



## การรีไซเคิลดินปนเปื้อนสนิมเหล็กเพื่อผลิตกระเบื้องเซรามิก

### THE RECYCLING OF SOIL CONTAMINATED WITH IRON RUST FOR FABRICATE CERAMIC TILES

เสรีย์ ตู๊ประกาย

รองศาสตราจารย์, สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยรามคำแหง

\*Corresponding author; E-mail: seree.t@ru.ac.th

#### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาสมบัติทางเคมีของดินปนเปื้อนสนิมเหล็ก หาค่าอัตราส่วนผสมของดินปนเปื้อนสนิมเหล็กกับดินและวัสดุอื่น ๆ ที่ใช้ผสมในเนื้อดินสำหรับเผาที่อุณหภูมิสูง สำหรับการพัฒนาระเบียงเซรามิก ถูกนำมาทดสอบสมบัติทางเคมีและทางกายภาพ ผลวิเคราะห์ทางเคมี พบธาตุที่มากที่สุดเป็นโลหะเหล็ก (Fe) มีปริมาณ 282,715 mg/L (141,357.5 mg/kg ดินปนเปื้อน) ดินปนเปื้อนสนิม มีองค์ประกอบ ดังนี้ อลูมินา ( $Al_2O_3$ ) เหล็กออกไซด์ ( $Fe_2O_3$ ) โพแทสเซียมออกไซด์ ( $K_2O$ ) ไทเทเนียมไดออกไซด์ ( $TiO_2$ ) แมงกานีสออกไซด์ ( $MnO_2$ ) แมกนีเซียมออกไซด์ ( $MgO$ ) ฟอสฟอรัสออกไซด์ ( $P_2O_5$ ) คลอไรด์ (Cl) แคลเซียมออกไซด์ ( $CaO$ ) โครเมียมออกไซด์ ( $Cr_2O_3$ ) นิกเกิลออกไซด์ ( $NiO$ ) คอปเปอร์ออกไซด์ ( $CuO$ ) ซิงค์ออกไซด์ ( $ZnO$ ) และ ซัลเฟอร์ออกไซด์ ( $SO_3$ ) โดยพบ  $Fe_2O_3$  มากที่สุด ในช่วง 72.04-78.85 % โดยน้ำหนัก โมเลกุล และน้ำหนักที่หายไป (L.O.I.) ร้อยละ 14.655 ค่าความหนาแน่นเฉลี่ย 1,632.50  $kg/m^3$  ค่าความชื้นเฉลี่ย 6.72 % ซึ่งเป็นดินที่มีค่าความหนาแน่นใกล้เคียงดินปกติทั่วไปอยู่ในช่วง 1,492  $kg/m^3$  สีของเนื้อดินเป็นสีน้ำตาลแดงอิฐ เมื่อพัฒนาเป็นแท่งเซรามิกแล้วสมบัติทางกายภาพ พบว่า หดตัวมากที่สุด ที่ร้อยละ 8.97 ที่สูตร P60 เผาที่อุณหภูมิ 1,100 องศาเซลเซียส สีของเนื้อดินหลังการเผาทั้งหมดจำนวน 3 สูตรพบว่า มีสีตั้งแต่ น้ำตาลเข้มออกส้ม เป็นไปตามอัตราส่วนผสมของดินปนเปื้อนสนิมที่ให้สีน้ำตาลแดง และความแข็งแรงเมื่อสูตรดินที่ผสมดินปนเปื้อนมากขึ้นจะส่งผลทำให้ความแข็งแรงลดลง ส่วนอุณหภูมิมากขึ้นทำให้มีความแข็งแรงมากขึ้น โดยค่ากำลังรับแรงคดของส่วน สูตร P80 ที่มากที่สุด มีค่าเท่ากับ 77.07  $kg/cm^2$  ที่อุณหภูมิการเผา 1,100 องศาเซลเซียส กระเบื้องสูตรดิน P80 สามารถขึ้นรูปได้มีการดูดซึมน้ำเกินกว่า 10 % รับแรงโมดูลัสแตกร้าวได้น้อยกว่า 7 นิวตันต่อตารางเมตร ตามมาตรฐานอุตสาหกรรม (มอก. 2508-2555)

คำสำคัญ: การรีไซเคิล; ดินปนเปื้อนสนิมเหล็ก; กระเบื้องเซรามิก

#### ABSTRACT

The purpose of this research is to study the chemical properties of soil contaminated with iron rust. The study aims to determine the optimal mixing ratios of iron rust-contaminated soil with other soil and raw materials used in high-temperature firing for the development of ceramic tiles. The chemical analysis revealed that iron (Fe) was the element present in the highest quantity, with a concentration of 282,715 mg/L (141,357.5 mg/kg of contaminated soil). The composition of the iron-contaminated soil includes aluminum oxide ( $Al_2O_3$ ), iron oxide ( $Fe_2O_3$ ), potassium oxide ( $K_2O$ ), titanium dioxide ( $TiO_2$ ), manganese dioxide ( $MnO_2$ ),

magnesium oxide (MgO), phosphorus pentoxide ( $P_2O_5$ ), chloride (Cl), calcium oxide (CaO), chromium oxide ( $Cr_2O_3$ ), nickel oxide (NiO), copper oxide (CuO), zinc oxide (ZnO), and sulfur trioxide ( $SO_3$ ). Among these components,  $Fe_2O_3$  was found to be the most abundant, ranging from 72.04% to 78.85 % by molecular weight and loss of ignition (L.O.I.) 14.655%. The average density of the soil  $1,632.50 \text{ kg/m}^3$ , the average moisture content 6.72 %. These values indicate that the density of the soil is similar to that of normal soil, which typically falls within the range of  $1,492 \text{ kg/m}^3$ . The color of the soil is reddish-brown, resembling fired bricks. After the soil was developed into ceramic tiles, the physical properties were evaluated. The highest shrinkage, at 8.97%, was observed in the P60 formula fired at a temperature of  $1,100 \text{ }^\circ\text{C}$ . The color of the tiles after firing varied from dark brown to orange, depending on the mixing ratio of the iron-contaminated soil, which contributes to the red-brown color. Increasing the proportion of iron-contaminated soil resulted in decreased tile strength, while higher firing temperatures increased tile strength. The highest flexural strength value, at  $77.07 \text{ kg/cm}^2$ , was obtained from the P80 formula fired at  $1,100 \text{ }^\circ\text{C}$ . The P80 tile formula exhibited water absorption of more than 10% and a modulus of rupture (MOR) of less than  $7 \text{ N/m}^2$ , meeting the industrial standards (TSIS 2508-2555).

