Research Article
Journal of Advanced Development in Engineering and Science
Vol.15 ● No.43 • May – August 2025

การพัฒนากากตะกอนน้ำเสียเพื่อเตรียมเม็ดดินเผาเป็นวัสดุปลูกพืช

Upcycling Waste Water Sludge for Preparing Clay pellets as Plant Grow Material

พิชามญชุ์ น้อยสุวรรณ[1] ฉันทมณี พูลเจริญศิลป์[2*] ธัญลักษณ์ ศรีสุข[3]
พัชราภรณ์ มณีศุภโชค[1] และ ภคพร สุขศิริ[1]
Phichamon Noisuwan[1], Chantamanee Poonjarernsilp[2*],
Tanyalak Srisuk[3], Phatcharaporn Maneesuphachoke[1]
and Pakaporn Suksiri[1]

Received: 20 May 2024
Revised: 10 April 2025
Accepted: 20 May 2025

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการเพิ่มมูลค่าของกากตะกอนน้ำเสียเพื่อเตรียมเม็ดดินเผาปลูกพืชจากกากตะกอนน้ำเสียที่มีส่วนผสมของซิงค์ซัลไฟด์ผสมดินเหนียว โดยศึกษาผลของอัตราส่วนระหว่างกากตะกอนน้ำเสียกับดินเหนียวที่อัตราส่วน50:50 40:60 30:70 0:100 ร้อยละโดยน้ำหนัก และผลของอุณหภูมิการเผาที่ 700 800 และ 900 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาทีต่อค่าความหนาแน่นและร้อยละการดูดซับน้ำของเม็ดดินเผาที่เตรียมได้ ผลการทดลองพบว่าอัตราส่วนระหว่างกากตะกอนน้ำเสียกับดินเหนียวทุกอัตราส่วนมีค่าร้อยละการดูดซับน้ำสูงกว่าเม็ดดินเผาจากดินเหนียว เนื่องจากตะกอนซิงค์ซัลไฟด์มีความพรุนตัวซึ่งสังเกตได้จากภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ส่วนผลของอุณหภูมิเผาพบว่าอุณหภูมิเผาไม่มีผลต่อค่าความหนาแน่นของเม็ดดินเผา นอกจากนี้ยังพบว่าตะกอนซิงค์ซัลไฟด์ยังคงอยู่ในเม็ดดินเผาหลังการเผาจากผลการวิเคราะห์ธาตุด้วยเทคนิค EDX ผลการทดลองสรุปว่าภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมเม็ดดินเผาผสมกากตะกอนคืออัตราส่วนระหว่าง

[1]สาขาวิชาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ กรุงเทพฯ ประเทศไทย 10120
[1]Department of Biology, Faculty of Science and Technology, Rajamangala University of Technology Krungthep, Bangkok, Thailand 10120
[2]สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ กรุงเทพฯ ประเทศไทย 10120
[2]Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Krungthep, Bangkok, Thailand 10120
[3]สาขาวิชาออกแบบสิ่งทอและแฟชั่น คณะอุตสาหกรรมสิ่งทอ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ กรุงเทพฯ ประเทศไทย 10120
[3]Department of Textile and Fashion Design, Faculty of Textile Industry, Rajamangala University of Technology Krungthep, Bangkok, Thailand 10120
*ผู้นิพนธ์ประสานงาน (Corresponding author) e-mail: chantamanee.w@mail.rmutk.ac.th

กากตะกอนน้ำเสียกับดินเหนียวที่ 50:50 ร้อยละโดยน้ำหนัก เผาที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ให้ค่าความหนาแน่นเฉลี่ย 1.97 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตรและให้ค่าร้อยละการดูดซับน้ำเฉลี่ย 17.5 ค่าความเป็นกรดด่าง 5.7 และปริมาณของสังกะสีทดสอบด้วยวิธี Zincon assay เท่ากับ 412 ppm ซึ่งเม็ดดินเผาผสมกากตะกอนที่ภาวะเหมาะสมดังกล่าวมีต้นทุนการผลิต 23 บาทต่อกิโลกรัม

คำสำคัญ: เม็ดดินเผา กากตะกอนน้ำเสีย ซิงค์ซัลไฟด์

ABSTRACT

This research was upcycling waste sludge for preparing the growing media expanded clay from wastewater sludge including zinc sulfide together with clay. The effect of the ratio of wastewater sludge to clay was studied at 50:50, 40:60, 30:70 and 0:100% wt. and the effect of the calcined temperature at 700, 800, 900 ºC for 30 minutes on the density and percentage of water adsorption of the prepared growing material were studied. The experimental results showed that every ratio of wastewater sludge to clay had a higher percentage of water adsorption than clay pellets form clay. This was because of zinc sulfide waste water sludge have high porosity, which can be observed from scanning electron microscopy (SEM) images. The effect of calcined temperature showed that the temperature did not affect the density of the clay pellets. Moreover, it was also found that zinc sulfide still contained in the expanded clay after calcination from the EDX result. The results of the experiment were concluded that the optimized condition prepared expanded clay pellets with waste water sludge was 50:50 %wt. ratio of waste water sludge to clay at 800°C of calcination temperature. By this optimal condition, the expanded clay pellets had density of 1.97 g/cm^3, water adsorption of 17.5%, pH 5.7 and 412ppm zinc content from zincon assay from leaching test. The estimation cost of expanded clay pellets with waste water sludge at the optimal condition was also calculated, resulting 23 bath/kilograms.

Keywords: Clay pellets; Waste Water Sludge; Zinc Sulfide

บทนำ

ในปัจจุบันการปลูกต้นไม้ในพื้นที่พักอาศัยได้รับความนิยมมากขึ้น เช่น การปลูกผักปลอดสารพิษ การปลูกไม้ดอกไม้ประดับไม้กระถาง แต่เนื่องจากดินที่มีคุณลักษณะที่เหมาะสมสำหรับปลูกต้นไม้ในกระถางหาได้ยาก จึงได้มีการพัฒนาวัสดุปลูกพืชที่มีสมบัติถ่ายเทอากาศ การอุ้มน้ำ และการค้ำจุนต้นและรากได้ดี วัสดุดังกล่าวเรียกว่า วัสดุปลูก [1,2] คือวัสดุที่เลือกสรรมาเพื่อใช้ในการปลูกพืช และทำให้ต้นพืชเจริญเติบโตได้เป็นปกติ อาจเป็นวัสดุชนิดเดียวกันหรือหลายชนิดผสมกันแต่ไม่ควรเกิน 3 อย่าง ชนิดของวัสดุปลูกอาจเป็นอินทรียวัตถุหรืออนินทรียวัตถุซึ่งมีหน้าที่เช่นเดียวกับดิน คือยึดลำต้น ให้น้ำ ธาตุอาหาร และแลกเปลี่ยนก๊าซเข้าออกบริเวณรากพืช [3] ข้อดีของวัสดุปลูกนอกจากมีสมบัติอุ้มน้ำแล้ว ยังประหยัดเวลา แรงงาน ตลอดจน

