

กลไกการเผาผนึกของเนื้อกระเบื้องเซรามิกซีโอไลต์ที่เติมเศษหินชนวน
Sintering Mechanism of Zeolite Ceramic Tile Body with the Addition of Slate Waste

อาชียะ หมักหมั่น¹ دنۇنپل تۇننۇيۇپاس^{2*} และสุชาติ จันทรมณี³
Arseeyah Makman¹ Danupon Tonnayopas^{2*} and Suchart Chantaramanee³

บทคัดย่อ

ศึกษาการใช้ซีโอไลต์และผงหินชนวนเป็นวัตถุดิบในการผลิตเนื้อกระเบื้องเซรามิก หินชนวนแทนที่ซีโอไลต์ร้อยละ 10 20 และ 30 โดยน้ำหนัก ภายใต้ความชื้นที่เหมาะสมในแต่ละอัตราส่วน ซึ่งวัตถุดิบทั้งหมดขึ้นรูปด้วยแรงอัดไฮดรอลิก 100 บาร์ หมักไว้ 8 ชั่วโมง แล้วอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง ก่อนเผาในเตาไฟฟ้า ที่อุณหภูมิต่างกันคือ 1,100 1,150 และ 1,200 องศาเซลเซียส ผลทดสอบพบว่าความหนาแน่นรวมได้เพิ่มขึ้นตามปริมาณหินชนวนที่เพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามการเติมหินชนวนลงไปได้ปรับปรุงให้สมบัติทางกายภาพและเชิงกลของกระเบื้องเซรามิกซีโอไลต์ดีขึ้น โดยเฉพาะกระเบื้องผสมผงหินชนวนร้อยละ 30 โดยน้ำหนักและอุณหภูมิเผาที่ 1,200 องศาเซลเซียส ทำให้กระเบื้องดูดซึมน้ำต่ำสุดคือร้อยละ 9.3 และที่เติมหินชนวนร้อยละ 10 กำลังคัดมีค่าสูงสุด 88.27 เมกะพาสคัล ซึ่งกระเบื้องทุกส่วนผสม และทุกอุณหภูมิเผาผ่านมาตรฐาน มอก. 37-2529 สำหรับกระเบื้องปูพื้น ประเภทดูดซึมน้ำสูง

คำสำคัญ : เนื้อกระเบื้องเซรามิก ซีโอไลต์ หินชนวน การเผาผนึก

Abstract

Zeolite and slate powder (SP) used as raw materials in the production of ceramic tile body was investigated. The slate powder content in the batches was varied from 10 wt%, 20 wt% and 30 wt% by replacing the zeolite content. These mixtures were molded using uniaxial hydraulic pressing with pressure of 100 bars. All specimens were cured at ambient temperature for 8 h. then heated at 100°C about 8 h. before fired in an electrical furnace at different temperature of 1,100, 1,150 and 1,200°C. Testing result indicated that there was an increase in the bulk density with the increase in SP content. However, the addition of SP in the matrix improved the physical

¹ นักศึกษาปริญญาตรี ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ หาดใหญ่ 90112

² รศ.ดร. ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ หาดใหญ่ 90112

³ วิศวกร ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ หาดใหญ่ 90112

* Corresponding author : E-mail: danupon.t@psu.ac.th โทรศัพท์/โทรสาร 074 558 834 ต่อ 7318

and mechanical properties of the zeolite ceramic tile. Particularly, the addition of SP as high as 30 wt% and firing at 1,200°C result in the minimum water absorption of 9.30%. The maximum flexural strength of 88.27 MPa can be obtained by adding 10 wt% of SP. It can be met of Thailand Industrial Standard (TIS 37) for floor tile, class high absorption.

