วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ปีที่ 29 ฉบับที่ 1 ม.ค.–มี.ค. 2562
*The Journal of KMUTNB., Vol. 29, No. 1, Jan.–Mar. 2019*

บทความวิจัย

# ผลของเถ้าถ่านหินต่อการแทรกซึมคลอไรด์และกำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตและมวลรวมธรรมชาติภายใต้สิ่งแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 5 ปี

เที่ยง ชีวะเกตุ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล และ วิเชียร ชาลี*
ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทรศัพท์ 08 9791 5171 อีเมล: wichian@buu.ac.th DOI: 10.14416/j.kmutnb.2018.11.005
รับเมื่อ 1 พฤษภาคม 2561 แก้ไขเมื่อ 19 มิถุนายน 2561 ตอบรับเมื่อ 3 สิงหาคม 2561 เผยแพร่ออนไลน์ 21 พฤศจิกายน 2561
© 2019 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

**บทคัดย่อ**

งานวิจัยนี้ศึกษาผลของเถ้าถ่านหินต่อสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ และกำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีต และมวลรวมจากธรรมชาติภายใต้สภาวะแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 5 ปี โดยใช้เถ้าถ่านหินจากแม่เมาะแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตและมวลรวมจากธรรมชาติในอัตราส่วนร้อยละ 0, 15, 25, 35 และ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน และใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B) เท่ากับ 0.40 และ 0.45 สำหรับมวลรวมจากเศษคอนกรีต และ 0.45 สำหรับมวลรวมจากธรรมชาติ หล่อตัวอย่างคอนกรีตทรงลูกบาศก์ขนาด 200×200×200 มม.$^3$ สำหรับทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์และกำลังอัดของคอนกรีต หลังจากบ่มคอนกรีตในน้ำเป็นเวลา 28 วัน นำตัวอย่างทดสอบไปแช่ในสิ่งแวดล้อมทะเลบริเวณชายฝั่งในสภาวะเปียกสลับแห้ง โดยเก็บตัวอย่างทดสอบการแทรกซึมของคลอไรด์ทั้งหมด และกำลังอัดของคอนกรีตที่อายุแช่น้ำทะเล 5 ปี ผลการศึกษาพบว่า คอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตทุกส่วนผสม มีการสูญเสียกำลังอัดหลังแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 5 ปี ส่วนกลุ่มที่ใช้มวลรวมจากธรรมชาติที่ผสมเถ้าถ่านหินทุกส่วนผสม มีกำลังอัดหลังแช่น้ำทะเลที่อายุ 5 ปี เพิ่มขึ้นจากอายุบ่ม 28 วัน การใช้เถ้าถ่านหินแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในปริมาณที่สูงขึ้น ส่งผลต่อการลดสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตลงได้อย่างชัดเจน ซึ่งให้ผลไปในทิศทางเดียวกันทั้งกลุ่มที่ใช้มวลรวมจากธรรมชาติและมวลรวมจากเศษคอนกรีต โดยพบว่า คอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินอย่างน้อยร้อยละ 15 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ให้สัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ต่ำกว่าคอนกรีตธรรมดาที่ใช้มวลรวมจากธรรมชาติ ซึ่งมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45

**คำสำคัญ**: มวลรวมจากเศษคอนกรีต, มวลรวมจากธรรมชาติ, เถ้าถ่านหิน, สัมประสิทธิ์การแทรกซึมคลอไรด์, สิ่งแวดล้อมทะเล

การอ้างอิงบทความ: เที่ยง ชีวะเกตุ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล และ วิเชียร ชาลี, "ผลของเถ้าถ่านหินต่อการแทรกซึมคลอไรด์และกำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตและมวลรวมธรรมชาติภายใต้สิ่งแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 5 ปี," *วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ*, ปีที่ 29, ฉบับที่ 1, หน้า 112–123, ม.ค.–มี.ค. 2562.

Research Article

# Effect of Fly Ash on Chloride Penetration and Compressive Strength of Reclycled and Natural Aggregate Concrete under 5-year Exposure in Marine Environment

Tieng Cheewaket Chai Jaturapitakkul and Wichian Chalee*
Civil Engineering Department, Faculty of Engineering, Burapha University, Chon Buri, Thailand

* Corresponding Author, Tel. 08 9791 5171, E–mail: wichian@buu.ac.th DOI: 10.14416/j.kmutnb.2018.11.005
Received 1 May 2018; Revised 19 June 2018; Accepted 3 August 2018; Published online: 21 November 2018
© 2019 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

**Abstract**

This research studied the effect of fly ash on chloride diffusion coefficient and compressive strength of both recycled and natural aggregate concretes exposed to marine environment for 5 years. Mae-Moh fly ash was used to replace Portland cement at the percentages of 0, 15, 25, 35, and 50 by the weight of binder with various water to binder (W/B) ratios of 0.40 and 0.45 in recycled aggregate mixtures and a W/B ratio of 0.45 in natural aggregate mixtures. Concrete cube specimens of 200×200×200 $mm^3$ were cast and cured in fresh water for 28 days and then were placed in a tidal zone of marine environment. The compressive strengths of the concrete exposed to marine environment for 5 years as well as the total chloride diffusion coefficients of the specimens were determined. The Results revealed that the compressive strengths of recycled aggregate concretes decreased after being exposed in marine environment for 5 years, whereas those of natural aggregate concretes and fly ash increased after 28 days of curing. Evidently, higher in fly ash contents would lower chloride diffusion coefficients of both recycled and natural aggregate concretes. Furthermore, use of fly ash as low as 15% replacement by weight in recycled aggregated concretes could provide lower chloride diffusion coefficient compared to Portland cement containing natural aggregate concrete with W/B of 0.45.

**Keywords**: Recycled Aggregate, Fly Ash, Chloride Diffusion Coefficient, Marine Environment

Please cite this article as: T. Cheewaket, C. Jaturapitakkul, and W. Chalee, "Effect of fly ash on chloride penetration and compressive strength of reclycled and natural aggregate concrete under 5-year exposure in marine environment," *The Journal of KMUTNB*, vol. 29, no. 1, pp. 112–123, Jan.–Mar. 2019 (in Thai).

