

ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำกับสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของ คลอไรด์ในคอนกรีตหลังแช่น้ำทะเล 10 ปี

กิริติกร เจริญพร้อม¹ และ วิเชียร ชาลี^{2*}

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างการซึมผ่านน้ำในคอนกรีต (k) และสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ (D_c) ในคอนกรีตที่แช่น้ำทะเลเป็นเวลา 10 ปี โดยใช้ส่วนผสมคอนกรีตที่แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ I ด้วยเถ้าถ่านหินจากแม่เมาะในอัตราส่วนร้อยละ 0, 15, 25, 35 และ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสานและใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45, 0.55 และ 0.65 (เป็นส่วนผสมเดียวกับกลุ่มที่แช่น้ำทะเล) หล่อตัวอย่างคอนกรีตทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มม. สูง 200 มม. สำหรับทดสอบการซึมผ่านน้ำในคอนกรีตที่อายุ 28 และ 90 วัน ตลอดจนทดสอบการแทรกซึมของคลอไรด์อิสระในคอนกรีตที่แช่น้ำทะเลเป็นเวลา 10 ปี เพื่อคำนวณหาสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของ

คลอไรด์ในคอนกรีต ผลการศึกษาพบว่า การใช้เถ้าถ่านหินแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในปริมาณที่สูงขึ้นส่งผลให้สัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำที่อายุ 28 วัน มีทิศทางตรงกันข้ามกับสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ ส่วนสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำที่อายุ 90 วันเป็นไปในทิศทางเดียวกับสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ นอกจากนั้นพบว่า การลดลงของสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำในคอนกรีตส่งผลให้สัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตมีค่าลดลง โดยส่งผลต่อการลดสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตธรรมดาามากกว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหิน

คำสำคัญ: สัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำ สัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ สิ่งแวดล้อมทะเล เถ้าถ่านหิน คอนกรีต

¹ นักศึกษา สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

² ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทรศัพท์ 08-9791-5171 อีเมล: wichian@buu.ac.th



Relation between Water Permeability and Chloride Diffusion Coefficient of Concrete under 10-year Exposure in Marine Environment

Kiratikorn Charoenprom¹ and Wichian Chalee^{2*}

Abstract

This research investigates the relationship between the water permeability coefficient (k) and chloride diffusion coefficient (D_c) of concrete after being exposed to the marine environment for 10 years. Concretes was cast by using fly ash from the Mea Moh Power Plant to partially replace Portland cement type I at the percentages of 0, 15, 25, 35 and 50 by the weight of the binder. The 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). The cylindrical specimens of 100-mm in diameter and 200-mm in height were cast for the water permeability test at 28 and 90 days of curing. In order to calculate the chloride diffusion coefficient, the exposed concrete was tested for free chloride penetration after being exposed to

the tidal zone of seawater for 10 years. At 28 days, the results showed that the increase of fly ash replacement of Portland cement type I resulted in an increase of water permeability coefficient, which was the opposite trend of the chloride diffusion coefficient. In contrast, at 90 days, the increase of fly ash resulted in a decrease in water permeability coefficient which was consistent with the chloride diffusion coefficient. In addition, the decrease of water permeability in concrete resulted in the decrease of the chloride diffusion coefficient, which was more effective for reducing the chloride diffusion coefficient in normal concrete than in the fly ash concrete.

Keywords: Water Permeability Coefficient, Chloride Diffusion Coefficient, Marine Environment, Fly Ash, Concrete

¹ Student, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Burapha University.

² Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Burapha University.

* Corresponding Author, Tel. 08-9791-5171, E-mail: wichian@buu.ac.th

1. บทนำ

การออกแบบส่วนผสมคอนกรีตเพื่อใช้งานในสภาพแวดล้อมทะเลจำเป็นต้องคำนึงถึงคุณสมบัติเชิงกลควบคู่กับคุณสมบัติด้านความคงทน คุณสมบัติเชิงกลของคอนกรีตสามารถทำการทดสอบได้ง่ายและให้ผลที่ค่อนข้างชัดเจนต่อความมั่นใจในการออกแบบใช้งาน ส่วนคุณสมบัติด้านความคงทนของคอนกรีตค่อนข้างมีความซับซ้อน เนื่องจากสภาพแวดล้อมจริงที่คอนกรีตสัมผัสมีปัจจัยหลายอย่างส่งผลต่อการทำลายและไม่สามารถควบคุมได้ การศึกษาปัญหาดังกล่าวเพื่อให้ผลที่ชัดเจนและสามารถอธิบายกลไกการทำลายตลอดจนแนวทางป้องกันความเสียหายจากสภาพแวดล้อมที่รุนแรงต่อคอนกรีต จึงจำเป็นต้องเก็บข้อมูลในสภาพแวดล้อมจริงภายใต้ระยะเวลาที่ยาวนาน การศึกษาที่ผ่านมา [1]-[5] ได้รวบรวมฐานข้อมูลเกี่ยวกับคุณสมบัติด้านความคงทนของคอนกรีตที่ต้องการใช้งานในสิ่งแวดล้อมทะเล โดยมุ่งประเด็นที่การปรับปรุงคุณสมบัติของคอนกรีตให้สามารถต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์และซัลเฟตจากน้ำทะเลที่เข้าทำลายคอนกรีตและเหล็กเสริม โดยผลการศึกษาเป็นที่ยอมรับว่า การใช้วัสดุปอซโซลานที่มีคุณภาพดี เช่น เถ้าถ่านหิน ซิลิกาฟูม หรือเถ้าชีวมวลบดละเอียด ให้ผลไปในทิศทางที่ดีและสามารถป้องกันการทำลายเนื่องจากสิ่งแวดล้อมทะเลได้

การทดสอบการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตสามารถทำได้หลายวิธี แต่ละวิธีมีเงื่อนไขของการทดสอบที่แตกต่างกัน ทั้งระยะเวลาที่ใช้ทดสอบ กระบวนการทดสอบ และความน่าเชื่อถือของผลที่ได้จากการทดสอบ การทดสอบที่สามารถทำได้สะดวกรวดเร็ว มักจะให้ข้อมูลที่เป็นแนวโน้มของการต้านทานคลอไรด์มากกว่าที่จะเป็นปริมาณการแทรกซึมของคลอไรด์จริง ดังนั้นในการวิจัยยังจำเป็นต้องเก็บข้อมูลการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่เกิดจากการแทรกซึมในสภาวะธรรมชาติที่ตัวอย่างคอนกรีตสัมผัสเพื่อจะได้วิเคราะห์สถานการณ์การกัดกร่อนภายใต้ระยะเวลาที่โครงสร้างมีการใช้งานได้อย่างถูกต้องมากขึ้น อย่างไรก็ตาม การศึกษาดังกล่าวจะต้องใช้ระยะเวลาในการเก็บข้อมูลที่ยาวนาน ตลอดจนค่าใช้จ่ายในการทดสอบค่อนข้างสูง ดังนั้นการศึกษาเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างผล

