

การปรับปรุงคุณภาพดินลูกรังด้วยเถ้าหนักจีโอโพลิเมอร์สำหรับงานทาง Lateritic Soil Stabilized with Bottom Ash Geopolymers for road work

ชูศักดิ์ ศิริรัตน์^{1*} ปิยะพงศ์ กีสวัสดิ์คอน² และ ทวีศักดิ์ รุ่งศักดิ์ทวีกุล³

^{1*, 2, 3} สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์

^{1*}E-mail: chusak.k@rmutr.ac.th, ²E-mail: piyapong.kes@rmutr.ac.th

³E-mail: thaweesak.run@rmutr.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาแรงอัดโดยปราศจากแรงดันข้างของดินลูกรังปรับปรุงคุณภาพด้วยเถ้าหนักเตาจีโอโพลิเมอร์ โดยนำดินลูกรังผสมกับเถ้าหนักเตาบดละเอียดร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 325 ในอัตราส่วน 70:30 50:50 และ 30:70 และใช้สารกระตุ้นแทนน้ำซึ่งเป็นส่วนผสมระหว่างสารละลายโซเดียมซิลิเกตและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ในอัตราส่วน 0:100 10:90 30:70 และ 50:50 โดยปริมาณสารกระตุ้นที่ใช้สำหรับบดอัดเพื่อเตรียมตัวอย่างทดสอบเท่ากับปริมาณความชื้นที่เหมาะสม ปริมาณความชื้นที่เหมาะสมลบสอง (ด้านแห้ง) และปริมาณความชื้นที่เหมาะสมบวกสอง (ด้านเปียก) นำตัวอย่างไปบ่มในตู้อบที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 7 วัน หลังจากนั้นนำตัวอย่างไปแช่น้ำเป็นระยะเวลา 2 ชั่วโมง แล้วจึงนำมาทดสอบ จากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าอัตราส่วนของดินลูกรังผสมเถ้าหนักเตาที่ดีที่สุด คือ 30:70 และอัตราส่วนของสารละลายโซเดียมซิลิเกตผสมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ดีที่สุด คือ 50:50 สำหรับอัตราส่วนของดินลูกรังผสมเถ้าหนักเตาและสารละลายโซเดียมซิลิเกตผสมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่แนะนำสำหรับงานทาง คือ 50:50 และ คือ 10:90 ตามลำดับ

คำสำคัญ: ดินลูกรัง เถ้าหนักเตา จีโอโพลิเมอร์ แรงอัดโดยปราศจากแรงดันข้าง

* Corresponding author, e-mail: chusak.k@rmutr.ac.th

Abstract

The objective of this research is to study the unconfined compressive strength of lateritic soil stabilized with bottom ash geopolymer. Lateritic soil (LS) was mixed with ground bottom ash (BA) passing no. 325 sieve at LS:BA ratios of 70:30, 50:50, and 30:70. A liquid alkali activator was used instead of water, which was a mixture of sodium silicate (Na_2SiO_3) solution and sodium hydroxide (NaOH) solution at Na_2SiO_3 :NaOH ratios of 0:100, 10:90, 30:70, and 50:50. The quantities of the liquid alkali activator used in specimen preparations by compacting were optimum moisture content (OMC), OMC minus 2% (dry side), and OMC plus 2% (wet side). After sample preparations, they were cured in oven at 65°C for 7 days. Then, the samples were taken to soak for 2 hours prior to testing. The results reveal the best proportion of LS:BA was 30:70 and the best Na_2SiO_3 :NaOH ratio was 50:50. The recommended proportions of LS:BA and Na_2SiO_3 :NaOH for road work were, 50:50 and 10:90, respectively.

Keywords: Lateritic soil, Bottom ash, Geopolymer, Unconfined compressive strength

1. ที่มาและความสำคัญ

พลังงานไฟฟ้านับว่าเป็นปัจจัยหลักในการขับเคลื่อนอุตสาหกรรมและเศรษฐกิจของประเทศ ซึ่งปัจจุบันโรงไฟฟ้าถ่านหินทั่วประเทศไทยมีอย่างน้อย 10 แห่ง โดย 9 แห่งเป็นของเอกชนตั้งอยู่ใน 4 จังหวัด ได้แก่ ระยอง จำนวน 6 โรง ปราจีนบุรี 2 โรง อุดรธานี 1 โรง และมีเพียง 1 โรงที่เป็นของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย คือ โรงไฟฟ้าแม่เมาะ จ.ลำปาง [1] โดยมีวัสดุพลอยได้จากกระบวนการผลิตกระแสไฟฟ้า ได้แก่ เถ้าลอย (Fly Ash) และเถ้าก้นเตา (Bottom Ash) ซึ่งมีปริมาณสะสมต่อปีเป็นจำนวนมาก ก่อให้เกิดปัญหาในเรื่องพื้นที่จัดเก็บและการกำจัด ทั้งยังส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมอีกด้วย ดังนั้นหน่วยงานต่าง ๆ ทั้งภาครัฐและเอกชนจึงได้มีแนวคิดในการนำกลับมาใช้และพัฒนาให้เป็นส่วนผสมหรือวัสดุทดแทนสำหรับงานคอนกรีตและวัสดุนานทาง

