



รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

ความต้านทานการซึมผ่านของคลอไรด์ของปอซโซลานิกคอนกรีต
Resistance to Chloride Permeability of Pozzolanic Concrete

โดย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์จักรพันธ์ แสงสุวรรณและคณะ

ได้รับทุนอุดหนุนวิจัยจาก
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

พ.ศ. ๒๕๕๖

รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ

ความต้านทานการซึมผ่านของคลอไรด์ของปอซโซลานิกคอนกรีต
Resistance to Chloride Permeability of Pozzolanic Concrete

ผู้วิจัย

สังกัด

ผศ.จักรพันธ์ แสงสุวรรณ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

ผศ.ดร.วันชัย ยอดสุดใจ

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ บางเขน

นายวิศิษ แซ่ลิ้ม

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ บางเขน

ได้รับทุนอุดหนุนวิจัยจาก

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

พ.ศ.๒๕๕๖

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	iii
สารบัญรูป	v
สารบัญตาราง.....	v
บทที่ 1 บทนำ.....	1-1
1.1 ความเป็นมาของโครงการ.....	1-1
1.2 วัตถุประสงค์.....	1-2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	1-2
1.4 ประโยชน์คาดว่าจะได้รับ.....	1-2
1.5 โครงสร้างของรายงาน	1-2
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	2-1
2.1 การเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีต	2-2
2.2 การเกิดสนิมของเหล็กเสริมโดยคลอไรด์	2-4
2.2.1 กลไกการกัดกร่อนของเหล็กเสริม.....	2-7
2.2.2 ชนิดของคลอไรด์ในคอนกรีต	2-9
2.2.3 การเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นของคลอไรด์ที่สัมผัสกับสิ่งแวดล้อมคลอไรด์.....	2-10
2.2.4 กำลังการยึดเหนี่ยวของเหล็กเสริม.....	2-11
2.3 การใช้วิธีทางไฟฟ้าเคมี	2-13
2.3.1 การลดปริมาณคลอไรด์อื้ออนด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมี	2-13
2.3.2 การหาปริมาณของคลอไรด์	2-19
2.4 วัสดุพอลิโพรพิลีน.....	2-20
2.3.1 เล้าลอย	2-20
2.3.2 ดินขาว	2-22
2.3.3 เล้าแกลบ	2-23
บทที่ 3 อุปกรณ์และวิธีการ	2-205
3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทำโครงการ	3-25
3.2 วัสดุและปฏิกิริยาส่วนผสมคอนกรีต	3-25
3.2.1 วัสดุที่ใช้ในการผสมคอนกรีต	3-25
3.2.2 ปฏิกิริยาส่วนผสมคอนกรีต.....	3-25
3.3 การเตรียมตัวอย่างคอนกรีต	3-27
3.3.1 ตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงกระบอกขนาด 10x20 cm	3-27
3.3.2 การทดสอบการเคลื่อนที่ของคลอไรด์อื้ออนด้วยไฟฟ้า	3-27



สารบัญ

	หน้า
บทที่ 4 ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง	4-32
4.1 ผลการทดสอบกำลังอัด.....	4-32
4.2 ผลการทดสอบการเคลื่อนที่ของคลอไรด์ไอออนด้วยไฟฟ้า	4-36
บทที่ 5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ.....	5-40
5.1 กำลังรับแรงอัดประลัยของคอนกรีตผสมสารปอซโซลานกับคอนกรีตควบคุม	5-1
5.2 ความต้านทานการซึมผ่านของคลอไรด์	5-1
5.3 ข้อเสนอแนะ.....	5-2
เอกสารอ้างอิง	5-3



สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 2.1	ปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีของการกัดกร่อนบนผิวเหล็กเสริม Bentur et al(1997)	2-3
รูปที่ 2.2	ปริมาณของเหล็กที่เกิดสนิม Nielsen (1985)	2-4
รูปที่ 2.3	ปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าของการกัดกร่อนของเหล็กเสริมในคอนกรีตจากคลอไรด์	2-7
รูปที่ 2.4	โครงสร้างคอนกรีตที่สภาวะเปียกสลับแห้งด้วยน้ำทะเล	2-11
รูปที่ 2.5	Bond stress-slip model CEB (1993).....	2-12
รูปที่ 2.6	การแตกร้าวของคอนกรีตเนื่องจากแรงกดอัด fib (2000).....	2-12
รูปที่ 2.7	แสดงขบวนการของวิธี Electrochemical Chloride Removal (ECR) J.M. Miranda	2-14
รูปที่ 2.8	ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าที่จ่ายในระบบกับปริมาณคลอไรด์	2-14
รูปที่ 2.9	แสดงการทดสอบ Chloride Migration Test R.D. Hooton (1996).....	2-15
รูปที่ 2.10	ปริมาณคลอไรด์ที่ออกจากคอนกรีตมาสะสมอยู่ในสารละลายของการทดสอบ	2-16
รูปที่ 2.11	แสดงอิทธิพลของสารละลายที่ใช้ในการทดสอบ	2-17
รูปที่ 2.12	ปริมาณคลอไรด์ที่สะสมอยู่ในคอนกรีตก่อนและหลังขบวนการทางไฟฟ้าเคมีโดยการเปลี่ยน สารละลายใหม่และไม่เปลี่ยนสารละลาย G.Fajardo at, el (2004)	2-17
รูปที่ 2.13	แสดงการเปรียบเทียบปริมาณคลอไรด์ก่อนและหลังการดึงคลอไรด์จากคอนกรีตด้วยวิธีทางไฟฟ้า เคมีระหว่างคอนกรีตที่มีสภาพคาร์บอนชั้นและคอนกรีตปกติ N.M. (1996)	
รูปที่ 2.14	แสดงการประยุกต์ใช้วิธีทางไฟฟ้าเคมีในการลดปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีต	2-19
รูปที่ 3.1	แสดงการเตรียมตัวอย่างของวัสดุปอซโซลาน.....	3-26
รูปที่ 3.2	แสดงการเตรียมตัวอย่างคอนกรีต, และการบ่มคอนกรีตที่ใช้ในการวิจัย.....	3-27
รูปที่ 3.3	ภาพตัวอย่างการทดสอบการเคลื่อนที่ของคลอไรด์ไอออนด้วยไฟฟ้า	3-28
รูปที่ 3.4	แสดงการเตรียมตัวอย่างในการทดสอบหาปริมาณคลอไรด์ในผงคอนกรีต	3-28
รูปที่ 3.5	แสดงตัวอย่างหลังการทดสอบหาปริมาณคลอไรด์ในสารละลาย	3-30
รูปที่ 3.6	แสดงการเตรียมตัวอย่างในการทดสอบหาปริมาณคลอไรด์ในผงคอนกรีต	3-31
รูปที่ 3.7	แสดงตัวอย่างหลังการทดสอบหาปริมาณคลอไรด์ในสารละลาย	3-30
รูปที่ 3.8	แสดงตัวอย่างหลังการทดสอบหาปริมาณคลอไรด์ในสารละลาย	3-30
รูปที่ 4.1	ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังอัดของถ้ำล้อยแทนที่ปูนซีเมนต์ที่ระดับร้อยละ 10,15 และ 20	3-30



สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังอัดของดินขาวแทนที่ซีเมนต์ที่ระดับร้อยละ 10, 15 และ 20.....	4-34
รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังอัดของเถ้ากลบแทนที่ซีเมนต์ที่ระดับร้อยละ 10, 15 และ 20	4-34
รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังอัดของเถ้าลอย ดินขาวและเถ้ากลบแทนที่ซีเมนต์ที่ระดับร้อยละ 10, 15 และ 20	4-35
รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการซึมผ่านของคลอไรด์ของเถ้าลอยแทนที่ซีเมนต์ร้อยละ 10, 15 และ 20	4-37
รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการซึมผ่านของคลอไรด์ของดินขาวแทนที่ซีเมนต์ร้อยละ 10, 15 และ 20	4-37
รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการซึมผ่านของคลอไรด์ของเถ้ากลบแทนที่ซีเมนต์ร้อยละ 10, 15 และ 20	4-38



สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 3.1 ปฏิภาคส่วนผสมคอนกรีต.....	3-25
ตารางที่ 4.1 ค่าเฉลี่ยของกำลังอัดที่อายุ 28 วัน.....	4-33
ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบการเคลื่อนที่ของคลอไรด์ด้วยกระแสไฟฟ้าของการแทนที่บางส่วน	4-36



บทที่ 1 บทนำ

1.1 ความเป็นมาของโครงการ

การเกิดสนิมของเหล็กเสริมในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กเป็นปัญหาด้านความคงทนของคอนกรีตในด้านการรับกำลังและลักษณะทางกายภาพ โดยเฉพาะเรื่องของความสามารถในการรับน้ำหนักตามที่ยกแบบไว้จะลดลง ทำให้เกิดความไม่ปลอดภัยกับโครงสร้างดังกล่าว เนื่องจากการเกิดสนิมทำให้เกิดการขยายตัวของผิวเหล็กเสริมคอนกรีตมีปริมาตรเพิ่มขึ้นส่งผลให้เกิดแรงดึงในคอนกรีตทำให้คอนกรีตเกิดการแตกร้าวโดยเฉพาะโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ต้องสัมผัสน้ำทะเล น้ำกร่อย หรืออยู่บริเวณชายฝั่งรวมทั้ง โครงสร้างใต้ดินบริเวณนั้น จะประสบปัญหาความเสียหายอย่างมากจากสภาพแวดล้อม การซ่อมแซมโครงสร้างที่เสื่อมสภาพหรือเกิดสนิมต้องการความเข้าใจในสาเหตุหลักและสภาพปัจจุบันของโครงสร้างนั้น เพื่อให้สามารถแก้ไขได้ตรงจุดและหยุดความเสียหายได้อย่างถาวร

กระบวนการซ่อมแซมโครงสร้างที่เสียหายจากสนิมเหล็กเสริมสามารถจำแนกเป็น 3 ลักษณะคือ การซ่อมแซม (Concrete Repair) การเสริมกำลัง (Strengthening) และการป้องกัน (Protection) การบำรุงรักษาอย่างมีแบบแผนและซ่อมแซมโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กนั้นมีความสำคัญอย่างยิ่งเนื่องจากสามารถยืดอายุเวลาของโครงสร้างให้มีความสามารถในการรับน้ำหนักที่กระทำต่อโครงสร้างตามที่วิศวกรได้ออกแบบไว้ได้อย่างมีประสิทธิภาพและยังส่งผลในเรื่องของความมั่นใจของผู้ใช้ งานโครงสร้างดังกล่าวอีกด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมี (Electro Chemical) เป็นวิธีการป้องกันการกัดกร่อนที่มีการใช้กันอย่างกว้างขวางเนื่องจากเป็นวิธีการที่สามารถประยุกต์ใช้กับโลหะและโลหะผสมทุกชนิดในทุกสภาพการใช้งานโดยมีข้อแม้ว่าต้องสัมผัสอยู่กับสารละลายอิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte) และเมื่อใช้แล้วยังสามารถลดอัตราการกัดกร่อนได้จนมีค่าใกล้เคียงศูนย์หรือไม่เกิดการกัดกร่อนเลยได้

การลดปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมี (Electrochemical Chloride Removal) คือการดึงเฉพาะคลอไรด์ไอออนออกจากคอนกรีตด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมี ซึ่งมีขั้วไฟฟ้าอยู่ในสารละลายซึ่งอยู่นอกคอนกรีตและมีการเชื่อมต่อไฟฟ้ากระแสตรงระหว่างขั้วไฟฟ้าและเหล็กเสริมภายในคอนกรีตมีการให้ไฟฟ้าตรงกับขั้วไฟฟ้าและเหล็กเสริมคอนกรีตโดยให้ขั้วไฟฟ้าภายนอกเป็นขั้วบวก (Anode) และเหล็กเสริมเป็นขั้วลบ (Cathode) จากการต่อระบบดังกล่าวนี้ เมื่อทำการจ่ายแรงดันไฟฟ้าที่สูงพอคลอไรด์ไอออนที่มีสภาพเป็นขั้วลบจะเคลื่อนที่ไปยังขั้วบวก (Anode) ซึ่งอยู่นอกส่งผลทำให้ความปนเปื้อนของคลอไรด์ไอออนในคอนกรีตมีค่าลดลงโดยเฉพาะบริเวณเหล็กเสริมซึ่งเป็นขั้วลบ นอกจากนี้ยังมี Hydroxyl Ions เกิดขึ้นจากระบบเพิ่มขึ้นอีกซึ่งจะทำให้ค่า pH สูงขึ้น ความเป็นด่างในคอนกรีตสูงขึ้นส่งผลให้มีแนวโน้มที่จะเพิ่มความต้านทานการเกิดสนิมที่ดีขึ้น และเนื่องจากการศึกษาภายในประเทศยังไม่มีข้อมูลเกี่ยวกับการลดปริมาณคลอไรด์ไอออนด้วยวิธีดังกล่าวมากนัก จึงมีความจำเป็นในการทำ การวิจัยเกี่ยวกับวิธีดังกล่าวเนื่องจากประเทศไทยมีพื้นที่ชายฝั่งทะเลอยู่เป็นจำนวนมากจึงเกิดผลกระทบกับโครงสร้างที่อยู่



บริเวณชายฝั่งทะเล ทำให้โครงสร้างเหล่านี้เสื่อมสภาพอย่างรวดเร็วจากการเป็นสนิมของเหล็กเสริมอันเนื่องมาจากคลอไรด์ในน้ำทะเล

การใช้วัสดุปอซโซลานเพื่อใช้ทำหน้าที่เป็นวัสดุประสานในงานคอนกรีต เนื่องจากมีคุณสมบัติที่เหมาะสมในการทำคอนกรีต จากเหตุผลข้างต้นจึงจำเป็นต้องมีการทำวิจัยเกี่ยวกับเรื่อง “ความต้านทานการซึมผ่านของคลอไรด์ของปอซโซลานิคคอนกรีต ” เพื่อนำมาเป็นแนวทางในการบำรุงรักษา และซ่อมแซมโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กได้อย่างมีประสิทธิภาพเนื่องจากวัสดุ ดังกล่าวสามารถเพิ่มความคงทนให้กับโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กและช่วยป้องกันการเกิดสนิมของ เหล็กเสริมในคอนกรีต นอกจากนี้ข้อมูลจากงานวิจัยนี้ยังอาจเป็นข้อมูลเพื่อเป็นแนวทางในการวางแผนการบำรุงรักษาซ่อมแซมโครงสร้างอย่างประจำ (Routine Maintenance) เพื่อที่จะสามารถนำมาวางแผนการซ่อมแซมโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก เพื่อช่วยลดค่าใช้จ่ายและพลังงานของประเทศในการซ่อมแซมโครงสร้างคอนกรีตที่เสียหายมากเนื่องจากขาดการบำรุงรักษา

1.2 วัตถุประสงค์

- 1) เพื่อศึกษาสัดส่วนที่เหมาะสมของวัสดุปอซโซลานที่ใช้เป็นส่วนผสมในคอนกรีต
- 2) เพื่อศึกษาความต้านทานของคอนกรีตที่มีส่วนผสมของปอซโซลานโดยพิจารณาการ เคลื่อนที่ของคลอไรด์ไอออนผ่านคอนกรีตเสริมเหล็กจากการจ่ายกระแสไฟฟ้า
- 3) เพื่อศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพของคอนกรีตที่มีวัสดุปอซโซลานแทนที่บางส่วน

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

การวิจัยนี้จะคำนึงถึงปัญหาการเกิดสนิมของเหล็กอันเนื่องมาจากคลอไรด์ไอออนเป็นหลัก ซึ่งปัญหานี้จะพบบ่อยมากในอาคารโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กชายทะเล และการวิจัยนี้ได้ทำการทดสอบหาค่าความต้านทานคลอไรด์ของคอนกรีตโดยใช้วัสดุปอซโซลานแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนและทดสอบทางด้านการรับกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่มีส่วนผสมที่แตกต่างกันของปอซโซลานโดยเปรียบเทียบกับตัวอย่างควบคุม และใช้วิธีการเร่งการเกิดปฏิกิริยาของคอนกรีต โดย จ่ายไฟฟ้ากระแสตรง (DC-Current) ผ่านแท่งคอนกรีตที่จมอยู่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้นร้อยละ 3 ซึ่งเป็นการจำลองโครงสร้างให้อยู่ในสภาวะสิ่งแวดล้อมทะเลซึ่งพฤติกรรมอาจจะแตกต่างจากสภาพจริงเนื่องจากถูกจำกัดในด้านระยะเวลา

1.4 ประโยชน์คาดว่าจะได้รับ

จากเหตุผลข้างต้นที่ได้กล่าวมาแล้วมีความจำเป็นต้องมีการทำวิจัยเกี่ยวกับเรื่อง “ความต้านทานการซึมผ่านของคลอไรด์ของ ปอซโซลานิคคอนกรีต ” เพื่อใช้สำหรับการตัดสินใจถึงความเหมาะสมการใช้งานของปริมาณและสัดส่วนการใช้วัสดุปอซโซลานในงานโครงสร้างคอนกรีตที่ต้านทานคลอไรด์ เพื่อเพิ่มความคงทนและอายุการใช้งานเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตทั่วไป และนำไปสู่การผลิตเชิงพาณิชย์ ใน การที่นำวัสดุที่เหลือทิ้ง (by product) นำกลับมาใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุด ซึ่งเป็นการลดต้นทุนในการผลิตปูนปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ หรือในอีกมุมหนึ่งสามารถจะช่วยให้การวางแผนการบำรุงรักษาและซ่อมแซม



โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ใช้ในการก่อสร้างได้อย่างถูกต้อง นอกจากนี้ผลของงานวิจัยยังสามารถใช้เป็นฐานข้อมูลที่จำเป็นต่อไปเพื่อเป็นแนวทางในการกำหนดเป็นมาตรฐานสำหรับใช้งานในโครงสร้างคอนกรีตที่อยู่ในบริเวณชายฝั่งทะเลในประเทศไทย

1.5 โครงสร้างของรายงาน

ในการศึกษาการทำวิจัยครั้งนี้เรื่อง “ความต้านทานการซึมผ่านของคลอไรด์ของปอ ซโซลานิคคอนกรีต” แบ่งการนำเสนอเนื้อหาสาระในเรื่องต่างๆ ดังต่อไปนี้

- บทที่ 1 บทนำ
- บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง
- บทที่ 3 อุปกรณ์และวิธีการ
- บทที่ 4 ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง
- บทที่ 5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ



บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

โดยปรกติคอนกรีตที่มีส่วนผสมของปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5 ซึ่งมีปริมาณ C3A ที่ต่ำจะเหมาะสำหรับโครงสร้างที่สัมผัสน้ำทะเล แต่เมื่อพิจารณาถึงองค์ประกอบในน้ำทะเลโดยแท้จริงแล้ว น้ำทะเลมีปริมาณซัลเฟตอยู่ประมาณ 10% ส่วนคลอไรด์นั้นกลับมีปริมาณถึง 90% ดังนั้นการคำนึงถึงทุกองค์ประกอบของน้ำทะเลจะมีเหตุผลมากกว่าการพิจารณาแต่เพียงซัลเฟตเท่านั้น โดยที่ น้ำทะเลมีเกลือคลอไรด์ซึ่งอยู่ในรูปสารประกอบ โซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ประมาณ 27,000 ppm แมกนีเซียมคลอไรด์ (MgCl₂) ประมาณ 3,200 ppm และแคลเซียมคลอไรด์ (CaCl₂) ประมาณ 500 ppm ส่วนซัลเฟตอยู่ในรูปของสารประกอบแมกนีเซียมซัลเฟต (MgSO₄) ประมาณ 2,200 ppm และแคลเซียมซัลเฟต (CaSO₄) ประมาณ 1,100 ppm (CPAC, 2008)

อย่างไรก็ตามจากความเจริญก้าวหน้าในด้านคอนกรีตเทคโนโลยีในปัจจุบัน การศึกษาวิจัยด้านวิศวกรรมคอนกรีตสามารถทำการศึกษาได้อย่างกว้างขวางขึ้น การศึกษาคอนกรีตสามารถลงลึกได้ถึงระดับโครงสร้างภายในเนื้อของคอนกรีต (Micro Structure) ทำให้เป็นที่ตระหนักว่าคอนกรีตไม่ใช่วัสดุก่อสร้างที่มีความทนทานสูงเสมอไป และต้องการการบำรุงรักษาเช่นเดียวกับวัสดุก่อสร้างชนิดอื่น ซึ่งในกลุ่มประเทศแถบยุโรปหรือกลุ่มประเทศ ที่พัฒนาแล้วการบำรุงรักษาสภาพของโครงสร้างอย่างสม่ำเสมอมีมูลค่าใกล้เคียงกับการก่อสร้างใหม่ แต่สำหรับในประเทศไทยวิศวกรโครงสร้างยังขาดความรู้และข้อมูลในเรื่องเกี่ยวกับการดูแลรักษา และเรื่องความคงทนของคอนกรีต จึงมีความจำเป็นในการทำการวิจัยเพื่อเป็นข้อมูลสำหรับวิศวกรเพื่อที่จะเป็นฐานข้อมูลในการวางแผนการบำรุงรักษา และซ่อมแซมโครงสร้าง

คอนกรีตที่ดีควรมีกำลังตามต้องการและทนทานต่อสภาวะแวดล้อมตลอดอายุการใช้งาน โดยยังสามารถคงรูปร่างและคุณสมบัติต่างๆ รวมถึงการใช้งานได้ดีเช่นเดิม ความเสียหายของคอนกรีตอาจเกิดขึ้นจากปัจจัยภายนอกหรืออาจเกิดจากปัจจัยภายในของคอนกรีตเองก็ได้ โดยทั่วไปอาจแบ่งสาเหตุของการเสื่อมสภาพของคอนกรีตออกเป็น 3 กลุ่มใหญ่ ๆ ดังต่อไปนี้

