

สมบัติทางวิศวกรรมและโครงสร้างจุลภาคของมอร์ตาร์มวลเบาเซลลูล่าจากเศษแก้วผสมเถ้าลอยกระตุ้นด้วยด่าง

Engineering and Microstructure Properties of Cellular Lightweight Mortar from Recycled Glass mixed with Alkali-activated Fly Ash

ณัฐพล ธาตุจิรวงศ์กุล¹ คำภี จิตชัยภูมิ^{1*} รัชกฤช เมธาธิรัตน์¹ เสริมศักดิ์ ตียะแสงทอง¹ ปิยธิดา อยู่สุข¹ และ
เชิดศักดิ์ สุขศิริพัฒน์พงศ์¹

Natthapon Thatuchirangkul¹ Khamphree Jitchaiyaphum¹ Rutchakit Maythathirut¹
Serm Sak Tiyasangthong¹ Piyathida Yoosuk¹ and Cherd Sak Suksiripattanapong¹

Received: February 12, 2025; Revised: May 16, 2025; Accepted: May 19, 2025

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ในการนำเศษแก้วบดละเอียด (RG) ที่เป็นผลพลอยได้จากกระบวนการผลิตขวดแก้วและเถ้าลอยถ่านหิน (FA) ที่เป็นผลพลอยได้ (by-product) ในการเผาถ่านหินจากกระบวนการผลิตกระแสไฟฟ้า นำมาผลิตเป็นมอร์ตาร์มวลเบาเซลลูล่าจากเศษแก้วบดละเอียดผสมเถ้าลอยกระตุ้นด้วยด่าง โดยศึกษาอิทธิพลความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ที่ระดับ 1 3 5 และ 7 โมลาร์ อัตราส่วนสารกระตุ้นต่อเถ้าลอย (L/FA) เท่ากับ 0.6 0.7 และ 0.8 ด้วยปริมาณฟองอากาศ (Ac) ร้อยละ 1 3 และ 5 โดยน้ำหนักของ FA ที่มีต่อสมบัติทางวิศวกรรมและโครงสร้างจุลภาค (Microstructure) ของตัวอย่างมอร์ตาร์มวลเบาเซลลูล่าที่อายุบ่ม 7 วัน ผลการทดสอบพบว่าหน่วยน้ำหนักต่ำสุดของก้อนตัวอย่างเมื่อความเข้มข้นของ NaOH เท่ากับ 1 โมลาร์ อัตราส่วน L/FA เท่ากับ 0.8 และปริมาณ Ac ร้อยละ 5 โดยน้ำหนักของ FA แห่งตัวอย่างให้กำลังรับแรงอัดสูงสุดเท่ากับ 23.8 MPa เมื่อความเข้มข้นของ NaOH เท่ากับ 7 โมลาร์ อัตราส่วน L/FA เท่ากับ 0.6 และปริมาณ Ac ร้อยละ 0 เมื่อเปรียบเทียบกับมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (มอก.) พบว่าอัตราส่วนที่เหมาะสมสำหรับบล็อกมวลเบาเติมฟองอากาศชนิด C10 คือความเข้มข้นของ NaOH เท่ากับ 1 โมลาร์ อัตราส่วน L/FA เท่ากับ 0.6 และปริมาณ Ac ร้อยละ 3 โดยน้ำหนักของ FA ขณะที่อัตราส่วนที่เหมาะสมสำหรับบล็อกมวลเบาแบบเติมฟองอากาศชนิด C12 คือความเข้มข้นของ NaOH เท่ากับ 1 โมลาร์ อัตราส่วนของ L/FA เท่ากับ 0.6 และปริมาณ Ac ร้อยละ 1 โดยน้ำหนักของ FA โครงสร้างทางจุลภาคแสดงให้เห็นว่าความเข้มข้นของสารละลาย NaOH และอัตราส่วน L/FA ที่เพิ่มขึ้นทำให้ผลผลิตแคลเซียมอะลูมิโนซิลิเกตไฮเดรต (C-A-S-H) อยู่ร่วมกับจีโอโพลีเมอร์เจล (Sodium Aluminosilicate Hydrate, NASH) เพิ่มขึ้น ในขณะที่ผลิตภัณฑ์จีโอโพลีเมอร์ไรเซชันลดลงตามปริมาณโฟมที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากปริมาณโฟมที่เพิ่มขึ้นในส่วนผสมมีคุณสมบัติเป็นสารลดแรงตึงผิว และสารพลาสติกเคลือบผิว

คำสำคัญ : เศษแก้ว; มอร์ตาร์มวลเบาเซลลูล่า; บล็อกมวลเบา

¹ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

¹ Faculty of Engineering and Technology, Rajamangala University of Technology Isan

* Corresponding Author, Tel. 08 5492 2456, E - mail: khamphreej@yahoo.com

Abstract

This research aimed to investigate the use of the ground recycled glass (RG), a by-product from glass bottle process and the coal fly ash (FA), a by-product of the electricity generation process through coal combustion. These materials were used to produce the cellular lightweight mortar from the ground glass waste mixed with alkali-activated FA. The effect of sodium hydroxide (NaOH) solution concentration of 1, 3, 5, and 7 M, liquid alkaline activator (L) content to FA ratio of 0.6, 0.7, and 0.8 with the air foam content (Ac) of 1, 3, and 5 % by weight of FA on 7 days cured age to the engineering and microstructure properties were evaluated. The lowest unit weight of the samples was observed with a NaOH concentration of 1 molar, with L/FA ratio of 0.8 and the Ac content were 5 % by weight of FA. In contrast, the maximum compressive strength of the samples was 23.8 MPa with NaOH concentration of 7 molars, L/FA ratio of 0.6 and the Ac content was 0 %. When compared to Thai Industrial Standards (TIS), the optimal ratio for C10-type lightweight blocks was a NaOH concentration of 1 molar, L/FA ratio of 0.6 and the Ac content were 3 % by weight of FA. Meanwhile, the optimal ratio for C12-type lightweight blocks was a NaOH concentration of 1 molar, L/FA ratio of 0.6 and the Ac content was 1 % by weight of FA. The microstructure analysis revealed that increasing the NaOH solution concentration and L/FA ratio resulted in higher production of calcium aluminosilicate hydrate (C-A-S-H) coexisting with the geopolymer gel (NASH). However, the geopolymerization products decreased with the air foam content increased. This is attributed to the foam acting as a surfactant and plasticizer coating the particle surfaces.

Keywords: Recycled Glass; Cellular Lightweight Mortar; Lightweight Block

บทนำ

เศษแก้วเหลือทิ้งจำนวนมากจากกระบวนการผลิตขวดแก้วทั่วโลกมีปริมาณเพิ่มขึ้นทุกปี เฉพาะที่ประเทศออสเตรเลียมีปริมาณเศษแก้วเหลือทิ้งประมาณ 1,000,000 ตันต่อปี ถูกนำไปทิ้งเป็นวัสดุฝังกลบดิน (Arulrajah et al., 2016) ในขณะที่ประเทศไทยมีเศษขวดแก้วที่เหลือทิ้งกลายเป็นขยะประมาณ 40,000 ตันต่อปี (Suntharanurak and Tonnayopas, 2013) โดยไม่ได้นำกลับมารีไซเคิล (Recycle) ในกระบวนการผลิตเป็นแก้วใหม่ มีงานวิจัยจำนวนมากได้ทำการศึกษาการนำเอาเศษแก้วที่เป็นผลพลอยได้จากการบดขวดแก้วและผลิตภัณฑ์แก้วอื่น ๆ มาใช้ทำเป็นวัสดุก่อสร้างต่าง ๆ เช่น คอนกรีต (Ali and Al-Tersawy, 2012) ถนนคอนกรีต (Arulrajah et al., 2013; Grubb et al., 2006; Ooi et al., 2008; Imteaz et al., 2012) ทางเท้าคอนกรีต (Arulrajah et al., 2012) และคอนกรีตบล็อก (Arulrajah et al., 2016) อย่างไรก็ตาม กระบวนการผลิตวัสดุก่อสร้างดังกล่าวใช้ปูนซีเมนต์เป็นหลัก เป็นที่ทราบกันดีว่า กระบวนการผลิตปูนซีเมนต์นั้นได้ปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ในปริมาณมาก ซึ่งส่งผลเสียต่อสภาพแวดล้อม อันเป็นสาเหตุหลักของการเกิดภาวะโลกร้อน (Greenhouse Effect) ขึ้นในปัจจุบัน (Mishra et al., 2023)

