

การประเมินประสิทธิภาพของสารยับยั้งการกัดกร่อนของเหล็กเสริมในคอนกรีต โดยวิธีการเร่งปฏิกิริยาไฟฟ้า

Evaluation of different coating materials to protect against corrosion of reinforcing rebar in concrete by accelerating the electrical reaction.

ศุภกร ประพัทธ์¹ วลัยรัตน์ บุญไทย² และ ณัฐชานนท์ นนทูล^{3,*}

^{1,2,3} ภาควิชาวิศวกรรมโยธา สถาบันวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร กรุงเทพมหานคร

*Corresponding author; E-mail address: nchn.nontul@gmail.com

บทคัดย่อ

บทความนี้ได้ทำการทดสอบประสิทธิภาพระบบการป้องกันสนิมของเหล็กเสริมโดยใช้สารยับยั้งการเกิดสนิมประเภททาเคลือบ โดยพิจารณาการเปรียบเทียบประสิทธิภาพสารเคลือบประเภท เคลือบผิวเหล็กเสริม, เคลือบผิวคอนกรีต และการใช้สารเคลือบทั้ง 2 ประเภทร่วมกัน เมื่อใช้วัสดุประสานผสมเพิ่มที่แตกต่างกัน คือ ซีเมนต์ประเภทที่ 5, แฉะลอย 35%, แฉะกลบหยาบ และแฉะกลบละเอียด ในอัตราส่วน 10%, 25% และ 40% ของน้ำหนักซีเมนต์ มีตัวอย่างทั้งสิ้น 36 ตัวอย่าง โดยติดตั้งเหล็กเสริมในแท่งคอนกรีตทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร ความสูง 20 เซนติเมตร เมื่อคอนกรีตมีอายุ 28 วัน ทำการเร่งปฏิกิริยาสนิมเหล็กของเหล็กเสริมคอนกรีตด้วยวิธีเซลล์ไฟฟ้าเคมีในบ่อที่มีสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 4% หลังจากเร่งปฏิกิริยาเรียบร้อยแล้วจึงตรวจสอบอัตราการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมจากการเกิดสนิม และตรวจสอบการแทรกซึมปริมาณคลอไรด์ ที่ระยะ 2.5 เซนติเมตร และ 5 เซนติเมตร จากผิวของแท่งตัวอย่างคอนกรีต ด้วยวิธีไทเทรต ผลทดสอบพบว่าการทดสอบการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริม ซึ่งการสารเคลือบผิวเหล็กมีประสิทธิภาพในการป้องกันการเกิดสนิมที่ดีที่สุด ส่วนปริมาณคลอไรด์ตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้ซีเมนต์ประเภทที่ 5 และมีส่วนผสมของแฉะลอย 35% และซีเมนต์ที่ 10% - 40% มีปริมาณคลอไรด์ น้อยกว่าตัวอย่างคอนกรีตที่ผสมด้วยซีเมนต์ประเภทที่ 1 ซึ่งสารเคลือบผิวคอนกรีตที่ใช้ในการทดสอบมีประสิทธิภาพในการป้องกันการซึมผ่านของคลอไรด์ใกล้เคียงกับการใช้วัสดุประสาน

คำสำคัญ: การกัดกร่อน, สารเคลือบ, การเร่งปฏิกิริยาสนิม, แฉะกลบ, แฉะลอย

Abstract

This article tested the efficiency of the corrosion protection system of reinforced rebar using corrosion inhibitors of the coating type. It considers comparing the performance of different types of coatings, including coatings on reinforced steel surfaces, concrete surfaces, and the combined use of both. When using different admixtures, type 5 cement, fly ash at 35%, coarse rice husk ash, and fine rice husk ash at proportions of 10%, 25%, and 40% by weight of cement, a total of 36 samples were prepared. The reinforced steel was installed in cylindrical concrete specimens with a diameter of 10 centimeters and a height of 20

centimeters. After 28 days of concrete curing, the reinforced concrete corrosion was accelerated in a solution containing 4% sodium chloride using the electrochemical cell method. Following the corrosion acceleration, the weight loss rate of the reinforced steel due to corrosion was examined. Additionally, the chloride penetration at distances of 2.5 centimeters and 5 centimeters from the concrete surface was investigated using the titration method. The test results revealed that the corrosion protection efficiency of the coated steel surface was most effective in preventing corrosion. As for the chloride content, the concrete samples with Type 5 cement and mixtures of 35% fly ash and 10%-40% coarse rice husk ash showed lower chloride content than those with Type 1 cement. The coatings used in the tests effectively prevented chloride permeation, similar to the use of admixtures.

Keywords: corrosion, coating, corrosion acceleration, rice husk ash, fly ash

1. ที่มาและความสำคัญ

โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กเป็นระบบโครงสร้างหลักที่ได้รับการใช้งานอย่างแพร่หลายทั้งในภาคที่อยู่อาศัย โครงสร้างพื้นฐาน และอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ อย่างไรก็ตาม หนึ่งในปัญหาหลักที่กระทบต่อความมั่นคงและอายุการใช้งานของโครงสร้างเหล่านี้ คือ การกัดกร่อนของเหล็กเสริมจากการแทรกซึมของไอออนคลอไรด์ โดยเฉพาะในพื้นที่ชายฝั่งทะเลที่มีความชื้นและความเค็มสูง [1-3]

กระบวนการกัดกร่อนเริ่มต้นเมื่อคลอไรด์สะสมถึงระดับวิกฤติบนผิวเหล็กเสริม ส่งผลให้ชั้น passivation บนผิวเหล็กเสื่อมสภาพ นำไปสู่ปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีและการเกิดสนิม [4] ซึ่งทำให้หน้าตัดของเหล็กลดลง เกิดแรงดันภายใน ส่งผลต่อรอยแตกร้าวและการหลุดร่อนของคอนกรีต และในที่สุดอาจทำให้โครงสร้างเสื่อมสภาพหรือวิบัติในระยะยาว [5-6]

เพื่อยืดอายุการใช้งานของโครงสร้าง จึงได้มีการพัฒนาแนวทางป้องกันสนิมหลายรูปแบบ เช่น การใช้โลหะกันกร่อน (sacrificial metals), ระบบกัลวานิกคาโทดิก [6], การควบคุมศักย์ไฟฟ้า [4], การปรับสูตรคอนกรีตด้วยวัสดุปอซโซลานิก [7-8] และการใช้สารยับยั้งการกัดกร่อนแบบทาเคลือบหรือผสมเพิ่ม [5], [9]

รายงานวสารยับยั้งประเภทผสมร่วมกับแฉะลอยสามารถลดอัตราการกัดกร่อนของเหล็กเสริมได้อย่างมีนัยสำคัญ [9] ขณะที่พบว่าแฉะกลบที่มี

ซิลิกาในรูปอสัณฐานสูงสามารถเพิ่มความตึงน้ำ และลดการซึมผ่านของคลอไรด์ได้ [7] ส่วนศึกษาการซึมคลอไรด์ในคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินภายใต้สภาพแวดล้อมทะเลระยะยาว พบว่าวัสดุประสานมีบทบาทสำคัญในการชะลอการแพร่ของไอออน [1]

อย่างไรก็ตาม งานวิจัยที่ผ่านมาให้ความสำคัญเฉพาะการป้องกันแบบเดียว เช่น เคลือบผิวเหล็กเพียงอย่างเดียว หรือปรับวัสดุประสานโดยไม่เปรียบเทียบกับระบบการเคลือบผิว [8], [10] นอกจากนี้ ยังขาดการทดสอบเชิงระบบภายใต้สภาวะแรงแบบไฟฟ้าเคมีที่เปรียบเทียบกับรูปแบบการเคลือบกับวัสดุประสานที่หลากหลาย

จากช่องว่างดังกล่าว งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของระบบการป้องกันการกัดกร่อนแบบทาเคลือบ 3 รูปแบบ ได้แก่ เคลือบผิวเหล็กเสริม เคลือบผิวคอนกรีต และการเคลือบทั้งสองร่วมกัน ร่วมกับวัสดุประสานที่มีคุณสมบัติปอกโซลานิกหลากหลาย ได้แก่ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และ 5 เถ้าลอย 35% และเถ้ากลบหยาบและละเอียดในอัตราส่วน 10-40% โดยใช้การเร่งปฏิกิริยาไฟฟ้าในสารละลาย NaCl เพื่อประเมินอัตราการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กและการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีต

ผลการศึกษาจะช่วยสนับสนุนแนวทางการออกแบบระบบป้องกันสนิมที่มีประสิทธิภาพ โดยอิงจากความเหมาะสมของวัสดุประสานและรูปแบบการเคลือบ ซึ่งสามารถประยุกต์ใช้กับโครงสร้างในพื้นที่เสี่ยงต่อการกัดกร่อนสูง เช่น โครงสร้างชายฝั่งหรือพื้นที่เปียกสลับแห้ง เพื่อเพิ่มอายุการใช้งาน ลดต้นทุนการบำรุงรักษา และส่งเสริมการก่อสร้างอย่างยั่งยืน

2. วิธีการศึกษา

การศึกษาครั้งนี้มุ่งเน้นการประเมินประสิทธิภาพของสารยับยั้งการกัดกร่อนในเหล็กเสริมคอนกรีต โดยใช้วิธีการเร่งปฏิกิริยาทางไฟฟ้า ซึ่งครอบคลุมกระบวนการตั้งแต่การเตรียมวัสดุ การผลิตตัวอย่าง ไปจนถึงการทดสอบในห้องปฏิบัติการ โดยมีรายละเอียดดังนี้

2.1 ประเภทของสารยับยั้งที่ใช้ในการศึกษา

เพื่อเปรียบเทียบความสามารถในการป้องกันสนิมของวิธีการใช้งานสารยับยั้งแต่ละประเภท จึงเลือกใช้สารยับยั้งการกัดกร่อนใน 3 รูปแบบหลัก

- สารยับยั้งประเภททาเคลือบผิวเหล็กเสริม
- สารยับยั้งประเภททาเคลือบผิวคอนกรีต
- สารยับยั้งประเภททาเคลือบทั้งผิวเหล็กเสริมและคอนกรีต

โดยปริมาณที่ใช้เป็นไปตามคำแนะนำจากผู้ผลิต เพื่อสะท้อนสภาพการใช้งานจริงในงานก่อสร้าง

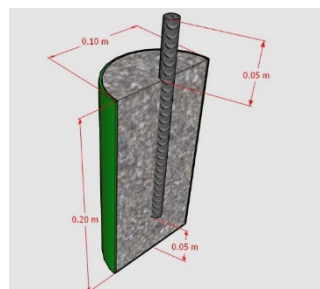
2.2 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

เพื่อศึกษาปัจจัยที่อาจส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของสารยับยั้ง จึงมีการเลือกใช้วัสดุประสานที่หลากหลาย โดยเฉพาะวัสดุผสมเพิ่มที่มีคุณสมบัติเชิงปอกโซลานิก ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อความตึงน้ำของคอนกรีตและการซึมผ่านของคลอไรด์ ได้แก่

- ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และ 5
- เถ้าลอย (35% โดยมวลของวัสดุประสาน)
- ซีเมนต์กลบทั้งชนิดหยาบและละเอียด (10%, 25%, 40%)
- เหล็กข้ออ้อย SD40 ขนาด 12 มม.
- มวลรวมหยาบและละเอียด และน้ำสะอาด
- สารละลาย NaCl ความเข้มข้น 5% เพื่อจำลองสภาวะไอออนคลอไรด์ในทะเล

2.3 รูปแบบและขนาดของตัวอย่างทดสอบ

รูปทรงของตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้ในการทดลองเป็นแบบทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 ซม. สูง 20 ซม. ดังแสดงในรูปที่ 1 โดยมีการติดตั้งเหล็กเสริมที่ตำแหน่งศูนย์กลางในแนวตั้งเพื่อให้เหมาะสมกับการเร่งปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี



รูปที่ 1 ขนาดและการติดตั้งเหล็กเสริมในแบบหล่อ

2.4 ขั้นตอนการทดลอง

2.4.1 การเตรียมตัวอย่างทดสอบ

เริ่มต้นด้วยการผสมคอนกรีตตามสัดส่วนที่กำหนด แล้วเทลงแบบหล่อโดยมีการจี้เข็มเพื่อให้เนื้อคอนกรีตแน่น ต่อจากนั้นบ่มตัวอย่างในน้ำ 28 วัน และนำไปแช่ในสารละลาย NaCl ก่อนติดตั้งระบบกระแสไฟฟ้าเพื่อเร่งการเกิดสนิมที่เหล็กเสริม โดยมีการออกแบบชิ้นงานการทดสอบดังแสดงในตารางต่อไปนี้

C = ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

SC = สารยับยั้งการกัดกร่อนประเภททาเคลือบผิวเหล็กเสริม

CC = สารยับยั้งการกัดกร่อนประเภททาเคลือบผิวคอนกรีต

BC = สารยับยั้งการกัดกร่อนประเภททาเคลือบทั้งผิวเหล็กเสริมและผิวคอนกรีต

F = วัสดุประสานประเภทผสมเถ้าลอย

H = วัสดุประสานประเภทผสมเถ้ากลบหยาบ

HF = วัสดุประสานประเภทผสมเถ้ากลบละเอียด

ตารางที่ 1 ประเภทผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1

สัญลักษณ์	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1	น้ำหนัก (กก./คอนกรีต 1 ลบ.ม.)		
		ทราย	หิน	น้ำ
C1	330	805	992	200
SC1	330	805	992	200
CC1	330	805	992	200
BC1	330	805	992	200

ตารางที่ 2 ประเภทผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 5

สัญลักษณ์	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 5	น้ำหนัก (กก./คอนกรีต 1 ลบ.ม.)		
		ทราย	หิน	น้ำ
C5	330	805	992	200
SC5	330	805	992	200
CC5	330	805	992	200
BC5	330	805	992	200

ตารางที่ 3 ประเภทผสมแกลลย 35 %

สัญลักษณ์	แกลลย 35 %	น้ำหนัก (กก./คอนกรีต 1 ลบ.ม.)			
		ปูนซีเมนต์	ทราย	หิน	น้ำ
CP35	115.5	214.5	805	992	200
SCF35	115.5	214.5	805	992	200
CCF35	115.5	214.5	805	992	200
BCF35	115.5	214.5	805	992	200

ตารางที่ 4 ประเภทผสมแกลบหยาบ 10%, 25%, 40%

สัญลักษณ์	แกลบ หยาบ	น้ำหนัก (กก./คอนกรีต 1 ลบ.ม.)			
		ปูนซีเมนต์	ทราย	หิน	น้ำ
CH10	33	300	805	992	200
SCH10	33	300	805	992	200
CCH10	33	300	805	992	200
BCH10	33	300	805	992	200
CH25	82.5	247.5	805	992	200
SCH25	82.5	247.5	805	992	200
CCH25	82.5	247.5	805	992	200
BCH25	82.5	247.5	805	992	200
CH40	132	198	805	992	200
SCH40	132	198	805	992	200
CCH40	132	198	805	992	200
BCH40	132	198	805	992	200

ตารางที่ 5 ประเภทผสมแกลบละเอียด 10%, 25%, 40%

สัญลักษณ์	แกลบ ละเอียด	น้ำหนัก (กก./คอนกรีต 1 ลบ.ม.)			
		ปูนซีเมนต์	ทราย	หิน	น้ำ
CHF10	33	300	805	992	200
SCHF10	33	300	805	992	200
CCHF10	33	300	805	992	200
BCHF10	33	300	805	992	200
CHF25	82.5	247.5	805	992	200
SCHF25	82.5	247.5	805	992	200
CCHF25	82.5	247.5	805	992	200
BCHF25	82.5	247.5	805	992	200
CHF40	132	198	805	992	200
SCHF40	132	198	805	992	200
CCHF40	132	198	805	992	200
BCHF40	132	198	805	992	200

