

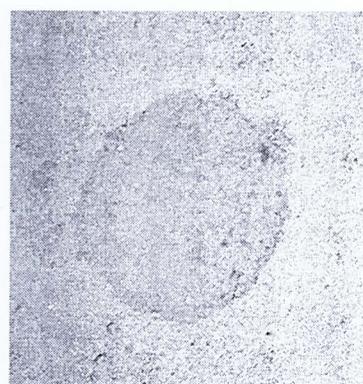
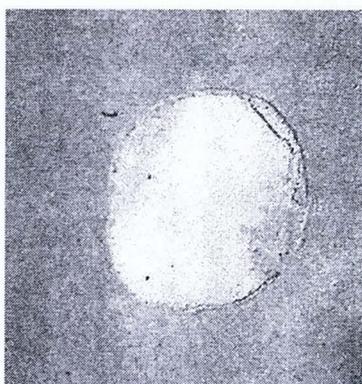
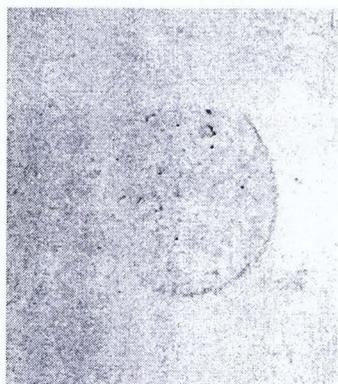
## บทที่ 5

### ผลการวิจัยและวิเคราะห์ข้อมูล

จากการดำเนินการวิจัยในบทที่ 4 ผลการวิจัยและวิเคราะห์ข้อมูลของการดำเนินการทั้ง 4 ส่วน อันได้แก่ การยึดเกาะ การรั่วซึมของน้ำ ความต้านทานคาร์บอนเข้ัน และความต้านทานคลอไรด์ มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

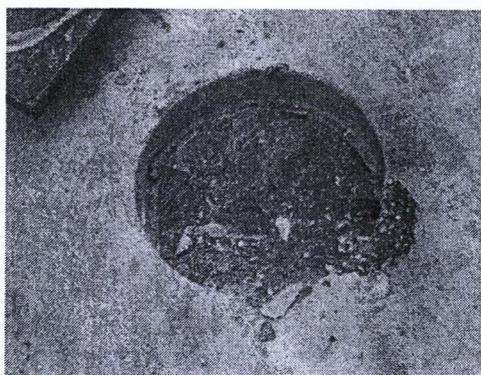
#### 5.1 การยึดเกาะ

ในการทดสอบการยึดเกาะระหว่างวัสดุซ่อมประสานซีเมนต์กับผิวคอนกรีตด้วยวิธีพุลออกฟซึ่งดัดแปลงจากมาตรฐาน ASTM C1583 นั้น พบว่า การยึดเกาะของวัสดุซ่อมประสานซีเมนต์ทั้งสามชนิดมีการวิบัติลักษณะเดียวกัน คือ วิบัติที่รอยต่อระหว่างวัสดุซ่อมประสานซีเมนต์และผิวคอนกรีตเดิม ดังแสดงในภาพที่ 5.1 บ่งชี้ว่ากำลังยึดเกาะของวัสดุซ่อมประสานซีเมนต์ทั้งสามชนิดมีค่าต่ำกว่ากำลังดึงของคอนกรีตและกำลังดึงของวัสดุซ่อมประสานซีเมนต์นั่นเอง



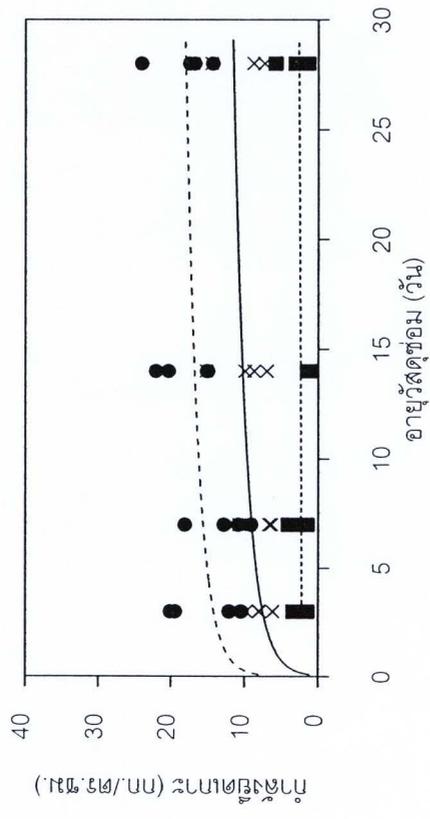
ก. การวิบัติของวัสดุซ่อม ก. ข. การวิบัติของวัสดุซ่อม ข. ค. การวิบัติของวัสดุซ่อม ค.

ภาพที่ 5.1 การวิบัติของวัสดุซ่อมประสานซีเมนต์ที่เคลือบผิวคอนกรีตเมื่อทดสอบกำลังยึดเกาะ

