

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

- คณะกรรมการการคอนกรีตและวัสดุ ภายใต้คณะกรรมการวิชาการสาขาวิศวกรรมโยธา
วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์. 2543. **ความคงทนของคอนกรีต**.
พิมพ์ครั้งที่ 1. บริษัทจุดทอง จำกัด, กรุงเทพฯ.
- ชัยยุทธ ช่างสาร และ เลิศณรงค์ ศรีพนม. 2543. **เคมีประยุกต์**. บริษัทซีเอ็ดดูเคชั่น จำกัด,
กรุงเทพฯ.
- เพ็ญศรี ทองนพเนื่อ. 2539. **เคมีวิเคราะห์เชิงไฟฟ้า**. พิมพ์ครั้งที่ 1. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย,
กรุงเทพฯ.
- ลาวัลย์ ศรีพงษ์. 2543. **การวิเคราะห์เชิงเคมีไฟฟ้า**. มหาวิทยาลัยศิลปากร, นครปฐม
- สาโรช พันธุ์แพ และ อภิชาติ ธรรมวิทย์กุล. 2526. **การชุบผิวโลหะด้วยไฟฟ้า**. มหาวิทยาลัย
เทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, กรุงเทพฯ
- สุมาลี สมนึกขวัญดี. 2531. **ปฏิบัติการเคมีเชิงฟิสิกส์**. พิมพ์ครั้งที่ 1. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์,
กรุงเทพฯ.
- อินทิรา หาญพงษ์พันธ์. 2538. **เคมีทั่วไป**. พิมพ์ครั้งที่ 4. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.
- Bentur, A., S. Diamond and N.S. Berke. 1997. **Steel Corrosion in Concrete: Fundamentals
and Civil Engineering Practice**. E & FN Spon, an imprint of Chapman & Hall,
London.
- Glasser, F. 1986. Blended Cement-Panaces or Problem?, pp. 3-4 In L.J. Parrott (eds.).
A Review of Carbonation in Reinforced Concrete. Cement and Concrete Association,
Slough, U.K.

Mindess, S., J.F. Young and D. Darwin. 2003. **Concrete**. Prentice Hall, Inc., New Jersey

Neville, A.M. 1997. **Properties of Concrete**. 4th and Final Edition. John Wiley and Sons, Inc., New York.

Nielsen, A. 1985. **Durability**. Beton Bogen, Aalborg Cement Company, Aalborg Portland.

Nishida, T., N. Otsuki, S. Miyazato, H. Udagawa and K. Kurabayashi. 2000. The investigation of Electrodeposition conditions for the crack closure of the land reinforced concrete. pp. 301-304. **Proc. of the Second International Summer Symposium**. Japan Society of Civil Engineers, Japan.

Pullar-Strecker, P. 1987. **Corrosion and Damaged Concrete: Assessment and Repair**. Butterworths, London.

Otsuki, N., M. Hisada and T. Amino. 1995. Electric current and ion migration through concrete, pp. 21-35. **Proceeding of the Regional Symposium on Infra-structures Development in Civil Engineering**. 19-20 December 1995, Bangkok.

Ryu, J.S. 2003. Influence of crack width, cover depth, water-cement ratio and temperature on the formation of Electrodeposits on the concrete surface. **Magazine of Concrete Research**. 55 (1): 35 – 40.

Ryu, J.S. and N. Otsuki. 1999. Potential for using electrodeposition method in repair of cracked mortar, pp. 271-274. **Proc. of the First International Summer Symposium**. Japan Society of Civil Engineers, Japan.

Ryu, J.S. and N. Otsuki. 2002a. Crack closure of reinforced concrete by electrodeposition technique. **Cement and Concrete Research**. 32 (1): 159 – 164.

Ryu, J.S. and N. Otsuki. 2002b. Application of electrochemical techniques for the control of cracks and steel corrosion in concrete. **Journal of Applied Electrochemistry**. 32: 635-639.

Ryu, J.S. and N. Otsuki. 2005. Experimental study on repair of concrete structural members by electrochemical method. **Scripta Materialia**. 52: 1123-1127.

Scannell, W.T. and A. Sohanghpurwala. 1993. Cathodic protection as a corrosion control alternative. **Concrete Corrosion Specialists**, Concorr, Inc.

Sohanghpurwala, A. and W.T. Scannell. 1994. Repair and protection of concrete exposed to seawater. **Concrete Corrosion Specialists**, Concorr, Inc.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

คุณสมบัติของส่วนผสมคอนกรีต และสารเคมี

ตารางผนวกที่ ก1 คุณสมบัติทางกายภาพของมวลรวม

คุณสมบัติ	มวลรวมละเอียด	มวลรวมหยาบ
ความถ่วงจำเพาะ	2.60	2.77
หน่วยน้ำหนักมวลรวม (กก./ลบ.ม.)	ไม่มี	1,502
เปอร์เซ็นต์การดูดซึม	1.35	0.42
โมดูลัสความละเอียด	2.40	ไม่มี

หมายเหตุ ไม่มี หมายถึง ไม่ได้ดำเนินการทดสอบสำหรับใช้ในการออกแบบส่วนผสม

ตารางผนวกที่ ก2 ส่วนผสมคอนกรีตสำหรับการทดสอบต่อปริมาตร 1 ลบ.ม.

กำลังอัดประลัย (กก./ตร.ซม.)	อัตราน้ำต่อ ซีเมนต์	ซีเมนต์ (กก.)	น้ำ (กก.)	หิน 3/4” (กก.)	ทราย (กก.)	ค่ายุบตัว (ซม.)
240	0.64	314.5	201	990	870	8-10

ตารางผนวกที่ ก3 คุณสมบัติและส่วนผสมของ $MgSO_4$

สัญลักษณ์	$MgSO_4 \cdot 7H_2O$
Molecular weight	246.48 g/mol
Maximum limit of impurities	%
<i>Cl</i>	0.0003
<i>N</i>	0.002
Heavy Metal (as <i>Pb</i>)	0.0005
<i>Ca</i>	0.005
<i>Cu</i>	0.0001
<i>Fe</i>	0.0001
<i>K</i>	0.001
<i>Mn</i>	0.0005
<i>Pb</i>	0.0001

ตารางผนวกที่ ก4 คุณสมบัติและส่วนผสมของ $MgCl_2$

สัญลักษณ์	$MgCl_2 \cdot 6H_2O$
Molecular weight	203.30 g/mol
Description	Colorless, hygroscopic crystals
Maximum limit of impurities	%
NO_3	0.001
PO_4	0.0005
Zn	0.0005
Mn	0.0005
Heavy Metal (as Pb)	0.0005
As	0.0003
Ba	0.002
NH_4	0.002
SO_4	0.002
Cu	0.0002
Fe	0.0002
Pb	0.0002
K	0.001
Na	0.001
Si	0.001
Ca	0.01
Conforms to ACS & FCC	

ตารางผนวกที่ ก5 คุณสมบัติและส่วนผสมของ ZnSO_4

สัญลักษณ์	$\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$
Molecular weight	287.54 g/mol
Description	Colorless, efflorescent crystals
Maximum limit of impurities	%
<i>Cl</i>	0.0005
<i>Cd</i>	0.0005
<i>Cu</i>	0.0005
<i>Fe</i>	0.0005
<i>NO</i> ₃	0.002
<i>As</i>	0.0001
<i>Ca</i>	0.001
<i>Pb</i>	0.001
<i>K</i>	0.001
<i>Na</i>	0.001
<i>NH</i> ₄	0.001
<i>Mn</i>	0.0003
<i>Mg</i>	0.005
Conforms to ACS	

ภาคผนวก ข

ผลการทดสอบความถี่ของการตกผลึกปีครอยแตกร้า

ตารางผนวกที่ ข1 ความลึกของการตกผลึกปีดรอยแตกร้าวโดยสารละลาย $MgCl_2$

ความเข้มข้น (โมล/ลิตร)	เวลาทดสอบ (วัน)	ศักย์ไฟฟ้า (โวลต์)	ความลึกการตกผลึกปีดรอยแตกร้าวโดยสารละลาย $MgCl_2$ (ซม.)					
			1	2	3	4	5	เฉลี่ย
0.1	3	3	2.5	3.0	3.3	3.1	3.6	3.10
		3	3.5	3.5	4.0	3.7	2.8	3.50
		6	2.5	1.0	1.1	1.8	2.4	1.76
		6	3.5	2.0	2.6	2.7	2.0	2.56
		9	3.0	2.5	2.0	2.5	2.5	2.51
		9	4.0	4.5	4.3	4.3	4.3	4.28
	7	3	4.0	3.0	5.0	4.6	3.7	4.06
		3	5.5	4.5	4.5	4.5	4.9	4.78
		6	4.4	4.4	4.1	3.5	4.1	4.10
		6	2.4	2.8	2.7	2.6	2.9	2.68
		9	3.2	2.6	5.0	4.1	5.5	4.08
		9	5.2	3.8	3.3	3.8	3.7	3.96
	28	3	3.9	4.3	4.5	6.9	6.5	5.22
		3	3.8	3.7	3.7	4.0	4.0	3.84
		6	4.4	4.7	4.5	5.0	5.3	4.78
		6	4.1	4.0	3.5	4.1	4.0	3.94
		9	7.8	4.5	4.5	4.0	4.0	4.96
		9	4.9	5.4	5.2	5.0	5.1	5.12
0.2	3	3	4.0	4.5	4.0	4.3	4.5	4.26
		3	4.0	4.0	3.7	3.3	4.0	3.80
		6	3.5	4.7	6.1	5.9	5.7	5.18
		6	3.3	3.9	3.7	3.4	2.8	3.42
		9	3.1	4.5	2.5	2.7	3.6	3.28
		9	6.0	6.7	4.3	4.1	5.5	5.32

ตารางผนวกที่ ข1 (ต่อ)

ความเข้มข้น (โมล/ลิตร)	เวลาทดสอบ (วัน)	ศักย์ไฟฟ้า (โวลต์)	ความถี่การตกผลึกปีตรอยแตกเร็วโดยสารละลาย MgCl ₂ (ชม.)					เฉลี่ย
			1	2	3	4	5	
0.2	7	3	6.0	5.6	5.5	5.9	6.3	5.86
		3	6.0	5.8	6.3	6.1	5.2	5.88
		6	6.5	7.0	7.0	7.5	7.0	7.00
		6	2.3	2.0	2.3	2.4	3.0	2.40
		9	7.4	5.6	6.4	8.0	6.9	6.86
		9	3.4	3.2	5.3	4.0	4.0	3.98
	28	3	5.7	5.4	4.8	6.8	7.2	5.98
		3	6.5	6.6	7.5	7.0	7.0	6.92
		6	7.0	6.5	6.5	6.0	7.5	6.70
		6	6.5	5.7	6.0	3.2	3.5	4.98
		9	5.9	7.4	6.0	6.2	6.5	6.40
		9	6.0	7.1	7.1	7.5	7.9	7.12
0.5	3	3	4.5	4.5	4.0	3.7	5.0	4.34
		6	4.9	6.4	6.9	3.9	4.4	5.30
		9	4.1	3.6	6.0	3.6	4.3	4.32
	7	3	6.0	7.0	5.7	6.0	6.5	6.24
		6	8.0	6.5	5.3	4.2	5.6	5.92
		9	6.8	7.2	6.7	7.2	5.9	6.76
	28	3	7.5	7.9	7.8	8.3	8.3	7.96
		3	8.7	8.5	8.3	8.4	8.2	8.42
		6	7.0	7.0	5.7	5.5	5.0	6.04
		6	5.5	6.9	7.8	8.0	7.6	7.16
		9	6.9	7.8	7.8	8.3	8.3	7.82
		9	6.3	8.5	8.7	8.5	8.4	8.08

ตารางผนวกที่ ข2 ความลึกของการตกผลึกปีโตรอยแตกร้าวโดยสารละลาย MgSO_4

ความเข้มข้น (โมล/ลิตร)	เวลาทดสอบ (วัน)	ศักย์ไฟฟ้า (โวลต์)	ความลึกการตกผลึกปีโตรอยแตกร้าวโดยสารละลาย MgSO_4 (ซม.)					
			1	2	3	4	5	เฉลี่ย
0.1	3	3	3.0	2.0	2.0	2.4	2.0	2.28
		3	2.5	2.7	2.0	2.1	3.0	2.46
		6	3.2	2.4	1.7	2.5	2.3	2.42
		6	3.0	2.6	2.3	2.5	2.7	2.62
		9	3.0	2.2	2.0	2.6	2.5	2.46
		9	2.9	2.1	2.3	1.8	2.4	2.30
	7	3	6.1	3.0	6.5	4.3	4.8	4.94
		3	3.0	3.2	4.5	4.4	4.0	3.82
		6	2.6	3.9	2.6	3.4	3.9	3.28
		6	2.7	3.7	3.1	3.7	3.5	3.34
		9	2.5	2.3	1.9	2.3	2.3	2.26
		9	4.5	5.3	5.4	5.7	5.9	5.36
	28	3	6.8	4.8	4.3	5.3	5.3	5.30
		3	3.7	4.6	5.0	4.7	5.3	4.66
		6	4.4	4.2	4.2	4.8	4.0	4.32
		6	4.3	4.0	3.7	3.5	3.3	3.76
		9	6.1	4.4	4.7	3.9	4.0	4.62
		9	3.9	6.1	6.0	5.2	5.0	5.24
0.2	3	3	3.5	3.0	3.0	2.9	3.2	3.12
		3	3.5	3.0	3.3	3.5	3.3	3.32
		6	3.2	4.8	4.6	4.4	4.4	4.27
		6	4.2	3.6	3.6	3.7	3.8	3.78
		9	4.3	4.9	4.4	4.4	4.0	4.40
		9	5.4	4.1	3.3	3.5	4.0	4.06

ตารางผนวกที่ ข2 (ต่อ)

ความเข้มข้น (โมล/ลิตร)	เวลาทดสอบ (วัน)	ศักย์ไฟฟ้า (โวลต์)	ความถี่การตกผลึกปีตรอยแตกเร็วโดยสารละลาย MgSO ₄ (ชม.)					เฉลี่ย
			1	2	3	4	5	
0.2	7	3	5.0	4.0	5.7	5.7	5.0	5.08
		3	5.9	5.1	5.7	5.3	4.9	5.38
		6	4.2	5.0	4.6	4.4	4.3	4.50
		6	4.5	4.6	4.8	3.7	4.3	4.38
		9	5.8	4.6	4.6	5.4	5.2	5.12
		9	6.4	6.4	5.5	5.6	6.5	6.08
	28	3	5.3	7.2	7.2	7.8	7.8	7.06
		3	8.0	7.6	7.8	8.2	8.2	7.96
		6	7.7	7.7	6.5	6.5	4.0	6.48
		6	5.3	5.3	4.5	5.3	5.0	5.08
		9	7.5	7.4	6.4	6.2	6.0	6.70
		9	4.1	5.3	5.3	5.9	5.0	5.12
0.5	3	3	3.5	3.5	4.0	3.3	4.0	3.66
		6	2.7	2.2	3.0	3.2	4.4	3.10
		9	5.9	5.2	5.2	6.0	7.8	6.02
	7	3	6.0	5.5	6.0	6.0	5.7	5.84
		6	4.5	5.1	7.4	7.3	4.9	5.84
		9	6.3	6.7	6.5	5.7	6.9	6.42
	28	3	7.2	8.2	8.6	7.6	7.0	7.72
		3	8.0	8.1	8.1	7.6	8.5	8.06
		6	7.8	7.7	8.3	7.2	7.0	7.60
		6	7.5	8.3	8.3	7.9	7.4	7.88
		9	7.0	7.8	7.5	7.5	4.0	6.76
		9	4.4	7.3	8.8	7.4	4.9	6.56

ตารางผนวกที่ ข3 ความลึกของการตกผลึกปีโตรอยแตกร้าวโดยสารละลาย ZnSO_4

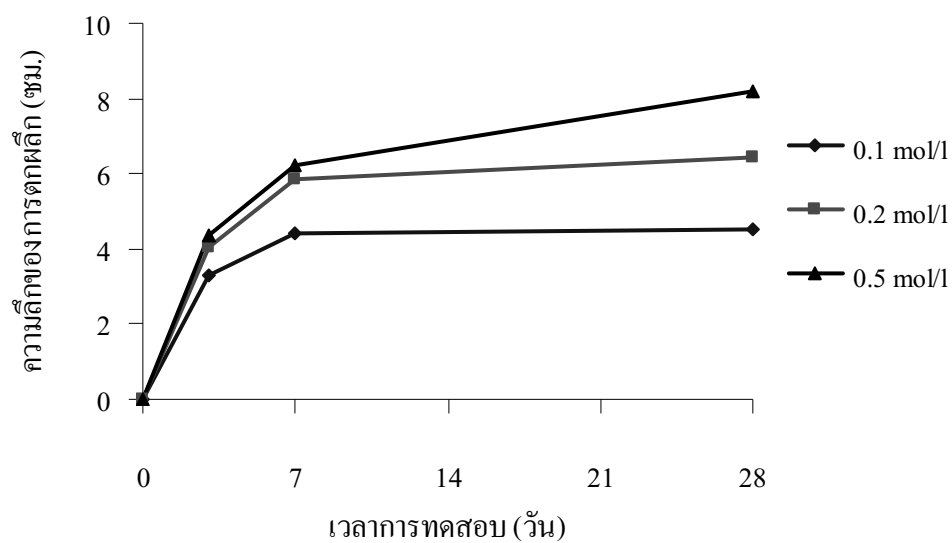
ความเข้มข้น (โมล/ลิตร)	เวลาทดสอบ (วัน)	ศักย์ไฟฟ้า (โวลต์)	ความลึกการตกผลึกปีโตรอยแตกร้าวโดยสารละลาย ZnSO ₄ (ซม.)					
			1	2	3	4	5	เฉลี่ย
0.1	3	3	1.0	1.2	3.2	3.1	1.9	2.08
		3	2.0	1.9	1.4	1.2	1.8	1.66
		6	3.5	2.8	1.8	2.8	2.7	2.72
		6	4.7	8.0	5.5	5.0	2.7	5.18
		9	2.6	2.4	2.5	3.2	2.7	2.68
		9	1.8	1.8	4.0	2.6	2.8	2.60
	7	3	4.8	3.8	3.5	3.4	3.7	3.84
		3	3.2	3.2	3.5	4.7	2.9	3.50
		6	2.9	4.8	5.4	5.0	4.6	4.54
		6	3.4	4.9	4.9	5.3	4.7	4.64
		9	3.2	2.4	3.3	5.6	3.6	3.62
		9	4.0	3.5	3.4	3.8	3.4	3.62
	28	3	4.0	5.1	5.7	6.1	6.1	5.40
		3	6.5	6.0	5.1	5.7	5.7	5.80
		6	5.5	5.5	5.0	4.5	4.0	4.90
		6	5.8	5.5	6.1	6.5	6.0	5.98
		9	5.8	6.3	6.3	5.7	5.5	5.92
		9	5.0	6.1	6.0	6.7	6.7	6.10
0.2	3	3	5.5	1.4	3.2	2.9	3.3	3.26
		3	3.8	4.0	5.0	4.7	4.4	4.38
		6	4.1	3.5	3.5	2.3	3.4	3.36
		6	2.6	2.8	2.8	3.4	2.3	2.78
		9	3.4	3.4	2.0	3.0	3.0	2.96
		9	2.0	2.6	2.7	3.9	2.3	2.70

ตารางผนวกที่ ข3 (ต่อ)

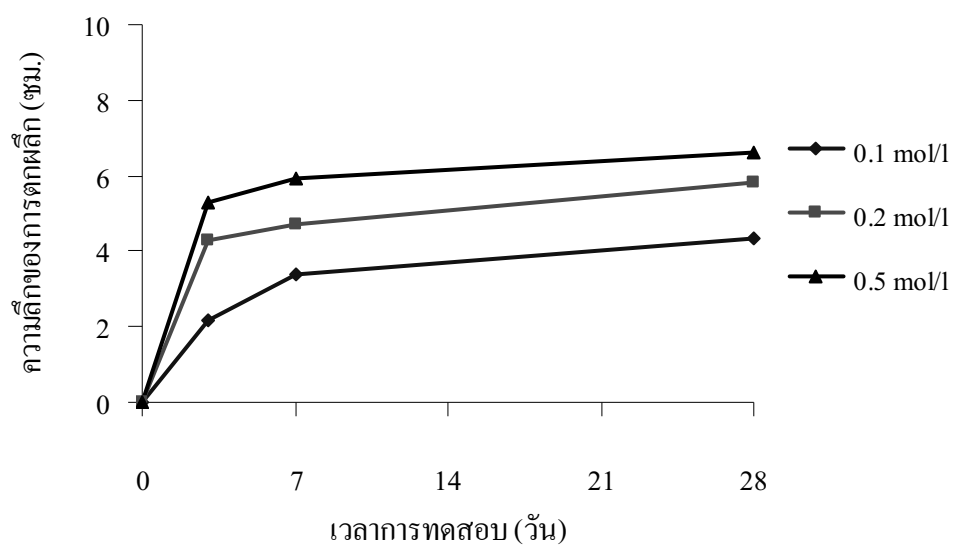
ความเข้มข้น (โมล/ลิตร)	เวลาทดสอบ (วัน)	ศักย์ไฟฟ้า (โวลต์)	ความถี่การตกผลึกปีตรอยแตกเร็วโดยสารละลาย ZnSO ₄ (ชม.)					เฉลี่ย
			1	2	3	4	5	
0.2	7	3	4.3	3.7	4.5	4.8	3.9	4.24
		3	4.7	4.3	5.5	4.3	5.0	4.76
		6	3.6	3.5	6.7	3.0	4.2	3.40
		6	6.2	6.4	7.3	7.3	7.0	4.20
		9	6.1	6.4	7.5	7.5	8.0	4.66
		9	6.8	7.1	7.0	5.9	5.7	4.20
	28	3	7.1	7.6	6.8	6.3	6.4	6.84
		3	5.7	6.8	6.8	6.0	5.2	7.10
		6	5.4	6.1	5.9	6.6	6.0	6.50
		6	6.1	5.0	5.2	5.4	5.8	6.84
		9	5.3	4.0	5.2	4.2	4.4	6.10
		9	6.0	8.6	7.7	3.8	6.0	6.00
0.5	3	3	6.5	7.5	6.3	6.2	6.0	5.50
		6	4.4	5.3	5.3	5.3	5.2	4.62
		9	5.5	8.3	8.3	5.7	7.0	6.42
	7	3	7.0	7.9	8.2	7.2	6.7	6.51
		6	8.5	8.9	8.8	8.5	8.5	5.10
		9	8.8	8.9	8.7	8.3	8.0	6.96
	28	3	8.0	7.9	7.9	8.0	7.8	7.40
		3	7.7	7.3	7.7	7.8	6.7	8.64
		6	8.1	8.3	8.1	8.5	8.5	8.54
		6	7.5	8.3	8.3	7.9	7.4	7.92
		9	7.0	7.8	7.5	7.5	4.0	7.44
		9	4.4	7.3	8.8	7.4	4.9	8.30