เถ้าลอยถ่านหิน (Coal Fly Ash; FA) เป็นผลพลอยได้จากกระบวนการผลิตกระแสไฟฟ้าโดยการเผาถ่านหิน ซึ่งมีธาตุ Si และ Al ในปริมาณสูง Palomo et al. (1999) พบว่าเถ้าลอยชนิดต่าง ๆ ที่ถูกกระตุ้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ความเข้มข้น 8 โมลาร์ ถึง 12 โมลาร์ และบ่มที่อุณหภูมิ 85 °C เป็นเวลานาน 24 ชั่วโมง สามารถทำให้ได้เถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์ที่มีกำลังรับแรงอัดประมาณ 35 MPa ถึง 40 MPa และประมาณ 90 MPa หากเติมโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) ลงในสารละลาย NaOH ส่วน Xie and Yunping (2001) พบว่ากระบวนการแข็งตัวของเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์ที่ถูกกระตุ้นด้วย Na_2SiO_3 มีสาเหตุหลักมาจากผลิตภัณฑ์ทำปฏิกิริยาที่มีลักษณะคล้ายเจล

ซึ่งช่วยยึดอนุภาคเถ้าลอยเข้าด้วยกัน จากงานวิจัยในอดีต Arulrajah et al. (2012) ได้ศึกษากำลังรับแรงอัดและโครงสร้างจุลภาคของเศษแก้วผสมเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์สำหรับวัสดุก่อสร้างคาร์บอนต่ำ พบว่าอัตราส่วน Na_2SiO_3 ต่อ NaOH เท่ากับ 70:30 และอัตราส่วนของสารกระตุ้นต่อเถ้าลอยเท่ากับ 0.625 เป็นส่วนผสมที่ให้ค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุดประมาณ 17 MPa ซึ่งผ่านเกณฑ์มาตรฐานในการผลิตบล็อกก่อสร้าง Suksiripattanapong et al. (2015) ได้พัฒนาบล็อกมวลเบาแบบเซลลูโลสจากตะกอนประปา เถ้าลอย จีโอโพลิเมอร์ ผลการศึกษาพบว่าส่วนผสมที่เหมาะสมคืออัตราส่วน Na_2SiO_3 ต่อ NaOH เท่ากับ 80:20 และอัตราส่วน L:FA เท่ากับขีดจำกัดเหลว (Liquid Limit) พอดีสำหรับทุกอุณหภูมิและระยะเวลาบ่ม ซึ่งอุณหภูมิที่ 65 °C เป็นอุณหภูมิที่เหมาะสมในการผลิตจีโอโพลิเมอร์ที่ทำจากตะกอนประปาผสมเถ้าลอย โดยบ่มเป็นเวลานาน 72 ชั่วโมง

วัตถุประสงค์ของการศึกษา

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการนำเอาเศษแก้วซึ่งเป็นผลพลอยได้ (By Product) จากโรงงานอุตสาหกรรมมาบดให้ละเอียดทำเป็นมวลรวมผสมกับเถ้าลอยถ่านหินซึ่งเป็นผลพลอยได้จากการผลิตกระแสไฟฟ้ามาทำเป็นมอร์ตาร์มวลเบาเซลลูโลสกระตุ้นด้วยด่าง NaOH โดยศึกษาอิทธิพลความเข้มข้นของ NaOH อัตราส่วนสารกระตุ้นต่อเถ้าลอยถ่านหิน และปริมาณฟองอากาศที่เติมเข้าไปต่อสมบัติทางวิศวกรรมและโครงสร้างทางจุลภาคของก้อนตัวอย่างมอร์ตาร์มวลเบาเซลลูโลสที่ทำจากเศษแก้วบดละเอียดผสมเถ้าลอยถ่านหินกระตุ้นด้วยด่าง NaOH ที่อายุบ่ม 7 วัน

วิธีดำเนินการวิจัย

1. วัสดุ

เศษแก้ว (Recycled Glass) ที่ใช้ในการศึกษานี้เป็นเศษแก้วสีชาได้มาจากบริษัท แก้วกรุงไทย จำกัด ดังรูปที่ 1(ก) (ลูกศรชี้) การเตรียมตัวอย่างเศษแก้วทำได้โดยนำไปล้างน้ำให้สะอาดแล้วตากแดดจนแห้ง จากนั้นนำไปบดให้ละเอียดด้วยเครื่อง Los Angeles ใช้เวลาในการบดประมาณ 10 นาที จากนั้นนำไปร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐาน ASTM เบอร์ 16 นำส่วนที่ลอดผ่านตะแกรงไปทดสอบ เศษแก้วที่ผ่านการบดละเอียดแล้ว (Ground Recycled Glass, RG) มีลักษณะดังรูปที่ 1(ข)



(ก) กองเศษแก้ว



(ข) เศษแก้วที่บดละเอียดแล้ว

รูปที่ 1 เศษแก้วเหลือทิ้งจากกระบวนการผลิตขวดแก้ว

เถ้าลอยถ่านหิน (Coal Fly Ash, FA) ที่ใช้ในการศึกษานี้ได้มาจากโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนแม่เมาะ อำเภอมะเมาะ จังหวัดลำปาง เถ้าลอยสำหรับใช้เป็นวัสดุตั้งต้นนี้ถูกนำไปผสมกับเศษแก้วบดละเอียด (RG) ในอัตราส่วน 50:50

สารกระตุ้นที่ใช้ในการทดสอบเป็นโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) สำเร็จรูปชนิดน้ำเกรดอุตสาหกรรม (สัดส่วนความเข้มข้น $\text{SiO}_2 = 30\%$ ต่อ $\text{Na}_2\text{O} = 9\%$) และโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ชนิดเกล็ดเกรดอุตสาหกรรมความบริสุทธิ์ 98 % โดยน้ำหนัก สำหรับชะละลาย (Leaching) กับวัสดุตั้งต้น (RG + FA) โดยใช้สัดส่วนโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Na}_2\text{SiO}_3:\text{NaOH}$) เท่ากับ 70:30 ความเข้มข้นของ NaOH เท่ากับ 1 3 5 และ 7 โมลาร์

สารเพิ่มฟองที่ใช้ในการทดสอบเป็นผลิตภัณฑ์สารลดแรงตึงผิวสำเร็จรูปชื่อทางการค้า Sika Poro 40 โดยนำไปเจือจางกับน้ำกลั่นในอัตราส่วนสารเพิ่มฟองต่อน้ำกลั่นเท่ากับ 1:40 ก่อนฉีดเป็นฟองหรือโฟมผสมลงบนมอร์ตาร์สด ในปริมาณร้อยละ 1 3 และ 5 โดยน้ำหนักของ FA

2. ปฏิภาศส่วนผสมและการผลิตมอร์ตาร์มวลเบาเซลลูล่า

การผลิตมอร์ตาร์มวลเบาเซลลูล่าจากเศษแก้วบดละเอียดผสมเถ้าลอยถ่านหินกระตุ้นด้วยต่าง ขั้นตอนแรก เริ่มจากการเจือจางสารเพิ่มฟองเตรียมไว้ (สารเพิ่มฟองต่อน้ำกลั่น 1:40) โดยเทลงไปในเครื่องสร้างฟองอากาศ Foam Generator) พร้อมกับเขย่าเล็กน้อยเพื่อให้ น้ำกลั่นและสารเพิ่มฟองละลายเข้าด้วยกัน จากนั้นนำไปต่อเข้ากับเครื่องอัดอากาศ (Air Pump) ที่ความดัน 0.55 ± 0.05 MPa เมื่อฉีดออกมาจะได้เนื้อฟองอากาศลักษณะคล้ายฟองครีม ให้ปริมาณมาก ขั้นตอนที่สองเป็นการเตรียมเศษแก้วบดละเอียด (RG) ผสมกับเถ้าลอยถ่านหิน (Coal Fly Ash, FA) ในอัตราส่วน 50:50 ด้วยเครื่องผสมมอร์ตาร์จนส่วนผสมรวมเป็นเนื้อเดียวกัน จากนั้นเติมสารกระตุ้น (Liquid Alkaline Activator, L) ในอัตราส่วน L/FA เท่ากับ 0.6 0.7 และ 0.8 ผสมต่อไปอีกจนส่วนผสมเป็นเนื้อเดียวกัน โดยที่ L เป็นสัดส่วนระหว่าง Na_2SiO_3 ต่อ NaOH เท่ากับ 70:30 และความเข้มข้นของ NaOH เท่ากับ 1 3 5 และ 7 โมลาร์ ตามปฏิภาศส่วนผสมดังตารางที่ 1