ทดสอบด้านความคงทนของคอนกรีต ที่สามารถทำได้ง่ายภายในระยะเวลาที่สั้นกับผลการทดลองที่ต้องใช้ระยะเวลานาน น่าจะเป็นประโยชน์ต่อการศึกษาพฤติกรรมด้านความคงทนที่ทำให้ประหยัดค่าใช้จ่ายและเวลาได้มากขึ้น

การศึกษาที่ผ่านมา [6], [7] พบว่าคอนกรีตธรรมดาและคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินมีกลไกของปฏิกิริยาที่ส่งผลต่อคุณสมบัติเชิงกลและความคงทนที่แตกต่างกัน โดยคุณสมบัติของคอนกรีตธรรมดาจะขึ้นกับปฏิกิริยาไฮเดรชันที่เกิดขึ้นในช่วงต้นและค่อนข้างคงที่ในระยะยาว ซึ่งการประเมินคุณสมบัติด้านความคงทนในระยะยาวของคอนกรีตธรรมดาจากผลการทดสอบระยะสั้น อาจทำได้ค่อนข้างง่ายและให้ผลดี ส่วนคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินคุณสมบัติของคอนกรีตจะขึ้นกับปฏิกิริยาไฮเดรชันในช่วงต้นและเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานต่อเนื่องเมื่ออายุคอนกรีตนานขึ้น จึงเป็นการยากที่จะประเมินคุณสมบัติด้านความคงทนในระยะยาวของคอนกรีตได้

ในงานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาเปรียบเทียบผลการทดสอบความทึบน้ำในคอนกรีตที่ทดสอบในช่วงอายุต้นกับคุณสมบัติด้านการต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ในระยะยาว โดยหาความสัมพันธ์ในรูปของค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำในคอนกรีตที่อายุบ่มในน้ำ 28 และ 90 วัน กับสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่มีส่วนผสมเถ้าถ่านหินหลังแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 10 ปี โดยสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตคำนวณจากปริมาณคลอไรด์อิสระในคอนกรีตที่ได้จากการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C 1218 [8] โดยทิศทางการศึกษาได้มุ่งประเด็นที่ผลของเถ้าถ่านหินต่อความสัมพันธ์ระหว่างการซึมผ่านน้ำที่ทดสอบในช่วงอายุต้นของคอนกรีต กับสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่แช่น้ำทะเลเป็นเวลา 10 ปี ตลอดจนประเมินสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่แช่น้ำทะเลเป็นเวลานานจากผลการทดสอบการซึมผ่านของน้ำที่อายุ 28 และ 90 วัน เพื่อใช้เป็นฐานข้อมูลในการประเมินคุณสมบัติด้านความคงทนของคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินในระยะยาวจากผลการทดสอบในระยะสั้นและระยะกลาง ซึ่งจะ

เป็นประโยชน์ต่อการออกแบบส่วนผสมคอนกรีตที่ต้องการความคงทนเพื่อใช้ในสภาวะแวดล้อมทะเลต่อไป

2. วิธีการศึกษา

2.1 วัสดุประสานและมวลรวม

วัสดุประสานได้ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และถ่านหินที่ได้จากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ ซึ่งมีความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.23 มีอนุภาคที่ค้ำตะแกรงเบอร์ 325 ร้อยละ 32 และอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน ASTM C 618 [9] ที่กำหนดไว้ไม่เกินร้อยละ 34 โดยน้ำหนัก

สำหรับองค์ประกอบทางเคมีของถ่านหินแม่เมาะ มีผลรวมของสารประกอบหลัก SiO_2 , Al_2O_3 และ Fe_2O_3 เท่ากับร้อยละ 72.51 และมีค่า LOI ร้อยละ 0.07 ซึ่งจัดเป็นถ่านหิน Class F ตามมาตรฐาน ASTM C 618 [9] โดยองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุประสาน แสดงดังตารางที่ 1

สำหรับมวลรวมหยาบที่ใช้ในการศึกษานี้มีขนาดใหญ่สุดของมวลรวมเท่ากับ 19 มม. และมวลรวมละเอียดใช้ทรายแม่น้ำที่ร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 4

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุประสาน

องค์ประกอบทางเคมี (%)	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1	ถ่านหิน (FA)
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	0.10	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

2.2 การเตรียมตัวอย่างและการทดสอบ

2.2.1 ส่วนผสมคอนกรีต

ตัวอย่างทดสอบใช้ส่วนผสมคอนกรีตเดียวกันกับกลุ่มที่แช่ในน้ำทะเลเมื่อ 10 ปีที่แล้ว ซึ่งได้ออกแบบ

ส่วนผสมคอนกรีตตามมาตรฐานของ ACI 211.1-91 [10] และแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยถ่านหินจากแม่เมาะในอัตราส่วนร้อยละ 0, 15, 25, 35 และ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B) เท่ากับ 0.45, 0.55 และ 0.65 โดยอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานดังกล่าวให้ระดับกำลังอัดที่อายุ 28 วันของคอนกรีตปกติ (Normal Strength Grade) เท่ากับ 500 (C500), 400 (C400) และ 300 (C300) กก./ซม.² ตามลำดับ ซึ่งอัตราส่วนผสมคอนกรีตแสดงดังตารางที่ 2

2.2.2 การทดสอบการซึมผ่านน้ำในคอนกรีต

การศึกษานี้ได้ทดสอบการซึมผ่านของน้ำในคอนกรีตโดยวิธีการไหลเวียนของน้ำ โดยทดสอบที่อายุคอนกรีตบ่มในน้ำเป็นเวลา 28 และ 90 วัน หล่อตัวอย่างคอนกรีตทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มม. สูง 200 มม. และตัดตัวอย่างให้ความหนา 40 มม. นำตัวอย่างคอนกรีตที่ตัดมาเคลือบด้วยอีพอกซีหนาแต่ละ 25 มม. (เส้นผ่านศูนย์กลางรวมทั้งหมด 150 มม.) จากนั้นจึงนำตัวอย่างคอนกรีตประกอบเข้ากับชุดเซลล์ทดสอบการซึมผ่านของน้ำ ผ่านความดันน้ำในตัวอย่างทดสอบเท่ากับ 0.5 เมกะปาสคาล [11],[12] รายละเอียดการเตรียมตัวอย่างทดสอบการซึมผ่านน้ำในคอนกรีตแสดงดังรูปที่ 1 ในการหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำในคอนกรีตคำนวณได้จากสูตรของ Darcy's Law และสมการความต่อเนื่อง ดังนี้

$$k = \frac{\rho L g Q}{P A} \quad (1)$$

เมื่อ

k = สัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ (เมตร/วินาที)

ρ = ความหนาแน่นของน้ำ (กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร)

g = ความเร่งเนื่องจากแรงดึงดูดของโลก (เมตร/วินาที²)

Q = อัตราการไหลของน้ำ (ลูกบาศก์เมตร/วินาที)

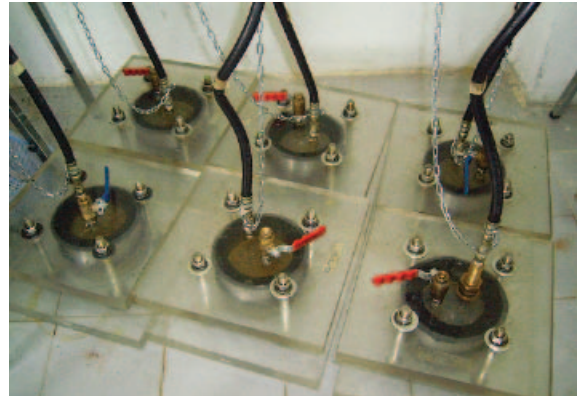
L = ความหนาของตัวอย่างคอนกรีต (เมตร)

P = ความดันน้ำสมบูรณ์ (ปาสคาล)

A = พื้นที่หน้าตัดของตัวอย่างคอนกรีต (ตารางเมตร)



ก) เครื่องตัวอย่างทดสอบด้วยอีพอกซี



ข) ประกอบตัวอย่างทดสอบเข้ากับชุดเซลล์ทดสอบการซึมผ่านของน้ำ

รูปที่ 1 การเตรียมตัวอย่างทดสอบการซึมผ่านน้ำในคอนกรีต

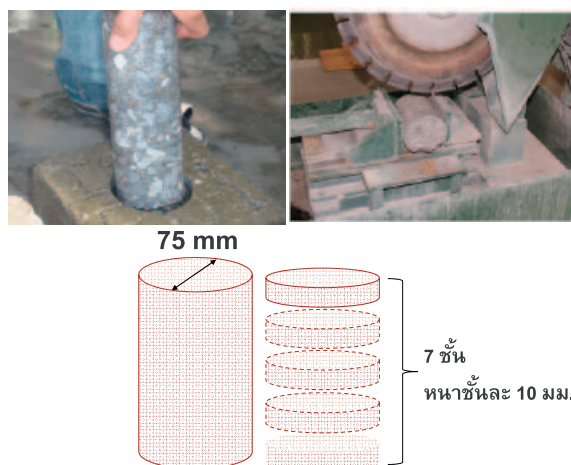
ตารางที่ 2 อัตราส่วนผสมของคอนกรีต

ระดับกำลังอัด คอนกรีตปกติ	ร้อยละการ แทนที่เถ้า ถ่านหิน	ส่วนผสมคอนกรีต (กก./ม. ³)					W/B ratio	กำลังอัดที่ อายุ 28 วัน (กก./ชม. ²)
		ปูนซีเมนต์ ประเภทที่ 1	เถ้าถ่านหิน (FA)	ทราย	หิน	น้ำ		
C500	0	478	0	639	1024	215	0.45	504
	15	406	72	639	1004	215	0.45	474
	25	359	119	639	990	215	0.45	432
	35	311	167	639	977	215	0.45	450
	50	239	239	639	957	215	0.45	338
C400	0	478	0	639	971	262	0.55	370
	15	406	72	639	948	262	0.55	320
	25	359	119	639	933	262	0.55	303
	35	311	167	639	918	262	0.55	327
	50	239	239	639	897	262	0.55	209
C300	0	478	0	639	922	311	0.65	290
	15	406	72	639	898	311	0.65	199
	25	359	119	639	881	311	0.65	210
	35	311	167	639	864	311	0.65	229
	50	239	239	639	840	311	0.65	166

2.2.3 การทดสอบการแทรกซึมของคลอไรด์

นำตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงลูกบาศก์ขนาด 200 x 200 x 200 มม.³ ที่แช่ในน้ำทะเลเป็นเวลา 10 ปี มาเจาะตรงบริเวณกึ่งกลางของตัวอย่าง ให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 มม. (3 นิ้ว) ทำการขัดผิวหน้าของแท่ง

คอนกรีตที่ได้จากการเจาะทั้งประมาณ 1 มม. เพื่อลดความแปรปรวนของปริมาณคลอไรด์ที่เกาะอยู่บริเวณผิวหน้าคอนกรีต จากนั้นตัดแท่งคอนกรีตที่เจาะตามขวางให้มีความหนา 10 มม. จำนวน 7 ชั้น (ถึงระดับความลึกจากผิวหน้าคอนกรีต 70 มม.) (ดังรูปที่ 2) และบด



รูปที่ 2 การเตรียมตัวอย่างเพื่อทดสอบการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตหลังแช่น้ำทะเล 10 ปี

ตัวอย่างที่ได้จากการตัดแต่ละชั้นให้ละเอียดเพื่อนำส่วนที่ร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 20 ที่ระยะความลึกต่างๆ ไปทดสอบหาปริมาณสารประกอบคลอไรด์ที่ละลายในน้ำ (Water-soluble Chloride) ตามมาตรฐาน ASTM C1218 [8] คำนวณสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีต (D_c) หลังแช่คอนกรีตในสิ่งแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 10 ปี โดยใช้กฎข้อที่ 2 ของ Fick ตามรายละเอียดที่แสดงในงานวิจัยของ Chalee และคณะ [13]

3. วิเคราะห์ผลการศึกษา

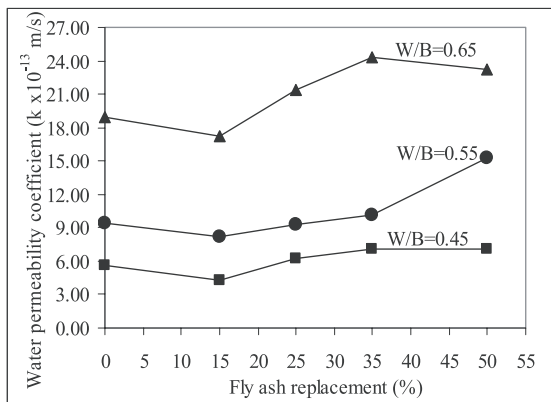
3.1 ผลของเถาเถาหินและอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่อการซึมผ่านน้ำในคอนกรีต

ตารางที่ 3 แสดงสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำในคอนกรีตที่อายุ 28 และ 60 วัน และสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตหลังแช่น้ำทะเล 10 ปี พิจารณาผลของเถาเถาหินและอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่อสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำในคอนกรีต หลังบ่มในน้ำประปาเป็นเวลา 28 และ 90 วัน ดังแสดงในรูปที่ 3ก และ 3ข ตามลำดับ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ลดลง ส่งผลชัดเจนให้สัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำมีค่าต่ำลง โดยมีแนวโน้มเหมือนกันทั้งกลุ่มที่บ่มในน้ำประปา 28 และ 90 วัน เมื่อพิจารณาสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำที่อายุ 90 วัน พบว่า

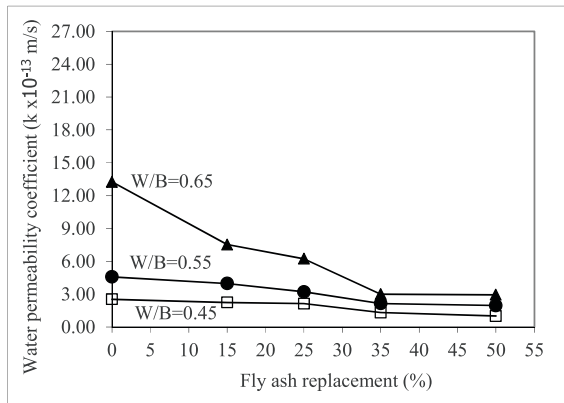
อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ลดลงมีผลต่อการลดการซึมผ่านของน้ำในคอนกรีตธรรมดาและคอนกรีตที่ผสมเถาเถาหินปริมาณต่ำมากกว่าคอนกรีตที่ผสมเถาเถาหินปริมาณสูง โดยอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ลดลงจาก 0.65 เป็น 0.45 ส่งผลให้สัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำที่อายุ 90 วัน ในคอนกรีตที่ผสมเถาเถาหินร้อยละ 0, 15, 25, 35, และ 50 มีการเปลี่ยนแปลงโดยลดลงเท่ากับ 10.71×10^{-13} , 5.28×10^{-13} , 4.10×10^{-13} , 1.69×10^{-13} และ 1.94×10^{-13} เมตร/วินาที ตามลำดับ ซึ่งน่าจะเป็นผลจากคอนกรีตที่ผสมเถาเถาหินในปริมาณที่สูงขึ้น ความที่น้ำไม่ได้ขึ้นกับอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเพียงอย่างเดียว แต่ขึ้นกับคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของเถาเถาหินด้วย [13]-[15] จากการศึกษาที่ผ่านมา [3], [16], [17] พบว่าเถาเถาหินที่มีลักษณะอนุภาคกลมตัน และมีองค์ประกอบออกไซด์ของซิลิกา อลูมินา และเหล็ก ในปริมาณสูง ส่งผลต่อคุณสมบัติเชิงกลและคุณสมบัติด้านความคงทนของคอนกรีตไปในทิศทางที่ดี ถึงแม้จะใช้เวลาเถาเถาหินผสมในคอนกรีตมากถึงร้อยละ 50 ก็ตาม

ตารางที่ 3 สัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำในคอนกรีตที่อายุ 28 และ 60 วัน และสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตหลังแช่น้ำทะเล 10 ปี

ระดับกำลังอัดคอนกรีตปกติ	ร้อยละการแทรกซึมแทนที่เถาเถาหิน	สัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ ($D_c \times 10^{-6}$ มม. ² /วินาที)	สัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ (k , 10^{-13} เมตร/วินาที)	
			28 วัน	90 วัน
C500 (W/B=0.45)	0	3.65	5.63	2.54
	15	1.55	4.25	2.25
	25	1.25	6.24	2.14
	35	0.95	7.12	1.32
	50	0.5	7.05	1.01
C400 (W/B=0.55)	0	6.08	9.35	4.58
	15	2.34	8.21	3.98
	25	1.56	9.33	3.21
	35	1.23	10.12	2.15
	50	0.65	15.28	1.97
C300 (W/B=0.65)	0	7.33	18.91	13.25
	15	2.55	17.25	7.53
	25	2.07	21.32	6.24
	35	1.75	24.32	3.01
	50	1.22	23.25	2.95



ก) อายุบ่มในน้ำ 28 วัน



ข) อายุบ่มในน้ำ 90 วัน

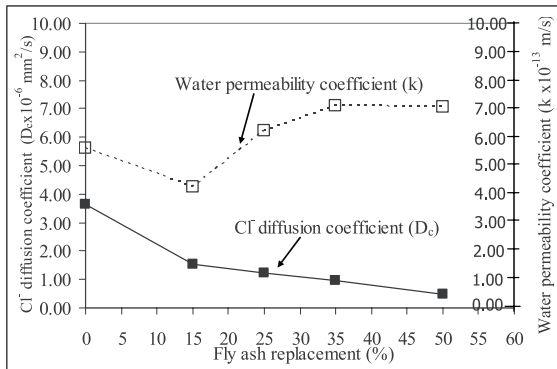
รูปที่ 3 ผลของเถ้าถ่านหินและอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุ
ประสานต่อสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำในคอนกรีต
หลังบ่มในน้ำประปาเป็นเวลา ก) 28 และ ข)
90 วัน

เมื่อพิจารณาผลของเถ้าถ่านหินต่อสัมประสิทธิ์
การซึมผ่านน้ำที่อายุ 28 วัน ตามรูปที่ 3ก จะเห็นได้ว่า
ปริมาณเถ้าถ่านหินที่มากขึ้นส่งผลให้สัมประสิทธิ์การซึมผ่าน
น้ำมีค่าสูงขึ้น และมีแนวโน้มเหมือนกันทั้ง 3 อัตราส่วน
น้ำต่อวัสดุประสาน โดยสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำใน
คอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55 และแทนที่
ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าถ่านหินร้อยละ
0, 15, 25, 35 และ 50 มีค่าเท่ากับ 9.35×10^{-13} , 8.21×10^{-13} , 9.33×10^{-13} , 10.12×10^{-13} และ 15.28×10^{-13} เมตร/วินาที

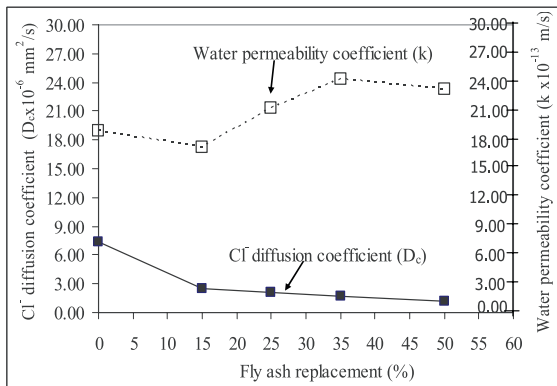
ตามลำดับ ผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า การบ่มคอนกรีต
ถึงอายุ 28 วัน ปฏิกริยาปอซโซลานที่เกิดขึ้นในคอนกรีต
ที่ผสมเถ้าถ่านหินยังไม่ส่งผลให้คอนกรีตมีความทึบน้ำ
มากขึ้น ตลอดจนการทดสอบการซึมผ่านน้ำในคอนกรีต
ครั้งนี้ ได้ใช้ความดันน้ำสูงถึง 5 บาร์ ซึ่งความดันดังกล่าว
อาจทำให้เกิดความพรุนในคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหิน
ปริมาณสูงได้ ดังนั้นการใช้เถ้าถ่านหินผสมในคอนกรีต
ที่อายุการบ่ม 28 วัน จึงไม่เหมาะสมที่จะใช้งานบริเวณ
สภาพแวดล้อมที่มีความรุนแรงสูง เช่น บริเวณที่มี
ความเข้มข้นของสารเคมีที่เป็นอันตรายกับคอนกรีต
ภายใต้แรงดันจากของเหลวที่สูงๆ ส่วนการซึม
ผ่านน้ำในคอนกรีตที่อายุบ่มในน้ำเป็นเวลา 90 วัน
ดังรูปที่ 3ข พบว่า การใช้เถ้าถ่านหินจากแม่เมาะแทนที่
ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในปริมาณที่สูงขึ้น
สามารถลดสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำลงได้อย่างชัดเจน
และเป็นแนวโน้มเดียวกันในอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน
ทั้ง 3 กลุ่ม ซึ่งผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า ปฏิกริยา
ปอซโซลานของเถ้าถ่านหินในส่วนผสมคอนกรีต มีผลค่อนข้าง
ชัดเจนต่อการปรับปรุงคุณสมบัติด้านความทึบน้ำใน
คอนกรีตหลังจากที่บ่มในน้ำประปาเป็นเวลา 90 วัน [11],
[18] ซึ่งที่อายุดังกล่าวนี้ สามารถนำคอนกรีตที่ผสมเถ้า
ถ่านหินไปใช้ในสภาวะแวดล้อมที่รุนแรงได้อย่างมั่นใจยิ่งขึ้น

3.2 เปรียบเทียบผลของเถ้าถ่านหินต่อการซึมผ่าน น้ำและสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ใน คอนกรีต

พิจารณาสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำในคอนกรีต
ที่ผสมเถ้าถ่านหินที่อายุ 28 วัน เทียบกับสัมประสิทธิ์
การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตหลังแช่ใน
สิ่งแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 10 ปี ดังรูปที่ 4 พบว่าการ
ใช้เถ้าถ่านหินแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท
ที่ 1 ในปริมาณที่สูงขึ้น ส่งผลให้สัมประสิทธิ์การซึมผ่าน
ของน้ำที่อายุ 28 วันมีทิศทางตรงกันข้ามกับสัมประสิทธิ์
การแทรกซึมของคลอไรด์ในระยะยาว โดยมีความชัดเจน
มากขึ้น เมื่อใช้เถ้าถ่านหินในคอนกรีตปริมาณสูงขึ้น
กล่าวคือคอนกรีตที่ใช้เถ้าถ่านหินในปริมาณที่ใช้เถ้าถ่านหิน



ก) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน เท่ากับ 0.45



ข) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน เท่ากับ 0.65

รูปที่ 4 ผลของเถ้านหินต่อสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำในคอนกรีตที่อายุ 28 วัน และสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่อายุแช่น้ำทะเล 10 ปี

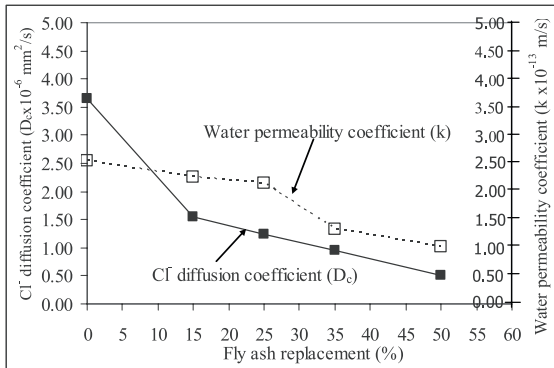
ในปริมาณที่มากขึ้น ส่งผลให้สัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำในคอนกรีตที่อายุ 28 วัน มีค่าเพิ่มขึ้น ขณะที่สัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์มีค่าต่ำลงอย่างชัดเจน และเป็นแนวโน้มเดียวกันทั้งกลุ่มที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.45 (รูปที่ 4ก) และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.65 (รูปที่ 4ข) การที่สัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำในคอนกรีตที่ทดสอบ 28 วัน มีทิศทางตรงกันข้ามกับสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตหลังแช่น้ำทะเล 10 ปี โดยมีความชัดเจนมากขึ้นเมื่อผสมเถ้าน

หินในคอนกรีตในปริมาณที่สูงขึ้น แสดงถึงผลของปฏิกิริยาปอซโซลาน ของคอนกรีตที่ผสมเถ้านหินต่อคุณสมบัติด้านความคงทนของคอนกรีตอย่างชัดเจน โดยส่งผลเสียต่อคุณสมบัติด้านความคงทนของคอนกรีตในช่วงแรก และให้ผลดีอย่างชัดเจนเมื่ออายุคอนกรีตมากขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากคอนกรีตที่ผสมเถ้านหินในปริมาณที่สูงขึ้นจะลดปริมาณของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในส่วนผสมคอนกรีตลง ส่งผลให้ลดปฏิกิริยาไฮเดรชันที่ทำให้คอนกรีตมีความแข็งแรงและที่บั่นในช่วงต้นลดลงไปด้วย [19] ส่วนระยะยาวปฏิกิริยาปอซโซลานมีผลทำให้คอนกรีตมีความที่บั่นและลดอัตราการแทรกซึมของคลอไรด์ที่อายุหลังแช่น้ำทะเล 10 ปีได้อย่างชัดเจน ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ผลการทดสอบสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำในคอนกรีตที่ผสมเถ้านหินที่อายุ 28 วัน ไม่สามารถเป็นตัวบ่งชี้คุณสมบัติด้านความคงทนในระยะยาวของคอนกรีตที่ผสมเถ้านหินได้

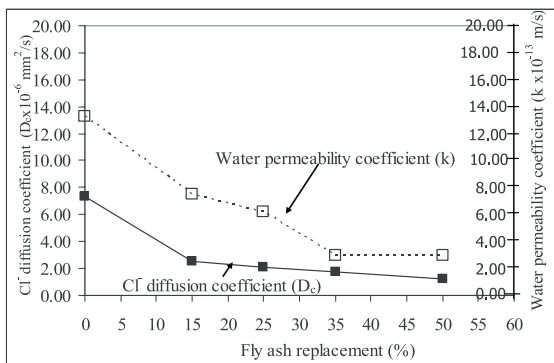
เมื่อพิจารณาผลการทดสอบสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำที่อายุคอนกรีตมากขึ้นเป็น 90 วัน ดังรูปที่ 5 พบว่าคุณสมบัติด้านความคงทนของคอนกรีตที่ได้จากการทดสอบทั้ง 2 วิธีมีทิศทางสอดคล้องกัน โดยสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำที่อายุ 90 วัน และสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์มีค่าลดลงเมื่อแทนที่เถ้านหินในคอนกรีตปริมาณสูงขึ้น ซึ่งน่าจะเป็นผลจากปฏิกิริยาปอซโซลานที่เริ่มส่งผลต่อคุณสมบัติด้านความคงทนอย่างชัดเจน ดังนั้นการประเมินคุณสมบัติด้านความคงทนของคอนกรีตที่ผสมเถ้านหินในระยะยาว จากข้อมูลทดสอบการซึมผ่านน้ำที่อายุ 90 วัน จึงมีความเหมาะสม เนื่องจากให้ผลการทดสอบไปในทิศทางเดียวกัน

3.3 ความสัมพันธ์ระหว่างการซึมผ่านน้ำและสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีต

พิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำในคอนกรีตที่อายุ 28 วัน ต่อสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตกลุ่มเดียวกันหลังแช่น้ำทะเล 10 ปี ดังแสดงในตารางที่ 3 และรูปที่ 6 พบว่า คอนกรีตที่มีสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำที่อายุ 28 วันเพิ่มขึ้น



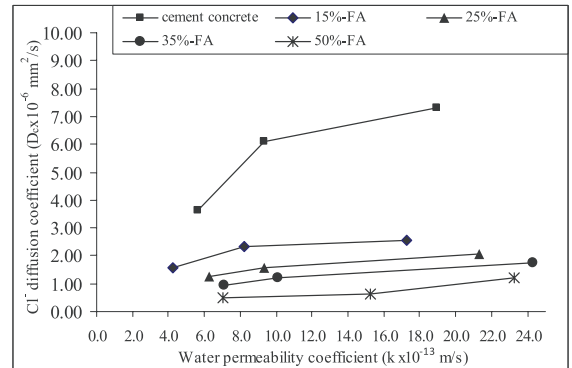
ก) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน เท่ากับ 0.45



ข) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน เท่ากับ 0.65

รูปที่ 5 ผลของเถ้านหินต่อสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำในคอนกรีตที่อายุ 90 วัน และสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่อายุแช่น้ำทะเล 10 ปี

(อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานสูงขึ้น) ส่งผลให้สัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ที่แช่น้ำทะเล 10 ปี เพิ่มขึ้นด้วย โดยการเพิ่มของสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตธรรมดา มีแนวโน้มสูงกว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้านหิน ซึ่งผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า คอนกรีตที่มีการซึมผ่านน้ำที่อายุ 28 วัน ลดลง (กำลังอัดคอนกรีตเพิ่มขึ้น) มีประสิทธิผลต่อการต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตธรรมดา มากกว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้านหิน เช่น คอนกรีต ธรรมดาที่มีสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำที่อายุ 28 วัน ลดลงเท่ากับ 13.28×10^{-13} เมตร/วินาที (ลดลงจาก 18.91×10^{-13} เมตร/วินาที ที่ W/B =



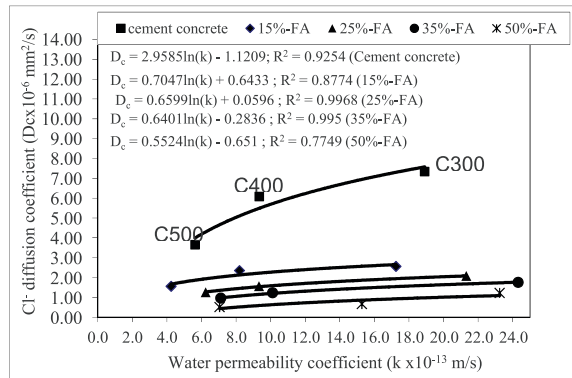
รูปที่ 6 ผลของการซึมผ่านน้ำในคอนกรีตที่อายุ 28 วัน ต่อสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์หลังแช่น้ำทะเล 10 ปี

0.65 เป็น 5.63×10^{-13} เมตร/วินาที ที่ W/B=0.45) ส่งผลให้ลดสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์หลังแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 10 ปี ลงเท่ากับ 3.68×10^{-6} มม.²/วินาที (ลดลงจาก 7.33×10^{-6} มม.²/วินาที ที่ W/B=0.65 เป็น 3.65×10^{-6} มม.²/วินาที ที่ W/B=0.45) ขณะที่คอนกรีตที่ผสมเถ้านหินร้อยละ 35 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน สัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำลดลงเท่ากับ 17.20×10^{-13} เมตร/วินาที (ลดลงจาก 24.32×10^{-13} เมตร/วินาที ที่ W/B = 0.65 เป็น 7.12×10^{-13} เมตร/วินาที ที่ W/B = 0.45) ส่งผลให้สัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์หลังคอนกรีตแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 10 ปี ลดลงเพียง 0.80×10^{-6} มม.²/วินาที เท่านั้น (ลดลงจาก 1.75×10^{-6} มม.²/วินาที ที่ W/B = 0.65 เป็น 0.95×10^{-6} มม.²/วินาที ที่ W/B=0.45) การลดลงของสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำในคอนกรีตที่อายุ 28 วัน ที่มีผลต่อการต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตธรรมดา มากกว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้านหิน น่าจะเป็นผลจากปฏิกิริยาไฮเดรชันในคอนกรีตธรรมดาคงจะเกิดในช่วงต้น ทำให้คอนกรีตสามารถพัฒนากำลังอัดและมีความทึบน้ำได้ภายใน 28 วัน [11], [18] ซึ่งส่งผลให้คุณสมบัติด้านความทึบน้ำในคอนกรีตในช่วง 28 วันมีความสอดคล้องกับการต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์เมื่ออายุคอนกรีตมากขึ้น ตลอดจนการศึกษาที่ผ่านมา [13] พบว่าความทึบน้ำ

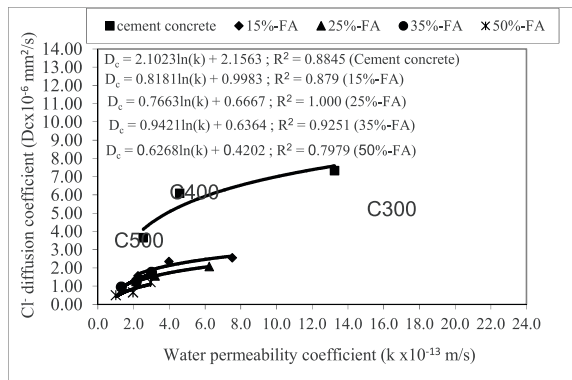
ในคอนกรีตธรรมดาที่มีปัจจัยหลักมาจากกำลังอัดที่เพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นผลจากการลดอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานในคอนกรีตลง ดังนั้นการศึกษาครั้งนี้ได้ลดอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานลงจาก 0.65 เป็น 0.45 จึงทำให้สัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำในคอนกรีตมีค่าลดลงและสอดคล้องกับสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ที่ลดลงในระยะยาวด้วย ส่วนกลไกการให้กำลังและความทึบน้ำในคอนกรีตในช่วง 28 วันแรกของคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินจะเป็นผลจากปฏิกิริยาไฮเดรชันและปฏิกิริยาปอซโซลานควบคู่กันไป [20] ซึ่งคอนกรีตที่มีกำลังอัดต่ำลง (อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานสูงขึ้น) ส่งผลให้ความทึบน้ำในคอนกรีตลดลงด้วย แต่หลังจากนั้น ความทึบน้ำในคอนกรีตมีผลจากปฏิกิริยาปอซโซลานที่ทำให้โพรงในคอนกรีตลดลงและต่ำกว่าคอนกรีตธรรมดาค่อนข้างมาก ซึ่งความทึบน้ำของคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินในระยะยาวไม่ได้ขึ้นกับอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเพียงอย่างเดียว แต่จะขึ้นกับคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของเถ้าถ่านหินด้วย ดังนั้นการลดลงของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานในคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินจึงไม่มีผลชัดเจนต่อความทึบน้ำของคอนกรีตในระยะยาว และส่งผลให้สัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่แช่น้ำทะเลเป็นเวลา 10 ปี ไม่แตกต่างกันมาก

3.4 การประเมินค่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตในระยะยาวจากผลการทดสอบการซึมผ่านของน้ำ

การประเมินค่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่แช่น้ำทะเลจากผลการทดสอบการซึมผ่านของน้ำซึ่งทดสอบในช่วงต้นของอายุคอนกรีต มีประโยชน์ในการประเมินคุณสมบัติด้านความคงทนของคอนกรีตในระยะยาวจากผลการทดสอบระยะสั้น การศึกษาครั้งนี้ได้ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างการซึมผ่านน้ำในคอนกรีตที่อายุ 28 และ 90 วัน กับสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่มีส่วนผสมเหมือนกับที่แช่น้ำทะเล 10 ปี ดังแสดงในรูปที่ 7ก และ 7ข ตามลำดับ โดยทำการศึกษาในคอนกรีตที่มีระดับกำลังอัด



ก) อายุ 28 วัน



ข) อายุ 90 วัน

รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำในคอนกรีตที่อายุ ก) 28 วัน และ ข) 90 วัน กับสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่อายุ 10 ปี

ของคอนกรีตธรรมดา (Normal Strength Grade) 3 ระดับ คือ 300, 400 และ 500 กก./ซม.² (คอนกรีต C300, C400 และ C 500) โดยแต่ละระดับกำลังอัดได้แทนที่เถ้าถ่านหินในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ร้อยละ 15, 25, 35 และ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ผลการศึกษาดังรูปที่ 7ก และ 7ข สามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำในคอนกรีตที่อายุ 28 และ 90 วัน กับสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์หลังแช่น้ำทะเล 10 ปี โดยการวิเคราะห์เชิงถดถอย (Regression Analysis) ได้ดังนี้

ก) ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำในคอนกรีตที่อายุ 28 วัน กับสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์

$$D_c = 2.9585 \ln(k_{28}) - 1.1209 \text{ คอนกรีตธรรมดา}$$

$$D_c = 0.7047 \ln(k_{28}) + 0.6433 \text{ คอนกรีตผสมเถ้าถ่านหิน 15\%}$$

$$D_c = 0.6599 \ln(k_{28}) + 0.0596 \text{ คอนกรีตผสมเถ้าถ่านหิน 25\%}$$

$$D_c = 0.6401 \ln(k_{28}) - 0.2836 \text{ คอนกรีตผสมเถ้าถ่านหิน 35\%}$$

$$D_c = 0.5524 \ln(k_{28}) - 0.651 \text{ คอนกรีตผสมเถ้าถ่านหิน 50\%}$$

ข) ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำในคอนกรีตที่อายุ 90 วัน กับสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์

$$D_c = 2.1023 \ln(k_{90}) + 2.1563 \text{ คอนกรีตธรรมดา}$$

$$D_c = 0.8181 \ln(k_{90}) + 0.9983 \text{ คอนกรีตผสมเถ้าถ่านหิน 15\%}$$

$$D_c = 0.7663 \ln(k_{90}) + 0.6667 \text{ คอนกรีตผสมเถ้าถ่านหิน 25\%}$$

$$D_c = 0.9421 \ln(k_{90}) + 0.6364 \text{ คอนกรีตผสมเถ้าถ่านหิน 35\%}$$

$$D_c = 0.6268 \ln(k_{90}) + 0.4202 \text{ คอนกรีตผสมเถ้าถ่านหิน 50\%}$$

เมื่อ D_c สัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีต หลังแช่น้ำทะเล 10 ปี ($\times 10^{-6}$ มม.²/ วินาที)

k_{28}, k_{90} = สัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำในคอนกรีตที่อายุ 28 และ 90 วัน ตามลำดับ ($\times 10^{-13}$ / วินาที)

ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำในคอนกรีตกับสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์หลังจากที่คอนกรีตแช่ในสิ่งแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 10 ปี ดังที่กล่าวมาข้างต้น ได้จากการวิเคราะห์เชิงถดถอย (Regression Analysis) จากการแปรเปลี่ยนสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำและสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่มีกำลังอัด 3 ระดับ (W/B=0.45, 0.55 และ 0.65) ซึ่งความสัมพันธ์นี้จะมีค่าถูกต้องมากขึ้นเมื่อเพิ่ม

ชุดข้อมูลทดสอบให้มากขึ้น อย่างไรก็ตามผลการศึกษาค้างนี้สามารถใช้เป็นแนวทางเบื้องต้นในการประเมินคุณสมบัติความคงทนของคอนกรีตในระยะยาวถึง 10 ปี จากผลการทดสอบการซึมผ่านน้ำในคอนกรีตที่อายุ 28 และ 90 วัน ได้

4. สรุป

จากผลการศึกษาศาสามารถสรุปได้ดังนี้

1) การใช้เถ้าถ่านหินแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในปริมาณที่สูงขึ้น ส่งผลให้สัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำในคอนกรีตที่อายุ 28 วัน มีค่าสูงขึ้น แต่ส่งผลให้สัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำที่อายุ 90 วัน มีค่าลดลง

2) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ลดลงมีผลต่อการลดการซึมผ่านของน้ำในคอนกรีตธรรมดามากกว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหิน

3) ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่เท่ากัน การใช้เถ้าถ่านหินแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในปริมาณที่สูงขึ้น ส่งผลให้สัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำที่อายุ 28 วัน มีทิศทางตรงข้ามกับสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์หลังคอนกรีตแช่น้ำทะเล 10 ปี และแนวโน้มดังกล่าวมีความชัดเจนมากขึ้นเมื่อใช้เถ้าถ่านหินในปริมาณที่สูงขึ้น ส่วนสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำที่อายุ 90 วัน มีทิศทางเดียวกับสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์

4) สัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำในคอนกรีตลดลงส่งผลให้สัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ที่แช่คอนกรีตในน้ำทะเล 10 ปี มีค่าลดลง โดยมีผลชัดเจนในคอนกรีตธรรมดามากกว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหิน

5) ข้อมูลจากการศึกษาค้างนี้ สามารถประเมินสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตธรรมดาและคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินร้อยละ 15 25 35 และ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน และมี W/B เท่ากับ 0.45 0.55 และ 0.65 หลังแช่ในน้ำทะเลถึง 10 ปี จากผลการทดสอบการซึมผ่านของน้ำในคอนกรีตที่อายุ 28 และ 90 วัน และผลการทดสอบการซึมผ่านน้ำที่อายุ 90 วัน สามารถใช้ประเมินสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ได้ดีกว่าอายุ 28 วัน เนื่องจากมีผลสอดคล้องในทิศทางเดียวกัน

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณ ทุนอุดหนุนการวิจัยและพัฒนา
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา สัญญาเลขที่
62/2553

เอกสารอ้างอิง

- [1] M.D.A. Thomas, J.D. Matthews, "Performance of pfa concrete in a marine environment-10-year results," *Cem Concr Res*, vol. 26, pp. 5-20, 2004.
- [2] H.A.F. Dehwah, M. Maslehuddin, and S.A. Austin, "Long-term effect of sulfate Ions and associated cat Ion type on chloride-Induced reinforcement corrosion in Portland cement concretes," *Cem Concr Comp*, vol. 24, pp. 17-25, 2002.
- [3] W. Chalee, P. Ausapanit, and C. Jaturapitakkul, "Utilization of fly ash concrete in marine environment for long term design life analysis," *Mater Design*, vol.31, pp. 1242-1249, 2010.
- [4] S. Rukzon and P. Chindaprasirt, "Strength and chloride resistance of blended Portland cement mortar containing palm oil fuel ash and fly ash," *Inter J Minera Metallu Mater*, vol.16, pp. 475-481, 2009.
- [5] A.A. Ramezaniapour and V.M. Malhotra, "Effect of curing on the compressive strength, resistance to chloride-Ion penetration and porosity of concretes incorporating slag, fly ash or silica fume," *Cem Concr Comp*, vol.17, pp. 125-133, 1995.
- [6] C. Jaturapitakkul, W. Tangchirapat *Pozzolan in Concrete*, 2th ed, KMUTT, 2008 (in Thai).
- [7] K. Kiattikomol, C. Jaturapitakkul, S. Songpiriyakij, and S. Shutubtim, "A study of ground coarse fly ashes with different finenesses from various sources as pozzolanic materials," *Cem Concr Comp*, vol.23, pp. 335-343, 2001.
- [8] ASTM C1218. Standard test method for water-soluble chloride in mortar and concrete. Annual Book of ASTM Standards, 2008, 04.02.
- [9] ASTM C618-03. Standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use in concrete. Annual Book of ASTM Standards 2003, 04.02.
- [10] ACI 211.1-91. Standard practice for selecting proportions for normal, heavyweight, and mass concrete. ACI Manual of Concrete Practice Part 1, 2002, Detroit.
- [11] P.Chindaprasirt, S.Homwuttiwong, and C. Jaturapitakkul, "strength and water permeability of concrete containing palm oil fuel ash and rice husk-bark ash," *Constr Build Mater*, vol.21, pp.1492-1499, 2007.
- [12] R.P. Khatri and V. Sirivivatnanon, "Methods for the determination of water permeability of concrete," *ACI Mater J*, vol.94, pp. 257-61, 1997.
- [13] W. Chalee and C. Jaturapitakkul, "Effect of W/B ratios and fly ash finenesses on chloride diffusion coefficient of concrete in marine environment," *Mater Struct*, vol. 42, pp. 505-514, 2009.
- [14] K. Charoenprom, W. Chalee. "Chloride penetration depth in concrete under marine exposure," *The Journal of KMUTNB*, vol.21.no.3, pp 257-266, 2011 (in Thai).
- [15] W. Chalee, C. Jaturapitakkul. "Threshold Chloride Content of Fly ash Concrete under Marine Environment," *The Journal of Industrial Technology*, vol.7, no. 1, pp. 21-22, 2011 (in Thai).
- [16] J. Tangpagasit, R. Cheerarot, C. Jaturapitakkul, and K. Kiattikomol, "Packing effect and pozzolanic reaction of fly ash in mortar," *Cem Concr Res*, vol. 35, pp. 1145-1151, 2005.



- [17] V. Sata, C. Jaturapitakkul, and K. Kiattikomol, "Influence of pozzolan from various by-product materials on mechanical properties of high-strength concrete," *Constr Build Mater*, vol. 21, pp.1589-1598, 2007.
- [18] R. Somna, C. Jaturapitakkul, P. Rattanachu, and W. Chalee, "Effect of ground bagasse ash on mechanical and durability properties of recycled aggregate concrete," *Mater Design*, vol. 36, pp. 597-603, 2012.
- [19] A.M. Neville, *Properties of Concrete*, 4th ed., England: Addison Wesley, 1996.
- [20] P. Chindaprasirt, C. Jaturapitakkul. *Cement, Pozzolan and Concrete*," 5th ed, Thailand Concrete Association, 2008, pp. 11-13, and pp. 238-240 (in Thai).