ตารางผนวกที่ ๔ ผลของความเข้มข้นต่อความลึกของการตกผลึกปีครอยแตกร้าวดโดย
สารละลาย $MgCl_2$

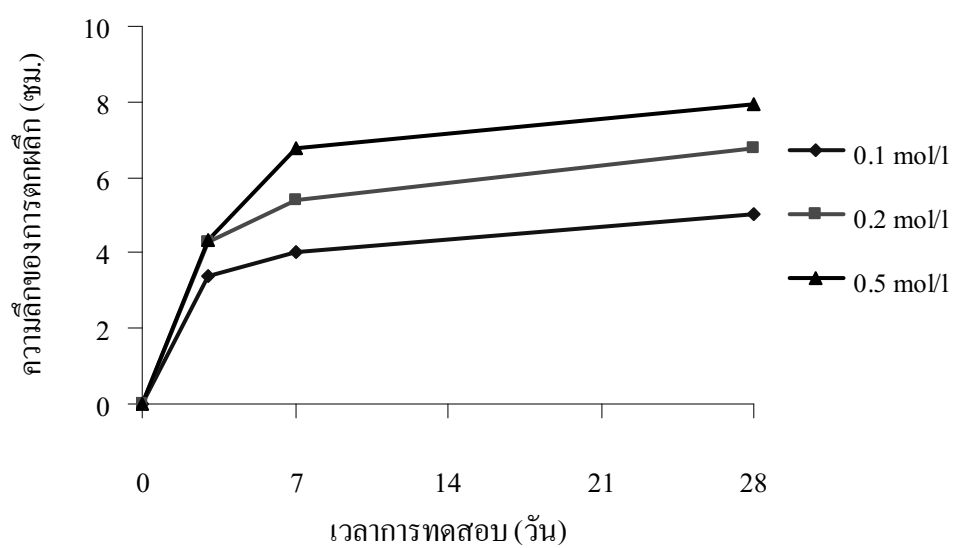
ความลึกการตกผลึกปีครอยแตกร้าวดโดยสารละลาย MgCl ₂ (ซม.)									
เวลาทดสอบ (วัน)	ศักย์ไฟฟ้า (โวลต์)								
	3			6			9		
	ความเข้มข้นของสารละลาย (โมลต่อลิตร)								
	0.1	0.2	0.5	0.1	0.2	0.5	0.1	0.2	0.5
3	3.30	4.03	4.34	2.16	4.30	5.30	3.39	4.30	4.32
7	4.42	5.87	6.24	3.39	4.70	5.92	4.02	5.42	6.76
28	4.53	6.45	8.19	4.36	5.84	6.60	5.04	6.76	7.95



ภาพผนวกที่ ๑ ความลึกของการตกผลึกเข้าไปในรอยแตกร้าวดจากการซ่อมแซมรอยแตกร้าวดโดย
วิธี Electrodeposition ที่ใช้สารละลาย $MgCl_2$ และศักย์ไฟฟ้าภายนอก 3 โวลต์



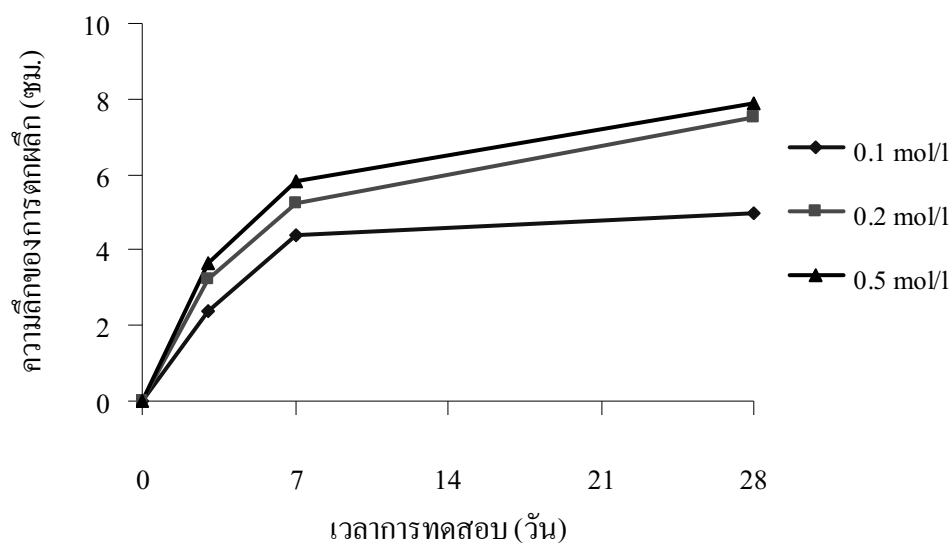
ภาพผนวกที่ ข2 ความลึกของการตกผลึกเข้าไปในรอยแตกร้าว จากการซ่อมแซมรอยแตกร้าวโดยวิธี Electrodeposition ที่ใช้สารละลาย $MgCl_2$ และศักย์ไฟฟ้าภายนอก 6 โวลต์



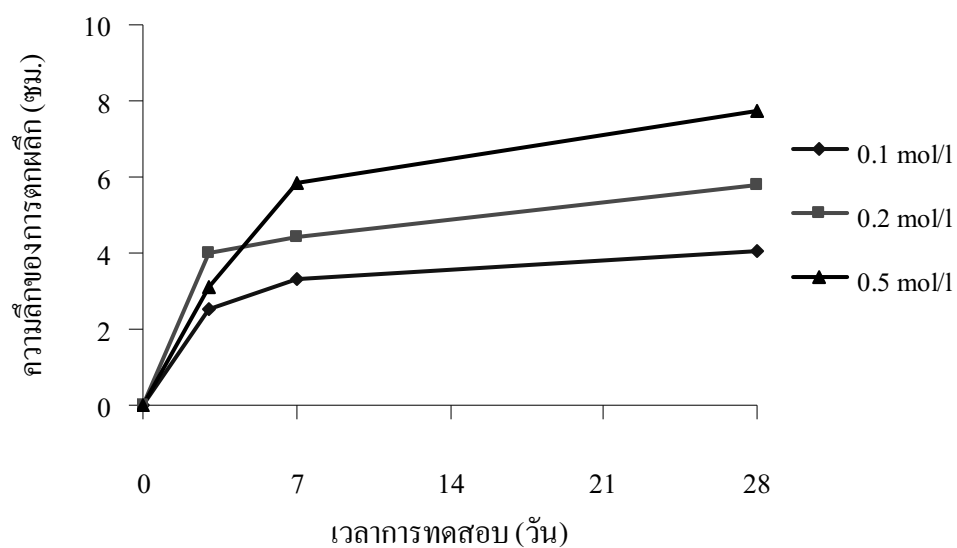
ภาพผนวกที่ ข3 ความลึกของการตกผลึกเข้าไปในรอยแตกร้าว จากการซ่อมแซมรอยแตกร้าวโดยวิธี Electrodeposition ที่ใช้สารละลาย $MgCl_2$ และศักย์ไฟฟ้าภายนอก 9 โวลต์

ตารางผนวกที่ ข5 ผลของความเข้มข้นต่อความลึกของการตกผลึกปicroยแตกร้าวโดย
สารละลาย MgSO_4

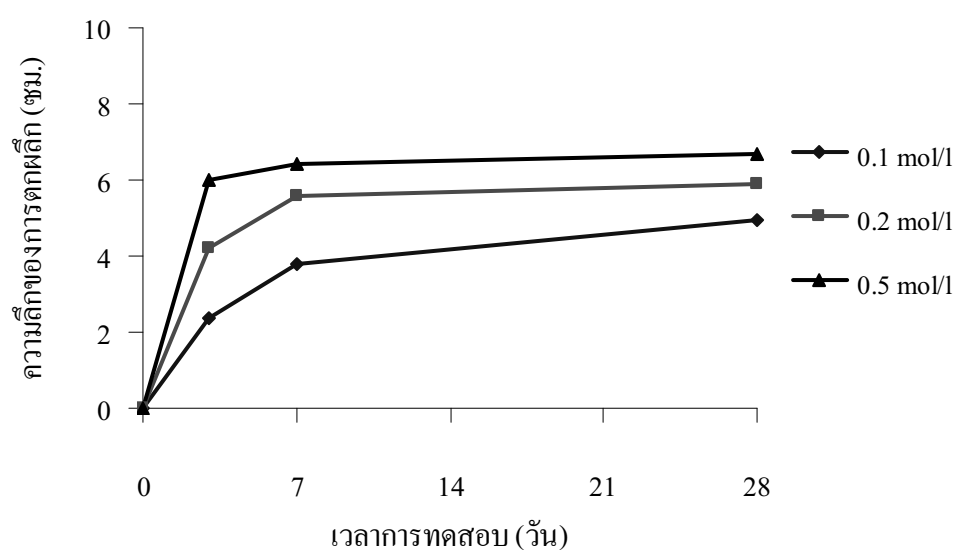
ความลึกการตกผลึกปีตรอยแตกร้าวโดยสารละลาย MgSO ₄ (ชม.)									
เวลาทดสอบ (วัน)		ศักย์ไฟฟ้า (โวลต์)							
		3			6			9	
		ความเข้มข้นของสารละลาย (โมลต่อลิตร)							
		0.1	0.2	0.5	0.1	0.2	0.5	0.1	0.2
3	2.37	3.22	3.66	2.52	4.03	3.10	2.38	4.23	6.02
7	4.38	5.23	5.84	3.31	4.44	5.84	3.81	5.60	6.42
28	4.98	7.51	7.89	4.04	5.78	7.74	4.93	5.91	6.66



ภาพผนวกที่ ข4 ความลึกของการตกผลึกเข้าไปในรอยแตกร้าว จากการซ่อมแซมรอยแตกร้าวโดย
วิธี Electrodeposition ที่ใช้สารละลาย MgSO_4 และศักย์ไฟฟ้าภายนอก 3 โวลต์



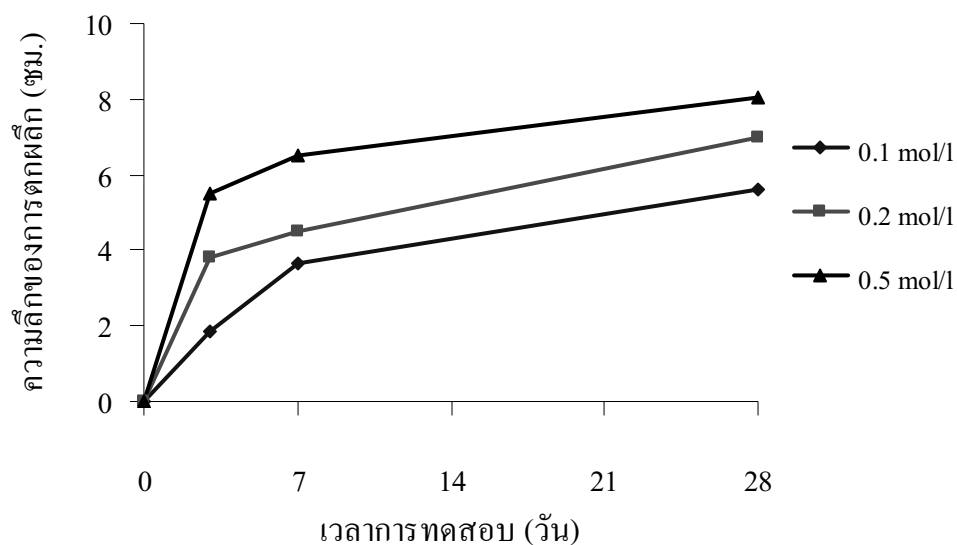
ภาพผนวกที่ ข5 ความลึกของการตกผลึกเข้าไปในรอยแตกร้าว จากการซ่อมแซมรอยแตกร้าวโดยวิธี Electrodeposition ที่ใช้สารละลาย $MgSO_4$ และศักย์ไฟฟ้าภายนอก 6 โวลต์



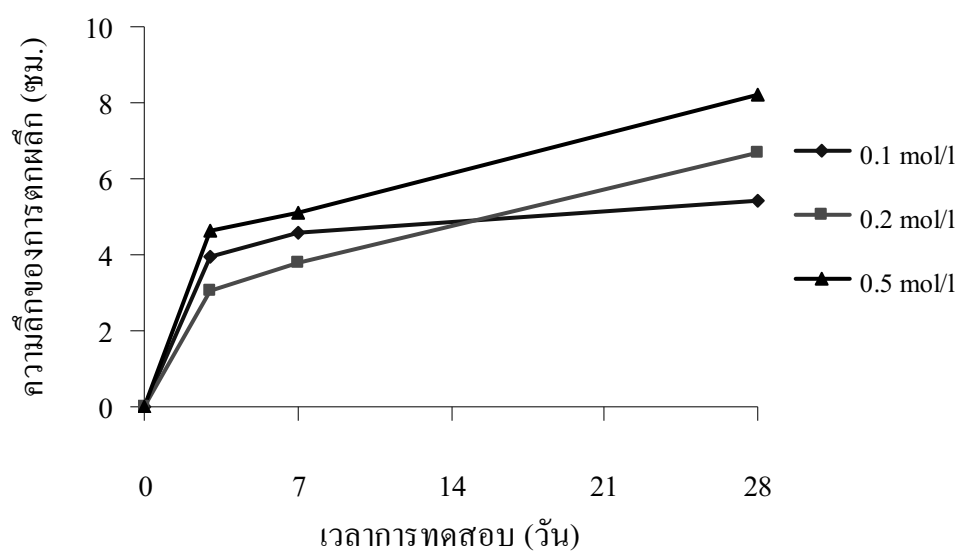
ภาพผนวกที่ ข6 ความลึกของการตกผลึกเข้าไปในรอยแตกร้าว จากการซ่อมแซมรอยแตกร้าวโดยวิธี Electrodeposition ที่ใช้สารละลาย $MgSO_4$ และศักย์ไฟฟ้าภายนอก 9 โวลต์

ตารางผนวกที่ ข6 ผลของความเข้มข้นต่อความลึกของการตกผลึกปีครอยแตกร้าวดโดย
สารละลาย ZnSO_4

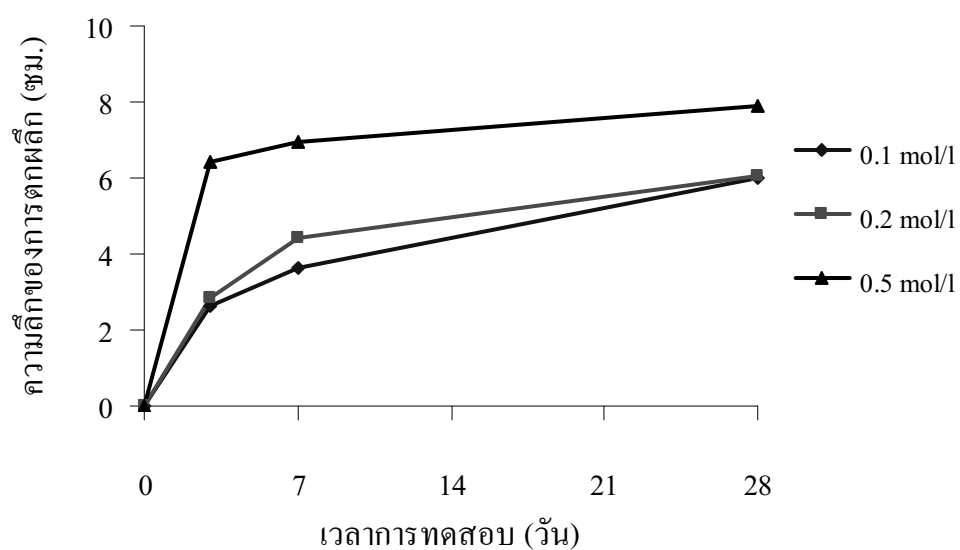
ความลึกการตกผลึกปีครอยแตกร้าวดโดยสารละลาย ZnSO ₄ (ชม.)									
เวลาทดสอบ (วัน)		ศักย์ไฟฟ้า (โวลต์)							
		3			6			9	
		ความเข้มข้นของสารละลาย (โมลต่อลิตร)							
		0.1	0.2	0.5	0.1	0.2	0.5	0.1	0.2
3	1.87	3.82	5.50	3.95	3.07	4.62	2.64	2.83	6.42
7	3.67	4.50	6.51	4.59	3.80	5.10	3.62	4.43	6.96
28	5.60	6.97	8.02	5.44	6.67	8.23	6.01	6.05	7.87



ภาพผนวกที่ ข7 ความลึกของการตกผลึกเข้าไปในรอยแตกร้าวดจากการซ่อมแซมรอยแตกร้าวดโดย
วิธี Electrodeposition ที่ใช้สารละลาย ZnSO_4 และศักย์ไฟฟ้าภายนอก 3 โวลต์



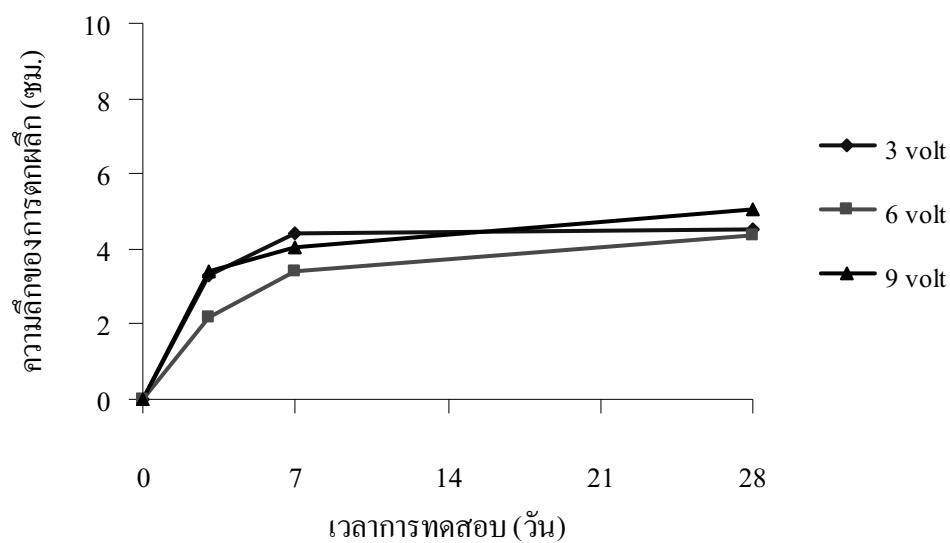
ภาพผนวกที่ ข8 ความลึกของการตกผลึกเข้าไปในรอยแตกร้าว จากการซ่อมแซมรอยแตกร้าวโดยวิธี Electrodeposition ที่ใช้สารละลาย ZnSO_4 และศักย์ไฟฟ้าภายนอก 6 โวลต์



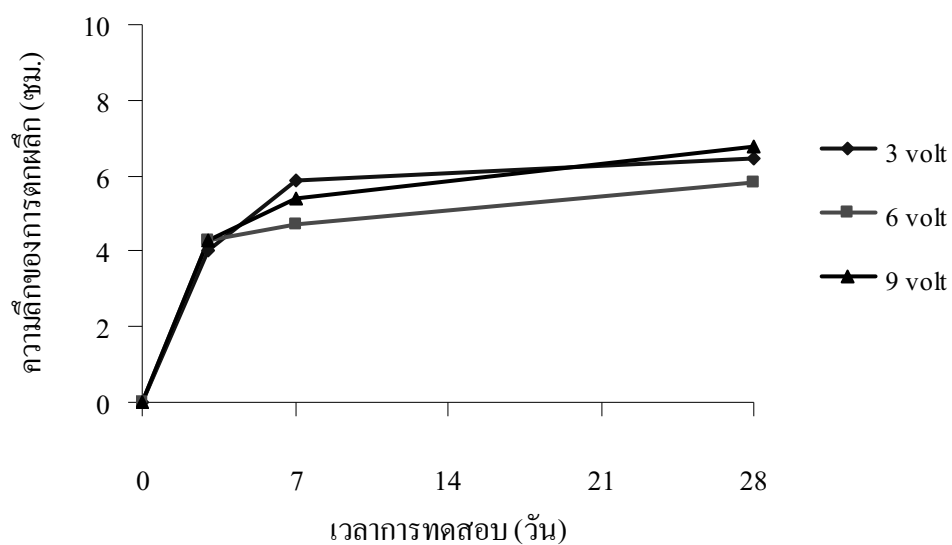
ภาพผนวกที่ ข9 ความลึกของการตกผลึกเข้าไปในรอยแตกร้าว จากการซ่อมแซมรอยแตกร้าวโดยวิธี Electrodeposition ที่ใช้สารละลาย ZnSO_4 และศักย์ไฟฟ้าภายนอก 9 โวลต์

