

การประเมินสมรรถนะของการประสานรอยร้าวด้วยวัสดุซ่อมประสานซีเมนต์



นาย ไอฟาร์ เหลืองเพชรภรณ์

ศูนย์วิทยพัทยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2553

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

EVALUATION OF CRACK SEALING PERFORMANCE  
OF CEMENTITIOUS REPAIR MATERIALS



Mr. Oran Luangpetcharaporn

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Engineering Program in Civil Engineering

Department of Civil Engineering

Faculty of Engineering


Chulalongkorn University

Academic Year 2010


Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การประเมินสมรรถนะของการประสานรอยร้าวด้วยวัสดุซ่อม ประสานซีเมนต์
โดย	นาย โอฟาร์ เหลืองเพชรภรณ์
สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร. บุญไชย สถิตมั่นในธรรม
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	ดร. รักติพงษ์ สหมิตรมงคล


คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นักศึกษานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน  
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

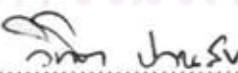
  
..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(รองศาสตราจารย์ ดร. บุญสม เลิศนिरองศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

  
..... ประธานกรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร. พงศ์ศักดิ์ เพียรสุสม)

  
..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก  
(รองศาสตราจารย์ ดร. บุญไชย สถิตมั่นในธรรม)

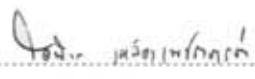


  
..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม  
(ดร. รักติพงษ์ สหมิตรมงคล)

  
..... กรรมการ  
(อาจารย์ ดร. วิฑิต ปานสุข)

  
..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย  
(ดร. ภัควัฒน์ แสนเจริญ)

โอฬาร เหลืองเพชรภรณ์ : การประเมินสมรรถนะของการประสานรอยร้าวด้วยวัสดุซ่อม  
 ประสานซีเมนต์. (EVALUATION OF CRACK SEALING PERFORMANCE OF  
 CEMENTITIOUS REPAIR MATERIALS) อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : รศ. ดร.  
 บุญไชย สถิตมั่นในธรรม, อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม : ดร. รักษิตพงษ์ สหมิตรมงคล, 83  
 หน้า.

ปัจจุบันการซ่อมแซมรอยร้าวเป็นส่วนสำคัญในงานบำรุงรักษาโครงสร้างคอนกรีต วัสดุ  
 ซ่อมจำนวนมากที่วางจำหน่ายในท้องตลาดได้แสดงให้เห็นถึงความสำคัญของการซ่อมแซมรอย  
 ร้าว ท่ามกลางวัสดุซ่อมมานานานชนิด วัสดุซ่อมที่มีซีเมนต์เป็นส่วนประกอบหรือวัสดุซ่อมประสาน  
 ซีเมนต์ (CRMs) เป็นวัสดุซ่อมที่มีความเข้ากันได้กับคอนกรีตเป็นอย่างดีและมีการใช้งานอย่าง  
 แพร่หลาย งานวิจัยนี้ได้นำปูนทรายซ่อมประสานซีเมนต์สามชนิดที่ใช้งานด้วยการเคลือบผิว มา  
 ศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการซ่อมแซมรอยร้าวโดยใช้การทดสอบกำลังยึดเกาะ การ  
 ทดสอบการรั่วซึมของน้ำผ่านรอยร้าว การทดสอบระยะคาร์บอนเนชั่นในสภาวะเร่ง และการทดสอบ  
 การแทรกซึมของคลอไรด์เป็นเกณฑ์ ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า กำลังยึดเกาะระหว่างวัสดุซ่อม  
 ประสานซีเมนต์กับคอนกรีตเดิมมีความสัมพันธ์กับกำลังอัดของวัสดุซ่อมประสานซีเมนต์  
 นอกจากนี้การซ่อมแซมรอยร้าวด้วยวัสดุซ่อมประสานซีเมนต์สามารถป้องกันการรั่วซึมของน้ำผ่าน  
 รอยร้าวคอนกรีตได้ ในส่วนของความต้านทานคาร์บอนเนชั่นและความต้านทานคลอไรด์ พบว่า  
 คอนกรีตที่มีรอยร้าวมีความต้านทานลดลงเมื่อเทียบกับคอนกรีตที่ไม่มีรอยร้าว โดยความต้านทาน  
 คาร์บอนเนชั่น ณ ตำแหน่งรอยร้าวมีความสัมพันธ์กับความกว้างรอยร้าวที่ผิวคอนกรีต อย่างไรก็ตาม  
 การซ่อมแซมด้วยวัสดุซ่อมประสานซีเมนต์สามารถลดการเกิดคาร์บอนเนชั่นและการแทรกซึม  
 ของคลอไรด์ลงได้ ซึ่งเป็นผลมาจากพฤติกรรมร่วมระหว่างวัสดุซ่อมประสานซีเมนต์และคอนกรีตที่  
 มีรอยร้าว และวัสดุซ่อมประสานซีเมนต์ต่างชนิดกันมีประสิทธิภาพในการซ่อมแซมรอยร้าวที่  
 แตกต่างกัน

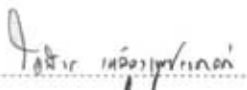


ภาควิชา.....	วิศวกรรมโยธา.....	ลายมือชื่อนิสิต.....	
สาขาวิชา.....	วิศวกรรมโยธา.....	ลายมือชื่ออ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....	
ปีการศึกษา.....	2553.....	ลายมือชื่ออ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม.....	

## 5170547021 : MAJOR CIVIL ENGINEERING

KEYWORDS : CEMENTITIOUS REPAIR MATERIAL / CONCRETE REPAIR / CRACK / DURABILITY / REPAIRING PERFORMANCE

ORAN LUANGPETCHARAPORN : EVALUATION OF CRACK SEALING PERFORMANCE OF CEMENTITIOUS REPAIR MATERIALS. ADVISOR : ASSOC. PROF. BOONCHAI STITMANNAITHUM, Ph.D., CO-ADVISOR : RAKTIPONG SAHAMITRMONGKOL, Ph.D., 83 pp.

Nowadays crack repairing has become an important activity in the maintenance of concrete structure. The significance of crack repairing is clearly indicated by a large number of repair materials in markets. Among various types of repair materials, cementitious repair materials (CRMs) are the one with compatibility to the concrete substrate and have been used widely. This study was conducted to evaluate the crack repairing performance of three cementitious repair mortars by surface coating method. The performance of crack repairing was evaluated through adhesive strength test, water leakage test, accelerated carbonation test, and chloride penetration test. Test results show that adhesive strength between CRMs and concrete substrate relates to compressive strength of CRMs. Crack repairing with CRMs also prevent water leakage through concrete crack. Carbonation resistance and chloride resistance of cracked concrete drastically decrease compared to non-crack concrete. The width of crack at concrete surface has a relationship with carbonation depth at position of crack in most cases. However crack repairing with CRMs can provide carbonation resistance and chloride penetration resistance because of combined behavior from both CRM and cracked section. And test data shows that each CRM has different performance on crack repairing

Department : .....Civil Engineering.....	Student's Signature	
Field of Study : .....Civil Engineering.....	Advisor's Signature	
Academic Year : .....2010.....	Co-advisor's Signature	

## กิตติกรรมประกาศ

ขอกราบขอบพระคุณรองศาสตราจารย์.ดร. บุญไชย สถิตมั่นในธรรม อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และอาจารย์ ดร. รักติพงษ์ สหมิตรมงคล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วมที่ได้อุทิศกำลังกาย กำลังใจ ตลอดจนสละเวลาอันมีค่ามาให้ ความรู้และคำแนะนำอันเป็นประโยชน์ ทั้งยังเสนอแนวทางแก้ไขเมื่อพบปัญหาข้อบกพร่องต่างๆ ตลอดระยะเวลาในการทำวิทยากราบขอบพระคุณ คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์อันประกอบด้วย รองศาสตราจารย์.ดร. พูลศักดิ์ เพียรสุข อาจารย์ ดร. วิจิต ปานสุข และอาจารย์ ดร. ภาควัฒน์ แสนเจริญ ที่ให้คำแนะนำและข้อเสนอแนะต่างๆ ด้วยดีเสมอมา และขอแสดงความขอบคุณบริษัท ซายน์เบ็ค มาร์เก็ตติ้ง เซอร์วิส (ประเทศไทย) จำกัด บริษัท บีเอเอสเอฟ (ไทย) จำกัด บริษัท ผลิตภัณฑ์และวัตถุดิบก่อสร้าง จำกัด และบริษัท ไออาร์ซี พรีเมียร์ จำกัด มา ณ โอกาสนี้ ที่ให้การสนับสนุนด้วยดีมาโดยตลอด

ท้ายที่สุดนี้ ความดีและประโยชน์ทั้งหลายอันพึงได้จากการวิจัย ขอมอบให้บิดามารดา อาจารย์ และผู้มีส่วนเกี่ยวข้องทุกท่าน ที่คอยสนับสนุนและช่วยเหลือมาโดยตลอด

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญภาพ.....	ญ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	4
1.3 แนวทางดำเนินการวิจัย.....	4
1.4 ขอบเขตของการวิจัย.....	5
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	6
2.1 วัสดุซ่อมประสานซีเมนต์.....	6
2.2 การจำแนกรอยร้าว.....	15
2.3 การซ่อมแซมรอยร้าวด้วยการเคลือบผิว.....	17
2.4 การยึดเกาะระหว่างวัสดุซ่อมและคอนกรีตเดิม.....	20
2.5 การรั่วซึมของน้ำผ่านรอยร้าวคอนกรีต.....	21
2.6 คาร์บอนเนชั่น.....	27
2.7 การแทรกซึมของคลอไรด์.....	30
บทที่ 3 วัสดุในงานวิจัย.....	33
3.1 คอนกรีต.....	33
3.2 วัสดุซ่อมประสานซีเมนต์.....	39

	หน้า
บทที่ 4 วิธีดำเนินการวิจัย.....	42
4.1 การยืดเกาะ.....	42
4.2 การรวบเข็ม.....	45
4.3 ความต้านทานคาร์บอนชั้น.....	49
4.4 ความต้านทานคลอไรด์.....	53
บทที่ 5 ผลการวิจัยและวิเคราะห์ข้อมูล.....	55
5.1 การยืดเกาะ.....	55
5.2 การรวบเข็ม.....	60
5.3 ความต้านทานคาร์บอนชั้น.....	65
5.4 ความต้านทานคลอไรด์.....	75
บทที่ 6 สรุปผลการวิจัย.....	79
6.1 สรุปผลการวิจัย.....	79
6.2 ข้อเสนอแนะ.....	80
รายการอ้างอิง.....	81
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	83

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



## สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1.1	ค่าซื้อวัสดุก่อสร้างและอุปกรณ์ที่ใช้ในการก่อสร้างในปี 2551 จำแนกตามขนาด ของสถานประกอบการ (จำนวนคนทำงาน) ที่ราชอาณาจักร พ.ศ. 2552.....	2
2.1	ชนิดของวัสดุซ่อม.....	6
2.2	คุณสมบัติเชิงกลของวัสดุซ่อมในปี ค.ศ. 1987.....	7
2.3	คุณสมบัติของคอนกรีตกับเหล็ก.....	7
2.4	คุณสมบัติเชิงกลของวัสดุซ่อมในปี ค.ศ. 1993.....	8
2.5	กำลังยึดเหนี่ยวของวัสดุซ่อมประสานซีเมนต์.....	14
2.6	วิธีการซ่อมแซมตามคุณสมบัติจำเพาะที่ต้องการ.....	17
2.7	การเตรียมผิวสำหรับงานเคลือบ.....	18
2.8	อัตราการไหลของน้ำที่อุณหภูมิต่างๆ ผ่านรอยรั่ว เทียบกับอัตราการไหลของ น้ำที่ 20 องศาเซลเซียส ผ่านรอยรั่วกว้าง 0.08 มม.....	25
3.1	สัดส่วนผสมคอนกรีตในการวิจัย (กก./ลบ.ม.ของคอนกรีต).....	33
3.2	กำลังอัดและความสามารถทำงานได้ของคอนกรีตในการวิจัย.....	34
3.3	ส่วนประกอบของเถ้าลอยในการวิจัย.....	35
3.4	คุณสมบัติของเถ้าลอยในการวิจัย.....	36
4.1	ตัวอย่างสำหรับการทดสอบการยึดเกาะ.....	43
4.2	ตัวอย่างสำหรับการทดสอบการรั่วซึมของน้ำผ่านรอยรั่วคอนกรีต.....	47
4.3	ตัวอย่างสำหรับการทดสอบความต้านทานคาร์บอนเนชั่น.....	51
4.4	ตัวอย่างสำหรับการทดสอบความต้านทานคลอไรด์ในแต่ละสัดส่วนผสม.....	53
5.1	ผลการทดสอบการรั่วซึมของน้ำ.....	62
6.1	สรุปประสิทธิภาพในการซ่อมแซมรอยรั่วด้วยวัสดุซ่อมประสานซีเมนต์.....	79

## สารบัญญภาพ

ภาพที่		หน้า
1.1	จำนวนและพื้นที่อาคารโรงเรียนที่ได้รับอนุญาตก่อสร้างใหม่ ปี 2542 – 2549...	1
2.1	การพัฒนากำลังอัดของวัสดุซ่อมประสานซีเมนต์.....	10
2.2	ความพรุนของวัสดุซ่อมประสานซีเมนต์ที่อายุต่างๆ.....	11
2.3	การซึมผ่านของออกซิเจนของวัสดุซ่อมประสานซีเมนต์ที่อายุต่างๆ.....	12
2.4	การซึมผ่านของน้ำของวัสดุซ่อมประสานซีเมนต์ที่อายุต่างๆ.....	13
2.5	ระยะช่องเปิดของรอยร้าวกับสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ.....	15
2.6	ระยะช่องเปิดของรอยร้าวกับประจุคลอไรด์ที่ผ่านขึ้นตัวอย่าง.....	16
2.7	การทดสอบกำลังยึดเกาะตามมาตรฐาน ASTM C1583.....	20
2.8	ลักษณะการวิบัติในการทดสอบกำลังยึดเกาะตามมาตรฐาน ASTM C1583.....	21
2.9	ลักษณะการทดสอบการไหลของน้ำผ่านรอยร้าวของ Edvardsen.....	22
2.10	ผลทดสอบการไหลของน้ำผ่านรอยร้าวคอนกรีตของ Edvardsen.....	23
2.11	อุปกรณ์ทดสอบการซึมผ่านของ H. W. Reinhardt และ M. Joose.....	23
2.12	การเสริมเหล็กลักษณะต่างๆ สำหรับการสร้างรอยร้าวบนตัวอย่างคอนกรีตของ H. W. Reinhardt และ M. Joose.....	24
2.13	ความกว้างรอยร้าวและสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำที่อุณหภูมิต่างๆ.....	24
2.14	ความกว้างรอยร้าวกับแรงดันสูงสุดที่ไม่เกิดการซึมผ่าน.....	26
2.15	ระยะคาร์บอนชั้นในเมืองแบบมีที่กำบัง (Sheltered) กับในสภาวะเร่ง.....	28
2.16	ระยะคาร์บอนชั้นในเมืองแบบไม่มีที่กำบัง (Non-sheltered) กับในสภาวะเร่ง...	28
2.17	ระยะคาร์บอนชั้นในบริเวณชนบท (Rural) กับในสภาวะเร่ง.....	29
2.18	ระยะคาร์บอนชั้นในบริเวณริมทะเล (Seaside) กับในสภาวะเร่ง.....	29
2.19	การเกิดสนิมเนื่องจากคลอไรด์.....	31
2.20	การวัดระยะแทรกซึมของคลอไรด์.....	31
3.1	การทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตในการวิจัย.....	34
3.2	การทดสอบค่าการยุบตัวของคอนกรีตในการวิจัย.....	34
3.3	ถ้ำลอยที่ใช้ในการวิจัย.....	37
3.4	การกระจายตัวของขนาดถ้ำลอยในการวิจัย.....	37
3.5	ขนาดคละของมวลรวมละเอียดในการวิจัย.....	38

ภาพที่		หน้า
3.6	ขนาดคละของมวลรวมหยาบในการวิจัย.....	38
3.7	วัสดุซ่อมประสานซีเมนต์ ก.....	39
3.8	วัสดุซ่อมประสานซีเมนต์ ข.....	40
3.9	วัสดุซ่อมประสานซีเมนต์ ค.....	40
3.10	การทดสอบกำลังอัดของวัสดุซ่อมประสานซีเมนต์ในการวิจัย.....	41
3.11	การพัฒนากำลังอัดของวัสดุซ่อมประสานซีเมนต์ในการวิจัย.....	41
4.1	เครื่องมือทดสอบกำลังยึดเกาะแบบพกพา.....	42
4.2	การทดสอบกำลังยึดเกาะตามมาตรฐาน ASTM C1583.....	44
4.3	การทดสอบกำลังยึดเกาะดัดแปลงจากมาตรฐาน ASTM C1583 ในการวิจัย....	44
4.4	การตั้งค่าเริ่มต้นเครื่องทดสอบกำลังยึดเกาะ.....	44
4.5	ตัวอย่างทดสอบการรั่วซึม.....	45
4.6	การสร้างรอยร้าวบนตัวอย่างทดสอบการรั่วซึมด้วยวิธีผ่าแยก.....	46
4.7	กล้องไมโครสโคป.....	46
4.8	รอยร้าวบนตัวอย่างบริเวณที่ติดตั้งท่อน้ำ.....	46
4.9	ตัวอย่างทดสอบการรั่วซึมของน้ำที่ผ่านการซ่อมแซมด้วยวัสดุซ่อมประสานซีเมนต์ ก.....	47
4.10	การติดตั้งท่อน้ำเข้ากับชิ้นตัวอย่างด้วยอีพอกซี.....	47
4.11	การทดสอบการรั่วซึมของน้ำผ่านรอยร้าวคอนกรีต.....	48
4.12	การสร้างรอยร้าวบนตัวอย่างด้วยวิธีผ่าแยก.....	49
4.13	ตัวอย่างที่มีรอยร้าวในการทดสอบความต้านทานคาร์บอนชั้น.....	49
4.14	การทำความสะอาดผิวที่ไม่ทดสอบ.....	50
4.15	การทาทะคริลิกป้องกันการรั่วซึมปิดผิวที่ไม่ต้องการทดสอบ.....	50
4.16	แบบจำลองการเกิดคาร์บอนชั้นในตัวอย่างที่ทาทะคริลิกปิดด้านที่ไม่ทดสอบ...	51
4.17	ตู้ทดสอบคาร์บอนชั้นที่สภาวะเร่ง.....	52
4.18	การเปลี่ยนสีของฟีนอล์ฟทาไลน์บริเวณที่เกิดคาร์บอนชั้น.....	52
4.19	ถังเก็บตัวอย่างภายใต้สภาวะคลอไรด์ไฮดรอกไซด์ 3%.....	54
4.20	กำลังยึดเกาะของวัสดุซ่อมประสานแต่ละชนิดกับกับคอนกรีตสัดส่วนผสมต่างๆ	54
4.21	ปริมาณน้ำที่รั่วซึมผ่านรอยร้าว ณ เวลาต่างๆ.....	54

ภาพที่		หน้า
5.1	การวิบัติของวัสดุซ่อมประสานซีเมนต์ที่เคลือบผิวคอนกรีตเมื่อทดสอบกำลังยึดเกาะ.....	55
5.2	การวิบัติของคอนกรีตเมื่อทดสอบกำลังยึดเกาะตามมาตรฐาน ASTM C1583...	55
5.3	การพัฒนากำลังยึดเกาะของวัสดุซ่อมประสานซีเมนต์.....	56
5.4	กำลังยึดเกาะของวัสดุซ่อมประสานแต่ละชนิดกับคอนกรีตสัดส่วนผสมต่างๆ....	58
5.5	ปริมาณน้ำที่รั่วซึมผ่านรอยร้าว ณ เวลาต่างๆ.....	61
5.6	อัตราการรั่วซึมของน้ำในตัวอย่างที่มีรอยร้าวกับความกว้างรอยร้าวเฉลี่ย.....	61
5.7	การซึมผ่านของน้ำตามแนวราบหลังการซ่อมแซมด้วยวัสดุซ่อม ก.....	63
5.8	การซึมผ่านของน้ำตามแนวราบหลังการซ่อมแซมด้วยวัสดุซ่อม ข.....	64
5.9	การซึมผ่านของน้ำตามแนวราบหลังการซ่อมแซมด้วยวัสดุซ่อม ค.....	64
5.10	การเกิดคาร์บอนเนชั่นในคอนกรีตที่ไม่มีรอยร้าวและคอนกรีตที่มีรอยร้าว.....	65
5.11	การเกิดคาร์บอนเนชั่นในคอนกรีตสภาพต่างๆ ภายใต้สภาวะคาร์บอนเนชั่น 28 วัน	65
5.12	ระยะคาร์บอนเนชั่นของตัวอย่างลักษณะต่างๆ.....	66
5.13	ระยะคาร์บอนเนชั่น ณ ตำแหน่งต่างๆ ของตัวอย่างที่มีความกว้างรอยร้าว $1.0 \pm 0.1$ มม. ภายใต้สภาวะเร่ง 28 วัน.....	68
5.14	ระยะคาร์บอนเนชั่น ณ ตำแหน่งต่างๆ ของตัวอย่างที่มีความกว้างรอยร้าว $1.0 \pm 0.1$ มม. ภายใต้สภาวะเร่ง 84 วัน.....	69
5.15	ความลึกของชั้นตัวอย่างกับระยะคาร์บอนเนชั่นแนวตั้งฉากกับทิศทางที่เกิดคาร์บอนเนชั่นโดยปกติของตัวอย่างลักษณะต่างๆ ที่ความกว้างรอยร้าวที่ผิวคอนกรีต $1.0 \pm 0.1$ มม.....	69
5.16	การเกิดคาร์บอนเนชั่น ณ ตำแหน่งเหล็กเสริม.....	70
5.17	ระยะคาร์บอนเนชั่น ณ ตำแหน่งรอยร้าว ภายใต้สภาวะคาร์บอนเนชั่น 28 วัน กับความกว้างของรอยร้าวที่ผิวคอนกรีต.....	70
5.18	การแบ่งพื้นที่ที่เกิดคาร์บอนเนชั่นเพื่อวัดพื้นที่.....	71
5.19	ช่องสี่เหลี่ยมคางหมูแต่ละช่องของการแบ่งพื้นที่ที่เกิดคาร์บอนเนชั่น.....	72
5.20	พื้นที่ที่เกิดคาร์บอนเนชั่นตัวอย่างคอนกรีตปกติในสภาวะเร่งคาร์บอนเนชั่นที่ 28 วัน.....	73

ภาพที่		หน้า
5.21	พื้นที่ที่เกิดคาร์บอนเนชั่นตัวอย่างคอนกรีตปกติในสภาวะเร่งคาร์บอนเนชั่นที่ 84 วัน.....	73
5.22	การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ไม่มีรอยร้าวและคอนกรีตที่มีรอยร้าว.....	75
5.23	การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่แช่สารละลายคลอไรด์ 14 วัน.....	75
5.24	ระยะแทรกซึมของคลอไรด์ ณ ตำแหน่งรอยร้าวกับความกว้างของรอยร้าวที่ผิว คอนกรีตสัดส่วนผสมต่างๆ.....	76



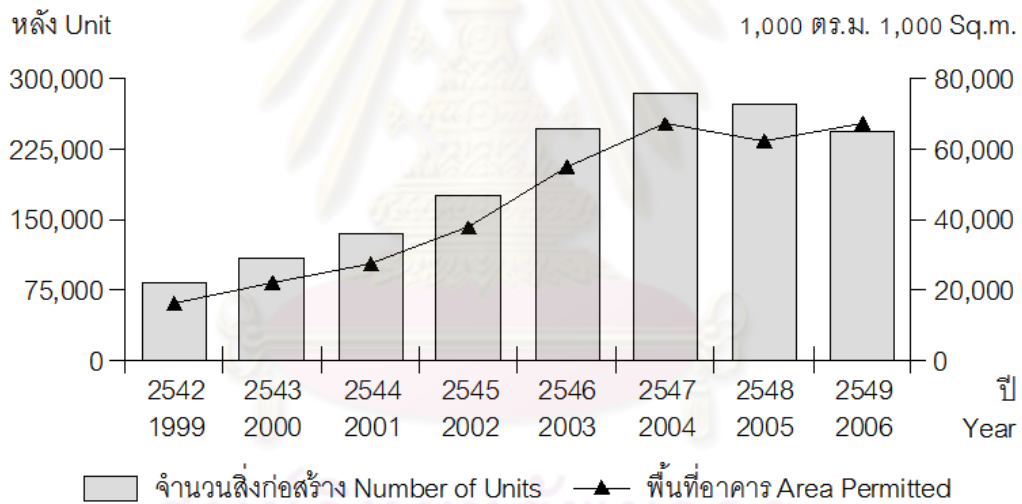
ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

จากข้อมูลของสำนักงานสถิติแห่งชาติ [1] ดังแสดงในภาพที่ 1.1 พบว่า ในช่วงปี 2542 ถึง 2549 ที่ผ่านมา จำนวนและพื้นที่อาคารโรงเรียนที่ได้รับอนุญาตก่อสร้างใหม่ขยายตัวขึ้นอย่างต่อเนื่องตั้งแต่ปี 2542 ถึง 2547 เฉพาะปี 2547 ซึ่งมีการก่อสร้างสูงสุด เพิ่มขึ้น 4 เท่าจากปี 2542 โดยในปีดังกล่าวมีมูลค่าการก่อสร้างรวมสูงถึง 321,647 ล้านบาท ขณะที่ในปีต่อๆ มา จำนวนและพื้นที่อาคารที่ได้รับอนุญาตก่อสร้างมีจำนวนลดลงเล็กน้อย อาคารโรงเรียนจำนวนมากเหล่านี้ เมื่อก่อสร้างแล้วเสร็จย่อมต้องมีการบำรุงซ่อมแซมให้อยู่ในสภาพที่เหมาะสมแก่การใช้งาน ข้อมูลนี้จึงบ่งชี้ว่า งานซ่อมแซมจะเข้ามามีบทบาทสำคัญในอนาคต



ภาพที่ 1.1 จำนวนและพื้นที่อาคารโรงเรียนที่ได้รับอนุญาตก่อสร้างใหม่ ปี 2542 – 2549 [1]

อาคารโรงเรียนส่วนใหญ่ในประเทศไทยนิยมใช้คอนกรีตในงานก่อสร้าง เนื่องจากคอนกรีตเป็นวัสดุที่มีความแข็งแรงทนทาน ใช้งานง่าย เทเข้าแบบรูปทรงต่างๆ ได้ดี มีอายุการใช้งานยาวนาน และมีราคาที่ไม่แพง ซึ่งจะเห็นได้จากการซื้อวัสดุก่อสร้างและอุปกรณ์ที่ใช้ในการก่อสร้างในปี 2551 ซึ่งเป็นข้อมูลล่าสุดของของสำนักงานสถิติแห่งชาติ [1] ดังแสดงในตารางที่ 1.1

ตารางที่ 1.1 ค่าซื้อวัสดุก่อสร้างและอุปกรณ์ที่ใช้ในการก่อสร้างในปี 2551 จำแนกตามขนาดของสถานประกอบการ (จำนวนคนทำงาน) ที่พระราชอาณาจักร พ.ศ. 2552  
[1]

ขนาดของสถาน ประกอบการ (จำนวน คนทำงาน)	จำนวน สถาน ประกอบการ	รวม	ไม้	ซีเมนต์	คอนกรีต สำเร็จรูป	เหล็ก	หิน	ดิน	ทราย	ลูกจิ่ง	ยาง แอสฟัลต์	(ล้านบาท)
												วัสดุและ อุปกรณ์ อื่นๆ
รวม	29,360	188,231.4	8,001.2	17,664.4	19,157.4	24,955.4	7,536.6	5,839.7	5,633.2	3,644.1	6,198.8	89,600.6
1 – 5 คน	18,038	2,761.7	129.8	324.0	161.8	322.6	155.8	343.3	106.1	70.9	8.7	1,138.7
6 – 10 คน	6,366	11,758.7	679.4	1,566.6	1,871.5	1,933.9	671.4	392.3	782.3	243.1	135.7	3,482.5
10 – 15 คน	2,061	8,034.2	570.2	1,117.8	923.2	1,179.0	565.1	282.1	462.8	224.2	398.1	2,311.7
16 – 20 คน	765	4,919.4	182.8	431.2	528.2	671.9	254.9	123.6	219.4	76.7	162.8	2,267.9
มากกว่า 20 คน	2,129	160,757.4	6,439.0	14,224.8	15,672.7	20,847.9	5,889.4	4,698.4	4,062.6	3,029.3	5,493.5	80,399.8

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 1.1 แสดงให้เห็นว่า มีการใช้ซีเมนต์ถึง 17,664 ล้านบาท และคอนกรีต 19,157 ล้านบาท ในปี 2551 ซึ่งยืนยันได้เป็นอย่างดีว่า คอนกรีตเป็นวัสดุที่ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายในประเทศไทย แต่บ่อยครั้งที่พบปัญหาการแตกร้าวของคอนกรีตจากหลายสาเหตุ ไม่ว่าจะเป็นมาจากการรับน้ำหนักสูงเกินไป การเกิดสนิมของเหล็กเสริม การหดตัวของคอนกรีต การเทคอนกรีตปริมาณมากโดยไม่มีรอยต่อ หรือสาเหตุอื่นใดก็ตาม รอยร้าวที่เกิดขึ้นย่อมส่งผลให้ประสิทธิภาพของโครงสร้างลดลง ทั้งในด้านการรับน้ำหนัก ความคงทน ความสามารถใช้งาน และอายุการใช้งานของอาคารโรงเรือน การซ่อมแซมจึงเข้ามามีบทบาทความสำคัญ เพื่อให้คอนกรีตมีสภาพเหมาะสมแก่การใช้งานดังเดิม

การซ่อมแซมรอยร้าวของคอนกรีตจะประสานรอยร้าวที่พบด้วยวิธีการต่างๆ เช่น การปะ (Patching) การทาสี (Painting) การเคลือบ (Coating) การฉีด (Injection) เป็นต้น โดยปัจจุบันมีวัสดุซ่อมให้ใช้งานหลากหลายชนิด เช่น ซีเมนต์ยาแนว ปูนฉาบ เรซิน โพลีเมอร์ โฟม อีพอกซี และอื่นๆ วิธีการซ่อมแซมและวัสดุซ่อมต่างๆ เหล่านี้ มีข้อดีข้อเสียแตกต่างกัน วัสดุซ่อมประสานซีเมนต์นับเป็นหนึ่งในวัสดุซ่อมสำหรับการซ่อมแซมรอยร้าวของคอนกรีตที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน โดยเกิดจากการนำซีเมนต์ไปผสมกับสารอื่นๆ จึงทำให้วัสดุซ่อมประสานซีเมนต์มีข้อดี คือ มีความเข้ากันได้กับเนื้อคอนกรีตเป็นอย่างดี และช่วยในการป้องกันการกัดกร่อนของเหล็กเสริมได้โดยการทำให้เกิดสภาวะแวดล้อมที่เป็นด่าง เพิ่มแผ่นฟิล์ม (Passivity Layer) แก่เหล็กเสริม อีกทั้งยังมีราคาไม่แพงเมื่อเทียบกับวัสดุซ่อมชนิดอื่นๆ อย่างไรก็ตาม วัสดุซ่อมประสานซีเมนต์ก็มีข้อเสียเช่นกัน คือ ต้องการระยะเวลาสำหรับบ่มวัสดุซ่อมประสานซีเมนต์เพื่อพัฒนากำลังคล้ายคลึงกับคอนกรีต มีลักษณะแข็งแต่เปราะ (Brittle) การยึดเกาะกับผิวคอนกรีตเดิมต่ำกว่าวัสดุซ่อมอื่น และคุณสมบัติของวัสดุซ่อมประสานซีเมนต์ เช่น ระยะเวลาการก่อตัว ความสามารถในการทำงาน การพัฒนากำลัง ความตึงน้ำ และอื่นๆ แตกต่างกันไปประกอบของวัสดุซ่อมประสานซีเมนต์และสัดส่วนผสมที่ใช้

เมื่อนำวัสดุซ่อมประสานซีเมนต์มาใช้งานจริง ในหลายๆ กรณี พบว่า สมรรถนะของโครงสร้างภายหลังการซ่อมแซมไม่เป็นดังที่ต้องการ เนื่องจากหลายสาเหตุ เช่น การใช้งานไม่ถูกวิธีการซ่อมแซมในรูปแบบที่ไม่เหมาะสม การบ่มที่ไม่เพียงพอ และที่สำคัญคือ ข้อมูลของวัสดุซ่อมประสานซีเมนต์มีเฉพาะวิธีการใช้งานและคุณสมบัติของวัสดุซ่อมประสานซีเมนต์จากผู้ผลิตเท่านั้น ซึ่งไม่ใช่คุณสมบัติของโครงสร้างภายหลังการซ่อมแซม การศึกษาวิจัยคุณสมบัติของโครงสร้างภายหลังการซ่อมแซมรอยร้าวด้วยวัสดุซ่อมประสานซีเมนต์จึงมีความสำคัญ เพื่อใช้เป็นแนวทางในการเลือกและการใช้งานวัสดุซ่อมประสานซีเมนต์อย่างมีประสิทธิภาพ และเป็นข้อมูลสำหรับการพัฒนาวิธีการซ่อมแซมรอยร้าวของคอนกรีตที่มีประสิทธิภาพต่อไป



## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ คือ ศึกษาวิธีประเมินสมรรถนะของการซ่อมแซมรอยร้าวของคอนกรีตโดยการเคลือบผิวด้วยวัสดุซ่อมประสานซีเมนต์ เพื่อเป็นข้อมูลสำหรับพัฒนาวิธีประเมินสมรรถนะของการซ่อมแซมรอยร้าว และนำวัสดุซ่อมประสานซีเมนต์ที่พบในท้องตลาดสามชนิด ซึ่งใช้งานด้วยวิธีเคลือบผิว มาเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการซ่อมแซมรอยร้าวของคอนกรีต โดยพิจารณาจากสามด้าน คือ กำลัง (Strength) ความสามารถใช้งาน (Serviceability) และความคงทน (Durability) เพื่อเป็นแนวทางในการเลือกและการใช้งานวัสดุซ่อมประสานซีเมนต์

## 1.3 แนวทางดำเนินการวิจัย

การซ่อมแซมรอยร้าวของคอนกรีตเป็นสิ่งจำเป็น รอยร้าวที่เกิดขึ้นอาจทำให้ความปลอดภัยของโครงสร้างลดลง ทำให้ไม่สามารถใช้งานโครงสร้างได้ตามวัตถุประสงค์ หรือทำให้อายุการใช้งานของโครงสร้างลดลง ซึ่งได้นำมาใช้เป็นแนวทางในการดำเนินการวิจัยนี้ เภณฑ์การเปรียบเทียบประสิทธิภาพภายหลังการซ่อมรอยร้าวด้วยวัสดุประสานซีเมนต์จึงแบ่งเป็น 3 ด้าน ให้สอดคล้องกับสาเหตุดังกล่าว ได้แก่ กำลัง ความสามารถใช้งาน และความคงทน

ในแต่ละด้านมีวิธีการและรายละเอียดในการพิจารณา เปรียบเทียบ และประเมินผลที่หลากหลาย ตัวอย่างเช่น ด้านกำลัง พิจารณาได้จากการรับน้ำหนักบรรทุกทุกจำลอง (Load Test) ภายหลังการซ่อมแซม การยึดเกาะของวัสดุซ่อมกับคอนกรีตเดิม (Adhesive Strength Test) เป็นต้น ด้านความสามารถใช้งาน พิจารณาได้จากลักษณะปรากฏ (Appearance) การรั่วซึม (Leakage) การเสียรูป (Deformation) เป็นต้น และด้านความคงทน พิจารณาได้จากการซึมผ่านของน้ำ (Water Permeability) ปริมาณคลอไรด์ในเนื้อคอนกรีต (Chloride Content) ความทนทานต่อกรด (Acid Resistance) เป็นต้น สำหรับการวิจัยนี้ได้กำหนดแนวทางการดำเนินการวิจัย ดังนี้

- 1.3.1 กำลัง เนื่องจากวัสดุซ่อมประสานซีเมนต์มีส่วนประกอบของซีเมนต์ จึงมีลักษณะเปราะและต้องการระยะเวลาสำหรับพัฒนากำลังหลังการซ่อมแซม เมื่อนำมาใช้ งานด้วยการเคลือบผิว จึงพบปัญหาการหลุดร่อนของวัสดุซ่อมประสานซีเมนต์ บ่อยกว่าวัสดุซ่อมชนิดอื่นๆ การวิจัยนี้จึงใช้การยึดเกาะระหว่างวัสดุซ่อมกับผิวคอนกรีตเดิมเป็นหนึ่งในเกณฑ์เปรียบเทียบประสิทธิภาพของการซ่อมแซมรอยร้าวโดยการเคลือบผิวด้วยวัสดุซ่อมประสานซีเมนต์
- 1.3.2 ความสามารถใช้งาน ดัชนีชี้วัดหนึ่งที่บ่งชี้ถึงความสามารถใช้งาน คือ การรั่วซึมของน้ำผ่านรอยร้าวของคอนกรีต (Water Leakage through Concrete Crack) โครงสร้างหลายชนิดไม่ต้องการให้เกิดการรั่วซึมของน้ำขึ้นภายหลังการซ่อมแซม

เช่น เชื้อรา อ่างเก็บน้ำ ชั้นใต้ดิน เป็นต้น และที่สำคัญ โครงสร้างคอนกรีตส่วนใหญ่เป็นคอนกรีตเสริมเหล็ก น้ำสามารถเข้าถึงเหล็กเสริมได้ผ่านทางรอยร้าวของคอนกรีต ทำให้เหล็กเสริมเป็นสนิม การรั่วซึมของน้ำผ่านรอยร้าวของคอนกรีตจึงถูกนำมาใช้เป็นหนึ่งเกณฑ์เปรียบเทียบประสิทธิภาพของการซ่อมแซมรอยร้าว โดยการเคลือบผิวด้วยวัสดุซ่อมประสานซีเมนต์

- 1.3.3 ความคงทน โครงสร้างคอนกรีตจำนวนมากตั้งอยู่ในบริเวณที่มีการจราจรหนาแน่นหรือบริเวณเขตอุตสาหกรรม ซึ่งมีปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สูง บริเวณทะเลและบริเวณชายฝั่ง ซึ่งมีปริมาณคลอไรด์สูง ซึ่งส่งผลให้โครงสร้างคอนกรีตมีอายุการใช้งานลดลง เพื่อให้คอนกรีตที่ผ่านการซ่อมแซมรอยร้าวแล้วสามารถกลับมาใช้งานอีกครั้งได้อย่างยาวนาน ความต้านทานคาร์บอนเนชั่น (Carbonation Resistance) และความต้านทานคลอไรด์ (Chloride Penetration Resistance) จึงถูกนำมาใช้เป็นเกณฑ์เปรียบเทียบประสิทธิภาพของการซ่อมแซมรอยร้าวโดยการเคลือบผิวด้วยวัสดุซ่อมประสานซีเมนต์ในการวิจัยนี้

