

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ปูนซีเมนต์และการทำปฏิกิริยา

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประกอบด้วยออกไซด์ 2 กลุ่มใหญ่ คือ ออกไซด์หลัก (Major oxides) และออกไซด์รอง (Minor oxides) ออกไซด์หลักได้แก่ แคลเซียมออกไซด์ (CaO) ซิลิกา (SiO_2) อลูมินา (Al_2O_3) และเฟอร์ริกออกไซด์ (Fe_2O_3) รวมกันประมาณ 90% ของน้ำหนักซีเมนต์ ส่วนออกไซด์รองได้แก่ แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) ออกไซด์ของอัลคาไล (Na_2O และ K_2O) ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3) ไทเทเนียมออกไซด์ (TiO_2) และฟอสฟอรัสเพนตะออกไซด์ (P_2O_5) ออกไซด์เหล่านี้จะทำปฏิกิริยากันและรวมตัวกันในระหว่างการเกิดปูนเม็ด เกิดเป็นสารประกอบที่สำคัญ 4 อย่าง ได้แก่

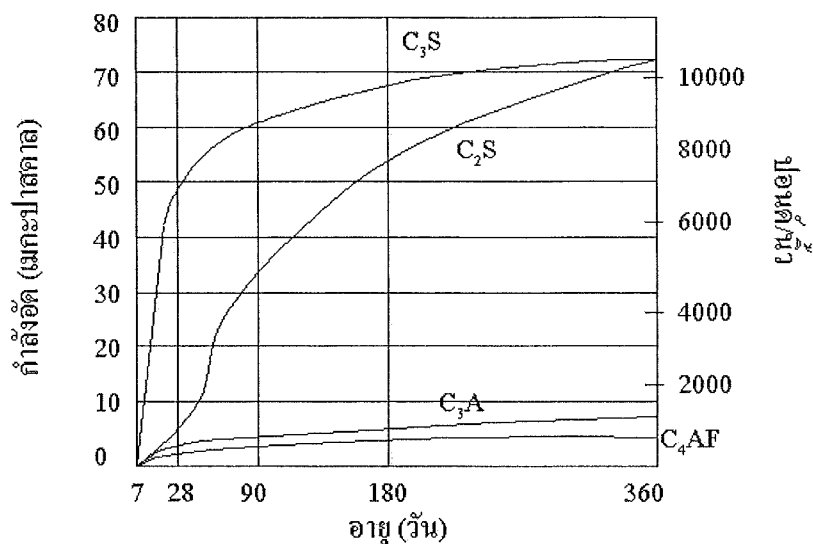
1. ไตรแคลเซียมซิลิเกต (Tricalcium silicate) $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ (C_3S)
2. ไดแคลเซียมซิลิเกต (Dicalcium silicate) $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ (C_2S)
3. ไตรแคลเซียมอลูมิเนต (Tricalcium aluminate) $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ (C_3A)
4. เตตระแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรต์ (Tetracalcium aluminoferrite) $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ (C_4AF)

ไตรแคลเซียมซิลิเกต (C_3S) จะมีอยู่มากที่สุดประมาณร้อยละ 45-55 เมื่อผสมกับน้ำจะเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันและเกิดความร้อนเรียกว่า ความร้อนของปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Heat of hydration) และเกิดการก่อตัวและแข็งตัว ไตรแคลเซียมซิลิเกต จะพัฒนาให้กำลังได้ดีในช่วง 7 วันแรก

ไดแคลเซียมซิลิเกต (C_2S) มีอยู่ในปูนซีเมนต์ร้อยละ 15-35 โดยไดแคลเซียมซิลิเกต มีอยู่ 4 รูปแบบ โดยเกิด $\alpha\text{C}_2\text{S}$ ที่อุณหภูมิ 1,450 องศาเซลเซียส และเย็นตัวลงจะแปลงสภาพเป็น $\alpha'\text{C}_2\text{S}$ ซึ่งเปลี่ยนเป็น $\beta\text{C}_2\text{S}$ ที่อุณหภูมิต่ำลง และเป็น C_2S ที่อุณหภูมิกปกติ แต่เนื่องจาก C_2S ในปูนซีเมนต์ไม่บริสุทธิ์มีสารแปลกปลอมอื่นผสมอยู่ ทำให้การแปลงสภาพจาก $\beta\text{C}_2\text{S}$ เป็น C_2S ไม่เกิดขึ้น ดังนั้น $\beta\text{C}_2\text{S}$ จะมีเสถียรภาพที่อุณหภูมิกปกติ C_2S เมื่อผสมกับน้ำจะเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน โดยจะปล่อยความร้อนของปฏิกิริยาไฮเดรชันออกมาไม่สูง และการพัฒนากำลังจะเป็นไปอย่างช้าๆ แต่ในระยะยาวจะได้กำลังใกล้เคียงกับ ไตรแคลเซียมซิลิเกต

