

ปริมาณคลอไรด์วิกฤติของคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินภายใต้สิ่งแวดล้อมทะเล

Threshold Chloride Content of Fly ash Concrete under Marine Environment

วิเชียร ชาติ¹ และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล²

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาผลของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน และปริมาณการแทนที่เถ้าถ่านหินต่อปริมาณคลอไรด์วิกฤติในคอนกรีตที่แช่ในสภาวะแวดล้อมน้ำทะเล คอนกรีตควบคุมทำจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45, 0.55 และ 0.65 (คอนกรีต I45 I55 I65 ตามลำดับ) ในแต่ละอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานได้แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าถ่านหินจากแม่เมาะในอัตราร้อยละ 15, 25, 35 และ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสานหล่อตัวอย่างคอนกรีตขนาด 200x200x200 มม. และฝังเหล็กเส้นกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มม. ยาว 50 มม. มีระยะคอนกรีตหุ้มเหล็ก 10, 20, 50 และ 75 มม. หลังจากบ่มคอนกรีตจนอายุครบ 28 วัน นำตัวอย่างคอนกรีตไปแช่บริเวณชายฝั่งทะเล จ.ชลบุรี ทำการเก็บตัวอย่างทดสอบปริมาณคลอไรด์อิสระ (ใช้น้ำทำละลาย) ในคอนกรีต ณ ตำแหน่งที่ฝังเหล็ก และวัดพื้นที่สนิมเหล็กที่เกิดขึ้นหลังแช่คอนกรีตในน้ำทะเลเป็นเวลา 3, 4, 5, 7 และ 10 ปี จากความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตที่ตำแหน่งฝังเหล็กกับการเกิดสนิมของเหล็กเสริม สามารถวิเคราะห์หาปริมาณคลอไรด์วิกฤติในแต่ละส่วนผสมได้ ผลการวิจัยพบว่า ปริมาณคลอไรด์วิกฤติ ในคอนกรีต มีค่าลดลงเมื่อปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าถ่านหินสูงขึ้น (โดยเฉพาะในคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินในปริมาณต่ำ) และมีค่าลดลงตามอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่มากขึ้น

คำสำคัญ : สภาวะแวดล้อมทะเล, เถ้าถ่านหิน, คลอไรด์วิกฤติ, อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน

¹ผู้ช่วยศาสตราจารย์, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยบูรพา

²ศาสตราจารย์, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

Abstract

The objectives of this investigation were to study the effect of W/B ratios and fly ash on threshold chloride content of concrete under marine environment. Control concretes were designed by using Portland cement type I with water to binder (W/B) ratios of 0.45, 0.55 and 0.65 (Concrete I45, I55 and I65, respectively). Mae Moh fly ash was used as a partial replacement of Portland cement type I at 15, 25, 35, and 50% by weight of binder with the same W/B ratio of control concretes. Concrete cube specimens of 200 mm were cast and steel bars of 12-mm in diameter and 50-mm in length were embedded at coverings of 10, 20, 50, and 75 mm. Subsequently, the hardened concretes were cured in fresh water until the age of 28 days and then were exposed to tidal zone of marine environment in Chonburi province. The specimens were tested for free chloride content (water soluble chloride) at the position of embedded steel bar and corrosion of embedded steel bar after being exposed to tidal zone of sea water for 3, 4, 5, 7, and 10 years. The threshold chloride level (T) was evaluated from relationship between chloride content at the position of embedded steel bar and initial corrosion of embedded steel bar. The results showed that the threshold chloride level (free chloride) of concrete decreased with increasing of fly ash replacement (especially in low volume fly ash) and the decrease of W/B ratio.

