



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ การศึกษาความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้วิธี
Electrodeposition ในการป้องกันการเกิดสนิมของเหล็กเสริมและ
การซ่อมแซมแตกร้าวของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก
คอนกรีตในประเทศไทย

โดย ผศ.ดร. วันชัย ยอดสุดใจ

เมษายน 2552

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยนี้ขอขอบคุณ สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) และสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา (สกอ.) ที่สนับสนุนทุนการศึกษาและวิจัย

โครงการวิจัยนี้สำเร็จสมบูรณ์ได้ด้วยความปรารถนาดี และความกรุณาของ รศ.ดร.ประเสริฐ สุวรรณวิทยา ผู้ซึ่ง ให้คำแนะนำ ตลอดจนให้ความรู้ในด้านวิชาการอันเป็นประโยชน์ และให้แนวคิดเพื่อการแก้ไขปัญหาต่างๆ ระหว่างการทำโครงการวิจัยด้วยดีมาโดยตลอด

นอกจากนี้ใคร่ขอขอบคุณ นายณัฐพล ทองขาว ผู้ซึ่งได้ทุ่มเทกำลังกาย กำลังสติปัญญาในการให้ความช่วยเหลือและร่วมดำเนินการในการทำวิจัย

หนึ่งผู้วิจัยขอขอบพระคุณหน่วยงาน ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์ช่วยเหลือในด้านวัสดุและอุปกรณ์ต่างๆ ได้แก่ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ และขอขอบคุณบริษัท นนทรี จำกัดที่สนับสนุนวัสดุในการดำเนินการวิจัย

ท้ายสุดนี้ขอมอบความดีของโครงการวิศวกรรมโยธานี้ เพื่อเป็นกตเวทิตาคุณแด่บิดา มารดาและคณาจารย์ทุกท่าน พร้อมกันนี้ผู้วิจัยหวังเป็นอย่างยิ่งว่าโครงการวิจัยนี้จะก่อให้เกิดประโยชน์ต่อสังคมและประเทศโดยส่วนรวมสืบไป

Abstract

Project Code : MRG4780139

Project Title : Feasibility study on application of electrodeposition method for preventing corrosion of embedded steel bars and repairing cracks of reinforced concrete structure under Thailand climatic condition

Investigator : Assistant Prof. Dr. Wanchai Yodsudjai

E-mail Address : fengwcy@ku.ac.th

Project Period : July 1, 2004 to June 30, 2006

Abstract : This study aims to study feasibility of application of electrodeposition method and to investigate the best condition for closing cracks of reinforced concrete.

Reinforced concrete specimens with the dimensions of 10 x 10 x 37 cm are used. After the specimens are cracked by applying three-point load, the MgCl_2 , MgSO_4 and ZnSO_4 solutions, instead of seawater, are used for repairing the cracked reinforced concrete on land. It is found that the electrodeposition method can be used for closing the cracks of reinforced concrete on land. The best electrodeposition conditions investigated in this study are using MgCl_2 and MgSO_4 solutions with the concentration of 0.1 mol/l. The cracks are closed by the deposited product, $\text{Mg}(\text{OH})_2$. The electrodeposits on the concrete crack increase the resistance to chloride penetration and carbonation of cracked reinforced concrete

Keywords : Electrodeposition, Carbonation, Cracks Repair

บทคัดย่อ

รหัสโครงการ : MRG4780139

ชื่อโครงการ : การศึกษาความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้วิธี Electrodeposition ในการป้องกันการเกิดสนิมของเหล็กเสริมและการซ่อมแซมรอยแตกร้าวของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กคอนกรีตในประเทศไทย

ชื่อนักวิจัย : ผศ.ดร. วันชัย ยอดสุดใจ

E-mail Address : fengwcy@ku.ac.th

ระยะเวลาโครงการ : 1 กรกฎาคม 2547 ถึง 30 มิถุนายน 2549

บทคัดย่อ : การศึกษานี้เป็นการศึกษาความเป็นไปได้ และหาเงื่อนไขที่ดีที่สุดสำหรับการใช้วิธีการพอกพูนสารด้วยไฟฟ้าในการปิดรอยแตกร้าวของคอนกรีตเสริมเหล็กบนพื้นดิน โดยใช้สารละลาย $MgCl_2$, $MgSO_4$ และ $ZnSO_4$ แทนการใช้น้ำทะเล เพื่อซ่อมแซมรอยแตกร้าวของตัวอย่างคอนกรีตเสริมเหล็กขนาด $10 \times 10 \times 37$ เซนติเมตร ที่ผ่านการทำให้แตกร้าวด้วยการกดแบบคาน ผลการศึกษาพบว่า มีความเป็นไปได้ในการใช้สารละลายที่เตรียมขึ้นเอง สำหรับการปิดรอยแตกร้าวของคอนกรีตเสริมเหล็กบนพื้นดิน ด้วยวิธีการพอกพูนสารด้วยไฟฟ้า โดยเงื่อนไขที่ให้ผลการทดลองที่ดีที่สุด คือ การใช้สารละลายที่มีโลหะแมกนีเซียมเป็นส่วนประกอบ ($MgCl_2$ หรือ $MgSO_4$) ที่มีความเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร ซึ่งให้ผลการซ่อมแซมเป็นผลิตภัณฑ์ $Mg(OH)_2$ ตกผลึกปิดรอยแตกร้าวของคอนกรีต ช่วยให้บริเวณรอยแตกร้าว มีความสามารถในการต้านทานการซึมผ่านของคลอไรด์และการคาร์บอนเนชั่นที่ดีขึ้น

คำหลัก : การพอกพูนสารด้วยไฟฟ้า, คาร์บอนเนชั่น, การปิดรอยแตกร้าว

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(4)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	3
ขอบเขตการศึกษา	3
การตรวจเอกสาร	4
การคัดกรองและการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีต	4
ผลกระทบของคลอไรด์ในคอนกรีต	7
ผลกระทบของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในคอนกรีต	8
การซ่อมแซมรอยแตกร้าวของคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยวิธี Electrodeposition	9
อุปกรณ์และวิธีการ	17
อุปกรณ์	17
วิธีการ	18
ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง	27
ผลิตภัณฑ์จากกระบวนการซ่อมแซมรอยแตกร้าว	27
ความถี่การตกผลึกปีครอยแตกร้าว	29
การซึมผ่านของคลอไรด์	39
ความถี่การคาร์บอนเนชั่น	44
สรุป	48
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	49
ภาคผนวก	52
ภาคผนวก ก คุณสมบัติของส่วนผสมคอนกรีต และสารเคมี	53
ภาคผนวก ข ผลการทดสอบความถี่ของการตกผลึกปีครอยแตกร้าว	57
ภาคผนวก ค ผลการทดสอบการซึมผ่านของคลอไรด์	78
ภาคผนวก ง ผลการทดสอบการคาร์บอนเนชั่น	81
ภาคผนวก จ ภาพแสดงการทดสอบ	85

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1 ผลการตกผลึกปีครอยแตกร้าว ที่ใช้สารละลาย $MgCl_2$ และความสามารถซึมผ่านของคอนกรีตหลังการซ่อมแซมรอยแตกร้าว	15
ตารางผนวกที่	
ก1 คุณสมบัติทางกายภาพของมวลรวม	54
ก2 ส่วนผสมคอนกรีตสำหรับการทดสอบต่อปริมาตร 1 ลบ.ม.	54
ก3 คุณสมบัติและส่วนผสมของ $MgSO_4$	54
ก4 คุณสมบัติและส่วนผสมของ $MgCl_2$	55
ก5 คุณสมบัติและส่วนผสมของ $ZnSO_4$	56
ข1 ความลึกของการตกผลึกปีครอยแตกร้าวโดยสารละลาย $MgCl_2$	58
ข2 ความลึกของการตกผลึกปีครอยแตกร้าวโดยสารละลาย $MgSO_4$	60
ข3 ความลึกของการตกผลึกปีครอยแตกร้าวโดยสารละลาย $ZnSO_4$	62
ข4 ผลของความเข้มข้นต่อความลึกของการตกผลึกปีครอยแตกร้าวโดยสารละลาย $MgCl_2$	64
ข5 ผลของความเข้มข้นต่อความลึกของการตกผลึกปีครอยแตกร้าวโดยสารละลาย $MgSO_4$	66
ข6 ผลของความเข้มข้นต่อความลึกของการตกผลึกปีครอยแตกร้าวโดยสารละลาย $ZnSO_4$	68
ข7 ผลของศักย์ไฟฟ้าต่อความลึกของการตกผลึกปีครอยแตกร้าวโดยสารละลาย $MgCl_2$	70
ข8 ผลของศักย์ไฟฟ้าต่อความลึกของการตกผลึกปีครอยแตกร้าวโดยสารละลาย $MgSO_4$	72
ข9 ผลของศักย์ไฟฟ้าต่อความลึกของการตกผลึกปีครอยแตกร้าวโดยสารละลาย $ZnSO_4$	74
ข10 ความลึกของการตกผลึกปีครอยแตกร้าวโดยไม่คิดผลเนื่องจากศักย์ไฟฟ้า	76

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่	หน้า
ค1 ความลึกการซึมผ่านของคลอไรด์ที่บริเวณรอยแตก ภายหลังการซ่อมแซม รอยแตกร้าวด้วยวิธี Electrodeposition	79
ค2 ผลความลึกการซึมผ่านของคลอไรด์ที่บริเวณรอยแตก ภายหลังการซ่อมแซม รอยแตกร้าวด้วยวิธี Electrodeposition เปรียบเทียบกับตัวอย่างที่มี และไม่มีรอยแตกร้าวด	80
ง1 ความลึกการคาร์บอนเนชั่นที่บริเวณรอยแตก ภายหลังการซ่อมแซมรอยแตกร้าวด ด้วยวิธี Electrodeposition	82
ง2 ผลความลึกการคาร์บอนเนชั่นที่บริเวณรอยแตก ภายหลังการซ่อมแซมรอยแตกร้าวด ด้วยวิธี Electrodeposition เปรียบเทียบกับตัวอย่างที่มีและไม่มีรอยแตกร้าวด	83

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
1 ปฏิกริยาไฟฟ้าเคมีของการกัดกร่อนของเหล็กเสริมในคอนกรีต	5
2 ปฏิกริยาไฟฟ้าเคมีของการกัดกร่อนของเหล็กเสริมในคอนกรีตจากคลอไรด์	8
3 การประยุกต์ใช้วิธี Electrodeposition กับ โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กในทะเล	10
4 เซลล์ไฟฟ้าเคมีสำหรับแยกสารตัวอย่างออกจากสารละลาย	11
5 อัตราการตกผลึกปีตรอยแตกร้าว ที่ใช้สารละลาย $ZnSO_4$ ที่มีความกว้างรอยแตกร้าวต่างกัน	13
6 การลดลงของความเข้มข้นของคลอไรด์ไอออนบริเวณเหล็กเสริม ภายหลังการซ่อมแซมรอยแตกร้าวด้วยวิธี Electrodeposition	13
7 อัตราการตกผลึกปีตรอยแตกร้าว ที่ใช้สารละลาย $ZnSO_4$ ที่ระยะหุ้มต่างๆ กันของคอนกรีต	14
8 อัตราการตกผลึกปีตรอยแตกร้าว ที่ใช้สารละลาย $ZnSO_4$ ที่ความกว้างรอยแตกร้าวต่างกัน	14
9 ตัวอย่างคอนกรีตเสริมเหล็กขนาด 10 x 10 x 37 เซนติเมตร	20
10 การกดตัวอย่างทดสอบคอนกรีตเสริมเหล็กเพื่อทำให้เกิดรอยแตกร้าว	21
11 รอยแตกร้าวของตัวอย่างทดสอบคอนกรีตเสริมเหล็กความกว้าง ประมาณ 0.5 มิลลิเมตร	21
12 การต่อตัวอย่างและตะแกรงไทเทเนียมเข้ากับเครื่องแปลงไฟฟ้ากระแสตรง	23
13 กระบวนการตกผลึกปีตรอยแตกร้าวของคอนกรีต	27
14 เปรียบเทียบรอยแตกร้าวของตัวอย่างก่อนและหลังการทดสอบด้วยสารละลาย $MgCl_2$ ความเข้มข้น 0.2 โมลต่อลิตร ที่ใช้ศักย์ไฟฟ้าภายนอก 6 โวลต์	30
15 แสดงความลึกของการตกผลึกปีตรอยแตกร้าว จากการทดสอบด้วยสารละลาย $MgCl_2$ ความเข้มข้น 0.2 โมลต่อลิตรที่ใช้ศักย์ไฟฟ้าภายนอก 6 โวลต์	30
16 ความลึกของการตกผลึกเข้าไปในรอยแตกร้าว จากการซ่อมแซมรอยแตกร้าวโดยวิธี Electrodeposition ที่ใช้สารละลาย $MgCl_2$ โดยใช้ศักย์ไฟฟ้าภายนอก 3 โวลต์	31
17 ความลึกของการตกผลึกเข้าไปในรอยแตกร้าว จากการซ่อมแซมรอยแตกร้าวโดยวิธี Electrodeposition ที่ใช้สารละลาย $MgCl_2$ ความเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร	31

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
18 ความลึกของการตกผลึกเข้าไปในรอยแตกร้าว จากการซ่อมแซมรอยแตกร้าวโดยวิธี Electrodeposition ที่ใช้สารละลาย $MgSO_4$ โดยใช้ศักย์ไฟฟ้าภายนอก 3 โวลต์	33
19 ความลึกของการตกผลึกเข้าไปในรอยแตกร้าว จากการซ่อมแซมรอยแตกร้าวโดยวิธี Electrodeposition ที่ใช้สารละลาย $MgSO_4$ ความเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร	33
20 ความลึกของการตกผลึกเข้าไปในรอยแตกร้าว จากการซ่อมแซมรอยแตกร้าวโดยวิธี Electrodeposition ที่ใช้สารละลาย $ZnSO_4$ โดยใช้ศักย์ไฟฟ้าภายนอก 3 โวลต์	34
21 ความลึกของการตกผลึกเข้าไปในรอยแตกร้าว จากการซ่อมแซมรอยแตกร้าวโดยวิธี Electrodeposition ที่ใช้สารละลาย $ZnSO_4$ ความเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร	35
22 การตกผลึกปิดรอยแตกร้าวจากการซ่อมแซมรอยแตกร้าวโดยวิธี Electrodeposition ที่ใช้สารละลาย $ZnSO_4$ ความเข้มข้น 0.5 โมลต่อลิตร และศักย์ไฟฟ้าภายนอก 3 โวลต์	36
23 ความลึกของการตกผลึกเข้าไปในรอยแตกร้าวที่ใช้สารละลาย $MgCl_2$ ที่มีความเข้มข้นต่างกัน โดยไม่คำนึงถึงศักย์ไฟฟ้าภายนอก	37
24 ความลึกของการตกผลึกเข้าไปในรอยแตกร้าวที่ใช้สารละลาย $MgSO_4$ ที่มีความเข้มข้นต่างกัน โดยไม่คำนึงถึงศักย์ไฟฟ้าภายนอก	38
25 ความลึกของการตกผลึกเข้าไปในรอยแตกร้าวที่ใช้สารละลาย $ZnSO_4$ ที่มีความเข้มข้นต่างกัน โดยไม่คำนึงถึงศักย์ไฟฟ้าภายนอก	39
26 ภาพตัวอย่างหลังจากผ่านการซ่อมแซมที่ใช้สารละลาย $MgSO_4$ และแช่ในสารละลาย โซเดียมคลอไรด์ แสดงการเกิดสนิมและความลึกการซึมผ่านของคลอไรด์	40
27 ภาพตัวอย่างหลังจากผ่านการซ่อมแซมที่ใช้สารละลาย $ZnSO_4$ และแช่ในสารละลาย โซเดียมคลอไรด์ แสดงการเกิดสนิมและความลึกการซึมผ่านของคลอไรด์	41
28 ความลึกของการซึมผ่านของคลอไรด์ของตัวอย่างที่ผ่านการซ่อมแซมด้วยวิธี Electrodeposition เปรียบเทียบกับตัวอย่างที่ไม่ได้มีการซ่อมแซมและตัวอย่างที่ไม่มีรอยแตกร้าว	42
29 เปรียบเทียบความลึกการซึมผ่านคลอไรด์ของตัวอย่างที่ไม่มีรอยแตกร้าว ตัวอย่างที่มีรอยแตกไม่ได้ผ่านการซ่อมแซม และตัวอย่างที่มีรอยแตกที่ผ่านการซ่อมแซมด้วยวิธี Electrodeposition โดยใช้สารละลาย $MgCl_2$ ความเข้มข้น 0.2 โมลต่อลิตร	43

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
30 เปรียบเทียบความลึกการการคาร์บอนชั้นของตัวอย่างที่ไม่มีรอยแตกร้าว และตัวอย่างที่มีรอยแตกที่ผ่านการซ่อมแซมโดยใช้สารละลาย $MgCl_2$ ความเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร	44
31 ความลึกของการการคาร์บอนชั้นของตัวอย่างที่ผ่านการซ่อมแซมด้วยวิธี Electrodeposition เปรียบเทียบกับตัวอย่างที่ไม่ได้มีการซ่อมแซมและ ตัวอย่างที่ไม่มีรอยแตกร้าว	45
ภาพผนวกที่	
ข1 ความลึกของการตกผลึกเข้าไปในรอยแตกร้าว จากการใช้สารละลาย $MgCl_2$ โดยให้ศักย์ไฟฟ้าภายนอก 3 โวลต์	64
ข2 ความลึกของการตกผลึกเข้าไปในรอยแตกร้าว จากการใช้สารละลาย $MgCl_2$ โดยให้ศักย์ไฟฟ้าภายนอก 6 โวลต์	65
ข3 ความลึกของการตกผลึกเข้าไปในรอยแตกร้าว จากการใช้สารละลาย $MgCl_2$ โดยให้ศักย์ไฟฟ้าภายนอก 9 โวลต์	65
ข4 ความลึกของการตกผลึกเข้าไปในรอยแตกร้าว จากการใช้สารละลาย $MgSO_4$ โดยให้ศักย์ไฟฟ้าภายนอก 3 โวลต์	66
ข5 ความลึกของการตกผลึกเข้าไปในรอยแตกร้าว จากการใช้สารละลาย $MgSO_4$ โดยให้ศักย์ไฟฟ้าภายนอก 6 โวลต์	67
ข6 ความลึกของการตกผลึกเข้าไปในรอยแตกร้าว จากการใช้สารละลาย $MgSO_4$ โดยให้ศักย์ไฟฟ้าภายนอก 9 โวลต์	67
ข7 ความลึกของการตกผลึกเข้าไปในรอยแตกร้าว จากการใช้สารละลาย $ZnSO_4$ โดยให้ศักย์ไฟฟ้าภายนอก 3 โวลต์	68
ข8 ความลึกของการตกผลึกเข้าไปในรอยแตกร้าว จากการใช้สารละลาย $ZnSO_4$ โดยให้ศักย์ไฟฟ้าภายนอก 6 โวลต์	69

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่	หน้า
ข9 ความลึกของการตกผลึกเข้าไปในรอยแตกร้าว จากการใช้สารละลาย ZnSO_4 โดยให้ศักย์ไฟฟ้าภายนอก 9 โวลต์	69
ข10 ความลึกของการตกผลึกเข้าไปในรอยแตกร้าว จากการใช้สารละลาย MgCl_2 ที่มีความเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร	70
ข11 ความลึกของการตกผลึกเข้าไปในรอยแตกร้าว จากการใช้สารละลาย MgCl_2 ที่มีความเข้มข้น 0.2 โมลต่อลิตร	71
ข12 ความลึกของการตกผลึกเข้าไปในรอยแตกร้าว จากการใช้สารละลาย MgCl_2 ที่มีความเข้มข้น 0.5 โมลต่อลิตร	71
ข13 ความลึกของการตกผลึกเข้าไปในรอยแตกร้าว จากการใช้สารละลาย MgSO_4 ที่มีความเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร	72
ข14 ความลึกของการตกผลึกเข้าไปในรอยแตกร้าว จากการใช้สารละลาย MgSO_4 ที่มีความเข้มข้น 0.2 โมลต่อลิตร	73
ข15 ความลึกของการตกผลึกเข้าไปในรอยแตกร้าว จากการใช้สารละลาย MgSO_4 ที่มีความเข้มข้น 0.5 โมลต่อลิตร	73
ข16 ความลึกของการตกผลึกเข้าไปในรอยแตกร้าว จากการใช้สารละลาย ZnSO_4 ที่มีความเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร	74
ข17 ความลึกของการตกผลึกเข้าไปในรอยแตกร้าว จากการใช้สารละลาย ZnSO_4 ที่มีความเข้มข้น 0.2 โมลต่อลิตร	75
ข18 ความลึกของการตกผลึกเข้าไปในรอยแตกร้าว จากการใช้สารละลาย ZnSO_4 ที่มีความเข้มข้น 0.5 โมลต่อลิตร	75
ข19 ความลึกของการตกผลึกเข้าไปในรอยแตกร้าว จากการใช้สารละลาย MgCl_2 โดยไม่คิดผลเนื่องจากศักย์ไฟฟ้า	76
ข20 ความลึกของการตกผลึกเข้าไปในรอยแตกร้าว จากการใช้สารละลาย MgSO_4 โดยไม่คิดผลเนื่องจากศักย์ไฟฟ้า	77
ข21 ความลึกของการตกผลึกเข้าไปในรอยแตกร้าว จากการใช้สารละลาย ZnSO_4 โดยไม่คิดผลเนื่องจากศักย์ไฟฟ้า	77

