



ผลของสารก่อผลึกต่อความพรุนและการดูดซึมน้ำในมอร์ตาร์

ทักษ์ดนัย เขียวอ่อน¹ สุวิมล สัจจวานิชย์¹ นันทวัฒน์ ขมหวาน^{2*} ไพศาล คงคาฉุยฉาย³
ประเสริฐ สุวรรณวิทยา¹ และ ประหยัด นันทศิลป์⁴

¹ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

² ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

³ ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

⁴ ภาควิชาวิทยาศาสตร์พื้นพิภพ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

* ผู้ประสานงานเผยแพร่ (Corresponding Author), E-mail: fengnwk@ku.ac.th

วันที่รับบทความ: 27 สิงหาคม 2567; วันที่ทบทวนบทความ: 3 มกราคม 2568; วันที่ตอบรับบทความ: 27 มกราคม 2568

วันที่เผยแพร่ออนไลน์: 22 เมษายน 2568

บทคัดย่อ: งานวิจัยนี้ศึกษาผลของการใช้สารก่อผลึก (CWPM) ทั้งชนิดสารผสมเพิ่ม (CM) และเคลือบผิว (CC) ในการลดความพรุนและการดูดซึมน้ำในมอร์ตาร์ เพื่อพิจารณาการใช้ CWPM อย่างเหมาะสมจึงกำหนดอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ (W/C) ที่ 0.3 0.4 และ 0.6 การทดสอบ ได้แก่ ความพรุน การดูดซึมน้ำ และกำลังรับแรงอัด รวมถึงการตรวจสอบสารประกอบทางเคมีในตัวอย่างเพื่อยืนยันผลของ CWPM โดยปริมาณและวิธีการใช้ CWPM ปฏิบัติตามคำแนะนำของผู้ผลิต การทดสอบที่อายุ 40 วัน และหลังจากบ่มต่อในน้ำอีก 30 วัน ผลการศึกษาแสดงว่า CWPM ทั้งชนิด CM และ CC มีผลต่อความพรุนและการดูดซึมน้ำที่ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ แต่มีผลแตกต่างกันตาม W/C และชนิดของ CWPM โดย W/C ที่ต่ำในตัวอย่างที่ผสม CWPM ให้ผลการลดความพรุนและการดูดซึมน้ำที่ดีกว่ารวมถึงผลของกำลังรับแรงอัดที่เพิ่มขึ้น ส่วนผลการวิเคราะห์สารประกอบทางเคมีพบว่าตัวอย่าง CWPM แสดงค่า Peak ของ CaCO_3 และ Ettringite (Aft) โดยเฉพาะอย่างยิ่งของ Calcium Aluminate Silicate Hydrates; C-A-S-H) ปรากฏเด่นชัดมากกว่าตัวอย่างควบคุม ผลการทดสอบสนับสนุนการปรับปรุงลักษณะเฉพาะให้ดีขึ้นทั้งในการบ่มระยะสั้นและยาว และยังส่งผลดีอย่างต่อเนื่องต่อบรรยากาศความชื้นและอัตราการดูดซึมน้ำของตัวอย่าง โดยเฉพาะเมื่อใช้ CWPM ชนิดผสมเพิ่มกับส่วนผสมที่มีค่า W/C ต่ำ (0.3) แต่การใช้ CWPM ชนิดเคลือบผิวกับส่วนผสมที่มี W/C ปานกลางถึงสูง (0.4-0.6) ให้ผลดีที่ชัดเจนกว่าส่วนผสมที่มีค่า W/C ต่ำ

คำสำคัญ: สารก่อผลึก; สมบัติของมอร์ตาร์; กำลังรับแรงอัด; ความพรุน; การดูดซึมน้ำ

Effect of Crystalline Waterproofing Material on Porosity and Water Absorption in Mortar

Thakdanai Kheaw-on¹, Suvimol Sujjavanich¹, Nantawat Khomwan^{2*},
Paisan Kongkachuichay³, Prasert Suwanvitaya¹ and Prayath Nantasin⁴

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

² Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering at Kamphaeng Saen, Kasetsart University

³ Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University

⁴ Department of Earth Sciences, Faculty of Science, Kasetsart University

* Corresponding author, E-mail: fengnwk@ku.ac.th

Received: 27 August 2024; Revised: 3 January 2025; Accepted: 27 January 2025

Online Published: 22 April 2025

Abstract: This research investigates the effect of crystalline waterproofing material (CWPM), namely mixing type (CM) and coating type (CC), on reducing porosity and water absorption in mortar. To determine the optimum use of CWPM in the mortar, tests were conducted at water-to-cement (W/C) ratios of 0.3, 0.4, and 0.6. Tests included porosity, water absorption and finally compressive strength, as well as investigating the chemical compounds in the samples to confirm the effects of using CWPM. The amount and applied method of CWPM as the manufacturer's suggestion were used to produce mortar samples, after 40 days all set was wet cured for 30 days before test. The results showed that CWPM both types of significantly reduced porosity and the consequent water absorption, but differently. The W/C and type dependent were clear. The lower W/C and mixing type yielded better porosity, water absorption and compressive strength, compared to the control samples. Both cementitious CWPM type samples showed the more pronounced peaks of CaCO_3 and Ettringite (AFt), especially calcium aluminate silicate hydrate (C-A-S-H), more clearly than the control samples. These results support the enhanced characteristics in both short-term and long-term curing, particularly by improving water resistance and reducing absorption rates. Specifically, the use of mixing-type CWPM with low to moderate W/C ratios (0.3 to 0.4) showed superior results, while coating-type CWPM was more effective with high W/C ratios (0.6) compared to lower W/C ratios.

Keywords: Crystalline waterproofing material; Mortar properties; Compressive strength; Porosity; Water absorption

1. บทนำ

ความคงทนของคอนกรีตมีผลต่อความปลอดภัย อายุการใช้งานและค่าบำรุงรักษาของโครงสร้างที่มีมูลค่าสูง ปัจจัยหลักหลายประการมีผลต่อความคงทนของโครงสร้างคอนกรีตได้แก่ วัสดุที่เลือกใช้ การออกแบบและการใช้งาน ตลอดจนสภาพแวดล้อม [1-3] โดยลักษณะเฉพาะหลักอย่างหนึ่งที่เกี่ยวข้องกับความคงทนและสมบัติอื่นหลายประการของคอนกรีต คือ ความพรุนหรือปริมาณช่องว่างที่ต่อเนื่องในเนื้อคอนกรีตนั้นๆ ซึ่งเป็นช่องทางให้น้ำหรือของไหลอื่นนำพาสิ่งที่เป็นอันตรายเข้าสู่ภายในเนื้อคอนกรีตได้ง่าย การลดความพรุนในคอนกรีตลง รวมถึงการตัดความต่อเนื่องของรูพรุนเป็นสิ่งสำคัญที่มีผลกระทบต่อความคงทนของคอนกรีต การลดความพรุนในคอนกรีตมักทำโดยการลดอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานการใช้วัสดุที่บดน้ำ สารปอซโซลานและผลิตภัณฑ์กันซึมในชนิดสารผสมเพิ่มร่วมกันหรือบนพื้นผิวคอนกรีตโดยตรง [4, 5]

แนวทางหลักในการพัฒนาความคงทนของคอนกรีต 2 ทาง ได้แก่ การป้องกันจากภายนอก โดยการปรับปรุงพื้นผิวคอนกรีต และการทำให้คอนกรีตมีความทึบน้ำโดยตรง กรณีแรก ได้แก่ การเคลือบผิวคอนกรีตให้มีความทึบน้ำ (Surface Coating) การใช้สารแทรกซึมเข้าไปในเนื้อคอนกรีตเพื่ออุดช่องว่าง (Sealer) และการเคลือบผิวทำให้คอนกรีตมีความไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) [6] เช่น Polyurethane Epoxy Acrylic Polymer และ Chlorinated Rubber เป็นต้น อย่างไรก็ตาม หากชั้นเคลือบผิวเกิดความเสียหายหรือหลุดร่อน รวมถึงการเกิดข้อบกพร่องของชั้นเคลือบผิวตั้งแต่กระบวนการเคลือบผิวอาจทำให้ความชื้น

หรือสารที่เป็นอันตรายสามารถซึมเข้าไปภายในคอนกรีตได้ [7, 8]