1. การเสื่อมสภาพโดยสาเหตุทางกายภาพ (Physical Deterioration) เช่น การหดตัวแบบแห้ง (Drying Shrinkage) การทรุดตัว (Settlement) การหดตัวพลาสติก (Plastic Shrinkage) การแข็งตัวและเหลวของน้ำในคอนกรีต (Freezing and Thawing)
2. การเสื่อมสภาพโดยสาเหตุทางเคมี (Chemical Deterioration) คาร์บอนเนชั่น (carbonation) การกัดกร่อนโดยกรด (Acid Attack) การกัดกร่อนโดยซัลเฟต (Sulfate Attack) ปฏิกริยาระหว่างต่างกับมวลรวม (Alkali-Aggregate Reaction) การเป็นสนิมของเหล็กเสริมจากคลอไรด์ในน้ำทะเล (Chloride Attack)



3. การเสื่อมสภาพโดยสาเหตุทางกล (Mechanical Deterioration) เช่น การขัดสี (Abrasion) การชะด้วยกระแสน้ำและกรวดทราย (Erosion) การแตกตัวของฟองอากาศในน้ำ (Cavitations)

2.1 การเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีต

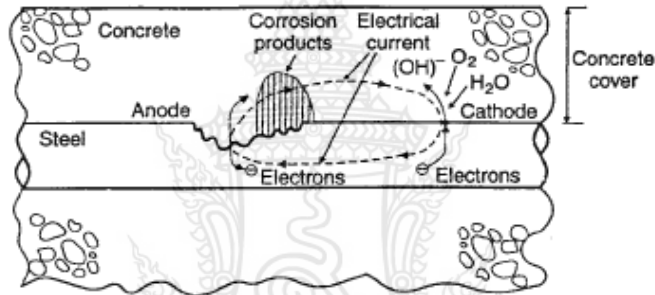
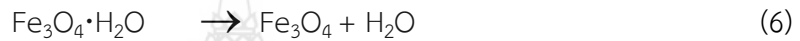
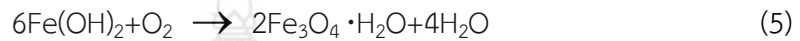
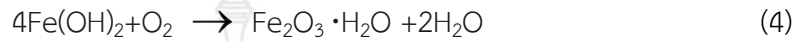
การเกิดสนิมของเหล็กเสริมเกิดจากปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี (Electrochemical Process) โดยมีส่วนประกอบที่สำคัญ 3 ส่วนคือ ปฏิกิริยา Anodic Reaction ปฏิกิริยา Cathodic Reaction และ Electrolyte กระบวนการเกิดสนิมเริ่มจากการมีความชื้นเพียงพอที่จะทำให้อะตอมของเหล็กสูญเสียอิเล็กตรอนกลายเป็น Fe^{2+} ละลายอยู่ในน้ำรอบเหล็กเสริมเรียกบริเวณนี้เป็นขั้ว Anode และอิเล็กตรอนนี้จะสะสมอยู่บริเวณผิวบนเหล็กเสริมทำให้เกิดศักย์ไฟฟ้าขึ้นและส่วนของเหล็กเสริมที่ไม่มีการแตกตัวจะมีศักย์ไฟฟ้าต่ำกว่าและทำหน้าที่เป็นขั้ว Cathode อธิบายได้ดังผิวดลาด! ไม่พบแหล่งการอ้างอิง ซึ่งเทียบได้กับการเกิดการกัดกร่อนของเหล็กเสริมในคอนกรีต ดังผิวดลาด! ไม่พบแหล่งการอ้างอิง (ก) ซึ่งเกิดจากการที่อะตอมของเหล็กเกิดการแตกตัวเป็น Fe^{2+} และเกิดการสูญเสียอิเล็กตรอนทำให้บริเวณนั้นเกิดเป็นขั้ว Anode ดังสมการที่ 1 อิเล็กตรอนนี้จะมีมากขึ้นบริเวณผิวของเหล็กเสริมทำให้เกิดศักย์ทางไฟฟ้าขึ้นในบริเวณที่ไม่เกิดการแตกตัวของเหล็กจะมีศักย์ไฟฟ้าที่ต่ำกว่าจะทำหน้าที่เป็นขั้ว Cathode อิเล็กตรอนที่เกิดจาก Anode จะเคลื่อนที่ตามเหล็กเสริมมายัง Cathode ที่มีศักย์ไฟฟ้าต่ำกว่าและทำปฏิกิริยากับออกซิเจน (O_2) และน้ำ (H_2O) ที่อยู่บริเวณนี้เกิดไฮดรอกซิลไอออน (OH^-) ขึ้น ดังสมการที่ 2 การเคลื่อนที่ของประจุไฟฟ้าเกิดขึ้นทั้งกระแสภายในเหล็กและกระแสภายนอกเหล็กเสริม กระแสภายในเหล็กเสริมเป็นการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่จาก Anode ไปสู่ Cathode ในขณะที่กระแสภายนอกเหล็กเสริมเป็นการเคลื่อนที่ของไอออน Fe^{2+} และ (OH^-) ผ่านสารละลายในช่องว่าง Pore Solution ของคอนกรีตรอบๆเหล็กเสริม (Bentur et al., 1997) ดังผิวดลาด! ไม่พบแหล่งการอ้างอิง (ข) โดยประจุลบคือ (OH^-) จะเคลื่อนที่จาก Cathode สู่อานode และประจุบวก Fe^{2+} จะเคลื่อนที่จาก Anode สู่อานode การเคลื่อนที่ของไอออนผ่าน Pore Solution ของคอนกรีตเป็นปัจจัยที่สำคัญของการเกิดการกัดกร่อน สารละลายในช่องว่างส่วนใหญ่เป็นสารละลายของ Alkali และ Calcium Hydroxide เปรียบเหมือนเป็นสารละลาย Electrolyte ทำให้เกิดการครบวงจรของ Galvanic Cell และเกิดการกัดกร่อนขึ้นได้ แต่ถ้าน้ำในช่องว่างนี้แห้งหรือโครงสร้างภายในของคอนกรีตที่บีบแน่นและช่องว่างภายในเกิดขึ้นไม่ต่อเนื่องการไหลของไอออน ผ่านจะเกิดขึ้นได้ยากขึ้นซึ่งทำให้การเกิดการกัดกร่อนช้าลงจนหยุดการกัดกร่อน



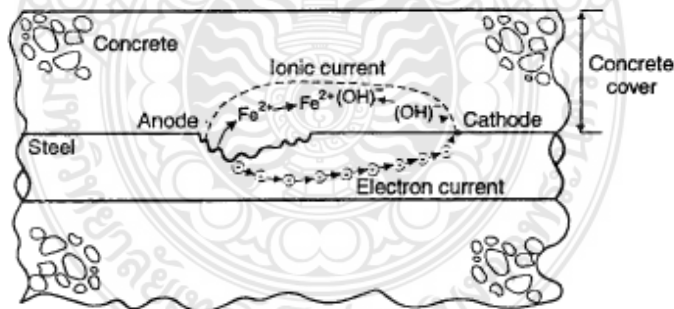
จากการที่เกิด Fe^{2+} และ OH^- จาก Anode และ Cathode ไอออนทั้งสองจะเคลื่อนที่เข้าหากันและทำปฏิกิริยาเกิดเป็น $Fe(OH)_2$ ดังสมการที่ 3 ซึ่งสามารถทำปฏิกิริยาต่อไปเป็น hydrate ferric oxide ($Fe_2O_3 \cdot H_2O$) หรือเรียกว่า red-brown rust และ black magnetite (Fe_3O_4) ซึ่งเกิดจาก Green hydrate magnetite ($Fe_3O_4 \cdot H_2O$) ดังสมการที่ 4, 5 และ 6 ผลิตภัณฑ์ซึ่งเกิดขึ้นจากปฏิกิริยาของการกัดกร่อนคือสนิมในรูปแบบต่างๆ ซึ่งมีปริมาณมากกว่าเหล็กก่อนเกิดปฏิกิริยา 4 ถึง 6 เท่า (Nielsen, 1985)



ดังผิดพลาด! ไม่พบแหล่งการอ้างอิง ซึ่งทำให้เกิดแรงดันภายในและคอนกรีตเกิดการแตกร้าวเสียหายได้ นอกจากนี้ในส่วนของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กบางจุดเกิดการสูญเสียเนื้อที่หน้าตัดเหล็ก และหน้าตัดของเหล็กเสริมลดลงส่งผลต่อการรับแรง ของโครงสร้างซึ่งถ้าไม่ได้ซ่อมแซมให้ถูกวิธีโครงสร้างอาจเกิดการวิบัติได้

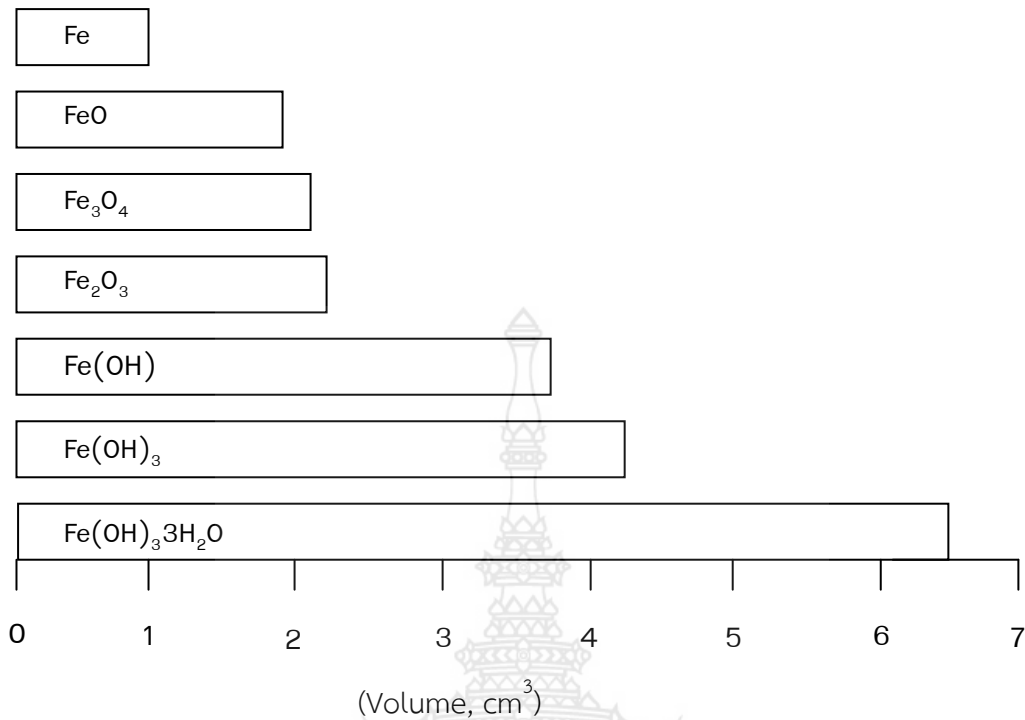


(ก) ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นที่ขั้ว Anode และ Cathode



(ข) การเคลื่อนที่ของประจุไฟฟ้าภายในและภายนอกเหล็กเสริม

รูปที่ 2.1 ปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีของการกัดกร่อนบนผิวเหล็กเสริม Bentur et al. (1997)



รูปที่ 2.2 ปริมาตรของเหล็กที่เกิดสนิม Nielsen (1985)

2.2 การเกิดสนิมของเหล็กเสริมโดยคลอไรด์

การเกิดสนิมของเหล็กเสริมเนื่องจากคลอไรด์ซึ่งเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เกิดการกัดกร่อนของเหล็กเสริมโดยอิออนของคลอไรด์ (Chloride Ions) เป็นตัวที่ทำให้ความเป็นต่างของคอนกรีตที่ป้องกันเหล็กเสริมไม่ให้เกิดสนิมถูกทำลายลดลงจนถึงระดับวิกฤตและถ้ามีน้ำและออกซิเจนเพียงพอก็จะทำให้เหล็กเกิดสนิมได้ แหล่งที่มาของคลอไรด์อาจมีอยู่เองในคอนกรีต หิน ทราย หรือน้ำยาผสมคอนกรีตบางชนิด เช่นแคลเซียมคลอไรด์ ที่มีมืออยู่ในสารเร่งการก่อตัว แต่ปัญหาของคลอไรด์ที่กระทบต่อความทนทานของคอนกรีตนั้น ส่วนมากจะมาจากภายนอกคอนกรีตในช่วงที่ใช้งาน เช่น จากน้ำทะเลจากดินหรือจากเกลือที่ใช้ละลายน้ำแข็งในประเทศที่มีอากาศหนาว (De-icing Salt) ซึ่งคลอไรด์อาจจะเข้าสู่คอนกรีตได้โดยวิธี การซึมผ่านเข้าไปในคอนกรีตที่แห้งของน้ำที่มีคลอไรด์ (Capillary Suction) การแพร่ของอิออนของคลอไรด์ (Chloride Ions Diffusion) จากภายนอกที่มีความเข้มข้นของคลอไรด์สูงกว่าภายในของคอนกรีต การซึมผ่านเข้าไปในคอนกรีตของน้ำที่มีคลอไรด์โดยแรงดันของน้ำ โดยทั่วไปแล้ว สำหรับคอนกรีตที่แช่อยู่ในทะเลตลอดเวลา นั้น ถึงแม้คลอไรด์จะสามารถซึมผ่านเข้าไปในคอนกรีตได้ดีแต่ถ้าไม่มีออกซิเจนการเกิดสนิมของเหล็กเสริมก็ไม่สามารถเกิดขึ้นได้ ความเสี่ยงที่จะเกิดการกัดกร่อนของเหล็กเสริมมากที่สุด มักพบในบริเวณคลื่นและละอองน้ำ (Splash Zone) รองลงมาเป็นบรรยากาศทะเล (Atmospheric Zone) และบริเวณน้ำขึ้น-น้ำลง (Tidal Zone) ส่วนบริเวณใต้น้ำทะเล (Submerged Zone) จะมีความเสี่ยงต่อการกัดกร่อนเหล็กเสริมน้อยมาก สำหรับในกรณีของสภาพเปียกสลับแห้งนั้น น้ำทะเลจะเข้าสู่คอนกรีตที่แห้งโดย

Absorption หรือ Capillary Suction จนกระทั่งคอนกรีตอยู่ในสภาพอิ่มตัว เมื่อสภาพภายนอกเปลี่ยนแปลงเป็นแห้ง น้ำที่ผิวคอนกรีตก็จะระเหยออกไปทิ้งไว้แต่คราบเกลือเมื่ออยู่ในสภาพเปียกอีก ความเข้มข้นของคลอไรด์ที่ใกล้ผิวก็จะสูงขึ้น คลอไรด์ไอออนซึ่งมีความเข้มข้นสูงที่บริเวณผิวจะซึมเข้าสู่ภายใน โดยการแพร่ซึ่งในแต่ละรอบของการเปียกและแห้งจะทำให้บริเวณใกล้ผิวมีความเข้มข้นสูงขึ้นเรื่อยๆ และจะเข้าไปสู่ภายในคอนกรีตและสู่บริเวณเหล็กเสริมมากขึ้น โดยปกติแล้วคอนกรีตจะเปียกได้เร็วแต่จะแห้งได้ช้ากว่ามากและภายในคอนกรีตนั้นไม่สามารถทำให้แห้งได้โดยสมบูรณ์ ดังนั้นการแพร่เข้าไปในคอนกรีตที่แช่อยู่ในน้ำทะเลตลอดเวลาจึงช้ากว่าการเข้าไปของโดยการเปียกกลับแห้งโดยน้ำทะเล โดยทั่วไปแล้วคอนกรีตที่สภาพแห้งนานกว่าสภาพเปียกมักจะให้คลอไรด์ไอออนเข้าสู่คอนกรีตได้เร็ว ดังนั้นคอนกรีตที่ถูกน้ำทะเลเป็นบางครั้งหรือช่วงแห้งนาน จะมีโอกาสเกิดปัญหาการกัดกร่อนของเหล็กเสริมมากกว่าคอนกรีตที่ประสบกับสภาวะช่วงแห้งสั้น การกัดกร่อนจะเริ่มเกิดขึ้นก็ต่อเมื่อปริมาณคลอไรด์ไอออน มีมากพอที่ผิวของเหล็กเสริม (Threshold Content of Chloride Ions)

สภาวะของคลอไรด์ในคอนกรีตนั้น จะมีคลอไรด์บางส่วนที่ถูกจับยึด (Fixed Chloride) โดยกลไกต่อไปนี้

- ❖ Chemical Binding คลอไรด์บางส่วนจะถูกจับโดยผลผลิตของปฏิกิริยาไฮเดรชัน
- ❖ Physical Binding คลอไรด์บางส่วนสามารถถูกยึดด้วยแรงทางกายภาพ (Surface Force) ได้บนผิวของ Hydration Product เช่น C-S-H และ C-A-H อีกทั้งสามารถถูกยึดอยู่บนผิวของวัสดุที่เป็นของแข็งที่ไม่มีปฏิกิริยาเช่น มวลรวม หรือ ผงฝุ่นหินได้ด้วย

การป้องกันการเกิดสนิมของเหล็กเสริมเนื่องจากคลอไรด์แบ่งออกเป็น 2 แนวทาง โดยการปรับปรุงคุณภาพของคอนกรีตและเหล็กเสริม อาทิเช่น

- ❖ ออกแบบและใช้คอนกรีตที่มีความชื้น น้ำต่ำมากๆ จะทำให้คลอไรด์แพร่เข้าไปในคอนกรีต ได้ยาก การใช้ปริมาณน้ำในคอนกรีตที่ต่ำ การลดอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์
- ❖ การใช้สารประเภท Filler เพื่อเพิ่มความทึบน้ำ เช่น ซิลิกาฟูม สารปอซโซลานในปริมาณที่เหมาะสมนอกจากจะช่วยให้คอนกรีตทึบน้ำมากขึ้นแล้วยังช่วยจับยึดคลอไรด์ได้มากกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์อย่างเดียว
- ❖ ใช้สารเคลือบผิวคอนกรีตเช่น Epoxy เป็นต้น
- ❖ ใช้สารผสมในคอนกรีตบางชนิด เช่น Calcium หรือ Sodium Nitrite ที่สามารถช่วยทำให้เกิดปฏิกิริยา Anodic นั้นเกิดยากขึ้น
- ❖ ออกแบบคอนกรีตไม่ให้เกิดการแตกร้าวเพราะรอยแตกร้าวจะเป็นบริเวณที่คลอไรด์สามารถเข้าไปในคอนกรีตได้ง่ายขึ้น



การป้องกันการเกิดสนิมของเหล็กเสริมโดยอาศัยขบวนการทางไฟฟ้าเคมี มี 3 วิธี ได้แก่

1) Cathodic Protection

กระบวนการลดอัตราการเกิดสนิมโดยเปลี่ยนแปลงศักย์ไฟฟ้าของขั้วลบให้เท่ากับศักย์ไฟฟ้าของขั้วบวก (วันชัย, 2548) จากกลไกของการเกิดสนิมในเหล็กเสริม พบว่าการเกิดสนิมจะเกิดขึ้นเมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลหมุนเวียน เพราะการเกิดสนิมเป็น (Electrochemical Process) ดังนั้นหากสามารถทำให้ทุกๆ จุดบนเหล็กเสริมมีศักย์ไฟฟ้าเท่ากันได้ ก็จะไม่เกิดการไหลของกระแสไฟฟ้าขึ้น สามารถทำได้โดย (ii) ติดโลหะซึ่งสามารถเกิดสนิมได้ง่ายกว่าเหล็ก ซึ่งสูญเสียอิเล็กตรอนได้ง่ายกว่าไว้กับ เหล็กเสริม เรียกโลหะนี้ว่า Sacrificial Anode โดยโลหะชนิดนี้จะทำหน้าที่แทนเหล็กในขบวนการ Anodic โลหะที่สูญเสียอิเล็กตรอนได้ดีกว่าเหล็กเสริมเช่น สังกะสี เป็นต้น เมื่อใช้โลหะเหล่านี้ ปฏิกิริยา Anodic จะเปลี่ยนเป็น $Zn \rightarrow Zn^{2+} + 2e^-$ ดังนั้นต้องมีการเปลี่ยนโลหะที่เสียอิเล็กตรอนแทนเหล็กเมื่อโลหะชนิดนี้ผุกร่อนจนหมด

2) โดยการติดตั้งไฟฟ้ากระแสตรงสู่เหล็กเสริม

Electrodeposition เริ่มจากเมื่อผ่านกระแสไฟฟ้าสู่น้ำทะเล แคลเซียมไอออน (Ca^{2+}) และแมกนีเซียมไอออน (Mg^{2+}) ซึ่งมีประจุบวกในน้ำทะเลจะตกผลึกเป็น แคลเซียมคาร์บอเนต ($CaCO_3$) หรือแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ $Mg(OH)_2$ ที่ผิวบริเวณขั้วลบ (ผิวคอนกรีต) เนื่องจากผลึกที่เกิดขึ้นนี้มีความสามารถละลายน้ำได้น้อยมาก และยังช่วยเพิ่มความทึบน้ำให้กับคอนกรีต จึง สามารถเป็นเครื่องป้องกันคลอไรด์ไอออนจากน้ำทะเลได้ (วันชัยและคณะ, 2548)

การกัดกร่อนในเหล็กเสริมเป็นหนึ่งในความเสียหายที่เกิดขึ้นกับโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก ซึ่งส่งผลกระทบต่อโดยรวมของการเกิดสนิมในเหล็ก คือ กำลังรับแรงของโครงสร้างลดลงเนื่องจากพื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริมน้อยลงโดยเฉพาะการต้านทานความล้า (Fatigue strength) และความสามารถในการแอ่นตัวหรือการเปลี่ยนรูปร่าง (Elongation ability) ของโครงสร้างก็ลดลงด้วย (Neal et al., 1990) นอกจากนี้การเกิดสนิมของเหล็กเสริมยังทำให้เกิดการแตกร้าวและหลุดออกของคอนกรีตหุ้มภายนอก **ดังผิดพลาด!** **ไม่พบแหล่งอ้างอิง** เนื่องจากปริมาณที่เพิ่มขึ้นของเหล็กเสริมจากการเกิดสนิม จะทำให้เกิดแรงดึงในเนื้อคอนกรีตซึ่งทำให้คอนกรีตที่มีระยะหุ้มที่มีความหนาน้อยนั้นเกิด การแตกร้าวเป็นผลให้เกิดความเสียหายกับโครงสร้างมากยิ่งขึ้น (Scannell and Sohngpurwala, 1993)

