

การนำแก้วขวดโซดาและเถ้าหนักปาล์มน้ำมัน มาใช้ประโยชน์ในการผลิตแก้วเซรามิก

Utilization of Soda Bottle Glass and Oil Palm Bottom Ash in Glass-Ceramics Production

พัชรี รัตนพิรุณ, ดวงเด่น รักศรีทอง, สุชาติ จันทร่มณีย์
และดนุพล ตันนโยภาส*

ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ถนนกาญจนวนิชย์ ตำบลคอกหงส์ อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา 90112
Patcharee Rattanapirun, Duangden Raksritong, Suchat Chantaramanee
and Danupon Tonnayopas*

Department of Mining and Materials Engineering, Faculty of Engineering,
Prince of Songkla University, Karnjanavanich Road, Kho Hong, Hat Yai, Songkhla 90110

บทคัดย่อ

เถ้าหนักของเสียจากการเผาไหม้เศษวัสดุปาล์มน้ำมันในโรงงานผลิตน้ำมันปาล์ม ซึ่งมีองค์ประกอบซิลิกา อะลูมินา และเหล็กสูง ใช้ผสมร่วมกับแก้วขวดโซดาเพื่อศึกษาผลกระทบของการเปลี่ยนสภาพแก้วต่อตัวอย่างแก้วเซรามิก วัสดุดิบทั้งเถ้าหนักและเศษแก้วขวดโซดานำไปบดด้วยเครื่องบดแบบลูกบอลกระแทก เป็นเวลา 3 ชั่วโมง จากนั้นนำมาคั่วขนาดให้อนุภาคเล็กกว่า 75 ไมครอน เถ้าหนักแทนที่เศษแก้วขวดโซดด้วยอัตราส่วนร้อยละ 20, 30, 40 และ 50 โดยน้ำหนัก อัดขึ้นรูปเป็นตัวอย่างเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 มิลลิเมตร และยาว 17 มิลลิเมตร ภายใต้แรงอัดแกนเดียว 50 เมกะพาสคัล และเผาที่อุณหภูมิในช่วง 750 ถึง 950 องศาเซลเซียส ค้างไว้เป็นเวลาหนึ่งชั่วโมง ตัวอย่างทดสอบทั้งสมบัติทางกายภาพและทางกล ได้แก่ ความหนาแน่น การดูดซึมน้ำ การหดตัวหลังเผาเชิงปริมาตร ความแข็งแบบชอร์ กำลังอัดที่อุณหภูมิทั่วไปและที่ 100 องศาเซลเซียส นอกจากนี้ยังทดสอบความคงทนต่อสารเคมี และการเปลี่ยนอุณหภูมิอย่างฉับพลัน เลือกตัวอย่างวิเคราะห์แร่ประกอบและโครงสร้างจุลภาคด้วยการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดตามลำดับ ผลการทดสอบพบว่าตัวอย่างที่ให้โดดเด่นคือใส่เถ้าหนักร้อยละ 30 เผาที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส ผลวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ได้ปรากฏวัฏภาคของแร่สำคัญ คือ โวลลาสโทไนต์ ไดออปไซด์ และคริสโทบาไลต์ ภาพถ่ายจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดแสดงลักษณะคล้ายรูปเข็มของโวลลาสโทไนต์และรอยโค้งเว้ารูปฝ่ามือของขอบรูพรองคริสโทบาไลต์

คำสำคัญ : แก้วเซรามิก; เถ้าหนักปาล์มน้ำมัน; แก้วขวดโซดา; การเผาผนึก; การเปลี่ยนสภาพแก้ว

Abstract

Oil palm bottom ash (OPBA) which is a pollutant residue from fuel in a palm oil factory consisting high silica, alumina and iron was incorporated with soda bottle glass (SBG) to study vitrification effects on the fired glass-ceramics specimens. Both raw materials were ground by ball mill for 3 hours, and then were sieved to the particle size lesser than 75 microns. OPBA was replaced partially in different proportions of 20, 30, 40 and 50 wt. %. Cylindrical specimens (15 mm in diameter and 17 mm in length) were formed under uniaxial pressure of 283 MPa and fired at temperatures ranging from 750 to 950 °C with the soaking time of one hour. Properties of specimen which are bulk density, water absorption, volumetric shrinkage, Shore hardness, and compressive strengths at ambient temperature and at 100°C were determined. In addition, chemical resistance and thermal shock tests were also performed. Mineral compositions and microstructures of the selected specimen were analysed by X-ray diffraction and scanning electron microscope, respectively. The experimental result indicated that the outstanding specimen is 30 % OPBA with heat treatment at 850 °C. XRD pattern revealed the presence of wollastonite, diopside and cristobalite, as major crystalline phase. SEM microphotography was characterized by the presence of needle like wollastonite crystal and conchoidal fracture of cristobalite pores.

Keywords: glass ceramic; oil palm bottom ash; soda bottle glass; sintering; vitrification

1. บทนำ

ปัจจุบันปริมาณเถ้าปาล์มน้ำมัน ขวดแก้ว และเศษแก้วใส่ทั่วประเทศไทยมีปริมาณเพิ่มมากขึ้น หน่วยงานรัฐและเอกชนต่าง ๆ ได้หามาตรการในการกำจัดของเสียที่เกิดขึ้น การนำของเสียจากกระบวนการผลิตนำกลับมาใช้ใหม่อีกดูเสมือนเป็นแนวทางเหมาะสมที่สุด [1] ประเทศไทยมีเศษแก้วทั้งเป็นขยะอยู่ประมาณปีละ 40,000 ตัน [2] ซึ่งไม่ได้นำกลับไปใช้ ในกระบวนการผลิตแก้วและนับวันจะมีปริมาณขยะเศษแก้วเพิ่มมากขึ้น อาจส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในอนาคต เถ้าหนัก (bottom ash) เป็นผลพลอยได้จากกระบวนการเผาวัสดุบางชนิด เช่น เตาเผาขยะชุมชน [3] เพื่อให้เกิดเป็นแก้วใช้ทำเป็นมวลรวมน้ำหนักเบา ซึ่งเป็นวิธีที่สามารถทำได้ง่าย ไม่ก่อมลพิษ

กับสิ่งแวดล้อม อีกทั้งยังลดปริมาณขยะ และเพิ่มมูลค่าให้กับเถ้าหนัก และเทคโนโลยีล่าสุดยังเป็นหนทางหนึ่งในการผลิตแก้วเซรามิก (glass-ceramic) ซึ่งมักมีสภาพเป็นผลึกอยู่ระหว่างร้อยละ 30 ถึง 90 มีสมบัติน่าสนใจ เป็นต้นว่าความพรุนศูนย์ กำลังสูง ความเหนียว โปร่งแสงหรือสภาพทึบแสง การเกิดสารสี การเรืองแสงแบบโอปอ การขยายตัวทางความร้อนต่ำหรือกระนั้นติดลบ เสถียรภาพที่อุณหภูมิสูง การเรืองแสงความสามารถในการกัดแต่ง (machinability) สภาพแม่เหล็กเฟอร์โร (ferromagnetism) สภาพดูดซับใหม่ (resorbability) หรือสภาพความคงทนทางเคมีสูง สภาพเข้ากันได้ทางชีวภาพ (biocompatibility) สภาพกระตุ้นชีวภาพ (bio-activity) สภาพนำไอออน สภาพนำยวดยิ่ง สมรรถภาพแยกแยะเอกเทศ (isolation

capabilities) การคงที่และการสูญเสียไดอิเล็กทริก ความต้านทานไฟฟ้าและความต่างศักย์แตกสลายสูง [4] การนำเถ้าหนักมาเผาที่อุณหภูมิสูงเกิดการหลอมละลายและเย็นตัวเป็นแก้วเซรามิกเกิดเป็นวัฏภาคแร่ เช่น แร่วอลลาสโทไนต์ (wollastonite, CaSiO_3) แร่ไดออปไซด์ (diopside, $\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$) เป็นต้น ซึ่งแร่เหล่านี้จะช่วยเสริมให้แก้วมีสมบัติดีขึ้นด้วยเช่นกัน [5]