ค่าใช้จ่ายในการเตรียมดิน และการกำจัดวัชพืช อีกทั้งยังช่วยลดปัญหาเกี่ยวกับศัตรูพืชที่เกิดจากดิน ทำให้สามารถปลูกพืชในพื้นที่เดียวกันได้ตลอดปี วัสดุปลูกชนิดอนินทรียวัตถุชนิดหนึ่งที่นิยมใช้คือเม็ดดินเผา (Clay Pebbles) หรือบางครั้งเรียกว่า Lightweight Expanded Clay Aggregate (LECA) [4-8] เป็นการนำแร่ดินเหนียวปั้นเป็นเม็ดทรงกลม นำมาเผาได้เม็ดดินเผา เกิดช่องว่างภายในขนาดใหญ่ จึงสามารถระบายน้ำและอากาศได้ดี มีความหนาแน่น ความเป็นกรดด่าง และความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุแตกต่างกัน ซึ่งขึ้นกับแหล่งที่มาและโครงสร้างของดินหรืออนินทรียวัตถุ นอกจากนี้มีการนำเม็ดดินเผามาโรยหน้าในภาชนะปลูกป้องกันการไหลเลอะของน้ำและหน้าดิน ช่วยประหยัดการให้น้ำ ดังนั้นทางเลือกหนึ่งในการนำเศษวัสดุเหลือใช้ประเภทอนินทรีย์มาเป็นส่วนประกอบในการเตรียมเม็ดดินเผาเพื่อเป็นวัสดุปลูกเพื่อเพิ่มมูลค่าของเศษวัสดุจึงเป็นแนวทางในการวิจัยด้านวัสดุที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม อันเป็นเป้าหมายหยุดการเสื่อมโทรมของดินและฟื้นสภาพกลับมาใหม่ของการพัฒนาที่ยั่งยืน (Sustainable Development Goals; SDGs)

การเพิ่มมูลค่าของเศษวัสดุ หรือที่เรียกว่า Upcycling ทางผู้วิจัยได้รับโจทย์วิจัยที่เกี่ยวกับการนำกากตะกอนน้ำเสียจากโรงงานผลิตเส้นยางยืดจากน้ำยางธรรมชาติซึ่งมีส่วนประกอบของซิงค์ซัลไฟด์ (Zinc sulfide; ZnS) เป็นส่วนมาก โดยตะกอนดังกล่าวเกิดจากการเติมโซเดียมซัลไฟด์ (Sodium sulfide; Na_2S) ในน้ำเสียเพื่อลดปริมาณสังกะสีออกจากน้ำเสีย โดยกากตะกอนจากการกรองด้วยเครื่องกรองแบบความดันคงที่ (Filter press) มีปริมาณมาก และต้องมีค่าใช้จ่ายในการดำเนินการกำจัด เนื่องจากกากตะกอนประกอบด้วยสารประกอบและแร่ธาตุที่อาจตอบโจทย์ในการทำวัสดุปลูก นอกจากนี้มีงานวิจัยที่ศึกษาการนำกากตะกอนน้ำเสีย [9-11] มาผสมดินเผา จึงมีความเป็นไปได้ในการนำกากตะกอนน้ำเสียมาผสมดินเหนียวเพื่อเตรียมเป็นวัสดุปลูก และเนื่องจากองค์ความรู้ในการนำกากตะกอนน้ำเสียมาเตรียมเป็นเม็ดดินเผาค่อนข้างมีน้อย ดังนั้นวัตถุประสงค์ของโครงงานนี้จึงศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมวัสดุปลูกจากกากตะกอนน้ำเสีย โดยศึกษาอัตราส่วนระหว่างกากตะกอนน้ำเสียกับดินเหนียว และอุณหภูมิในการเผา โดยการเลือกภาวะที่เหมาะสมพิจารณาจากสมบัติทางกายภาพของเม็ดดินเผาที่เตรียมได้ คือ ทดสอบความหนาแน่น ความพรุนตัว รวมถึงวิเคราะห์โลหะที่มีอยู่ในวัสดุปลูกที่เตรียมได้ โดยประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากโครงงานนี้คือ สามารถลดปริมาณกากตะกอนน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม (Zero Waste) และสร้างมูลค่าให้กับกากตะกอน

วิธีดำเนินการวิจัย

1.การเตรียมเม็ดดินเผาจากการตะกอนน้ำเสีย

ดินเหนียว (จากโรงโอ่งเรืองศิลป์ 3 ตำบลดอนตะโก อำเภอเมือง จังหวัดราชบุรี) และกากตะกอนจากการบำบัดน้ำเสีย (กากตะกอนน้ำเสียจากเครื่องกรอง filter press ของบริษัท แน็ชเชอรับเบอร์เธร็ด จำกัด ตำบลหมอนนาง อำเภอพนัสนิคม จังหวัดชลบุรี) ทั้งดินเหนียวและกากตะกอนน้ำเสียได้วิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุด้วยอุปกรณ์วิเคราะห์ธาตุ (Energydispersive x-ray spectroscopy, EDX) ซึ่งกล่าวในหัวข้อผลการวิจัยในลำดับต่อไป นำดินเหนียวและกากตะกอนไปตากแดดรวมเป็นเวลา 24 ชั่วโมง หลังจากการผ่านการตากแห้ง นำกากตะกอนน้ำเสียและดินเหนียวมาบดด้วยเครื่องบดแบบใช้แรงกระแทกเพื่อให้ได้อนุภาคที่ผ่านตะแกรงคัดขนาดเบอร์ 42 เมช (mesh) นำกากตะกอนและดินเหนียวที่ผ่านการคัดขนาดมาผสมกันโดยมีอัตราส่วนร้อยละโดยน้ำหนักระหว่างกากตะกอนกับดินเหนียวเท่ากับ 50:50 40:60 30:70 และ 0:100 โดยชั่งน้ำหนักของผสมกากตะกอนน้ำเสียกับดินเหนียวให้มีน้ำหนักประมาณ 30 กรัมต่อลูกและปั้นเป็นทรงกลมโดยใส่น้ำ 6 มิลลิลิตร หลังจากปั้นเม็ดดินผสมกากตะกอนน้ำเสียในอัตราส่วนต่างๆแล้วนำของผสมไปเผาที่อุณหภูมิ 700 800 และ 900 องศาเซลเซียส โดยกำหนดอัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิที่ 5

องศาเซลเซียสต่อนาทีจนถึงอุณหภูมิเผาที่กำหนด และให้อุณหภูมิเผาคงที่เป็นเวลา 30 นาทีจากนั้นปล่อยให้อุณหภูมิลดลงถึงอุณหภูมิห้อง

2.การทดสอบค่าความหนาแน่นรวมของเม็ดดินเผา (Bulk density)