**KEYWORDS:** Recycling; Rust Iron Contaminated Soil; Ceramic Tiles

## 1. บทนำ

ดินปนเปื้อนสนิมเหล็กเป็นกากตะกอนอุตสาหกรรมจากอุตสาหกรรมการผลิตเหล็กรูปพรรณ [1] ดังแสดงในรูปที่ 1 โดยเริ่มจากกระบวนการหลอมเศษเหล็กด้วยเตาไฟฟ้า (electric arc furnace) ทำให้เกิดดินปนเปื้อนสนิมเหล็กจากกระบวนการร่อนเศษเหล็ก โดยใช้เครื่องจักรในการร่อน รหัส waste 17 05 03 HZ contaminated soil (ดินกับกองเศษเหล็ก) จำเป็นต้องกำจัดด้วยวิธีกำจัดวัตถุอันตรายในเตาเผา ทำให้ต้องเสียค่ากำจัด หากนำมาผ่านกระบวนการร่อนปรับปรุงดินปนเปื้อนและผสมให้เหมาะสมสามารถใช้เป็นเนื้อดินเซรามิก เพื่อการผลิตภัณฑ์กระเบื้องเซรามิก ใช้งานงานก่อสร้าง และสามารถกำจัดกากตะกอนที่เกิดขึ้นด้วยการสร้างผลิตภัณฑ์ทางเซรามิกอื่น ๆ ตามมาหากเนื้อดินมีสี และคุณสมบัติที่ดี มีความแข็งแรง



รูปที่ 1 ดินปนเปื้อนสนิมเหล็กจากโรงงานรีไซเคิล จังหวัดพิษณุโลก

เทคโนโลยีการรีไซเคิลของเสียในอุตสาหกรรมกระเบื้องเซรามิก [2] และสมรรถนะของเทคนิคการผลิตกระเบื้องเซรามิกมีผลจากตัวผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการนำของเสียมาเป็นส่วนผสม ในประการแรกต้องทำการทดสอบข้อจำกัดทางเทคนิคของกระบวนการผลิตและกากของเสียที่นำมาใช้ในกระบวนการผลิตให้ได้กระเบื้องเซรามิก ประการที่สอง ต้องพิจารณารายละเอียดของ

แหล่งที่มาของของเสียที่มีความหลากหลาย ซึ่งมีผลโดยตรงต่อตัวกระเบื้องเซรามิกที่จะผลิตขึ้น โดยต้องมีส่วนประกอบของของเสียหรือกากของเสียจากภาคอุตสาหกรรมที่เหมาะสม ประการสุดท้ายเทคโนโลยีการรีไซเคิลมีแนวโน้มของความเป็นไปได้ที่ต้องจัดการการผลิตในปริมาณมาก ๆ โดยเป้าหมายที่สำคัญของการออกแบบกระเบื้องเซรามิกจากของเสีย นั้นเป็นไปตามปัจจัยดังนี้ 1) เกิดผลิตภัณฑ์ใหม่ หรือทดแทนวัสดุธรรมชาติ 2) เป็น Light-firing และ dark-firing bodies 3) เป็น Dark-firing bodies สำหรับ red stoneware, porous หรือ split tiles 4) บทบาทเทคโนโลยี light-firing batches (flux, filler, ส่วนประกอบ plastic) 5) ผลิตภัณฑ์จากกากของเสีย 100% ของของเสีย หรือผสมกันระหว่างชนิดของกากของเสียหรือเพิ่มกากของเสียกับส่วนผสมวัสดุอื่น (ผสมกันระหว่างกากอุตสาหกรรมที่ต่างชนิดกันเป็นชุด ๆ)

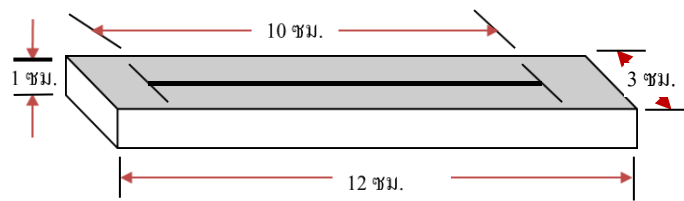
งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการใช้ตะกอนเหลือทิ้งหรือของเหลือทิ้งจากกระบวนการผลิต โดยนำมาพัฒนาพร้อมกับเนื้อดินเพื่อให้สามารถผลิตผลิตภัณฑ์เซรามิกใหม่ ได้แก่ การศึกษาใช้ประโยชน์ของดินตะกอนประปา [3, 4] การศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพของดินเหนียวแฉวมวลเบาที่ทำจากโคละตอมไมต์หรือดินเบาผสมโพลีเมอร์ชนิดเติมฟองอากาศ [5] การศึกษาผลการใช้เศษแก้วเป็นสารเติมแต่งต่อสมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกลของอิฐดินเผา [6] สำหรับงานวิจัยในต่างประเทศ [7] ที่ได้มีการวิจัยนำของเหลือทิ้งมาผสมกับเนื้อดินผลิตเป็นก้อนอิฐดินเผา (fired clay bricks : FCB's) โดยสามารถสรุปตัวแปรที่ศึกษาได้ดังนี้ การหาเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของธาตุดังประกอบหาโดย X-ray diffraction (XRD) การเตรียมตัวอย่างหรือการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์โดยขึ้นรูปด้วยการกด (pressing) ด้วยการดัน (extrusion) หรือการใช้แบบหล่อ (casting) การเตรียมตัวอย่างจากของเสียเพื่อนำมาใช้ผสมกับเนื้อดินต้องทำการบดขยี้ด้วยเครื่องมือให้เป็นผงก่อนแล้วจึงผ่านตะแกรงร่อนขนาด ล้างด้วยน้ำ ทำให้ตกตะกอน ทำให้แห้ง ทำให้เป็นเนื้อเดียวกัน โดยขนาดและจำนวนตัวอย่างต้องทำการกำหนดให้ชัดเจน การกำหนดขนาดของตัวอย่างที่ขึ้นรูป มีความหลากหลาย โดยการทำให้แห้งมีความหลากหลายขึ้นกับขนาดของตัวอย่าง กรณีผลิตภัณฑ์มีขนาดเล็กใช้เวลาน้อยกว่าขนาดใหญ่ ที่สำคัญคือปริมาณน้ำได้ระเหยออกจากตัวอย่างจนน้ำหนักคงที่แล้ว เช่น การไว้ในอุณหภูมิห้อง 24 ชม. จนน้ำหนักคงที่ การใช้เตาเผาที่หลากหลายรูปแบบ เช่น เตาเผาไฟฟ้า หรือเตาเผาอุตสาหกรรม โดยตั้งอุณหภูมิ มีดังนี้ 830 850 880 900 920 950 960 1,000 1,010 1,125 1,050 1,075 1,080 1,100 และ 1,570 องศาเซลเซียส (°C) การให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้นตามกำหนดไว้เป็นเส้น โค้งของการเพิ่มอุณหภูมิ แล้วทำให้เย็นตัวลงที่อุณหภูมิห้อง ในการทดสอบคุณสมบัติมีดังนี้ x-ray diffraction (XRD) การดูดซึมน้ำ (water absorption, WA) การรับแรงกดอัด (compressive strength) การดูดซึมน้ำ (water suction) แรงยึดหยุ่น (flexural strength) ค่าการหดตัว (linear shrinkage) ความหนาแน่น (bulk density) น้ำหนักสูญเสียน้ำ (weight loss) การกระจายขนาดอนุภาค (particle size distribution) โครงสร้างทางจุลภาคโดยใช้กล้องจุลทรรศน์กำลังขยายสูง (scanning electron microscope, SEM) ถ่ายภาพ และความพรุนตัว (porosity measures)

