วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ปีที่ 30, ฉบับที่ 3 ก.ค.–ก.ย. 2563
The Journal of KMUTNB., Vol. 30, No. 3, Jul.–Sep. 2020

บทความวิจัย

การใช้ปูนซีเมนต์และเถ้าขยะในการปรับปรุงกำลังอัดของดินเหนียว

วรวิทย์ โพธิ์จันทร์* และ อนุชาติ ลื้อนันต์ศักดิ์ศิริ
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยภาคตะวันออกเฉียงเหนือ

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทรศัพท์ 08 9943 1604 อีเมล: Worawit.Pho@neu.ac.th DOI: 10.14416/j.kmutnb.2020.06.001
รับเมื่อ 1 ตุลาคม 2562 แก้ไขเมื่อ 11 พฤศจิกายน 2562 ตอบรับเมื่อ 20 ธันวาคม 2562 เผยแพร่ออนไลน์ 1 มิถุนายน 2563
© 2020 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

บทคัดย่อ

บทความนี้ศึกษาอิทธิพลของตัวแปรควบคุม (ปริมาณความชื้น ปริมาณปูนซีเมนต์ ปริมาณเถ้าหนักจากการเผาขยะ และอายุบ่ม) ต่อกำลังอัดของดินเหนียวผสมปูนซีเมนต์และเถ้าขยะ โครงการนี้แสดงให้เห็นถึงความเป็นไปได้ในการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าขยะเพื่อเพิ่มกำลังอัดของดินเหนียว กำลังอัดของดินเหนียวผสมซีเมนต์มีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณเถ้าขยะ เนื่องจากเถ้าขยะช่วยให้อนุภาคของดินเหนียวและปูนซีเมนต์กระจายตัวและสัมผัสน้ำได้มากขึ้น ทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันได้ดีขึ้นในทุกอัตราส่วนผสมระหว่างปูนซีเมนต์และน้ำ การผสมเถ้าขยะในปริมาณร้อยละ 20 ของปูนซีเมนต์ ให้กำลังอัดสูงสุด กำลังอัดของดินเหนียวผสมซีเมนต์เถ้าขยะที่อัตราส่วนผสมต่างๆ สามารถประมาณได้โดยอาศัยพารามิเตอร์ Clay-water/Cement Ratio ร่วมกับตัวแปรปริมาณปูนซีเมนต์เทียบเท่า จากการศึกษาพบว่า ที่อายุต่างๆ เถ้าขยะมีประสิทธิภาพเทียบเท่ากับ 0.80 เท่าของปูนซีเมนต์ สำหรับทุกอัตราส่วนผสมระหว่างปริมาณความชื้น ปริมาณปูนซีเมนต์ และปริมาณเถ้าขยะ

คำสำคัญ: เถ้าขยะ กระจายตัว ตัวแปรปริมาณปูนซีเมนต์เทียบเท่า

การอ้างอิงบทความ: วรวิทย์ โพธิ์จันทร์ และ อนุชาติ ลื้อนันต์ศักดิ์ศิริ, "การใช้ปูนซีเมนต์และเถ้าขยะในการปรับปรุงกำลังอัดของดินเหนียว," *วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ*, ปีที่ 30, ฉบับที่ 3, หน้า 364–371, ก.ค.–ก.ย. 2563.

Research Article

Using of Cement and Bottom Ash to Strength Improvement of Clay

Worawit Phojan* and Anuchat Leeanansaksiri
Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, North Eastern University, Khon Kaen, Thailand

* Corresponding Author, Tel. 08 9943 1604, E–mail: Worawit.Pho@neu.ac.th DOI: 10.14416/j.kmutnb.2020.06.001
Received 1 October 2019; Revised 11 November 2019; Accepted 20 December 2019; Published online: 1 June 2020
© 2020 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

Abstract

This present paper investigates the influence of equivalent control, (moisture content, cement content, the amount of bottom ash from Khon Kaen municipal solid waste ash content, and curing time) on strength development in clay admixed with cement and bottom ash. This paper reveals a possibility of replacing cement with bottom ash to improve strength of clay. It is found that strength increases with bottom ash content. The role of bottom ash is to disperse the clay-cement clusters into smaller clusters, which increases the reactive surface, and hence strength. An addition of 20% bottom ash in the cement gives the highest strength for all combination of water content and cement content. Based on the clay-water/cement ratio and the parameter equivalent cement content, the strength prediction equation for the clay admixed cement is introduced. It is found that for all curing times test, bottom ash content is equal to 0.80 cement content for all combinations of water content, cement content and bottom ash content.

