

การศึกษากำลังอัดและความต้านทานคลอไรด์ของมอร์ตาร์กระตุ้นด้วยต่างจากเถ้าลอยและเศษแก้วบดละเอียด

A study of compressive and chloride resistance of alkali-activated mortar made from fly ash and waste glass powder

ฉัตรทริกา เพียงพิมาย¹ อภัย เบ็ญจพงษ์¹ เซาพีร์ ตือราแม^{1,*} ประภาส ขาวขุนทด² และ อัทธนีย์ บุญเกิด²

¹ อาจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ กรุงเทพมหานคร

² นิสิตปริญญาตรี ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ กรุงเทพมหานคร

*Corresponding author; E-mail address: Saofee.d@mail.rmutk.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการศึกษาสมบัติของมอร์ตาร์กระตุ้นด้วยต่างที่ใช้วัสดุประสานเถ้าลอยและเศษแก้วบดละเอียด โดยมีอัตราส่วนของเถ้าลอยต่อเศษแก้วบดละเอียดเท่ากับ 90 : 10 , 80 : 20 และ 70 : 30 และใช้สารละลายต่างเพื่อกระตุ้นปฏิกิริยาโดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้น 10 โมลาร์ ต่อสารละลายโซเดียมซิลิเกตในอัตราส่วน 1:1 ทำการศึกษาสมบัติของมอร์ตาร์สดด้านการไหลแม่ สมบัติด้านการรับกำลังอัดที่อายุ 7, 28 และ 90 วัน และการเกิดสนิมของเหล็กเสริมเนื่องจากคลอไรด์โดยใช้การเร่งด้วยกระแสไฟฟ้า จากผลการทดสอบพบว่าการใช้เศษแก้วบดละเอียดแทนที่เถ้าลอยในปริมาณที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้มอร์ตาร์มีการไหลแม่ที่เพิ่มขึ้น ในขณะที่เดียวกันผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดพบว่าการใช้เศษแก้วบดละเอียดแทนที่เถ้าลอยที่เพิ่มขึ้นส่งผลต่อการพัฒนากำลังอัดที่ลดลง อย่างไรก็ตามจะเห็นว่าการใช้เศษแก้วบดละเอียดในอัตราส่วนร้อยละ 10 สามารถพัฒนากำลังอัดได้ถึง 539.1 กก/ซม² ที่อายุ 90 วัน นอกจากนี้ สำหรับการทดสอบการเกิดสนิมของเหล็กเสริมเนื่องจากคลอไรด์แสดงให้เห็นว่ากลุ่มมอร์ตาร์กระตุ้นด้วยต่างที่ทำจากเถ้าลอยร่วมกับเศษแก้วบดละเอียดยังสามารถต้านทานต่อการเกิดสนิมได้ในระดับที่ต่ำกว่ามอร์ตาร์ควบคุมที่ใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานทุกส่วนผสม

คำสำคัญ: เถ้าลอย, เศษแก้วบดละเอียด, วัสดุประสานกระตุ้นด้วยต่าง, การเกิดสนิม

Abstract

This article presents an experiential study of the properties of alkali-activated mortar using a binder made from fly ash and waste glass powder. The ratio of fly ash and waste glass powder were 90:10, 80:20, and 70:30, and sodium hydroxide solutions (NaOH) with a concentration of 10M and sodium silicate (Na₂SiO₃) solutions at ratio of 1:1 was used as an alkali activator. The study examined the fresh mortar properties, including flowability. The compressive strength of mortar was tested at 7, 28, and 90 days. The corrosion resistance of the reinforcing steel was tested by impressive voltage at 28 days. The results showed that using a higher proportion of waste glass powder to replace fly ash increased the flowability of the mortar. For the compressive strength of mortar, it was found that higher amounts of waste glass powder reduced compressive strength.

However, the use of 90% of fly ash combined with 10% of waste glass powder could enhance the compressive strength up to 539.1 kg/cm² at 90 days. Moreover, all alkali-activated fly ash and waste glass powder mortar showed higher corrosion resistance than Portland cement mortar.

