

ผลกระทบของอุณหภูมิและระยะเวลาการหน่วงสำหรับการบ่มต่อกำลังอัด ของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ผสมเถ้าถ่านหินบด

Effect of Temperature and Delay Time for Curing on Compressive Strength of Geopolymer Mortar Ground Fly ash

นิติธร สีมะเมือง¹ สำเรียง รักซ้อน^{1*} และ ปริญญ์ จินดาประเสริฐ²

Nititron Simaung¹, Sumrereng Rukzon^{1*} and Prinya Chindaprasit²

Received: 12 March 2020, Revised: 3 July 2020, Accepted: 16 September 2020

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาศักยภาพในการพัฒนาเถ้าถ่านหินบดเป็นวัสดุจีโอโพลิเมอร์ ส่วนผสมของตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ใช้ค่าสารละลายต่อเถ้าถ่านหินบดคงที่เพื่อควบคุมการทดสอบค่าการไหลแต่ศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิ การบ่ม ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) อัตราส่วนโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) ต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และการหน่วงระยะเวลาสำหรับบ่มที่มีผลต่อกำลังอัด ผลทดสอบพบว่าความสามารถทำงานได้ของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์มีค่าการไหลแผ่อยู่ระหว่างร้อยละ 107-113 โดยขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$) และความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) จีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์เถ้าถ่านหินบดละเอียดมีกำลังอัดที่สูงด้วยความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ใช้เท่ากับ 15 โมลาร์ (15Molar, 15M) และอัตราส่วนโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่เหมาะสมเท่ากับ 1.50 โดยน้ำหนัก การใช้เถ้าถ่านหินบดเป็นส่วนผสมจีโอโพลิเมอร์ให้ค่ากำลังอัดที่ดีด้วยการนำตัวอย่างทิ้งไว้ก่อนนำเข้าตู้อบเป็นเวลา 1 ชั่วโมง (Delay time) และอุณหภูมิการบ่มที่เหมาะสมในการบ่ม คือ 65 องศาเซลเซียส ในระยะเวลาการบ่ม 1 วัน

คำสำคัญ: กำลังอัด, การหน่วงเวลาบ่ม, เถ้าถ่านหินบด, จีโอโพลิเมอร์, มอร์ตาร์, ปอชโซลาน

¹ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ 96 ถนนพุทธมณฑลสาย 5 ตำบลสาละวิน อำเภอพุทธมณฑล จังหวัดนครปฐม 73170

¹ Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Rattanakosin, 96 Phuttamonthon Sai 5 Road, Salaya, Phuttamonthon, Nakhonpatom 73170, Thailand.

² ศูนย์วิจัยและพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานอย่างยั่งยืน ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น 123 หมู่ 16 ถนนมิตรภาพ ตำบลในเมือง อำเภอเมือง จังหวัดขอนแก่น 40002

² Sustainable Infrastructure Research and Development Center, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Khon Kaen University, 123 Moo 16 Mitraphap Road, Nai-Muang, Muang, Khonkaen 40002, Thailand.

* ผู้รับผิดชอบประสานงาน ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์ (Corresponding author, e-mail): sumrereng.ruk@rmutr.ac.th

ABSTRACT

This research examines the potential in developing ground fly ash as a geopolymer material. Geopolymer mortar ground fly ash with constant liquid to ash ratio was used for testing radiant flow value. Effect of temperature, delay time of curing, concentration of sodium hydroxide (NaOH) and sodium silicate (Na_2SiO_3) to sodium hydroxide (NaOH) ratio on compressive strength were investigated. Test results showed that the workable flow of geopolymer mortar was in the range of 107-113% and was dependent on the ratio by mass of sodium silicate to NaOH and concentration of NaOH. The geopolymer mortar ground fly ash with high strength was obtained with concentration of NaOH of 15M (15Molar, 15M) with the sodium silicate to NaOH ratio by weight of 1.5. Using ground fly ash as a geopolymer mixture, the compressive strength was gained by leaving the sample for 1 h (delay time) before being put into the oven, and the optimum curing temperature was 65 °C in 1 day curing period.

Key words: compressive strength, delay time curing, ground fly ash, geopolymer, mortar, pozzolan

บทนำ

ในงานวิจัยด้านคอนกรีตและวัสดุที่ใช้ในงานคอนกรีต พบว่านักวิจัยพยายามศึกษาวิธีการลดปริมาณการใช้ปูนซีเมนต์ลง ทั้งนี้เพื่อลดต้นทุนการผลิตโดยใช้วัสดุปอซโซลานที่เป็นของเสียจากผลพลอยได้ในโรงงานอุตสาหกรรมและเกษตรกรรม มาใช้แทนปูนซีเมนต์เพื่อผลิตมอร์ตาร์และคอนกรีต (Posi *et al.*, 2019; Chindaprasirt *et al.*, 2007; Chindaprasirt *et al.*, 2008; Chindaprasirt and Rukzon, 2015; Rukzon and Chindaprasirt, 2011; Rukzon and Chindaprasirt, 2018) โดยที่ผ่านมามีการพยายามใช้วัสดุประสานที่ไม่จำเป็นต้องใช้ปูนซีเมนต์เพื่อผลิตคอนกรีตและมอร์ตาร์ วัสดุดังกล่าว คือ วัสดุจีโอโพลิเมอร์ (Chindaprasirt *et al.*, 2007; Guo *et al.*, 2010; Rukzon and Chindaprasirt, 2014; Sukmak *et al.*, 2013; Sathonsaopark *et al.*, 2009; Rovnanik, 2010) การผลิตจีโอโพลิเมอร์ทำโดยการนำสารละลายอัลคาไลที่มีความเข้มข้นสูงมากระตุ้นสารซิลิกาออกไซด์ที่มีอยู่ในวัสดุปอซโซลาน ส่งผลให้ได้

