

# ผลของการเติมแคลเซียมคาร์บอเนตที่มีต่อการเกิดตำหนิแบบหลุมใน ผลิตภัณฑ์กระเบื้องมุงหลังคาดินเผาลอนกาบกล้วย

## Effect of Calcium Carbonate Addition on Hole Defect in Kab-Kluay Terracotta Roof Tile Products

ศรินยา ประทีปชนะชัย\*

Sarinya Prateepchanachai

สาขาวิชาวิศวกรรมการจัดการอุตสาหกรรม คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏราชนครินทร์

Industrial Management Engineering Department, Faculty of Industrial Technology,

Rajabhat Rajanagarindra University

Received : 23 April 2019

Revised : 19 August 2019

Accepted : 8 October 2019

### บทคัดย่อ

แคลเซียมคาร์บอเนตมีสมบัติบางประการที่น่าสนใจสำหรับนำมาใช้งานในอุตสาหกรรมกระเบื้องดินเผา แต่อาจทำให้เกิดตำหนิบนพื้นผิวของผลิตภัณฑ์ จึงนำมาสู่การพิจารณาสมบัติของแคลเซียมคาร์บอเนตเพื่อลดการสูญเสียของผลิตภัณฑ์ งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาชนิดของสารประกอบ องค์ประกอบทางเคมี ขนาดและการกระจายตัว และศักย์ไฟฟ้าของวัสดุสำหรับการผลิตกระเบื้องดินเผาลอนกาบกล้วย จากผลการศึกษานี้พบว่า ตำแหน่ง 2θ เท่ากับ 25.76°, 28.76°, 29.47°, 32.06°, 32.88°, 34.21°, 39.77°, 47.24°, 49.21° และ 50.99° เป็นตำแหน่งพีคการเลี้ยวเบนของแคลเซียมคาร์บอเนตซึ่งช่วยยืนยันสาเหตุการเกิดตำหนิแบบหลุม การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุ 4 ชนิด ได้แก่ ดินดำ ดินแดง ดินขาว และเฟลด์สปาร์ พบว่าองค์ประกอบทางเคมีเรียงจากมากไปน้อย คือ ซิลิกา อะลูมินา และฮีมาไทต์ ตามลำดับ จากการศึกษาส่วนผสมของดินที่มีปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตแตกต่างกัน ตั้งแต่ร้อยละ 20 โดยน้ำหนักขึ้นไป มีขนาดอนุภาคน้อยกว่า 1.01, 0.96 และ 1.09 ไมโครเมตร มีอยู่ร้อยละ 10 โดยปริมาตร ตามลำดับ และอนุภาคที่มีขนาดน้อยกว่า 7.19, 7.35 และ 9.21 ไมโครเมตร มีอยู่ร้อยละ 50 โดยปริมาตร ตามลำดับ ส่งผลให้มีขนาดอนุภาคใหญ่ขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับสูตรดินผสมจากโรงงานอุตสาหกรรม และปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตตั้งแต่ร้อยละ 30 โดยน้ำหนักขึ้นไป ส่งผลให้มีการกระจายขนาดอนุภาคลดลง เท่ากับ 4.42 และ 3.56 ตามลำดับ ดังนั้นการเติมสูตรผสมดินจากโรงงานอุตสาหกรรมร่วมกับแคลเซียมคาร์บอเนตร้อยละ 20 โดยน้ำหนักมีการกระจายตัวของอนุภาคดินดีที่สุด และการศึกษาค่าศักย์ไฟฟ้า พบว่าปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตตั้งแต่ร้อยละ 30 โดยน้ำหนักขึ้นไป ทำให้ค่าศักย์ไฟฟ้าลดลงแต่ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ เท่ากับ -57.8 และ -58.0 มิลลิโวลต์ ตามลำดับ อาจส่งผลให้อนุภาคของดินเกิดการรวมกลุ่มกันเป็นก้อนและสมบัติความเป็นความเหนียวของเนื้อดินลดลง

**คำสำคัญ** : แคลเซียมคาร์บอเนต, ขนาดและการกระจายตัว, ศักย์ไฟฟ้า, ตำหนิแบบหลุม

\*Corresponding author. E-mail : sarinya\_prateep@hotmail.com

### Abstract

Calcium carbonate has some interesting qualities for applying in the terracotta roof tile product industry, but it could result in product defects, therefore, this studies to the consideration of calcium carbonate's property in order to reduce the loss of products. This research purposed to study the composition, the chemical composition, the particle-size distribution, and the zeta potential of the raw materials for the production of Kab-Kluay terracotta roof tile products. According to the study of the composition, it was found that the  $2\theta$  was  $25.76^\circ$ ,  $28.76^\circ$ ,  $29.47^\circ$ ,  $32.06^\circ$ ,  $32.88^\circ$ ,  $34.21^\circ$ ,  $39.77^\circ$ ,  $47.24^\circ$ ,  $49.21^\circ$ , and  $50.99^\circ$ ; which are the diffraction pattern of calcium carbonate that confirm the cause of hole defect. From the analysis of the chemical composition of the 4 types of raw materials, which were ball clay, red ball clay, kaolin, and feldspar, then compose of silica, alumina, and hematite, respectively. The study of different calcium carbonate more than 20% by weight, it was found that the calcium carbonate has the size of particle less than 1.01, 0.96, and 1.09  $\mu\text{m}$  have 10% by volume respectively, while the smaller size than 7.19, 7.35, and 9.21  $\mu\text{m}$  having 50% by volume respectively. This results in a larger size compared to the formula used by the industrial factory and by adding 30% more of calcium carbonate by weight decreases particle diffusion by 4.42 and 3.56 respectively. Therefore, the addition formula with the best particle-size distribution was derived from the formula used by industrial factory combined with 20% by weight of calcium carbonate. Regarding the study of the zeta potential, it was found that calcium carbonate increases by 30% and 50% by weight cause a decrease of zeta potential without any significant differences at -57.8 and -58.0 mV, respectively. This may affect the clay particles agglomeration and plasticity of clay decrease.

**Keywords** : calcium carbonate, particle-size distribution, zeta potential, hole defect

### บทนำ

เมื่อเร็ว ๆ นี้ ดินได้รับความสนใจอย่างมากในหลายกลุ่มอุตสาหกรรม เนื่องจากเป็นวัสดุที่มีสมบัติทางเคมีกายภาพ และสมบัติเป็นพลาสติกที่น่าสนใจ ในบรรดากลุ่มอุตสาหกรรมที่นิยมนำดินมาใช้งานกันอย่างแพร่หลายมากที่สุดนั้นคือ อุตสาหกรรมกระเบื้องมุงหลังคาดินเผา ซึ่งมีอายุการใช้งานที่ยาวนานสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานด้านสิ่งก่อสร้างที่หลากหลายรูปแบบ ได้แก่ หลังคาโบสถ์ หลังคาบ้านทรงไทย หลังคาอาคารสิ่งก่อสร้างที่มีสถาปัตยกรรมเชิงอนุรักษ์ อาคารร้านค้า โรงแรมและรีสอร์ท เป็นต้น โดยผลิตภัณฑ์ดังกล่าวผู้บริโภคมักมีการดำเนินการสั่งซื้อในปริมาณมากและยังมีแนวโน้มการเติบโตของตลาดอย่างต่อเนื่อง นอกจากนี้ ยังพบว่ามีการแข่งขันการออกแบบและพัฒนาโครงสร้างกระเบื้องมุงหลังคา ดินเผาที่แข็งแรงมากขึ้น จึงทำให้ผู้ประกอบการจำเป็นต้องมองหาเทคนิคและวัตถุดิบใหม่อยู่เสมอเพื่อปรับปรุงคุณภาพของ ผลิตภัณฑ์ตลอดจนการลดต้นทุนในการผลิต (Theerapapvisetpong & Nilpairach, 2019) โดยทั่วไป วัตถุดิบในการผลิต กระเบื้องมุงหลังคาดินเผาประกอบด้วย ดินดำ ดินแดง และดินขาว ซึ่งทำหน้าที่เป็นพลาสติกของดิน และเฟลด์สปาร์จะทำ

หน้าที่เป็นฟลักซ์ทำให้หลอมตัวที่อุณหภูมิต่ำลง (Kamseu *et al.*, 2007) ซึ่งการนำวัสดุดิบแต่ละชนิดมาผสมกันอาจส่งผลต่อสมบัติของผลิตภัณฑ์ขั้นสุดท้ายที่เกิดจากกระบวนการอัดขึ้นรูปและการเผาซินเทอร์เป็นอย่างมาก (Alcântara *et al.*, 2008)