วัสดุนานทางเป็นองค์ประกอบสำคัญของการดำเนินกิจการสาธารณะโครงสร้างพื้นฐานด้านงานทาง ซึ่งดินลูกรังเป็นวัสดุนานทางชนิดหนึ่งที่ถูกนำมาใช้เป็นจำนวนมาก ทำให้ปัจจุบันดินลูกรังที่มีคุณภาพดีและเป็นไปตามเกณฑ์มาตรฐานของหน่วยงานที่เกี่ยวข้องกับงานทางมีปริมาณลดน้อยลง ส่งผลให้หลาย ๆ พื้นที่ประสบปัญหาการขาดแคลนดินลูกรังคุณภาพดีสำหรับนำมาใช้เป็นวัสดุนานทาง ดังนั้นจึงมีมาตรฐานพื้นทางและรองพื้นทางดินซีเมนต์ (ทล.-ม 204 และ ทล.-ม 206) เพื่อแก้ปัญหาการขาดแคลนดินที่มีคุณภาพดี จากปัญหาการขาดแคลนดินลูกรังคุณภาพดีและปัญหาการกองเก็บเถ้าถ่านหินของโรงงานไฟฟ้า จึงทำให้มีความสนใจในการศึกษาวัสดุนานทาง โดยใช้ศักยภาพของจีโอโพลิเมอร์ซึ่งสามารถใช้ทดแทนปูนซีเมนต์ได้ [2] มาใช้ในการปรับปรุงคุณภาพดินลูกรัง [3, 4]

2. วัตถุประสงค์

- 2.1 เพื่อศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพของเถ้าก้นเตาและดินลูกรัง
- 2.2 เพื่อศึกษาคุณสมบัติทางด้านกำลังของดินลูกรังปรับปรุงคุณภาพด้วยเถ้าก้นเตาจีโอโพลิเมอร์
- 2.3 เพื่อศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมของดินลูกรังปรับปรุงคุณภาพด้วยเถ้าก้นเตาจีโอโพลิเมอร์

3. ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

3.1 ดินลูกรัง

ดินลูกรังเป็นดินที่เกิดขึ้นเนื่องจากผลของการผุร่อนทางเคมีซึ่งทำให้หินต้นกำเนิดเกิดการกักร่อนผุพังกลายเป็นดิน และมีสารพวก Laterite Constituents (Fe, Al, Ti, Mn) สะสมอยู่ มักพบดินลูกรังในบริเวณที่มีสภาพภูมิอากาศแบบร้อนชื้น และส่วนใหญ่มีสีแดงเนื่องจากมีออกไซด์ของเหล็กสะสมอยู่ ดินลูกรังอาจเป็นดินชนิดผุพังอยู่กับที่ (Residual Soil) ซึ่งจะเกิดอยู่บนหินต้นกำเนิด และแบ่งเป็นชั้น ๆ อย่างเห็นได้ชัด หรือดินที่ผุพังแล้วถูกพัดพา (Transported Soil) ซึ่งจะไปทับถมในพื้นที่ที่ห่างจากหินต้นกำเนิด [5] สามารถนำมาใช้เป็นวัสดุงานทางได้ เมื่อดินลูกรังมีคุณสมบัติตามข้อกำหนดของหน่วยงานที่เกี่ยวข้องกับงานทาง

3.2 เถ้าก้นเตา (Bottom Ash)

เถ้าก้นเตาเป็นเถ้าจากกระบวนการเผาไหม้ถ่านหินในโรงไฟฟ้า และเป็นผลพลอยได้จากกระบวนการผลิตไฟฟ้า เช่นเดียวกับเถ้าลอย โดยเถ้าก้นเตามีขนาดอนุภาคใหญ่ มีความพรุนสูงและมีการกระจายตัวใกล้เคียงกับมวลรวมละเอียด จึงมีหลายงานวิจัยนำเถ้าก้นเตามาใช้เป็นมวลรวมละเอียดแทนทราย [6, 7] และด้วยส่วนประกอบทางเคมีของเถ้าก้นเตาที่มีธาตุหลักเป็นซิลิกาและอลูมินา จึงจัดได้ว่าเป็นวัสดุปอซโซลาน แต่เนื่องจากเถ้าก้นเตามีขนาดอนุภาคที่ใหญ่จึงมีการศึกษาการเพิ่มความสามารถในการทำปฏิกิริยาปอซโซลานโดยการทำให้ขนาดอนุภาคของเถ้าก้นเตาเล็กลง ซึ่งพบว่าทำให้เถ้าก้นเตามีอนุภาคเล็กลงสามารถทำให้เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานได้สมบูรณ์มากขึ้น [8] (Cheriat, et al., 1999) และพบว่าเมื่อบดเถ้าก้นเตาให้มีขนาดอนุภาคเล็กลงมากจะมีคุณสมบัติเป็นวัสดุปอซโซลานที่ดี [9] (Jaturapitakkul and Cheerarot, 2003) และสามารถนำมาใช้ในการปรับปรุงคุณภาพดินได้