Keywords : Ceramic tile body, Zeolite, Slate, Sintering

บทนำ

การพัฒนาผลิตภัณฑ์ซึ่งสามารถผลิตได้จากของเสียจากผลพลอยได้ในท้องถิ่นกับทรัพยากรธรรมชาติเป็นสิ่งที่สำคัญ ผงเหลือมาจากการดำเนินงานตัดและขัดในเหมืองหินชนวนมีผลกระทบน้อยสำคัญและสำคัญต่อสิ่งแวดล้อม กระบวนการอัดและเผาผนึกผงเหล่านี้อาจจะเป็นการสะสางทางหนึ่งในคืนกลับและนำกลับมาใช้ใหม่การเปลี่ยนวัฏภาคเกิดขึ้นในช่วงวัฏจักรเผาผนึกได้ องค์ประกอบใหม่ก็สามารถนำไปใช้งานเซรามิกได้เนื่องจากหินชนวนเป็นวัสดุซับซ้อนจึงคาดว่ากลไกการเผาผนึกประกอบด้วยความซับซ้อนวัฏภาคเหลวเกิดขึ้นจะช่วยวัสดุหนาแน่น ขณะที่ก๊าซปล่อยออกมาอาจเป็นต้นกำเนิดแห่งความพรุนการที่ได้โครงสร้างจุลภาคพอเหมาะนำไปใช้งานนั้นจำเป็นต้องมีวัฏจักรเผาผนึกเหมาะสมที่สุด ซีโอไลต์เป็นไฮเดรตกลุ่มหนึ่งของอะลูมิโนซิลิเกตเนื้อผลึกพรุนขนาดละเอียดมาก ประกอบด้วยแคตไอออนกลุ่มธาตุ 1 และ 2 อะตอม แลกเปลี่ยนได้ (เช่น Na^+ , K^+ , Mg^{2+} และ Ca^{2+}) และดูดซับและคายน้ำกลับได้ ลักษณะสมบัตินี้ทำให้มีความหนาแน่นต่ำและปริมาตรโพรงสูงเมื่อคายน้ำ ระดับคุดน้ำในชั้นสูง โดยทั่วไปโครงสร้างผลึกเสถียรเมื่อคายน้ำ สมบัติในการแลกเปลี่ยนไอออน สมบัติดูดซับ (ก๊าซ ไอน้ำ เป็นต้น) สมบัติเร่งปฏิกิริยา ร่องโมเลกุลเดียวในผลึกคายน้ำ ซีโอไลต์จัดเป็นกลุ่มสำคัญได้ 3 ชั้น บนพื้นฐานลักษณะผลึก ได้แก่ ผลึกรูปเส้นใย รูปแบนหนาและรูปขนาดเท่า [1] ปัญหาสำคัญประการหนึ่งในเหมืองหินต่างๆ คือ การเกิดปริมาณของเสีย (ฝุ่นและผง)

มหาศาลซึ่งมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ในประเทศไทยมีการทำหินประดับชนิดต่างๆ อาทิเช่น หินอ่อน [2] แกรนิต [3] และหินชนวนหรือหินกาบ [4] และหินไนส์ [5] เป็นต้น จากการทำเหมืองหินชนวนและกระบวนการก่อให้เกิดผงหินชนวนละเอียดในระหว่างกระบวนการสกัด การตัดและการขัดปริมาณมาก และด้วยองค์ประกอบทางเคมีของหินชนวนมีความเหมาะสมเป็นวัตถุดิบเซรามิก [4] ในการผลิตกระเบื้องก่อสร้าง ราวทศวรรษที่ผ่านมาได้มีการพยายามทำการเผาผนึกจากของเสียผงหินชนวน [6-9] หล่อด้วยน้ำเคลือบ [10, 11] และวัสดุผสมหินชนวนกับอะลูมินา [12] German [13] กล่าวถึงการเผาผนึก 400-600°C สูญเสียกลุ่ม OH พันธะเชิงโครงสร้าง 500-920°C สิ่งเจือปนคาร์บอนปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ช่วงอุณหภูมิ 600-900 °C SiO_2 และ Al_2O_3 ทำปฏิกิริยามากกลายเป็นออสติฐาน สารประกอบของ Al_2O_3 ละลายในกรดได้ง่ายจากอุณหภูมิ 950°C เริ่มก่อตัวมุลไลต์ (mullite) 1,200°C ก่อตัวมุลไลต์และคริสโทแบไลต์ (cristobalite) อย่างไรก็ตามกลไกการเผาผนึกที่จะได้ผลิตภัณฑ์กระเบื้องเซรามิกผสมเศษหินชนวนตามเกณฑ์ มอก. ยังไม่ชัดเจนจึงคิดทดลองหาอุณหภูมิเผาที่เหมาะสมและส่วนผสมของวัตถุดิบ อันเป็นแนวทางหนึ่งในการพัฒนาผลิตภัณฑ์เชิงนิเวศน์ให้เหมาะกับภาวะอากาศโลกเปลี่ยนแปลงและการประหยัดพลังงานของประเทศ

วิธีการ วัสดุและอุปกรณ์

วัตถุดิบที่ใช้

วัสดุที่ใช้ประกอบด้วย ซีโอโลดซ์ซื้อจากเอกชน ส่วนหินชนวนจากแหล่งหินที่เขابันไคมา อ.ปากช่อง จ.นครราชสีมา มีสีเทาเข้มถึงดำ คราบสนิมเหล็กแทรกตามรอยแยกและแนวแตกทั่วไปคัดออก ตรวจชนิดแร่ที่ประกอบในหินชนวนด้วยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray Diffraction -XRD) ผลแสดงในตารางที่ 1 สมบัติทางความร้อนเชิงอนุพันธ์ (Differential Thermal Analysis - DTA) มีจุดเปลี่ยนวัฏภาคดูดความร้อนสูงสุดที่อุณหภูมิ 1016.85°C [3] จึงกำหนดอุณหภูมิที่ใช้ช่วง 1100-1200 °C

