



การวิเคราะห์สมบัติทางเคมีและทางกายภาพของดินในการผลิตกระเบื้องมุงหลังคาดินเผา Analysis of chemical and physical properties of clays in the production of terracotta roof tile

ศรินยา ประทีปชนะชัย^{1*} และ อรินทรเชษฐ์ ศิรินันท์วิทยา²

¹ สาขาเทคโนโลยีอุตสาหกรรม คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏราชนครินทร์ ฉะเชิงเทรา 24000

² ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ ปทุมธานี 12120

Sarinya Prateepchanachai^{1*} and Arintarached Sirinantawittaya²

¹ Division of Industrial Technology, Faculty of Industrial Technology, Rajabhat Rajanagarindra University
Chachoengsao 24000

² National Metal and Materials Technology Center, National Science and Technology Development Agency
Pathum Thani 12120

Received: 22 August 2019/ Revised: 3 December 2019/ Accepted: 12 December 2019

บทคัดย่อ

การเกิดฟองอากาศในเนื้อดินก่อให้เกิดตำหนิบนตัวผลิตภัณฑ์กระเบื้องมุงหลังคาดินเผาจนยากด้วย จึงทำการวิเคราะห์สมบัติทางเคมีและทางกายภาพของวัตถุดิบหลักที่นำมาใช้งานเพื่อลดข้อเสียในโรงงานอุตสาหกรรม งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์สมบัติทางเคมีและทางกายภาพของดิน 4 ชนิด ได้แก่ ดินดำ ดินแดง ดินขาว และแร่เฟลด์สปาร์ โดยทำการตรวจวัดความเป็นกรด-เบส ขนาดและการกระจายตัวของอนุภาค และความหนาแน่นปรากฏของดินแต่ละชนิด จาก ผลการศึกษาความเป็นกรด-เบสพบว่า ดินดำมีความเป็นกรดแก่ แต่ดินขาวมีความเป็นกลาง และแร่เฟลด์สปาร์มีความเป็น เบสแก่ ผลการศึกษาขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคพบว่า แร่เฟลด์สปาร์มีขนาดอนุภาคสูงที่สุด รองลงมาคือ ดินขาว ส่วนดินดำและดินแดงมีขนาดอนุภาคต่ำที่สุดซึ่งไม่แตกต่างกันทางสถิติ (ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95) และยังพบอินทรีย์สารปนอยู่ในเนื้อดินเป็นจำนวนมาก แต่แร่เฟลด์สปาร์และดินขาวมีการกระจายตัวของอนุภาคต่ำที่สุด รองลงมาคือ ดินดำและดินแดงโดยมีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติ (ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95) ผลการศึกษาความหนาแน่นปรากฏพบว่า แร่เฟลด์สปาร์มีความหนาแน่นปรากฏสูงที่สุด รองลงมาคือ ดินแดง ดินดำ และดินขาว ตามลำดับ ดังนั้นในขั้นตอนการเตรียมวัตถุดิบจำเป็นต้องกำจัดอินทรีย์สารที่ปนอยู่ในดิน ซึ่งทำให้เกิดการแตกสลายตัวออกมาเป็นก๊าซได้ขณะเผาซึ่งเป็นสาเหตุของการเกิดตำหนิรูเข็ม และควรเพิ่มความละเอียดในการบดดินและร่อนดินเพื่อลดขนาดเม็ดดินและเพิ่มการกระจายตัวสามารถใช้เป็นแนวทางในการลดตำหนิแบบหลุม การแตกร้าว และลักษณะผิวเคลือบไม่เรียบบนตัวผลิตภัณฑ์ให้แก่โรงงานอุตสาหกรรมได้

คำสำคัญ: ขนาดและการกระจายตัว ความหนาแน่นปรากฏ ตำหนิฟองอากาศ



Abstract

The procreation of bubbles defect in the clays causing defects on the Kab-Kluay terracotta roof tile products, therefore, analyze the chemical and physical properties of the main raw materials used in order to reduce industrial waste. This research purposed to study the qualification of 4 clays which were ball clay, red ball clay, kaolin and feldspar by conducting acid-base measurements, size and particle size-distribution and apparent density of each clay type. The study results in acid-base, it was found that ball clay and red ball clay have strong acid, kaolin has neutral and feldspar comprise of strong base. The results of study in size and particle size-distribution, it was found that the feldspar has the highest particle size, followed by kaolin. Ball clay and red ball clay have the lowest particle-sizes, having no statistical difference (at 95% confidence level) and also founded organic impurities mixed in clays. On the other hand, feldspar and kaolin had the lowest particle-size distribution, follow by ball clay and red ball clay, which had no statistical difference (at 95% confidence level). The results of apparent density, it was found that feldspar contained the highest value, follow by red ball clay, ball clay and kaolin, respectively. Therefore, the processes of preparing raw materials, it is necessary to eliminate the organic impurities in clays that made decomposition into gas during sintering which is caused of pin hole defect. That should increase the resolution of clays grinding and sieving to reduce clay particle size and increase dispersion can be used as a guideline to reduce hole defect, cracking and surface roughness on products for industrial factory.

Keywords: Particle-size distribution, Apparent density, Bubble defect

บทนำ

ปัจจุบันกระเบื้องมุงหลังคาดินเผาลอนกากบกล้วยได้รับความนิยมจากผู้ใช้งานเป็นอย่างมาก เนื่องจากเป็นลอนสวยงามในแบบอนุรักษ์นิยม มีความทนทานสามารถพบเห็นได้ตามสถาปัตยกรรมต่าง ๆ เช่น บ้านทรงไทย โบสถ์ และวิหาร เป็นต้น และมีความเป็นฉนวนที่ดีช่วยทำให้ความร้อนจากภายนอกที่สูงกว่าถ่ายเทเข้าไปในอาคารได้น้อยลง และรู้สึกเย็นสบาย ซึ่งถือว่าเป็นเอกลักษณ์อีกรูปแบบหนึ่งที่จะช่วยสร้างความประทับใจให้แก่ผู้ที่พบเห็นได้เป็นอย่างดี [1] โดยมีกระบวนการผลิตที่ไม่ยุ่งยากซับซ้อน ได้แก่ กระบวนการเตรียมเนื้อดิน กระบวนการขึ้นรูป กระบวนการเคลือบผิว กระบวนการเผา และการควบคุมคุณภาพ [2] อย่างไรก็ตามเป็นที่ทราบกันดีอยู่แล้วว่าในโรงงานอุตสาหกรรมนั้นมีปัจจัยต่างๆ มากมายที่สามารถทำให้เกิดปัญหาเกี่ยวกับข้อบกพร่อง

ที่เป็นตำหนิบนผิวเคลือบของผลิตภัณฑ์ได้ ซึ่งการเตรียมเนื้อดินเป็นกระบวนการหนึ่งที่มีความสำคัญ ส่งผลถึงประสิทธิภาพของกระบวนการผลิตในทุกขั้นตอน ทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้หลังเผาเกิดตำหนิได้ เช่น รอยแตกร้าว ฟองอากาศ จุดเหล็ก สีเคลือบดิ่งตัว การระเบิดของยิปซั่มที่อยู่ภายในเนื้อดิน และการเกิดแก๊สในเนื้อดิน [1, 3] เป็นต้น จึงจำเป็นต้องมีการควบคุมคุณภาพในการเตรียมเนื้อดินเพื่อให้เนื้อดินมีสมบัติตามต้องการ สามารถนำไปใช้งานได้โดยลดข้อผิดพลาด และช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในกระบวนการผลิตรวมทั้งลดต้นทุนการผลิตในระยะยาว