ส่วนกรณีหลังการทำให้คอนกรีตมีความทึบน้ำจากภายในเพิ่มขึ้นจะช่วยเพิ่มความต้านทานน้ำ โดยเฉพาะการลดความพรุนในคอนกรีตลง [4] ในปัจจุบันเริ่มมีการใช้สารก่อผลึก (Crystalline Waterproofing Material หรือ CWPM) มากขึ้น สารนี้เป็นวัสดุอินทรีย์ที่พัฒนาขึ้นเพื่อปรับปรุงคอนกรีตในระดับจุลภาค โดยสารก่อผลึกแทรกซึมเติมช่องว่างภายในทำให้ทึบน้ำขึ้น ป้องกันความชื้นหรือสารอันตรายเคลื่อนเข้าสู่คอนกรีตยากขึ้นและทนทานต่อการเสื่อมสภาพในสภาวะรุนแรงได้ดีขึ้น [9, 10] ส่วนประกอบหลักของสารกลุ่มนี้มักได้แก่ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประมาณร้อยละ 10 ถึง 50 ทรายซิลิกาประมาณร้อยละ 10 ถึง 40 และสารประกอบเคมีอื่นๆ ประมาณร้อยละ 30 ถึง 60 เมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำ มักให้ผลิตภัณฑ์หลักคือแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตเจล (Calcium Silicate Hydrate หรือ C-S-H gel) และแคลเซียมคาร์บอเนต (Calcium carbonate หรือ CaCO_3) ซึ่งเข้าไปเติมโพรงในระดับคาปิลลารีทำให้คอนกรีตมีความทึบน้ำขึ้น [11]

ในปัจจุบันมีการใช้งานสารก่อผลึกหลายชนิด เช่น กรณีโครงสร้างเก่า หรือคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว เช่น ผังชั้นใต้ดินหรือการซ่อมถึงน้ำจากปัญหาการแทรกซึมคลอไรด์ นิยมใช้การเคลือบผิวคอนกรีต ส่วนกรณีโครงสร้างใหม่ใช้การโรยหน้าคอนกรีตสดซึ่งง่ายในการติดตั้ง แต่ไม่เหมาะกับพื้นที่ขนาดใหญ่ที่ใช้เวลานานและประสิทธิภาพอาจด้อยลงจากการทำงาน หรือใช้การผสมวัสดุผงในคอนกรีตสดซึ่งให้ประสิทธิภาพสูงสุดจากสารก่อผลึกกระจายตัวได้ทั่วเนื้อคอนกรีต [12] ซึ่งทั้ง



ชนิดเคลือบผิวและผสมเพิ่มแสดงประสิทธิภาพในการลดความพรุนจนมีค่าต่ำกว่าคอนกรีตควบคุม และมีรายงานว่าคอนกรีตผสมสารก่อผลึกมีปริมาณความพรุนต่ำกว่าคอนกรีตเคลือบผิวเพียงเล็กน้อย [13] อย่างไรก็ตามปัจจัยศึกษาที่แตกต่างกันอาจมีผลให้ข้อมูลบางส่วนยังมีความขัดแย้งและไม่ชัดเจน เช่น Cappellesso et al. (2016) พบว่าคอนกรีตผสมสารก่อผลึกมีปริมาณความพรุนสูงกว่าคอนกรีตเคลือบผิว [11] เช่น มีผลแสดงว่าชนิดเคลือบผิวให้ผลแทรกซึมน้ำต่ำกว่าชนิดที่ใช้ผสมคอนกรีตตลอดอายุการทดสอบ [12] ขณะที่งานวิจัยของ Khomwan et al. (2024) พบว่าคอนกรีตผสมสารก่อผลึกทุกปริมาณโดยน้ำหนักซีเมนต์ที่ใช้ (ร้อยละ 0.5 0.8 1 และ 2) มีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำต่ำกว่าคอนกรีตเคลือบผิว [14] ก่อนหน้านั้นมีรายงานว่าการใช้สารก่อผลึกให้ผลเชิงลบเนื่องจากคอนกรีตผสมสารก่อผลึกมีการดูดซึมน้ำสูงกว่าตัวอย่างควบคุมทุกอายุและทุกสภาวะการบ่มที่ทดสอบ [15] วิธีการบ่มยังมีผลกระทบต่อ การดูดซึมน้ำของคอนกรีตปกติและคอนกรีตที่เคลือบผิวต่างกัน งานวิจัยของ Rahman and Chamberlain [16] แสดงว่าการเคลือบผิวคอนกรีตแล้วบ่มตัวอย่างในสภาวะรุนแรงด้วยพัลส์ไฟฟ้าเป่าโดยตรงมีผลให้คอนกรีตเคลือบผิวมีการดูดซึมน้ำสูงกว่าตัวอย่างควบคุม ขณะที่การบ่มน้ำปกติคอนกรีตเคลือบผิวด้วยวัสดุสร้างผลึกดูดซึมน้ำต่ำกว่าตัวอย่างควบคุมทุกอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ (W/C) เท่ากับ 0.44 และ 0.55 [17] นักวิจัยกลุ่มเดียวกันได้ศึกษาต่อโดยใช้สารก่อผลึกชนิดสารผสมเพิ่มและผันแปร W/C ในช่วง 0.32 ถึง 0.46 พบว่าคอนกรีตผสมสารก่อผลึกมีการดูดซึมน้ำต่ำอย่างชัดเจนเมื่อ W/C ต่ำ [18]

ผลการศึกษาก่อนหน้านี้ ซึ่งมีความแตกต่างกันในรายละเอียดวัสดุและวิธีการที่ใช้ทำให้ยากที่จะสรุปได้ชัดเจน ดังนั้นเพื่อการใช้สารก่อผลึกที่เหมาะสมงานวิจัยนี้จึงศึกษาเปรียบเทียบผลของสารก่อผลึกทั้ง 2 ชนิด คือการเคลือบผิวและสารผสมเพิ่มที่ผสมคอนกรีตสดโดยตรงในสภาวะและอายุคล้ายคลึงกันต่อสมบัติพื้นฐานของมอร์ตาร์ในด้านความพรุนและการดูดซึมน้ำรวมถึงกำลังรับแรงอัดซึ่งเป็นผลกระทบที่เกี่ยวข้องและตรวจสอบหาสารประกอบทางเคมีในชั้นตัวอย่างในช่วงอัตราส่วน W/C จากต่ำไปสูง ได้แก่ 0.3 0.4 และ 0.6

2. วัสดุและการเตรียมตัวอย่าง

2.1 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

ในการศึกษานี้ใช้ตัวอย่างมอร์ตาร์เพื่อลดความแปรปรวนจากมวลรวมหยาบในการศึกษาด้วยคอนกรีตโดยวัสดุที่ใช้ประกอบด้วย ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 (C) ตามมาตรฐาน ASTM C150 ซึ่งเลือกใช้เนื่องจากมีคุณสมบัติที่คงที่ตามมาตรฐาน ช่วยลดความแปรปรวนของผลการทดสอบ เหมาะสำหรับศึกษาผลของสารก่อผลึกในด้านสมบัติเชิงโครงสร้าง เช่น ความพรุน การดูดซึมน้ำ และกำลังรับแรงอัด นอกจากนี้การใช้น้ำปูนซีเมนต์ประเภทนี้ยังช่วยให้ผลการทดสอบสามารถเปรียบเทียบกับงานวิจัยที่แล้วเสร็จ ซึ่งใช้วัสดุหลากหลายประเภทและหลายระบบ รวมถึงการเปรียบเทียบผลกับงานวิจัยในระดับนานาชาติได้อย่างชัดเจน

สารก่อผลึก 2 ชนิด ได้แก่ ชนิดเคลือบผิว (CC) และชนิดผสมเพิ่ม (CM) ใช้มวลรวมเป็นทรายแม่น้ำทั่วไป (S) ความถ่วงจำเพาะ 2.49 และค่าการดูดซึมน้ำร้อยละ 0.76

2.2 การเตรียมตัวอย่าง

การเตรียมตัวอย่างใช้ส่วนอัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อทราย (C/S) 1 ต่อ 2 และ W/C เท่ากับ 0.3 0.4 และ 0.6 ใช้สารก่อผลึกจากผู้ผลิตเดียวกัน 2 ชนิด โดยเตรียมตัวอย่างตามคำแนะนำของผู้ผลิต คือ 1) ชนิดเคลือบผิว และ 2) ชนิดผสมเพิ่ม ซึ่งใช้ปริมาณร้อยละ 1 โดยน้ำหนักปูนซีเมนต์