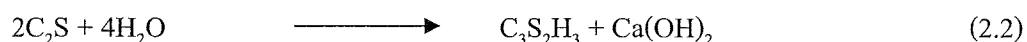
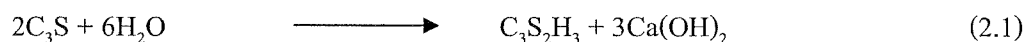
ไตรแคลเซียมอลูมิเนต (C_3A) มีอยู่ในซีเมนต์ประมาณร้อยละ 7-15 เมื่อผสมกับน้ำจะทำปฏิกิริยาทันทีและทำให้เพสต์ก่อตัวทันที แข็งตัวไว และการพัฒนากำลังจะเร็วมาก จะเกิดขึ้นภายใน 1-2 วัน แต่กำลังประลัยที่ได้มีค่าค่อนข้างต่ำ

เตตระแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรต์ (C_4AF) มีอยู่ประมาณร้อยละ 5-10 เมื่อผสมกับน้ำจะทำปฏิกิริยารวดเร็วมาก และเกิดการก่อตัวภายในไม่กี่นาที ความร้อนจากปฏิกิริยามีค่าปานกลาง การพัฒนากำลังเป็นไปอย่างรวดเร็วแต่กำลังประลัยที่ได้มีค่าต่ำ

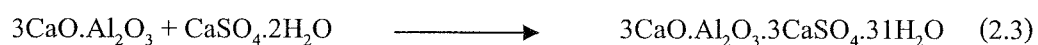


รูปที่ 2.1 การพัฒนากำลังของ C_3S , C_2S , C_3A และ C_4AF

การทำปฏิกิริยาของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ โดย C_3S และ C_2S ทำปฏิกิริยากับน้ำ ก่อให้เกิดแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) และสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต ($3CaO \cdot 2SiO_2 \cdot 3H_2O$ หรือ $C_3S_2H_3$) ที่มีหน้าที่เป็นตัวเชื่อมประสาน และให้ความแข็งแรง ดังสมการ 2.1 และ 2.2



ส่วนการทำปฏิกิริยาของ C_3A จะเกิดทันทีทันใด และก่อให้เกิดการแข็งตัวอย่างรวดเร็ว จึงมีการใส่ยิปซัม ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$) เพื่อหน่วงการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของ C_3A ไม่ให้เกิดอย่างรวดเร็ว โดยยิปซัมจะทำปฏิกิริยากับ C_3A ทำให้เกิดแคลเซียมซัลโฟอะลูมิเนตไฮเดรต (Calcium sulfoaluminate hydrate, $3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3CaSO_4 \cdot 31H_2O$) เรียกว่า เอตทริงไกต์ (Ettringite) โดยปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นการเพิ่มการขยายตัวดังสมการ 2.3



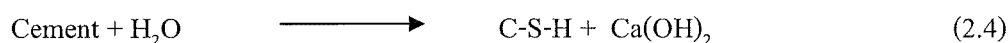
เมื่อเกิด Ettringite จะเกิดแรงดันที่มากจากการขยายตัวของของแข็ง แรงดันนี้จะทำให้ชั้นของ Ettringite แตกออก และจะเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันอีกครั้ง แต่ถ้าไอออนของซัลเฟตยังมีอยู่จะทำให้ C_3A ทำปฏิกิริยากับไอออนของซัลเฟต เกิดเป็น Ettringite อีกครั้งเข้าไปแทนที่เป็นการหน่วงปฏิกิริยาไฮเดรชันอีกครั้งหนึ่ง ขั้นตอนจะเป็นไปจนกระทั่ง ไอออนของซัลเฟตมีปริมาณไม่เพียงพอที่จะก่อให้เกิด Ettringite จะเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของ C_3A โดยเปลี่ยน Ettringite ไปเป็น แคลเซียมโมโนซัลโฟอะลูมิเนต