**1. บทนำ**

เถ้าถ่านหินเป็นวัสดุปอซโซลานที่ได้รับความนิยมในการนำมาใช้แทนที่บางส่วนในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เพื่อใช้เป็นวัสดุก่อสร้างในเชิงพาณิชย์อย่างเป็นรูปธรรมมากขึ้น เนื่องจากมีงานวิจัยที่น่าเชื่อถือได้ว่า เถ้าถ่านหินส่งผลให้สมบัติบางประการของคอนกรีตดีขึ้น โดยเฉพาะสมบัติด้านความคงทนของคอนกรีต จากการศึกษาที่ผ่านมา [1]–[3] พบว่า เถ้าถ่านหินมีบทบาทที่สำคัญในการปรับปรุงสมบัติของเพสต์ให้สามารถต้านทานการทำลายเนื่องจากสารเคมีที่เป็นอันตรายต่อคอนกรีตได้อย่างชัดเจน โดยมีผลการศึกษาที่ยืนยันตรงกันทั้งในห้องปฏิบัติการและการศึกษาระยะยาวในภาคสนาม ทั้งนี้เนื่องจาก เถ้าถ่านหินมีซิลิกาและอะลูมินาที่ไม่เป็นผลึก ประกอบกับเถ้าถ่านหินที่มีอนุภาคกลมตัน และมีความละเอียดสูง สามารถที่จะทำปฏิกิริยาปอซโซลานได้ดี จึงมีผลต่อการเพิ่มกำลังอัดและความทึบน้ำของคอนกรีต ตลอดจนการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานช่วยลดปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ส่งผลต่อความคงทนของคอนกรีตลงด้วย การศึกษาที่ผ่านมา [4] พบว่า การใช้เถ้าถ่านหินแทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในปริมาณที่สูงถึงร้อยละ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ในคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากธรรมชาติสามารถลดการแทรกซึมของคลอไรด์และลดการเกิดสนิมเหล็กเนื่องจากสิ่งแวดล้อมทะเลได้เป็นอย่างดี อย่างไรก็ตาม การใช้เถ้าถ่านหินในปริมาณสูง ส่งผลให้กำลังอัดของคอนกรีตลดลง [3] และมีปัญหาต่อการรับแรงเชิงกลในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก ตลอดจนส่งผลให้การทำลายเนื่องจากสิ่งแวดล้อมทะเลเกิดขึ้นได้มากขึ้น การศึกษาที่ผ่านมา [1], [2] พบว่า การใช้เถ้าถ่านหินที่มีคุณภาพดีแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในช่วงร้อยละ 25–35 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ส่งผลดีทั้งสมบัติด้านความคงทนและสมบัติเชิงกลควบคู่กันไป

แนวคิดในการปรับปรุงมวลรวมจากเศษคอนกรีต (Recycled Concrete Aggregate) ซึ่งเป็นการนำมวลรวมจากสิ่งปลูกสร้างที่ถูกรื้อถอน มาใช้แทนมวลรวมจากธรรมชาติ โดยนำเศษคอนกรีตมาย่อยให้มีขนาดเล็กลง พบว่ามีการศึกษามากขึ้น อย่างไรก็ตาม ผลการศึกษาพบว่า สมบัติของคอนกรีตที่ได้จากการใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตจะด้อยกว่าคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากธรรมชาติค่อนข้างชัดเจน ทั้งทางด้านสมบัติเชิงกลและสมบัติด้านความคงทน [5]–[7] การปรับปรุงสมบัติของเพสต์เพื่อชดเชยข้อด้อยของมวลรวมจากเศษคอนกรีตเป็นแนวทางการศึกษาที่น่าสนใจ โดยการศึกษาที่ผ่านมา พบว่า [5] การใช้เถ้าชานอ้อยบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ไม่เกินร้อยละ 20 สามารถลดการแทรกซึมของคลอไรด์เข้าไปในคอนกรีตลงได้อย่างชัดเจน นอกจากนั้น Somna *et al.*, [8] ยังพบว่าการใช้เถ้าถ่านหินที่มีคุณภาพดีแทนที่บางส่วนในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์สามารถทำให้คอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีต พัฒนากำลังอัดเพิ่มขึ้นในช่วงหลัง และทำให้คอนกรีตมีความทึบน้ำมากขึ้น ซึ่งส่งผลให้สมบัติด้านความคงทนของคอนกรีตดีขึ้น นอกจากนั้นได้มีผลการศึกษาการปรับปรุงความคงทนของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตที่แช่ในทะเลเป็นเวลา 3 ปี [9] ซึ่งพบว่า คอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีต ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 และแทนที่เถ้าถ่านหินในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ร้อยละ 15 ถึง 25 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน มีความเหมาะสมที่จะใช้ในสิ่งแวดล้อมทะเล เนื่องจากมีกำลังอัดและความสามารถในการต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์เป็นไปตามที่ ACI 201.2R [10] ได้แนะนำไว้ อย่างไรก็ตาม ข้อมูลการศึกษาด้านความคงทนของคอนกรีตในสภาพแวดล้อมจริงจำเป็นต้องใช้ระยะเวลาเก็บข้อมูลที่นานขึ้น และควรมีการศึกษาเปรียบเทียบกับคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากธรรมชาติภายใต้เงื่อนไขเดียวกัน เพื่อเป็นฐานข้อมูลในการนำไปใช้งานอย่างน่าเชื่อถือมากขึ้น ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงต้องการศึกษาเปรียบเทียบผลของการปรับปรุงสมบัติด้านความคงทนของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีต และมวลรวมจากธรรมชาติ โดยใช้เถ้าถ่านหิน โดยศึกษาผลของเถ้าถ่านหินต่อสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ และกำลังอัดของคอนกรีตภายใต้สภาวะแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 5 ปี

**2. วิธีการศึกษา**

**2.1 วัสดุประสาน**

วัสดุประสานที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ประกอบด้วย

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เถ้าถ่านหินจากแม่เมาะที่ได้จากโรงงานโดยตรง ในคอนกรีตกลุ่มที่ใช้มวลรวมจากธรรมชาติใช้เถ้าถ่านหินที่มีค่ากลางของอนุภาคเท่า 9.7 ไมโครเมตร ความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.21 และมีผลรวมของสารประกอบหลัก $SiO_2$, $Al_2O_3$ และ $Fe_2O_3$ เท่ากับร้อยละ 79.45 และ มีค่า LOI ร้อยละ 0.05 ส่วนกลุ่มที่ใช้ในมวลรวมจากเศษคอนกรีตมีค่ากลางของอนุภาคเท่า 10.1 ไมโครเมตร ความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.23 และมีผลรวมของสารประกอบหลัก $SiO_2$, $Al_2O_3$ และ $Fe_2O_3$ เท่ากับร้อยละ 72.51 และมีค่า LOI ร้อยละ 0.07 โดยเถ้าถ่านหินที่ใช้ในคอนกรีตทั้งสองกลุ่มมีสมบัติทางกายภาพและทางเคมีใกล้เคียงกัน จากสมบัติทางเคมีจัดเป็นเถ้าถ่านหิน Class F ตามมาตรฐาน ASTM C618 [11]

