

แก้วโซดาไลม์ผสมกับเถ้าลอยลิกไนต์ซิลิกาต่ำผลิตแก้วเซรามิก Soda-Lime Glass Mixed with Low Silica Lignite Fly Ash to produce Glass- Ceramics

เมทนี อ้วนแสง, ดนุพล ตันนโยภาส* และสุชาติ จันทรมณี

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา 90112

*E-mail: danupon.t@psu.ac.th

บทคัดย่อ

นำเถ้าลอยมีซิลิกาต่ำที่เป็นของหลงเหลือตกค้างจากการเผาไหม้ของลิกไนต์ใช้เป็นสารเติมแก่แก้วโซดาไลม์ แล้วอัดขึ้นรูป เฝานึกผงเพื่อผลิตเป็นแก้วเซรามิก ก่อนอัดขึ้นรูปบดแก้วโซดาไลม์และเถ้าลอยด้วยหม้อบด เป็นเวลา 3 ชั่วโมง และ 2 ชั่วโมง ตามลำดับ คัดขนาดแก้วโซดาไลม์และเถ้าลอยที่อนุภาคเล็กกว่า 75 ไมครอน เถ้าลอยแทนที่แก้วโซดาไลม์บดในอัตราส่วนร้อยละ 20 30 40 และ 50 โดยน้ำหนัก ตัวอย่างทดสอบอัดขึ้นรูป ทรงกระบอกสูง 17 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 15 มิลลิเมตร ตัวอย่างดิบนำไปเผาที่อุณหภูมิ 750 850 และ 950 องศาเซลเซียส คงไว้เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ทดสอบสมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกลประกอบด้วย ความหนาแน่นรวม การหดตัวเชิงปริมาตร การดูดซึมน้ำ ความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะ ความแข็งแบบชาร์ กาลังอัดที่อุณหภูมิปกติและที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส นอกจากนี้ตรวจสอบการทนต่อสารเคมี ความต้านทานการเปลี่ยนอุณหภูมิอย่างฉับพลัน และวิเคราะห์ ชนิดแร่และโครงสร้างจุลภาคด้วยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดตามลำดับ ผลการทดลองพบว่าแก้วเซรามิกผสมเถ้าลอยร้อยละ 40 เผาที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส ให้กำลังอัดสูงสุดคือ 44.04 เมกะพาสคัล ที่อุณหภูมิห้อง และ 39.64 เมกะพาสคัล ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส ความหนาแน่นรวม 1.72 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของตัวอย่างที่เด่นระบุว่า วัฏภาคแร่สำคัญประกอบด้วย แร่คริสโทไฟไลต์ ไดออปไซด์ และโวลลาสไทต์

คำสำคัญ: แก้วเซรามิก, เถ้าลอยลิกไนต์, แก้วโซดาไลม์, การเฝานึก

Abstract

Fly ash (FA) with low silica, a pollutant residue from the combustion of lignite, was utilized as an additive to a powder of soda-lime glass (SLG) produced glass-ceramics by powder technology. The SLG and FA were ground in a ball mill for 3 h and 2 h respectively. The particle sizes of SLG and FA were finer than 75 micron. The SLG was replaced partially in proportions of 20, 30, 40, and 50 wt.% FA. Then specimens were uniaxially pressed into a cylindrical form 15 mm in diameter and 17 mm in length. The green specimens were fired at different temperatures of 750, 850 and 950°C and held for 1 h. Physical and mechanical properties containing bulk density, volumetric shrinkage, water absorption, electrical resistivity, Shore hardness, and compressive strengths at an ambient temperature and 80°C were determined. Chemical resistance and thermal shock was also performed. Crystallinity and micro-structural properties were analyzed under the X-ray diffraction (XRD) method and scanning electron microscopy respectively. The glass-ceramic specimen containing 40% FA with firing at 850°C showed the highest compressive strength of 44.04 MPa at an ambient temperature and 39.64 MPa at a temperature of 80°C

and bulk density of 1.72 g/cm³. XRD patterns of the dominant specimens indicated the major mineral phases including cristobalite, diopside, and wollastonite

Keywords: Glass-Ceramic; Lignite Fly Ash; Soda-Lime Glass; Sintering

บทนำ

ประเทศไทยมีเถ้าลอย (fly ash) ซึ่งเป็นของเสียที่หลงเหลือตกค้างจากกระบวนการเผาไหม้ของถ่านหิน จะมีขนาดเล็กและละเอียดมากโดยจากการเผาไหม้ถ่านหินลิกไนต์จากโรงไฟฟ้าแม่เมาะพบว่าจะได้เถ้าลิกไนต์ออกมาประมาณวันละ 10,000 ตัน/วัน ซึ่งในจำนวนนั้นจะเป็นเถ้าลอยประมาณ 8,000 ตัน [1] ซึ่งยังไม่รวมกับเถ้าถ่านหินที่ใช้เป็นเชื้อเพลิงในอุตสาหกรรมอื่นอีก แต่มีจำนวนน้อยเช่น โรงงานผลิตยางพารา นอกจากนี้ ขยะพวกแก้วทั้งปริมาณปีละ 40,000 ตัน [2] เนื่องจากระบบการนำแก้วที่ใช้แล้วกลับไปใช้ในกระบวนการผลิตแก้วหรืออุตสาหกรรมปลายน้ำของประเทศไทยยังขาดประสิทธิภาพ ดังนั้น นับวันจะมีปริมาณขยะแก้วเพิ่มมากขึ้น ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในอนาคต ทำให้มีการรณรงค์การนำวัสดุเหลือทิ้งกลับมาใช้ใหม่

ในประเทศไทยยังเหลือเศษแก้วยังไม่ได้กลับมาใช้ประโยชน์ในด้านต่างๆ อีก ซึ่งในต่างประเทศมีการนำเศษแก้วกลับมาหลอมใหม่ใช้เป็นฟลักซ์ [3] ในเครื่องปั้นดินเผาสโตนแวร์ (stoneware) ผลิตแก้วเซรามิก (glass-ceramic) มีผลึกขนาดนาโนและกระจายตัวสม่ำเสมออยู่ในเนื้อแก้ว [4] เป็นวัสดุที่ทนต่อแรงกระแทก แรงดัด [5] และแรงอัดได้ดีกว่าเซรามิกและแก้ว [6] นอกจากนี้ยังทนการกัดกร่อนทางเคมี มีสมบัติเป็นฉนวนไฟฟ้าที่ดีในสภาวะความต่างศักย์สูง และมีการขยายตัวทางความร้อนต่ำมาก [7] จึงได้มีการวิจัยนำเอาของเสียและแร่บางชนิดมาทำแก้วเซรามิก เช่น เถ้าลอยลิกไนต์ [8], [9], [10] เถ้าหนัก [11] หางแร่ทังสเตน [12] แร่คอร์เดียไรต์ [13] แร่ฟลูออโรอะพาไทต์ [14] แร่วิลเลไมต์ (willemite) มีการนำไปประยุกต์หลายด้านเช่น กระเบื้องปูพื้น [15] การเรืองแสงแบบใช้แสง [16] นำมาเคลือบเหล็กกล้าไร้สนิมทนต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างฉับพลันและกันผลจากการออกซิเดชันที่อุณหภูมิ 600-1,250 องศาเซลเซียส [17]