ตารางผนวกที่ ข7 ผลของศักย์ไฟฟ้าต่อความลึกของการตกผลึกปีครอยแตกร้าวดโดย
สารละลาย $MgCl_2$

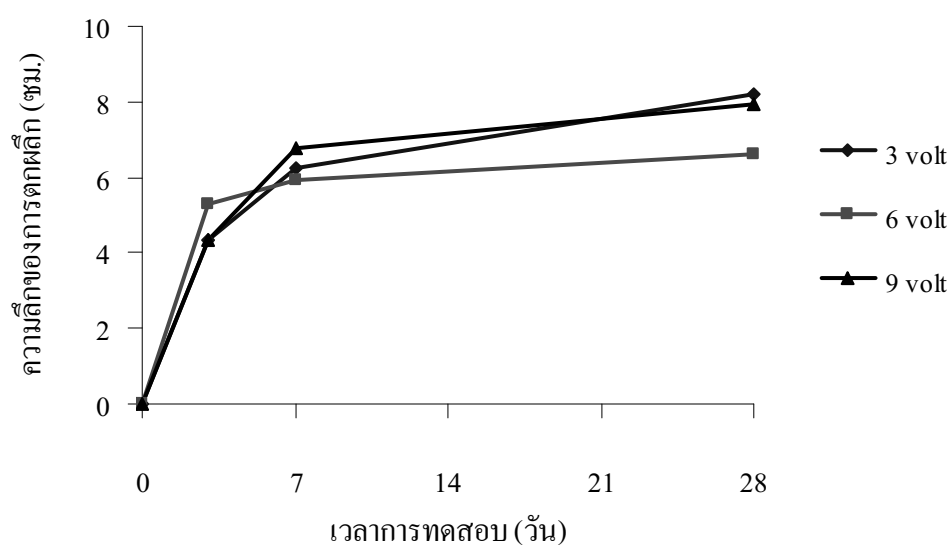
ความลึกการตกผลึกปีครอยแตกร้าวดโดยสารละลาย $MgCl_2$ (ซม.)									
เวลาทดสอบ (วัน)	ความเข้มข้นของสารละลาย (โมลต่อลิตร)								
	ศักย์ไฟฟ้า (โวลต์)								
	0.1			0.2			0.5		
	3	6	9	3	6	9	3	6	9
3	3.30	2.16	3.39	4.03	4.30	4.30	4.34	5.30	4.32
7	4.42	3.39	4.02	5.87	4.70	5.42	6.24	5.92	6.76
28	4.53	4.36	5.04	6.45	5.84	6.76	8.19	6.60	7.95



ภาพผนวกที่ ข10 ความลึกของการตกผลึกเข้าไปในรอยแตกร้าวดจากการซ่อมแซมรอยแตกร้าวดโดย
วิธี Electrodeposition ที่ใช้สารละลาย $MgCl_2$ ความเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร



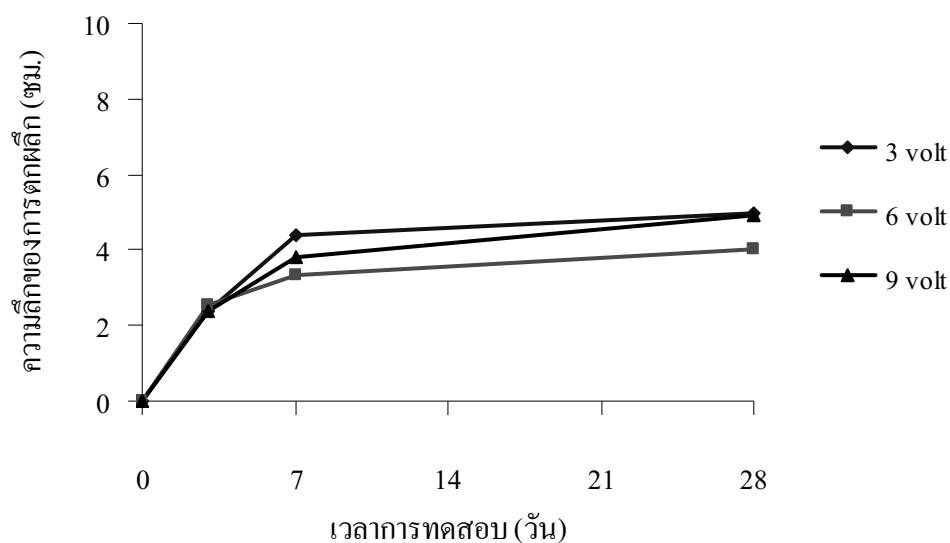
ภาพผนวกที่ ข11 ความลึกของการตกผลึกเข้าไปในรอยแตกร้าว จากการซ่อมแซมรอยแตกร้าวโดยวิธี Electrodeposition ที่ใช้สารละลาย $MgCl_2$ ความเข้มข้น 0.2 โมลต่อลิตร



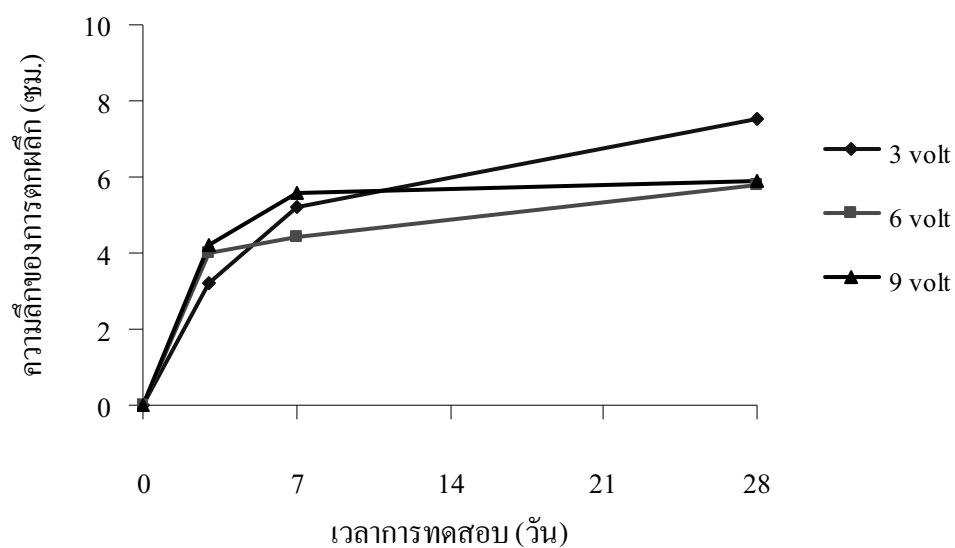
ภาพผนวกที่ ข12 ความลึกของการตกผลึกเข้าไปในรอยแตกร้าว จากการซ่อมแซมรอยแตกร้าวโดยวิธี Electrodeposition ที่ใช้สารละลาย $MgCl_2$ ความเข้มข้น 0.5 โมลต่อลิตร

ตารางผนวกที่ ข8 ผลของศักย์ไฟฟ้าต่อความลึกของการตกผลึกปโตรอยแตกร้าวดโดย
สารละลาย MgSO_4

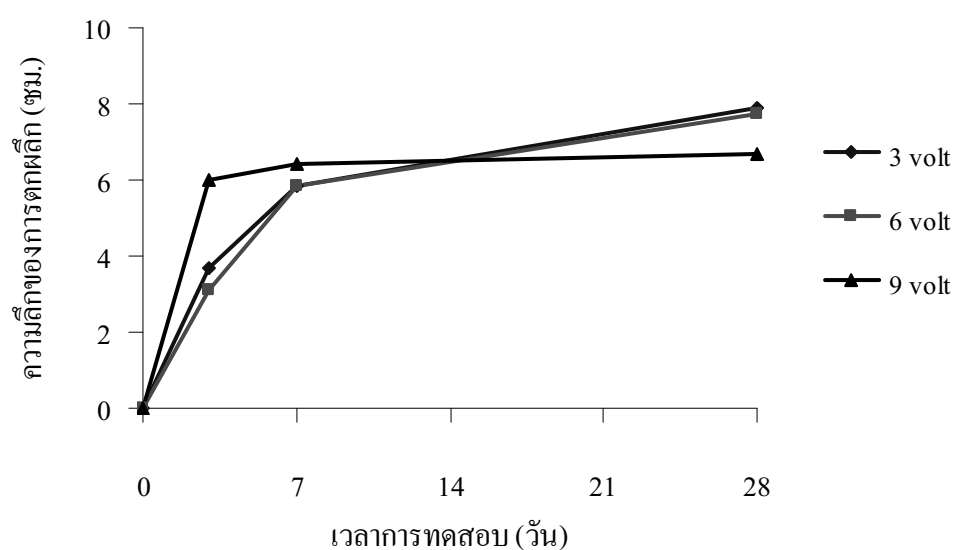
ความลึกการตกผลึกปโตรอยแตกร้าวดโดยสารละลาย MgSO_4 (ซม.)									
เวลาทดสอบ (วัน)	ความเข้มข้นของสารละลาย (โมลต่อลิตร)								
	ศักย์ไฟฟ้า (โวลต์)								
	0.1			0.2			0.5		
	3	6	9	3	6	9	3	6	9
3	2.37	2.52	2.38	3.22	4.03	4.23	3.66	3.10	6.02
7	4.38	3.31	3.81	5.23	4.44	5.60	5.84	5.84	6.42
28	4.98	4.04	4.93	7.51	5.78	5.91	7.89	7.74	6.66



ภาพผนวกที่ ข13 ความลึกของการตกผลึกเข้าไปในรอยแตกร้าวดจากการซ่อมแซมรอยแตกร้าวดโดย
วิธี Electrodeposition ที่ใช้สารละลาย MgSO_4 ความเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร



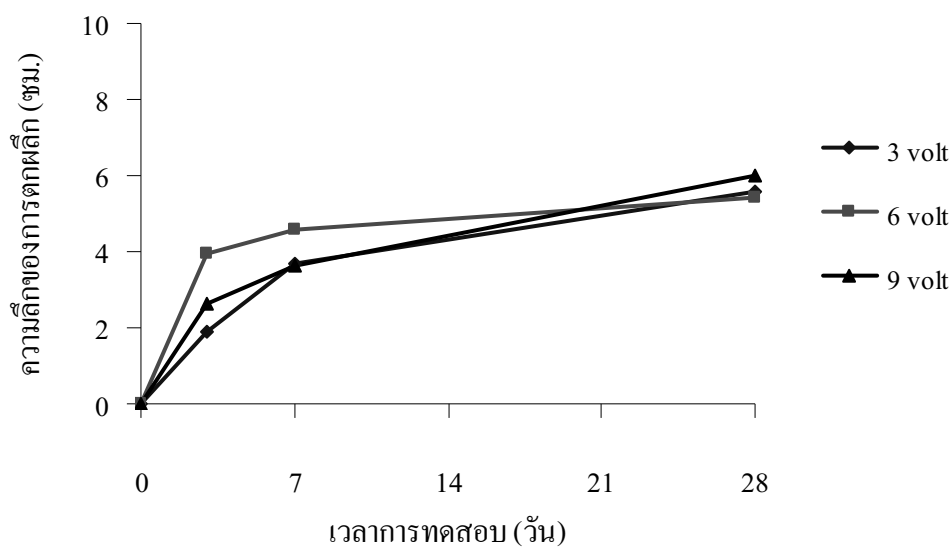
ภาพผนวกที่ ข14 ความลึกของการตกผลึกเข้าไปในรอยแตกร้าว จากการซ่อมแซมรอยแตกร้าวโดยวิธี Electrodeposition ที่ใช้สารละลาย MgSO_4 ความเข้มข้น 0.2 โมลต่อลิตร



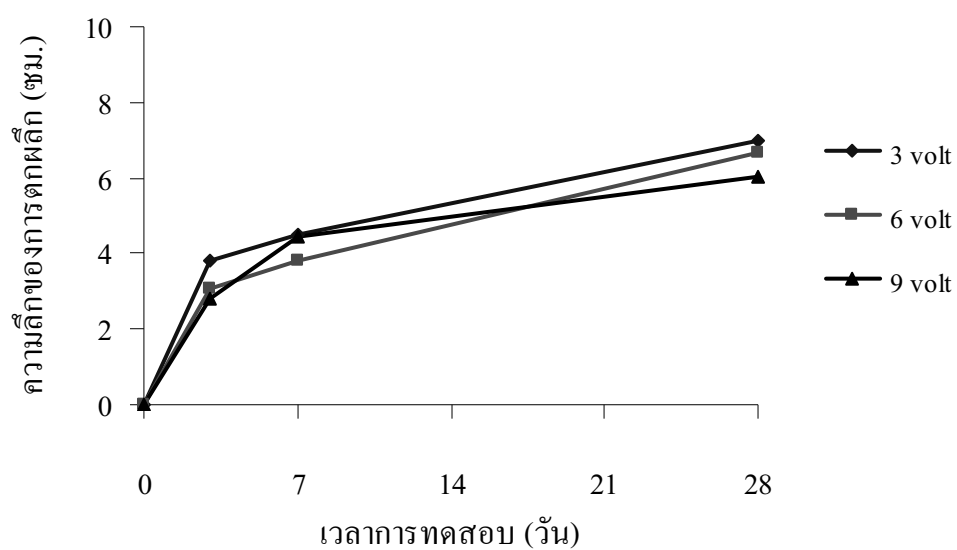
ภาพผนวกที่ ข15 ความลึกของการตกผลึกเข้าไปในรอยแตกร้าว จากการซ่อมแซมรอยแตกร้าวโดยวิธี Electrodeposition ที่ใช้สารละลาย MgSO_4 ความเข้มข้น 0.5 โมลต่อลิตร

ตารางผนวกที่ ข9 ผลของศักย์ไฟฟ้าต่อความลึกของการตกผลึกปีตรอยแตกร้าวดโดย
สารละลาย ZnSO_4

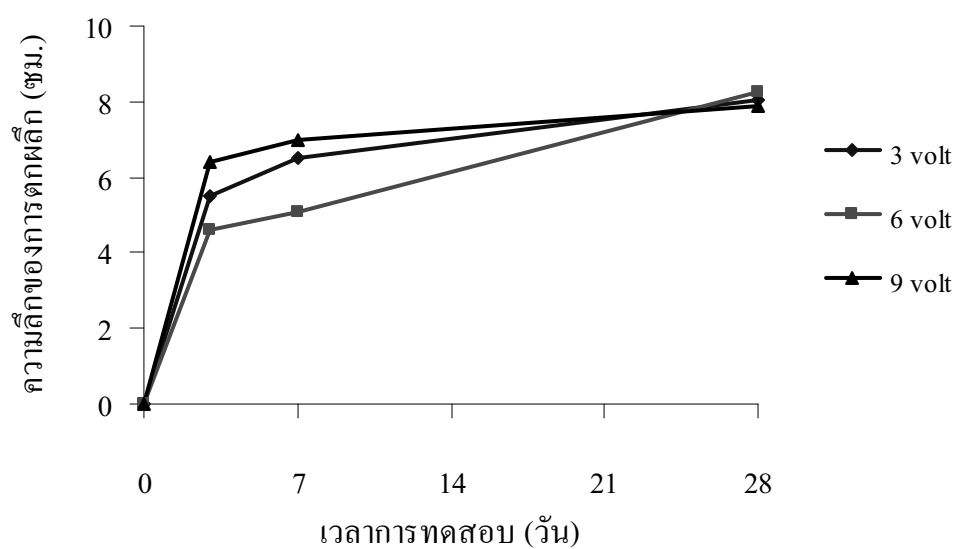
ความลึกการตกผลึกปีตรอยแตกร้าวดโดยสารละลาย ZnSO_4 (ซม.)									
เวลาทดสอบ (วัน)	ความเข้มข้นของสารละลาย (โมลต่อลิตร)								
	ศักย์ไฟฟ้า (โวลต์)								
	0.1			0.2			0.5		
	3	6	9	3	6	9	3	6	9
3	1.87	3.95	2.64	3.82	3.07	2.83	5.50	4.62	6.42
7	3.67	4.59	3.62	4.50	3.80	4.43	6.51	5.10	6.96
28	5.60	5.44	6.01	6.97	6.67	6.05	8.02	8.23	7.87



ภาพผนวกที่ ข16 ความลึกของการตกผลึกเข้าไปในรอยแตกร้าวดจากการซ่อมแซมรอยแตกร้าวดโดย
วิธี Electrodeposition ที่ใช้สารละลาย ZnSO_4 ความเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร



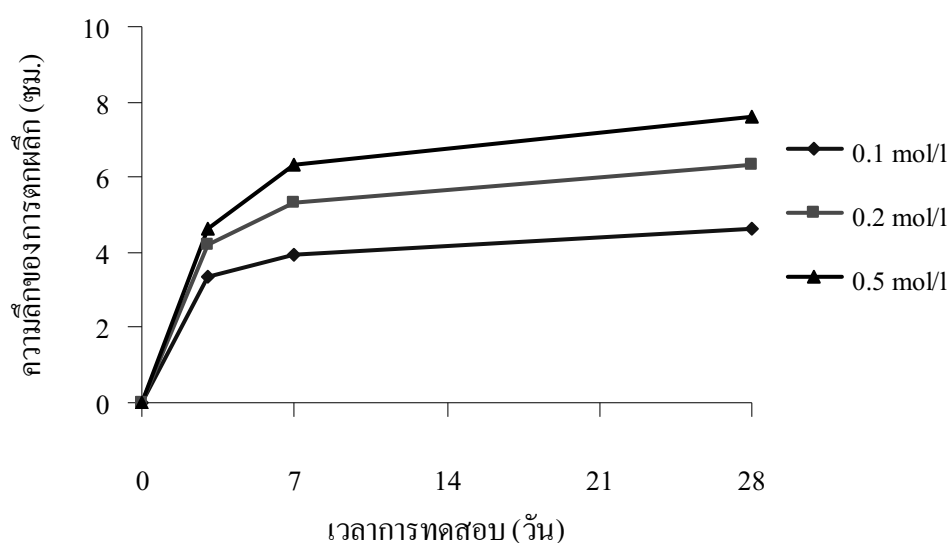
ภาพผนวกที่ ข17 ความลึกของการตกผลึกเข้าไปในรอยแตกร้าว จากการซ่อมแซมรอยแตกร้าวโดยวิธี Electrodeposition ที่ใช้สารละลาย ZnSO_4 ความเข้มข้น 0.2 โมลต่อลิตร



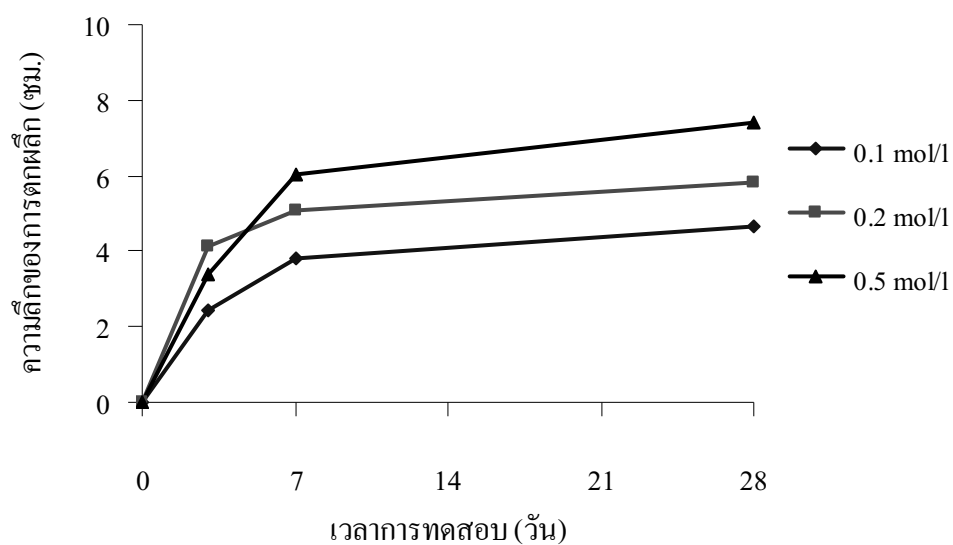
ภาพผนวกที่ ข18 ความลึกของการตกผลึกเข้าไปในรอยแตกร้าว จากการซ่อมแซมรอยแตกร้าวโดยวิธี Electrodeposition ที่ใช้สารละลาย ZnSO_4 ความเข้มข้น 0.5 โมลต่อลิตร