#### 1.4 ขอบเขตของการวิจัย

เพื่อให้การวิจัยสามารถดำเนินไปได้อย่างเหมาะสมภายใต้ข้อจำกัดต่างๆ ในการวิจัยจึงใช้ตัวอย่างที่จัดทำจากคอนกรีตทั่วไป คอนกรีตกำลังสูง คอนกรีตที่มีการใช้เถ้าลอย และคอนกรีตกำลังสูงที่มีการใช้เถ้าลอย เป็นตัวแทนของโครงสร้างคอนกรีตจริง และใช้วัสดุซ่อมประสานซีเมนต์ 3 ชนิด เป็นตัวแทนของวัสดุซ่อมประสานซีเมนต์ที่มีจำหน่ายในท้องตลาด มาทำการเคลือบผิวเพื่อซ่อมแซมรอยร้าวบนตัวอย่าง

ในส่วนของรอยร้าวบนตัวอย่างนั้น เกิดจากการให้น้ำหนักกระทำแก่ตัวอย่างคอนกรีตในห้องปฏิบัติการด้วยวิธีผ่าแยก (Splitting) เพื่อใช้แทนรอยร้าวที่เกิดจากการใช้งานจริง โดยในการวิจัยนี้ ความกว้างรอยร้าวของตัวอย่างอยู่ในช่วง 0.2 มม. ถึง 2.0 มม. ซึ่งความคงทนของคอนกรีตลดลงอย่างมีนัยสำคัญเมื่อความกว้างรอยร้าวใหญ่กว่า 0.2 มม. ดังที่กล่าวถึงในหัวข้อ 2.2 ขณะที่ความกว้างรอยร้าวสูงสุด 2.0 มม. เป็นความกว้างรอยร้าวสูงสุดที่เคลือบผิวด้วยวัสดุซ่อมประสานซีเมนต์ได้ในการศึกษาวิจัยนี้ เนื่องจากวิธีการเตรียมตัวอย่างที่มีรอยร้าวมีข้อจำกัด

และการประเมินประสิทธิภาพของการซ่อมแซมรอยร้าวของคอนกรีตทั้งสามด้านพิจารณาจากการยึดเกาะระหว่างวัสดุซ่อมกับผิวคอนกรีตเดิม การรั่วซึมของน้ำผ่านรอยร้าวคอนกรีต ความต้านทานคาร์บอนเนชั่น และความต้านทานคลอไรด์ ดังที่กล่าวไปแล้วในหัวข้อ 1.3 แนวทางการดำเนินการวิจัย

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 วัสดุซ่อมประสานซีเมนต์

เมื่องานซ่อมแซมเข้ามา มีบทบาทสำคัญในงานก่อสร้าง ความต้องการในการใช้งานวัสดุซ่อมจึงมีเพิ่มขึ้น เป็นเหตุให้ผู้ผลิตแข่งขันกันพัฒนาวัสดุซ่อมต่างๆ ออกมาอย่างต่อเนื่อง ในปัจจุบันจึงมีวัสดุซ่อมให้เลือกใช้มากมาย ในปี ค.ศ. 1987 G. Mays และคณะ [2] ได้แบ่งวัสดุซ่อมเหล่านี้เป็น 3 กลุ่ม ตามส่วนประกอบที่ใช้ ดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ชนิดของวัสดุซ่อม [2]

Resinous Materials	Polymer Modified Cementitious Materials	Cementitious Materials
A: Epoxy Mortar	D: Styrene Butadiene Modified	G: Ordinary Portland Cement/Mortar
B: Polyester Mortar	E: Vinyl Acetate Modified	H: High Alumina Cement Mortar
C: Acrylic Mortar	F: Magnesium Phosphate Modified	I: Flowing Concrete

G. Mays และคณะได้รวบรวมคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุซ่อมทั้งสามกลุ่มในปี ค.ศ. 1987 เอาไว้ดังแสดงในตารางที่ 2.2 พบว่า วัสดุซ่อมประสานซีเมนต์ทั่วไปมีคุณสมบัติเชิงกลที่ต่ำกว่า วัสดุซ่อมกลุ่มเรซินมาก ขณะที่วัสดุซ่อมประสานซีเมนต์ที่ปรับปรุงด้วยโพลีเมอร์มีคุณสมบัติที่ดีขึ้น แต่ยังคงดีกว่าวัสดุซ่อมกลุ่มเรซินเช่นกัน อย่างไรก็ตาม เมื่อเปรียบเทียบกับคุณสมบัติเชิงกลของคอนกรีต ดังแสดงในตารางที่ 2.3 พบว่า คุณสมบัติเชิงกลของวัสดุซ่อมประสานซีเมนต์มีค่าใกล้เคียงกับคุณสมบัติเชิงกลของคอนกรีตโครงสร้างทั่วไป ไม่ว่าจะเป็นด้านกำลัง โมดูลัสยืดหยุ่น หรือสัมประสิทธิ์การขยายตัวภายใต้อุณหภูมิ ซึ่งบ่งชี้ว่า วัสดุซ่อมประสานซีเมนต์กับคอนกรีตมีความเข้ากันได้ (Compatibility)

ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติเชิงกลของวัสดุซ่อมในปี ค.ศ. 1987 [2]

Property	Resin Mortar	Polymer Modified Cementitious Mortar	Plain Cementitious Mortar
Compressive Strength (MPa)	50 – 100	30 – 60	20 – 50
Tensile Strength (MPa)	10 – 15	5 – 10	2 – 5
Modulus of Elasticity in Compression (GPa)	10 – 20	15 – 25	20 – 30
Coefficient of Thermal Expansion (per °C)	$25 - 30 \times 10^{-6}$	$10 - 20 \times 10^{-6}$	$10 \times 10^{-6}$
Water Absorption (% by Mass)	1 – 2	0.1 – 0.5	5 – 15
Maximum Service Temperature (°C)	40 - 80	100 – 300	> 300

ตารางที่ 2.3 คุณสมบัติของคอนกรีตกับเหล็ก [3]

วัสดุ	ความ หนาแน่น (กก./ลบ.ม.)	กำลังดึง (กก./ตร.ซม.)	โมดูลัส ยืดหยุ่น (E) (กก./ตร.ซม.)	ส.ป.ส. การ ขยายตัว ( $10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ )	การนำความ ร้อน (W/m.k)
คอนกรีต	2300 – 2400	30	$2.5 \times 10^5$	10	3
เหล็ก					
ทั่วไป	7800	3000	$2.1 \times 10^6$	11	50
กำลังสูง	7800	10000	$2.1 \times 10^6$	12	45

ต่อมาในปี ค.ศ. 1993 R.T.L. Allen และคณะ [4] ได้รวบรวมคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุซ่อมเช่นกัน โดยแบ่งวัสดุซ่อมออกเป็น 4 กลุ่ม ดังแสดงในตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 คุณสมบัติเชิงกลของวัสดุซ่อมในปี ค.ศ. 1993 [4]

	Epoxy Resin Grouts, Mortars and Concretes	Polyester Resin Grouts, Mortars and Concretes	Cementitious Grouts, Mortars and Concretes	Polymer Modified Cementitious System
Compressive Strength (N/mm <sup>2</sup> )	55 – 110	55 – 110	20 – 70	10 – 80
Compressive Modulus E - value (kN/mm <sup>2</sup> )	0.5 – 20	2 – 10	20 – 30	1 – 30
Flexural Strength (N/mm <sup>2</sup> )	25 – 50	25 – 30	2 – 5	6 – 15
Tensile Strength (N/mm <sup>2</sup> )	9 – 20	8 – 17	1.5 – 3.5	2 – 8
Elongation at Break (%)	0 – 15	0 – 2	0	0 – 5
Linear Coefficient of Thermal Expansion per °C	$25 - 30 \times 10^{-6}$	$25 - 35 \times 10^{-6}$	$7 - 12 \times 10^{-6}$	$8 - 20 \times 10^{-6}$
Water Absorption, 7 Days at 25°C (%)	0 – 1	0.2 – 0.5	5 – 15	0.1 – 0.5
Maximum Service Temperature under Load (°C)	40 – 80	50 – 80	In excess 300°C dependent upon mix design	100 – 300
Rate of Development of Strength at 20°C	6 – 48 hours	2 – 6 hours	1 – 4 weeks	1 – 7 days

จากตารางที่ 2.4 จะเห็นได้ว่า คุณสมบัติเชิงกลของวัสดุซ่อมประสานซีเมนต์ในปี ค.ศ. 1993 นั้นมีการพัฒนาขึ้นจากปี ค.ศ. 1987 โดยเฉพาะด้านกำลัง แต่แนวโน้มโดยรวมยังคงเป็นเช่นเดิม คือ วัสดุซ่อมประสานซีเมนต์มีคุณสมบัติเชิงกลที่ต่ำกว่าวัสดุซ่อมกลุ่มเรซิน และคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุซ่อมประสานซีเมนต์มีค่าใกล้เคียงกับคอนกรีตเช่นเดิม ซึ่งยืนยันถึงความเข้ากันได้ระหว่างวัสดุซ่อมประสานซีเมนต์กับคอนกรีต

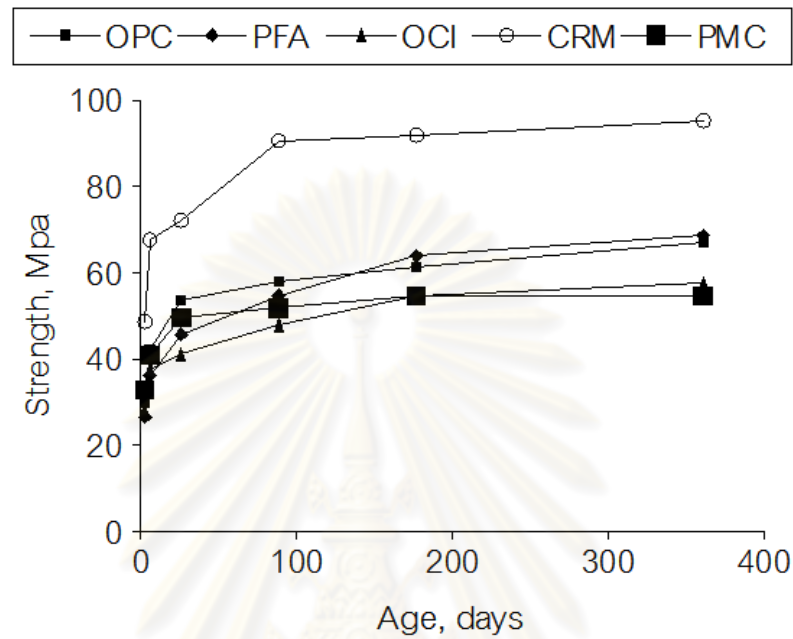
แม้ว่าวัสดุซ่อมประสานซีเมนต์ จะเป็นวัสดุซ่อมที่ราคาถูกและหาได้ทั่วไปตามท้องตลาด แต่ด้วยส่วนประกอบที่แตกต่างกันของวัสดุซ่อมประสานซีเมนต์ ส่งผลให้วัสดุซ่อมประสานซีเมนต์แต่ละชนิดมีคุณสมบัติที่ต่างกันออกไป งานวิจัยของ J. G. Cabrera และคณะ [5] จึงได้นำวัสดุซ่อมประสานซีเมนต์หลายชนิดมาทดสอบคุณสมบัติ เพื่อเป็นข้อมูลประกอบการตัดสินใจในการเลือกใช้งาน

วัสดุซ่อมประสานซีเมนต์ที่ J. G. Cabrera และคณะใช้ในการวิจัย มี 4 ชนิด ได้แก่ วัสดุซ่อมประสานซีเมนต์ (Cementitious Repair Material, CRM) วัสดุซ่อมประสานซีเมนต์ที่ผ่านการปรับปรุงด้วยโพลีเมอร์ (Polymer Modified Cementitious Repair Material, PMC) ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมสารยับยั้งการกัดกร่อน (Ordinary Portland Cement with Corrosion Inhibitor, OCI) และคอนกรีตที่มีส่วนผสมของปอซโซลานเถ้าเชื้อเพลิง (Pozzolanic Concrete Mix/Pulverised Fuel Ash, PFA) รวมทั้งยังมีการทดสอบคุณสมบัติของคอนกรีตปกติ (Ordinary Portland Cement Concrete Mix, OPC) ในงานวิจัยนี้ด้วย โดยขึ้นตัวอย่างที่เป็น CRM และ PMC ทั้งหมดใช้สัดส่วนผสมตามที่ผู้ผลิตแนะนำ ขึ้นตัวอย่างนอกจากนี้ จะใช้สัดส่วนซีเมนต์ต่อทรายต่อหินเท่ากับ 1 ต่อ 2.33 ต่อ 3.5 ทั้งหมด เพื่อเป็นการควบคุมสัดส่วนผสม

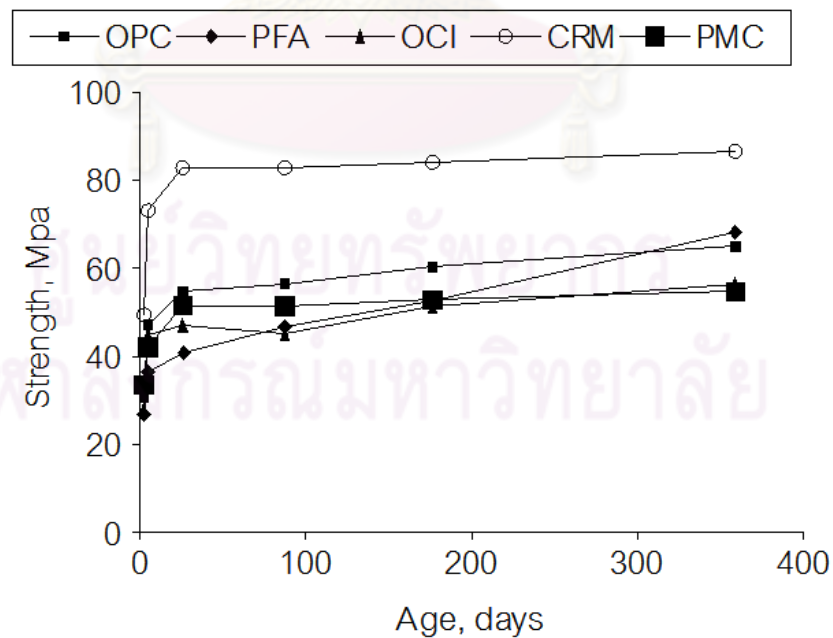
ขึ้นตัวอย่างที่หล่อขึ้นรูปแล้วจะถูกเก็บพร้อมแบบหล่อไว้ ณ อุณหภูมิห้อง ( $20 \pm 2$  องศาเซลเซียส) เพื่อถอดแบบหล่อที่ 24 ชั่วโมง แล้วจึงนำขึ้นตัวอย่างไปบ่มในห้องบ่มที่อุณหภูมิ  $20 \pm 2$  องศาเซลเซียส และความชื้น 99% เป็นเวลา 3 วัน หลังจากนั้นจะทำการแยกบ่มเป็น 2 ลักษณะ คือ บ่มด้วยห้องบ่มอุณหภูมิ  $20 \pm 2$  องศาเซลเซียส และความชื้น  $65 \pm 5\%$  เพื่อจำลองสภาวะการก่อสร้างทั่วไป และบ่มด้วยห้องบ่มร้อนอุณหภูมิ  $35$  องศาเซลเซียส ความชื้น  $45 \pm 5\%$  และความเร็วลม 3 เมตรต่อวินาที เพื่อจำลองสภาวะชายฝั่งทะเลในประเทศแถบตะวันออกกลาง ซึ่งมักพบการเสื่อมสภาพของคอนกรีตเร็วกว่าปกติ

J. G. Cabrera และคณะได้ทำการทดสอบคุณสมบัติทั้งสิ้น 4 การทดสอบ คือ การทดสอบกำลังอัด การทดสอบกำลังยึดเหนี่ยวด้วยวิธีแรงเฉือนเอียง (Slant Shear) การทดสอบความพรุน และการทดสอบการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนและน้ำ เพื่อใช้ในการพิจารณา

เปรียบเทียบประสิทธิภาพของวัสดุซ่อมประสานซีเมนต์ทั้ง 4 ชนิด โดยได้ผลการทดสอบดังแสดงในภาพที่ 2.1 ถึงภาพที่ 2.4 และตารางที่ 2.5

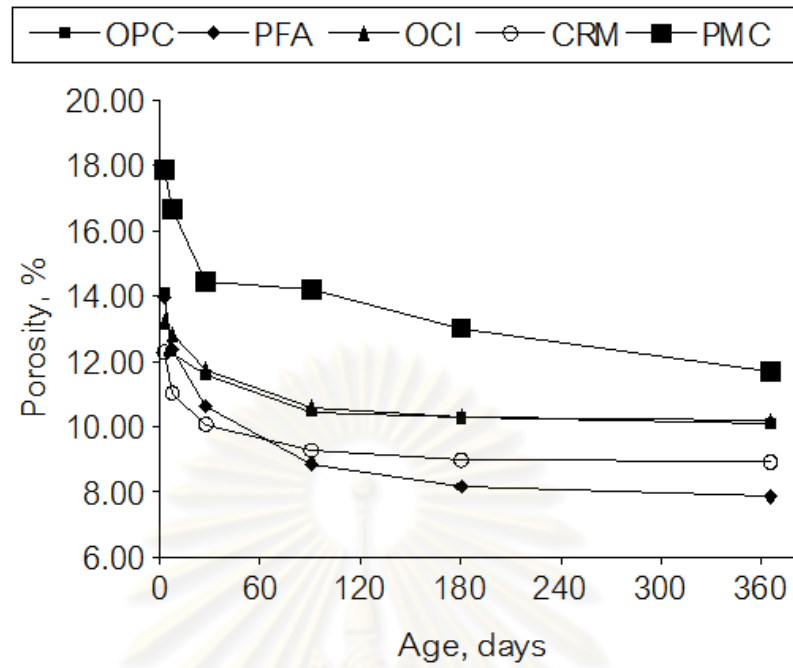


ก. ป้มที่ 20 องศาเซลเซียส ความชื้น 65%

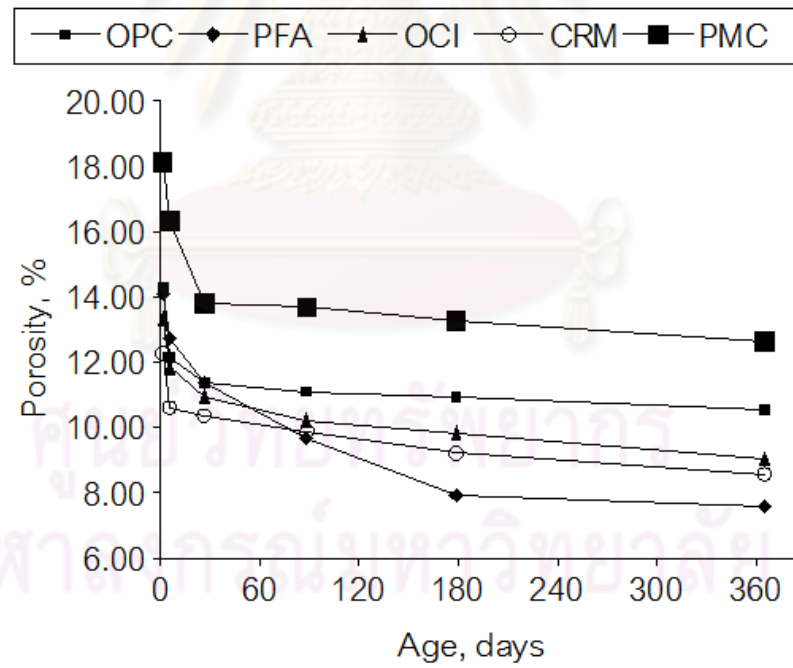


ข. ป้มที่ 35 องศาเซลเซียส ความชื้น 45%

ภาพที่ 2.1 การพัฒนากำลังอัดของวัสดุซ่อมประสานซีเมนต์ [5]



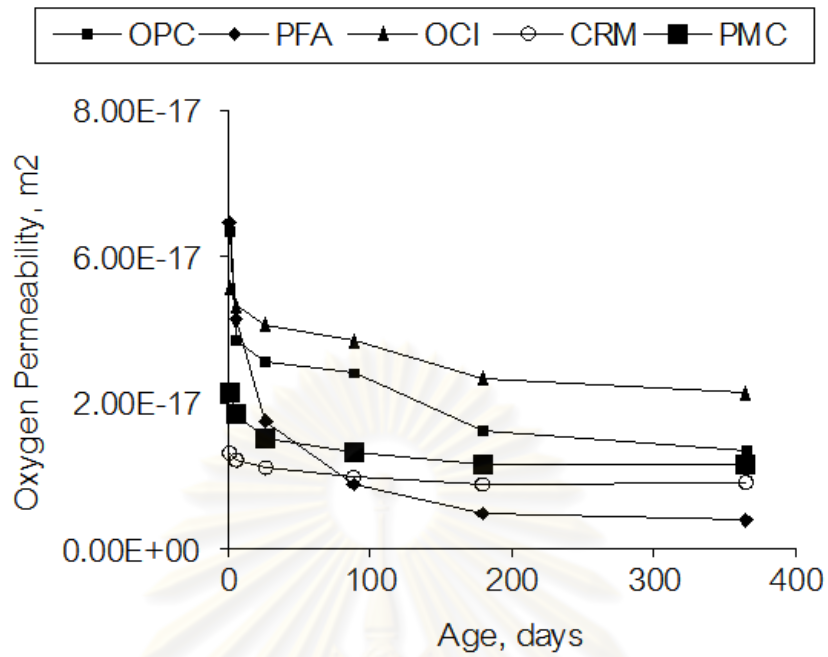
ก. ป่มีที่ 20 องศาเซลเซียส ความชื้น 65%



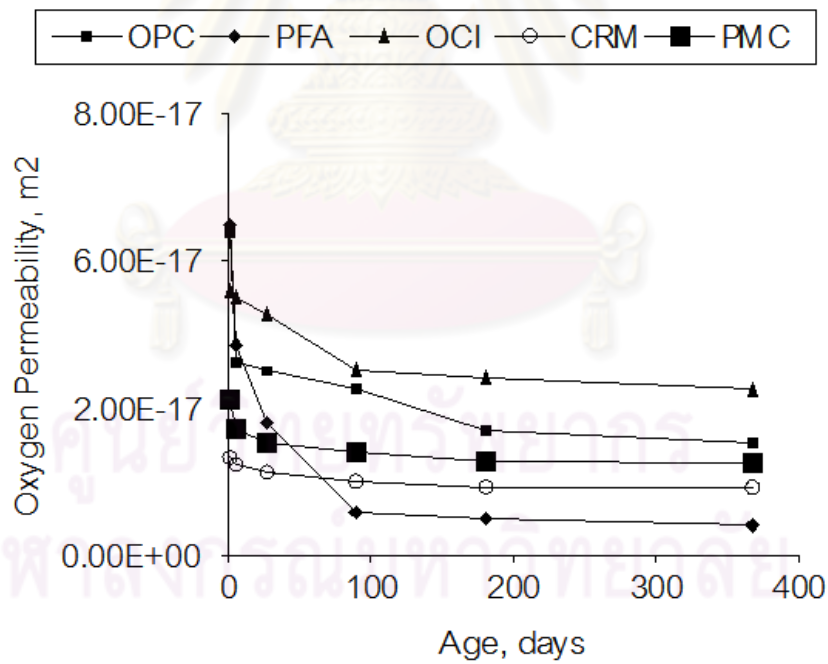
ข. ป่มีที่ 35 องศาเซลเซียส ความชื้น 45%

ภาพที่ 2.2 ความพรุนของวัสดุซ่อมประสานซีเมนต์ที่อายุต่างๆ [5]



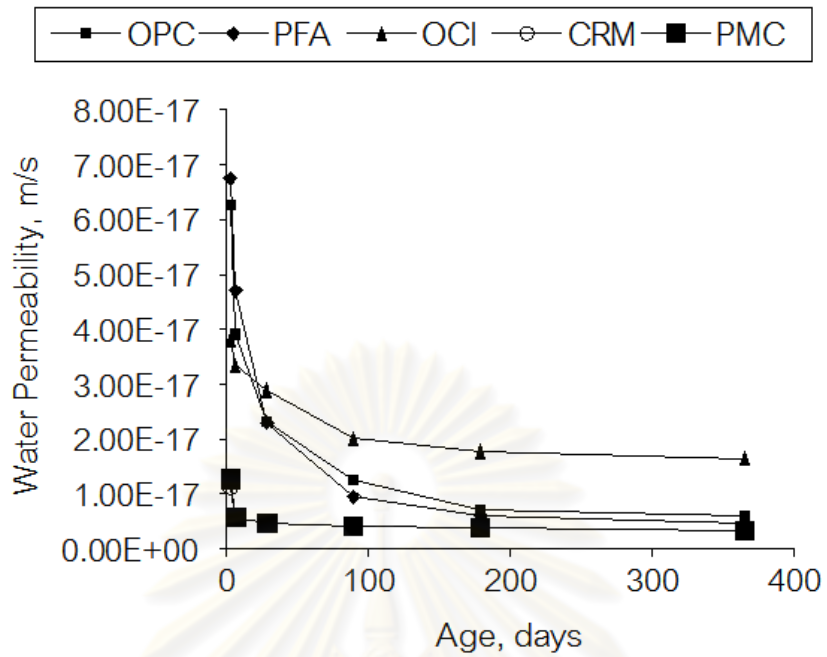


ก. ป่มีที่ 20 องศาเซลเซียส ความชื้น 65%

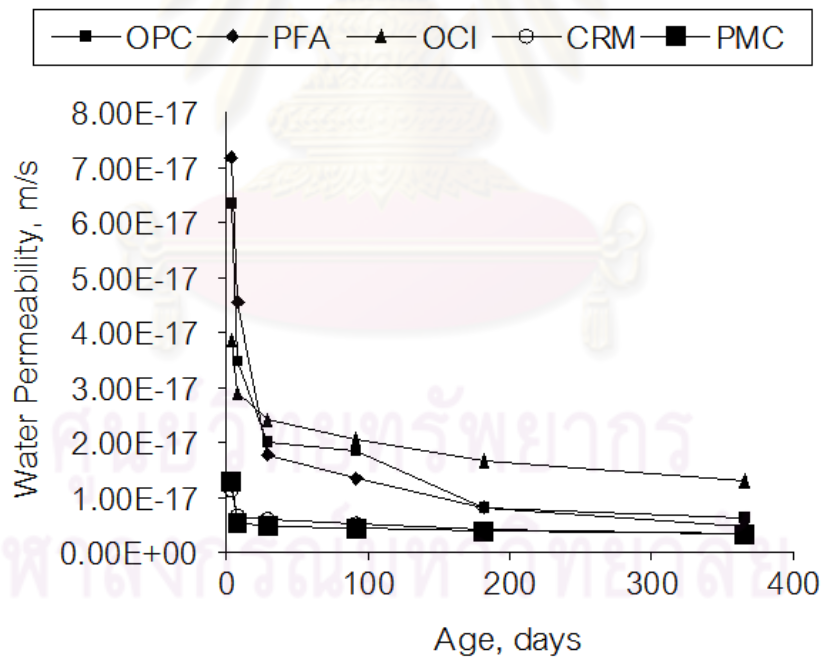


ข. ป่มีที่ 35 องศาเซลเซียส ความชื้น 45%

ภาพที่ 2.3 การซึมผ่านของออกซิเจนของวัสดุซ่อมประสานซีเมนต์ที่อายุต่างๆ [5]



ก. ป่่มที่ 20 องศาเซลเซียส ความชื้น 65%



ข. ป่่มที่ 35 องศาเซลเซียส ความชื้น 45%

ภาพที่ 2.4 การซึมผ่านของน้ำของวัสดุซ่อมประสานซีเมนต์ที่อายุต่างๆ [5]

ตารางที่ 2.5 กำลังยึดเหนี่ยวของวัสดุซ่อมประสานซีเมนต์ [5]

Material	Curing Condition					
	20°C / 65% R.H.			35°C / 45% R.H.		
	Bond Strength (MPa)	Plane Failure Through	E (GPa)	Bond Strength (MPa)	Plane Failure Through	E (GPa)
OPC	13.8	OPC	35.88	12.5	OPC	35.30
PFA	14.2	OPC – PFA	30.36	13.3	OPC – PFA	32.88
OCI	15.8	OCI	36.15	15.5	OCI	36.02
CRM	20.1	Interphase	28.87	15.9	Interphase	27.40
PMC	10.7	Interphase	18.83	10.0	Interphase	20.10

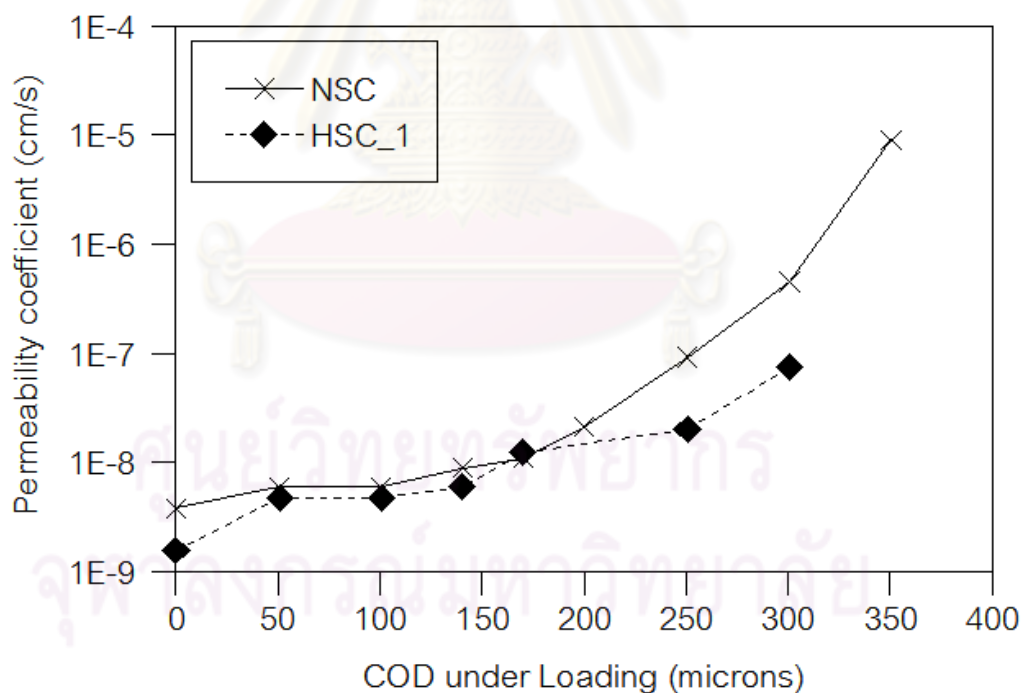
งานวิจัยของ J. G. Cabrera และคณะ ได้ข้อสรุปว่า วัสดุซ่อมประสานซีเมนต์แต่ละชนิดมีคุณสมบัติที่ต่างกัน ในด้านกำลังอัด CRM ให้กำลังสูงที่สุด ขณะที่วัสดุซ่อมอีก 3 ชนิด มีค่าไม่ต่างจาก OPC อย่างไรก็ตาม กำลังเพียงอย่างเดียวไม่สามารถบ่งบอกได้ว่าควรเลือกใช้วัสดุใด ดังจะเห็นได้จากความพรุนและการซึมผ่านของก๊าซ ซึ่ง PFA ให้ค่าต่ำที่สุด ขณะที่การซึมผ่านของน้ำมีแนวโน้มคือ  $PMC \approx CRM < PFA < OPC < OCI$  จากการเปรียบเทียบคุณสมบัติของวัสดุซ่อมประสานซีเมนต์ทั้งหมดที่ทดสอบในงานวิจัยนี้ ควรเลือกใช้ PFA เป็นวัสดุซ่อมแซม

เห็นได้ว่า งานวิจัยที่กล่าวถึงเน้นศึกษาคุณสมบัติของวัสดุซ่อมประสานซีเมนต์ ไม่ใช่คุณสมบัติของโครงสร้างภายหลังการซ่อมแซมซึ่งเป็นวัสดุประกอบ (Composite Materials) อย่างไรก็ตาม งานวิจัยนี้ได้แสดงให้เห็นถึงภาพรวมของคุณสมบัติของวัสดุซ่อมประสานซีเมนต์ได้เป็นอย่างดี โดยเฉพาะการที่วัสดุซ่อมประสานซีเมนต์แต่ละชนิดมีคุณสมบัติที่ต่างกัน

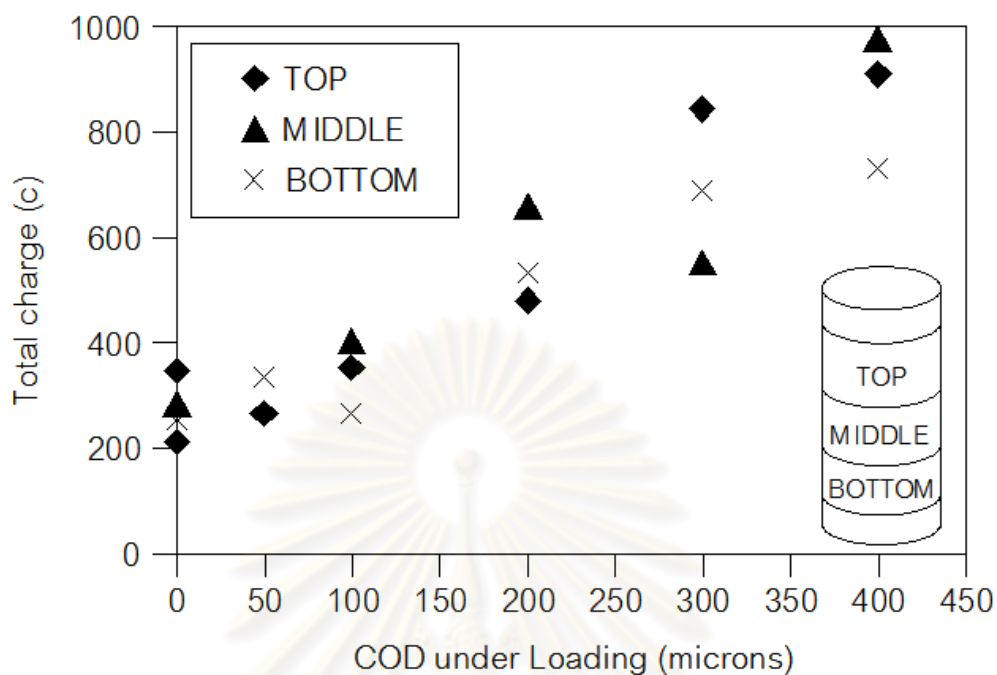
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## 2.2 การจำแนกรอยร้าว

รอยร้าวของคอนกรีตสามารถจำแนกได้หลายวิธี ไม่ว่าจะเป็นการจำแนกตามลักษณะของการเกิดรอยร้าว [3] เช่น รอยร้าวจากสาเหตุทางกายภาพ (Cracks due to Physical Causes) รอยร้าวจากสาเหตุทางเคมี (Cracks due to Chemical Causes) และรอยร้าวเนื่องจากเหล็กเสริมเกิดการกัดกร่อน (Cracks due to Corrosion of Reinforcement) หรือการจำแนกตามการเคลื่อนตัว [2] เช่น รอยร้าวที่ไม่มีการเคลื่อนที่ (Dead Cracks) และรอยร้าวที่มีการเคลื่อนที่ (Live Cracks) หรือจำแนกตามระยะช่องเปิดของรอยร้าว เช่นในงานวิจัยของ C. M. Aldea และคณะ [6] ซึ่งดำเนินการเพื่อหาเกณฑ์กำหนดสำหรับคอนกรีตที่คงทน (Durable Concrete) โดยทดสอบหาสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำและการแทรกซึมของคลอไรด์ที่ความกว้างของรอยร้าว (Crack Opening Displacement, COD) ค่าต่างๆ ในคอนกรีตปกติ (Normal Strength Concrete, NSC) และคอนกรีตกำลังสูง (High Strength Concrete, HSC) ได้ผลการทดสอบดังแสดงในภาพที่ 2.5 และภาพที่ 2.6



ภาพที่ 2.5 ระยะช่องเปิดของรอยร้าวกับสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ [6]



ภาพที่ 2.6 ระยะช่องเปิดของรอยร้าวกับประจุล่อไรต์ที่ผ่านชั้นตัวอย่าง [6]

จากผลการทดสอบของ C. M. Aldea และคณะ พบว่า รอยร้าวที่มีขนาดเล็กกว่า 200 ไมครอน หรือ 0.2 มม. คอนกรีตมีการซึมผ่านของน้ำค่อนข้างคงที่ วัดค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ประมาณ  $1 \times 10^{-8}$  ซม.ต่อวินาที ซึ่งคอนกรีตปกติและคอนกรีตกำลังสูงมีความแตกต่างกันน้อยมาก แต่รอยร้าวที่ใหญ่กว่า 200 ไมครอน การซึมผ่านของน้ำเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วตามความกว้างของรอยร้าวที่เพิ่มขึ้น และสามารถสังเกตความแตกต่างของคอนกรีตปกติและคอนกรีตกำลังสูงได้ ขณะที่ผลทดสอบการแทรกซึมของคลอไรด์มีแนวโน้มคล้ายคลึงกันกับผลการทดสอบการซึมผ่านของน้ำ คือ รอยร้าวที่มีขนาดเล็กกว่า 200 ไมครอน วัดประจุคลอไรด์ที่ผ่านตัวอย่างได้ค่อนข้างคงที่ แต่เมื่อรอยร้าวมีขนาดใหญ่กว่า 200 ไมครอน ประจุคลอไรด์ที่วัดได้มีค่าเพิ่มขึ้นตามความกว้างของรอยร้าว ดังนั้น C. M. Aldea และคณะ จึงสรุปว่า รอยร้าวขนาด 200 ไมครอน หรือ 0.2 มม. สามารถใช้เป็นเกณฑ์ในการจำแนกรอยแตกร้าวของคอนกรีตที่พิจารณาด้านความคงทนได้

### 2.3 การซ่อมแซมรอยร้าวด้วยการเคลือบผิว

P. Roberty และคณะ [7] ได้รวบรวมข้อมูลจาก The European Committee for Standardisation (CEN) เพื่อให้สามารถเลือกวิธีการซ่อมแซมที่เหมาะสม ดังแสดงในตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6 วิธีการซ่อมแซมตามคุณสมบัติจำเพาะที่ต้องการ [7]