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่	หน้า
ค1 ความลึกการซึมผ่านของคลอไรด์ที่บริเวณรอยแตก ภายหลังการซ่อมแซม รอยแตกร้าวด้วยวิธี Electrodeposition	80
ง1 ความลึกการคาร์บอนเนชั่นที่บริเวณรอยแตก ภายหลังการซ่อมแซมรอยแตกร้าวด้วยวิธี Electrodeposition	84
จ1 การเตรียมตัวอย่างให้มีรอยแตกร้าวดำเนินไปซ่อมแซม	86
จ2 การซ่อมแซมรอยแตกร้าวด้วย Electrodeposition	87
จ3 ตัวอย่างที่ผ่านการซ่อมแซมด้วยวิธี Electrodeposition โดยใช้สารละลาย $MgCl_2$ ความเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร ศักย์ไฟฟ้า 3 โวลต์ เป็นเวลา 28 วัน	88
จ4 ตัวอย่างที่ผ่านการซ่อมแซมด้วยวิธี Electrodeposition โดยใช้สารละลาย $MgCl_2$ ความเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร ศักย์ไฟฟ้า 6 โวลต์ เป็นเวลา 28 วัน	89
จ5 ตัวอย่างที่ผ่านการซ่อมแซมด้วยวิธี Electrodeposition โดยใช้สารละลาย $MgSO_4$ ความเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร ศักย์ไฟฟ้า 3 โวลต์ เป็นเวลา 28 วัน	90
จ6 ตัวอย่างที่ผ่านการซ่อมแซมด้วยวิธี Electrodeposition โดยใช้สารละลาย $MgSO_4$ ความเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร ศักย์ไฟฟ้า 6 โวลต์ เป็นเวลา 28 วัน	91
จ7 ตัวอย่างที่ผ่านการซ่อมแซมด้วยวิธี Electrodeposition โดยใช้สารละลาย $ZnSO_4$ ความเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร ศักย์ไฟฟ้า 6 โวลต์ เป็นเวลา 28 วัน	92
จ8 ตัวอย่างที่ผ่านการซ่อมแซมด้วยวิธี Electrodeposition โดยใช้สารละลาย $ZnSO_4$ ความเข้มข้น 0.5 โมลต่อลิตร ศักย์ไฟฟ้า 6 โวลต์ เป็นเวลา 28 วัน	93
จ9 การทดสอบการซึมผ่านของคลอไรด์ของตัวอย่างที่ผ่านการซ่อมแซม รอยแตกร้าวด้วยวิธี Electrodeposition แล้ว	94
จ10 การทดสอบการคาร์บอนเนชั่นของตัวอย่างที่ผ่านการซ่อมแซม รอยแตกร้าวด้วยวิธี Electrodeposition แล้ว	95

การศึกษาความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้วิธี Electrodeposition ในการป้องกันการเกิดสนิมของเหล็กเสริมและการซ่อมแซมรอยแตกร้าวของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก คอนกรีตในประเทศไทย

คำนำ

ความเสียหายของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก มีสาเหตุจากการเกิดสนิมของเหล็กเสริมเป็นสำคัญ โดยที่การเกิดสนิมของเหล็กเสริมนั้น มีปัจจัยหลายอย่างเข้ามาเกี่ยวข้อง เช่น ความชื้น การสัมผัสกับอากาศของเหล็กเสริม อายุการใช้งานของคอนกรีต และสภาพแวดล้อมของคอนกรีต โดยเฉพาะอย่างยิ่งกับโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีรอยแตกร้าว ซึ่งจะทำให้การเกิดสนิมของเหล็กเสริมรวดเร็วและรุนแรงยิ่งขึ้น นอกจากนี้ การจะบูรณะซ่อมแซมโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสียหาย ให้มีความคงทนดังเดิมนั้น จะต้องเสียค่าใช้จ่ายจำนวนมาก ดังนั้น จึงเป็นเรื่องสำคัญที่จะต้องมีการป้องกันไม่ให้เหล็กเสริมในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กเกิดสนิม เพื่อลดค่าใช้จ่ายในการซ่อมแซม และช่วยยืดอายุการใช้งานของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก การที่จะป้องกันไม่ให้เกิดสนิมของเหล็กเสริมนั้น สิ่งสำคัญคือ การทำให้เหล็กเสริมอยู่ในสภาวะที่เหมาะสม โดยการลดปัจจัยเสี่ยงที่จะทำให้เกิดสนิมของเหล็กเสริม

ในงานวิจัยนี้ เป็นการศึกษาการประยุกต์ใช้ศักย์ไฟฟ้า เพื่อลดการเกิดสนิมของเหล็กเสริม และซ่อมแซมรอยแตกร้าวของคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยใช้วิธีการพอกพูนสารด้วยไฟฟ้า (Electrodeposition) ซึ่งวิธีนี้เป็นวิธีทางเคมีไฟฟ้า โดยจะใช้กระแสไฟฟ้าช่วยในการป้องกันการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีรอยแตกร้าว เพื่อให้คอนกรีตเสริมเหล็กมีความคงทนและมีอายุการใช้งานเพิ่มมากขึ้น

Electrodeposition เป็นวิธีการหนึ่งที่ใช้ในการลดการเกิดสนิมของเหล็กเสริมและการซ่อมแซมรอยแตกร้าวของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ได้ผลดี โดยเฉพาะอย่างยิ่งกับโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่อยู่ใต้ทะเล มีหลักการคือ ทำให้สารประกอบในน้ำทะเลแตกตัวเป็นไอออน โดยการจ่ายกระแสไฟฟ้า และทำให้อิออนของโลหะไปตกผลึกปิดรอยแตกร้าวและเคลือบผิวของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก ช่วยป้องกันก๊าซหรือสารละลายไม่ให้เข้าสู่เนื้อคอนกรีต ในประเทศญี่ปุ่น ได้มีแนวคิดในการนำวิธีการนี้มาประยุกต์ใช้กับโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่อยู่บนพื้นดิน โดยการใช้สารละลายที่เตรียมขึ้นเองแทนที่การใช้น้ำทะเลตามธรรมชาติ ซึ่ง

อยู่ในขั้นตอนของการศึกษาและวิจัย ยังไม่มีการนำไปใช้งานจริง และการศึกษาที่ผ่านมา ส่วนใหญ่เป็นการศึกษาในห้องปฏิบัติการที่มีการควบคุมอุณหภูมิ แต่สำหรับในงานวิจัยนี้ ไม่ได้มีการควบคุมอุณหภูมิ เพื่อให้การนำไปใช้งานจริง มีภาวะหรือสภาพที่ใกล้เคียงกับการทดสอบในห้องปฏิบัติการมากที่สุด

Electrodeposition เป็นวิธีที่อาศัยการเคลื่อนที่ของไอออนของโลหะจากขั้วไฟฟ้าบวก ไปสู่ขั้วไฟฟ้าลบ เป็นสำคัญ ซึ่งการเคลื่อนที่ของไอออนนี้ ขึ้นอยู่กับหลายๆ ปัจจัย โดยเฉพาะปัจจัยด้านอุณหภูมิ เนื่องจากการเคลื่อนที่ของไอออนในสารละลายขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของสารละลายเป็นสำคัญ ดังนั้น การที่จะนำวิธี Electrodeposition มาประยุกต์ใช้ในการลดการเกิดสนิมของเหล็กเสริมและการซ่อมแซมรอยแตกร้าวของคอนกรีตเสริมเหล็กนั้น จำเป็นต้องผ่านการศึกษาในเบื้องต้น เพื่อที่จะได้เลือกชนิดและความเข้มข้นของสารละลาย ศักย์ไฟฟ้าภายนอก และระยะเวลาการจ่ายศักย์ไฟฟ้า ที่เหมาะสมที่สุดในการป้องกันการเกิดสนิมของเหล็กเสริม และการซ่อมแซมรอยแตกร้าวในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ได้ผลดีมากที่สุด

วัตถุประสงค์

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยครั้งนี้คือ

1. เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้วิธี Electrodeposition ซึ่งเป็นวิธีทางเคมีไฟฟ้า ในการลดการเกิดสนิมของเหล็กเสริม และการปิดรอยแตกร้าวของคอนกรีตเสริมเหล็กบนพื้นดิน
2. เพื่อศึกษาหาชนิดของสารละลาย ความเข้มข้นของสารละลาย ขนาดของศักย์ไฟฟ้า และระยะเวลาการจ่ายศักย์ไฟฟ้าที่เหมาะสม สำหรับวิธี Electrodeposition ในการลดการเกิดสนิมของเหล็กเสริม และการปิดรอยแตกร้าวของคอนกรีตเสริมเหล็กบนพื้นดิน
3. เพื่อเป็นแนวทางสำหรับการวิจัยในการใช้วิธี Electrodeposition เพื่อลดการเกิดสนิมของเหล็กเสริม และการปิดรอยแตกร้าวของคอนกรีตเสริมเหล็ก ต่อไป

ขอบเขตการศึกษา

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาเพื่อหาเงื่อนไขที่ดีที่สุดสำหรับการใช้วิธี Electrodeposition ในการลดการเกิดสนิมของเหล็กเสริม และการปิดรอยแตกร้าวของคอนกรีตเสริมเหล็กบนพื้นดิน โดยใช้สารละลายของ $MgCl_2$, $MgSO_4$ และ $ZnSO_4$ ที่มีความเข้มข้น 0.1, 0.2 และ 0.5 โมลต่อลิตรแทนการใช้น้ำทะเล และให้ศักย์ไฟฟ้าภายนอกขนาด 3, 6 และ 9 โวลต์ เป็นเวลา 28 วัน แก่คอนกรีตเสริมเหล็กที่ผ่านการทำให้มีรอยแตกร้าวด้วยการกดแบบคาน ขนาดความกว้างรอยแตกประมาณ 0.5 มิลลิเมตร โดยวัดผลการทดลองจากความลึกของการตกผลึกปิดรอยแตกร้าว การต้านทานการเกิดคาร์บอนขึ้น และความต้านทานการซึมผ่านของคลอไรด์ที่บริเวณรอยแตกร้าว

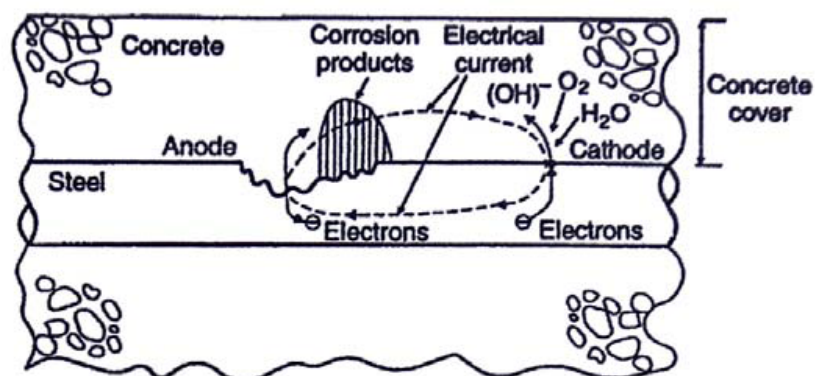
การตรวจเอกสาร

เป็นที่ทราบกันดีว่า การบำรุงรักษาและการบูรณะซ่อมแซมโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสียหาย ให้มีความแข็งแรงคงเดิมนั้นต้องเสียค่าใช้จ่ายมหาศาล ในประเทศแถบยุโรปงบประมาณค่าก่อสร้างในแต่ละปีจะประกอบไปด้วยงบประมาณการบำรุงรักษา และบูรณะซ่อมแซมโครงสร้าง ไม่ต่ำกว่างบประมาณที่ใช้ในการสร้างโครงสร้างใหม่ ซึ่งสถานการณ์นี้ อาจยังไม่ประสบกับประเทศไทยที่มีการเริ่มก่อสร้างโครงสร้างเป็นจำนวนมากเมื่อไม่นานมานี้ แต่ในอนาคตประเทศไทยก็ต้องประสบกับสถานการณ์นี้เช่นเดียวกัน ซึ่งวิศวกร

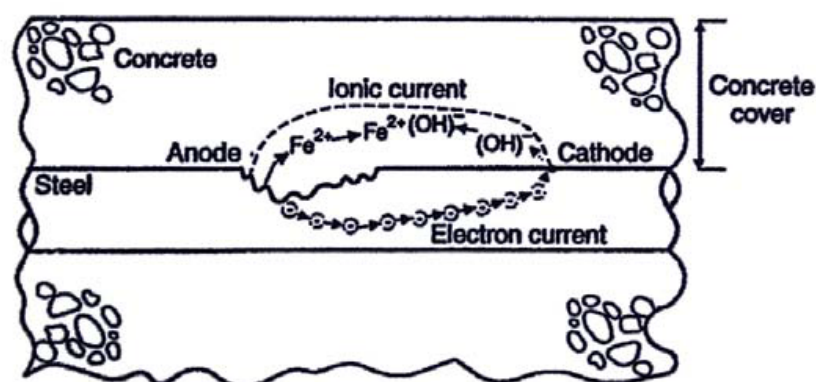
ในประเทศไทยยังขาดความรู้ความเข้าใจในด้านการคงทนของคอนกรีต ดังนั้นการศึกษาวิจัยในด้านการคงทนของคอนกรีตเป็นสิ่งสำคัญในปัจจุบัน เนื่องจากปัญหาด้านความคงทนของคอนกรีตอาจเกิดขึ้นกับประเทศไทยในอนาคตอันใกล้ (คณะอนุกรรมการคอนกรีตและวัสดุ วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย, 2543) การเกิดสนิมของเหล็กเสริม เป็นหนึ่งในความเสียหายหลักที่เกิดขึ้นกับโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก ซึ่งผลกระทบโดยรวมของการเกิดสนิมเหล็กคือ กำลังรับแรงของโครงสร้างลดลงเนื่องจากพื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริมน้อยลง โดยเฉพาะความต้านทานความล้า (Fatigue strength) และความสามารถในการแอ่นตัวหรือเปลี่ยนรูปร่าง (Elongation ability) ของโครงสร้างก็ลดลงด้วย นอกจากนี้การเกิดสนิมยังทำให้เกิดการแตกร้าวและหลุดออกของคอนกรีตหุ้มภายนอก เนื่องจากปริมาตรที่เพิ่มขึ้นของเหล็กเสริมจากการเกิดสนิม จะทำให้เกิดแรงดึงในเนื้อคอนกรีต ซึ่งทำให้คอนกรีตหุ้มที่มีความหนาน้อยนั้นเกิดการแตกร้าว เป็นผลให้เกิดความเสียหายกับโครงสร้างมากยิ่งขึ้น (Scannell and Sohahghpurwala, 1993)

การกัดกร่อนและการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีต

การกัดกร่อนของเหล็กเสริมในคอนกรีตเป็นกระบวนการทางเคมีไฟฟ้า ประกอบด้วยปฏิกิริยาอะโนดิก (Anodic reaction) และปฏิกิริยาแคโทดิก (Cathodic reaction) กระบวนการเกิดสนิมเริ่มจากการมีความชื้นเพียงพอที่จะทำให้อะตอมเหล็กเกิดการสูญเสียอิเล็กตรอนกลายเป็น Fe^{2+} ดังสมการที่ 1 ละลายอยู่ในน้ำรอบๆ เหล็กเสริมเรียกว่าบริเวณนี้เป็นขั้วแอโนด (Anode) และอิเล็กตรอนนี้จะสะสมอยู่บริเวณผิวหน้าของเหล็กทำให้เกิดศักย์ไฟฟ้าขึ้น และส่วนของเหล็กเสริมที่ไม่มีการแตกตัวจะมีศักย์ไฟฟ้าต่ำกว่าและทำหน้าที่เป็นขั้วแคโทด (Cathode) ดังภาพที่ 1 (ก) อิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นที่ขั้วแอโนดจะเคลื่อนที่ไปตามเหล็กเสริมไปยังบริเวณที่มีศักย์ไฟฟ้าต่ำกว่า และเข้าทำปฏิกิริยากับน้ำ (H_2O) และออกซิเจน (O_2) เกิดเป็นไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) ดังสมการที่ 2 หลังจากนั้นจะเกิดการเคลื่อนที่ของประจุไฟฟ้าทั้งภายในและภายนอกเหล็กเสริม กระแสภายในเป็นการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจากแอโนดไปแคโทด ส่วนกระแสภายนอกเป็นการเคลื่อนที่ของ Fe^{2+} และ OH^- ผ่านสารละลายในช่องว่างของคอนกรีต ซึ่ง Fe^{2+} จะเคลื่อนที่จากแอโนดสู่แคโทด และ OH^- จะเคลื่อนที่จากแคโทดไปสู่แอโนด ดังภาพที่ 1 (ข) โดยที่มีสารละลายในช่องว่างของคอนกรีต ช่วยทำให้ปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าครบวงจรและเกิดการกัดกร่อนขึ้น (Bentur *et al.*, 1997) ซึ่งการเคลื่อนที่ของ Fe^{2+} และ OH^- เข้าหากันเกิดผลเป็น $Fe(OH)_2$ (ferrous hydroxide) ดังสมการที่ 3 ซึ่งสามารถทำปฏิกิริยากับ O_2 ต่อได้ เกิดเป็นสนิมเหล็ก Fe_2O_3 (red rust) และ Fe_3O_4 (black rust) ดังสมการที่ 4 และ 5 ซึ่งผลิตภัณฑ์สนิมที่เกิดขึ้นจากการกัดกร่อนนี้ มีปริมาณมากกว่าเหล็กก่อนเกิดปฏิกิริยา 4 ถึง 6 เท่า (Nielsen, 1985) ทำให้เกิดการแตกร้าวและหลุดออกของคอนกรีตหุ้ม



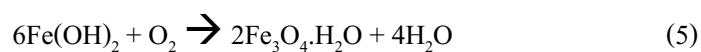
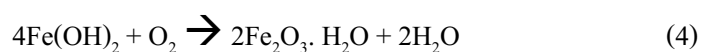
(ก) ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นที่ขั้วแอโนดและแคโทด



(ข) การเคลื่อนที่ของประจุไฟฟ้าทั้งภายในและภายนอกเหล็กเสริม

ภาพที่ 1 ปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าของการกัดกร่อนของเหล็กเสริมในคอนกรีต

ที่มา: Bentur *et al.* (1997)

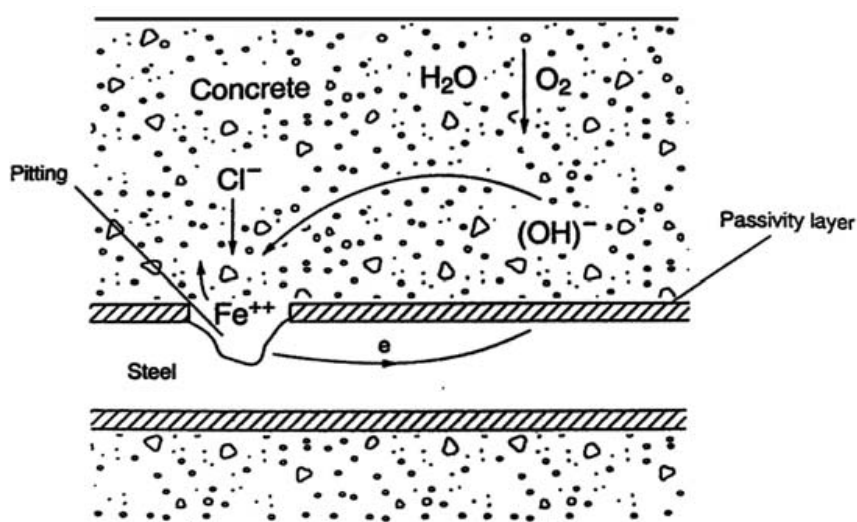


โดยทั่วไปแล้ว เหล็กเป็นโลหะที่เกิดการกัดกร่อนได้เองในธรรมชาติและการกัดกร่อนนี้เกิดขึ้นตลอดเวลาในบริเวณที่มีความชื้น (ชัยยุทธ และ เลิศณรงค์, 2543) แต่สำหรับเหล็กเสริมที่อยู่ในคอนกรีตเสริมเหล็กนั้น จะอยู่ในสถานะที่ไม่เกิดสนิม เนื่องจากมี Passivation film ที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration) ของซีเมนต์กับน้ำในระหว่างการพัฒนาโครงสร้างของคอนกรีต มีความเป็นด่างสูง มีค่า pH ประมาณ 13 ซึ่งสามารถป้องกันการเกิดสนิมของเหล็กเสริมได้ (Bentur *et al.*, 1997; Sohaghpurwala and Scannell, 1994) เนื่องจากในสถานะของการเป็นด่างสูง เหล็กจะไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาอะโนดิกได้ นั่นคือเหล็กจะไม่แตกตัวเป็นไอออน ทำให้ปฏิกิริยาการเกิดสนิมไม่สามารถเกิดขึ้นได้ อย่างไรก็ตาม โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กทั่วไปนั้น มักอยู่ในสภาพแวดล้อมที่อาจสัมผัสกับสารเคมี สภาพที่เป็นกรด หรือสภาพแวดล้อมที่มีความเสี่ยงต่อการเกิดสนิม เช่น โครงสร้างที่อยู่บริเวณชายทะเลนั้น ความเข้มข้นของคลอไรด์จะเป็นตัวทำลายสภาพความเป็นด่างของคอนกรีตเป็นต้น ซึ่งเป็นตัวเร่งให้เกิดสนิมของเหล็กเสริมเร็วขึ้น