สารประกอบชนิดใหม่ที่มีสมบัติเชื่อมประสานได้ (Chindaprasirt *et al.*, 2019a; Guo *et al.*, 2010; Davidovits and James, 1999; Chindaprasirt *et al.*, 2007)

ในงานวิจัยที่ผ่านมา พบว่า มีการนำเถาถ่านหิน ถ่านกัมไธ และวัสดุปอซโซลานอื่นๆ ใช้เป็นสารตั้งต้นในการสังเคราะห์จีโอโพลิเมอร์ (Chindaprasirt *et al.*, 2007; Guo *et al.*, 2010; Rukzon and Chindaprasirt, 2014; Sukmak *et al.*, 2013; Sathonsaopark *et al.*, 2009; Rovnanik, 2010; Davidovits and James, 1999) เช่น ในงานวิจัยบางชิ้นศึกษาผลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) อัตราส่วนโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) ต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และอุณหภูมิการบ่มที่แตกต่างกันต่อกำลังอัดของตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์โดยใช้วัสดุปอซโซลานคือ เถ้าขานอ้อย (Rukzon and Chindaprasirt, 2014) ที่ผ่านมามีงานวิจัยไม่มากนักที่พิจารณาถึงผลของการหน่วงเวลาการบ่ม หรือ Delay time (Chindaprasirt *et al.*, 2007) ดังนั้น ในการศึกษาครั้งนี้ มีวัตถุประสงค์

เพื่อพัฒนาเถ้านหินบดเพื่อใช้เป็นวัสดุจีโอโพลิเมอร์ในการผลิตมอร์ตาร์ โดยการศึกษาความสามารถทำงานได้ของ จีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ นอกจากนั้นได้ศึกษาผลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ อัตราส่วนของโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ อิทธิพลของอุณหภูมิในการบ่ม ผลของการหน่วงระยะเวลา (Delay time) ก่อนเข้าคูบ และนำตัวอย่างมอร์ตาร์เข้าคูบทันที ทั้งนี้เพื่อศึกษากำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ ต่อไป

วิธีดำเนินการวิจัย

1. การเตรียมตัวอย่าง

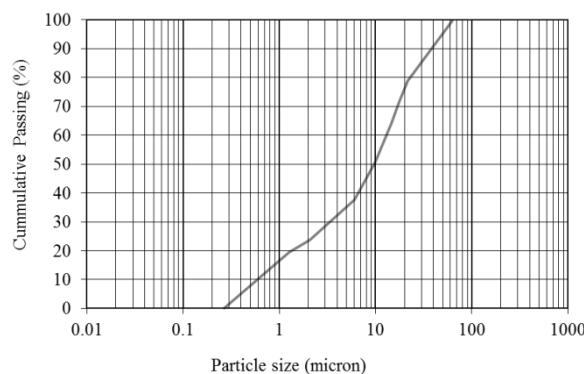
1.1 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

1.1.1 เถ้านหิน

เถ้านหินได้จากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง โดยการศึกษานี้ใช้เถ้านหินบดให้มีปริมาณข้างบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 ร้อยละ 10-12 โดยน้ำหนัก และมีความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.34 ดังแสดงในตารางที่ 1 ส่วนในภาพที่ 1 แสดงขนาดการกระจายตัวของเถ้านหิน พบว่า เถ้านหินบดมีขนาดการกระจายตัวเท่ากับ 10 ไมครอน โดยวัดค่าที่ d_{50} ในการศึกษาครั้งนี้ใช้เถ้านหินบดที่มีความละเอียด (พื้นที่ผิวจำเพาะ) โดยวิธีของเบลนเท่ากับ 3,600 ตารางเซนติเมตรต่อกรัม

ตารางที่ 1 คุณสมบัติของเถ้านหิน

รายการทดสอบ	คุณสมบัติของเถ้านหิน
ปริมาณสัดส่วนร้อยละข้างบนตะแกรงมาตรฐาน เบอร์ 325 (%)	10-12
ความถ่วงจำเพาะ	2.96
ความละเอียดโดยวิธีของเบลน (ตารางเซนติเมตรต่อกรัม)	3,600
ขนาดการกระจายตัว (ไมครอน)	10



ภาพที่ 1 การกระจายตัวของเถ้านหินบด

1.1.2 มวลรวมละเอียด

มวลรวมละเอียด ใช้ทรายคัดพิเศษเพื่อผลของการศึกษา ทั้งนี้อยู่ในสภาพอิมตัวผิวแห้งซึ่งมีอนุภาคผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 16 ที่มีค่าโมดูลัส

ความละเอียด (Fineness modulus; FM) เท่ากับ 2.50 ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C136 (ASTM, 2005a) มีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.25 และค่าการดูดความชื้นเท่ากับร้อยละ 4-6

1.1.3 สารละลายโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3)

ในการศึกษานี้ใช้สารละลายที่ใช้ในการผสม จีโอโพลิเมอร์ และควบคุมชนิดและคุณภาพของ สารละลายดังกล่าวให้เป็นประเภทเดียวกันเพื่อผลการวิเคราะห์ สารละลายที่ใช้ในการกระตุ้นการเกิดปฏิกิริยาด้านเคมี ในที่นี้ คือ สารละลายโซเดียมซิลิเกต