Specific Property	Repair Principle
Ingress Protection	Surface Impregnation
	Surface Coating
	Crack Sealing
Moisture Control	Surface Treatment
	Surface Coating
Concrete Restoration	Bonding Hand – applied Mortar
	Recasting with Concrete
	Spraying Concrete or Mortar
Structural Strengthening	Installing Ties or Anchors
	Steel Plate Bonding
	Adding Mortar or Concrete
	Injection
Concrete Bonding	Injection for Continuity
Physical Resistance	Overlays or Coatings
	Impregnation
Chemical Resistance	Overlays or Coatings
	Impregnation
Restoring Passivity	Replacing Concrete
	Realkalisation by Diffusion
Increasing Resistivity	Limiting Moisture Content
Corrosion Control	Limiting Oxygen Content
Control of Anodic Areas	Active Reinforcement Coating
	Barrier Coatings on Reinforcement
	Anodic Inhibitors in Concrete

จากตารางที่ 2.6 ข้างต้น จะเห็นว่า การซ่อมแซมด้วยการเคลือบ (Coating) เป็นวิธีการที่มี การนำมาใช้งานในหลายๆ ลักษณะ เช่น การป้องกันจากภายนอก (Ingress Protection) การ ควบคุมความชื้น (Moisture Control) ความต้านทานทางกายภาพ (Physical Resistance) และ ความต้านทานทางเคมี (Chemical Resistance) การเคลือบเป็นการซ่อมแซมที่มีความสะดวก รวดเร็วในการทำงาน มีขั้นตอนการดำเนินการที่ไม่ยุ่งยาก อีกทั้งยังสามารถใช้ได้กับงานซ่อมแซม ขนาดใหญ่ การเคลือบ โดยแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอน คือ การเตรียมผิว (Surface Preparation) และ การเคลือบผิว (Surface Coating)

ตารางที่ 2.7 การเตรียมผิวสำหรับงานเคลือบ [4]

Standard	Description	Methods	Expected Tensile Adhesion
Third	Dry and free from grease, free from dust, flakes and salts	Application of emulsified degreaser, (where necessary) washing clean with water, scraping and hand wire brushing to remove loose matter and brushing clean	0.5 – 1.0 N/mm <sup>2</sup>
Second	Dry and free from grease, free from dust, flakes, salts and superficial laitance	Application of emulsified degreaser, (where necessary) and washing clean with water, scraping off any looser matter, power wire brushing and vacuum cleaning to remove dust	1.5 – 2.0 N/mm <sup>2</sup>
First	Dry and free from grease, free from dust, flakes, salts and laitance, with a sharp even finish	Application of emulsified degreaser, (where necessary) and washing clean with water, grit blasting, high – pressure water jetting and acid etching	2.5 – 3.0 N/mm <sup>2</sup>

การเตรียมผิว เป็นกระบวนการเตรียมสภาพผิววัสดุเดิมให้พร้อมก่อนการเคลือบผิว เพื่อให้วัสดุซ่อมที่นำมาเคลือบผิวยึดเกาะกับวัสดุเดิมได้เป็นอย่างดี บริเวณที่ต้องการเคลือบผิวต้องปราศจาก ฝุ่น ผง คราบต่างๆ หรือวัสดุอื่นๆ เกาะอยู่ วัสดุเหล่านี้เป็นสาเหตุให้เกิดการวิบัติของงานเคลือบผิว คือ การหลุดร่อนของวัสดุซ่อม R.T.L. Allen [4] จึงได้เสนอการเตรียมผิวสำหรับงานเคลือบผิวคอนกรีตไว้ โดยแบ่งเป็น 3 ข้อกำหนด คือ ข้อกำหนดงานชั้นสามสำหรับกำลังยึดเกาะ 0.5 – 1.0 นิวตัน/ตร.มม. ใช้น้ำยาทำความสะอาดคราบมันในบริเวณที่จำเป็น ล้างด้วยน้ำ และขัดผิวด้วยแปรงลวดด้วยมือ ข้อกำหนดงานชั้นสองสำหรับกำลังยึดเกาะ 1.5 – 2.0 นิวตัน/ตร.มม. ใช้น้ำยาทำความสะอาดคราบมันในบริเวณที่จำเป็น ล้างด้วยน้ำ ขัดผิวด้วยแปรงลวดที่มีกำลังแรง และดูดฝุ่น และข้อกำหนดงานชั้นหนึ่งสำหรับกำลังยึดเกาะ 2.5 – 3.0 นิวตัน/ตร.มม. ใช้น้ำยาทำความสะอาดคราบมันในบริเวณที่จำเป็น ล้างด้วยน้ำ ฟนลมเป่าฝุ่นผง ชัดด้วยน้ำแรงดันสูง และกัดด้วยกรด ดังแสดงในตารางที่ 2.7 ข้างต้น

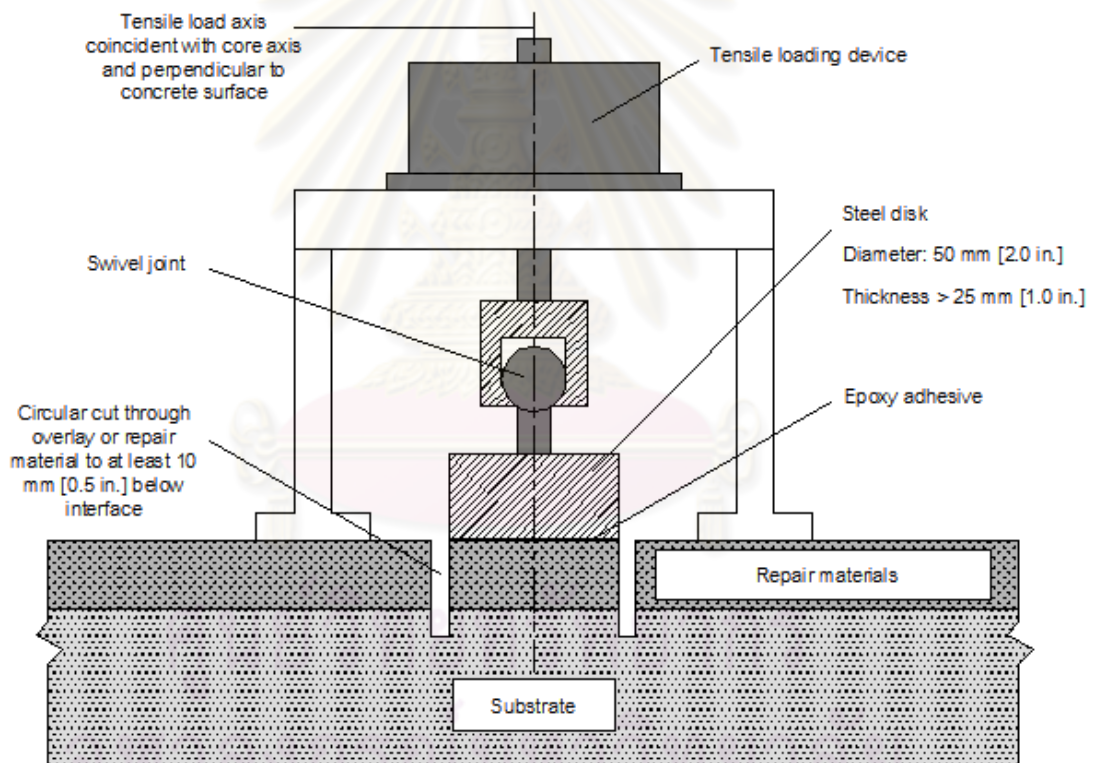
การเคลือบผิว เป็นขั้นตอนที่สามารถดำเนินการได้หลายวิธี เช่น การพ่น (Spray Techniques) การใช้ลูกกลิ้ง (Roller Application) การใช้แปรง (Brush Application) การใช้ผ้า (Trowel Application) เป็นต้น การเลือกวิธีที่เหมาะสมมักจะพิจารณาจากพื้นที่ที่ต้องทำงานเป็นหลัก กรณีมีพื้นที่ทำงานมาก การพ่นจะเป็นวิธีที่มีความเหมาะสม สามารถทำงานได้อย่างรวดเร็ว หากพื้นที่ทำงานมีขนาดลดลงมา ควรเลือกใช้ลูกกลิ้ง และพื้นที่ทำงานเล็กๆ จะใช้แปรง นอกจากนี้ยังมีปัจจัยอื่นที่ต้องคำนึงถึงด้วย เช่น ต้นทุน ระยะเวลาทำงาน จำนวนแรงงาน เป็นต้น โดยปริมาณวัสดุซ่อมที่ใช้เคลือบผิวนิยามออกเป็นปริมาณต่อพื้นที่ทำงาน ตัวอย่างเช่น กก./ตร.ม. หากเป็นกรณีที่ต้องการควบคุมความหนาของวัสดุซ่อมในการเคลือบ เช่น ต้องการชั้นวัสดุซ่อมหนา 1 มม. เป็นต้น มาตรฐานอุตสาหกรรมประเทศญี่ปุ่น JIS K 5600-1-7 [8] ได้นำเสนอวิธีการหนึ่งเรียกว่า การหาความหนาฟิล์มเปียกด้วยการชั่งน้ำหนัก (Determination of Wet-film Thickness: Method 1C by Weighting) ซึ่งเป็นวิธีการที่เหมาะสมสำหรับขึ้นตัวอย่างทดสอบที่สามารถหาพื้นที่ได้ และวัสดุเคลือบไม่ระเหยเร็วเกินไป โดยใช้ความหนาแน่นของวัสดุเคลือบในการคำนวณความหนาของวัสดุเคลือบจากค่าน้ำหนักของวัสดุเคลือบและพื้นที่ทำงาน ด้วยวิธีการชั่งน้ำหนักในมาตรฐานนี้ ช่วยควบคุมความหนาของการเคลือบผิวและลดความคลาดเคลื่อนของการเตรียมขึ้นตัวอย่างที่พื้นที่ผิวที่ทำงานไม่มากได้เป็นอย่างดี



## 2.4 การยึดเกาะระหว่างวัสดุซ่อมและคอนกรีตเดิม

เมื่อต้องการทราบคุณภาพการยึดเกาะระหว่างวัสดุซ่อมและคอนกรีตเดิมเป็นค่าตัวเลข นิยมระบุเป็นค่ากำลังยึดเกาะ หนึ่งในวิธีการหาค่ากำลังยึดเกาะระหว่างวัสดุซ่อมและคอนกรีตเดิม คือ มาตรฐาน ASTM C1583 [9] ซึ่งดำเนินการโดยการเจาะ (Coring) ทะลุผ่านชั้นของวัสดุซ่อม ทะลุไปจนถึงชั้นของคอนกรีต เพื่อแยกบริเวณที่ทดสอบจากบริเวณอื่น จากนั้นทำการให้แรงดึง (Direct Tensile) ค่ากำลัง ( $f_a$ ) สามารถคำนวณได้จากแรงดึง (T) ต่อพื้นที่ที่ทดสอบ (A) ดังแสดงใน สมการที่ 2.1 วิธีการทดสอบนี้ เรียกว่า การทดสอบพูลออฟ (Pull-off Test) ดังแสดงในภาพที่ 2.7

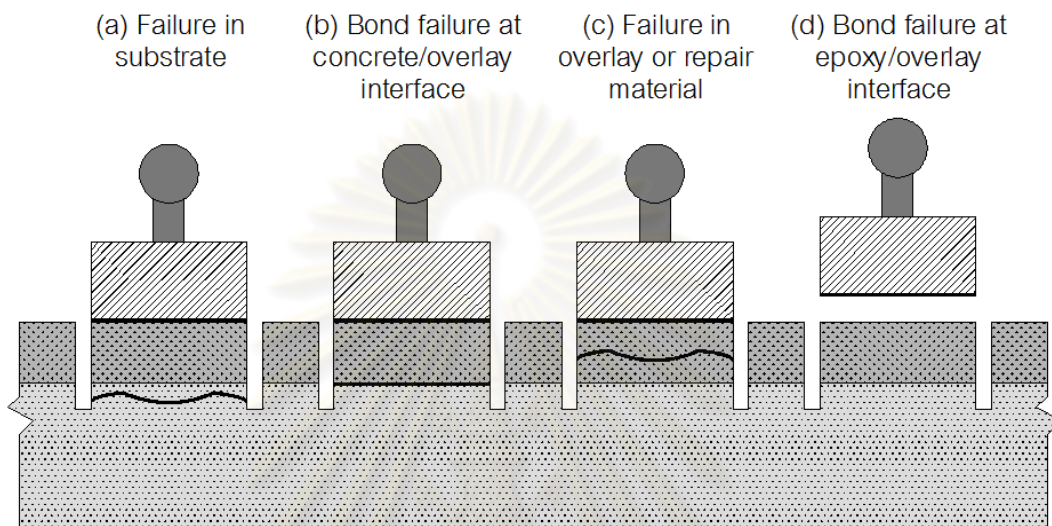
$$f_a = T/A \quad (2.1)$$



ภาพที่ 2.7 การทดสอบกำลังยึดเกาะตามมาตรฐาน ASTM C1583 [9]

อย่างไรก็ตาม ค่ากำลังที่ได้จากการทดสอบพูลออฟ ตามสมการที่ 2.1 สามารถเป็นกำลังดึงของคอนกรีต (Tensile Strength of Concrete) กำลังยึดเกาะ (Adhesive Strength) หรือกำลังดึงของวัสดุซ่อม (Tensile Strength of Overlay Material) ก็ได้ โดยขึ้นอยู่กับลักษณะของการวิบัติ กรณีเกิดการวิบัติที่ชั้นของวัสดุเดิม ดังแสดงภาพที่ 2.8a กำลังที่ได้คือกำลังดึงของคอนกรีต กรณีเกิดการแยกตัวบริเวณรอยต่อของวัสดุเดิมและวัสดุซ่อม ดังแสดงในภาพที่ 2.8b กำลังที่ได้คือ

กำลังยึดเกาะระหว่างวัสดุซ่อมกับคอนกรีตเดิม กรณีเกิดการวิบัติที่ชั้นของวัสดุซ่อม ดังแสดงในภาพที่ 2.8c กำลังที่ได้คือกำลังดึงของวัสดุซ่อม และกรณีเกิดการแยกตัวบริเวณรอยต่อระหว่างวัสดุซ่อมกับอีพอกซี ดังแสดงในภาพที่ 2.8d ผลการทดสอบดังกล่าวจะไม่ถูกนำมาพิจารณา



ภาพที่ 2.8 ลักษณะการวิบัติในการทดสอบกำลังยึดเกาะตามมาตรฐาน ASTM C1583 [9]

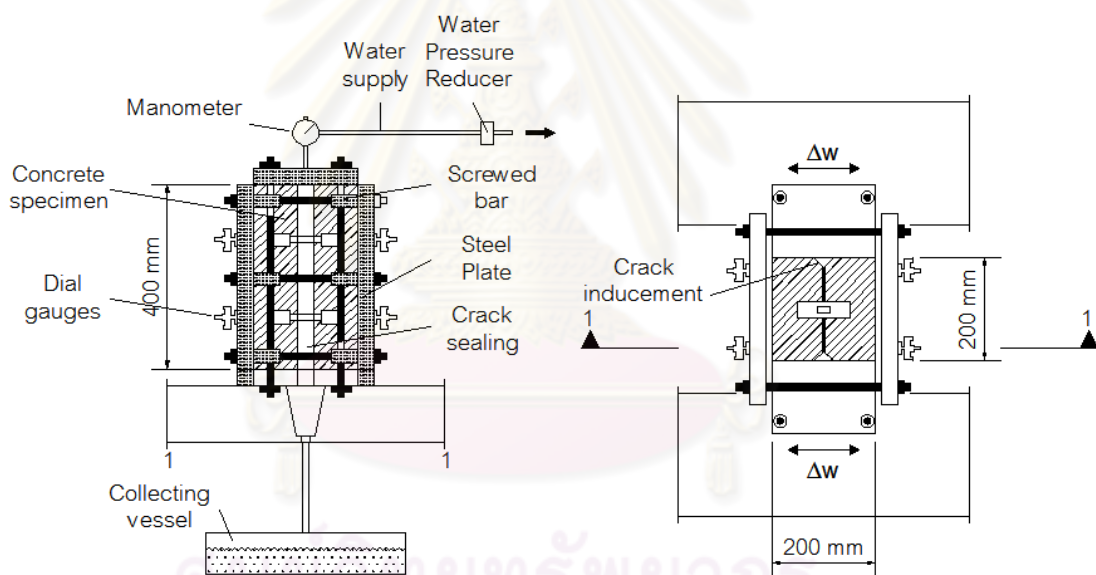
## 2.5 การรั่วซึมของน้ำผ่านรอยร้าวคอนกรีต

โครงสร้างคอนกรีตหลายชนิดต้องสัมผัสกับน้ำตลอดเวลา เช่น เขื่อน อ่างเก็บน้ำ สระน้ำ เป็นต้น อีกทั้งไม่ต้องการให้เกิดการรั่วซึมของน้ำ จึงมีงานวิจัยหลายงานศึกษาการรั่วซึมของน้ำในคอนกรีตที่มีรอยร้าว เช่น C. Edvardsen [10] ซึ่งทดสอบการไหลของน้ำผ่านรอยร้าวของคอนกรีตเพื่อศึกษาการผสานรอยร้าวด้วยตัวเองในคอนกรีต (Autogenous Healing of Cracks in Concrete) และความสามารถใช้งานของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีรอยร้าวภายใต้แรงดันน้ำ เช่น ชั้นใต้ดิน โครงสร้างกักเก็บน้ำ หรือบ่อน้ำทิ้ง สำหรับนำผลไปใช้ในงานวิศวกรรม C. Edvardsen ตั้งสมมติฐานว่า การไหลที่เกิดขึ้นเป็นการไหลของของไหลตาม Law of Hagen Poiseuille โดยมีตัวคูณลดขนาดเนื่องจากความขรุขระของรอยร้าว (Reduction Factor Comprising the Roughness of Crack,  $\xi$ ) ซึ่งมีค่า 0.02 ถึง 0.17 ดังแสดงในสมการที่ 2.2

$$q_r = \xi \Delta p b w^3 / 12 \eta d \quad (2.2)$$

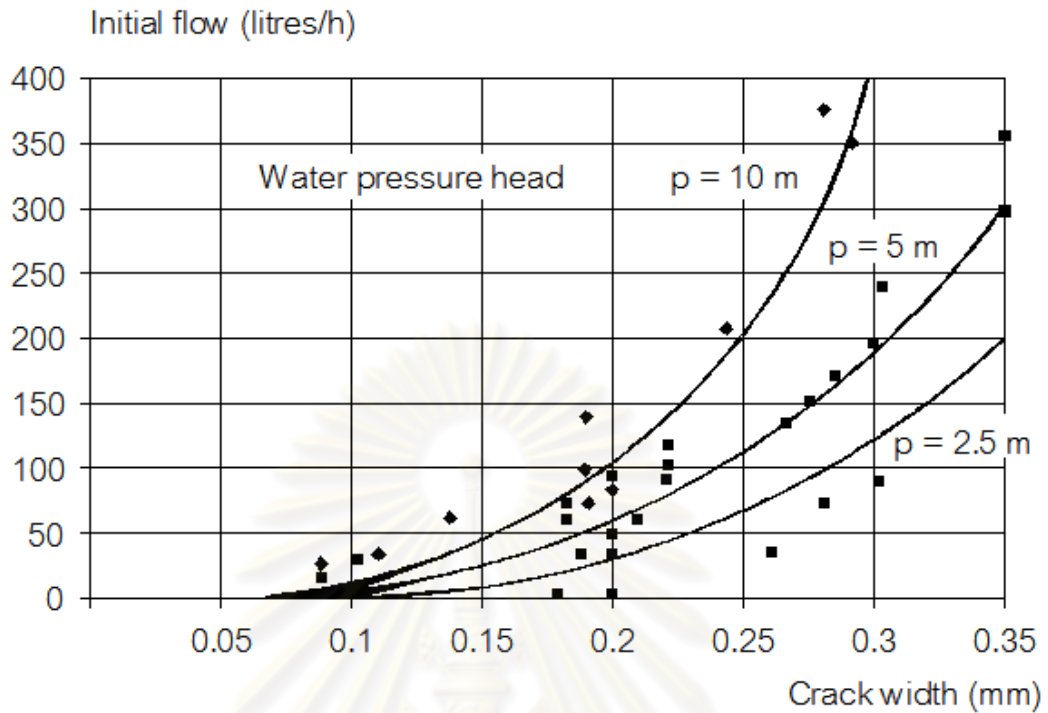
- เมื่อ  $q_f$  คือ อัตราการไหล ( $\text{ม.}^3/\text{วินาที}$ )  
 $\Delta p$  คือ ผลต่างความดัน ณ จุดที่น้ำไหลเข้าและไหลออก ( $\text{นิวตัน}/\text{ม.}^2$ )  
 $b$  คือ ความยาวรอยร้าวที่สังเกตเห็นได้ ณ ผิวของโครงสร้าง ( $\text{ม.}$ )  
 $w$  คือ ความกว้างของรอยร้าว ( $\text{ม.}$ )  
 $\eta$  คือ ความหนืดสัมบูรณ์ของน้ำ ( $\text{นิวตัน}\cdot\text{วินาที}/\text{ม.}^2$ ) และ  
 $d$  คือ ระยะทางตามแนวที่น้ำไหลผ่านหรือความหนาของโครงสร้าง ( $\text{ม.}$ )

การทดสอบของ C. Edvardsen ใช้ตัวอย่างที่มีรอยร้าวเนื่องจากแรงดึง (Tension Crack) ที่มีความกว้างรอยร้าวอยู่ในช่วง 0.1 มม. ถึง 0.3 มม. มาติดตั้งอุปกรณ์ทดสอบดังแสดงในภาพที่ 2.9 และให้แรงดันน้ำกระทำแก่ตัวอย่าง

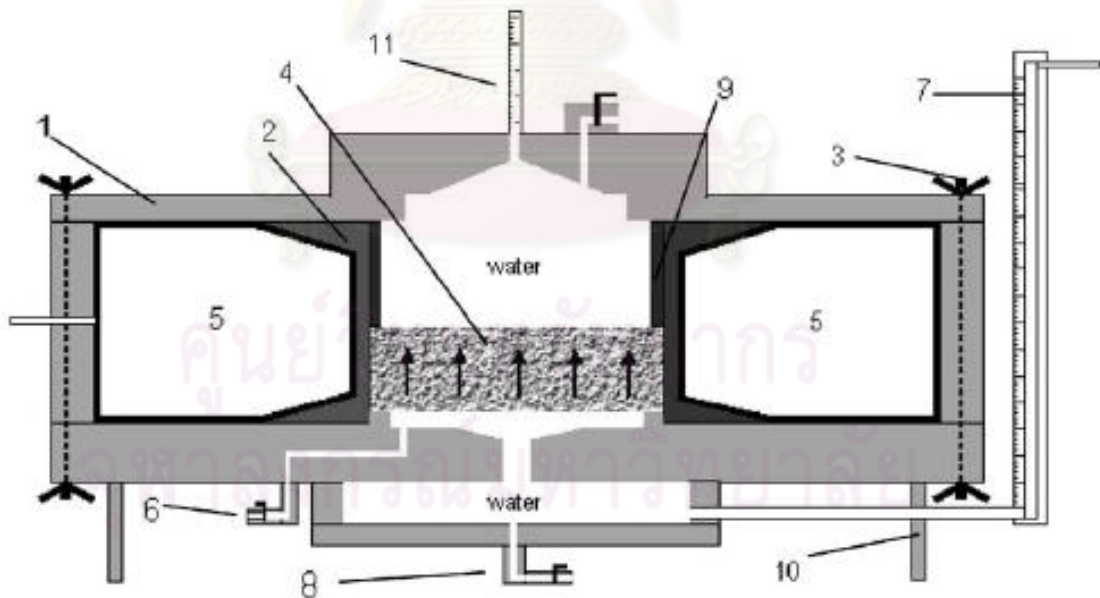


ภาพที่ 2.9 ลักษณะการทดสอบการไหลของน้ำผ่านรอยร้าวของ Edvardsen [10]

ผลทดสอบการไหลของน้ำผ่านรอยร้าวคอนกรีตในภาพที่ 2.10 แสดงให้เห็นว่า อัตราการไหลของน้ำผ่านรอยร้าวมีความสัมพันธ์กับความกว้างรอยร้าวตามสมการที่ 2.2 ซึ่งจากสภาพที่ทดสอบและผลการทดสอบ สามารถนำมาคำนวณค่าตัวคูณลดขนาดเนื่องจากความขรุขระของรอยร้าวได้เท่ากับ 0.25 และทำให้สามารถประมาณการไหลของน้ำผ่านรอยร้าวคอนกรีตได้



ภาพที่ 2.10 ผลทดสอบการไหลของน้ำผ่านรอยร้าวคอนกรีตของ Edvardsen [10]

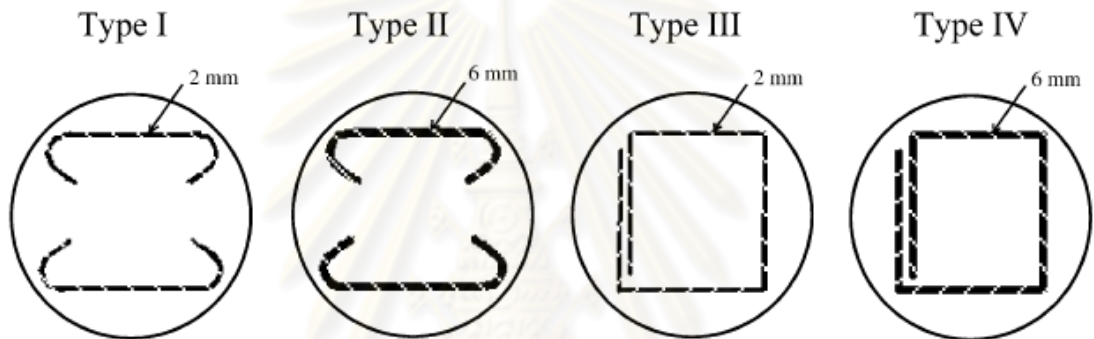


ภาพที่ 2.11 อุปกรณ์ทดสอบการซึมผ่านของ H. W. Reinhardt และ M. Joose [9]

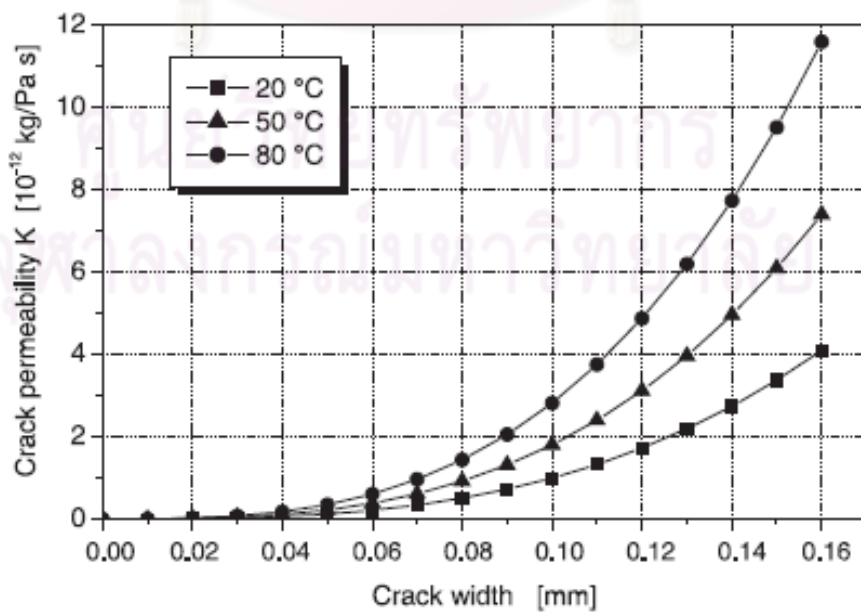
งานวิจัยของ H. W. Reinhardt และ M. Joose [11] ซึ่งทั้งคู่ทำการศึกษาการซึมผ่าน (Permeability) และการผานรอยร้าวด้วยตัวเองของคอนกรีตที่มีรอยร้าว (Self - healing of Cracked Concrete) โดยใช้คุณสมบัติของน้ำและความกว้างรอยร้าวของคอนกรีตเป็นตัวแปร

ควบคุม เพื่อนำมาใช้เป็นข้อมูลสำหรับอ่างเก็บน้ำอุณหภูมิต่ำ โดยการทดสอบการซึมผ่านของน้ำผ่านตัวอย่างคอนกรีตใช้อุปกรณ์ทดสอบ ดังแสดงในภาพที่ 2.11 ซึ่งหมายเลขต่างๆ ในภาพที่ 2.12 ได้แก่ (1) ตู้ออสโมมิเนียม (2) ตัวป้องกันความดัน (3) ตัวยึด (4) ตัวอย่างคอนกรีต (5) ช่องความดัน (6) ท่ออากาศ (7) ตัววัดความดันน้ำ (8) ท่อน้ำเข้า (9) ตัวยึดตัวอย่าง (10) ฐานรอง และ (11) อุปกรณ์วัดอัตราการไหล

สำหรับตัวอย่างทดสอบ มีลักษณะเป็นคอนกรีตแผ่นกลม เส้นผ่าศูนย์กลาง 150 มม. ความหนา 50 มม. มีการเสริมเหล็กต่างๆ กัน 4 ลักษณะ เพื่อให้เมื่อนำตัวอย่างมาสร้างรอยร้าวด้วยวิธีผ่าแยก (Splitting) แล้ว ได้ตัวอย่างที่มีความกว้างรอยร้าวต่างกัน ดังแสดงในภาพที่ 2.12



ภาพที่ 2.12 การเสริมเหล็กลักษณะต่างๆ สำหรับการสร้างรอยร้าวบนตัวอย่างคอนกรีตของ H. W. Reinhardt และ M. Joose [9]



ภาพที่ 2.13 ความกว้างรอยร้าวและสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำที่อุณหภูมิต่างๆ [9]

จากการทดสอบการซึมผ่านของน้ำที่อุณหภูมิต่างๆ ของ H. W. Reinhardt และ M. Joose พบว่า สัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อความกว้างรอยร้าวมีขนาดใหญ่ขึ้น และการเพิ่มอุณหภูมิส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านมีค่าเพิ่มขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 2.13

นอกจากนี้ H. W. Reinhardt และ M. Joose ได้ทำการเปรียบเทียบผลทดสอบที่ได้กับ Law of Hagen Poiseuille ดังแสดงในสมการที่ 2.2 ด้วย ได้ผล ดังแสดงในตารางที่ 2.8

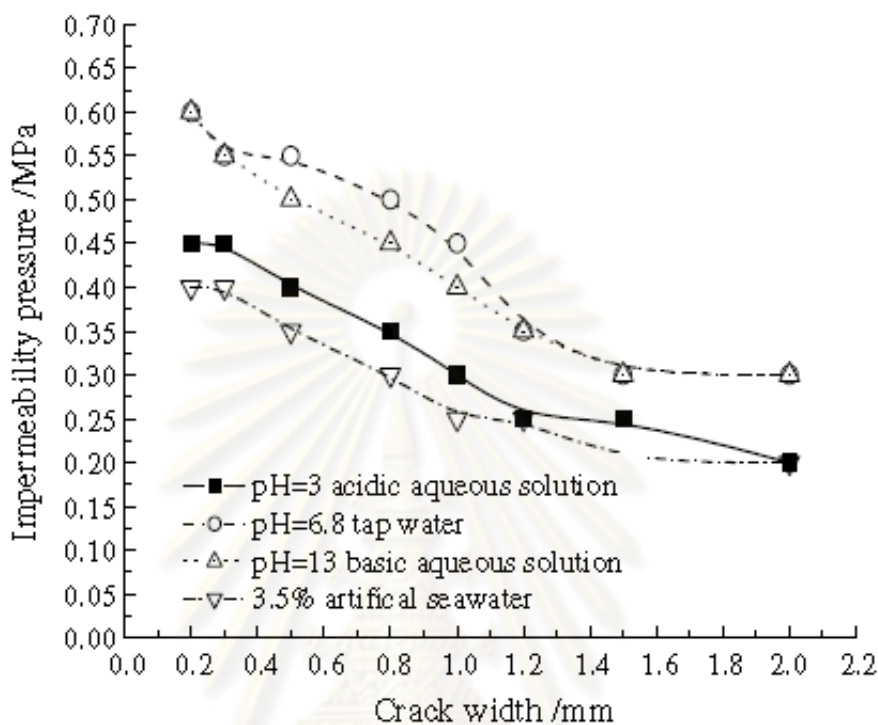
ตารางที่ 2.8 อัตราการไหลของน้ำที่อุณหภูมิต่างๆ ผ่านรอยร้าว เทียบกับอัตราการไหลของน้ำที่ 20 องศาเซลเซียส ผ่านรอยร้าวกว้าง 0.08 มม. [9]

Flow Rate Determination	Crack Width (mm)	Temperature (°C)		
		20	50	80
By Theory	0.05	0.24	0.44	0.67
	0.08	1.00	1.80	2.82
	0.10	1.95	3.52	5.50
By Test	0.05	0.21	0.38	0.60
	0.08	1.00	1.61	2.90
	0.10	2.12	3.62	4.87

จากตารางที่ 2.8 ข้างต้น แสดงให้เห็นว่า ผลทดสอบอัตราการไหลของน้ำผ่านรอยร้าวของคอนกรีตเทียบกับอัตราการไหลของน้ำตาม Law of Hagen Poiseuille แล้ว พบว่า มีค่าสอดคล้องกัน คือ ความกว้างรอยร้าวที่เพิ่มขึ้นทำให้อัตราการไหลของน้ำมีค่าสูงขึ้น ขณะที่การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของน้ำมีผลต่อความหนืดของน้ำและความหนาแน่นของน้ำ ซึ่งส่งผลต่ออัตราการไหลของน้ำตามสมการที่ 2.2

นอกจากการรั่วซึมของน้ำผ่านรอยร้าวคอนกรีตแล้ว การรั่วซึมของน้ำผ่านคอนกรีตที่ซ่อมแซมแล้วก็มีการศึกษาวิจัยกันอย่างแพร่หลายเช่นกัน ในหลายกรณีพบว่าคอนกรีตที่ซ่อมแซมแล้วไม่พบการรั่วซึมของน้ำหรือพบการรั่วซึมของน้ำในอัตราที่ต่ำ ซึ่งต้องใช้ระยะเวลาในการทดสอบอัตราการรั่วซึมของน้ำ จึงจำเป็นต้องใช้วิธีการทดสอบอื่นแทน ดังเช่น งานวิจัยของ X. F. Song และคณะ [12] ซึ่งทำการวิจัยเพื่อนำเสนอแนวทางทดสอบประสิทธิภาพภายหลังการซ่อมแซมด้วย Super-absorbent Resin (SAR) หนึ่งใน การทดสอบเหล่านั้น คือ การทดสอบการรั่วซึม ด้วยการใช้แรงดัน 0.1 MPa ดันน้ำใส่ตัวอย่าง ซึ่งเป็นคอนกรีตที่เจาะ (Coring) มาจากพื้นที่มีรอยร้าวทะลุ (Through-thickness Crack) และผ่านการซ่อมแซมมาแล้ว โดยเพิ่มความดัน 0.05

MPa ทุก 2 ชั่วโมง จนกระทั่งสังเกตเห็นน้ำซึมบนตัวอย่างอีกด้านหนึ่ง จึงหยุดและบันทึกค่าแรงดันสูงสุดที่ใช้ ได้ผลการทดสอบดังแสดงในภาพที่ 2.14



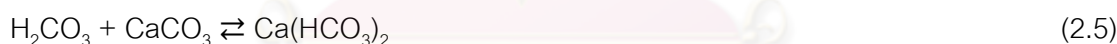
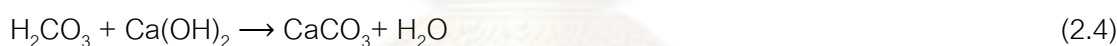
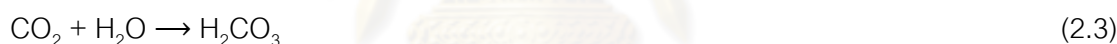
ภาพที่ 2.14 ความกว้างรอยร้าวกับแรงดันสูงสุดที่ไม่เกิดการซึมผ่าน [12]

ในช่วงความกว้างรอยร้าว 0.2 มม. ถึง 2.0 มม. ที่ทดสอบ ตัวอย่างที่ซ่อมแซมด้วย SAR แล้ว สามารถทนน้ำที่มีแรงดัน 0.2 MPa ถึง 0.6 MPa ได้ ขึ้นอยู่กับความกว้างรอยร้าวและสภาพของน้ำที่ใช้ โดยแรงดันที่ทนได้จะมีค่าลดลงเมื่อความกว้างรอยร้าวเพิ่มขึ้น ขณะที่สภาพน้ำที่ใช้ในการทดสอบเรียงจากประสิทธิภาพสูงไปต่ำ คือ น้ำก๊อก (Tap Water) น้ำที่มีสภาพเป็นด่าง น้ำที่มีสภาพเป็นกรด และน้ำเกลือ

งานวิจัยเหล่านี้ชี้ให้เห็นว่า วิธีทดสอบการรั่วซึมของน้ำผ่านรอยร้าวคอนกรีตสามารถดำเนินการได้หลายวิธี ซึ่งการนำมาใช้ดำเนินการวิจัยจำเป็นต้องเลือกวิธีที่สอดคล้องกับวัตถุประสงค์ในการทดสอบหรือนำมาประยุกต์ให้ใช้ได้เหมาะสม

