

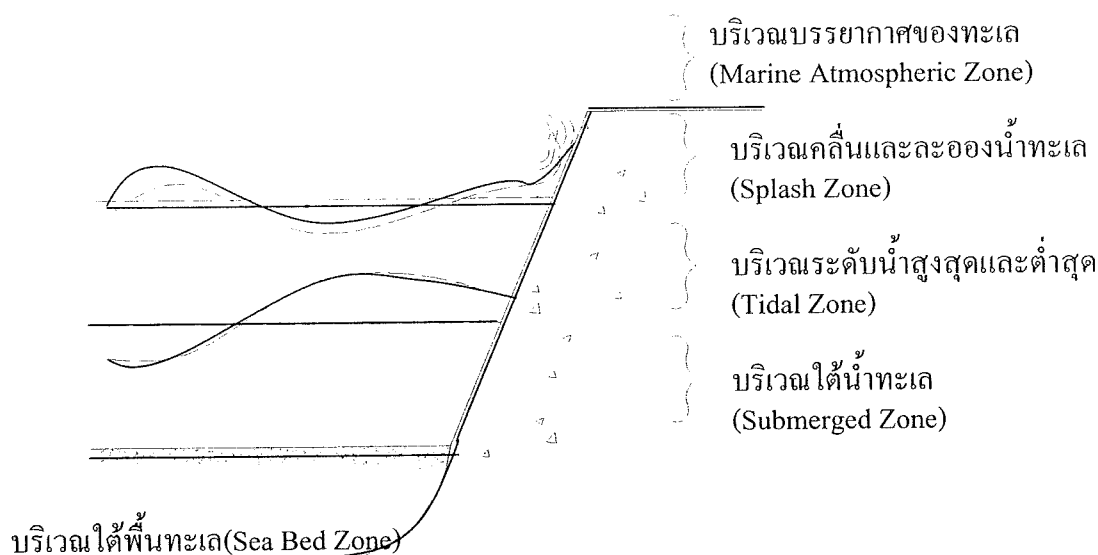
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

บทนี้จะกล่าวถึงผลกระทบของน้ำทะเลที่มีต่อคอนกรีต, กลไกการกัดกร่อนเนื่องจากคลอไรด์ ที่ส่งผลให้เหล็กเสริมในคอนกรีตเป็นสนิม, การกัดกร่อนเนื่องจากซัลเฟต, วัสดุปอซโซลาน, ปฏิกิริยาปอซโซลาน, เถ้าถ่านหิน, การป้องกันการกัดกร่อนของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กบริเวณชายฝั่งทะเลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ความเสียหายของโครงสร้างคอนกรีตในทะเล