1.1.4 สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH)

ในการศึกษานี้ใช้ของเหลวหรือสารละลาย โซเดียมไฮดรอกไซด์ โดยใช้เป็นเกรดห่อหุ้มปฏิบัติการ เพื่อเป็นสารละลายในการกระตุ้นการเกิดปฏิกิริยาร่วมกับสารละลายโซเดียมซิลิเกต

1.1.5 น้ำกลั่น

การศึกษานี้ป้องกันสิ่งเจือปนของสิ่งสกปรก และสารละลายประเภทอื่นๆ ที่อาจส่งผลกระทบต่อ การวิเคราะห์ ดังนั้น ในการผสมจีโอโพลิเมอร์ของ งานวิจัยนี้จึงใช้เป็นน้ำกลั่น

2. การเตรียมตัวอย่างการทดสอบ

ส่วนผสมตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ใช้ อัตราส่วนเถ้าถ่านหินต่อทราย เท่ากับ 1:2.75 และ อัตราส่วนสารละลายต่อวัสดุจีโอโพลิเมอร์ ใช้เท่ากับ 0.62 โดยควบคุมค่าการไหลแผ่ด้วยโต๊ะมาตรฐาน ทดสอบการไหล (Flow table) เท่ากับร้อยละ 105-115 การใช้อัตราส่วนสารละลายต่อวัสดุจีโอโพลิเมอร์ ใช้ เท่ากับ 0.62 เท่ากันในทุกส่วนผสม เนื่องจากต้องการ ควบคุมความสามารถในการทำงานได้ตามมาตรฐาน ASTM C 230-C 230M (ASTM , 2005b) เพื่อใช้ในการ เปรียบเทียบผลการทดสอบ และเมื่อดำเนินการ ทดลองส่วนผสมด้วยอัตราส่วนสารละลายต่อวัสดุ จีโอโพลิเมอร์ที่ค่าต่ำกว่า 0.62 และสูงกว่า 0.62 พบว่า ไม่สามารถควบคุมค่าการไหลแผ่ให้อยู่ในช่วง ร้อย ละ 105-115 ได้ ดังนั้นจึงใช้อัตราส่วนสารละลายต่อ วัสดุจีโอโพลิเมอร์ ใช้เท่ากับ 0.62 สำหรับการ ควบคุมค่าการไหลแผ่ โดยงานวิจัยที่ผ่านมาใช้ค่าการ

ไหลแผ่ควบคุมความสามารถทำงานได้ (Chindaprasirt *et al.*, 2007) การศึกษานี้ใช้สารละลาย โซเดียม ไฮดรอกไซด์ ในปริมาณความเข้มข้นเท่ากับ 10 โมลาร์ (10M) และ 15 โมลาร์ (15M) นอกจากนั้น ในการศึกษานี้ใช้อัตราส่วนของ $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ เท่ากับ 0.50, 1.00, 1.50 ตามลำดับ การใช้สารละลาย โซเดียมไฮดรอกไซด์ ในปริมาณความเข้มข้นเท่ากับ 10 โมลาร์ (10M) และ 15 โมลาร์ (15M) และ อัตราส่วนของ $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ เท่ากับ 0.50, 1.00, 1.50 นั้น เนื่องจาก พบว่า งานวิจัยที่ผ่านมา (Chindaprasirt *et al.*, 2007) ได้ศึกษาการใช้เถ้าถ่าน หินเป็นวัสดุจีโอโพลิเมอร์ และใช้สารละลาย โซเดียมไฮดรอกไซด์ ในปริมาณความเข้มข้นเท่ากับ 10, 15 และ 20 โมลาร์ ด้วยอัตราส่วนของ $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ เท่ากับ 0.67, 1.00, 1.50 และ 3.00 โดยที่อัตราส่วนของ $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ เท่ากับ 1.00 กำลังอัดมีแนวโน้มสูงขึ้น ตามปริมาณความเข้มข้น ของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่สูงขึ้น ขณะที่เมื่อใช้ อัตราส่วนของ $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ เท่ากับ 1.50 พบว่า กำลังอัดมีแนวโน้มลดลงเมื่อใช้ปริมาณความเข้มข้นของ โซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 15 โมลาร์ ดังนั้น งานวิจัย จึงพัฒนาการทดสอบ ด้วยการใส่สารละลาย โซเดียมไฮดรอกไซด์ ในปริมาณความเข้มข้นเท่ากับ 10 โมลาร์ (10M) และ 15 โมลาร์ (15M) และเพิ่มการ ใช้อัตราส่วนของ $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ เท่ากับ 0.50, 1.00, 1.50 เพื่อใช้เปรียบเทียบผลการทดสอบ ต่อไป

3. วิธีการทดสอบ

3.1 การทดสอบกำลังอัด

การทดสอบกำลังอัดใช้แบบหล่อขนาด $5 \times 5 \times 5$ เซนติเมตร หลังจากหล่อจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ หุ้ม ด้วยพลาสติกกันความชื้น จากนั้นดำเนินการบ่ม ตัวอย่างในตู้อบ โดยทดสอบ 2 กรณี ดังนี้

