

กำลังรับแรงอัดและดัดของจีโอโพลีเมอร์เม็ดดินเหนียวเบาสำหรับอาคารประหยัดพลังงาน Compressive and Flexural Strength of Geopolymer Lightweight Expanded Clay Aggregate for Energy Efficient Building

สำเนียง องสุพันธ์กุล^{1*}, วราธร แก้วแสง², จิรฐิติ บรรจงศิริ³

¹ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ พื้นที่ศาลายา 96 หมู่ 3 ตำบลศาลายา อำเภอพุทธมณฑล จังหวัดนครปฐม 73170

^{2,3} มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์ 19/1 ถนนเพชรเกษม แขวงหนองค้างพลู เขตหนองแขม กรุงเทพมหานคร 10160

* E-mail: sumnieng@rmutr.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษากำลังรับแรงอัดและกำลังรับแรงดัดของจีโอโพลีเมอร์จากเม็ดดินเหนียวเบาสำหรับอาคารประหยัดพลังงาน โดยทำการศึกษาคคุณสมบัติทางด้านวิศวกรรมของจีโอโพลีเมอร์เม็ดดินเหนียวเบาที่อัตราส่วนและอายุการบ่มที่แตกต่างกัน โดยกำหนดให้เม็ดดินเหนียวเบาที่มีรูปร่างเป็นแบบทรงกลม ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.0 เซนติเมตร ทำการเผาเม็ดดินตัวอย่างดินเหนียวที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส เป็นเวลาในการเผา 30 นาที โดยนำเม็ดดินเหนียวเบาที่ได้แทนที่เป็นมวลรวมในส่วนผสม และกำหนดให้วัสดุประสานที่ใช้ในการทดลองคือ สารจีโอโพลีเมอร์ ที่มีอัตราส่วนสารละลายโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) ต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เท่ากับ 0.60 และอัตราส่วนสารละลาย ($\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$) ต่อเกลือลอย เท่ากับ 0.50 , 0.55 และ 0.60 โดยกำหนดให้ใช้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ 10 , 15 และ 20 โมลาร์ แล้วทำการขึ้นรูปตัวอย่างรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร และสูง 20 เซนติเมตร ตามลำดับ และแบบคานซึ่งจะมีขนาดความกว้าง 7 เซนติเมตร ความสูง 7.5 เซนติเมตร และความยาว 30 เซนติเมตร ตามลำดับ โดยกำหนดให้จีโอโพลีเมอร์แข็งตัว ณ อุณหภูมิห้องประมาณ 22-27 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้วทำการบ่มในตู้อบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 วัน แล้วจึงถอดแบบนำไปหุ้มด้วยพลาสติกใส ทำการบ่ม ณ อุณหภูมิห้องประมาณ 22-27 องศาเซลเซียส อีกครั้งหนึ่งเป็นเวลา 7, 14 และ 28 วัน ตามลำดับ เมื่อครบอายุการบ่มดังกล่าวแล้วนำตัวอย่างมาวัดขนาดความสูง และชั่งน้ำหนัก เพื่อหาความหนาแน่น แล้วทำการทดสอบกำลังรับแรงอัดประลัย ระบุตามมาตรฐาน ASTM C39/39M-03 และกำลังรับแรงดัดประลัย ระบุตามมาตรฐาน ASTM C72-02 ตามลำดับ

จากผลการศึกษา พบว่า กำลังรับแรงอัดประลัยมีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่ออายุการบ่มเพิ่มขึ้น โดยให้ค่าเฉลี่ยกำลังรับแรงอัดประลัย 23.99-25.59 , 23.52-25.52 และ 23.67-25.60 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และกำลังรับแรงดัดประลัยมีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่ออายุการบ่มเพิ่มขึ้น โดยให้ค่าเฉลี่ยโมดูลัสแตกร้าวกว่าเท่ากับ 97.66-106.78 , 100.10-111.97 และ 99.49-118.10 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ที่อายุการบ่ม 7 , 14 และ 28 วัน ตามลำดับ และเมื่อพิจารณาค่ากำลังรับแรงอัดและอัตราส่วนผสมโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ 10 , 15 และ 20 โมลาร์ พบว่า กำลังรับแรงอัดประลัยมีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้นขึ้น โดยให้ค่าเฉลี่ยกำลังรับแรงอัดที่ค่าสูงสุดและต่ำสุดที่ร้อยละ 6.25 , 7.84 และ 7.54 และ กำลังรับแรงดัดประลัยที่มีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้นขึ้น โดยให้ค่าเฉลี่ยโมดูลัสแตกร้าวกว่าที่ค่าสูงสุดและต่ำสุดที่ร้อยละ 8.54 , 10.60 และ 15.76 ตามลำดับ โดยค่ารับกำลัง