งานวิจัยนี้จึงได้มีวัตถุประสงค์ เพื่อศึกษาสมบัติทางเคมีของดินปนเปื้อนสนิมเหล็ก เพื่อศึกษาหาอัตราส่วนผสมของดินปนเปื้อนสนิมเหล็กกับดินและวัสดุอื่น ๆ ที่ใช้ผสมในเนื้อดินสำหรับเผาที่อุณหภูมิสูง สำหรับการพัฒนากระเบื้องเซรามิกสามารถนำกากอุตสาหกรรมที่เป็นดินปนเปื้อนสนิมเหล็ก รีไซเคิลผลิตเป็นกระเบื้องเซรามิก ดำเนินการตามหลักเศรษฐกิจหมุนเวียน และการพัฒนาที่ยั่งยืน (sustainable development) ลดการนำกากอุตสาหกรรมไปเผาทำลาย ลดค่าใช้จ่ายในการเผาทำลาย สร้างแนวคิดในการพัฒนาผลิตภัณฑ์จากวัสดุที่ไม่ใช่แล้วให้มีมูลค่าเพิ่ม และเกิดความคุ้มค่าในด้านเศรษฐกิจ รวมทั้งลดปัญหาทางด้านสิ่งแวดล้อมให้แก่โรงงานอุตสาหกรรม เพิ่มประสิทธิภาพเชิงเศรษฐกิจ (eco-efficiency) ในการบริหารจัดการกากของเสีย เพื่อก่อให้เกิดการใช้ประโยชน์ของทรัพยากรอย่างสูงสุด โดยมี ผลผลิต (output) ผลิตภัณฑ์กระเบื้องเซรามิกจากการใช้ดินปนเปื้อนสนิมเหล็ก ผลลัพธ์ (outcome) ลดการนำดินปนเปื้อนสนิมเหล็กไปกำจัดด้วยการเผา หรือฝังกลบ และ ผลกระทบ (impact) อุตสาหกรรมการผลิตเหล็กโครงสร้างรูปพรรณ (structural steel) สามารถนำดินปนเปื้อนสนิมเหล็กไปผลิตผลิตภัณฑ์ในอุตสาหกรรมกระเบื้องเซรามิกใช้ในอุตสาหกรรมก่อสร้าง ทำให้อุตสาหกรรมผลิตกระเบื้องเซรามิกสามารถรับดินปนเปื้อนสนิมเหล็กมาผสมเป็นการลด

ต้นทุนการผลิตของผลิตภัณฑ์เดิม ได้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ส่งเสริมให้เกิดการหมุนเวียนการใช้ประโยชน์จากวัสดุที่ไม่ใช้แล้วและของเสียอุตสาหกรรมและลดปริมาณวัสดุที่ไม่ใช้แล้วและของเสียอุตสาหกรรมที่ต้องนำไปกำจัดด้วยการฝังกลบ

## 2. วัสดุและวิธีดำเนินการวิจัย

ลักษณะการวิจัย เป็นการศึกษาเชิงทดลอง และวิเคราะห์ข้อมูลในช่วงเวลาใดเวลาหนึ่ง (cross sectional analytic survey) โดยการสำรวจ รวบรวมข้อมูลพื้นฐาน และทำการทดสอบวัดค่าตัวอย่างที่ผลิตขึ้นเป็นแห่งทดสอบ ตามรูปที่ 2



รูปที่ 2 ลักษณะและขนาดของแห่งทดสอบ [8, 9]

ดินที่ใช้นามาศึกษาในครั้งนี้ ได้จากดินปนเปื้อนสนิมเหล็ก (จากโรงงานรีไซเคิล จังหวัดพิษณุโลก) ร้อนผ่านตะแกรงเบอร์ 10 บดด้วยเครื่องบดความเร็วสูง ร้อนผ่านตะแกรงเบอร์ 100 เมช ผสมกับ ดินสำเร็จรูป PAA (จาก บริษัท คอมพาวด์เคลย์ จำกัด) ดังแสดงรูปที่ 3 วัตถุประสงค์ที่นำมาทดลองทำการตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมี (Chemical Compositions) โดยใช้เทคนิค X-ray Fluorescence (XRF : HORIBA Scientific, XGT-5200 X-ray Analytical Microscope ) องค์ประกอบทางแร่ (Mineral Compositions) โดยใช้เทคนิค X-ray Diffractometer (XRD : Rigaku รุ่น smart lab Diffractometer) ตรวจสอบขนาดอนุภาค ของดิน (Particle Size Distribution : HORIBA Scientific Laser Scattering Particle Size Distribution Analyzer รุ่น Partica mini LA-350) ความหนาแน่น (bulk density)



(ก)



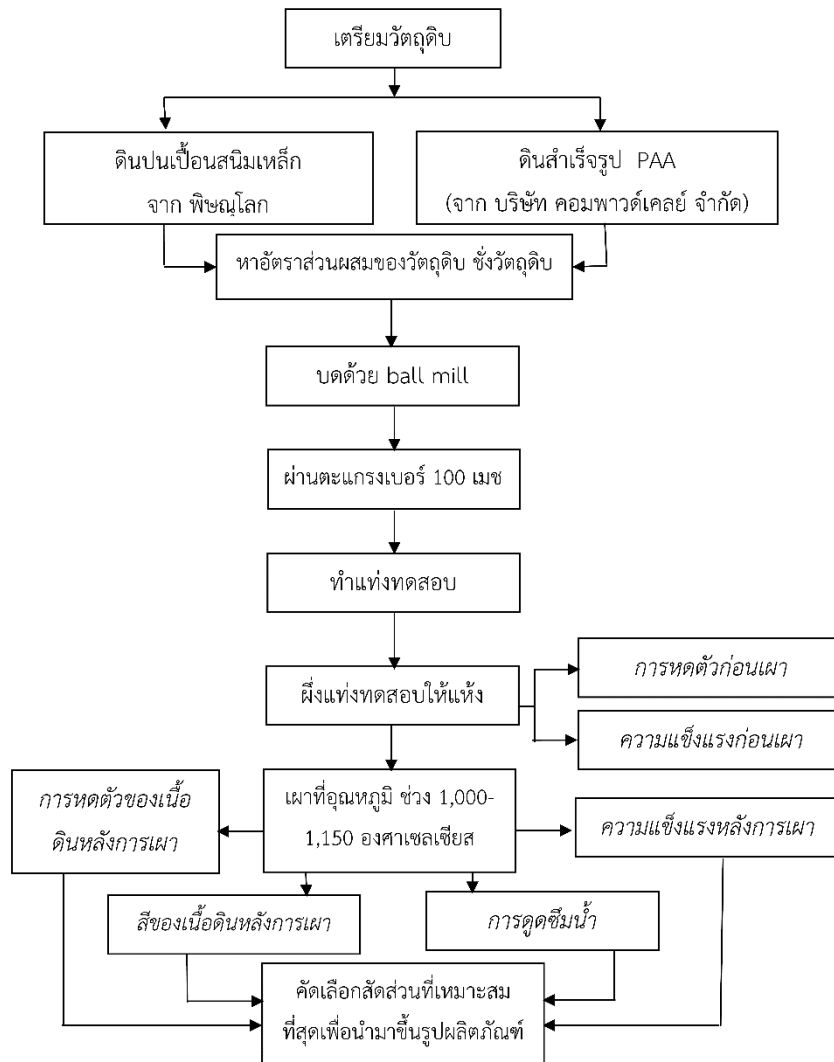
(ข)

รูปที่ 3 วัตถุประสงค์สำหรับการทดลอง (ก) ดินปนเปื้อนสนิมเหล็กผ่านการร้อน (ข) ดินสำเร็จรูป PAA

วิเคราะห์ปริมาณสารโลหะหนักดินปนเปื้อนสนิมเหล็กวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Inductively Coupled Plasma - Optical Emission Spectrometer (ICP – OES, ตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่อง การจัดการสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว พ.ศ.2566 มีผลใช้