Keywords: Bottom Ash, Disperse, Parameter Equivalent Cement Content

Please cite this article as: W. Phojan and A. Leeanansaksiri, "Using of cement and bottom ash to strength improvement of clay," *The Journal of KMUTNB*, vol. 30, no. 3, pp. 364–371, Jul.–Sep. 2020 (in Thai).

1. บทนำ

จากวิกฤตปัญหาพื้นที่ฝังกลบขยะของเทศบาลนครขอนแก่นมีไม่เพียงพอเกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมโดยรอบ ซึ่งขยะเก่าสะสมตกค้างในจังหวัดขอนแก่น มีกว่า 8 แสนตัน จึงจัดตั้งโครงการบริหารจัดการและกำจัดขยะมูลฝอยด้วยวิธีแปรรูปขยะเป็นพลังงานไฟฟ้า โดยให้เอกชนที่มีประสบการณ์เข้ามาบริหารจัดการและลงทุนเองทั้งหมดในปี พ.ศ. 2554 นอกจากจะกำจัดขยะมูลฝอยอย่างถูกหลักสุขาภิบาลแล้ว ยังสามารถนำพลังงานไฟฟ้าไปใช้ประโยชน์ และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม โรงไฟฟ้าขยะขอนแก่นแห่งนี้ใช้เทคโนโลยีแบบเผาตรงระบบปิด นำพลังงานความร้อนไปผลิตกระแสไฟฟ้า ซึ่งเป็นเทคโนโลยีการเผาไหม้ขยะประสิทธิภาพสูง ประกอบด้วยระบบบำบัดมลภาวะทางอากาศที่มีประสิทธิภาพ เป็นที่ยอมรับและใช้ในหลายประเทศ สามารถเผาขยะได้ทุกชนิดพร้อมๆ กัน เช่น เศษไม้ กระดาษ พลาสติก ยาง ผ้า และเศษอาหาร จากทั้งขยะเก่าและขยะใหม่ของเทศบาลนครขอนแก่น

ถึงแม้ว่าเทคโนโลยีการเผาขยะมูลฝอยจะเป็นวิธีลดปริมาณของขยะมูลฝอยได้มากที่สุด แต่ยังคงมีเถ้าตกค้างเป็นปริมาณมาก เถ้าจากการเผาไหม้ขยะมูลฝอยชุมชนแบ่งเป็น 2 ประเภท คือ เถ้าหนัก (Bottom Ash) จะมีอนุภาคใหญ่ซึ่งออกมาจากระบบเผาไหม้ และถูกทำให้เย็นลงด้วยน้ำในช่องระบายเถ้า เถ้าจะถูกระบายสู่บ่อพักเถ้า จากนั้นใช้เครนในการขนถ่ายสู่รถบรรทุกแล้วนำไปฝังกลบ อีกประเภทหนึ่งคือ เถ้าลอย (Fly Ash) ซึ่งมีอนุภาคขนาดเล็กจะถูกดักไว้ด้วยอุปกรณ์กรองฝุ่นชนิดถุง (Bag Filter) ก่อนปล่อยออกสู่ชั้นบรรยากาศ จากนั้นจะนำเถ้าลอยไปฝังกลบในหลุมฝังกลบต่อไป [1]

จากการศึกษาวิจัยที่ผ่านมาพบว่า ขี้เถ้าลอยมีสารปนเปื้อนทางเคมีที่อันตราย แต่เมื่อนำมาทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในการผลิตคอนกรีตจะช่วยลดปริมาณสารปนเปื้อนได้ จากการได้ตรวจสอบคุณสมบัติ ทางเคมีของขี้เถ้าลอยพบว่า ขี้เถ้าลอยมีองค์ประกอบทางเคมีที่ใกล้เคียงกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ แต่มีค่าการนำความร้อนที่ต่ำกว่า เมื่อนำขี้เถ้าลอยมาทดแทนปูนซีเมนต์ในการผลิตคอนกรีตประมาณร้อยละ 10–15 คอนกรีตนั้นยังคงมีคุณสมบัติเชิงกล และคุณสมบัติทางกายภาพเหมือนเดิม และยังได้มีวัสดุก่อสร้างอาคารที่สามารถทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยขี้เถ้าลอยจากขยะ ได้แก่ อิฐบล็อกประสานและอิฐมวลเบา ซึ่งอิฐมวลเบามีการลดความร้อนที่ดีกว่าอิฐบล็อกประสาน [2] อีกทั้งการใช้เถ้าลอยจากขยะที่แทนที่ปูนซีเมนต์พบว่า สามารถใช้เถ้าลอยแทนที่ในปูนซีเมนต์ในการทำผลิตภัณฑ์คอนกรีตบล็อกได้มากถึงร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก แม้ว่าจะทำให้กำลังอัดของก้อนคอนกรีตบล็อกไม่รับน้ำหนักมีค่าลดลง แต่ยังคงอยู่ในมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม เลขที่ มอก. 58-2530 [1]