Keyword : Marine environment, Fly ash, Threshold chloride, W/B ratio

1. บทนำ

การใช้เถาถ่านหินในการปรับปรุงคุณสมบัติของคอนกรีตเพื่อใช้ในสภาวะแวดล้อมทะเลเป็นที่ยอมรับว่าให้ผลไปในทิศทางที่ดีต่อการป้องกันการทำลายของสภาวะแวดล้อมดังกล่าว โดยจากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า การใช้เถาถ่านหินที่มีคุณสมบัติที่ดี สามารถลดการทำลายเนื่องจากสภาวะแวดล้อมทะเลได้อย่างชัดเจน ทั้งทำให้คอนกรีตมีความทนน้ำมากขึ้น [1-5] และลดการแทรกซึมของคลอไรด์และซัลเฟต ที่จะเข้าไปทำอันตรายกับคอนกรีต หรือเพิ่มความสามารถในการกักเก็บคลอไรด์ [6, 7] ซึ่งเป็นผลให้ปริมาณคลอไรด์อิสระที่จะมาทำลายเหล็กเสริมมีปริมาณน้อยลง โดยแสดงผลการวิจัยอย่างชัดเจนและสอดคล้องกัน ทั้งที่มีการศึกษาในสภาพแวดล้อมจริง และในห้องปฏิบัติการ อย่างไรก็ตามการศึกษาคุณสมบัติของคอนกรีตเพื่อป้องกันการทำลายเนื่องจากสภาพแวดล้อมทะเลและขีดอายุการใช้งานของโครงสร้างคอนกรีต ก่อนข้างที่จะชำรุดและมีปัจจัยหลายอย่างที่ควรศึกษา ไม่ว่าจะเป็นลักษณะทางด้านกายภาพของคอนกรีต เช่น ความทนน้ำ หรือลักษณะทางเคมี เช่น การกักเก็บคลอไรด์ ปริมาณคลอไรด์วิกฤติ และสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ เป็นต้น ซึ่งลักษณะทั้งหมดนี้เรียกว่า คุณสมบัติด้านความคงทนของคอนกรีต

ปริมาณคลอไรด์วิกฤติ เป็นปริมาณคลอไรด์รอบผิวเหล็กเสริมที่ส่งผลให้เริ่มเกิดการกัดกร่อน โดยทั่วไปคอนกรีตเสริมเหล็กเริ่มมีการกัดกร่อนเมื่อปริมาณคลอไรด์มีค่าเกินร้อยละ 0.2 ถึง 0.7 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน [7, 8] อย่างไรก็ตามปริมาณคลอไรด์วิกฤติจะขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น ลักษณะผิวของเหล็กเสริม, ชนิดของวัสดุประสาน, คุณสมบัติของคอนกรีต, ตลอดจนสภาวะแวดล้อมที่คอนกรีตสัมผัส เป็นต้น ปริมาณคลอไรด์วิกฤติมีประโยชน์ในการศึกษาถึงความสัมพันธ์ระหว่างสถานะของการกัดกร่อนเริ่มต้นของเหล็กที่เสริมในคอนกรีต กับปริมาณของคลอไรด์อิสระรอบผิวของเหล็กเสริม ซึ่งจะมีผลสืบเนื่องในการพิจารณาความเสี่ยงของการกัดกร่อนในเหล็กเสริมเมื่อทราบปริมาณคลอไรด์ที่แทรกซึมเข้าไปในเนื้อคอนกรีต นอกจากนั้น ในงานโครงสร้างใหม่ที่มีมีการออกแบบที่ต้องคำนึงถึงคุณสมบัติ

ด้านความคงทนของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก จำเป็นที่จะต้องใช้อัตราปริมาณคลอไรด์วิกฤติประกอบในการออกแบบด้วย งานวิจัยที่ผ่านมาส่วนใหญ่ได้นำเสนอค่าปริมาณคลอไรด์วิกฤติจากฐานข้อมูลในห้องปฏิบัติการโดยวิธีการทางไฟฟ้าเคมี ซึ่งจะวัดค่าออกมาในรูปแบบของความเสี้ยวที่เริ่มกัดกร่อนของเหล็กเสริมในคอนกรีตมากกว่าการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นจริง และเป็นสภาวะแวดล้อมที่อยู่ในห้องปฏิบัติการ ซึ่งจะแตกต่างจากสภาวะแวดล้อมจริงที่มีปัจจัยหลายอย่างที่เกื้อหนุนให้เกิดการทำลายโครงสร้างทั้งทางด้านเคมีและทางด้านกายภาพ นอกจากนั้นยังพบว่ามีการศึกษาที่เกี่ยวกับปริมาณคลอไรด์วิกฤติจากการเก็บข้อมูลในสภาวะแวดล้อมจริงจำนวนน้อยมาก ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงศึกษาปริมาณคลอไรด์วิกฤติจากการเก็บข้อมูลของคอนกรีตที่ผสมเถาถ่านหินในสภาวะแวดล้อมทะเลจริงถึงระยะเวลาแช่น้ำทะเล 10 ปี