การเตรียมและอัตราส่วนผสมของแผ่นกระเบื้อง

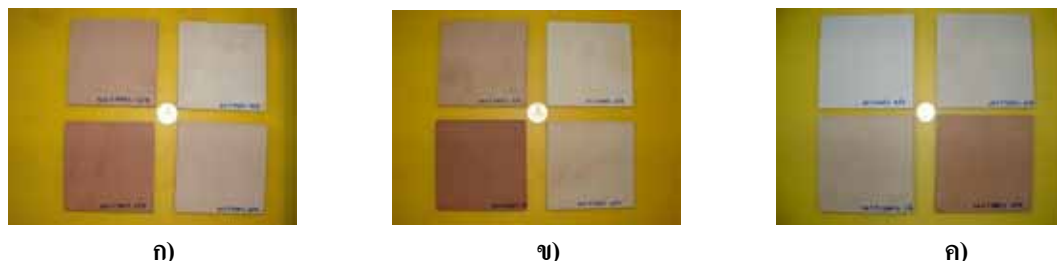
บดและคัดขนาดหินชนวนขนาดเล็กกว่า 75 ไมครอน ด้วยเครื่องบดลูกบอลกระแทก (Ball mill) เป็นเวลา 12 ชั่วโมง ซีโอโลดซ์สำเร็จรูปขนาด 45 ไมครอน ผสมวัตถุดิบตามที่กำหนดไว้ในตารางที่ 2 หนักประมาณ 200 กรัม/แผ่น ไปอัดขึ้นรูปเป็นแผ่นกระเบื้องด้วยเครื่องอัดไฮดรอลิก ที่แรงดัน 100 บาร์ เวลาอัดแช่ 10 วินาที ตบแต่งขอบและผิวหน้า กระเบื้องดิบให้เรียบและเสมอกัน นำไปอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง นำกระเบื้องมาวัดขนาดและชั่งน้ำหนักก่อนการเผา เพื่อเป็นข้อมูลในการทดสอบสมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกล

ตารางที่ 1 ปริมาณอย่างคร่าวที่คำนวณจากพื้นที่ได้กราฟ XRD และชนิดแร่ประกอบของวัตถุดิบที่ใช้

ชนิดแร่	ซีโอโลดซ์โดยน้ำหนัก (%)	หินชนวนโดยน้ำหนัก (%)
ไบโอไทต์ (biotite)	21.02	-
แคลไซต์ (calcite)	-	70.05
ไฮดรอกซีอะพาไทต์ (hydroxylapatite)	-	14.08
ควอตซ์ (quartz)	12.97	9.86
แอนดีซีน (andesine)	35.72	-
เฮอร์ซีนไนต์ (hercynite)	-	6.01
ไดออปไซด์ (diopside)	29.94	-
ระบุชนิดแร่ไม่ได้ (unidentified)	0.35	-

ตารางที่ 2 อัตราส่วนผสมของกระเบื้องที่ใช้ศึกษา

รหัสสูตรตัวอย่าง	อัตราส่วนผสมโดยน้ำหนัก (%)		อัตราส่วนน้ำโดยน้ำหนักแห้ง (%)
	ซีโอโลดซ์	ผงหินชนวน	
Z100SP0	100	0	12.5
Z90SP10	90	10	11.5
Z80SP20	80	20	10.5
Z70SP30	70	30	9.5



ภาพที่ 1 ตัวอย่างกระเบื้องที่อัตราส่วนต่างกัน เผาที่อุณหภูมิ ก) 1,100°C ข) 1,150°C และ ค) 1,200°C

เผาในเตาเผาไฟฟ้าตามอุณหภูมิที่กำหนดไว้ ให้อัตราความร้อนแก่เตาเผาเริ่มจากอุณหภูมิห้อง (25°C) ด้วยอัตราความร้อน 2°C/นาที่ จนถึงอุณหภูมิ 500°C แช่วิธีนาน 30 นาที ซึ่งทำให้ของเหลวบางชนิดยังหลงเหลือในโครงสร้างเนื้อซีโอไลต์ระเหยออกไป หลังจากนั้นให้อัตราความร้อน 2°C/นาที่ จนถึงอุณหภูมิสูงสุดที่ตั้งไว้ แช่วิธีนาน 30 นาที แล้วปล่อยให้เย็นในเตาเผา วัดขนาดและชั่งน้ำหนักหลังเผา (ภาพที่ 1)

แรงกดตรงกลาง มีหน้ากว้าง 100 มม. และหั่วกดทดสอบเลื่อนลงมาด้วยความเร็ว 1.8 มม./นาที่ วิเคราะห์ของเนื้อกระเบื้องด้วยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (XRD) ส่องกราดในช่วง $2\theta = 5-90$ องศา โครงสร้างจุลภาคของแผ่นตัวอย่างที่เผาตรวจด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) เครื่อง Quanta400, FEI

ผลการวิจัยและอภิปรายผล

การหดและขยายตัวหลังเผา

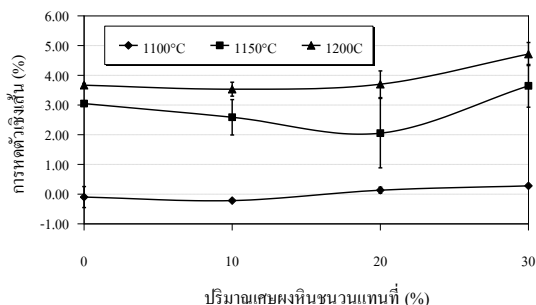
พบว่าการหดตัวเชิงเส้นเพิ่มสูงขึ้นตามอุณหภูมิในการเผาและปริมาณผงหินชนวนเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกับค่าความหนาแน่นรวม (ภาพที่ 2 ก) ได้ค่าเฉลี่ยอยู่ในช่วงร้อยละ -0.22 - 4.72 ทำนองเดียวกับการหดตัวเชิงปริมาตรซึ่งได้ค่าร้อยละ -10.73 - 15.01 ที่อุณหภูมิเผา 1,100°C ไม่เติมผงหินชนวนและเติมร้อยละ 10 กระเบื้องมีการขยายตัว ทำนองเดียวกับกระเบื้องหินชนวนผสมเต็มแก่ลบสีค่าปริมาตรหลังเผายู่ระหว่างร้อยละ 3.90-7.20 [3]