นันทชัย และคณะ [3] ได้ศึกษาอิทธิพลของปริมาณเถ้าขยะเทศบาลที่นำมาผสมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 10, 20, 30, 40 และ 50 โดยน้ำหนัก แล้วนำไปบ่มในน้ำธรรมดา และคอนกรีตที่ผสมด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 กับเถ้าขยะเทศบาลในอัตราส่วนร้อยละ 10, 30 และ 50 โดยน้ำหนัก แล้วนำไปบ่มในน้ำผสมสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ความเข้มข้นร้อยละ 5 เป็นระยะเวลา 7, 14, 28, 60, 90, 120 และ 180 วัน ซึ่งผลการศึกษานี้แสดงให้เห็นว่า คอนกรีตที่มีอัตราส่วนผสมระหว่างปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 กับเถ้าขยะเทศบาลในอัตราส่วนร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก มีคุณสมบัติในด้านต่างๆ ดีกว่าคอนกรีตที่มีอัตราส่วนผสมของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ล้วน ดังนั้นหากมีการวิจัยและพัฒนาเพิ่มเติมก็สามารถจะนำไปใช้ทดแทนคอนกรีตที่มีอยู่ในปัจจุบันให้เหมาะสมกับงานโครงสร้างต่างๆ ต่อไป อีกทั้งยังช่วยรักษาสิ่งแวดล้อมในการลดปริมาณเถ้าเหลือทิ้งจากการเผาขยะนำมาใช้ประโยชน์ได้อีกทางหนึ่งด้วย

ด้วยเหตุนี้เองงานวิจัยส่วนใหญ่ได้ศึกษาถึงการนำเถ้าลอยจากการเผาขยะมาใช้ในการแทนที่ปูนซีเมนต์ แต่ยังไม่มีการใช้เถ้าหนัก ซึ่งเป็นเถ้าอีกชนิดหนึ่งที่เหลือจากการเผาขยะมาแทนปูนซีเมนต์ ดังนั้นผู้วิจัยจะทำการศึกษาการใช้เถ้าหนักหรือเถ้าก้นเตาจากการเผาขยะ (ในงานวิจัยนี้จะผู้วิจัยจะเรียกว่าเถ้าขยะ) เพื่อใช้ในการปรับปรุงคุณภาพดินเหนียวร่วมกับซีเมนต์ โดยมุ่งศึกษาอิทธิพลของตัวแปร

ควบคุม (ปริมาณความชื้น ปริมาณปูนซีเมนต์ และปริมาณเถ้าขยะ) ต่อการพัฒนากำลังอัดแกนเดียว

2.วิธีการวิจัย

2.1 ตัวอย่างดิน ปูนซีเมนต์ และเถ้าขยะ

ดินเหนียวตัวอย่างที่จะใช้ในงานวิจัยนี้เก็บในบริเวณพื้นที่บ้านเพชร ตำบลบ้านเพชร อำเภอภูเขียว จังหวัดชัยภูมิ มีลักษณะเป็นดินเหนียว สีน้ำตาล-เทา ที่ความลึก 2 เมตร ขีดจำกัดเหลว และขีดจำกัดพลาสติกมีค่าเท่ากับร้อยละ 44 และ 20.81 ตามลำดับ ปริมาณความชื้นตามธรรมชาติเท่ากับร้อยละ 32 ดินมีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.63 ดินประเภทนี้จัดเป็นดินเหนียวที่มีค่าพลาสติกต่ำ (CL) ด้วยการจำแนกดินแบบเอกภาพ (Unified soil Classification System; USCS) ดินตัวอย่างถูกนำมาร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 16 เพื่อแยกเศษรากไม้และเม็ดดินที่มีขนาดใหญ่ออก และทำการปรับปริมาณความชื้นในดินให้มีค่า Liquidity Index (LI) เท่ากับ 1.0, 1.5 และ 2.0