## 2.6 คาร์บอนเนชั่น

โดยปกติ ความเป็นต่างของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) ในซีเมนต์เพสต์ มีค่าประมาณ 12.6 ถึง 13.5 ทำให้เกิดชั้นออกไซด์ของเหล็ก ( $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ ) เกาะติดกับเหล็กเสริมในคอนกรีต ชั้นดังกล่าวเรียก พาสซีวิตีเลเยอร์ พาสซีวิตีเลเยอร์จะทำหน้าที่ป้องกันเหล็กเสริมจากออกซิเจนและน้ำ ซึ่งเป็นสาเหตุการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีต [13] แต่ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ( $\text{CO}_2$ ) ซึ่งเป็นก๊าซที่พบได้ทั่วไป สามารถทำปฏิกิริยากับน้ำ ( $\text{H}_2\text{O}$ ) ได้ผลิตภัณฑ์เป็นกรดคาร์บอนิก ( $\text{H}_2\text{CO}_3$ ) ดังแสดงในสมการที่ 2.3 ซึ่งกรดคาร์บอนิกทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ต่อได้แคลเซียมคาร์บอเนต ( $\text{CaCO}_3$ ) และน้ำเป็นผลิตภัณฑ์ ดังแสดงในสมการที่ 2.4 นอกจากนี้กรดคาร์บอนิกสามารถทำปฏิกิริยากับแคลเซียมคาร์บอเนตได้ด้วย โดยเป็นปฏิกิริยาที่สามารถย้อนกลับได้มีแคลเซียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต ( $\text{Ca(HCO}_3)_2$ ) เป็นผลิตภัณฑ์ ดังแสดงในสมการที่ 2.5 และแคลเซียมไฮโดรเจนคาร์บอเนตนี้เป็นสารอีกหนึ่งตัวที่ทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ได้ และได้แคลเซียมคาร์บอเนตและน้ำเป็นผลิตภัณฑ์ ดังแสดงในสมการที่ 2.6 ปฏิกิริยาเหล่านี้ [14] ส่งผลให้ความเป็นต่างของซีเมนต์เพสต์มีค่าลดลงและลดพาสซีวิตีเลเยอร์เหล็กเสริมจึงเป็นสนิมได้ง่ายขึ้น



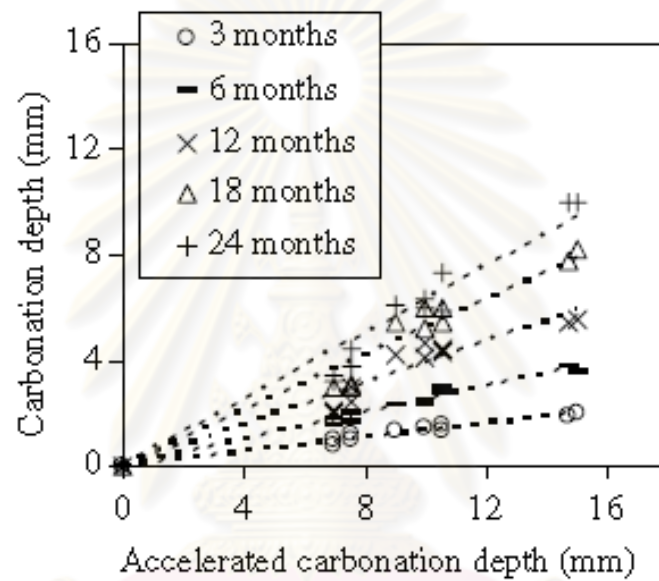
ภายใต้สภาวะคงที่ ระยะเวลาคาร์บอนเนชั่นของคอนกรีตเป็นสัดส่วนโดยตรงกับรากที่ 2 ของเวลา ดังแสดงในสมการที่ 2.7 เมื่อ D คือ ระยะเวลาคาร์บอนเนชั่น (Depth of Carbonation) (มม.) K คือสัมประสิทธิ์คาร์บอนเนชั่น (Carbonation Coefficient) (มม./ปี<sup>0.5</sup>) และ t คือ เวลา (ปี) สำหรับคอนกรีตที่กำลังต่ำ (Low-Strength Concrete) พบว่า ค่า K มีค่ามากกว่า 3-4 มม./ปี<sup>0.5</sup> [13]

$$D = Kt^{0.5} \quad (2.7)$$

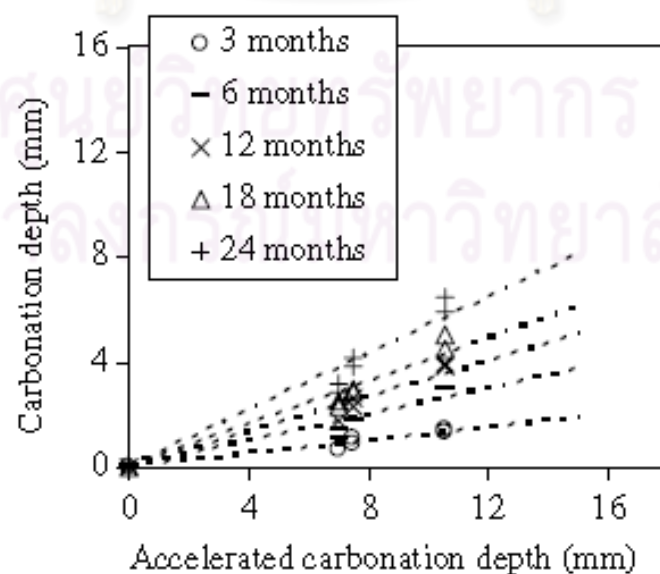
ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มีความเข้มข้นในอากาศปกติประมาณ 0.03% โดยปริมาตร ในเมืองใหญ่ 0.3% และมีความเข้มข้นสูงกว่ในที่ในสภาพแวดล้อมที่มีปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สูง เช่น บริเวณที่มีการจราจรหนาแน่น อุโมงค์ที่มีการเดินรถ เขตอุตสาหกรรม เป็นต้น โดยความ



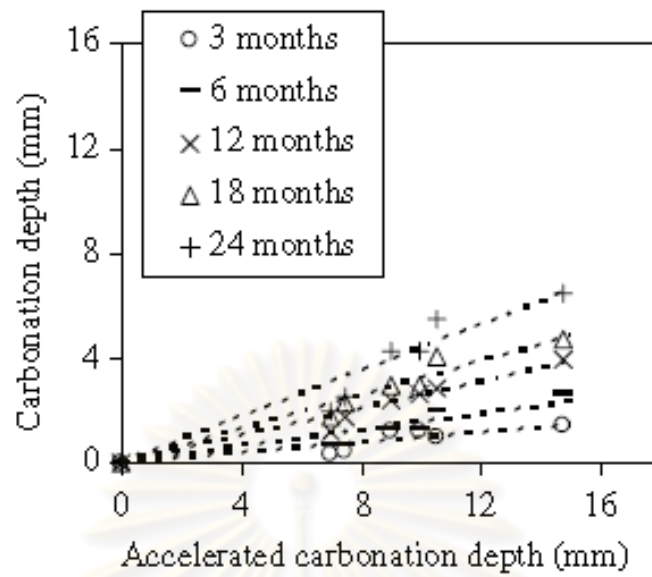
เข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ อุณหภูมิ และความชื้น ล้วนเป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อการเกิดคาร์บอนเนชั่น J. Khunthongkeaw และคณะ [15] ได้ทำการศึกษาวิจัยเพื่อทำนายระยะคาร์บอนเนชั่นของคอนกรีตผสมเถ้าลอย (Fly Ash Concrete) โดยมีส่วนหนึ่งของการวิจัยเป็นการทดสอบระยะคาร์บอนเนชั่นในสภาวะเร่งที่ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เข้มข้น 4% อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส และความชื้นสัมพัทธ์ 55% เทียบกับระยะคาร์บอนเนชั่นในสภาวะแวดล้อมจริง ได้ผลการทดสอบ ดังแสดงในภาพที่ 2.15 ถึงภาพที่ 2.18



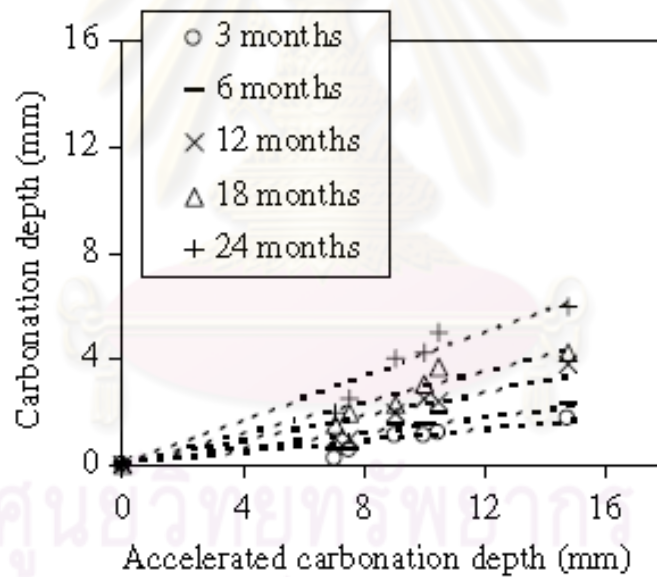
ภาพที่ 2.15 ระยะคาร์บอนเนชั่นในเมืองแบบมีที่กำบัง (Sheltered) กับในสภาวะเร่ง [15]



ภาพที่ 2.16 ระยะคาร์บอนเนชั่นในเมืองแบบไม่มีที่กำบัง (Non-sheltered) กับในสภาวะเร่ง [15]



ภาพที่ 2.17 ระยะคาร์บอนเนชั่นในบริเวณชนบท (Rural) กับในสภาวะเร่ง [15]



ภาพที่ 2.18 ระยะคาร์บอนเนชั่นในบริเวณริมทะเล (Seaside) กับในสภาวะเร่ง [15]

จากผลการทดสอบข้างต้น J. Khunthongkeaw และคณะ พบว่า ระยะคาร์บอนเนชั่นในสภาวะเร่งมีความสัมพันธ์กับระยะคาร์บอนเนชั่นในสภาวะแวดล้อมจริง สำหรับสภาวะแวดล้อมในประเทศไทย ดังแสดงในสมการที่ 2.8 และสมการที่ 2.9

$$D_{n,t} = A D_a t^{0.5} \quad (2.8)$$

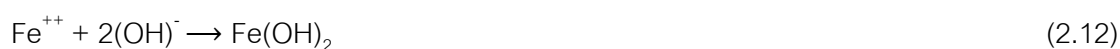
$$A = 0.22C^{0.65}/RH \quad (2.9)$$

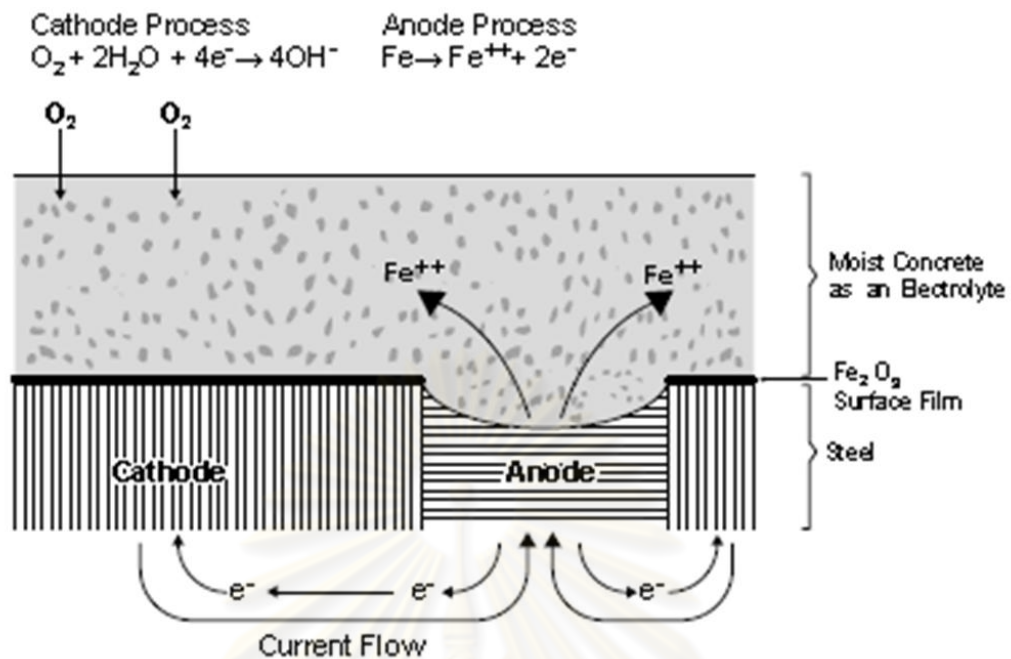
- เมื่อ  $D_{n,t}$  คือ ระยะคาร์บอนเนชั่นในสภาวะแวดล้อมจริง (มม.)  
 $D_a$  คือ ระยะคาร์บอนเนชั่นในสภาวะเร่งดังกล่าว 1 เดือน (มม.)  
 $t$  คือ ระยะเวลาในสภาวะแวดล้อมจริง (เดือน)  
 $A$  คือ ความสัมพันธ์เชิงเส้นที่ได้จากสมการที่ 2.9  
 $C$  คือ ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (ส่วนในล้านส่วน, ppm) และ  
 $RH$  คือ ความชื้นสัมพัทธ์ (%)

งานวิจัยดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า ที่สภาวะเร่งข้างต้นมีความสัมพันธ์กับการเกิดคาร์บอนเนชั่นในสภาพแวดล้อมจริง เหมาะแก่การนำมาใช้เพื่อเร่งการเกิดปฏิกิริยาคาร์บอนเนชั่นในการวิจัย เพื่อแทนการเกิดคาร์บอนเนชั่นในสภาวะธรรมชาติซึ่งใช้ระยะเวลายาวนาน

## 2.7 การแทรกซึมของคลอไรด์

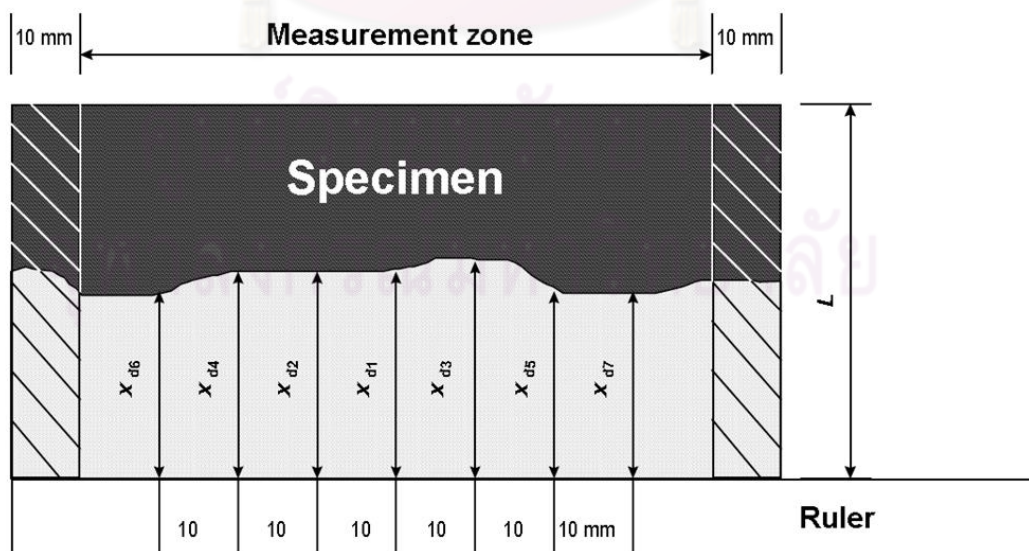
เช่นเดียวกับปฏิกิริยาคาร์บอนเนชั่น คลอไรด์ไอออน ( $Cl^-$ ) ไม่ได้ส่งผลต่อปฏิกิริยาการเกิดสนิมของเหล็กโดยตรง การเกิดสนิมของเหล็กจากคลอไรด์เริ่มต้นจากการที่คลอไรด์อิสระ (Free Chloride) ซึ่งสามารถละลายน้ำได้ เคลื่อนที่ผ่านเนื้อคอนกรีตเข้าไปจนถึงผิวเหล็กเสริม ความต่างศักย์ทางไฟฟ้าเคมี (Electrochemical Potential) จะเกิดขึ้น ส่งผลให้ผิวเหล็กเสริมเกิดพื้นที่แอโนด (Anode) และแคโทด (Cathode) โดยมีน้ำในโพรง (Pore Water) เป็นอิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte) ดังแสดงในภาพที่ 2.19 บริเวณแอโนดอิเล็กโตรดจะเคลื่อนที่ผ่านสารละลายอิเล็กโทรไลต์ไปยังบริเวณแคโทด ทำให้เกิดเฟอรัสไอออน (Ferrous Ion,  $Fe^{++}$ ) ที่แอโนดดังแสดงในสมการที่ 2.10 ขณะที่บริเวณแคโทดอิเล็กโตรดจะรวมตัวกับออกซิเจนและน้ำเป็นไฮดรอกซิลไอออน (Hydroxyl Ion,  $OH^-$ ) ดังแสดงในสมการที่ 2.11 เฟอรัสไอออนและไฮดรอกซิลไอออนจะรวมตัวกันเป็นเฟอรัสไฮดรอกไซด์ (Ferrous Hydroxide,  $Fe(OH)_2$ ) และผลิตภัณฑ์สุดท้ายจะได้เฟอริกไฮดรอกไซด์ (Ferric Hydroxide,  $Fe(OH)_3$ ) หรือสนิมเหล็กดังแสดงในสมการที่ 2.12 และสมการที่ 2.13 ตามลำดับ [16]





ภาพที่ 2.19 การเกิดสนิมเนื่องจากคลอไรด์ [1]

ในการตรวจสอบระยะแทรกซึมของคลอไรด์ NT BUILD 492 [17] ได้ระบุให้ผ่าแยก (Splitting) ตัวอย่างที่ต้องการทดสอบเป็นสองส่วน และพ่นด้วยสารละลายซิลเวอร์ไนเตรต (Silver Nitrate,  $AgNO_3$ ) เข้มข้น 0.1 M ทันที เมื่อเห็นแนวการแทรกซึมของคลอไรด์ชัดเจน จึงทำการวัดระยะทุก 10 มม. โดยเว้นจากขอบตัวอย่างเป็นระยะ 10 มม. ดังแสดงในภาพที่ 2.20



ภาพที่ 2.20 การวัดระยะแทรกซึมของคลอไรด์ [15]

แนวการแทรกซึมของคลอไรด์ที่สังเกตเห็นนั้นเกิดจากปฏิกิริยาระหว่างซิลเวอร์ไนเตรตกับคลอไรด์ไอออน ได้ซิลเวอร์คลอไรด์ (Silver Chloride, AgCl) ซึ่งเป็นตะกอนสีขาวเป็นผลิตภัณฑ์ ดังแสดงในสมการที่ 2.12 ขณะที่ตัวสารละลายซิลเวอร์ไนเตรตเอง เมื่อโดนแสงจะมีสีคล้ำ จึงสามารถใช้ซิลเวอร์ไนเตรตตรวจสอบบริเวณที่คลอไรด์แทรกซึมเข้าไปในเนื้อคอนกรีตได้



จากเอกสารของ D. Riss [18] ซึ่งใช้ซิลเวอร์ไนเตรต 1.7 กรัม ละลายในน้ำ 98 มล. หรือความเข้มข้น 0.1 M เป็นสารละลายมาตรฐาน เพื่อตรวจหาคลอไรด์ในตัวอย่าง D. Riss เริ่มจากการเตรียมนำสารตัวอย่าง 10 มล. ถึง 30 มล. ใส่ในหลอดทดลอง และหยดสารละลายมาตรฐานซิลเวอร์ไนเตรตลงไปสองหยด จากนั้นนำไปส่องด้วยแสงโดยมีฉากหลังสีดำ หากความเข้มข้นของคลอไรด์ที่ทดสอบมากกว่า 100 ส่วนในล้านส่วน (Parts per Million, ppm) จะสังเกตเห็นเริ่มเห็นสารละลายขุ่นคล้ายเมฆ (Cloudy) หากคลอไรด์เข้มข้นมากกว่า 250 ppm จะสังเกตเห็นชัดเจน

### บทที่ 3 วัสดุในงานวิจัย

วัสดุที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีหลายชนิด เช่น ซีเมนต์ ทราช หิน แก้วลอย วัสดุซ่อมประสาน ซีเมนต์ เป็นต้น วัสดุเหล่านี้แบ่งได้เป็น 2 กลุ่มหลัก คือ คอนกรีต และวัสดุซ่อม มีรายละเอียดดังนี้

#### 3.1 คอนกรีต

คอนกรีตเป็นวัสดุที่ใช้เป็นตัวแทนของโครงสร้างคอนกรีตในงานวิจัย มีทั้งหมด 8 สัดส่วนผสม สัดส่วนผสมที่ 1 ถึง 4 เป็นคอนกรีตที่ผสมภายในห้องปฏิบัติการ และคอนกรีตสัดส่วนผสมที่ 5-8 เป็นคอนกรีตผสมเสร็จ โดยแต่ละสัดส่วนผสมมีการควบคุมปริมาณมวลรวม ซึ่งพิจารณาว่าเป็นสารเจือยให้มีค่าใกล้เคียงกัน ดังแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 สัดส่วนผสมคอนกรีตในการวิจัย (กก./ลบ.ม.ของคอนกรีต)

ที่	รายละเอียด	w/b	ซีเมนต์	แก้ว ลอย	น้ำ	มวล รวม ละเอียด	มวล รวม หยาบ	สาร ผสม เพิ่ม
1	คอนกรีตทั่วไป	0.50	367	-	184	703	1126	-
2	คอนกรีตกำลังสูง	0.35	450	-	158	703	1126	2.7 <sup>1</sup>
3	คอนกรีตทั่วไป ผสมปอชโซลาน	0.50	257	110	184	703	1126	-
4	คอนกรีตกำลังสูง ผสมปอชโซลาน	0.35	315	135	158	703	1126	2.7 <sup>1</sup>
5	คอนกรีตผสมเสร็จทั่วไป	0.45	400	-	180	815	1035	1.2 <sup>2</sup>
6	คอนกรีตผสมเสร็จกำลังสูง	0.28	500	-	140	810	1065	7.5 <sup>3</sup>
7	คอนกรีตผสมเสร็จทั่วไป ผสมปอชโซลาน	0.36	315	135	160	800	1035	2.3 <sup>2</sup>
8	คอนกรีตผสมเสร็จกำลังสูง ผสมปอชโซลาน	0.21	410	170	120	780	1050	8.1 <sup>3</sup>

<sup>1</sup>สารลดน้ำอย่างมาก    <sup>2</sup>สารลดน้ำและยืดเวลาก่อตัว    <sup>3</sup>สารลดน้ำอย่างมากและยืดเวลาก่อตัว

คอนกรีตแต่ละสัดส่วนผสมทดสอบค่ากำลังอัดตามมาตรฐาน ASTM C39 และค่าการยุบตัว (Slump) ตามมาตรฐาน ASTM C143 ได้ผลทดสอบ ดังแสดงในตารางที่ 3.2 ต่อไปนี้

ตารางที่ 3.2 กำลังอัดและความสามารถทำงานได้ของคอนกรีตในการวิจัย

สัดส่วนผสมที่	กำลังอัดเฉลี่ยที่ 28 วัน (กก./ตร.ซม.)	ค่าการยุบตัวเฉลี่ย (ซม.)
1	410	7.0
2	550	4.7
3	330	8.8
4	520	7.1
5	400	7.5 <sup>1</sup>
6	650	17.5 <sup>1</sup>
7	380	7.5 <sup>1</sup>
8	670	17.5 <sup>1</sup>

<sup>1</sup>ข้อมูลจากบริษัทคอนกรีตผสมเสร็จ



ภาพที่ 3.1 การทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตในการวิจัย



ภาพที่ 3.2 การทดสอบค่าการยุบตัวของคอนกรีตในการวิจัย

สำหรับวัสดุที่เป็นส่วนประกอบของคอนกรีต ได้แก่ ซีเมนต์ เถ้าลอย น้ำ มวลรวมละเอียด และมวลรวมหยาบ มีรายละเอียดดังนี้

- 3.1.1 ซีเมนต์ ใช้ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ทดสอบความถ่วงจำเพาะตามมาตรฐาน ASTM C188 ได้ 3.13 มีระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นและระยะเวลาการก่อตัวสุดท้ายด้วยไวกแคท (Vicat) ตามมาตรฐาน ASTM C 191 ที่ 90 นาที และ 120 นาที ตามลำดับ
- 3.1.2 น้ำ น้ำที่ใช้เป็นส่วนผสมของคอนกรีตในการวิจัย คือ น้ำประปา
- 3.1.3 เถ้าลอย เป็นเถ้าลอยจากการไฟฟ้าฝ่ายผลิต แม่เมาะ มีองค์ประกอบทางเคมีและคุณสมบัติต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 3.3 และตารางที่ 3.4 ตามลำดับ และการกระจายตัวของอนุภาคเถ้าลอย ดังแสดงในภาพที่ 3.4

ตารางที่ 3.3 ส่วนประกอบของเถ้าลอยในการวิจัย

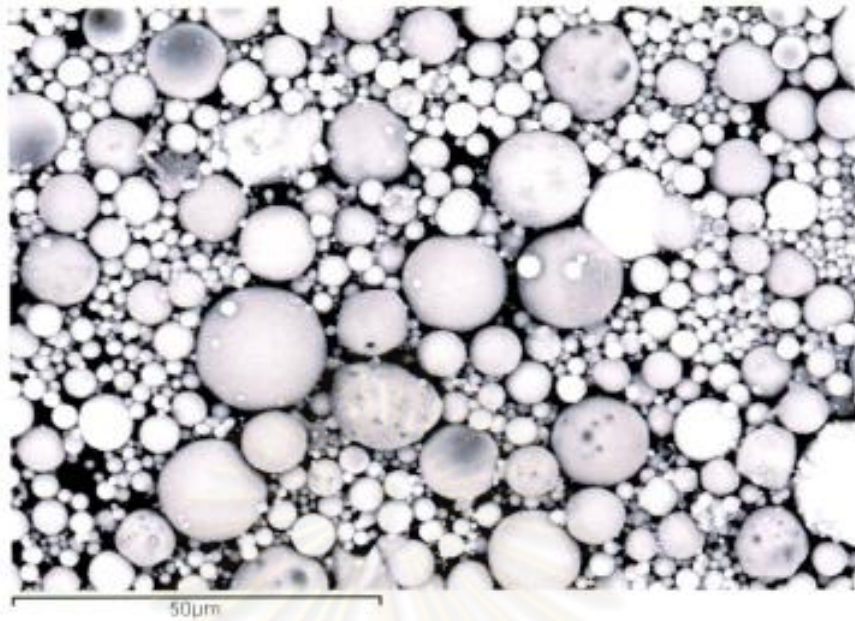
Method of Analysis: X – Ray Fluorescence / Wet Chemical

Silicon Dioxide	(SiO <sub>2</sub> )	%	41.68
Aluminum Oxide	(Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	%	24.20
Iron Oxide	(Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	%	13.24
Calcium Oxide	(CaO)	%	11.13
Magnesium Oxide	(MgO)	%	2.23
Sulfur Trioxide	(SO <sub>3</sub> )	%	2.83
Loss on Ignition	(LOI)	%	0.38
Sodium Oxide	(Na <sub>2</sub> O)	%	0.74
Potassium Oxide	(K <sub>2</sub> O)	%	2.58
Free CaO		%	0.71
Moisture		%	0.16

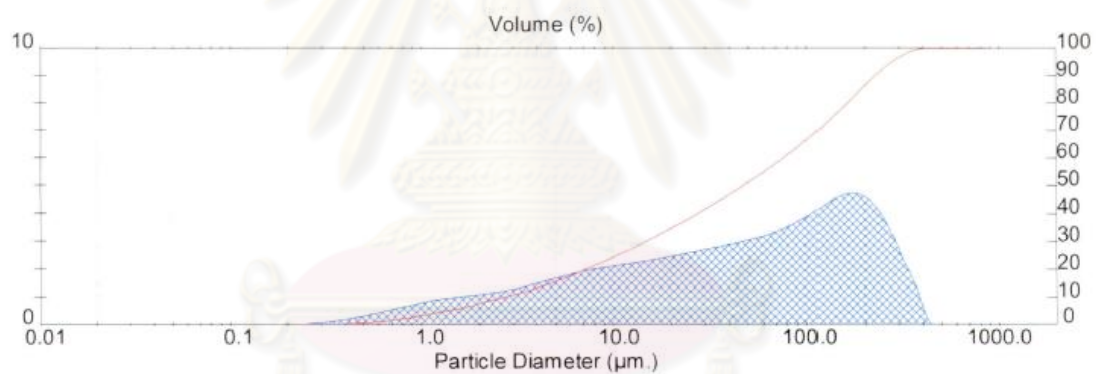


ตารางที่ 3.4 คุณสมบัติของเถ้าลอยในการวิจัย

Standard Specification for Sampling and Testing Fly Ash or Natural Pozzolans Using in Portland – Cement Concrete According to ASTM C 311 - 02			
Item		Control Mix	Test Mix
Fineness of Hydraulic Cement by Air Permeability Apparatus (ASTM C 204 – 00)	cm <sup>2</sup> /g	-	3290
Density (ASTM C 188 – 95)	g/cm <sup>3</sup>	-	2.07
Fineness: Wet Sieve on a 45 μm; No. 325 (ASTM C 311 – 02 and ASTM C 430 – 96)	%	-	45.11
Soundness (ASTM C 311 – 02 and ASTM C 151 – 00)	%	-0.01	0.00
Strength Activity Index (ASTM C 311 – 02 and ASTM C 109/C 109M – 02)			
Flow	%	112	112
Water Required for Control Mix	mL	242	-
Water Required for Test Mix	mL	-	238
Water Required in Percent of Control		100	98
7 Days Compressive Strength of Control Mix	MPa	31.1	-
7 Days Compressive Strength of Test Mix	MPa	-	22.9
Strength Activity Index at 7 Days	%	100	73.6
28 Days Compressive Strength of Control Mix	MPa	41.5	-
28 Days Compressive Strength of Test Mix	MPa	-	34.0
Strength Activity Index at 28 Days	%	100	81.9

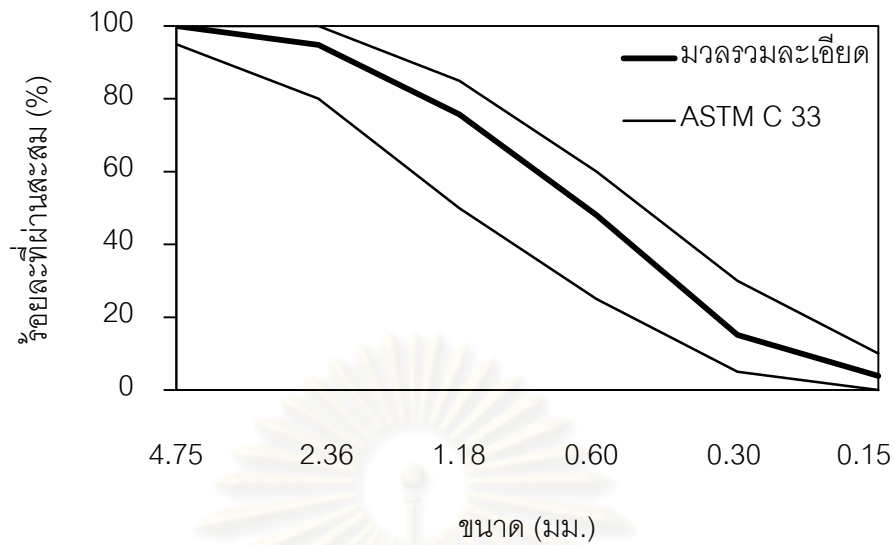


ภาพที่ 3.3 แก้วลอยที่ใช้ในการวิจัย



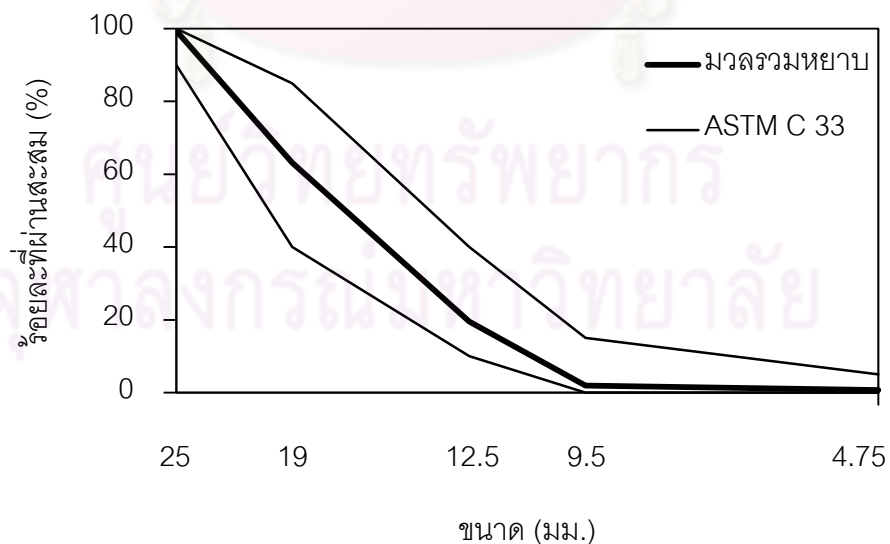
ภาพที่ 3.4 การกระจายตัวของขนาดแก้วลอยในการวิจัย

- 3.1.4 มวลรวมละเอียด ใช้ทรายแม่น้ำเป็นมวลรวมละเอียด มวลรวมละเอียดที่นำมาใช้ จะผ่านการร่อนเอากรวดออก ล้างทำความสะอาด และผึ่งแดดให้แห้งก่อนการใช้งาน โดยมีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.60 ความชื้น 0.29% และค่าการดูดซึมน้ำ 0.83% ตามมาตรฐาน ASTM C 128 และมีขนาดคละตามมาตรฐาน ASTM C 33 ดังแสดงในภาพที่ 3.5



ภาพที่ 3.5 ขนาดคละของมวลรวมละเอียดในการวิจัย

3.1.5 มวลรวมหยาบ ใช้หินปูน (Limestone) ขนาดโตสุด 19 มม. (3/4") เป็นมวลรวมหยาบ ซึ่งผ่านการล้างทำความสะอาดและผึ่งแดดให้แห้งก่อนการใช้งาน โดยมีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.74 ความชื้น 0.29% และค่าการดูดซึมน้ำ 0.32% ตามมาตรฐาน ASTM C 127 และมีขนาดคละตามมาตรฐาน ASTM C 33 ดังแสดงในภาพที่ 3.6



ภาพที่ 3.6 ขนาดคละของมวลรวมหยาบในการวิจัย

### 3.2 วัสดุซ่อมประสานซีเมนต์

วัสดุซ่อมประสานซีเมนต์ในงานวิจัยนี้ใช้วัสดุซ่อมประสานซีเมนต์ที่พบในท้องตลาด 3 ชนิด ซึ่งอยู่ในรูปของปูนทรายซ่อมประสานซีเมนต์ (Cementitious Repair Mortar) ที่มีการผสมมาให้เรียบร้อยแล้ว สามารถนำมาใช้งานได้โดยการเติมน้ำตามอัตราส่วนที่ระบุ โดยก่อนการเคลือบผิวได้ทำการปิดฝุ่นผงที่ผิวด้วยแปรงและล้างด้วยน้ำสะอาด ดังข้อกำหนดงานชั้นสามของการเตรียมผิวสำหรับงานเคลือบผิวคอนกรีตในหัวข้อที่ 2.3 สำหรับวัสดุซ่อมประสานซีเมนต์แต่ละชนิดในงานวิจัยนี้ มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

- 3.2.1 วัสดุซ่อมประสานซีเมนต์ ก. เป็นวัสดุซ่อมสำหรับงานกันซึม ป้องกันและซ่อมแซมคอนกรีตด้วยการทำปฏิกิริยากับสารในคอนกรีต ก่อให้เกิดผลึกที่ป็นน้ำในโพรงคอนกรีต มีองค์ประกอบ คือ ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ดินต่าง ทรายคัดเกรด และแคลเซียมอลูมิเนต การใช้งานใช้วัสดุซ่อม ก. 0.7 กก. ต่อพื้นที่ทำงาน 1 ตร.ม. มาผสมกับน้ำในอัตราส่วน วัสดุซ่อม ก. 5 ส่วนต่อน้ำ 2 ส่วน โดยปริมาตร [19, 20]



ภาพที่ 3.7 วัสดุซ่อมประสานซีเมนต์ ก.

- 3.2.2 วัสดุซ่อมประสานซีเมนต์ ข. ใช้ป้องกันการรั่วซึมของน้ำโดยการสร้างผลึกในรูคานาปีลาไรและช่องว่างในคอนกรีต มีส่วนประกอบของซีเมนต์ มวลรวมซิลิกา (Silica Aggregate) และสารเคมีกระตุ้นความชื้น (Moisture Activated Chemicals) การใช้งานใช้วัสดุซ่อม ข. 1.25 กก. ต่อพื้นที่ทำงาน 1 ตร.ม. มาผสมกับน้ำในอัตราส่วนวัสดุซ่อม ข. 25 ต่อน้ำ 7.5 โดยน้ำหนัก และภายหลังการเคลือบผิว 4 ชม. ให้เคลือบผิวชั้นที่สองทับอีกครั้ง [21, 22]



ภาพที่ 3.8 วัสดุซ่อมประสานซีเมนต์ ข.

- 3.2.3 วัสดุซ่อมประสานซีเมนต์ ค. เป็นปูนทรายผสมเสร็จสำหรับงานฉาบผนังอิฐมอญหรืออิฐบล็อกทั่วไป ใช้ได้ทั้งภายในและภายนอกอาคาร และช่วยลดการแตกร้าว ส่วนประกอบ ได้แก่ ซีเมนต์ หินปูนบด ทรายคัดขนาด สารเพิ่มความชุ่มน้ำ สารเพิ่มฟองอากาศ สารเพิ่มแรงยึดเกาะ และสารเพิ่มระยะเวลาการก่อตัว ในงานวิจัยนี้ นำวัสดุซ่อม ค. มาใช้เป็นวัสดุซ่อมด้วยวิธีเคลือบผิว โดยใช้วัสดุซ่อม ค. 1.95 กก. ต่อพื้นที่ทำงาน 1 ตร.ม. มาผสมกับน้ำในอัตราส่วน วัสดุซ่อม ค. 50 ต่อ น้ำ 10.5 โดยน้ำหนัก [23, 24]



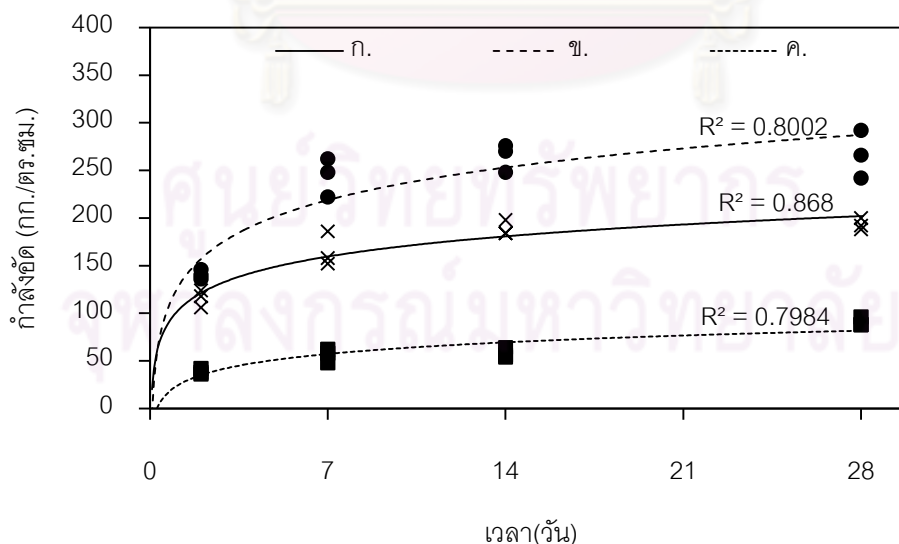
ภาพที่ 3.9 วัสดุซ่อมประสานซีเมนต์ ค.