ความหนาแน่นรวม

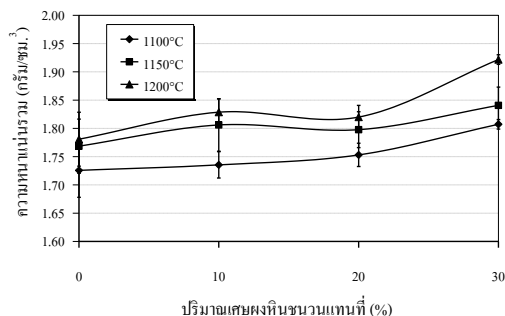
ค่าความหนาแน่นรวมเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่เผาและปริมาณผงหินชนวนที่เติม ซึ่งมีค่าเฉลี่ยอยู่ในช่วง 1.73-1.92 กรัม/ลบ.ซม. (ภาพที่ 2 ข) มีค่าน้อยกว่าค่าความหนาแน่นรวมเฉลี่ยของกระเบื้องซีโอไลต์อยู่ในช่วง 1.63 -2.46 กรัม/ลบ.ซม. ขณะที่กระเบื้องหินชนวนผสมแก่ลบสีมีค่า 1.50-2.85 กรัม/ลบ.ซม. [3] แสดงถึงอิทธิพลของอุณหภูมิเผาต่อการเผาไหม้และผงหินชนวนที่เติมลงทำหน้าที่คล้ายเป็นเชื้อถลุง (flux) ช่วยให้การหลอมเร็วขึ้นหดตัวมากขึ้น ในงานวิจัยของ de' Gennaro et al. [14] เติมซีโอไลต์เพิ่มขึ้นในกระเบื้องเนื้อหินพอร์ซเลน มีค่าความหนาแน่นลดลงในช่วง 2.11-2.41 กรัม/ลบ.ซม. และลดลงตามอุณหภูมิเผาไหม้ที่เพิ่มขึ้น (1,120 - 1,180°C)

การดูดซึมน้ำ

ค่าการดูดซึมน้ำอยู่ในช่วงร้อยละ 9.16 - 13.88 ไม่อยู่ในเกณฑ์ของกระเบื้องประเภทดูดซึมน้ำปานกลางค่อนข้างต่ำตามมาตรฐาน มอก. 37-2529 โดยเฉพาะอุณหภูมิ 1,100°C ค่าการดูดซึมน้ำค่อนข้างสูงมาก อันเนื่องจากอุณหภูมินี้ยังไม่ทำให้เนื้อกระเบื้องหลอมปิดรูพรุนสนิท จึงทำให้ดูดซึมน้ำมากขึ้น แต่เมื่ออุณหภูมิเผาสูงขึ้น ก็ส่งผลให้การดูดซึมน้ำมีแนวโน้มลดลง (ภาพที่ 3 ก) คำนี้อาจใกล้เคียงกับกระเบื้องเซรามิกผงหินชนวนเต็มแก่ลบสีค่าร้อยละ 0.06 - 13.63 [3] สำหรับ de' Gennaro et al. [14] ได้ค่าการดูดซึมน้ำลดลงตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น การดูดซึมน้ำก็มีแนวโน้ม



ก)



ข)

ภาพที่ 2 การแปรผันของกระเบื้อง ก) ความหนาแน่นรวม และ ข) การหดและขยายตัวเชิงเส้น

เพิ่มขึ้นตามปริมาณซีโอไลต์แทนที่เพิ่มขึ้น เมื่อเทียบกับเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมกระเบื้องปูพื้น มอก. 37-2529 พบว่ากระเบื้องซีโอไลต์ล้วนและสูตรผสมผงหินชนวนร้อยละ 10 และ 20 เผาที่อุณหภูมิ 1,150 °C และ 1,200 °C อยู่ในเกณฑ์กำลังดี

