



วารสารวิชาการ วิศวกรรมศาสตร์ ม.อบ.
UBU Engineering Journal

บทความวิจัย

กำลังอัดและโครงสร้างจุลภาคของดินลูกรัง-กากกาแฟปรับปรุงด้วยเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์

Compressive Strength and Microstructure of Lateritic Soil-Used Coffee Grounds Stabilized Fly Ash Geopolymer

คุณาพจน์ วงษ์คำ¹ เชิดศักดิ์ สุขศิริพัฒน์พงศ์^{1*} เสริมศักดิ์ ดิยะแสงทอง¹ จักษดา อารังวุฒิ¹ ชยภฤต เพชรช่วย¹

¹ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน จังหวัดนครราชสีมา
Kunapot Wongkhum¹ Cherdasak Suksiripattanapong^{1*} Sermsak Tiyasangthong¹ Jaksada Thumrongvut¹
Chayakrit Phetchuay¹

¹ Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering and Architecture, Rajamangala University of Technology Isan, Muang, Nakhon Ratchasima 30000

* Corresponding author.

E-mail: cherdasak.su@rmu.ac.th; Telephone: 08 1760 7722

บทคัดย่อ

บทความนี้ศึกษา กำลังอัดและโครงสร้างจุลภาคของดินลูกรัง-กากกาแฟปรับปรุงด้วยเถ้าลอย จีโอโพลิเมอร์ เถ้าลอยนำมาจากโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง กากกาแฟได้จากร้านกาแฟในพื้นที่ จังหวัดนครราชสีมา สารกระตุ้นเป็นส่วนผสมของสารละลายโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) และโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{SiO}_3:\text{NaOH}$ เท่ากับ 50:50 ความเข้มข้น (NaOH) เท่ากับ 5 โมลาร์ ทดสอบกำลังอัดของตัวอย่างที่อายุบ่ม 7 วัน ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดมีค่าลดลงตามการเพิ่มขึ้นของปริมาณกากกาแฟ โดยที่หน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดของตัวอย่างมีค่าเท่ากับ 20.12 19.75 18.96 และ 18.05 kN/m^3 สำหรับปริมาณกากกาแฟเท่ากับร้อยละ 0 10 20 และ 30 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ หน่วยน้ำหนักแห้งลดลงเกิดจากอนุภาคของกากกาแฟที่มีความพรุนสูง กำลังอัดของดินลูกรัง-กากกาแฟปรับปรุงด้วยเถ้าลอย จีโอโพลิเมอร์ที่อายุบ่ม 7 วัน และปริมาณความชื้นเหมาะสมให้กำลังอัดสูงสุดซึ่งมีค่าเท่ากับ 2.57 1.82 1.40 และ 0.88 MPa สำหรับปริมาณกากกาแฟเท่ากับร้อยละ 0 10 20 และ 30 ตามลำดับ

คำสำคัญ

กำลังอัด โครงสร้างทางจุลภาค ดินลูกรัง กากกาแฟ เถ้าลอย จีโอโพลิเมอร์

Abstract

This article investigated compressive strength and microstructure of lateritic soil-used coffee grounds stabilized fly ash geopolymer. Fly ash (FA) was obtained from the Mae Moh power plant, Lampang Province. Used coffee grounds (CG) was collected from the coffee shop in Nakhon Ratchasima area. Liquid alkaline activator was mixed of sodium silicate (Na_2SiO_3) and sodium hydroxide (NaOH). The $\text{Na}_2\text{SiO}_3:\text{NaOH}$ ratio was 50:50. The concentration of NaOH was 5 molar. The compressive strength of samples at curing time of 7 days was examined. Test results show that the unit weight of lateritic soil-CG FA geopolymer decreases with increasing the CG. The maximum unit weight of sample is 20.12, 19.75, 18.96 and

18.05 kN/m³ for CG content of 0, 10, 20 and 30% by weight, respectively. The decrease in unit weight causes high porosity in particles of CG. The lateritic soil-CG FA geopolymer at curing time of 7 days and optimal water content gives the maximum compressive strength which is 2.57, 1.82, 1.40 and 0.88 MPa for GC content of 0, 10, 20 and 30%, respectively.

Keywords

compressive strength; microstructure; lateritic soil; used coffee grounds; fly ash geopolymer

1. บทนำ

กากกาแฟเป็นผลผลิตทางการเกษตรที่มีปริมาณมาก และได้รับความนิยมในการบริโภคทั้งในอดีตจนถึงปัจจุบัน จากกระบวนการผลิตกาแฟสำเร็จรูปของโรงงานอุตสาหกรรม และกระบวนการผลิตในรูปแบบกาแฟสด ทั่วโลกทำให้มีกากกาแฟเหลือทิ้งประมาณ 7.4 ล้านตันต่อปี [1] ในประเทศไทยมีกากกาแฟเหลือทิ้งประมาณ 21,000 ตันต่อปี [2] เนื่องจากปริมาณการบริโภคยังคงมีอย่างสม่ำเสมอ ต่อเนื่อง และมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นส่งผลให้ปริมาณกากกาแฟมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณการบริโภค อย่างไรก็ตามกากกาแฟดังกล่าวถูกนำไปทิ้งซึ่งไม่ได้ใช้ประโยชน์เท่าที่ควร และถ้าหากกากกาแฟไม่ได้รับการกำจัดอย่างถูกวิธีก็จะเป็นแหล่งเพาะพันธุ์ของเชื้อโรคได้

