การแพร่กระจายของคลอไรด์ในสภาวะไม่คงตัวของคอนกรีตชนิดอัดแน่นได้ด้วยตัวเองภายใต้การบ่มเร่งช่วงต้นด้วยพลังงานไมโครเวฟในสภาวะความดันต่ำ

Non-steady-state Chloride Migration of Self-compacting Concrete under Early-stage Accelerated-microwave Curing at Low Pressure Condition

ปัณณภัสร์ เฮงเติม[1], สมศักดิ์ วงษ์ประดับไชย[2], ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช[2], ณิชาภัส สิทธิศุข[1] และ ณัฏฐ์ มากุล[1,*]

[1]คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนคร กรุงเทพมหานคร
[2]ศูนย์รวมผู้เชี่ยวชาญทางด้านการประยุกต์ใช้พลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในงานวิศวกรรม ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ (ศูนย์รังสิต) จ.ปทุมธานี
**Corresponding author; E-mail address: natt@pnru.ac.th*

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการแพร่กระจายของคลอไรด์ในสภาวะไม่คงตัว (Non-steady-state chloride migration) ของคอนกรีตชนิดอัดแน่นได้ด้วยตัวเอง (Self-compacting concrete: SCC) ภายใต้การบ่มเร่งช่วงต้นด้วยพลังงานไมโครเวฟในสภาวะความดันต่ำ โดยกำหนดตัวแปรของการศึกษาประกอบด้วย สัดส่วนผสมของคอนกรีตชนิดอัดแน่นได้ด้วยตัวเอง ได้แก่ อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ (w/c) เท่ากับ 0.25, 0.35 และ 0.45 ปริมาณปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกเท่ากับ 450 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร (kg/m^3) และใช้หินบดธรรมชาติ (Natural Coarse Aggregate: NCA) และเศษคอนกรีตบด (Recycled Concrete Aggregate: RCA) เป็นมวลรวมหยาบ โดยเงื่อนไขของการบ่มเร่งของคอนกรีตด้วยพลังงานไมโครเวฟประกอบด้วย ระยะเวลาหลังการผสมคอนกรีตก่อนทำการบ่ม (Delay time) เท่ากับ 30 นาที คลื่นไมโครเวฟมีกำลัง (Power) เท่ากับ 800 วัตต์ (watt) และทำการบ่ม (Application time) ภายใต้สภาวะความดันภายในคาวิตี้ (Cavity) เท่ากับ 70.0 กิโลปาสคาล (kPa) (ความดันบรรยากาศปกติเท่ากับ 101.325 กิโลปาสคาล (kPa)) เป็นเวลา 10 นาที ต่อเนื่อง เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ น้ำหนัก และสมบัติไดอิเล็กทริก (Dielectric properties) ทั้งก่อนและหลังทำการบ่มด้วยพลังงานไมโครเวฟ จากนั้นทำการทดสอบความลึกของการแพร่กระจายของคลอไรด์ (Chloride migration) และคำนวณสัมประสิทธิ์แพร่กระจายของคลอไรด์ (Chloride migration coefficient: D_{nssm}) เมื่อคอนกรีตมีอายุที่ 1, 3 และ 7 วัน หลังทำการบ่ม ตามลำดับ จากการศึกษาพบว่า การใช้พลังงานไมโครเวฟในสภาวะความดันต่ำช่วยเพิ่มอัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นและอุณหภูมิในคอนกรีตส่งผลให้โครงสร้างภายในคอนกรีตมีความหนาแน่นเพิ่มขึ้นทำให้ค่าการแพร่กระจายของคลอไรด์ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ นอกจากนั้นการใช้เศษคอนกรีตบดช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการแพร่กระจายของคลอไรด์ได้ด้วย ถึงแม้ว่ามวลรวมดังกล่าวมีความพรุนที่สูง ดังนั้นกระบวนการบ่มคอนกรีตโดยใช้ไมโครเวฟและสภาวะความดันต่ำนี้เป็นทางเลือกหนึ่งที่ช่วยลดเวลาการผลิตของคอนกรีตที่ประหยัดพลังงานและเหมาะอย่างยิ่งต่อการประยุกต์ใช้ในการก่อสร้างคอนกรีตสมัยใหม่

คำสำคัญ: การแพร่กระจายของคลอไรด์ในสภาวะไม่คงตัว, คอนกรีตชนิดอัดแน่นได้ด้วยตัวเอง, การบ่มด้วยพลังงานไมโครเวฟในช่วงต้น, สภาวะความดันต่ำ

Abstract

This research studies the non-steady-state chloride migration of self-compacting concrete (SCC) under early curing with microwave energy at low pressure. The study variables consist of self-compacting concrete mix proportions as water-to-cement ratios (w/c) of 0.25, 0.35, and 0.45, hydraulic cement volume of 450 kg/m^3, and natural coarse aggregate (NCA) and recycled concrete aggregate (RCA) as coarse aggregates. The conditions of microwave curing of concrete consist of: The time after mixing the concrete before curing (Delay time) was 30 min, the microwave power was 800 watts, and the curing (Application time) was under the condition of cavity pressure of 70.0 kilopascals (kPa) (Atmospheric pressure is 101.325 kilopascals (kPa)) for 10 minutes continuously to study the change of temperature, weight, and dielectric properties before and after curing with microwave energy. Then, the depth of chloride migration was tested, and the chloride migration coefficient (D_{nssm}) was calculated when the concrete was 1, 3, and 7 days old after curing, respectively. The study found that using microwave energy under low pressure increased the hydration reaction rate and temperature in the concrete, resulting in an increased density of the internal structure of the concrete, significantly reducing the chloride diffusion value. In addition,

using crushed concrete waste also increased the efficiency of chloride diffusion, even though the aggregate had high porosity. Therefore, this concrete curing process using microwave and low pressure is an alternative to reduce the production time of concrete, save energy, and is very suitable for application in modern concrete construction.

Keywords: Non-steady-state chloride migration, Self-compacting concrete, Early-stage accelerated-microwave curing, Low pressure condition

1. บทนำ

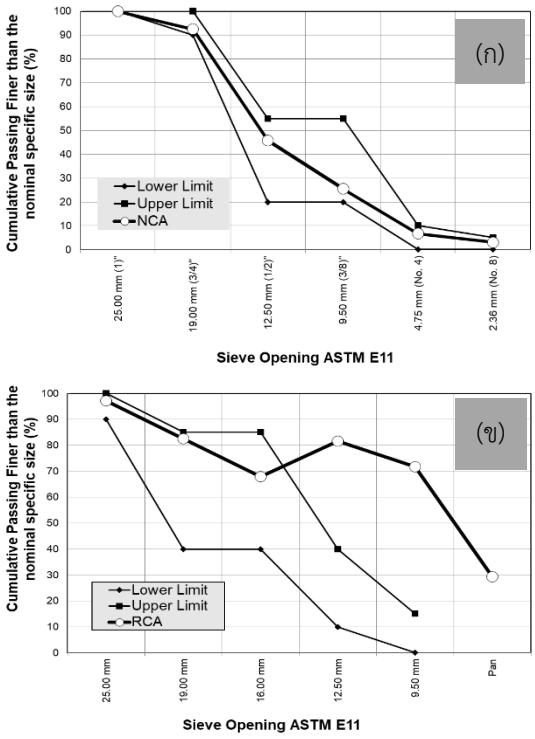
ในปัจจุบันงานก่อสร้างด้วยคอนกรีตชนิดอัดแน่นได้ด้วยตัวเอง (Self-Compacting Concrete: SCC) ได้รับความนิยมเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด เนื่องจากสามารถไหลเข้าแบบได้โดยไม่ต้องใช้เครื่องสั่นหรือแรงอัดเพิ่มเติม ช่วยลดการเกิดโพรงอากาศและปัญหาการแยกตัวของส่วนผสมทำให้ได้โครงสร้างคอนกรีตที่มีความสม่ำเสมอและผิวงานที่เรียบร้อยโดยใช้แรงงานน้อยลง แต่อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาถึงโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กในสภาพแวดล้อมที่มีคลอไรด์ เช่น พื้นที่ชายฝั่งทะเลหรือบริเวณที่มีการใช้สารเคมีกำจัดน้ำแข็ง โอกาสของการกัดกร่อนเหล็กเสริมจะสูงขึ้นอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ [1-3] หากคลอไรด์แพร่เข้าสู่เหล็กเสริมจนเกิดสนิมและขยายตัวในระยะยาว ย่อมนำไปสู่การแตกร้าวของคอนกรีตและลดทอนกำลังรับน้ำหนักของโครงสร้าง ดังนั้น ความทนทาน (Durability) ของคอนกรีตเสริมเหล็กจึงเป็นประเด็นที่นักวิจัยและวิศวกรต้องให้ความสำคัญเป็นอย่างยิ่ง ดังนั้นเพื่อเสริมสร้างความทนทานของคอนกรีตเสริมเหล็กให้ต้านทานการแพร่กระจายของคลอไรด์ตั้งแต่ช่วงต้น ขั้นตอนสำคัญอย่างหนึ่งคือ การบ่ม (Curing) ซึ่งมีบทบาทกำหนดโครงสร้างภายในของคอนกรีตให้หนาแน่น แต่เนื่องด้วยการบ่มแบบดั้งเดิมอาจใช้เวลานานและสิ้นเปลืองทรัพยากร ดังนั้นในทางกลับกันเทคโนโลยีการบ่มด้วยไมโครเวฟควบคู่กับสภาวะความดันต่ำ (Microwave-assisted low-pressure processing) ได้ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อลดระยะเวลาการบ่มและเร่งอัตราการสร้างผลึกไฮเดรต (Hydration products) ให้เกิดขึ้นได้รวดเร็ว โดย Makul (2016) [4] พบว่าการใช้ไมโครเวฟจะสร้างความร้อนเฉพาะจุดภายในเนื้อคอนกรีตช่วยกระตุ้นปฏิกิริยาไฮเดรชั่นให้ดำเนินไปอย่างมีประสิทธิภาพภายใต้สภาวะความดันต่ำทำให้ความชื้นส่วนเกินถูกขจัดออกเพียงบางส่วน จึงช่วยเสริมยกคุณภาพของคอนกรีตให้มีความสม่ำเสมอและมีสมบัติทางกลที่สูงกว่า ทั้งยังมีแนวโน้มที่จะต้านทานการแพร่กระจายและจากไอออนคลอไรด์ได้ดียิ่งขึ้น