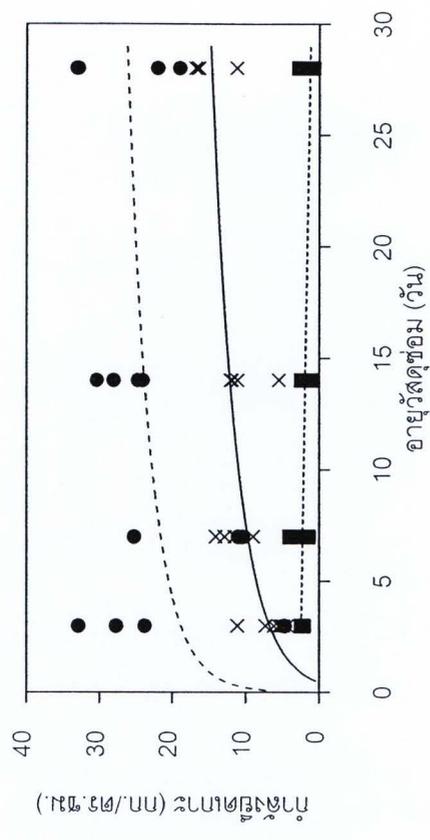


ภาพที่ 5.2 การวิบัติของคอนกรีตเมื่อทดสอบกำลังยึดเกาะตามมาตรฐาน ASTM C1583

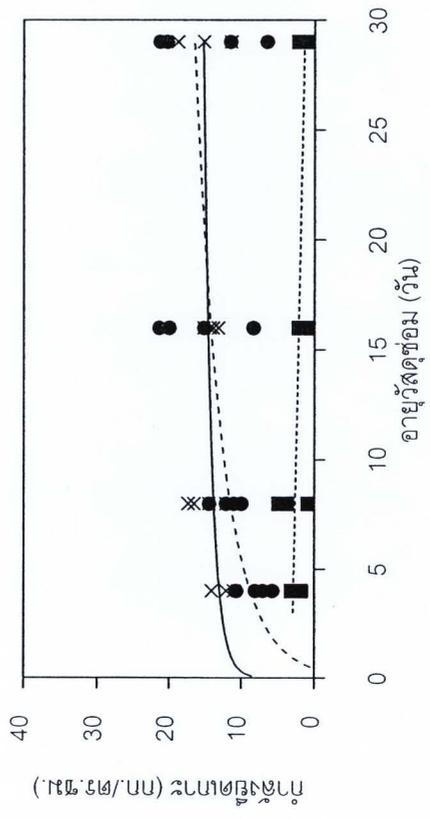
ก. ค. ข. ● ■ x



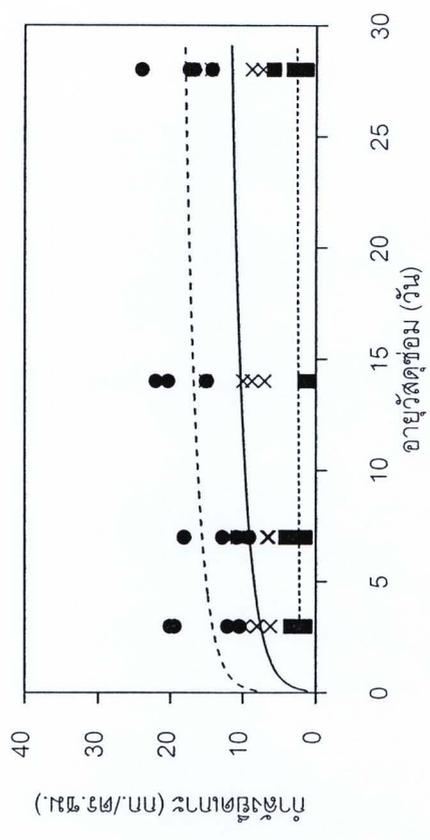
ก. สัตว์ผสมที่ 1 คอนกรีตทั่วไป



ข. สัตว์ผสมที่ 2 คอนกรีตกำลังสูง



ค. สัตว์ผสมที่ 3 คอนกรีตทั่วไปผสมเถ้าลอย

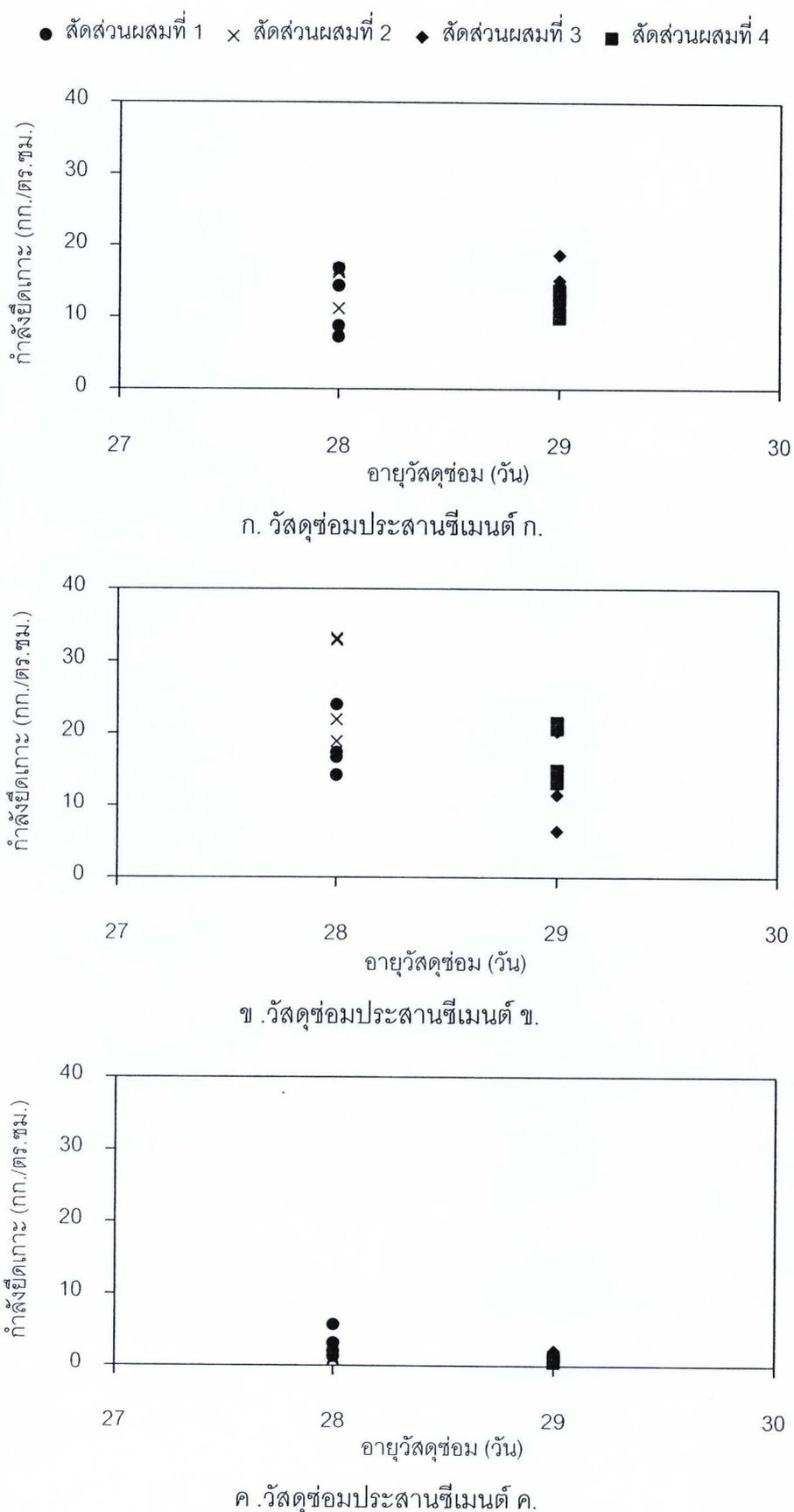


ง. สัตว์ผสมที่ 4 คอนกรีตกำลังสูงผสมเถ้าลอย

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 กำลังไข่เดาะของวีสดูซ่อมประสานแต่ละชนิดกับคอนกรีตสัตว์ผสมต่างๆ

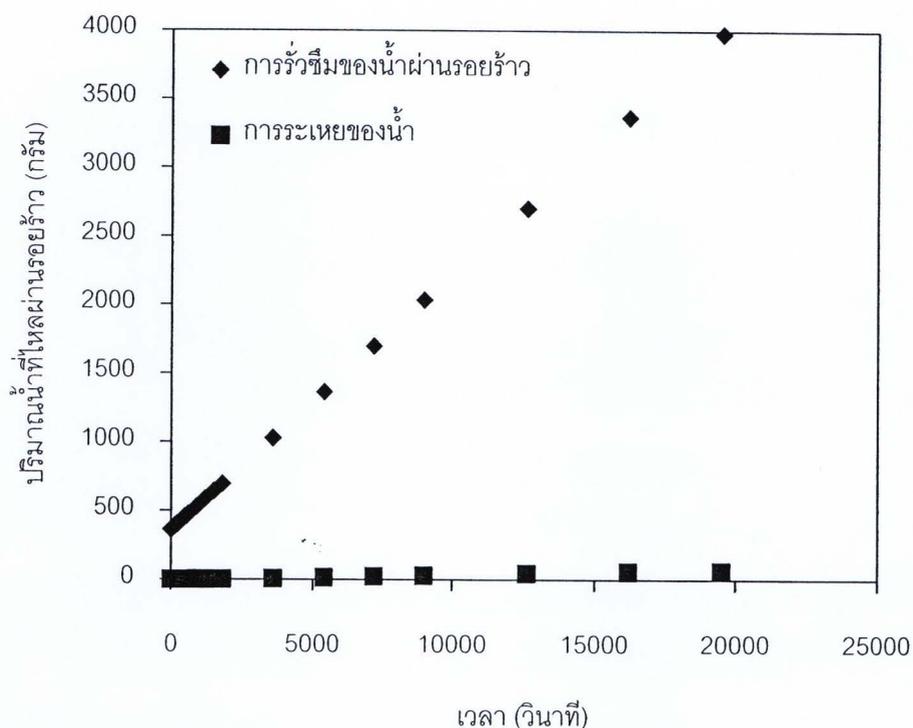
หากนำข้อมูลดังแสดงในภาพที่ 5.3 มาจัดเรียงใหม่ โดยรวมผลการทดสอบกำลังยึดเกาะของวัสดุซ่อมประสานซีเมนต์ชนิดเดียวกันกับผิวคอนกรีตแต่ละสัดส่วนผสมที่ 28 วัน มาไว้ด้วยกัน ดังแสดงในภาพที่ 5.4 ช่วยให้สามารถพิจารณาแนวโน้มการยึดเกาะของวัสดุซ่อมประสานซีเมนต์กับผิวคอนกรีตสัดส่วนผสมต่างๆ ได้ชัดเจนขึ้น โดยกำลังยึดเกาะของวัสดุซ่อมประสานซีเมนต์ 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 แก้วลอย ได้ต่ำกว่าคอนกรีตที่ไม่มีส่วนผสมของปอชโซลานนั้น เนื่องจากแก้วลอยมีความถ่วงจำเพาะต่ำกว่าซีเมนต์ จึงเคลื่อนตัวมาอยู่ที่ผิวของคอนกรีต ด้วยลักษณะของอนุภาคแก้วลอยที่เป็นทรงกลม ผิวของคอนกรีตที่มีแก้วลอยเป็นส่วนผสมจึงเรียกว่าผิวคอนกรีตที่ไม่มีแก้วลอยเป็นส่วนผสม วัสดุซ่อมประสานซีเมนต์ที่เคลือบผิวคอนกรีตที่มีแก้วลอยเป็นปอชโซลานจึงยึดเกาะได้ไม่ดี