จีโอโพลิเมอร์ (geopolymer) เป็นวัสดุผสมอามอร์ฟัส ซิลิเกตที่มีโครงสร้าง 3 มิติแบบอสัณฐาน (amorphous) หรือเรียกอีกอย่างว่า สารประกอบจีโอโพลิเมอร์อินิน หรือ จีโอโพลิเมอร์ เป็นวัสดุเชื่อมประสานชนิดหนึ่งที่มีส่วนผสมของแร่ธาตุเป็นองค์ประกอบเกิด ปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้น โดยส่วนประกอบทางเคมีของแร่ธาตุนั้นจะอยู่ในรูปอสัณฐานซึ่งมีองค์ประกอบของ SiO₂ และ Al₂O₃ เป็นหลัก โดยถูกทำให้แตกตัวด้วยอัลคาไลน์หรือสารละลายที่เป็นด่างสูงได้แก่ สารละลาย Na₂SiO₃ หรือ KOH จากนั้นใช้ความร้อนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาซึ่งสามารถเกิดการแข็งตัวและทำให้กำลังอัด และความทนทานสูงขึ้น [3–8]

Teck et al. [9] ศึกษาคุณสมบัติพื้นฐาน และคุณสมบัติวิศวกรรมของกากกาแฟ-เถ้าลอย จีโอโพลิเมอร์ เพื่อประยุกต์ใช้

เป็นวัสดุรองพื้นทาง และวัสดุคัดเลือก ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมของกากกาแฟ-เถ้าลอย จีโอโพลิเมอร์ที่สามารถประยุกต์ใช้เป็นวัสดุรองพื้นทาง และวัสดุคัดเลือกคืออัตราส่วนกากกาแฟต่อเถ้าลอยเท่ากับ 70:30 อัตราส่วนสารกระตุ้นต่อเถ้าลอยเท่ากับ 1.00 ซึ่งให้กำลังอัดเท่ากับ 634 kPa และยังแสดงให้เห็นว่าการปรับปรุงคุณภาพของกากกาแฟด้วยวัสดุจีโอโพลิเมอร์ให้กำลังสูงกว่าการปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์ (กำลังอัดน้อยกว่า 100 kPa) [10] อย่างไรก็ตามยังไม่พบงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการนำกากกาแฟมาผสมกับดินลูกรังเพื่อประยุกต์ใช้เป็นวัสดุรองพื้นทาง

งานวิจัยนี้ศึกษาถึงความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้ดินลูกรัง-กากกาแฟ เถ้าลอย จีโอโพลิเมอร์เพื่อประยุกต์ใช้เป็นวัสดุรองพื้นทาง และเปรียบเทียบผลทดสอบกำลังอัดแกนเดียวกับมาตรฐานกรมทางหลวงแห่งประเทศไทย (DH-S204/2533, DH-S 206/2532) ประโยชน์ของงานวิจัยนี้คือได้แนวทางการใช้วัสดุเหลือทิ้ง (กากกาแฟ) ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยเถ้าลอย จีโอโพลิเมอร์สำหรับวัสดุรองพื้นทาง

2. วิธีการทดสอบ

2.1 ดินตัวอย่าง

ดินลูกรังเก็บจากบ่ออ้อม อ.สีคิ้ว จ.นครราชสีมา ตัวอย่างซึ่งประกอบด้วยทรายร้อยละ 81.41 ดินเหนียวร้อยละ 18.54 ดินลูกรังมีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.72 ชิดจำกัดเหลวและพิกัดพลาสติกของดินลูกรังเท่ากับร้อยละ 30 และ 21 ตามลำดับ การกระจายขนาดผลของดินลูกรังแสดงใน 1 ขนาดเฉลี่ย (D₅₀) ของดินลูกรังเท่ากับ 0.42 mm ดินชนิดนี้

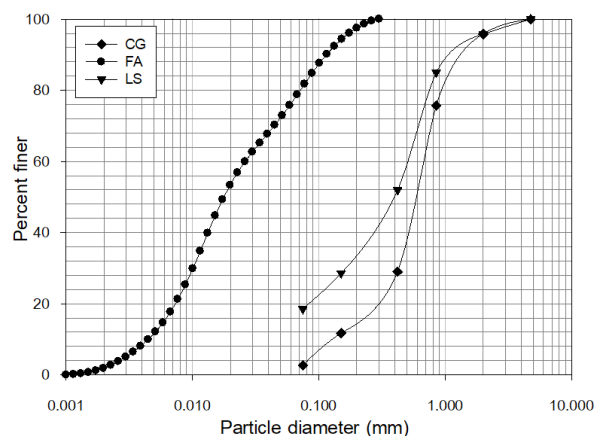
จำแนกเป็นดินทรายปนดินเหนียว (SC) ตามระบบเอกภาพ (Unified Soil Classification System, USCS) รูปที่ 1 แสดงลักษณะอนุภาคของดินลูกรังโดยเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) จะพบว่ารูปร่างลักษณะส่วนใหญ่ของดินลูกรังเป็นเหลี่ยม ผิวขรุขระ และมีขนาดไม่สม่ำเสมอแสดงในรูปที่ 2