รับแรงอัดประลัยและกำลังรับแรงดัดประลัยที่เหมาะสมและสามารถนำไปใช้งาน ที่อัตราส่วนผสมโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ 15 โมลาร์ ที่อัตราส่วนสารละลายต่อแก้วลอยที่ 0.50 และ ที่อัตราส่วนผสมโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ 10 โมลาร์ ที่อัตราส่วนสารละลายต่อแก้วลอยที่ 0.55 โดยให้ค่าสูงสุดเท่ากับ 25.60 และ 118.10 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตรตามลำดับ

คำสำคัญ: กำลังรับแรงอัด, กำลังรับแรงดัด, จีโอโพลีเมอร์, เม็ดดินเหนียวเผามวลเบา

Abstract

This research aims to investigate the compressive strength and flexural strength of geopolymer from lightweight expanded clay aggregate for energy efficient building. The engineering properties of geopolymer from lightweight expanded clay aggregate at different ratios and curing times were examined. The lightweight expanded clay aggregate were set up to a spherical shape with diameter of 1.0 cm. The samples were burnt at 1200 Celsius degree for 30 minutes. The lightweight expanded clay aggregate were used to replace the aggregate in the mixture. The ratio of geopolymer which was used in the experiment in four different ratios of sodium silicate solution (Na_2SiO_3) to sodium hydroxide solution (NaOH) as 0.60 and the ratio of solution ($\text{Na}_2\text{SiO}_3 / \text{NaOH}$) to fly ash as 0.50, 0.55 and 0.60 respectively. The concentrations of sodium hydroxide (NaOH) solution were arranged at 10, 15 and 20 molar. The cylindrical sample size was 10 centimeter in diameter and 20 centimeter in height and sample beams in dimension of 7.0x7.5x30 centimeter, respectively. The geopolymers were kept at room temperature about 22-27 degree Celsius for 1 hour, then incubated in an oven at 60 degree Celsius for 2 days. At the end of the curing period, took the sample to measure the height and weight to identify the compressive strength in accordance with ASTM C39/39M-03 and strength of flexural strength in accordance with ASTM C72-02, respectively.

The results of the tests revealed that the ultimate compressive strength tend to increase with longer curing age by exhibiting average ultimate compressive strength of 23.99 – 25.99; 23.52 – 25.52; and 23.67 – 25.60 kg/cm^2 at curing ages of 7, 14, and 28 days, respectively. Succeeding results also showed that the average flexural strength resulted to better outcome as the curing ages increased by exhibiting average modulus of rupture of 97.66-106.78; 100.10-111.97; and 99.49-118.10 kg/cm^2 at curing ages of 7, 14, and 28 days, respectively. Based on the compressive and flexural strengths with mixing ratios of sodium hydroxide of 10, 15, and 20 molars, it was found that the ultimate compressive strength and ultimate flexural strengths were higher as the solutions of sodium hydroxide were more concentrated by exhibiting an average minimum compressive

strength of 6.25%, 7.84%, and 7.54% while the modulus of rupture had 8.54%, 10.60%, and 15.76%, respectively.

The findings also found that, to obtain the appropriate compressive strength, the ideal mixing ratios of sodium hydroxide and the proportions of solution to fly ash were 15 molars and 0.50; while for achieving the suitable flexural strength, the mixing proportions should be 10 molars and 0.55, respectively. From these proportions, the highest compressive and flexural strengths obtained from the experiments were 25.60 kg/cm² and 118.10 kg/cm², respectively.

Keywords: Compressive strength, Flexural strength, Geopolymer, Lightweight expanded clay aggregate

1. ที่มาและความสำคัญ

ในกระบวนการผลิตคอนกรีตพูนหรือคอนกรีตมวลเบา ในปัจจุบันต้องอาศัยเทคโนโลยีขั้นสูงและใช้เงินลงทุนในการผลิตอย่างมาก ทำให้ราคาของคอนกรีตมวลเบา มีราคาแพงทำให้การใช้คอนกรีตพูน หรือคอนกรีตมวลเบา ดังกล่าวในท้องถิ่นไม่สามารถเข้าถึงได้ คณะผู้วิจัยจึงเล็งเห็นว่าคอนกรีตพูนจะมีน้ำหนักเบาและมีความเป็นฉนวนได้ อยู่ที่มวลรวมหยาบของส่วนผสมจึงได้แนวคิดที่จะทดแทนมวลรวมหยาบด้วยเม็ดดินเหนียวเผาผลาญ (Lightweight expanded clay aggregate) ซึ่งเป็นการนำดินเหนียวอ่อน (Soft clay) ซึ่งจัดได้ว่าเป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติทางวิศวกรรมต่ำมาก มาทำการปั้นเป็นก้อนรูปทรงกลม แล้วนำมาผ่านกระบวนการให้ความร้อนสูงภายใต้อุณหภูมิระหว่าง 600-1200 องศาเซลเซียส ทำให้เนื้อดินเหนียวเปลี่ยนสภาพโครงสร้างอย่างถาวรได้ดินเหนียวเผาผลาญ ซึ่งเม็ดดินเหนียวเผาผลาญจัดเป็นวัสดุมวลรวมหยาบเบา (Lightweight aggregate) ตามมาตรฐาน ASTM C 331 ที่ระบุให้มีหน่วยน้ำหนักระหว่าง 600 - 1,000 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร เมื่อเทียบกับ 1,100 - 1,750 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ของมวลรวมปกติ ส่วนวัสดุประสานจะถูกแทนที่ด้วยเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์ซึ่งเป็นวัสดุประสานในการผลิตคอนกรีตแทนการใช้ปูนซีเมนต์ และยังเป็นวัสดุที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม เนื่องจากในอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์มีการปล่อยก๊าซที่ก่อให้เกิดสภาวะเรือนกระจกสู่ชั้นบรรยากาศ โดยปูนซีเมนต์จำนวน 1 ตัน ที่ผลิตจะปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ออกมาจำนวน 1 ตัน เช่นกัน หรือประมาณร้อยละ 5-8 ของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในโลก (Worrell et.al., 2001)