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

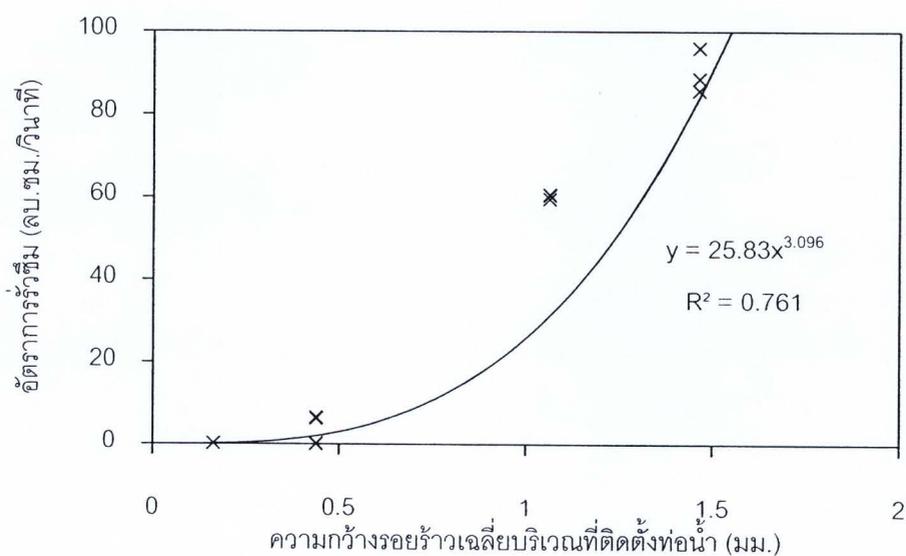
## 5.2 การรั่วซึมของน้ำ

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. มาใช้เป็นตัวอย่งทดสอบเบื้องต้นนั้น 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



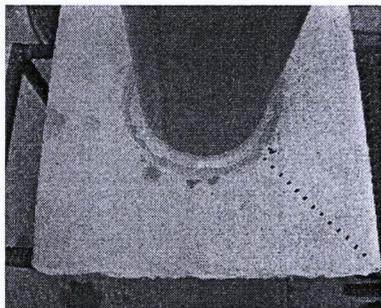
ภาพที่ 5.6 อัตราการรั่วซึมของน้ำในตัวอย่างที่มีรอยร้าวกับความกว้างรอยร้าวเฉลี่ย

ตารางที่ 5.1 ผลการทดสอบการรั่วซึมของน้ำ

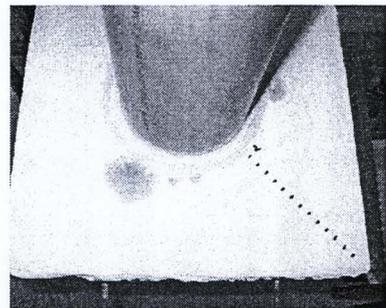
ตัวอย่าง ที่	ความกว้าง รอยร้าวเฉลี่ย ก่อนซ่อมแซม (มม.)	อัตราการรั่วซึม เฉลี่ย (ลบ.ซม./วินาที)	ลักษณะที่พบ
1 ร้าว	0.16	0.18	น้ำรั่วซึมผ่านรอยร้าวของคอนกรีต
2 ร้าว	0.44	0.15	น้ำรั่วซึมผ่านรอยร้าวของคอนกรีต
3 ร้าว	0.44	6.48	น้ำรั่วซึมผ่านรอยร้าวของคอนกรีต
4 ร้าว	1.06	60.17	น้ำรั่วซึมผ่านรอยร้าวของคอนกรีต
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

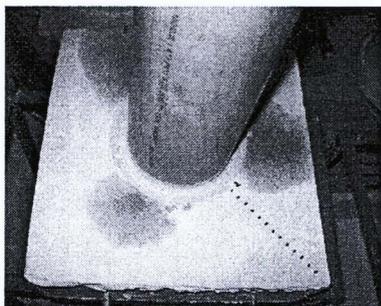
อย่างไรก็ตาม ผลการทดสอบการรั่วซึมของน้ำของคอนกรีตที่ซ่อมแซมแล้วดังแสดงในตารางที่ 5.1 ไม่พบน้ำในภาชนะรองรับน้ำสำหรับกลุ่มที่ซ่อมแซมวัสดุซ่อมประสานซีเมนต์ ก. และวัสดุซ่อมประสานซีเมนต์ ข. ขณะที่ในกลุ่มที่ซ่อมแซมด้วยวัสดุซ่อมประสานซีเมนต์ ค. พบคราบน้ำเป็นจุดในภาชนะรองรับน้ำ แสดงให้เห็นว่าอัตราการรั่วซึมของน้ำน้อยกว่าอัตราการระเหยของน้ำ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



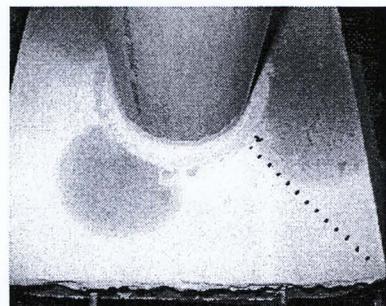
ก. ก่อนเติมน้ำ



ข. หลังเติมน้ำ 30 นาที

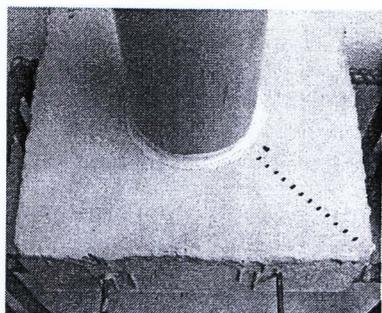


ค. หลังเติมน้ำ 360 นาที

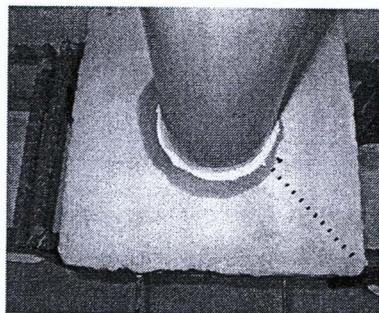


ง. ณ สภาวะคงที่ (หลังเติมน้ำ 1440 นาที)

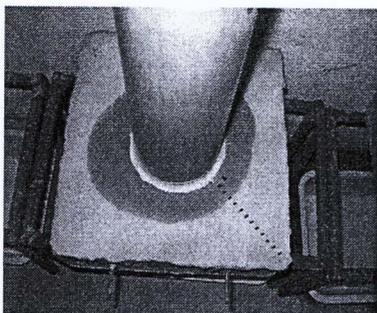
ภาพที่ 5.7 การซึมผ่านของน้ำตามแนวร้าวหลังการซ่อมแซมด้วยวัสดุซ่อม ก.



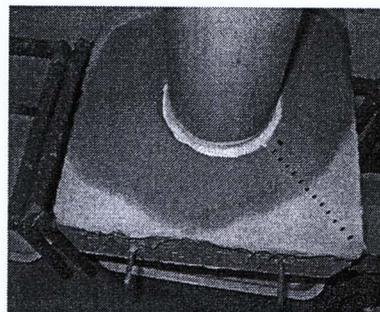
ก. ก่อนเติมน้ำ



ข. หลังเติมน้ำ 30 นาที

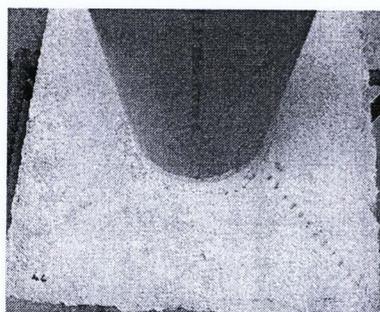


ค. หลังเติมน้ำ 360 นาที

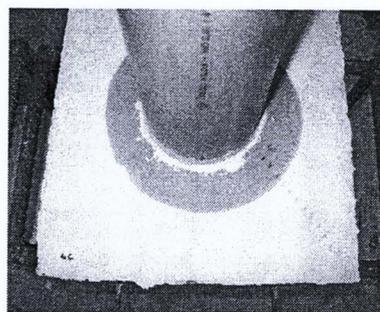


ง. ณ สภาวะคงที่ (หลังเติมน้ำ 1440 นาที)

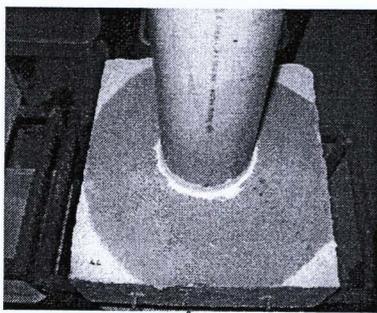
ภาพที่ 5.8 การซึมผ่านของน้ำตามแนวราบหลังการซ่อมแซมด้วยวัสดุซ่อม ข.