แคลเซียมคาร์บอเนต (Calcium carbonate) หรือแคลไซต์ (Calcite) เป็นแร่ชนิดหนึ่งที่พบมากที่สุดในธรรมชาติ โครงสร้างหลักประกอบด้วย แคลเซียมไอออน ( $\text{Ca}^{2+}$ ) และคาร์บอเนตไอออน ( $\text{CO}_3^{2-}$ ) ที่ยึดเหนี่ยวกันด้วยพันธะไอออนิก มีสูตรทางเคมี คือ  $\text{CaCO}_3$  จากโครงสร้างทางเคมีดังกล่าวจึงมีการนำแคลเซียมคาร์บอเนตไปใช้ประโยชน์เป็นสารตั้งต้นในอุตสาหกรรมกระเบื้องดินเผา สามารถช่วยลดต้นทุนทั้งปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าและปริมาณเชื้อเพลิงลงได้ โดยทำหน้าที่เป็นฟลักซ์ช่วยให้อุณหภูมิซินเทอร์ลดลง เนื่องจากแร่ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของดินในระหว่างการปรับสภาพด้วยความร้อนจึงทำให้โครงสร้างในเนื้อดินไม่มีความพรุนตัว (Vitreous phase) มากขึ้นที่อุณหภูมิต่ำลงเมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุที่ปราศจากคาร์บอเนต (Martirena *et al.*, 2006) นอกจากนี้ ยังช่วยลดทั้งการหดตัวของผลิตภัณฑ์หลังจากการเผาอันเนื่องมาจากการเกิดผลึกของ Andalusite ( $\text{Al}_2\text{SiO}_5$ ) และ Gehlenite ( $\text{CaAl}_2\text{SiO}_7$ ) และการขยายตัวเชิงปริมาตรของผลิตภัณฑ์หลังการเผาเพิ่มขึ้น (Vodova *et al.*, 2014) อย่างไรก็ตาม การประยุกต์ใช้แคลเซียมคาร์บอเนตมักประสบปัญหาการผสมร่วมกับวัสดุหลักในปริมาณที่ไม่เหมาะสม ซึ่งแคลเซียมคาร์บอเนตเป็นส่วนผกผันกับดัชนีพลาสติก (Plasticity index) (Tonnisen *et al.*, 1985) เนื่องจากปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตที่เพิ่มมากขึ้นส่งผลต่อความเสถียรทางความร้อนและสมบัติทางกลลดลง เพราะมีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างผิวของแคลเซียมคาร์บอเนตและดินที่ไม่ดี ทำให้แคลเซียมคาร์บอเนตไม่สามารถช่วยเพิ่มการประสานผลึกของวัสดุต่าง ๆ ให้หลอมละลายเป็นเนื้อเดียวกันได้ดีเท่าที่ควร ส่งผลให้เกิดปัญหาตำหนิบนพื้นผิวของผลิตภัณฑ์ตามมาได้

จากการสำรวจข้อมูลการผลิตกระเบื้องดินเผาของโรงงานอุตสาหกรรมแห่งหนึ่งใน อ. บางคล้า จ. ฉะเชิงเทรา พบว่าในกระบวนการผลิตมีของเสียเกิดขึ้นเป็นจำนวนมากอยู่ในช่วงร้อยละ 20-50 ต่อหนึ่งครั้งและไม่ทราบสาเหตุที่ชัดเจน ทั้งนี้มีสมมติฐานมาจากการเติมแคลเซียมคาร์บอเนตผสมกับวัสดุหลักในขั้นตอนการเตรียมเนื้อดินอาจส่งผลกระทบต่อขั้นตอนการเผาผลิตภัณฑ์ ซึ่งไม่สามารถหลอมผลึกแคลเซียมคาร์บอเนตให้ลดลงและเกิดกระจายขนาดอนุภาคในเนื้อดินได้ดีเท่าที่ควร ส่งผลให้แคลเซียมคาร์บอเนตเกิดการเกาะกลุ่มกันเป็นก้อนสีขาว ก่อให้เกิดข้อบกพร่องเป็นตำหนิแบบหลุมบนผิวกระเบื้องดินเผา ซึ่งปัญหาดังกล่าวนี้สร้างความเสียหายให้แก่ผู้ประกอบการโรงงานอุตสาหกรรมเป็นอย่างมาก จากกระบวนการผลิตที่ขาดการควบคุมคุณภาพในขั้นตอนการเตรียมเนื้อดินทำให้ส่งผลกระทบต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ขั้นสุดท้าย และทำให้เกิดการเพิ่มค่าใช้จ่ายของวัสดุ เชื้อเพลิง และเสียเวลา นอกจากนี้ผู้ประกอบการไม่สามารถซ่อมแซมตำหนิแบบหลุมบนผิวของกระเบื้องเพื่อนำกลับมาจำหน่ายอีกครั้งหนึ่งได้ ดังนั้นตำหนิแบบหลุมอันเนื่องมาจากการเติมแคลเซียมคาร์บอเนตจึงเป็นสิ่งที่ผู้ประกอบการในโรงงานอุตสาหกรรมนี้ไม่ต้องการให้เกิดขึ้น แม้จะมีการตัดสินใจแก้ปัญหาดังกล่าวโดยยกเลิกการใช้แคลเซียมคาร์บอเนตแล้วก็ตาม แต่เป็นการแก้ปัญหาที่ปลายเหตุซึ่งไม่ได้ช่วยลดต้นทุนการผลิตของโรงงานอุตสาหกรรมอย่างแท้จริง ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงศึกษาผลของการเติมแคลเซียมคาร์บอเนตผสมในขั้นตอนการเตรียมเนื้อดินสำหรับกระบวนการผลิตกระเบื้องดินเผาแบบกบด้วยแบบไม่เคลือบ โดยใช้แผนภูมิแก๊งปาลามาช่วยวิเคราะห์ปัญหาและสาเหตุที่ส่งผลกระทบต่อการผลิตตำหนิแบบหลุมบนผิวของผลิตภัณฑ์ การวิเคราะห์ชนิดของสารประกอบที่ทำให้เกิดตำหนิดังกล่าวด้วยเทคนิคเอกซเรย์ดิฟแฟร็กโตมิเตอร์ (X-Ray Diffractometer; XRD) เพื่อยืนยันสมมติฐานที่มีสาเหตุมาจากแคลเซียมคาร์บอเนต และการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของเนื้อดินที่ใช้เป็นวัสดุหลัก ได้แก่ ดินดำ ดินแดง ดินขาว และเฟลด์สปาร์ด้วยเทคนิค

เอกซเรย์ฟลูออเรสเซนส์ (X-Ray Fluorescence; XRF) นอกจากนี้ยังได้ทดลองผสมสูตรดินจากโรงงานอุตสาหกรรมผสมร่วมกับแคลเซียมคาร์บอเนตที่มีระดับความเข้มข้นแตกต่างกัน ได้แก่ ร้อยละ 10, 20, 30 และ 50 โดยน้ำหนัก เพื่อเปรียบเทียบปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตที่เหมาะสมต่อการผลิตกระเบื้องดินเผาลอนนากบกล้วยแบบไม่เคลือบ ตลอดจนการวิเคราะห์ขนาดและการกระจายตัวของอนุภาค และอิทธิพลของแคลเซียมคาร์บอเนตที่มีผลต่อประจุบนพื้นผิวของเนื้อดินด้วยการวิเคราะห์ค่าศักย์ซีต้า (Zeta potential) ซึ่งแทบจะยังไม่มียุทธศาสตร์ศึกษาความสัมพันธ์ของตัวแปรต่าง ๆ ดังกล่าวข้างต้นสำหรับการนำข้อมูลมาช่วยวิเคราะห์สาเหตุที่ทำให้เกิดตำหนิแบบหลุม เพื่อช่วยลดความเสียหายของผลิตภัณฑ์และเป็นประโยชน์ต่อการพัฒนาอุตสาหกรรมการผลิตกระเบื้องดินเผาต่อไป

## วิธีดำเนินการวิจัย

การศึกษาผลของการเติมแคลเซียมคาร์บอเนตในการเตรียมเนื้อดินสำหรับการผลิตกระเบื้องดินเผาลอนนากบกล้วยแบบไม่เคลือบ เพื่อวิเคราะห์สาเหตุการเกิดตำหนิแบบหลุมบนพื้นผิวของกระเบื้อง มีรายละเอียดตามลำดับต่อไปนี้

### 1. วัสดุอุปกรณ์

ในงานวิจัยนี้ใช้ดินดำ ดินแดง ดินขาว และเฟลด์สปาร์จากโรงงานอุตสาหกรรม (ฉะเชิงเทรา ประเทศไทย) ในส่วนของแคลเซียมคาร์บอเนตจัดซื้อจากร้านสมัยการค้า (ฉะเชิงเทรา ประเทศไทย) ดังแสดงในภาพที่ 1 และน้ำปราศจากไอออนจัดซื้อจากบริษัท ทโรปี้ก้าไลฟ์ จำกัด (กรุงเทพมหานคร ประเทศไทย)



ภาพที่ 1 แคลเซียมคาร์บอเนตทางการค้า

### 2. การเตรียมอัตราส่วนผสมของดิน

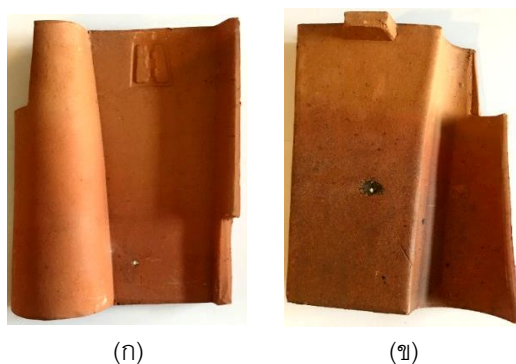
สำหรับการเตรียมอัตราส่วนผสมของเนื้อดินในแต่ละสูตร กระทำโดยการนำสูตรผสมดินจากโรงงานอุตสาหกรรมผสมร่วมกับแคลเซียมคาร์บอเนตร้อยละ 10, 20, 30 และ 50 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ ดังตารางที่ 1 หลังจากนั้นนำวัตถุดิบแต่ละสูตรมาผ่านการบดและผสมให้เป็นเนื้อเดียวกันด้วยเครื่องบดอัตโนมัติความเร็วสูง จากบริษัท KAMP Engineering Group CO., Ltd. เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ก่อนนำไปทดสอบสมบัติต่าง ๆ ของดินต่อไป