ภายหลังการเคลือบผิว 1 วัน ทำการบ่มวัสดุซ่อมประสานซีเมนต์โดยพ่นด้วยละอองน้ำวันละ 2 ครั้ง แต่แต่ละครั้งห่างกันอย่างน้อย 6 ชม. จนกระทั่งวัสดุซ่อมประสานซีเมนต์มีอายุครบ 7 วัน ยกเว้นกรณีที่มีการทดสอบ ตัวอย่างทดสอบจะถูกปล่อยให้แห้งอย่างน้อย 24 ชม. ก่อนการทดสอบ

วัสดุซ่อมประสานซีเมนต์ทั้งสามชนิดทดสอบกำลังอัดตามมาตรฐาน ASTM C109 ได้ผลการทดสอบดังแสดงในภาพที่ 1.1 ซึ่งพบว่า ลักษณะการพัฒนากำลังของวัสดุซ่อมประสานซีเมนต์ทั้งสามชนิดคล้ายคลึงกันและคล้ายกับปูนทรายหรือคอนกรีตทั่วไป คือ มีการพัฒนากำลังที่รวดเร็วในช่วงอายุต้นตั้งแต่วินาทีแรกเริ่มผสมถึงอายุ 7 วัน โดยเฉพาะในช่วง 3 วันแรก วัสดุซ่อมประสานซีเมนต์สามารถพัฒนากำลังได้ถึงครึ่งหนึ่งของกำลังที่อายุ 28 วัน อย่างไรก็ตาม การพัฒนากำลังจะลดลงเรื่อยๆ ตามอายุของตัวอย่าง เมื่อวัสดุซ่อมประสานซีเมนต์มีอายุ 28 วัน วัสดุซ่อม ก. มีกำลังอัดเฉลี่ย 190 กก./ตร.ซม. วัสดุซ่อม ข. มีกำลังอัดเฉลี่ย 270 กก./ตร.ซม. และวัสดุซ่อม ค. มีกำลังอัดเฉลี่ย 90 กก./ตร.ซม.



ภาพที่ 3.10 การทดสอบกำลังอัดของวัสดุซ่อมประสานซีเมนต์ในการวิจัย



ภาพที่ 3.11 การพัฒนากำลังอัดของวัสดุซ่อมประสานซีเมนต์ในการวิจัย

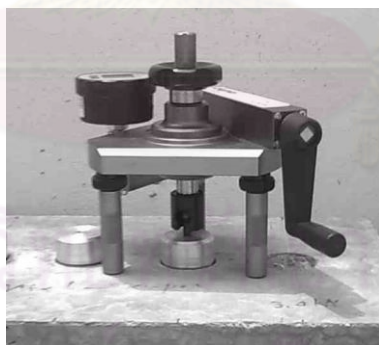
## บทที่ 4

### วิธีดำเนินการวิจัย

วิธีดำเนินการวิจัยแบ่งเป็น 4 ส่วน ตามวิธีการทดสอบในแนวทางดำเนินการวิจัย ได้แก่ การยึดเกาะ การรั่วซึมของน้ำ ความต้านทานคาร์บอนเนชั่น และความต้านทานคลอไรด์ แต่ละส่วนมีรายละเอียด ดังนี้

#### 4.1 การยึดเกาะ

การยึดเกาะระหว่างวัสดุซ่อมประสานซีเมนต์กับคอนกรีตเดิมจัดอยู่ในการทดสอบด้านกำลัง เนื่องจากวัสดุซ่อมประสานซีเมนต์มีลักษณะเปราะและต้องการระยะเวลาในการพัฒนา กำลังเช่นเดียวกับซีเมนต์ ภายหลังจากการซ่อมแซมจึงพบปัญหาการหลุดร่อนของวัสดุซ่อมประสานซีเมนต์บ่อยครั้ง มาตรฐาน ASTM ได้นำเสนอวิธีการทดสอบการยึดเกาะ คือ ASTM C1583 ซึ่งทดสอบการกำลังยึดเกาะระหว่างวัสดุเคลือบผิวหรือวัสดุเททับ (Overlay) กับวัสดุเดิมโดยการหาล้างพูลออฟ (Pull-off Strength) เครื่องมือทดสอบกำลังยึดเกาะตาม ASTM C1583 แบบพกพา ดังแสดงในภาพที่ 4.1 จึงถูกนำมาใช้ในการวิจัยนี้เพื่อเปรียบเทียบการยึดเกาะภายหลังจากซ่อมแซม



ภาพที่ 4.1 เครื่องมือทดสอบกำลังยึดเกาะแบบพกพา

การดำเนินการวิจัยเริ่มจากการนำตัวอย่างคอนกรีตสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่ 1 ถึงสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่ 4 ดังแสดงในตารางที่ 3.1 มาหล่อเป็นคอนกรีตทรงสี่เหลี่ยม ขนาด 30 x 60 x 10 ซม. หลังถอดแบบที่ 24 ชั่วโมง บ่มตัวอย่างด้วยการพันพลาสติกจนกระทั่งตัวอย่างอายุ 28 วัน เมื่ออายุครบ 91 วัน จึงทำการเคลือบผิวตัวอย่างด้วยวัสดุซ่อมประสานซีเมนต์ทั้งสามชนิด ดังแสดงในตารางที่ 4.1 และ บ่มวัสดุซ่อมด้วยการพ่นละอองน้ำดังที่กล่าวในหัวข้อ 3.2 เมื่อวัสดุซ่อมอายุครบ 3 วัน 7 วัน 14 วัน

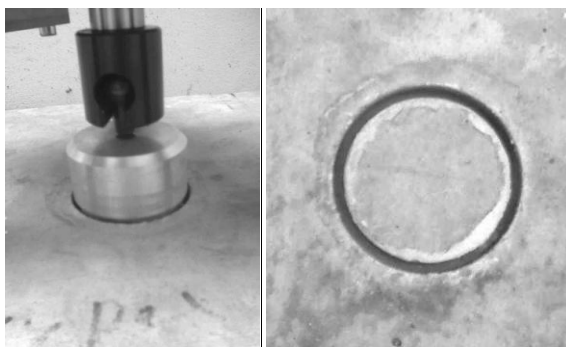
และ 28 วัน จึงทำการทดสอบกำลังยึดเกาะ ดังนั้นกรณีที่มีการทดสอบกำลังยึดเกาะที่อายุวัสดุซ่อม 3 วัน และ 7 วัน ตัวอย่างทดสอบจะถูกปล่อยให้แห้งอย่างน้อย 24 ชม. ก่อนการทดสอบ

ตารางที่ 4.1 ตัวอย่างสำหรับการทดสอบการยึดเกาะ

ตัวอย่างที่	สัดส่วนผสมคอนกรีตที่ใช้	วัสดุซ่อมประสานซีเมนต์ที่ใช้เคลือบผิว
1	1	ก.
2	1	ข.
3	1	ค.
4	2	ก.
5	2	ข.
6	2	ค.
7	3	ก.
8	3	ข.
9	3	ค.
10	4	ก.
11	4	ข.
12	4	ค.

ในส่วนของรายละเอียดการทดสอบกำลังยึดเกาะนั้น มีการปรับเปลี่ยนวิธีการทดสอบจากมาตรฐาน ASTM C1583 ดังแสดงในภาพที่ 4.2 เล็กน้อย คือ ไม่เซาะร่อง (Partial Coring) รอบบริเวณที่ทดสอบ ดังแสดงในภาพที่ 4.3 เนื่องจากมีการทดสอบที่อายุวัสดุซ่อมน้อย เช่น ที่ 3 วัน ซึ่งวัสดุซ่อมยังมีกำลังยึดเกาะที่ต่ำ ค่าที่วัดจากการทดสอบตามมาตรฐานจะใกล้เคียงกับค่าต่ำสุดของเครื่องมือทดสอบ อาจเป็นเหตุให้เกิดความคลาดเคลื่อนขึ้นในการทดสอบได้ ดังนั้นจึงไม่ทำการเซาะร่องในทุกตัวอย่าง เพื่อช่วยเพิ่มกำลังยึดเกาะให้แก่วัสดุซ่อม อีกทั้งสภาพที่ไม่ได้ทำการเซาะร่องยังเป็นสภาพเดียวกับการใช้งานจริงอีกด้วย





ภาพที่ 4.2 การทดสอบกำลังยึดเกาะตามมาตรฐาน ASTM C1583



ภาพที่ 4.3 การทดสอบกำลังยึดเกาะดัดแปลงจากมาตรฐาน ASTM C1583 ในการวิจัย

การทดสอบกำลังยึดเกาะในงานวิจัยนี้ ใช้หัวทดสอบขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 5 ซม. ยึดติดกับบริเวณที่ทดสอบด้วยอีพอกซีก่อนการทดสอบประมาณ 24 ชั่วโมง เมื่อเริ่มการทดสอบ ให้ตั้งค่าเริ่มต้นบนส่วนแสดงผลเป็นศูนย์ ดังแสดงในภาพที่ 4.4 จากนั้นจึงเริ่มหมุนคันทวนด้วยอัตราสม่ำเสมอจนกระทั่งเกิดการวิบัติ บันทึกค่าน้ำหนักกระทำสูงสุดและลักษณะการวิบัติ



ภาพที่ 4.4 การตั้งค่าเริ่มต้นเครื่องทดสอบกำลังยึดเกาะ

กำลังยึดเกาะของวัสดุเชื่อมกับคอนกรีตเดิม ( $f_a$ ) ในการทดสอบแบบดัดแปลงนี้ สามารถคำนวณได้จากน้ำหนักกระทำ ( $P$ ) ต่อพื้นที่ ( $A$ ) ดังแสดงในสมการที่ 4.1

$$f_a = P/A \quad (4.1)$$

ในการทดสอบพูลออป 1 ตัวอย่าง ทดสอบอย่างน้อย 4 จุด โดยจุดทดสอบแต่ละจุดกึ่งกลางของจุดทดสอบต้องห่างจากจุดกึ่งกลางของจุดทดสอบถัดไปอย่างน้อย 2 เท่าของเส้นผ่าศูนย์กลางหัวทดสอบ คือ 10 ซม.

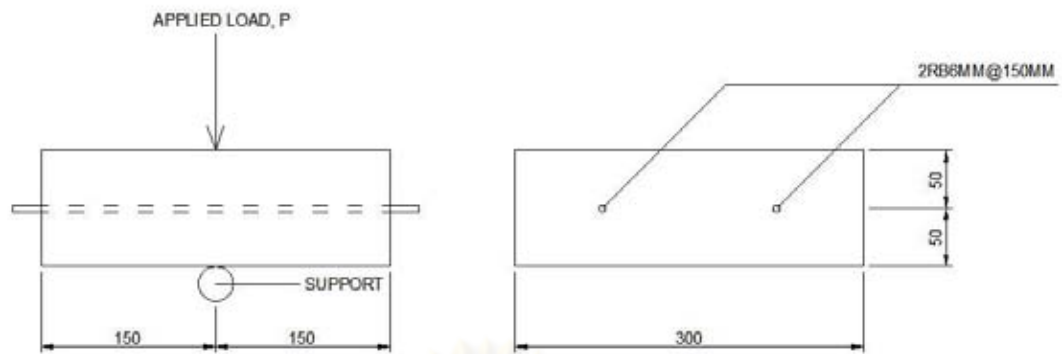
#### 4.2 การรั่วซึมของน้ำ

การทดสอบการรั่วซึมของน้ำผ่านรอยร้าวคอนกรีตใช้อัตราการรั่วซึมของน้ำ คือ ปริมาณน้ำต่อหน่วยเวลาในการเปรียบเทียบประสิทธิภาพ โดยใช้คอนกรีตสัดส่วนผสมที่ 1 ดังแสดงในตารางที่ 3.1 มาหล่อเป็นตัวอย่างทรงสี่เหลี่ยมขนาด 30 x 30 x 10 ซม. มีเหล็กกลม 6 มม. 2 เส้นที่ระยะ 7.5 ซม. และ 22.5 ซม. ของหน้าตัด ณ ตำแหน่งกึ่งกลางความสูง เพื่อป้องกันไม่ให้ตัวอย่างแยกเป็นออกจากกันขณะสร้างรอยร้าว ดังแสดงในภาพที่ 4.5



ภาพที่ 4.5 ตัวอย่างทดสอบการรั่วซึม

หลังถอดแบบที่ 24 ชั่วโมง บ่มตัวอย่างด้วยการพันพลาสติกจนกระทั่งตัวอย่างอายุ 28 วัน จากนั้นนำตัวอย่างมาสร้างรอยร้าวด้วยวิธีผ่าแยก ดังแสดงในภาพที่ 4.6 จากนั้นทิ้งไว้ให้รอยร้าวบนตัวอย่างปิดกลับอย่างน้อย 7 วัน จึงวัดความกว้างรอยร้าวด้วยกล้องไมโครสโคป ดังแสดงในภาพที่ 4.7 โดยที่บริเวณผิวตัวอย่างวัดทุกระยะ 10 ซม. และบริเวณที่ติดตั้งท่อ น้ำ ดังแสดงในภาพที่ 4.8 วัดทุกระยะ 2 ซม.

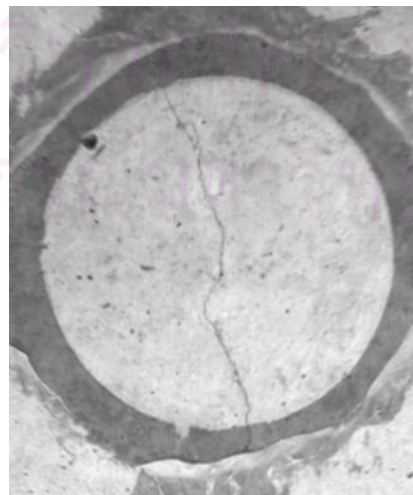


NOTE: ALL DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS.

ภาพที่ 4.6 การสร้างรอยร้าวบนตัวอย่างทดสอบการรั่วซึมด้วยวิธีผ่าแยก



ภาพที่ 4.7 กล้องไมโครสโคป



ภาพที่ 4.8 รอยร้าวบนตัวอย่างบริเวณที่ติดตั้งท่อน้ำ

เมื่อตัวอย่างอายุ 91 วัน เคลือบผิวตัวอย่างด้วยวัสดุซ่อมประสานซีเมนต์ทั้งสามชนิด ดังแสดงในภาพที่ 4.9 และบ่มวัสดุซ่อมตามที่กล่าวถึงในหัวข้อ 3.2 จนกระทั่งวัสดุซ่อมที่เคลือบผิวอยู่ มีอายุ 25 วัน จึงทำการติดตั้งท่อน้ำขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 10 ซม. เข้ากับชิ้นตัวอย่างด้วยอีพอกซี ดังแสดงในภาพที่ 4.10 และเมื่อวัสดุซ่อมมีอายุครบ 28 วัน จึงนำไปทดสอบการรั่วซึม ซึ่งมีตัวอย่าง ในการทดสอบการรั่วซึมทั้งหมด ดังแสดงในตารางที่ 4.2



ภาพที่ 4.9 ตัวอย่างทดสอบการรั่วซึมของน้ำที่ผ่านการซ่อมแซมด้วยวัสดุซ่อมประสานซีเมนต์ ก.

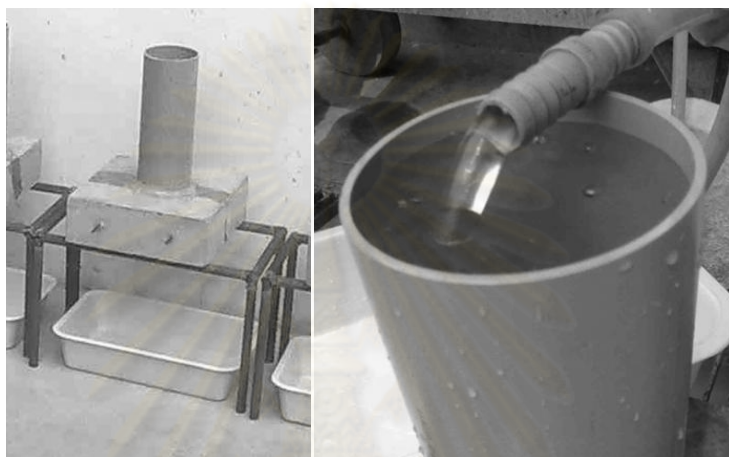


ภาพที่ 4.10 การติดตั้งท่อน้ำเข้ากับชิ้นตัวอย่างด้วยอีพอกซี

ตารางที่ 4.2 ตัวอย่างสำหรับการทดสอบการรั่วซึมของน้ำผ่านรอยร้าวคอนกรีต

ตัวอย่างชุดที่	วัสดุซ่อมประสานซีเมนต์ที่ใช้	จำนวนตัวอย่าง
1	ไม่มีการซ่อมแซม	6
2	ก.	6
3	ข.	6
4	ค.	6

ก่อนเริ่มการทดสอบ เติมน้ำลงในท่อและทำการควบคุมระดับน้ำให้อยู่ในระดับ  $30 \pm 1$  ซม. เมื่อระดับน้ำคงที่ เริ่มการทดสอบโดยนำภาชนะรองรับน้ำมารองไว้ใต้ตัวอย่าง และเริ่มจับเวลา ดังแสดงในภาพที่ 4.11 เมื่อระดับน้ำในภาชนะรองรับน้ำสูงประมาณครึ่งหนึ่งของภาชนะรองรับน้ำ จึงบันทึกเวลาและน้ำหนักของน้ำในภาชนะรองรับน้ำ และดำเนินการทดสอบเช่นเดิมซ้ำอีกสองครั้ง เพื่อนำผลการทดสอบที่ได้มาวิเคราะห์ผลต่อไป



ภาพที่ 4.11 การทดสอบการรั่วซึมของน้ำผ่านรอยร้าวคอนกรีต

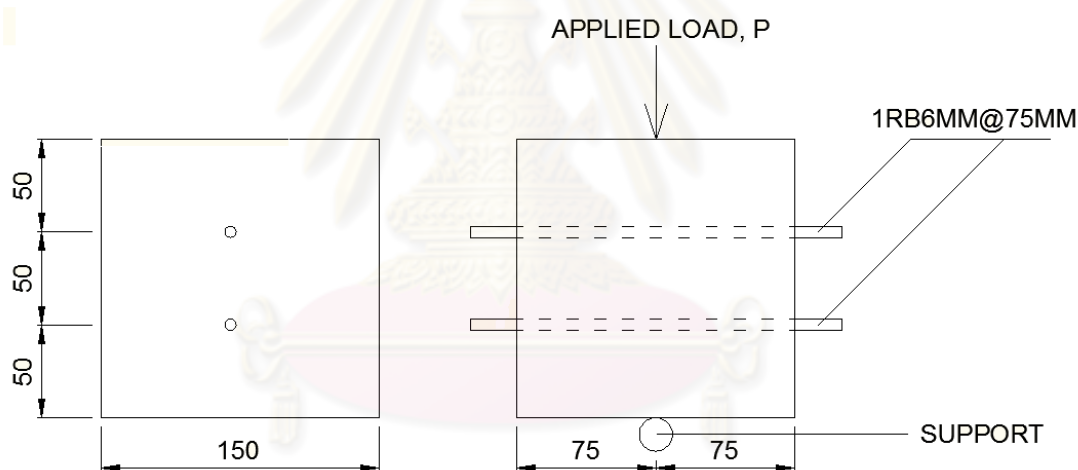
จากการทดสอบการรั่วซึมในงานวิจัยนี้ อัตราการไหลของน้ำผ่านรอยร้าวคอนกรีต ( $R$ , ลบ. ซม./วินาที) จึงสามารถหาได้จาก น้ำหนักน้ำ ( $W$ , กรัม) ความหนาแน่นของน้ำ ( $D_w$ , กรัม/ลบ. ซม.) และเวลา ( $t$ , วินาที) ดังแสดงในสมการที่ 4.2 สำหรับน้ำที่รั่วซึมลงสู่ภาชนะรองรับน้ำและมีการระเหยไปนั้น ดำเนินการโดยนำภาชนะรองรับน้ำขนาดและลักษณะเดียวกับที่ทดสอบมาเติมน้ำสูงครึ่งหนึ่งของภาชนะรองรับน้ำ วางไว้บริเวณที่ทดสอบการรั่วซึม น้ำในภาชนะรองรับน้ำจะเกิดการระเหย จึงทราบปริมาณน้ำที่ระเหยในระหว่างการทดสอบการรั่วซึมได้จากการวัดน้ำหนักของน้ำในภาชนะกับเวลา

$$R = W/(D_w \cdot t) \quad (4.2)$$

#### 4.3 ความต้านทานคาร์บอนเนชั่น

หนึ่งในการทดสอบเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการซ่อมแซมรอยร้าวด้านความคงทนในการวิจัยนี้ คือ การทดสอบความต้านทานคาร์บอนเนชั่น ซึ่งในการวิจัยนี้พิจารณาจากระยะคาร์บอนเนชั่น เพื่อให้คอนกรีตในตัวอย่างทดสอบทุกชิ้นมีความสม่ำเสมอ คอนกรีตผสมเสร็จจึงถูกนำมาใช้งาน โดยใช้สัดส่วนผสมที่ 5 ดังแสดงในตารางที่ 3.1 ถูกนำมาใช้หล่อเป็นตัวอย่างคอนกรีตทรงลูกบาศก์ขนาด 15x15x15 ซม. ที่มีเหล็กเสริมเป็นเหล็กกลมเส้นผ่าศูนย์กลาง 6 มม. 2 เส้น ที่ระยะ 5 ซม. และ 10 ซม. ของความสูง เพื่อป้องกันไม่ให้ตัวอย่างแยกออกจากกันเมื่อทำการสร้างรอยร้าวบนตัวอย่าง และภายหลังจากถอดแบบหล่อที่ 24 ชั่วโมง ทำการบ่มตัวอย่างด้วยการห่อพลาสติกจนกระทั่งตัวอย่างมีอายุ 7 วัน

ในส่วนของการสร้างรอยร้าวบนตัวอย่างคอนกรีต ใช้วิธีทางกายภาพ คือ การผ่าแยก ดังแสดงในภาพที่ 4.12 และได้ตัวอย่างที่มีรอยร้าว ดังแสดงในภาพที่ 4.13



NOTE: ALL DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS.

ภาพที่ 4.12 การสร้างรอยร้าวบนตัวอย่างด้วยวิธีผ่าแยก



ภาพที่ 4.13 ตัวอย่างที่มีรอยร้าวในการทดสอบความต้านทานคาร์บอนเนชั่น

หลังจากการสร้างรอยร้าวบนชิ้นตัวอย่างอย่างน้อย 7 วัน ใช้กล้องไมโครสโคปวัดความกว้างรอยร้าวที่ผิวคอนกรีต ณ ตำแหน่งกึ่งกลางของตัวอย่างด้านที่ทดสอบ และทำการตัดให้ได้ตัวอย่างที่ความกว้างรอยร้าวที่ผิวคอนกรีตอยู่ระหว่าง 0.2 มม. ถึง 2.0 มม. ตามขอบเขตของการวิจัย สำหรับผิวตัวอย่างด้านอื่นๆ ที่ไม่ได้ทดสอบ จะถูกขัดผิวด้วยลูกหมูที่ติดตั้งหัวขัดและล้างทำความสะอาดผิว ดังแสดงในภาพที่ 4.14 สำหรับการทดสอบความต้านทานคาร์บอนเนชั่นนั้น ต้องการให้เกิดคาร์บอนเนชั่นในตัวอย่างเพียงด้านเดียว ด้านที่เหลืออีก 5 ด้านของตัวอย่างจึงถูกทาด้วยอะคริลิกปิดไว้ไม่ให้เกิดคาร์บอนเนชั่น โดยทาอะคริลิกหนา 1 มม. และหลังจากทาชั้นแรก 1 วัน จึงทาอะคริลิกชั้นที่สองทับ ดังแสดงในภาพที่ 4.15

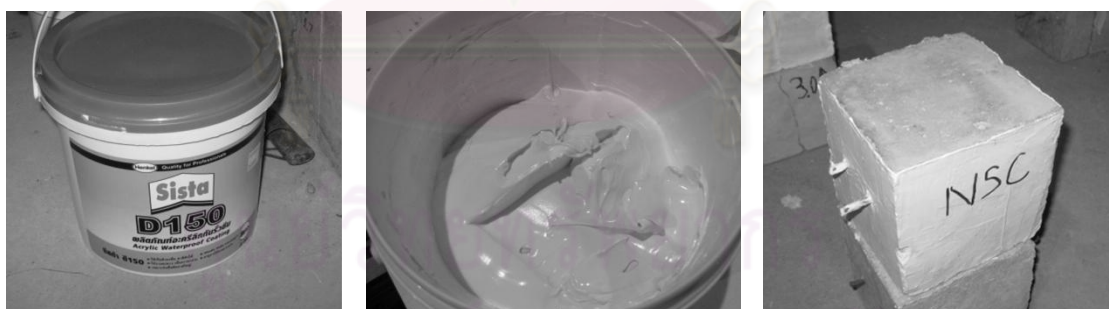


ก. ลูกหมูติดตั้งหัวขัด

ข. ล้างด้วยน้ำสะอาด

ค. เช็ดผิวทำความสะอาด

ภาพที่ 4.14 การทำความสะอาดผิวที่ไม่ทดสอบ



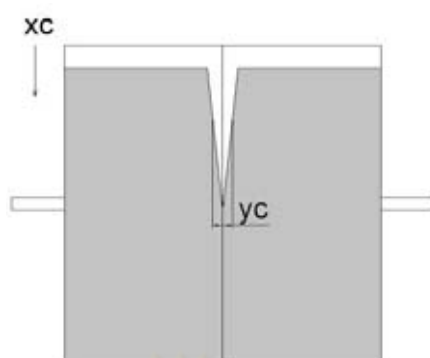
ก. บรรจุภัณฑ์ของอะคริลิก

ข. อะคริลิก

ค. ตัวอย่างที่ทาอะคริลิกแล้ว

ภาพที่ 4.15 การทาอะคริลิกป้องกันการรั่วซึมปิดผิวที่ไม่ต้องการทดสอบ

เมื่อตัวอย่างมีอายุ 56 วัน จึงนำมาซ่อมแซมรอยร้าวโดยการเคลือบผิวด้วยวัสดุซ่อมประสานซีเมนต์ทั้งสามชนิด และบ่มวัสดุซ่อมประสานซีเมนต์ ดังที่กล่าวในหัวข้อ 3.2 ซึ่งเมื่อนำตัวอย่างไปทดสอบจะเกิดคาร์บอนเนชั่นเพียงด้านเดียว คือ ด้านที่ไม่ได้ทาอะคริลิก ซึ่งคาร์บอนเนชั่นเกิดในแนว xc ดังแสดงในภาพที่ 4.16



ภาพที่ 4.16 แบบจำลองการเกิดคาร์บอนเนชั่นในตัวอย่างที่ทำอะคริลิกปิดด้านที่ไม่ทดสอบ

โดยทั่วไป การเกิดคาร์บอนเนชั่นในคอนกรีตนั้นใช้ระยะเวลานาน จำเป็นต้องดำเนินการทดสอบที่สภาวะเร่ง ในการวิจัยนี้ใช้สภาวะเร่งเช่นเดียวกับ J. Khunthongkeaw [13] คือ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เข้มข้น 4% อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส และความชื้นสัมพัทธ์ 55% ตัวอย่างคอนกรีตที่ไม่มีรอยร้าว ตัวอย่างคอนกรีตที่มีรอยร้าว และตัวอย่างที่ผ่านการซ่อมแซมรอยร้าวด้วยวัสดุซ่อมประสานซีเมนต์ ก. ข. และ ค. ที่มีอายุคอนกรีต 70 วัน และอายุวัสดุซ่อม 14 วัน ทั้งหมดดังแสดงในตารางที่ 4.3 จะถูกเก็บไว้ภายใต้สภาวะดังกล่าวเป็นระยะเวลา 28 วัน และ 84 วัน ดังภาพที่ 4.17

ตารางที่ 4.3 ตัวอย่างสำหรับการทดสอบความต้านทานคาร์บอนเนชั่น

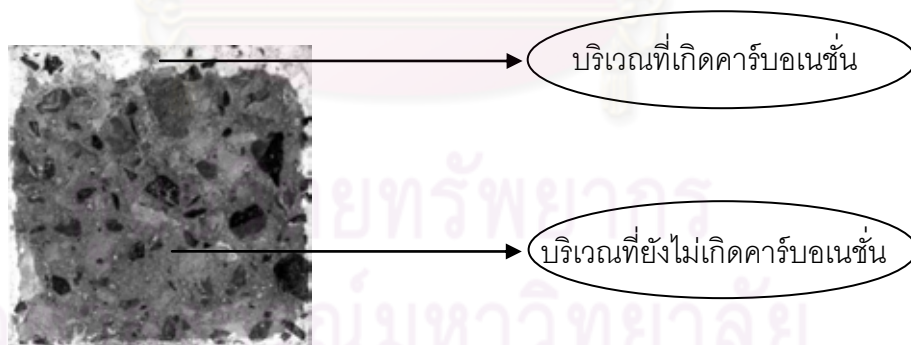
ตัวอย่างที่	รายละเอียด	วัสดุซ่อมประสานซีเมนต์ที่ใช้	จำนวนตัวอย่าง
1	คอนกรีตปกติ	-	6
2	คอนกรีตที่มีรอยร้าว	-	12
3	คอนกรีตที่มีรอยร้าวแล้วผ่านการซ่อมแซมแล้ว	ก.	12
4	คอนกรีตที่มีรอยร้าวแล้วผ่านการซ่อมแซมแล้ว	ข.	12
5	คอนกรีตที่มีรอยร้าวแล้วผ่านการซ่อมแซมแล้ว	ค.	12





ภาพที่ 4.17 ตู้ทดสอบคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเร่ง

เมื่อครบกำหนด 28 วัน หรือ 84 วัน จึงนำตัวอย่างออกมาผ่าแยก ณ ตำแหน่งกึ่งกลาง ตัวอย่าง และพ่นด้วยละอองฟีนอล์ฟทาลีน (Phenolphthalein) เข้มข้น 1% โดยน้ำหนัก ในเอทิลแอลกอฮอล์ (Ethyl Alcohol) 70% ฟีนอล์ฟทาลีนจะเปลี่ยนเป็นสีม่วงสำหรับคอนกรีตบริเวณที่ยังไม่เกิดปฏิกิริยาคาร์บอนเนชัน ขณะที่ส่วนที่เกิดปฏิกิริยาแล้ว สีจะใกล้เคียงกับลักษณะเนื้อคอนกรีตเดิม ดังแสดงในภาพที่ 4.18 เนื่องจากฟีนอล์ฟทาลีนมีคุณสมบัติเปลี่ยนจากใสไม่มีสีเป็นสีชมพูเมื่อค่า pH มากกว่า 10 จากนั้นบันทึกข้อมูลรูปร่างลักษณะและระยะคาร์บอนเนชันที่วัดได้



ภาพที่ 4.18 การเปลี่ยนสีของฟีนอล์ฟทาลีนบริเวณที่เกิดคาร์บอนเนชัน

#### 4.4 ความต้านทานคลอไรด์

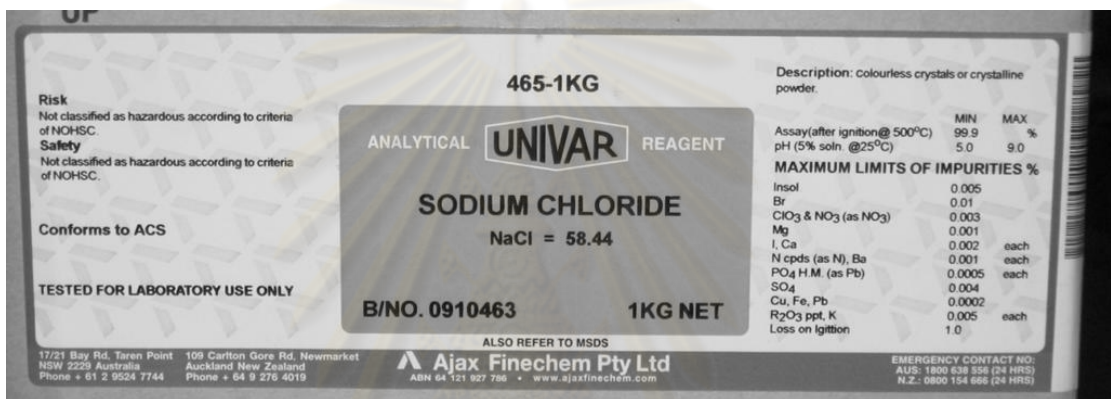
เช่นเดียวกับความต้านทานคาร์บอนเนชั่น ความต้านทานคลอไรด์เป็นการทดสอบด้านความคงทน การวิจัยนี้ใช้ระยะแทรกซึมของคลอไรด์ในการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการซ่อมแซมรอยร้าวด้วยวัสดุซ่อมประสานซีเมนต์ โดยคอนกรีตผสมเสร็จสัดส่วนผสมที่ 5 ถึงสัดส่วนผสมที่ 8 ดังแสดงในตารางที่ 3.1 ถูกนำมาใช้หล่อเป็นตัวอย่างสำหรับทดสอบความต้านทานคลอไรด์ ซึ่งมีขนาด รูปทรง การเสริมเหล็ก การบ่ม การสร้างรอยร้าว การปิดผิวที่ไม่ทดสอบ ตลอดจนการซ่อมรอยร้าวด้วยวัสดุซ่อมประสานซีเมนต์ในลักษณะเดียวกับการเตรียมตัวอย่างของความต้านทานคาร์บอนเนชั่น โดยมีส่วนที่แตกต่างกัน คือ ตัวอย่างทดสอบความต้านทานคลอไรด์ก่อนการทดสอบมีอายุคอนกรีต 84 วัน และอายุวัสดุซ่อม 28 วัน และถูกเก็บไว้ภายใต้สภาวะสารละลายโซเดียมคลอไรด์ (Sodium Chloride, NaCl) ที่มีความเข้มข้นของคลอไรด์ไอออน 3% โดยน้ำหนัก เป็นระยะเวลา 14 วัน และ 28 วัน ดังแสดงในภาพที่ 4.18 และ 4.19 ทั้งนี้เนื่องมาจากผลการทดสอบเบื้องต้น พบว่า การแทรกซึมของคลอไรด์เกิดขึ้นรวดเร็วกว่าการเกิดปฏิกิริยาคาร์บอนเนชั่น การทดสอบการแทรกซึมของคลอไรด์จึงปรับเพิ่มอายุของตัวอย่างและลดระยะเวลาที่ทดสอบลงมาให้มีความเหมาะสม ตัวอย่างแต่ละสัดส่วนผสมมีดังแสดงในตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ตัวอย่างสำหรับการทดสอบความต้านทานคลอไรด์ในแต่ละสัดส่วนผสม

ตัวอย่างที่	รายละเอียด	วัสดุซ่อมประสานซีเมนต์ที่ใช้	จำนวนตัวอย่าง
1	คอนกรีตปกติ	-	6
2	คอนกรีตที่มีรอยร้าว	-	12
3	คอนกรีตที่มีรอยร้าวแล้วผ่านการซ่อมแซมแล้ว	ก.	12
4	คอนกรีตที่มีรอยร้าวแล้วผ่านการซ่อมแซมแล้ว	ข.	12
5	คอนกรีตที่มีรอยร้าวแล้วผ่านการซ่อมแซมแล้ว	ค.	12

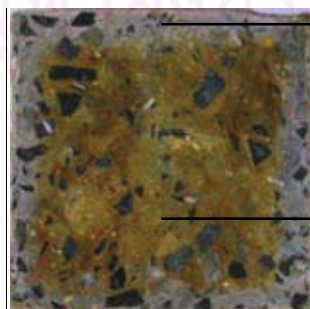


ภาพที่ 4.19 ถังเก็บตัวอย่างภายใต้สภาวะคลอไรด์ไอออนเข้มข้น 3%



ภาพที่ 4.20 โซเดียมคลอไรด์ที่ใช้ในการวิจัย

เมื่อแช่ในสารละลายคลอไรด์ครบตามกำหนด จึงนำตัวอย่างออกมาผ่าแยก ณ ตำแหน่งกึ่งกลางตัวอย่าง เช่นเดียวกับการทดสอบความต้านทานคาร์บอนเนชั่น และพ่นด้วยละอองซิลเวอร์ไนเตรต (Silver Nitrate, AgNO<sub>3</sub>) เข้มข้น 0.1 M คอนกรีตบริเวณที่มีคลอไรด์แทรกซึมจะมีใกล้เคียงกับสีคอนกรีตเดิม ส่วนบริเวณที่ไม่พบคลอไรด์แทรกซึม สีคอนกรีตจะเปลี่ยนไปเป็นดังแสดงในภาพที่ 4.18 จากนั้นทำการบันทึกข้อมูลรูปร่างลักษณะและระยะแทรกซึมของคลอไรด์



บริเวณที่คลอไรด์แทรกซึม

บริเวณที่ไม่พบคลอไรด์แทรกซึม

ภาพที่ 4.21 การเปลี่ยนสีของซิลเวอร์ไนเตรตบริเวณที่เกิดการแทรกซึมของคลอไรด์

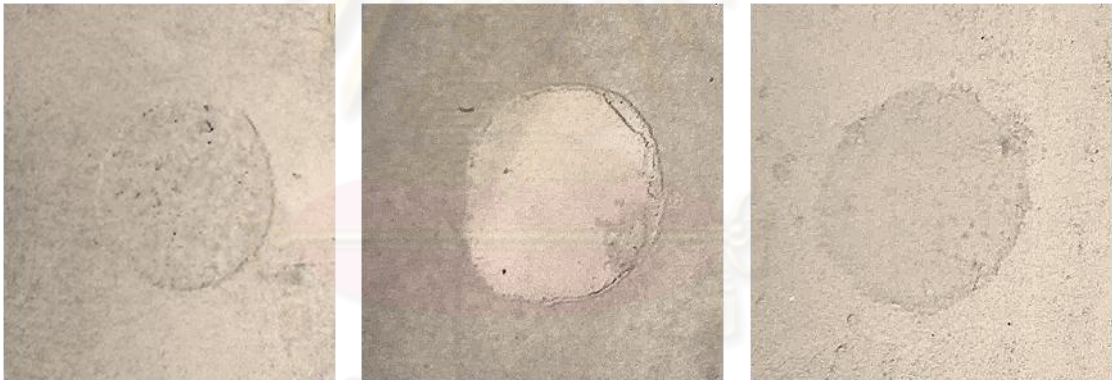
## บทที่ 5

### ผลการวิจัยและวิเคราะห์ข้อมูล

จากการดำเนินการวิจัยในบทที่ 4 ผลการวิจัยและวิเคราะห์ข้อมูลของการดำเนินการทั้ง 4 ส่วน อันได้แก่ การยัดเกาะ การรั่วซึมของน้ำ ความต้านทานคาร์บอนชั้น และความต้านทานคลอไรด์ มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

#### 5.1 การยัดเกาะ

ในการทดสอบการยัดเกาะระหว่างวัสดุซ่อมประสานซีเมนต์กับผิวคอนกรีตด้วยวิธีพูลออฟ ซึ่งดัดแปลงจากมาตรฐาน ASTM C1583 นั้น พบว่า การยัดเกาะของวัสดุซ่อมประสานซีเมนต์ทั้งสามชนิดมีการวิบัติลักษณะเดียวกัน คือ วิบัติที่รอยต่อระหว่างวัสดุซ่อมประสานซีเมนต์และผิวคอนกรีตเดิม ดังแสดงในภาพที่ 5.1 บ่งชี้ว่ากำลังยัดเกาะของวัสดุซ่อมประสานซีเมนต์ทั้งสามชนิดมีค่าต่ำกว่ากำลังดึงของคอนกรีตและกำลังดึงของวัสดุซ่อมประสานซีเมนต์นั่นเอง

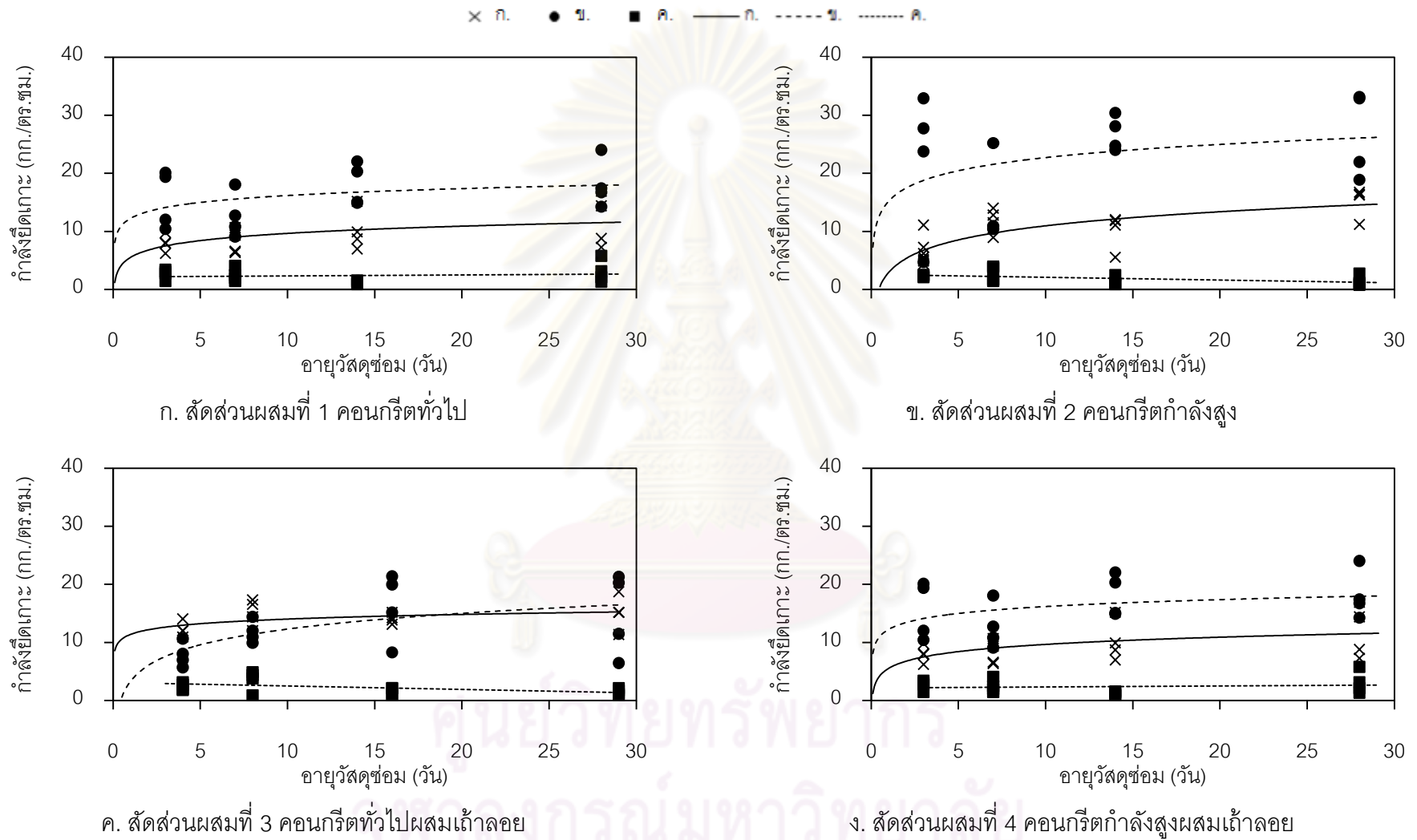


ก. การวิบัติของวัสดุซ่อม ก. ข. การวิบัติของวัสดุซ่อม ข. ค. การวิบัติของวัสดุซ่อม ค.