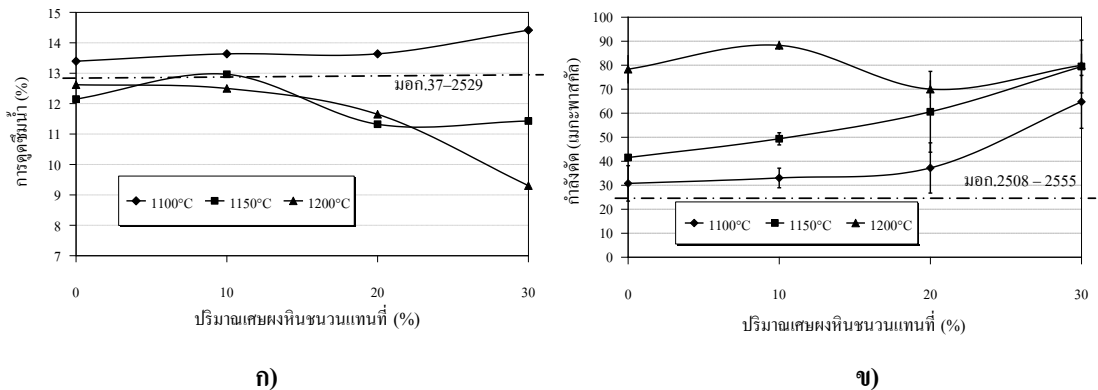
มีค่าเฉลี่ยอยู่ในช่วง 33.02 - 88.27 เมกะพาสคัล (ภาพที่ 3 ข) ทำนองเดียวกับค่าความแข็งแรงกระดอน หากพิจารณาเกณฑ์กระเบื้องดินเผาปูพื้นตาม มอก. 2508 - 2555 ประเภทดูดซึมน้ำปานกลางค่อนข้างต่ำ ที่ต้องมีกำลังดีไม่น้อยกว่า 25 เมกะพาสคัล กระเบื้องทดสอบครั้งนี้ได้ผลตามเกณฑ์ทุกอุณหภูมิและทุกอัตราส่วนเทียบกับกระเบื้องผงหินชนวนเดิมแล้ว แกลบดำได้ค่าเฉลี่ยในช่วง 26.60 - 41.37 เมกะพาสคัล [3] ส่วน de' Gennaro et al. [14] ทำกระเบื้องเนื้อหินพอร์ซเลน เผาที่อุณหภูมิ 1,120 - 1,180°C ได้ค่าโมดูลัสแตกหัก 27.6 - 51.8 เมกะพาสคัล โดยที่อุณหภูมิ 1,200°C กระเบื้องเซรามิกซีโอไลต์ผสมหินชนวนร้อยละ 10 มีค่ากำลังดีสูงสุด ค่ากำลังดีทุกสูตรและทุกอุณหภูมิล้วนอยู่ในเกณฑ์กระเบื้องปูพื้นและกระเบื้องผนังประเภทภายนอก

การดูดซึมน้ำ

ค่าการดูดซึมน้ำอยู่ในช่วงร้อยละ 9.16 - 13.88 ไม่อยู่ในเกณฑ์ของกระเบื้องประเภทดูดซึมน้ำปานกลาง

ค่อนข้างต่ำตามมาตรฐาน มอก. 37-2529 โดยเฉพาะอุณหภูมิ 1,100°C ค่าการดูดซึมน้ำค่อนข้างสูงมาก อันเนื่องจากอุณหภูมินี้ยังไม่ทำให้เนื้อกระเบื้องหลอมปิดรูพรุนสนิท จึงทำให้ดูดซึมน้ำมากขึ้น แต่เมื่ออุณหภูมิเผาสูงขึ้น ก็ส่งผลให้การดูดซึมน้ำมีแนวโน้มลดลง (ภาพที่ 3 ก) ค่านี้ใกล้เคียงกับกระเบื้องเซรามิกผงหินชนวนเดิมแล้ว แกลบดำมีค่าร้อยละ 0.06 - 13.63 [3] สำหรับ de' Gennaro et al. [14] ได้ค่าการดูดซึมน้ำลดลงตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น การดูดซึมน้ำก็มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณซีโอไลต์แทนที่เพิ่มขึ้น เมื่อเทียบกับเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมกระเบื้องปูพื้น มอก. 37-2529 พบว่ากระเบื้องซีโอไลต์ล้วนและสูตรผสมผงหินชนวนร้อยละ 10 และ 20 เผาที่อุณหภูมิ 1,150°C และ 1,200°C อยู่ในเกณฑ์กำลังดี

ภาพมีค่าเฉลี่ยอยู่ในช่วง 33.02 - 88.27 เมกะพาสคัล (ภาพที่ 3 ข) ทำนองเดียวกับค่าความแข็งแรงกระดอน หากพิจารณาเกณฑ์กระเบื้องดินเผาปูพื้นตาม มอก. 2508-2555 ประเภทดูดซึมน้ำปานกลางค่อนข้างต่ำ ที่ต้องมีกำลังดีไม่น้อยกว่า 25 เมกะพาสคัล กระเบื้องทดสอบครั้งนี้ได้ผลตามเกณฑ์ทุกอุณหภูมิและทุกอัตราส่วนเทียบกับกระเบื้องผงหินชนวนเดิมแล้ว แกลบดำได้ค่าเฉลี่ยในช่วง 26.60 - 41.37 เมกะพาสคัล [3] ส่วน de' Gennaro et al. [14] ทำกระเบื้องเนื้อหินพอร์ซเลน