แต่อย่างไรก็ดี ปัจจัยด้านสภาพแวดล้อมและพฤติกรรมของคลอไรด์ยังมีความซับซ้อนสูงในสภาวะไม่คงตัว (Non-steady-state chloride migration) ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงความชื้น อุณหภูมิ และความเข้มข้นของคลอไรด์อยู่ตลอดเวลา Sua-iam และ Makul (2024) [5] พบว่าการออกแบบและปรับปรุงโครงสร้างภายในของคอนกรีตชนิดอัดแน่นได้ด้วยตัวเองตั้งแต่ช่วงต้นสามารถเพิ่มความทนทานโดยรวมของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กได้อย่างมีนัยสำคัญ เมื่อผนวกกับเทคโนโลยีการบ่มเร่งด้วยไมโครเวฟและความดันต่ำแล้วซึ่งคาดการณ์ได้ว่าจะช่วยลดอัตราการแพร่กระจายของคลอไรด์ได้ดีขึ้น อีกทั้งยังเพิ่มความแข็งแรงและยืดอายุการใช้งานโครงสร้างในระยะยาวซึ่งลดค่าใช้จ่ายทั้งในด้านการซ่อมแซมและบำรุงรักษา [6,7] จึงนับเป็นแนวทางเลือกอีกทางหนึ่งที่ช่วยให้โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กมีคุณภาพและความยั่งยืนในระดับสูงจึงเป็นที่มาของงานวิจัยนี้ที่มุ่งศึกษาการแพร่กระจายของคลอไรด์ในสภาวะไม่คงตัว (Non-steady-state chloride migration) ของคอนกรีตชนิดอัดแน่นได้ด้วยตัวเองภายใต้การบ่มเร่งช่วงต้นด้วยพลังงานไมโครเวฟในสภาวะความดันต่ำ

2. วิธีการศึกษา

2.1 วัสดุ

ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก (Hydraulic cement) มีองค์ประกอบเคมีและสมบัติทางกายภาพเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C1157 [8] มวลรวมละเอียด (Fine aggregate) ใช้เป็นทรายแม่น้ำ (River sand) ที่มีสมบัติเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C33 [9] โดยมีค่าโมดูลัสความละเอียด (Fineness modulus: FM) เท่ากับ 2.32 ส่วนมวลรวมหยาบ (Coarse aggregate) ใช้มี 2 ประเภทคือ หินบดธรรมชาติ (Natural Coarse Aggregate: NCA) และเศษคอนกรีตบด (Recycled Concrete Aggregate: RCA) ซึ่งผ่านการบดและมีขนาดระบุใหญ่สุด (Nominal maximum size) เท่ากับ 25 มม. และมีการกระจายขนาดคละ (Gradation) แสดงในรูปที่ 1 และสารลดน้ำพิเศษชนิดลดน้ำอย่างแรงประเภท G ตามมาตรฐาน ASTM C494 [10] ที่มีค่าความถ่วงจำเพาะ (SG) อยู่ที่ 1.08 และมีความเป็นกรดด่าง (pH) อยู่ที่ 7.14



รูปที่ 1 การกระจายขนาดคละของ (ก) NCA และ (ข) RCA

จากรูปที่ 1 ที่แสดงขนาดคละของ RCA ไม่สามารถควบคุมให้ตรงตามมาตรฐานได้ซึ่งเป็นผลมาจากคอนกรีตเศษคอนกรีตมีสมบัติที่มีความหลากหลายได้แก่เศษคอนกรีตที่มีอายุแตกต่างกัน ความหนาแน่น และมีเนื้อมอร์ต้าร์เก่าที่เกาะผิวอยู่ (Adhered mortar) ซึ่งจะแตกเป็นผงระหว่างการบดทำให้ส่วนละเอียดสูงกว่าเกณฑ์ที่กำหนด รูปทรงที่ส่วนหยาบก่อให้เกิดการแตกซ้ำขณะทำการร่อนทำให้แม้ปรับกราฟคละได้ก็ยังไม่เข้าค่าเกณฑ์การกระจายขนาดคละตามมาตรฐาน ASTM C33 [9] ที่กำหนดไว้สำหรับหินธรรมชาติ (NCA) เป็นหลัก ดังนั้นการควบคุมให้การกระจายขนาดคละของ RCA ให้อยู่ในช่วงที่มาตรฐานกำหนดจึงเป็นการเพิ่มขั้นตอนบดและการร่อนแยกซึ่งหมายถึงการสิ้นเปลืองพลังงานและต้นทุน ดังนั้นแนวการวิจัยนี้จึงยอมให้มีการขยายช่วงขนาดคละกว้างให้มีขึ้นแล้วชดเชยด้วยเทคนิคการออกแบบส่วนผสมคอนกรีตร่วมกับการใช้สารลดน้ำพิเศษแทน

2.2 สัดส่วนผสมของคอนกรีตชนิดอัดแน่นได้ด้วยตัวเอง

สัดส่วนผสมของคอนกรีตชนิดอัดแน่นได้ด้วยตัวเอง ที่ใช้แสดงในตารางที่ 1 โดยควบคุมปริมาณปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกเท่ากับ 450 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร โดยควบคุมอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ (w/c) เท่ากับ 0.25, 0.35 และ 0.45 และอัตราส่วนสารลดน้ำพิเศษที่ชนิดลดน้ำอย่างแรงประเภท G เท่ากับร้อยละ 0.60 โดยน้ำหนักปูนซีเมนต์

ตารางที่ 1 สัดส่วนผสมคอนกรีตชนิดอัดแน่นได้ด้วยตัวเอง

SCC	วัตถุดิบในหน่วยกิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร				น้ำยาลดน้ำ
	ปูนซีเมนต์	น้ำ	ทราย	หิน	(ร้อยละ)
NCA0.25[*]	450	112.5	975	739	0.60
NCA0.35	450	157.5	975	739	0.60
NCA0.45	450	202.5	975	739	0.60
RCA0.25[**]	450	112.5	975	739	0.60
RCA0.35	450	157.5	975	739	0.60
RCA0.45	450	202.5	975	739	0.60

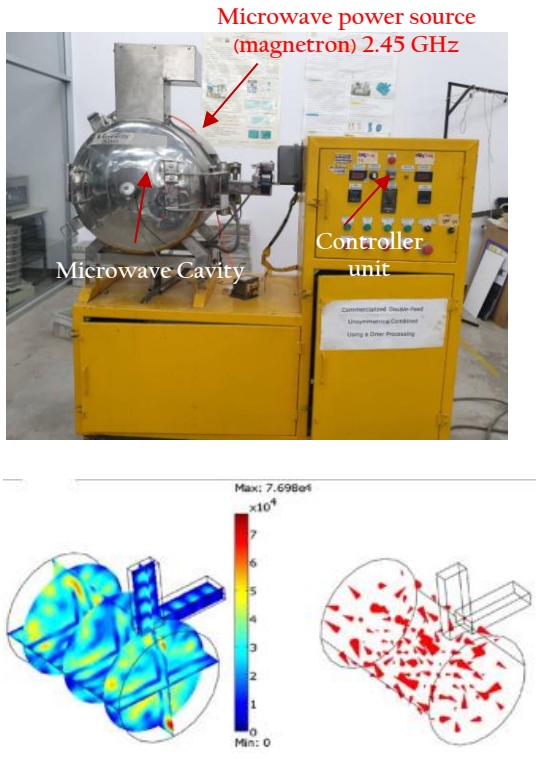
หมายเหตุ

[*] NCA0.25 หมายถึงคอนกรีตชนิดไหลอัดแน่นได้ด้วยตัวเองควบคุมผสมหินธรรมชาติ (NCA) และปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกซีเมนต์ ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ (w/c) เท่ากับ 0.25 (NCA0.35 มี w/c เท่ากับ 0.35 และ NCA0.45 มี w/c เท่ากับ 0.45)

[**] RCA0.25 หมายถึงคอนกรีตชนิดไหลอัดแน่นได้ด้วยตัวเองผสมเศษคอนกรีตบด (RCA) และปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกซีเมนต์ ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ (w/c) เท่ากับ 0.25 (RCA0.35 มี w/c เท่ากับ 0.35 และ RCA/0.45 มี w/c เท่ากับ 0.45)

2.3 ระบบไมโครเวฟกำลังต่ำชนิดป้อนคลื่นหลายตำแหน่งร่วมกับระบบสุญญากาศ

ระบบไมโครเวฟกำลังต่ำชนิดป้อนคลื่นหลายตำแหน่งร่วมกับระบบสุญญากาศมีคาวิตี้ (Cavity) แบบมัลติโหมด (Microwave-multimode cavity) หลอมรวมอยู่ในโครงสร้างเดียวกันเพื่อประหยัดพื้นที่เพื่อตัดลดการเดินท่อเชื่อมต่อหลายจุด และยังเสริมประสิทธิภาพในการกระจายคลื่นไมโครเวฟให้ทั่วถึงกว่าวิธีดั้งเดิม ในส่วนของแหล่งกำเนิดคลื่น ระบบนี้อาศัยแมกนีตรอนชนิดกำลังต่ำหลายตัว (Low-power magnetrons) ที่จัดวางตำแหน่งป้อนคลื่นอย่างไม่สมมาตร (Unsymmetrical feeds) เพื่อเลี่ยงการก่อตัวของคลื่นนิ่ง (Standing wave) หรือการหักล้างคลื่น ซึ่งสาเหตุของความร้อนเฉพาะจุด (Hot spot) และภายในคาวิตี้ยังติดตั้งถังหมุน (Rotary drum) ทำจากโพลิโพรพิลีนซึ่งไม่ดูดซับไมโครเวฟจึงไม่ดูดซับกำลังของคลื่น และด้วยการหมุนตัวถัง 360 องศา รวมถึงการเจาะรูรอบด้านเพื่อระบายความชื้น อีกทั้งการปรับความดันในระบบให้ลดลงถึงระดับ 1.33–26.66 kPa (10–200 Torr) ส่งผลให้อุณหภูมิจุดเดือดภายในวัสดุลดลงต่ำกว่าการให้ความร้อนในบรรยากาศปกติและสามารถดำเนินการบ่มที่อุณหภูมิต่ำกว่าระดับ 100 องศาเซลเซียส ระบบนี้ยังติดตั้งเซนเซอร์และเครื่องมือวัดครบวงจรตั้งแต่เกจวัดความดัน (Pressure gauge) เทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple) สายไฟเบอร์ออปติก (Optical fiber sensor) โหลดเซลล์ (Load cell) สำหรับประมวลผลปริมาณน้ำหนักของวัสดุ ฯลฯ ทั้งหมดนี้เชื่อมเข้ากับระบบควบคุมแบบอัตโนมัติ (Fully automated microwave system) ที่สามารถสั่งการ เปิด-ปิด หรือปรับค่าการทำงานได้เรียลไทม์ (Real time) ทั้งในแง่ของกำลังไมโครเวฟที่ป้อนความดันและอุณหภูมิดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 ระบบไมโครเวฟกำลังต่ำชนิดป้อนคลื่นหลายตำแหน่งร่วมกับระบบสุญญากาศในศูนย์รวมผู้เชี่ยวชาญทางด้านการประยุกต์ใช้พลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในงานวิศวกรรม ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ (ศูนย์รังสิต)

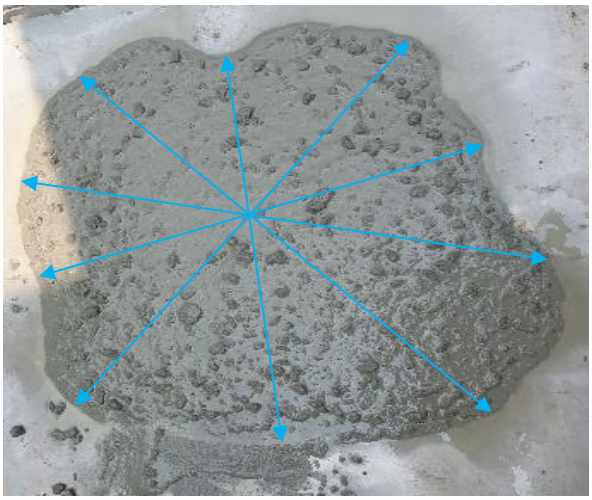
2.4 การเตรียมตัวอย่างและทดสอบสมบัติของคอนกรีต

การเตรียมตัวอย่างคอนกรีต เริ่มจากการผสมวัตถุดิบตั้งต้นตามสัดส่วนที่ทำการออกแบบในโม่ หลังจากผสมเสร็จจึงทำการทดสอบค่าการยุบตัวแบบไหลแผ่ (Flow test) ตามมาตรฐาน ASTM C1611/C1611M-14 [11] ดังแสดงในรูปที่ 3 และทำการเก็บตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 9.0 ซม. สูงเท่ากับ 7.0 ซม. จำนวน 6 ตัวอย่าง พร้อมกัน และตั้งทิ้งไว้ในอุณหภูมิห้อง (Delay time) เป็นเวลา 30 นาที หลังจากนั้นนำตัวอย่างใส่ในคาวิตี้ (Cavity) และปิดฝาหน้าแล้วจึงทำการปรับความดันภายในคาวิตี้ด้วยปั๊มสุญญากาศลงเหลืออยู่ที่ระดับ 70.0 กิโลปาสคาล (kPa) แล้วเปิดการทำงานของแมกนีตรอมที่คลื่นไมโครเวฟที่กำลังเท่ากับ 800 วัตต์ (Watt) เพื่อทำการบ่มตัวอย่างเป็นเวลา 10 นาที ต่อเนื่องเมื่อทำการปิดการทำงานของแมกนีตรอนจึงปรับวาล์วความดันภายในให้ความดันภายในคาวิตี้เพิ่มสูงขึ้นมาอยู่ที่ความดันบรรยากาศ (101.3 กิโลปาสคาล (kPa)) ด้วยอัตราการเพิ่มขึ้นของความดันเท่ากับ 10 กิโลปาสคาล ต่อนาที หลังจากนั้นจึงเปิดฝาหน้าของคาวิตี้จึงทำการวัดอุณหภูมิ น้ำหนัก และค่าไดอิเล็กทริก (Dielectric properties) ทันที แล้วจึงทำการถอดตัวอย่างออกจากแบบหล่อแล้วห่อด้วยพลาสติกใสจนตัวอย่างมีอายุครบ 1, 3 และ 7 วัน หลังการผสม จึงนำมาประกอบเข้าแบบเพื่อทำการทดสอบการแพร่กระจายของคลอไรด์ (Chloride migration) ด้วยแบบหล่อซึ่งทำด้วยพอลิไวนิลคลอไรด์ (Polyvinyl chloride (PVC)) ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 9.0 ซม. สูงเท่ากับ 15.0 ซม. จำนวน 6 ตัวอย่างต่อ 1 อายุทดสอบ (รูปที่ 4)

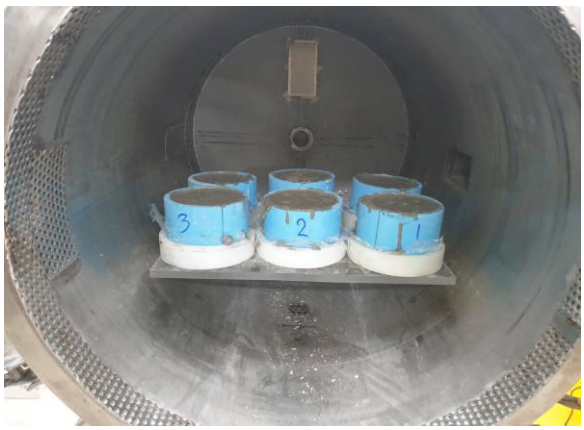
สำหรับขั้นตอนการทดสอบการแพร่กระจายของคลอไรด์ในสภาวะไม่คงตัว (Non-steady-state chloride migration) เป็นไปตามมาตรฐาน Nordic standard test NT BUILD 492 [12] (รูปที่ 5) โดยทดสอบต่อเนื่องเป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง แล้วจึงแกะออกจากแบบมาทำการผึ่งในห้องที่ควบคุมอุณหภูมิเท่ากับ 25 ± 2 องศาเซลเซียส (°C) ความชื้นสัมพัทธ์กับร้อยละ 60 ± 5 เป็นเวลา 3 ชั่วโมง จากนั้นทำการกดผ่าซีกตัวอย่างออกเป็นสองซีกและทำการพ่นด้วยสารละลายซิลเวอร์ไนเตรต (Silver nitrate: $AgNO_3$) ที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 1.0 โมลาร์ (Molar) ทิ้งไว้เป็นเวลา 15 นาที แล้วจึงวัดระยะความลึก (x_d) ที่ความละเอียด 0.1 มม. เป็นจำนวน 5 ค่า แล้วนำมาเฉลี่ยเพื่อคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การแพร่กระจายของคลอไรด์จากระยะความที่คลอไรด์ดังแสดงในรูปที่ 6 จากสมการที่ (1)

$$D_{nssm} = \frac{00239(273.15+T)L}{(U-2)t}\left(X_d - 0.0238\sqrt{\frac{(273.15+T)LX_d}{U-2}}\right) \quad ...(1)$$

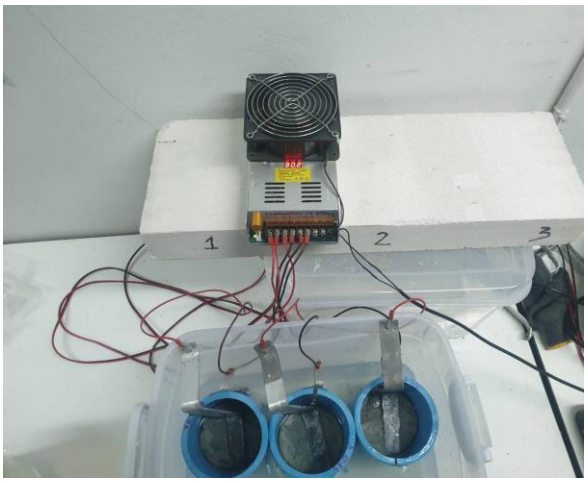
โดยที่ D_{nssm} คือ สัมประสิทธิ์ของการแทรกแพร่กระจายในสภาวะไม่คงตัว (Non-steady-state migration coefficient) (× 10^{-12} m^2/s); U คือ แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงสัมบูรณ์ (Absolute applied voltage (V)) ในการทดลองนี้ใช้ที่ระดับ 30.2 โวลล์ (Volts) ตามกระแสและความดันที่วัดได้เมื่อทำการสอบเทียบค่าความต้านทานของตัวอย่างคอนกรีต T คือ อุณหภูมิของสารละลายโดยเฉลี่ย (Average solution temperatures) ในหน่วยองศาเซลเซียส (°C) L คือความหนาของตัวอย่างคอนกรีต (Specimen thickness) หน่วยเป็น มม. x_d คือค่าเฉลี่ยของความลึกของการแพร่กระจาย (Average penetration depth) หน่วยเป็น มม. และ t คือ เวลาในป้อนแรงดันไฟฟ้า หน่วยเป็นชั่วโมง



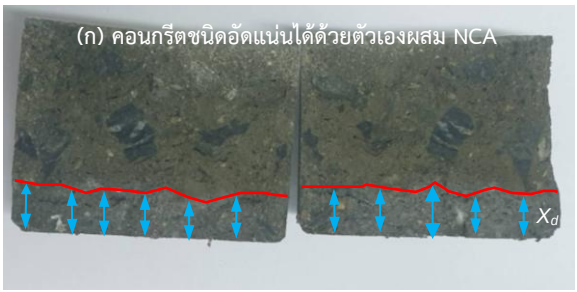
รูปที่ 3 การทดสอบค่าการไหลแผ่ของคอนกรีตตามมาตรฐาน ASTM C1611/C1611M-14 [11]



รูปที่ 4 การบ่มตัวอย่างด้วยระบบไมโครเวฟร่วมกับสุญญากาศ



รูปที่ 5 การทดสอบการแพร่กระจายของคลอไรด์เป็นเวลาต่อเนื่อง 24 ชั่วโมง



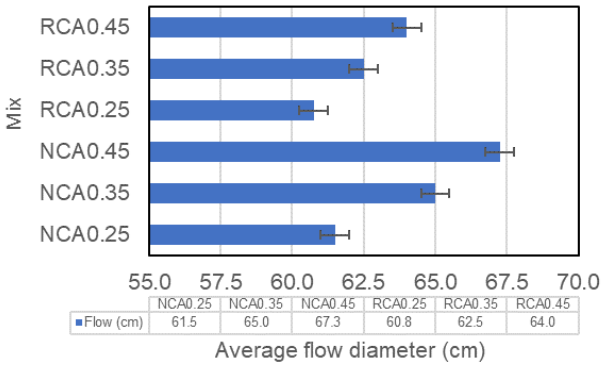
รูปที่ 6 การแพร่กระจายของคลอไรด์ของคอนกรีต (ก) คอนกรีตชนิดอัดแน่นได้ด้วยตัวเองผสม NCA และ (ข) คอนกรีตชนิดอัดแน่นได้ด้วยตัวเองผสม RCA

3. ผลการทดสอบและวิเคราะห์ผล

3.1 สมบัติพื้นฐานของคอนกรีตชนิดอัดแน่นได้ด้วยตัวเอง

จากรูปที่ 7 เมื่อเพิ่มอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์มีผลทำให้ค่าการไหลแผ่ (Slump flow) จะสูงขึ้นอย่างชัดเจน เนื่องจากมีปริมาณน้ำมากช่วยลดความหนืดของซีเมนต์เพสต์และทำให้อนุภาคมวลรวมสามารถกระจายตัวภายในเนื้อคอนกรีตได้ดีขึ้นซึ่งเห็นได้ชัดว่าคอนกรีต NCA0.45 มีค่าการไหลแผ่สูงกว่า NCA0.35 และ NCA0.25 เช่นเดียวกันกับกลุ่ม RCA นอกจากนั้นการที่อัตราส่วน w/c สูง ยังทำให้ระยะเวลาที่มวลรวมและเพสต์เคลื่อนที่ภายใต้แรงโน้มถ่วงนานขึ้นจึงส่งผลให้คอนกรีตมีระยะไหลมากขึ้น ทั้งนี้อัตราส่วนน้ำที่มากเกินไปส่งผลต่อการแยกตัวและผิวหน้าคอนกรีตที่ไม่สม่ำเสมอ

สำหรับอิทธิพลของชนิดมวลรวมหยาบ (NCA และ RCA) พบว่าคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหินธรรมชาติ (NCA) มีค่าการยุบตัวแบบไหลแผ่สูงกว่าคอนกรีตที่ใช้เศษคอนกรีตบด (RCA) ที่อัตราส่วน w/c เดียวกันอย่างต่อเนื่อง เหตุผลสำคัญคือ เนื่องจากอนุภาค RCA มีพื้นผิวที่หยาบและมีความพรุนมากกว่าจึงดูดซึมน้ำหรือซีเมนต์เพสต์บางส่วนเข้าสู่เนื้อภายในและลดน้ำอิสระที่เหลือสำหรับการไหลส่งผลให้เนื้อคอนกรีตเหนียวหนืดขึ้นทำให้ระยะไหลแผ่ (Flow) โดยรวมสั้นลง อีกทั้งเศษคอนกรีตบดอาจมีอนุภาคที่แตกต่างกันในรูปทรงและขนาดมากกว่าหินธรรมชาติ NCA จึงมีผลต่อการไหลจึงถูกขัดขวางได้มากขึ้นด้วยเช่นกัน



รูปที่ 7 ค่ายุบตัวแบบไหลแผ่ (Slump Flow) ของคอนกรีตผสมหินธรรมชาติ (NCA) และชนิดเศษคอนกรีตบด (RCA)

3.2 สมบัติกายภาพของคอนกรีตทั้งก่อนและหลังทำการบ่มเร่งด้วยพลังงานไมโครเวฟ

จากตารางที่ 2 แสดงสมบัติกายภาพของคอนกรีตแต่ละส่วนผสม ทั้งชนิดหินธรรมชาติ (NCA) และชนิดเศษคอนกรีตบด (RCA) ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ (w/c) ต่างกัน (0.25, 0.35, 0.45) ในช่วงเวลาไมโครเวฟ 10 นาที พบว่าคอนกรีตทุกสัดส่วนผสมมีการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิภายหลังบ่มด้วยไมโครเวฟในทุกตัวอย่างซึ่งบ่งชี้ถึงการดูดซับพลังงานคลื่นไมโครเวฟในเนื้อคอนกรีตและการเปลี่ยนรูปเป็นพลังงานความร้อนแบบเชิงมวล (Volumetric heating) โดยคลื่นไมโครเวฟจะแพร่กระจายไปทั่วคอนกรีตทำให้เกิดการเสียดสีระหว่างโมเลกุลน้ำหรือไอออนต่าง ๆ ภายในส่งผลให้เกิดความร้อนอย่างรวดเร็วและทั่วถึง แต่พฤติกรรมที่เพิ่มขึ้นคือ หากมีน้ำอยู่ในโพรงหรือรอยแตกขนาดเล็ก พลังงานไมโครเวฟจะทำให้โมเลกุลน้ำสั่นสะเทือนรุนแรงขึ้นจนเกิดความร้อนสูงเช่น RCA0.25 ที่มีอุณหภูมิสูงกว่ากลุ่มอื่นอย่างเห็นได้ชัดเจน เนื่องจากเศษคอนกรีตบด (RCA) มีพื้นผิวหยาบและดูดซึมน้ำมากกว่าหินธรรมชาติ (NCA) จึงอุ้มน้ำและปลดปล่อยความร้อนได้อย่างรวดเร็ว ซึ่งจะสอดคล้องกับการลดลงของน้ำหนักตัวอย่างซึ่งให้เห็นว่าในช่วงสั้น ๆ [13-15] ของการบ่มด้วยไมโครเวฟมีผลทำให้ความชื้นอิสระ (Free Water) หรือแม้แต่น้ำส่วนหนึ่งที่เคยถูกดูดซับในเนื้อมวลรวมได้ระเหยออกมาจากคอนกรีต และจากการที่ RCA มีพื้นผิวและรูพรุนมากกว่าหินธรรมชาติจึงมีแนวโน้มสูญเสียน้ำได้มากกว่าอย่างเห็นได้ชัดเจน ทั้งนี้หลักการสำคัญคือ อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นภายในเนื้อคอนกรีตจะเร่ง

กระบวนการระเหย โดยเฉพาะอย่างยิ่งในบริเวณ Interfacial Transition Zone (ITZ) ระหว่างซีเมนต์เพสต์กับมวลรวมทำให้น้ำระเหยได้ง่ายส่งผลให้มวลโดยรวมลดลงในช่วงการบ่มระยะสั้นเพียง 10 นาที แสดงว่าไมโครเวฟสามารถดึงน้ำออกได้รวดเร็วโดยไม่ต้องอาศัยอุณหภูมิภายนอกระดับสูง

ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (Dielectric constant) เป็นค่าที่แสดงถึงความสามารถของวัสดุ (ในที่นี้คือคอนกรีต) ในการกักเก็บประจุไฟฟ้า (Polarization capability) ซึ่งสัมพันธ์อย่างลึกซึ้งกับปริมาณน้ำอิสระ เนื้อโครงสร้างที่มีรูพรุน และสถานะของไอออนภายในคอนกรีต เช่น คอนกรีต NCA0.25 มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกลดลงจาก 14.2564 เป็น 11.6885 แสดงว่าคอนกรีตได้สูญเสียความสามารถในการกักเก็บหรือเกิดโพลาไรเซชั่น (Polarization) เนื่องจากปริมาณน้ำอิสระที่ระเหยออกหลังการบ่มไมโครเวฟ สำหรับคอนกรีตอื่นกลับมีค่าไดอิเล็กทริกสูงขึ้น เช่น NCA0.35 เพิ่มขึ้นจาก 16.6592 เป็น 19.7770 ซึ่งเป็นผลมาจากมีบางบริเวณในคอนกรีตที่อาจยังคงเหลือน้ำหรือมีการเคลื่อนย้ายความชื้นแบบกระจายกลับไปกลับมา (Re-distribution) ไปสะสมในระดับรูพรุนขนาดเล็กกว่าทำให้เกิดผลรวมของโมเลกุลน้ำหรือไอออนที่ยังเหลืออยู่มีการสะสมแบบเข้มข้นขึ้นในจุดใดจุดหนึ่ง ส่งผลให้ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูงขึ้นใน ในขณะที่สำหรับ RCA ที่มีโครงสร้างซับซ้อนมีผลต่อค่าไดอิเล็กทริกที่เกิดการเปลี่ยนแปลงในหลายทิศทางตามระดับการระเหยและการเคลื่อนตัวของความชื้นภายในคอนกรีต [16,17]

สำหรับค่าการสูญเสียพลังงานไฟฟ้า (Loss factor) ซึ่งหมายถึงความสามารถของวัสดุในการดูดกลืนพลังงานคลื่นไมโครเวฟแล้วแปรไปเป็นพลังงานความร้อน โดยการที่ค่าสัมบูรณ์แปรผันสูงหรือติดลบมากขึ้นเช่น NCA0.45 ลดลงจาก -2.9380 เป็น -9.2319 แสดงให้เห็นว่าเมื่อทำการบ่มคอนกรีตด้วยพลังงานไมโครเวฟ คอนกรีตในช่วงนั้นมีการดูดซับพลังงานอย่างเข้มข้นหรือมีจุดของความร้อนภายในเกิดขึ้นได้มากกว่าซึ่งเป็นผลมาจากยังคงมีน้ำแฝงอยู่ในโครงสร้างที่กระจายตัวเหมาะสม โดยยิ่งคอนกรีตสามารถดูดซับพลังงานได้ดีทำให้ยิ่งเกิดความร้อนภายในรวดเร็ว แต่อย่างไรก็ตาม หากความชื้นถูกทำให้ระเหยจนเหลือปริมาณน้อยเกินไป (เช่น RCA0.25 มีค่าลงลงจาก -4.7486 เป็น -0.7695) แสดงถึงไม่มีน้ำเพียงพอในการสั่นสะเทือนเพื่อนำไปสู่การดูดซับพลังงานไมโครเวฟทำให้ค่าดังกล่าวลดลงในเชิงสัมบูรณ์ [18]

สำหรับผลกระทบของชนิดมวลรวมหยาบ (NCA และ RCA) พบว่าคอนกรีตผสมเศษคอนกรีตบด (RCA) มีพื้นผิวพรุนและหยาบ ทำให้ขณะที่บ่มด้วยไมโครเวฟมีการดูดซับพลังงานและปลดปล่อยความร้อนได้อย่างกระจุกตัว ซึ่งมีผลต่ออัตราการระเหยน้ำได้ในปริมาณสูงมาก (น้ำหนักคอนกรีตลดลงหลังทำการบ่ม) ส่งผลให้ค่า ไดอิเล็กทริกเปลี่ยนแปลงรวดเร็ว โดยทั้งนี้การเพิ่มขึ้นหรือลดลงของค่าทั้งสองขึ้นอยู่กับการเคลื่อนย้ายความชื้นและไอออนในแต่ละจุดภายในเนื้อคอนกรีตซึ่งมีความแตกต่างไปจากคอนกรีตผสมมวลรวมหินธรรมชาติ (NCA) มีผิวค่อนข้างเรียบและพรุนต่ำจึงทำให้ไม่มีการสูญเสียน้ำมากเหมือน RCA และค่าไดอิเล็กทริกมีเปลี่ยนแปลงได้อย่างรวดเร็วซึ่งหมายถึงเมื่อทำการบ่มด้วยไมโครเวฟสำหรับคอนกรีตผสม RCA อาจต้องคำนึงถึงความไม่สม่ำเสมอของการดูดซับคลื่นหรือการเกิดความร้อนเฉพาะจุด (Hot spot) มากกว่า NCA หรือก็คือ RCA มีความซับซ้อนเชิงโครงสร้างมากกว่าจึงต้องอาศัยเทคนิคในการควบคุมพลังงานไมโครเวฟและระยะเวลาการบ่มให้สมดุลเพื่อให้ได้คุณภาพคอนกรีตที่ดีโดยไม่เกิดการแตกร้าวจากความร้อนเฉพาะจุดมากเกินไป

ตารางที่ 2 สมบัติกายภาพคอนกรีต

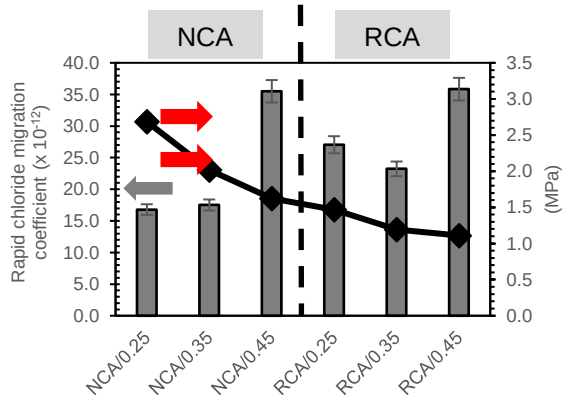
ชนิด	เวลา (10 นาที)	อุณหภูมิ (°C)	น้ำหนัก (กรัม)	Dielectric constant	Loss factor
NCA0.25	ก่อนบ่ม	26.07	1.690	14.2564	-4.6020
	หลังบ่ม	39.35	1.680	11.6885	-3.7459
NCA0.35	ก่อนบ่ม	27.35	1.650	16.6592	-3.7229
	หลังบ่ม	48.10	1.645	19.7770	-2.2054
NCA0.45	ก่อนบ่ม	28.17	1.705	25.8711	-2.9380
	หลังบ่ม	49.85	1.685	22.2866	-0.2319
RCA0.25	ก่อนบ่ม	23.48	1.665	16.2934	-4.7486
	หลังบ่ม	47.10	1.655	13.8424	-0.7695
RCA0.35	ก่อนบ่ม	25.87	1.690	30.0149	-9.1304
	หลังบ่ม	48.10	1.685	21.7660	-6.6721
RCA0.45	ก่อนบ่ม	25.77	1.675	27.6607	-9.5555
	หลังบ่ม	45.97	1.650	19.9983	-7.0099

3.3 ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่กระจายของคลอไรด์ด้วยวิธี Migration และกำลังดึงแบบผ่าซีก

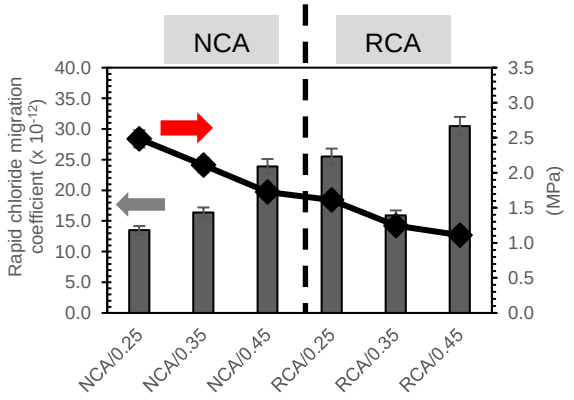
รูปที่ 8 แสดงผลการทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การแพร่กระจายของคลอไรด์ (Chloride Permeability Coefficient) ของคอนกรีตชนิดไหลอัดแน่นได้ด้วยตัวเอง (SCC) ที่ผสมมวลรวมหยาบธรรมชาติ (NCA) และเศษคอนกรีตบด (RCA) ภายใต้สัดส่วนอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ (w/c) เท่ากับ 0.25, 0.35 และ 0.45 ณ ช่วงอายุการบ่ม 1, 3 และ 7 วัน ตามลำดับ พบว่าเมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่กระจายของคลอไรด์มีค่าเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ในทุกช่วงอายุที่ทำการทดสอบ ซึ่งเป็นผลมาจากการมีน้ำปริมาณมากขึ้นในสัดส่วนผสมมีผลทำให้โครงสร้างภายในคอนกรีตมีความพรุน (Porosity) สูงขึ้นและช่องว่าง (Voids) มีแนวโน้มกว้างหรือเชื่อมต่อกัน (Connectivity) ได้ง่ายจึงทำให้คลอไรด์สามารถแพร่หรือแพร่กระจายเข้าไปในเนื้อคอนกรีตได้สะดวกยิ่งขึ้น

ในกรณีของคอนกรีตที่ใช้ RCA เป็นมวลรวมหยาบได้แสดงแนวโน้มที่แตกต่างออกไปกล่าวคือ เมื่อเพิ่มอัตราส่วน w/c จาก 0.25 เป็น 0.35 ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่กระจายของคลอไรด์กลับลดลงก่อน จากนั้นจึงเพิ่มขึ้นอีกครั้งเมื่อเพิ่มค่า w/c เป็น 0.45 โดยมีสาเหตุจากการที่มวลรวมหยาบ RCA ซึ่งมีพื้นผิวหยาบและพรุนสูงกว่าหินธรรมชาติส่งผลให้ในช่วง w/c ที่ไม่สูงมาก (0.35) ทำให้ระดับการอุ้มน้ำในเนื้อคอนกรีตกับซีเมนต์เพสต์ช่วยลดช่องทางการแพร่คลอไรด์ได้ในบางส่วน แต่เมื่อค่า w/c เพิ่มจนถึง 0.45 ปริมาณน้ำมากเพียงพอจะขยายช่องว่างภายในทำให้คลอไรด์แพร่กระจายได้รวดเร็วกว่าช่วง 0.25 ไปเป็น 0.35

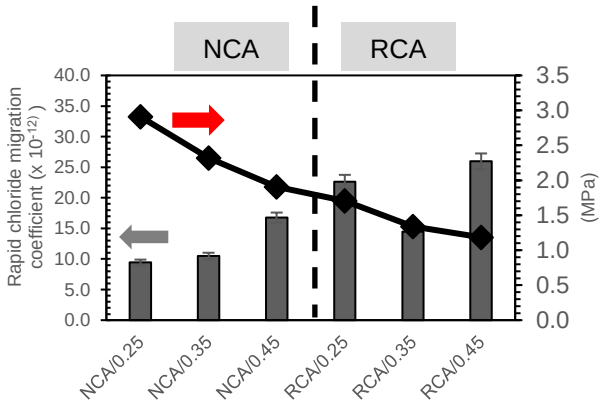
ในส่วนกำลังดึงแบบผ่าซีก (Splitting tensile strength) หลังจากการทดสอบการแทกซึมของคลอไรด์ พบว่าคอนกรีตทั้งชนิดที่ผสม NCA และ RCA กำลังดึงแบบผ่าซีก มีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญเมื่อตัวอย่างมี w/c สูงขึ้น โดยที่อายุ 3 วัน คอนกรีต NCA มีค่ากำลังดึงแบบผ่าซีก เท่ากับ 2.48, 2.11 และ 1.72 เมกะปาสคาล (MPa) ซึ่งลดลงร้อยละ 14.9 และ 30.6 เมื่อเปรียบเทียบกับค่า w/c เท่ากับ 0.35 และ 0.45 กับ 0.25 ตามลำดับ ส่วน RCA มีค่า 1.61, 1.24 และ 1.10 เมกะปาสคาล (MPa) ลดลงร้อยละ 22.9 และ 31.6 เมื่อเปรียบเทียบ 0.35 และ 0.45 กับ 0.25 เช่นกัน ในขณะที่อายุ 7 วัน มีพฤติกรรมในลักษณะเดียวกัน โดยคอนกรีตผสม NCA ลดลงร้อยละ 20.34 และ 34.48 สำหรับ w/c เท่ากับ 0.35 และ 0.45 ตามลำดับ ส่วนคอนกรีตผสม RCA ลดลงร้อยละ 21.7 และ 30.5 โดยค่า w/c ที่สูงขึ้นมีผลอย่างชัดเจนต่อความพรุนภายในโครงสร้างยิ่งมากทำให้คลอไรด์ซึมเข้าสู่ภายใน โดยเฉพาะที่บริเวณรอยต่อ (Interfacial transition zone: ITZ) ระหว่างมวลรวมกับซีเมนต์เพสต์ส่งผลอย่างชัดเจนต่อกำลังดึงแบบผ่าซีกที่ลดลง



(ก) ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่กระจายของคลอไรด์และกำลังดึงแบบผ่าซีกของคอนกรีตที่อายุ 1 วัน



(ข) ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่กระจายของคลอไรด์และกำลังดึงแบบผ่าซีกของคอนกรีตที่อายุ 3 วัน

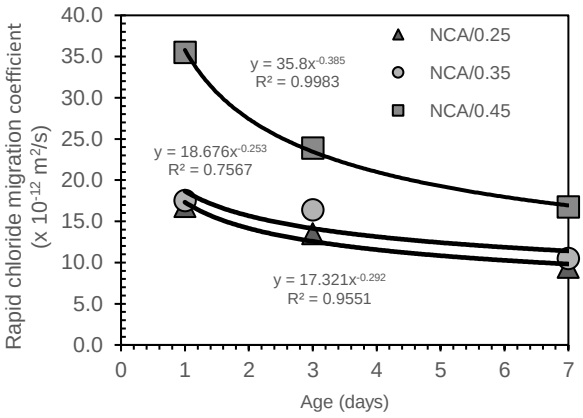


(ค) ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่กระจายของคลอไรด์และกำลังดึงแบบผ่าซีกของคอนกรีตที่อายุ 7 วัน

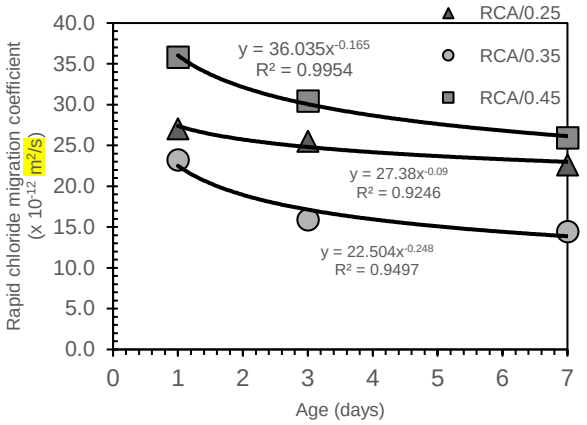
รูปที่ 8 ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่กระจายของคลอไรด์ด้วยวิธี Migration และกำลังดึงแบบผ่าซีก

สำหรับความสัมพันธ์ระหว่างการแพร่กระจายคลอไรด์กับกำลังดึงแบบผ่าซีก พบว่าเมื่อมวลรวมที่ใช้ผสมคอนกรีตมีความพรุนเพิ่มขึ้นมีผลต่อการแพร่กระจายสู่คลอไรด์เข้าสู่ภายในโครงสร้างคอนกรีตทั้งที่ผสม NCA หรือ RCA ที่สูงขึ้น ซึ่งหมายถึงสมรรถนะทางด้านความคงทน (Durability) ที่ลดลงตามไปด้วย

เมื่อพิจารณาการแพร่กระจายของคลอไรด์ (Chloride permeability coefficient) ในคอนกรีตชนิดไหลอัดแน่นได้ด้วยตัวเอง (SCC) ที่ผสมมวลรวมธรรมชาติ (NCA) และเศษคอนกรีตบด (RCA) ซึ่งผ่านการบ่มร่วมกันด้วยไมโครเวฟกำลัง 800 วัตต์ และสภาวะความดัน 70 กิโลปาสคาล (kPa) พร้อมทั้งทดสอบสมบัติต่อเนื่องที่ 24 ชั่วโมง แสดงในรูปที่ 9 พบว่าคอนกรีต (NCA) ในทุกช่วงอายุมีแนวโน้มค่าสัมประสิทธิ์การแพร่กระจายของคลอไรด์เพิ่มสูงขึ้นตามอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ (w/c) ที่มากขึ้น ขณะที่คอนกรีต (RCA) พบค่าที่แตกต่างออกไป โดยในอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ 0.25 และ 0.45 นั้น ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่กระจายของคลอไรด์มีแนวโน้มใกล้เคียงกันในช่วงอายุ 7 วัน ส่วนอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.35 กลับเป็นสัดส่วนที่ทำให้คอนกรีตผสม RCA แสดงค่าการแพร่กระจายของคลอไรด์ต่ำที่สุด



(ก) คอนกรีตผสมหินธรรมชาติ (NCA)



(ข) คอนกรีตผสมเศษคอนกรีตบด (RCA)

รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การแพร่กระจายของคลอไรด์ของคอนกรีตทุกช่วงอายุการทดสอบ

4. อภิปรายผล

คอนกรีตชนิดไหลอัดแน่นได้ด้วยตัวเอง (SCC) ที่บ่มด้วยวิธีเร่งในช่วงต้นด้วยไมโครเวฟภายใต้สภาวะความดันต่ำสามารถลดระยะเวลาการบ่มแบบดั้งเดิมได้ ในขณะที่ยังคงสมบัติด้านความแข็งแรงและความต้านทานการแพร่กระจายของคลอไรด์ไว้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อเปรียบเทียบคอนกรีตผสมมวลรวมหินธรรมชาติ (NCA) กับเศษคอนกรีตบด (RCA) ภายใต้ปริมาณน้ำต่อปูนซีเมนต์ (w/c) ต่างกัน โดยคอนกรีตผสม NCA มีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่กระจายของคลอไรด์เพิ่มขึ้นสอดคล้องกับการเพิ่มขึ้นของ w/c อย่างชัดเจน ซึ่งมีส่วนผสมมีน้ำมากขึ้นในส่วนผสมช่วยลดความหนืด แต่ในขณะเดียวกันก็ทำให้เกิดช่องว่างภายใน (Void) ได้สูงขึ้นด้วยเช่นเดียวกันส่งผลให้คลอไรด์สามารถแพร่กระจายเข้าเนื้อคอนกรีตได้สูงกว่า ส่วนในกรณีของคอนกรีตผสม RCA มีแนวโน้มแตกต่างออกไปเล็กน้อย เมื่อ w/c เพิ่มขึ้นจาก 0.25 เป็น 0.35 แล้ว ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่กระจายของคลอไรด์กลับลดลง ก่อนจะเพิ่มขึ้นอีกครั้งเมื่อขยับ w/c เป็น 0.45 ซึ่งอธิบายได้ว่าอนุภาคมสลรวม RCA มีพื้นผิวหยาบและพรุนสูง เมื่อ w/c อยู่ในระดับเหมาะสม (0.35) อาจเกิดจากการอุ้มน้ำ (Internal Curing) และช่วยเพิ่มการอัดแน่นโครงสร้างได้บางส่วน แต่เมื่อค่า w/c สูงขึ้นถึงระดับ 0.45 มีผลต่อความพรุนรวมเพิ่มขึ้นกลับทำให้คลอไรด์ซึมผ่านได้สูงกว่า

การใช้พลังงานไมโครเวฟร่วมกับสภาวะความดันต่ำในช่วงต้นของการบ่ม (Early-stage accelerated microwave curing) ทำให้อุณหภูมิภายในคอนกรีตเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในลักษณะความร้อนเชิงปริมาตร (Volumetric heating) ซึ่งมีผลทำให้น้ำหรือความชื้นส่วนเกินในเนื้อคอนกรีตระเหยออกได้ในอัตราที่สูงขึ้นภายใต้ความดันต่ำที่ประมาณ 70 กิโลปาสคาล (kPa) ซึ่งช่วยลดอุณหภูมิจุดเดือดของน้ำให้ต่ำลง ผลดังกล่าวทำให้ช่วงต้นของอายุคอนกรีต (1–7 วัน) มีการเกิดผลึกไฮเดรชั่น (Hydration products) มีอัตราการก่อและขยายตัวตัวได้ไวส่งผลให้เนื้อซีเมนต์เพสต์แข็งตัวเร็วและหนาแน่นขึ้นจึงช่วยลดโอกาสที่คลอไรด์แพร่กระจายได้ แต่อย่างไรก็ตาม เมื่อคอนกรีตมีอัตราส่วน w/c สูงมากหรือการใช้ RCA พบว่าในระยะที่ 7 วัน ค่าการซึมผ่านของคลอไรด์ยังขึ้นกับโครงสร้างภายในคอนกรีตเป็นหลัก

สำหรับความแตกต่างระหว่างคอนกรีตผสม NCA และ RCA ภายใต้วิธีบ่ม แบบเดียวกันพบว่า คอนกรีตผสม NCA มีการดูดซึมน้ำต่ำกว่า และค่อนข้างเรียบ ทำให้การซึมผ่านของคลอไรด์หลังการบ่มไมโครเวฟขึ้นกับ w/c เป็นปัจจัยหลัก แสดงค่าเพิ่มขึ้นตามสัดส่วน w/c ที่เพิ่มสูง ส่วนการบ่มไมโครเวฟคอนกรีตผสม RCA ช่วงต้น ทำให้ช่วยเร่งการสร้างไฮเดรชั่นบางส่วน แต่เนื่องจากความหยาบและความพรุนของเศษคอนกรีตเก่าที่ถูกนำมาบดใหม่ก็มีผลให้พฤติกรรมการต้านทานคลอไรด์เกิดสลับทิศทางตามอัตราส่วน w/c กล่าวคือ เมื่อค่า w/c ต่ำถึงระดับปานกลาง (0.35) อาจช่วยประสานช่องว่างได้ดี แต่เมื่อค่า w/c สูง (0.45) กลับขยายโพรงภายในให้คลอไรด์แพร่กระจายได้ง่ายขึ้นมาก

สำหรับประเด็นการกระจายความร้อนจากไมโครเวฟแบบเชิงปริมาตร (Volumetric heating) ภายใต้ความดันต่ำ (Low-pressure) มีผลทำให้น้ำส่วนเกินระเหยออกได้อย่างรวดเร็วและการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นรวดเร็วตั้งแต่ระยะต้นซึ่งส่งผลให้กำลังดึง (Splitting tensile strength) ถูกพัฒนาได้ดีกว่า นอกจากนี้โครงสร้างคอนกรีตโดยรวมยังค่อนข้างมีความหนาแน่นซึ่งหมายถึงความทนทานต่อคลอไรด์ได้ดีขึ้นตามไปด้วย แต่อย่างไรก็ตามวิธีบ่มด้วยไมโครเวฟร่วมกับความดันต่ำจะมีประสิทธิภาพ แต่ยังต้องคำนึงถึงการควบคุมค่า w/c ของคอนกรีตไม่ให้มีค่าสูงเกินไป [19-21] และหาวิธีการควบคุมคุณภาพของเศษคอนกรีตบด (RCA) ให้มีเหมาะสมเช่น การลดฝุ่นซีเมนต์เก่า) เพื่อป้องกันการดูดซึมน้ำมากเกินจนทำให้การซึมผ่านของคลอไรด์เพิ่มขึ้นในระยะหลัง นอกจากนั้นการใช้ RCA ต้องศึกษาอย่างละเอียดถึงสัดส่วน w/c ที่ก่อให้เกิดโครงสร้างเหมาะสมร่วมกับการออกแบบทั้งปัจจัยเรื่องของเวลาและกำลังของพลังงานไมโครเวฟที่อยู่ในระดับที่เหมาะสมเพื่อไม่ให้เกิดความร้อนเฉพาะจุด (Hot spot) จนนำไปสู่การแตกร้าวของโครงสร้างภายในได้ [22-25]

5. บทสรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 บทสรุป

จากการศึกษาในประเด็นของการแพร่กระจายของคลอไรด์ในสภาวะไม่คงตัวของคอนกรีตชนิดอัดแน่นได้ด้วยตัวเองภายใต้การบ่มเร่งในช่วงต้นด้วยพลังงานไมโครเวฟในสภาวะความดันต่ำมีข้อสรุปดังต่อไปนี้

- การบ่มคอนกรีตชนิดอัดแน่นได้ด้วยตัวเอง (SCC) ด้วยไมโครเวฟกำลังต่ำและลดความดันภายในคาวิตี้ให้มีค่าต่ำกว่าแรงดันบรรยากาศช่วยเร่งอัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นอย่างมีประสิทธิภาพทำให้อุณหภูมิภายในคอนกรีตสูงขึ้นเร็วและทั่วถึง (Volumetric heating) ส่งผลให้ความหนาแน่นของโครงสร้างคอนกรีตเพิ่มขึ้นและลดระยะเวลาการบ่มให้สั้นลง
- อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ (w/c) ส่งผลต่อการแพร่กระจายคลอไรด์อย่างมีนัยสำคัญโดยคอนกรีตมีค่า w/c สูงขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่กระจายของคลอไรด์มีค่าเพิ่มตามไปด้วย โดยเฉพาะคอนกรีตผสมหินธรรมชาติ (NCA) ซึ่งมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเป็นเชิงเส้นตรงซึ่ง

สะท้อนถึงความพรุนและช่องว่างในโครงสร้างที่มากขึ้นเมื่อมีน้ำในสัดส่วนสูง

- แนวโน้มการแพร่กระจายคลอไรด์ของคอนกรีตผสมเศษคอนกรีตบด (RCA) ซับซ้อนกว่า โดยคอนกรีตผสม RCA ที่มีอัตราส่วน w/c เท่ากับ 0.35 ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่กระจายของคลอไรด์ลดต่ำลง ทั้งนี้เพราะโครงสร้าง RCA อาจมีการดูดซับน้ำและเติมเต็มช่องว่างภายในช่วยให้เกิดการอัดแน่น แต่เมื่อ w/c สูงจนถึง 0.45 ความพรุนโดยรวมกลับเพิ่มขึ้นช่วยให้คลอไรด์แพร่เข้าสู่เนื้อคอนกรีตได้ดีขึ้น
- หลังบ่มด้วยไมโครเวฟที่ความดันต่ำ คอนกรีตมีอุณหภูมิสูงขึ้นและน้ำหนักลดลงเล็กน้อย โดยมวลรวมมีความพรุน (RCA) ยิ่งสูญเสียน้ำได้มาก ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (Dielectric constant) และ ค่าการสูญเสียพลังงานไฟฟ้า (Loss factor) จึงผันผวนตามปริมาณน้ำและคลอไรด์ที่แพร่กระจายภายในเนื้อคอนกรีต
- กำลังดึงแบบผ่าซีกหลังการทดสอบคลอไรด์ลดลงเมื่อ w/c สูง ทั้งคอนกรีต NCA และ RCA มีค่ากำลังดึงแบบผ่าซีก (Splitting tensile strength) ลดลงอย่างมีนัยสำคัญตามการเพิ่มขึ้นของ w/c หลังผ่านการทดสอบคลอไรด์ เนื่องจากความพรุนที่สูงช่วยไอออนคลอไรด์ซึมเข้าสู่โครงสร้างและกัดกร่อนบริเวณรอยต่อ (ITZ) ระหว่างซีเมนต์เพสต์กับมวลรวมได้ดีขึ้น
- การบ่มวิธีเร่งในช่วงต้นด้วยไมโครเวฟร่วมกับสภาวะความดันต่ำเป็นเทคนิคที่ช่วยลดระยะเวลาการบ่มคอนกรีตสมัยใหม่ได้ดี เหมาะกับงานก่อสร้างที่ต้องการความรวดเร็วและคุณภาพสูง แต่อย่างไรก็ตามต้องคำนึงถึงอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ (w/c) และชนิดมวลรวมให้มีความเหมาะสมกับสมบัติของคอนกรีตที่ต้องการ

5.2 ข้อเสนอแนะ

การบ่มเร่งด้วยไมโครเวฟร่วมกับสภาวะความดันต่ำ (Accelerated-microwave curing at low pressure condition) ในช่วงต้นของคอนกรีตชนิดอัดแน่นได้ด้วยตัวเอง (SCC) แสดงให้เห็นประสิทธิภาพหลายประการ ได้แก่ สามารถลดระยะเวลาการบ่มแบบดั้งเดิมได้อย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากไมโครเวฟจะให้ความร้อนในลักษณะเชิงปริมาตร (Volumetric heating) ภายใต้สภาวะความดันที่ต่ำกว่าบรรยากาศช่วยเร่งอัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน และทำให้อุณหภูมิภายในคอนกรีตสูงขึ้นทั่วถึงภายในเวลาอันสั้น ช่วยทำให้โครงสร้างของคอนกรีตมีการพัฒนาได้รวดเร็วทั้งด้านกำลังและความหนาแน่น นอกจากนั้นการเลือกใช้สภาวะความดันต่ำช่วยลดจุดเดือดของน้ำในเนื้อคอนกรีตและดึงความชื้นส่วนเกินออกได้เร็วขึ้นจึงเป็นการ ลดความเสี่ยงเรื่องโพรงอากาศและการแตกร้าวจากแรงดันไอน้ำ (Steam pressure) ระหว่างการบ่ม และที่สำคัญพบว่า คอนกรีตมีต้านทานการแพร่กระจายของคลอไรด์ได้ดีขึ้นตั้งแต่อายุเริ่มต้น เมื่อเทียบกับวิธีบ่มแบบทั่วไปเหมาะกับงานก่อสร้างที่ต้องการทั้งความรวดเร็วและคุณภาพเชิงกลสูง รวมถึงสามารถนำเทคโนโลยีไปประยุกต์ใช้กับคอนกรีตที่ใช้มวลรวมรีไซเคิล (RCA) ซึ่งเป็นแนวทางการใช้ทรัพยากรอย่างยั่งยืน

แต่อย่างไรก็ดียังมีข้อจำกัดทางเทคนิคที่ต้องคำนึงถึงในการนำวิธีนี้ไปใช้จริงได้แก่ ต้องอาศัยอุปกรณ์เฉพาะในการผลิตและควบคุมคลื่นไมโครเวฟภายใต้ความดันต่ำทั้งแมกนีตรอนหลายตำแหน่ง (Multi-feed magnetrons) ถังหมุน (Rotary drum) และเซนเซอร์วัดค่าต่าง ๆ เพื่อการตรวจสอบอุณหภูมิ ความดัน และความชื้นจึงมีค่าใช้จ่ายการลงทุนและการซ่อมบำรุงสูงกว่าเทคนิคบ่มทั่วไป นอกจากนั้นการออกแบบสัดส่วนส่วนผสม (Mix design) ยังคงต้องควบคุมปริมาณน้ำต่อปูนซีเมนต์ (w/c) และชนิดมวลรวมอย่างละเอียด โดยเฉพาะเมื่อใช้เศษคอนกรีตบด (RCA) ซึ่งมีลักษณะพรุนและหยาบ เป็นส่วนประกอบหลักของคอนกรีต ซึ่งการสูญเสียน้ำอาจไม่สม่ำเสมอมีผลทำให้เกิดปัญหาอุณหภูมิสูงเฉพาะจุด (Hot spot) หรือการกระจุกตัวของความร้อนภายในที่อาจนำไปสู่รอยแตกร้าวตั้งแต่ระยะแรกหากกำลังไมโครเวฟหรือเวลาบ่มไม่เหมาะสม นอกจากนี้ปริมาณน้ำที่ระเหยออกมากในช่วงสั้น ๆ อาจมีผลต่อความคงทนของคอนกรีตในระยะยาวหากไม่มีการควบคุมระดับความชื้นภายในเนื้อคอนกรีตให้ดีจึงจำเป็นต้องทดลองใช้งานในระดับอุตสาหกรรมจริงต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยและนวัตกรรมจากสำนักงานการวิจัยแห่งชาติและมหาวิทยาลัยราชภัฏพระนคร สัญญาเลขที่ N42A660379

เอกสารอ้างอิง

[1] Morwal, T., Bansal, T., Azam, A., Talakokula, V., & Saravanan, J. 2024. Exploring chloride-induced corrosion in reinforced concrete structures through embedded piezo sensor technology: an experimental and numerical study. https://doi.org/10.1088/1361-665x/ad287a

[2] Manoj, T., Bommisetty, J., Rao, T. M., Ramanjaneyulu, B., Kumar, M., & Rao, T. M. 2024. Performance Evaluation of Corrosion Inhibitors in Electrochemical Resistance of Steel Reinforcement in Concrete. E3S Web of Conferences, 588, 03028. https://doi.org/10.1051/e3sconf/202458803028

[3] Sadeq, H., Nasser, A., El-Miad, A. K., & Amar, N. 2024. A Review of Oxide Layer Formation and Corrosion Dynamics in Reinforced Concrete. E3S Web of Conferences, 582, 02007. https://doi.org/10.1051/e3sconf/202458202007

[4] Makul, N., 2016. Innovative hybrid curing method for accelerating the strength of high-performance cement paste using microwave heating coupling with low-pressure processing. Construction and Building Materials, 105, 245-252.

[5] Sua-iam, G. and Makul, N., 2024. Characteristics of non-steady-state chloride migration of self-compacting concrete

containing recycled concrete aggregate made of fly ash and silica fume. Case Studies in Construction Materials, 20, e02877.

[6] Akoba, B., Ajah, U. C., & Kennedy, C. 2024. Utilizing Electrochemical Techniques for Assessing the Probability of Concrete Resistivity and Corrosion Potential in Reinforced Concrete Structures. Middle East Research Journal of Engineering and Technology, 4(02), 21–38. https://doi.org/10.36348/merjet.2024.v04i02.001

[7] Interacting Action of Alkali-Silica Reaction and Chloride-Induced Steel Corrosion on The Reinforced Concrete Structures – A Critical Review. (2023). CSID Journal of Infrastructure Development. https://doi.org/10.7454/jid.v6.i2.1101

[8] American Society for Testing and Materials. 2017. ASTM C1157 Performance Specification for Hydraulic. Annual Book of ASTM Standard, 4.02 PA, USA.

[9] American Society for Testing and Materials. (2018). ASTM C33/C33M-18 Standard Specification for Concrete Aggregates. Annual Book of ASTM Standard, 4.02 PA, USA.

[10] American Society for Testing and Materials. (2017). ASTM C494/C494M-17 Standard Specification for Chemical Admixtures for Concrete. Annual Book of ASTM Standard, 4.02 PA, USA.

[11] American Society for Testing and Materials. (2021). ASTM C1611/C1611M-21 Standard Test Method for Slump Flow of Self-Consolidating Concrete. Annual Book of ASTM Standard, 4.02 PA, USA.

[12] NT build 492, Nordtest method. Concrete, mortar and cement-based repair materials: chloride migration coefficient from non-steady-state migration experiments. Finland. 1999.

[13] Lepers, B., Putranto, A., Umminger, M., Link, G., & Jelonnek, J. 2014. A drying and thermoelastic model for fast microwave heating of concrete. Frontiers in Heat and Mass Transfer, 5(13), 11. https://doi.org/10.5098/HMT.5.13

[14] Wei, W., Shao, Z., Zhang, P., Chen, W., Qiao, R., & Yuan, Y. 2021. Experimental assessment of microwave heating assisted aggregate recycling from dried and saturated concrete. Materials and Structures, 54(4), 1–14. https://doi.org/10.1617/S11527-021-01741-7

[15] Wei, W., Shao, Z., Chen, W., Zhang, P., & Yuan, Y. 2021. A Fully Coupled Electromagnetic Irradiation, Heat and Mass Transfer Model of Microwave Heating on Concrete. IEEE Access, 9, 1575–1589. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3047457

[16] Zhong, Y., Zhang, B., Cao, C., Du, X., Ni, Y., & Wang, Y. 2023. Composite Dielectric Model for Cement Concrete Considering Water Saturation. Journal of Materials in Civil Engineering, 35(7). https://doi.org/10.1061/jmcee7.mteng-15174

[17] Chung, K. L., Yuan, L., Ji, S., & Zhang, C. 2017. Determination of water content for early-age concrete based on dielectric constant. 189–191. https://doi.org/10.1109/IWEM.2017.7968830

[18] Van Beek, A. (2000). Dielectric measurements to characterize the microstructural changes of young concrete. 44(1). https://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid%3Ae01f3f7a-4f42-4ab3-8a75-79c540995146/datastream/OBJ/download

[19] Bumanis, G., & Bajare, D. (2017). The effect of curing conditions on the durability of high-performance concrete. 251(1), 012006. https://doi.org/10.1088/1757-899X/251/1/012006

[20] Chava, V., Rao, S. M. V., Munugala, P. K., & Chereddy, S. S. D. (2023). Effect of Mineral Admixtures and Curing Regimes on Properties of Self-Compacting Concrete. Journal of Sustainable Construction Materials and Technologies. https://doi.org/10.47481/jscmt.1383493

[21] Audenaert, K., & De Schutter, G. (2009). Time dependency of chloride migration coefficient in self-compacting concrete. 65, 325–334. https://biblio.ugent.be/publication/948585

[22] Mubarak, K., Bois, K. J., & Zoughi, R. 2001. A simple, robust, and on-site microwave technique for determining water-to-cement ratio (w/c) of fresh Portland cement-based materials. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 50(5), 1255–1263. https://doi.org/10.1109/19.963194

[23] Lee, J.-G., Case, E. D., & Lee, K.-Y. 2002. Enhancing the microwave processing of ceramics by avoiding hot spots and local melting in refractory specimen enclosures. Journal of Advanced Materials, 34(2), 49–59.

[24] Beaumont, P. W. R., & Soutis, C. 2016. Structural integrity of engineering composite materials: a cracking good yarn. Philosophical Transactions of the Royal Society A, 374(2071), 20160057. https://doi.org/10.1098/RSTA.2016.0057

[25] Antipov, S., Avrakhov, P., Gomez, E., Kuzikov, S., & Vikharev, A. A. (2019). CW Room Temperature Accelerating Structures. 2990–2992. https://doi.org/10.18429/JACOW-IPAC2019-WEPRB073