		
	51.1	28.5	54.1	25.6	2.00		
80 : 20	51.1	29.7	53.8	24.1	2.12	2.10	0.03
	52	29.9	54.1	24.2	2.15		
	51.9	30.1	54.7	24.6	2.11		
	51.9	29.6	54.9	25.3	2.05		
	51.5	29.5	54.3	24.8	2.08		
70 : 30	51.4	30.2	53.7	23.5	2.19	2.15	0.04
	51.5	29.7	54.5	24.8	2.08		
	51.5	29.9	53.9	24.0	2.15		
	51.3	30.2	54.1	23.9	2.15		
	51.5	30.1	53.7	23.6	2.18		
60 : 40	52.9	31.5	55.1	23.6	2.24	2.17	0.04
	53.4	31.1	55.8	24.7	2.16		
	52.9	31.3	55.6	24.3	2.18		
	53	30.8	55.7	24.9	2.13		
	53.2	31.3	55.9	24.6	2.16		
50 : 50	53.7	31.7	56.1	24.4	2.20	2.18	0.04
	53.7	31.5	56.3	24.8	2.17		
	53.7	30.8	56.1	25.3	2.12		
	53.6	31.7	55.8	24.1	2.22		
	53.7	32.1	56.4	24.3	2.21		
40 : 60	55.4	32.9	58.1	25.2	2.20	2.24	0.05
	55.6	32.7	58.1	25.4	2.19		
	54.9	32.6	57.5	24.9	2.20		
	55.9	34.1	58.3	24.2	2.31		
	55.7	33.5	57.8	24.3	2.29		

ตารางที่ ก.3 ผลการทดสอบความหนาแน่นของกระเบื้องที่ผลิตจากดินดำ เผาที่อุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียส

อัตราส่วนผสมระหว่างดินดำต่อเศษแก้วสีชา	น้ำหนักแห้งก่อนต้ม (g)	น้ำหนักหลังต้มชั่งในน้ำ (g)	น้ำหนักหลังต้มชั่งในอากาศ (g)	ปริมาตร (cm^3)	ค่าความหนาแน่น (g/cm^3)	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
100 : 0	50.6	29.5	53.1	23.6	2.14	2.15	0.02
	50.9	29.7	53.4	23.7	2.15		
	50.9	30.1	53.5	23.4	2.18		
	50.6	29.8	53.1	23.3	2.17		
	50.8	29.1	53.1	24.0	2.12		
80 : 20	51.6	30.9	53.9	23.0	2.24	2.23	0.02
	51.8	30.9	54.2	23.3	2.22		
	51.2	30.6	53.7	23.1	2.22		
	51.8	30.9	54.4	23.5	2.20		
	51.3	31.1	53.7	22.6	2.27		
70 : 30	51.5	31.4	53.9	22.5	2.29	2.27	0.05
	51.4	30.4	53.8	23.4	2.20		
	51.5	30.6	53.5	22.9	2.25		
	51.8	31.3	53.8	22.5	2.30		
	51.4	31.7	53.7	22.0	2.34		
60 : 40	54.4	33.4	56.4	23.0	2.37	2.33	0.04
	53.9	33.1	56.2	23.1	2.33		
	53.4	33.3	55.8	22.5	2.37		
	54	32.5	56.4	23.9	2.26		
	54.2	32.7	56.3	23.6	2.30		
50 : 50	-	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-		
	-	-	-	-	-		
	-	-	-	-	-		
	-	-	-	-	-		
40 : 60	-	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-		
	-	-	-	-	-		
	-	-	-	-	-		
	-	-	-	-	-		

ตารางที่ ก.4 ผลการทดสอบความหนาแน่นของกระเบื้องที่ผลิตจากดินดำ เผาที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส

อัตราส่วนผสมระหว่างดินดำต่อเศษแก้วสีชา	น้ำหนักแห้งก่อนต้ม (g)	น้ำหนักหลังต้มชั่งในน้ำ (g)	น้ำหนักหลังต้มชั่งในอากาศ (g)	ปริมาตร (cm^3)	ค่าความหนาแน่น (g/cm^3)	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
100 : 0	50.7	29.8	52.9	23.1	2.19	2.21	0.04
	50.6	30.2	53.1	22.9	2.21		
	50.3	30.1	52.5	22.4	2.25		
	50.7	29.9	53.6	23.7	2.14		
	50.4	30.3	52.7	22.4	2.25		
80 : 20	51.8	29.9	53.7	23.8	2.18	2.25	0.05
	51.7	31.1	54.1	23.0	2.25		
	51.6	31.2	54.4	23.2	2.22		
	51.8	31.2	54	22.8	2.27		
	51.4	31.4	53.6	22.2	2.32		
70 : 30	51.5	31.8	53.7	21.9	2.35	2.33	0.01
	51.4	31.4	53.5	22.1	2.33		
	51.5	31.3	53.6	22.3	2.31		
	51.2	31.6	53.5	21.9	2.34		
	51.4	31.5	53.6	22.1	2.33		
60 : 40	53.5	32.9	55.6	22.7	2.36	2.42	0.06
	52.7	33.4	54.7	21.3	2.47		
	53.8	32.9	55.9	23.0	2.34		
	52.2	33.2	54.2	21.0	2.49		
	53.3	33.5	55.4	21.9	2.43		
50 : 50	-	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-		
	-	-	-	-	-		
	-	-	-	-	-		
	-	-	-	-	-		
40 : 60	-	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-		
	-	-	-	-	-		
	-	-	-	-	-		
	-	-	-	-	-		

ตารางที่ ก.5 ผลการทดสอบความหนาแน่นของกระเบื้องที่ผลิตจากดินขาว เผาที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส

อัตราส่วนผสมระหว่างดินขาวต่อเศษแก้วสีชา	น้ำหนักแห้งก่อนต้ม (g)	น้ำหนักหลังต้มชั่งในน้ำ (g)	น้ำหนักหลังต้มชั่งในอากาศ (g)	ปริมาตร (cm^3)	ค่าความหนาแน่น (g/cm^3)	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
100 : 0	51.3	29.9	53.2	23.3	2.20	2.04	0.08
	51.2	28.9	54.1	25.2	2.03		
	51.6	28.2	54.5	26.3	1.96		
	51.5	28.7	54.2	25.5	2.02		
	51.2	28.5	54.2	25.7	1.99		
80 : 20	53.6	29.7	55.9	26.2	2.05	2.07	0.02
	53.1	30.5	56.2	25.7	2.07		
	53.8	30.6	56.6	26.0	2.07		
	53.8	30.9	56.4	25.5	2.11		
	52.3	29.5	55.1	25.6	2.04		
70 : 30	53.8	30.1	56.4	26.3	2.05	2.09	0.03
	54.3	31.5	56.9	25.4	2.14		
	55.2	31.3	57.4	26.1	2.11		
	54.4	31.5	57.4	25.9	2.10		
	53.5	30.8	56.7	25.9	2.07		
60 : 40	54	31.1	56.6	25.5	2.12	2.13	0.03
	53	31.4	55.8	24.4	2.17		
	53	30.7	55.4	24.7	2.15		
	53.8	31.3	56.5	25.2	2.13		
	53.6	30.6	56.3	25.7	2.09		
50 : 50	55.4	32.3	57.7	25.4	2.18	2.15	0.04
	55.4	31.8	58.1	26.3	2.11		
	54.6	32.5	57.2	24.7	2.21		
	54.8	31.7	57.7	26.0	2.11		
	55.2	32.4	58.1	25.7	2.15		
40 : 60	56	33.2	58.7	25.5	2.20	2.21	0.03
	55.8	33.6	58.4	24.8	2.25		
	56	33.3	58.3	25.0	2.24		
	55.4	32.9	58.3	25.4	2.18		
	56.1	32.7	58.6	25.9	2.17		