**ตารางที่ 1** อัตราส่วนผสมของสูตรผสมดินจากโรงงานอุตสาหกรรมต่อแคลเซียมคาร์บอเนตในแต่ละสูตร

สูตรผสมดิน	สูตรผสมดินจากโรงงานอุตสาหกรรม (กรัม)	แคลเซียมคาร์บอเนต (กรัม)
1.	90	10
2.	80	20
3.	70	30
4.	50	50

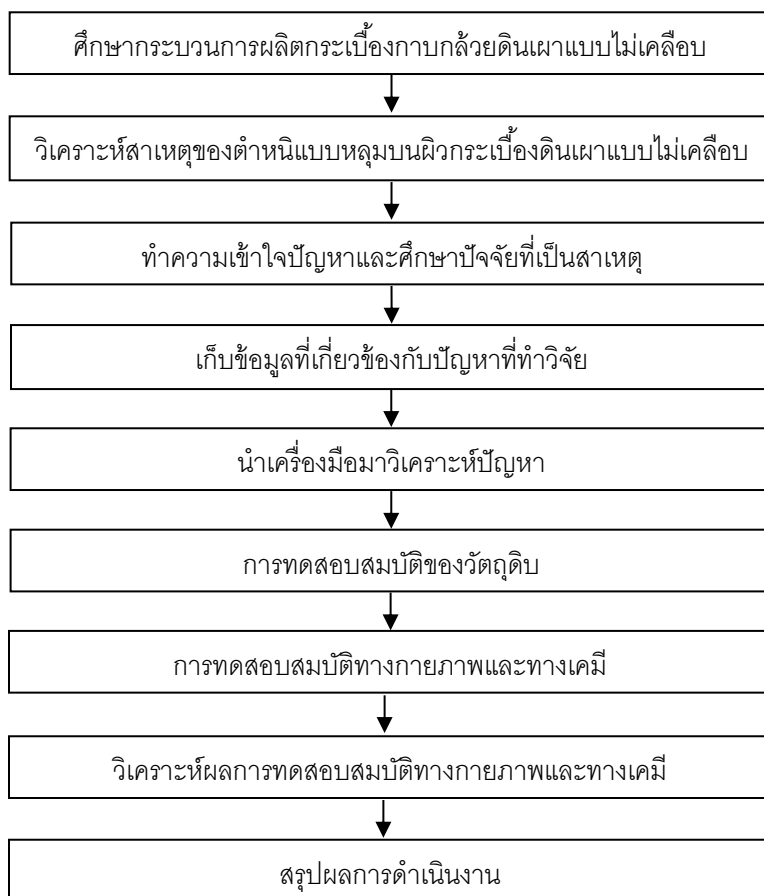
### 3. ขั้นตอนการดำเนินการทดลอง

การศึกษาผลของการเติมแคลเซียมคาร์บอเนตในกระบวนการผลิตกระเบื้องดินเผาลอนกากด้วยแบบไม่เคลือบ เริ่มต้นจากการวิเคราะห์หาชนิดและปริมาณของสารประกอบต่าง ๆ ในการเกิดตำหนิแบบหลุมบนผิวกระเบื้องดินเผา ดังภาพที่ 2 แสดงลักษณะการเกิดหลุมบนผิวกระเบื้องที่มีลักษณะเป็นก้อนผงสีขาว ผู้วิจัยจึงนำเฉพาะก้อนสีขาวไปวิเคราะห์หาชนิดของสารประกอบโดยใช้เครื่อง XRD เพื่อยืนยันสมมติฐานการเกิดตำหนิแบบหลุมอันเนื่องมาจากผลของการเติมแคลเซียมคาร์บอเนต



**ภาพที่ 2** ตำหนิแบบหลุม (ก) ด้านหน้า (ข) ด้านหลัง บนผิวกระเบื้องดินเผาลอนกากด้วยแบบไม่เคลือบ

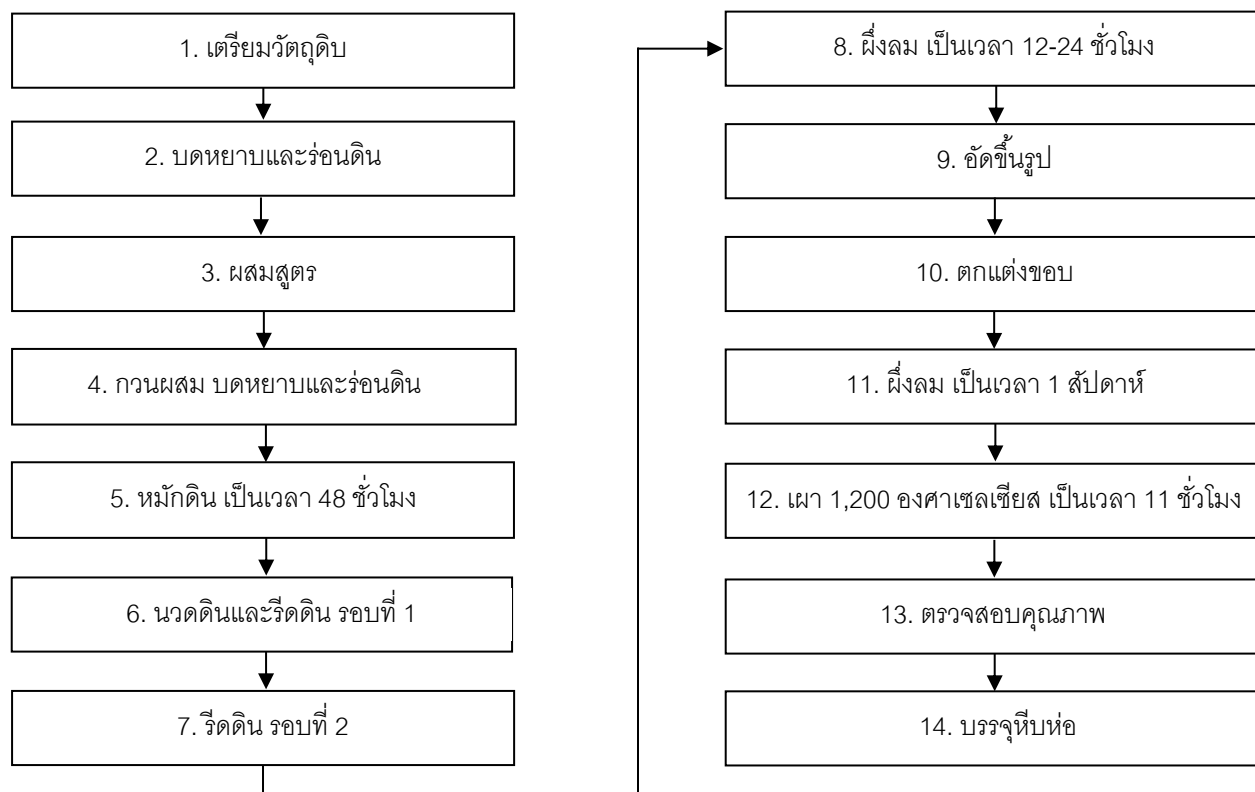
จากปัญหาของโรงงานอุตสาหกรรมดังกล่าวข้างต้น ผู้วิจัยจึงดำเนินการศึกษากระบวนการผลิต การวิเคราะห์หาสาเหตุของปัญหา และทดสอบสมบัติของดิน ซึ่งเป็นสิ่งที่มีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการช่วยอธิบายสาเหตุการเกิดตำหนิแบบหลุมบนผิวของกระเบื้องดินเผาลอนกากด้วยแบบไม่เคลือบได้อย่างเหมาะสม ในกระบวนการดำเนินงานศึกษาวิจัย ได้สรุปขั้นตอนต่าง ๆ ดังภาพที่ 3