บังคับบางข้อตั้งแต่วันที่ 1 มิถุนายน 2566) โดยวิเคราะห์ นิเกิล (Ni) ตะกั่ว (Pb)ปรอท (Hg) แบเรียม (Ba) แคดเมียม (Cd) สังกะสี (Zn) คอปเปอร์ (Cu) สารหนู (As) โครเมียม (Cr) และ เหล็ก (Fe)

กลุ่มตัวอย่าง ที่ใช้ในการวิจัยในครั้งนี้ คือ ดินปนเปื้อนสนิมเหล็ก กับ ดินสำเร็จรูป PAA และอัตราส่วนผสมของดินปนเปื้อนสนิมเหล็ก ต่อ ดินสำเร็จรูป PAA คือ C (0 : 100) P60 (60 : 40) P70 (70 : 30) และ P80 (80 : 20) P แทน “ดินปนเปื้อนสนิมเหล็ก” C แทน “ดินสำเร็จรูป” เลข XX แทนเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของดินปนเปื้อนสนิมเหล็ก



รูปที่ 4 การขึ้นรูปและทดสอบสมบัติทางกายภาพก่อนการเผาและหลังการเผาของแท่งทดสอบ

รูปที่ 4 แผนการทดลองหาอัตราส่วนผสมของเนื้อดินใช้วัสดุดิบ คือ ดินปนเปื้อนสนิมเหล็กและดินสำเร็จรูป PAA นำส่วนผสมของเนื้อดินที่ได้ มาชั่งตัวอย่างละ 2,000 กรัม นำส่วนผสมของเนื้อดินมาผสมแบบเปียกด้วยเครื่องบอลมิลล์ (ball mill) เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ทำการปรับความถ่วงจำเพาะให้เหมาะสมกับการขึ้นรูปโดยการเติมโซเดียมซิลิเกตและน้ำ บันที่กปริมาตร โซเดียมซิลิเกตที่เติมนำเนื้อดินมาทำแท่งทดสอบด้วยแบบพิมพ์ดังแสดงในรูปที่ 5 เพื่อทดสอบสมบัติทางกายภาพในการทดสอบค่าการหดตัว (linear shrinkage) และความแข็งแรง (modulus of rupture) ก่อนการเผา นำแท่งทดลองมาอบแห้งที่อุณหภูมิ 110 °C วัดค่าการหดตัวของ

แท่งทดสอบก่อนการเผา แล้วนำไปทดสอบความแข็งแรงก่อนการเผา นำแท่งทดสอบไปเผาโดยใช้เตาไฟฟ้า โดยวิธีการเผาเริ่มตั้งแต่อุณหภูมิห้องจนถึงอุณหภูมิที่กำหนดในช่วง 1,000 1,050 และ 1,100 °C ใช้ระยะเวลาในการเผา 8 ชั่วโมง และเผาขึ้นไฟ (soaking time) เป็นเวลา 15 นาที แล้วปิดเตา รวมระยะเวลาที่ใช้ 8 ชั่วโมง 15 นาที [8, 9] ทำการทดสอบสมบัติทางกายภาพของเนื้อดินหลังเผาโดยทำการทดสอบสมบัติการหดตัวหลังการเผา การดูดซึมน้ำ (water absorption) ความหนาแน่น (bulk density) ความแข็งแรง และสีของเนื้อดินที่ปรากฏภายหลังการเผา นำเนื้อดินตัวอย่างมาคัดเลือกสูตรที่มีความเหมาะสม มีสมบัติที่ดีเพื่อนำมาขึ้นรูปกระเบื้องด้วยวิธีการอัดแบบพิมพ์ขนาด

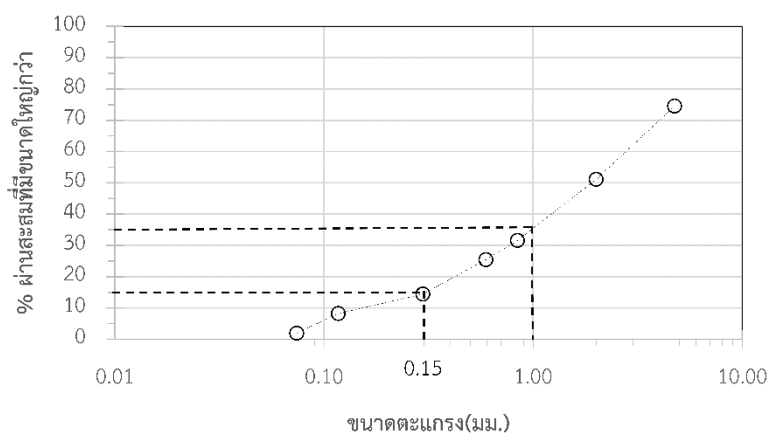


รูปที่ 5 แบบพิมพ์แท่งทดสอบ

### 3. ผลการวิจัย

#### 3.1 ดินปนเปื้อนสนิมเหล็ก

การทดสอบสมบัติทางกายภาพของเนื้อดินจากส่วนผสมของดินปนเปื้อนสนิมเหล็กมีลักษณะดังรูปที่ 1 ซึ่งมีลักษณะของการปนเปื้อนสนิมเหล็กจากการกองเก็บไว้ ร่วงหล่นลงสู่ดิน ในอุตสาหกรรมการรีไซเคิลเหล็ก ก่อนร่อนเหล็กนำไปหลอมในกระบวนการต่อไป ดินมีลักษณะสีน้ำตาลแดงจากสนิมเหล็ก มีหลากหลายขนาดรวมถึงมีเศษเหล็กปะปนมาด้วย



รูปที่ 6 ขนาดมวลคละของดินปนเปื้อนสนิม (Sieve Analysis)

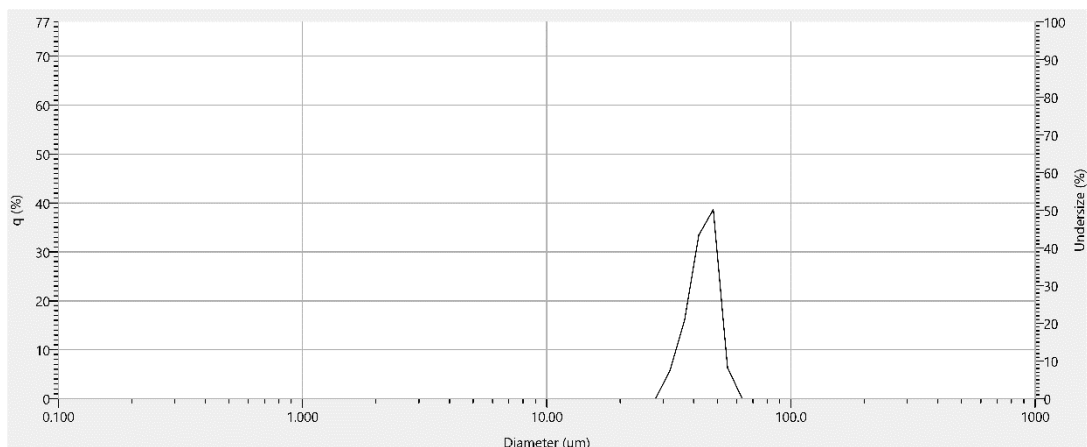
ขนาดมวลคละของดินปนเปื้อนสนิม (sieve analysis) มีขนาดดังรูปที่ 6 มีลักษณะการกระจายตัวตามขนาดต่าง ๆ อนุภาคใหญ่กว่า 1 มิลลิเมตรเท่ากับ 35 เปอร์เซ็นต์ โดยจะพบดินขนาดเล็กผ่านตะแกรง มากกว่า 0.15 มม. เท่ากับ 15 เปอร์เซ็นต์