ตารางที่ ก.6 ผลการทดสอบความหนาแน่นของกระเบื้องที่ผลิตจากดินขาว เผาที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส

อัตราส่วนผสมระหว่างดินขาวต่อเศษแก้วสีชา	น้ำหนักแห้งก่อนต้ม (g)	น้ำหนักหลังต้มชั่งในน้ำ (g)	น้ำหนักหลังต้มชั่งในอากาศ (g)	ปริมาตร (cm^3)	ค่าความหนาแน่น (g/cm^3)	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
100 : 0	51.2	29.5	53.8	24.3	2.11	2.07	0.02
	50.7	28.7	53.6	24.9	2.04		
	51.6	29.1	54.2	25.1	2.06		
	51.7	29.3	54.4	25.1	2.06		
	51.4	28.9	53.7	24.8	2.07		
80 : 20	53	30.4	55.7	25.3	2.09	2.14	0.03
	52.9	30.3	55.3	25.0	2.12		
	53	31.2	55.7	24.5	2.16		
	52.8	31.1	55.5	24.4	2.16		
	52.9	30.5	55.1	24.6	2.15		
70 : 30	53.9	32.2	56.3	24.1	2.24	2.19	0.04
	54	32.3	56.5	24.2	2.23		
	53.8	31.7	56.4	24.7	2.18		
	54	31.3	56.6	25.3	2.13		
	53.9	31.4	56.5	25.1	2.15		
60 : 40	53.6	31.2	56.1	24.9	2.15	2.21	0.05
	53.7	32.5	56.1	23.6	2.28		
	53.6	32.1	55.8	23.7	2.26		
	53.5	31.9	56.3	24.4	2.19		
	53.5	31.4	55.8	24.4	2.19		
50 : 50	54.8	31.9	57.4	25.5	2.15	2.23	0.06
	54.8	33.6	57.3	23.7	2.31		
	54.6	33.1	56.8	23.7	2.30		
	55.3	32.5	57.7	25.2	2.19		
	55.1	32.5	57.5	25.0	2.20		
40 : 60	55	33.6	57.2	23.6	2.33	2.32	0.06
	55.4	33.2	57.9	24.7	2.24		
	55.5	34.1	57.6	23.5	2.36		
	55.3	34.4	57.4	23.0	2.40		
	55.5	33.4	58.1	24.7	2.25		

ตารางที่ ก.7 ผลการทดสอบความหนาแน่นของกระเบื้องที่ผลิตจากดินขาว เผาที่อุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียส

อัตราส่วนผสมระหว่างดินขาวต่อเศษแก้วสีชา	น้ำหนักแห้งก่อนต้ม (g)	น้ำหนักหลังต้มชั่งในน้ำ (g)	น้ำหนักหลังต้มชั่งในอากาศ (g)	ปริมาตร (cm^3)	ค่าความหนาแน่น (g/cm^3)	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
100 : 0	50.9	30.5	53.4	22.9	2.22	2.18	0.03
	51.7	29.9	54.1	24.2	2.14		
	51.5	30.6	53.8	23.2	2.22		
	51.4	30.4	53.9	23.5	2.19		
	51.5	30.1	54	23.9	2.15		
80 : 20	52.8	31.3	55.3	24.0	2.20	2.26	0.05
	52.8	31.4	55.2	23.8	2.22		
	52.8	32.4	55.1	22.7	2.33		
	52.8	31.7	54.8	23.1	2.29		
	52.7	31.9	55.3	23.4	2.25		
70 : 30	54.1	32.6	56.3	23.7	2.28	2.29	0.03
	53.7	32.3	55.9	23.6	2.28		
	53.9	32.5	56.2	23.7	2.27		
	53.7	32.4	56.1	23.7	2.27		
	53.6	32.7	55.6	22.9	2.34		
60 : 40	53.5	33.4	55.4	22.0	2.43	2.40	0.03
	53.6	32.9	55.8	22.9	2.34		
	53.6	33.3	55.6	22.3	2.40		
	53.6	33.7	55.9	22.2	2.41		
	53.6	33.6	55.7	22.1	2.43		
50 : 50	54.7	34.3	56.8	22.5	2.43	2.44	0.04
	54.7	34.1	56.5	22.4	2.44		
	54.5	34.7	56.5	21.8	2.50		
	54.7	33.7	56.7	23.0	2.38		
	54.3	34.4	56.4	22.0	2.47		
40 : 60	55.3	35.4	56.8	21.4	2.58	2.51	0.05
	54.4	34.7	56.3	21.6	2.52		
	55.5	34.8	57.4	22.6	2.46		
	55.2	34.6	57.2	22.6	2.44		
	54.8	34.9	56.4	21.5	2.55		

ตารางที่ ก.8 ผลการทดสอบความหนาแน่นของกระเบื้องที่ผลิตจากดินขาว เผาที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส

อัตราส่วนผสมระหว่างดินขาวต่อเศษแก้วสีชา	น้ำหนักแห้งก่อนต้ม (g)	น้ำหนักหลังต้มชั่งในน้ำ (g)	น้ำหนักหลังต้มชั่งในอากาศ (g)	ปริมาตร (cm^3)	ค่าความหนาแน่น (g/cm^3)	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
100 : 0	51.5	30.6	53.6	23.0	2.24	2.28	0.05
	50.1	31.2	52.5	21.3	2.35		
	51	30.8	53.5	22.7	2.25		
	51.6	31.5	53.8	22.3	2.31		
	51.2	30.7	53.5	22.8	2.25		
80 : 20	50.4	32.7	52.6	19.9	2.53	2.36	0.09
	52.9	32.5	55.5	23.0	2.30		
	53.1	32.3	55.2	22.9	2.32		
	53.2	32.5	55.3	22.8	2.33		
	52.8	32.3	55.3	23.0	2.30		
70 : 30	54.3	34.3	56.8	22.5	2.41	2.43	0.01
	55.3	34.5	57.3	22.8	2.43		
	54	34.4	56.7	22.3	2.42		
	55.7	34.7	57.5	22.8	2.44		
	54.6	34.2	56.7	22.5	2.43		
60 : 40	53.5	34.3	55.4	21.1	2.54	2.54	0.03
	53.5	34.7	55.5	20.8	2.57		
	53.5	34.2	55.4	21.2	2.52		
	53.4	34.3	55.7	21.4	2.50		
	53.4	34.5	55.3	20.8	2.57		
50 : 50	54.8	35.6	56.6	21.0	2.61	2.61	0.02
	54.7	35.4	56.3	20.9	2.62		
	54.8	35.3	56.4	21.1	2.60		
	54.6	35.8	56.5	20.7	2.64		
	54.4	35.2	56.3	21.1	2.58		
40 : 60	-	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-		
	-	-	-	-	-		
	-	-	-	-	-		
	-	-	-	-	-		