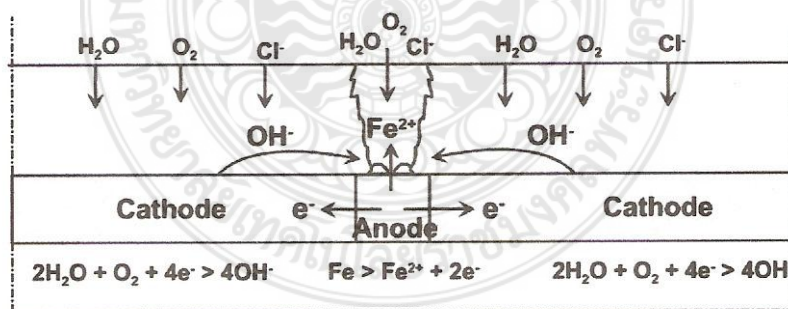
โดยทั่วไปแล้ว เหล็กเสริมที่อยู่ในคอนกรีต นั้น จะอยู่ในสถานะที่ไม่เกิดสนิมเนื่องจากมี Passivation film ที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration) ของซีเมนต์กับน้ำในระหว่างการพัฒนากำลังของคอนกรีต ซึ่งมีความเป็นด่างสูง มีค่า *pH* ประมาณ 13 ซึ่งสามารถป้องกันการเกิดสนิมได้ (Bentur et al., 1997) อย่างไรก็ตามโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กทั่วไปนั้น มักจะอยู่ในสภาพแวดล้อมที่อาจจะสัมผัสสารเคมี หรือสภาพแวดล้อมที่มีความเสี่ยงต่อการเกิดสนิม เช่น โครงสร้างที่อยู่บริเวณชายฝั่งทะเลนั้น ความเข้มข้นของคลอไรด์จะเป็นตัวทำลายสภาพความเป็นด่างของคอนกรีต เป็นต้น ซึ่งเป็นตัวเร่งให้เกิดสนิม ในเหล็กเสริมเร็วขึ้น ดังแบบจำลองการกัดกร่อนของเหล็กเสริม



2.2.1 กลไกการกัดกร่อนของเหล็กเสริม

การกัดกร่อนในเหล็กเสริมของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กนั้น เกิดได้หลายสาเหตุด้วยกัน โดยที่สาเหตุหลักของการเกิดสนิม คือ การเกิดรอยแตกร้าวของโครงสร้าง (Pullar-Strecker, 1987) ที่มักเกิดจากการหดตัวในขณะที่คอนกรีตแข็งตัว (สำหรับโครงสร้างที่มีขนาดใหญ่) รอยต่อของคอนกรีตที่เกิดจากการก่อสร้าง สภาวะแวดล้อม หรือเกิดจากสภาวะการใช้งานเป็นต้น โดยปกติแล้วและอากาศสามารถซึมผ่านเนื้อคอนกรีตไปถึงเหล็กเสริมได้ในปริมาณที่น้อย ขึ้นอยู่กับความทึบของเนื้อคอนกรีต แต่การเกิดการแตกร้าวของโครงสร้างจะเป็นการเร่งให้น้ำและออกซิเจน เข้าไปถึงบริเวณเหล็กได้รวดเร็วและมากยิ่งขึ้น ทำให้การเกิดสนิมของเหล็กเสริมเร็วและรุนแรงมากขึ้น และอีกสาเหตุหนึ่งของการเกิดสนิมในเหล็กเสริมของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก คือ การสูญเสียสภาพการเป็นด่าง (Depassivation) เนื่องจากสภาพแวดล้อม โดยเฉพาะคาร์บอนไดออกไซด์ ในอากาศและการซึมผ่านของคลอไรด์ไอออนในสารละลาย เข้าสู่ช่องว่างในคอนกรีต ทั้งสองสาเหตุนี้ (คาร์บอนไดออกไซด์และคลอไรด์ไอออน) ถ้าความเข้มข้นมากพอ จะทำให้ความแตกต่างของคอนกรีตลดลง ซึ่งสาเหตุนี้นำไปสู่การเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตได้ (คณะอนุกรรมการคอนกรีตและวัสดุ วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย, 2543)

คลอไรด์เป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เกิดการกัดกร่อนของเหล็กเสริมได้ โดยการกัดกร่อนจะเริ่มขึ้นเมื่อคลอไรด์ไอออนมีความเข้มข้นมากพอ (Threshold concentration) ที่ผิวหน้าของเหล็กเสริม (Neville, 2002) ซึ่งจะทำให้ค่า *pH* ลดลงจนถึงระดับวิกฤต ทำให้สภาพการเป็นด่างของคอนกรีตที่ป้องกันการเกิดสนิมของเหล็กเสริมถูกทำลาย (Depassivation) ถ้ามีน้ำและออกซิเจนเพียงพอจะทำให้เหล็กเสริมเกิดสนิมได้ ดัง **ผิดพลาด! ไม่พบแหล่งอ้างอิง** โดยที่คลอไรด์ในคอนกรีตมีแหล่งที่มาได้จากทั้งภายในและภายนอก แต่ปัญหาของคลอไรด์ที่กระทบต่อความทนทานของคอนกรีตนั้น ส่วนมากเป็นคลอไรด์ที่มาจากแหล่งภายนอกเข้าสู่เนื้อคอนกรีตในช่วงการใช้งาน เช่น จากน้ำทะเล พื้นดิน หรือเกลือที่ใช้ละลายน้ำแข็งในประเทศที่มีอากาศหนาวเย็น เป็นต้น



รูปที่ 2.3 ปฏิริยาเคมีไฟฟ้าของการกัดกร่อนของเหล็กเสริมในคอนกรีตจากคลอไรด์ Raupach (1996)

เหล็กเสริมในคอนกรีตจะเป็นสนิมได้ก็ต่อเมื่อเงื่อนไข 3 ประการดังต่อไปนี้

1. ความเป็นต่างในคอนกรีตลดลงจนปฏิกิริยาอะโนดิก (Anodic process) สามารถเกิดขึ้นได้ ซึ่งความเป็นต่างในระดับที่จะทำให้ปฏิกิริยาอะโนดิกเกิดขึ้นได้นั้น จะมีค่าของ pH ต่ำกว่าระดับ 9 ถึง 10 และมักจะเรียกระดับวิกฤต (Critical level) ของความเป็นต่าง

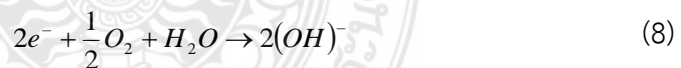
2. มีความชื้นเพียงพอที่ทำให้ไอออนของเหล็ก (Fe^{2+}) เข้าสู่สภาวะสารละลายและเพียงพอที่จะทำให้เกิดปฏิกิริยาในการเกิดสนิม ซึ่งโดยปกติความชื้นมักจะเพียงพออยู่ในบริเวณคอนกรีตที่หุ้มรอบๆ เหล็กเสริมอยู่แล้ว

3. มีปริมาณออกซิเจนเพียงพอในการทำปฏิกิริยาเพื่อการเกิดสนิม ซึ่งปกติแล้วออกซิเจน ในปริมาณที่เพียงพอในการเกิดสนิมมักจะแพร่เข้าสู่คอนกรีตบริเวณเหล็กเสริมโดยผ่านทางช่องว่างที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ (Unsaturated pores) นั่นคือแพร่ผ่านอากาศในช่องว่างแต่การแพร่ของออกซิเจนผ่านทางช่องว่างที่อิ่มตัวด้วยน้ำ (Saturated pores) จะเป็นไปได้ยาก เนื่องจากออกซิเจนละลายในน้ำได้น้อยมาก ดังนั้นคอนกรีตที่อิ่มตัวด้วยน้ำอยู่ตลอดเวลาจะไม่เกิดสนิมในเหล็กเสริม

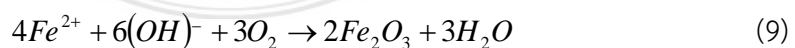
กลไกของการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีต **ดังผิดพลาด!** ไม่พบแหล่งอ้างอิง จะเริ่มต้นด้วยการที่ความเป็นต่างของคอนกรีตที่บริเวณที่หุ้มรอบๆ เหล็กเสริมอยู่ลดลงจนถึงระดับวิกฤตและมีความชื้นเพียงพอทำให้เหล็กเกิดปฏิกิริยา Electrolysis ขึ้น ดังสมการที่ 7



โดยเหล็กจะแตกตัวเป็นไอออน (Fe^{2+}) และอิเล็กตรอนจะวิ่งไปตามเหล็กปฏิกิริยานี้เรียกว่า กระบวนการอะโนดิก (Anodic process) ต่อจากนั้น $2e^-$ ที่เกิดจากปฏิกิริยาอะโนดิกจะไปรวมตัวกับน้ำและออกซิเจนทำให้เกิดเป็นไฮดรอกซิลไอออน (OH^-) ดังสมการที่ 8



ซึ่งปฏิกิริยานี้เรียกว่ากระบวนการแคโทดิก (Cathodic process) หลังจากนั้น ปฏิกิริยาการเกิดสนิมเกิดขึ้น ดังสมการที่ 9



โดยที่ Fe_2O_3 คือ เฟอร์ริกออกไซด์ หรือสนิมที่เกิดขึ้นกับเหล็กเสริม



โดยทั่วไปแล้วแหล่งของคลอไรด์ ที่มีผลกระทบต่อโครงสร้างคอนกรีตนั้นมาจากน้ำทะเล สำหรับคอนกรีตที่แช่อยู่ในน้ำทะเลตลอดเวลาจนถึงแม้คลอไรด์สามารถซึมผ่านเข้าไปในคอนกรีตได้ดี แต่ถ้าไม่มีออกซิเจน การเกิดสนิมของเหล็กเสริมก็ไม่สามารถเกิดขึ้นได้ จึงไม่เป็นปัญหานัก

2.2.2 ชนิดของคลอไรด์ในคอนกรีต

ชนิดของคลอไรด์ในคอนกรีตประกอบไปด้วย Bound Chloride คือคลอไรด์ที่ถูกจับยึดอยู่ในปฏิกิริยาไฮเดรชันและเกิดปฏิกิริยาเปลี่ยนแปลงในรูปของ C-A-H หรือถูกดูดซับด้วยผิวของ Gel Pore ซึ่งคลอไรด์ส่วนนี้จะไม่ผลต่อการเกิดสนิมและคลอไรด์อิสระ Free Chloride คือคลอไรด์ที่ละลายอยู่ในโพรงของคอนกรีตซึ่งสามารถแพร่กระจายเข้าไปในคอนกรีตและทำให้ความเป็นด่างลดลงทำให้เหล็กเสริมในคอนกรีตเสริมเหล็กเกิดสนิมได้ สำหรับการวัดระยะที่คลอไรด์ซึมผ่านเข้าสู่คอนกรีตทำได้โดยใช้น้ำยาซิลเวอร์ไนเตรดฉีดลงบนผิวคอนกรีตที่สกัดไว้แล้วและระยะที่คลอไรด์ซึมผ่านจะปรากฏเป็นสีเทาที่ผิวของคอนกรีตที่มีคลอไรด์อยู่ ซึ่งในการหาปริมาณการซึมผ่านของคลอไรด์ ในคอนกรีตมีวิธีการที่ง่ายและสะดวกโดยการใช้สว่านเจาะคอนกรีตที่ระดับความลึกต่างๆ และนำผงคอนกรีตที่ได้มาทดสอบหาปริมาณของคลอไรด์ไอออนและเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ปริมาณคลอไรด์ไอออนเปรียบเทียบกับระดับความลึกต่างๆซึ่งจะทำให้สามารถประมาณระยะเวลาที่เหล็กอยู่ก่อนที่เหล็กเสริมจะเกิดสนิม ความเสี่ยงที่จะเกิดการกัดกร่อนของเหล็กเสริมมากที่สุด มักพบในบริเวณคลื่นและละออง น้ำ (Splash zone) รองลงมาเป็นบริเวณบรรยากาศทะเล (Atmospheric zone) และบริเวณน้ำขึ้นน้ำลง (Tidal zone) ส่วนบริเวณใต้น้ำทะเล (Submerged zone) จะมีความเสี่ยงต่อการกัดกร่อนเหล็กเสริม น้อยมาก ในบริเวณใต้น้ำทะเลความเสี่ยงต่อการเกิดสนิมของเหล็กเสริมมีน้อย เนื่องจากมีความ เข้มข้นของออกซิเจนน้อย และอัตราการแพร่ของออกซิเจนเข้าไปในคอนกรีตต่ำมาก เนื่องจากช่องว่างภายในคอนกรีตเป็นช่องว่างอิมมิตัวด้วยน้ำ ซึ่งออกซิเจนละลายน้ำได้น้อยมากทำให้อัตราการแพร่เกิดขึ้นน้อยถึงแม้ว่าจะมีปริมาณออกซิเจนมาก ในบริเวณน้ำขึ้นน้ำลง แต่การเกิดสนิมก็ถูกจำกัดโดยอัตราการแพร่ที่ต่ำของออกซิเจน ผ่าน ช่องว่างที่อิมมิตัวด้วยน้ำของคอนกรีตในช่วงที่คอนกรีตเปียก

ในกรณีของสภาพเปียกสลับแห้งนั้น น้ำทะเลจะเข้าสู่คอนกรีตที่แห้งโดย Absorption หรือ Capillary suction จนกระทั่งคอนกรีตอยู่ในสภาวะที่อิมมิตัว (Saturated) เมื่อสภาพภายนอกเปลี่ยนเป็นแห้ง น้ำที่ผิวคอนกรีตก็จะระเหยออกไปทิ้งไว้แต่คราบเกลือ เมื่ออยู่ในสภาพเปียกอีก ความเข้มข้นของคลอไรด์ที่ใกล้ผิวก็จะสูงขึ้น ดังนั้นไอออนของคลอไรด์ (Chloride ions) ซึ่งมีความ เข้มข้นสูงที่บริเวณผิว จะซึมเข้าสู่ภายในโดยการแพร่ ซึ่งในแต่ละรอบของการเปียกและการแห้ง จะทำให้คลอไรด์บริเวณใกล้ผิวมีความเข้มข้นสูงขึ้นเรื่อยๆ และจะเข้าไปสู่ภายในคอนกรีตและสู่บริเวณเหล็กเสริมมากขึ้น โดยปกติแล้วคอนกรีตจะเปียก (Saturated) ได้เร็ว แต่จะแห้งได้ช้ากว่ามาก และภายในของคอนกรีตนั้นไม่สามารถทำให้แห้งได้โดยสมบูรณ์ ดังนั้น การแพร่ของไอออนของคลอไรด์เข้าไปในคอนกรีตที่แช่อยู่ในน้ำทะเลตลอดเวลาจึงช้ากว่าการเข้าไปของคลอไรด์โดยการเปียกสลับแห้งโดยน้ำทะเล



การเคลื่อนตัวของไอออนของคลอไรด์ไปในคอนกรีตนั้น ขึ้นอยู่กับระยะเวลาของสภาพเปียกและแห้ง ซึ่งขึ้นอยู่กับสถานที่และสภาพแวดล้อม เช่น อุณหภูมิ ความชื้น การไหลของ น้ำทะเล ทิศทางลม ทิศทางแสงอาทิตย์ และการใช้งานของโครงสร้าง เป็นต้น ทำให้โครงสร้างเดียวกัน แต่ละส่วนอาจจะประสบกับสภาวะเปียกและแห้งได้ไม่เหมือนกัน โดยทั่วไปแล้วคอนกรีตที่สภาพแห้งนานกว่าสภาพเปียกมักจะเร่งให้อิออนของคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีตได้เร็วขึ้น ดังนั้นคอนกรีตที่ถูกน้ำทะเลเป็นบางครั้ง (ช่วงแห้งนาน) จะมีโอกาสเกิดปัญหาการกัดกร่อนของเหล็กเสริม มากกว่าคอนกรีตที่ประสบกับสภาวะช่วงแห้งสั้น การกัดกร่อนจะเริ่มเกิดขึ้นก็ต่อเมื่อ ปริมาณไอออนของคลอไรด์ (Chloride ions) มีมากพอที่ผิวของเหล็กเสริม (Threshold content of chloride ions) ซึ่งทำให้ค่าความเป็นด่างของคอนกรีตลดลงจนถึงระดับวิกฤต

2.2.3 การเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นของคลอไรด์ที่สัมผัสกับสิ่งแวดล้อมคลอไรด์

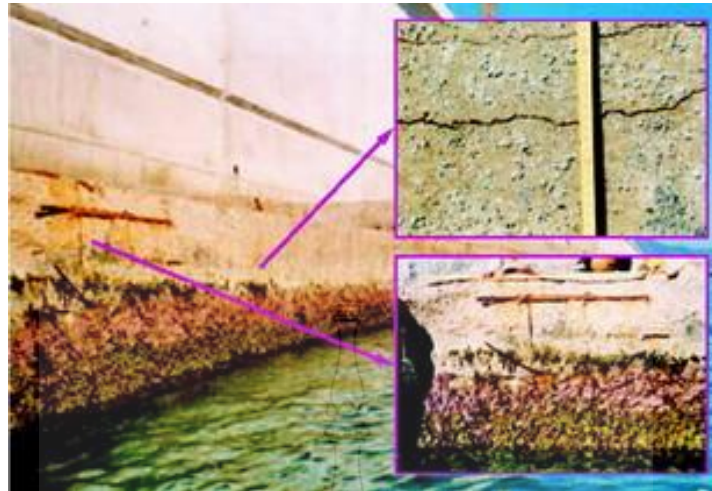
ความเข้มข้นของคลอไรด์บริเวณผิวของคอนกรีตที่สัมผัสกับสิ่งแวดล้อมคลอไรด์ เช่น ทะเล เป็นเวลานาน จะมีความเข้มข้นของคลอไรด์ในสารละลายที่อยู่ในช่องว่างของคอนกรีตสูงกว่าความเข้มข้นของคลอไรด์ในสิ่งแวดล้อมได้ ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า Chloride Condensation ซึ่งเกิดได้ใน 2 ลักษณะ ดังนี้

1) ในกรณีของสภาวะเปียกสลับกับแห้งด้วยน้ำทะเล

ดังผิตพลาด! ไม่พบแหล่งการอ้างอิง ในขณะที่บริเวณผิวคอนกรีตแห้ง คอนกรีตจะสูญเสียเฉพาะน้ำซึ่งจะระเหยออกจากผิวของคอนกรีต ทิ้งเกลือไว้ ในบริเวณผิวคอนกรีตที่แห้ง แต่พอคอนกรีตเข้าสู่สภาวะเปียก น้ำเกลือจะซึมเข้าไปในคอนกรีตอย่างรวดเร็ว เมื่อสภาวะเปียกสลับแห้งดำเนินไปหลายๆ รอบ ก็จะทำให้ความเข้มข้นของคลอไรด์ในบริเวณผิวของคอนกรีตสูงกว่าในสิ่งแวดล้อมได้

2) ในกรณีของสภาวะเปียกตลอดเวลาในน้ำทะเลหรือน้ำใต้ดินที่มีเกลือ

ในกรณีนี้คลอไรด์ในสิ่งแวดล้อมสามารถถูกดึงเข้าไปในช่องว่างของคอนกรีตได้ด้วยแรงทางประจุไฟฟ้า เนื่องจากผิวของช่องว่างในคอนกรีตซึ่งมักจะเป็นผลผลิตทางไฮเดรชัน เช่น แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) จะมีคุณสมบัติทางศักย์ไฟฟ้าเป็นบวกซึ่งสามารถดึงคลอไรด์ในสิ่งแวดล้อมซึ่งมีประจุเป็นลบเข้าไปได้ อย่างไรก็ตามในสภาพของสิ่งแวดล้อมที่เปียกตลอดเวลา ถึงแม้คลอไรด์จะเข้าไป ในคอนกรีตได้มากก็มักไม่เป็นอันตรายต่อเหล็กเสริม เนื่องจากไม่มีออกซิเจนเพียงพอในการเกิดสนิม ยกเว้นแต่ว่าในบริเวณที่ติดกับคอนกรีตจะมีส่วนที่มีสภาวะแห้งได้ด้วย เช่น บริเวณผิวดินซึ่งคลอไรด์ที่เข้าไปอาจแพร่เข้าไปสู่บริเวณที่สามารถแห้งได้ ทำให้ปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตบริเวณผิวดินมีมากขึ้น และในบริเวณผิวดินซึ่งมีออกซิเจนมากเพียงพอ จึงอาจนำพาให้โครงสร้างบริเวณผิวดินเกิดสนิมในเหล็กเสริมได้



รูปที่ 2.4 โครงสร้างคอนกรีตที่สภาวะเปื่อยสลับแห้งด้วยน้ำทะเล

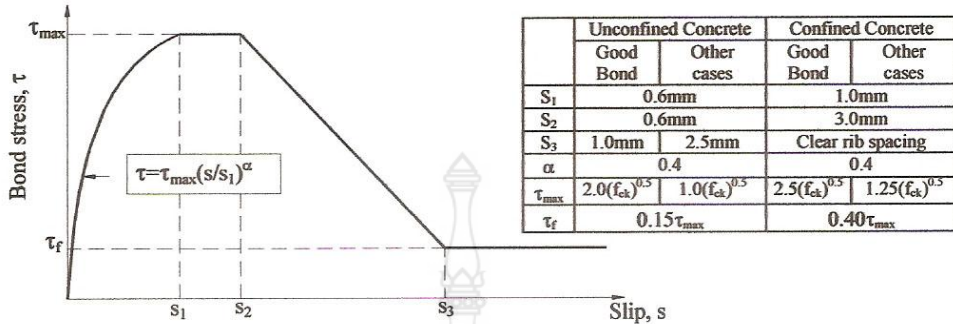
2.2.4 กำลังการยึดเหนี่ยวของเหล็กเสริม

การออกแบบเพื่อหาเหล็กเสริมตามยาวที่ใช้ต้านทานโมเมนต์ดัด และเหล็กเสริมทางขวาง ที่ใช้เพื่อต้านทานแรงเฉือนส่วนที่เกินกว่าความต้านทานแรงเฉือนของคอนกรีต อาศัยสมมติฐานการยึดเหนี่ยวระหว่างคอนกรีตและเหล็กเสริมเป็นไปอย่างสมบูรณ์ นั่นหมายความว่าในขณะที่โครงสร้างรับ น้ำหนักบรรทุกทุกจะสมมติว่าเหล็กเสริมไม่เกิดการครูดหรือลื่นหลุด (Slip) จากคอนกรีตที่หุ้มห่อแต่อย่างใด หรือมีการลื่นไถลเกิดขึ้นมีค่าน้อยมาก มิฉะนั้นเหล็กเสริมจะไม่มีกำลังรับแรงได้ตามต้องการอันเป็นสาเหตุให้ส่วนโครงสร้างไม่สามารถรับน้ำหนักบรรทุกได้ตามต้องการ