ตารางที่ 1 คุณสมบัติทางกายภาพของดินปนเปื้อนสนิม

สมบัติทางกายภาพ	หน่วย	ดินปนเปื้อนสนิม	ค่าเฉลี่ย
ค่าความหนาแน่น	kg/m <sup>3</sup>	1,583-1,682	1,632.50 ± 53.77
ค่าความชื้น	%	6.65-6.79	6.72 ± 0.10

เมื่อทดสอบคุณสมบัติดินปนเปื้อนสนิมเหล็กแล้ว ได้ข้อมูลดังแสดงในตารางที่ 1 พบว่า ค่าความหนาแน่นเฉลี่ย 1,632.50 kg/m<sup>3</sup> ค่าความชื้นเฉลี่ย 6.72 % เป็นดินที่มีค่าความหนาแน่นใกล้เคียงดินปกติทั่วไปอยู่ในช่วง 1,492 kg/m<sup>3</sup> ส่วนความชื้นขึ้นกับสภาพอากาศและการจัดเก็บ ข้อมูลค่าความชื้นที่ได้จากการทดสอบเป็นดินที่ตากแดดจนแห้งแล้ว

เมื่อนำไปร่อนผ่านตะแกรง 100 เมช แล้วนำไปเผาที่อุณหภูมิ 1,000 องศาเซลเซียส ในเตาเผาไฟฟ้า มีลักษณะทางกายภาพ มีสีน้ำตาลแดงเข้มขึ้น และมีค่าการสูญเสียการเผา (Loss of ignition, L.O.I.) ที่อุณหภูมิ 1,000 องศาเซลเซียส 14.655 % โดยน้ำหนัก แสดงให้เห็นว่า เมื่อนำไปใช้ผลิตเซรามิกทำให้มีสารคงเหลือเป็นโครงสร้างตัวเนื้อดินได้มาก เมื่อนำไปหาค่าการกระจายขนาดด้วยเครื่องวิเคราะห์การกระจายขนาดด้วยเครื่อง HORIBA Laser Scattering พบว่าขนาดเฉลี่ย 45.25 μm ดังแสดงในรูปที่ 7 คำนวนจากขนาดค่ากลางเฉลี่ยของตัวอย่างดินปนเปื้อนสนิมเหล็ก

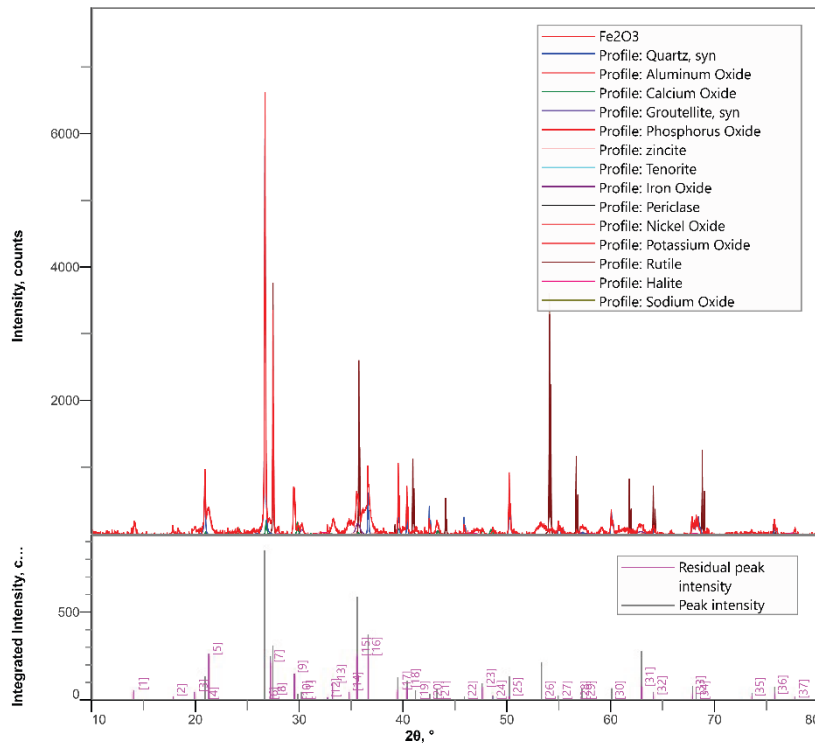


รูปที่ 7 ขนาดการกระจายของดินผ่านการร่อน

การวิเคราะห์เพสดินปนเปื้อนสนิมเหล็ก ดังแสดงในรูปที่ 8 มีปริมาณออกไซด์ของธาตุเป็นองค์ประกอบ พบว่า ดินมีแร่ควอตซ์ (Quartz=Q) และเฮทไรท์ (Hatite=H)

ดินปนเปื้อนสนิมเหล็กมีปริมาณองค์ประกอบทางเคมี (วิเคราะห์ด้วย XRF) ประกอบด้วย อลูมินา (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) 1.626% เหล็กออกไซด์ (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) 78.854 % โพแทสเซียมออกไซด์ (K<sub>2</sub>O) 0.645% ไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO<sub>2</sub>) 1.228% แมงกานีสออกไซด์ (MnO<sub>2</sub>) 0.133 % แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) 3.769% ฟอสฟอรัสออกไซด์ (P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) 0.053% คลอไรด์ (Cl) 0.000% แคลเซียมออกไซด์ (CaO) 7.595% โครเมียมออกไซด์ (Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) 0.133% นิกเกิลออกไซด์ (NiO) 0.380% คอปเปอร์ออกไซด์ (CuO) 0.460% สังกะสีออกไซด์ (ZnO) 4.132% และ ซัลเฟอร์ออกไซด์ (SO<sub>3</sub>) 0.173% โดยน้ำหนักโมเลกุลโดยพบ Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> มากที่สุด

ปริมาณโลหะหนักที่พบในดินปนเปื้อนสนิมเหล็ก พบมากที่สุดเป็น Fe มีปริมาณ 282,715.000 mg/L (141,357.500 mg/kg ดินปนเปื้อน) สำหรับ Ni Pb Hg Ba Cd Zn Cu As และ Cr ต่ำกว่าค่ามาตรฐานตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่อง การจัดการสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว พ.ศ.2566 มีผลใช้บังคับบางข้อตั้งแต่วันที่ 1 มิถุนายน 2566



รูปที่ 8 ลวดลายการเลี้ยวเบน (XRD) ขององค์ประกอบดินปนเปื้อนสนิมเหล็ก

### 3.2 ดินสำเร็จรูป PAA

ดินสำเร็จรูป PAA เป็นดินพอร์ซเลนงานหล่อที่ไม่เน้นความขาว เหมาะสำหรับงานหล่อและงานปั้น โรลเลอร์ ที่สามารถเผาเร็วได้ สำหรับอุณหภูมิ 1,200-1,230 °C บรรยากาศออกซิเดชันและสามารถเผาภายใต้บรรยากาศรีดักชัน ได้ถึง 1,280-1,300 °C เนื้อหลังเผาสีขาว คุณสมบัติหล่อง่าย หล่อเร็ว สำหรับผลิตภัณฑ์บนโต๊ะอาหารและถ้วยกาแฟ