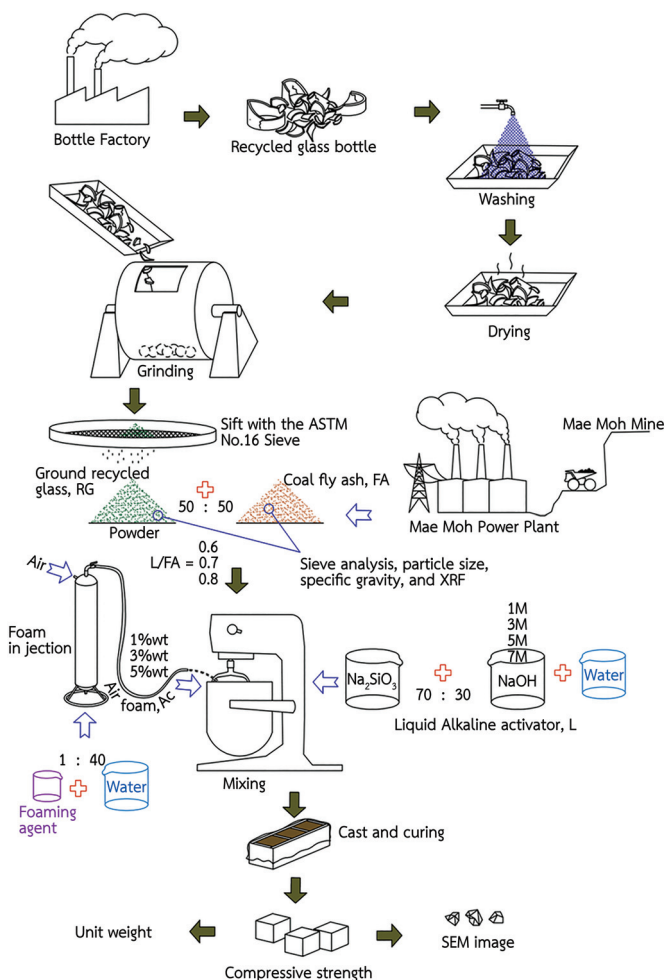
ตารางที่ 1 ปฏิภาศส่วนผสมมอร์ตาร์มวลเบาเซลลูล่าจากเศษแก้วบดละเอียดและเถ้าลอยถ่านหินกระตุ้นด้วยต่างต่อ 1 m^3

Mix No.	Na ₂ SiO ₃ :NaOH	RG (kg)	FA (kg)	Air foam,		Liquid alkaline activator, L					L/FA
						Ac		Na ₂ SiO ₃ (kg)	NaOH		
				%	(kg)	M	(kg)				
1	70 : 30	870	870	0	0	45.3	1	19.4	457.3	522	0.6
2	70 : 30	870	870	0	0	131.0	3	56.0	335.0	522	0.6
3	70 : 30	870	870	0	0	210.0	5	90.0	222.0	522	0.6
4	70 : 30	870	870	0	0	278.8	7	119.5	123.7	522	0.6
5	70 : 30	870	870	1	8.7	45.3	1	19.4	448.6	522	0.6
6	70 : 30	870	870	1	8.7	131.0	3	56.0	326.3	522	0.6
7	70 : 30	870	870	1	8.7	210.0	5	90.0	213.3	522	0.6
8	70 : 30	870	870	1	8.7	278.8	7	119.5	115.0	522	0.6
9	70 : 30	870	870	3	26.1	45.3	1	19.4	431.2	522	0.6
10	70 : 30	870	870	3	26.1	131.0	3	56.0	308.9	522	0.6
11	70 : 30	870	870	3	26.1	210.0	5	90.0	195.9	522	0.6
12	70 : 30	870	870	3	26.1	278.8	7	119.5	97.6	522	0.6
13	70 : 30	870	870	5	43.5	45.3	1	19.4	413.8	522	0.6
14	70 : 30	870	870	5	43.5	131.0	3	56.0	291.5	522	0.6
15	70 : 30	870	870	5	43.5	210.0	5	90.0	178.5	522	0.6
16	70 : 30	870	870	5	43.5	278.8	7	119.5	80.2	522	0.6
17	70 : 30	870	870	0	0	52.8	1	22.6	533.6	609	0.7
18	70 : 30	870	870	0	0	152.4	3	65.3	391.3	609	0.7
19	70 : 30	870	870	0	0	245.0	5	105.0	259.0	609	0.7
20	70 : 30	870	870	0	0	325.5	7	139.5	144.0	609	0.7
21	70 : 30	870	870	1	8.7	52.8	1	22.6	524.9	609	0.7
22	70 : 30	870	870	1	8.7	152.4	3	65.3	382.6	609	0.7
23	70 : 30	870	870	1	8.7	245.0	5	105.0	250.3	609	0.7
24	70 : 30	870	870	1	8.7	325.5	7	139.5	135.3	609	0.7

ตารางที่ 2 ปฏิภาคส่วนผสมมอร์ตาร์มวลเบาเซลลูโลสจากเศษแก้วบดละเอียดและแก้ลอยถ่านหินกระตุ้นด้วยต่างต่อ 1 m^3 (ต่อ)

Mix No.	Na ₂ SiO ₃ :NaOH	RG (kg)	FA (kg)	Air foam,		Liquid alkaline activator, L					L/FA
				Ac		Na ₂ SiO ₃ (kg)	NaOH		Water (kg)	(kg)	
				%	(kg)		M	(kg)			
25	70 : 30	870	870	3	26.1	52.8	1	22.6	507.5	609	0.7
26	70 : 30	870	870	3	26.1	152.4	3	65.3	365.2	609	0.7
27	70 : 30	870	870	3	26.1	245.0	5	105.0	232.9	609	0.7
28	70 : 30	870	870	3	26.1	325.5	7	139.5	117.9	609	0.7
29	70 : 30	870	870	5	43.5	52.8	1	22.6	490.1	609	0.7
30	70 : 30	870	870	5	43.5	152.4	3	65.3	347.8	609	0.7
31	70 : 30	870	870	5	43.5	245.0	5	105.0	215.5	609	0.7
32	70 : 30	870	870	5	43.5	325.5	7	139.5	100.5	609	0.7
33	70 : 30	870	870	0	0	60.4	1	25.9	609.7	696	0.8
34	70 : 30	870	870	0	0	174.3	3	74.7	447.0	696	0.8
35	70 : 30	870	870	0	0	280.2	5	120.1	295.7	696	0.8
36	70 : 30	870	870	0	0	371.9	7	159.4	164.7	696	0.8
37	70 : 30	870	870	1	8.7	60.4	1	25.9	601.0	696	0.8
38	70 : 30	870	870	1	8.7	174.3	3	74.7	438.3	696	0.8
39	70 : 30	870	870	1	8.7	280.2	5	120.1	287.0	696	0.8
40	70 : 30	870	870	1	8.7	371.9	7	159.4	156.0	696	0.8
41	70 : 30	870	870	3	26.1	60.4	1	25.9	583.6	696	0.8
42	70 : 30	870	870	3	26.1	174.3	3	74.7	420.9	696	0.8
43	70 : 30	870	870	3	26.1	280.2	5	120.1	269.6	696	0.8
44	70 : 30	870	870	3	26.1	371.9	7	159.4	138.6	696	0.8
45	70 : 30	870	870	5	43.5	60.4	1	25.9	566.2	696	0.8
46	70 : 30	870	870	5	43.5	174.3	3	74.7	403.5	696	0.8
47	70 : 30	870	870	5	43.5	280.2	5	120.1	252.2	696	0.8
48	70 : 30	870	870	5	43.5	371.9	7	159.4	121.2	696	0.8

จากนั้นฉีดโฟม (Air Foam, AC) ลงบนตัวอย่าง RG-FA-L ในปริมาณร้อยละ 1 3 และ 5 โดยน้ำหนักของ FA ทำการผสมต่อไปอีกจนกระทั่งส่วนผสมทั้งหมดรวมเป็นเนื้อเดียวกันจึงได้มอร์ตาร์มวลเบาเซลลูโลส ซึ่งขั้นตอนที่สองใช้เวลาประมาณ 10 นาที จากนั้นเทมอร์ตาร์สดลงในแบบหล่อทรงลูกบาศก์ขนาด $50 \times 50 \times 50$ มิลลิเมตร พร้อมทั้งห่อด้วยแผ่นพลาสติกให้มิดชิดเพื่อป้องกันการสูญเสียน้ำอย่างรวดเร็วอันเป็นสาเหตุของการหดตัวสภาพพลาสติก จากนั้นนำไปบ่มในห้องปฏิบัติการที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลานาน 7 วัน ก่อนทำการทดสอบหน่วยน้ำหนัก ทดสอบกำลังรับแรงอัดตามมาตรฐาน ASTM C 109 และนำชิ้นส่วนแตกของก้อนตัวอย่างไปทดสอบโครงสร้างทางจุลภาคด้วยเทคนิค Scanning Electron Microscope (SEM) ตามแผนผังดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 แผนผังการผลิตมอร์ตาร์มวลเบาเซลลูโลสจากเศษแก้วบดละเอียดและเถ้าลอยถ่านหินกระตุ้นด้วยต่าง

3. การทดสอบหน่วยน้ำหนัก

การทดสอบหาหน่วยน้ำหนักแห้ง (Dry Unit Weight) หรือความหนาแน่นแห้ง (Dry Density) ทำได้โดยนำก้อนตัวอย่างมอร์ตาร์มวลเบาเซลลูโลสขนาด $0.05 \times 0.05 \times 0.05$ เมตร ที่ผ่านการอบแห้งแล้วเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ไปชั่งน้ำหนัก (Weight, W) มีหน่วยเป็นนิวตัน (N) หาค่าปริมาตร (Volume, V) ของก้อนตัวอย่างมีหน่วยเป็นลูกบาศก์เมตร (m^3) หน่วยน้ำหนักแห้งมีหน่วยเป็นนิวตันต่อลูกบาศก์เมตร (N/m^3) ดังสมการที่ (1)

$$Unit\ weight\ (N/m^3) = \frac{W}{V} \quad (1)$$

4. การทดสอบกำลังรับแรงอัด

วิธีการทดสอบกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์มวลเบาเซลลูโลสทำตามมาตรฐาน ASTM C 109M ทำได้โดยนำแท่งทดสอบไปกดเพื่อหาค่าแรงกดสูงสุดหรือแรงอัดประลัย (Ultimate) ก่อนการวิบัติ โดยมีอัตราการให้แรงกดลงบนแท่งทดสอบอยู่ระหว่าง 900 นิวตัน/วินาที ถึง 1,800 นิวตัน/วินาที กำลังรับแรงอัดมีหน่วยเป็น N/m^2 หรือ Pa คำนวณได้จากเอาแรงอัดประลัย (Ultimate Force, P) ก่อนการวิบัติมีหน่วยเป็นนิวตัน (N) หาค่าพื้นที่หน้าตัดขวาง (Cross Section Area, A) มีหน่วยเป็นตารางเมตร (m^2) ดังสมการที่ (2)

$$Compressive\ strength\ (N/m^2) = \frac{P}{A} \quad (2)$$

5. การทดสอบโครงสร้างทางจุลภาค

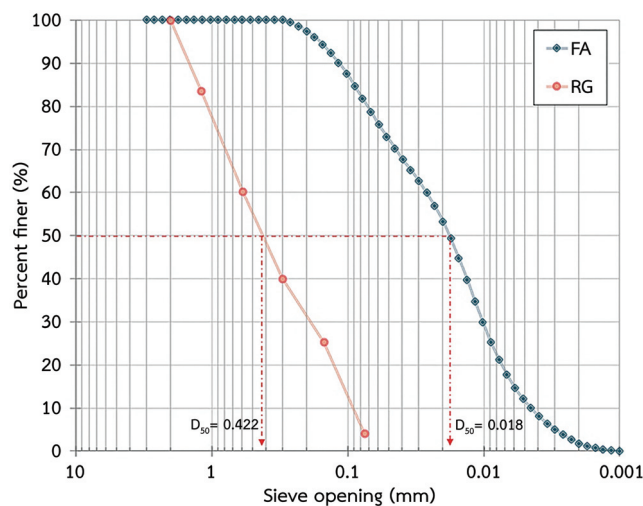
หลังจากการทดสอบกำลังรับแรงอัด ขึ้นส่วนแตกของก้อนตัวอย่างมอร์ตาร์มวลเบาเซลลูโลสจากเศษแก้ว บดละเอียดผสมเถ้าลอยถ่านหินกระตุ้นด้วยต่างถูกนำไปถ่ายภาพขยายอนุภาคกำลังสูง (Scanning Electron Microscopy) เพื่อนำภาพถ่ายมาวิเคราะห์ผลการเตรียมตัวอย่างทำได้โดยทุบชิ้นส่วนแตกให้เป็นก้อนขนาดเล็กประมาณ 10×10 มิลลิเมตร ความหนา 5 มิลลิเมตร จากนั้นนำชิ้นตัวอย่างไปทำให้แห้งด้วยเครื่อง Freeze-Dryer ที่อุณหภูมิ -40°C ภายใต้ความดัน 0.5 Pascal เป็นเวลานาน 2 วัน จากนั้นนำชิ้นตัวอย่างไปเคลือบผิวด้วยทองคำแล้วจึงนำไปทดสอบการถ่ายภาพขยายอนุภาคกำลังสูงด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM)

ผลการทดสอบและวิจารณ์ผล

1. คุณสมบัติของวัสดุ

ผลการทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity) ของ RG ทำตามมาตรฐาน ASTM C 128 พบว่าค่าความถ่วงจำเพาะของ RG เท่ากับ 2.51 เมื่อนำไปทดสอบหาขนาดคละของมวลรวมละเอียด วิธีทดสอบทำตามมาตรฐาน ASTM C 136 พบว่ามีค่าโมดูลัสความละเอียด (Fineness Modulus, FM) เท่ากับ 2.87 และเมื่อเทียบค่า FM ของเศษแก้วบดละเอียดกับค่า FM ของทรายแม่น้ำทั่วไป พบว่า RG อยู่ในช่วงทรายหยาบ เพราะว่า FM อยู่ระหว่าง 2.50 - 3.50 นอกจากนี้มีขนาดเฉลี่ยของอนุภาค RG ที่ลอดผ่านตะแกรง (Percent Finer หรือ Percent Passing) หรือ D_{50} เท่ากับ 0.422 mm การกระจายขนาดคละของอนุภาค RG มีขนาดตั้งแต่ 0.075 mm ถึง 2 mm ดังรูปที่ 3

ผลการทดสอบคุณสมบัติเบื้องต้นของ FA ทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะตามมาตรฐาน ASTM C 188 ได้ค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.34 เมื่อนำไปทดสอบด้วยเครื่อง Laser Particle Size Analyzer พบว่าขนาดเฉลี่ยของอนุภาค FA ที่ลอดผ่านตะแกรง (Percent Finer หรือ Percent Passing) ร้อยละ 50 หรือ D_{50} เท่ากับ 0.018 mm การกระจายขนาดคละของอนุภาค FA มีขนาดตั้งแต่ 0.001 mm ถึง 3 mm ดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 การกระจายขนาดคละของ RG และ FA

ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีโดยเครื่อง X-ray Fluorescence หรือ XRF ของเศษแก้วบดละเอียด (RG) และเถ้าลอยถ่านหิน (FA) ดังตารางที่ 2 พบว่า RG มีปริมาณซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) เท่ากับ 87.88 % ซึ่งมากกว่า 70 % จึงจัดเป็นวัสดุปอซโซลานชนิดสังเคราะห์ชั้น F เนื่องจากเศษแก้วผ่านการเผาที่อุณหภูมิสูงมาแล้ว ส่วน FA มีปริมาณซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) และอลูมิเนียมไตรออกไซด์ (Al_2O_3) เท่ากับ 43.19 % และ 15.77 % ซึ่งผลรวมปริมาณของ $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ มีมากกว่า 70 % โดยน้ำหนัก จึงจัดเป็นวัสดุปอซโซลานชนิดสังเคราะห์

ชั้น F (Class F) และยังมีปริมาณแคลเซียมออกไซด์ (CaO) สูงเกินกว่า 10 % โดยน้ำหนัก หรือเป็นเถ้าลอยแคลเซียมสูง (High-Calcium Fly Ash) ตามมาตรฐาน ASTM C 618 ส่วนการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (Loss On Ignition, LOI) พบว่า RG และ FA เท่ากับ 0.41 % และ 0.84 % โดยน้ำหนัก ทั้ง RG และ FA มีค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผาไม่เกิน 6 % ตามที่มาตรฐาน ASTM C 618 กำหนดไว้ ซึ่งแสดงถึงการมีสารมลทิน (เช่น คาร์บอน คาร์บอนเอนต์ และน้ำในโครงสร้าง) เจือปนในปริมาณต่ำที่นอกเหนือจากสารประกอบหลัก (Si และ Al) มีปริมาณที่เพียงพอ ดังนั้นวัสดุ RG และ FA ที่ศึกษานี้จึงมีความเหมาะสมในการทดสอบจีโอโพลีเมอร์

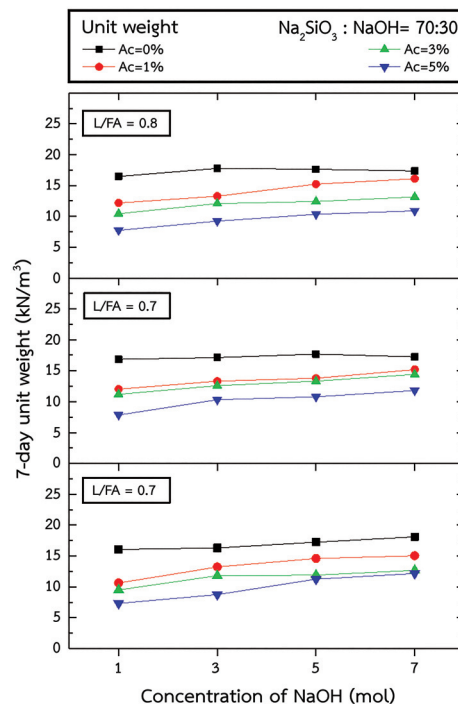
ตารางที่ 2 องค์ประกอบทางเคมีในรูปสารประกอบออกไซด์ของ RG และ FA

Chemical Composition	Ground Recycled Glass, RG (% by Weight)	Coal Fly Ash, FA (% by Weight)
SiO ₂	87.88	43.19
Al ₂ O ₃	N.D.	15.77
Fe ₂ O ₃	0.81	14.43
CaO	8.35	19.55
MgO	2.13	N.D.
SO ₃	N.D.	3.86
Na ₂ O	N.D.	0.91
K ₂ O	0.42	1.45
LOI	0.41	0.84

หมายเหตุ : N.D. = Not Detected, LOI = Loss On Ignition

2. หน่วยน้ำหนัก

รูปที่ 4 แสดงหน่วยน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ตาร์มวลเบาเซลลูโลสจากเศษแก้วบดละเอียดผสมเถ้าลอยถ่านหิน กระตุ้นด้วยด่าง โดยตัวอย่างทดสอบมีอัตราส่วน RG ต่อ FA เท่ากับ 50:50 อัตราส่วน Na₂SiO₃ ต่อ NaOH เท่ากับ 70:30 ความเข้มข้นของ NaOH เท่ากับ 1 3 5 และ 7 โมลาร์ อัตราส่วน L/FA เท่ากับ 0.6 0.7 และ 0.8 และปริมาณ Ac ร้อยละ 0 1 3 และ 5 โดยน้ำหนักของ FA ตามลำดับ ผลการทดสอบพบว่าแท่งตัวอย่างมอร์ตาร์มวลเบาเซลลูโลสจาก เศษแก้วบดละเอียดผสมเถ้าลอยถ่านหินกระตุ้นด้วยด่างที่ไม่ได้เติมฟองอากาศเข้าไป (Ac = 0 %) มีหน่วยน้ำหนักแห้ง ประมาณ 17.5 kN/m³ แต่เมื่อเติมฟองอากาศเข้าไปและกระตุ้นด้วยด่าง NaOH ในสัดส่วน L/FA ต่าง ๆ พบว่า แท่งตัวอย่างมีหน่วยน้ำหนักลดลง นั้นแสดงให้เห็นว่าความเข้มข้นของ NaOH อัตราส่วนของ L/FA และ Ac ส่งผลต่อหน่วยน้ำหนักของมอร์ตาร์มวลเบาเซลลูโลสจากเศษแก้วบดละเอียดผสมเถ้าลอยถ่านหินกระตุ้นด้วยด่าง หน่วยน้ำหนักของก้อนตัวอย่างเพิ่มขึ้นเล็กน้อยตามความเข้มข้นของ NaOH และอัตราส่วนของ L/FA เนื่องจาก ความเข้มข้นที่เพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย (จาก 1 ถึง 7 โมลาร์) ส่งผลให้หน่วยน้ำหนักของ NaOH เพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย (Suksiripattanapong et al., 2015) ในขณะที่หน่วยน้ำหนักของก้อนตัวอย่างลดลงตามปริมาณ Ac ที่เพิ่มขึ้น เนื่องจาก Ac ที่เพิ่มขึ้นทำให้ช่องว่างในตัวอย่างเพิ่มขึ้น (Yoosuk et al., 2021) หน่วยน้ำหนักต่ำสุดของตัวอย่าง มอร์ตาร์มวลเบาเซลลูโลสจากเศษแก้วบดละเอียดผสมเถ้าลอยถ่านหินกระตุ้นด้วยด่างพบที่ความเข้มข้นของ NaOH เท่ากับ 1 โมลาร์ อัตราส่วนของ L/FA เท่ากับ 0.8 และปริมาณ Ac ร้อยละ 5 โดยน้ำหนักของ FA

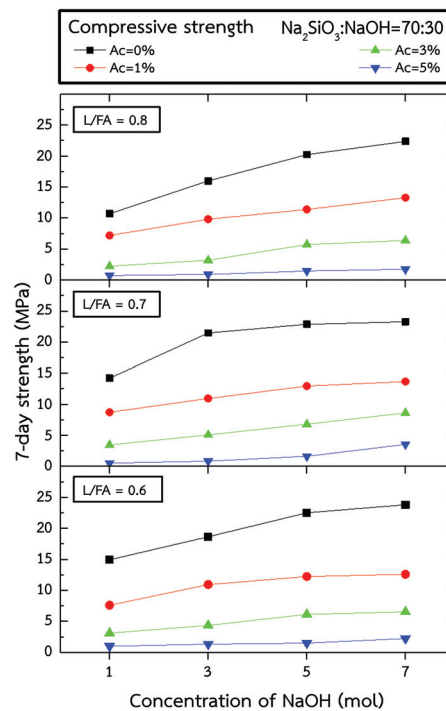


รูปที่ 4 หน่วยน้ำหนักของมอร์ตาร์มวลเบาเซลลูโลสจากเศษแก้วบดละเอียดผสมเถ้าลอยถ่านหินกระตุ้นด้วยต่าง

3. กำลังรับแรงอัด

รูปที่ 5 แสดงกำลังรับแรงอัดของก้อนตัวอย่างมอร์ตาร์มวลเบาเซลลูโลสจากเศษแก้วบดละเอียดผสมเถ้าลอยถ่านหินกระตุ้นด้วยต่าง โดยตัวอย่างทดสอบมีอัตราส่วน RG ต่อ FA เท่ากับ 50:50 อัตราส่วน Na_2SiO_3 ต่อ NaOH เท่ากับ 70:30 ความเข้มข้นของ NaOH เท่ากับ 1 3 5 และ 7 โมลาร์ อัตราส่วน L/FA เท่ากับ 0.6 0.7 และ 0.8 และปริมาณ Ac ร้อยละ 0 1 3 และ 5 โดยน้ำหนักของ FA ตามลำดับ ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่ากำลังรับแรงอัดของตัวอย่างมอร์ตาร์มวลเบาเซลลูโลสจากเศษแก้วบดละเอียดผสมเถ้าลอยถ่านหินกระตุ้นด้วยต่างเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของ NaOH ที่เพิ่มขึ้น กำลังรับแรงอัดสูงสุดของตัวอย่างมีค่าเท่ากับ 23.8 MPa ที่อัตราส่วน Na_2SiO_3 ต่อ NaOH เท่ากับ 70:30 อัตราส่วน L/FA เท่ากับ 0.6 และปริมาณ Ac ร้อยละ 0 ปริมาณ L มีผลต่อกำลังรับแรงอัดอย่างเห็นได้ชัด กำลังรับแรงอัดของตัวอย่างมีค่าลดลงตามการเพิ่มขึ้นของปริมาณ L เนื่องจากปริมาณ L ที่มากเกินไปทำให้เกิดการยุบตัว และเกิดรอยแตกร้าว เมื่อตัวอย่างเสียความชื้น เช่นเดียวกันกับการเพิ่มขึ้นของ Ac กำลังรับแรงอัดของตัวอย่างมีค่าลดลงตามการเพิ่มขึ้นของ Ac เนื่องจาก Ac ทำให้ตัวอย่างมีความพรุน ช่องว่างขนาดเล็กที่อยู่ระหว่าง RG จำนวนมาก จึงทำให้กำลังรับแรงอัดลดลง

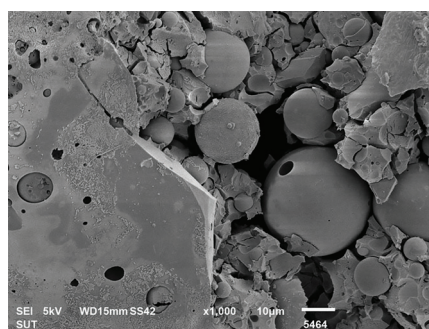
เมื่อเปรียบเทียบหน่วยน้ำหนักและกำลังรับแรงอัดของตัวอย่างมอร์ตาร์มวลเบาเซลลูโลสจากเศษแก้วบดละเอียดผสมเถ้าลอยถ่านหินกระตุ้นด้วยต่างกับมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมคอนกรีตบล็อกมวลเบาเติมฟองอากาศ มอก. 2601-2556 (C10 และ C12) ที่ระบุเกณฑ์กำลังต้านทานแรงอัดตามมาตรฐานไว้ไม่น้อยกว่า 2.55 MPa และหน่วยน้ำหนักแห้งอยู่ระหว่าง 900 kg/m^3 ถึง $1,200 \text{ kg/m}^3$ พบว่าอัตราส่วน (เศษแก้วบดละเอียด เถ้าลอย ปริมาณสารกระตุ้น และสารเพิ่มฟอง) ที่เหมาะสมในการเตรียมตัวอย่างเพื่อให้ได้มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมคอนกรีตบล็อกมวลเบาแบบเติมฟองอากาศชนิด C10 คือความเข้มข้นของ NaOH เท่ากับ 1 โมลาร์ อัตราส่วน L/FA เท่ากับ 0.6 และปริมาณ Ac ร้อยละ 3 โดยน้ำหนักของ FA ซึ่งให้หน่วยน้ำหนักและกำลังรับแรงอัดเท่ากับ 9.8 kN/m^3 และ 2.8 MPa และอัตราส่วน (เศษแก้วบดละเอียด เถ้าลอย ปริมาณสารกระตุ้น และสารเพิ่มฟอง) ที่เหมาะสมในการเตรียมตัวอย่างเพื่อให้ได้มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมคอนกรีตบล็อกมวลเบาแบบเติมฟองอากาศชนิด C12 คือความเข้มข้นของ NaOH เท่ากับ 1 โมลาร์ อัตราส่วน L/FA เท่ากับ 0.6 และปริมาณ Ac ร้อยละ 1 โดยน้ำหนักของ FA ซึ่งให้หน่วยน้ำหนักและกำลังรับแรงอัดเท่ากับ 10.3 kN/m^3 และ 7.5 MPa



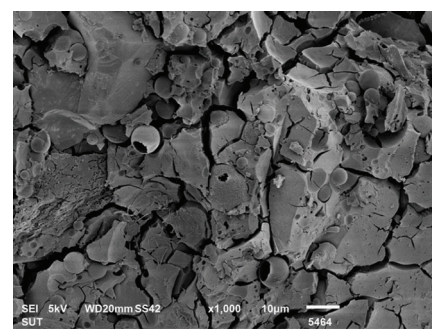
รูปที่ 5 กำลังรับแรงอัดของตัวอย่างมอร์ตาร์มวลเบาเซลลูโลสจากเศษแก้วบดละเอียดผสมเถ้าลอยถ่านหินกระตุ้นด้วยต่าง

4. โครงสร้างทางจุลภาค

รูปที่ 6 แสดงโครงสร้างทางจุลภาคของตัวอย่างมอร์ตาร์มวลเบาเซลลูโลสจากเศษแก้วบดละเอียดผสมเถ้าลอยถ่านหินกระตุ้นด้วยต่างที่อัตราส่วน RG ต่อ FA เท่ากับ 50:50 อัตราส่วน Na_2SiO_3 ต่อ NaOH เท่ากับ 70:30 อัตราส่วน L/FA เท่ากับ 0.6 ปริมาณ Ac ร้อยละ 0 และความเข้มข้นของ NaOH เท่ากับ 1 3 5 และ 7 โมลาร์ ตามลำดับ พบว่าความเข้มข้นของสารละลาย NaOH ที่เพิ่มขึ้นจะชะลอการเกิดและลดปริมาณของเถ้าลอยหลุดออก เกิดโพรงขนาดใหญ่ และขยายโพรงให้ใหญ่ขึ้น เถ้าลอยขนาดเล็กอัดตัวเข้าไปในโพรงเกิดผลิตภัณฑ์ทั้งภายในและภายนอกผิวของเถ้าลอย (Yoosuk et al., 2021) และสารละลาย NaOH ที่มีความเข้มข้นมากขึ้นจะทำปฏิกิริยากับแคลเซียมซิลเฟต ทำให้เกิดแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งแคลเซียมไฮดรอกไซด์จะทำปฏิกิริยากับซิลิกา และอลูมินาจากเถ้าลอยเกิดเป็นแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) และแคลเซียมอะลูมิเนตไฮเดรต (C-A-H) หรือที่เรียกว่า ปฏิกิริยาปอซโซลานิก เมื่อสารประกอบ C-S-H มากขึ้น (Horpibulsuk et al., 2015) สารนี้จะเพิ่มความแน่นทำให้ลดช่องว่างของเฟสทดสอบคล้องกับค่ากำลังรับแรงอัดที่เพิ่มขึ้น

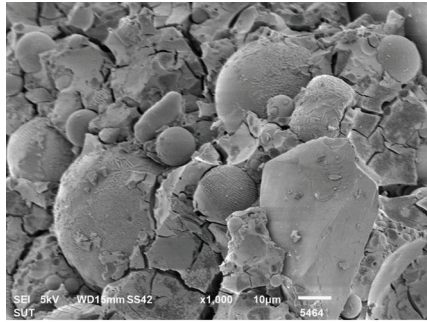


NaOH concentration=1M

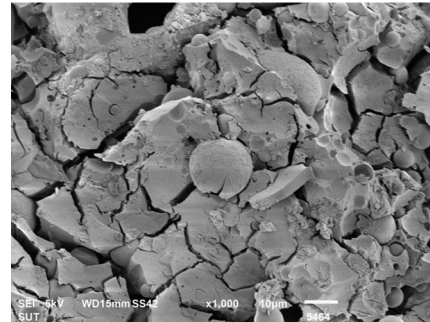


NaOH concentration=3M

รูปที่ 6 โครงสร้างจุลภาคของตัวอย่างมอร์ตาร์มวลเบาเซลลูโลสจากเศษแก้วบดละเอียดผสมเถ้าลอยถ่านหินกระตุ้นด้วยต่าง ปริมาณ Ac = 0 %, L/FA = 0.6 ความเข้มข้น NaOH = 1 3 5 และ 7 โมลาร์



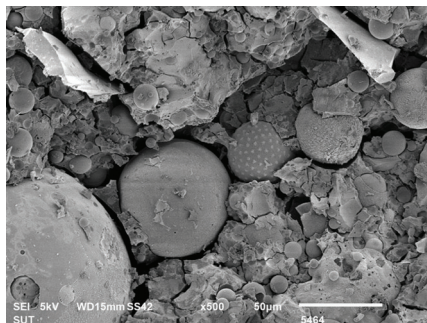
NaOH concentration=5M



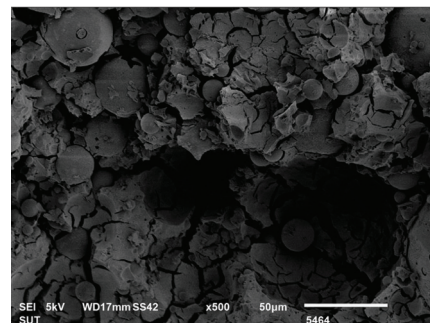
NaOH concentration=7M

รูปที่ 6 โครงสร้างจุลภาคของตัวอย่างมอร์ตาร์มวลเบาเซลลูโลสจากเศษแก้วบดละเอียดผสมเถ้าลอยถ่านหินกระตุ้นด้วยต่าง ปริมาณ Ac = 0 %, L/FA = 0.6 ความเข้มข้น NaOH = 1 3 5 และ 7 โมลาร์ (ต่อ)

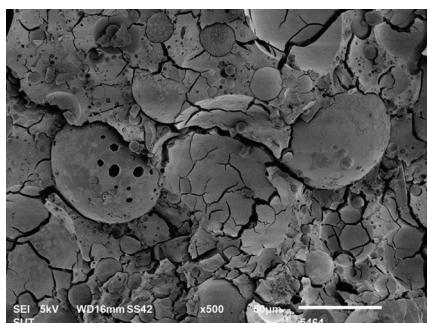
รูปที่ 7 แสดงโครงสร้างทางจุลภาคของตัวอย่างมอร์ตาร์มวลเบาเซลลูโลสจากเศษแก้วบดละเอียดผสมเถ้าลอยถ่านหินกระตุ้นด้วยต่างที่อัตราส่วน RG ต่อ FA เท่ากับ 50:50 อัตราส่วน Na_2SiO_3 ต่อ NaOH เท่ากับ 70:30 ความเข้มข้นของ NaOH เท่ากับ 5 โมลาร์ ที่อัตราส่วน L/FA เท่ากับ 0.6 และปริมาณ Ac ร้อยละ 0 1 3 และ 5 โดยน้ำหนักของ FA ตามลำดับ พบว่าผลิตภัณฑ์ (สารประกอบใด ๆ ที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาเคมีระหว่างสารตั้งต้น เช่น จากปฏิกิริยาปอซโซลานิก จากปฏิกิริยาไฮเดรชัน จากปฏิกิริยาโพลีเมอร์ ฯลฯ ทางวิศวกรรมโยธา เรียกว่า ผลิตภัณฑ์) จีโอโพลีเมอร์ไรเซชันมีค่าลดลงตามปริมาณโฟมที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากปริมาณโฟมที่เพิ่มขึ้นในส่วนผสม มีคุณสมบัติเป็นสารลดแรงตึงผิวและสารพลาสติกเคลือบผิว อาจกล่าวได้ว่าด้วยคุณสมบัตินี้ทำให้โฟมเข้าไปเคลือบผิวของเถ้าลอย จึงส่งผลให้ความสามารถของสารละลาย NaOH ในการชะซิลิกาและอลูมินาลดลง เห็นได้ชัดเจนจากอนุภาคเถ้าลอยที่ไม่เกิดปฏิกิริยาและมีอนุภาคเถ้าลอยฝังอยู่ในเนื้อวัสดุเชื่อมประสาน



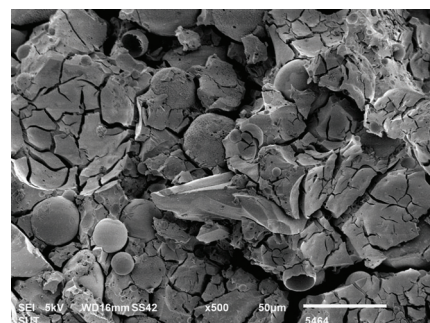
Foam content=0%



Foam content=1%



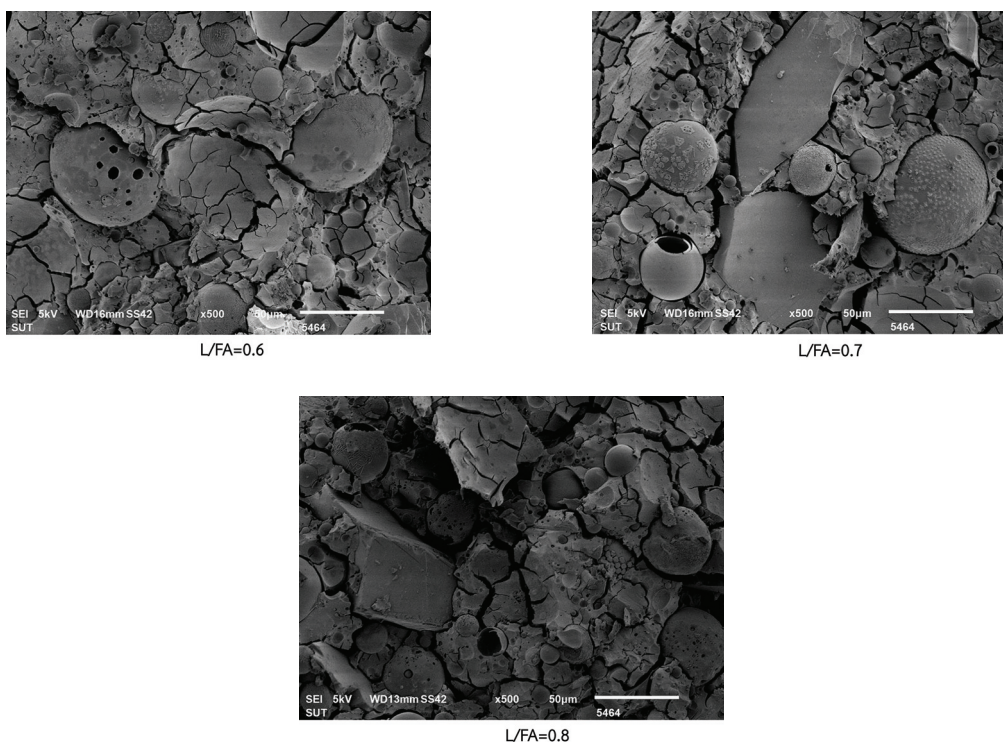
Foam content=3%



Foam content=5%

รูปที่ 7 โครงสร้างจุลภาคของมอร์ตาร์มวลเบาเซลลูโลสจากเศษแก้วบดละเอียดผสมเถ้าลอยถ่านหินกระตุ้นด้วยต่าง ปริมาณ Ac = 0 1 3 และ 5 %, L/FA = 0.6 ความเข้มข้น NaOH = 5 โมลาร์

รูปที่ 8 แสดงโครงสร้างทางจุลภาคของตัวอย่างมอร์ตาร์มวลเบาเซลลูโลสจากเศษแก้วบดละเอียดผสมเถ้าลอยถ่านหินกระตุ้นด้วยต่างที่อัตราส่วน RG ต่อ FA เท่ากับ 50:50 อัตราส่วน Na_2SiO_3 ต่อ NaOH เท่ากับ 70:30 ความเข้มข้นของ NaOH เท่ากับ 5 โมลาร์ อัตราส่วน L/FA เท่ากับ 0.6 0.7 0.8 และปริมาณ Ac ร้อยละ 3 โดยน้ำหนักของ FA พบว่าโครงสร้างทางจุลภาคของก้อนตัวอย่างมีลักษณะการก่อตัวเป็นเนื้อเดียวกันค่อนข้างดีนอกจากนี้สามารถสังเกตได้ว่าโครงสร้างจีโอโพลีเมอร์เกิดผลผลิตแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) หรือแคลเซียมอะลูมิโนซิลิเกตไฮเดรต (C-A-S-H) อยู่ร่วมกับจีโอโพลีเมอร์เจล (NASH) เพิ่มขึ้น (Posi et al., 2013)



รูปที่ 8 โครงสร้างจุลภาคของตัวอย่างมอร์ตาร์มวลเบาเซลลูโลสจากเศษแก้วบดละเอียดผสมเถ้าลอยถ่านหินกระตุ้นด้วยต่าง ปริมาณ Ac = 3 %, L/FA = 0.6 0.7 และ 0.8 ความเข้มข้น NaOH = 5 โมลาร์

สรุปผล

จากการศึกษาสมบัติทางวิศวกรรมและโครงสร้างทางจุลภาคของมอร์ตาร์มวลเบาเซลลูโลสจากเศษแก้วบดละเอียดผสมเถ้าลอยถ่านหินกระตุ้นด้วยต่างโดยแปรผันความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) อัตราส่วนสารกระตุ้นต่อเถ้าลอยและปริมาณโพลีเมอร์ ผลการทดสอบได้ดังนี้

1. หน่วยน้ำหนักต่ำที่สุดของตัวอย่างมอร์ตาร์มวลเบาเซลลูโลสจากเศษแก้วบดละเอียดผสมเถ้าลอยกระตุ้นด้วยต่างเมื่อความเข้มข้นของ NaOH เท่ากับ 1 โมลาร์ อัตราส่วนของ L/FA เท่ากับ 0.8 และปริมาณ Ac ร้อยละ 5 โดยน้ำหนักของ FA
2. กำลังรับแรงอัดสูงสุดของตัวอย่างมีค่าเท่ากับ 23.8 MPa ที่ความเข้มข้นของ NaOH เท่ากับ 7 โมลาร์ อัตราส่วน L/FA เท่ากับ 0.6 และปริมาณ Ac ร้อยละ 0
3. อัตราส่วนที่เหมาะสมสำหรับบล็อกมวลเบาแบบเติมฟองอากาศชนิด C10 คือความเข้มข้นของ NaOH เท่ากับ 1 โมลาร์ อัตราส่วน L/FA เท่ากับ 0.6 และปริมาณ Ac ร้อยละ 3 โดยน้ำหนักของ FA ในขณะที่อัตราส่วนที่เหมาะสมสำหรับบล็อกมวลเบาแบบเติมฟองอากาศชนิด C12 คือ ความเข้มข้นของ NaOH เท่ากับ 1 โมลาร์ อัตราส่วนของ L/FA เท่ากับ 0.6 และปริมาณ Ac ร้อยละ 1 โดยน้ำหนักของ FA

4. โครงสร้างทางจุลภาคแสดงให้เห็นว่าระดับความเข้มข้นสูงของ NaOH มีประสิทธิภาพในการชะซิลิกอนและอลูมิเนียมบริเวณผิวเผินหลุดออกทำให้โพรงขยายใหญ่ขึ้น แก้วลอยขนาดเล็กเข้าไปอัดตัวแทรกในโพรงเกิดผลิตภัณฑ์ทั้งภายในและภายนอกผิวของแก้วลอย ในขณะที่ผลิตภัณฑ์จีโอโพลีเมอร์ไรเซชันมีค่าลดลงตามปริมาณโพมที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากโพมมีคุณสมบัติเป็นสารลดแรงตึงผิวและสารพลาสติกเคลือบผิว

5. โครงสร้างทางจุลภาคของตัวอย่างที่อัตราส่วน L/FA ต่าง ๆ มีลักษณะการก่อตัวเป็นเนื้อเดียวกันค่อนข้างดี นอกจากนี้ยังสามารถสังเกตได้ว่าโครงสร้างจีโอโพลีเมอร์เกิดผลผลิตแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) หรือแคลเซียมอะลูมิโนซิลิเกตไฮเดรต (C-A-S-H) อยู่ร่วมกับจีโอโพลีเมอร์เจล (NASH) เพิ่มขึ้น

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากกองทุนส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม ประเภทยุทธศาสตร์สนับสนุนงานมูลฐาน (Fundamental Fund) ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2568 รหัสโครงการ FF68/NKR/130 เครื่องมือและสถานที่วิจัยได้รับการสนับสนุนจากสาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี และเศษขวดแก้วที่ใช้ในการศึกษาได้รับความอนุเคราะห์จาก บริษัท แก้วกรุงไทย จำกัด

References

- Ali, E.E. and Al-Tersawy, S.H. (2012). Recycled Glass as a Partial Replacement for Fine Aggregate in Self-Compacting Concrete. *Construction and Building Materials*, 35, 785-791. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.04.117>
- Arulrajah, A., Ali, M.M.Y., Disfani, M.M., Piratheepan, J. and Bo, M.W. (2012). Geotechnical Performance of Recycled Glass-Waste Rock Blends in Footpath Bases. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 25(5), 653-661. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0000617](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000617)
- Arulrajah, A., Ali, M.M.Y., Disfani, M.M. and Horpibulsuk, S. (2013). Recycled-Glass Blends in Pavement Base/Subbase Applications: Laboratory and Field Evaluation. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 26(7), [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0000966](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000966)
- Arulrajah, A., Kua, T.A., Horpibulsuk, S., Phetchuay, C., Suksiripattanapong, C. and Du, Y.J. (2016). Strength and Microstructure Evaluation of Recycled Glass-Fly Ash Geopolymer as Low-Carbon Masonry Units. *Construction and Building Materials*, 114, 400-406. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.03.123>
- Grubb, D.G., Gallagher, P.M., Wartman, J., Liu, Y. and Carnivale, M. (2006). Laboratory Evaluation of Crushed Glass-Dredged Material Blends. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 132(5), 562-576. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2006\)132:5\(562\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2006)132:5(562))
- Horpibulsuk, S., Suksiripattanapong, C., Samingthong, W., Rachan, R. and Arulrajah A. (2015). Durability Against Wetting-Drying Cycles of Water Treatment Sludge-Fly Ash Geopolymer and Water Treatment Sludge-Cement and Silty Clay-Cement Systems. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 28(1), 04015078. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0001351](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001351)
- Imteaz, M.A., Ali, M.Y. and Arulrajah, A. (2012). Possible Environmental Impacts of Recycled Glass Used as a Pavement Base Material. *Waste Management & Research: The Journal for a Sustainable Circular Economy*, 30(9), 917-921. <https://doi.org/10.1177/0734242X12448512>

- Mishra, G., Danoglidis, P.A., Shah, S.P. and Konsta Gdoutos, M.S. (2023). Carbon Capture and Storage Potential of Biochar-Enriched Cementitious Systems. *Cement and Concrete Composites*, 140, 105078. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2023.105078>
- Ooi, P.S.K., Li, M.M.W., Sagario, M.L.Q. and Song, Y. (2008). Shear Strength Characteristics of Recycled Glass. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2059(1), 52-62. <https://doi.org/10.3141/2059-06>
- Palomo, A., Grutzeck, M.W. and Blanco, M.T. (1999). Alkali-Activated Fly Ashes: A Cement for the Future. *Cement and Concrete Research*, 29(8), 1323-1329. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(98\)00243-9](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(98)00243-9)
- Posi, P., Teerachanwit, C., Tanutong, C., Limkamoltip, S., Lertnimoolchai, S., Sata, V. and Chindaprasirt, P. (2013). Lightweight Geopolymer Concrete Containing Aggregate from Recycles Lightweight Block. *Materials and Design*, 52, 580-586. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.06.001>
- Suksiripattanapong, C., Horpibulsuk, S., Chanprasert, P., Sukmak, P. and Arulrajah, A. (2015). Compressive Strength Development in Fly Ash Geopolymer Masonry Units Manufactured from Water Treatment Sludge. *Construction and Building Materials*, 82, 20-30. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.02.040>
- Suntharanurak, J. and Tonnayopas, D. (2013). Strength Development and Sulfate Durability of Waste Clear Bottle Glass Aggregate Concrete Containing Sugarcane Bagasse Ash. *The Journal of Industrial Technology*, 10(1), 62-69. https://ph01.tci-thaijo.org/index.php/jit_journal/article/view/32813/27943 (in Thai)
- Xie, Z. and Yunping, X. (2001). Hardening Mechanisms of an Alkaline-Activated Class F Fly Ash. *Cement and Concrete Research*, 31(9), 1245-1249. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(01\)00571-3](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(01)00571-3)
- Yoosuk, P., Suksiripattanapong, C., Sukontasukkul, P. and Chindaprasirt, P. (2021). Properties of Polypropylene Fiber Reinforced Cellular Lightweight High Calcium Fly Ash Geopolymer Mortar. *Case Studies in Construction Materials*, 15, e00730. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00730>