ความต้านทานต่อการลื่นไถลดังกล่าวได้จากแรงยึดเหนี่ยวระหว่างคอนกรีตและเหล็กเสริม ซึ่งเป็นแรงเฉือนรอบผิวสัมผัสระหว่างคอนกรีตและเหล็กเสริมในขณะที่ยึดเหนี่ยวกันรับน้ำหนักบรรทุก กำลังยึดเหนี่ยวได้จาก ก) การยึดเกาะทางเคมี (Chemical adhesion) เมื่อคอนกรีตแข็งตัว ข) การยึดเกาะโดยอาศัยแรงเสียด (Friction) รอบผิวเหล็กเสริมกับคอนกรีต และ ค) การยึดรั้งทางกล (Mechanical anchorage) กำลังยึดเหนี่ยวสำหรับเหล็กกลมผิวเรียบกับคอนกรีตได้จากสองแบบแรกซึ่งขึ้นกับ การทำคอนกรีต (การผสม การเท และการทำให้แน่น) แต่กำลังของเหล็กกลมผิวเรียบมีค่าไม่มากนัก อย่างไรก็ตามก็สามารถเพิ่มกำลังยึดเหนี่ยวให้มากขึ้นโดยการทำให้เกิดการยึดรั้งทางกล เช่น การของอที่ปลายเหล็กเสริมกลมผิวเรียบและให้มีระยะฝังยึดในคอนกรีตอย่างเพียงพอ หรือการใช้เหล็กข้ออ้อย เป็นต้น

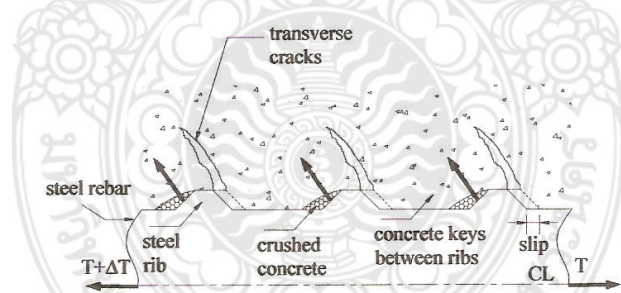
การวิบัติเนื่องจากแรงยึดเหนี่ยว (Bond failure) เป็นการปริแยกของคอนกรีต (Splitting) ตามแนวยาวของเหล็กเสริม และมักเกิดขึ้นหลังจากที่ปรากฏรอยร้าวในแนวทแยงที่เป็นผลมาจากแรงดึงทแยง ซึ่งเมื่อรวมผลของการเฉือนในเหล็กเสริม (Dowel action) ก็จะช่วยให้อายุการปริแยกเคลื่อนตัวเข้าหาจุดรองรับเร็วขึ้น หาก

ปลายของส่วนของโครงสร้างนั้นปราศจากการยึดรั้งที่เพียงพอที่จะเกิดการวิบัติทันทีที่แบบจำลองกำลังการยึดเหนี่ยวของเหล็กเสริม (Bond stress-slip model) ดังรูปที่ 2.



รูปที่ 2.5 Bond stress-slip model CEB (1993)

สำหรับคานที่เสริมเหล็กข้ออ้อยซึ่งมีผิวของเหล็กเสริมเป็นข้อหรือปล้อง กำลังยึดเหนี่ยว จะมีค่ามากขึ้น เพราะเมื่อกำลังยึดเหนี่ยวที่ได้จากการยึดเกาะทางเคมีและจากแรงฝืดถูกทำลายไป ก็จะมีเหลือกำลังยึดเหนี่ยวที่ได้จากส่วนของข้อหรือปล้องของเหล็กเสริมอีก กล่าวคือเมื่อเหล็กเสริมเริ่มจะเลื่อนไถล ส่วนของข้อหรือปล้องของเหล็กเสริมโดยรอบจะดันคอนกรีตที่หุ้มห่อให้ต้องรับแรงกดอัดหรือแรงแบกทาน (Bearing) และแรงเฉือน ดัง รูปที่ 2. จนกว่าแรงที่กระทำนั้นมีค่าเกินกว่ากำลังต้านทานของคอนกรีต คอนกรีตในบริเวณนั้นจึงค่อยๆปริแยกและแตกออก (Wedging action) ทั้งนี้ความกว้างของรอยร้าวและการโก่งตัวจะน้อยกว่าที่เกิดขึ้นในคานที่เสริมด้วยเหล็กกลมผิวเรียบ



รูปที่ 2.6 การแตกร้าวของคอนกรีตเนื่องจากแรงกดอัด fib (2000)

ผลจากการทดลองพบว่าปัจจัยที่สำคัญนอกเหนือจากกำลังวัสดุและขนาดของเหล็กเสริมที่ใช้ กำลังยึดเหนี่ยว ยังขึ้นกับระยะคอนกรีตที่หุ้มเหล็กเสริม ระยะห่างระหว่างเหล็กเสริมและเสริมเหล็กตามขวาง หากระยะของคอนกรีตใต้เหล็กเสริมมีค่ามากพอ คอนกรีตจะสามารถต้านทานแรงดึงได้มากขึ้นและช่วยชะลอการแตกหรือปริแยกออกในแนวตั้งได้ และเมื่อระยะห่างระหว่างเหล็กเสริมมากขึ้นซึ่งจะทำให้มีเนื้อที่คอนกรีตหุ้มเหล็กแต่ละเส้นมากขึ้นก็จะช่วยต้านทานการแตกหรือปริออกของคอนกรีตในแนวนอนได้ นอกจากนี้ หากส่วนโครงสร้างนั้นมีเหล็กเสริมทางขวาง เช่น เหล็กปลอก กำลังต้านทานแรงดึงจะมากขึ้นซึ่งช่วยชะลอการเกิด

รอยร้าวจากแรงดึงได้ นั้นเสมือนว่าเหล็กเสริมทางขวางช่วยชะลอการแตกหรือปริแยกออกทั้งในแนวตั้ง และแนวนอน ทำให้ช่วยลดระยะที่จะต้องฝังเหล็กเสริมในคอนกรีตลงได้

2.3 การใช้วิธีทางไฟฟ้าเคมี (Electro Chemical)

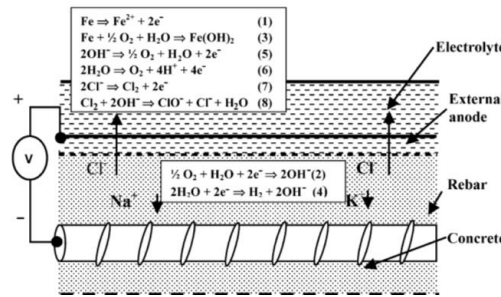
การใช้วิธีทางไฟฟ้าเคมี (Electro Chemical) ในการบำรุงรักษาโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กเป็นวิธีการป้องกันการกัดกร่อนที่มีการใช้กันอย่างกว้างขวางเนื่องจากเป็นวิธีการที่สามารถประยุกต์ใช้กับโลหะและโลหะผสมทุกชนิดในทุกสภาพ (ศิริลักษณ์, 2545) การใช้งานโดยมีข้อแม้ว่าต้องสัมผัสอยู่กับสารละลายอิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte) และเมื่อใช้แล้วยังสามารถลดอัตราการกัดกร่อนได้จนมีค่าใกล้เคียงหรือไม่เกิดการกัดกร่อนเลยได้ นอกจากนี้การทำงานของวิธีนี้ยังสามารถทำได้นานตลอดความต้องการ การควบคุมและการติดตามการทำงานอย่างสะดวกและง่ายโดยการให้โลหะเป่า หมายที่ต้องการการปกป้องชั่วคราวหนึ่ง ชั่วโมงในเซลล์เคมีไฟฟ้า ซึ่งมีวิธีการทำอยู่ 2 แบบคือ

- แบบให้โลหะเป่าหมายเป็นขั้วลบ เรียกว่าการป้องกันแบบคาโทดิก (Cathodic Protection)
- แบบให้โลหะเป่าหมายเป็นขั้วบวก เรียกว่าการป้องกันแบบอโนดิก (Anodic Protection)

ซึ่งการประยุกต์ใช้วิธีทางไฟฟ้าเคมีในการ ป้องกันหรือซ่อมแซมการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตนั้นมีหลายวิธี เช่น Electrodeposition, Cathodic Protection หรือ Electrochemical Chloride Removal เป็นต้นซึ่งมีข้อมูลเกี่ยวกับการซ่อมแซมวิธีการดึงคลอไรด์ออกด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมี ในต่างประเทศต่างๆ ดังนี้

2.3.1 การลดปริมาณคลอไรด์ออกด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมี (Electrochemical Chloride Removal)

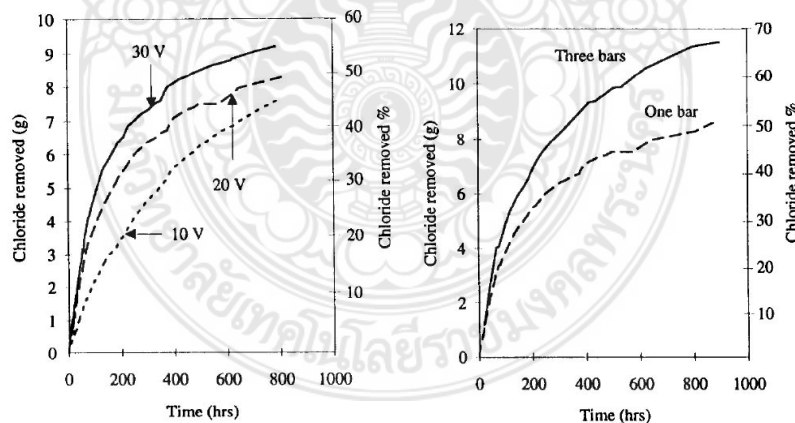
การลดปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมี (Electrochemical Chloride Removal) คือการเอาเฉพาะคลอไรด์ออกนอกจากคอนกรีตด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมี ซึ่งมีขั้วไฟฟ้าอยู่ในสารละลายซึ่งอยู่ภายนอกคอนกรีตและมีการเชื่อมต่อไฟฟ้ากระแสตรงระหว่างขั้วไฟฟ้าและเหล็กเสริมภายในคอนกรีตมีการให้ไฟฟ้าตรงกับขั้วไฟฟ้าและเหล็กเสริมคอนกรีตโดยให้ขั้วไฟฟ้าภายนอกเป็นขั้วบวก (Anode) และเหล็กเสริมเป็นขั้วลบ (Cathode) จากการต่อระบบดังนี้ เมื่อทำการจ่ายแรงดัน ไฟฟ้าที่สูงพอคลอไรด์ออกที่มีสภาพเป็นขั้วลบจะเคลื่อนที่ไปยังขั้วบวกซึ่งอยู่ภายนอกมีผลทำให้ความปนเปื้อนของคลอไรด์ออกในคอนกรีตมีค่าลดลง ดังแสดงในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 แสดงขบวนการของวิธี Electrochemical Chloride Removal (ECR)

ที่มา: J.M. Miranda et. al, 2005

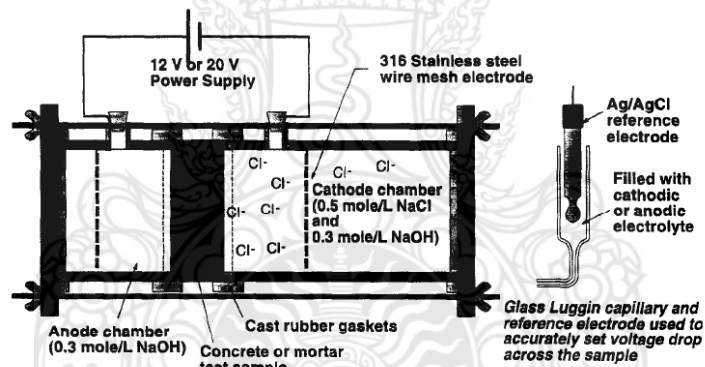
ความสามารถในการซ่อมแซมด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมียังขึ้นอยู่กับลักษณะทางกายภาพของโครงสร้างนั้นๆด้วย Arya. C. และ Sa'id-shawqi (1996) ได้เสนอการกำหนดลักษณะทางกายภาพเพื่อหาความสามารถในการดึงคลอไรด์ไอออนออกจากคอนกรีตตามลักษณะทางกายภาพของตัวอย่างการทดลองโดยกำหนดให้มีจำนวนเหล็กเสริมที่ต่างกัน หรือระยะหุ้มคอนกรีตไม่เท่ากันและในแต่ละตัวอย่างการทดลองก็จะมีการจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าสู่ระบบในขนาดต่างๆรวมทั้งขนาดของคลอไรด์ในส่วนผสมของคอนกรีตที่ไม่เท่ากันกันเพื่อหาเส้นอิทธิพลเพื่อที่จะนำมาเป็นข้อมูลเพื่อเป็นการตรวจสอบหรืออ้างอิง จากการศึกษาพบว่าเมื่อมีสื่อที่จะนำกระแสไฟฟ้าขั้วลบ มากขึ้นเท่าใดความสามารถในการเคลื่อนที่ของคลอไรด์ไอออนจากคอนกรีตออกสู่สารละลายจะมากขึ้นโดยแปรผันตรงกันกับกระแสไฟฟ้าและจำนวนของสื่อในการนำกระแสไฟฟ้าไม่ว่าจะเป็นกรณีที่มีเหล็กเสริมในคอนกรีตมากกว่า 1 หรือ 2 เส้นในการทดลองอื่นๆ หรือเมื่อเทียบกับการปล่อยกระแสไฟที่ 10 V, 20 V. และ 30 V. ตามลำดับดังแสดงในรูปที่ 2.8 จะเห็นได้ว่าคลอไรด์ไอออนจากคอนกรีตออกสู่สารละลายได้มากขึ้นตามปริมาณของกระแสไฟฟ้าและสื่อที่จะเป็นขั้วลบ



รูปที่ 2.8 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับปริมาณคลอไรด์ ที่ออกจากตัวอย่าง ในการทดลองและความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของสื่อที่เป็นขั้วลบกับปริมาณคลอไรด์ที่ออกจากตัวอย่างการทดลอง

ที่มา: Arya. C. and Sa'id-shawqi, 1996

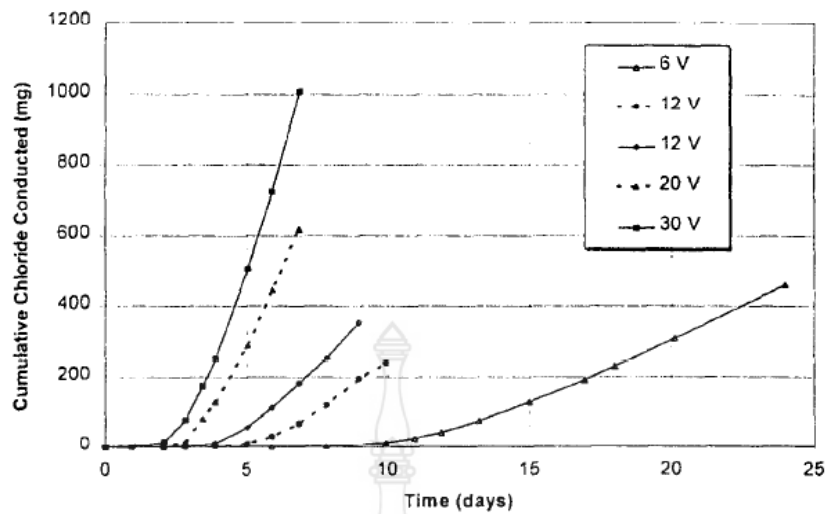
จากรูปที่ 2.10 แสดงให้เห็นว่าเมื่อใช้ความต่างศักย์สูงหรือมีพื้นที่ในการนำไฟฟ้ามากขึ้นเท่าใดจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความสามารถในการดึงคลอไรด์ไอออนด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมีซึ่งต่อมาในปี 1996 Rob B. Polder ยังได้รายงานผลการศึกษานอกห้องทดลองที่ใช้ขึ้นตัวอย่างที่แซในทะเลน่านถึง 16 ปี (บริเวณ North Sea 1796-1992) เพื่อให้คลอไรด์ในน้ำทะเลธรรมชาติแทรกซึมเข้าไปในแท่งตัวอย่างการทดลองขนาด 50 x 100 x 100 ซม. แล้วนำมาเข้ากระบวนการดึง คลอไรด์ไอออนด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมี โดยใช้สารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ และน้ำประปาเป็นอิเล็กโทรไลต์เป็นเวลา 39 วันด้วยการจ่ายกระแสไฟฟ้า 1 และ 4 A/m.² ในเบื้องต้นสามารถดึง คลอไรด์ไอออนออกจากเนื้อคอนกรีตได้ถึงร้อยละ 40-70 สำหรับตัวอย่างที่มีน้ำประปาเป็นอิเล็กโทรไลต์ และร้อยละ 70-90 สำหรับสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์อิมตัวเป็นอิเล็กโทรไลต์ ซึ่งรายงานผลการทดลองดังกล่าวสอดคล้องกับ Arya. C. และ Sa'id-shawqi (1996) เนื่องจากปริมาณกระแสไฟฟ้าที่มากกว่าคือขนาด 4 A/m.² สามารถดึงปริมาณคลอไรด์จากคอนกรีตมาสะสมอยู่ในสารละลาย อิเล็กโทรไลต์มากกว่าขนาด 1 A/m.² โดยในปีเดียวกัน P.F. McGrath and R.D. Hooton (1996) ได้ทำการทดสอบ Chloride Migration Test โดยใช้คอนกรีตที่มีปฏิกิริยาส่วนผสมเดียวกันทุกตัวอย่างการทดลองและทำการจ่ายกระแสไฟฟ้าขนาดต่างๆกันในการทดลองและทำการวัดปริมาณคลอไรด์ที่เคลื่อนผ่านคอนกรีตมาสะสมอยู่ในสารละลายประจุบวกบวก (Anolyte) ในการทดสอบดังแสดงในรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.9 แสดงการทดสอบ Chloride Migration Test

ที่มา: P.F. McGrath and R.D. Hooton (1996)

จากรูปที่ 2.9 สามารถอธิบายได้ว่าความสามารถในการเคลื่อนที่ของคลอไรด์ไอออนผ่านคอนกรีตนั้นขึ้นอยู่กับขนาดของกระแสไฟฟ้าโดยขนาดของกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลองในครั้งนี้คือ 6, 12, 20 และ 30 โวลต์ซึ่งความเร็วในการเคลื่อนที่ของคลอไรด์ไอออนผ่านคอนกรีตเป็นสัดส่วนโดยตรงกับกระแสไฟฟ้า ที่จ่ายเข้าไปในการทดลองเนื่องจากการผลการทดลองแสดงให้เห็นว่ากระแสไฟฟ้าขนาด 30 โวลต์สามารถดึงคลอไรด์มาสะสมอยู่ในสารละลายที่มีประจุบวกได้มากกว่าขนาดกระแสไฟฟ้าขนาด 5 โวลต์ กล่าวคือในวันที่ 4 ของการทดสอบคลอไรด์สามารถเดินทางผ่านคอนกรีตมาสะสมอยู่ในสารละลายที่มีประจุบวกของตัวอย่างที่ใช้กระแสไฟฟ้าขนาด 30 โวลต์และในวันที่ 7 ของการทดลองตัวอย่างที่ใช้กระแสไฟฟ้า 30 โวลต์สามารถดึง

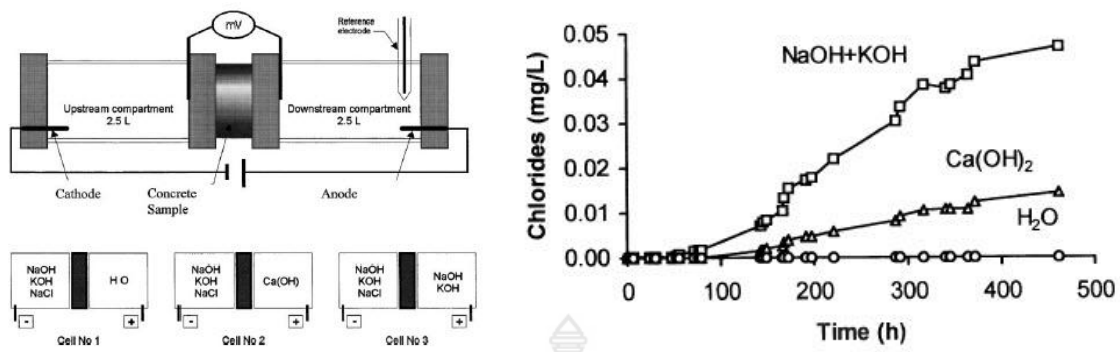


รูปที่ 2.10 ปริมาณคลอไรด์ที่ออกจากคอนกรีตมาสะสมอยู่ในสารละลายของการทดสอบ Chloride migration test

ที่มา: P.F. McGrath and R.D. Hooton (1996)

คลอไรด์ได้มากถึง 1000 มิลลิกรัม ในขณะที่ตัวอย่างที่ใช้กระแสไฟฟ้า 6 โวลต์ต้องใช้ระยะเวลาในการทำให้คลอไรด์เคลื่อนที่ผ่านคอนกรีตมากกว่า 10 วันเพื่อที่จะทำให้คลอไรด์เดินทางผ่านคอนกรีตมาสะสมอยู่ในสารละลายที่มีประจุบวก

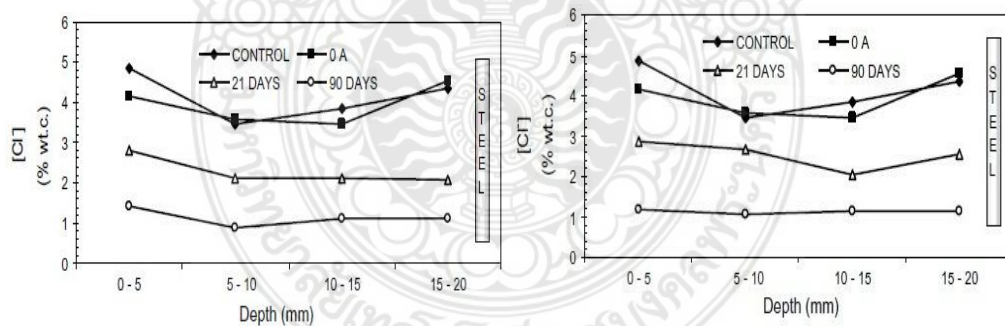
การทดสอบ Chloride Migration Test นั้นสารละลายที่ใช้ในการทดสอบการเคลื่อนที่ของคลอไรด์ยังมีผลต่อการเคลื่อนที่ของคลอไรด์ซึ่ง W. Prince และ R. Gagne (2000) ได้รายงานผลการทดสอบการเคลื่อนที่ของคลอไรด์ผ่านคอนกรีตด้วยวิธี Chloride Migration Test ของคอนกรีตที่ใช้ปฏิกิริยาส่วนผสมเดียวกัน โดยใช้สารละลายที่มีศักย์ไฟฟ้าขั้วบวกบวก 3 ชนิดและใช้กระแสไฟฟ้าในการทดสอบขนาด 12 โวลต์ในทุกตัวอย่างโดยผลการทดลองพบว่าผลกระทบของสารละลายมีผลต่อการเคลื่อนที่ของคลอไรด์ผ่านคอนกรีตดังแสดงในรูปที่ 2.10 โดยในรายงานผลการทดลองได้รายงานผลว่าสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ผสมกับสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ซึ่งเป็นการจำลองสารละลายในช่องว่างของคอนกรีตสามารถดึงปริมาณคลอไรด์อออนมาสะสมอยู่ในสารละลายได้มากกว่าสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์และการใช้น้ำเป็นสารละลาย



รูปที่ 2.11 แสดงอิทธิพลของสารละลายที่ใช้ในการทดสอบ Chloride Migration Test

ที่มา: W. Prince and R. Gagne, 2000

G.Fajardo et. al (2004) ได้เสนองานวิจัยเรื่อง Electrochemical Chloride Extraction (ECE) from Steel-Reinforced Concrete Specimens Contaminated by “Artificial” Sea-Water โดยทำการเตรียมตัวอย่างคอนกรีตขนาด 5 ซม. และ 11 ซม. และนำไปแช่ในสถานะน้ำทะเลเทียมโดยมีองค์ประกอบทางเคมีซึ่งเป็นการจำลองคุณสมบัติให้เหมือนน้ำทะเลในมหาสมุทรแอตแลนติกโดยนำไปแช่อยู่ในน้ำทะเลเทียมเป็นเวลา 3 วัน และนำมาอบในตู้อบอุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 4 วันซึ่งเป็นการเร่งการซึมผ่านของคลอไรด์ให้เข้าสู่ตัวอย่างในการทดลองในสภาวะเปียกสลับแห้งตลอดระยะเวลาในการทดลอง 300 วันและทำการหาปริมาณคลอไรด์ก่อนและหลังกระบวนการทางไฟฟ้าเคมีโดยเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการลดปริมาณคลอไรด์ด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมีระหว่างเปลี่ยนสารละลายในระหว่างการทดลองและไม่เปลี่ยนสารละลายดังแสดงในรูปที่ 2.11



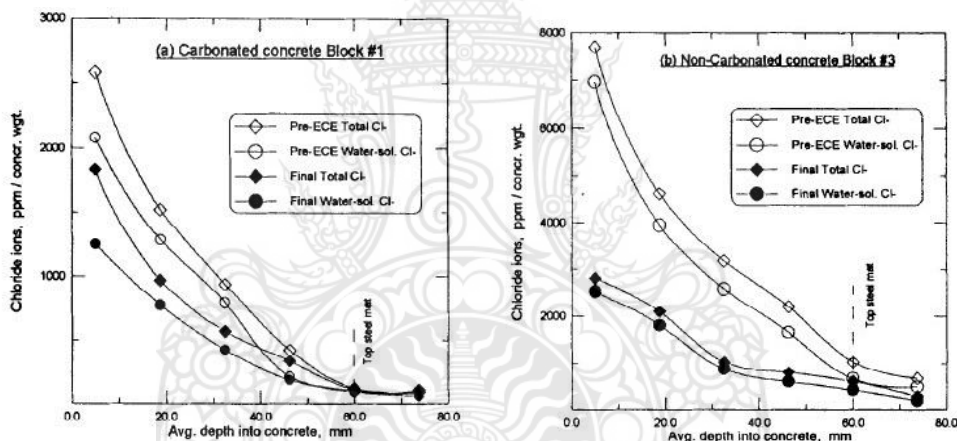
รูปที่ 2.12 ปริมาณคลอไรด์ที่สะสมอยู่ในคอนกรีตก่อนและหลังขบวนการทางไฟฟ้าเคมีโดยการเปลี่ยนสารละลายใหม่และไม่เปลี่ยนสารละลาย

ที่มา: G.Fajardo et, al (2004)

รูปที่ 2.12 แสดงประสิทธิภาพในการดึงคลอไรด์ออกจากคอนกรีตด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมีที่อยู่ภายในคอนกรีตที่ใช้ในการทดลองโดยเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการดึงคลอไรด์ออกจากคอนกรีตระหว่างการเปลี่ยนสารละลายในการทดลอง

ทุก 2 วันจะเห็นได้ว่าระหว่างการเปลี่ยนสารละลายและไม่ได้เปลี่ยนสารละลาย ประสิทธิภาพของ การดึงคลอไรด์ในคอนกรีตไม่ได้น้อยลง แต่อิทธิพลที่ส่งผลต่อการดึงคลอไรด์นั้นคือระยะเวลาในการทำการจ่ายกระแสไฟฟ้า มีประสิทธิภาพไปในทางเดียวกันกล่าวคือการทำกรดึงคลอไรด์ที่ระยะเวลา 90 วันสามารถดึงคลอไรด์ที่อยู่ในคอนกรีตมากกว่าการทดลองที่ 21 วันในทุกๆระยะความลึกต่างๆ

ยังมีนักวิจัยที่ศึกษาผลกระทบต่อการดึงคลอไรด์อออนในคอนกรีตด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมีโดย N.M. Ihekwaba et. al. ในปี 1996 พบว่าการดึงคลอไรด์อออนด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมีจากคอนกรีตที่ได้รับผลกระทบจากคาร์บอนเนชั่นจะลดประสิทธิภาพลดลง โดยได้ทำการเตรียมตัวอย่างคอนกรีตเป็น 2 กลุ่มคือกลุ่มที่คอนกรีตมีสภาพคาร์บอนเนชั่นโดยนำไปบ่มในตู้อบคาร์บอนไดออกไซด์เป็นเวลา 6 เดือนหลังจากนั้นนำตัวอย่างที่ผ่านการเข้าตู้อบคาร์บอนไดออกไซด์และคอนกรีตที่ไม่มีสภาพคาร์บอนเนชั่นมาทำการแช่อยู่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์อิ่มตัว (Saturated NaCl) เป็นเวลา 18 เดือนจากนั้นทำการหาปริมาณคลอไรด์ก่อนทำการดึงคลอไรด์อออนจากคอนกรีตด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมีดังแสดงในรูปที่ 2.13



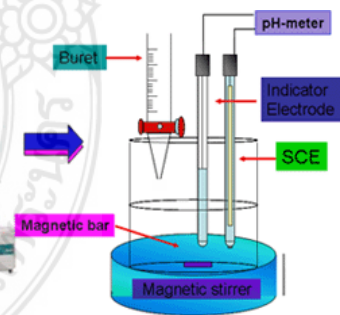
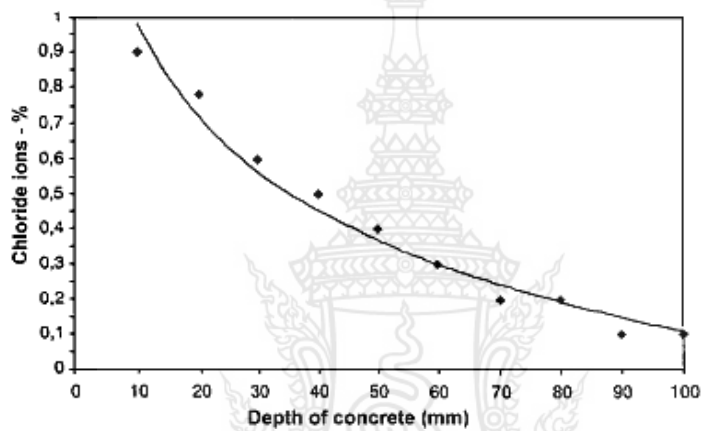
รูปที่ 2.13 แสดงการเปรียบเทียบปริมาณคลอไรด์ก่อนและหลังการดึงคลอไรด์จากคอนกรีตด้วยวิธี ทางไฟฟ้าเคมีระหว่างคอนกรีตที่มีสภาพคาร์บอนเนชั่นและคอนกรีตปกติ

ที่มา: N.M. Ihekwaba et. al, 1996

รูปที่ 2.13 แสดงการเปรียบเทียบปริมาณก่อนและหลังการดึงคลอไรด์จากคอนกรีตด้วยวิธี ทางไฟฟ้าเคมีระหว่างคอนกรีตที่มีสภาพคาร์บอนเนชั่นและคอนกรีตปกติจะเห็นได้ว่าคอนกรีตที่มีสภาพคาร์บอนเนชั่นนั้นส่งผลต่อประสิทธิภาพในการดึงคลอไรด์อออนด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมีโดยสามารถลดปริมาณคลอไรด์ได้น้อยกว่าคอนกรีตที่ไม่มีสภาพคาร์บอนเนชั่นโดยคอนกรีตที่มีสภาพคาร์บอนเนชั่นสามารถลดปริมาณคลอไรด์จากปริมาณคลอไรด์เริ่มต้นประมาณ 2600 ppm. ต่อน้ำหนักคอนกรีตเหลือประมาณ 1800 ppm. ต่อน้ำหนักคอนกรีตส่วนคอนกรีตที่ไม่มีสภาพคาร์บอนเนชั่นสามารถลดปริมาณคลอไรด์จากปริมาณคลอไรด์เริ่มต้นประมาณ 7800 ppm. ต่อน้ำหนักคอนกรีตเหลือประมาณ 2900 ppm.ต่อน้ำหนักคอนกรีต

2.3.2 การหาปริมาณของคลอไรด์ (Chloride Content)

ปริมาณของคลอไรด์ เป็นส่วนที่สำคัญที่ทำให้เหล็กเสริมเกิดการผุกร่อนส่งผลให้เหล็กเสริมเป็นสนิม ถ้ามีปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตมากพอจนทำให้ Passivation Film ที่ทำหน้าที่ป้องกันการเป็นสนิมของเหล็กเสริมเสียหาย หรือถ้าเกิดการแทรกซึมของคลอไรด์จากน้ำทะเลจนถึงตำแหน่งของเหล็กเสริม จะส่งผลให้เหล็กเสริมเกิดสนิมอย่างรวดเร็ว การหาปริมาณการซึมผ่านของคลอไรด์ทำได้โดยการใช้ส่วานเจาะคอนกรีตที่ระดับความลึกต่างๆและนำผงคอนกรีตที่ได้มาทดสอบหาปริมาณของคลอไรด์ไอออน และเขียนกราฟความสัมพันธ์ของปริมาณคลอไรด์ไอออนกับระดับความลึกต่างๆ ซึ่งจะทำให้สามารถประมาณระยะเวลาที่เหลืออยู่ก่อนที่เหล็กเสริมจะเกิดสนิมได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 การทดสอบหาปริมาณคลอไรด์ไอออนในห้องปฏิบัติการและกราฟความสัมพันธ์ของปริมาณคลอไรด์เปรียบเทียบกับระดับความลึกต่างๆ

ที่มา: <http://www.caer.uky.edu/renewablefuels/lab.shtml>

2.4 วัสดุปอซโซลาน

2.4.1 วัสดุเถ้าลอย

เถ้าถ่านหินหรือเถ้าลอยได้จากการเผาถ่านหินในโรงไฟฟ้าถ่านหิน โดยเถ้าลอยจะถูกดักจับเก็บไว้ด้วยตัวดักจับแล้วรวบรวมเก็บไว้ในไซโล เถ้าลอยมีสีเทา เทาดำหรือน้ำตาลมีส่วนประกอบหลักเป็นอัยรูปของซิลิกาและอลูมินาสามารถทำปฏิกิริยาปอซโซลานกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration) ของซีเมนต์กับน้ำได้สารประกอบที่มีความสามารถในการเชื่อมประสานองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยประกอบด้วย องค์ประกอบออกไซด์ของแร่ธาตุต่างๆได้แก่ ซิลิกาออกไซด์ (SiO_2) อะลูมินาออกไซด์ (Al_2O_3) เหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3) แคลเซียมออกไซด์ (CaO) แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3) เป็นต้น

ได้มีการศึกษาคอนกรีตผสมเถ้าลอยในปริมาณสูงสำหรับใช้ในงานโครงสร้างครั้งแรกโดย The Canadian Centre for Mineral and Energy Technology (CANMET) ในปลายทศวรรษ 1980s (Malhotra, 1986) คอนกรีตชนิดนี้มีส่วนผสมเถ้าลอยมากกว่าซีเมนต์โดยน้ำหนักและปกติจะผสมที่อัตราส่วน W/B ประมาณ 0.3 กำลังของคอนกรีตในระยะต้นอยู่ในระดับที่ยอมรับได้และมีการพัฒนากำลังและโมดูลัสความยืดหยุ่นในระยะหลังมากขึ้นมีการหดตัวแห้ง (drying shrinkage) และการล้า (creep) ต่ำและมความทนทานสูงเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ปกติ (Langley et al., 1989; Carrette et al., 1993; Bilodeau et al., 1994; Bisailon et al., 1994) เชื่อกันว่าในการผสมเถ้าลอยมากกว่า 50% โดยน้ำหนัก เถ้าลอยจะมีส่วนสำคัญในการเชื่อมประสาน (Berry et al., 1994) เถ้าลอยเป็นที่รู้จักในฐานะวัสดุปอซโซลานมานานโดยตัวเถ้าลอยเองแล้วมีคุณสมบัติน้อยหรือไม่มีคุณสมบัติทางการเชื่อมประสาน (ASTM 618-94a, 1995) และไม่สามารถทำปฏิกิริยากับน้ำได้โดยตรงซึ่งโดยทั่วไปแล้วการใช้เถ้าลอยในคอนกรีตในงานโครงสร้างมักนิยมใช้แทนที่ซีเมนต์ในช่วง 15% ถึง 25% (ACI Committee 211, 1993; Berry et al., 1994) แต่เมื่อมีการใช้เถ้าลอยปริมาณที่สูงจะมีผลต่อคุณสมบัติของคอนกรีตทั้งในการพัฒนากำลังและปฏิกิริยาไฮเดรชันโดยทั่วไปปริมาณเถ้าลอยที่ผสมในคอนกรีตสำหรับใช้ในงานโครงสร้างจะจำกัดประมาณ 20 ถึง 25% ของวัสดุประสาน (Zhang, 1995) มาตรฐานในหลายประเทศยังคงจำกัดปริมาณมากที่สุดของเถ้าลอยที่ผสมในคอนกรีตสำหรับงานโครงสร้างประมาณ 20 ถึง 25% ซึ่งในคอนกรีตผสมเถ้าลอยในปริมาณสูงปฏิกิริยาปอซโซลาน อาจะยังคงเกิดขึ้นไม่สมบูรณ์เนื่องจากปริมาณเถ้าลอยที่มีอัตราส่วนสูงเมื่อเทียบกับซีเมนต์ ซึ่งเถ้าลอยบางส่วนอาจยังคงอยู่ในสภาพเดิมโดยไม่ทำปฏิกิริยาถึงแม้เป็นระยะหลังการบ่มเป็นเวลานาน (Zhang, 1995)

Feldman et al. (1990) พบว่าในคอนกรีตผสมเถ้าลอยในปริมาณสูง เถ้าลอยจะเริ่มทำปฏิกิริยากับ Ca(OH)_2 ในช่วง 3 ถึง 7 วัน แต่ยังคงมีปริมาณ Ca(OH)_2 และเถ้าลอยจำนวนมากที่ยังไม่ทำปฏิกิริยาหลัง 91 วัน ของปฏิกิริยาไฮเดรชัน ผลิตภัณฑ์หลักของปฏิกิริยาอยู่ในรูปของ calcium silicate hydrate (C-S-H) และมีอัตราส่วนแคลเซียมต่อซิลิกา (c/s) ที่ต่ำ



Berry et al. (1990) ศึกษากลไกของปฏิกิริยาไฮเดรชันในเฟสที่ใช้อัลลอยปริมาณสูงแทนซีเมนต์ โดยทดสอบหาคุณสมบัติทางกายภาพด้านกำลังอัดของมอร์ต้าทางรูปร่าง (morphology) โดยการใช้วิธี SEM ส่วนประกอบของส่วนของแข็ง(solid-phase)และระดับของปฏิกิริยาไฮเดรชัน โดยการใช้วิธี XRD และการวิเคราะห์ทางด้านอุณหภูมิตาม (thermal analysis) และส่วนประกอบของ pore fluid โดยวิธี high-pressure extraction พบว่าในระบบอัลลอยปริมาณสูง (high-volume fly ash system) ทั้งปัจจัยทางกายภาพและทางเคมีมีผลกระทบร่วมกันต่อความแน่น (density) และแรงยึดเหนี่ยวในเฟส ในช่วงต้นผลกระทบทางด้านกายภาพโดยการอุดตันช่องว่างและทางเคมีโดยมีผลต่อการเกิด ettringite หรือการเกิด sulphoaluminate เป็นปัจจัยสำคัญต่อการพัฒนากำลัง ในระยะยาวปฏิกิริยาไฮเดรชัน มีอิทธิพลจากการเกิด silico-aluminate binder ที่เกี่ยวพันจากปฏิกิริยากับอัลลอย Sivasundaram et al. (1989) ศึกษาการก่อตัวเริ่มต้น (initial setting time) และการก่อตัวสุดท้าย (final setting time) ของคอนกรีตผสมอัลลอยในปริมาณสูง โดยมี W/C หรือ W/B เดียวกันพบว่า การก่อตัวเริ่มต้นสามารถเปรียบเทียบกันได้กับคอนกรีตควบคุมคือ 7.5 ชั่วโมง ในขณะที่การก่อตัวสุดท้ายถูกหน่วงให้ช้ากว่าคอนกรีตควบคุมประมาณ 3 ชั่วโมง Sivasundaram et al. (1991) รายงานว่าการหน่วงระยะเวลาก่อตัวสามารถเกิดขึ้นได้กับคอนกรีตผสมอัลลอยในปริมาณสูงที่ผสมจากอัลลอยบางชนิด และการหน่วงระยะเวลาก่อตัวยังสัมพันธ์กับความเข้ากันได้ (compatibility) ระหว่างวัสดุประสานและ superplasticizer และเมื่อใช้ superplasticizer ในปริมาณสูง อาจทำให้เกิดการหน่วงระยะเวลาก่อตัวได้

Carette et al. (1995) ศึกษาโมดูลัสความยืดหยุ่นของคอนกรีตผสมอัลลอยปริมาณสูง เปรียบเทียบกับปอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีตปกติที่มีกำลังเท่ากัน พบว่าคอนกรีตผสมอัลลอยในปริมาณสูงมีโมดูลัสความยืดหยุ่นสูงกว่าปอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีตปกติ โดยโมดูลัสความยืดหยุ่นที่สูงของอนุภาคอัลลอยทำให้เฟสของคอนกรีตผสมอัลลอยปริมาณสูงมีโมดูลัสความยืดหยุ่นที่มากกว่าเฟสของคอนกรีตที่ไม่มีส่วนผสมอัลลอยและอนุภาคของอัลลอยยังปรับปรุงแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคในเฟสให้ดีขึ้นโดยอนุภาคของอัลลอยทำหน้าที่เป็นมวลรวมขนาดเล็ก (microaggregate) ที่มีโมดูลัสความยืดหยุ่นที่สูงกว่า matrix ของผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Zhang, 1995)

Jiang (1999) ศึกษา interfacial zone และแรงยึดเหนี่ยวระหว่างมวลรวมและซีเมนต์เฟสในคอนกรีตผสมอัลลอยในปริมาณสูง พบว่าหลังคอนกรีตอายุ 28 วันไม่มี transition zone ระหว่างมวลรวมและซีเมนต์เฟสให้เห็นอย่างชัดเจน และแรงยึดเหนี่ยวระหว่างมวลรวมและเฟสขึ้นกับกำลังของเฟส โดยเฟสที่มีกำลังสูงจะให้แรงยึดเหนี่ยวที่สูงตามไปด้วย

Atis (2001) ศึกษาความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชันในคอนกรีตผสมอัลลอยปริมาณสูงโดยวัดอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นในคอนกรีตภายใต้สภาวะการบ่มแบบ adiabatic พบว่าความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชันในอัลลอยคอนกรีตขึ้นกับระดับการแทนที่ซีเมนต์ของอัลลอยและปริมาณ Superplasticizer ที่ใช้เพื่อรักษาความสามารถในการทำงานได้ การใช้อัลลอยแทนที่ซีเมนต์ทำให้ลดระดับอุณหภูมิสูงสุดและเมื่อเพิ่มระดับการแทนที่ของอัลลอยยังเป็นการลดอุณหภูมิที่เกิดขึ้นและ Superplasticizer สามารถชะลอระยะเวลาที่จะเกิดอุณหภูมิสูงสุดโดยคอนกรีตที่มีส่วนผสมเหมือนกันแสดงอุณหภูมิสูงสุดที่เท่ากันโดยไม่ขึ้นกับการใส่ superplasticizer



