

การปรับปรุงสมรรถนะของวัสดุไฟเบอร์ซีเมนต์ด้วยสารประกอบอะลูมิเนียม-สังกะสี

Enhancing the Performance of Fiber Cement Composites through the Incorporation of Aluminum-Zinc Compounds

พรรษจิรา มานูญวงศ์¹ สุรรัตน์ ผลศิลป์^{2*} ปริญญา ฉากจนโรตม³ และ วิชิต ประกายพรรณ⁴

ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์^{1,2,3}

บริษัท ซอสรันเนอร์ จำกัด⁴

Email: pudjira.ma@ku.th¹, fengsrn@ku.ac.th^{2*}, fengpryc@ku.ac.th³, wichit@sourcerunner.co.th⁴

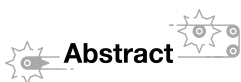
* ผู้ประพันธ์บรรณกิจ (corresponding author)



บทคัดย่อ

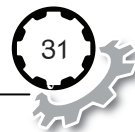
วัสดุไฟเบอร์ซีเมนต์เป็นวัสดุที่ได้รับความนิยมใช้ในการก่อสร้าง โดยผ่านการขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีขั้นสูง ที่เรียกว่ากระบวนการแฮทเช็ค และการบ่มด้วยความดันไอน้ำสูง หรือการบ่มที่สภาวะปกติ ผลลัพธ์ไฟเบอร์ซีเมนต์ถูกนำไปใช้ในงานที่หลากหลาย ดังนั้นจึงจำเป็นที่จะต้องมีการพัฒนาสมบัติทั้งทางกลและทางกายภาพ อย่างไรก็ตามการยืดหดตัวของผลิตภัณฑ์เนื่องจากความชื้น ส่งผลให้อายุการใช้งานของผลิตภัณฑ์ลดลง งานวิจัยนี้ต้องการพัฒนาผลิตภัณฑ์ไฟเบอร์ซีเมนต์ที่มีสมบัติในการกันน้ำทั่วทั้งผลิตภัณฑ์ โดยใช้สารเติมแต่งชนิดสารประกอบอินทรีย์ ประเภทสารประกอบสังกะสี และสารประกอบอะลูมิเนียมขึ้นงานตัวอย่างผ่านการทดสอบสมบัติทางกลโดยเครื่องทดสอบอเนกประสงค์ มีค่ามอดูลัสการแตกหักและค่ามอดูลัสยืดหยุ่น สูงกว่ามาตรฐานอยู่ที่ 9.5 และ 8161 เมกะปาสคาล ตามลำดับ การทดสอบสมบัติทางกายภาพ ได้แก่ การทดสอบค่าความหนาแน่น การดูดซึมน้ำ และการทดสอบมุมสัมผัส พบว่าผลิตภัณฑ์ใหม่ที่ได้มีความหนาแน่นที่สูงขึ้น การดูดซึมน้ำลดลง มุมสัมผัสสูงสุดได้ถึง 133.5 องศา ซึ่งแสดงให้เห็นถึงสมบัติการกันน้ำของผลิตภัณฑ์ อีกทั้งทำการวิเคราะห์ธาตุและองค์ประกอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด และเทคนิค Energy Dispersive X-ray Spectroscopy เพื่อตรวจสอบการมีอยู่ของเฟสที่เกิดขึ้นใหม่ คือ แคลเซียม ไฮดรอกซีซิงค์ไฮดรอกไซด์ และเกลือฟิเดล

 **คำสำคัญ:** วัสดุเชิงประกอบ; วัสดุไฟเบอร์ซีเมนต์; สมบัติการกันน้ำ; สารประกอบอะลูมิเนียม; สารประกอบสังกะสี



Abstract

Fiber cement composite is a popular building material produced using advanced manufacturing processes such as the Hatschek process, autoclave, and air curing. Fiber



cement products find application in various scenarios, making it necessary to develop their mechanical and physical properties. However, the movement of moisture within the product leads to a reduction in its lifespan. This research aims to create a water-repellent fiber cement product with consistent properties throughout the material by incorporating inorganic compounds such as zinc and aluminum. The specimens underwent mechanical property testing using a universal testing machine. The results showed that the modulus of rupture and the modulus of elasticity of the specimens exceeded industry standards at 9.5 and 8161 MPa, respectively. Physical attributes were evaluated, including bulk density, water absorption, and a contact angle test. It was found that the density of the resulting product increased, and water absorption decreased. The resulting product demonstrates water-repellent properties across its entirety, with a maximum contact angle test measurement of 133.5 degrees. Elemental composition was analyzed using scanning electron microscopy (SEM) and Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (EDS) techniques to determine the presence of the newly formed phases, namely Calcium zinc hydroxide dehydrate and Friedel's salt.

**Keywords:**

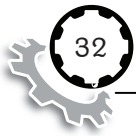
Composite material; Fiber cement material; Water-repellent properties; Aluminum compounds; Zinc compounds

1. บทนำ



ผลิตภัณฑ์ไฟเบอร์ซีเมนต์ (Fiber Cement) เป็นวัสดุก่อสร้างที่ได้รับความนิยมอย่างมากในปัจจุบัน โดยสามารถใช้งานได้ทั้งภายในและภายนอกอาคาร ในรูปแบบของวัสดุรับแรงและวัสดุตกแต่ง โดยแต่ละผลิตภัณฑ์จะถูกขึ้นรูปด้วยกระบวนการผลิตแบบแฮทเช็ค (Hatschek Process) จากนั้นผลิตภัณฑ์จะถูกบ่มทั้งในสภาวะปกติ (Air Curing) และภายใต้ความดันไอน้ำสูง (Autoclave Curing) เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีความแข็งแรง ทนทานในทุกสภาพการใช้งาน วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตวัสดุไฟเบอร์ซีเมนต์