### 3.3 การทดสอบสมบัติของแท่งทดสอบเซรามิกจากการหาอัตราส่วนผสมของดินปนเปื้อนสนิมเหล็กกับดินสำเร็จรูป

ดังตารางที่ 2 สามารถอภิปรายผลการทดลองได้ดังต่อไปนี้

ดินคอมพาวด์ชนิด PAA ที่ขึ้นรูปเป็นแท่งทดสอบ (C) พบว่ามีการหดตัว 4.11% ความแข็งแรงของแท่งทดสอบ 14.59 kg/cm<sup>2</sup> เมื่อเผาถึงอุณหภูมิ 1,000 °C ภายใต้บรรยากาศออกซิเดชัน แท่งทดสอบมีการหดตัวและความแข็งแรงเพิ่มขึ้นเป็น 4.58 % และ 51.7 % ที่อุณหภูมิ 1,050 °C ซึ่งงานความแข็งแรงเพิ่มขึ้นเป็น 157.02 kg/cm<sup>2</sup> การดูดซึมน้ำ 26.84 % เมื่อเผาถึงอุณหภูมิ 1,100 °C ดินจะเกิดการสุกตัวและมีค่าความแข็งแรง พบว่า มีค่าความแข็งแรง 220.68 kg/cm<sup>2</sup> ความหนาแน่น 1.63 g/cm<sup>3</sup> เปอร์เซ็นต์การหดตัว 7.5% มีการดูดซึมน้ำ 23.12%

ดินคอมพาวด์ผสมดินปนเปื้อนสนิมสูตร P60 พบว่ามีการหดตัว 5.58% ความหนาแน่นเท่ากับ 1.58 g/cm<sup>3</sup> ความแข็งแรงของแท่งทดสอบ 14.34 kg/cm<sup>2</sup> เมื่อเผาถึงอุณหภูมิ 1,000 °C ภายใต้บรรยากาศออกซิเดชัน แท่งทดสอบมีการหดตัวความหนาแน่นและความแข็งแรงเพิ่มขึ้นเป็น 6.13%, 1.65 g/cm<sup>3</sup> และ 50.72% ตามลำดับ เมื่อเพิ่มอุณหภูมิถึง 1,050 °C แท่งทดสอบมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นเป็น 93.31 kg/cm<sup>2</sup>, ความหนาแน่น 1.7 g/cm<sup>3</sup> และการดูดซึมน้ำ 27.3% เมื่อเผาถึงอุณหภูมิ 1,100 °C พบว่า มีค่าความแข็งแรง 177.91 kg/cm<sup>2</sup> ความหนาแน่น 1.85 g/cm<sup>3</sup> เปอร์เซ็นต์การหดตัว 8.97% มีการดูดซึมน้ำ 22.43%



ดินคอมพาวด์ผสมดินปนเปื้อนสนิมสูตร P70 พบว่ามีการหดตัว 5.42% ความแข็งแรงของแท่งทดสอบ 19.19 kg/cm<sup>2</sup> เมื่อเผาถึงอุณหภูมิ 1,000°C ภายใต้บรรยากาศออกซิเดชัน แท่งทดสอบมีการหดตัวความหนาแน่นและความแข็งแรงเพิ่มขึ้นเป็น 5.42%, 1.65 g/cm<sup>3</sup> และ 43.20 kg/cm<sup>2</sup> ตามลำดับ เมื่อเพิ่มอุณหภูมิถึง 1,050°C แท่งทดสอบมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นเป็น 97.83 kg/cm<sup>2</sup>, การหดตัว 6.29% ความหนาแน่น 1.68 g/cm<sup>3</sup> และการดูดซึมน้ำ 27.3% เมื่อเผาถึงอุณหภูมิ 1,100°C พบว่า มีค่าความแข็งแรงสูงสุดเทียบกับดินคอมพาวด์ผสมดินปนเปื้อนสนิมทั้งหมด 203.26 kg/cm<sup>2</sup> ความหนาแน่น 1.83 g/cm<sup>3</sup> เปอร์เซ็นต์การหดตัว 7.97% มีการดูดซึมน้ำ 22.13% ดังตารางที่ 2 ดังนั้น ดินคอมพาวด์ที่ผสมดินปนเปื้อนสนิมสูตร P70 มีความเหมาะสมที่จะนำไปผลิตเป็นกระเบื้องตกแต่งได้

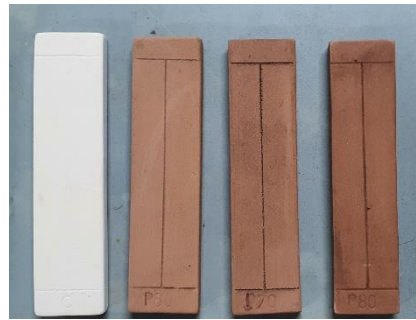
ดินคอมพาวด์ผสมดินปนเปื้อนสนิมสูตร P80 พบว่ามีการหดตัว 4.72% ความแข็งแรงของแท่งทดสอบ 14.01 kg/cm<sup>2</sup> เมื่อเผาถึงอุณหภูมิ 1,000°C ภายใต้บรรยากาศออกซิเดชัน แท่งทดสอบมีการหดตัวความหนาแน่นและความแข็งแรงเพิ่มขึ้นเป็น 5.88%, 1.61 g/cm<sup>3</sup> และ 45.95 kg/cm<sup>2</sup> ตามลำดับ เมื่อเพิ่มอุณหภูมิถึง 1,050°C แท่งทดสอบมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นเป็น 52.26 kg/cm<sup>2</sup>, การหดตัว 6.12% ความหนาแน่น 1.84 g/cm<sup>3</sup> และการดูดซึมน้ำ 32.92% เมื่อเผาถึงอุณหภูมิ 1,100°C พบว่า มีค่าความแข็งแรงเท่ากับ 77.07 kg/cm<sup>2</sup> ความหนาแน่นลดลงเท่ากับ 1.56 g/cm<sup>3</sup> เปอร์เซ็นต์การหดตัว 7.97% มีการดูดซึมน้ำ 24.71%

ตารางที่ 2 สมบัติของแท่งทดสอบดินคอมพาวด์และดินคอมพาวด์ผสมดินปนเปื้อนสนิม

สูตรของ แท่งทดสอบ	อุณหภูมิเผา (°C)	สมบัติของแท่งทดสอบ			
		การหดตัว (%)	ความหนาแน่น (g/cm <sup>3</sup> )	การดูดซึมน้ำ (%)	MOR (kg/cm <sup>2</sup> )
C	ก่อนเผา	4.11±0.60	1.62±n	-	14.59±4.30
	1,000	4.58±0.31	1.52±0.01	27.86±0.23	51.70±31.09
	1,050	5.88±0.51	1.54±0.02	26.84±0.56	157.02±0.51
	1,100	7.50±2.23	1.63±0.03	23.12±2.14	220.68±n
P 60	ก่อนเผา	5.58±0.33	1.58±n	-	14.34±0.56
	1,000	6.13±0.35	1.65±0.02	29.81±0.37	50.72±0.96
	1,050	8.61±4.06	1.70±0.01	27.30±0.26	93.31±2.54
	1,100	8.97±0.24	1.85±0.02	22.43±1.09	177.91±n
P 70	ก่อนเผา	4.72±0.19	1.65±n	-	19.19±2.71
	1,000	5.42±0.16	1.65±0.01	30.74±0.50	43.20±14.33
	1,050	6.12±0.14	1.68±0.02	29.27±0.66	97.83±35.95
	1,100	8.58±0.18	1.83±0.02	24.13±0.61	203.26±n
P 80	ก่อนเผา	4.54±0.64	1.67±n	-	14.01±0.83
	1,000	5.86±0.60	1.61±0.02	32.92±0.75	45.95±6.46
	1,050	6.29±0.40	1.84±0.18	24.97±5.75	52.26±6.06
	1,100	7.97±0.34	1.56±0.14	34.71±4.98	77.07±n