ภาพที่ 3 แผนภูมิขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

#### 4. การศึกษากระบวนการผลิตกระบื้องานกัลวายนิกเกิลแบบไม่เคลือบ

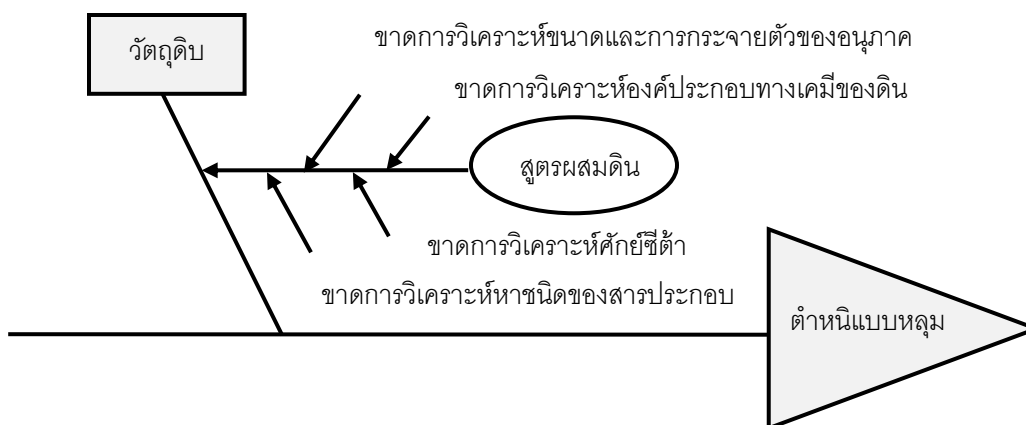
ผู้วิจัยได้ทำการเก็บข้อมูลขั้นตอนการผลิตกระบื้องานกัลวายนิกเกิลแบบไม่เคลือบประกอบด้วย 14 ขั้นตอนหลัก ดังแสดงไว้ในภาพที่ 4 ในกรณีสูตรผสมดินจากโรงงานอุตสาหกรรมนั้นไม่สามารถเปิดเผยรายละเอียดได้จากเหตุผลด้านความลับ เนื่องจากวัสดุและอัตราส่วนผสมต่าง ๆ เป็นปัจจัยสำคัญด้านคุณภาพของผลิตภัณฑ์ในการสร้างความได้เปรียบในการแข่งขัน แต่อย่างไรก็ตามหลังจากกระบวนการผลิตลำดับที่ 12 การเผาที่อุณหภูมิ 1,200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 11 ชั่วโมงนั้น ผู้ประกอบการมักประสบปัญหาเกี่ยวกับการเกิดหลุมบนผิวกระบื้องานกัลวายนิกเกิลแบบไม่เคลือบส่งผลให้ผลิตภัณฑ์ที่มีความเสียหายเป็นจำนวนมาก



ภาพที่ 4 ขั้นตอนการผลิตกระเบื้องดินเผาลอนกาทก้วยแบบไม่เคลือบ

#### 5. การวิเคราะห์หาสาเหตุของปัญหา

ผู้วิจัยดำเนินการเก็บข้อมูลจากการสัมภาษณ์ผู้ประกอบการเกี่ยวกับปัญหาต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นจากสภาพปัจจุบันของทางโรงงานอุตสาหกรรม พบปัญหาของเสียในผลิตภัณฑ์กระเบื้องดินเผาลอนกาทก้วยแบบไม่เคลือบที่มีลักษณะตำหนิแบบหลุมบริเวณโดยรอบของผลิตภัณฑ์ที่มีก้อนสีขาวอยู่บริเวณตรงกลางของหลุมเหล่านั้น ผู้วิจัยจึงดำเนินการศึกษาวิเคราะห์สาเหตุของปัญหาโดยเลือกศึกษาค้นคว้าผลของการเติมแคลเซียมคาร์บอเนตที่อาจส่งผลกระทบต่อความเสียหายของผลิตภัณฑ์ นอกจากนี้ผู้ประกอบการยังไม่มีเก็บข้อมูลสมบัติของเนื้อดินแต่ละชนิดที่ใช้เป็นวัตถุดิบหลักในการผลิต จึงทำการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี และได้ดำเนินการทดลองนำสูตรผสมดินจากโรงงานอุตสาหกรรมผสมร่วมกับแคลเซียมคาร์บอเนตที่อัตราส่วนแตกต่างกันเพื่อหาอัตราส่วนผสมที่เหมาะสม แล้วจึงดำเนินการวิเคราะห์สมบัติของดิน ได้แก่ ขนาดและการกระจายตัวของอนุภาค และศักย์ซีดี ผู้วิจัยจึงได้กำหนดเครื่องมือที่ใช้ในการเก็บรวบรวมข้อมูลต่าง ๆ นั่นคือ แผนภูมิแก๊งปลา (Fish-bone diagram) เนื่องจากเป็นเครื่องมือตัวหนึ่งที่จะช่วยให้ข้อมูลดิบมากมายถูกทำให้วิเคราะห์ง่ายขึ้น การวิเคราะห์ปัญหาและสาเหตุที่ส่งผลกระทบต่อลักษณะคุณภาพของผลิตภัณฑ์ สำหรับตรวจสอบลักษณะคุณภาพที่ต้องปรับปรุงและกำจัดสาเหตุที่ทำให้เกิดคุณภาพที่ไม่ดี โดยใช้หลักการ 4M (Man, Machine, Materials, Method) เพื่อนำไปสู่ปัญหาที่แท้จริงโดยการกำหนดสาเหตุหลัก สาเหตุรอง และสาเหตุย่อยของปัญหาทั้งหมด ดังภาพที่ 5



ภาพที่ 5 แผนภูมิกำลังปลาเพื่อวิเคราะห์สาเหตุของวัตถุดิบที่ทำให้เกิดตำหนิแบบหลุมบนผิวผลิตภัณฑ์

## 6. วิธีการทดสอบสมบัติของดิน

### 6.1 การทดสอบชนิดของสารประกอบ

สำหรับการทดสอบชนิดสารประกอบของธาตุประยุกต์ตามวิธีการทดลองของ Makul (2015) ที่มีการปรับปรุงบางประการ กระทำโดยใช้เครื่อง XRD ยี่ห้อ Bruker (รุ่น Bruker AXS D8 Discover, Karlsruhe ประเทศเยอรมนี) โดยใช้การยิงรังสี  $\text{CuK}\alpha$  ที่ความยาวคลื่น 1.542 อังสตรอม ที่ 40 กิโลโวลต์ และ 40 มิลลิแอมป์ บันทึกค่าความเข้มของ Diffraction peak ( $2\theta$ ) ตั้งแต่  $5-80^\circ$  การวัดค่าข้อมูลโดยเก็บค่าทุกๆ 197 วินาที (Step time) โดยมีระยะห่างระหว่างค่ามุมเป็น  $0.02^\circ$  สเปกตรัมที่ได้เป็นการพล็อตระหว่างค่าความเข้ม (Intensity) หรือความสูง (Count) ในแกน Y และค่ามุม  $2\theta$  (degree) ในแกน X มาทำการวิเคราะห์ข้อมูลตัวอย่างแร่ดินจากผลของสเปกตรัมที่ได้ โดยแทนค่าตามสมการของ Bragg's law ดังนี้

$$n\lambda = 2d\sin\theta \quad (1)$$

โดย  $n$  คือ ลำดับที่ของการเลี้ยวเบน (Diffracting order) โดยเป็นจำนวนเต็ม เช่น 1, 2, 3,...

$\lambda$  คือ ความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์

$d$  คือ ระยะห่างระหว่างระนาบของอะตอม (Diffraction spacing)

$\theta$  คือ มุมตกกระทบและมุมสะท้อน

### 6.2 การทดสอบองค์ประกอบทางเคมี

นำตัวอย่างดินแต่ละชนิดที่ผ่านการบดและร่อนดินรอบที่ 1 จากโรงงานอุตสาหกรรมมาทดสอบองค์ประกอบทางเคมี โดยใช้เทคนิค XRF ยี่ห้อ Bruker AXS (รุ่น S4 Pioneer Wavelength Dispersive X-Ray Fluorescence (WDXRF) Spectrometry, Karlsruhe ประเทศเยอรมนี) เป็นเทคนิคที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์ธาตุได้อย่างรวดเร็วและไม่ทำลายตัวอย่าง และสามารถวิเคราะห์ได้หลาย ๆ ธาตุพร้อมกัน วิธีการเตรียมตัวอย่างทำโดยการบดดินปริมาณ 2 กรัม ผสมกับตัวยึดเกาะและอัดเป็นแผ่นเพื่อให้สามารถใส่ลงในถ้วยตัวอย่างสำหรับตรวจวัดได้ที่ 60 กิโลโวลต์ และ 50 มิลลิแอมป์ บันทึกค่าความเข้มของ



Diffraction peak ในช่วง  $0.2-20^\circ$  (60-0.6 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์) และค่า Total resolution อยู่ในช่วง 3-100 อิเล็กตรอนโวลต์ เป็นเวลา 2-10 วินาทีต่อธาตุ จากนั้นวิเคราะห์หาองค์ประกอบทางเคมีโดยใช้โปรแกรมทางคอมพิวเตอร์ SPECTRA Plus software of the Bruker with the standardless analysis