ส่วนของ C_4AF ทำปฏิกิริยากลาย C_3A แต่ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจะช้ากว่าและความร้อนของปฏิกิริยาน้อยกว่า ปฏิกิริยาระหว่าง C_4AF และยิปซัมทำให้เกิดแคลเซียมซัลโฟลูมิเนตและซัลโฟเฟอร์ไรต์ ผลผลิตนี้มีลักษณะเหมือนเข็มคล้ายเอททริงไกต์และเปลี่ยนเป็นแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรต์ที่มีซัลเฟตต่ำได้เช่นกัน แต่การแปลงกลับเป็นเอททริงไกต์ไม่เกิดขึ้น

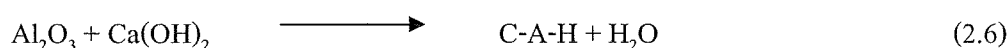
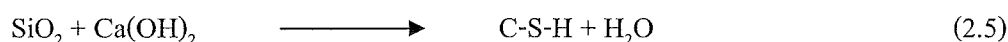
2.2 ปฏิกิริยาระหว่างปูนซีเมนต์ผสมสารปอซโซลาน

การใส่สารปอซโซลาน เช่น เถ้าลอย แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์บางส่วน ทำให้ปริมาณของสารประกอบ C_3S , C_2S , C_3A และ C_4AF ในคอนกรีตลดลง การทำปฏิกิริยาของสารซีเมนต์จะช้าลง การคายความร้อนจากปฏิกิริยาจะลดตัวออกไป เถ้าลอยมีอนุภาคขนาดเล็กและมีเม็ดทรงกลมทำให้สามารถกระจายตัวได้ดีในเพสต์ สามารถแทรกตัวเข้าไปในช่องว่างทำให้เพสต์แน่นขึ้น เถ้าลอยประกอบไปด้วย SiO_2 , Al_2O_3 และ $Ca(OH)_2$ เป็นหลัก ปฏิกิริยาหลักของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมเถ้าลอยและน้ำจะเกิดระหว่าง SiO_2 และ Al_2O_3 กับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์และน้ำ ดังสมการ 2.4 2.5 และ 2.6 โดยปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นปฏิกิริยาปอซโซลานิก (Pozzolanic reaction) โดยจะเกิดขึ้นค่อนข้างช้า

ปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration reaction)



ปฏิกิริยาปอซโซลานิก (Pozzolanic reaction)

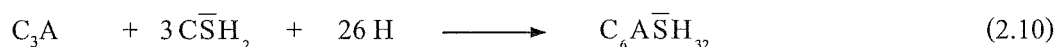
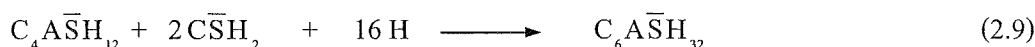
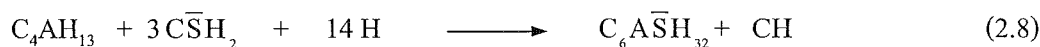


2.3 การทำลายของซัลเฟต

1. กลไกของการทำลายโดยเกลือโซเดียมซัลเฟต

กลไกนี้เริ่มต้นเมื่อเกิดปฏิกิริยาระหว่างโซเดียมซัลเฟต (Na_2S) กับ แคลเซียมไฮดรอกไซด์ (CH) ที่เป็นผลผลิตจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน ดังแสดงในสมการ 2.7 ทำให้ได้โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaH) ซึ่งทำให้ค่า pH ของซีเมนต์เพสต์สูงขึ้นเป็น 13.5 ซึ่งมากกว่าค่า pH ของสารละลาย CH อิมดัวที่มีค่าเพียง 12.4 ดังนั้นจึงเป็นการรักษาเสถียรภาพของ $C-S-H$ และ Ettringite ($C_6A\bar{S}H_{32}$) ไม่ให้ทำปฏิกิริยากลายไปเป็นผลผลิตอื่น สารยิปซัม ($C\bar{S}H_2$) ที่ได้จากสมการ 2.7 จะทำปฏิกิริยากับผลผลิตไฮเดรชันบางตัว เช่น แคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต (C_4AH_{13}) โมโนซัลเฟต ($C_4A\bar{S}H_{12}$) และ/หรือ ไตรแคลเซียมอลูมิเนต (C_3A) ที่เหลือจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน ทำให้ได้ Secondary Ettringite อีก ดังแสดงในสมการ 2.8 ถึง 2.10 เนื่องจากโดยธรรมชาติแล้ว Ettringite จะมีความหนาแน่นต่ำกว่าผลผลิตของปฏิกิริยาไฮเดรชันชนิดอื่น