ตารางที่ 6 จำนวนชิ้นทดสอบกำลังอัด

ปูนซีเมนต์ พอร์ต แลนด์ ประเภทที่ 1	ปูนซีเมนต์ พอร์ต แลนด์ ประเภทที่ 5	แกลลย 35 %	แกลบ หยาบ 10%, 25%, 40%	แกลบ ละเอียด 10%, 25%, 40%	รวม (ตัวอย่าง)
3	3	3	9	9	27

2.4.2 การทดสอบและการวัดผล

การประเมินประสิทธิภาพของสารยับยั้งทำให้การวัดค่าพารามิเตอร์สำคัญ ได้แก่

- กำลังอัดประลัยของคอนกรีต ที่อายุ 28 วัน ด้วยเครื่องทดสอบแรงอัด โดยวางตัวอย่างทรงกระบอกที่ทำการเคลือบผิวด้านบนโดยก้ำมะถันในแนวตั้ง เพื่อให้แรงกดจากเครื่องทดสอบกระจายตัวสม่ำเสมอตลอดหน้าตัด ตัวอย่างทรงกระบอกดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 การทดสอบกำลังอัดตัวอย่าง

- การสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริม ก่อนและหลังการกัดกร่อน โดยทำการทบก้อนคอนกรีตเพื่อนำเหล็กมาทำความสะอาดโดยนำเหล็กมาแช่ในสารละลายไฮโดรคลอริก 12 % โดยปริมาตรเป็นเวลา 30 นาทีดังในรูปที่ 3 จากนั้นนำมาแช่สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เวลา 5 นาทีนำมาล้างด้วยน้ำสะอาดและนำเหล็กมาชั่งน้ำหนักอีกครั้ง เพื่อดำเนินการวิเคราะห์การกัดกร่อน



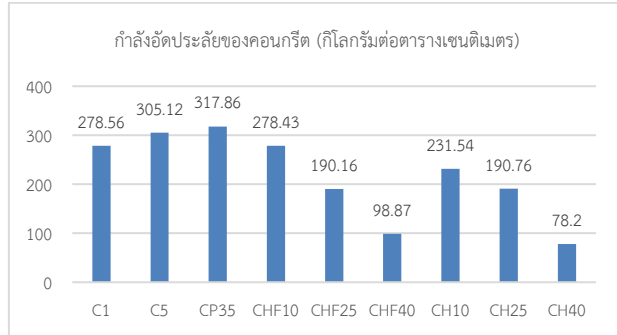
รูปที่ 3 ตัวอย่างคอนกรีตที่แช่สารละลาย

- การวิเคราะห์ปริมาณคลอไรด์ ที่ระดับความลึก 2.5 ซม. และ 5 ซม. จากผิวคอนกรีต ด้วยวิธีไทเทรตตาม ASTM C1152 โดยจะเริ่มจากการเจาะตัวอย่างผิวคอนกรีตที่มีความลึก 2.5 และ 5 เซนติเมตร แล้วนำผงคอนกรีตที่ได้ไปละลายในกรดเพื่อดึงเอาคลอไรด์ออกมา จากนั้นทำการไทเทรตด้วยสารละลายซิลเวอร์ไนเตรด (AgNO_3) จนเกิดตะกอนสีแดง ซึ่งแสดงว่าคลอไรด์ในสารละลายถูกทำปฏิกิริยาจนหมด แล้วจึงคำนวณหาปริมาณคลอไรด์ที่อยู่ในเนื้อคอนกรีต เพื่อใช้เปรียบเทียบประสิทธิภาพการป้องกันการซึมผ่านของคลอไรด์ในแต่ละกรณีของการทดลอง

3. ผลและวิเคราะห์การทดสอบ

การศึกษานี้ได้ดำเนินการทดสอบเพื่อประเมินประสิทธิภาพของวัสดุประสานและสารยับยั้งการกัดกร่อนในคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยใช้ตัวชี้วัด 3 ด้านหลัก ได้แก่ กำลังอัดประลัยของคอนกรีต การสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมจากการเกิดสนิม และปริมาณคลอไรด์ที่แทรกซึมเข้าสู่คอนกรีต ณ ความลึก 2.5 เซนติเมตร และ 5 เซนติเมตร ซึ่งสะท้อนถึงแนวโน้มการกัดกร่อนในสภาพแวดล้อมที่มีความชื้นและคลอไรด์สูง มีผลการทดสอบดังต่อไปนี้

3.1 กำลังอัดของคอนกรีต

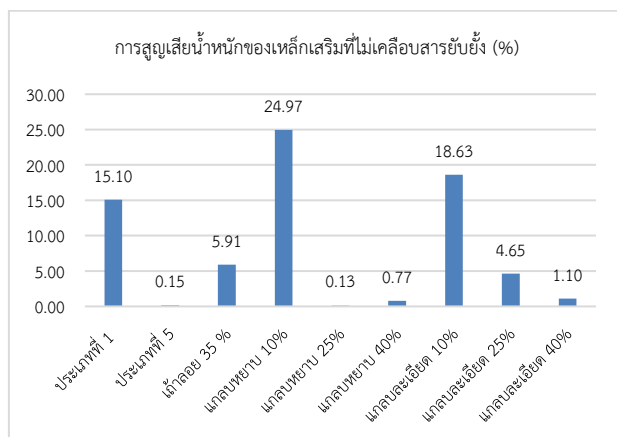


รูปที่ 4 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตตัวอย่าง

จากผลการทดสอบในรูปที่ 4 พบว่า คอนกรีตที่ผสมแล้ลลอย 35 % ให้ค่ากำลังอัดเฉลี่ยสูงสุดที่ 317.9 kg/cm² รองลงมาคือปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5 (305.1 kg/cm²) และประเภทที่ 1 (278.6 kg/cm²) ขณะที่คอนกรีตที่ผสมแกลบละเอียด 40% ให้ค่ากำลังอัดต่ำที่สุดที่ 78.2 kg/cm² แสดงให้เห็นว่าวัสดุประสานผสมเพิ่มบางประเภท โดยเฉพาะในอัตราส่วนสูง มีผลให้ค่ากำลังอัดลดลงอย่างมีนัยสำคัญ

3.2 การสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมในคอนกรีต

3.2.1 กลุ่มควบคุม (ไม่มีการเคลือบสารยับยั้ง)

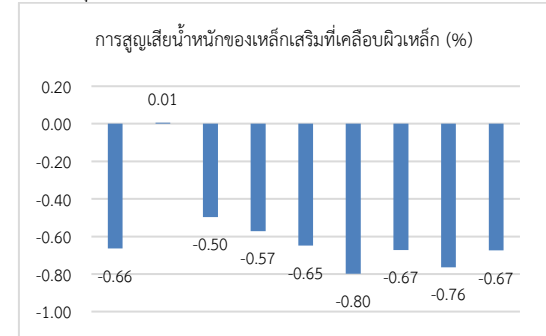


รูปที่ 5 การสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมในคอนกรีตที่ไม่มีการเคลือบสารยับยั้ง

ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าเหล็กเสริมในคอนกรีตที่ไม่มีการเคลือบผิวมีการสูญเสียน้ำหนักสูงที่สุดในทุกกลุ่ม โดยเฉพาะในกรณีที่มีผสมแกลบหยาบ 10% ซึ่งมีการสูญเสียถึง 24.97 % และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่มีค่าการสูญเสีย 15.10 % สาเหตุหลักเนื่องจากวัสดุประสาน

ในกลุ่มนี้ไม่สามารถต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ส่งผลให้เกิดสนิมบนเหล็กเสริมในอัตราที่สูง