### 6.3 การทดสอบศักย์ซีต้า

การวัดค่าศักย์ซีต้าของอนุภาคดินประยุกต์ตามวิธีการทดลองของ Abuh *et al.* (2014) โดยใช้เครื่อง Zetasizer NANO-ZS (Malvern Instrument, Worcester-shire, UK) ที่มีการปรับปรุงบางประการ ใช้ก๊าซผสมฮีเลียม-นีออน (He-Ne) เป็นแหล่งกำเนิดแสงที่มีความยาวคลื่น 633 นาโนเมตร การเตรียมตัวอย่างเริ่มต้นจากกรองน้ำปราศจากไอออนด้วยฟิลเตอร์ ขนาด 0.2 ไมโครเมตร จำนวน 100 มิลลิลิตร เตรียมสารละลายร้อยละ 0.1 น้ำหนักโดยปริมาตร ของ Sodium hexametaphosphate จำนวน 1,000 มิลลิลิตร นำตัวอย่างดินไปกระจายตัวในสารละลายที่เตรียมไว้ จำนวน 40 มิลลิลิตร จากนั้นนำไปเข้าเครื่อง Ultrasonic bath นาน 10 นาที เพื่อให้ตัวอย่างดินกระจายตัว หลังจากนั้นนำตัวอย่างดินปริมาตร 1 มิลลิลิตร มาใส่ในน้ำปราศจากไอออนที่ผ่านฟิลเตอร์แล้วปริมาตร 10 มิลลิลิตร หลังจากนั้นทำการคนตัวอย่างให้กระจายตัว นำตัวอย่างปริมาตร 1 มิลลิลิตรใส่เข้าไปในเซลล์บรรจุตัวอย่าง (Disposable zeta cell) แล้วจึงทำการวัดค่าศักย์ซีต้าด้วยเครื่อง Zetasizer Nano ZS ที่อุณหภูมิห้อง และทำการตรวจวัดซ้ำ จำนวน 3 ครั้ง และคำนวณค่าศักย์ซีต้าจากสมการ Smoluchowski's equation

### 6.4 การทดสอบขนาดและการกระจายตัวของอนุภาค

การวิเคราะห์ขนาดอนุภาคของเนื้อดินประยุกต์ตามวิธีการทดลองของ Qi *et al.* (2018) โดยใช้เครื่อง Laser Particle Size Distribution Analyzer ยี่ห้อ Malvern (รุ่น Mastersizer 2000, Worcestershire ประเทศอังกฤษ) ที่มีการปรับปรุงบางประการ 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 สำหรับการวิเคราะห์กระทำโดยชั่งน้ำหนักดินแต่ละชนิดจำนวน 100 กรัม หลังจากนั้นนำดินแต่ละชนิดที่ชั่งได้ไปร่อนผ่านตะแกรงขนาด 850 ไมโครเมตร แล้วชั่งน้ำหนักดินที่ค้างตะแกรงร่อนและบันทึกผล เตรียมสารละลายร้อยละ 0.1 น้ำหนักโดยปริมาตรของ Sodium hexametaphosphate จากนั้นปรับความเร็วรอบเครื่องกวนผสมของ Hydro 2000S (A) ที่ 2,000 รอบต่อนาที นำตัวอย่างดินไปกระจายตัวในตัวกลางปริมาตร 40 มิลลิลิตร จากนั้นนำไปเข้าเครื่อง Ultrasonic bath นาน 10 นาที เพื่อให้ตัวอย่างกระจายตัว เติตัวอย่างที่กระจายตัวแล้วลงไป Chamber ของ Hydro 2000S (A) แล้วจึงทำการวัดขนาดอนุภาคของเนื้อดิน

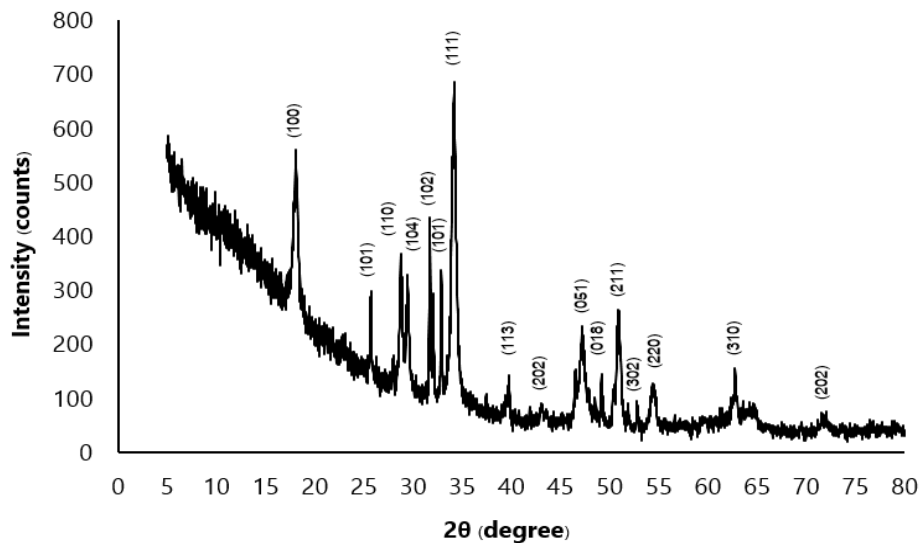
## 7. การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

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

## ผลการวิจัย

### 1. ชนิดของสารประกอบ

จากการวิเคราะห์ตัวอย่างแร่ดินที่มีลักษณะเป็นก้อนสีขาวอยู่ในหลุมบนพื้นผิวกระเบื้องดินเผาลอนนากด้วยแบบไม่เคลือบหลังการเผาที่อุณหภูมิ 1,200 องศาเซลเซียส ด้วยเทคนิค XRD มีการเปรียบเทียบข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์ตัวอย่างกับฐานข้อมูลอ้างอิง ICDD database เลขที่ 01-072-0156 ผลการทดสอบแสดงดังภาพที่ 6 โดยปรากฏพีคในตำแหน่ง  $2\theta$  เท่ากับ  $18.07^\circ$ ,  $25.76^\circ$ ,  $28.76^\circ$ ,  $29.47^\circ$ ,  $32.06^\circ$ ,  $32.88^\circ$ ,  $34.21^\circ$ ,  $39.77^\circ$ ,  $47.24^\circ$ ,  $49.21^\circ$ ,  $50.99^\circ$  และ  $62.78^\circ$



ภาพที่ 6 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของแร่ดินที่มีลักษณะสีขาวในเนื้อดินของผลิตภัณฑ์

### 2. องค์ประกอบทางเคมี

จากผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของดินดำ ดินแดง ดินขาว และเฟลด์สปาร์ด้วยเทคนิค XRF เพื่อหาชนิดและปริมาณธาตุที่อยู่ในดินแต่ละชนิด โดยแสดงผลในรูปของสารประกอบออกไซด์ของธาตุ ดังแสดงในตารางที่ 2 พบว่ามีปริมาณองค์ประกอบทางเคมีที่มากที่สุด 3 อันดับแรก เรียงจากมากไปน้อย คือ ซิลิกา ( $\text{SiO}_2$ ) อะลูมินา ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) และฮีมาไทต์ ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) ตามลำดับ ดินแต่ละชนิดจะมีสัดส่วนของปริมาณซิลิกาซึ่งเป็นสารประกอบหลักในเนื้อวัสดุกระเบื้องอยู่มากที่สุด เรียงตามลำดับจากมากไปน้อย คือ ดินขาว (ร้อยละ 67.1) เฟลด์สปาร์ (ร้อยละ 66.9) ดินดำ (ร้อยละ 66.5) และดินแดง (ร้อยละ 64.3) โดยน้ำหนัก ตามลำดับ นอกจากนี้สัดส่วนปริมาณของฮีมาไทต์ ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) ที่เป็นองค์ประกอบทางเคมีอยู่ในเนื้อดินมากที่สุด เรียงลำดับจากมากไปน้อย คือ ดินแดง (ร้อยละ 9.1) ดินดำ (ร้อยละ 4.6) ดินขาว (ร้อยละ 1.6) และเฟลด์สปาร์ (ร้อยละ 0.7) โดยดินแดงมีสัดส่วนปริมาณของฮีมาไทต์อยู่มากที่สุด

ตารางที่ 2 องค์ประกอบทางเคมีของดินแต่ละชนิด

องค์ประกอบทางเคมี (ร้อยละโดยน้ำหนักต่อปริมาตร)	ดินดำ	ดินแดง	ดินขาว	เฟลด์สปาร์
SiO <sub>2</sub>	66.48	64.28	67.09	66.92
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	23.20	21.81	29.08	18.98
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.56	9.12	1.56	0.66
K <sub>2</sub> O	2.11	1.76	0.32	1.05
TiO <sub>2</sub>	1.00	1.23	1.03	0.28
MgO	0.88	0.59	0.22	0.60
Cl	0.51	0.12	0.14	0.03
SO <sub>3</sub>	0.49	0.26	0.06	0.00
CaO	0.32	0.39	0.19	4.27
Na <sub>2</sub> O	0.20	0.28	0.18	6.68
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.08	0.03	0.03	0.34
BaO	0.06	0.03	0.01	0.00
ZrO <sub>2</sub>	0.04	0.04	0.00	0.00
SrO	0.02	0.01	0.00	0.12
V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.02	0.02	0.00	0.00
MnO	0.01	0.01	0.00	0.01