### 3.4 สีของเนื้อดิน

สีของเนื้อดินหลังการเผาทั้งหมดจำนวน 3 สูตรพบว่า มีสีตั้งแต่น้ำตาลเข้มออกส้ม เป็นไปตามอัตราส่วนผสมของดินปนเปื้อนสนิมที่ทำให้สีน้ำตาลแดง ดังแสดงในรูปที่ 9 และตารางที่ 3 จะเห็นได้ว่า สูตรดินสำเร็จรูป PAA จะมีสีครีม ส่วนสูตรดินที่ผสมดินปนเปื้อนสนิมเหล็ก จะเป็นสีน้ำตาลแดง เนื่องมาจากมีส่วนผสมของ เหล็กออกไซด์ ทำให้เนื้อดินหลังเผา มีสีน้ำตาลเข้ม



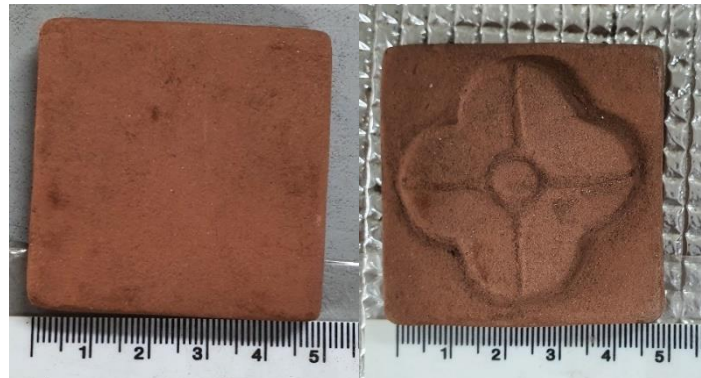
รูปที่ 9 แท่งตัวอย่างดินคอมพาวด์ C และดินที่ปนเปื้อนสนิมเหล็กสูตร P60, P70 และ P80 (เรียงตามลำดับ)

### ตารางที่ 3 สีของเนื้อดินก่อนและหลังเผาที่อุณหภูมิต่าง ๆ

สูตร	สีของเนื้อดินก่อนการเผา		สีของเนื้อดินหลังการเผา					
			1,000 °C		1,050 °C		1,100 °C	
C	ครีมออกเทาอ่อน		ครีมออกส้มอ่อน		ครีมออกส้มอ่อน		ครีมออกส้มอ่อนมาก	
P60	น้ำตาลออกเทา		น้ำตาลออกส้ม		น้ำตาลออกส้ม		น้ำตาลเข้มออกส้ม	
P70	น้ำตาลส้มออกเทา		น้ำตาลออกส้ม		น้ำตาลออกส้ม		น้ำตาลเข้มออกส้ม	
P80	น้ำตาลส้มออกเทา		น้ำตาลออกส้ม		น้ำตาลเข้มออกส้ม		น้ำตาลเข้มออกส้ม	

### 3.5 การพัฒนากระเบื้องเซรามิก

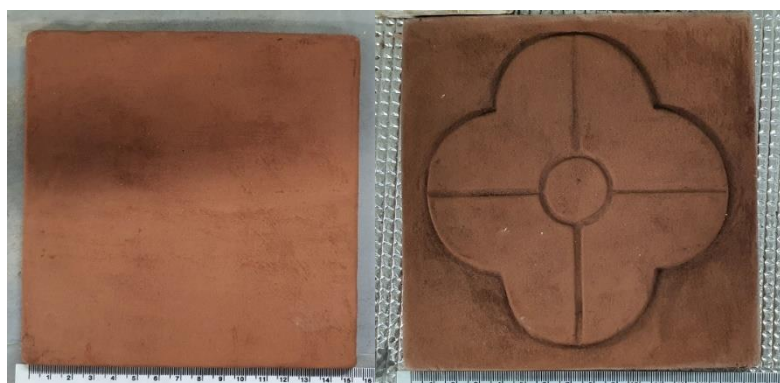
จากการทดสอบแท่งตัวอย่างของสูตรดินชนิดต่าง ๆ จึงได้เลือกสูตรดิน P80 มาพัฒนากระเบื้องเซรามิก โดยเลือกพัฒนาขนาด 5 X 5 เซนติเมตร 10 X 10 เซนติเมตร และ 15 X 15 เซนติเมตร เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ เมื่อใช้ข้อมูลจากการทดสอบแท่งตัวอย่างข้างต้นดังแสดงรูปที่ 10 (ก) (ข) และ (ค) ตามลำดับ จากการใช้สูตรดิน P80 เป็นสูตรดินที่ใช้ดินปนเปื้อนสนิมเหล็ก 80 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก ต่อผสมกับดินสำเร็จรูป PAA 20 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก เผาที่อุณหภูมิ 1,100 °C สามารถขึ้นรูปได้ตามภาพ โดยสามารถกำหนดขนาดได้ไม่คลาดเคลื่อนเกินกว่า มาตรฐานกระเบื้องเซรามิกแบบไม่เคลือบ แต่มีการดูดซึมน้ำเกินกว่า 10 % รับแรงโมดูลัสแตกร้าวได้น้อยกว่า 7 นิวตันต่อตารางเมตร ตามมาตรฐานอุตสาหกรรม (มอก. 2508-2555)



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 10 ขนาดกระเบื้องเซรามิก สูตรดิน P80 เผาที่อุณหภูมิ 1,100 °C  
(ก) 5 X 5 cm (ข) 10 X 10 cm (ค) และ 15 X 15 cm

#### 4. สรุปผลการวิจัย

สมบัติของดินปนเปื้อนสนิมเหล็ก พบธาตุที่มากที่สุดเป็น Fe มีปริมาณ 282,715 mg/L (141,357.5 mg/kg ดินปนเปื้อน) โดยไม่เป็นของเสียอันตรายตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่อง การจัดการสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว พ.ศ.2566 มีผลใช้บังคับบางข้อตั้งแต่วันที่ 1 มิถุนายน 2566 มีส่วนประกอบขององค์ประกอบทางเคมีของดิน ประกอบด้วย อลูมินา ( $Al_2O_3$ ) เหล็กออกไซด์ ( $Fe_2O_3$ ) โพแทสเซียมออกไซด์ ( $K_2O$ ) ไทเทเนียมไดออกไซด์ ( $TiO_2$ ) แมงกานีสออกไซด์ ( $MnO_2$ ) แมกนีเซียมออกไซด์ ( $MgO$ )