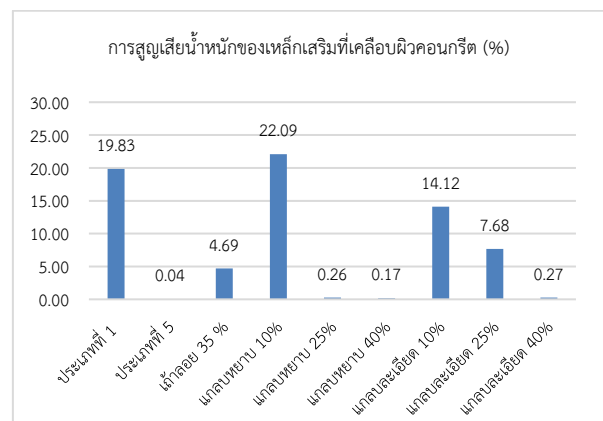
3.2.2 กลุ่มเคลือบผิวเหล็กเสริม



รูปที่ 6 การสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมในคอนกรีตที่มีสารยับยั้งการกัดกร่อนประเภทเคลือบผิวเหล็กเสริม

เมื่อพิจารณาเฉพาะกลุ่มที่มีการทาสารยับยั้งบนผิวเหล็กเสริม พบว่าการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กลดลงอย่างมาก และในหลายกรณีมีค่าน้อยกว่าศูนย์ (น้ำหนักเพิ่มขึ้นเล็กน้อยจากน้ำหนักแห้งหรือสิ่งสะสมอื่น ๆ) เช่น ในปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 อยู่ที่ -0.66% และในแกลบหยาบ 25% อยู่ที่ -0.65% ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการเคลือบผิวเหล็กมีประสิทธิภาพสูงในการยับยั้งกระบวนการกัดกร่อนของเหล็กแม้ในสภาพแวดล้อมที่มีคลอไรด์สูง

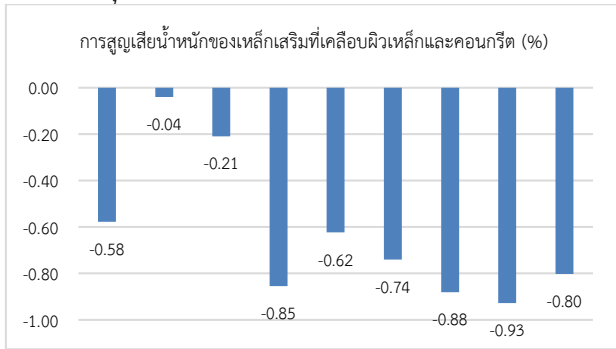
3.2.3 กลุ่มเคลือบผิวคอนกรีต



รูปที่ 7 การสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมในคอนกรีตที่มีสารยับยั้งการกัดกร่อนประเภทเคลือบผิวคอนกรีต

การทาสารยับยั้งบนผิวคอนกรีตเพียงอย่างเดียวช่วยลดการกัดกร่อนได้ระดับหนึ่ง แต่ประสิทธิภาพยังน้อยกว่าการทาผิวเหล็กโดยตรง โดยพบว่าในบางกรณี เช่น แกลบละเอียด 10% ยังคงมีการสูญเสียน้ำหนักสูงถึง 14.12% และในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 สูงถึง 19.83% ซึ่งชี้ว่าการทาคอนกรีตอาจไม่สามารถป้องกันไอออนคลอไรด์จากการซึมลึกถึงผิวเหล็กได้อย่างสมบูรณ์

3.2.4 กลุ่มเคลือบทั้งผิวเหล็กและผิวคอนกรีต



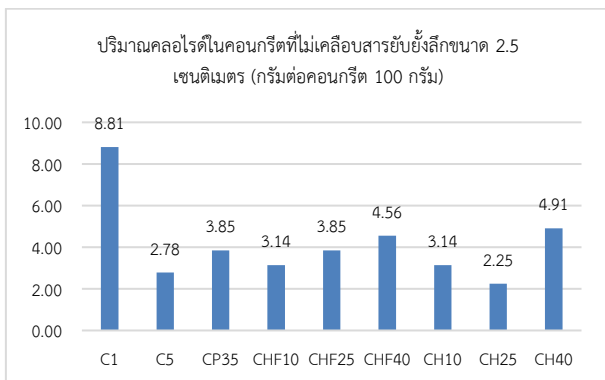
รูปที่ 8 การสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมในคอนกรีตที่มีสารยับยั้งการกัดกร่อนประเภททาเคลือบทั้งผิวเหล็กเสริมและผิวคอนกรีต

กลุ่มนี้ให้ผลดีที่สุดในการยับยั้งการเกิดสนิม โดยการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมต่ำมากหรือแทบไม่มีเลย เช่น แกลบละเอียด 25% อยู่ที่ -0.93 % และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ที่ -0.04% แสดงให้เห็นว่าการป้องกันแบบผสมผสานทั้งจากภายในและภายนอกสามารถลดการกัดกร่อนได้อย่างมีนัยสำคัญมากที่สุด

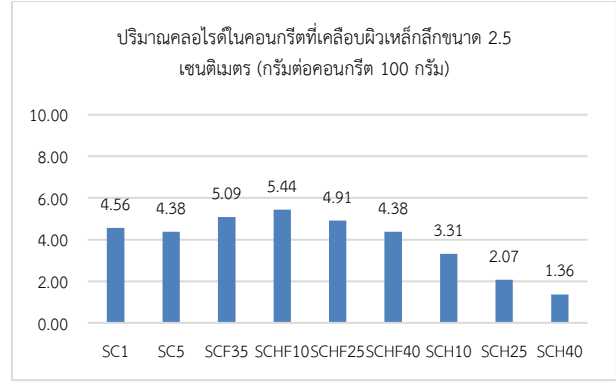
การเปรียบเทียบผลการทดลองในแต่ละกลุ่มชี้ให้เห็นว่า การเคลือบผิวเหล็กเสริมโดยตรง หรือการเคลือบทั้งเหล็กและคอนกรีตร่วมกัน มีประสิทธิภาพสูงสุดในการลดอัตราการสูญเสียจากการกัดกร่อน รองลงมาคือการทาคอนกรีต และสุดท้ายคือกลุ่มควบคุมที่ไม่มีการป้องกันใดๆ ซึ่งมีความเสี่ยงต่อการเกิดสนิมสูงที่สุด โดยเฉพาะเมื่อใช้วัสดุประสานที่มีรุกรานสูงและไม่สามารถยับยั้งการซึมของคลอไรด์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

3.3 ปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีต

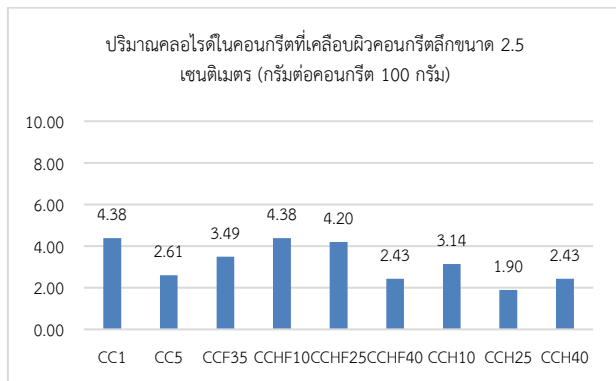
ระดับความลึก 2.5 เซนติเมตรเป็นบริเวณผิวคอนกรีตที่ใกล้กับสิ่งแวดล้อมภายนอกมากที่สุด ซึ่งมีโอกาสรับคลอไรด์จากภายนอกโดยตรง ผลการทดสอบแสดงให้เห็นความแตกต่างอย่างชัดเจนในประสิทธิภาพของวัสดุประสานและการป้องกันผิว ดังนี้