ตารางผนวกที่ ข10 ความลึกของการตกผลึกปึดรอยแตกร้าวโดยไม่คิดผลเนื่องจกัศักย์ไฟฟ้า

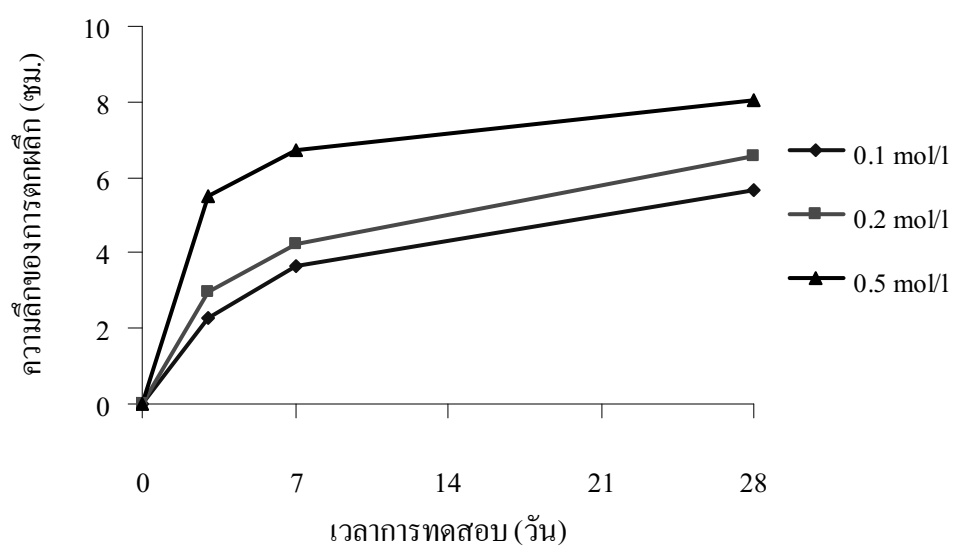
ความลึกการตกผลึกปัดรอยแตกร้าว (ซม.) โดยไม่คิดผลเนื่องจากศักย์ไฟฟ้า									
เวลาทดสอบ (วัน)	ชนิดสารละลาย								
	MgCl ₂			MgSO ₄			ZnSO ₄		
	ความเข้มข้นของสารละลาย (โมลต่อลิตร)								
	0.1	0.2	0.5	0.1	0.2	0.5	0.1	0.2	0.5
3	3.35	4.21	4.65	2.42	4.13	3.38	2.26	2.95	5.51
7	3.94	5.33	6.31	3.83	5.09	6.03	3.65	4.24	6.73
28	4.64	6.35	7.58	4.65	5.85	7.43	5.68	6.56	8.04



ภาพผนวกที่ ข19 ความลึกของการตกผลึกเข้าไปในรอยแตกร้าวโดยใช้สารละลาย MgCl₂ ที่มีความเข้มข้นต่างกัน โดยไม่คำนึงถึงศักย์ไฟฟ้าภายนอก



ภาพผนวกที่ ข20 ความลึกของการตกลึกเข้าไปในรอยแตกร้าวโดยใช้สารละลาย MgSO_4 ที่มีความเข้มข้นต่างกัน โดยไม่คำนึงถึงศักย์ไฟฟ้าภายนอก



ภาพผนวกที่ ข21 ความลึกของการตกลึกเข้าไปในรอยแตกร้าวโดยใช้สารละลาย ZnSO_4 ที่มีความเข้มข้นต่างกัน โดยไม่คำนึงถึงศักย์ไฟฟ้าภายนอก

ภาคผนวก ค

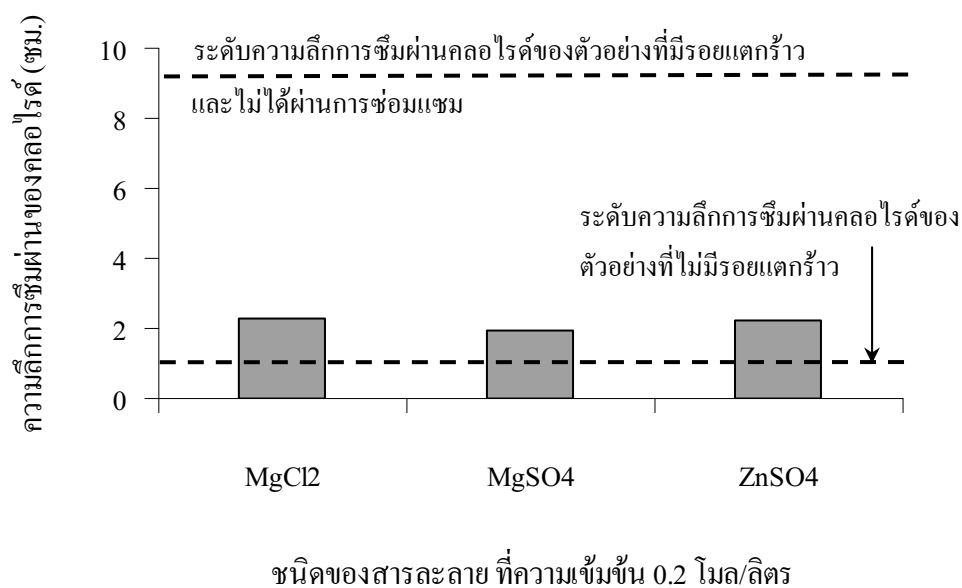
ผลการทดสอบการซึมผ่านของคลอไรด์

ตารางผนวกที่ ค1 ความลึกการซึมผ่านของคลอไรด์ที่บริเวณรอยแตก ภายหลังจากการซ่อมแซม
รอยแตกร้าวด้วยวิธี Electrodeposition

สารละลาย	ความเข้มข้น (โมล/ลิตร)	ศักย์ไฟฟ้า (โวลต์)	การซึมผ่านของคลอไรด์หลังซ่อมแซมรอยแตกร้าว ด้วยวิธี Electrodeposition (ซม.)					
			1	2	3	4	5	เฉลี่ย
MgCl ₂	0.2	6	2.2	2.3	2.6	2.2	2.4	2.34
			1.9	2.1	1.9	1.6	1.5	1.80
			3.3	3.2	2.7	2.1	2.4	2.74
MgSO ₄	0.2	6	2.1	1.9	1.9	1.8	2.2	1.98
			1.9	1.8	1.6	1.5	2.4	1.84
			2.1	2.3	1.8	1.7	2.1	2.00
ZnSO ₄	0.2	6	2.1	2.2	2.0	2.2	2.6	2.22
			2.8	2.2	1.5	2.4	2.0	2.18
			1.9	2.0	2.3	2.4	2.7	2.26
ตัวอย่างไม่มีรอยแตกร้าว			1.3	1.0	1.1	1.3	1.3	1.20
			1.2	1.2	1.1	1.3	1.3	1.22
			1.3	1.2	1.2	1.1	1.1	1.18
ตัวอย่างมีรอยแตกร้าว แต่ไม่ได้ผ่านการซ่อมแซม			9.1	9.1	9.3	9.4	9.3	9.24
			9.2	9.1	9.8	9.8	9.7	9.52
			9.3	9.2	9.2	9.1	9.2	9.20

ตารางผนวกที่ ค2 ผลความลึกการซึมผ่านของคลอไรด์ที่บริเวณรอยแตก ภายหลังการซ่อมแซม รอยแตกด้วยวิธี Electrodeposition เปรียบเทียบกับตัวอย่างที่มีและไม่มีรอยแตก

สารละลาย	ความเข้มข้น (โมลต่อลิตร)	ศักย์ไฟฟ้าภายนอก (โวลต์)	ความลึกการซึมผ่านของ คลอไรด์ (ซม.)
MgCl ₂	0.2	6	2.29
MgSO ₄	0.2	6	1.94
ZnSO ₄	0.2	6	2.22
ตัวอย่างไม่มีรอยแตก			9.32
ตัวอย่างมีรอยแตกแต่ไม่ได้ผ่านการซ่อมแซม			1.20



ภาพผนวกที่ ค1 ความลึกการซึมผ่านของคลอไรด์ที่บริเวณรอยแตก ภายหลังการซ่อมแซม รอยแตกด้วยวิธี Electrodeposition

ภาคผนวก ง

ผลการทดสอบการคาร์บอนขึ้น

ตารางผนวกที่ ๑1 ความลึกการคาร์บอนชั้นที่บริเวณรอยแตก ภายหลังการซ่อมแซมรอยแตกร้าว
ด้วยวิธี Electrodeposition

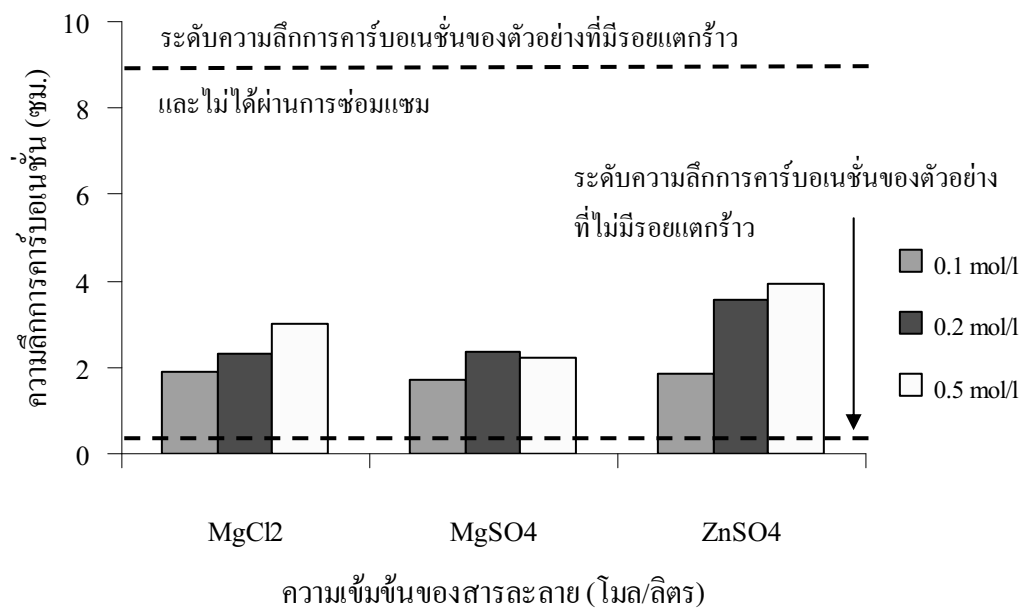
สารละลาย	ความเข้มข้น (โมล/ลิตร)	ศักย์ไฟฟ้า (โวลต์)	ความลึกการคาร์บอนชั้นหลังซ่อมแซมรอยแตกร้าว ด้วยวิธี Electrodeposition (ซม.)					
			1	2	3	4	5	เฉลี่ย
MgCl ₂	0.1	6	1.4	1.1	1.0	1.8	2.4	1.54
			2.4	2.2	2.6	1.8	1.9	2.18
			2.5	1.6	2.2	2.6	0.9	1.96
	0.2	6	2.5	2.2	1.9	1.9	2.7	2.24
			2.0	1.9	1.9	2.1	2.4	2.06
			1.7	2.0	2.4	3.1	3.7	2.58
	0.5	6	1.0	2.7	3.2	2.5	2.8	2.44
			2.8	4.0	2.7	2.3	2.0	2.76
			3.5	4.2	4.1	4.0	3.2	3.80
MgSO ₄	0.1	6	0.8	0.4	1.9	2.0	2.1	1.44
			0.5	1.8	1.9	1.4	1.6	1.44
			2.5	2.3	2.5	2.2	1.8	2.26
	0.2	6	2.2	2.1	1.9	1.9	3.4	2.30
			2.4	2.6	3.0	2.4	2.5	2.58
			1.9	3.2	2.8	2.2	0.7	2.16
	0.5	6	1.5	3.6	3.6	3.0	3.1	2.96
			1.4	1.2	0.7	0.4	0.4	0.82
			2.7	1.8	4.3	2.9	2.4	2.82
ZnSO ₄	0.1	6	2.6	2.6	2.5	1.7	2.0	2.28
			1.7	1.7	1.8	2.2	2.6	2.00
			1.9	0.4	0.3	2.1	2.0	1.34
	0.2	6	3.0	3.4	2.4	2.3	2.1	2.64
			2.5	2.6	2.4	2.9	2.8	2.64
			3.0	2.6	3.1	2.7	2.4	2.76

ตารางผนวกที่ ๑1 (ต่อ)

สารละลาย	ความเข้มข้น (โมล/ลิตร)	ศักย์ไฟฟ้า (โวลต์)	ความลึกการคาร์บอนชั้นหลังซ่อมแซมรอยแตกร้าว ด้วยวิธี Electrodeposition (ชม.)					
			1	2	3	4	5	เฉลี่ย
ZnSO ₄	0.5	6	1.6	1.4	2.4	2.7	2.0	2.02
			3.1	2.8	3.4	3.6	4.1	3.40
			3.1	3.4	4.4	3.5	3.2	3.52
ตัวอย่างไม่มีรอยแตกร้าว			0.4	0.5	0.6	0.3	0.3	0.42
			0.2	0.2	0.2	0.2	0.3	0.22
ตัวอย่างมีรอยแตกร้าว			8.9	9.2	9.1	9.3	8.6	9.02
แต่ไม่ได้ผ่านการซ่อมแซม			8.5	8.9	9.3	9.3	9.2	9.04

ตารางผนวกที่ ๑2 ผลความลึกการคาร์บอนชั้นที่บริเวณรอยแตก ภายหลังการซ่อมแซมรอยแตกร้าว
ด้วยวิธี Electrodeposition เปรียบเทียบกับตัวอย่างที่มีและไม่มีรอยแตกร้าว

สารละลาย	ความเข้มข้น (โมลต่อลิตร)	ศักย์ไฟฟ้าภายนอก (โวลต์)	ความลึกการคาร์บอนชั้น (ชม.)
MgCl ₂	0.1	6	1.89
	0.2	6	2.29
	0.5	6	3.00
MgSO ₄	0.1	6	1.71
	0.2	6	2.35
	0.5	6	2.20
ZnSO ₄	0.1	6	1.87
	0.2	6	3.57
	0.5	6	3.95
ตัวอย่างไม่มีรอยแตกร้าว			0.32
ตัวอย่างมีรอยแตกร้าวแต่ไม่ได้ผ่านการซ่อมแซม			9.03



ภาพผนวกที่ 1 ความลึกการคาร์บอนเนชั่นที่บริเวณรอยแตก ภายหลังการซ่อมแซมรอยแตกร้าว ด้วยวิธี Electrodeposition

ภาคผนวก จ

ภาพแสดงการทดสอบ



(ก) เหล็กเสริมขนาด 5 x 32 ซม.



(ข) คอนกรีตเสริมเหล็ก 10 x 10 x 37 ซม.



(ค) เครื่องทดสอบกำลังคอนกรีต



(ง) การกดเพื่อสร้างรอยแตกร้าวให้ตัวอย่าง



(จ) ความลึกรอยแตกร้าวประมาณ 8 ซม.



(ฉ) ความกว้างรอยแตกร้าวประมาณ 0.5 มม.

ภาพผนวกที่ ๑1 การเตรียมตัวอย่างให้มีรอยแตกร้าวเพื่อนำไปช่อมแซม



(ก) การซ่อมแซมรอยแตกร้าวด้วย Electrodeposition



(ข) กลุ่มตัวอย่างที่ทดสอบด้วยพลาสติก เพื่อป้องกันการระเหยของสารละลาย

ภาพผนวกที่ จ2 การซ่อมแซมรอยแตกร้าวด้วย Electrodeposition



(ก) รอยแตกร้าวก่อนการซ่อมแซม



(ข) รอยแตกร้าวหลังการซ่อมแซม



(ค) การตกผลึกเข้าไปในรอยแตกร้าวของคอนกรีต

ภาพผนวกที่ ๖3 ตัวอย่างที่ผ่านการซ่อมแซมด้วยวิธี Electrodeposition โดยใช้สารละลาย MgCl_2 ความเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร ศักย์ไฟฟ้า 3 โวลต์ เป็นเวลา 28 วัน



(ก) รอยแตกร้าวก่อนการซ่อมแซม



(ข) รอยแตกร้าวหลังการซ่อมแซม



(ค) การตกผลึกเข้าไปในรอยแตกร้าวของคอนกรีต

ภาพผนวกที่ ๔ ตัวอย่างที่ผ่านการซ่อมแซมด้วยวิธี Electrodeposition โดยใช้สารละลาย MgCl_2 ความเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร ศักย์ไฟฟ้า 6 โวลต์ เป็นเวลา 28 วัน



(ก) รอยแตกร้าวก่อนการซ่อมแซม



(ข) รอยแตกร้าวหลังการซ่อมแซม



(ค) การตกผลึกเข้าไปในรอยแตกร้าวของคอนกรีต

ภาพผนวกที่ ๖ ตัวอย่างที่ผ่านการซ่อมแซมด้วยวิธี Electrodeposition โดยใช้สารละลาย MgSO_4 ความเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร ศักย์ไฟฟ้า 3 โวลต์ เป็นเวลา 28 วัน



(ก) รอยแตกร้าวก่อนการซ่อมแซม



(ข) รอยแตกร้าวหลังการซ่อมแซม



(ค) การตกผลึกเข้าไปในรอยแตกร้าวของคอนกรีต

ภาพผนวกที่ ๖ ตัวอย่างที่ผ่านการซ่อมแซมด้วยวิธี Electrodeposition โดยใช้สารละลาย MgSO_4 ความเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร ศักย์ไฟฟ้า 6 โวลต์ เป็นเวลา 28 วัน



(ก) รอยแตกร้าวก่อนการซ่อมแซม



(ข) รอยแตกร้าวหลังการซ่อมแซม



(ค) การตกผลึกเข้าไปในรอยแตกร้าวของคอนกรีต

ภาพผนวกที่ ๗ ตัวอย่างที่ผ่านการซ่อมแซมด้วยวิธี Electrodeposition โดยใช้สารละลาย ZnSO_4 ความเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร ศักย์ไฟฟ้า 6 โวลต์ เป็นเวลา 28 วัน



(ก) รอยแตกร้าวก่อนการซ่อมแซม



(ข) รอยแตกร้าวหลังการซ่อมแซม

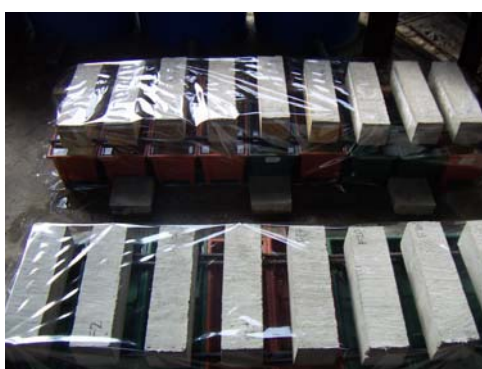


(ค) การตกผลึกเข้าไปในรอยแตกร้าวของคอนกรีต

ภาพผนวกที่ ๖8 ตัวอย่างที่ผ่านการซ่อมแซมด้วยวิธี Electrodeposition โดยใช้สารละลาย ZnSO_4 ความเข้มข้น 0.5 โมลต่อลิตร ศักย์ไฟฟ้า 6 โวลต์ เป็นเวลา 28 วัน



(ก) การทดสอบการซึมผ่านของคลอไรด์

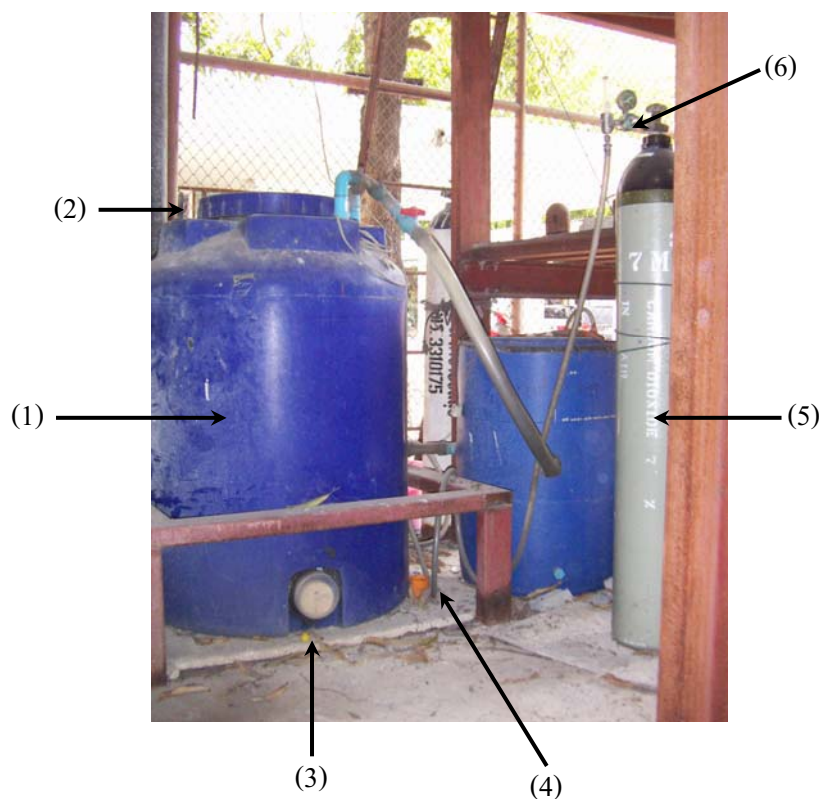


(ข) คลุมพลาสติกเพื่อให้การทดสอบเป็นระบบปิด



(ค) ตัวอย่างคอนกรีตเสริมเหล็กที่อยู่ภายในไอระเหยของสารละลายโซเดียมคลอไรด์

ภาพผนวกที่ ๑๙ การทดสอบการซึมผ่านของคลอไรด์ของตัวอย่างที่ผ่านการซ่อมแซมรอยแตกร้าว
ด้วยวิธี Electrodeposition แล้ว



ภาพผนวกที่ จ10 การทดสอบการคาร์บอนเนชั่นของตัวอย่างที่ผ่านการซ่อมแซมรอยแตกแล้ว

ด้วยวิธี Electrodeposition แล้ว

- (1) ถังคาร์บอนเนชั่น (2) ท่อปล่อยก๊าซออก (3) เกจวัดความชื้นสัมพัทธ์ภายในตู้
- (4) ท่อปล่อยก๊าซเข้า (5) ถังคาร์บอนไดออกไซด์
- (6) อุปกรณ์วัดอัตราการไหลของก๊าซ

Output จากโครงการวิจัยที่ได้รับทุนจาก สกว.