Lane and Best (1978) ศึกษาผลกระทบของการใช้ Superplasticizer ร่วมกับเถ้าลอยในคอนกรีต และได้สรุปว่า superplasticizer มีความเข้ากันได้กับเถ้าลอย โดยสามารถใช้ร่วมกันได้โดยไม่เกิดผลเสียในคอนกรีต โดยเปอร์เซ็นต์การลดน้ำในคอนกรีตผสมเถ้าลอยที่มีค่าความยุบตัวเท่ากันมีค่าไม่เกิน 5% ปรับปรุงคุณสมบัติทางการลดน้ำมากกว่าสารลดน้ำมาตรฐานเพียงเล็กน้อย เท่านั้น ในคอนกรีตผสมเถ้าลอยให้เปอร์เซ็นต์การลดน้ำที่ต่ำกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตปกติที่มีความชื้นเหลวเท่ากันเนื่องจากในความชื้นเหลวเท่ากันคอนกรีตผสมเถ้าลอยจะมีน้ำส่วนเกินที่น้อยกว่าดังนั้นการเติมสารลดน้ำเพื่อนำส่วนเกินนี้มาใช้ จึงมีผลกระทบที่น้อยกว่า

ประจิต (2526) ใช้เถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะผสมกับคอนกรีต และศึกษากำลังรับแรงอัดโดยใช้อัตราส่วนของเถ้าลอยต่อปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในปริมาณ 0 ถึง 50% อัตราส่วนของน้ำต่อซีเมนต์เป็น 0.50, 0.75, 1.00 และ 1.25 ตามลำดับจากการทดลองพบว่าสามารถเติมเถ้าลอยเข้าไปในคอนกรีตเพื่อทดแทนซีเมนต์ได้ถึง 25 และ 29% ในคอนกรีตอายุ 28 วัน และ 45 วัน ตามลำดับโดยคอนกรีตยังให้กำลังเท่าเดิม

ปริญญาและอินทรชัย (2528) พบว่ากำลังอัดระยะแรกของปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอยลิกไนต์มีค่าลดลงตามปริมาณของเถ้าลอยที่เพิ่มขึ้นและเมื่อเวลาผ่านไปกำลังรับแรงอัดของปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอยจะดีขึ้นเพราะเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานและเสนอปริมาณการแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยที่เหมาะสมในช่วง 0 ถึง 40% ซึ่งทำให้ปฏิกิริยาปอซโซลานที่เกิดขึ้นชดเชยปฏิกิริยาของซีเมนต์ที่ถูกเถ้าลอยแทนที่ได้มีการศึกษาการใช้เถ้าลอยแม่เมาะเพื่อปรับปรุงความสามารถในการเทได้ของคอนกรีตสด และมีรายงานว่าเมื่อปริมาณการแทนที่ซีเมนต์เพิ่มขึ้นจะช่วยปรับปรุงความสามารถในการเทได้เพิ่มขึ้น แต่มีผลในการลดกำลังอัดของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน

2.4.2 วัสดุดินขาว

ดินขาว ($Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$) จัดเป็นวัสดุปอซโซลานที่ได้จากการนำเอาดินขาวดิบจากธรรมชาติ ($Al_2SiO_5(OH)_4$) มาปรับปรุงคุณภาพด้วยความร้อน โดยวิธีการเผาในช่วงเวลาและอุณหภูมิที่เหมาะสมซึ่งโดยทั่วไปมีลักษณะเป็นลักษณะเป็นอัยรูป (Amorphous) ไม่มีรูปร่างที่แน่นอนมีลักษณะเป็นผงสีขาวหรือชมพูขึ้นอยู่กับปริมาณของธาตุหลักของดินขาวประกอบด้วยซิลิกาออกไซด์ (SiO_2) และอลูมินาออกไซด์ (Al_2O_3) ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักและรองลงมาเป็นเฟอร์ริกออกไซด์ (Fe_2O_3) แคลเซียมออกไซด์ (CaO) แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) เป็นต้น โดยองค์ประกอบทางเคมีเหล่านี้จะแปรผันที่แตกต่างกันตามแหล่งกำเนิดของดิน อนุภาคของดินขาวโดยเฉลี่ยมีขนาดประมาณ 1.5 ไมครอน (Balaguru, 2001) ตามมาตรฐาน ASTM C168 ดินขาวเป็นสารปอซโซลาน Class N (Raw or Calcined Pozzolan) เมื่อผสมในคอนกรีตดินขาวจะทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ $Ca(OH)_2$ ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันเกิดสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) และแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต (CAH) ที่มีคุณสมบัติในการเชื่อมประสานและให้กำลังแก่คอนกรีต นอกจากนั้นดินขาวยังช่วยเร่งการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์กับน้ำทำให้กำลังอัดของคอนกรีตในช่วงต้นเพิ่มขึ้น (Wild, 1996) นอกจากนั้นดินขาวยังช่วยปรับปรุงคุณภาพของคอนกรีตโดยที่อนุภาคของดินขาวจะเข้าไปแทรกในช่องว่างขนาดเล็ก (Microfiller Effect) ช่วยลดความพรุนและทำให้คอนกรีตมีความทึบแน่นเพิ่มขึ้นส่งผลให้คอนกรีตมีการรับ



กำลังและความคงทนที่สูงขึ้น ปริมาณดินขาวที่เหมาะสมที่สุดในการแทนที่ซีเมนต์เพื่อช่วยปรับปรุงคุณสมบัติของคอนกรีตมีค่าประมาณร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก (Wild, 1996 ; จิรวัดน์, 2546)

2.4.3 เถ้าแกลบ

เถ้าแกลบ (Rice Husk Ash) เป็นผลพลอยได้จากโรงไฟฟ้าชีวมวล ซึ่งใช้เถ้าแกลบเป็นเชื้อเพลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้าในแต่ละปีมีปริมาณมาก ประเทศไทยมีการผลิตข้าวปีละประมาณ 25 ล้านตัน และได้แกลบจากการสีข้าวประมาณ 5 ล้านตัน ในแต่ละตัน (1,000 กิโลกรัม) ของข้าวเปลือกเมื่อสีแล้วจะมีแกลบอยู่ประมาณร้อยละ 20 ของน้ำหนักแกลบหรือประมาณ 40 กิโลกรัมจากการศึกษาพบว่าเถ้าแกลบ- เปลือกไม่มีคุณสมบัติเป็นวัสดุปอซโซลานที่ดีเมื่อมีความละเอียดและกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตผสมเถ้าแกลบขึ้นอยู่กับความละเอียดและร้อยละการแทนที่ของเถ้าแกลบ

2.4.3.1 ผลกระทบของเถ้าแกลบต่อคอนกรีตสด

การที่เถ้าแกลบมีรูพรุนสูงมากและรูปร่างที่ไม่แน่นอนทำให้คอนกรีตที่มีส่วนผสมของเถ้าแกลบต้องการน้ำในส่วนผสมเพิ่มขึ้น การที่เถ้าแกลบต้องการน้ำในส่วนผสมเพิ่มขึ้นจะทำให้กำลังอัดของคอนกรีตมีค่าต่ำลงเพื่อแก้ไขปัญหาจึงนำเถ้าแกลบมาบดให้ละเอียดขึ้นซึ่งจะทำลายรูพรุนของเถ้าแกลบได้และใช้สารลดน้ำเข้าช่วยเพื่อให้คอนกรีตยังมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่าเดิมและมีความสามารถในการเทตามต้องการการก่อตัวระยะต้นและระยะปลายของเพสต์ที่ใช้เถ้าแกลบแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนจะนานกว่าซีเมนต์เพสต์ นอกจากนี้ยังสามารถใช้เถ้าแกลบผสมร่วมกับวัสดุปอซโซลานอื่น เช่น เถ้าถ่านหิน ซึ่งทำให้วัสดุประสานมีคุณสมบัติดีขึ้น

2.4.3.2 ผลกระทบของเถ้าแกลบต่อคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว

กำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบที่อายุต้นขึ้นอยู่กับความละเอียดของเถ้าแกลบที่มีความละเอียดสูงจะให้กำลังในระยะต้นสูง เนื่องจากความว่องไวต่อการทำปฏิกิริยาส่วนเถ้าแกลบซึ่งได้จากการเผาแกลบโดยตรงจะทำให้คอนกรีตมีกำลังอัดต่ำเนื่องจากเถ้าแกลบเป็นวัสดุปอซโซลาน ดังนั้นจึงต้องใช้ต่างที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์มาทำปฏิกิริยาแต่เมื่ออายุมากขึ้นกำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบสามารถมีค่าสูงกว่าคอนกรีตที่ไม่ผสมเถ้าแกลบ โดยเฉพาะกรณีที่เถ้าแกลบมีความละเอียดสูง เช่น การใช้เถ้าแกลบบดละเอียดซึ่งมีอนุภาคค้ำบนตะแกรงเบอร์ 325 ไม่เกินร้อยละ 1 แทนที่ปูนซีเมนต์เพื่อทำคอนกรีตคุณภาพสูงโดยมีสารลดน้ำพิเศษเพื่อปรับความสามารถในการเท พบว่าในช่วงอายุต้น (3 ถึง 7 วัน) คอนกรีตผสมเถ้าแกลบบดละเอียดมีกำลังต่ำกว่าคอนกรีตควบคุม แต่เมื่ออายุ 28 และ 56 วันพบว่าคอนกรีตที่ใช้เถ้าแกลบบดละเอียดร้อยละ 30 มีกำลังอัดที่สูงกว่าคอนกรีตควบคุม แต่การแทนที่เถ้าแกลบบดละเอียดในปริมาณที่สูงกว่านี้จะให้กำลังอัดต่ำทั้งอายุต้นและอายุปลาย การใช้ เถ้าแกลบแทนที่ปูนซีเมนต์ในปริมาณที่เหมาะสมจะส่งผลดีต่อกำลังอัดซึ่งแสดงถึงกำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าแกลบที่มีความละเอียดสูงส่วนผสมที่ใช้เถ้าแกลบแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 20 ถึง 40 โดยน้ำหนักให้กำลังอัดค่อนข้างสูงแต่การใช้เถ้าแกลบแทนที่ปูนซีเมนต์มากเกินไปทำให้กำลังอัดของคอนกรีตต่ำกว่าคอนกรีตที่ไม่ผสมเถ้าแกลบ



การผสมเถ้าแกลบทำให้การหดตัวแห้งเพิ่มขึ้น แต่ทนทานการกัดกร่อนของกรดซัลฟูริกและกรดไฮโดรคลอริกดีกว่าคอนกรีตที่ไม่ผสมเถ้าแกลบอย่างมากเพราะปฏิกิริยาโปซโซลานจากเถ้าแกลบสามารถลดปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ในซีเมนต์เพสต์



บทที่ 3 อุปกรณ์และวิธีการ

วิธีการดำเนินการศึกษาผลกระทบความต้านทานการซึมผ่านของคลอไรด์ของปอซโซลานนิคคอนกรีต สำหรับอุปกรณ์และวิธีการทดลองดังนี้

3.1 อุปกรณ์

- 3.1.1 แบบหล่อแท่งตัวอย่างรูปทรงกระบอก ขนาด 10 × 20 เซนติเมตร
- 3.1.2 แบบหล่อแท่งตัวอย่างคานคอนกรีต ขนาด 10 × 20 × 70 เซนติเมตร
- 3.1.3 ถังสำหรับแช่ตัวอย่าง ขนาด 120 × 150 เซนติเมตร
- 3.1.4 เครื่องชั่งน้ำหนัก สามารถอ่านค่าได้ละเอียด 0.1 กรัม
- 3.1.5 เครื่องแปลงกระแสไฟฟ้ากระแสตรงและสายไฟฟ้า
- 3.1.6 แบตเตอรี่เก็บประจุไฟฟ้า
- 3.1.7 สารเคมีสำหรับการไทเทรตหาปริมาณคลอไรด์ (รายละเอียดแสดงในส่วนถัดไป)
- 3.1.8 ชุดเครื่องมือเก็บตัวอย่างผงคอนกรีต เช่น สว่านเจาะคอนกรีต แปรงขัดฝุ่น เป็นต้น
- 3.1.9 อุปกรณ์สำหรับเตรียมสารละลาย

3.2 วัสดุและปฏิกิริยาส่วนผสมคอนกรีต

3.2.1 วัสดุที่ใช้ในการผสมคอนกรีต

- ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ตราช้างของบริษัทปูนซีเมนต์ไทยจำกัด
- ดินขาว (Metakaolin)
- เถ้าลอย (fly ash)
- เถ้าแกลบ (rice husk ash)
- วัสดุมวลรวมหยาบ ใช้ หินปูนย่อย (Crushed limestone) ขนาดใหญ่สุด 3/8 นิ้ว
- มวลรวมละเอียด ทรายแม่น้ำร้อนผ่านตะแกรงเบอร์ 4 (SSD)
- สารละลายโซเดียมคลอไรด์ ความเข้มข้น 3 เปอร์เซ็นต์

3.2.2 ปฏิกิริยาส่วนผสมคอนกรีต

ในการศึกษาใช้ปฏิกิริยาส่วนผสมคอนกรีตดังแสดงในตารางที่ 3.1 การออกแบบส่วนผสมคอนกรีตตามมาตรฐาน ACI ให้มีกำลังอัดที่ 28 วัน อยู่ในช่วง 240 กก./ตร.ซม. ใช้ปอซโซลานแทนที่ปูนซีเมนต์



บางส่วนในคอนกรีตแตกต่างกันโดยใช้ เถ้าลอย (Fly ash) ดินขาว (Meta kaolin) และเถ้าแกลบ (Rice Husk ash) โดยใช้แทนที่ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ในปริมาณร้อยละ 10,15,20 โดย ดังรูปภาพที่ 3.1และส่วนผสมตามตารางที่ 3.2



รูปที่ 3.1 แสดงการเตรียมตัวอย่างของวัสดุปอซโซลาน

ตารางที่ 3.1 ปฏิภาคส่วนผสมคอนกรีต

วัสดุในการผสมคอนกรีต	ปริมาณน้ำหนัก (กก./ลบ.ม.)
ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1	450
มวลรวมหยาบ	992
มวลรวมละเอียด	750
น้ำ	180
สารละลายโซเดียมคลอไรด์	3 และ 5% ต่อน้ำหนักซีเมนต์

ตารางที่ 3.2 ปริมาณปอซโซลานที่แทนที่ซีเมนต์ในตัวอย่างการทดลอง (w/c = 0.40)

	Fly-Ash (kg.)	Meta kaolin (kg.)	Rice Husk Ash (kg.)	Cement (kg.)
OPC	-	-	-	450
OPC+POZ10	45	45	45	405
OPC+POZ15	67.5	67.5	67.5	382.5
OPC+POZ20	90	90	90	360

OPC=Ordinary Portland Cement, POZ = Pozzolans , FA = Fly Ash, MK = Meta kaolin, RHA = Rice Husk Ash

3.3 การเตรียมตัวอย่างคอนกรีต

3.3.1 ตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงกระบอกขนาด 20x10 cm. สำหรับค่ากำลังรับแรงอัด

การเตรียมตัวอย่างตามรูปที่ 3.2 สำหรับ การทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต ตามมาตรฐาน ASTM C 31 เตรียมตัวอย่างรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร สูง 20 เซนติเมตร เทคอนกรีตให้เต็มแบบ ทำการอัดแน่น แต่งผิวหน้าตัวอย่างให้เรียบและคลุมด้วยพลาสติกเพื่อป้องกันความชื้นระเหยออกจากคอนกรีต ถอดแบบหลังจากหล่อแล้ว 24 ชั่วโมง จากนั้นนำไปบ่มในน้ำ ที่มีอุณหภูมิห้องปกติ และทดสอบกำลังอัดเมื่อคอนกรีตอายุได้ 28 วัน โดยวางก้อนตัวอย่างให้ตรงศูนย์กลางของแท่นกด ให้นำหนักกดด้วยอัตราสม่ำเสมอจนก้อนตัวอย่างวิบัติ บันทึกค่าน้ำหนักที่ได้และวัดพื้นที่หน้าตัดรับน้ำหนัก เพื่อคำนวณหาค่ากำลังอัดประลัย



รูปที่ 3.2 แสดงการเตรียมตัวอย่างคอนกรีต, และการบ่มคอนกรีตที่ใช้ในการวิจัย

3.3.2 การทดสอบการเคลื่อนที่ของคลอไรด์ไอออนด้วยไฟฟ้า (Chloride Migration Test)

ทำการเตรียมตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 นิ้วจำนวน 3 ตัวอย่าง โดยใช้ปริมาตรส่วนผสมเดียวกันกับข้างต้นและทำการบ่มคอนกรีตเป็นเวลา 28 วันหลังจากนั้นทำการตัดคอนกรีตด้วยเครื่องตัดคอนกรีตเพื่อทำการเคลื่อนที่ของคลอไรด์ไอออนด้วยไฟฟ้าโดยวิธี Chloride Migration Test โดยใช้สมการของ Nernst planck ดังแสดงในสมการที่ 5 (Modified Fick's second law) จากมาตรฐาน JSCE -G571-2003 เพื่อยืนยันผลการทดลองการเคลื่อนที่ของคลอไรด์โดยนำคอนกรีตที่ทำการตัดมาเคลือบอีพ็อกซีด้านข้าง ทำการแช่น้ำกลั่นเป็นเวลา 24 ชั่วโมงจากนั้นทำการจ่ายความต่างศักย์ไฟฟ้าขนาด 15 โวลต์ดังแสดงในภาพที่ 3.3 และทำการวัดปริมาณคลอไรด์ไอออนที่อยู่ในสารละลายทุกวันด้วยเครื่อง Chloride Analyzer

$$J_{Cl} = D_e \frac{z_{cl} F C_{cl} (\Delta E - \Delta E_c)}{RTl} \tag{5}$$

เมื่อ J_{Cl} = Flux of Chloride Ions in Steady State ($\text{mol}/(\text{cm}^2 \text{ year})$)

D_e = Effective Diffusion Coefficient (cm^2/year)

R = Gas Constant ($8.31 \text{ J}/(\text{mol K})$)

z_{Cl} = Charge of Chloride ion (=1)

F = Faraday Constant ($96,500 \text{ C}/\text{mol}$)

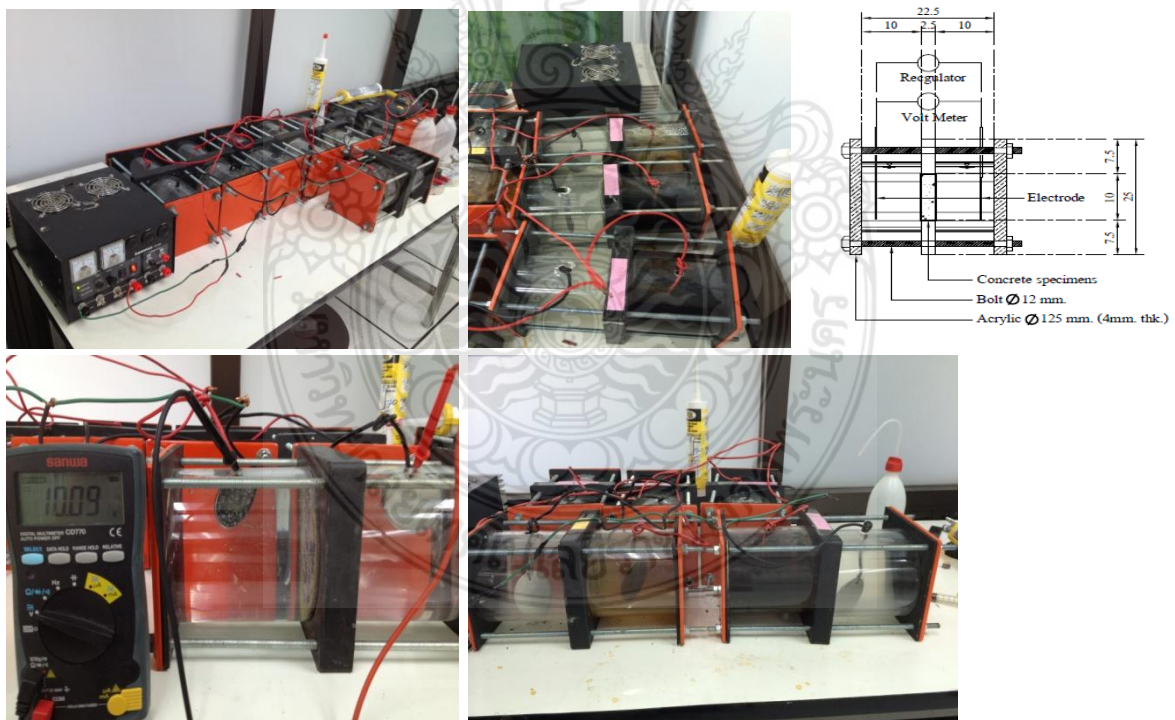
C_{Cl} = Chloride Ion Concentration (mol/l)

$\Delta E - \Delta E_c$ = Potential Gradient (V)

l = Length (mm.)

