การประเมินการแทรกซึมของคลอไรด์ระยะยาวในคอนกรีตภายใต้สิ่งแวดล้อมทะเลจากผลทดสอบโดยวิธี Bulk diffusion test

Evaluation of Long Term Chloride Penetration in Concrete under Marine Environment by Bulk Diffusion Test Method

ปุณยวีร์ นิลรัตน์[1] วัฒนา พุธโธทา[1] และวิเชียร ชาลี[1*]

Punyavee Ninrat[1], Wattana Puttota[1] and Wichian Chalee[1*]

[1]ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

[1]Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Burapha University

วันที่รับบทความ 12 มิถุนายน พ.ศ. 2557

วันที่ตอบรับตีพิมพ์ 14 พฤศจิกายน พ.ศ. 2557

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาการประเมินการแทรกซึมของคลอไรด์ระยะยาวในคอนกรีตภายใต้สิ่งแวดล้อมทะเล จากผลทดสอบโดยวิธี Bulk diffusion test โดยใช้ส่วนผสมคอนกรีตที่แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าถ่านหินจากแม่เมาะในอัตราส่วนร้อยละ 0 15 25 35 และ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน และมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.45 0.55 และ 0.65 (ส่วนผสมเดียวกับคอนกรีตที่แช่ในสิ่งแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 12 ปี) หล่อตัวอย่างคอนกรีตทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มม. สูง 200 มม. เพื่อทดสอบการแทรกซึมของคลอไรด์โดยวิธี Bulk diffusion test (แช่ตัวอย่างคอนกรีตในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) เข้มข้น 2.8 โมลาร์ เป็นเวลา 35 วัน) นอกจากนั้น ได้เก็บตัวอย่างคอนกรีตที่แช่ในน้ำทะเลบริเวณน้ำขึ้นน้ำลงเป็นเวลา 12 ปี มาทดสอบการแทรกซึมของคลอไรด์โดยใช้น้ำเป็นตัวทำละลาย ผลการศึกษาพบว่า การใช้เถ้าถ่านหินแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในปริมาณที่มากขึ้น ส่งผลให้การแทรกซึมของคลอไรด์ที่ทดสอบโดยวิธี Bulk diffusion test มีแนวโน้มลดลง และเป็นไปในทิศทางเดียวกับสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตหลังแช่ในสิ่งแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 12 ปี นอกจากนั้น คอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ต่ำลง ส่งผลให้การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตธรรมดามีค่าลดลงมากกว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหิน การศึกษาครั้งนี้ สามารถประเมินการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่แช่ในสิ่งแวดล้อมทะเลระยะยาว จากผลการทดสอบโดยวิธี Bulk diffusion test ได้

คำสำคัญ : การแทรกซึมคลอไรด์ สิ่งแวดล้อมทะเล วิธี Bulk diffusion test เถ้าถ่านหิน

***Corresponding author. E-mail:** wichian@buu.ac.th

Abstract

This research aimed to evaluate the long term chloride penetration of concrete under marine environment from the Bulk diffusion test method. Fly ash concretes were cast by using fly ash from Mae Moh power plant to partially replace Portland cement type I at percentages of 0, 15, 25, 35 and 50 by weight of binder. Water to binder ratios (W/B) were varied at 0.45, 0.55, and 0.65. (the same mix proportions of concrete exposed to marine site for 12 years). The cylindrical specimen with 100-mm in diameter and 200-mm in height were cast for Bulk diffusion test (concrete specimens were exposed to 2.8 M of NaCl concentration for 35 days). In addition, water soluble chlorides in the concrete were measured after the concrete was exposed to the tidal zone for 12 years. The results show that the chloride penetration of concrete from Bulk diffusion test decrease with the increase of fly ash replacement of Portland cement type I, which is the same trend of chloride diffusion coefficient of 12-year exposure in marine site. In addition, when the W/B ratio of concrete was reduced, the decrease of chloride penetration in normal concrete was higher than that of the fly ash concrete. The results of bulk diffusion test in this study can be used to evaluate the chloride penetration of fly ash concrete under long term exposure in marine environment.

Key words : chloride penetration, marine environment, Bulk diffusion test method, fly ash

บทนำ

โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ใช้งานในสภาพแวดล้อมทะเล มีการกัดกร่อนที่ก่อเกิดความเสียหายกับโครงสร้างได้เร็วกว่าโครงสร้างปกติ โดยการทำลายส่วนใหญ่เกิดจากเกลือคลอไรด์ที่เร่งให้สนิมในเหล็กเสริมคอนกรีตเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็ว ขยายตัวและดันคอนกรีตให้เกิดการแตกร้าวเสียหาย ตลอดจนการรับแรงเชิงกลของเหล็กเสริมและคอนกรีตลดลงอย่างชัดเจน (Neville, 1996 ; Dimitri Val *et al*., 2003 ; Chalee *et al*., 2010 ; Cheewaket *et al*., 2012) โดยทั่วไปสารประกอบคลอไรด์จะไม่ส่งผลที่เป็นอันตรายกับเนื้อของคอนกรีตที่ไม่มีเหล็กเสริม ซึ่งจากงานวิจัยที่ผ่านมา (Kaushik and Islam, 1995) พบว่า การใช้น้ำที่มีเกลือคลอไรด์ผสมในคอนกรีตกลับส่งผลให้คอนกรีตมีกำลังอัดสูงขึ้น แต่การใช้งานของคอนกรีตในโครงสร้างทั่วไป จำเป็นต้องมีเหล็กเสริมในคอนกรีตเพื่อใช้รับแรงดึง คอนกรีตที่มีเหล็กเสริมจะส่งผลให้การทำลายเนื่องจากคลอไรด์ต่อโครงสร้างคอนกรีตมีความชัดเจนและรุนแรงมากขึ้น

การวัดการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตสามารถทำได้หลายวิธี เช่น การทดสอบความต้านทานต่อการแทรกซึมของคลอไรด์ โดยวิธีเร่ง (Rapid chloride penetration test) วิธี Bulk diffusion test วิธี Salt ponding และวิธีฉีดสี (Colorimetric technique) เป็นต้น ซึ่งแต่ละวิธีมีเงื่อนไขของการทดสอบที่แตกต่างกัน ทั้งด้านระยะเวลาที่ใช้ทดสอบ กระบวนการทดสอบ ตลอดจนผลที่ได้จากการทดสอบก็แสดงค่าแตกต่างกัน การทดสอบความสามารถในการต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีต มักแสดงผลในลักษณะของแนวโน้มในการต้านทานคลอไรด์ โดยเฉพาะในการทดสอบที่ใช้ระยะเวลาสั้น อย่างไรก็ตาม ข้อมูลด้านความคงทนของคอนกรีต จำเป็นต้องทราบอัตรา