Cheeseman และคณะ ได้ศึกษาแก้วเซรามิกเม็ดกลมเล็ก (pellet) ทำจากเถ้าหนัก (bottom ash) ในเตาเผาขยะ บดเถ้าให้ขนาดอนุภาคเล็กกว่า 8 มิลลิเมตร ด้วยหม้อบดแบบลูกบอลกระแทก มีองค์ประกอบหลักควอตซ์ (SiO_2) และแคลไซต์ และเผาผนึกในเตาแบบหมุน (rotary furnace) ที่อุณหภูมิ 900-1,080 องศาเซลเซียส พบว่าอุณหภูมิเผามีผลต่อความหนาแน่น การดูดซึมน้ำ และกำลังบด (crushing strength) เม็ดกลมเล็กเผาผนึกประกอบด้วยแร่ไดออปไซด์ วอลลาสโทไนต์ และไคลโนเอนสตาไทต์ (clinoenstatite- $\text{Mg}_2\text{Si}_2\text{O}_6$) อนุภาคน้ำหนักต่ำกว่า 1,000 องศาเซลเซียส อนุภาคไม่แข็งแรง อนุภากระหว่าง 1,000-1,050 องศาเซลเซียส ได้เม็ดกลมมีความหนาแน่นเฉลี่ยประมาณ 1.4-1.6 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร เเผาที่อุณหภูมิ 1,060 องศาเซลเซียส ทำให้ผิวเกิดรอยร้าว และอุณหภูมิเผาสูงกว่า 1,080 องศาเซลเซียส อนุภาคจับตัวเป็นก้อนและติดเตาเผา [3] ต่อมา Cheeseman และคณะ ศึกษากระบวนการผลิตเซรามิกจากเถ้าหนักจากเตาเผาขยะบดขนาดเล็กกว่า 8 มิลลิเมตร ซึ่งประกอบด้วยควอตซ์ (SiO_2) แคลไซต์ (CaCO_3) กิลีไนต์ (gehlenite- $\text{Ca}_2\text{Al}(\text{AlSi})\text{O}_7$) และฮีมาไทต์ (Fe_2O_3) คัดขนาดที่ 150 และ 355 ไมครอน นำไปอบแห้งประมาณ 24 เซนติเมตร แล้วนำไปผ่านหม้อบดแบบลูกบอลกระแทก (ball mill) ความเร็วรอบ 50 รอบต่อนาที เเผาที่อุณหภูมิ 1,080-1,115 องศาเซลเซียส ซึ่งเผาผนึกที่ 1,110 องศาเซลเซียส ได้

เซรามิกความหนาแน่นเฉลี่ยระหว่าง 2.43 ถึง 2.64 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร และการดูดซึมน้ำร้อยละ 0.5-1.9 จากภาพถ่ายกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope, SEM) เห็นรูพรุนทรงกลมภายในเนื้อพื้น (matrix) การชะละลายโลหะหนักลดลงจากการหุ้มด้วยเนื้อแก้วและผสมวัฏภาคผลึก [7] Yoon และ Yun ทำแก้วเซรามิกได้จากเถ้าหนักตะกอนน้ำเสียและเศษแก้ว ซึ่งมีขนาดอนุภาคเล็กกว่า 150 เมช เเผาที่อุณหภูมิ 850-1,050 องศาเซลเซียส ใช้เครื่องบดแบบลูกบอลกระแทก 30 นาที ความเร็ว 700 รอบต่อนาที เมื่อเผาที่อุณหภูมิสูงขึ้น ความหนาแน่นของตัวอย่างเป็น 2.329, 2.647 และ 2.691 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร ตามลำดับ ซึ่งความหนาแน่นแปรผันตามกับอุณหภูมิ และเมื่อความหนาแน่นต่ำสมบัติเชิงกลก็ต่ำไปด้วย เนื่องจากมีรูพรุนมากส่งผลต่อสมบัติต่าง ๆ ของวัสดุ [8] นอกจากนี้ยังมีการหาเงื่อนไขที่ดีที่สุดผลิตแก้วเซรามิกที่ปลอดภัยและได้มาตรฐาน จากการผสมเถ้าหนักและเถ้าลอยถ่านหิน โดยเถ้าหนักร้อยละ 80 ส่วนเถ้าลอยร้อยละ 20 ที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส แร่ที่เกิดในแก้วเซรามิกคือ กิลีไนต์ อะเคอร์มานไนต์ (akermanite- $\text{Ca}_2\text{MgSiO}_7$) และวอลลาสโทไนต์ เป็นไปได้พัฒนาแก้วเซรามิกชั้นเยี่ยมประยุกต์ในงานก่อสร้าง [6] ดังนั้นการนำเถ้าหนักจากปาล์มน้ำมันในโรงงานผลิตน้ำมันปาล์ม ที่ดูเหมือนนำกลับมาใช้ประโยชน์ได้น้อย ให้มีคุณค่าเพิ่มขึ้นในการนำมาทำเป็นวัตถุดิบในการผลิตแก้วเซรามิกได้อีกครั้ง ถือว่าเป็นแนวทางการกำจัดของเสียที่เสียค่าใช้จ่ายน้อย ประหยัดพลังงานและยังเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม

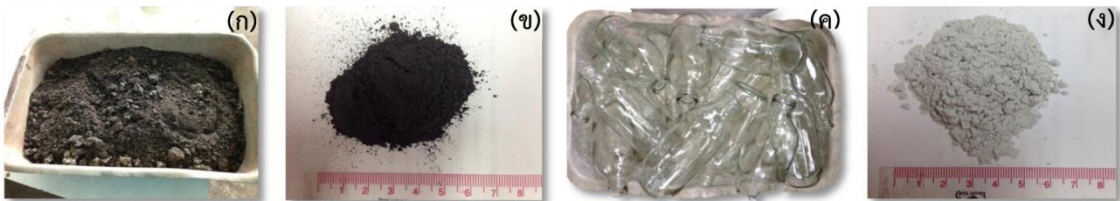
2. อุปกรณ์และวิธีการ

2.1 การเตรียมวัสดุแก้วเซรามิก

งานวิจัยนี้ใช้เถ้าหนักจากเชื้อเพลิงปาล์มน้ำมัน โดยเฉพาะส่วนทะลายปาล์มของโรงงานผลิต