### 3. ขนาดและการกระจายตัวของอนุภาค

ขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคดินในแต่ละสูตร ได้แก่ ดินดำ ดินแดง ดินขาว เฟลด์สปาร์ แคลเซียมคาร์บอเนต สูตรผสมดินจากโรงงานอุตสาหกรรม และสูตรผสมดินจากโรงงานอุตสาหกรรมร่วมกับปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตที่แตกต่างกัน ได้แก่ ร้อยละ 10, 20, 30 และ 50 โดยน้ำหนัก ดังแสดงไว้ในตารางที่ 3 พบว่า แคลเซียมคาร์บอเนตมีขนาดอนุภาค 3.44 ไมโครเมตร มีอยู่ร้อยละ 10 โดยปริมาตร อนุภาคที่มีขนาดน้อยกว่า 14.88 ไมโครเมตร มีอยู่ร้อยละ 50 โดยปริมาตร และอนุภาคที่น้อยกว่า 47.53 ไมโครเมตร มีอยู่ร้อยละ 90 โดยปริมาตร ขนาดอนุภาคเฉลี่ยโดยปริมาตร เท่ากับ 22.05 ไมโครเมตร และการกระจายขนาดอนุภาค เท่ากับ 2.96 โดยมีขนาดอนุภาคที่ร้อยละ 90 โดยปริมาตร ซึ่งขนาดอนุภาคเฉลี่ยโดยปริมาตร และการกระจายขนาดอนุภาคต่ำกว่าสูตรผสมดินจากโรงงานอุตสาหกรรมอย่างมีนัยสำคัญ แสดงให้เห็นว่าสูตรดินผสมจากโรงงานอุตสาหกรรมมีการกระจายอนุภาคที่สูง เท่ากับ 12.55 สูตรผสมดินจากโรงงานอุตสาหกรรมร่วมกับปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตตั้งแต่ร้อยละ 20 โดยน้ำหนักขึ้นไป มีขนาดอนุภาค 1.01, 0.96 และ 1.09 ไมโครเมตร มีอยู่ร้อยละ 10 โดยปริมาตร ตามลำดับ และอนุภาคที่มีขนาดน้อยกว่า 7.19, 7.35 และ 9.21 ไมโครเมตร มีอยู่ร้อยละ 50 โดยปริมาตร ตามลำดับ ส่งผลให้มีขนาดอนุภาคใหญ่ขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับสูตรดินผสมจากโรงงานอุตสาหกรรม แต่การเติมปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตตั้งแต่ร้อยละ 10 โดยน้ำหนักขึ้นไป ส่งผลให้มีขนาดอนุภาคลดลงเท่ากับ 40.80, 44.24, 33.43 และ 33.90 ไมโครเมตร ตามลำดับ มีอยู่ร้อยละ 90 โดยปริมาตร นอกจากนี้ขนาดอนุภาคเฉลี่ยโดยปริมาตรลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับสูตรดินผสมจาก

โรงงานอุตสาหกรรม เท่ากับ 15.52, 16.53, 14.54 และ 15.44 ตามลำดับ สำหรับการเติมปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตร้อยละ 10 และร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก มีการกระจายขนาดอนุภาคไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ และการเติมปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตเพิ่มสูงขึ้นตั้งแต้อยู่ที่ร้อยละ 30 โดยน้ำหนักขึ้นไป ส่งผลให้มีการกระจายขนาดอนุภาคลดลงเป็นอย่างมาก

**ตารางที่ 3** ขนาดอนุภาคและการกระจายตัวของอนุภาคของดินแต่ละชนิด

ชนิด	การกระจายตัวของขนาดอนุภาค (โดยปริมาตร)				
	D <sub>10</sub>	D <sub>50</sub>	D <sub>90</sub>	D [4,3]	Span
ดินดำ	0.89 ± 0.04 <sup>C</sup>	5.31 ± 0.37 <sup>A</sup>	102.30 ± 6.36 <sup>E</sup>	31.73 ± 0.23 <sup>E</sup>	19.13 ± 0.85 <sup>E</sup>
ดินแดง	0.75 ± 0.00 <sup>B</sup>	5.97 ± 0.05 <sup>B</sup>	121.82 ± 9.13 <sup>F</sup>	38.78 ± 2.40 <sup>F</sup>	20.28 ± 1.39 <sup>F</sup>
ดินขาว	0.65 ± 0.01 <sup>A</sup>	28.40 ± 0.78 <sup>G</sup>	176.35 ± 3.25 <sup>G</sup>	62.88 ± 1.37 <sup>H</sup>	6.19 ± 2.38 <sup>C</sup>
เฟลด์สปาร์	3.75 ± 0.02 <sup>G</sup>	32.79 ± 0.09 <sup>H</sup>	95.04 ± 0.27 <sup>D</sup>	42.46 ± 0.18 <sup>G</sup>	2.78 ± 0.01 <sup>A</sup>
แคลเซียมคาร์บอเนต	3.44 ± 0.08 <sup>F</sup>	14.88 ± 0.04 <sup>F</sup>	47.53 ± 0.36 <sup>B</sup>	22.05 ± 0.14 <sup>C</sup>	2.96 ± 0.02 <sup>A</sup>
สูตรดินผสมจากโรงงานอุตสาหกรรม	0.85 ± 0.00 <sup>C</sup>	6.65 ± 0.03 <sup>C</sup>	84.26 ± 2.82 <sup>C</sup>	27.98 ± 0.74 <sup>D</sup>	12.55 ± 0.37 <sup>D</sup>
แคลเซียมคาร์บอเนตร้อยละ 10	0.86 ± 0.00 <sup>C</sup>	6.02 ± 0.07 <sup>B</sup>	40.80 ± 1.02 <sup>B</sup>	15.52 ± 0.42 <sup>AB</sup>	6.63 ± 0.10 <sup>C</sup>
แคลเซียมคาร์บอเนตร้อยละ 20	1.01 ± 0.01 <sup>D</sup>	7.19 ± 0.13 <sup>D</sup>	44.24 ± 0.50 <sup>B</sup>	16.53 ± 0.09 <sup>B</sup>	6.01 ± 0.18 <sup>C</sup>
แคลเซียมคาร์บอเนตร้อยละ 30	0.96 ± 0.00 <sup>D</sup>	7.35 ± 0.02 <sup>D</sup>	33.43 ± 0.28 <sup>A</sup>	14.54 ± 0.17 <sup>A</sup>	4.42 ± 0.05 <sup>B</sup>
แคลเซียมคาร์บอเนตร้อยละ 50	1.09 ± 0.01 <sup>E</sup>	9.21 ± 0.01 <sup>E</sup>	33.90 ± 0.54 <sup>A</sup>	15.44 ± 0.13 <sup>AB</sup>	3.56 ± 0.07 <sup>A</sup>

ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่เหมือนกัน อยู่ภายในสดมภ์เดียวกัน หมายถึง ค่าที่ระบุไว้ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ( $p > 0.05$ )

#### 4. ศักย์ซีต้า

ตารางที่ 4 แสดงการเปลี่ยนแปลงค่าศักย์ซีต้าของดินแต่ละชนิด กรณีของแคลเซียมคาร์บอเนตมีค่าศักย์ซีต้าสูงที่สุดเท่ากับ -64.1 มิลลิโวลต์ ซึ่งสูตรผสมดินจากโรงงานอุตสาหกรรมมีค่าศักย์ซีต้าต่ำกว่าแคลเซียมคาร์บอเนต เท่ากับ -51.9 มิลลิโวลต์ เมื่อเติมปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตที่ระดับต่าง ๆ ได้แก่ ปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตร้อยละ 10 และร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก มีค่าศักย์ซีต้าลดลงแต่ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเปรียบเทียบกับสูตรผสมดินจากโรงงานอุตสาหกรรม อย่างไรก็ตาม การเติมปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตเพิ่มมากขึ้นที่ร้อยละ 10 และร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก มีค่าศักย์ซีต้าลดลงซึ่งไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ เท่ากับ -57.8 และ -58.0 มิลลิโวลต์ ตามลำดับ

ตารางที่ 4 ผลการวิเคราะห์ศักย์ซีต้าของดินแต่ละกรณี

ชนิด	ศักย์ซีต้า (มิลลิโวลต์)
ดินดำ	-58.4 ± 1.2 <sup>B</sup>
ดินแดง	-59.8 ± 2.9 <sup>AB</sup>
ดินขาว	-58.0 ± 3.1 <sup>B</sup>
เฟลด์สปาร์	-58.5 ± 1.2 <sup>B</sup>
แคลเซียมคาร์บอเนต	-64.1 ± 1.8 <sup>A</sup>
สูตรผสมดินจากโรงงานอุตสาหกรรม	-51.9 ± 3.6 <sup>C</sup>
แคลเซียมคาร์บอเนตร้อยละ 10	-52.0 ± 3.4 <sup>C</sup>
แคลเซียมคาร์บอเนตร้อยละ 20	-51.4 ± 0.9 <sup>C</sup>
แคลเซียมคาร์บอเนตร้อยละ 30	-57.8 ± 4.4 <sup>B</sup>
แคลเซียมคาร์บอเนตร้อยละ 50	-58.0 ± 3.6 <sup>B</sup>

ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่เหมือนกัน อยู่ภายในสดมภ์เดียวกัน หมายถึง ค่าที่ระบุไว้ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ( $p > 0.05$ )