ตารางที่ ก.9 ผลการทดสอบร้อยละการดูดซึมน้ำของกระเบื้องที่ผลิตจากดินดำ เผาที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส

อัตราส่วนผสมระหว่างดินดำต่อเศษแก้วสีชา	น้ำหนักแห้งก่อนต้ม (g)	น้ำหนักหลังต้มชั่งในอากาศ (g)	ค่าร้อยละการดูดซึมน้ำ (ร้อยละ)	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
100 : 0	51.3	53.9	5.07	5.37	0.20
	51.6	54.3	5.23		
	51.2	54.1	5.66		
	51.3	54.1	5.46		
	51.4	54.2	5.45		
80 : 20	52.3	54.9	4.97	5.20	0.66
	52.3	54.7	4.59		
	52.2	54.6	4.60		
	52.3	55.2	5.54		
	52.2	55.5	6.32		
70 : 30	51.1	53.6	4.89	5.15	0.35
	50.8	53.7	5.71		
	51.1	53.5	4.70		
	50.7	53.4	5.33		
	50.5	53.1	5.15		
60 : 40	53.8	56.9	5.76	5.11	0.78
	54.5	56.5	3.67		
	53.2	55.8	4.89		
	53.4	56.4	5.62		
	53.3	56.3	5.63		
50 : 50	53.7	56.5	5.21	5.05	0.19
	53.3	55.8	4.69		
	53.7	56.5	5.21		
	53.2	55.9	5.08		
	53.5	56.2	5.05		
40 : 60	55.9	58.4	4.47	4.71	0.32
	55.4	58.1	4.87		
	55.6	58.5	5.22		
	55.9	58.3	4.29		
	55.5	58.1	4.68		

ตารางที่ ก.10 ผลการทดสอบร้อยละการดูดซึมน้ำของกระเบื้องที่ผลิตจากดินดำ เผาที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส

อัตราส่วนผสมระหว่างดินดำต่อเศษแก้วสีชา	น้ำหนักแห้งก่อนต้ม (g)	น้ำหนักหลังต้มชั่งในอากาศ (g)	ค่าร้อยละการดูดซึมน้ำ (ร้อยละ)	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
100 : 0	51.1	53.6	4.89	5.31	0.47
	51.2	53.9	5.27		
	51.1	53.5	4.70		
	49.9	52.8	5.81		
	51.1	54.1	5.87		
80 : 20	51.1	53.8	5.28	5.19	0.60
	52	54.1	4.04		
	51.9	54.7	5.39		
	51.9	54.9	5.78		
	51.5	54.3	5.44		
70 : 30	51.4	53.7	4.47	4.94	0.60
	51.5	54.5	5.83		
	51.5	53.9	4.66		
	51.3	54.1	5.46		
	51.5	53.7	4.27		
60 : 40	52.9	55.1	4.16	4.79	0.39
	53.4	55.8	4.49		
	52.9	55.6	5.10		
	53	55.7	5.09		
	53.2	55.9	5.08		
50 : 50	53.7	56.1	4.47	4.58	0.32
	53.7	56.3	4.84		
	53.7	56.1	4.47		
	53.6	55.8	4.10		
	53.7	56.4	5.03		
40 : 60	55.4	58.1	4.87	4.43	0.39
	55.6	58.1	4.50		
	54.9	57.5	4.74		
	55.9	58.3	4.29		
	55.7	57.8	3.77		

ตารางที่ ก.11 ผลการทดสอบร้อยละการดูดซึมน้ำของกระเบื้องที่ผลิตจากดินดำ เผาที่อุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียส

อัตราส่วนผสมระหว่างดินดำต่อเศษแก้วสีชา	น้ำหนักแห้งก่อนต้ม (g)	น้ำหนักหลังต้มชั่งในอากาศ (g)	ค่าร้อยละการดูดซึมน้ำ (ร้อยละ)	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
100 : 0	50.6	53.1	4.94	4.89	0.19
	50.9	53.4	4.91		
	50.9	53.5	5.11		
	50.6	53.1	4.94		
	50.8	53.1	4.53		
80 : 20	51.6	53.9	4.46	4.73	0.20
	51.8	54.2	4.63		
	51.2	53.7	4.88		
	51.8	54.4	5.02		
	51.3	53.7	4.68		
70 : 30	51.5	53.9	4.66	4.31	0.36
	51.4	53.8	4.67		
	51.5	53.5	3.88		
	51.8	53.8	3.86		
	51.4	53.7	4.47		
60 : 40	54.4	56.4	3.68	4.15	0.32
	53.9	56.2	4.27		
	53.4	55.8	4.49		
	54	56.4	4.44		
	54.2	56.3	3.87		
50 : 50	-	-	-	-	-
	-	-	-		
	-	-	-		
	-	-	-		
	-	-	-		
40 : 60	-	-	-	-	-
	-	-	-		
	-	-	-		
	-	-	-		
	-	-	-		

ตารางที่ ก.12 ผลการทดสอบร้อยละการดูดซึมน้ำของกระเบื้องที่ผลิตจากดินดำ เผาที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส

อัตราส่วนผสมระหว่างดินดำต่อเศษแก้วสีชา	น้ำหนักแห้งก่อนต้ม (g)	น้ำหนักหลังต้มชั่งในอากาศ (g)	ค่าร้อยละการดูดซึมน้ำ (ร้อยละ)	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
100 : 0	50.7	52.9	4.34	4.79	0.51
	50.6	53.1	4.94		
	50.3	52.5	4.37		
	50.7	53.6	5.72		
	50.4	52.7	4.56		
80 : 20	51.8	53.7	3.67	4.45	0.58
	51.7	54.1	4.64		
	51.6	54.4	5.43		
	51.8	54	4.25		
	51.4	53.6	4.28		
70 : 30	51.5	53.7	4.27	4.24	0.15
	51.4	53.5	4.09		
	51.5	53.6	4.08		
	51.2	53.5	4.49		
	51.4	53.6	4.28		
60 : 40	53.5	55.6	3.93	3.88	0.06
	52.7	54.7	3.80		
	53.8	55.9	3.90		
	52.2	54.2	3.83		
	53.3	55.4	3.94		
50 : 50	-	-	-	-	-
	-	-	-		
	-	-	-		
	-	-	-		
	-	-	-		
40 : 60	-	-	-	-	-
	-	-	-		
	-	-	-		
	-	-	-		
	-	-	-		

ตารางที่ ก.13 ผลการทดสอบร้อยละการดูดซึมน้ำของกระเบื้องที่ผลิตจากดินขาว เผาที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส

อัตราส่วนผสมระหว่างดินขาวต่อเศษแก้วสีชา	น้ำหนักแห้งก่อนต้ม (g)	น้ำหนักหลังต้มชั่งในอากาศ (g)	ค่าร้อยละการดูดซึมน้ำ (ร้อยละ)	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
100 : 0	51.3	53.2	3.70	5.22	0.78
	51.2	54.1	5.66		
	51.6	54.5	5.62		
	51.5	54.2	5.24		
	51.2	54.2	5.86		
80 : 20	53.6	55.9	4.29	5.10	0.52
	53.1	56.2	5.84		
	53.8	56.6	5.20		
	53.8	56.4	4.83		
	52.3	55.1	5.35		
70 : 30	53.8	56.4	4.83	5.02	0.68
	54.3	56.9	4.79		
	55.2	57.4	3.99		
	54.4	57.4	5.51		
	53.5	56.7	5.98		
60 : 40	54	56.6	4.81	4.94	0.25
	53	55.8	5.28		
	53	55.4	4.53		
	53.8	56.5	5.02		
	53.6	56.3	5.04		
50 : 50	55.4	57.7	4.15	4.87	0.41
	55.4	58.1	4.87		
	54.6	57.2	4.76		
	54.8	57.7	5.29		
	55.2	58.1	5.25		
40 : 60	56	58.7	4.82	4.66	0.38
	55.8	58.4	4.66		
	56	58.3	4.11		
	55.4	58.3	5.23		
	56.1	58.6	4.46		

ตารางที่ ก.14 ผลการทดสอบร้อยละการดูดซึมน้ำของกระเบื้องที่ผลิตจากดินขาว เผาที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส

อัตราส่วนผสมระหว่างดินขาวต่อเศษแก้วสีชา	น้ำหนักแห้งก่อนต้ม (g)	น้ำหนักหลังต้มชั่งในอากาศ (g)	ค่าร้อยละการดูดซึมน้ำ (ร้อยละ)	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
100 : 0	51.2	53.8	5.08	5.11	0.40
	50.7	53.6	5.72		
	51.6	54.2	5.04		
	51.7	54.4	5.22		
	51.4	53.7	4.47		
80 : 20	53	55.7	5.09	4.80	0.39
	52.9	55.3	4.54		
	53	55.7	5.09		
	52.8	55.5	5.11		
	52.9	55.1	4.16		
70 : 30	53.9	56.3	4.45	4.71	0.15
	54	56.5	4.63		
	53.8	56.4	4.83		
	54	56.6	4.81		
	53.9	56.5	4.82		
60 : 40	53.6	56.1	4.66	4.55	0.39
	53.7	56.1	4.47		
	53.6	55.8	4.10		
	53.5	56.3	5.23		
	53.5	55.8	4.30		
50 : 50	54.8	57.4	4.74	4.41	0.24
	54.8	57.3	4.56		
	54.6	56.8	4.03		
	55.3	57.7	4.34		
	55.1	57.5	4.36		
40 : 60	55	57.2	4.00	4.16	0.37
	55.4	57.9	4.51		
	55.5	57.6	3.78		
	55.3	57.4	3.80		
	55.5	58.1	4.68		

ตารางที่ ก.15 ผลการทดสอบร้อยละการดูดซึมน้ำของกระเบื้องที่ผลิตจากดินขาว เผาที่อุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียส

อัตราส่วนผสมระหว่างดินขาวต่อเศษแก้วสีชา	น้ำหนักแห้งก่อนต้ม (g)	น้ำหนักหลังต้มชั่งในอากาศ (g)	ค่าร้อยละการดูดซึมน้ำ (ร้อยละ)	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
100 : 0	50.9	53.4	4.91	4.75	0.17
	51.7	54.1	4.64		
	51.5	53.8	4.47		
	51.4	53.9	4.86		
	51.5	54	4.85		
80 : 20	52.8	55.3	4.73	4.47	0.39
	52.8	55.2	4.55		
	52.8	55.1	4.36		
	52.8	54.8	3.79		
	52.7	55.3	4.93		
70 : 30	54.1	56.3	4.07	4.13	0.24
	53.7	55.9	4.10		
	53.9	56.2	4.27		
	53.7	56.1	4.47		
	53.6	55.6	3.73		
60 : 40	53.5	55.4	3.55	3.92	0.26
	53.6	55.8	4.10		
	53.6	55.6	3.73		
	53.6	55.9	4.29		
	53.6	55.7	3.92		
50 : 50	54.7	56.8	3.84	3.66	0.21
	54.7	56.5	3.29		
	54.5	56.5	3.67		
	54.7	56.7	3.66		
	54.3	56.4	3.87		
40 : 60	55.3	56.8	2.71	3.23	0.35
	54.4	56.3	3.49		
	55.5	57.4	3.42		
	55.2	57.2	3.62		
	54.8	56.4	2.92		

ตารางที่ ก.16 ผลการทดสอบร้อยละการดูดซึมน้ำของกระเบื้องที่ผลิตจากดินขาว เผาที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส

อัตราส่วนผสมระหว่างดินขาวต่อเศษแก้วสีชา	น้ำหนักแห้งก่อนต้ม (g)	น้ำหนักหลังต้มชั่งในอากาศ (g)	ค่าร้อยละการดูดซึมน้ำ (ร้อยละ)	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
100 : 0	51.5	53.6	4.08	4.51	0.31
	50.1	52.5	4.79		
	51	53.5	4.90		
	51.6	53.8	4.26		
	51.2	53.5	4.49		
80 : 20	50.4	52.6	4.37	4.38	0.40
	52.9	55.5	4.91		
	53.1	55.2	3.95		
	53.2	55.3	3.95		
	52.8	55.3	4.73		
70 : 30	54.3	56.8	4.60	4.06	0.65
	55.3	57.3	3.62		
	54	56.7	5.00		
	55.7	57.5	3.23		
	54.6	56.7	3.85		
60 : 40	53.5	55.4	3.55	3.74	0.29
	53.5	55.5	3.74		
	53.5	55.4	3.55		
	53.4	55.7	4.31		
	53.4	55.3	3.56		
50 : 50	54.8	56.6	3.28	3.22	0.25
	54.7	56.3	2.93		
	54.8	56.4	2.92		
	54.6	56.5	3.48		
	54.4	56.3	3.49		
40 : 60	-	-	-	-	-
	-	-	-		
	-	-	-		
	-	-	-		
	-	-	-		

ตารางที่ ก.17 ผลการทดสอบการหดตัวหลังเผาของกระเบื้องที่ผลิตจากดินดำ เผาที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส

อัตราส่วนผสมระหว่างดินดำต่อเศษแก้วสีชา	ความยาวเมื่อแห้ง (mm)	ความยาวหลังเผา (mm)	ค่าการหดตัวหลังเผา (ร้อยละ)	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
100 : 0	153.49	150.69	1.82	1.84	0.03
	153.49	150.70	1.82		
	153.45	150.64	1.83		
	153.57	150.66	1.89		
	153.47	150.64	1.84		
80 : 20	154.33	148.09	4.04	4.06	0.06
	154.23	148.10	3.97		
	154.27	148.02	4.05		
	154.61	148.22	4.13		
	154.46	148.10	4.11		
70 : 30	153.22	146.15	4.61	4.6	0.01
	153.25	146.22	4.58		
	153.31	146.21	4.62		
	153.37	146.32	4.60		
	153.29	146.25	4.59		
60 : 40	153.15	142.27	7.10	7.24	0.12
	153.17	142.03	7.27		
	153.09	141.69	7.44		
	153.14	142.07	7.23		
	153.13	142.18	7.15		
50 : 50	152.46	140.04	8.14	8.02	0.13
	152.47	140.18	8.06		
	151.98	140.18	7.76		
	152.70	140.42	8.04		
	152.45	140.20	8.08		
40 : 60	153.62	140.18	8.74	8.71	0.13
	153.49	140.18	8.67		
	153.80	140.04	8.94		
	153.53	140.42	8.53		
	153.60	140.27	8.67		