คือ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (Portland Cement) หินทราย (Sand) วัสดุเสริมแรง (Reinforcement) โดยในปัจจุบันจะนิยมใช้เส้นใย 2 ชนิดคือ เส้นใยเซลลูโลส (Cellulose Fiber) ซึ่งจะเป็นเส้นใยที่มาจากธรรมชาติ เพื่อช่วยเพิ่มสมบัติเชิงกล และเส้นใยสังเคราะห์ (Synthetic Fiber) เพื่อช่วยเสริมความทนทาน [1] อีกหนึ่งองค์ประกอบที่สำคัญคือ สารเติมแต่ง (Admixture) โดยจะถูกใช้เพื่อปรับปรุงสมบัติ หรือเพิ่มประสิทธิภาพของวัสดุ จากที่ได้กล่าวมาข้างต้น แม้ว่าผลิตภัณฑ์ไฟเบอร์ซีเมนต์สามารถถูกใช้งานได้



ทั้งภายในและภายนอก แต่หากถูกนำไปใช้งานภายใต้สภาวะที่มีความเปลี่ยนแปลงจากปัจจัยภายนอกอย่างต่อเนื่อง เช่น ในสภาวะร้อนชื้นสูง จะส่งผลให้เกิดการแตกหักเสียหาย ความแข็งแรงและอายุการใช้งานลดลง ผลเสียดังกล่าวเกิดจากการสะสมของความเครียด (Stress) ภายในโครงสร้างของวัสดุอันเป็นผลมาจากการเปลี่ยนแปลงขนาด (Dimension Change) ที่เกิดจากการเคลื่อนตัวของความชื้น (Moisture Movement) [2] นอกจากนี้ การสะสมตัวของความชื้นและน้ำในวัสดุ ก็เป็นหนึ่งในปัจจัยที่จะเร่งการสะสม และการเติบโตของเชื้อราและจุลินทรีย์ต่าง ๆ ที่เป็นอันตรายต่อสุขภาพ

ดังนั้นงานวิจัยในครั้งนี้ จึงมุ่งเน้นการพัฒนาผลิตภัณฑ์ไฟเบอร์ซีเมนต์ที่มีสมบัติพิเศษในด้านการกันความชื้นและกันน้ำ (Moisture and Water repellence) เพื่อให้ได้มาซึ่งผลิตภัณฑ์ที่มีความแข็งแรงทนทานต่อการใช้งานที่สภาพแวดล้อมต่าง ๆ ทั้งภายในและภายนอก ซึ่งสมบัติดังกล่าวสามารถทำได้โดยใช้สารเติมแต่งจำพวกสารประกอบอินทรีย์จำพวกสารประกอบสังกะสี (Zinc Compounds, ZC) เมื่อสารประกอบสังกะสี ทำปฏิกิริยาเคมีกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ส่งผลทำให้เกิดสารประกอบชนิดใหม่ขึ้นในโครงสร้าง ที่มีสมบัติเป็นวัสดุไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic Materials) ส่งผลให้เกิดเป็นผลิตภัณฑ์ไฟเบอร์ซีเมนต์ชนิดใหม่ที่มีสมบัติการกันน้ำ (Water Repellence) ได้อย่างดีเยี่ยม [3, 4] อย่างไรก็ตาม สารประกอบสังกะสีมีสมบัติเป็นตัวหน่วง (Retarder) [5] ปฏิกิริยา

ไฮเดรชัน ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ส่งผลให้ความแข็งแรงทางกายภาพและเชิงกลลดลง ด้วยเหตุนี้จึงจำเป็นต้องมีการใช้สารเร่ง (Accelerating Agent) จำพวกที่มีอะลูมิเนียม (Aluminum Compounds, AC) เป็นองค์ประกอบ เพื่อเร่งปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ให้กลับมาเทียบเท่า หรือมากกว่าของเดิม [6] ทำให้ได้วัสดุไฟเบอร์ซีเมนต์ชนิดใหม่ที่นอกจากจะมีสมบัติทางด้านการกันน้ำแล้ว ยังมีสมบัติทางกายภาพและเชิงกล เหนือกว่ามาตรฐานทางอุตสาหกรรม [7] และวัสดุไฟเบอร์ซีเมนต์ที่มีอยู่ตามท้องตลาดทั่วไป

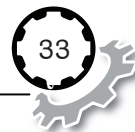
2. วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการ



2.1 วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย (Experimental Materials and Equipment for Research)

2.1.1 วัสดุ (Experimental Materials)

วัสดุที่ใช้ในการผลิตแผ่นทดสอบไฟเบอร์ซีเมนต์มีดังนี้ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (Portland Cement) ทราย (Sand) วัสดุเสริมแรง (Reinforcement) เส้นใยเซลลูโลส (Cellulose Fiber) เส้นใยสังเคราะห์ (Synthetic Fiber) และสารเติมแต่ง (Admixture) ซึ่งได้แก่ สารประกอบสังกะสี (Zinc Compounds, ZC) มีองค์ประกอบหลักคือ Zinc Hydroxyacetate ($Zn_5(OH)_8(CH_3COO)_2 \cdot 4H_2O$) และสารประกอบอะลูมิเนียม (Aluminum Compounds, AC) มีองค์ประกอบหลักคือ Aluminum Chlorohydrate ($Al_2ClH_9O_7$)



2.1.2 อุปกรณ์ (Equipment)

อุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัยครั้งนี้ แบ่งออกเป็น 2 ประเภทคือ ประเภทที่หนึ่ง อุปกรณ์สำหรับเตรียมชิ้นงาน ได้แก่ เครื่องปั่นผสม (Hobart Mixer) เครื่องอัดขึ้นรูปชิ้นงาน (Pasadena Machine) เป็นเครื่องมือที่ใช้สำหรับขึ้นรูป Fiber cement product โดยเฉพาะ ซึ่งหลักการเหมือนกับ Vibrating filter press machine และตู้อบชิ้นงาน (Dryer) ประเภทที่สอง อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์สมบัติ ได้แก่ เครื่องมือบันทึกอุณหภูมิ (Temperature Recording Device) เครื่องทดสอบแรงอเนกประสงค์ (Universal Testing Machine) เครื่องมือวัดมุมสัมผัส (Static Optical Contact angle Meter) อุปกรณ์สำหรับทดสอบการดูดซึมน้ำ (Water Absorption Testing Equipment) และอุปกรณ์สำหรับทดสอบค่าความหนาแน่น (Bulk Density Testing Equipment)