การแทรกซึมของคลอไรด์ที่แสดงค่าจริงจากการแทรกซึมในสภาวะธรรมชาติ ที่ตัวอย่างคอนกรีตสัมผัสอยู่ เพื่อให้สามารถวิเคราะห์สถานะการกัดกร่อนภายใต้ระยะเวลาที่โครงสร้างมีการใช้งานได้อย่างถูกต้องมากขึ้น แต่ในการทดสอบเพื่อให้ได้ข้อมูลดังกล่าวต้องใช้ระยะเวลาในการศึกษายาวนาน ตลอดจนเสียค่าใช้จ่ายค่อนข้างสูง ดังนั้นถ้ามีการศึกษาเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างผลการทดสอบของการแทรกซึมคลอไรด์ในคอนกรีต ที่ทำได้ง่ายในระยะเวลาสั้นกับผลการทดสอบที่ต้องใช้ระยะเวลานาน ก็จะเป็นประโยชน์ต่อการศึกษาพฤติกรรมด้านความคงทนที่ทำให้ประหยัดค่าใช้จ่ายและเวลาได้

การทดสอบความสามารถในการต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตโดยวิธี Bulk diffusion test ตามมาตรฐาน ASTM C1556 เป็นอีกวิธีที่สามารถทำได้ง่ายในห้องปฏิบัติการ ใช้ระยะเวลาในการทดสอบ 35 วัน โดยผลการทดสอบแสดงในรูปของเส้นกราฟการแทรกซึมของคลอไรด์ (chloride penetration profile) และสามารถใช้ในการวิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตได้ ดังนั้นการศึกษาครั้งนี้ จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อทดสอบหาการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินโดยวิธี Bulk diffusion test ที่วัดผลการแทรกซึมโดยการไทเทรต (titration test) โดยใช้น้ำเป็นตัวทำละลายตามมาตรฐาน ASTM C 1218 ซึ่งเป็นวิธีที่ทดสอบในห้องปฏิบัติการที่ทำได้ง่าย และให้ข้อมูลการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ครบถ้วน เพื่อใช้ผลดังกล่าวในการประเมินสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่แช่ในน้ำทะเล เป็นเวลานานถึง 12 ปี ที่หาจากปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตที่ทดสอบตาม ASTM C 1218 ซึ่งเป็นการประเมินผลทดสอบการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่แช่ในสิ่งแวดล้อมทะเลบริเวณชายฝั่ง (tidal zone) จากวิธีการทดสอบที่ทำได้ง่ายและรวดเร็ว เพื่อเป็นฐานข้อมูลในการออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ต้องการใช้งานบริเวณชายฝั่งทะเล ตลอดจนอาจใช้เป็นข้อมูลในการประเมินสถานะการกัดกร่อนโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่อยู่ระหว่างการใช้งาน เพื่อวางแผนบำรุงรักษาและซ่อมแซมโครงสร้างดังกล่าวได้อย่างมีประสิทธิภาพ

วิธีการวิจัย

วัสดุประสาน

การศึกษานี้ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และเถ้าถ่านหินเป็นวัสดุประสานดังนี้

เถ้าถ่านหิน

การศึกษาครั้งนี้ใช้เถ้าถ่านหินที่ได้จากโรงไฟฟ้าแม่เมาะซึ่งมีความถ่วงจำเพาะ เท่ากับ 2.22 มีอนุภาคที่ค้างตะแกรงเบอร์ 325 ร้อยละ 31 โดยน้ำหนัก ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C 618 ที่กำหนดไว้ไม่เกินร้อยละ 34 โดยน้ำหนัก สำหรับองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าถ่านหินแม่เมาะ มีผลรวมของสารประกอบหลัก SiO_2, $Al2O_3$ และ Fe_2O_3 เท่ากับร้อยละ 74.34 และ มีค่า LOI ร้อยละ 0.11 ซึ่งจัดเป็นเถ้าถ่านหิน Class F ตามมาตรฐาน ASTM C 618 โดยองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุประสาน แสดงดังตารางที่ 1

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

ความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เท่ากับ 3.15 ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ปกติของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ทั่วไปตามมาตรฐาน ASTM C150 ที่มีค่าอยู่ระหว่าง 3.00 ถึง 3.20 ความละเอียดของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีค่า

น้ำหนักค้างบนตะแกรงเบอร์ 325 เท่ากับร้อยละ 20 พื้นที่ผิวจำเพาะวิธีของเบลนเท่ากับ 3,250 ซม.^{2}/ก. และมีค่าเฉลี่ยของอนุภาค (d_{50}) ที่ทดสอบจากการร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐาน เท่ากับ 25 ไมโครเมตร ส่วนองค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีออกไซด์หลัก ได้แก่ แคลเซียมออกไซด์ (CaO) ซิลิกา (SiO_2) อะลูมินา (Al_2O_3) และเฟอร์ริกออกไซด์ (Fe_2O_3) รวมกันได้ร้อยละ 96.29 (ตารางที่ 1)

มวลรวม

การศึกษาครั้งนี้ใช้ทรายแม่น้ำเป็นมวลรวมละเอียด โดยมีค่ามอดูลัสความละเอียดเท่ากับ 2.75 และความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.62 ส่วนมวลรวมหยาบใช้หินขนาดใหญ่สุดเท่ากับ 19 มม. มีค่ามอดูลัสความละเอียดเท่ากับ 6.89 และมีความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.73 ร้อยละการของดูดซึมน้ำของมวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียดเท่ากับ 0.45 และ 0.91 ตามลำดับ

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุประสาน

องค์ประกอบทางเคมี (%)	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1	เถ้าถ่านหิน
Silicon Dioxide, SiO_2	21.52	35.12
Aluminum Oxide, Al_2O_3	3.56	21.51
Iron Oxide, Fe_2O_3	4.51	17.71
Calcium Oxide, CaO	66.70	17.15
Magnesium Oxide, MgO	1.06	-
Sodium Oxide, Na_2O	0.10	0.69
Potassium Oxide, K_2O	0.24	1.59
Sulfur Trioxide, SO_3	2.11	2.13
Loss On Ignition, LOI	1.74	0.11

การเตรียมตัวอย่างและการทดสอบ

การเตรียมตัวอย่างเพื่อทดสอบการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตโดยวิธี Bulk diffusion test

การเตรียมตัวอย่างเพื่อทดสอบความสามารถในการต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตโดยวิธี Bulk diffusion test (ASTM C1556) ได้ใช้ส่วนผสมคอนกรีตเดียวกันกับกลุ่มที่แช่ในน้ำทะเลเมื่อ 12 ปี ที่แล้ว ซึ่งเป็นคอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45 0.55 และ 0.65 โดยแต่ละอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานแทนที่เถ้าถ่านหินจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 0 15 25 35 และ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน (ตารางที่ 2) หล่อตัวอย่างทดสอบทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มม. สูง 200 มม. และตัดตัวอย่างทดสอบให้มีความหนาประมาณ 60 มม. หลังจากนั้นเคลือบอีพอกซี่ที่ขอบของตัวอย่างทั้งหมดโดยเปิดไว้ 1 ด้าน เพื่อให้เกลือคลอไรด์แทรกซึมเข้าไปในทิศทางเดียว และบ่มตัวอย่างคอนกรีต เป็นเวลา 28 วัน จากนั้นแช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) เข้มข้น 2.8 โมลาร์ เป็นเวลา 35 วัน ก่อนทดสอบความสามารถในการต้านทานคลอไรด์

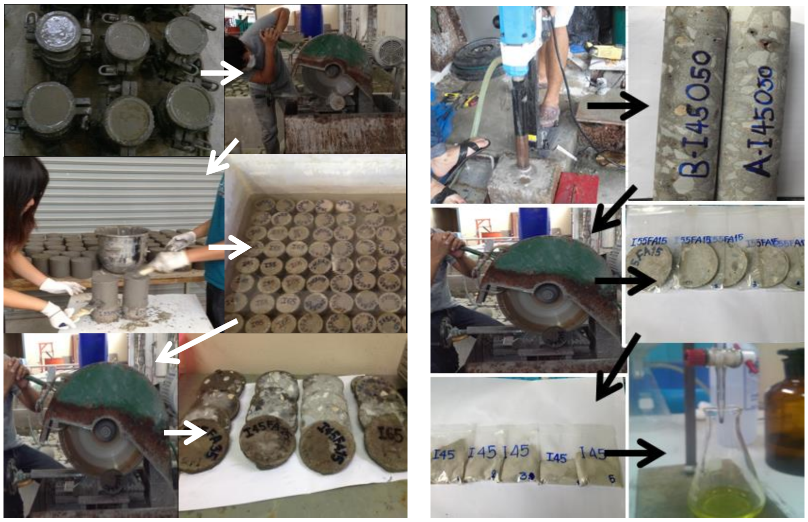
ที่วัดในรูปของกราฟการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีต ซึ่งตัดตัวอย่างคอนกรีตเป็นชั้นๆ หนาชั้นละ 10 มม. หลังจากนั้นนำคอนกรีตแต่ละชั้นมาบดให้ละเอียดและนำผงคอนกรีตส่วนที่ผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 20 ไปทดสอบหาปริมาณคลอไรด์โดยใช้น้ำเป็นตัวทำละลายตามมาตรฐาน ASTM C1218 โดยปริมาณคลอไรด์ที่ระดับความลึกต่างๆในแต่ละส่วนผสมได้จากค่าเฉลี่ยของการทดสอบในคอนกรีต 3 ตัวอย่าง การเตรียมตัวอย่างเพื่อทดสอบการต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์โดยวิธี Bulk diffusion test แสดงดังภาพที่ 1(ก)

การเตรียมตัวอย่างเพื่อทดสอบการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่แช่ในน้ำทะเลเป็นเวลา 12 ปี

การทดสอบการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่แช่ในน้ำทะเล ได้นำตัวอย่างคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินที่แช่ในน้ำทะเลเป็นเวลา 12 ปี มาเจาะบริเวณกึ่งกลางของก้อนตัวอย่าง แล้วนำแท่งคอนกรีตที่ได้จากการเจาะมาตัดเป็นชั้นตามระยะความลึกต่างๆ โดยให้ลึกลงไปประมาณ 80 มม. (ตัดตัวอย่างหนาชั้นละ 10 มม.) จากนั้นบดตัวอย่างคอนกรีตแต่ละชั้นให้ละเอียด และนำผงคอนกรีตที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 20 มาทดสอบปริมาณคลอไรด์ โดยใช้น้ำเป็นตัวทำละลายตามมาตรฐาน ASTM C 1218 การทดสอบการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่แช่ในน้ำทะเลที่อายุ 12 ปี แสดงดังภาพที่ 1(ข)

ตารางที่ 2 *ส่วนผสมคอนกรีต*

อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B)	ร้อยละการแทนที่เถ้าถ่านหิน	ส่วนผสมคอนกรีต (กก./ม.^{3})				
		ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1	เถ้าถ่านหิน	ทราย	หิน	น้ำ
0.45	0	478	0	639	1024	215
	15	406	72	639	1004	215
	25	359	119	639	990	215
	35	311	167	639	977	215
	50	239	239	639	957	215
0.55	0	478	0	639	971	262
	15	406	72	639	948	262
	25	359	119	639	933	262
	35	311	167	639	918	262
	50	239	239	639	897	262
0.65	0	478	0	639	922	311
	15	406	72	639	898	311
	25	359	119	639	881	311
	35	311	167	639	864	311
	50	239	239	639	840	311



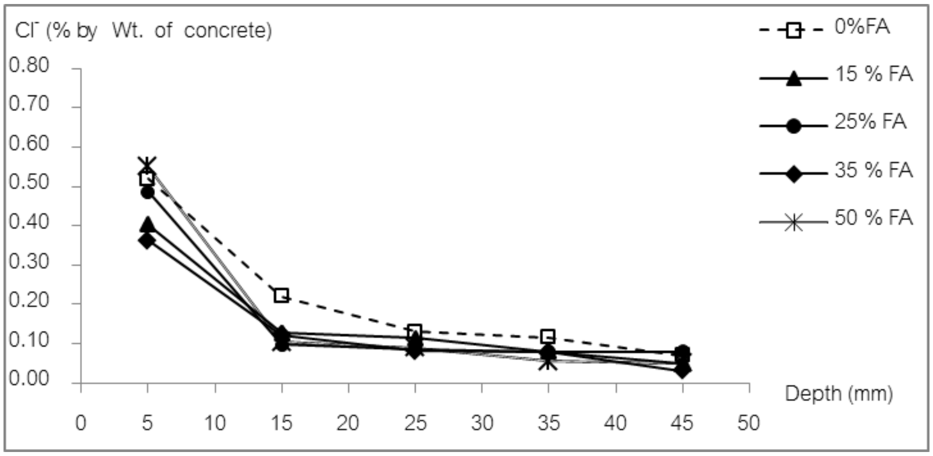
(ก) (ข)

ภาพที่ 1 การเตรียมตัวอย่างคอนกรีตโดย ก) การเตรียมตัวอย่างเพื่อทดสอบการต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์โดยวิธี Bulk diffusion test ข) การทดสอบการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่แช่ในน้ำทะเลที่อายุ 12 ปี

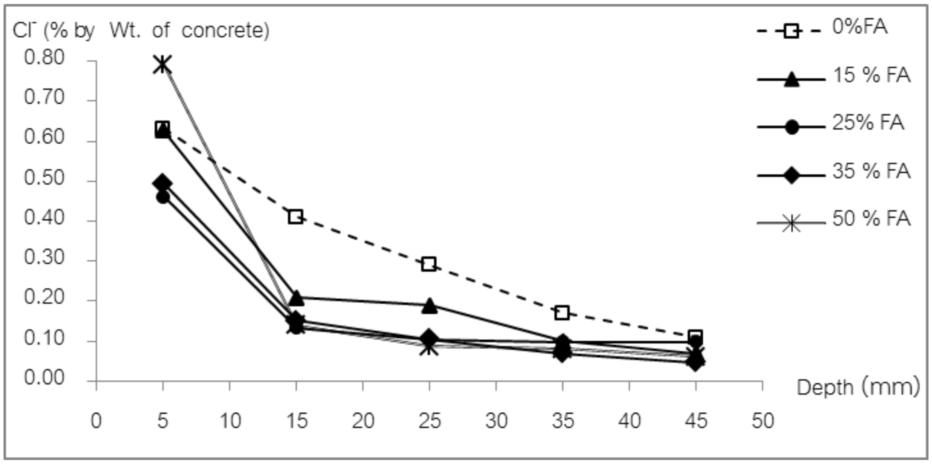
ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

ผลของเถ้าถ่านหินต่อการแทรกซึมของคลอไรด์ที่ทดสอบโดยวิธี Bulk diffusion test

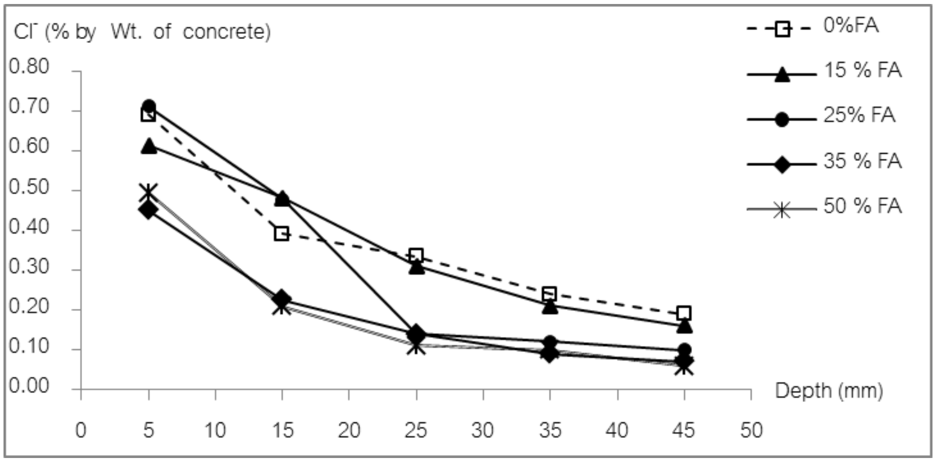
พิจารณาผลของเถ้าถ่านหินต่อการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีต ที่ทดสอบโดยวิธี Bulk diffusion test ดังภาพที่ 2 พบว่า การใช้เถ้าถ่านหินในปริมาณที่มากขึ้น ส่งผลให้การแทรกซึมของคลอไรด์มีค่าลดลง โดยมีแนวโน้มเหมือนกันในทุกอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน เช่น คอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45 ผสมเถ้าถ่านหินในอัตราส่วนร้อยละ 0 15 25 35 และ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน มีปริมาณคลอไรด์ที่ระดับความลึก 25 มม. หลังแช่สารละลายโซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 2.8 โมลาร์ เป็นเวลา 35 วัน เท่ากับร้อยละ 0.13 0.11 0.09 0.08 และ 0.07 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าปฏิกิริยาปอซโซลานระหว่างเถ้าถ่านหินกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เป็นผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยาไฮเดรชั่น ส่งผลดีต่อคุณสมบัติทางด้านความคงทนของคอนกรีต โดยสามารถลดการแทรกซึมของคลอไรด์ลงได้ ทั้งนี้เนื่องจากซิลิกาและอลูมินาในเถ้าถ่านหินเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานทำให้ได้แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) และแคลเซียมอลูมิเนียมไฮเดรต (C-A-H) ซึ่งช่วยลดช่องว่างในซีเมนต์เพสต์ลงและคอนกรีตมีความทึบน้ำมากขึ้น (Neville, 1996; Sata *et al.*, 2012)



ก) W/B = 0.45



ข) W/B = 0.55

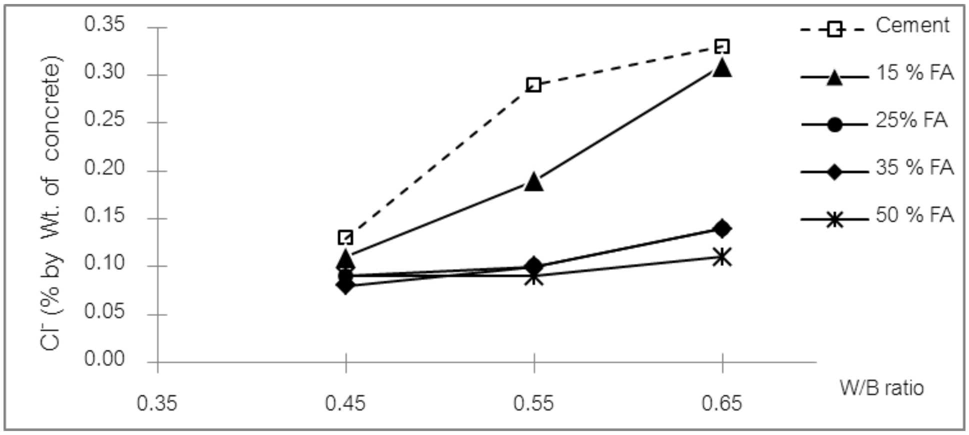


ค) W/B = 0.65

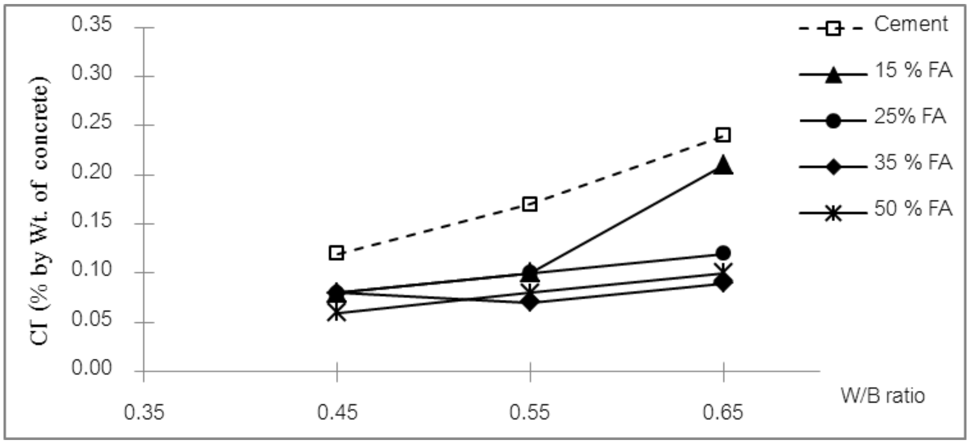
ภาพที่ 2 การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ทดสอบโดยวิธี Bulk diffusion test

ผลของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่อการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ทดสอบโดยวิธี Bulk diffusion test

เมื่อพิจารณาผลของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่อการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ทดสอบโดยวิธี Bulk diffusion test ดังแสดงในภาพที่ 3 พบว่า อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ต่ำลง ส่งผลให้การแทรกซึมของคลอไรด์ที่ระดับความลึกต่างๆ ลดลงและมีแนวโน้มเหมือนกันในทุกอัตราส่วนการแทนที่เถ้าถ่านหิน ซึ่งเกิดจากปริมาณน้ำในคอนกรีตที่ลดลง ส่งผลให้คอนกรีตมีความทึบน้ำมากขึ้นและลดการแทรกซึมของคลอไรด์ลงได้ โดยสังเกตเห็นว่าการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตธรรมดามากกว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหิน เช่น การลดอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานลงจาก 0.55 เป็น 0.45 ส่งผลให้ปริมาณคลอไรด์ที่ระดับความลึก 25 มม. (ภาพที่ 3(ก)) ในคอนกรีตธรรมดาลดลงร้อยละ 0.16 (ลดลงจาก 0.29 ในคอนกรีตที่มี W/B = 0.55 เป็น 0.13 ในคอนกรีตที่มี W/B = 0.45) ส่วนคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินร้อยละ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน พบว่าการลดลงของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานจาก 0.55 เป็น 0.45 ส่งผลให้ปริมาณคลอไรด์ที่ระดับความลึกเดียวกันลดลงแค่ร้อยละ 0.08 (ลดลงจาก 0.19 ในคอนกรีตที่มี W/B = 0.55 เป็น 0.11 ในคอนกรีตที่มี W/B = 0.45) และมีแนวโน้มเหมือนกันกับปริมาณคลอไรด์ที่แทรกซึมที่ระดับความลึก 35 มม. ดังแสดงในภาพที่ 3(ข) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานมีผลต่อการลดลงของคลอไรด์ ที่แทรกซึมในคอนกรีตธรรมดามากกว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหิน เป็นผลจากความทึบน้ำในคอนกรีตธรรมดาขึ้นกับอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเป็นหลัก โดยปริมาณน้ำในส่วนผสมคอนกรีตที่ลดลง ส่งผลให้กำลังอัดของคอนกรีตธรรมดาสูงขึ้นอย่างชัดเจน ซึ่งทำให้คอนกรีตมีความทึบน้ำและลดการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตธรรมดาลงได้ (Neville, 1996) ส่วนคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหิน นอกจากที่ความทึบน้ำในคอนกรีตจะขึ้นกับอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานแล้ว ยังขึ้นกับลักษณะทางเคมีและทางกายภาพของเถ้าถ่านหินด้วย (Neville, 1996 ; Chindaprasirt *et al*., 2005 ; Chalee *et al*., 2009 ; Sata *et al*., 2012) โดยเถ้าถ่านหินที่มีความละเอียดสูงและมีองค์ประกอบทางเคมีที่ประกอบด้วย ซิลิกา อลูมินาและเฟอร์ริกออกไซด์ ในปริมาณสูงจะทำให้เกิดปฏิกิริยาปอซโซลาน ที่ส่งผลในเกิดความทึบน้ำในคอนกรีตและสามารถต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ได้ดี (Chalee et al., 2009 ; Sata *et al*., 2012) ซึ่งในการศึกษาครั้งนี้ใช้เถ้าถ่านหินแม่เมาะที่มีอนุภาคกลมตัน และมีความละเอียดค่อนข้างสูงผ่านเกณฑ์มาตรฐานตาม ASTM C 618 จึงทำให้เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานได้ค่อนข้างสมบูรณ์ ดังนั้นการใช้เถ้าถ่านหินผสมในคอนกรีตในปริมาณที่สูงขึ้นจึงมีผลให้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานมีผลต่อการต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์น้อยลง โดยผลการศึกษาครั้งนี้พบว่า อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ลดลงในคอนกรีตที่ใช้เถ้าถ่านหินในปริมาณที่สูงขึ้น มีผลต่อการต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ได้น้อยลง เช่น คอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินร้อยละ 0 15 25 35 และ 50 โดยน้ำหนักวัสดุ เมื่ออัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานลดลงจาก 0.55 เป็น 0.45 ส่งผลให้ปริมาณคลอไรด์ที่ระดับความลึก 25 มม. ลดลงเท่ากับ 0.16 0.08 0.01 0.02 และ 0 ตามลำดับ ซึ่งผลการศึกษาดังกล่าวนี้ สอดคล้องกับคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินที่แช่ในสิ่งแวดล้อมทะเลในงานวิจัยที่ผ่านมา (Chalee *et al*., 2009)



ก) ความลึก 25 มม.



ข) ความลึก 35 มม.

ภาพที่ 3 ผลของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่อการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ทดสอบโดยวิธี Bulk diffusion test

การหาสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีต

การหาค่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ทดสอบโดยวิธี Bulk diffusion test (D_{CB}) และหลังแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 12 ปี (D_C) ได้ใช้กฎการแพร่ข้อที่สองของฟิค (Fick's second law) ดังแสดงในสมการที่ (1)

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_{CB}\frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \qquad (1)$$

เมื่อค่า D_{CB} ในสมการที่ (1) เป็นค่าคงที่ คำตอบทั่วไปของสมการที่ (1) แสดงดังสมการที่ (2)

$$C_{x,t} = C_0\left[1 - erf\left(\frac{x}{2\sqrt{D_{CB}t}}\right)\right] \qquad (2)$$

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

x = ระยะจากหน้าผิวคอนกรีต (มม.)

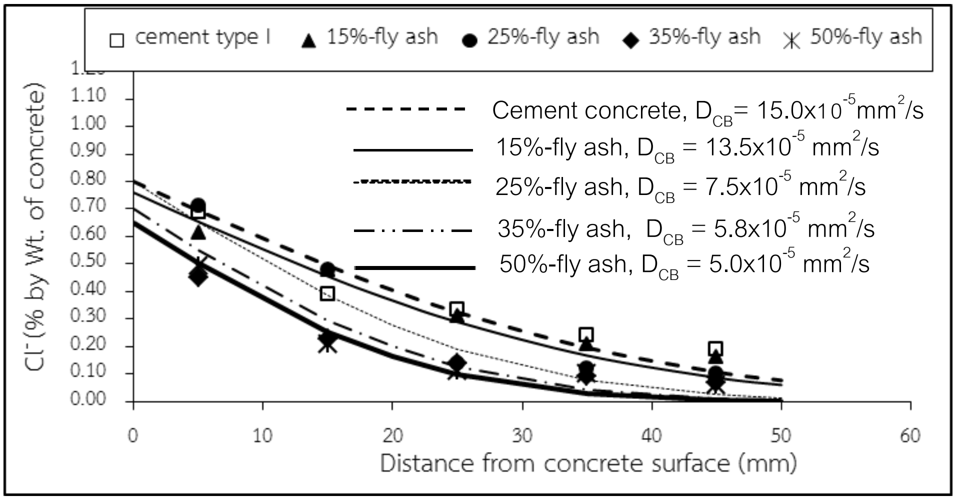
t = ระยะเวลาที่แช่ (วินาที)

C_0 = ความเข้มข้นของคลอไรด์ที่ผิวคอนกรีต (ที่ x = 0) ที่ระยะเวลาแช่ t

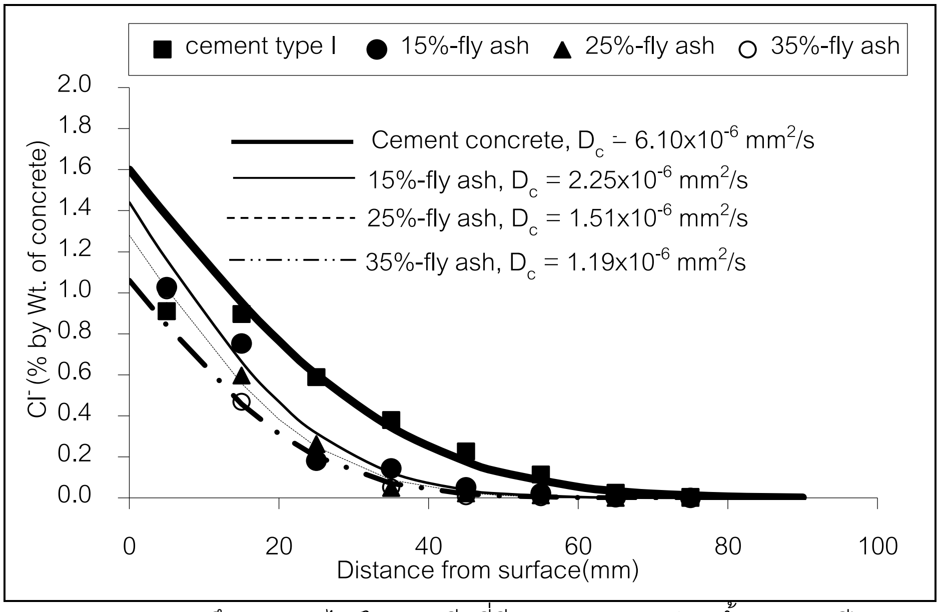
D_{CB} = สัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ ที่ระยะเวลาแช่ t ที่ทดสอบโดยวิธี Bulk diffusion test (มม^2/วินาที)

erf =ฟังก์ชันค่าผิดพลาด (Error function)

ทำการปรับค่า D_{CB} และ C_o ในสมการที่ (2) เพื่อให้กราฟสอดคล้องกับข้อมูลการแทรกซึมของคลอไรด์ส่วนผสมต่างๆ มากที่สุด ดังภาพที่ 4(ก) ที่แสดงการหาค่า D_{CB} และ C_o โดยใช้สมการที่ (2) ในข้อมูลการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.65 ที่ทดสอบโดยวิธี Bulk diffusion test ส่วนค่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่แช่น้ำทะเลเป็นเวลา 12 ปี หาได้ในลักษณะเดียวกัน (ภาพที่ 4(ข)) โดยแทนค่า D_{CB} ด้วย D_C และปรับค่า D_C ในสมการที่ (2) ให้กราฟสอดคล้องกับข้อมูลการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่แช่น้ำทะเล โดยตารางที่ 3 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ทดสอบโดยวิธี Bulk diffusion test และที่แช่น้ำทะเลเป็นเวลา 12 ปี



ก) การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่มี W/B = 0.65 ที่ทดสอบโดยวิธี Bulk diffusion test



ข) การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่มี W/B = 0.55 หลังแช่น้ำทะเล 12 ปี

ภาพที่ 4 การหาค่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์จากข้อมูลการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีต

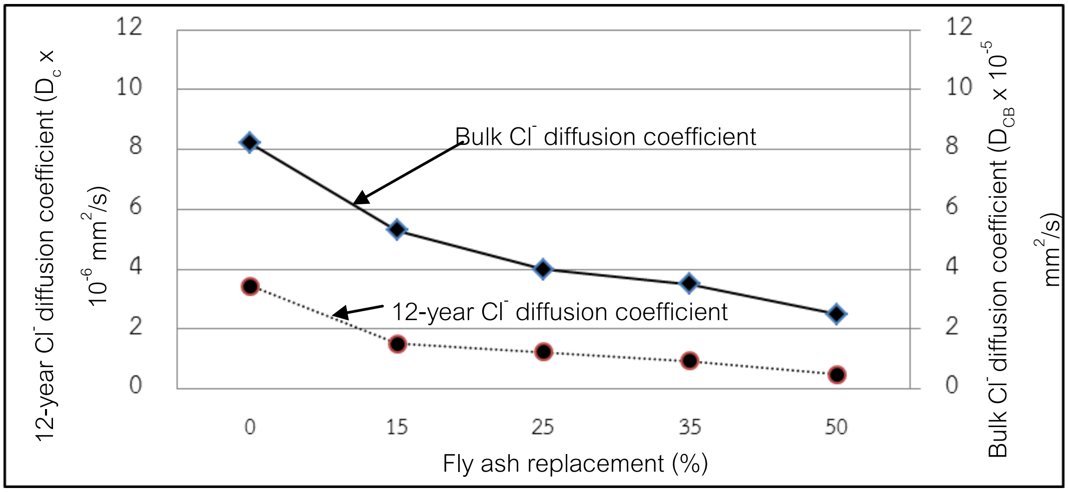
ตารางที่ 3 สัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ทดสอบโดยวิธี Bulk diffusion test (D_{CB}) และหลังแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 12 ปี (D_C)

ส่วนผสม	สัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ (มม^2/วินาที)	
	D_{CB} x10^{-6}	D_C x10^{-6}
I45	82.00	3.45
I45FA15	53.00	1.51
I45FA25	40.00	1.23
I45FA35	35.00	0.93
I45FA50	25.00	0.49
I55	105.00	6.10
I55FA15	75.00	2.25
I55FA25	65.00	1.51
I55FA35	52.00	1.19
I55FA50	35.00	0.63
I65	150.00	7.12
I65FA15	135.00	2.53
I65FA25	75.00	2.05
I65FA35	58.00	1.71
I65FA50	50.00	1.19

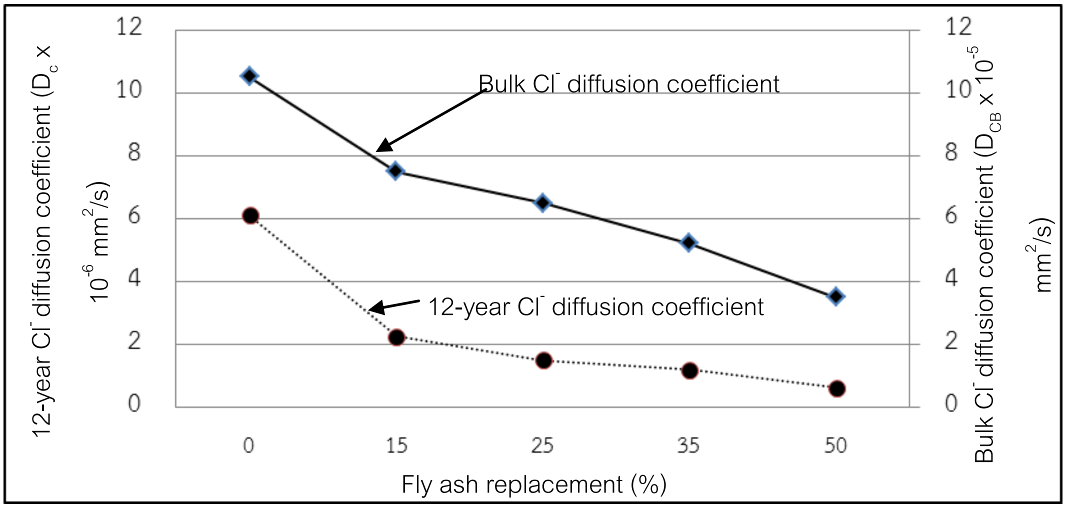
ผลของเถ้าถ่านหินต่อสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ที่ทดสอบโดยวิธี Bulk diffusion test และที่แช่น้ำทะเล 12 ปี

เมื่อพิจารณาสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ที่ทดสอบโดยวิธี Bulk diffusion test (D_{CB}) ในคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหิน ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45 0.55 และ 0.65 เทียบกับสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีต หลังแช่ในสิ่งแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 12 ปี (D_C) ดังภาพที่ 5 พบว่า การใช้เถ้าถ่านหินแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่1 ในปริมาณที่สูงขึ้น ส่งผลให้สัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ทดสอบโดยวิธี Bulk diffusion test มีแนวโน้มลดลง และมีทิศทางเดียวกับสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตหลังแช่ในสภาพแวดล้อมทะเล 12 ปี เนื่องจากคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินในปริมาณที่สูงขึ้น ปฏิกิริยาปอซโซลานในระยะยาวมีผลทำให้คอนกรีตมีความทึบน้ำ และลดอัตราการแทรกซึมของคลอไรด์หลังแช่ในสิ่งแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 12 ปี ได้ (Chindaprasirt *et al*., 2005 ; Chalee *et al*., 2009) การผสมเถ้าถ่านหินสามารถลดอัตราการแทรกซึมของคลอไรด์เข้าไปในคอนกรีตได้อย่างชัดเจน โดยการแทนที่เถ้าถ่านหินในปริมาณที่สูงขึ้นทำให้ D_{CB} และ D_C มีค่าลดลงเป็นแนวโน้มในทางเดียวกัน ซึ่งแสดงให้เห็นว่า การทดสอบในห้องปฏิบัติการ (ระยะสั้น) และผลทดสอบในภาคสนามที่เป็นสิ่งแวดล้อมจริง (ระยะยาว) มีผลทดสอบที่สอดคล้องกัน โดยจะเห็นได้ว่า D_{CB} มีแนวโน้มเดียวกับ D_C แต่มีค่าสูงกว่าค่อนข้างมาก เนื่องจากสารละลายคลอไรด์ที่ใช้แช่ตัวอย่างคอนกรีตโดยวิธี

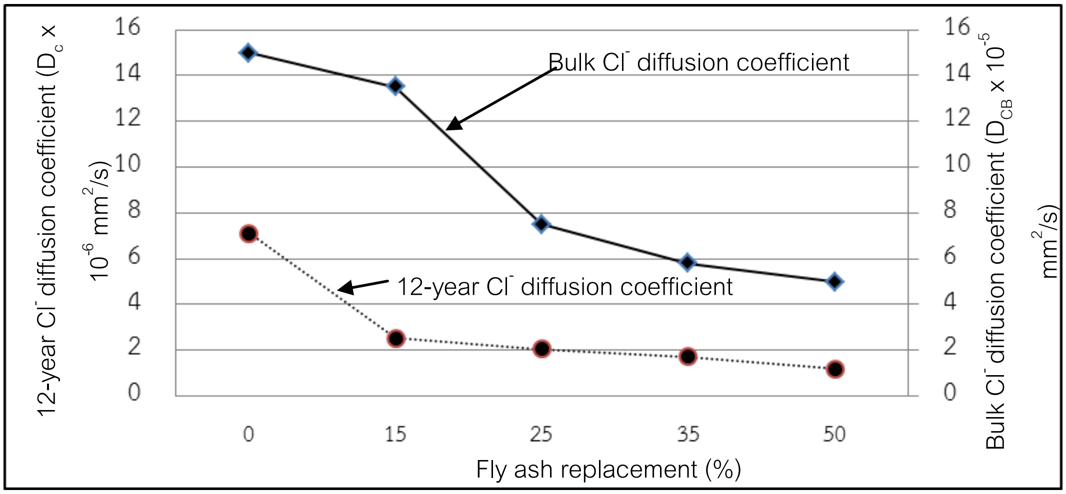
Bulk diffusion test มีความเข้มข้นสูงถึง 2.8 โมลาร์ และสูงกว่าความเข้มข้นของเกลือคลอไรด์ในน้ำทะเลที่แช่ตัวอย่างทดสอบในภาคสนามที่มีความเข้มข้นของคลอไรด์ประมาณ 0.50 โมลาร์ (Chalee *et al.*, 2010) จึงส่งผลให้อัตราการแทรกซึมของคลอไรด์ที่วัดในรูปสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์สูงกว่ากลุ่มที่แช่ในน้ำทะเลอย่างชัดเจน โดยการทดสอบวิธี Bulk diffusion test กับสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ สามารถเป็นข้อมูลเบื้องต้นในการพิจารณาสัมประสิทธิ์การแทรกซึมคลอไรด์ในระยะยาวภายใต้สิ่งแวดล้อมทะเล จากผลทดสอบ Bulk diffusion test ที่อายุ 35 วัน ได้



ก) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน เท่ากับ 0.45



ข) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน เท่ากับ 0.55



ค) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน เท่ากับ 0.65

ภาพที่ 5 ผลของเถ้าถ่านหินต่อสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ที่ทดสอบโดยวิธี Bulk diffusion test (D_{CB}) กับสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตหลังแช่ในสิ่งแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 12 ปี (D_C)

การประเมินการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตระยะยาวจากผลทดสอบ Bulk diffusion test

การประเมินค่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่แช่ในน้ำทะเลเป็นเวลา 12 ปี จากผลทดสอบโดยวิธี Bulk diffusion test สามารถประเมินคุณสมบัติด้านความคงทนของคอนกรีตในระยะยาว จากผลการทดสอบระยะสั้นในคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินร้อยละ 0 15 25 35 และ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45 0.55 และ 0.65 ดังภาพที่ 6 โดยใช้หลักการวิเคราะห์เชิงถดถอย (regression analysis) ได้ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ที่ทดสอบโดยวิธี Bulk diffusion test (D_{CB}) กับสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตหลังแช่ในสิ่งแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 12 ปี (D_C) ในรูปแบบสมการเชิงเส้น (linear equation) ดังสมการที่ (3) ถึง (7)

$$D_C = 0.496 D_{CB} - 0.021 \quad \text{(คอนกรีตธรรมดา)} \quad (3)$$

$$D_C = 0.108 D_{CB} + 1.150 \quad \text{(คอนกรีตผสมเถ้าถ่านหินร้อยละ 15)} \quad (4)$$

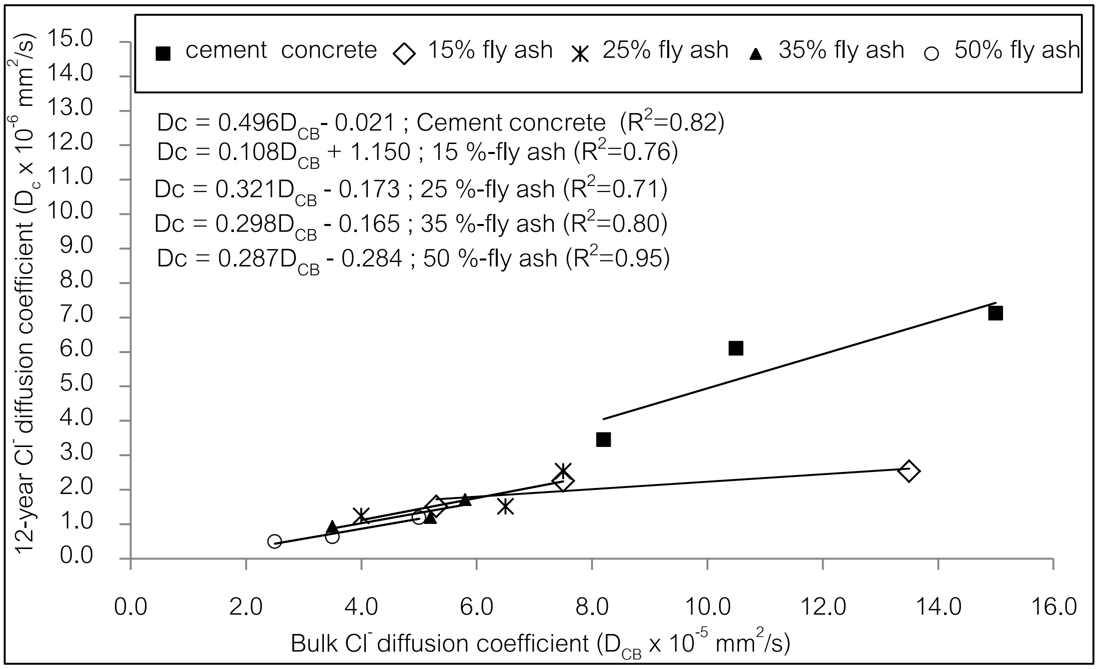
$$D_C = 0.321 D_{CB} - 0.173 \quad \text{(คอนกรีตผสมเถ้าถ่านหินร้อยละ 25)} \quad (5)$$

$$D_C = 0.298 D_{CB} - 0.165 \quad \text{(คอนกรีตผสมเถ้าถ่านหินร้อยละ 35)} \quad (6)$$

$$D_C = 0.287 D_{CB} - 0.284 \quad \text{(คอนกรีตผสมเถ้าถ่านหินร้อยละ 50)} \quad (7)$$

เมื่อ D_C = สัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตหลังแช่ในสิ่งแวดล้อมทะเล เป็นเวลา 12 ปี (x 10^{-6} มม^2/ วินาที)

D_{CB} = สัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ที่ทดสอบโดยวิธี Bulk diffusion test (x 10^{-5} มม^2/ วินาที)



ภาพที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่แช่น้ำทะเลเป็นเวลา 12 ปี D_C กับ สัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ที่ทดสอบโดยวิธี Bulk diffusion test (D_{CB})

สรุปผลการวิจัย

ผลการศึกษาสรุปได้ดังนี้

1. การใช้เถ้าถ่านหินแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนประเภทที่ 1 ในปริมาณที่สูงขึ้น ให้ค่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ที่ทดทดสอบโดยวิธี Bulk diffusion test มีแนวโน้มลดลงและมีทิศทางเดียวกับค่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีต หลังแช่คอนกรีตในน้ำทะเลเป็นเวลา 12 ปี
2. คอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่ำลง ส่งผลให้การแทรกซึมของคลอไรด์ที่ทดสอบโดยวิธี Bulk diffusion test และที่แช่ในน้ำทะเลเป็นเวลา 12 ปี ลดลง โดยการลดลงของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน มีผลต่อการลดปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตธรรมดามากกว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหิน
3. ความเข้มข้นของคลอไรด์ที่คอนกรีตสัมผัส มีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตอย่างชัดเจน โดยสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ที่ได้จากการทดสอบโดยวิธี Bulk diffusion test (ตัวอย่างคอนกรีตแช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 2.8 โมลาร์) มีค่าสูงกว่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่แช่ในน้ำทะเล (น้ำทะเลมีความเข้มข้นของสารละลายคลอไรด์ประมาณ 0.50 โมลาร์) ค่อนข้างมาก
4. ข้อมูลจากการศึกษาครั้งนี้ สามารถประเมินสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตธรรมดาและคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินร้อยละ 15 25 35 และ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน หลังจากแช่ในน้ำทะเลเป็นเวลา 12 ปี จากผลการทดสอบการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ทดสอบโดยวิธี Bulk diffusion test ได้

กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณ ทุนอุดหนุนการวิจัยงบประมาณเงินรายได้ (เงินอุดหนุนจากรัฐบาล) มหาวิทยาลัยบูรพา ประจำปีงบประมาณ 2557

เอกสารอ้างอิง

ASTM C1556.(2008). Standard Test Method for Determining the Apparent Chloride Diffusion Coefficient of Cementitious Mixtures by Bulk Diffusion. *Annual Book of ASTM Standards; V. 04.02.*

ASTM C1218. (2008). Standard test method for water-soluble chloride in mortar and concrete. *Annual Book of ASTM Standards; V. 04.02.*

ASTM C618. (1997). Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete, fly ash, natural pozzolan, pozzolans. *Annual Book of ASTM Standards; V. 04.01.*

ASTM C150.(1997). Standard Specification for Portland Cement. *Annual Book of ASTM Standards; V. 04.01.*

Chalee, W., & Jaturapitakkul, C., (2009). Effect of W/B ratios and fly ash finenesses on chloride diffusion coefficient of concrete in marine environment. *Materials and Structures, 42,* 505 -514.

Chalee, W., Ausapanit, P. & Jaturapitakkul, C., (2010). Utilization of fly ash concrete in marine environment for long term design life analysis. *Materials and Design, 31,* 1242-1249.

Cheewaket, C., Jaturapitakkul, C. & Chalee, W., (2012). Initial corrosion presented by chloride threshold penetration of concrete up to 10 year-results under marine site. *Construction and Building Materials, 37,* 693-698.

Chindaprasirt, P., Jaturapitakkul, C. & Sinsiri, T., (2005). Effect of fly ash fineness on compressive strength and pore size of blended cement paste. *Cement and Concrete Composites, 27,* 425 -428.

Crank, J., (1975). *The Mathematics of Diffusion*, 2nd*, ed*., Oxford Press, London.

Dimitri Val, V., & Mark Stewart, G., (2003). Life Cycle Cost Analysis of Reinforced Concrete Structure in Marine Environments. *Structural Safety, 25,* 343-362.

Kaushik, S. K. and Islam, S., 1995 “Suitability Of Sea Water for Mixing Structural Concrete Exposed to a Marine Environment,” Cement and Concrete Composites, Vol. 17, pp. 177-185.

Neville, A.M., (1996). *Properties of Concrete, 4th ed.,* England, Addison Wesley

Sata, V., Tangpagasit, J., Jaturapitakkul, C. & Chindaprasirt, P., (2012). Effect of W/B ratios on pozzolanic reaction of biomass ashes in Portland cement matrix. *Cement and Concrete Composites, 34,* 94 -100.