จากการสำรวจข้อมูลกระบวนการผลิตของโรงงานอุตสาหกรรมกระเบื้องมุงหลังคาดินเผาลอนกากบกล้วยแห่งหนึ่งในตำบลบางคล้า อำเภอบางคล้า จังหวัดฉะเชิงเทรา พบว่าในการผลิตกระเบื้องแต่ละครั้งจะมีของเสียเป็น



จำนวนมากอยู่ในช่วงร้อยละ 20-50 ต่อหนึ่งครั้งและไม่ทราบสาเหตุที่ชัดเจน ทั้งนี้มีสมมติฐานมาจากตำหนิฟองอากาศที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิตขั้นต้นแรกอาจขาดการควบคุมคุณภาพของวัตถุดิบ แล้วนำไปใช้กับอีกกระบวนการผลิตถัดไปจึงทำให้เกิดของเสียที่มีลักษณะเป็นรอยตำหนิ ซึ่งปัญหาการเกิดตำหนิฟองอากาศนี้สร้างความเสียหายให้แก่ผู้ประกอบการเป็นอย่างมาก ไม่ว่าจะเป็นการเพิ่มค่าใช้จ่ายของวัตถุดิบ เชื้อเพลิง และเวลา อีกทั้งการใช้แรงงานสำหรับการเพิ่มขั้นตอนการปฏิบัติงานซ่อมผิวของผลิตภัณฑ์ก่อนนำไปเคลือบผิว แม้ว่าการซ่อมผิวของผลิตภัณฑ์ด้วยวิธีการขัดอาจช่วยแก้ปัญหาเบื้องต้นได้ แต่บางครั้งก็อาจกลายเป็นสินค้าที่ด้อยคุณภาพ ดังนั้นการเกิดตำหนิฟองอากาศจึงเป็นสิ่งที่ผู้ประกอบการในโรงงานอุตสาหกรรมนี้ต้องการให้เกิดขึ้น การวิเคราะห์สมบัติของดินจึงเป็นสิ่งจำเป็น เพื่อให้ผู้ประกอบการสามารถเลือกใช้งานได้อย่างเหมาะสมกับลักษณะการผลิตและสามารถตอบสนองให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้เป็นไปตามวัตถุประสงค์ของการใช้งาน อีกทั้งสามารถควบคุมคุณภาพได้อย่างสม่ำเสมอ และช่วยลดปัญหาของเสียที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิต [3] เนื่องจากดินเป็นวัตถุดิบหลักที่ใช้ในกระบวนการผลิตกระเบื้องซึ่งเป็นของผสมที่เกิดขึ้นเองในธรรมชาติประกอบด้วยอินทรีย์วัตถุ อินทรีย์วัตถุ อากาศ และน้ำ ดินจากแหล่งที่ต่างกันจะมีองค์ประกอบในสัดส่วนที่ต่างกันและจะสามารถแตกสลายตัวเป็นก๊าซได้ จึงอาจส่งผลต่อกระทบในขั้นตอนการเผาแล้วทำให้เกิดปัญหารูพรุนที่ผิวหน้าเคลือบได้ [4] จากสภาพปัญหาข้างต้น ยังมีการพัฒนาแนวคิดเพื่อแก้ปัญหาดังกล่าวด้วยการใช้เทคนิคต่างๆ ในการผลิต เช่น การเพิ่มความละเอียดของวัตถุดิบในขั้นตอนการเตรียมวัตถุดิบก่อนการผสมเนื้อดิน เพื่อให้ส่วนผสมเข้ากันดีขึ้น การกระจายตัวที่กว้างจะมีผลต่อการจัดเรียงขนาดของอนุภาคดิน [5] และการใช้อุณหภูมิของการเผาที่เหมาะสมมีผลต่อสมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกลที่ดี เพราะเนื้อดินเกิดการหลอมตัวยึดเกาะระหว่างอนุภาคมากขึ้นและมีรูพรุนลดลง [6, 7] และการปรับปรุงส่วนผสมเนื้อดินที่ช่วยให้เกิดการหลอมตัวของเนื้อดินหลังเผาดีขึ้นกว่าเดิม ซึ่งการรวมตัวหลอมละลายอนุภาคเนื้อดินจากเดิมที่มีลักษณะเป็นเม็ดได้

รับความร้อนจนลดพื้นที่ผิว และลดความพรุนตัวของเนื้อผลิตภัณฑ์ส่งผลให้ช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้เนื้อผลิตภัณฑ์หลังการเผา [8] ดังนั้นการตรวจสอบคุณภาพของดินจึงเป็นสิ่งที่สำคัญ

งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์สมบัติทางเคมีและทางกายภาพของวัตถุดิบหลักประเภทดิน 4 ชนิด ได้แก่ ดินดำ ดินแดง ดินขาว และแร่เฟลด์สปาร์ที่นำมาใช้ในการผลิตกระเบื้องมุงหลังคาดินเผาลอนนากบกล้วย ซึ่งเกิดปัญหาดำหนิ รูเข็ม ตำหนิแบบหลุม ปัญหาการแตกร้าว และลักษณะผิวเคลือบไม่เรียบบนตัวผลิตภัณฑ์ โดยทำการตรวจวัดความเป็นกรด-เบส เนื่องจากความเป็นกรด-เบสของดินมีผลต่อสมบัติทางเนื้อสัมผัส การวัดขนาดและการกระจายตัวและความหนาแน่นปรากฏของดินแต่ละชนิดที่อาจส่งผลกระทบต่อสมบัติทางกล โดยสามารถนำมาอธิบายสาเหตุการเกิดตำหนิชนิดต่าง ๆ อันเนื่องมาจากการเกิดตำหนิฟองอากาศในเนื้อดินในกระบวนการเตรียมวัตถุดิบ และใช้แผนภูมิแก๊งปลามาช่วยวิเคราะห์ปัญหาและหาสาเหตุที่แท้จริง อีกทั้งยังทำการเก็บรวบรวมข้อมูลวัตถุดิบเพื่อเสนอแนวทางการแก้ไขปัญหากับของเสียที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิตให้แก่โรงงานอุตสาหกรรม