ตารางที่ ก.18 ผลการทดสอบการหดตัวหลังเผาของกระเบื้องที่ผลิตจากดินดำ เผาที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส

อัตราส่วนผสมระหว่างดินดำต่อเศษแก้วสีชา	ความยาวเมื่อแห้ง (mm)	ความยาวหลังเผา (mm)	ค่าการหดตัวหลังเผา (ร้อยละ)	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
100 : 0	154.34	148.58	3.73	3.66	0.05
	154.23	148.55	3.68		
	154.33	148.81	3.57		
	154.51	148.82	3.68		
	154.46	148.81	3.65		
80 : 20	153.70	139.93	8.20	8.08	0.10
	153.82	139.63	8.09		
	153.71	139.69	7.89		
	153.66	139.75	8.14		
	153.80	139.66	8.10		
70 : 30	153.13	140.57	8.95	9.11	0.10
	153.13	140.74	9.23		
	153.06	140.97	9.12		
	153.14	140.67	9.05		
	153.13	140.72	9.19		
60 : 40	152.45	136.46	10.48	9.67	0.63
	152.48	136.87	10.23		
	152.31	137.93	9.44		
	151.70	138.38	8.70		
	152.38	137.91	9.49		
50 : 50	153.20	137.97	9.94	10.20	0.20
	153.24	137.86	10.03		
	153.30	137.39	10.38		
	153.17	137.12	10.47		
	153.27	137.69	10.16		
40 : 60	153.63	136.82	10.94	10.6	0.29
	153.51	138.05	10.07		
	153.60	137.17	10.69		
	153.53	137.07	10.72		
	153.53	137.28	10.58		

ตารางที่ ก.19 ผลการทดสอบการหดตัวหลังเผาของกระเบื้องที่ผลิตจากดินดำ เผาที่อุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียส

อัตราส่วนผสมระหว่างดินดำต่อเศษแก้วสีชา	ความยาวเมื่อแห้ง (mm)	ความยาวหลังเผา (mm)	ค่าการหดตัวหลังเผา (ร้อยละ)	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
100 : 0	154.34	139.04	9.91	9.93	0.03
	154.51	139.10	9.97		
	154.28	139.02	9.89		
	154.31	138.93	9.96		
	154.38	139.05	9.93		
80 : 20	153.67	136.35	11.27	11.27	0.03
	153.50	136.20	11.27		
	153.47	136.27	11.20		
	153.54	136.18	11.30		
	153.58	136.23	11.29		
70 : 30	153.33	132.64	13.49	13.61	0.15
	153.80	132.54	13.82		
	153.37	132.45	13.64		
	153.43	132.85	13.40		
	153.66	132.61	13.70		
60 : 40	153.88	132.07	14.17	14.23	0.04
	153.83	131.96	14.21		
	153.93	131.95	14.27		
	153.80	131.96	14.20		
	153.87	131.87	14.29		
50 : 50	-	-	-	-	-
	-	-	-		
	-	-	-		
	-	-	-		
	-	-	-		
40 : 60	-	-	-	-	-
	-	-	-		
	-	-	-		
	-	-	-		
	-	-	-		

ตารางที่ ก.20 ผลการทดสอบการหดตัวหลังเผาของกระเบื้องที่ผลิตจากดินดำ เผาที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส

อัตราส่วนผสมระหว่างดินดำต่อเศษแก้วสีชา	ความยาวเมื่อแห้ง (mm)	ความยาวหลังเผา (mm)	ค่าการหดตัวหลังเผา (ร้อยละ)	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
100 : 0	154.26	134.79	12.65	12.87	0.13
	154.53	134.67	12.85		
	154.47	134.65	12.87		
	154.77	134.58	13.05		
	154.62	134.63	12.92		
80 : 20	153.86	134.69	12.45	12.91	0.24
	153.89	133.71	13.09		
	153.75	133.94	12.88		
	153.71	133.55	13.11		
	153.82	133.82	13.00		
70 : 30	153.26	131.55	14.16	14.53	0.22
	153.95	131.13	14.82		
	153.55	131.29	14.49		
	153.53	131.00	14.67		
	153.54	131.23	14.53		
60 : 40	154.15	129.88	15.74	15.63	0.27
	154.22	129.89	15.77		
	154.16	130.08	15.09		
	154.20	129.89	15.76		
	154.19	129.83	15.79		
50 : 50	-	-	-	-	-
	-	-	-		
	-	-	-		
	-	-	-		
	-	-	-		
40 : 60	-	-	-	-	-
	-	-	-		
	-	-	-		
	-	-	-		
	-	-	-		

ตารางที่ ก.21 ผลการทดสอบการหดตัวหลังเผาของกระเบื้องที่ผลิตจากดินขาว เผาที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส

อัตราส่วนผสมระหว่างดินขาวต่อเศษแก้วสีชา	ความยาวเมื่อแห้ง (mm)	ความยาวหลังเผา (mm)	ค่าการหดตัวหลังเผา (ร้อยละ)	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
100 : 0	154.55	152.70	1.20	1.29	0.06
	154.55	152.54	1.30		
	154.72	152.57	1.39		
	154.64	152.73	1.24		
	154.64	152.62	1.30		
80 : 20	153.71	150.82	1.88	1.88	0.45
	153.76	150.49	2.13		
	153.73	150.32	2.22		
	153.69	150.35	2.17		
	154.54	152.96	1.02		
70 : 30	153.80	147.56	4.06	3.99	0.05
	153.72	147.67	3.94		
	153.76	147.69	3.95		
	153.81	147.58	4.05		
	153.74	147.66	3.95		
60 : 40	153.77	146.51	4.72	4.69	0.02
	153.83	146.63	4.68		
	153.75	146.55	4.68		
	153.81	146.58	4.70		
	153.79	146.61	4.67		
50 : 50	153.74	144.85	5.78	5.71	0.05
	153.76	144.92	5.74		
	153.70	144.89	5.73		
	153.71	145.04	5.64		
	153.65	144.97	5.65		
40 : 60	153.50	140.07	8.75	8.35	0.72
	150.65	140.18	6.92		
	153.52	140.13	8.72		
	153.58	140.31	8.64		
	153.61	140.20	8.73		

ตารางที่ ก.22 ผลการทดสอบการหดตัวหลังเผาของกระเบื้องที่ผลิตจากดินขาว เผาที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส

อัตราส่วนผสมระหว่างดินขาวต่อเศษแก้วสีชา	ความยาวเมื่อแห้ง (mm)	ความยาวหลังเผา (mm)	ค่าการหดตัวหลังเผา (ร้อยละ)	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
100 : 0	154.88	151.86	1.94	1.84	0.17
	154.91	151.85	1.97		
	154.82	151.94	1.51		
	154.86	151.87	1.93		
	154.73	151.85	1.86		
80 : 20	153.85	146.93	4.50	4.59	0.09
	153.87	146.96	4.49		
	153.82	146.60	4.69		
	153.99	146.75	4.70		
	153.81	146.79	4.56		
70 : 30	153.51	144.22	6.05	5.76	0.16
	154.46	144.67	5.72		
	153.49	144.68	5.74		
	153.50	144.96	5.56		
	153.47	144.65	5.75		
60 : 40	153.80	141.68	7.88	7.82	0.07
	153.80	141.62	7.91		
	153.81	141.95	7.71		
	153.81	141.77	7.82		
	153.80	141.82	7.79		
50 : 50	153.82	139.98	9.00	9.02	0.02
	153.80	139.89	9.04		
	153.85	140.00	9.00		
	153.71	139.85	9.01		
	153.82	139.89	9.05		
40 : 60	153.72	136.64	11.11	11.11	0.02
	153.80	136.70	11.11		
	153.72	136.70	11.07		
	153.85	136.75	11.11		
	153.88	136.74	11.13		

ตารางที่ ก.23 ผลการทดสอบการหดตัวหลังเผาของกระเบื้องที่ผลิตจากดินขาว เผาที่อุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียส

อัตราส่วนผสมระหว่างดินขาวต่อเศษแก้วสีชา	ความยาวเมื่อแห้ง (mm)	ความยาวหลังเผา (mm)	ค่าการหดตัวหลังเผา (ร้อยละ)	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
100 : 0	154.11	149.36	3.08	3.23	0.22
	154.18	149.31	3.15		
	154.79	149.11	3.67		
	154.09	149.28	3.12		
	154.13	149.32	3.12		
80 : 20	153.55	140.39	8.57	8.91	0.17
	153.49	139.69	8.99		
	153.52	139.61	9.06		
	153.53	139.80	8.94		
	153.48	139.71	8.97		
70 : 30	155.02	139.76	9.84	9.85	0.02
	154.97	139.69	9.86		
	154.96	139.85	9.85		
	154.96	139.75	9.81		
	154.97	139.67	9.87		
60 : 40	153.82	137.41	10.67	10.79	0.07
	153.80	137.17	10.81		
	153.76	137.06	10.86		
	153.71	137.13	10.78		
	153.82	137.16	10.83		
50 : 50	153.80	137.20	10.79	10.95	0.13
	153.80	137.06	10.88		
	153.81	137.07	10.88		
	153.74	136.62	11.13		
	153.92	136.87	11.07		
40 : 60	153.72	135.56	11.81	11.82	0.09
	153.82	135.76	11.74		
	153.74	135.70	11.73		
	153.86	135.42	11.98		
	153.85	135.60	11.86		

ตารางที่ ก.24 ผลการทดสอบการหดตัวหลังเผาของกระเบื้องที่ผลิตจากดินขาว เผาที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส

อัตราส่วนผสมระหว่างดินขาวต่อเศษแก้วสีชา	ความยาวเมื่อแห้ง (mm)	ความยาวหลังเผา (mm)	ค่าการหดตัวหลังเผา (ร้อยละ)	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
100 : 0	154.98	143.49	7.41	7.40	0.19
	155.81	143.72	7.76		
	154.96	143.72	7.25		
	155.02	143.80	7.23		
	154.97	143.56	7.36		
80 : 20	153.88	137.66	10.53	10.61	0.09
	153.91	137.62	10.58		
	153.89	137.40	10.77		
	153.90	137.69	10.53		
	153.88	137.53	10.62		
70 : 30	153.86	137.34	10.73	10.61	0.12
	153.74	137.51	10.55		
	153.84	137.42	10.67		
	153.76	137.74	10.41		
	153.77	137.33	10.69		
60 : 40	153.97	136.69	11.22	11.33	0.27
	153.99	135.71	11.87		
	154.01	136.66	11.26		
	153.99	136.80	11.16		
	153.98	136.73	11.15		
50 : 50	153.75	135.94	11.58	11.64	0.09
	153.80	136.00	11.57		
	153.81	135.79	11.71		
	153.95	135.79	11.79		
	153.92	136.10	11.57		
40 : 60	-	-	-	-	-
	-	-	-		
	-	-	-		
	-	-	-		
	-	-	-		

ตารางที่ ก.25 ผลการทดสอบกำลังรับแรงดัดของกระเบื้องที่ผลิตจากดินดำ เผาที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส

อัตราส่วนผสมระหว่างดินดำต่อเศษแก้วสีชา	แรงกด (kg)	ระยะห่างของจุดรองรับ (cm)	ความกว้าง (cm)	ความหนา (cm)	ค่ากำลังรับแรงดัด (MPa)	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
100 : 0	1.63	10	2.54	1.08	0.81	1.01	0.15
	2.14	10	2.54	1.07	1.08		
	1.95	10	2.54	1.09	0.95		
	2.56	10	2.55	1.09	1.24		
	1.91	10	2.53	1.08	0.95		
80 : 20	6.72	10	2.50	0.99	4.03	4.51	0.28
	7.44	10	2.50	0.99	4.47		
	8.17	10	2.50	0.99	4.90		
	7.98	10	2.54	1.01	4.53		
	7.71	10	2.51	0.99	4.61		
70 : 30	11.08	10	2.48	0.94	7.44	8.20	0.62
	12.39	10	2.26	0.93	9.32		
	11.83	10	2.46	0.93	8.18		
	11.69	10	2.47	0.94	7.88		
	12.07	10	2.46	0.94	8.17		
60 : 40	13.60	10	2.40	0.95	9.24	9.73	0.37
	14.99	10	2.40	0.96	9.97		
	14.08	10	2.40	0.94	9.77		
	14.79	10	2.40	0.94	10.26		
	13.92	10	2.41	0.95	9.41		
50 : 50	23.55	10	2.40	0.97	15.34	14.91	0.71
	20.42	10	2.41	0.95	13.81		
	21.62	10	2.41	0.96	14.32		
	22.28	10	2.41	0.94	15.39		
	23.76	10	2.42	0.96	15.67		
40 : 60	24.62	10	2.36	0.85	21.24	21.62	0.94
	23.73	10	2.36	0.85	20.47		
	26.20	10	2.36	0.84	23.14		
	25.12	10	2.36	0.84	22.19		
	24.32	10	2.35	0.85	21.07		

ตารางที่ ก.26 ผลการทดสอบกำลังรับแรงดัดของกระเบื้องที่ผลิตจากดินดำ เผาที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส

อัตราส่วนผสมระหว่างดินดำต่อเศษแก้วสีชา	แรงกด (kg)	ระยะห่างของจุดรองรับ (cm)	ความกว้าง (cm)	ความหนา (cm)	ค่ากำลังรับแรงดัด (MPa)	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
100 : 0	2.51	10	2.51	1.06	1.31	1.32	0.06
	2.69	10	2.50	1.06	1.41		
	2.61	10	2.50	1.09	1.29		
	2.32	10	2.51	1.05	1.23		
	2.63	10	2.51	1.07	1.35		
80 : 20	12.90	10	2.4	0.93	9.14	9.25	0.22
	13.40	10	2.36	0.93	9.66		
	12.37	10	2.35	0.92	9.15		
	12.83	10	2.35	0.93	9.29		
	12.49	10	2.35	0.93	9.04		
70 : 30	25.69	10	2.32	0.87	21.52	22.49	1.25
	28.88	10	2.31	0.87	24.30		
	24.91	10	2.31	0.87	20.96		
	27.51	10	2.31	0.89	22.12		
	28.10	10	2.32	0.87	23.54		
60 : 40	30.48	10	2.32	0.93	22.34	24.08	1.14
	32.82	10	2.34	0.92	24.38		
	33.34	10	2.33	0.91	25.42		
	31.82	10	2.33	0.93	23.23		
	32.98	10	2.34	0.91	25.04		
50 : 50	37.55	10	2.37	0.94	26.38	26.04	0.62
	36.48	10	2.38	0.94	25.52		
	37.29	10	2.38	0.94	26.08		
	38.40	10	2.37	0.94	26.97		
	36.69	10	2.37	0.95	25.23		
40 : 60	36.54	10	2.30	0.83	33.92	33.16	2.77
	32.45	10	2.33	0.83	29.74		
	33.07	10	2.34	0.80	32.48		
	38.18	10	2.31	0.80	37.99		
	33.71	10	2.33	0.82	31.65		

ตารางที่ ก.27 ผลการทดสอบกำลังรับแรงดัดของกระเบื้องที่ผลิตจากดินดำ เผาที่อุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียส

อัตราส่วนผสมระหว่างดินดำต่อเศษแก้วสีชา	แรงกด (kg)	ระยะห่างของจุดรองรับ (cm)	ความกว้าง (cm)	ความหนา (cm)	ค่ากำลังรับแรงดัด (MPa)	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
100 : 0	6.60	10	2.35	0.99	4.22	4.60	0.22
	7.52	10	2.34	0.99	4.82		
	7.15	10	2.34	0.99	4.59		
	6.98	10	2.33	0.98	4.59		
	7.31	10	2.34	0.98	4.78		
80 : 20	19.71	10	2.23	0.84	18.43	19.14	1.03
	18.66	10	2.22	0.84	17.52		
	21.58	10	2.23	0.84	20.17		
	20.95	10	2.22	0.83	20.15		
	20.38	10	2.24	0.83	19.43		
70 : 30	28.01	10	2.22	0.85	25.69	25.48	0.99
	29.15	10	2.21	0.86	26.23		
	25.75	10	2.22	0.85	23.62		
	27.67	10	2.24	0.83	26.38		
	27.89	10	2.23	0.85	25.46		
60 : 40	37.81	10	2.28	0.95	27.03	29.20	1.93
	41.36	10	2.25	0.95	29.96		
	35.48	10	2.27	0.84	32.58		
	34.34	10	2.31	0.88	28.24		
	35.68	10	2.35	0.89	28.20		
50 : 50	-	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-		
	-	-	-	-	-		
	-	-	-	-	-		
	-	-	-	-	-		
40 : 60	-	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-		
	-	-	-	-	-		
	-	-	-	-	-		
	-	-	-	-	-		

ตารางที่ ก.28 ผลการทดสอบกำลังรับแรงดัดของกระเบื้องที่ผลิตจากดินดำ เผาที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส

อัตราส่วนผสมระหว่างดินดำต่อเศษแก้วสีชา	แรงกด (kg)	ระยะห่างของจุดรองรับ (cm)	ความกว้าง (cm)	ความหนา (cm)	ค่ากำลังรับแรงดัด (MPa)	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
100 : 0	14.12	10	2.27	0.95	10.14	10.41	0.41
	14.55	10	2.26	0.95	10.49		
	15.23	10	2.27	0.95	10.94		
	13.62	10	2.27	0.95	9.78		
	14.82	10	2.26	0.95	10.69		
80 : 20	22.74	10	2.21	0.86	20.47	20.50	0.43
	21.98	10	2.15	0.85	20.81		
	21.37	10	2.19	0.85	19.87		
	21.90	10	2.20	0.85	20.27		
	22.16	10	2.19	0.84	21.10		
70 : 30	34.82	10	2.21	0.82	34.47	34.64	1.12
	36.54	10	2.23	0.81	36.74		
	34.36	10	2.21	0.82	34.01		
	35.21	10	2.23	0.82	34.54		
	33.91	10	2.22	0.82	33.42		
60 : 40	47.25	10	2.30	0.92	35.70	35.41	0.54
	45.09	10	2.28	0.91	35.13		
	45.93	10	2.29	0.91	35.63		
	44.48	10	2.29	0.91	34.50		
	46.70	10	2.30	0.91	36.07		
50 : 50	-	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-		
	-	-	-	-	-		
	-	-	-	-	-		
	-	-	-	-	-		
40 : 60	-	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-		
	-	-	-	-	-		
	-	-	-	-	-		
	-	-	-	-	-		

ตารางที่ ก.29 ผลการทดสอบกำลังรับแรงดัดของกระเบื้องที่ผลิตจากดินขาว เผาที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส

อัตราส่วนผสมระหว่างดินขาวต่อเศษแก้วสีชา	แรงกด (kg)	ระยะห่างของจุดรองรับ (cm)	ความกว้าง (cm)	ความหนา (cm)	ค่ากำลังรับแรงดัด (MPa)	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
100 : 0	3.54	10	2.55	1.09	1.72	1.49	0.14
	3.27	10	2.63	1.09	1.54		
	2.90	10	2.55	1.09	1.41		
	3.12	10	2.59	1.10	1.46		
	2.75	10	2.62	1.09	1.30		
80 : 20	7.85	10	2.54	1.07	3.97	4.68	0.39
	8.93	10	2.60	1.03	4.76		
	8.63	10	2.55	1.02	4.79		
	9.17	10	2.55	1.01	5.19		
	8.34	10	2.56	1.01	4.70		
70 : 30	16.88	10	2.51	1.02	9.51	8.97	0.73
	15.16	10	2.50	1.02	8.57		
	13.72	10	2.50	1.02	7.76		
	15.99	10	2.49	0.98	9.84		
	15.89	10	2.50	1.01	9.17		
60 : 40	17.87	10	2.52	1.04	9.64	10.02	0.64
	20.38	10	2.52	1.03	11.21		
	17.29	10	2.60	1.02	9.40		
	19.13	10	2.52	1.05	10.13		
	17.72	10	2.53	1.03	9.71		
50 : 50	25.29	10	2.47	1.01	14.76	16.74	1.47
	25.94	10	2.46	1.01	15.21		
	28.69	10	2.44	0.98	18.01		
	30.49	10	2.45	1.00	18.31		
	28.40	10	2.45	0.99	17.40		
40 : 60	35.29	10	2.44	1.02	20.45	23.07	1.89
	42.12	10	2.44	1.01	24.89		
	33.39	10	2.45	0.97	21.31		
	37.82	10	2.46	0.98	23.55		
	41.22	10	2.46	0.99	25.15		