ความหนาแน่นรวมของเม็ดดินเผา (Bulk density) คำนวณได้จากสมการที่ (1) เมื่อ m คือน้ำหนักของเม็ดดินเผา (หน่วย g), v คือปริมาตรของทรงกลมที่รวมช่องว่างภายในของเม็ดดินเผา, π คือค่าคงที่ทางคณิตศาสตร์มีค่าเท่ากับ 22/7 และ r คือรัศมีของเม็ดดินเผา (หน่วย cm) ในการวิเคราะห์ใช้ตัวอย่างเม็ดดินเผาอย่างน้อย 10 ลูก ในการหาค่าความหนาแน่นเฉลี่ย

$$Bulk\ density\ = \frac{m}{v} = \frac{m}{\frac{4}{3}\pi r^3} \quad (1)$$

3.การทดสอบร้อยละการดูดซึมน้ำของเม็ดดินเผา (% Water absorption)

นำเม็ดดินเผาอบแห้งที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 2 ชั่วโมง ทิ้งให้เย็นในเครื่องดูดความชื้นแล้วนำมาชั่งน้ำหนักแห้ง (Wdry) (หน่วย g) จากนั้นนำเม็ดดินเผาแช่ในน้ำกลั่นเป็นเวลา 24 ชั่วโมงโดยต้องให้น้ำท่วมเม็ดดินเผาตลอดเวลา หลังจากนั้นนำเม็ดดินเผาไปชั่งน้ำหนักที่อิ่มตัวด้วยน้ำ (Wsat) (หน่วย g) ที่ทำการซับน้ำที่ผิวของเม็ดดินเผาด้วยผ้าแล้ว การคำนวณร้อยละการดูดซึมน้ำแสดงดังสมการที่ (2) [7] และในการวิเคราะห์เช่นเดียวกับความหนาแน่น ตัวอย่างที่ใช้อย่างน้อย 10 ลูกเพื่อวิเคราะห์หาร้อยละการดูดซึมน้ำเฉลี่ย

$$\%Water\ adsorption\ = \left(\frac{W_{sat}-W_{dry}}{W_{dry}}\right) \times 100 \quad (2)$$

4.การทดสอบความเป็นกรด-ด่าง (pH) ของเม็ดดินเผา

การทดสอบความเป็นกรด-ด่างของเม็ดดินเผาใช้เครื่องวัดความเป็นกรด-ด่าง (pH meter) โดยนำเม็ดดินเผา 5 กรัมมาบดแล้วละลายในน้ำกลั่น 5 กรัม แล้วใช้หัววัดที่ผ่านการ calibrate ด้วยสารละลายบัฟเฟอร์ที่มีค่า pH เท่ากับ 4, 7 และ 10 ตามลำดับ แล้วทำการวัดค่าซ้ำอย่างน้อย 5 ครั้ง

5.การวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscopy, SEM) และอุปกรณ์วิเคราะห์ธาตุ (Energydispersive x-ray spectroscopy, EDX)

โดยนำตัวอย่างอนุภาคของ (1) เม็ดดินเผาที่เตรียมจากดินเหนียว 100 % โดยน้ำหนัก (2) กากตะกอนน้ำเสีย และ (3) เม็ดดินเผาที่เตรียมจากกากตะกอนกับดินเหนียวที่สภาวะเหมาะสม โดยนำเม็ดดินเผาและกากตะกอนที่เตรียมบดให้ละเอียด แล้วไปวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวของดินเหนียวและตะกอนที่เตรียมเป็นเม็ดดินเผาแล้วด้วย SEM และวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบของเม็ดดินเผาด้วยเทคนิค EDX

6.การวิเคราะห์ปริมาณของสังกะสีด้วย Zincon assay

เตรียมสารละลายบัฟเฟอร์ pH 9 โดยการละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 2.4 กรัมในน้ำกลั่น 60 ลูกบาศก์เซนติเมตร ปรับปริมาตรในขวดวัดปริมาตรให้เป็น 100 ลูกบาศก์เซนติเมตร เติมโปแตสเซียมคลอไรด์ 3.73 กรัมและกรดบอริก 3.1 กรัม เตรียมสารละลายซินคอน (Zincon) โดยการละลายซินคอน 0.065 กรัมในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 1 โมลาร์ 1 ลูกบาศก์เซนติเมตรและเจือจางให้เป็น 50 ลูกบาศก์เซนติเมตร ปิเปตต์น้ำที่แช่เม็ดดินเผา 1 ลูกบาศก์เซนติเมตรผสมกับสารละลายบัฟเฟอร์ 0.5 ลูกบาศก์เซนติเมตร หยดสารละลายซินคอนทีละหยดลงในสารตัวอย่างซึ่งหากสารละลายตัวอย่างมีสังกะสี

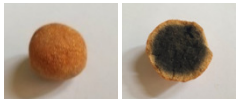
ไอออน (Zn^{2+}) สารละลายตัวอย่างจะเป็นสีน้ำเงิน และหยดต่อไปทีละหยดจนสารละลายตัวอย่างเปลี่ยนเป็นสีแดง ซึ่งแสดงถึงปริมาณที่มากเกินพอของซินคอนที่เกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับ Zn^{2+} ในสารละลายตัวอย่างจนหมด จากนั้นเจือจางสารละลายให้เป็น 5 ลูกบาศก์เซนติเมตรโดยใช้น้ำกลั่นแล้ววัดค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายที่ความยาวคลื่นที่ 620 นาโนเมตร ด้วยเครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสง (UV-Visible Spectrophotometer) เพื่อหาความเข้มข้นของสารละลาย Zn^{+2} ที่ไม่ทราบความเข้มข้น (ppm) ด้วยกราฟมาตรฐานของซินคอน (Calibration curve)

ผลการวิจัย

1.ลักษณะทางกายภาพของเมล็ดดินเผา

ลักษณะทางกายภาพเมื่อนำกากตะกอนน้ำเสียผสมกับดินเหนียวที่อัตราส่วน 50:50, 40:60, 30:70 และ 0:100 ร้อยละโดยน้ำหนักและนำไปเผาที่อุณหภูมิ 700 , 800 และ 900 °C แสดงดัง Table 1 พบว่าเม็ดดินเผาเปลี่ยนสีจากน้ำตาลเป็นสีส้มแดงสำหรับเม็ดดินเผาจากดินเหนียว 100% ไม่พบรอยไหม้ที่พื้นผิวภายนอกและภายใน ต่างจากเม็ดดินเผาที่มีกากตะกอนพบรอยไหม้ภายในเม็ดดินเผาและพบรอยไหม้ที่ผิวด้านนอกของเม็ดดินเผาเมื่อเผาที่อุณหภูมิ 900 °C แสดงให้เห็นชัดเจนว่ากากตะกอนที่ผสมในเม็ดดินเผาซึ่งมี

Table 1 Physical characteristic of clay pebbles from waste water sludge

Ratio of Waste sludge: Clay	Characteristics before Heat Treatment	Characteristics after Heat Treatment at Treatment temperature		
		700°C	800°C	900°C
50:50				
40:60				
30:70				
0:100				

ส่วนประกอบของซิงค์ซัลไฟด์ (ZnS) เปลี่ยนสีเป็นสีดำหลังผ่านความร้อน 700-900 °C การเกิดสีดำของซิงค์ซัลไฟด์ถูกระบุว่า [12] เกิดจากไอออนบวกของซิงค์และไอออนลบของซัลไฟด์ถูกปลดปล่อยออกมายังพื้นผิว ทำให้เกิดอิเล็กโทรไลซิสกับชั้นฟิล์มความชื้นที่ผิววัตถุซึ่งสัมผัสกับอากาศ ด้วยปฏิกิริยาเคมีดังกล่าวทำให้เกลือซัลไฟด์เปลี่ยนเป็นสีดำ การเกิดการดูดซับไอออนในเนื้อดินเหนียวสามารถเกิดขึ้นได้เนื่องจากเนื้อดินเหนียวมีประจุลบ [13] มีอำนาจดึงไอออนบวกให้เข้ามาอยู่ใกล้หรือผลักดันไอออนลบให้ห่างออกไป โดยดินเหนียวสามารถดูดซับไอออนบวกของน้ำรอบๆ ผิวดินเข้ามาและพร้อมทำปฏิกิริยากับซัลไฟด์ในเนื้อเม็ดดินเผาได้ จึงปรากฏสีดำของซิงค์ซัลไฟด์ในเนื้อเม็ดดินเผา และที่อุณหภูมิการเผาสูงขึ้นที่ 900°C เนื้อดินเหนียวผสมกากตะกอนอาจเกิดรูพรุนที่มากขึ้น ทำให้ประจุของซิงค์ซัลไฟด์สามารถแพร่มายังผิวด้านนอกของเม็ดดินเผาซึ่งสามารถเกิดปฏิกิริยากับความชื้นและอากาศจนเกิดเป็นสีดำได้

นอกจากนี้ยังได้วิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวของเมล็ดดินเผาที่มีดินเหนียว 100% (อัตราส่วน 0:100) กับเม็ดดินที่มีดินเหนียว 50% (อัตราส่วน 50:50) ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (SEM) (Figure 1) พบว่าผิวของเม็ดดินเผาที่มีกากตะกอน มีผิวขรุขระ และเกิดรูพรุนมากกว่าผิวของเม็ดดินเผาจากดินเหนียวที่ไม่มีซิงค์ซัลไฟด์ผสมซึ่งมีพื้นผิวเรียบเป็นแผ่นซ้อนกัน ซึ่งเป็นองค์ประกอบของแร่ดินเหนียวที่มีองค์ประกอบเป็นพวกอะลูมิโนซิลิเกตที่มีโครงสร้างเป็นแผ่นหรือชั้นซ้อนๆ กันซึ่งสามารถสังเกตลักษณะดังกล่าวใน Figure 1 (a)

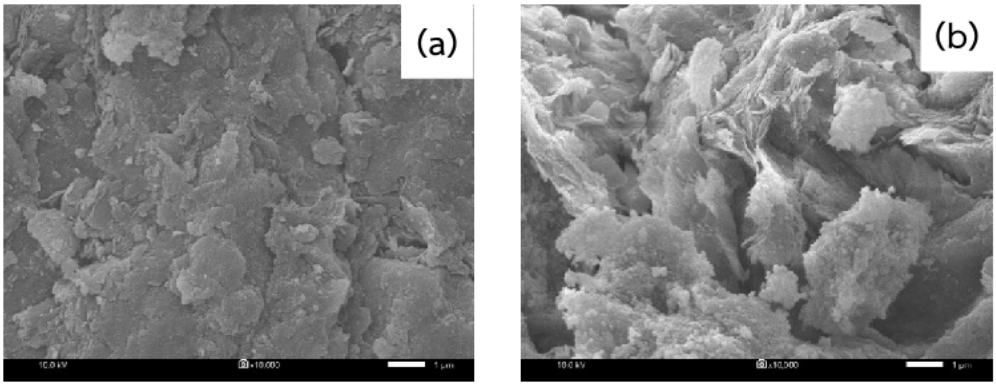


Figure 1 SEM images of clay paddle when the ratio of waste sludge to clay is (a) 0:100 and (b) 50:50 at oven temperature 800°C

2. ผลของอัตราส่วนตะกอนน้ำเสียและอุณหภูมิเผาต่อค่าความหนาแน่นและความพรุนตัวของเม็ดดินเผา

จากผลการทดลองเพื่อหาความหนาแน่นของเม็ดดินเผาจากดินเหนียว เทียบกับดินเหนียวผสมกากตะกอนที่อัตราส่วนร้อยละโดยน้ำหนักกากตะกอนต่อดินเหนียวเท่ากับ 50:50 40:60 และ 30:70 แสดงดัง Figure 2 เมื่อพิจารณาเม็ดดินเผาจากดินเหนียว 100% (0:100) ที่อุณหภูมิสูงขึ้นค่าความหนาแน่นลดลง ส่วนเม็ดดินเผาที่ผสมกากตะกอนที่อัตราส่วนร้อยละโดยน้ำหนัก 40:60 และ 30:70 ค่าความหนาแน่นเปลี่ยนแปลงไม่มากนักเมื่ออุณหภูมิการเผาเพิ่มขึ้น แต่ในกรณีที่อัตราส่วนตะกอนต่อดินเผาเท่ากับ 50:50 ที่อุณหภูมิการเผาที่ 800°C มีค่าความหนาแน่นสูงขึ้น ดังนั้นอาจกล่าวได้ว่าอุณหภูมิในการเผาไม่มีผลต่อค่าความหนาแน่นของเม็ดดินเผาที่มีอัตราส่วนของกากตะกอนต่ำว่า 50% โดยน้ำหนัก นอกจากนี้ยังสังเกตได้

ว่าที่อุณหภูมิเผาที่ 800°C ความหนาแน่นของเม็ดดินเผาจากกากตะกอนและจากดินเหนียวอย่างเดียวมีค่าความหนาแน่นที่ใกล้เคียงกันประมาณ 2 g/cm^3

ส่วนผลของอุณหภูมิการเผาและอัตราส่วนของกากตะกอนต่อร้อยละการดูดซับน้ำของเม็ดดินเผาที่เตรียมได้แสดงดัง Figure 3 พบว่าเม็ดดินเผาที่ผสมกากตะกอนที่ทุกอัตราส่วน มีค่าการดูดซับน้ำมากกว่าเม็ดดินเผาจากดินเหนียว 100% (0:100) อันเนื่องจากเม็ดดินเผาที่มีกากตะกอนมีลักษณะพื้นผิวที่มีรูพรุน ในขณะที่ผิวของเม็ดดินเผาจากดินเหนียวมีพื้นผิวค่อนข้างเรียบจึงดูดซับน้ำได้น้อยกว่าดังแสดงในรูป SEM (Figure 1) เมื่อพิจารณาที่อัตราส่วนร้อยละโดยน้ำหนักของตะกอนต่อดินเหนียว 30:70 และ 40:60 พบว่าอุณหภูมิการเผาที่เพิ่มขึ้นไม่มีผลกับร้อยละการดูดซับน้ำ ส่วนสภาวะที่ได้ค่าร้อยละการดูดซับน้ำมากที่สุดที่ 17.5% คือ อัตราส่วนร้อยละโดยน้ำหนักของตะกอนต่อดินเหนียว 50:50 ที่อุณหภูมิ 800°C