การเกิดสนิมของเหล็กเสริมในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กนั้น เกิดได้จากหลายสาเหตุด้วยกัน โดยที่สาเหตุหลักของการเกิดสนิมคือ การเกิดรอยแตกร้าวของโครงสร้าง (Pullar-Strecker, 1987) ที่มักเกิดจากการหดตัวในขณะที่คอนกรีตแข็งตัว (สำหรับโครงสร้างขนาดใหญ่) เนื่องจากความแตกต่างของอุณหภูมิในเนื้อคอนกรีตกับอุณหภูมิบรรยากาศ รอยต่อของคอนกรีตจากการก่อสร้าง สภาพแวดล้อม หรือเกิดจากสถานะการใช้งาน เป็นต้น ซึ่ง Mindess *et al.* (2003) กล่าวว่า รอยแตกร้าวของคอนกรีตไม่มีผลกับความสามารถในการรับแรงของโครงสร้าง แต่มีผลกับความคงทนของคอนกรีต เนื่องจากโดยปกติแล้ว น้ำและอากาศสามารถซึมผ่านเนื้อคอนกรีตไปถึงเหล็กเสริมได้ ในปริมาณที่น้อย ขึ้นอยู่กับความทึบของเนื้อคอนกรีต แต่การมีรอยแตกร้าวของโครงสร้างจะเป็นการเร่งให้น้ำและออกซิเจน เข้าไปถึงบริเวณเหล็กเสริมได้รวดเร็วและมากยิ่งขึ้น ทำให้การเกิดสนิมของเหล็กเสริมรวดเร็วและรุนแรงมากขึ้น และอีกสาเหตุหนึ่งของการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก คือ การสูญเสียสภาพการเป็นด่าง (Depassivation) เนื่องจากสภาพแวดล้อม โดยเฉพาะการคาร์บอนขึ้น และการซึมผ่านของคลอไรด์ไอออนในสารละลายเข้าสู่ช่องว่างในคอนกรีต ทั้งสองสาเหตุนี้ ถ้ามีความเข้มข้นมากพอ จะทำให้สภาพความเป็นด่างของคอนกรีตลดลงถึงระดับวิกฤต หรือมีค่า pH ต่ำกว่า 9 ถึง 10 ซึ่งสาเหตุนี้ นำไปสู่การเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตได้

ผลกระทบของคลอไรด์ในคอนกรีต

โดยธรรมชาติเหล็กเสริมในคอนกรีตจะมี Passivation film ปกป้องเหล็กเสริมจากการเกิดสนิม ซึ่ง Passive layer ที่เคลือบที่ผิวเหล็กเสริมนี้ ทำให้อัตราการแพร่ของออกซิเจนและน้ำมาสู่ผิวเหล็กเสริมลดลง ทำให้อัตราการกัดกร่อนลดลงด้วย โดย Passive layer มีเสถียรภาพอยู่ได้ในสภาวะที่มีความเป็นด่างสูง ซึ่งเป็นธรรมชาติของคอนกรีตที่มี pH อยู่ในช่วง 12 ถึง 13 คอนกรีตจึงเป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติป้องกันเหล็กเสริมจากการเกิดสนิมตามธรรมชาติ คลอไรด์เป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เกิดการกัดกร่อนของเหล็กเสริมได้ โดยการกัดกร่อนจะเริ่มขึ้นเมื่อคลอไรด์ไอออนมีความเข้มข้นมากพอ (Threshold concentration) ที่ผิวหน้าของเหล็กเสริม (Neville, 1997) ซึ่งจะทำให้ค่า pH ลดลงจนถึงระดับวิกฤต ทำให้สภาพการเป็นด่างของคอนกรีตที่ป้องกันการเกิดสนิมของเหล็กเสริมถูกทำลาย (Depassivation) ถ้ามีน้ำและออกซิเจนเพียงพอก็จะทำให้เหล็กเสริมเกิดสนิมได้ ดังภาพที่ 2 โดยที่ คลอไรด์ในคอนกรีตมีแหล่งที่มาได้จากทั้งภายในและภายนอก แต่ปัญหาของคลอไรด์ที่กระทบต่อความทนทานของคอนกรีตนั้น ส่วนมากเป็นคลอไรด์ที่มาจากแหล่งภายนอกเข้าสู่เนื้อคอนกรีตในช่วงการใช้งาน เช่น จากน้ำทะเล พื้นดิน หรือเกลือที่ใช้ละลายน้ำแข็งในประเทศที่มีอากาศหนาวเย็น เป็นต้น



ภาพที่ 2 ปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าของการกัดกร่อนของเหล็กเสริมในคอนกรีตจากคลอไรด์
ที่มา: Neville (1997)

ผลกระทบของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในคอนกรีต

การแพร่ของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) เข้าสู่เนื้อคอนกรีตเป็นอีกสาเหตุหนึ่งที่ทำให้ค่า pH ของคอนกรีตลดลง โดยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์นี้จะทำปฏิกิริยากับน้ำ (H_2O) และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) ที่บริเวณใกล้ผิวหน้าของคอนกรีต ให้ผลเป็นผลิตภัณฑ์คาร์บอเนต เรียกว่าการคาร์บอเนชัน (Carbonation) ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจากกระบวนการนี้คือ แคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) จะช่วยอุดช่องว่างส่วนหนึ่งในคอนกรีต ทำให้ความพรุนของคอนกรีตในบริเวณที่เกิดการคาร์บอเนชันลดลง ช่วยให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์แพร่เข้าไปในคอนกรีตได้ยากขึ้น แต่ผลกระทบสำคัญของการคาร์บอเนชันคือ ค่าความแตกต่างของคอนกรีตลดลงเนื่องจากแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) ถูกนำไปใช้ในปฏิกิริยาการคาร์บอเนชัน ทำให้ค่า pH ของคอนกรีตจากประมาณ 13 ลดลงเหลือเท่ากับหรือต่ำกว่า 9 (Glasser, 1986) หรืออยู่ในระดับวิกฤต จะทำให้เกิดสนิมของเหล็กเสริม ซึ่งเป็นผลเสียสำหรับคอนกรีตเสริมเหล็กมากกว่าผลที่ได้จากการที่คอนกรีตมีความพรุนลดลง

อย่างไรก็ตาม อัตราการแพร่ของคลอไรด์ไอออนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เข้าสู่คอนกรีตนั้น เกิดขึ้นได้มากหรือน้อย ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของคลอไรด์ไอออนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และความทึบของเนื้อคอนกรีตเป็นสำคัญ ดังนั้นถ้าเราออกแบบให้คอนกรีตเสริมเหล็กมีความทึบสูง หรือมีความพรุนต่ำ จะเป็นการช่วยลดการแพร่ของคลอไรด์ไอออนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เข้าสู่คอนกรีต ซึ่งเป็นสาเหตุที่นำไปสู่การเกิดสนิมของเหล็กเสริม และความเสียหายของโครงสร้างได้ แต่สำหรับโครงสร้างที่มีรอยแตกร้าว คลอไรด์และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ปริมาณมาก สามารถเข้าสู่คอนกรีตได้ง่ายที่บริเวณรอยแตกร้าว ทำให้อัตราการเกิดสนิมเป็นไปอย่างรวดเร็ว ส่งผลให้โครงสร้างได้รับความเสียหาย และมีอายุการใช้งานน้อยลง

วิธีการหนึ่งที่จะช่วยป้องกันการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตที่มีรอยแตกร้าวได้ คือ การใช้วิธีทางเคมีไฟฟ้า (Electrochemical) โดยใช้หลักการของกระแสไฟฟ้า และการเคลื่อนตัวของไอออนในสารละลาย ซึ่งการประยุกต์ใช้วิธีทางเคมีไฟฟ้า ในการป้องกันการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตนั้น มีหลายวิธี เช่น วิธี Electrodeposition, Cathodic protection, Desalination และ Realkalization เป็นต้น (Otsuki *et al.*, 1995) ซึ่งแต่ละวิธีก็ใช้สำหรับวัตถุประสงค์ที่แตกต่างกันออกไป โดยในงานวิจัยนี้ จะเป็นการศึกษาการลดการเกิดสนิมของเหล็กเสริม และการซ่อมแซมรอยแตกร้าวของคอนกรีตเสริมเหล็ก ด้วยวิธี Electrodeposition ซึ่งถูกพัฒนามาจากเทคนิคการแยกสารละลายด้วยไฟฟ้า

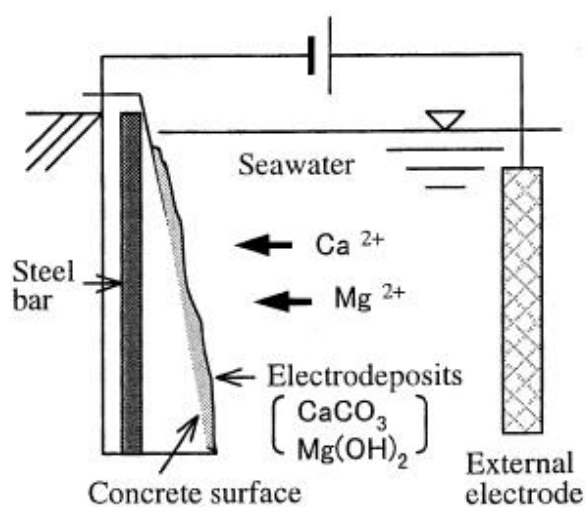
การซ่อมแซมรอยแตกร้าวของคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยวิธี Electrodeposition

วิธี Electrodeposition เป็นวิธีการหนึ่งที่ใช้ลดการเกิดสนิมของเหล็กเสริมและการซ่อมแซมรอยแตกร้าวของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ได้ผลดี โดยเฉพาะอย่างยิ่ง กับโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่อยู่ใต้ทะเลจากการศึกษาของ Otsuki *et al.* (1995) พบว่า การใช้ Electrodeposition ในการป้องกันการเกิดสนิมของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่อยู่ใต้ทะเลนั้น วิธีการนี้จะทำให้แคลเซียมไอออน (Ca^{2+}) และ/หรือ แมกนีเซียมไอออน (Mg^{2+}) ซึ่งเป็นไอออนของโลหะ ที่แตกตัวจากสารประกอบที่มีอยู่ในน้ำทะเล เกิดการตกผลึกเป็น แคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) และแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Mg}(\text{OH})_2$) ตามลำดับ ที่ผิวนอกและรอยแตกร้าวของคอนกรีต ดังภาพที่ 3 ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นนี้ เป็นสารประกอบอนินทรีย์ที่มีความสามารถในการละลายน้ำได้น้อยมาก และยังช่วยเพิ่มความทึบน้ำให้กับคอนกรีต จึงได้มีแนวคิดที่จะนำวิธีนี้มาประยุกต์ใช้กับโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่อยู่บนพื้นดิน โดยการใช้สารละลายทางเคมีที่เตรียมขึ้นเองแทนที่การใช้น้ำทะเลตามธรรมชาติ

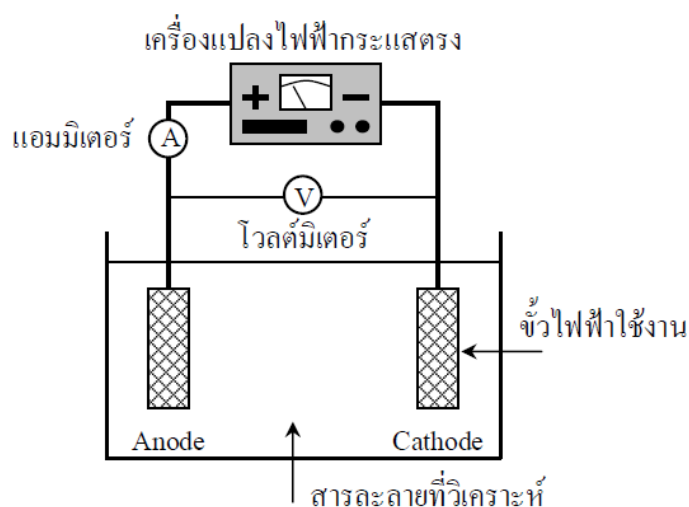
วิธี Electrodeposition เป็นวิธีที่จะช่วยซ่อมแซมรอยแตกร้าวเพื่อลดการเกิดสนิมของเหล็กเสริมได้ ซึ่งเป็นเทคนิคหนึ่งของการวิเคราะห์ทางเคมีไฟฟ้า เพื่อแยกสารตัวอย่างออกจากสารละลาย โดยมีหลักการที่ใช้วิเคราะห์คือ อาศัยพลังงานไฟฟ้าจากแหล่งพลังงานภายนอก เพื่อให้สารตัวอย่างที่ต้องการทำการวิเคราะห์แตกตัวออกจากสารละลายเป็นไอออน และให้ผลของการเกิดปฏิกิริยาเป็นของแข็ง (ผลึกของสารตัวอย่างที่ทำการวิเคราะห์) สะสมอยู่ที่ขั้วไฟฟ้า ซึ่งวิธีนี้ประกอบด้วยกลไกสำคัญ 2 อย่าง คือ กลไกแรกเป็นการแยกสารตัวอย่างออกจากสารละลายด้วยไฟฟ้า เรียกว่าการแยกสารละลายด้วยไฟฟ้า (Electroreparation) หลังจากนั้นจะเป็นกลไกการสะสมของสารตัวอย่างที่ขั้วไฟฟ้า เรียกว่าการพอกพูนสารด้วยไฟฟ้า (Electrodeposition) การจัดเซลล์ไฟฟ้าแบบนี้เป็นแบบเซลล์อิเล็กโตรไลต์ ซึ่งจะเกิดปฏิกิริยาเคมีได้ เมื่อมีการให้ศักย์ไฟฟ้าหรือกระแสไฟฟ้าจากภายนอกเข้าสู่เซลล์ (ลาวัลย์, 2543) ซึ่งแตกต่างกับการเกิดสนิมของเหล็กเสริม ที่สามารถเกิดปฏิกิริยาได้เองโดยไม่ต้องใช้พลังงานจากภายนอก หรือเรียกเซลล์ชนิดนี้ว่าเป็น เซลล์กัลวานิก และ เพียศรี (2539) กล่าวว่า เมื่อให้พลังงานในรูปศักย์ไฟฟ้าจากภายนอกที่สูงกว่าศักย์แตกตัวของสารละลาย จะทำให้สารประกอบในสารละลายเกิดการแตกตัวเป็นไอออนไฟฟ้า โดยไอออนบวกซึ่งเป็นไอออนของโลหะจะเกิดการเคลื่อนที่จากขั้วไฟฟ้าบวกเข้าสู่ขั้วไฟฟ้าลบ ซึ่งเป็นขั้วไฟฟ้าใช้งาน และทำให้เกิดการสะสมหรือตกผลึกของโลหะที่ขั้วไฟฟ้านี้ แสดงดังภาพที่ 4 วิธีการนี้ โลหะที่ใช้เป็นขั้วไฟฟ้าบวกจะต้องเป็นโลหะที่มีความเฉื่อยสูง ไม่ว่องไวในการเกิดปฏิกิริยา ซึ่งทำหน้าที่เป็นทางให้อิเล็กตรอนไหลผ่านเข้าหรือออกได้ โดยไม่มีปฏิกิริยากับไอออนในสารละลายนั้นๆ (อินทรา, 2538) เพื่อไม่ให้เกิดการละลายของขั้วไฟฟ้าบวกที่เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน

ในขณะที่ สุมาลี (2531) กล่าวว่า วิธีการแยกสารละลายด้วยไฟฟ้านี้ถูกใช้ประโยชน์ทางเคมี เพื่อการวิเคราะห์หาปริมาณของโลหะที่ผสมอยู่ในสารละลาย โดยมีปัจจัยหลักที่มีความเกี่ยวข้องอยู่หลายปัจจัยได้แก่

ศักย์ไฟฟ้าที่ให้แก่สารละลาย สารละลายหรือสารประกอบเชิงซ้อนที่วิเคราะห์ ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า และอุณหภูมิ ดังนั้น การนำวิธี Electrodeposition มาประยุกต์ใช้ในการป้องกันการเกิดสนิมของเหล็กเสริมและการซ่อมแซมรอยแตกร้าวของคอนกรีตเสริมเหล็กในประเทศไทยนั้น ต้องคำนึงถึงอุณหภูมิด้วย เนื่องจากวิธีนี้จะต้องอาศัยการเคลื่อนที่ของไอออนที่มีอยู่ในสารละลาย ไปตกผลึกปิดรอยร้าวที่มีอยู่บนพื้นผิวของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยอาศัยการนำของไฟฟ้า ซึ่งโดยปกติ การเคลื่อนที่ของไอออนจะแปรเปลี่ยนไปตามอุณหภูมิของสถานะแวดล้อม การศึกษาที่ผ่านมาในประเทศญี่ปุ่น ส่วนใหญ่เป็นการศึกษาในห้องปฏิบัติการที่มีการควบคุมอุณหภูมิ แต่สำหรับในงานวิจัยนี้ ไม่ได้มีการควบคุมอุณหภูมิ เพื่อให้การนำไปใช้งานจริง มีภาวะหรือสภาพที่ใกล้เคียงกับการทดสอบในห้องปฏิบัติการมากที่สุด



ภาพที่ 3 การประยุกต์ใช้วิธี Electrodeposition กับโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กในทะเล
ที่มา: Ryu and Otsuki (2002a)



ภาพที่ 4 เซลล์เคมีไฟฟ้าสำหรับแยกสารตัวอย่างออกจากสารละลาย

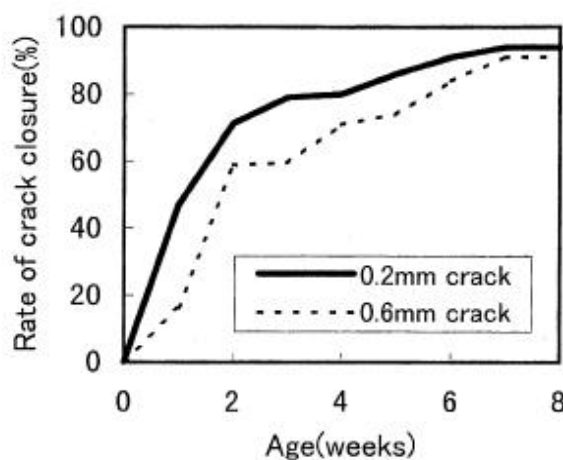
การใช้วิธี Electrodeposition สำหรับการซ่อมแซมรอยแตกร้าวของคอนกรีตนั้น Ryu and Otsuki (2002) กล่าวว่า การสะสมของของแข็งจากปฏิกิริยาไฟฟ้า มีแนวโน้มที่จะสะสมบริเวณรอยแตกร้าวของคอนกรีต เนื่องจากความนำไฟฟ้าบริเวณรอยแตกร้าวจะสูงกว่าบริเวณอื่น ซึ่งตรงกับสาขาโรซ และ อภิชชาติ (2526) ที่กล่าวถึงการเคลือบผิวโลหะด้วยไฟฟ้าว่า บริเวณใดของชิ้นงานที่มีลักษณะไม่เรียบ หยัก หรือเป็นมุมแหลม จะมีการกระจายของกระแสไฟฟ้าที่บริเวณนั้นหนาแน่นกว่าบริเวณอื่น จึงทำให้การเคลือบชิ้นงานที่บริเวณนั้นมีความหนาของการเคลือบมากกว่า และการเคลือบชิ้นงานที่ใช้ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าต่ำนั้น จะได้รับการสะสมของของแข็งหรือผิวเคลือบที่มีความเป็นระเบียบมากกว่าการใช้ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าสูง แต่จะใช้เวลานานกว่า