ต่อมา Francis et al. [18] ได้ศึกษาจลนพลศาสตร์การเกิดผลึกอนุภาคแก้วเตรียมจากเถ้าถ่านหินและเศษแก้วโซดาไลม์ สามารถตั้งต้นทำวัสดุแก้วเซรามิกได้ และ Yoon and Yun [19] ผลิตแก้วเซรามิกจากเถ้าลอยโรงไฟฟ้าถ่านหินผสมเศษแก้วที่บดละเอียดขนาดเล็กกว่า 150 เมช อัดขึ้นรูปทรงกระบอกที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มม. และสูง 30 มม. โดยไม่ใช้ตัวประสาน (binder) เเผาที่อุณหภูมิ 800 900 1000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ทดสอบความหนาแน่น ความทนต่อการดัดขลุ่ยที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction, XRD) พบว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมในการผลิตแก้วเซรามิก คือ 1000 องศาเซลเซียส มีสมบัติความหนาแน่น กำลังอัดหรือกำลังดัดที่ดีกว่าการเผาที่อุณหภูมิต่ำ

ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์หาสภาวะที่เหมาะสมในการทำแก้วเซรามิก จากแก้วโซดาไลม์ใช้แล้วกับเถ้าลอย อันเป็นการช่วยแก้ไขสภาพแวดล้อม และเพิ่มมูลค่าให้แก่เศษแก้ว และได้วัสดุแก้วเซรามิกที่สามารถไปต่อยอดผลิตวัสดุก่อสร้างมวลรวม แผ่นปู อิฐ และกระเบื้องชนิดพิเศษต่อไป

วัตถุประสงค์และวิธีการวิจัย

1. การเตรียมวัตถุดิบ

1.1 แก้วโซดาไลม์

ทำความสะอาดขวดแก้วบรรจุน้ำโซดาใช้แล้วและปล่อยไว้จนแห้ง (รูปที่ 1 ก) แล้วลดขนาดขวดแก้วโดยใช้ค้อนทุบ บดด้วยหม้อบด (ball mill) แบบแห้งที่ความเร็ว 70 รอบ/นาที เป็นเวลา 3 ชั่วโมง แล้วจึงนำผงขวดแก้วโซดามาอบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง และคัดขนาดเล็กลงกว่า 75 ไมครอน (รูปที่ 1 ข) องค์ประกอบทางเคมี [2] ความหนาแน่นจริง (true density) ดังในตารางที่ 1 อยู่ในเกณฑ์แก้วโซดาไลม์ ซึ่งต่อไป เรียกว่า ผงแก้ว

1.2 แก้วลอย

แก้วลอยลูกในัดจากโรงงานยางพาราในหาดใหญ่ มาบดที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง (รูปที่ 1 ก) จากนั้นบดต่อด้วยหม้อบดแบบแห้ง ความเร็ว 70 รอบ/นาที เป็นเวลา 2 ชั่วโมง นำแก้วที่

บดละเอียดไปบดอีกครั้ง แล้วคัดขนาดที่เล็กกว่า 75 ไมครอน (รูปที่ 1 ง) องค์ประกอบทางเคมีของแก้วลอย ดังในตารางที่ 1 ซึ่งมีองค์ประกอบหลักเช่นเดียวกับแก้วลอยในงานของ Yilmaz [20] ที่ทดลองทำแก้วเซรามิกเช่นกัน

ตารางที่ 1 สมบัติทางกายภาพและเคมีของวัตถุดิบที่ใช้

องค์ประกอบทางเคมี	ผงแก้ว	แก้วลอย
ซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2)	70.60	28.59
อะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3)	2.10	16.49
เหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3)	0.30	27.29
โพแทสเซียมออกไซด์ (K_2O)	0.10	1.09
แคลเซียมออกไซด์ (CaO)	11.50	13.46
โซเดียมออกไซด์ (Na_2O)	13.40	-
แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO)	1.90	-
แมงกานีสออกไซด์ (MnO)	-	0.21
ไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2)	-	0.93
น้ำหนักสูญหายหลังเผา (LOI)	0.10	11.94
ความหนาแน่นจริง (กรัม/ลบซม.)	3.03	2.30



ก)



ข)



ค)



ง)

รูปที่ 1 ก) ขวดแก้วใสบรรจุน้ำโซดาใช้แล้วเป็นวัตถุดิบตั้งต้นในการศึกษาครั้งนี้ ข) ผงขวดแก้วหลังคัดขนาดเล็กกว่า 75 ไมครอน ค) แก้วลอยก่อนบด และ ง) ผงแก้วลอยที่ผ่านการคัดขนาดเล็กกว่า 75 ไมครอน

2.2 การเตรียมตัวอย่างทดสอบ

ผงแก้วและเถ้าลอยที่คัดขนาดเล็กลงกว่า 75 ไมครอน (รูปที่ 1 ง) ผสมกัน โดยเถ้าลอยแทนที่ร้อยละ 0, 20, 30, 40 และ 50 โดยน้ำหนัก น้ำหนักรวมทั้งหมดครั้งละ 120 กรัม (ตารางที่ 2) ใส่ในกระบอกผสมไปหมุนบนรางหม้อบดแบบลูกกลิ้ง (jar mill) เป็นเวลา 3 ชั่วโมง แล้วจึงนำมาขึ้นรูปตัวอย่างด้วยปั๊มเหล็กไร้สนิมมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 มิลลิเมตร ความสูง 20 มิลลิเมตร ด้วยแรงดัน 283 เมกะพาสคัล (50 กิโลนิวตัน) โดยวิธีอัดแห้งไม่ใช้ตัวประสาน (binder) อัดตัวอย่างดิบสูตรละ 15 แท่ง ไปวัดขนาดและชั่งน้ำหนัก เเผที่อุณหภูมิ 750 850 และ 950 องศาเซลเซียส ที่อัตรา 5 องศา/นาที คงอุณหภูมิไว้นาน 1 ชั่วโมง ปลอຍให้ตัวอย่างเย็นอยู่ในเตา จึงนำไปชั่งน้ำหนักและวัดขนาดอีกครั้ง (รูปที่ 2) ก่อนนำไปทดสอบตามรายการกำหนดไว้

ตารางที่ 2 ส่วนผสมตัวอย่างและอุณหภูมิทดลองครั้งนี้

ตัวแปร รหัสสูตร	ผงแก้ว (%wt.)	เถ้าลอย (%wt.)	อุณหภูมิ (°C)
G750FA0	100	0	750
G850FA0	100	0	850
G950FA0	100	0	950
G750FA20	80	20	750
G850FA20	80	20	850
G950FA20	80	20	950
G750FA30	70	30	750
G850FA30	70	30	850
G950FA30	70	30	950
G750FA40	60	40	750
G850FA40	60	40	850
G950FA40	60	40	950
G750FA50	50	50	750
G850FA50	50	50	850
G950FA50	50	50	950

2.3 วิธีการทดสอบตัวอย่าง

การทดสอบสมบัติทางกายภาพของตัวอย่างประกอบด้วย สี ลักษณะผิวเนื้อ [21] ความหนาแน่นรวม การดูดซึมน้ำ [22] ค่าแรงดันสมการ (1) และวัด

ความต้านทานไฟฟ้าด้วยเครื่อง Megohmmeter รุ่น CA 6525 ความดันไฟฟ้า 500 โวลต์ คำนวณจากสมการที่ (2)

$$\text{การดูดซึมน้ำ (\%)} = \frac{W_o - W_n}{W_o} \times 100 \dots\dots\dots (1)$$

W_o = น้ำหนักตัวอย่างก่อนแช่น้ำ (กรัม)

W_n = น้ำหนักตัวอย่างหลังแช่น้ำ (กรัม)

$$\text{ความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะ (\rho)} = \frac{RA}{L} \dots\dots\dots (2)$$

R = ค่าความต้านทานไฟฟ้าที่วัดได้ (เมกะโอห์ม, MΩ)

A = พื้นที่ภาคตัดขวางของตัวอย่าง (ตร.ซม.)

L = ความยาวของตัวอย่าง (ซม.)

ส่วนการทดสอบสมบัติเชิงกล ได้แก่ ความแข็งแบบชอร์ (Shore hardness) วัดด้วยเครื่องรุ่น EQU TIP กำลังอัดที่อุณหภูมิห้องและอุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส ด้วยเครื่อง Hounsfield Test Equipment รุ่น H100KS พร้อมตู้ควบคุมอุณหภูมิด้วยอัตรา 2 มม./นาที และความต้านทานการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างฉับพลัน [23] และการทดสอบการทนต่อสารเคมี [24] เป็นเวลา 7 วัน ติดต่อกัน โดยทำความสะอาดผิวตัวอย่างทุกวันและชั่งน้ำหนักวันแรกกับวันสุดท้ายหลังอบแห้ง วิเคราะห์แร่เกิดขึ้นภายหลังเผาด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction-XRD) และโครงสร้างจุลภาคด้วยถ่ายภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope-SEM) คำนวณขนาดของผลึกแร่ด้วยสมการของ Scherrer [25] ดังสมการที่ (3) และปริมาณแร่คิดจากพื้นที่ใต้รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (XRD pattern) ตามลำดับ

$$T = \frac{K\lambda}{\beta \cos \theta} \dots\dots\dots (3)$$

T = ขนาดของผลึก K = Shape factor (0.9) ไม่มีหน่วย

λ = ความยาวคลื่นรังสีเอกซ์ (1.5406×10^{-3} ไมครอน)

β = ค่าความสูงครึ่งฟีก θ = มุม Bragg

3. ผลการวิจัย

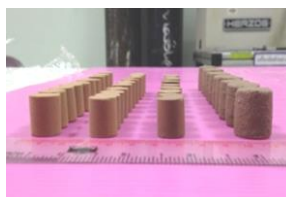
3.1 สีและผิวของตัวอย่าง

สีของผงแก้วล้วนนั้นหลังเผามีสีเทาเข้ม ที่ 750 องศาเซลเซียส ผิวลื่นและมันวาว แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิ เผาพบว่าสีของผงแก้วล้วน สว่างขึ้นจนเกือบขาว แต่ผิวมีความสาก (รูปที่ 2 ก) แต่เมื่อเพิ่มปริมาณเถ้าลอย ในอัตราส่วนต่าง ๆ และเผาที่อุณหภูมิ 750 850 และ

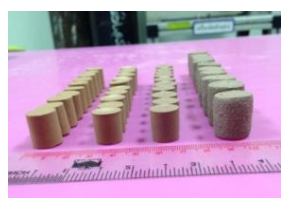
950 องศาเซลเซียส มีผลทำให้แก้วเซรามิกที่ได้มีสีน้ำตาลเข้ม (รูปที่ 2 ข) โดยสีที่ได้ของแก้วเซรามิก ขึ้นอยู่กับปริมาณของเถ้าลอยที่เติมลงไป ปริมาณเถ้าลอยสูงทำให้ได้ตัวอย่างมีสีน้ำตาลเข้มมากขึ้น (รูปที่ 2 ค) ในขณะเดียวกันเมื่อเพิ่มอุณหภูมิเผาสูงขึ้นทำให้แก้วเซรามิกที่ได้มีสีน้ำตาลจางลง (รูปที่ 2 ง) และที่ปริมาณเถ้าลอยเพิ่มขึ้นลักษณะผิวของแก้วเซรามิกมีความหยาบมากขึ้นด้วย



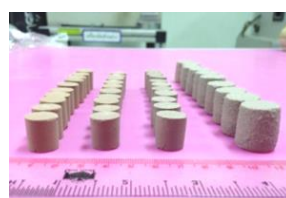
ก)



ข)



ค)



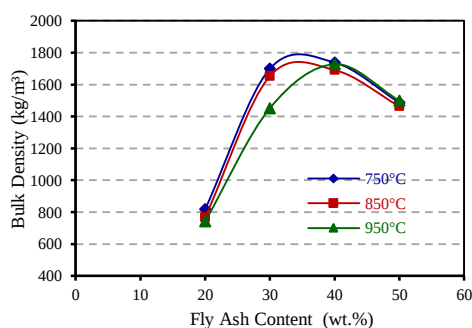
ง)

รูปที่ 2 ตัวอย่างที่ทดสอบเรียงแถวจากซ้ายไปขวาตามลำดับ ก) แก้วล้วนเผาที่อุณหภูมิ 750 850 และ 950 องศาเซลเซียส ข) ผสมเถ้าลอยร้อยละ 50, 40, 30 และ 20 เผาที่ 750 องศาเซลเซียส ค) ผสมเถ้าลอยร้อยละ 50, 40, 30 และ 20 เผาที่ 850 ง) ผสมเถ้าลอยร้อยละ 50 40 30 20 เผาที่ 950 องศาเซลเซียส

3.2 ความหนาแน่นรวม

ความหนาแน่นรวมของตัวอย่างแก้วเซรามิกที่ได้หลังจากเผาที่อุณหภูมิตามที่กำหนดไว้ (ตารางที่ 2) พบว่าอัตราส่วนของแก้วเซรามิกที่ผสมผงเถ้าลอยร้อยละ 40 มีความหนาแน่นรวมสูงสุด ดังในรูปที่ 3 แต่ความหนาแน่นรวมที่ได้ยังคงมีค่าน้อยกว่าความหนาแน่นรวมของแก้วล้วน จากงานวิจัยของ Nimjaroen et al. [26] ผลิตภัณฑ์ที่มีความพรุนจากเถ้าลอย ทำให้ได้แก้วเซรามิกที่มีความหนาแน่นลดลงตามปริมาณเถ้าลอยที่เติมลงไป แต่ผลทดลองครั้งนี้พบว่า แก้วเซรามิกที่ผสมเถ้าลอยร้อยละ 40 มีค่าความหนาแน่นสูงสุด สันนิษฐานว่า SiO_2 จากเถ้าลอยแทรกอุดตามซอก

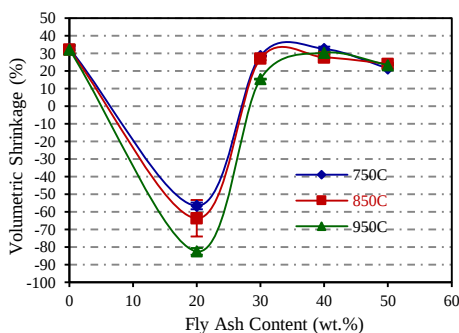
ผงแก้ว โดยไม่มีผลจากความหนาแน่นจริงของเถ้าลอยที่น้อยกว่าผงแก้วมาก (ตารางที่ 1)



รูปที่ 3 ความหนาแน่นรวมของตัวอย่างแก้วเซรามิก ผสมเถ้าลอยลิกันต์

3.3 การเปลี่ยนแปลงขนาดหลังเผาเชิงปริมาตร

ตัวอย่างที่ผสมผงเถ้าลอยร้อยละ 40 มีค่าการหดตัวเชิงปริมาตรสูงสุดที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส ดังในรูปที่ 4 ซึ่งมีค่าเฉลี่ยการหดตัวเชิงปริมาตรร้อยละ 32.53 และการหดตัวเชิงปริมาตรมีค่าลดลงเมื่อเผาที่อุณหภูมิสูงขึ้น แต่แก้วเซรามิกที่ผสมเถ้าลอยร้อยละ 20 เกิดการขยายตัวมากขึ้นในทุกอุณหภูมิที่เผา นักสันนิษฐานว่ามาจากสารประกอบ CaO ที่อยู่ในรูปปูนขาวอิสระ (free lime) เกิดการดันตัวของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งอุณหภูมิการเผาที่สูง การขยายตัวของแก้วเซรามิกดังกล่าวก็สูงขึ้นแต่ไม่มาก เนื่องจาก CaO ส่วนใหญ่เกิดผลึกใหม่ (recrystallization) เป็นแคลไซต์กับ SiO_2 ที่เกิดผลึกเป็นควอตซ์ได้จับตัวโครงสร้างใหม่เป็นแร่วิลลาสโทไนต์ขึ้น

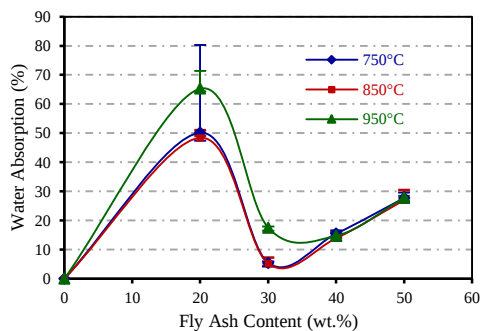


รูปที่ 4 การเปลี่ยนแปลงขนาดหลังเผาเชิงปริมาตรของตัวอย่างแก้วเซรามิก

3.4 การดูดซึมน้ำ

การดูดซึมน้ำของตัวอย่างทดสอบเผาที่อุณหภูมิ 750 850 และ 950 องศาเซลเซียส พบว่า ตัวอย่างที่มีแก้วล้วนไม่ดูดซึมน้ำ เนื่องจากเนื้อเป็นเอกพันธ์ (homogeneous) ไม่มีรูเล็ก แต่เมื่อเทียบกับแก้วเซรามิกที่ผสมเถ้าลอยร้อยละ 30 เผาที่อุณหภูมิต่างๆ พบว่า แก้วเซรามิกเผาที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส มีค่าการดูดซึมน้ำต่ำที่สุดเพียงร้อยละ 5.21 และเมื่อเพิ่มปริมาณเถ้าทำให้ค่าการดูดซึมน้ำมีทั้งค่าเพิ่มขึ้นและลดลง ซึ่งขึ้นกับอุณหภูมิเผาด้วย เช่นตัวอย่างเผาอุณหภูมิ 950

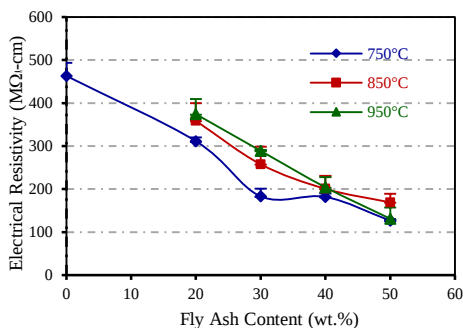
องศาเซลเซียส ทำให้แก้วเซรามิกมีการดูดซึมน้ำเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับอุณหภูมิที่ 750 และ 850 องศาเซลเซียส ซึ่งต่างจากผลทดลองของ Cheng et al. [8] แก้วเซรามิกเผาที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส มีค่าการดูดซึมน้ำร้อยละ 12.63 โดยค่านี้นลดลงเมื่อเผาที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส แต่ผลการทดลองในครั้งนี้พบว่าแก้วเซรามิกเผาที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส มีค่าการดูดซึมน้ำร้อยละ 5.21 ดังในรูปที่ 5 สอดคล้องกับผลทดลองค่าความหนาแน่นรวม (รูปที่ 3)



รูปที่ 5 การดูดซึมน้ำของตัวอย่างแก้วเซรามิก

3.5 ความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะ

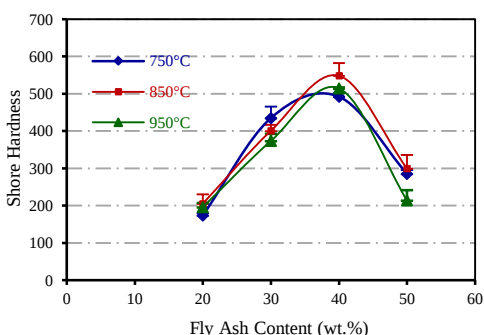
ตัวอย่างแก้วล้วนและที่ผสมเถ้าลอยลงไปเผาที่อุณหภูมิ 750 850 และ 950 องศาเซลเซียส พบว่าตัวอย่างแก้วล้วนมีค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะสูงกว่าตัวอย่างแก้วเซรามิกที่ผสมเถ้าลอย ดังในรูปที่ 6 โดยผงแก้วที่ผสมเถ้าลอยมีผลทำให้ค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะลดลงตามปริมาณเถ้าที่เติมลงไป ในขณะที่เดียวกันการเพิ่มอุณหภูมิทำให้ค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะสูงขึ้น ซึ่งต่างจากงานวิจัยของ Cheng et al. [8] ที่มีค่าความต้านทานไฟฟ้าลดลงเมื่อเผาผลึกที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส ทั้งนี้เนื่องมาจากโครงสร้างเนื้อแก้วเซรามิกมีความพรุนเปิด (open porosity) และจำนวนรูเล็ก (capillary) ที่แตกต่างกัน



รูปที่ 6 ความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะของตัวอย่าง แก้วเซรามิก

3.6 ความแข็งแบบชอร์

ตัวอย่างทดสอบมีผงแก้วล้วน รูปทรงไม่เอื้อต่อการทดสอบความแข็งแบบชอร์ (รูปที่ 2) ซึ่งตัวอย่างที่ผสมเถ้าลอยร้อยละ 40 เเผที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส มีค่าความแข็ง 548.67 ส่วนตัวอย่างที่ผสมเถ้าลอยร้อยละ 20 มีความแข็งต่ำสุดของทุกอุณหภูมิที่เผา (รูปที่ 7) เนื่องจากตัวอย่างที่ได้มีความพรุนเพิ่มขึ้นส่งผลให้ความแข็งแรงลดลง อันน่าเป็นผลจากเถ้าลอยมีสารประกอบ CaO อยู่ (ตารางที่ 1) เมื่อได้รับความร้อนแตกตัวให้เป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และตัวอย่างเเผที่อุณหภูมิสูงขึ้น ทำให้ค่าความแข็งสูงขึ้นด้วยและตัวอย่างที่ทดสอบไม่ชำรุด

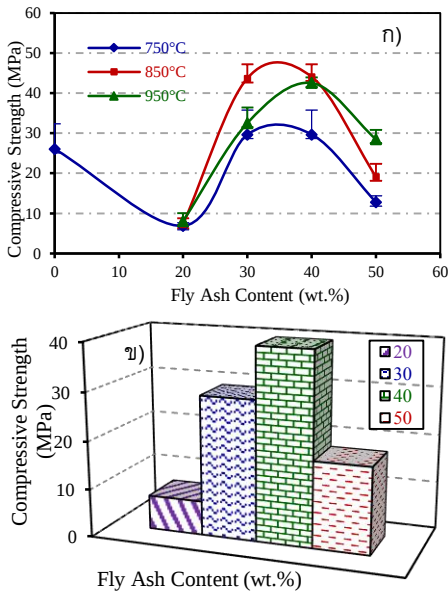


รูปที่ 7 ความแข็งแบบชอร์ของตัวอย่างแก้วเซรามิก

3.7 กำลังอัด

กำลังอัดที่อุณหภูมิปกติของตัวอย่างแก้วเซรามิกที่เติมเถ้าลอยร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก ให้ค่ากำลังอัดสูงสุดของตัวอย่างทดสอบในแต่ละอุณหภูมิเเผที่ 750 850 และ 950 องศาเซลเซียส ดังในรูปที่ 8 ก) ซึ่งนอกจากนี้ ยังพบว่าตัวอย่างที่ผสมเถ้าลอยร้อยละ 40 เเผหนึ่งที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส ให้กำลังอัดเฉลี่ยสูงสุด 44.04 เมกะพาสคัล ส่วนตัวอย่างเเผที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส มีกำลังอัดสูงสุดในช่วงที่มีส่วนผสมของเถ้าลอยร้อยละ 40 คือมีกำลังอัดเฉลี่ย 29.65 เมกะพาสคัล และสำหรับตัวอย่างเเผที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส มีกำลังอัดสูงสุดในช่วงที่มีส่วนผสมของเถ้าลอย ร้อยละ 40 มีกำลังอัดเฉลี่ย 42.55 เมกะพาสคัล ซึ่งสอดคล้องกับค่าความแข็งแบบชอร์ และสอดคล้องกับงานวิจัยของ Cheng et al. [8] เเผตัวอย่างที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส มีค่ากำลังอัด 41.44 เมกะพาสคัล ส่วนตัวอย่างเเผที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส ค่ากำลังอัดลดลงเช่นกัน

สำหรับการทดสอบกำลังอัดที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เฉพาะตัวอย่างแก้วเซรามิกที่เติมเถ้าลอยเเผที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส พบว่าแก้วเซรามิกที่ผสมเถ้าลอยร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก มีค่ากำลังอัดเฉลี่ยสูงสุดเช่นกัน ที่ 39.64 เมกะพาสคัล เปรียบเทียบกับกำลังอัดที่อุณหภูมิห้อง (รูปที่ 8 ก) พบว่ามีค่าลดลงร้อยละ 11.1 จึงเห็นได้ว่าอุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส มีผลเพียงเล็กน้อยต่อกำลังอัดของแก้วเซรามิกที่ศึกษาครั้งนี้

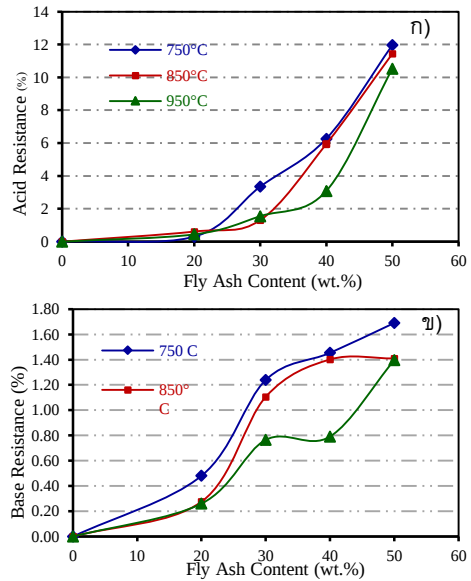


รูปที่ 8 กำลังอัดที่ ก) อุนหภูมิห้อง และ ข) อุนหภูมิ 80 องศาเซลเซียส

3.8 ความทนต่อการกร่อนด้วยกรดและด่าง

ตัวอย่างแก้วล้วนเผาที่อุณหภูมิ 750 850 และ 950 องศาเซลเซียส แช่ในกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้นร้อยละ 3 พบว่า มีความคงทนต่อการละลายกรด HCl แต่แก้วเซรามิกที่ผสมเถ้าลอยเกิดการกัดกร่อนเล็กน้อย ดังแสดงในรูปที่ 9 ก) โดยขึ้นอยู่กับปริมาณเถ้าลอยที่เติมลงไป ตัวอย่างที่เติมเถ้าลอยร้อยละ 50 เกิดการกร่อนสูงสุด ผลจาก CaO สูงขึ้นและเมื่อพิจารณาในแง่อุณหภูมิพบว่า อุณหภูมิที่เผาผนึกสูงขึ้น อัตราการทนกรดสูงขึ้น ผลจากเผาผนึกสูงขึ้น

ตัวอย่างแก้วล้วนเผาที่อุณหภูมิ 750 850 และ 950 องศาเซลเซียส แช่ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้นร้อยละ 3 พบว่า ตัวอย่างแก้วล้วนมีความคงทนต่อการละลายต่าง NaOH แต่ตัวอย่างที่ผสมเถ้าลอยเกิดการกร่อนตามปริมาณเถ้าลอยที่เติมลงไป ตัวอย่างที่เติมเถ้าลอยลงร้อยละ 50 เกิดการกร่อนสูงสุด และเมื่อคำนึงถึงอุณหภูมิเผาพบว่า เมื่ออุณหภูมิเผาสูงขึ้นทำให้อัตราการกร่อนของตัวอย่างลดลง ดังแสดงในรูป 9 ข) ซึ่งไปในทิศทางเดียวกับการทนทานต่อกรด



รูปที่ 9 ความทนของตัวอย่างแก้วเซรามิกต่อสารละลาย ก) กรด และ ข) ด่าง

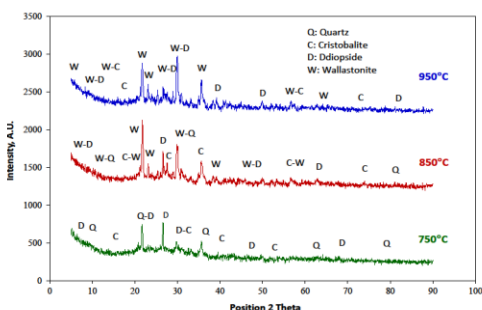
3.9 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างฉับพลัน

ตัวอย่างผ่านการเผาผนึกที่อุณหภูมิ 750 850 และ 950 องศาเซลเซียส ซึ่งผสมเถ้าลอยในอัตราส่วนร้อยละ 20 30 40 และ 50 โดยน้ำหนักพบว่า ตัวอย่างแก้วเซรามิกที่ได้จากการทดลองครั้งนี้สามารถทนต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างฉับพลันที่ไม่เกินอุณหภูมิ 260 องศาเซลเซียส ได้ โดยไม่เกิดปริแตกร้าวหรือความเสียหายใดๆ

3.10 การวิเคราะห์แร่ประกอบของแก้วเซรามิก

แก้วเซรามิกที่ได้จากผสมเถ้าลอยร้อยละ 40 เผาที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส ให้กำลังอัดสูงสุด นำไปวิเคราะห์วิภูภาคแร่ (mineral phases) ดังในรูปที่ 10 ด้วยแรงอัดและความร้อนจึงเกิดวิภูภาคแร่ ได้แก่ ไดออปไซด์ คริสโทบาไลต์ (cristobalite, SiO_2) และ วอลลาสไทต์ (wallastonite, CaSiO_3) ซึ่งเห็นได้ว่าอุณหภูมิเพิ่มขึ้นมีผลให้เกิดแร่วอลลาสไทต์มากขึ้นตามไปด้วย ในขณะที่เดียวกันแร่ควอตซ์ (quartz, SiO_2) และคริสโทบาไลต์ลดลง ทั้งนี้เพราะมีควอตซ์และแคลไซต์ที่เกิดผลึกใหม่ส่วนมากมาจับโครงสร้างกันขึ้น

เป็นโวลลาสโทไนต์แทน โดยมีขนาดผลึกเล็กลงเล็กน้อย ดังแสดงในตารางที่ 3 ซึ่งจัดเป็นแร่ทนความร้อนชนิดหนึ่ง [27] เช่นเดียวกับงานของ Lu et al. [28] ได้แก้วเซรามิกที่มีผลึกขนาดเล็กและมีกำลังอัดเพิ่มขึ้น



รูปที่ 10 รูปแบบการเลี้ยงเบเนรังสีเอกซ์ของตัวอย่าง แก้วเซรามิกผสมแก้วลอยร้อยละ 40 หลังเผาที่อุณหภูมิต่างกัน

ตารางที่ 3 ชนิด ปริมาณแร่และขนาดของตัวอย่างแก้ว
เซรามิกผสมเถ้าลอยร้อยละ 40 เผาที่
อุณหภูมิต่างกัน

อุณหภูมิ (°C)	ชนิดแร่	ปริมาณ (wt.%)	ขนาดผลึก (ไมครอน)
750	ควอตซ์	20.30	32.8
	คริสโทไบไลต์	32.77	27.1
	ไดออพไซด์	46.92	22.7
850	ควอตซ์	5.11	21.1
	คริสโทไบไลต์	22.57	24.6
	ไดออพไซด์	18.28	29.2
	โวลลาสโทไนต์	54.02	26.5
950	คริสโทไบไลต์	21.14	24.6
	โวลลาสโทไนต์	46.75	24.5
	ไดออพไซด์	32.10	24.1

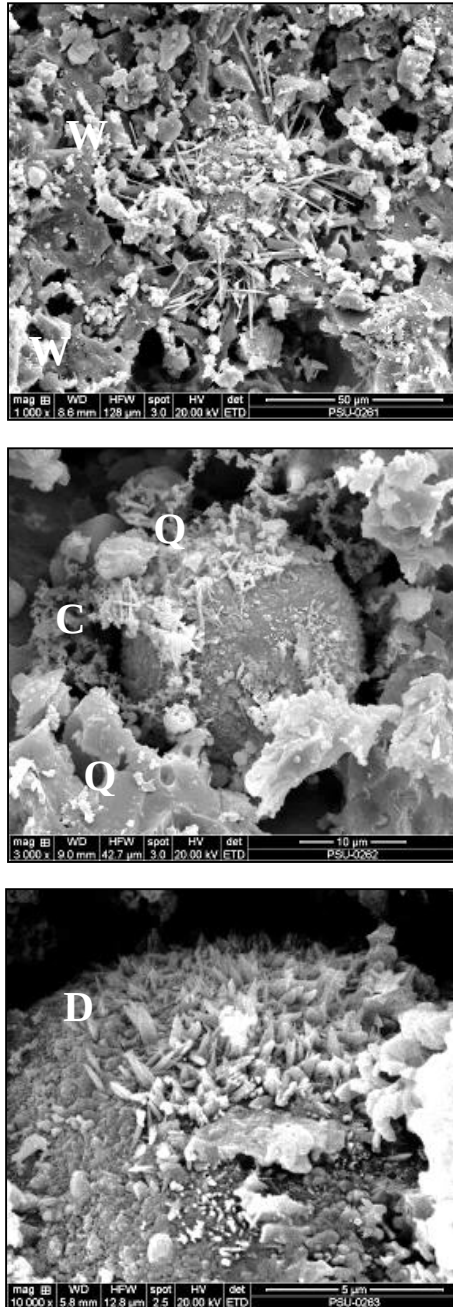
3.11 โครงสร้างจุลภาคของแก้วเซรามิก

ผลจากการวิเคราะห์โครงสร้างผิวหน้าตัวอย่างที่ผสมเถ้าลอยร้อยละ 40 เผาที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) พบว่า อนุภาคของเถ้าลอยและผงแก้วได้เกาะกันกัน จากอิทธิพลของการแปรสภาพ

ด้วยความร้อน (thermal metamorphism) ซึ่งทำให้ บางส่วนของแก้วเซรามิกที่ได้เกิดผลึกใหม่แร่ควอตซ์มี รูปร่างหยักขอบคมโค้งเว้ารูปฝ่าหอย ดังรูปที่ 11 ก) และบางส่วนเกิดผลึกแร่คริสโทบาลต์ (C) ที่มักเกิดที่ อุณหภูมิสูง [29] มีรูปร่างกลมมนดังรูปที่ 11 ข) และใน ขณะเดียวกันบริเวณที่อุณหภูมิของตัวอย่างเกิดการเผา ผนึกหรืออาจก่อนิวเคลียส ส่งผลให้เกิดแร่ชนิดใหม่ ขึ้นมา มีรูปร่างต่างๆ ที่แทรกอยู่ในเนื้อ ซึ่งลักษณะเป็น ผลึกแท่งยาวแหลมคล้ายเข็มคือ แร่โวลลาสโทไนต์ (W) (รูปที่ 11 ก) และยังพบผลึกใหม่เกิดขึ้นอีกชนิดหนึ่งใน เนื้อแก้วเซรามิก โดยผลึกขนาดเล็กงอกอยู่บนแร่ คริสโทบาลต์คือ แร่ไดออปไซด์ (D) ดังรูปที่ 11 ค) ที่ นำเกิดแบบนิวเคลียสขึ้นมา อันเป็นการผลิตแก้วเซรามิก ชนิดโวลลาสโทไนต์ด้วยต้นทุนต่ำ [30] แม้ว่าเถาลอย ที่ใช้มีปริมาณ SiO_2 ต่ำ ผสมผงแก้วก็สามารถก่อให้เกิด แก้วเซรามิกที่มีเนื้อละเอียดได้เช่นเดียวกับงานของ Vasilopoulos and et al. [31] ที่ใช้เถาลอยมีซิลิกาต่ำ ชนิดเดียวเท่านั้น

สรุปและเสนอแนะ

สรุปผลการวิจัยแก้วเซรามิกทำจากผงแก้วโซดา-ไลม์ (ขวดน้ำโซดา) และเถ้าลอยลิกไนต์มี SiO_2 ต่ำ อัตราส่วนผสมที่เหมาะสมคือ ปริมาณเถ้าลอยลิกไนต์ ร้อยละ 40 และเศษแก้วร้อยละ 60 และอุณหภูมิที่เหมาะสมคือ 850 องศาเซลเซียส ซึ่งให้ตัวอย่างแก้วเซรามิกมีสมบัติโดดเด่นที่สุด ค่ากำลังอัดที่อุณหภูมิห้องสูงสุด 44.04 เมกะพาสคัล และที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส ได้ค่าสูงสุด 39.64 เมกะพาสคัล รวมถึงมีค่าความหนาแน่นรวม 1.72 กรัมต่อลูกบาศก์ เซนติเมตร ค่าการหดตัวเชิงปริมาตรร้อยละ 27.71 ค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะ 200.82 เมกะโอห์ม-เซนติเมตร ค่าความแข็งแบบชอรัสอดคล้องกับกำลังอัด จึงเป็นการหาค่าทางอ้อมได้โดยตัวอย่างไม่เสียหาย และความต้านทานการเปลี่ยนแปลงความร้อนอย่างฉับพลันได้เกินอุณหภูมิ 260 องศาเซลเซียส อันเป็นผลจากการเกิดแร่ไวลลาสโทไนต์ขึ้นในตัวอย่างแก้วเซรามิกชนิดนี้



รูปที่ 11 ภาพถ่ายจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดจากผิวรอยแตกเนื้อแก้วเซรามิกผสมเถ้าลอยร้อยละ 40 เผา ที่ 850 องศาเซลเซียส กำลังขยาย ก) 1,000 เท่า พบโพลลาสไทน์เกาะทั่วไป (W) ข) 3,000 เท่า และ ค) 10,000 เท่า แร่ไดออปไซด์ขนาดเล็ก (D) บนผิวแร่ คริสโทบาไลต์ (C)

แก้วเซรามิกที่ได้ครั้งนี้กำลังอัดสูง สามารถไปพัฒนาขยายผลต่อในการผลิตแก้วพรุน (foam glass) [32] มวลรวมน้ำหนักเบา [33] และผลิตภัณฑ์วัสดุก่อสร้างเชิงนิเวศอื่นๆ ที่ใช้งานในสภาวะมีความร้อนสูงกว่าอุณหภูมิห้อง [34], [35] เช่น แผ่นปูโต๊ะหุงอาหาร (cooktops)

สำหรับข้อเสนอแนะแนวทางในการศึกษาวิจัยครั้งต่อไปมีดังนี้

1. การศึกษาครั้งต่อไปควรเลือกเศษขวดแก้วสีอื่น (สีเขียว สีน้ำตาล) อาจส่งผลกระทบต่อสมบัติของแก้วเซรามิกที่ผลิตขึ้นมาใหม่

2. ควรปรับเปลี่ยนอัตราอุณหภูมิและเวลาในการเผาขึ้นมากกว่า 1 ชั่วโมง จากการทดลองครั้งนี้ อาจมีผลต่อสมบัติและโครงสร้างของแก้วเซรามิกที่ได้

3. ควรปรับเปลี่ยนอุณหภูมิในการทดลองต่างกัน ช่วงละ 25 องศาเซลเซียส ระหว่าง 750-900 องศาเซลเซียส เพื่อให้ทราบถึงกลไกกระบวนการเปลี่ยนผลึกและช่วงสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการเกิดแก้วเซรามิกที่ชัดเจนยิ่งขึ้น โดยเพิ่มเทคนิคการตรวจสอบ เช่น ฟูเรียทรานส์ฟอร์มอินฟราเรด (Fourier transform infrared, FTIR) การวิเคราะห์ความร้อนเชิงอนุพันธ์ (differential thermal analysis, DTA) และเทอร์โมกราวิเมตรี (thermogravimetry, TG)

เอกสารอ้างอิง

[1] กรมควบคุมมลพิษ. 2558. "การใช้เถ้าลอยในงานครีต." http://www.pcd.go.th/info_serv/pol_suc_ash.html. 25 มกราคม.

[2] จักกฤษณ์ สุนทรานุรักษ์ และดนุพล ตันนโยภาส. 2557. "การพัฒนากำลังและความคงทนต่อซัลเฟต ของคอนกรีตใส่มวลรวมเศษขวดแก้วใสผสมเถ้าขาน้อย". *วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม*. 10 (1): 63-75.

[3] Tucci, A. and et al. 2004. "Use of Soda-Lime Scrap-Glass as a Fluxing Agent in a Porcelain Stoneware Tile Mix". *J Eur Ceram Soc*. 24: 83–92.

[4] Peng, F., Liang K.-M. and Hu A.-M. 2005. "Nano-Crystal Glass–Ceramics Obtained from High Alumina Coal Fly Ash". *Fuel*. 84 : 341–346.