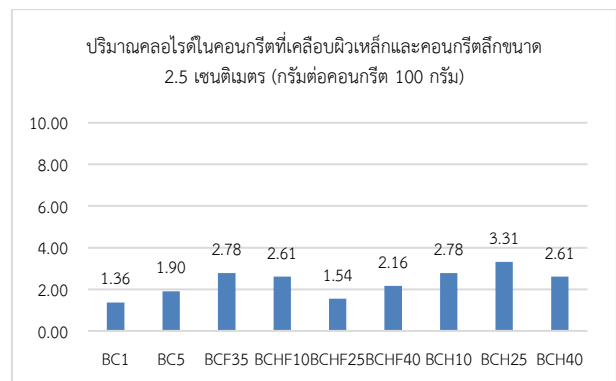
รูปที่ 9 ปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตที่ไม่เคลือบสารยับยั้งการกัดกร่อน ที่ความลึก 2.5 เซนติเมตร



รูปที่ 10 ปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตเคลือบสารยับยั้งการกัดกร่อนประเภททาเคลือบผิวเหล็กเสริม ที่ความลึก 2.5 เซนติเมตร



รูปที่ 11 ปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตเคลือบสารยับยั้งการกัดกร่อนประเภททาเคลือบผิวคอนกรีต ที่ความลึก 2.5 เซนติเมตร

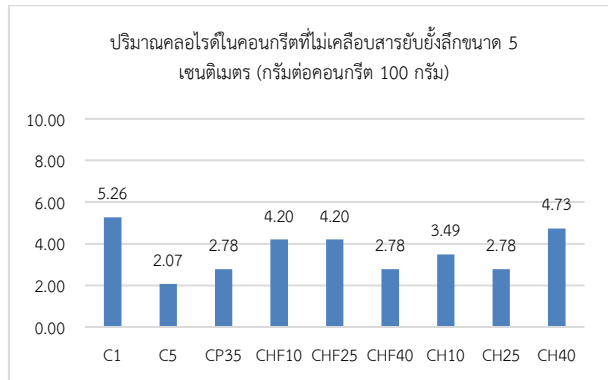


รูปที่ 12 ปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตเคลือบสารยับยั้งการกัดกร่อนประเภททาเคลือบทั้งผิวเหล็กเสริมและผิวคอนกรีต ที่ความลึก 2.5 เซนติเมตร

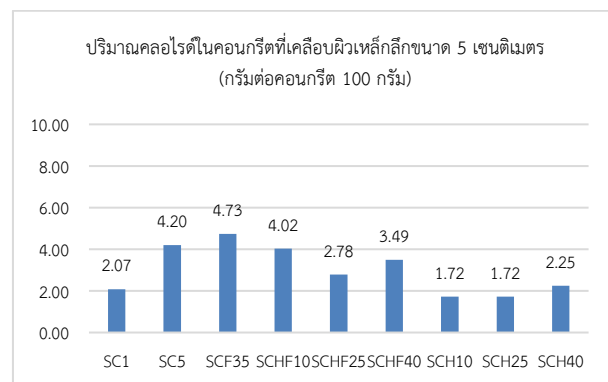
จากรูปที่ 9-12 คือปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตที่ระดับผิวคอนกรีตความลึก 2.5 เซนติเมตร พบว่า ปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตแตกต่างกันอย่างชัดเจนตามชนิดของวัสดุประสานและรูปแบบการป้องกันผิว โดยคอนกรีตที่ไม่มีการเคลือบผิวใด ๆ ให้ค่าปริมาณคลอไรด์สูงที่สุด เช่น ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 อยู่ที่ 8.81 g/100g ขณะที่กลุ่มที่มีการเคลือบผิวทั้งเหล็กและคอนกรีต โดยเฉพาะเมื่อใช้แกลบหรือแกลบละเอียด 25% ให้ค่าคลอไรด์ต่ำมาก อยู่ในช่วงประมาณ 1.5-2.0 g/100g สะท้อนให้เห็นว่า การเคลือบผิวคอนกรีตมีบทบาทสำคัญในการลดการซึม

ผ่านของคลอไรด์บริเวณผิว โดยเฉพาะเมื่อใช้ร่วมกับวัสดุประสานที่มีคุณสมบัติปอซโซลานิก

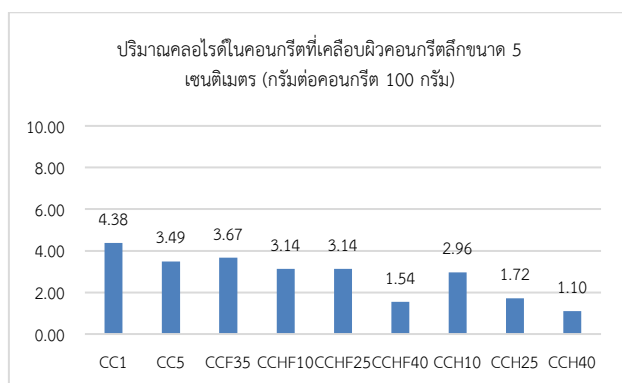
ต่อมาปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตที่ระดับความลึก 5 เซนติเมตรแสดงถึงความสามารถของคอนกรีตในการต้านทานการแพร่ของคลอไรด์ ผ่านเนื้อคอนกรีตเข้าสู่บริเวณที่ใกล้เหล็กเสริมมากขึ้น ซึ่งเกี่ยวข้องโดยตรงกับความคงทนในระยะยาว มีผลการทดสอบดังต่อไปนี้



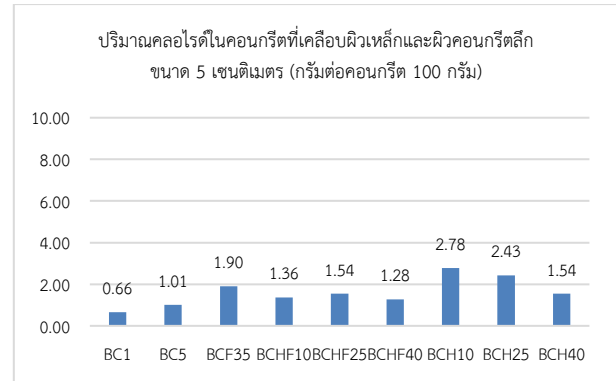
รูปที่ 13 ปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตที่ไม่เคลือบสารยับยั้งการกัดกร่อน ที่ความลึก 5 เซนติเมตร



รูปที่ 14 ปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตเคลือบสารยับยั้งการกัดกร่อน ประเภททาเคลือบผิวเหล็กเสริม ที่ความลึก 5 เซนติเมตร



รูปที่ 15 ปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตเคลือบสารยับยั้งการกัดกร่อน ประเภททาเคลือบผิวคอนกรีต ที่ความลึก 5 เซนติเมตร



รูปที่ 16 ปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตเคลือบสารยับยั้งการกัดกร่อน ประเภททาเคลือบทั้งผิวเหล็กเสริมและผิวคอนกรีต ที่ความลึก 5 เซนติเมตร

ที่ระดับความลึก 5 เซนติเมตร ซึ่งอยู่ใกล้เหล็กเสริมมากขึ้น พบว่าแนวโน้มการแทรกซึมของคลอไรด์ยังคงมีอยู่ในกลุ่มที่ไม่มีการเคลือบผิวหรือใช้วัสดุผสมที่มีความพรุนสูง เช่น คอนกรีตผสมแกลบหยาบ 40% มีค่าคลอไรด์สูงถึง 4.73 g/100g ขณะที่คอนกรีตที่ผ่านการเคลือบผิวทั้งเหล็กและคอนกรีต และใช้วัสดุประสานคุณภาพสูง เช่น ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 หรือแกลบละเอียด 25% มีค่าคลอไรด์ที่ลดลงมาเหลือเพียง 1.7-2.1 g/100g ซึ่งแสดงถึงประสิทธิภาพในการต้านทานการแพร่ของคลอไรด์เข้าสู่ภายใน