1. ผลงานตีพิมพ์ในวารสารวิชาการนานาชาติ (ระบุชื่อผู้แต่ง ชื่อเรื่อง ชื่อวารสาร ปี เล่มที่ เลขที่ และหน้า) หรือผลงานตามที่คาดไว้ในสัญญาโครงการ

1.1 Wanchai Yodsudjai, Prasert Suwanvitaya and Natthaphon Thongkhaw., Experimental study on application of electrodeposition method for decreasing carbonation and chloride penetration of cracked reinforced concrete under Thailand climatic condition, Cement and Concrete Research, Submitted

2. การนำผลงานวิจัยไปใช้ประโยชน์

- เชิงวิชาการ (มีการพัฒนาการเรียนการสอน/สร้างนักวิจัยใหม่)

2.1 มีการนำเนื้อหางานวิจัยเพื่อนำไปใช้ในการประกอบการเรียนการสอนในระดับปริญญาโท ในเนื้อหาวิชา Advanced Concrete Technology (คอนกรีตเทคโนโลยีขั้นสูง) ในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

2.2 มีการนำแนวคิดเบื้องต้นในการวิจัยนี้ เป็นฐานข้อมูล และดำเนินการวิจัยต่อเนื่อง เพื่อสร้างองค์ความรู้ด้านการบำรุงรักษาซ่อมแซมโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยวิธีการทางไฟฟ้าเคมี อาทิเช่น โครงการวิจัยต่างๆ ดังต่อไปนี้

2.2.1 โครงการวิจัยเรื่อง “Feasibility Study on Soil Improvement using Electrochemical Technique” โดยการสนับสนุนจาก Japan Society for the Promotion of Science (JSPS) ระยะเวลา 3 เดือน ตั้งแต่วันที่ 3 เดือน กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2548 ถึง วันที่ 3 เดือน พฤษภาคม พ.ศ. 2548

2.2.2 หัวหน้าโครงการวิจัยเรื่อง “การศึกษาเปรียบเทียบการซึมผ่านของคลอไรด์ไอออนของคอนกรีตที่เสื่อมสภาพอันเนื่องมาจากการเกิดสนิมของเหล็กเสริมหลังจากที่ซ่อมแซมแล้วด้วยวัสดุเพื่อการซ่อมแซมชนิดต่าง” โดยการสนับสนุนจาก คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ระยะเวลา 6 เดือน ตั้งแต่วันที่ 6 เดือน กรกฎาคม
พ.ศ. 2547 ถึง วันที่ 5 เดือน มกราคม พ.ศ. 2548

2.2.3 โครงการวิจัยการศึกษาการเกิดสนิมของเหล็ก
เสริมในจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตเสริมเหล็ก โดยการ
สนับสนุนจาก สกว. และบริษัทปูนซีเมนต์นคร
หลวงจำกัด (มหาชน)

2.2.4 โครงการวิจัยเรื่องการศึกษาการลดคลอไรด์ใน
โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยวิธีทางไฟฟ้า
เคมี โดยการสนับสนุนจากสถาบันวิจัยและพัฒนา
แห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

3. อื่นๆ (เช่น ผลงานตีพิมพ์ในวารสารวิชาการในประเทศ การเสนอผลงานในที่ประชุม
วิชาการ หนังสือ การจดสิทธิบัตร)

3.1 วันชัย ยอดสุดใจ ประเสริฐ สุวรรณวิทยา และ ณัฐพล ทองขาว,
การศึกษาการใช้สารละลายแทนน้ำทะเลสำหรับวิธี
electrodeposition เพื่อซ่อมแซมรอยแตกร้าวของคอนกรีตเสริมเหล็ก
บนพื้นดิน, เอกสารการประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี ครั้งที่ 1,
ระยอง, 2548, REP 1-REP 4

3.2 ณัฐพล ทองขาว และ วันชัย ยอดสุดใจ, การซ่อมแซมรอยแตกร้าว
ของคอนกรีตเสริมเหล็กเพื่อลดการเกิดสนิมโดยวิธี
Electrodeposition, โยธาสาร, วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย, ปีที่
17, ฉบับที่ 4, น. 49-51

3.3 ณัฐพล ทองขาว, วันชัย ยอดสุดใจ และประเสริฐ สุวรรณวิทยา,
ความต้านทานการเกิดคาร์บอนเนชั่นของตัวอย่างคอนกรีตเสริมเหล็ก
ที่มีรอยแตกร้าวหลังจากผ่านการซ่อมแซมรอยแตกร้าวด้วยวิธี
electrodeposition, เอกสารการประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธา
แห่งชาติครั้งที่ 11, ภูเก็ต, 2549, CDROM

3.4 Wanchai Yodsudjai, Prasert Suwanvitaya and Natthaphon
Thongkhaw., 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,
European Symposium on Service Life and Serviceability of
Concrete Structures (ESCS-2006), 2006, Helsinki, Finland

การศึกษาการใช้สารละลายแทนน้ำทะเลสำหรับวิธี electrodeposition เพื่อซ่อมแซมรอยแตกร้าวของคอนกรีตเสริมเหล็กบนพื้นดิน

วันชัย ยอดสุดใจ¹, ประเสริฐ สุวรรณวิทยา² และ ณัฐพล ทองขาว³

¹อาจารย์, ²รองศาสตราจารย์, ³นักศึกษานิพนธ์โท ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน

บทคัดย่อ: Electrodeposition เป็นวิธีการทางเคมีไฟฟ้า ที่ใช้ซ่อมแซมรอยแตกร้าวของคอนกรีตได้ทะเล โดยการจ่ายกระแสไฟฟ้าเพื่อให้สารละลายในน้ำทะเลแตกตัวเป็นไอออน และไอออนของโลหะนั้นจะตกผลึกปิดรอยแตกบริเวณผิวหน้าของคอนกรีต ในงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาเพื่อหาสารละลายที่เหมาะสมมาใช้แทนน้ำทะเล สำหรับวิธี electrodeposition เพื่อลดการเกิดสนิมและซ่อมแซมรอยแตกร้าวของคอนกรีตเสริมเหล็กบนพื้นดิน โดยใช้ตัวอย่างคอนกรีตเสริมเหล็ก ขนาดหนึ่งส่วนผสมขนาด 10 x 10 x 37 เซนติเมตร ที่ผ่านการทำให้แตกด้วยการกดแบบคาน ไปแช่ในสารละลาย $MgCl_2$, $MgSO_4$ และ $ZnSO_4$ ที่มีความเข้มข้น 0.1, 0.2 และ 0.5 โมลต่อลิตร แล้วให้ศักย์ไฟฟ้าภายนอกขนาดคงที่ ผลที่ได้คือ สารละลายที่มีโลหะแมกนีเซียมเป็นส่วนผสม ทั้ง $MgCl_2$ และ $MgSO_4$ ที่ความเข้มข้น 0.2 โมลต่อลิตร ให้ผลการปิดรอยแตกร้าวที่ดี

ABSTRACT: Electrodeposition method, based on the electrochemical method, is used to repair cracks in reinforced concrete structures located under seawater by applying an electric current. Electrodeposits of the chemical compounds is filled the cracks in reinforced concrete and coated the concrete surface. The purpose of this study was to study the effective solution instead of seawater for repairing the cracks of reinforced concrete on land. Reinforced concrete specimens with the dimension of 10 x 10 x 37 cm. were used. After specimens were cracked by applying three-point load, the specimens were immersed in $MgCl_2$, $MgSO_4$ and $ZnSO_4$ with the concentration of 0.1, 0.2 and 0.5 mol/L. The constant potential was applied between the reinforcing steel and the external electrode. As a result, the both of $MgCl_2$ and $MgSO_4$ with the solution of 0.2 mol/l were the effective solution for closing cracks in the reinforced concrete structures.

คำหลัก: Electrodeposition; การซ่อมแซม; การเกิดสนิมเหล็ก; รอยแตกร้าว

1. บทนำ

การเกิดสนิมในเหล็กเสริม เป็นหนึ่งในความเสียหายหลักที่เกิดขึ้นกับโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก ซึ่งผลกระทบโดยรวมของการเกิดสนิมในเหล็กคือ กำลังรับแรงของโครงสร้างลดลง เนื่องจากพื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริมน้อยลง โดยที่สาเหตุหลักของการเกิดสนิมคือ การเกิดรอยแตกร้าวของโครงสร้างที่มักเกิดจากการหดตัวขณะที่คอนกรีตแข็งตัว (สำหรับโครงสร้างที่มีขนาดใหญ่) รอยต่อของคอนกรีตจากการก่อสร้าง สภาวะแวดล้อม หรือเกิดจากสภาวะการใช้งาน เป็นต้น วิธีการหนึ่งที่จะช่วยลดการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตเสริมเหล็กที่

มีรอยแตกร้าวได้คือ การใช้วิธี electrodeposition ซึ่งเป็นวิธีการทางเคมีไฟฟ้า

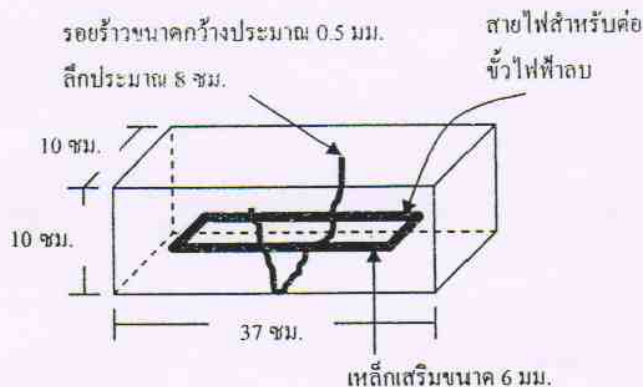
วิธี electrodeposition เป็นวิธีการหนึ่งที่ใช้ในการลดการเกิดสนิมของเหล็กเสริมและการซ่อมแซมรอยแตกร้าวของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ได้ผลดี โดยเฉพาะอย่างยิ่งกับโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่อยู่ใต้ทะเลวิธีการนี้จะทำให้แคลเซียมไอออน (Ca^{2+}) และ/หรือ แมกนีเซียมไอออน (Mg^{2+}) ซึ่งเป็นไอออนของโลหะ ที่แตกตัวจากสารประกอบที่มีอยู่ในน้ำทะเล เกิดการตกผลึกเป็นแคลเซียมคาร์บอเนต ($CaCO_3$) และแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ ($Mg(OH)_2$) ตามลำดับ ที่บริเวณผิวหน้าและรอยแตกร้าวของคอนกรีต ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นนี้

เป็นสารประกอบอินทรีย์ที่มีความสามารถในการละลายน้ำได้น้อยมาก และยังช่วยเพิ่มความตึงน้ำให้กับคอนกรีต จึงได้มีแนวคิดในการนำวิธีนี้มาประยุกต์ใช้กับโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่อยู่บนพื้นดิน โดยในงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการซ่อมแซมรอยแตกร้าวของคอนกรีตเสริมเหล็ก ด้วยวิธี electrodeposition โดยการใช้สารเคมีที่เตรียมขึ้นแทนการใช้น้ำทะเลตามธรรมชาติ

2. การทดลอง

2.1 ตัวอย่างทดสอบ

ใช้ตัวอย่างคอนกรีตเสริมเหล็กขนาด $10 \times 10 \times 37$ เซนติเมตร ที่มีกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตเท่ากับ 240 กก./ตร.ซม. เสริมเหล็กตรงกึ่งกลางของแท่งคอนกรีต โดยใช้เหล็กกลมที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 6 มิลลิเมตร ทำการต่อสายไฟเข้ากับเหล็กเสริม หลังจากหล่อตัวอย่างแล้ว บ่มตัวอย่างทดสอบคอนกรีตในน้ำเป็นเวลา 28 วัน จากนั้นนำตัวอย่างมาทดสอบโดยให้น้ำหนักแบบสามจุด (three-point load) เพื่อทำให้เกิดรอยร้าวขึ้นในตัวอย่างทดสอบ โดยกำหนดให้รอยร้าวมีค่าความกว้างโดยประมาณ 0.5 มิลลิเมตร และมีค่าความลึกโดยประมาณ 8 เซนติเมตร แสดงดังรูปที่ 1

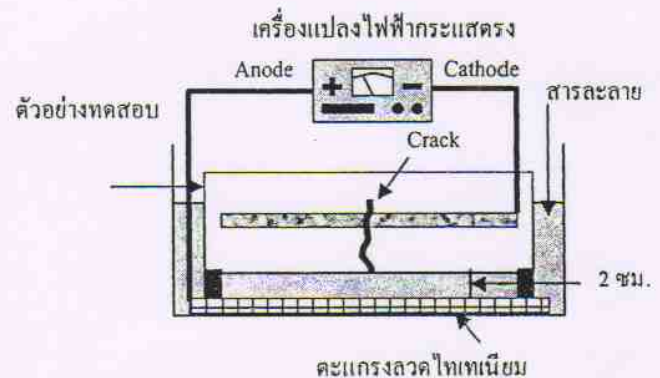


รูปที่ 1 แสดงการเตรียมตัวอย่างทดสอบคอนกรีตเสริมเหล็กสำหรับวิธี Electrodeposition

ก่อนนำไปทำการทดสอบด้วยวิธี electrodeposition เคลือบผิวด้านข้างทุกด้านของตัวอย่างทดสอบคอนกรีตด้วย epoxy resin เพื่อให้การปกคลุมของอ็อกซิเจนบนพื้นผิวของตัวอย่างทดสอบคอนกรีตมีเพียงด้านล่างด้านเดียวเท่านั้น

2.2 การทดสอบด้วยวิธี electrodeposition

ทำการทดสอบโดยต่อเครื่องแปลงกระแสไฟฟ้าตรง เข้ากับเหล็กเสริมที่อยู่ในตัวอย่างทดสอบคอนกรีตเสริมเหล็กและตะแกรงไทเทเนียม โดยต่อกับเหล็กเสริมในคอนกรีตเข้ากับขั้วไฟฟ้าลบ และใช้ตะแกรงไทเทเนียมซึ่งเป็นโลหะที่มีความเฉื่อยสูง เพื่อป้องกันการละลาย ต่อเข้ากับขั้วไฟฟ้าบวก แสดงดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 แสดงการต่อตัวอย่างทดสอบและตะแกรงไทเทเนียมเข้ากับเครื่องแปลงไฟฟ้ากระแสตรง

เติมสารละลายที่ทดสอบให้มีระดับความสูงของสารละลาย สูงกว่าระดับของเหล็กเสริม จากนั้นจ่ายศักย์ไฟฟ้าขนาดคงที่ 3 โวลต์ จากเครื่องแปลงกระแสไฟฟ้าตรง เพื่อเป็นการเริ่มการทดสอบ

2.3 ตัวแปรที่ทำการทดสอบ

ในงานวิจัยนี้จะศึกษาการใช้สารละลาย $MgCl_2$, $MgSO_4$ และ $ZnSO_4$ แทนการใช้น้ำทะเล สำหรับงานซ่อมแซมรอยแตกร้าวของคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยวิธี electrodeposition โดยชนิดของสารละลายที่ใช้ในการทดสอบ ได้แก่ สารละลายแมกนีเซียมคลอไรด์ ($MgCl_2$), แมกนีเซียมซัลเฟต ($MgSO_4$), และ ซิงค์ซัลเฟต ($ZnSO_4$) โดยแต่ละชนิดของสารละลายที่ทำการทดสอบ กำหนดให้มีความเข้มข้นเท่ากับ 0.10, 0.20 และ 0.50 โมลต่อลิตร และให้ศักย์ไฟฟ้าภายนอกคงที่ขนาด 3 โวลต์ แก่สารละลายเป็นระยะเวลา 3 และ 7 วัน

3. ผลและการวิเคราะห์ผลการทดลอง

หลังจากให้ศักย์ไฟฟ้าแก่สารละลายเป็นเวลา 3 และ 7 วันแล้ว นำตัวอย่างทดสอบขึ้น ผ่าตัวอย่างทดสอบตามรอยแตก วัด

ความลึกของการตกผลึกปฏิกิริยาของตัวอย่างได้ผลดัง
ตารางที่ 1

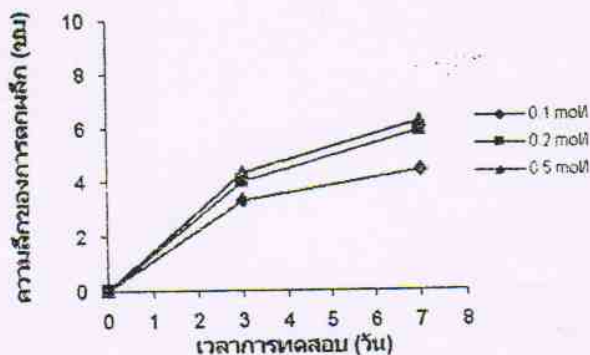
ตารางที่ 1 ความลึกของการตกผลึกเข้าไปภายในรอยแตกร้าว

สารละลาย	เวลา (วัน)	ความลึกของการตกผลึก(ซม.)		
		ความเข้มข้นของสารละลาย (โมล/ลิตร)		
		0.1	0.2	0.5
$MgCl_2$	3	3.30	4.03	4.33
	7	4.42	5.87	6.23
$MgSO_4$	3	2.37	3.22	3.67
	7	4.38	5.23	5.83
$ZnSO_4$	3	1.86	3.81	5.50
	7	3.67	4.50	6.51

จากผลการทดสอบในตารางที่ 1 แสดงให้เห็นว่า

1. สารละลาย $MgCl_2$ และ $MgSO_4$ ซึ่งมีโลหะแมกนีเซียมเป็นส่วนประกอบ ให้ผลของการทดสอบที่ใกล้เคียงกันทั้งความลึกของการตกผลึก และอิทธิพลของความเข้มข้นของสารละลายต่อความลึกของการตกผลึก ตามรูปที่ 3 และ 4 คือ

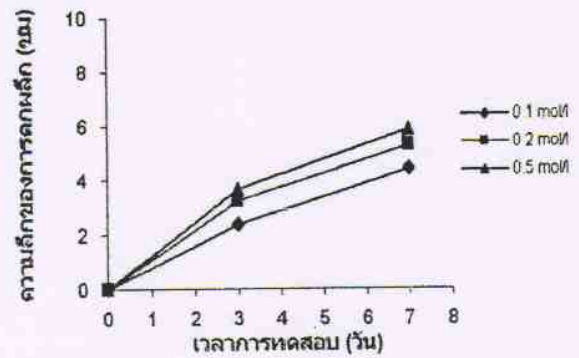
ความลึกของการตกผลึกของสารละลาย $MgCl_2$



รูปที่ 3 ความลึกของการตกผลึกเข้าไปในรอยแตกร้าวของตัวอย่างคอนกรีต ของสารละลาย $MgCl_2$ ที่ความเข้มข้นต่างกัน

ความลึกของการตกผลึกของสารละลายทั้งสองชนิดนั้นมีค่าใกล้เคียงกันในทุกความเข้มข้นและระยะเวลาการให้ศักย์ไฟฟ้า นอกจากนี้ยังพบว่า ความเข้มข้นของสารละลายที่มากขึ้น เป็นผลให้มีการตกผลึกปฏิกิริยาร้าวที่ดีขึ้น แต่จากกราฟเห็นว่าความเข้มข้นของสารละลายที่ 0.2 โมลต่อลิตร ให้ผลใกล้เคียงกับ 0.5 โมลต่อลิตร กล่าวคือ ไม่จำเป็นต้องใช้ความเข้มข้นของสารละลายที่สูง แต่ให้มีพอเพียงที่ใช้ในการตกผลึก

ความลึกของการตกผลึกของสารละลาย $MgSO_4$



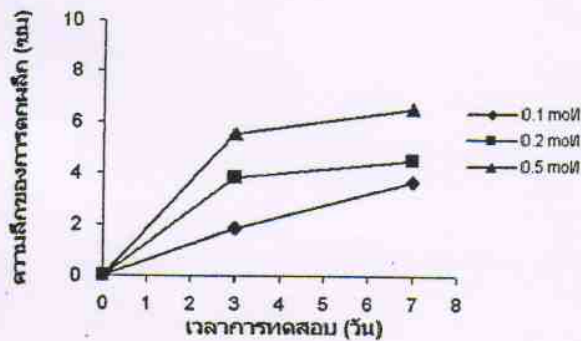
รูปที่ 4 ความลึกของการตกผลึกเข้าไปในรอยแตกร้าวของตัวอย่างคอนกรีต ของสารละลาย $MgSO_4$ ที่ความเข้มข้นต่างกัน

2. สารละลาย $ZnSO_4$ ก็ให้ผลเช่นเดียวกัน คือ ความเข้มข้นที่สูงขึ้นจะให้ผลการตกผลึกปฏิกิริยาร้าวที่ดีขึ้น จากรูปที่ 5 เส้นกราฟในช่วงที่ 2 (ระหว่าง 3-7 วัน) เห็นว่าอัตราการตกผลึกของสารละลายนั้นลดลง สำหรับความเข้มข้น 0.2 และ 0.5 โมลต่อลิตร ในขณะที่อัตราการตกผลึกปฏิกิริยาของ $ZnSO_4$ 0.1 โมลต่อลิตรนั้น ยังเหมือนในช่วงแรก ดังนั้น หากมีการให้ศักย์ไฟฟ้าต่อไป สามารถทำนายแนวโน้มของการใช้สารละลาย $ZnSO_4$ ได้ว่า ความเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร น่าจะให้ผลการตกผลึกปฏิกิริยาร้าวที่เท่ากันหรือดีกว่า $ZnSO_4$ ที่ความเข้มข้น 0.2 และ 0.5 โมลต่อลิตร