น้ำมันปาล์ม อำเภอลำทับ จังหวัดกระบี่ (รูปที่ 1ก) และแก้วขวดโซดาใสที่ล้างสะอาดและอบแห้ง (รูปที่ 1ค) แล้วจึงนำวัตถุดิบทั้งสองมาบดด้วยเครื่องบดแบบ ลูกบอลลกระแทก ขนาดเล็กกว่า 75 ไมครอน (รูปที่ 1ข

และ 1ง) ม้องค์ประกอบทางเคมีดังแสดงในตารางที่ 1 พบว่าเถ้าหนักมี SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 และ CaO สูง ซึ่งล้วนเป็นสารประกอบที่สำคัญในงานเซรามิก [1]



รูปที่ 1 (ก) เถ้าหนักปาล์มก่อนบด (ข) เถ้าหนักปาล์มหลังบดขนาดเล็กกว่า 75 ไมครอน (ค) ขวดแก้วใสก่อนบด และ (ง) หลังบดขนาดเล็กกว่า 75 ไมครอน

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุดิบตั้งต้นจากวิธีการร้าวแสงรังสีเอกซ์ (X-rays fluorescence)

wt. %	ชนิดวัสดุ							
	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	Na_2O	K_2O	LOI
แก้วขวดโซดา [2]	70.60	2.10	0.30	11.50	1.90	13.40	0.10	0.10
เถ้าหนักปาล์มน้ำมัน	39.55	12.30	15.60	13.10	8.31	4.0	2.78	4.36

2.2 การเตรียมตัวอย่างทดสอบ

เถ้าหนักแทนที่เศษแก้วใสในอัตราส่วน 50, 40, 30, 20 โดยน้ำหนัก น้ำหนักส่วนผสมทั้งหมด 100 กรัม (ตารางที่ 2) ผสมให้เข้ากันในกระบอกที่วางไว้บน ลูกกลิ้งเครื่องบดชนิดลูกกลิ้ง (jar mill) เป็นเวลา 2 ชั่วโมง เพื่อสำหรับอัดขึ้นรูปตัวอย่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 มิลลิเมตร ความสูง 16 มิลลิเมตร ใช้แรงดัน 283 เมกะพาสคัล (50 kN) โดยไม่ใช้ตัว

ประสาน [9] วัดความสูง เส้นผ่านศูนย์กลาง และซึ่งน้ำหนักของตัวอย่างดิบ (ตารางที่ 2) ก่อนเผาที่อุณหภูมิ 750, 850 และ 950 องศาเซลเซียส ด้วยอัตรา 5 องศาเซลเซียส/นาที่ คงอุณหภูมิสูงไว้ 1 ชั่วโมง จากนั้นปล่อยให้เย็นภายในเตา ซึ่งน้ำหนัก วัดมิติอีกครั้ง (รูปที่ 2) พบว่าตัวอย่างแก้วล้วนมีรูปทรงไม่เอื้อต่อการทดสอบความแข็งแรงแบบชอร์และกำลังอัด



รูปที่ 2 ตัวอย่างแก้วเซรามิกจากสูตรทั้งหมดในการศึกษาครั้งนี้

ตารางที่ 2 การออกแบบอัตราส่วนของเศษแก้วกับเส้นใยที่ทดลอง

สูตร	ตัวแปร			
	ผงแก้ว (wt. %)	ผงเส้นใยปาล์มน้ำมัน (wt. %)	อุณหภูมิเผา (°C)	จำนวนตัวอย่าง
G50BA50-750	50	50	750	15
G50BA50-850	50	50	850	15
G50BA50-950	50	50	950	15
G60BA40-750	60	40	750	15
G60BA40-850	60	40	850	15
G60BA40-950	60	40	950	15
G70BA30-750	70	30	750	15
G70BA30-850	70	30	850	15
G70BA00-950	70	30	950	15
G80BA20-750	80	20	750	15
G80BA20-850	80	20	850	15
G80BA20-950	80	20	950	15
G100BA0-750	100	0	750	15
G100BA0-850	100	0	850	15
G100BA0-950	100	0	950	15

2.3 วิธีการทดสอบ

ศึกษาสมบัติทางกายภาพและเชิงกล ได้แก่ ลักษณะเนื้อแก้ว ความหนาแน่นรวม การดูดซึมน้ำ ความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะ ความแข็งแบบชาร์ก กำลังอัด และการทนต่อสารเคมี วิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค ด้วยวิธีภาพถ่ายกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) และวิเคราะห์ด้วยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction-XRD)

2.3.1 ความหนาแน่นรวม (bulk density)

ตัวอย่างที่มีรูปทรงกระบอกที่สามารถคำนวณหาปริมาตรได้ ชั่งน้ำหนัก นำมาคำนวณโดยสมการที่ 1

$$D = \frac{M}{V} \quad (1)$$

โดย D = ความหนาแน่นรวม (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)

M = น้ำหนักตัวอย่าง (กรัม)

V = ปริมาตรของตัวอย่าง (ลูกบาศก์เซนติเมตร)

2.3.2 การดูดซึมน้ำ

ชั่งน้ำหนักตัวอย่างก่อนแช่ในน้ำร้อนเป็นเวลา 2 ชั่วโมง แล้วแช่ทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง จากนั้นจึงนำมาเช็ดผิวแห้งและชั่งน้ำหนัก คำนวณค่าการดูดซึมน้ำตามสมการที่ 2

$$Ab = \frac{W_n - W_o}{W_o} \times 100 \quad (2)$$

โดย Ab = การดูดซึมน้ำ (ร้อยละ)

W_o = น้ำหนักตัวอย่างก่อนแช่น้ำ (กรัม)

W_n = น้ำหนักตัวอย่างหลังแช่น้ำ (กรัม)

2.3.3 การหัดตัวเชิงปริมาตร

โดยการวัดขนาดของชิ้นงานทั้งก่อนและหลังเผาแล้วคำนวณตามสมการที่ 3

$$S_v = \frac{V_o - V_1}{V_o} \times 100 \quad (3)$$

โดย S_v = การหัดตัวเชิงปริมาตร (ร้อยละ)

V_o = ปริมาตรตัวอย่างก่อนเผา (ลูกบาศก์เซนติเมตร)

V_1 = ปริมาตรตัวอย่างหลังเผา (ลูกบาศก์เซนติเมตร)

2.3.4 ความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะ

(electrical resistivity)

ใช้เครื่อง Megohmmeter รุ่น CA 6525 ด้วยความดันไฟฟ้า 500 โวลต์ อ่านค่าความต้านทานไฟฟ้า จากนั้นนำค่าที่ได้มาคำนวณตามสมการที่ 4

$$\rho = \frac{RA}{L} \quad (4)$$

โดย ρ = ความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะ (เมกะโอห์ม-เซนติเมตร)

R = ค่าความต้านทานที่วัดได้ (เมกะโอห์ม, $M\Omega$)

A = พื้นที่ภาคตัดขวางของตัวอย่าง (ตารางเซนติเมตร)

L = ความยาวของตัวอย่าง (เซนติเมตร)