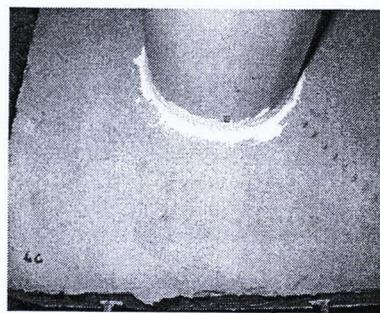
ก. ก่อนเติมน้ำ



ข. หลังเติมน้ำ 30 นาที



ค. หลังเติมน้ำ 360 นาที

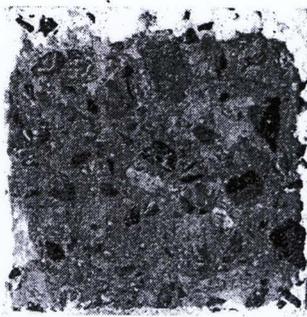


ง. ณ สภาวะคงที่ (หลังเติมน้ำ 1440 นาที)

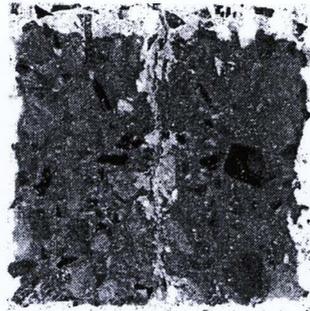
ภาพที่ 5.9 การซึมผ่านของน้ำตามแนวราบหลังการซ่อมแซมด้วยวัสดุซ่อม ค.

### 5.3 ความต้านทานคาร์บอนเนชั่น

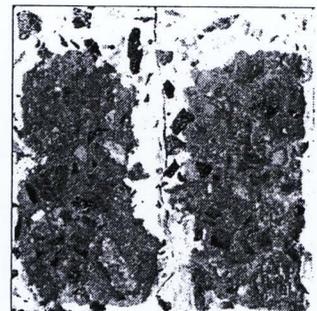
ผลการทดสอบความต้านทานคาร์บอนเนชั่น พบว่า คอนกรีตที่ไม่มีรอยร้าวสามารถสังเกตเห็นการเกิดปฏิกิริยาคาร์บอนเนชั่นอย่างสม่ำเสมอตามแนวผิวคอนกรีตที่สัมผัสกับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ แต่เมื่อคอนกรีตมีรอยร้าวเกิดขึ้น ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สามารถแพร่ผ่านตามแนวของรอยร้าวได้ จึงเกิดคาร์บอนเนชั่นตลอดแนวของรอยร้าว ดังแสดงในภาพที่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



ก. ไม่มีรอยร้าว ที่ 28 วัน



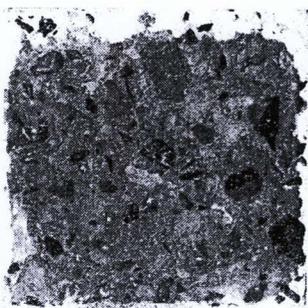
ข. รอยร้าว 1.0 มม. ที่ 28 วัน



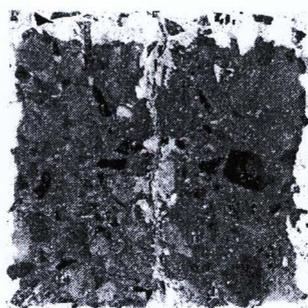
ค. รอยร้าว 1.0 มม. ที่ 84 วัน

ภาพที่ 5.10 การเกิดคาร์บอนเนชั่นในคอนกรีตที่ไม่มีรอยร้าวและคอนกรีตที่มีรอยร้าว

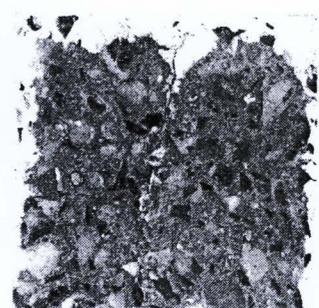
แต่เมื่อซ่อมแซมด้วยวัสดุซ่อมประสานซีเมนต์แล้ว ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ต้องแพร่ผ่านชั้นของวัสดุซ่อมก่อนจึงสามารถแพร่ผ่านชั้นของคอนกรีตที่มีรอยร้าวมาตามแนวของรอยร้าวได้ ลักษณะของการเกิดคาร์บอนเนชั่นจึงเปลี่ยนเป็นพฤติกรรมร่วมระหว่างวัสดุซ่อมประสานซีเมนต์และคอนกรีตที่มีรอยร้าว ผลการทดสอบพบว่า หลังการซ่อมแซม ระยะคาร์บอนเนชั่น ณ ตำแหน่งรอยร้าวไม่จำเป็นต้องเกิดตลอดแนวของรอยร้าว ดังแสดงในภาพที่ 5.11 ซึ่งยืนยันได้ว่าการซ่อมแซมด้วยวัสดุซ่อมประสานซีเมนต์มีประสิทธิภาพในการประสานรอยร้าวได้ในระดับหนึ่ง



ก. ไม่มีรอยร้าว

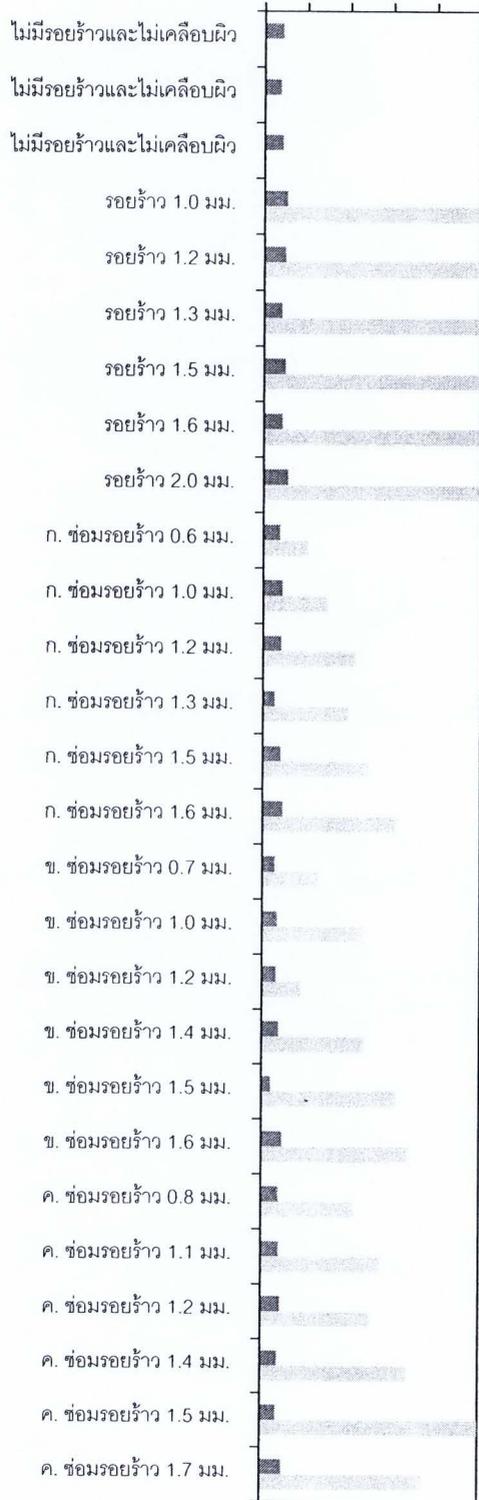
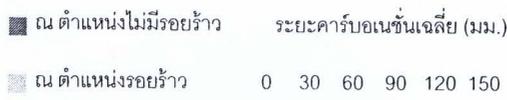


ข. รอยร้าว 1.0 มม.

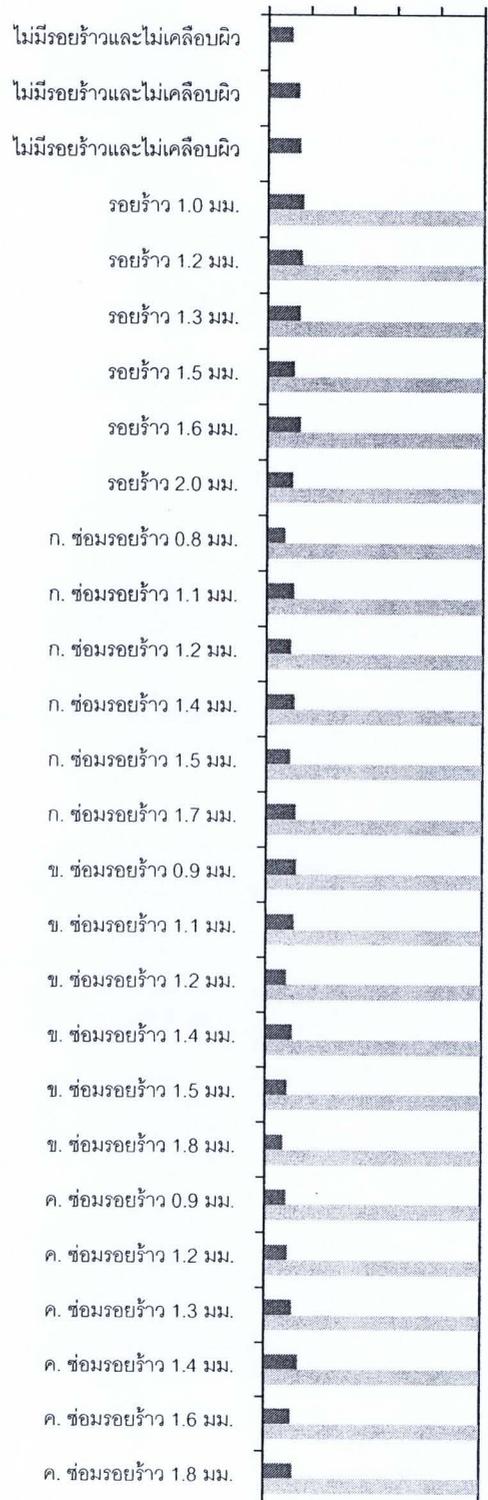
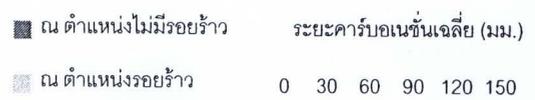


ค. รอยร้าว 1.0 มม. ซ่อม ก.