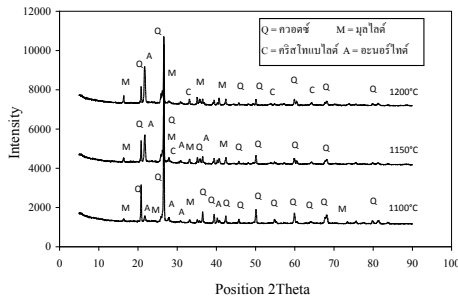
ภาพที่ 3 สมบัติของกระเบื้องแปรรูป ก) การดูดซึมน้ำ และ ข) กำลังตัด

เผาที่อุณหภูมิ 1,120 – 1,180°C ได้ค่าโมดูลัสแตกหัก 27.6–51.8 เมกะพาสคัล โดยที่อุณหภูมิ 1,200°C กระเบื้องเซรามิกซีโอโลइटผสมหินชนวนร้อยละ 10 มีค่ากำลังดัดสูงสุด ค่ากำลังดัดทุกสูตรและทุกอุณหภูมิล้วนอยู่ในเกณฑ์กระเบื้องปูพื้นและกระเบื้องบุผนังประเภทภายนอก

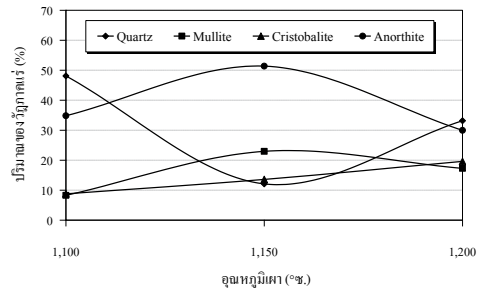
การเกิดวิวัฒนาการของแร่และโครงสร้างจุลภาค

ผงหินชนวนเป็นหินแปรที่สภาพเสถียรแล้วที่สามารถแปลงรูปสู่สถานะเนื้อผลึกเสถียรได้ โดยการเผา เรียกว่า การเปลี่ยนสภาพแก้วเป็นผลึก (devitrification) หรือการตกผลึก ความแข็งแรงของผงหินชนวนมีบทบาทสำคัญต่อกระบวนการเผาผนึกและแข็งตัวขึ้นในเนื้อเซรามิกหินชนวนกับซีโอไลต์ วัฏภาคเหลวก่อให้เกิดการคัดแปรกลไกการเผาผนึกสู่กลไกการเผาผนึกวัฏภาคของของเหลว จากโครงสร้างจุลภาคการเกิดความหนาแน่นภายในสันนิษฐานประกอบสามขั้นตอน คือ 1) การไหลของของเหลว 2) สารละลาย/การตกตะกอนใหม่ และ 3) การเผาผนึกสถานะของแข็ง ในช่วงขั้นตอนแรก ของเหลวไหลเข้าไปในสภาพรูเล็ก เนื่องจากความดันในรูเล็ก (capillary pressure) แตกต่างกันระหว่างรูเล็กกับรูใหญ่ ดังนั้นอนุภาคเนื้อสามารถกระจายตัวใหม่โดยการไหลของเหลว [13] การจัดเรียงตัวใหม่ของอนุภาคมาจากการปรากฏการณ์นี้

ในกระเบื้องที่มีผงหินชนวนมาก (20-30%) ทำให้เกิดความหนาแน่นสูงขึ้นที่อุณหภูมิต่ำ Costa Oliveira et al. [9] แสดงให้เห็นว่าการเติมผงหินชนวนแก่ระบบเซรามิกแก้วอุณหภูมิการเผาผนึกได้ลดลงอย่างรวดเร็ว [15] ความพรุนและความหนาแน่นของตัวอย่างมีผงหินชนวนมากแสดงแนวโน้มแบบฉับของเนื้อเซรามิกเผาผนึกโดยกลไกวัฏภาคของเหลว [13] ที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิส่งผ่านสู่แก้วแก้วอ่อนตัวได้ลดความพรุนเปิดและการหดตัวเชิงเส้นเพิ่มขึ้น ผงหินชนวนที่อ่อนอยู่ที่ขอบเม็ดของโพรงเนื้อซีโอไลต์ดึงดูดซึ่งกันและกัน อันนำไปสู่การหดตัวสูง ส่วนหินชนวนมาก (30%) เติมนในซีโอไลต์ได้เน้นการตกผลึกของวิฏกาคมุลไลต์ ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_{13}$) ดังแสดงในภาพที่ 4 ก) ช่วงผลึกอยู่ตัวเหมาะสมสำหรับแผ่นตัวอย่าง เมื่อความพรุนเปิดค่าเข้าใกล้ศูนย์สุดและการหดตัวเชิงเส้นเข้าสู่สถานะทรงตัวที่อุณหภูมิ 1,150 °C การเผาเหนือช่วงการคงผลึกยังผลให้เพิ่มความพรุนและการหดตัววงที่ เนื่องจากการแปลงรูปจากแก้วสู่ผลึกแร่คริสโทแบลไลต์ ที่อุณหภูมิ 1,100 °C ตัวอย่างหินชนวนร้อยละ 10 แสดงการขยายตัวเชิงเส้นและความพรุนเพิ่มขึ้น เนื่องจากการเนื้อซีโอไลต์เผาผนึกไม่สมบูรณ์ ผลวิเคราะห์แร่ที่เกิดขึ้นหลังการเผาด้วยวิธี XRD ของกระเบื้องที่ผสมผงหินชนวนร้อยละ 30