2. วิธีการศึกษา

2.1 วัสดุ

การศึกษานี้ใช้ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และเถาถ่านหินที่ได้โดยตรงจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ ซึ่งมีความถ่วงจำเพาะ เท่ากับ 2.23 มีอนุภาคที่ค้ำตะแกรงเบอร์ 325 ร้อยละ 32 ซึ่งอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน ASTM C 618 [9] ที่กำหนดไว้ไม่เกินร้อยละ 34 โดยน้ำหนัก สำหรับองค์ประกอบทางเคมีของเถาถ่านหินแม่เมาะ มีปริมาณผลรวมของสารประกอบหลัก SiO_2 , Al_2O_3 และ Fe_2O_3 เท่ากับร้อยละ 79.45 และมีค่า LOI ร้อยละ 0.52 สามารถจัดเป็นเถาถ่านหิน Class F ตามมาตรฐาน ASTM C 618 [9] โดยลักษณะทางกายภาพและองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุประสาน แสดงดังตารางที่ 1 และ 2 ตามลำดับ

ตารางที่ 1 ลักษณะทางกายภาพของวัสดุประสาน

ลักษณะทางกายภาพ	วัสดุ	
	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1	เถ้าถ่านหิน (FA)
Specific Gravity	3.15	2.23
Retained on a Sieve	N/A	32
Mean Particle Size	3	30

ตารางที่ 2 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุประสาน

องค์ประกอบทางเคมี (%)	วัสดุ	
	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1	เถ้าถ่านหิน (FA)
Silicon Dioxide, SiO ₂	20.80	44.95
Aluminium Oxide, Al ₂ O ₃	5.50	23.70
Iron Oxide, Fe ₂ O ₃	3.16	10.80
Calcium Oxide, CaO	64.97	13.80
Magnesium Oxide, MgO	1.06	3.47
Sodium Oxide, Na ₂ O	0.08	0.07
Potassium Oxide, K ₂ O	0.55	2.38
Sulfur Trioxide, SO ₃	2.96	1.31
Loss On Ignition, LOI	2.89	0.52

2.2 การเตรียมตัวอย่าง

การศึกษานี้ใช้คอนกรีตที่มี อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B) เท่ากับ 0.45, 0.55 และ 0.65 และใช้เถ้าถ่านหินที่ได้โดยตรงจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 15, 25, 35 และ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ส่วนผสมของคอนกรีตที่ใช้ในการศึกษาแสดงในตารางที่ 3 หล่อตัวอย่างคอนกรีตขนาด 200x200x200 มม. และฝังเหล็กเส้นกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มม. ยาว 50 มม. ที่ระยะหุ้มคอนกรีต 10, 20, 50 และ 75 มม. หลังจากบ่มคอนกรีตจนอายุครบ 28 วัน นำตัวอย่างคอนกรีตไปแช่บริเวณชายฝั่งทะเล จ.ชลบุรี โดยคอนกรีตสัมผัสกับน้ำทะเลในสภาพเปียกสลับแห้ง คุณสมบัติของน้ำทะเลบริเวณที่นำก้อนตัวอย่าง

คอนกรีตไปแช่ มีค่าความเป็นกรดด่าง (pH) อยู่ในช่วง 7.9-8.2 และปริมาณคลอไรด์มีค่าอยู่ระหว่าง 16,000-19,000 มก./ล. ส่วนซัลเฟตระหว่าง 2,200-2,700 มก./ล. และมีอุณหภูมิอยู่ระหว่าง 20 ถึง 35 องศาเซลเซียส หลังจากแช่ตัวอย่างคอนกรีตครบ 3, 4, 5, 7 และ 10 ปี ได้นำคอนกรีตมาทดสอบการเกิดสนิมในเหล็กที่ฝังในคอนกรีตโดยการวัดพื้นที่ของการเกิดสนิมเหล็กและนำตัวอย่างคอนกรีตบริเวณรอบผิวเหล็กที่ฝังมาทดสอบหาปริมาณคลอไรด์ตาม ASTM C1218 [10] ซึ่งเป็นปริมาณคลอไรด์อิสระที่อยู่ในโพรงของคอนกรีต โดยจากความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณคลอไรด์กับการเกิดสนิมของเหล็กเสริมสามารถนำมาวิเคราะห์หาปริมาณคลอไรด์วิกฤตในแต่ละส่วนผสมได้ รูปที่ 1 แสดงรายละเอียดตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษานี้

ตารางที่ 3 อัตราส่วนผสมของคอนกรีต

ส่วนผสม	ส่วนผสมคอนกรีต (กก/ม ³)					W/B
	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	เถ้าถ่านหิน (FA)	ทราย	หิน	น้ำ	
I45	478	-	639	1,024	215	0.45
I55	478	-	639	971	262	0.55
I65	478	-	639	922	311	0.65
I45FA15	406	72	639	1,004	215	0.45
I45 FA 25	359	119	639	990	215	0.45
I45 FA 35	311	167	639	977	215	0.45
I45 FA 50	239	239	639	957	215	0.45
I55 FA 15	406	72	639	948	262	0.55
I55 FA 25	359	119	639	933	262	0.55
I55 FA 35	311	167	639	918	262	0.55
I55 FA 50	239	239	639	897	262	0.55
I65 FA 15	406	72	639	898	311	0.65
I65 FA 25	359	119	639	881	311	0.65
I65 FA 35	311	167	639	864	311	0.65
I65 FA 50	239	239	639	840	311	0.65

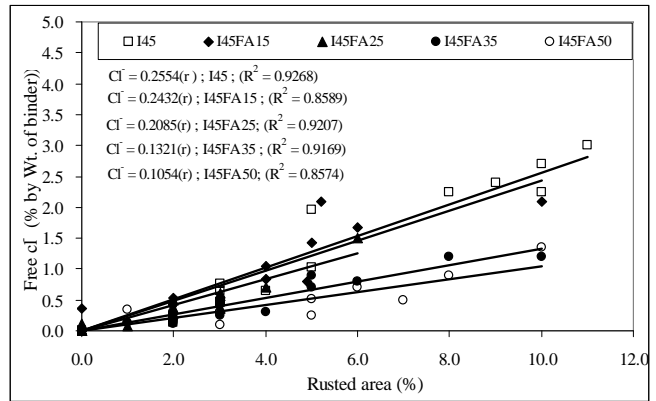


รูปที่ 1 การเตรียมตัวอย่างเพื่อทดสอบปริมาณคลอไรด์วิกฤติ

3. ผลการทดสอบและการวิเคราะห์

3.1 การหาปริมาณคลอไรด์วิกฤติในคอนกรีต (T)

ในการศึกษาครั้งนี้ทำการหาปริมาณคลอไรด์วิกฤติ (T) จากข้อมูลที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการเกิดสนิมในเหล็กที่ฝังในคอนกรีตกับปริมาณคลอไรด์อิสระที่ตำแหน่งเหล็กที่ฝังในคอนกรีต ที่ได้จากการทดสอบหลังจากที่แช่ตัวอย่างคอนกรีตในสถานะแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 3, 4, 5, 7 และ 10 ปี โดยกำหนดให้ปริมาณคลอไรด์วิกฤติที่ได้จากการศึกษาในครั้งนี้ เป็นปริมาณคลอไรด์ที่เริ่มทำให้เหล็กที่ฝังในคอนกรีตเกิดสนิม (ร้อยละ 1) เมื่อพิจารณาตามรูปที่ 2 ที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการเกิดสนิมกับปริมาณคลอไรด์ที่บริเวณใกล้ผิวเหล็กในคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.45 ที่แช่ในสถานะแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 3, 4, 5, 7 และ 10 ปี พบว่าสมการความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณคลอไรด์อิสระ (CI) และร้อยละการเกิดสนิม (r) คือ $CI = 0.2554(r)$ เมื่อแทนค่า r เท่ากับ 1% ได้ $Free\ CI = 0.26\%$ โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ซึ่งปริมาณคลอไรด์อิสระดังกล่าวกำหนดให้เป็นค่า คลอไรด์วิกฤติ (T) ของคอนกรีต I45 นอกจากนี้ปริมาณคลอไรด์วิกฤติ ของคอนกรีตส่วนผสมอื่นๆหาได้ในลักษณะเดียวกัน และแสดงดังตารางที่ 4



รูปที่ 2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการเกิดสนิมกับปริมาณคลอไรด์ที่บริเวณใกล้ผิวเหล็กในคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.45 ที่แช่ในสถานะแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 3, 4, 5, 7 และ 10 ปี

ตารางที่ 4 ปริมาณคลอไรด์วิกฤติของคอนกรีตที่ผสมเข้าถ่านหินที่แช่ในสิ่งแวดล้อมทะเลในสถานะเปียกสลับแห้ง

ส่วนผสม	ปริมาณคลอไรด์วิกฤติ (% โดยน้ำหนักวัสดุประสาน)	ส่วนผสม	ปริมาณคลอไรด์วิกฤติ (% โดยน้ำหนักวัสดุประสาน)
I45	0.26	I55FA35	0.13
I45FA15	0.24	I55FA50	0.10
I45FA25	0.20	I65	0.18
I45FA35	0.13	I65FA15	0.14
I45FA50	0.10	I65FA25	0.10
I55	0.25	I65FA35	0.10
I55FA15	0.17	I65FA50	0.09
I55FA25	0.15		

3.2 ผลของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานและเข้าถ่านหินต่อระดับคลอไรด์วิกฤติ

โดยทั่วไประดับคลอไรด์วิกฤติในคอนกรีตจะขึ้นกับลักษณะทางเคมีและทางกายภาพของสารละลายในโพรงของซีเมนต์เพสต์ที่อยู่ใกล้ผิวเหล็กเสริม โดยลักษณะทางเคมีได้แก่

อัตราส่วนของ Cl^-/OH^- [6, 7, 11, 12] ซึ่งถ้าความเป็นด่างในโพรงซีเมนต์เพสต์มีค่าต่ำและปริมาณคลอไรด์อิสระในโพรงมีค่าสูงจะมีผลทำให้อัตราส่วนของ Cl^-/OH^- มีค่าสูงขึ้นด้วย จะส่งผลให้การกัดกร่อนเหล็กเสริมเกิดขึ้นได้เร็ว ซึ่งหมายถึง ระดับของปริมาณคลอไรด์วิกฤติที่ทำให้เริ่มเกิดการกัดกร่อนเหล็กเสริมในคอนกรีตมีค่าต่ำลง อย่างไรก็ตาม ปริมาณคลอไรด์วิกฤติยังขึ้นกับปัจจัยทางกายภาพอื่นๆ เช่น ลักษณะผิวของเหล็กที่ใช้เสริมคอนกรีต สภาพแวดล้อมภายนอก และความพรุนในคอนกรีต เป็นต้น โดยคอนกรีตที่มีความพรุนสูง จะทำให้ปริมาณคลอไรด์วิกฤติมีค่าต่ำลง เนื่องจากการกัดกร่อนเหล็กเสริมจะเกิดได้เร็วกว่าคอนกรีตที่มีความพรุนต่ำ

