



คุณสมบัติทางกายภาพของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์เถ้าปาล์มน้ำมัน

PHYSICAL PROPERTIES OF GEOPOLYMER MORTAR PALM OIL FUEL ASH

สำเร้ง รุกซออน^{1*}, ทิวา ตันสถิต², ประพัฒน์ สีใส² และ ปริญญ์ จินดาประเสริฐ³

^{1*}รองศาสตราจารย์, สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

²อาจารย์, สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

³ศาสตราจารย์, ศูนย์วิจัยและพัฒนาโครงสร้างมูลฐานอย่างยั่งยืน ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยขอนแก่น

*Corresponding author: sumrereng.ruk@rmutr.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาพัฒนาเถ้าปาล์มน้ำมันเป็นวัสดุจีโอโพลิเมอร์ ในงานนี้ศึกษากำลัังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน บดละเอียด ส่วนผสมจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ใช้ค่าสารละลายต่อเถ้าปาล์มน้ำมันคงที่เพื่อควบคุมการทดสอบค่าการไหลแต่ ศึกษา อิทธิพลของอุณหภูมิการบ่ม ระยะเวลาการหน่วงก่อนบ่ม ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ และอัตราส่วนโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ ต่อค่าลัังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ ผลการทดสอบชี้ให้เห็นว่า ความสามารถทำงานได้ของ จีโอโพลิเมอร์มีการไหลอยู่ระหว่างร้อยละ 108-115 โดยขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ และความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ ส่วนการเพิ่มน้ำในส่วนผสมส่งผลให้ความสามารถการทำงานของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ดีขึ้น จีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์เถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดมีค่าลัังอัดที่ดีด้วยความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ใช้เท่ากับ 15 โมลาร์ (15Molar, 15M) และอัตราส่วนโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เหมาะสมเท่ากับ 2.5 โดยน้ำหนัก การใช้เถ้าปาล์มน้ำมัน บดละเอียดเป็นส่วนผสมของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ให้ค่าลัังอัดที่ดีด้วยการนำตัวอย่างทิ้งไว้ก่อนนำเข้าตู้อบเป็นเวลา 1 ชั่วโมง (Delay time) และอุณหภูมิการบ่มที่เหมาะสมในการบ่มเท่ากับ 75 องศาเซลเซียส ในระยะเวลาการบ่ม 1 วัน

คำสำคัญ: ค่าลัังอัด; การหน่วงเวลา; จีโอโพลิเมอร์; เถ้าปาล์มน้ำมันบด; ปอลิโซลาน; มอร์ตาร์

ABSTRACT

This research studies the development for using palm oil fuel ash as a geopolymer material. This work presents a study of the compressive strength of geopolymer mortar containing ground palm oil fuel ash. Geopolymer mortar with constant liquid to palm oil fuel ash ratio and similar flow were used for the tests. Effects of temperature, delay time of curing, concentration of sodium hydroxide and sodium silicate to sodium hydroxide ratio on compressive strength were investigated. Test results indicate that, the workable flow of geopolymer mortar was in the range of 108–115% and was dependent on the ratio by mass of sodium silicate to NaOH and the concentration of NaOH. Extra water was used to improve the workability. The geopolymer mortars

Sumrereng Rukzon^{1*}, Tiwa Tansathit¹, Prapat Seesai¹ and Prinya Chindaprasit²

^{1*}Assoc. Prof., Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Rattanakosin

²Lecturer, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Rattanakosin

³Prof, Sustainable Infrastructure Research and Development Center, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering,

Khon Kaen University

palm oil fuel ash good strengths was obtained with concentration of NaOH of 15M (15Molar, 15M) with the sodium silicate to NaOH ratio by weight of 2.5. The use of palm oil fuel ash produces geopolymer mixes with good strength were obtained with the delay time before subjecting the sample to heat was 1 h (Delay time) and the optimum curing temperature in the oven was 75 C with the curing duration of 1 day.

KEYWORDS: Compressive strength; Delay time; Ground Palm oil fuel ash; Geopolymer; Mortar; Pozzolan

1. บทนำ

วัสดุเหลือทิ้งในประเทศไทยจากผลพลอยได้ภาคอุตสาหกรรมและเกษตรกรรมที่สามารถใช้แทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนได้ เช่น เถ้าถ่านหิน เถ้าถ่านเตา เถ้าแกลบ เถ้าขานอ้อย เถ้าแกลบ-เปลือกไม้ และเถ้าปาล์มน้ำมัน วัสดุเหล่านี้เรียกว่า วัสดุพอซโซลาน (Pozzolan Material) [1] ซึ่งนิยมใช้ในงานคอนกรีต ที่ผ่านมามีงานวิจัยบางชิ้นได้ศึกษาเกี่ยวกับการใช้วัสดุพอซโซลานในงานคอนกรีต [2-10] วัสดุพอซโซลานดังกล่าวข้างต้น เป็นวัสดุที่มีสารจำพวกซิลิกา (Silica) หรือซิลิกาและอลูมินา (Silica and Alumina) ปนอยู่ [1] สารประกอบหลักดังกล่าวนี้จะทำปฏิกิริยาเพิ่มเติมจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน [6, 9, 10-13] ซึ่งเป็นปฏิกิริยาระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำ ส่งผลให้สมบัติของคอนกรีตเปลี่ยนแปลงไป อีกทั้งการนำปูนซีเมนต์มาผสมรวมกับวัสดุพอซโซลานในสัดส่วนที่เหมาะสม อาจส่งผลให้คอนกรีตมีกำลังรับแรงที่ใกล้เคียงหรือสูงกว่าการใช้ปูนซีเมนต์เพียงอย่างเดียว [3-5, 7, 9] ทั้งนี้เป็นการปรับปรุงคุณสมบัติของคอนกรีตหรือมอร์ตาร์ในด้านความคงทน [7, 9, 10, 12] และลดปัญหาผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและลดพื้นที่การจัดทิ้งวัสดุเหลือทิ้งดังกล่าว ซึ่งการจัดทิ้งกระทำได้ยากและใช้งบประมาณมาก

จากความสำคัญและที่มาของปัญหาดังกล่าว งานวิจัยนี้จึงต้องการศึกษาและพัฒนาวัสดุเหลือทิ้งจากกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรม คือ เถ้าปาล์มน้ำมัน เพื่อนำมาใช้เป็นวัสดุอิโพลิเมอร์ผลิตเป็นมอร์ตาร์ซึ่งเป็นวัสดุก่อสร้างที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม โดยใช้กระบวนการทำปฏิกิริยาเคมีระหว่างวัสดุอิโพลิเมอร์กับสารละลายที่มีความเป็นเบสสูง [14-16] และศึกษาอิทธิพลของปัจจัยของสารเคมีและกระบวนการผลิตต่อคุณสมบัติทางกายภาพและการรับกำลังอัด จากนั้นพัฒนาเทคโนโลยีในการนำเถ้าปาล์มน้ำมัน ไปใช้ได้จริงในอุตสาหกรรมก่อสร้างอย่างมีประสิทธิภาพ และผลวิจัยที่ได้ส่งผลให้เกิดความมั่นใจแก่อุตสาหกรรมก่อสร้างไทยที่จะนำไปประยุกต์ใช้กับงานจริง ทั้งยังช่วยลดปัญหาผลกระทบและปัญหาสิ่งแวดล้อมจากการกองทิ้งวัสดุเหลือทิ้งในบริเวณพื้นที่ใกล้เคียง ลดพื้นที่การจัดทิ้งของเสีย เพิ่มมูลค่าให้เถ้าทิ้งในชุมชน เพื่อเป็นแนวทางในการประกอบอาชีพในวิสาหกิจชุมชน สำหรับการผลิตวัสดุนิคมใหม่ได้ในอนาคตอย่างยั่งยืน เป็นการเพิ่มมูลค่าของเสีย ทำให้เพิ่มรายได้จากการขายของเสียที่เป็นผลพลอยได้และเปลี่ยนวัสดุเหลือทิ้งที่ไม่มีมูลค่าเป็นวัสดุเหลือทิ้งที่มีราคาในตัวเองได้อย่างยั่งยืน ที่ผ่านมามีงานวิจัยที่ใช้เถ้าถ่านหินอย่างกว้างขวางและเป็นที่ยอมรับว่าการผลิตคอนกรีตทั่วไปจากเถ้าถ่านหินจะให้คุณสมบัติคอนกรีตที่ดี อย่างไรก็ตาม งานวิจัยเกี่ยวกับการใช้เถ้าปาล์มน้ำมันเพื่อนำไปเป็นวัสดุ อิโพลิเมอร์มีอยู่น้อยมาก จึงจำเป็นต้องทำการศึกษาเพิ่มเติม ดังนั้นวัสดุ อิโพลิเมอร์จึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งสำหรับงานคอนกรีตหรือมอร์ตาร์ที่ไม่ใช้ปูนซีเมนต์ สามารถลดปริมาณของเสียจากอุตสาหกรรม และเพิ่มศักยภาพการใช้ประโยชน์จากของเสียในเชิงพาณิชย์ได้

2. การเตรียมตัวอย่าง

2.1 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

2.1.1 เถ้าปาล์มน้ำมัน

เถ้าปาล์มน้ำมัน (Palm oil fuel ash) ได้จากกระบวนการผลิตกระแสไฟฟ้าโดยใช้ผลพลอยได้เกษตรกรรมในโรงไฟฟ้าขนาดเล็กที่ได้ส่วนที่เหลือเป็นเถ้าถ่าน โดยปรับปรุงคุณภาพของเถ้าปาล์มน้ำมันด้วยการนำไปบดด้วยเครื่องบดวัสดุพอชโซลานให้มีขนาดลดลง โดยบดให้มีความละเอียดในปริมาณข้างบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 น้อยกว่าร้อยละ 34 โดยน้ำหนัก [1, 3, 4] สำหรับใช้เป็นวัสดุอิโพลิเมอร์

2.1.2 ทฤษฎี

ใช้ทฤษฎี เป็นวัสดุมวลละเอียด ในส่วนผสมอิโพลิเมอร์ โดยใช้ขนาดละเอียดเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C33 [17] และ ASTM C136 [18] มีค่าโมดูลัสความละเอียด (Fineness modulus; FM) เท่ากับ 2.52 (ASTM C136 [18]) และมีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.46

2.1.3 สารละลายโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3)

ในการศึกษานี้ใช้สารละลายโซเดียมซิลิเกตในการผสมอิโพลิเมอร์ และควบคุมชนิดและคุณภาพของสารละลายดังกล่าวให้เป็นประเภทเดียวกันตลอดการศึกษา สารละลายสารละลายโซเดียมซิลิเกตใช้ในการกระตุ้นการเกิดปฏิกิริยา

2.1.4 สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH)

ในการศึกษานี้ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ โดยใช้เป็นกรดห่อหุ้มปฏิบัติการ เพื่อเป็นสารละลายในการกระตุ้นการเกิดปฏิกิริยาร่วมกับสารละลายโซเดียมซิลิเกต

2.1.5 น้ำกลั่น

การศึกษานี้ครั้งนี้เพื่อป้องกันการเจือปนของสารจำพวกคลอรีนและสารละลายประเภทอื่น ๆ ในของเหลวสำหรับการผสมอิโพลิเมอร์ ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงใช้น้ำกลั่น

2.2 การเตรียมตัวอย่างการทดสอบ

ส่วนผสมตัวอย่างอิโพลิเมอร์มอร์ตาร์ครั้งนี้ใช้อัตราส่วนเถ้าปาล์มน้ำมันต่อทราย เท่ากับ 1:2.75 และอัตราส่วนสารละลายต่อวัสดุอิโพลิเมอร์ ใช้เท่ากับ 0.65 โดยควบคุมค่าการไหลแผ่ด้วยโต๊ะมาตรฐานทดสอบการไหล (Flow table) เท่ากับร้อยละ 105-115 การศึกษานี้ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ในปริมาณความเข้มข้นเท่ากับ 10 โมลาร์ (10M) และ 15 โมลาร์ (15M) นอกจากนั้น ในการศึกษาครั้งนี้ใช้อัตราส่วนของสารละลาย $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ เท่ากับ 0.5, 1.5, 2.5 ตามลำดับ และหากพบว่า ส่วนผสมมีความสามารถทำงานได้ยากหรือเนื้อมอร์ตาร์มีความหนืด จำเป็นต้องเติมน้ำลงไปในส่วนผสมเพื่อเพิ่มความสามารถทำงานได้ของมอร์ตาร์ (Extra water)

3. วิธีการทดสอบ

3.1 การทดสอบกำลังอัด

การทดสอบกำลังอัดใช้แบบหล่อขนาด $5 \times 5 \times 5$ เซนติเมตร หลังจากหล่ออิโพลิเมอร์มอร์ตาร์แล้วเสร็จ หุ้มด้วยพลาสติกกันความชื้น จากนั้นบ่มตัวอย่างในตู้อบอุณหภูมิ โดยการทดสอบการบ่มแบ่งเป็น 2 วิธี ดังนี้

1) วิธีที่ 1 หน่วงเวลาการทดสอบ (Delay time)

วิธีนี้ทดสอบโดยหลังจากหล่อตัวอย่างและหุ้มด้วยพลาสติกกันความชื้นแล้ว ให้พักตัวอย่างไว้ในอุณหภูมิห้องเป็นเวลา 1 ชั่วโมงก่อนเข้าตู้อบ (Delay time) ต่อเนื่องอีก 1 วัน

2) วิธีที่ 2 นำตัวอย่างเข้าตู้อบทันที

วิธีนี้ทดสอบโดย หลังจากหล่อตัวอย่างและหุ้มด้วยพลาสติกกันความชื้นแล้ว นำตัวอย่างเข้าสู่อบที่ต่อเนื่องอีก 1 วัน ในการทดสอบทั้ง 2 วิธี นำตัวอย่างปมในตู้อบที่อุณหภูมิที่แตกต่างกัน คือ 45 °C, 75 °C และ 90 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำออกจากตู้อบ และทำการทดสอบกำลังอัดของมอร์ต้าร์ตามอายุการทดสอบ ต่อไป

3.2 สัญลักษณ์ตัวอย่าง

ในส่วนของสัญลักษณ์ที่ใช้ในงานนี้ตัวได้สรุปไว้ในตารางที่ 1 เช่น ความเข้มข้นของ NaOH และ อัตราส่วนของ $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ เป็นต้น

ตารางที่ 1 สัญลักษณ์ตัวอย่างที่ใช้ศึกษา

ตัวอย่างมอร์ต้าร์	สัญลักษณ์
10M-0.5Si/Na	ความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์ 10 โมลาร์-อัตราส่วนโซเดียมซิลิเกต/โซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.5
10M-1.5Si/Na	ความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์ 10 โมลาร์-อัตราส่วนโซเดียมซิลิเกต/โซเดียมไฮดรอกไซด์ 1.5
10M-2.5Si/Na	ความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์ 10 โมลาร์-อัตราส่วนโซเดียมซิลิเกต/โซเดียมไฮดรอกไซด์ 2.5
15M-0.5Si/Na	ความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์ 15 โมลาร์-อัตราส่วนโซเดียมซิลิเกต/โซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.5
15M-1.5Si/Na	ความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์ 15 โมลาร์-อัตราส่วนโซเดียมซิลิเกต/โซเดียมไฮดรอกไซด์ 1.5
15M-2.5Si/Na	ความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์ 15 โมลาร์-อัตราส่วนโซเดียมซิลิเกต/โซเดียมไฮดรอกไซด์ 2.5
10M	ความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์ 10 โมลาร์
15M	ความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์ 15 โมลาร์
45 °C	การบ่มตัวอย่างในตู้อบที่อุณหภูมิ 45 °C
75 °C	การบ่มตัวอย่างในตู้อบที่อุณหภูมิ 75 °C
90 °C	การบ่มตัวอย่างในตู้อบที่อุณหภูมิ 90 °C
Na_2SiO_3	สารละลายโซเดียมซิลิเกต
NaOH	สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

4. ผลการทดสอบ

4.1 ผลของการปรับขนาดตัวอย่างเต้าปาล์มน้ำมัน (Palm oil fuel ash)

ปรับปรุงคุณภาพของเต้าปาล์มน้ำมันด้วยการนำไปบดด้วยเครื่องบดวัสดุพอชโซลานให้มีขนาดลดลง หรือให้มีความละเอียดในปริมาณข้างบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 น้อยกว่าร้อยละ 34 โดยน้ำหนัก [1, 3, 4] ซึ่งผลการทดสอบครั้งนี้ ได้ความละเอียดเต้าปาล์มน้ำมันข้างบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 ร้อยละ 5-10 โดยน้ำหนัก สามารถใช้เป็นวัสดุจีโอโพลิเมอร์ได้ เนื่องจาก เมื่อพิจารณาในการประยุกต์ใช้มาตรฐานของ ASTM C618 [1] จึงสามารถใช้เป็นวัสดุประสานได้ โดยที่ความละเอียดของวัสดุพอชโซลานจะเกิดปฏิกิริยาทางเคมีได้ดีเนื่องจากพื้นที่ผิวจำเพาะที่มากขึ้น [3, 4, 7, 9, 11, 14]

ตารางที่ 2 เป็นคุณสมบัติทางกายภาพของเต้าปาล์มน้ำมัน ก่อนบดหรือก่อนปรับขนาด จากตารางที่ 2 พบว่า เต้าปาล์มน้ำมัน มีความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 1.65 เต้าปาล์มน้ำมันก่อนบดไม่สามารถหาค่าความละเอียดวิธีของเบลนได้ เนื่องจากความพรุนที่สูงส่งผลให้อากาศไหลผ่านเครื่องทดสอบของเบลนไปอย่างรวดเร็ว จึงอ่านค่าไม่ได้ [3, 4]

ตารางที่ 3 เป็นคุณสมบัติทางกายภาพของเถ้าปลาล์มน้ำมัน หลังปรับปรุงขนาดด้วยการบดละเอียด ส่วนรูปที่ 1 แสดงการกระจายตัวของขนาดอนุภาค (Particle size distribution) ของเถ้าปลาล์มน้ำมันบด ซึ่งการศึกษานี้ได้ปรับปรุงให้มีขนาดความละเอียดเพิ่มขึ้น โดยการศึกษาครั้งนี้ชี้ให้เห็นว่า การบดเถ้าปลาล์มน้ำมัน ส่งผลให้ความถ่วงจำเพาะ พื้นที่ผิวจำเพาะเพิ่มขึ้น [3, 4] และขนาดอนุภาคลดลง สอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา [3, 4, 19, 20] กล่าวคือ ค่าของ Median particle size (μm), d_{50} ของ เถ้าปลาล์มน้ำมัน มีค่าเท่ากับ 7.31 ไมครอน ดังแสดงในตารางที่ 3 และรูปที่ 1

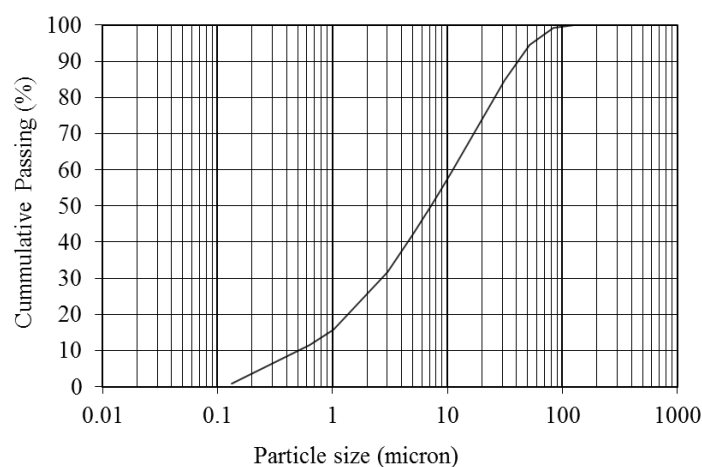
จากคุณสมบัตินี้จะส่งผลต่อการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานได้ดี [3, 4, 7, 9, 10, 12] อนุภาคที่ค้างบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 น้อยลงเนื่องจากส่วนละเอียดปริมาณมากที่ผ่านตะแกรงซึ่งมีขนาดเล็กกว่าและอนุภาคที่ถูกบดจนแตกและมีขนาดเล็กของเถ้าปลาล์มน้ำมัน [3, 4] ทำให้พื้นที่ผิวจำเพาะเพิ่มขึ้นดังที่กล่าวไว้ในข้างต้น และพบว่าเถ้าปลาล์มน้ำมันบดละเอียด มีการกระจายตัวอยู่ในช่วงร้อยละ 80 โดยอยู่ในช่วงประมาณ 1-40 ไมครอน

ตารางที่ 2 ความถ่วงจำเพาะและความละเอียดของเถ้าปลาล์มน้ำมัน ก่อนปรับปรุงขนาด

Physical properties	เถ้าปลาล์มน้ำมัน
Retained on a sieve No. 325 (%)	74
Specific Gravity	1.65
Blaine Fineness (cm^2/gm) - ตารางเซนติเมตรต่อกรัม	-

ตารางที่ 3 ความถ่วงจำเพาะและความละเอียดของเถ้าปลาล์มน้ำมันหลังปรับปรุงขนาด

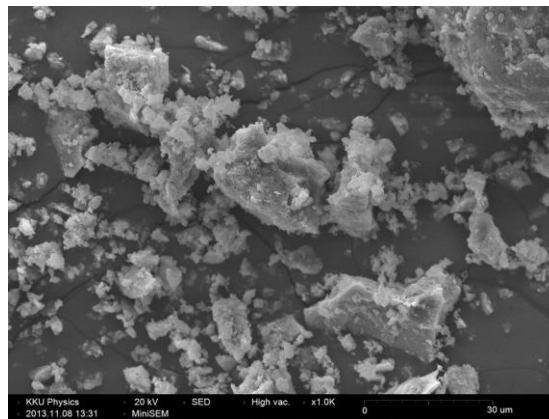
Physical properties	เถ้าปลาล์มน้ำมัน
Median particle size (μm), d_{50} - ไมครอน	7.31
Retained on a sieve No. 325 (%)	5-10
Specific Gravity	2.23
Blaine Fineness (cm^2/gm) - ตารางเซนติเมตรต่อกรัม	11,500



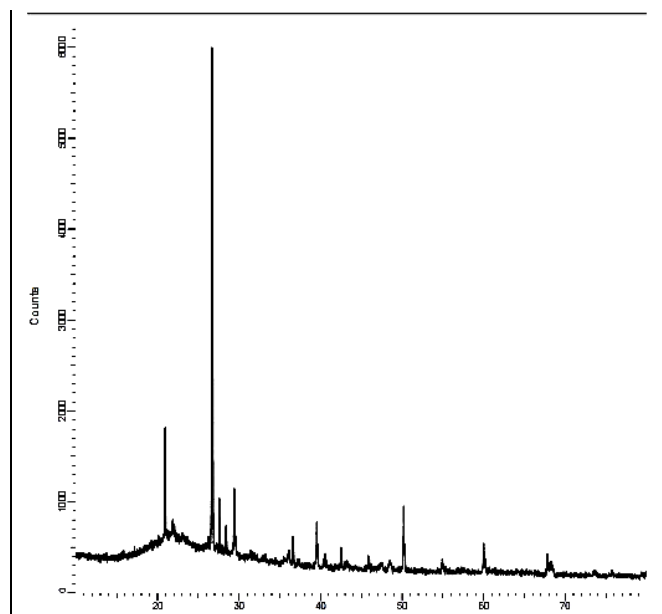
รูปที่ 1 Particle size distribution ของเถ้าปลาล์มน้ำมันหลังปรับปรุงขนาดด้วยการบดละเอียด

4.2 รูปร่างของอนุภาคและองค์ประกอบด้านเคมีของเถ้าปาล์มน้ำมัน

รูปที่ 2 เป็นภาพถ่ายกำลังขยายกำลังสูงด้วยเครื่อง Scanning electron microscope หรือเครื่อง SEM ของเถ้าปาล์มน้ำมัน หลังปรับปรุงขนาดด้วยการบดละเอียด พบว่าเมื่อบดเถ้าปาล์มน้ำมันด้วยเครื่องบดส่งผลทำให้อนุภาคของเถ้าปาล์มน้ำมันมีขนาดเล็กลง ความพรุนลดลง รูปร่างไม่แน่นอน (Irregular) ความพรุนยังมีอยู่บ้างแต่อาจน้อยกว่าก่อนการบด [3, 4] รูปที่ 3 แสดงผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าปาล์มน้ำมัน ด้วย X-ray diffraction (XRD) ผลการวิเคราะห์ พบว่าองค์ประกอบของเถ้าปาล์มน้ำมันมีซิลิกา (SiO_2) เป็นองค์ประกอบหลัก เมื่อพิจารณาผลการทดสอบทางเคมีดังกล่าวนี้พบว่าเถ้าปาล์มน้ำมันในงานวิจัยนี้จึงสามารถใช้เป็นวัสดุพอลิเมอร์ได้และสามารถนำไปเป็นวัสดุอีโพลิเมอร์ได้ เมื่อพิจารณาตามผลการทดสอบมาตรฐานทางกายภาพ ดังกล่าวข้างต้น ซึ่งผลที่ได้คล้ายกับงานวิจัยที่ผ่านมาบางชิ้น [3-5, 9, 12-14]



รูปที่ 2 ภาพถ่ายขยายของเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียด (PA)



รูปที่ 3 XRD ของเถ้าปาล์มน้ำมัน

4.3 ความสามารถทำงานได้ของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์

การทดสอบความสามารถในการทำงานได้ของมอร์ตาร์ แสดงไว้ในตารางที่ 3 และ 4 โดยผลการทดสอบแสดงค่าการไหลของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากถ้วยปาล์มน้ำมันที่มีความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ 10 และ 15 โมลาร์ ตามลำดับ และใช้อัตราส่วนของสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 0.50, 1.5 และ 2.50 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ ผลทดสอบพบว่า ค่าการไหลของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากถ้วยปาล์มน้ำมันในตารางที่ 3 และ 4 มีค่าอยู่ในช่วงระหว่างร้อยละ 108-115 (10 และ 15 โมลาร์) การผสมมอร์ตาร์โดยใช้อัตราส่วนของสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 0.50 (10M) ทำงานได้ยากเนื่องจากมอร์ตาร์มีเนื้อแข็งจึงต้องเพิ่มน้ำลงในส่วนผสมเพื่อให้สามารถทำงานได้ โดยมีค่าการไหลแผ่นเท่ากับร้อยละ 114 ส่วนการใช้อัตราส่วนของสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 1.50 (10M) ทำงานได้ยากเล็กน้อย เนื่องจากความเหนียวของเนื้อมอร์ตาร์ [14-16, 21, 22] ดังนั้น จึงต้องเพิ่มน้ำปริมาณร้อยละ 2.8 ของถ้วยปาล์มน้ำมันลงในส่วนผสมเพื่อให้สามารถทำงานได้ โดยมีค่าการไหลแผ่นเท่ากับร้อยละ 108 ขณะที่การใช้อัตราส่วนของสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 2.50 (10M) สามารถทำงานได้ยากมากเนื่องจากมอร์ตาร์มีเนื้อเหนียวมากจำเป็นต้องเติมน้ำในส่วนผสม [14, 16] และมีค่าการไหลแผ่นเท่ากับร้อยละ 109 ส่วนผลทดสอบในตารางที่ 4 พบว่า การใช้อัตราส่วนของสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 0.50, 1.5 และ 2.50 (15M) ได้ผลการทดสอบไปในทิศทางเดียวกับ 10M (ตารางที่ 3) กล่าวคือ การใช้อัตราส่วนของสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 0.50, 1.50 และ 2.50 ต้องการปริมาณน้ำในการทำงานเท่ากับร้อยละ 3.1, 3.3 และ 4.1 ของถ้วยปาล์มน้ำมัน และมีค่าการไหลแผ่นเท่ากับร้อยละ 111-115

ความสามารถทำงานได้ของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ สอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมาบางชิ้น [14, 16] สำหรับตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์ที่ใช้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 10 โมลาร์ มีแนวโน้มค่าการไหลแผ่นลดลง เมื่อเทียบกับตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์ที่ใช้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 15 โมลาร์ จีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์สามารถทำงานได้ง่ายเมื่อเพิ่มอัตราส่วนของสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์สูงขึ้น

การเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนของสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ในส่วนผสมจะส่งผลทำให้ค่าการไหลของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ลดลง สอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา [14, 16] เนื่องจากโดยตัวของสารละลายโซเดียมซิลิเกตจะมีความหนืดสูง และหากยังใช้ในส่วนผสมมากย่อมเป็นการเพิ่มค่าความหนืด (Viscosity) ของสารละลายและลดค่าการไหลในที่สุด [14, 16] ผลการทดสอบยังพบว่า เมื่อความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เพิ่มขึ้นจาก 10 เป็น 15 โมลาร์ ส่งผลให้ส่วนผสมมีความเหนียวขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับส่วนผสมที่ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 10 โมลาร์ จำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องเติมน้ำเพิ่มเติม (Extra water) ลงไปในส่วนผสมเพื่อให้สามารถทำงานได้ การเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ในส่วนผสมจะส่งผลทำให้ค่าการไหลของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ลดลง เนื่องจากการเพิ่มความเข้มข้นเป็นการเพิ่มค่าความหนืด (Viscosity) ของสารละลายและลดค่าการไหลของส่วนผสม การเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ และการเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนของสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์จะลดความสามารถในการทำงานได้ของส่วนผสมทั้งสิ้น และในการเพิ่มความสามารถในการทำงานได้จึงทดลองด้วยวิธีการเติมน้ำเพิ่มเติม (Extra water) ลงไปในส่วนผสมของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ [14]

ในผลการทดสอบข้างต้น นอกจากการเติมน้ำเพื่อให้มอร์ตาร์มีความสามารถทำงานได้แล้ว สังเกตได้ว่าอัตราส่วนของสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 0.50 โดยน้ำหนัก มอร์ตาร์ไม่มีความเหนียว แต่เนื้อของ

มอร์ตาร์มีความแข็ง จึงเพิ่มความสามารถในการแตกตัวการเติมน้ำเพื่อผลของค่าการไหลแผ่ เนื่องจากถ้าปาล์มน้ำมัน มีพื้นที่ผิวเพิ่มขึ้นเมื่อผ่านการบด จึงส่งผลให้มอร์ตาร์มีความต้องการน้ำเพิ่มขึ้น [3, 4] ผลเนื่องจากความละเอียดของวัสดุปอซโซลานดังกล่าวที่นำมาใช้เป็นวัสดุจีโอโพลิเมอร์ ดังนั้น ในการผลิตจีโอโพลิเมอร์ มอร์ตาร์ด้วยการใช้ถ้าปาล์มน้ำมัน ต้องพิจารณาถึงความสามารถทำงานได้ของ มอร์ตาร์เป็นสำคัญ โดยทั้งนี้อาจขึ้นกับความละเอียดของวัสดุด้วย เพราะความละเอียดของวัสดุส่งผลต่อการทำงานได้ ซึ่งส่งผลต่อปริมาณความต้องการน้ำ

ตารางที่ 3 ค่าการไหลแผ่ (Flow ability) ของจีโอโพลิเมอร์จากถ้าปาล์มน้ำมัน ที่ 10M

อัตราส่วนของสารละลาย โซเดียมซิลิเกต ต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์	ความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (โมลาร์)	ค่าการไหล (%)	น้ำ (% ของถ้า)
0.50	10	114	2.5
1.50	10	108	2.8
2.50	10	109	3.8

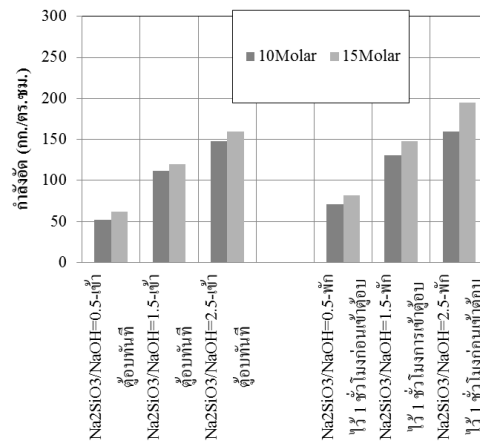
ตารางที่ 4 ค่าการไหลแผ่ (Flow ability) ของจีโอโพลิเมอร์จากถ้าปาล์มน้ำมัน ที่ 15M

อัตราส่วนของสารละลาย โซเดียมซิลิเกต ต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์	ความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (โมลาร์)	ค่าการไหล (%)	น้ำ (% ของถ้า)
0.50	15	115	3.1
1.50	15	111	3.3
2.50	15	111	4.1

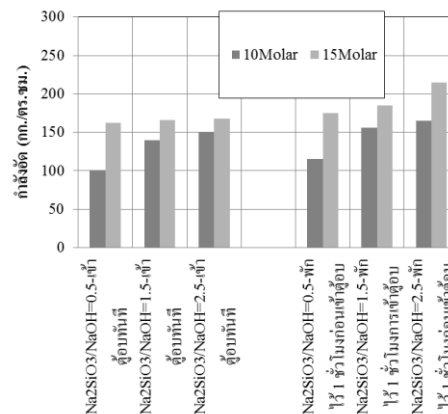
4.4 กำลังอัดของมอร์ตาร์

4.4.1 ผลของความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ต่อกำลังอัด

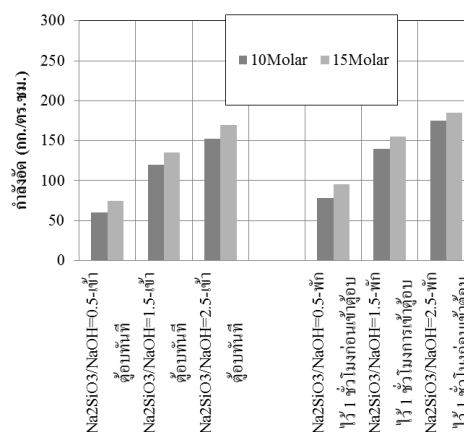
ในรูปที่ 4 ก), ข) และ ค) แสดงผลของความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่อุณหภูมิการบ่ม 45 °C, 75 °C และ 90 °C ตามลำดับ ผลทดสอบจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ถ้าปาล์มน้ำมัน พบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณความเข้มข้นของ NaOH ส่งผลให้กำลังอัดสูงขึ้น กล่าวคือ ปริมาณความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 15M (15Molar) มีค่ากำลังอัดสูงกว่าตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่มีปริมาณความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 10M (10Molar) เนื่องจากถ้าปาล์มน้ำมันมีซิลิกาและอลูมินาที่ชะละลายที่ผิวมากขึ้น ส่งผลทำให้เกิดปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอเรชันได้ดีกว่าปริมาณความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ต่ำกว่า ผลการทดสอบนี้คล้ายกับงานวิจัยที่ผ่านมา [14, 16, 21, 22]



ก) บ่มที่อุณหภูมิ 45 °C



ข) บ่มที่อุณหภูมิ 75 °C



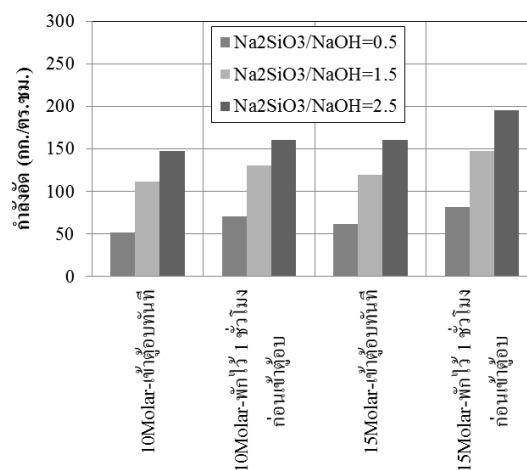
ค) บ่มที่อุณหภูมิ 90 °C

รูปที่ 4 ผลของปริมาณความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อค่าการกัดกร่อนของมอร์ตาร์เถ้าปาล์มน้ำมันที่ความเข้มข้น 10Molar (10M) และ 15 Molar (15M) บ่มที่อุณหภูมิ ก) 45 °C, ข) 75 °C และ ค) 90 °C

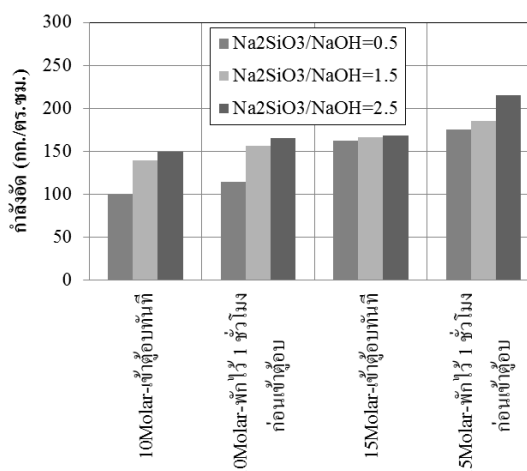
4.4.2 ผลของ $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ ต่อกำลังอัด

ในรูปที่ 5 ก), ข) และ ค) แสดงผลการทดสอบกำลังของจีโอโพลิเมอร์ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันที่มีปริมาณของโซเดียมไฮดรอกไซด์ 10M และ 15M ด้วยอัตราส่วนของ $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ เท่ากับ 0.5, 1.5 และ 2.5 ตามลำดับ

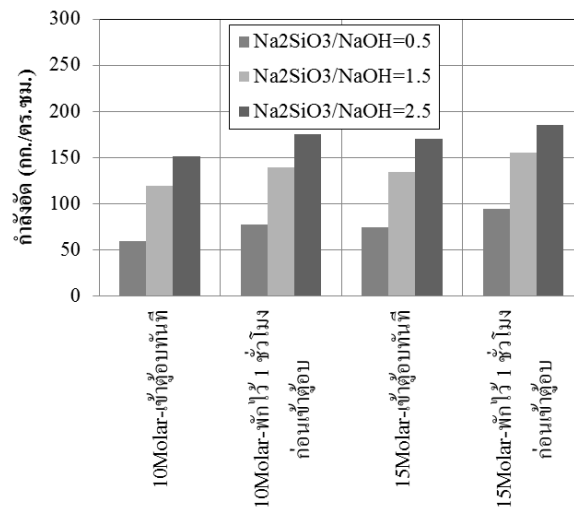
ในรูปที่ 5 ก), ข) และ ค) แสดงผลของอัตราส่วนของ $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ ต่อกำลังอัดที่อุณหภูมิการบ่ม 45°C , 75°C และ 90°C ตามลำดับ ผลการทดสอบพบว่า กำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์มีค่าสูงขึ้นตามอัตราส่วนของ $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ ที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากปริมาณ Na_2SiO_3 มีผลต่อกำลังอัด อัตราส่วนที่เพิ่มขึ้นจะมีปริมาณ Na_2SiO_3 สูงขึ้น ทำให้ค่ากำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์สูงขึ้นตามไปด้วย ผลการทดสอบนี้คล้ายกับงานวิจัยที่ผ่านมาบางชิ้น [14, 16, 21, 22] อย่างไรก็ตาม กำลังอัดลดลงตามอัตราส่วนของ $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ ที่ลดลงด้วย กำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ผสมวัสดุเถ้าปาล์มน้ำมันมีค่าที่สูง ซึ่งเหมาะสมสำหรับการใช้งานได้งานได้ทั่วไปได้ เนื่องจากองค์ประกอบเคมีของซิลิกาในเถ้าปาล์มน้ำมันที่มีปริมาณค่อนข้างสูง (รูปที่ 3) จึงส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาได้มากโดยเฉพาะผลิตผลของแคลเซียมซิลิเกตไฮดรต หรือ CSH [9, 11, 14, 16]



ก) บ่มที่อุณหภูมิ 45°C



ข) บ่มที่อุณหภูมิ 75°C



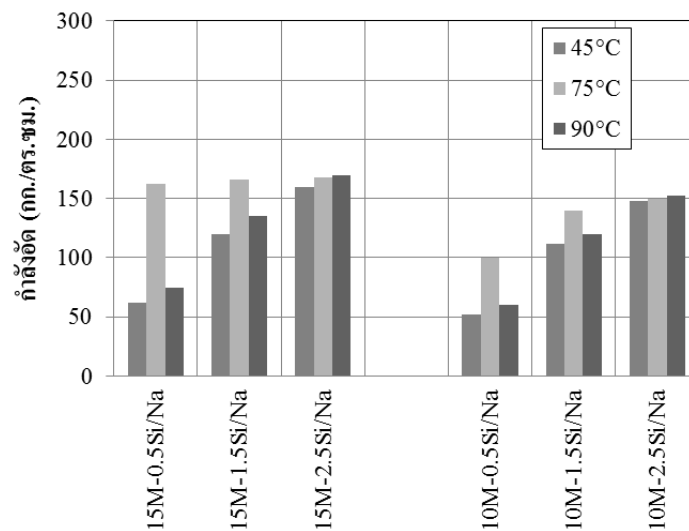
ค) บ่มที่อุณหภูมิ 90 °C

รูปที่ 5 ผลของอัตราส่วนของ Na₂SiO₃/NaOH ต่อค่าลึงอัดของอีพ็อกซีโพลีเมอร์มอร์ตาร์เฝ้าป่าลัมน้ำมัน บ่มที่อุณหภูมิ ก) 45 °C, ข) 75 °C และ ค) 90 °C

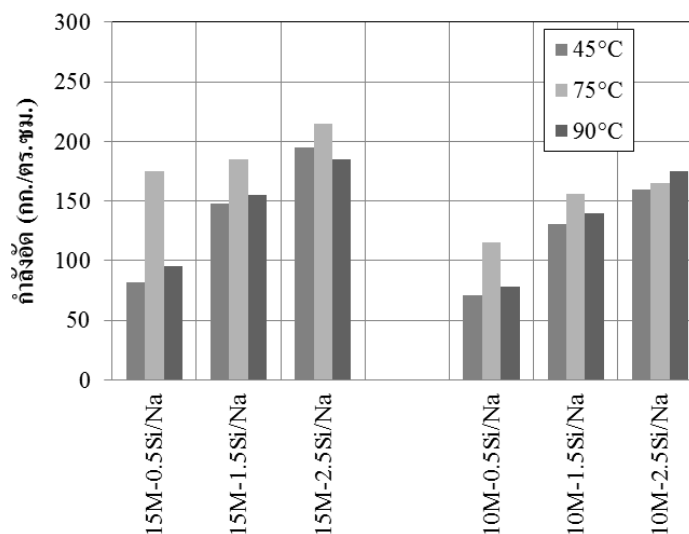
4.4.3 ผลของอุณหภูมิการบ่มต่อค่าลึงอัด

รูปที่ 6 แสดงผลของอุณหภูมิการบ่มที่ 45 °C, 75 °C และ 90 °C โดยรูปที่ 6 ก) นำตัวอย่างเข้าตู้อบทันที และ ข) พักตัวอย่างทิ้งไว้ 1 ชั่วโมงก่อนเข้าตู้อบ (Delay time) ผลการทดสอบพบว่าอีพ็อกซีโพลีเมอร์มอร์ตาร์ที่มีการบ่มในตู้อบที่อุณหภูมิ 75 °C มีค่าลึงรับแรงอัดสูงที่สุด เนื่องจาก หากอุณหภูมิต่ำส่งผลให้ตัวอย่างมีความชื้นที่อยู่ภายในมอร์ตาร์มีค่าสูง เมื่อทำการทดสอบจะพบว่าการวิบัติแบบไม่สมมาตร กล่าวคือ จะวิบัติที่ผิวภายนอกโดยที่แกนกลางยังมีความชื้นอยู่ซึ่งทำให้ได้ค่าลึงต่ำ [14, 16, 21, 22] เมื่อบ่มตัวอย่างที่อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส ค่าลึงอัดของอีพ็อกซีโพลีเมอร์ผสมเฝ้าป่าลัมน้ำมันมีแนวโน้มสูงกว่าการบ่มที่อุณหภูมิ 45 และ 90 องศาเซลเซียส ค่าลึงอัดมีแนวโน้มลดลง เมื่อบ่มที่อุณหภูมิสูงขึ้นถึง 90 องศาเซลเซียส

ผลการทดสอบครั้งนี้แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิการบ่มส่งผลต่อการเกิดปฏิกิริยาของอีพ็อกซีโพลีเมอร์ กล่าวคือ อุณหภูมิการบ่มมีผลต่อค่าลึงอัดเนื่องจากเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา การพัฒนาค่าลึงอัดของอีพ็อกซีโพลีเมอร์มีแนวโน้มลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงถึง 90 องศาเซลเซียส เนื่องจากการระเหยไปอย่างรวดเร็วของความชื้นอย่างต่อเนื่องที่ภายใต้สภาวะความร้อนสูงมาก สอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา [14, 16] ดังนั้นการผลิตอีพ็อกซีโพลีเมอร์จากเฝ้าป่าลัมน้ำมัน ควรบ่มที่อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส ผลทดสอบคล้ายกับงานวิจัยที่ผ่านมาบางชิ้น [14]



ก) ตัวอย่างเข้าสู่ตู้อบทันที

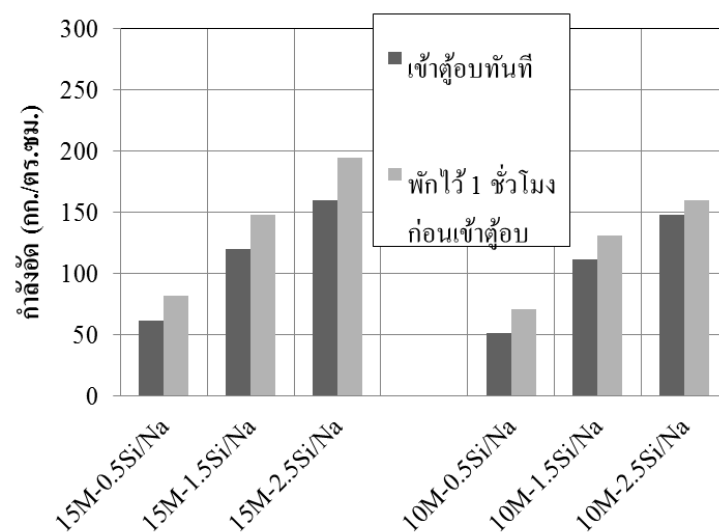


ข) ตัวอย่างพักไว้ 1 ชั่วโมงก่อนเข้าสู่ตู้อบ (Delay time)

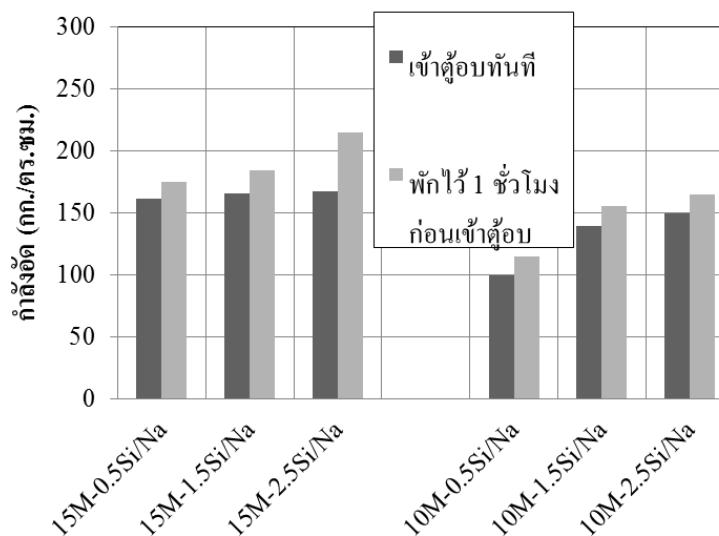
รูปที่ 6 ผลของอุณหภูมิในการบ่ม ก) ตัวอย่างเข้าสู่ตู้อบทันที และ ข) ตัวอย่างพักไว้ 1 ชั่วโมงก่อนเข้าสู่ตู้อบ (Delay time)

4.4.4 การหน่วงระยะเวลาในการเข้าสู่ของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ (Delay time)

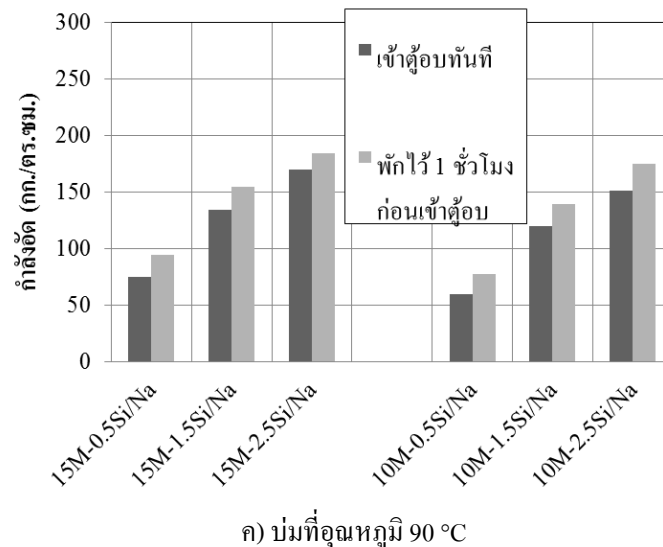
รูปที่ 7 ก), ข) และ ค) แสดงผลการทดสอบระยะเวลาในการเข้าสู่ของจีโอโพลิเมอร์ บ่มที่อุณหภูมิเท่ากับ 45 °C, 75 °C และ 90 °C ซึ่งผลทดสอบพบว่า จีโอโพลิเมอร์จากเถาปาล์มน้ำมัน ที่มีการพักไว้ 1 ชั่วโมงก่อนเข้าสู่อบ มีค่ากำลังอัดสูงกว่าการนำตัวอย่างเข้าสู่อบทันทีที่ผสมเสร็จ เนื่องจากการทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องทำให้เกิดปฏิกิริยาอย่างช้า ๆ และเกิดการแข็งตัว ทำให้มีการพัฒนากำลังอัดได้ดีกว่าการอบด้วยความร้อนทันทีที่ผสมเสร็จ ผลทดสอบสอดคล้องกับงานวิจัยบางชิ้น [14, 16, 21, 22]



ก) บ่มที่อุณหภูมิ 45 °C



ข) บ่มที่อุณหภูมิ 75 °C



รูปที่ 7 ผลการห้วงเวลาการบ่มที่อุณหภูมิ ก) 45 °C, ข) 75 °C และ ค) 90 °C ต่อกำลังอัดของมอร์ตาร์

5. สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้สามารถสรุปผลได้ ดังนี้

- 1) ในทุกส่วนผสมของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ถ้าปาล์มน้ำมันมีค่าการไหลแผ่ เท่ากับร้อยละ 108-115 และอัตราส่วนของสารละลายต่อเนื้อดินหินมีค่าคงที่เท่ากับ 0.65 และส่วนผสมที่มีความเหนียวขึ้น จำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องเติมน้ำเพิ่มเติม (Extra water) ลงไปในส่วนผสมเพื่อให้สามารถทำงานได้
- 2) จีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่มีปริมาณความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์สูง มีค่ากำลังอัดสูงกว่าตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่มีปริมาณความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่ำ
- 3) กำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์มีค่าสูงขึ้นตามอัตราส่วนของ $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ ที่เพิ่มขึ้น
- 4) จีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่มีการบ่มในตู้อบที่อุณหภูมิ 75 °C มีค่ากำลังรับแรงอัดสูงที่สุด เมื่อเทียบกับอุณหภูมิ 45 °C และ 90 °C
- 5) จีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากปาล์มน้ำมันบดที่มีการพักไว้ 1 ชั่วโมงก่อนเข้าตู้อบ (Delay time) มีค่ากำลังอัดสูงกว่าการนำตัวอย่างเข้าตู้อบทันที

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับสนับสนุนทุนวิจัยและสถานที่ดำเนินการวิจัยจาก มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ และ Sustainable Infrastructure Research and Development Center และ Thailand Research Fund (TRF) under the TRF Distinguished Research Professor Grant No. DPG6180002 และขอขอบคุณสาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ที่ให้ความอนุเคราะห์สถานที่ในการดำเนินงานวิจัย

เอกสารอ้างอิง

- [1] ASTM, C618. Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use as a Mineral Admixture in Concrete. *Annual Book of ASTM Standard*, 2005 04.02, pp. 323-325.
- [2] Bahurudeen, A. *et al.* Development of sugarcane bagasse ash based Portland pozzolana cement and evaluation of compatibility with superplasticizers. *Construction and Building Materials*, 2014, 68, pp. 465-475.
- [3] Chindaprasirt, P. *et al.* Resistance to chloride penetration of blended Portland cement mortar containing palm oil fuel ash, rice husk ash and fly ash., *Construction and Building Materials*, 2008, 22(5), pp. 932-938.
- [4] Chindaprasirt, P. *et al.* Use of palm oil fuel ash to improve chloride and corrosion resistance of high-strength and high-workability concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2011, 23(4), pp. 499-503.
- [5] Rukzon, S. and Chindaprasirt, P. Strength and chloride penetration of Portland cement mortar containing palm oil fuel ash and ground river sand, *Computers and Concrete*, 2009, 6(5), pp. 391-401.
- [6] Chopra, D. *et al.* Strength, permeability and microstructure of self-compacting concrete containing rice husk ash. *Biosystems Engineering*, 2015, 130, pp. 72-80.
- [7] Rukzon, S. and Chindaprasirt, P. Strength, porosity and chloride resistance of mortar using combination of two kinds of the pozzolanic materials. *International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials*, 2013, 20(8), pp. 808-814.
- [8] Chalee, W. *et al.* Utilization of rice husk-bark ash to improve the corrosion resistance of concrete under 5-year exposure in a marine environment. *Cement and Concrete Composites*, 2013, 37, pp. 47-53.
- [9] Rukzon, S. and Chindaprasirt, P. 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 of Sciences*, 2018, 45(4), pp. 863-1874
- [10] Rukzon, S. and Chindaprasirt, P. Use of ternary blend of Portland cement and two pozzolans to improve durability of high-strength concrete. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 2014, 18(6), pp. 1745-1752.
- [11] Neville AM. *Properties of concrete*. 4th and Final Edition. Malaysia: Longman Group Limited; 1995.
- [12] Rukzon, S. and Chindaprasirt, P. Utilization of bagasse ash in high-strength concrete. *Materials and Design*, 2011, 34, pp. 45-50.
- [13] Rukzon, S. and Chindaprasirt, P. Strength and porosity of bagasse ash-based geopolymer mortar. *Journal of Applied Sciences*, 2014, 14(6), pp. 586-591.
- [14] Chindaprasirt, P. *et al.* Workability and strength of coars high calcium fly ash geopolymer mortar. *Cement and Concrete Composite*, 2007, 29, pp. 224-229.
- [15] Davidovits, J. *et al.* Chemistry of Geopolymeric Systems Terminology in Geopolymer '99. *International Conference, France*, 1999, 1(1), pp. 9-40.
- [16] Sathonsaopark, A. *et al.* Workability and strength of lignite bottom ash geopolymer mortar., *Journal of Hazardous Materials*, 2009, pp. 168, 45-50.
- [17] ASTM, C33. Standard Specification Concrete Aggregates. *Annual Book of ASTM Standard*, 2005, 04.02, 10-20.
- [18] ASTM, C136. Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates. *Annual Book of ASTM Standard*, 2005, 04.02, pp. 88-92.
- [19] Awal, A.S.M. and Hussin, M. The effectiveness of palm oil fuel ash in preventing expansion due to alkali-silica reaction. *Cement and Concrete Composites*, 1997, 19(4), pp3 67-372.
- [20] Coutinho, J.S. The combined benefits of CPF and RHA in improving the durability of concrete structures. *Cement and Concrete Composites*, 2003, 25(1), pp. 51-59.
- [21] Dias, DP. and Thaumaturgo, C. Fracture toughness of geopolymeric concretes reinforced with basalts fibers. *Cement and Concrete Composite*, 2005, 27, pp. 49-54.
- [22] Palomo, A. *et al.* Alkali-activated fly ashes: A cement for the future. *Cement and Concrete Research*, 1999, 8(29), pp. 1323-1329.