**2.2 มวลรวม**

สมบัติมวลรวมที่ใช้ในคอนกรีตที่ใช้มวลรวมธรรมชาติ มวลรวมหยาบมีขนาดใหญ่สุดของมวลรวมเท่ากับ 19 มม. และมีค่าโมดูลัสความละเอียดเท่ากับ 6.66 ส่วนมวลรวมละเอียดมีค่าโมดูลัสความละเอียดเท่ากับ 2.63 ความถ่วงจำเพาะทั้งหมดของมวลรวมหยาบและละเอียดในสภาวะอิ่มตัวผิวแห้งเท่ากับ 2.77 และ 2.57 ตามลำดับ

**ตารางที่ 1** สมบัติทางกายภาพของมวลรวม

| สมบัติทางกายภาพ | คอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีต | | คอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากธรรมชาติ | |
|---|---|---|---|---|
| | มวลรวมละเอียด | มวลรวมหยาบ | มวลรวมละเอียด | มวลรวมหยาบ |
| โมดูลัสความละเอียด | 2.74 | 6.42 | 2.63 | 6.66 |
| ความถ่วงจำเพาะ | 2.63 | 2.44 | 2.61 | 2.80 |
| การดูดซึมน้ำ (%) | 0.91 | 4.92 | 0.96 | 0.64 |
| ความหนาแน่น (กก./ลบ.ม.) | 1725 | 1476 | 1699 | 1616 |

สำหรับคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตได้ใช้ทรายแม่น้ำที่มีค่าโมดูลัสความละเอียดเท่ากับ 2.74 และความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.63 ส่วนมวลรวมหยาบใช้หินที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีต ซึ่งกำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้ย่อยอยู่ในช่วง 240–320 กก./ซม.$^2$ (ทรงกระบอก) มีโมดูลัสความละเอียดเท่ากับ 6.42 ความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.44 ร้อยละการดูดซึมน้ำของมวลรวมจากเศษคอนกรีตเท่ากับ 4.92 ซึ่งสูงกว่ามวลรวมหยาบธรรมชาติที่เป็นหินปูนค่อนข้างมาก โดยมวลรวมหยาบธรรมชาติมีร้อยละการของดูดซึมน้ำเท่ากับ 0.64 สมบัติทางกายภาพของมวลรวมละเอียดและมวลรวมหยาบที่ใช้ในการศึกษาแสดงดังตารางที่ 1

**2.3 การเตรียมตัวอย่างและการทดสอบ**

ตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตได้เตรียมเมื่อ 5 ปีที่แล้ว ส่วนผสมคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45 และแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าถ่านหินจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ ในอัตราส่วนร้อยละ 0, 15, 25, 35 และ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน หล่อตัวอย่างคอนกรีตทรงลูกบาศก์ขนาด 200×200×200 มม.$^3$ สำหรับทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์และกำลังอัดของคอนกรีต หลังจากบ่มคอนกรีตในน้ำเป็นเวลา 28 วัน นำตัวอย่างไปแช่บริเวณชายฝั่งทะเลในสภาวะเปียกสลับแห้ง ที่มีน้ำขึ้นลงวันละ 2 รอบ โดยน้ำทะเลมีค่าความเป็นกรดด่าง (pH) อยู่ในช่วง 7.9-8.2 และปริมาณคลอไรด์มีค่าอยู่ระหว่าง 16,000–19,000 มก./ล. ส่วนซัลเฟตระหว่าง 2,200–2,700 มก./ล. และมีอุณหภูมิอยู่ระหว่าง 25 ถึง 35 องศาเซลเซียส เก็บตัวอย่างทดสอบการแทรกซึมของคลอไรด์ทั้งหมดโดยใช้กรดเป็นตัวทำละลายตามมาตรฐาน ASTM C1152 [12] และเจาะตัวอย่างทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มม. สูง 100 มม. เพื่อทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตที่อายุแช่น้ำทะเล 5 ปี การเตรียมตัวอย่างและการทดสอบแสดงดังรูปที่ 1

ส่วนคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากธรรมชาติได้ใช้ฐานข้อมูลจากงานวิจัยที่ผ่านมา [13] ที่ใช้ส่วนผสมคอนกรีตและการเตรียมตัวอย่างทดสอบเหมือนกับคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีต โดยใช้ข้อมูลการแทรกซึมของคลอไรด์และกำลังอัดของคอนกรีตที่สภาวะแวดล้อมทะเล และอายุแช่น้ำ

**รูปที่ 1** การเตรียมตัวอย่างเพื่อทดสอบการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตหลังแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 5 ปี

ทะเลเดียวกับกลุ่มที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตเพื่อศึกษาเปรียบเทียบผลการใช้เถ้าถ่านหินในการปรับปรุงคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตและมวลรวมจากธรรมชาติภายใต้เงื่อนไขเดียวกัน โดยส่วนผสมคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตและมวลรวมจากธรรมชาติแสดงดังตารางที่ 2 และ 3 ตามลำดับ

**ตารางที่ 2** อัตราส่วนผสมของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีต

| ส่วนผสม | สัดส่วนผสมคอนกรีต (กก./ม.$^3$) | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 | เถ้าถ่านหิน | ทราย | มวลรวมจากเศษคอนกรีต | น้ำ | สารลดน้ำพิเศษ |
| 40FR00 | 477 | 0 | 767 | 935 | 190 | 0.5 |
| 40FR15 | 405 | 72 | 767 | 910 | 190 | 0.5 |
| 40FR25 | 358 | 119 | 767 | 894 | 190 | 0.5 |
| 40FR35 | 310 | 167 | 767 | 875 | 190 | 0.5 |
| 40FR50 | 239 | 239 | 767 | 850 | 190 | 0.5 |
| 45FR00 | 424 | 0 | 767 | 979 | 190 | 0.4 |
| 45FR15 | 360 | 64 | 767 | 957 | 190 | 0.4 |
| 45FR25 | 318 | 106 | 767 | 938 | 190 | 0.4 |
| 45FR35 | 276 | 148 | 767 | 925 | 190 | 0.4 |
| 45FR50 | 212 | 212 | 767 | 903 | 190 | 0.4 |

**ตารางที่ 3** อัตราส่วนผสมของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากธรรมชาติ

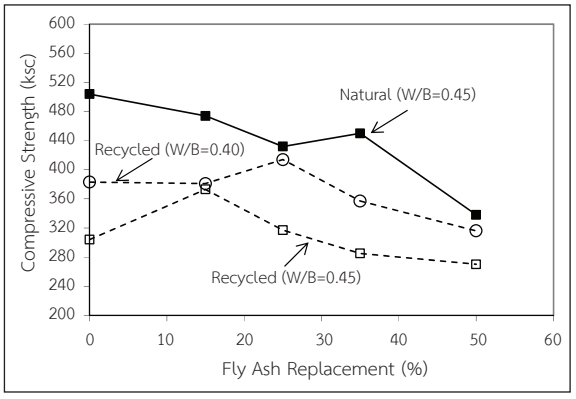
| ส่วนผสม | สัดส่วนผสมคอนกรีต (กก./ม.$^3$) | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 | เถ้าถ่านหิน | ทราย | มวลรวมจากธรรมชาติ | น้ำ |
| I45 | 478 | - | 639 | 1,024 | 215 |
| I45FA15 | 406 | 72 | 639 | 1,004 | 215 |
| I45FA25 | 359 | 119 | 639 | 990 | 215 |
| I45FA35 | 311 | 167 | 639 | 977 | 215 |
| I45FA50 | 239 | 239 | 639 | 957 | 215 |