T = Time

โดยนำผลการทดสอบ Chloride Migration Test ในส่วนของอัตราการไหล (Flux, J_{Cl}) ของคลอไรด์ไอออนและสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน (Diffusion Coefficient, D_e) ของคอนกรีตในการทดสอบมาเป็นข้อมูลในการทำนายการลดปริมาณคลอไรด์ด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมีเพื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองในห้องปฏิบัติการ



ภาพที่ 3.3 ภาพตัวอย่างการทดสอบการเคลื่อนที่ของคลอไรด์ไอออนด้วยไฟฟ้า

(Chloride Migration Test)

3.3.3. การทดสอบหาปริมาณคลอรีนในผงคอนกรีต

จากรูปภาพที่ 3.4-3.7 แสดงการเตรียม การทดสอบหาปริมาณคลอรีนในผงคอนกรีตด้วยวิธี Argentometric หรือ Mohr Method

1. นำน้ำปูนตัวอย่าง (ผงปูน 4-5 กรัมแช่ทิ้งไว้ในน้ำกลั่น 75 มิลลิตร เป็นเวลา 1 วัน) มากรองด้วยกระดาษกรองลงในขวดรูปกรวยขนาด 250 มิลลิตรและวัดปริมาตรของสารละลายที่กรองมาได้ในกระบอกตวง และบันทึกปริมาตรของสารตัวอย่างไว้

2. ปรับ pH ของสารละลายตัวอย่างให้เป็นกลาง เพราะ Ag^+ จะตกตะกอนเป็น $AgOH$ ที่ pH สูง และ CrO_4^{2-} จะถูกเปลี่ยนไปเป็น $Cr_2O_7^{2-}$ ที่ pH ต่ำ ดังนั้นจึงไทเทรตที่สภาวะเป็นกลาง ด้วยการหยดฟีนอล์ฟทาลีนอินดิเคเตอร์ลงในสารตัวอย่าง 1 หยด สังเกตการเปลี่ยนแปลงของสีสารละลายตัวอย่าง

3. ถ้าเปลี่ยนเป็นสีชมพูแสดงว่าสารละลายมีค่า pH สูงกว่า 7 หรือมีสภาวะเป็นเบสให้เติมกรดกำมะถันทีละหยดจนสารตัวอย่างกลับมาใสเหมือนเดิม

4. ถ้าสารตัวอย่างไม่เปลี่ยนสีแสดงว่าสารละลายมีค่า pH ต่ำกว่า 7 หรือมีสภาวะเป็นเบสให้เติมโซเดียมไฮดรอกไซด์ทีละหยดจนกระทั่งสารตัวอย่างเปลี่ยนเป็นสีชมพู จากนั้นให้ปรับค่า pH กลับเหมือนกับข้อ 1

5. นำ $AgNO_3$ ที่เตรียมไว้เทผ่านกรวยลงในบิวเรตขนาด 50 มิลลิตร

6. เติมโปตัสเซียมโครเมตจำนวน 1 มิลลิตรที่เตรียมไว้ลงในสารละลายตัวอย่างจะได้สารละลายสีเหลือง

7. หยด $AgNO_3$ ลงในสารละลายตัวอย่างไปเรื่อยๆ สารละลายตัวอย่างจะเริ่มเปลี่ยนจากสีเหลืองใสเป็นสีเหลืองขุ่นและเริ่มตกตะกอนเป็น $AgCl$ จนกระทั่งสารละลายเป็นสีน้ำตาลแดงทั้งหมดถือว่าเป็นจุด End Point อ่านค่าปริมาตรของ $AgNO_3$ ที่ใช้ไปและบันทึกปริมาตร

8. ทำการหา Blank คือส่วนที่เกินมาของ $AgNO_3$ ในปฏิกิริยาการตกตะกอน $AgCl$ เนื่องจากสารละลายที่เปลี่ยนเป็นตะกอนสีน้ำตาลแดงนั้นคือ Ag_2CrO_4 โดยการใช้ น้ำกลั่นในการไทเทรต บันทึกปริมาตรของสารละลาย $AgNO_3$ ที่ถูกใช้ไปเป็น Blank





ภาพที่ 3.4 แสดงการเตรียมตัวอย่างในการทดสอบหาปริมาณคลอไรด์ในผงคอนกรีต, การปรับสภาพความเป็นกรดต่างค่า (pH) และการทำ Blank



ภาพที่ 3.5 แสดงตัวอย่างหลังการทดสอบหาปริมาณคลอไรด์ในสารละลาย

9. ทำการคำนวณหาปริมาณคลอไรด์ในสารละลายโดยใช้สมการที่ 6 และบันทึกปริมาณคลอไรด์ในสารละลายตามระดับความลึกต่างของทุกตัวอย่างในการทดลอง

$$mg/l \ Cl^- = \frac{(A - B) \times C \times 35400}{ml \ sample} \quad (6)$$

โดยที่ A = มิลลิลิตรของ $AgNO_3$ ที่ใช้ในการไทเทรตตัวอย่าง

B = มิลลิลิตรของ $AgNO_3$ ที่ใช้ในการไทเทรต Blank

C = นอร์มัลลิตีของ $AgNO_3$



รูปที่ 3.6 แสดงการเตรียมตัวอย่างในการทดสอบหาปริมาณคลอไรด์ในผงคอนกรีต



รูปที่ 3.7 แสดงการปรับสภาพความเป็นกรดต่างค่า (pH) และการทำ Blank

บทที่ 4 ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

4.1 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัด

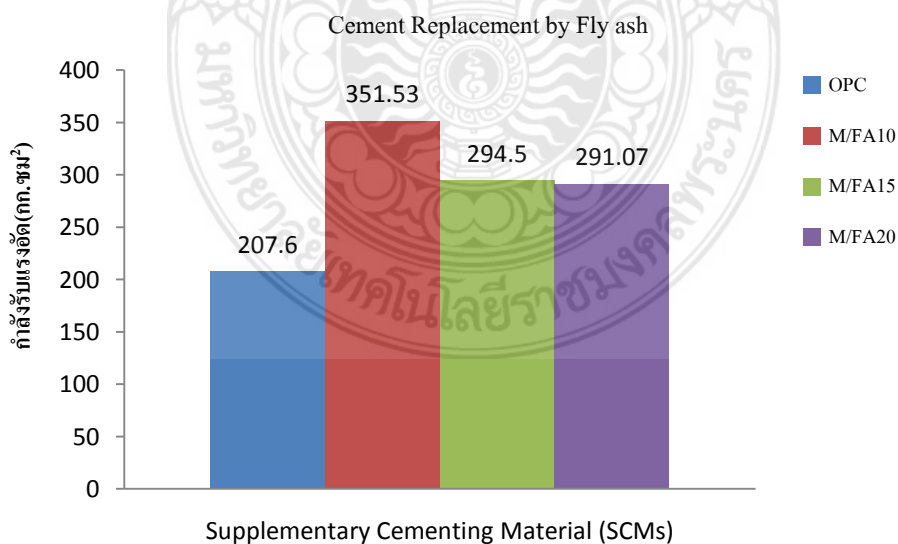
จากผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่ใช้วัสดุ ปอซโซลานแทนที่ปูนซีเมนต์ บางส่วนที่อายุ 28 วันอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 ทุกอัตราส่วน สามารถสรุปค่าเฉลี่ยของ กำลังอัดของส่วนผสมที่แตกต่างกันเปรียบเทียบกับคอนกรีตควบคุมได้ดังตารางที่ 4.1 และจากรูปที่ 4.1 แสดง ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังอัดของ แก้วลอยแทนที่ปูนซีเมนต์มีกำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตธรรมดา ในขณะที่ ระดับร้อยละ 10 จะมีแนวโน้มของกำลังอัดมากที่สุด ลองลงมาคือร้อยละ 15 และ 20 ตามลำดับ จะเห็นได้ว่า เมื่อปริมาณของ แก้วลอยที่เพิ่มขึ้นในลักษณะ แทนที่ ซีเมนต์จะส่งผลให้ กำลัง อัดของคอนกรีต ลดลง ทั้งนี้ เนื่องจากอัตราการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยแก้วลอยที่ร้อยละ 10 มีปริมาณของซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) ที่ทำ ปฏิกิริยากับปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)_2) ที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันที่เหมาะสมพอดี กับ ปฏิกิริยาปอซโซลานิกอย่างสมบูรณ์ทำให้คอนกรีตมีกำลังแรงอัดสูงกว่าคอนกรีตควบคุม และสำหรับ ส่วนผสมของแก้วลอยที่มีอัตราการแทนที่ร้อยละ 15 และ 20 มีปริมาณของซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) มากเกิน กว่าปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)_2) จึงเป็นเหตุให้มีปริมาณไม่เพียงพอต่อการ ทำปฏิกิริยาปอซโซลา นิก ทำให้เหลือแก้วลอยที่มีซิลิกอนไดออกไซด์ที่ไม่ได้ทำปฏิกิริยาภายในช่องว่างของคอนกรีต ส่งผลให้กำลังรับ แรงอัดจึงต่ำกว่าคอนกรีตควบคุม และจากรูปที่ 4.2 และ 4.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังอัดของ ดิน ขาวแทนที่ซีเมนต์ บางส่วนให้ค่ากำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตควบคุม ในข ณะที่เมื่อดินขาวแทนที่ปูนซีเมนต์ใน ระดับร้อยละ 10 จะมีแนวโน้มของกำลังอัดมากที่สุด ลองลงมาคือร้อยละ 15 และ 20 ตามลำดับ จะเห็นได้ ว่าเมื่อปริมาณของ ดินขาว ที่เพิ่มขึ้นในลักษณะ แทนที่ซีเมนต์จะส่งผลให้ กำลัง อัดของคอนกรีต ลดลง ทั้งนี้ เนื่องจากอัตราการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยดินขาว ที่ร้อยละ 10 มีปริมาณของซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) และ อลูมิน่า (Al_2O_3) ที่ทำปฏิกิริยากับปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)_2) ที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันที่ เหมาะสมพอดีกับปฏิกิริยาปอซโซลานิกอย่างสมบูรณ์ทำให้คองกรีตมีกำลังแรงอัดสูงกว่าคอนกรีตควบคุม และสำหรับส่วนผสมของแก้วลอยที่มีอัตรา ากการแทนที่ร้อยละ 15 และ 20 มีปริมาณของซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) และอลูมิน่า (Al_2O_3) มากเกินกว่าปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)_2) จึงเป็นเหตุให้มี (Ca(OH)_2) ในปริมาณไม่เพียงพอต่อการทำปฏิกิริยา ปอซโซลานิก ทำให้เหลือดินขาว ที่มีซิลิกอนไดออกไซด์ และ (Al_2O_3) ที่ไม่ได้ทำปฏิกิริยาภายในช่องว่างของคอนกรีต ส่งผลให้ กำลังรับแรงอัดจึงต่ำกว่าคอนกรีต ควบคุม และจากรูปที่ 4.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังอัดของแก้วกลบแทนที่ซีเมนต์บางส่วนให้ค่า กำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตควบคุม ในขณะที่ เมื่อแก้วกลบแทนที่ปูนซีเมนต์ใน ระดับร้อยละ 10 จะมีแนวโน้ม ของกำลังอัดมากที่สุด ลองลงมาคือร้อยละ 15 และ 20 ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าเมื่อปริมาณของ แก้วลอยที่ เพิ่มขึ้นในลักษณะ แทนที่ซีเมนต์จะส่งผลให้ กำลัง อัดของคอนกรีต ลดลง ทั้งนี้เนื่องจากอัตราการแทนที่ ปูนซีเมนต์ด้วยดินขาวที่ร้อยละ 10 มีปริมาณของซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) ที่ทำปฏิกิริยากับปริมาณ



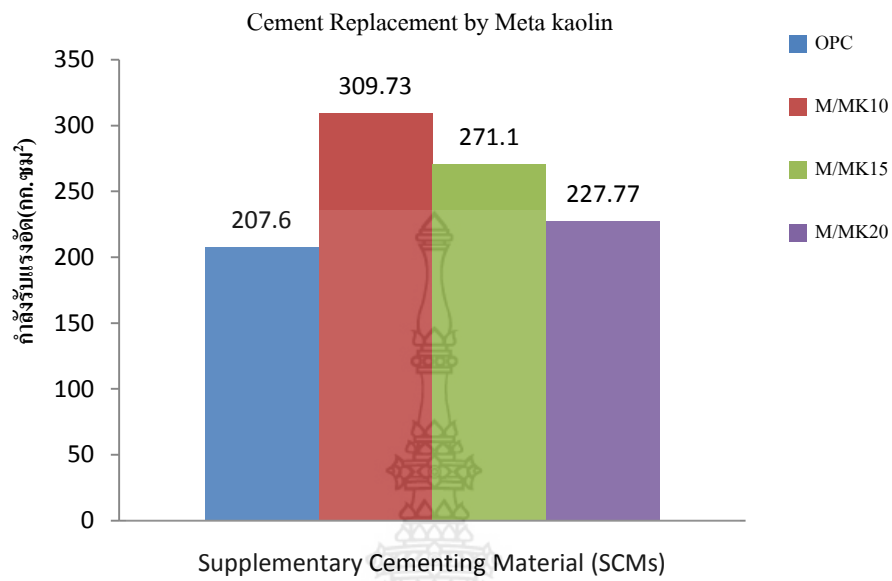
แคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH₂)) ที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันที่เหมาะสมพอดีกับปฏิกิริยาปอซโซลานิกอย่างสมบูรณ์ทำให้คอนกรีตมีกำลังแรงอัดสูงกว่าคอนกรีตควบคุม และสำหรับส่วนผสมของเถ้าลอยที่มีอัตราการแทนที่ร้อยละ 15 และ 20 มีปริมาณของซิลิกอนออกไซด์ (SiO₂) มากเกินกว่าปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH₂)) จึงเป็นเหตุให้มี (Ca(OH₂)) ในปริมาณไม่เพียงพอต่อการทำปฏิกิริยาปอซโซลานิก จึงทำให้เหลือเถ้าลอยที่มีซิลิกอนออกไซด์ ที่ไม่ได้ทำปฏิกิริยาภายในช่องว่างของคอนกรีต ส่งผลให้กำลังรับแรงอัดจึงต่ำกว่าคอนกรีตควบคุม

ตารางที่ 4.1 ค่าเฉลี่ยของกำลังรับแรงอัดที่อายุ 28 วัน

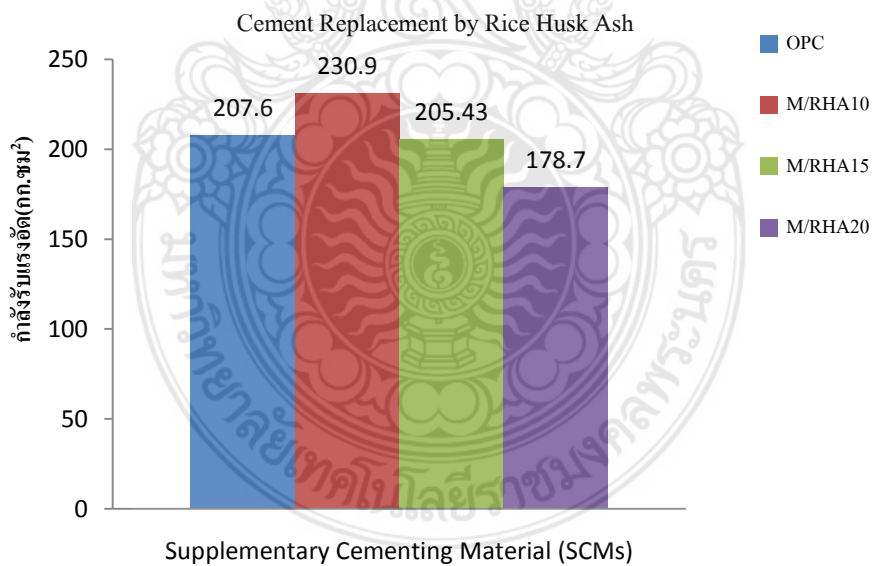
Mix	28-days		
	ksc	Stdv.	COV.
OPC	207.6	2.10	0.801
M/FA10	351.53	5.578	1.677
M/FA15	294.5	0.838	0.284
M/FA20	291.07	5.002	2.008
M/MK10	309.73	10.84	2.308
M/MK15	271.1	13.23	2.904
M/MK20	227.77	19.67	3.879
M/RHA10	230.90	13.37	2.626
M/RHA15	205.43	17.65	3.845
M/RHA20	178.70	20.15	4.386



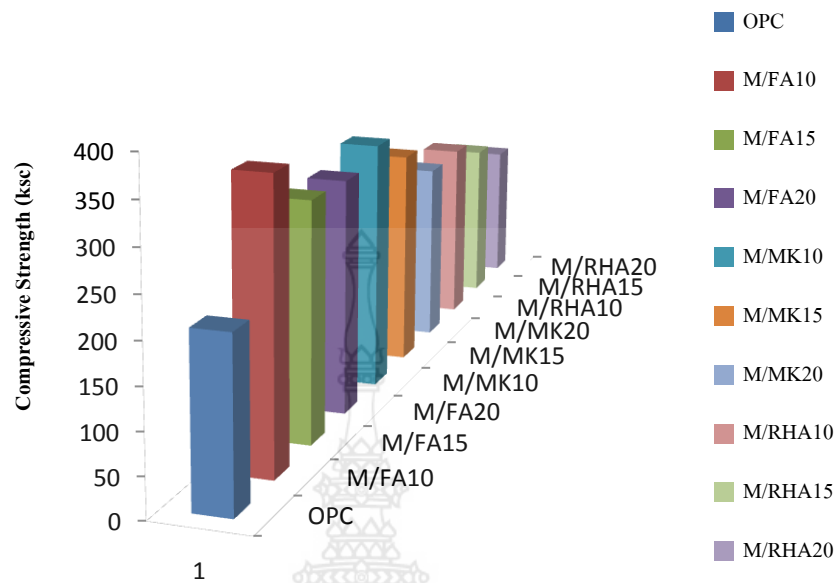
รูปที่ 4.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังอัดของเถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ที่ระดับร้อยละ 10,15 และ20



รูปที่ 4.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังอัดของดินขาวแทนที่ปูนซีเมนต์ที่ระดับร้อยละ 10,15 และ20



รูปที่ 4.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังอัดของเถ้าแกลบแทนที่ปูนซีเมนต์ที่ระดับร้อยละ 10,15 และ20



Supplementary Cementing Materials (SCMs) at age 28-days

รูปที่ 4.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังอัดของเถ้าลอย ดินขาวและเถ้าแกลบแทนที่ปูนซีเมนต์ที่ระดับร้อยละ 10,15 และ20 ตามลำดับ

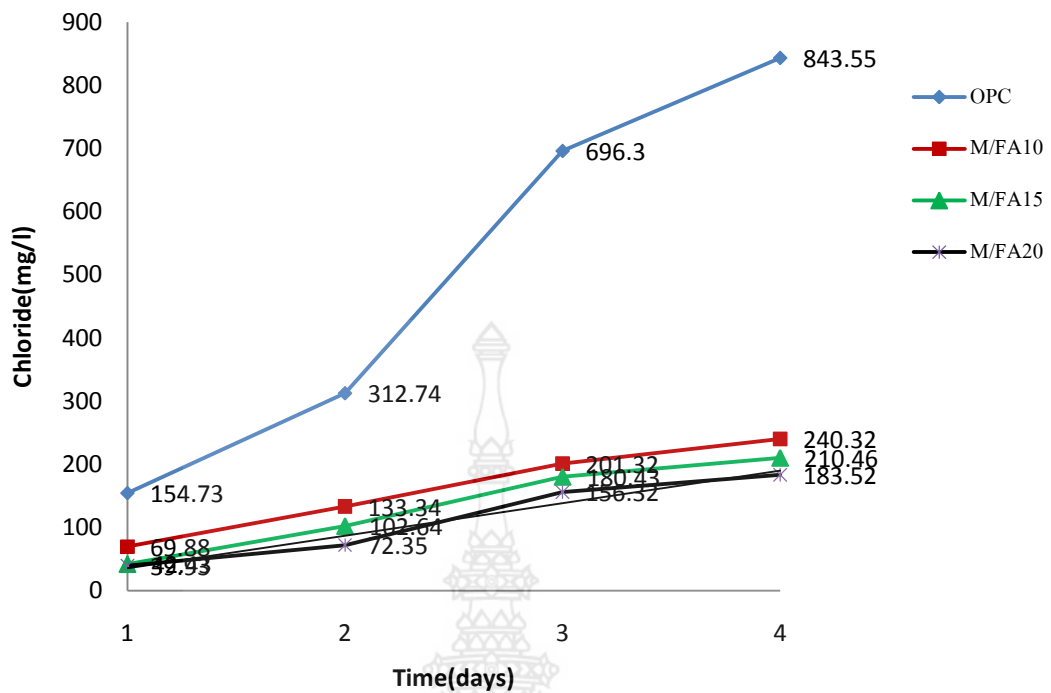
และจากรูปที่ 4.4 เปรียบเทียบ ค่ากำลังอัดของ เถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์มีกำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตธรรมดา ดินขาวและเถ้าแกลบ ตามลำดับ และจะเห็นได้ว่าเมื่อปริมาณของเถ้าลอย ดินขาวและเถ้าแกลบ ที่เพิ่มขึ้นในลักษณะแทนที่ซีเมนต์จะส่งผลให้ กำลังอัดของคอนกรีต ลดลง ทั้งนี้เนื่องจากอัตราการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย ดินขาวและเถ้าแกลบที่ร้อยละ 10 มีปริมาณของซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) ที่ทำปฏิกิริยากับปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) ที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันที่เหมาะสมพอดีกับปฏิกิริยาปอซโซลานิกอย่างสมบูรณ์ทำให้คอนกรีตมีกำลังแรงอัดสูงกว่าคอนกรีตควบคุม และสำหรับส่วนผสมของเถ้าลอย ดินขาวและเถ้าแกลบ ที่มีอัตราการแทนที่ร้อยละ 15 และ 20 มีปริมาณของซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) และอลูมินา (Al_2O_3) มากเกินกว่าปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) จึงเป็นเหตุให้ ($Ca(OH)_2$) มีปริมาณไม่เพียงพอต่อการทำปฏิกิริยา ปอซโซลานิก ทำให้เหลือ ซิลิกอนไดออกไซด์ และอลูมินาออกไซด์ ที่ไม่ได้ทำปฏิกิริยาภายในช่องว่างของคอนกรีต ส่งผลให้กำลังรับแรงอัดจึงต่ำกว่าคอนกรีตควบคุม

4.2 ผลการทดสอบการเคลื่อนที่ของคลอไรด์ไอออนด้วยไฟฟ้า (Chloride Migration Test)