ได้มีการศึกษาการใช้วิธี Electrodeposition สำหรับการซ่อมแซมรอยแตกร้าวของคอนกรีตบนพื้นดินในประเทศญี่ปุ่น ซึ่ง Ryu and Otsuki (1999) ได้ใช้สารละลาย $MgCl_2$ และ $ZnSO_4$ ความเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร แทนการใช้น้ำทะเล และจ่ายกระแสไฟฟ้าขนาด 0.25 แอมแปร์ต่อตารางเมตร สำหรับการซ่อมแซมรอยแตกร้าวของคอนกรีตด้วยวิธี Electrodeposition กับตัวอย่างคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีรอยแตกร้าวขนาด 0.05 – 0.10 มิลลิเมตร ที่เกิดจากการหดตัวแบบแห้ง พบว่า รอยแตกร้าวถูกปิดอย่างรวดเร็วในสัปดาห์แรก และรอยแตกร้าวถูกปิด 100 เปอร์เซ็นต์ในสัปดาห์ที่ 2 โดยผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการตกผลึกของสารละลาย $MgCl_2$ และ $ZnSO_4$ คือซิงค์ออกไซด์ (ZnO) และ แมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ ($Mg(OH)_2$) ตามลำดับ และยังมีประสิทธิภาพด้านทานการคาร์

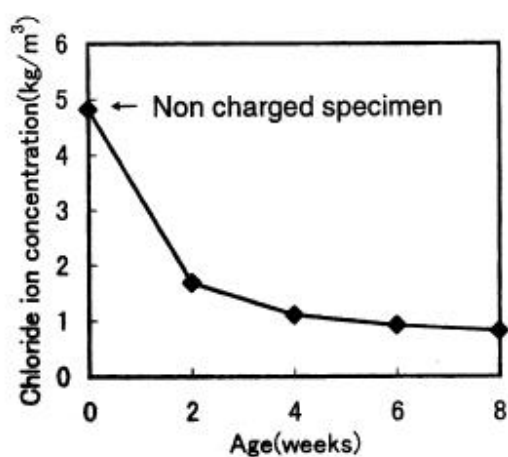
บอเนชั่น (Carbonation) เนื่องจากความหนาแน่นของชั้นการสะสมของแข็ง ที่บริเวณผิวหน้าของคอนกรีต

Nishida *et al.* (2000) กล่าวว่าวิธี Electrodeposition สามารถนำมาประยุกต์ใช้ซ่อมแซมรอยแตกร้าวของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กบนพื้นดินได้ ซึ่งวิธีนี้จะให้ผลที่แตกต่างกัน ขึ้นกับการเลือกใช้ชนิดของสารละลาย ความเข้มข้นของสารละลาย ความเข้มข้นของกระแสไฟฟ้า และอุณหภูมิ จากการศึกษาของ Nishida *et al.* ที่ใช้สารละลาย $MgCl_2$, $Mg\text{-}ace$, $Mg(NO_3)_2$, $MgSO_4$, MgS_2O_3 , $ZnSO_4$, $Ca(CH_3COO)$ และ $Ca(CO_3)_2$ แทนการใช้น้ำทะเล พบว่าสารละลายที่มีโลหะ Mg เป็นส่วนประกอบให้ผลการปิดรอยแตกร้าวของคอนกรีตเสริมเหล็กที่ดี และเงื่อนไขที่ดีที่สุดสำหรับวิธี Electrodeposition คือใช้สารละลาย $Mg\text{-}ace$ ที่มีความเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตรและความเข้มข้นของกระแสไฟฟ้า 1 แอมแปร์ต่อตารางเมตร นอกจากนี้ยังพบอีกว่า การตกผลึกปิดรอยแตกร้าวของโลหะในสารละลายมีความสามารถต้านทานการเกิดคาร์บอนชั่นได้ โดยที่ ปัจจัยด้านความเข้มข้นของสารละลาย มีนัยสำคัญกับความต้านทานการเกิดคาร์บอนชั่นมากกว่าปัจจัยด้านความเข้มข้นของกระแสไฟฟ้า

Ryu and Otsuki (2002a, 2002b) พบว่า วิธี Electrodeposition ที่ใช้สารละลาย $ZnSO_4$ แทนน้ำทะเล ทำให้รอยแตกร้าวของตัวอย่างส่วนมากจะถูกปิดเป็นอย่างดี ภายใน 2 สัปดาห์แรกของการทดสอบ ดังภาพที่ 5 โดยความลึกของการตกผลึกปิดรอยแตกร้าวจะขึ้นกับความกว้างของรอยร้าว นั้นๆ ชั้นของการตกผลึกที่บริเวณผิวหน้าของคอนกรีตมีความหนา 0.5 ถึง 2 มิลลิเมตร ช่วยให้การซึมผ่านของน้ำที่บริเวณรอยแตกร้าวลดลง และพบว่าหลังจากให้กระแสไฟฟ้ากับตัวอย่างเป็นเวลา 4 สัปดาห์ ทำให้ความเข้มข้นของคลอไรด์ไอออนบริเวณเหล็กเสริมลดลงถึง 70 เปอร์เซ็นต์ แสดงดังภาพที่ 6 เนื่องจากความต่างของศักย์ไฟฟ้าทำให้คลอไรด์ไอออนภายในคอนกรีต เคลื่อนที่ออกมาสู่ขั้วไฟฟ้าบวกภายนอก และช่วยให้คอนกรีตส่วนใหญ่ที่ผ่านการซ่อมแซมด้วยวิธี Electrodeposition คืนสู่สภาพความเป็นด่างอีกด้วย (Re-passivity)



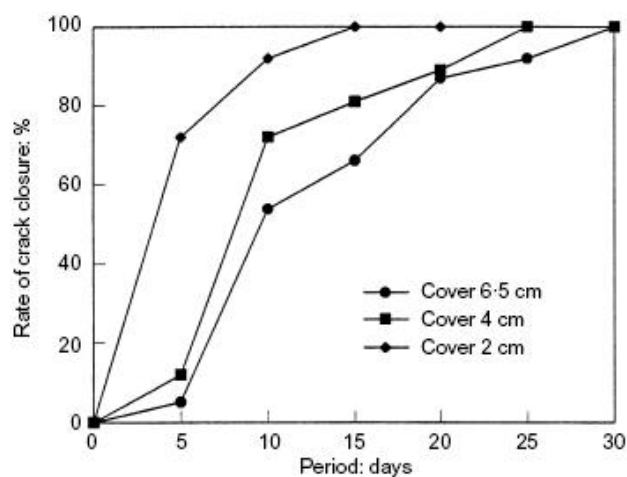
ภาพที่ 5 อัตราการตกผลึกปิดรอยแตกกว้าง ที่ใช้สารละลาย $ZnSO_4$ ที่มีความกว้างรอยแตกกว้างต่างกัน
ที่มา: Ryu and Otsuki (2002a)



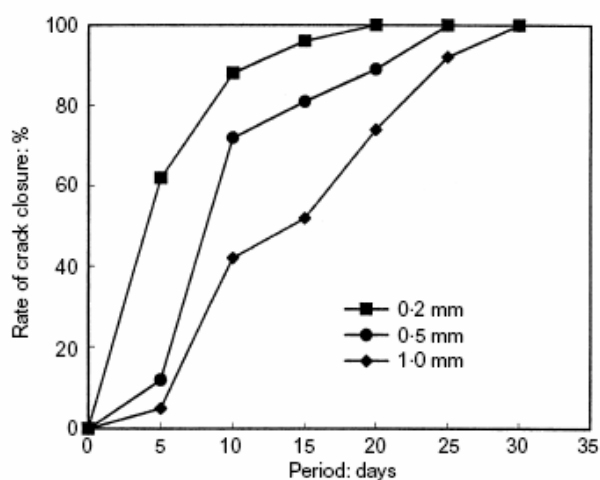
ภาพที่ 6 การลดลงของความเข้มข้นของคลอไรด์ไอออนบริเวณเหล็กเสริมภายหลังการซ่อมแซม
รอยแตกกว้างด้วยวิธี Electrodeposition
ที่มา: Ryu and Otsuki (2002a)

จากการศึกษาของ Ryu (2003) ที่ใช้สารละลาย $ZnSO_4$ ที่มีความเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร แทนการใช้น้ำทะเล และใช้ความเข้มข้นของกระแสไฟฟ้า 0.5 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ทดสอบกับคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีความกว้างของรอยแตกกว้างและระยะหุ้มคอนกรีตต่างๆ กัน พบว่า การปิดรอยแตกกว้างจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วใน 10 วันแรกของการทดสอบ และตัวอย่างทดสอบส่วนมากจะถูกปิดรอยแตกกว้างอย่างสมบูรณ์ภายใน 30 วัน ดังภาพที่ 7 และ 8 โดยที่ การใช้วิธี Electrodeposition ในการซ่อมแซมรอยแตกกว้างของคอนกรีตขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย

คือ ความกว้างของรอยแตก ความลึกของรอยแตก อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ของคอนกรีต และอุณหภูมิของสารละลาย



ภาพที่ 7 อัตราการตกผลึกปิดรอยแตกร้าว ที่ใช้สารละลาย $ZnSO_4$ ที่ระยะหุ้มต่างๆ กันของคอนกรีต
ที่มา: Ryu (2003)



ภาพที่ 8 อัตราการตกผลึกปิดรอยแตกร้าว ที่ใช้สารละลาย $ZnSO_4$ ที่ความกว้างรอยแตกร้าวต่างกัน
ที่มา: Ryu (2003)

นอกจากนี้ยังมีการศึกษาคุณสมบัติของคอนกรีตที่ผ่านการซ่อมแซมรอยแตกร้าวด้วยวิธี Electrodeposition ของ Ryu and Otsuki (2005) ที่ใช้สารละลาย $MgCl_2$ ที่มีความเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร พบว่าหลังจาก 4 สัปดาห์ของการให้กระแสไฟฟ้า รอยแตกร้าวถูกปิดได้มากถึง 90 เปอร์เซ็นต์ โดยการตกผลึกของสารประกอบที่ผิวหน้าของคอนกรีตจะช่วยลดความสามารถซึมผ่านได้ของน้ำ แสดงดังตารางที่ 1 และสารประกอบสามารถเข้าไปตกผลึกในเนื้อคอนกรีตได้ ช่วยลดช่องว่างในเนื้อคอนกรีต ทำให้คอนกรีตมีความคงทนที่ดีขึ้น

ตารางที่ 1 ผลการตกผลึกปิดรอยแตกร้าว ที่ใช้สารละลาย $MgCl_2$ และความสามารถซึมผ่านของคอนกรีตหลังการซ่อมแซมรอยแตกร้าว

Crack width (mm)	Crack closure (%)			Permeability ($cm\ s^{-1}$)		
	0 week	2 weeks	4 weeks	0 week	2 weeks	4 weeks
0.1	0	73	94	7.8×10^{-4}	5.7×10^{-7}	4.3×10^{-8}
0.5	0	62	91	2.4×10^{-2}	6.2×10^{-6}	5.6×10^{-7}

ที่มา: Ryu and Otsuki (2005)

จากการศึกษาและวิจัยที่ผ่านมาเห็นได้ว่า วิธีการนี้ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ ดังนั้น ถ้าต้องการนำวิธี Electrodeposition มาประยุกต์ใช้งานซ่อมแซมรอยแตกร้าวของคอนกรีตในประเทศไทย มีความจำเป็นที่จะต้องมีการศึกษาและวิจัยเบื้องต้น เพื่อหาวัสดุ อุปกรณ์ วิธีการ และปัจจัยที่เหมาะสมกับประเทศไทยมากที่สุด เพื่อให้สามารถนำไปใช้งานจริงได้

ในงานวิจัยนี้ เลือกการให้พลังงานภายนอกแก่สารละลายเพื่อให้แตกตัวเป็นไอออนและเกิดการตกผลึกเป็นแบบการควบคุมศักย์ไฟฟ้า แทนการควบคุมกระแสไฟฟ้า เพื่อให้เหมาะสมกับการวิจัยในห้องปฏิบัติการ เนื่องจาก การควบคุมกระแสไฟฟ้า จำเป็นต้องใช้เครื่องแปลงกระแสไฟฟ้า 1 เครื่อง ต่อ 1 ตัวอย่างทดสอบ ไม่สามารถต่อวงจรแบบอนุกรมเพื่อทดสอบหลายตัวอย่างในคราวเดียวกันได้ ถึงแม้ว่าในทางทฤษฎี การต่อวงจรแบบอนุกรมจะให้กระแสไฟฟ้าที่เท่ากันตลอด แต่ในความเป็นจริง สำหรับการซ่อมแซมรอยแตกร้าวของคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยวิธี Electrodeposition การไหลของกระแสไฟฟ้าจะลดลงเนื่องจากถูกนำไปใช้ในการตกผลึก (สาโรช และ อภิชาติ, 2526) ทำให้กระแสไฟฟ้าไหลเข้าและออกไม่เท่ากัน แต่สำหรับการควบคุมศักย์ไฟฟ้านั้น สามารถทำการทดสอบครั้งละหลายตัวอย่างได้ โดยการต่อวงจรแบบขนาน จะทำให้ได้พลังงาน

ศักย์ที่จ่ายให้ทุกตัวอย่างมีค่าเท่าๆ กัน และวิธีการควบคุมศักย์ไฟฟ้านี้ ยังสามารถทำได้ง่ายกว่าเมื่อนำการ
ซ่อมแซมรอยแตกร้าวของคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยวิธี Electrodeposition ไปใช้งานจริงในสนาม

อย่างไรก็ตาม ยังไม่เคยมีการศึกษาวิจัยเรื่องนี้ในประเทศไทย ดังนั้น การทำวิจัยนี้จะเป็นการศึกษา
เบื้องต้น เพื่อเป็นฐานข้อมูลในการศึกษาวิจัยและพัฒนาต่อไป

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. วัสดุผสมซีเมนต์ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1
2. มวลรวมละเอียด ใช้ทรายแม่น้ำผ่านตะแกรงเบอร์ 4
3. มวลรวมหยาบ ใช้หินปูนย่อยขนาดโตสุด 3/4 นิ้ว
4. เหล็กเส้นกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร
5. เครื่องผสมคอนกรีตขนาดใหญ่ ความจุ 0.2 ลบ.ม.
6. เครื่องมือวัดการยุบตัวคอนกรีต (Slump test)
7. เครื่องวิเคราะห์ความละเอียดด้วยตะแกรง
8. เครื่องอบหิน ทราย
9. เครื่องชั่งน้ำหนัก
10. เครื่องตัดคอนกรีต
11. เครื่องทดสอบ Universal Testing Machine
12. แบบหล่อคอนกรีตขนาด 10 x 10 x 37 เซนติเมตร
13. ตู้คาร์บอนเนชั่น (Carbonation chamber)
14. อุปกรณ์วัดความดันและอัตราการไหลของก๊าซ (Flow meter)
15. ถังบรรจุก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 7 เปอร์เซ็นต์ (CO₂ 7% balance Air)
16. ถังสำหรับแช่สารละลายโซเดียมคลอไรด์
17. เครื่องทดสอบกำลังรับแรงดัด (Three-point load)
18. ตะแกรงลวดไทเทเนียม
19. ลวดผูกเหล็ก
20. ตะกั่วบัดกรี
21. ปืนบัดกรี
22. เลื่อยตัดเหล็ก
23. สายไฟ
24. อุปกรณ์วัดความกว้างรอยแตกร้าว
25. แผ่นพลาสติก
26. เทปพันสายไฟ

27. เครื่องแปลงไฟฟ้ากระแสตรง
28. สารเคมีที่ใช้ทดสอบ ได้แก่ $MgCl_2$, $MgSO_4$ และ $ZnSO_4$
29. สารละลายโซเดียมคลอไรด์
30. ฟีนอล์ฟทาลีน (Phenolphthalein)
31. เอทิลแอลกอฮอล์ (Ethyl Alcohol)
32. อีพอกซีเรซิน (Epoxy resin)
33. ภาชนะสำหรับแช่คอนกรีตในสารละลาย
34. ชุดอุปกรณ์สำหรับผสมสารละลาย
35. อุปกรณ์วัดค่าศักย์ไฟฟ้า
36. ขวดฉีดละอองน้ำ
37. ถังมือยาง

วิธีการ

1. วัสดุและปฏิกาส่วนผสมคอนกรีต

1.1 วัสดุในงานผสมคอนกรีตประกอบด้วย

- ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 ตราช้าง ของบริษัทปูนซีเมนต์ไทยจำกัด (มหาชน) โดยมีคุณภาพตรงตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม

- วัสดุมวลรวมหยาบ ใช้หินปูนย่อยขนาดโตสุด 3/4 นิ้ว

- วัสดุมวลรวมละเอียด ใช้ทรายแม่น้ำผ่านตะแกรงเบอร์ 4

1.2 ปฏิกาส่วนผสมคอนกรีต

การศึกษานี้ เป็นการศึกษาเบื้องต้น เพื่อดูความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้วิธี Electrodeposition เพื่อลดการเกิดสนิมและซ่อมแซมรอยแตกร้าวของคอนกรีตเสริมเหล็ก ดังนั้นจึงใช้คอนกรีตที่มีกำลังรับแรงอัด 240 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร เพียงอย่างเดียว โดยออกแบบตาม

มาตรฐานของ ACI มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.64 ค่าการยุบตัว 8 – 10 เซนติเมตร แสดงส่วนผสมคอนกรีตสำหรับการทดสอบดังตารางผนวกที่ 2ก

2. การเตรียมตัวอย่างคอนกรีตเสริมเหล็ก

2.1 การเตรียมเหล็กเสริมสำหรับหล่อตัวอย่างคอนกรีตเสริมเหล็ก

2.1.1 ใช้เหล็กกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 6 มิลลิเมตร ที่มีกำลังคราก 2400 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ผูกต่อกันในลักษณะวงรอบสี่เหลี่ยม ให้มีขนาด 5 x 32 เซนติเมตร ยึดปลายเหล็กทั้งสองด้านเข้าด้วยกันให้แน่นด้วยลวดผูกเหล็ก

2.1.2 ต่อสายไฟเข้ากับปลายด้านหนึ่งของเหล็กเสริม เพื่อใช้เป็นขั้วไฟฟ้าลบ โดยทำการบัดกรีลวดทองแดงของสายไฟให้ยึดเข้ากับเหล็กเสริม

2.2 กระบวนการผสมคอนกรีต

2.2.1 นำหินและทรายทั้งหมดใส่ลงในเครื่องผสมคอนกรีต หลังจากนั้นเทน้ำลงในเครื่องผสมคอนกรีตเป็นจำนวนครึ่งหนึ่งของน้ำทั้งหมดที่ได้ออกแบบปฏิภาคส่วนผสม แล้วทำการเดินเครื่องผสมคอนกรีตให้ทราย หิน และน้ำ คลุกเคล้าเข้ากันเป็นเวลา 1 นาที

2.2.2 ปล่อยส่วนผสมทิ้งไว้ประมาณ 5 นาที เพื่อให้วัสดุมวลรวมดูดซึมน้ำ

2.2.3 ใส่ปูนซีเมนต์ที่เตรียมไว้ลงในวัสดุมวลรวมข้างต้น พร้อมกับน้ำที่เหลือทั้งหมด แล้วทำการผสมจนเป็นเนื้อเดียวกันโดยใช้เวลาผสมประมาณ 3 นาที

2.2.4 หลังจากการผสมคอนกรีตจนเข้ากันดีแล้ว และไม่พบการแยกตัวในเนื้อคอนกรีต ทำการทดสอบค่าการยุบตัวของคอนกรีต

2.3 กระบวนการหล่อคอนกรีต

2.3.1 นำคอนกรีตที่ผ่านการทดสอบค่าการยุบตัวโดยอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้แล้ว จึงเทคอนกรีตลงในแบบหล่อคอนกรีตขนาด 10 x 10 x 37 เซนติเมตร ที่จัดเตรียมไว้ โดยผ่านการทาน้ำมันบางๆ ที่ผิวทั้งแบบหล่อ เทคอนกรีตลงไปครึ่งหนึ่งของความสูงแบบหล่อ ใช้เหล็กกระทุ้ง ทำการกระทุ้งคอนกรีตให้ทั่วบริเวณ เพื่อให้แน่ใจว่า คอนกรีตสามารถแทรกตัวเข้าไปรวมกันจนแน่นดี และไม่มีฟองอากาศ

2.3.2 วางเหล็กเสริมที่เตรียมโดยผ่านการต่อเข้ากับสายไฟไว้แล้ว มาวางบนผิวหน้าคอนกรีต โดยให้มีระยะหุ้มด้านข้างประมาณ 2.5 เซนติเมตร

2.3.3 จากนั้นเทคอนกรีตลงจนเต็มความสูงแบบหล่อ ใช้เหล็กกระทุ้ง ทำการกระทุ้งคอนกรีตให้ทั่วบริเวณอีกครั้ง เพื่อให้แน่ใจว่า คอนกรีตทั้งสองชั้นเชื่อมต่อกันและสามารถแทรกตัวเข้าไปรวมกันจนแน่นดี จึงนำมาเก็บไว้และคลุมด้วยแผ่นพลาสติก กระทั่งเวลาผ่านไป 24 ชั่วโมง จึงทำการถอดแบบออก แสดงภาพตัวอย่างคอนกรีตเสริมเหล็กที่หล่อเสร็จแล้วดังภาพที่ 8 จากนั้นนำคอนกรีตไปบ่มในน้ำ



ภาพที่ 9 ตัวอย่างคอนกรีตเสริมเหล็กขนาด 10 x 10 x 37 เซนติเมตร

2.4 การเตรียมตัวอย่างคอนกรีตเสริมเหล็กให้มีรอยแตกร้าวเพื่อนำไปซ่อมแซม

2.4.1 หลังจากบ่มคอนกรีตครบกำหนดอายุเป็นเวลา 28 วันแล้ว นำตัวอย่างทดสอบคอนกรีตมาทดสอบโดยให้น้ำหนักแบบโก่ง (Three-point bending load) ดังภาพที่ 9 เพื่อทำให้เกิดรอยแตกร้าวขึ้นในตัวอย่างทดสอบคอนกรีต โดยกำหนดให้รอยร้าวมีค่าความกว้างโดยประมาณ 0.5 มิลลิเมตร มีค่าความลึกโดยประมาณ 8 เซนติเมตร แสดงดังภาพที่ 10



ภาพที่ 10 การกดตัวอย่างทดสอบคอนกรีตเสริมเหล็กเพื่อทำให้เกิดรอยแตกร้าว



ภาพที่ 11 รอยแตกร้าวของตัวอย่างทดสอบคอนกรีตเสริมเหล็กความกว้างประมาณ 0.5 มิลลิเมตร

2.4.2 เคลือบผิวด้านข้างทุกด้านของตัวอย่างทดสอบคอนกรีตด้วย epoxy resin เพื่อให้การปกคลุมของอิออนบนพื้นผิวของตัวอย่างทดสอบคอนกรีตมีเพียงด้านเดียวเท่านั้น ซึ่งจะทำให้ง่ายต่อการวิเคราะห์ผลการทดสอบ

3. การซ่อมแซมรอยแตกร้าวของคอนกรีตเสริมเหล็กโดยวิธี **Electrodeposition**

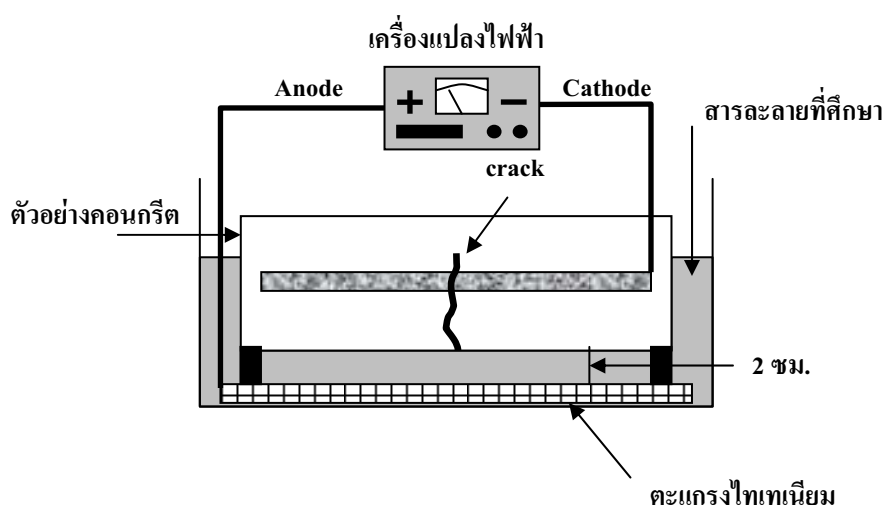
3.1 การติดตั้งตัวอย่างคอนกรีตเสริมเหล็กเข้ากับเครื่องแปลงไฟฟ้ากระแสตรง

3.1.1 เตรียมตะแกรงไทเทเนียมให้มีขนาดเท่ากับพื้นที่ด้านหน้าของตัวอย่าง ต่อปลายด้านหนึ่งของตะแกรงเข้ากับสายไฟ เพื่อใช้เป็นขั้วไฟฟ้าบวก และต้องทำการบัดกรีลวดทองแดงในสายไฟให้ยึดติดกับตะแกรงไทเทเนียม รวมทั้งพันจุดต่อไว้ด้วยเทปพันสายไฟ เพื่อป้องกันการกัดกร่อนของลวดทองแดงในสายไฟ จากก๊าซที่เกิดขึ้นในขณะที่เกิดปฏิกิริยา

3.1.2 วางตะแกรงลวดไทเทเนียมลงที่ก้นของภาชนะที่ใช้ โดยต้องเป็นภาชนะที่ไม่นำไฟฟ้า ให้จุดต่อเชื่อมระหว่างสายไฟและตะแกรงลวดไทเทเนียมอยู่สูงกว่าระดับภาชนะ เพื่อป้องกันไม่ให้จุดต่อเชื่อมนี้จมอยู่ในสารละลาย เพราะจะเกิดการกัดกร่อน และทำให้เกิดการละลายของขั้วไฟฟ้า

3.1.3 วางตัวอย่างทดสอบคอนกรีตลงในภาชนะ คำนวณให้ด้านที่มีรอยแตกร้าวอยู่ด้านล่าง และให้ห่างจากตะแกรงไทเทเนียมที่ต่อไว้กับสายไฟ ประมาณ 2 เซนติเมตร โดยรองตัวอย่างคอนกรีตด้วยแท่งไม้

3.1.4 ต่อเครื่องแปลงไฟฟ้ากระแสตรง เข้ากับเหล็กเสริมที่อยู่ในตัวอย่างทดสอบคอนกรีตและตะแกรงไทเทเนียม โดยต่อเหล็กเสริมในคอนกรีตเข้ากับขั้วไฟฟ้าลบ และต่อตะแกรงไทเทเนียมเข้ากับขั้วไฟฟ้าบวกผ่านทางสายไฟที่ต่อเตรียมไว้ แสดงการติดตั้งตัวอย่างคอนกรีตเข้ากับเครื่องแปลงไฟฟ้ากระแสตรงดังภาพที่ 11 และใช้การต่อวงจรแบบขนานสำหรับการซ่อมแซมรอยแตกร้าวที่ใช้เครื่องแปลงไฟฟ้าตัวเดียวกัน เพื่อให้ศักย์ไฟฟ้าที่จ่ายให้กับตัวอย่างมีค่าเท่ากัน



ภาพที่ 12 การต่อตัวอย่างและตะแกรงไทเทเนียมเข้ากับเครื่องแปลงไฟฟ้ากระแสตรง

3.2 การดำเนินการซ่อมแซมรอยแตกร้าวด้วยวิธี Electrodeposition

3.2.1 เติมสารละลายตามความเข้มข้นที่จะทำการทดสอบลงในภาชนะ โดยให้ระดับความสูงของสารละลายสูงกว่าระดับของเหล็กเสริม ปิดภาชนะด้วยพลาสติกเพื่อป้องกันการระเหยของน้ำในสารละลาย

3.2.2 ให้ศักย์ไฟฟ้าจากเครื่องแปลงไฟฟ้ากระแสตรง (DC Regulator) เพื่อให้ไอออนบวกของโลหะที่มีอยู่ในสารละลาย เคลื่อนตัวไปตกผลึกอุดรอยร้าวที่อยู่บนผิวแท่งตัวอย่างทดสอบคอนกรีต

3.2.3 โดยกำหนดตัวแปรในการทดสอบ ดังนี้

- ชนิดของสารละลาย ได้แก่ MgCl_2aq , MgSO_4aq และ ZnSO_4aq
- ความเข้มข้นของสารละลาย ได้แก่ 0.10, 0.20 และ 0.50 โมลต่อลิตร
- ศักย์ไฟฟ้าภายนอก ได้แก่ 3, 6 และ 9 โวลต์
- ระยะเวลาการให้ศักย์ไฟฟ้า ได้แก่ 3, 7 และ 28 วัน

4. การตรวจสอบประสิทธิผลหลังจากการทำ Electrodeposition

4.1 ความลึกของการตกผลึกปicroยแตกร้าว

4.1.1 นำตัวอย่างคอนกรีตที่ผ่านการซ่อมแซมด้วยวิธี Electrodeposition เป็นเวลา 3, 7 และ 28 วัน แล้ว ที่ใช้สารละลาย $MgCl_2$, $MgSO_4$ และ $ZnSO_4$ ความเข้มข้น 0.10, 0.20 และ 0.50 โมลต่อลิตร โดยให้ศักย์ไฟฟ้าภายนอกขนาด 3, 6 และ 9 โวลต์ มาตัดตามแนวของรอยร้าวเดิม ขั้นตอนนี้ต้องทำอย่างระมัดระวังเพื่อไม่ให้สารประกอบที่ตกผลึกปicroยแตกร้าวหลุดออกมา

4.1.2 วัดความลึกของสารประกอบที่ตกผลึกปicroยแตกร้าว โดยวัดความลึกทั้งหมด 5 จุด เว้นระยะจากขอบของตัวอย่างด้านข้าง ด้านละ 2.5 เซนติเมตร เพื่อไม่ให้มีอิทธิพลของ สารประกอบที่เข้ามาตกผลึกจากรอยแตกทางด้านข้างของคอนกรีต

4.2 การทดสอบการซึมผ่านของคลอไรด์

4.2.1 นำตัวอย่างคอนกรีตที่ผ่านการซ่อมแซมด้วยวิธี Electrodeposition เป็นเวลา 28 วัน แล้ว ที่ใช้สารละลาย $MgCl_2$, $MgSO_4$ และ $ZnSO_4$ ความเข้มข้น 0.10, 0.20 และ 0.50 โมลต่อลิตร โดยให้ศักย์ไฟฟ้าขนาด 6 โวลต์ มาทาผิวทุกด้านด้วย epoxy resin อีกครั้งหนึ่ง ยกเว้นด้านที่ผ่านการ ซ่อมแซมรอยแตกร้าว เพื่อให้สารละลายโซเดียมคลอไรด์สามารถเข้าสู่คอนกรีตได้ในทิศทางเดียว แล้วไปแช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 3 เปอร์เซ็นต์ เป็นเวลา 28 วัน

4.2.2 นำตัวอย่างคอนกรีตที่ผ่านการซ่อมแซมด้วยวิธี Electrodeposition เป็นเวลา 28 วัน แล้ว ที่ใช้สารละลาย $MgCl_2$, $MgSO_4$ และ $ZnSO_4$ ความเข้มข้น 0.20 โมลต่อลิตร โดยให้ ศักย์ไฟฟ้าขนาด 6 โวลต์ ไปทดสอบการซึมผ่านได้ของคลอไรด์ โดยวางตัวอย่างให้ด้านที่มีรอย แตกร้าวที่ผ่านการซ่อมแซมแล้วคว่ำลงบนภาชนะที่บรรจุสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 3 เปอร์เซ็นต์ โดยให้ผิวด้านหน้าคอนกรีตห่างจากสารละลาย 1 เซนติเมตร แล้วคลุมด้วยพลาสติก เพื่อให้เป็นระบบปิดและมีไอระเหยของโซเดียมคลอไรด์ตลอดเวลา และทำการฉีดพ่นด้วย สารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 3 เปอร์เซ็นต์ ที่ผิวด้านที่มีรอยแตกวันเว้นวัน จนครบ 28 วัน

4.2.3 นำตัวอย่างทดสอบจาก 4.2.1 และ 4.2.2 ที่ครบ 28 วัน ทิ้งไว้ให้แห้ง 24 ชั่วโมง แล้วนำมาตัดให้ผ่านตามแนวรอยร้าวเดิม ทำความสะอาดผิวหน้าคอนกรีตด้วยแปรงปัดฝุ่น ฉีดพ่นด้วยสารละลาย 0.1N ซิลเวอร์ไนเตรด แล้ววัดระยะการซึมผ่านของคลอไรด์ไอออนที่เปลี่ยนสีของตัวอย่างทดสอบคอนกรีตเสริมเหล็กเป็นสีเทา เปรียบเทียบกับตัวอย่างทดสอบที่ไม่ได้ผ่านวิธี Electrodeposition

4.3 การทดสอบความต้านทานการคาร์บอนขึ้น

4.3.1 นำตัวอย่างคอนกรีตที่ผ่านการซ่อมแซมด้วยวิธี Electrodeposition เป็นเวลา 28 วัน แล้ว ที่ใช้สารละลาย $MgCl_2$, $MgSO_4$ และ $ZnSO_4$ ความเข้มข้น 0.10, 0.20 และ 0.50 โมลต่อลิตร โดยให้ศักย์ไฟฟ้าขนาด 6 โวลต์ มาทาผิวทุกด้านด้วย epoxy resin อีกครั้งหนึ่ง ยกเว้นด้านที่ผ่านการซ่อมแซมรอยแตกร้าว เพื่อให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สามารถแพร่เข้าสู่คอนกรีตได้ในทิศทางเดียว วางเข้าไปในถังคาร์บอนขึ้น ให้มีระยะห่างในแต่ละก้อนของการวางเรียงด้านข้างเท่ากับ 20 มิลลิเมตร เพื่อให้ก๊าซสามารถกระจายเข้าไปสัมผัสกับผิวของคอนกรีตได้อย่างทั่วถึง หลังจากนั้นจึงวางก้อนคอนกรีตส่วนที่เหลือซ้อนกันทางด้านข้างให้สูงขึ้นไป เนื่องจากไม่ต้องการให้มีการแพร่ของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เข้าไปในส่วนนี้ ต้องการให้มีการแพร่ในด้านที่มีรอยแตกเท่านั้น เพื่อป้องกันการซึมน้ำของการคาร์บอนขึ้น

4.3.2 ปลอยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์หนาแน่น 7 เปอร์เซ็นต์ เข้าสู่ถังคาร์บอนขึ้นด้วยอัตราการไหลเท่ากับ 2 ลิตรต่อนาที เป็นเวลา 45 นาที เพื่อให้มีก๊าซเข้าไปแทรกตามช่องว่างได้อย่างทั่วถึง และไล่อากาศที่มีอยู่ในตู้ก่อนหน้าออกไปให้หมด โดยแช่ตัวอย่างไว้ในถังคาร์บอนขึ้นเป็นเวลา 28 วัน ที่ความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิห้องปฏิบัติการ

4.3.3 เมื่อครบกำหนดเวลา 28 วัน นำก้อนคอนกรีตเสริมเหล็กที่ผ่านกระบวนการคาร์บอนขึ้น มาตัดให้ผ่านตามแนวของรอยร้าวเดิม ทำความสะอาดผิวหน้าคอนกรีต ด้วยแปรงปัดฝุ่น เพื่อกำจัดฝุ่นคอนกรีตที่เกิดจากกระบวนการตัด

4.3.4 ฉีดพ่นผิวหน้าคอนกรีตที่ถูกผ่าตามแนวรอยร้าวเดิม ด้วยสารละลายที่เตรียมจากสารละลายฟีนอล์ฟธาเลิน (Phenolphthalein) 1 เปอร์เซ็นต์ ผสมกับเอทิลแอลกอฮอล์ (Ethyl Alcohol) 70 เปอร์เซ็นต์ ในขวดฉีดละอองน้ำพลาสติก

4.3.5 ภายหลังจากฉีดพ่นสารละลายอย่างทั่วถึงโดยไม่ควรฉีดจนเยิ้มผิวคอนกรีต สีของคอนกรีตที่ยังไม่เกิดการคาร์บอนชั่น จะเกิดการเปลี่ยนแปลงไปเป็นสีชมพูแดงหรือสีม่วงภายในระยะเวลาประมาณ 1 นาที

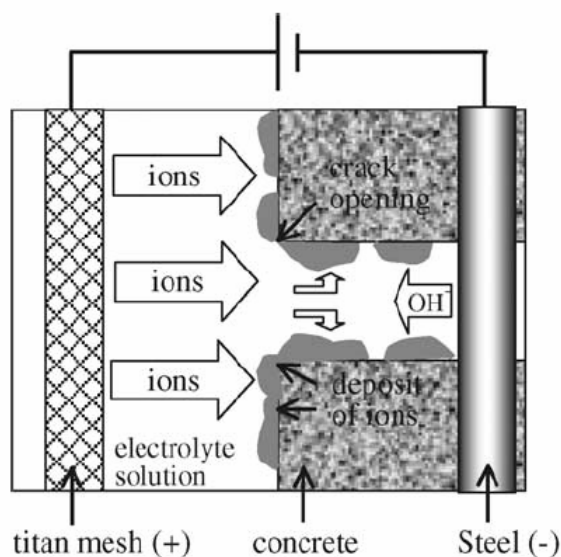
4.5.6 วัดค่าความลึกคาร์บอนชั่นในพื้นที่ที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงสี ระหว่างจุดนอกที่เป็นผิวของคอนกรีตกับจุดที่เป็นตำแหน่งในแนวของการเปลี่ยนสี และเปรียบเทียบกับตัวอย่างทดสอบที่ไม่ได้ผ่านวิธี Electrodeposition

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

ผลิตภัณฑ์จากกระบวนการซ่อมแซมรอยแตกร้าว

ในกระบวนการซ่อมแซมรอยแตกร้าวด้วยวิธี Electrodeposition ที่ใช้สารละลาย $MgCl_2$, $MgSO_4$ และ $ZnSO_4$ ที่เตรียมขึ้นแทนการใช้น้ำทะเล เมื่อให้ศักย์ไฟฟ้าภายนอกแก่ระบบ จะทำให้เกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีขึ้น ได้ผลของปฏิกิริยานี้เป็นสารประกอบของโลหะ ที่เกิดจากการตกผลึกของไอออนบวกในสารละลายที่ทำการทดสอบ สะสมอยู่บริเวณขั้วไฟฟ้าลบ หรือบริเวณรอยแตกร้าวของคอนกรีต ซึ่งสามารถแยกการเกิดปฏิกิริยาออกได้เป็น 2 ส่วน คือ ปฏิกิริยาที่ขั้วไฟฟ้า และปฏิกิริยาเคมีในสารละลาย

เมื่อให้ศักย์ไฟฟ้าแก่ระบบ จะเกิดปฏิกิริยาที่ขั้วไฟฟ้าขึ้น ทั้งที่ขั้วไฟฟ้าบวก (แอโนด) และขั้วไฟฟ้าลบ (แคโทด) ดังสมการที่ 6 และ 7 ตามลำดับ ซึ่งเป็นปฏิกิริยาออกซิเดชันและรีดักชันของน้ำ ไฮดรอกไซด์ไอออนที่ได้จากปฏิกิริยารีดักชันของขั้วไฟฟ้าลบ จะเข้าทำปฏิกิริยากับไอออนของโลหะในสารละลาย เกิดเป็นของแข็งตกผลึกที่บริเวณรอยแตกร้าวของคอนกรีต ดังภาพที่ 13



ภาพที่ 13 กระบวนการตกผลึกปิดรอยแตกร้าวของคอนกรีต

ที่มา: Ryu and Otsuki (2005)



1. ผลิตภัณฑ์จากการใช้สารละลาย $MgCl_2$

ปฏิกิริยาที่ขั้วไฟฟ้าบวกและลบ ทำให้น้ำ (H_2O) แตกตัวเป็นไฮโดรเจนไอออน (H^+) และไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) ซึ่งจะเข้าทำปฏิกิริยากับไอออนของแมกนีเซียม (Mg^{2+}) ในสารละลาย ได้ผลเป็นแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ ($Mg(OH)_2$) ตกผลึกสะสมที่ขั้วไฟฟ้าลบ หรือบริเวณรอยร้าวของคอนกรีตที่มีความนำไฟฟ้าสูง แสดงการเกิดและผลของปฏิกิริยาดังสมการที่ 8 ถึง 10



2. ผลิตภัณฑ์จากการใช้สารละลาย $MgSO_4$

เช่นเดียวกับการใช้สารละลาย $MgCl_2$ คือเมื่อให้ศักย์ไฟฟ้าแก่ระบบ ปฏิกิริยาที่ขั้วไฟฟ้าบวกและลบ ทำให้น้ำ (H_2O) แตกตัวเป็นไฮโดรเจนไอออน (H^+) และไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) ซึ่งจะเข้าทำปฏิกิริยากับไอออนของแมกนีเซียม (Mg^{2+}) ในสารละลาย ได้ผลเป็นแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ ($Mg(OH)_2$) เหมือนกัน ตกผลึกสะสมที่รอยแตกร้าวของคอนกรีต โดยแสดงการเกิดและผลของปฏิกิริยาดังสมการที่ 11 ถึง 13



3. ผลลัพธ์จากการใช้สารละลาย $ZnSO_4$

ไฮโดรเจนไอออน (H^+) และไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) ที่เกิดจากการแตกตัวของน้ำ จากปฏิกิริยาที่ขั้วไฟฟ้า จะเข้าทำปฏิกิริยากับไอออนของซิงค์ (Zn^{2+}) ในสารละลาย ได้เป็นซิงค์ออกไซด์ (ZnO) ตกผลึกสะสมที่ขั้วไฟฟ้าลบ แสดงการเกิดและผลของปฏิกิริยาดังสมการที่ 14 ถึง 16



โดยผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นนี้ ทั้ง $Mg(OH)_2$ และ ZnO เป็นสารประกอบอินทรีย์ที่มีความสามารถในการละลายน้ำได้น้อยมาก และยังช่วยเพิ่มความตึงน้ำให้กับคอนกรีต ซึ่งจะช่วยให้คอนกรีตที่มีรอยแตกร้าวมีความคงทนมากขึ้น

ความลึกการตกผลึกปิดรอยแตกร้าว

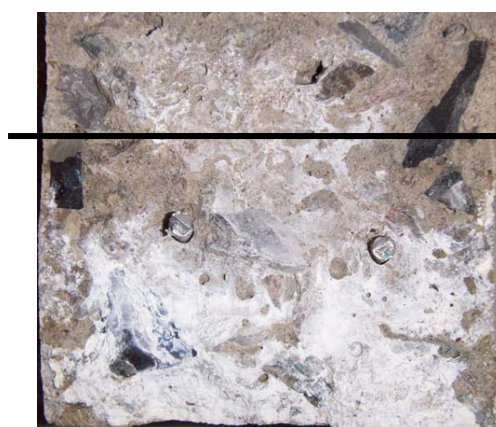
หลังจากทำการซ่อมแซมรอยแตกร้าวด้วยวิธี Electrodeposition ตามระยะเวลาที่กำหนดแล้ว เมื่อผ่าตัวอย่างตามแนวของรอยแตกร้าวเดิม จะสามารถมองเห็นสารประกอบที่ตกผลึกเข้าไปในรอยแตกร้าวได้

1. ความลึกการตกผลึกปิดรอยแตกร้าวของการใช้สารละลาย $MgCl_2$

การซ่อมแซมรอยแตกร้าวของคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยวิธี Electrodeposition ที่ใช้สารละลาย $MgCl_2$ โดยให้ผลเป็นสารประกอบ $Mg(OH)_2$ ตกผลึกปิดรอยแตกร้าวของตัวอย่างภาพที่ 12 แสดงให้เห็นว่า รอยแตกร้าวเกือบทั้งหมดถูกปิดเป็นอย่างดี จากการตกผลึกของโลหะในสารละลาย และ แสดงให้เห็นภาพตัดขวางของตัวอย่างตามแนวรอยแตกร้าวเดิม ซึ่งจะเห็นการตกผลึกเข้าไปในความลึกของรอยแตกร้าว แสดงดังภาพที่ 13 และสามารถวัดระดับความลึกของการตกผลึกได้



ภาพที่ 14 เปรียบเทียบรอยแตกร้าวของตัวอย่างก่อนและหลังการทดสอบด้วยสารละลาย MgCl_2 ความเข้มข้น 0.2 โมลต่อลิตรที่ใช้ศักย์ไฟฟ้าภายนอก 6 โวลต์

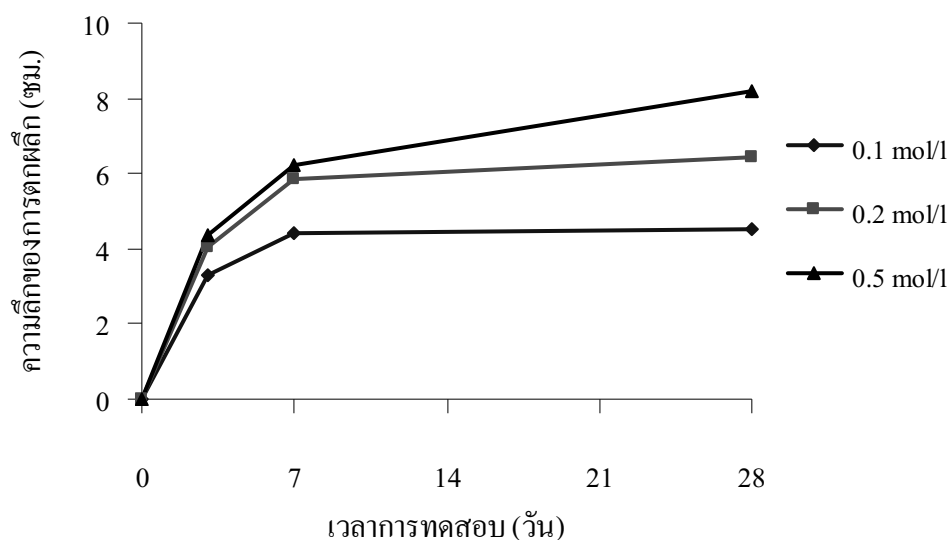


ระดับความลึกของการ
ตกผลึกปีดรอยแตกร้าว

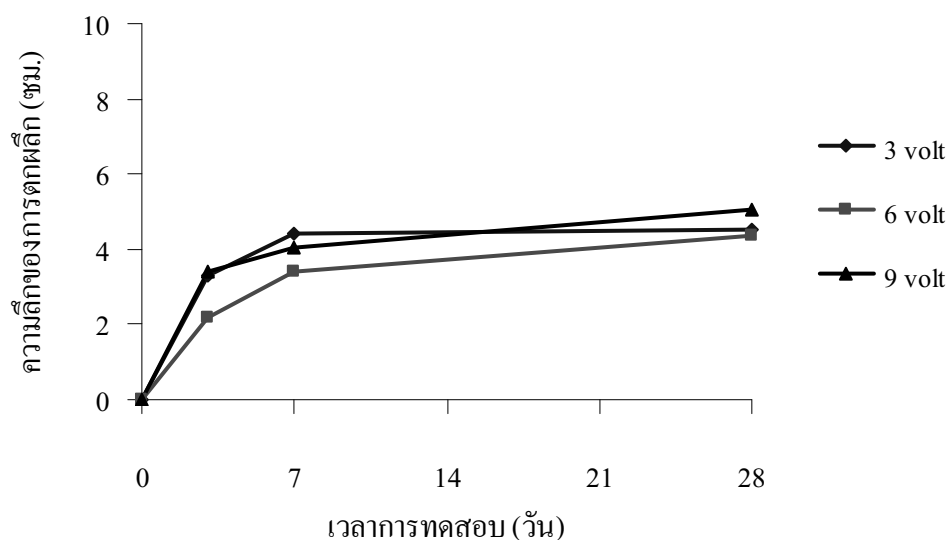
ภาพที่ 15 แสดงความลึกของการตกผลึกปีดรอยแตกร้าว จากการทดสอบด้วยสารละลาย MgCl_2 ความเข้มข้น 0.2 โมลต่อลิตรที่ใช้ศักย์ไฟฟ้าภายนอก 6 โวลต์

เมื่อพิจารณาจากผลของความเข้มข้นของสารละลาย พบว่า ความเข้มข้นของสารละลายที่มากขึ้น เป็นผลให้มีความลึกของการตกผลึกปีดรอยร้าวที่มากขึ้นด้วย โดยที่อัตราการตกผลึกเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วใน 7 วันแรกที่ให้ศักย์ไฟฟ้า ซึ่งมีค่าความลึกของการตกผลึกเป็นร้อยละ 84.2 เทียบกับที่ 28 วัน ดังภาพที่ 14 จะเห็นได้ว่า หลังจากให้ศักย์ไฟฟ้าไปแล้ว 7 วัน อัตราความลึกของการตกผลึกปีดรอยแตกร้าวมีค่าน้อย ยกเว้นสารละลาย MgCl_2 ที่มีความเข้มข้น 0.5 โมลต่อลิตร ที่อัตราการตกผลึกยังสูงอยู่ เนื่องจากยังมีไอออนของโลหะเหลืออยู่มากในสารละลาย จึงทำให้การตกผลึกปีดรอยแตกร้าวยังดำเนินต่อไปได้ ซึ่งการทดสอบโดยใช้ศักย์ไฟฟ้าภายนอก 6 และ 9 โวลต์ ก็ให้ผลไปในแนวทางเดียวกัน

นอกจากปริมาณที่เหลืออยู่ของสารที่ทำปฏิกิริยาแล้ว อีกสาเหตุหนึ่งที่ทำให้การตกผลึกปิดรอยแตกช้าลงตามเวลา คือ การตกผลึกปิดรอยแตกจะเริ่มจากด้านนอกของรอยแตกที่มีความนำไฟฟ้าสูงเข้าสู่ด้านใน ทำให้รอยแตกนั้นค่อยๆ ถูกปิดจากด้านนอก อีออนของโลหะจากสารละลายที่เหลืออยู่จึงเข้าไปทำปฏิกิริยาได้น้อยลง



ภาพที่ 16 ความลึกของการตกผลึกเข้าไปในรอยแตกช้า จากการซ่อมแซมรอยแตกช้า โดยวิธี Electrodeposition ที่ใช้สารละลาย $MgCl_2$ และศักย์ไฟฟ้าภายนอก 3 โวลต์



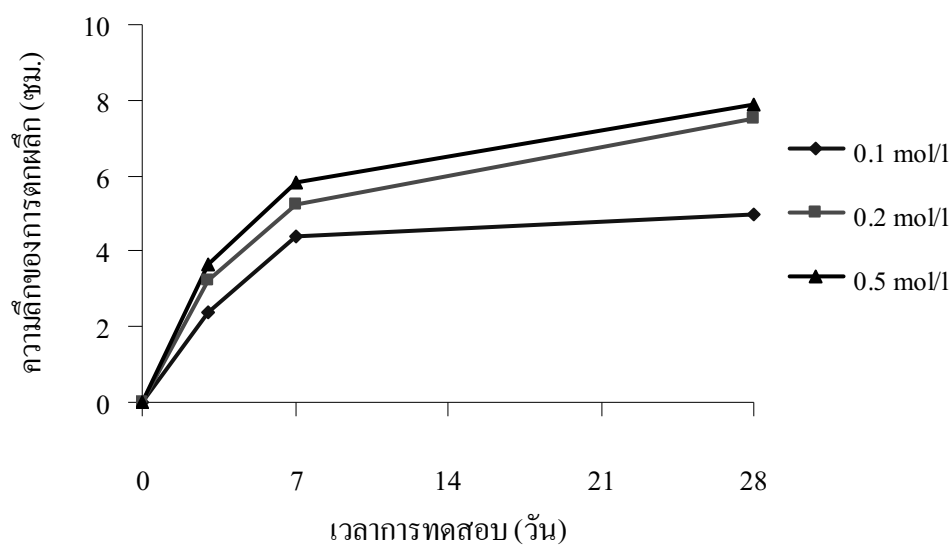
ภาพที่ 17 ความลึกของการตกผลึกเข้าไปในรอยแตกช้า จากการซ่อมแซมรอยแตกช้า โดยวิธี Electrodeposition ที่ใช้สารละลาย $MgCl_2$ ความเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร

จากภาพที่ 15 เมื่อพิจารณาความลึกการตกผลึกปีครอยแตกร้าวดโดยดูผลของตัวแปรด้าน ศักย์ไฟฟ้าภายนอกที่ให้แก่สารละลายเป็นหลัก จะเห็นว่า สารละลาย $MgCl_2$ ที่มีความเข้มข้นเท่ากัน ในที่นี้คือ 0.1 โมลต่อลิตร เมื่อให้ศักย์ไฟฟ้าภายนอกขนาด 3, 6 และ 9 โวลต์ มีความลึกการตกผลึก ปีครอยแตกร้าวดที่ใกล้เคียงกันในทุกช่วงเวลาของการทดสอบ ซึ่งเป็นเช่นเดียวกันกับสารละลาย $MgCl_2$ ที่มีความเข้มข้น 0.2 และ 0.5 โมลต่อลิตร (แสดงผลการทดสอบในภาคผนวก ข รวมไปถึง กรณียของสารละลายอื่นๆ ด้วย) ดังนั้น กล่าวได้ว่าความเข้มข้นของสารละลาย $MgCl_2$ มีอิทธิพลกับ ความลึกของการตกผลึกปีครอยแตกร้าวดมากกว่าศักย์ไฟฟ้าภายนอกที่ให้แก่สารละลาย

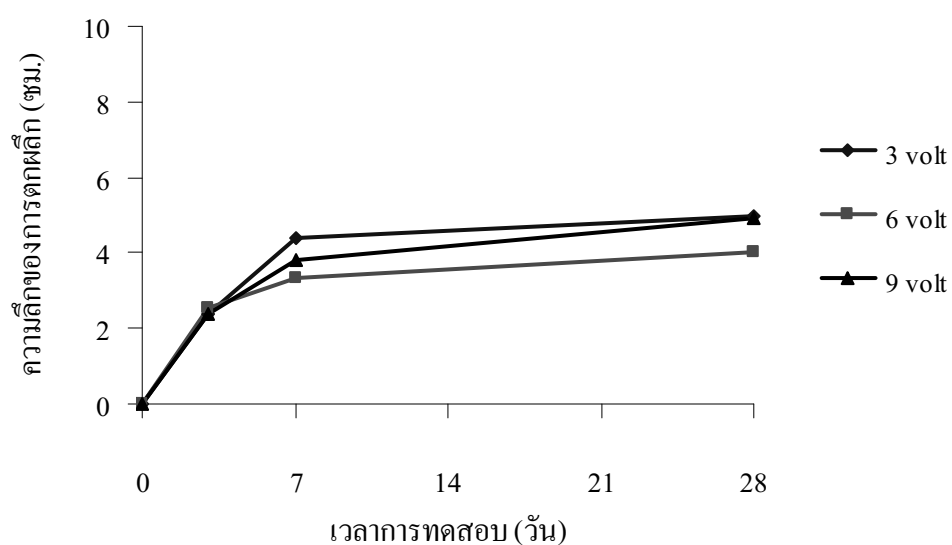
นอกจากนี้ จากการทดสอบยังพบอีกว่า ขณะที่ทำการซ่อมแซมรอยแตกร้าวดของคอนกรีต คลอไรด์ไอออนที่เกิดจากการแตกตัวของสารละลาย $MgCl_2$ ที่มีอยู่ในสารละลายไม่สามารถซึมผ่าน เข้าไปในเนื้อคอนกรีตได้ เนื่องจากที่บริเวณผิวหน้าของคอนกรีตจะหนาแน่นไปด้วยประจุลบ ทำให้เกิดการผลักคลอไรด์ไอออนที่มีประจุลบเช่นเดียวกันออกจากบริเวณผิวหน้าและรอยแตกร้าวดของ คอนกรีต ดังนั้น ทรายเท่าที่ยังมีการให้ศักย์ไฟฟ้าภายนอกแก่สารละลาย คลอไรด์ไอออนใน สารละลายจะไม่สามารถซึมผ่านเข้าไปในเนื้อคอนกรีตได้

2. ความลึกการตกผลึกปีครอยแตกร้าวดของการใช้สารละลาย $MgSO_4$

การซ่อมแซมรอยแตกร้าวดของคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยวิธี Electrodeposition ที่ใช้ สารละลาย $MgSO_4$ โดยให้ผลเป็นสารประกอบ $Mg(OH)_2$ ตกผลึกปีครอยแตกร้าวดของตัวอย่าง และ มีพฤติกรรมการตกผลึกปีครอยแตกร้าวดที่เหมือนกันกับการใช้สารละลาย $MgCl_2$ กล่าวคือ เมื่อ พิจารณาจากผลของความเข้มข้นของสารละลาย พบว่า ความเข้มข้นของสารละลายที่มากขึ้น เป็น ผลให้มีความลึกของการตกผลึกปีครอยร้าวดที่มากขึ้นด้วย โดยที่อัตราความลึกของการตกผลึก เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วใน 7 วันแรกที่ให้ศักย์ไฟฟ้า เช่นเดียวกับกรณีแรก มีค่าความลึกของการตกผลึก เป็นร้อยละ 81.6 เทียบกับที่ 28 วัน ดังภาพที่ 16 จะเห็นได้ว่า หลังจากให้ศักย์ไฟฟ้าไปแล้ว 7 วัน อัตราความลึกของการตกผลึกปีครอยแตกร้าวดมีค่าลดลง ซึ่งการทดสอบโดยใช้ศักย์ไฟฟ้าภายนอก 6 และ 9 โวลต์ ก็ให้ผลไปในแนวทางเดียวกัน



ภาพที่ 18 ความลึกของการตกผลึกเข้าไปในรอยแตกร้าว จากการซ่อมแซมรอยแตกร้าวโดยวิธี Electrodeposition ที่ใช้สารละลาย MgSO_4 และศักย์ไฟฟ้าภายนอก 3 โวลต์



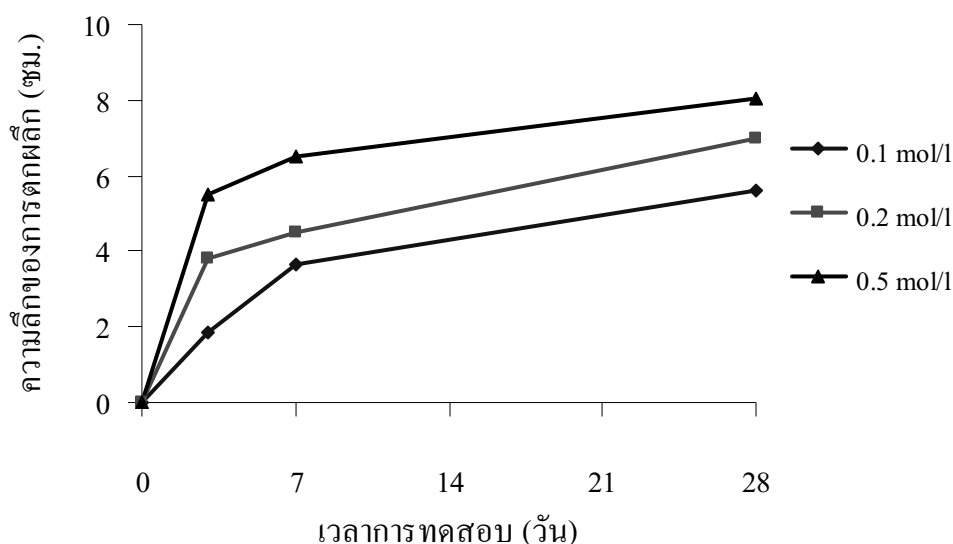
ภาพที่ 19 ความลึกของการตกผลึกเข้าไปในรอยแตกร้าว จากการซ่อมแซมรอยแตกร้าวโดยวิธี Electrodeposition ที่ใช้สารละลาย MgSO_4 ความเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร

จากภาพที่ 17 เมื่อพิจารณาความลึกการตกผลึกปิดรอยแตกร้าวโดยดูผลของตัวแปรด้าน ศักย์ไฟฟ้าภายนอกที่ให้แก่สารละลายเป็นหลัก จะเห็นว่า สารละลาย MgSO_4 ที่มีความเข้มข้น เท่ากัน ในที่นี้คือ 0.1 โมลต่อลิตร เมื่อให้ศักย์ไฟฟ้าภายนอกขนาด 3, 6 และ 9 โวลต์ มีความลึกการ

ตกผลึกปิโตรอยแตกร้าวที่ใกล้เคียงกันในทุกช่วงเวลาของการทดสอบ ซึ่งเป็นเช่นเดียวกันกับ สารละลาย MgSO_4 ที่มีความเข้มข้น 0.2 และ 0.5 โมลต่อลิตร ดังนั้น กล่าวได้ว่าความเข้มข้นของ สารละลาย MgSO_4 มีอิทธิพลกับความลึกของการตกผลึกปิโตรอยแตกร้าวมากกว่าศักย์ไฟฟ้า ภายนอกที่ให้แก่สารละลาย ดังนั้นกล่าวได้ว่า การซ่อมแซมรอยแตกร้าวของคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยวิธี Electrodeposition ที่ใช้สารละลาย MgCl_2 และ MgSO_4 ให้ผลที่เหมือนกันทุกประการทั้ง พฤติกรรมการตกผลึกและความลึกของการตกผลึกปิโตรอยแตกร้าว