ปูนซีเมนต์ที่ใช้ในการศึกษาคือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เถ้าหนักหรือเถ้าก้นเตาจากการเผาขยะ (Bottom Ash from Khon Kaen Municipal Solid Waste; BA) ได้มาจากโรงเผาขยะมูลฝอยชุมชนและผลิตไฟฟ้า บ้านคำบอน ตำบลโนนท่อน อำเภอเมือง จังหวัดขอนแก่น ขยะที่นำมาใช้เผาเป็นขยะมูลฝอยตามครัวเรือน จะถูกเผาด้วยอุณหภูมิอยู่ที่ 850–1,100 องศาเซลเซียส ตัวอย่างเถ้าขยะจะถูกนำมาอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส แล้วนำมาร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 16 เพื่อคัดเศษขยะที่เผาไหม้ไม่หมดออก แล้วนำไปบดละเอียดด้วยเครื่องบดปอซโซลานจนมีความละเอียดผ่านตะแกรงเบอร์ 325 เท่ากับร้อยละ 73 ดังรูปที่ 1 มีองค์ประกอบทางเคมีที่ทดสอบด้วยวิธี X-ray Fluorescence Spectrometry (XRF) โดยสถาบันวิจัยและพัฒนาอัญมณีและเครื่องประดับแห่งชาติ (องค์กรมหาชน) ดังแสดงในตารางที่ 1 ซึ่งพบว่า เถ้าขยะไม่มีคุณสมบัติของซีเมนต์และวัสดุปอซโซลานใน Class F และ Class C ตามมาตรฐาน ASTM C618-98 เนื่องจากมีผลรวมของซิลิกาออกไซด์ เฟอร์ริกออกไซด์ และอะลูมินาออกไซด์ น้อยกว่าร้อยละ 70 และ 50 ตามลำดับ

(ก)

(ข)

รูปที่ 1 เถ้าหนักหรือเถ้าก้นเตาจากการเผาขยะ (ก) กองเถ้าขยะจากโรงเผาที่ยังไม่บด (ข) เถ้าขยะที่ผ่านการอบให้แห้งและบดละเอียดแล้ว

ตารางที่ 1 คุณสมบัติทางเคมีของเถ้าขยะ

Chemical Composition (%)	Bottom Ash; BA
SiO_2	19.47
Al_2O_3	1.67
CaO	32.26
Na_2O	7.94
SO_3	6.14
Fe_2O_3	3.90

2.2 การเตรียมตัวอย่างดินซีเมนต์เถ้าขยะ

ดินตัวอย่างถูกปรับให้มีปริมาณความชื้นต่างๆ (LI = 1.0,

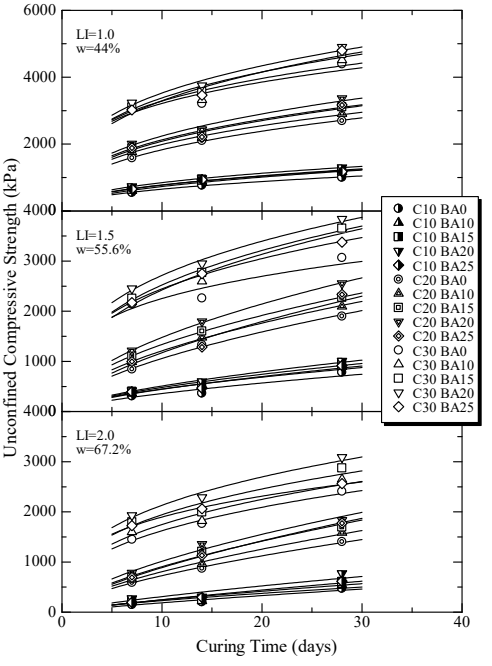
1.5 และ 2.0) และนำมาผสมกับปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 และเถ้าขยะ ในอัตราส่วนปูนซีเมนต์ร้อยละ 10, 20 และ 30 ของน้ำหนักดิน และปริมาณเถ้าขยะร้อยละ 0, 10, 15, 20 และ 25 ของน้ำหนักปูนซีเมนต์ จนเป็นเนื้อเดียวกันด้วยเครื่องผสม เป็นเวลา 10 นาที หลังจากนั้น ดินผสมปูนซีเมนต์และเถ้าขยะถูกบรรจุในแบบหล่อทรงกระบอกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร สูง 100 มิลลิเมตร เมื่อได้อายุบ่ม 24 ชั่วโมง ตัวอย่างดินซีเมนต์เถ้าขยะถูกถอดออกจากแบบหล่อและห่อด้วยฟิล์มถนอมอาหาร และบ่มที่อุณหภูมิห้องปฏิบัติการ เมื่อได้อายุบ่มที่ต้องการ (7, 14 และ 28 วัน) นำตัวอย่างออกจากฟิล์มถนอมอาหาร แล้วนำไปทดสอบกำลังอัดแกนเดียวทันที ด้วยอัตราการกดร้อยละ 1 ของความสูงตัวอย่างต่อนาที

3. ผลการวิจัย

3.1 อิทธิพลของปริมาณซีเมนต์ เถ้าขยะ และปริมาณความชื้นอายุบ่มต่อกำลังอัดแกนเดียวของดินเหนียวซีเมนต์

รูปที่ 2 แสดงอิทธิพลของปริมาณปูนซีเมนต์ เถ้าขยะ และปริมาณความชื้นต่อกำลังอัดแกนเดียวที่อายุบ่มต่างๆ ดินตัวอย่างถูกปรับปริมาณความชื้นจนมีค่า LI = 1.0, 1.5 และ 2.0 ผสมกับปูนซีเมนต์ในปริมาณร้อยละ 10, 20 และ 30 ของน้ำหนักดินและปริมาณเถ้าขยะร้อยละ 0, 10, 15, 20 และ 25 ของน้ำหนักปูนซีเมนต์ เมื่อได้อายุบ่ม 7, 14 และ 28 วัน แล้วทดสอบกำลังอัดแกนเดียว

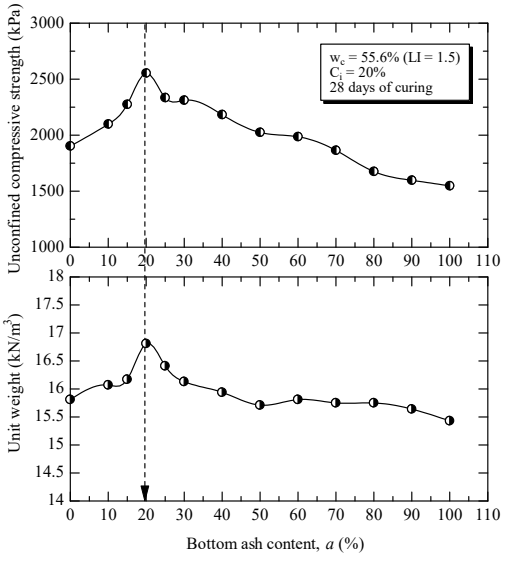
ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า ที่ปริมาณความชื้นและอายุบ่มเดียวกัน กำลังอัดแกนเดียวมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณปูนซีเมนต์ เถ้าขยะ และอายุบ่ม สามารถสรุปได้ว่ากำลังอัดของดินซีเมนต์เถ้าขยะขึ้นอยู่กับอิทธิพลร่วม (ไฮเดรชันและการกระจายตัว) อิทธิพลจากปฏิกิริยาไฮเดรชันถูกควบคุมโดยปริมาณปูนซีเมนต์ ขณะที่อิทธิพลจากการกระจายตัวถูกควบคุมโดยปริมาณเถ้าขยะ (อัตราส่วนการผสมเพิ่ม) ดังนั้นสามารถกล่าวได้ว่าสามารถประยุกต์ใช้เถ้าขยะในรูปแบบของวัสดุผสมเพิ่มแล้ว ซึ่งเถ้าขยะจะเป็นวัสดุช่วยเพิ่มการกระจายตัวของซีเมนต์ (Dispersing Material) ที่เติมลงในปูนซีเมนต์เพื่อเพิ่มปฏิกิริยาไฮเดรชัน และเพิ่มกำลังอัดของดินซีเมนต์ได้ [4]–[6]



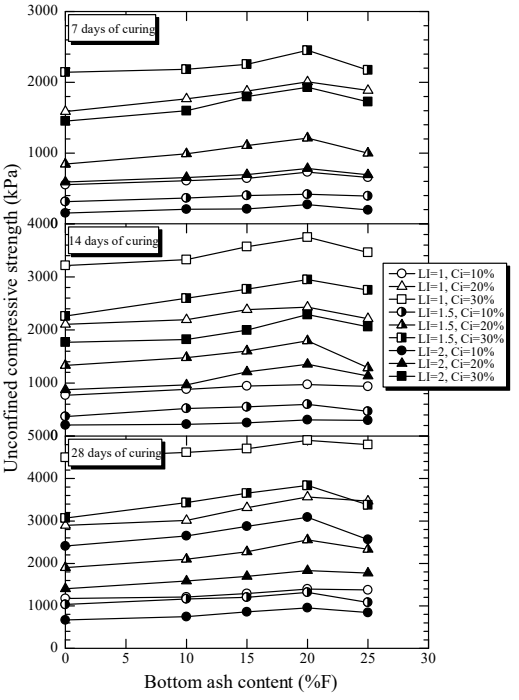
รูปที่ 2 ความสัมพันธ์ของปริมาณปูนซีเมนต์ เถ้าขยะ และปริมาณความชื้นต่อกำลังอัดแกนเดียวที่อายุบ่มต่างๆ

3.2 อิทธิพลของปริมาณเถ้าขยะต่อกำลังอัดแกนเดียวของดินเหนียวซีเมนต์

รูปที่ 3 แสดงอิทธิพลของปริมาณเถ้าขยะต่อหน่วยน้ำหนักและกำลังอัดแกนเดียว ดินเหนียวผสมปูนซีเมนต์ที่ปริมาณความชื้นร้อยละ 55.6 (LI = 1.5) ปริมาณปูนซีเมนต์ร้อยละ 20 และปริมาณเถ้าขยะที่ร้อยละ 0 ถึง 100 ของปริมาณปูนซีเมนต์ จะเห็นได้ว่าเมื่อเพิ่มปริมาณเถ้าขยะ กำลังอัดของดินซีเมนต์ และหน่วยน้ำหนักของดินซีเมนต์มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงแรก หลังจากนั้นกำลังอัดและหน่วยน้ำหนักมีแนวโน้มลดลง ปริมาณเถ้าขยะที่มากกว่าร้อยละ 20 เป็นการเพิ่มการกระจายตัวให้กับตัวอย่างดินซีเมนต์ที่มากเกินไป จะไปขัดขวางการทำปฏิกิริยาระหว่างน้ำกับซีเมนต์ ทำให้อิทธิพลจากปฏิกิริยาไฮเดรชันมีค่าน้อยลง กำลังอัดดินซีเมนต์จึงลดลง [6] ดังนั้น จึงสามารถสรุปได้ว่าปริมาณเถ้าขยะที่เหมาะสม (ให้กำลังอัดสูงสุด) คือร้อยละ 20 ดังนั้นในการทดสอบกำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์เถ้าขยะจึงเลือกทดสอบในช่วงปริมาณเถ้าขยะไม่เกินร้อยละ 20



รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดแกนเดียวและหน่วยน้ำหนักของดินซีเมนต์ที่ปริมาณเถ้าขยะต่างๆ ที่อายุบ่ม 28 วัน



รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดแกนเดียวและปริมาณเถ้าขยะของดินซีเมนต์

รูปที่ 4 แสดงการพัฒนากำลังอัดของดินเหนียวผสมปูนซีเมนต์และเถ้าขยะที่ปริมาณความชื้น ปริมาณปูนซีเมนต์และอายุบ่มต่างๆ สำหรับเถ้าขยะร้อยละ 25 ที่อายุบ่ม 7, 14 และ 28 วัน จะเห็นได้ว่ากำลังอัดมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณเถ้าขยะที่ผสมไม่เกินร้อยละ 20 ของปริมาณปูนซีเมนต์ที่ปริมาณเถ้าขยะร้อยละ 25 กำลังอัดจะลดลงในทุกอัตราส่วนผสม ในอัตราส่วนผสมระหว่างปูนซีเมนต์และเถ้าขยะที่เหมือนกัน ปริมาณความชื้นที่สูงกว่าให้กำลังอัดที่ต่ำกว่า เนื่องจากระยะห่างระหว่างอนุภาคดิน (Pore Space) มีมากกว่า [4], [6] และทุกอัตราส่วนผสมที่เท่ากัน กำลังอัดจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามอายุบ่ม

จากการศึกษาพบว่า เถ้าลอยในดินซีเมนต์ทำหน้าที่เป็นวัสดุกระจายอนุภาคดินซีเมนต์ ส่งผลให้ปูนซีเมนต์ทำปฏิกิริยากับน้ำได้ดีขึ้นและเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันเพิ่มขึ้น [4]–[6] ซึ่งสอดคล้องกับผลทดสอบของดินเหนียวผสมปูนซีเมนต์และเถ้าขยะ การเพิ่มขึ้นของเถ้าขยะในปริมาณไม่เกินร้อยละ 20 ของปูนซีเมนต์ เปรียบเสมือนการเพิ่มปูนซีเมนต์ให้กับดินซีเมนต์ ดังนั้น

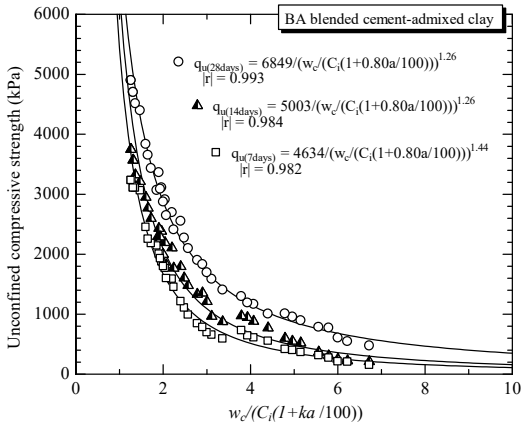
$$C_e = kf \quad (1)$$

เมื่อ C_e คือ ปริมาณปูนซีเมนต์เทียบเท่า k คือ ตัวแปรประสิทธิภาพ และ f คือ ปริมาณเถ้าขยะซึ่งเป็นปริมาณโดยน้ำหนักของดินแห้ง สมการที่ (1) เขียนใหม่ในรูปของปริมาณเถ้าขยะโดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ได้ดังสมการที่ (2)

$$C_e = kC_i a \quad (2)$$

เมื่อ C_i คือ ปริมาณปูนซีเมนต์ที่ใส่เริ่มต้น a คือ ปริมาณเถ้าขยะโดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ ดังนั้นปริมาณปูนซีเมนต์ทั้งหมด (C) ที่มีอยู่ในดินเหนียวจึงเท่ากับ

$$C = C_i + C_e$$
$$C = C_i (1 + k\,a) \quad (3)$$



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและอัตราส่วนปริมาณน้ำในดินต่อปริมาณปูนซีเมนต์ (เถ้าขยะในอัตราส่วนไม่เกินร้อยละ 20)

โดยการรวมสมการที่ (2) และ (3) เข้ากับตัวแปรอัตราส่วนปริมาณน้ำในดินต่อปริมาณปูนซีเมนต์ [7]–[9] ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและอัตราส่วนปริมาณน้ำในดินต่อปริมาณปูนซีเมนต์ที่อายุบ่มใดๆ แสดงดังนี้

$$q_u = \frac{A}{\left(\frac{w_c}{C_i(1+ka)}\right)^B} \quad (4)$$

เมื่อ A และ B เป็นค่าคงที่ และ q_u คือ กำลังอัดที่อายุบ่มใดๆ พารามิเตอร์ A, B และ k สามารถหาได้จากการทำ Non-linear Regression Analysis ค่าพารามิเตอร์ A, B ของดินซีเมนต์เถ้าขยะที่อายุบ่ม 7, 14 และ 28 วัน รูปที่ 5 แสดงผลการวิเคราะห์กำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์เถ้าขยะ ที่อายุต่างๆ ด้วยพารามิเตอร์อัตราส่วนปริมาณน้ำในดินต่อปริมาณปูนซีเมนต์ จะเห็นได้ว่าความสัมพันธ์ที่นำเสนอสามารถใช้ได้กับดินซีเมนต์เถ้าขยะที่ปริมาณความชื้นในช่วง 1.0 ถึง 2.0 เท่าของ Liquidity Index ปริมาณปูนซีเมนต์ที่ร้อยละ 10 ถึง 30 ของน้ำหนักดินแห้ง และปริมาณเถ้าขยะที่ร้อยละ 0 ถึง 20 ของน้ำหนักปูนซีเมนต์

ค่าของพารามิเตอร์ A มีค่าเพิ่มขึ้นตามอายุบ่ม พารามิเตอร์ B และ k มีค่าประมาณคงที่ไม่แปรผันตามอายุบ่ม [4], [5], [7]

จากการศึกษาพบว่า B มีค่าประมาณ 1.26 ถึง 1.44 และ k มีค่าเท่ากับ 0.80 ดังนั้นสามารถกล่าวได้ว่าเถ้าขยะมีประสิทธิภาพเป็น 0.80 เท่าของปูนซีเมนต์ หรือกล่าวอย่างง่ายว่าในการเติมปูนซีเมนต์ 20 เปอร์เซ็นต์ของดินแห้ง และเถ้าขยะ 20 เปอร์เซ็นต์ของปูนซีเมนต์ (4 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักดินแห้ง) เทียบได้เท่ากับการเติมปูนซีเมนต์เพียงอย่างเดียวเท่ากับ 23.2 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักดินแห้ง

4. อภิปรายผลและสรุป

จากการศึกษากำลังอัดของดินเหนียวผสมซีเมนต์และเถ้าขยะสามารถสรุปได้ดังนี้

1) เถ้าขยะไม่มีคุณสมบัติเป็นวัสดุปอซโซลาน ใน Class F และ Class C ตามมาตรฐาน ASTM C618-98 แต่มีคุณสมบัติเป็นวัสดุกระจายตัว ในช่วงปริมาณเถ้าขยะไม่เกินร้อยละ 20 ทำให้อนุภาคของปูนซีเมนต์สัมผัสกับน้ำได้ดีขึ้น ส่งผลให้กำลังอัดของดินซีเมนต์สูงขึ้น

2) กำลังอัดแกนเดียวของดินซีเมนต์ผสมเถ้าขยะบดอัดมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนปริมาณน้ำต่อปริมาณปูนซีเมนต์มีค่าลดลง ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดแกนเดียวกับอัตราส่วนปริมาณน้ำต่อปริมาณปูนซีเมนต์สามารถแทนด้วยฟังก์ชันกำลัง (Power Function) นอกจากนี้พบว่า กำลังอัดจะมีค่าเพิ่มมากขึ้นเมื่ออายุบ่มมากขึ้น เมื่อในอัตราส่วนผสมระหว่างปูนซีเมนต์และเถ้าขยะที่เหมือนกัน ปริมาณความชื้นที่สูงกว่าให้กำลังอัดที่ต่ำกว่า เนื่องจากระยะห่างระหว่างอนุภาคดิน (Pore Space) มีมากกว่า

3) สำหรับการผสมเพิ่มเถ้าขยะในอัตราส่วนน้อยกว่าร้อยละ 20 เถ้าขยะมีประสิทธิภาพเทียบเท่ากับ 0.80 เท่าของปูนซีเมนต์ สำหรับทุกอัตราส่วนผสมระหว่างปริมาณความชื้น ปริมาณปูนซีเมนต์ และอายุบ่ม

4) ตัวแปรปริมาณปูนซีเมนต์เทียบเท่ากับความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังอัดแกนเดียว และอัตราส่วนปริมาณน้ำในดินต่อปริมาณปูนซีเมนต์ สามารถใช้ในการทำนายกำลังอัดของดินเหนียวผสมปูนซีเมนต์และเถ้าขยะได้

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณโรงเผาขยะมูลฝอยชุมชนและผลิตไฟฟ้าบ้านคำบอน ตำบลโนนท่อน อำเภอเมือง จังหวัดขอนแก่น ที่เอื้อเฟื้อตัวอย่างเถ้าหนักที่เหลือจากการผลิตไฟฟ้า และขอขอบคุณ คุณทวีศักดิ์ โนนรุ่งเรือง คุณมานพ พันธุ์กาง และคุณเริงศักดิ์ เลขาโชค ที่ช่วยทำวิจัยโครงการนี้จนแล้วเสร็จสมบูรณ์

เอกสารอ้างอิง

[1] S. Puangmanee, "Feasibility study of using fly ash from Phuket Municipal solid waste incinerator to produce hollow non-load-bearing concrete masonry units," M.S. thesis, Faculty of Environmental Management, Prince of Songkla University, Songkhla, 2002 (in Thai).

[2] P. Sancharoen, "Utilization of municipal solid waste incinerator fly ash as a partial cement replacement on concrete," M.S. thesis, Departmental Program in Environmental Management Graduate School, Chulalongkorn University, Bangkok, 2003 (in Thai).

[3] N. Chusilp, S. Ngarmkham, and M. Anusiri "Effects of municipal waste ash on the durability and mechanical properties of concrete," in *Proceedings of the 22nd National Convention on Civil Engineering*, Nakhon Ratchasima, Thailand, vol. 2, pp. 91–96, 2017 (in Thai).

[4] A. Suddeepong, R. Rachan, and S. Horpibulsuk, "Equivalent cement content-A new parameter for analysis of strength delelopment in blended cement admixed clay," presented at the 14th National Convention on Civil Engineering. Nakhon Ratchasima, Thailand, 2009 (in Thai).

[5] W. Phojan and S. Horpibulsuk, "Analysis of strength development blended cement admixed saline soil," *KKU Enguneering Journal*, vol. 38, no. 1, pp. 27–34, 2011 (in Thai).

[6] S. Horpibulsuk, R. Racha, and Y. Raksachon, "Role of fly ash on strength and microstructure development in blended cement stabilized silty clay," *Soils and Foundations*, vol. 49, no. 1, pp. 85–98, 2009.

[7] S. Horpibulsuk, N. Miura, and T. S. Nagaraj, "Assessment of strength development in cement-admixed high water content clays with Abrams' law as a basis," *Geotechnique*, vol. 53, no. 4, pp. 439–444, 2003.

[8] S. Horpibulsuk and N. Miura, "A new approach for studying behavior of cement stabilized clays," in *Proceedings of the 15th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Istanbul, Turkey, vol. 3, pp. 1759–1762, 2001.

[9] N. Miura, S. Horpibulsuk, and T. S. Nagaraj, "Engineering behavior of cement stabilized clay at high water content," *Soil and Foundation*, vol. 41, no. 5, pp. 33–45, 2001.