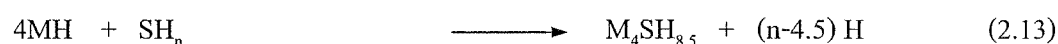
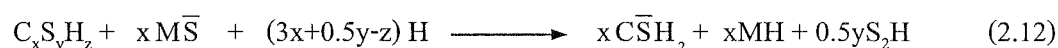
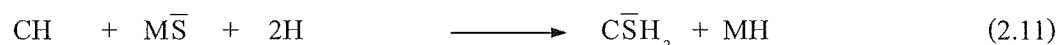
มาก จึงทำให้เกิดการขยายตัว ดังนั้นผลที่เกิดจากการทำลายโดยโซเดียมซิลเฟตจึงเป็นการขยายตัวและการแตกร้าวของคอนกรีต



โดยที่ C = CaO, N = Na₂O, M = MgO, S = SiO₂, $\bar{\text{S}}$ = SO₃, H = H₂O

2. กลไกของการทำลายโดยเกลือแมกนีเซียมซิลเฟต

กลไกการทำลายเริ่มต้นจากปฏิกิริยาในสมการ 2.11 อย่างไรก็ตาม MH ที่เกิดขึ้นนี้ไม่เหมือนกับ NH ตรงที่มีความสามารถในการละลายน้ำที่น้อยมาก และค่า pH ของสารละลาย MH ที่อิ่มตัวมีค่า 10.5 ดังนั้นจึงทำให้ทั้ง C-S-H และ Ettringite ไม่มีเสถียรภาพ



ดังนั้นกลไกในการทำลายโดยแมกนีเซียมซิลเฟตจะเริ่มต้นจากสมการ 2.12 ถึง 2.13 โดยการเปลี่ยน C-S-H เป็น M-S-H ซึ่งไม่มีความสามารถในการประสานเลย การทำลายดังกล่าวจะทำให้เกิดการอ่อนตัวและเสื่อมสภาพของผิวซีเมนต์เพสต์ที่แข็งตัว และเกิดการสะสมของยิปซัมและ Brucite อย่างไรก็ตามที่จุด Brucite จะถูกเปลี่ยนไปเป็น M-S-H ดังแสดงในสมการ 2.13 โดยที่ไม่เกิดการขยายตัวมาก อย่างไรก็ตามการทำลายโดยโซเดียมซิลเฟต

2.4 การทำลายของคลอไรด์

คลอไรด์เป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เกิดการกัดกร่อนของเหล็กเสริม โดยไอออนของคลอไรด์ (Chloride ions) เป็นตัวการที่ทำให้ชั้นฟิล์มที่ป้องกันเหล็กเสริมไม่ให้เกิดสนิม (Passive film) สลายไปหลังจากที่ปริมาณคลอไรด์ที่ผิวเหล็กเสริมมีค่าถึงคลอไรด์วิกฤต (Chloride threshold) แล้วหากมีน้ำหรือออกซิเจนเพียงพอจะทำให้เหล็กเสริมเกิดสนิมได้

แหล่งที่มาของคลอไรด์

คลอไรด์อาจมีอยู่ในคอนกรีตเอง เช่น อยู่ใน น้ำที่ผสม หิน และทราย หรือน้ำยาผสมคอนกรีตบางชนิด เช่น แคลเซียมคลอไรด์ที่มักมีอยู่ในสารเร่งการก่อตัว แต่ปัญหาของคลอไรด์ที่มีผลกระทบต่อ

ความทนทานของคอนกรีตนั้น ส่วนมากจะมาจากภายนอกคอนกรีตในช่วงใช้งานซึ่งคลอไรด์อาจเข้าสู่คอนกรีตได้โดยวิธี เช่น การซึมผ่านคอนกรีตที่แห้งของน้ำที่มีคลอไรด์ การแพร่ของไอออนคลอไรด์ จากภายนอกที่มีความเข้มข้นของคลอไรด์สูงกว่าภายในของคอนกรีต และการซึมผ่านเข้าไปในคอนกรีตของน้ำที่มีคลอไรด์โดยแรงดันน้ำ เป็นต้น

โดยทั่วไปแล้วแหล่งของคลอไรด์ที่มีผลกระทบต่อโครงสร้างคอนกรีตนั้นมาจากน้ำทะเล สำหรับคอนกรีตที่แช่อยู่ในน้ำทะเลตลอดเวลา นั้น ถึงแม้ว่าคลอไรด์จะซึมเข้าไปในคอนกรีตได้ดี แต่ถ้าไม่มีออกซิเจนเพียงพอ การเกิดสนิมของเหล็กเสริมก็ไม่สามารถเกิดขึ้นได้จึงไม่เป็นปัญหามาก ส่วนที่มีความเสี่ยงสูงที่จะเกิดการกัดกร่อนของเหล็กเสริมมากที่สุด มักพบในบริเวณคลื่นละอองน้ำ ร่องลงมากที่เป็นบริเวณบรรยากาศทะเล และบริเวณน้ำขึ้นน้ำลง