ภาพที่ 5.1 การวิบัติของวัสดุซ่อมประสานซีเมนต์ที่เคลือบผิวคอนกรีตเมื่อทดสอบกำลังยัดเกาะ



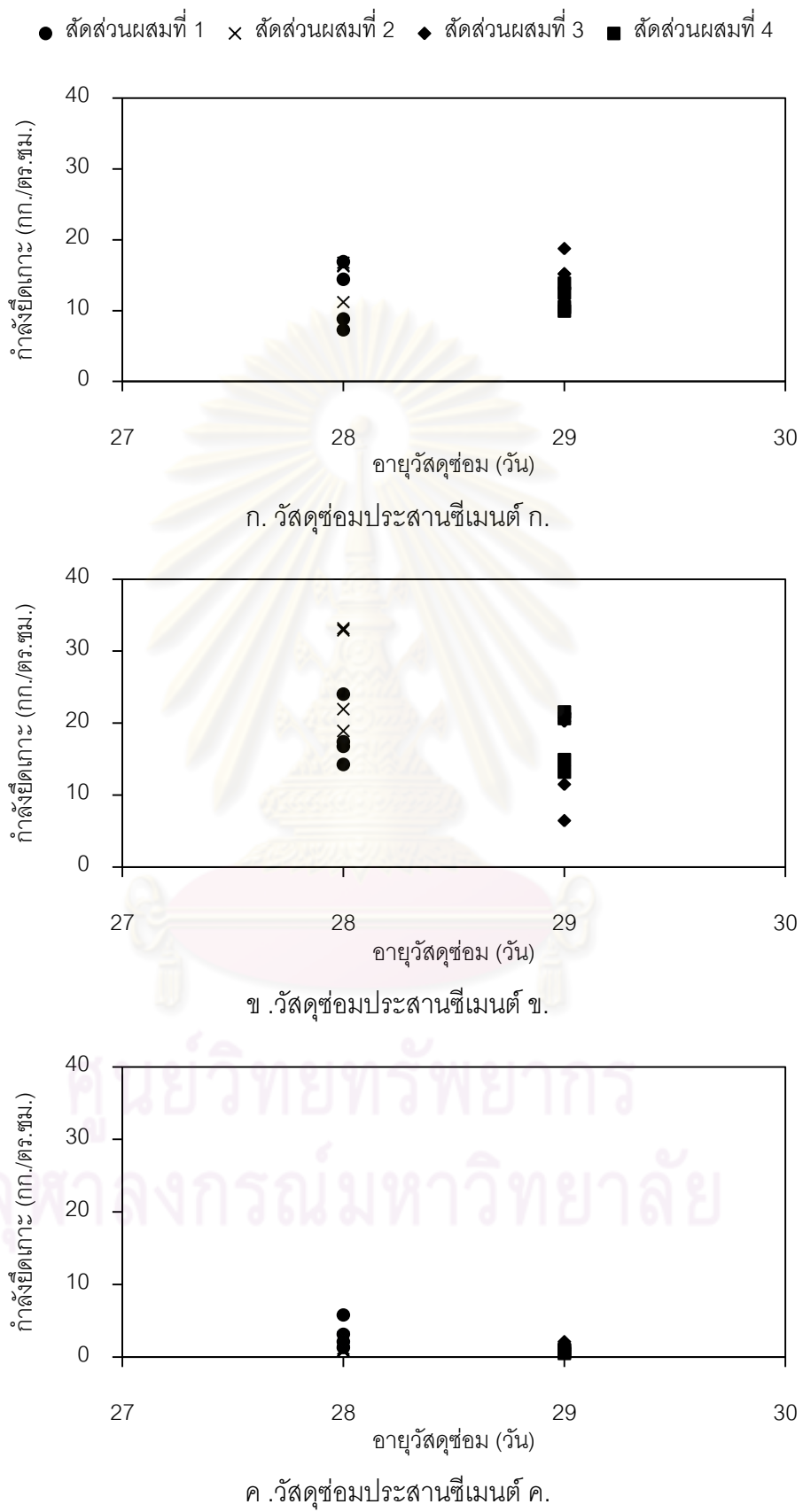
ภาพที่ 5.2 การวิบัติของคอนกรีตเมื่อทดสอบกำลังยัดเกาะตามมาตรฐาน ASTM C1583



ภาพที่ 5.3 การพัฒนากำลังยึดเกาะของวัสดุซ่อมประสานซีเมนต์

ในการทดสอบการยึดเกาะ ได้ผลการทดสอบ ดังแสดงในภาพที่ 5.3 ซึ่งแสดงให้เห็นว่า นอกจากลักษณะการวิบัติที่เหมือนกันแล้ว วัสดุซ่อมประสานซีเมนต์ทั้งสามชนิดมีการพัฒนากำลังยึดเกาะเช่นเดียวกัน คือ กำลังยึดเกาะพัฒนาอย่างรวดเร็วในช่วง 3 วันแรก เช่น ผลการทดสอบกำลังยึดเกาะระหว่างวัสดุซ่อมประสานซีเมนต์ทั้งสามชนิดกับคอนกรีตสัดส่วนผสมที่ 1 คอนกรีตทั่วไป ดังแสดงในภาพที่ 5.3ก คือ วัสดุซ่อมประสานซีเมนต์ ก. มีกำลังยึดเกาะเฉลี่ย 8.0 กก./ตร.ซม. 8.3 กก./ตร.ซม. 10.2 กก./ตร.ซม. และ 11.9 กก./ตร.ซม. ที่อายุวัสดุซ่อม 3 วัน 7 วัน 14 วัน และ 28 วัน ตามลำดับ ซึ่งกำลังยึดเกาะที่ 3 วัน 7 วัน และ 14 วัน ดังกล่าว คิดเป็นร้อยละ 67 ร้อยละ 70 และร้อยละ 86 ของกำลังยึดเกาะที่อายุ 28 วัน สำหรับวัสดุซ่อมประสานซีเมนต์ ข. มีกำลังยึดเกาะเฉลี่ย 15.5 กก./ตร.ซม. 12.7 กก./ตร.ซม. 18.1 กก./ตร.ซม. และ 18.1 กก./ตร.ซม. ที่อายุวัสดุซ่อม 3 วัน 7 วัน 14 วัน และ 28 วัน ตามลำดับ ซึ่งกำลังยึดเกาะที่ 3 วัน 7 วัน และ 14 วัน ดังกล่าว คิดเป็นร้อยละ 86 ร้อยละ 71 และร้อยละ 100 ของกำลังยึดเกาะที่อายุ 28 วัน และวัสดุซ่อมประสานซีเมนต์ ค. มีกำลังยึดเกาะเฉลี่ย 2.7 กก./ตร.ซม. 2.5 กก./ตร.ซม. 1.2 กก./ตร.ซม. และ 3.1 กก./ตร.ซม. ที่อายุวัสดุซ่อม 3 วัน 7 วัน 14 วัน และ 28 วัน ตามลำดับ ซึ่งกำลังยึดเกาะที่ 3 วัน 7 วัน และ 14 วัน ดังกล่าว คิดเป็นร้อยละ 87 ร้อยละ 81 และร้อยละ 39 ของกำลังยึดเกาะที่อายุ 28 วัน ในช่วงหลังจากช่วง 3 วันแรก พบว่า การพัฒนากำลังยึดเกาะลดลงตามอายุของวัสดุซ่อมประสานซีเมนต์ และหลังจาก 7 วันแรก กำลังยึดเกาะที่ทดสอบได้มีค่าค่อนข้างคงที่ สำหรับการยึดเกาะของวัสดุซ่อมประสานซีเมนต์ทั้งสามชนิดกับผิวคอนกรีตสัดส่วนผสมอื่นๆ ในการวิจัยนี้ ดังแสดงในภาพที่ 5.3ข ถึงภาพที่ 5.3ง พบว่า การพัฒนากำลังมีลักษณะเช่นเดียวกัน คือ กำลังยึดเกาะพัฒนาอย่างรวดเร็วในช่วง 3 วันแรก หลังจากนั้นการพัฒนากำลังยึดเกาะลดลงตามอายุของวัสดุซ่อมประสานซีเมนต์ และกำลังยึดเกาะมีค่าค่อนข้างคงที่หลังจากวัสดุซ่อมประสานซีเมนต์มีอายุ 7 วัน

เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการยึดเกาะระหว่างวัสดุซ่อมประสานซีเมนต์ทั้งสามกับผิวคอนกรีตสัดส่วนผสมที่ 1 คอนกรีตทั่วไป ดังแสดงในภาพที่ 5.3ก สามารถเรียงกำลังยึดเกาะที่อายุวัสดุซ่อมประสานซีเมนต์ 28 วัน จากสูงไปต่ำได้ คือ วัสดุซ่อมประสานซีเมนต์ ข. วัสดุซ่อมประสานซีเมนต์ ก. และวัสดุซ่อมประสานซีเมนต์ ค. โดยมีค่าเฉลี่ย 11.9 กก./ตร.ซม. 18.1 กก./ตร.ซม. และ 3.1 กก./ตร.ซม. หรือคิดเป็นร้อยละ 6 ร้อยละ 7 และร้อยละ 3 ของกำลังกำลังอัดของวัสดุซ่อมประสานซีเมนต์ตามลำดับ สำหรับคอนกรีตสัดส่วนผสมอื่นๆ ในการวิจัยนี้ ดังแสดงในภาพที่ 5.3ข ถึงภาพที่ 5.3ง พบว่า กำลังยึดเกาะที่อายุวัสดุซ่อมประสานซีเมนต์ 28 วัน สามารถเรียงจากสูงไปต่ำได้ในลักษณะเดิม คือ วัสดุซ่อมประสานซีเมนต์ ข. วัสดุซ่อมประสานซีเมนต์ ก. และวัสดุซ่อมประสานซีเมนต์ ค.



ภาพที่ 5.4 กำลังยึดเกาะของวัสดุซ่อมประสานแต่ละชนิดกับคอนกรีตสัตว์ผสมต่างๆ

หากนำข้อมูลดังกล่าวแสดงในภาพที่ 5.3 มาจัดเรียงใหม่ โดยรวมผลการทดสอบกำลังยึดเกาะของวัสดุซ่อมประสานซีเมนต์ชนิดเดียวกันกับผิวคอนกรีตแต่ละสัดส่วนผสมที่ 28 วัน มาไว้ด้วยกัน ดังแสดงในภาพที่ 5.4 ช่วยให้สามารถพิจารณาแนวโน้มการยึดเกาะของวัสดุซ่อมประสานซีเมนต์กับผิวคอนกรีตสัดส่วนผสมต่างๆ ได้ชัดเจนขึ้น โดยกำลังยึดเกาะของวัสดุซ่อมประสานซีเมนต์ ก. กับผิวคอนกรีตสัดส่วนผสมต่างๆ ดังแสดงในภาพที่ 5.4ก นั้น มีค่าใกล้เคียงกัน พบว่า กำลังยึดเกาะของวัสดุซ่อม ก. กับคอนกรีตสัดส่วนผสมที่ 1 ถึงสัดส่วนผสมที่ 4 ที่อายุวัสดุซ่อม 28 วัน มีค่าอยู่ในช่วง 11.2 – 16.8 กก./ตร.ซม. 7.3 – 16.9 กก./ตร.ซม. 9.9 – 13.9 กก./ตร.ซม. และ 11.4 – 18.7 กก./ตร.ซม. ตามลำดับ โดยมีค่าเฉลี่ยของกำลังยึดเกาะ เท่ากับ 15.1 กก./ตร.ซม. 11.9 กก./ตร.ซม. 11.7 กก./ตร.ซม. และ 15.1 กก./ตร.ซม. ตามลำดับ และมีค่าเฉลี่ยรวมเท่ากับ 13.4 กก./ตร.ซม. เมื่อพิจารณาการกระจายตัวของข้อมูลจากค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน พบว่า ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานมีค่าเพียง 1.9 กก./ตร.ซม. เท่านั้น นั่นคือ การยึดเกาะกับผิวคอนกรีตทั้งสี่สัดส่วนผสมต่างกันไม่มาก ไม่สามารถบ่งชี้ได้ว่า การซ่อมแซมด้วยเคลือบผิวโดยวัสดุซ่อมประสานซีเมนต์ ก. มีการยึดเกาะกับผิวคอนกรีตสัดส่วนผสมใดได้ดีกว่ากัน เช่นเดียวกับกำลังยึดเกาะระหว่างวัสดุซ่อมประสานซีเมนต์ ค. กับผิวคอนกรีตสัดส่วนผสมต่างๆ ที่ 28 วัน ดังแสดงในภาพที่ 5.4ค ซึ่งเห็นได้จากการที่จุดของข้อมูลแต่ละสัดส่วนผสมในภาพมีค่าแตกต่างกันไม่มากเช่นกัน จึงไม่สามารถบ่งชี้ได้ว่า การซ่อมแซมด้วยเคลือบผิวโดยวัสดุซ่อมประสานซีเมนต์ ค. มีการยึดเกาะกับผิวคอนกรีตสัดส่วนผสมใดได้ดีกว่ากัน ซึ่งส่วนหนึ่งอาจมาจากการที่วัสดุซ่อม ค. มีกำลังยึดเกาะต่ำ แต่ผลการทดสอบการยึดเกาะของวัสดุซ่อมประสานซีเมนต์ ข. นั้น มีการยึดเกาะกับคอนกรีตแต่ละสัดส่วนผสมแตกต่างกันสามารถสังเกตเห็นได้ชัดเจน ดังแสดงในภาพที่ 5.4ข โดยวัสดุซ่อมประสานซีเมนต์ ข. นั้นสามารถยึดเกาะกับผิวคอนกรีตที่มีกำลังสูงได้ดีกว่า ดังเห็นได้จากการยึดเกาะกับผิวคอนกรีตสัดส่วนผสมที่ 1 คอนกรีตทั่วไป ได้ต่ำกว่าสัดส่วนผสมที่ 2 คอนกรีตกำลังสูง และการยึดเกาะกับผิวคอนกรีตสัดส่วนผสมที่ 3 คอนกรีตทั่วไปผสมปอชโซลาน ได้ต่ำกว่าสัดส่วนผสมที่ 4 คอนกรีตกำลังสูงผสมปอชโซลาน และจากผลการทดสอบยังพบว่า วัสดุซ่อมประสานซีเมนต์ ข. นั้นสามารถยึดเกาะกับผิวคอนกรีตที่ไม่มีส่วนผสมของปอชโซลานได้ดีกว่า คือ ยึดเกาะกับผิวคอนกรีตสัดส่วนผสมที่ 1 คอนกรีตทั่วไป ได้ดีกว่าสัดส่วนผสมที่ 3 คอนกรีตทั่วไปผสมปอชโซลาน และยึดเกาะกับผิวคอนกรีตสัดส่วนผสมที่ 2 คอนกรีตกำลังสูง ได้ดีกว่าสัดส่วนผสมที่ 4 คอนกรีตกำลังสูงผสมปอชโซลาน การที่วัสดุซ่อมประสานซีเมนต์ ข. ยึดเกาะกับผิวคอนกรีตที่มีกำลังสูงได้ดี เนื่องจากคอนกรีตกำลังสูงมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ต่ำ จึงมีน้ำบริเวณผิวคอนกรีตน้อย ผิวคอนกรีตจึงไม่เรียบเท่าคอนกรีตที่มีกำลังอัดต่ำ วัสดุซ่อมประสานซีเมนต์ที่เคลือบผิวคอนกรีตกำลังสูงจึงยึดเกาะได้ดี สำหรับการที่วัสดุซ่อมประสานซีเมนต์ ข. ยึดเกาะกับคอนกรีตที่มีส่วนผสมของ

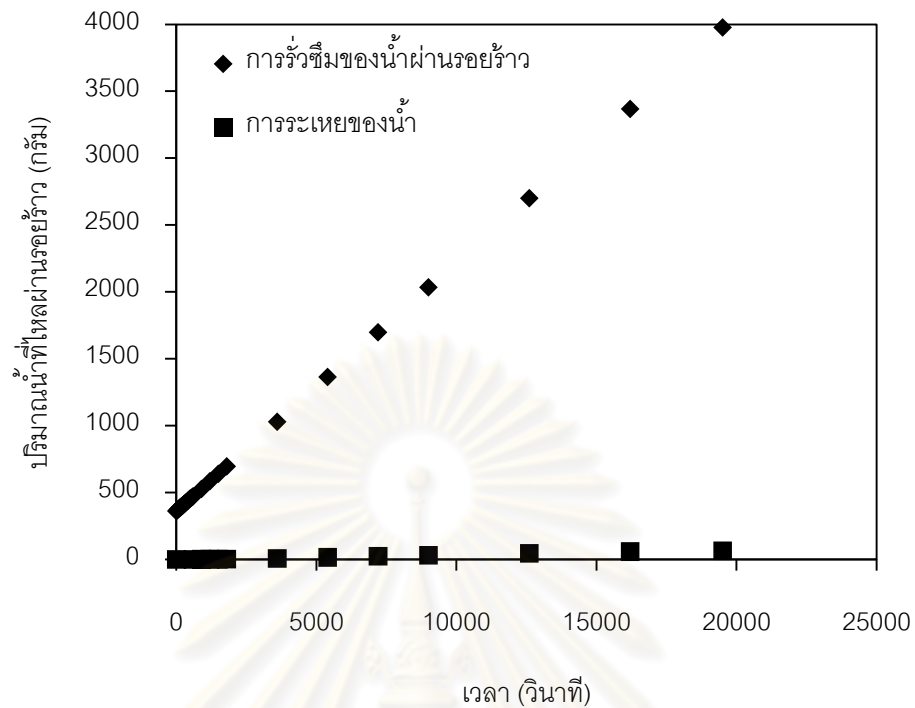


ปอชโซลาน ซึ่งในการวิจัยนี้ คือ ถั่วลอจ ได้ต่ำกว่าคอนกรีตที่ไม่มีส่วนผสมของปอชโซลานนั้น เนื่องจากถั่วลอจมีความถ่วงจำเพาะต่ำกว่าซีเมนต์ จึงเคลื่อนตัวมาอยู่ที่ผิวของคอนกรีต ด้วยลักษณะของอนุภาคถั่วลอจที่เป็นทรงกลม ผิวคอนกรีตที่มีถั่วลอจเป็นส่วนผสมจึงเรียกว่าผิวคอนกรีตที่ไม่มีถั่วลอจเป็นส่วนผสม วัสดุซ่อมประสานซีเมนต์ที่เคลือบผิวคอนกรีตที่มีถั่วลอจเป็นปอชโซลานจึงยึดเกาะได้ไม่ดี

จากผลทดสอบการยึดเกาะทั้งหมดที่ได้ แสดงให้เห็นว่า ลักษณะการพัฒนากำลังยึดเกาะและค่ากำลังยึดเกาะของวัสดุซ่อมประสานซีเมนต์กับผิวคอนกรีต สอดคล้องกับการพัฒนากำลังอัดและกำลังอัดของวัสดุซ่อมประสานซีเมนต์ ดังแสดงในภาพที่ 3.11 คือ กำลังยึดเกาะระหว่างวัสดุซ่อมประสานซีเมนต์กับผิวคอนกรีตมีความสัมพันธ์กับกำลังอัดของวัสดุซ่อมประสานซีเมนต์ โดยวัสดุซ่อมประสานซีเมนต์ที่มีกำลังอัดสูงย่อมมีกำลังยึดเกาะกับผิวคอนกรีตที่สูง และจากผลทดสอบการยึดเกาะของวัสดุซ่อมประสานซีเมนต์กับผิวคอนกรีตสัดส่วนผสมต่างๆ ในงานวิจัยนี้ แสดงให้เห็นว่า วัสดุซ่อมประสานซีเมนต์มีแนวโน้มยึดเกาะกับคอนกรีตกำลังสูงและคอนกรีตที่ไม่มีถั่วลอจเป็นส่วนผสมได้ดี

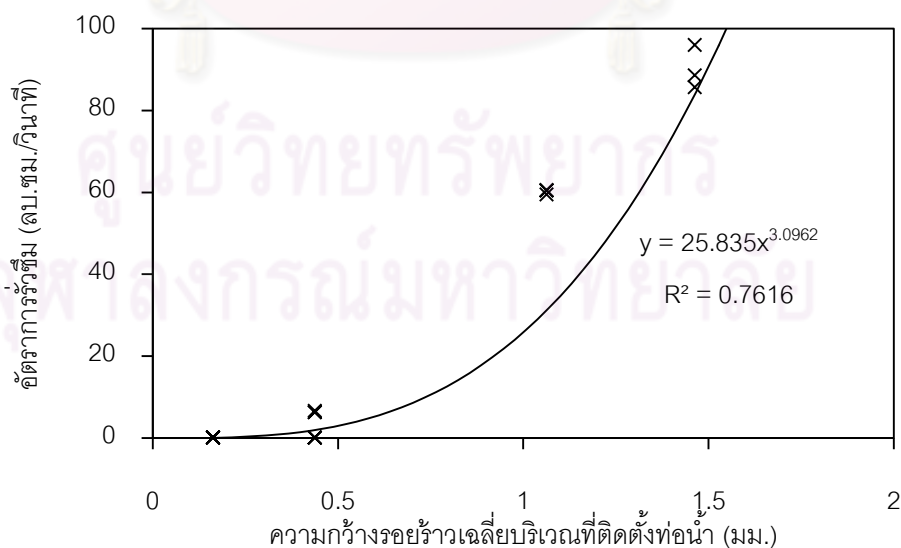
## 5.2 การรั่วซึมของน้ำ

การรั่วซึมของน้ำผ่านรอยร้าวคอนกรีตในการวิจัยนี้พิจารณาจากอัตราการรั่วซึม (ลบ.ซม./วินาที) ซึ่งเป็นค่าปริมาณน้ำ (ลบ.ซม.) เทียบกับเวลา (วินาที) ซึ่งก่อนการทดสอบจริง ได้ดำเนินการทดสอบเบื้องต้น โดยนำตัวอย่างคอนกรีตที่มีรอยร้าว ความกว้างของรอยร้าวเฉลี่ย 0.3 มม. ซึ่งอยู่ในช่วงขอบเขตของการวิจัย คือ 0.2 มม. ถึง 2.0 มม. และยังไม่ได้รับการซ่อมแซม มาทดสอบดังที่กล่าวในหัวข้อ 4.2 เช่นเดียวกับการทดสอบการรั่วซึมของน้ำผ่านรอยร้าวของคอนกรีต โดยทำการวัดปริมาณน้ำ ณ เวลาต่างๆ เป็นระยะเวลา 5 ชม. เพื่อศึกษาพฤติกรรมของการรั่วซึมของน้ำว่ามีลักษณะอย่างไร อัตราการไหลคงที่หรือไม่ โดยการใช้ตัวอย่างที่มีความกว้างของรอยร้าวเฉลี่ย 0.3 มม. มาใช้เป็นตัวอย่างทดสอบเบื้องต้นนั้น เนื่องจากรอยร้าวมีขนาดเล็ก จึงมีการรั่วซึมที่ไม่รวดเร็วเกินไป สามารถควบคุมระดับน้ำได้สะดวก และเหมาะแก่การสังเกตการรั่วซึมที่เกิดขึ้น ซึ่งจากการทดสอบเบื้องต้น พบว่า ปริมาณน้ำที่รั่วซึมผ่านรอยร้าวในการทดสอบเทียบกับเวลาหรืออัตราการรั่วซึมของน้ำ มีค่าค่อนข้างคงที่ตลอดการทดสอบ นอกจากนี้ยังพบว่าปริมาณน้ำที่ระเหยไประหว่างการทดสอบมีค่าน้อยมากเทียบกับปริมาณน้ำที่รั่วซึมผ่านรอยร้าวของคอนกรีต ดังแสดงในภาพที่ 5.5 ดังนั้นในการทดสอบการรั่วซึมของน้ำจึงไม่พิจารณาผลของน้ำที่ระเหยระหว่างการทดสอบ



ภาพที่ 5.5 ปริมาณน้ำที่รั่วซึมผ่านรอยร้าว ณ เวลาต่างๆ

กลุ่มตัวอย่างที่มีรอยร้าวได้ผลการทดสอบการรั่วซึมของน้ำ ดังแสดงในภาพที่ 5.6 และตัวอย่างทั้งหมดในการวิจัยนี้ได้ผลการทดสอบการรั่วซึมของน้ำ ดังแสดงในตารางที่ 5.1



ภาพที่ 5.6 อัตราการรั่วซึมของน้ำในตัวอย่างที่มีรอยร้าวกับความกว้างรอยร้าวเฉลี่ย

ตารางที่ 5.1 ผลการทดสอบการรั่วซึมของน้ำ

ตัวอย่าง ที่	ความกว้าง รอยร้าวเฉลี่ย ก่อนซ่อมแซม (มม.)	อัตราการรั่วซึม เฉลี่ย (ลบ.ซม./วินาที)	ลักษณะที่พบ
1 ร้าว	0.16	0.18	น้ำรั่วซึมผ่านรอยร้าวของคอนกรีต
2 ร้าว	0.44	0.15	น้ำรั่วซึมผ่านรอยร้าวของคอนกรีต
3 ร้าว	0.44	6.48	น้ำรั่วซึมผ่านรอยร้าวของคอนกรีต
4 ร้าว	1.06	60.17	น้ำรั่วซึมผ่านรอยร้าวของคอนกรีต
5 ร้าว	1.46	90.09	น้ำรั่วซึมผ่านรอยร้าวของคอนกรีต
6 ร้าว	2.39	-	-
1 ซ่อม ก.	0.13	-	พบน้ำซึมบางตำแหน่ง ไม่พบน้ำในถาด
2 ซ่อม ก.	0.36	-	พบน้ำซึมบางตำแหน่ง ไม่พบน้ำในถาด
3 ซ่อม ก.	0.39	-	พบน้ำซึมบางตำแหน่ง ไม่พบน้ำในถาด
4 ซ่อม ก.	0.76	-	พบน้ำซึมบางตำแหน่ง ไม่พบน้ำในถาด
5 ซ่อม ก.	1.84	-	พบน้ำซึมบางตำแหน่ง ไม่พบน้ำในถาด
6 ซ่อม ก.	3.26	-	พบน้ำซึมบางตำแหน่ง ไม่พบน้ำในถาด
1 ซ่อม ข.	0.13	-	พบน้ำซึมเป็นวงรอบท่อ ไม่พบน้ำในถาด
2 ซ่อม ข.	0.29	-	พบน้ำซึมเป็นวงรอบท่อ ไม่พบน้ำในถาด
3 ซ่อม ข.	0.46	-	พบน้ำซึมเป็นวงรอบท่อ ไม่พบน้ำในถาด
4 ซ่อม ข.	0.44	-	พบน้ำซึมเป็นวงรอบท่อ ไม่พบน้ำในถาด
5 ซ่อม ข.	0.76	-	พบน้ำซึมเป็นวงรอบท่อ ไม่พบน้ำในถาด
6 ซ่อม ข.	2.00	-	พบน้ำซึมเป็นวงรอบท่อ ไม่พบน้ำในถาด
1 ซ่อม ค.	0.26	-	พบน้ำซึมเป็นวงรอบท่อ พบคราบน้ำเป็นจุดในถาด
2 ซ่อม ค.	0.28	-	พบน้ำซึมเป็นวงรอบท่อ พบคราบน้ำเป็นจุดในถาด
3 ซ่อม ค.	0.35	-	พบน้ำซึมเป็นวงรอบท่อ พบคราบน้ำเป็นจุดในถาด
4 ซ่อม ค.	0.79	-	พบน้ำซึมเป็นวงรอบท่อ พบคราบน้ำเป็นจุดในถาด
5 ซ่อม ค.	1.25	-	พบน้ำซึมเป็นวงรอบท่อ พบคราบน้ำเป็นจุดในถาด
6 ซ่อม ค.	2.09	-	พบน้ำซึมเป็นวงรอบท่อ พบคราบน้ำเป็นจุดในถาด

จากภาพที่ 5.6 พบว่า อัตราการรั่วซึมของน้ำในกลุ่มตัวอย่างที่มีรอยร้าวมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วตามขนาดความกว้างรอยร้าวที่เพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณาเส้นแนวโน้มที่ได้จากวิธีกำลังสองน้อยสุด (Least Square Method) พบว่า อัตราการไหลของน้ำผ่านรอยร้าวแปรผันตรงกับความกว้างรอยร้าวยกกำลัง 3.096 ใกล้เคียงกับ Law of Hagen Poiseuille ดังแสดงในสมการที่ 2.2 ซึ่งอัตราการไหลของน้ำผ่านรอยร้าวแปรผันตรงกับความกว้างรอยร้าวยกกำลัง 3

อย่างไรก็ตาม ผลการทดสอบการรั่วซึมของน้ำของคอนกรีตที่ซ่อมแซมแล้วดังแสดงในตารางที่ 5.1 ไม่พบน้ำในภาชนะรองรับน้ำสำหรับกลุ่มที่ซ่อมแซมวัสดุซ่อมประสานซีเมนต์ ก. และวัสดุซ่อมประสานซีเมนต์ ข. ขณะที่ในกลุ่มที่ซ่อมแซมด้วยวัสดุซ่อมประสานซีเมนต์ ค. พบคราบน้ำเป็นจุดในภาชนะรองรับน้ำ แสดงให้เห็นว่าอัตราการรั่วซึมของน้ำน้อยกว่าอัตราการระเหยของน้ำ นั่นคือ มีการรั่วซึมน้อยมาก บ่งชี้ว่า วัสดุซ่อมประสานซีเมนต์สามารถป้องกันการรั่วซึมของน้ำได้ในระดับหนึ่ง อย่างไรก็ตาม ยังคงพบการซึมผ่านของน้ำ (Water Permeability) เช่นเดียวกับคอนกรีตปกติ โดยสังเกตเห็นการซึมผ่านของน้ำตามแนวราบ ดังแสดงในภาพที่ 5.7 ถึงภาพที่ 5.9



ก. ก่อนเติมน้ำ



ข. หลังเติมน้ำ 30 นาที



ค. หลังเติมน้ำ 360 นาที



ง. ณ สภาวะคงที่ (หลังเติมน้ำ 1440 นาที)

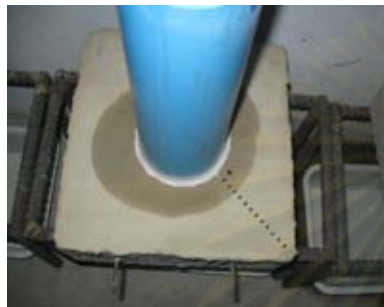
ภาพที่ 5.7 การซึมผ่านของน้ำตามแนวราบหลังการซ่อมแซมด้วยวัสดุซ่อม ก.



ก. ก่อนเติมน้ำ



ข. หลังเติมน้ำ 30 นาที



ค. หลังเติมน้ำ 360 นาที



ง. ณ สภาวะคงที่ (หลังเติมน้ำ 1440 นาที)

ภาพที่ 5.8 การซึมผ่านของน้ำตามแนวรบบหลังการซ่อมแซมด้วยวัสดุซ่อม ข.



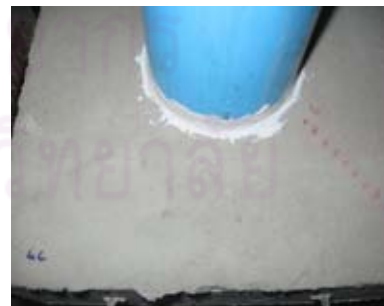
ก. ก่อนเติมน้ำ



ข. หลังเติมน้ำ 30 นาที



ค. หลังเติมน้ำ 360 นาที

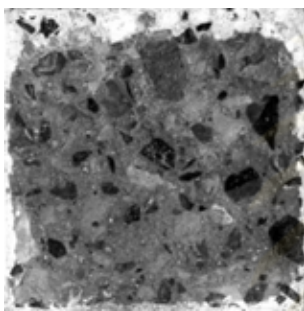


ง. ณ สภาวะคงที่ (หลังเติมน้ำ 1440 นาที)

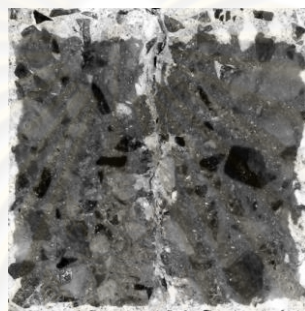
ภาพที่ 5.9 การซึมผ่านของน้ำตามแนวรบบหลังการซ่อมแซมด้วยวัสดุซ่อม ค.

