



การใช้ประโยชน์ของเถ้าเิปาล์มน้ำมัน เป็นตัวเติมในกระเบื้องดินเผา

دنۇفل دنننؤباس* گىرتىگاندى نىلىونغ* لىلىسۇخاتى جىنثرمىنىي*

บทคัดย่อ

ศึกษาการใช้เถ้าปาล์มน้ำมันซึ่งเป็นของเสียมาจากเชื้อเพลิงเศษวัสดุหีบปาล์มน้ำมันของโรงงานน้ำมันปาล์มเป็นตัวเติมในกระเบื้องดินเผา แทนที่ดินเหนียวในอัตราส่วนร้อยละ 0 10 20 และ 30 โดยน้ำหนัก เตรียมกระเบื้องตัวอย่างขนาด 100x100x7 มิลลิเมตร ขึ้นรูปด้วยวิธีอัดแห้งไฮดรอลิกที่ 100 บาร์ และเผาที่อุณหภูมิ 1,000 และ 1,100 องศาเซลเซียส กระเบื้องตัวอย่างได้ตรวจสอบความได้จาก ความหนาแน่นรวม น้ำหนักสูญหายหลังเผา การหดตัวหลังเผา การดูดซึมน้ำ ความแข็งแบบชอร์ โมดูลัสแตกร้าว และความคงทนต่อสารเคมี ตรวจลักษณะของตัวอย่างด้วยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ผลการทดลองระบุว่า ส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุดแก่การผลิตคือ เถ้าปาล์มน้ำมันร้อยละ 30 เผาที่อุณหภูมิ 1,100 องศาเซลเซียส ลายพิมพ์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของตัวอย่างที่เด่นแสดงผลเกิดวัฏภาคแร่ประกอบด้วย ควอตซ์ ซีมาไทต์ และอะนอร์ไทต์ ภาพถ่ายกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดแสดงแร่ดังกล่าวได้ฝังตัวอยู่ในเนื้อกระเบื้องที่เผาพูนึก กระเบื้องดินเผามีสมบัติใกล้เคียงตามเกณฑ์กระเบื้องเซรามิกของ มอก. 2508-2555

คำสำคัญ : เถ้าเิปาล์มน้ำมัน กระเบื้องดินเผา อุณหภูมิเผาพูนึก โมดูลัสแตกร้าว โครงสร้างจุลภาค

* ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ถนนกาญจนวนิชย์ ตำบลคอกหงส์ อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา 90112 อีเมล : danupon.t@psu.ac.th



Utilization of Oil Palm Fiber Ash as a Filler in Fired Clay Tiles

Danupon Tonnayopas* Keeratikarn Ninyong* and Suchart Chantaramanee*

Abstract

Oil palm fiber ash (OPFA), which was waste derived from crushed oil palm residues fuel in palm oil factories, used as filler in fired clay tile was investigated. Clay was replaced in ratios of 0, 10, 20 and 30% w/w. Preparing of tile sample on size of 100 x 100 x 7 mm was formed by dry-hydraulic press method at 100 bars and heat treatment at 1,000 and 1,100°C holding 1 h. All specimens were determined on squareness, bulk density, weight loss, linear shrinkage, water absorption, Shore hardness, modulus of rupture and chemical resistance. Some specimens were characterized by the X-ray diffraction (XRD) and scanning electron microscope (SEM). Experimental results indicated that the most suitable ratio of 30% OPFA and heat at 1,100°C for manufacture. XRD pattern of dominant specimens were revealed some mineral phases including quartz, hematite and anorthite. SEM microphotograph was also confirmed so that minerals are embedded in sintered tile body. The fired clay tile was nearly met the TIS. 2508-2555 Specification.

Keywords: Oil palm fiber ash, Fired clay tile, Sintering temperature, Modulus of rupture, Microstructure

* Department of Mining and Materials Engineering, Faculty of Engineering, Prince of Songkla University, Kanchanawanich Road, Tampon Kho Hong, Amphur Hat-Yai, Songkhla 90112, Thailand. E-mail : danupon.t@psu.ac.th

บทนำ

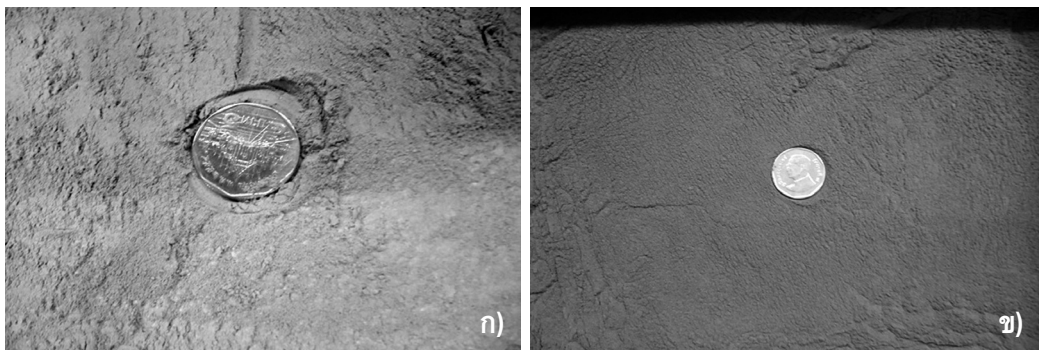
ทวีปเอเชียในอดีตนิยมใช้กระเบื้องดินเผาสีแดงอิฐหรือน้ำตาลแดงเข้ม ซึ่งตัวกระเบื้องดินเผาเองนั้นมีการดูดซึมน้ำค่อนข้างมาก แต่มีความเหนียว และเมื่อแห้งมีกำลังสูง ทำให้ผลิตภัณฑ์หลังแห้งมีความแข็งแรง ดินเหนียวมักมีการหดตัวสูง จึงเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้ผลิตภัณฑ์มีการแตกร้าว ดังนั้นจึงไม่นิยมใช้เนื้อดินเหนียวล้วนในการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ แต่มีการผสมวัสดุที่ไม่มีความเหนียว อาทิเช่น ดินเชื้อหรือทราย เพื่อลดการดึงตัวและหดตัวของดิน อันจะช่วยลดการแตกร้าวลงได้ ดินเหนียวหลายชนิด มีช่วงอุณหภูมิที่จะเปลี่ยนไปเป็นเนื้อแก้วกว้าง ซึ่งเป็นสิ่งที่ดี ช่วยปรับปรุงเนื้อผลิตภัณฑ์หลังการเผาให้ดีขึ้น นอกจากนี้ยังมีการปรับปรุงด้วยผงฟูนินอ่อน (อนุพล ตันนโยภาส และภานุมาศ ณ พัทลุง, 2540) พงหินแกรนิต (Segadaes *et al.*, 2005; Kooptarnond and Tonnayopas, 2007) เศษวัสดุพีช (Demir, 2008) เพื่อเพิ่มความแข็งแรง หรือช่วยให้น้ำดินมีการไหลตัวดีขึ้น ปัจจุบันมีการพัฒนาผลิตภัณฑ์ดินเหนียวกระเบื้องดินเผาแทนที่ด้วยวัสดุชนิดต่างๆ เช่น พงหินปูน (อนุพล ตันนโยภาส และคณะ, 2553ก) ตะกอนทิ้งจากโรงกรองน้ำประปา (อนุพล ตันนโยภาส และคณะ, 2553ข) พงหินพัมมิช (อนุพล ตันนโยภาส และคณะ, 2553ข) พงหินชนวน (อนุพล ตันนโยภาส และคณะ, 2553ง) เศษแก้วขวดใส (อนุพล ตันนโยภาส และคณะ, 2548) แต่ยังคงรักษารูปแบบและสมบัติของกระเบื้องดินเผาไว้ได้ตามเกณฑ์ มอก. เป็นอย่างดี