2.2 วิธีการ (Methodology)

2.2.1 การเตรียมส่วนผสมเพื่อใช้ในการวิเคราะห์ความร้อนของปฏิกิริยาไฮเดรชัน

การทดสอบของผู้วิจัยพบว่าสารประกอบสังกะสีที่ร้อยละ 3 ของน้ำหนักปูนซีเมนต์ ส่งผลให้เกิดการหน่วงปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ [8, 9] แต่มีใกล้เคียงกับสูตรอ้างอิง และเป็นอัตราส่วนที่ส่งผลต่อสมบัติการกันน้ำที่ดี ในงานวิจัยนี้จึงใช้อัตราส่วนสารประกอบสังกะสีดังกล่าว นำมาพัฒนาต่อยอดโดยการใส่สารเร่งปฏิกิริยาไฮเดรชันที่มีอะลูมิเนียมเป็นองค์ประกอบ เพื่อทำการเร่งปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ให้เทียบเท่าหรือมากกว่า

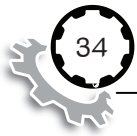
ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ โดยทำการผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่มีการเติมสารประกอบสังกะสีและสารประกอบอะลูมิเนียม ด้วยอัตราส่วนร้อยละที่เพิ่มเติมจากองค์ประกอบหลัก [9] ดังแสดงในตารางที่ 1 เข้าด้วยกันโดยวิธีการผสมแห้ง (Dry Mixing) จากนั้นเติมน้ำลงในส่วนผสมแห้งที่เตรียมไว้ด้วยอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (Water to Cement Ratio) ที่ 0.35 ทำการปั่นส่วนผสมด้วยเครื่อง Hobart Mixer เป็นเวลา 2 นาที จนวัตถุดิบทั้งหมดเข้ากันดีมีลักษณะเป็นของเหลวข้น (Slurry)

ตารางที่ 1 สูตรผสมหาการคายความร้อนปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เมื่อทำการเติมสารประกอบสังกะสี และสารประกอบอะลูมิเนียม

Sample	Composition (%w/w)		
	Portland cement	ZC	AC
Ref.	100	0	0
H0	100	3	0
H1	100	3	1
H2	100	3	3
H3	100	3	5

2.2.2 การวิเคราะห์ความร้อนที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน

ส่วนผสมที่เตรียมตารางที่ 1 ได้รับการตรวจสอบค่าความร้อนที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาไฮเดรชันด้วยเครื่องมือบันทึกอุณหภูมิ (Temperature Recording Device) ตามมาตรฐาน ASTM C186-98



(Standard Test Method For Heat of hydration of hydraulic cement) โดยอุณหภูมิที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาการคายความร้อนจะถูกบันทึกทุก ๆ 30 วินาที ตั้งแต่เริ่มต้นจนกระทั่งจบปฏิกิริยาไฮเดรชัน

2.2.3 การขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบ

ทำการพิจารณาเลือกสูตรที่มีค่าการคายความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชันใกล้เคียงกับสูตรอ้างอิงซึ่งเป็นสูตรที่ใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์ไฟเบอร์ซีเมนต์ปกติ ประกอบด้วย ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ทรายละเอียดและเส้นใยเสริมแรง ตามอัตราส่วนดังแสดงในตารางที่ 2 สูตรที่เลือก คือ สูตร SH0 ที่มีการเติมสารประกอบสังกะสีที่ 3% โดยน้ำหนักขององค์ประกอบหลักและสูตร SH1 ที่มีการเติมสารประกอบสังกะสีที่ 3% และเติมสารประกอบอะลูมิเนียมเพิ่มขึ้นในปริมาณ 1% โดยน้ำหนักขององค์ประกอบหลัก ผสมวัตถุดิบชนิดต่าง ๆ เข้าด้วยกันโดยวิธีการผสมแห้ง (Dry mixing) เป็นเวลา 2 นาที จากนั้นเติมน้ำลงในส่วนผสมแห้งที่เตรียมไว้ด้วยอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (Water to Cement ratio) ที่ 0.90 จับเวลา 30 วินาที จากนั้นทำการปั่นส่วนผสมด้วยเครื่อง Hobart mixer ที่ความเร็ว 218 รอบต่อนาที (RPM) เป็นเวลา 30 วินาที และปั่นต่อที่ความเร็ว 416 รอบต่อนาที (RPM) เป็นเวลา 1 นาที จนวัตถุดิบทั้งหมดเข้ากันดี มีลักษณะเป็นของเหลวข้น (Slurry) ทำการขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดขึ้นรูป (Pasadena) เป็นชิ้นงานไฟเบอร์ซีเมนต์ที่มีขนาด 8 ซม. x 16 ซม. x 0.6 ซม.

ตารางที่ 2 ส่วนผสมในการขึ้นรูปชิ้นงานไฟเบอร์ซีเมนต์

Materials	Formula (%w/w)		
	Ref.	SH0	SH1
Portland cement	70.5	70.5	70.5
Sand	25.0	25.0	25.0
Cellulose fiber	3.8	3.8	3.8
Polyvinyl alcohol (PVA) fiber	0.7	0.7	0.7
Zinc compounds (ZC)	-	3.0	3.0
Aluminum compounds (AC)	-	-	1.0

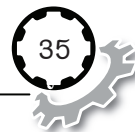
2.2.4 การบ่ม (Curing) ชิ้นงานทดสอบ

นำชิ้นงานที่เตรียมตามข้อ 2.2.3 มาผ่านการบ่มที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 1 วัน จากนั้นทำการบ่มชิ้นงานภายใต้อากาศปกติ (Air curing) เป็นระยะเวลา 1 7 และ 14 วัน ตามลำดับ