3. จากผลการทดลองเห็นได้ว่า ความเข้มข้นที่มีค่าสูง (0.5 โมลต่อลิตร) ให้ผลการตกผลึกปฏิกิริยาร้าวที่ใกล้เคียงกับสารละลายที่มีความเข้มข้นต่ำกว่า (0.1-0.2 โมลต่อลิตร) ดังนั้นสารละลายที่มีความเข้มข้นประมาณ 0.1 – 0.2 โมลต่อลิตร จึงเหมาะสมกว่าเมื่อเทียบกับปริมาณสารละลายที่ต้องใช้ รูปที่ 6 เป็นการเปรียบเทียบการตกผลึกปฏิกิริยาร้าวของทั้ง 3 สารละลายที่มีความเข้มข้น 0.2 โมลต่อลิตร ซึ่งเห็นว่า ทั้งสามชนิดให้ผลการทดลองที่ใกล้เคียงกัน แต่ถ้าดูจากรูปถ่ายก่อนและหลังการทดลอง (รูปที่ 7-8 เป็นรูปของการทดลองให้ศักย์ภายนอกขนาด 6 โวลต์ ระยะเวลา 7 วัน ความเข้มข้นของสารละลายเท่ากับ 0.2 โมลต่อลิตร ซึ่งเห็นผลการทดลองชัดเจนกว่า ให้ศักย์ภายนอกขนาด 3 โวลต์) จะเห็นว่าสารละลายที่มีโลหะแมกนีเซียมเป็นส่วนประกอบให้ผลการปฏิกิริยาร้าวที่ชัดเจน (มีผลึกปฏิกิริยาร้าวอยู่โดยเห็นได้จากภายนอก) กว่าสารละลาย $ZnSO_4$ และมีแนวโน้มที่จะมีการพัฒนาการปฏิกิริยาร้าวได้หมดถ้ามีการ

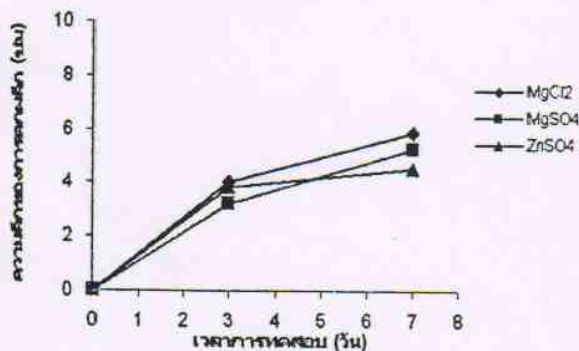
จ่ายพลังงานจากภายนอกต่อไป นอกจากนี้ การสำรวจความลึกของการตกผลึกของสารละลายยังพบว่า เหล็กเสริมที่อยู่ภายในคอนกรีตอยู่ในสภาพสมบูรณ์ ไม่มีการเกิดสนิมเนื่องจากการสัมผัสกับคลอไรด์ไอออนในสารละลาย

ความลึกของการตกผลึกของสารละลาย $ZnSO_4$

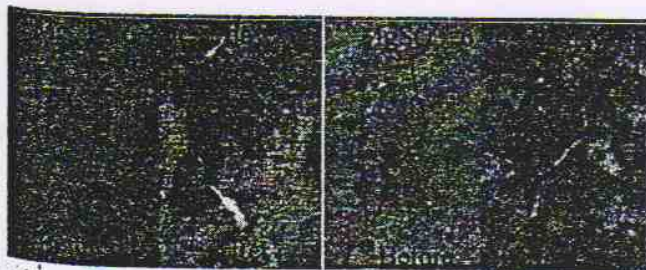


รูปที่ 5 ความลึกของการตกผลึกเข้าไปในรอยแตกกว้างของตัวอย่างคอนกรีต ของสารละลาย $ZnSO_4$ ที่ความเข้มข้นต่างกัน

ความลึกของการตกผลึกของสารละลาย $MgCl_2$, $MgSO_4$ และ $ZnSO_4$ ที่มีความเข้มข้น 0.2 โมลต่อลิตร



รูปที่ 6 ความลึกของการตกผลึกเข้าไปในรอยแตกกว้างของตัวอย่างคอนกรีต ของสารละลาย $MgCl_2$, $MgSO_4$ และ $ZnSO_4$ ที่ความเข้มข้น 0.2 โมลต่อลิตร



รูปที่ 7 เปรียบเทียบรอยแตกกว้างของตัวอย่างก่อนและหลังการทดสอบด้วยสารละลาย $MgCl_2$ และ $MgSO_4$ ความเข้มข้น 0.2 โมลต่อลิตร ศักย์ภายนอก 6 โวลต์ เป็นระยะเวลา 7 วัน



รูปที่ 8 เปรียบเทียบรอยแตกกว้างของตัวอย่างก่อนและหลังการทดสอบด้วยสารละลาย $ZnSO_4$ ความเข้มข้น 0.2 โมลต่อลิตร ศักย์ภายนอก 6 โวลต์ เป็นระยะเวลา 7 วัน

4. สรุปผลการทดลอง

1. สามารถใช้สารละลาย $MgCl_2$ และ $MgSO_4$ แทนน้ำทะเล สำหรับการซ่อมแซมรอยแตกกว้างของคอนกรีตเสริมเหล็กบนพื้นดินโดยวิธี electrodeposition ได้ โดยผลของการปิดรอยแตกกว้างขึ้นอยู่กับ ความเข้มข้นของสารละลาย และชนิดของสารละลายเป็นสำคัญ
2. การทดลองใช้วิธี electrodeposition ซ่อมแซมรอยแตกกว้างของคอนกรีตเสริมเหล็ก ที่ให้ศักย์ไฟฟ้าภายนอก 3 โวลต์ เงื่อนไขที่ให้ผลการทดลองที่ดีที่สุดคือ การใช้สารละลายที่มีโลหะแมกนีเซียมเป็นส่วนประกอบโดยมีความเข้มข้น 0.2 โมลต่อลิตร

กิตติกรรมประกาศ

การศึกษาและวิจัยครั้งนี้ขอขอบคุณ สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ที่สนับสนุนทุนการศึกษาและวิจัย (ทุนวิจัย เลขที่ MRG4780139) และขอขอบคุณบริษัทนนทรีจำกัดที่สนับสนุนตะแกรงลวดไทเทเนียม

5. เอกสารอ้างอิง

- [1] Otsuki, N., Hisada, M. and Amino, T.. Electric current and ion migration through concrete. *Proceeding of the Regional Symposium on Infra-structures Development in Civil Engineering*. 19 – 20 December 1995. Bangkok. Thailand. 21 – 35.
- [2] Ryu, J.S.. 2003. Influence of crack width, cover depth, water-cement ratio and temperature on the formation of electrodeposits on the concrete surface. *Magazine of Concrete Research*. 55(1). 35 – 40.
- [3] Ryu, J.S. and Otsuki, N.. 2002. Crack closure of reinforced concrete by Electrodeposition Technique. *Cement and Concrete Research*. 32(1). 159 – 164.

■ ณัฐพล ทองขาว นักศึกษาปริญญาโท
ดร.วันชัย ยอดสุดใจ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

การซ่อมแซมรอยแตกร้าว ของคอนกรีตเสริมเหล็ก เพื่อลดการเกิดสนิมโดยวิธี Electrodeposition

การเกิดสนิมในเหล็กเสริม เป็นหนึ่งในความเสียหายหลักที่เกิดขึ้นกับโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก ซึ่งผลกระทบโดยรวมของการเกิดสนิมในเหล็กคือ กำลังรับแรงของโครงสร้างลดลงเนื่องจากพื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริม นอกจากนี้การเกิดสนิมยังทำให้เกิดการแตกร้าวและหลุดออกของคอนกรีตหุ้มภายนอก เนื่องจากปริมาตรที่เพิ่มขึ้นจากการเกิดสนิม จะทำให้เกิดแรงดึงในเนื้อคอนกรีต ซึ่งทำให้คอนกรีตหุ้มที่มีความหนาน้อยนั้นเกิดการแตกร้าวเป็นผลให้เกิดความเสียหายกับโครงสร้างมากยิ่งขึ้น ดังรูปที่ 1 ทำให้อายุการใช้งานของโครงสร้างลดลง และต้องเสียค่าใช้จ่ายจำนวนมากในการซ่อมแซมโครงสร้างนั้นๆ

โดยปกติแล้ว น้ำและอากาศสามารถซึมผ่านเนื้อคอนกรีตไปถึงเหล็กเสริมได้ในปริมาณที่น้อย ขึ้นอยู่กับความทึบของเนื้อคอนกรีต แต่การเกิดรอยแตกร้าวของโครงสร้าง จะเป็น

การเร่งให้น้ำและออกซิเจนเข้าไปถึงบริเวณเหล็กเสริมได้รวดเร็วและมากยิ่งขึ้น ทำให้การเกิดสนิมของเหล็กเสริมเร็วและรุนแรงมากขึ้น นอกจากนี้ โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กทั่วไปนั้น มักจะอยู่ในสภาพแวดล้อมที่มีความเสี่ยงต่อการเกิดสนิม โดยเฉพาะโครงสร้างที่อยู่ในหรือบริเวณชายทะเลนั้น ความเข้มข้นของคลอไรด์จะเป็นตัวเร่งให้การเกิดสนิมในเหล็กเสริมเร็วขึ้น ดังนั้น ถ้าเราสามารถป้องกันไม่ให้เกิดสนิมในเหล็กเสริมได้ ก็จะทำให้โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กนั้นมีอายุการใช้งานที่ยาวนานขึ้น

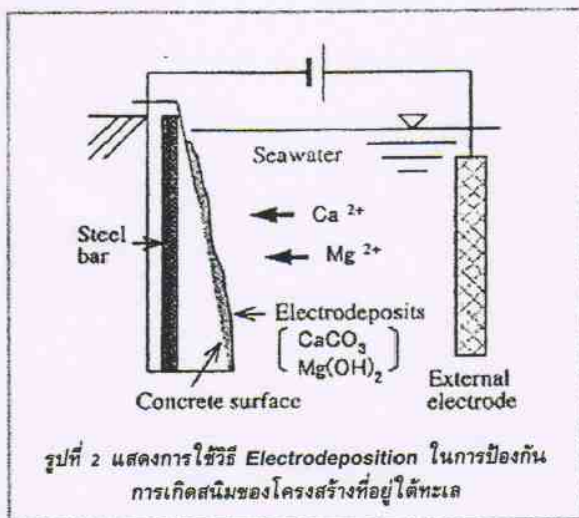
วิธีการหนึ่งที่จะช่วยป้องกันการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตได้ คือ การใช้วิธีทางเคมีไฟฟ้า (Electrochemical) โดยใช้หลักการของกระแสไฟฟ้า และการเคลื่อนตัวของไอออน ซึ่งการประยุกต์ใช้วิธีทางเคมีไฟฟ้าในการป้องกันการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตนั้นมีหลายวิธี เช่น วิธี Electrodeposition, Cathodic Protection และ Realkalization เป็นต้น ซึ่งแต่ละวิธีก็ใช้สำหรับวัตถุประสงค์ที่แตกต่างกันออกไป โดยบทความนี้จะนำเสนอการลดการเกิดสนิมของเหล็กเสริม และการซ่อมแซมรอยแตกร้าวของคอนกรีตเสริมเหล็ก ด้วยวิธี Electrodeposition

วิธี Electrodeposition

วิธี Electrodeposition เป็นวิธีการหนึ่งที่ใช้ในการลดการเกิดสนิมของเหล็กเสริมและการซ่อมแซมรอยแตกร้าว



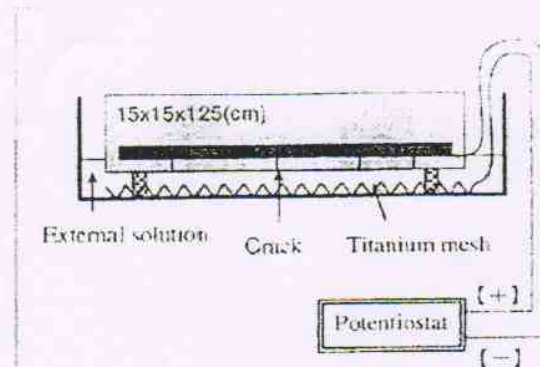
ของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่อยู่ใต้ทะเล โดยการจ่ายกระแสไฟฟ้า เพื่อให้สารละลายที่มีอยู่ในน้ำทะเลแตกตัวเป็นไอออน วิธีการนี้จะทำให้แคลเซียมไอออน (Ca^{2+}) และ/หรือแมกนีเซียมไอออน (Mg^{2+}) ซึ่งเป็นไอออนของโลหะที่แตกตัวจากสารประกอบที่มีอยู่ในน้ำทะเล เกิดการตกผลึกเป็นแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) และแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Mg}(\text{OH})_2$) ตามลำดับ ดังรูปที่ 2 ที่ผิวนอกและรอยแตกร้าวของคอนกรีต ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นนี้เป็นสารประกอบอินทรีย์ที่มีความสามารถในการละลายน้ำได้น้อยมากๆ และยังช่วยเพิ่มความหนาให้กับคอนกรีต



วิธี Electrodeposition เป็นวิธีที่จะช่วยซ่อมแซมรอยแตกร้าวเพื่อลดการเกิดสนิมของเหล็กเสริมได้ ซึ่งวิธีนี้เป็นเทคนิคหนึ่งของการวิเคราะห์เคมีไฟฟ้า เพื่อแยกสารตัวอย่างออกจากสารละลาย ซึ่งการใช้วิธี Electrodeposition สำหรับการซ่อมแซมรอยแตกร้าวของคอนกรีตนั้น จะทำให้เกิดการสะสมของของแข็งจากปฏิกิริยาไฟฟ้า โดยมีแนวโน้มที่จะสะสมบริเวณรอยแตกร้าวของคอนกรีต เนื่องจากความนำไฟฟ้าบริเวณรอยแตกร้าวนั้นจะสูงกว่าบริเวณอื่น และยังพบว่า คอนกรีตที่ผ่านการทำ Electrodeposition จะมีประสิทธิภาพในการต้านทานการซึมผ่านของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เนื่องมาจากความหนาแน่นของชั้นการสะสมของของแข็ง ที่บริเวณผิวหน้าของคอนกรีต

ได้มีการศึกษาวิธี Electrodeposition สำหรับการซ่อมแซมรอยแตกร้าวของคอนกรีตบนพื้นดินในประเทศญี่ปุ่น ซึ่งพบว่าการใช้วิธีนี้โดยใช้สารละลาย ZnSO_4

แทนน้ำทะเล ดังรูปที่ 3 ทำให้รอยแตกร้าวของตัวอย่างส่วนมากจะถูกปิดเป็นปกติ



โดยในสองสัปดาห์ของการทดสอบ ชั้นของการตกผลึกของ ZnO ที่บริเวณผิวหน้าของคอนกรีตมีความหนา 0.5-2 มิลลิเมตร ช่วยให้การซึมผ่านของน้ำที่บริเวณรอยแตกร้าวลดลง และยังช่วยลดความเข้มข้นของคลอไรด์ไอออนบริเวณเหล็กเสริมได้มากถึง 70%

Electrode reaction	(anode) $2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{O}_2\uparrow + 4\text{H}^+ + 4\text{e}^-$ (cathode) $2\text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2\uparrow + 2\text{OH}^-$
Aqueous reaction	$\text{ZnSO}_4 \rightarrow \text{Zn}^{2+} + \text{SO}_4^{2-}$ $\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{OH}^- + \text{H}^+$ $\text{Zn}^{2+} + 2\text{OH}^- \rightarrow \text{Zn}(\text{OH})_2$

แสดงการเกิดปฏิกิริยาเคมี และผลที่ได้จากปฏิกิริยา



นอกจากนี้ ยังมีการศึกษาอื่นที่น่าสนใจ Electrodeposition มาใช้ในการซ่อมแซมรอยแตกร้าวของคอนกรีตบนพื้นดิน โดยพบว่า การปิดรอยแตกร้าวจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วใน 10 วันแรกของการทดสอบ และตัวอย่างส่วนมากจะถูกปิดรอยแตกอย่างสมบูรณ์ภายใน 30 วัน

จะเห็นว่า การซ่อมแซมรอยแตกร้าวของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยวิธี Electrodeposition นั้น ให้ผลที่ดี อย่างไรก็ตามยังไม่มีผลการนำวิธีนี้มาประยุกต์ใช้จริงในงานซ่อมแซมโครงสร้างบนพื้นดิน และน่าจะมีการสนับสนุนให้มีการศึกษาวิจัยเรื่องนี้ เพื่อเป็นฐานข้อมูลในการพัฒนางานด้านการซ่อมแซมโครงสร้างต่อไป

Thailand. 21-35.

- [2] Ryu, J.S.. 2003. Influence of crack width, cover depth, water-cement ratio and temperature on the formation of electrodeposits on the concrete surface. *Magazine of Concrete Research*. 55(1). 35-40.
- [3] Ryu, J.S. and Otsuki, N.. 2002. Crack closure of reinforced concrete by Electrodeposition Technique. *Cement and Concrete Research*. 32(1). 159 - 164.

เอกสารอ้างอิง

- [1] Otsuki, N., Hisada, M. and Amino, T. Electric current and ion migration through concrete. *Proceeding of the Regional Symposium on Infra-structures Development in Civil Engineering*. 19-20 December 1995. Bangkok.



เชิญชวนร่วมร่างมาตรฐานวิศวกรรมไฟฟ้า

กรรมการฝ่ายงานมาตรฐานวิศวกรรมไฟฟ้า วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์ (ว.ส.ท.) ขอเชิญชวนท่านผู้สนใจร่วมร่างมาตรฐานวิชาชีพเพื่อประโยชน์ต่อประชาชน ในหัวข้อ ดังต่อไปนี้

- มาตรฐานการตรวจสอบการติดตั้งสายสัญญาณเครือข่ายคอมพิวเตอร์ในสถานที่สำหรับผู้ใช้ในประเทศไทย
- มาตรฐานการวัดและการตรวจสอบการติดตั้งทางไฟฟ้า
- มาตรฐานการวัดและการทดสอบทางเสียง
- มาตรฐานสถานีเคเบิลใต้น้ำ อุปกรณ์สถานีเคเบิลใต้น้ำ
- มาตรฐานการติดตั้งและวัดตรวจสอบสายสัญญาณภาพและเสียงในอาคาร
- มาตรฐานสำหรับตรวจสอบอุปกรณ์ระบบ SDH/IP
- แนวปฏิบัติในการจัดซื้อจัดจ้างระบบสารสนเทศ โดยใช้เกณฑ์ราคาต่อสมรรถนะ (Price Performance)
- มาตรฐานการออกแบบการติดตั้งเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมภาคพื้นดิน DTH : Direct to Home
- มาตรฐานระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ 3G
- มาตรฐานการเชื่อมต่ออินเทอร์เน็ต (Internet) สำหรับประชาชน
- มาตรฐานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก

ทุกความคิดเห็นสามารถส่งมาได้ทั้ง

วรวิทย์ ศรีสมศักดิ์ บริษัท ไทโรคมเนค จำกัด (มหาชน)

เลขที่ 99 ถ.แจ้งวัฒนะ หลักสี่ กรุงเทพฯ 10002

โทรศัพท์ : 0-2573-7932 โทรสาร : 0-2573-3884

E-mail : sworawut@catttelecom.co.th

ความต้านทานการเกิดคาร์บอนชั้นของตัวอย่างคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีรอยแตกร้าวหลังจากผ่านการ
ซ่อมแซมรอยแตกร้าวด้วยวิธี electrodeposition

**CARBONATION RESISTANCE OF CRACKED REINFORCED CONCRETE
SPECIMENS AFTER REPAIR BY ELECTRODEPOSITION METHOD**

ณัฐพล ทองขาว (Natthaphon Thongkhaw)¹

วันชัย ยอดสุตใจ (Wanchai Yodsudjai)²

ประเสริฐ สุวรรณวิทยา (Prasert Suwanvitaya)³

¹นิสิตปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ tongcivil@hotmail.com

²อาจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ fengwcy@ku.ac.th

³รองศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ fengprs@yahoo.com

บทคัดย่อ: Electrodeposition เป็นวิธีการทางเคมีไฟฟ้า ที่ใช้ซ่อมแซมรอยแตกร้าวของคอนกรีตได้ทะเล โดยการจ่ายกระแสไฟฟ้า เพื่อให้สารละลายในน้ำทะเลแตกตัวเป็นไอออน และไอออนของโลหะนั้น จะตกผลึกปิดรอยแตกร้าวบริเวณผิวหน้าของคอนกรีต ในงานวิจัยนี้ เป็นการศึกษาการใช้วิธี electrodeposition เพื่อซ่อมแซมรอยแตกร้าวของคอนกรีตเสริมเหล็กบนพื้นดิน และศึกษาความสามารถต้านทานการเกิดคาร์บอนชั้น ของตัวอย่างคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีรอยแตกร้าวและผ่านการซ่อมแซมด้วยวิธี electrodeposition โดยใช้ตัวอย่างคอนกรีตเสริมเหล็กขนาด 10 x 10 x 37 เซนติเมตร ที่ผ่านการทำให้แตกด้วยการกดแบบคาน และนำไปซ่อมแซมรอยแตกร้าวด้วยวิธี electrodeposition ซึ่งใช้สารละลาย $MgCl_2$, $MgSO_4$ และ $ZnSO_4$ ที่มีความเข้มข้น 0.1, 0.2 และ 0.5 โมลต่อลิตร แทนการใช้น้ำทะเล ผลที่ได้คือ สารละลายที่มีโลหะแมกนีเซียมเป็นส่วนผสม ($MgCl_2$ และ $MgSO_4$) ที่ความเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร ให้ผลการปิดรอยแตกร้าวและการต้านทานการเกิดคาร์บอนชั้นที่น่าพอใจ

ABSTRACT: Electrodeposition method, based on the electrochemical method, is used to repair cracks in reinforced concrete structures located under seawater by applying an electric current. Electrodeposits of the chemical compounds are filled the cracks in reinforced concrete and coated the concrete surface. The purpose of this study was to investigate the effective solution, instead of seawater, for repairing the cracks of reinforced concrete on land. Reinforced concrete specimens with the dimension of 10x10x37 cm were used. After specimens were cracked by applying three-point loading, the specimens were immersed in $MgCl_2$, $MgSO_4$ and $ZnSO_4$ with the concentration of 0.1, 0.2 and 0.5 mol/L. The constant potential was applied between the reinforcing steel and the external electrode. As a result, both of $MgCl_2$ and $MgSO_4$ with the solution of 0.1 mol/l were the effective solutions for closing cracks and preventing carbonation in the reinforced concrete structures.

KEYWORDS: Electrodeposition, Carbonation, Crack Repair

1. บทนำ

การเกิดสนิมในเหล็กเสริม เป็นหนึ่งในความเสียหายหลักที่เกิดขึ้นกับโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก ซึ่งผลกระทบโดยรวมของการเกิดสนิมในเหล็กคือ กำลังรับแรงของโครงสร้างลดลง เนื่องจากพื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริมน้อยลง โดยที่ สาเหตุหลักของการเกิดสนิม คือ การเกิดรอยแตกร้าวของโครงสร้าง ที่มักเกิดจากการหดตัวขณะที่ยังคอนกรีตแข็งตัว (สำหรับโครงสร้างที่มีขนาดใหญ่) รอยต่อของคอนกรีตจากการก่อสร้าง สภาพแวดล้อม หรือเกิดจากสภาวะการใช้งาน เป็นต้น ซึ่งการเกิดรอยแตกร้าวของโครงสร้าง เป็นสาเหตุให้น้ำและอากาศสามารถเข้าถึงบริเวณเหล็กเสริมได้รวดเร็ว โดยเฉพาะก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในอากาศ ที่จะทำให้เกิดการสูญเสียสภาพการเป็นด่าง (depassivation) บริเวณรอบๆ เหล็กเสริม ทำให้การเกิดสนิมเป็นไปด้วยความรวดเร็วยิ่งขึ้น วิธีการหนึ่งที่จะช่วยลดการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีรอยแตกร้าวได้คือการซ่อมแซมโดยปิดรอยแตกร้าวเหล่านั้นๆ เพื่อลดการซึมผ่านของน้ำและอากาศซึ่งเป็นตัวเร่งให้เกิดสนิม ให้ไปถึงบริเวณเหล็กเสริมได้น้อยลง

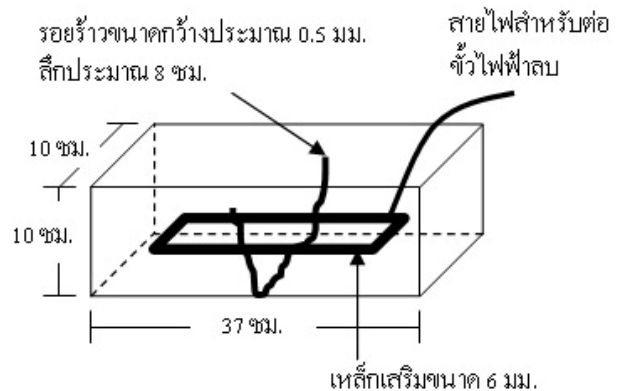
วิธี electrodeposition เป็นวิธีการหนึ่งที่ใช้ในการลดการเกิดสนิมของเหล็กเสริมและการซ่อมแซมรอยแตกร้าวของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ได้ผลดี โดยเฉพาะอย่างยิ่งกับโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่อยู่ใต้ทะเล วิธีการนี้จะทำให้เคลือบผิวของโลหะที่แตกตัวจากสารประกอบที่ละลายอยู่ในน้ำทะเล เกิดการตกผลึกเป็นแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) และแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ (Mg(OH)_2) ตามลำดับ ที่บริเวณผิวนอกและรอยแตกร้าวของคอนกรีต ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจากกระบวนการนี้เป็นสารประกอบอนินทรีย์ที่มีความสามารถในการละลายน้ำได้น้อยมาก และยังช่วยเพิ่มความทึบน้ำให้กับคอนกรีต จึงได้มีแนวคิดในการนำวิธีนี้มาประยุกต์ใช้ซ่อมแซมโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่อยู่บนพื้นดิน

ในรายงานวิจัยนี้ เป็นการศึกษาการใช้วิธี electrodeposition เพื่อซ่อมแซมรอยแตกร้าวของคอนกรีตเสริมเหล็กบนพื้นดิน และความสามารถในการต้านทานการเกิดคาร์บอนชั่น ของตัวอย่างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ผ่านการซ่อมแซมด้วยวิธี electrodeposition ซึ่งใช้สารละลายที่เตรียมขึ้นเองแทนการใช้น้ำทะเล

2. การทดลอง

2.1 ตัวอย่างทดสอบ

ใช้ตัวอย่างคอนกรีตเสริมเหล็กขนาด $10 \times 10 \times 37$ เซนติเมตร ที่มีกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตเท่ากับ 240 กก./ตร.ซม. เสริมเหล็กตรงกึ่งกลางของแท่งคอนกรีต โดยใช้เหล็กกลมที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 6 มิลลิเมตร ผูกต่อกันในลักษณะวงรอบสี่เหลี่ยม ให้มีระยะหุ้มของคอนกรีตด้านข้างเท่ากับ 2.5 เซนติเมตร ทำการต่อสายไฟเข้ากับเหล็กเสริม หลังจากหล่อตัวอย่างแล้ว บ่มตัวอย่างทดสอบคอนกรีตในน้ำเป็นเวลา 28 วัน จากนั้นนำตัวอย่างมากดแบบ three-point load เพื่อทำให้เกิดรอยร้าวขึ้นในตัวอย่างทดสอบ กำหนดให้รอยร้าวมีค่าความกว้างโดยประมาณ 0.5 มิลลิเมตร และมีค่าความลึกโดยประมาณ 8 เซนติเมตร แสดงดังภาพที่ 1



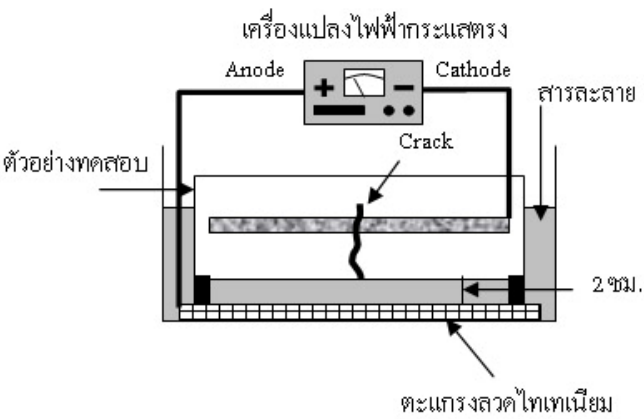
ภาพที่ 1 แสดงการเตรียมตัวอย่างทดสอบคอนกรีตเสริมเหล็กสำหรับวิธี Electrodeposition

ก่อนนำไปซ่อมแซมรอยแตกร้าวด้วยวิธี electrodeposition ทำการเคลือบผิวด้านข้างทุกด้านของตัวอย่างทดสอบคอนกรีตด้วย epoxy resin เพื่อให้การปกคลุมของอ็อกไซด์บนพื้นผิวของตัวอย่างทดสอบคอนกรีตมีเพียงด้านเดียวเท่านั้น

2.2 การทดสอบด้วยวิธี electrodeposition

ทำการทดสอบโดยต่อเครื่องแปลงกระแสไฟฟ้าตรง เข้ากับเหล็กเสริมที่อยู่ในตัวอย่างทดสอบคอนกรีตเสริมเหล็กและตะแกรงลวดไทเทเนียม (ใช้ไทเทเนียมเนื่องจากเป็นโลหะที่มีความเฉื่อยสูง เพื่อป้องกันการละลายของขั้วไฟฟ้าจากการเสียอิเล็กตรอน) โดยต่อเหล็กเสริมในคอนกรีตเข้ากับขั้วไฟฟ้าลบ และต่อตะแกรงลวดไทเทเนียมเข้ากับขั้วไฟฟ้าบวก จากนั้นเติมสารละลายที่เตรียมไว้ให้มีระดับความสูงของสารละลายสูงกว่า

ระดับของเหล็กเสริม แล้วจ่ายศักย์ไฟฟ้าขนาดคงที่จากเครื่องแปลงกระแสไฟฟ้าตรง เพื่อเป็นการเริ่มการทดสอบ แสดงการติดตั้งเพื่อทดสอบดังภาพที่ 2



ภาพที่ 2 แสดงการต่อตัวอย่างทดสอบและตะแกรงไทเทเนียมเข้ากับเครื่องแปลงไฟฟ้ากระแสตรง

2.3 การทดสอบและวัดผล

ในงานวิจัยนี้ ใช้สารละลายที่เตรียมขึ้น 3 ชนิด แทนการใช้น้ำทะเล โดยมี แมกนีเซียมคลอไรด์ ($MgCl_2$), แมกนีเซียมซัลเฟต ($MgSO_4$), และ ซิงค์ซัลเฟต ($ZnSO_4$) สำหรับใช้งานซ่อมแซมรอยแตกร้าวของคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยวิธี electrodeposition บนพื้นดิน โดยแต่ละชนิดของสารละลายที่ใช้ทำการทดสอบ กำหนดให้มีความเข้มข้นเท่ากับ 0.10, 0.20 และ 0.50 โมลต่อลิตร และให้ศักย์ไฟฟ้าภายนอกคงที่ขนาด 6 โวลต์ แก่สารละลายเป็นระยะเวลา 3, 7 และ 28 วัน เพื่อวัดความลึกของการตกผลึกปิดรอยแตกร้าว และ นำตัวอย่างที่ผ่านการซ่อมแซมแล้ว (เฉพาะตัวอย่างที่ผ่านการให้ศักย์ไฟฟ้า 28 วัน) ไปแช่ในถังควบคุมปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีความเข้มข้นร้อยละ 7 เพื่อตรวจสอบความต้านทานการเกิดคาร์บอนเนชั่น โดยนำตัวอย่างทดสอบที่ซ่อมแซมแล้วมาตัดตามรอยร้าว พันด้วยสารละลายฟีนอล์ฟทาไลน์ร้อยละ 1 ในแอลกอฮอล์ แล้ววัดความลึกการเกิดคาร์บอนเนชั่น

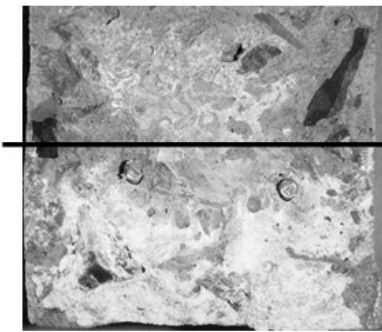
3. ผลและการวิเคราะห์ผลการทดลอง

หลังจากให้ศักย์ไฟฟ้าแก่สารละลายเป็นเวลา 3, 7 และ 28 วัน แล้ว นำตัวอย่างทดสอบขึ้นจากสารละลาย ผ่าตัวอย่างทดสอบตามรอยแตก ภาพที่ 3 และ 4 แสดงตัวอย่างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ผ่านการซ่อมแซมรอยแตกร้าวด้วยวิธี electrodeposition แล้ว

จากภาพที่ 3 แสดงให้เห็นว่า รอยแตกร้าวเกือบทั้งหมดถูกปิดเป็นอย่างดี จากการตกผลึกของโลหะในสารละลาย และ ภาพที่ 4 แสดงให้เห็นภาพตัดขวางของตัวอย่าง โดยจะเห็นการตกผลึกเข้าไปในความลึกของรอยแตกร้าว และสามารถวัดระดับความลึกของการตกผลึกดังแสดงในตารางที่ 1



ภาพที่ 3 เปรียบเทียบรอยแตกร้าวของตัวอย่างก่อนและหลังการทดสอบด้วยสารละลาย $MgCl_2$ ความเข้มข้น 0.2 โมลต่อลิตร



ระดับความลึกของการตกผลึกปิดรอยแตกร้าว

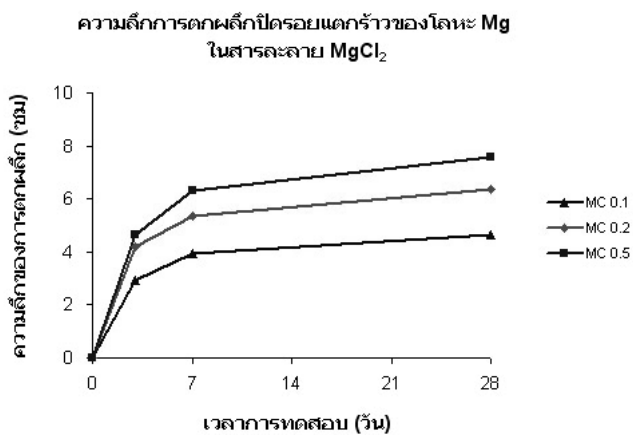
ภาพที่ 4 รูปตัดขวางตามรอยแตกของตัวอย่างหลังจากผ่านการซ่อมแซม แสดงความลึกของการตกผลึกปิดรอยแตกร้าว จากการทดสอบด้วยสารละลาย $MgCl_2$ ความเข้มข้น 0.2 โมลต่อลิตร

ตารางที่ 1 ความลึกของการตกผลึกเข้าไปภายในรอยแตกร้าว

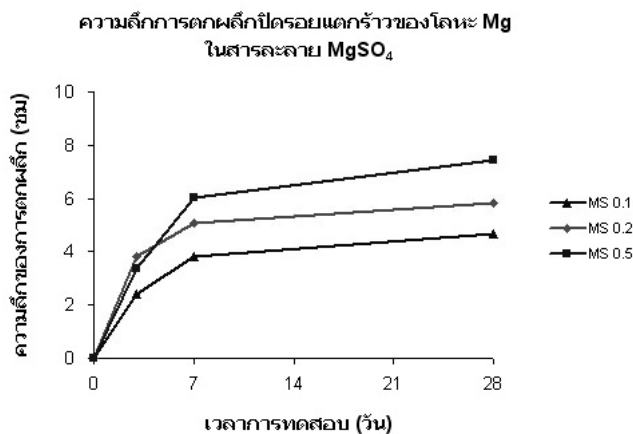
สารละลาย	ระยะเวลา (วัน)	ความลึกของการตกผลึก (ซม.)		
		ความเข้มข้นของสารละลาย (โมลต่อลิตร)		
		0.1	0.2	0.5
$MgCl_2$ (MC)	3	2.95	4.21	4.65
	7	3.94	5.33	6.31
	28	4.64	6.35	7.58
$MgSO_4$ (MS)	3	2.42	3.83	3.38
	7	3.83	5.09	6.03
	28	4.65	5.85	7.43
$ZnSO_4$ (ZS)	3	2.26	3.24	5.51
	7	3.96	4.24	6.73
	28	5.68	6.56	8.04

จากผลการทดสอบในตารางที่ 1 นำไปเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความลึกของการตกผลึกและระยะเวลาการให้ศักย์ไฟฟ้าได้ตามรูปที่ 5 - 7 พบว่า

1. สารละลาย $MgCl_2$ และ $MgSO_4$ ซึ่งมีโลหะแมกนีเซียมเป็นส่วนประกอบ ให้ผลของการทดสอบที่ใกล้เคียงกัน ทั้งความลึกของการตกผลึก และอิทธิพลของความเข้มข้นของสารละลาย ต่อความลึกของการตกผลึก ตามภาพที่ 5 และ 6 คือ ความลึกของการตกผลึกของสารละลายทั้งสองชนิด มีค่าใกล้เคียงกันในทุกความเข้มข้นและระยะเวลาการให้ศักย์ไฟฟ้า นอกจากนี้ยังพบว่า ความเข้มข้นของสารละลายที่มากขึ้น เป็นผลให้มีการตกผลึกปีตรอยร้าวที่ดีขึ้น โดยที่อัตราความลึกของการตกผลึกเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วใน 7 วันแรกที่ทำให้ศักย์ไฟฟ้า ซึ่งมีค่าความลึกของการตกผลึกเป็นร้อยละ 84 เทียบกับที่ 28 วัน

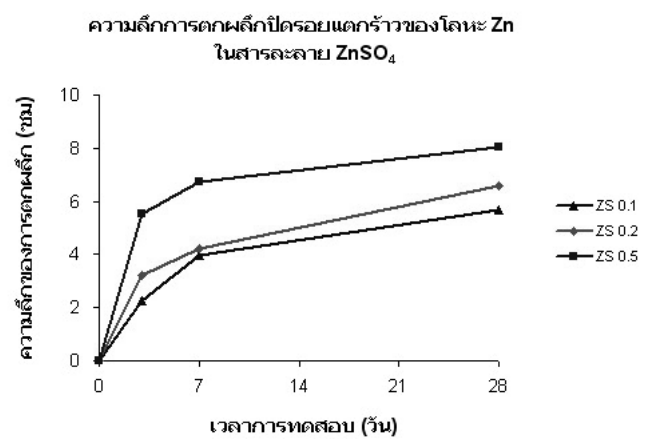


ภาพที่ 5 ความลึกของการตกผลึกเข้าไปในรอยแตกร้าวของตัวอย่างคอนกรีต ของสารละลาย $MgCl_2$ ที่ความเข้มข้นต่างกัน



ภาพที่ 6 ความลึกของการตกผลึกเข้าไปในรอยแตกร้าวของตัวอย่างคอนกรีต ของสารละลาย $MgSO_4$ ที่ความเข้มข้นต่างกัน

2. สารละลาย $ZnSO_4$ ก็ให้ผลเช่นเดียวกัน คือ ความเข้มข้นที่สูงขึ้นจะให้ผลการตกผลึกปีตรอยร้าวที่ดีขึ้น และอัตราความลึกของการตกผลึกที่สูงใน 7 วันแรกเช่นเดียวกัน ดังภาพที่ 7 นอกจากนี้ จากกราฟความลึกของการตกผลึก จะเห็นว่า ความลึกของการตกผลึกปีตรอยแตกร้าวของสารละลาย $ZnSO_4$ ที่มีความเข้มข้น 0.1 และ 0.2 โมลต่อลิตรนั้น ให้ผลที่ใกล้เคียงกันตามระยะเวลาที่ให้ศักย์ไฟฟ้า และน้อยกว่าสารละลาย $ZnSO_4$ ที่มีความเข้มข้น 0.5 โมลต่อลิตร อย่างเห็นได้ชัด โดยที่ระยะเวลา 7 วันของสารละลายที่มีความเข้มข้น 0.5 โมลต่อลิตร ให้ความลึกการตกผลึกสูงกว่าที่ 28 วันของสารละลายที่มีความเข้มข้น 0.1 และ 0.2 โมลต่อลิตร

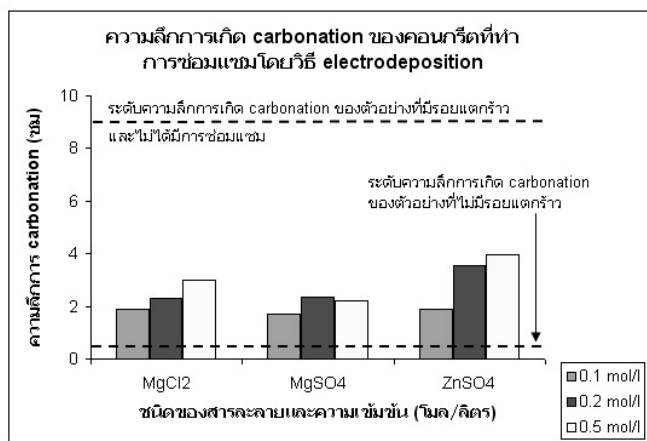


ภาพที่ 7 ความลึกของการตกผลึกเข้าไปในรอยแตกร้าวของตัวอย่างคอนกรีต ของสารละลาย $ZnSO_4$ ที่ความเข้มข้นต่างกัน

จากนั้น นำตัวอย่างที่ผ่านการซ่อมแซม (ให้ศักย์ไฟฟ้าเป็นเวลา 28 วัน) ไปบ่มในถังก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ความเข้มข้นร้อยละ 7 เป็นเวลา 28 วัน และผ่าตัวอย่างทดสอบตามรอยแตกวัดความลึกของการเกิดคาร์บอนเนชั่น เปรียบเทียบกับตัวอย่างทดสอบที่ไม่ได้ผ่านวิธี electrodeposition ทั้งที่มีรอยแตกร้าว และไม่มีรอยแตกร้าว แสดงผลการทดสอบดังภาพที่ 8 ซึ่งแสดงให้เห็นว่า

3. การซ่อมแซมรอยแตกร้าวของตัวอย่างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ใช้สารละลาย $MgCl_2$, $MgSO_4$ และ $ZnSO_4$ ที่มีความเข้มข้นต่ำ ในที่นี้คือ 0.1 โมลต่อลิตรนั้น ให้ผลการต้านทานการเกิดคาร์บอนเนชั่นที่ดีกว่า โดยมีความลึกของการเกิดคาร์บอนเนชั่นประมาณ 2 เซนติเมตร ซึ่งช่วยลดการซึมผ่านของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ถึงร้อยละ 78