ฟอสฟอรัสออกไซด์ ( $P_2O_5$ ) คลอไรด์ (Cl) แคลเซียมออกไซด์ (CaO) โครเมียมออกไซด์ ( $Cr_2O_3$ ) นิกเกิลออกไซด์ (NiO) คอปเปอร์ออกไซด์ (CuO) ซิงค์ออกไซด์ (ZnO) และ ซัลเฟอร์ออกไซด์ ( $SO_3$ ) โดยพบ  $Fe_2O_3$  มากที่สุด ในช่วง 72.039-78.853 % โดยน้ำหนัก โมเลกุล ค่าความหนาแน่น อยู่ในช่วง 1,583-1,682  $kg/m^3$  ค่าความชื้น อยู่ในช่วง 6.65-6.79 % เป็นดินที่มีค่าความหนาแน่นใกล้เคียงดินปกติทั่วไปอยู่ในช่วง 1,492  $kg/m^3$  สีของเนื้อดินเป็นสีน้ำตาลแดงอิฐ

อัตราส่วนผสมของดินปนเปื้อนสนิมเหล็กกับดินสำเร็จรูป เเผาที่อุณหภูมิสูง สำหรับการพัฒนากระเบื้องเซรามิก ปริมาณอัตราส่วนผสมของเนื้อดินของดินปนเปื้อนสนิมเหล็ก และดินสำเร็จรูป PAA ในการวิจัยจึงดำเนินการทดลอง สูตร 4 สูตร ได้แก่ C P60 P70 และ P80 สีของเนื้อดินหลังการเผาทั้งหมดจำนวน 3 สูตรพบว่า มีสีตั้งแต่สีน้ำตาลเข้มออกส้ม เป็นไปตามอัตราส่วนผสมของดินปนเปื้อนสนิมที่ทำให้สีน้ำตาลแดง สูตรดินที่ผสมดินปนเปื้อนสนิมเหล็ก จะเป็นสีน้ำตาลแดง เนื่องจากมีส่วนผสมของเหล็กออกไซด์ในปริมาณมากที่สุด สูตรดินที่ผสมดินปนเปื้อนมากขึ้นจะส่งผลทำให้รับแรงคดลดลง ค่ากำลังรับแรงคดของส่วนสูตร P80 ที่มากที่สุด มีค่าเท่ากับ 77.07  $kg/cm^2$  ที่อุณหภูมิการเผา 1,100 องศาเซลเซียส

การเตรียมชิ้นรูปกระเบื้องสูตรดิน P80 สามารถขึ้นรูปได้มีการดูดซึมน้ำเกินกว่า 10 % รับแรง โมดูลัสแตกร้าวได้น้อยกว่า 7 นิวตันต่อตารางเมตร ตามมาตรฐานอุตสาหกรรม (มอก. 2508-2555) เซรามิกมีลักษณะทางกายภาพ สีคล้ายหินทรายประดับธรรมชาติ

## 5. ข้อเสนอแนะ

ทำการศึกษาวิจัยต่อข้อด้อยด้านต้นทุนการผลิตและความต้องการด้านผลิตภัณฑ์กระเบื้องเซรามิก จากการใช้วัสดุของเสียที่ไม่อันตรายจากอุตสาหกรรมเพื่อส่งเสริมด้านเศรษฐกิจหมุนเวียน (Circular Economy : CE) และวิเคราะห์ด้านโลหะหนักปนเปื้อนในน้ำชะ (leachates) หากต้องการผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ต่อไป

## ผลประโยชน์ทับซ้อน

ผู้เขียนขอประกาศว่าบทความนี้ไม่มีผลประโยชน์ทับซ้อน

## กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ “ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากงบประมาณรายจ่ายจากรายได้มหาวิทยาลัยรามคำแหง ประเภทมหาวิทยาลัย โดยสถาบันวิจัยและพัฒนา งบประมาณประจำปี 2565” ขอขอบพระคุณ ดร.สมไทย วงษ์เจริญ ประธานกรรมการ โรงงานคัดแยกขยะเพื่อรีไซเคิลวงษ์พาณิชย์สนับสนุนข้อมูลการด้านความคิดแนวทาง และวัตถุดิบที่เป็นดินจากจังหวัดพิษณุโลก เป็นผู้ที่ให้คำแนะนำ รวมถึงให้ข้อชี้แนะ ขอขอบคุณนักศึกษาสาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยรามคำแหง และสุดท้ายนี้ต้องขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์เกษม พุกกะวัน อาจารย์ผู้ให้ความใส่ใจและคำปรึกษาอย่างต่อเนื่อง ทั้งยังให้ความรู้ด้านเซรามิก ตรวจสอบรายละเอียดข้อเสนอโครงการวิจัย ฯ เป็นที่ปรึกษาตลอดโครงการวิจัยตั้งแต่ต้นจนจบโครงการวิจัย

## เอกสารอ้างอิง

- [1] Thanasarn. *เหล็กรูปพรรณ*, 2565. Available from: <http://www.thanasarn.co.th/> [Accessed 18 สิงหาคม พ.ศ. 2565].
- [2] Chiara Zanelli, Sonia Conte, Chiara Molinari, Roberto Soldati and Michele Dondi. Waste recycling in ceramic tiles: a technological outlook. *Resources. Conservation & Recycling*, 2021, 168, p. 28.

- [3] เกษม พุกกะวัน. การศึกษาประโยชน์ของดินตะกอนประปาจากกระบวนการผลิตน้ำประปา เพื่อใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์เซรามิก. ทุนวิจัยการประปานครหลวง, รายงานการวิจัย, 2545.
- [4] สุทธิดา การะเวก ศศิธร คนทน อนันตกุล อินทรผดุง และ รัชชกฤต เทียมธรรม. การพัฒนาเนื้อดินผสมสำเร็จรูปจากดินตะกอนน้ำประปาสำหรับงานเครื่องปั้นดินเผา. วารสารวิจัยราชภัฏพระนคร สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, 2562, 14(1) หน้า 117-136.
- [5] ณัฐพล ธาตุจิรวงศ์กุล และ คำภีร์ จิตชัยภูมิ. คุณสมบัติทางกายภาพของดินเหนียวผามวลเบาทำจากไคอะตอมไมต์ผสมโฟม. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 25, การประชุมรูปแบบออนไลน์, 15-17 กรกฎาคม 2563, หน้า 1-8.
- [6] นนทพงษ์ พลพวก. การพัฒนากระบวนการผลิตอิฐมอญโดยใช้เศษแก้วเป็นสารเติมแต่ง. วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏศรีสะเกษ, 2564, 1(2) หน้า 1-11.
- [7] Velasco, P.M., Morales Ortiz, M.P., Mendivil Giro, M.A., Velasco, L.M. Fired clay bricks manufactured by adding wastes as sustainable construction material – A review. *Construction and Building Materials*, 2014, 63, pp. 97-107.
- [8] เกษม พุกกะวัน. การศึกษาความเหมาะสมของดินตำบลโคกไม้ตาย จังหวัดปราจีนบุรีเพื่อใช้ผลิตเซรามิก ตอนที่ 1 การผลิตเนื้อดินสำหรับกรหล่อโดยการเติมดินขาวลำปาง. วารสารรามคำแหง ฉบับวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ฉบับวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, 2556, 30(2) หน้า 98-117.
- [9] เกษม พุกกะวัน และ อัสนีย์ แจ่มกล้า. การพัฒนาดินเหนียวกรุงเทพฯ เพื่อผลิตเซรามิก. *Srinakharinwirot Science Journal*, 2557, 30(2) หน้า 131-149.