



การใช้เศษแก้วและกากตะกอนเคลือบฟritเป็นตัวช่วยหลอม
ในการผลิตกระเบื้องเซรามิก

โดย

นางสาวภัทรวรรณ เจยเจริญ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาเทคโนโลยีการจัดการพลังงานและสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมเคมี
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
พ.ศ. 2553

การใช้เศษแก้วและกากตะกอนเคลือบฟritเป็นตัวช่วยหลอม
ในการผลิตกระเบื้องเซรามิก

โดย

นางสาวภัทรวรรณ เจษฎาเจริญ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาเทคโนโลยีการจัดการพลังงานและสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมเคมี
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
พ.ศ. 2553

Using Glass Wastes and Frit Glaze Sludge as a Fluxing Agent
for Ceramic Tile Production

By

Miss Pattarawan Choeycharoen

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering
Department of Chemical Engineering
Faculty of Engineering
Thammasat University
2010

มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

วิทยานิพนธ์

ของ

นางสาวภัทรวรรณ เฉยเจริญ

เรื่อง

การใช้เศษแก้วและกากตะกอนเคลือบฟritเป็นตัวช่วยหลอมในการผลิตกระเบื้องเซรามิก

ได้รับการตรวจสอบและอนุมัติ ให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

เมื่อ วันที่ 3 มิถุนายน พ.ศ. 2553

ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุพิชชา รุ่งโรจน์นิมิตชัย)

กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(รองศาสตราจารย์ ดร. ภาณุ ด่านวานิชกุล)

กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(ดร. อนุชา วรณกัณ)

กรรมการสอบวิทยานิพนธ์

(อาจารย์ ดร. จีรวรรณ คล้อยภยันต์)

คณบดี

(รองศาสตราจารย์ ดร. อรุยา วิสกุล)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาการนำวัสดุเหลือทิ้งประเภทเศษแก้วโซดาไลม์ เศษแก้วโบโรซิลิเกต และกากตะกอนเคลือบพริต กลับมาใช้ให้เกิดประโยชน์ในการเป็นตัวช่วยหลอมทดแทนแร่โซเดียมเฟลด์สปาร์ ซึ่งเป็นแร่ธรรมชาติที่นิยมใช้เป็นตัวช่วยหลอมในปัจจุบัน โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อช่วยลดอุณหภูมิในการเผา ลดการใช้ทรัพยากรธรรมชาติ และส่งเสริมการนำวัสดุเหลือทิ้งกลับมาใช้ให้เกิดประโยชน์ในอุตสาหกรรมการผลิตกระเบื้องเซรามิก การทดลองได้ทำการแทนที่แร่โซเดียมเฟลด์สปาร์ซึ่งมีอยู่ในปริมาณ 40% ในสูตรกระเบื้องมาตรฐานที่ใช้อ้างอิงด้วยวัสดุเหลือทิ้งประเภทต่างๆ ในปริมาณ 50 60 70 80 และ 100% โดยน้ำหนัก การเตรียมชิ้นงานทดลองใช้วิธีการเดียวกันกับการผลิตจริงในทางอุตสาหกรรม ทำการเผาชิ้นงานที่อุณหภูมิ 1,000 1,050 1,100 และ 1,125°C ทดสอบสมบัติทางกายภาพต่างๆ ได้แก่ ค่าการหดตัวเชิงเส้น ค่าความหนาแน่น ค่าการดูดซึมน้ำ และค่าความบิดเบี้ยวของชิ้นงานหลังเผา สมบัติทางกล ได้แก่ ค่าความต้านทานแรงดัด สมบัติทางความร้อน ได้แก่ ค่าการขยายตัวและหดตัวของชิ้นงานในระหว่างการเผาด้วยเครื่อง Dilatometer วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของสูตรเนื้อดินด้วยเทคนิค XRF และวิเคราะห์องค์ประกอบทางแร่ของชิ้นงานหลังเผาด้วยเทคนิค XRD เปรียบเทียบผลการทดสอบระหว่างชิ้นงานสูตรทดลองและสูตรมาตรฐานที่ใช้อ้างอิง เพื่อศึกษาประสิทธิภาพในการเป็นตัวช่วยหลอมของวัสดุเหลือทิ้งประเภทต่างๆ

ผลจากการศึกษา พบว่า วัสดุเหลือทิ้งทุกประเภทสามารถนำมาใช้เป็นตัวช่วยหลอมทดแทนแร่โซเดียมเฟลด์สปาร์ในการผลิตกระเบื้องบุผนังเซรามิกได้ โดยปริมาณการใช้งานมากที่สุดที่สามารถใช้ได้สูตร คือ 28% โดยน้ำหนัก (70% ของการแทนที่แร่โซเดียมเฟลด์สปาร์) และสามารถช่วยลดอุณหภูมิในการเผาผลิตภัณฑ์ลงมาได้ที่ 1,050°C โดยชิ้นงานยังคงมีสมบัติต่างๆ ผ่านตามเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมกระเบื้องบุผนังเซรามิกทั้งประเภทภายในและภายนอกอาคาร (มอก. 613-2529 และ มอก. 614-2529) โดยพบว่ากากตะกอนเคลือบพริตมีประสิทธิภาพในการเป็นตัวช่วยหลอมได้มากที่สุด รองลงมาคือเศษแก้วโซดาไลม์ และเศษแก้วโบโรซิลิเกต ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่าการใช้วัสดุเหลือทิ้งทั้ง 3 ประเภทในปริมาณที่มากเกินไปกว่า 28% โดยน้ำหนัก และทำการเผาที่อุณหภูมิสูงเกินกว่า 1,100°C นั้น จะส่งผลต่อค่าความบิดเบี้ยวที่มากขึ้น และค่าความแข็งแรงที่ลดลงของชิ้นงานหลังเผา โดยพบว่ากากตะกอนเคลือบพริตและเศษแก้วโซดาไลม์ จะส่งผลกระทบดังกล่าวมากกว่าเศษแก้วโบโรซิลิเกต

Abstract

The feasibility of substituting sodium feldspar flux, a raw material in ceramic wall tile body, with soda-lime glass waste, borosilicate glass waste and frit glaze sludge was investigated. The aim of this work is to reduce firing temperature, save natural resources and also promote the reuse of wastes as additives for traditional ceramic tile production. The test was done by replacing 40 wt% of sodium feldspar in reference tile formula with each of waste materials at 50, 60, 70, 80 and 100% by weight. Test specimens were prepared by the same process as in the industrial ceramic tile production. Prepared specimens were fired in the laboratory electric kiln at 1000, 1050, 1100 and 1125°C. Physical properties, i.e. linear firing shrinkage, bulk density, water absorption and warpage of fired samples, mechanical property, i.e. three-point bending strength, and thermal properties, i.e. thermal expansion and contraction of test specimens during firing measured by dilatometer were investigated. In addition, chemical composition of raw materials and body formula was measured by X-ray fluorescence technique and mineralogical composition of fired samples was analyzed by X-ray diffraction technique. Those test results as well as fluxing efficiency of waste materials for trial and reference tile formulas were compared.

The results showed that all each waste material could be used as a fluxing agent in replacement of sodium feldspar in ceramic wall tile body. The maximum quantity that could be used in body formula is 28% by weight (70 wt% replacement of sodium feldspar) and also helped decreasing the firing temperature to 1,050°C, while the fired samples still passed Thai Industrial Standards for ceramic wall tiles (TIS 613-2529 and TIS 614-2529). Fluxing efficiency of frit glaze sludge was better than soda-lime glass waste and borosilicate glass waste respectively. However, it should be noted that using each of these waste materials in high quantity of replacement more than 28 wt% in body formula and firing at high temperature (more than 1,100°C) could result in increasing warpage and decreasing bending strength of fired sample. It was found that the effects from frit glaze sludge and soda-lime glass waste were larger than borosilicate glass waste.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ผู้วิจัยใคร่ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. ภาณุ ด้านวานิชกุล กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก และ ดร. อนุชา วรรณก้อง กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่ได้ให้ความรู้ คำปรึกษา คำแนะนำ รวมถึงให้ข้อเสนอแนะต่างๆ ทำให้สามารถแก้ไขปัญหา และทำวิจัยให้สำเร็จลุล่วงได้เป็นอย่างดี พร้อมกันนี้ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุพิชชา รุ่งโรจน์นิมิตชัย และอาจารย์ ดร. จิรวรรณ คล้อยภยันต์ ที่กรุณาเป็นประธานกรรมการ และคณะกรรมการในการสอบวิทยานิพนธ์ครั้งนี้

ขอขอบพระคุณ คุณชูศักดิ์ ปรัชญางค์ปรีชา กรรมการผู้จัดการบริษัท คุณนิธินันท์ ฉายนพมณีนิล ผู้จัดการโรงงาน คุณเกรียงสิทธิ์ ส่งศิริ รองผู้จัดการโรงงาน และคุณบุศรินทร์ ม้าทอง ผู้ช่วยผู้จัดการโรงงาน ตลอดจนพนักงานของบริษัท ไทยอุตสาหกรรมเครื่องปั้นดินเผา จำกัด และห้างหุ้นส่วนจำกัด กระเบื้องไทย ทุกท่าน ที่กรุณาให้ความช่วยเหลือและอำนวยความสะดวกในการทำวิจัยครั้งนี้ ทั้งในด้านอนุเคราะห์ข้อมูล วัตถุดิบ เครื่องมือและอุปกรณ์ต่างๆ รวมถึงสถานที่ที่ใช้ในการทำวิจัย

ขอขอบพระคุณ บริษัท AGC Techno Glass (ประเทศไทย) จำกัด ที่ให้การสนับสนุนเศษแก้วชนิดโบโรซิลิเกต ซึ่งเป็นวัตถุดิบที่นำมาใช้ในงานวิจัย

ขอขอบพระคุณ ห้องปฏิบัติการผลิตและออกแบบสำหรับอุตสาหกรรมเซรามิกส์ หน่วยปฏิบัติการวิจัยเทคโนโลยีเซรามิกส์ ห้องปฏิบัติการอิเล็กทรอนิกส์แฟรกชันและอิเล็กทรอนิกส์ออเรสเซนส์ ห้องปฏิบัติการวิเคราะห์ทดสอบผลิตภัณฑ์กระเบื้องเซรามิก ของศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ ที่ให้การสนับสนุนสถานที่ รวมถึงเครื่องมืออุปกรณ์ต่างๆ ที่ใช้ในการทำวิจัย

สุดท้าย ขอขอบพระคุณบิดา มารดา ญาติพี่น้อง ตลอดจนเพื่อนและมิตรสหายทุกท่านที่คอยเป็นกำลังใจ และให้ความช่วยเหลือในด้านต่างๆ เป็นอย่างดี

หากวิทยานิพนธ์นี้ก่อให้เกิดประโยชน์ต่อส่วนรวม ผู้วิจัยขอมอบความดีนี้ให้แก่ผู้มีพระคุณทุกๆ ท่าน

ภัทรวรรณ เจยเจริญ
มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
พ.ศ. 2553

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	(1)
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	(2)
กิตติกรรมประกาศ.....	(3)
สารบัญ	(4)
สารบัญตาราง.....	(7)
สารบัญภาพประกอบ	(9)
 บทที่	
1. บทนำ	1
1.1 หลักการและเหตุผล	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	3
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	5
 2. วารสารปริทัศน์.....	 6
2.1 กระเบื้องเซรามิก	6
2.2 วัตถุดิบเซรามิก และวัตถุดิบประเภทตัวช่วยหลอม	9
2.3 วัสดุประเภทแก้วโซดาไลม์ และแก้วโบโรซิลิเกต	10
2.3.1 แก้วชนิดโซดาไลม์	10
2.3.2 แก้วชนิดโบโรซิลิเกต	11
2.4 ฟrit และการใช้ในเคลือบเซรามิก	12

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.5 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	13
3. ขั้นตอนดำเนินงานวิจัย.....	20
3.1 วัตถุดิบและอุปกรณ์	20
3.1.1 วัตถุดิบที่ใช้ในงานวิจัย	20
3.1.2 อุปกรณ์และเครื่องมือวิเคราะห์ที่ใช้ในงานวิจัย	22
3.2 การบดเศษแก้วก่อนนำมาใช้งาน	23
3.3 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบประเภทตัวช่วยหลอม	25
3.4 การทดสอบการหลอมตัวของวัตถุดิบประเภทตัวช่วยหลอมในเบื้องต้น (Fusion Test)	25
3.5 การเตรียมชิ้นงานทดลอง	27
3.6 การวิเคราะห์ทดสอบสมบัติต่างๆ ของชิ้นงาน	35
3.6.1 การทดสอบสมบัติทางกายภาพของชิ้นงานหลังเผา.....	35
3.6.1.1 ค่าการหดตัวเชิงเส้น (Linear firing shrinkage)	35
3.6.1.2 ค่าความหนาแน่นทั้งก้อน (Bulk density)	35
3.6.1.3 ค่าการดูดซึมน้ำ (Water absorption).....	36
3.6.1.4 ค่าความบิดเบี้ยวของชิ้นงานหลังเผา (Warpage)	36
3.6.2 การทดสอบสมบัติทางกลของชิ้นงานหลังเผา	40
3.6.3 การทดสอบสมบัติทางความร้อน	43
3.6.4 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี (Cheical Composition Analysis)	45
3.6.5 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางแร่ (Mineralogical Composition Analysis)	46
4. ผลของการวิจัยและอภิปรายผล	47
4.1 ผลการทดสอบการหลอมตัวของวัตถุดิบประเภทตัวช่วยหลอมในเบื้องต้น (Fusion Test)	47

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.2 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของวัตถุบิประเภทตัวช่วยหลอม	49
4.3 ผลการทดสอบสมบัติทางกายภาพของชิ้นงานหลังเผา	51
4.3.1 ผลการทดสอบการหดตัวเชิงเส้น	52
4.3.2 ผลการทดสอบความหนาแน่นของชิ้นงาน	56
4.3.3 ผลการทดสอบการดูดซึมน้ำ	61
4.3.4 ผลการทดสอบความบิดเบี้ยวของชิ้นงาน	65
4.3.4.1 ผลการทดสอบความบิดเบี้ยวของชิ้นงานในลักษณะนูนขึ้น และแอ่นลง	66
4.3.4.2 ผลการทดสอบความบิดเบี้ยวของชิ้นงานในลักษณะโค้งออก และเว้าเข้า	74
4.4 ผลการทดสอบสมบัติทางกลของชิ้นงานหลังเผา	79
4.5 ผลการทดสอบสมบัติทางความร้อน	84
4.6 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของเนื้อดินกระเบื้องสูตรต่างๆ	95
4.7 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางแร่ของชิ้นงานกระเบื้องหลังเผาสูตรต่างๆ .	97
5. สรุปผลการศึกษาวิจัยและข้อเสนอแนะ	103
5.1 สรุปผลการศึกษาวิจัย	103
5.2 ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคต	106
รายการอ้างอิง.....	108
ประวัติการศึกษา.....	111

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 สูตรกระเบื้องมาตรฐานที่ใช้อ้างอิง และสูตรกระเบื้องทดลองซึ่งใช้ของเสียประเภทต่างๆ แทนที่แร่โซเดียมเฟลด์สปาร์ในปริมาณ 50 และ 100 % โดยน้ำหนัก.....	27
3.2 สูตรกระเบื้องมาตรฐานที่ใช้อ้างอิง และสูตรกระเบื้องทดลองซึ่งใช้ของเสียประเภทต่างๆ แทนที่แร่โซเดียมเฟลด์สปาร์ในปริมาณ 50, 60, 70 และ 80 %โดยน้ำหนัก	34
4.1 ผลการทดสอบการหลอมตัวของวัตถุดิบประเภทตัวช่วยหลอมในเบื้องต้นที่อุณหภูมิเผา 1,125°C	47
4.2 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบประเภทตัวช่วยหลอมต่างๆ ด้วยเทคนิคเอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนส์(XRF).....	49
4.3 ผลการทดสอบการหดตัวเชิงเส้นของชิ้นงานหลังเผาที่อุณหภูมิต่างๆ ในการทดลองครั้งที่ 1	53
4.4 ผลการทดสอบการหดตัวเชิงเส้นของชิ้นงานหลังเผาที่อุณหภูมิต่างๆ ในการทดลองครั้งที่ 2	54
4.5 ผลการทดสอบความหนาแน่นของชิ้นงานหลังเผาที่อุณหภูมิต่างๆ ในการทดลองครั้งที่ 1	57
4.6 ผลการทดสอบความหนาแน่นของชิ้นงานหลังเผาที่อุณหภูมิต่างๆ ในการทดลองครั้งที่ 2	58
4.7 ผลการทดสอบการดูดซึมน้ำของชิ้นงานหลังเผาที่อุณหภูมิต่างๆ ในการทดลองครั้งที่ 1	62
4.8 ผลการทดสอบการดูดซึมน้ำของชิ้นงานหลังเผาที่อุณหภูมิต่างๆ ในการทดลองครั้งที่ 2	63
4.9 ผลการทดสอบความบิดเบี้ยวในลักษณะนูนขึ้นและแอ่นลงตามแนวขอบของชิ้นงานหลังเผาที่อุณหภูมิต่างๆ ในการทดลองครั้งที่ 1	67

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.10 ผลการทดสอบความบิดเบี้ยวในลักษณะนูนขึ้นและแอ่นลงตามแนวขอบ ของชิ้นงานหลังเผาที่อุณหภูมิต่างๆ ในการทดลองครั้งที่ 2	68
4.11 ผลการทดสอบความบิดเบี้ยวในลักษณะนูนขึ้นและแอ่นลงตามแนวเส้น ทแยงมุมของชิ้นงานหลังเผาที่อุณหภูมิต่างๆ ในการทดลองครั้งที่ 1	70
4.12 ผลการทดสอบความบิดเบี้ยวในลักษณะนูนขึ้นและแอ่นลงตามแนวเส้น ทแยงมุมของชิ้นงานหลังเผาที่อุณหภูมิต่างๆ ในการทดลองครั้งที่ 2	72
4.13 ผลการทดสอบความบิดเบี้ยวในลักษณะโค้งออกและเว้าเข้าตามแนวขอบ ของชิ้นงานหลังเผาที่อุณหภูมิต่างๆ ในการทดลองครั้งที่ 1	75
4.14 ผลการทดสอบความบิดเบี้ยวในลักษณะโค้งออกและเว้าเข้าตามแนวขอบ ของชิ้นงานหลังเผาที่อุณหภูมิต่างๆ ในการทดลองครั้งที่ 2	76
4.15 ผลการทดสอบความต้านทานแรงดัดของชิ้นงานหลังเผาที่อุณหภูมิต่างๆ ในการทดลองครั้งที่ 1	80
4.16 ผลการทดสอบความต้านทานแรงดัดของชิ้นงานหลังเผาที่อุณหภูมิต่างๆ ในการทดลองครั้งที่ 2	81
4.17 สรุปผลค่าการหดตัวของชิ้นงานเมื่อสิ้นสุดการเผา และอุณหภูมิเริ่มต้นที่ ชิ้นงานเกิดการหดตัวจากการทดสอบด้วยเครื่อง Dilatometer ของกระเบื้อง ทดลองสูตรต่างๆ.....	92
4.18 ผลการทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนเชิงเส้น (CTE) ระหว่างอุณหภูมิ 30 – 600°C ของชิ้นงานทดลองสูตรต่างๆ.....	93
4.19 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของเนื้อดินกระเบื้องสูตรต่างๆ ด้วยเทคนิคเอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนส์ (XRF)	95
4.20 สรุปผลการทดสอบสมบัติต่างๆ ของชิ้นงานหลังเผาที่อุณหภูมิ 1,050°C เปรียบเทียบกับเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก. 613-2529 และ มอก. 614-2529	101

สารบัญภาพประกอบ

ภาพที่	หน้า
1.1 กราฟแสดงสัดส่วนการส่งออกผลิตภัณฑ์เซรามิกของประเทศไทย ในปี พ.ศ. 2552	2
2.1 แผนภูมิแสดงกระบวนการผลิตกระเบื้องเซรามิกโดยทั่วไป	8
3.1 เศษแก้วชนิดโซดาไลม์ก่อนบดย่อย.....	21
3.2 เศษแก้วชนิดโบโรซิลิเกตก่อนบดย่อย.....	21
3.3 กากตะกอนเคลือบฟrit ซึ่งเป็นของเสียจากโรงงานผลิตกระเบื้องเซรามิก ..	22
3.4 เครื่องบดย่อยชนิด Edge runner mill.....	24
3.5 เศษแก้วที่ถูกบดละเอียดและคัดแยกขนาดพร้อมนำไปใช้งาน.....	24
3.6 เครื่องมือวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยเทคนิค X-ray fluorescence .	25
3.7 แม่พิมพ์โลหะรูปโคนที่ใช้ในการเตรียมตัวอย่าง.....	26
3.8 ตัวอย่างชิ้นงานหลังอัดก่อนนำไปเผา.....	26
3.9 หม้อบด Ball mill ที่ใช้ในการทดลอง.....	29
3.10 เครื่องพ่นฝอยและอบแห้ง (Spray dryer) เพื่อผลิตเม็ดผงดินที่ใช้ในการ ทดลอง	30
3.11 เม็ดผงดินที่ได้จากเครื่อง Spray dryer พร้อมนำไปอัดขึ้นรูป.....	30
3.12 เครื่องอัดไฮดรอลิกสำหรับใช้ในการขึ้นรูปแผ่นกระเบื้อง	31
3.13 เตาอบไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลอง.....	32
3.14 เตาเผาไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลอง	32
3.15 การวัดความบิดเบี้ยวในลักษณะฐานขึ้นและแ่นลง	37
3.16 ภาพจำลองกระเบื้องในลักษณะฐานขึ้นตามแนวขอบและแนวเส้นทแยงมุม	38
3.17 ภาพจำลองกระเบื้องในลักษณะแ่นลงตามแนวขอบและแนวเส้นทแยงมุม	38
3.18 การวัดความบิดเบี้ยวในลักษณะโค้งออกและเว้าเข้า.....	39
3.19 ภาพจำลองกระเบื้องในลักษณะโค้งออกและเว้าเข้าตามแนวขอบ	39
3.20 เครื่องวัดความบิดเบี้ยวของกระเบื้องที่ใช้ในการทดสอบ.....	40
3.21 การทดสอบความต้านทานแรงดัดแบบ Three-point bending strength...	41
3.22 เครื่องวัดความต้านทานแรงดัดที่ใช้ในการทดสอบ	42

สารบัญภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
3.23 เครื่องวัดค่าการขยายตัวและหดตัวทางความร้อน (Dilatometer)	44
3.24 เครื่องวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี X-ray fluorescence spectrometer (XRF)	45
3.25 เครื่องวิเคราะห์องค์ประกอบทางแร่ X-ray diffraction (XRD)	46
4.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการหดตัวเชิงเส้น และอุณหภูมิในการเผาขึ้นงาน ในการทดลองครั้งที่ 1	53
4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการหดตัวเชิงเส้น และอุณหภูมิในการเผาขึ้นงาน ในการทดลองครั้งที่ 2	55
4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่น และอุณหภูมิในการเผาขึ้นงาน ในการทดลองครั้งที่ 1	57
4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่น และอุณหภูมิในการเผาขึ้นงาน ในการทดลองครั้งที่ 2	59
4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดซึมน้ำ และอุณหภูมิในการเผาขึ้นงาน ในการทดลองครั้งที่ 1	62
4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดซึมน้ำ และอุณหภูมิในการเผาขึ้นงาน ในการทดลองครั้งที่ 2	64
4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความบิดเบี้ยวสูงขึ้น – แ่นลงตามแนวขอบ และอุณหภูมิในการเผาขึ้นงาน ในการทดลองครั้งที่ 1	67
4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความบิดเบี้ยวสูงขึ้น – แ่นลงตามแนวขอบ และอุณหภูมิในการเผาขึ้นงาน ในการทดลองครั้งที่ 2	69
4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความบิดเบี้ยวสูงขึ้น – แ่นลงตามแนวเส้นทแยงมุม และอุณหภูมิในการเผาขึ้นงาน ในการทดลองครั้งที่ 1	71
4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความบิดเบี้ยวสูงขึ้น – แ่นลงตามแนวเส้นทแยงมุม และอุณหภูมิในการเผาขึ้นงาน ในการทดลองครั้งที่ 2	73

สารบัญภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความบิดเบี้ยวโค้งออก – เว้าเข้าตามแนวขอบ และอุณหภูมิในการเผาขึ้นงาน ในการทดลองครั้งที่ 1	75
4.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความบิดเบี้ยวโค้งออก – เว้าเข้าตามแนวขอบ และอุณหภูมิในการเผาขึ้นงาน ในการทดลองครั้งที่ 2	77
4.13 ชิ้นงานกระเบื้องที่ใช้วัสดุเหลือทิ้งทั้ง 3 ประเภททดแทนแร่โซเดียมเฟลด์สปาร์ในปริมาณ 100% และขึ้นงานสูตรมาตรฐานอ้างอิง เพื่อเปรียบเทียบความบิดเบี้ยวของชิ้นงานหลังผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 1,125°C	78
4.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานแรงดัด และอุณหภูมิในการเผาขึ้นงาน ในการทดลองครั้งที่ 1	80
4.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานแรงดัด และอุณหภูมิในการเผาขึ้นงาน ในการทดลองครั้งที่ 2	82
4.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการขยายตัวและหดตัวของชิ้นงานระหว่างทำการเผาที่ อุณหภูมิ 25 - 1,100°C ของสูตรเนื้อดินกระเบื้องมาตรฐาน (100F)	85
4.17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการขยายตัวและหดตัวของชิ้นงานระหว่างทำการเผาที่อุณหภูมิ 25 - 1,100°C ของเนื้อดินกระเบื้องสูตร 50F 50SLG.....	86
4.18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการขยายตัวและหดตัวของชิ้นงานระหว่างทำการเผาที่อุณหภูมิ 25 - 1,100°C ของเนื้อดินกระเบื้องสูตร 20F 80SLG.....	87
4.19 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการขยายตัวและหดตัวของชิ้นงานระหว่างทำการเผาที่อุณหภูมิ 25 - 1,100°C ของเนื้อดินกระเบื้องสูตร 50F 50BSG	88
4.20 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการขยายตัวและหดตัวของชิ้นงานระหว่างทำการเผาที่อุณหภูมิ 25 - 1,100°C ของเนื้อดินกระเบื้องสูตร 20F 80BSG	89

สารบัญภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.21 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการขยายตัวและหดตัวของชิ้นงาน ระหว่างทำการเผาที่อุณหภูมิ 25 - 1,100°C ของเนื้อดินกระเบื้องสูตร 50F 50FGS.....	90
4.22 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการขยายตัวและหดตัวของชิ้นงาน ระหว่างทำการเผาที่อุณหภูมิ 25 - 1,100°C ของเนื้อดินกระเบื้องสูตร 20F 80FGS.....	91
4.23 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางแร่ของชิ้นงานกระเบื้องทดลองสูตรต่างๆ เผาที่อุณหภูมิ 1,050°C เทียบกับชิ้นงานกระเบื้องสูตรมาตรฐานอ้างอิง ซึ่งเผาที่อุณหภูมิ 1,125°C	98

บทที่ 1

บทนำ

1.1 หลักการและเหตุผล

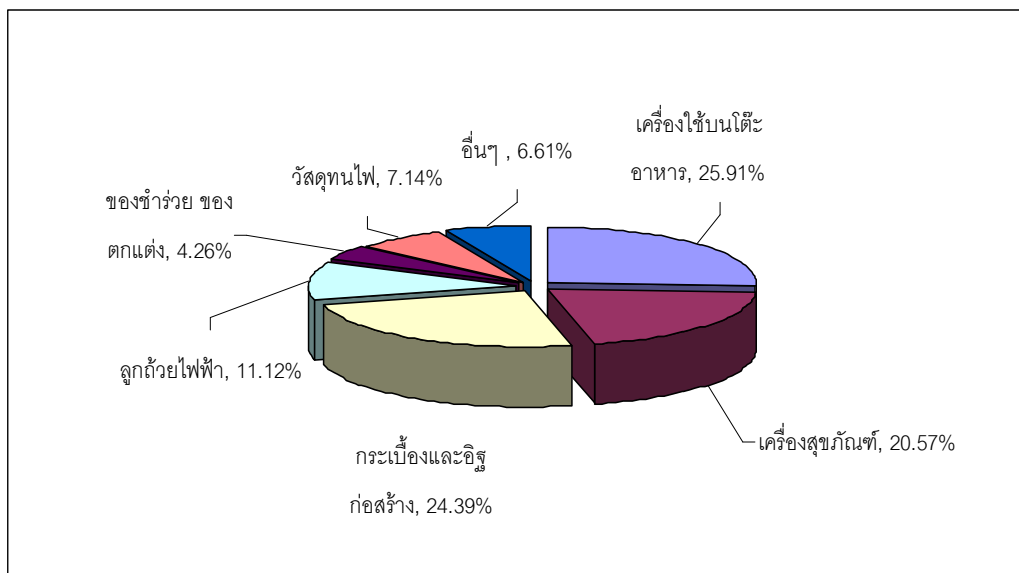
ปัจจุบันทั่วโลก รวมถึงประเทศไทย ได้ให้ความสนใจในการอนุรักษ์พลังงานและสิ่งแวดล้อมมากยิ่งขึ้น จึงทำให้การลดการใช้พลังงานและการนำของเสียกลับมาใช้ให้เกิดประโยชน์เป็นประเด็นที่มีความสำคัญและมีผู้ให้ความสนใจเป็นจำนวนมาก อุตสาหกรรมการผลิตเซรามิกเป็นอีกหนึ่งอุตสาหกรรมที่มีการใช้พลังงานค่อนข้างสูง เนื่องจากกระบวนการเผาผลิตภัณฑ์เป็นกระบวนการที่ต้องใช้อุณหภูมิสูง เพื่อให้เนื้อผลิตภัณฑ์หลังเผามีความแข็งแรงตามประเภทของผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ สำหรับอุตสาหกรรมการผลิตกระเบื้องเซรามิกนั้น ในปัจจุบันมักเผาที่อุณหภูมิสูงไม่เกิน 1,200 องศาเซลเซียส โดยส่วนใหญ่กระเบื้องปูพื้นจะเผาให้เนื้อผลิตภัณฑ์แกร่งถึงจุดสุกตัวที่อุณหภูมิประมาณ 1,150 – 1,180 องศาเซลเซียส ส่วนกระเบื้องปูผนังจะนิยมเผาที่อุณหภูมิต่ำลงมาประมาณ 1,100 องศาเซลเซียส (ไพจิตร อิงศิริวัฒน์, 2541) นอกจากนี้ต้นทุนทางด้านพลังงานแล้ว กระบวนการผลิตเซรามิกยังมีต้นทุนทางด้านวัตถุดิบที่สูงมากอีกด้วย เมื่อพิจารณาถึงต้นทุนในการผลิตโดยรวมแล้ว พบว่า อุตสาหกรรมเซรามิกมีต้นทุนค่าวัตถุดิบสูงเป็นอันดับที่หนึ่ง รองลงมาได้แก่ ต้นทุนทางด้านพลังงาน ต้นทุนค่าแรงงาน และต้นทุนค่าเสื่อมราคา ตามลำดับ (เพ็ชรพร เชาวกิจเจริญ และคณะ, 2549)

อุตสาหกรรมการผลิตเซรามิก นับเป็นอีกหนึ่งอุตสาหกรรมที่นำรายได้เข้าสู่ประเทศเป็นจำนวนมาก จากข้อมูลของกรมศุลกากร กระทรวงการคลัง พบว่า ในปี พ.ศ. 2551 มูลค่าการส่งออกผลิตภัณฑ์เซรามิกของประเทศไทยมีมูลค่าถึง 32,917 ล้านบาท (ประมาณ 900 ล้านเหรียญสหรัฐ) และในปี พ.ศ. 2552 การส่งออกมีมูลค่าลดลงเป็น 18,484 ล้านบาท ตามสภาวะการตกต่ำของเศรษฐกิจโลกในปีที่ผ่านมา โดยจากข้อมูลสถิติการนำเข้า-ส่งออก ตั้งแต่เดือนมกราคมถึงเดือนธันวาคม 2552 พบว่า ผลิตภัณฑ์เซรามิกในกลุ่มกระเบื้อง ทั้งประเภทปูพื้น ปูผนัง ผนังหลังคา รวมถึงอิฐก่อสร้าง มีสัดส่วนการเป็นสินค้าส่งออกมากเป็นอันดับที่สอง รองจากผลิตภัณฑ์ในกลุ่มเครื่องใช้บนโต๊ะอาหาร โดยคิดเป็นมูลค่า 4,509 ล้านบาท หรือคิดเป็นสัดส่วน 24.39% ของผลิตภัณฑ์เซรามิกทุกประเภทที่ส่งออก ข้อมูลแสดงดังกราฟในภาพที่ 1.1 (กรมศุลกากร, 2553) ดังนั้น อุตสาหกรรมการผลิตกระเบื้องเซรามิก จึงเป็นอีกหนึ่งอุตสาหกรรมที่ส่งผลกระทบต่อเศรษฐกิจของประเทศ ซึ่งควรได้รับการวิจัยและพัฒนาเพื่อปรับปรุงคุณภาพของ

ผลิตภัณฑ์ และลดต้นทุนในการผลิต โดยเฉพาะต้นทุนทางด้านวัตถุดิบและการใช้พลังงาน เพื่อให้อุตสาหกรรมการผลิตกระเบื้องเซรามิกของไทยมีศักยภาพที่สูงขึ้น สามารถแข่งขันได้ในตลาดโลก ตามสภาวะการแข่งขันทางเศรษฐกิจในปัจจุบัน

ภาพที่ 1.1

กราฟแสดงสัดส่วนการส่งออกผลิตภัณฑ์เซรามิกของประเทศไทย ในปี พ.ศ. 2552



ที่มา: กรมศุลกากร กระทรวงการคลัง (<http://www.customs.go.th/Statistic/Index.jsp>)

งานวิจัยนี้ จึงได้ทำการศึกษาเพื่อหาแนวทางในการลดต้นทุนการผลิตให้แก่อุตสาหกรรมกระเบื้องเซรามิก ทั้งในด้านลดการใช้พลังงาน และลดต้นทุนค่าวัตถุดิบ โดยนำของเสียที่มีอยู่ภายในโรงงานผลิตกระเบื้องเซรามิกเอง ได้แก่ กากตะกอนเคลือบฟrit และของเสียจากอุตสาหกรรมผลิตแก้วและกระจก ได้แก่ เศษแก้วชนิดโซดาไลม์ และเศษแก้วชนิดโบโรซิลิเกต มาศึกษาการนำมาใช้ประโยชน์เป็นตัวช่วยหลอมทดแทนแร่เฟลด์สปาร์ ซึ่งเป็นแร่ธรรมชาติที่นิยมใช้เป็นตัวช่วยหลอมในการผลิตกระเบื้องเซรามิกในปัจจุบัน เนื่องจากของเสียเหล่านี้มีสารประกอบออกไซด์ของธาตุหมู่ 1 และ 2 (อัลคาไลและอัลคาไลน์เอิร์ท) เป็นองค์ประกอบหลักอยู่หลายชนิด คล้ายกับแร่เฟลด์สปาร์ ได้แก่ K_2O , Na_2O , CaO และ MgO ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวช่วยหลอมในกระบวนการเผาผลิตภัณฑ์เซรามิก

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาการนำวัสดุเหลือทิ้งประเภทเศษแก้วโซดาไลม์ เศษแก้วโบโรซิลิเกต และกากตะกอนเคลือบฟริต กลับมาใช้ให้เกิดประโยชน์ในการเป็นตัวช่วยหลอมทดแทนแร่โซเดียมเฟลด์สปาร์ในสูตรเนื้อดินกระเบื้องเซรามิก
2. เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการเป็นตัวช่วยหลอมของวัสดุเหลือทิ้งประเภทต่างๆ ได้แก่ เศษแก้วโซดาไลม์ เศษแก้วโบโรซิลิเกต และกากตะกอนเคลือบฟริต
3. เพื่อศึกษาการลดอุณหภูมิเผาของเนื้อดินกระเบื้องเซรามิก โดยใช้วัสดุเหลือทิ้งประเภทเศษแก้วโซดาไลม์ เศษแก้วโบโรซิลิเกต และกากตะกอนเคลือบฟริต
4. เพื่อศึกษาสมบัติทางกายภาพ สมบัติทางกล สมบัติทางความร้อน องค์ประกอบทางเคมีและแร่ รวมถึงคุณภาพของกระเบื้องหลังเผาที่ได้จากการทดแทนแร่โซเดียมเฟลด์สปาร์ด้วยวัสดุเหลือทิ้งประเภทเศษแก้วโซดาไลม์ เศษแก้วโบโรซิลิเกต และกากตะกอนเคลือบฟริต

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1. วัสดุเหลือทิ้งที่นำมาทดลองใช้เป็นตัวช่วยหลอมทดแทนแร่โซเดียมเฟลด์สปาร์ในงานวิจัยนี้ ได้แก่ เศษแก้วชนิดโซดาไลม์ (จากโรงงานผลิตกระจกใส) เศษแก้วชนิดโบโรซิลิเกต (จากโรงงานผลิตเครื่องแก้วชนิดโบโรซิลิเกต) และกากตะกอนเคลือบฟริต (จากโรงงานผลิตกระเบื้องเซรามิก)
2. ทำการทดลองโดยแทนที่แร่โซเดียมเฟลด์สปาร์ในสูตรกระเบื้องมาตรฐานที่ใช้อ้างอิงด้วยวัสดุเหลือทิ้งแต่ละประเภทในปริมาณ 50 และ 100 % โดยน้ำหนัก ซึ่งสูตรกระเบื้องมาตรฐานอ้างอิงที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นสูตรกระเบื้องเซรามิกประเภทผนังทั้งภายในและภายนอก
3. ทำการเผาชิ้นงานทดสอบ ทั้งชิ้นงานสูตรมาตรฐาน และสูตรที่ใช้วัสดุเหลือทิ้งแต่ละประเภทแทนที่แร่โซเดียมเฟลด์สปาร์ ที่อุณหภูมิ 1000, 1050, 1100 และ 1125 องศาเซลเซียส
4. วิเคราะห์ทดสอบสมบัติทางกายภาพ ได้แก่ ค่าการหดตัวเชิงเส้น (Linear firing shrinkage) ค่าความหนาแน่นทั้งก้อน (Bulk density) ค่าการดูดซึมน้ำ (Water absorption) และค่าความบิดเบี้ยว (Warpage) ของชิ้นงานหลังเผาเปรียบเทียบกับกระเบื้องสูตรทดลองที่ใช้วัสดุเหลือทิ้งประเภทต่างๆ เป็นตัวช่วยหลอมทดแทนการใช้แร่โซเดียมเฟลด์สปาร์ และสูตรมาตรฐานอ้างอิงที่ใช้แร่โซเดียมเฟลด์สปาร์เป็นตัวช่วยหลอมแต่เพียงอย่างเดียว โดยการทดสอบอ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM C 326-03, ASTM C 373-88 (ASTM Standards, 2005) และมาตรฐาน

ผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมกระเบื้องเซรามิก มอก. 613-2529 (สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม , 2543) และ มอก. 614-2529 (สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2529)

5. วิเคราะห์ทดสอบสมบัติทางกล ได้แก่ ค่าความต้านทานแรงดัด (Three-point Bending Strength) เพื่อบ่งบอกความแข็งแรงของชิ้นงานหลังเผาเปรียบเทียบกับระหว่างสูตรทดลองที่ใช้วัสดุเหลือทิ้งประเภทต่างๆ เป็นตัวช่วยหลอมทดแทนการใช้แร่โซเดียมเฟลด์สปาร์ และสูตรมาตรฐานอ้างอิงที่ใช้แร่โซเดียมเฟลด์สปาร์เป็นตัวช่วยหลอมเพียงอย่างเดียว โดยพิจารณาตามเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมกระเบื้องเซรามิก มอก. 614-2529 (สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2529)

6. วิเคราะห์ทดสอบสมบัติทางความร้อน ได้แก่ ค่าการขยายตัวและหดตัวระหว่างการเผาชิ้นงาน รวมถึงค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนเชิงเส้น (Coefficient of linear thermal expansion, CTE) ของชิ้นงานในขณะถูกให้ความร้อนที่อุณหภูมิต่างๆ เปรียบเทียบกันระหว่างสูตรมาตรฐาน และสูตรที่ใช้วัสดุเหลือทิ้งแต่ละประเภทเป็นตัวช่วยหลอมทดแทนการใช้แร่โซเดียมเฟลด์สปาร์ โดยใช้เครื่องมือ Dilatometer และทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C 372 – 94 (ASTM Standards, 2005)

7. วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี (Chemical Composition Analysis) ของเนื้อดินกระเบื้องที่เตรียมจากการทดแทนแร่โซเดียมเฟลด์สปาร์ด้วยวัสดุเหลือทิ้งประเภทต่างๆ และเนื้อดินกระเบื้องสูตรมาตรฐาน โดยใช้เทคนิค X-ray fluorescence (XRF) เพื่อศึกษาองค์ประกอบออกไซด์ของธาตุต่างๆ ที่มีอยู่ในสูตรเนื้อดินเหล่านั้น เปรียบเทียบกันระหว่างสูตรทดลอง และสูตรมาตรฐานที่ใช้อ้างอิง

8. วิเคราะห์องค์ประกอบทางแร่ (Mineralogical Composition Analysis) ของชิ้นงานกระเบื้องหลังเผาแต่ละสูตร เปรียบเทียบกันระหว่างสูตรที่ใช้วัสดุเหลือทิ้งประเภทต่างๆ ทดแทนแร่โซเดียมเฟลด์สปาร์ และสูตรมาตรฐานที่ใช้อ้างอิง เพื่อศึกษาเฟสที่เกิดขึ้นหลังเผาของชิ้นงานกระเบื้องแต่ละสูตร โดยใช้เทคนิค X-ray diffraction (XRD)

9. เมื่อได้ผลจากการวิจัยโดยการแทนที่แร่โซเดียมเฟลด์สปาร์ด้วยวัสดุเหลือทิ้งทั้ง 3 ประเภทในปริมาณ 50 และ 100 % โดยน้ำหนักแล้ว ทำการศึกษาเพิ่มเติม โดยปรับปริมาณการแทนที่แร่โซเดียมเฟลด์สปาร์ด้วยวัสดุเหลือทิ้งประเภทต่างๆ ในปริมาณที่ละเอียดมากขึ้น เพื่อศึกษาสมบัติของชิ้นงานหลังเผาที่ดีที่สุด และผ่านตามเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมกระเบื้องเซรามิก ให้สามารถนำไปใช้งานได้จริงในภาคอุตสาหกรรมต่อไป

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถช่วยลดต้นทุนในการผลิตให้แก่อุตสาหกรรมกระเบื้องเซรามิกได้ จากการลดอุณหภูมิในการเผาผลิตภัณฑ์ให้มีอุณหภูมิที่จุดสุกตัวต่ำลง ซึ่งเป็นการลดการใช้พลังงานเชื้อเพลิงในเตาเผาผลิตภัณฑ์

2. ส่งเสริมการนำวัสดุเหลือทิ้ง และของเสียที่มีอยู่ภายในโรงงานเซรามิกกลับมาใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุด ซึ่งนอกจากจะช่วยลดต้นทุนค่าวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตกระเบื้องเซรามิกแล้ว ยังสามารถลดค่าใช้จ่ายที่เกิดจากการต้องกำจัดของเสียเหล่านั้นด้วย

บทที่ 2

วารสารปริทัศน์

2.1 กระเบื้องเซรามิก

คำว่า “เซรามิก” มีศัพท์เดิมมาจากภาษากรีกว่า “เครามอส” (Keramos) ซึ่งมีความหมายว่า “เผา” ในปัจจุบัน “เซรามิก” หมายถึง ผลิตภัณฑ์ที่มีส่วนประกอบมาจากวัตถุดิบที่มีอยู่ตามธรรมชาติบนเปลือกโลก เป็นวัสดุประเภทอนินทรีย์ และเป็นอโลหะ โดยกรรมวิธีการผลิตต้องผ่านการเผาที่อุณหภูมิสูง (ปรีดา พิมพ์ขาวขำ, 2539)