เมื่อตัวอย่างมอร์ตาร์ล้นบ่มในน้ำครบ 28 วัน เช็ดให้อยู่ในสภาพอิมตัวผิวแห้งและขัดเปิดผิวเพื่อให้สารก่อผลึกแทรกซึมได้ง่ายขึ้น แล้วจึงเคลือบผิวตัวอย่างมอร์ตาร์ด้วยสารเคลือบที่ผสมอัตราส่วนสารก่อผลึกต่อน้ำเป็น 5 ต่อ 2 ส่วน โดยปริมาตร โดยใช้แปรงขนพลาสติกทาเคลือบบนผิวอย่างสม่ำเสมอจนทั่วชั้นเคลือบเมื่อแล้วเสร็จ มีความหนาประมาณ 1 มิลลิเมตร หลังจากนั้นบ่มชั้นตัวอย่างโดยพ่นละอองน้ำทั่วผิว 3 ครั้งต่อวัน นาน 12 วัน จนครบอายุ 40 วัน สำหรับตัวอย่างที่ผสมสารก่อผลึกนำไปบ่มในน้ำ จนมีอายุ 28 วัน และบ่มต่อด้วยวิธีการเดียวกันที่ใช้สำหรับตัวอย่างเคลือบผิวที่อายุ 28 วัน จนมีอายุครบ 40 วัน

3. วิธีการทดสอบ

3.1 การทดสอบกำลังรับแรงอัด

ตัวอย่างรูปทรงลูกบาศก์ ขนาด 50 x 50 x 50 มิลลิเมตร ใช้เพื่อทดสอบกำลังรับแรงอัดในภาวะอิมตัวผิวแห้งที่มีอายุและเงื่อนไขต่างๆ ด้วยเครื่องทดสอบขนาด 1000 กิโลนิวตัน ใช้ความเร็วในการทดสอบ 1350 นิวตันต่อวินาที ตามมาตรฐาน ASTM C109 [19] ทำการทดสอบตัวอย่างที่อายุ 40 วัน และหลังแช่น้ำอีก 30 วัน (อายุ 70 วัน)

3.2 การทดสอบหาความพรุน

ตัวอย่างมอร์ตาร์รูปทรงลูกบาศก์ ขนาด 100 x 100 x 100 มิลลิเมตร ใช้เพื่อทดสอบหาความพรุนโดยทดสอบที่อายุมอร์ตาร์ 40 วัน และหลังแช่น้ำอีกครั้ง 30 วัน (อายุ 70 วัน) โดยอ้างอิงมาตรฐานการทดสอบหาดูดซึมน้ำและโพรงในคอนกรีต (ASTM C642) ซึ่งทำการอบตัวอย่างที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ก่อนชั่งน้ำหนัก และแช่น้ำเป็นเวลา 48 ชั่วโมง แล้วจึงชั่งน้ำหนักตัวอย่างอิมตัวผิวแห้งในน้ำและอากาศอีกครั้งเพื่อใช้ค่าต่างๆ คำนวณหาค่าโพรงในมอร์ตาร์ [20]

3.3 การทดสอบหาการดูดซึมน้ำ

การทดสอบนี้ใช้ตัวอย่างรูปทรงลูกบาศก์ เช่นเดียวกับการทดสอบกำลังรับแรงอัด ที่อายุมอร์ตาร์ 40 วัน และหลังแช่น้ำอีกครั้ง 30 วัน เช่นเดียวกับการทดสอบหาความพรุน (มาตรฐาน RILEM Test No.11.4) [21] เตรียมตัวอย่างทดสอบโดยอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จนน้ำหนักคงที่แล้วจึงติดตั้งหลอดแก้ว Rilem (Karsten tube) บนตัวอย่างและเติมน้ำกลั่นลงในหลอดแก้วจนถึงขีดระดับ 0 มิลลิลิตร ทำการบันทึกระดับน้ำที่ลดลงทุก 10 นาที จนถึง 60 นาที

3.4 การหาสารประกอบเคมี

การทดสอบหาสารประกอบทางเคมีเทคนิควิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray Diffractometer หรือ XRD) เพื่อตรวจหาชนิดโครงสร้างของผลึกที่เกิดขึ้นในผงที่เก็บจากตัวอย่างรูปทรงกระบอกขนาด 30 x 30 มิลลิเมตร อายุ 40 วัน ทั้งที่เคลือบผิวและผสมเพิ่ม



การเตรียมตัวอย่างก่อนตรวจสอบจะหยุดปฏิกิริยาไฮเดรชันโดยแช่ตัวอย่างในสาร Absolute Alcohol 48 ชั่วโมงแล้วบดตัวอย่างให้ละเอียดจนร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 200 แล้วนำผงที่ได้ไปอบที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส นาน 48 ชั่วโมง [22] และเก็บในถุงสุญญากาศก่อนนำไปตรวจสอบ (ใช้ตัวอย่างผง 5 กรัม)

4. ผลการศึกษา

4.1 กำลังรับแรงอัด

ผลทดสอบกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ตั้งรูปที่ 1 แสดงเป็นร้อยละกำลังรับแรงอัดทำให้ปกติ (Normalize) ของตัวอย่างที่อายุ 40 และ 70 วัน (NC40 และ NC70) โดยค่าจากการทดสอบของตัวอย่างควบคุม (CT) ที่ W/C เท่ากับ 0.3 0.4 และ 0.6 อายุ 40 วัน มีค่ากำลังรับแรงอัด 26.1 19.8 และ 14.0 เมกะปาสคาล ตามลำดับที่ W/C สูง นอกจากกำลังรับแรงอัดลดลงแล้วยังส่งผลต่อการยึมน้ำ และมีช่องว่างในเนื้อมอร์ตาร์สูงกว่าจากบริเวณที่มีน้ำส่วนเกินจากปฏิกิริยาไฮเดรชันขณะนั้น [5] เมื่อตัวอย่างอายุ 70 วัน กำลังรับแรงอัดของตัวอย่างที่ W/C เท่ากับ 0.3 0.4 และ 0.6 มีค่าเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยคือ 26.4 20.0 และ 14.2 เมกะปาสคาล จากการบ่มที่มีผลต่อกำลังอัดตามปฏิกิริยาไฮเดรชันที่เกิดขึ้นต่อเนื่องแต่ช้าลงมากหลังจาก 28 วัน [23] จากผลงานวิจัยที่ผ่านมามีพบว่า CWPM ช่วยเพิ่มความหนาแน่นและกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตได้จากการพ่นละอองน้ำบ่มชั้นระยะสั้น 3 วัน โดยเป็นผลของความชื้นต่อปฏิกิริยาของสารก่อผลึก [24] งานวิจัยนี้จึงมุ่งหมายศึกษาและเปรียบเทียบอิทธิพลของ W/C และ

การบ่มน้ำที่สมบูรณ์และนานขึ้น (30 วัน) ต่อช่องว่างการดูดซึมน้ำและกำลังรับแรงอัด เมื่อใช้ CWPM ทั้ง 2 ชนิด

การใช้ CWPM ทั้ง 2 ชนิดและ W/C ที่แตกต่างกันมีผลต่อกำลังรับแรงอัดที่อายุต่างๆ ต่างกัน (NC40 และ NC70) โดยตัวอย่าง CM ที่ใช้ W/C ต่ำ เท่ากับ 0.3 มีกำลังรับแรงอัด (NC40) สูงกว่า CT ร้อยละ 10.0 และมีการพัฒนากำลังรับแรงอัด NC70 เพิ่มขึ้นจากที่อายุ 40 วัน เพียงเล็กน้อย (เมื่อคิดจากค่ากำลังรับแรงอัดจริงคือร้อยละ 2.5) แต่ผลกระทบของการเคลือบผิวต่ออัตราการพัฒนาำลังอัดไม่ชัดเจนนักแม้มีการบ่มที่สมบูรณ์ขึ้นและนานขึ้นสำหรับกลุ่ม W/C ต่ำ (ทั้ง W/C เท่ากับ 0.3 และ 0.4 ที่ NC40 เทียบกับ NC70) ขณะที่ตัวอย่าง CC ที่มี W/C สูง (0.6) การบ่มที่สมบูรณ์และนานขึ้นมีผลต่อการพัฒนากำลังรับแรงอัดที่ชัดเจนมากขึ้นกว่าเมื่อใช้ W/C ต่ำ ทั้งนี้อาจอธิบายได้จากอิทธิพลของปริมาณและขนาดช่องว่าง เนื่องจากผลิตภัณฑ์จากสารก่อผลึกเข้าไปแทรกเติมช่องว่างในมอร์ตาร์ทำให้ความทึบแน่นขึ้นจึงส่งผลให้ตัวอย่างมีกำลังรับแรงอัดสูงขึ้นตาม [24, 25] และอาจสรุปได้ว่าการใช้ W/C ต่ำถึงปานกลาง CWPM ชนิดผสมเพิ่มช่วยเพิ่มกำลังรับแรงอัดได้ชัดเจนกว่าชนิดเคลือบผิวเมื่อพิจารณาจากค่ากำลังอัดจริงที่เพิ่มขึ้นจากการกระจายตัวของ CWPM ระหว่างการผสม [11, 26] แต่การเคลือบผิว ยังคงให้ผลดีที่มีค่า W/C สูง โดยช่วยเพิ่มค่ากำลังอัดได้มากขึ้นจากการแทรกซึมช่องว่างที่มีมากตามเวลาโดยเฉพาะสำหรับคอนกรีตเก่า [27]