กากกาแฟได้จากร้านกาแฟ จ.นครราชสีมา การกระจายขนาดของกากกาแฟแสดงในรูปที่ 1 ค่าสัมประสิทธิ์ความโค้ง (C_c) และสัมประสิทธิ์ความสม่ำเสมอ (C_u) มีค่าเท่ากับ 2.4 และ 5.8 ตามลำดับ ขนาดละเอียด (D_{50}) ของกากกาแฟเท่ากับ 0.60 mm มีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 1.37 กากกาแฟสามารถจำแนกเป็นทรายขนาดละเอียดสม่ำเสมอ (SP) ตามระบบเอกภาพ (Unified Soil Classification System, USCS) รูปที่ 1 แสดงภาพถ่าย SEM ของอนุภาคกากกาแฟ จะพบว่าลักษณะของกากกาแฟมีผิวขรุขระ ปริมาณช่องว่างสูง และขนาดไม่สม่ำเสมอ

เถ้าลอย (FA) ได้จากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง ขนาดละเอียด (D_{50}) ของ FA มีค่าเท่ากับ 20 ไมครอน คุณสมบัติทางเคมีของดินลูกรัง กากกาแฟ และเถ้าลอยได้จากการทดสอบ X-ray fluorescence (XRF, HORIBA XGT-5200) ผลการทดสอบแสดงในตารางที่ 1 จะพบว่า เถ้าลอย (FA) มีผลรวมของปริมาณธาตุ SiO_2 , Al_2O_3 และ Fe_2O_3 เท่ากับร้อยละ 67.31 และปริมาณธาตุ CaO เท่ากับร้อยละ 30.24 FA จำแนกเป็น Class C ตามมาตรฐาน ASTM C618 รูปที่ 2 ลักษณะอนุภาคของเถ้าลอยเมื่อพิจารณาจากภาพถ่ายขยายโดยเครื่อง SEM จะพบว่าลักษณะส่วนใหญ่ของเม็ดเถ้าลอยเป็นทรงกลม และผิวเรียบ

2.2 การเตรียมตัวอย่าง

ดินลูกรัง (LS) นำมาผสมเข้ากับกากกาแฟ (CG) และเถ้าลอย (FA) ในอัตราส่วนผสม LS:CG:FA เท่ากับ 50:0:50, 40:10:50, 30:20:50 และ 20:30:50 โดยน้ำหนักแล้วนำมา



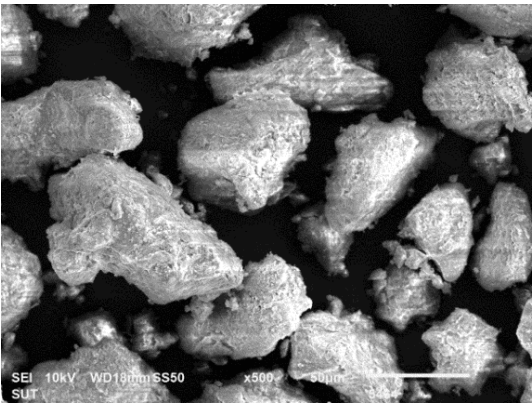
รูปที่ 1 ขนาดละเอียดของดินลูกรัง กากกาแฟ และเถ้าลอย

ผสมกับสารกระตุ้น (Liquid alkaline activator, L) ซึ่งเป็นส่วนผสมของ Na_2SiO_3 และ $NaOH$ ในอัตราส่วน $Na_2SiO_3:NaOH$ เท่ากับ 50:50 ความเข้มข้นของ $NaOH$ เท่ากับ 5 โมลาร์ หลังจากผสมดินลูกรัง, กากกาแฟ, เถ้าลอย และสารกระตุ้นเข้าด้วยกัน ส่วนผสมดังกล่าวจะถูกนำมาทดสอบการบดอัดที่พลังงานการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐานโดยการเพิ่มปริมาณสารกระตุ้น