1) กรณีที่ 1 หน่วงเวลาการทดสอบ

กรณีนี้ทดสอบโดย หลังจากหล่อตัวอย่างและหุ้มด้วยพลาสติกกันความชื้นแล้ว ให้พักตัวอย่างไว้ในอุณหภูมิห้อง 25 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ก่อนเข้าสู่อบ (Delay time) ต่อเนื่องอีก 1 วัน เนื่องจาก ต้องการให้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ มีระยะเวลาในการชะละลายเอาซิลิกาและอลูมินาจากเถาถ่านหินบดออกมาได้ อย่างไรก็ตาม งานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า การหน่วงเวลามากกว่า 1 ชั่วโมง ไม่มีผลต่อกำลังอัด (Chindaprasirt *et al.*, 2007) ดังนั้น เพื่อเป็นการประหยัดพลังงานในการบ่ม จึงเลือกใช้เวลาการหน่วงเท่ากับ 1 ชั่วโมง

2) กรณีที่ 2 นำตัวอย่างเข้าสู่อบทันที

กรณีนี้ทดสอบโดย หลังจากหล่อตัวอย่างและหุ้มด้วยพลาสติกกันความชื้นแล้ว นำตัวอย่างเข้าสู่อบทันทีต่อเนื่องอีก 1 วัน จากนั้น เปรียบเทียบการบ่มในกรณีที่ 1

การทดสอบทั้ง 2 กรณี บ่มในตู้อบที่อุณหภูมิที่แตกต่างกัน คือ 45, 55 และ 65 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 วัน เพื่อลดพลังงานในการบ่ม จากนั้นนำออกจากตู้อบและทำการทดสอบกำลังอัด ต่อไป

3.2 สัญลักษณ์ตัวอย่าง

ในส่วนของสัญลักษณ์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ได้สรุปไว้ในตารางที่ 2 เช่น ความเข้มข้นของ NaOH และอัตราส่วนของ $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ เป็นต้น

ตารางที่ 2 สัญลักษณ์ตัวอย่างที่ใช้ศึกษา

ตัวอย่างมอร์ตาร์	สัญลักษณ์
10M-0.50Si/Na	ความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์ 10 โมลาร์-อัตราส่วนโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.50
10M-1.0Si/Na	ความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์ 10 โมลาร์-อัตราส่วนโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ 1.00
10M-1.5Si/Na	ความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์ 10 โมลาร์-อัตราส่วนโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ 1.50
15M-0.5Si/Na	ความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์ 15 โมลาร์-อัตราส่วนโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.50
15M-1.0Si/Na	ความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์ 15 โมลาร์-อัตราส่วนโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ 1.00
15M-1.5Si/Na	ความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์ 15 โมลาร์-อัตราส่วนโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ 1.50

ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

1. ความสามารถทำงานได้ ของมอร์ตาร์

การทดสอบความสามารถในการทำงานได้ของมอร์ตาร์ พบว่า ในทุกส่วนผสมมีค่าการไหลแผ่เท่ากับร้อยละ 107-113 ในการศึกษาครั้งนี้ ส่วนผสม

มอร์ตาร์ไม่ต้องการน้ำเพิ่มเติม เนื่องจากเถาถ่านหินมีขนาดอนุภาคกลมตัน คล้ายกับงานวิจัยที่ผ่านมา (Chindaprasirt *et al.*, 2007; Rukzon and Chindaprasirt, 2018; Sathonsaopark *et al.*, 2009) โดยพบว่า อัตราส่วนของสารละลายต่อเถาถ่านหินมีค่าคงที่เท่ากับ 0.62 สำหรับส่วนผสมของจีโอโพลิ

เมอร์มอร์ตาร์ ทั้งนี้ เมื่อดำเนินการทดลองส่วนผสมด้วยอัตราส่วนสารละลายต่อวัสดุอีโพลิเมอร์ที่ต่ำกว่า 0.62 และสูงกว่า 0.62 พบว่า ไม่สามารถควบคุมค่าการไหลแผ่ให้อยู่ในช่วง ร้อยละ 105-115

ได้ ดังนั้นจึงใช้อัตราส่วนสารละลายต่อวัสดุอีโพลิเมอร์ ใช้เท่ากับ 0.62 สำหรับการควบคุมค่าการไหลแผ่ ดังกล่าว การวัดค่าการไหลแผ่ แสดงไว้ในภาพที่ 2



ภาพที่ 2 การวัดค่าการไหลแผ่ของอีโพลิเมอร์เข้าถ่านหินบด

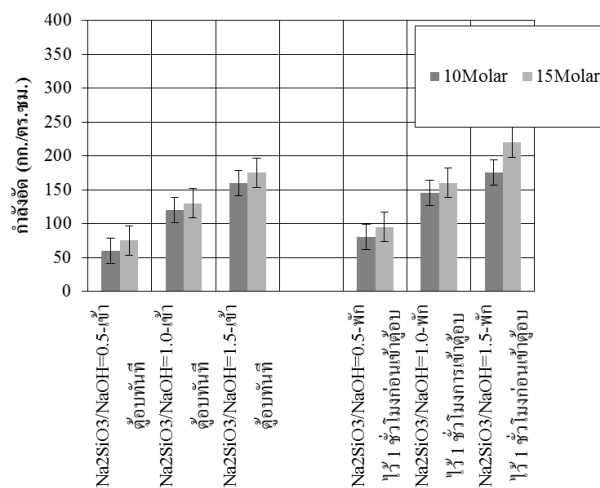
2. กำลังอัดของมอร์ตาร์

2.1 ผลของความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ต่อกำลังอัด

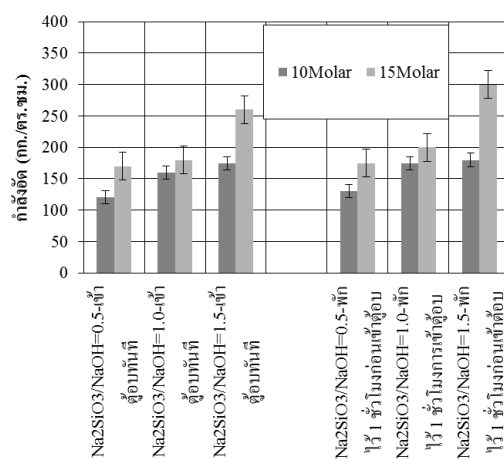
ในภาพที่ 3 (ก) (ข) และ (ค) แสดงผลของความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อกำลังอัดที่อุณหภูมิการบ่ม 45, 55 และ 65 องศาเซลเซียสตามลำดับ

ผลการทดสอบครั้งนี้แสดงให้เห็นว่า ตัวอย่างอีโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่มีปริมาณความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 15M (15Molar) มีกำลังอัดสูงกว่าตัวอย่างอีโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่มีปริมาณความเข้มข้นของสารละลาย

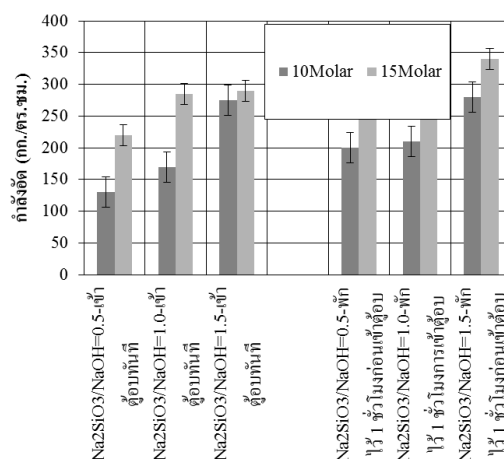
โซเดียมไฮดรอกไซด์ 10M (10Molar) เนื่องจากสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นสูงมีความสามารถในการชะละลายสารซิลิกาออกไซด์และอะลูมินาออกไซด์จากถ่านหินบดได้มากขึ้น ส่งผลทำให้เกิดปฏิกิริยาอีโพลิเมอร์ไรเซชันได้ดีกว่าสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นต่ำ (Chindaprasirt *et al.*, 2007) ผลการทดสอบนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Chindaprasirt *et al.* (2019a), Chindaprasirt *et al.* (2019b), Chindaprasirt *et al.* (2007), Sathonsaopark *et al.* (2009) และ Davidovits and James (1999)



(ก) บ่มอุณหภูมิ 45 °C (องศาเซลเซียส)



(ข) บ่มอุณหภูมิ 55 °C (องศาเซลเซียส)



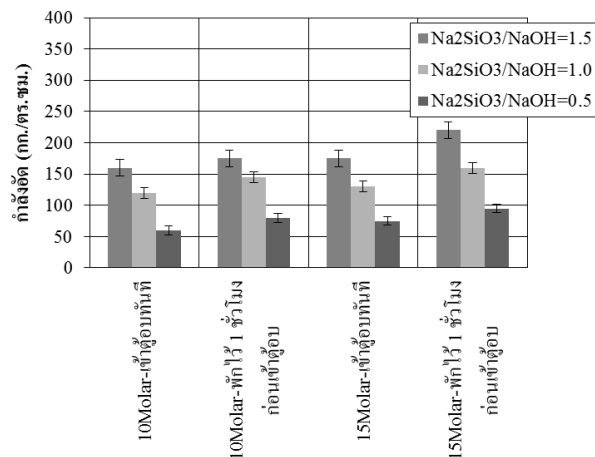
(ค) บ่มอุณหภูมิ 65 °C (องศาเซลเซียส)

ภาพที่ 3 ผลของปริมาณความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อกำลัังอัดของมอร์ตาร์ ที่ 10 Molar (10M) และ 15 Molar (15M) บ่มที่อุณหภูมิ (ก) 45 °C, (ข) 55 °C และ (ค) 65 °C (องศาเซลเซียส)

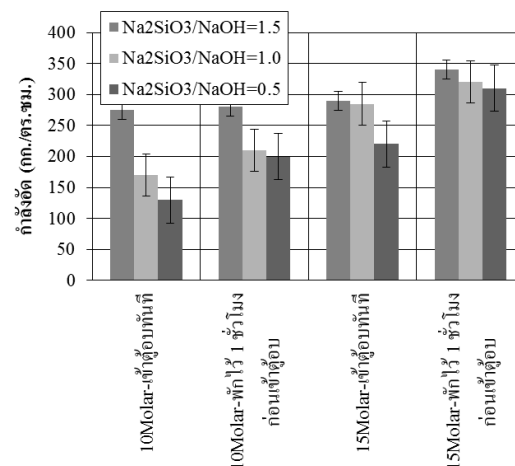
2.2 ผลของ $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ ต่อค่าลึงอัด

ในภาพที่ 4 (ก), (ข) และ (ค) แสดงผลของอัตราส่วน $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ ต่อค่าลึงอัดที่อุณหภูมิการบ่ม 45, 55 และ 65 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ผลการทดสอบพบว่า ค่าลึงอัดของจีโอโพลิเมอร์มีค่าสูงขึ้นตามอัตราส่วนของ $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ ที่เพิ่มขึ้น กล่าวคือ อัตราส่วนของ $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ เท่ากับ 1.50 มีค่าลึงอัดสูงกว่า 1.00 และ 0.50 เนื่องจากปริมาณ Na_2SiO_3 มีผลต่อค่าลึงอัด อัตราส่วนที่เพิ่มขึ้นของ $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ ส่งผลให้ปริมาณ Na_2SiO_3 สูงขึ้น ทำให้ค่าลึงอัดของจีโอโพลิเมอร์สูงตามไปด้วย ผลการ

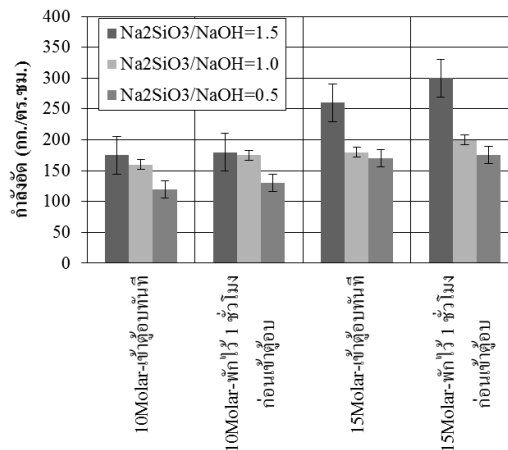
ทดสอบนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Chindaprasirt *et al.* (2019b), Chindaprasirt *et al.* (2007), Rukzon and Chindaprasirt (2018), Sathonsaopark *et al.* (2009) และ Davidovits and James (1999) ในส่วนของซิลิกาและอลูมินา ที่มีอยู่ในเต้าถ่านหินบด พบว่า เมื่อปริมาณสัดส่วนสารละลายโซเดียม ซิลิเกตที่เพิ่มขึ้นส่งผลทำให้โครงสร้างของซิลิเกตที่ได้จากการชะละลายซิลิกาและอลูมินาด้วยสารละลาย NaOH มีการแข็งตัวอย่างรวดเร็ว ส่งผลให้ค่าลึงอัดเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนของ $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ ที่เพิ่มขึ้น



(ก) บ่มอุณหภูมิ 45 °C (องศาเซลเซียส)



(ข) บ่มอุณหภูมิ 55 °C (องศาเซลเซียส)



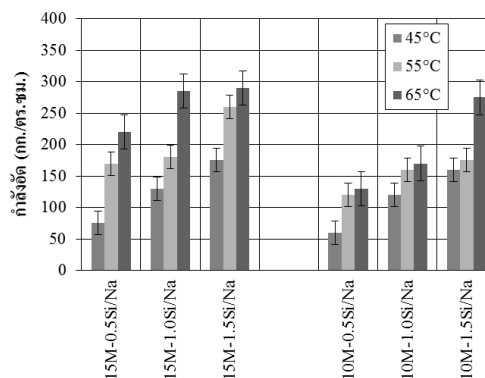
(ค) ปุ่มอุณหภูมิ 65 °C (องศาเซลเซียส)

ภาพที่ 4 ผลของอัตราส่วนของ $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ ที่อุณหภูมิการบ่ม (ก) 45 °C, (ข) 55 °C และ (ค) 65 °C (องศาเซลเซียส) ต่อกำลังอัดของมอร์ต้าร์

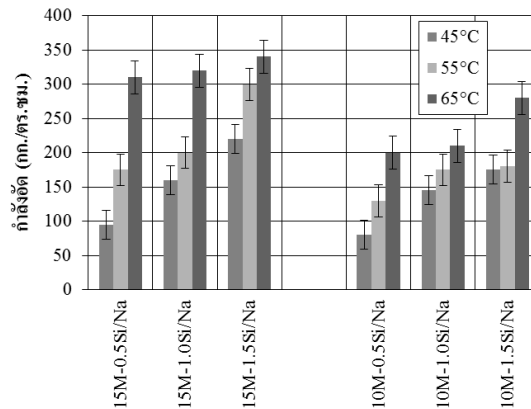
2.3 ผลของอุณหภูมิต่อกำลังอัด

ภาพที่ 5 แสดงผลของอุณหภูมิการบ่มที่ 45, 55 และ 65 องศาเซลเซียส โดยภาพที่ 5 (ก) คือการนำตัวอย่างเข้าตูบทันที และ 5 (ข) คือพักตัวอย่างทิ้งไว้ 1 ชั่วโมงก่อนเข้าตูบ (Delay time) ผลการทดสอบพบว่า จีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ที่มีการบ่มในตูบที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส มีค่ากำลังรับแรงอัดสูงที่สุด เนื่องจาก หากอุณหภูมิต่ำส่งผลให้ตัวอย่างมีความชื้นที่อยู่ภายในมอร์ต้าร์มีค่าสูง เมื่อทำการทดสอบพบว่าเกิดการวิบัติแบบไม่สมบูรณ์ กล่าวคือเกิดการวิบัติที่ผิวภายนอกโดยที่แกนกลางยังมี

ความชื้นอยู่ซึ่งทำให้ได้กำลังต่ำสอดคล้องกับงานวิจัยของ Chindaprasirt *et al.* (2007), Guo *et al.* (2010), Rukzon and Chindaprasirt (2014), Sathonsaopark *et al.* (2009) และ Davidovits and James (1999) งานวิจัยนี้พบว่า ความร้อนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาทำให้จีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์สามารถพัฒนากำลังอัดได้ดีขึ้น อย่างไรก็ตาม งานวิจัยของ Chindaprasirt *et al.* (2007) ได้ศึกษาจีโอโพลิเมอร์เถาถ่านหิน พบว่า เมื่อใช้อุณหภูมิการบ่มที่ 90 องศาเซลเซียส ส่งผลให้กำลังอัดมีแนวโน้มลดลง



(ก) ตัวอย่างเข้าตูบทันที



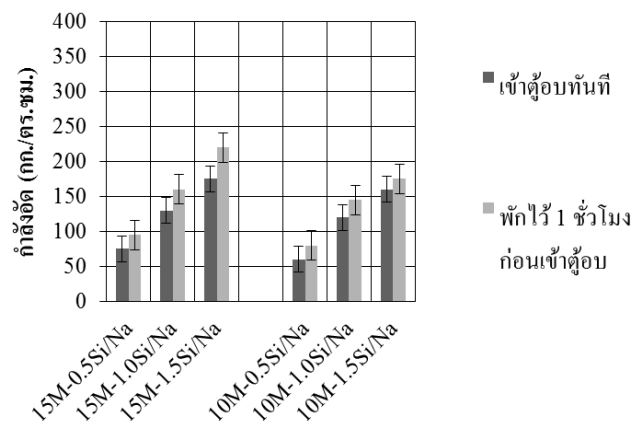
(ข) ตัวอย่างพักไว้ 1 ชั่วโมงก่อนเข้าสู่อบ

ภาพที่ 5 ผลของอุณหภูมิในการบ่ม (ก) ตัวอย่างเข้าสู่อบทันที และ (ข) ตัวอย่างพักไว้ 1 ชั่วโมงก่อนเข้าสู่อบ (Delay time) ต่อค่าลึงอัด

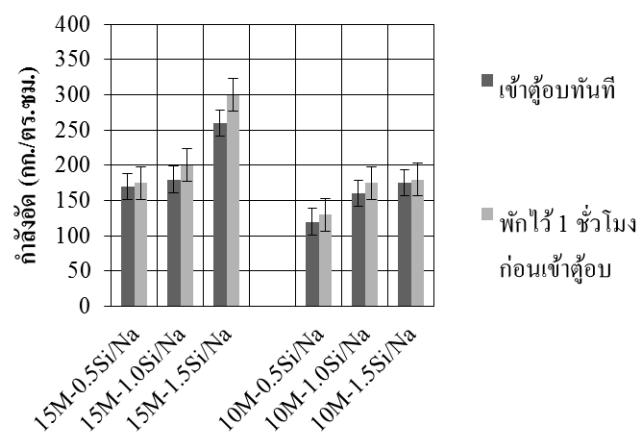
2.4 การหวั่นระยะเวลาในการเข้าสู่อบของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ (Delay time)

ภาพที่ 6 (ก) (ข) และ (ค) แสดงผลการทดสอบระยะเวลาในการเข้าสู่อบของจีโอโพลิเมอร์บ่มที่อุณหภูมิเท่ากับ 45, 55 และ 65 องศาเซลเซียส ซึ่งผลทดสอบพบว่า จีโอโพลิเมอร์จากเถาถ่านหินที่มีการพักไว้ 1 ชั่วโมงก่อนเข้าสู่อบ มีค่าค่าลึงอัดสูงกว่าการนำตัวอย่างเข้าสู่อบทันทีที่ผสมเสร็จ เนื่องจากการทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องทำให้ จะทำให้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์มีระยะเวลาในการชะละลายเอา

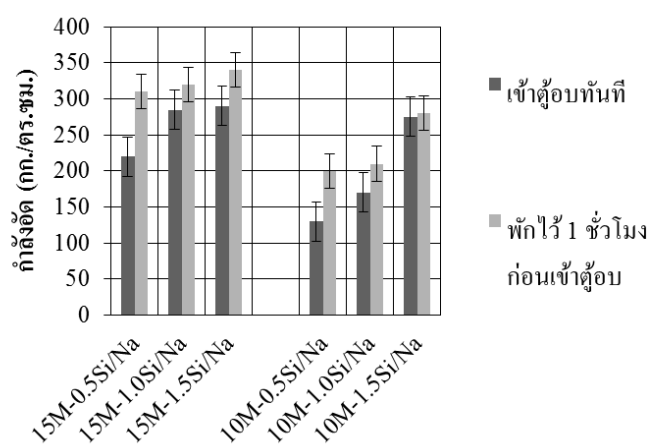
ซิลิกาและอลูมินาจากเถาถ่านหินบดออกมาได้ดีกว่าตัวอย่างที่บ่มโดยเข้าสู่อบทันที และเกิดการแข็งตัวทำให้มีการพัฒนาค่าลึงอัดได้ดีกว่าการอบด้วยความร้อนทันทีที่ผสมเสร็จ เช่นเดียวกับงานวิจัยของ Chindaprasirt *et al.* (2007), Guo *et al.* (2010), Rukzon and Chindaprasirt (2014), Sathonsaopark *et al.* (2009) และ Davidovits and James (1999) ภาพที่ 7 แสดงตัวอย่างของมอร์ตาร์จีโอโพลิเมอร์ที่แข็งตัวแล้ว และผ่านการทดสอบค่าลึงอัด



(ก) บ่มอุณหภูมิ 45 °C (องศาเซลเซียส)



(ข) บ่มอุณหภูมิ 55 °C (องศาเซลเซียส)



(ค) บ่มอุณหภูมิ 65 °C (องศาเซลเซียส)

ภาพที่ 6 ผลการห้วงเวลาการบ่มที่อุณหภูมิ (ก) 45 °C, (ข) 55 °C และ (ค) 65 °C (องศาเซลเซียส)
ต่อกำลังอัดของมอร์ตาร์



ภาพที่ 7 ตัวอย่างของมอร์ตาร์จีโอโพลิเมอร์ที่แข็งตัวแล้วและผ่านการทดสอบกำลังอัด

สรุป

ผลทดสอบที่ได้จากงานวิจัยนี้สามารถนำไปประยุกต์สำหรับใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมก่อสร้างได้ดี กล่าวคือ จีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าถ่านหินบด สามารถนำไปใช้เป็นวัสดุซ่อมแซมโครงสร้างคอนกรีตได้ เนื่องจากพบว่ามีความกำลังอัดที่สูง โดยปัจจัยที่มีผลต่อกำลังอัด คือ อิทธิพลในการบ่ม ซึ่งประกอบไปด้วยการบ่มที่อุณหภูมิและสภาพแวดล้อมที่แตกต่างกันจะให้ค่ากำลังอัดที่แตกต่างกันด้วย นอกจากนี้ ส่วนผสมและกำลังอัดของมอร์ตาร์ขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เนื่องจาก สารละลายต่างต่อการเกิดปฏิกิริยาของจีโอโพลิเมอร์ไรซ์เซชันมีความต้องการซิลิกาและอลูมินาที่มีอยู่ในเถ้าถ่านหินบด เมื่อปริมาณสัดส่วนสารละลายโซเดียมซิลิเกตที่เพิ่มขึ้น จะส่งผลทำให้โครงสร้างของซิลิเกตที่ได้จากการชะละลายซิลิกาและอลูมินาด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ มีการแข็งตัวอย่างรวดเร็วและระยะเวลาในการก่อตัวเร็วขึ้นด้วย ดังนั้น ผลที่ได้จากงานวิจัยนี้จะมีประโยชน์มากในด้านการใช้งานจริงโดยเฉพาะใช้เป็นวัสดุซ่อมแซมที่มีความต้องการใช้งานอย่างเร่งด่วนและมีค่าการรับกำลังอัดได้ดี

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้ดำเนินงานวิจัยขอขอบคุณสาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ ที่ให้ความอนุเคราะห์สถานที่ในการวิจัย และ ศูนย์วิจัยโครงสร้างมูลฐานอย่างยั่งยืน มหาวิทยาลัยขอนแก่น ที่ให้ความอนุเคราะห์วัสดุทดสอบ

เอกสารอ้างอิง

- ASTM. 2005a. ASTM C136. Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates. Annual Book of ASTM Standard. American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA.
- ASTM. 2005b. ASTM C 230-C 230M. Standard Specification for Flow Table for Use in Tests of Hydraulic Cement. Annual Book of ASTM Standard. American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA.
- Chindaprasirt, P., Chareerat, T. and Sirivivatnanon, V. 2007. Workability and strength of coarse high calcium fly ash geopolymer mortar. **Cement and Concrete Composites** 29: 224-229.
- Chindaprasirt, P., Rukzon, S. and Sirivivatnanon, V. 2008. Resistance to chloride penetration of blended Portland cement mortar containing palm oil fuel ash, rice husk ash and fly ash. **Construction and Building Materials** 22(5): 932-938.
- Chindaprasirt, P. and Rukzon, S. 2015. Strength and chloride penetration of Portland cement mortar containing rice husk ash and ground river sand. **Materials and Structures** 48(11): 3771-3777.
- Chindaprasirt, P., Sujumongtokulb, P. and Posi, P. 2019a. Durability and mechanical properties of pavement concrete containing bagasse ash. **Materials Today: Proceedings** 17: 1612-1626.

- Chindaprasirt, P., Kasemsiri, P., Poomsrisa, P. and Posi, P. 2019b. Fluidized bed coalbark fly ash geopolymer with additives cured at ambient temperature. **International Journal of GEOMATE** 16(54): 29-35.
- Davidovits, J. 1999. Chemistry of Geopolymeric Systems, Terminology, pp. 9-39. *In Proceedings of the 2nd International Conference.* Geopolymer Institute, Saint-Quentin.
- Guo, X., Shi, H. and Dick, WA. 2010. Compressive strength and microstructural characteristics of class C fly ash geopolymer. **Cement and Concrete Composites** 32: 142-147.
- Posi, P., Kasemsiri, P., Lertnimoolchai, S. and Chindaprasirt, P. 2019. Effect of fly ash fineness on compressive, flexural and shear strengths of high strength-high volume fly ash jointing mortar. **International Journal of GEOMATE** 16(54): 36-41.
- Rovnanik, P. 2010. Effect of curing temperature on the development of hard structure of metakaolin-based geopolymer. **Construction and Building Materials** 24: 1176-1183.
- Rukzon, S. and Chindaprasirt, P. 2011. Utilization of bagasse ash in high-strength concrete. **Materials and Design** 34: 45-50.
- Rukzon, S. and Chindaprasirt, P. 2018. Strength, chloride penetration and corrosion resistance of ternary blends of Portland cement self-compacting concrete containing bagasse ash and rice husk-bark ash. **Chiang Mai Journal Science** 45(4): 1863-1874.
- Rukzon, S. and Chindaprasirt, P. 2014. Strength and porosity of bagasse ash-based geopolymer mortar. **Journal of Applied Sciences** 14(6): 586-591.
- Sathonsaopark, A., Chindaprasirt, P. and Pimraksa, K. 2009. Workability and strength of lignite bottom ash geopolymer mortar. **Journal of Hazardous Materials** 168: 45-50.
- Sukmak, P., Horpibulsuk, S., Shen, SL. Chindaprasirt, P. and Suksiripattanaponga, C. 2013. Factors influencing strength development in clay-fly ash geopolymer. **Construction and Building Materials** 47(1): 1125-1136.