ตารางที่ ก.30 ผลการทดสอบกำลังรับแรงดัดของกระเบื้องที่ผลิตจากดินขาว เผาที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส

อัตราส่วนผสมระหว่างดินขาวต่อเศษแก้วสีชา	แรงกด (kg)	ระยะห่างของจุดรองรับ (cm)	ความกว้าง (cm)	ความหนา (cm)	ค่ากำลังรับแรงดัด (MPa)	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
100 : 0	2.95	10	2.56	1.08	1.45	1.62	0.16
	3.77	10	2.57	1.07	1.88		
	2.97	10	2.57	1.08	1.46		
	3.43	10	2.58	1.09	1.65		
	3.36	10	2.57	1.07	1.68		
80 : 20	15.90	10	2.48	0.96	10.23	10.28	0.49
	17.45	10	2.47	0.97	11.05		
	16.75	10	2.47	0.98	10.39		
	15.12	10	2.49	0.97	9.49		
	16.26	10	2.48	0.97	10.25		
70 : 30	35.43	10	2.36	0.94	24.99	26.33	1.19
	37.24	10	2.36	0.93	26.84		
	39.09	10	2.35	0.93	28.29		
	36.42	10	2.36	0.93	26.25		
	35.66	10	2.35	0.94	25.26		
60 : 40	41.46	10	2.39	0.97	27.12	27.11	1.09
	39.06	10	2.38	0.97	25.66		
	42.63	10	2.39	0.97	27.89		
	40.91	10	2.39	0.98	26.22		
	43.85	10	2.39	0.97	28.68		
50 : 50	38.85	10	2.39	0.93	27.65	29.25	1.44
	39.14	10	2.30	0.91	30.23		
	41.78	10	2.30	0.92	31.57		
	39.35	10	2.31	0.94	28.36		
	39.95	10	2.39	0.93	28.43		
40 : 60	58.84	10	2.45	0.96	38.33	38.13	0.61
	57.62	10	2.43	0.95	38.65		
	59.55	10	2.45	0.96	38.80		
	56.09	10	2.46	0.95	37.16		
	56.90	10	2.46	0.95	37.70		

ตารางที่ ก.31 ผลการทดสอบกำลังรับแรงดัดของกระเบื้องที่ผลิตจากดินขาว เผาที่อุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียส

อัตราส่วนผสมระหว่างดินขาวต่อเศษแก้วสีชา	แรงกด (kg)	ระยะห่างของจุดรองรับ (cm)	ความกว้าง (cm)	ความหนา (cm)	ค่ากำลังรับแรงดัด (MPa)	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
100 : 0	10.44	10	2.52	1.05	5.53	5.56	0.84
	9.95	10	2.52	1.06	5.17		
	13.56	10	2.52	1.05	7.18		
	9.63	10	2.54	1.04	5.16		
	9.24	10	2.53	1.06	4.78		
80 : 20	32.81	10	2.36	0.91	24.70	25.30	0.42
	33.33	10	2.36	0.91	25.09		
	33.43	10	2.36	0.91	25.16		
	35.02	10	2.36	0.92	25.79		
	34.20	10	2.36	0.91	25.74		
70 : 30	45.54	10	2.31	0.91	35.02	35.71	0.53
	47.77	10	2.32	0.91	36.58		
	46.22	10	2.31	0.91	35.54		
	46.80	10	2.31	0.91	35.99		
	47.11	10	2.31	0.92	35.44		
60 : 40	48.60	10	2.39	0.92	35.34	36.79	0.97
	50.32	10	2.38	0.93	35.96		
	47.68	10	2.26	0.91	37.48		
	49.60	10	2.36	0.91	37.33		
	50.73	10	2.38	0.91	37.86		
50 : 50	53.84	10	2.33	0.93	39.30	40.66	0.96
	54.50	10	2.30	0.91	42.09		
	53.75	10	2.30	0.92	40.62		
	54.58	10	2.30	0.92	41.24		
	53.00	10	2.30	0.92	40.05		
40 : 60	57.91	10	2.37	0.94	40.68	41.52	0.64
	59.43	10	2.38	0.93	42.47		
	57.33	10	2.37	0.93	41.14		
	58.52	10	2.36	0.94	41.28		
	59.82	10	2.37	0.94	42.02		

ตารางที่ ก.32 ผลการทดสอบกำลังรับแรงดัดของกระเบื้องที่ผลิตจากดินขาว เผาที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส

อัตราส่วนผสมระหว่างดินขาวต่อเศษแก้วสีชา	แรงกด (kg)	ระยะห่างของจุดรองรับ (cm)	ความกว้าง (cm)	ความหนา (cm)	ค่ากำลังรับแรงดัด (MPa)	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
100 : 0	17.69	10	2.42	1.00	10.75	11.05	0.22
	18.28	10	2.43	0.99	11.29		
	18.38	10	2.42	1.00	11.17		
	18.44	10	2.42	1.00	11.21		
	17.90	10	2.43	1.00	10.84		
80 : 20	43.97	10	2.31	0.92	33.08	35.87	2.22
	43.75	10	2.31	0.89	35.17		
	46.15	10	2.31	0.86	39.74		
	47.21	10	2.30	0.91	36.46		
	44.36	10	2.31	0.90	34.87		
70 : 30	53.43	10	2.32	0.92	40.03	38.95	0.91
	52.58	10	2.33	0.94	37.57		
	52.26	10	2.33	0.91	39.84		
	54.44	10	2.33	0.94	38.90		
	52.86	10	2.34	0.93	38.42		
60 : 40	56.75	10	2.31	0.93	41.78	42.52	0.71
	57.78	10	2.31	0.94	41.64		
	57.28	10	2.33	0.92	42.73		
	57.00	10	2.31	0.92	42.88		
	57.63	10	2.30	0.92	43.55		
50 : 50	58.95	10	2.31	0.93	43.40	45.45	1.23
	60.71	10	2.32	0.91	46.48		
	61.34	10	2.33	0.91	46.76		
	60.92	10	2.31	0.92	45.83		
	59.51	10	2.31	0.92	44.77		
40 : 60	-	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-		
	-	-	-	-	-		
	-	-	-	-	-		
	-	-	-	-	-		

ประวัติผู้ดำเนินโครงงาน

ชื่อ นายเกษมสันต์ จางตระกูล

ภูมิลำเนา 105/2 ถ.สองแควสอง อำเภอแม่สอด
จังหวัดตาก 63110

ประวัติการศึกษา

- จบระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียนสรรพวิทยาคม
- ปัจจุบันกำลังศึกษาในระดับปริญญาตรีชั้นปีที่ 4
  สาขาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์
  มหาวิทยาลัยนเรศวร

E-mail: farron_7@hotmail.com

ชื่อ นายสถาพร ทองย้อย

ภูมิลำเนา 18016/154 ตำบลกะปาง อำเภอทุ่งสง
จังหวัดนครศรีธรรมราช 80310

ประวัติการศึกษา

- จบระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียนสตรีทุ่งสง
- ปัจจุบันกำลังศึกษาในระดับปริญญาตรีชั้นปีที่ 4
  สาขาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์
  มหาวิทยาลัยนเรศวร

E-mail: kopkap_1988@hotmail.com