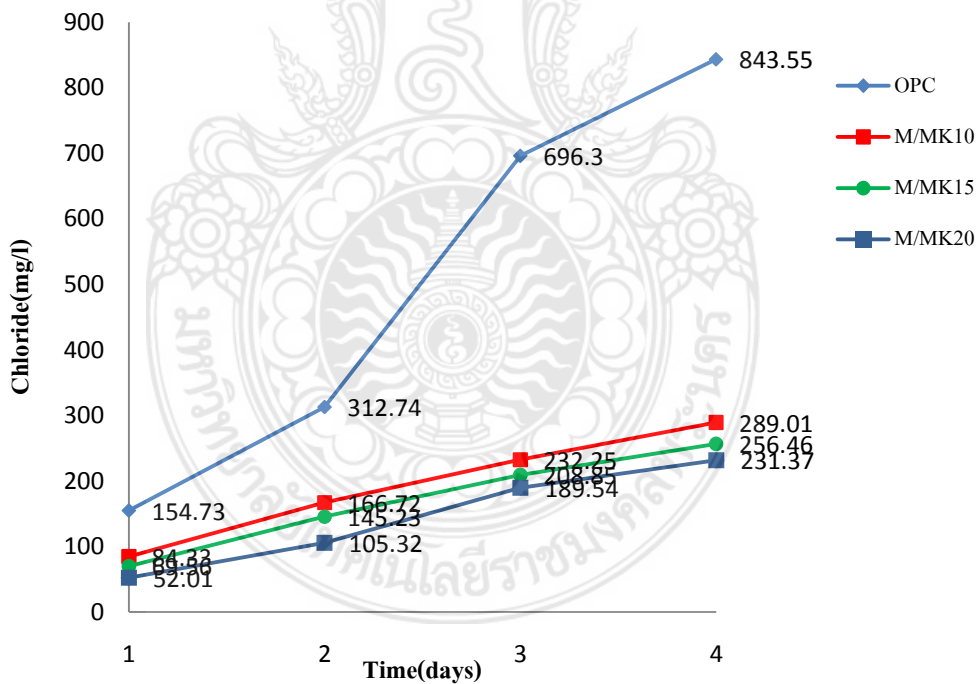
การทดสอบการเคลื่อนที่ของคลอไรด์ไอออนผ่านคอนกรีตโดยใช้กระแสไฟฟ้าในการขับเคลื่อนคลอไรด์ไอออนเพื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองการดึงคลอไรด์ไอออนด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมีโดยการเคลื่อนที่ของคลอไรด์ไอออนผ่านคอนกรีตที่ใช้ในการทดลอง จะทำให้ทราบถึงปริมาณของ คลอไรด์ไอออนที่ผ่านคอนกรีต ตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองเพื่อที่จะทราบถึงสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน (Diffusion Coefficient) ของคอนกรีต และทราบถึงความเร็วในการไหล (Flux) ของคลอไรด์ไอออนเพื่อที่จะมาเป็นแนวทางในการออกแบบการดึงคลอไรด์ไอออนกับโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กในสภาพแวดล้อมจริงและเพื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองในครั้งนี้โดยผลการทดลองการเคลื่อนที่ของคลอไรด์ไอออนด้วยไฟฟ้าดังแสดงในตารางที่ 4.2-4.3

ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบการเคลื่อนที่ของคลอไรด์ด้วยกระแสไฟฟ้า (Chloride Migration Test) ของการแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนของปอซโซลาน ด้วยความต่างศักย์ไฟฟ้า 15 Volts (v)

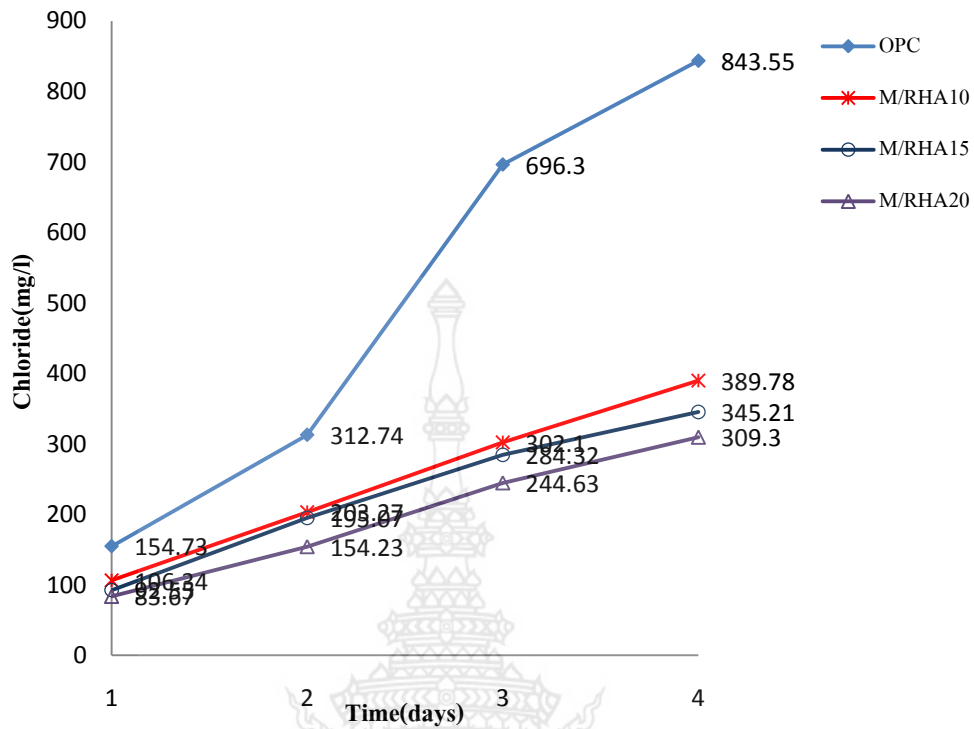
ชนิดของ POZ	ปริมาณคลอไรด์ในสารละลาย (มิลลิกรัม/ลิตร)			
	7 วัน	14 วัน	21 วัน	28 วัน
OPC	154.73	312.74	696.30	843.55
FA 10	69.88	133.34	201.32	240.32
FA 15	42.43	102.64	180.43	210.46
FA 20	39.93	72.35	156.32	183.32
MK 10	84.33	166.72	232.25	289.01
MK 15	69.56	145.23	208.85	256.46
MK 20	52.01	105.32	189.54	231.37
RHA 10	106.34	203.27	302.10	389.78
RHA 15	92.55	195.07	284.32	345.21
RHA 20	83.67	154.23	244.63	309.30



รูปที่ 4.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการซึมผ่านของคลอไรด์ของเถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 10,15 และ 20 ตามลำดับ



รูปที่ 4.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการซึมผ่านของคลอไรด์ของดินขาวแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 10,15 และ 20 ตามลำดับ



รูปที่ 4.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการซึมผ่านของคลอไรด์ของแก้วแลบแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 10, 15 และ 20 ตามลำดับ

จากภาพที่ 4.5-4.7 แสดงปริมาณคลอไรด์ที่ผ่านคอนกรีตในการทดสอบการเคลื่อนที่ของคลอไรด์ที่ผ่านคอนกรีตโดยใช้กระแสไฟฟ้า Chloride Migration Test จะเห็นได้ว่าปริมาณคลอไรด์ที่ผ่านคอนกรีต ควบคุมมีสูงที่สุดมากกว่า คอนกรีตที่มีส่วนผสมของเถ้าลอย ดินขาวและเถ้าแกบลบ ทุกช่วงอายุ โดยเฉพาะคอนกรีตที่มีเถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 20 จะมีการซึมผ่านของคลอไรด์น้อยที่สุดที่ระดับรองลงมา ร้อยละ 15 และ 10 ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับการแทนที่ปูนซีเมนต์ของดินขาวและเถ้าแกบลบ และแนวโน้มการเพิ่มปริมาณสารปอซโซลานของเถ้าลอย ดินขาวและเถ้าแกบลบ จะช่วยลดการซึมผ่านของคลอไรด์มากกว่า คอนกรีตที่ไม่ได้มีส่วนผสมของสารปอซโซลาน และจะเห็นได้ว่าเมื่อปริมาณของ เถ้าลอย ดินขาวและเถ้าแกบลบที่เพิ่มขึ้นในลักษณะ แทนที่ซีเมนต์จะส่งผลให้ การซึมผ่านคลอไรด์ ลดลง ทั้งนี้เนื่องจากอัตราการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย ดินขาวและเถ้าแกบลบ ที่ร้อยละเพิ่มขึ้นจะทำให้ มีปริมาณของซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) และอลูมินาออกไซด์ (Al_2O_3) ทำปฏิกิริยากับปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)_2) ที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันได้ เหมาะสมพอดีกับปฏิกิริยาปอซโซลานิก อย่างสมบูรณ์ทำให้คอนกรีตมีความต้านทานของคลอไรด์ในคอนกรีต กว่าคอนกรีตควบคุม และสำหรับส่วนผสมของเถ้าลอย ดินขาวและเถ้าแกบลบที่มีอัตราการแทนที่ร้อยละ 10 และ 15 มีปริมาณของซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) และอลูมินา (Al_2O_3) น้อยหรือไม่พอเพียงในการทำปฏิกิริยากับ แคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)_2) จึงเป็นเหตุให้

(Ca(OH)₂) จึงทำให้เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกน้อย ทำให้เหลือ ปริมาณของ(Ca(OH)₂) ที่ไม่ได้ทำปฏิกิริยา ภายในช่องว่างของคอนกรีต ส่งผลให้ความต้านทานการซึมผ่านของคลอไรด์มีน้อยกว่าคอนกรีตควบคุม



บทที่ 5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ

5.1 กำลังรับแรงอัดประลัยของคอนกรีตผสมสารปอซโซลานกับคอนกรีตควบคุม

จากการเปรียบเทียบ ค่ากำลังอัดของ คอนกรีตควบคุมกับคอนกรีตผสมปอซโซลานบางส่วนพบว่า ถ้า ลอยแทนที่ปูนซีเมนต์มีกำลังอัดสูงกว่าคอนกรีต ควบคุมทุกส่วนผสมของ ดินขาวและเถ้าแกลบ ตามลำดับ และจะเห็นได้ว่าเมื่อปริมาณของเถ้าลอย ดินขาวและเถ้าแกลบที่เพิ่มขึ้นในลักษณะ แทนที่ซีเมนต์จะส่งผลให้ กำลังอัดของคอนกรีต ลดลงทั้งนี้เนื่องจากอัตราการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย ดินขาวและเถ้าแกลบที่ ร้อยละ 10 มีปริมาณของซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) ที่ทำปฏิกิริยากับปริมาณแคลเซียม ไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)_2) ที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันที่เหมาะสมพอดีกับปฏิกิริยาปอซโซลานิก อย่างสมบูรณ์ทำให้ คอนกรีตมีกำลังแรงอัดสูงกว่าคอนกรีตควบคุม และสำหรับส่วนผสมของเถ้าลอย ดินขาวและเถ้าแกลบที่มี อัตราการแทนที่ร้อยละ 15 และ 20 มีปริมาณของซิลิกอนออกไซด์ (SiO_2) และอลูมิน่า (Al_2O_3) มากเกิน กว่าปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)_2) จึงเป็นเหตุให้ (Ca(OH)_2) มีปริมาณไม่เพียงพอต่อการทำ ปฏิกิริยาปอซโซลานิก ทำให้เหลือซิลิกอนออกไซด์และอลูมิน่าออกไซด์ ที่ไม่ได้ทำปฏิกิริยาภายในช่องว่าง ของคอนกรีต ส่งผลให้กำลังรับแรงอัดจึงต่ำกว่าคอนกรีตควบคุม

5.2 ความต้านทานการซึมผ่านคลอไรด์ของคอนกรีต

จากการทดสอบความต้านทานการซึมผ่านคลอไรด์แสดงปริมาณคลอไรด์ที่ผ่านคอนกรีตในการทดสอบ การเคลื่อนที่ของคลอไรด์ไอออนผ่านคอนกรีตโดยใช้กระแสไฟฟ้า Chloride Migration Test จะเห็นได้ว่า คลอไรด์สามารถซึมผ่านตัวอย่างคอนกรีตควบคุมได้มากกว่าคอนกรีตที่มีส่วนผสมของเถ้าลอย ดินขาวและ เถ้าแกลบทุกช่วงอายุ ในขณะที่คอนกรีตที่มีเถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 20 จะมีการซึมผ่านของคลอไรด์ต่ำที่สุดและที่ระดับรองลงมาร้อยละ 15 และ 10 ตามลำดับ และจะเห็นได้ว่าเมื่อ ปริมาณ การแทนที่ ปูนซีเมนต์ของดินขาวและเถ้าแกลบมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจะมีผลทำให้คอนกรีต ช่วยลดปริมาณการซึมผ่าน ของ คลอไรด์ในคอนกรีตได้มากกว่าคอนกรีตที่มีส่วนผสมของสารปอซโซลาน น้อยกว่าและไม่มีส่วนผสมของปอซ โซลาน ทั้งนี้เนื่องจากอัตราการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย ดินขาวและเถ้าแกลบที่ร้อยละเพิ่มขึ้นจะทำให้ มีปริมาณของซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) และอลูมิน่าออกไซด์ (Al_2O_3) ทำปฏิกิริยากับปริมาณ แคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)_2) ที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันได้เหมาะสมพอดีกับปฏิกิริยาปอซโซลานิก อย่างสมบูรณ์ทำให้คอนกรีตมีความต้านทาน ของคลอไรด์ในคอนกรีตกว่าคอนกรีตควบคุม และสำหรับ ส่วนผสมของเถ้าลอย ดินขาวและเถ้าแกลบที่มีอัตราการแทนที่ร้อยละ 10 และ 15 มีปริมาณของซิลิกอน ออกไซด์ (SiO_2) และอลูมิน่า (Al_2O_3) น้อยหรือไม่พอเพียงในการทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)_2) จึงเป็นเหตุให้ (Ca(OH)_2) จึงทำให้เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกน้อย ทำให้เหลือ ปริมาณของ



(Ca(OH)₂) ที่ไม่ได้ทำปฏิกิริยาภายในช่องว่างของคอนกรีต ส่งผลให้ความต้านทานการซึมผ่านของคลอไรด์มีน้อยกว่าคอนกรีตควบคุม

5.3 ข้อเสนอแนะ

ในการทดสอบการดึงคลอไรด์ออกด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมีจะเห็นได้ว่าปริมาณคลอไรด์ที่ออกมาอยู่ในสารละลายภายนอกนั้นมีกระแสไฟฟ้าหรือพื้นที่ของสารละลายเป็นตัวกำหนดการลดลงของประมาณคลอไรด์ดังนั้นควรพัฒนาสารละลายหรือพื้นที่กระแสไฟฟ้าบวก (Anode area) ให้สามารถติดตั้งได้ง่ายและศึกษาถึงผลกระทบอื่นๆของการดึงคลอไรด์ด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมีเช่นอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ หรือองค์ประกอบอื่นของสารผสมเพิ่มที่ใช้ในการผสมคอนกรีตเนื่องจากการเคลื่อนที่ของคลอไรด์ใช้ช่องว่างภายในคอนกรีตในการเดินทางออกมาอยู่ในสารละลาย และออกแบบการทดลองให้สามารถวัดกระแสไฟฟ้าตามตำแหน่งต่างๆให้สามารถติดตามขนาดของกระแสไฟฟ้าตามตำแหน่งต่างๆเพื่อให้สามารถหาความสัมพันธ์ของปริมาณคลอไรด์ที่ดึงออกจากคอนกรีตกับขนาดของกระแสไฟฟ้า

โดยแนวทางการพัฒนาการลดปริมาณคลอไรด์ออกด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมีอาจจะทำการศึกษาจากผลกระทบหลายๆด้านเช่นคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่แตกต่างกันจะส่งผลให้มีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านแตกต่างกัน ดังนั้นระยะเวลาและประสิทธิในการลดปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตในคอนกรีตจะแตกต่างกันออกไป และยังขึ้นปริมาณคลอไรด์ที่ปนเปื้อนอยู่ในคอนกรีตก่อนกระบวนการทางไฟฟ้าเคมีเนื่องจากระดับปริมาณที่มากจะส่งผลให้ใช้ระยะเวลาในการดึงคลอไรด์ออกจากคอนกรีตมากขึ้นไปด้วย หรือยังสามารถศึกษาเกี่ยวกับระยะห่างของเหล็กเสริมคอนกรีตเนื่องจากระยะห่างของคอนกรีตที่มีมากเกินไปอาจจะลดทอนประสิทธิภาพในการดึงคลอไรด์ได้เนื่องจากเหล็กเสริมในคอนกรีตทำหน้าที่เป็นสื่อนำไฟฟ้าในการผลักคลอไรด์ออกในคอนกรีตออกสู่สารละลายภายนอก

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

- กัญญา ตระกูลคู่. 2534. เทคโนโลยีการกัดกร่อน. พิมพ์ครั้งที่ 2. ห้างหุ้นส่วนจำกัด เอ็กซ์เพรส มีเดีย กรุงเทพฯ
- คณะกรรมการการคอนกรีตและวัสดุ ภายใต้คณะกรรมการวิชาสาขาวิศวกรรมโยธาวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์. 2543. ความคงทนของคอนกรีต. พิมพ์ครั้งที่ 1. บริษัทจุดทอง จำกัด, กรุงเทพฯ
- ชัยยุทธ ช่างสาร และ เลิศณรงค์ ศรีพนม. 2543. เคมีประยุกต์. บริษัทซีเอ็ดยูเคชั่น จำกัด, กรุงเทพฯ
- นันทชัย สกานพงษ์ และ ศิวกรณ์ ก้องเอกภพ. 2550. การศึกษาเชิงปฏิบัติการของการลดปริมาณคลอไรด์ด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมี. โครงการงานวิศวกรรมโยธา. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
- มาตรฐาน ว.ส.ท. 1007-34 . มาตรฐานสำหรับอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กโดยวิธีหน่วยแรงใช้งาน วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์. 2536. พิมพ์ครั้งที่ 2
- มาตรฐาน ว.ส.ท. 1008-38. มาตรฐานสำหรับอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กโดยวิธีกำลัง. วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์. 2538. พิมพ์ครั้งที่ 1
- วันชัย ยอดสุดใจ. 2548. การลดปริมาณคลอไรด์ด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมี. โยธาสาร: 49-51 สุรพงษ์ สุวจิตตานนท์. ไฟฟ้าเคมี. 2531. โอเดียนสโตร์, กรุงเทพฯ
- A. Bentur, S. Diamond and N.S. Berke. 1997. **Steel Corrosion in Concrete: Fundamentals and Civil Engineering Practice**. E & FN Spon, an imprint of Chapman & Hill, London
- A.M. Neville. 1997. **Properties of Concrete**. 4th and Final Edition. John Wiley and Sonc, Inc., New York
- A.M. Hassanein, G.K. Glass, N.R. Buenfeld. 2002. Protection Current Distribution in Reinforced Concrete Cathodic Protection Systems. **Cement and Concrete Research**. Elsevier Ltd. Cement and Concrete Research 24: 159-167
- B. Elsener. 2001. Half-cell Potential Mapping to Assess Repair Work on RC Structure. **Construction and Building Materials**. Elsevier Ltd. Vol. 15: 133-139
- B. Elsener and U.Angst. 2007. Mechanism of Electrochemical Chloride Removal. **Corrosion Science**. Elsevier Ltd. Corrosion Science 49: 4504-4522
- C. Arya, Q. Sa'id-Shawqi and P.R.W. Vassie. 1996. Factors Influencing Electrochemical removal of Chloride Removal of Chloride from Concrete. **Cement and Concrete Research**. Elsevier Ltd. Cement and Concrete Research 26 No. 6: 851-860
- Gerodo G. Clemena and Donald R. Jackson, 2000. Trial Application of Electrochemical Chloride Extraction on Concrete Bridge Components in Virginia. Virginia Transportation Research Council. **U.S. Department of Transportation**. VTRC 00-R18
- G. Fajardo, G. Escadeillas and G. Arliguie. 2006. Electrochemical Chloride Extraction (ECE) from Steel-Reinforced Concrete Specimens Contaminated by Artificial Sea-Water. **Corrosion Science**. Elsevier Ltd. Corrosion Science 48: 110-125



- J.C. Orellan, G. Escadeillas and G. Arliguie. 2004. Electrochemical Chloride Extraction: Efficiency and Side Effects. **Cement and Concrete Research**. Pergamon. Cement and Concrete Research 34: 227-234
- J.M. Miranda, J.A. Gonzalez, A. Cobo and E. Otero. 2006. Several Question about Electrochemical Rehabilitation Methods for Reinforced Concrete Structure. **Corrosion Science**. Elsevier Ltd. Corrosion Science 48: 2172-2188
- N.M. Ihekwha, B.B. Hope and C.M. Hansson. 1996. Carbonation and Electrochemical Chloride Extraction from Concrete. **Cement and Concrete Research**. Pergamon. Cement and Concrete Research 27 No.8. 1095-1107
- O. Mejlhede Jensen, P. Freiesleben Hansen, A.M. Coats, F.P. Glasser. 1999. Chloride Ingress in Cement Paste and Mortar. **Cement and Concrete Research**. Pergamon. Cement and Concrete Research 29: 1497-1504
- P.F. Megrath and R.D. Hooton. 1996. Influence of Voltage on Chloride Diffusion Coefficients from Chloride Migration Tests. **Cement and Concrete Research**. Elsevier Ltd. Cement and Concrete Research 26 No.8: 1239-1244
- Rob B. Polder. 1995. Electrochemical Chloride Removal from Concrete Prisms Containing Chloride Penetrated from Sea Water. **Construction and Building Materials**. Elsevier Ltd. Vol. 10. No. 1: 83-88
- Stephen R. Sharp, Gerry G. Clemeña, Y. Paul Virmani, Glenn E. Stoner, Robert G. Kelly. 2002. Electrochemical Chloride Extraction: Influence of Concrete Surface on Treatment. **Virginia Transportation Research Council**. U.S. Department of Transportation. FHWA- RD-02-107
- S. Mindess, J.F. Young and D. Darwin. 2003. **Concrete**. Prentice Hall, Inc., New Jersey
- W. Prince and R. Gagne. 2001. The Effects of Types of Solutions used in Accelerated Chloride Migration Tests for Concrete. **Cement and Concrete Research**. Pergamon. Cement and Concrete Research 31. 775-780

