

แก้วเซรามิกได้จากแก้วขวดโซดาและเถ้าปาล์มน้ำมัน

Glass-Ceramics Derived from Soda Bottle Glass and Oil Palm Ash

คุณพล ตันนโยภาส* รัตติกาล สุริยะ และ สุชาติ จันทรมณีชัย

Danupon Tonnayopas, Ruttikan Suriya and Suchart Chantaramanee

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องแม่และวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา 90112

บทคัดย่อ

ศึกษาสมบัติแก้วเซรามิกทำจากแก้วขวดโซดาผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน โดยเทคนิคการเผาผนึก เถ้าปาล์มน้ำมันแทนที่ในผงแก้วขวดโซดาในอัตราส่วนร้อยละ 20 30 40 และ 50 อัดขึ้นรูปส่วนผสมตัวอย่างมีขนาดสูง 20 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 15 มิลลิเมตร โดยปราศจากวัสดุประสาน ตัวอย่างคืบเผาด้วยอัตราการให้ความร้อน 50 องศาเซลเซียส/นาที ที่อุณหภูมิ 750 850 900 950 และ 1000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ทดสอบหาความหนาแน่นรวม การดูดซึมน้ำ ความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะ ความแข็งแรงแบบวิกเกอร์ และกำลังอัด วิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์และโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ผลทดสอบพบว่าแก้วเซรามิกผสมเถ้าปาล์มร้อยละ 30 เผาที่ 850 องศาเซลเซียส มีกำลังอัดสูงสุดคือ 150 เมกะพาสคัล การดูดซึมน้ำร้อยละ 0.05 และตัวอย่างกััดตรวจเกิดวัฏภาคแร่หลักประกอบด้วย แร่คริสโทบาไลต์ ไดออปไซด์ และโวลลาสโทไนต์

คำสำคัญ : เถ้าปาล์มน้ำมัน แก้วเซรามิก แก้วขวดโซดา การเผาผนึก ผลิตภัณฑ์เซรามิก

Abstract

Properties of glass-ceramics (GC) made from mixtures of oil palm ash (OPA) and soda bottle glass (SBG) by powder sintering were investigated. The SBG was replaced partially in proportion of 20, 30, 40 and 50 wt.% OPA. Specimen was uniaxial pressed into a 15 mm in diameter and 20 mm in

*E-mail address: danupon.t@psu.ac.th โทรศัพท์ : 0837150978 โทรสาร : 074-558834

length without using binder. The green specimen was heated treatment in an electric furnace with a constant heating rate of 5°C/min at different temperatures of 750, 850, 900, 950 and 1000°C for 1 h. Physical and mechanical properties were determined bulk density, water absorption, electrical resistivity, Vickers hardness and compressive strength. X-ray diffraction and scanning electron microscopy were employed to identify crystallinity and microstructural properties. The GC content of 30 wt.% OPA and heat treatment at 850°C exhibited highest compressive strength of 150 MPa and water absorption of 0.05%. The mineral phase of GC consisted of cristobalite, diopside and wollastonite.

Keywords: oil palm ash, glass-ceramics, soda bottle glass, sintering, green products

1. บทนำ

สถานการณ์โลกปัจจุบันมีการนำเอาของเสียทางการเกษตรและอุตสาหกรรมต่าง ๆ มาเป็นวัตถุดิบในการทำเซรามิก เซรามิกพอร์น (porous ceramic) แก้วพอร์น (foam glass) และแก้วเซรามิก (glass ceramic) โดยเฉพาะเศษวัสดุเหลือทิ้งไม่ว่าจะเป็น เถ้าลอย [1- 6] เถ้าหนักจากเตาเผาขยะชุมชน [7-8] เถ้าแกลบ [9-10] เถ้าไม้ยางพารา [11] หินฝุ่นแกรนิต [12] หางดินขาว [13] หินฝุ่นชนวน [14] หินฝุ่นแอนดิไซต์ [15] และเถ้าปาล์มน้ำมัน [16] เป็นต้น ซึ่งองค์ประกอบหลักของเถ้าส่วนใหญ่มีซิลิกาปริมาณมาก จึงมีศักยภาพในการเปลี่ยนสภาพเป็นแก้ว (vitrification) และแก้วเซรามิก แต่ในกระบวนการส่วนใหญ่ต้องใช้ความร้อนไม่ต่ำกว่า 1,400 องศาเซลเซียส แม้ว่าในเถ้ามีสารประกอบ โซเดียม โปแทสเซียม และแคลเซียมที่ช่วยลดอุณหภูมิในการหลอมอยู่ก็ตาม [17-19] ดังนั้นนักวิจัยหลายกลุ่มจึงได้นำแก้วผสมรวมกับเถ้าลอย [20] เถ้าขานอ้อย [21] เถ้าวัสดุภูเขาไฟ [22] หางดินขาว [23] ผลิตเป็นแก้วเซรามิก และเซรามิกพอร์น ขณะที่ประเทศไทยมีปริมาณเศษแก้วทิ้งที่ไม่สามารถนำกลับไปใช้ใหม่ได้ถึง 40,000 ตันต่อปี [24] ประกอบด้วยเศษแก้วที่มาจากบรรจุภัณฑ์ชนิด โซดาไลม์ (soda-lime) และเศษกระจกชนิดต่าง ๆ เป็นต้น

ในภาคใต้และภาคตะวันออกของประเทศไทย มีผลผลิตน้ำมันปาล์มมากจัดเป็นอันดับ 3 ของโลก ในปี 2556 มีเนื้อที่ให้ผลผลิตประมาณ 4.09 ล้านไร่ และผลผลิตประมาณ 12.42 ล้านตัน เพิ่มขึ้นจากปี 2555 ถึงร้อยละ 2.76 และ 9.62 ตามลำดับ [25] ทำให้กากของผลปาล์มมีปริมาณที่สูงตามผลการผลิต

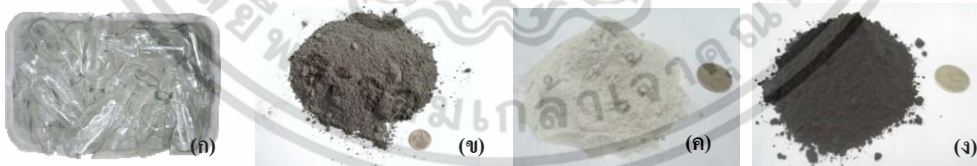
ปาล์มประมาณ 6.58 ล้านตันต่อปี และหลังจากการเผาได้เถ้าปาล์มน้ำมันที่เกิดขึ้นมีปริมาณสูงถึง 329,000 ตันต่อปี ดังนั้นแนวทางกำจัดเถ้าปาล์มน้ำมันและเศษแกลบอย่างยั่งยืนคือ การนำเถ้าปาล์มน้ำมันผสมกับ แกวซ์คอกซ์ตามผลผลิตวัสดุ ซึ่งมีองค์ประกอบทางเคมีเหมาะสมสำหรับเซรามิก (ตารางที่ 1) ผสมในสัดส่วน และอุณหภูมิในการเผาที่แตกต่างกัน ให้ได้แก้วเซรามิกที่มีศักยภาพใช้ประโยชน์ทั้งในด้านงานก่อสร้าง วัสดุ มวลเบา เป็นต้น

ตารางที่ 1. องค์ประกอบทางเคมีของแกวซ์และเถ้าปาล์มน้ำมันวิเคราะห์โดยวิธีการวาวแสงรังสีเอกซ์ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)

องค์ประกอบทางเคมี (%)	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	KO ₂	LOI
แกวซ์คอกซ์ [26]	70.60	2.10	0.30	11.50	1.90	-	13.40	-	0.20
เถ้าปาล์มน้ำมัน [16]	44.65	0.51	1.98	21.65	4.01	4.98	-	13.16	2.47

2. วิธีดำเนินการวิจัย

วัสดุที่ใช้ประกอบด้วยแกวซ์คอกซ์และเถ้าปาล์มน้ำมันที่ได้รับการสนับสนุนจากบริษัทรับ น้ำมันปาล์ม จำกัด นำแกวซ์คอกซ์มาล้างให้สะอาด (รูปที่ 1 ก) เมื่อแห้งทำการลดขนาดด้วยค้อน แล้วนำทั้ง เศษแกวซ์และเถ้าปาล์มน้ำมันมาอบ (รูปที่ 1 ข) จากนั้นนำไปบดด้วยเครื่องบดแบบลูกบอล (ball mill) ที่ ความเร็ว 700 รอบ/นาที เป็นเวลา 3 ชั่วโมง นำเถ้าที่บดแล้วมาอบแห้งที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็น เวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำผงแกวซ์ (รูปที่ 1 ค) และเถ้าปาล์ม (รูปที่ 1 ง) มาร่อนแบบแห้งคัดขนาดเล็กลงว่า 75 ไมครอน

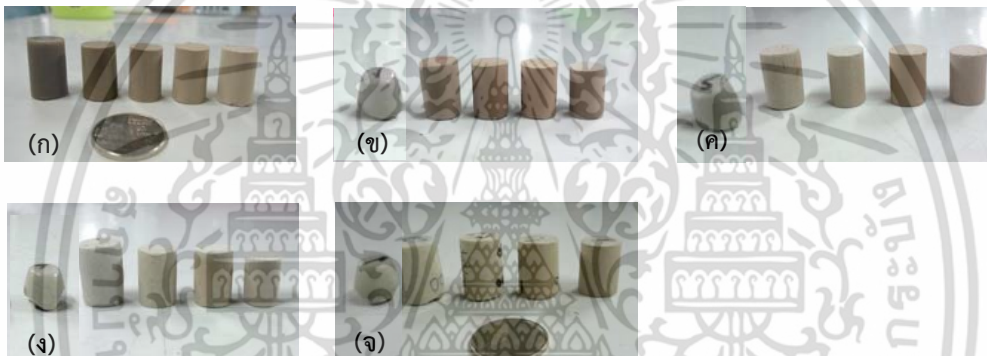


รูปที่ 1. (ก) แกวซ์คอกซ์ที่ใส่ก่อนบด (ข) เถ้าปาล์มน้ำมันก่อนบด (ค) ผงแกวซ์ขนาดเล็กลงว่า 75 ไมครอน และ (ง) เถ้าปาล์ม น้ำมันขนาดเล็กลงว่า 75 ไมครอน

2.1 การเตรียมตัวอย่าง

นำแกวซ์คอกซ์มาล้างทำความสะอาดก่อนบด แล้วนำผงแกวซ์และเถ้าปาล์มมาคัดขนาดให้เล็ก กว่า 75 ไมครอน ทำการผสมผงแกวซ์และเถ้าปาล์มโดยใช้เถ้าปาล์มแทนที่ผงแกวซ์ 4 อัตราส่วน ที่ร้อยละ 20

30, 40 และ 50 โดยน้ำหนัก แต่ละตัวอย่างใช้ส่วนผสมหนัก 120 กรัม บรรจุในกระบอกผสมไปวางบนเครื่องบดแบบลูกกลิ้ง (jar mill) เป็นเวลา 3 ชั่วโมง เพื่อคลุกให้ทั่วถึง อัดขึ้นรูปตัวอย่างด้วยเบ้าเหล็กกล้าไร้สนิมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 มิลลิเมตร ความสูง 20 มิลลิเมตร ด้วยแรงดัน 50 กิโลนิวตัน (ประมาณ 283 เมกะพาสคัล) โดยปราศจากการใช้ตัวยึดประสาน จากนั้นนำตัวอย่างคิบ (green body) ที่เตรียมได้ไปอบแห้งก่อนเผาที่อุณหภูมิต่างกัน 5 ระดับ ได้แก่ 750, 850, 900, 950, และ 1,000 องศาเซลเซียส ขึ้นอุณหภูมิเป็นเวลา 1 ชั่วโมง ด้วยอัตรา 5 องศาเซลเซียสต่ออนาที จากนั้นให้ตัวอย่างทดสอบเย็นภายในเตาเผาจนถึงอุณหภูมิต่ำกว่า 100 องศาเซลเซียส นำตัวอย่างทั้งหมดไปชั่งน้ำหนัก วัดมิติ (รูปที่ 2) และทดสอบสมบัติด้านต่าง ๆ



รูปที่ 2. ตัวอย่างทดสอบในรูปเรียงลำดับจากซ้ายไปขวาคือ ผงแก้วล้วน ผงแก้วร้อยละ 80 70 60 50 (ก) เตา 750 องศาเซลเซียส (ข) 850 องศาเซลเซียส (ค) 900 องศาเซลเซียส (ง) 950 องศาเซลเซียส และ (จ) 1,000 องศาเซลเซียส

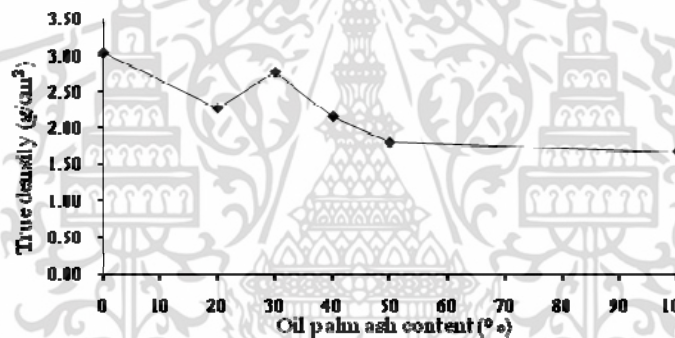
2.2 วิธีการทดสอบตัวอย่าง

ทดสอบความหนาแน่นจริงของผงวัดคิบด้วยเครื่อง Multipycnometer ความต้านทานไฟฟ้าวัดด้วยเครื่อง Megohmmeter รุ่น CA 6525 ความดัน 500 V วัดการหดตัวทั้งหมด (เชิงปริมาตร) หลังเผาทดสอบความหนาแน่นรวม (bulk density) การดูดซึมน้ำตามวิธี ASTM C373 [27] ทดสอบความแข็งแรงแบบวิกเกอร์ด้วยแรงกด 1,000 กรัม (gf) ทดสอบกำลังอัดด้วยเครื่อง Hounsfield test equipment รุ่น H100KS ตัวอย่างผงแก้วล้วนเผาตั้งแต่ 850 องศาเซลเซียส ขึ้นไปทั้งรูปทรงและขนาดของตัวอย่างไม่เอื้อในการวัด ดังนั้นสมบัติความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะ ความแข็งแรงวิกเกอร์ (Vickers hardness) และกำลังอัดไม่มีรายงานค่า ตัวอย่างที่ดีที่สุดนำไปวิเคราะห์ XRD ด้วยเครื่อง PHILIPS X'Pert MPD ที่มีสมรรถนะความร้อนสูงถึง 1,200 องศาเซลเซียส ด้วยหลอดทองแดง และ SEM ด้วยเครื่อง Quanta400, FEI

3. ผลการทดลองและวิจารณ์

3.1 ความหนาแน่นจริง

ความหนาแน่นจริง (true density) ของผงแก้วล้วน (100%) มีค่า 3.03 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร ส่วนผงแก้วผสมกับผงเถ้าปาล์มน้ำมันในอัตราส่วนต่างๆ พบว่า วัสดุผสมผงแก้วกับเถ้าปาล์มน้ำมันร้อยละ 30 มีค่าความหนาแน่นจริงสูงสุด 2.76 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร โดยค่าความหนาแน่นจริงผันแปรตามปริมาณผงเถ้าปาล์มน้ำมันที่เพิ่มขึ้น ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากรูปทรงพื้นฐานเป็นเม็ดเหลี่ยมขอบคม โค้งเว้ารูปฝ่าหอย [26] และขนาดของผงแก้วที่ผสมกับผงเถ้าปาล์มน้ำมันมีลักษณะบางส่วนกลมมน [26] รูโพรงมาก [28] ปริมาณร้อยละ 30 เข้าไปแทรกตัวอยู่ในช่องว่างที่ขัดกันระหว่างอนุภาคของผงแก้วด้วยกันได้อย่างเหมาะสมลงตัวพอดี ส่งผลให้ผงวัสดุผสมมีการบดอัดแน่นสูงสุดดังในรูปที่ 3



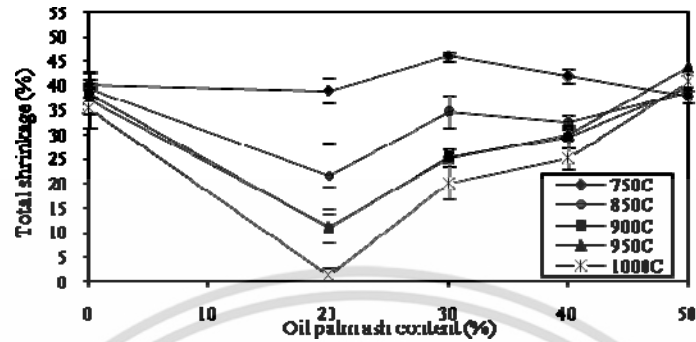
รูปที่ 3. ความหนาแน่นจริงของส่วนผสมผงแก้ว โซดากับเถ้าปาล์มน้ำมัน

3.2 การหดตัวทั้งหมด

ตัวอย่างผสมเถ้าปาล์มน้ำมันร้อยละ 30 เป็นอัตราส่วนที่มีค่าการหดตัวทั้งหมดสูงสุดที่อุณหภูมิเผา 750 องศาเซลเซียส โดยมีค่าเฉลี่ยสูงสุดอยู่ที่ร้อยละ 45.95 (รูปที่ 4) ค่าการหดตัวทั้งหมดมีแนวโน้มหดตัวลง เมื่ออุณหภูมิเผาเพิ่มขึ้น ในขณะที่ตัวอย่างผสมเถ้าปาล์มมากขึ้นตั้งแต่ร้อยละ 20 และอุณหภูมิเผาเกิน 750 องศาเซลเซียส ขึ้นไป ค่าการหดตัวเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เป็นเพราะองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าปาล์ม

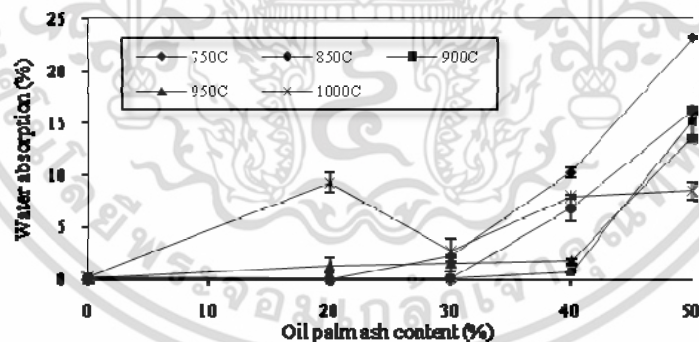
3.3 การดูดซึมน้ำ

การดูดซึมน้ำของตัวอย่างทดสอบแก้วล้วนที่อุณหภูมิเผาไม่เกิน 1,000 องศาเซลเซียส ไม่ดูดซึมน้ำ (รูปที่ 5) ขณะที่ตัวอย่างผสมเถ้าปาล์มน้ำมันร้อยละ 30 เผาที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส มีค่าการดูดซึมน้ำต่ำที่สุดคือร้อยละ 0.05 และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิเผาสูงขึ้นทำให้ตัวอย่างมีแนวโน้มค่าการดูดซึมน้ำลดลง



รูปที่ 4. การหดตัวทั้งหมดของแก้วเซรามิกทำจากแก้วโซดาผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน

แต่ในขณะที่เดียวกันการผสมเถ้าปาล์มน้ำมันที่ปริมาณมากก็ส่งผลกระทบต่อในด้านตรงกันข้ามคือ ทำให้ค่าการดูดซึมน้ำมากขึ้น การที่ตัวอย่างดูดซึมน้ำเพิ่มขึ้น คงเป็นเพราะว่าในเถ้าปาล์มมีสารประกอบแคลเซียมคาร์บอเนตสูง (CaCO_3) ในรูป CaO อยู่ถึงร้อยละ 21.65 (ตารางที่ 1) เมื่อได้รับความร้อนจึงสลายตัวเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ระเหยออกไปจากเนื้อตัวอย่าง ทำให้เกิดแรงดันเนื้อตัวอย่างขยายตัวและรูพรุนขึ้น ซึ่งต่างจากตัวอย่างทดลองของ Vu *et al.* ที่เมื่อเพิ่มปริมาณเถ้าได้ทำให้ค่าการดูดซึมน้ำเพิ่มขึ้นและค่าการดูดซึมน้ำลดลงเมื่อตัวอย่างเผาที่อุณหภูมิสูงขึ้น [22] ทั้งนี้คงเป็นเพราะองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าภูเขาไฟต่างจากเถ้าปาล์มที่ใช้ทดลองครั้งนี้มาก จึงให้ผลตรงกันข้ามกัน

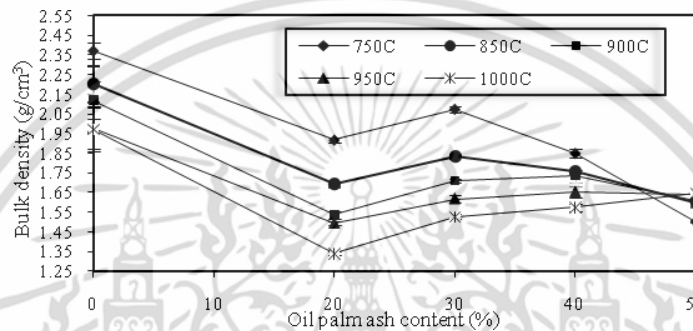


รูปที่ 5. การดูดซึมน้ำของแก้วเซรามิกทำจากแก้วโซดาผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน

3.4 ความหนาแน่นรวม

ความหนาแน่นรวมของตัวอย่างอยู่ในช่วง 1.34-2.37 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร ที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันร้อยละ 30 มีความหนาแน่นรวมสูงสุด (รูปที่ 6) โดยเฉพาะเผาที่ 850 องศาเซลเซียส และความหนาแน่นรวมของตัวอย่างผสมทั้งหมดมีค่าน้อยกว่าความหนาแน่นรวมของตัวอย่างผงแก้วล้วนทุก

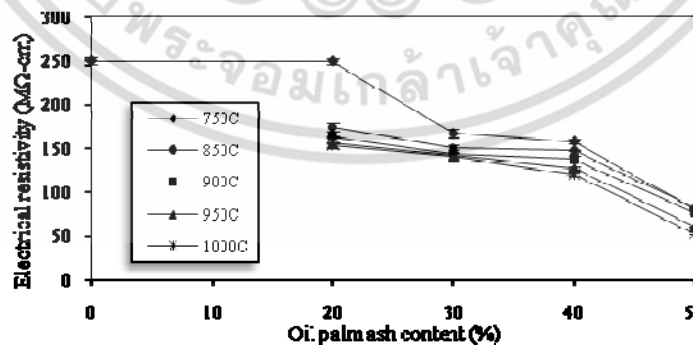
อุณหภูมิเผา และที่อุณหภูมิเผา 1,000 องศาเซลเซียส มีค่าความแน่นต่ำสุดในอัตราส่วนผสมเถ้าปาล์ม น้ำมันน้อยกว่าร้อยละ 50 คงสืบเนื่องจากปริมาณลดลงจากการหลอมติดกันและรูพรุนในเนื้อมากขึ้นจาก แก๊สลอยออกไป จึงส่งผลให้ค่าความหนาแน่นลดลง รวมทั้งความหนาแน่นจริงของเถ้าปาล์มที่น้อยกว่า แก้ว ดังนั้นเมื่อเพิ่มปริมาณเถ้าจึงลดความหนาแน่นของตัวอย่างลงไป สอดคล้องกับค่าการหดตัวทั้งหมด (รูปที่ 4) และแปรผกผันกับค่าการดูดซึมน้ำ (รูปที่ 5)



รูปที่ 6. ความหนาแน่นรวมของแก้วเซรามิกทำจากแก้วโซดาผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน

3.5 ความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะ

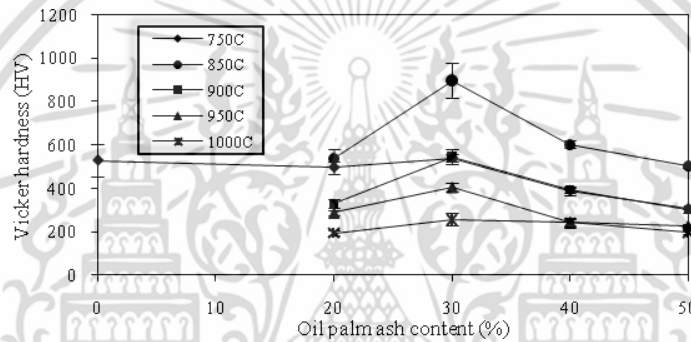
ค่าความต้านทานไฟฟ้าของตัวอย่างผงแก้วล้วนเผาที่ 750 องศาเซลเซียส ได้ค่าเฉลี่ยความต้านทานไฟฟ้าสูงสุด 249.65 เมกะ โฮห์ม-เซนติเมตร (รูปที่ 7) การเติมผงเถ้าปาล์มน้ำมันสูงขึ้นมีผลให้ค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะลดลงตามลำดับ เนื่องจากเถ้ามีความพรุน จึงเกิดขบวนการไหลของไฟฟ้าและเมื่ออุณหภูมิเผาสูงขึ้นทำให้ค่าความต้านทานไฟฟ้าของตัวอย่างลดลง ทั้งนี้เนื่องจากเนื้อตัวอย่างได้หลอมกันเข้า ทำให้เนื้อหนาแน่นขึ้นจึงนำไฟฟ้าได้ดีกว่า สอดคล้องกับผลงานของ Cheng *et al.* [1]



รูปที่ 7. ความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะของแก้วเซรามิกทำจากแก้ว โซดาผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน

3.6 ความแข็งแบบวิกเกอร์

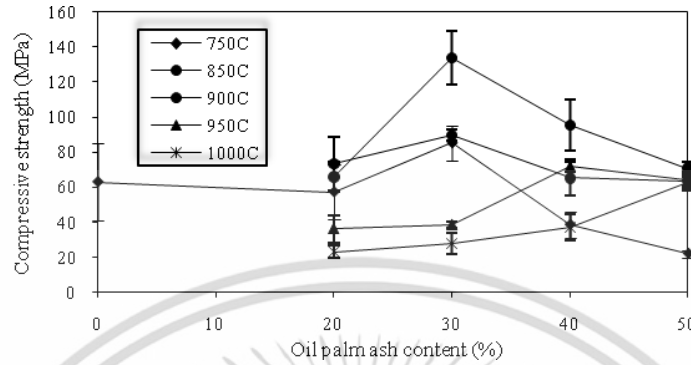
ตัวอย่างทดลองที่มีค่าความแข็งแบบวิกเกอร์สูงสุด คือ ตัวอย่างสูตรที่ผสมเถ้าปาล์มร้อยละ 30 เเผาที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส มีค่าความแข็ง 985.53 HV ในการทดลองครั้งนี้เมื่ออุณหภูมิเผาเกิน 850 องศาเซลเซียส และปริมาณเถ้าปาล์มมากกว่าร้อยละ 30 ตัวอย่างมีค่าความแข็งลดลง (รูปที่ 8) แสดงให้เห็นถึงอิทธิพลของอุณหภูมิเผาและปริมาณของเถ้าปาล์มน้ำมันที่มีต่อค่าความแข็งของตัวอย่าง นำมาประมวลผลก็สอดคล้องกับค่าความหนาแน่นรวม (รูปที่ 6) และแปรผกผันกับค่าการดูดซึมน้ำ (รูปที่ 7)



รูปที่ 8. ความแข็งแบบวิกเกอร์ของแก้วเซรามิกทำจากแก้วโซดาผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน

3.7 กำลังอัด

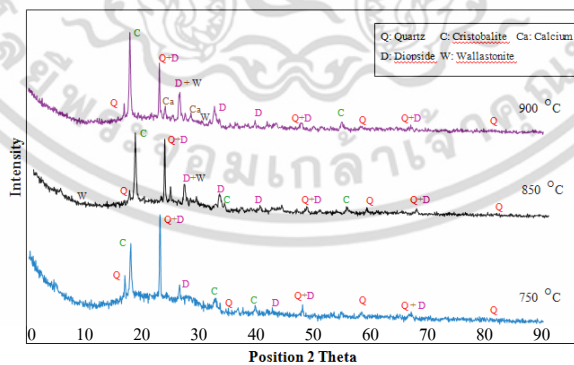
กำลังอัดของตัวอย่างที่เติมเถ้าปาล์มน้ำมันร้อยละ 30 มีค่ากำลังอัดเฉลี่ยสูงสุดเมื่อเผาที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส คือ 133.73 เมกะพาสคัล (รูปที่ 9) อิทธิพลของปัจจัยทั้งอุณหภูมิเผาและปริมาณเถ้าที่ต่างกันล้วนส่งผลต่อกำลังอัดอย่างมาก ซึ่งค่อนข้างสอดคล้องกับค่าความหนาแน่น (รูปที่ 6) และความแข็งแบบวิกเกอร์ (รูปที่ 8) เช่นเดียวกับผลงานของ Vu *et al.* [6] ในขณะที่ Yoon and Yun [20] พบว่าตัวอย่างผสมร้อยละ 20 เเผาอุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ให้กำลังอัด 219.7 เมกะพาสคัล ในขณะที่ Chen *et al.* [3] ได้ทำเซรามิกพูนจากแก้วผสมกับเถ้าลอยร้อยละ 70 อุณหภูมิเผา 800 องศาเซลเซียส 1 ชั่วโมง ได้กำลังอัด 3.44 เมกะพาสคัล และ Cheng *et al.* [1] ผลิตแก้วเซรามิกจากเถ้าลอยเผาที่ 850 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ได้กำลังอัด 41.44 เมกะพาสคัล ต่ำกว่าผลทดลองครั้งนี้



รูปที่ 9. กำลังอัดของแก้วเซรามิกทำจากแก้วโซดาผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน

3.8 การวิเคราะห์องค์ประกอบผลึกของตัวอย่าง

พลังงานความร้อนที่ใช้ไปในการกระตุ้นการเผาผลาญของตัวอย่างแก้วลดลงเมื่อแทนที่ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันมากขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากเถ้าปาล์มหลอมที่ 1,098 องศาเซลเซียส [29] ทำให้ส่วนผสมของตัวอย่างมีเถ้าเกิดสภาวะการเผาผลาญที่อุณหภูมิสูงขึ้น พลังงานความร้อนได้กำจัดอินทรีย์วัตถุที่เจือปนในเถ้าออก และเปลี่ยนสภาพแก้วเป็นผลึก (devitrification) ซึ่งที่อุณหภูมิเผา 850 องศาเซลเซียส ผสมเถ้าร้อยละ 20 เกิดการโยกระบบ Si+Ca+Mg ทำให้เกิดผลึกใหม่ (recrystallization) [14] ได้ ควอตซ์อุณหภูมิต่ำ (แก้ว) คริสโทบาไลต์ ไดออปไซด์ และโวลลาสโทไนต์ (รูปที่ 10) และผลจากการคำนวณปริมาณวัฏภาคแร่ด้วยวิธีพื้นที่ใต้กราฟรูปที่ 10 พบว่าอุณหภูมิเผาสูงขึ้นได้ปริมาณวัฏภาคแร่ต่างออกไป (ตารางที่ 2) โดยเฉพาะแร่คริสโทบาไลต์ ไดออปไซด์ และโวลลาสโทไนต์



รูปที่ 10. การเปรียบเทียบรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของตัวอย่างแก้วผสมเถ้าปาล์มน้ำมันร้อยละ 30 เเผาที่อุณหภูมิ 750 และ 900 องศาเซลเซียส

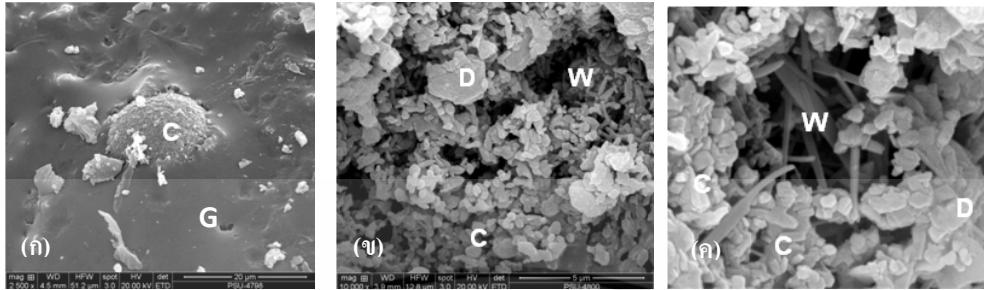
ตารางที่ 2. ชนิดและปริมาณของวัฏภาคแร่จากตัวอย่างที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันร้อยละ 30 เผาที่อุณหภูมิต่างกันที่ได้จากเทคนิค XRD

ชนิดแร่	ปริมาณแร่ที่คำนวณ (%)	อุณหภูมิเผา (องศาเซลเซียส)		
		750	850	900
ควอตซ์ไม่จัดลำดับ (Quartz -SiO ₂)	33.80	15.82	10.23	
คริสโทบาไลต์ (Cristobalite -SiO ₂)	27.29	20.33	20.00	
ไดออปไซด์ (Diopside -MgCaSi ₂ O ₆)	38.92	27.98	25.35	
โวลลาสโทไนต์ (Wollastonite -CaSiO ₃)	-	35.87	37.41	
แคลเซียม (Calcium-Ca)	-	-	7.01	

3.9 โครงสร้างจุลภาคของแก้วเซรามิก

ผลการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ของส่วนผสมแก้วกับเถ้าปาล์มน้ำมันร้อยละ 30 อุณหภูมิเผา 850 องศาเซลเซียส พบว่าเนื้อแก้วเซรามิกที่ได้ประกอบด้วยแก้ว (G) และผลึกหมู่แร่ซิลิเกต [30] ได้แก่ โวลลาสโทไนต์ (W) ไดออปไซด์ (D) และคริสโทบาไลต์ (C) โดยทั่วไปการเผาผนึกเป็นแรงขับเคลื่อนให้การไหลหนืดเพิ่มขึ้น (viscous flow) อันเนื่องจากยังคงมีความเป็นวัฏภาคเนื้อแก้วอยู่ การเผาผนึกไหลหนืดนั้นขึ้นกับสภาพความหนืดและการแพร่ขยาย เวลาในการเผาผนึกและอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นสามารถลดสภาพความหนืดของวัฏภาคแก้วที่ประกอบอยู่ในเนื้อพื้น (matrix) ลง มีผลให้การไหลหนืดเพิ่มขึ้นและการควบแน่นของเนื้อแก้วเซรามิกเกิดขึ้นอีกครั้ง ขณะเดียวกันพลังงานกระตุ้นลดลง พร้อมกับเกิดการรวมตัวของแร่ทั้ง 3 ที่ให้ความแข็งแรงแทรกตัวอยู่ในเนื้อพื้นแก้วดังในรูปที่ 11 (ก) ซึ่งผลึกคริสโทบาไลต์มีสีเทาอ่อนลักษณะเป็นก้อนทรงกลมลูกโลกเรียงต่อกัน มีรูพรุนดังในรูปที่ 11 (ข) นอกจากนี้เนื้อพื้นแก้วเซรามิกมีรูโพรง มีผลึกแท่งแบนขอบสันของไดออปไซด์และเกิดผลึกที่มีลักษณะรูปแท่งเรียวยาวของโวลลาสโทไนต์ ดังในรูปที่ 11 (ค) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Yoon and Yun [20] เมื่อเผาตัวอย่างที่อุณหภูมิสูงขึ้นมีผลให้เม็ดทรงกลมของเถ้าลอยลดลงและเกิดผลึกโวลลาสโทไนต์ที่มีลักษณะรูปคล้ายเข็มเพิ่มมากขึ้นแทน

การเผาผนึกจะเกิดเป็นวัฏภาคแร่ชนิดใดนั้นก็ขึ้นกับส่วนผสมและอุณหภูมิเผาเป็นสำคัญ ซึ่งแก้วเซรามิกมีโอกาสประกอบขึ้นด้วยแร่กีห์ไลน์ต์ (gehlenite -Ca₂Al₂SiO₇) [1, 6] โวลลาสโทไนต์ [20, 31] และไดออปไซด์ [20, 32] มักได้จากส่วนผสมที่มีเถ้าลอยอยู่ด้วย ขณะที่เซรามิกและแก้วเซรามิกที่เผา



รูปที่ 11. ภาพถ่ายจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของตัวอย่างที่มีส่วนผสมแก้วกับเถ้าปาล์มน้ำมันร้อยละ 30 เตาที่ 850 องศาเซลเซียส กำลังขยาย (ก) 2,500 เท่า (ข) 10,000 เท่า และ (ค) 20,000 เท่า

ผืนกจากส่วนผสมมีเถ้าปาล์มน้ำมัน [16]และหางแร่ดินขาว [23] อยู่มักประกอบขึ้นด้วยวัสดุภาคแร่คริสโตบาลิตและโวลลาสโทไนต์

4. สรุปผลการทดลอง

ผลการทดลองแก้วเซรามิกจากการผสมผงแก้วจากขวดโซดา กับผงเถ้าปาล์มน้ำมันพอสรุปได้ว่า อัตราส่วนผสมของแก้วเซรามิกที่เหมาะสม คือ ส่วนผสมของเถ้าปาล์มน้ำมันร้อยละ 30 และปริมาณผงแก้วโซดาร้อยละ 70 และอุณหภูมิเผาที่เหมาะสมที่สุดคือ 850 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่แก้วเซรามิกในอัตราส่วนนี้เกิดการเผาผนึกได้ดีที่สุด ซึ่งตัวอย่างทดสอบมีค่ากำลังอัดสูงสุด 150.1 เมกะพาสคัล รวมถึงมีค่าความหนาแน่น 1.83 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร การดูดซึมน้ำร้อยละ 0.05 และค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะ 150.07 เมกะโฮห์ม-เซนติเมตร ดังนั้น จึงมีความเป็นไปได้ที่จะนำเศษแก้วและเถ้าปาล์มน้ำมันที่เป็นวัสดุเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมปาล์มน้ำมันมาใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุดในการผลิตแก้วเซรามิกที่มีคุณภาพ ซึ่งเป็นแนวทางหนึ่งในการทำผลิตภัณฑ์เชิงนิเวศ

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณบริษัท ตรังน้ำมันปาล์ม จำกัด อำเภอห้วยยอด จังหวัดตรัง ได้ให้ความอนุเคราะห์เถ้าปาล์มน้ำมัน รองศาสตราจารย์สุธรรม นิยมवास และภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่สนับสนุนอุปกรณ์และเครื่องมือตลอดจนสถานที่

เอกสารอ้างอิง (References)

- [1] Cheng, T.W., Ueng, T.H., Chen, Y.S. and Chiu, J.P., 2002. Production of glass-ceramic from incinerator fly ash. *Ceramics International*, 28(7), 779–783.
- [2] Dong, Y., Liu, X., Ma, Q. and Meng, G., 2006. Preparation of cordierite-based porous ceramic micro-filtration membranes using waste fly ash as the main raw materials. *Journal of Membrane Science*, 285(1-2), 173–181.
- [3] Chen, B., Luo, Z. and Lu, A., 2011. Preparation of sintered foam glass with high fly ash content. *Materials Letters*, 65(23-24), 3555–3558.
- [4] Barbieria, L., Lancellottia, I., Manfredinia, T., Queralt, I., Rinconc, J.M. and Romeroc, M., 1999. Design, obtainment and properties of glasses and glass-ceramics from coal fly ash. *Fuel*, 78(2), 271–276.
- [5] Yuruyen, S. and Ozkan T.H., 2009. The sintering kinetics of porcelain bodies made from waste glass and fly ash. *Ceramics International*, 35(6), 2427–2433.
- [6] Vu, D.H., Wang, K.-S., Chen, J.-H., Nama, B.X. and Bac, B.H., 2012. Glass-ceramic from mixtures of bottom ash and fly ash. *Waste Management*, 32(12), 2306–2314.
- [7] Appendino, P., Ferraris, M., Matekovits, I. and Salvo, M., 2004. Production of glass-ceramic bodies from the bottom ashes of municipal solid waste incinerators. *Journal of the European Ceramic Society*, 24(5), 803–810.
- [8] Barbieri, L., Corradi Bonamartini, A. and Lancellotti, I., 2000. Alkaline and alkaline-earth silicate glasses and glass-ceramics from municipal and industrial wastes. *Journal of the European Ceramic Society*, 20(14-15), 2477-2483.
- [9] ดนุพล ตันนโยภาส, ธรณิศร จิตรพิศาล และสุชาติ จันทรมณี, 2553. สมบัติของกระเบื้องเซรามิกที่ทำจากหินชนวนเติมเถ้าแกลบดำ. การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ครั้งที่ 8. หน้า 841-846. [Danupon Tonnayopas, Torranisorn Jitpisan and Suchart Chantaramanee, 2010. Properties of Slate Ceramic Tile Addition of Black Rice Husk Ash. The

- 8th PSU Engineering Conference (PEC-8), Prince of Songkla University, Songkhla. pp. 841-846. (in Thai)]
- [10] Andreola, F., Martín, M.I., Ferrari, A.M., Lancellotti, I., Bondioli, F., Rincón, J.Ma., Romero, M. and Barbieri, L., 2013. Technological properties of glass-ceramic tiles obtained using rice husk ash as silica precursor. *Ceramics International*, 39(5), 5427-5435.
- [11] ดนุพล ตันนโยภาส, วิลาวรรณ ศิลป์สอน และสุชาติ จันทรมณีชัย, 2555. การเตรียมกระเบื้องมวลเบาด้วยเศษเบ้าเซรามิกถุงมือชำรุดผสมเถ้าลอยไม้ยางพาราและหางแร่ดินขาว. การประชุมวิชาการระดับชาติมหาวิทยาลัยทักษิณครั้งที่ 22 ประจำปี 2555 ณ ศูนย์ประชุมนานาชาติฉลองสิริราชสมบัติครบ 60 ปี อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา หน้า 8. [Danupon Tonnayopas, Wilawan Sinsorn and Suchart Chantaramanee, 2012. Preparation of Lightweight Tile by Ceramic Glove Mould Waste Blended Rubber Wood Fly Ash and Kaolin Tailing. The 22nd Thaksin University Annual Conference, The 60th Anniversary of His Majesty the King's Accession to the Throne International Convention Center, Hat-Yai, Songkhla. pp.8, (in Thai)]
- [12] Tonnayopas, D., Kooptarnond, K. and Masae, M., 2009. Novel ecological tiles made with granite fine quarry waste and oil palm fiber ash. *Thammasat International Journal of Science and Technology*, 14(1), 10-20.
- [13] ดนุพล ตันนโยภาส และธราฯ เหมมีจฉา, 2554. การพัฒนาการของสมบัติ โครงสร้างจุลภาค และวิทยาแร่ในระหว่างเผาหางแร่ดินขาวกับเถ้าแกลบค้ำเนินกระเบื้องเซรามิก. การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ครั้งที่ 9 โรงแรมเมอร์ลิน บีช รีสอร์ท (หาดไทรตรังค์) จ.ภูเก็ต. หน้า 699-704. [Danupon Tonnayopas and Tara Hammidcha, 2011. Evolution of Properties, Microstructure and Mineralogy during Firing of Kaolin Tailings with Black Rice Husk Ash Based on Ceramic Tiles. The 9th PSU Engineering Conference (PEC-9), Merlin Beach Resort, Tritun Beach, Phuket. pp. 699-704. (in Thai)]
- [14] อาชีวะ หมักหมั่น ดนุพล ตันนโยภาส และสุชาติ จันทรมณีชัย, 2556. กลไกการเผาผนึกของกระเบื้องเซรามิกซีโอไลต์เติมเศษหินชนวน. *วารสารมหาวิทยาลัยทักษิณ*, 16(1), 10-16. [Arseeyah Makman, Danupon Tonnayopas and Suchart Chantaramanee, 2013. Sintering mechanism of zeolite ceramic tile body with the addition of slate waste. *Thaksin University Journal*, 16(1), 10-16. (in Thai)]

- [15] เสาวภา ชูศรี, ดนุพล ตันนโยภาส และสุชาติ จันทรมณี, 2556. การผลิตกระเบื้องเซรามิกและกระเบื้องมวลเบาจากหินฝุ่นแอนดีไซต์ผสมเถ้าไม้ยางพารา. *วิศวกรรมสารเกษมบัณฑิต*, 3(1), 70-83. [Saowapa Choosri, Danupon Tonnayopas and Suchart Chantaramanee, 2013. Production of ceramic and lightweight tile from waste andesite fine and para rubber wood ash. *Kasem Bundit Engineering Journal*, 3(1), 70-83. (in Thai)]
- [16] ดนุพล ตันนโยภาส, วรณรัตน์ แก้วสมบูรณ์ และสุชาติ จันทรมณี, 2553. คุณลักษณะกระเบื้องเซรามิกผลิตจากหินฝุ่นบะซอลต์ผสมร่วมกับเถ้าใบปาล์มน้ำมัน. *วารสารมหาวิทยาลัยทักษิณ*, 12(3), 149-159. [Danupon Tonnayopas, Waranrat Kaewsomboon and Suchart Chantaramanee, 2010. Characterization of ceramic tile fabricated from basalt quarry dust incorporated with oil palm fiber ash. *Thaksin University Journal*, 12(3), 149-159. (in Thai)]
- [17] Monteiro, R.C.C., Alendouro, S.J.G., Figueiredo, F.M.L., Ferro, M.C. and Fernandes, M.H.V., 2006. Development and properties of a glass made from MSWI bottom ash. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 352(2), 130-135.
- [18] Erol, M., Kucukbayrak, S. and Ersoy-Mericboyu, A., 2007. Characterization of coal fly ash for possible utilization in glass production. *Fuel*, 86(5-6), 706-714.
- [19] Luan, J., Li, A., Su, T. and Cui, X., 2010. Synthesis of nucleated glass-ceramics using oil shale fly ash. *Journal of Hazardous Materials*, 173(1-3), 427-432.
- [20] Yoon, S.-D. and Yun, Y.-H., 2005. An advanced technique for recycling fly ash and waste glass. *Journal of Materials Processing Technology*, 168(1), 56-61.
- [21] Teixeira, S.R., Magalhães, R.S., Arenales, A., Souza, A.E., Romero, M. and Rincón, J.M., 2014. Valorization of sugarcane bagasse ash: Producing glass-ceramic materials. *Journal of Environmental Management*, 134(15), 15-19.
- [22] Vu, D.-H., Wang, K.-S., Nam, B.X., Bac, B.H. and Chu, T.-C., 2011. Preparation of humidity-controlling porous ceramics from volcanic ash and waste glass. *Ceramics International*, 37(7), 2845-2853.
- [23] ดนุพล ตันนโยภาส, กัลยาณี คุปตานนท์ และณัฐพงศ์ ช้อย่างทอง, 2554. สมบัติของกระเบื้องมุงหลังคาผลิตด้วยผงเถ้าไสกับหางแร่ดินขาว. การประชุมวิชาการด้านเหมืองแร่โลหการและ

- ปีโตรเลียม ครั้งที่ 9 โรงแรมมณเฑียร ริเวอร์ไซด์ กทม. 13-14 มกราคม 2554 หน้า 249-255. [Danupon Tonnayopas, Kalayanee Kooptarnond and Natapong Yoiyangthong, 2011. Properties of Roofing Tile Produced with Waste Clear Glass Powder and Kaolin Tailings. The 9th Mining, Metallurgy and Petroleum Conference, Jan. 13-14, 2011, Montien Riverside Hotel, Bangkok. pp. 249-255. (in Thai)]
- [24] จักกฤษณ์ สุนทรานุรักษ์ และคุณพล ตันนโยภาส, 2557. การพัฒนากำลังและความคงทนต่อซัลเฟตของคอนกรีตใต้มวลรวมเศษขวดแก้วใสผสมเถ้าชานอ้อย. *วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม*, 10(1), 62-69. [Jukkrit Suntharanurak and Danupon Tonnayopas, 2013. Strength development and sulfate durability of waste clear bottle glass aggregate concrete containing sugarcane bagasse ash. *The Journal of Industrial Technology*, 10(1), 62-69. (in Thai)]
- [25] สำนักวิจัยเศรษฐกิจการเกษตร, 2556. สถานการณ์สินค้าเกษตรที่สำคัญและแนวโน้มปี 2557. สืบค้นเมื่อ 20 กันยายน 2556 [Bureau of Agricultural Economic Research, 2013. *Situation of Thai Important Agricultural Products and Trends in 2014*. [online] Available at: <http://www.oae.go.th/ewtadmin/ewt/oae_web/download/journal/trends2556.pdf> [Accessed 20 September 2013].
- [26] Danupon Tonnayopas and Chanamet Thanawisitsawas, 2008. Influence of Ground Waste Float Glass and Oil Palm Fiber Fuel Ash Mixed with Areca-Nut Fiber Solution on Mortar Properties. 2nd International Workshop and Conference on Earth Resources Technology: April 3-4, 2008, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University, Bangkok. pp. 31-35.
- [27] 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. Philadelphia.
- [28] คุณพล ตันนโยภาส และอภิภูมิ พลษา, 2548. คุณประโยชน์ของเถ้าเชื้อเพลิงใยปาล์มน้ำมันในการทำอิฐดินเผาก่อสร้าง. การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมศาสตร์ ครั้งที่ 4 มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ 8-9 ธันวาคม 2548. หน้า CE-7-CE-12. [Danupon Tonnayopas and Apipum Ponsa, 2005. Beneficiation of Oil Palm Fibre Fuel Ash in Making Construction Clay Brick. The 4th PSU

- Engineering Conf., 8-9 Dec. 2005, Faculty of Engineering, Songkhla. pp. CE-7 – CE-12. (in Thai)]
- [29] ดนุพล ตันนโยภาส พีระพงษ์ ทิมสกุล และสรารุช จริตงาม, 2550. การผสมเถ้าจากใยปาล์มน้ำมันในอิฐดินเผา. การประชุมวิชาการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ครั้งที่ 6 มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ 7-9 มีนาคม 2550. หน้า CE-7-CE-12. [Danupon Tonnayopas, Perapong Tekasakul and Saravut Jariyngam, 2007. Incorporation of Ash from Oil palm Fiber into Clay Brick. The 6th National Environmental Conference, 7-9 March, 2007, Amarin Lagoon Hotel, Phitsanulok. 8 p. (in Thai)]
- [30] ดนุพล ตันนโยภาส, 2553. วิทยาแร่. พิมพ์ครั้งที่ 2, คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ [Danupon Tonnayopas, 2010. Mineralogy, 2nd ed. Faculty of Engineering Press, Prince of Songkla University (in Thai)]
- [31] 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. *Journal of Materials Science & Technology*, 29(2), 149-153.
- [32] Qian, G., Song, Y., Zhang, C., Xia, Y., Zhang, H. and Chui, P., 2006. Diopside-based glass-ceramics from MSW fly ash and bottom ash. *Waste Management*, 26(12), 1462-1467.