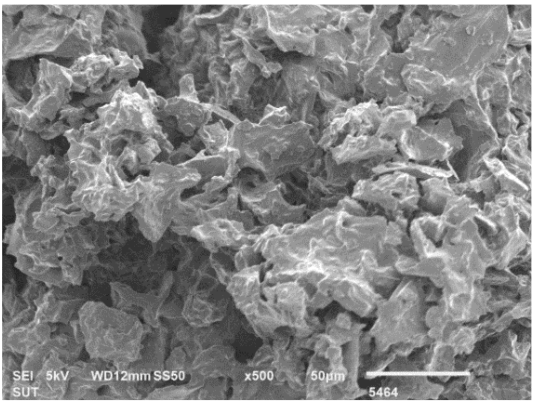
อัตราส่วนผสม LS:CG:FA ที่ปริมาณสารกระตุ้นเหมาะสมเท่ากับ 0.80 WC 1.00 WC และ 1.20 WC จะถูกนำมาเตรียมตัวอย่างทดสอบหน่วยน้ำหนัก และกำลังอัด ซึ่งขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร และสูง 100 มิลลิเมตร ด้วยแม่แรงไฮดรอลิคจนได้ความหนาแน่นแห้งสูงสุด ตัวอย่างการทดสอบจะนำมาบ่มต่อที่อุณหภูมิ (ประมาณ 28 °C) ในห้องปฏิบัติการ จนได้อายุบ่ม 7 วัน จากนั้นนำตัวอย่างไปแช่น้ำ 2 ชั่วโมง ก่อนทดสอบกำลังอัด ตามมาตรฐาน ASTM D1633 ตารางที่ 2 แสดงจำนวนตัวอย่างทดสอบหน่วยน้ำหนักและกำลังอัด

3. ผลการทดสอบ

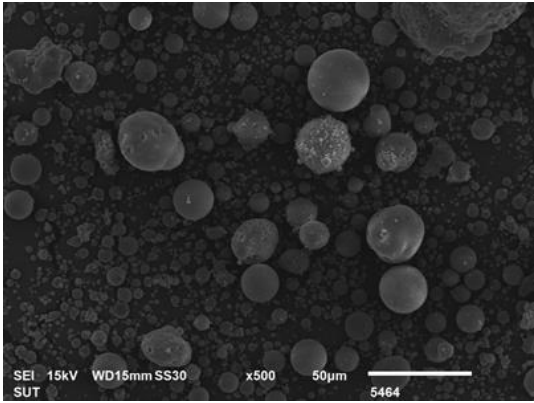
รูปที่ 3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้งและปริมาณความชื้นที่อัตราส่วน $Na_2SiO_3:NaOH$ เท่ากับ 50:50 ความสัมพันธ์ดังกล่าวเป็นข้อมูลพื้นฐานในการเตรียม



(a)



(b)



(c)

รูปที่ 2 ภาพถ่าย SEM ของ a) ดินลูกรัง (LS) b) กากกาแฟ (CG) c) เถ้าลอย (FA)

ตารางที่ 1 คุณสมบัติทางเคมีของดินลูกรัง กากกาแฟ และเถ้าลอย

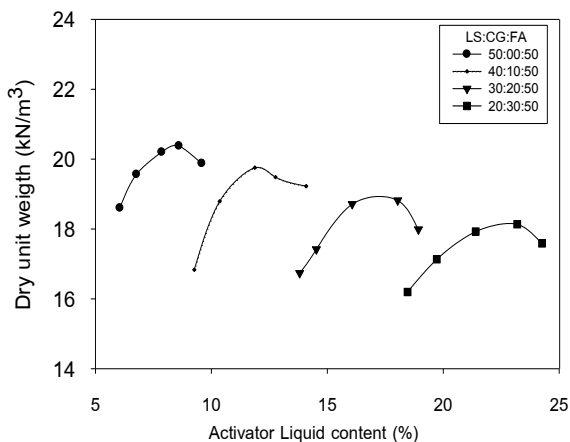
Chemical composition (%)	LS	CG	FA
SiO ₂	36.44	0.62	47.51
Al ₂ O ₃	8.16	0.10	13.14
Fe ₂ O ₃	8.23	0.60	6.66
CaO	40.99	9.65	30.24
MgO	0.72	0.47	N.D.
SO ₃	N.D.	3.16	N.D.
Na ₂ O	0.05	N.D.	0.41
K ₂ O	3.06	16.29	1.63
MoO ₃	N.D.	65.26	N.D.
LOI	2.35	3.85	0.42

ตัวอย่างดินลูกรัง-กากกาแฟ-เถ้าลอย จีโโพลีเมอร์ จะเห็นได้
ว่าความสัมพันธ์ดังกล่าวมีลักษณะเป็นระฆังคว่ำ ปริมาณสาร

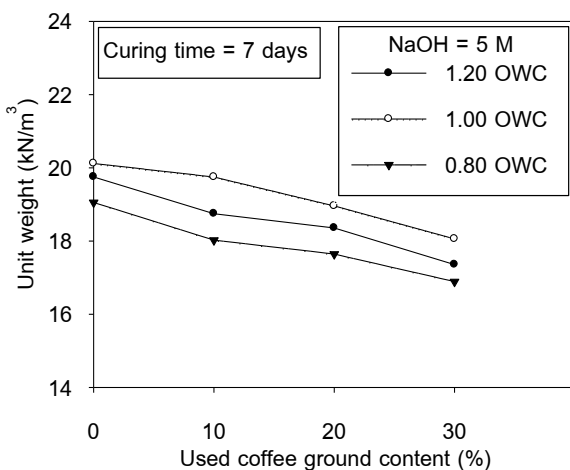
กระตุ้น (Na₂SiO₃:NaOH) มีผลต่อการบำบัด สารกระตุ้น
(L) ทำหน้าที่เป็นตัวหล่อลื่นอนุภาคของดินลูกรัง-กากกาแฟ-
เถ้าลอย ดังนั้น การเพิ่มปริมาณ L ทำให้อนุภาคของดินลูกรัง-
กากกาแฟ-เถ้าลอย สามารถเข้าไปแทรกในช่องว่างระหว่าง
อนุภาคได้ดีขึ้น แต่เมื่อปริมาณ L สูงเกินกว่าค่าเหมาะสม
ปริมาณ L จะเข้าไปแทรกระหว่าง อนุภาคของ ดินลูกรัง-กาก
กาแฟ-เถ้าลอย ส่งผลให้หน่วยน้ำหนักลดลง หน่วยน้ำหนักแห้ง
สูงสุดมีค่าลดลงตามการเพิ่มขึ้นของปริมาณกากกาแฟ โดยที่
หน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดของตัวอย่างมีค่าเท่ากับ 20.12 19.75
18.96 และ 18.05 kN/m³ สำหรับปริมาณกากกาแฟเท่ากับ
ร้อยละ 0 10 20 และ 30 ตามลำดับ ขณะที่ปริมาณความชื้นที่
เหมาะสมมีค่าเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของปริมาณกากกาแฟ
ปริมาณความชื้นที่เหมาะสม มีค่าประมาณ ร้อยละ 8.5 12 18

ตารางที่ 2 จำนวนตัวอย่างทดสอบหน่วยน้ำหนักและกำลังอัด

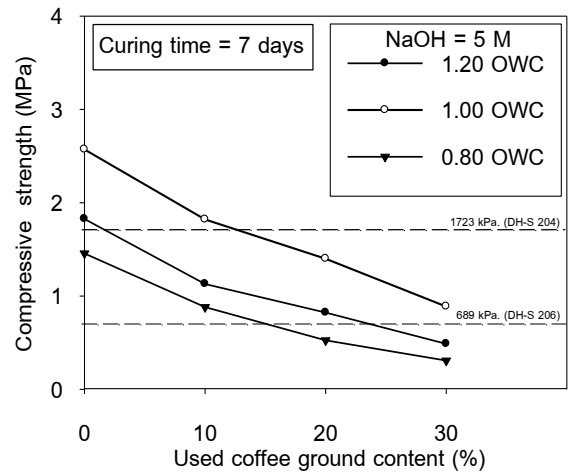
ตัวแปรต้น	จำนวน	หมายเหตุ
อัตราส่วน LS:CG:FA	4	50:0:50, 40:10:50, 30:20:50, 20:30:50
$\text{Na}_2\text{SiO}_3 : \text{NaOH}$	1	50:50
ปริมาณความชื้น (%)	3	0.8 OWC, 1.0 OWC, 1.2 OWC
อายุบ่ม (วัน)	1	7 วัน
จำนวนตัวอย่าง	36	3 ตัวอย่าง



รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้งและปริมาณความชื้น



รูปที่ 4 หน่วยน้ำหนักของดินลูกรัง-กากกาแฟ แล้วย ที่อายุบ่ม 7 วัน

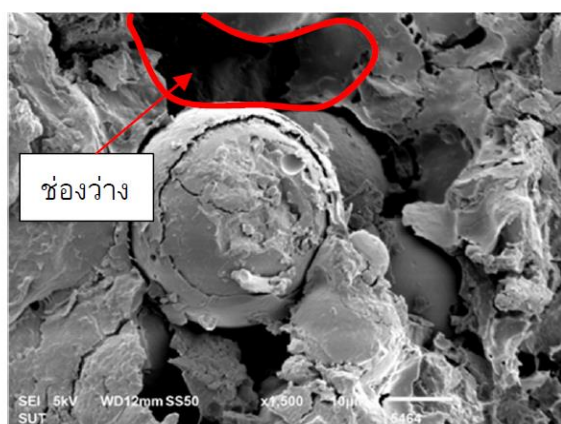


รูปที่ 5 กำลังอัดของดินลูกรัง-กากกาแฟ แล้วย จีโอโพลิเมอร์ ที่อายุบ่ม 7 วัน

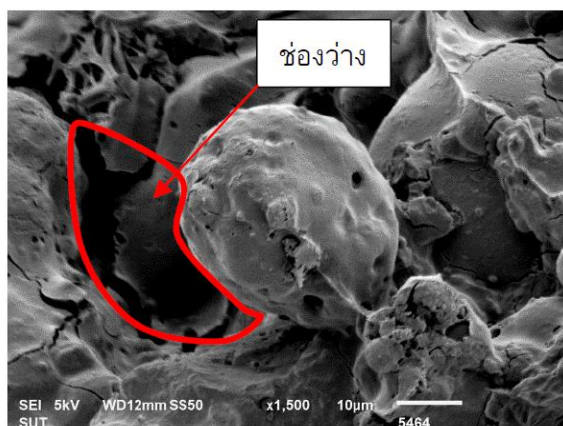
และ 23 สำหรับปริมาณกากกาแฟแทนที่เท่ากับร้อยละ 0 10 20 และ 30 ตามลำดับ

อิทธิพลของปริมาณกากกาแฟต่อกำลังอัดของดินลูกรัง-กากกาแฟ แล้วย จีโอโพลิเมอร์ ที่อายุบ่ม 7 วัน ผลทดสอบพบว่า กำลังอัดสูงสุดอยู่ที่ปริมาณความชื้นที่เหมาะสม 1.00 OWC โดยจะมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากปริมาณช่องว่างของกากกาแฟที่ส่งผลให้ตัวอย่างเกิดรอยร้าวได้ง่าย ดังนั้นความสามารถในการรับน้ำหนักจึงมีแนวโน้มลดลงตามปริมาณกากกาแฟที่เพิ่มขึ้นที่ปริมาณร้อยละ 0 10 20 และ 30 ตามลำดับ แสดงใน รูปที่ 4

รูปที่ 5 แสดงกำลังอัดของดินลูกรัง-กากกาแฟ แล้วย จีโอโพลิเมอร์ ที่อายุบ่ม 7 วัน และปริมาณความชื้นเท่ากับ 0.80 OWC 1.00 OWC และ 1.20 OWC ผลทดสอบแสดงให้เห็นว่ากำลังอัดของดินลูกรัง-กากกาแฟ แล้วย จีโอโพลิเมอร์มีแนวโน้มลดลงตามปริมาณกากกาแฟที่เพิ่มขึ้น อิทธิพลของปริมาณกากกาแฟต่อกำลังอัดของดินลูกรัง-กากกาแฟ แล้วย จีโอโพลิเมอร์ ที่อายุบ่ม 7 วัน และปริมาณความชื้นเท่ากับ 0.80 OWC 1.00 OWC และ 1.20 OWC ผลทดสอบแสดงให้เห็นว่ากำลังอัดของดินลูกรัง-กากกาแฟ แล้วย จีโอโพลิเมอร์มีค่าสูงที่สุดที่ปริมาณความชื้นเหมาะสมซึ่งมีค่าเท่ากับ 2.57,



a) 0.80OWC



c) 1.20OWC



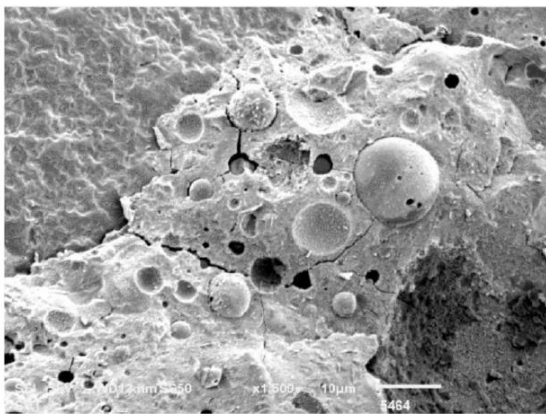
b) 1.00OWC

รูปที่ 6 ภาพถ่าย SEM ของดินลูกรัง-กากกาแฟ แฉะลอยจีโอโพลิเมอร์ที่ปริมาณความชื้นต่าง ๆ

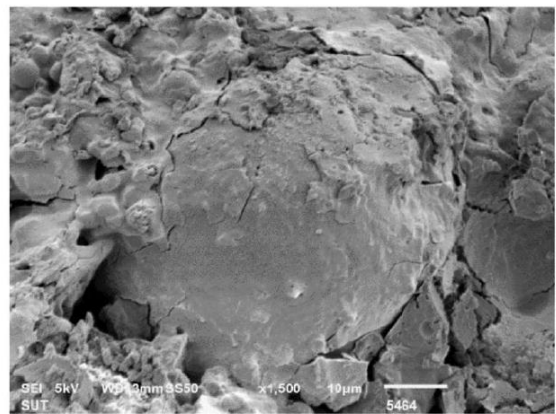
1.82 1.40 และ 0.88 MPa สำหรับปริมาณกากกาแฟเท่ากับ ร้อยละ 0 10 20 และ 30 ตามลำดับ

เมื่อเปรียบเทียบผลทดสอบกำลังอัดแกนเดียวกับ มาตรฐานพื้นทางดินซีเมนต์ (DH-S204/2556) และมาตรฐาน รองพื้นฐานดินซีเมนต์ (DH-S 206/2532) ซึ่งระบุกำลังอัด เท่ากับ 1,724 และ 689 kPa ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า กำลังอัดแกนเดียวของดินลูกรัง-กากกาแฟ แฉะลอย จีโอโพลิเมอร์ที่ปริมาณความชื้นเหมาะสมมีค่าสูงกว่ามาตรฐานรอง พื้นฐานดินซีเมนต์ (DH-S 206/2532) สำหรับทุกปริมาณกาก กาแฟ

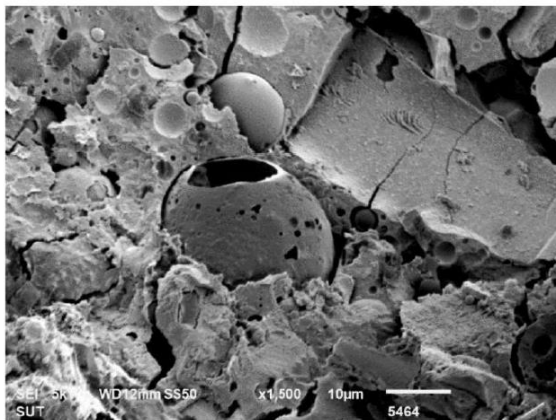
รูปที่ 6 แสดงภาพถ่าย SEM ของดินลูกรัง-กากกาแฟ แฉะลอย จีโอโพลิเมอร์ ที่อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ เท่ากับ 50:50 และปริมาณความชื้นเท่ากับ 0.80 OWC 1.00 OWC และ 1.20 OWC จะพบว่าสำหรับปริมาณความชื้นที่เหมาะสม สารกระตุ้น (liquid alkaline activator, L) เข้าไปแทรกช่องว่างระหว่าง ดินลูกรัง กากกาแฟและแฉะลอย ซึ่งส่งผลให้อนุภาคของดิน ลูกรัง กากกาแฟและแฉะลอยมีการยึดเกาะกันแน่น และ ผลิตภัณฑ์ของจีโอโพลิเมอร์เกิดขึ้นบนเม็ดแฉะลอยอย่างเห็นได้ ชัด (รูป 6b) ปริมาณความชื้นที่ต่ำกว่าค่าที่เหมาะสมจะเกิด ผลิตภัณฑ์จีโอโพลิเมอร์ไรเซชั่นน้อยกว่า และโครงสร้างของดิน



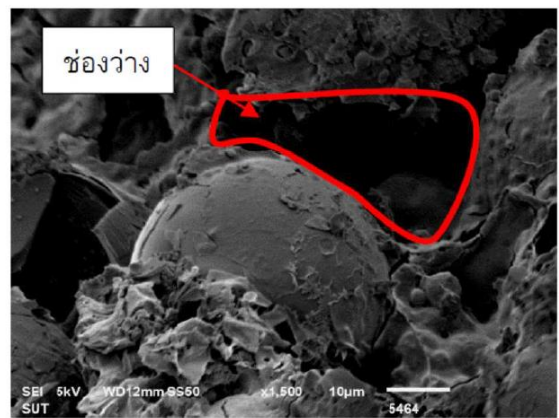
a) CG=0



b) CG=10%



c) CG=20%



d) CG=30%

รูปที่ 7 ภาพถ่าย SEM ของดินลูกรัง-กากกาแฟ แฉะลอย จีโอโพลีเมอร์ ที่ปริมาณกากกาแฟต่าง ๆ

ลูกรัง กากกาแฟและแฉะลอยมีช่องว่างมากกว่า ในขณะที่ปริมาณความชื้นที่สูงเกินกว่าค่าที่เหมาะสม เมื่อตัวอย่างสูญเสียความชื้น ตัวอย่างจะเกิดโพรงในตัวอย่าง [5,6] (รูป6a และ c) ดังนั้นความชื้นที่เหมาะสม (optimum water content, OWC) จึงให้ค่ากำลังอัดสูงสุด

รูปที่ 7 แสดงภาพถ่าย SEM ของดินลูกรัง-กากกาแฟ แฉะลอย จีโอโพลีเมอร์ ที่อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ เท่ากับ 50:50 และปริมาณกากกาแฟเท่ากับร้อยละ 0 10 20 และ 30 ผลทดสอบ SEM แสดงให้เห็นว่าปริมาณช่องว่างในโครงสร้างดินลูกรัง-กากกาแฟ แฉะลอย จีโอโพลีเมอร์มีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณกากกาแฟที่เพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับหน่วยน้ำหนักที่ลดลงของตัวอย่างอย่างเห็นได้ชัด

4. สรุป

กำลังอัดและโครงสร้างจุลภาคของดินลูกรัง-กากกาแฟปรับปรุงด้วยแฉะลอย จีโอโพลีเมอร์ ได้นำเสนอในบทความวิจัยนี้ และสามารถสรุปได้ดังนี้

- 1) ปริมาณสารกระตุ้น ($\text{Na}_2\text{SiO}_3:\text{NaOH}$) มีผลต่อกราฟการบดอัด สารกระตุ้น (L) ทำหน้าที่เป็นตัวหล่อลื่นอนุภาคของดินลูกรัง-แฉะลอย-กากกาแฟ ดังนั้น การเพิ่มปริมาณ L ทำให้อนุภาคของดินลูกรัง-แฉะลอย-กากกาแฟสามารถเข้าไปแทรกในช่องว่างระหว่างอนุภาคได้ดีขึ้น แต่เมื่อปริมาณ L สูงเกินกว่าค่าที่เหมาะสม ปริมาณ L จะเข้าไปแทรกระหว่างอนุภาค

ของดินลูกรัง-เถ้าลอย-กากกาแฟ ซึ่งส่งผลให้หน่วยน้ำหนักลดลง

- 2) หน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดมีค่าลดลงตามการเพิ่มขึ้นของปริมาณกากกาแฟ โดยที่หน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดของตัวอย่างมีค่าเท่ากับ 20.12 19.75 18.96 และ 18.05 kN/m³ สำหรับปริมาณกากกาแฟเท่ากับร้อยละ 0 10 20 และ 30 ตามลำดับ
3. กำลังอัดของดินลูกรังกากกาแฟ เถ้าลอย จีโพลิเมอร์ มีค่าสูงที่สุดที่ปริมาณความชื้นเหมาะสมซึ่งมีค่าเท่ากับ 2.57 1.82 1.40 และ 0.88 MPa สำหรับปริมาณกากกาแฟร้อยละ 0 10 20 และ 30 ตามลำดับ
4. สำหรับปริมาณความชื้นที่เหมาะสม สารกระตุ้น (liquid alkaline activator, L) เข้าไปแทรกช่องว่างระหว่างดินลูกรัง กากกาแฟและเถ้าลอย ซึ่งส่งผลให้อุณหภูมิของดินลูกรัง กากกาแฟและเถ้าลอยมีการยึดเกาะกันแน่น และผลิตภัณฑ์ของจีโพลิเมอร์เกิดขึ้นบนเม็ดเถ้าลอยอย่างเห็นได้ชัด ปริมาณความชื้นที่ต่ำกว่าค่าที่เหมาะสมจะเกิดผลิตภัณฑ์จีโพลิเมอร์ไรเซชันน้อยกว่า และโครงสร้างของตัวอย่างมีช่องว่างมากกว่า ในขณะที่ปริมาณความชื้นที่สูงเกินกว่าค่าที่เหมาะสม ตัวอย่างจะเกิดโพรงในตัวอย่าง ดังนั้นความชื้นที่เหมาะสม (optimum water content, OWC) จึงให้ค่ากำลังอัดสูงสุด

กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน สำหรับเครื่องมือการทดสอบและสิ่งอำนวยความสะดวก ในการทำวิจัยนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Kondamudi N, Mohapatra SK, Misra M. Spent coffee grounds as a versatile source of green energy. *J. Agric. Food Chem.* 2008; 56: 11757–11760.
- [2] Boonamnuyvitaya V, Chaiya C, Tanthapanichakoon W, Jarudilokkul S. Removal of heavy metals by adsorbent prepared from pyrolyzed coffee residues and clay. *Separation and Purification Technology.* 2004; 35: 11–22.
- [3] Suksiripattanapong C, Horpibulsuk S, Chanprasert P, Sukmak P, Arulrajah A. Compressive strength development in fly ash geopolymer masonry units manufactured from water treatment sludge. *Construction and Building Materials.* 2015; 82: 20–30.
- [4] Horpibulsuk S, Suksiripattanapong C, Samingthong W, Chinkulkijniwat A, Rachan R, Arulrajah A. Durability against wet-dry cycles of water treatment sludge–fly ash geopolymer. *Journal of Materials in Civil Engineering.* 2015; 94: 807–816.
- [5] Suksiripattanapong C, Horpibulsuk S, Boongrasan S, Udomchai A, Chinkulkijniwat A, Arulrajah A. Unit weight, strength and microstructure of a water treatment sludge–fly ash lightweight cellular geopolymer. *Construction and Building Materials.* 2015; 58: 254–257.
- [6] Suksiripattanapong C, Srijumpa S, Horpibulsuk S, Sukmak P, Arulrajah A, Du JY. Compressive strength of water treatment sludge–fly ash geopolymer at various compression energies. *Lowland Technology International Journal.* 2015; 17(2).
- [7] Sukmak P, Horpibulsuk S, Shen SL. Strength development in clay–fly ash geopolymer. *Construction and Building Materials.* 2013; 40: 566–574.

- [8] Sukmak P, Horpibulsuk S, Shen SL, Chindaprasirt P, Suksiripattanpong C. Factors influencing strength development in clay-fly ash geopolymer. *Construction and Building Materials*. 2013; 47: 1125–1135.
- [9] Kua TA, Arulrajah A, Horpibulsuk S, Shen SL, Du YJ. Strength assessment of spent coffee grounds-geopolymer cement utilizing slag and fly ash precursors. *Construction and Building Materials*. 2016; 115: 565–575.
- [10] Kua TA, Arulrajah A, Horpibulsuk S, Du YJ, Suksiripattanpong C. Engineering and environmental evaluation of spent coffee grounds stabilized with industrial by-products as a road subgrade material. *Clean technologies and environmental policy*. 2017; 19: 63–75.