2.2.5 การทดสอบสมบัติต่าง ๆ

นำชิ้นงานที่ผ่านการบ่มด้วยเวลาที่ต่างกัน มาทดสอบสมบัติต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

2.2.5.1 การทดสอบสมบัติทางกล (Mechanical properties) ด้วยเครื่อง Universal Testing Machine (UTM) อ้างอิงตามมาตรฐาน ISO7500-1:2004 (Standard Publication Metallic materials – Verification of static uniaxial testing machines)



โดยทดสอบแรงดัดงอแบบ 3 จุด (Three-Point Bending Test) ทำให้ได้สมบัติทางกลต่าง ๆ ของชิ้นงานทดสอบ ได้แก่ ค่ามอดูลัสการแตกหัก (Modulus of rupture, MOR) บ่งบอกความแข็งแรงของเนื้อพื้น และค่ามอดูลัสยืดหยุ่น (Modulus of elasticity, MOE) เป็นค่าที่บ่งบอกความสามารถในการยืดติดกันระหว่างเส้นใยเสริมแรงกับเนื้อพื้น

2.2.5.2 การทดสอบสมบัติทางกายภาพ (Physical properties) มีดังต่อไปนี้ การทดสอบค่าความหนาแน่น (Bulk density), การดูดซึมน้ำ (Water Absorption) ตามมาตรฐาน ASTM C20-00(2022) Standard Test Methods for Apparent Porosity, Water Absorption, Apparent Specific Gravity, and Bulk Density of Burned Refractory Brick and Shapes by Boiling Water

2.2.5.3 การทดสอบสมบัติการกันน้ำ สามารถดำเนินการด้วยการพิจารณารูปร่างของหยดน้ำที่เกาะอยู่บนพื้นผิว โดยการวัดมุมสัมผัสระหว่างหยดน้ำกับพื้นผิว (Contact angle) ตามมาตรฐาน ASTM D7334-08(2013) Standard Practice for Surface Wettability of Coatings, Substrates, and Pigments by Advancing Contact Angle Measurement

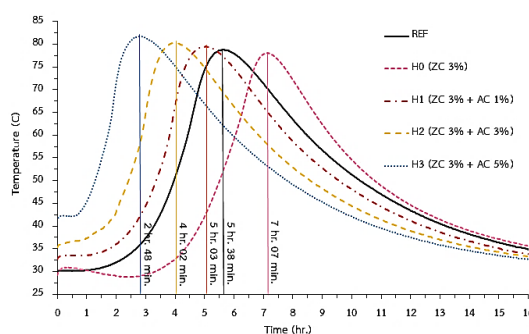
2.2.5.4 การวิเคราะห์ธาตุและองค์ประกอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) และเทคนิค Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (EDS) ยี่ห้อ Jeol รุ่น JSM IT-510 ที่แรงดันไฟฟ้า 15 กิโลโวลต์ (kV) และกระแสไฟฟ้า 30 มิลลิแอมแปร์

(mA) เพื่อวิเคราะห์ธาตุในเชิงคุณภาพ (Qualitative element analysis) ศึกษาธาตุที่เป็นองค์ประกอบในชิ้นงานทดสอบ

3. ผลการวิจัยและวิเคราะห์ผล

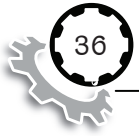


3.1 การคายความร้อนของปฏิกิริยาไฮเดรชัน

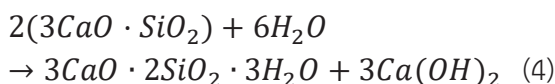
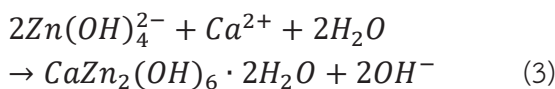
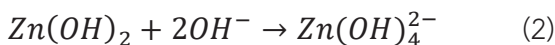
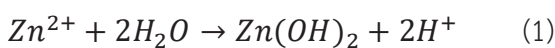


ภาพที่ 1 กราฟแสดงผลการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันเมื่อเติมสารประกอบสังกะสี และสารประกอบอะลูมิเนียม ลงไปในปูนซีเมนต์ตามสูตรส่วนผสม

จากกราฟที่แสดงในภาพที่ 1 พบว่าค่าการคายความร้อนของปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เมื่อเติมสารประกอบสังกะสีที่ 3% โดยน้ำหนักขององค์ประกอบหลักทำให้เกิดการหน่วงปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ โดยสังเกตได้จากเวลาที่ใช้ในการแข็งตัว เพิ่มขึ้นจาก 5 ชั่วโมง 38 นาที เป็น 7 ชั่วโมง 7 นาที โดยเมื่อเติมสารประกอบสังกะสีลงในส่วนผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ สารประกอบสังกะสีจะเข้าทำปฏิกิริยากับน้ำ เกิดเป็นสังกะสีไฮดรอกไซด์ (Zinc Hydroxide, $\text{Zn}(\text{OH})_2$) ตามสมการที่ 1 จากนั้นเกิดปฏิกิริยาต่อเนื่องกับ

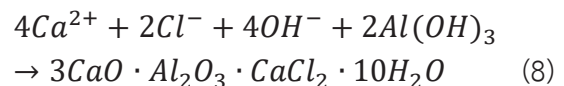
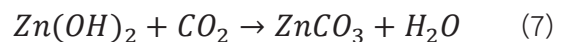
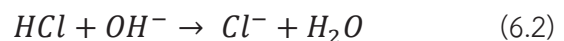
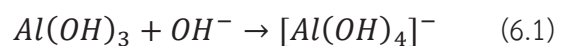


ไฮดรอกซิลไอออน (Hydroxide Ion, OH^-) เกิดเป็นสังกะสีไอออน (Zincate Ion, $\text{Zn}(\text{OH})_4^{2-}$) ดังแสดงในสมการที่ 2 จากนั้นสังกะสีไอออนจะเข้าทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไอออน (Calcium Ion, Ca^{2+}) จากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เกิดเป็นแคลเซียมไฮดรอกซีซิงค์เซท (Calcium Zinc Hydroxide Dehydrate, $\text{CaZn}_2(\text{OH})_6 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) [10] ดังที่แสดงในสมการที่ 3 โดยปฏิกิริยานี้จะเกิดวนซ้ำอย่างต่อเนื่องจนกว่าสารประกอบสังกะสีจะหมดไป จากนั้นแคลเซียมไอออนจึงจะสามารถเข้าทำปฏิกิริยากับซิลิเกตไอออน (Silicate Ion, SiO_4^{4-}) จากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (Tricalcium Silicate, $2(3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2)$) และไฮดรอกซิลไอออน เกิดเป็นแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (Calcium Silicate Hydrate, $3\text{CaO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$) และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Calcium Hydroxide, $\text{Ca}(\text{OH})_2$) ตามสมการที่ 4 ซึ่งเป็นปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ [11]



เมื่อเติมสารประกอบอะลูมิเนียมเพิ่มขึ้นในปริมาณ 1% 3% และ 5% โดยน้ำหนักขององค์ประกอบหลัก ส่งผลทำให้เวลาที่ใช้ในการ

แข็งตัวลดลงเป็น 5 ชั่วโมง 3 นาที, 4 ชั่วโมง 2 นาที และ 2 ชั่วโมง 48 นาที ตามลำดับ โดยสารประกอบอะลูมิเนียมเข้าทำปฏิกิริยากับน้ำเกิดเป็นอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ (Aluminum Hydroxide, $\text{Al}(\text{OH})_3$) และคาร์บอนไดออกไซด์ (Carbon Dioxide, CO_2) หรือเกิดเป็นอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ (Aluminum Hydroxide, $[\text{Al}(\text{OH})_4]^-$) และคลอไรด์ไอออน (Chloride Ion, Cl^-) ดังแสดงในสมการที่ 5 และสมการที่ 6 ตามลำดับ สารประกอบสังกะสีในรูปของสังกะสีไฮดรอกไซด์ ทำปฏิกิริยากับคาร์บอนไดออกไซด์ เกิดเป็นสังกะสีคาร์บอเนต (Zinc Carbonate, ZnCO_3) ตามสมการที่ 7 ตกตะกอนลงมา ดังนั้นจึงไม่สามารถแสดงสภาวะการหวนงปฏิกิริยาได้



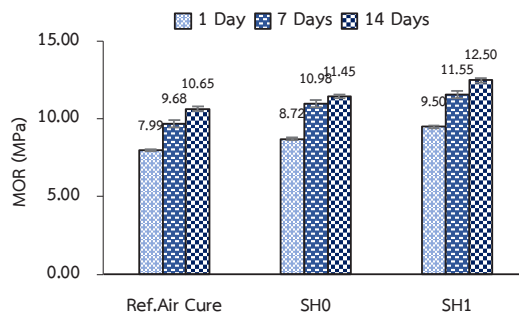
นอกจากนี้ แคลเซียมไฮดรอกไซด์จากการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ตามสมการที่ 4 สามารถเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันเพิ่มเติมโดยเข้าทำปฏิกิริยากับอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ และ



คลอไรด์ไอออน ตามสมการที่ 6 เกิดเป็น เกลือฟิเดล (Friedel's salt, $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaCl}_2 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) [12, 13] ตามสมการที่ 8 ด้วยเหตุนี้จึงเป็นสาเหตุให้เวลาในการแข็งตัวเร็วขึ้น ซึ่งจากการทดลองพบว่าปริมาณสารประกอบอะลูมิเนียมที่ 1% เป็นปริมาณที่เหมาะสมที่สุดเนื่องจากมีเวลาในการแข็งตัวใกล้เคียงปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ใช้เป็นตัวอ้างอิง (Ref.)

3.2 สมบัติเชิงกล

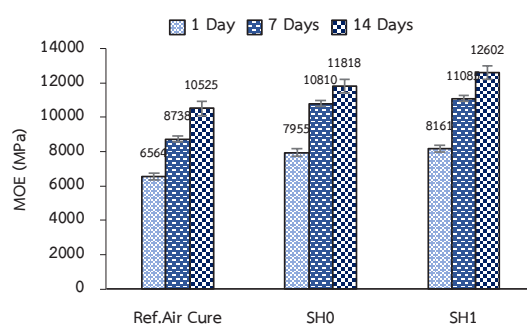
จากผลการทดสอบพบว่าสมบัติเชิงกล ดังแสดงในภาพที่ 2 และ 3 ของชิ้นงานไฟเบอร์ซีเมนต์ทั้งในส่วนของคุณสมบัติการแตกหัก (MOR) และค่ามอดูลัสยืดหยุ่น (MOE) เพิ่มขึ้น โดยชิ้นงานที่มีการเติมสารเติมแต่งทั้งจากสารประกอบสังกะสีและสารประกอบอะลูมิเนียม ส่งผลให้ค่าสมบัติเชิงกลมากกว่าชิ้นงานอ้างอิงในทุก ๆ ช่วงเวลาของการบ่ม และเมื่อนำค่าที่ได้จากการทดสอบ การบ่มชิ้นงานในสภาวะปกติเป็นเวลา 1 วัน มาเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานทางอุตสาหกรรม ดังที่แสดงในตารางที่ 3 และ 4 พบว่ามีค่า MOR และ MOE สูงกว่าสูตรอ้างอิง ซึ่งผลดังกล่าวเกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันที่เกิดเพิ่มเติม ส่งผลให้โครงสร้างของเกลือฟิเดล ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaCl}_2 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) ในโครงสร้าง ช่วยเสริมความแข็งแรงเพิ่มขึ้น [12]



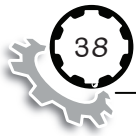
ภาพที่ 2 ค่ามอดูลัสการแตกหัก (MOR) ของสูตรส่วนผสมในการขึ้นรูปชิ้นงานตามตารางที่ 2

ตารางที่ 3 ค่ามอดูลัสการแตกหัก (MOR) ของชิ้นงานที่การบ่ม 1 วัน

ค่ามอดูลัสการแตกหัก (MOR)	ที่การบ่ม 1 วัน (MPa)
Ref. Air Cure	7.99
SH0	8.72
SH1	9.50



ภาพที่ 3 ค่ามอดูลัสยืดหยุ่น (MOE) ของสูตรส่วนผสมในการขึ้นรูปชิ้นงานตามตารางที่ 2

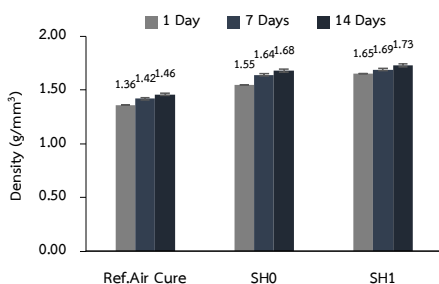


ตารางที่ 4 ค่ามอดุลัสยืดหยุ่น (MOE) ของชิ้นงานที่การบ่ม 1 วัน

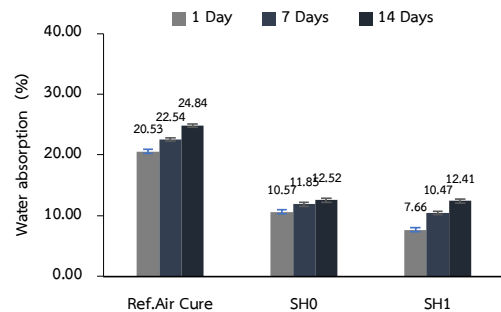
ค่ามอดุลัสยืดหยุ่น (MOE)	ที่การบ่ม 1 วัน (MPa)
Ref.Air Cure	6564
SH0	7955
SH1	8161

3.3 สมบัติทางกายภาพ

จากผลทดสอบความหนาแน่น (Bulk Density) และการดูดซึมน้ำ (Water Absorption) ดังแสดงในภาพที่ 4 และ 5 พบว่าเมื่อเวลาที่ใช้ในการบ่มเพิ่มขึ้น ความหนาแน่นของชิ้นงานจะเพิ่มขึ้น ส่วนสมบัติด้านการดูดซึมน้ำโดยเฉพาะในชิ้นงานที่มีการเติมสารเติมแต่งทั้งจากสารประกอบสังกะสี และสารประกอบอะลูมิเนียม จะมีค่าการดูดซึมน้ำลดลง 2 เท่าเมื่อเทียบกับชิ้นงานอ้างอิงในทุก ๆ ช่วงเวลาของการบ่ม ซึ่งผลดังกล่าวเกิดจากองค์ประกอบที่เกิดขึ้นใหม่คือ แคลเซียมไฮดรอกซีซิงค์เซท ($\text{CaZn}_2(\text{OH})_6 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) และเกลือฟิเดล ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaCl}_2 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) เพิ่มขึ้น



ภาพที่ 4 ค่าความหนาแน่น (Bulk density) ของสูตรส่วนผสมในการขึ้นรูปชิ้นงานไฟเบอร์ซีเมนต์ตามตารางที่ 2



ภาพที่ 5 ค่าการดูดซึมน้ำ (Water absorption) ของสูตรส่วนผสมในการขึ้นรูปชิ้นงานไฟเบอร์ซีเมนต์ตามตารางที่ 2

3.4 สมบัติการกันน้ำ

ผลทดสอบสมบัติการกันน้ำโดยการทดสอบมุมสัมผัส (Contact angle) ดังแสดงในภาพที่ 6 พบว่า ชิ้นงานไฟเบอร์ซีเมนต์ที่มีการเติมสารประกอบสังกะสีที่ 3% (SH0) และชิ้นงานที่มีการเติมสารประกอบสังกะสีที่ 3% ร่วมกับสารประกอบอะลูมิเนียมที่ 1% (SH1) มีค่ามุมสัมผัสที่ 124.80° และ 133.50° ตามลำดับ ซึ่งค่าดังกล่าวจะมากกว่าเป็น 3 เท่า เมื่อเทียบกับชิ้นงานอ้างอิง (Ref.) ที่มีค่ามุมสัมผัสอยู่ที่ 41.50° ซึ่งค่ามุมสัมผัสดังกล่าวบอกลักษณะของพื้นผิวโดยจากตารางที่ 3 แสดงให้เห็นว่าพื้นผิวของชิ้นงานที่มีการเติมสารเติมแต่ง มีองค์ประกอบแคลเซียมไฮดรอกซีซิงค์เซท ($\text{CaZn}_2(\text{OH})_6 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) และเกลือฟิเดล ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaCl}_2 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) เพิ่มขึ้นในโครงสร้างโดยองค์ประกอบทั้งสองชนิดนี้ แสดงสมบัติของการไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) ซึ่งสมบัติดังกล่าวจะสะท้อนให้เห็นถึงความสามารถในการกันน้ำของผลิตภัณฑ์



ตารางที่ 5 ความสัมพันธ์ของขนาด Contact Angle กับลักษณะพื้นผิว

Contact Angle (θ)	Surfaces
$\theta < 80^\circ$	Hydrophilic
$\theta = 80^\circ - 150^\circ$	Hydrophobic
$\theta > 150^\circ$	Super hydrophobic



(ก.)

(ข.)

(ค.)