3. ความลึกการตกผลึกปิโตรอยแตกร้าวของการใช้สารละลาย ZnSO_4

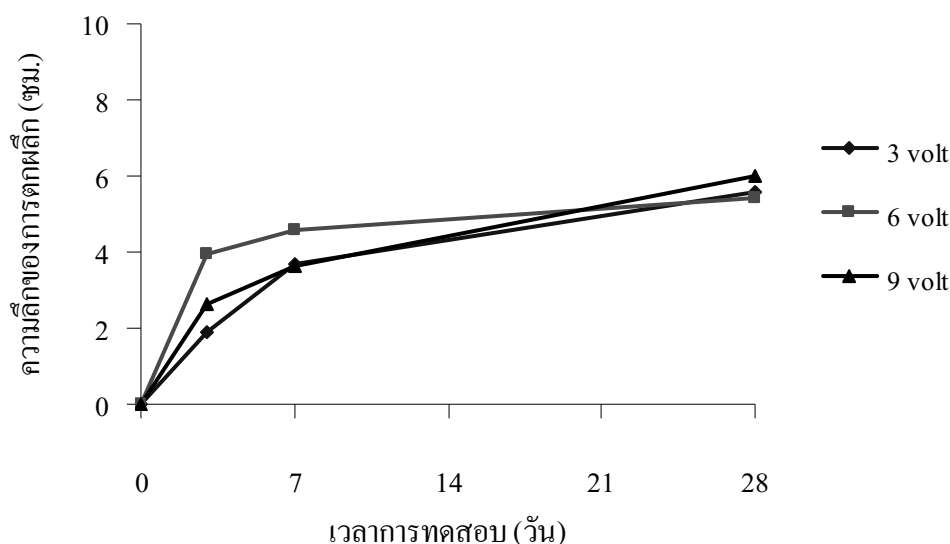
การซ่อมแซมรอยแตกร้าวของคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยวิธี Electrodeposition ที่ใช้ สารละลาย ZnSO_4 โดยให้ผลเป็นสารประกอบ ZnO ตกผลึกปิโตรอยแตกร้าวของตัวอย่าง และมีผล ของความลึกการตกผลึกปิโตรอยแตกร้าวที่เหมือนกันกับการใช้สารละลาย MgCl_2 และ MgSO_4 คือ ความเข้มข้นของสารละลายที่มากขึ้น เป็นผลให้มีความลึกของการตกผลึกปิโตรอยร้าวที่มากขึ้นด้วย โดยที่อัตราความลึกของการตกผลึกเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วใน 7 วันแรกที่ใช้ศักย์ไฟฟ้า เช่นเดียวกับ สองกรณีแรก โดยมีค่าความลึกของการตกผลึกเป็นร้อยละ 70.7 เทียบกับที่ 28 วัน ดังภาพที่ 18 ซึ่ง การทดสอบโดยใช้ศักย์ไฟฟ้าภายนอก 6 และ 9 โวลต์ ก็ให้ผลไปในแนวทางเดียวกัน



ภาพที่ 20 ความลึกของการตกผลึกเข้าไปในรอยแตกร้าว จากการซ่อมแซมรอยแตกร้าวโดยวิธี Electrodeposition ที่ใช้สารละลาย ZnSO_4 และศักย์ไฟฟ้าภายนอก 3 โวลต์

เมื่อพิจารณาความลึกการตกผลึกปัดรอยแตกร้าวดูผลของตัวแปรด้านศักย์ไฟฟ้าภายนอกที่ให้แก่สารละลายเป็นหลัก จากภาพที่ 19 จะเห็นว่า สารละลาย ZnSO_4 ที่มีความเข้มข้นเท่ากัน ในที่นี้คือ 0.1 โมลต่อลิตร เมื่อให้ศักย์ไฟฟ้าภายนอกขนาด 3, 6 และ 9 โวลต์ มีความลึกการตกผลึกปัดรอยแตกร้าวดูใกล้เคียงกันในทุกช่วงเวลาของการทดสอบ ซึ่งเป็นเช่นเดียวกันกับการใช้สารละลาย ZnSO_4 ที่มีความเข้มข้น 0.2 และ 0.5 โมลต่อลิตร ดังนั้น กล่าวได้ว่าความเข้มข้นของสารละลาย ZnSO_4 มีอิทธิพลกับความลึกของการตกผลึกปัดรอยแตกร้าวมากกว่าศักย์ไฟฟ้าภายนอกที่ให้แก่สารละลาย ซึ่งให้ผลการซ่อมแซมรอยแตกร้าวดูของคอนกรีตเสริมเหล็กโดยวิธี

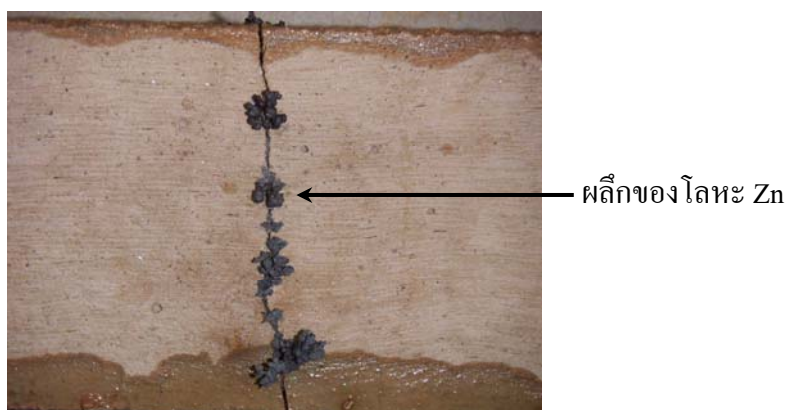
Electrodeposition ด้านความลึกการตกผลึกเหมือนกับการใช้สารละลาย MgCl_2 และ MgSO_4



ภาพที่ 21 ความลึกของการตกผลึกเข้าไปในรอยแตกร้าวดูจากการซ่อมแซมรอยแตกร้าวดูโดยวิธี

Electrodeposition ที่ใช้สารละลาย ZnSO_4 ความเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร

ข้อแตกต่างระหว่างการใช้สารละลาย ZnSO_4 กับสารละลายสองชนิดแรก คือ การทดลองโดยใช้สารละลาย ZnSO_4 ความเข้มข้น 0.5 โมลต่อลิตร นอกจากจะได้ผลิตภัณฑ์ ZnO ตามสมการที่ 16 แล้ว ยังมีอีกผลิตภัณฑ์หนึ่งที่เกิดขึ้นที่ขั้วไฟฟ้าลบด้วยคือ โลหะสังกะสี (Zn) ซึ่งจะตกผลึกอยู่ร่วมกับ ZnO จากภาพที่ 20 จะเห็นว่าโลหะ Zn ตกผลึกอยู่บริเวณภายนอกและขอบของรอยแตกร้าวดู ซึ่งจะจับตัวกันอย่างหลวมๆ และหลุดออกได้ง่าย ในขณะที่ ZnO จะตกผลึกเข้าไปในรอยแตกร้าวดูของคอนกรีตได้มากและหนาแน่นกว่า ดังนั้นกล่าวได้ว่า สารละลาย ZnSO_4 ความเข้มข้น 0.5 โมลต่อลิตรนั้น มีปริมาณของสารตั้งต้นมากเพียงพอที่จะเกิดปฏิกิริยาได้เป็นสารประกอบ ZnO และโลหะ Zn ที่ขั้วไฟฟ้าลบได้ ดังสมการที่ 17

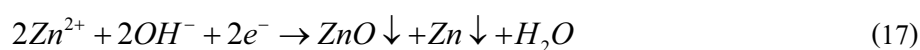


(ก) รอยแตกร้าวหลังการซ่อมแซมโดยใช้สารละลาย ZnSO_4 ความเข้มข้น 0.5 โมลต่อลิตร และศักย์ไฟฟ้าภายนอก 3 โวลต์



(ข) ภาพตัวอย่างหลังจากผ่านการซ่อมแซมโดยใช้สารละลาย ZnSO_4 ความเข้มข้น 0.5 โมลต่อลิตร และศักย์ไฟฟ้าภายนอก 3 โวลต์

ภาพที่ 22 การตกผลึกปิดรอยแตกร้าวจากการซ่อมแซมรอยแตกร้าวโดยวิธี Electrodeposition ที่ใช้สารละลาย ZnSO_4 ความเข้มข้น 0.5 โมลต่อลิตร และศักย์ไฟฟ้าภายนอก 3 โวลต์

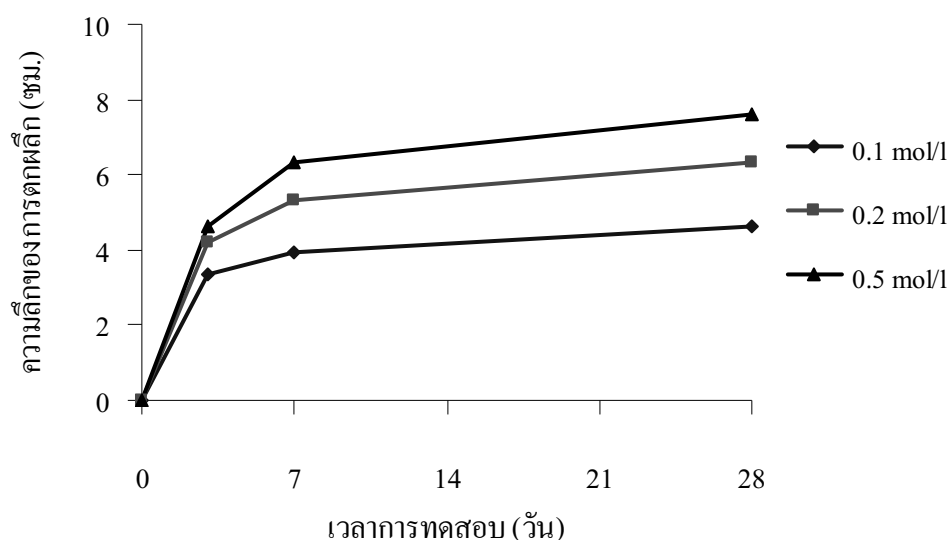


สารละลายทั้งสามชนิดคือ MgCl_2 , MgSO_4 และ ZnSO_4 ให้ผลสุดท้ายของความลึกการตกผลึกเฉลี่ยที่ 28 วันใกล้เคียงกันมาก คือ 6.19, 6.16 และ 6.76 เซนติเมตรตามลำดับ แต่อัตราการตกผลึกของสารละลาย ZnSO_4 ในช่วง 7 วันแรกมีค่าน้อยกว่า และจากผลการทดลองจะเห็นว่าความลึกการตกผลึกปิดรอยแตกร้าวขึ้นอยู่กับปัจจัยด้านความเข้มข้นเป็นสำคัญ ดังนั้น ถ้าพิจารณาผลการ

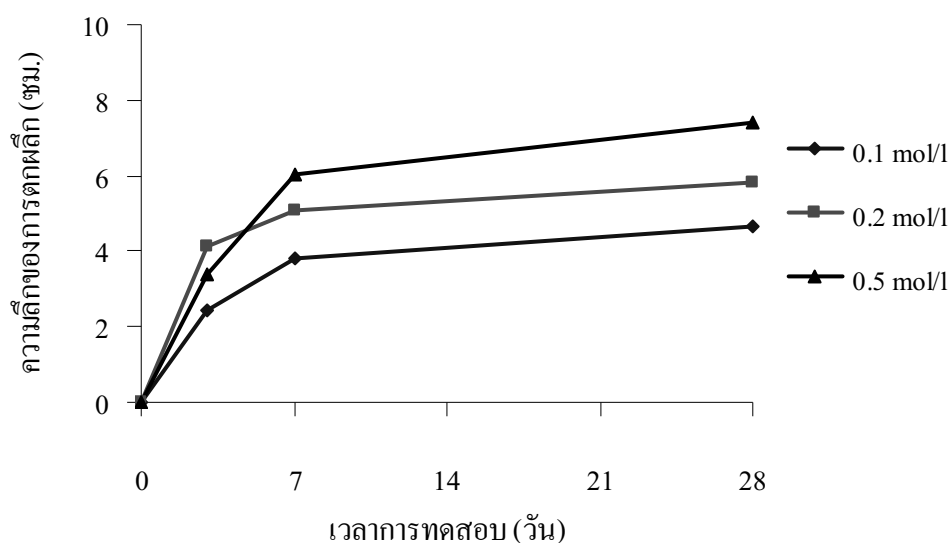
ตกผลึกโดยไม่คำนึงถึงศักย์ไฟฟ้าภายนอกที่ให้แก่สารละลาย จะสามารถเห็นพฤติกรรมตกผลึกที่ชัดเจนขึ้น

4. ความลึกการตกผลึกปัดรอยแตกร้าวของสารละลายโดยไม่คิดผลเนื่องจากศักย์ไฟฟ้า

จากผลการทดลองที่ได้ เห็นว่าศักย์ไฟฟ้าที่ให้กับสารละลายมีผลกับการตกผลึกน้อยมาก ดังนั้นสามารถพิจารณาการตกผลึกโดยไม่คำนึงถึงศักย์ไฟฟ้าภายนอกได้ จากการหาค่าเฉลี่ยความลึกของสารละลายที่มีความเข้มข้นเท่ากัน พบว่า สารละลาย $MgCl_2$ และ $MgSO_4$ ซึ่งมีโลหะแมกนีเซียมเป็นส่วนประกอบ ให้ผลของการทดสอบที่ใกล้เคียงกันทั้งความลึกของการตกผลึก และอิทธิพลของความเข้มข้นของสารละลาย ต่อความลึกของการตกผลึก ตามภาพที่ 21 และ 22 คือ ความลึกของการตกผลึกของสารละลายทั้งสองชนิด มีค่าใกล้เคียงกันในทุกความเข้มข้นและระยะเวลาการให้ศักย์ไฟฟ้า และมีพฤติกรรมตกผลึกปัดรอยแตกร้าวเหมือนกัน ดังที่กล่าวไปแล้วข้างต้น ดังนั้น จะเห็นว่า การตกผลึกปัดรอยแตกร้าวที่ใช้สารละลายที่มีส่วนผสมของโลหะชนิดเดียวกัน ในที่นี้คือ โลหะแมกนีเซียมในสารละลาย $MgCl_2$ และ $MgSO_4$ ให้ผลการทดสอบที่เหมือนกัน การตกผลึกปัดรอยแตกร้าวจึงขึ้นอยู่กับชนิดของโลหะในสารละลายมากกว่าชนิดของสารละลาย

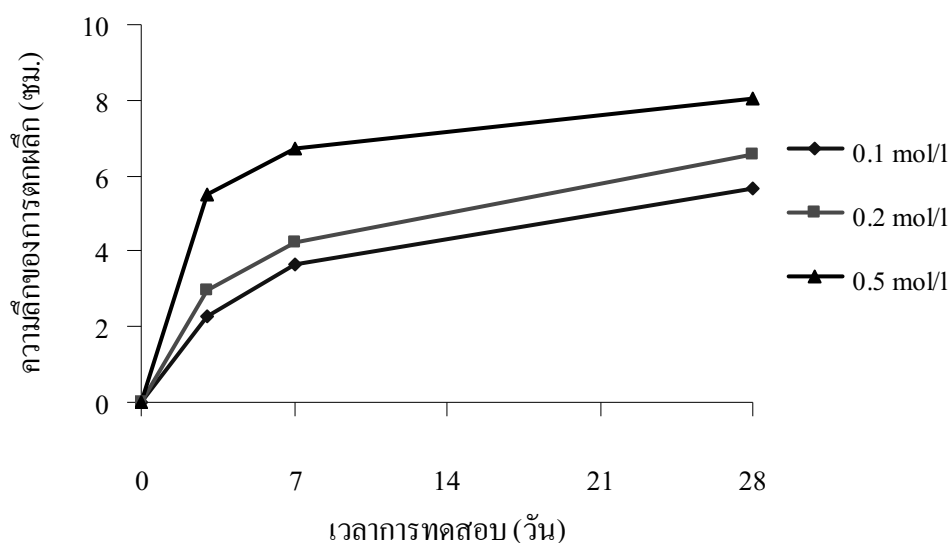


ภาพที่ 23 ความลึกของการตกผลึกเข้าไปในรอยแตกร้าวโดยใช้สารละลาย $MgCl_2$ ที่มีความเข้มข้นต่างกันโดยไม่คำนึงถึงศักย์ไฟฟ้าภายนอก



ภาพที่ 24 ความลึกของการตกผลึกเข้าไปในรอยแตกร้าวโดยใช้สารละลาย MgSO_4 ที่มีความเข้มข้นต่างกันโดยไม่คำนึงถึงศักย์ไฟฟ้าภายนอก

สำหรับสารละลาย ZnSO_4 ก็ให้ผลเช่นเดียวกัน คือ ความเข้มข้นที่สูงขึ้นจะให้ผลการตกผลึกปฏิกิริยาที่ดีขึ้น และอัตราความลึกของการตกผลึกที่สูงใน 7 วันแรกเช่นเดียวกัน ดังภาพที่ 23 นอกจากนี้ จากกราฟความลึกของการตกผลึกจะเห็นว่า ความลึกของการตกผลึกปฏิกิริยาของสารละลาย ZnSO_4 ที่มีความเข้มข้น 0.1 และ 0.2 โมลต่อลิตรนั้น ซึ่งให้ผลิตภัณฑ์เป็น ZnO ให้ผลที่ใกล้เคียงกันมากตามระยะเวลาที่ให้ศักย์ไฟฟ้า และน้อยกว่าสารละลาย ZnSO_4 ที่มีความเข้มข้น 0.5 โมลต่อลิตร ที่ให้ผลิตภัณฑ์ของการตกผลึกเป็น ZnO และ Zn อย่างเห็นได้ชัด โดยที่ระยะเวลา 7 วันของสารละลายที่มีความเข้มข้น 0.5 โมลต่อลิตร ให้ความลึกของการตกผลึกสูงกว่าที่ 28 วันของสารละลายที่มีความเข้มข้น 0.1 และ 0.2 โมลต่อลิตร

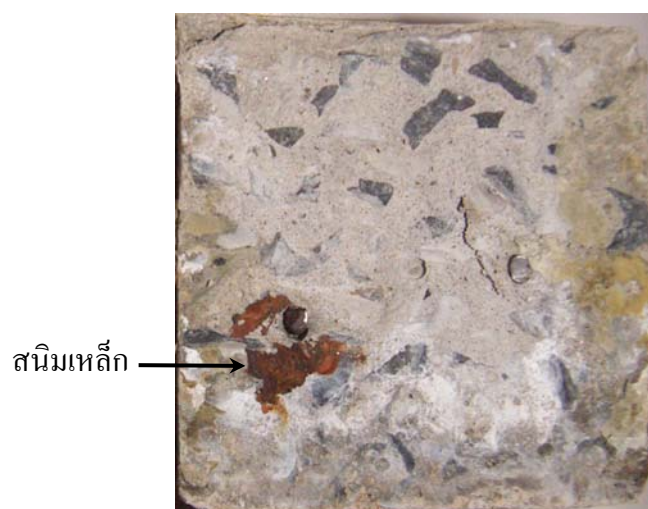


ภาพที่ 25 ความลึกของการตกผลึกเข้าไปในรอยแตกร้าวโดยใช้สารละลาย ZnSO_4 ที่มีความเข้มข้นต่างกันโดยไม่คำนึงถึงศักย์ไฟฟ้าภายนอก

การซึมผ่านของคลอไรด์

1. การซึมผ่านของคลอไรด์จากการแช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์

หลังจากนำตัวอย่างที่ผ่านการซ่อมแซมรอยแตกร้าวด้วยวิธี Electrodeposition เป็นเวลา 28 วันแล้ว โดยใช้สารละลาย MgCl_2 , MgSO_4 และ ZnSO_4 ความเข้มข้น 0.10, 0.20 และ 0.50 โมลต่อลิตร โดยให้ศักย์ไฟฟ้าขนาด 6 โวลต์ มาแช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 3 เปอร์เซ็นต์ ปรากฏว่าการใช้สารละลายทั้ง 3 ชนิดให้ผลการทดสอบที่เหมือนกัน คือ เมื่อฉีดพ่นด้วยสารละลาย 0.1N ซิลเวอร์ไนเตรด พบว่าคลอไรด์สามารถซึมผ่านเข้าไปได้ตลอดหน้าตัดที่มีรอยร้าว ดังภาพที่ 24 และ 25 มีการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตเกิดขึ้น เนื่องจาก เมื่อนำตัวอย่างที่ผ่านการซ่อมแซมไปแช่ในสารละลายโดยไม่มีการให้ศักย์ไฟฟ้าต่อมัน จะทำให้ผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการตกผลึกละลายกลับสู่สารละลายและทำให้เกิดสนิมขึ้นในเหล็กเสริม



(ก) การเกิดสนิมจากการแช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์



ระดับความลึกของการ
การซึมผ่านของคลอไรด์

(ข) ความลึกการซึมผ่านของคลอไรด์หลังฉีดพ่นด้วยสารละลายซิลเวอร์ไนเตรด

ภาพที่ 26 ภาพตัวอย่างหลังจากผ่านการซ่อมแซมที่ใช้สารละลาย $MgSO_4$ และแช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ แสดงการเกิดสนิมและความลึกการซึมผ่านของคลอไรด์