การป้องกันแบบผสมผสาน ร่วมกับวัสดุประสานประเภทเถ้าลอยหรือแกลบละเอียดในปริมาณเหมาะสม เป็นแนวทางที่ให้ผลดีที่สุด ทั้งในการลดการซึมผ่านของคลอไรด์บริเวณผิว (2.5 ซม.) และป้องกันการแพร่ (5 ซม.) ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญต่ออายุการใช้งานของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กในสภาพแวดล้อมที่มีความเสี่ยงสูง

3.4 วิเคราะห์ผลการทดสอบ

3.4.1 วิเคราะห์ผลทางด้านกำลังรับแรงอัด

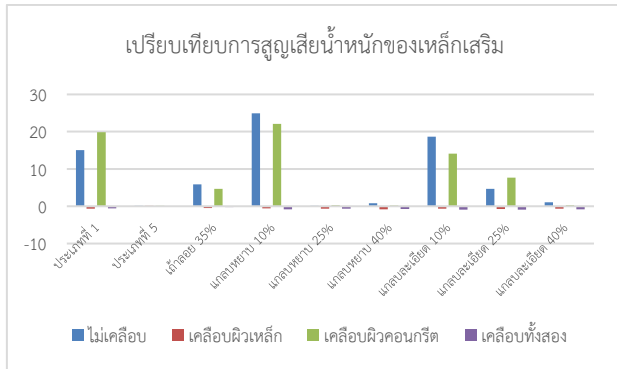
จากการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน พบว่าชนิดและสัดส่วนของวัสดุประสาน มีผลกระทบต่อค่ากำลังอัดของคอนกรีตอย่างชัดเจน โดยวัสดุผสมที่ให้ผลดีที่สุดคือ เถ้าลอย 35% ซึ่งให้ค่ากำลังอัดเฉลี่ยสูงสุดที่ 317.9 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร รองลงมาคือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 และประเภทที่ 1 ที่ให้ค่า 305.1 และ 278.6 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ โดยสอดคล้องกับ [8] ที่มีการใช้เถ้าลอยในปริมาณที่เหมาะสม จะเพิ่มความทึบของคอนกรีตส่งผลถึงกำลังอัดของคอนกรีตที่สูงขึ้น

ในขณะที่คอนกรีตที่ผสมแกลบ โดยเฉพาะในสัดส่วนที่สูง เช่น แกลบละเอียด 40% ให้ค่ากำลังอัดต่ำที่สุดที่ 78.2 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ซึ่งสะท้อนว่าแม้แกลบจะเป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติปอซโซลานิกในระดับหนึ่ง แต่หากใช้ในปริมาณมากเกินไป จะส่งผลให้โครงสร้างคอนกรีตเกิดความพรุนและความไม่สม่ำเสมอ ทำให้กำลังอัดลดลงอย่างมาก ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัย [7] ที่ยังมีการให้ใช้แกลบในสัดส่วนที่สูงมีแนวโน้มที่จะลดกำลังอัดของคอนกรีต

ในเชิงกลไก วัสดุประสานประเภทเถ้าลอยมีความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกซึ่งช่วยสร้างเจลเคลือบซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H gel) เพิ่มเติมจากกระบวนการไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ ส่งผลให้โครงสร้างคอนกรีตมีความหนาแน่นสูงขึ้นและมีกำลังอัดเพิ่มขึ้น ในขณะที่แกลบ โดยเฉพาะแกลบที่ไม่ผ่านกระบวนการเตรียมที่เหมาะสม อาจมีรูพรุนสูง

และทำให้เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกได้ไม่เต็มที่ รวมถึงลดความสามารถในการอัดแน่นของเนื้อคอนกรีต

3.4.2 ด้านการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริม



รูปที่ 17 เปรียบเทียบการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริม

ผลการทดสอบดังแสดงในรูปที่ 17 แสดงการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมในคอนกรีตภายใต้สภาวะเร่งการกัดกร่อนด้วยไฟฟ้า แสดงให้เห็นถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญในของแตละกลุ่มตัวอย่าง ทั้งในด้านวัสดุประสานและรูปแบบของการป้องกัน โดย กลุ่มที่ไม่มีการเคลือบผิวใด ๆ พบว่าการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กในระดับสูง เช่น คอนกรีตผสมเกลบหยาบ 10% มีค่าการสูญเสียสูงสุดที่ 24.97 กรัม และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีค่าถึง 15.10 กรัม ซึ่งสะท้อนถึงระดับการกัดกร่อนที่รุนแรงเมื่อไม่มีมาตรการป้องกัน สอดคล้องกับ [9] ที่ชี้ว่าสารยับยั้งสามารถลดอัตราการสูญเสียมวลเหล็กได้อย่างมีประสิทธิภาพเมื่อใช้งานร่วมกับวัสดุปอซโซลานิก โดยเฉพาะในสภาพแวดล้อมที่มีคลอไรด์สูง

ในทางตรงกันข้าม กลุ่มที่ใช้สารยับยั้งการกัดกร่อนแบบเคลือบผิวเหล็กเสริม สามารถลดการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยบางกรณีพบค่าน้อยกว่าศูนย์ เช่น ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่มีค่าการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักเท่ากับ -0.66 กรัม ซึ่งอาจเกิดจากการดูดซับความชื้นหรือสารเคลือบบางส่วน อย่างไรก็ตามผลลัพธ์ชี้ชัดว่าการเคลือบผิวเหล็กช่วยป้องกันการกัดกร่อนได้ดี แม้ในสภาพแวดล้อมที่มีคลอไรด์สูง

กลุ่มที่เคลือบผิวคอนกรีตเพียงอย่างเดียวให้ผลการสูญเสียในระดับปานกลางโดยยังพบการสูญเสียน้ำหนักในบางกรณีที่ค่อนข้างสูง เช่น แกะลวยละเอียด 10% สูญเสียถึง 14.12 กรัม แสดงให้เห็นว่าการเคลือบผิวคอนกรีตเพียงอย่างเดียวอาจไม่เพียงพอในการป้องกันการซึมผ่านของคลอไรด์ในคอนกรีตที่มีรูพรุนสูง

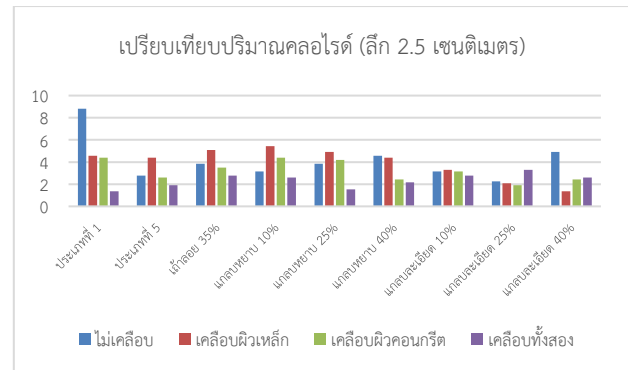
กลุ่มที่มีการเคลือบทั้งผิวเหล็กและผิวคอนกรีตแสดงผลการป้องกันที่ดีที่สุด โดยค่าการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กในกลุ่มนี้อยู่ในช่วง -0.93 ถึง -0.04 กรัม สำหรับวัสดุผสมที่เหมาะสม เช่น ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 และแกะลวยละเอียด 25% ซึ่งแสดงถึงการยับยั้งการกัดกร่อนอย่างสมบูรณ์

ผลที่ได้สอดคล้องกับกลไกของการกัดกร่อนในคอนกรีตเสริมเหล็ก ซึ่งเกิดจากการที่คลอไรด์ซึมผ่านเนื้อคอนกรีตไปยังผิวเหล็กเสริม และทำลายชั้น passivation ของฟิล์มออกไซด์บนเหล็ก ทำให้เกิดการสูญเสียอิเล็กตรอนและเกิดสนิมตามมา วัสดุประสานที่สามารถลดการซึมผ่านของคลอไรด์ เช่น แกะลวย หรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 จะช่วยลดความเสี่ยงนี้ได้เป็นอย่างดี โดยเฉพาะเมื่อใช้ร่วมกับสารเคลือบซึ่งทำหน้าที่เป็นเกราะป้องกันทางกายภาพที่มีประสิทธิภาพ

การสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมสามารถลดลงได้อย่างมีนัยสำคัญเมื่อใช้ สารยับยั้งการกัดกร่อนร่วมกับวัสดุประสานที่มีคุณสมบัติในการลดรูพรุน

ของคอนกรีต โดยแนวทางที่มีประสิทธิภาพสูงสุดคือ การเคลือบทั้งผิวเหล็กและผิวคอนกรีตร่วมกัน ซึ่งเหมาะสมกับโครงสร้างที่อยู่ในพื้นที่เสี่ยงต่อการกัดกร่อน เช่น บริเวณน้ำทะเลกระเด็นหรือเขตเปียกสลับแห้ง

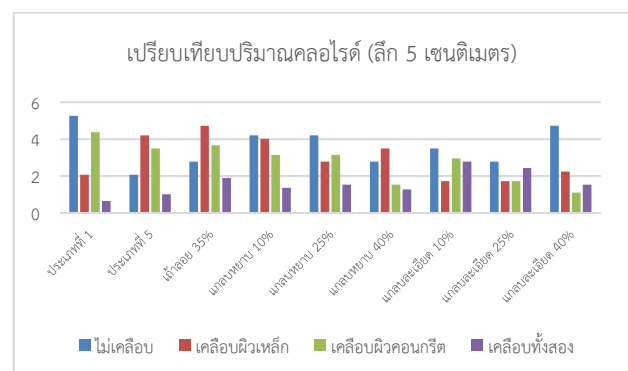
3.4.3 ด้านการแทรกซึมของคลอไรด์



รูปที่ 18 เปรียบเทียบปริมาณคลอไรด์ที่ความลึก 2.5 เซนติเมตร

จากผลการทดสอบที่แสดงในรูปที่ 18 พบว่า ปริมาณคลอไรด์ที่ระดับ 2.5 เซนติเมตรมีความแปรผันอย่างชัดเจนตามชนิดของวัสดุประสานและรูปแบบการป้องกันผิวคอนกรีต โดยคอนกรีตที่ไม่มีการเคลือบสารยับยั้ง (กลุ่มควบคุม) ให้ค่าปริมาณคลอไรด์สูงที่สุด เช่น ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 อยู่ที่ 8.81 g/100g และแกะลวยหยาบ 40% อยู่ที่ 4.91 g/100g แสดงถึงความสามารถในการซึมผ่านของคลอไรด์จากผิวเข้าสู่เนื้อคอนกรีตได้อย่างรวดเร็ว

ในทางตรงกันข้าม กลุ่มที่มีการเคลือบผิวคอนกรีตและผิวเหล็กเสริมพบว่าค่าปริมาณคลอไรด์ลดลงอย่างชัดเจน โดยเฉพาะในกรณีที่ใช้วัสดุประสานที่มีคุณสมบัติปอซโซลาน เช่น แกะลวย หรือแกะลวยละเอียดในอัตราส่วนเหมาะสม ตัวอย่างเช่น คอนกรีตผสมเกลบละเอียด 25% ที่ผ่านการเคลือบทั้งผิวเหล็กและผิวคอนกรีต มีค่าคลอไรด์เพียง 1.54 g/100g เท่านั้น



รูปที่ 19 เปรียบเทียบปริมาณคลอไรด์ที่ความลึก 5 เซนติเมตร

การทดสอบปริมาณคลอไรด์ที่ระดับความลึก 5 เซนติเมตร มีจุดประสงค์เพื่อตรวจสอบว่าไอออนคลอไรด์สามารถแพร่ลึกเข้าสู่ชั้นใกล้เหล็กเสริมได้มากน้อยเพียงใด ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญต่อการเริ่มต้นของกระบวนการกัดกร่อน

ผลการทดสอบพบว่าคอนกรีตที่ไม่มีการเคลือบผิว (กลุ่มควบคุม) ยังคงมีค่าคลอไรด์ที่ระดับ 5 ซม. ในระดับสูง เช่น ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท

ที่ 1 วัดได้ที่ 5.26 g/100g และแกลบหยาบ 40% ที่ 4.73 g/100g ซึ่งแสดงถึงการซึมผ่านลึกของคลอไรด์ผ่านเนื้อคอนกรีต และมีแนวโน้มส่งผลให้ชั้น passivation ของเหล็กเสริมถูกทำลายในระยะเวลาอันสั้น

ในขณะที่กลุ่มที่มีการเคลือบผิวคอนกรีตหรือเคลือบทั้งผิวเหล็กและผิวคอนกรีต โดยเฉพาะเมื่อใช้ร่วมกับวัสดุประสานที่มีความตึงน้ำสูง เช่น เถ้าลอยหรือแกลบละเอียด 25% พบว่าค่าคลอไรด์ที่ระดับ 5 ซม. ลดลงอย่างมาก เช่น ปูนซีเมนต์ ป.5 เหลือเพียง 2.07 g/100g และแกลบละเอียด 25% อยู่ที่ 2.78 g/100g ซึ่งอยู่ในช่วงที่ยังไม่ถึงค่าคลอไรด์วิกฤติ ตามมาตรฐานหลายแหล่งที่กำหนดไว้ราว 0.4% โดยน้ำหนักวัสดุประสาน

ผลการวิเคราะห์ปริมาณคลอไรด์ที่ระดับความลึก 2.5 และ 5 เซนติเมตร พบแนวโน้มที่สอดคล้องกัน โดยกลุ่มตัวอย่างที่ไม่มีการเคลือบผิวใด ๆ มีค่าคลอไรด์สูงทั้งบริเวณผิวและภายใน ซึ่งสะท้อนถึงการซึมผ่านของคลอไรด์ได้อย่างรวดเร็วโดยไม่มีแนวป้องกัน เช่น ปูนซีเมนต์ ป.1 มีค่า 8.81 g/100g ที่ 2.5 ซม. และ 5.26 g/100g ที่ 5 ซม. ในขณะที่กลุ่มที่ใช้วัสดุประสานเชิงปอซโซลาน เช่น เถ้าลอย หรือแกลบละเอียด 25% ร่วมกับการเคลือบผิวทั้งเหล็กและคอนกรีต ให้ค่าคลอไรด์ต่ำทั้งสองระดับ เช่น อยู่ในช่วง 1.5–2.0 g/100g ที่ผิว และไม่เกิน 2.1 g/100g ที่ระดับลึก แสดงให้เห็นว่าการผสมผสานระหว่างวัสดุประสานคุณภาพสูงและการป้องกันภายนอกสามารถยับยั้งการแทรกซึมของคลอไรด์ได้ทั้งในระยะสั้นและระยะลึก ซึ่งช่วยลดความเสี่ยงต่อการกัดกร่อนของเหล็กเสริมได้อย่างมีประสิทธิภาพ สอดคล้องกับผล [1] และ [6] ที่พบว่าสารเคลือบร่วมกับวัสดุประสานที่มีคุณภาพสูงสามารถลดการแพร่คลอไรด์ได้อย่างชัดเจน

4. สรุปผลการทดสอบ

จากผลการทดลองและการวิเคราะห์เชิงเปรียบเทียบ พบว่าแนวทางที่มีประสิทธิภาพสูงสุดในการลดการกัดกร่อนในคอนกรีตเสริมเหล็กภายใต้สภาวะแวดล้อมที่มีคลอไรด์สูง ได้แก่ การเคลือบผิวเหล็กเสริมร่วมกับการใช้วัสดุประสานที่มีคุณสมบัติปอซโซลานิกสูง โดยเฉพาะแกลบหยาบ 25% , 40% และ แกลบละเอียด 40% ที่ผ่านการเตรียมอย่างเหมาะสม ซึ่งสามารถลดการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กได้มากกว่า 90% และลดการแทรกซึมของคลอไรด์ได้อย่างมีนัยสำคัญ

เมื่อเปรียบเทียบกับ [9] และ [5] พบว่าผลลัพธ์ของงานวิจัยนี้สอดคล้องกับรายงานก่อนหน้าในด้านประสิทธิภาพของสารยับยั้งที่เคลือบโดยตรงกับผิวเหล็ก โดยเฉพาะเมื่อใช้ร่วมกับวัสดุปอซโซลานิกคุณภาพสูง เช่น เถ้าลอยหรือแกลบละเอียด ซึ่งมีคุณสมบัติในการลดรูพรุนและเพิ่มความหนาแน่นภายในเนื้อคอนกรีต

ด้านกำลังอัดของคอนกรีต กลุ่มที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ร่วมกับเถ้าลอย 35% ให้ค่ากำลังอัดสูงที่สุด ซึ่งมีแนวโน้มสนับสนุนผลการศึกษาของ [3] ที่รายงานว่าเถ้ากลบในรูปแบบละเอียดสามารถเพิ่มความตึงน้ำและความทนทานของคอนกรีตได้อย่างมีนัยสำคัญ

สำหรับการแทรกซึมของคลอไรด์ ผลการทดลองในงานวิจัยนี้ยืนยันผล [1] ที่แสดงให้เห็นว่าวัสดุประสานที่มีคุณสมบัติทางปอซโซลานิกสามารถลดระดับคลอไรด์ในชั้นลึกได้จริง ซึ่งส่งผลต่อการชะลอกระบวนการกัดกร่อนของเหล็กเสริมในระยะยาว

โดยสรุป ผลลัพธ์จากงานวิจัยนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการออกแบบส่วนผสมคอนกรีตและระบบป้องกันการกัดกร่อนที่มีประสิทธิภาพเพื่อเพิ่มความยั่งยืนของโครงสร้าง ลดภาระค่าบำรุงรักษาในระยะยาว และสนับสนุนการพัฒนาทางวิศวกรรมที่ตอบสนองต่อสภาพแวดล้อม

5. ข้อเสนอแนะ

5.1 ควรเลือกใช้วัสดุประสานที่มีคุณสมบัติลดการซึมผ่านของคลอไรด์ เช่น เถ้าลอยหรือแกลบละเอียดในสัดส่วนไม่เกิน 25% ร่วมกับการเคลือบผิวเหล็กเสริมและผิวคอนกรีต (Double Coated) โดยเฉพาะในโครงสร้างที่อยู่ในบริเวณชายฝั่งทะเล หรือพื้นที่ที่มีความชื้นสูงและเกิดการกัดกร่อนง่าย

5.2 ในการออกแบบส่วนผสมคอนกรีตสำหรับโครงสร้างที่ต้องการความทนทานสูง ควรกำหนดให้ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่ำร่วมกับการใช้วัสดุปอซโซลานิกคุณภาพดี เพื่อเพิ่มความหนาแน่นของเนื้อคอนกรีตและลดการแพร่ของคลอไรด์ในระยะยาว

5.3 ในโครงสร้างที่ไม่สามารถหลีกเลี่ยงความเสี่ยงจากคลอไรด์ ควรมีการกำหนดระยะเวลาตรวจสอบสภาพเหล็กเสริมด้วยวิธีที่ไม่ทำลาย เช่น Half-cell Potential เพื่อประเมินโอกาสการเกิดสนิม และวางแผนซ่อมแซมก่อนโครงสร้างจะเสื่อมสภาพอย่างรุนแรง

5.4 ควรมีการศึกษาระยะยาวภายใต้สภาวะแวดล้อมจริง เช่น โครงสร้างริมทะเล หรือโครงสร้างในภูมิอากาศชื้น เพื่อประเมินประสิทธิภาพของสารยับยั้งในสภาวะการใช้งานจริง และเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดลองในห้องปฏิบัติการ

5.5 แนะนำให้ศึกษาวัสดุผสมเพิ่มเติมอื่น ๆ ที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม เช่น เถ้าชีวมวล, กากอุตสาหกรรม หรือวัสดุเหลือใช้ทางเกษตรกรรมอื่น ๆ ที่อาจมีคุณสมบัติปอซโซลานิกเพื่อนำมาใช้แทนปูนซีเมนต์บางส่วนอย่างยั่งยืน

5.6 เสนอให้มีการศึกษาด้านเศรษฐศาสตร์ เช่น การเปรียบเทียบต้นทุน-ประสิทธิภาพ (cost-benefit analysis) ของแนวทางการป้องกันแต่ละแบบ เพื่อสนับสนุนการตัดสินใจในเชิงเศรษฐกิจควบคู่กับเชิงเทคนิค

เอกสารอ้างอิง

- [1] นันทรัตน์ โยคะวัฒน์ และ อภิเดช รัตนติลล ญ ภูเก็ต (2556). *การกักเก็บคลอไรด์และการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินภายใต้สภาวะแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 15 ปี*, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา.
- [2] พัฒพงษ์ วงษ์เสียงดัง (2555). *ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อ การเกิดสนิมของเหล็กและเหล็กเคลือบผิวด้วยสังกะสีในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก*. สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [3] วิเชียร ขาลี (2556). *ระดับคลอไรด์วิกฤติในคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบเปลือกไม้ที่แช่ในสภาวะแวดล้อมทะเล*, *วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา*, ปีที่ 18, ฉบับที่ 2, หน้า 132-143.
- [4] สิริศิลป์ กัลป์ยานกุล, สิริพงษ์ สุวรรณปัญจศิลป์, ธาดา โยคาพจร และ วันชัย ยอดสุดใจ (2555). *ปัจจัยที่มีผลต่อการทดสอบแนวโน้มการเกิดสนิมด้วยวิธีศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์*, *วิศวกรรมสาร มช.*, ปีที่ 39, ฉบับที่ 4, หน้า 401-406.
- [5] เมธิตา แก้วพันธ์ และ วันชัย ยอดสุดใจ (2561). *การกัดกร่อนของเหล็กเสริมในคอนกรีตที่มีส่วนผสมของสารยับยั้ง*, การประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ครั้งที่ 56, กรุงเทพมหานคร, 30 มกราคม - 2 กุมภาพันธ์ 2561, หน้า 490-498.
- [6] สลิล รักรณิษฐ์ และวันชัย ยอดสุดใจ (2558). *ประสิทธิภาพของระบบป้องกันการเกิดสนิมในเหล็กเสริมโดยวิธีกลาวานิกคาโทดิก*, การประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ครั้งที่ 53, กรุงเทพมหานคร, 3-6 กุมภาพันธ์ 2558, หน้า 516-523.

- [7] ภาณุพงศ์ พงษ์พิทักษ์กุล (2559). การใช้เถ้าแกลบผสมปูนซีเมนต์เพื่อปรับปรุงคุณภาพของคอนกรีต. สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [8] วิเชียร ชาลี, มณเฑียร ติฆวานิช, ชัย จาตุรพิทักษ์กุล และ ประสิทธิ์ อุตสาห์พานิช (2550). ผลกระทบของน้ำทะเลต่องำลังอัด การซึมผ่านของคลอไรด์และการกัดกร่อนของเหล็กเสริมในคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินที่อยู่ในสภาวะแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 4 ปี. วารสารวิจัยและพัฒนา มจร., ปีที่ 30, ฉบับที่ 1, หน้า 153-166
- [9] โตมร บุญหนุน (2556). ประสิทธิภาพของสารยับยั้งการเกิดสนิมในการป้องกันการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตเนื่องจากคลอไรด์. สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี.
- [10] รัฐ ตันตศิริไพบูลย์ (2551). การผลิตโม่อะลูมิเนียมที่ทำให้เสถียรด้วยเถ้าแกลบ. สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.