#### วิจารณ์ผลการวิจัย

ผลการทดสอบชนิดของสารประกอบพบว่า ปรากฏเส้นพีคที่มีความคมซึ่งเป็นลักษณะของความเป็นผลึก (Crystalline) ปรากฏพีคในตำแหน่ง  $2\theta$  เท่ากับ  $18.07^\circ$  ซึ่งเป็นตำแหน่งของแร่ Kaolinite ที่มักพบอยู่ในดินมากที่สุด พีคในตำแหน่ง  $2\theta$  เท่ากับ  $25.76^\circ$ ,  $28.76^\circ$  และ  $29.47^\circ$  เป็นตำแหน่งของพีคที่พบในโครงสร้างของแคลเซียมคาร์บอเนตที่อยู่ในรูปผลึกอะราโกไนต์ และมีลักษณะเป็นออร์โธโรมบิก (Orthorhombic) (Boonyuen *et al.*, 2017) รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์จะปรากฏตำแหน่งพีคของแคลเซียมคาร์บอเนตที่อยู่ในรูปแคลไซต์ชัดเจนมากขึ้นที่  $2\theta$  เท่ากับ  $32.06^\circ$ ,  $32.88^\circ$ ,  $34.21^\circ$ ,  $39.77^\circ$ ,  $47.24^\circ$ ,  $49.21^\circ$  และ  $50.99^\circ$  ซึ่งมีโครงสร้างผลึกแบบเฟซเซนเตอร์คิวบิก (Face-Center Cubic; FCC) เนื่องจากการเติมแคลเซียมคาร์บอเนตนั้น ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนผลึกเป็นโครงสร้างผลึกแบบแคลไซต์ที่มีลักษณะเป็นรอมโบฮีดรัล (Rhombohedral) เกิดการสลายตัวเพื่อเปลี่ยนโครงสร้างผลึกเป็นแคลเซียมออกไซด์เมื่อได้รับความร้อนสูง ๆ และให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกมาระหว่างการเผา ( $\text{CaCO}_3 (\text{s}) \xrightarrow{\Delta} \text{CaO} (\text{s}) + \text{CO}_2$ ) (Boonyuen *et al.*, 2015) และพีคในตำแหน่ง  $2\theta$  เท่ากับ  $62.78^\circ$  ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะของผลึกแมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) ดังนั้น จากข้อมูลข้างต้นจึงสามารถยืนยันได้ว่า ลักษณะก่อนสีขาวที่ทำให้เกิดตำหนิแบบหลุมบนพื้นผิวของกระเบื้องเป็นโครงสร้างผลึกของแคลเซียมคาร์บอเนตที่มีลักษณะเป็นออร์โธโรมบิกเป็นส่วนใหญ่

ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบหลัก ได้แก่ ดินดำ ดินแดง ดินขาว และเฟลด์สปาร์ พบว่าดินแต่ละชนิดจะมีสัดส่วนของปริมาณซิลิกาซึ่งเป็นสารประกอบหลักในเนื้อวัสดุกระเบื้องอยู่มากที่สุด สามารถทำให้สัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนสูง จึงส่งผลเสียต่อผลิตภัณฑ์อันเนื่องมาจากเกิดการขยายตัวอย่างรวดเร็ว (Lawanwadeekul & Ramingwon, 2012) ในกระบวนการเผาอาจส่งผลให้เกิดตำหนิที่ผิวของกระเบื้องดินเผาได้ง่าย ทั้งนี้กระบวนการดังกล่าวยัง

สามารถเกิดขึ้นอย่างรุนแรงเพราะมีขนาดอนุภาคที่ใหญ่อีกด้วย ดินแดงมีสัดส่วนปริมาณของฮีมาไทต์อยู่มากที่สุด จึงทำให้สามารถนำดินแดงไปใช้เป็นวัตถุดิบแล้วเผาผลิตเป็นผลิตภัณฑ์กระเบื้องดินเผาได้โดยง่าย ส่งผลให้ได้ผลิตภัณฑ์กระเบื้องดินเผามีความแข็งแรงทนทานสูงกว่าดินดำ ดินขาว และเฟลด์สปาร์ เนื่องจากในเนื้อวัสดุมีเหล็กคอยเสริมความแข็งแรงอยู่เป็นจำนวนมาก โดยส่วนประกอบในเนื้อดินที่ช่วยเพิ่มความทนให้กับกระเบื้องดินเผานั้นสัดส่วนปริมาณของทั้งฮีมาไทต์และอะลูมินาเป็นออกไซด์ของโลหะที่ช่วยเสริมความแข็งแรงให้กับเนื้อวัสดุได้เป็นอย่างดี (Kaewkhao & Kaewnuam, 2016) อย่างไรก็ตาม ปริมาณของฮีมาไทต์ที่พบใน ดินแดง ดินดำ และดินขาวมีค่าเกินร้อยละ 1 มีผลต่อการเกิดสีของเนื้อดินหลังการเผา กรณีเผาออกซิเดชันได้สีน้ำตาล ดังนั้นเฟลด์สปาร์ช่วยทำให้เนื้อดินมีความขาวมากขึ้นเพราะมีปริมาณของฮีมาไทต์ไม่เกินร้อยละ 1 นอกจากนี้ยังพบว่า เฟลด์สปาร์มีผลรวมของอัตราส่วนระหว่างโพแทสเซียมออกไซด์ ( $K_2O$ ) และโซเดียมออกไซด์ ( $Na_2O$ ) อยู่ในเนื้อดินสูงถึงร้อยละ 7.8 เนื่องจากองค์ประกอบทางเคมีของสารทั้งสองชนิดทำหน้าที่เป็นฟลักซ์ส่งผลให้ช่วยเพิ่มการหลอมละลาย ซึ่งในเนื้อดินควรมีปริมาณไม่เกินร้อยละ 4 (Lawanwadeekul & Ramingwon, 2012)

การเติมปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตร้อยละ 20 โดยน้ำหนักเป็นอัตราส่วนที่ดีที่สุด โดยมีค่าศักย์ซีต้าเท่ากับ -51.4 มิลลิโวลต์ และมีค่าศักย์ซีต้าสูงกว่าการเติมปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตตั้งแต่ร้อยละ 30 โดยน้ำหนักขึ้นไป เนื่องจากแคลเซียมไฮดรอกไซด์ทำให้เกิดการผลักระหว่างประจุบวกและคาร์บอเนตไฮดรอกไซด์ทำให้เกิดการผลักระหว่างประจุลบในเนื้อดิน แสดงให้เห็นถึงการกระจายตัวของอนุภาคดินที่เหมาะสม และยังมีควมกว้างในการกระจายตัวของอนุภาคลดลง ซึ่งช่วยทำให้วัตถุดิบมีความเป็นเนื้อเดียวกัน ส่งผลให้ลดการเกิดตำหนิแบบหลุมในผลิตภัณฑ์กระเบื้องดินเผาได้เป็นอย่างดี นอกจากนี้ยังช่วยกำจัดฟองอากาศที่อยู่ในดินออกไปได้อีกด้วย จึงทำให้ความพรุนในผลิตภัณฑ์ลดลง โดยผลการวิเคราะห์ขนาดรูพรุนของกระเบื้องด้วยเครื่อง Micromeritics รุ่น ASAP 2460 พบว่า ก่อนการเติมแคลเซียมคาร์บอเนต มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 14.6 นาโนเมตร เมื่อเติมแคลเซียมคาร์บอเนตส่งผลให้ขนาดรูพรุนในกระเบื้องลดลง มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 12.5 นาโนเมตร และผลการวัดขนาดอนุภาคพบว่า การเติมปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตร้อยละ 20 โดยน้ำหนักขึ้นไป ส่งผลให้มีขนาดอนุภาคใหญ่ขึ้น มีอยู่ร้อยละ 10 และ 50 โดยปริมาตร เมื่อเปรียบเทียบกับสูตรดินผสมจากโรงงานอุตสาหกรรม อาจเกิดจากการรวมตัวกันของอนุภาคดินดำ ดินแดง ดินขาว เฟลด์สปาร์ และแคลเซียมคาร์บอเนต แต่อย่างไรก็ตาม ผลของการเติมปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตร้อยละ 30 โดยน้ำหนักขึ้นไป ทำให้ขนาดอนุภาคมีแนวโน้มลดลง มีอยู่ร้อยละ 90 โดยปริมาตร สำหรับการเติมปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตตั้งแต่ร้อยละ 30 โดยน้ำหนักขึ้นไป ส่งผลให้มีการกระจายขนาดอนุภาคลดลงเป็นอย่างมาก ซึ่งมีปริมาณไม่เหมาะสมสำหรับการผลิตกระเบื้องดินเผาอันเนื่องมาจากการกระจายตัวของอนุภาคที่ไม่สม่ำเสมอและอนุภาคของดินดำ ดินแดง ดินขาว และเฟลด์สปาร์เกิดการรวมตัวกันเป็นก้อน (Agglomerate) และสมบัติความเหนียวของเนื้อดินลดลง

ผลการทดสอบศักย์ซีต้าพบว่า เมื่อเติมปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตตั้งแต่ร้อยละ 30 โดยน้ำหนักขึ้นไป พบว่ามีค่าศักย์ซีต่าน้อยลง อาจเนื่องมาจากเกิดการดูดซับของไฮดรอกไซด์ไอออน ( $OH^-$ ) บนพื้นผิวของสูตรผสมดินจากโรงงานอุตสาหกรรมเพิ่มมากขึ้น ทำให้ความหนาของการแพร่กระจายประจุลบของคาร์บอเนต ( $CO_3^{2-}$ ) ล้อมรอบอนุภาคดินลดลงทำให้ค่าศักย์ซีต้าลดลง จึงส่งผลให้อนุภาคของแคลเซียมคาร์บอเนตและอนุภาคของดินจากโรงงานอุตสาหกรรมเกิดการรวมกลุ่มกันเป็นก้อน ดังนั้นการเติมปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตเพิ่มสูงขึ้น ตั้งแต่ร้อยละ 30 โดยน้ำหนักขึ้นไป แสดงให้เห็นถึงอัตราส่วนที่ไม่เหมาะสมสำหรับการผลิต ซึ่งคาดว่าอาจส่งผลต่อลักษณะผลิตภัณฑ์ภายหลังการเผาที่อุณหภูมิ 1,200 องศาเซลเซียส ส่งผลให้เกิดตำหนิแบบหลุมภายในเนื้อในผลิตภัณฑ์ได้