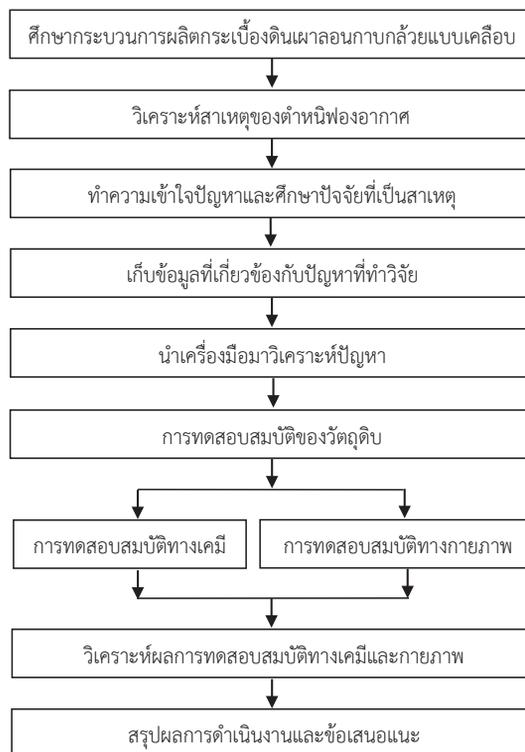
วิธีดำเนินการวิจัย

การศึกษาสาเหตุการเกิดตำหนิฟองอากาศในเนื้อดินที่ส่งผลให้ตัวผลิตภัณฑ์กระเบื้องเกิดความเสียหายในรูปแบบของตำหนิชนิดต่าง ๆ ได้แก่ ตำหนิแบบหลุม (hole defect) ตำหนิรูเข็ม (pin hole defect) การแตกร้าว (cracking) และลักษณะผิวเคลือบไม่เรียบอันเนื่องมาจากรูพรุนบนตัวอย่างชิ้นงานของโรงงานอุตสาหกรรม ซึ่งคาดว่า เป็นผลมาจากวัตถุดิบหลักในกระบวนการผลิตตั้งแต่ต้นนั้น ขาดการตรวจสอบคุณภาพ ภาพที่ 1 แสดงลักษณะตำหนิที่เกิดขึ้นในผลิตภัณฑ์กระเบื้องมุงหลังคาดินเผาลอนนากบกล้วย แบบไม่เคลือบและแบบเคลือบภายหลังการเผาที่อุณหภูมิ 1,200 องศาเซลเซียส



ภาพที่ 1 ลักษณะตำหนิแบบต่าง ๆ บนตัวอย่างชิ้นงาน

จากปัญหาดังกล่าวจึงทำการศึกษาขั้นตอนการ ปัญหาเพื่อเสนอแนวทางการแก้ไขปัญหาต่อไป โดยมีการ
ผลิตกระเบื้องมุงหลังคาดินเผาลอนกากกล้วย และกำหนด ดำเนินงานวิจัยตามขั้นตอนต่างๆแสดงดังภาพที่ 2

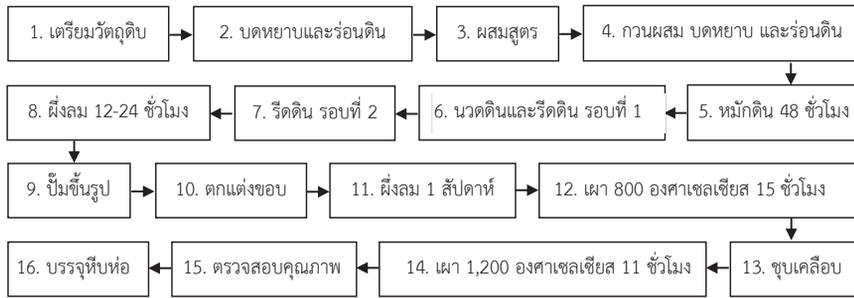


ภาพที่ 2 แผนภูมิขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

1. การศึกษากระบวนการผลิตกระเบื้องดินเผาลอนกากกล้วยแบบเคลือบ

ผู้วิจัยได้ทำการเก็บข้อมูลกระบวนการผลิต กระเบื้องดินเผาลอนกากกล้วยแบบเคลือบ โดยมีจำนวน 16

ขั้นตอนหลัก ดังแสดงไว้ในภาพที่ 3 โดยเนื้อดินหลังจากผ่าน ขั้นตอนที่ 6 การนวดดินและรีดดินรอบที่ 1 แล้วพบปัญหา เกี่ยวกับการเกิดตำหนิฟองอากาศในส่วนผสมของเนื้อดิน

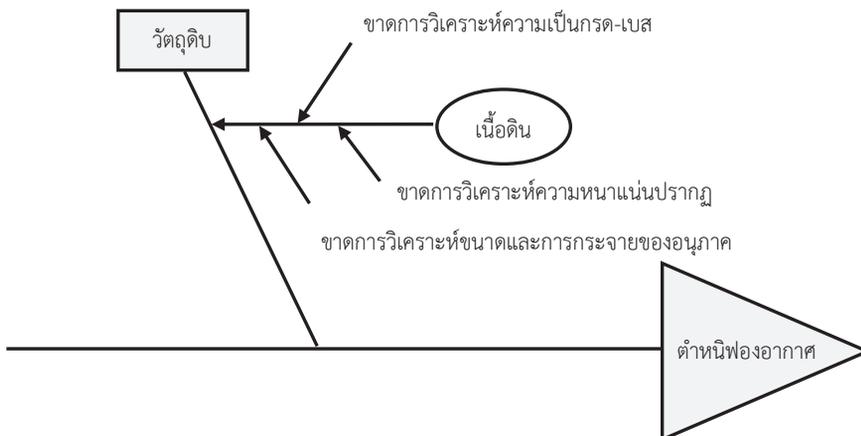


ภาพที่ 3 แผนผังขั้นตอนกระบวนการผลิตกระเบื้องกาบกล้วยดินเผาแบบเคลือบ

2. การวิเคราะห์สาเหตุของปัญหา

ผู้วิจัยดำเนินการเก็บข้อมูลจากการสัมภาษณ์ผู้ประกอบการเกี่ยวกับปัญหาต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นจากสภาพปัจจุบันของทางโรงงานอุตสาหกรรม โดยการทดลองสุ่มตัวอย่างชิ้นงาน จำนวน 10 ตัวอย่าง พบปริมาณของเสียที่เกิดตำหนิบนผิวเคลือบทั้งด้านหน้าและด้านหลังชิ้นงาน ซึ่งมีตำหนิแบบหลุมอยู่ประมาณ 1-5 จุดต่อแผ่น ขนาดกว้างเฉลี่ย 2 เซนติเมตร ตำหนิรูเข็มเกิดบริเวณที่มีการเคลือบผิว และลักษณะผิวเคลือบไม่เรียบจะเกิดรอยผิวชิ้นงานประมาณร้อยละ 30-50 และการแตกร้าวมีความยาวอยู่ในช่วง 2-10 เซนติเมตร แนวทางการแก้ไขเบื้องต้นกระทำโดยให้พนักงานขัดผิวชิ้นงานกลายเป็นสินค้าด้อยคุณภาพ จึงมีข้อสันนิษฐานอยู่มากมายเกี่ยวกับสาเหตุการเกิดตำหนิบนผิวผลิตภัณฑ์ ซึ่งคาดว่าเกิดจากฟองอากาศในส่วนผสมของเนื้อดินที่เป็นปัญหาหลัก ผู้วิจัยได้ดำเนินการวิเคราะห์สาเหตุของปัญหาเพื่อลดปริมาณฟองอากาศ โดยทำการเลือกศึกษาการควบคุม