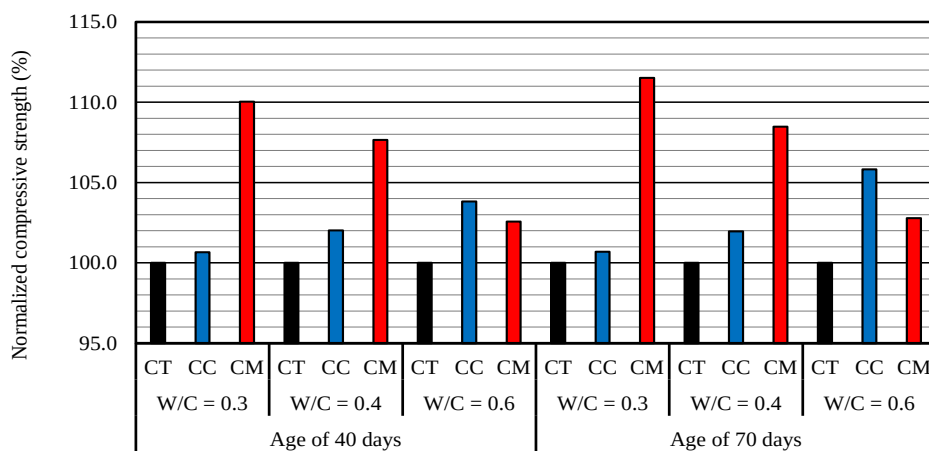
4.2 ความพรุน

การทดสอบความพรุนในมอร์ตาร์แสดงผลเป็นร้อยละของความพรุนที่ซึมผ่านได้ทำให้ปกติ (Normalize) ในรูปที่ 2 โดยตัวอย่าง CT (W/C เท่ากับ 0.3 0.4 และ 0.6) อายุ 40 วัน (NC40) มีปริมาณความพรุนแท้จริงร้อยละ 26.1 31.4 และ 37.7 ซึ่งค่าเพิ่มขึ้นตาม W/C ที่สูงขึ้นและลดลงเล็กน้อย (ร้อยละ 1.4 ถึง 4.0) เมื่อบ่มต่อระยะสั้น 30 วัน (NC70) [5]

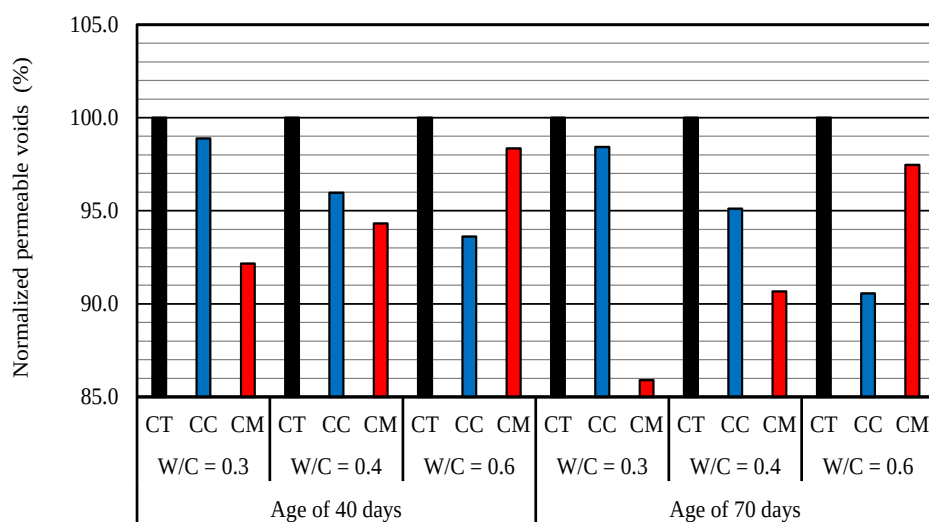
ตัวอย่าง CM ที่ W/C เท่ากับ 0.3 ที่อายุ 40 และ 70 วัน มีปริมาณความพรุนน้อยกว่า เมื่อเทียบกับตัวอย่าง CT เท่ากับร้อยละ 7.8 และ 14.1 และเมื่อ W/C สูงขึ้นเป็น 0.4 ตัวอย่าง CM มีความพรุนน้อยกว่าตัวอย่าง CT เท่ากับร้อยละ 5.7 ถึง 9.3 และมีค่าใกล้เคียงกับตัวอย่าง CT เมื่อมี W/C เท่ากับ 0.6 แต่เมื่อบ่มนานขึ้น (CM ที่อายุ 40 และ 70 วัน มีปริมาณความพรุนน้อยกว่าตัวอย่าง CT เท่ากับร้อยละ 1.6 และ 2.5 ตามลำดับ

ผลการทดสอบตัวอย่างเคลือบผิวแตกต่างจากกรณีสารผสมเพิ่ม โดยตัวอย่าง CC ที่ W/C เท่ากับ 0.3 มีความพรุนใกล้เคียงกับ CT โดยมีปริมาณความพรุนต่ำกว่าเล็กน้อย (ร้อยละ 1.1 ถึง 1.6) (NC40 และ NC70) ขณะที่ W/C ที่สูงกว่า ได้แก่ 0.4 และ 0.6 ช่วยลดความพรุนชัดเจนขึ้นที่อายุการบ่มนานขึ้น (ร้อยละ 4.0 ถึง 4.9 และร้อยละ 6.4 ถึง 9.4 ตามลำดับ) ซึ่งการเคลือบผิวในตัวอย่าง W/C สูงช่วยลดความพรุนได้มากกว่าชนิดสารผสมเพิ่มเนื่องจากตัวอย่างเดิมมีความพรุนน้อยอยู่แล้วทั้งจากผลของ W/C ที่ต่ำ การแทรกของ CWPM และการเกิดปฏิกิริยาต่อเนื่องภายหลัง ขณะที่ตัวอย่างเคลือบผิวที่มี W/C สูงมีความพรุนเดิมภายในสูงเมื่อเคลือบผิวและบ่มทำให้ส่วนพื้นผิวตัวอย่างมีความพรุน