ก)



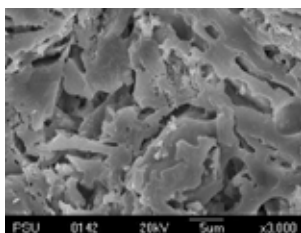
ข)

ภาพที่ 4 ลายพิมพ์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของกระเบื้องซีโอไลต์ผสมเศษผงหินชนวนร้อยละ 20 เผาที่อุณหภูมิ 1,100, 1,150 และ 1,200°C และ ข) ปริมาณและชนิดวิภาคแร่เกิดในกระเบื้อง

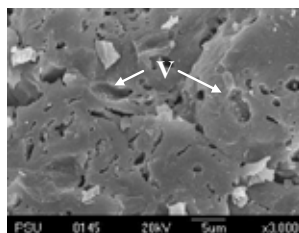
อุณหภูมิเผาทั้งสาม พบว่าอุณหภูมิเผายิ่งเพิ่ม ปริมาณ วิภาคแร่ควอตซ์ลดลง ปริมาณ คริสโทแบไลต์เพิ่มขึ้น ส่วนปริมาณแร่มุลไลต์และอะนอร์ไทต์ ($\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$) เพิ่มขึ้นจนถึงอุณหภูมิ 1,150°C และลดลงที่อุณหภูมิ 1,200°C (ภาพที่ 4 ก) เนื่องจากปริมาณธาตุ Al_2O_3 ได้พร่องลงจนไม่สามารถที่ก่อตัวแร่ได้อีกต่อไป

ในแง่กลับกันปริมาณควอตซ์ลดลงก็เนื่องจาก อุณหภูมิที่สูงขึ้น ทำให้ SiO_2 ของควอตซ์บางส่วนไป รวมกับ Al_2O_3 ก่อตัวขึ้นเป็นแร่ที่เหลืออีกทั้ง 2 ชนิด คือ มุลไลต์และอะนอร์ไทต์ ดังนั้นเมื่อ Al_2O_3 หหมด SiO_2 ได้รับความร้อนเพิ่มขึ้นจึงก่อตัวเป็นคริสโทแบไลต์ ซึ่งแร่ทั้ง 3 ชนิด ได้เสริมความแข็งแรงแก่กระเบื้อง ผลวิเคราะห์พบอีกว่าหากอุณหภูมิสูงถึง 1,200°C. ปริมาณแร่มุลไลต์และอะนอร์ไทต์ลดลง แต่แร่คริสโทแบไลต์เพิ่มขึ้น (ภาพที่ 4 ข) กระเบื้องที่มีซีโอไลต์สูง (90-100%) ความพรุนเพิ่มขึ้นและความหนาแน่นลดลง

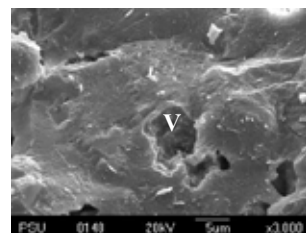
พร้อมกับอุณหภูมิเผาเพิ่มขึ้นในช่วง 1,150°C และ 1,200°C ให้แก่วัสดุจากการสลายตัวของ หินชนวน ซึ่งแนวโน้มโพรงขยายตัว การรวมกันก่อตัว วิภาคของเหลวและการสลายตัวของหินชนวนให้ ความพรุนรวมและการขยายตัวสูงขึ้น เนื่องจาก แก๊สได้ขับออกจากที่กักไว้ในโพรงปิดด้วยวิภาค ของเหลว (ภาพที่ 5 ค) ส่วนการเปลี่ยนสภาพแก้วเป็น ผลึกเริ่มจากปริมาณของวิภาคแก้วลดลงภายหลัง บรรดาโพรง (V) และชั้นระหว่างซีโอไลต์ด้านในดูดซับ บริเวณหัดตัวครั้งที่สองปรากฏขึ้นที่ 1,150 °C อันเนื่อง มาจากการงอกของผลึกแร่อะนอร์ไทต์ ซึ่งก่อตัวขึ้น ทรงสี่เหลี่ยมคล้ายจาน ขั้นตอนการเผาไหม้ของ ตัวอย่างผสมหินชนวนร้อยละ 20 และ 30 ความพรุน เริ่มลดลง พฤติกรรมนี้สืบเนื่องจากการตกผลึกของแร่ อะนอร์ไทต์ และเปลี่ยนแปลงของการเผาไหม้จากการ เผาไหม้วิภาคของเหลวสู่กลไกการเผาไหม้ในสภาวะ ของแข็งทั่วไป



ก)



ข)



ค)

ภาพที่ 5 โครงสร้างจุลภาคของรอยแตกหน้าตัดข้างเนื้อกระเบื้องซีโอไลต์ผสมเศษผงหินชนวน ด้วยกำลังขยาย 3000 เท่า อุณหภูมิเผาที่ ก) 1,100°C ข) 1,150°C และ ค) 1,200°C

