วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ปีที่ 27 ฉบับที่ 3 ก.ค.–ก.ย. 2560
The Journal of KMUTNB., Vol. 27, No. 3, Jul.–Sep. 2017

บทความวิจัย

สัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินภายใต้สิ่งแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 3 ปี

นำพล บุตรเชื้อไทย เที่ยง ชีวะเกตุ และ วิเชียร ชาลี*
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทรศัพท์ 08–9791–5171 อีเมล: wichian@buu.ac.th DOI: 10.14416/j.kmutnb.2017.06.002
รับเมื่อ 9 มิถุนายน 2559 ตอบรับเมื่อ 11 สิงหาคม 2559 เผยแพร่ออนไลน์ 14 มิถุนายน 2560
© 2017 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาผลของเถ้าถ่านหินต่อสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ ในคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีต ภายใต้สภาวะแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 3 ปี โดยใช้เถ้าถ่านหินจากแม่เมาะแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 0, 15, 25, 35 และ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน และใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B) เท่ากับ 0.40, 0.45, 0.50 โดยหล่อตัวอย่างคอนกรีตทรงลูกบาศก์ขนาด 200×200×200 มม.^{3} สำหรับทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ โดยใช้กฎการแพร่ข้อที่ 2 ของฟิค ผลการศึกษาพบว่าคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินในทุกอัตราส่วนโดยน้ำหนักให้ค่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ต่ำกว่าคอนกรีตที่ไม่ได้ผสมเถ้าถ่านหินอย่างชัดเจน และคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ต่ำลง สามารถลดสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ลงได้ โดยเห็นผลชัดเจนในคอนกรีตที่ไม่ได้ผสมเถ้าถ่านหินมากกว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหิน การศึกษาครั้งนี้พบว่า คอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีต ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 และแทนที่เถ้าถ่านหินในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ร้อยละ 15 ถึง 25 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน มีความเหมาะสมที่จะใช้ในสิ่งแวดล้อมทะเล เนื่องจากมีกำลังอัดและความสามารถในการต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์เป็นไปตามที่ ACI 201.2R ได้แนะนำไว้

คำสำคัญ: มวลรวมจากเศษคอนกรีต, เถ้าถ่านหิน, สัมประสิทธิ์การแทรกซึมคลอไรด์, สิ่งแวดล้อมทะเล

การอ้างอิงบทความ: นำพล บุตรเชื้อไทย เที่ยง ชีวะเกตุ และ วิเชียร ชาลี, "สัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินภายใต้สิ่งแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 3 ปี," *วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ*, ปีที่ 27, ฉบับที่ 3, หน้า 441–451, ก.ค.–ก.ย. 2560

Research Article

Chloride Diffusion Coefficient of Reclycled Aggregate Concrete Containing Fly Ash under 3-Year Exposure in Marine Environment

Numpon Butchueathai, Tieng Cheewaket and Wichian Chalee*
Civil Engineering Department, Faculty of Engineering, Burapha Universiy, Chon Buri, Thailand

* Corresponding Author, Tel. 08–9791–5171, E–mail: wichian@buu.ac.th DOI: 10.14416/j.kmutnb.2017.06.002
Received 9 June 2016; Accepted 11 August 2016; Published online: 14 June 2017
© 2017 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

Abstract

This research studied the chloride diffusion coefficient of recycled concrete aggregate containing fly ash exposed to marine environment for 3 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 water to binder (W/B) ratios of 0.40, 0.45, and 0.50 in the mixtures. The concrete cube specimens of 200×200×200 mm^3 were cast and placed in the tidal zone of marine environment for 3 years. Chloride diffusion coefficients of the specimens were determined according to Fick's second law of diffusion. The research revealed that chloride diffusion coefficients of recycled concrete aggregate containing fly ash were significantly lower than those of recycled concrete aggregate without any fly ash. Smaller in W/B ratio also lessened the chloride penetration coefficient especially in recycled concrete aggregate with no fly ash than those of concrete aggregate containing fly ash. Considering ACI 201.2R recommendation, the use of Mae-Moh fly ash to replace Portland cement between 15 and 25 percent by weight of binder with the W/B ratio of 0.40 in the mixture would be suggested to satisfy both compressive strength and chloride penetration resistance of recycled concrete aggregate exposed to marine environment due to the suitable compressive strength and the ability to resist chloride diffusion.

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

Please cite this article as: N. Butchueathai, T. Cheewaket, and W. Chalee, "Chloride diffusion coefficient of reclycled aggregate concrete containing fly ash under 3-year exposure in marine environment," *The Journal of KMUTNB.*, vol. 27, no. 3, pp. 441–451, Jul.–Sep. 2017 (in Thai).

1. บทนำ

มวลรวมจากเศษคอนกรีต (Recycled Aggregate) คือ การนำมวลรวมจากสิ่งปลูกสร้างที่ถูกรื้อถอน มาใช้แทนมวลรวมจากธรรมชาติ โดยนำเศษคอนกรีตที่แข็งตัวมาย่อยให้มีขนาดลดลง สมบัติของคอนกรีตที่ได้จากการใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตจะด้อยกว่าคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากธรรมชาติ เช่น กำลังอัด ความทึบน้ำ ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น และการต้านทานการขัดสี อย่างไรก็ตามจากการศึกษาที่ผ่านมา [1]–[3] พบว่าการใช้วัสดุปอซโซลานที่มีคุณภาพดีแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์บางส่วน สามารถทำให้คอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีต พัฒนากำลังอัดเพิ่มขึ้นในช่วงหลัง และทำให้คอนกรีตมีความทึบน้ำมากขึ้น ซึ่งส่งผลให้สมบัติด้านความคงทนของคอนกรีต เช่น การต้านทานต่อคลอไรด์ และซัลเฟต ดีขึ้น การนำวัสดุปอซโซลานที่มีคุณภาพดีมาปรับปรุงสมบัติในส่วนที่ด้อยของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีต ให้สามารถใช้งานได้ดีเหมือนกับคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากธรรมชาติ ได้มีผลการศึกษาในห้องปฏิบัติการเบื้องต้นไปในทิศทางที่ดี โดยเฉพาะคุณสมบัติด้านความทึบน้ำและสมบัติเชิงกลของคอนกรีต ซึ่งเป็นแนวโน้มที่ดีในการพัฒนาคอนกรีตดังกล่าว ให้สามารถใช้งานได้ในสภาพแวดล้อมที่มีการกัดกร่อนสูง เหมือนกับคอนกรีตที่ทำจากมวลรวมจากธรรมชาติ ที่มีผลการศึกษาในภาคสนามซึ่งให้ผลการศึกษาไปในทิศทางที่ดี [4]–[7]

ปัญหาด้านความคงทนของคอนกรีตมีความสำคัญอย่างมากและส่งผลกระทบโดยตรงต่ออายุการใช้งานของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก ส่งผลให้ต้องเสียค่าใช้จ่ายในการซ่อมแซมสูง การนำเถ้าถ่านหินซึ่งเป็นวัสดุปอซโซลานมาผสมร่วมกับปูนซีเมนต์เพื่อปรับปรุงคุณภาพคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากธรรมชาติ ได้มีการศึกษาในภาคสนามและพบว่า คอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินที่มีคุณภาพดีสามารถต้านทานการทำลายเนื่องจากสิ่งแวดล้อมทะเลได้อย่างมีประสิทธิภาพ [4], [5] ดังนั้น การทดลองนำเถ้าถ่านหินมาผสมกับปูนซีเมนต์เพื่อปรับปรุงคุณภาพคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีต น่าจะเป็นแนวทางที่ทำให้คอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีต สามารถใช้งานในสิ่งแวดล้อมทะเลได้ [8], [9] งานวิจัยนี้ จึงศึกษาผลของการใช้เถ้าถ่านหินเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีต ให้สามารถใช้งานในสิ่งแวดล้อมที่มีการกัดกร่อนสูงได้ โดยมุ่งประเด็นไปที่คุณสมบัติด้านการต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ และกำลังอัด หลังจากเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล บริเวณชายฝั่งเป็นเวลา 3 ปี

2. วิธีการศึกษา

2.1 วัสดุประสานและมวลรวม

วัสดุประสานที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ประกอบด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เถ้าถ่านหินจากแม่เมาะที่ได้จากโรงงานโดยตรง โดยมีปริมาณอนุภาคค้างบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 เท่ากับร้อยละ 32 ซึ่งมีค่าต่ำกว่าที่มาตรฐาน ASTM C618 [10] กำหนดไว้ไม่เกินร้อยละ 34 จึงสามารถใช้เป็นวัสดุปอซโซลานได้ ความถ่วงจำเพาะของเถ้าถ่านหินเท่ากับ 2.23 สำหรับองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าถ่านหินแม่เมาะ มีผลรวมของสารประกอบหลัก SiO_2, Al_2O_3 และ Fe_2O_3 เท่ากับร้อยละ 72.51 และมีค่า LOI ร้อยละ 0.07 ซึ่งจัดเป็นเถ้าถ่านหิน Class F ตามมาตรฐาน ASTM C618 [10] สมบัติทางเคมีของวัสดุประสานที่ใช้ในการศึกษาแสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุประสาน

องค์ประกอบทางเคมี (%)	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1	เถ้าถ่านหิน
Silicon Dioxide, SiO_2	21.52	36.02
Aluminum Oxide, Al_2O_3	3.56	20.58
Iron Oxide, Fe_2O_3	4.51	15.91
Calcium Oxide, CaO	66.70	18.75
Magnesium Oxide, MgO	1.06	-
Sodium Oxide, Na_2O	0.12	0.69
Potassium Oxide, K_2O	0.24	1.69
Sulfur Trioxide, SO_3	2.11	2.24
Loss On Ignition, LOI	1.74	0.07

มวลรวมละเอียดใช้ทรายแม่น้ำที่มีค่าโมดูลัสความละเอียดเท่ากับ 2.74 และความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.63 ส่วนมวลรวมหยาบใช้หินที่ได้จากการย่อยเศษคอนกรีตในโครงการก่อสร้างของบริษัท อิตาเลียนไทย ดีเวล็อปเมนต์ จำกัด (มหาชน) ซึ่งคอนกรีตที่ใช้ย่อยดังกล่าวมีกำลังอัดในช่วง 240–320 กก./ซม.^{2} (ทรงกระบอก) โดยมวลรวมดังกล่าวมีโมดูลัสความละเอียดเท่ากับ 6.42 ความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.44 ร้อยละการของดูดซึมน้ำของมวลรวมจากเศษคอนกรีตเท่ากับ 4.92 ซึ่งสูงกว่ามวลรวมหยาบธรรมชาติที่เป็นหินปูนประมาณ 5 เท่า มีขนาดใหญ่สุดของมวลรวมเท่ากับ 19 มม. สมบัติทางกายภาพของมวลรวมละเอียดและมวลรวมหยาบที่ใช้ในการศึกษาแสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 สมบัติทางกายภาพมวลรวม

สมบัติทางกายภาพ	มวลรวมละเอียด	มวลรวมจากเศษคอนกรีต
โมดูลัสความละเอียด	2.74	6.42
ความถ่วงจำเพาะ	2.63	2.44
การดูดซึม (ร้อยละ)	0.91	4.92
ความหนาแน่น (กก./ลบ.ม.)	1725	1476
ช่องว่าง (ร้อยละ)	33.9	39.1
ขนาดใหญ่สุดของมวลรวม (มม.)		19
การสูญเสียการขัดสี (ร้อยละ)	-	41

2.2 การเตรียมตัวอย่างและการทดสอบ

หล่อตัวอย่างคอนกรีตทรงลูกบาศก์ขนาด 200×200×200 มม.^{3} จากส่วนผสมคอนกรีตที่ใช้เถ้าถ่านหินจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตเป็นมวลรวมหยาบในอัตราส่วนร้อยละ 0, 15, 25, 35 และ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน และใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40, 0.45 และ 0.50 ส่วนผสมคอนกรีตที่ใช้ในการศึกษาแสดงดังตารางที่ 3 หลังจากบ่มคอนกรีตในน้ำประปาจนมีอายุครบ 28 วัน นำตัวอย่างคอนกรีตไปแช่น้ำทะเล (ในสภาวะเปียกสลับสภาวะแห้ง) บริเวณชายทะเลโรงพยาบาลสมเด็จพระบรมราชเทวี ณ ศรีราชา อ.ศรีราชา จ.ชลบุรี เป็นเวลา 3 ปี ได้นำตัวอย่างคอนกรีตมาเจาะ เพื่อทดสอบหาปริมาณคลอไรด์ที่ระดับความลึกต่าง ๆ จากผิวหน้าของคอนกรีต โดยใช้กรดเป็นตัวทำละลายตามมาตรฐาน ASTM C1152 [11] ดังแสดงในรูปที่ 1 หลังจากนั้นได้นำข้อมูลการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่เก็บเป็นระยะเวลา 3 ปี มาคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์โดยใช้กฎการแพร่ข้อที่สองของฟิค (Fick's Second Law) และยังได้หล่อตัวอย่างคอนกรีตทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มม. สูง 200 มม. เพื่อทดสอบกำลังอัดที่อายุ 28 วัน และ 3 ปี อีกด้วย

รูปที่ 1 การเตรียมตัวอย่างเพื่อหาปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีต

2.3 การคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมคลอไรด์ (D_c)

ในการศึกษาครั้งนี้ได้นำสมการกฎการแพร่ข้อที่สองของฟิค (Fick's Second Law) เพื่อคำนวณหาค่า

ตารางที่ 3 อัตราส่วนผสมของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีต

ส่วนผสม	สัดส่วนผสมคอนกรีต (กก./ม.^{3})					
	ปูนซีเมนต์ ประเภทที่ 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
50FR00	385	0	767	1012	190	0.3
50FR15	327	58	767	990	190	0.3
50FR25	289	96	767	978	190	0.3
50FR35	250	135	767	964	190	0.3
50FR50	193	193	767	944	190	0.3

สัมประสิทธิ์การแทรกซึมคลอไรด์ ดังแสดงในสมการที่ (1) [12]

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

เมื่อ D_c ในสมการที่ (1) เป็นค่าคงที่ คำตอบทั่วไปของสมการที่ (1) แสดงดังสมการที่ (2)

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

โดยที่

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

x = ระยะจากผิวหน้าคอนกรีต (มม.)

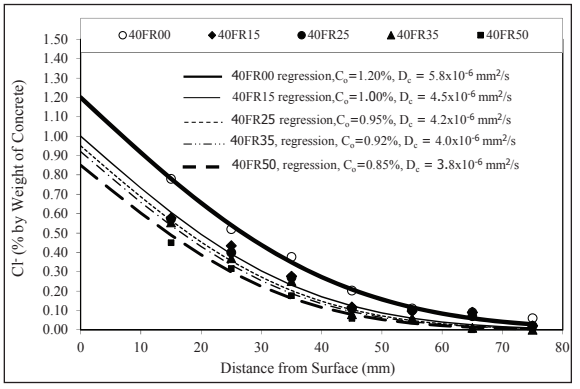
t = ระยะเวลาแช่ (วินาที)

C_o = ความเข้มข้นของคลอไรด์ที่ผิวคอนกรีต (ที่ x=0) ที่ระยะเวลาแช่น้ำทะเล t

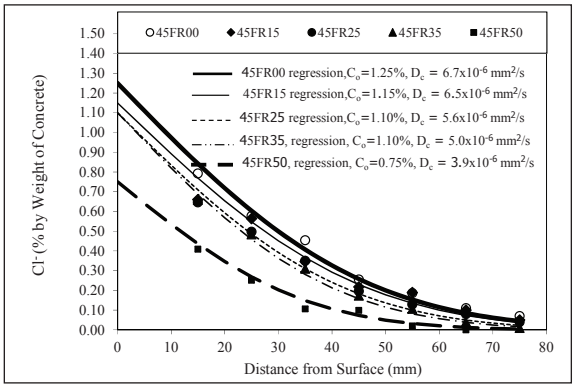
D_c = สัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ที่ระยะเวลาแช่ t (มม.^{2}/วินาที)

erf = ฟังก์ชันค่าผิดพลาด (Error Function)

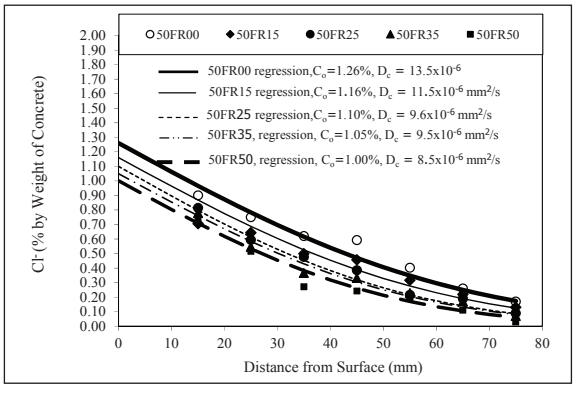
ปรับค่า D_c และ C_o ในสมการที่ (2) เพื่อให้กราฟสอดคล้องกับข้อมูลการแทรกซึมของคลอไรด์มากที่สุด ดังตัวอย่างในรูปที่ 2(ก), 2(ข) และ 2(ค) ที่แสดงการหาค่า D_c โดยใช้สมการที่ (2) ในข้อมูลการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีต ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่ไม่ได้ผสมเถ้าถ่านหินและที่ผสมเถ้าถ่านหินร้อยละ 15, 25, 35 และ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ในคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40, 0.45 และ 0.50 ตามลำดับ โดยค่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินหลังแช่น้ำทะเลในสภาพเปียกสลับแห้งเป็นเวลา 3 ปี แสดงดังตารางที่ 4



(ก) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40



(ข) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45



(ค) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.50

รูปที่ 2 การหาค่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ (D_c) ในคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหิน เมื่อแช่ในน้ำทะเลเป็นเวลา 3 ปี

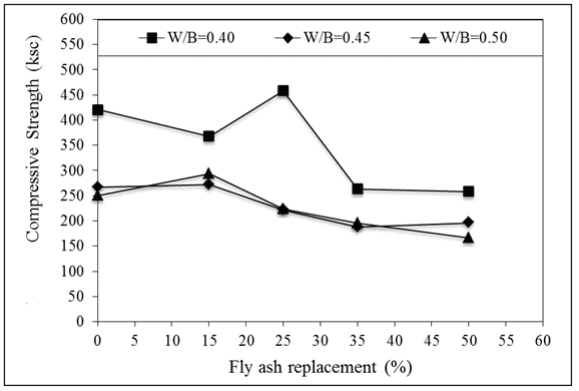
ตารางที่ 4 สัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ (D_c) ในคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหิน เมื่อแช่ในน้ำทะเลเป็นเวลา 3 ปี

ส่วนผสม	C_o (% โดยน้ำหนักของคอนกรีต)	$D_c \times 10^{-6}$ (มม.^{2}/วินาที)
40FR00	1.20	5.80
40FR15	1.00	4.50
40FR25	0.95	4.20
40FR35	0.92	4.00
40FR50	0.85	3.80
45FR00	1.25	6.70
45FR15	1.15	6.50
45FR25	1.10	5.60
45FR35	1.10	5.00
45FR50	0.75	3.90
50FR00	1.26	13.50
50FR15	1.16	11.50
50FR25	1.10	9.60
50FR35	1.05	9.50
50FR50	1.00	8.50

3. วิเคราะห์ผลการศึกษา

3.1 กำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตหลังแช่ในน้ำทะเลเป็นเวลา 3 ปี

กำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตหลังแช่ในน้ำทะเลเป็นเวลา 3 ปี แสดงดังตารางที่ 5 โดยรูปที่ 3 แสดงผลของการแทนที่เถ้าถ่านหิน ต่อกำลังอัดคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีต พบว่าการใช้ปริมาณเถ้าถ่านหินแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เพิ่มขึ้นถึงร้อยละ 35 ส่งผลให้กำลังอัดคอนกรีตหลังแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 3 ปี ลดลงอย่างชัดเจนเช่น คอนกรีตที่ใช้ W/B เท่ากับ 0.40 และแทนที่เถ้าถ่านหินในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เท่ากับร้อยละ 0, 15, 25, 35, 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน มีกำลังหลังแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 3 ปีเท่ากับ 421, 368, 458, 263 และ 258 กก./ซม.^{2} ตามลำดับ การลดลงของกำลังอัดคอนกรีตที่ใช้มวลรวม



รูปที่ 3 ผลของเถ้าถ่านหินต่อกำลังอัดของคอนกรีตที่แช่ในน้ำทะเลเป็นเวลา 3 ปี

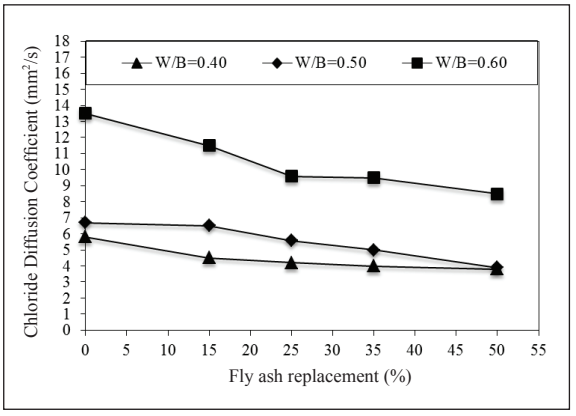
จากเศษคอนกรีต ที่ผสมเถ้าถ่านหินสูงถึงร้อยละ 35 และ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน หลังแช่น้ำทะเล 3 ปี อาจเกิดจากการใช้เถ้าถ่านหินผสมในปริมาณมากเกินไป แม้ว่าอนุภาคที่เล็กของเถ้าถ่านหินจะสามารถแทรกอุดช่องว่างของเพสต์ ส่งผลให้คอนกรีตแน่นขึ้น แต่การใช้เถ้าถ่านหินแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 35 และ 50 โดยน้ำหนักต่อวัสดุประสานถือว่าค่อนข้างมาก ส่งผลให้กำลังอัดที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันหายไป ตลอดจนแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันลดลง ส่งผลให้ปฏิกิริยาปอซโซลานลดลงด้วย ซึ่งทำให้กำลังอัดที่ได้จากปฏิกิริยาปอซโซลาน ไม่เพียงพอที่จะทดแทนกำลังอัดที่หายไปจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน ตลอดจนคุณภาพของมวลรวมจากเศษคอนกรีตค่อนข้างต่ำ เมื่อเทียบกับมวลรวมจากธรรมชาติ จึงอาจมีผลให้ความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อนทางกายภาพ (การขัดสีของกรวด ทราย คลื่นกระแทก การทำลายทางชีวภาพ) เนื่องจากสิ่งแวดล้อมทะเลลดลงได้ โดยทั่วไปความแข็งแรงของมวลรวม จะมีผลต่อการต้านทานการสึกกร่อนในคอนกรีตที่มีกำลังของเพสต์ที่ต่ำมากกว่าในเพสต์ที่มีกำลังสูง ดังนั้นการใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตในเพสต์ที่ผสมเถ้าถ่านหินในปริมาณสูง (กำลังอัดต่ำ) จึงส่งผลให้การต้านทานการสึกกร่อนเนื่องจากน้ำทะเลลดลงอย่างชัดเจน จึงทำให้กำลังอัดของคอนกรีตในกลุ่มนี้ลดลงอย่างมาก [13], [14]

ตารางที่ 5 กำลังอัดของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน และหลังแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 3 ปี

ส่วนผสม	กำลังอัดของคอนกรีต		ร้อยละกำลังอัดที่ 3 ปีเทียบกับ 28 วัน
	28 วัน	แช่น้ำทะเล 3 ปี	
40FR00	383	421	110
40FR15	381	368	97
40FR25	414	458	111
40FR35	347	263	76
40FR50	316	258	82
45FR00	304	268	88
45FR15	373	273	73
45FR25	317	223	70
45FR35	285	189	66
45FR50	270	197	73
50FR00	285	250	88
50FR15	310	294	95
50FR25	305	224	74
50FR35	282	196	69
50FR50	267	167	62

3.2 ผลของเถ้าถ่านหินต่อสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ (D_c) ในคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีต

เมื่อพิจารณาผลของเถ้าถ่านหินต่อสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ ในคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40, 0.45 และ 0.50 หลังแช่น้ำทะเลในสภาวะเปียกสลับแห้งเป็นเวลา 3 ปี ดังแสดงในรูปที่ 4 พบว่า การใช้เถ้าถ่านหินแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่ผสมเถ้าถ่านหินทุกส่วนผสมจะมีค่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ต่ำกว่าคอนกรีตที่ไม่ได้ผสมเถ้าถ่านหิน อีกทั้งเมื่อผสมเถ้าถ่านหินในปริมาณที่สูงขึ้น ส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตหลังแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 3 ปี มีแนวโน้มลดลงเมื่อเทียบกับคอนกรีตควบคุม เช่น คอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินร้อยละ 0, 15, 25, 35 และ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน และมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 มีค่า D_c

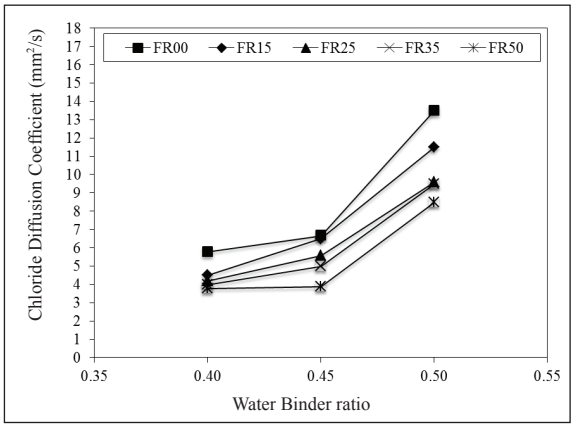


รูปที่ 4 ผลของเถ้าถ่านหินต่อสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ ในคอนกรีต

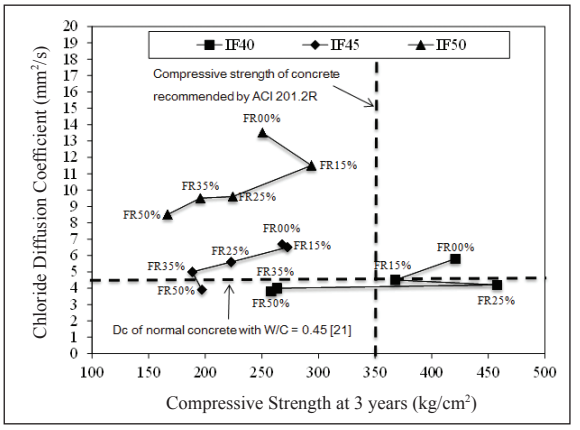
เท่ากับ 5.8×10^{-6}, 4.5×10^{-6}, 4.2×10^{-6}, 4.0×10^{-6} และ 3.8×10^{-6} มม.^{2}/วินาที ตามลำดับ และให้ผลไปในทิศทางเดียวกันในคอนกรีตทั้ง 3 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าปฏิกิริยาปอซโซลานระหว่างเถ้าถ่านหินกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์จากปฏิกิริยาไฮเดรชันให้ผลดีต่อคุณสมบัติทางด้านความคงทนของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีต โดยลดค่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตลงได้อย่างชัดเจน เมื่อเทียบกับกลุ่มที่ไม่ได้ผสมเถ้าถ่านหิน การศึกษาครั้งนี้เป็นไปในทิศทางเดียวกับงานวิจัยที่ผ่านมา [15] ที่ใช้เถ้าถ่านหินจากการเผาด้วยระบบฟลูอิดไดซ์เบดบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตที่พบว่า เมื่อแทนที่เถ้าถ่านหินในปริมาณสูงขึ้นส่งผลให้สัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำที่อายุ 28 และ 90 วัน มีแนวโน้มลดลงซึ่งแสดงให้เห็นว่าผลการทดสอบการซึมผ่านของน้ำในคอนกรีตกลุ่มนี้ สามารถใช้เป็นข้อมูลเบื้องต้นในการประเมินแนวโน้มของการต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ของคอนกรีต จากสภาพแวดล้อมทะเลได้ การศึกษาครั้งนี้ใช้เถ้าถ่านหินจากแม่เมาะโดยตรง โดยไม่ได้ผ่านการบดให้อนุภาคเล็กลง ซึ่งเถ้าถ่านหินดังกล่าวได้จากการเผาแบบพูลเวอร์ไรซ์ซึ่งอุณหภูมิที่ใช้เผาสูงกว่าเถ้าถ่านหินที่เผาแบบฟลูอิดไดซ์เบด แต่ให้ผลการศึกษาไปในทิศทางเดียวกัน ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาที่ผ่านมาในคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากธรรมชาติ [16], [17] ที่พบว่า การแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าถ่านหินส่งผลให้การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตลดลง และค่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์จะมีค่าลดลง เนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานในคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินได้ผลิตภัณฑ์เป็น แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) และแคลเซียมอลูมิเนียมไฮเดรต (C-A-H) ที่ช่วยลดช่องว่างระหว่างในคอนกรีตลง ส่งผลให้เนื้อคอนกรีตมีความทึบน้ำมากขึ้น [15], [18] โดยผลการศึกษานี้ยังสอดคล้องกับผลการวิจัยที่ผ่านมา [19] พบว่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำที่อายุ 90 วัน และสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ จะมีค่าลดลงเมื่อแทนที่เถ้าถ่านหินในคอนกรีตปริมาณสูงขึ้น ซึ่งน่าจะเป็นผลจากปฏิกิริยาปอซโซลานที่เริ่มส่งผลต่อคุณสมบัติด้านความคงทนอย่างชัดเจน

3.3 ผลของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่อสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ (D_c) ในคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีต

เมื่อพิจารณาผลของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่อสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ ในคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีต ดังแสดงในรูปที่ 5 พบว่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ต่ำลง สามารถลดค่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ลงได้ และให้ผลไปในทิศทางเดียวกันทั้งคอนกรีตธรรมดาและคอนกรีตที่มีการผสมเถ้าถ่านหิน ซึ่งเป็นแนวโน้มเดียวกับคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากธรรมชาติ [20] ผลการศึกษาครั้งนี้พบว่าการใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ลดลง มีผลต่อการลดสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ ในคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตและไม่ได้ผสมเถ้าถ่านหินมากกว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหิน เช่น การใช้ W/B ที่ลดลงจาก 0.50 เป็น 0.40 มีผลให้คอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตที่ไม่ได้ผสมเถ้าถ่านหิน มีค่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมคลอไรด์ลดลงเท่ากับ 7.7×10^{-6} มม.^{2}/วินาที



รูปที่ 5 ผลของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่อสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตหลังแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 3 ปี

(ลดลงจาก 13.5×10^{-6} ในคอนกรีต 50FR00 เป็น 5.8×10^{-6} ในคอนกรีต 40FR00) ในขณะที่คอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินร้อยละ 50 โดยน้ำหนักต่อวัสดุประสาน พบว่ามีค่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ลดลงแค่ 4.7×10^{-6} มม.^{2}/วินาที (ลดลงจาก 8.5×10^{-6} ในคอนกรีต 50FR50 เป็น 3.8×10^{-6} ในคอนกรีต 40FR50) ทั้งนี้อาจเกิดจากในคอนกรีตธรรมดาความทึบน้ำในคอนกรีตจะขึ้นอยู่กับกำลังอัด และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน ส่วนในคอนกรีตที่ผสมวัสดุปอซโซลานนอกจากคุณสมบัติด้านกำลังอัดและอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานแล้ว คุณสมบัติด้านความทึบน้ำของคอนกรีตจะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของวัสดุปอซโซลาน ซึ่งส่งผลต่อปฏิกิริยาปอซโซลานด้วย [21]

3.4 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีต

รูปที่ 6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ พบว่าคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีต ที่มีความเหมาะสมในการใช้งานในสภาวะแวดล้อมทะเล ได้แก่ กลุ่มคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตที่มี W/B เท่ากับ 0.40 และผสมเถ้าถ่านหินแทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 15 ถึง 25 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน เนื่องจากให้กำลังอัดหลังแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 3 ปี สูงกว่า 350 กก./ซม.^{2} ซึ่งเป็นค่ากำลังอัดคอนกรีตอย่างต่ำที่เหมาะสมในการก่อสร้างในสภาพแวดล้อมทะเลตามคำแนะนำของ ACI 201.2R [22] นอกจากนั้น ACI 201.2R [22] ได้แนะนำให้คอนกรีตที่ใช้ก่อสร้างในสิ่งแวดล้อมทะเล ควรมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานไม่เกินกว่า 0.45 ซึ่งจากการศึกษาที่ผ่านมา [20] พบว่าคอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่ใช้มวลรวมจากธรรมชาติ ให้ค่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตหลังแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 3 ปี เท่ากับ 4.3×10^{-6} มม.^{2}/วินาที ดังนั้นการศึกษาครั้งนี้พบว่า คอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานไม่เกิน 0.40 และผสมเถ้าถ่านหินแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในช่วงร้อยละ 15 ถึง 25 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน มีความเหมาะสมที่จะใช้เป็นคอนกรีตที่ก่อสร้างในสิ่งแวดล้อมทะเลเนื่องจากให้กำลังอัดที่สูงกว่า 350 กก./ซม.^{2} และให้ค่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ต่ำกว่าคอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่ใช้มวลรวมจากธรรมชาติ ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.45

4. สรุป

จากผลการศึกษาสามารถสรุปได้ดังนี้

4.1 คอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินในทุกอัตราส่วนโดยน้ำหนัก มีค่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ต่ำกว่าคอนกรีตที่ไม่ได้ผสมเถ้าเถ้าถ่านหิน

4.2 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ต่ำลงสามารถลดสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ลงได้ โดยเห็นผลชัดเจนในคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตที่ไม่ได้ผสมเถ้าถ่านหินมากกว่าคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหิน

4.3 การศึกษาครั้งนี้ พบว่าคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีต ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 และแทนที่เถ้าถ่านหินในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ร้อยละ 15 ถึง 25 โดยน้ำหนักวัสดุประสานมีความเหมาะสมที่จะใช้ในสิ่งแวดล้อมทะเล เนื่องจากมีกำลังอัดและความสามารถในการต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ เป็นไปตามที่ ACI 201.2R ได้แนะนำไว้

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณ ทุนอุดหนุนการวิจัยและพัฒนา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา สัญญาเลขที่ วจพ. 24 /2556

เอกสารอ้างอิง

[1] W. Tangchirapat, R. Buranasing, C. Jaturapitakkul, and P. Chindaprasirt, "Influence of rice husk-bark ash on mechanical properties of concrete containing high amount of recycled aggregates," *Construction and Building Materials*, vol. 22, no. 8, pp. 1812–1819, August 2008.

[2] M. C. Limbachiya, T. Leelawat, and R. K. Dhir, "Use of recycled concrete aggregate in high-strength concrete," *Materials and Structure*, vol. 33, pp. 574–580, November 2000.

[3] 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, April 2012.

[4] 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.

[5] W. Chalee, T. Sasakul, P. Suwanmaneechot, and C. Jaturapitakkul, "Utilization of rice husk-bark ash to improve the corrosion resistance of concrete under 5-year exposure in a marine environment," *Cement and concrete composites*, vol. 37, pp. 47–53, March 2013.

[6] W. Chalee and C. Jaturapitakkul, "Relation between Water Permeability and Chloride Diffusion Coefficient of Concrete Exposure in Marine Environment," *Annual Concrete Conference*, vol. 51, no. 5, pp. 959–974, 2011 (in Thai).

[7] W. Chalee, C. Jaturapitakkul, and P. Chindaprasirt, "Predicting the chloride penetration of fly ash concrete in seawater," *Marine Structures*, vol. 22, no. 3, pp. 341–353, July 2009.

[8] S. Rukzon and P. Chindaprasirt, "Strength and chloride resistance of blended Portland cement mortar containing palm oil fuel ash and fly ash," *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, vol. 16, no. 4, pp. 475–481, August 2009.

[9] J. Tangpagasit, R. Cheerarot, C. Jaturapitakkul, and K. Kiattikomol, "Packing effect and pozzolanic reaction of fly ash in mortar," *Cement and Concrete Research*, vol. 35, no. 6, pp. 1145–1151, June 2005.

[10] *Standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use in concrete*, ASTM C 618-03, 2003.

[11] *Standard test method for acid-soluble chloride in mortar and concrete*, ASTM C 1152, 2008.

[12] J. Crank, *The Mathematic of Diffusion*, Oxford Press, London, 2nd, edn., 1975.

[13] P. Sravana, P. Sarika, S. Rao, S. Sekhar, and G. Apparao, "Studies on relationship between water/binder ratio and compressive strength of high volume fly ash concrete," *AJER American Journal of Engineering Research*, vol. 2, no. 8, pp. 115–122, 2013.

[14] K. Rahmani, A. Shamsai, B. Saghafian, and S. Peroti, "Effect of water and cement ratio on compressive strength and abrasion of microsilica concrete," *Middle-East Journal of Scientific Research*, vol. 12, no. 8, pp. 1056–1061, 2012.

[15] R. Somna, C. Jaturapitakkul, W. Chalee, and P. Rattanachu, "Effect of W/B ratio and ground fly ash on properties of recycled aggregate," *ASCE's Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 24, no. 1, pp. 16–22, January 2012.

[16] P. Suwanmaneechot and W. Chalee, "Chloride penetration and steel corrosion in portland cement type V concrete containing fly ash from fluidized-bed and pulverized combustions under marine exposure," *Journal of King Mongkut's University of Technology North Bangkok*, vol. 22, no. 3, pp. 1–13, 2012 (in Thai).

[17] R. Somna, W. Chalee, and C. Jaturapitakkul, "Influence of classified fly ashes from 5-Source on compressive strength of mortar and sulfuric acid attack on concrete," *Annual Concrete Conference*, vol. 2, pp. 107–112, 2008 (in Thai).

[18] J. Tangpagasit, R. Cheerarot, C. Jaturapitakkul, and K. Kiattikomol, "Packing effect and pozzolanic reaction of fly ash in mortar," *Cement and Concrete Research*, vol. 35, no. 6, pp. 1145–1151, June 2005.

[19] K. Charoenprom and W. Chalee, "Relation between water permeability and chloride diffusion coefficient of concrete under 10-year exposure in marine environment," *Journal of King Mongkut's University of Technology North Bangkok*, vol. 23, no. 1, pp. 29–41, 2013 (in Thai).

[20] 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, May 2009.

[21] W. Chalee, C. Jaturapitakkul, and P. Chindaprasirt, "Predicting the chloride penetration of fly ash concrete in seawater," *Marine Structures*, vol. 22, no. 3, pp. 341–353, July 2009.

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