ภาพที่ 5.11 การเกิดคาร์บอนเนชั่นในคอนกรีตสภาพต่างๆ ภายใต้สภาวะคาร์บอนเนชั่น 28 วัน



ก. ที่ 28 วัน



ข. ที่ 84 วัน

ภาพที่ 5.12 ระยะเวลาบริเวณชั้นของตัวอย่างลักษณะต่างๆ

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

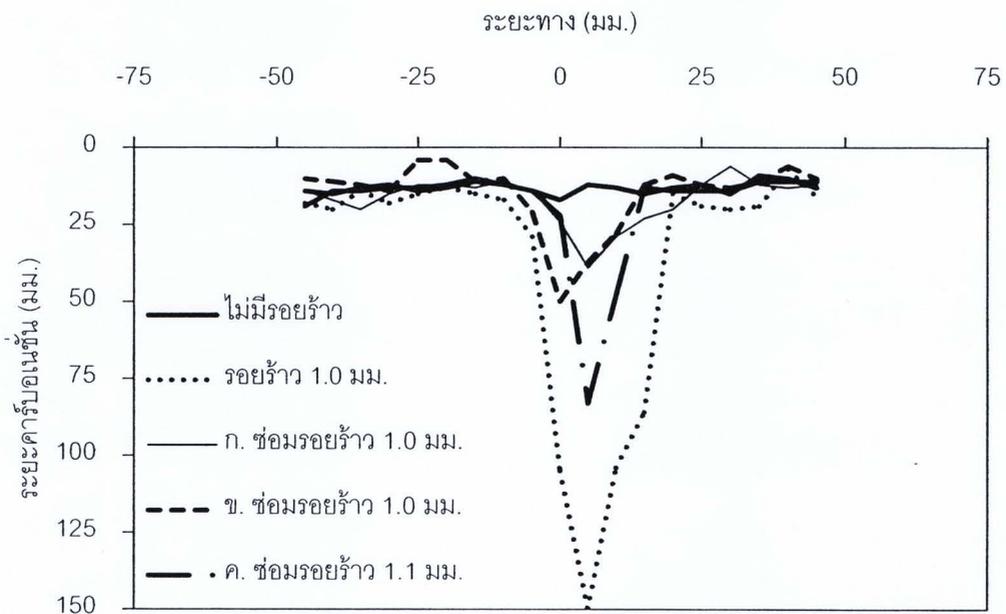
ในส่วนผลการทดสอบตัวอย่างที่เผชิญสภาวะเร่ง 84 วัน ดังแสดงในภาพที่ 5.12ข พบว่า ตำแหน่งรอยร้าว ตัวอย่างทดสอบทั้งหมดวัดระยะคาร์บอนชั้นได้ 150 มม. จึงไม่สามารถพิจารณาเปรียบเทียบประสิทธิภาพได้ ขณะที่ตำแหน่งที่ไม่มีรอยร้าว ตัวอย่างที่มีรอยร้าวมีระยะคาร์บอนชั้นอยู่ในช่วง 19 มม. ถึง 25 มม. มากกว่าตัวอย่างที่ไม่มีรอยร้าวซึ่งอยู่ในช่วง 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 แสดงว่ามีความพรุนต่ำ และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์แพร่ผ่านได้ยาก นอกจากนี้วัสดุ

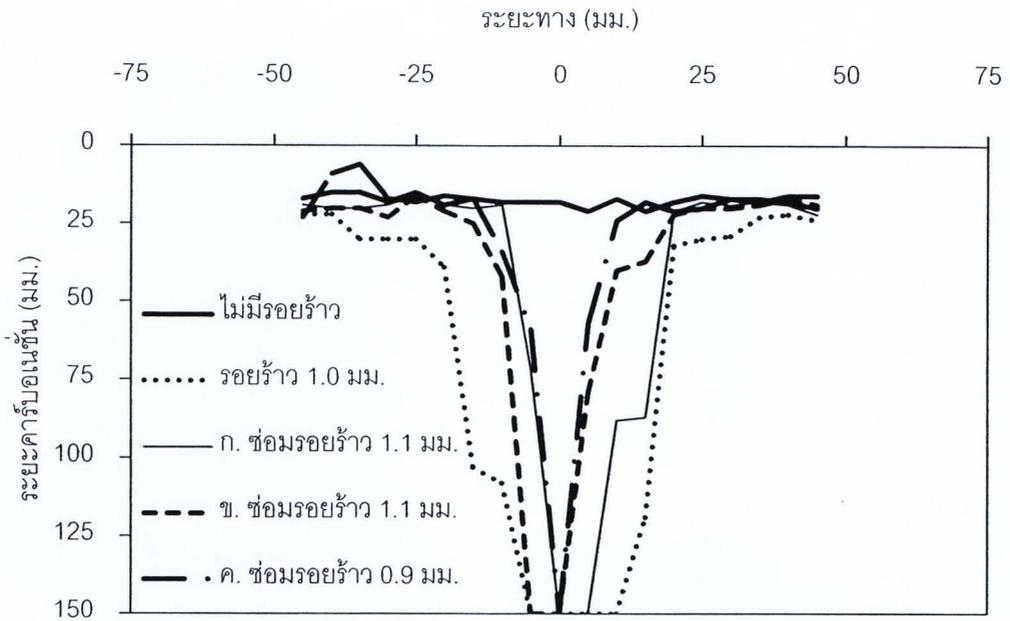
ซ่อม ก. ยังไหลเข้ามาปิดรอยร้าวตามแนวรอยร้าวได้เล็กน้อยอีกด้วย ส่งผลให้วัสดุซ่อม ก. มีความต้านทานคาร์บอนเพิ่มขึ้นที่ดี

ส่วนวัสดุซ่อมประสานซีเมนต์ ข. มีความต้านทานคาร์บอนเพิ่มขึ้น ณ ตำแหน่งรอยร้าวรองจากวัสดุซ่อม ก. เล็กน้อย และมีความต้านทาน ณ ตำแหน่งที่ไม่มีรอยร้าวใกล้เคียงกับวัสดุซ่อม ก. เนื่องจากวัสดุซ่อม ข. มีช่องว่างในเนื้อวัสดุซ่อมน้อย ดังที่เห็นได้จากกำลังอัดที่มีค่าสูงที่สุดและองค์ประกอบซึ่งมีการใช้ซิลิกาเป็นมวลรวม จึงทำให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์แพร่ผ่านชั้นของวัสดุซ่อมได้ค่อนข้างยาก สำหรับตำแหน่งรอยร้าววัสดุซ่อม ข. สามารถไหลเข้ามาปิดรอยร้าวตามแนวรอยร้าวได้เล็กน้อยเช่นเดียวกับวัสดุซ่อม ก.

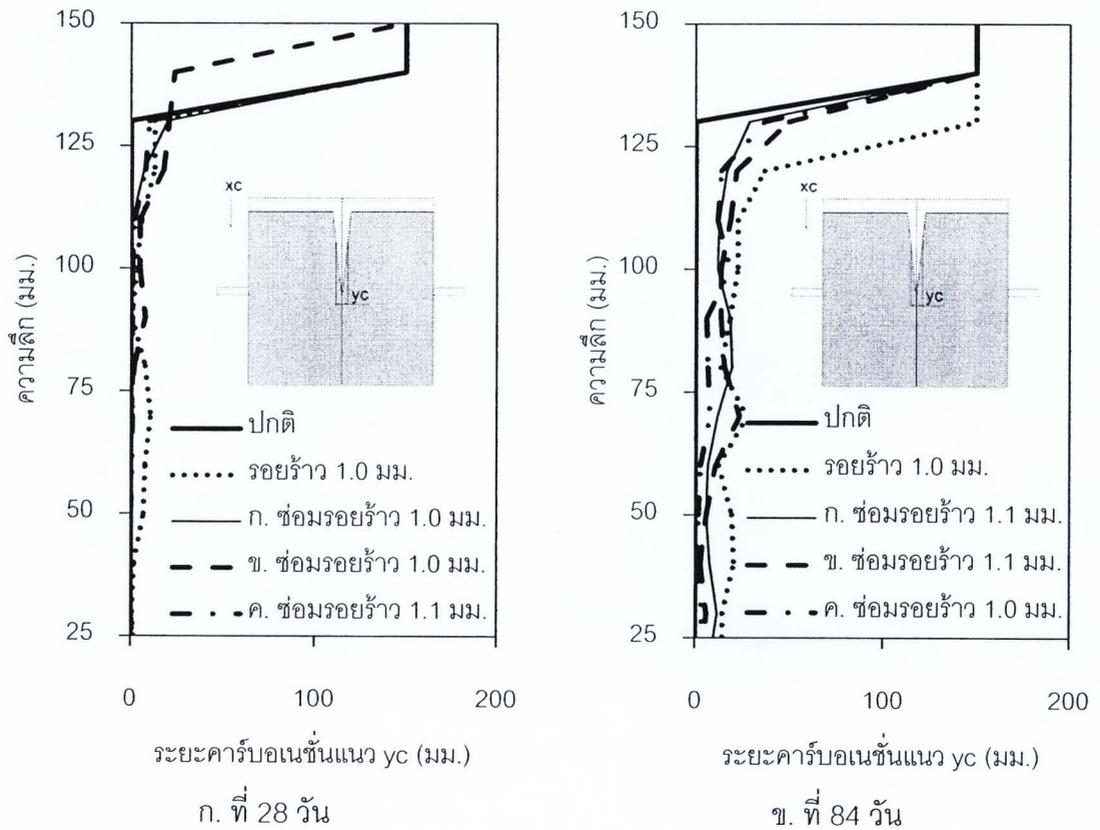
สำหรับวัสดุซ่อม ค. นั้น แม้เป็นวัสดุสำหรับงานผนัง แต่เมื่อมีการนำมาใช้งานในลักษณะของการเคลือบผิวเพื่อซ่อมแซมรอยร้าว พบว่า สามารถป้องกันการเกิดคาร์บอนเพิ่มขึ้นได้เพียงระดับหนึ่ง ดีน้อยกว่าวัสดุในกลุ่มซ่อมแซมอย่างวัสดุ ก. และ ข. อีกทั้งยังไม่สามารถไหลเข้ามาตามแนวรอยร้าวแบบเดียวกับวัสดุซ่อม ก. และวัสดุซ่อม ข. ได้ เนื่องจากมีความสามารถทำงานได้ที่ต่ำกว่า



ภาพที่ 5.13 ระยะคาร์บอนเพิ่มขึ้น ณ ตำแหน่งต่างๆ ของตัวอย่างที่มีความกว้างรอยร้าว  $1.0 \pm 0.1$  มม. ภายใต้สภาวะแรง 28 วัน



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

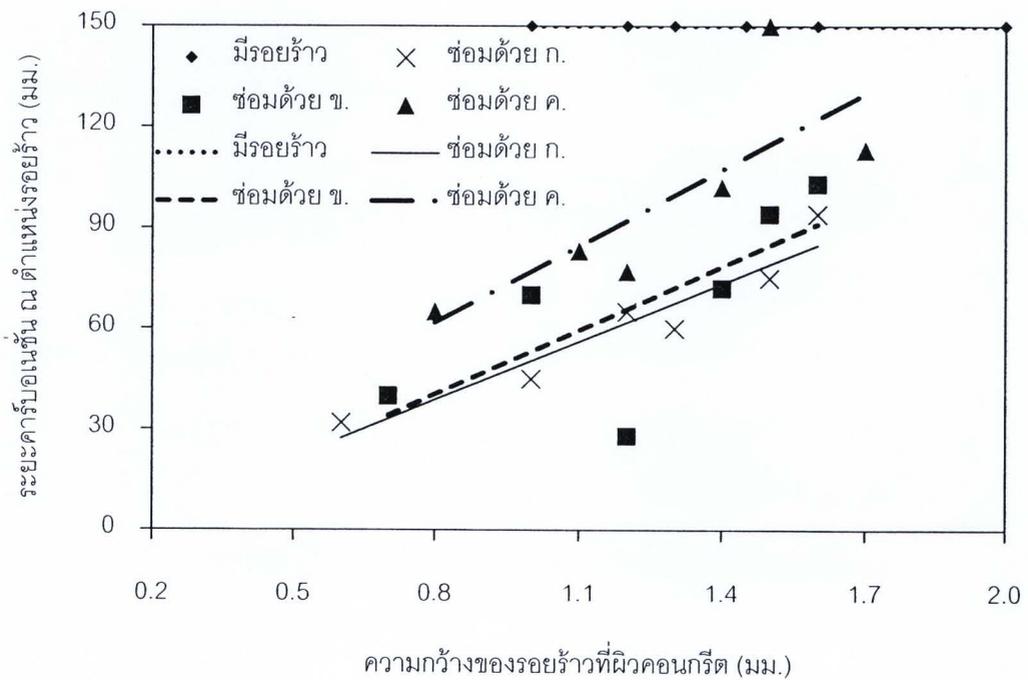


ภาพที่ 5.15 ความลึกของชั้นตัวอย่างกับระยะคาร์บอนเนชันแนวตั้งฉากกับทิศทางที่เกิดคาร์บอนเนชันโดยปกติของตัวอย่างลักษณะต่างๆ ที่ความกว้างรอยร้าวที่ผิวคอนกรีต  $1.0 \pm 0.1$  มม.



ภาพที่ 5.16 การเกิดคาร์บอนเนชั่น ณ ตำแหน่งเหล็กเสริม

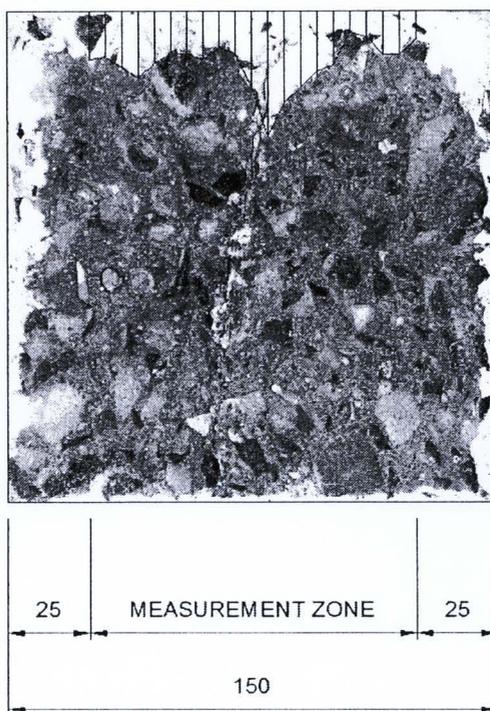
ภาพที่ 5.10 ถึงภาพที่ 5.14 ได้แสดงให้เห็นถึงระยะคาร์บอนเนชั่นแนวตั้งฉาก (ทิศทาง yc) กับทิศทางที่เกิดคาร์บอนเนชั่นปกติ (ทิศทาง xc) เมื่อพิจารณาเทียบกับความลึกของตัวอย่าง ดังแสดงในภาพที่ 5.15 พบว่า ระยะคาร์บอนเนชั่นแนวตั้งฉากบริเวณใกล้ผิวคอนกรีตมีค่ามาก และมีแนวโน้มลดลงเมื่อความลึกเพิ่มขึ้น แต่ ณ ความลึกประมาณ 75 มม. ซึ่งเป็นตำแหน่งที่มีเหล็กเสริม พบว่า ระยะคาร์บอนเนชั่นแนวตั้งฉากมีค่าสูงกว่าที่ความลึกอื่นๆ เนื่องจากบริเวณดังกล่าวมีค่าการซึมผ่านที่สูงกว่าบริเวณอื่น จึงเกิดคาร์บอนเนชั่นมากกว่า ดังแสดงในภาพที่ 5.16



ภาพที่ 5.17 ระยะคาร์บอนเนชั่น ณ ตำแหน่งรอยร้าว ภายใต้สภาวะคาร์บอนเนชั่น 28 วัน กับความกว้างของรอยร้าวที่ผิวคอนกรีต