ในกรณีสภาพเปียกสลับแห้งนั้น น้ำทะเลจะเข้าสู่คอนกรีตที่แห้งโดย Absorption หรือ Capillary suction จนกระทั่งคอนกรีตอยู่ในสภาพที่อิ่มตัว เมื่อสภาพภายนอกเปลี่ยนเป็นแห้งน้ำที่ผิวคอนกรีตจะระเหยออกไป เหลือไว้แต่คราบเกลือ เมื่ออยู่ในสภาพเปียกอีกครั้งความเข้มข้นของคลอไรด์ที่ผิวก็จะสูงขึ้น ดังนั้นความเข้มข้นของไอออนของคลอไรด์จึงมีความเข้มข้นสูงที่บริเวณผิวของคอนกรีต และจะทำให้คลอไรด์บริเวณใกล้ผิวมีความเข้มข้นสูงขึ้นเรื่อยๆ และจะเข้าสู่คอนกรีตมากขึ้นเรื่อยๆ ซึ่งภายในคอนกรีตนั้นไม่สามารถทำให้แห้งได้โดยสมบูรณ์ ดังนั้นการแพร่ของไอออนคลอไรด์เข้าไปในคอนกรีตแบบที่สภาพเปียกสลับแห้งใช้เวลาเร็วกว่าคอนกรีตที่แช่อยู่ในน้ำตลอดเวลา

การเคลื่อนตัวของไอออนของคลอไรด์ไปนคอนกรีตนั้น ขึ้นอยู่กับระยะเวลาของสภาพเปียกและแห้ง ซึ่งขึ้นอยู่กับสถานที่และสภาพแวดล้อมเช่น อุณหภูมิ ความชื้น การไหลของน้ำ ทิศทางลม ทิศทางแสงอาทิตย์ และการใช้งานของโครงสร้าง โดยทั่วไปแล้วคอนกรีตที่สภาพแห้งนานกว่าสภาพเปียกมักจะเร่งให้อิออนของคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีตได้เร็วขึ้น ดังนั้นคอนกรีตที่ถูกน้ำทะเลเป็นบางครั้งก็เวลาช่วงแห้งนานๆ จะมีโอกาสเกิดปัญหาการกัดกร่อนของเหล็กเสริมได้มากกว่าคอนกรีตที่ถูกน้ำทะเลเป็นบางครั้งแต่เวลาช่วงแห้งสั้นๆ การกัดกร่อนของคลอไรด์จะเกิดขึ้นต่อเมื่อ ปริมาณไอออนของคลอไรด์ มีมากพอที่ผิวของเหล็กเสริม ซึ่งทำให้ค่าความเป็นด่างของคอนกรีตบริเวณรอบเหล็กเสริมลดต่ำลงจนถึงระดับวิกฤต

สถานะคลอไรด์ในคอนกรีต

คลอไรด์เมื่ออยู่ในคอนกรีตนั้นจะเรียกว่า คลอไรด์ทั้งหมด (Total chloride) โดยจะมีบางส่วนที่ถูกจับยึดไว้ เรียกว่า คลอไรด์ที่ถูกยึดจับ (Fixed chloride) โดยกลไกการยึดจับสามารถแบ่งได้ดังนี้

1. การยึดจับทางเคมี (Chemical binding) คลอไรด์บางส่วนจะถูกจับโดยผลผลิตของปฏิกิริยาไฮเดรชัน เช่น ผลผลิตของ C_3A และ C_4AF ในรูปของ $3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot CaCl_2 \cdot 10H_2O$ (Fridel's salt) หรือ $3CaO \cdot Fe_2O_3 \cdot CaCl_2 \cdot 10H_2O$ (Calcium chloroferrite) หรือแม้แต่ว่าอยู่ในโครงสร้างของผลผลิตของปฏิกิริยาไฮเดรชัน

2. การยึดจับทางกายภาพ (Physical binding) คลอไรด์บางส่วนสามารถถูกยึดด้วยแรงทางกายภาพ (Surface force) ได้บนผิวของผลิตภัณฑ์ไฮดรเจน เช่น C-S-H และ C-A-H เป็นต้น อีกทั้งยังสามารถถูกยึดอยู่บนผิวของวัสดุที่เป็นของแข็งที่ไม่มีปฏิกิริยา เช่นมวลรวม หรือ ผงฝุ่น ได้ ถึงแม้ปริมาณจะน้อยมากก็ตาม

คลอไรด์ส่วนใหญ่ที่ไม่ถูกจับยึดเรียกว่า คลอไรด์อิสระ (Free chloride) ซึ่งจะมีสภาพเป็นสารละลายอยู่ในน้ำที่อยู่ช่องว่างของคอนกรีต (Pore solution) คลอไรด์อิสระนี้เป็นส่วนของคลอไรด์ที่สามารถแพร่เข้าไปยังคอนกรีตที่มีความเข้มข้นคลอไรด์อิสระต่ำกว่า และเป็นส่วนที่ทำให้ความเป็นด่างในคอนกรีตลดลง ดังถ้ายึดจับคลอไรด์ไว้ได้เป็นจำนวนมากก็จะสามารถยืดระยะเวลาของการเกิดสนิมในเหล็กเสริมออกไปได้

การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีต

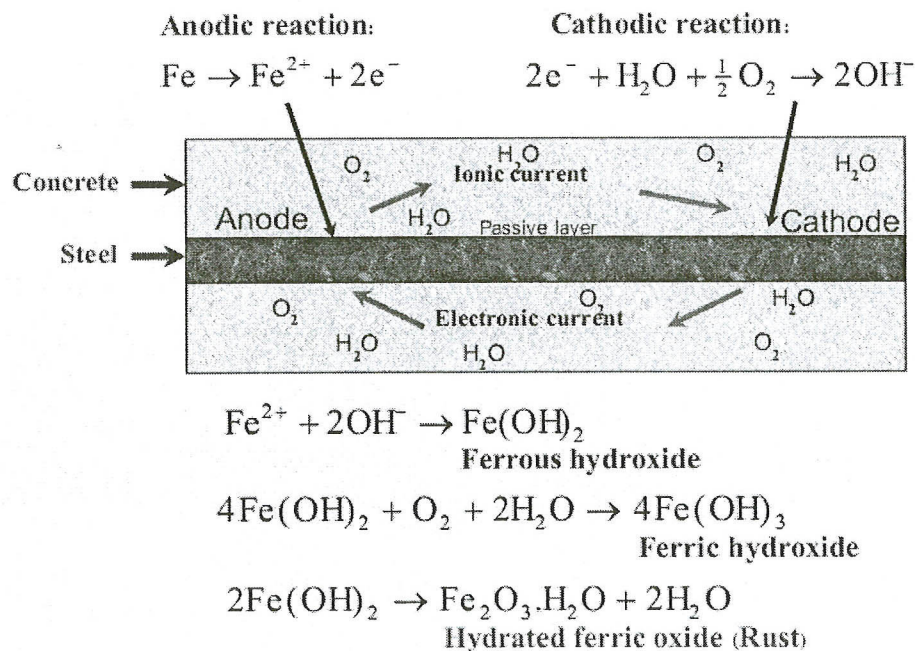
การเคลื่อนที่ของคลอไรด์ผ่านเข้าไปยังเนื้อคอนกรีตถือเป็นสิ่งสำคัญ เนื่องจากคลอไรด์สามารถเข้าไปทำปฏิกิริยากับส่วนประกอบของคอนกรีต ซึ่งมีผลต่อความคงทนของคอนกรีตทั้งทางตรงและทางอ้อม และนำไปสู่การเสื่อมสภาพของโครงสร้างคอนกรีต โดยทั่วไปแล้วการเคลื่อนที่ของคลอไรด์ เรียกว่า การแทรกซึมของคลอไรด์ (Chloride penetration) สามารถเกิดขึ้นจากสาเหตุต่างๆ เช่น ความแตกต่างของความเข้มข้น แรงดันน้ำ และประจุไฟฟ้า นอกจากนั้นยังขึ้นอยู่กับแรงขับเคลื่อนของกลไกและธรรมชาติของสารที่เคลื่อนผ่าน ดังนั้นกลไกสำคัญของการแทรกซึมของคลอไรด์เข้าไปยังเนื้อคอนกรีตสามารถแบ่งได้เป็น 4 กลไก ดังนี้

1. การแพร่ (Diffusion) เกิดจากการที่ระดับความเข้มข้นของคลอไรด์ไอออนในสิ่งแวดล้อมภายนอกของคอนกรีตมากกว่าความเข้มข้นของคลอไรด์ไอออนในบริเวณรูพรุนของคอนกรีต จะเกิดกลไกการแพร่ขึ้น โดยคลอไรด์ไอออนในสิ่งแวดล้อมภายนอกจะแพร่เข้ามาในตัวคอนกรีตซึ่งมีความเข้มข้นต่ำกว่า เป็นไปตามกฎข้อที่ 2 ของฟิคส์ (Fick's second law of diffusion)
2. การดึงดูดแบบคาปิลลารี (Capillary suction) การดึงดูดแบบคาปิลลารีจะเกิดขึ้นเมื่อมีการผ่านเข้าไปของน้ำเค็มที่มีเกลือคลอไรด์เข้าไปในรูพรุนหรือโพรงช่องว่าง (Pore) เล็กๆ ที่อยู่ในคอนกรีต ซึ่งกลไกที่ดูดน้ำเค็มเก็บไว้ในรูพรุนของคอนกรีตนี้เรียกว่า การดึงดูดแบบคาปิลลารี และการแทรกซึมของคลอไรด์จากวงจรสภาวะเปียกและสภาวะแห้ง (Cyclic wetting and drying) ก็คือการดึงดูดแบบคาปิลลารีนั่นเอง
3. การดึงดูดไอออน (Ion adsorption) การดึงดูดไอออนเกิดขึ้นเพราะผลจากบริเวณผนังของโพรงช่องว่าง (Pore wall) ในคอนกรีตมีคุณสมบัติทางศักย์ไฟฟ้าเป็นประจุบวก จึงได้ดึงดูดคลอไรด์ไอออนที่เป็นประจุลบเข้ามา สำหรับโครงสร้างที่มีความพรุนสูง คอนกรีตจะมีค่าการดึงดูดไอออนที่สูงกว่าคอนกรีตที่มีความพรุนต่ำกว่า ดังนั้นการลดความพรุนในตัวโครงสร้างคอนกรีตเองก็เป็นอีกวิธีหนึ่งที่จะป้องกันการแทรกซึมของคลอไรด์ได้

4. ความดันน้ำ (Hydraulic pressure) โครงสร้างที่อยู่ภายใต้ความดันน้ำ เช่น กำแพงกันดิน อุโมงค์ เื่อนริมทะเล เป็นต้น ความแตกต่างของ Hydraulic head จะทำให้บริเวณที่ Hydraulic head สูง ผลักดันน้ำเข้าไปยังบริเวณที่มี Hydraulic head ต่ำกว่า ซึ่งจะนำพาคลอไรด์ไอออนเข้าสู่โครงสร้างคอนกรีตด้วย

ปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีของการผุกร่อนของเหล็กเสริมในคอนกรีต

เกลือคลอไรด์เมื่อเข้าไปในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กแล้วจะถูกแบ่งออกเป็นสองประเภท คือ คลอไรด์ที่ถูกยึดจับ (Fixed chloride) และคลอไรด์อิสระ (Free chloride) ทั้งนี้เฉพาะเกลือคลอไรด์อิสระเท่านั้นที่สามารถเคลื่อนที่ลึกเข้าไปในคอนกรีตได้ โดยเมื่อสะสมตรงบริเวณผิวหน้าเหล็กเสริมในคอนกรีตจนมีปริมาณมากพอถึงค่าระดับคลอไรด์วิกฤต (Chloride threshold level) ชั้นฟิล์มที่ปกป้องออกไซด์กันเหล็กเสริม (Passive film layer) ก็จะสลายตัว เหล็กเสริมก็สามารถทำปฏิกิริยากับออกซิเจนและน้ำในคอนกรีตตามกระบวนการไฟฟ้าเคมีดังรูปที่ 2.2 เกิดเป็นสนิม (Rust) ขึ้นมา และมีการสูญเสียเนื้อเหล็กเนื่องจากการผุกร่อน (Corrosion) เกิดขึ้น ซึ่งทำให้พื้นที่หน้าตัดเหล็กเสริมน้อยลง เมื่อรับน้ำหนักบรรทุกอาจทำให้โครงสร้างวิบัติได้

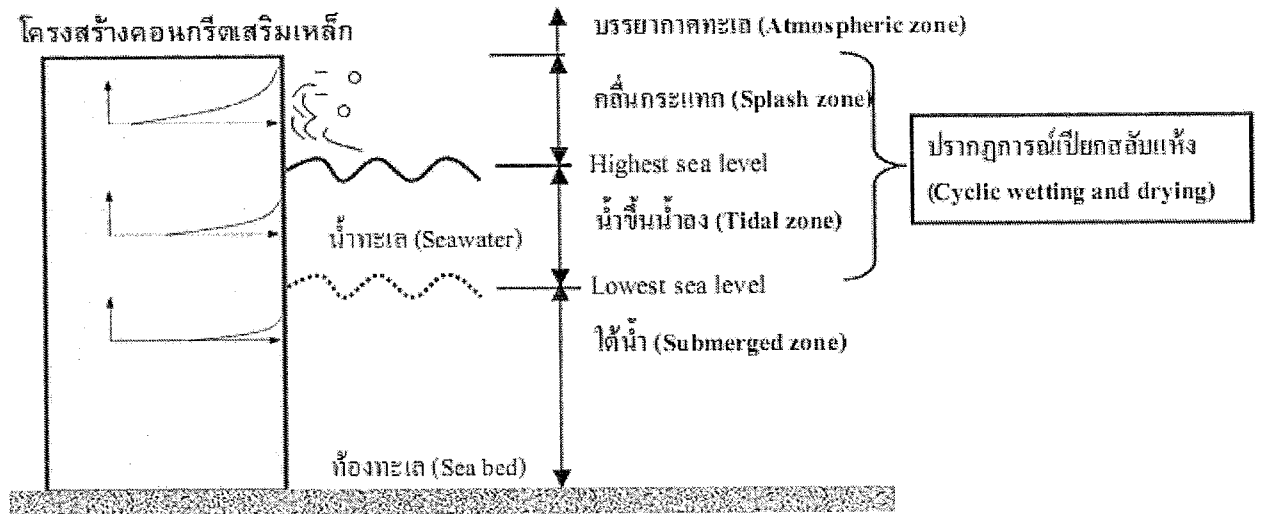


รูปที่ 2.2 แผนภาพแสดงปฏิกิริยาทางไฟฟ้าเคมีของการเกิดสนิมของเหล็กเสริม

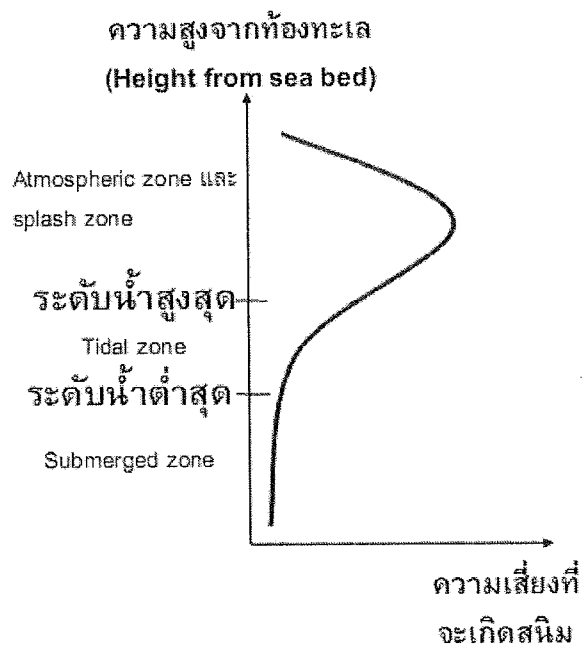
ความเสี่ยงที่จะเกิดสนิมของโครงสร้างในสิ่งแวดล้อมทะเล

ทั้งนี้ความเสียหายของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กอันเนื่องมาจากการผุกร่อนของเหล็กเสริมเนื่องมาจากเกลือคลอไรด์จะเกิดมากที่สุด ในบริเวณละอองคลื่น (Splash zone) และบริเวณน้ำขึ้นน้ำลง (Tidal zone) เนื่องจากได้รับอิทธิพลของปรากฏการเปียกสลับแห้ง (Cyclic wetting and drying) ดัง

รูปที่ 2.3 รองลงมาคือส่วนโครงสร้างที่จมอยู่บริเวณใต้น้ำทะเล (Submerged zone) มักไม่พบปัญหาการกัดกร่อนเหล็กเสริมอันเนื่องมาจากคลอไรด์ เนื่องจากมีปริมาณออกซิเจนที่สามารถเข้าไปทำปฏิกิริยาออกซิเดชันต่ำ ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.3 รูปแสดงชั้นบริเวณในสิ่งแวดล้อมทะเล



รูปที่ 2.4 ความเสี่ยงที่จะเกิดสนิมของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กในแต่ละบริเวณ