ลดลงจากผลของผลิตภัณฑ์ CWPM ที่เกิดปฏิกิริยาและค่อยๆ ซึมแทรกเข้าสู่ภายในจากการบ่มจากภายนอกอย่างต่อเนื่องและง่ายกว่าเมื่อช่องว่างมีขนาดใหญ่ โดยที่ช่องว่างที่มีลักษณะต่อเนื่องอาจแทรกเต็มทั้งหมดหรือบางส่วนจากการสร้างผลึกรูปทรงเข็มในรูพรุนที่เคยมีรายงานมาแล้ว [28] และยืนยันจากการวิเคราะห์สารประกอบจากการศึกษานี้ในหัวข้อ 4.4 และผลการศึกษาที่ยังบ่งชี้ชัดเจนว่าการบ่มที่นานขึ้นส่งผลต่อความพรุนที่ลดลงชัดเจนมากขึ้น ขณะที่ตัวอย่างที่ใช้ W/C ต่ำถึงปานกลางมีผลต่อการลดความพรุนน้อยกว่ามาก (ตัวเลขร้อยละความพรุนที่ลดลง NC40 และ NC70 สำหรับ W/C สูง และต่ำถึงปานกลาง ตามลำดับ มีค่าเท่ากับร้อยละ 6.4 ต่อร้อยละ 1.1 และ 4.0 (NC40) และมีค่าเท่ากับร้อยละ 9.4 ต่อร้อยละ 1.6 และ 4.9 (NC70)) ซึ่งต่างจาก CWPM ในลักษณะสารผสมเพิ่มที่ตัวอย่าง W/C ต่ำถึงปานกลาง มีผลต่อการลดความพรุนสูงกว่ามาก (ตัวเลขร้อยละความพรุนที่ลดลง NC40 และ NC70 สำหรับ W/C สูง และต่ำถึงปานกลาง ตามลำดับ มีค่าเท่ากับร้อยละ 1.6 ต่อร้อยละ 7.8 และ 5.7 (NC40) และมีค่าเท่ากับร้อยละ 2.5 ต่อร้อยละ 14.1 และ 9.3 (NC70) ผลการทดสอบบ่งชี้ว่า CWPM ต่อความพรุนมีประสิทธิภาพที่แตกต่างกันขึ้นกับชนิดและระยะเวลาการบ่ม โดยเฉพาะ CWPM ในชนิดผสมเพิ่มช่วยลดความพรุนได้ดีกว่าชนิดเคลือบผิว จากการกระจายตัวของ CWPM ตั้งแต่ขั้นตอนการผสมมอร์ตาร์ ซึ่งมีรายงานการพบผลึกรูปเข็มจำนวนมากในรูพรุน เป็นผลให้มีความพรุนต่ำทั่วทั้งตัวอย่างที่ใช้ CWPM ชนิดผสมเพิ่ม ขณะที่ชนิดเคลือบผิวมีความพรุนต่ำและความทึบแน่นบริเวณชั้นเคลือบผิวและใกล้เคียงเท่านั้น [13, 29]



รูปที่ 1 ร้อยละกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์



รูปที่ 2 ร้อยละความพรุนในมอร์ตาร์



4.3 การดูดซึมน้ำ

ผลค่าการดูดซึมน้ำจริงและค่าทำให้ปกติ (Normalize) ของตัวอย่างที่อายุ 40 และ 70 วัน (NC40 และ NC70) ของตัวอย่างแสดงในรูปที่ 3 และ 4 โดยตัวอย่าง CT ที่ W/C เท่ากับ 0.3 0.4 และ 0.6 อายุ 40 วัน มีการดูดซึมน้ำ เป็น 0.106 0.167 และ 0.399 มิลลิเมตรต่อนาที่ ตามลำดับ ต่อมาเมื่อบ่มในน้ำต่อระยะ สั้นจนอายุ 70 วัน พบว่าตัวอย่าง CT ที่ W/C เท่ากับ 0.3 0.4 และ 0.6 มีการดูดซึมน้ำลดลงเป็น 0.095 0.156 0.381 มิลลิเมตรต่อนาที่ หรือลดลงจากอายุ 40 วัน เป็น ร้อยละ 10.5 6.3 และ 4.5 ตามลำดับ ซึ่งเป็นทิศทางเดียวกับความพรุน การบ่มนานขึ้นมีผลดีต่อการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันอย่างต่อเนื่องลดขนาดช่องว่าง และลดการดูดซึมน้ำลงชัดเจนโดยเฉพาะเมื่อใช้ W/C ต่ำ [5]

สำหรับตัวอย่างที่ใช้ CWPM ชนิดสารผสมเพิ่มช่วยลดการดูดซึมน้ำได้ดีในตัวอย่างทุก W/C และอายุการทดสอบ โดยตัวอย่าง CM ที่ W/C เท่ากับ 0.3 0.4 และ 0.6 มีค่าการดูดซึมน้อยกว่าตัวอย่าง CT ร้อยละ 22.0 22.3 และ 6.4 ตามลำดับ (อายุ 40 วัน) ต่อมาเมื่อบ่ม นานขึ้นที่อายุ 70 วัน CM ที่ W/C ทั้ง 3 ค่า 0.3 0.4 และ 0.6 มีค่าการดูดซึมน้อยกว่าตัวอย่าง CT ค่าร้อยละ 25.7 23.5 และ 7.1 ตามลำดับ ซึ่งแสดงว่าตัวอย่าง CM ที่ W/C ต่ำถึง ปานกลางช่วยลดการดูดซึมน้ำอย่างเห็น ได้ชัด ซึ่งสอดคล้องกับรายงานอื่น [18, 30] แต่ การศึกษานี้ยังพบอีกว่าการบ่มนานขึ้นมีผลดีต่อ ตัวอย่างที่มี W/C ต่ำถึงปานกลาง จากการทำปฏิกิริยา เพิ่มเติมของสารก่อผลึกกับ CH เพื่อสร้างผลิตภัณฑ์ หลัก C-S-H และ CaCO_3 รวมถึงผลิตภัณฑ์อื่นอุด ช่องว่างและรอยแตกเพิ่มขึ้น [9]

อย่างไรก็ตามการเคลือบผิวตัวอย่างด้วย CWPM ไม่เห็นผลชัดเจนต่อการดูดซึมน้ำมากนัก ตัวอย่าง CC ที่ W/C ต่ำ 0.3 อายุ 40 และ 70 วัน มีการดูดซึมน้ำ มากกว่าตัวอย่าง CT (W/C เท่ากับ 0.3 ร้อยละ 3.7 และ 1.8) แต่ผลดีจากการเคลือบผิวเห็นชัดขึ้น เมื่อ W/C สูงขึ้นและมีการบ่มนานขึ้นจากค่าการดูดซึมน้ำลดลง (W/C เท่ากับ 0.4 และ 0.6 ที่อายุ 40 และ 70 วัน มีค่าเท่ากับ ร้อยละ 14.3 และ 16.4 และร้อยละ 17.0 และ 21.4 ตามลำดับ) ซึ่งมีการสันนิษฐานว่าในช่วงแรก CWPM ทำหน้าที่ดูดซับน้ำเพื่อทำการสร้างผลึกและหลังจาก การก่อตัวของผลึกเกิดขึ้นทำให้อาจขับน้ำส่วนเกินจาก การทำปฏิกิริยา [18] อย่างไรก็ตามตัวอย่างที่มี W/C ต่ำมีช่องว่างน้อยกว่าการแทรกซึมและการเกิดผลึกต้อง ใช้เวลาการดูดซึมน้ำจึงค่อนข้างต่ำใกล้เคียงกับ ตัวอย่างปกติที่มีค่า W/C เดียวกันแม้เมื่อความชื้น ขณะที่ตัวอย่าง CC ที่ W/C สูงขึ้น ช่องว่างมากขึ้นและ ขนาดใหญ่ขึ้น การซึมผ่านน้ำซึ่งมีผลต่อการสร้างผลึกทำได้ ง่ายขึ้นและเห็นผลชัดเจนมากกว่า ซึ่งบ่งชี้ว่าการเคลือบ ผิวด้วยสารก่อผลึกทำให้ตัวอย่างมีความต้านทานการ ซึมผ่านน้ำเพิ่มขึ้นจากการก่อผลึกรูปทรงเข็มตามรูปพรุน และในรอยแตกขนาดเล็กที่อาจมีอยู่ [14, 31]

ความเชื่อมโยงระหว่างกำลังรับแรงอัด ความพรุน และการดูดซึมน้ำของมอร์ตาร์ที่ใช้ CWPM ที่มี W/C ต่างกันอาจอธิบายดังนี้

ความสัมพันธ์ระหว่างความพรุนกับกำลังรับแรงอัด บ่งชี้ว่าที่ W/C ต่ำ มอร์ตาร์มีความพรุนน้อยที่สุด เมื่อใช้ CWPM ชนิดผสมเพิ่ม ซึ่งช่วยเติมเต็มช่องว่างขนาดเล็กในมอร์ตาร์ ให้ทึบแน่นมากขึ้นส่งผลให้โครงสร้าง แน่นขึ้นและกำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนเมื่อ เทียบกับตัวอย่าง CT และ CC ส่วนกรณีที่ W/C สูง



มอร์ตาร์มีความพรุนสูง การเคลือบผิวด้วย CWPM ช่วยลดความพรุนในบริเวณผิวได้อย่างชัดเจน ช่วงเวลาการบ่มชั้นที่ใช้ในการศึกษานี้อาจจำกัดประสิทธิภาพของความทึบแน่นที่เกิดขึ้นเฉพาะบริเวณผิวและพื้นที่ใกล้เคียงเท่านั้น ซึ่งแตกต่างจากการใช้ CWPM ชนิดผสมเพิ่มที่ช่วยให้ความทึบแน่นสม่ำเสมอในเนื้อวัสดุได้ดีกว่า อย่างไรก็ตาม ในกรณีที่ W/C สูง ช่องว่างในเนื้อวัสดุยังคงมีอยู่มากและมีขนาดใหญ่ ส่งผลให้กำลังรับแรงอัดโดยรวมของพื้นที่หน้าตัดไม่เพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน แม้ในช่วงหลังของการบ่มระยะยาว

สำหรับความสัมพันธ์ระหว่างความพรุนกับการดูดซึมน้ำพบว่า W/C ต่ำถึงปานกลาง (0.3 ถึง 0.4) มีความพรุนที่ลดลงส่งผลให้การดูดซึมน้ำลดลง โดยเฉพาะตัวอย่างที่ใช้ CWPM ชนิดผสมเพิ่ม ซึ่งทำให้รูพรุนในเนื้อวัสดุเชื่อมต่อกันน้อยลงและลดช่องทางที่น้ำสามารถซึมผ่านได้ ขณะที่ W/C สูง พบว่าชนิดเคลือบผิวลดการดูดซึมน้ำในช่วงหลังการบ่มได้ดี โดยเฉพาะในตัวอย่างที่มีรูพรุนขนาดใหญ่

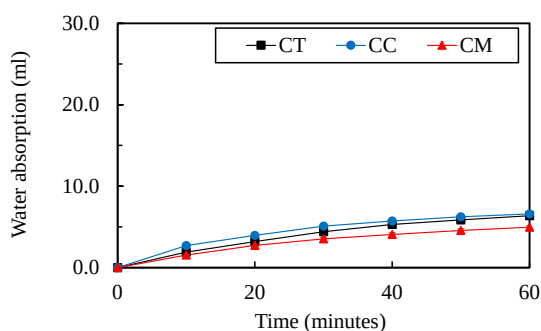
ดังนั้นการปรับใช้ CWPM ทั้งชนิดผสมเพิ่มและชนิดเคลือบผิวจึงควรพิจารณาจากค่า W/C และสมบัติที่ต้องการของมอร์ตาร์ในการใช้งาน

4.4 สารประกอบทางเคมี

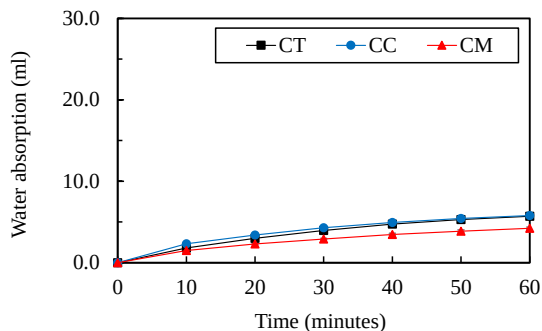
การวิเคราะห์สารประกอบทางเคมีในมอร์ตาร์อายุ 40 วัน ด้วยเทคนิค XRD ในรูปที่ 5 ไม่พบความแตกต่างของตำแหน่งความเข้มของจุดสูงสุด (Peak) สารหลักของตัวอย่าง CT และ CWPM ทั้งสองชนิด

ซึ่งบ่งชี้ว่าทั้งตัวอย่าง CM และ CC ไม่ได้มีโครงสร้างผลึกหลักรูปแบบใหม่เกิดขึ้น นอกจากพบ Peak ของ Calcium Aluminate Silicate Hydrates (C-A-S-H) ที่ชัดเจน ซึ่งไม่พบจากตัวอย่าง CT และพบผลิตภัณฑ์หลักเช่นเดียวกับจากปฏิกิริยาไฮเดรชันซีเมนต์ ได้แก่ C-S-H Calcium Hydroxide (CH) CaCO_3 และ Calcium Sulfoaluminate (Ettringite หรือ Aft) ซึ่ง เป็นการยืนยันผลงานวิจัยอื่นที่ชัดเจนมากขึ้นโดย Zhang et al. [32] วิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD แสดงให้เห็นว่าไม่มีการสร้างสารประกอบทางเคมีใหม่ แต่มีการปรับปรุงและเพิ่มปริมาณของสารประกอบทางเคมีที่มีอยู่เดิม เช่น C-S-H และ Aft ผ่านการเร่งปฏิกิริยาไฮเดรชันและสารประกอบทางเคมีของ CWPM

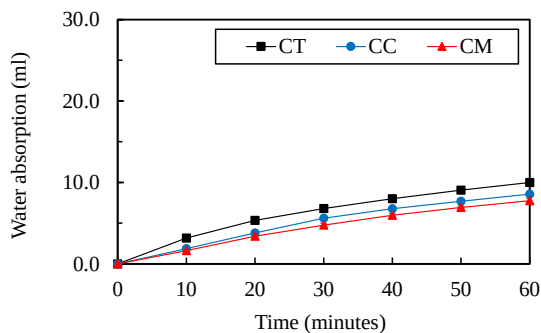
อย่างไรก็ตาม ตัวอย่างที่มี CWPM พบค่า Peak สูงสุดของ C-A-S-H ซึ่งมาจากการทำปฏิกิริยาของซีเมนต์และ CWPM ที่มีองค์ประกอบของต่าง [33] มีค่า Peak สูงสุดของ CaCO_3 และ Aft เด่นชัดมากกว่า CT และพบค่า Peak สูงสุดของ C-S-H ขณะที่ค่า Peak ของ CH ลดลงในทั้งในตัวอย่าง CM และ CC [34] แต่ในตัวอย่างที่ W/C ต่ำและปานกลาง (0.3 และ 0.4) การใช้สารก่อผลึกแสดง Peak ของ Aft ชัดเจนกว่าตัวอย่างที่ W/C สูง (0.6) ส่วนค่า Peak ของ CH ในตัวอย่างกลุ่มนี้ไม่ชัดเจนเหมือน CT ซึ่งอาจเป็นเพราะสารก่อผลึกทำปฏิกิริยากับ CH สร้างผลึกรูปทรงเข็มและผลิตภัณฑ์หลักที่ทำให้มอร์ตาร์มีความแข็งแรง ได้แก่ C-S-H และ CaCO_3 [29, 31] ซึ่งผลิตภัณฑ์เหล่านี้ทำให้มอร์ตาร์มีความทึบแน่นและปริมาณของรูพรุนลดลงจึงเป็นผลให้มอร์ตาร์ CWPM มีการดูดซึมน้ำต่ำ



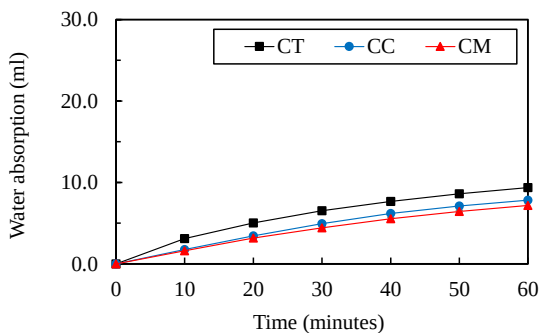
W/C = 0.3 อายุ 40 วัน



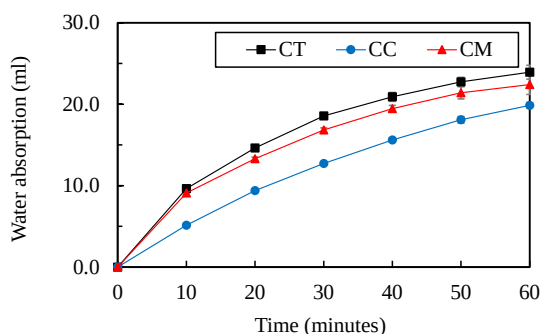
W/C = 0.3 อายุ 70 วัน



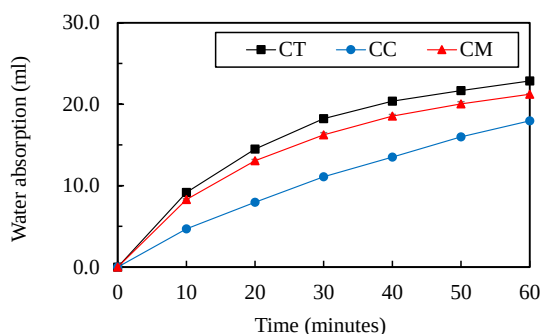
W/C = 0.4 อายุ 40 วัน



W/C = 0.4 อายุ 70 วัน

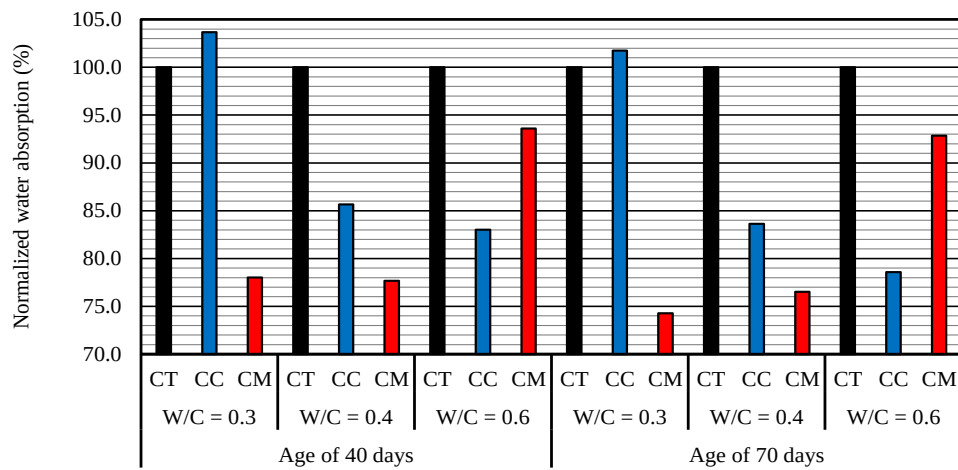


W/C = 0.6 อายุ 40 วัน

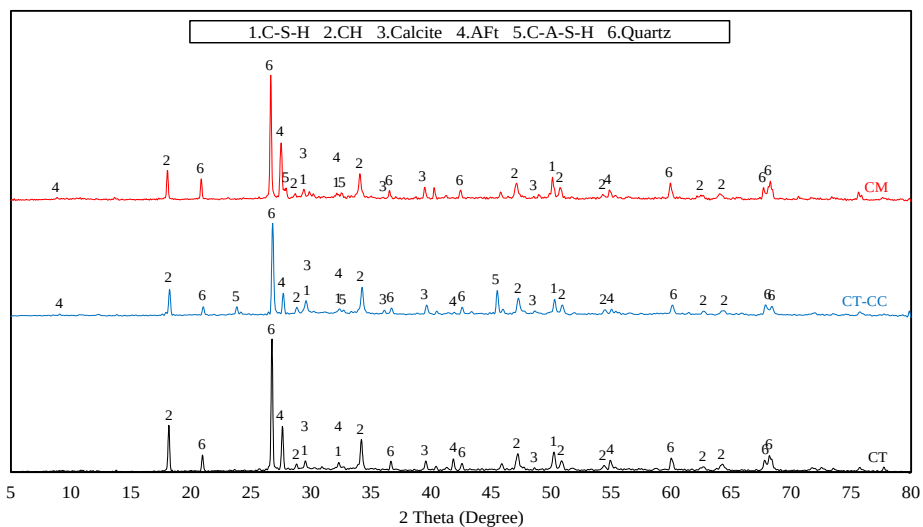


W/C = 0.6 อายุ 70 วัน

รูปที่ 3 การดูดซึมน้ำในมอร์ตาร์

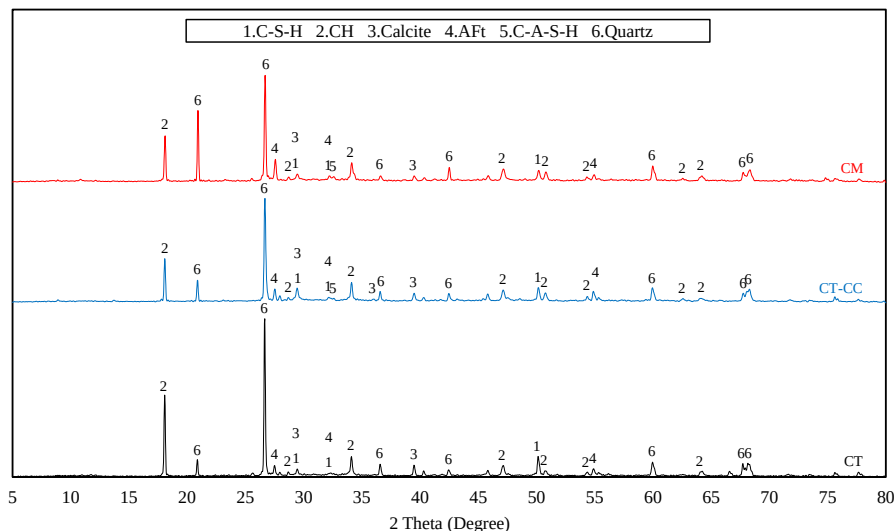


รูปที่ 4 ร้อยละการดูดซึมน้ำในมอร์ตาร์

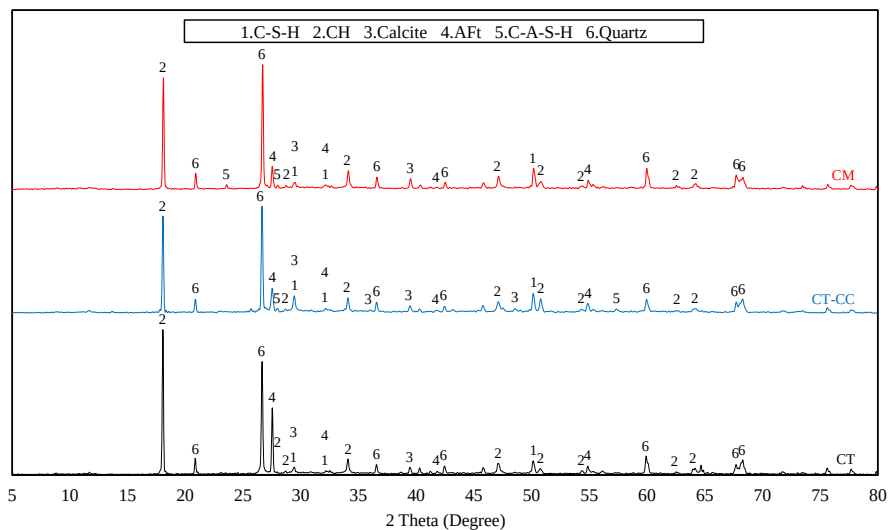


(ก) W/C เท่ากับ 0.3

รูปที่ 5 สารประกอบเคมีในมอร์ตาร์



(ข) W/C เท่ากับ 0.4



(ค) W/C เท่ากับ 0.6

รูปที่ 5 (ต่อ)



5. สรุปผลการศึกษา

1. การใช้สารก่อผลึกชนิดผสมเพิ่มช่วยลดความพรุนได้ดีกว่าการเคลือบผิวในตัวอย่าง W/C ต่ำถึงปานกลาง ขณะที่ชนิดเคลือบผิวในตัวอย่าง W/C สูงช่วยลดความพรุนได้ดีกว่าชนิดผสมเพิ่ม และการบ่มต่อเนื่องในระยะสั้นทำให้ความพรุนลดลง

2. การใช้สารก่อผลึกชนิดผสมเพิ่มช่วยลดการดูดซึมน้ำได้ในตัวอย่างทุก W/C แต่มีผลเล็กน้อยกับตัวอย่าง W/C สูง ส่วนชนิดเคลือบผิวช่วยลดการดูดซึมน้ำได้ดีในตัวอย่าง W/C สูง ขณะที่ตัวอย่างเคลือบผิว W/C ต่ำ มีการดูดซึมน้ำเพิ่มขึ้นเล็กน้อย แต่เมื่อบ่มตัวอย่างในระยะสั้นทำให้มีการดูดซึมน้ำลดลง

3. ผลของสารก่อผลึกส่งผลดีต่อสมบัติการทึบน้ำของคอนกรีตโดยเฉพาะเมื่อใช้สารก่อผลึกชนิดผสมเพิ่มร่วมกับตัวอย่างที่มี W/C ในช่วงต่ำถึงปานกลาง (0.3 ถึง 0.4) แต่การใช้สารก่อผลึกชนิดเคลือบผิวกับตัวอย่างที่ W/C สูง (0.6) ให้ผลดีที่ชัดเจนกว่าส่วนผสมที่มี W/C ต่ำ

4. ผลพลอยได้จากการเติมผลึกจากการใช้สารก่อผลึกช่วยเพิ่มกำลังรับแรงอัด โดยชนิดผสมเพิ่มช่วยเพิ่มกำลังรับแรงอัดได้มากกว่าชนิดเคลือบผิว ซึ่งมีผลเฉพาะบริเวณใกล้ผิวยกเว้นตัวอย่าง W/C สูง ที่ชนิดเคลือบผิวช่วยเพิ่มกำลังรับแรงอัดได้ดีกว่า รวมทั้งการบ่มตัวอย่างสารก่อผลึกในน้ำต่อช่วยเพิ่มกำลังรับแรงอัดได้มากกว่าตัวอย่างควบคุม

5. ตัวอย่างสารก่อผลึกไม่พบโครงสร้างผลึกของสารประกอบทางเคมีใหม่ แต่ค่า Peak ของ CaCO_3 และ Ettringite โดยเฉพาะ C-A-S-H ปรากฏขึ้นเด่นชัดมากกว่าตัวอย่างควบคุม อีกทั้งการใช้สารก่อผลึกชนิดผสมเพิ่มและชนิดเคลือบผิวไม่พบ

ความแตกต่างของโครงสร้างที่เกิดขึ้นในตัวอย่างในแต่ละ W/C อย่างไรก็ตามในตัวอย่าง W/C ต่ำถึงปานกลาง มีค่า Peak ของ C-S-H ชัดเจนมากกว่าตัวอย่างที่ W/C สูง

ข้อมูลเหล่านี้สนับสนุนการปรับปรุงลักษณะเฉพาะให้ดีขึ้นจากการใช้สารก่อผลึกทั้ง 2 ชนิด ในการบ่มระยะสั้นและระยะยาว และยังส่งผลดีต่อสมบัติการทึบน้ำของตัวอย่างโดยมีผลแตกต่างกันตาม W/C และชนิดของสารก่อผลึก

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตรมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ สนับสนุนทุนในการศึกษาวิจัย

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] D. Ribeiro, A. Sales, C. Sousa, F. Almeida, M. Cunha, M. Lourenço, and P. Helene, Corrosion in concrete structures: Theory, control and analysis methods, 1st Ed., Rio de Janeiro, Brazil, 2014.
- [2] Subcommittee on concrete and materials, Durability of Concrete, Engineering Institute of Thailand under His Majesty the King's Patronage (EIT), 2000. (in Thai)
- [3] EN 1990, Eurocode-Basis of structural design, Brussels, 2002.
- [4] E. P. Kearsley, and P. J. Wainwright, Porosity and permeability of foamed concrete, Cement and Concrete Research, 2001, 31(5), 805-812.

- [5] A.M. Neville, Properties of concrete, Longman, London, 1995.
- [6] B. Kerkhoff, Effects of substances on concrete and guide to protective treatments: Portland cement association, IL, 2007.
- [7] A.A. Almusallam, F.M. Khan, S.U. Dulaijan, and O.S.B. Al-Amoudi, Effectiveness of surface coatings in improving concrete durability, Cement and Concrete Composites, 2003, 25(4), 473-481.
- [8] M. Safiuddin, Concrete damage in field conditions and protective sealer and coating systems, Coatings, 2017, 7(7), 90.
- [9] ACI 212.3R-10, Report on Chemical Admixtures, American Concrete Institute, MI, 2010.
- [10] BS EN 934-2:2009, Admixtures For Concrete, Mortar and Grout-Part 2: Concrete Admixtures; Definitions, Requirements, Conformity, Marking and Labelling, British Standards Institution, London, 2009.
- [11] V.G. Cappellesso, N. dos Santos Petry, D. C.C. Dal Molin, and A.B. Masuero, Use of crystalline waterproofing to reduce capillary porosity in concrete, Building Pathology and Rehabilitation, 2016, 1, 9.
- [12] D. Yodmalai, R. Sahamitmongkol and S. Tangtermsirikul, The use of crystalline materials to improve the durability of concrete, TCA e-magazine, 2010, 9. (in Thai)
- [13] S. Lim, and S. Kawashima, Mechanisms underlying crystalline waterproofing through microstructural and phase characterization, Journal of Materials in Civil Engineering, 2019, 31(9), 04019175.
- [14] N. Khomwan, S. Sujjavanich and T. Kheaw-on, Effect of crystalline waterproofing materials on corrosion potential of steel in concrete, Innovative Infrastructure Solutions, 2024, 9, 12.
- [15] M.J. Al-Kheetan, M.M. Rahman, and D.A. Chamberlain, Development of hydrophobic concrete by adding dual-crystalline admixture at mixing stage, Structural Concrete, 2018, 19(5), 1504-1511.
- [16] M.M. Rahman and D.A. Chamberlain, Application of crystallising hydrophobic mineral and curing agent to fresh concrete, Construction and Building Materials, 2016, 127, 945-949.
- [17] M.M. Rahman and D.A. Chamberlain, Performance of crystalline hydrophobic in wet concrete protection, Journal of Materials in Civil Engineering, 2017, 29(6), 0401700.

- [18] M.J. Al-Kheetan, M.M. Rahman and D.A. Chamberlain, Optimum mix design for internally integrated concrete with crystallizing protective material, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2019, 31(7), 04019101.
- [19] ASTM C109/C109M-20 ASTM, Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50 mm] Cube Specimens), ASTM International, PA, 2002.
- [20] ASTM C642-97, Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete, ASTM International, PA 1997.
- [21] RILEM Test No. II.4, Systems and Structures, Water Absorption Under Low Pressure (Pipe Method), European organization, Paris 1980.
- [22] Z. D. Rong, W. Sun, H. J. Xiao and W. Wang, Effect of silica fume and fly ash on hydration and microstructure evolution of cement based composites at low water-binder ratios, *Construction and Building Materials*, 2014, 51, 446-450.
- [23] I. Soroka, C.H. Jaegermann and A. Bentur, Short-term steam-curing and concrete later-age strength, *Matériaux et Construction*, 1978, 11(2), 93-96.
- [24] T. Kheaw-on, N. Khomwan and S. Sujjavanich, The effect of crystalline waterproofing materials on accelerated corrosion of steel reinforcement in concrete, *International Journal of Civil Engineering*, 2021, 19, 699–716.
- [25] T.L. Weng and A. Cheng, Influence of curing environment on concrete with crystalline admixture, *Monatshefte für Chemie - Chemical Monthly*, 2014, 145(1), 195-200.
- [26] D. Yodmalai, Durability properties of concrete with crystalline materials, Thesis, Thammasat University, 2011.
- [27] T. Kheaw-on, N. Khomwan and S. Sujjavanich, The effect of crystalline coatings defects of steel-corrosion in reinforced concrete, *Journal of Thailand Concrete Association*, 2018, 6, (2), 49-57.
- [28] P. Azarsa, R. Gupta and A. Biparva, Inventive microstructural and durability investigation of cementitious composites involving crystalline waterproofing admixtures and portland limestone cement, *Materials*, 2020, 13(6), 1425.

- [29] B.-B Xiong, L. Gao, J.-G. Chen, X.-C. Lu, B. Tian, B.-F. Chen, and Y.-B. Li, Action mechanism for improving water impermeability of concrete surface based on deep penetrating sealer, *Construction and Building Materials*, 2022, 322, 126424.
- [30] A. Gojević, V. Ducman, I.N. Grubeša, A. Baričević and I.B. Pečur, The effect of crystalline waterproofing admixtures on the self-Healing and permeability of concrete, 2021, *Materials*, 14(8), 1860.
- [31] L.W. Teng, R. Huang, J. Chen, A. Cheng, and H.M. Hsu, A study of crystalline mechanism of penetration sealer materials, *Materials*, 2014, 7(1), 399-412.
- [32] Y. Zhang, Q. Wang, J. Chen, J. Tang, H. Zhou, W. Zhou, X. Chang and Y. Cheng, Preparation and performance study of active chemicals in cementitious capillary crystalline waterproofing materials, *Case Studies in Construction Materials*, 2024, 20, e02874.
- [33] G. Li, X. Huang, J. Lin, X. Jiang and X. Zhang, Activated chemicals of cementitious capillary crystalline waterproofing materials and their self-healing behaviour, *Construction and Building Materials*, 2019, 200, 36-45.
- [34] Y. Zhang, L. Zuo, J. Yang, X. Cai, Y. Zhao and X. Zeng, Effect of cementitious capillary crystalline waterproofing coating on the gas permeability of mortar, *Structural Concrete*, 2019, 20(5), 1763-1770.