คุณภาพในการเตรียมเนื้อดิน เนื่องจากผู้ประกอบการยังไม่มี การเก็บข้อมูลสมบัติของเนื้อดินแต่ละชนิด อาทิเช่น ความเป็นกรด-เบส การบดดินและร่อนดิน เพื่อให้ได้ขนาดของความละเอียดเนื้อดินที่เหมาะสมแก่การขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ และความหนาแน่นปรากฏของเนื้อดิน ผู้วิจัยจึงได้กำหนดเครื่องมือที่ใช้ในการเก็บรวบรวมข้อมูลต่างๆ นั่นคือ แผนภูมิ ก้างปลา (fish-bone diagram) เนื่องจากเป็นเครื่องมือตัวหนึ่งที่จะช่วยทำให้ข้อมูลดิบที่มีอยู่จำนวนมากถูกทำให้วิเคราะห์ง่ายขึ้น ดำเนินการวิเคราะห์ปัญหา และสาเหตุที่ส่งผลกระทบต่อลักษณะคุณภาพของผลิตภัณฑ์ ดำเนินการตรวจสอบเพื่อปรับปรุงและกำจัดสาเหตุที่ทำให้เกิดคุณภาพที่ไม่ดี โดยใช้หลักการ 4M คือ คน (man) เครื่องจักร เครื่องมือ (machine) วัสดุอุปกรณ์ (materials) และวิธีการปฏิบัติงาน (method) เพื่อนำไปสู่ปัญหาที่แท้จริง โดยการกำหนดสาเหตุหลัก สาเหตุรอง และสาเหตุย่อยของปัญหาทั้งหมด ดังภาพที่ 4



ภาพที่ 4 แผนภูมิ ก้างปลาเพื่อวิเคราะห์สาเหตุของวัตถุดิบที่ทำให้เกิดตำหนิฟองอากาศ



3. การทดสอบสมบัติทางเคมีและทางกายภาพ

นำเนื้อดินแต่ละชนิด ได้แก่ ดินดำ ดินแดง ดินขาว และแร่เฟลด์สปาร์ (ภาพที่ 5) ที่ได้จากโรงงานอุตสาหกรรม



(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

ภาพที่ 5 วัตถุที่ใช้ผลิตกระเบื้องมุงหลังคาดินเผา لونกากกล้วยแบบเคลือบ (ก) ดินดำ (ข) ดินแดง (ค) ดินขาว และ (ง) แร่เฟลด์สปาร์

3.1 การทดสอบความเป็นกรด-เบส

นำเนื้อดินมาทดสอบความเป็นกรด-เบส (pH) ประยุกต์ตามวิธีการทดลองของ Abuh และคณะ [9] โดยใช้เครื่อง pH handheld meter ยี่ห้อ HM Digital pH Hydro Tester (รุ่น PH-80, Seoul ประเทศเกาหลีใต้) ค่าความคลาดเคลื่อน ± 0.2 pH ซึ่งก่อนการทดสอบจะทำการปรับเทียบความเป็นกรด-เบสด้วยสารละลายบัฟเฟอร์มาตรฐาน pH 4, pH 7 และ pH 10 ค่าความคลาดเคลื่อน ± 0.02 จำนวน 3 ครั้ง การทดสอบเริ่มจากนำเนื้อดินแต่ละชนิดชั่งหนัก 2 กรัม แล้วผสมน้ำปราศจากไอออน (deionized water) ที่มีค่ากรด-เบส เท่ากับ 5.5 ± 0.1 ปริมาตร 100 มิลลิลิตร จากนั้นกวนผสมให้เนื้อดินกระจายตัวด้วยเครื่องกวนสารยี่ห้อ LMS (รุ่น HTS-1003, Fukuoka ประเทศญี่ปุ่น) ที่ความเร็วรอบ 40 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 นาที ที่อุณหภูมิห้อง แล้วจึงทำการวัดตัวอย่างจำนวน 3 ซ้ำ เพื่อหาค่าเฉลี่ยในการรายงานผล

3.2 การทดสอบขนาดและการกระจายตัว

การวิเคราะห์ขนาดอนุภาคของดินมีการประยุกต์ตามวิธีการทดลองของ Qi และคณะ [10] โดยใช้เครื่อง Laser Particle Size Distribution Analyzer ยี่ห้อ Malvern (รุ่น

หลังจากกระบวนการบดหยาบและร่อนดินในขั้นตอนที่ 2 (ก่อนผสมสูตร) มาทดสอบสมบัติทางเคมีและทางกายภาพของดิน รายละเอียดวิธีการทดสอบสมบัติต่างๆ มีดังต่อไปนี้

Mastersizer-2000, Worcestershire ประเทศอังกฤษ) โดยใช้ Red light source คือ He-Ne laser source ที่ความยาวคลื่น 633 นาโนเมตร ส่วน blue light source คือ solid state light source และ beam length ที่ความยาวคลื่น 2.35 มิลลิเมตร ค่าดัชนีหักเหของตัวอย่างเท่ากับ 1.555 บันทึกค่าขนาดอนุภาคในช่วง 0.02-2,000 ไมโครเมตร และการทดสอบแบบเปียกใช้ระบบ Hydro 2000S (A) ที่มีน้ำปราศจากไอออนเป็นตัวกลาง สำหรับการวิเคราะห์กระทำโดยชั่งน้ำหนักดินแต่ละชนิด 100 กรัม หลังจากนั้นนำดินแต่ละชนิดที่ชั่งได้ไปผ่านตะแกรงร่อนคัดขนาด (test sieve) 850 ไมโครเมตร แล้วชั่งน้ำหนักดินที่ค้างตะแกรงร่อนและบันทึกผลเตรียมสารละลาย 0.1 น้ำหนักโดยปริมาตรของ Sodium hexametaphosphate จากนั้นปรับความเร็วรอบเครื่องกวนผสมของ Hydro 2000S (A) ที่ 2,000 รอบต่อนาที นำตัวอย่างดินไปกระจายตัวในตัวกลาง ปริมาตร 40 มิลลิลิตร จากนั้นนำไปเข้าเครื่องเครื่องอัลตราโซนิก เป็นเวลานาน 10 นาที เพื่อให้ตัวอย่างกระจายตัว เทตัวอย่างที่กระจายตัวแล้วลงใน Chamber ของ Hydro 2000S (A) จากนั้นทำการวัดขนาดอนุภาคของเนื้อดิน และทำการวัดตัวอย่างจำนวน 3 ซ้ำ เพื่อหาค่าเฉลี่ยในการรายงานผล



3.3 การทดสอบความหนาแน่นปรากฏของอนุภาค

นำเนื้อดินแต่ละชนิดมาทดสอบความหนาแน่นประยุกต์ตามวิธีการทดลองของ Vianati และคณะ [11] โดยใช้เครื่อง Automatic Gas Pycnometers ยี่ห้อ Quantachrome (รุ่น Ultrapyc 1200e, Kawasaki ประเทศญี่ปุ่น) ด้วยเทคนิคการแทนที่ของก๊าซฮีเลียม (ความบริสุทธิ์ 99.99%) ดำเนินการ Calibrate volume เครื่องมือภายใต้การควบคุมอุณหภูมิประมาณ 21.7 องศาเซลเซียส และทำการทดสอบวิเคราะห์ด้วยลูกเหล็กมาตรฐานเพื่อตรวจสอบความถูกต้องก่อนการวิเคราะห์จริง สำหรับการวิเคราะห์กระทำโดยนำเนื้อดินแต่ละชนิดที่ผ่านตะแกรงร่อนขนาด 850 ไมโครเมตร ผ่านกระบวนการอบแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นปล่อยให้เย็นในโถแก้วดูดความชื้น และดำเนินการชั่งเนื้อดินหนัก 2 กรัม ใส่ในเซลล์บรรจุสารละลายตัวอย่าง แล้วทำการตีเบา ๆ 30 ครั้ง จากนั้นจึงนำไปเข้าเครื่องทดสอบจะให้ค่าความหนาแน่นปรากฏและทำการวัดตัวอย่างจำนวน 3 ซ้ำ เพื่อหาค่าเฉลี่ยในการรายงานผล

3.4 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

นำข้อมูลที่ได้จากการทดลองทั้งหมดมาวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) และทดสอบความแตกต่างของค่า

เฉลี่ยโดยใช้โปรแกรม SPSS® (Version 16, Chicago, IL) โดยใช้การทดสอบแบบ Duncan's ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 โดยการทดลองทั้งหมดมีจำนวน 3 ซ้ำ

ผลการวิจัย

1. การศึกษาความเป็นกรด-เบส

จากผลการทดลองพบว่า ดินแต่ละชนิดมีความเป็นกรด-เบสแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ โดยดินดำและดินแดงมีความเป็นกรดแก่ เท่ากับ 4.4 และ 5.2 ตามลำดับ ในทางตรงกันข้ามพบว่า ดินขาวมีความเป็นกลาง เท่ากับ 7.2 และแร่เฟลด์สปาร์มีความเป็นเบสแก่ เท่ากับ 9.1 ดังแสดงไว้ในตารางที่ 1 จะเห็นได้ว่าค่าความเป็นกรด-เบสของดิน 4 ชนิดนี้มีค่าแตกต่างกันจึงเกิดการดึงดูดกันด้วยแรงทางไฟฟ้า อาจทำให้อนุภาคเกิดการเกาะรวมตัวกันจึงทำให้เกิดตำหนิบนตัวผลิตภัณฑ์หลังจากการเผา จึงควรปรับเปลี่ยนประจุที่ผิวอนุภาคโดยการปรับสภาพความเป็นกรด-เบสให้มีค่าน้อยกว่า 2 หรือมากกว่า 9 เพื่อให้อนุภาคเกิดการกระจายตัวที่ดี โดยการผลึกกันเนื่องจากแรงทางไฟฟ้า [12]

ตารางที่ 1 ผลการวิเคราะห์กรด-เบส ขนาดและการกระจายตัวของอนุภาค และความหนาแน่นปรากฏของดินแต่ละชนิด

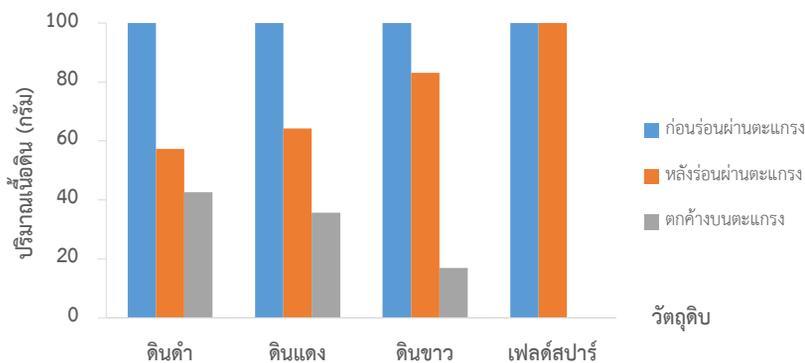
วัตถุดิบ	กรด-เบส	การกระจายตัวของอนุภาค (โดยปริมาตร)		ความหนาแน่นปรากฏ (กรัม/ซีซี)
		D ₅₀ (ไมโครเมตร)	Span	
ดินดำ	4.4±0.1 ^A	5.31±0.37 ^A	19.13±0.85 ^C	2.5873±0.01 ^B
ดินแดง	5.2±0.1 ^B	5.97±0.05 ^A	20.28±1.39 ^C	2.6836±0.01 ^C
ดินขาว	7.2±0.1 ^C	28.40±0.78 ^B	6.19±2.38 ^B	2.5555±0.01 ^A
แร่เฟลด์สปาร์	9.1±0.1 ^D	32.79±0.09 ^C	2.78±0.01 ^A	2.7111±0.01 ^D

หมายเหตุ ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่เหมือนกัน อยู่ภายในสดมภ์และแถวเดียวกัน หมายถึง ค่าที่ระบุไว้ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความ เชื่อมั่นร้อยละ 95 (p>0.05)



2. การศึกษาขนาดและการกระจายตัวของอนุภาค

ผลการทดสอบขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคของดินพบว่า เมื่อนำดินแต่ละชนิดไปซั่งและร่อนผ่านตะแกรงคัดขนาดเม็ดดินจะทำให้แบ่งดินออกเป็น 2 ลักษณะคือ อนุภาคดินที่มีขนาดใหญ่และขนาดเล็กหรือละเอียด กรณีดินดำมีอนุภาคขนาดใหญ่จะไม่สามารถผ่านตะแกรงได้นั้นมีปริมาณสูงที่สุดอยู่ที่ร้อยละ 42.7 และดินดำอีกส่วนหนึ่งที่มีอนุภาคขนาดเล็กจะสามารถร่อนผ่านตะแกรงได้มีปริมาณร้อยละ 57.3 รองลงมา คือ ดินแดงมีอนุภาคขนาดใหญ่ที่ปริมาณร้อยละ 35.7 และมีอนุภาคขนาดเล็กที่ปริมาณร้อยละ 64.3 ดินขาวมีอนุภาคขนาดใหญ่ที่ปริมาณร้อยละ 17.0 และมีอนุภาคขนาดเล็กอยู่ที่ปริมาณร้อยละ 83.0 และแร่เฟลด์สปาร์มีอนุภาคขนาดเล็กซึ่งสามารถร่อนผ่านตะแกรงได้ทั้งหมด เนื่องจากมีความละเอียดมาก ดังภาพที่ 6 แสดงผลการเปรียบเทียบปริมาณเนื้อดินก่อน หลังร่อนและตกค้าง

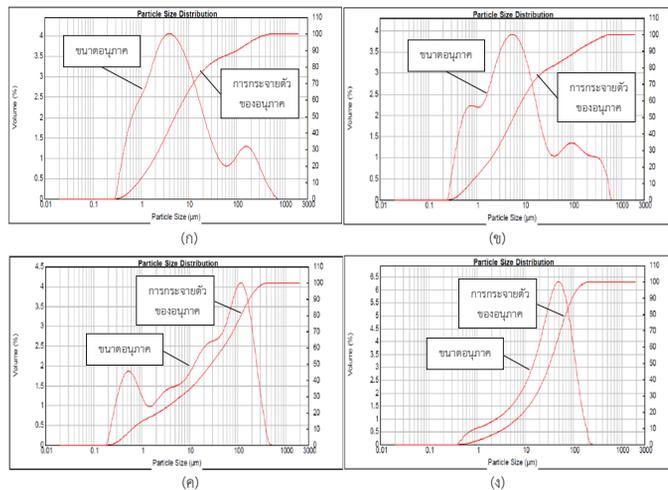


ภาพที่ 6 การเปรียบเทียบปริมาณเนื้อดินก่อน หลัง และตกค้างบนตะแกรงร่อนคัดขนาด 850 ไมโครเมตร

เมื่อนำดินแต่ละชนิดที่มีอนุภาคขนาดเล็กมาทดสอบโดยใช้เทคนิค Laser diffraction ด้วยเครื่อง Mastersizer-2000 (ตารางที่ 1) พบว่า ดินดำและดินแดงมีขนาดอนุภาค (D_{50}) ต่ำที่สุด มีค่าเท่ากับ 5.31 และ 5.97 ไมโครเมตร ตามลำดับโดยมีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติ (ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95) เนื่องจากดินถูกบดย่อยตามธรรมชาติเป็นระยะเวลาจนถึงทำให้ดินมีเนื้อละเอียดมาก [14] ดินขาวมีขนาดอนุภาคสูงกว่าดินดำและดินแดง เท่ากับ 28.40 และแร่เฟลด์สปาร์มีขนาดอนุภาคสูงที่สุด เท่ากับ

บนตะแกรงร่อนคัดขนาด นอกจากนี้ยังพบว่าดินที่มีอนุภาคขนาดใหญ่จะมีอินทรีย์สารและเศษเล็ก ๆ ของพลาสติกปนอยู่ในดินเป็นจำนวนมาก เมื่อนำเนื้อดินแต่ละชนิดที่ไม่สามารถร่อนผ่านตะแกรงมาวัดขนาดด้วยเวอร์เนียแบบดิจิทัลพบว่า ดินดำ ดินแดง และดินขาว มีขนาดอนุภาคเท่ากับ 6.99 ± 0.81 , 6.30 ± 0.60 และ 3.64 ± 0.45 มิลลิเมตรตามลำดับ เนื่องจากขนาดอนุภาคของดินจะส่งผลต่อการยึดเกาะกันและการผสมกันระหว่างส่วนผสมของดิน 2-3 ชนิด รวมถึงยังส่งผลถึงความแข็งแรง และความแกร่งของกระเบื้องดินเผาลอนกวางกลัยเป็นอย่างมาก โดยผลการวิเคราะห์ขนาดอนุภาคของดินทั้ง 4 ชนิด จะเห็นได้ว่ามีทั้งขนาดใหญ่และขนาดเล็กที่แตกต่างกันมากเกินไป ดังนั้นจึงควรนำดินไปผ่านกระบวนการบดย่อยเพื่อลดขนาดของอนุภาคดินก่อนที่จะถูกนำไปผ่านกระบวนการขึ้นรูปในขั้นตอนต่อไป [13]

32.79 ไมโครเมตร ในกรณีที่ดินดำและดินแดงมีการกระจายตัวของอนุภาคดินสูงที่สุด เท่ากับ 19.13 และ 20.28 โดยปริมาตร โดยมีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติ (ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95) ดังภาพที่ 7 (ก) และ (ข) ซึ่งการกระจายตัวของอนุภาคมีผลกระทบต่อการจัดเรียงตัวของอนุภาคของผลึกในเนื้อดินก่อนการเผา [5] ส่วนดินขาวและแร่เฟลด์สปาร์มีการกระจายตัวของอนุภาคลดลง เท่ากับ 6.19 และ 2.78 โดยปริมาตร ดังภาพที่ 7 (ค) และ (ง) ตามลำดับ



ภาพที่ 7 ขนาดและการกระจายตัวของอนุภาค (ก) ดินดำ (ข) ดินแดง (ค) ดินขาว และ (ง) แร่เฟลด์สปาร์

3. การศึกษาความหนาแน่นปรากฏ

จากผลการศึกษาความหนาแน่นปรากฏของดินแต่ละชนิด ดังแสดงไว้ในตารางที่ 1 พบว่า แร่เฟลด์สปาร์มีความหนาแน่นปรากฏสูงที่สุดอย่างมีนัยสำคัญ (ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95) มีค่าเท่ากับ 2.7111 กรัมต่อซีซี รองลงมาคือ ดินแดง และดินดำ เท่ากับ 2.6836 และ 2.5873 กรัมต่อซีซี ตามลำดับ และดินขาวมีความหนาแน่นปรากฏน้อยที่สุดเท่ากับ 2.5555 กรัมต่อซีซี

อภิปรายและสรุปผลการวิจัย

ผลการศึกษาความเป็นกรด-เบสของดินพบว่า ดินดำและดินแดงมีความเป็นกรดแก่ซึ่งสอดคล้องกับผลของ Keller และ Matlack [15] เนื่องจากการสร้างไฮโดรเจนไอออน (H⁺) จำนวนมากจากการเกิดปฏิกิริยาอเล็กโทรไลซิส จึงทำให้เนื้อดินมีความเป็นกรด โดยคาดว่าไฮโดรเจนไอออนจำนวนมากนี้อาจส่งผลให้การกระจายตัวของอนุภาคเพิ่มขึ้น และทำให้เกิดการแตกตัวของเม็ดดินอันเนื่องมาจากประจุบวกที่บริเวณพื้นผิวโดยแรงผลักทางไฟฟ้าสถิต นอกจากนี้ความเป็นกรดยังก่อให้เกิดความแข็งแรงของพันธะ จึงทำให้ผลึกดินมีโครงสร้างภายในที่แข็งแรง และความเป็นกรด-เบสของดินมีผลต่อสมบัติทางเนื้อสัมผัส ได้แก่ พื้นผิวจำเพาะ ขนาดรูพรุน และการกระจายของขนาดรูพรุน

อีกทั้งยังสามารถชี้ให้เห็นถึงสมบัติของการดูดซับบนพื้นผิว [11] และกระบวนการทางกายภาพ [9] ดินขาวมีความเป็นกลางเพราะมีส่วนประกอบทางเคมีเป็น Al₂O₃·2SiO₂·2H₂O ที่มีประจุบวกและประจุลบบนพื้นผิวเท่ากัน และแร่เฟลด์สปาร์มีความเป็นเบสแก่อันเนื่องมาจากการสร้างไฮดรอกซิลไอออน (OH⁻) จำนวนมาก และพฤติกรรมของเนื้อดินที่มีสภาพพื้นผิวเป็นลบอาจลดความแรงไอออน (ionic strength) จึงทำให้ดินมีลักษณะเป็นเม็ดและสามารถเกิดการรวมตัวกันเป็นก้อน ส่งผลให้เกิดตำหนิแบบหลุมบนผิวกระเบื้องมุงหลังคาดินเผาได้

ผลการศึกษาขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคดินโดยใช้ตะแกรงร่อนคัดขนาดดินพบว่า ดินดำ ดินแดง ดินขาว ไม่สามารถร่อนผ่านตะแกรงได้ทั้งหมดเนื่องจากมีอนุภาคขนาดใหญ่ แต่แร่เฟลด์สปาร์สามารถร่อนผ่านตะแกรงได้ทั้งหมด แสดงให้เห็นถึงกระบวนการเตรียมเนื้อดินของโรงงานอุตสาหกรรมนี้มีอนุภาคดินขนาดไม่เท่ากันปะปนอยู่เป็นจำนวนมาก ทั้งนี้คาดว่าอาจเกิดจากการบดดินและร่อนดินในขั้นตอนการเตรียมวัตถุดิบก่อนการผสมนั้นมีความละเอียดไม่เพียงพอ และตะแกรงร่อนดินของโรงงานอุตสาหกรรมอาจมีขนาดไม่เหมาะสม ทำให้สามารถนำไปสู่การเกิดส่วนผสมของเนื้อดินเข้ากัน ไม่นิ่ง [5] ส่งผลให้การประสานตัวของเนื้อดินจะเข้ากันไม่ดีเมื่อหมักทิ้งไว้ จึงทำให้



มีฟองอากาศเล็ก ๆ ปนกับน้ำผสมดิน แล้วเมื่อเข้าเครื่องรีด เนื้อดินอาจไม่เป็นเนื้อเดียวกัน ส่งผลกระทบต่อการเกิด ปริมาณรูพรุนและตำหนิต่าง ๆ ในเนื้อผลิตภัณฑ์ รวมทั้ง รอยร้าวและลักษณะผิวเคลือบไม่เรียบบนตัวอย่างชิ้นงาน นอกจากนี้ดินที่มีอนุภาคขนาดใหญ่อาจไปอยู่ที่ผิวของบิสกิต หรือผิวของเนื้อดินดิบ อนุภาคเหล่านี้จะไม่ดูดซึมน้ำเคลือบ ในขณะที่ชุบทำให้เคลือบแยกตัวออกเป็นรูเล็กๆ และขนาดของ รูจะขยายมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิในการเผาเคลือบสูงขึ้น เนื่องจากแรงดึงผิวของเคลือบ [7] ผลการวิเคราะห์ขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคโดยใช้เครื่อง Mastersizer-2000 พบว่า ดินดำและดินแดงมีขนาดอนุภาคต่ำที่สุด โดยมีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติ (ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95) เมื่อเปรียบเทียบกับดินขาวและแร่เฟลด์สปาร์มีขนาดอนุภาคเพิ่มสูงขึ้นตามลำดับ ซึ่งผลการทดลองนี้มีขนาดอนุภาคใหญ่กว่า งานวิจัยอื่น ๆ เป็นอย่างมาก [14, 16] โดยงานวิจัยของ Chapman [16] มีขนาดอนุภาคของดินน้อยกว่า 5 ไมโครเมตร แต่แร่เฟลด์สปาร์จากโรงงานอุตสาหกรรมมีขนาดอนุภาคอยู่ในช่วงระหว่าง 19-38 ไมโครเมตร ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Xu และคณะ [17] นอกจากนี้ยังพบว่าในเนื้อดินมี อินทรีย์สารและเศษเล็ก ๆ ของพลาสติกเจือปนอยู่ โดยมีเนื้อดินอาจส่งผลให้เกิดการเผาไหม้กลายเป็นก๊าซตันผิวเคลือบออกมาและทิ้งตำหนิเอาไว้ที่ผิวระหว่างเนื้อดินกับชั้นเคลือบ ซึ่งถ้าเคลือบมีความหนืดและมีแรงดึงผิวสูงก็จะทำให้เกิดตำหนิขึ้นที่ตำแหน่งนี้ได้ ดังนั้นจึงควรมีการล้างดินให้สิ่งเจือปนออกให้หมดก่อนนำไปใช้งาน ในส่วนของดินดำและดินแดงมีการกระจายตัวสูงที่สุดโดยไม่แตกต่างกันทางสถิติ (ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95) แต่ดินขาวและแร่เฟลด์สปาร์มีการกระจายตัวของอนุภาคลดลง แสดงให้เห็นถึงอนุภาคมีการจัดเรียงตัวกันอย่างใกล้ชิดส่งผลต่อการเกิดตำหนิแบบหลุมบนผลิตภัณฑ์

ผลการศึกษาความหนาแน่นปรากฏของดินพบว่า ดินดำและดินแดงมีความหนาแน่นปรากฏน้อยกว่าแร่เฟลด์สปาร์ อาจเป็นเพราะเนื้อดินมีอนุภาคขนาดเล็กและมีช่องว่างการกระจายตัวที่สูงส่งผลให้เนื้อดินมีความหนาแน่นปรากฏลดลง ส่วนแร่เฟลด์สปาร์มีความหนาแน่นปรากฏสูง

ที่สุด เพราะโครงสร้างของเฟลด์สปาร์มีการอัดตัวแน่นส่งผลให้เกิดการเกาะกลุ่มกัน ซึ่งมีผลสอดคล้องกับการวิเคราะห์ขนาดและการกระจายตัวของอนุภาค อย่างไรก็ตามวัสดุที่มีความหนาแน่นปรากฏสูงอาจทำให้ส่วนผสมหลักเกิดการจับตัวกันเป็นก้อน และขัดขวางการจัดเรียงตัวของอนุภาคชนิดอื่นได้ ซึ่งมีผลกระทบต่อสมบัติทางกลของผลิตภัณฑ์ที่ด้อยลง และดินขาวมีความหนาแน่นปรากฏน้อยที่สุด เนื่องจากดินขาวมีการกระจายตัวของอนุภาคที่สูงแต่สามารถทำให้เกิดฟองอากาศขนาดเล็กๆ ปรากฏอยู่ในช่องว่างของเนื้อดินได้ง่าย แต่หลังจากนำดินไปผ่านกระบวนการบดย่อยและร่อนดินอีกครั้ง รวมทั้งการนวดดินให้อัดแน่นเป็นเนื้อเดียวกันเพื่อลดฟองเล็ก ๆ ที่อยู่ในเนื้อดินกลับพบว่า เนื้อดินมีฟองอากาศลดลงซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ จุติภา และปราณี [18] และทำการตรวจวิเคราะห์เพื่อยืนยันผลด้วยการทดสอบกระเบื้องตัวอย่างที่มีค่าการดูดซึมน้ำร้อยละ 6.89 และมีความต้านทานต่อการหัก เท่ากับ 226.44 กิโลกรัมแรง โดยมีผลต่อสมบัติทางกลที่ดีขึ้น

จากผลการศึกษาสมบัติของดินดำ ดินแดง ดินขาว และแร่เฟลด์สปาร์ในกระบวนการเตรียมวัตถุดิบหลักสำหรับการผลิตกระเบื้องมุงหลังคาดินเผาลอนกาบกล้วยเกิดตำหนิต่าง ๆ บนตัวผลิตภัณฑ์โดยใช้แผนภูมิแกงปลาช่วยในการวิเคราะห์ปัญหาและหาสาเหตุของปัญหาพบว่า ปัญหาหลักเกิดจากขาดการควบคุมคุณภาพวัตถุดิบจึงทำให้เกิดตำหนิฟองอากาศใน เนื้อดิน และทำการวิเคราะห์สมบัติทางเคมีและทางกายภาพของดินแต่ละชนิด ได้แก่ ความเป็นกรด-เบส ขนาดและการกระจายตัวของอนุภาค และความหนาแน่นปรากฏเพื่อนำไปปรับปรุงแก้ไขข้อบกพร่องในกระบวนการผลิตมีดังนี้ ผลการศึกษาคือความเป็นกรด-เบสพบว่า ดินดำและดินแดงมีความเป็นกรดแก่ แต่ดินขาวมีความเป็นกลาง และแร่เฟลด์สปาร์มีความเป็นเบสแก่ ผลการศึกษารูพรุนและการกระจายตัวของอนุภาคพบว่า แร่เฟลด์สปาร์มีขนาดอนุภาคสูงที่สุด รองลงมาคือ ดินขาว ส่วนดินดำและดินแดงมีขนาดอนุภาคต่ำสุดโดยไม่แตกต่างกันทางสถิติ (ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95) และยังพบอินทรีย์สารปนอยู่ในเนื้อดินเป็นจำนวนมาก ในทางตรงกันข้ามแร่เฟลด์สปาร์และ