โครงสร้างของคอนกรีตในน้ำทะเลและบริเวณชายฝั่งเป็นส่วนที่ต้องเผชิญกับสภาพแวดล้อมที่แปรปรวนส่งผลให้การกัดกร่อนเกิดขึ้นค่อนข้างสูงไม่ว่าจะเป็นการกัดกร่อนเนื่องจากสภาพแวดล้อมทางกายภาพโดยการได้รับแรงกระทำจากคลื่น ทราบ กรวดโดยตรง ซึ่งส่งผลให้เกิดการสึกกร่อนที่ผิวคอนกรีตหรือการกัดกร่อนที่เกิดจากกระบวนการทางเคมีที่เกิดขึ้นเนื่องจากสารประกอบเคมีซึ่งเป็นองค์ประกอบในน้ำทะเล โดยการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นในแต่ละบริเวณจะมีความรุนแรงที่แตกต่างกันทั้งนี้ขึ้นอยู่กับสารเคมีที่เป็นองค์ประกอบในน้ำทะเลและสภาพแวดล้อมทางกายภาพ เช่น ความแปรปรวนของระดับน้ำทะเล ความแรงและการพัดพาของคลื่น ตลอดจนสิ่งแวดล้อมภายนอกที่มีอิทธิพลต่อการเกิดปฏิกิริยาในกระบวนการกัดกร่อนทางเคมีต่อโครงสร้างคอนกรีต ดังแสดงในรูปที่ 2.1 โดยบริเวณบรรยากาศของทะเล (Marine Atmospheric Zone) เป็นบริเวณที่ไม่ได้รับแรงกระทำและสัมผัสกับน้ำทะเลโดยตรงอาจอยู่ห่างไกลจากทะเลหลายกิโลเมตร ความเสียหายที่เกิดขึ้นจะเป็นผลเนื่องจากเกลือคลอไรด์ที่มีในอากาศ เกิดการพัดพาโดยลมสัมผัสกับเนื้อคอนกรีต เกิดการแพร่ของอออนคลอไรด์ (Chloride Ions) เข้าไปในเนื้อคอนกรีตในบริเวณที่มีรอยแตกร้าวหรือมีความพรุน ส่งผลให้เกิดสนิมในเหล็กเสริมเร็วขึ้นและเกิดการขยายตัวดันคอนกรีตให้แตกร้าวเสียหาย บริเวณคลื่นและละอองน้ำทะเล (Splash Zone) บริเวณนี้จะได้รับแรงกระทำค่อนข้างแรงส่งผลให้เกิดรอยปริแตกเล็ก ๆ ทำให้คลอไรด์และความชื้นซึมผ่านเข้าไปถึงเหล็กเสริมส่งผลให้เกิดสนิมในเหล็กเสริมได้ค่อนข้างสูง เนื่องจากเป็นบริเวณที่มีออกซิเจนอยู่เป็นจำนวนมาก ประกอบกับการซึมผ่านของคลอไรด์ที่เร่งให้เกิดสนิมเหล็กมากขึ้น โดยความเสียหายที่เกิดขึ้นในบริเวณนี้จะเป็นผลเนื่องจากคลอไรด์เป็นหลัก และการกัดกร่อนเนื่องจากซัลเฟตจะมีน้อยมาก บริเวณที่สัมผัสกับน้ำทะเลในลักษณะเปียกและแห้งสลับกัน (Tidal Zone) จะได้รับผลกระทบทั้งจากคลื่น กรวด ทราบ ที่กระทำ ตลอดจนผลกระทบจากการกัดกร่อนเนื่องจากกระบวนการทางเคมีทั้งคลอไรด์และซัลเฟต ซึ่งน้ำทะเลจะเข้าสู่เนื้อคอนกรีตที่แห้งโดยการซึมผ่าน (Absorption) จนคอนกรีตอยู่ในสภาพอิ่มตัวและเมื่อสภาพแวดล้อมเปลี่ยนเป็นแห้งจะมีคราบเกลือที่ติดผิวคอนกรีตโดยเกลือของสารประกอบต่างๆ เมื่ออยู่ในสถานะของแข็งจะไม่เป็นอันตรายต่อโครงสร้างคอนกรีต แต่เมื่อกลับมา

สภาพเปียกอีกครั้ง จะได้เป็นสารละลายคลอไรด์ซึ่งมีความเข้มข้นมากขึ้นและแพร่เข้าไปในเนื้อคอนกรีตมากขึ้นซึ่งเมื่อน้ำลดคอนกรีตจะสัมผัสกับออกซิเจนและคลอไรด์ที่มีเข้มข้นอยู่แล้วในเนื้อคอนกรีตจะเร่งให้เกิดสนิมเหล็กมากขึ้น ความเสียหายที่เกิดขึ้นในสภาพแวดล้อมแบบนี้มีความรุนแรงมากขึ้นในกรณีที่ช่วงเวลาที่คอนกรีตแห้งนาน [2-4] และนอกจากนั้นบริเวณนี้ยังได้รับผลกระทบจากการกัดกร่อนของซัลเฟตอีกด้วย ดังนั้นการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นต่อโครงสร้างในสภาวะนี้ค่อนข้างสูง ซึ่งการศึกษาถึงกระบวนการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นตลอดจนการศึกษาถึงแนวทางในการป้องกันและต้านทานการกัดกร่อนเป็นสิ่งที่จะต้องให้ความสำคัญและพัฒนาข้อมูลให้ชัดเจนมากขึ้น ส่วนบริเวณที่อยู่ใต้น้ำ (Submerged Zone) การกัดกร่อนที่เกิดขึ้นจะมีความรุนแรงน้อยกว่า เนื่องจากไม่ได้รับผลกระทบที่รุนแรงจากคลื่นประกอบกับการซึมผ่านของออกซิเจนเข้าไปเร่งการเกิดสนิมในเหล็กเสริมมีน้อยมาก ถึงแม้ความเข้มข้นของคลอไรด์จะมีสูงแต่ถ้าไม่ได้สัมผัสกับออกซิเจนก็จะไม่เกิดสนิมในเหล็กเสริม แต่การกัดกร่อนที่เกิดขึ้นเป็นผลเนื่องจากซัลเฟตที่เกิดปฏิกิริยากับซีเมนต์เพสต์โดยตรง