Keywords: Fly Ash, Waste Glass Powder, Alkali-Activated Binder, Corrosion

1. บทนำ

ปัจจุบันการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศเป็นปัญหาสำคัญปัญหาหนึ่งของโลก ซึ่งหนึ่งในสาเหตุหลักที่สำคัญอันส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมมาจากอุตสาหกรรมคอนกรีต เนื่องจากกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์เพื่อใช้สำหรับเป็นวัสดุในการผลิตคอนกรีตปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ซึ่งเป็นตัวการหลักที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมโดยตรงกับโลกก่อให้เกิดภาวะเรือนกระจกหรือภาวะโลกร้อน และยังมีสารมลพิษอื่นๆ ที่ถูกปล่อยออกสู่บรรยากาศของโลกเป็นจำนวนมากเช่นเดียวกัน ซึ่งการปล่อยก๊าซ CO₂ ของอุตสาหกรรมคอนกรีตคิดเป็นประมาณ 8% ของชั้นบรรยากาศทั่วโลก [1] ก๊าซเหล่านี้จะกระทบต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศและการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิโลก นอกจากนี้กระบวนการผลิตปูนซีเมนต์จะต้องใช้ทรัพยากรจากธรรมชาติจำนวนมากเพื่อเป็นวัตถุดิบในการผลิตซีเมนต์ หากสามารถลดการใช้ปริมาณปูนซีเมนต์หรือหาวัสดุทางเลือกมาทดแทนการใช้ปูนซีเมนต์สำหรับผลิตคอนกรีตจะช่วยลดปัญหาดังกล่าวลงได้

วัสดุประสานกระตุ้นด้วยต่าง (Alkali-activated binder) เป็นวัสดุประสานทางเลือกหนึ่งที่สามารถนำมาใช้เป็นวัสดุประสานในการผลิตคอนกรีตที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม โดยกระบวนการผลิตได้จากการนำวัสดุที่มีองค์ประกอบของซิลิกาและอะลูมินามาใช้เป็นสารตั้งต้นและผสมร่วมกับสารละลายต่างเพื่อกระตุ้นปฏิกิริยาเกิดเป็นโครงสร้างที่สามารถรับกำลังได้ [2] เถ้าลอยเป็นวัสดุพลอยได้ชนิดหนึ่งที่น่านำมาใช้ในอุตสาหกรรมคอนกรีตอย่างแพร่หลายและสามารถใช้เป็นสารตั้งต้นในการผลิตเป็นวัสดุประสานกระตุ้นด้วยต่างได้ เนื่องจากมีองค์ประกอบของซิลิกาและอะลูมินาก่อให้เกิดสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) และ แคลเซียมอะลูมิโนซิลิเกตไฮเดรต (C-A-S-H) อยู่ร่วมกับการเกิดโซเดียมอะลูมิโนซิลิเกตไฮเดรต (N-A-S-H) ซึ่งส่งผลต่อการพัฒนากำลังอัดเช่นเดียวกับการเกิดปฏิกิริยาของระบบซีเมนต์ [3-4]

เศษแก้ว (Waste glass) เป็นวัสดุเหลือทิ้งได้จากเครื่องใช้อุปโภค/บริโภคที่ผ่านการใช้งานแล้วนำมารีไซเคิลใหม่โดยเอาไปผ่านกระบวนการปรับปรุงคุณภาพด้วยวิธีการบดละเอียดเพื่อให้สามารถนำกลับมาใช้ให้เกิด

ประโยชน์สูงสุดได้ เศษแก้วบดละเอียดมีองค์ประกอบทางเคมีของซิลิกา (SiO₂) แคลเซียมออกไซด์ (CaO) และโซเดียมออกไซด์ (Na₂O) ในปริมาณสูง [5-7] อย่างไรก็ตามยังคงมีส่วนของเศษแก้วจำนวนมากที่ไม่สามารถนำมารีไซเคิลใหม่ได้ และยังมีความจำเป็นที่ต้องใช้การกำจัดโดยการกองทิ้งหรือฝังกลบ ซึ่งก่อให้เกิดปัญหาทางมลพิษที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมเป็นอย่างมาก เพื่อลดปัญหาดังกล่าวจากงานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการนำเศษแก้วมาแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วน [7] ซึ่งพบว่า การใช้เศษแก้วบดละเอียดร้อยละ 5 แทนที่ในปูนซีเมนต์สามารถพัฒนากำลังอัดในช่วงอายุต้น 7 วันแรกเท่ากับ 37 MPa. Wang และคณะ [6] รายงานว่าการใช้เศษแก้วบดละเอียด (WGP) แทนที่ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด (GGBS) ที่เพิ่มขึ้นถึงร้อยละ 30 จะส่งผลเชิงบวกต่อความสามารถทำงานได้และมีอัตราการหดตัวของมอร์ตาร์ลดลงเมื่อเทียบกับส่วนผสมที่ไม่มีการแทนที่ WGP ถึง 68.0 เปอร์เซ็นต์ และการแทนที่ WGP ร้อยละ 15 จะพัฒนากำลังอัดได้สูงถึง 42.2 MPa ที่อายุ 28 วัน ดังนั้นจะเห็นว่าวัสดุดังกล่าวมีคุณสมบัติที่สามารถนำมาเป็นวัสดุตั้งต้นทดแทนการใช้ปูนซีเมนต์เพื่อพัฒนาเป็นวัสดุที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมได้

