



การพัฒนาจีโอโพลิเมอร์ความแข็งแรงสูงด้วยเถ้าชานอ้อยวงไวสูง

ภคมน กิตติสยาม¹ ธรรมรส ปันทองสุข¹ อาคิรา ศรีคชา¹ ดวงฤดี ฉายสุวรรณ¹ และ
ชญานี ทิพยเสมอ^{2*}

¹ ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

² ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมการเชื่อม, วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า
พระนครเหนือ

*ผู้ประสานงานเผยแพร่ (Corresponding Author), E-mail: chayanee.t@cit.kmutnb.ac.th

วันที่รับบทความ: 5 ตุลาคม 2563; วันที่ทบทวนบทความ: 2 พฤศจิกายน 2563; วันที่ตอบรับบทความ: 9 พฤศจิกายน 2563

วันที่เผยแพร่ออนไลน์: 9 ธันวาคม 2563

บทคัดย่อ: จีโอโพลิเมอร์เป็นวัสดุชนิดใหม่ที่มีสมบัติคล้ายคลึงกับปูนซีเมนต์ จึงมักถูกนำมาใช้ในอุตสาหกรรมการก่อสร้างเนื่องจากมีกำลังรับแรงอัดสูง โดยจีโอโพลิเมอร์ผลิตมาจากวัสดุอะลูมิเนียมซิลิเกตที่เรียกว่าวัสดุปอชโซลาน เช่น เมตาเคโอลิน เถ้าลอย เถ้าชานอ้อย และเถ้าแกลบ ผสมกับสารละลายอัลคาไลที่มีความเป็นด่างสูงเพื่อเกิดปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ไรเซชัน แต่ในการนำเอาซีเถ้าจากการเกษตร มาใช้นั้นมีข้อจำกัดอยู่ที่ความวงไวในการทำปฏิกิริยา หากวัสดุปอชโซลานมีความวงไวในการทำปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ไรเซชันต่ำจะทำให้กำลังรับแรงอัดช่วงต้นของชิ้นงานมีค่าน้อยเช่นเดียวกัน ดังนั้นในงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ที่ทำให้เถ้าชานอ้อยมีความวงไวสูงต่อการทำปฏิกิริยาโดยการนำเถ้าชานอ้อยไปแช่ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และเกิดเป็นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ชนิดซิลิกาสูง (Silica-rich (SR)-NaOH) ในงานวิจัยนี้ใช้วัสดุปอชโซลานอัตราส่วนระหว่างเมตาเคโอลินต่อเถ้าชานอ้อยที่ 80:20 และอัตราส่วนปอชโซลานต่อสารละลายอัลคาไลเท่ากับ 1:1 ปริมาณเถ้าชานอ้อยแตกต่างกันที่ 0, 20 และ 50 เปอร์เซ็นต์ ผสมเข้ากับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 10 โมลาร์ ได้เป็นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ชนิดซิลิกาสูง จากนั้นทดสอบสมบัติทางเคมี ได้แก่ การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเครื่องฟูเรียรทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วย เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ และความสามารถในการละลายของต่าง จากผลการทดสอบพบว่าการใช้ SR-NaOH ที่ผสมเถ้าชานอ้อย 50 เปอร์เซ็นต์ จะมีค่ากำลังรับแรงอัดสูงที่สุด โดยมีค่ากำลังรับแรงอัดสูงกว่าชิ้นงานที่ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เชิงพาณิชย์มากกว่า 2 เท่า ที่อายุบ่ม 7 วันและมากกว่า 3.5 เท่าที่อายุบ่ม 28 วัน

คำสำคัญ: จีโอโพลิเมอร์ชนิดเมตาเคโอลิน; เถ้าชานอ้อยวงไวสูง; ความแข็งแรงรับแรง; สารละลายโซเดียมซิลิเกต; สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ชนิดซิลิกาสูง



Development of High-Strength Geopolymers by High-Reactive Bagasse Ash

Pakamon Kittisayarm¹ Thammaros Pantongsuk¹ Akeru Srikhacha¹,
Duangrudee Chaysuwan¹ and Chayanee Tippayasam^{2*}

¹ Department of Materials Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University

² Department of Welding Engineering Technology, College of Industrial Technology,
King Mongkut's University of Technology North Bangkok

* Corresponding author, E-mail: chayanee.t@cit.kmutnb.ac.th

Received: 5 October 2020; Revised 2 November 2020; Accepted: 9 January 2020

Online Published: 9 December 2020

Abstract: Geopolymer is a new material whose properties are similar to cement. Therefore, it is often used in the construction industry due to its high compressive strength. Geopolymers are made from aluminosilicate materials called pozzolanic materials such as metakaolin, fly ash, bagasse ash and rice husk ash mixed with a high alkali solution to occur geopolymerization, however, the agricultural ashes have limited reactivity. Since the pozzolanic materials had low reactivity for geopolymerization, the early compressive strength of geopolymer was low as well. Therefore, this research aimed to prepare the high-reactive bagasse ash by soaking the ash in sodium hydroxide solution to transform into silica-rich sodium hydroxide (SR-NaOH). In this study, the ratio of metakaolin and bagasse ash was 80:20 and the ratio of solid to alkali liquid was 1:1. The quantity of bagasse ash for SR-NaOH was varied as 0, 20 and 50%, mixed with 10M NaOH. The chemical properties were characterized including the functional group analysis by FTIR, the chemical compositions by XRD and the alkalinity test. From the results, it was found that the usage of SR-NaOH with 50 percent of bagasse ash presented the highest compressive strength which was 2 times at 7 day age and 3.5 times at 28 day age higher than that of commercial NaOH.