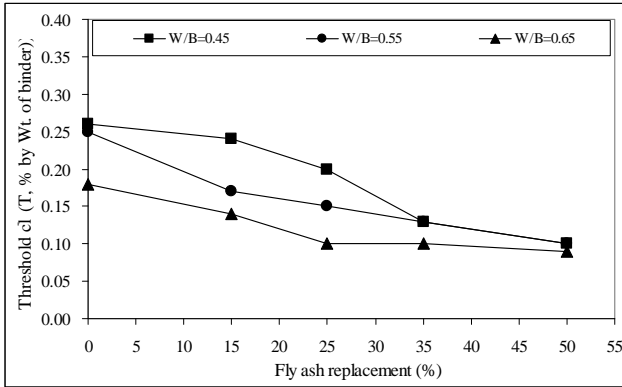
รูปที่ 3 แสดงผลของเส้นผ่านศูนย์กลางต่อระดับคลอไรด์วิกฤติของคอนกรีตที่แช่ในสภาวะแวดล้อมทะเลจากข้อมูลถึง 10 ปี จากผลการศึกษาพบว่า ระดับคลอไรด์วิกฤติของคอนกรีตลดลงตามปริมาณการแทนที่เส้นผ่านศูนย์กลางที่มากขึ้น เช่น คอนกรีตที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45 มีปริมาณคลอไรด์วิกฤติของคอนกรีตที่ผสมเส้นผ่านศูนย์กลาง 0, 15, 25, 35 และ 50 เท่ากับ 0.26%, 0.24%, 0.20%, 0.13%, และ 0.10% โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ตามลำดับ จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าการใช้เส้นผ่านศูนย์กลางผสมในคอนกรีตในปริมาณที่สูงขึ้น จะส่งผลให้การกักเก็บคลอไรด์มีมากขึ้น และส่งผลให้มีปริมาณคลอไรด์อิสระในโพรงของซีเมนต์เพสต์ลดลงได้ [13] ซึ่งน่าจะมีผลทำให้อัตราส่วนของ Cl^-/OH^- มีค่าต่ำลงตามปริมาณการแทนที่เส้นผ่านศูนย์กลาง แต่การใช้เส้นผ่านศูนย์กลางที่สูงขึ้นก็ส่งผลให้ความเป็นด่างในโพรงซีเมนต์เพสต์ลดลงได้มากเช่นกัน และทำให้อัตราส่วนของ Cl^-/OH^- มีค่าเพิ่มขึ้นได้ ดังนั้น ระดับคลอไรด์วิกฤติ จึงต่ำลงตามการแทนที่เส้นผ่านศูนย์กลางที่มากขึ้น นอกจากนี้ในการศึกษาครั้งนี้ พบว่า การใช้เส้นผ่านศูนย์กลางในปริมาณต่ำ (ในช่วงร้อยละ 15-35) ส่งผลต่อระดับคลอไรด์วิกฤติมากกว่าคอนกรีตที่ใช้เส้นผ่านศูนย์กลางสูง (ร้อยละ 35-50) เช่น ในคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45 เมื่อแทนที่เส้นผ่านศูนย์กลางในคอนกรีตเพิ่มจากร้อยละ 15 ถึงร้อยละ 35 ส่งผลให้ค่าคลอไรด์วิกฤติลดลงได้ถึง 0.11% (ลดลงจาก 0.24% เป็น 0.13%) ในขณะที่การเพิ่มปริมาณเส้นผ่านศูนย์กลางจากร้อยละ 35 เป็น ร้อยละ 50 ส่งผลให้ ระดับคลอไรด์วิกฤติ ลดลงแค่ 0.03%

เท่านั้น (ลดลงจาก 0.13% เป็น 0.10%) หรือ ระดับคลอไรด์วิกฤติมีค่าเกือบคงที่ ซึ่งอาจเป็นผลมาจากในคอนกรีตที่มีปริมาณเส้นผ่านศูนย์กลางทำให้คอนกรีตมีความทึบน้ำมาก โดยจากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า การใช้เส้นผ่านศูนย์กลางร้อยละ 35 และ 50 ให้ค่าสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ใกล้เคียงกัน [15] และมีความทึบน้ำสูงมาก ดังนั้นระดับคลอไรด์วิกฤติที่ใกล้เคียงกันในกลุ่มคอนกรีตที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางสูงน่าจะมีผลมาจากลักษณะทางกายภาพของโพรงในซีเมนต์เพสต์ เป็นหลัก