เทียบกับตัวอย่างที่มีรอยแตกร้าวแต่ไม่ได้ผ่านการซ่อมแซม



ภาพที่ 8 ความลึกของการเกิดคาร์บอนชั้นของตัวอย่างที่ผ่านการซ่อมแซมด้วยวิธี electrodeposition เปรียบเทียบกับตัวอย่างที่ไม่ได้มีการซ่อมแซมและตัวอย่างที่ไม่มีรอยแตกร้าว

- การซ่อมแซมรอยแตกร้าวของตัวอย่างที่ใช้สารละลาย MgCl_2 และ MgSO_4 ให้ผลการต้านทานการซึมผ่านของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ใกล้เคียงกันในทุกความเข้มข้นของสารละลายทั้ง 2 ชนิด และจากผลการทดลองพบว่า ความสามารถในการต้านทานการซึมผ่านของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์นั้น ไม่มีความสัมพันธ์กับความลึกของการตกผลึกปฏิกิริยารอยแตกร้าว แต่น่าจะขึ้นกับความหนาแน่นของการตกผลึกเป็นสำคัญ ดังนั้น จึงไม่จำเป็นต้องใช้สารละลาย MgCl_2 และ MgSO_4 ที่มีความเข้มข้นสูง เนื่องจากให้ผลการต้านทานการเกิดคาร์บอนชั้นที่ใกล้เคียงกันกับความเข้มข้นที่ต่ำกว่า ในที่นี้แนะนำให้ใช้สารละลาย MgCl_2 หรือ MgSO_4 ที่มีความเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร สำหรับใช้ในการซ่อมแซมรอยแตกร้าวของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยวิธี electrodeposition
- ไม่แนะนำให้ใช้สารละลาย ZnSO_4 เนื่องจาก พบว่าที่ความเข้มข้นของสารละลาย 0.1 และ 0.2 โมลต่อลิตรนั้น ให้ความลึกของการตกผลึกปฏิกิริยารอยแตกร้าวที่ใกล้เคียงกัน แต่ความสามารถต้านทานการซึมผ่านของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ที่ใช้สารละลายความเข้มข้น 0.2 โมลต่อลิตรต่ำกว่าค่อนข้างมาก แสดงให้เห็นว่า การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารละลาย ZnSO_4 ในช่วง

เริ่มต้นเพียงเล็กน้อยทำให้ความสามารถต้านทานการซึมผ่านของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ลดลงอย่างมาก ในขณะที่ความเข้มข้นของสารละลายระหว่าง 0.2 และ 0.5 โมลต่อลิตรกลับให้ผลการต้านทานการซึมผ่านของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ใกล้เคียงกัน ยกที่จะทำนายพฤติกรรม ซึ่งแตกต่างกับการใช้สารละลาย MgCl_2 และ MgSO_4

4. สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาสามารถสรุปได้ว่า

- มีความเป็นไปได้ในการใช้สารละลายที่เตรียมขึ้นเอง สำหรับการซ่อมแซมรอยแตกร้าวของคอนกรีตเสริมเหล็กบนพื้นดินโดยวิธี electrodeposition
- ความลึกการตกผลึกปฏิกิริยารอยแตกร้าวขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารละลายเป็นสำคัญ แต่ไม่มีความสัมพันธ์กับความสามารถในการต้านทานการซึมผ่านของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์
- การซ่อมแซมรอยแตกร้าวของคอนกรีตเสริมเหล็กโดยวิธี electrodeposition เมื่อพิจารณาจากความลึกของการตกผลึก ความสามารถในการต้านทานการเกิดคาร์บอนชั้น และปริมาณของสารเคมีที่ต้องใช้ เงื่อนไขที่ดีที่สุดคือ การใช้สารละลายที่มีโลหะแมกนีเซียมเป็นส่วนประกอบ (MgCl_2 หรือ MgSO_4) โดยมีความเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร

5. กิตติกรรมประกาศ

การศึกษาและวิจัยครั้งนี้ขอขอบคุณ สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ที่สนับสนุนทุกการศึกษาและวิจัย (ทุนวิจัยเลขที่ MRG4780139) และขอขอบคุณบริษัทนนทรีจำกัด ที่สนับสนุนตะแกรงลวดไทเทเนียม

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Otsuki, N., Hisada, M. and Amino, T., 1995. Electric current and ion migration through concrete. Proceeding of the Regional Symposium on Infra-structures Development in Civil Engineering. Bangkok. Thailand. 21 – 35.
- [2] Ryu, J.S., 2003. Influence of crack width, cover depth, water-cement ratio and temperature on the formation of electrodeposits on the concrete surface. Magazine of Concrete Research. 55(1). 35 – 40.
- [3] Ryu, J.S. and Otsuki, N., 2002. Crack closure of reinforced concrete by Electrodeposition Technique. Cement and Concrete Research. 32(1). 159 – 164.
- [4] ณัฐพล ทองขาว และ วันชัย ยอดสุดใจ, 2548. การซ่อมแซมรอยแตกร้าวของคอนกรีตเสริมเหล็กเพื่อลดการเกิดสนิมโดยวิธี electrodeposition. โยธาสาร: 49 – 51
- [5] วันชัย ยอดสุดใจ, ประเสริฐ สุวรรณวิทยา และ ณัฐพล ทองขาว, 2548. การศึกษาการใช้สารละลายแทนน้ำทะเลสำหรับวิธี electrodeposition เพื่อซ่อมแซมรอยแตกร้าวของคอนกรีตเสริมเหล็กบนพื้นดิน. การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี ครั้งที่ 1, โรงแรมระยองรีสอร์ท ระยอง

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

Wanchai YODSUDJAI
D.Eng.
Lecturer Dept. of Civil
Engineering
Kasetsart University
50 Phahonyothin Rd.,
Jatujuk, Bangkok, 10900,
Thailand
fengwcy@ku.ac.th



W. Yodsudjai is a lecturer of Dept. of Civil Engineering at Kasetsart University, Bangkok, Thailand. He received his Master's and Doctor's degrees from Tokyo Institute of Technology, Tokyo, Japan. His main interest is repair and maintenance of reinforced concrete structure.

Prasert SUWANVITTAYA
Ph.D.
Associate Professor
Dept. of Civil Engineering
Kasetsart University
fengprs@ku.ac.th



P. Suwanvittaya is an associate professor of Dept. of Civil Engineering, Kasetsart University, Bangkok, Thailand. He received his Ph.D. from the University of New South Wales, Australia. His main interest is the durability of reinforced concrete.

Nattaphon THONGKHAW
B.Eng.
Graduate Student Dept. of
Civil Engineering
Kasetsart University
tongcivil@hotmail.com



N. Thongkhaw is a graduate student of Dept. of Civil Engineering, Kasetsart University, Bangkok, Thailand.

Summary

Electrodeposition method, based on the electrochemical method, is used to repair cracks in reinforced concrete structures located under seawater by applying an electric current. Electrodeposits of the chemical compounds are filled the cracks in reinforced concrete and coated the concrete surface. The purpose of this study was to study the effective solution instead of seawater for repairing the cracks of reinforced concrete on land. Reinforced concrete specimens with the dimension of 10 x 10 x 37 cm. were used. After specimens were cracked by applying three-point load, the specimens were immersed in $MgCl_2$, $MgSO_4$ and $ZnSO_4$ with the concentration of 0.1, 0.2 and 0.5 mol/L. The constant current was applied between the reinforcing steel and the external electrode. As a result, the both of $MgCl_2$ and $MgSO_4$ with the solution of 0.1-0.2 mol/L were the effective solution for closing cracks in the reinforced concrete structures.

KEYWORDS

electrodeposition, cracks, repair, reinforced concrete

1. Introduction

Deterioration of reinforced concrete structure due to corrosion of steel bar is an important problem in reinforced concrete structures. Steel corrosion in concrete leads to cracking, reduction of bond strength, reduction of steel cross section and loss of serviceability. Reinforced concrete undergoing corrosion does not only give the appearance of poor performance, but can in extreme cases, lose its structural integrity. It has been stated that carbonation and presence of chloride ions, which may either have been present in the concrete constituent right from the beginning or are introduced into

the concrete through ingress during service life are two major factors, which cause corrosion of reinforcement in concrete to proceed to an unacceptable degree [1]. Also, the intensity of cracks is one of the important parameters that have a great bearing upon the initiation and sustenance of reinforcement corrosion [1]. Concrete crack is caused by various factors involving construction technique and environmental condition. Depending on the type of crack, there are many repair methods available such as epoxy injection, routing and sealing, and grouting.

Electrodeposition as a crack-repair method had been originally developed in Japan in late of 1980's by the Harbor Research institute (Port and Airport Research Institute) and the Mitsui Engineering and Shipbuilding Co., Ltd. [2]. The aim of electrodeposition method is to fill the crack in concrete and to coat the concrete surface by electrodeposits of chemical compound. This can be accomplished by feeding a weak direct current between the reinforced steel (the cathode) in concrete structure and an electrode (the anode) located under seawater.

There are some studies on application to marine structures and also to land-based environment in foreign countries [2-6]; however, studies on its performance and application for reinforced concrete member under Thailand climatic condition is not yet fully explored and documented. Therefore, the purpose of this study was to study the effective solution instead of seawater for repairing the cracks of reinforced concrete on land under Thailand climatic condition.

2. Experimental Program

2.1 Specimen description

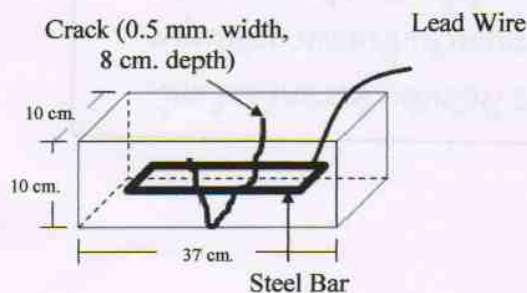


Fig. 1 Specimen description

Concrete specimens with the dimension of 10 x 10 x 37 cm were prepared. The compressive strength of concrete used was 240 kg/cm². At the center of specimen, 6 mm. in diameter of reinforcing steel bar was arranged. The cover depth of concrete was 25 mm. After cure the concrete specimens for 28 days, crack with 0.5 mm width and 8 cm depth was made on the specimen using 3-point bending load as can be seen in Fig. 1. Since only one surface area was exposed to electrodeposition repair, all the other surfaces had been coated with an epoxy resin to protect it from the deposition of the electrodeposits.

2.2 Experimental procedure

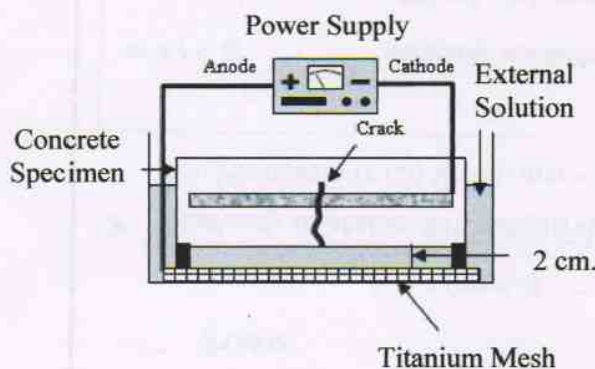


Fig. 2 Charging method

The method of charging the concrete specimen is shown in Fig. 2. As shown, the concrete specimen was placed with its exposed surface facing downward at a distance 2 cm away from the titanium mesh placed at the base of the plastic container. The reinforcing steel bar was connected to the cathode and the titanium mesh was connected to the anode. The container was filled with the external solution until the level of surface of the solution was higher than that of the reinforcing steel bar. A direct current was provide in the electric circuit to initiate the electrodeposition process.

2.3 Test and evaluation method

Three types of external solutions: MgCl_2 , MgSO_4 and ZnSO_4 , were used in this study. The concentrations of the solutions were 0.1, 0.2 and 0.5 mol/L. After applying an electrical charge of 6 V. between the reinforcing steel in the concrete specimens and the electrode in the external solutions for 3, 7 and 28 days, the concrete specimens were tested for the accelerated carbonation test (CO_2 concentration; 7%, temperature; 30 °C). After exposed in the carbon dioxide chamber for 28 days, the concrete specimens were broken and were sprayed with 1% phenolphthalein solution for measuring the carbonation depth of the concrete specimens.

3. Results and Discussion

Fig. 3 shows exposed surfaces of the concrete specimens before and after charging. As shown, it can be seen that the crack can be perfectly closed by the electrodeposits. Fig. 4 shows the cross-section of electrodeposited concrete specimen. As shown, it can be seen that the electrodeposits not only deposit at the surface of concrete specimen but also deposits inside the crack. Fig. 4 also shows the line of the deposition depth within the crack of the concrete specimen.



Fig. 3 Exposed surfaces of concrete specimens before and after charging (MgCl_2 0.2 mol/L)



Fig. 4 Cross-section of electrodeposited concrete specimen (MgCl_2 0.2 mol/L)

Table 1. Deposition depth

Solution	Duration (days)	Deposition depth (cm.)		
		Solution concentration (mol/L)		
		0.1	0.2	0.5
MgCl_2	3	2.95	4.21	4.65
	7	3.94	5.33	6.31
	28	4.64	6.35	7.58
MgSO_4	3	2.42	3.83	3.38
	7	3.83	5.09	6.03
	28	4.65	5.85	7.43
ZnSO_4	3	2.26	3.24	5.51
	7	3.96	4.24	6.73
	28	5.68	6.56	8.04

Table 1 show the deposition depth of the electrodeposited concrete specimens with various external solutions, concentrations and durations of charging. The data of deposition depth from Table 1 are plotted into the graphs as can be seen in Figs. 5, 6 and 7.

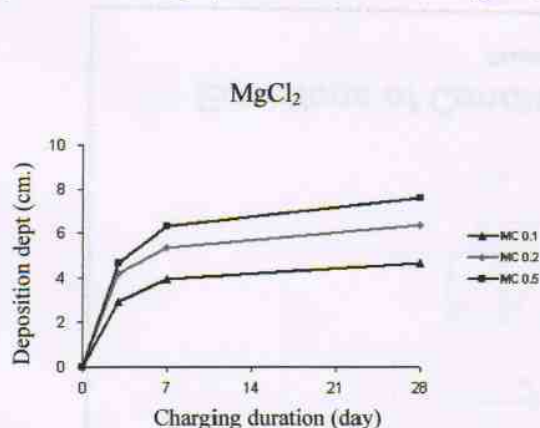


Fig. 5 Deposition depths of electrodeposited concrete specimens by using MgCl_2 as external solution with various concentrations and charging durations

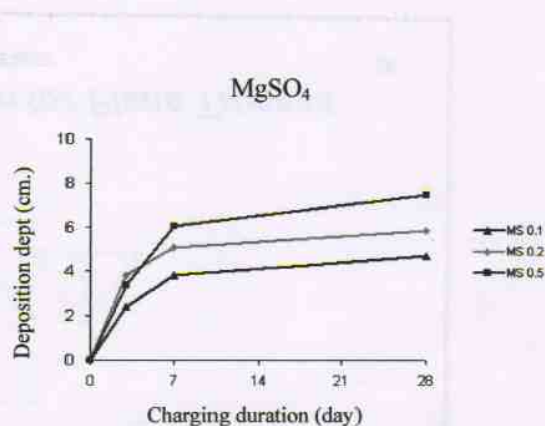


Fig. 6 Deposition depths of electrodeposited concrete specimens by using MgSO_4 as external solution with various concentrations and charging durations

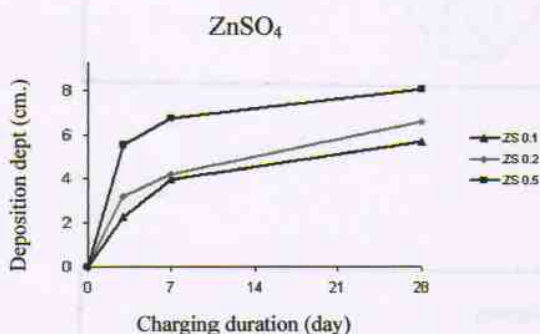


Fig. 7 Deposition depths of electrodeposited concrete specimens by using ZnSO_4 as external solution with various concentrations and charging durations

Figs. 5 and 6 show the deposition depths of the electrodeposited concrete specimens by using the MgCl_2 and MgSO_4 as the external solutions respectively with various concentrations and charging durations. As shown, the deposition depths of the electrodeposited concrete specimens by using these two solutions are similar in every concentration and charging duration. It can be seen that the deposition depth increases as the concentration of the external solution increases. In addition, it can be seen that, the rate of the deposition of the beginning period (1-7 days charging duration) is faster than that of the later period (7-28 days charging duration). The deposition depth of the beginning period (7 days charging duration) is 84% of the total deposition depth (28 days charging duration). Fig. 7 shows the deposition depths of the electrodeposited concrete specimens by

using the ZnSO_4 as the external solution with various concentrations and charging durations. Similar to the electrodeposited concrete specimens using the MgCl_2 and MgSO_4 as the external solutions, the deposition depth increases as the concentration of the solution increases. Also, the rate of the deposition of the beginning period (1-7 days charging duration) is faster than that of the later period (7-28 days charging duration). However, it can be seen that the deposition depths when using the concentrations of 0.1 and 0.2 mol/L are not much different but when using the concentration of 0.5 mol/L the deposition depth is much higher than that of using the concentrations of 0.1 and 0.2 mol/L. It is also interesting that the deposition depth when using the concentration of 0.5 mol/L at 7 days charging duration is higher than that of using the concentration of 0.1 and 0.2 mol/L at 28 days charging duration.

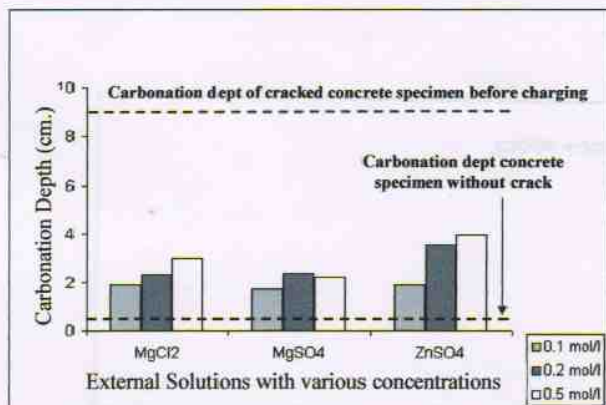


Fig. 8 Carbonation depth of electrodeposited concrete specimens by using various external solutions and concentrations (28 days charging duration)

Fig. 8 shows the carbonation depth of the electrodeposited concrete specimens by using various external solutions and concentrations at 28 days charging duration. As shown, it can be seen that the carbonation depth of the electrodeposited concrete specimens using the 0.1 mol/L concentration is smaller than that of the electrodeposited concrete specimens using 0.2 and 0.5 mol/L concentrations for all types of the external solutions. The carbonation depths of the electrodeposited concrete specimens are around 2 cm, which is smaller than that of the concrete specimens with cracks before charging (around 9 cm carbonation depth). Similar to the deposition depth, the carbonation depth of the electrodeposited concrete specimens using the MgCl₂ and MgSO₄ are similar for all concentrations.

It is also interesting that the carbonation depths of the electrodeposited concrete specimens have no correlation with the deposition depths. It is anticipated that the carbonation depth of the electrodeposited concrete specimens is depended on the concentration of the electrodeposits of the chemical compound not the deposition depth. Therefore, it can be said that there is not necessary to use the high concentration of the external solutions for the electrodeposition method as there is no correlation between the concentrations of the external solutions and the carbonation resistance. In this study, the using 0.1 mol/L of MgCl₂ and MgSO₄ is the most effective to resist the carbonation in the cracked concrete specimen. For using the ZnSO₄ as the external solution, it is difficult to predict its effectiveness for resisting carbonation. That is, a slight increase in concentration (from 0.1 to 0.2 mol/L) has a larger different of carbonation depth than that of the larger increase in concentration (from 0.2 to 0.5 mol/L).

4. Conclusions

From this study, it can be concluded as follows.

1. The electrodeposition method by using the external solutions instead of the seawater can be feasible for repairing cracks in reinforced concrete on land under Thailand climatic condition.
2. The deposition depth is influenced by the concentration of the external solutions but do not influence on the carbonation resistance.
3. The MgCl₂ and MgSO₄ with the concentration of 0.1 mol/L is the most effective for using as the external solutions in the electrodeposition method in order to resist the carbonation.

5. Acknowledgement

The financial support received from the Thailand Research Fund (TRF): Research Grant No. MRG4780139, is greatly appreciated.

6. References

- [1] Shamsad A., "Reinforcement corrosion in concrete structures, its monitoring and service life prediction-a review", *Cement and Concrete Composite*, Vol. 25, 2003, pp. 459-471.
- [2] Yokota M., Sasaki H. and Fukute T., "Rehabilitation and Protection of Marine Concrete Member using Electrodeposition Method", *Proceedings of the International RILEM/CSIRO/ACRA Conference on Rehabilitation of Concrete Member*, RILEM,

Melbourne, 1992, pp. 213-222

- [3] Otsuki, N., Hisada, M. and Amino, T., "Electric current and ion migration through concrete". *Proceeding of the Regional Symposium on Infra-structures Development in Civil Engineering, Bangkok, Thailand, 1995*, pp. 21 – 35.
- [4] Ryu, J.S., "Influence of crack width, cover depth, water-cement ratio and temperature on the formation of electrodeposits on the concrete surface", *Magazine of Concrete Research*, Vol. 55, No. 1, 2003, pp. 35 – 40.
- [5] Ryu, J.S. and Otsuki, N., "Crack closure of reinforced concrete by Electrodeposition Technique", *Cement and Concrete Research*, Vol. 32, No. 1, 2002, pp. 159 – 164.
- [6] Ryou, J., "New waterproofing technique for leaking concrete", *Journal of Materials Science Letters*, Vol. 22, 2003, pp. 1023-1025