งานวิจัยนี้จึงนำเศษแก้วเหลือทิ้งมาผ่านกระบวนการปรับปรุงคุณภาพด้วยวิธีการบดละเอียดเพื่อใช้เป็นสารตั้งต้นร่วมกับเถ้าลอย โดยศึกษาคุณสมบัติพื้นฐานของมอร์ตาร์ อาทิเช่น การไหลแผ่ ความสามารถในการรับกำลังอัด ตลอดจนความสามารถในการต้านทานการเกิดสนิมของเหล็กเสริมเนื่องจากคลอไรด์ด้วยกระแสไฟฟ้า

2. วัสดุและวิธีการดำเนินงาน

2.1 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการนำเศษแก้วบดละเอียดมาใช้เป็นสารตั้งต้นร่วมกับเถ้าลอยในการผลิตเป็นมอร์ตาร์กระตุ้นด้วยต่างเพื่อเปรียบเทียบกับมอร์ตาร์ควบคุมที่ผลิตจากปูนซีเมนต์ ปูนซีเมนต์ที่ใช้เป็นปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกชนิด GU type มีความถ่วงจำเพาะและความละเอียดของเบลนเท่ากับ 3.15 และ 3,600 g/cm³ ตามลำดับ (รูปที่ 1ก) เถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะจังหวัดลำปาง มีความถ่วงจำเพาะและความละเอียดของเบลนเท่ากับ 2.67 และ 4,300 g/cm³ ตามลำดับ ซึ่งผลรวมปริมาณของซิลิกา (SiO₂) อะลูมินา (Al₂O₃) และเฟอร์ริกออกไซด์ (Fe₂O₃) เท่ากับ 56.6% ซึ่งจะถูกจำแนกเป็นเถ้าลอยแคลเซียมสูง (Class C) ตามมาตรฐาน ASTM C618-22 [8] (รูปที่ 1ข) มาใช้เป็นสารตั้งต้นร่วมกับเศษแก้วบดละเอียด ซึ่งได้มาจากเศษแก้วเหลือทิ้งจากกระบวนการรีไซเคิล (รูปที่ 1ค) เศษแก้วบดละเอียดก่อนนำมาใช้งานต้องผ่านการทำความสะอาดและเข้าสู่กระบวนการย่อยหรือบดด้วยเครื่องลอสแองเจลิสเป็นเวลา 120 นาที และนำมาร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 100 (150 μm) (รูปที่ 1ง) โดยองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุที่ใช้ในงานวิจัยนี้แสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุ

Composition (%)	Cement	Fly ash	Waste glass powder [9]
SiO ₂	16.1	24.2	70-75
Al ₂ O ₃	3.8	14.1	2.5
Fe ₂ O ₃	3.6	18.3	0.5
CaO	69.0	29.6	7-12
MgO	0.9	2.4	5
K ₂ O	0.8	0.3	1.5
Na ₂ O	0.4	2.1	12-15
SO ₃	4.7	6.5	-



n) Cement



ข) Fly ash



ค) Waste glass



ง) Waste glass powder

รูปที่ 1 วัสดุตั้งต้นที่ใช้ในงานวิจัย

2.2 ส่วนผสม

การศึกษาค้นคว้านี้เป็นการนำเศษแก้วบดละเอียดมาใช้เป็นสารตั้งต้นร่วมกับเถ้าลอยในการผลิตวัสดุประสานกระตุ้นด้วยต่าง โดยมีอัตราส่วนของเถ้าลอยต่อเศษแก้วบดละเอียด (FA:GP) เท่ากับ 90:10, 80:20, 70:30 และใช้สารละลายต่างกระตุ้นปฏิกิริยาของมอร์ตาร์ ได้แก่ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ที่มีความเข้มข้น 10 โมลาร์ และสารละลายโซเดียมซิลิเกต (Na₂SiO₃) ในอัตราส่วน 1:1 ใช้อัตราส่วนวัสดุประสานต่อทรายเท่ากับ 1: 2.75 โดยน้ำหนัก และควบคุมอัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสาน (L/B) เท่ากับ 0.80 เปรียบเทียบกับมอร์ตาร์ควบคุมที่ผลิตจากปูนซีเมนต์ซึ่งมีอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ (W/C) เท่ากับ 0.50 โดยอัตราส่วนผสมของมอร์ตาร์ที่ใช้ในการศึกษาแสดงดังตารางที่ 2

2.3 วิธีการทดสอบ

2.3.1 การทดสอบการไหลแผ่

การทดสอบความสามารถในการไหลแผ่เป็นการทดสอบเพื่อเปรียบเทียบความสามารถในการทำงานได้ของมอร์ตาร์ ซึ่งทำการทดสอบโดยใช้โต๊ะการไหล (Flow table) ตามมาตรฐาน ASTM C1437-20 [10]