ดังนั้นเพื่อช่วยลดปัญหาดังกล่าว คณะผู้วิจัยจึงได้นำเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์ (Fly ash geopolymer) เป็นทางเลือกหนึ่ง ที่เป็นไปได้ที่จะนำมาทดแทนปูนซีเมนต์ โดยจีโอโพลิเมอร์เป็นการพัฒนาสารซีเมนต์ใหม่โดยไม่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ซึ่งใช้สารปอซโซลานที่ประกอบด้วยสารซิลิกา (Silica, SiO₃) และอลูมินา (Alumina, Al₂O₃) เป็นองค์ประกอบในการทำวัสดุซีเมนต์ โดยใช้หลักการทำปฏิกิริยาลูกโซ่ที่เกิดจากซิลิกา (Si) และอลูมินา (Al) ให้เป็นโมเลกุลลูกโซ่ในลักษณะของโพลิเมอร์ โดยการทำปฏิกิริยาลูกโซ่ที่เกิดจากซิลิกาและอลูมินาจะใช้สารละลายที่เป็นด่างสูง (Alkali solution) เช่น สารโซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide, NaOH) เป็นต้น โดยให้ความร้อนเป็นตัวกระตุ้น (Activated) จะได้สารซีเมนต์ที่มีความสามารถในการรับกำลังอัด แรงดัด ความคงทน และความต้านทาน

ความร้อน ได้ และโดยเบื้องต้นได้ทำการศึกษากำลังรับแรงอัดและกำลังรับแรงดัดของจีโอโพลิเมอร์จากเม็ดดินเหนียว เฝามวลเบาอัตราส่วนและอายุการบ่มที่แตกต่างกัน เพื่อจะนำไปประยุกต์ใช้กับอาคารประหยัดพลังงานได้ในอนาคต

2. วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ และอัตราส่วนสารละลายโซเดียมซิลิเกต กับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อค่าล้อยที่ส่งผลต่อคุณสมบัติทางกล คือ กำลังรับแรงอัดและกำลังรับแรงดัดของ จีโอโพลิเมอร์จากเม็ดดินเหนียวเฝามวลเบา ที่อัตราส่วนและอายุการบ่มที่แตกต่างกัน

3. ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

3.1 คอนกรีตพรุน (Pervious concrete) หรือเรียกอีกอย่างว่าคอนกรีตที่ไม่มีมวลละเอียด (No-fine concrete) ซึ่งเป็นคอนกรีตมวลเบา (Lightweight concrete) ชนิดหนึ่ง (Neville, 1995) มีการนำมาใช้ในงานก่อสร้างเป็นเวลานานกว่า 30 ปี ในหลายประเทศในยุโรป อเมริกา และญี่ปุ่น (Schaefer et.al., 2006) โดยทั่วไป คอนกรีตพรุนจะมีค่าการยุบตัวของคอนกรีตเป็นศูนย์ มวลหยาบมีขนาดคละไม่ต่อเนื่อง ไม่มีมวลละเอียดผสมอยู่ จากตามรายงานของ ACI 522 (2010) ระบุไว้ว่าคอนกรีตพรุนโดยทั่วไปมีกำลังอัด กำลังรับแรงดึงต่ำซีก และความหนาแน่นต่ำกว่าคอนกรีตทั่วไป มีกำลังรับแรงอัดระหว่าง 2.8-28 เมกะปาสคาล มีขนาดโพรงระหว่าง 2-8 มิลลิเมตร และมีอัตราส่วนช่องว่างระหว่างร้อยละ 18-35 และกรณีคอนกรีตพรุนสดจะต้องมีความชื้นเหลือพอเหมาะโดยกำหนดค่าการไหลอยู่ในช่วง 170-180 มิลลิเมตร ระบุตาม JIS R 5201 (1997)