3.3 จีโอโพลิเมอร์

จีโอโพลิเมอร์ เกิดจากการทำปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ไรเซชันของสารละลายอัลคาไลที่มีความเข้มข้นสูงและออกไซด์ของซิลิกอนและอะลูมิเนียม กลายเป็นวัสดุที่มีโครงสร้างแข็งแรง สามารถก่อตัว แข็งตัว รับกำลังแรงอัดได้ คล้ายโครงสร้างของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ จึงเป็นวัสดุทางเลือกที่สามารถทดแทนการใช้ปูนซีเมนต์ได้ วัสดุที่ใช้ผสมทำจีโอโพลิเมอร์คือวัสดุปอซโซลาน (Pozzolan materials) ซึ่งมีซิลิกาและอลูมินาเป็นองค์ประกอบ โดยกลไกการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีของจีโอโพลิเมอร์ มีดังนี้

3.3.1 การชะละลาย (Dissolution) กล่าวคือ เมื่อวัสดุปอซโซลานถูกผสมเข้ากับสารละลายที่มีความเป็นด่างสูง เช่น สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) หรือ โซดาไฟเหลว เป็นต้น จะทำให้เกิดการชะละลายของสารซิลิกา (SiO₂) และอลูมินา (Al₂O₃)

3.3.2 สารละลายโซเดียมซิลิเกต ($\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{SiO}_3$) ทำให้เกิดการก่อตัวเป็นเจลที่ผิวของอนุภาคของวัสดุปอซโซลานและเกิดปฏิกิริยาขั้นที่สองเรียกว่าปฏิกิริยาพอลิเมอร์ (Polymerization) อธิบายได้ว่า ไอออนของซิลิกา (Si) และอลูมินา (Al) ที่ถูกชะละลายออกมาจะเกิดการถูกดึงให้รวมตัวกับไอออนออกซิเจนอยู่ในรูปสามเหลี่ยมจัตุรัส (Tetrahedron) แล้วเกิดการเชื่อมต่อกันระหว่างโมเลกุลของซิลิกากับอลูมินา ได้เป็นสารประกอบออลูมิโนซิลิเกต (Si-O-Al-O)

4. วิธีดำเนินการวิจัย

4.1 วัสดุทดสอบ

4.1.1 เล้ากันเตา นำมาจากโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้า บีแอลซีพีเพาเวอร์ จำกัด นิคมอุตสาหกรรมมาบตาพุด จังหวัดระยอง ไม่มีคุณสมบัติการยึดเกาะกันระหว่างอนุภาค มีธาตุซิลิกาและอลูมินาเป็นส่วนประกอบหลัก นำมาบดละเอียดร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐาน เบอร์ 325 เมื่อจำแนกด้วยระบบเอกภาพ (USCS) พบว่าเป็นชนิด ML กล่าวคือ เป็นทรายแป้งที่ไม่มีความเหนียว

4.1.2 ดินลูกรัง นำมาจากบ้านพุทไธสง ตำบลห้วยทรายเหนือ อำเภอชะอำ จังหวัดเพชรบุรี ร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 4 เมื่อจำแนกด้วยระบบเอกภาพ (USCS) พบว่าเป็นดินชนิด SP มีความหมายว่า เป็นเม็ดทรายที่มีขนาดคลุกกันไม่ดี

4.1.3 สารละลายโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) เป็นสารละลายที่มีส่วนประกอบของโซเดียมออกไซด์ (Na_2O) ซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2) และน้ำ (H_2O)

4.1.4 สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ความเข้มข้น 5 โมลาร์ ได้จากการนำโซเดียมไฮดรอกไซด์แบบเกล็ดหนัก 200 กรัม ผสมกับน้ำให้ได้ปริมาตร 1000 มิลลิลิตร ตั้งทิ้งไว้อย่างน้อย 24 ชั่วโมงก่อนนำมาใช้งาน

4.2 การทดสอบ

4.2.1 การเตรียมอัตราส่วนผสม

อัตราส่วนผสมของดินลูกรังและเล้ากันเตากำหนดให้ใช้ขนาดของดินลูกรัง (LS) ร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 4 และเล้ากันเตา (BA) ที่ร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 325 โดยแปรผันสัดส่วนของ LS:BA จำนวน 3 ค่า ได้แก่ 70:30 (LS70BA30) 50:50 (LS50BA50) และ 30:70 (LS30BA70) สำหรับสัดส่วนของสารกระตุ้น Na_2SiO_3 :NaOH มีจำนวน 4 ค่า ได้แก่ 0:100 10:90 30:70 และ 50:50 โดยน้ำหนัก