2.3.2 การทดสอบกำลังอัด

การทดสอบกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ ทดสอบโดยใช้ตัวอย่างมอร์ตาร์ทรงลูกบาศก์ขนาด 50x50x50 มิลลิเมตร ตามมาตรฐาน ASTM C109-20 [11] ซึ่งทำการทดสอบที่อายุ 7, 28 และ 90 วัน ในแต่ละอัตราส่วนผสมของมอร์ตาร์และในแต่ละช่วงอายุ ใช้ตัวอย่างทดสอบอย่างน้อย 3 ตัวอย่างต่อหนึ่งอัตราส่วนผสม

2.3.3 การทดสอบการเกิดสนิม

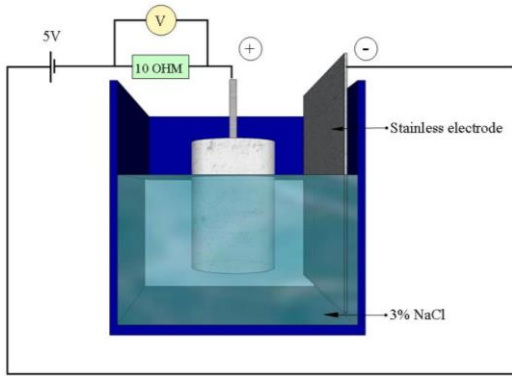
การทดสอบการเกิดสนิมของเหล็กเสริมที่ฝังในคอนกรีตโดยการเร่งด้วยกระแสไฟฟ้าซึ่งประยุกต์มาจากการทดสอบตามมาตรฐาน NT Build 356 [12] ใช้ตัวอย่างทรงกระบอกเส้นผ่าศูนย์กลาง 100 มิลลิเมตร สูง 200 มิลลิเมตร ทำการฝังเหล็กเส้นกลมขนาด 9 มิลลิเมตร ที่มีความยาวประมาณ 200 มิลลิเมตร ฝังลงในเนื้อมอร์ตาร์ลึก 150 มิลลิเมตร ที่บริเวณกึ่งกลางของหน้าตัดตัวอย่าง เพื่อให้เหล็กเสริมมีระยะหุ้มของมอร์ตาร์เท่ากันประมาณ 50 มิลลิเมตร (รูปที่ 2ข) ทำการบ่มตัวอย่างเป็นเวลา 24 ชั่วโมง เมื่อครบตามกำหนดทำการถอดแบบหล่อ จากนั้นนำตัวอย่างบ่มในน้ำจืดจนครบอายุการทดสอบที่อายุ 28 วัน โดยนำตัวอย่างไปทดสอบในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ที่มีความเข้มข้นร้อยละ 3 ให้ระดับของสารละลายอยู่ต่ำกว่าพื้นผิวของตัวอย่างมอร์ตาร์ 50 มิลลิเมตร จากนั้นต่อ

ตารางที่ 2 อัตราส่วนผสมมอร์ตาร์ (อัตราส่วนผสมมอร์ตาร์จำนวน 9 ตัวอย่าง)

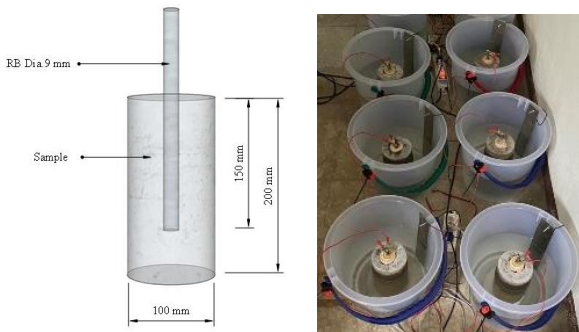
Sample	L/B ratio	Cement	Fly ash	Waste glass powder	Sand	Alkali solution		Tap water
		(g)	(g)	(g)	(g)	NaOH (g)	Na ₂ SiO ₃ (g)	(g)
CT	0.50*	740	-	-	2035	-	-	370
FA90GP10		-	666	74	2035	296	296	-
FA80GP20	0.80	-	592	148	2035	296	296	-
FA70GP30		-	518	222	2035	296	296	-

หมายเหตุ: *ส่วนผสมของมอร์ตาร์ควบคุม CT จะใช้เป็นอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ (W/C)

เข้ากับวงจรไฟฟ้ากระแสตรงที่มีความต่างศักย์ 5 โวลต์ เข้าสู่ก้อนตัวอย่างทดสอบโดยนำขั้วบวกไปต่อกับตัวต้านทาน 10 โอห์ม แล้วเชื่อมเข้ากับเหล็กเสริมที่ฝังอยู่ในมอร์ตาร์ หลังจากนั้นนำขั้วลบไปต่อกับแผ่นสแตนเลสซึ่งมีความเป็นอิเล็กโทรด (รูปที่ 2ก) จากนั้นบันทึกผลทดสอบด้วยการวัดค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวอย่างทุกๆ 12 ชั่วโมง



ก) ลักษณะการติดตั้งตัวอย่าง [12]