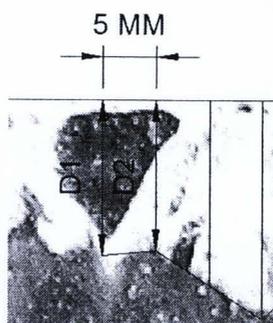
เมื่อนำความกว้างของรอยร้าวที่ผิวคอนกรีตค่าต่างๆ มาเปรียบเทียบกับค่าระยะคาร์บอนเนชั่น ณ ตำแหน่งรอยร้าวที่เกิดขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 5.17 พบว่า ตัวอย่างที่มีรอยร้าวและยังไม่ได้รับการซ่อมแซม เกิดปฏิกิริยาคาร์บอนเนชั่นตามแนวรอยร้าวลึกเต็มหน้าตัด เนื่องจากรอยร้าวมีลักษณะเป็นรอยร้าวทะลุ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จึงสามารถแพร่ได้ตามแนวของรอยร้าว ซึ่งคอนกรีตที่มีรอยร้าวขนาด 0.2 มม. ถึง 2.0 มม. นั้นให้ค่าคาร์บอนเนชั่นไม่น้อยกว่า 150 มม. ในสถานะที่ทดสอบ 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 และพื้นที่ที่เกิดคาร์บอนขึ้นทั้งหมดสามารถคำนวณได้ดังแสดงในสมการที่ 5.2 หรือคิดเป็นร้อยละของพื้นที่ทั้งหมดได้ดังแสดงในสมการที่ 5.3



ภาพที่ 5.19 ช่องสี่เหลี่ยมคางหมูแต่ละช่องของการแบ่งพื้นที่ที่เกิดคาร์บอนขึ้น

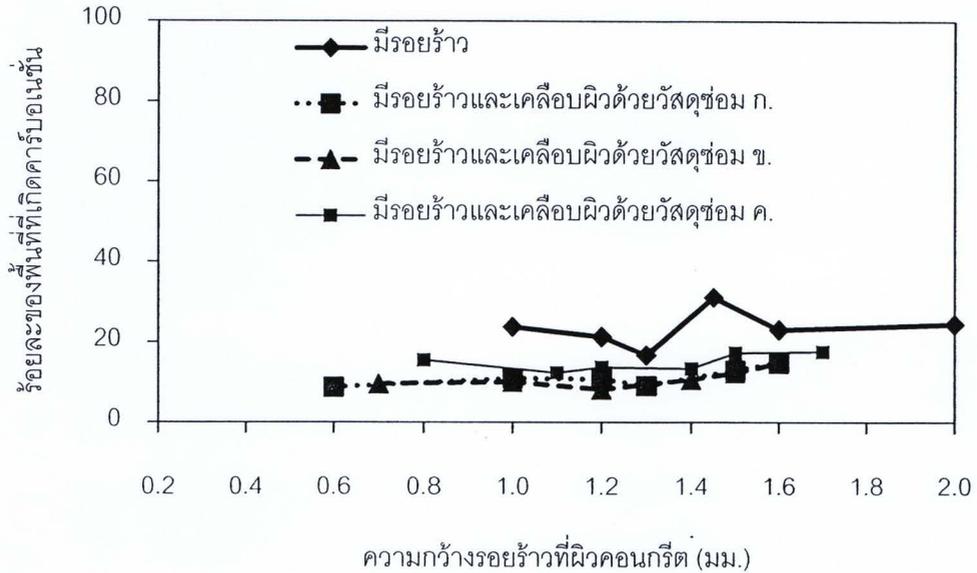
$$\text{Carbonated Area (sq.mm.)} = 0.5 \times (D1 + D2) \times 5 \quad (5.1)$$

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

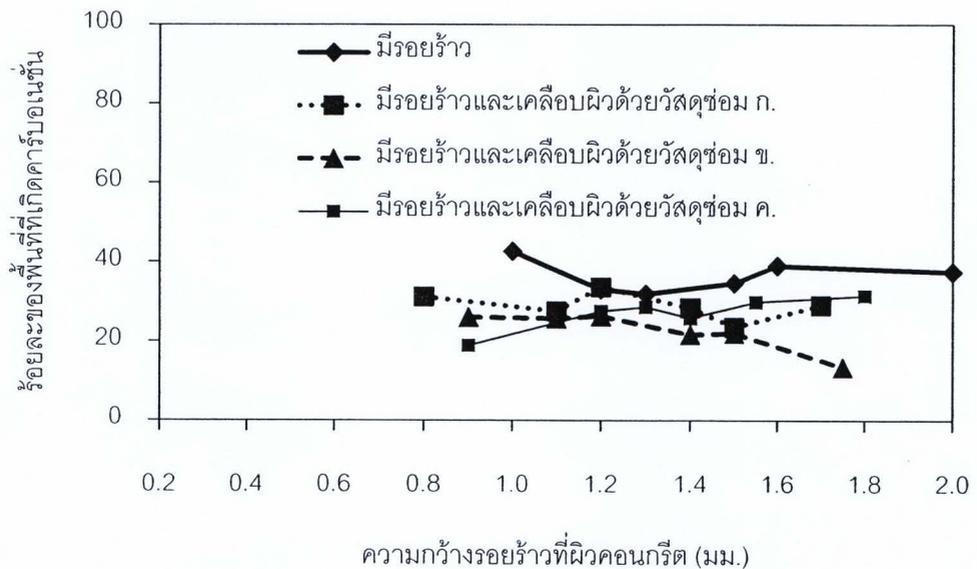
$$\text{Percentage of Total Carbonated Area (\%)} = \text{Total Carbonated Area} \times 100 / 15000 \quad (5.3)$$

จากระยะคาร์บอนขึ้นของตัวอย่างคอนกรีตปกติในสภาวะเร่งคาร์บอนขึ้นที่ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เข้มข้น 4% อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส และความชื้นสัมพัทธ์ 55% ที่ 28 วัน ตัวอย่างที่ไม่มีรอยร้าวและไม่มีการเคลือบผิวมีพื้นที่ที่เกิดคาร์บอนขึ้นในช่วงร้อยละ 7 ถึงร้อยละ 9 ขณะที่ตัวอย่างที่มีรอยร้าวและตัวอย่างที่ซ่อมแซมด้วยการเคลือบผิวแล้วมีพื้นที่ที่เกิดคาร์บอนขึ้นดังแสดงในภาพที่ 5.20 พบว่า ตัวอย่างที่รอยร้าวมีพื้นที่ที่เกิดคาร์บอนขึ้นเพิ่มขึ้นมาอยู่ในช่วงร้อยละ 17 ถึงร้อยละ 31 เนื่องจากผลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่แพร่เข้ามาตามแนวรอยร้าวทำให้เกิดคาร์บอนขึ้นมากขึ้น อย่างไรก็ตามเมื่อซ่อมแซมด้วยการเคลือบผิวด้วยวัสดุซ่อมประสานซีเมนต์แล้ว พื้นที่ที่เกิดคาร์บอนขึ้นมีค่าลดลง โดยพื้นที่ที่เกิดคาร์บอนขึ้นหลังการเคลือบผิวด้วยวัสดุซ่อม ก. อยู่ที่ร้อยละ 9 ถึงร้อยละ 15 วัสดุซ่อม ข. ร้อยละ 8 ถึงร้อยละ 15 และวัสดุซ่อม ค. ร้อยละ 12 ถึงร้อยละ 18 ทั้งนี้เนื่องจากพฤติกรรมร่วมระหว่างวัสดุซ่อมประสานซีเมนต์และหน้าตัดคอนกรีต คือ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ต้องแพร่ผ่านชั้นของวัสดุซ่อมประสานซีเมนต์ก่อน จึงสามารถแพร่ตามแนวรอยร้าวได้ แสดงให้เห็นว่าการเคลือบผิวด้วยวัสดุซ่อมประสานซีเมนต์เพื่อซ่อมแซมรอยร้าวมีประสิทธิภาพต้านทานการเกิดคาร์บอนขึ้นได้ 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

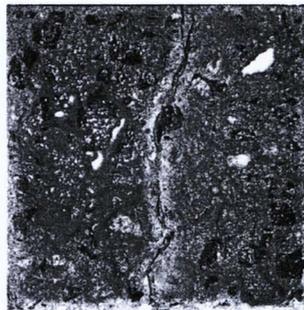
ดังนั้นในงานวิจัยนี้ สามารถเรียงความต้านทานคาร์บอนขึ้นของคอนกรีตสภาพต่างๆ จากสูงไปต่ำได้ดังนี้ คอนกรีตที่ไม่มีรอยร้าว คอนกรีตที่ผ่านการซ่อมแซมรอยร้าวด้วยวัสดุซ่อมประสานซีเมนต์แล้ว และคอนกรีตที่มีรอยร้าว ตามลำดับ และประสิทธิภาพของการซ่อมแซมรอยร้าวโดยการเคลือบผิวด้วยวัสดุซ่อมประสานซีเมนต์ เรียงจากประสิทธิภาพสูงไปต่ำได้ดังนี้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