### 5.3 ความต้านทานคาร์บอนเนชั่น

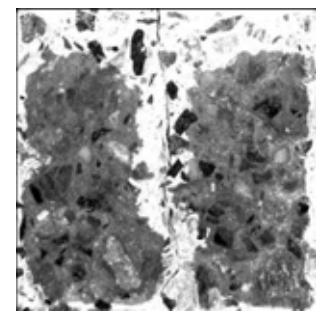
ผลการทดสอบความต้านทานคาร์บอนเนชั่น พบว่า คอนกรีตที่ไม่มีรอยร้าวสามารถสังเกตเห็นการเกิดปฏิกิริยาคาร์บอนเนชั่นอย่างสม่ำเสมอตามแนวผิวคอนกรีตที่สัมผัสกับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ แต่เมื่อคอนกรีตมีรอยร้าวเกิดขึ้น ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สามารถแพร่ผ่านตามแนวของรอยร้าวได้ จึงเกิดคาร์บอนเนชั่นตลอดแนวของรอยร้าว ดังแสดงในภาพที่ 5.10 และภาพที่ 5.10ค โดยรอยร้าวบริเวณใกล้ผิวคอนกรีตเกิดคาร์บอนเนชั่นมากเป็นพิเศษ และยังพบว่าระยะคาร์บอนเนชั่นมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาที่เก็บไว้ภายใต้สภาวะเร่งของคาร์บอนเนชั่น



ก. ไม่มีรอยร้าว ที่ 28 วัน



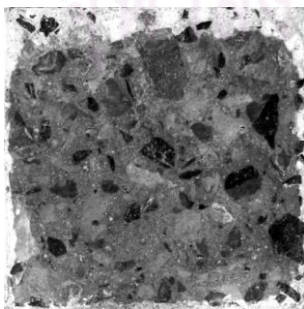
ข. รอยร้าว 1.0 มม. ที่ 28 วัน



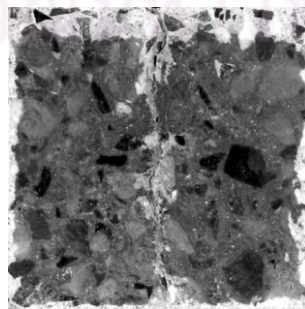
ค. รอยร้าว 1.0 มม. ที่ 84 วัน

ภาพที่ 5.10 การเกิดคาร์บอนเนชั่นในคอนกรีตที่ไม่มีรอยร้าวและคอนกรีตที่มีรอยร้าว

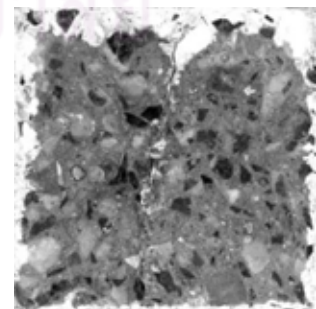
แต่เมื่อซ่อมแซมด้วยวัสดุซ่อมประสานซีเมนต์แล้ว ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ต้องแพร่ผ่านชั้นของวัสดุซ่อมก่อนจึงสามารถแพร่ผ่านชั้นของคอนกรีตที่มีรอยร้าวมาตามแนวของรอยร้าวได้ ลักษณะของการเกิดคาร์บอนเนชั่นจึงเปลี่ยนเป็นพฤติกรรมร่วมระหว่างวัสดุซ่อมประสานซีเมนต์และคอนกรีตที่มีรอยร้าว ผลการทดสอบพบว่า หลังการซ่อมแซม ระยะคาร์บอนเนชั่น ณ ตำแหน่งรอยร้าวไม่จำเป็นต้องเกิดตลอดแนวของรอยร้าว ดังแสดงในภาพที่ 5.11 ซึ่งยืนยันได้ว่า การซ่อมแซมด้วยวัสดุซ่อมประสานซีเมนต์มีประสิทธิภาพในการประสานรอยร้าวได้ในระดับหนึ่ง



ก. ไม่มีรอยร้าว

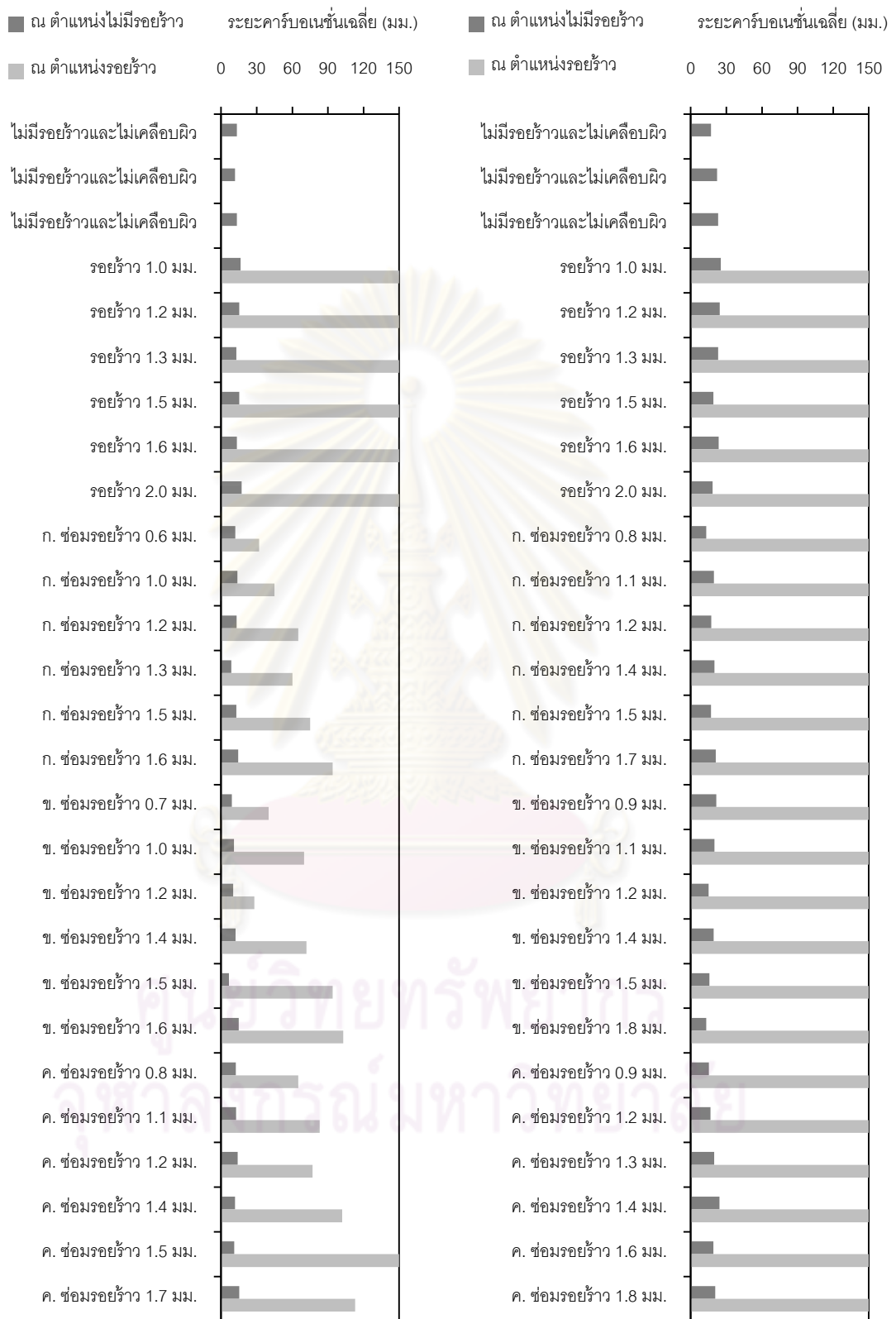


ข. รอยร้าว 1.0 มม.



ค. รอยร้าว 1.0 มม. ซ่อม ก.

ภาพที่ 5.11 การเกิดคาร์บอนเนชั่นในคอนกรีตสภาพต่างๆ ภายใต้สภาวะคาร์บอนเนชั่น 28 วัน



ก. ที่ 28 วัน

ข. ที่ 84 วัน

ภาพที่ 5.12 ระยะเวลาคาร์บอนเนชั่นของตัวอย่างลักษณะต่างๆ

ในภาพที่ 5.12 ตำแหน่งที่ไม่มีรอยร้าว คือ ค่าเฉลี่ยของระยะคาร์บอนชั้นที่วัดทุกระยะ 0.5 ซม. โดยเว้นจากขอบตัวอย่างข้างละ 2.5 ซม. และหากตัวอย่างมีรอยร้าว เว้นจากรอยร้าว 2.5 ซม. ขณะที่ตำแหน่งรอยร้าว คือ ระยะคาร์บอนชั้น ณ รอยร้าว พบว่า ตัวอย่างต่างๆ ที่เผชิญสภาวะเร่งของคาร์บอนชั้น 28 วัน ดังแสดงในภาพที่ 5.12ก ตัวอย่างที่ไม่มีรอยร้าวและไม่เคลือบผิว มีระยะคาร์บอนชั้นเฉลี่ยของอยู่ระหว่าง 12 มม. ถึง 13 มม. แต่สำหรับตัวอย่างที่มีรอยร้าว ระยะคาร์บอนชั้นของทุกตัวอย่างมีค่าเป็น 150 มม. ณ ตำแหน่งรอยร้าว เนื่องจากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สามารถแพร่ผ่านตามแนวของรอยร้าวได้ดังที่กล่าวข้างต้น ส่วนตำแหน่งที่ไม่มีรอยร้าวของตัวอย่างที่มีรอยร้าว พบว่า ระยะคาร์บอนชั้นเฉลี่ยมีค่าเพิ่มขึ้นมาอยู่ในช่วง 13 มม. ถึง 17 มม. เนื่องจากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่แพร่เข้ามาทางรอยร้าวส่งผลถึงตำแหน่งที่ไม่มีรอยร้าวด้วย อย่างไรก็ตาม เมื่อคอนกรีตที่มีรอยร้าวได้รับการเคลือบผิวด้วยวัสดุซ่อมประสานซีเมนต์แล้ว พบว่า ประสิทธิภาพดีขึ้นทั้งตำแหน่งรอยร้าวและตำแหน่งที่ไม่มีรอยร้าวเทียบกับขณะที่รอยร้าวยังไม่ได้รับการซ่อมแซม โดยระยะคาร์บอนชั้น ณ ตำแหน่งรอยร้าวลดลงมาอยู่ในช่วง 32 มม. ถึง 94 มม. เมื่อเคลือบผิวด้วยวัสดุซ่อม ก. ช่วง 40 มม. ถึง 103 มม. เมื่อเคลือบผิวด้วยวัสดุซ่อม ข. และช่วง 65 มม. ถึง 150 มม. เมื่อเคลือบผิวด้วยวัสดุซ่อม ค. ส่วนตำแหน่งที่ไม่มีรอยร้าว ระยะคาร์บอนชั้นเฉลี่ยลดลงมาอยู่ในช่วง 9 ถึง 15 มม. ช่วง 9 ถึง 15 มม. และช่วง 11 ถึง 15 มม. เมื่อเคลือบผิวด้วยวัสดุซ่อม ก. วัสดุซ่อม ข. และวัสดุซ่อม ค. ตามลำดับ ซึ่งเป็นผลจากพฤติกรรมร่วมระหว่างวัสดุซ่อมประสานซีเมนต์และคอนกรีตดังกล่าวไปแล้ว

ในส่วนผลการทดสอบตัวอย่างที่เผชิญสภาวะเร่ง 84 วัน ดังแสดงในภาพที่ 5.12ข พบว่า ที่ตำแหน่งรอยร้าว ตัวอย่างทดสอบทั้งหมดวัดระยะคาร์บอนชั้นได้ 150 มม. จึงไม่สามารถพิจารณาเปรียบเทียบประสิทธิภาพได้ ขณะที่ตำแหน่งที่ไม่มีรอยร้าว ตัวอย่างที่มีรอยร้าวมีระยะคาร์บอนชั้นอยู่ในช่วง 19 มม. ถึง 25 มม. มากกว่าตัวอย่างที่ไม่มีรอยร้าวซึ่งอยู่ในช่วง 17 มม. ถึง 23 มม. และตัวอย่างที่ได้รับการเคลือบผิวด้วยวัสดุซ่อม ก. วัสดุซ่อม ข. และวัสดุซ่อม ค. มีระยะคาร์บอนชั้นลดลงมาอยู่ในช่วง 13 มม. ถึง 21 มม. ช่วง 13 มม. ถึง 22 มม. และช่วง 15 มม. ถึง 24 มม. ตามลำดับ ซึ่งแนวโน้มนี้คล้ายคลึงกับตัวอย่างทดสอบที่เผชิญสภาวะเร่ง 28 วัน

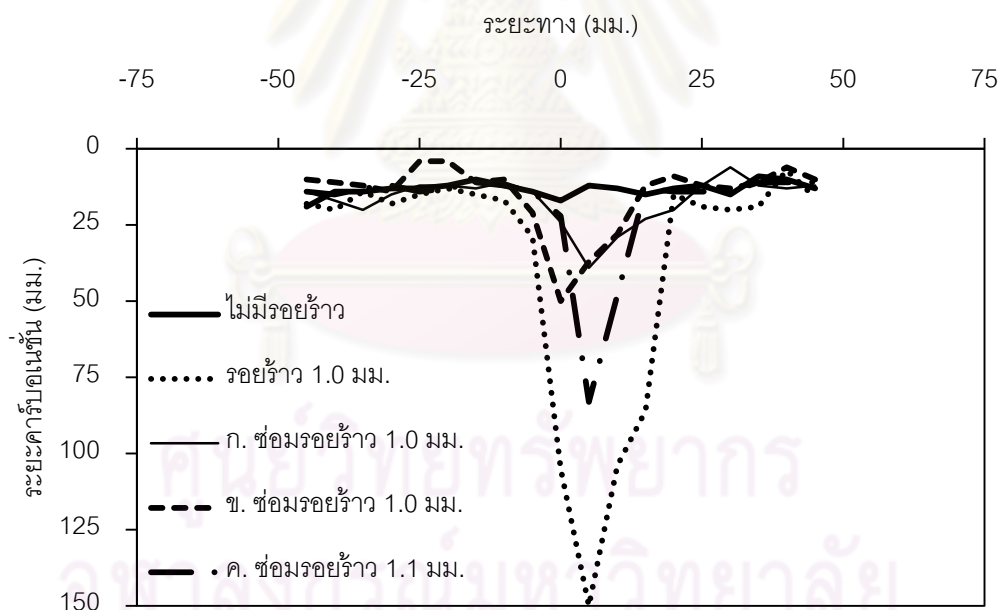
เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของวัสดุซ่อมประสานซีเมนต์ทั้งสามชนิด พบว่า วัสดุซ่อมประสานซีเมนต์ ก. มีความต้านทานคาร์บอนชั้น ณ ตำแหน่งรอยร้าวดีที่สุด สามารถอธิบายได้จากการที่วัสดุซ่อม ก. มีส่วนประกอบของดินต่าง จึงสามารถลดความเป็นกรดจากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ ทำให้ปฏิกิริยาคาร์บอนชั้นเกิดได้ยาก และวัสดุซ่อม ก. มีกำลังอัดเทียบค่อนข้างดี แสดงว่ามีความพูนตัว และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์แพร่ผ่านได้ยาก นอกจากนี้วัสดุ



ซุ่ม ก. ยังไหลเข้ามาปิดรอยร้าวตามแนวรอยร้าวได้เล็กน้อยอีกด้วย ส่งผลให้วัสดุซุ่ม ก. มีความต้านทานคาร์บอนเพิ่มขึ้นที่ดี

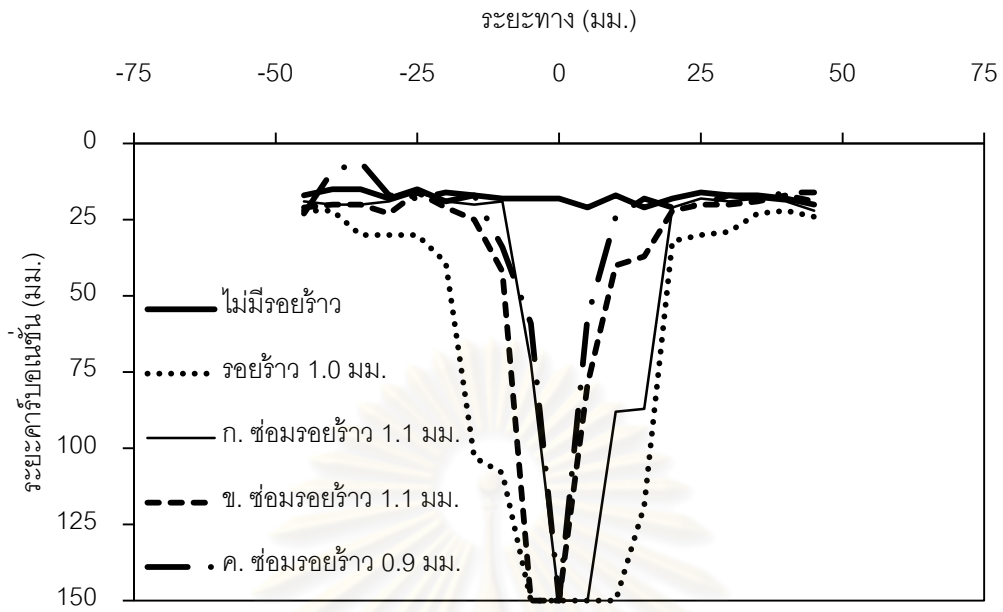
ส่วนวัสดุซุ่มประสานซีเมนต์ ข. มีความต้านทานคาร์บอนเพิ่มขึ้น ณ ตำแหน่งรอยร้าวรองจากวัสดุซุ่ม ก. เล็กน้อย และมีความต้านทาน ณ ตำแหน่งที่ไม่มีรอยร้าวใกล้เคียงกับวัสดุซุ่ม ก. เนื่องจากวัสดุซุ่ม ข. มีช่องว่างในเนื้อวัสดุซุ่มน้อย ดังที่เห็นได้จากกำลังอัดที่มีค่าสูงที่สุดและองค์ประกอบซึ่งมีการใช้ซิลิกาเป็นมวลรวม จึงทำให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์แพร่ผ่านชั้นของวัสดุซุ่มได้ค่อนข้างยาก สำหรับตำแหน่งรอยร้าววัสดุซุ่ม ข. สามารถไหลเข้ามาปิดรอยร้าวตามแนวรอยร้าวได้เล็กน้อยเช่นเดียวกับวัสดุซุ่ม ก.

สำหรับวัสดุซุ่ม ค. นั้น แม้เป็นวัสดุสำหรับงานผนัง แต่เมื่อมีการนำมาใช้งานในลักษณะของการเคลือบผิวเพื่อซุ่มแซมรอยร้าว พบว่า สามารถป้องกันการเกิดคาร์บอนเพิ่มขึ้นได้เพียงระดับหนึ่ง ต่ำกว่าวัสดุในกลุ่มซุ่มแซมอย่างวัสดุ ก. และ ข. อีกทั้งยังไม่สามารถไหลเข้ามาตามแนวรอยร้าวแบบเดียวกับวัสดุซุ่ม ก. และวัสดุซุ่ม ข. ได้ เนื่องจากมีความสามารถทำงานได้ที่ต่ำกว่า

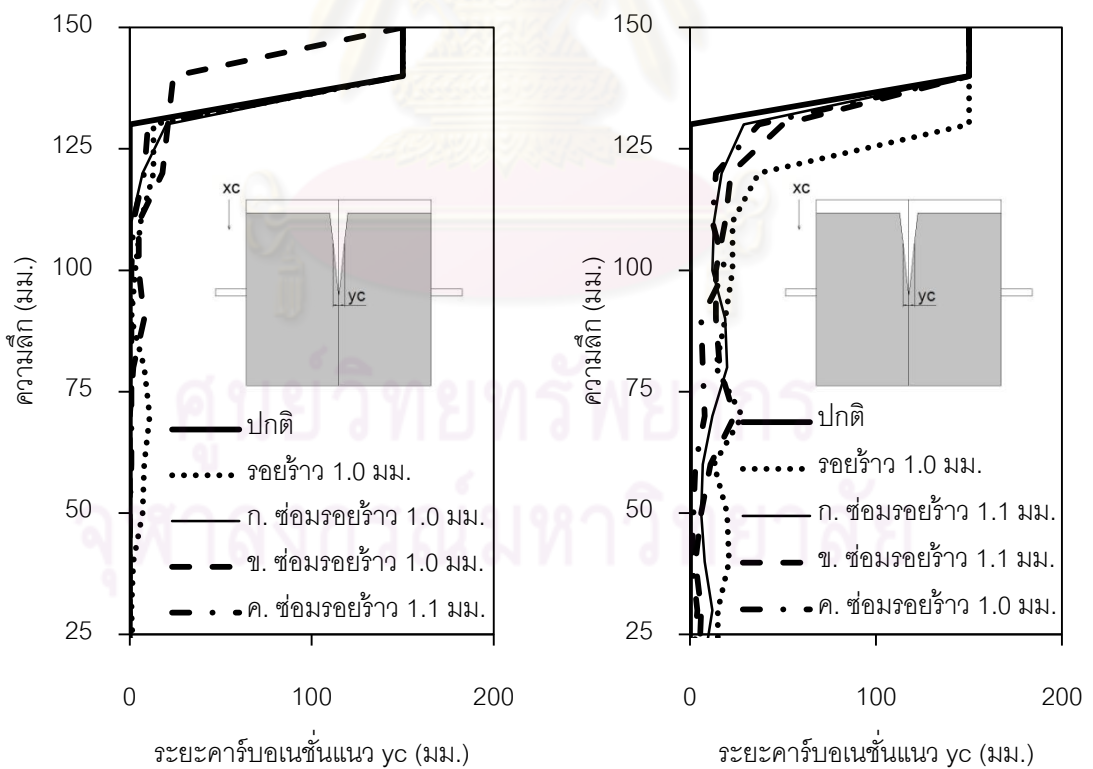


ภาพที่ 5.13 ระยะคาร์บอนเพิ่มขึ้น ณ ตำแหน่งต่างๆ

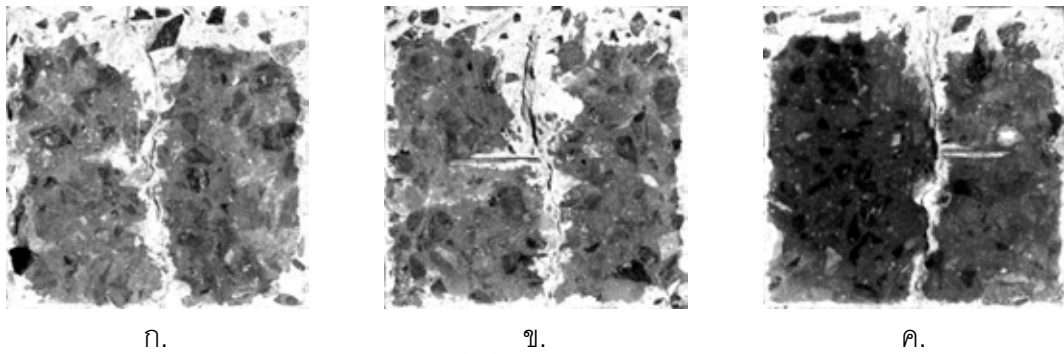
ของตัวอย่างที่มีความกว้างรอยร้าว  $1.0 \pm 0.1$  มม. ภายใต้อุณหภูมิ 28 วัน



ภาพที่ 5.14 ระยะคาร์บอนเนชั่น ณ ตำแหน่งต่างๆ ของตัวอย่างที่มีความกว้างรอยร้าว  $1.0 \pm 0.1$  มม. ภายใต้สภาวะแรง 84 วัน

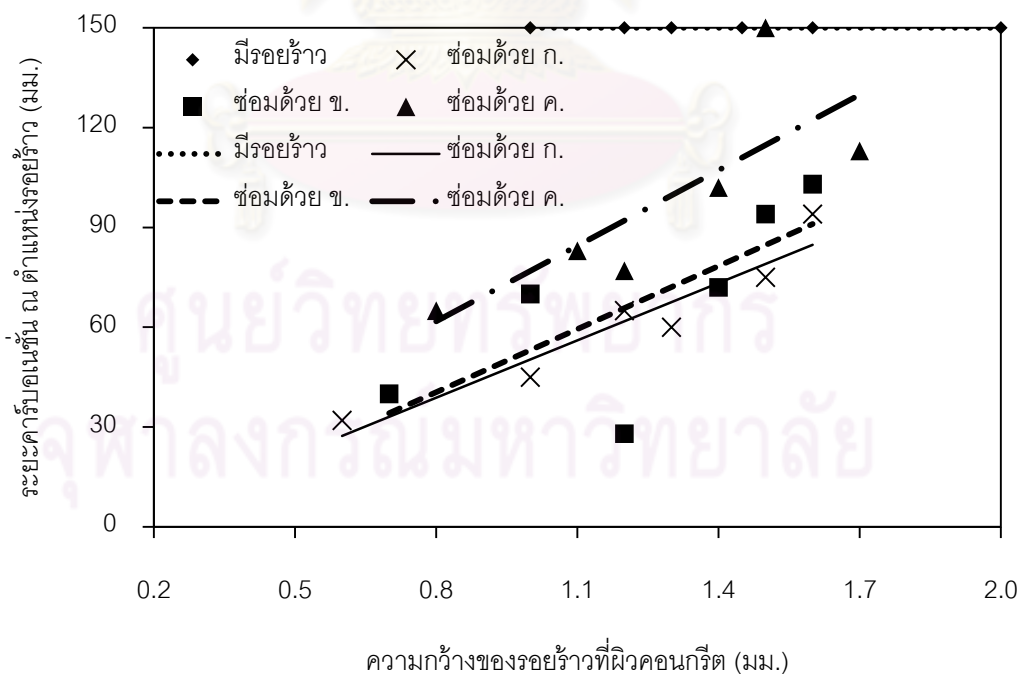


ภาพที่ 5.15 ความลึกของชั้นตัวอย่างกับระยะคาร์บอนเนชั่นแนวตั้งฉากกับทิศทางที่เกิดคาร์บอนเนชั่นโดยปกติของตัวอย่างลักษณะต่างๆ ที่ความกว้างรอยร้าวที่ผิวคอนกรีต  $1.0 \pm 0.1$  มม.



ภาพที่ 5.16 การเกิดคาร์บอนชั้น ณ ตำแหน่งเหล็กเสริม

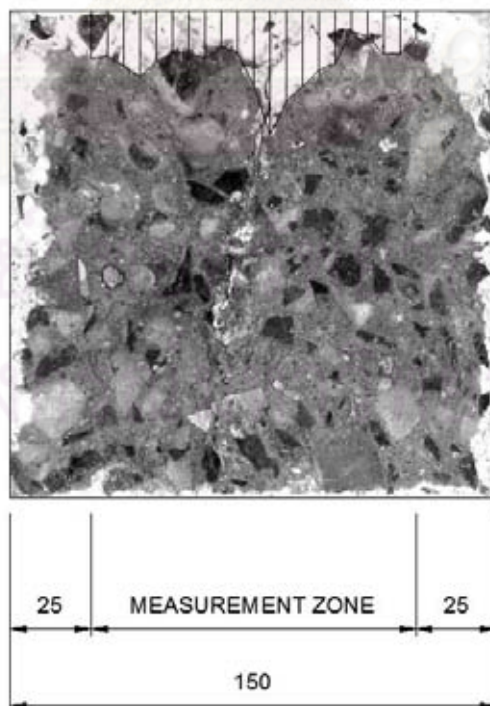
ภาพที่ 5.10 ถึงภาพที่ 5.14 ได้แสดงให้เห็นถึงระยะคาร์บอนชั้นแนวตั้งฉาก (ทิศทาง yc) กับทิศทางที่เกิดคาร์บอนชั้นปกติ (ทิศทาง xc) เมื่อพิจารณาเทียบกับความลึกของตัวอย่าง ดังแสดงในภาพที่ 5.15 พบว่า ระยะคาร์บอนชั้นแนวตั้งฉากบริเวณใกล้ผิวคอนกรีตมีค่ามาก และมีแนวโน้มลดลงเมื่อความลึกเพิ่มขึ้น แต่ ณ ความลึกประมาณ 75 มม. ซึ่งเป็นตำแหน่งที่มีเหล็กเสริม พบว่า ระยะคาร์บอนชั้นแนวตั้งฉากมีค่าสูงกว่าที่ความลึกอื่นๆ เนื่องจากบริเวณดังกล่าวมีค่าการซึมผ่านที่สูงกว่าบริเวณอื่น จึงเกิดคาร์บอนชั้นมากกว่า ดังแสดงในภาพที่ 5.16



ภาพที่ 5.17 ระยะคาร์บอนชั้น ณ ตำแหน่งรอยร้าว ภายใต้สภาวะคาร์บอนชั้น 28 วัน กับความกว้างของรอยร้าวที่ผิวคอนกรีต

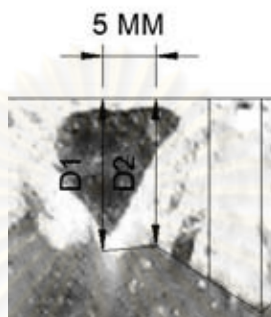
เมื่อนำความกว้างของรอยร้าวที่ผิวคอนกรีตค่าต่างๆ มาเปรียบเทียบกับค่าระยะคาร์บอนเนชั่น ณ ตำแหน่งรอยร้าวที่เกิดขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 5.17 พบว่า ตัวอย่างที่มีรอยร้าวและยังไม่ได้รับการซ่อมแซม เกิดปฏิกิริยาคาร์บอนเนชั่นตามแนวรอยร้าวลึกเต็มหน้าตัด เนื่องจากรอยร้าวมีลักษณะเป็นรอยร้าวทะลุ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จึงสามารถแพร่ได้ตามแนวของรอยร้าว ซึ่งคอนกรีตที่มีรอยร้าวขนาด 0.2 มม. ถึง 2.0 มม. นั้นให้ค่าคาร์บอนเนชั่นไม่น้อยกว่า 150 มม. ในสภาวะที่ทดสอบ แต่กรณีที่คอนกรีตได้รับการเคลือบผิวด้วยวัสดุซ่อมประสานซีเมนต์แล้ว พบว่าตัวอย่างทดสอบส่วนใหญ่ที่มีความกว้างรอยร้าวที่ผิวก่อนการซ่อมแซมมาก มีแนวโน้มที่จะเกิดระยะคาร์บอนเนชั่น ณ ตำแหน่งรอยร้าวมาก เนื่องจากมีโอกาสที่ความกว้างของรอยร้าวที่แต่ละตำแหน่งจะมีค่ามากเช่นเดียวกับความกว้างของรอยร้าวที่ผิว ทำให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์แพร่ได้ง่าย และเกิดปฏิกิริยาคาร์บอนเนชั่นได้ง่ายกว่าตัวอย่างที่มีความกว้างรอยร้าวที่ผิวน้อย

ในส่วนของปริมาณพื้นที่ที่เกิดคาร์บอนเนชั่นคำนวณจากวิธีประมาณ โดยแบ่งพื้นที่ที่เกิดคาร์บอนเนชั่นออกเป็นช่องสี่เหลี่ยมคางหมูย่อยๆ ผลรวมของพื้นที่สี่เหลี่ยมคางหมูทั้งหมด คือ พื้นที่ที่เกิดคาร์บอนเนชั่น ในการแบ่งช่อง เริ่มวัดพื้นที่จากตำแหน่งที่ห่างจากขอบ 25 มม. จนกระทั่งถึงตำแหน่งห่างจากขอบ 25 มม. อีกด้านหนึ่ง ดังแสดงในภาพที่ 5.18



ภาพที่ 5.18 การแบ่งพื้นที่ที่เกิดคาร์บอนเนชั่นเพื่อวัดพื้นที่

ช่องสี่เหลี่ยมคางหมูแต่ละช่องกำหนดให้มีระยะระหว่างด้านคู่ขนานกว้าง 5 มม. ดังแสดงในภาพที่ 5.19 จึงมีจำนวนสี่เหลี่ยมคางหมูทั้งหมด 20 ช่อง โดยพื้นที่ของสี่เหลี่ยมคางหมูสามารถคำนวณได้ ดังแสดงในสมการที่ 5.1 และพื้นที่ที่เกิดคาร์บอนเนชั่นทั้งหมดสามารถคำนวณได้ดังแสดงในสมการที่ 5.2 หรือคิดเป็นร้อยละของพื้นที่ทั้งหมดได้ดังแสดงในสมการที่ 5.3



ภาพที่ 5.19 ช่องสี่เหลี่ยมคางหมูแต่ละช่องของการแบ่งพื้นที่ที่เกิดคาร์บอนเนชั่น

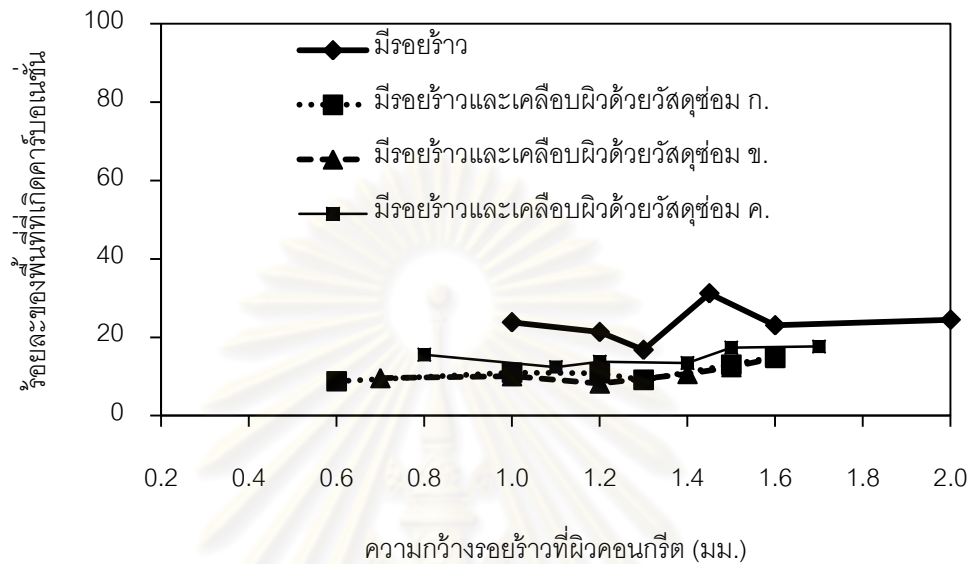
$$\text{Carbonated Area (sq.mm.)} = 0.5 \times (D1 + D2) \times 5 \quad (5.1)$$

$$\text{Total Carbonated Area (sq.mm.)} = 0.5 \times (D1 + 2 \times (D2 + D3 + \dots) + D21) \times 5 \quad (5.2)$$

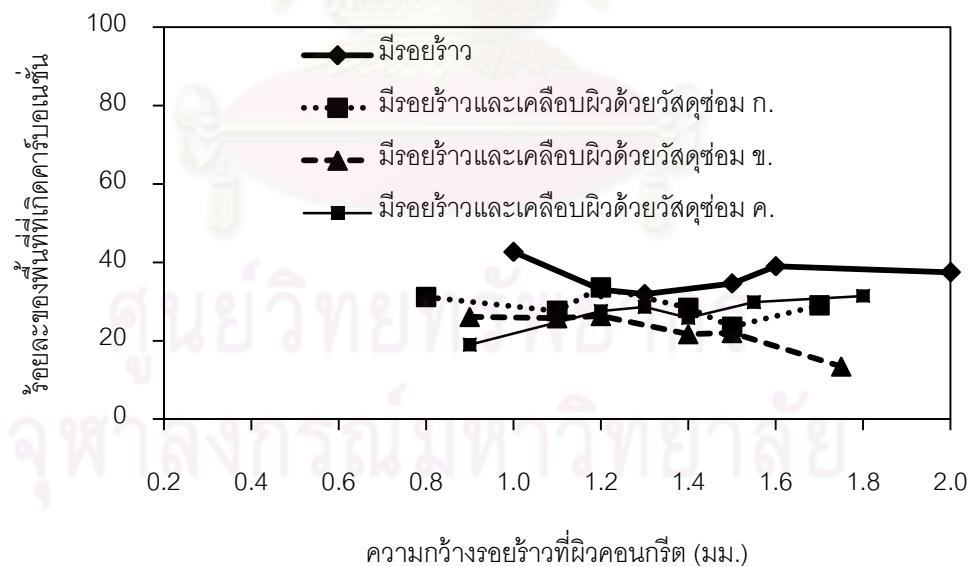
$$\text{Percentage of Total Carbonated Area (\%)} = \text{Total Carbonated Area} \times 100 / 15000 \quad (5.3)$$

จากระยะคาร์บอนเนชั่นของตัวอย่างคอนกรีตปกติในสภาวะเร่งคาร์บอนเนชั่นที่ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เข้มข้น 4% อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส และความชื้นสัมพัทธ์ 55% ที่ 28 วัน ตัวอย่างที่ไม่มีรอยร้าวและไม่มีการเคลือบผิวมีพื้นที่ที่เกิดคาร์บอนเนชั่นอยู่ในช่วงร้อยละ 7 ถึงร้อยละ 9 ขณะที่ตัวอย่างที่มีรอยร้าวและตัวอย่างที่ซ่อมแซมด้วยการเคลือบผิวแล้วมีพื้นที่ที่เกิดคาร์บอนเนชั่นดังแสดงในภาพที่ 5.20 พบว่า ตัวอย่างที่รอยร้าวมีพื้นที่ที่เกิดคาร์บอนเนชั่นเพิ่มขึ้นมาอยู่ในช่วงร้อยละ 17 ถึงร้อยละ 31 เนื่องจากผลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่แพร่เข้ามาตามแนวรอยร้าวทำให้เกิดคาร์บอนเนชั่นมากขึ้น อย่างไรก็ตามเมื่อซ่อมแซมด้วยการเคลือบผิวด้วยวัสดุซ่อมประสานซีเมนต์แล้ว พื้นที่ที่เกิดคาร์บอนเนชั่นมีค่าลดลง โดยพื้นที่ที่เกิดคาร์บอนเนชั่นหลังการเคลือบผิวด้วยวัสดุซ่อม ก. อยู่ที่ร้อยละ 9 ถึงร้อยละ 15 วัสดุซ่อม ข. ร้อยละ 8 ถึงร้อยละ 15 และวัสดุซ่อม ค. ร้อยละ 12 ถึงร้อยละ 18 ทั้งนี้เนื่องจากพฤติกรรมร่วมระหว่างวัสดุซ่อมประสานซีเมนต์และหน้าตัดคอนกรีต คือ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ต้องแพร่ผ่านชั้นของวัสดุซ่อมประสานซีเมนต์ก่อน จึงสามารถแพร่ตามแนวรอยร้าวได้ แสดงให้เห็นว่าการเคลือบผิวด้วยวัสดุซ่อมประสานซีเมนต์เพื่อซ่อมแซมรอยร้าวมีประสิทธิภาพต้านทานการเกิดคาร์บอนเนชั่นได้ โดยกลุ่มของวัสดุซ่อม ได้แก่ วัสดุ

ซอม ก. และวัสดุซอม ข. มีประสิทธิภาพใกล้เคียงกัน ขณะที่วัสดุซอม ค. ซึ่งเป็นปูนทรายสำหรับงานฉาบ มีประสิทธิภาพในระดับหนึ่ง



ภาพที่ 5.20 พื้นที่ที่เกิดคาร์บอนเนชั่นตัวอย่างคอนกรีตปกติในสภาวะเร่งคาร์บอนเนชั่นที่ 28 วัน



ภาพที่ 5.21 พื้นที่ที่เกิดคาร์บอนเนชั่นตัวอย่างคอนกรีตปกติในสภาวะเร่งคาร์บอนเนชั่นที่ 84 วัน