ข) รายละเอียดของตัวอย่างมอร์ตาร์

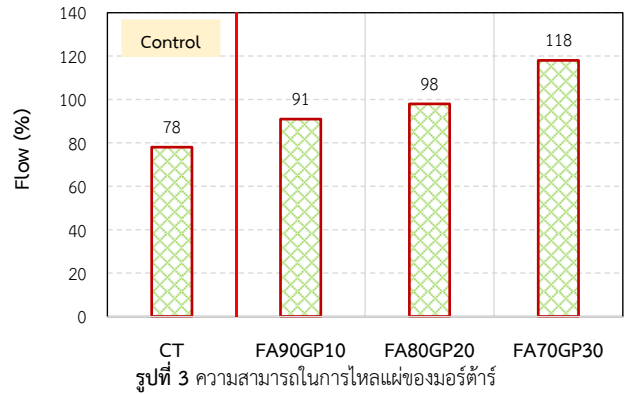
รูปที่ 2 การทดสอบการเร่งสนิมของเหล็กเสริมด้วยกระแสไฟฟ้า

3. ผลการทดสอบและอภิปรายผล

3.1 ความสามารถในการไหลผ่าน

ผลการทดสอบการไหลผ่านของมอร์ตาร์แสดงดังรูปที่ 3 ผลการทดสอบมอร์ตาร์ควบคุม (CT) มีการค่าการไหลผ่านมากกว่ากลุ่มของมอร์ตาร์ที่ใช้วัสดุประสานกระตุ้นด้วยต่าง โดยมอร์ตาร์ควบคุม (CT) มีการไหลผ่านเท่ากับร้อยละ 78 การใช้วัสดุประสานกระตุ้นด้วยต่างมีการทำปฏิกิริยาระหว่างองค์ประกอบของสารตั้งต้นและสารละลายต่าง ก่อให้เกิดการก่อตัวอย่างรวดเร็วขณะผสม โดยเฉพาะสารตั้งต้นที่มีองค์ประกอบเคมีของแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ในปริมาณที่สูง ทำให้มอร์ตาร์สดมีความหนืดมากกว่ามอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสาน ซึ่งส่งผลต่อความสามารถในการทำงานได้ของมอร์ตาร์ [13] ในขณะที่ตัวอย่างมอร์ตาร์ของ

FA90GP10, FA80GP20 และ FA70GP30 มีค่าไหลผ่านเท่ากับร้อยละ 91, 98 และ 118 ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา [6] การเพิ่มเศษแก้วบดละเอียดร้อยละ 15-30 ช่วยให้การไหลผ่านของมอร์ตาร์เพิ่มขึ้นเท่ากับ 130-155 มิลลิเมตร และยังส่งผลต่อเวลาในการก่อตัวของมอร์ตาร์ที่ยาวนานขึ้นตามไปด้วย เนื่องจาก GP มีคุณสมบัติในการดูดซึมน้ำที่ค่อนข้างต่ำ เมื่อมีการแทนที่ GP ใน FA ที่เพิ่มขึ้น ทำให้เกิดมีน้ำในตัวอย่างเพิ่มขึ้น [6,14] และอีกประเด็นคือ GP จะเข้าไปลดความรุนแรงของปฏิกิริยาระหว่างเกลือและสารละลายต่างในช่วงต้นทำให้เกิดการยึดเกาะน้อยลง ส่งผลต่อค่าการไหลผ่านของมอร์ตาร์ที่มากขึ้น กล่าวคือการใช้เศษแก้วบดละเอียดช่วยเพิ่มความสามารถในการทำงานได้ (Workability) ของมอร์ตาร์สดที่ใช้วัสดุประสานกระตุ้นด้วยต่างเป็นผลให้การไหลผ่านของมอร์ตาร์มากขึ้น



3.2 กำลังอัดของมอร์ตาร์

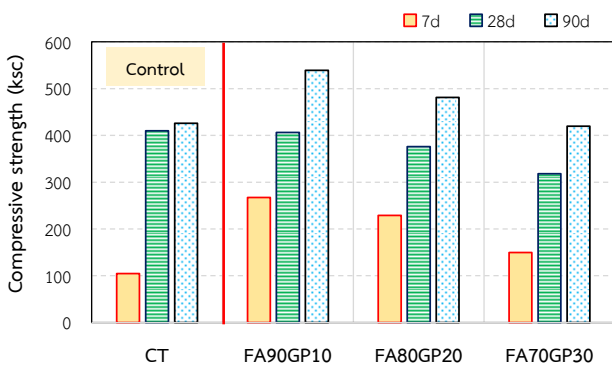
ผลการทดสอบกำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ผลิตจากเกลือผสมผงเศษแก้วบดละเอียดเปรียบเทียบกับมอร์ตาร์ควบคุมที่ผลิตจากปูนซีเมนต์แสดงดังตารางที่ 3 พบว่า มอร์ตาร์ควบคุม (CT) เป็นส่วนผสมที่ใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานมีค่ากำลังอัด เท่ากับ 104.6, 409.9 และ 426.0 กก/ซม² ที่อายุ 7, 28 และ 90 ตามลำดับ ส่วนกลุ่มของมอร์ตาร์ที่ใช้วัสดุประสานกระตุ้นด้วยต่างมีค่ากำลังอัดอยู่ช่วงระหว่าง 149.7-267.2, 318.0-406.4 และ 419.9-539.1 กก/ซม² ที่อายุ 7, 28 และ 90 ตามลำดับ

ตารางที่ 3 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์

Sample	Compressive Strength (ksc)		
	7 days	28 Days	90 Days
CT	104.6	409.9	426.0
FA90GP10	267.2	406.4	539.1
FA80GP20	228.8	375.9	481.1
FA70GP30	149.7	318.0	419.9

เมื่อเปรียบเทียบผลของมอร์ตาร์ควบคุมที่ใช้ปูนซีเมนต์และกลุ่มของมอร์ตาร์ที่ใช้วัสดุประสานกระตุ้นด้วยด่าง ดังแสดงในรูปที่ 4 จากผลการทดสอบการพัฒนากำลังอัดของมอร์ตาร์เห็นได้ว่ามอร์ตาร์ควบคุม (CT) ที่ใช้ปูนซีเมนต์มีการพัฒนากำลังอัดที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงระหว่าง 7 ถึง 28 วัน ในทางกลับกันกำลังอัดเริ่มมีแนวโน้มของการพัฒนากำลังที่ช้าลงหลังจากอายุตัวอย่างที่ 28 วัน ในขณะที่เดียวกันกลุ่มของมอร์ตาร์ที่ใช้วัสดุประสานที่ผลิตจากผงเศษแก้วบดละเอียดแทนที่ในเถ้าลอยร้อยละ 10, 20 และ 30 พบว่าการพัฒนากำลังอัดเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องตั้งแต่อายุทดสอบ 28 วัน จนกระทั่งถึงอายุทดสอบที่ 90 วัน เนื่องจากกระบวนการเกิดโครงสร้างในการรับกำลังที่ได้จากวัสดุประสานกระตุ้นด้วยด่างแตกต่างกับการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ โดยการเกิดปฏิกิริยาเคมีส่งผลให้เกิดการแข็งตัวเกิดเป็นโครงสร้างที่สามารถรับกำลังของวัสดุประสานกระตุ้นด้วยด่าง เนื่องจากเกิดจากการถูกชะละลายองค์ประกอบของซิลิกาและอะลูมินาจากสารตั้งต้นของสารละลายที่มีความเป็นด่าง จากนั้นเกิดการเชื่อมโยงกันเป็นโครงสร้างของสารประกอบที่สามารถรับกำลังได้ [2,15]

เมื่อเปรียบเทียบผลของการใช้ผงเศษแก้วบดละเอียด จะเห็นได้ว่าการใช้เศษแก้วบดละเอียดในปริมาณที่มากขึ้นส่งผลต่อการพัฒนากำลังที่ลดลงซึ่งผลการทดสอบมีแนวโน้มเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับงานวิจัยของ Çelik, A. i และคณะ [9] รายงานว่าการใช้เศษแก้วบดละเอียดส่งผลต่อการพัฒนากำลังอัดที่ลดลง เนื่องจากเศษแก้วบดละเอียดมีอัตราการทำปฏิกิริยาที่น้อยกว่าเถ้าลอย อย่างไรก็ตามที่อายุทดสอบ 90 วัน ตัวอย่างมอร์ตาร์ของ FA90GP10 และ FA80GP20 มีค่ากำลังอัดที่สูงกว่ามอร์ตาร์ควบคุม (CT) ส่วนมอร์ตาร์ของ FA70GP30 พบว่าให้กำลังอัดต่ำกว่ามอร์ตาร์ควบคุม (CT) เพียงเล็กน้อย ดังนั้นจากผลการทดสอบกำลังอัดแสดงให้เห็นว่าการใช้เศษแก้วบดละเอียดในอัตราส่วนร้อยละ 10 เป็นอัตราส่วนที่เหมาะสมซึ่งมีแนวโน้มที่จะสามารถพัฒนากำลังได้สูงถึง 539.1 กก/ซม² ที่อายุ 90 วัน

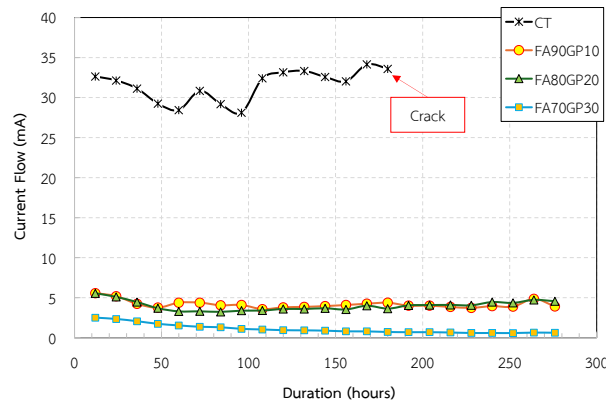


รูปที่ 4 กำลังอัดของมอร์ตาร์

3.3 ผลการทดสอบการเกิดสนิมเนื่องจากคลอไรด์

จากรูปที่ 5 แสดงผลของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวอย่างมอร์ตาร์ซึ่งทำการฝังเหล็กเส้นกลมขนาด 9 มิลลิเมตรไว้ ณ ตำแหน่งกึ่งกลางของตัวอย่าง โดยค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวอย่างสามารถบ่งบอกถึงการแทรกซึมของคลอไรด์ไอออน เพราะอิเล็กตรอนหรือคลอไรด์ไอออนเป็นสาเหตุของการเกิดสนิม โดยการเกิดสนิมในเหล็กเกิดจากความต่างศักย์ทางไฟฟ้าของเหล็กเสริมในคอนกรีต อิเล็กตรอนหรือคลอไรด์ไอออนจะเคลื่อนที่โดยอาศัยระบบโพรงภายในของซีเมนต์เพสต์ [16,17] จากผลการทดสอบพบว่ากลุ่มของมอร์ตาร์ที่ทำจากวัสดุประสานกระตุ้นด้วยด่างมีแนวโน้มของการต้านทานการไหลผ่านของกระแสไฟฟ้าได้ดีกว่ามอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสาน ตัวอย่างมอร์ตาร์ของ FA90GP10, FA80GP20 และ

FA70GP30 มีค่ากระแสไฟฟ้าสุดท้าย เท่ากับ 3.9, 4.5 และ 0.6 มิลลิแอมแปร์ ตามลำดับ หลังจากเร่งด้วยกระแสไฟฟ้าเป็นเวลา 276 ชั่วโมง ในขณะที่มอร์ตาร์ควบคุม (CT) ที่ใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานมีค่ากระแสไฟฟ้าสุดท้าย เท่ากับ 33.6 มิลลิแอมแปร์ ตัวอย่างได้ปรากฏรอยร้าวขึ้นหลังจากเร่งด้วยกระแสไฟฟ้าเป็นเวลาเพียง 180 ชั่วโมง โดยลักษณะของการแตกร้าวของตัวอย่างแสดงดังรูปที่ 6 นอกจากนี้ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าการใช้เศษแก้วบดละเอียดแทนที่เถ้าลอยสำหรับใช้เป็นสารตั้งต้นในปริมาณที่เพิ่มสูงขึ้น สามารถเพิ่มความต้านทานของการไหลผ่านของกระแสไฟฟ้าได้ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของที่ผ่านมา [18,19] ซึ่งพบว่า การใช้เศษแก้วบดละเอียดสามารถลดการแทรกซึมของคลอไรด์ไอออนที่เคลื่อนที่ผ่านเข้าสู่คอนกรีตได้



รูปที่ 5 กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านมอร์ตาร์



ก) CT mortar



ข) Fly ash-waste glass powder alkali-activated mortar

รูปที่ 6 ตัวอย่างการเกิดสนิมของเหล็กเสริมที่ผ่านการเร่งด้วยกระแสไฟฟ้า

4. สรุป

จากผลการทดสอบและวิเคราะห์ผลของการใช้เศษแก้วบดละเอียดผสมเถ้าลอยเป็นสารตั้งต้นในการผลิตมอร์ตาร์กระตุ้นด้วยด่าง สามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

4.1 การใช้เศษแก้วบดละเอียดแทนที่ในเถ้าลอยในปริมาณที่เพิ่มขึ้นส่งผลต่อการไหลผ่านที่มากขึ้น กล่าวคือการใช้เศษแก้วบดละเอียดช่วยเพิ่มความสามารถในการทำงานได้

4.2 การใช้เศษแก้วบดละเอียดแทนที่ในเถ้าลอยในปริมาณที่มากขึ้นส่งผลต่อการรับกำลังอัดที่ลดลง อย่างไรก็ตามการใช้เศษแก้วบดละเอียดร่วมกับเถ้าลอยในอัตราส่วนไม่เกินร้อยละ 20 มอร์ตาร์ยังคงมีค่ากำลังอัดที่สูงกว่ามอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสาน โดยการใช้เศษแก้วบดละเอียดในอัตราส่วนร้อยละ 10 สามารถพัฒนากำลังได้สูงถึง 539.1 กก/ซม² ที่อายุ 90 วัน

4.3 การใช้เศษแก้วดละเอียดแทนที่ในเถ้าลอยในปริมาณที่มากขึ้น ส่งผลต่อความสามารถในการต้านทานการเกิดสนิมได้ดีกว่ามอร์ตาร์ที่ใช้วัสดุประสานจากปูนซีเมนต์