เถ้าปาล์มน้ำมัน (palm oil fuel ash) เป็นวัสดุพลอยได้จากการนำกากของผลปาล์มน้ำมัน ได้แก่ เศษกะลา เส้นใย และทลายปาล์มเปล่าของผลปาล์มเผาเป็นเชื้อเพลิงให้กับหม้อกำเนิดไอน้ำในการผลิตกระแสไฟฟ้าใช้ภายในโรงงาน หลังจากการใช้เป็นเชื้อเพลิง ทำให้เกิดเถ้าขนาดเล็กฟุ้งกระจาย จากข้อมูลสำนักงานเศรษฐกิจเกษตรและสหกรณ์ พบว่า ในปี พ.ศ.2556 ประเทศไทยมีเนื้อที่ให้ผลปาล์มประมาณ 4.09 ล้านไร่ และผลผลิตประมาณ 12.42 ล้านตัน เพิ่มขึ้นจากปี 2555 ถึงร้อยละ 2.76 และ 9.62 ตามลำดับ (สำนักงานวิจัยเศรษฐกิจเกษตร, 2556) ทำให้กากของผลปาล์มมีปริมาณที่สูงตามผลการผลิตปาล์มประมาณ 6.58 ล้านตันต่อปี และหลังจากการเผาได้เถ้าปาล์มน้ำมันที่เกิดขึ้นมีปริมาณสูงถึง 329,000 ตันต่อปี ดังนั้นการนำเถ้าปาล์มซึ่งมีองค์ประกอบทางเคมีพื้นฐานคือ SiO_2 และ K_2O ช่วยให้ดินแข็งแรงขึ้น และการเผาผนึก (sintering) ที่อุณหภูมิต่ำ อันเป็นประโยชน์ในงานเซรามิกอย่างยั่งยืน แนวทางหนึ่งที่ได้ทำกันมาคือ การนำไปผลิตวัสดุก่อสร้าง เช่น อิฐ (อนุพล ตันนโยภาส และนันทิยา ลิมบัวนัสพงศ์, 2547; อนุพล ตันนโยภาส และอภิภูมิ พลชา, 2548; อนุพล ตันนโยภาส และคณะ, 2550) และกระเบื้องเซรามิก (Tonnayopas *et al.*, 2009; อนุพล ตันนโยภาส และคณะ, 2553ง; Pinatti *et al.*, 2006) ในงานวิจัยนี้เน้นผสมเถ้าปาล์มแทนที่ดินเหนียว โดยเทียบกระเบื้องที่ผลิตได้กับเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมเซรามิกของประเทศไทย (มอก. 2508, 2555)

วิธีดำเนินการวิจัย

การเตรียมวัตถุดิบทำกระเบื้องตัวอย่างทดลอง

วัตถุดิบหลักที่ใช้คือ ดินเหนียวและเถ้าเถ้าปาล์มน้ำมัน (ภาพที่ 1) ดินเหนียวมาจากโรงงานอิฐตำบลบ้านพรุ อำเภอลาดใหญ่ นำมาเพื่อขจัดความชื้นที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 ชั่วโมง ทำการบดหยาบให้เป็นก้อนเล็กด้วยเครื่องบดปากงับ (jaw crusher) บดละเอียดสองครั้งด้วยเครื่องบดปากกรวย (gyratory) เพื่อให้เป็นผงคัดขนาดโดยการร่อนแบบแห้งผ่านตะแกรงเบอร์ 200 เมช หรือ 75 ไมครอน ส่วนเถ้าเถ้าปาล์มน้ำมันสีเทาเข้มถึงดำได้มาจากโรงเผาถ่านไม้ อำเภอสวี จังหวัดชุมพร มีลักษณะเป็นผงแต่มีความชื้นอยู่มาก จึงทำให้แห้งด้วยการอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง คัดขนาดเถ้าเถ้าปาล์มน้ำมันเล็กกว่า 75 ไมครอน เช่นกัน



ภาพที่ 1 วัตถุดิบบดละเอียดคัดขนาดเล็กกว่า 75 ไมครอน ก) ดินเหนียว และ ข) เถ้าเถ้าปาล์มน้ำมัน

การออกแบบ ขึ้นรูป และการเผากระเบื้องตัวอย่าง

กำหนดดินเหนียวผสมกับเถ้าปาล์มน้ำมันตามอัตราส่วนร้อยละ 0 10 20 และ 30 (ตารางที่ 1) คลุกให้เข้ากันในกระบอกพลาสติก เติมน้ำในปริมาณหนึ่งก่อน และคลุกเคล้าให้เข้ากัน จนปริมาณน้ำ 24 กรัม เท่ากันทั้ง 4 สูตร วัตถุดิบที่ได้เตรียมไว้เทลงเข้า แล้วอัดขึ้นรูปด้วยวิธีอัดแห้ง ด้วยเครื่องอัดไฮโดรลิกที่แรงกด 100 บาร์ ค้างไว้ประมาณ 30 วินาที เพื่อให้วัตถุดิบอัดตัวกันแน่นยิ่งขึ้น นำแผ่นกระเบื้องที่ได้จากการอัดขึ้นรูป มาตากแห้งบริเวณขอบและผิวหน้า และนำไปอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง กระเบื้องดิบมาวัดขนาดมิติและชั่งน้ำหนัก กระเบื้องไปเผาที่อุณหภูมิ 1,000 และ 1,100 องศาเซลเซียส ในเตาไฟฟ้า และกำหนดให้อัตราความร้อนของเตาเผาเริ่มที่อุณหภูมิห้อง (26 องศาเซลเซียส) ด้วยอัตราความร้อน 5 องศาเซลเซียสต่อนาที จนถึงอุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส แช่วานาน 30 นาที หลังจากนั้นให้อัตราความร้อน 3 องศาเซลเซียสต่อนาที จนถึงอุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส แช่วานาน 30 นาที หลังจากนั้นให้อัตราความร้อน 1 องศาเซลเซียสต่อมิลลิเมตร จนถึงอุณหภูมิสูงสุดที่กำหนด แช่วานาน 30 นาที แล้วจึงลั่นสุดอุณหภูมิเผา ให้ตัวอย่างเย็นตัวในเตาเผา

ตารางที่ 1 อัตราส่วนผสมของกระเบื้องทดลอง

อัตราส่วนผสม ดินเหนียว : เถ้าปาล์มน้ำมัน	น้ำหนักส่วนผสม (กรัม)	
	ดินเหนียว	เถ้าปาล์มน้ำมัน
100 : 0	200	0
90 : 10	180	20
80 : 20	160	40
70 : 30	140	60

การทดสอบสมบัติกระเบื้องตัวอย่าง

ความได้น้ำของกระเบื้อง ทำการทดสอบโดยใช้หลักจากวัดมุมของกระเบื้อง โดยที่ขอบบนของกระเบื้องที่เบี่ยงเบนไปจากเส้นตรงที่ทำมุมฉากกับด้านประชิด ณ จุดห่างจากมุมเป็นระยะ 100 มิลลิเมตร ต้องไม่เกิน 0.5 มิลลิเมตร (มอก. 2398 เล่ม 2-2553)

การดูดซึมน้ำ ด้วยวิธีต้ม (มอก. 2398 เล่ม 3-2553) นำแผ่นกระเบื้องไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส จากนั้นปล่อยให้เย็นตัวที่อุณหภูมิห้อง แล้วก็นำไปชั่งน้ำหนัก นำแผ่นกระเบื้องทดสอบไปต้มในน้ำเดือดเป็นเวลา 2 ชั่วโมง แล้วแช่ไว้ 24 ชั่วโมง นำแผ่นกระเบื้องขึ้นมาใช้ผ้าซับผิวแผ่นกระเบื้องหมาดๆ ให้ทั่ว นำแผ่นกระเบื้องไปชั่งน้ำหนัก

$$\frac{W_w - W_d}{W_d} \times 100 \dots\dots\dots (1)$$

เมื่อ W_w คือ น้ำหนักกระเบื้องหลังจากต้มและแช่น้ำ (กรัม) W_d คือ น้ำหนักกระเบื้องอบแห้ง (กรัม)

การหดตัว (shrinkage) กระเบื้องดิบนำไปอบเพื่อไล่ความชื้น จากนั้นวัดขนาดทั้งสามมิติและชั่งน้ำหนัก เมื่อเผาเสร็จก็นำวัดขนาด และชั่งน้ำหนักอีกครั้ง นำผลที่ได้มาคำนวณ การหดตัวเชิงเส้น (linear shrinkage)

$$S_l = \frac{L_0 - L}{L_0} \times 100 \dots\dots\dots (2)$$

เมื่อ S_1 = การหดตัวเชิงเส้น (ร้อยละ) L_0 = ความยาวก่อนเผาของตัวอย่าง (เซนติเมตร)
 L = ความยาวหลังเผาของตัวอย่าง (เซนติเมตร)

ความหนาแน่น (bulk density) คือมวลแห้งของชิ้นกระเบื้องทดสอบหารด้วยปริมาตร (มอก.2398 เล่ม 3-2553) คำนวณจากสูตร

$$\rho = \frac{M}{V} \dots\dots\dots (3)$$

เมื่อ ρ คือ ความหนาแน่นปรากฏ (กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร) M คือ น้ำหนักตัวอย่างหลังเผา (กรัม) V คือ ปริมาตรตัวอย่างหลังเผา (ลูกบาศก์เซนติเมตร)

ค่าโมดูลัสแตกร้าว ทำการทดสอบตามวิธีการ มอก. 2398 เล่ม 4-2553 ด้วยเครื่องทดสอบแรงดัด (hounsfield test equipment) รุ่น H 100KS โดยความเร็วในการกด 1.8 มิลลิเมตรต่อนาที อัตราความเครียด (strain rate) 10^{-3} sec^{-1} และสามารถคำนวณค่าโมดูลัสแตกร้าวหรือกำลังดัดจาก

$$MOR = \frac{3P_{\max} l_2}{2h^2 b} \dots\dots\dots (4)$$

เมื่อ MOR คือ โมดูลัสแตกร้าว (เมกะพาสคัล) $P_{\max}$ คือ แรงกดจนแตก (นิวตัน) l_2 คือ ระยะห่างของแนวแกนของที่รองรับ (มิลลิเมตร) h คือ ความหนาน้อยสุดตามแนวรอยแตกของกระเบื้อง (มิลลิเมตร) b คือ ความกว้างหรือยาวของกระเบื้องหน่วยเป็น (มิลลิเมตร)

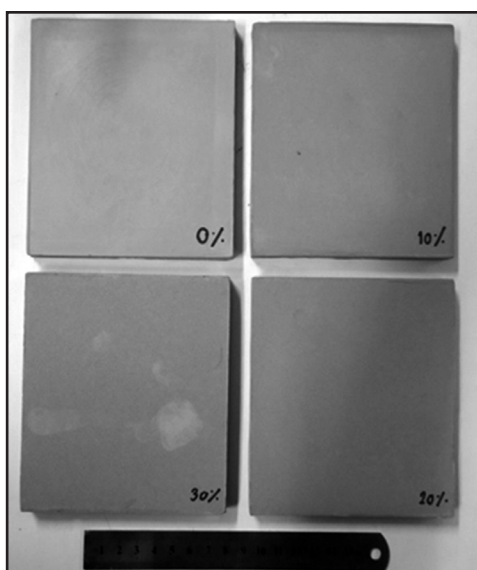
ทดสอบความแข็งกระดอง (shore hardness) อุปกรณ์ทดสอบคือ Hardness tester รุ่น EQUOTIP เป็นอุปกรณ์วัดความแข็งของโลหะที่ใช้หลักการของลูกบอลเหล็กไร้สนิมกระแทกและค่ากระดองขึ้นมา ไม่มีหน่วย ซึ่งเป็นวิธีการไม่ทำลายตัวอย่าง

การทนทานต่อสารเคมี กรดไฮโดรคลอริก (HCl) สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เตรียมสารละลายไฮโดรคลอริก เข้มข้นร้อยละ 3 จากไฮโดรคลอริกชนิดเข้มข้นจำนวน 30 มิลลิกรัม แล้วเติมน้ำกลั่นจนครบ 1 ลิตร เตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ จำนวน 30 กรัม แล้วเติมน้ำกลั่นจนครบ 1 ลิตร (มอก. 2398 เล่ม 13-2553) นำชิ้นตัวอย่างกระเบื้องที่หลังทดสอบโมดูลัสแตกร้าวจุ่มลงในสารละลายที่เตรียมไว้ โดยจุ่มชิ้นกระเบื้องทั้งที่มีส่วนแช่จุ่มลงในและส่วนบนกรดและด่างนั้น เป็นเวลา 7 วัน เมื่อครบกำหนด นำกระเบื้องไปล้างผ่านน้ำ 1 วัน และต้มน้ำเดือด 30 นาที ซับและอบแห้ง มาตรวจพินิจผิวหน้าการเปลี่ยนแปลง แล้วนำไปอบแห้งซึ่งน้ำหนักและเปรียบเทียบกับน้ำหนักของกระเบื้องก่อนทำการทดลอง

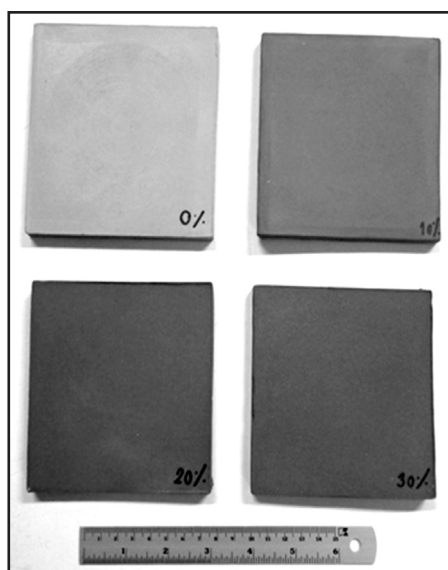
ผล

สีและการบิดเบี้ยว

จากการสังเกตลักษณะสีของเนื้อกระเบื้องดินเผาล้วนมีสีส้มอ่อน และเมื่อเติมเถ้าไยปาล์มน้ำมันเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วน (ร้อยละ 10 20 และ 30) สีของกระเบื้องเข้มขึ้นจากแดงน้ำตาลจนถึงเกมน้ำตาลในที่สุด (ภาพที่ 2ก) ส่วนความหนา ความตรงของขอบ ความได้ฉาก ความราบของผิวของกระเบื้อง ความยาวแนวทแยงของกระเบื้องมีความแตกต่างกันเพียงเล็กน้อยเท่านั้น นอกจากนี้ยังพบว่า กระเบื้องที่ผสมเถ้าไยปาล์มน้ำมันและเผาที่อุณหภูมิ 1,100 องศาเซลเซียส ผิวเนื้อมีลักษณะเคลือบเป็นมันวาว จัดเป็นชั้นคุณภาพ 1 (ภาพที่ 2ข) ส่วนที่อุณหภูมิเผา 1,000 องศาเซลเซียส ผิวเนื้อกระเบื้องมีลักษณะด้านเป็นฝุ่นแป้ง จัดเป็นชั้นคุณภาพ 3 (มอก. 2398 เล่ม 2-2553)



(ก)

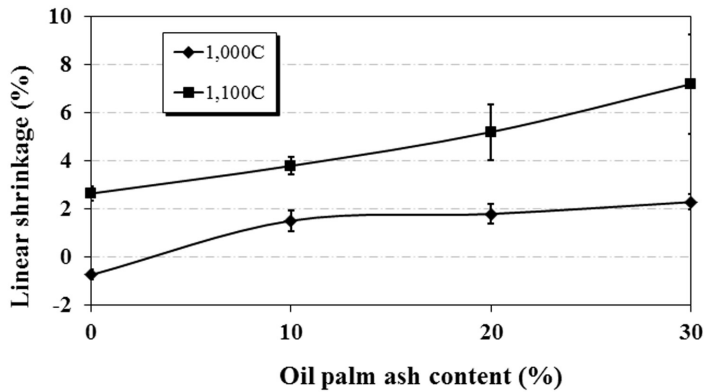


(ข)

ภาพที่ 2 ตัวอย่างกระเบื้องดินเผาที่อุณหภูมิ (ก) 1,000 องศาเซลเซียส และ (ข) 1,100 องศาเซลเซียส

การหดตัวหลังเผาเชิงเส้น

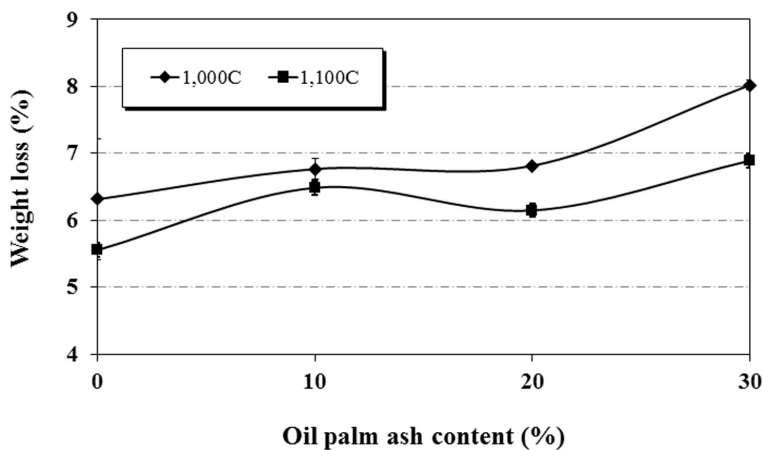
กระเบื้องดินเผาผสมเถ้าไยปาล์มน้ำมันมีการหดตัวเชิงเส้นเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนผสมเถ้าไยปาล์มน้ำมันและอุณหภูมิในการเผา (ภาพที่ 3) มีค่าทั้งการขยายตัวและหดตัวเชิงเส้นเฉลี่ยอยู่ในช่วงร้อยละ -0.74 ถึง 7.18



ภาพที่ 3 การหดตัวเชิงเส้นของกระเบื้องดินเผาผสมเถ้าไผ่ปาล์มน้ำมัน

น้ำหนักสูญหายหลังเผา

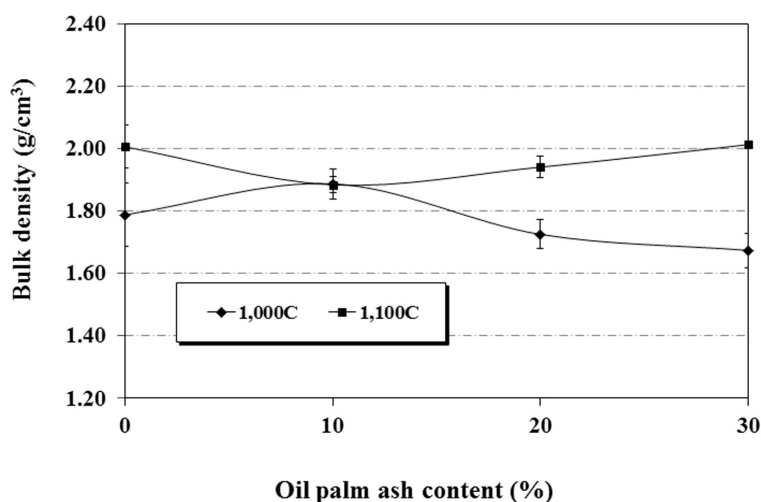
ค่าน้ำหนักสูญหายเฉลี่ยอยู่ในช่วงร้อยละ 5.55-8.01 โดยกระเบื้องที่มีน้ำหนักสูญหายมากที่สุดคือ กระเบื้องผสมเถ้าไผ่ปาล์มน้ำมันร้อยละ 30 เผาที่อุณหภูมิ 1,100 องศาเซลเซียส และกระเบื้องที่มีน้ำหนักสูญหายน้อยที่สุดคือ กระเบื้องดินเหนียวล้วน เผาที่อุณหภูมิ 1,000 องศาเซลเซียส (ภาพที่ 4) พบว่า เมื่อเพิ่มอัตราส่วนเถ้าไผ่ปาล์มน้ำมันในกระเบื้องดินเผา มีค่าน้ำหนักสูญหายเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Tonnayopas และคณะ (2009) ซึ่งเนื้อกระเบื้องมีน้ำหนักที่สูญหายอยู่ในช่วงร้อยละ 0.6-1.8



ภาพที่ 4 น้ำหนักสูญหายหลังเผาของกระเบื้องดินเผาผสมเถ้าไผ่ปาล์มน้ำมัน

ความหนาแน่นรวม

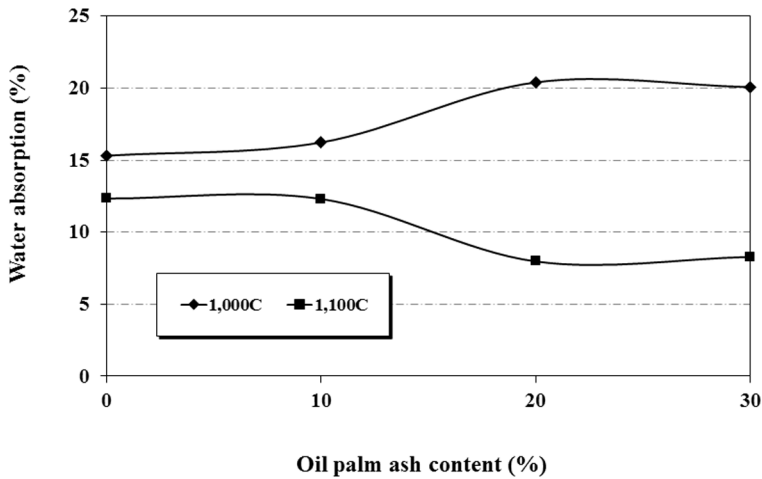
ตัวอย่างกระเบื้องดินเผาผสมเถ้าใบปาล์มน้ำมันเผาที่อุณหภูมิ 1,000 และ 1,100 องศาเซลเซียส มีค่าความหนาแน่นรวมอยู่ระหว่าง 1.67-2.01 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร (ภาพที่ 5) โดยอัตราส่วนผสมของเถ้าใบปาล์มน้ำมันและอุณหภูมิเผาเพิ่มขึ้น ทำให้ค่าความหนาแน่นของตัวอย่างเผาเพิ่มขึ้น ส่วนผสมของเถ้าใบปาล์มน้ำมันที่มีค่าความหนาแน่นรวมสูงสุดคือ อัตราส่วนร้อยละ 30 เเผาที่อุณหภูมิ 1,100 องศาเซลเซียส และค่าความหนาแน่นรวมต่ำสุดคือ อัตราส่วนร้อยละ 30 เเผาที่อุณหภูมิ 1,000 องศาเซลเซียส



ภาพที่ 5 ความหนาแน่นรวมของกระเบื้องดินเผาผสมเถ้าใบปาล์มน้ำมัน

การดูดซึมน้ำ

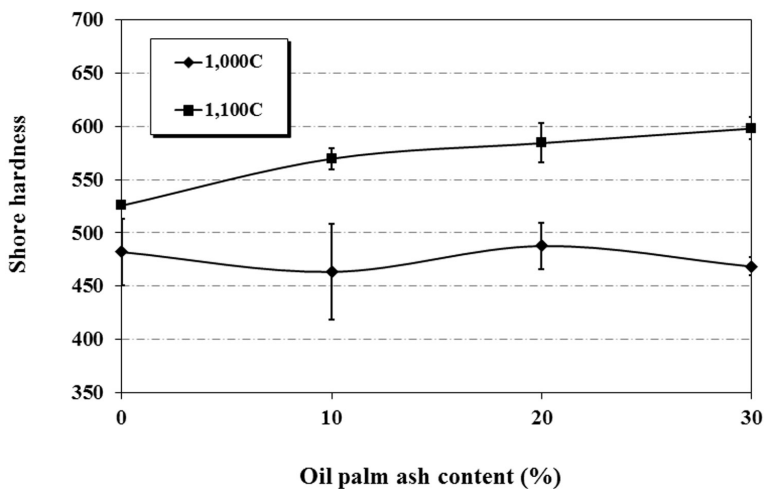
เนื้อกระเบื้องดินเผาผสมเถ้าใบปาล์มน้ำมันมีค่าการดูดซึมน้ำอยู่ในช่วงร้อยละ 7.97-20.40 พบว่า อุณหภูมิเผาที่ 1,000 องศาเซลเซียส เมื่อเพิ่มอัตราส่วนเถ้าใบปาล์มน้ำมัน ตัวอย่างกระเบื้องมีการดูดซึมน้ำเพิ่มขึ้น (ภาพที่ 6) และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิเผาค่าการดูดซึมน้ำลดลง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Tonayopas และคณะ (2009) พบว่า เมื่อเพิ่มอัตราส่วนเถ้าใบปาล์มน้ำมัน มีค่าการดูดซึมน้ำเพิ่มขึ้นประมาณร้อยละ 20-50 และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการเผาค่าการดูดซึมน้ำลดลงอย่างมากประมาณร้อยละ 75-85



ภาพที่ 6 การดูดซึมน้ำของกระเบื้องดินเผาผสมเถ้าใบปาล์มน้ำมัน

ความแข็งแบบชอร์

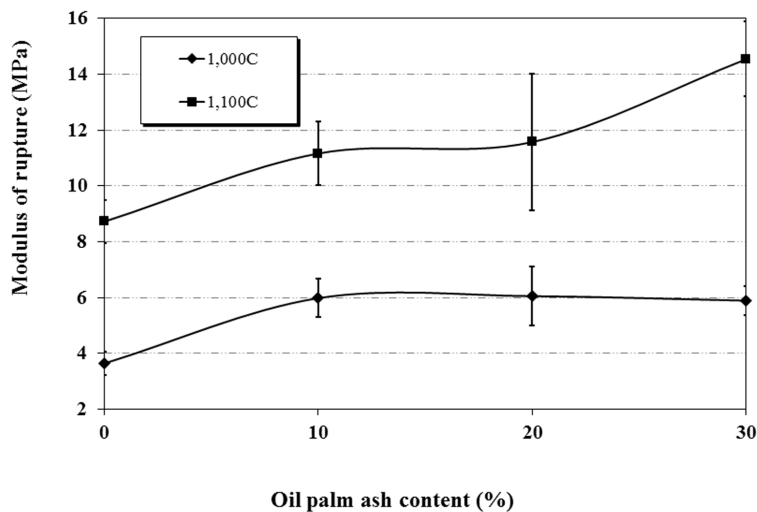
เนื้อกระเบื้องดินเผาผสมเถ้าใบปาล์มน้ำมัน มีค่าแข็งแบบชอร์ของกระเบื้องอยู่ในช่วง 463-598 ความแข็งแบบชอร์แปรผันตามอุณหภูมิเผาเพิ่มขึ้น (ภาพที่ 7) พบว่า มีค่าสอดคล้องกับค่าความหนาแน่นรวม (ภาพที่ 5) ค่าการหดตัวเชิงเส้น (ภาพที่ 3) และค่าน้ำหนักสูญหายหลังเผา (ภาพที่ 4) เช่นเดียวกับผลงานของ Tonnayopas และคณะ (2009) เมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการเผา ค่าความแข็งแบบชอร์มีค่าสูงขึ้นประมาณร้อยละ 16-24



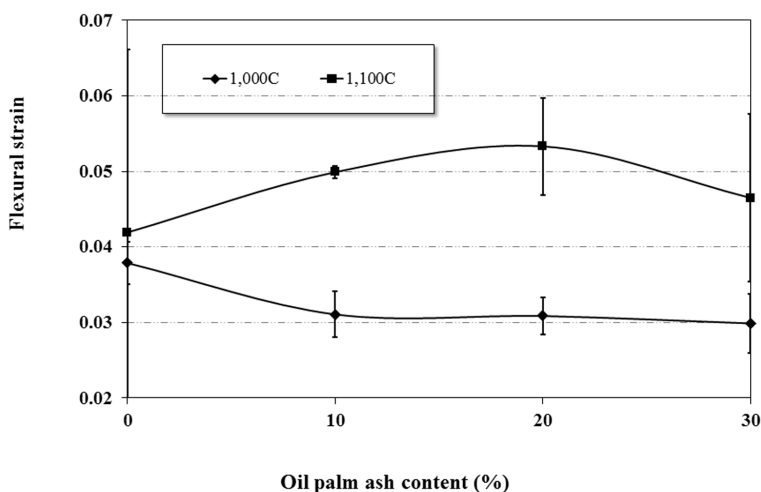
ภาพที่ 7 ความแข็งแบบชอร์ของกระเบื้องดินเผาผสมเถ้าใบปาล์มน้ำมัน

โมดูลัสแตกร้าว

กระเบื้องมีค่าโมดูลัสเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิและปริมาณเถ้าใบปาล์มน้ำมันที่เพิ่มขึ้น ซึ่งตัวอย่างเผาที่อุณหภูมิ 1,100 องศาเซลเซียส ให้ค่าโมดูลัสสูงสุด ส่วนตัวอย่างกระเบื้องทุกอัตราส่วนเถ้าที่ 1,000 องศาเซลเซียส ให้ค่าต่ำกว่าอุณหภูมิเผาที่ 1,100 องศาเซลเซียส (ภาพที่ 8) ซึ่งมีค่าตรงกันข้ามกับอัตราความเครียด (ภาพที่ 9) ค่าโมดูลัสได้สอดคล้องกับค่าความแข็งแรงแบบชอร์และค่าความหนาแน่นรวม เช่นเดียวกันพบว่า เมื่อเพิ่มอุณหภูมิเผา ค่าโมดูลัสแตกร้าวมีค่าสูงขึ้นประมาณร้อยละ 31-45 แต่ต่างกันเมื่อเพิ่มปริมาณเถ้าใบปาล์มน้ำมันที่ร้อยละ 30 ค่าโมดูลัสแตกร้าวได้ลดลง



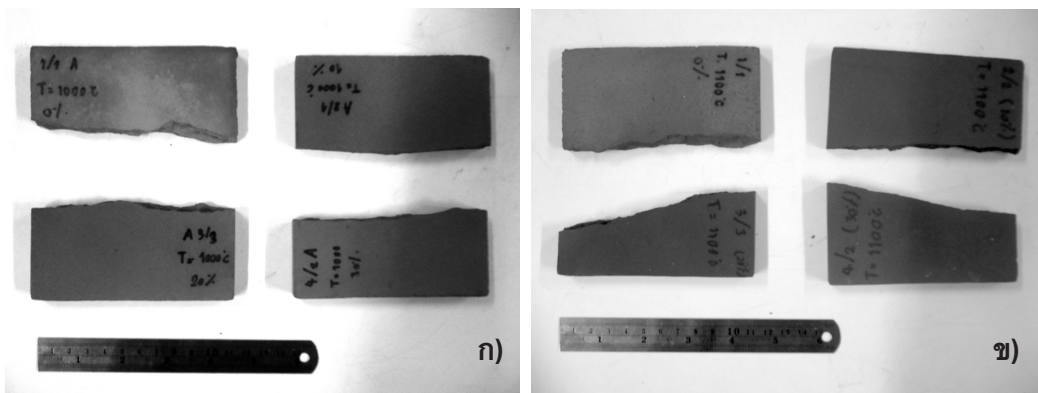
ภาพที่ 8 โมดูลัสแตกร้าวของกระเบื้องดินเผาผสมเถ้าใบปาล์มน้ำมัน



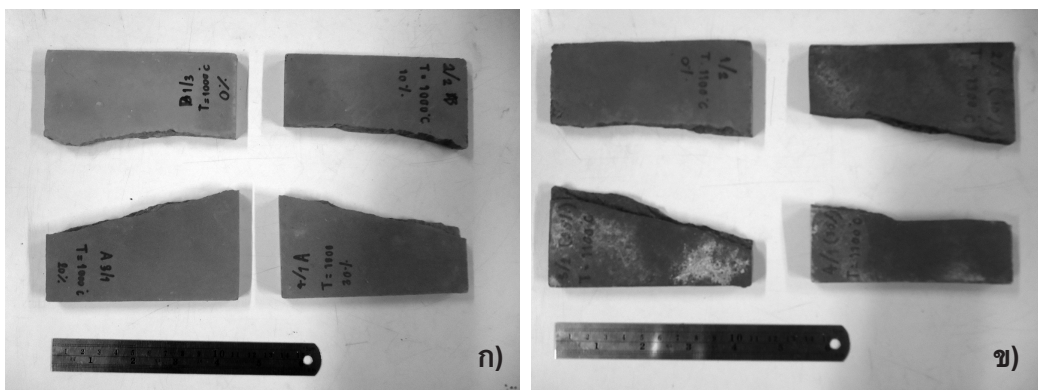
ภาพที่ 9 อัตราความเครียดของกระเบื้องดินเผาผสมเถ้าใบปาล์มน้ำมัน

ความคงทนต่อสารเคมี

ตรวจพินิจด้วยสายตาพบว่า ผิวกระเบื้องดินเผาผสมเถ้าเใยปาล์มน้ำมันที่แช่กรดไม่เกิดมีรอยดำหนิเกิดขึ้น ยกเว้นชิ้นงานตัวอย่างดินเหนียวล้วน ที่ผิวมีรอยคราบเป็นผงแป้งเล็กน้อย น้ำหนักมีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย (ภาพที่ 10) ส่วนแผ่นกระเบื้องที่แช่ด่างที่อุณหภูมิเผา 1,000 องศาเซลเซียส ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง ส่วนที่อุณหภูมิเผา 1,100 องศาเซลเซียส เกิดคราบสีขาวที่ผิว ยกเว้นที่ไม่เติมเถ้าเใยปาล์มน้ำมัน น้ำหนักหลังแช่ด่างเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยเช่นกัน (ภาพที่ 11)



ภาพที่ 10 ความคงทนกรดของกระเบื้องดินเผาผสมเถ้าเใยปาล์มน้ำมัน ก) 1,000 องศาเซลเซียส และ ข) 1,100 องศาเซลเซียส



ภาพที่ 11 ความคงทนต่อด่างของกระเบื้องดินเผาผสมเถ้าเใยปาล์มน้ำมัน ก) 1,000 องศาเซลเซียส และ ข) 1,100 องศาเซลเซียส

การวิเคราะห์วัฏภาคแร่ของตัวอย่างกระเบื้องหลังเผา

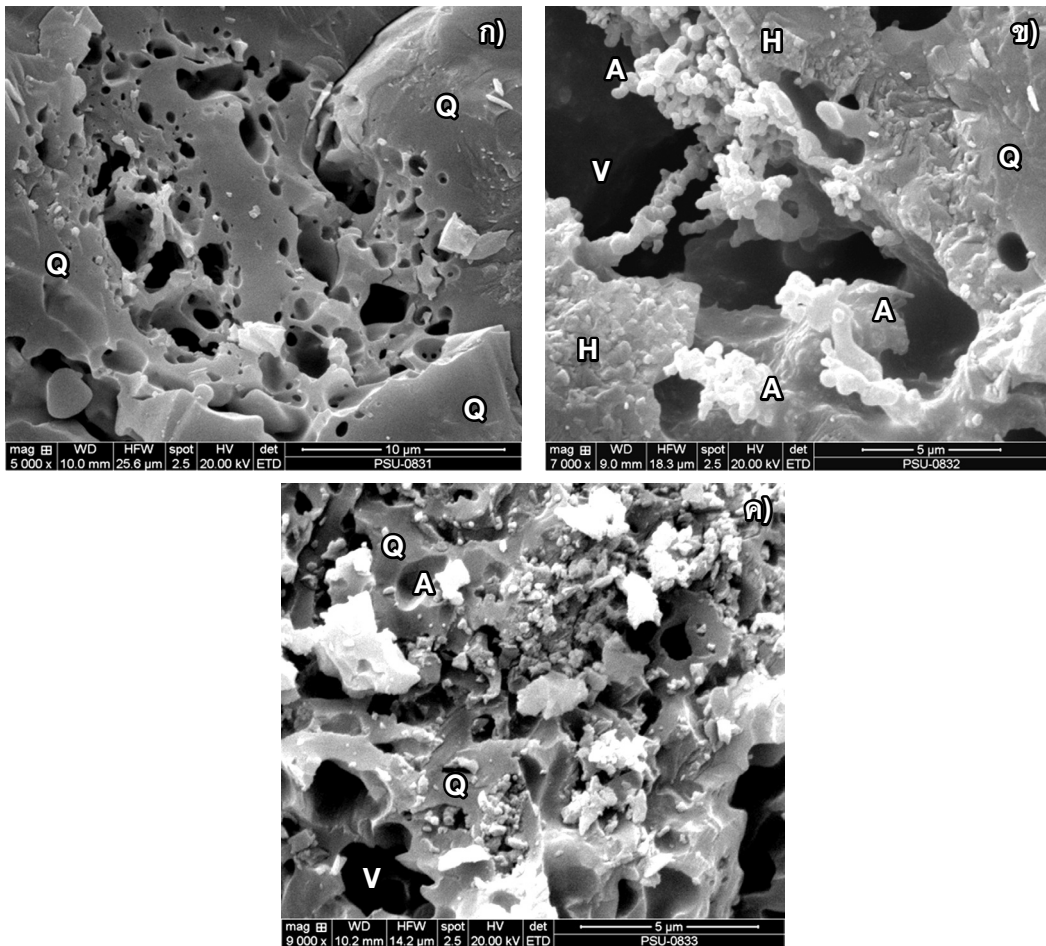
นำกระเบื้องดินเผาที่กำลังตัดสูงสุด ที่อัตราส่วนผสมเถ้าไยปาล์มน้ำมันร้อยละ 30 อุณหภูมิเผา 1,000 และ 1,100 องศาเซลเซียส ตามลำดับ มาวิเคราะห์ตรวจวัฏภาคแร่ (mineral phases) ที่เกิดขึ้นหลังจากเผาด้วยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (x-ray diffraction, XRD) ที่อุณหภูมิเผา 1,000 องศาเซลเซียส เกิดควอตซ์เท่านั้น ส่วน 1,100 องศาเซลเซียส (ภาพที่ 10) วัฏภาคแร่ที่เกิดขึ้นสามชนิด ได้แก่ ควอตซ์ ฮีมาไทต์ และอะนอร์ไทต์ (ตารางที่ 2)

ตารางที่ 2 ผลการวิเคราะห์วัฏภาคแร่ที่เกิดขึ้นหลังเผากระเบื้องดินเผาผสมเถ้าไยปาล์มน้ำมัน

อุณหภูมิเผา (องศาเซลเซียส)	ชนิดแร่	ปริมาณ (ร้อยละ)
1,000	ควอตซ์ (quartz)	91.69
	ไม่สามารถระบุชนิดแร่	8.31
1,100	ควอตซ์	49.64
	ฮีมาไทต์ (hematite)	4.45
	อะนอร์ไทต์ (anorthite)	44.41
	ไม่สามารถระบุชนิดแร่	1.50

โครงสร้างจุลภาคของตัวอย่างกระเบื้อง

ภาพถ่ายจุลทรรศน์ด้วยอิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ของกระเบื้องดินเผาผสมเถ้าไยปาล์มน้ำมันที่ผสมเถ้าไยปาล์มน้ำมัน 30 และเผาที่อุณหภูมิ 1,100 องศาเซลเซียส พบว่าเนื้อกระเบื้องมีการเผาผนึกดี มีลักษณะเป็นขอบคมโค้งเว้าเนื้อควอตซ์ (Q) (ภาพที่ 11ก) ก้อนกลมเม็ดไขปลาฮีมาไทต์ (ภาพที่ 11ข) และก้อนเหลี่ยมสีขาวของอะนอร์ไทต์ (A) ติดบนเนื้อ (ภาพที่ 11ค) และมีรูพรุนเล็กน้อย (V) เกิดขึ้นในเนื้อกระเบื้อง เนื่องจากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในเถ้าไยปาล์มน้ำมันได้ระเหยออกขณะเผาผนึก ส่งผลให้เกิดช่องว่างระหว่างอนุภาค ทำให้การดูดซึมน้ำของกระเบื้องดินเผาเพิ่มขึ้น



ภาพที่ 13 ภาพถ่ายจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของกระเบื้องดินเผาผสมเถ้าใบปาล์มน้ำมันร้อยละ 30 กำลังขยาย ก) 5,000 เท่า ข) 7,000 เท่า และ ค) 9,000 เท่า

อภิปรายผล

สภาวะที่เหมาะสมของการเผาผนึกกระเบื้อง

วัตถุดิบของดินเหนียวประกอบด้วย ควอตซ์ อิลไลต์ และฮีมาไทต์หรือ $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-Fe}_2\text{O}_3$ เป็นหลัก ขณะที่เถ้าที่ใช้ประกอบด้วยสารประกอบแอลคาไลหรือ $\text{SiO}_2\text{-CaO-K}_2\text{O}$ เป็นส่วนใหญ่ (ตารางที่ 3) ดังนั้นเมื่อนำมาผสมกันทำให้ตัวอย่างกระเบื้องมีองค์ประกอบหลักเป็น $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-CaO-K}_2\text{O-Fe}_2\text{O}_3$ ทำให้เพิ่มซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2) แอลคาไลออกไซด์ เช่น K_2O และแคลเซียมออกไซด์ (CaO) และลดอะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) และเหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3) ลงเล็กน้อย ในช่วงเผาค่าน้ำหนักสูญหายหลังเผา (LOI) กีดขวางให้การควบแน่นเกิด

ตารางที่ 3 องค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบใช้ทดลอง

องค์ประกอบทางเคมี	ปริมาณ (wt.%)	
	ดินเหนียว ¹	เถ้าปาล์มน้ำมัน ²
ซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO ₂)	59.87	44.65
อะลูมิเนียมออกไซด์ (Al ₂ O ₃)	17.75	0.51
เหล็กออกไซด์ (Fe ₂ O ₃)	8.62	1.98
โพแทสเซียมออกไซด์ (K ₂ O)	3.37	13.16
ไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO ₂)	1.48	-
แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO)	0.96	4.01
แคลเซียมออกไซด์ (CaO)	0.74	21.65
แมงกานีสไดออกไซด์ (MnO ₂)	0.20	-
ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO ₃)	-	4.98
น้ำหนักร้อยเหลือ (LOI)	0.28	9.06

หมายเหตุ ¹ = ดนุพล ตันนโยภาส และคณะ (2553) ² = Tonnayopas และคณะ (2009)

ยากและเพิ่มให้เกิดความพรุน สารประกอบทั้งสาม SiO₂-Al₂O₃- Fe₂O₃ ในดินเหนียวขาดเชื้อถลุง (flux) ดังนั้นการเติมเถ้าที่มี K₂O ทำให้วัฏภาคการหลอมเกิดที่อุณหภูมิต่ำขึ้นมีปริมาณมากที่อุณหภูมิเผา 1,000 องศาเซลเซียส จึงปรากฏวัฏภาคแร่ควอตซ์เป็นส่วนใหญ่ (ตารางที่ 2) นำเป็นผลมาจากสารประกอบแคลเซียมคาร์บอเนตในเถ้าปาล์มที่มีสูง เมื่ออุณหภูมิเผาประมาณ 900 องศาเซลเซียส จะเปลี่ยนเป็นปูนขาว (CaO) ตามสมการ (5)



เมื่อเย็นตัวลง CaO จะดูดความชื้นในอากาศได้ ดังสมการ (6) ทำให้กระเบื้องตัวอย่างเกิดการบวมตัวเสียรูปทรงได้



แต่เมื่อเผากระเบื้องตัวอย่างจนถึงขั้นการเผาให้แตกตัว (calcination) สารประกอบแคลเซียมอยู่ในเถ้าปาล์มน้ำมันรวมตัวกับสารประกอบซิลิกาและอะลูมินา เกิดฟลักอะนอร์ไทต์ขึ้น (ธนุพล ตันนโยภาส, 2552) สารประกอบแคลเซียมยังทำให้เกิดการพอกสีของสารประกอบเหล็กให้ตัวอย่างกระเบื้องมีสีซีดลง กลายเป็นสีครีมหรือสีเนื้อแทนที่จะเป็นสีแดง เช่น ตัวอย่างกระเบื้องควมคุม (ไม่ผสมเถ้า) ทำนองเดียวกับผลงานของธนุพล ตันนโยภาส และคณะ (2557) ได้กระเบื้องมวลเบาสีขาวที่ผสมด้วยเถ้าไม้ยางพาราที่มี CaO สูง

สมบัติของกระเบื้อง

การหดตัวเชิงเส้นสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผลิตกระเบื้องแกรนิตเต็มเถ้าปาล์ม การหดตัวได้เพิ่มขึ้นแปรผันตามปริมาณเถ้าปาล์มน้ำมันและอุณหภูมิเผาสูงขึ้น ประมาณร้อยละ 2.5-16.0 (Tonnyapopas *et al.*, 2009) และทำนองเดียวกับงานผลิตกระเบื้องดินผสมเศษหินอ่อนและแกรนิตของ Segadaes และคณะ (2005) และการใส่เถ้าเกลบในเครื่องปั้นดินขาวของ Prasad และคณะ (2001) ทั้งการดูดซึมน้ำและความหนาแน่นรวม มีค่าตรงกันข้ามกันและค่าใกล้เคียงกับงานวิจัยของ Tonnyapopas และคณะ (2009) ที่ค่าความหนาแน่นรวมของกระเบื้องเศษหินแกรนิตหุงหวังผสมเถ้าปาล์มน้ำมันอยู่ในช่วง 1.70-1.83 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร และอุณหภูมิเผาเพิ่มขึ้นทำให้การดูดซึมน้ำลดลงและความหนาแน่นรวมเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกับ Segadaes และคณะ (2005) ขณะเดียวกันการเพิ่มปริมาณเถ้าปาล์มหรือเถ้าเศษวัสดุพืชและอุณหภูมิเผาสูงขึ้น ทำให้ค่าโมดูลัสแตกร้าวสูงขึ้นตามไปด้วย (Pinatti *et al.*, 2006) เช่นเดียวกับงาน Tonnyapopas และคณะ (2009) และ Segadaes และคณะ (2005) ส่วนสมบัติความแข็งแรงแบบชอร์และน้ำหนักสูญหายหลังเผา แม้ว่าไม่ได้กำหนดไว้ในเกณฑ์คุณภาพ แต่ก็ยังเป็นสมบัติที่มีความสัมพันธ์กับค่าโมดูลัสแตกร้าว ความหนาแน่นรวม และการดูดซึมน้ำ เช่นในงาน Tonnyapopas และคณะ (2009) ธนุพล ตันนโยภาส และคณะ (2553ก, 2553ข, 2553ค, 2553ง) โดยเฉพาะค่าความแข็งแรงแบบชอร์ (ภาพที่ 7) สามารถเทียบเคียงค่าโมดูลัสแตกร้าว (ภาพที่ 8) ทำให้ลดเวลาการทดสอบและไม่ทำให้ตัวอย่างเสียหาย

คุณภาพกระเบื้องตามอุตสาหกรรม

เมื่อนำข้อมูลการทดลองที่ได้มาวิเคราะห์คุณภาพกระเบื้องเซรามิก พบว่า ตัวอย่างกระเบื้องเผาทั้งสองอุณหภูมิ ไม่อยู่ในเกณฑ์คุณภาพระดับใดของมาตรฐานเซรามิก มอก. 2508-2555 อย่างไรก็ตามตัวอย่างที่อุณหภูมิเผา 1,100 องศาเซลเซียส มีสมบัติการดูดซึมน้ำและโมดูลัสแตกร้าวเข้าใกล้กับระดับเกณฑ์คุณภาพ BIIb และ BIII (มอก. 2508, 2555)

ดังนั้นผลการทดลองโดยใช้เถ้าปาล์มน้ำมันอันเป็นเศษวัสดุเหลือใช้จากอุตสาหกรรมปาล์มน้ำมันนำกลับมาใช้ปริมาณมากถึงร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก อุนหภูมิเผาที่เหมาะสมคือ 1,100 องศาเซลเซียส สามารถเติมแทนที่ในส่วนผสมของอุตสาหกรรมดินเผาได้ โดยหากต้องการให้อยู่ในเกณฑ์ตามมาตรฐาน มอก. 2508-2555 ปรับสูตรเล็กน้อย (อุนหภูมิเผา) ก็สามารถอยู่ในเกณฑ์คุณภาพ Billb และ Bill และที่สำคัญคือมีความเป็นไปได้ที่ใช้อุนหภูมิเผาต่ำลง อันทำให้ประหยัดพลังงาน และการใช้เถ้าปาล์มน้ำมันมากก็ยิ่งเป็นสิ่งช่วยลดพื้นที่ฝังกลบเถ้า และยังเป็นหนทางหนึ่งได้ผลิตภัณฑ์เชิงนิเวศและอย่างยั่งยืน

กิตติกรรมประกาศ

คณะวิจัยขอขอบคุณ หน่วยวิจัยธรณีเทคนิคและวัสดุก่อสร้างนวัตกรรม ภาควิศวกรรม
เหมืองแร่และวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ และศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัย
สงขลานครินทร์ ที่อำนวยความสะดวกในการใช้อุปกรณ์การทดลอง จนงานวิจัยสามารถสำเร็จ
ลุล่วงได้ด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

[illegible][illegible]

دنۇفل دىننىيولاس، مامامەسۇئو مىمەشە ۋە گۇمفول رامرىڭسۇتتى. (2548). لىكشىنە كېرەڭدىن فەل
فولم شەخەد كەڭ. كارپىزىمىشاكار تاروتىقورمىسا ستر
ماھىتپالىسىن خالان كرنتىر كرىڭنى 4، 8-9 ئىنۋادىم 2548.
سۇخلا : ماھىتپالىسىن خالان كرنتىر.

ดนุพล ตันโนโยภาส และอภิญญา พลชา. (2548). คุณประโยชน์ของเก้าอี้พอลิไธลามน้ำมัน
 ในการทำอิฐดินเผาก่อสร้าง. การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมศาสตร์
 มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ครั้งที่ 4, 8-9 ธันวาคม 2548.
 สงขลา : มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

- ดนุพล ตันนโยภาส, พิระพงศ์ ทีฆสกุล, และสราวุธ จริตงาม. (2550). การผสมเถ้าจากใยปาล์ม น้ำมันใส่ในอิฐดินเผา. การประชุมวิชาการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ครั้งที่ 6, 7-9 มีนาคม 2550. พิษณุโลก : โรงแรมอัมรินทร์ลากูน
- ดนุพล ตันนโยภาส. (2552). วิทยาแร่. (พิมพ์ครั้งที่ 2.) สงขลา : ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- ดนุพล ตันนโยภาส, จิระวรรณ หนูฤทธิ์ และสุชาติ จันทรมนีย์. (2553ก). สมบัติของกระเบื้องดินเผา สทั้งพระที่ผสมแคลไซต์และตะกอนทิ้งจากโรงกรองน้ำประปา. การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ครั้งที่ 8, 22-23 เมษายน 2553. สงขลา : มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- ดนุพล ตันนโยภาส, ปาจารย์ เกิดกุล และสุชาติ จันทรมนีย์. (2553ข). ผลกระทบของการเติม ผงหินฟอสฟอรัสที่มีต่อสมบัติและโครงสร้างจุลภาคของเนื้อดินสทั้งพระสำหรับการผลิต กระเบื้อง. การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ครั้งที่ 8, 22-23 เมษายน 2553. สงขลา : มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- ดนุพล ตันนโยภาส, กัลยาณี คุปตานนท์ และสิริพร รัตนมณี. (2553ค). การพัฒนาส่วนประกอบของ กระเบื้องดินเผาเน้นใช้ดินสทั้งพระกับผงหินปูน. การประชุมวิชาการและเสนอผลงานวิจัย มหาวิทยาลัยทักษิณ ครั้งที่ 20, 16-18 กันยายน 2553. สงขลา : มหาวิทยาลัยทักษิณ.
- ดนุพล ตันนโยภาส, ธรณิศร จิตรพิศาล และสุชาติ จันทรมนีย์. (2553ง). สมบัติของกระเบื้อง เซรามิก ที่ทำจากหินชนวนเติมเถ้าแกลบดำ. การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ครั้งที่ 8, 22-23 เมษายน 2553. สงขลา : มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- ดนุพล ตันนโยภาส, วรณรัตน์ แก้วสมบุญ และสุชาติ จันทรมนีย์. (2553จ). คุณลักษณะ กระเบื้องเซรามิกผลิตจากหินฝุ่นบะซอลต์ผสมร่วมกับเถ้าใยปาล์มน้ำมัน. วารสารมหาวิทยาลัยทักษิณ, 12, 149-159.
- ดนุพล ตันนโยภาส, กัลยาณี คุปตานนท์, หทัยทิพย์ พันฤทธิ์ดำ และสุชาติ จันทรมนีย์. (2557). กระเบื้องเซรามิกมวลเบาชนิดใหม่ทำจากหางแร่ดินขาวและเถ้าลอยไม้ยางพารา. วารสารวิชาการคณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง, 7, 70-82.
- มอก. 2398. (2553). มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมกระเบื้องเซรามิก เล่ม 2 วิธีตรวจสอบ มิติและคุณภาพผิวหน้า.
- มอก. 2398. (2553). มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมกระเบื้องเซรามิก เล่ม 3 วิธีหาค่าการ ดูดซึมน้ำความพรุนปรากฏ ความหนาแน่นสัมพัทธ์ปรากฏ และความหนาแน่นรวม.
- มอก. 2398. (2553). มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมกระเบื้องเซรามิก เล่ม 4 วิธีหามอดุลัส

แตกร้าวและความต้านแรงกดแตก.

มอก. 2398. (2553). มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมกระเบื้องเซรามิก เล่ม 13 วิธีหาความทนสารเคมี.

มอก. 2508. (2555). มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมกระเบื้องเซรามิก.

สำนักวิจัยเศรษฐกิจการเกษตร. (2556). สถานการณ์สินค้าเกษตรที่สำคัญและแนวโน้ม ปี 2557. กรุงเทพฯ : สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, 43.

Demir, I. (2008). Effect of organic residues addition on the technological properties of clay bricks. *Waste Management*, 28, 622–627.

Kooptarnond, K. and Tonnayopas, D. (2007). Using weathered granite for ceramic tile production. *Int. Conf. Recycling and Waste Processing: Materials Recovery from Wastes; Batteries and Co/Ni; Precious Metal Recovery; and Other Non Ferrous*, TMS (The Minerals, Metals & Materials Society), Florida: Orlando.

Pinatti, D. G., Conte, R. A., Borlini, M. C., Santos, B. C., Oliveira, I., Vieira, C. M. F., and Monteiro, S. N. (2006). Incorporation of the ash from cellulignin into vitrified ceramic tiles. *Journal of the European Ceramic Society*, 26, 305–310.

Prasad, C.S., Maiti, K.N., and Venugopal, R. (2001). Effect of rice husk ash in whiteware compositions. *Ceramics International*, 27, 629–635.

Segadaes, A. M., Carvalho, M. A., and Acchar, W. (2005). Using marble and granite rejects to enhance the processing of clay products. *Applied Clay Science*, 30, 42– 52.

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 (TIJSAT)*, 14, 10-20.