← สนิมเหล็ก

(ก) การเกิดสนิมจากการแช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์



ระดับความลึกการซึม
ผ่านของคลอไรด์

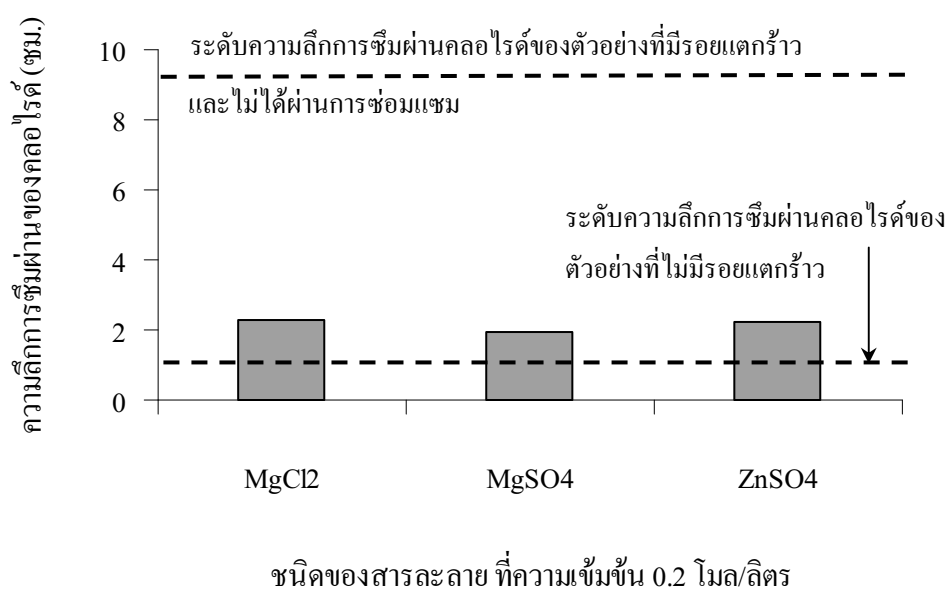
(ข) ความลึกการซึมผ่านของคลอไรด์หลังฉีดพ่นด้วยสารละลายซิลเวอร์ไนเตรด

ภาพที่ 27 ภาพตัวอย่างหลังจากผ่านการซ่อมแซมที่ใช้สารละลาย $ZnSO_4$ และแช่ในสารละลาย โซเดียมคลอไรด์ แสดงการเกิดสนิมและความลึกการซึมผ่านของคลอไรด์

2. การซึมผ่านของคลอไรด์จากการฉีดพ่นด้วยสารละลายโซเดียมคลอไรด์

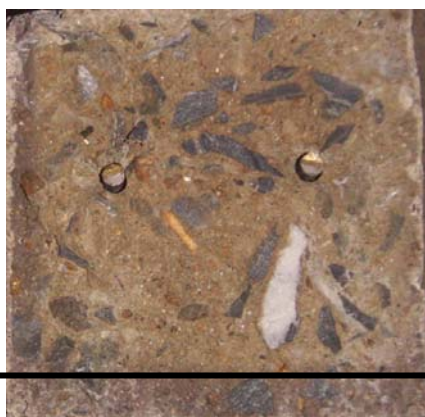
เมื่อพบว่าตัวอย่างที่ผ่านการซ่อมแซมแล้ว และนำไปแช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ไม่สามารถต้านทานการซึมผ่านของคลอไรด์ได้ เนื่องจากเกิดการละลายนกลับสู่สารละลายของ ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการตกผลึก และยังมีการเกิดสนิมของเหล็กเสริมอีกด้วย จึงทำการทดสอบการ ซึมผ่านของคลอไรด์ด้วยการเก็บตัวอย่างที่ผ่านการซ่อมแซมแล้วไว้ในระบบปิดที่มีไอระเหยของ

สารละลายโซเดียมคลอไรด์และฉีดพ่นสารละลายโซเดียมคลอไรด์ โดยในการซ่อมแซมใช้สารละลาย MgCl_2 , MgSO_4 และ ZnSO_4 ความเข้มข้น 0.20 โมลต่อลิตร โดยให้ศักย์ไฟฟ้าขนาด 6 โวลต์ ได้ผลดังภาพที่ 26



ภาพที่ 28 ความลึกของการซึมผ่านของคลอไรด์ของตัวอย่างที่ผ่านการซ่อมแซมแล้วเปรียบเทียบกับตัวอย่างที่ไม่ได้มีการซ่อมแซมและตัวอย่างที่ไม่มีรอยแตกร้าว

จากผลการทดสอบจะเห็นได้ว่า ตัวอย่างที่ผ่านการซ่อมแซมรอยแตกร้าวมีความสามารถในการต้านทานการซึมผ่านคลอไรด์ที่ดีขึ้น โดยเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างที่มีรอยแตกร้าวพบว่าการซ่อมแซมรอยแตกร้าวโดยวิธี Electrodeposition ที่ใช้สารละลายที่มีโลหะแมกนีเซียม ความเข้มข้น 0.2 โมลต่อลิตรเป็นส่วนประกอบ ช่วยลดการซึมผ่านของคลอไรด์ได้มากถึง 75.4 และ 79.2 เปอร์เซ็นต์ สำหรับสารละลาย MgCl_2 และ MgSO_4 ตามลำดับ ในขณะที่ การใช้สารละลาย ZnSO_4 ช่วยลดการซึมผ่านของคลอไรด์ได้ถึง 76.2 เปอร์เซ็นต์ โดยที่ไม่พบการเกิดสนิมของเหล็กเสริม ภายหลังการทดสอบจากการใช้สารละลายทั้ง 3 ชนิด ดังภาพที่ 27 จากผลการทดสอบนี้เห็นว่า การซ่อมแซมรอยแตกร้าวของคอนกรีตเสริมเหล็กโดยวิธี Electrodeposition ช่วยลดการซึมผ่านของคลอไรด์ที่บริเวณรอยแตกร้าวได้เป็นอย่างดี



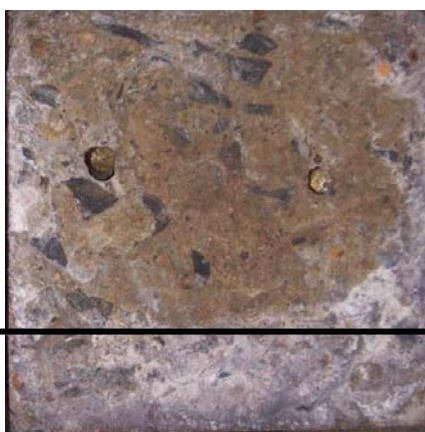
ระดับความลึกการซึม
ผ่านของคลอไรด์

(ก) การซึมผ่านของคลอไรด์ของตัวอย่างที่ไม่มีรอยแตกร้าว



ระดับความลึกการซึม
ผ่านของคลอไรด์

(ข) การซึมผ่านของคลอไรด์ของตัวอย่างที่มีรอยแตกร้าว



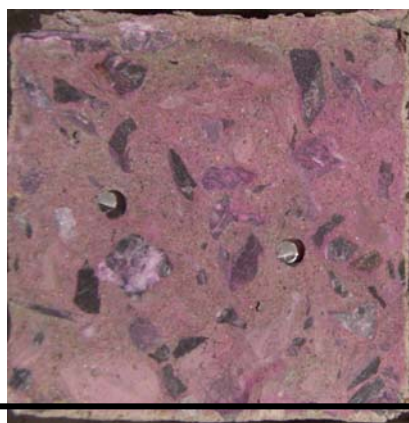
ระดับความลึกการซึม
ผ่านของคลอไรด์

(ค) การซึมผ่านของคลอไรด์ของตัวอย่างที่ผ่านการซ่อมด้วย Electrodeposition

ภาพที่ 29 เปรียบเทียบความลึกการซึมผ่านคลอไรด์ของตัวอย่างที่ไม่มีรอยแตกร้าว ตัวอย่างที่มีรอยแตกไม่ได้ผ่านการซ่อมแซม และตัวอย่างที่มีรอยแตกที่ผ่านการซ่อมแซมโดยใช้สารละลาย $MgCl_2$ ความเข้มข้น 0.2 โมลต่อลิตร

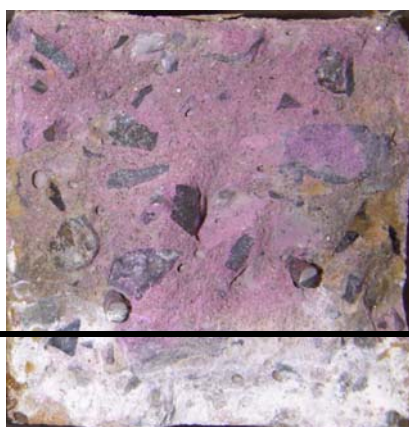
ความลึกการคาร์บอนชั้น

เมื่อนำตัวอย่างคอนกรีตที่ผ่านการซ่อมแซมด้วยวิธี Electrodeposition เป็นเวลา 28 วัน แล้วที่ใช้สารละลาย $MgCl_2$, $MgSO_4$ และ $ZnSO_4$ ความเข้มข้น 0.10, 0.20 และ 0.50 โมลต่อลิตร โดยให้ศักย์ไฟฟ้าขนาด 6 โวลต์ ไปบ่มในถังก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ความเข้มข้นร้อยละ 7 เป็นเวลา 28 วัน และผ่าตัวอย่างทดสอบตามรอยแตก ฉีดพ่นผิวหน้าคอนกรีตที่ถูกผ่าตามแนวรอยร้าวเดิม ด้วยสารละลายฟีนอล์ฟธาลิน วัดความลึกของการเกิดคาร์บอนชั้น ดังภาพที่ 28 เปรียบเทียบกับตัวอย่างทดสอบที่ไม่ได้ผ่านวิธี Electrodeposition ทั้งที่มีและไม่มีรอยแตกร้าว แสดงผลการทดสอบดังภาพที่ 29 ซึ่งแสดงให้เห็นว่า



ระดับความลึกการ
คาร์บอนชั้น

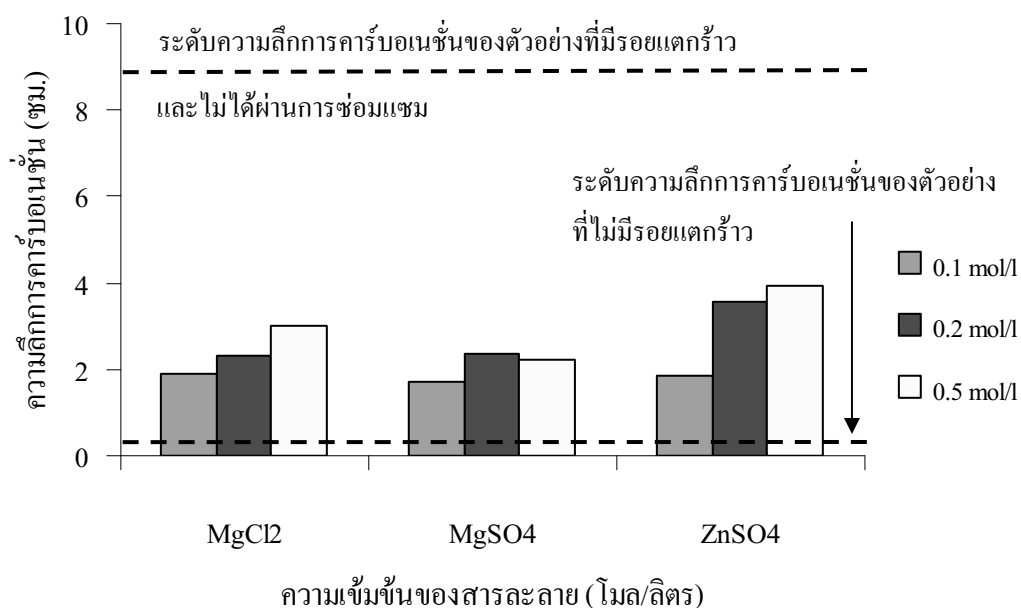
(ก) ความลึกการคาร์บอนชั้นของตัวอย่างที่ไม่มีรอยแตกร้าว



ระดับความลึกการ
คาร์บอนชั้น

(ข) ความลึกการคาร์บอนชั้นของตัวอย่างที่ผ่านการซ่อมด้วย Electrodeposition

ภาพที่ 30 เปรียบเทียบความลึกการการคาร์บอนชั้นของตัวอย่างที่ไม่มีรอยแตกร้าว และตัวอย่างที่มีรอยแตกที่ผ่านการซ่อมแซมโดยใช้สารละลาย $MgCl_2$ ความเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร



ภาพที่ 31 ความลึกของการคาร์บอนชั้นของตัวอย่างที่ผ่านการชุบเคลือบด้วยวิธี Electrodeposition เปรียบเทียบกับตัวอย่างที่ไม่ได้มีการชุบเคลือบและตัวอย่างที่ไม่มีรอยแตกร้าว

1. การชุบเคลือบรอยแตกร้าวของตัวอย่างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ใช้สารละลาย MgCl_2 , MgSO_4 และ ZnSO_4 ที่มีความเข้มข้นต่ำ ในที่นี้คือ 0.1 โมลต่อลิตรนั้น ให้ผลการต้านทานการเกิดคาร์บอนชั้นที่ดีกว่า โดยมีความลึกของการเกิดคาร์บอนชั้นประมาณ 2 เซนติเมตร เปรียบเทียบกับตัวอย่างที่ไม่มีรอยแตกร้าวและตัวอย่างที่มีรอยแตกร้าวแต่ไม่มีการชุบเคลือบ ซึ่งมีเกิดจากความลึกการคาร์บอนชั้นเป็น 0.32 และ 9.03 เซนติเมตร ตามลำดับ เห็นได้ว่าการชุบเคลือบรอยแตกร้าวของตัวอย่างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ใช้สารละลายที่มีความเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร สามารถช่วยลดการซึมผ่านของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ถึงร้อยละ 78 เทียบกับตัวอย่างที่มีรอยแตกร้าวแต่ไม่ได้ผ่านการชุบเคลือบ

2. การชุบเคลือบรอยแตกร้าวของตัวอย่างที่ใช้สารละลาย MgCl_2 และ MgSO_4 ให้ผลการต้านทานการซึมผ่านของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ใกล้เคียงกันในทุกความเข้มข้นของสารละลายทั้ง 2 ชนิด และจากผลการทดลองพบว่า ความสามารถในการต้านทานการซึมผ่านของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์นั้น ไม่มีความสัมพันธ์กับความลึกของการตกผลึกปีโครยแตกร้าว แต่น่าจะขึ้นกับความหนาแน่นของการตกผลึกเป็นสำคัญ ดังนั้น จึงไม่จำเป็นต้องใช้สารละลาย MgCl_2 และ

MgSO_4 ที่มีความเข้มข้นสูง เนื่องจากให้ผลการต้านทานการเกิดคาร์บอนเนชั่นที่ใกล้เคียงกันกับความเข้มข้นที่ต่ำกว่า ในที่นี้แนะนำให้ใช้สารละลาย MgCl_2 หรือ MgSO_4 ที่มีความเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร สำหรับใช้ในการซ่อมแซมรอยแตกร้าวของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยวิธี

Electrodeposition

จะเห็นได้ว่าการใช้สารละลายทั้ง 3 ชนิดในการทดสอบนี้ สารละลายที่มีความเข้มข้นต่ำให้ผลการต้านทานการซึมผ่านของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ดีที่สุด แต่จากผลการทดสอบด้านความลึกของการตกผลึกปฏิกิริยาดังกล่าว พบว่า ยิ่งความเข้มข้นของสารละลายเพิ่มมากขึ้นความลึกของการตกผลึกปฏิกิริยาดังกล่าวก็มากขึ้นตามไปด้วย ซึ่งให้ผลในทางตรงกันข้ามกับการเกิดคาร์บอนเนชั่น ดังนั้นการต้านทานการซึมผ่านของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของผลึกที่รอยแตกร้าว ไม่ได้ขึ้นอยู่กับความลึกของการตกผลึก แต่ขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของการตกผลึก กล่าวคือ จากภาพแสดงการตกผลึกของสารละลายเทียบกับเวลา เห็นว่า สารละลายที่มีความเข้มข้นต่ำจะมีอัตราการตกผลึกปฏิกิริยาดังกล่าวที่ช้ากว่า จึงให้ผลิตภัณฑ์ที่มีความหนาแน่นและเป็นระเบียบมากกว่า การใช้สารละลายที่มีความเข้มข้นสูง จึงให้ผลการต้านทานการซึมผ่านของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ดีกว่า

3. การซ่อมแซมรอยแตกร้าวของตัวอย่างที่ใช้สารละลาย ZnSO_4 พบว่าที่ความเข้มข้นของสารละลาย 0.1 และ 0.2 โมลต่อลิตรนั้น ให้ความลึกของการตกผลึกปฏิกิริยาดังกล่าวที่ใกล้เคียงกัน ดังภาพที่ 23 แต่ความสามารถต้านทานการซึมผ่านของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ที่ใช้สารละลายความเข้มข้น 0.2 โมลต่อลิตรต่ำกว่าค่อนข้างมาก แสดงให้เห็นว่า การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารละลาย ZnSO_4 ในช่วงเริ่มต้นเพียงเล็กน้อยทำให้ความสามารถต้านทานการซึมผ่านของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ลดลงอย่างมาก ในขณะที่ความเข้มข้นของสารละลายระหว่าง 0.2 และ 0.5 โมลต่อลิตร ให้ผลการตกผลึกปฏิกิริยาดังกล่าวที่ต่างกัน แต่กลับให้ผลการต้านทานการซึมผ่านของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ใกล้เคียงกันมาก ยากที่จะทำนายพฤติกรรม ซึ่งแตกต่างกับการใช้สารละลาย MgCl_2 และ MgSO_4

นอกจากนี้ การซ่อมแซมรอยแตกร้าวของตัวอย่างที่ใช้สารละลาย ZnSO_4 ความเข้มข้นของสารละลาย 0.5 โมลต่อลิตรนั้น ให้ผลการต้านทานการซึมผ่านของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ต่ำที่สุด ซึ่งคิดเป็น 52.3 เปอร์เซ็นต์ เทียบกับตัวอย่างที่มีรอยแตกร้าวแต่ไม่ได้ผ่านการซ่อมแซม ดังนั้นเห็นได้ว่า ผลิตภัณฑ์โลหะ Zn ที่เกิดจากการตกผลึกของสารละลาย ZnSO_4 ที่มีความเข้มข้นสารละลาย

0.5 โมลต่อลิตรนั้น ไม่ได้มีส่วนช่วยให้รอยแตกร้าวถูกปิดดีขึ้น มีเพียงผลิตภัณฑ์ ZnO เท่านั้น ที่ช่วยให้รอยแตกร้าวมีความคงทนมากขึ้น

สรุป

จากการศึกษาความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้วิธีการพอกพูนสารด้วยไฟฟ้า เพื่อปิดรอยแตกร้าวของคอนกรีตเสริมเหล็ก สามารถสรุปผลการศึกษาได้ดังนี้

1. มีความเป็นไปได้ในการใช้สารละลายที่เตรียมขึ้นเอง สำหรับการปิดรอยแตกร้าวของคอนกรีตเสริมเหล็กบนพื้นดิน โดยวิธี Electrodeposition
2. การตกผลึกปิดรอยแตกร้าวขึ้นอยู่กับชนิดของโลหะในสารละลาย และความเข้มข้นของสารละลายเป็นสำคัญ แต่ไม่ขึ้นกับศักย์ไฟฟ้าภายนอก
3. การตกผลึกของสารประกอบปิดรอยแตกร้าวของคอนกรีต ที่ใช้สารละลาย $MgCl_2$, $MgSO_4$ และ $ZnSO_4$ ช่วยเพิ่มความสามารถในการต้านทานการซึมผ่านของคลอไรด์ที่บริเวณรอยแตกร้าวได้
4. การซ่อมแซมรอยแตกร้าวของตัวอย่างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ใช้สารละลาย $MgCl_2$ และ $MgSO_4$ ที่มีความเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร ให้ผลการต้านทานการเกิดคาร์บอนเนชั่นที่ดีที่สุด สามารถช่วยลดการซึมผ่านของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่บริเวณรอยแตกร้าวได้ดี โดยความสามารถในการต้านทานการซึมผ่านของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ไม่มีความสัมพันธ์กับความลึกการตกผลึกปิดรอยแตกร้าว แต่ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารละลายเป็นสำคัญ
5. เงื่อนไขที่ให้ผลการทดลองที่ดีที่สุด สำหรับการปิดรอยแตกร้าวของคอนกรีตเสริมเหล็กบนพื้นดิน คือ การใช้สารละลายที่มีโลหะแมกนีเซียมเป็นส่วนประกอบ ($MgCl_2$ หรือ $MgSO_4$) โดยมีความเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร