

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

วัสดุปอซโซลาน

ปอซโซลาน (Pozzolan) คือ วัสดุที่มีซิลิกา (Siliceous) หรือซิลิกาและอะลูมินา (Siliceous and Aluminous) เป็นองค์ประกอบหลัก โดยทั่วไปวัสดุปอซโซลานจะไม่มีคุณสมบัติในการยึดประสาน แต่ถ้าวัสดุปอซโซลานมีความละเอียดมาก และมีน้ำหรือความชื้นที่เพียงพอ จะสามารถทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่อุณหภูมิปกติ เกิดเป็นสารประกอบซึ่งมีคุณสมบัติในการยึดประสานได้

คำว่าปอซโซลานเริ่มจากในอดีตได้มีการนำเถ้าภูเขาไฟวิซุเวียส (Vesuvius) อยู่ใกล้หมู่บ้านปอซซุโอลิ (Pozzuoli) ในประเทศอิตาลี ซึ่งเคยระเบิดพ่นลาวา (Lava) จึงมีเถ้าถ่านออกมาอย่างมากมาย และเนื่องจากเป็นเถ้าถ่านที่ดีที่สุด ดังนั้นคำว่า “ปอซโซลาน” จึงใช้ต่อกันมาจนถึงปัจจุบัน ในยุคแรกชาวกรีกและชาวโรมันโบราณได้นำเถ้าภูเขาไฟ (Volcanic Ash) ที่บดให้ละเอียดผสมกับปูนขาวและทราย ทำเป็นมอร์ต้าร์ที่มีความแข็งแรงขึ้นสามารถทนทานต่อการละลายของน้ำได้ดี ทำเป็นปูนก่อในงานก่อสร้างสถานที่สำคัญ เช่น โคลีเซียม (Coliseum) ในกรุงโรม ซึ่งอาคารยังคงทนอยู่ได้จนถึงปัจจุบัน เถ้าภูเขาไฟจึงนับเป็นวัสดุปอซโซลานธรรมชาติชนิดแรกที่ได้นำมาใช้ในงานก่อสร้าง นอกจากนี้ยังมีวัสดุปอซโซลานชนิดอื่น ๆ เช่น เถ้าลอยจากถ่านหิน (Coal Fly Ash) ดินเหนียวเผา (Calcined Clay) ดินขาวเผา (Metakaolin) เถ้าแกลบ (Rice Husk Ash) ซิลิกาฟูม (Silica Fume) ตะกรันเตาถลุงเหล็ก (Blast-Furnace Slag) และเถ้าก้นเตา (Bottom Ash)

ในปัจจุบันการใช้วัสดุปอซโซลานเป็นส่วนผสมในปูนซีเมนต์คอนกรีตมีการพัฒนากันอย่างคั่งเนื่องและใช้กันอย่างแพร่หลาย โดยมากการปรับปรุงคุณภาพทางกลด้วยการบดให้มีขนาดอนุภาคเล็กลง เพื่อให้คุณสมบัติปอซโซลานดีขึ้นนั้นเป็นที่นิยมกันมาก โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติบางประการของคอนกรีตให้ดีขึ้น เช่น ช่วยปรับคุณสมบัติของคอนกรีตสดเพื่อให้ทำงานได้ง่ายขึ้น ทำให้ความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชันลดลง เพิ่มความสามารถในการต้านทานของคอนกรีตต่อสภาพการกัดกร่อน ด้านทานทั้งสารละลายซัลเฟตและคลอไรด์ ลดปฏิกิริยาอัลคาไลซิลิกา ทำให้คอนกรีตมีอัตราการซึมผ่านน้ำลดลง และที่สำคัญที่สุดช่วยในการเพิ่มขึ้นของกำลังอัด เป็นต้น นอกจากนี้การใช้วัสดุปอซ

โซลานนอกจากยังเป็นการช่วยรักษาสิ่งแวดล้อม และเป็นการลดต้นทุนของในการผลิตปูนซีเมนต์ส่งผลทำให้ราคาคอนกรีตนั้นถูกลงด้วย (ปริญา จินดาประเสริฐ และชัย จาตุรพิทักษ์กุล. 2549 : 1-5)

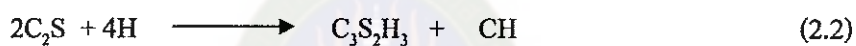
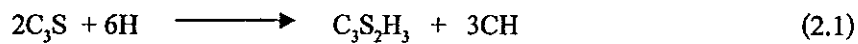
เถ้าแกลบ

แกลบเป็นวัสดุผลพลอยจากโรงสีข้าว ในภาคตะวันออกเฉียงเหนือมีพื้นที่ปลูกข้าวคิดเป็นร้อยละ 45 ของพื้นที่เพาะปลูกข้าวทั้งประเทศ รองลงมา คือ ภาคกลาง และภาคเหนือ มีพื้นที่เพาะปลูกข้าวเท่ากันประมาณร้อยละ 25 โดยเฉลี่ยในแต่ละปีจะมีปริมาณแกลบเหลือจากการสีข้าวถึงถึงปีละกว่า 7 ล้านตัน ซึ่งสัดส่วนที่ได้จากการสีข้าวนั้นจะได้ปริมาณแกลบประมาณร้อยละ 22 แต่เมื่อนำแกลบไปเผา ทำให้คงเหลือเถ้าแกลบเพียงร้อยละ 20 - 25 จากแกลบทั้งหมด เถ้าแกลบสามารถแบ่งได้เป็น 2 ชนิดตามลักษณะการใช้งาน คือ เถ้าแกลบดำ (Black Rice Husk Ash) เป็นวัสดุเหลือทิ้งจากการเผาแกลบเป็นเชื้อเพลิงในการต้มน้ำเพื่อใช้แรงดันไอน้ำไปเดินเครื่องสีข้าว และเถ้าแกลบขาว (White Rice Husk Ash) เป็นวัสดุเหลือทิ้งจากการเผาแกลบเป็นเชื้อเพลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้า ในงานวิจัยนี้ใช้เถ้าแกลบจากโรงไฟฟ้าชีวมวลร้อยเอ็ดกรีน ในจังหวัดร้อยเอ็ดและจังหวัดที่ใกล้เคียงพบว่า มีแกลบที่เป็นผลผลิตพลอยได้จากการสีข้าวประมาณ 1.97 ล้านตันต่อปี ในขณะที่โรงไฟฟ้าใช้แกลบเป็นเชื้อเพลิงเพียง 80,000 ตันต่อปี

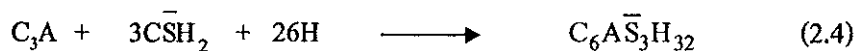
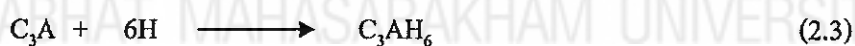
บุรฉัตร ฉัตรวีระ และเชิดพงษ์ วิสารทานนท์ (2544 : 63-68) ได้กล่าวไว้ว่าองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าแกลบในประเทศไทยมี SiO_2 สูงมากถึงประมาณร้อยละ 90 ส่วนที่เหลือเป็นออกไซด์ของโซเดียม โพแทสเซียม แคลเซียม แมกนีเซียม เหล็ก ฟอสฟอรัส และซัลเฟอร์ และค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (LOI) ซึ่งตามปกติมีค่าประมาณร้อยละ 2 - 5 เถ้าแกลบส่วนใหญ่ที่ใช้กันมีขนาดอนุภาคใกล้เคียงกับปูนซีเมนต์ มีโครงสร้างรูปร่างคล้ายกับรังผึ้ง มีความพรุนสูง ขนาดเฉลี่ยของอนุภาคอยู่ในช่วงประมาณ 5 - 20 ไมครอน แต่ทั้งนี้ขนาดเฉลี่ยที่ใหญ่ประมาณ 25 ไมครอน และขนาดเฉลี่ยเล็กมากประมาณ 1 ไมครอนก็มีการใช้กันอยู่ จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า เถ้าแกลบมีความว่องไวในการทำปฏิกิริยาปอซโซลานสูง เมื่อมีการควบคุมอุณหภูมิการเผาสูงถึง 700 องศาเซลเซียส เนื่องจากมีปริมาณของซิลิกาที่อยู่ในสถานะอสัณฐาน (Amorphous) สูง และจากการเผาที่สมบูรณ์ทำให้มีการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผาต่ำ ส่งผลให้มีการดูดน้ำต่ำ ทำให้กำลังของคอนกรีตสูงขึ้น (ปริญา จินดาประเสริฐ และชัย จาตุรพิทักษ์กุล. 2549 : 317-319)

ปฏิกิริยาไฮเดรชันและปฏิกิริยาปอซโซลาน

เมื่อพิจารณาปฏิกิริยาทางเคมีของปูนซีเมนต์กับน้ำพบว่า ปฏิกิริยาที่ได้คือ ปฏิกิริยาไฮเดรชันซึ่งเกิดจากสารประกอบหลักของปูนซีเมนต์คือ ไตรแคลเซียมซิลิเกต (C_3S) ไคแคลเซียมซิลิเกต (C_2S) ไตรแคลเซียมอลูมิเนต (C_3A) และเตตระแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรต์ (C_4AF) ผสมกับน้ำ โดยส่วนใหญ่แล้ว ไตรแคลเซียมซิลิเกต (C_3S) และไคแคลเซียมซิลิเกต (C_2S) มีองค์ประกอบทางเคมีที่เหมือนกันแตกต่างกันเพียงที่จำนวนของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ที่ทำปฏิกิริยาดังสมการที่ 2.1 และสมการที่ 2.2



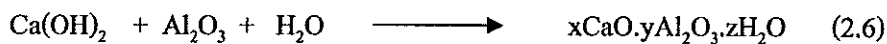
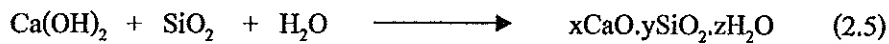
สารประกอบไตรแคลเซียมอลูมิเนต (C_3A) จะทำปฏิกิริยากับน้ำอย่างรวดเร็วและได้ แคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต (C-A-H) สมการที่ 2.3 ปฏิกิริยาดังกล่าวทำให้เกิดการก่อตัวอย่างรวดเร็วจึงจำเป็นต้องผสมยิบซัมเพื่อหน่วงปฏิกิริยา เพราะไตรแคลเซียมอลูมิเนต (C_3A) จะทำปฏิกิริยากับอ็อกซิเจนของซัลเฟตได้แคลเซียมซัลโฟลูมิเนตไฮเดรตหรือเรียกว่าเอททริงไกต์ (Ettringite) สมการที่ 2.4



ปฏิกิริยาของเตตระแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรต์ (C_4AF) คล้ายกับปฏิกิริยาของไตรแคลเซียมอลูมิเนต (C_3A) แต่เกิดขึ้นช้ากว่าและมีความร้อนของปฏิกิริยาน้อยกว่า ส่วนสารประกอบเหล็กออกไซด์ (F) ทำปฏิกิริยาคคล้ายกับอลูมิเนียมออกไซด์ (A)

หลังจากเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันขึ้นได้ผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาขึ้น คือ แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (CH) สมการที่ 2.1 และสมการที่ 2.2 เมื่อนำวัสดุปอซโซลานผสมในมอร์ตาร์หรือคอนกรีต ซิลิกาออกไซด์ (SiO_2) และอลูมินา

ออกไซด์ (Al_2O_3) อันเป็นสารประกอบหลักของวัสดุปอซโซลาน เมื่อทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ได้แคลเซียมซิลิเกตไฮดรต (C-S-H) และแคลเซียมอลูมิเนตไฮดรต (C-A-H) ตามสมการที่ 2.5 และสมการที่ 2.6



สำหรับค่า x , y และ z เป็นตัวแปรที่ขึ้นอยู่กับชนิดของแคลเซียมซิลิเกตไฮดรต และแคลเซียมอลูมิเนตไฮดรต (Malhotra and Ramezani pour, 1994 : 7-11)

แหล่งที่มาคลอไรด์ในคอนกรีต

คลอไรด์เป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เกิดการกัดกร่อนของเหล็กเสริมได้ โดยอิออนของคลอไรด์ (Chloride Ions) เป็นตัวการที่ทำให้ความเป็นด่างของคอนกรีตที่ป้องกันเหล็กเสริมไม่ให้เกิดสนิมลดลง และหลังถึงจุดวิกฤตแล้ว ถ้ามีน้ำและออกซิเจนเพียงพอ ก็จะทำให้เหล็กเกิดสนิมได้ ซึ่งเป็นสาเหตุที่สำคัญทำให้โครงสร้างคอนกรีตเสื่อมสภาพลง โดยหลักมีที่มาจาก 2 แหล่ง คือ

1. คลอไรด์ที่มาจากในระหว่างการผสมคอนกรีต อาจอยู่ในวัสดุที่ใช้เป็นส่วนผสมของคอนกรีต เช่น น้ำที่ใช้ผสมคอนกรีต หรือที่ปนเปื้อนมากับหิน ทราบ รวมถึงสารเคมีผสมเพิ่มบางประเภท เช่น แคลเซียมคลอไรด์ ($CaCl_2$) ที่พบอยู่ในสารเร่งการก่อตัว
2. คลอไรด์ที่มาจากสิ่งแวดล้อมที่แทรกซึมเข้าไปในคอนกรีต เช่น โครงสร้างที่ตั้งอยู่ในสภาพแวดล้อมทะเล บริเวณที่มีดินเค็ม เกลือที่ใช้ในการช่วยละลายน้ำแข็ง (Deicing Salts) ในประเทศที่มีอากาศหนาว หรือบริเวณโรงงานอุตสาหกรรมอาหาร

แต่ปัญหาของคลอไรด์ที่มีผลกระทบต่อความคงทนของคอนกรีตนั้นส่วนมากมาจากสภาพแวดล้อมภายนอก หากอยู่ในสภาพหรือปัจจัยที่เหมาะสม โดยแหล่งคลอไรด์ที่มีผลกระทบที่รุนแรงต่อโครงสร้างมากที่สุดมาจากน้ำทะเล แต่สำหรับคอนกรีตที่แช่อยู่ในน้ำทะเลตลอดเวลานั้น แม้ว่าคลอไรด์สามารถแทรกซึมเข้าไปในเนื้อคอนกรีตได้แต่เนื่องจากไม่มีปริมาณของออกซิเจนที่เพียงพอหรือไม่มีเลย ดังนั้นการกัดกร่อนของเหล็กเสริมจึงไม่สามารถเกิดขึ้นได้ คลอไรด์เป็นสารประกอบหลักที่มีอยู่มากในน้ำทะเล ดังแสดงในตาราง 1

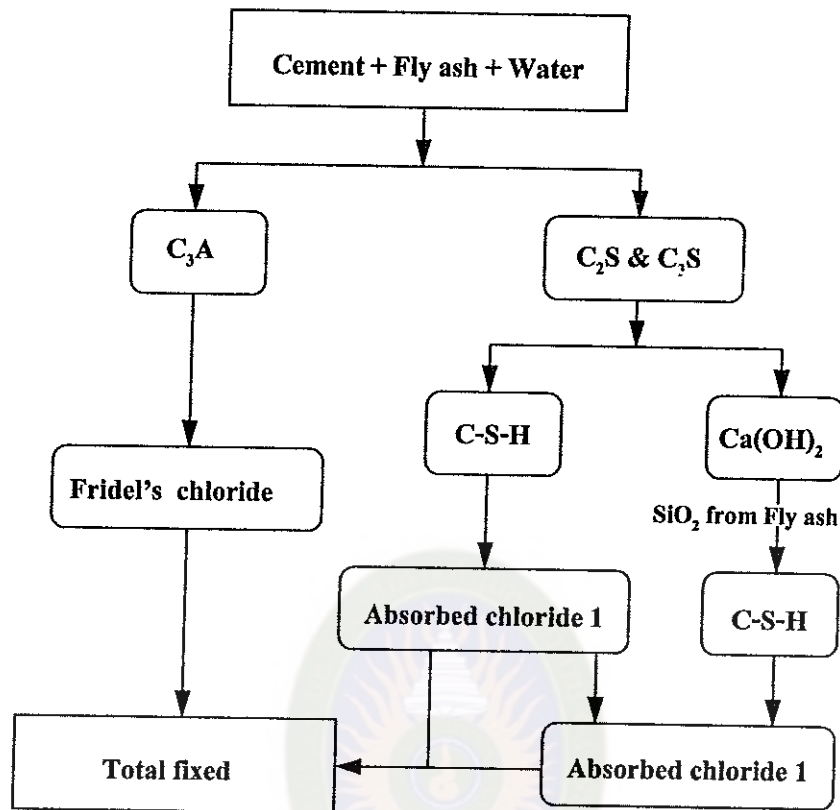
ตาราง 1 ส่วนประกอบของน้ำทะเล

Composition of Seawater	Quantity (ppm.)
Sodium chloride	27,000
Magnesium chloride	3,200
Magnesium sulphate	2,200
Calcium sulphate	1,100
Calcium chloride	500
Total dissolved salts	34,000

ที่มา : Mindess and Young. 1981 : 102

ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดในเนื้อของคอนกรีต (Total Chloride) เป็นผลรวมของคลอไรด์ในสองส่วน โดยส่วนที่หนึ่งเรียกว่า "Bound Chloride" คือ คลอไรด์ส่วนที่ถูกจับยึดอยู่ที่ผิวผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน เช่น C-S-H และ C-A-H ส่วนที่สองมาจากการเกิดปฏิกิริยาแล้วจึงเปลี่ยนรูปไปเป็นเกลือฟิเคิล (Friedel's Salt) คือ คลอไรด์ที่ละลายน้ำอยู่ในโพรงของคอนกรีต ดังแสดงในภาพประกอบ 1 (สมนึก ตั้งเต็มสิริกุล และคณะ. 2542 : 62-66) คลอไรด์ส่วนนี้สามารถแพร่กระจายเข้าสู่เนื้อคอนกรีตในบริเวณที่มีระดับความเข้มข้นของคลอไรด์ที่ต่ำกว่า ทำให้ความเป็นด่างในบริเวณดังกล่าวของคอนกรีตลดลงเพราะ ไอออนคลอไรด์ที่หนักกว่าจะเข้าไปแทนที่ไอออนไฮดรอกไซด์ ถ้าคลอไรด์อิสระแพร่เข้าไปถึงตำแหน่งของเหล็กเสริมแล้วทำให้ค่า pH ของคอนกรีตรอบ ๆ เหล็กเสริมลดลงเหลือประมาณ 9 ซึ่งเป็นสาเหตุให้เหล็กเสริมเกิดสนิมได้

ดังนั้นหากสามารถขัดขวางหรือคักจับคลอไรด์ในส่วนนี้ไว้ได้เป็นจำนวนมาก หรือลดการแทรกซึมให้น้อยลงจะสามารถช่วยยืดระยะเวลาของการเริ่มกระบวนการกัดกร่อนเหล็กเสริมออกไปได้มากขึ้น ซึ่งถ้าลดยในส่วนผสมคอนกรีตสามารถจับยึดไอออนของคลอไรด์ไว้ได้บางส่วนทำให้คอนกรีตที่มีส่วนผสมของเถ้าลอยสามารถลดปริมาณของไอออนของคลอไรด์ในส่วนที่จะเข้าไปทำให้เกิดสนิมที่ผิวของเหล็กเสริมได้ (Martin-Perez and others. 2000 : 1215-1233)



ภาพประกอบ 1 แสดงการเก็บกักปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด

ที่มา: สมนึก ตั้งเต็มสิริกุล และคณะ. 2542 : 62-66

สมนึก ตั้งเต็มสิริกุล และคณะ (2542 : 62-66) กล่าวว่าปริมาณคลอไรด์อิสระที่มีอยู่ในคอนกรีตสามารถทราบได้โดยตรงจากการวิเคราะห์ความเข้มข้นของคลอไรด์ในช่องว่างของคอนกรีต สำหรับปริมาณคลอไรด์ที่ถูกเก็บกัก สามารถหาได้จากสมการที่ 2.7 และสมการที่ 2.8

$$C_{fixed} = \alpha_{fixed} C_{tot} \quad (2.7)$$

และสามารถหาปริมาณคลอไรด์อิสระได้จาก

$$C_{free} = C_{tot} - C_{fixed} \quad (2.8)$$

C_{free} = ปริมาณคลอไรด์อิสระ

C_{fixed} = ปริมาณคลอไรด์ที่ถูกเก็บกัก

C_{tot} = ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดคิดเป็นค่าร้อยละโดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์

α_{fixed} = Fixed Chloride Factor

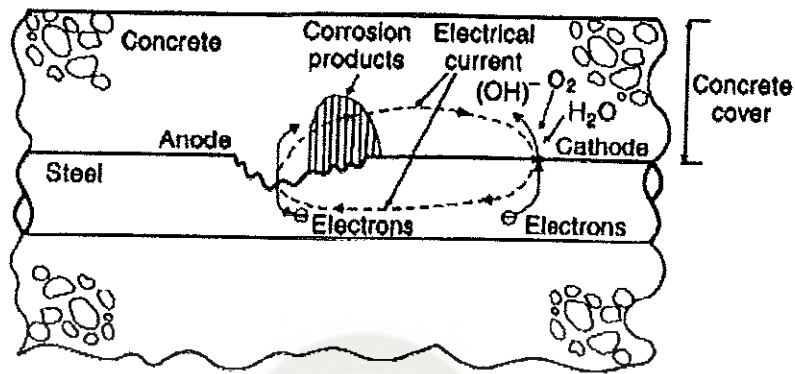
ดังนั้นสามารถเก็บกักคลอไรด์ได้มากคลอไรด์อิสระก็จะมีย่อยทำให้โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กมีอายุการใช้งานนานขึ้น

กลไกการกัดกร่อนเหล็กเสริมในคอนกรีตโดยคลอไรด์

การกัดกร่อนเนื่องจากคลอไรด์แตกต่างจากการกัดกร่อนทางเคมีอื่นตรงที่ คลอไรด์ทำให้เหล็กเสริมเป็นสนิมและคอนกรีตบริเวณรอบ ๆ เหล็กเสริมเท่านั้นที่เสียหายเนื่องจากการขยายตัวของเหล็กเสริมนั้นเป็นสาเหตุสำคัญหลักที่ทำให้ลายของค่าการคอนกรีตเสริมเหล็ก เมื่อปูนซีเมนต์ทำปฏิกิริยากับน้ำจะเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน และความเป็นด่างของสารละลายในโพรงของคอนกรีต ทำให้คอนกรีตมีค่าความเป็นกรด - ด่าง (pH) เฉลี่ยอยู่ในช่วง 12.5 - 13.5 (Soroka, 1993 : 99) ซึ่งภายใต้สภาวะนี้ก่อให้เกิดชั้นฟิล์มบาง ๆ ของ γ - Fe_2O_3 (Protective Passivity Layer) เคลือบที่ผิวของเหล็กไว้ ช่วยป้องกันความชื้น และออกซิเจนทำให้ไม่เกิดสนิม แต่เมื่ออายุการใช้งานของโครงสร้างผ่านไปในระยะหนึ่งชั้นฟิล์มดังกล่าวจะถูกทำลายลงอย่างช้า ๆ ตลอดเวลาอันเนื่องมาจากปัจจัยโดยสภาพแวดล้อม ทำให้ค่าความเป็นกรด-ด่างของคอนกรีตลดลง ซึ่งเกิดการแทรกซึมของไอออนคลอไรด์เข้าไปในคอนกรีตซึ่งมีปริมาณมากพอประกอบกับเมื่อมีออกซิเจนกับความชื้นที่เหมาะสม ชั้นฟิล์มป้องกันจะถูกทำลายลงทำให้เหล็กเสริมเป็นสนิม

การทำลายชั้นฟิล์มเกิดขึ้น โดยกระบวนการไฟฟ้าเคมีเกิดขึ้นทำให้บริเวณชั้นฟิล์มโดนทำลายมีศักย์ไฟฟ้าเป็นขั้วบวก (Anodic) ซึ่งเรียกว่าปฏิกิริยาแอโนด (Anodic Reaction) ดังแสดงในสมการที่ 2.9 อิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นนี้วิ่งผ่านไปยังบริเวณที่ฟิล์มไม่ได้โดนทำลายซึ่งมีศักย์ไฟฟ้าเป็นขั้วลบ (Cathodic) และทำปฏิกิริยากับน้ำและออกซิเจนเกิดเป็นไฮดรอกไซด์ไอออน ดังแสดงในสมการที่ 2.10 ซึ่งกระบวนการนี้เรียกว่าปฏิกิริยาคาโทด (Cathodic

60) หรือจมอยู่ในน้ำ (ไม่มีออกซิเจน) เป็นตัวจำกัดการเกิดการกัดกร่อน แต่การกัดกร่อนจะเกิดอย่างรวดเร็วเมื่อความชื้นสัมพัทธ์อยู่ระหว่างร้อยละ 70 – 80



ภาพประกอบ 2 กระบวนการกัดกร่อนในคอนกรีตเสริมเหล็ก

ที่มา : Bentur and others, 1997 : 114

กลไกการแทรกซึมของคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีต

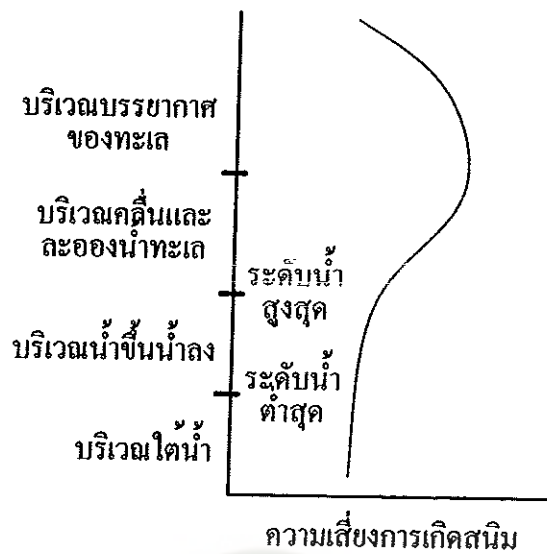
โดยทั่วไปแล้วรูปแบบและวิธีการแทรกซึมของไอออนของคลอไรด์ผ่านเข้าสู่ภายในเนื้อของคอนกรีต สามารถแบ่งได้ตามลักษณะดังต่อไปนี้

1. โดยวิธีการแพร่กระจาย (Diffusion) สามารถเกิดขึ้นได้เนื่องจากความแตกต่างของระดับความเข้มข้นของคลอไรด์ในคอนกรีต โดยจะเคลื่อนที่จากระดับความเข้มข้นที่มากไปสู่ระดับความเข้มข้นที่น้อยกว่าเสมอ
2. การเคลื่อนย้าย (Migration) เกิดจากมีความแตกต่างทางศักย์ไฟฟ้าในคอนกรีต ซึ่งการแทรกซึมโดยวิธีดังกล่าวเกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่อมีความต่อเนื่องของน้ำในโพรงเท่านั้น และเป็นการสัมประสิทธิ์การแพร่ของไอออนคลอไรด์ (Diffusion coefficient)
3. โดยวิธีการซึมผ่าน (Permeability or Chloride Ingress) เกิดขึ้นเนื่องจากผลของความแตกต่างของแรงดันเชิงไฮดรอลิก (Hydrostatic Pressure) ทำให้น้ำที่มีคลอไรด์ผสมอยู่สามารถแทรกซึมผ่านเข้าสู่เนื้อคอนกรีตได้ ซึ่งในปี ค.ศ. 1855 อะดอร์ฟ ฟิค (Adolf Eugen Fick) นักคณิตศาสตร์ชาวเยอรมันได้พัฒนาสมการทางคณิตศาสตร์เพื่อแก้ปัญหาการไหลหรือการซึมผ่านภายใต้เงื่อนไขของความแตกต่างเชิงไฮดรอลิกได้เรียกว่ากฎของฟิค (Fick's Law)

4. โดยวิธีการดูดซึม (Absorption) สามารถเกิดขึ้นได้ทั้งเนื่องจากผลของการเกิดวัฏจักรเปียกสลับแห้งซึ่งทำให้เกิดแรงดึงดูคาพิลารี (Capillary Suction) ขึ้นภายในเนื้อคอนกรีต ทำให้ไอออนของคลอไรด์เข้าสู่เนื้อคอนกรีตได้ด้วยการพา (Convection) และเกิดขึ้นเนื่องจากความแตกต่างของระดับความชื้น (Moisture Gradient) ระหว่างผิวทั้งสอง เมื่อผิวด้านหนึ่งของคอนกรีตสัมผัสอยู่กับน้ำหรือความชื้นที่มีคลอไรด์ส่วนผิวอีกด้านอยู่ในสภาพแห้ง ไอออนของคลอไรด์สามารถที่จะแทรกซึมจากผิวด้านที่เปียกไปยังด้านที่แห้งด้วยกระบวนการที่เรียกว่าวิกกิง (Wicking)

ความเสี่ยงที่จะเกิดการกัดกร่อนของเหล็กเสริมมากที่สุด มักพบในบริเวณคลื่น และละอองน้ำ (Splash Zone) รองลงมาเป็นบริเวณบรรยากาศทะเล (Atmospheric Zone) และบริเวณน้ำขึ้นน้ำลง (Tidal Zone) ส่วนบริเวณใต้น้ำทะเล (Submerged Zone) จะมีความเสี่ยงต่อการกัดกร่อนเหล็กเสริมน้อยมาก ดังแสดงในภาพประกอบ 3 ในบริเวณใต้น้ำทะเลความเสี่ยงต่อการเกิดสนิมของเหล็กเสริมมีน้อย เนื่องจากมีความเข้มข้นของออกซิเจนน้อย และอัตราการแพร่ของออกซิเจนเข้าไปในคอนกรีตต่ำมาก เนื่องจากช่องว่างภายในคอนกรีตเป็นช่องว่างอิมมิดัวด้วยน้ำ ซึ่งออกซิเจนละลายน้ำได้น้อยมากทำให้อัตราการแพร่เกิดขึ้นน้อย

ในกรณีของสภาพเปียกสลับแห้งนั้น น้ำทะเลจะเข้าสู่คอนกรีตที่แห้งโดยวิธีการดูดซึม หรือแรงดึงดูคาพิลารี จนกระทั่งคอนกรีตอยู่ในสภาพที่อิมมิดัวแล้ว (Saturated) เมื่อสภาพภายนอกเปลี่ยนเป็นแห้ง น้ำที่ผิวคอนกรีตก็จะระเหยออกไป ทิ้งไว้แค่ราบเกลือ เมื่ออยู่ในสภาพที่เปียกอีก ความเข้มข้นของคลอไรด์ที่ใกล้ผิวก็จะสูงขึ้น ดังนั้นไอออนของคลอไรด์ซึ่งมีความเข้มข้นสูงที่บริเวณผิวจะซึมเข้าสู่ภายในโดยการแพร่ ซึ่งในแต่ละรอบของการเปียกและการแห้งทำให้คลอไรด์บริเวณใกล้ผิวมีความเข้มข้นสูงขึ้นเรื่อย ๆ และจะเข้าไปสู่ภายในคอนกรีตและสู่บริเวณเหล็กเสริมมากขึ้น โดยปกติแล้วคอนกรีตจะเปียกได้เร็วแต่จะแห้งได้ช้ากว่ามาก และภายในของคอนกรีตนั้นไม่สามารถทำให้แห้งได้โดยสมบูรณ์ ดังนั้นการแพร่ของไอออนของคลอไรด์เข้าไปในคอนกรีตที่แช่อยู่ในน้ำทะเลตลอดเวลาจึงช้ากว่าการเข้าไปของคลอไรด์โดยการเปียกสลับแห้งโดยน้ำทะเล (Mejlbro and Poulsen. 2006 : 4-6)



ภาพประกอบ 3 ความเสี่ยงที่จะเกิดการสนิมตามสภาพสิ่งแวดล้อม
ที่มา : คณะอนุกรรมการคอนกรีตและวัสดุ. 2543 : 15

ประเภทของคลอไรด์ในคอนกรีต

ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดในเนื้อของคอนกรีต (Total Chloride) เป็นผลรวมของคลอไรด์ในสองส่วน ดังแสดงในภาพประกอบ 4 โดยมีกลไกดังต่อไปนี้

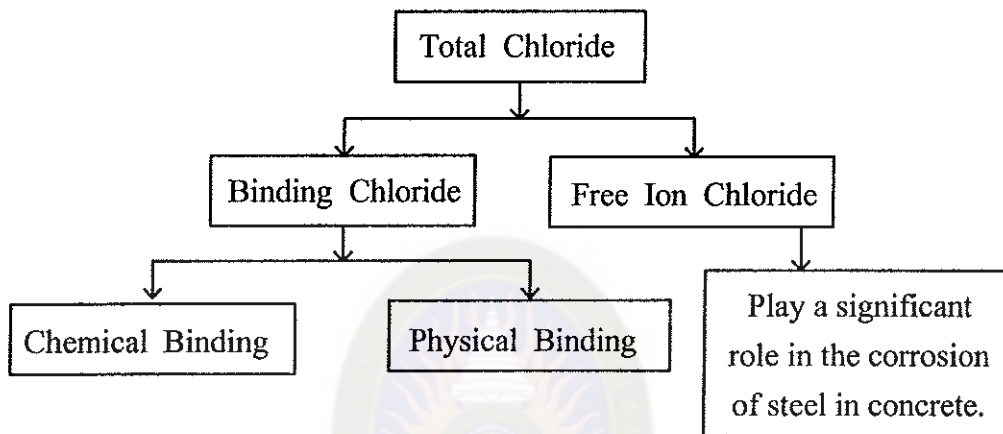
1. คลอไรด์ที่ถูกจับยึด (Binding Chloride) แบ่งออกได้เป็น 2 ลักษณะ คือ

1.1 ถูกจับยึดโดยทางเคมี (Chemical Binding) คลอไรด์บางส่วนจะถูกจับโดยผลผลิตของปฏิกิริยาไฮเดรชัน เช่น ผลผลิตของ C_3A และ C_4AF แล้วจึงเปลี่ยนไปอยู่ในรูปของเกลือฟิเดล (Fidel's Salt หรือ $3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot CaCl_2 \cdot 10H_2O$) และแคลเซียมคลอโรเฟอร์ไรท์ (Calcium Chloroferrite หรือ $3CaO \cdot Fe_2O_3 \cdot CaCl_2 \cdot 10H_2O$) หรือแม้แต่องค์ประกอบโครงสร้างของผลผลิตของปฏิกิริยาไฮเดรชัน

1.2 ถูกจับยึดโดยทางกายภาพ (Physical Binding) โดยคลอไรด์บางส่วนสามารถถูกยึดด้วยแรงทางกายภาพ (Surface Force) ได้บนผิวของผลผลิตไฮเดรชัน เช่น แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) แคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต (C-A-H) และเอททริงไกต์ (Ettringite) เป็นต้น อีกทั้งยังสามารถถูกยึดอยู่บนผิวของวัสดุที่เป็นของแข็งที่ไม่มีปฏิกิริยา เช่น มวลรวม หรือผงฝุ่นหินได้ด้วย ถึงแม้จะเป็นปริมาณน้อยมากก็ตาม

2. คลอไรด์อิสระ (Free Chloride) เป็นคลอไรด์ส่วนที่ไม่ถูกจับยึด ซึ่งจะมีสภาพเป็นสารละลายอยู่ในน้ำที่อยู่โพรงของคอนกรีต (Pore Solution) คลอไรด์อิสระนี้เป็น

ส่วนของคลอไรด์ที่สามารถแพร่เข้าไปยังคอนกรีตที่มีความเข้มข้นของคลอไรด์อิสระต่ำกว่า ส่งผลต่อการเกิดการกัดกร่อนเหล็กเสริมในโครงสร้าง (Martin-Perez and others, 2000 : 1215-1223) และเป็นส่วนที่ทำให้ความเป็นด่างในคอนกรีตลดลง ดังนั้นถ้าสามารถจับยึดคลอไรด์อิสระไว้เป็นจำนวนมากก็จะสามารถยืดเวลาของการเกิดสนิมในเหล็กเสริมออกไปได้

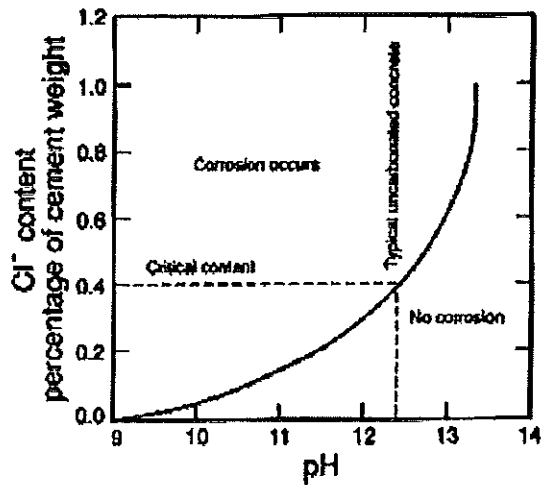


ภาพประกอบ 4 ประเภทของคลอไรด์ในคอนกรีต

ที่มา : Martin-Perez and others, 2000 : 1215-1223

ปริมาณของคลอไรด์ที่เสี่ยงต่อการเกิดของสนิม

ความเข้มข้นของคลอไรด์ที่แทรกซึมเข้าไปในเนื้อคอนกรีตจะเพิ่มขึ้นตามกาลเวลา และลดลงตามระยะของโพรงคอนกรีต เมื่อความเข้มข้นของคลอไรด์สูงเกินค่าหนึ่ง ๆ นั้น ไอออนอิสระจะเริ่มทำให้ชั้นฟิล์ม (γ - Fe_2O_3) ถูกทำลายลง หรือเรียกว่า ปริมาณวิกฤต (Threshold) ซึ่งขึ้นอยู่กับค่า pH ของน้ำในโพรง ส่วนมากแสดงในรูปร้อยละของน้ำหนักซีเมนต์ ในการป้องกันไม่ให้เหล็กเสริมเสียสภาพของชั้นฟิล์มบาง ๆ ต้องป้องกันไม่ให้ไอออนของคลอไรด์เข้าถึงเหล็กเสริม หรือให้ค่าความเข้มข้นของคลอไรด์ต่ำกว่าระดับวิกฤต และปริมาณวิกฤตยังขึ้นอยู่กับตัวแปรอื่นด้วย เช่น ส่วนประกอบของซีเมนต์ โดยทั่วไปสำหรับคอนกรีตที่ไม่มีคาร์บอนเนชัน ปริมาณวิกฤตเท่ากับร้อยละ 0.4 ของน้ำหนักซีเมนต์ และลดลงเป็นศูนย์เมื่อ pH เท่ากับ 9 ซึ่งเป็นค่า pH ที่ทำให้เกิดการเสียสภาพของชั้นฟิล์มบาง ๆ เนื่องจากน้ำในโพรงมีความเป็นด่างที่ต่ำ ดังแสดงในภาพประกอบ 5



ภาพประกอบ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า pH ของน้ำในโพรงกับปริมาณคลอไรด์วิกฤต
ที่มา : Soroka. 1993 : 166

Meck และ Sirivivatnanon (2003 : 1113-1117) ได้อ้างถึงสถาบัน Building Research Establishment ได้มีการประเมินปริมาณของคลอไรด์ทั้งหมดที่เสี่ยงต่อการเกิดของสนิมโดยน้ำหนักของซีเมนต์ ดังต่อไปนี้

1. อัตราเสี่ยงการเกิดสนิมที่ต่ำ คือ ปริมาณของคลอไรด์น้อยกว่าร้อยละ 0.4
2. อัตราเสี่ยงการเกิดสนิมปานกลาง คือ ปริมาณของคลอไรด์ ระหว่างร้อยละ 0.4 - 1.0
3. อัตราเสี่ยงการเกิดสนิมที่สูง คือ ปริมาณของคลอไรด์มากกว่าร้อยละ 1

จากรายงานของสถาบัน European State-of-the-art Report ไม่ได้มีการตกลงร่วมกันเรื่องระดับวิกฤตของคลอไรด์ที่ยอมรับได้ มีแต่บอกว่า การเกิดของสนิมจะเกิดขึ้นเมื่อจำนวนของคลอไรด์ใกล้ถึงร้อยละ 0.35 - 1.0 โดยน้ำหนักของซีเมนต์ โดยผลการทดลองมีค่าอยู่ในเกณฑ์ มีปริมาณอยู่ระหว่างร้อยละ 0.28 - 1.41 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน มาตรฐาน ASTM STP 906 ได้แนะนำไว้ว่าเมื่อบริเวณได้ห้องสะพานคอนกรีต มีปริมาณของคลอไรด์ทั้งหมดมากกว่าร้อยละ 0.3 จะต้องมีการซ่อมแซมหรือเปลี่ยนคอนกรีตที่หุ้มเหล็กเสริมใหม่ทั้งหมด คณะกรรมการวิชาการสาขาวิศวกรรมโยธา (2538 : 41) ได้กำหนดปริมาณของไอออนคลอไรด์ในคอนกรีตที่อาจมีปัญหาเนื่องจากการกัดกร่อนของเหล็กเสริม ซึ่งคล้ายกับหลักการเลือกคอนกรีตในกรณีที่สร้างบริเวณทะเล ดังแสดงในตาราง 2

ข้อเสนอแนะในการเลือกใช้ความหนาของระยะหุ้มคอนกรีตที่หนาขึ้นกว่าปกติทำให้ไอออนคลอไรด์ต้องใช้เวลานานขึ้นในการแทรกซึมจนถึงผิวเหล็ก สามารถดูได้จากมาตรฐานสมาคมวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์ (วสท.) และการใช้คอนกรีตที่มีความซึมผ่านน้ำต่ำทำได้โดยกำหนดให้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/C) ที่ต่ำกว่า 0.5 ซึ่งอาจต้องใช้สารลดน้ำเข้าช่วย แต่ถ้าคอนกรีตเสริมเหล็กสัมผัสกับน้ำกร่อยหรือน้ำทะเล หรือละอองของน้ำดังกล่าว อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/C) ควรมีค่าไม่เกิน 0.40

ตาราง 2 ปริมาณสูงสุดของคลอไรด์ไอออนเพื่อป้องกันการเกิดสนิม

ชนิดขององค์อาคาร	ปริมาณสูงสุดของคลอไรด์ไอออน (CI) ที่ละลายน้ำได้ในคอนกรีต (ร้อยละ โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์)
คอนกรีตอัดแรง	0.06
คอนกรีตเสริมเหล็กที่สัมผัสกับคลอไรด์ในขณะใช้งาน	0.15
คอนกรีตเสริมเหล็กในสภาวะแห้งหรือที่มีการป้องกันความชื้นในขณะใช้งาน	1.00

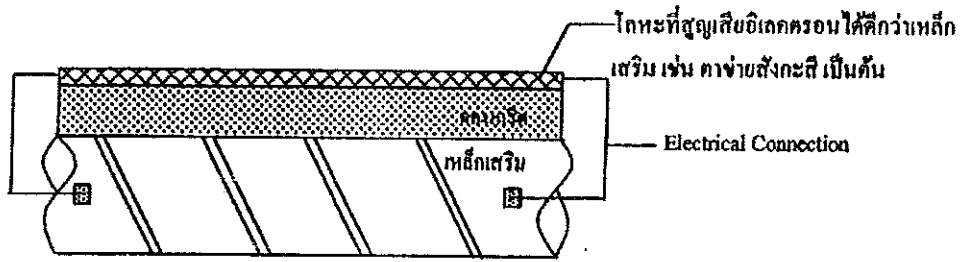
ที่มา : ปริญา จินดาประเสริฐ และชัย จาตุรพิทักษ์กุล. 2547 : 243-250

การป้องกันการเกิดสนิมของเหล็กเสริมเนื่องจากคลอไรด์

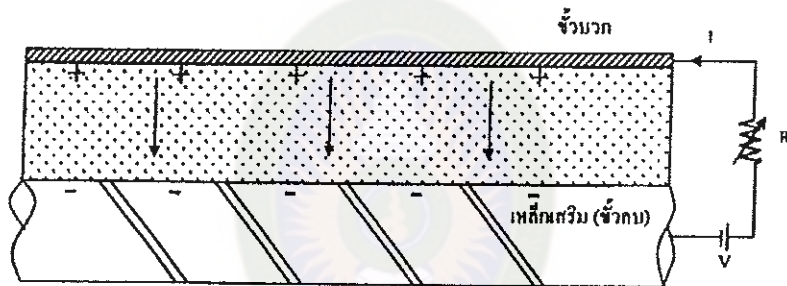
วิธีการป้องกันการเกิดสนิมของเหล็กเสริมเนื่องจากคลอไรด์ สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 แนวทาง ซึ่งในแต่ละแนวทางมีรายละเอียดดังนี้

1. โดยการปรับปรุงคุณภาพของคอนกรีตและเหล็กเสริม การป้องกันการเกิดสนิมของเหล็กเสริมโดยการปรับปรุงคุณภาพของคอนกรีต และเหล็กเสริมอาจกระทำได้ดังต่อไปนี้

1.1 ออกแบบและใช้คอนกรีตที่มีความชื้นน้ำต่ำมากๆ คอนกรีตที่มีความชื้นน้ำต่ำจะทำให้คลอไรด์แพร่เข้าไปในคอนกรีตได้ยาก เนื่องจากความสามารถในการแพร่ก็จะน้อยลงด้วย ซึ่งจะทำให้ได้โดยการ ใช้ปริมาณน้ำในคอนกรีตน้อย การลดอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ การใช้สารประเภทเติมเต็ม (Filler) เพื่อเพิ่มความทึบน้ำ เช่น ซิลิกาฟูม การใช้



ภาพประกอบ 6 การป้องกันการเกิดสนิมในเหล็กเสริมโดยการติดตั้งตาข่ายสังกะสี
ที่มา : คณะอนุกรรมการคอนกรีตและวัสดุ. 2543 : 40-46

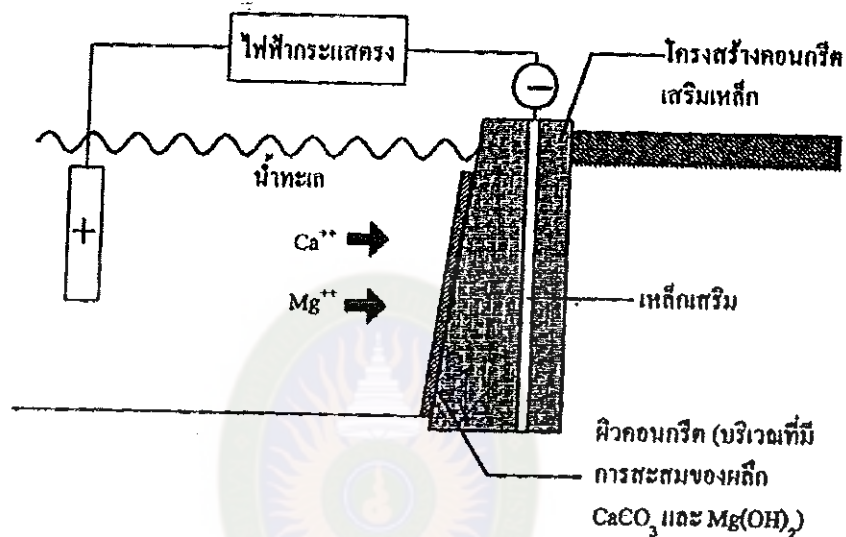


ภาพประกอบ 7 การป้องกันการเกิดสนิมในเหล็กเสริมโดยการติดตั้งไฟฟ้ากระแสตรง
ที่มา : คณะอนุกรรมการคอนกรีตและวัสดุ. 2543 : 40-46

2.2 Electrodeposition โดยทั่วไปเมื่อผ่านกระแสไฟฟ้าสู่น้ำทะเล แคลเซียมไอออน (Ca^{2+}) และ/หรือ แมกนีเซียมไอออน (Mg^{2+}) ซึ่งมีประจุบวกในน้ำทะเลตกผลึกเป็นแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) และ/หรือ แมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Mg}(\text{OH})_2$) ที่ผิวบริเวณขั้วลบ (ขั้วลบ) เนื่องจากผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นนี้มีความสามารถในการละลายน้ำได้น้อยมาก ๆ และยังช่วยเพิ่มความทึบน้ำให้กับคอนกรีต ดังนั้นชั้นของของแข็งที่เกิดขึ้นจะสามารถเป็นเครื่องป้องกันไอออนของคลอไรด์ (Cl^-) จากน้ำทะเลได้

การป้องกันการเกิดสนิมด้วยวิธี Electrodeposition สามารถกระทำได้โดยผ่านไฟฟ้ากระแสตรงระหว่างเหล็กเสริม (ขั้วลบ) ในคอนกรีตกับขั้วไฟฟ้า (ขั้วบวก) ที่ติดตั้งอยู่อีกบริเวณหนึ่งได้ทะเล ดังแสดงในภาพประกอบ 8 เนื่องจากคอนกรีตเป็นตัวนำไฟฟ้า ดังนั้นชั้นของของแข็งจากปฏิกิริยาไฟฟ้าจึงสะสมอยู่บนผิวส่วนที่จมน้ำของโครงสร้างคอนกรีต

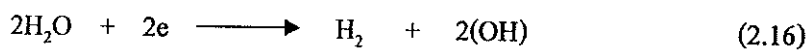
ขบวนการนี้ยังช่วยซ่อมแซมรอยแตกเพราะการสะสมของของแข็งจากปฏิกิริยาไฟฟ้า มีแนวโน้มที่จะสะสมรอบรอยแตกเร็ว เนื่องจากความนำไฟฟ้าบริเวณรอยแตกจะสูงกว่าบริเวณอื่น วิธีการป้องกันการเกิดสนิมด้วยวิธีการนี้เหมาะสำหรับโครงสร้างที่อยู่ใต้ทะเล



ภาพประกอบ 8 วิธีป้องกันเหล็กเสริมด้วยวิธี Electrodeposition

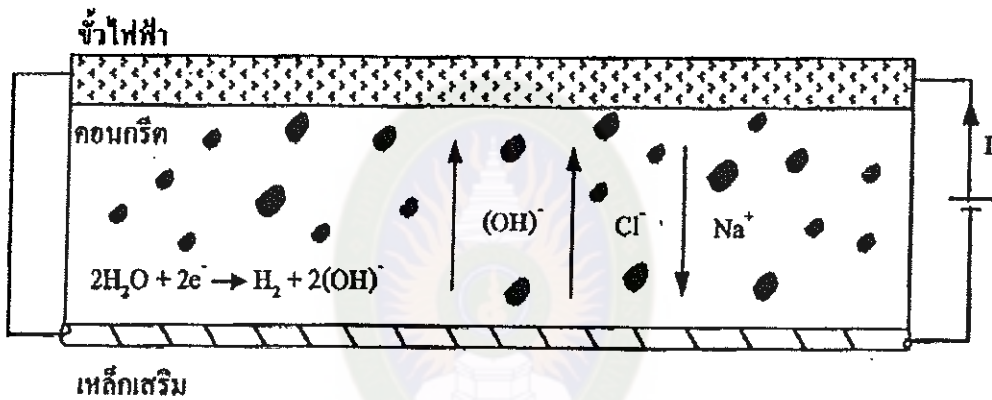
ที่มา : คณะอนุกรรมการคอนกรีตและวัสดุ. 2543 : 40-46

2.3 Desalination and Realkalization เป็นวิธีการป้องกันการเกิดสนิมที่ไม่ซับซ้อน โดยมีหลักการคือ เมื่อแท่งคอนกรีตที่มีไอออนของคลอไรด์ (Cl) ถูกวางอยู่ระหว่างขั้วไฟฟ้า 2 ขั้ว ไอออนของคลอไรด์ซึ่งมีประจุลบเคลื่อนที่ไปสู่ขั้วบวก และถ้าแรงดันไฟฟ้าสูงพอไอออนของคลอไรด์จะเคลื่อนที่ออกจากคอนกรีตไปสะสมในขั้วบวก ในขณะที่เดียวกันที่บริเวณเหล็กเสริมที่เป็นขั้วลบ อิเล็กตรอนก็จะรวมตัวกันกับน้ำ ทำให้เกิดเป็นก๊าซไฮโดรเจนและไฮดรอกซิลไอออน ดังแสดงในสมการ 2.16



ซึ่งทำให้บริเวณรอบเหล็กเสริมมีความเป็นด่างสูงขึ้นด้วย และข้อควรระวังสำหรับวิธีการนี้คือ ถ้าแรงดันไฟฟ้าสูงมากเกินไปก๊าซไฮโดรเจน (H_2) เกิดมากเกินไปอาจทำ

ให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างผิวเหล็กกับคอนกรีตเสียหายได้ ในภาพประกอบ 9 แสดงการคิดตั้งอุปกรณ์แยกส่วนที่เป็นเกลือคลอไรด์จะถูกแยกออกจากคอนกรีตโดยการเคลื่อนที่ของไอออน เพราะขั้วบวกอยู่ภายนอกคอนกรีต ไอออนของคลอไรด์เคลื่อนที่ออกจากคอนกรีต และรวมอยู่บนขั้วบวก ดังนั้นปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตจะลดลงโดยเฉพาะอย่างยิ่งรอบผิวของเหล็กเสริมที่มีประจุลบ ในขณะเดียวกันผลผลิตจากปฏิกิริยาคือ ไฮดรอกซิลไอออนที่ผิวของเหล็กเสริมทำให้บริเวณรอบเหล็กเสริมมีความเป็นด่างสูงขึ้น ดังนั้นวิธีการนี้เป็นการช่วยเพิ่มความแข็งแรงในคอนกรีต และลดปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตไปในขณะเดียวกัน



ภาพประกอบ 9 วิธีป้องกันเหล็กเสริมด้วยวิธี Desalination and Realkalization

ที่มา : คณะอนุกรรมการคอนกรีตและวัสดุ. 2543 : 40-46

มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม
RAJABHAT MAHASARAKHAM UNIVERSITY