## สรุปผลการวิจัย

จากผลการศึกษาปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตในชั้นตอนการเตรียมเนื้อดินสำหรับผลิตกระเบื้องดินเผาอุณหภูมิ 1,200 องศาเซลเซียสส่งผลให้ผลิตภัณฑ์เกิดตำหนิแบบหลุมเป็นจำนวนมาก จึงทำการยืนยันสมมติฐานด้วยการวิเคราะห์ชนิดของสารประกอบ พบว่าตัวอย่างแร่ดินมีการเกิดฟิสิกในตำแหน่ง 2θ เท่ากับ 25.76°, 28.76°, 29.47°, 32.06°, 32.88°, 34.21°, 39.77° 47.24°, 49.21° และ 50.99° ซึ่งเป็นตำแหน่งของพีคที่พบในโครงสร้างของแคลเซียมคาร์บอเนต และผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของดินดำ ดินแดง ดินขาว และเฟลด์สปาร์ พบว่า ปริมาณองค์ประกอบทางเคมีของดินที่มีมากที่สุด คือ ซิลิกา (SiO<sub>2</sub>) อะลูมินา (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) และฮีมาไทต์ (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) ตามลำดับ ซึ่งดินแต่ละชนิดจะมีสัดส่วนของปริมาณซิลิกาซึ่งเป็นสารประกอบหลักในเนื้อวัสดุกระเบื้องอยู่มากที่สุด เรียงตามลำดับจากมากไปน้อย คือ ดินขาว (ร้อยละ 67.1) เฟลด์สปาร์ (ร้อยละ 66.9) ดินดำ (ร้อยละ 66.5) และดินแดง (ร้อยละ 64.3) โดยน้ำหนัก ตามลำดับ ในกระบวนการเผาอาจส่งผลให้เกิดตำหนิที่ผิวของกระเบื้องดินเผาได้ง่าย ผลการศึกษากการเติมปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตที่แตกต่างกัน (ร้อยละ 10, 20, 30 และ 50 โดยน้ำหนัก) พบว่า ความเข้มข้นของแคลเซียมคาร์บอเนตมีผลต่อขนาดและการกระจายตัว โดยปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตตั้งแต่ร้อยละ 20 โดยน้ำหนักขึ้นไป พบว่ามีขนาดอนุภาค 1.01, 0.96 และ 1.09 ไมโครเมตร มีอยู่ร้อยละ 10 ตามลำดับ และอนุภาคที่มีขนาดน้อยกว่า 7.19, 7.35 และ 9.21 ไมโครเมตร มีอยู่ร้อยละ 50 โดยปริมาตร ตามลำดับ ส่งผลให้มีขนาดอนุภาคใหญ่ขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับสูตรดินผสมจากโรงงานอุตสาหกรรม แต่การเติมปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตตั้งแต่ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ส่งผลให้มีขนาดอนุภาคลดลง โดยอนุภาคมีขนาด 40.80, 44.24, 33.43 และ 33.90 ไมโครเมตร ตามลำดับ มีอยู่ร้อยละ 90 โดยปริมาตร และการเติมปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตเพิ่มสูงขึ้นตั้งแต่ร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก จะส่งผลให้มีการกระจายขนาดอนุภาคลดลงมากยิ่งขึ้น เท่ากับ 4.42 และ 3.56 ตามลำดับ ดังนั้น การเติมสูตรผสมดินจากโรงงานอุตสาหกรรมร่วมกับแคลเซียมคาร์บอเนตร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก ทำให้มีการกระจายตัวของอนุภาคดินดีที่สุด และผลการศึกษาค่าศักย์ซีต้า พบว่าการเติมปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตร้อยละ 10 และ 20 โดยน้ำหนัก มีค่าศักย์ซีต้าลดลง แต่การเติมปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตเพิ่มมากขึ้นตั้งแต่ร้อยละ 30 โดยน้ำหนักขึ้นไป ทำให้ค่าศักย์ซีต้าลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับสูตรผสมดินจากโรงงานอุตสาหกรรม อาจส่งผลให้อนุภาคดินเกิดการรวมกลุ่มกันเป็นก้อนและสมบัติความเหนียวของเนื้อดินลดลง

## เอกสารอ้างอิง

- Abuh, M. A., Abia-Basse, N., Udeinya, T. C., Nwannewuihe, H. U., Abong, A. A. & Akpomie, K. G. (2014). Industrial Potentials of Adiabo Clay in Calabar Municipal of Cross River State South South Nigeria. *The Pacific Journal of Science and Technology*, 15(1), 63-75.
- Alcântara, A.C.S., Beltrão, M.S.S., Oliveira, H.A., Gimenez, I.F., & Barreto, L.S. (2008). Characterization of Ceramic Tiles Prepared from Two Clays from Sergipe-Brazil. *Applied Clay Science*, 39(3-4), 160-165.
- Boonyuen, S., Malaithong, M., Prokaew, A., Cherdhirunkorn, B., & Chuesantia, I. (2015). Decomposition Study of Calcium Carbonate in Shells. *Thammasat Journals*, 4(2), 115-122. (in Thai)

- Boonyuen, S., Malaithong, M., Prokaew, A., Cherdhirunkorn, B., & Chuesantia, I. (2017). Utilization of Modified Waste Outer Lip of Turbo jourdani (Turbinidae) Shells for Biodiesel Production. *Thammasat Journals*, 24(6), 896-903. (in Thai)
- Kaewkhao, J., & Kaewnuam, E. (2016). Comparative Study of Composition in Raw Clay Material for Pottery Industry in Ratchaburi. In *Proceeding of The 8<sup>th</sup> NPRU National Academic Conference*. (pp. 132-140). Nakhon Pathom Rajabhat University: Nakhon Pathom. (in Thai)
- Kamseu, E., Leonelli, C., Boccaccini, D.N., Veronesi, P., Miselli, P., Pellacani, G., & Chinje, M.U. (2007). Characterisation of Porcelain Compositions Using Two China Clays from Cameroon. *Ceramics International*, 33(5), 851-857.
- Lawanwadeekul, S., & Ramingwon, K. (2012). Study of Ratio between Lampang Kaolin and Mae Tan Ball Clay on Physical and Mechanical Properties of Clay Slip. *Industrial Technology Lampang Rajabhat University Journal*, 5(2), 51-59. (in Thai)
- Makul, S. (2015). *Forensic analysis of soil samples by the X-RAY diffraction (XRD) method*. Master of Science Thesis, Department of Forensic Science, Silpakorn University, 1-75. (in Thai)
- Martirena, J.F., DAY, R.L., Betancourt, D., & Diaz, Y. (2006). *Improvement of Engineering Properties of Fired Clay Bricks through the Addition of Calcite*. Retrieved March 2, 2019, from [https://www.researchgate.net/profile/Yosvany\\_Diaz\\_Cardenas/publication/276831956\\_Improvement\\_of\\_Engineering\\_Properties\\_of\\_Fired\\_Clay\\_Bricks\\_Through\\_the\\_Addition\\_of\\_Calcite/links/555a1b0908ae6fd2d8281dae/Improvement-of-Engineering-Properties-of-Fired-Clay-Bricks-Through-the-Addition-of-Calcite.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Yosvany_Diaz_Cardenas/publication/276831956_Improvement_of_Engineering_Properties_of_Fired_Clay_Bricks_Through_the_Addition_of_Calcite/links/555a1b0908ae6fd2d8281dae/Improvement-of-Engineering-Properties-of-Fired-Clay-Bricks-Through-the-Addition-of-Calcite.pdf)
- Qi, F., Zhang, R., Liu, X., Niu, Y., Zhang, H., Li, H., Li, J., Wang, B., & Zhang, G., (2018). Soil Particle Size Distribution Characteristics of Different Land-Use Types in the Funiu Mountainous Region. *Soil & Tillage Research*, 184, 45-51.
- Theerapavisetpong, A., & Nilpairach, S. (2019). Development of Low Water Absorption Terracotta Roof Tile from Local Pottery Clay and Soda Lime Glass Cullet. *The Journal of King Mongkut's University of Technology North Bangkok*, 29(2), 1-7. (in Thai)
- Tonnisen, J.Y., Den Haan, E.J., Luger, H.J., & Dobie, M.J.D. (1985). Pier Foundations of the Saudi Arabia-Bahrain Causeway. In *Proceedings of The 11<sup>th</sup> International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*. (pp. 1575-1578). Rotterdam: A.A.Balkema.
- Vodova, L., Sokolar, R., & Hroudova, J. (2014). The Effect of CaO Addition on Mechanical Properties of Ceramic Tiles. *International Journal of Civil and Environmental Engineering*, 8(6), 717-720.