สำหรับตัวอย่างคอนกรีตปกติในสภาวะเร่งคาร์บอนเนชั่นที่ 84 วัน พื้นที่ที่เกิดคาร์บอนเนชั่นมีค่าเพิ่มขึ้นมาจากตัวอย่างคอนกรีตปกติในสภาวะเร่งคาร์บอนเนชั่นที่ 28 วัน โดยตัวอย่างที่ไม่มีรอยร้าวและไม่มีการเคลือบผิวมีพื้นที่ที่เกิดคาร์บอนเนชั่นอยู่ในช่วงร้อยละ 12 ถึงร้อยละ 15 ขณะที่

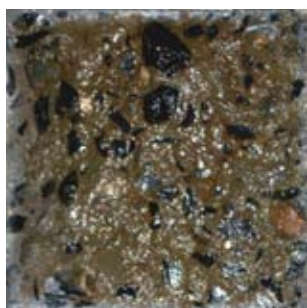
ตัวอย่างที่มีรอยร้าวและตัวอย่างที่ซ่อมแซมด้วยการเคลือบผิวแล้ววัดพื้นที่ที่เกิดคาร์บอนขึ้นได้ดังแสดงในภาพที่ 5.21 พบว่า ตัวอย่างที่มีรอยร้าวมีพื้นที่ที่เกิดคาร์บอนขึ้นเพิ่มขึ้นมาอยู่ในช่วงร้อยละ 32 ถึงร้อยละ 43 ซึ่งเป็นผลมาจากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่แพร่เข้ามาตามแนวรอยร้าว อย่างไรก็ตามเมื่อซ่อมแซมด้วยการเคลือบผิวด้วยวัสดุซ่อมประสานซีเมนต์แล้ว พื้นที่ที่เกิดคาร์บอนขึ้นมีค่าลดลง โดยพื้นที่ที่เกิดคาร์บอนขึ้นหลังการเคลือบผิวด้วยวัสดุซ่อม ก. อยู่ที่ร้อยละ 24 ถึงร้อยละ 34 วัสดุซ่อม ข. ร้อยละ 13 ถึงร้อยละ 26 และวัสดุซ่อม ค. ร้อยละ 19 ถึงร้อยละ 31 ข้อมูลเหล่านี้แสดงให้เห็นว่าตัวอย่างในสภาวะเร่งคาร์บอนขึ้นที่ 84 วัน มีแนวโน้มเช่นเดียวกับที่ 28 วัน คือ ตัวอย่างที่มีรอยร้าวมีพื้นที่ที่เกิดคาร์บอนขึ้นเพิ่มขึ้นจากตัวอย่างที่ไม่มีรอยร้าวและตัวอย่างที่ผ่านการเคลือบผิวเพื่อซ่อมแซมรอยร้าวแล้วมีพื้นที่ที่เกิดคาร์บอนขึ้นลดลงจากตัวอย่างที่มีรอยร้าว ซึ่งเนื่องจากพฤติกรรมร่วมระหว่างวัสดุซ่อมประสานซีเมนต์และหน้าตัดคอนกรีต และที่ 84 วันนี้สังเกตเห็นว่าวัสดุซ่อมทั้งสามชนิดมีประสิทธิผลใกล้เคียงกัน เนื่องจากการที่ระยะคาร์บอนขึ้นที่ตำแหน่งรอยร้าวมีระยะ 150 มม. เท่ากันทั้งหมด ดังแสดงในภาพที่ 5.17 ที่ผ่านมา จึงวัดพื้นที่ที่เกิดคาร์บอนขึ้นได้ใกล้เคียงกัน

เมื่อพิจารณาถึงความสัมพันธ์ของความกว้างรอยร้าวที่ผิวคอนกรีตกับพื้นที่ที่เกิดคาร์บอนขึ้น พบว่าพื้นที่ที่เกิดคาร์บอนขึ้นมีค่าค่อนข้างคงที่เมื่อความกว้างรอยร้าวที่ผิวคอนกรีตมีค่าเปลี่ยนไป ดังแสดงในภาพที่ 5.20 และภาพที่ 5.21 ซึ่งไม่สอดคล้องกับแนวโน้มของความสัมพันธ์ระหว่างระยะคาร์บอนขึ้นที่ตำแหน่งรอยร้าวกับความกว้างรอยร้าวที่ผิวคอนกรีต ดังภาพที่ 5.17 ซึ่งระบุว่า ระยะคาร์บอนขึ้นที่ตำแหน่งรอยร้าวมีค่าเพิ่มขึ้นตามความกว้างรอยร้าวที่ผิวคอนกรีต ทั้งนี้สามารถอธิบายได้ว่า ระยะคาร์บอนขึ้นเพิ่มขึ้นไม่มากเพื่อความกว้างรอยร้าวเพิ่มขึ้น พื้นที่ที่เกิดคาร์บอนขึ้นที่ตำแหน่งรอยร้าวจึงเพิ่มไม่มาก นอกจากนี้ระยะคาร์บอนขึ้นที่เพิ่มขึ้นดังกล่าวเป็นระยะคาร์บอนขึ้นเพียงตำแหน่งเดียว พื้นที่ที่เกิดคาร์บอนขึ้นที่ตำแหน่งรอยร้าวที่มีค่าเพิ่มขึ้นจึงไม่ส่งผลให้พื้นที่ที่เกิดคาร์บอนขึ้นทั้งหมดเปลี่ยนแปลงไปมากนัก

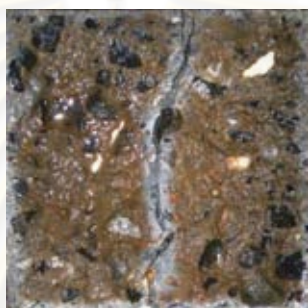
ดังนั้นในงานวิจัยนี้ สามารถเรียงความต้านทานคาร์บอนขึ้นของคอนกรีตสภาพต่างๆ จากสูงไปต่ำได้ดังนี้ คอนกรีตที่ไม่มีรอยร้าว คอนกรีตที่ผ่านการซ่อมแซมรอยร้าวด้วยวัสดุซ่อมประสานซีเมนต์แล้ว และคอนกรีตที่มีรอยร้าว ตามลำดับ และประสิทธิภาพของการซ่อมแซมรอยร้าวโดยการเคลือบผิวด้วยวัสดุซ่อมประสานซีเมนต์ เรียงจากประสิทธิภาพสูงไปต่ำได้ดังนี้ คอนกรีตที่ซ่อมแซมรอยร้าวด้วยวัสดุซ่อมประสานซีเมนต์ ก. คอนกรีตที่ซ่อมแซมรอยร้าวด้วยวัสดุซ่อมประสานซีเมนต์ ข. และคอนกรีตที่ซ่อมแซมรอยร้าวด้วยวัสดุซ่อมประสานซีเมนต์ ค. ตามลำดับ

#### 5.4 ความต้านทานคลอไรด์

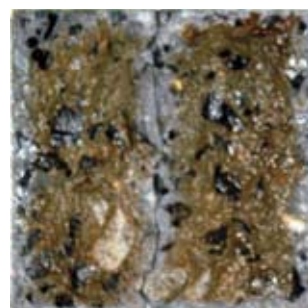
จากผลการทดสอบระยะแทรกซึมของคลอไรด์ พบว่า คอนกรีตที่ไม่มีรอยร้าวสังเกตเห็นการแทรกซึมของคลอไรด์อย่างสม่ำเสมอตามแนวผิวคอนกรีตที่สัมผัสกับสารละลายคลอไรด์ ดังแสดงในภาพที่ 5.22ก แต่เมื่อคอนกรีตมีรอยร้าวเกิดขึ้น พบการแทรกซึมของคลอไรด์ตามแนวของรอยร้าวยาวตลอดแนว ดังแสดงในภาพที่ 5.22ข และภาพที่ 5.22ค เนื่องจากคลอไรด์สามารถแทรกซึมผ่านมาตามแนวของรอยร้าวได้เช่นเดียวกับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดยรอยร้าวบริเวณใกล้ผิวคอนกรีตพบการแทรกซึมมากกว่าบริเวณอื่นๆ และพบว่า การแทรกซึมของคลอไรด์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาที่ตัวอย่างถูกเก็บไว้ในสารละลายคลอไรด์



ก. ไม่มีรอยร้าว ที่ 14 วัน



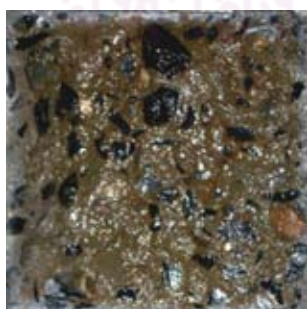
ข. รอยร้าว 1.0 มม. ที่ 14 วัน



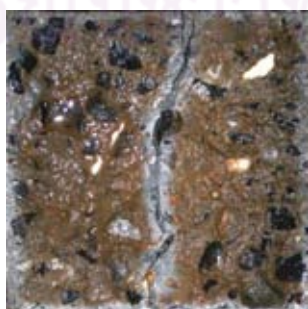
ค. รอยร้าว 1.0 มม. ที่ 28 วัน

ภาพที่ 5.22 การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ไม่มีรอยร้าวและคอนกรีตที่มีรอยร้าว

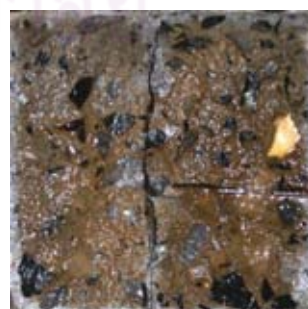
แต่เมื่อเคลือบผิวด้วยวัสดุซ่อมประสานซีเมนต์แล้ว คลอไรด์ต้องแพร่ผ่านชั้นของวัสดุซ่อมก่อนจึงสามารถแพร่ผ่านชั้นของคอนกรีตที่มีรอยร้าวมาตามแนวของรอยร้าวได้ ลักษณะของการแทรกซึมจึงเปลี่ยนเป็นพฤติกรรมร่วมระหว่างวัสดุซ่อมประสานซีเมนต์และคอนกรีตที่มีรอยร้าว เช่นเดียวกับผลความต้านทานคาร์บอนเช่นกัน ภาพที่ 5.23 ยืนยันได้ว่า การซ่อมแซมโดยการเคลือบผิวด้วยวัสดุซ่อมประสานซีเมนต์มีประสิทธิภาพในการซ่อมแซมรอยร้าวได้ในระดับหนึ่ง



ก. ไม่มีรอยร้าว



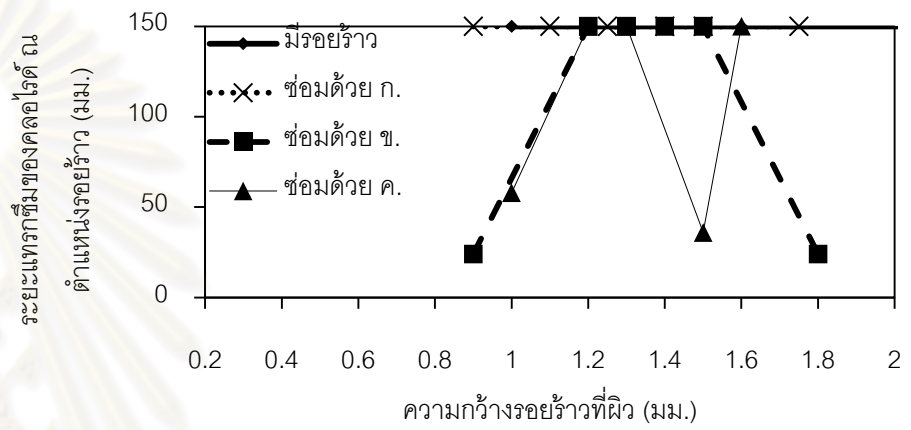
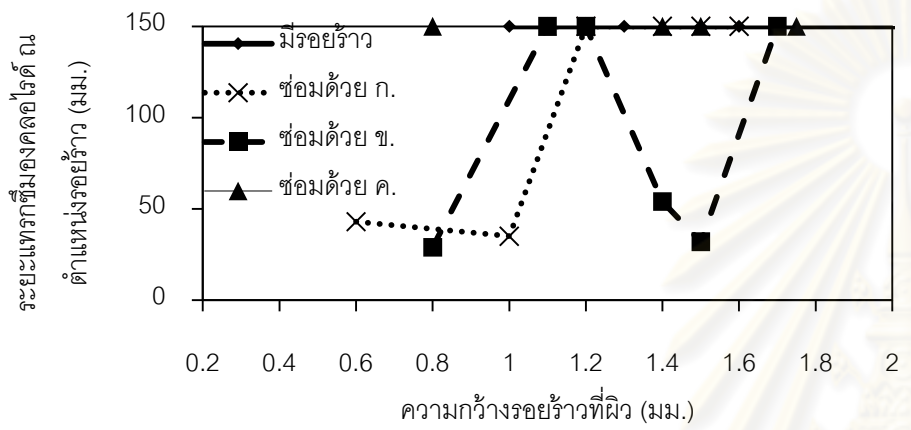
ข. รอยร้าว 1.0 มม.



ค. รอยร้าว 1.0 มม. ซ่อม ก.

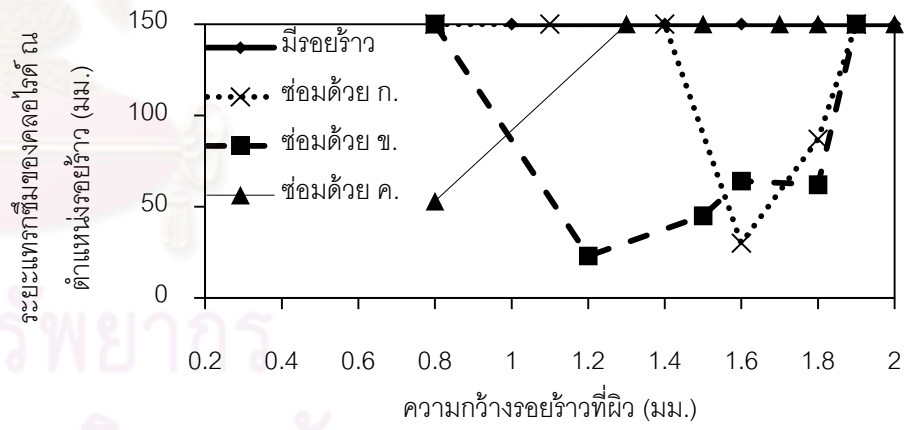
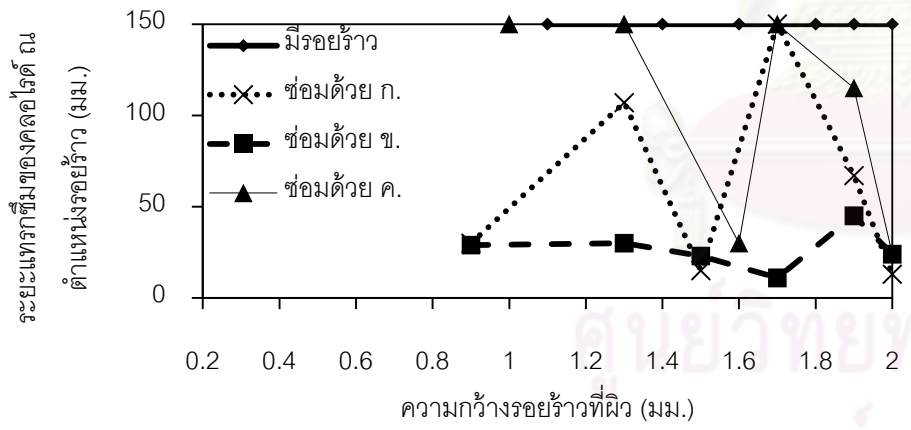
ภาพที่ 5.23 การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่แช่สารละลายคลอไรด์ 14 วัน





ก. สัดส่วนผสมที่ 1 คอนกรีตทั่วไป แสงสารละลายคลอไรด์ 14 วัน

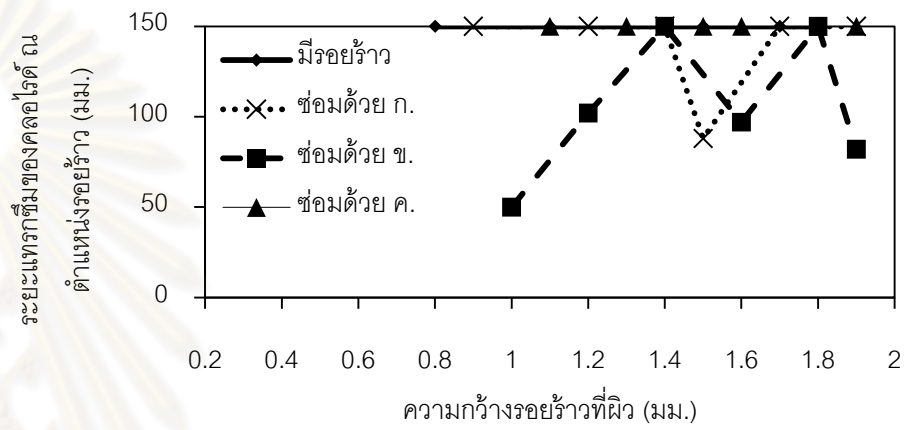
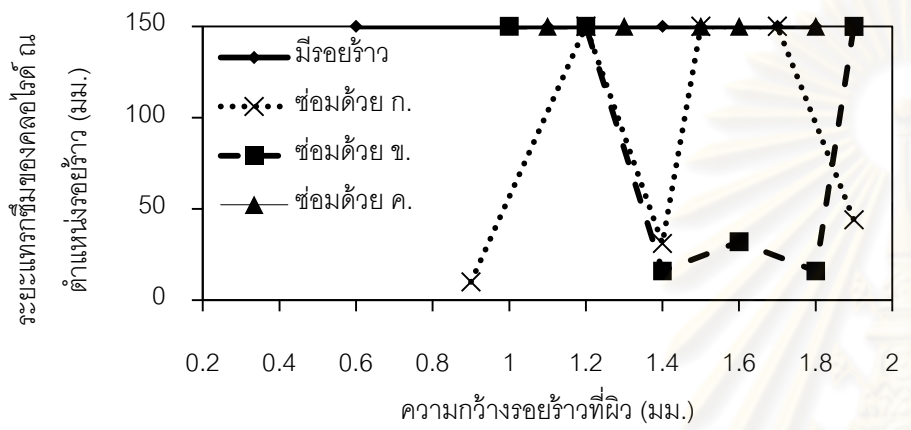
ข. สัดส่วนผสมที่ 1 คอนกรีตทั่วไป แสงสารละลายคลอไรด์ 28 วัน



ค. สัดส่วนผสมที่ 2 คอนกรีตกำลังสูง แสงสารละลายคลอไรด์ 14 วัน

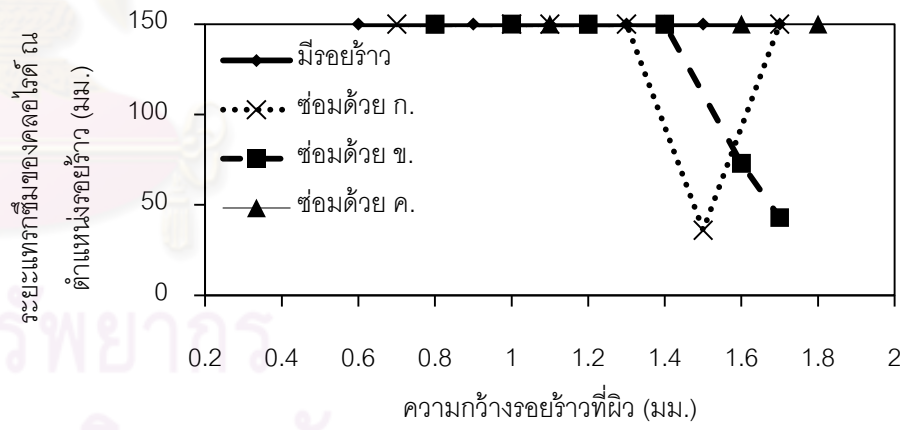
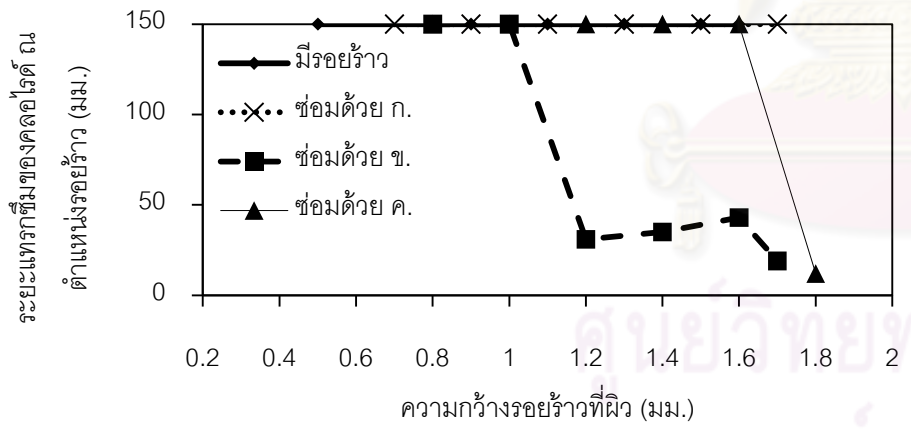
ง. สัดส่วนผสมที่ 2 คอนกรีตกำลังสูง แสงสารละลายคลอไรด์ 28 วัน

ภาพที่ 5.24 ระยะเวลาแทรกซึมของคลอไรด์ ณ ตำแหน่งรอยร้าวกับความกว้างของรอยร้าวที่ผิวคอนกรีตสัดส่วนผสมต่างๆ



จ. สัตว์ส่วนผสมที่ 3 คอนกรีตทั่วไปผสมเถ้าลอย เซสสารละลายคลอไรด์ 14 วัน

ฉ. สัตว์ส่วนผสมที่ 3 คอนกรีตทั่วไปผสมเถ้าลอย เซสสารละลายคลอไรด์ 28 วัน



ช. สัตว์ส่วนผสมที่ 4 คอนกรีตกำลังสูงผสมเถ้าลอย เซสสารละลายคลอไรด์ 14 วัน

ซ. สัตว์ส่วนผสมที่ 4 คอนกรีตกำลังสูงผสมเถ้าลอย เซสสารละลายคลอไรด์ 28 วัน

ภาพที่ 5.24 (ต่อ) ระยะแทรกซึมของคลอไรด์ ณ ตำแหน่งรอยร้าวกับความกว้างของรอยร้าวที่ผิวคอนกรีตสัตว์ส่วนผสมต่างๆ

ในกรณีการแทรกซึมของคลอไรด์นั้น ผลการทดสอบระยะแทรกซึม ณ ตำแหน่งรอยร้าวของกลุ่มตัวอย่างที่มีรอยร้าวในคอนกรีตทุกสัดส่วนผสม มีลักษณะคล้ายกับผลการทดสอบระยะคาร์บอนเนชั่น คือ มีระยะแทรกซึมของคลอไรด์ลึกเต็มหน้าตัด ดังภาพที่ 5.24 จึงไม่สามารถสรุปผลของความกว้างรอยร้าวที่ผิวคอนกรีตกับระยะแทรกซึมของคลอไรด์ในช่วงที่ทดสอบได้

สำหรับกลุ่มตัวอย่างที่ผ่านการซ่อมแซมรอยร้าวโดยการเคลือบผิวด้วยวัสดุซ่อมประสานซีเมนต์แล้ว พบว่า การแทรกซึมของคลอไรด์ ณ ตำแหน่งรอยร้าวในตัวอย่างที่หล่อด้วยคอนกรีตสัดส่วนผสมที่ 1 คอนกรีตทั่วไป ดังแสดงในภาพที่ 5.24ก และภาพที่ 5.24ข มีระยะแทรกซึมสูง ไม่สามารถสังเกตแนวโน้มได้ ขณะที่ตัวอย่างที่หล่อด้วยคอนกรีตสัดส่วนผสมที่ 2 คอนกรีตกำลังสูง มีช่องว่างน้อยกว่า คลอไรด์จึงซึมผ่านได้ยาก สามารถสังเกตการณ์เปลี่ยนแปลงได้ดีขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 5.24ค และภาพที่ 5.24ง พบว่า วัสดุซ่อมประสานซีเมนต์ ข. มีประสิทธิภาพในการต้านทานคลอไรด์สูงที่สุด ถัดมาคือวัสดุซ่อมประสานซีเมนต์ ก. และวัสดุซ่อมประสานซีเมนต์ ค. ตามลำดับ โดยในกลุ่มตัวอย่างที่หล่อด้วยคอนกรีตสัดส่วนผสมที่ 3 คอนกรีตทั่วไปผสมปอชโซลาน และสัดส่วนผสมที่ 4 คอนกรีตกำลังสูงผสมปอชโซลาน เห็นได้ว่า มีวัสดุซ่อมประสานซีเมนต์ ข. มีประสิทธิภาพต้านทานคลอไรด์สูงที่สุด รองลงมาคือวัสดุซ่อมประสานซีเมนต์ ก. และวัสดุซ่อมประสานซีเมนต์ ค. ตามลำดับ ดังแสดงในภาพที่ 5.24จ ถึงภาพที่ 5.24ซ

อย่างไรก็ตาม ผลการทดสอบความต้านทานคลอไรด์ที่ได้ ยังไม่เพียงพอที่จะบ่งบอกความสัมพันธ์ระหว่างความกว้างรอยร้าวที่ผิวคอนกรีตกับระยะแทรกซึมของคลอไรด์ ณ ตำแหน่งรอยร้าวได้ เนื่องจากคลอไรด์มีการแทรกซึมที่รวดเร็ว ตัวอย่างจำนวนมากแม้จะผ่านกระบวนการซ่อมแซมโดยการเคลือบผิวด้วยวัสดุซ่อมประสานซีเมนต์แล้ว ยังพบระยะแทรกซึมของคลอไรด์ลึกเต็มหน้าตัด ซึ่งจากการดำเนินการวิจัยนี้ มีข้อเสนอแนะ คือ หลังจากปรับเปลี่ยนวัสดุเคลือบผิวด้านที่ไม่ต้องการทดสอบจากอะคริลิกเป็นวัสดุชนิดอื่นที่มีประสิทธิภาพดีกว่าเรียบร้อยแล้ว ในการทดสอบปรับปรุงวิธีการทดสอบความต้านทานของคลอไรด์เพื่อลดปัญหาการแทรกซึมของคลอไรด์เต็มหน้าตัด สามารถดำเนินการได้หลายแนวทาง เช่น เพิ่มความหนาของชั้นวัสดุซ่อมประสานซีเมนต์ที่เคลือบผิวตัวอย่าง เพิ่มความลึกของตัวอย่าง ลดความเข้มข้นของสารละลายคลอไรด์หรือลดระยะเวลาที่แช่ตัวอย่างในสารละลายคลอไรด์ เป็นต้น แต่วิธีลดความเข้มข้นของสารละลายคลอไรด์และวิธีลดระยะเวลาที่แช่ตัวอย่างในสารละลายคลอไรด์อาจมีความยุ่งยากในขั้นตอนการทดสอบเบื้องต้นเพื่อหาปริมาณคลอไรด์และระยะเวลาที่เหมาะสม โดยเฉพาะงานวิจัยที่ใช้ตัวอย่างคอนกรีตหลายสัดส่วนผสม

## บทที่ 6

### สรุปผลการวิจัย

#### 6.1 สรุปผลการวิจัย

จากการดำเนินการวิจัยตามบทที่ 4 และผลการวิจัยและวิเคราะห์ข้อมูลในบทที่ 5 นำมาสรุปผลการวิจัยได้ดังนี้

- 6.1.1 การยึดเกาะระหว่างวัสดุซ่อมประสานซีเมนต์กับคอนกรีตเดิมมีแนวโน้มสูงเมื่อวัสดุซ่อมประสานซีเมนต์มีกำลังอัดสูง
- 6.1.2 วัสดุซ่อมประสานซีเมนต์มีแนวโน้มยึดเกาะกับผิวคอนกรีตกำลังสูงได้ดี แต่มีการยึดเกาะกับผิวคอนกรีตผสมเถ้าลอยต่ำ
- 6.1.3 การซ่อมแซมรอยร้าวด้วยวัสดุซ่อมประสานซีเมนต์ ป้องกันการรั่วซึมของน้ำได้ระดับหนึ่ง แต่ยังพบการซึมผ่านของน้ำได้เช่นเดียวกับคอนกรีตทั่วไป
- 6.1.4 ความต้านทานคาร์บอนเนชั่นและความต้านทานคลอไรด์ของคอนกรีตที่มีรอยร้าวลดลงเมื่อเทียบกับคอนกรีตที่ไม่มีรอยร้าว อย่างไรก็ตาม การซ่อมแซมรอยร้าวโดยการเคลือบผิวด้วยวัสดุซ่อมประสานซีเมนต์สามารถเพิ่มความต้านทานคาร์บอนเนชั่นและความต้านทานคลอไรด์ได้มากน้อยตามแต่ชนิด คุณสมบัติ และองค์ประกอบของวัสดุซ่อมประสานซีเมนต์ ซึ่งวัสดุซ่อมที่มีความเป็นเบสสูงสามารถต้านทานคาร์บอนเนชั่นได้ดี
- 6.1.5 ระยะเวลาคาร์บอนเนชั่น ณ ตำแหน่งที่มีรอยร้าวส่วนใหญ่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามความกว้างรอยร้าวที่ผิวของคอนกรีต
- 6.1.6 ประสิทธิภาพในการซ่อมแซมรอยร้าวโดยการเคลือบผิวด้วยวัสดุซ่อมประสานซีเมนต์ในด้านต่างๆ ในงานวิจัยนี้สามารถเรียงได้ดังแสดงในตารางที่ 6.1 ต่อไปนี้

ตารางที่ 6.1 สรุปประสิทธิภาพในการซ่อมแซมรอยร้าวด้วยวัสดุซ่อมประสานซีเมนต์

ด้านที่พิจารณา	ประสิทธิภาพของวัสดุซ่อมประสานซีเมนต์ในการซ่อมแซมรอยร้าวเรียงจากสูงไปต่ำ (สูง → ต่ำ)		
	วัสดุซ่อม ข.	วัสดุซ่อม ก.	วัสดุซ่อม ค.
การยึดเกาะ	วัสดุซ่อม ข.	วัสดุซ่อม ก.	วัสดุซ่อม ค.
การรั่วซึมของน้ำ	วัสดุซ่อม ก. ~ วัสดุซ่อม ข.		วัสดุซ่อม ค.
ความต้านทานคาร์บอนเนชั่น	วัสดุซ่อม ก.	วัสดุซ่อม ข.	วัสดุซ่อม ค.
ความต้านทานคลอไรด์	วัสดุซ่อม ข.	วัสดุซ่อม ก.	วัสดุซ่อม ค.

## 6.2 ข้อเสนอแนะ

จากการวิจัยทั้งหมดที่ผ่านมา มีข้อเสนอแนะดังนี้

- 6.2.1 การสร้างรอยร้าวบนตัวอย่างด้วยวิธีผ่าแยก เพื่อให้ได้ความกว้างรอยร้าวในช่วงที่ต้องการ ควรมีตัวอย่างจำนวนมาก และควรมีการเสริมเหล็กหลายขนาดหลายรูปแบบ เพื่อให้ความกว้างรอยร้าวที่ได้มีการกระจายตัว ดังแสดงในภาพที่ 2.12
- 6.2.2 เครื่องทดสอบกำลังยึดเกาะที่ใช้ควรมีค่าต่ำสุดที่อ่านได้และความละเอียดของเครื่องที่เหมาะสมกับตัวอย่างทดสอบ
- 6.2.3 ในการทดสอบการรั่วซึมของน้ำผ่านรอยร้าวคอนกรีตที่ใช้ระดับน้ำสูง เช่น 2.0 ม. ปัญหาในการควบคุมระดับน้ำ เนื่องจากอัตราการไหลเข้าของน้ำต่ำกว่าอัตราการรั่วซึมของน้ำผ่านรอยร้าวคอนกรีต เป็นสิ่งที่พึงระวัง อาจทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนในการทดสอบได้ และในกรณีที่น่าตัวอย่างที่ได้รับการซ่อมแซมรอยร้าวด้วยการเคลือบผิวแล้วมาทดสอบ ชั้นของวัสดุซ่อมที่มีกำลังต่ำหรือมีความหนาไม่เพียงพอมีโอกาสแตกเนื่องจากแรงดันน้ำ โดยเฉพาะอย่างยิ่งบริเวณที่มีรอยร้าวเดิมอยู่
- 6.2.4 การเคลือบผิวด้านอื่นๆ ที่ไม่ได้ทำการทดสอบด้วยอะคริลิกไม่สามารถป้องกันการเกิดคาร์บอนเนชั่นและการแทรกซึมของคลอไรด์ได้ทั้งหมด ควรมีการทำทับหลายชั้นเพื่อลดการเกิดคาร์บอนเนชั่นและการแทรกซึมของคลอไรด์ หรือเปลี่ยนวัสดุเคลือบผิวเป็นวัสดุชนิดอื่นๆ ที่มีประสิทธิภาพดีกว่า เช่น อีพอกซี โพลิเมอร์ เรซิน เป็นต้น
- 6.2.5 ตัวอย่างทดสอบความต้านทานคาร์บอนเนชั่นและความต้านทานคลอไรด์ควรเพิ่มความหนาของชั้นวัสดุซ่อมประสานซีเมนต์ที่เคลือบผิวดังกล่าว หรือเพิ่มความลึกของตัวอย่าง เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดระยะคาร์บอนเนชั่นหรือระยะแทรกซึมของคลอไรด์เต็มหน้าตัด

## รายการอ้างอิง

- [1] Industrial and Business Statistics group, Economic and Social Statistic Bureau, National Statistical Office. 2011. The Construction Industry Survey Whole Kingdom [Online]. Available from: <http://www.nso.go.th>[2011, March 1]
- [2] Mays, G., and Wilkinson, W. 1987. Polymer Repairs to Concrete: Their Influence on Structural Performance. ACI SP 100 (1987): 351-375.
- [3] Siam Cement Industry. 2005. Cement and Applications. 2<sup>nd</sup>ed.
- [4] Allen, R. T. L., Edwards, S. C., and Shaw, J. N. D. 1993. The Repair of Concrete Structures. 2<sup>nd</sup>ed. London UK: Blackie Academic & Professional.
- [5] Cabrera, J. G., and Al-Hasan, A. S. Performance Properties of Concrete Repair Materials. Construction and Building Materials 11 (1997): 283-290.
- [6] Aldea, C. M., Shah, S. P., and Karr, A. 1999. Effect of Cracking on Water and Chloride Permeability of Concrete. Journal of Materials in Civil Engineering 11 (1999, August).
- [7] Roberty, P., and Shaw, J. 1997. Materials for the Repair and Protection of Concrete. Construction and Building Materials 11 (1997): 275-281.
- [8] JIS K 5600 – 1 – 7:1999. 2000. Testing Methods for Paints – Part 1: General Rule – Section 7: Determination of Film Thickness. Japanese Industrial Standard. 1<sup>st</sup> English ed. Tokyo Japan: Japanese Standard Association.
- [9] ASTM Designation: C 1583/C 1583M – 04. 2004. Standard Test Method for Tensile Strength of Concrete Surfaces and the Bond Strength or Tensile Strength of Concrete Repair and Overlay Materials by Direct Tension (Pull – off Method). Annual Book of American Society for Testing Materials Standard C04.02 (2004). United States: ASTM International.
- [10] Edvardsen, C. 1999. Water Permeability and Autogenous Healing of Cracks in Concrete. ACI Materials Journal 96-M56 (1999, July-August).
- [11] Reinhardt, H. W., and Joose, M. 2003. Permeability and Self-healing of Cracked Concrete as a Function of Temperature and Crack Width. Cement and Concrete Research 33 (2003): 981-985.

- [12] Song, X. F., Wei, J. F., and He, T. SH. 2009. A Method to Repair Concrete Leakage Through Cracks by Synthesizing Super-absorbent Resin in situ. Construction and Building Materials 23 (2009): 386-391.
- [13] Neville, A. M. 1995. Properties of Concrete. 4<sup>th</sup> ed: Longman Group Limited.,
- [14] Hewlett, P. C. 2004. Lea's Chemistry of Cement and Concrete. 4<sup>th</sup> ed: Elsevier Science & Technology Books.
- [15] Khunthongkeaw, J., Tangtermsirikul, S. and Leelawat, T. 2006. A Study on Carbonation Depth Prediction for Fly Ash Concrete. Construction and Building Materials 20 (2006): 744-753.
- [16] Mehta, P. K., and Monteiro, P. J. M. Concrete: Microstructure, Properties, and Materials. 3<sup>rd</sup> ed: McGraw-Hill.
- [17] NT BUILD 492. Concrete, Mortar and Cement-base Repair Materials: Chloride Migration Coefficient from Non-steady-state Migration Experiments. Approved on 1999, November. Finland: NORDTEST.
- [18] Riss, D. 1993. Testing for Chloride with Silver Nitrate. Conserve 0 Gram 6/3 (1993). National Park Service.
- [19] Xypex. 2004. CONCENTRATE DS [Online]. Available from: <http://www.xypex.co.th>[2010, March 22]
- [20] Xypex. 2004. MSDS Concentrate Modified DS1 PatchnPlug [Online]. Available from: <http://www.xypex.co.th>[2010, March 22]
- [21] BASF Construction Chemicals. 2007. Masterseal 530 (Thoroseal SLX) PDS [Online]. Available from: <http://www.basf-cc.com>[2009, April 21]
- [22] BASF Construction Chemicals. 2007. Masterseal 530 (Thoroseal SLX) MSDS [Online]. Available from: <http://www.basf-cc.com>[2009, April 21]
- [23] SCG Cement. 2009. Product Information Plaster: General Plane Plaster [Online]. Available from: <http://cement.scg.co.th>[2011, February 25]
- [24] Arkraworathikumporn, P. 2009, May 13. Engineer, CPAC. Interview.

## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายไอฟาร เหลืองเพชรภรณ์ เกิดเมื่อวันที่ 4 ตุลาคม พ.ศ. 2528 ที่จังหวัดขอนแก่น เข้า  
รับการศึกษาระดับประถมศึกษาที่โรงเรียนพระกุมารร้อยเอ็ด ระดับมัธยมศึกษาที่โรงเรียนร้อยเอ็ด  
วิทยาลัย และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาบัณฑิต หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขา  
วิศวกรรมโยธา จากจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยในปีการศึกษา 2550 และเข้าศึกษาต่อในระดับ  
ปริญญาโท สาขาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโครงสร้าง คณะ  
วิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปีการศึกษา 2551 จบจนปัจจุบัน



ศูนย์วิทยพัชการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย