http://journal.rmutp.ac.th/

กำลังอัด ความสามารถเก็บกักคลอไรด์และสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตผสมเถ้าก้นเตาบดละเอียดและผงหินปูน

บัญญัติ วารินทร์ไหล[1]* และ ปิติศานต์ กร้ำมาตร[2]

[1] สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม

[2] ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

[1] 85 ถนนมาลัยแมน อำเภอเมือง จังหวัดนครปฐม 73000

[2] 39 หมู่ 1 ถนนรังสิต-นครนายก ตำบลคลองหก อำเภอธัญบุรี จังหวัดปทุมธานี 12110

รับบทความ 16 พฤศจิกายน 2563 แก้ไขบทความ 8 มิถุนายน 2564 ตอบรับบทความ 7 กรกฎาคม 2564

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มุ่งศึกษาค่ากำลังอัดประลัย ความสามารถเก็บกักคลอไรด์และสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตผสมเถ้าก้นเตาบดละเอียด และผงหินปูน ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (OPC) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55 จากผลการศึกษาพบว่า กำลังอัดประลัยของคอนกรีตผสมเถ้าก้นเตาบดละเอียดมีค่าน้อยกว่าของ OPC ล้วนที่อายุ 28 วัน ส่วนกำลังอัดประลัยของคอนกรีตผสมผงหินปูนมีค่าใกล้เคียงกับของ OPC ล้วน และมีการพัฒนากำลังอัดประลัยมากขึ้นเมื่อผสมเถ้าก้นเตาบดละเอียดร้อยละ 20 และ 30 ที่อายุ 56 วัน นอกจากนี้ ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดของคอนกรีตผสมเถ้าก้นเตาบดละเอียด และคอนกรีตผสมผงหินปูนมีค่าน้อยกว่าของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตผสมเถ้าก้นเตาบดละเอียด และคอนกรีตผสมผงหินปูน มีค่าน้อยกว่าของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ในขณะที่ความสามารถในความสามารถเก็บกักคลอไรด์ของคอนกรีตผสมเถ้าก้นเตาบดละเอียด และคอนกรีตผสมผงหินปูน มีมากกว่าของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน สุดท้ายพบว่าคอนกรีตผสมเถ้าก้นเตาบดละเอียดและผงหินปูนให้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์น้อยกว่าคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน

คำสำคัญ : คอนกรีต; ความสามารถเก็บกักคลอไรด์; สัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์; เถ้าก้นเตาบดละเอียด; ผงหินปูน

** ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทร: +668 1194 1759, ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์: nowsurvey@hotmail.com*

http://journal.rmutp.ac.th/

Compressive Strength, Chloride Binding Capacity and Chloride Diffusion Coefficient of Concrete Containing Ground Bottom Ash and Limestone Powder

Banyut Warinlai[1]* and Pitisan Krammart[2]

[1] Civil Engineering, Faculty of Science and Technology, Nakhon Pathom Rajabhat University

[2] Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi

[1] 85 Malai Man Road, Muang District, Nakhon Pathom 73000

[2] 39 Moo 1, Rangsit-Nakhon Nayok Road, Khlong Hok, Thanyaburi District, Pathum Thani 12110

Received 16 November 2020; Revised 8 June 2021; Accepted 7 July 2021

Abstract

This research was aimed to study the compressive strength, chloride binding capacity and chloride diffusion coefficient of concrete replaced by ground bottom ash (GBA), and limestone powder in ordinary Portland cement (OPC). The water to binder ratios were 0.55. The results showed that the compressive strength of concrete with GBA was lesser than that of OPC concrete at 28 days. Also, the compressive strength of concrete with limestone powder was close to that of OPC concrete and compressive strength could develop of concrete with GBA 20% and 30% higher than that of OPC concrete at 56 days. Moreover, the total chloride of the concrete containing GBA and limestone powder was less than that of OPC concrete. The chloride penetration of the concrete containing GBA and limestone powder was less than that of OPC concrete. The chloride binding capacity of the concrete made with ground bottom ash and limestone powder were higher than that of OPC concrete. Finally, the chloride diffusion coefficient of the concrete containing GBA and limestone powder was less than that of OPC concrete.

Keywords : Concrete; Chloride Binding Capacity; Chloride Diffusion Coefficient; Ground Bottom Ash; Limestone Powder

** Corresponding Author. Tel.: +668 1194 1759, E-mail Address: nowsurvey@hotmail.com*

1. บทนำ

ปัจจุบันโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กเป็นที่นิยมใช้ในวงการก่อสร้าง โครงสร้างคอนกรีตจำเป็นต้องมีการออกแบบโครงสร้างที่ดี สามารถรับน้ำหนักออกแบบได้ตลอดอายุการใช้งาน โดยปราศจากการซ่อมแซมในระดับที่เกินกว่าการคาดหมายเอาไว้ โครงสร้างคอนกรีตแต่ละประเภทที่มีการก่อสร้างล้วนแล้วแต่อยู่ในสภาวะแวดล้อมที่แตกต่างกันออกไป อายุของโครงสร้างจึงไม่เท่ากัน โดยเฉพาะอย่างยิ่งในสภาวะแวดล้อมที่รุนแรง มีการกัดกร่อนสูง ซึ่งส่วนใหญ่จะพบในสภาวะแวดล้อมชายทะเล เป็นผลให้คอนกรีตมีคุณสมบัติทางกลแย่ลง โดยเฉพาะคุณสมบัติการรับแรงต่ำลงไปตามกาลเวลา รวมถึงทำให้เกิดการกัดกร่อนของเหล็กเสริม ส่งผลต่อความคงทนของโครงสร้าง

จากสภาวะแวดล้อมชายทะเล คลอไรด์ที่มีอยู่ในน้ำทะเลและมีก๊าซออกซิเจนร่วมอยู่ด้วย การกัดกร่อนของคลอไรด์จะเริ่มเกิดเมื่อสารละลายคลอไรด์กระทำต่อฟิล์มบางๆที่หุ้มเหล็กเสริมไว้ จนเมื่อฟิล์มเสียหายและอิออนของคลอไรด์กับก๊าซออกซิเจนทำปฏิกิริยากับเหล็กจนเหล็กเกิดสนิมในโครงสร้างคอนกรีตซึ่งสนิมเหล็กเหล่านี้ จนเกิดการขยายตัวของเหล็กเสริม เมื่อปริมาตรเหล็กเสริมเกิดการขยายตัว ทำให้เกิดแรงดันขึ้นรอบๆ ส่งผลให้คอนกรีตเกิดการขยายตัวจนแตกร้าวและก่อความเสียหายแก่โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กในที่สุด ทำให้คุณสมบติด้านกำลัง ความคงทนลดลงตามลำดับ

เถ้าก้นเตาบดละเอียดเป็นวัสดุปอซโซลานที่ใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ในส่วนผสมคอนกรีตได้เป็นอย่างดี [1] จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าคุณสมบติด้านกำลังในระยะยาวจะดีขึ้น [2,3] รวมถึงคุณสมบัติด้านความคงทนของคอนกรีตเกี่ยวกับการต้านทานคลอไรด์และซัลเฟตดีขึ้นเช่นกัน [4,5] ในส่วนของผงหินปูนซึ่งเป็นผลพลอยได้จากการย่อยหินเพื่อใช้ในการผลิตปูนซีเมนต์ และอุตสาหกรรมในการผลิตคอนกรีตผสมเสร็จ จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าผงหินปูนจัดเป็นวัสดุผสมเพิ่มในปูนซีเมนต์ที่สามารถปรับปรุงคุณสมบัติเชิงกลและความคงทนของวัสดุเชื่อมประสานในระยะยาวได้ [5] รวมถึงคอนกรีตผสมผงหินปูนมีกำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตผสมสารปอซโซลานบางชนิด โดยผงหินปูนไปอุดโพรงช่องว่างของคอนกรีต ทำให้คอนกรีตเกิดความแข็งแรงมากขึ้น [6] นอกจากนี้ ยังพบอีกว่า การใช้วัสดุปอซโซลานจำพวกเถ้าลอยและเถ้าก้นเตาร้อยละ 10 ทำให้การต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตสูงขึ้น [7] ซึ่งจะเห็นได้ว่า วัสดุปอซโซลานรวมทั้งฝุ่นหินปูน เมื่อนำมาใช้แทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนในปริมาณที่เหมาะสมย่อมเกิดผลดีช่วยปรับปรุงคุณสมบัติบางประการของคอนกรีตให้มีความคงทนขึ้น [8] การวิจัยที่ผ่านมาไม่ว่าจะต่างประเทศหรือในประเทศไทยนั้น การนำเอาเถ้าก้นเตาบดละเอียดหรือผงหินปูนอย่างใดอย่างหนึ่ง มาใช้แทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วน หรือนำทั้งเถ้าก้นเตาบดละเอียดและผงหินปูนรวมกันทั้งสองชนิดมาแทนที่ในปูนซีเมนต์ ซึ่งถือว่ายังมีการนำมาใช้น้อยมาก จึงทำให้คุณสมบัติบางประการของคอนกรีตด้อยลง อย่างไรก็ตามปริมาณที่เหมาะสมในการใช้งานเถ้าก้นเตาบดละเอียดและผงหินปูน รวมถึงการนำมาใช้ร่วมกันอย่างมีประสิทธิภาพนั้น จำเป็นต้องมีการศึกษาเพิ่มเติมเพื่อทราบคุณสมบัติและพฤติกรรมของวัสดุประสานให้แน่ชัด โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการนำวัสดุดังกล่าวมาใช้ผสมร่วมในส่วนผสมคอนกรีต เพื่อเพิ่มความคงทนให้กับคอนกรีตที่ต้องเผชิญสิ่งแวดล้อมต่างๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งสภาวะแวดล้อมชายทะเล เพื่อเพิ่มศักยภาพในการใช้งานของเถ้าก้นเตาในงานคอนกรีตประเภทต่างๆได้ดียิ่งขึ้น

จากที่กล่าวมา เพื่อเพิ่มศักยภาพในการใช้งานของเถ้าก้นเตาบดละเอียดและผงหินปูนในงานคอนกรีตประเภทต่างๆให้ดียิ่งขึ้น การวิจัยครั้งนี้จึงได้มุ่งเน้นการนำเถ้าก้นเตาบดละเอียด ซึ่งเป็นวัสดุปอซโซลาน ร่วมด้วยผงหินปูน มาใช้แทนที่บางส่วนในปูนซีเมนต์ เพื่อ

ศึกษากำลังอัด ความสามารถต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์และการเก็บกักคลอไรด์ ตลอดจนค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์เพื่อใช้เป็นฐานข้อมูลการออกแบบสำหรับโครงสร้างคอนกรีตที่มีการเสื่อมสภาพเนื่องจากคลอไรด์ให้มีอายุการใช้งานที่ยาวนานขึ้นต่อไป

2. ระเบียบวิธีวิจัย

2.1 วัสดุที่ใช้ในการศึกษา

ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ใช้วัสดุประสานซึ่งประกอบด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลัก เถ้าก้นเตาบดละเอียด และผงหินปูน (ขนาดเฉลี่ย 8 ไมโครเมตร) เป็นวัสดุประสานเพิ่มแทนที่บางส่วนในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ โดยมวลรวมใช้หินและทรายแม่น้ำ ส่วนน้ำใช้น้ำประปา

2.2 รายละเอียดวิธีการศึกษา

การศึกษาในครั้งนี้ประกอบด้วย 1) สมบัติพื้นฐานของวัสดุประสาน ซึ่งได้แก่ ความละเอียดโดยวิธีเบลน ความถ่วงจำเพาะ 2) กำลังอัดประลัยของคอนกรีตและ 3) ความสามารถในความสามารถเก็บกักคลอไรด์ของคอนกรีต โดยมีรายละเอียดดังนี้

2.2.1 สมบัติพื้นฐานของวัสดุประสาน

สำหรับวัสดุประสานที่ใช้ในการศึกษาประกอบด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เถ้าก้นเตาบดละเอียด และผงหินปูน โดยความละเอียดโดยวิธีเบลนทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C 204 [9] ความถ่วงจำเพาะ ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C 188 [10] โดยในส่วนองค์ประกอบทางเคมีนั้น ใช้วิธีวิเคราะห์หาปริมาณสารประกอบออกไซด์ของวัสดุประสาน ด้วยเครื่อง X-Ray Fluorescence (XRF)

2.2.2 กำลังอัดประลัยของคอนกรีต

สำหรับกำลังอัดประลัยของคอนกรีต ทดสอบตามมาตรฐาน BS 1881-116 [11] โดยใช้ตัวอย่างคอนกรีตขนาด 100x100x100 มม.^{3} จำนวน 3 ตัวอย่างต่อหนึ่งสัดส่วนผสม หลังจากถอดแบบ 1 วัน ทำการบ่มน้ำจนถึงเวลาทำการทดสอบที่อายุ 28 และ 56 วัน

2.2.3 ความสามารถเก็บกักคลอไรด์และการแทรกซึมคอลไรด์ของคอนกรีต

สำหรับการหาความสามารถในความสามารถเก็บกักคลอไรด์ (chloride binding capacity) ของคอนกรีต มีรายละเอียดวิธีการศึกษาดังนี้

การเตรียมตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้ในการศึกษา

ทำการหล่อตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 150 มิลลิเมตร สูง 300 มิลลิเมตร ถอดแบบเมื่อครบ 24 ชั่วโมง และบ่มตัวอย่างในน้ำประปาเป็นเวลา 28 วัน

การแช่สารละลายโซเดียมคลอไรด์และการเก็บผงตัวอย่างคอนกรีต

ทำการบ่มคอนกรีตในน้ำ 28 วัน นำขึ้นมาจากน้ำทิ้งไว้ 24 ชั่วโมงให้ผิวตัวอย่างแห้ง ทำการเคลือบผิวคอนกรีตด้านข้างและด้านล่างให้รอบโดยอีพ็อกซี (Epoxy) เว้นผิวด้านบนหนึ่งด้านจำนวน 3 รอบทิ้งระยะห่างในการเคลือบผิวประมาณ 4 ถึง 6 ชั่วโมง ต้องมั่นใจว่าไม่มีรูหรือรอยให้น้ำซึมเข้าได้ที่ผิวเคลือบ ทิ้งให้สารเคลือบผิวคอนกรีตแห้งระยะเวลา 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นทำการเตรียมสารละลายโซเดียมคลอไรด์ (น้ำเกลือ) ความเข้มข้นของคลอไรด์ ไอออนร้อยละ 5 แช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ตามมาตรฐาน ASTM C 1556 [12] ตามระยะเวลาการทดสอบที่อายุ 28 และ 91 วัน เมื่ออายุการทดสอบ นำตัวอย่างคว่ำผิวบนลงให้น้ำระบายออก 24 ชั่วโมง เก็บตัวอย่างคอนกรีตด้วยการเจาะเอาผงตัวอย่างชั้นละ 10 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 1 จำนวนน้ำหนักชั้นละ 20 กรัม ทุกๆ ชั้น โดยวัดจากผิวหน้าของคอนกรีตที่คลอไรด์ซึมผ่านจำนวน 5 ชั้น นำไปไตเตรทหาปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีต ดังแสดงในรูปที่ 2 ซึ่งจะได้ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด (Total Chloride) ตามมาตรฐาน ASTM C1152 [13] และ

ปริมาณคลอไรด์อิสระ (Free Chloride) ตามมาตรฐาน ASTM C1218 [14] ส่วนปริมาณคลอไรด์ยึดจับ (Fixed Chloride) ได้มาจากผลต่างของคลอไรด์ทั้งหมดกับคลอไรด์อิสระ นอกจากนี้ค่าปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตสามารถนำมาหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ ได้ดังสมการที่ 1

$$C(x,t) = C_s\left[1 - erf\left(\frac{x}{2\sqrt{D_a t}}\right)\right] \quad (1)$$

โดยที่ C(x, t) คือ ปริมาณคลอไรด์ที่ระยะความลึก x จากผิวหน้าที่ระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเลt (% โดยน้ำหนักวัสดุประสาน), Cs คือปริมาณเกลือคลอไรด์ที่ผิวหน้าของคอนกรีต (% โดยน้ำหนักวัสดุประสาน), Da คือสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ในคอนกรีต (ซม.^{2}/วัน), x คือ ระยะทางจากผิวหน้าคอนกรีต (ซม.), t คือ ระยะเวลาที่เผชิญคลอไรด์ (วัน)

รูปที่ 1 การแช่สารละลายโซเดียมคลอไรด์และการเก็บผงตัวอย่างคอนกรีต

รูปที่ 2 การหาปริมาณคลอไรด์ด้วยเครื่องวัดคลอไรด์อัตโนมัติ

2.3 ส่วนผสมของคอนกรีตที่ใช้

สัดส่วนผสมของคอนกรีตที่ใช้ในการทดสอบกำลังอัดประลัย และความสามารถในความสามารถเก็บกักคลอไรด์ของคอนกรีต มีการออกแบบสัดส่วนผสมที่ใช้วัสดุประสานสอง และสามชนิด คือ ระบบวัสดุประสานสองชนิด แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าก้นเตาบดละเอียดในอัตราส่วนร้อยละ 20, 30 และผงหินปูนในอัตราส่วนร้อยละ 5, 10 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน และระบบวัสดุประสานสามชนิด แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าก้นเตาบดละเอียดในอัตราส่วนร้อยละ 10, 15, 20, 25 ร่วมกับผงหินปูนในอัตราส่วนร้อยละ 5, 10 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน คอนกรีตใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) เท่ากับ 0.55 โดยน้ำหนัก ดังตารางที่ 1 ตลอดการศึกษา

ตารางที่ 1 ส่วนผสมของคอนกรีตที่ใช้ในการทดสอบกำลังอัดประลัย และการหาความสามารถในความสามารถเก็บกักคลอไรด์ของคอนกรีต โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) เท่ากับ 0.55

สัดส่วนผสม	ส่วนผสมของคอนกรีต (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)					
	ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1	เถ้าก้นเตาบดละเอียด	ผงหินปูน	ทราย (SSD)	หิน (SSD)	น้ำ
CC	395	-	-	795	964	214
CC-20BA	316	79	-	759	964	214
CC-30BA	277	118	-	759	964	214
CC-5LP	375	-	20	759	964	214
CC-10LP	356	-	39	759	964	214
C-15BA-5LP	316	59	20	759	964	214
C-25BA-5LP	277	98	39	759	964	214
C-10BA-10LP	316	39	20	759	964	214
CC-20BA-10LP	277	79	20	759	964	214

หมายเหตุ CC หมายถึง คอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน, CC-5LP หมายถึงคอนกรีตผสมผงหินปูนร้อยละ 5 และ CC-20BA หมายถึง คอนกรีตผสมเถ้าก้นเตาบดละเอียดร้อยละ 20 เป็นต้น

ตารางที่ 2 องค์ประกอบทางเคมี ของวัสดุประสาน

องค์ประกอบทางเคมี (%)	ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1	เถ้าก้นเตาบดละเอียด	ผงหินปูน
SiO_2	19.50	41.35	0.45
Al_2O_3	4.97	20.11	0.05
Fe_2O_3	3.78	13.24	0.03
CaO	65.38	16.65	55.20
MgO	1.08	2.37	0.34
SO_3	2.16	2.68	<0.01
Na_2O	0.22	0.29	<0.01
K_2O	0.47	2.51	0.01
LOI	2.27	1.01	43.12
Free lime	1.00	<0.01	<0.01

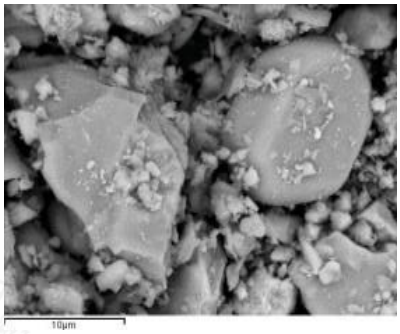
ตารางที่ 3 คุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุประสาน

องค์ประกอบทางเคมี (%)	ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1	เถ้าก้นเตาบดละเอียด	ผงหินปูน
ความละเอียดโดยวิธีเบลน (ซม.^{2}/ก.)	3,250	4,960	5,210
ความถ่วงจำเพาะ	3.12	2.65	2.69
ร้อยละที่ค้างตะแกรงเบอร์ 325	20.04	16.34	-

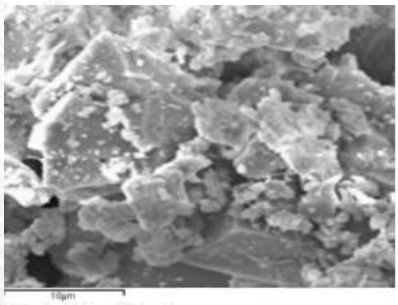
3. ผลการศึกษาและอภิปรายผล

3.1 สมบัติพื้นฐานของวัสดุประสาน

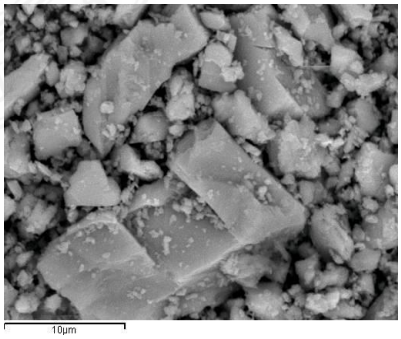
จากการทดสอบสมบัติพื้นฐานของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เถ้าก้นเตาบดละเอียด และผงหินปูนที่ใช้ในการศึกษา ได้ผลการศึกษาขององค์ประกอบทางเคมี ดังแสดงในตารางที่ 2 และคุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุประสานดังแสดงในตารางที่ 3 สำหรับรูปที่ 3 แสดงภาพถ่ายขยายกำลังของอนุภาค โดยวิธี SEM (Scanning Electron Microscope) ขยาย 3500 เท่า จะเห็นว่าลักษณะอนุภาคของปูนซีเมนต์มีลักษณะเป็นเหลี่ยม ผิวค่อนข้างขรุขระไม่เรียบ และมีอนุภาคหลายๆ ขนาดปนกันอยู่ ในขณะที่ผงหินปูนและเถ้าก้นเตาบดละเอียดนั้นมีลักษณะอนุภาคเป็นเหลี่ยม ผิวขรุขระไม่เรียบคล้ายกับกรณีของปูนซีเมนต์แต่มีขนาดของอนุภาคที่เล็กกว่า



(ก) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1



(ข) เถ้าก้นเตาบดละเอียด

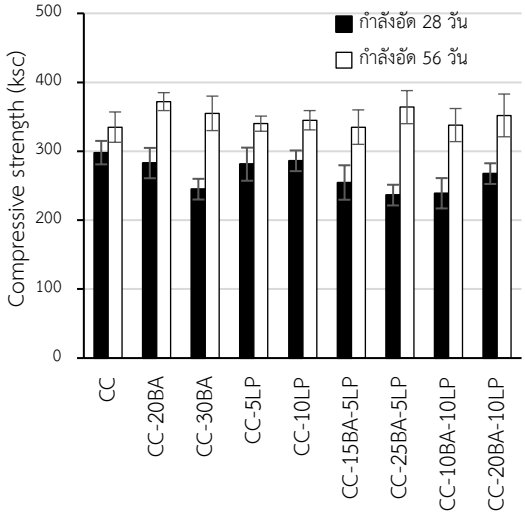


(ค) ผงหินปูน

รูปที่ 3 ภาพถ่ายขยายกำลังสูงของอนุภาคของวัสดุประสานโดยวิธี SEM กำลังขยาย 3,500 เท่า

3.2 กำลังอัดประลัยของคอนกรีต

รูปที่ 4 แสดงค่ากำลังอัดประลัยของคอนกรีตโดยตัวอย่างคอนกรีตบ่มน้ำที่อายุ 28 วัน พบว่ากำลังอัดประลัยของคอนกรีตที่ผสมเถ้าก้นเตาบดละเอียดมีค่าน้อยกว่าของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน โดยเฉพาะเมื่อแทนที่ในปริมาณที่มาก ทั้งนี้เนื่องจากการผสมเถ้าก้นเตาบดละเอียดเป็นการลดปริมาณปูนซีเมนต์ลง ซึ่งกำลังรับแรงช่วงแรกจะขึ้นอยู่กับปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นหลัก ส่งผลให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันเกิดน้อยรวมทั้งการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานจะเกิดช้า ส่งผลให้กำลังรับแรงอัดช่วงแรกต่ำ ส่วนเมื่อผสมด้วยผงหินปูนส่งผลให้ค่ากำลังอัดประลัยของคอนกรีตมีแนวโน้มลดลงและใกล้เคียงกับคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อผสมผงหินปูนในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ทำให้ปริมาณปูนซีเมนต์ลดลง และผงหินปูนมีอนุภาคที่ค่อนข้างละเอียดจึงเป็นการช่วยในการเติมเต็มในช่องว่างของคอนกรีตส่งผลให้กำลังอัดประลัยมีค่าใกล้เคียงหรือลดลงไม่มากนักเมื่อเทียบกับคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน แต่เมื่อตัวอย่างคอนกรีตอายุ 56 วัน การพัฒนากำลังอัดที่มีส่วนผสมของเถ้าก้นเตาบดละเอียดผสมในอัตราส่วนร้อยละ 20 และ 30 พบว่ากำลังอัดมีมากกว่าที่อายุ 28 วัน ซึ่งมีความสอดคล้องกับงานวิจัยที่นำเสนอผ่านมาของ K. Tuntisukrarom และคณะ [3] ทั้งนี้เนื่องจากคอนกรีตทำปฏิกิริยาไฮเดรชันและการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานสมบูรณ์ สำหรับคอนกรีตผสมด้วยผงหินปูนมีแนวโน้มค่ากำลังอัดประลัยของคอนกรีตใกล้เคียงหรือสูงกว่าไม่มากเมื่อเทียบกับคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ส่วนการผสมกรณี 3 วัสดุประสาน คือ คอนกรีตผสมเถ้าก้นเตาบดละเอียดร่วมกับฝุ่นหินปูนให้ผลในแนวโน้มที่สอดคล้องกับการผสมด้วยเถ้าก้นเตาบดละเอียดหรือผงหินปูนเพียงอย่างเดียว ดังเหตุผลดังที่กล่าวมาแล้ว



รูปที่ 4 ค่ากำลังอัดประลัยของคอนกรีต

3.3 ความสามารถเก็บกักคลอไรด์ของคอนกรีต

สำหรับความสามารถในการเก็บกักคลอไรด์ (Chloride Binding Capacity) ของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน คอนกรีตผสมเถ้าก้นเตาบดละเอียด และคอนกรีตผสมผงหินปูน โดยได้บ่มตัวอย่างคอนกรีตในน้ำ 28 วัน เมื่อครบอายุการบ่มแล้ว จากนั้นนำตัวอย่างไปเผชิญเกลือคลอไรด์ที่ 28 และ 91 วัน ผลการทดสอบดังแสดงในตารางที่ 4 และ 5 ประกอบด้วยผลของคลอไรด์ทั้งหมด (Total Chloride) และคลอไรด์อิสระ (Free Chloride) ส่วนคลอไรด์ยึดจับ (Fixed Chloride) ได้มาจากผลต่างของคลอไรด์ทั้งหมดกับคลอไรด์อิสระ และในกรณีอัตราส่วนคลอไรด์ยึดจับ (Fixed Chloride Ratio) เป็นอัตราส่วนระหว่างคลอไรด์ยึดจับต่อคลอไรด์ทั้งหมด

โดยการทดลองนี้ใช้อัตราส่วนคลอไรด์ยึดจับพิจารณาความสามารถเก็บกักคลอไรด์ของคอนกรีต พบว่า ความสามารถเก็บกักคลอไรด์ของคอนกรีตผสมเถ้าก้นเตาบดละเอียด (ร้อยละ 20 และ 30) มีค่ามากกว่าของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน

ทั้งนี้ อาจเป็นเพราะเถ้าก้นเตาบดละเอียดมีปริมาณของสารประกอบ Al_2O_3 (ร้อยละ 20.11) ซึ่งมากกว่าในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 จึงส่งผลให้ความสามารถในการดักจับคลอไรด์ในรูปของปฏิกิริยาเคมีสูงขึ้น เมื่อมีการเพิ่มปริมาณการแทนที่ด้วยเถ้าก้นเตาบดละเอียดมากขึ้น และปฏิกิริยาปอซโซลานที่เพิ่มขึ้นทำให้มีปริมาณแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรท (CSH) และแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรท (CAH) มากขึ้น ทั้งยังสามารถดักจับคลอไรด์ไอออนได้ ซึ่งเป็นการดักจับคลอไรด์ไอออนด้วยกระบวนการทางกายภาพ ส่งผลให้สามารถยึดจับคลอไรด์ได้มากขึ้น [15] ในส่วนของคอนกรีตผสมผงหินปูน พบว่า ความสามารถเก็บกักคลอไรด์มากกว่าของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ทั้งนี้อาจเป็นเพราะ ฝุ่นหินปูนช่วยยึดจับคลอไรด์ด้วยกระบวนการถูกยึดด้วยแรงทางกายภาพ (Surface Force) ได้บนผิวของผลผลิตไฮเดรชัน เช่น แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรท และแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรท เป็นต้น [15] นอกจากนี้เมื่อพิจารณารูปที่ 5 ถึง 8 พบว่า ที่ระยะเวลาการเผชิญคลอไรด์ที่ 91 วัน ความสามารถเก็บกักคลอไรด์มีแนวโน้มมากกว่าของคอนกรีตที่ระยะเวลาการเผชิญคลอไรด์ที่ 28 วัน ทั้งนี้อาจเป็นไปได้ เพราะเมื่ออายุของคอนกรีตนานขึ้นการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันหรือปอซโซลานของคอนกรีตสมบูรณ์มากขึ้น ส่งผลให้ยึดจับคลอไรด์ได้มากขึ้น

ตารางที่ 4 ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด คลอไรด์อิสระและคลอไรด์ที่ถูกยึดจับ และอัตราส่วนคลอไรด์ที่ถูกยึดจับของคอนกรีตที่บ่มน้ำ 28 วัน และเผชิญเกลือคลอไรด์ 28 วัน

ลำดับที่	สัญลักษณ์	ระยะจากผิว (มม.)	คลอไรด์ทั้งหมด (%โดย นน. วัสดุประสาน)	คลอไรด์อิสระ (%โดย นน. วัสดุประสาน)	คลอไรด์ยึดจับ (%โดย นน. วัสดุประสาน)	อัตราส่วนคลอไรด์ยึดจับ
1	CC	5	0.391	0.370	0.021	0.054
		15	0.188	0.173	0.015	0.080
		25	0.100	0.090	0.010	0.100
		35	0.062	0.032	0.030	0.484
		45	0.038	0.030	0.008	0.211
2	CC-20BA	5	0.230	0.160	0.070	0.304
		15	0.080	0.036	0.044	0.550
		25	0.020	0.015	0.005	0.250
		35	0.000	0.000	0.000	0.000
		45	0.000	0.000	0.000	0.000
3	CC-30BA	5	0.288	0.196	0.092	0.319
		15	0.086	0.063	0.023	0.267
		25	0.019	0.010	0.009	0.474
		35	0.011	0.009	0.002	0.182
		45	0.009	0.005	0.004	0.444

ลำดับที่	สัญลักษณ์	ระยะจากผิว (มม.)	คลอไรด์ทั้งหมด (%โดย นน. วัสดุประสาน)	คลอไรด์อิสระ (%โดย นน. วัสดุประสาน)	คลอไรด์ยึดจับ (%โดย นน. วัสดุประสาน)	อัตราส่วนคลอไรด์ยึดจับ
4	CC-5LP	5	0.370	0.300	0.070	0.189
		15	0.136	0.129	0.007	0.051
		25	0.040	0.033	0.007	0.175
		35	0.010	0.009	0.001	0.100
		45	0.010	0.005	0.005	0.500
5	CC-10LP	5	0.365	0.299	0.066	0.181
		15	0.059	0.044	0.015	0.254
		25	0.014	0.010	0.004	0.286
		35	0.000	0.000	0.000	0.000
		45	0.000	0.000	0.000	0.000

ตารางที่ 5 ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด คลอไรด์อิสระและคลอไรด์ที่ถูกยึดจับ และอัตราส่วนคลอไรด์ที่ถูกยึดจับของคอนกรีตที่บ่มน้ำ 28 วัน และเผชิญเกลือคลอไรด์ 28 วัน (ต่อ)

ลำดับที่	สัญลักษณ์	ระยะจากผิว (มม.)	คลอไรด์ทั้งหมด (%โดย นน. วัสดุประสาน)	คลอไรด์อิสระ (%โดย นน. วัสดุประสาน)	คลอไรด์ยึดจับ (%โดย นน. วัสดุประสาน)	อัตราส่วนคลอไรด์ยึดจับ
6	CC-15BA-5LP	5	0.350	0.280	0.070	0.200
		15	0.160	0.150	0.010	0.063
		25	0.050	0.050	0.000	0.000
		35	0.030	0.006	0.024	0.800
		45	0.000	0.000	0.000	0.000
7	CC-25BA-5LP	5	0.360	0.340	0.020	0.056
		15	0.149	0.120	0.029	0.195
		25	0.041	0.033	0.008	0.195
		35	0.018	0.009	0.009	0.500
		45	0.011	0.005	0.006	0.545
8	CC-10BA-10LP	5	0.363	0.250	0.113	0.311
		15	0.161	0.127	0.034	0.211
		25	0.055	0.041	0.014	0.255
		35	0.014	0.009	0.005	0.357
		45	0.011	0.010	0.001	0.091

ลำดับที่	สัญลักษณ์	ระยะจากผิว (มม.)	คลอไรด์ทั้งหมด (%โดย นน. วัสดุประสาน)	คลอไรด์อิสระ (%โดย นน. วัสดุประสาน)	คลอไรด์ยึดจับ (%โดย นน. วัสดุประสาน)	อัตราส่วนคลอไรด์ยึดจับ
9	CC-20BA-10LP	5	0.250	0.185	0.065	0.260
		15	0.060	0.030	0.030	0.500
		25	0.016	0.014	0.002	0.125
		35	0.010	0.009	0.001	0.100
		45	0.010	0.009	0.001	0.100

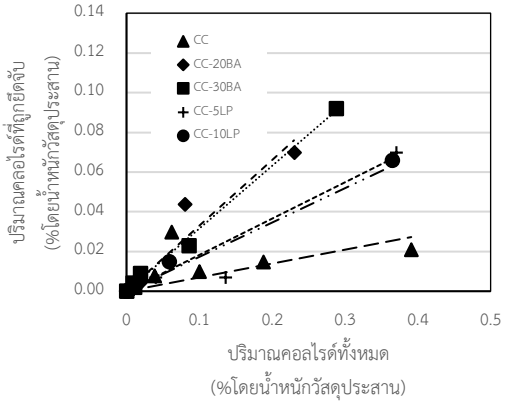
ตารางที่ 6 ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด คลอไรด์อิสระและคลอไรด์ที่ถูกยึดจับ และอัตราส่วนคลอไรด์ที่ถูกยึดจับของคอนกรีตที่บ่มน้ำ 28 วัน และเผชิญเกลือคลอไรด์ 91 วัน

ลำดับที่	สัญลักษณ์	ระยะจากผิว (มม.)	คลอไรด์ทั้งหมด (%โดย นน. วัสดุประสาน)	คลอไรด์อิสระ (%โดย นน. วัสดุประสาน)	คลอไรด์ยึดจับ (%โดย นน. วัสดุประสาน)	อัตราส่วนคลอไรด์ยึดจับ
1	CC	5	0.425	0.330	0.095	0.224
		15	0.200	0.198	0.002	0.010
		25	0.135	0.126	0.009	0.067
		35	0.080	0.070	0.010	0.125
		45	0.050	0.020	0.030	0.600
2	CC-20BA	5	0.360	0.180	0.180	0.500
		15	0.090	0.060	0.030	0.333
		25	0.024	0.019	0.005	0.208
		35	0.022	0.016	0.006	0.273
		45	0.014	0.012	0.002	0.143
3	CC-30BA	5	0.310	0.280	0.030	0.097
		15	0.092	0.080	0.012	0.130
		25	0.020	0.015	0.005	0.250
		35	0.010	0.009	0.001	0.100
		45	0.010	0.000	0.010	1.000
4	CC-5LP	5	0.400	0.322	0.078	0.195
		15	0.175	0.110	0.065	0.371
		25	0.120	0.104	0.016	0.133
		35	0.065	0.051	0.014	0.215
		45	0.040	0.026	0.014	0.350

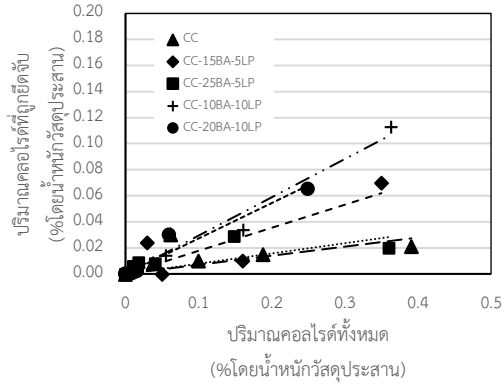
ลำดับที่	สัญลักษณ์	ระยะจากผิว (มม.)	คลอไรด์ทั้งหมด (%โดย นน. วัสดุประสาน)	คลอไรด์อิสระ (%โดย นน. วัสดุประสาน)	คลอไรด์ยึดจับ (%โดย นน. วัสดุประสาน)	อัตราส่วนคลอไรด์ยึดจับ
5	CC-10LP	5	0.292	0.190	0.102	0.349
		15	0.131	0.100	0.031	0.237
		25	0.075	0.057	0.018	0.240
		35	0.035	0.026	0.009	0.257
		45	0.016	0.012	0.004	0.250

ตารางที่ 7 ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด คลอไรด์อิสระและคลอไรด์ที่ถูกยึดจับ และอัตราส่วนคลอไรด์ที่ถูกยึดจับของคอนกรีตที่บ่มน้ำ 28 วัน และเผชิญเกลือคลอไรด์ 91 วัน (ต่อ)

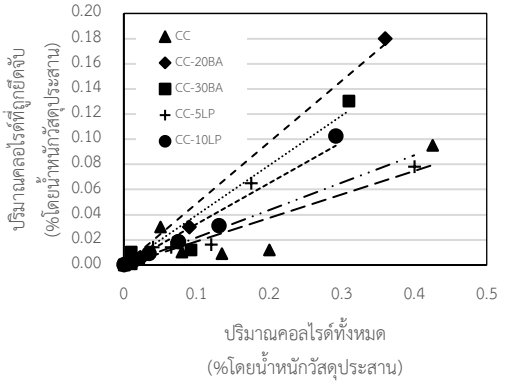
ลำดับที่	สัญลักษณ์	ระยะจากผิว (มม.)	คลอไรด์ทั้งหมด (%โดย นน. วัสดุประสาน)	คลอไรด์อิสระ (%โดย นน. วัสดุประสาน)	คลอไรด์ยึดจับ (%โดย นน. วัสดุประสาน)	อัตราส่วนคลอไรด์ยึดจับ
6	CC-15BA-5LP	5	0.321	0.250	0.071	0.221
		15	0.187	0.168	0.019	0.102
		25	0.050	0.025	0.025	0.500
		35	0.040	0.020	0.020	0.500
		45	0.016	0.011	0.005	0.313
7	CC-25BA-5LP	5	0.386	0.251	0.135	0.350
		15	0.160	0.100	0.060	0.375
		25	0.029	0.021	0.008	0.276
		35	0.014	0.011	0.003	0.214
		45	0.014	0.007	0.007	0.500
8	CC-10BA-10LP	5	0.380	0.300	0.080	0.211
		15	0.130	0.065	0.065	0.500
		25	0.060	0.040	0.020	0.333
		35	0.030	0.030	0.000	0.000
		45	0.020	0.010	0.010	0.500
9	CC-20BA-10LP	5	0.330	0.260	0.070	0.212
		15	0.10	0.070	0.030	0.300
		25	0.030	0.015	0.015	0.500
		35	0.020	0.010	0.010	0.500
		45	0.010	0.009	0.001	0.100



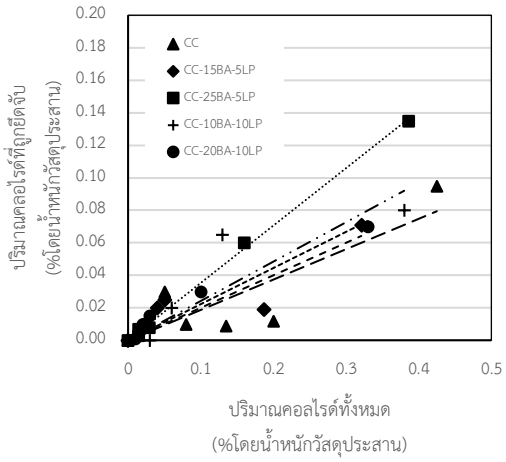
รูปที่ 5 ความสามารถยึดจับคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้วัสดุประสานแบบ 2 ชนิด ภายหลังเผชิญเกลือคลอไรด์เป็นระยะเวลา 28 วัน



รูปที่ 6 ความสามารถยึดจับคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้วัสดุประสานแบบ 3 ชนิด ภายหลังเผชิญเกลือคลอไรด์เป็นระยะเวลา 28 วัน



รูปที่ 7 ความสามารถยึดจับคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้วัสดุประสานแบบ 2 ชนิด ภายหลังเผชิญเกลือคลอไรด์เป็นระยะเวลา 91 วัน

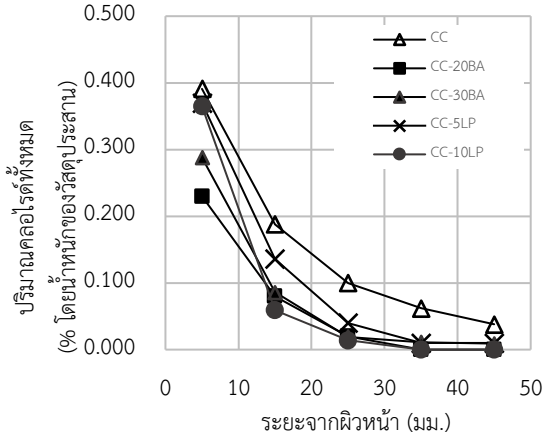


รูปที่ 8 ความสามารถยึดจับคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้วัสดุประสานแบบ 3 ชนิด ภายหลังเผชิญเกลือคลอไรด์เป็นระยะเวลา 91 วัน

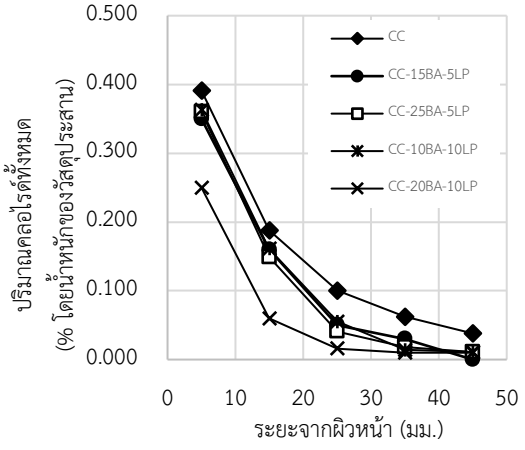
3.4 การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีต

ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด จากตารางที่ 4 ถึง 7 และ รูปที่ 9 ถึง 12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดกับระยะความลึกจากผิวคอนกรีตของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน คอนกรีตผสมเถ้าก้นเตาบดละเอียด คอนกรีตผสมผงหินปูน และคอนกรีตผสมเถ้ากันเตาบดละเอียดร่วมกับผงหินปูน โดยพบว่า ที่ระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ 28 วัน ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดของคอนกรีตผสมเถ้าก้นเตาบดละเอียด คอนกรีตผสมผงหินปูนมีค่าน้อยกว่าของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ทั้งนี้อาจเป็นเพราะ การเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานของเถ้าก้นเตาบดละเอียด รวมทั้งวัสดุส่วนอื่นที่ยังไม่ทำปฏิกิริยาปอซโซลานทำหน้าที่ช่วยในการเติมเต็มส่งให้คอนกรีตมีความทึบมากขึ้นจึงทำให้คลอไรด์ซึมผ่านเข้าไปในคอนกรีตยากขึ้น นอกจากนี้ความละเอียดของผงหินปูนที่มีส่วนช่วยเข้าไปอุดช่องว่างภายในเนื้อคอนกรีตทำให้คอนกรีตมีความพรุนน้อย จึงส่งผลให้คลอไรด์ซึมผ่านเข้าไปในคอนกรีตยากเช่นกัน ในส่วนของคอนกรีตผสมเถ้าก้นเตาบดละเอียดร่วมกับผงหินปูนมีค่าการซึมผ่านคลอไรด์น้อยกว่าคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

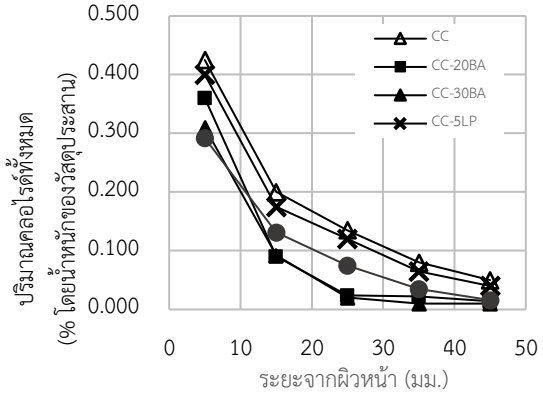
ประเภทที่ 1 ล้วน เนื่องจากเหตุผลดังที่กล่าวมาแล้ว สำหรับคอนกรีตที่เผชิญคลอไรด์ 91 วัน มีค่าการซึมผ่านคลอไรด์มากกว่าคอนกรีตที่เผชิญคลอไรด์ 28 วัน เพราะคอนกรีตที่เผชิญคลอไรด์เป็นระยะเวลานานกว่าย่อมเกิดการเสื่อมสภาพ เนื่องจากคลอไรด์มากขึ้นตามลำดับไปด้วย



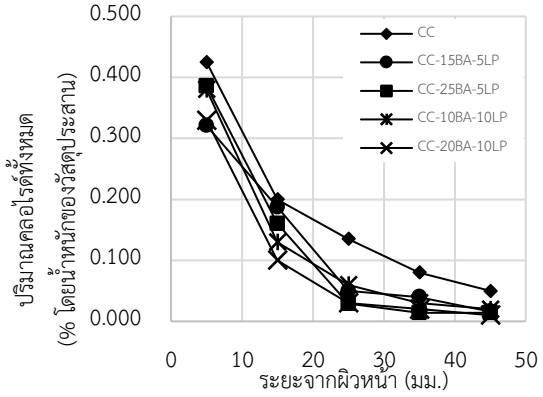
รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดกับระยะความลึกจากผิวคอนกรีตของคอนกรีตที่ใส่ 2 สัดส่วนผสม ที่ระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ที่ 28 วัน



รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดกับระยะความลึกจากผิวคอนกรีตของคอนกรีตที่ใส่ 3 สัดส่วนผสม ที่ระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ที่ 28 วัน



รูปที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดกับระยะความลึกจากผิวคอนกรีตของคอนกรีตที่ใส่ 2 สัดส่วนผสม ที่ระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ที่ 91 วัน



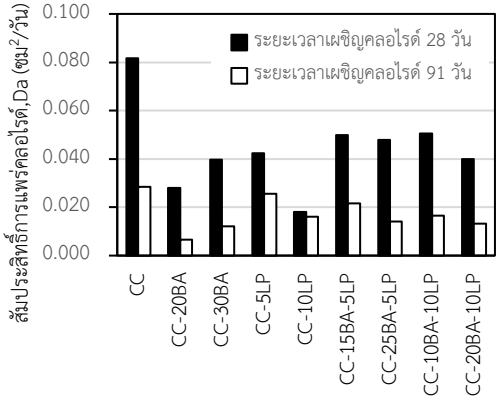
รูปที่ 12 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดกับระยะความลึกจากผิวคอนกรีตของคอนกรีตที่ใส่ 3 สัดส่วนผสม ที่ระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ที่ 91 วัน

3.5 สัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีต

จากผลการทดสอบความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตให้ค่าปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดเพื่อนำมาหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ (Da) ได้ดังรูปที่ 13 ซึ่งคอนกรีตมีอายุที่เพิ่มขึ้นสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์นั้นมีค่าที่ต่ำลง ทั้งนี้เนื่องจากคอนกรีตสามารถเกิดปฏิกิริยาได้สมบูรณ์มากขึ้นส่งผลให้คอนกรีตมีเนื้อภายในที่แน่นขึ้นและโพรงช่องว่างภายในลดลง

นอกจากนี้พบว่าการใช้เถ้าก้นเตาบดละเอียดและผงหินปูนแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

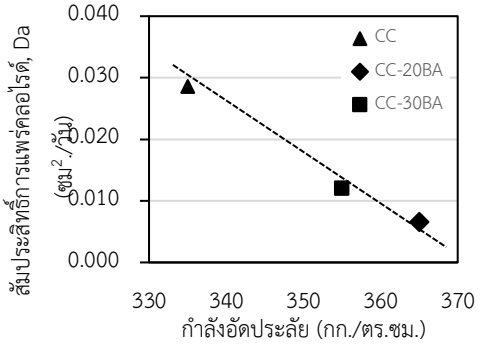
สามารถลดค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ได้มากกว่าของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ทั้งนี้เนื่องจากการใช้เถ้าก้นเตาบดละเอียดและฝุ่นหินปูนแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ทำให้อนุภาคของฝุ่นหินปูนกระจายตัวดีขึ้น ประกอบกับขนาดอนุภาคที่เล็กของฝุ่นหินปูนเข้าไปอุดโพรงช่องว่าง ส่งผลให้คอนกรีตมีเนื้อภายในที่แน่นขึ้น รวมถึงเถ้าก้นเตาบดละเอียดเป็นสารปอซโซลานที่เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกที่ช่วยปรับปรุงให้คอนกรีตมีคุณสมบัติต่างๆดีขึ้น ประกอบระยะเวลาการทำปฏิกิริยาที่นานขึ้นทำให้ปฏิกิริยาปอซโซลานเกิดสมบูรณ์ ในส่วนของคอนกรีตเถ้าก้นเตาบดละเอียดผสมฝุ่นหินปูน ให้ค่ามีแนวโน้มที่สอดคล้องกับการผสมด้วยด้วยเถ้าก้นเตาบดละเอียดเพียงอย่างเดียว ดังเหตุผลที่กล่าวมาแล้ว



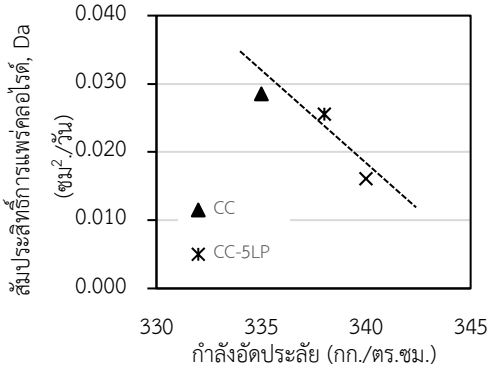
รูปที่ 13 สัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตที่เผชิญคลอไรด์ 28 และ 91 วัน

3.6 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีต

จากรูปที่ 14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดประลัยของคอนกรีตอายุ 56 วัน และสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตที่บ่มน้ำ 28 วันและเผชิญคลอไรด์ 28 วัน พบว่าสัมประสิทธิ์การแพร่จะมีค่าน้อยลงกำลังอัดประลัยของคอนกรีตจะมากขึ้น คอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วนจะให้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ที่มีคลอไรด์แทรกซึมเข้าไปในเนื้อคอนกรีตสูงและกำลังอัดประลัยของคอนกรีตมีแนวโน้มต่ำลง ซึ่งคอนกรีตที่มีการผสมเถ้าก้นเตาบดละเอียดจะให้ค่าที่ตรงกันข้ามกับคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน เนื่องจากเถ้าก้นเตาบดละเอียดเป็นสารปอซโซลานที่เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิค ที่ช่วยปรับปรุงให้คอนกรีตมีคุณสมบัติต่างๆดีขึ้น และด้วยระยะเวลาที่นานขึ้นการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันและปฏิกิริยาปอซโซลานเกิดได้อย่างต่อเนื่องและสมบูรณ์ที่สุด ส่วนของฝุ่นหินปูนที่มีขนาดอนุภาคที่เล็ก สามารถไปอุดโพรงช่องว่างคอนกรีต เป็นผลให้คอนกรีตมีรูพรุนน้อยลง



(ก) คอนกรีตผสมเถ้าก้นเตาบดละเอียด



(ข) คอนกรีตผสมฝุ่นหินปูน

รูปที่ 14 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดประลัยของคอนกรีตที่อายุ 56 วันและสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตที่บ่มน้ำ 28 วัน และเผชิญเกลือคลอไรด์ 28 วัน

4. สรุป

จากผลการศึกษาวิจัยครั้งนี้สามารถสรุปได้ดังนี้

1. กำลังอัดประลัยของคอนกรีตผสมเถ้าก้นเตาบดละเอียดมีค่าน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วนที่อายุ 28 วัน ส่วนกำลังอัดประลัยของคอนกรีตผสมผงหินปูนมีค่าใกล้เคียงกับของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และมีแนวโน้มการพัฒนากำลังอัดมากขึ้นเมื่อผสมเถ้าก้นเตาร้อยละ 20 และ 30 ที่อายุ 56 วัน

2. ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดของคอนกรีตผสมเถ้าก้นเตาบดละเอียด และคอนกรีตผสมผงหินปูนมีค่าน้อยกว่าของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน

3. การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตผสมเถ้าก้นเตาบดละเอียด และคอนกรีตผสมผงหินปูน มีค่าน้อยกว่าของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน

4. ความสามารถเก็บกักคลอไรด์ของคอนกรีตผสมเถ้าก้นเตาบดละเอียด และคอนกรีตผสมผงหินปูนมีมากกว่าของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน

5. คอนกรีตผสมเถ้าก้นเตาบดละเอียดและผงหินปูนให้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์น้อยกว่าคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสำนักงานการวิจัยแห่งชาติ (วช.) ที่สนับสนุนทุนการวิจัยในครั้งนี้ ตลอดจนสาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม และภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

6. เอกสารอ้างอิง

[1] C. Jaturapitakkul and R. Cheerarot, “Development of Bottom Ash as Pozzolanic Material,” *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 13, no. 1, pp. 48-53, Feb. 2003.

[2] R. Cheerarot and C. Jaturapitakkul, “Use of Ground Bottom Ash as a Pozzolanic Material in Concrete,” *Research and development journal*, vol. 14, no. 2, pp. 1-8, 2003.

[3] K. Tuntisukrarom, T. Choksawangnetr, P. Srihabutra and R. Cheerarot, “Utilization of ground bottom ash in high performance concrete,” *Research and development journal*, vol. 23, no. 1, pp. 40-47, 2012.

[4] S. Inthata and R. Cheerarot, “The Resistance to Chloride Penetration of Ground Bottom Ash Concrete,” *Research and development journal*, vol. 19, no. 2, pp. 39-46, 2008.

[5] P. Krammart and S. Tangtermsirikul, “Sulfate Resistance of Mortars with Limestone Powder,” in *Proceeding of the 3rd Annual Concrete Conference, Thailand Concrete Association*, October 2010, pp. MAT 89-96.

[6] H. Hornain, J. Marchand, V. Duhot and M. Moranville, “Diffusion of chloride ions in limestone filler blended cement pastes and motars,” *Cement and concrete research*, vol. 25, no. 8, pp. 1667-1678, Dec. 1995.

[7] S. Arttamart and T. Sumranwanich, “Compressive strength and chloride

penetration resistance of concrete with fly ash, limestone powder and partial replacement of fine aggregate by bottom ash," *Journal of Engineering, RMUTT*, vol. 17, no. 2, pp. 113-125, 2019.

[8] T. Jena and K.C. Panda, "Mechanical and durability properties of marine concrete using fly ash and silpozz," *Advances in Concrete Construction*, vol. 6, no. 1, pp. 47-68, Feb. 2018.

[9] American Society for Testing and Materials, ASTM C 204 - 00: Standard Test Method for Fineness of Hydraulic Cement by Air-Permeability Apparatus, Annual Book of ASTM Standards, 2000.

[10] American Society for Testing and Materials, ASTM C 188 - 95: Standard Test Method for Density of Hydraulic Cement, Annual Book of ASTM Standards, 1995.

[11] British Standard Institute, BS 1881: Part 108 Method of Making Test Cube from Fresh Concrete, London, 1983.

[12] American Society for Testing and Materials, ASTM C1556, Standard test method for determining the apparent chloride diffusion coefficient of cementitious mixtures by bulk diffusion. 2004. vol. 4.02.

[13] American Society for Testing and Materials, ASTM C1152, Standard test method for acid-soluble chloride in mortar and concrete. 2004. vol. 4.02.

[14] American Society for Testing and Materials, ASTM C1218 M-99R08, Standard test method for water soluble chloride in mortar and concrete. 2008. vol. 4.02.

[15] S. Tangtermsirikul, Durability and Mix Design of Concrete, 1st ed., Printing House of Thammasat University, 2003.