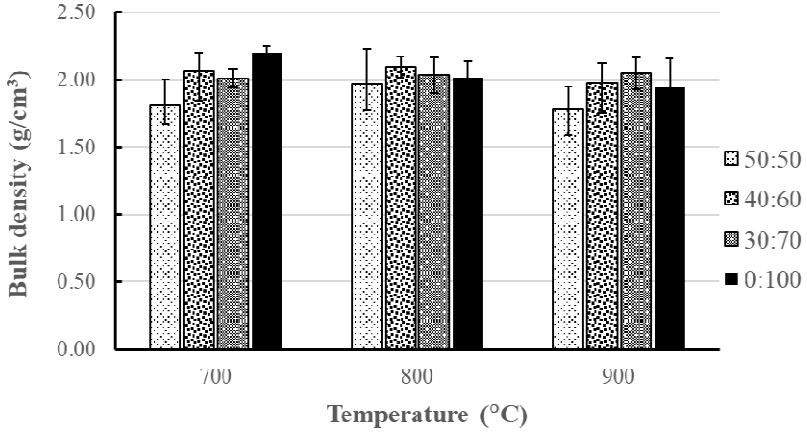


Figure 2 Effect of treatment temperature on bulk density of clay paddles with the ratio of waste sludge to clay of 50:50, 40:60, 30:70 and 0:100

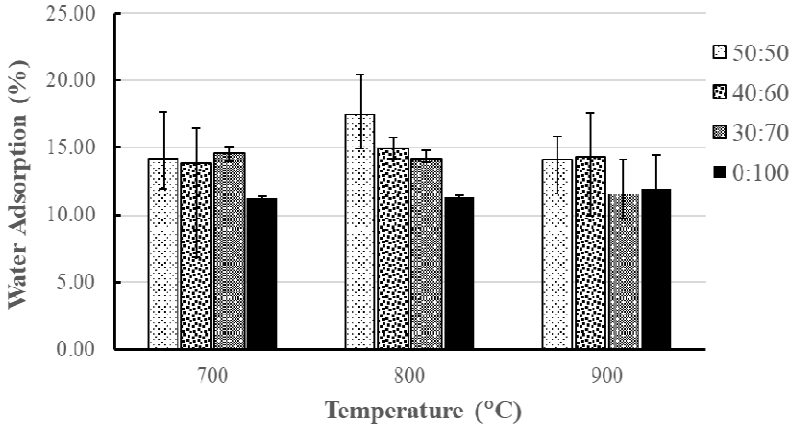
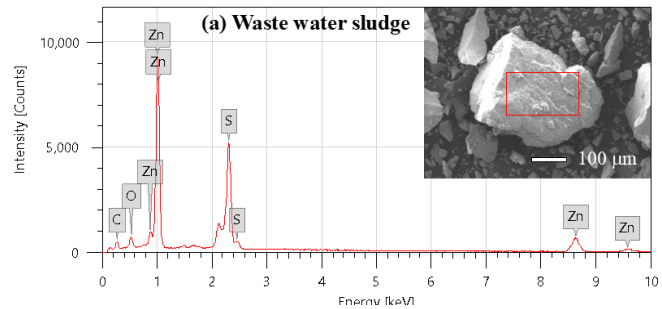


Figure 3 Effect of treatment temperature on %water adsorption of clay paddles with the ratio of waste sludge to clay of 50:50, 40:60, 30:70 and 0:100

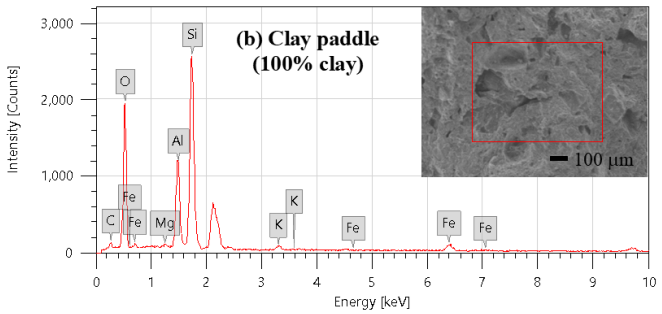
3.การวิเคราะห์สมบัติทางเคมีของเม็ดดินเผาและสภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมเม็ดดินเผา

ในการวิจัยเพื่อเตรียมเม็ดดินเผาจากดินเหนียวกับกากตะกอนน้ำเสีย โดยศึกษาผลของอัตราส่วนร้อยละโดยน้ำหนักของกากตะกอนต่อดินเหนียวและอุณหภูมิการเผา ที่มีผลต่อค่าความหนาแน่นและร้อยละการดูดซับน้ำของเม็ดดินเผาที่เตรียมได้นั้น ในขั้นต้นได้ตรวจสอบลักษณะทางกายภาพและองค์ประกอบทางเคมีของตะกอนน้ำเสียที่นำมาจากโรงงาน มีลักษณะเป็นอนุภาคสีขาวเนื้อละเอียด เมื่อนำวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDX พบซิงค์ซัลไฟด์ (ZnS) เป็นองค์ประกอบหลัก ดังแสดงใน Figure 4 (a) ส่วนดินเหนียวที่นำมาจากโรงงานผลิตโอ่งในการเตรียมเมื่อเปียกมีลักษณะเหนียวเกาะยึดกับตะกอนได้ดี ดินเหนียวมีสีน้ำตาล หลังการเผาเม็ดดินเหนียวเปลี่ยนเป็นสีส้มดังแสดงใน Table 1 นำเม็ดดินเหนียวที่ผ่านการเผามาวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDX ดังแสดงใน Figure 4 (b) พบว่าดินเหนียวที่ใช้มีองค์ประกอบของอะตอมซิลิกอน (Si) อะลูมิเนียม(Al) ออกซิเจน (O) และโพแทสเซียม (K) ซึ่งสามารถระบุชนิดของดินเหนียวได้ กล่าวคือดินเหนียวประกอบด้วยแผ่นผลึกซิลิกาสองแผ่นและแผ่นอะลูมินาหนึ่งแผ่น (2:1 type clay) คล้ายดินเหนียวชนิดสเม็กไทต์ (Smectite) แต่เมื่อพบ K สามารถจำแนกชนิดของดินเหนียวเป็นแบบอิลไลต์ (Illite) [13] โดย Si อะตอมในแผ่นซิลิกาบางส่วนจะถูกแทนที่โดย Al อะตอมและประจุที่เหลือค้าง เนื่องจากการแทนที่กันนี้จะถูกดูดยึดชดเชยทำให้เป็นกลางโดย K^+ ซึ่ง K^+ ที่ฝังตัวอยู่ทำหน้าที่คล้ายดุมยึดแผ่นผลึกของอิลไลต์ที่เรียงซ้อนกันอยู่ทำให้ขยับเขยื้อนได้ยาก ซึ่งมีผลทำให้หลืบระหว่างแผ่นผลึกของแร่ดินเหนียวขยายและหดตัวไม่ได้เมื่อดินเหนียวนั้นเปียกหรือแห้ง ซึ่งสอดคล้องกับขนาดเม็ดดินเผาผสมกากตะกอนก่อนและหลังการเผามีขนาดไม่เปลี่ยนแปลง นอกจากนี้โมเลกุลน้ำและไอออนบวกอาจแทรกซึมเข้าดูดซับที่ผิวภายในบริเวณใกล้ขอบผลึกของอิลไลต์ได้ ซึ่งทำให้ปรากฏสีดำของ ZnS ที่สามารถดูดซับภายในผิวของดินเผาดังที่กล่าวมา นอกจากนี้จากผล EDX ยังพบอะตอมของเหล็ก (Fe) ซึ่งแสดงถึงการมีออกไซด์ของเหล็กในดินเหนียว ก่อนการเผามีสีน้ำตาลอาจเพราะดินเหนียวมีแร่ไลมอไนต์ (Limonite; $2Fe_2O_3.3H_2O$) [14] เมื่อถูกเผาทำให้เกิดการสูญเสียผลึกน้ำกลายเป็นแร่ฮีมาไทต์ (Hematite; Fe_2O_3) ซึ่งมีสีน้ำตาลแดงหรือสีส้มดังที่ปรากฏใน Table 1

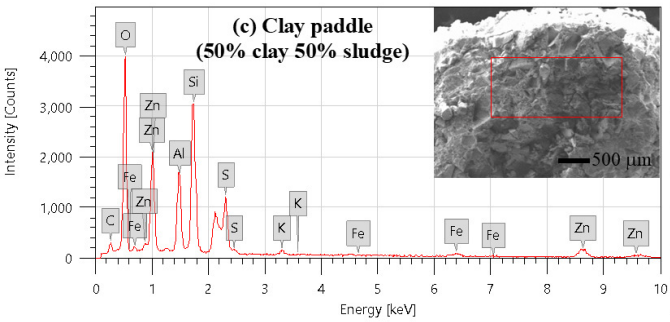
จากผลการทดลองเม็ดดินเผาที่มีสมบัติความหนาแน่นสูง ร้อยละการดูดซับน้ำสูง คือเม็ดดินเผาที่เตรียมจากกากตะกอนต่อดินเหนียว 50:50 ร้อยละโดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 800 °C ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกภาวะนี้เป็นภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการเตรียมเมล็ดดินเผาจากการตะกอนน้ำเสีย จึงได้นำเม็ดดินเผาที่เตรียมในภาวะเหมาะสมมาวิเคราะห์สมบัติทางเคมี โดยการนำสารละลายที่แช่ด้วยเม็ดดินเผาผสมกากตะกอน ไปวิเคราะห์ค่าความเป็นกรดด่าง (pH) มีค่าเท่ากับ 5.7 แสดงสภาพกรดจริงคือส่วนของ H^+ ที่ถูกชะละลายจากเม็ดดินเผา สภาพที่เป็นกรดปานกลางของเม็ดดินเผาอาจเกิดได้หลายปัจจัย เช่น องค์ประกอบของไอออน กำมะถันที่ละลายน้ำกลายเป็นกรดกำมะถัน หรือมาจากอินทรียสารของดินเหนียว เป็นต้น นอกจากนี้ยังได้วิเคราะห์ความเข้มข้นของสังกะสีในน้ำที่แช่เม็ดดินเผาด้วยวิธี Zincon assay พบว่าปริมาณของสังกะสีในน้ำเท่ากับ 412 ppm การที่ไอออนบวกของสังกะสี ($Zn^{2+)}$ ถูกชะล้างด้วยน้ำออกมาจากผิวของเม็ดดินเผาสามารถเกิดขึ้นได้ แม้ว่าโดยปกติแร่ดินเหนียวมีประจุลบ [13] ซึ่งจะดึงดูดไอออนบวกไว้ แต่อย่างไรก็ตามไอออนบวกพวกนี้สามารถถูกไล่ที่ออกไปโดยไอออนบวกอื่นๆ ได้โดยง่าย เพื่อรักษาความสมดุลกันระหว่างไอออนบวกที่ดูดซับที่พื้นผิวของดินเหนียว ดังนั้นจึงมีความเป็นได้ที่ Zn^{2+} จะสามารถถูกชะออกมาได้จากการรักษาสมดุลของไอออนที่มีอยู่ที่ผิวของดินเหนียว นอกจากนี้เม็ดดินเผาที่เตรียมจากกากตะกอนต่อดินเหนียว 50:50 ร้อยละโดยน้ำหนักที่อุณหภูมิ 800°C ซึ่งเลือกให้เป็นสภาวะที่เหมาะสม ได้นำไปวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยเทคนิค EDX ดังแสดงใน Figure 4 (c) แสดงถึงองค์ประกอบของทั้งดินเหนียวและกากตะกอน ZnS



Element	Mass%	Atom%
C	12.70%	35.47%
O	3.71%	7.78%
S	26.02%	27.21%
Zn	57.57%	29.533%



Element	Mass%	Atom%
C	6.77%	11.79%
O	38.56%	50.41%
Mg	0.38%	0.33%
Al	12.50%	9.69%
Si	32.13%	23.93%
K	1.42%	0.76%
Fe	8.23%	3.08%



Element	Mass%	Atom%
C	8.28%	15.47%
O	34.55%	49.38%
Al	8.63%	7.33%
Si	16.85%	13.72%
S	7.34%	5.24%
K	0.78%	0.47%
Fe	2.15%	0.89%
Zn	21.42%	7.50%

Figure 4 SEM/EDX of (a) wast water sludge, (b) clay paddle from clay 100%wt and (c) clay paddle from optimized condition (ratio 50:50, 800°C)

อภิปรายและสรุปผลการวิจัย

เม็ดดินเผาที่เตรียมจากกากตะกอนซิงค์ซัลไฟด์ (ZnS) และดินเหนียวที่อัตราส่วนร้อยละโดยน้ำหนัก 50:50 40:60 30:70 และ 0:100 นำมาเผาขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 700°C 800°C และ 900°C โดยเม็ดดินผสมกากตะกอนก่อนการเผาแต่ละอัตราส่วนสามารถขึ้นรูปเป็นทรงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 เซนติเมตร ระหว่างการเผาเม็ดดินเผาผสมกากตะกอนที่อุณหภูมิต่างๆ เม็ดดินเผาเปลี่ยนจากสีน้ำตาลเป็นสีส้ม ซึ่งแสดงถึงการมีแร่ฮีมาไทต์ (Hematite; Fe_2O_3) ในดินเหนียวซึ่งสอดคล้องกับผล EDX ที่พบธาตุ Fe และ O ในเม็ดดินเผา ซึ่งฮีมาไทต์เกิดขึ้นง่ายจากการสูญเสียผลึกน้ำของแร่ไลมอไนต์ (Limonite; $2Fe_2O_3.3H_2O$) สอดคล้องกับสีน้ำตาลของดินเหนียวก่อนเผา นอกจากนี้ยังพบโพแทสเซียม (K) ในดินเหนียว ซึ่งสันนิฐานได้ว่าแร่ดินเหนียวในเม็ดดินเผามีการจัดเรียงตัวแบบอิลไลต์ (Illite) จัดเรียง 2:1 คือมีแผ่นซิลิกา 2 แผ่นต่อแผ่นอะลูมินา 1 แผ่น

ในหนึ่งหน่วย และในโครงสร้างจะมี K ผสมอยู่ด้วยทำให้ขยายตัวได้น้อย จึงสังเกตได้ว่าหลังการเผาเม็ดดินเผามีขนาดไม่เปลี่ยนแปลง มีความแข็งเหนียว จากโครงสร้างของดินเหนียวแบบอิลไลต์ [13] องค์ประกอบทางเคมีเหล่านี้ในดินเหนียวส่งผลต่อความสามารถในการดูดซับไอออนภายในดินเหนียว ดังนั้นตะกอน ZnS ซึ่งมีทั้งประจุบวกและลบจึงถูกดูดซับเข้ากับเนื้อดินเหนียวได้ นอกจากนี้ในดินเหนียวยังประกอบด้วยผลึกน้ำในรูปแบบของ hydrous silicates of alumina (Al_2O_3 $2SiO_2$ $2H_2O$) ซึ่งอาจมีปริมาณมากหรือน้อยภายในดินเหนียว [15] โดยผลึกน้ำสามารถสลายไปในช่วงอุณหภูมิการเผา 700-900°C ซึ่งส่งผลต่อสมบัติทางกายภาพของดินเหนียว เนื่องจากมีการสลายไปของผลึกน้ำอาจทำให้เกิดรูพรุนภายในเม็ดดินเผาเพิ่มขึ้น สังเกตได้จากภาพ SEM ใน Figure 4 (b) ส่งผลให้ความหนาแน่นของเม็ดดินเผาจากดินเหนียวร้อยละ 100 โดยน้ำหนักมีค่าลดลงและเมื่อพิจารณาเม็ดดินเผาที่ผสมกากตะกอนซึ่งประกอบด้วย ZnS หลังการเผาพบว่ากากตะกอนเปลี่ยนเป็นสีดำเนื่องจากปฏิกิริยาอิเล็กโทรไลซิสของไอออนของซิงค์และซัลไฟด์กับชั้นฟิล์มความชื้นที่ผิววัตถุซึ่งสัมผัสกับอากาศ แต่ความหนาแน่นของเม็ดดินเผาที่อัตราส่วนร้อยละโดยน้ำหนักระหว่างกากตะกอนกับดินเหนียวเท่ากับ 40:60 และ 30:70 มีค่าไม่เปลี่ยนแปลง ซึ่งอาจสรุปได้ว่าช่วงอุณหภูมิ 700-900°C ไม่ส่งผลต่อความหนาแน่นของดินเหนียวกับกากตะกอนมากนัก ทั้งนี้อาจเกิดจากการขยายของดินเหนียวที่มีโครงสร้างแบบอิลไลต์ภายในเม็ดดินเผาเกิดน้อยทำให้ปริมาตรภายในเม็ดดินเผาไม่เปลี่ยนแปลง ประกอบกับการดูดซับไอออนบวกของซิงค์โดยดินเหนียวทำให้ปริมาณกากตะกอนยังคงรวมเป็นเนื้อเดียวกับดินเหนียวในเม็ดดินเผาซึ่งแสดงในภาพ SEM (Figure 2 (b) และ Figure 4 (c))

ค่าการดูดซับน้ำของเม็ดดินเผาเป็นค่าที่แสดงถึงการมีรูพรุนเปิด (open pore) ภายในเมล็ดดินเผา ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ SEM ว่าเม็ดดินเผาที่ผสมกากตะกอนมีรูพรุนมากกว่าดินเหนียวเพียงอย่างเดียว จากผลการทดลองสรุปได้ว่าเม็ดดินเผาผสมกากตะกอนมีความสามารถในการดูดซับน้ำมากกว่าเม็ดดินเผา เนื่องจากตะกอนน้ำเสียเพิ่มรูพรุนภายในเม็ดดินเผาผสมกากตะกอน โดยอัตราส่วนของกากตะกอนน้ำเสียกับดินเผาที่อัตราส่วนร้อยละโดยน้ำหนัก 50:50 อุณหภูมิ 800°C มีค่าร้อยละการดูดซับน้ำเฉลี่ย 17.5 และเป็นที่น่าสังเกตว่าเมื่อกากตะกอนน้ำเสียมีสัดส่วนของกากตะกอนน้ำเสียเพิ่มขึ้นมีร้อยละการดูดซับน้ำเพิ่มขึ้น โดยสรุปจากผลการวิจัยนี้ภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมเม็ดดินเผาคืออัตราส่วนร้อยละโดยน้ำหนักระหว่างกากตะกอนและดินเหนียวเท่ากับ 50:50 อุณหภูมิเผา 800°C โดยเม็ดดินเผาที่เตรียมได้มีค่าความหนาแน่นรวมเฉลี่ย 1.97 g/cm^3 และค่าร้อยละการดูดซับน้ำเฉลี่ย 17.5 ความหนาแน่นของเม็ดดินเผามีส่วนสัมพันธ์กับโครงสร้างของดินเหนียวและตะกอน โดยความหนาแน่นของดินเหนียวขึ้นกับระดับความลึกของชั้นดิน ซึ่งดินที่มีความหนาแน่นรวมประมาณ 1.7 g/cm^3 เป็นดินที่อยู่ในระดับลึกล่างสุดมีสีน้ำตาลอ่อนและมีความพรุนตัวต่ำ [14] ซึ่งส่งผลต่อค่าร้อยละการดูดซับน้ำของเม็ดดินเผาจากดินเหนียว 100% ซึ่งมีค่าต่ำเมื่อเทียบกับเม็ดดินเผาที่ผสมกากตะกอน ค่าร้อยละการดูดซับน้ำแสดงความสามารถในการอุ้มน้ำ การถ่ายเทอากาศของเม็ดดินเผาเพื่อใช้เป็นวัสดุปลูก [16] ส่วนค่าความเป็นกรดด่าง (pH) ของวัสดุปลูกคือค่า pH ของสารละลายที่อยู่รอบๆ วัสดุปลูกซึ่งแสดงความสามารถในการยึดประจุบวก เช่น H^+ ในสารละลายเรียกว่า Cation exchange capacity ซึ่งมีความสำคัญต่อการปลดปล่อยของธาตุอาหารต่างๆ และควบคุมกิจกรรมของจุลินทรีย์ซึ่งค่า pH ที่เหมาะสมในการปลูกพืชขึ้นกับชนิดของพืชที่ปลูก แต่โดยส่วนใหญ่เป็นกรดเล็กน้อยถึงเป็นกลางซึ่งอยู่ในเกณฑ์เหมาะสมกับการเจริญเติบโตของพืชทั่วไป [17] สภาวะกรดยังส่งเสริมให้มีปริมาณของสารละลายสังกะสีในน้ำที่ได้จากการแช่เม็ดดินเผาเป็นเวลา 24 ชั่วโมงได้สังกะสีเป็นจุลธาตุอาหาร (Trace element) ต่อการเจริญเติบโตของพืช โดยมีบทบาทเกี่ยวกับฮอร์โมนพืช มีส่วนในการขยายพันธุ์พืชบางชนิด

มีบทบาททางอ้อมในการสร้างคลอโรฟิลล์ ดังนั้นโอกาสสังกะสีเป็นพิษในพืชนั้นน้อยมาก [18] ความต้องการสังกะสีขึ้นอยู่กับพืชแต่ละชนิด ปริมาณสังกะสีไอออนที่ถูกชะออกมาจากเม็ดดินเผาเกิดจากการรักษาสมดุลของไอออนที่มีอยู่ที่ผิวของดินเหนียว

จากผลการทดสอบเม็ดดินเผาผสมกากตะกอนทั้งทางด้านกายภาพ คือความหนาแน่น ร้อยละการดูดซับน้ำ และด้านเคมี คือค่าความเป็นกรดด่าง (pH) และปริมาณของสารละลายสังกะสีในน้ำ เป็นการศึกษาเบื้องต้นในการพัฒนาเศษวัสดุเพื่อเพิ่มมูลค่า ซึ่งสามารถประยุกต์ใช้เม็ดดินเผาผสมกากตะกอนเป็นวัสดุปลูก โดยในเบื้องต้นทางคณะวิจัยคำนวณค่าใช้จ่ายในการใช้กากตะกอนผสมดินเหนียวเพื่อเตรียมเป็นเม็ดดินเผาน้ำหนัก 1 กิโลกรัม โดยพิจารณาค่าวัตดุดิบคือดินเหนียว ค่าไฟฟ้าสำหรับเตาเผา โดยไม่พิจารณาค่าแรงและค่าเครื่องจักร ซึ่งเตรียมที่ภาวะเหมาะสมดังกล่าวมีต้นทุนการผลิต 23 บาทต่อกิโลกรัมเมื่อเทียบราคาเม็ดดินเผามวลหนัก 1 กิโลกรัม ที่มีขายในปัจจุบันราคา 90 บาท [19] จึงเป็นอีกช่องทางในการนำกากตะกอนน้ำเสียซึ่งต้องมีค่าใช้จ่ายในการนำกากตะกอนไปบำบัด มาพัฒนาเป็นวัสดุปลูกเพื่อเพิ่มมูลค่าของกากตะกอน

References

[1] Assadayudh, A., et al. (2020). Study of Diatomite Pellet Medium to Substitute Mixed Soil for Indoor Pot Plant. In *The 58th Kasetsart University Annual Conference* (p. 252-259). 5-7 February, 2020, Bangkok, Thailand. (in Thai)

[2] Wongmukda, K., et al. (2020). Production of Lightweight Expanded Clay Aggregate from Water Treatment Sludge and Cassava Sludge. *Journal of Science and Technology Mahasarakham University*, 39(4), 472-479. (in Thai)

[3] Optian, S., et al. (2017). Feasibility Study of Growing Material Production from Sugarcane Bagasse and Wastewater Sludge. *VRU Research and Development Journal Science and Technology*, 12(1), 79-92. (in Thai)

[4] Dechprasittichoke, P., et al. (2013). *The Study of Physical and Chemical Properties of Combusted Wasted Growing Mediums* (Research report). Bangkok: Suan Dusit University. (in Thai)

[5] Lorwongtragool, P., & Leasen, S. (2022). *Development of Lightweight Expanded Clay Aggregate from Agricultural Waste Materials* (Research reports). Nonthaburi: Rajamangala University of Technology Suvarnabhumi. (in Thai)

[6] Harech, M. A., et al. (2021). Effect of Temperature and Clay Addition on the Thermal Behavior of Phosphate Sludge. *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*, 60(3), 194-204.

[7] Loutou, M., et al. (2016). Heated Blends of Clay and Phosphate Sludge: Microstructure and Physical Properties. *Journal of Asian Ceramic Societies*, 4(1), 11-18.

[8] Antonkiewicz, J., et al. (2020). Application of Ash and Municipal Sewage Sludge as Macronutrient Sources in Sustainable Plant Biomass Production. *Journal of Environmental Management*, 264, 110450.

[9] Boudaghpour, S., & Hashemi, S. (2008). A Study on Light Expanded Clay Aggregate (LECA) in a Geotechnical View and its Application on Greenhouse and Greenroof Cultivation. *International Journal of Geology*, 4(2), 59-63.

[10] Arioz, O., et al. (2008). A Preliminary Research on the Properties of Lightweight Expanded Clay Aggregate. *Journal of the Australian Ceramic Society*, 44(1), 23-30.

[11] Karasu, B., et al. (2006). Properties of Expanded Clay Aggregates. In *6th National Ceramic Congress with International Participation*. January, 2006, Adapazari, Turkey.

[12] Gordon, N. T., et al. (1939). The Blackening of Zinc Sulfide Phosphors. *The Journal of Chemical Physics*, 7(1), 4-7.

[13] Rattanasophon, S. (2005). Chapter 6 Soil Colloids. In Lecturers of department of soil science, Faculty of Agriculture, Kasetsart University (Ed.). *Introduction to soil science*. 10th ed. (p.161-185). Bangkok: Kasetsart University Press. (in Thai)

[14] Suddhiprakarn, A. (2005). Chapter 2 Soil Genesis. In Lecturers of department of soil science, Faculty of Agriculture, Kasetsart University (Ed.). *Introduction to soil science*. 10th ed. (p.8-53). Bangkok: Kasetsart University Press. (in Thai)

[15] Johnston, C. T. (2018). Clay Mineral-Water Interactions. In Schoonheydt. R., et al. (Ed). *Developments in Clay Science: Volume 9: Surface and Interface Chemistry of Clay Minerals* (p.89-124). Elsevier. doi: 10.1016/B978-0-08-102432-4.00004-4

[16] Ong-art, S., et al. (2020). Medial Culture Types on Growth and Yield Quality of Melon. *Khon Kaen Agriculture Journal*, 48 (Suppl.1), 63-68. (in Thai)

[17] Thagaeng, A. (2005). Study on the Effects of Soilless media on the Growth and Yield of Tomato in Drip Fertigation System. *Journal of Agricultural Research and Extension*, 22(1), 46-57. (in Thai)

[18] Prapruttam, P. (2005). Chapter 16 Micronutrient Elements. In Lecturers of department of soil science, Faculty of Agriculture, Kasetsart University (Ed.). *Introduction to soil science*. 10th ed. (p. 329-353). Bangkok: Kasetsart University Press. (in Thai)

[19] HomePro. (2025). *Clay pellets*. Available form https://www.homepro.co.th. Accessed date: 5 April 2025. (in Thai)