(ก.) สูตรอ้างอิง (Ref.) ให้ค่ามุมสัมผัสที่ 41.50°

(ข.) สารประกอบสังกะสี 3% (SH0) ให้ค่ามุมสัมผัสที่ 124.80°

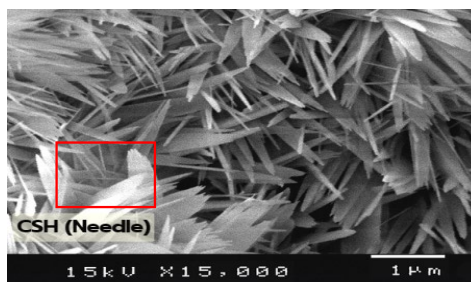
(ค.) สารประกอบสังกะสี 3% และสารประกอบอะลูมิเนียม 1% (SH1) ให้ค่ามุมสัมผัสที่ 133.50°

ภาพที่ 6 ผลการทดสอบความสามารถในการกันน้ำโดยการทดสอบมุมสัมผัส

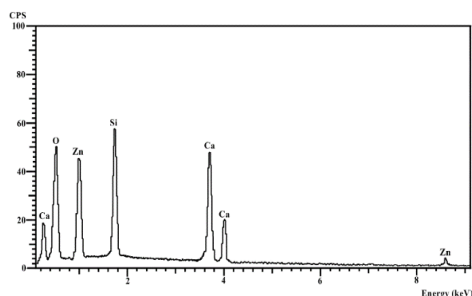
3.5 ผลการวิเคราะห์ธาตุและองค์ประกอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) และเทคนิค Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (EDS)

ศึกษาโครงสร้างจุลภาค โดยวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ภายใต้เงื่อนไข Low Vacuum Mode ที่กำลังไฟฟ้า 15 kV และ SE Mode ที่กำลังขยาย 15,000 เท่า ภาพถ่าย SEM พบผลึกของแคลเซียมซิลิเกตไฮดรตมีรูปร่างลักษณะคล้ายเข็ม (Needle) [14, 15] ดังแสดงในภาพที่ 7

ในภาพที่ 8 กราฟ EDS แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง แกน Y คือ สัญญาณของรังสีเอกซ์ที่ตรวจวัดได้ และแกน X คือ พลังงานของรังสีเอกซ์ในหน่วยของ keV ซึ่งพิกัดที่เกิดขึ้นในสเปกตรัมจะสอดคล้องกับธาตุที่เป็นองค์ประกอบในชิ้นงานที่ทำการวิเคราะห์สเปกตรัม EDS พบพิกัดของธาตุแคลเซียม (Ca) ออกซิเจน (O) ซิลิกอน (Si) และ สังกะสี (Zn) ซึ่งสอดคล้องกับสมการเคมีของชิ้นงานทดสอบที่มีการเติมสารประกอบสังกะสี มีผลทำให้เกิดแคลเซียมไฮดรอกซีซิงค์เซต และแคลเซียมซิลิเกตไฮดรต ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Nazari, A. และ S. Riahi (2012) [15]

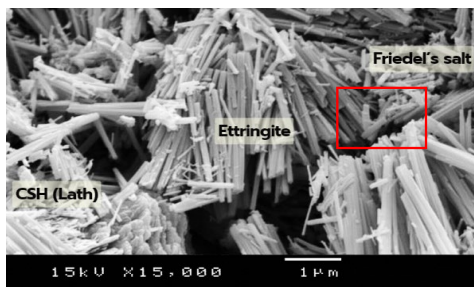


ภาพที่ 7 ภาพถ่าย SEM ที่กำลังขยาย 15,000 เท่าของชิ้นงานที่มีการเติมสารประกอบสังกะสี

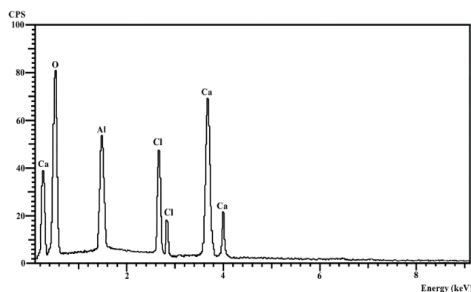


ภาพที่ 8 สเปกตรัมที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDS ของชิ้นงานที่มีการเติมสารประกอบสังกะสี

ภาพถ่าย SEM ดังที่แสดงในภาพที่ 9 ที่เงื่อนไขแรงดันไฟฟ้า 15 kV กำลังขยาย 15,000 เท่า พบผลึกของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต มีลักษณะเป็น Lath-like structure และผลึกของเกลือฟิเดล ซึ่ง มีลักษณะเป็น Fibrous-like structure สเปกตรัม EDS แสดงในภาพที่ 10 พบพีคของธาตุแคลเซียม (Ca) ออกซิเจน (O) อะลูมิเนียม (Al) และคลอรีน (Cl) ซึ่งสอดคล้องกับสมการเคมีของเกลือฟิเดล ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaCl}_2 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) สอดคล้องกับงานวิจัยของ Kim, T., et al. (2019) และงานวิจัยของ Tang, S., et al. (2023) [12, 16]



ภาพที่ 9 ภาพถ่าย SEM ที่กำลังขยาย 15,000 เท่าของชิ้นงานที่มีการเติมสารประกอบอะลูมิเนียม



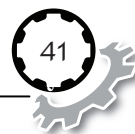
ภาพที่ 10 สเปกตรัมที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDS ของชิ้นงานที่มีการเติมสารประกอบอะลูมิเนียม

4. วิจารณ์ผลการทดลอง

จากการทดลองพบว่าการเติมสารประกอบสังกะสีและสารประกอบอะลูมิเนียม เป็นสารเติมแต่งในการผลิต Fiber cement product จะทำให้เกิด Hydration products ใหม่ขึ้น คือ แคลเซียมไฮดรอกซีซิงค์เซท ($\text{CaZn}_2(\text{OH})_6 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) และเกลือฟิเดล ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaCl}_2 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) ตามลำดับ โดย Hydration Products ทั้ง 2 ชนิด จะมีรูปผลึก (Crystal Form) และขนาด (Size) เล็กกว่าผลึกที่เกิดขึ้นโดยปกติ (Conventional Hydration Product) กล่าวคือ แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (Calcium Silicate Hydrate, $3\text{CaO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$) ที่มีรูปผลึกเป็นแผ่นขนาดใหญ่ (Plate-Like Structure) [17] ดังแสดงในรูป SEM จึงส่งผลให้รูพรุนในโครงสร้างมีขนาดเล็กลง ค่าความหนาแน่น (Bulk Density) และการดูดซึมน้ำ (Water Absorption) จึงลดลง

5. สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยในครั้งนี้ที่สามารถพัฒนาผลิตภัณฑ์ไฟเบอร์ซีเมนต์ที่มีสมบัติพิเศษในด้านการกันน้ำ และมีความแข็งแรงทนทานต่อการใช้งาน ทนทานต่อสภาพแวดล้อมทั้งภายในและภายนอก โดยใช้สารเติมแต่งจำพวกสารประกอบอนินทรีย์มาเป็นสารเติมแต่งร่วมในการผลิตผลิตภัณฑ์ไฟเบอร์ซีเมนต์ ซึ่งจากผลการทดสอบพบว่าเมื่อเติมสารประกอบสังกะสี 3% และสารประกอบอะลูมิเนียม 1% โดยน้ำหนักขององค์ประกอบหลัก ลงไปในส่วนผสม มีค่าการคายความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชันกลับมา



ใกล้เคียงกับสูตรอ้างอิง ซึ่งเป็นประโยชน์ต่อการนำไปปรับใช้ในกระบวนการผลิตจริงในระดับอุตสาหกรรม อีกทั้งส่งเสริมให้สมบัติทางกลกล่าวคือ ค่ามอดูลัสการแตกหัก (MOR) ที่ผ่านการบ่ม 1 วัน สูงกว่าสูตรอ้างอิงถึง 31.29% และมีค่ามอดูลัสยืดหยุ่น (MOE) ที่ผ่านการบ่ม 1 วัน สูงกว่าสูตรอ้างอิงถึง 24.33% สมบัติทางกายภาพของผลิตภัณฑ์ พบว่าค่าความหนาแน่นที่การบ่ม 1 วันเพิ่มขึ้นจากสูตรอ้างอิง 17.47% มีค่าการดูดซึมน้ำที่ลดลงจากสูตรอ้างอิงถึง 62.96% และมุมสัมผัสที่เพิ่มขึ้นสูงถึง 133.50° ส่งผลให้ชิ้นงานมีสมบัติด้านการกันน้ำที่ดีเยี่ยม พบว่าหยดน้ำสามารถกลิ้งบนพื้นผิวชิ้นงานได้ ช่วยลดปัญหาการยืดหดตัวของผลิตภัณฑ์เนื่องจากความชื้น พร้อมทั้งช่วยลดปัญหาการสะสมของเชื้อจุลินทรีย์ต่าง ๆ บริเวณพื้นผิว ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์มีอายุการใช้งานที่นานยิ่งขึ้น

6. กิตติกรรมประกาศ

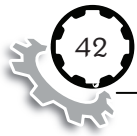


งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนพัฒนานวัตกรรมของนิสิตระดับปริญญาโท คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ปีการศึกษา 2564 (รหัสทุน 64/05/MATE/Innovation)

7. เอกสารอ้างอิง



- [1] Ling Y F et al. (2020). Effect of Sand Size on Mechanical Performance of Cement-Based Composite Containing PVA Fibers and Nano-SiO(2). Materials (Basel), 13(2).
- [2] Shawia N B, M A Jabber, and A F Mamouri (2014). Mechanical and physical properties of natural fiber cement board for building partitions. Physical Sciences Research International, 2(3): 49-53.
- [3] Falchi L et al. (2015). The influence of water-repellent admixtures on the behaviour and the effectiveness of Portland limestone cement mortars. Cement and Concrete Composites, 59: 107-118.
- [4] Kumar M, M Bansal, and R Garg (2020). An overview of beneficiary aspects of zinc oxide nanoparticles on performance of cement composites. Materials Today: Proceedings, 43.
- [5] Šiler P, et al. (2018). The Effect of Zinc on the Portland Cement Hydration. Key Engineering Materials, 761: 131-134.
- [6] Dorn T, O Blask, and D Stephan (2022). Acceleration of cement hydration – A review of the working mechanisms, effects on setting time, and compressive strength development of accelerating admixtures. Construction and Building Materials, 323: 126554.
- [7] Briendl L G, et al. (2020). Early hydration of cementitious systems accelerated by aluminium sulphate: Effect of fine limestone. Cement and Concrete Research, 134: 106069.



- [8] Ataie F F, et al. (2015). Comparison of the retarding mechanisms of zinc oxide and sucrose on cement hydration and interactions with supplementary cementitious materials. *Cement and Concrete Research*, 72: 128-136.
- [9] Bartik P, and M Paramita (2022). Understanding Retardation of Cement Hydration Caused by Zinc. *ACI Materials Journal*, 119(1): 221-232.
- [10] Ziegler F, and C A Johnson (2001). The solubility of calcium zincate ($\text{CaZn}_2(\text{OH})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). *Cement and Concrete Research*, 31(9): 1327-1332.
- [11] Matejka L, et al. (2021). Negative effect of zinc compounds on hydration kinetics of ordinary Portland cement. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1039(1): 012004.
- [12] Kim T, et al. (2019). Investigating the Effects of Polyaluminum Chloride on the Properties of Ordinary Portland Cement. *Materials (Basel)*, 12(20).
- [13] Ma J, et al. (2015). Synthesis, characterization and formation mechanism of friedel's salt ($\text{FS: } 3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaCl}_2 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) by the reaction of calcium chloride with sodium aluminate. *Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed.*, 30(1): 76-83.
- [14] Zhang Z, G Scherer, and A Bauer (2018). Morphology of cementitious material during early hydration. *Cement and Concrete Research*, 107: 85-100.
- [15] Nazari A, and S Riahi (2012). The Effects of ZnO_2 Nanoparticles on Strength Assessments and Water Permeability of Concrete in Different Curing Media. *Journal of Experimental Nanoscience - J EXP NANOSCI*, 14: 1-21.
- [16] Tang S, et al. (2023). Influences of Friedel's Salt Produced by CaO-Activated Titanium-Extracted Tailing Slag on Chloride Binding. *Materials*, 16, DOI: 10.3390/ma16072843.
- [17] Mostafa N, et al. (2009). Hydrothermal synthesis and characterization of aluminium and sulfate substituted 1.1 nm tobermorites. *Journal of Alloys and Compounds*, 467: 332– 337.