[5] Collini, L. and Carfagni G.R. 2014. "Flexural Strength of Glass–Ceramic for Structural Applications". *J Eur Ceram Soc*. 34 (11): 2675–2685.

[6] Erol, M., Kucukbayrak S. and Ersoy-Mericboyu A. 2008. "Comparison of the Properties of Glass, Glass–Ceramic and Ceramic Materials Produced from Coal Fly Ash". *J Hazard Mater*. 153 (1-2): 418–425.

[7] Holand, W. and Beall G.H. 2002. *Glass-Ceramic Technology*. John Wiley & Sons Inc., New Jersey, USA.

[8] Cheng, T.W. and et al. 2002. "Production of Glass–Ceramic from Incinerator Fly Ash". *Ceram Int*. 28 (1): 779-783.

[9] Yoon, S.-D. and et al. 2013. "Characterization of Wollastonite Glass-Ceramics Made from Waste Glass and Coal Fly Ash". *J Mater Sci Technol*. 29 (2): 149-153.

[10] Karamberi, A. and Moutsatsou A. 2006. "Vitrification of Lignite Fly Ash and Metal Slags for the Production of Glass and Glass Ceramics". *China Part*. 4 (5): 250-253.

[11] Vu, D.H. and et al. 2012. "Glass–Ceramic from Mixtures of Bottom Ash and Fly Ash". *Waste Manage*. 32 (12): 2306–2314.

[12] Peng, K., Lv C. and Yang H. 2014. "Novel Preparation of Glass Ceramics from Amorphized Tungsten Tailings". *Ceram Int*. 40 (7): 10291–10296.

[13] Ghosh, S. and et al. 2014. "Cordierite Based Glass–Ceramic Glazed Floor Tiles by Microwave Processing". *Mater Charact*. 95 : 192–200.

- [14] Chen, X. and et al. 2014. "Novel Alkali Free Bioactive Fluorapatite Glass Ceramics". **J Non-Cryst Solids**. 402 : 172–177.
- [15] Yao, R. and et al. 2014. "Dual Functions of Novel Glass–Ceramic Floor Tile Design and Preparation". **Ceram Int.** 40 (6): 8667–8675.
- [16] Tarafder, A. and et al. 2014. "Fabrication and Enhanced Photoluminescence Properties of Sm^{3+} -Doped $\text{ZnO-Al}_2\text{O}_3\text{-B}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ Glass Derived Willemite Glass–Ceramic Nanocomposites". **Opt Mater.** 36 (9): 1463–1470.
- [17] Shan, X. and et al. 2014. "Influence of CoO Glass–Ceramic Coating on the Anti-Oxidation Behavior and Thermal Shock Resistance of 200 Stainless Steel at Elevated Temperature". **Ceram Int.** 40 (8): 12327–12335.
- [18] Francis, A.A. and et al. 2004. "Crystallization Kinetic of Glass Particles Prepared from a Mixture of Coal Ash and Soda-Lime Cullet Glass". **J Non-Cryst Solids**. 333 (2): 187–193.
- [19] Yoon, S. and Yun Y. 2005. "An Advanced Technique for Recycling Fly Ash and Waste Glass". **J Mater Process Tech.** 168 (2): 56–61.
- [20] Yilmaz, G. 2012. "Structural Characterization of Glass–Ceramics Made from Fly Ash Containing $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-Fe}_2\text{O}_3\text{-CaO}$ and Analysis by FT-IR–XRD–SEM Methods". **J Mol Struct.** 1019 : 37-42.
- [21] มอก. 2398-เล่ม 2-2553. 2553. กระเบื้องเซรามิก เล่ม 2 วิธีตรวจสอบมิติและคุณภาพผิวหน้า. กรุงเทพฯ : สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม.
- [22] มอก.2398-เล่ม 3-2553. 2553. กระเบื้องเซรามิก เล่ม 3 วิธีการดูดซึมน้ำ ความพรุนปรากฏ ความหนาแน่นสัมพัทธ์ปรากฏและความหนาแน่นรวม. กรุงเทพฯ : สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม.
- [23] มอก.2398-เล่ม 9-2551. 2551. กระเบื้องเซรามิก เล่ม 9 วิธีหาค่าความต้านทานการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างฉับพลัน. กรุงเทพฯ : สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม.
- [24] มอก. 2398-เล่ม 13-2553. 2553. กระเบื้องเซรามิก เล่ม 13 วิธีหาความทนสารเคมี. สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม.
- [25] Jenkins, R. and Snyder R.L. 1996. **Introduction to X-ray Powder Diffractometry**, John Wiley & Sons Inc.
- [26] Nimjaroen, C., Morimoto S. and Tangsathitkulchai C. 2009. "Preparation and Properties of Porous Glass Using Fly Ash as a Raw Material". **J Non-Cryst Solids**. 355 (34–36): 1737-1741.
- [27] ดนุพล ตันนโยภาส. 2553. แร่และหิน. พิมพ์ครั้งที่ 1. สงขลา : ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- [28] Lu, J. and et al. 2014. "Influence of Particle Size on Sinterability, Crystallisation Kinetics and Flexural Strength of Wollastonite Glass-Ceramics from Waste Glass and Fly Ash". **Mater Chem Phys.** 148 (1–2): 449-456.
- [29] ดนุพล ตันนโยภาส. 2552. วิทยาแร่. พิมพ์ครั้งที่ 2 สงขลา : ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- [30] Zhang, W. and Liu H. 2013. "A Low Cost Route for Fabrication of Wollastonite Glass–Ceramics Directly Using Soda-Lime Waste Glass by Reactive Crystallization–Sintering". **Ceram Int.** 39 (2): 1943–1949.

- [31] Vasilopoulos, K.C. and et al. 2009, "Bulk Nucleated Fine Grained Mono-Mineral Glass-Ceramics from Low-Silica Fly Ash". *Ceram Int.* 35 (2): 555-558.
- [32] Bai, J. and et al. 2014. "Preparation of Foam Glass from Waste Glass and Fly Ash". *Mater Lett.* 136 : 52–54.
- [33] ดนุพล ตันนโยภาส, สุรินทร์ ไชยสุริยา และสุชาติ จันทรมณีนธ์. 2557. "ผลของการเติมเถ้าลอยไม่ยางพาราต่อสมบัติของมวลรวมน้ำหนักเบาผลิตจากแก้วขวดใส". *วารสารวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยสยาม.* 15 (2): 1-12.
- [34] ดนุพล ตันนโยภาส, รัตติกาล สุริยะ และสุชาติ จันทรมณีนธ์. 2557. "แก้วเซรามิกได้จากแก้วขวดโซดาและเถ้าปาล์มน้ำมัน". *วารสารวิทยาศาสตร์ลาดกระบัง.* 23 (2): 1-16.
- [35] พัชรีย์ รัตนพิรุณ และคณะ. 2558. "การนำแก้วขวดโซดาและเถ้าหนักปาล์มน้ำมันมาใช้ประโยชน์ในการผลิตแก้วเซรามิก". *วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.* 23 (1): 127-140.