Keywords: Metakaolin-based geopolymer; High-reactive bagasse ash; Compressive strength; Sodium silicate solution; Silica-rich sodium hydroxide,



1. บทนำ

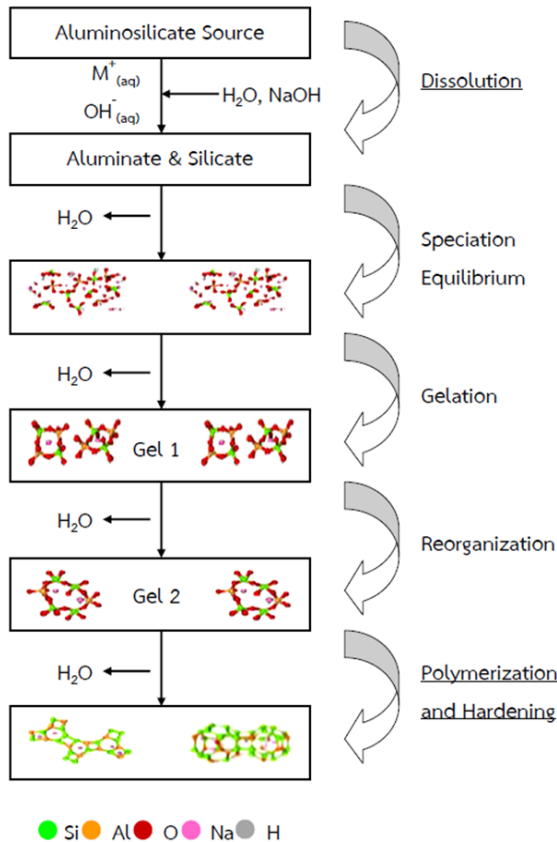
ในอุตสาหกรรมก่อสร้าง ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ถือเป็นวัสดุหลักที่ใช้งานก่อสร้างนิยมใช้กันแพร่หลายเนื่องจากมีความแข็งแรงสูง ทนทาน มีอายุการใช้งานสูง [1] เนื่องจากอุณหภูมิที่ใช้ในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์นั้นค่อนข้างสูงมากโดยใช้อุณหภูมิสูงถึง 1,400–1,600 องศาเซลเซียส [2] ส่งผลให้มีการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) [3-4] ในปริมาณที่สูงก่อให้เกิดเป็นภาวะโลกร้อน (Global Warming) [5] ดังนั้นเพื่อลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม [6, 7] Robert Mccaffrey ได้นำเสนอ 3 แนวทางการลดการปลดปล่อย CO_2 จากโรงงานปูนซีเมนต์ ได้แก่ (1) ลดปริมาณวัสดุที่ต้องผ่านกระบวนการเผาในปูนซีเมนต์ (2) ลดการใช้ซีเมนต์ และ (3) ลดสิ่งปลูกสร้างจากซีเมนต์ ดังนั้นเพื่อลดการใช้ปูนซีเมนต์ Dr. Joseph Davidovits [8, 9] ได้เสนอวัสดุจีโอโพลิเมอร์ (Geopolymer) เป็นวัสดุทางเลือกเพื่อใช้ทดแทนปูนซีเมนต์ [10]

จีโอโพลิเมอร์ [11] คือวัสดุที่มีส่วนประกอบของอะลูมิเนียมซิลิเกตที่มีโครงสร้าง 3 มิติแบบอสัณฐาน (Amorphous) ประกอบด้วยวัสดุปอซโซลาน [12] (Pozzolanic materials) มีส่วนประกอบหลักของซิลิกา (SiO_2) กับอะลูมินา (Al_2O_3) เป็นองค์ประกอบหลัก [13] เช่น เมตาเคโอลิน (Metakaolin) และ วัสดุของเหลือทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและการเกษตร เช่น เถ้าลอย (Fly ash) เถ้าชานอ้อย (Bagasse ash) และ เถ้าแกลบ (Rice husk ash) ที่ถูกทำให้แตกตัวด้วยสารละลายอัลคาไลหรือสารละลายที่เป็นด่างสูง [14] เช่น สารละลายโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) หรือโพแทสเซียม-

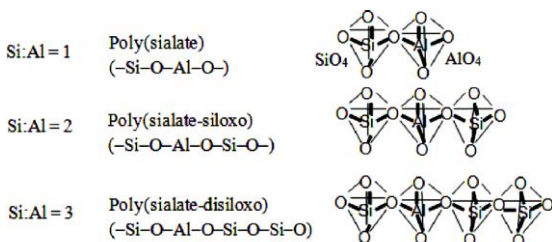
ซิลิเกต (K_2SiO_3) โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) ทำปฏิกิริyajีโอโพลิเมอไรเซชัน (Geopolymerization)

จีโอโพลิเมอร์เกิดจากปฏิกิริyajีโอโพลิเมอไรเซชัน โดยสามารถแบ่งปฏิกิริyajีโอโพลิเมอไรเซชันได้ 2 ชั้น [15-17] คือ (1) การชะละลาย (Dissolution) ซึ่งเกิดขึ้นเมื่อสารประกอบอะลูมิเนียมซิลิเกตผสมกับสารละลายมีความเป็นด่างสูง ได้เป็นอะลูมิเนต และซิลิเกตทรงหน่วยสี่หน้าที่เกิดโคออร์ดิเนตแบบสี่แขนกับออกซิเจน (O) ซึ่งกระจายตัวและจัดเรียงตัวใหม่ในลักษณะของเจล และ (2) การทำปฏิกิริยาควแน่น (Condensation & Chain polymerization) ซึ่งเกิดการรวมตัวกันของผลผลิตที่ได้จากปฏิกิริยาเบื้องต้น กลายเป็นสารที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ขึ้น และปลดปล่อยโมเลกุลของน้ำออกมาในช่วงต้นจะได้หน่วยที่กึ่งเสถียร (Meta-stable) ที่มีปริมาณอะลูมิเนียม (Aluminium; Al) สูง เมื่อเกิดปฏิกิริยามากขึ้นจะเปลี่ยนเป็นหน่วยที่มีซิลิกอน (Silicon; Si) มากขึ้น ดังรูปที่ 1 ซึ่งได้แก่ พอลิเซียเลต (Polysialate; PS), พอลิเซียเลตไซลอกโซ (Polysialate Siloxo; PSS) และพอลิเซียเลต ไดไซลอกโซ (Polysialate Disiloxo; PSDS) ดังรูปที่ 2 จากนั้นทำปฏิกิริยาหลุกโซ่ทำให้โมเลกุลเชื่อมขวางกันมากขึ้นในลักษณะโพลิเมอร์ ผลิตภัณฑ์ที่ได้หลังจากปฏิกิริยาจึงมีความหนาแน่นขึ้น ทำให้เกิดโครงสร้างรับแรงได้ กลไกการเกิดปฏิกิริยาของจีโอโพลิเมอไรเซชัน

การต่อสายโซ่โมเลกุลจะแสดงอัตราส่วน $\text{SiO}_2:\text{Al}_2\text{O}_3$ ที่แตกต่างกันโดย $\text{SiO}_2:\text{Al}_2\text{O}_3$ เป็นปัจจัยสำคัญทางด้านองค์ประกอบทางเคมีที่จะส่งผลต่อสมบัติของจีโอโพลิเมอร์ จากงานวิจัยของ De Silva, Sagoe-Crenstil, & Sirivivatnanon [18] ศึกษาการเกิด



รูปที่ 1 แบบจำลองกลไกการเกิดปฏิกิริยาของ จีโอโพลิเมโรเซชัน [16]



รูปที่ 2 รูปแบบพื้นฐานของจีโอโพลิเมอร์ [17]

ปฏิกิริยาในช่วงต้นของจีโอโพลิเมอร์ โดยการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนผสมระหว่างเมตาเคโอลินต่อสารละลายอัลคาไล โดยการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนโมลาร์ของ SiO₂:Al₂O₃ บ่มร้อนที่อุณหภูมิ 40 °C เป็นเวลา 72 ชั่วโมง เพื่อทดสอบระยะเวลาการก่อตัว พบว่าการเพิ่มอัตราส่วน SiO₂:Al₂O₃ มีผลทำให้ระยะเวลาก่อตัวนานขึ้น ลักษณะการพัฒนาที่กำลังช่วงต้น พบว่าการเพิ่มอัตราส่วน SiO₂:Al₂O₃ ไปจนถึง 3.4-3.8 ส่งผลให้ได้กำลังดีที่สุดและ จากงานวิจัยของ Zhang, Sun, & Li [19] ทำการศึกษาผลกระทบของอัตราส่วนโมลาร์ของ SiO₂:Al₂O₃ ของเคโอลิน พบว่ามีอัตราส่วนโมลาร์น้อยกว่าเมตาเคโอลิน นอกจากนี้ อัตราส่วนระหว่าง Si ต่อ Al เป็นตัวแยกการใช้งานในประเภทต่างๆ แสดงดังตารางที่ 1 [20]

ตารางที่ 1 อัตราส่วนความเข้มข้นของ Si ต่อ Al และการนำไปใช้งานของจีโอโพลิเมอร์จากเมตาเคโอลิน

Si : Al	การนำไปใช้งาน
1:1	อิฐ เซรามิก และวัสดุกันไฟ
2:1	ซีเมนต์ คอนกรีต และวัสดุกักเก็บกัมมันตรังสี และสารพิษ
3:1	วัสดุกันไฟ กันความร้อน อุปกรณ์สำหรับงานหล่อ และเครื่องมือต่างๆ
> 3:1	วัสดุกันรั่ว
20-35:1	วัสดุกันไฟ และกันความร้อน

ดังนั้นในงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มกำลังรับแรงอัดในระยะต้นของจีโอโพลิเมอร์ด้วยการเพิ่มปริมาณซิลิกา ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เพื่อให้เกิดเป็นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ชนิดซิลิกาสูงเป็นการเร่งปฏิกิริยาจีโอโพลิเมโรเซชัน จากการนำเข้าฐานอ้อยที่มีปริมาณซิลิกาสูงแต่มี



ความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์เซชันต่ำผสมโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 10 โมลาร์เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ทำให้เถ้าชานอ้อย อยู่ในสภาพที่ว่องไวต่อการทำปฏิกิริยามากขึ้นพร้อมทำปฏิกิริยาให้เกิดจีโอโพลิเมอร์เซชัน ที่มีกำลังรับแรงกดอัดสูงในเวลารวดเร็วตลอดจนสามารถพัฒนาเป็นวัสดุนำมาใช้ทดแทนปูนซีเมนต์ที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

2. วิธีการดำเนินงานวิจัย/ทดลอง

2.1 การเตรียมวัสดุปอชโซลาน

วัสดุปอชโซลานที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ได้แก่ เมตาเคโอลินและเถ้าชานอ้อยในอัตราส่วน 80:20 โดยดินขาว (Kaolin) ได้รับมาจากบริษัท มินเนอร์ล รีซอร์สเซส ดีเวลลอปเม้นท์ จำกัด จังหวัดระนอง นำมาเผาที่อุณหภูมิ 600 °C เป็นระยะเวลา 2 ชั่วโมง โดยใช้ อัตราการเพิ่มอุณหภูมิที่ 10 °C ต่อนาที เพื่อเปลี่ยนโครงสร้างจาก Kaolin (Al₂O₃·2SiO₂·2H₂O) เป็นโครงสร้าง Metakaolin (Al₂O₃·2SiO₂) [21] โดยขนาดผ่านตะแกรงขนาด 325 เมช ร้อยละ 90 ส่วนเถ้าชานอ้อย (Bagasse ash; BA) ได้มาจากโรงงานน้ำตาลจังหวัดชลบุรี นำเถ้าชานอ้อยไปบดเป็นเวลา 10 ชั่วโมง แล้วร่อนผ่านตะแกรงขนาด 325 เมช (<45 ไมโครเมตร)

2.2 การเตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ชนิดซิลิกาสูง (Silica-rich Sodium Hydroxide; SR-NaOH)

เตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 10 โมลาร์ (10 M NaOH) ในขวดวัดปริมาตรขนาด 1000 มล. จากโซเดียมไฮดรอกไซด์ 400 กรัม

ทิ้งไว้เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ก่อนนำมาใช้ผสมกับเถ้าชานอ้อยละเอียดในปริมาณที่แตกต่างกันได้แก่ 0, 20 และ 50 wt% ของวัสดุปอชโซลาน เพื่อให้เถ้าชานอ้อยถูกชะละลายและว่องไวต่อการทำปฏิกิริยามากขึ้น

2.3 การเตรียมจีโอโพลิเมอร์เพสต์

จีโอโพลิเมอร์เพสต์ (Geopolymer Paste) เตรียมโดยใช้เมตาเคโอลิน:เถ้าชานอ้อย ในอัตราส่วน 80:20 ผสมจนเป็นเนื้อเดียวกันในเครื่องผสม เติมน้ำละลายอัลคาไลในอัตราส่วนปอชโซลาน:สารละลายอัลคาไลเท่ากับ 1:1 โดยเริ่มจากผสมสารละลาย SR-NaOH ผสมให้เข้ากับวัสดุปอชโซลาน จากนั้นจึงผสม Na₂SiO₃ ผสมจนเป็นเนื้อเดียวกัน โดยที่สารละลายอัลคาไลเตรียมจาก SR-NaOH : Na₂SiO₃ เท่ากับ 1:1 จากนั้นเทจีโอโพลิเมอร์เพสต์ใส่แม่พิมพ์อะคริลิกทรงลูกบาศก์ขนาด 25 x 25 x 25 มม³ ห่อด้วยฟิล์มพลาสติกที่อุณหภูมิ 80 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นชิ้นงานจะถูกบ่มไว้ที่อุณหภูมิห้องจนครบอายุบ่มเพื่อทำการทดสอบอัตราส่วนผสมแสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ส่วนผสมของจีโอโพลิเมอร์เพสต์

Mixture	Pozzolanic Materials (wt%)		BA in SR-NaOH (wt% of Pozzolanic)	Alkali Solutions (wt%)	
	MK	BA		SR-NaOH	Na ₂ SiO ₃
	BA0	80	20	0	50
BA20	80	20	20	50	50
BA50	80	20	50	50	50



2.4 การวิเคราะห์และทดสอบ

2.4.1 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุพอลิโพรพิลีน

วิเคราะห์ปริมาณออกไซด์ (Oxide) ของเมตาเคโอลินและแก้วซันอ้อยด้วยเครื่องวิเคราะห์ส่วนประกอบทางเคมี (X-ray Fluorescence; XRF) (Horiba, XGT-5200, Japan) เพื่อนำมาคำนวณหาอัตราส่วนระหว่างซิลิกอนต่ออะลูมิเนียม (Si:Al) และโซเดียมต่ออะลูมิเนียม (Na:Al) และวิเคราะห์ตัวอย่างด้วยเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray diffractometer, XRD) (X'pert, Philips, Netherlands) เพื่อยืนยันองค์ประกอบของวัสดุ

2.4.2 วิเคราะห์สมบัติของจีโอโพลิเมอร์เพสต์

วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ (Fourier Transform Infrared Spectrometer; FT-IR) โดยการบดชิ้นงานจีโอโพลิเมอร์ด้วยโกรบดสาร (Agate mortar) ให้ละเอียดและมีการกระจายตัวสม่ำเสมอแล้วนำเข้าเครื่อง FT-IR

วิเคราะห์โครงสร้างผลึกโดยบดชิ้นงาน จีโอโพลิเมอร์ให้ละเอียดและมีการกระจายตัวสม่ำเสมอเพื่อเข้าเครื่อง XRD อัดผงงานลงใน Holder ให้แน่น วิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD โดยใช้พารามิเตอร์ดังนี้ กระแสไฟฟ้า 35 mA ความต่างศักย์ 40 kV, Step Size 0.02°, Time per Step 0.4 s, Scan Range 5° – 80° มุม 2θ และใช้ระยะเวลาสแกน 45 นาที

ทดสอบกำลังรับแรงอัดของชิ้นงานจีโอโพลิเมอร์เพสต์ดำเนินการตามมาตรฐาน ASTM C109 [22] ด้วยเครื่อง Universal Testing Machine, UTM (Hounsfield, H50KS, England) ขนาดชิ้นงาน 25 x 25 x 25 มม³ ที่อายุบ่ม 7, 14 และ 28 วัน โดยใช้ชิ้นงานทดสอบที่มีอายุบ่มเท่ากันจำนวน 4 ตัวอย่างต่อ 1 สูตร

การทดสอบการดูดซึมน้ำ (Water absorption) ความหนาแน่นรวม (Bulk density) และ ความพรุนตัวปรากฏ (Apparent porosity) โดยทดสอบจากชิ้นงานที่มีอายุบ่ม 28 วัน ขนาดชิ้นงาน 25 x 25 x 25 มม³ จำนวนสูตรละ 4 ชิ้น โดยอบชิ้นงานในเตาอบที่มีอุณหภูมิ 105 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วนำไปชั่งน้ำหนักแห้ง และนำไปแช่น้ำ 24 ชั่วโมง จากนั้นนำไปชั่งน้ำหนักในน้ำและในอากาศ ตามมาตรฐาน ASTM C642-13 [23]

ทดสอบความสามารถในการชะละลายความเป็นต่าง [24] โดยการนำจีโอโพลิเมอร์เพสต์อายุ 28 วัน ขนาด 25 x 25 x 25 มม³. ไปแช่น้ำปริมาณ 225 mL เป็นระยะเวลา 15 นาที จากนั้นวัดค่า pH ที่ได้ และนับจำนวนครั้งของการชะจนกว่าค่า pH ของจีโอโพลิเมอร์เพสต์มีค่าเท่ากับ 7 เพื่อทดสอบความสามารถในการชะละลายความเป็นต่างของจีโอโพลิเมอร์เพสต์

3. ผลการวิจัย/ทดลองและการอภิปรายผล

3.1 ผลวิเคราะห์ของวัสดุพอลิโพรพิลีน

3.1.1 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุพอลิโพรพิลีน

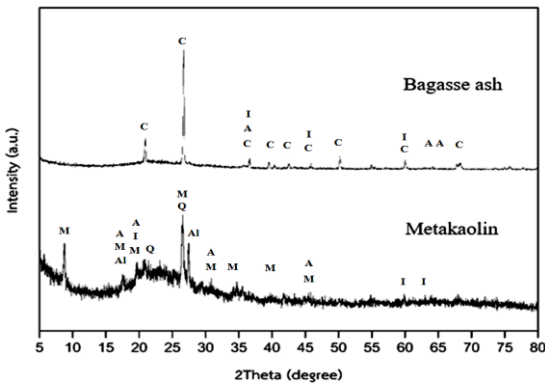
ตารางที่ 3 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุพอลิโพรพิลีนจากการวิเคราะห์ด้วย XRF พบว่าเมตาเคโอลินและแก้วซันอ้อยมีปริมาณซิลิกา 53.39 และ 68.61% และมีอะลูมินา 43.98 และ 5.67% ซึ่งเมตาเคโอลินและแก้วซันอ้อยมีอัตราส่วน Si /Al 1.21 และ 12.10 ตามลำดับ ซึ่งการผลติจีโอโพลิเมอร์ที่มีความแข็งแรงสูงนั้นค่า Si/Al ควรอยู่ที่ 2-3 ทั้งเมตาเคโอลินและแก้วซันอ้อยในงานวิจัยนี้จึงไม่เหมาะสมที่จะใช้เป็นวัสดุหลักในการผลิตจีโอโพลิเมอร์



ตารางที่ 3 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุปอซโซลาน

Pozzolans	Chemical compositions (wt.%)								
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	LOI
Metakaolin	53.39	43.98	0.63	0.04	0.08	-	0.86	0.02	1.00
Bagasse ash	68.61	5.67	4.06	2.73	1.58	0.18	3.41	0.23	13.53

คณะผู้วิจัยจึงมีแนวทางในการผสมเมตาเคโอลิน และเถ้าชานอ้อยในอัตราส่วน 80 ต่อ 20 เพื่อปรับอัตราส่วนของ Si /Al ให้มีค่าที่เหมาะสมมากขึ้น



รูปที่ 3 ผลการวิเคราะห์ XRD ของวัสดุหลัก (เมตาเคโอลิน และเถ้าชานอ้อย)

จากรูปที่ 3 ผลการวิเคราะห์ XRD แสดงถึงเมตาเคโอลินที่มีความเป็นอสัณฐาน (Amorphous) ผสมกับโครงสร้างผลึก (Crystalline) ประกอบไปด้วย Quartz หรือ Silica และ Muscovite เป็นหลัก ส่วนเถ้าชานอ้อยจะพบพีคของ Cristobalite ซึ่งรูปผลึกชนิดนี้มีสูตรทางเคมีคือ SiO₂ ซึ่งหมายความว่าองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าชานอ้อยส่วนใหญ่ประกอบไปด้วยซิลิกา M = Muscovite (KAl₂(AlSi₃O₁₀)(OH)₂, 00-007-0042), Q = Quartz (SiO₂, 01-089-8934), A = Alumina (Al₂O₃, 00-004-0877), Al = Alunite (KAl₃(SO₄)₂(OH)₆, 00-003-0616), C = Cristobalite

(SiO₂, 00-003-0257), I = Iron oxide (Fe₂O₃, 00-016-0895)

3.2 ผลวิเคราะห์ของจีโอโพลิเมอร์เฟสดี

3.2.1 อัตราส่วนระหว่าง Si:Al และ Na:Al

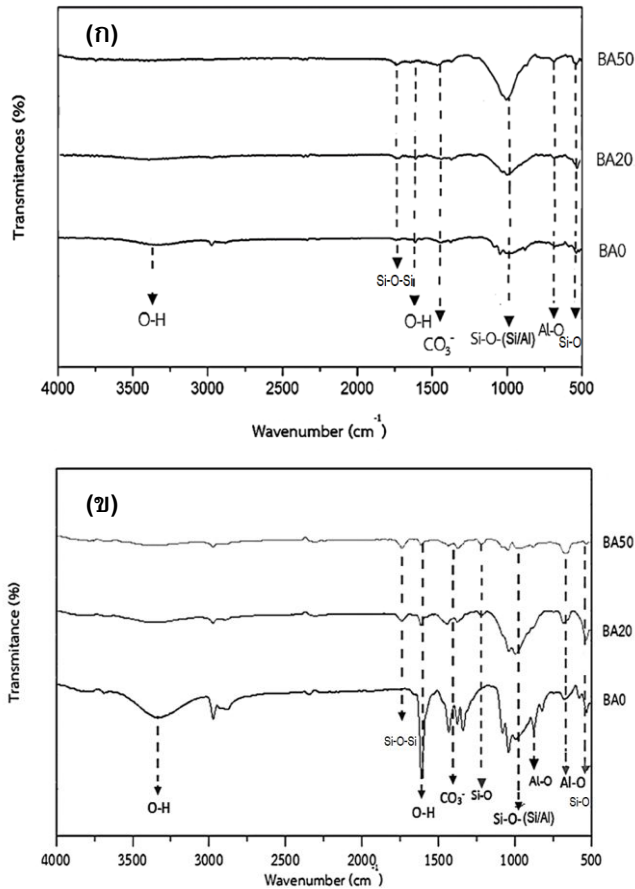
ค่าอัตราส่วนระหว่าง Si:Al มีค่าอยู่ในช่วง 1.79-2.45 (ตารางที่ 4) โดยพบว่าเมื่อเติมปริมาณเถ้าชานอ้อย (BA20 และ BA50) เพิ่มขึ้นอัตราส่วนระหว่าง Si:Al จะเพิ่มสูงขึ้น เท่ากับ 2.07 และ 2.45 ตามลำดับ เหมาะสมที่จะนำมาใช้สำหรับงานก่อสร้าง อัตราส่วนระหว่าง Si:Al ที่เหมาะสมประมาณ 2-3 [18, 20] และอัตราส่วน Na:Al ไม่เกินกว่า 1 ซึ่งในงานวิจัยนี้มีอัตราส่วน Na:Al อยู่ในช่วง 0.76-0.79 ซึ่งอยู่ในช่วงที่เหมาะสม

ตารางที่ 4 อัตราส่วนระหว่าง Si:Al และ Na:Al

Mixture	Si:Al	Na:Al
BA0	1.79	0.81
BA20	2.07	0.79
BA50	2.45	0.76

3.2.2 หมู่ฟังก์ชันของจีโอโพลิเมอร์เฟสดี

จากรูปที่ 4 (ก) พบว่าชั้นงานจีโอโพลิเมอร์เฟสดีที่อายุ 7 วัน พบพีคของ O-H ที่เลขคลื่น 3440 cm⁻¹ และ 1670 cm⁻¹ ซึ่งเป็นหมู่ฟังก์ชันของน้ำภายในโครงสร้างจีโอโพลิเมอร์ ที่เลขคลื่น 1440-1460 cm⁻¹



รูปที่ 4 หมู่ฟังก์ชันของจีโอโพลิเมอร์เฟสดีที่อายุบ่ม (ก) 7 วัน และ (ข) 28 วัน

พบหมู่ฟังก์ชัน C-O เกิดจากการเกิดปฏิกิริยาระหว่าง Na และ CO₂ ในอากาศ เกิดเป็น Na₂CO₃ พบได้ชัดเจนในสเปกตร BA0 ที่ช่วงเลขคลื่น 1030-900 cm⁻¹ เริ่มพบพีคของ Si-O-(Si/Al) ซึ่งเป็นหมู่ฟังก์ชันที่เกิดจากปฏิกิริยาจีโอโพลิเมไรเซชัน ที่ช่วงเลขคลื่น 980-950 cm⁻¹ ในสเปกตร BA0 และ BA20 ซึ่งจะเห็นการจับตัวของหมู่ฟังก์ชัน Si-O-(Si/Al) ชัดเจนมากที่อายุ 28 วัน ซึ่งเป็นโครงสร้างที่ให้ความแข็งแรงในจีโอโพลิเมอร์ [25] พบหมู่ฟังก์ชัน Si-O และ Al-O ที่ช่วง

เลขคลื่น 545-520 cm⁻¹ พบ Si-O ในโครงสร้างจีโอโพลิเมอร์ ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของวัตถุดิบตั้งต้นจากการพิจารณาหมู่ฟังก์ชันที่อายุบ่มช่วงต้นพบว่าชิ้นงาน BA0 ที่ใช้ NaOH แบบไม่ผสมเก้าชานอ้อยมีปรากฏของหมู่ O-H ที่ 3440 cm⁻¹ ซึ่งเป็น by-product จากการเกิด Si-O-Al ซึ่งเป็นเฟสที่ไม่เสถียรของจีโอโพลิเมอร์ ในขณะที่ชิ้นงาน BA20 และ BA50 ที่มีการใส่เก้าชานอ้อย 20 และ 50% ไม่พบ O-H แต่พบ Si-O-(Si/Al) แทน

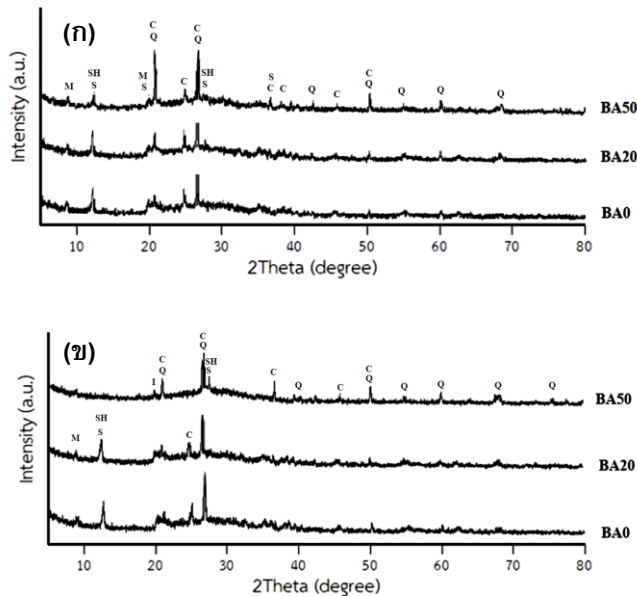


ในอายุบ่ม 28 วัน (รูปที่ 4 (ข)) พบว่าชั้นงานสูตร BA0 เกิดพีคของ O-H น้อยลงที่เลขคลื่น 3440 cm^{-1} และ 1670 cm^{-1} ซึ่งเป็นหมู่ฟังก์ชันของน้ำภายในโครงสร้างจีโอโพลิเมอร์ และเกิดพีคของ Si-O-(Si/Al) ที่เลขคลื่น 980-950 cm^{-1} ซึ่งเป็นโครงสร้างหลักที่ทำให้ความแข็งแรงในจีโอโพลิเมอร์ โดยจะเกิดพีคของ Si-O-(Si/Al) ชัดเจนในสูตรที่เพิ่มเก้าชานอ้อย 50% (BA50) ซึ่งสอดคล้องกับค่าความแข็งแรงรับแรงกดอัดที่มีค่าสูงเช่นกัน นอกจากนี้พบพีคของ Si-O ในช่วง 545-520 cm^{-1} สูตร BA0 ที่ใช้ NaOH เกรดเชิงพาณิชย์ ทำให้มีความเข้มข้นของ Na ที่มากกว่าสูตรอื่นจึงแสดงผลของหมู่ฟังก์ชัน ในรูปแบบที่คล้ายกัน

กับจีโอโพลิเมอร์ที่ใช้สารละลายอัลคาไล เฉพาะ NaOH ในการขึ้นรูป [26]

3.2.3 องค์ประกอบทางเคมีของจีโอโพลิเมอร์เพสต์

จากรูปที่ 5 วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของจีโอโพลิเมอร์เพสต์เปรียบเทียบอายุบ่ม (ก) 7 วัน และ (ข) 28 วัน ตามลำดับ พบว่าทุกสูตรเกิดปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอไรเซชัน ซึ่งยืนยันได้จากการพบพีค Sodium Aluminium Silicate และ Sodium Aluminium Silicate Hydrate ที่อายุบ่ม 7 วัน ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์หลักของปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอไรเซชันเมื่อเข้าถึงอายุบ่ม 28 วันพีคของ Sodium Aluminium Silicate ได้ลดลง หรือหายไป



S = Sodium Aluminium Silicate ($\text{Na}_6\text{Al}_6\text{Si}_{10}\text{O}_{32}$, 01-074-1787), Q = Quartz (SiO_2 , 01-089-8934), C = Calcium Silicate Hydrate ($\text{Ca}_2(\text{SiO}_3\text{OH})\text{OH}$, 00-006-0286), SH = Sodium Aluminium Silicate Hydrate ($\text{Na}_3 \cdot 6\text{Al}_3 \cdot 6\text{Si}_{12} \cdot 4\text{O}_{32} \cdot 14\text{H}_2\text{O}$, 00-044-0052), M = MuscoviteT ($(\text{K},\text{Na})(\text{Al},\text{Mg},\text{Fe})_2(\text{Si}_{3.1}\text{Al}_{0.9})\text{O}_{10}(\text{OH})_2$), I = Iron Oxide (Fe_2O_3 , 00-016-0895)

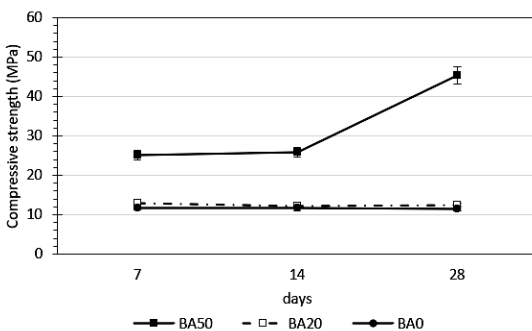
รูปที่ 5 ผลการวิเคราะห์ XRD ของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่อายุบ่ม (ก) 7 และ (ข) 28 วัน



เนื่องจากจีโอโพลิเมอร์มีโครงสร้างเป็นแบบอสัณฐาน จึงเป็นตัวยืนยันว่าจีโอโพลิเมอร์นั้นทำปฏิกิริยา สมบูรณ์ อีกทั้งมีการเกิด แคลเซียมซลิเกตไฮเดรต (C-S-H) เป็นผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาไฮเดรชันซึ่งเป็น โครงสร้างที่ให้ความแข็งแรงในปูนซีเมนต์และพบว่า เกิดขึ้นในจีโอโพลิเมอร์ส่งผลให้จีโอโพลิเมอร์มีค่า ความแข็งแรงรับแรงกดอัดสูงขึ้นที่อายุบ่ม 28 วัน

3.2.4 ค่ากำลังรับแรงอัด

จากรูปที่ 6 เมื่อเปรียบเทียบค่าความแข็งแรง รับแรงกดอัดของชิ้นงานจีโอโพลิเมอร์ที่ไม่เพิ่มและ เพิ่มเถ้าขานอ้อย (0, 20 และ 50%) พบว่าที่อายุบ่ม 7 และ 28 วัน การเติมเถ้าขานอ้อย 20% (BA20) ไม่ ส่งผลกระทบต่อค่าความแข็งแรงแต่เมื่อเพิ่มถึง 50% (BA50) สามารถเพิ่มความแข็งแรงมากกว่า 2 เท่า โดยสูตร BA50 มีค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุดคือ 45.38 MPa เนื่องจากสัดส่วน Si:Al กับ Na:Al ที่เหมาะสม ต่อการเกิดปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ไรเซชันโดย BA50 ให้กำลังรับแรงอัดสูงสุดที่ 28 วัน ซึ่งสอดคล้องกับผล ของ FTIR

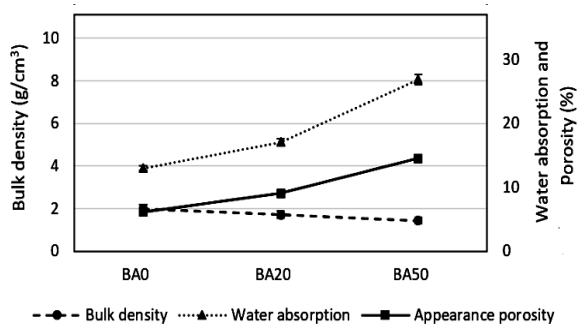


รูปที่ 6 ค่ากำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์ที่อายุบ่ม 7, 14, และ 28 วัน

3.2.5 การดูดซึมน้ำ ความพรุนปรากฏ และความหนาแน่นรวม

ผลการศึกษาสมบัติทางกายภาพ พบว่า การ ดูดซึมน้ำ ความพรุนปรากฏ และความหนาแน่นรวม ของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่อายุ 28 วัน แสดงในรูปที่ 7 ความหนาแน่นรวมของจีโอโพลิเมอร์เพสต์อยู่ในช่วง 1.43-1.98 g/cm³ ความหนาแน่นขึ้นอยู่กับปริมาณการ เพิ่มเถ้าขานอ้อยของสารละลาย SR-NaOH โดยจะ ส่งผลให้ความหนาแน่นของชิ้นงานลดลง ความพรุน ปรากฏอยู่ในช่วง 6.15-14.49% ซึ่งมีแนวโน้มตรงกัน ข้ามกับความหนาแน่นรวม

BA50 ปรากฏความพรุนสูงสุดเนื่องจากเถ้า ขานอ้อยมีความพรุนตัวภายในโครงสร้างส่งผลให้การ เพิ่มเถ้าขานอ้อยในปริมาณมากชิ้นงานจีโอโพลิเมอร์ เพสต์จึงมีความพรุนปรากฏที่สูงเช่นเดียวกับการดูด ซึมน้ำอยู่ในช่วง 12.98-26.90% ซึ่งมีแนวโน้มเดียวกัน กับความพรุนปรากฏ ชิ้นงานยังมีความพรุนปรากฏ มากยิ่งดูดซึมน้ำสูง



รูปที่ 7 การดูดซึมน้ำ ความพรุนปรากฏ และความ หนาแน่นรวม ที่อายุบ่ม 28 วัน



3.2.6 ความสามารถในการละลายของต่าง

จากการทดสอบความสามารถในการละลายของต่างค่า pH เริ่มต้นของชิ้นงานจีโอโพลีเมอร์เพสต์มีค่าอยู่ในช่วง 10.0-11.5 แต่เมื่อผ่านการชะด้วยน้ำจนค่า pH เข้าใกล้ความเป็นกลาง (pH = 7) เห็นได้ว่าชิ้นงานจีโอโพลีเมอร์สูตรที่เพิ่มเถ้าชานอ้อย 20% และ 50% ใช้จำนวนครั้งในการชะน้อยกว่าชิ้นงานจีโอโพลีเมอร์ที่ไม่เพิ่มเถ้าชานอ้อย สูตร BA0 BA20 และ BA50 มีจำนวนครั้งที่ใช้ในการชะเพื่อให้ค่าความเป็นกรด-ด่างเข้าใกล้ความเป็นกลาง มีค่าเท่ากับ 14 10 และ 10 ครั้ง ตามลำดับ เนื่องจากสูตรที่ไม่ได้เพิ่มเถ้าชานอ้อย ส่งผลให้มีสารละลายไฮดรอกไซด์จากการทำปฏิกิริยาเหลือในระบบ ทำให้มีค่าความเป็นด่างที่สูงกว่า จึงจำเป็นต้องใช้น้ำชะเป็นจำนวนครั้งมากกว่า สูตรที่มีการเติมเถ้าชานอ้อยในไฮดรอกไซด์ที่ถูกใช้ทำปฏิกิริยากับเถ้าชานอ้อยที่เพิ่มเข้าไป

4. สรุปผลการดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้ศึกษาเกี่ยวกับการเพิ่มความว่องไวในการทำปฏิกิริยาจีโอโพลีเมอร์โรเซชันของเถ้าชานอ้อยโดยการผสมเถ้าชานอ้อยในสารละลายไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 10 โมลาร์ โดยจากผลการทดลองสามารถสรุปได้ว่าเถ้าชานอ้อยที่แช่สารละลาย NaOH จนอยู่ในสภาวะ SR- NaOH ช่วยเพิ่มความแข็งแรงระยะต้นแก่จีโอโพลีเมอร์โดยจากการทดสอบ FTIR และ XRD แสดงให้เห็นว่าปฏิกิริยาจีโอโพลีเมอร์โรเซชันเกิดขึ้นที่อายุบ่ม 7 วันโดยในชิ้นงาน BA0 จะยังพบ O-H ที่เป็นน้ำซึ่งเป็น by-product จากการเกิด Poly (Sialate) (Si-O-Al-O) ซึ่งเป็นเฟสที่ให้ความ

ความแข็งแรงเบื้องต้นแต่มีความเสถียรภาพต่ำในขณะที่ BA20 และ BA50 พบ O-H ในปริมาณที่น้อย แต่พบ Poly (Sialate-siloso) (Si-O-Al-O-Si-O) ซึ่งมักพบที่อายุบ่มช่วงท้ายและเป็นความแข็งแรงที่ยั่งยืนจึงสามารถสรุปได้ว่าการแช่ BA ใน NaOH ช่วยให้ BA มีความว่องไวและเพิ่มความแข็งแรงในระยะต้นรวมถึงเร่งการเกิดปฏิกิริยาจีโอโพลีเมอร์โรเซชัน

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (KURDI) และคณะวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์สำหรับทุนวิจัยและทุนการศึกษา และงานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือในการจัดหาพื้นที่วิเคราะห์และห้องปฏิบัติการ รวมถึงขอขอบคุณโครงการฝึกอบรมเชิงปฏิบัติการเขียนผลงานวิจัยและบทความวิชาการเพื่อตีพิมพ์เผยแพร่ซึ่งจัดโดยวิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือมา ณ ที่นี้ด้วย วัสดุในงานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนเมตาเคโอลินจากบริษัทมินเนอรัล รีซอร์สเซส ดีเวลลอปเม้นท์ จำกัด และเถ้าชานอ้อยจากบริษัทน้ำตาล นิวกว้างสุนท์ลี จำกัด

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] P.C. Aitcin, Cements of Yesterday and Today: Concrete of Tomorrow, Cement and Concrete research, 2000, 30(9), 1349-1359.



- [2] E. Benhelal, G. Zahedi, E. Shamsaei and A. Bahadori, Global Strategies and Potentials to Curb CO₂ Emissions in Cement Industry, *Journal of Cleaner Production*, 2013, 51, 142-161.
- [3] A. Akbar, F. Farooq, M. Shafique, F. Aslam, R. Alyousaf and H. Abduljabbar, Sugarcane Bagasse Ash-Based Engineered Geopolymer Mortar Incorporating Propylene Fibers, *Journal of Building Engineering*, 2020, 33, 101492.
- [4] C.L. Wong, K.H. Mo, U.J. Alengaram and S.P. Yap, Mechanical Strength and Permeation Properties of High Calcium Fly Ash-Based Geopolymer Containing Recycled Brick Powder, *Journal of Building Engineering*, 2020, 32, 101655.
- [5] J. Davidovits, Properties of Geopolymer Cements, *Scientific Research Institute on Binders and Materials*, 1994, 1, 131-149.
- [6] R. McCaffrey, Climate Change and the Cement Industry, *Global Cement and Lime Magazine*, 2002, Environmental Special Issue, 15-19.
- [7] P.K. Mehta, Greening of the Concrete Industry for Sustainable Development, *Concrete International*, 2002, 24, 23-28.
- [8] J. Davidovits, Global Warming Impact on the Cement and Aggregates Industries, *World Resource Review*, 1994, 6(2), 263-278.
- [9] J. Davidovits, Geopolymers: Inorganic Polymeric New Materials, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 1991, 37(8), 1633-1656.
- [10] C. Tippayasam, C. Leonelli, and D. Chaysuwan, Effect of Agricultural Wastes with Fly Ash on Strength of Geopolymers, *Suranaree Journal of Science and Technology*, 2014, 21(1), 1-7.
- [11] C. Tippayasam, S. Sutikulsombat, E. Kamseu, R. Rosa, P. Thavorniti, P. Chindaprasirt, C. Leonelli, G. Heness and D. Chaysuwan, In Vitro Surface Reaction in SBF of A Non-Crystalline Aluminosilicate (Geopolymer) Material, *Journal of the Australian Ceramic Society*, 2019, 55(1), 11-17.
- [12] Y.M. Liew, H. Kamarudin, A.M. Mustafa Al Bakri, M. Bnhussain, M. Luqman, I. Khairul Nizar, C.M. Ruzaidi and C.Y. Heah, Optimization of Solids-to-Liquid and Alkali Activator Ratios of Calcined Kaolin Geopolymeric Powder, *Construction and Building Materials*, 2012, 37, 440-451.



- [13] C. Tippayasam, P. Boonanunwong, J. Calvez, P. Thavorniti, P. Chindaprasirt, and D. Chaysuwan, Effect of Porosity and Pore Size on Microstructures and Mechanical Properties of Metakaolin Blended with $\text{Ca}(\text{OH})_2$ and PLA as Porous Geopolymers, *Key Engineering Materials*, 2016, 690, 276-281.
- [14] C. Tippayasam, P. Balyore, P. Thavorniti, E. Kamseu, C. Leonelli, P. Chindaprasirt and D. Chaysuwan, Potassium Alkali Concentration and Heat Treatment Affected Metakaolin-Based Geopolymer, *Construction and Building Materials*, 2016, 104, 293-297.
- [15] A. Fernandez-Jimenez, A. Palermo and M. Criado, Microstructure Development of Alkali-Activated Fly Ash Cement a Descriptive Model, *Cement and Concrete Research*, 2004, 35, 1204-1209.
- [16] A.M. Hameed, R.R. Rawdhan and S.A. Al-Mishhadani, Effect of Various Factors on the Manufacturing of Geopolymer Mortar, *Archives of Science*, 2017, 1(3), 1-8.
- [17] S. M. Kabir, U. J. Alengaram, M. Z. Jumaat, A. Sharmin and A. Islam, Influence of Molarity and Chemical Composition on the Development of Compressive Strength in POFA Based Geopolymer Mortar, *Advances in Materials Science and Engineering*, 2015, 647071, 1-15.
- [18] Y. S. Zhang, W. Sun and J. Z. Li, Hydration Process of Interfacial Transition in Potassium Polysialate (K-PSDS) Geopolymer Concrete, *Magazine of Concrete Research*, 2005, 57(1), 33-38.
- [19] P. De Silva, K. Sagoe-Crenstil, and V. Sirivivatnanon, Kinetics of geopolymerization: role of Al_2O_3 and SiO_2 , *Cement and Concrete Research*, 2007, 37(4), 512-518.
- [20] N. Fifinatasha, M.M.A.B. Abdullah, C.M.R. Ghazali, K. Hussin, M. Binhussain, and A.V. Sandu, Comparison Characterization of Geopolymer Source Materials for Coating Application, *Applied Mechanics and Materials*, 2015, 754, 664-670.
- [21] C. Tippayasam, P. Keawpapasson, P. Thavorniti, T. Panyathanmaporn, C. Leonelli, and D. Chaysuwan, Effect of Thai Kaolin on Properties of Agricultural Ash Blended Geopolymers, *Construction and Building Materials*, 2014, 53, 455-459.
- [22] ASTM C109, Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens), 2016.
- [23] ASTM C642-13, Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete, 2013.



- [24] C. Tippayasam, S. Sutikulsombat, J. Paramee, C. Leonelli, and D. Chaysuwan, Development of Geopolymer Mortar from Metakaolin Blended with Agricultural and Industrial Wastes, *Key Engineering Materials*, 2018, 766, 305-310.
- [25] S. Kumar and R. Kumar, Mechanical activation of fly ash: Effect on Reaction, Structure and Properties of Resulting Geopolymer, *Ceramics International*, 2011, 37(2), 533-541.
- [26] D. A. Runyut, S. Robert, I. Ismail, R. Ahmadi, N. A. S. B. Abdul Samat, Microstructure and Mechanical Characterization of Alkali-Activated Palm Oil Fuel Ash, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2018, 30(7), 04018119.