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ สำหรับสถานที่และเครื่องมือในการทำวิจัยครั้งนี้ นอกจากนี้ขอขอบคุณบริษัท สยามคัลเล็ท จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์นำเศษแก้วมาใช้สำหรับเป็นวัสดุในการศึกษาวิจัยเพื่อเป็นข้อมูลและแนวทางในการพัฒนาวัสดุก่อสร้างในภายภาคหน้าต่อไป

เอกสารอ้างอิง

- [1] Barcelo, L., Kline, J., Walenta, G. and Gartner, E. (2014). Cement and carbon emissions. *Materials and structures*, 47(6), 1055-1065.
- [2] Shi C., Roy D. and Krivenko P. (2003). *Alkali-activated cements and concretes*, CRC press.
- [3] Phiangphimai, C., Joinok, G., Phoo-ngernkham, T., Damrongwiriyanupap, N., Hanjitsuwan, S., Suksiripattanapong, C., Sukontasukkul, P., and Chindaprasirt, P. (2023). "Durability properties of novel coating material produced by alkali-activated/cement powder." *Construction and Building Materials*, 363, 129837.
- [4] Phoo-ngernkham, T., Phiangphimai, C., Intarabut, D., Hanjitsuwan, S., Damrongwiriyanupap, N., Li, L.-y., and Chindaprasirt, P. (2020). "Low cost and sustainable repair material made from alkali-activated high-calcium fly ash with calcium carbide residue." *Construction and Building Materials*, 247, 118543.
- [5] Ali, H. A., Sun, K., Xuan, D., Lu, J.-X., Cyr, M., and Poon, C. S. (2023). "Recycling of high-volume waste glass powder in alkali-activated materials: An efflorescence mitigation strategy." *Journal of Building Engineering*, 65, 105756.
- [6] Wang, C., Tian, Q., Zhang, M., Ruan, M., and Zhao, Z. (2024). "Design and properties of ternary alkali-activated binder based on blast furnace slag, recycled powder and waste glass powder." *Journal of Environmental Management*, 365, 121685.
- [7] Muhedin, D. A. and Ibrahim, R. K. (2023). Effect of waste glass powder as partial replacement of cement & sand in concrete. *Case Studies in Construction Materials*, 19, e02512.
- [8] ASTM C618-22 (2022). "Standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use in concrete." *Annual Book of ASTM Standard*, Vol.04.02.
- [9] Çelik, A. İ., Tunç, U., Bahrami, A., Karalar, M., Mydin, M. A. O., Alomayri, T. and Özkılıç, Y. O. (2023). Use of waste glass powder toward more sustainable geopolymer concrete. *Journal of materials research and technology*, 24, 8533-8546.
- [10] ASTM C1437-20 (2020). *Standard Test Method for Flow of Hydraulic Cement Mortar*, ASTM International.
- [11] ASTM C109/C109M-20 (2020). *Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens)*, ASTM International
- [12] NT BUILD 356 (1989). *Concrete, Repairing Materials and Protective Coating: Embedded Steel Method, Chloride Permeability*, Nordtest Building Method.
- [13] Chindaprasirt, P., De Silva, P., Sagoe-Crentsil, K. and Hanjitsuwan, S. (2012). Effect of SiO₂ and Al₂O₃ on the setting and hardening of high calcium fly ash-based geopolymer systems. *Journal of Materials Science*, 47, pp. 4876-4883.
- [14] Yan, P., Chen, B., Zhua, M., and Meng, X. (2024). "Study on mechanical properties and microstructure of green ultra-high performance concrete prepared by recycling waste glass powder." *Journal of Building Engineering*, 82, 108206.
- [15] Ruengsilapanun, K., Udtaranakron, T., Pulngern, T., Tangchirapat, W. and Jaturapitakul, C. (2021). Mechanical properties, shrinkage, and heat evolution of alkali activated fly ash concrete. *Construction and Building Materials*, 299, 123954.
- [16] Broomfield, J. P. (2023). *Corrosion of steel in concrete: understanding, investigation and repair*. Crc Press.
- [17] Dueramae, S., Tangchirapat, W., Chindaprasirt, P. and Jaturapitakul, C (2017). Influence of activation methods on strength and chloride resistance of concrete using calcium carbide residue-fly ash mixture as a new binder *ournal of Materials in Civil Engineering*, 29 (4), 04016265.
- [18] Navaneetha, E., Rao, P. N. and Bahurudeen, A. (2025). Development of sustainable and durable ternary blended concrete using sugarcane bagasse ash and glass powder. *Construction and Building Materials*, 466, 140329.
- [19] Balasubramanian, B., Krishna, G. G., Saraswathy, V. and Srinivasan, K. (2021). Experimental investigation on concrete partially replaced with waste glass powder and waste E-plastic. *Construction and Building Materials*, 278, 122400.