การนำไปประยุกต์ใช้งานของคอนกรีตพรุนสามารถนำไปใช้ได้หลายอย่าง อาทิเช่น ใช้เป็นพื้นทางในสวนสาธารณะ พื้นทางจราจรที่มีการรับน้ำหนักไม่มากนัก สนามเทนนิส ทางเท้า ในโรงเรือนเพาะชำ และงานทางด้านวิศวกรรมโยธา หรืองานตกแต่งทางสถาปัตยกรรมต่างๆ (Haselbach et.al., 2006; Bentz, 2008; Scholz and Grabowiecki, 2007) โดยจะกล่าวได้ว่าคอนกรีตพรุนเป็นคอนกรีตที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม

3.2 จีโอโพลิเมอร์ เป็นวัสดุเชื่อมประสานทำจากสารปอซโซลานที่ประกอบด้วยซิลิกาและอลูมินาเป็นหลัก เมื่อผสมกับด่างอัลคาไลไฮดรอกไซด์ (Alkali hydroxide) สารละลายโซเดียมซิลิเกต (Sodium silicate solution) และเร่งปฏิกิริยาด้วยความร้อน สามารถก่อตัวและแข็งตัวให้กำลังรับแรงได้ สามารถใช้เป็นวัสดุเชื่อมประสานแบบเดียวกับซีเมนต์เพสต์ สารปอซโซลานที่นิยมใช้กันได้แก่ เถ้าลอย และดินขาวเผา

จีโอโพลิเมอร์มีองค์ประกอบทางโครงสร้างแตกต่างจากไฮดรอกซิลของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เนื่องจาก องค์ประกอบหลักของวัสดุและการเกิดปฏิกิริยาที่ไม่เหมือนกัน โดยจีโอโพลิเมอร์มีโครงสร้างหลักที่เกิดจากองค์ประกอบของ ซิลิกา (Si), อลูมินา (Al) และ ออกซิเจน (O) เกิดปฏิกิริยาโดยใช้สารละลายที่มีความเป็นด่างสูงในการทำให้สารเหล่านี้แตกตัวออกมาทำปฏิกิริยาเคมีเกิดเป็น Polymer chain เกิดขึ้น ซึ่งโดยปกติแล้วจะใช้ ความร้อนในการเร่งปฏิกิริยาควบคู่กันไปด้วย

จีโอโพลิเมอร์ใช้หลักการของการทำปฏิกิริยาระหว่างซิลิกา (Si) และอลูมินา (Al) ให้เป็นโมเลกุลลูกโซ่ในลักษณะของโพลิเมอร์ (polymer) (Hua และ Van Deventer, 2000) ดังสมการที่ 1



โดยที่

M เป็นธาตุอัลคาไล

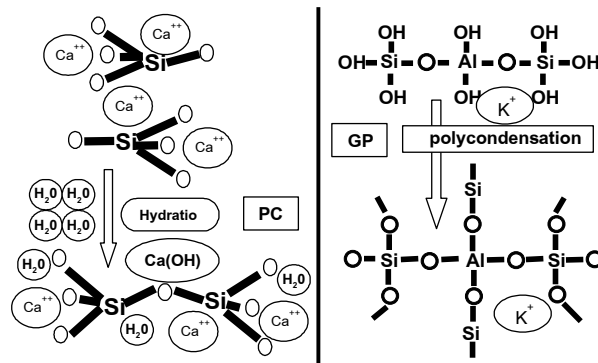
- เป็นการยึดเกาะ (bond)

z เป็นจำนวนโมเลกุลของ Si - O₂ เท่ากับ 1, 2 หรือ 3

n บ่งบอกปริมาณของการทำโมเลกุลลูกโซ่

w เป็นจำนวนโมเลกุลของน้ำ

การทำปฏิกิริยาลูกโซ่ของ Si และ Al จะใช้สารละลายที่เป็นด่างสูงและใช้ความร้อนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา จากการวิจัย พบว่า สามารถใช้เถ้าลอยที่ได้จากการเผาถ่านหินเป็นเชื้อเพลิงในการผลิตไฟฟ้าที่มีองค์ประกอบของซิลิกาและอลูมินา ในการทำจีโอโพลิเมอร์ที่สามารถรับแรงได้ดี เช่นเดียวกับการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ โดยการผสมเถ้าลอยกับสารเร่งปฏิกิริยา (Activator) และใช้ความร้อนในช่วง 60-100 องศาเซลเซียส ในการเร่งปฏิกิริยา สารเร่งที่ใช้เป็นสารพวก อัลคาไลไฮดรอกไซด์ และสารละลายโซเดียมซิลิเกต



รูปที่ 1 การเปรียบเทียบปฏิกิริยาของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และปฏิกิริยา Geopolymerization

(ที่มา : <http://www.geopolymer.org>, 2014)

3.3 เม็ดดินเหนียวเผามวลเบา ได้ผลผลิตมาจากดินเหนียวอ่อน (Soft clay) หรือหินชนวน (Slate) ซึ่งจัดได้ว่าเป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติทางวิศวกรรมต่ำ เมื่อนำมาทำการปั้นเป็นก้อนทรงกลมให้มีลักษณะคล้ายวัสดุมวลรวม (Aggregates) แล้วนำมาผ่านกระบวนการให้ความร้อนสูงภายใต้อุณหภูมิระหว่าง 600-1200 องศาเซลเซียส ทำให้เนื้อดินเหนียวเปลี่ยนสภาพโครงสร้างอย่างถาวรได้ดินเหนียวเผา ซึ่งเรียกว่า เม็ดดินเหนียวเผา (Lightweight expanded clay aggregates) ซึ่งได้ถูกเรียกชื่อทั้งทางด้านการวิชาการและด้านการค้าว่า “เลก้า” (LECA) สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานทางด้านวิศวกรรมโยธาได้มากมาย อาทิเช่น ใช้แทนวัสดุมวลรวมในงานคอนกรีตทำให้คอนกรีตมีน้ำหนักเบาขึ้น การประยุกต์ใช้งานทางด้านวิศวกรรมธรณีเทคนิค เช่น เพื่อลดแรงดันดินด้านข้างที่กระทำต่อกำแพงกันดิน งานลาดดิน ใช้เป็นวัสดุรองพื้นทางสำหรับงานถนน และในปัจจุบันได้นำมาใช้ร่วมกับงานอนุรักษ์สิ่งแวดล้อม เช่น อาคารสีเขียว (Greenhouse) เป็นต้น



รูปที่ 2 ลักษณะผิวนอกและภายในของเม็ดดินเผามวลเบา
(ที่มา : วิชัย, 2523)

4. วิธีดำเนินการวิจัย

4.1 วิธีการเตรียมวัสดุอุปกรณ์

4.1.1 ดินเหนียวอ่อนที่ใช้ศึกษาเป็นดินเหนียวอ่อนกรุงเทพมหานครจำนวน 1 แหล่ง โดยได้มาจากการก่อสร้างทำเสาเข็มเจาะ โดยตัวอย่างดินที่จัดเก็บจะเลือกดินเหนียวที่ระดับตั้งแต่ 2 ถึง 8 เมตร ซึ่งเป็นชั้นของดินเหนียวอ่อน ตัวอย่างทั้งหมดที่จัดเก็บได้ทั้งหมดจะถูกนำไปใส่ในกระสอบแล้วนำไปเก็บยังห้องจัดเก็บวัสดุเพื่อทำการบ่มขึ้นรูปต่อไป

4.1.2 เถ้าลอย (Fly ash) ใช้เถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ อำเภอมะเมาะ จังหวัดลำปาง

4.1.3 น้ำ ใช้ในการทดลองเป็นน้ำประปาที่มีความสะอาด

4.1.4 กำหนดให้อัตราส่วนสารละลายโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) ต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เท่ากับ 0.60 และอัตราส่วนสารละลาย ($\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$) ต่อเถ้าลอย เท่ากับ 0.50, 0.55, 0.60 กำหนดความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เท่ากับ 10, 15 และ 20 โมลาร์ ตามลำดับ

4.1.5 การเตรียมเม็ดดินที่มีรูปร่างเป็นแบบทรงกลม ที่มีขนาดรูปร่าง 10 มิลลิเมตร โดยทำการเผาตัวอย่างดินเหนียวที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส เวลาที่ใช้ในการเผา 30 นาที จะได้เม็ดดินเหนียวเผามวลเบา

4.1.6 แบบหล่อจีโอโพลีเมอร์ใช้แบบหล่อรูปทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร และสูง 20 เซนติเมตร และแบบคานซึ่งจะมีขนาดความกว้าง 7 เซนติเมตร ความสูง 7.5 เซนติเมตร และความยาว 30 เซนติเมตร ตามลำดับ

4.2 ระเบียบวิธีการทดสอบ

4.2.1 การทดสอบกำลังต้านทานแรงอัด โดยกำหนดให้จีโอโพลีเมอร์แข็งตัว ณ อุณหภูมิห้องประมาณ 22-27 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้วทำการบ่มในตู้อบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 วัน แล้วถอดแบบนำไปหุ้มด้วยพลาสติกใส ทำการบ่ม ณ อุณหภูมิห้องประมาณ 22-27 องศาเซลเซียส อีกครั้งหนึ่งเป็นเวลา 7, 14 และ 28 วัน ตามลำดับ เมื่อครบอายุการบ่มดังกล่าวนำตัวอย่างมาวัดขนาด ความสูง และชั่งน้ำหนัก เพื่อหาความหนาแน่น แล้วทำการทดสอบกำลังต้านทานแรงอัดทันที

4.2.2 การทดสอบกำลังรับแรงอัด เพื่อหาค่าโมดูลัสการแตกหัก (Modulus of Rupture) ระบุตามมาตรฐาน ASTM C78/C78M-10 โดยทำการทดสอบเมื่อตัวอย่างมีอายุการบ่มที่ 7, 14 และ 28 วัน ตามลำดับ เช่นเดียวกับกำลังรับแรงอัด



ตัวอย่างเม็ดยัดดินก่อนการเผา



การผสมตัวอย่าง



การทดสอบแรงอัด



การทดสอบแรงดัด

รูปที่ 3 ภาพรวมของวิธีดำเนินการวิจัย

5. ผลและวิจารณ์

5.1 ผลการศึกษาองค์ประกอบทางเคมี

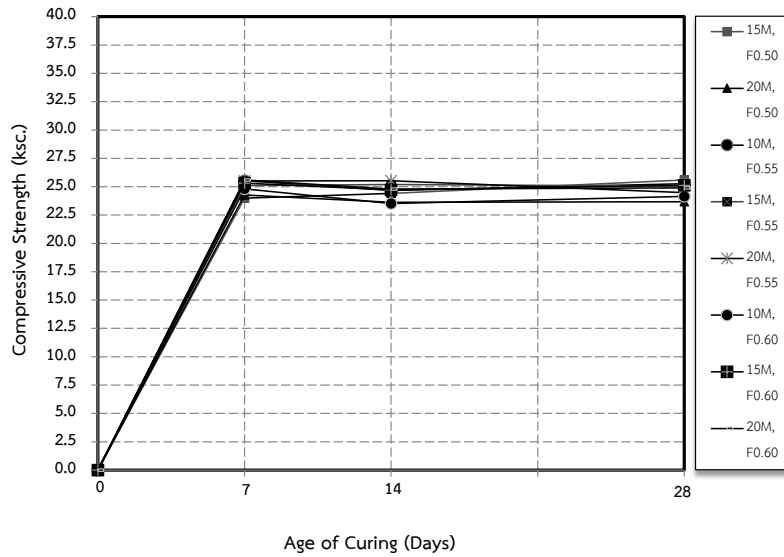
ผลศึกษาวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอย โดยใช้เครื่องมือ X-Ray Fluorescence (XRF) ได้ผลดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยโดย X-Ray Fluorescent

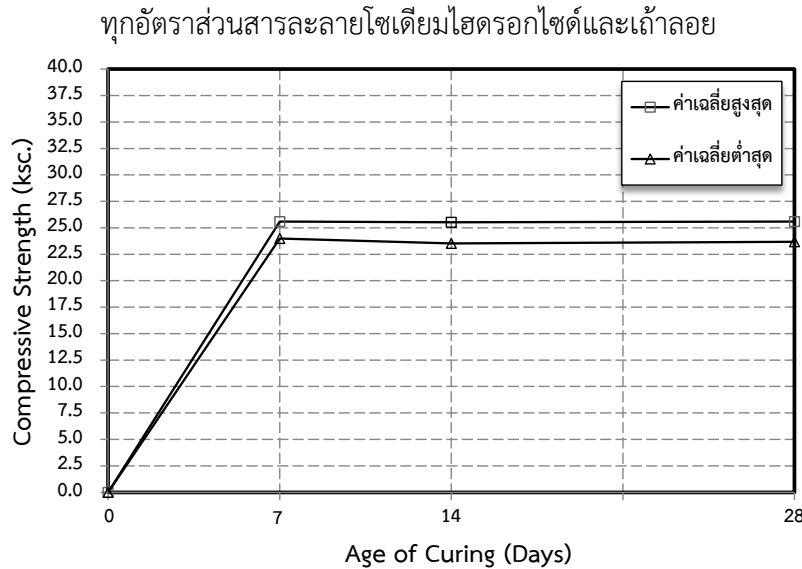
องค์ประกอบทางเคมี	เถ้าลอย (ร้อยละ)
SiO ₂	33.7
Al ₂ O ₃	18.8
Fe ₂ O ₃ + FeO	12.9
CaO	19.3
MgO	2.55
K ₂ O	2.10
Na ₂ O	2.02
SO ₃	7.23

จากตารางที่ 1 ผลการทดสอบองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอย พบว่า มีซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO₂) ร้อยละ 33.7 เป็นส่วนประกอบหลักทางเคมี และมีแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ร้อยละ 19.3 เป็นส่วนประกอบรอง ซึ่งเมื่อรวม SiO₂ + Al₂O₃ + Fe₂O₃ มีค่าร้อยละ 65.4 โดยน้ำหนัก พบว่า เถ้าลอยจัดอยู่ใน Class C ตามมาตรฐาน ASTM C618

5.2 ผลทดสอบกำลังรับแรงอัด โดยพิจารณาอิทธิพลของอายุการบ่มที่ส่งผลต่อกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลีเมอร์ จากเม็ดยัดดินเหนียวเฝ้ามวลเบา ที่อัตราส่วนสารละลายต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 4 และ 5 ตามลำดับ



รูปที่ 4 ค่ากำลังรับแรงอัดกับอายุการบ่มของจีโอโพลีเมอร์จากเม็ดดินเหนียวผสมมวลเบา



รูปที่ 5 ค่ากำลังรับแรงอัดเฉลี่ยสูงสุดและต่ำสุดกับอายุการบ่มทุกอัตราส่วนสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และเถ้าลอย

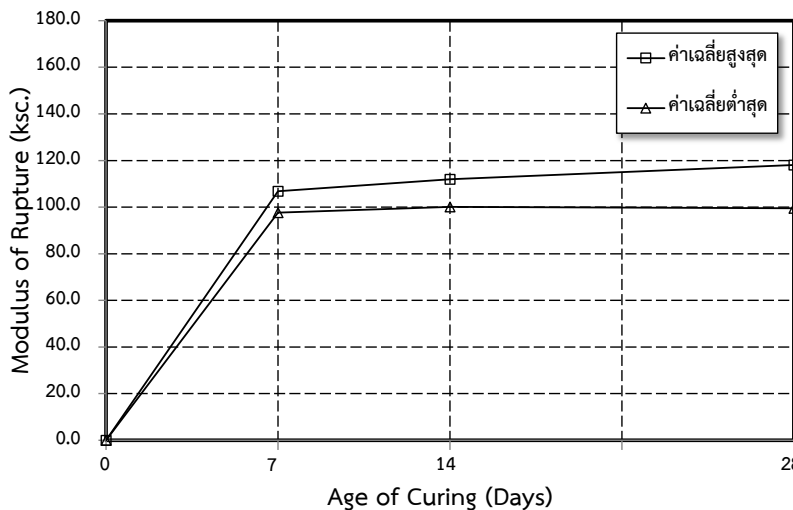
จากรูปที่ 4 และ 5 พบว่า อายุการบ่มที่เพิ่มขึ้นให้ค่ากำลังรับแรงอัดที่ใกล้เคียงกัน โดยที่อัตราส่วนผสม 10, 15 และ 20 โมลาร์ เถ้าลอยที่ 0.50, 0.55 และ 0.60 ให้ค่าเฉลี่ยกำลังรับแรงอัดเท่ากับ 23.99-25.59, 23.52-25.52 และ 23.67-25.60 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และค่ากำลังรับแรงอัดเฉลี่ยสูงสุดและต่ำสุดกับอายุการบ่มทุกอัตราส่วนสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และเถ้าลอย พบว่า ให้ค่ากำลังรับแรงอัดเฉลี่ยสูงสุดและต่ำสุดต่างกันร้อยละ 6.25, 7.84 และ 7.54 ตามลำดับ

5.3 ผลทดสอบกำลังรับแรงดัด โดยพิจารณาอิทธิพลของอายุการบ่มที่ส่งผลต่อค่าโมดูลัสการแตกร้าวของจีโอโพลีเมอร์จากเม็ดดินเหนียวผสมมวลเบา ที่อัตราส่วนสารละลายต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 6 และ 7 ตามลำดับ



รูปที่ 6 ค่าโมดูลัสการแตกร้าวกับอายุการบ่มของจีโอโพลีเมอร์จากเม็ดดินเหนียวเผามวลเบา

ทุกอัตราส่วนสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และเถ้าลอย



รูปที่ 7 ค่าโมดูลัสการแตกร้าวเฉลี่ยสูงสุดและต่ำสุดกับอายุการบ่มทุกอัตราส่วนสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ และเถ้าลอย

จากรูปที่ 6 และ 7 พบว่า ที่อายุการบ่มที่เพิ่มขึ้นให้ค่าโมดูลัสการแตกร้าวที่ใกล้เคียงกัน โดยที่อัตราส่วนผสม 10, 15 และ 20 โมลาร์ เถ้าลอยที่ 0.50, 0.55 และ 0.60 ให้ค่าเฉลี่ยโมดูลัสการแตกร้าวเท่ากับ 97.66-106.78 , 100.10-111.97 และ 99.49-118.10 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และค่าโมดูลัสการแตกร้าวเฉลี่ยสูงสุดและต่ำสุด กับอายุการบ่มทุกอัตราส่วนสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และเถ้าลอย พบว่า ให้ค่าค่าโมดูลัสการแตกร้าวเฉลี่ยสูงสุด และต่ำสุดต่างกันร้อยละ 8.54 , 10.60 และ 15.76 ตามลำดับ

5.4 รูปแบบการวิบัติของตัวอย่างภายใต้แรงอัดและแรงดัด



(ก) แรงอัด

(ข) แรงดัด

รูปที่ 8 การวิบัติของตัวอย่างภายใต้แรงอัดและแรงดัด

6. สรุปผล

6.1 กำลังรับแรงอัดเฉลี่ยให้ค่าเฉลี่ยกำลังรับแรงอัดเฉลี่ย 23.99-25.59 , 23.52-25.52 และ 23.67-25.60 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และกำลังรับแรงดัดเฉลี่ยให้ค่าเฉลี่ยโมดูลัสแตกร้าวกเท่ากับ 97.66-106.78 , 100.10-111.97 และ 99.49-118.10 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ที่อายุการบ่ม 7 , 14 และ 28 วัน ตามลำดับ

6.2 ให้ค่าเฉลี่ยกำลังรับแรงอัดที่ค่าสูงสุดและต่ำสุดที่ร้อยละ 6.25, 7.84 และ 7.54 ส่วนกำลังรับแรงดัดเฉลี่ยที่ให้ค่าเฉลี่ยโมดูลัสแตกร้าวกที่ค่าสูงสุดและต่ำสุดที่ร้อยละ 8.54, 10.60 และ 15.76 ตามลำดับ

6.3 กำลังรับแรงอัดเฉลี่ยและกำลังรับแรงดัดเฉลี่ยที่เหมาะสมและสามารถนำไปใช้งาน ที่อัตราส่วนผสมโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ 15 โมลาร์ ที่อัตราส่วนสารละลายต่อแก้วลอยที่ 0.50 และ ที่อัตราส่วนผสมโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ 10 โมลาร์ ที่อัตราส่วนสารละลายต่อแก้วลอยที่ 0.55 โดยให้ค่าสูงสุดเท่ากับ 25.60 และ 118.10 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ

7. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ พื้นที่ศาลายา ที่ได้ให้การสนับสนุนเงินทุนวิจัยประจำปีงบประมาณ 2558 และสถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ พื้นที่ศาลายา และมหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์ที่สนับสนุนพื้นที่สำหรับงานวิจัย นายณัฐกฤษฏ์ ลิ้มสกุล นางสาวนิภาพร วิทยาคม นายวิวัฒน์ ปานอ่อน นายอิทธิ เกิดพุดม และนายเอกสุวัชร มานะชัยทรัพย์ นักศึกษาด้านวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์ ที่ช่วยทดสอบและรวบรวมข้อมูลงานวิจัยในครั้งนี้

รวมทั้งเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการวัสดุศาสตร์ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเอเชีย
อาคเนย์ ที่ให้ความร่วมมือในการทำวิจัยสำเร็จลุล่วง

บรรณานุกรม

- [1] ASTM C 331-89, Standard Specification for Lightweight Aggregates for Concrete Masonry Units, American Society for Testing and Materials, 1916, Race Street Philadelphia, PA 19103.
- [2] Worrell, E., Price, L., Martin, N., Hendriks, C., Meida, L.O., 2001, “Carbon dioxide emissions from the global cement industry,” Annual Review of Energy and the Environment 26, 303–329.
- [3] Neville, A.M., 1995, Properties of Concrete, Englewood Cliffs, NJ, Prentice.
- [4] Schaefer, V.R., Wang, K., Sulieman, M.T., and Kevern, J.T., 2006, “Mix Design Development for Pervious Concrete in Cold Weather Climates,” A Report from the National Concrete Pavement Technology Center (CP Tech Center), Ames, IA: Iowa State University.
- [5] American Concrete Institute (ACI), 2010, ACI 522R-10: Report on Pervious Concrete, Detroit, USA.
- [6] Japanese Standards Association, 1997, JIS R 5201: Physical testing methods of cement, Tokyo, Japan.
- [7] Haselbach, L.M., Valavala, S., and Montes, F., 2006, “Permeability Predictions for Sand-Clogged Portland Cement Pervious Concrete Pavement Systems,” Journal of Environmental Management, 81., 42–49.
- [8] Bentz, D.P., 2008. “Virtual Pervious Concrete: Microstructure Percolation and Permeability,” ACI Materials Journal, 105 (3), 297-301.
- [9] Scholz, M., and Grabowiecki, P., 2007, Review of permeable pavement systems, Building and Environment, 42., 3830–3836.
- [10] <http://www.geopolymer.org/science/portland-cement-chemistry-vs-geopolymer-chemistry>. Portland Cement Chemistry vs. Geopolymer Chemistry, [Posted by: Editor updated on May 11, 2014]
- [11] วิชัย สัจจพรปทานสกุล, 2523, “การผลิตและหาคุณสมบัติทางด้านวิศวกรรมของเม็ดดินเผาซึ่งทำจากดินเหนียว กรุงเทพฯ,” วิทยานิพนธ์ปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ : 115 หน้า