#### 5.4 ความต้านทานคลอไรด์

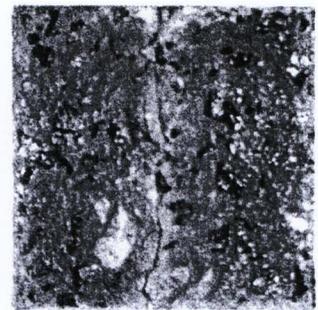
จากผลการทดสอบระยะแทรกซึมของคลอไรด์ พบว่า คอนกรีตที่ไม่มีรอยร้าวสังเกตเห็นการแทรกซึมของคลอไรด์อย่างสม่ำเสมอตามแนวผิวคอนกรีตที่สัมผัสกับสารละลายคลอไรด์ ดังแสดงในภาพที่ 5.22ก แต่เมื่อคอนกรีตมีรอยร้าวเกิดขึ้น พบการแทรกซึมของคลอไรด์ตามแนวของรอยร้าวยาวตลอดแนว ดังแสดงในภาพที่ 5.22ข และภาพที่ 5.22ค เนื่องจากคลอไรด์สามารถแทรกซึมผ่านมาตามแนวของรอยร้าวได้เช่นเดียวกับก๊าซคา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



ก. ไม่มีรอยร้าว ที่ 14 วัน



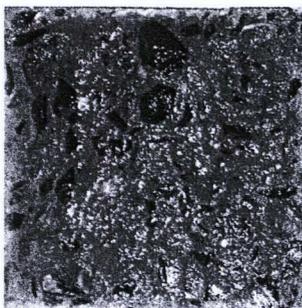
ข. รอยร้าว 1.0 มม. ที่ 14 วัน



ค. รอยร้าว 1.0 มม. ที่ 28 วัน

ภาพที่ 5.22 การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ไม่มีรอยร้าวและคอนกรีตที่มีรอยร้าว

แต่เมื่อเคลือบผิวด้วยวัสดุซ่อมประสานซีเมนต์แล้ว คลอไรด์ต้องแพร่ผ่านชั้นของวัสดุซ่อมก่อนจึงสามารถแพร่ผ่านชั้นของคอนกรีตที่มีรอยร้าวมาตามแนวของรอยร้าวได้ ลักษณะของการแทรกซึมจึงเปลี่ยนเป็นพฤติกรรมร่วมระหว่างวัสดุซ่อมประสานซีเมนต์และคอนกรีตที่มีรอยร้าว เช่นเดียวกับผลความต้านทานคาร์บอนเช่นกัน ภาพที่ 5.23 ยืนยันได้ว่า การซ่อมแซมโดยการเคลือบผิวด้วยวัสดุซ่อมประสานซีเมนต์มีประสิทธิภาพในการซ่อมแซมรอยร้าวได้ในระดับหนึ่ง



ก. ไม่มีรอยร้าว

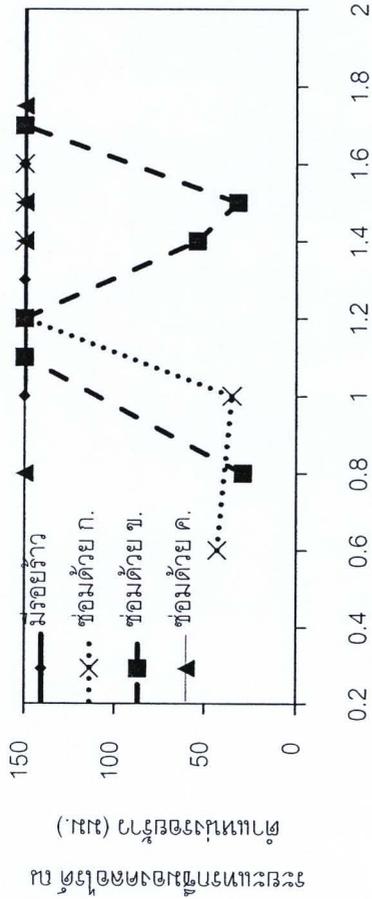


ข. รอยร้าว 1.0 มม.

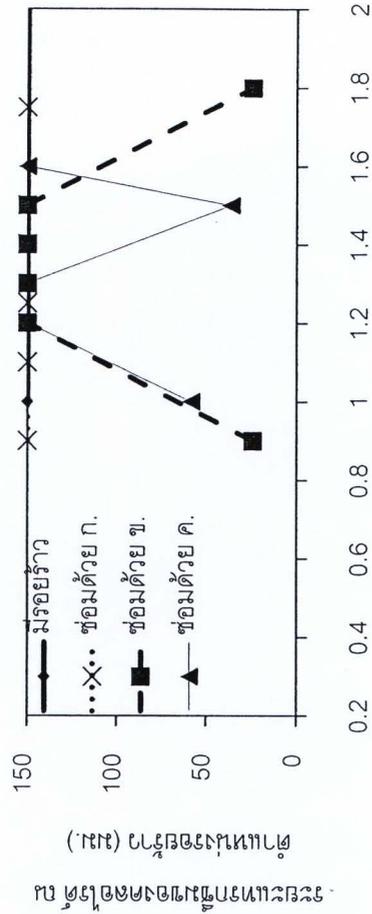


ค. รอยร้าว 1.0 มม. ซ่อม ก.

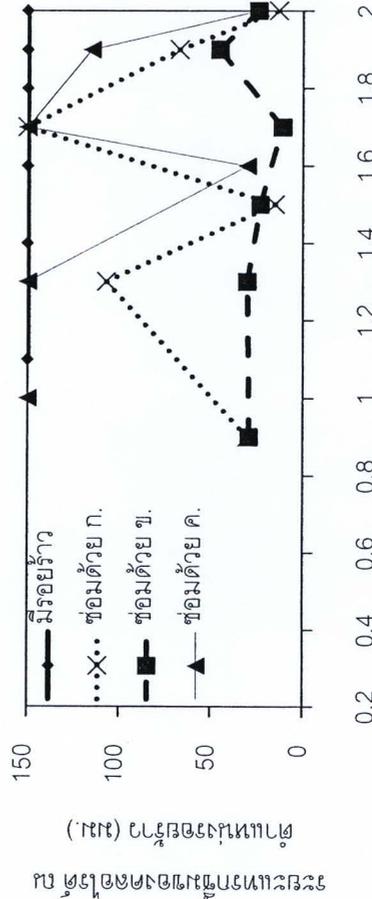
ภาพที่ 5.23 การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่แช่สารละลายคลอไรด์ 14 วัน



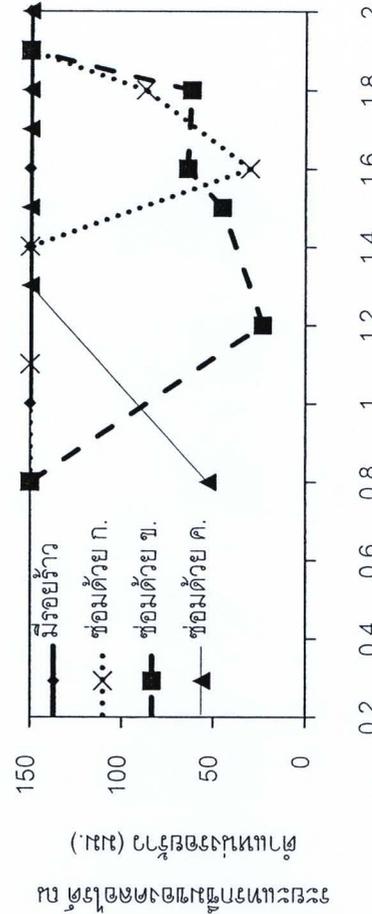
ก. สัดส่วนผสมที่ 1 คอนกรีตทั่วไป เสาสารละลายคลอไรด์ 14 วัน



ข. สัดส่วนผสมที่ 1 คอนกรีตทั่วไป เสาสารละลายคลอไรด์ 28 วัน



ค. สัดส่วนผสมที่ 2 คอนกรีตกำลังสูง เสาสารละลายคลอไรด์ 14 วัน



ง. สัดส่วนผสมที่ 2 คอนกรีตกำลังสูง เสาสารละลายคลอไรด์ 28 วัน

ภาพที่ 5.24 ระยะแทรกซึมของรอยร้าวกับความกว้างรอยร้าวกับความหนาของคอนกรีตที่ผิวคอนกรีตที่ผิวคอนกรีตกำลังสูง



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 เพิ่มความหนาของชั้นวัสดุซ่อมประสานซีเมนต์ที่เคลือบผิวดังกล่าว เพิ่มความลึกของตัวอย่าง ลดความเข้มข้นของสารละลายคลอไรด์หรือลดระยะเวลาที่แช่ตัวอย่างในสารละลายคลอไรด์ เป็นต้น แต่วิธีลดความเข้มข้นของสารละลายคลอไรด์และวิธีลดระยะเวลาที่แช่ตัวอย่างในสารละลายคลอไรด์อาจมีความยุ่งยากในขั้นตอนการทดสอบเบื้องต้นเพื่อหาปริมาณคลอไรด์และระยะเวลาที่เหมาะสม โดยเฉพาะงานวิจัยที่ใช้ตัวอย่างคอนกรีตหลายสัดส่วนผสม