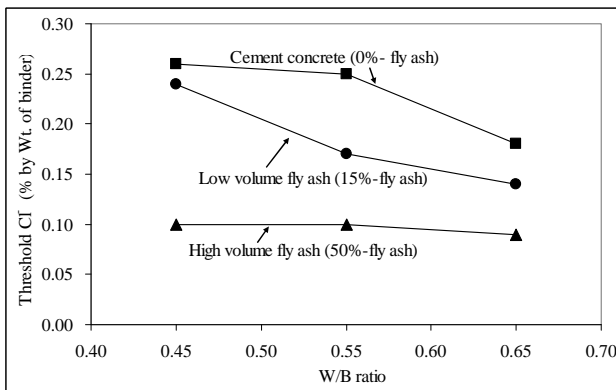
เมื่อพิจารณาผลของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่อปริมาณคลอไรด์วิกฤติ ดังแสดงในรูปที่ 4 พบว่า อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ปริมาณคลอไรด์วิกฤติมีค่าลดลง และมีผลชัดเจนในคอนกรีตที่ใช้เส้นผ่านศูนย์กลางต่ำ (ร้อยละ 15) มากกว่าในคอนกรีตที่ใช้เส้นผ่านศูนย์กลางสูง (ร้อยละ 50) การที่ปริมาณคลอไรด์วิกฤติมีค่าลดลงเมื่ออัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเพิ่มขึ้น เป็นผลมาจากคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานสูง จะมีความพรุนสูง ความชื้นและออกซิเจนสามารถแทรกซึมเข้าไปได้ง่าย และส่งผลให้เหล็กเกิดการกัดกร่อนได้เร็วภายใต้ปริมาณคลอไรด์ที่มีความเข้มข้นต่ำได้ ซึ่งหมายถึงระดับคลอไรด์วิกฤติมีค่าต่ำลงนั่นเอง

จากผลการศึกษานี้พบว่า ปริมาณคลอไรด์วิกฤติในคอนกรีตที่ผสมเส้นผ่านศูนย์กลางต่ำกว่าคอนกรีตธรรมดาที่ไม่ได้ผสมเส้นผ่านศูนย์กลาง แต่การเกิดสนิมเหล็กในคอนกรีตธรรมดากลับมีมากกว่าคอนกรีตที่ผสมเส้นผ่านศูนย์กลาง ซึ่งแสดงให้เห็นว่าคอนกรีตที่ผสมเส้นผ่านศูนย์กลางถึงแม้ว่าระดับคลอไรด์วิกฤติจะต่ำกว่าคอนกรีตธรรมดา แต่ด้วยปฏิกิริยาปอซโซลานที่ส่งผลให้คอนกรีตมีความทึบน้ำ และมีสัมประสิทธิ์การแทรกซึมของคลอไรด์ที่ต่ำกว่าคอนกรีตธรรมดา [14] สามารถลดปริมาณของคลอไรด์ที่แทรกซึมเข้าไปในคอนกรีตกลุ่มที่ผสมเส้นผ่านศูนย์กลางได้อย่างชัดเจน ดังนั้นผลการศึกษานี้เห็นได้ว่า ปัจจัยที่ส่งผลต่อความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อนคอนกรีตเสริมเหล็กในสภาพแวดล้อมทะเลจะขึ้นกับความสามารถในการต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์มากกว่าระดับของคลอไรด์วิกฤติที่แตกต่างกัน อย่างไรก็ตามหลักการเลือกวัสดุประสานที่เหมาะสมเพื่อใช้ป้องกันการกัดกร่อนเนื่องจากสิ่งแวดล้อมทะเล

จะต้องพิจารณาถึงความสามารถในการต้านทานคลอไรด์ที่สูง (สัมประสิทธิ์การแทรกซึมคลอไรด์ต่ำ) และระดับปริมาณคลอไรด์วิกฤติที่ต่ำ ตลอดจนให้คุณสมบัติเชิงกลที่ดี



รูปที่ 3 ผลของเถ้าถ่านหินต่อระดับคลอไรด์วิกฤติของคอนกรีตที่แช่ในสภาวะแวดล้อมทะเลในสภาพเปียกสลับแห้ง



รูปที่ 4 ผลของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่อระดับคลอไรด์วิกฤติของคอนกรีตที่แช่ในสภาวะแวดล้อมทะเลในสภาพเปียกสลับแห้ง

4. บทสรุป

จากผลการศึกษานี้สามารถสรุปได้ดังนี้

- 1) ระดับคลอไรด์วิกฤติของคอนกรีตลดลงตามปริมาณการแทนที่เถ้าถ่านหินที่มากขึ้น
- 2) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ปริมาณคลอไรด์วิกฤติมีค่าลดลง และมีผลชัดเจนในคอนกรีตที่ใช้

เถ้าถ่านหินในปริมาณต่ำ มากกว่าในคอนกรีตที่ใช้เถ้าถ่านหินปริมาณสูง

- 3) คอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินในปริมาณต่ำ ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงระดับคลอไรด์วิกฤติมากกว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินในปริมาณสูง

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณ ทนอดหนุนการวิจัยและพัฒนา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา สัญญาเลขที่ 12 /2553 และทุนสนับสนุนโครงการวิจัยจากสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษาประจำปี พ.ศ. 2554

เอกสารอ้างอิง

- 1 ปริญญา จินดาประเสริฐ และอุกฤษฏ์ ไช้ศรี, “กำลังรับแรงและความสามารถในการต้านทานการซึมผ่านของคลอไรด์ของคอนกรีตผสมเถ้าถ่านหินและเถ้าแกลบ”, การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 10, 2-4 พฤษภาคม, ชลบุรี, 2548, หน้า MAT 44-48.
- 2 มณฑิร ทีฆวานิช และคณะ. “ผลกระทบของน้ำทะเลต่อการซึมผ่านของคลอไรด์และการเกิดสนิมเหล็กในคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหิน”, การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 10, 2-4 พฤษภาคม, ชลบุรี, 2548, หน้า MAT 49-54.
- 3 MDA. Thomas and JD. Matthews, “Performance of pfa concrete in a marine environment-10-year results”, Cement and Concrete Composites, 2004, Vol.26, pp. 5-20.
- 4 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, 2009, Vol.16, pp. 475-481.
- 5 W. Chalee, M. Teekavanit, K. Kiattikomol, A. Siripanichgorn and C. Jaturapitakul, “Effect of W/C ratio on covering depth of fly ash concrete in marine

- environment”, *Construction and Building Materials*, 2007, Vol.21, pp. 965-971.
- 6 Ki Yong Ann and Ha-Won Song, “Chloride threshold level for corrosion of steel in concrete”, *Corrosion Science*, 2007, Vol.49, pp. 4113 - 4133.
- 7 M. Thomas, “Chloride threshold in marine concrete”, *Cement and Concrete Research*, 1996, Vol.26, pp. 513-519.
- 8 Broomfield, “Corrosion of Steel in Concrete”, England Taylor & Francis, Ltd 1996, pp. 1-10.
- 9 ASTM C618, “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*, 1997, Vol.04.01.
- 10 ASTM C1218, “Standard test method for water-soluble chloride in mortar and concrete”, *Annual Book of ASTM Standards*, 1997, Vol.04.01.
- 11 K. Thangavel and NS. Rengaswamy, “Relationship between chloride/hydroxide ratio and corrosion rate of steel in concrete”, *Cement and Concrete Composites*, 1998, Vol.20, pp. 283-292.
- 12 C. Alonso, C. Andrade, M. Castellote and P. Castro, “Chloride threshold values to depassivate reinforcing bars embedded in a standardized OPC mortar”, *Cement and Concrete Research*, 2000, Vol.30, pp. 1047-1055.
- 13 T. Cheewaket, C. Jaturapitakkul and W. Chalee, “Long term performance of chloride binding capacity in fly ash concrete in a marine environment”, *Construction and Building Materials*, 2010, Vol.24, pp. 1352-1357.
- 14 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*, 2009, Vol.42, pp. 505-515.