2.3.5 การทดสอบความแข็งแบบชอร์

ใช้เครื่องทดสอบความแข็งแบบ Shore hardness รุ่น EQU TIP มีหลักการของลูกบอลเหล็กกระดอนสูงต่ำตามความหนาแน่นของวัตถุที่วัด ซึ่งได้ทดลองบนผิวที่เรียบของตัวอย่างจำนวน 3 ครั้ง และคำนวณค่าความแข็งเฉลี่ย

2.3.6 การทดสอบกำลังอัด

ตัวอย่างแก้วเซรามิกที่เตรียมไว้สุตรละ 3 ตัวอย่าง ทำการทดสอบกดที่อุณหภูมิห้องและสภาพอุณหภูมิปกติที่ 100 องศาเซลเซียส ภายในตู้ปรับอุณหภูมิช่วงต่ำ เครื่องทดสอบกำลังอัดชนิด

Hounsfield Test Equipment รุ่น H100KS วางก้อนตัวอย่างบนแท่นให้อยู่กึ่งกลางของแท่นกด ให้แรงกดคงที่ด้วยอัตรา 2 มิลลิเมตรต่อวินาที จนตัวอย่างเกิดการพิบัติ บันทึกข้อมูลการเปลี่ยนแปลงความเค้นและความเครียดของตัวอย่างแบบอัตโนมัติด้วยคอมพิวเตอร์

2.3.7 การทดสอบการเปลี่ยนอุณหภูมิอย่างฉับพลัน

ตัวอย่างจะทดสอบไปอบที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นนำออกจากเตาอบแล้วจุ่มในน้ำทันที สังเกตตัวอย่างมีรอยร้าวหรือไม่ ถ้าตัวอย่างยังไม่แตก ให้ทดสอบเช่นเดิมโดยเพิ่มอุณหภูมิครั้งละ 20 องศาเซลเซียส จนถึง 260 องศาเซลเซียส จึงยุติการทดลอง

2.3.8 การทดสอบการทนต่อสารเคมี

สารละลายกรดไฮโดรคลอริกและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เข้มข้นร้อยละ 3 ตัวอย่าง แช่ไว้เป็นเวลา 7 วัน เมื่อครบกำหนดแล้วนำตัวอย่างขึ้นมาสังเกตการณ์เปลี่ยนแปลงภายนอก จากนั้นนำไปล้างและอบแห้ง แล้วนำไปชั่งเพื่อเปรียบเทียบกับน้ำหนักก่อนและหลังแช่สารเคมี

2.3.9 การวิเคราะห์ด้วย XRD และ SEM

การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคด้วยการวิเคราะห์ด้วยการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ โดยใช้เครื่อง X-Ray Diffractometer (XRD) รุ่น Philips X'Pert MPD จากนั้นนำผลการวิเคราะห์มาคำนวณหาขนาดของผลึกตามสมการที่ 5

$$\text{ขนาดของผลึก (D)} = \frac{K\lambda}{\beta \cos\theta} \quad (5)$$

โดยที่ D = ขนาดของผลึก

K = Shape factor (0.9)

λ = X-ray wave length (1.5406 ไมโครเมตร)

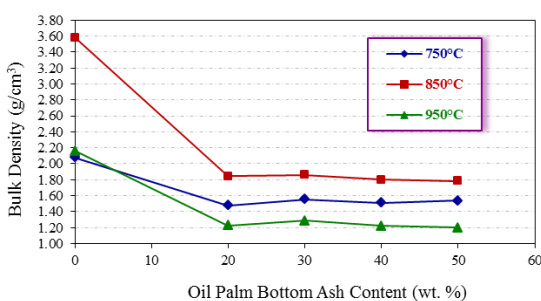
β = ค่าความสูงครึ่งพีค

ส่วนการถ่ายภาพโครงสร้างจุลภาคนั้น ใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (scanning electron microscope, SEM) รุ่น FEI Quanta 400 (SEM-Quanta)

3. ผลการวิจัยและวิจารณ์

3.1 ความหนาแน่นรวม

ความหนาแน่นรวมของแต่ละส่วนผสมมีค่าน้อยกว่าความหนาแน่นรวมของตัวอย่างแก้วล้วนทุกอุณหภูมิเผา ยิ่งเมื่อเทียบค่าความหนาแน่นรวมที่ผสมแล้วอัตราส่วน ตัวอย่างแก้วเซรามิกที่ผสมแล้วหนักร้อยละ 30 มีความหนาแน่นสูงสุดของทุกอุณหภูมิเผา ตัวอย่างเผาที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส มีค่าสูงสุด (รูปที่ 3) Bethanis และคณะ เผาตัวอย่างที่อุณหภูมิสูงขึ้น ตัวอย่างมีความหนาแน่นสูงขึ้น และเมื่อสูงจนถึงอุณหภูมิหนึ่ง ค่าความหนาแน่นของตัวอย่างได้ลดลง เนื่องจากตัวอย่างได้เกิดการขยายตัวภายในเนื้อเกิดรูพรองเล็กน้อย [10] ซึ่งใกล้เคียงกับผลการทดลองครั้งนี้ โดยที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส มีค่าความหนาแน่นมากที่สุด ดังแสดงในรูปที่ 3

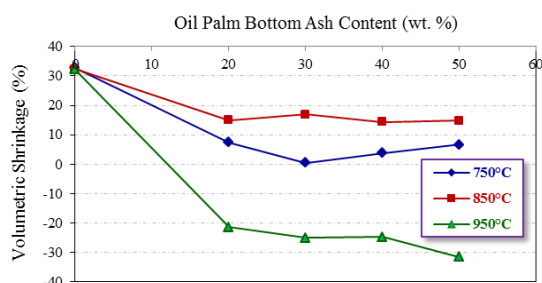


รูปที่ 3 ความหนาแน่นรวมของตัวอย่างแก้วเซรามิก

3.2 การเปลี่ยนแปลงเชิงปริมาตร

ตัวอย่างที่ผสมแล้วหนักในทุกอัตราส่วนเผา ที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส ยังคงมีค่าการหดตัวเชิงปริมาตรสูงสุดเมื่อเทียบกับอุณหภูมิอื่น ๆ ซึ่งมีการหด

ตัวสูงสุดอยู่ที่ร้อยละ 30 แต่ก็ยังมีค่าต่ำกว่าตัวอย่างแก้วล้วน และที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส พบว่าตัวอย่างแก้วเซรามิกเกิดการขยายตัว (ค่าติดลบ) ภายในตัวอย่างเกิดรูพรุนขึ้น อันเกิดจากแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ สอดคล้องกับค่าความหนาแน่นรวม (รูปที่ 3) ส่วนที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส มีค่าการหดตัวเชิงปริมาตรสูงสุดเมื่อเทียบกับอีกสองอุณหภูมิ ดังรูปที่ 4 ซึ่งต่างจากงานวิจัยของ Bethanis และคณะ ที่ใช้เถ้าหนักจากเตาเผาขยะที่มีองค์ประกอบทางเคมีต่างกัน เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ตัวอย่างมีการหดตัวมากขึ้น [10]