## 3. วิเคราะห์ผลการศึกษา

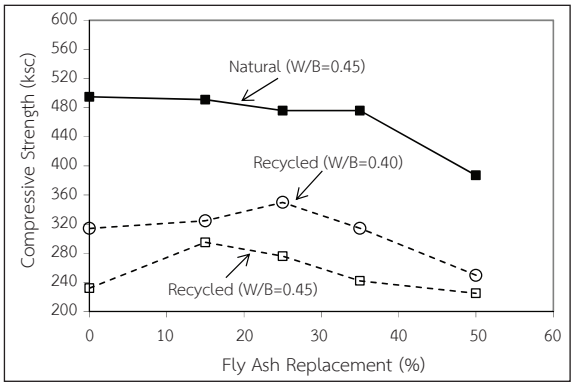
### 3.1 กำลังอัดของคอนกรีต

กำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีต ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.45 และมวลรวมจากธรรมชาติที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.45 ที่อายุ 28 วัน และหลังแช่น้ำทะเล 5 ปี แสดงดังตารางที่ 4 โดยพบว่ากำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากธรรมชาติทุกส่วนผสมมีกำลังอัดที่ อายุ 28 วัน และหลังแช่น้ำทะเล 5 ปี สูงกว่า 350 กก./ซม.$^2$ ซึ่งมีความเหมาะสมเชิงกลที่จะใช้ในสิ่งแวดล้อมทะเลตามข้อกำหนดของ ACI 201.2R [10]

ส่วนคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตและมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 และแทนที่เถ้าถ่านหินในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ไม่เกินร้อยละ 35 เท่านั้นที่มีกำลังอัดที่อายุ 28 วัน สูงกว่า 350 กก./ซม.$^2$ และกำลังอัดของคอนกรีตกลุ่มนี้หลังแช่น้ำทะเล 5 ปี ลดลงค่อนข้างชัดเจน และต่ำกว่า 350 กก./ซม.$^2$ ซึ่งอาจไม่มีความเหมาะสมในด้านสมบัติเชิงกลที่ใช้ในสิ่งแวดล้อมทะเล เมื่อพิจารณาผลของมวลรวมต่อกำลังอัดของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน ดังรูปที่ 2 (ก) พบว่า คอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากธรรมชาติมีกำลังอัดสูงกว่ามวลรวมจากเศษคอนกรีตทั้งสองอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานค่อนข้างชัดเจน ถึงแม้ว่ามวลรวมจากเศษคอนกรีตจะใช้ปริมาณน้ำที่ต่ำกว่าและใช้สารลดน้ำเพื่อช่วยในการทำงานได้ แต่กำลังอัดก็ยังต่ำกว่ามวลรวมจากธรรมชาติ




(ก) อายุบ่ม 28 วัน




(ข) อายุแช่น้ำทะเล 5 ปี

**รูปที่ 2** ผลของเถ้าถ่านหินต่อกำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตและมวลรวมจากธรรมชาติ

ซึ่งผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า คุณภาพของมวลรวมหยาบมีผลค่อนข้างชัดเจนต่อสมบัติเชิงกลของคอนกรีต

เมื่อพิจารณาผลของเถ้าถ่านหินต่อกำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากธรรมชาติและมวลรวมจากเศษคอนกรีตที่อายุบ่ม 28 วัน พบว่า ให้ผลไปในทิศทางเดียวกัน กล่าวคือ การใช้เถ้าถ่านหินแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในปริมาณที่สูงขึ้น ส่งผลให้กำลังอัดมีแนวโน้มลดลง โดยเห็นผลชัดเจนในคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากธรรมชาติมากกว่ามวลรวมจากเศษคอนกรีต ซึ่งพบว่า คอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินทุกส่วนผสมที่ใช้มวลรวมจากธรรมชาติมีกำลังอัดที่อายุ 28 วัน ต่ำกว่าคอนกรีตที่ไม่ได้ผสมเถ้าถ่านหิน ส่วนคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตพบว่า การใช้เถ้าถ่านหินผสมในคอนกรีตร้อยละ 15 โดยน้ำหนักวัสดุประสานมีผลให้กำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตที่ไม่ได้ผสมเถ้าถ่านหิน และคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่ำที่ 0.40 ให้กำลังอัดสูงที่สุด เมื่อแทนที่เถ้าถ่านหินในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 สูงถึงร้อยละ 25 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ซึ่งผลดังกล่าวเกิดจากกำลังอัดในช่วงต้นของคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินเกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำเป็นหลัก และการลดปูนซีเมนต์ลง โดยการแทนที่เถ้าถ่านหินในปริมาณที่มากขึ้น ยิ่งมีผลทำให้กำลังอัดที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันลดลง ส่วนปฏิกิริยาปอซโซลานระหว่างเถ้าถ่านหินกับปูนซีเมนต์เริ่มมีผลต่อการเพิ่มกำลังอัดคอนกรีตในช่วงหลัง 7 วัน เป็นต้นไป และพัฒนากำลังอัดต่อเนื่องในระยะยาว [13], [14]

ส่วนในกรณีของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตที่พบว่า กำลังอัดสูงกว่ากลุ่มควบคุมเมื่อใช้เถ้าถ่านหินผสมในคอนกรีตไม่เกินร้อยละ 25 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน เป็นผลจากเถ้าถ่านหินที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้มีลักษณะอนุภาคที่กลมตัน สามารถแทรกช่องว่างในคอนกรีตได้ดี ทำให้คอนกรีตมีความทึบน้ำและส่งผลให้กำลังอัดสูงกว่ากลุ่มควบคุมได้ [6] นอกจากนั้นปฏิกิริยาปอซโซลานระหว่างซิลิกาและอะลูมินาในเถ้าถ่านหิน กับแคลเซียมไฮดรอกไซด์จากปฏิกิริยาไฮเดรชันยังส่งผลให้คอนกรีตมีกำลังอัดสูงขึ้นได้

เมื่อพิจารณากำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากธรรมชาติและมวลรวมจากเศษคอนกรีตหลังแช่น้ำทะเลบริเวณชายฝั่งเป็นเวลา 5 ปี ดังตารางที่ 4 พบว่าคอนกรีตที่ใช้มวลจากธรรมชาติที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45 ยังคงให้กำลังอัดสูงกว่ากลุ่มที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตทั้งสองอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน โดยรูปที่ 2 (ข) พบว่า แนวโน้มของกำลังอัดคอนกรีตทั้งสองกลุ่มที่ปริมาณการแทนที่เถ้าถ่านหินต่างกัน เป็นไปในทิศทางกับกำลังอัดที่อายุ 28 วัน โดยพบว่า คอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากธรรมชาติ มีกำลังอัดหลังแช่น้ำทะเลสูงกว่ากลุ่มที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตชัดเจนมากขึ้น เมื่อเทียบกับกำลังอัดที่อายุบ่ม 28 วัน ซึ่งผลดังกล่าวสอดคล้องกับการสูญเสียกำลังอัดหลังแช่น้ำทะเลที่อยู่ในรูปร้อยละกำลังอัดที่อายุแช่น้ำทะเล

5 ปี เทียบกับอายุบ่มคอนกรีต 28 วัน ซึ่งพบว่า คอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหิน ทุกส่วนผสมมีร้อยละกำลังอัดที่อายุแช่น้ำทะเล 5 ปี เทียบกับ 28 วัน สูงกว่า 100 ในขณะที่คอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตทุกส่วนผสมมีกำลังอัดที่อายุแช่น้ำทะเล 5 ปี เทียบกับอายุบ่มคอนกรีต 28 วัน ต่ำกว่าร้อยละ 90 ผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีต ต้านทานการทำลายเนื่องจากสิ่งแวดล้อมทะเลได้ต่ำกว่ามวลรวมจากธรรมชาติค่อนข้างมาก

**ตารางที่ 4** กำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตและมวลรวมจากธรรมชาติที่อายุ 28 วัน และหลังแช่น้ำทะเล 5 ปี

| W/B Ratio | เถ้าถ่านหิน (ร้อยละ) | กำลังอัดของคอนกรีต (กก./ซม.$^2$) | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | มวลรวมจากเศษคอนกรีต | | | มวลรวมจากธรรมชาติ | | |
| | | 28 วัน | แช่น้ำทะเล 5 ปี | กำลังอัด 5 ปี เทียบ 28 วัน (ร้อยละ) | 28 วัน | แช่น้ำทะเล 5 ปี | กำลังอัด 5 ปี เทียบ 28 วัน (ร้อยละ) |
| 0.45 | 0 | 304 | 232 | 76.3 | 504 | 495 | 98.2 |
| | 15 | 373 | 295 | 79.1 | 474 | 491 | 103.6 |
| | 25 | 317 | 276 | 87.1 | 432 | 476 | 110.2 |
| | 35 | 285 | 242 | 84.9 | 450 | 476 | 105.8 |
| | 50 | 270 | 225 | 83.3 | 338 | 387 | 114.5 |
| 0.40 | 0 | 383 | 314 | 82.0 | - | - | - |
| | 15 | 381 | 325 | 85.2 | - | - | - |
| | 25 | 414 | 350 | 84.5 | - | - | - |
| | 35 | 357 | 314 | 88.0 | - | - | - |
| | 50 | 316 | 250 | 79.0 | - | - | - |

การทำลายเนื่องจากสิ่งแวดล้อมทะเลที่ส่งผลต่อกำลังอัดของคอนกรีตเกิดจากสาเหตุทางกายภาพและทางเคมี โดยการทำลายทางเคมีเกิดจากสารประกอบซัลเฟตที่อยู่ในน้ำทะเล ส่งผลให้คอนกรีตเกิดการขยายตัวแตกร้าว และสูญเสียการรับแรง [15] ส่วนการทำลายทางกายภาพเกิดจากการการกัดเซาะ (Erosion) ได้แก่ คลื่นจากน้ำทะเล กรวดทรายที่ทำให้คอนกรีตเกิดการสึกกร่อน และสูญเสียการรับแรงได้ ในการศึกษาครั้งนี้ ตัวอย่างคอนกรีตแช่บริเวณชายฝั่งทะเล ซึ่งส่งผลให้การทำลายทางกายภาพสูงกว่าการทำลายทางเคมี ดังนั้นคุณภาพของมวลรวมที่ช่วยต้านทานการทำลายเนื่องจากลักษณะทางกายภาพ จึงมีความสำคัญมากกว่าการใช้เถ้าถ่านหินที่ช่วยป้องกันการทำลายเนื่องจากสารประกอบซัลเฟต ซึ่งส่งผลให้คอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากธรรมชาติที่มีคุณภาพดีกว่าสามารถทนทานต่อการกัดเซาะ และส่งผลให้มีการสูญเสียกำลังอัดน้อยกว่ากลุ่มที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตค่อนข้างชัดเจน

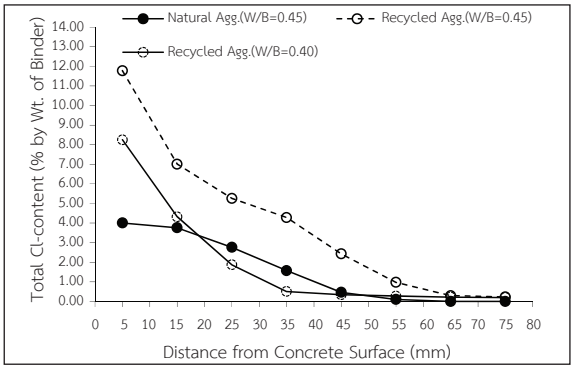
นอกจากนั้นยังพบว่า การแทนที่เถ้าถ่านหินในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในปริมาณที่สูงขึ้นในคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตไม่ได้ส่งผลชัดเจนต่อการสูญเสียกำลังอัดหลังคอนกรีตแช่น้ำทะเล เช่น คอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 และแทนที่เถ้าถ่านหินร้อยละ 0, 15, 25, 35 และ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน มีกำลังอัดที่อายุแช่น้ำทะเล 5 ปี เทียบกับ 28 วัน เท่ากับร้อยละ 82.0, 85.2, 84.5, 88.0 และ 79.0 ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่า การใช้เถ้าถ่านหินเพื่อลดการทำลายเนื่องจากสารประกอบซัลเฟตมีผลค่อนข้างน้อยเมื่อเทียบกับคุณภาพของมวลรวม

อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณากำลังอัดของคอนกรีตกลุ่มที่ใช้มวลรวมจากธรรมชาติ พบว่า กำลังอัดคอนกรีตหลังแช่ในน้ำทะเลสภาพเปียกสลับแห้งเป็นเวลา 5 ปี มีแนวโน้มสูงกว่าที่อายุ 28 วัน เล็กน้อย โดยให้ร้อยละกำลังอัดคอนกรีตที่อายุแช่น้ำทะเล 5 ปี เทียบกับอายุ 28 วัน อยู่ในช่วง 98.2 ถึง 114.5 โดยกลุ่มที่ผสมเถ้าถ่านหินมีผลดีต่อการลดการสูญเสียกำลังอัดเนื่องจากน้ำทะเลมากกว่าคอนกรีตที่ไม่ผสมเถ้าถ่านหิน ทั้งนี้เป็นผลจากปฏิกิริยาปอซโซลานที่ส่งผลให้กำลังอัดของคอนกรีตเพิ่มขึ้นในระยะยาว และคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินช่วยลดแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ที่เป็นสารตั้งต้นที่เข้าทำปฏิกิริยากับสารประกอบซัลเฟตและลดการสูญเสียกำลังอัดเนื่องจากเกลือซัลเฟตได้ [15], [16]

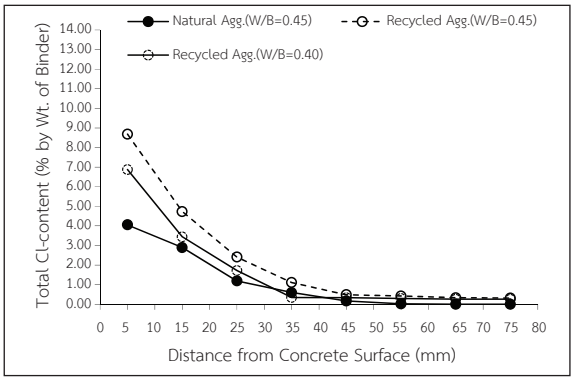
### 3.2 การแทรกซึมของคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตและมวลรวมจากธรรมชาติที่อายุแช่น้ำทะเล 5 ปี

การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตและมวลรวมจากธรรมชาติ หลังแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 5 ปี ดังแสดงในรูปที่ 3 พบว่า การใช้เถ้าถ่านหินแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในปริมาณที่มากขึ้นส่งผลต่อการลดการแทรกซึมของคลอไรด์ ในคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากธรรมชาติและมวลรวมจากเศษคอนกรีตอย่างชัดเจน เช่น คอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45 และใช้มวลรวมจากธรรมชาติและมวลรวมจากเศษคอนกรีต เมื่อผสมเถ้าถ่านหินร้อยละ 0, 15 และ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน พบปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดที่แทรกซึมเข้ามาที่ระดับความลึก 35 มม. เท่ากับร้อยละ 1.57, 0.59, 0.05 และ 4.28, 1.11, 0.28 โดยน้ำหนักวัสดุประสานตามลำดับ ซึ่งผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า ปฏิกิริยาปอซโซลานระหว่างแคลเซียมไฮดรอกไซด์กับซิลิกาและอะลูมินาจากเถ้าถ่านหิน ได้เป็นแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตที่เป็นเจลแข็งสามารถอุดช่องว่างและลดโพรงในคอนกรีตส่งผลให้ลดการแทรกซึมของคลอไรด์เข้าในคอนกรีตได้อย่างชัดเจน [15], [16] ประกอบกับอนุภาคที่กลมตันของเถ้าถ่านหินที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ สามารถแทรกช่องว่างและทำให้คอนกรีตมีความทึบน้ำมากขึ้น

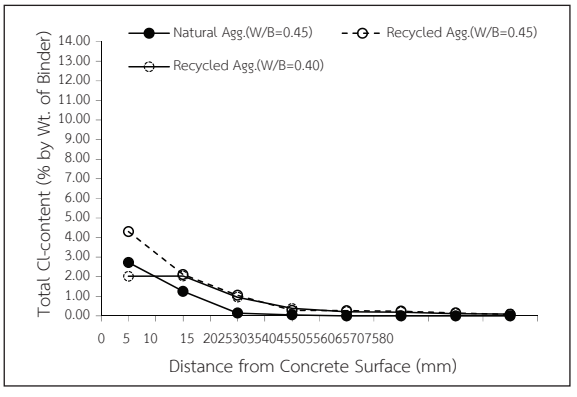
การศึกษาครั้งนี้พบว่า ในคอนกรีตที่ไม่ได้ผสมเถ้าถ่านหินและมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากัน กลุ่มที่ใช้มวลรวมจากธรรมชาติ สามารถลดการแทรกซึมของคลอไรด์ลงได้มากกว่ากลุ่มที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตอย่างชัดเจน [รูปที่ 3 (ก)] และเมื่อผสมเถ้าถ่านหินในคอนกรีตร้อยละ 15 โดยน้ำหนักวัสดุประสานดังรูปที่ 3 (ข) พบว่า ความสามารถในการต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์เนื่องจากน้ำทะเลของคอนกรีตทั้งสองกลุ่มใกล้เคียงกันมากขึ้น และการใช้เถ้าถ่านหินปริมาณสูงถึงร้อยละ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสานในคอนกรีตดังรูปที่ 3 (ค) ยิ่งพบว่า กลุ่มที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีต สามารถลดการแทรกซึมของคลอไรด์ลงได้ใกล้เคียงกับคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากธรรมชาติ ซึ่งผลดังกล่าวแสดง




(ก) คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1




(ข) คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมเถ้าถ่านหินร้อยละ 15 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน




(ค) คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมเถ้าถ่านหินร้อยละ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน

**รูปที่ 3** การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตและมวลรวมจากธรรมชาติ หลังแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 5 ปี

ให้เห็นศักยภาพของเถ้าถ่านหิน ที่ชดเชยข้อด้อยของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีต โดยการเพิ่มความสามารถในการต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ ในคอนกรีตที่อยู่ในสิ่งแวดล้อมทะเลได้อย่างดี อย่างไรก็ตาม คอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากธรรมชาติและผสมเถ้าถ่านหิน ยังส่งผลดีต่อความคงทนของคอนกรีต ที่ใช้ในสิ่งแวดล้อมทะเลบริเวณชายฝั่งได้ดีกว่าคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตค่อนข้างมาก ทั้งในด้านการลดการแทรกซึมของคลอไรด์และกำลังอัดของคอนกรีตที่มีความคงทนต่อการทำลายทางกายภาพได้เป็นอย่างดี

### 3.3 สัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตและมวลรวมจากธรรมชาติที่อายุแช่น้ำทะเล 5 ปี

การหาค่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตและมวลรวมจากธรรมชาติ หลังแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 5 ปี ($D_c$) ได้ใช้กฎการแพร่ข้อที่สองของฟิค (Fick's Second Law) ดังแสดงในสมการที่ (1)

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D_c \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \quad (1)$$

เมื่อค่า $D_c$ ในสมการที่ (1) เป็นค่าคงที่ คำตอบทั่วไปของสมการที่ (1) แสดงดังสมการที่ (2)

$$C_{x,t} = C_0[1 - erf(\frac{x}{2\sqrt{D_C t}})] \quad (2)$$

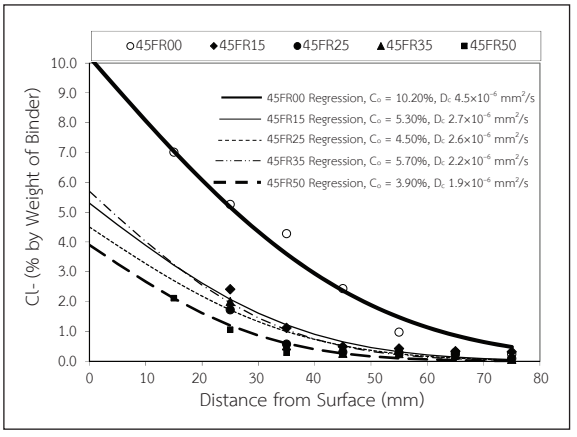
เมื่อ $D_{x,t}$ = ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด (โดยน้ำหนักวัสดุประสาน) ที่ระดับความลึก $x$ และระยะเวลาในการแช่ $t$

$x$ = ระยะจากหน้าผิวคอนกรีต (มม.)

$t$ = ระยะเวลาที่แช่น้ำทะเล (วินาที)

$C_0$ = ความเข้มข้นของคลอไรด์ที่ผิวคอนกรีต (ที่ $x=0$) ที่ระยะเวลาแช่น้ำทะเล $t$

$D_c$ = สัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ที่ระยะเวลาแช่น้ำทะเล $t$

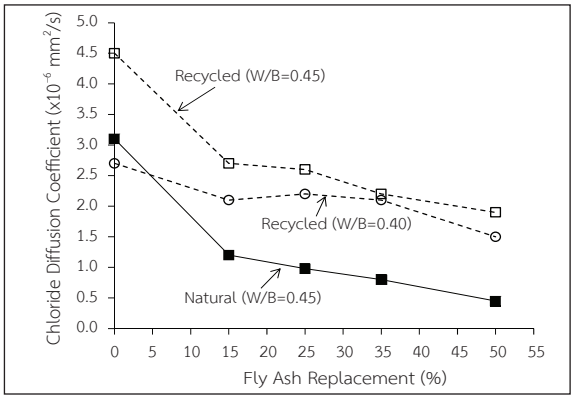



**รูปที่ 4** การหาสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตที่มี W/B เท่ากับ 0.45 หลังแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 5 ปี

$erf$ = ฟังก์ชันค่าผิดพลาด (Error Function )

ทำการปรับค่า $D_c$ และ $D_o$ ในสมการที่ (2) เพื่อให้กราฟสอดคล้องกับข้อมูลการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีต ที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตและมวลรวมจากธรรมชาติ หลังแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 5 ปี โดยรูปที่ 4 แสดงการหาสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45 หลังแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 5 ปี ค่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตในส่วนผสมอื่นๆ หาได้ในลักษณะเดียวกัน โดยสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากธรรมชาติหลังแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 5 ปี ได้ใช้ข้อมูลจากงานวิจัยที่ผ่านมา [13] ดังแสดงในตารางที่ 5

เมื่อพิจารณาผลของเถ้าถ่านหินต่อสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ ในคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตและมวลรวมจากธรรมชาติ หลังแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 5 ปี ดังรูปที่ 5 พบว่า การใช้เถ้าถ่านหินแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในปริมาณที่สูงขึ้น ส่งผลต่อการลดสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ลงได้อย่างชัดเจน ซึ่งให้ผลไปในทิศทางเดียวกัน ทั้งกลุ่มที่ใช้มวลรวมจากธรรมชาติและมวลรวมจากเศษคอนกรีต โดยผลดังกล่าวสอดคล้องกับการแทรกซึมของคลอไรด์ดังที่กล่าวมาข้างต้น




**รูปที่ 5** ผลของเถ้าถ่านหินต่อสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตและมวลรวมจากธรรมชาติ หลังแช่น้ำทะเลเป็นเวลา

**ตารางที่ 5** สัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ ($D_c$) ในคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตและมวลรวมจากธรรมชาติหลังแช่ในน้ำทะเลเป็นเวลา 5 ปี

| Fly Ash Replacement (%) | Chloride Diffusion Coefficient ($D_c \times 10^{-6}$ mm$^2$/s) | | |
|---|---|---|---|
| | Recycled (W/B=0.40) | Recycled (W/B=0.45) | Natural (W/B=0.45) |
| 0 | 2.7 | 4.5 | 3.10 |
| 15 | 2.1 | 2.7 | 1.20 |
| 25 | 2.2 | 2.6 | 0.98 |
| 35 | 2.1 | 2.2 | 0.80 |
| 50 | 1.5 | 1.9 | 0.45 |

เมื่อพิจารณาผลของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน ต่อสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีต พบว่าการใช้ปริมาณน้ำในคอนกรีตที่ลดลง ส่งผลให้ลดค่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ไม่ได้ผสมเถ้าถ่านหินมากกว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหิน โดยผลดังกล่าวนี้สอดคล้องกับการศึกษาที่ผ่านมา [13] ที่ศึกษาผลของเถ้าถ่านหิน และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่อสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากธรรมชาติ ทั้งนี้เนื่องจากความทึบน้ำในคอนกรีตที่ไม่ได้ผสมเถ้าถ่านหิน ขึ้นกับปริมาณน้ำและกำลังอัดเป็นหลัก ส่วนคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหิน ความทึบน้ำขึ้นกับสมบัติทางเคมีของเถ้าถ่านหินที่ส่งผลต่อการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลาน และสมบัติทางกายภาพที่สามารถอุดแทรกช่องว่างในคอนกรีตส่งผลให้ลดการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตได้ดี โดยผลดังกล่าวนี้จะชัดเจนในคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินที่มีอนุภาคกลม ตัน นอกจากนั้นพบว่า คอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินอย่างน้อยร้อยละ 15 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ให้สัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ต่ำกว่าคอนกรีตธรรมดา ที่ใช้มวลรวมจากธรรมชาติและใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45 ซึ่งแสดงให้เห็นว่า เถ้าถ่านหินสามารถปรับปรุงคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตให้ต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ได้ดีกว่าคอนกรีตธรรมดาที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45

อย่างไรก็ตาม ถึงแม้เถ้าถ่านหินสามารถเพิ่มสมบัติความคงทนของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีต โดยการลดการแทรกซึมของคลอไรด์ลงได้อย่างน่าพอใจ แต่คอนกรีตที่ใช้ในสิ่งแวดล้อมทะเล จำเป็นต้องมีสมบัติด้านความคงทนควบคู่กับกำลังรับแรงอัดที่สูง โดยผลการศึกษาพบว่า การใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตส่งผลให้กำลังอัดคอนกรีตหลังแช่น้ำทะเลลดลงค่อนข้างมาก เมื่อเทียบกับมวลรวมจากธรรมชาติ ดังนั้นความเหมาะสมในการใช้เป็นคอนกรีตเพื่อใช้ก่อสร้างจริง ในสิ่งแวดล้อมทะเลคงสู้คอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากธรรมชาติไม่ได้อย่างแน่นอน 5 ปี

## 4. สรุป

จากผลการศึกษาสามารถสรุปได้ดังนี้

4.1 คอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากธรรมชาติที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45 มีกำลังอัดหลังแช่น้ำทะเล 5 ปี สูงกว่าคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 ค่อนข้างชัดเจน ถึงแม้ว่ามวลรวมจากเศษคอนกรีตจะใช้ปริมาณน้ำที่ต่ำกว่าและใช้สารลดน้ำเพื่อช่วยในการทำงานได้ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าคุณภาพของมวลรวมหยาบมีผลค่อนข้างชัดเจนต่อสมบัติ

เชิงกลของคอนกรีตที่สัมผัสกับสิ่งแวดล้อมทะเล

4.2 คอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตทุกส่วนผสม มีการสูญเสียกำลังอัดหลังแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 5 ปี ขณะที่กลุ่มที่ใช้มวลรวมจากธรรมชาติที่ผสมเถ้าถ่านหินทุกส่วนผสม มีกำลังอัดหลังแช่น้ำทะเลที่อายุ 5 ปี เพิ่มขึ้นจากอายุบ่ม 28 วัน

4.3 การใช้เถ้าถ่านหินแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในปริมาณที่มากขึ้น ส่งผลต่อการลดการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากธรรมชาติและมวลรวมจากเศษคอนกรีตอย่างชัดเจน โดยการใช้เถ้าถ่านหินในปริมาณที่สูงขึ้น มีผลให้การต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตเข้าใกล้คอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากธรรมชาติมากขึ้น

4.4 การใช้เถ้าถ่านหินแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในปริมาณที่สูงขึ้น ส่งผลต่อการลดสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตลงได้อย่างชัดเจน โดยพบว่า คอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินอย่างน้อยร้อยละ 15 โดยน้ำหนักวัสดุประสานและมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานไม่เกิน 0.45 มีสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ ต่ำกว่าคอนกรีตธรรมดาที่ใช้มวลรวมจากธรรมชาติที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45

**5. กิตติกรรมประกาศ**

ผู้เขียนขอขอบคุณ ทุนสนับสนุนการวิจัยจากงบประมาณเงินรายได้จากเงินอุดหนุนจากรัฐบาล (งบประมาณเงินแผ่นดิน) ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2560 มหาวิทยาลัยบูรพา ผ่านสำนักงานคณะกรรมการการวิจัยแห่งชาติ เลขที่สัญญา 106/2560 และขอขอบคุณ คุณวัชรพงศ์ ขำสุวรรณ และคุณรัฐวิทย์ ธนาชัยวราคุณ ที่ช่วยเก็บรวบรวมข้อมูลในการศึกษาครั้งนี้

**เอกสารอ้างอิง**

[1] W. Chalee, P. Ausapanit, and C. Jaturapitakkul, “Utilization of fly ash concrete in marine environment for long term design life analysis,” *Materials and Design*, vol. 31, no. 3, pp. 1242–1249, March 2010.

[2] A. K. Saha, “Effect of class F fly ash on the durability properties of concrete,” *Sustainable Environment Research*, vol. 28, no. 1, pp. 25–31, 2018.

[3] C. H. Huang, S. K. Lin, C. S. Chang, and H. J. Chen, “Mix proportions and mechanical properties of concrete containing very high-volume of Class F fly ash,” *Construction and Building Materials*, vol. 46, no. 3, pp. 71–78, 2013.

[4] EG. Moffatt, MDA. Thomas, and A. Fahiml, “Performance of high-volume fly ash concrete in marine environment,” *Cement and Concrete Research*, vol. 102, pp. 127–135, 2017.

[5] R. Somna, C. Jaturapitakkul, P. Rattanachu, and W. Chalee, “Effect of ground bagasse ash on mechanical and durability properties of recycled aggregate concrete,” *Materials and Design*, vol. 36, pp. 597–603, 2012.

[6] M. Etxeberria, E. Vazquez, E. Mari, and M. Barra, “Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete,” *Cement and Concrete Research*, vol. 37, no. 5, pp. 735–742, 2012.

[7] SC. Kou, KC. Poon, and D. Chan, “Influence of fly ash as cement replacement on the properties of recycled aggregate concrete,” *ASCE’s Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 19, no. 9, pp. 16–22, 2007.

[8] R. Somna, C. Jaturapitakkul, W. Chalee, and P. Rattanachu, “Effect of W/B ratio and ground fly ash on properties of recycled aggregate,” *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 24,

no. 1, pp. 16–22, 2012.

[9] N. Butchueathai, T. Cheewaket, and W. Chalee, "Chloride diffusion coefficient of recycled aggregate concretes containing fly ash under 3-year exposure in marine environment" *The Journal of KMUTNB*, vol. 27, no. 3, pp. 441–451, 2017 (in Thai).

[10] *ACI Guide to durable concrete*, American Concrete Institute ACI Committee 201.2R-01, 2003.

[11] *ASTM Standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use in concrete*, Annual Book of ASTM Standards C618-03, 2003, 04.02.

[12] *ASTM Standard test method for acid-soluble chloride in mortar and concrete*, Annual Book of ASTM Standards C 1152, 2008, 04.02.

[13] W. Chalee and C. Jaturapitakkul, "Effect of W/B ratios and fly ash finenesses on chloride diffusion coefficient of concrete in marine environment," *Materials and Structures*, vol. 42, no. 4, pp. 505–515, 2009.

[14] A. M. Rashad, "A brief on high-volume class F fly ash as cement replacement – A guide for civil engineer," *International Journal of Sustainable Built Environment*, vol. 4, pp. 278–306, 2015.

[15] P. Chindaprasirt and C. Jaturapitakkul, "Cement, pozzolan and concrete," in *Proceedings 5th ed, Thailand Concrete Association*, pp. 11–13, and pp. 238–240, 2008 (in Thai).

[16] V. Bulatovic, M. Melešev, M. Radeka, V. Radonjanin, and I. Lukic, "Evaluation of sulfate resistance of concrete with recycled and natural aggregates," *Construction and Building Materials*, vol. 152, no. 15, pp. 614–631, 2017.