ผลิตภัณฑ์เซรามิกที่ใช้กันอยู่ในชีวิตประจำวันมีมากมายหลายประเภท ได้แก่ เครื่องใช้บนโต๊ะอาหาร เครื่องสุขภัณฑ์ กระเบื้องปูพื้น-ปูผนัง ของตกแต่งบ้านและสวน ของขวัญของชำร่วย รวมถึงลูกถ้วยไฟฟ้า นอกจากนี้ ยังมีเซรามิกที่ใช้เป็นส่วนประกอบในเครื่องมืออุปกรณ์ต่างๆ เช่น ชิ้นส่วนสำหรับแผงวงจร อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เครื่องใช้ไฟฟ้า คอมพิวเตอร์ หรือใช้เป็นส่วนประกอบในเครื่องยนต์ เครื่องบิน หัวเทียน เป็นต้น ชิ้นส่วนจำพวกนี้ จำเป็นต้องใช้วัสดุประเภทเซรามิก เนื่องจากในสภาวะการใช้งานจะต้องทนต่อความร้อนและการขัดสีได้เป็นอย่างดี โดยวัสดุประเภทโลหะ หรือพลาสติกไม่สามารถมีคุณสมบัติดังกล่าวได้ดีเทียบเท่ากับวัสดุประเภทเซรามิก (Kingery Bowen and Uhlmann, 1976)

สำหรับผลิตภัณฑ์ประเภทกระเบื้องเซรามิกนั้น มีการผลิตกันมาเป็นระยะเวลานานทั้งในต่างประเทศ และประเทศไทย โดยทั่วไปสามารถแบ่งประเภทของผลิตภัณฑ์กระเบื้องเซรามิกตามค่าการดูดซึมน้ำได้เป็น 3 ประเภทหลัก ได้แก่ กระเบื้องปูพื้น กระเบื้องปูผนังภายในอาคาร และกระเบื้องปูผนังภายนอกอาคาร ตามข้อกำหนดของมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมไทย (มอก.) ดังต่อไปนี้

1. กระเบื้องปูพื้น อ้างอิงตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก. 37-2529 (สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2542) ได้จัดแบ่งประเภทกระเบื้องปูพื้นออกเป็นประเภทย่อยต่างๆ ได้แก่
 - กระเบื้องประเภทดูดซึมน้ำต่ำ (ทั้งชนิดเคลือบและไม่เคลือบ) การดูดซึมน้ำต้องไม่เกินร้อยละ 3 และต้องมีค่าความต้านทานแรงดัดไม่น้อยกว่า 25 เมกะปาสคาล

- กระเบื้องประเภทดูดซึมน้ำปานกลางค่อนข้างต่ำ (ทั้งชนิดเคลือบและไม่เคลือบ) การดูดซึมน้ำต้องไม่เกินร้อยละ 6 และต้องมีค่าความต้านทานแรงดัดไม่น้อยกว่า 25 เมกะปาสคาล
 - กระเบื้องประเภทดูดซึมน้ำปานกลาง (ต้องเป็นชนิดเคลือบอย่างเดียว) การดูดซึมน้ำต้องไม่เกินร้อยละ 10 และต้องมีค่าความต้านทานแรงดัดไม่น้อยกว่า 17.5 เมกะปาสคาล
 - กระเบื้องประเภทดูดซึมน้ำสูง (ต้องเป็นชนิดเคลือบอย่างเดียว) การดูดซึมน้ำต้องไม่เกินร้อยละ 16 และต้องมีค่าความต้านทานแรงดัดไม่น้อยกว่า 17.5 เมกะปาสคาล
2. กระเบื้องบุผนังภายในอาคาร อ้างอิงตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก. 613-2529 (สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2543) ค่าการดูดซึมน้ำต้องไม่เกินร้อยละ 18 (ไม่ต้องทดสอบค่าความต้านทานแรงดัด)
 3. กระเบื้องบุผนังภายนอกอาคาร อ้างอิงตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก. 614-2529 (สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2529) ค่าการดูดซึมน้ำต้องไม่เกินร้อยละ 6 และต้องมีค่าความต้านทานแรงดัดไม่น้อยกว่า 20 เมกะปาสคาล

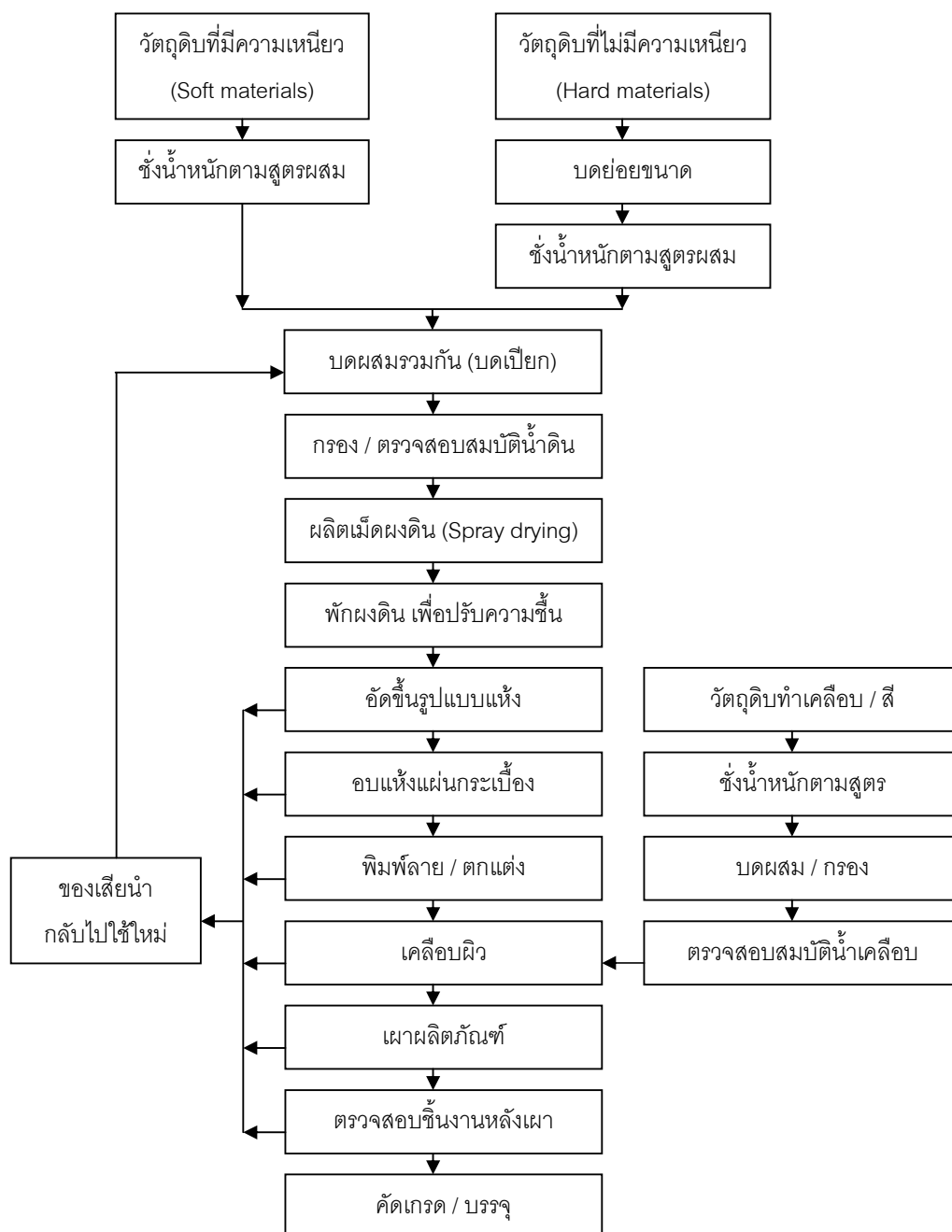
การแบ่งประเภทของเนื้อดินกระเบื้องเซรามิก จัดแบ่งได้ดังนี้

- กระเบื้องบุผนังภายในอาคาร จัดเป็นเนื้อดินประเภทเอิร์ทเทร็นแวร์ (Earthenware) อุณหภูมิในการเผา 800 - 1,150°C
- กระเบื้องบุผนังภายนอกอาคาร และกระเบื้องปูพื้น แบ่งเป็น 3 ประเภท ได้แก่ เนื้อดินประเภทสโตนแวร์ (Stoneware) อุณหภูมิในการเผา 1,150 - 1,250°C เนื้อดินประเภทพอร์ซเลน-สโตนแวร์ (Porcelain-stoneware) อุณหภูมิในการเผา 1,200 - 1,250°C และเนื้อดินประเภทพอร์ซเลน (Porcelain) อุณหภูมิในการเผา 1,250 - 1,300°C

ขั้นตอนในการผลิตกระเบื้องเซรามิกโดยทั่วไป แสดงดังภาพที่ 2.1

ภาพที่ 2.1

แผนภูมิแสดงกระบวนการผลิตกระเบื้องเซรามิกโดยทั่วไป



2.2 วัตถุดิบเซรามิก และวัตถุดิบประเภทตัวช่วยหลอม

วัตถุดิบที่ใช้ในอุตสาหกรรมเซรามิก สามารถแบ่งกลุ่มอย่างกว้างๆ ออกได้เป็น วัตถุดิบประเภทที่มีความเหนียว หรือวัตถุดิบประเภทดิน (Plastic materials) และวัตถุดิบประเภท ที่ไม่มีความเหนียว (Non-plastic materials) โดยวัตถุดิบทั้งสองกลุ่มดังกล่าวอาจจะจำแนก ออกเป็นกลุ่มย่อยได้อีก ซึ่งโดยทั่วไปสามารถแบ่งกลุ่มของวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์เซรา มิกได้เป็น 3 กลุ่มหลักๆ ได้แก่

วัตถุดิบประเภทดิน (Clays) ทำหน้าที่ให้ความเหนียว และช่วยให้สามารถขึ้นรูป ขึ้นงานได้ง่าย รวมถึงทำให้เนื้อดินมีความแข็งแรงเพียงพอหลังการเผา ซึ่งทำให้สามารถหยิบจับ ขึ้นงานในกระบวนการทำงานในขั้นตอนต่างๆ ได้ง่าย

วัตถุดิบประเภทตัวช่วยหลอม หรือวัตถุดิบประเภทฟลักซ์ (Fluxes) ส่วนใหญ่เป็นแร่ที่ ประกอบด้วยอัลคาไลหรืออัลคาไลน์เอิร์ท ซึ่งจะหลอมตัวในระหว่างการเผา และทำปฏิกิริยากับ สารประกอบตัวอื่นๆ ในเนื้อดิน เพื่อฟอร์มตัวเป็นแก้วซึ่งจะทำหน้าที่ให้ความแข็งแรงกับชิ้นงานหลัง เผา ดังนั้นสารประกอบฟลักซ์จึงเป็นตัวช่วยลดอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาชิ้นงานลง

วัตถุดิบประเภทตัวเติม (Fillers) เป็นวัตถุดิบประเภทที่ไม่มีความเหนียวที่ใช้เป็น ส่วนผสมในสูตรเนื้อดินซึ่งไม่ใช่วัตถุดิบในกลุ่มของฟลักซ์ โดยทั่วไปตัวเติมหรือ Fillers สำหรับเนื้อ ดินในทางเซรามิก มักจะหมายถึงซิลิกา (Silica) เสมอ ไม่ว่าจะเป็นอยู่ในรูปของฟลินท์ (Flint) หรือ ทราย (Sand) ก็ตาม วัตถุดิบประเภทนี้จะทำหน้าที่หลักในการควบคุมค่าการขยายตัวทางความ ร้อนของเนื้อดินที่ผ่านการเผา และช่วยทำให้การแห้งตัวของเนื้อดินทำได้ง่ายขึ้น ทำให้ค่าการหดตัว หลังอบแห้ง (Drying shrinkage) และความเหนียว (Plasticity) ของเนื้อดินลดลงด้วยเช่นกัน นอกจากนี้ ฟลินท์และทรายยังมีส่วนช่วยในเรื่องของความขาวของเนื้อดินหลังเผาได้อีกด้วย (Ryan and Radford, 1997)

วัตถุดิบประเภทตัวช่วยหลอม

วัตถุดิบประเภทตัวช่วยหลอมในเนื้อดินเซรามิก หรือวัตถุดิบประเภทฟลักซ์ (Fluxes) คือวัตถุดิบที่ทำหน้าที่เป็นตัวช่วยหลอมเพื่อลดอุณหภูมิในการเผา ซึ่งทำให้ส่วนผสมที่ถูกเติมลงไป มีจุดหลอมเหลวที่ต่ำลง โดยวัตถุดิบที่มีคุณสมบัติเป็นตัวช่วยหลอมซึ่งถูกบดละเอียดผสมอยู่ใน สูตรเนื้อดินนั้น จะเริ่มเกิดการหลอมตัวก่อน แล้วดึงเอาวัตถุดิบตัวอื่นๆ ที่มีความทนไฟมากกว่าซึ่ง อยู่รอบๆ ผลึกมาหลอมเข้าด้วยกัน ทำให้ช่องว่างที่อยู่ระหว่างผลึกเม็ดดินหายไป และส่วนผสม หรือเนื้อดินนั้นเกิดการหดตัวรวมกันหลอมจนเนื้อแน่นคล้ายแก้วและมีจุดหลอมตัวที่ต่ำลง วัตถุดิบ

ที่โดยทั่วไปถือว่าเป็นตัวช่วยหลอม และนิยมนำมาใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์เซรามิก ได้แก่ วัตถุดิบที่เป็นต่าง หรือมีสารประกอบจำพวกอัลคาไลและอัลคาไลน์เอิร์ทอยู่ในตัวค่อนข้างสูง เช่น โพแทสเซียม (K) โซเดียม (Na) ลิเทียม (Li) แคลเซียม (Ca) หรือ แมกนีเซียม (Mg) เป็นต้น สารประกอบฟลักซ์ที่มีปริมาณอัลคาไลที่สูงกว่าจะมีประสิทธิภาพในการทำปฏิกิริยาในขณะเผาได้ดีกว่า จึงช่วยลดจุดหลอมตัวของสูตรเนื้อดินได้ดีกว่านั่นเอง สำหรับวัตถุดิบที่มีสารประกอบฟลักซ์ในปริมาณที่สูง และนิยมนำมาใช้เป็นตัวช่วยหลอมในเนื้อดินเซรามิก ได้แก่ แร่หินฟันม้า (Feldspar) เนฟเฟลีนไชนท์ (Nepheline Syenite) หินคอร์นิช (Cornish Stone) ทัลค์ (Talc) หินปูน (Limestone) หรือ โดโลไมต์ (Dolomite) เป็นต้น (ไพจิตร อิงศิริวัฒน์, 2541 และ Ryan and Radford, 1997)

2.3 วัสดุประเภทแก้วโซดาไลม์ และแก้วโบโรซิลิเกต

2.3.1 แก้วชนิดโซดาไลม์

แก้วโซดาไลม์ (Soda-lime-silica glass หรือบางครั้งอาจเรียกง่าย ๆ ว่า Soda-lime glass) มีองค์ประกอบเป็น SiO_2 -CaO- Na_2O ซึ่งเป็นแก้วชนิดอ่อน (Soft glass) ที่มี Na_2O เป็นองค์ประกอบในปริมาณมากจึงหลอมละลายได้ง่าย แก้วโซดาไลม์เป็นชนิดของแก้วทางการค้าที่เก่าแก่ที่สุด มีการผลิตและพัฒนามาเป็นเวลานานนับพันปีก่อนคริสตวรรษ แก้วโซดาไลม์มีโครงสร้างพื้นฐานคือซิลิกา (SiO_2) โดยมีการเติมโซดาแอช (Na_2CO_3) และหินปูน (Limestone, CaCO_3) ลงไปในทรายแก้ว (Silica sand, Crystalline quartz) ซึ่งทำหน้าที่เป็นฟลักซ์ช่วยให้หลอมทรายได้ง่ายขึ้นในกระบวนการผลิต แก้วชนิดนี้สามารถผลิตได้ในปริมาณมากๆ และมีราคาถูก ผลิตภัณฑ์ประเภทแก้วโซดาไลม์จะมีอยู่ประมาณ 90% ของผลิตภัณฑ์แก้วทั้งหมดที่พบเห็นกันในชีวิตประจำวัน ได้แก่ แก้วประเภทขวดต่างๆ ทั้งชนิดใสและมีสี แก้วน้ำ ภาชนะแก้วบนโต๊ะอาหาร กระຈกแผ่น หลอดไฟ และอื่นๆ เนื่องจากแก้วประเภทนี้มีการขยายตัวและหดตัวเนื่องจากความร้อนมาก ภาชนะแก้วโซดาไลม์จึงไม่สามารถใช้ใส่ของร้อนมากๆ หรือไม่สามารถใช้งานที่อุณหภูมิสูงๆ เช่นในเตาไมโครเวฟได้ ถึงแม้ว่าแก้วโซดาไลม์จะแข็งและเปราะแต่ด้วยเทคนิคการแปรรูปต่างๆ แก้วประเภทนี้ยังสามารถนำไปผลิตเป็นแก้วนิรภัย (Safety glass) ซึ่งใช้เป็นกระจกรถยนต์ แก้วกันกระสุน (Bullet proof glass) และลูกถ้วยไฟฟ้า (Glass insulator) เป็นต้น แก้วโซดาไลม์โดยทั่วไปมีส่วนประกอบที่สำคัญ คือ $15\text{Na}_2\text{O} \cdot 10\text{CaO} \cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 73\text{SiO}_2$ % โดยน้ำหนัก (Harper, 2001)

2.3.2 แก้วชนิดโบโรซิลิเกต

แก้วโบโรซิลิเกต (Borosilicate glass หรือ $\text{SiO}_2\text{-B}_2\text{O}_3\text{-Na}_2\text{O}$) เป็นแก้วที่มีการใช้บอริกออกไซด์เป็นตัวช่วยหลอม (Fluxing agent) ในส่วนประกอบของแก้ว ซึ่งมีการใช้ในยุโรปตั้งแต่ในศตวรรษที่ 18 แก้วโบโรซิลิเกตจัดเป็นแก้วในกลุ่ม Hard glass ที่มีปริมาณโบรอนออกไซด์โดยน้ำหนักมากกว่า 5% ขึ้นไปในส่วนประกอบ สารประกอบโบรอนจะทำให้เกิดการหลอมตัวที่อุณหภูมิต่ำลง จึงถือว่าเป็นตัวช่วยหลอมแทนสารประกอบอัลคาไล (B_2O_3 เป็นสารประกอบที่มีจุดหลอมเหลวต่ำที่ 455°C , (SACMI, 2002)) นอกจากนี้แก้วโบโรซิลิเกตยังเป็นแก้วที่มีลักษณะพิเศษ คือ มีการขยายตัวเนื่องจากความร้อนที่ต่ำกว่าแก้วโซดาไลม์มาก สามารถทนการเปลี่ยนแปลงทางความร้อน (Thermal shock) ได้ดี ทนต่อการกัดกร่อนทางเคมี (Chemical corrosion) รวมทั้งยังมีสมบัติทางไฟฟ้าที่ดี ผลิตภัณฑ์แก้วประเภทนี้ที่รู้จักกันดีคือ แก้วไพเร็กซ์ (Pyrex) ซึ่งเป็นชื่อทางการค้าของบริษัท Corning ผลิตจาก Na_2SiO_3 และ CaSiO_3 แก้วไพเร็กซ์ เป็นแก้วที่ทนต่อสารเคมี จึงเป็นแก้วที่นิยมใช้งานในห้องทดลองและใช้ในทางการแพทย์ เช่น ขวดใส่ยาหรือสารเคมี เป็นต้น เนื่องจากคุณสมบัติที่ทนต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิได้ดี แก้วชนิดนี้จึงสามารถนำมาใช้เป็นส่วนประกอบของเตาอบหรือเตาไมโครเวฟ และใช้เป็นภาชนะหุงต้มทำอาหารได้ โดยการใช้แก้วเป็นภาชนะหุงต้มนั้น ถึงแม้ว่าแก้วจะเป็นตัวนำความร้อนที่ไม่ดีนัก แต่ก็มี การดูดความร้อนที่ดี หม้อแก้วดูดความร้อนได้ดีกว่าหม้อโลหะจึงสามารถช่วยประหยัดพลังงานได้มาก นอกจากนี้แก้วโบโรซิลิเกตยังเป็นแก้วที่นิยมใช้ในงานทางอุตสาหกรรม เช่น พกโยแก้ว ท่อแก้วต่างๆ ที่เป็นส่วนประกอบของเครื่องจักร หลอดไฟที่ให้แสงความเข้มสูงหรือหลอดไฟสัญญาณต่างๆ แก้วชนิดนี้ยังใช้ทำเลนส์ชนิดต่างๆ ได้ดีอีกด้วย เช่น เลนส์สำหรับกล้องดูดาว เป็นต้น โดยทั่วไปแก้วโบโรซิลิเกต (Alkali borosilicate) จะมีส่วนประกอบทางเคมี ดังนี้ $81\text{SiO}_2\cdot 13\text{B}_2\text{O}_3\cdot 4\text{Na}_2\text{O}\cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3$ % โดยน้ำหนัก ซึ่งสูตรนี้ใกล้เคียงกับผลิตภัณฑ์แก้ว Pyrex ของ Corning code 7740 (Harper, 2001)

2.4 ฟริต และการใช้ในเคลือบเซรามิก

ตามคำนิยาม ฟริต (Frit) หมายถึง วัตถุดิบที่มีลักษณะคล้ายแก้วที่แตกละเอียด ถูกผลิตขึ้นมาโดยการหลอมวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตเคลือบเซรามิกให้กลายเป็นน้ำแก้ว แล้วทำให้เกิดการเย็นตัวลงอย่างรวดเร็ว (Quenching) จนแตกละเอียด การทำฟริตมีประโยชน์และวัตถุประสงค์ดังต่อไปนี้

1. เปลี่ยนวัตถุดิบของเคลือบที่ละลายน้ำ เช่น อัลคาไลของคาร์บอเนต ไนเตรท และบอเรต ให้เป็นส่วนผสมในรูปของฟริตที่ไม่ละลายน้ำ โดยสารเหล่านี้หากมีการละลายน้ำแล้ว จะไม่สามารถนำเคลือบไปใช้งานบนผิวผลิตภัณฑ์ได้ เนื่องจากขณะทำการชุบหรือพ่น เคลือบจะถูกดูดซึมเข้าสู่รูพรุนของเนื้อดินปั้น ไม่ติดอยู่ที่ผิวของชิ้นงานตามต้องการ และทำให้อัตราส่วนของน้ำเคลือบที่อยู่บนผิวเนื้อดินเปลี่ยนแปลงได้ อีกทั้งสารเหล่านี้อาจแห้งเป็นผลึกติดอยู่ตามริมหรือขอบของชิ้นงาน ทำให้ผลิตภัณฑ์ที่เผาแล้วเกิดตำหนิต่างๆ สีไม่เรียบและไม่สม่ำเสมอได้

2. เปลี่ยนวัตถุดิบที่เป็นพิษ เช่น ตะกั่วออกไซด์ ที่ต้องการใช้เพื่อช่วยลดจุดหลอมตัวในเคลือบ ให้สามารถนำมาใช้ประโยชน์เป็นส่วนประกอบในการผลิตเคลือบเซรามิกได้ โดยอยู่ในรูปของฟริตซึ่งกลายเป็นวัตถุดิบที่ไม่เป็นพิษ หรือมีความเป็นพิษน้อยลง ทำได้โดยการหลอมรวมตัวกับซิลิกา และออกไซด์เพิ่มเติมชนิดอื่นๆ ตามคุณสมบัติของฟริตที่ต้องการ เมื่อวัตถุดิบเหล่านี้ถูกหลอมกลายเป็นแก้วมาแล้วจึงไม่สามารถระเหยหรือละลายน้ำให้เป็นอันตรายต่อผู้ใช้งานวัตถุดิบนั้นๆ อีก

3. เปลี่ยนวัตถุดิบที่มีขนาดอนุภาคหยาบ หรือละเอียดมากๆ ให้อยู่ในรูปของฟริต เช่น แมกนีเซียมคาร์บอเนต หรือ ซิงค์ออกไซด์ เพื่อป้องกันการหลุดตัวที่มากเกินไปของเคลือบดิบ ซึ่งจะทำให้เกิดตำหนิบนเคลือบหลังเผาได้

4. เคลือบฟริตจะไม่ทำปฏิกิริยากับเนื้อดินหรือสีได้เคลือบ ดังนั้นจึงไม่จำเป็นต้องทำการเคลือบผิวให้หนามาก ทั้งนี้เนื่องจากฟริตมีส่วนผสมที่มีความเข้มข้นและมีความหนาแน่นสูง ซึ่งเป็นผลมาจากการเกิดการสลายตัวของสารบางส่วนไปแล้วนั่นเอง

5. ฟริตช่วยป้องกันการแยกตัวของส่วนผสมในเคลือบที่มีความหนาแน่น ขนาดรูปร่าง หรือความแข็งของอนุภาคที่แตกต่างกันได้ ช่วยทำให้เกิดการกระจายของสีเคลือบที่สม่ำเสมอ ป้องกันการเกิดจุดตำหนิบนผิวเคลือบ และทำให้เคลือบมีความสุกใสเพิ่มขึ้น

เคลือบเซรามิก (Ceramic glaze) หมายถึง ส่วนผสมที่ประกอบไปด้วยสารประกอบ อะลูมินา ซิลิกา และสารประกอบที่ช่วยให้เกิดการหลอมละลายเป็นเนื้อเดียวกัน เมื่อทำการบด ผสมรวมกัน แล้วเคลือบหรือฉาบบนผิวหน้าของเนื้อดินเซรามิก ผ่านการเผาให้ความร้อนที่ อุณหภูมิสูงจนถึงจุดสุกตัว จะกลายเป็นชั้นของแก้วปิดทับอยู่ที่ผิวหน้าของผลิตภัณฑ์ โดยทำให้ผิว ของผลิตภัณฑ์มีความแข็งแรง สามารถทนต่อสารเคมี กรดหรือด่างได้ รวมถึงทำให้ผลิตภัณฑ์มี ความสวยงาม สะดวกต่อการทำความสะอาด และป้องกันการขีดข่วนได้

เคลือบฟริต (Frit glaze) หมายถึง สูตรเคลือบเซรามิกที่มีวัตถุดิบประเภท “ฟริต” เป็น ส่วนประกอบหลัก ร่วมกับส่วนผสมวัตถุดิบอื่นๆที่ใช้ในการผลิตเคลือบ การใช้ฟริตเป็น ส่วนประกอบในการผลิตเคลือบเซรามิกนั้น จะช่วยทำให้เคลือบสามารถหลอมตัวได้ง่ายขึ้น และมี จุดสุกตัวที่อุณหภูมิต่ำลงได้ (ปริดา พิมพิขาวขำ, 2530)

กากตะกอนเคลือบฟริต (Frit glaze sludge) ที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้ คือ กากตะกอน เศษเคลือบเซรามิกชนิดเคลือบฟริต ซึ่งเป็นของเสียที่สะสมอยู่ภายในโรงงานผลิตกระเบื้องเซรามิก ซึ่งกากตะกอนเหล่านี้มาจากการล้างทำความสะอาดหม้อบดเคลือบในขั้นตอนการบดผสมเพื่อ เตรียมน้ำเคลือบใน Ball mill หรือจากขั้นตอนการเทราดน้ำเคลือบลงบนผิวผลิตภัณฑ์ ซึ่งจะมีน้ำ เคลือบส่วนเกินที่ต้องปาดออกจากผิวหรือขอบของชิ้นงานเพื่อให้สวยงาม และไม่ติดกันในขณะที่ทำ การเผา นอกจากนี้ยังได้มาจากการทำความสะอาดสายพานลำเลียงในขั้นตอนการเคลือบชิ้นงาน อีกด้วย

2.5 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เพชรพร เชาวกิจเจริญ และคณะ (2549) ได้ทำการศึกษาผลของการนำของเสีย ประเภทเศษแก้วโซดาไลม์ มาเป็นวัตถุดิบทดแทนแร่เฟลด์สปาร์ในการผลิตกระเบื้องเซรามิก โดย เปรียบเทียบประสิทธิภาพของเศษขวดแก้วโซดาไลม์ 3 สี ได้แก่ เศษขวดแก้วสีชา เศษขวดแก้วสี เขียว และเศษกระจกใสที่ใช้แล้ว ทำการศึกษาโดยแปรค่าอัตราส่วนการทดแทนแร่เฟลด์สปาร์ที่ใช้ ในส่วนผสมด้วยของเสียที่เป็นแก้วร้อยละ 0 และร้อยละ 100 ขึ้นรูปชิ้นงานเป็นแผ่นกระเบื้องขนาด 4 x 4 ตารางนิ้ว ด้วยความดัน 100 บาร์ เผาด้วยอุณหภูมิ 1,200°C ทดสอบคุณภาพของกระเบื้อง ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมกระเบื้องปูพื้น มอก. 37-2529 ผลการศึกษาที่ได้พบว่า กระเบื้องที่มีส่วนผสมของเศษแก้วสีเขียวผ่านการทดสอบและมีคุณภาพที่ดีที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับ เศษแก้วสีอื่นๆ และแร่เฟลด์สปาร์ เมื่อได้ผลการทดลองดังกล่าว จึงได้ทำการศึกษาเพิ่มเติม

โดยแปรค่าความดันและอุณหภูมิในการเผากระเบื้องใหม่เป็น 200 บาร์ และ $1,150^{\circ}\text{C}$ เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมและดีที่สุด ผลการทดสอบ พบว่า กระเบื้องเซรามิกที่มีส่วนผสมของเศษแก้วสีเขียวร้อยละ 100 ขึ้นรูปที่ความดัน 100 บาร์ และเผาที่อุณหภูมิ $1,150^{\circ}\text{C}$ ได้ผลการทดสอบผ่านตามเกณฑ์มาตรฐานอุตสาหกรรม (มอก. 37-2529) และมีคุณสมบัติดีที่สุด โดยมีค่ากำลังรับแรงดัดเท่ากับ 28.86 เมกะปาสคาล ค่าการหดตัวหลังการเผา และค่าการดูดซึมน้ำเท่ากับร้อยละ 14.83 และ ร้อยละ 3.93 ตามลำดับ จากผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่า ของเสียประเภทเศษขวดแก้วสีเขียว สามารถนำมาใช้ทดแทนแร่เฟลด์สปาร์ได้มีประสิทธิภาพดีที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับเศษขวดแก้วที่เป็นสีชา และเศษแก้วที่เป็นกระจกสีใส

Matteucci และคณะ (2002) ได้ทำการศึกษาถึงผลกระทบของการใช้แก้วประเภทโซดาไลม์ที่มีต่อกระบวนการเผา Sintering และคุณสมบัติทางเทคนิคของกระเบื้องประเภทพอร์ซเลน-สโตนแวร์ ทำการศึกษาโดยใช้แก้วประเภทโซดาไลม์ที่เป็นกระจกแผ่น (Float glass) และแก้วภาชนะบรรจุภัณฑ์ต่างๆ (Container glass) แทนที่แร่เฟลด์สปาร์ในสูตรกระเบื้องเนื้อพอร์ซเลน-สโตนแวร์ทั่วไปในปริมาณ 5 และ 10 % โดยน้ำหนัก ทำการทดลองในระดับห้องปฏิบัติการโดยจำลองเหมือนกระบวนการผลิตจริงในอุตสาหกรรม วัตถุดิบที่ใช้สำหรับการผลิตกระเบื้องเนื้อพอร์ซเลน-สโตนแวร์โดยทั่วไป มักได้แก่ ดินเหนียว (Ball clays) แร่เฟลด์สปาร์ ทรายควอร์ตซ์ และสารให้สี (Pigments) กระบวนการผลิตกระเบื้องชนิดนี้ในอุตสาหกรรมการผลิตจริงโดยทั่วไป เริ่มจากการบดส่วนผสมทั้งหมดแบบบดเปียก (Wet grinding) จากนั้นทำการอัดแบบแห้ง (Dry pressing) อบแห้งแบบรวดเร็ว (Fast drying) และทำการเผาครั้งเดียวแบบรวดเร็ว (Fast single firing) ที่อุณหภูมิสูงสุดประมาณ $1,190-1,230^{\circ}\text{C}$ โดยกระเบื้องประเภทนี้จะแสดงคุณสมบัติหลังเผาที่ดีเยี่ยม โดยเฉพาะค่าความแข็งแรงทางกล ค่าความต้านทานการขีดสีในระดับลึก ค่าความต้านทานความเย็นจัด หรือค่าความต้านทานสารเคมี สำหรับในการทดลองนี้ เริ่มจากการบดเปียกส่วนผสมทั้งหมดด้วยหม้อบดพอร์ซเลนชนิดลูกบดอะลูมินา เป็นเวลา 18 ชั่วโมง จากนั้นอบน้ำดินให้แห้งที่อุณหภูมิ $105\pm 5^{\circ}\text{C}$ บดให้เป็นผงดินด้วย Hammer Mill และปรับความชื้นผงดินให้มีค่า 5 - 6% ทำการอัดแบบแห้งที่กำลังอัด 40 MPa ให้เป็นแผ่นกระเบื้องขนาด $110 \times 55 \times 6$ มิลลิเมตร อบแผ่นกระเบื้องในเตาอบที่อุณหภูมิ $105\pm 5^{\circ}\text{C}$ เผาด้วยเตาไฟฟ้าแบบ Roller kiln เป็นเวลา 60 นาที ที่อุณหภูมิสูงสุดจาก 1,120 ถึง $1,200^{\circ}\text{C}$ ทำการวัดคุณสมบัติต่างๆ ของกระเบื้องทั้งก่อนและหลังเผา ผลที่ได้พบว่า แก้วประเภทโซดาไลม์ทั้ง 2 แบบ สามารถใช้ทดแทนฟลักซ์แบบดั้งเดิม เช่น แร่โซเดียมเฟลด์สปาร์ ในเนื้อดินกระเบื้องพอร์ซเลน-สโตนแวร์ได้ โดยไม่มีข้อเสียใดๆ ในเชิงเทคนิค กระบวนการผลิต แต่จะมีผลอยู่บ้างกับคุณสมบัติหลังเผา โดยในระหว่างการเผาแก้วโซดาไลม์จะ

เป็นตัวเร่งกระบวนการ Densification ทำให้เกิดผลดีคือ รูพรุนเปิด (Open porosity) มีค่าต่ำลง รวมกับผลในทางลบ คือ การหดตัว (Shrinkage) และค่ารูพรุนปิด (Closed porosity) มีค่ามากขึ้น ค่าความหนาแน่นทั้งก้อน (Bulk density) และคุณสมบัติทางกลของชิ้นงานมีค่าต่ำลง ซึ่งความแตกต่างของคุณสมบัติเหล่านี้เมื่อเทียบกับกระเบื้องมาตรฐาน จะเห็นเด่นชัดมากขึ้น เมื่อทำการเติมแก้วในปริมาณมากขึ้น (10%) แก้วโซดาไลม์จะทำการปรับปรุงสมดุลระหว่างการอยู่ร่วมกันของ Glassy phase และ Crystalline phase นั่นคือ จะมีเฟสที่เป็นแก้ว (Vitreous phase) ในปริมาณมากกว่า และมีปริมาณของเฟส Quartz และ Mullite ในปริมาณน้อยกว่า นอกจากนี้ ของเสียประเภทแก้วยังช่วยปรับปรุงกลไกการเผา (Sintering kinetics) อย่างสังเกตเห็นได้ชัด คือ ทำให้ความหนืดของเฟสของเหลว (Liquid phase) มีค่าต่ำลง

ในทำนองเดียวกัน Luz และ Ribeiro (2007) ได้ทำการศึกษาการใช้ของเสียที่เป็นผงแก้วโซดาไลม์มาเป็นวัตถุดิบผสมในการผลิตกระเบื้องเนื้อพอร์ซเลน-สโตนแวร์ มีจุดประสงค์เพื่อหาวัตถุดิบอื่นมาใช้ทดแทนวัตถุดิบที่เป็นฟลักซ์ดั้งเดิมโดยไม่ส่งผลกระทบต่อกระบวนการเปลี่ยนแปลงกระบวนการผลิต และไม่ส่งผลกระทบต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์กระเบื้องเนื้อพอร์ซเลน-สโตนแวร์ที่ได้หลังเผา กระเบื้องเนื้อพอร์ซเลน-สโตนแวร์จัดเป็นกระเบื้องที่มีคุณสมบัติที่ดี ทั้งในด้านความแข็งแรง ความทนต่อสารเคมี ความแข็งของพื้นผิว และอื่นๆ วัตถุดิบที่ใช้ในการทดลองนี้ได้แก่ ดินขาว (Kaolinitic clay) แร่ควอร์ตซ์ แร่โซเดียมเฟลด์สปาร์ และผงแก้วบด การทดลองได้ปรับสัดส่วนวัตถุดิบต่างๆ และทดแทนแร่โซเดียมเฟลด์สปาร์ด้วยผงแก้วบดทั้งหมดและบางส่วน ทำการขึ้นรูปโดยอัดขึ้นงานเป็นแผ่นกระเบื้องขนาด 114 X 25 x 7 มิลลิเมตร เผาขึ้นงานทดลองในช่วงอุณหภูมิตั้งแต่ 1,000 – 1,250°C ทดสอบสมบัติต่างๆ ของชิ้นงานหลังเผา ได้แก่ การหดตัวเชิงเส้น (Linear shrinkage ตามมาตรฐาน ASTM C 326) การดูดซึมน้ำ (Water absorption ตามมาตรฐาน ASTM C 373) ความพรุนตัว (Total porosity ตามมาตรฐาน ASTM C 329-88) ค่าความแข็งแรง (Flexural strength แบบ Three-point bending) ค่าความต้านทานรอยขีดข่วน (Abrasion resistance ตามมาตรฐาน ISO 10545-6) จากนั้นทำการเลือกขึ้นทดสอบที่ให้ผลค่าการหดตัวเชิงเส้นและค่าการดูดซึมน้ำที่ดีที่สุดมาทำการวิเคราะห์เฟสของผลึกด้วยเทคนิคเอ็กซเรย์ดิฟแฟรกชัน (XRD) ผลการทดลอง พบว่า ผงแก้วบดมีประสิทธิภาพในการเป็นตัวช่วยหลอม (Fluxing agent) เมื่อใช้เป็นตัวเติมในส่วนผสมของกระเบื้องเซรามิกต่างๆ โดยผงแก้วบดจะทำหน้าที่เป็นตัวเร่งกระบวนการ Densification ในระหว่างการเผาขึ้นงาน ซึ่งส่งผลดีต่อชิ้นงาน ได้แก่ ทำให้ปริมาณรูพรุนเปิด และค่าการดูดซึมน้ำของชิ้นงานลดต่ำลง แต่ก็มีผลเสียคือ ค่าการหดตัวและปริมาณรูพรุนปิดของชิ้นงานจะมีค่าสูงขึ้น ส่งผลต่อค่าความแข็งแรงของชิ้นงาน นอกจากนี้ การใช้ผงแก้วบดจะ

ทำให้ความหนืดของเฟสของเหลวในขณะหลอมตัวมีค่าต่ำลง ซึ่งค่าความหนืดของเฟสของเหลวจะลดต่ำลงตามปริมาณของผงแก้วบดที่ใช้มากขึ้น ซึ่งถือว่าเป็นผลดีต่อกระบวนการหลอมตัวของชิ้นงานเมื่อเผาให้ความร้อน เมื่อวิเคราะห์เฟสด้วยเทคนิค XRD พบเฟสมัลไลต์ (Mullite, $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$) ควอร์ตซ์ (Quartz) และอะนอร์ไทต์ (Anorthite) ซึ่งเป็นเฟสที่บ่งชี้สมบัติของกระเบื้องประเภทนี้ เมื่อพิจารณาสมบัติต่างๆ ที่ได้หลังเผา พบว่า กระเบื้องทุกสูตรมีค่าต่างๆ เป็นไปตามมาตรฐานสำหรับกระเบื้องเนื้อพอร์ซเลน-สโตนแวร์ ยกเว้นเมื่อพิจารณาค่าความต้านทานต่อรอยขีดข่วน พบว่าสูตรกระเบื้องที่ใช้ฟลักซ์เป็นแร่เฟลด์สปาร์ 25% ผสมกับผงแก้วบด 5% เป็นสูตรทดลองเพียงสูตรเดียวเท่านั้นที่มีค่าความต้านทานต่อรอยขีดข่วนอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานที่จัดได้ว่าเป็นกระเบื้องเนื้อพอร์ซเลน-สโตนแวร์ ส่วนกระเบื้องสูตรอื่นๆ ที่มีปริมาณผงแก้วบดมากกว่า (10, 15 และ 20%) มีค่าความต้านทานรอยขีดข่วนไม่ผ่านตามเกณฑ์มาตรฐาน เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของปริมาณผงแก้วบด จะส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของความพรุนตัวของชิ้นงาน ซึ่งทำให้ค่าความแข็งแรงของชิ้นงานลดลงด้วย ดังนั้น จากการทดลองจึงสรุปได้ว่า สูตรกระเบื้องที่ใช้แร่เฟลด์สปาร์ 25% และผงแก้วบด 5% เป็นฟลักซ์นั้น เป็นกระเบื้องเพียงสูตรเดียวที่มีคุณสมบัติทุกอย่างเป็นไปตามเกณฑ์มาตรฐานของกระเบื้องเซรามิกเนื้อพอร์ซเลน-สโตนแวร์

Raimondo และคณะ (2007) ได้ทำการศึกษาผลของการใช้ของเสียประเภทแก้วจากหลอดแคโทดและหน้าจอทีวีหรือจอคอมพิวเตอร์ (TV/PC cathodic tube and screen) ที่มีต่อคุณสมบัติทางเทคนิคและพฤติกรรมของการเผาของกระเบื้องชนิดพอร์ซเลน-สโตนแวร์ วัสดุดิบต่างๆ ที่ใช้ในการทดลอง ได้แก่ แก้วที่ได้มาจากหลอดแคโทด (Cathodic tube glass) และแก้วจากหน้าจอ (Screen glass) ของ TV/PC ดินเหนียว (Ball clay) ทรายควอร์ตซ์ โซเดียมเฟลด์สปาร์ และโพแทสเซียมเฟลด์สปาร์ ทำการทดลองโดยแทนที่แร่โซเดียมเฟลด์สปาร์ในสูตรอ้างอิงด้วยแก้วจากหลอดแคโทดในปริมาณ 5 และ 10 wt% แทนที่แร่โซเดียมเฟลด์สปาร์ด้วยแก้วจากหน้าจอ TV/PC ปริมาณ 5 และ 10 wt% และแทนที่แร่โซเดียมเฟลด์สปาร์ด้วยแก้วจากหลอดแคโทดผสมกับแก้วจากหน้าจอ TV/PC อย่างละ 5 wt% (เป็น 10 wt%) บดส่วนผสมด้วยวิธีบดเปียกในหม้อบดพอร์ซเลนที่ใช้ลูกบดชนิดอะลูมินา (Planetary mill) เป็นเวลา 20 นาที จากนั้นอบน้ำดินให้แห้งที่อุณหภูมิ $105 \pm 5^\circ\text{C}$ บดให้เป็นผงด้วย Hammer mill และปรับความชื้นผงดินให้มีค่า 7-8% ทำการอัดชิ้นงานที่กำลังอัด 40 MPa ให้เป็นแผ่นกระเบื้องขนาด $110 \times 55 \times 6$ มิลลิเมตร อบในเตาอบไฟฟ้าที่อุณหภูมิ $105 \pm 5^\circ\text{C}$ เป็นเวลาข้ามคืน จากนั้นเผาชิ้นงานด้วยเตาไฟฟ้าแบบ Roller kiln ที่อุณหภูมิสูงสุดในช่วงจาก 1,180 ถึง $1,220^\circ\text{C}$ ที่เวลา 51 นาทีต่อหนึ่งรอบการเผา ทำการวัดคุณสมบัติต่างๆ ของกระเบื้องทั้งก่อนและหลังเผา ได้แก่ ค่าน้ำหนักต่อปริมาตร และค่าเปอร์เซ็นต์น้ำของน้ำดิน ค่า

การกระจายขนาดอนุภาคของผงดิน (ASTM C 958) ค่าความชื้นของผงดิน (ASTM C 324) ค่าการหดตัว (ASTM C 326) ปริมาณรูพรุนเปิด ค่าความหนาแน่นทั้งก้อน (ISO 10545-3) ค่าความแข็งแรง (3-point flexural strength) (ISO 10545-4) ค่าการดูดซึมน้ำ ค่าน้ำหนักจำเพาะ ค่าความพรุนตัวโดยรวม ค่าการวัดสี (CIE-Lab colourimetry) (ISO 10545-16) นอกจากนี้ ได้วิเคราะห์เฟสด้วยเทคนิค XRPD และโครงสร้างระดับจุลภาคด้วย SEM-EDS ผลการทดลองสรุปได้ว่า แก้วหน้าจอและหลอดแคโทด TV/PC สามารถเติมลงไปในสูตรเนื้อดินกระเบื้องพอร์ซเลน-สโตนแวร์เพื่อแทนที่ฟลักซ์ดั้งเดิมในบางส่วนได้ โดยไม่ส่งผลกระทบต่อเทคนิคกระบวนการผลิต อย่างไรก็ตาม แก้วที่เป็นของเสียเหล่านี้จะส่งผลกระทบต่อองค์ประกอบ และพฤติกรรมในการเผา โดยมีคุณสมบัติทางกล และสมบัติทางเทคนิคต่างๆ คล้ายกับเนื้อกระเบื้องที่ใช้อ้างอิง จากการทดสอบพบโลหะอันตราย PbO ที่สูญหายไปในช่วงการเผา 0.2-0.3 %โดยน้ำหนัก และพบปริมาณ PbO เล็กน้อยในชิ้นงานหลังจากผ่านกระบวนการเผา (< 0.7 มก./กก.) ของเสียที่เป็นแก้วชนิดหลอดแคโทด สามารถเลื่อนอุณหภูมิของการหดตัวสูงสุดออกไปได้ที่ต่ำกว่าค่า $1,180^{\circ}\text{C}$ แสดงให้เห็นจากปริมาณของเฟสที่เป็นแก้ว (Glassy phase) ของเนื้อดินที่เพิ่มขึ้น ในขณะที่ความหนืดของเฟสของเหลว (Liquid phase) มีค่าต่ำลง สรุปโดยรวมได้ว่า ของเสียประเภทแก้วทั้ง 2 ชนิดนี้สามารถนำมาใช้แทนที่ฟลักซ์ในบางส่วนได้ โดยส่งผลดีต่อสมบัติทางกายภาพและทางเทคนิคของเนื้อกระเบื้องที่มีการเติมแก้วเหล่านั้น และส่งผลต่อการปรับปรุงพฤติกรรมและการเผาของกระเบื้องให้ดีขึ้นด้วย

เช่นเดียวกับ Andreola และคณะ (2008) ที่ได้ทำการศึกษาการแทนที่แร่เฟลด์สปาร์ในเนื้อดินกระเบื้องพอร์ซเลน-สโตนแวร์ด้วยของเสียประเภทแก้ว CRT (Panel Cathode Ray Tube) ในสูตรมาตรฐานซึ่งมีแร่โซเดียมเฟลด์สปาร์อยู่ในปริมาณ 35 wt% ทำการเผาในช่วงอุณหภูมิที่แตกต่างกันตั้งแต่ $1,000-1,250^{\circ}\text{C}$ วัดระดับของการหลอมตัวโดยใช้ค่าความพรุนตัวแบบปิด และความพรุนตัวทั้งหมด (Closed and total porosity) และประเมินอัตราการหลอมตัว (Sintering rate) ด้วย non-isothermal dilatometer ตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบทางเฟสและผลึกโดยการวิเคราะห์ XRD รวมถึงวัดสมบัติต่างๆ ทางกายภาพ และสมบัติทางกลของชิ้นงานทดลองเปรียบเทียบกับสูตรมาตรฐาน จากผลการศึกษาโดยใช้ปริมาณของแก้ว CRT แทนที่แร่เฟลด์สปาร์ในปริมาณที่แตกต่างกัน (2.5, 5 และ 10 wt%) พบว่า การใช้เศษแก้ว CRT ในปริมาณ 5 %โดยน้ำหนัก แทนที่ในสูตรจะช่วยปรับปรุงกระบวนการหลอมตัว (Densification process) ได้แก่ คุณสมบัติการหดตัวเชิงเส้น การดูดซึมน้ำ ค่าความหนาแน่นปรากฏ และสมบัติทางกล ได้แก่ ค่า Young' modulus โดยในช่วงการเผา พบว่า แก้ว CRT ให้ผลทางด้าน

Sintering kinetic ที่ดีขึ้นในเชิงบวก ได้แก่ ค่าความพรุนตัวแบบเปิดและโดยรวม (Open and total porosity) ที่ต่ำลง และมีค่า Apparent density ที่สูงขึ้น โดยพบว่าการใช้แก้ว CRT มากขึ้นที่ 10 wt% ก็ไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงเฟสของผลึกที่ปรากฏ และโครงสร้างในเนื้อชิ้นงาน แต่ในทางตรงกันข้ามการใช้ในปริมาณที่สูง 35 wt% จะให้ผลทางด้านลบ เนื่องจากแก้วจะทำปฏิกิริยากับวัตถุดิบประเภทพอร์ซเลน-สโตนแวร์ แล้วทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างในระดับจุลภาคของเนื้อชิ้นงาน

สำหรับ Pontikes และคณะ (2007) ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมทางความร้อนของเนื้อดินสำหรับการผลิตเซรามิกแบบดั้งเดิมประเภทอิฐและกระเบื้องมุงหลังคา โดยมีส่วนผสมของของเสียที่เป็นแก้วชนิดโซดาไลม์ซิลิกาอยู่ด้วย ทำการประเมินถึงผลกระทบของปริมาณแคลไซต์ (Calcite) ที่มีอยู่ในส่วนผสมของเนื้อดิน ผลกระทบของขนาดอนุภาคของผงแก้ว และอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาชิ้นงาน จากการศึกษาพบว่า ในกรณีที่ส่วนผสมระหว่างเนื้อดินกับแก้วมีปริมาณของแคลไซต์โดยรวมอยู่มากกว่านั้น จะเพิ่มอัตราการขยายตัวของเนื้อดินในระหว่างการเผาที่อุณหภูมิสูงกว่า 700°C เล็กน้อย ซึ่งผลกระทบนี้จะทำให้การปลดปล่อยก๊าซ CO_2 ออกจากชิ้นงานในระหว่างกระบวนการเผาทำได้ยากขึ้น และกระบวนการหลอมตัวจะเริ่มต้นที่อุณหภูมิต่ำกว่าสำหรับตัวอย่างที่มีแก้วเป็นส่วนผสม โดยสังเกตได้ว่าเนื้อดินมีการหดตัวในช่วงที่สอง (Second shrinkage zone) ที่อุณหภูมิเกือบ $1,000^{\circ}\text{C}$ นอกจากนี้ยังพบว่า ปริมาณของแคลไซต์ เป็นปัจจัยหลักในการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางแรงของเนื้อดินหลังเผา โดยการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิในการเผา และการลดการกระจายขนาดอนุภาคของผงแก้ว จะส่งผลให้เนื้อดินมีการหลอมตัว (Densification) ที่มากขึ้น

จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องดังกล่าว พบว่า ส่วนใหญ่มีการทำการศึกษาเฉพาะการนำเศษแก้วชนิดโซดาไลม์ และแก้ว CRT มาใช้เป็นตัวช่วยหลอมทดแทนวัตถุดิบหลักดั้งเดิม (แร่เฟลด์สปาร์) เท่านั้น ยังไม่มีงานวิจัยที่ได้ทดลองนำของเสียที่เป็นแก้วประเภทโบโรซิลิเกต หรือของเสียอื่นๆ ที่มีคุณสมบัติคล้ายแก้วมาศึกษา ดังนั้น ในงานวิจัยนี้ จึงได้ทำการศึกษาเพิ่มเติม โดยนำวัสดุทดแทนชนิดอื่นที่มีคุณสมบัติคล้ายกัน ได้แก่ เศษแก้วชนิดโบโรซิลิเกต และกากตะกอนเคลือบฟrit ซึ่งเป็นของเสียจากกระบวนการผลิตที่มีอยู่มากในโรงงานผลิตกระเบื้องเซรามิก ปัจจุบัน มาศึกษาประสิทธิภาพในการเป็นตัวช่วยหลอมทดแทนแร่โซเดียมเฟลด์สปาร์ เปรียบเทียบกับประสิทธิภาพของเศษแก้วชนิดโซดาไลม์ซึ่งมีผู้ศึกษาอยู่แล้ว นอกจากนี้ ในงานวิจัยที่ผ่านมาส่วนมากจะเน้นไปที่การวิจัยสำหรับผลิตภัณฑ์กระเบื้องเซรามิกชนิดเนื้อพอร์ซเลน-สโตนแวร์ ซึ่งเป็นกระเบื้องชนิดที่เผาอุณหภูมิสูง ($1,200 - 1,250^{\circ}\text{C}$) นิยมผลิตกันมากในต่างประเทศ ส่วนใน

งานวิจัยนี้ เนื่องจากได้รับความร่วมมือจากโรงงานผลิตกระเบื้องเซรามิกในทางอุตสาหกรรม จึงได้
ทำการศึกษาวิจัยสำหรับกระเบื้องเซรามิกชนิดที่โรงงานทำการผลิตอยู่ ณ ปัจจุบัน ได้แก่ กระเบื้อง
เนื้อเอิร์ทเทร็นแวร์ และสโตนแวร์ ซึ่งมีการเผาที่อุณหภูมิต่ำกว่ากระเบื้องเนื้อพอร์ซเลน-สโตนแวร์
(1,000 – 1,150°C) แต่เป็นกระเบื้องชนิดที่นิยมผลิตกันมากในประเทศไทย

บทที่ 3

ขั้นตอนดำเนินงานวิจัย

3.1 วัตถุดิบและอุปกรณ์

3.1.1 วัตถุดิบที่ใช้ในงานวิจัย

วัตถุดิบจากธรรมชาติสำหรับการผลิตกระเบื้องเซรามิก และวัสดุเหลือทิ้งที่นำมาทดลองใช้ในงานวิจัยนี้ ได้แก่

- 1) แร่โซเดียมเฟลด์สปาร์ จากบริษัท สยามเฟลด์สปาร์ จำกัด (แหล่งแร่ จ.ราชบุรี)
- 2) แร่ไพโรฟิลไลต์ (Pyrophyllite) จากบริษัท ภัทรเจริญไมนิ่ง จำกัด (แหล่งแร่ จ.ปราจีนบุรี)
- 3) หินผุ (Pottery Stone) จากบริษัท เอ็ม. เอส. อินดัสเทรียล จำกัด (แหล่งแร่ จ. กาญจนบุรี)
- 4) หินปูน (Limestone) จากบริษัท ศิลาสกาฬ จำกัด (แหล่งแร่ จ.ปราจีนบุรี)
- 5) ดินเหนียว (Ball Clay) จากบริษัท เอ็มอาร์ดี-อีซีซี จำกัด
- 6) ทรายบด (Milled Sand) จากบริษัท อินดัสเตรียล มินเนอรัล ดิวิชั่นเมนท์ จำกัด
- 7) เศษแก้วโซดาไลม์ จากบริษัท มีศิลป์เซรามิค จำกัด (แสดงดังภาพที่ 3.1)
- 8) เศษแก้วโบโรซิลิเกต จากบริษัท AGC Techno Glass (ประเทศไทย) จำกัด (แสดงดังภาพที่ 3.2)
- 9) กากตะกอนเคลือบพริตในโรงงานผลิตกระเบื้องเซรามิก จากห้างหุ้นส่วนจำกัด กระเบื้องไทย (แสดงดังภาพที่ 3.3)

ภาพที่ 3.1
เศษแก้วชนิดโซดาไลม์ก่อนบดย่อย



ที่มา: <http://www.ski-engineering.co.th/home.php> และ
http://www.lks.ac.th/student/kroo_su/chem1/page16.html

ภาพที่ 3.2
เศษแก้วชนิดโบโรซิลิเกตก่อนบดย่อย



ที่มา: บริษัท AGC Techno Glass (ประเทศไทย) จำกัด

ภาพที่ 3.3

กากตะกอนเคลือบฟrit ซึ่งเป็นของเสียจากโรงงานผลิตกระเบื้องเซรามิก



ที่มา: ฝ่ายผลิต ห้างหุ้นส่วนจำกัด กระเบื้องไทย

3.1.2 อุปกรณ์และเครื่องมือวิเคราะห์ที่ใช้ในงานวิจัย

- 1) เครื่องบดเศษแก้ว (Edge runner mill)
- 2) ตะแกรงร่อน (Test sieves) ขนาดรูเปิด No. 70, 100 และ 200 mesh
- 3) เครื่องชั่งดิจิตอล ทศนิยม 2 ตำแหน่ง
- 4) เครื่องบดน้ำดินแบบ High speed mill
- 5) เครื่องบดน้ำดินแบบ Ball mill
- 6) เตารีดไฟฟ้า
- 7) โกร่งบด (Mortar)
- 8) เครื่องอัดชิ้นงานแบบไฮดรอลิก
- 9) เครื่องพ่นฝอยและอบแห้งน้ำดิน (Spray dryer)
- 10) เตาเผาไฟฟ้า
- 11) เตาแก๊ส หรือ Hot plate สำหรับต้มชิ้นงาน

- 12) เวอร์เนียคาลิปเปอร์
- 13) เครื่องวัดความแข็งแรงของชิ้นงานแบบ 3-point bending strength
- 14) เครื่องวัดความบิดเบี้ยวของกระเบื้อง
- 15) เครื่องวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี (X-ray fluorescence)
- 16) เครื่องวิเคราะห์องค์ประกอบทางแร่ (X-ray diffraction)
- 17) เครื่องวัดค่าการขยายตัวและหดตัวทางความร้อนของวัสดุ (Dilatometer)

3.2 การบดเศษแก้วก่อนนำมาใช้งาน

เศษแก้วโซดาไลม์ และเศษแก้วโบโรซิลิเกตที่จะนำมาใช้ในงานวิจัยนั้น จะต้องนำมาบดย่อยให้ละเอียดก่อนนำมาใช้งาน โดยเศษแก้วชนิดโซดาไลม์ ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้เศษกระจกใสนั้น ได้ถูกบดให้ละเอียดมาแล้วจากบริษัทที่ซื้อมาใช้ (บริษัท มีคิลป์ เซรามิค จำกัด) แต่สำหรับเศษแก้วชนิดโบโรซิลิเกต ได้มาจากเศษแก้วที่เป็นของเสียจากกระบวนการผลิตของบริษัท AGC Techno Glass (ประเทศไทย) จำกัด ซึ่งยังไม่ได้ถูกบดย่อยให้ละเอียดมาก่อน (แสดงดังภาพที่ 3.2) ดังนั้น จึงต้องนำมาบดให้ละเอียดด้วยเครื่องบดย่อยชนิด Edge runner mill (แสดงดังภาพที่ 3.4) จากนั้น นำมาร้อนผ่านตะแกรงเบอร์ 70 เมช (ขนาดรูเปิด 212 ไมครอน) เพื่อคัดแยกขนาดให้ละเอียดเพียงพอก่อนนำมาใช้งาน ภาพที่ 3.5 แสดงเศษแก้วทั้ง 2 ชนิดที่ถูกบดย่อยให้ละเอียดและคัดแยกขนาดแล้วพร้อมนำไปใช้งานต่อ

ภาพที่ 3.4

เครื่องบดย่อยชนิด Edge runner mill



ที่มา: http://www.pscmceramic.com/pd_ed.htm

ภาพที่ 3.5

เศษแก้วที่ถูกดละเอียดและคัดแยกขนาดพร้อมนำไปใช้งาน

(ก) เศษแก้วชนิดโซดาไลม์

(ข) เศษแก้วชนิดโบโรซิลิเกต



(ก)



(ข)

3.3 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของวัตถุโบราณประเภทถ้วยหอลอม

ทำการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของวัตถุโบราณประเภทถ้วยหอลอม และของเสียที่นำมาใช้ในการทดลอง ได้แก่ แร่โซเดียมเฟลด์สปาร์ เศษแก้วชนิดโซดาไลม์ เศษแก้วชนิดโบโรซิลิเกต และกากตะกอนเคลือบฟริต ด้วยเทคนิคเอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนส์ (XRF) เพื่อเปรียบเทียบปริมาณออกไซด์ของธาตุหมู่ที่ 1 และ 2 (อัลคาไล และอัลคาไลน์เอิร์ท) ที่มีอยู่ในวัตถุโบราณแต่ละชนิด ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นฟลักซ์ ทำหน้าที่เป็นตัวช่วยหลอมและช่วยลดอุณหภูมิในการเผาผลาญภัณฑ์เซรามิก โดยใช้เครื่องมือทดสอบที่ห้องปฏิบัติการเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกชันและเอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนส์ของศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ ยี่ห้อ Philips รุ่น PW-2404 แสดงตัวอย่างดังภาพที่ 3.6

ภาพที่ 3.6

เครื่องมือวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยเทคนิค X-ray fluorescence (XRF)



ที่มา: <http://www2.ultratrace.com.au/index.php?page=x-ray-fluorescence>

3.4 การทดสอบการหลอมตัวของวัตถุโบราณประเภทถ้วยหอลอมในเบ้าดิน (Fusion Test)

ทำการศึกษาประสิทธิภาพในการหลอมตัวของวัตถุโบราณประเภทถ้วยหอลอม และของเสียที่นำมาใช้ในการทดลองในเบ้าดิน โดยวิธีการนำวัตถุโบราณแต่ละชนิด ได้แก่ แร่โซเดียมเฟลด์สปาร์ เศษแก้วชนิดโซดาไลม์ เศษแก้วชนิดโบโรซิลิเกต และกากตะกอนเคลือบฟริต ที่ผ่านการบดให้ละเอียด และร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 70 เมช (212 ไมครอน) แล้ว มาอัดลงในแม่พิมพ์

โลหะรูปโคน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 เซนติเมตร สูง 4 เซนติเมตร ลักษณะแสดงดังภาพที่ 3.7 และ 3.8 จากนั้นนำขึ้นตัวอย่างที่เตรียมได้ไปเผาในเตาไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 1,125 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาผลิตภัณฑ์ของห้างหุ้นส่วนจำกัด กระเบื้องไทย แล้วทำการเปรียบเทียบลักษณะการหลอมตัวของวัตถุดิบแต่ละประเภทหลังการเผา

ภาพที่ 3.7

แม่พิมพ์โลหะรูปโคนที่ใช้ในการเตรียมตัวอย่าง



ที่มา: ฝ่ายควบคุมคุณภาพ ห้างหุ้นส่วนจำกัด กระเบื้องไทย และ บริษัท คอมพาวด์เคลย์ จำกัด

ภาพที่ 3.8

ตัวอย่างชิ้นงานหลังอัดก่อนนำไปเผา



3.5 การเตรียมชิ้นงานทดลอง

ทำการเตรียมชิ้นงานทดลอง ตามวิธีการดังต่อไปนี้

1. กำหนดสูตรมาตรฐานของกระเบื้องสำหรับใช้เป็นสูตรอ้างอิง โดยยึดตามเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมกระเบื้องบุผนัง มอก. 613 - 2529 และ มอก. 614 - 2529 สูตรกระเบื้องสำหรับอ้างอิงดังกล่าว ประกอบไปด้วย แร่โซเดียมเฟลด์สปาร์บดละเอียดขนาด 150 เมช 40% แร่ไพโรฟิลไลต์ 10% หินผุ (Pottery stone) 20% ดินเหนียว (Ball clay) 20% และทรายบดละเอียด 10%

2. กำหนดสูตรทดลอง โดยแทนที่แร่โซเดียมเฟลด์สปาร์ในสูตรกระเบื้องที่ใช้อ้างอิง ด้วยวัสดุเหลือทิ้งทั้ง 3 ประเภท ได้แก่ เศษแก้วชนิดโซดาไลม์ เศษแก้วชนิดโบโรซิลิเกต และกากตะกอนเคลือบฟrit ในปริมาณ 50 และ 100 %โดยน้ำหนัก แสดงสูตรทดลอง และสูตรมาตรฐานที่ใช้อ้างอิงทั้งหมดจำนวน 7 สูตร ได้ดังตารางที่ 3.1 ดังนี้

ตารางที่ 3.1

สูตรกระเบื้องมาตรฐานที่ใช้อ้างอิง และสูตรกระเบื้องทดลองซึ่งใช้ของเสียประเภทต่างๆ

แทนที่แร่โซเดียมเฟลด์สปาร์ในปริมาณ 50 และ 100% โดยน้ำหนัก

วัตถุดิบ	ชื่อสูตร / ส่วนประกอบ (% โดยน้ำหนัก)						
	100F (สูตร อ้างอิง)	50F 50SLG	100SLG	50F 50BSG	100BSG	50F 50FGS	100FGS
แร่โซเดียมเฟลด์สปาร์	40	20	-	20	-	20	-
เศษแก้วโซดาไลม์	-	20	40	-	-	-	-
เศษแก้วโบโรซิลิเกต	-	-	-	20	40	-	-
กากตะกอน เคลือบฟrit	-	-	-	-	-	20	40
แร่ไพโรฟิลไลต์ (Pyrophyllite)	10	10	10	10	10	10	10

วัตถุดิบ	ชื่อสูตร / ส่วนประกอบ (% โดยน้ำหนัก)						
	100F (สูตร อ้างอิง)	50F 50SLG	100SLG	50F 50BSG	100BSG	50F 50FGS	100FGS
หินผุ (Pottery stone)	20	20	20	20	20	20	20
ดินเหนียว (Ball clay)	20	20	20	20	20	20	20
ทรายบด (Milled sand)	10	10	10	10	10	10	10
รวม	100	100	100	100	100	100	100

หมายเหตุ: F = แร่โซเดียมเฟลด์สปาร์

SLG = เศษแก้วโซดาไลม์

BSG = เศษแก้วโบโรซิลิเกต

FGS = กากตะกอนเคลือบฟrit

3. การเตรียมชิ้นงานทดสอบ เริ่มด้วยทำการบดวัตถุดิบทุกตัวให้ละเอียด ร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 70 เมช (ขนาดรูเปิด 212 ไมครอน) แล้วนำวัตถุดิบที่ผ่านตะแกรงไปอบให้แห้งก่อนนำมาใช้

4. ชั่งน้ำหนักวัตถุดิบต่างๆ ตามส่วนผสมในแต่ละสูตร ดังแสดงในตารางที่ 3.1 เติมน้ำในปริมาณ 33-35% ($34 \pm 1\%$) ของน้ำหนักวัตถุดิบแห้งที่ใช้ ทำการบดผสมส่วนประกอบทั้งหมดเข้าด้วยกัน โดยใช้หม้อบดชนิด Ball mill ซึ่งบุผนัง (Lining) ด้วยพอร์ซเลน และใช้ลูกบดชนิดอะลูมินา (แสดงดังภาพที่ 3.9) บดผสมวัตถุดิบจนกระทั่งได้ค่าความละเอียดที่ปริมาณกากค้างตะแกรงเบอร์ 200 เมช (75 ไมครอน) เท่ากับ $1.7-3.3\%$ ($2.5 \pm 0.8\%$)

ภาพที่ 3.9
หม้อบด Ball mill ที่ใช้ในการทดลอง



ที่มา: ฝ่ายควบคุมคุณภาพ ห้างหุ้นส่วนจำกัด กระเบื้องไทย

5. ถายนํ้าดินที่บดผสมเสร็จแล้วออกจากหม้อบด กรองนํ้าดินที่ได้ผ่านตะแกรงเบอร์ 100 เมช (150 ไมครอน) จากนั้นป้อนนํ้าดินเข้าสู่เครื่องพ่นฝอยและอบแห้ง (Spray dryer) เพื่อผลิตเป็นเม็ดผงดิน แสดงดังภาพที่ 3.10 และ 3.11

ภาพที่ 3.10

เครื่องพ่นฝอยและอบแห้ง (Spray dryer) เพื่อผลิตเม็ดผงดินที่ใช้ในการทดลอง



ที่มา: ฝ่ายผลิตผงดิน ห้างหุ้นส่วนจำกัด กระเบื้องไทย

ภาพที่ 3.11

เม็ดผงดินที่ได้จากเครื่อง Spray dryer พร้อมนำไปอัดขึ้นรูป



ที่มา: ฝ่ายผลิตผงดิน ห้างหุ้นส่วนจำกัด กระเบื้องไทย

6. ปรับความชื้นของผงดินให้มีค่าความชื้นประมาณ 6-7% เพื่อให้สามารถอัดขึ้นรูปขึ้นงานได้ ทิ้งไว้อย่างน้อย 24 ชั่วโมง เพื่อให้ความชื้นของผงดินมีความสม่ำเสมอทั่วถึงกัน

7. นำผงดินที่ได้มาอัดให้เป็นแผ่นกระเบื้องขนาด $106 \times 106 \times 10.5$ มิลลิเมตร ด้วยเครื่องอัดไฮดรอลิกที่ค่ากำลังอัด 350 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร จากนั้นทำการวัดขนาดทั้งสี่ด้านของชิ้นงานที่ได้หลังการขึ้นรูปในหน่วยมิลลิเมตร ภาพที่ 3.12 แสดงเครื่องอัดไฮดรอลิกสำหรับใช้ในการขึ้นรูปแผ่นกระเบื้องเซรามิก

ภาพที่ 3.12

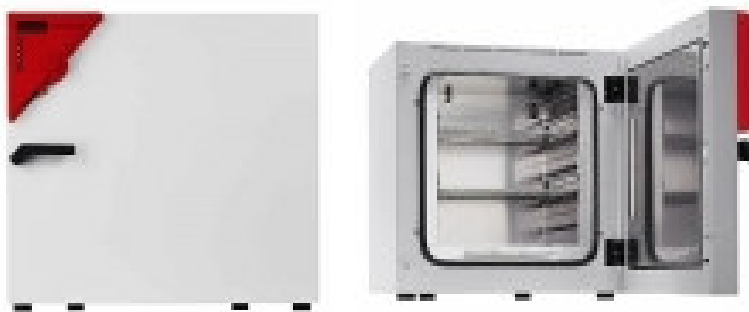
เครื่องอัดไฮดรอลิกสำหรับใช้ในการขึ้นรูปแผ่นกระเบื้อง



ที่มา: ฝ่ายผลิต (อัดขึ้นรูป) ห้างหุ้นส่วนจำกัด กระเบื้องไทย

8. อบชิ้นงานให้แห้งในเตาอบไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลาอย่างน้อย 10 ชั่วโมง ก่อนนำไปเผาด้วยเตาไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 1000, 1050, 1100 และ 1125°C โดยใช้อัตราการให้ความร้อนที่ $3^{\circ}\text{C}/\text{นาท}$ และเผาแช่ไฟที่อุณหภูมิสูงสุด (Soaking time) เป็นเวลา 90 นาที ภาพที่ 3.13 และ 3.14 แสดงเตาอบ และเตาเผาไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลอง

ภาพที่ 3.13
เตาอบไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลอง



ที่มา: <http://www.ponpe.com/home/ตู้อบความร้อน.html>

ภาพที่ 3.14
เตาเผาไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลอง



ที่มา: http://www.nabertherm.com/produkte/details/en/artscrafts_kammeroefen

9. เมื่อชิ้นงานออกจากเตาเผา ปล่อยให้เย็นตัวลง จากนั้นทำการตรวจสอบลักษณะทั่วไปของชิ้นงานที่ได้หลังเผา และทำการทดสอบสมบัติทางกายภาพต่างๆ ได้แก่ ค่าการหดตัวเชิงเส้น (Linear firing shrinkage) ตามวิธีการทดสอบในมาตรฐาน ASTM C 326-03 ค่าการดูดซึมน้ำ (Water absorption) ค่าความหนาแน่นทั้งก้อน (Bulk density) ตามวิธีการทดสอบในมาตรฐาน ASTM C 373-88 (ASTM Standards, 2005) และค่าความบิดเบี้ยวของชิ้นงานหลังเผา (Warpage) ตามวิธีการทดสอบในมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมกระเบื้องดินเผาเคลือบผนังภายใน มอก. 613-2529 (สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2543) และ มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมกระเบื้องดินเผาผนังภายนอก มอก. 614-2529 (สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2529)

10. ทำการทดสอบสมบัติทางกลของชิ้นงานหลังเผา ได้แก่ ค่าความต้านทานแรงดัดแบบ Three-point bending strength ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมกระเบื้องดินเผาผนังภายนอก มอก. 614-2529 (สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2529)

11. เปรียบเทียบสมบัติทางกายภาพต่างๆ และสมบัติทางกลของชิ้นงานที่ได้หลังเผาระหว่างชิ้นงานสูตรมาตรฐานที่ใช้อ้างอิง และชิ้นงานที่ใช้วัสดุเหลือทิ้งทั้ง 3 ประเภทแทนที่แร่โซเดียมเฟลด์สปาร์ เพื่อดูประสิทธิภาพในการเป็นตัวช่วยหลอมของวัสดุเหลือทิ้งแต่ละประเภท

12. ทำการทดลองซ้ำ โดยปรับเปลี่ยนปริมาณของการแทนที่แร่โซเดียมเฟลด์สปาร์ด้วยวัสดุเหลือทิ้งประเภทต่างๆ ในปริมาณที่ละเอียดมากขึ้น ได้แก่ การแทนที่ในปริมาณ 50, 60, 70 และ 80 %โดยน้ำหนัก เพื่อหาผลการทดลองที่ดีที่สุดต่อไป แสดงสูตรในการทดลองซ้ำดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2

สูตรกระเบื้องมาตรฐานที่ใช้อ้างอิง และสูตรกระเบื้องทดลองซึ่งใช้ของเสียประเภทต่างๆ

แทนที่แรงแผ่นดินไหวในปริมาณ 50, 60, 70 และ 80 % โดยน้ำหนัก

[illegible]

13. คัดเลือกชิ้นงานสูตรที่ใช้วัสดุเหลือทิ้งแต่ละประเภททดแทนแร่โซเดียมเฟลด์สปาร์ที่มีสมบัติทางกายภาพต่างๆ และสมบัติทางกลที่ดีที่สุด และผ่านตามเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก. 613-2529 และ มอก. 614-2529 มาทำการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อน วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี และวิเคราะห์องค์ประกอบทางแร่ โดยทำการวัดเปรียบเทียบกันระหว่างสูตรกระเบื้องมาตรฐานที่ใช้อ้างอิงและสูตรกระเบื้องทดลองต่างๆ ที่ให้ผลหลังเผาที่ดี เพื่อเป็นประโยชน์ในการนำไปใช้งานจริงในอุตสาหกรรมการผลิตต่อไป

3.6 การวิเคราะห์ทดสอบสมบัติต่างๆ ของชิ้นงาน

3.6.1 การทดสอบสมบัติทางกายภาพของชิ้นงานหลังเผา

3.6.1.1 ค่าการหดตัวเชิงเส้น (Linear firing shrinkage)

ทำการทดสอบหาค่าการหดตัวเชิงเส้นของชิ้นงานหลังเผา ตามวิธีการทดสอบในมาตรฐาน ASTM C 326-03 (ASTM Standards, 2005) ซึ่งทำได้โดยวัดขนาดของชิ้นงานกระเบื้องก่อนและหลังการเผาทั้ง 4 ด้าน แล้วหาค่าเฉลี่ย จากนั้นนำมาคำนวณเป็นค่าเปอร์เซ็นต์การหดตัวเชิงเส้น ดังสมการที่ 3.1

$$S_f = \frac{L_d - L_f}{L_d} \times 100 \quad \text{.....(3.1)}$$

เมื่อ S_f คือ เปอร์เซ็นต์การหดตัวเชิงเส้นของชิ้นงานหลังการเผา (%)

L_d คือ ความยาวเฉลี่ยของชิ้นงานก่อนการเผา (มิลลิเมตร)

L_f คือ ความยาวเฉลี่ยของชิ้นงานหลังการเผา (มิลลิเมตร)

3.6.1.2 ค่าความหนาแน่นทั้งก้อน (Bulk density)

หาค่าความหนาแน่นแบบ Bulk density ของชิ้นงานหลังการเผา ตามวิธีการทดสอบในมาตรฐาน ASTM C 373-88 (ASTM Standards, 2005) ซึ่งทำได้โดยการชั่งน้ำหนัก และวัดขนาดของชิ้นงานหลังการเผา ทั้งด้านความกว้าง ยาว และสูง เพื่อหาค่าปริมาตรของชิ้นงาน จากนั้นนำมาคำนวณหาค่าความหนาแน่นของชิ้นงานหลังเผา ดังสมการที่ 3.2

$$D = \frac{M}{V} \quad \dots(3.2)$$

- เมื่อ D คือ ค่าความหนาแน่นของชิ้นงานหลังเผา (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)
 M คือ น้ำหนักของชิ้นงานหลังเผา (กรัม)
 V คือ ปริมาตรของชิ้นงานหลังเผา (ลูกบาศก์เซนติเมตร)

3.6.1.3 ค่าการดูดซึมน้ำ (Water absorption)

หาค่าการดูดซึมน้ำของชิ้นงานกระเบื้องหลังเผา ตามวิธีการทดสอบในมาตรฐาน ASTM C 373-88 (ASTM Standards, 2005) ซึ่งทำได้โดยชั่งน้ำหนักของชิ้นงานที่เย็นตัวแล้วหลังจากออกจากเตาเผา จากนั้นนำชิ้นงานไปต้มในน้ำกลั่นให้เดือดเป็นเวลา 5 ชั่วโมง และแช่ชิ้นงานเหล่านั้นให้เย็นตัวในน้ำต่อไปอีก 24 ชั่วโมง ใช้ผ้าหมาดๆ ซับน้ำบริเวณผิวชิ้นงานออก ทำการชั่งน้ำหนักชิ้นงานเหล่านั้นอีกครั้งในทันที แล้วนำค่าที่ได้มาคำนวณหาค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำของชิ้นงาน ดังสมการที่ 3.3

$$A = \frac{M - D}{D} \times 100 \quad \dots(3.3)$$

- เมื่อ A คือ เปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำของชิ้นงานหลังเผา (%)
 M คือ น้ำหนักของชิ้นงานหลังจุ่มตัวไปด้วยน้ำ (กรัม)
 D คือ น้ำหนักของชิ้นงานแห้ง (กรัม)

3.6.1.4 ค่าความบิดเบี้ยวของชิ้นงานหลังเผา (Warpage)

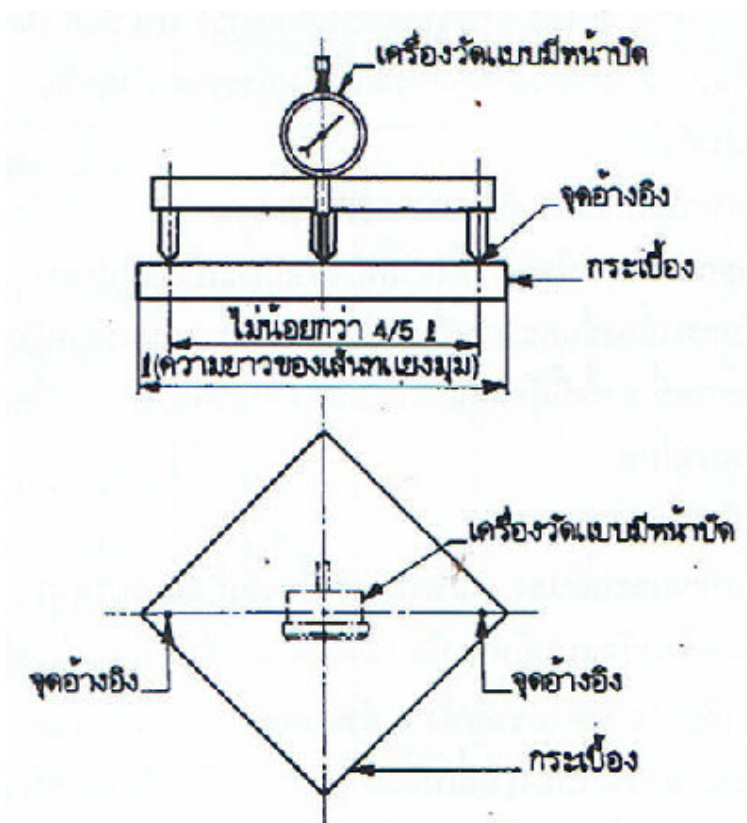
ทำการทดสอบค่าความบิดเบี้ยวตามแนวขอบ และตามแนวเส้นทแยงมุมของชิ้นงานกระเบื้องหลังผ่านการเผา ตามวิธีการทดสอบในมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมกระเบื้องดินเผา เคลือบผนังภายใน มอก. 613-2529 (สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2543) และมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมกระเบื้องดินเผาผนังภายนอก มอก. 614-2529 (สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2529) ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 ประเภท และมีวิธีการทดสอบ ดังนี้

- การวัดความบิดเบี้ยวในลักษณะนูนขึ้นและแอ่นลง

ใช้เครื่องวัดแบบมีหน้าปัด (Dial gauge) ที่วัดได้ละเอียดถึง 0.05 มิลลิเมตร วัดตามขอบทั้ง 4 ด้าน และตามแนวเส้นทแยงมุมทั้ง 2 เส้นของกระเบื้องรูปสี่เหลี่ยมมุมฉาก โดยระยะระหว่างขาทั้งสองของเครื่องวัดต้องห่างกันไม่น้อยกว่า $\frac{4}{5}$ ของความยาวจริงของเส้นที่วัด (แสดงดังภาพที่ 3.15) อ่านค่าที่จุดกึ่งกลางของเส้นตามแนวขอบและแนวเส้นทแยงมุม แล้วรายงานความบิดเบี้ยวโดยใช้ค่าสูงสุด สำหรับกระเบื้องรูปอื่นๆ ให้วัดตามแนวแกนหลัก 2 แกน โดยใช้วิธีวัดเช่นเดียวกับกระเบื้องรูปสี่เหลี่ยมมุมฉาก และรายงานความบิดเบี้ยวโดยใช้ค่าสูงสุด

ภาพที่ 3.15

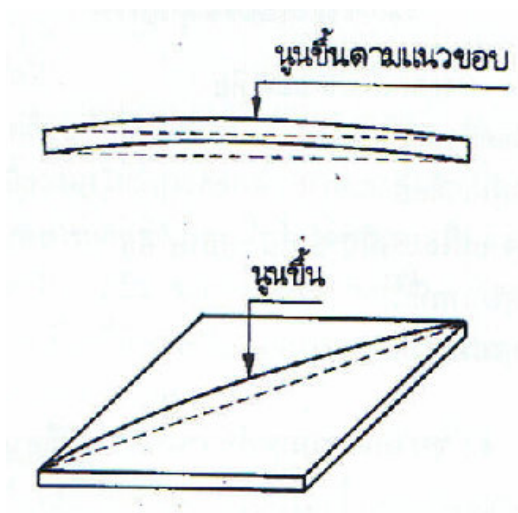
การวัดความบิดเบี้ยวในลักษณะนูนขึ้นและแอ่นลง



ที่มา: มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก. 613 และ 614-2529

ภาพที่ 3.16

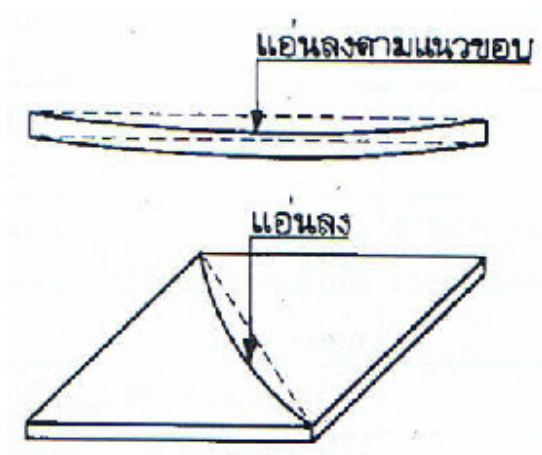
ภาพจำลองกระเบื้องในลักษณะนูนขึ้นตามแนวขอบและแนวเส้นทแยงมุม



ที่มา: มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก. 613 และ 614-2529

ภาพที่ 3.17

ภาพจำลองกระเบื้องในลักษณะแอ่นลงตามแนวขอบและแนวเส้นทแยงมุม



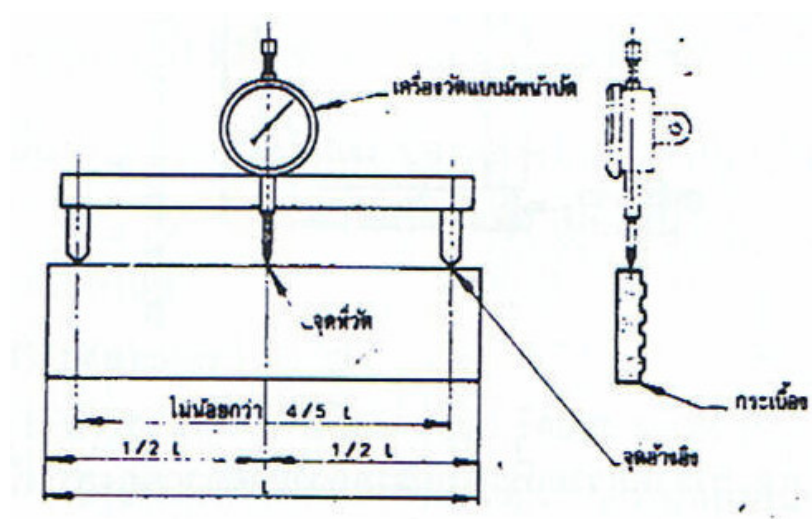
ที่มา: มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก. 613 และ 614-2529

- การวัดความบิดเบี้ยวในลักษณะโค้งออกและเว้าเข้า

ใช้เครื่องวัดชนิดเดียวกับข้างต้น วัดตามแนวขอบของกระเบื้องทางด้านยาวทั้งสองด้านไม่น้อยกว่า 4 ใน 5 ของความยาวจริงของขอบที่วัด (ดังภาพที่ 3.18) อ่านค่าที่จุดกึ่งกลางของขอบ แล้วรายงานความบิดเบี้ยวโดยใช้ค่าที่สูงที่สุด

ภาพที่ 3.18

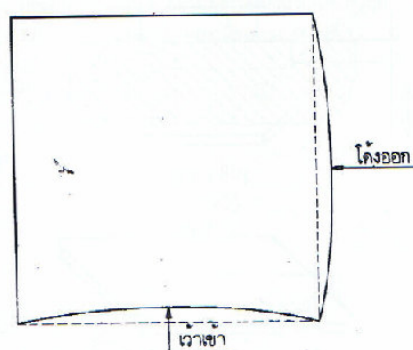
การวัดความบิดเบี้ยวในลักษณะโค้งออกและเว้าเข้า



ที่มา: มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก. 613 และ 614-2529

ภาพที่ 3.19

ภาพจำลองกระเบื้องในลักษณะโค้งออกและเว้าเข้าตามแนวขอบ



ที่มา: มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก. 613 และ 614-2529

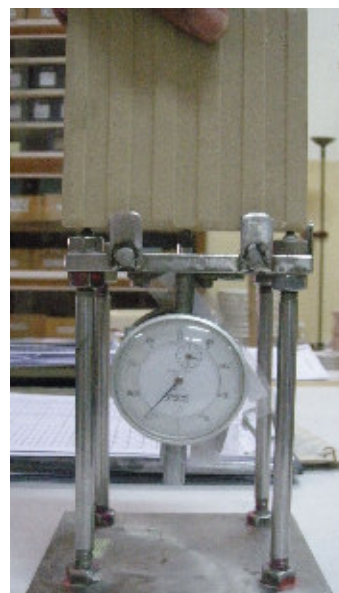
ภาพที่ 3.20

เครื่องวัดความบิดเบี้ยวของกระเบื้องที่ใช้ในการทดสอบ

(ก) การวัดในลักษณะนูนขึ้นและแอ่นลง (ข) การวัดในลักษณะโค้งออกและเว้าเข้า



(ก)



(ข)

ที่มา: ฝ่ายควบคุมคุณภาพ ห้างหุ้นส่วนจำกัด กระเบื้องไทย

3.6.2 การทดสอบสมบัติทางกลของชิ้นงานหลังเผา

ทำการทดสอบสมบัติทางกลของชิ้นงานหลังเผา ได้แก่ ค่าความต้านทานแรงดัดแบบ Three-point bending strength ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมกระเบื้องดินเผาปูผนัง ภายนอก มอก. 614-2529 (สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2529) มีวิธีการทดสอบดังต่อไปนี้

1) ยึดที่รองรับซึ่งเป็นแท่งเหล็กขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางไม่น้อยกว่า 9 มิลลิเมตร 2 แท่ง ให้มันคงอยู่ในแนวนอนและขนานกัน โดยให้แนวแกนของแท่งเหล็กทั้งสองห่างกันไม่น้อยกว่า 90 มิลลิเมตร

2) วางกระเบื้องบนที่รองรับให้ด้านยาวตั้งฉากกับแนวแกนของที่รองรับ และจัดวางแท่งเหล็กขนาดเดียวกันกับข้อ 1) ซึ่งใช้เป็นที่ใช้ให้แรงกด ให้อยู่กึ่งกลางระหว่างที่รองรับ ดังแสดงในภาพที่ 3.21

3) ที่จุดรองรับ และที่จุดรับแรงกดของกระเบื้อง ให้รองด้วยแผ่นยางที่มีค่าความแข็ง 60 ถึง 70 IRHD หนาประมาณ 3 มิลลิเมตร ยาวตลอดแผ่นกระเบื้องเพื่อให้เกิดการกระจายแรงอย่างสม่ำเสมอ

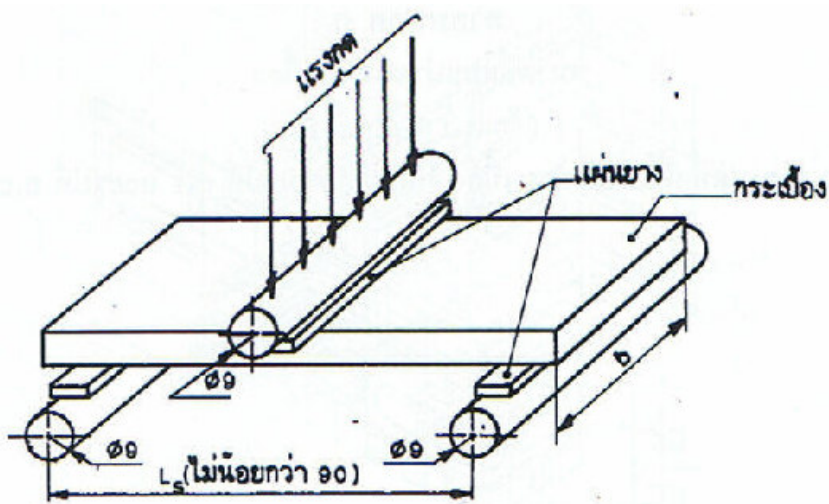
หมายเหตุ: IRHD หรือ International Rubber Hardness Degrees เป็นหน่วยที่ใช้บ่งบอกค่าระดับความแข็งของวัสดุยางหรือวัสดุที่ยืดหยุ่นได้ ค่าความแข็งนี้จะสัมพันธ์กับค่าแรงกด และความลึกของรอยกดที่ปรากฏบนวัสดุทดสอบ โดยหัวกดที่ใช้มีรูปร่างทรงกลม ค่า IRHD ที่เท่ากับ 0 จะเป็นตัวแทนของวัสดุที่มีค่า Young's Modulus เป็นศูนย์ และค่า IRHD เท่ากับ 100 หมายถึงวัสดุที่มีค่า Young's Modulus เป็นอินฟินิตี้

(http://www.ides.com/property_descriptions/ASTMD1415.asp, สืบค้น 16 พ.ค. 53)

4) ในกรณีที่แป้นกระเบื้องรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส ถ้าทราบแกนที่เป็นจุดอ่อน ให้ใช้แกนนั้นเป็นแกนทดสอบ

ภาพที่ 3.21

การทดสอบความต้านทานแรงดัดแบบ Three-point bending strength



ที่มา: มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก. 614-2529

- 5) เพิ่มแรงลงบนที่กดให้แรงกระจายอย่างสม่ำเสมอตลอดแกนของที่กดนั้น โดยควบคุมอัตราการเพิ่มแรงให้ได้ประมาณ 60 นิวตันต่อตารางเซนติเมตร ภายในเวลา 30 วินาที
- 6) วัดแรงกดสูงสุด ก่อนกระเบื้องที่ทดสอบแตก
- 7) หาค่าความหนาเฉลี่ยของกระเบื้องตรงรอยแตก โดยการวัดต้องกระทำไม่น้อยกว่า 2 จุด
- 8) คำนวณหาค่าความต้านทานแรงดัด จากสมการ

$$B = \frac{3P_{\max} L_s}{2a^2 b} \quad \dots(3.4)$$

เมื่อ	B	คือ ความต้านทานแรงดัด (เมกะปาสคาล)
	$P_{\max}$	คือ แรงกดสูงสุด (นิวตัน)
	L_s	คือ ระยะห่างของแนวแกนที่รองรับ (มิลลิเมตร)
	a	คือ ความหนาเฉลี่ยตรงรอยแตกของกระเบื้อง (มิลลิเมตร)
	b	คือ ความกว้างหรือความยาวของกระเบื้อง (มิลลิเมตร)

ภาพที่ 3.22

เครื่องวัดความต้านทานแรงดัดที่ใช้ในการทดสอบ



ที่มา: ฝ่ายควบคุมคุณภาพ ห้างหุ้นส่วนจำกัด กระเบื้องไทย

3.6.3 การทดสอบสมบัติทางความร้อน

ทำการทดสอบหาค่าการขยายตัวและหดตัวของชิ้นงานในระหว่างกระบวนการให้ความร้อนแก่ชิ้นงานไปเรื่อยๆ ซึ่งในการทดสอบนี้ใช้ที่อุณหภูมิห้องไปจนถึง $1,100^{\circ}\text{C}$ เพื่อบ่งบอกถึงประสิทธิภาพในการหลอมตัวขณะทำการเผาของเนื้อดินกระเบื้องทดลองแต่ละสูตร เปรียบเทียบค่ากับกระเบื้องสูตรมาตรฐาน รวมถึงหาค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนเชิงเส้น (Coefficient of linear thermal expansion, CTE) ของชิ้นงานในระหว่างการเผาจากอุณหภูมิ $30 - 600^{\circ}\text{C}$ เพื่อให้ทราบค่าการขยายตัวของเนื้อดินกระเบื้องระหว่างทำการเผาที่อุณหภูมินี้ ซึ่งจะเป็นประโยชน์สำหรับการนำเนื้อดินเหล่านี้ไปประยุกต์ใช้กับสูตรเคลือบเซรามิกต่างๆ ต่อไป โดยสูตรเคลือบกับสูตรเนื้อดินเซรามิกจะต้องมีค่าการขยายตัวที่สัมพันธ์กันในการเผา หากมีความแตกต่างกันมากจะเป็นสาเหตุทำให้เกิดตำหนิต่างๆ บนผลิตภัณฑ์หลังเผาได้ เช่น ตำหนิเคลือบร้าว หรือเคลือบร่อน เป็นต้น

การวัดค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนเชิงเส้นนั้น เป็นการวัดค่าความยาวของชิ้นงานที่เปลี่ยนแปลงไปเทียบกับค่าความยาวเริ่มต้น ในระหว่างการให้ความร้อนแก่ชิ้นงานจากอุณหภูมิหนึ่งไปยังอีกอุณหภูมิหนึ่ง ดังแสดงในสมการที่ 3.5

$$\alpha(T_2, T_1) = \frac{\left[\frac{dL}{L_0} \right]_{T_2} - \left[\frac{dL}{L_0} \right]_{T_1}}{T_2 - T_1} \quad \dots\dots(3.5)$$

เมื่อ	α	คือ ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนเชิงเส้นจากช่วงอุณหภูมิ T_1 ถึง T_2 ($^{\circ}\text{C}$)
	L_0	คือ ความยาวเริ่มต้นของชิ้นงานที่อุณหภูมิห้อง (มิลลิเมตร)
	dL/L_0	คือ ความยาวของชิ้นงานที่เปลี่ยนแปลงไปเทียบกับค่าความยาวเริ่มต้น (ไม่มีหน่วย)
	T_1	คือ อุณหภูมิเริ่มต้นที่ต้องการวัด ($^{\circ}\text{C}$)
	T_2	คือ อุณหภูมิสุดท้ายที่ต้องการวัด ($^{\circ}\text{C}$)

การทดสอบดังกล่าวปฏิบัติตามวิธีการในมาตรฐาน ASTM C 372 – 94 (ASTM Standards, 2005) ซึ่งเตรียมชิ้นทดสอบเป็นแท่งกลมหรือแท่งเหลี่ยม ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหรือความหนาประมาณ 5 มิลลิเมตร ยาวประมาณ 25-28 มิลลิเมตร ทำการทดสอบในสภาวะการเผาแบบใช้อากาศปกติ (Static air) อัตราการให้ความร้อน (Heating rate) และอัตราการเย็นตัว (Cooling rate) เท่ากับ $3^{\circ}\text{C}/\text{นาท}$ เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบเรียกว่า Dilatometer แสดงดังภาพที่ 3.23 ซึ่งในงานวิจัยนี้ ใช้เครื่องมือของห้องปฏิบัติการวิเคราะห์ทดสอบผลิตภัณฑ์กระเบื้องเซรามิก ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ ยี่ห้อ Netzsch รุ่น DIL 402 PC

ภาพที่ 3.23

เครื่องวัดค่าการขยายตัวและหดตัวทางความร้อน (Dilatometer)



ที่มา: <http://www.netzsch-thermal-analysis.com/en/products/detail/pid,15.html>

3.6.4 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี (Chemical Composition Analysis)

ทำการวิเคราะห์หาองค์ประกอบทางเคมีของสูตรเนื้อดินกระเบื้องที่เตรียมจากการทดแทนแร่โซเดียมเฟลด์สปาร์ด้วยวัสดุเหลือทิ้งประเภทต่างๆ และเนื้อดินกระเบื้องสูตรมาตรฐาน โดยใช้เทคนิค X-ray fluorescence (XRF) เพื่อศึกษาหาองค์ประกอบออกไซด์ของธาตุต่างๆ ที่มีอยู่ในสูตรเนื้อดินเหล่านั้น เปรียบเทียบกันระหว่างสูตรทดลอง และสูตรมาตรฐานที่ใช้อ้างอิง โดยทำการทดสอบที่ห้องปฏิบัติการเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกชันและเอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนส์ของศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ เครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์เป็นยี่ห้อ Philips รุ่น PW-2404 (แสดงดังภาพที่ 3.6 ในข้างต้น) และสำหรับการทดสอบสูตรเนื้อดินกระเบื้องที่มีเศษแก้วโบโรซิลิเกตเป็นส่วนผสม ใช้การวิเคราะห์ที่ห้องปฏิบัติการของกรมวิทยาศาสตร์บริการ เครื่องมือที่ใช้เป็นยี่ห้อ Bruker รุ่น S8 Tiger แสดงดังภาพที่ 3.24 ทั้งนี้เนื่องจากเครื่องวิเคราะห์ X-ray fluorescence ของศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ มีข้อจำกัดที่ไม่สามารถวิเคราะห์ออกไซด์ของธาตุโบรอน (B_2O_3) ที่มีอยู่ในเศษแก้วโบโรซิลิเกตได้

ภาพที่ 3.24

เครื่องวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี X-ray fluorescence spectrometer (XRF)



ที่มา: <http://www.mining-technology.com/contractors/analysis/bruker-axs2/bruker-axs22.html>

3.6.5 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางแร่ (Mineralogical Composition Analysis)

ทำการศึกษาวิเคราะห์องค์ประกอบทางแร่ ของชิ้นงานกระเบื้องหลังเผาแต่ละสูตร เปรียบเทียบกันระหว่างสูตรที่ใช้วัสดุเหลือทิ้งประเภทต่างๆ ทดแทนแร่โซเดียมเฟลด์สปาร์ และสูตรกระเบื้องมาตรฐานที่ใช้อ้างอิง ด้วยเทคนิค X-ray diffraction (XRD) เพื่อศึกษาถึงเฟสที่เกิดขึ้นหลังกระบวนการเผาของชิ้นงานกระเบื้องในแต่ละสูตร โดยทำการทดสอบที่ห้องปฏิบัติการอิเล็กทรอนิกส์แฟรกชันและอิเล็กทรอนิกส์ฟลูออเรสเซนส์ ของศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ เครื่องที่ใช้เป็นยี่ห้อ JEOL รุ่น JDX-3530 และวิเคราะห์ผลโดยใช้โปรแกรม MDI Jade 6.5 แสดงดังภาพที่ 3.25 การเตรียมตัวอย่างทำโดยตัดชิ้นงานกระเบื้องหลังเผาเป็นชิ้นสี่เหลี่ยมเล็กๆ ขนาด 1.5×1.5 เซนติเมตร และทำการทดสอบในช่วงมุม 2θ ตั้งแต่ 10° ถึง 70° โดยใช้ Step angle เท่ากับ 0.04° , Count time เท่ากับ 1.00 วินาที, Tube voltage เท่ากับ 30 kV และ Tube current เท่ากับ 40 mA

ภาพที่ 3.25

เครื่องวิเคราะห์องค์ประกอบทางแร่ X-ray diffraction (XRD)



ที่มา: http://www.pwri.go.jp/team/tishitsu/apparatus_e.htm

บทที่ 4

ผลของการวิจัยและอภิปรายผล

4.1 ผลการทดสอบการหลอมตัวของวัสดุประเภทตัวช่วยหลอม ในเบื้องต้น (Fusion Test)

การทดสอบการหลอมตัวของวัสดุประเภทตัวช่วยหลอมที่นำมาใช้ในการทดลองในเบื้องต้น ทำได้โดยการอัดผงวัสดุต่าง ๆ เป็นรูปโคน แล้วนำเข้าเผาที่อุณหภูมิเดียวกัน ซึ่งในการทดลองนี้ใช้อุณหภูมิ $1,125^{\circ}\text{C}$ ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่ทำการเผาผลิตภัณฑ์จริงของห้างหุ้นส่วนจำกัด กระเบื้องไทย ดังได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 3

การทำการทดสอบดังกล่าว ทำเพื่อเป็นการประเมินในเบื้องต้นว่าวัสดุที่นำมาใช้ในแต่ละประเภท ซึ่งรวมถึงวัสดุเหลือทิ้งที่ทดลองนำมาใช้เป็นตัวช่วยหลอม วัสดุชนิดใดจะมีประสิทธิภาพในการหลอมตัวที่อุณหภูมิเดียวกันได้ดีกว่ากัน โดยดูจากลักษณะของชิ้นทดสอบรูปโคนที่หลอมสั้นลงมา หรือแผ่กว้างออก แสดงลักษณะของชิ้นทดสอบหลังเผา และผลการทดสอบได้ดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1

ผลการทดสอบการหลอมตัวของวัสดุประเภทตัวช่วยหลอมในเบื้องต้น
ที่อุณหภูมิเผา $1,125^{\circ}\text{C}$

ชื่อวัสดุ	ลักษณะการหลอมตัวหลังเผา
เศษแก้วโซดาไลม์	

ชื่อวัตถุดิบ	ลักษณะการหลอมตัวหลังเผา	
กากตะกอนเคลือบพริต		
เศษแก้วโบโรซิลิเกต		
แร่โซเดียมเฟลด์สปาร์		

จากผลการทดสอบ Fusion Test เพื่อเปรียบเทียบคุณสมบัติภาพในการหลอมตัวของวัตถุดิบแต่ละประเภทที่นำมาใช้เป็นตัวช่วยหลอมในงานวิจัยนี้ พบว่า วัตถุดิบประเภทวัสดุเหลือทิ้งทั้ง 3 ตัว มีประสิทธิภาพในการหลอมตัวที่อุณหภูมิเผา $1,125^{\circ}\text{C}$ ได้ดีกว่าแร่โซเดียมเฟลด์สปาร์ ซึ่งเป็นวัตถุดิบจากธรรมชาติที่โรงงานใช้เป็นตัวช่วยหลอมในกระบวนการผลิตกระเบื้องจริง โดยสามารถเรียงลำดับการหลอมตัวของวัตถุดิบต่างๆ จากหลอมตัวมากไปหาน้อยได้ดังนี้ เศษแก้วโซดาไลม์ > กากตะกอนเคลือบพริต > เศษแก้วโบโรซิลิเกต > แร่โซเดียมเฟลด์สปาร์ โดยจากภาพพบว่า เศษแก้วโบโรซิลิเกต และกากตะกอนเคลือบพริต มีความสามารถในการหลอมตัวได้ใกล้เคียงกัน

4.2 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของวัตถุโบราณประเภทถ้วยชาม

การวิเคราะห์หาองค์ประกอบทางเคมีของวัตถุโบราณประเภทถ้วยชามต่างๆ ที่นำมาใช้ในงานวิจัยด้วยเทคนิคเอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนส์ (XRF) นั้น ทำเพื่อเป็นการเปรียบเทียบและตรวจสอบดูว่าวัตถุโบราณต่างๆ ที่นำมาใช้ มีองค์ประกอบออกไซด์ของธาตุหมู่ 1 และ หมู่ 2 รวมถึงสารประกอบ B_2O_3 และ PbO ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นตัวช่วยหลอม (Fluxing agent) ในกระบวนการเผาผลิตภัณฑ์เซรามิกอยู่หรือไม่ และมีปริมาณมากน้อยเพียงใด ตามที่ได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 2 โดยผลการวิเคราะห์ที่ได้แสดงดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2

ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของวัตถุโบราณประเภทถ้วยชามต่างๆ
ด้วยเทคนิคเอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนส์ (XRF)

องค์ประกอบ ออกไซด์ของธาตุ	วัตถุโบราณ / องค์ประกอบทางเคมี (% โดยน้ำหนัก)			
	เศษแก้ว โซดาไลม์	เศษแก้ว โบโรซิลิเกต	กากตะกอน เคลือบฟริต	แร่โซเดียม เฟลด์สปาร์
SiO_2	70.84	78.40	51.84	61.69
Al_2O_3	1.12	2.13	10.00	18.95
B_2O_3	N/A	14.36	N/A	N/A
Na_2O	13.40	4.88	4.57	7.10
K_2O	0.23	0.08	3.28	1.08
MgO	4.16	N/A	0.40	3.45
CaO	8.89	N/A	8.80	4.91
SrO	N/A	N/A	0.01	0.06
BaO	0.19	N/A	1.26	N/A
PbO	N/A	N/A	5.27	N/A
TiO_2	0.20	N/A	0.20	0.69
Fe_2O_3	0.48	0.04	0.64	0.89
ZrO_2	0.02	N/A	9.14	0.07

องค์ประกอบ ออกไซด์ของธาตุ	วัตถุดิบ / องค์ประกอบทางเคมี (% โดยน้ำหนัก)			
	เศษแก้ว โซดาไลม์	เศษแก้ว โบโรซิลิเกต	กากตะกอน เคลือบฟrit	แร่โซเดียม เฟลด์สปาร์
Cr_2O_3	0.02	N/A	0.32	N/A
ZnO	N/A	N/A	3.29	N/A
P_2O_5	N/A	N/A	0.13	0.43
Co_3O_4	N/A	N/A	0.28	N/A
MnO	N/A	N/A	0.16	N/A
อื่นๆ	0.45	0.11	0.20	N/A
ปริมาณฟลักซ์จาก ออกไซด์ของธาตุ หมู่ 1 และ 2	26.87	4.96	18.32	16.60
ปริมาณฟลักซ์จาก B_2O_3	-	14.36	-	-
ปริมาณฟลักซ์จาก PbO	-	-	5.27	-
ปริมาณฟลักซ์รวม	26.87	19.32	23.59	16.60

หมายเหตุ: N/A หมายถึง ไม่มีออกไซด์ของธาตุนั้นเป็นองค์ประกอบอยู่เลย หรือมีในปริมาณน้อยมากซึ่งเครื่องไม่สามารถตรวจวัดได้

จากผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบต่างๆ ในตารางข้างต้น พบว่าแร่โซเดียมเฟลด์สปาร์ และวัสดุเหลือทิ้งทุกประเภทมีสารประกอบออกไซด์ของธาตุหมู่ 1 และหมู่ 2 (อัลคาไล และอัลคาไลน์เอิร์ท) ประกอบอยู่ด้วยทั้งสิ้น ได้แก่ Na_2O , K_2O , MgO , CaO , SrO และ BaO ในปริมาณเล็กน้อยแตกต่างกันไป สำหรับสารประกอบโบรอนออกไซด์ (B_2O_3) ซึ่งมีอยู่เฉพาะในเศษแก้วโบโรซิลิเกต และสารประกอบออกไซด์ของตะกั่ว (PbO) ที่มีอยู่ในกากตะกอนเคลือบฟrit นั้น ถึงแม้จะไม่ใช้สารประกอบออกไซด์ของธาตุหมู่ 1 และหมู่ 2 แต่ก็ถือได้ว่าเป็นตัวช่วยหลอมในทางเซรามิกด้วยเช่นเดียวกัน ทั้งนี้เนื่องจากสารประกอบทั้งสองมีจุดหลอมเหลวของตัวเองที่ต่ำมาก โดย B_2O_3 มีจุดหลอมเหลวที่ 455°C และ PbO มีจุดหลอมเหลวที่ 500°C จึงใช้เป็นตัวช่วยหลอมในทางเซรามิกได้ นอกเหนือจากสารประกอบจำพวกอัลคาไล และอัลคาไลน์เอิร์ท (SACMI, 2002)

จากผลการวิเคราะห์ พบว่า เมื่อคิดปริมาณฟลักซ์โดยรวมของวัตถุดิบแต่ละประเภท แล้ว เศษแก้วโซดาไลม์มีปริมาณฟลักซ์โดยรวมอยู่มากที่สุด คิดเป็นปริมาณ 26.87% รองลงมา ได้แก่ กากตะกอนเคลือบฟrit ที่มีอยู่ในปริมาณ 23.59% ลำดับต่อมาคือ เศษแก้วโบโรซิลิเกต ซึ่งมีอยู่ในปริมาณ 19.32% และแร่โซเดียมเฟลด์สปาร์มีปริมาณฟลักซ์โดยรวมอยู่ในตัวน้อยที่สุด เท่ากับ 16.60% ดังนั้นจึงเรียงลำดับปริมาณฟลักซ์โดยรวมที่มีอยู่ในวัตถุดิบแต่ละประเภทที่นำมาใช้เป็นตัวช่วยหลอมในงานวิจัยนี้ ตามลำดับจากมากไปหาน้อยได้ดังนี้ เศษแก้วโซดาไลม์ > กากตะกอนเคลือบฟrit > เศษแก้วโบโรซิลิเกต > แร่โซเดียมเฟลด์สปาร์ ซึ่งพบว่า ผลที่ได้มีความสอดคล้องกับผลการทดลองหลอมวัตถุดิบแต่ละประเภทในรูปโคน เพื่อดูประสิทธิภาพการหลอมตัวในเบื้องต้น (Fusion Test) ตามที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อที่ 4.1

จากผลการทดสอบ พบว่า กากตะกอนเคลือบฟritมีองค์ประกอบออกไซด์ของตะกั่ว (PbO) อยู่ในปริมาณที่ค่อนข้างมาก (5.27%) จึงให้คุณสมบัติเป็นตัวช่วยหลอมที่ดี ซึ่งโดยปกติแล้ว ตะกั่วถือว่าเป็นตัวช่วยหลอมที่มีประสิทธิภาพมากในการใช้งานทางเซรามิก เนื่องจากมีจุดหลอมเหลวที่ต่ำ แต่ไม่นิยมใช้เนื่องจากมีความเป็นอันตรายแก่ผู้ปฏิบัติงาน และผู้บริโภคสำหรับผลิตภัณฑ์ประเภทเครื่องใช้บนโต๊ะอาหาร แต่สำหรับโรงงานผลิตกระเบื้องเซรามิกนั้น มักนิยมใช้เพื่อช่วยลดอุณหภูมิในการเผาเคลือบ และยังสามารถเพิ่มความแวววาวให้กับเคลือบเซรามิกได้ด้วย โดยจะใช้น้ำรูปของฟritตะกั่ว ซึ่งเป็นวัตถุดิบที่ผ่านการหลอมให้เป็นแก้วมาแล้ว โดยตะกั่วจะถูกหลอมรวมตัวกับซิลิกา และออกไซด์ตัวอื่นๆ ทำให้ไม่สามารถระเหยหรือละลายน้ำได้อีก จึงไม่อันตรายแก่ผู้ปฏิบัติงานในขณะทำการบดผสมรวมกับวัตถุดิบตัวอื่นๆ ดังที่ได้เคยอธิบายวัตถุประสงค์และข้อดีของการทำฟritมาแล้วในบทที่ 2

4.3 ผลการทดสอบสมบัติทางกายภาพของชิ้นงานหลังเผา

การทดสอบสมบัติทางกายภาพของชิ้นงานหลังเผา สามารถใช้เป็นตัวบ่งชี้ถึงประสิทธิภาพในการหลอมตัวของวัตถุดิบต่างๆ ที่นำมาใช้เป็นส่วนประกอบของผลิตภัณฑ์ และเป็นการบ่งบอกถึงคุณภาพของผลิตภัณฑ์หลังการเผาได้อีกด้วย ซึ่งโดยทั่วไปสมบัติทางกายภาพของผลิตภัณฑ์หลังการเผา ต้องควบคุมให้อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ตามมาตรฐานสากล เช่น สำหรับประเทศไทยต้องผ่านตามเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (มอก.) หรือสำหรับผลิตภัณฑ์ที่ส่งออกไปยังต่างประเทศจะต้องผ่านตามเกณฑ์มาตรฐานของกลุ่มประเทศนั้นๆ เช่น มาตรฐาน ISO หรือ EN เป็นต้น สำหรับในงานวิจัยนี้ จะยึดตามเกณฑ์

มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมกระเบื้องบุผนังภายในและภายนอกอาคาร (มอก. 613-2529 และ มอก. 614-2529) โดยการทดสอบสมบัติทางกายภาพของผลิตภัณฑ์กระเบื้องที่ต้องควบคุมให้ผ่านตามเกณฑ์มาตรฐานนั้น ได้แก่ ค่าการดูดซึมน้ำ และค่าความบิดเบี้ยวของชิ้นงานหลังการเผา สำหรับค่าการหดตัวเชิงเส้น และค่าความหนาแน่นของชิ้นงาน ถึงแม้เป็นคุณสมบัติที่ไม่มีข้อกำหนดตามเกณฑ์มาตรฐานที่ต้องทดสอบ แต่นิยมกระทำเพื่อนำผลวิเคราะห์ที่ได้มาเป็นข้อมูลประกอบ และพิจารณาร่วมกันกับสมบัติทางกายภาพอื่นๆ เพื่อให้ได้ผลการทดสอบที่ถูกต้องและน่าเชื่อถือมากยิ่งขึ้น

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการทดลองเป็นจำนวน 2 ครั้ง ตามที่ได้กล่าวมาแล้วในขั้นตอนดำเนินงานวิจัยในบทที่ 3 กล่าวคือ ครั้งที่ 1 ทำการทดลองโดยแทนที่แร่โซเดียมเฟลด์สปาร์ในสูตรกระเบื้องมาตรฐานด้วยวัสดุเหลือทิ้งประเภทต่างๆ ในปริมาณ 50 และ 100% โดยน้ำหนัก และจากผลในครั้งที่ 1 ได้ทำการทดลองซ้ำเป็นครั้งที่ 2 เพื่อศึกษาผลในระดับที่ละเอียดมากขึ้น โดยทำการแทนที่แร่โซเดียมเฟลด์สปาร์ในสูตรกระเบื้องมาตรฐานด้วยวัสดุเหลือทิ้งประเภทต่างๆ ในปริมาณ 50 60 70 และ 80% โดยน้ำหนัก ทั้งนี้เนื่องจากผลการทดลองในครั้งที่ 1 พบว่า กระเบื้องที่ใช้วัสดุเหลือทิ้งทั้ง 3 ประเภททดแทนแร่โซเดียมเฟลด์สปาร์ในปริมาณ 100% โดยน้ำหนักนั้น มีผลการทดสอบค่าความบิดเบี้ยวของชิ้นงานหลังเผา ไม่ผ่านตามเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก. 613-2529 และ มอก. 614-2529 ดังนั้น จึงได้ทำการทดลองซ้ำโดยปรับเปลี่ยนปริมาณการแทนที่แร่โซเดียมเฟลด์สปาร์ด้วยวัสดุเหลือทิ้งประเภทต่างๆ ในปริมาณที่ลดลง ตั้งแต่ 50 – 80% โดยน้ำหนัก ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว ผลการวิเคราะห์ทดสอบสมบัติทางกายภาพต่างๆ ทั้งหมดแสดงดังต่อไปนี้

4.3.1 ผลการทดสอบการหดตัวเชิงเส้น

การหดตัวของชิ้นงานหลังผ่านกระบวนการเผาอบบอถึงความทนไฟ และความสุกตัวของเนื้อดินที่ใช้ (ไพจิตร อิงศิริวัฒน์, 2541) ซึ่งสามารถบ่งชี้ถึงประสิทธิภาพในการหลอมตัวของวัตถุดิบประเภทตัวช่วยหลอมที่นำมาใช้ในส่วนผสมได้ด้วย สำหรับชิ้นงานหลังเผาที่มีเปอร์เซ็นต์การหดตัวเชิงเส้นที่มากกว่า แสดงว่ามีการหลอมตัวที่มากกว่าด้วย ผลการทดสอบการหดตัวเชิงเส้นหลังเผาของชิ้นงานทดลองสูตรต่างๆ เทียบกับชิ้นงานสูตรมาตรฐานที่ใช้อ้างอิงในการทดลองครั้งที่ 1 แสดงดังตารางที่ 4.3 และแสดงเป็นกราฟในภาพที่ 4.1 ส่วนผลจากการทดลองในครั้งที่ 2 แสดงดังตารางที่ 4.4 และกราฟในภาพที่ 4.2

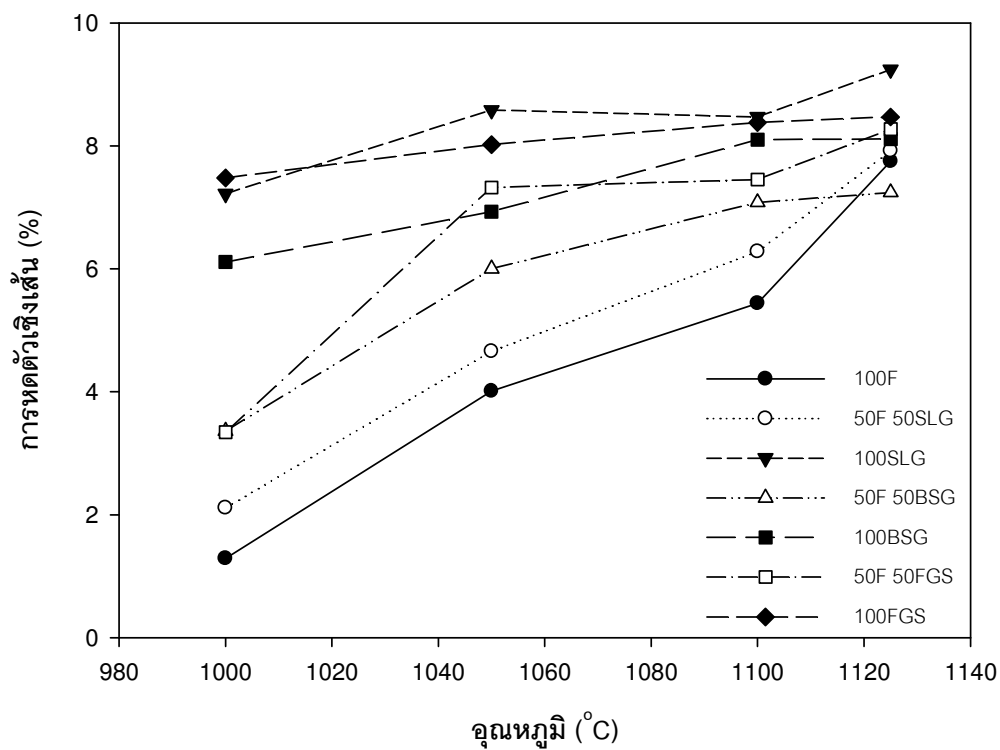
ตารางที่ 4.3

ผลการทดสอบการหดตัวเชิงเส้นของชิ้นงานหลังเผาที่อุณหภูมิต่างๆ ในการทดลองครั้งที่ 1

อุณหภูมิเผา (°C)	ข้อสูตร / ค่าการหดตัวเชิงเส้น (%)						
	100F (Ref.)	50F 50SLG	100SLG	50F 50BSG	100BSG	50F 50FGS	100FGS
1000	1.29	2.11	7.22	3.36	6.11	3.34	7.48
1050	4.01	4.66	8.58	6.00	6.93	7.32	8.02
1100	5.44	6.28	8.47	7.08	8.10	7.45	8.38
1125	7.75	7.92	9.24	7.24	8.11	8.27	8.47

ภาพที่ 4.1

กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการหดตัวเชิงเส้น และอุณหภูมิในการเผาชิ้นงาน
ในการทดลองครั้งที่ 1



ตารางที่ 4.4

ผลการทดสอบการหดตัวเชิงเส้นของชิ้นงานหลังเผาที่อุณหภูมิต่างๆ ในการทดลองครั้งที่ 2

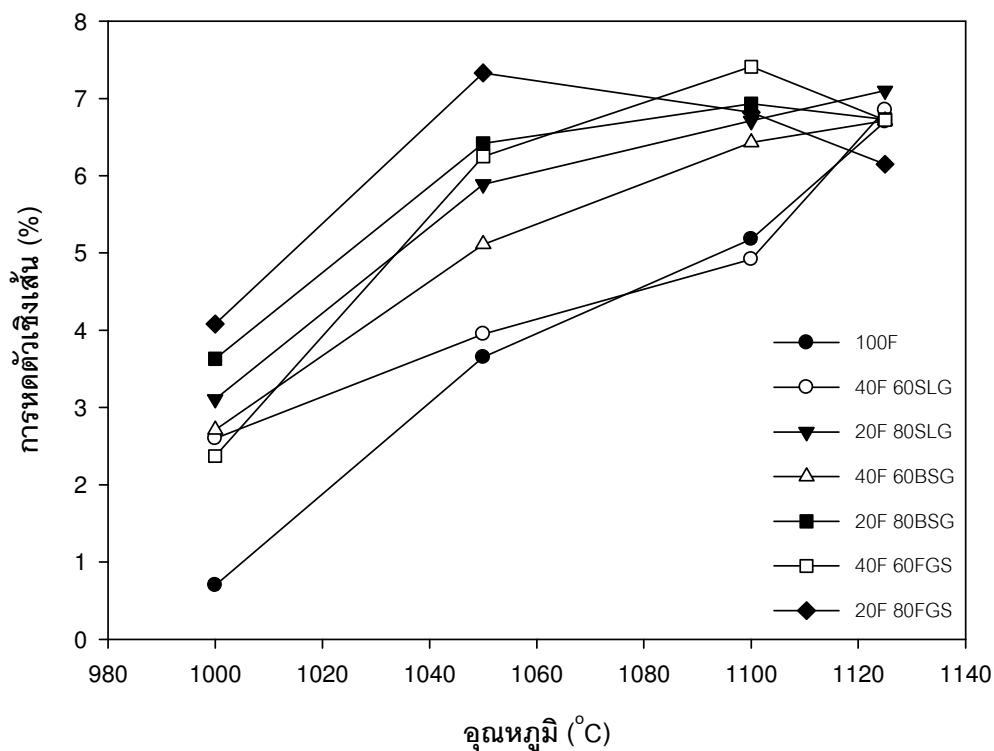
อุณหภูมิเผา (°C)	ชื่อสูตร / ค่าการหดตัวเชิงเส้น (%)								
	100F (Ref.)	50F 50SLG	40F 60SLG	30F 70SLG	20F 80SLG	50F 50BSG	40F 60BSG	30F 70BSG	20F 80BSG
1000	0.70±0.06	2.10±0.08	2.60±0.09	3.10±0.25	3.11±0.08	2.20±0.16	2.71±0.12	3.64±0.32	3.63±0.12
1050	3.65±0.18	3.40±0.14	3.95±0.11	5.32±0.13	5.89±0.08	4.84±0.27	5.11±0.05	5.67±0.17	6.42±0.06
1100	5.18±0.01	4.70±0.14	4.92±0.19	6.42±0.31	6.71±0.31	6.66±0.31	6.43±0.33	6.80±0.40	6.93±0.27
1125	6.70±0.28	6.37±0.17	6.85±0.10	7.07±0.61	7.10±0.48	6.51±0.57	6.71±0.28	6.27±0.79	6.73±0.64

ตารางที่ 4.4 (ต่อ)

อุณหภูมิเผา (°C)	ชื่อสูตร / ค่าการหดตัวเชิงเส้น (%)			
	50F 50FGS	40F 60FGS	30F 70FGS	20F 80FGS
1000	2.43±0.16	2.37±0.07	3.40±0.17	4.08±0.05
1050	6.58±0.33	6.25±0.06	8.00±0.24	7.33±0.17
1100	7.97±0.63	7.41±0.64	7.91±0.43	6.82±0.67
1125	6.68±0.54	6.72±0.85	6.41±0.72	6.15±0.49

ภาพที่ 4.2

กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการหดตัวเชิงเส้น และอุณหภูมิในการเผาขึ้นงาน
ในการทดลองครั้งที่ 2



จากผลการทดลองทั้ง 2 ครั้งข้างต้น พบว่า ค่าการหดตัวเชิงเส้นของขึ้นงานหลังเผาส่วนใหญ่มีค่าสอดคล้องกัน และเป็นไปตามทฤษฎี กล่าวคือ เมื่ออุณหภูมิที่ทำการเผาขึ้นงานเพิ่มขึ้น จะทำให้ค่าการหดตัวเชิงเส้นของขึ้นงานมีค่าที่เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ซึ่งบ่งบอกถึงการหลอมตัวของขึ้นงานที่มากขึ้นด้วย แต่สำหรับการใช้กากตะกอนเคลือบฟritเป็นตัวช่วยหลอมทดแทนแร่โซเดียมเฟลด์สปาร์ ในการทดลองครั้งที่ 2 นั้น พบว่า มีข้อน่าสังเกตคือ ค่าการหดตัวเชิงเส้นหลังเผาที่อุณหภูมิสูงขึ้น (ตั้งแต่ 1,100 และ 1,125°C) กลับมีค่าการหดตัวที่ลดลง และจะพบค่าการหดตัวที่ลดลงมากกว่าสำหรับสูตรที่มีการใช้กากตะกอนเคลือบฟritในปริมาณที่มากกว่าด้วย โดยการใส่เศษแก้วโบโรซิลิเกตเป็นตัวช่วยหลอมก็ให้ผลเช่นเดียวกันกับกากตะกอนเคลือบฟrit แต่ผลที่ปรากฏยังไม่ชัดเจนเท่ากับการใช้กากตะกอนเคลือบฟrit อาจเป็นไปได้ว่า การใช้กากตะกอนเคลือบฟritในปริมาณที่มากเกินไป และทำการเผาที่อุณหภูมิสูงๆ จะทำให้ขึ้นงานที่เคยหดตัวแล้ว

กลับมีการขยายตัวเพิ่มขึ้นเล็กน้อยอีกครั้งเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ซึ่งอาจต้องใช้การพิจารณาร่วมกับผลการทดสอบสมบัติทางกายภาพอื่นๆ ร่วมด้วย จึงจะสามารถสรุปได้ชัดเจนมากกว่านี้

ดังนั้น จากผลการทดสอบโดยส่วนใหญ่ทั้ง 2 ครั้ง สามารถสรุปได้ว่า การใช้วัสดุเหลือทิ้งทั้ง 3 ประเภททดแทนแร่โซเดียมเฟลด์สปาร์ในปริมาณต่างๆ นั้น ให้ผลค่าการหดตัวเชิงเส้นหลังเผาที่มากกว่าการใช้แร่โซเดียมเฟลด์สปาร์เป็นตัวช่วยหลอมแต่เพียงอย่างเดียว สำหรับการเผาที่อุณหภูมิต่ำ (1,000 และ 1,050°C) ซึ่งหมายถึงมีประสิทธิภาพในการเป็นตัวช่วยหลอมที่ดีกว่าด้วย โดยเมื่อพิจารณาโดยรวมแล้ว พบว่า กากตะกอนเคลือบพริตมีประสิทธิภาพในการเป็นตัวช่วยหลอมที่ดีกว่าเศษแก้วโซดาไลม์ และเศษแก้วโบโรซิลิเกต แต่ทั้งนี้ ผลการทดสอบค่าการหดตัวเชิงเส้นที่ได้ยังไม่ชัดเจนมากนัก จึงต้องพิจารณาร่วมกับผลการทดสอบสมบัติอื่นๆ ร่วมด้วย ดังจะได้กล่าวต่อไป

4.3.2 ผลการทดสอบความหนาแน่นของชิ้นงาน

ค่าความหนาแน่นของชิ้นงาน คือ ค่าสัดส่วนระหว่างน้ำหนักต่อปริมาตรของชิ้นงานนั้นๆ โดยในการทดสอบนี้ เป็นการหาค่าความหนาแน่นแบบ Bulk density ซึ่งเป็นการคิดปริมาตรของชิ้นงานทั้งก้อน โดยรวมรูพรุนทั้งแบบเปิดและปิดที่มีอยู่เข้าไปด้วย การหาค่าความหนาแน่นของชิ้นงานหลังผ่านกระบวนการเผา สามารถใช้บ่งบอกการหลอมตัวของชิ้นงานได้ โดยชิ้นงานที่หลอมตัวมากกว่า จะมีค่าความหนาแน่นที่มากกว่าด้วย เนื่องจากขนาดหรือปริมาตรของชิ้นงานที่ลดลง ซึ่งเชื่อมโยงกับค่าการหดตัวเชิงเส้นของชิ้นงานดังที่ได้กล่าวมาแล้วในข้างต้นด้วย ดังนั้น เราจึงสามารถใช้ค่าความหนาแน่นของชิ้นงานหลังเผาบ่งบอกถึงประสิทธิภาพในการเป็นตัวช่วยหลอมของวัตถุดิบที่นำมาใช้ได้อีกทางหนึ่ง

ผลการทดสอบค่าความหนาแน่นของชิ้นงานกระเบื้องสุตรทดลอง และสุตรมาตรฐาน หลังผ่านการเผาที่อุณหภูมิต่างๆ ในการทดลองทั้ง 2 ครั้ง แสดงดังตารางที่ 4.5 – 4.6 และแสดงเป็นกราฟในภาพที่ 4.3 – 4.4 ตามลำดับ

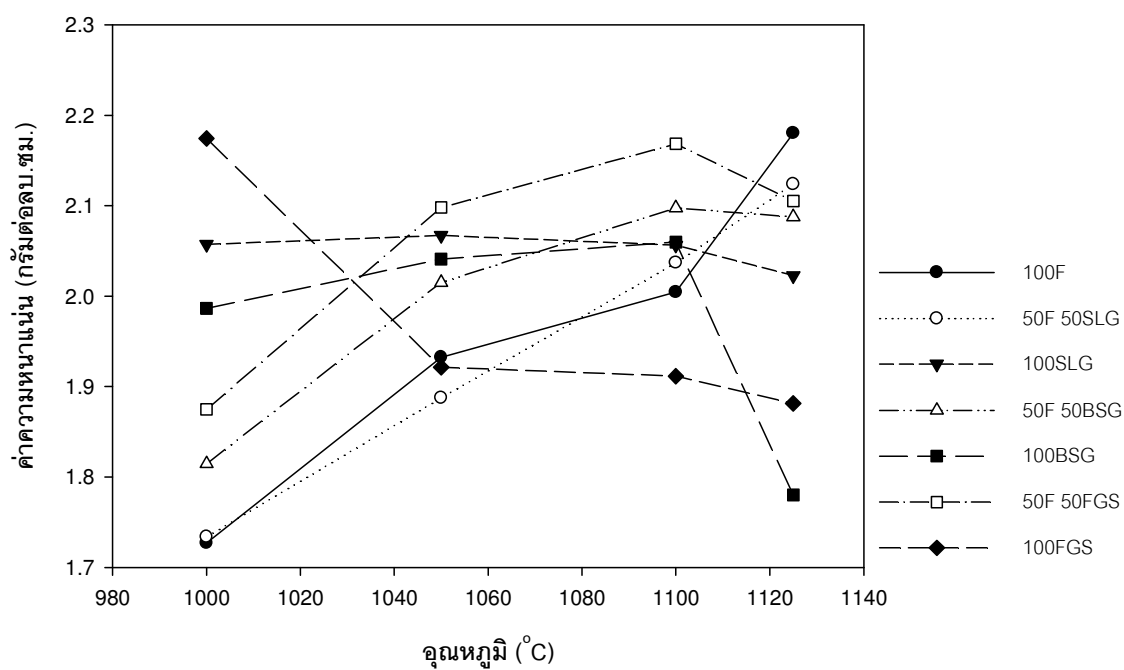
ตารางที่ 4.5

ผลการทดสอบความหนาแน่นของชิ้นงานหลังเผาที่อุณหภูมิต่างๆ ในการทดลองครั้งที่ 1

อุณหภูมิเผา (°C)	ชื่อสูตร / ค่าความหนาแน่นของชิ้นงาน (กรัมต่อลบ.ซม.)						
	100F (Ref.)	50F 50SLG	100SLG	50F 50BSG	100BSG	50F 50FGS	100FGS
1000	1.727	1.734	2.057	1.815	1.986	1.875	2.174
1050	1.932	1.888	2.067	2.015	2.041	2.098	1.921
1100	2.004	2.037	2.056	2.098	2.060	2.168	1.912
1125	2.180	2.124	2.023	2.088	1.780	2.105	1.881

ภาพที่ 4.3

กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่น และอุณหภูมิในการเผาชิ้นงาน
ในการทดลองครั้งที่ 1



ตารางที่ 4.6

ผลการทดสอบความหนาแน่นของชิ้นงานหลังเผาที่อุณหภูมิต่างๆ ในการทดลองครั้งที่ 2

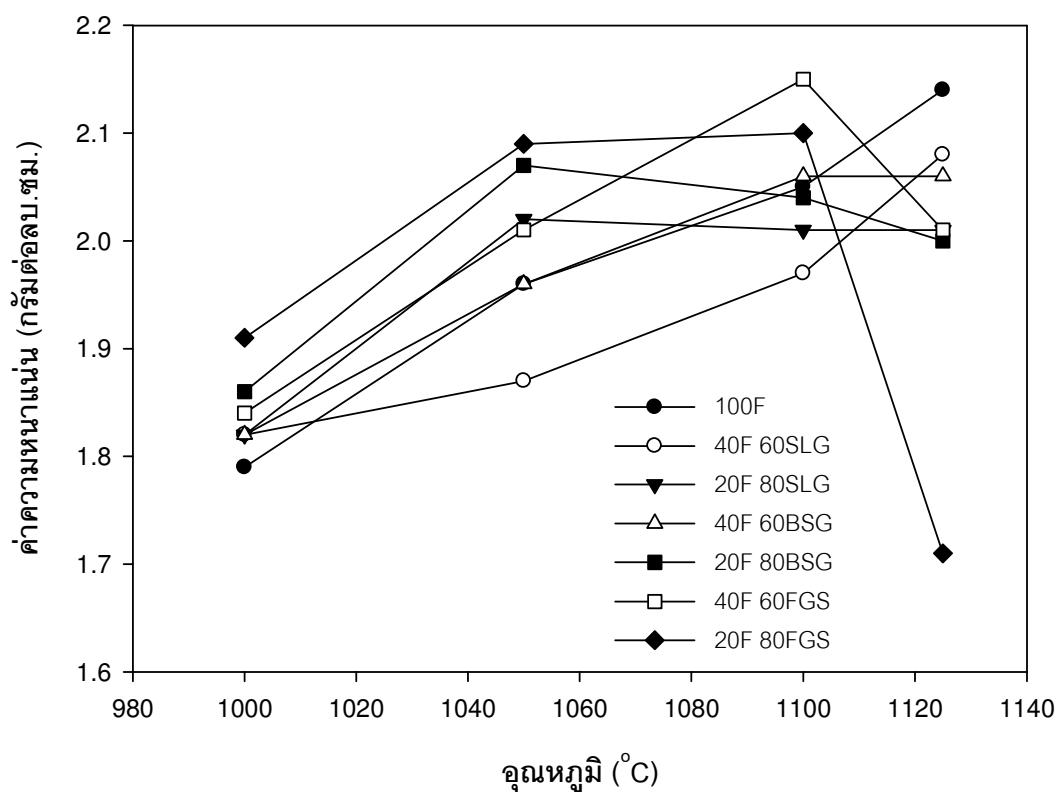
อุณหภูมิเผา (°C)	ชื่อสูตร / ค่าความหนาแน่น (กรัมต่อลบ.ซม.)								
	100F (Ref.)	50F 50SLG	40F 60SLG	30F 70SLG	20F 80SLG	50F 50BSG	40F 60BSG	30F 70BSG	20F 80BSG
1000	1.79±0.02	1.80±0.02	1.82±0.01	1.87±0.01	1.82±0.00	1.81±0.02	1.82±0.02	1.87±0.02	1.86±0.01
1050	1.96±0.02	1.87±0.01	1.87±0.04	2.01±0.04	2.02±0.03	1.94±0.03	1.96±0.01	1.96±0.02	2.07±0.05
1100	2.05±0.00	1.93±0.01	1.97±0.05	2.09±0.03	2.01±0.05	2.00±0.08	2.06±0.01	2.05±0.01	2.04±0.03
1125	2.14±0.03	2.05±0.04	2.08±0.01	2.10±0.05	2.01±0.06	2.08±0.01	2.06±0.01	2.01±0.02	2.00±0.02

ตารางที่ 4.6 (ต่อ)

อุณหภูมิเผา (°C)	ชื่อสูตร / ค่าความหนาแน่น (กรัมต่อลบ.ซม.)			
	50F 50FGS	40F 60FGS	30F 70FGS	20F 80FGS
1000	1.86±0.03	1.84±0.02	1.87±0.02	1.91±0.03
1050	2.05±0.03	2.01±0.00	2.07±0.01	2.09±0.07
1100	2.18±0.01	2.15±0.01	2.13±0.02	2.10±0.04
1125	2.00±0.10	2.01±0.08	1.91±0.07	1.71±0.07

ภาพที่ 4.4

กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่น และอุณหภูมิในการเผาขึ้นงาน
ในการทดลองครั้งที่ 2



จากผลการทดลองทั้ง 2 ครั้ง พบว่า ผลที่ได้สอดคล้องกับค่าการหดตัวเชิงเส้นตามที่ได้กล่าวมาแล้ว กล่าวคือ ค่าความหนาแน่นของชิ้นงานหลังเผาโดยส่วนใหญ่มีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อทำการเผาขึ้นงานที่อุณหภูมิสูงขึ้น ซึ่งหมายถึงชิ้นงานมีการหลอมตัวที่มากขึ้นด้วยนั่นเอง และการใช้วัสดุเหลือทิ้งทั้ง 3 ประเภทเป็นตัวช่วยหลอมทดแทนแร่โซเดียมเฟลด์สปาร์นั้น จะให้ประสิทธิภาพในการหลอมตัวที่ดีกว่าการใช้แร่โซเดียมเฟลด์สปาร์เป็นตัวช่วยหลอมแต่เพียงอย่างเดียว แต่จะได้ผลดังกล่าว เฉพาะการเผาที่อุณหภูมิต่ำเท่านั้น (1,000 - 1,100°C) สำหรับการเผาที่อุณหภูมิสูงเกิน 1,100°C ขึ้นไป กลับพบว่า ชิ้นงานมีประสิทธิภาพในการหลอมตัวที่ลดลง สังเกตได้จากผลค่าความหนาแน่นที่ลดลง และจะมีผลอย่างมากกับชิ้นงานที่ใช้วัสดุเหลือทิ้งทั้ง 3 ประเภทเป็นตัวช่วยหลอม โดยยิ่งใช้วัสดุเหลือทิ้งทั้ง 3 ประเภทในปริมาณที่มากขึ้น ยิ่งส่งผลให้ประสิทธิภาพการหลอมตัวลดลงมากขึ้นด้วย แต่สำหรับการใช้แร่โซเดียมเฟลด์สปาร์เป็นตัวช่วยหลอมเพียงอย่างเดียวไม่

พบการเปลี่ยนแปลงดังกล่าว นั่นคือ การหลอมตัวจะมากขึ้นเรื่อยๆ เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น สังเกตได้จากค่าความหนาแน่นที่เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ในกราฟจากการทดลองทั้ง 2 ครั้ง

ดังนั้น เมื่อพิจารณาผลการทดลอง ทั้งจากค่าการหดตัวเชิงเส้น และค่าความหนาแน่นของชิ้นงานหลังเผา จึงสรุปโดยรวมได้ว่า การใช้วัสดุเหลือทิ้งทั้ง 3 ประเภทเป็นตัวช่วยหลอมทดแทนแร่โซเดียมเฟลด์สปาร์ในปริมาณต่างๆ นั้น ให้ผลที่ดีกว่าการใช้แร่โซเดียมเฟลด์สปาร์เป็นตัวช่วยหลอมเพียงอย่างเดียว แต่จะต้องควบคุมปริมาณการใช้ไม่ให้มากเกินไป นั่นคือ ไม่ควรแทนที่แร่โซเดียมเฟลด์สปาร์เกิน 70% (28% ในสูตรเนื้อดิน) และควรทำการเผาชิ้นงานเฉพาะที่อุณหภูมิต่ำๆ เท่านั้น (ไม่เกิน $1,100^{\circ}\text{C}$) โดยพบว่า กากตะกอนเคลือบพริตมีประสิทธิภาพในการเป็นตัวช่วยหลอมได้มากกว่าเศษแก้วโบโรซิลิเกต และเศษแก้วโซดาไลม์ ซึ่งให้ผลที่แตกต่างกันไม่ชัดเจนนัก

พบว่า ผลที่ได้จากการทดลองดังกล่าว มีความสอดคล้องกับผลงานวิจัยของ Matteucci และคณะ (2002) รวมถึง Luz และ Ribeiro (2007) ที่ได้ทำการทดลองโดยแทนที่แร่โซเดียมเฟลด์สปาร์ในสูตรกระเบื้องเซรามิกชนิดพอร์ซเลน-สโตนแวร์ ด้วยเศษแก้วโซดาไลม์ในปริมาณแตกต่างกัน โดย Matteucci และคณะ พบว่า การใช้แก้วโซดาไลม์ในปริมาณ 10% และเผาขึ้นทดสอบที่อุณหภูมิสูง $1,120-1,200^{\circ}\text{C}$ จะส่งผลกระทบต่อชิ้นงานหลังเผาในด้านลบ ได้แก่ ค่าความหนาแน่นทั้งก้อน (Bulk density) และค่าความแข็งแรงของชิ้นงานมีค่าลดลง ในขณะที่ค่าการหดตัว (Shrinkage) และค่ารูพรุนปิด (Closed porosity) มีค่าที่เพิ่มขึ้น ซึ่ง Luz และ Ribeiro ก็ได้ผลการทดลองในทำนองเดียวกันนี้ โดยพบเพิ่มเติมว่า การเพิ่มขึ้นของปริมาณผงแก้วบด จะส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของความพรุนตัวในเนื้อชิ้นงาน ทำให้ค่าความแข็งแรงของชิ้นงานลดลงด้วย และสำหรับกระเบื้องเนื้อพอร์ซเลน-สโตนแวร์นั้น ไม่สามารถใช้ผงแก้วบดเป็นฟลักซ์ร่วมกับแร่โซเดียมเฟลด์สปาร์ได้ในปริมาณที่มากถึง 5% เนื่องจากส่งผลต่อค่าความต้านทานรอยขีดข่วน (Abrasion resistance) ที่ไม่ผ่านตามเกณฑ์มาตรฐาน ISO 10545-6 ของกระเบื้องชนิดนี้อีกด้วย

แต่สำหรับงานวิจัยของ Andreola และคณะ (2008) พบว่าให้ผลที่ไม่ค่อยเหมือนกันเท่าใดนัก กล่าวคือ Andreola ทำการทดลองแล้วพบว่า การแทนที่แร่โซเดียมเฟลด์สปาร์ในสูตรกระเบื้องพอร์ซเลน-สโตนแวร์ด้วยของเสียประเภทแก้ว CRT ในปริมาณ 5% โดยน้ำหนัก เเผาชิ้นงานทดลองในช่วงอุณหภูมิ $1,000-1,250^{\circ}\text{C}$ จะส่งผลกระทบต่อกระบวนการหลอมตัวที่ดีขึ้นของเนื้อชิ้นงาน ได้แก่ ค่าการหดตัวเชิงเส้น ค่าความหนาแน่นที่ปรากฏ (Apparent density) และค่าความแข็งแรงของชิ้นงานมีค่าสูงขึ้น ส่วนค่าการดูดซึมน้ำ และความพรุนตัวโดยรวมมีค่าต่ำลง โดย

ชิ้นงานจะเริ่มหลอมตัวหลังจากอุณหภูมิเผา $1,100^{\circ}\text{C}$ เป็นต้นไป แต่สำหรับการใช้ในปริมาณที่สูง 35% โดยน้ำหนักในสูตรเนื้อดินนั้น จะให้ผลในด้านลบแทน

4.3.3 ผลการทดสอบการดูดซึมน้ำ

ค่าการดูดซึมน้ำ (Water absorption) เป็นการหาสัดส่วนของปริมาตรรูพรุนเปิด (Open pore volume) ที่มีอยู่ในเนื้อชิ้นงานเทียบกับค่าน้ำหนักของชิ้นงาน (Ryan and Radford, 1997) ดังนั้น การทดสอบหาค่าการดูดซึมน้ำของชิ้นงานหลังผ่านกระบวนการเผา จึงเป็นการบ่งบอกถึงปริมาณรูพรุนเปิดที่มีอยู่ในเนื้อชิ้นงานหลังผ่านการเผา ซึ่งในกระบวนการเผาทากเนื้อดินมีการหลอมตัวที่ดี จะทำให้ปริมาณรูพรุนที่หลงเหลืออยู่ภายในเนื้อชิ้นงานทั้งรูพรุนชนิดเปิดและปิด มีปริมาณน้อยลงตามไปด้วย เราจึงสามารถใช้ค่าการดูดซึมน้ำของชิ้นงานหลังเผาบ่งบอกระดับในการหลอมตัวของเนื้อดินได้ ซึ่งเชื่อมโยงไปถึงการบ่งบอกประสิทธิภาพในการเป็นตัวช่วยหลอมของวัสดุเหลือทิ้งประเภทต่างๆ ที่นำมาใช้ในการทดลองด้วย

สำหรับผลิตภัณฑ์กระเบื้องเซรามิกนั้น มีการจัดแบ่งประเภทและควบคุมระดับคุณภาพของผลิตภัณฑ์โดยใช้ค่าการดูดซึมน้ำเป็นตัวที่บ่งชี้ด้วย โดยสำหรับมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมของประเทศไทย (มอก.) ได้มีการจัดแบ่งประเภทของกระเบื้องตามค่าการดูดซึมน้ำ ดังนี้

- กระเบื้องปูพื้นประเภทดูดซึมน้ำต่ำ ค่าการดูดซึมน้ำต้องไม่เกิน 3% (มอก. 37-2529)
- กระเบื้องปูพื้นประเภทดูดซึมน้ำปานกลางค่อนข้างต่ำ (มอก. 37-2529) และกระเบื้องประเภทปูผนังภายนอกอาคาร (มอก. 614-2529) ค่าการดูดซึมน้ำต้องไม่เกิน 6%
- กระเบื้องประเภทปูผนังภายในอาคาร ค่าการดูดซึมน้ำต้องไม่เกิน 18% (มอก. 613-2529)

ในงานวิจัยนี้ ได้ทำการทดลองโดยอ้างอิงมาตรฐานของกระเบื้องประเภทปูผนัง ทั้งภายในและภายนอกอาคาร ซึ่งเป็นชนิดของผลิตภัณฑ์ที่ห้างหุ้นส่วนจำกัด กระเบื้องไทย ผลิตภัณฑ์ ปัจจุบัน ผลการทดสอบค่าการดูดซึมน้ำของชิ้นงานหลังเผาสูตรต่างๆ ในการทดลองทั้งสองครั้ง แสดงดังตารางที่ 4.7 – 4.8 และแสดงเป็นกราฟในภาพที่ 4.5 – 4.6 ตามลำดับ

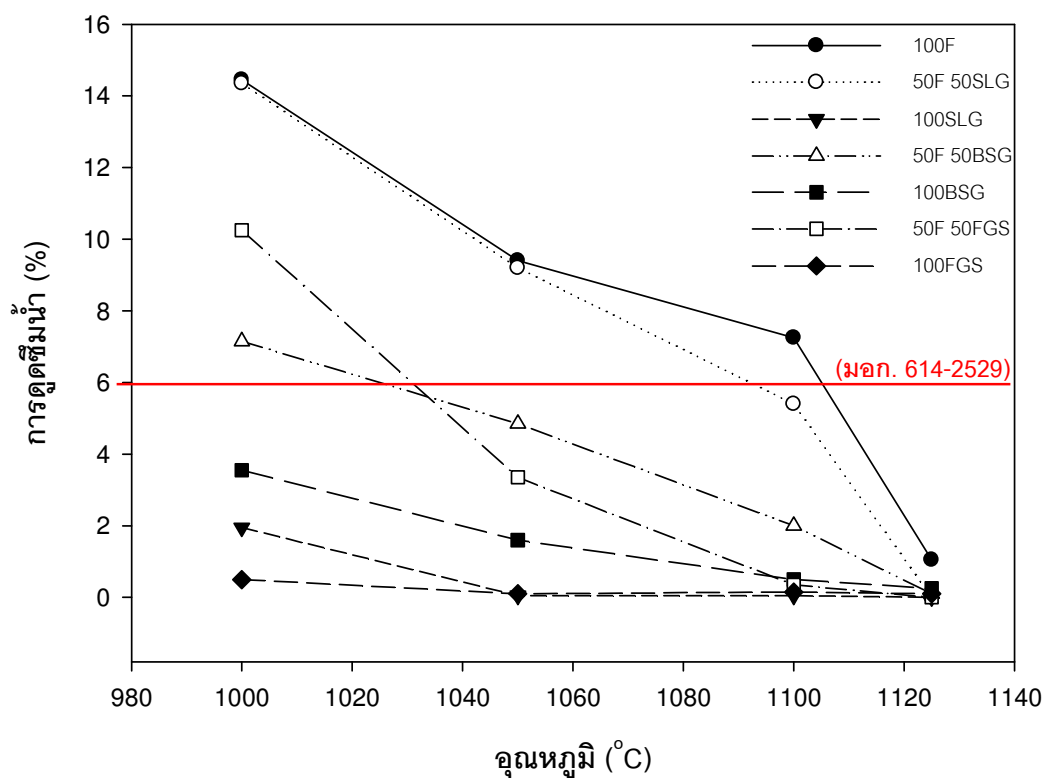
ตารางที่ 4.7

ผลการทดสอบการดูดซึมน้ำของชิ้นงานหลังเผาที่อุณหภูมิต่างๆ ในการทดลองครั้งที่ 1

อุณหภูมิเผา (°C)	ชื่อสูตร / ค่าการดูดซึมน้ำ (%)						
	100F (Ref.)	50F 50SLG	100SLG	50F 50BSG	100BSG	50F 50FGS	100FGS
1000	14.45	14.35	1.95	7.15	3.55	10.25	0.50
1050	9.40	9.20	0.05	4.85	1.60	3.35	0.10
1100	7.25	5.40	0.05	2.00	0.50	0.35	0.15
1125	1.05	0.00	0.00	0.10	0.25	0.00	0.10

ภาพที่ 4.5

กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดซึมน้ำ และอุณหภูมิในการเผาชิ้นงาน
ในการทดลองครั้งที่ 1



ตารางที่ 4.8

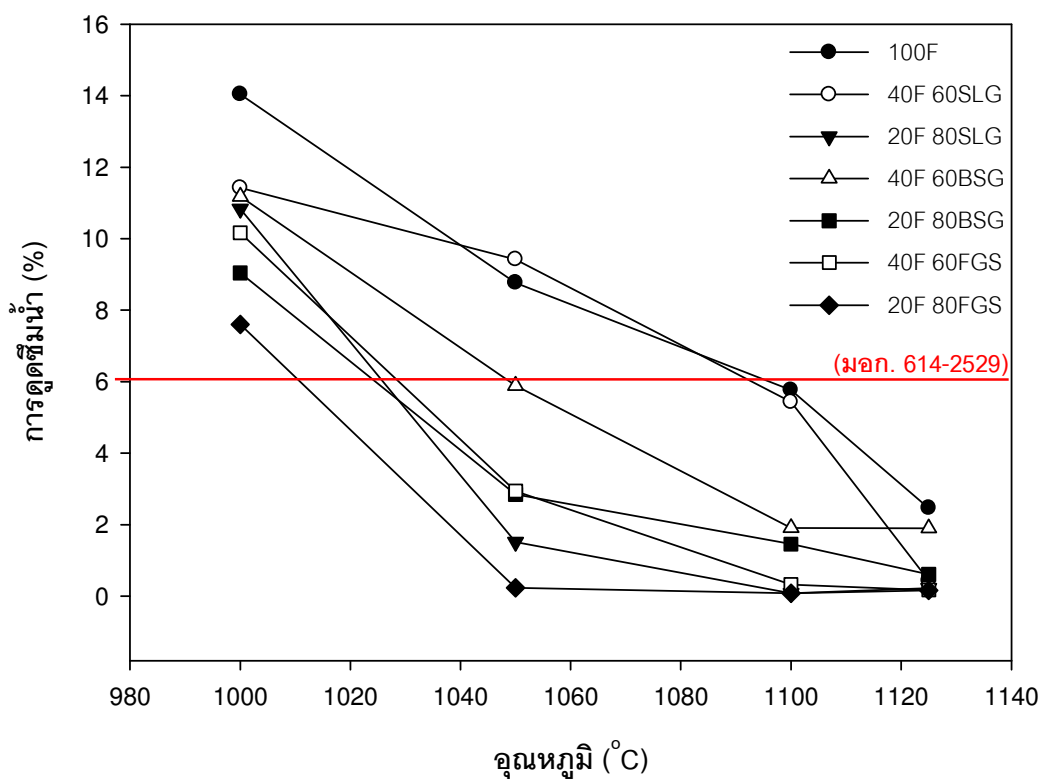
ผลการทดสอบการดูดซึมน้ำของชิ้นงานหลังเผาที่อุณหภูมิต่างๆ ในการทดลองครั้งที่ 2

อุณหภูมิเผา (°C)	ชื่อสูตร / ค่าการดูดซึมน้ำ (%)								
	100F (Ref.)	50F 50SLG	40F 60SLG	30F 70SLG	20F 80SLG	50F 50BSG	40F 60BSG	30F 70BSG	20F 80BSG
1000	14.04±0.76	12.98±0.60	11.42±0.40	9.68±0.86	10.83±0.05	11.31±0.98	11.18±0.35	8.41±0.27	9.04±0.45
1050	8.77±0.25	10.27±0.50	9.42±0.65	4.21±0.64	1.52±0.43	6.50±0.85	5.89±0.36	3.75±0.71	2.85±0.25
1100	5.77±0.54	7.72±0.93	5.43±0.30	0.61±0.44	0.08±0.07	2.50±0.93	1.91±0.78	0.62±0.30	1.46±0.99
1125	2.47±0.77	1.68±0.50	0.44±0.41	0.02±0.03	0.22±0.06	0.74±0.19	1.90±0.51	0.14±0.05	0.61±0.27

ตารางที่ 4.8 (ต่อ)

อุณหภูมิเผา (°C)	ชื่อสูตร / ค่าการดูดซึมน้ำ (%)			
	50F 50FGS	40F 60FGS	30F 70FGS	20F 80FGS
1000	10.56±0.53	10.16±0.35	9.37±0.41	7.60±0.72
1050	2.89±0.27	2.94±0.72	0.64±0.09	0.23±0.11
1100	0.19±0.04	0.33±0.06	0.17±0.12	0.08±0.03
1125	0.12±0.03	0.17±0.05	0.09±0.10	0.16±0.20

ภาพที่ 4.6
กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดซึมน้ำ และอุณหภูมิในการเผาขึ้นงาน
ในการทดลองครั้งที่ 2



จากผลการทดลองทั้งสองครั้ง พบว่า ค่าการดูดซึมน้ำของชิ้นงานหลังเผาที่ได้เป็นไปตามทฤษฎี และสอดคล้องกับผลงานวิจัยต่างๆ ที่ผ่านมาของ Matteucci และคณะ (2002) Luz และ Ribeiro (2007) Raimondo และคณะ (2007) และ Andreola และคณะ (2008) ดังได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 2 กล่าวคือ ค่าการดูดซึมน้ำของชิ้นงานหลังเผาจะมีค่าลดลงตามอุณหภูมิในการเผาที่เพิ่มขึ้น ซึ่งหมายถึง ความสามารถในการหลอมตัวของเนื้อดินที่เพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาขึ้นงานด้วย โดยสังเกตได้ว่า ชิ้นงานที่ใช้วัสดุเหลือทิ้งทั้ง 3 ประเภทเป็นตัวช่วยหลอมทดแทนแร่ไฮเดียมเฟลด์สปาร์ในปริมาณต่างๆ นั้น โดยส่วนใหญ่จะมีค่าการดูดซึมน้ำที่น้อยกว่าชิ้นงานสูตรมาตรฐานอ้างอิง ซึ่งค่าการดูดซึมน้ำจะลดลงตามปริมาณการใช้วัสดุเหลือทิ้งแต่ละประเภทในสูตรที่เพิ่มขึ้น ในช่วงการเผาที่อุณหภูมิตั้งแต่ 1,100°C ลงไป (1,000, 1,050 และ 1,100°C) แต่สำหรับการเผาที่อุณหภูมิสูง 1,125°C กลับพบว่า ค่าการดูดซึมน้ำของการใช้เศษแก้ว

โซดาไลม์ และกากตะกอนเคลือบฟritเป็นตัวช่วยหลอมที่ปริมาณ 80% นั้นมีค่าที่เพิ่มขึ้นอีกครั้ง ซึ่งหมายถึง ประสิทธิภาพในการหลอมตัวของวัสดุเหลือทิ้งทั้ง 2 ประเภทดังกล่าว อาจลดลงที่การเผา อุณหภูมิสูงขึ้น ดังนั้น จึงสรุปได้ว่า การใช้วัสดุเหลือทิ้งทั้ง 3 ประเภทเป็นตัวช่วยหลอมทดแทนแร่ โซเดียมเฟลด์สปาร์นั้น จะมีประสิทธิภาพสูงสุด ณ การเผาที่อุณหภูมิต่ำๆ ไม่เกิน $1,100^{\circ}\text{C}$ และพบว่า กากตะกอนเคลือบฟrit มีประสิทธิภาพในการเป็นตัวช่วยหลอมได้มากกว่าเศษแก้วโซดาไลม์ และเศษแก้วโบโรซิลิเกต โดยเศษแก้วทั้ง 2 ประเภทให้ผลการทดลองที่ใกล้เคียงกัน ไม่สามารถสรุปได้อย่างชัดเจน ซึ่งผลการทดสอบค่าการดูดซึมน้ำมีความสอดคล้องกับผลการทดสอบ ค่าการหดตัวเชิงเส้น และค่าความหนาแน่นของชิ้นงานหลังเผาที่ผ่านมาด้วย

จากผลการทดสอบทั้งหมด พบว่า ชิ้นงานทุกสูตรมีค่าการดูดซึมน้ำผ่านตามเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมกระเบื้องประเภทผนังภายใน (มอก. 613- 2529) ซึ่งระบุไว้ว่า จะต้องมียค่าการดูดซึมน้ำไม่เกิน 18% ถึงแม้จะเผาที่อุณหภูมิต่ำสุดก็ตาม ($1,000^{\circ}\text{C}$) แต่ถ้าอ้างอิงตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมกระเบื้องประเภทผนังภายนอก (มอก. 614- 2529) ซึ่งจะต้องมียค่าการดูดซึมน้ำไม่เกิน 6% นั้น พบว่า ชิ้นงานสูตรมาตรฐานที่ใช้อ้างอิง (ใช้แร่โซเดียมเฟลด์สปาร์เป็นตัวช่วยหลอมแต่เพียงอย่างเดียว) จะผ่านตามเกณฑ์มาตรฐานนี้ เฉพาะการเผาที่อุณหภูมิสูง $1,125^{\circ}\text{C}$ เท่านั้น แต่สำหรับชิ้นงานสูตรที่ใช้วัสดุเหลือทิ้งทั้ง 3 ประเภททดแทนแร่ โซเดียมเฟลด์สปาร์ในปริมาณต่างๆ นั้น สามารถมีค่าการดูดซึมน้ำผ่านตามเกณฑ์มาตรฐานนี้ ตั้งแต่การเผาที่อุณหภูมิต่ำสุด $1,000^{\circ}\text{C}$ สำหรับการใช้ในปริมาณ 100% ของการแทนที่ แต่สำหรับการใช้ปริมาณ 80% ของการแทนที่นั้น พบว่าค่าการดูดซึมน้ำจะผ่านตามเกณฑ์มาตรฐานนี้ที่อุณหภูมิเผาตั้งแต่ $1,050^{\circ}\text{C}$ ขึ้นไป โดยปริมาณการใช้วัสดุเหลือทิ้งที่เพิ่มขึ้น จะมีผลทำให้ค่าการดูดซึมน้ำลดลงไปด้วย ดังนั้น จึงสามารถสรุปได้ว่า วัสดุเหลือทิ้งทั้ง 3 ประเภทสามารถช่วยลดอุณหภูมิในการเผาผลิตภัณฑ์กระเบื้องเซรามิกประเภทผนังทั้งภายในและภายนอกอาคารลงได้

4.3.4 ผลการทดสอบความบิดเบี้ยวของชิ้นงาน

การทดสอบความบิดเบี้ยวของชิ้นงานกระเบื้องหลังเผา เป็นคุณสมบัติที่โรงงานผลิตภัณฑ์กระเบื้องเซรามิกจำเป็นต้องทดสอบให้ผ่านตามเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมไทย (มอก.) ซึ่งในงานวิจัยนี้ อ้างอิงตามเกณฑ์มาตรฐานสำหรับการผลิตกระเบื้องเซรามิกประเภทผนังทั้งภายในและภายนอกอาคาร มอก. 613-2529 และ มอก. 614-2529 ตามลำดับ โดยการวัดค่าความบิดเบี้ยวของชิ้นงานตามเกณฑ์มาตรฐานของ มอก. นั้น ได้แบ่งออกเป็นค่าความบิดเบี้ยว

ในลักษณะนูนขึ้นและแอ่นลงตามแนวขอบและตามแนวเส้นทแยงมุมของกระเบื้อง และค่าความบิดเบี้ยวในลักษณะโค้งออกและเว้าเข้าตามแนวขอบของกระเบื้อง ดังจะได้กล่าวถึงผลการทดสอบต่อไป

ค่าความบิดเบี้ยวของชิ้นงานหลังเผา จะมีความสัมพันธ์กับการหลอมตัวของเนื้อดิน ในขณะทำการเผาชิ้นงานกระเบื้อง โดยเนื้อดินที่มีการหลอมตัวขณะเผามากจะมีโอกาสเกิดความบิดเบี้ยวหลังการเผาได้ง่ายกว่าด้วย เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงสถานะและโครงสร้างของเนื้อดิน ในขณะหลอมตัวจากการเผา โดยในขณะเผาเนื้อดินจะหลอมตัวเข้าหากันทำให้อยู่ในสถานะเฟสของเหลวมากกว่าของแข็งจึงเกิดการเสียรูปได้ง่าย

4.3.4.1 ผลการทดสอบความบิดเบี้ยวของชิ้นงานในลักษณะนูนขึ้นและแอ่นลง

การทดสอบความบิดเบี้ยวของชิ้นงานหลังเผาในลักษณะนูนขึ้นและแอ่นลงจะทดสอบบริเวณแนวขอบทั้งสี่ด้าน และแนวเส้นทแยงมุมทั้งสองเส้นของชิ้นงานกระเบื้อง แล้วรายงานผลค่าสูงสุดที่วัดได้ โดยคิดเป็นเปอร์เซ็นต์เทียบกับความยาวของจุดอ้างอิง 2 จุดของเส้นที่วัดตามขอบและตามแนวเส้นทแยงมุมของกระเบื้อง ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก. 613 และ 614-2529 ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 3 โดยข้อกำหนดตามมาตรฐานระบุไว้ว่า สำหรับกระเบื้องที่มีขนาดไม่เกิน 200 มิลลิเมตร ซึ่งเป็นขนาดที่ใช้ในงานวิจัยนี้ จะต้องมีความบิดเบี้ยวหลังเผา ผ่านตามเกณฑ์มาตรฐาน ดังนี้

- ความบิดเบี้ยวในลักษณะนูนขึ้นและแอ่นลงตามแนวขอบ สำหรับมาตรฐานการผลิตกระเบื้องบุผนังภายในอาคาร มอก. 613-2529 ต้องมีค่านูนขึ้นไม่เกินร้อยละ 0.4 และค่าแอ่นลงไม่เกินร้อยละ 0.3 และสำหรับมาตรฐานการผลิตกระเบื้องบุผนังภายนอกอาคาร มอก. 614-2529 จะต้องมีค่านูนขึ้นและแอ่นลง ไม่เกินร้อยละ 1.5
- ความบิดเบี้ยวในลักษณะนูนขึ้นและแอ่นลงตามแนวเส้นทแยงมุม สำหรับมาตรฐานการผลิตกระเบื้องบุผนังภายในอาคาร มอก. 613-2529 ต้องมีค่านูนขึ้นไม่เกินร้อยละ 0.3 และค่าแอ่นลงไม่เกินร้อยละ 0.2 และสำหรับมาตรฐานการผลิตกระเบื้องบุผนังภายนอกอาคาร มอก. 614-2529 จะต้องมีค่านูนขึ้นและแอ่นลงไม่เกินร้อยละ 0.75

ผลการทดสอบค่าความบิดเบี้ยวในลักษณะนูนขึ้นและแอ่นลง ทั้งตามแนวขอบและตามแนวเส้นทแยงมุมของชิ้นงานหลังเผาจากการทดลองทั้ง 2 ครั้ง แสดงดังตารางที่ 4.9 – 4.12 และแสดงเป็นกราฟในภาพที่ 4.7 – 4.10 ตามลำดับ

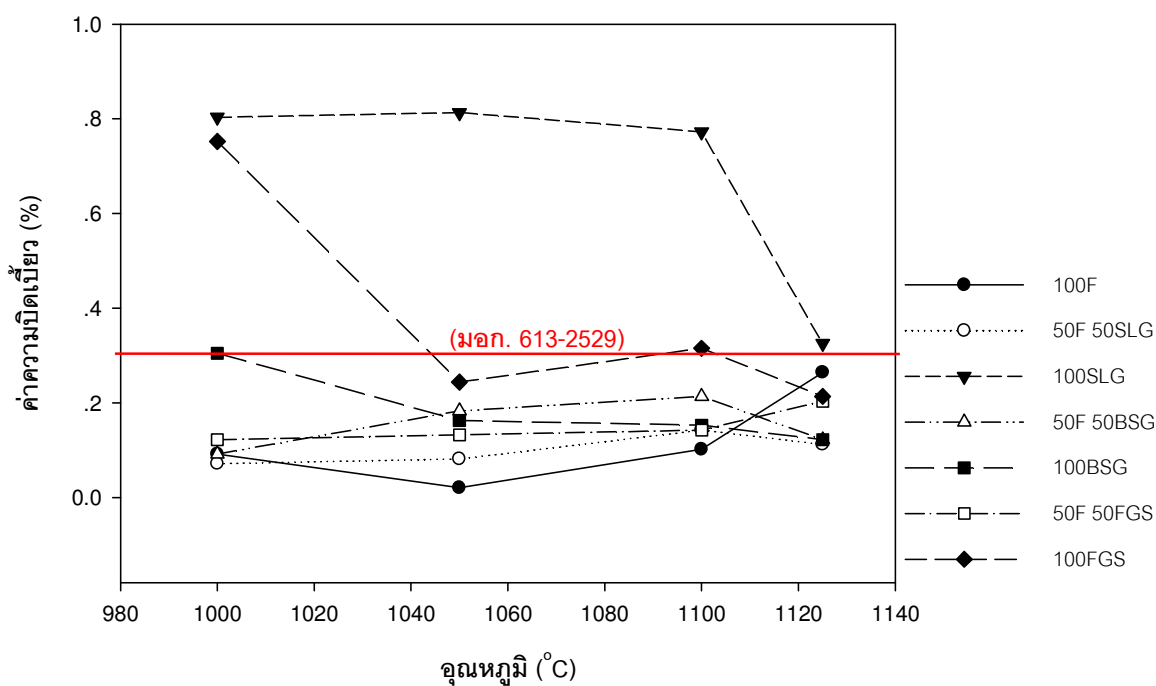
ตารางที่ 4.9

ผลการทดสอบความบิดเบี้ยวในลักษณะนูนขึ้นและแอ่นลงตามแนวขอบของชิ้นงานหลังเผาที่อุณหภูมิต่างๆ ในการทดลองครั้งที่ 1

อุณหภูมิเผา (°C)	ชื่อสูตร / ค่าความบิดเบี้ยวนูนขึ้น-แอ่นลงตามแนวขอบ (%)						
	100F (Ref.)	50F 50SLG	100SLG	50F 50BSG	100BSG	50F 50FGS	100FGS
1000	0.09	0.07	0.80	0.09	0.30	0.12	0.75
1050	0.02	0.08	0.81	0.18	0.16	0.13	0.24
1100	0.10	0.14	0.77	0.21	0.15	0.14	0.32
1125	0.26	0.11	0.33	0.12	0.12	0.20	0.21

ภาพที่ 4.7

กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความบิดเบี้ยวนูนขึ้น - แอ่นลงตามแนวขอบและอุณหภูมิในการเผาชิ้นงาน ในการทดลองครั้งที่ 1



ตารางที่ 4.10

ผลการทดสอบความบิดเบี้ยวในลักษณะนูนขึ้นและแอ่นลงตามแนวขอบของชิ้นงานหลังเผาที่อุณหภูมิต่างๆ ในการทดลองครั้งที่ 2

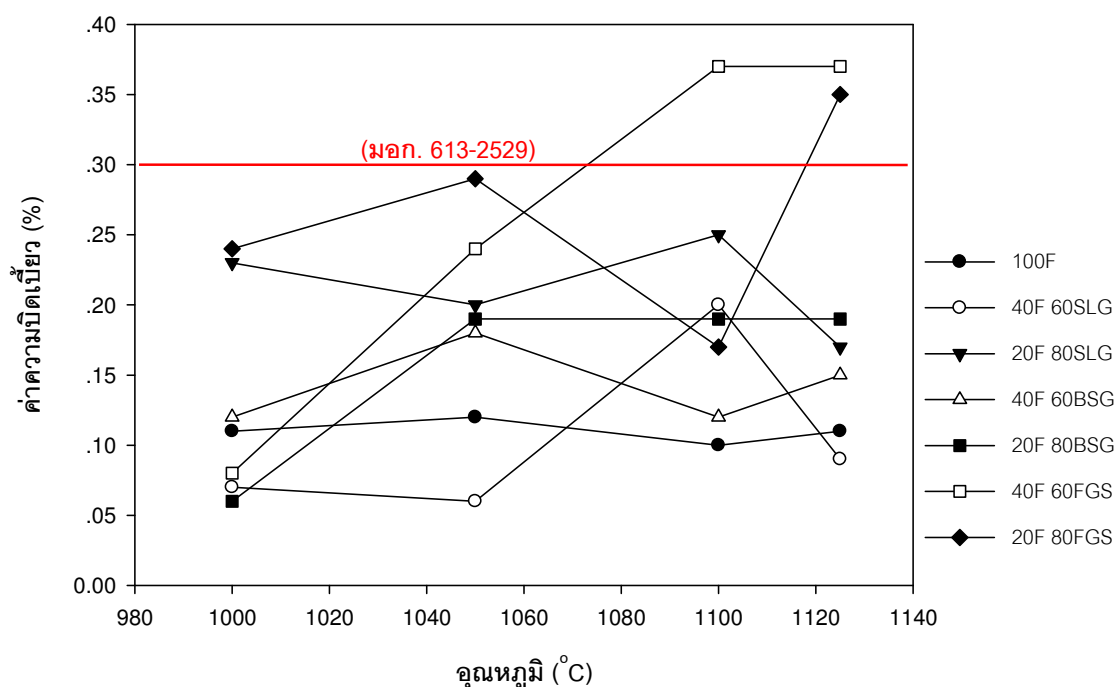
อุณหภูมิเผา (°C)	ชื่อสูตร / ค่าความบิดเบี้ยวขึ้น-แอ่นลงตามแนวขอบ (%)								
	100F (Ref.)	50F 50SLG	40F 60SLG	30F 70SLG	20F 80SLG	50F 50BSG	40F 60BSG	30F 70BSG	20F 80BSG
1000	0.11±0.03	0.08±0.03	0.07±0.01	0.13±0.04	0.23±0.01	0.06±0.03	0.12±0.01	0.16±0.01	0.06±0.00
1050	0.12±0.09	0.08±0.02	0.06±0.03	0.20±0.05	0.20±0.07	0.11±0.04	0.18±0.09	0.16±0.07	0.19±0.09
1100	0.10±0.03	0.07±0.05	0.20±0.08	0.25±0.02	0.25±0.09	0.26±0.05	0.12±0.08	0.14±0.05	0.19±0.05
1125	0.11±0.03	0.13±0.05	0.09±0.05	0.10±0.03	0.17±0.03	0.21±0.07	0.15±0.07	0.20±0.08	0.19±0.09

ตารางที่ 4.10 (ต่อ)

อุณหภูมิเผา (°C)	ชื่อสูตร / ค่าความบิดเบี้ยวขึ้น-แอ่นลงตามแนวขอบ (%)			
	50F 50FGS	40F 60FGS	30F 70FGS	20F 80FGS
1000	0.12±0.04	0.08±0.03	0.10±0.02	0.24±0.03
1050	0.26±0.05	0.24±0.07	0.27±0.07	0.29±0.09
1100	0.45±0.08	0.37±0.06	0.26±0.09	0.17±0.02
1125	0.20±0.04	0.37±0.05	0.33±0.05	0.35±0.05

ภาพที่ 4.8

กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความบิดเบี้ยวขึ้น - แ่นลงตามแนวขอบ
และอุณหภูมิในการเผาขึ้นงาน ในการทดลองครั้งที่ 2



จากผลการทดลองทั้ง 2 ครั้ง พบว่า หากพิจารณาตามเกณฑ์มาตรฐานการผลิต กระเบื้องบุผนังภายนอกอาคาร มอก. 614-2529 ซึ่งต้องมีค่าความบิดเบี้ยวตามแนวขอบใน ลักษณะนูนขึ้นและแอ่นลงไม่เกินร้อยละ 1.5 นั้น ขึ้นงานทุกสูตรมีค่าผ่านตามเกณฑ์มาตรฐาน ทั้งหมด แต่หากพิจารณาตามเกณฑ์มาตรฐานของการผลิตกระเบื้องบุผนังภายในอาคาร มอก. 613-2529 ซึ่งต้องมีค่าความบิดเบี้ยวตามแนวขอบในลักษณะนูนขึ้นไม่เกินร้อยละ 0.4 และแอ่นลง ไม่เกินร้อยละ 0.3 พบว่า ผลจากการทดลองในครั้งนี้ ชิ้นงานที่ใช้เศษแก้วโซดาไลม์และกาก ตะกอนเคลือบพริตแทนที่แร่โซเดียมเฟลด์สปาร์ในปริมาณ 100% โดยน้ำหนักนั้น มีค่าความบิด เบี้ยวไม่ผ่านตามเกณฑ์มาตรฐาน (มีค่าเกินร้อยละ 0.3) จึงทำการทดลองซ้ำในครั้งที่ 2 โดยลด ปริมาณการใช้วัสดุเหลือทิ้งทั้ง 3 ประเภทลง เป็นการแทนที่ในปริมาณ 50 60 70 และสูงสุดที่ 80% โดยน้ำหนัก ผลที่ได้พบว่า เฉพาะชิ้นงานที่ใช้กากตะกอนเคลือบพริตเป็นตัวช่วยหลอมเท่านั้น ที่มี ค่าความบิดเบี้ยวตามแนวขอบในลักษณะนูนขึ้นและแอ่นลง ไม่ผ่านตามเกณฑ์มาตรฐาน และจะ

ไม่ผ่านเฉพาะการเผาที่อุณหภูมิสูง 1,100 และ 1,125°C เท่านั้น ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่า กากตะกอนเคลือบพริตมีผลต่อการบิดเบี้ยวในลักษณะนูนขึ้นและแอ่นลงตามแนวขอบของชิ้นงานหลังเผามากที่สุด และจะมีผลมากขึ้นกับการเผาที่อุณหภูมิสูงตั้งแต่ 1,100°C ขึ้นไป แต่สามารถใช้ได้กับการเผาที่อุณหภูมิต่ำๆ ซึ่งถือเป็นผลดีเนื่องจากในงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ที่ต้องการลดอุณหภูมิในการเผาชิ้นงานให้ต่ำลงอยู่แล้วนั่นเอง

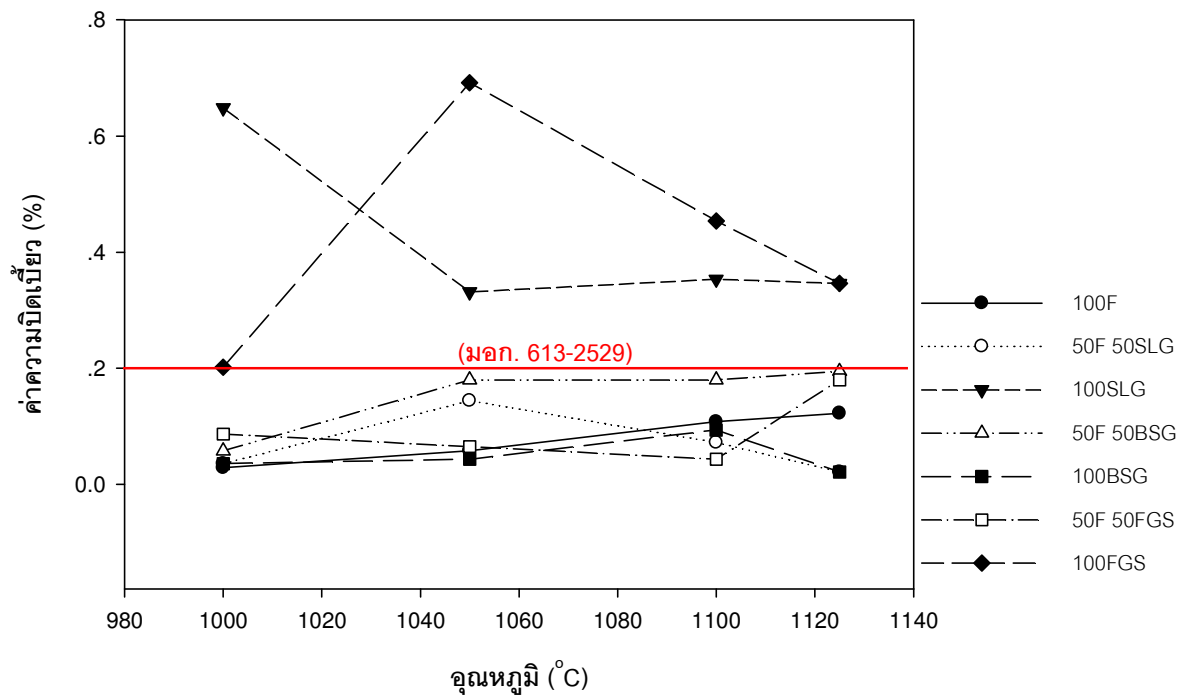
ตารางที่ 4.11

ผลการทดสอบความบิดเบี้ยวในลักษณะนูนขึ้นและแอ่นลงตามแนวเส้นทแยงมุม
ของชิ้นงานหลังเผาที่อุณหภูมิต่างๆ ในการทดลองครั้งที่ 1

อุณหภูมิเผา (°C)	ชื่อสูตร / ค่าความบิดเบี้ยวนูนขึ้น-แอ่นลงตามแนวเส้นทแยงมุม (%)						
	100F (Ref.)	50F 50SLG	100SLG	50F 50BSG	100BSG	50F 50FGS	100FGS
1000	0.03	0.04	0.65	0.06	0.04	0.09	0.20
1050	0.06	0.14	0.33	0.18	0.04	0.06	0.69
1100	0.11	0.07	0.35	0.18	0.09	0.04	0.45
1125	0.12	0.02	0.35	0.19	0.02	0.18	0.35

ภาพที่ 4.9

กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความบิดเบี้ยวขึ้น - แอนลงตามแนวเส้นทแยงมุม
และอุณหภูมิในการเผาขึ้นงาน ในการทดลองครั้งที่ 1



ตารางที่ 4.12

ผลการทดสอบความบิดเบี้ยวในลักษณะนูนขึ้นและแอ่นลงตามแนวเส้นทแยงมุมของชิ้นงานหลังเผาที่อุณหภูมิต่างๆ ในการทดลองครั้งที่ 2

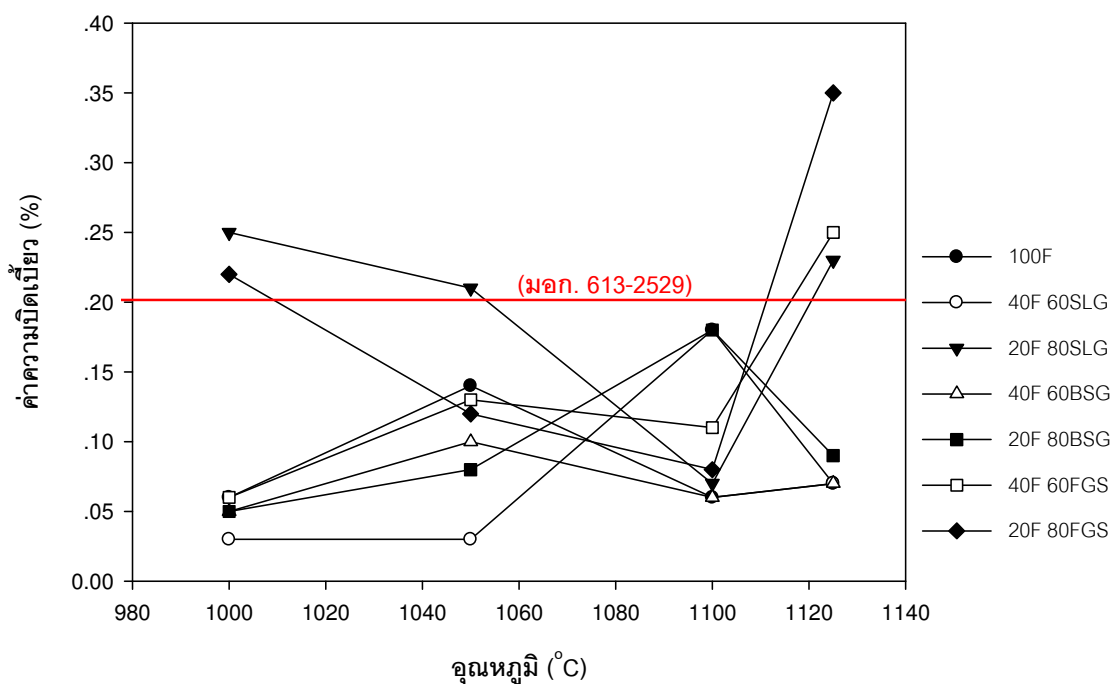
อุณหภูมิเผา (°C)	ชื่อสูตร / ค่าความบิดเบี้ยวขึ้น-แอ่นลงตามแนวเส้นทแยงมุม (%)								
	100F (Ref.)	50F 50SLG	40F 60SLG	30F 70SLG	20F 80SLG	50F 50BSG	40F 60BSG	30F 70BSG	20F 80BSG
1000	0.06±0.04	0.03±0.02	0.03±0.01	0.15±0.04	0.25±0.07	0.06±0.02	0.05±0.01	0.19±0.08	0.05±0.00
1050	0.14±0.06	0.04±0.04	0.03±0.02	0.20±0.01	0.21±0.09	0.07±0.02	0.10±0.04	0.10±0.02	0.08±0.06
1100	0.06±0.03	0.08±0.02	0.18±0.07	0.19±0.06	0.07±0.02	0.10±0.04	0.06±0.01	0.11±0.04	0.18±0.08
1125	0.07±0.02	0.16±0.03	0.07±0.04	0.09±0.04	0.23±0.02	0.08±0.06	0.07±0.04	0.08±0.07	0.09±0.06

ตารางที่ 4.12 (ต่อ)

อุณหภูมิเผา (°C)	ชื่อสูตร / ค่าความบิดเบี้ยวขึ้น-แอ่นลงตามแนวเส้นทแยงมุม (%)			
	50F 50FGS	40F 60FGS	30F 70FGS	20F 80FGS
1000	0.05±0.02	0.06±0.02	0.04±0.01	0.22±0.08
1050	0.05±0.01	0.13±0.07	0.15±0.09	0.12±0.03
1100	0.18±0.06	0.11±0.03	0.10±0.08	0.08±0.07
1125	0.18±0.07	0.25±0.07	0.27±0.09	0.35±0.06

ภาพที่ 4.10

กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความบิดเบี้ยวขึ้น - แอนลงตามแนวเส้นทแยงมุม
และอุณหภูมิในการเผาขึ้นงาน ในการทดลองครั้งที่ 2



จากผลการทดลองทั้ง 2 ครั้ง พบว่า ค่าความบิดเบี้ยวในลักษณะนูนขึ้นและแอ่นลงตามแนวเส้นทแยงมุมของชิ้นงานหลังเผาทุกสูตร มีค่าผ่านตามเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์กระเบื้องปูผนังภายนอกอาคาร มอก. 614-2529 ซึ่งค่าความบิดเบี้ยวในลักษณะนูนขึ้นและแอ่นลงต้องไม่เกินร้อยละ 0.75 แต่สำหรับมาตรฐานการผลิตกระเบื้องปูผนังภายในอาคาร มอก. 613-2529 ซึ่งต้องมีค่าความบิดเบี้ยวตามแนวเส้นทแยงมุมในลักษณะนูนขึ้นไม่เกินร้อยละ 0.3 และแอ่นลงไม่เกินร้อยละ 0.2 นั้น ชิ้นงานที่ใช้เศษแก้วชนิดโซดาไลม์ และกากตะกอนเคลือบฟritเป็นตัวช่วยหลอมแทนที่แร่โซเดียมเฟลด์สปาร์ มีค่าความบิดเบี้ยวไม่ผ่านตามเกณฑ์มาตรฐาน โดยสำหรับเศษแก้วโซดาไลม์ พบว่า การใช้แทนที่ในปริมาณตั้งแต่ 70% ขึ้นไป จะทำให้ค่าความบิดเบี้ยวไม่ผ่านตามเกณฑ์มาตรฐาน ส่วนการใช้กากตะกอนเคลือบฟritนั้น พบว่า การแทนที่ในปริมาณตั้งแต่ 60% ขึ้นไปจะมีผลทำให้ค่าความบิดเบี้ยวไม่ผ่านตามเกณฑ์มาตรฐาน โดยเฉพาะการเผาที่อุณหภูมิสูง 1,125°C ดังนั้น จึงสรุปได้ว่า การใช้เศษแก้วชนิดโซดาไลม์ และกากตะกอน

เคลือบฟริตเป็นตัวช่วยหลอมทดแทนแร่โซเดียมเฟลด์สปาร์นั้น มีผลต่อความบิดเบี้ยวในลักษณะนูนขึ้นและแอ่นลงของชิ้นงานหลังเผา ทั้งตามแนวขอบและตามแนวเส้นทแยงมุมของชิ้นงาน โดยจะมีผลมากขึ้นกับการใช้ในปริมาณที่สูงขึ้น และทำการเผาชิ้นงานที่อุณหภูมิสูง แต่สำหรับเศษแก้วชนิดโบโรซิลิเกตนั้น ไม่มีผลต่อค่าความบิดเบี้ยวในลักษณะนูนขึ้นและแอ่นลงของชิ้นงานหลังเผาดังนั้น จึงถือได้ว่าเป็นวัสดุเหลือทิ้งประเภทเดียวที่สามารถนำมาใช้เป็นตัวช่วยหลอมได้ โดยไม่ส่งผลกระทบใดๆ ต่อความบิดเบี้ยวของชิ้นงานหลังเผาในลักษณะนูนขึ้นและแอ่นลง

4.3.4.2 ผลการทดสอบความบิดเบี้ยวของชิ้นงานในลักษณะโค้งออกและเว้าเข้า

นอกจากการทดสอบความบิดเบี้ยวของชิ้นงานหลังเผาในลักษณะนูนขึ้นและแอ่นลงแล้ว ตามมาตรฐานการผลิตกระเบื้องปูผนังเซรามิกทั้งประเภทภายในและภายนอกอาคาร ยังต้องทดสอบความบิดเบี้ยวในลักษณะโค้งออกและเว้าเข้าตามแนวขอบของกระเบื้องอีกด้วย โดยตามเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมกระเบื้องเซรามิกปูผนังภายใน มอก. 613-2529 จะต้องมียุทธค่าความบิดเบี้ยวในลักษณะโค้งออกและเว้าเข้าตามแนวขอบของกระเบื้อง ไม่เกินร้อยละ 0.5 และสำหรับมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมกระเบื้องเซรามิกปูผนังภายนอก มอก. 614-2529 จะต้องมียุทธค่าความบิดเบี้ยวในลักษณะโค้งออกและเว้าเข้าตามแนวขอบของกระเบื้อง ไม่เกินร้อยละ 0.75 ผลการทดสอบความบิดเบี้ยวในลักษณะโค้งออกและเว้าเข้าตามแนวขอบของชิ้นงานหลังผ่านการเผาที่อุณหภูมิต่างๆ ในการทดลองครั้งที่ 1 และครั้งที่ 2 แสดงดังตารางที่ 4.13 - 4.14 และแสดงเป็นกราฟในภาพที่ 4.11 - 4.12 ตามลำดับ

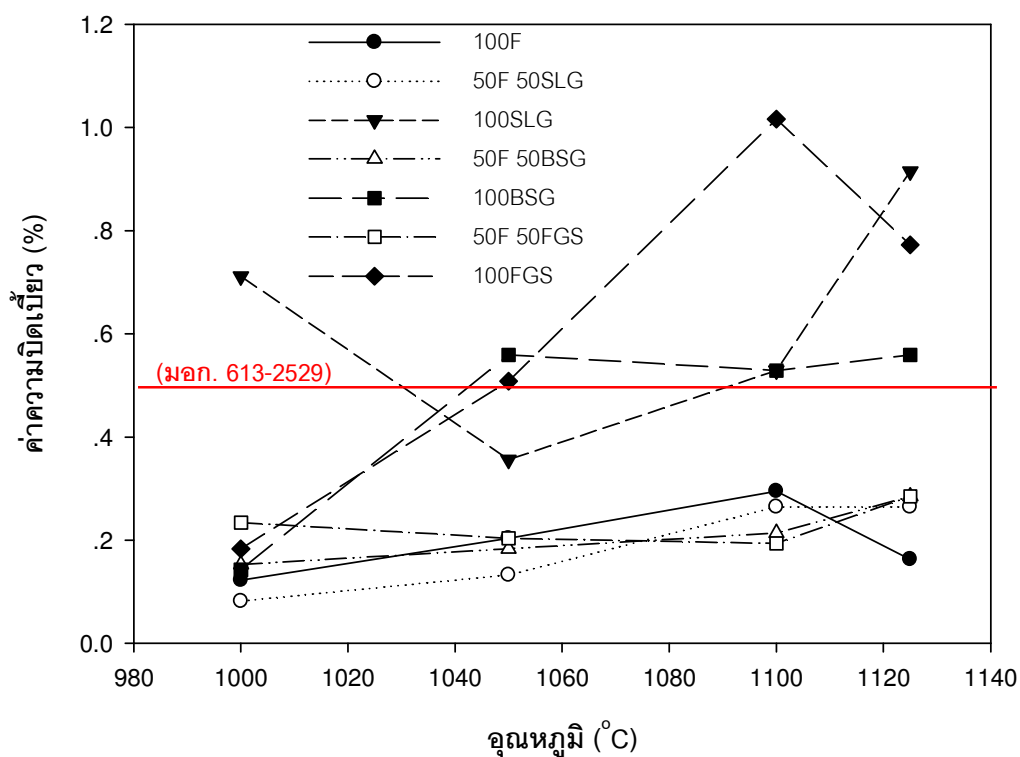
ตารางที่ 4.13

ผลการทดสอบความบิดเบี้ยวในลักษณะโค้งออกและเว้าเข้าตามแนวขอบ
ของชิ้นงานหลังเผาที่อุณหภูมิต่างๆ ในการทดลองครั้งที่ 1

อุณหภูมิเผา (°C)	ชื่อสูตร / ค่าความบิดเบี้ยวโค้งออก-เว้าเข้าตามแนวขอบ (%)						
	100F (Ref.)	50F 50SLG	100SLG	50F 50BSG	100BSG	50F 50FGS	100FGS
1000	0.12	0.08	0.71	0.15	0.14	0.23	0.18
1050	0.20	0.13	0.36	0.18	0.56	0.20	0.51
1100	0.29	0.26	0.53	0.21	0.53	0.19	1.02
1125	0.16	0.26	0.91	0.28	0.56	0.28	0.77

ภาพที่ 4.11

กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความบิดเบี้ยวโค้งออก - เว้าเข้าตามแนวขอบ
และอุณหภูมิในการเผาชิ้นงาน ในการทดลองครั้งที่ 1



ตารางที่ 4.14

ผลการทดสอบความบิดเบี้ยวในลักษณะโค้งออกและเว้าเข้าตามแนวขอบของชิ้นงานหลังเผาที่อุณหภูมิต่างๆ ในการทดลองครั้งที่ 2

อุณหภูมิเผา (°C)	ชื่อสูตร / ค่าความบิดเบี้ยวโค้งออก-เว้าเข้าตามแนวขอบ (%)								
	100F (Ref.)	50F 50SLG	40F 60SLG	30F 70SLG	20F 80SLG	50F 50BSG	40F 60BSG	30F 70BSG	20F 80BSG
1000	0.09±0.03	0.12±0.07	0.17±0.04	0.27±0.01	0.39±0.05	0.06±0.02	0.13±0.05	0.13±0.00	0.15±0.04
1050	0.13±0.05	0.18±0.04	0.25±0.07	0.21±0.04	0.40±0.09	0.18±0.03	0.14±0.04	0.17±0.05	0.15±0.04
1100	0.10±0.03	0.07±0.02	0.12±0.04	0.19±0.06	0.20±0.08	0.09±0.06	0.19±0.05	0.18±0.05	0.17±0.06
1125	0.23±0.03	0.29±0.04	0.22±0.06	0.32±0.08	0.40±0.05	0.20±0.07	0.13±0.08	0.33±0.09	0.23±0.01

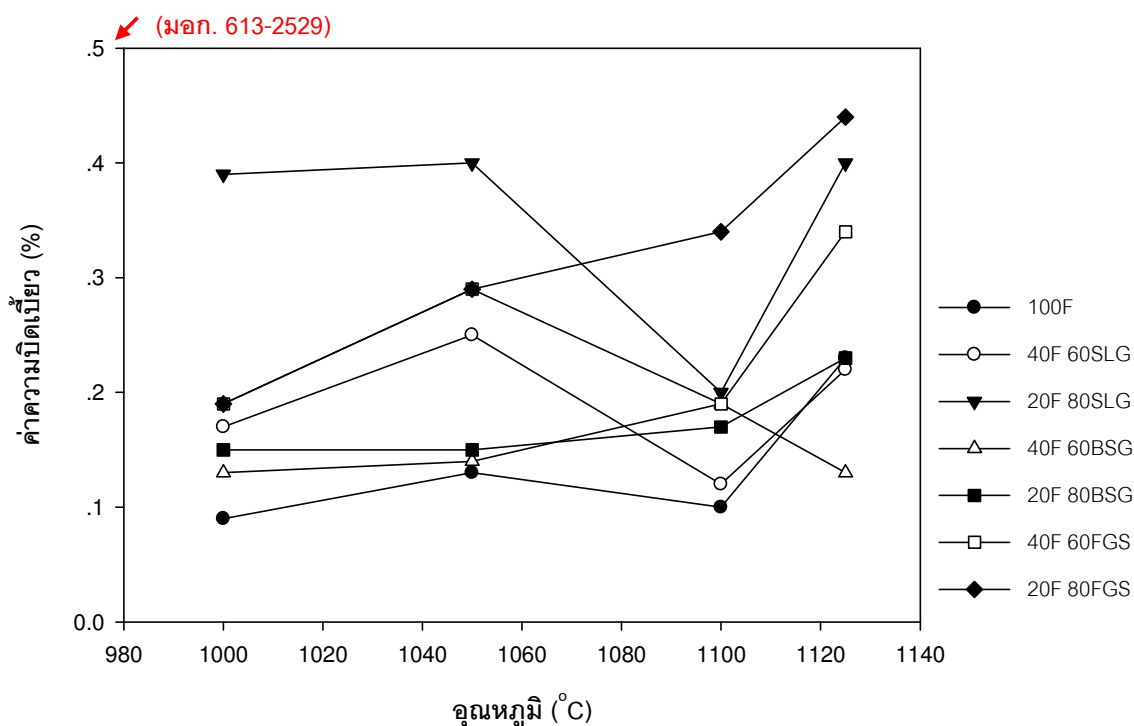
ตารางที่ 4.14 (ต่อ)

อุณหภูมิเผา (°C)	ชื่อสูตร / ค่าความบิดเบี้ยวโค้งออก-เว้าเข้าตามแนวขอบ (%)			
	50F 50FGS	40F 60FGS	30F 70FGS	20F 80FGS
1000	0.12±0.01	0.19±0.04	0.18±0.06	0.19±0.09
1050	0.25±0.08	0.29±0.03	0.19±0.05	0.29±0.05
1100	0.19±0.06	0.19±0.00	0.33±0.04	0.34±0.06
1125	0.35±0.01	0.34±0.02	0.35±0.08	0.44±0.09

ภาพที่ 4.12

กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความบิดเบี้ยวโค้งออก - เว้าเข้าตามแนวขอบ

และอุณหภูมิในการเผาขึ้นงาน ในการทดลองครั้งที่ 2



จากผลการทดลองในครั้งที่ 1 พบว่า การใช้วัสดุเหลือทิ้งทั้ง 3 ประเภทเป็นตัวช่วย หลอมทดแทนแร่โซเดียมเฟลด์สปาร์ในสูตรกระเบื้องในปริมาณ 100% นั้น ให้ผลค่าความบิดเบี้ยว ในลักษณะโค้งออกและเว้าเข้าตามแนวขอบของชิ้นงานหลังเผา ส่วนใหญ่ไม่ผ่านตามเกณฑ์ มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมกระเบื้องเซรามิกทั้งประเภทบุผนังภายในและภายนอกอาคาร (มอก. 613-2529 และ มอก. 614-2529 ตามลำดับ) มีเพียงเฉพาะการใช้เศษแก้วโบโรซิลิเกต เท่านั้น ที่มีค่าความบิดเบี้ยวทั้งหมดผ่านตามเกณฑ์มาตรฐานกระเบื้องบุผนังภายนอก ซึ่งมีค่าไม่เกินร้อยละ 0.75 แต่สำหรับมาตรฐานกระเบื้องบุผนังภายใน ซึ่งต้องมีค่าไม่เกินร้อยละ 0.5 นั้น พบว่าผลการทดสอบส่วนใหญ่ยังมีค่าไม่ผ่านตามเกณฑ์มาตรฐาน ยกเว้นการเผาที่อุณหภูมิต่ำสุด 1,000°C เท่านั้น ที่ผลการทดสอบมีค่าผ่านตามเกณฑ์ ดังนั้น ในการทดลองครั้งที่ 2 จึงได้ทำการ ลดปริมาณการใช้วัสดุเหลือทิ้งประเภทต่างๆ ลง ผลที่ได้พบว่า ชิ้นงานทุกสูตรมีค่าความบิดเบี้ยว ในลักษณะโค้งออกและเว้าเข้าตามแนวขอบผ่านตามเกณฑ์มาตรฐานทั้งหมด ทั้งประเภทกระเบื้อง

บุผนังภายในและภายนอกอาคาร โดยจากกราฟในภาพที่ 4.12 พบว่า เศษแก้วโซดาไลม์ และกากตะกอนเคลือบฟrit จะมีผลทำให้เกิดความบิดเบี้ยวของชิ้นงานหลังเผาในลักษณะนี้ได้มากที่สุด โดยค่าความบิดเบี้ยวจะมากขึ้นตามปริมาณการใช้ในสูตร และอุณหภูมิในการเผาที่สูงขึ้นด้วย

ดังนั้น จากผลการทดลองเกี่ยวกับค่าความบิดเบี้ยวของชิ้นงานหลังเผาทั้งหมด ทั้งการทดสอบในลักษณะขึ้น-แ่นลง และการทดสอบในลักษณะโค้งออก-เว้าเข้า สามารถสรุปได้ว่า เศษแก้วโบโรซิลิเกต เป็นวัสดุเหลือทิ้งที่สามารถใช้เป็นตัวช่วยหลอมทดแทนแร่โซเดียมเฟลด์สปาร์ในสูตรกระเบื้องบุผนังได้ดีที่สุด เนื่องจากส่งผลต่อค่าความบิดเบี้ยวของชิ้นงานหลังเผาที่น้อยที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับเศษแก้วชนิดโซดาไลม์ และกากตะกอนเคลือบฟrit ตามผลการทดลองดังที่ได้กล่าวมาแล้ว และแสดงชิ้นงานให้เห็นดังภาพที่ 4.13

ภาพที่ 4.13

ชิ้นงานกระเบื้องที่ใช้วัสดุเหลือทิ้งทั้ง 3 ประเภททดแทนแร่โซเดียมเฟลด์สปาร์ในปริมาณ 100% และชิ้นงานสูตรมาตรฐานอ้างอิง เพื่อเปรียบเทียบความบิดเบี้ยวของชิ้นงานหลังผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 1,125°C

	
สูตรมาตรฐานอ้างอิง (100F)	เศษแก้วโบโรซิลิเกต 100% (100BSG)
	
เศษแก้วโซดาไลม์ 100% (100SLG)	กากตะกอนเคลือบฟrit 100% (100FGS)

4.4 ผลการทดสอบสมบัติทางกลของชิ้นงานหลังเผา

การทดสอบสมบัติทางกลของชิ้นงานหลังเผาในงานวิจัยนี้ ใช้การทดสอบความแข็งแรงของชิ้นงานโดยหาค่าความต้านทานแรงดัดแบบ 3-point bending strength อ้างอิงตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมกระเบื้องปูผนังภายนอกอาคาร มอก. 614-2529 ซึ่งกำหนดไว้ว่ากระเบื้องประเภทปูผนังภายนอกจะต้องมีค่าความต้านทานแรงดัดไม่น้อยกว่า 20 เมกะปาสคาล โดยสำหรับกระเบื้องปูผนังภายใน ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก. 613-2529 ไม่จำเป็นต้องทดสอบค่าความต้านทานแรงดัด

โดยปกติค่าความแข็งแรงของชิ้นงานหลังเผา จะมีความสัมพันธ์กับปริมาณรูพรุนที่มีอยู่ภายในเนื้อชิ้นงาน หากชิ้นงานมีปริมาณรูพรุนที่มากกว่า ย่อมส่งผลต่อค่าความแข็งแรงที่น้อยกว่าตามไปด้วย ชิ้นงานโดยส่วนใหญ่เมื่อทำการเผาที่อุณหภูมิสูงขึ้น ย่อมมีการหลอมตัวได้ดีกว่า จึงมีปริมาณรูพรุนหลงเหลืออยู่ภายในเนื้อชิ้นงานน้อย และส่งผลให้ค่าความแข็งแรงของชิ้นงานเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ซึ่งจากผลงานวิจัยที่ผ่านมาของหลายๆ ท่าน ได้แก่ Matteucci และคณะ (2002), Luz และ Ribeiro (2007) และ Andreola และคณะ (2008) ก็ให้ผลการทดสอบเป็นไปในทำนองดังกล่าว

ผลการทดสอบค่าความต้านทานแรงดัดของชิ้นงานหลังเผาที่อุณหภูมิต่างๆ ในการทดลองทั้งสองครั้ง แสดงดังตารางที่ 4.15 – 4.16 และแสดงเป็นกราฟในภาพที่ 4.14 และ 4.15 ตามลำดับ

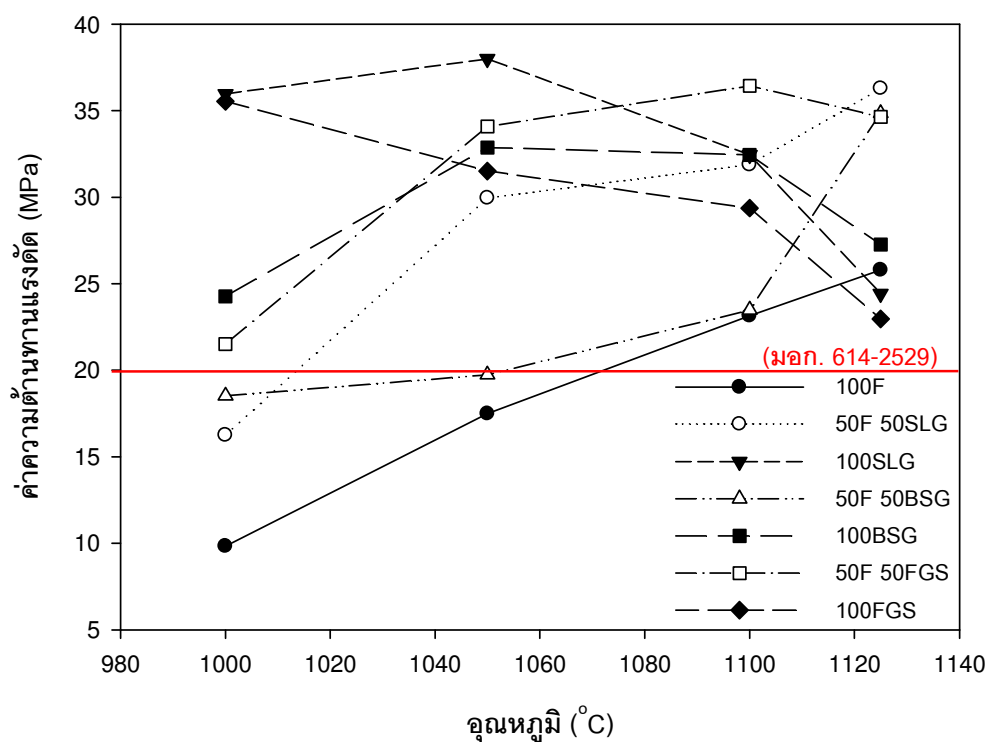
ตารางที่ 4.15

ผลการทดสอบความต้านทานแรงดัดของชิ้นงานหลังเผาที่อุณหภูมิต่างๆ ในการทดลองครั้งที่ 1

อุณหภูมิเผา (°C)	ชื่อสูตร / ค่าความต้านทานแรงดัด (เมกะปาสกาล)						
	100F (Ref.)	50F 50SLG	100SLG	50F 50BSG	100BSG	50F 50FGS	100FGS
1000	9.82	16.24	35.97	18.52	24.27	21.51	35.53
1050	17.49	29.95	37.99	19.74	32.86	34.07	31.51
1100	23.14	31.87	32.45	23.47	32.44	36.43	29.37
1125	25.79	36.28	24.43	34.84	27.26	34.63	22.96

ภาพที่ 4.14

กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานแรงดัด และอุณหภูมิในการเผาชิ้นงาน
ในการทดลองครั้งที่ 1



ตารางที่ 4.16

ผลการทดสอบความต้านทานแรงดัดของชิ้นงานหลังเผาที่อุณหภูมิต่างๆ ในการทดลองครั้งที่ 2

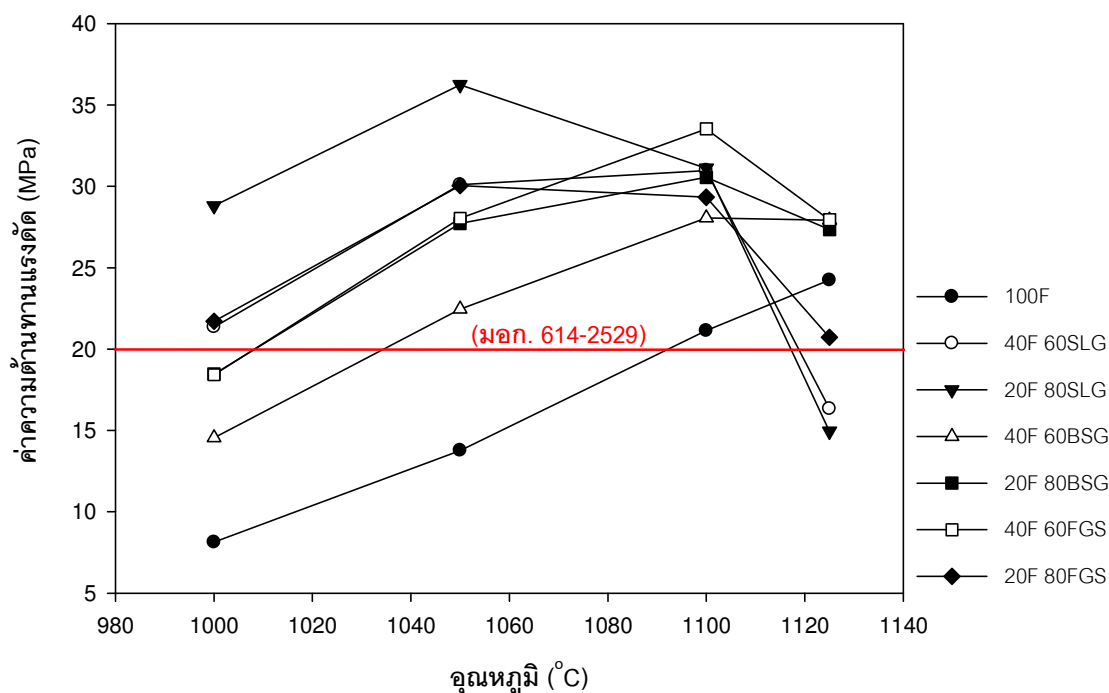
อุณหภูมิเผา (°C)	ชื่อสูตร / ค่าความต้านทานแรงดัด (เมกะปาสคาล)								
	100F (Ref.)	50F 50SLG	40F 60SLG	30F 70SLG	20F 80SLG	50F 50BSG	40F 60BSG	30F 70BSG	20F 80BSG
1000	8.14±0.64	15.64±0.34	21.35±0.31	26.33±2.20	28.80±0.64	15.49±1.48	14.55±0.43	17.66±1.86	18.47±1.15
1050	13.77±0.96	25.78±2.61	30.10±1.95	26.85±3.63	36.24±1.03	21.06±1.88	22.46±2.56	25.01±1.89	27.72±2.93
1100	21.13±1.66	30.54±1.03	30.98±2.00	30.49±2.43	31.11±2.23	28.76±1.54	28.05±0.74	30.41±1.12	30.55±1.56
1125	24.24±1.81	31.42±0.61	16.34±0.72	31.28±1.35	14.94±1.45	29.43±0.28	27.91±1.55	30.50±1.15	27.35±0.83

ตารางที่ 4.16 (ต่อ)

อุณหภูมิเผา (°C)	ชื่อสูตร / ค่าความต้านทานแรงดัด (เมกะปาสคาล)			
	50F 50FGS	40F 60FGS	30F 70FGS	20F 80FGS
1000	17.66±1.04	18.42±0.51	22.60±0.85	21.71±0.21
1050	27.76±0.70	28.03±0.83	31.77±0.66	30.05±0.24
1100	29.91±2.11	33.52±1.81	31.23±1.86	29.33±0.44
1125	26.14±0.41	27.94±1.94	24.72±1.61	20.72±3.48

ภาพที่ 4.15

กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานแรงดัด และอุณหภูมิในการเผาขึ้นงาน
ในการทดลองครั้งที่ 2



จากผลการทดลองในครั้งที่ 1 พบว่า ค่าความต้านทานแรงดัดของชิ้นงานส่วนใหญ่มีค่าเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิการเผาที่เพิ่มขึ้น โดยชิ้นงานสูตรมาตรฐานที่ใช้แร่โซเดียมเฟลด์สปาร์เป็นตัวช่วยหลอมเพียงอย่างเดียว และสูตรทดลองที่มีการแทนที่แร่โซเดียมเฟลด์สปาร์ด้วยเศษแก้วโซดาไลม์ และเศษแก้วโบโรซิลิเกตในปริมาณ 50% นั้น มีค่าความแข็งแรงไม่ผ่านตามเกณฑ์มาตรฐาน มอก. 614-2529 (มีค่าความต้านทานแรงดัด ต่ำกว่า 20 MPa) ที่การเผาที่อุณหภูมิต่ำๆ (1,000 และ 1,050°C) แต่ค่าความแข็งแรงจะเพิ่มสูงขึ้น และผ่านตามเกณฑ์มาตรฐานเมื่อทำการเผาที่อุณหภูมิสูงขึ้น ส่วนสูตรการทดลองที่มีการใช้วัสดุเหลือทิ้งทั้ง 3 ประเภทเป็นตัวช่วยหลอมแทนที่แร่โซเดียมเฟลด์สปาร์ทั้งหมดในปริมาณ 100% นั้น พบว่ามีค่าความแข็งแรงผ่านตามเกณฑ์มาตรฐานทั้งหมดในทุกๆ อุณหภูมิการเผา แต่สังเกตได้ว่าค่าความแข็งแรงของชิ้นงานจะมีค่าลดลงเมื่อทำการเผาที่อุณหภูมิสูงขึ้น โดยเฉพาะที่อุณหภูมิเผาตั้งแต่ 1,100°C ขึ้นไป

และผลจากการทดลองในครั้งที่ 2 พบว่า มีความสอดคล้องกับครั้งแรก กล่าวคือ ชิ้นงานจะมีค่าความแข็งแรงเพิ่มขึ้น เมื่อทำการเผาที่อุณหภูมิสูงขึ้น แต่เมื่อถึงอุณหภูมิสูงสุดที่ใช้ในการทดลอง ($1,125^{\circ}\text{C}$) ชิ้นงานส่วนใหญ่จะมีค่าความแข็งแรงที่ลดลง ยกเว้นชิ้นงานสูตรมาตรฐานที่ใช้แร่โซเดียมเฟลด์สปาร์เป็นตัวช่วยหลอมเพียงอย่างเดียว และชิ้นงานสูตรที่ใช้เศษแก้วโซดาไลม์ และเศษแก้วโบโรซิลิเกตเป็นตัวช่วยหลอมทดแทนแร่โซเดียมเฟลด์สปาร์ในปริมาณ 50% ที่ยังคงมีค่าความแข็งแรงเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิในการเผา ส่วนชิ้นงานสูตรที่มีการใช้กากตะกอนเคลือบฟrit ทดแทนแร่โซเดียมเฟลด์สปาร์ในทุกปริมาณ มีค่าความแข็งแรงหลังเผาลดลงที่อุณหภูมิการเผาสูงสุด ($1,125^{\circ}\text{C}$) ทั้งสิ้น และสำหรับการเผาที่อุณหภูมิต่ำสุด ($1,000^{\circ}\text{C}$) พบว่า ชิ้นงานส่วนใหญ่ยังมีค่าความแข็งแรงไม่ผ่านตามเกณฑ์มาตรฐานอุตสาหกรรม มอก.614-2529 ยกเว้นชิ้นงานสูตรที่มีการใช้เศษแก้วโซดาไลม์ และกากตะกอนเคลือบฟrit แทนที่แร่โซเดียมเฟลด์สปาร์ในปริมาณที่ค่อนข้างสูง (70 และ 80% โดยน้ำหนัก) ที่มีค่าความแข็งแรงผ่านตามเกณฑ์มาตรฐานตั้งแต่การเผาที่อุณหภูมิต่ำสุด $1,000^{\circ}\text{C}$ สำหรับเศษแก้วโบโรซิลิเกตนั้น ถึงแม้ค่าความแข็งแรงของชิ้นงานจะยังไม่ผ่านตามเกณฑ์มาตรฐาน ณ การเผาที่อุณหภูมิต่ำสุด แต่ก็พบว่ามีความแข็งแรงที่มากกว่าชิ้นงานสูตรมาตรฐานซึ่งใช้แร่โซเดียมเฟลด์สปาร์เป็นตัวช่วยหลอมเพียงอย่างเดียวค่อนข้างมาก

ดังนั้น จากผลการทดลองทั้ง 2 ครั้ง จึงสรุปโดยรวมได้ว่า การใช้วัสดุเหลือทิ้งทั้ง 3 ประเภทเป็นตัวช่วยหลอมทดแทนแร่โซเดียมเฟลด์สปาร์นั้น ให้ผลค่าความแข็งแรงหลังเผาที่ดีกว่าการใช้แร่โซเดียมเฟลด์สปาร์เป็นตัวช่วยหลอมในสูตรกระเบื้องบุผนังแต่เพียงอย่างเดียว โดยค่าความแข็งแรงของชิ้นงานจะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่ใช้ในการเผา และตามปริมาณการใช้วัสดุเหลือทิ้งประเภทต่างๆ ในสูตรที่มากขึ้น แต่สำหรับการเผาที่อุณหภูมิสูงกว่า $1,100^{\circ}\text{C}$ ขึ้นไป จะพบว่าให้ผลในทางตรงกันข้าม กล่าวคือ ค่าความแข็งแรงของชิ้นงานกลับมีค่าลดลง แต่นับเป็นผลดีเนื่องจากการนำวัสดุเหลือทิ้งประเภทต่างๆ มาใช้เป็นตัวช่วยหลอมในสูตรนั้น จะให้ค่าความแข็งแรงของชิ้นงานหลังเผาผ่านตามเกณฑ์มาตรฐานตั้งแต่การเผาที่อุณหภูมิต่ำๆ จึงเป็นการช่วยลดอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาชิ้นงานลง ทำให้ช่วยประหยัดพลังงานเชื้อเพลิงในการเผาได้ โดยผลจากการทดสอบค่าความแข็งแรงของชิ้นงานทั้ง 2 ครั้งนั้น มีความสอดคล้องกับค่าการหดตัวเชิงเส้น ค่าความหนาแน่น และค่าการดูดซึมน้ำของชิ้นงานหลังเผาตามที่ได้กล่าวมาแล้วในข้างต้น

นอกจากนี้ ยังพบว่าผลจากการทดลองสอดคล้องกับผลงานวิจัยที่ผ่านมาของหลายๆ ท่าน ได้แก่ Matteucci และคณะ (2002), Luz และ Ribeiro (2007) และ Andreola และคณะ (2008) ที่พบว่า จากงานวิจัยซึ่งใช้เศษแก้วชนิดโซดาไลม์ และแก้ว CRT มาเป็นวัสดุหลักทดแทนแร่โซเดียมเฟลด์สปาร์สำหรับการผลิตกระเบื้องเซรามิกชนิดเนื้อพอร์ซเลน – สโตนแวร์นั้น การเผา

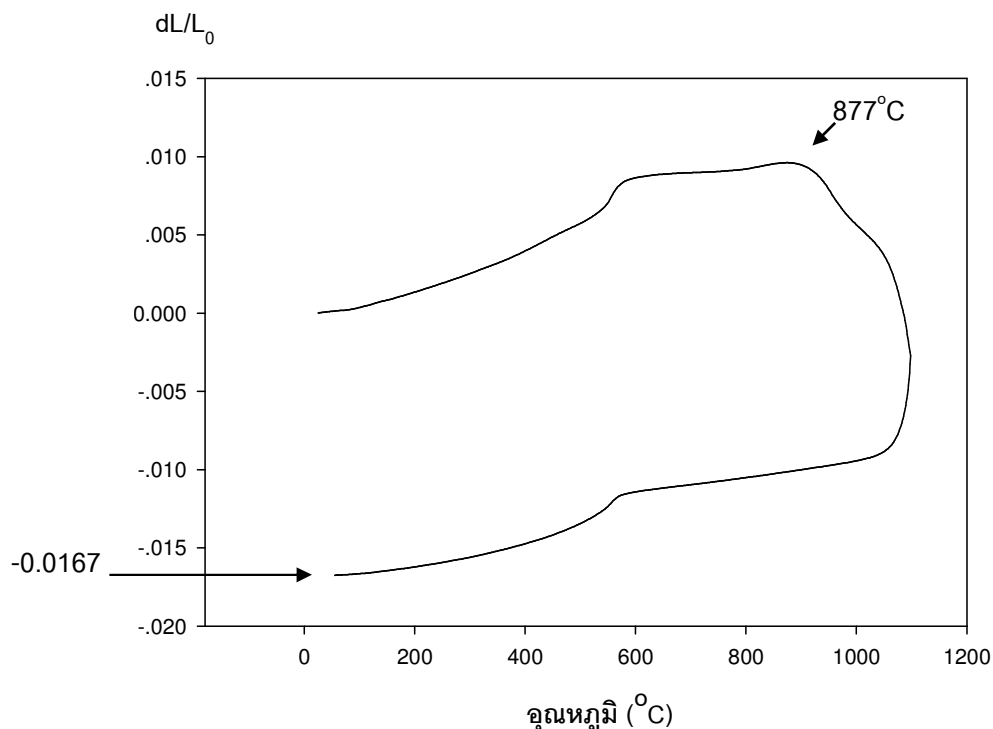
ชิ้นงานที่อุณหภูมิสูงขึ้นตั้งแต่ $1,120 - 1,250^{\circ}\text{C}$ รวมทั้งการใช้ปริมาณเศษแก้วบดที่เพิ่มมากขึ้นจะส่งผลต่อค่าความแข็งแรงที่ลดลงของชิ้นงานหลังเผา เนื่องจากปริมาณรูพรุนปิดที่เกิดขึ้นภายในเนื้อชิ้นงานมีปริมาณเพิ่มมากขึ้นตามปริมาณการใช้เศษแก้ว และการเผาที่อุณหภูมิสูง โดยแต่ละงานวิจัย พบข้อจำกัดของปริมาณการใช้เศษแก้วแต่ละชนิดที่แตกต่างกันออกไป ตามมาตรฐานของเนื้อผลิตภัณฑ์กระเบื้องที่ต้องการเผาและวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิต ดังได้กล่าวไว้ในบทที่ 2

4.5 ผลการทดสอบสมบัติทางความร้อน

การทดสอบสมบัติทางความร้อนของชิ้นงานที่ทำในงานวิจัยนี้ได้แก่ การทดสอบหาค่าการขยายตัวและการหดตัวของชิ้นงานในระหว่างกระบวนการให้ความร้อนแก่ชิ้นงาน โดยทำการทดสอบตั้งแต่อุณหภูมิห้อง 25°C จนถึง $1,100^{\circ}\text{C}$ ด้วยเครื่อง Dilatometer ตามที่ได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 3 เพื่อบ่งบอกถึงความสามารถในการหลอมตัวขณะทำการเผาของเนื้อดินกระเบื้องสูตรต่างๆ รวมถึงหาค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนเชิงเส้น (Coefficient of linear thermal expansion, CTE) ของชิ้นงานระหว่างอุณหภูมิ $30 - 600^{\circ}\text{C}$ เพื่อเป็นประโยชน์ในการนำไปใช้งานต่อกับสูตรเคลือบเซรามิกต่างๆ ว่ามีค่าการขยายตัวในขณะทำการเผาเข้ากันได้ดีหรือไม่ เนื่องจากจะมีผลต่อตำหนิที่เกิดขึ้นบนผลิตภัณฑ์หลังเผา เช่น ตำหนิเคลือบร้าว หรือเคลือบร่อน หากสูตรเนื้อดินและเคลือบเซรามิกที่ใช้มีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนเชิงเส้นที่ไม่เข้ากัน ผลการทดสอบทั้งหมดแสดงดังต่อไปนี้

ภาพที่ 4.16

กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการขยายตัวและหดตัวของชิ้นงานระหว่างทำการเผาที่อุณหภูมิ 25 - 1,100°C ของสูตรเนื้อดินกระเบื้องมาตรฐาน (100F)

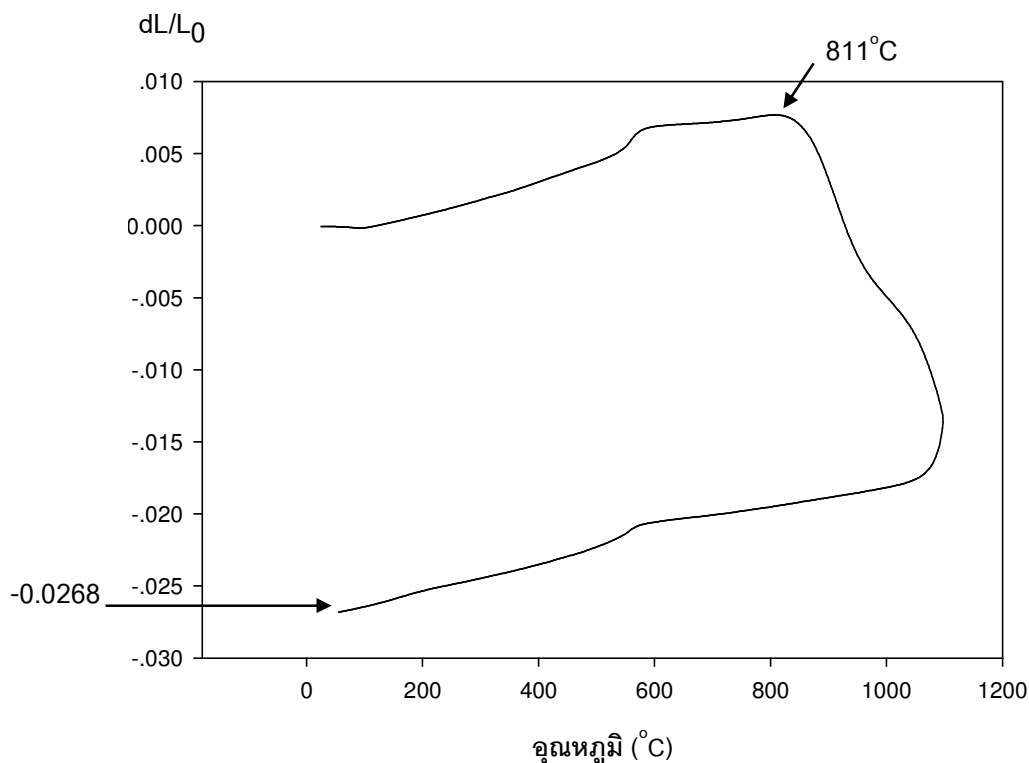


จากผลการทดสอบค่าการขยายตัวและหดตัวเชิงเส้นของชิ้นงานกระเบื้องสูตรมาตรฐาน (100F) ซึ่งใช้แร่โซเดียมเฟลด์สปาร์เป็นตัวช่วยหลอมแต่เพียงอย่างเดียว นั้น พบว่า เมื่อทำการเผาให้ความร้อนแก่ชิ้นงานไปเรื่อยๆ ชิ้นงานจะมีการขยายตัวเพิ่มขึ้น จนกระทั่งถึงอุณหภูมิ 877°C ชิ้นงานจึงเริ่มมีการหดตัวลง ซึ่งสังเกตได้จากค่า dL/L_0 ที่เริ่มมีค่าลดลง จากนั้นชิ้นงานจะมีการหดตัวลงอย่างรวดเร็วจนถึงอุณหภูมิสูงสุดที่ 1,100°C และถึงแม้จะทำการลดอุณหภูมิเผาลงมาแล้วก็ตาม ยังพบว่าชิ้นงานมีค่าการหดตัวเพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆ ในอัตราที่รวดเร็วจนถึงอุณหภูมิประมาณ 1,000°C จากนั้นชิ้นงานจะมีอัตราการหดตัวที่ค่อนข้างช้าลง แต่ก็ยังคงมีการหดตัวอย่างต่อเนื่องจนถึงอุณหภูมิจากนั้น เมื่อสิ้นสุดการเผาพบว่า ค่าการหดตัวของชิ้นงานหลังเผาอยู่ที่ค่า dL/L_0 เท่ากับ -0.0167

ภาพที่ 4.17

กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการขยายตัวและหดตัวของชิ้นงานระหว่างทำการเผาที่

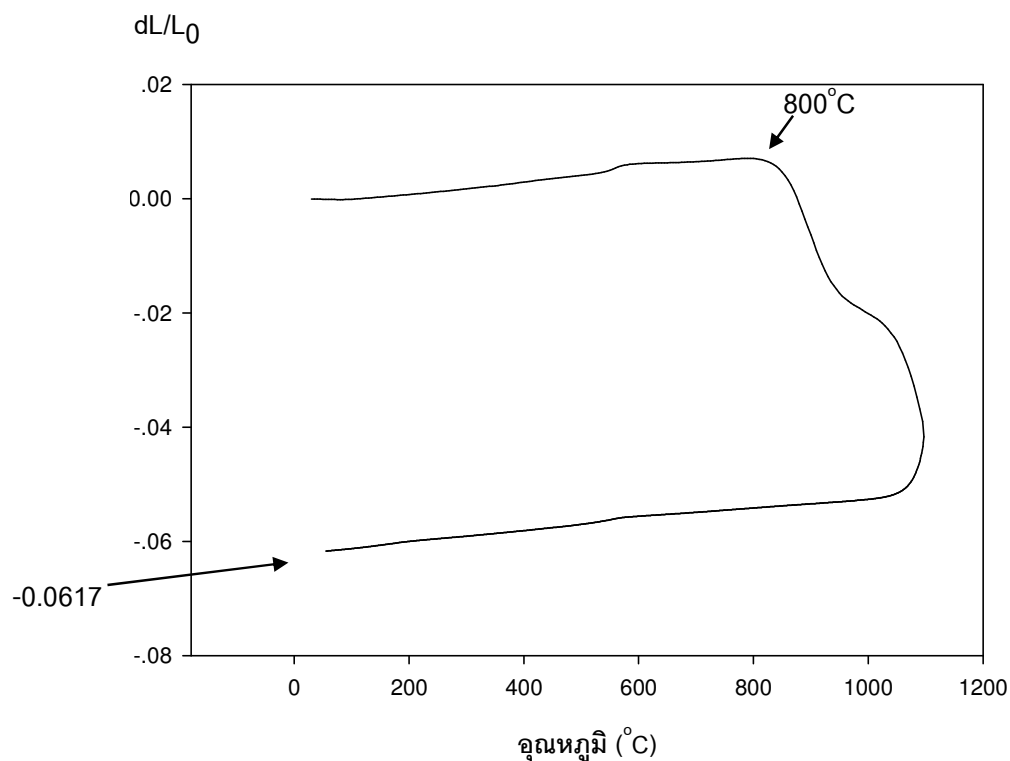
อุณหภูมิ 25 - 1,100°C ของเนื้อดินกระเบื้องสูตร 50F 50SLG



สำหรับสูตรที่มีการใช้เศษแก้วโซดาไลม์เป็นตัวช่วยหลอมแทนที่แร่โซเดียมเฟลด์สปาร์ในปริมาณ 50% โดยน้ำหนักนั้น พบว่า ชิ้นงานทดลองเริ่มมีการหดตัวครั้งแรกที่อุณหภูมิลดลง ซึ่งหมายถึงเนื้อดินมีการหลอมตัวที่เร็วขึ้นด้วยนั่นเอง โดยอุณหภูมิเริ่มต้นที่ชิ้นงานเริ่มมีการหดตัวคือ 811°C หลังจากนั้น ชิ้นงานจะมีค่าการหดตัวเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนถึงอุณหภูมิเผาสูงสุด 1,100°C และยังคงหดตัวอย่างต่อเนื่องจนถึงอุณหภูมิห้อง แสดงดังเส้นกราฟในภาพที่ 4.17 โดยเมื่อสิ้นสุดการเผา และชิ้นงานเย็นตัวลงแล้ว พบว่า ค่าการหดตัวของชิ้นงานหลังเผาอยู่ที่ค่า dL/L_0 เท่ากับ -0.0268 ซึ่งมีค่าการหดตัวที่มากกว่าสูตรกระเบื้องมาตรฐาน (100F) เช่นเดียวกับผลของกระเบื้องสูตร 20F 80SLG ซึ่งจะได้กล่าวถึงต่อไป

ภาพที่ 4.18

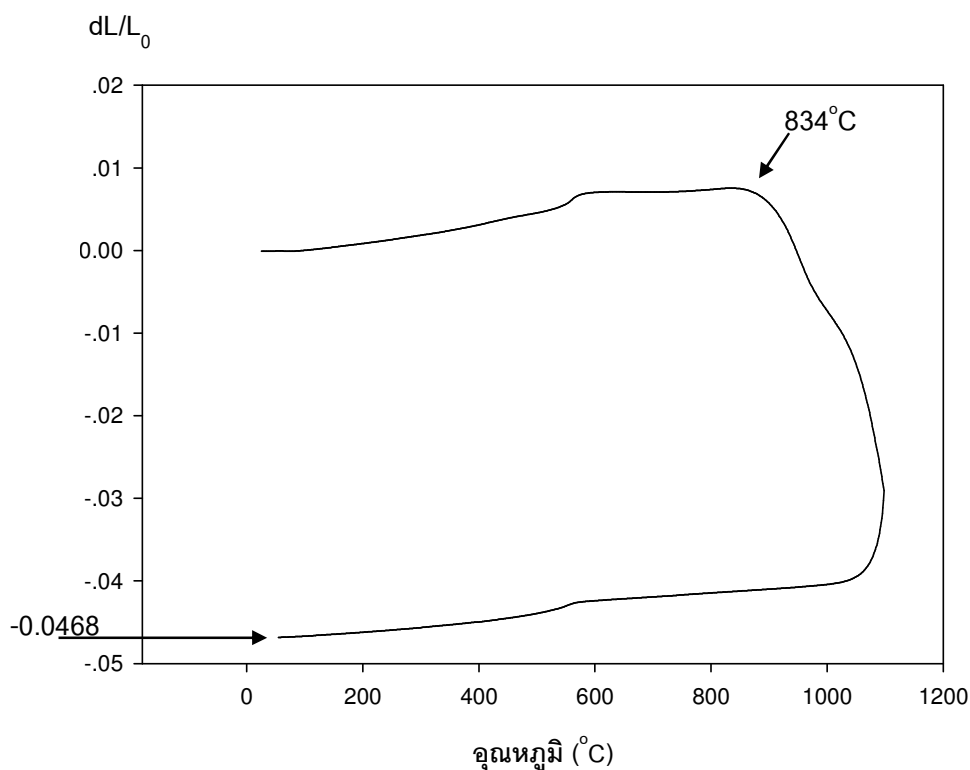
กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการขยายตัวและหดตัวของชิ้นงานระหว่างทำการเผาที่อุณหภูมิ 25 - 1,100°C ของเนื้อดินกระเบื้องสูตร 20F 80SLG



จากกราฟในภาพที่ 4.18 พบว่า ชิ้นงานทดลองซึ่งใช้เศษแก้วโซดาไลม์เป็นตัวช่วยหลอมแทนที่แร่โซเดียมเฟลด์สปาร์ในปริมาณที่มากขึ้นเป็น 80% โดยน้ำหนักนั้น ให้ผลค่าการหดตัวของชิ้นงานหลังเผาที่มากกว่าสูตรที่ใช้ในปริมาณ 50% โดยน้ำหนัก และสูตรมาตรฐานดังกล่าวข้างต้น โดยชิ้นงานจะเริ่มมีการหดตัวที่อุณหภูมิลดลงอีกเล็กน้อยที่ 800°C และมีค่าการหดตัวเมื่อสิ้นสุดการเผาที่มากกว่าด้วย นั่นคือ dL/L_0 เท่ากับ -0.0617 ดังแสดงในกราฟ ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าการใช้เศษแก้วโซดาไลม์เป็นตัวช่วยหลอมในสูตรเนื้อดินนั้น จะให้ประสิทธิภาพในการหลอมตัวที่มากกว่าการใช้แร่โซเดียมเฟลด์สปาร์แต่เพียงอย่างเดียว

ภาพที่ 4.19

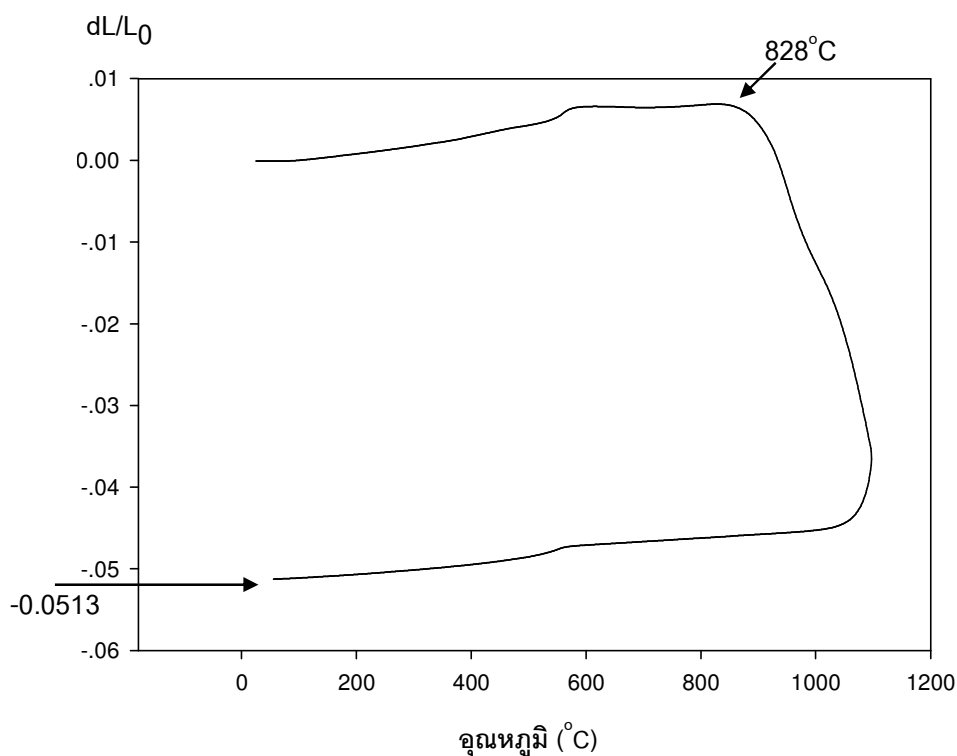
กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการขยายตัวและหดตัวของชิ้นงานระหว่างทำการเผาที่อุณหภูมิ 25 - 1,100°C ของเนื้อดินกระเบื้องสูตร 50F 50BSG



สำหรับเศษแก้วโบโรซิลิเกตนั้น จากกราฟในภาพที่ 4.19 พบว่า การใช้แทนที่แร่โซเดียมเฟลด์สปาร์ในสูตรทดลองในปริมาณ 50% โดยน้ำหนัก จะทำให้ค่าการหดตัวของชิ้นงานหลังสิ้นสุดการเผาอยู่ที่ค่า dL/L_0 เท่ากับ -0.0468 ซึ่งเป็นค่าที่มากกว่าการหดตัวของชิ้นงานสูตรมาตรฐาน และสูตรที่ใช้เศษแก้วโซดาไลม์ในปริมาณที่เท่ากันด้วย ถึงแม้อุณหภูมิที่ชิ้นงานสูตรนี้เริ่มมีการหดตัวจะมากกว่าอุณหภูมิของชิ้นงานสูตรที่ใช้เศษแก้วโซดาไลม์อยู่เล็กน้อยก็ตาม (834°C) ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า สำหรับการแทนที่แร่โซเดียมเฟลด์สปาร์ในปริมาณ 50% โดยน้ำหนักนั้น เศษแก้วโบโรซิลิเกตให้ประสิทธิภาพในการเป็นตัวช่วยหลอมได้ดีกว่าเศษแก้วโซดาไลม์

ภาพที่ 4.20

กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการขยายตัวและหดตัวของชิ้นงานระหว่างทำการเผาที่อุณหภูมิ 25 - 1,100°C ของเนื้อดินกระเบื้องสูตร 20F 80BSG

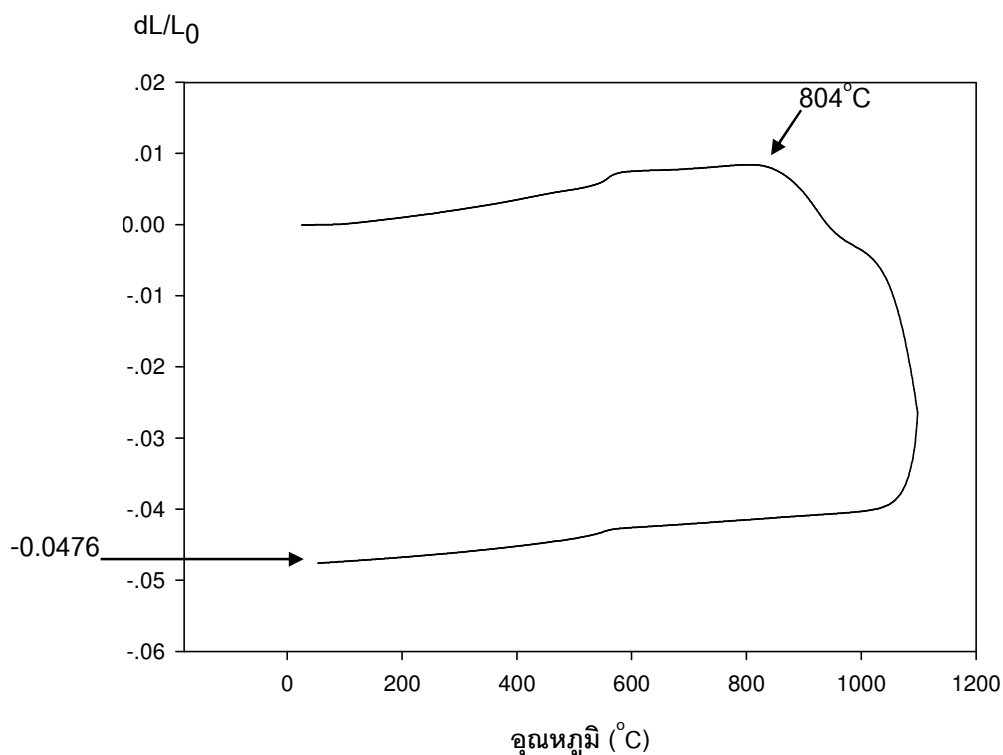


สำหรับสูตรที่ใช้เศษแก้วโบโรซิลิเกตแทนที่แร่โซเดียมเฟลด์สปาร์ในปริมาณที่เพิ่มขึ้นเป็น 80% โดยน้ำหนัก พบว่า การหดตัวของชิ้นงานเริ่มต้นที่อุณหภูมิเร็วกว่า (828°C) และมีค่าการหดตัวเมื่อสิ้นสุดการเผามากกว่าการใช้ในปริมาณ 50% โดยน้ำหนักอยู่เล็กน้อย กล่าวคือ มีค่า dL/L_0 อยู่ที่ -0.0513 ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า การแทนที่แร่โซเดียมเฟลด์สปาร์ด้วยเศษแก้วโบโรซิลิเกตนั้น ปริมาณในการใช้ไม่ค่อยส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าการหดตัวของชิ้นงานเท่าใดนัก ต่างกับการใช้เศษแก้วชนิดโซดาไลม์ที่ผลการหดตัวหลังเผาของชิ้นงานแตกต่างกันค่อนข้างมาก เมื่อใช้ในปริมาณ 50 และ 80% อย่างไรก็ตาม ผลที่ได้ปรากฏว่า การใช้เศษแก้วโบโรซิลิเกตเป็นตัวช่วยหลอมให้ผลที่ดีกว่าการใช้เศษแก้วโซดาไลม์ในปริมาณ 50% และสูตรมาตรฐานซึ่งไม่ใช่วัสดุเหลือทิ้งใดๆ เลย

ภาพที่ 4.21

กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการขยายตัวและหดตัวของชิ้นงานระหว่างทำการเผาที่

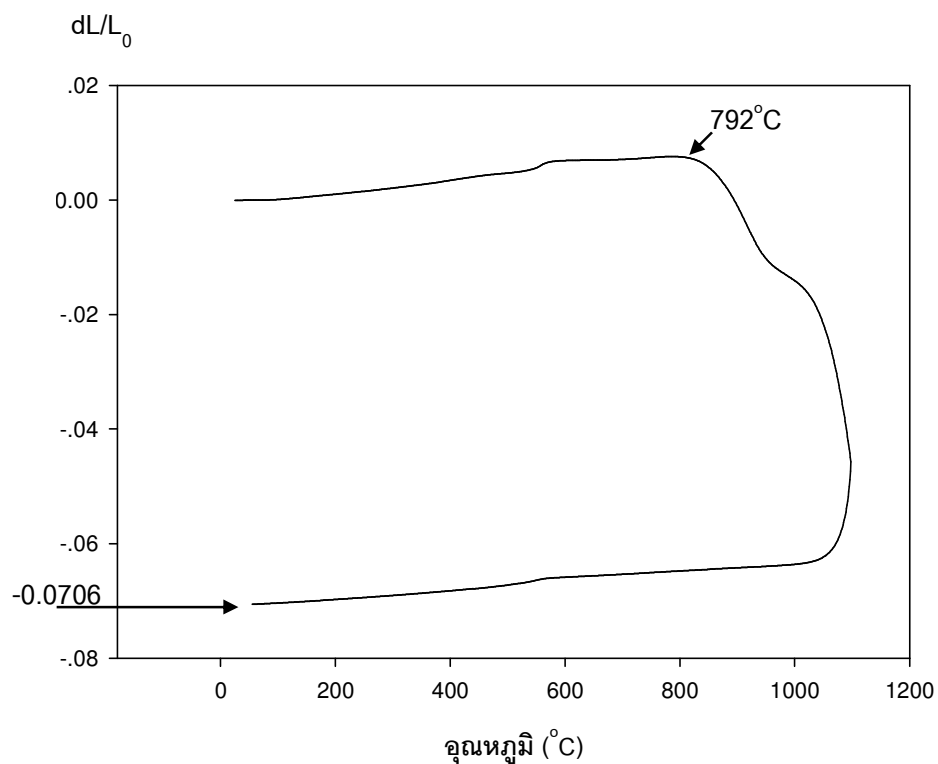
อุณหภูมิ 25 - 1,100°C ของเนื้อดินกระเบื้องสูตร 50F 50FGS



เมื่อพิจารณาผลของการใช้กากตะกอนเคลือบฟrit แทนที่แร่โซเดียมเฟลด์สปาร์ในสูตรกระเบื้องนั้น พบว่า สำหรับการใช้แทนที่ด้วยปริมาณ 50% โดยน้ำหนัก ค่าการหดตัวของชิ้นงานหลังเผาอยู่ที่ ค่า dL/L_0 เท่ากับ -0.0476 และอุณหภูมิที่ชิ้นงานเริ่มมีการหดตัวอยู่ที่ 804°C ดังแสดงในกราฟที่ 4.21 ส่วนการทดลองแทนที่ในปริมาณ 80% โดยน้ำหนักนั้น ค่าการหดตัวของชิ้นงานหลังเผาอยู่ที่ ค่า dL/L_0 เท่ากับ -0.0706 และอุณหภูมิที่ชิ้นงานเริ่มมีการหดตัวอยู่ที่ 792°C ดังแสดงในกราฟที่ 4.22 ดังนั้นจากผลทั้งหมดสามารถสรุปได้ว่า การใช้กากตะกอนเคลือบฟrit เป็นตัวช่วยหลอมทดแทนแร่โซเดียมเฟลด์สปาร์นั้น ให้ผลค่าการหดตัวหลังเผาที่ดีที่สุด และชิ้นงานก็เริ่มหดตัวที่อุณหภูมิต่ำที่สุดด้วย ซึ่งหมายถึงมีประสิทธิภาพในการช่วยหลอมตัวมากกว่าการใช้วัสดุเหลือทิ้งประเภทอื่นๆ และการที่ไม่ใช่เลย (สูตรมาตรฐานซึ่งใช้แร่โซเดียมเฟลด์สปาร์เป็นตัวช่วยหลอมเพียงอย่างเดียว) โดยปริมาณการใช้กากตะกอนเคลือบฟrit ที่มากขึ้น จะส่งผลต่อค่าการหดตัวที่เพิ่มขึ้นค่อนข้างมากด้วย

ภาพที่ 4.22

กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการขยายตัวและหดตัวของชิ้นงานระหว่างทำการเผาที่อุณหภูมิ 25 - 1,100°C ของเนื้อดินกระเบื้องสูตร 20F 80FGS



สามารถสรุปผลค่าการหดตัวของชิ้นงานเมื่อสิ้นสุดการเผา และอุณหภูมิเริ่มต้นที่ชิ้นงานเกิดการหดตัว จากผลการทดสอบทั้งหมดของชิ้นงานกระเบื้องสูตรต่างๆ เพื่อให้ง่ายต่อการเปรียบเทียบกัน ดังแสดงในตารางที่ 4.17

ตารางที่ 4.17

สรุปผลค่าการหดตัวของชิ้นงานเมื่อสิ้นสุดการเผา และอุณหภูมิเริ่มต้นที่ชิ้นงานเกิดการหดตัวจาก
การทดสอบด้วยเครื่อง Dilatometer ของกระเบื้องทดลองสูตรต่างๆ

ชื่อสูตรทดลอง	ค่าการหดตัวหลังเผา (dL/L ₀)	อุณหภูมิเริ่มต้นของการหดตัว (°C)
100F (Ref.)	-0.0167	877
50F 50SLG	-0.0268	811
20F 80SLG	-0.0617	800
50F 50BSG	-0.0468	834
20F 80BSG	-0.0513	828
50F 50FGS	-0.0476	804
20F 80FGS	-0.0706	792

จากผลการทดลองในตารางที่ 4.17 สามารถสรุปได้ว่า เมื่อใช้ผลค่าการหดตัวของชิ้นงานเมื่อสิ้นสุดการเผา และอุณหภูมิเริ่มต้นที่ชิ้นงานเกิดการหดตัวจากเครื่อง Dilatometer เป็นตัวบ่งบอกถึงประสิทธิภาพในการหลอมตัวของเนื้อดินกระเบื้องสูตรต่างๆ แล้ว พบว่า กากตะกอนเคลือบฟrit มีประสิทธิภาพในการเป็นตัวช่วยหลอมทดแทนแร่โซเดียมเฟลด์สปาร์ได้ดีที่สุด รองลงมาได้แก่ เศษแก้วโซดาไลม์ และเศษแก้วโบโรซิลิเกต สำหรับกระเบื้องสูตรมาตรฐานที่ใช้แร่โซเดียมเฟลด์สปาร์เป็นตัวช่วยหลอมแต่เพียงอย่างเดียว นั้น ให้ผลค่าการหดตัวหลังเผาที่ต่ำสุด และมีอุณหภูมิเริ่มต้นของการหดตัวที่สูงสุด ซึ่งหมายถึงมีการหลอมตัวที่ช้ากว่าการใช้วัสดุเหลือทิ้งประเภทต่างๆ มาเป็นตัวช่วยหลอมร่วมด้วย และจากผลการทดลองพบว่า ปริมาณการใช้วัสดุเหลือทิ้งประเภทต่างๆ ที่มากขึ้น จะทำให้ประสิทธิภาพในการช่วยหลอมตัวเพิ่มมากขึ้นด้วย ซึ่งก็สอดคล้องกับผลการทดสอบสมบัติทางกายภาพต่างๆ และสมบัติทางกลของชิ้นงานหลังเผา ทั้งค่าการหดตัวเชิงเส้น ค่าความหนาแน่น ค่าการดูดซึมน้ำ และค่าความแข็งแรงของชิ้นงานหลังเผาตามที่ได้กล่าวมาแล้วในข้างต้น

พบว่า ผลการทดสอบค่าการขยายตัวและหดตัวของชิ้นงานด้วยเครื่อง Dilatometer นั้น มีความสอดคล้องกับงานวิจัยของ Raimondo และคณะ (2007) ซึ่งได้ทำการทดลองโดยใช้ของเสียประเภทแก้วจากหลอดแคโทดและหน้าจอทีวีหรือจอคอมพิวเตอร์ (TV/PC cathodic tube

and screen) แทนที่แร่โซเดียมเฟลด์สปาร์ในสูตรกระเบื้องเซรามิกชนิดเนื้อพอร์ซเลน-สโตนแวร์ในปริมาณ 5-10% โดยน้ำหนัก และพบว่าสามารถช่วยเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของการหดตัวสูงสุดของชิ้นงานให้ต่ำลงได้ถึงอุณหภูมิต่ำกว่า $1,180^{\circ}\text{C}$ (จากเดิมที่อุณหภูมิสูงสุด $1,220^{\circ}\text{C}$) ผลของการวิจัยได้สรุปไว้ว่า ของเสียประเภทแก้วทั้ง 2 แบบนี้ สามารถนำมาใช้แทนที่ฟลักซ์ในบางส่วนได้ โดยส่งผลดีต่อสมบัติทางกายภาพและทางเทคนิคของเนื้อดินกระเบื้องที่มีการเติมแก้วเหล่านี้ลงไป รวมถึงส่งผลต่อการปรับปรุงพฤติกรรมการเผาของกระเบื้องให้ดีขึ้นอีกด้วย

นอกจากนี้ ยังยืนยันได้จากผลการทดลองของ Pontikes และคณะ (2007) ที่ทำการศึกษาพฤติกรรมทางความร้อนของเนื้อดินเซรามิกประเภทอิฐและกระเบื้องมุงหลังคา ที่มีการผสมของเสียประเภทแก้วโซดาไลม์บดละเอียดลงไปด้วย และจากผลการศึกษาพบว่า กระบวนการหลอมตัว (Densification) ของเนื้อดินจะเริ่มต้นที่อุณหภูมิต่ำกว่าสำหรับตัวอย่างที่มีเศษแก้วเป็นส่วนผสม โดยสังเกตได้ว่าเนื้อดินมีการหดตัวที่อุณหภูมิก่อน $1,000^{\circ}\text{C}$

สำหรับผลการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนเชิงเส้นระหว่างอุณหภูมิ $30 - 600^{\circ}\text{C}$ ของชิ้นงานทดลองสูตรต่างๆ เพื่อเป็นประโยชน์ในการนำไปประยุกต์ใช้กับสูตรเคลือบเซรามิกตามที่ได้กล่าวมาแล้ว แสดงดังตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 4.18

ผลการทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนเชิงเส้น (CTE)
ระหว่างอุณหภูมิ $30 - 600^{\circ}\text{C}$ ของชิ้นงานทดลองสูตรต่างๆ

ชื่อสูตรทดลอง	ค่า CTE ช่วงอุณหภูมิ $30 - 600^{\circ}\text{C}$ ($1/^{\circ}\text{C}$)
100F (Ref.)	15.1065E-06
50F 50SLG	12.1771E-06
20F 80SLG	10.9121E-06
50F 50BSG	12.4762E-06
20F 80BSG	11.6582E-06
50F 50FGS	13.2466E-06
20F 80FGS	12.1404E-06

จากผลการทดสอบในตารางข้างต้น พบว่า ชี้นงานสูตรมาตรฐานอ้างอิงที่ใช้แร่โซเดียมเฟลด์สปาร์เป็นตัวช่วยหลอมเพียงอย่างเดียว นั้น มีค่าการขยายตัวในช่วงอุณหภูมิ 30 – 600°C มากที่สุด รองลงมาได้แก่ ชี้นงานที่ใช้วัสดุเหลือทิ้งประเภทต่างๆ แทนที่แร่โซเดียมเฟลด์สปาร์ในปริมาณ 50 และ 80 %โดยน้ำหนัก ตามลำดับ โดยพบว่า กากตะกอนเคลือบพริตมีผลต่อการขยายตัวในช่วงอุณหภูมินี้มากที่สุด รองลงมาได้แก่ เศษแก้วโบโรซิลิเกต และเศษแก้วโซดาไลม์มีผลต่อการขยายตัวในช่วงอุณหภูมินี้น้อยที่สุด โดยในช่วงอุณหภูมิเฝ้าระหว่าง 30 – 600°C นี้ จำเป็นต้องทำการตรวจสอบค่าการขยายตัวของเนื้อดินในระหว่างการเผา เนื่องจากที่อุณหภูมิ 573°C จะมีการเปลี่ยนแปลงเฟสของแร่ควอร์ตซ์ ซึ่งเป็นส่วนประกอบในเนื้อดินค่อนข้างมาก ทำให้เนื้อดินมีการขยายตัวเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว (Kingery Bowen and Uhlmann, 1976) จึงต้องทำการเผาชี้นงานในช่วงอุณหภูมินี้อย่างระมัดระวัง โดยเฉพาะกับชี้นงานที่มีการเคลือบปิดทับที่ผิวหน้าเนื้อดิน สูตรเคลือบที่ใช้จะต้องมีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวในช่วงอุณหภูมิดังกล่าวใกล้เคียงกับสูตรเนื้อดิน และเนื้อดินไม่ควรมีการขยายตัวมากกว่าชั้นเคลือบมากเกินไป ซึ่งจะทำให้เกิดการดึงตัวกันระหว่างชั้นเคลือบกับชั้นเนื้อดิน เกิดเป็นตำหนิเคลือบร่อนขึ้นบนผลิตภัณฑ์หลังเผาได้

4.6 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของเนื้อดินกระเบื้องสูตรต่างๆ

การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของเนื้อดินกระเบื้องสูตรทดลองต่างๆ เทียบกับกระเบื้องสูตรมาตรฐานด้วยเทคนิคเอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนส์ (XRF) นั้น ทำเพื่อเป็นการเปรียบเทียบปริมาณสารประกอบหลักที่มีอยู่ในส่วนผสมในแต่ละสูตร เพื่อป้องกันถึงแนวโน้มในการหลอมตัวของสูตรเนื้อดินกระเบื้องทดลองต่างๆ รวมถึงประสิทธิภาพในการเป็นตัวช่วยหลอมของวัสดุเหลือทิ้งแต่ละประเภทด้วย โดยผลการวิเคราะห์ที่ได้แสดงดังตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 4.19

ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของเนื้อดินกระเบื้องสูตรต่างๆ
ด้วยเทคนิคเอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนส์ (XRF)

ออกไซด์ของธาตุ	ชื่อสูตร / องค์ประกอบทางเคมี (%โดยน้ำหนัก)						
	100F (Ref.)	50F 50SLG	20F 80SLG	50F 50BSG	20F 80BSG	50F 50FGS	20F 80FGS
SiO ₂	72.19	73.13	73.69	71.36	73.21	71.13	70.61
Al ₂ O ₃	16.77	13.50	11.52	15.73	14.84	15.36	14.64
B ₂ O ₃	N/A	N/A	N/A	2.21	2.29	N/A	N/A
Na ₂ O	1.81	2.52	2.91	1.82	1.46	1.53	1.26
K ₂ O	1.01	0.97	0.94	1.29	1.34	1.38	1.46
MgO	0.93	1.31	1.56	0.80	0.55	0.70	0.54
CaO	1.27	2.49	3.22	0.90	0.49	1.78	1.98
SrO	N/A	N/A	N/A	0.03	0.02	N/A	N/A
BaO	0.04	0.03	0.04	0.03	0.04	0.19	0.24
PbO	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	0.49	0.59
TiO ₂	0.51	0.43	0.39	0.47	0.44	0.45	0.40
Fe ₂ O ₃	0.88	0.90	0.90	1.02	1.02	0.82	0.83
ZrO ₂	0.04	0.03	0.02	0.04	0.05	1.20	2.33
Cr ₂ O ₃	0.02	0.01	0.01	N/A	N/A	0.02	0.02

ออกไซด์ของธาตุ	ชื่อสูตร / องค์ประกอบทางเคมี (%โดยน้ำหนัก)						
	100F (Ref.)	50F 50SLG	20F 80SLG	50F 50BSG	20F 80BSG	50F 50FGS	20F 80FGS
ZnO	N/A	N/A	0.01	N/A	N/A	0.36	0.46
P ₂ O ₅	0.26	0.23	0.21	0.33	0.32	0.24	0.22
CoO	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	0.05	0.04
Mn ₂ O ₃	0.01	0.01	0.01	N/A	N/A	0.01	0.01
อื่นๆ	0.02	N/A	N/A	0.07	0.07	N/A	N/A
ปริมาณฟลักซ์จากออกไซด์ของธาตุหมู่ 1 และ 2	5.06	7.32	8.67	4.87	3.90	5.58	5.48
ปริมาณฟลักซ์จาก B ₂ O ₃	-	-	-	2.21	2.29	-	-
ปริมาณฟลักซ์จาก PbO	-	-	-	-	-	0.49	0.59
ปริมาณฟลักซ์รวม	5.06	7.32	8.67	7.08	6.19	6.07	6.07

หมายเหตุ: N/A หมายถึง ไม่มีออกไซด์ของธาตุเหล่านั้นเป็นองค์ประกอบอยู่เลย หรือมีในปริมาณน้อยมากซึ่งเครื่องไม่สามารถตรวจวัดได้

จากผลการวิเคราะห์ XRF ในตารางข้างต้น พบว่า สูตรเนื้อดินกระเบื้องทุกสูตรมีสารประกอบฟลักซ์ ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวช่วยลดอุณหภูมิเผาในปริมาณและชนิดที่แตกต่างกันออกไป โดยองค์ประกอบออกไซด์ของธาตุที่เป็นฟลักซ์ในสูตรเนื้อดินต่างๆ ที่พบจากผลการวิเคราะห์ ได้แก่ Na₂O, K₂O, MgO, CaO, SrO, BaO, B₂O₃ และ PbO

เมื่อเปรียบเทียบปริมาณสารประกอบฟลักซ์โดยรวมที่มีอยู่ในสูตรเนื้อดินต่างๆ แล้วพบว่า สูตรเนื้อดินกระเบื้องที่ใช้เศษแก้วโซดาไลม์เป็นตัวช่วยหลอมร่วมกับแร่ซีเดียมเฟลด์สปาร์ทั้งในปริมาณการแทนที่ 50 และ 80 %โดยน้ำหนักนั้น มีปริมาณสารประกอบฟลักซ์โดยรวมอยู่มากที่สุด (7.32 และ 8.67% ตามลำดับ) รองลงมาได้แก่ สูตรเนื้อดินที่ใช้เศษแก้วโบโรซิลิเกตเป็นตัวช่วยหลอมร่วมกับแร่ซีเดียมเฟลด์สปาร์ในปริมาณการแทนที่ 50 และ 80 %โดยน้ำหนัก ซึ่งมีปริมาณสารประกอบฟลักซ์โดยรวมอยู่ที่ 7.08 และ 6.19% ตามลำดับ และต่อมาก็คือ สูตรเนื้อดินที่

ใช้กากตะกอนเคลือบฟritเป็นตัวช่วยหลอมร่วมกับแร่โซเดียมเฟลด์สปาร์ ซึ่งมีปริมาณฟลักซ์โดยรวมอยู่ที่ 6.07% ทั้งในปริมาณการแทนที่ 50 และ 80 %โดยน้ำหนัก โดยสูตรที่มีปริมาณสารประกอบฟลักซ์โดยรวมอยู่น้อยที่สุด (5.06%) ได้แก่ สูตรเนื้อดินกระเบื้องมาตรฐานอ้างอิง ซึ่งใช้แร่โซเดียมเฟลด์สปาร์เป็นตัวช่วยหลอมเพียงอย่างเดียว

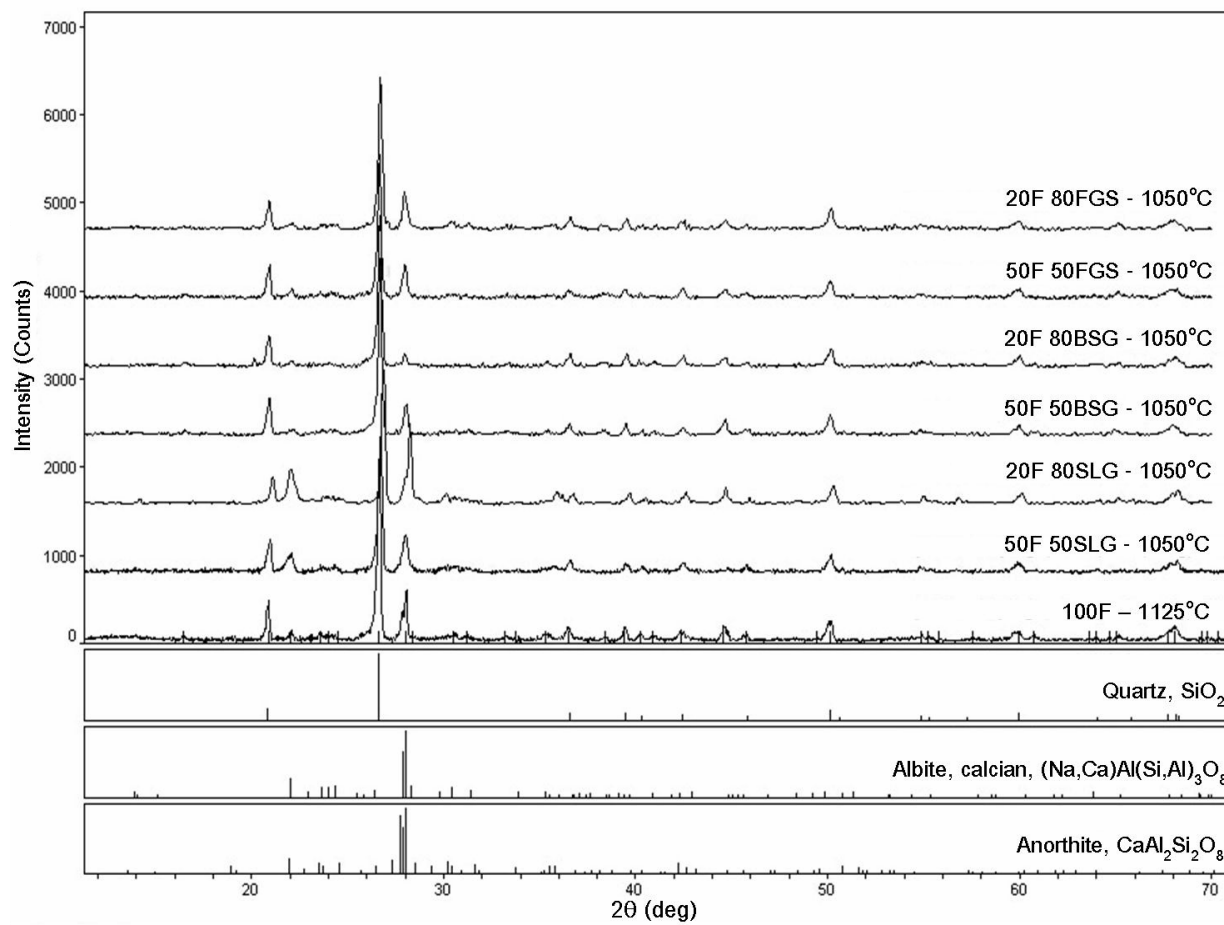
จากผลการวิเคราะห์ที่ได้ควรสรุปได้ว่า สูตรเนื้อดินที่มีเศษแก้วโซดาไลม์เป็นส่วนประกอบมีการหลอมตัวได้ง่ายที่สุด รองลงมาได้แก่ สูตรเนื้อดินที่ใช้เศษแก้วโบโรซิลิเกต กากตะกอนเคลือบฟrit และสูตรมาตรฐานอ้างอิงที่ไม่มีการใช้วัสดุเหลือทิ้งใดๆ มีการหลอมตัวยากที่สุด ตามลำดับ แต่จากผลการทดสอบสมบัติทางกายภาพ สมบัติทางกล และสมบัติทางความร้อนของชิ้นงานหลังเผาตามที่ได้กล่าวมาแล้วในช่วงต้น กลับพบว่า สูตรเนื้อดินกระเบื้องที่มีกากตะกอนเคลือบฟritเป็นส่วนประกอบจะมีประสิทธิภาพในการหลอมตัวได้มากที่สุด รองลงมาจึงเป็นเศษแก้วโซดาไลม์ เศษแก้วโบโรซิลิเกต และสูตรมาตรฐานอ้างอิงเป็นลำดับสุดท้าย จากผลการวิเคราะห์พบว่า มีข้อที่น่าสังเกตคือ กากตะกอนเคลือบฟritเป็นวัสดุเหลือทิ้งเพียงประเภทเดียวที่มีออกไซด์ของตะกั่ว (PbO) เป็นส่วนประกอบ ในขณะที่เศษแก้วทั้ง 2 ประเภทและสูตรมาตรฐานอ้างอิงไม่มีอยู่เลย ดังนั้นจึงน่าจะเป็นสาเหตุหลักที่ทำให้สูตรเนื้อดินที่มีกากตะกอนเคลือบฟritเป็นส่วนประกอบมีการหลอมตัวที่ดีกว่า ถึงแม้จะมีปริมาณฟลักซ์โดยรวมอยู่น้อยกว่าสูตรที่ใช้เศษแก้วทั้งสองชนิดก็ตาม จึงอาจสรุปได้ว่า PbO เป็นสารประกอบฟลักซ์ที่มีประสิทธิภาพในการช่วยลดจุดหลอมตัวของเนื้อดินกระเบื้องได้มากกว่า เมื่อเทียบกับสารประกอบฟลักซ์ประเภทอัลคาไลหรืออัลคาไลน์เอิร์ท และ B_2O_3

4.7 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางแร่ของชิ้นงานกระเบื้องหลังเผาสูตรต่างๆ

การวิเคราะห์องค์ประกอบทางแร่ของชิ้นงานกระเบื้องหลังเผาด้วยเทคนิค X-ray Diffraction (XRD) นั้น ทำเพื่อเป็นการวิเคราะห์ถึงเฟสที่เกิดขึ้นในเนื้อชิ้นงานหลังผ่านการเผา เพื่อบ่งบอกถึงความสุกตัวของเนื้อชิ้นงาน และเพื่อเป็นการเปรียบเทียบได้ว่าชิ้นงานสูตรทดลองซึ่งใช้วัสดุเหลือทิ้งในปริมาณต่างๆ เป็นตัวช่วยหลอมร่วมกับแร่โซเดียมเฟลด์สปาร์นั้น หลังผ่านการเผาที่อุณหภูมิลดต่ำลงแล้ว มีเฟสที่เกิดขึ้นในเนื้อชิ้นงานหลังเผาเหมือนกับเฟสที่เกิดขึ้นในเนื้อกระเบื้องสูตรมาตรฐานที่ใช้อ้างอิงซึ่งผ่านการเผาที่อุณหภูมิสูงกว่า (อุณหภูมิเผาปกติของโรงงาน) หรือไม่ ซึ่งเป็นการบ่งชี้ได้ว่าชิ้นงานกระเบื้องหลังเผาในแต่ละสูตรทดลองมีความสุกตัวเทียบเท่าได้กับชิ้นงานกระเบื้องสูตรมาตรฐานแล้วหรือไม่นั่นเอง ผลการวิเคราะห์ที่ได้แสดงดังภาพที่ 4.23

ภาพที่ 4.23

ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางแร่ของชิ้นงานกระเบื้องทดลองสูตรต่างๆ เเผที่อุณหภูมิ 1,050°C
เทียบกับชิ้นงานกระเบื้องสูตรมาตรฐานอ้างอิงซึ่งเผที่อุณหภูมิ 1,125°C



จากผลการวิเคราะห์ XRD ในกราฟข้างต้น พบว่า ชิ้นงานกระเบื้องหลังเผาทุกสูตร ประกอบไปด้วย 3 เฟสหลักๆ ที่เหมือนกันในเนื้อชิ้นงาน ได้แก่ ควอร์ตซ์ (Quartz, SiO_2) อัลไบต์ (Albite, calcian, $(\text{Na,Ca})\text{Al}(\text{Si,Al})_3\text{O}_8$) และ อะนอร์ไทต์ (Anorthite, $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$) โดยอาจมีปริมาณของแต่ละเฟสมากน้อยแตกต่างกันออกไป ซึ่งดูได้จากความสูงของเส้นกราฟในแต่ละพีค จากกราฟพบว่า ปริมาณของเฟสที่แตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด คือกราฟของสูตรที่ใช้เศษแก้วโซดาไลม์เป็นส่วนประกอบ (50F50SLG และ 20F80SLG) โดยจะเห็นได้ว่ามีความสูงของพีคที่เป็นเฟสอัลไบต์และอะนอร์ไทต์ สูงกว่ากราฟของสูตรอื่นๆ โดยเฉพาะสูตร 20F80SLG จะมีความสูงของพีคดังกล่าวมากกว่าสูตร 50F50SLG ทั้งนี้เนื่องจากการแทนที่ด้วยเศษแก้วโซดาไลม์ในปริมาณที่มากกว่า ทำให้มี CaO และ Na_2O ในปริมาณที่สูงกว่าด้วยนั่นเอง ซึ่งส่งผลต่อค่าความแข็งแรงของชิ้นงานหลังเผาที่มากกว่าสูตรอื่นๆ ด้วย พบว่าผลที่ได้สอดคล้องกับผลการวิเคราะห์องค์ประกอบออกไซด์ของธาตุด้วยเทคนิค XRF และผลการทดสอบสมบัติทางกลของชิ้นงานหลังเผา ที่พบว่าค่าความต้านทานแรงดัดของสูตรที่มีการใช้เศษแก้วโซดาไลม์เป็นส่วนผสมและเผาที่อุณหภูมิ $1,050^\circ\text{C}$ จะมีค่าความแข็งแรงมากกว่าสูตรที่ใช้วัสดุเหลือทิ้งประเภทอื่นๆ และสูตรอ้างอิง อุณหภูมิการเผาเดียวกัน รวมถึงมีค่าความแข็งแรงมากกว่าสูตรอ้างอิงที่ใช้แร่ซีเดียมเฟลด์สปาร์เป็นตัวช่วยหลอมเพียงอย่างเดียวที่ทำการเผาที่อุณหภูมิ $1,125^\circ\text{C}$ อีกด้วย

เมื่อเปรียบเทียบเฟสที่เกิดขึ้นหลังเผา รวมถึงลักษณะและความสูงของกราฟของกระเบื้องทดลองในแต่ละสูตรซึ่งเผาที่อุณหภูมิ $1,050^\circ\text{C}$ กับกระเบื้องสูตรมาตรฐานอ้างอิงซึ่งเผาที่อุณหภูมิปกติของโรงงาน $1,125^\circ\text{C}$ แล้ว พบว่ามีความใกล้เคียงกันมาก มีความแตกต่างกันเฉพาะปริมาณของเฟสอัลไบต์และอะนอร์ไทต์ของสูตรที่มีเศษแก้วโซดาไลม์เป็นส่วนประกอบเท่านั้น ดังได้กล่าวมาแล้ว ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าชิ้นงานกระเบื้องทดลองสามารถถูกเผาให้สุกตัวได้ที่อุณหภูมิต่ำลง (อย่างน้อย 75°C) โดยใช้วัสดุเหลือทิ้งประเภทต่างๆ มาเป็นตัวช่วยหลอมร่วมกับแร่ซีเดียมเฟลด์สปาร์

พบว่า ผลที่ได้จากการทดลองสอดคล้องกับงานวิจัยของ Luz และ Ribeiro (2007) ที่พบเฟสมัลไลต์ (Mullite, $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$) ควอร์ตซ์ และอะนอร์ไทต์ จากผลการวิเคราะห์ XRD ของเนื้อดินกระเบื้องเซรามิกชนิดพอร์ซเลน-สโตนแวร์ที่เขาค้นคว้าการศึกษาโดยมีเศษแก้วโซดาไลม์เป็นส่วนผสมในปริมาณ 5-20% ทั้งนี้เนื่องจากเฟสมัลไลต์ เป็นเฟสที่สามารถพบได้ทั้งการเผาอุณหภูมิสูง ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงไม่พบเฟสดังกล่าว แต่สำหรับ Luz และ Ribeiro ได้ทำการเผาชิ้นงานที่อุณหภูมิตั้งแต่ $1,000 - 1,250^\circ\text{C}$ และพบเฟสมัลไลต์ที่อุณหภูมิตั้งแต่ $1,150^\circ\text{C}$ ขึ้นไป นอกจากนี้วัตถุดิบที่ใช้ในสูตรเนื้อดินที่แตกต่างกันก็มีส่วนทำให้ไม่พบเฟสมัลไลต์ในเนื้อกระเบื้องหลังเผาได้

โดยในงานวิจัยของ Luz และ Ribeiro จะใช้ดินขาว (Kaolinitic clay) เป็นวัตถุดิบหลัก ซึ่งมีปริมาณ Al_2O_3 และ SiO_2 อยู่ในตัวค่อนข้างสูง (Al_2O_3 28.20 wt.% และ SiO_2 50.94 wt.%) และใช้ในปริมาณที่มากถึง 60-80% ในสูตรทดลอง ทำให้สามารถพบเฟสมัลไลต์หลังเผาได้ง่ายกว่า ในขณะที่ในงานวิจัยนี้ไม่มีการใช้แร่ดินขาว แต่จะใช้ดินเหนียว (Ball clay) ในปริมาณเพียง 20% ในสูตร ทำให้มีปริมาณ Al_2O_3 อยู่ในสูตรเนื้อดินกระเบื้องที่ต่ำกว่า ดังนั้นจึงทำให้เกิดเฟสมัลไลต์ได้ยากกว่ากระเบื้องเนื้อพอร์ซเลน-สโตนแวร์อีกด้วย

จากจุดประสงค์ของงานวิจัยที่ต้องการลดอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาขึ้นงานลง โดยผลิตภัณฑ์กระเบื้องหลังเผายังคงมีสมบัติต่างๆ ผ่านตามข้อกำหนดของเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมกระเบื้องบุผนังเซรามิกทั้งประเภทภายในและภายนอกอาคาร (มอก. 613-2529 และ มอก. 614-2529) นั้น ผลที่ได้จากการทดลองทั้งหมด พบว่า อุณหภูมิในการเผาที่ต่ำสุดที่สามารถนำวัสดุเหลือทิ้งประเภทต่างๆ มาใช้งานเป็นตัวช่วยหลอมทดแทนแร่โซเดียมเฟลด์สปาร์ ในสูตรกระเบื้องบุผนังเซรามิกได้นั้น คือ $1,050^\circ\text{C}$ และปริมาณการใช้งานมากที่สุดที่สามารถใช้ได้ คือ 70% ของการแทนที่แร่โซเดียมเฟลด์สปาร์ (ใช้งานในสูตรจริง 28%โดยน้ำหนัก) โดยขึ้นงานยังคงมีสมบัติต่างๆ ผ่านตามเกณฑ์มาตรฐานดังกล่าว ซึ่งจากผลการทดสอบ พบว่า กากตะกอนเคลือบฟrit ให้ประสิทธิภาพในการเป็นตัวช่วยหลอมได้มากกว่า เศษแก้วโซดาไลม์ และเศษแก้วโบโรซิลิเกต ตามลำดับ สามารถสรุปผลการทดสอบให้เห็นได้ชัดเจน ดังแสดงในตารางที่ 4.20

ตารางที่ 4.20 (ต่อ)

ประเภท ของวัสดุ เหลือทิ้ง	ชื่อสูตร	กระเบื้องบุผนังภายในอาคาร (มอก. 613-2529)				กระเบื้องบุผนังภายนอกอาคาร (มอก. 614-2529)				
		การดูด ซึมน้ำ (≤ 18%)	ความบิดเบี้ยว			การดูด ซึมน้ำ (≤ 6%)	ความบิดเบี้ยว			ความ ต้านทาน แรงดัด (≥ 20 MPa)
			นูนขึ้น-แอ่นลง		โค้งออก- เว้าเข้า (≤ 0.5%)		นูนขึ้น-แอ่นลง		โค้งออก- เว้าเข้า (≤ 0.75%)	
			แนวขอบ (≤ 0.3%)	แนวเส้น ทแยงมุม (≤ 0.2%)			แนวขอบ (≤ 1.5%)	แนวเส้น ทแยงมุม (≤ 0.75%)		
เศษแก้ว โบริซิลิเกต	30F 70BSG	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	40F 60BSG	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	50F 50BSG	✓	✓	✓	✓	✗	✓	✓	✓	✓
กากตะกอน เคลือบฟริต	100 FGS	✓	✓	✗	✗	✓	✓	✓	✓	✓
	20F 80FGS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	30F 70FGS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	40F 60FGS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	50F 50FGS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

หมายเหตุ: ✓ หมายถึง ผ่านตามเกณฑ์มาตรฐาน
✗ หมายถึง ไม่ผ่านตามเกณฑ์มาตรฐาน

บทที่ 5

สรุปผลการศึกษาวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการศึกษาวิจัย

งานวิจัยในหัวข้อวิทยานิพนธ์เรื่อง “การใช้เศษแก้วและกากตะกอนเคลือบฟritเป็นตัวช่วยหลอมในการผลิตกระเบื้องเซรามิก” มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาหาแนวทางในการนำของเสียกลับมาใช้ให้เกิดประโยชน์ และลดต้นทุนการผลิตให้แก่อุตสาหกรรมกระเบื้องเซรามิก ทั้งในด้านลดการใช้พลังงานจากการลดอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาผลิตภัณฑ์ ลดการใช้ทรัพยากรแร่จากธรรมชาติ รวมถึงลดต้นทุนค่าวัตถุดิบในการผลิต โดยนำของเสียที่มีอยู่ภายในโรงงานผลิตกระเบื้องเซรามิกเอง ได้แก่ กากตะกอนเคลือบฟrit และของเสียจากอุตสาหกรรมการผลิตแก้วและกระจกต่างๆ ได้แก่ เศษแก้วชนิดโซดาไลม์ และเศษแก้วชนิดโบโรซิลิเกต กลับมาใช้ให้เกิดประโยชน์เป็นตัวช่วยหลอมทดแทนแร่โซเดียมเฟลด์สปาร์ ซึ่งเป็นแร่ธรรมชาติที่ปัจจุบันใช้เป็นตัวช่วยหลอมในกระบวนการผลิตกระเบื้องเซรามิก ทั้งนี้เนื่องจากของเสียเหล่านี้มีสารประกอบออกไซด์ของธาตุหมู่ 1 และ 2 (อัลคาไลและอัลคาไลน์เอิร์ท) เป็นองค์ประกอบหลักอยู่หลายชนิด คล้ายกับแร่โซเดียมเฟลด์สปาร์ ได้แก่ Na_2O , K_2O , MgO และ CaO ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวช่วยหลอมในกระบวนการเผาผลิตภัณฑ์

การทดลองได้ทำการแทนที่แร่โซเดียมเฟลด์สปาร์ที่มีอยู่ 40% ในสูตรกระเบื้องบุผนังเซรามิก ซึ่งใช้เป็นสูตรมาตรฐานอ้างอิงด้วยวัสดุเหลือทิ้งประเภทต่างๆ ในปริมาณ 50 และ 100% โดยน้ำหนัก เมื่อได้ผลการทดสอบสมบัติทางกายภาพ และสมบัติทางกลของชิ้นงานหลังเผาแล้วพบว่า สูตรกระเบื้องทดลองที่มีการใช้วัสดุเหลือทิ้งทั้ง 3 ประเภททดแทนแร่โซเดียมเฟลด์สปาร์ในปริมาณ 100% นั้น ส่วนใหญ่มีค่าความบิดเบี้ยวของชิ้นงานหลังเผาไม่ผ่านตามเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก.613-2529 และ 614-2529 จึงได้ทำการทดลองซ้ำ เพื่อศึกษาผลในระดับที่ละเอียดมากขึ้น โดยทำการแทนที่ในปริมาณ 50 60 70 และ 80 % โดยน้ำหนัก การเตรียมชิ้นงานทดลองใช้วิธีการเช่นเดียวกับการผลิตกระเบื้องจริงในทางอุตสาหกรรม ทำการเผาชิ้นงานเพื่อศึกษาผลที่อุณหภูมิ 1000, 1050, 1100 และ 1125°C ทดสอบสมบัติทางกายภาพ ได้แก่ ค่าการหดตัวเชิงเส้น ค่าความหนาแน่น ค่าการดูดซึมน้ำ และค่าความบิดเบี้ยวของชิ้นงานหลังเผาสมบัติทางกล ได้แก่ ค่าความต้านทานแรงดัด สมบัติทางความร้อน ได้แก่ ค่าการขยายตัวและหดตัวของชิ้นงานในระหว่างกระบวนการเผาด้วยเครื่อง Dilatometer วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี

ของสูตรเนื้อดิน และวัตถุดิบที่นำมาใช้ด้วยเทคนิค XRF และวิเคราะห์องค์ประกอบทางแร่ของชิ้นงานหลังเผาด้วยเทคนิค XRD เปรียบเทียบผลการทดสอบระหว่างสูตรทดลองซึ่งแทนที่แร่โซเดียมเฟลด์สปาร์ด้วยวัสดุเหลือทิ้งในปริมาณต่างๆ และสูตรกระเบื้องมาตรฐานที่ใช้อ้างอิง เพื่อศึกษาถึงประสิทธิภาพในการเป็นตัวช่วยหลอมของวัสดุเหลือทิ้งแต่ละประเภท

ผลการศึกษาทั้งหมด พบว่า กากตะกอนเคลือบฟrit เป็นวัสดุเหลือทิ้งที่มีประสิทธิภาพช่วยลดจุดหลอมตัวของเนื้อดินกระเบื้องเซรามิกได้มากที่สุด รองลงมาจึงเป็นเศษแก้วโซดาไลม์ และเศษแก้วโบโรซิลิเกต ตามลำดับ โดยการใช่วัสดุเหลือทิ้งเป็นตัวช่วยหลอมร่วมกับแร่โซเดียมเฟลด์สปาร์จะให้ผลที่ดีกว่าการใช้แร่โซเดียมเฟลด์สปาร์เป็นตัวช่วยหลอมแต่เพียงอย่างเดียวในสูตรมาตรฐานอ้างอิง แต่จะให้ผลคุณสมบัติหลังเผาที่ดีและผ่านตามเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมกระเบื้องบุผนังเซรามิกทั้งประเภทภายในและภายนอกอาคาร (มอก. 613-2529 และ มอก. 614-2529) เฉพาะกับการเผาที่อุณหภูมิต่ำๆ ไม่เกิน $1,100^{\circ}\text{C}$ และการใช้ในปริมาณที่ไม่มากเกินไปเท่านั้น โดยปริมาณที่เริ่มส่งผลกระทบต่อค่าสมบัติทางกายภาพที่ไม่ผ่านตามเกณฑ์มาตรฐาน คือ การใช้ในปริมาณที่เกิน 28% โดยน้ำหนักในสูตรทดลอง (แทนที่แร่โซเดียมเฟลด์สปาร์เกิน 70%) ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อความแข็งแรงของชิ้นงานหลังเผาที่ลดลง ทั้งนี้เนื่องจากวัสดุเหลือทิ้งต่างๆ ที่นำมาใช้เป็นประเภทแก้ว และคล้ายแก้ว (กากตะกอนเคลือบฟrit) ซึ่งเป็นวัสดุประเภทอสัณฐาน (Amorphous materials) ที่ไม่มีผลึกในโครงสร้าง หรือโมเลกุลเรียงตัวกันอย่างไม่เป็นระเบียบ ดังนั้นที่อุณหภูมิสูงจึงเกิดการหลอมตัวได้ง่าย และมีความแข็งแรงต่ำกว่าวัสดุประเภทที่มีโครงสร้างเป็นผลึกที่ชัดเจน เช่น แร่โซเดียมเฟลด์สปาร์

ผลการทดลอง พบว่าสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุเหลือทิ้งประเภทต่างๆ เปรียบเทียบกับแร่โซเดียมเฟลด์สปาร์ ซึ่งพบว่าปริมาณของสารประกอบฟลักซ์โดยรวม (ออกไซด์ของอัลคาไลและอัลคาไลน์เอิร์ท รวมถึง PbO และ B_2O_3) ที่พบในวัสดุเหลือทิ้งประเภทต่างๆ นั้น มีค่ามากกว่าในแร่โซเดียมเฟลด์สปาร์ โดยพบว่าสาเหตุที่กากตะกอนเคลือบฟrit มีประสิทธิภาพในการเป็นตัวช่วยหลอมได้มากที่สุด เนื่องจากมีออกไซด์ของตะกั่ว (PbO) อยู่ในปริมาณมาก ซึ่งไม่พบในวัสดุเหลือทิ้งประเภทอื่นๆ เลย โดย PbO เป็นสารประกอบฟลักซ์ที่ให้ผลรุนแรงมากกว่าออกไซด์ของอัลคาไลและอัลคาไลน์เอิร์ท เนื่องจากมีจุดหลอมเหลวของตัวเองที่ต่ำ (ประมาณ 500°C)

นอกจากนี้ ผลการวิเคราะห์การขยายตัวและหดตัวของชิ้นงานในระหว่างการทำความร้อนด้วยเครื่อง Dilatometer ยังสามารถยืนยันผลได้ว่า กากตะกอนเคลือบฟrit มีประสิทธิภาพในการเป็นตัวช่วยหลอมได้มากที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุเหลือทิ้งตัวอื่นๆ และแร่

โซเดียมเฟลด์สปาร์ เนื่องจากพบว่าสูตรที่มีการใช้กากตะกอนเคลือบฟritเป็นตัวช่วยหลอมร่วมด้วยนั้น จะมีค่าการหดตัวของชิ้นงานเมื่อสิ้นสุดการเผาที่มากกว่า และอุณหภูมิเริ่มต้นที่ชิ้นงานเกิดการหดตัวยังต่ำกว่าสูตรอื่นๆ ด้วย

สำหรับผลการวิเคราะห์ห้องประกอบทางแร่ของชิ้นงานหลังเผาโดยใช้เทคนิค XRD ทำให้ทราบว่าที่อุณหภูมิการเผาลดต่ำลงเป็น $1,050^{\circ}\text{C}$ นั้น ชิ้นงานกระเบื้องทดลองซึ่งใช้วัสดุเหลือทิ้งแต่ละประเภทมาเป็นตัวช่วยหลอมร่วมกับแร่โซเดียมเฟลด์สปาร์ในปริมาณต่างๆ ให้ผลการสุกตัวของชิ้นงานหลังเผาได้เช่นเดียวกับชิ้นงานกระเบื้องสูตรมาตรฐานอ้างอิง ซึ่งทำการเผาที่อุณหภูมิสูงกว่า ($1,125^{\circ}\text{C}$) โดยดูได้จากชนิดและปริมาณของเฟสที่เกิดขึ้นในเนื้อชิ้นงานหลังเผาที่เหมือนกัน ทำให้เป็นการยืนยันผลได้ว่า การใช้วัสดุเหลือทิ้งแต่ละประเภทมาเป็นตัวช่วยหลอมร่วมกับแร่โซเดียมเฟลด์สปาร์ในการผลิตกระเบื้องบุผนังเซรามิกนั้น สามารถช่วยลดอุณหภูมิในการเผาผลิตภัณฑ์ลงมาได้อย่างน้อยถึง 75°C

ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า วัสดุเหลือทิ้งประเภทเศษแก้วโซดาไลม์ เศษแก้วโบโรซิลิเกต และกากตะกอนเคลือบฟritในโรงงานผลิตกระเบื้องเซรามิกนั้น สามารถนำมาใช้เป็นตัวช่วยหลอมทดแทนแร่โซเดียมเฟลด์สปาร์ในสูตรเนื้อดินกระเบื้องบุผนังเซรามิกได้ และสามารถช่วยลดอุณหภูมิในการเผาผลิตภัณฑ์ลงมาได้ที่ $1,050^{\circ}\text{C}$ โดยชิ้นงานยังคงมีสมบัติต่างๆ ผ่านตามเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมกระเบื้องบุผนังเซรามิกทั้งประเภทภายในและภายนอกอาคาร (มอก. 613-2529 และมอก. 614-2529) และพบว่า กากตะกอนเคลือบฟritมีประสิทธิภาพในการเป็นตัวช่วยหลอมได้มากที่สุด รองลงมาได้แก่ เศษแก้วชนิดโซดาไลม์ และเศษแก้วชนิดโบโรซิลิเกตตามลำดับ แต่การใช้วัสดุเหลือทิ้งทั้ง 3 ประเภทเป็นตัวช่วยหลอมร่วมกับแร่โซเดียมเฟลด์สปาร์นั้นยังมีข้อจำกัด กล่าวคือ จะสามารถใช้งานได้มากที่สุด ในปริมาณ 28% โดยน้ำหนักในสูตรเนื้อดิน (70% ของการแทนที่แร่โซเดียมเฟลด์สปาร์) โดยการใช้ในปริมาณที่มากเกินไปกว่า 28% โดยน้ำหนัก และทำการเผาที่อุณหภูมิสูงเกินกว่า $1,100^{\circ}\text{C}$ ขึ้นไปนั้น จะส่งผลต่อค่าความบิดเบี้ยวที่มากขึ้น และค่าความแข็งแรงที่ลดลงของชิ้นงานหลังเผา ซึ่งพบว่ากากตะกอนเคลือบฟrit และเศษแก้วโซดาไลม์ จะส่งผลกระทบต่อค่าดังกล่าวมากกว่าการใช้เศษแก้วโบโรซิลิเกต

จากการอ้างอิงข้อมูลจากกรณีศึกษา “โครงการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีสะอาดในการผลิตเซรามิก ระยะที่ 2” ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ, 2552 ซึ่งพบว่าการใช้พลังงานเชื้อเพลิงประเภทแก๊สปิโตรเลียมเหลว (LPG) ในกระบวนการเผาผลิตภัณฑ์เซรามิกประเภทของตกแต่งบ้านและสวน ด้วยเตาเผาชนิด Shuttle kiln นั้น การลดอุณหภูมิในการเผาผลิตภัณฑ์ลงได้ 100°C จะสามารถช่วยประหยัดพลังงานเชื้อเพลิงที่ใช้ในกระบวนการเผาลงได้ถึง 23.15% ดังนั้น

จากผลการศึกษาวิจัยที่พบว่า การใช้วัสดุเหลือทิ้งทั้ง 3 ประเภทเป็นตัวช่วยหลอมร่วมกับแร่โซเดียมเฟลด์สปาร์ในสูตรเนื้อดินกระเบื้องบุผนังเซรามิกนั้น จะสามารถช่วยลดอุณหภูมิในการเผาผลิตภัณฑ์ลงได้ถึง 75°C หากคิดเป็นมูลค่าการประหยัดพลังงานเชื้อเพลิงที่ใช้ในกระบวนการเผาผลิตภัณฑ์ จะสามารถคิดเป็นมูลค่าการประหยัดพลังงานได้ถึง 17.36%

5.2 ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคต

เนื่องจากงานวิจัยนี้ได้รับความร่วมมือจากโรงงานผลิตกระเบื้องเซรามิก (ห้างหุ้นส่วนจำกัดกระเบื้องไทย) จึงมีจุดมุ่งหมายให้สามารถนำไปใช้งานได้จริงในอุตสาหกรรมการผลิตต่อไป ดังนั้นจากผลงานวิจัยซึ่งพัฒนาเฉพาะสูตรเนื้อดินกระเบื้องเซรามิก จึงควรทำการวิจัยและพัฒนาสูตรเคลือบของโรงงานให้เหมาะสมกับสูตรเนื้อดินที่มีการใช้ของเสียเป็นส่วนผสมด้วย โดยต้องมีการปรับปรุงสูตรเคลือบให้มีค่าการขยายตัวในระหว่างกระบวนการเผาที่สอดคล้องกับค่าการขยายตัวของเนื้อดิน ซึ่งสามารถดูข้อมูลได้จากผลการวิเคราะห์ของเครื่อง Dilatometer ที่ได้จากงานวิจัยนี้ เพื่อไม่ให้เกิดปัญหาตำหนิเคลือบร้าว หรือเคลือบร่อนเกิดขึ้นบนผลิตภัณฑ์หลังผ่านการเผา หากมีการใช้ของเสียต่างๆ ร่วมด้วย

นอกจากนี้ จากผลการวิจัยพบว่า สีของเนื้อดินหลังเผาจากสูตรที่มีการใช้กากตะกอนเคลือบฟritเป็นส่วนผสมนั้น มีความไม่สม่ำเสมอและมีสีที่เพี้ยนไปจากสีเนื้อดินปกติ (สูตรมาตรฐานที่ใช้อ้างอิง) ค่อนข้างมาก ทั้งนี้เนื่องมาจากกากตะกอนเคลือบที่นำมาใช้ในแต่ละครั้งนั้น อาจมีคุณภาพที่ไม่เหมือนกัน และมีการปนเปื้อนของสีหรือวัตถุติดต่างๆ ที่ใช้ในการผลิตเคลือบที่แตกต่างกันออกไปตามแผนการผลิตของโรงงาน ดังนั้น การนำเอากากตะกอนเคลือบเหล่านี้กลับมาใช้จึงอาจต้องควบคุมปริมาณการใช้งานในแต่ละครั้งที่ไม่เท่ากัน หากต้องการสีหลังเผาให้อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานตามความต้องการของโรงงาน ซึ่งอาจต้องทำการวิจัยและพัฒนาเพิ่มเติมถึงปริมาณการใช้งานที่เหมาะสมไม่ให้ส่งผลกระทบต่อสีของเนื้อดินหลังเผา โดยเฉพาะอย่างยิ่งหากต้องการนำไปใช้กับผลิตภัณฑ์กระเบื้องประเภทที่ต้องใช้สีเนื้อดิน (ไม่เคลือบ) หรือใช้กับสูตรเคลือบใสหรือเคลือบสีอ่อน โดยอาจต้องมีการวิจัยและพัฒนาสูตรเคลือบเอนโกบเพิ่มเติม (สูตรเคลือบที่มีส่วนผสมปนกันระหว่างเนื้อดินกับเคลือบ ใช้งานในลักษณะเป็นตัวรองพื้นเพื่อปกปิดผิวหน้าเนื้อดินก่อนหนึ่งชั้น แล้วค่อยเคลือบผิวชั้นงานตามปกติ เพื่อให้ได้สีเคลือบหลังเผตรงตามความต้องการ) แต่ในบางครั้งสีของเนื้อดินหลังเผาที่เพี้ยนไปบ้าง ก็ไม่มีความสำคัญสำหรับเนื้อดินที่นำไปใช้กับสูตรเคลือบในลักษณะที่ทึบและมีสีเข้ม เนื่องจากในการนำไปใช้งานจริงนั้นผลิตภัณฑ์

กระเบื้องไม่จำเป็นต้องทาสีเนื้อดิน ดังนั้นจึงขึ้นอยู่กับรูปแบบและความต้องการของโรงงานว่าจะนำสูตรเนื้อดินเหล่านี้ไปใช้กับสูตรเคลือบในลักษณะใดบ้าง ซึ่งอาจต้องมีการพัฒนาและปรับปรุงเพิ่มเติมเป็นรายกรณีไป

รายการอ้างอิง

หนังสือ (ภาษาไทย)

- ไพจิตร อิงศิริวัฒน์. (2541). *เนื้อดินเซรามิก*. กรุงเทพฯ: โอเดียนสโตร์.
- ปรีดา พิมพ์ขาวขำ. (2530). *เคลือบเซรามิกส์*. กรุงเทพฯ: อักษรเจริญทัศน์.
- ปรีดา พิมพ์ขาวขำ. (2539). *เซรามิกส์ (พิมพ์ครั้งที่ 4, ฉบับปรับปรุงแก้ไข)*. กรุงเทพฯ: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

หนังสือ (ภาษาอังกฤษ)

- ASTM C 326-03 (2005). Standard Test Method for Drying and Firing Shrinkages of Ceramic Whiteware Clays. *Annual Book of ASTM Standards* (Volume 15.02 Glass; Ceramic Whitewares). U.S.A.
- ASTM C 373-88 (2005). Standard Test Method for Water Absorption, Bulk Density, Apparent Porosity, and Apparent Specific Gravity of Fired Whiteware Products. *Annual Book of ASTM Standards* (Volume 15.02, Glass; Ceramic Whitewares). U.S.A.
- ASTM C 372 – 94 (2005). Standard Test Method for Linear Thermal Expansion of Porcelain Enamel and Glaze Frits and Fired Ceramic Whiteware Products by the Dilatometer Method. *Annual Book of ASTM Standards* (Volume 15.02, Glass; Ceramic Whitewares). U.S.A.
- Harper, Charles A. (2001). *Handbook of Ceramics, Glasses, and Diamonds*. New York: McGraw-Hill.
- Kingery, W.D., Bowen, H.K., and Uhlmann D.R. (1976). *Introduction to Ceramics* (Second Edition). U.S.A.: A Wiley-Interscience Publication.
- Ryan, W., and Radford, C. (1997). *Whitewares: Production, Testing and Quality Control*. London: The Institute of Materials.
- SACMI. (2002). *Applied Ceramic Technology (Volume I)*. Italy.

บทความวารสาร (ภาษาไทย)

เพชรพร เชาวกิจเจริญ ,ชดชนก อัทธมพงศ์ ,อลิสสา วิเชียรเจริญ และ อัจฉราภรณ์ พรหมบุตร. (2549). การใช้ของเสียที่เป็นแก้วทดแทนแร่เฟลด์สปาร์ในการผลิตกระเบื้องเซรามิก. *วารสารวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมไทย*, 20(1), 39-47.

บทความวารสาร (ภาษาอังกฤษ)

- Andreola, F., Barbieri, L., Karamanova, E., Lancellotti, I., and Pelino, M. (2008). Recycling of CRT panel glass as fluxing agent in the porcelain stoneware tile production. *Ceramics International*, 34, 1289-1295.
- Luz, A.P., and Ribeiro, S. (2007). Use of glass waste as a raw material in porcelain stoneware tile mixtures. *Ceramics International*, 33, 761-765.
- Matteucci, F., Dondi, M. and Guarini, G. (2002). Effect of soda-lime glass on sintering and technological properties of porcelain stoneware tiles. *Ceramics International*, 28, 873-880.
- Pontikes, Y., Esposito, L., Tucci, A., and Angelopoulos, G.N. (2007). Thermal behaviour of clays for traditional ceramics with soda-lime-silica waste glass admixture. *Journal of the European Ceramic Society*, 27, 1657-1663.
- Raimondo, M., Zanelli, C., Matteucci, F., Guarini, G., Dondi, M., and Labrincha, J.A. (2007). Effect of waste glass (TV/PC cathodic tube and screen) on technological properties and sintering behaviour of porcelain stoneware tiles. *Ceramics International*, 33, 615-623.

เอกสารอื่น ๆ

- สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. (2542). *มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมกระเบื้องดินเผา/พื้น* (มอก. 37-2529). กรุงเทพฯ: กระทรวงอุตสาหกรรม.
- สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. (2543). *มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมกระเบื้องดินเผาเคลือบผนังภายใน* (มอก. 613-2529). กรุงเทพฯ: กระทรวงอุตสาหกรรม.
- สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. (2529). *มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมกระเบื้องดินเผาผนังภายนอก* (มอก. 614-2529). กรุงเทพฯ: กระทรวงอุตสาหกรรม.

สมนึก ศิริสุนทร. (2552). เอกสารประกอบการสัมมนาเรื่อง "สภาวะการณ์อุตสาหกรรมเซรามิกในปัจจุบัน". งานสัมมนาเชิงวิชาการ เรื่อง "ผู้วิฤติด้วยระบบโลจิสติกส์ ทางเลือกใหม่ของผู้ประกอบการเซรามิก". 3 สิงหาคม 2552 โรงแรมเรดิสัน กรุงเทพฯ.

สื่ออิเล็กทรอนิกส์

กรมศุลกากร กระทรวงการคลัง. สถิติข้อมูลการนำเข้า-ส่งออก. สืบค้นเมื่อวันที่ 8 กุมภาพันธ์ 2553, จาก <http://www.customs.go.th/Statistic/Index.jsp>

IRHD: International Rubber Hardness Degrees. สืบค้นเมื่อวันที่ 16 พฤษภาคม 2553, จาก http://www.ides.com/property_descriptions/ASTMD1415.asp

ประวัติการศึกษา

ชื่อ	นางสาวภัทรวรรณ เจยเจริญ
วันเดือนปีเกิด	3 ธันวาคม พ.ศ. 2522
วุฒิการศึกษา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเซรามิก คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ผลงานทางวิชาการ	- The 35th Congress on Science and Technology of Thailand (STT 35), “Ceramic glaze from 100% solid wastes”, October 15-17, 2009. - การประชุมวิชาการวิศวกรรมเคมีและเคมีประยุกต์แห่งประเทศไทย ครั้งที่ 19 “การใช้เศษแก้วและกากตะกอนเคลือบฟritเป็นตัวช่วยหลอมในการผลิตกระเบื้องเซรามิก”, 26-27 ตุลาคม 2552. - วารสารเซรามิกส์ (Ceramics Journal), “การพัฒนากระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์เซรามิกในจังหวัดลำปาง”, สมาคมเซรามิกส์ไทย ปีที่ 12 ฉบับที่ 28, พฤษภาคม – สิงหาคม 2551. หน้า 39 – 42. - วารสารเซรามิกส์ (Ceramics Journal), “การควบคุมคุณภาพในโรงงานเซรามิก”, สมาคมเซรามิกส์ไทย ปีที่ 11 ฉบับที่ 24, มกราคม – เมษายน 2550. หน้า 65 – 71. - Thai Ceramic Directory 2007-2009, “ตำหนิฐเพิ่มเติมชิ้นงานก่อนและหลังเผาปัสกิต” กลุ่มการผลิตและออกแบบสำหรับอุตสาหกรรมเซรามิกส์ ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ, 2550. หน้า 92 - 95.
ประสบการณ์ทำงาน	ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (2544 – ปัจจุบัน)