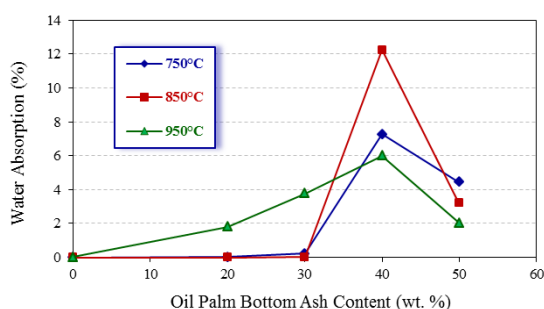


รูปที่ 4 การเปลี่ยนแปลงเชิงปริมาตรของตัวอย่างแก้วเซรามิก

3.3 การดูดซึมน้ำ

ค่าการดูดซึมน้ำของตัวอย่าง มีค่าการดูดซึมน้ำสูงสุดที่แต่ละอุณหภูมิ 750, 850 และ 950 องศาเซลเซียส มีค่าร้อยละ 7.28, 12.25 และ 5.99 ตามลำดับ ในขณะที่เถ้าหนักร้อยละ 20 และ 30 มีค่าการดูดซึมน้ำน้อย และตัวอย่างแก้วล้วนนั้นไม่มีการดูดซึมน้ำ (รูปที่ 5) เมื่อเทียบกับงานวิจัยของ Bethanis และคณะ พบว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ตัวอย่างทำจากเถ้าหนักเตาเผาขยะมีการดูดซึมน้ำลดลง [10] ซึ่งต่างกับตัวอย่างทดลองครั้งนี้ คือ ตัวอย่างเกือบทุกอัตราส่วนผสมเถ้าหนักเผาที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส มีการดูดซึมน้ำเพิ่มขึ้น ส่วนที่ผสมเถ้าหนักร้อยละ 40

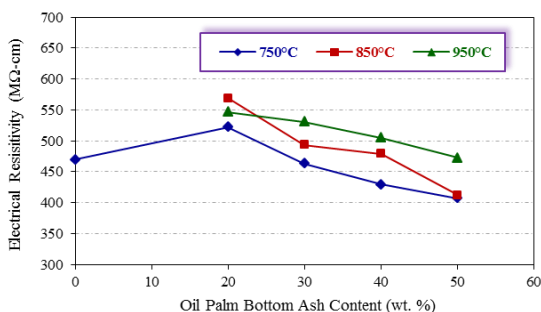
เผาที่ 850 องศาเซลเซียส มีค่าสูงขึ้นมากที่สุด สันนิษฐานว่าในส่วนผสมเติมเถ้าหนักเกินร้อยละ 30 ได้รับอิทธิพลจากองค์ประกอบทางเคมีแก่ตัวอย่างเซรามิกผนวกกับอุณหภูมิความร้อนที่เผา จึงช่วยเสริมให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างเนื้อแก้วเซรามิกขึ้นอย่างมาก โดยเฉพาะการเกิดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ทั่วผิวนอกมา แต่เมื่อผสมเถ้าหนักร้อยละ 50 โครงสร้างโพรงบางส่วนพังยุบตัวลงเชื่อมติดกันเข้า จึงทำให้รูพรุนลดลงหรือการดูดซึมน้ำลดลงไปด้วยนั่นเอง



รูปที่ 5 การดูดซึมน้ำของตัวอย่างแก้วเซรามิก

3.4 ความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะ

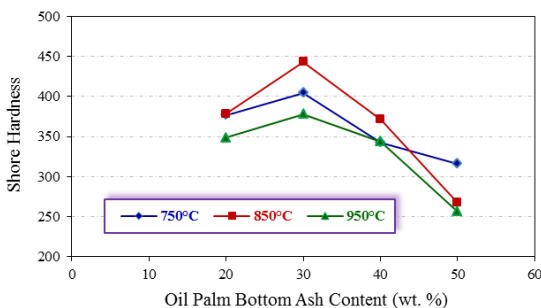
พบว่าค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะลดลงเมื่อมีปริมาณเถ้าหนักเพิ่มขึ้นดังรูปที่ 6 และเมื่อทำการทดสอบตัวอย่างที่เผาอุณหภูมิสูงขึ้น ค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะมีค่าสูงขึ้นด้วยเช่นกัน ซึ่งส่วนผสมเถ้าหนักร้อยละ 20 ให้ค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะสูงที่สุด พบว่าตัวอย่างที่มีส่วนผสมของเถ้ามากขึ้น แปรผกผันกับค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะ ทั้งนี้เนื่องจากสารประกอบหลักมีมากในเถ้าหนัก รวมทั้งเนื้อตัวอย่างแก้วเซรามิกที่มีความพรุนเพิ่มขึ้น สอดคล้องกับความหนาแน่น (รูปที่ 3) การเปลี่ยนแปลงเชิงปริมาตร (รูปที่ 4) และการดูดซึมน้ำ (รูปที่ 5) จึงทำให้ลดความต้านทานไฟฟ้า เช่นเดียวกับตัวอย่างเซรามิกแก้ว ได้จากการผสมด้วยเถ้าลอยปาล์มน้ำมัน [11]



รูปที่ 6 ความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะของตัวอย่างแก้วเซรามิก

3.5 ความแข็งแบบชอร์

พบว่าตัวอย่างที่มีความแข็งที่สุด คือตัวอย่างที่มีเถ้าหนักร้อยละ 30 ซึ่งสามารถวัดค่าความแข็งได้คือ 443.33 โดยขึ้นงานตัวอย่างที่เผาที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส มีค่าความแข็งสูงสุด (รูปที่ 7) เนื่องจากภายในตัวอย่างเผาอุณหภูมิอื่น (750 และ 950 องศาเซลเซียส) เกิดรูพรุนภายในตัวอย่างขึ้นมาก (รูปที่ 3 และ 5) ส่งผลให้ค่าความแข็งลดลง

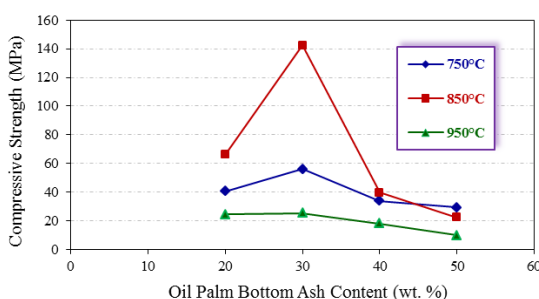


รูปที่ 7 ความแข็งแบบชอร์ของตัวอย่างแก้วเซรามิก ทำจากผงแก้วผสมกับเถ้าหนักปาล์มน้ำมัน

3.6 กำลังอัด

ตัวอย่างผสมเถ้าหนักร้อยละ 30 ให้ค่ากำลังสูงสุดในทุกอุณหภูมิเผา และค่าสูงสุดเผาที่ 850 องศาเซลเซียส คือ 142.50 เมกะพาสคัล ซึ่งสอดคล้อง

กับค่าความแข็งแรงแบบชอร์ และตัวอย่างที่เติมเถ้าหนัก ร้อยละ 30 นั้น ยังให้ค่ากำลังอัดสูงกว่าตัวอย่างแก้ว ล้วนอีกด้วย (รูปที่ 8) โดยตัวอย่างทดสอบเผาที่ อุณหภูมิสูงขึ้น ให้กำลังอัดมีค่าลดลงด้วยเหตุผล เช่นเดียวกับค่าความแข็งแรงแบบชอร์ (รูปที่ 7) คือ ผลกระทบจากรูพรุนเกิดขึ้นภายในเนื้อตัวอย่าง ทำให้ ระบุได้ว่า อุณหภูมิและอัตราส่วนที่ให้ค่ากำลังอัดที่ดี ที่สุด คือ 850 องศาเซลเซียส และมีส่วนผสมของเถ้า หนักร้อยละ 30

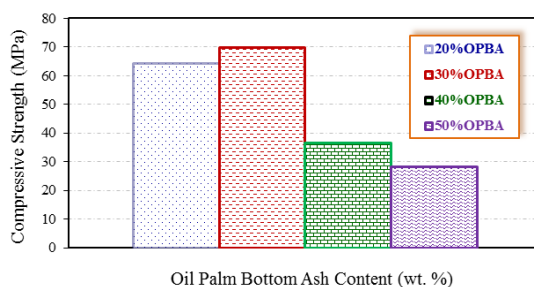


รูปที่ 8 กำลังอัดของตัวอย่างแก้วเซรามิกทำจากผง แก้วผสมกับเถ้าหนักปาล์มน้ำมันที่บรรยากาศ ห้อง

เพื่อต้องการทราบพฤติกรรมกำลังอัด ของตัวอย่างเผาที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส ทุก ส่วนผสมเถ้าหนัก ภายใต้อุณหภูมิปกคลุม 100 องศาเซลเซียส เพื่อศึกษาผลกระทบจากอุณหภูมิ สภาพแวดล้อมสูงขึ้น พบว่าตัวอย่างส่วนใหญ่มีค่ากำลัง อัดลดลง ยกเว้นตัวอย่างที่ผสมเถ้าหนักร้อยละ 50 มีค่า เพิ่มขึ้นเล็กน้อยจาก 22.36 เมกะพาสคัล เป็น 28.00 เมกะพาสคัล (รูปที่ 9) ทั้งนี้สันนิษฐานว่าเถ้าหนัก บางส่วนที่ยังไม่เผาไหม้ได้เกิดการตกผลึกใหม่ แต่ เนื่องจากผลการทดลองไม่มากเพียงพอ จึงควรทำการ ทดลองลงรายละเอียดกว่านี้

3.7 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างฉับพลัน

ทุกตัวอย่างแก้วเซรามิกทดสอบการทนต่อ การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างฉับพลัน ไม่ปรากฏการ เปลี่ยนแปลงใดขึ้น ปรากฏการรอยแตกร้าวเกิดขึ้น ตั้งแต่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส จนถึงอุณหภูมิ 260 องศาเซลเซียส ที่กำหนดไว้ สามารถทนต่อการเปลี่ยน อุณหภูมิอย่างฉับพลันได้เป็นอย่างดี



รูปที่ 9 กำลังอัดของตัวอย่างแก้วเซรามิกภายใต้ อุณหภูมิปกคลุม 100 องศาเซลเซียส

3.8 ความคงทนต่อสารเคมี

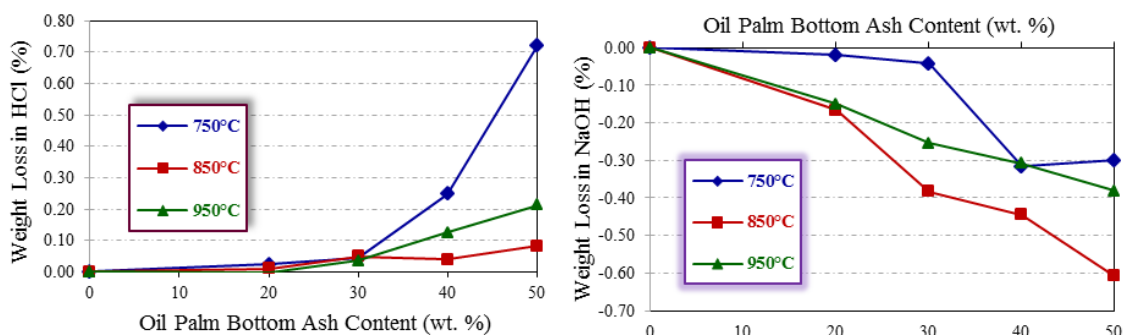
ผลทดลองตัวอย่างไปแช่ในสารละลายกรด และเบส พบว่าการแช่ตัวอย่างในกรดเป็นเวลา 7 วัน ทำให้ตัวอย่างเกิดการกัดกร่อนขึ้น จากน้ำหนักที่ หายไปของตัวอย่าง โดยตัวอย่างที่มีอัตราส่วนของเถ้า หนักร้อยละ 50 มีการกัดกร่อนมากที่สุดในทุกอุณหภูมิ เผา (รูปที่ 10ก) ส่วนการแช่ตัวอย่างในเบส (รูปที่ 10ข) พบว่าการคำนวณน้ำหนักที่หายไปนั้น มีค่าเพิ่มขึ้น (เป็นลบ) เนื่องจากคราบเกลือได้ตกผลึกเกาะอยู่ตามรู พรุนภายในตัวอย่าง ทำให้น้ำหนักของตัวอย่างเพิ่มขึ้น

3.9 วิเคราะห์ในตัวอย่าง

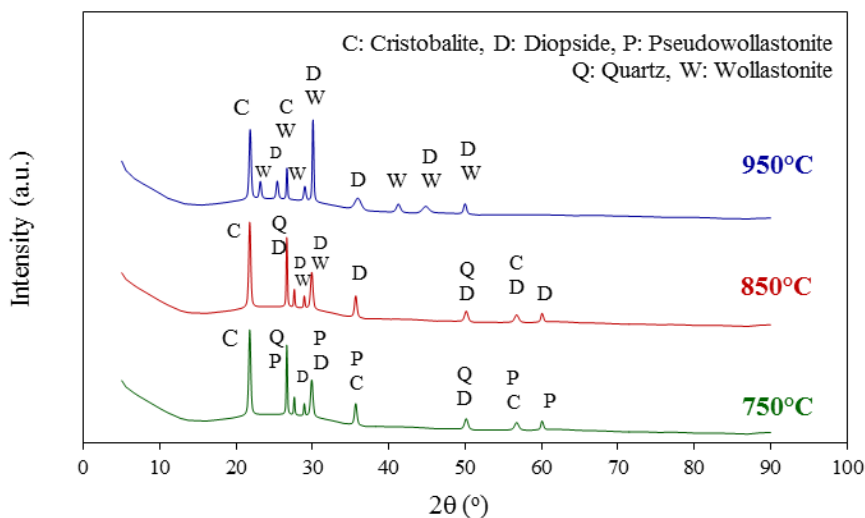
ผลวิเคราะห์วัฏภาคแร่ (mineral phases) โดยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD) ของตัวอย่าง ที่มีอัตราส่วนของเถ้าหนักร้อยละ 30 ที่อุณหภูมิ 750, 850 และ 950 องศาเซลเซียส มีความแข็งแรงสูงสุด ดังรูปที่ 8 พบว่าเผาที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส

ความร้อนยังไม่เพียงพอ ทำให้เกิดซูโดโวลลาสโทไนต์ แต่เมื่ออุณหภูมิเผาสูงขึ้น จึงเกิดแร่วอลลาสโทไนต์ (W) ขึ้นสมบูรณ์ ผลทำนองเดียวกับใช้เศษแก้วผสมกับเถ้าลอยถ่านหิน [12] ที่มีองค์ประกอบคล้ายคลึงกันกับเถ้าหนักปาล์มน้ำมัน และเมื่อเผาที่อุณหภูมิสูงขึ้น 950 องศาเซลเซียส เกิดแร่ควอตซ์ (Q) และคริสโทบาไลต์ (C) ลดลง ส่วนโวลลาสโทไนต์และไดออปไซด์มากขึ้น ดังรูปที่ 11 เป็นการแสดงถึงความสมดุลวัฏภาคที่

เกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่างกัน มีสารประกอบหลักอยู่ในระบบ $MgO + Al_2O_3 + nSiO_2$ หรือระบบ MAS จากปฏิกิริยาระหว่างสารประกอบแคลเซียม (CaO) ซึ่งตรวจจากการหยดกรดเกลือเจือจางบนเถ้าหนักปาล์มน้ำมันพบว่าเกิดฟองฟู สันนิษฐานว่ามาจาก $CaCO_3$ และแมกนีเซียม (MgO) และซิลิกา (SiO_2) จากขวดแก้วก่อตัวได้โวลลาสโทไนต์และไดออปไซด์ [13,14] ดังสามารถอธิบายด้วยสมการเคมีข้างล่าง



รูปที่ 10 ความคงทนของตัวอย่างแก้วเซรามิกต่อสารเคมี (ก) กรดเกลือ และ (ข) ต่าง



รูปที่ 11 ผลวิเคราะห์ XRD ของตัวอย่างแก้วเซรามิกที่อุณหภูมิเผา 750, 850 และ 950 องศาเซลเซียส

ผลจากการคำนวณปริมาณแร่ที่เกิดขึ้นมาแสดงไว้ในตารางที่ 3 พบว่าแร่ไดออปไซด์ (D)

โวลลาสโทไนต์ และคริสโทบาไลต์ล้วนเป็นแร่เกิดสอดคล้องกับตามอุณหภูมิสมดุลวัฏภาคของเซรามิก

[13] ขนาดผลึกที่คำนวณได้จากสมการที่ 5 ได้แสดงในตารางที่ 3 ซึ่งต่างกันเล็กน้อยกับขนาดผลึกของแร่ที่วัด

จากมาตราส่วนในภาพถ่ายอิเล็กตรอนแบบส่องกราด (รูปที่ 12)

ตารางที่ 3 ผลการคำนวณปริมาณและขนาดวัฏภาคแร่ประกอบในตัวอย่างแก้วเซรามิกจากอุณหภูมิเผาต่างกันด้วยวิธี XRD

ชนิดแร่	อุณหภูมิเผา					
	750 °C		850 °C		950 °C	
	ปริมาณ (%)	ขนาด (μm)	ปริมาณ (%)	ขนาด (μm)	ปริมาณ (%)	ขนาด (μm)
ควอตซ์อุณหภูมิสูง (high quartz)	20.15	24	11.03	35	5.48	18
คริสโทบาไลต์	22.69	24	21.81	24	18.33	38
ซูโดไวลลาสโทไนต์ (pseudowollastonite)	24.99	25	-	-	-	-
ไดออปไซด์	32.17	25	26.18	32	28.09	26
ไวลลาสโทไนต์	-	-	40.98	34	48.11	25

3.10 การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค

จากผลการวิเคราะห์ภาพถ่ายอิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ของแก้วเซรามิกที่ผสมเถ้าหัก ร้อยละ 30 อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส พบลักษณะเนื้อแก้วเผาที่อุณหภูมิสูงและพบแร่คริสโทบาไลต์และไวลลาสโทไนต์ ดังแสดงในรูป 12ก ซึ่งได้รับการยืนยันจากผลวิเคราะห์ด้วย XRD (รูปที่ 11) อาจกล่าวได้ว่าเมื่อเผาที่อุณหภูมิสูงขึ้น ควอตซ์ได้เกิดการตกผลึกใหม่ (recrystallization) เป็นไวลลาสโทไนต์ [14] มองเห็นเป็นลักษณะเป็นเส้นขีดเล็กสีขาวฝังในเนื้อพื้นแก้ว (glassy matrix) ส่วนแร่คริสโทบาไลต์ได้ฝังเป็นรอยแอ่งหลุมค่อนข้างกลม ผิวเนื้อภายในเรียบมองดูคล้ายหลุมขนมครก การก่อตัวแร่ได้เริ่มหยุดลงเมื่อความร้อนลดลงและเนื้อรอบข้างแข็งตัว ส่วนการที่ผลึกได้เกาะทะลุออกไปเห็นเป็นรอย มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 30 ไมครอน (รูปที่ 12ก) นั้นได้

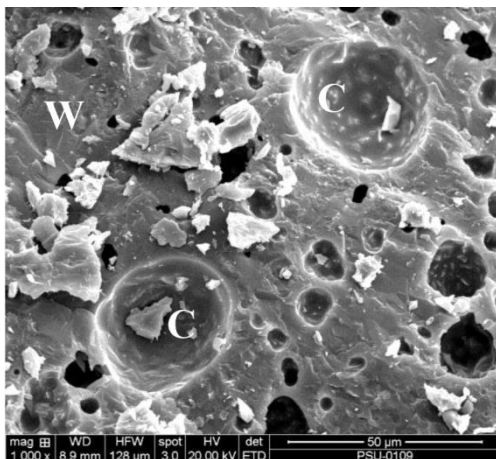
เกิดขึ้นจากแรงกระแทกในช่วงเตรียมตัวอย่างมาตรวจเห็นว่าเนื้อแก้วกับเถ้าหักหลอมรวมเป็นเนื้อเดียวกัน ดังรูปที่ 12ข และที่กำลังขยายมากขึ้น พบว่าภายในเนื้อแก้วมีรูพรุนรูปมนขอบคม (V) มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 5 ไมครอน และแร่ไวลลาสโทไนต์และไดออปไซด์ฝังอยู่ในเนื้อแก้ว ดังแสดงในรูปที่ 12ค ซึ่งไวลลาสโทไนต์ไม่ขัดเท่ากับตกผลึกขึ้นในตัวอย่างแก้วเซรามิกของ Barbieri และคณะ [5] เนื่องจากมีองค์ประกอบ SiO_2 (45.13 %) และ CaO (18.78 %) มากกว่า

4. สรุป

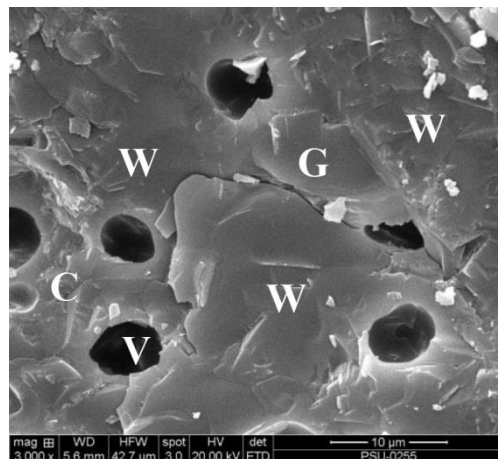
ผลการศึกษาการใช้ประโยชน์จากเถ้าหักในการผลิตแก้วเซรามิก พบว่าแก้วเซรามิกที่เถ้าหักปาล์มน้ำมันแทนที่ผงเศษแก้วร้อยละ 30 ที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส ให้สมบัติของแก้วเซรามิกเด่นที่สุดในทุกด้าน ด้านสมบัติทางกายภาพ ความหนาแน่น

1.86 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร มีการหดตัวเชิงปริมาตรหลังเผาร้อยละ 16.98 และการดูดซึมน้ำอยู่ที่ร้อยละ 0.01 ค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะ 493.23 เมกะโอห์ม-เซนติเมตร ส่วนสมบัติเชิงกลของแก้วเซรามิก ได้แก่ ค่าความแข็งแบบชอร์ 443.33 ค่ากำลังอัด 142.50 เมกะพาสคัล ต่างก็สอดคล้องกัน รวมไปถึง

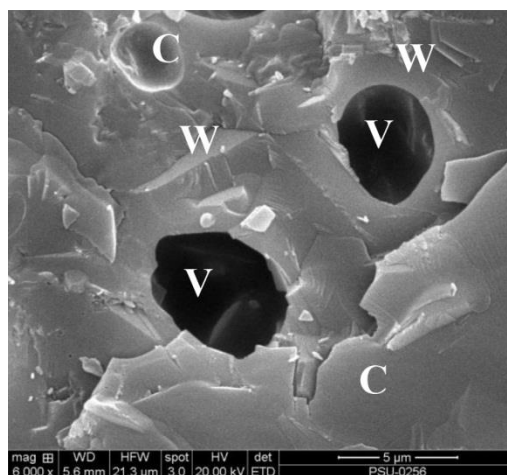
สภาพความคงทนต่อสารเคมีสูงและการทนต่อการเปลี่ยนอุณหภูมิอย่างฉับพลันได้ดี โดยเนื้อตัวอย่างมีการเผาผนึกที่ดี เนื้อแก้วและเส้าหนักรวมกันตกผลึกได้วัฏภาคแร่คริสโทบาลิต ไดออปไซด์และโวลลาสไทน์ต์ ช่วยเสริมให้เนื้อแก้วเซรามิกแข็งแรงและทนต่อสารเคมี



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 12 ภาพถ่ายจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของเนื้อแก้วเซรามิกผสมเส้าหนักร้อยละ 30 เผาที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส กำลังขยาย (ก) 1,000 เท่า (ข) 3,000 เท่า และ (ค) 6,000 เท่า

ดังนั้นผลการศึกษาสมบัติของแก้วเซรามิกข้างต้น ทำให้ได้แนวทางในการพัฒนานำเส้าหนักปาล์ม น้ำมันและเศษแก้วใสมาทำแก้วเซรามิกในเบื้องต้นได้ และประยุกต์ใช้ให้เกิดประโยชน์ในงานวัสดุมวลรวม

น้ำหนักเบาของสิ่งก่อสร้างได้ ซึ่งเป็นแนวทางกำจัดของเสียอย่างยั่งยืน อีกทั้งยังเป็นการลดต้นทุนการผลิตและได้สมบัติของแก้วเซรามิกที่ดีขึ้น

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนเงินทุนจากหน่วยวิจัยธรณีเทคนิคและวัสดุวิศวกรรม ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ และอุปกรณ์ขึ้นรูปตัวอย่างจาก รองศาสตราจารย์ ดร. สุธรรม นิยมवास คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ และโรงงานปาล์มน้ำมัน จังหวัดกระบี่

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Tonayopas, D., Kooptarnond, K. and Masae M., 2009, Novel ecological tiles made with granite fine quarry waste and oil palm fiber ash, *Thammasat Int. J. Sci. Tech.* 14: 10-20.
- [2] จักกฤษณ์ สุนทรานุรักษ์ และดนุพล ตันนโยภาส, 2557, การพัฒนากำลังและความคงทนต่อซัลเฟตของคอนกรีตใสมวลรวมเศษขวดแก้วใสผสมเถ้าขานอ้อย, *ว.วิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม* 10: 62-69.
- [3] Cheeseman, C.R., Monteiro da Rocha, S., Sollars, C., Bethanis, S. and Boccaccini, A.R., 2003, Ceramic processing of incinerator bottom ash, *Waste Manag.* 23: 907-916.
- [4] Elan Technology, 2014, Glass Ceramic Composite Components, Available Source: <http://www.elantechnology.com/glass/glass-ceramic-composite-components/>, August 28, 2014.
- [5] Barbieri, L., Corradi, A. and Lancellotti, I., 2000, Bulk and sintered glass-ceramics by recycling municipal incinerator bottom ash, *J. Eur. Ceramic Soc.* 20: 1637-1643.
- [6] Vu, D.H., Wang, K.S., Chen, J.-H., Nam B.X. and Bac, B.H., 2012, Glass-ceramic from mixtures of bottom ash and fly ash, *Waste Manag.* 32: 2306-2314.
- [7] Cheeseman, C.R., Makinde, A. and Bethanis, S., 2005, Properties of lightweight aggregate produced by rapid sintering of incinerator bottom ash, *Res. Conserv. Recycling* 43: 147-162.
- [8] Yoon, S.D. and Yun, Y.H., 2011, Preparation of glass ceramics from sludge bottom ash and waste glass, *Ceramic Proc. Res.* 12: 361-364.
- [9] ASTM C373, 2014, Standard test method for water absorption, bulk density, apparent porosity, and apparent specific gravity of fired whiteware products, ceramic tiles, and glass tiles
- [10] Bethanis, S., Cheeseman, C.R. and Sollars, C.J., 2002, Properties and microstructure of sintered incinerator bottom ash, *Ceramics Int.* 28: 881-886.
- [11] ดนุพล ตันนโยภาส, รัตติกาล สุริยะ และสุชาติ จันทรมณี, แก้วเซรามิกได้จากแก้วขวดโซดาและเถ้าปาล์มน้ำมัน, *ว.วิทยาศาสตร์ลาดกระบี่ (กำลังจัดพิมพ์)*.
- [12] Yoon, S.D., Lee, J.U., Lee, J.H., Yun, Y.H. and Yoon W.J., 2013, Characterization of wollastonite glass-ceramics made from waste glass and coal fly ash, *J. Mater. Sci. Technol.* 29: 149-153.

[13] Bergeron, C.G., Risbud, S.H. and Bereron, C.G., 2006, Introduction to Phase Equilibria in Ceramics, John Wiley and Sons, Ltd., 158 p.

[14] ดนุพล ตันนโยภาส, 2552, วิทยาแร่, พิมพ์ครั้งที่ 2, ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, สงขลา, 350 น.