สรุปผลการทดลอง

ผลการศึกษาใช้ซีโอไลต์อย่างเดี่ยวหรือผสมกับเศษหินชนวนจนถึงร้อยละ 30 สามารถผลิตกระเบื้องเซรามิกด้วยกระบวนการเผาเซรามิกแบบดั้งเดิม กระบวนการเผาผนึกของส่วนผสมซีโอไลต์กับเศษหินชนวนได้ผ่านกลไกวัฏภาคของเหลวหนืดที่อุณหภูมิสูงกว่า 1,100 °C วัฏภาคของเหลวช่วยให้เผาผนึกและให้พลังงานจลน์แก่กระเบื้องให้หนาแน่นเร็วขึ้น ดังนั้นวัสดุเซรามิกสามารถผลิตจากเศษหินชนวนโดยการเผาผนึกผงในราคาถูกในแนวทางกระบวนการเผาผนึกแบบเดิมที่อุณหภูมิเหนือจุดอ่อนตัว พลิกแร่มูลสัตว์ ปรากฏในเนื้อกระเบื้องเซรามิกผสมผงหินชนวนค่อยๆ เพิ่มขึ้น และเกือบแทนที่ด้วยอะนอร์ไทต์ในแผ่นที่เดิมหินชนวนปริมาณร้อยละ 30 การเติมผงหินชนวนช่วยควบคุมการขยายตัวหลังเผาผนึกได้ ความคงทนต่อการดัดและด่างที่สูง รวมทั้งเชื้อราและไลเคน กระเบื้องสามารถผสมกับเศษหินชนวนผลิตเชิงพาณิชย์ได้ง่าย ช่วยลดค่าเวลาและเพิ่มผลผลิตดำเนินการในสายการผลิตให้มีประสิทธิภาพ

เอกสารอ้างอิง

[1] Payra, P. and Dutta, P.K. (2003). **Zeolites: A Primer in Handbook of zeolite science and technology**. Marcel Dekker Inc.

[2] คุณพล ตันนโยภาส. (2536). **คุณสมบัติทางธรณีเชิงกลของหินอ่อนจังหวัดยะลา** การประชุมใหญ่ทางวิชาการประจำปี 2536 วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย หน้า 1081 – 1094.

[3] 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(1), 10-20.

[4] คุณพล ตันนโยภาส ธรณิศร จิตรพิศาล และสุชาติ จันทรมณีย์. (2553). **สมบัติของกระเบื้องเซรามิก**

ที่ทำจากหินชนวนเดิมแล้วเคลือบดำ การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ครั้งที่ 8 22-23 เมษายน 2553 หน้า 841-846.

[5] Souza, A.J., Pinheiro, B.C.A. and Holanda, J.N.F. (2010). Recycling of gneiss rock waste in the manufacture of vitrified floor tiles, **Journal of Environmental Management**. 91(3), 685-689.

[6] Catarino, L., Sousa, J., Martins, I.M., Vieira, M.T. and Oliveira, M.M. (2003). Ceramic products obtained from rock wastes, **Journal of Materials Processing Technology**. 143–144, 843-845.

[7] Vieira, M.T., Barreiros, F.M. and Catarino, L. (2003). Recovering inorganic wastes, **Journal of Materials Processing Technology**. 143–144, 454–457.

[8] Campos, M., Velasco, F., Martínez, M.A. and Torralba, J.M. (2004). Recovered slate waste as raw material for manufacturing sintered structural tiles. **Journal of the European Ceramic Society**. 24(5), 811-819.

[9] Costa Oliveira, F.A., Livramento, V. and Delmas, F. (2008). Novel mullite-based ceramics manufactured from inorganic wastes I. Densification behaviour. **Journal of Materials Processing Technology**. 196 (1–3), 101-108.

[10] de F. Souza, L.P. and Mansur, H.S. (2004). Production and characterization of ceramic pieces obtained by slip casting using powder wastes, **Journal of Materials Processing Technology**. 145(1), 14-20.

[11] Mansur, A.A.P., Peres, A.E.C., Palhares, L. and Mansur, H.S. (2006). Study of pore size

- distribution of slate ceramic pieces produced by slip casting of waste powders, **Minerals Engineering**. 19(5), 525-527.
- [12] Vieira, S.C., Ramos, A.S. and Vieira, M.T. (2007). Mullitization kinetics from silica- and alumina-rich wastes. **Ceramics International**. 33(1), 59-66.
- [13] German, R.M. (1996). **Sintering theory and practice**. New York (NY), John-Wiley & Sons, Inc.
- [14] de' Gennaro, R., Cappelletti, P., Cerri, G., de' Gennaro, M., Dondi, M., Guarini, G., Langella, A. and Naimo, D. (2003). Influence of zeolites on the sintering and technological properties of porcelain stoneware tiles. **Journal of the European Ceramic Society**. 23(13), 2237-2245.
- [15] Tonnayopas, D., Kooptarnond, K. and Masae, M. (2009). **Effect of firing temperature and para rubber wood ash on the quarry granite waste roofing tiles body**. 4th Int. Conf. Eng. Tec.-ICET 2009. April 28-30 2009, Hotel Park, Novi Sad, Serbia, pp. 257-262.