ดินขาวมีการกระจายตัวของอนุภาคต่ำที่สุด รองลงมาคือ ดินดำและดินแดงมีการกระจายตัวของขนาดอนุภาคต่ำสุด โดยไม่แตกต่างกันทางสถิติ (ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95) ผลการศึกษาความหนาแน่นปรากฏพบว่า แร่เฟลด์สปาร์มีความหนาแน่นปรากฏสูงที่สุด รองลงมา คือ ดินแดง ดินดำ และดินขาว ตามลำดับ ดังนั้นการวิเคราะห์สมบัติทางเคมีและทางกายภาพของดินสามารถนำไปใช้ประโยชน์สำหรับเป็นแนวทางในการปรับปรุงกระบวนการผลิต โดยการกำจัดอินทรีย์สารที่ปนอยู่ในดิน การเพิ่มความละเอียดในการบดและร่อนดิน รวมทั้งการนวดดินให้อัดแน่นเป็นเนื้อเดียวกันสามารถช่วยลดการเกิดตำหนิฟองอากาศในเนื้อดินได้

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏราชนครินทร์ และศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการเอื้อเฟื้อสถานที่ อุปกรณ์ ส่งเสริมและสนับสนุนเกี่ยวกับงานวิจัยครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

1. Saiintawong K. Process of ceramic roof tile. *Ceram J* 2009;13(31):11-15.
2. คชินท์ สายอินทวงศ์. การจำแนกแยกแยะข้อมูลเพื่อการแก้ปัญหา. *Thai ceramic society.com* [อินเทอร์เน็ต]. 2551 [เข้าถึงเมื่อ 8 ม.ค. 2562]. เข้าถึงได้จาก: http://www.thaiceramicsociety.com/ts_position.php
3. วรณา ต.แสงจันทร์, ฉัตรกล้า ติตะปิ่น, ฉัตรชัย บาลศรี, ปราณี จันทร์ลา, อินทรา มาฆพัฒน์สิน. การควบคุมคุณภาพในดิน. เอกสารประกอบการฝึกอบรมเชิงปฏิบัติการ [อินเทอร์เน็ต]. 2555 [เข้าถึงเมื่อ 16 ก.พ. 2562]. เข้าถึงได้จาก: http://lib3.dss.go.th/fulltext/dss_manual/M040.pdf
4. Thipjariyudom Y. Enjoy the activity of GLOBE. *Sci J* 2003;31(126):35-42.

5. Kunyodying T. The effect of changes in talc size on the properties of earthenware. *Ind Technol Lampang Rajabhat Uni J* 2015;8(1):34-45.
6. Lawanwadeekul S, Boonma M. Effects of grinding and firing temperatures on physical and mechanical properties of common bricks from ban san bun reung community enterprise group lampang province. *Ind Technol Lampang Rajabhat Uni J* 2015;8(1):70-78.
7. คชินท์ สายอินทวงศ์. บอกลา..ตำหนิรูเข็ม. *วารสารเซรามิกส์* 2553;14(33):20-24.
8. Korwuttipong P. Development of a clay mixture from Ban Nong Hua Yang soil for stoneware pottery production. *Ind Technol Lampang Rajabhat Uni J* 2017;10(1):60-74.
9. Abuh MA, Abia-Basseyy N, Udeinya TC, Nwannewuihe HU, Abong AA, Akpomie KG. Industrial potentials of adiabo clay in calabar municipal of cross river state south south Nigeria. *Pac J Sci Technol* 2014;15(1):63-75.
10. Qi F, Zhang R, Liu X, Niu Y, Zhang H, Li H, et al. Soil particle size distribution characteristics of different land-use types in the Funiu mountainous region. *Soil Till Res* 2018;184:45-51.
11. Vinati A, Mahanty B, Behera SK. Clay and clay minerals for fluoride removal from water: a state-of-the-art review. *App Clay Sci* 2015;114:340-8.
12. ดร.ณิ วัฒนศิริเวช, สุธิ วัฒนศิริเวช, อภินันท์ นันทิยา. การศึกษาและปรับปรุงคุณสมบัติของเนื้อดินเซรามิกจากแหล่งดินเวียงกาหลง. รายงานการวิจัยมหาวิทยาลัยแม่ฟ้าหลวง. เชียงราย; 2562.



13. ภัทรพล เรืองศรี, จตุรงค์ เลาะห์เพ็ญแสง, ทรงวุฒิ เอกภูมิวงศา. การศึกษากระบวนการใช้ประโยชน์จากวัสดุเหลือใช้ประเภทกระเบื้องเซรามิกส์เพื่อประยุกต์ใช้ในการพัฒนาผลิตภัณฑ์ชุมชน. วารสารวิชาการ ศิลปะสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร 2561; 9(2):101-17.
14. มิ่งสรรพ์ ขาวสอาด, ศิริธันว์ เจียมศิริเลิศ, อนุชา วรรณก้อน, อัครพงศ์ อันทอง, อนุชา พรหมวังขวา, วันทนีย์ พุกกะคุปต์ และคณะ. ผลงานวิจัยและพัฒนาสูตรเคลือบและวิธีการใช้งานระบบฐานข้อมูลสูตรเคลือบสำหรับอุตสาหกรรมเซรามิก. พิมพ์ครั้งที่ 1. ปทุมธานี: ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี; 2557.
15. Keller WD, Matlack K. The pH of clay suspensions in the field and laboratory, and methods of measurement of their pH. *App Clay Sci* 1990;5(2)123-33.
16. Chapman RS. Particle size and X-ray analysis of feldspar, calvert, ball and jordan soils. Washington, D.C.: Nasa Langley Research Center; 1977.
17. Xu L, Tian J, Wu H, Deng W, Yang Y, Sun W, et al. New insights into the oleate flotation response of feldspar particles of different sizes: anisotropic adsorption model. *J Colloid Interface Sci* 2017; 505:500-8.
18. จุติภา บุญวิเศษ, ปราณี จันทร์ลา. กระบวนการผลิตเซรามิก. เอกสารประกอบการฝึกอบรมเชิงปฏิบัติการหลักสูตร “กระบวนการผลิต การตกแต่งลวดลาย การพัฒนารูปแบบ และศึกษาดูงาน”. นราธิวาส: สำนักเทคโนโลยีชุมชน กรมวิทยาศาสตร์บริการ กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี; 2558.