4.2.2 การเตรียมตัวอย่างและการทดสอบ

4.2.2.1 นำดินลูกรังผสมเล้ากันเตาตามสัดส่วน LS:BA ที่กำหนดไว้แล้ว โดยใช้เครื่องปั่นผสมให้เข้ากัน หลังจากนั้นนำดินที่ผสมเข้ากันแล้วไปทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพ ได้แก่ ชีตจำกัดความชื้นเหลว

และค่าความถ่วงจำเพาะ รวมทั้งทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน เพื่อหาพารามิเตอร์การบดอัด ได้แก่ ปริมาณความชื้นที่เหมาะสม (OMC) และความหนาแน่นแห้งสูงสุด (ρ_{dmax}) ของแต่ละสัดส่วนผสม LS:BA

4.2.2.2 ดำเนินการบดอัดดินลูกรัง โดยใช้ปริมาณน้ำเท่ากับ OMC-2%, OMC และ OMC+2% ตามลำดับ หลังจากเตรียมตัวอย่างแล้วนำไปบ่มที่อุณหภูมิห้องและอุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 0, 3 และ 7 วัน หลังจากนั้นนำไปทดสอบแรงอัดโดยปราศจากแรงด้านข้าง

4.2.2.3 ดำเนินการบดอัดดินลูกรัง โดยใช้สารกระตุ้นแทนน้ำในปริมาณเท่ากับ OMC-2%, OMC และ OMC+2% ตามลำดับ โดยสารกระตุ้นจะผสมตามสัดส่วน $\text{Na}_2\text{SiO}_3:\text{NaOH}$ ที่กำหนดไว้ หลังจากเตรียมตัวอย่างแล้วบ่มที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 7 วัน แล้วนำไปทดสอบแรงอัดโดยปราศจากแรงด้านข้าง

4.2.2.4 ดำเนินการบดอัดดินลูกรังผสมเถ้าก้นเตาตามสัดส่วน LS:BA ที่กำหนดไว้แล้ว ใช้สารกระตุ้นแทนน้ำในปริมาณเท่ากับ OMC-2%, OMC และ OMC+2% ตามลำดับ ซึ่งแต่ละสัดส่วนผสมของดินลูกรังและเถ้าก้นเตาจะใช้สารกระตุ้นผสมตามสัดส่วน $\text{Na}_2\text{SiO}_3:\text{NaOH}$ ที่กำหนดไว้ หลังจากเตรียมตัวอย่างแล้วบ่มที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 7 วัน แล้วนำไปทดสอบแรงอัดโดยปราศจากแรงด้านข้าง

5. ผลและวิจารณ์

ผลการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพ และคุณสมบัติทางด้านกำลังมีรายละเอียด ดังต่อไปนี้

5.1 คุณสมบัติทางกายภาพ

ผลการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของดินลูกรัง เถ้าก้นเตา และดินลูกรังผสมเถ้าก้นเตาตามสัดส่วน LS:BA ดังแสดงในตารางที่ 1 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าดินลูกรังมีค่าขีดจำกัดเหลวและดัชนีความเหนียวอยู่ในเกณฑ์ของมาตรฐานวัสดุรองพื้นทาง (มยพ. 2102-57) และมาตรฐานวัสดุลูกรังทำผิวจราจร (มยพ. 2106-57) โดยค่าขีดจำกัดเหลวของดินลูกรังผสมเถ้าก้นเตา มีค่าลดลงตามปริมาณเถ้าก้นเตาที่เพิ่มขึ้น และความเป็นพลาสติกของดินลูกรังมีแนวโน้มลดลง สำหรับค่าความถ่วงจำเพาะของดินลูกรังผสมเถ้าก้นเตาพบว่ามีค่าลดลงตามการเพิ่มขึ้นของเถ้าก้นเตา เนื่องจากน้ำหนักของเถ้าก้นเตาเบากว่าน้ำหนักของดินลูกรัง

5.2 คุณสมบัติการบดอัด

ผลการทดสอบการบดอัดดินลูกรังผสมเถ้าก้นเตาของแต่ละสัดส่วนผสมดังตารางที่ 2 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าปริมาณความชื้นที่เหมาะสมของดินลูกรังผสมเถ้าก้นเตามีแนวโน้มมากขึ้นตามปริมาณเถ้าก้นเตาที่เพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากเถ้าก้นเตามีความละเอียด มีลักษณะผิวขรุขระและความพรุนจึงทำให้มีความต้องการน้ำสูงกว่าดินลูกรัง [10] เป็นผลทำให้ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดลดลง ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ อุมารพรและประทีป [11]

ตารางที่ 1 คุณสมบัติทางกายภาพของดินลูกรังและเถ้าก้นเตา

คุณสมบัติ	สัดส่วนผสมระหว่างดินลูกรังและเถ้าก้นเตา				
	LS0BA100	LS100BA0	LS70BA30	LS50BA50	LS30BA70
ขีดจำกัดเหลว (ร้อยละ)	NP	32.10	25.69	25.21	25.09
ขีดจำกัดพลาสติก (ร้อยละ)	NP	17.87	15.84	15.45	NP
ดัชนีพลาสติก (ร้อยละ)	NP	14.23	9.85	9.76	NP
ความถ่วงจำเพาะ	2.51	2.88	2.67	2.65	2.63

ตารางที่ 2 คุณสมบัติการบดอัดของดินลูกรังผสมเถ้าก้นเตา

สัดส่วนผสม	ความหนาแน่นแห้งสูงสุด (กรัม/ลบ.ซม.)	ปริมาณความชื้นที่เหมาะสม (ร้อยละ)
LS100BA0	1.97	14.39
LS70BA30	1.92	15.79
LS50BA50	1.81	16.90
LS30BA70	1.67	20.96

5.3 คุณสมบัติการรับแรงอัดโดยปราศจากแรงด้านข้าง

5.3.1 ตัวอย่างดินลูกรังผสมน้ำ (บ่มที่อุณหภูมิห้อง)

ผลการทดสอบแรงอัดโดยปราศจากแรงด้านข้างของตัวอย่างเมื่อทดสอบทันทีหลังการบดอัด อายุการบ่ม 3 วัน และ 7 วัน ดังแสดงในรูปที่ 1(ก) พบว่ากำลังรับแรงอัดโดยปราศจากแรงด้านข้างของตัวอย่างผสมน้ำที่ OMC มีค่าสูงสุด และมีค่าลดลงที่ปริมาณน้ำ OMC-2% และ OMC+2% ตามลำดับ โดยเป็นไปตามทฤษฎีบดอัดดินทั่วไป และพบว่าการรับแรงอัดโดยปราศจากแรงด้านข้างมีค่าสูงขึ้นตามระยะเวลาการบ่ม เนื่องจากดินมีปริมาณความชื้นลดลงทำให้สภาพดินแข็งขึ้น

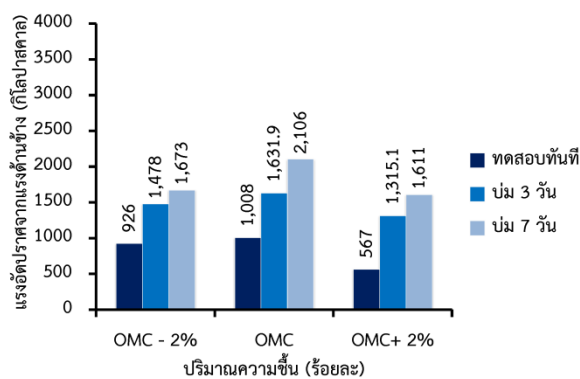
5.3.2 ตัวอย่างดินลูกรังผสมน้ำ (บ่มที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส)

ผลการทดสอบแรงอัดโดยปราศจากแรงด้านข้างของตัวอย่างเมื่อทดสอบทันทีหลังบดอัด อายุการบ่ม 3 วัน และ 7 วัน ดังแสดงในรูปที่ 1(ข) พบว่ากำลังรับแรงอัดโดยปราศจากแรงด้านข้างของตัวอย่างที่อายุการบ่ม 3 วัน และ 7 วัน มีพฤติกรรมการรับแรงอัดโดยปราศจากแรงด้านข้างแตกต่างจากทดสอบทันทีหลังบดอัด กล่าวคือกำลังรับแรงอัดโดยปราศจากแรงด้านข้างของตัวอย่างที่ผสมปริมาณน้ำ OMC+2% มีค่าสูงสุด และมีค่าลดลงที่ปริมาณน้ำ OMC และ OMC-2% ตามลำดับ ทั้งนี้อาจเนื่องจากอุณหภูมิที่สูงทำให้

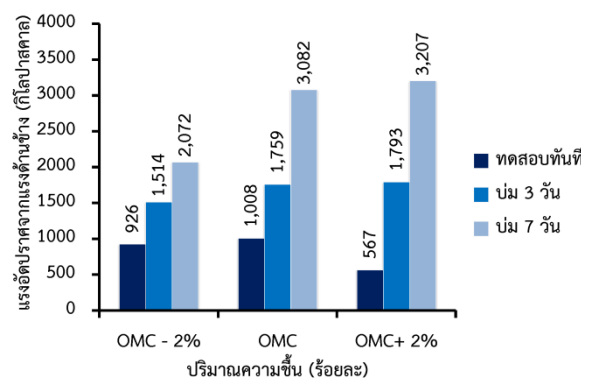
น้ำระเหยออกจากดินมากเป็นผลทำให้การยึดเกาะระหว่างเม็ดดินแน่นขึ้น และมีค่าสูงขึ้นตามระยะเวลาบ่มที่เพิ่มขึ้น

5.3.3 ตัวอย่างดินลูกรังผสมสารกระตุ้น (บ่มที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส)

ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดโดยปราศจากแรงด้านข้างของตัวอย่างที่อายุการบ่ม 7 วัน ดังแสดงในรูปที่ 2 ซึ่งพบว่ากำลังรับแรงอัดโดยปราศจากแรงด้านข้างของตัวอย่างดินลูกรังผสมสารกระตุ้นที่ปริมาณ OMC+2% ให้ค่าสูงที่สุด โดยเมื่อผสมที่ปริมาณสารกระตุ้น OMC และ OMC-2% มีค่าลดลงตามลำดับ โดยปริมาณสารกระตุ้นที่สัดส่วน $\text{Na}_2\text{SiO}_3:\text{NaOH}$ เท่ากับ 30:70 ให้ค่ากำลังสูงที่สุด และมีค่าลดลงเมื่อสัดส่วน $\text{Na}_2\text{SiO}_3:\text{NaOH}$ เท่ากับ 50:50, 10:90 และ 0:100 ตามลำดับ ซึ่งสันนิษฐานว่าสารกระตุ้นและการบ่มด้วยอุณหภูมิที่สูงขึ้นไปทำปฏิกิริยากับซิลิกาในดินลูกรังเกิดเป็นผลให้เกิดปฏิกิริยาโพลิเมอร์ไรเซชัน ทำให้การยึดเกาะระหว่างเม็ดดินแน่นขึ้น ซึ่งให้ค่าสูงกว่าการผสมดินลูกรังกับน้ำและมีค่าสูงขึ้นตามระยะเวลาบ่มที่เพิ่มขึ้น

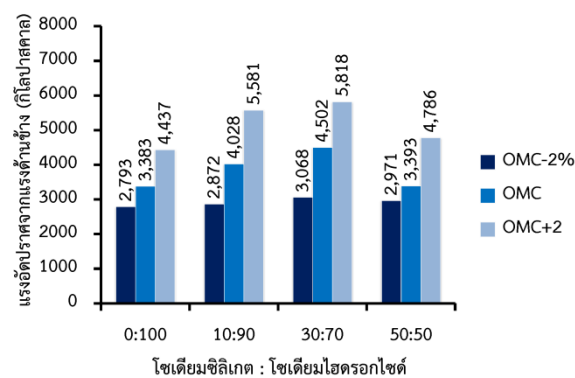


(ก) บ่มที่อุณหภูมิห้อง



(ข) บ่มที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส

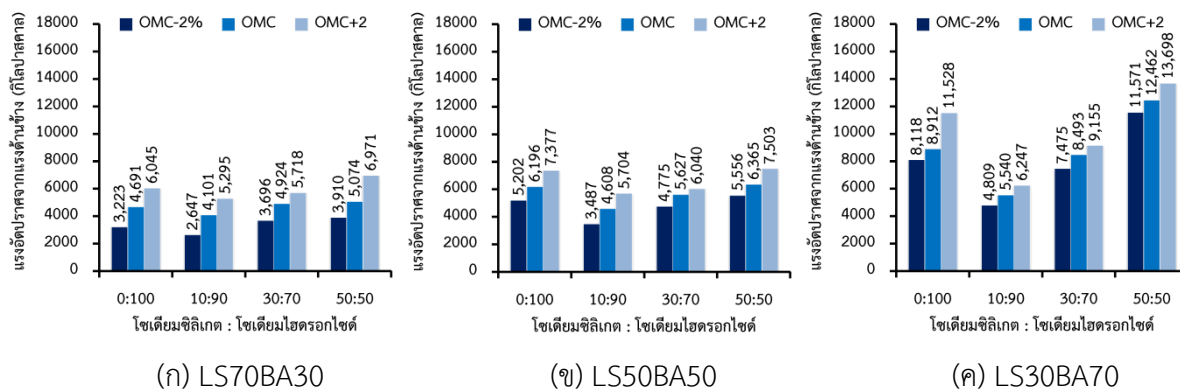
รูปที่ 1 กำลังรับแรงอัดโดยปราศจากแรงด้านข้างของตัวอย่างดินลูกรังผสมน้ำ



รูปที่ 2 กำลังรับแรงอัดโดยปราศจากแรงด้านข้างของตัวอย่างดินลูกรังผสมสารกระตุ้น

5.3.4 ผลการทดสอบตัวอย่างดินลูกรังผสมเถ้ากันเตาจีโอโพลิเมอร์ (บ่มที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส)

แรงอัดโดยปราศจากแรงด้านข้างของตัวอย่างดินลูกรังผสมเถ้ากันเตาจีโอโพลิเมอร์ ที่อัตราส่วน LS:BA เท่ากับ 70:30, 50:50 และ 30:70 ปริมาณความชื้น เท่ากับ OMC, OMC-2% และ OMC+2% และอัตราส่วน $\text{Na}_2\text{SiO}_3:\text{NaOH}$ เท่ากับ 0:100, 10:90, 30:70 และ 50:50 ดังแสดงในรูปที่ 3 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแรงอัดโดยปราศจากแรงด้านข้างของตัวอย่างดินลูกรังผสมเถ้ากันเตาจีโอโพลิเมอร์ ที่อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{SiO}_3:\text{NaOH}$ เท่ากับ 10:90 มีค่าลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับแรงอัดโดยปราศจากแรงด้านข้างที่อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{SiO}_3:\text{NaOH}$ เท่ากับ 0:100 และแรงอัดโดยปราศจากแรงด้านข้างจะเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ตามปริมาณการเพิ่มขึ้นของ Na_2SiO_3 กล่าวคือแรงอัดโดยปราศจากแรงด้านข้างที่อัตราส่วนผสม $\text{Na}_2\text{SiO}_3:\text{NaOH}$ เท่ากับ 0:100 NaOH มีความสามารถในการชะละลายซิลิกาและอลูมินาจากเถ้ากันเตาออกมาได้มากกว่า ซึ่งทำให้เกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันสมบูรณ์มากขึ้น และเมื่อ Na_2SiO_3 มีปริมาณเพิ่มขึ้นเป็นผลทำให้ซิลิกาและอลูมินาที่ถูกชะละลายออกมา ถูกดึงให้รวมตัวกับไอออนออกซิเจน ทำให้เกิดการเชื่อมต่อกันระหว่างโมเลกุลของซิลิกา กับอลูมินา ทำให้สารประกอบอลูมิโนซิลิกา (Si-O-Al-O) มีค่ามากขึ้นส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันได้สมบูรณ์มากขึ้น สำหรับอัตราส่วนของดินลูกรังผสมเถ้ากันเตาที่ดีที่สุด คือ 30:70 และอัตราส่วนของสารละลายโซเดียมซิลิเกตผสมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ดีที่สุด คือ 50:50



รูปที่ 3 กำลังรับแรงอัดโดยปราศจากแรงด้านข้างของตัวอย่างดินลูกรังผสมเถ้ากันเตาจีโอโพลิเมอร์

6. สรุปผล

ผลจากการศึกษาสามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

6.1 ผลการทดสอบตัวอย่างดินลูกรังผสมน้ำ บ่มที่อุณหภูมิห้อง พบว่ากำลังรับแรงอัดโดยปราศจากแรงด้านข้างของตัวอย่างดินลูกรังผสมน้ำที่ปริมาณความชื้นที่เหมาะสม ให้ค่าสูงที่สุด โดยเมื่อใช้ปริมาณน้ำที่ปริมาณความชื้นด้านแห้งและปริมาณความชื้นด้านเปียก ให้ค่ากำลังลดลงตามลำดับ ซึ่งเป็นไปตามทฤษฎีการบดอัดดิน และมีค่าสูงขึ้นตามระยะเวลาบ่มที่เพิ่มขึ้น

6.2 ผลการทดสอบตัวอย่างดินลูกรังผสมน้ำ บ่มที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส พบว่ากำลังรับแรงอัดโดยปราศจากแรงด้านข้างของดินลูกรังผสมน้ำที่ปริมาณความชื้นด้านเปียกให้ค่าสูงที่สุด โดยเมื่อใช้ปริมาณน้ำที่ปริมาณความชื้นที่เหมาะสมและปริมาณความชื้นด้านแห้ง ให้ค่ากำลังลดลงตามลำดับ ซึ่งอาจเกิดขึ้นเนื่องจากอุณหภูมิที่สูงทำให้น้ำระเหยออกจากดินมากเป็นผลทำให้การยึดเกาะระหว่างเม็ดดินแน่นขึ้น และมีค่าสูงขึ้นตามระยะเวลาบ่มที่เพิ่มขึ้น

6.3 ผลการทดสอบตัวอย่างดินลูกรังผสมสารกระตุ้น บ่มที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส พบว่ากำลังรับแรงอัดโดยปราศจากแรงด้านข้างของดินลูกรังผสมสารกระตุ้นที่ปริมาณความชื้นด้านเปียกให้ค่าสูงที่สุด โดยเมื่อใช้สารกระตุ้นที่ปริมาณความชื้นที่เหมาะสมและปริมาณความชื้นด้านแห้ง ให้ค่ากำลังลดลงตามลำดับ ซึ่งอาจเกิดขึ้นเนื่องจากสารกระตุ้นและอุณหภูมิที่สูงขึ้นทำให้การทำปฏิกิริยากับซิลิกาในดินลูกรังเกิดมากขึ้น ส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาโพลิเมอร์ไรเซชันมากขึ้น เป็นผลทำให้การยึดเกาะระหว่างเม็ดดินแน่นขึ้น ทำให้มีกำลังสูงกว่าการผสมดินลูกรังกับน้ำและมีค่าสูงขึ้นตามระยะเวลาบ่มที่เพิ่มขึ้น

6.4 ผลการทดสอบดินลูกรังปรับปรุงด้วยเถ้าก้นเตาจีโอโพลิเมอร์ พบว่าสารกระตุ้นที่มีอัตราส่วนโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ 30:70 ให้ค่ากำลังรับแรงอัดโดยปราศจากแรงด้านข้างสูงที่สุด และลดลงที่อัตราส่วนผสม 50:50, 10:90 และ 0:100 ตามลำดับ

6.5 อัตราส่วนผสมที่แนะนำสำหรับการใช้เป็นวัสดุงานทาง คือ ดินลูกรังผสมเถ้าก้นเตาอัตราส่วน 50:50 และปริมาณสารกระตุ้นควรใช้ที่ปริมาณความชื้นด้านแห้ง (OMC - ร้อยละ 2) โดยอัตราส่วนผสมของโซเดียมซิลิเกต:โซเดียมไฮดรอกไซด์แนะนำให้ใช้อัตราส่วน 10:90 เนื่องจากเพียงพอต่อการผ่านเกณฑ์มาตรฐานพื้นทางสำหรับปริมาณจราจรน้อย ($q_u = 1,724$ kPa) และปริมาณจราจรมาก ($q_u = 2,413$ kPa) และเป็นการลดต้นทุนค่าใช้จ่ายในการจัดซื้อสารกระตุ้นด้วย

7. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ วิทยาเขตวังไกลกังวลที่อำนวยความสะดวกในด้านสถานที่และอุปกรณ์ในการทดสอบ และขอบคุณโรงไฟฟ้าบีแอลพีซี เพาเวอร์ จำกัด จังหวัดระยอง ที่ให้ความอนุเคราะห์เถ้าก้นเตา ซึ่งทำให้การศึกษาค้นคว้าครั้งนี้ให้เสร็จสมบูรณ์

8. เอกสารอ้างอิง

- [1] คมชัดลึก. (11 เมษายน 2560). ไทยมีโรงไฟฟ้าถ่านหินกี่แห่ง. www.komchadluek.net/news/scoop/270838
- [2] Muduli, S. D., Sadangi, J. K., Nayak, B. D. and Mishra, B. K. (2013). Effect of NaOH concentration in manufacture of geopolymer fly ash building brick. Greener Journal of Physical Sciences. 3(6). 204-221.

- [3] Deraman, L.M., Al Bakri Abdullah, M.M., Yun Ming, L., Hussin, K., and Yahya, Z. (2015). A Review on Processing and Properties of Bottom Ash Based Geopolymer Materials. *Key Engineering Materials*. 660, 3–8.
- [4] Suksiripattanapong, C., Tuntawoot, N., Thumrongvut, J., Wonglakorn, N., Chongutsah, S., and Tabyang, W. (2019). Compressive Strength of Marginal Lateritic Soil Stabilized with Bottom Ash Geopolymer as a Pavement Material. *International Journal of Engineering and Technology*. 11(3). 177-180.
- [5] สุภาพร แจ่มเจริญ. (2533). ดินลูกรัง. *วิศวกรรมสาร มก.* 9. 25-32.
- [6] Ghafoori, N. and Bucholc, J. (1997). Properties of High-Calcium Dry Bottom Ash Concrete. *ACI Materials Journal*, 94(2). 90-101.
- [7] Onprom, P., Chaimoon, K., and Cheerarot, R. (2015). Influence of Bottom Ash Replacements as Fine Aggregate on the Property of Cellular Concrete with Various Foam Contents. *Advances in Materials Science and Engineering*. 2015.381704.
- [8] Cheriaf, M., Rocha, J. C. and Pera, J. (1999). Pozzolanic Properties of Pulverized Coal Combustion Bottom Ash, *Cement and Concrete Research*. 28(9). 1387-1391.
- [9] Jaturapitakkul, C. and Cheerarot, R. (2003). Development of Bottom Ash as Pozzolanic Material. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 15(1). 48-53.
- [10] เรืองรุชต์ ชีระโรจน์ และชัย จาตุรพิทักษ์กุล. (2546). การใช้เถ้าก้นเตาบาดละเอียดเป็นวัสดุปอซโซลานในงานคอนกรีต. *วิศวกรรมสาร ฉบับวิจัยและพัฒนา*. 14(2). 1-8.
- [11] อุมาพร ปฏิพันธุ์ภูมิสกุล และประทีป ดวงเดือน. (2553). การปรับปรุงคุณภาพดินลูกรังโดยใช้เถ้าก้นเตา เศษปูนขาวและโซเดียมไฮดรอกไซด์. *การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 15*.