รูปที่ 2.1 ชนิดของสิ่งแวดล้อมทะเล

2.2 กระบวนการกัดกร่อนทางเคมีเนื่องจากสารประกอบซัลเฟตต่อคอนกรีต

ในน้ำทะเลจะมีส่วนประกอบของเกลือของสารประกอบต่างๆ หลายชนิดโดยส่วนประกอบหลักๆ จะเป็นเกลือของคลอไรด์และซัลเฟต โดยมีสารประกอบของคลอไรด์มากที่สุด ซึ่งการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นเนื่องจากคลอไรด์จะมีความรุนแรงมากในกรณีที่เป็คอนกรีตเสริมเหล็กเนื่องจากคลอไรด์จะเร่งให้เกิดสนิมในเหล็กเสริมมากขึ้น ส่วนสารประกอบซัลเฟตจะพบรองลงมาและการกัดกร่อนที่

เกิดขึ้นจะเกิดกับซีเมนต์เพสต์ โดยทำให้คอนกรีตเกิดการแตกร้าวและเสียหายซึ่งจะได้กล่าวละเอียดต่อไป ในงานวิจัยฉบับนี้จะให้ความสำคัญกับการศึกษาการกัดกร่อนของน้ำทะเลต่อคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินซึ่งตัวอย่างทดสอบเป็นคอนกรีตที่ไม่มีเหล็กเสริม การกัดกร่อนที่เกิดขึ้นจะเป็นผลเนื่องจากสารประกอบซัลเฟตมากกว่า ดังนั้นจึงมุ่งประเด็นการศึกษาไปที่การกัดกร่อนเนื่องจากสารประกอบซัลเฟตในน้ำทะเล เป็นหลัก

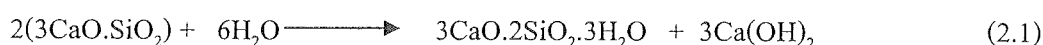
2.2.1 กระบวนการกัดกร่อนของสารประกอบซัลเฟตต่อคอนกรีต

เกลือซัลเฟตที่พบในธรรมชาติและเป็นอันตรายต่อโครงสร้างคอนกรีตได้แก่ โซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) แมกนีเซียมซัลเฟต (MgSO_4) และแคลเซียมซัลเฟต (CaSO_4) โดยเฉพาะในน้ำทะเลจะพบแมกนีเซียมซัลเฟตเป็นส่วนใหญ่ ซึ่งโดยทั่วไปแล้วคอนกรีตจะมีส่วนผสมของมวลรวมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์แต่มวลรวมจะมีผลในการทำปฏิกิริยากับซัลเฟตน้อยมาก ดังนั้นจึงนำมาเสนอเฉพาะกระบวนการกัดกร่อนที่เกิดจากปฏิกิริยาระหว่างปูนซีเมนต์กับซัลเฟตเท่านั้น

2.2.1.1 ปฏิกิริยาไฮเดรชัน

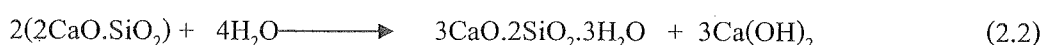
เป็นที่ทราบกันอยู่แล้วว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประกอบไปด้วยสารประกอบหลักอยู่ 4 ชนิดได้แก่ ไตรแคลเซียมซิลิเกต ($3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$) หรือ C_3S ไดแคลเซียมซิลิเกต ($2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$) หรือ C_2S ไตรแคลเซียมอลูมิเนต ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$) หรือ C_3A และเตตระแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรต์ ($4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$) หรือ C_4AF โดย C_3S เมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำจะให้ความแข็งแรงกับคอนกรีตในระยะแรกๆ สูง และเกิดความร้อนในคอนกรีตสูงด้วย C_2S จะให้ความแข็งแรงกับคอนกรีตในระยะแรกๆ ต่ำและให้กำลังสูงขึ้นในระยะหลัง ส่วน C_3A และ C_4AF ให้ความแข็งแรงกับคอนกรีตน้อยมากและเมื่อแข็งตัวจะก่อให้เกิดปัญหาการกัดกร่อนของคอนกรีตเนื่องจากซัลเฟต แต่จำเป็นต้องมี C_3A และ C_4AF เป็นส่วนประกอบของปูนซีเมนต์เสมอเนื่องจากเป็นฟลักซ์ในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ โดยทำให้อุณหภูมิในการเผาไหม้ต่ำลงและเสียค่าใช้จ่ายในการผลิตต่ำลง เมื่อปูนซีเมนต์ผสมกับน้ำจะเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันตามสมการที่ 2.1 ถึง 2.3 ดังนี้

ปฏิกิริยาไฮเดรชันระหว่างไตรแคลเซียมซิลิเกตกับน้ำ



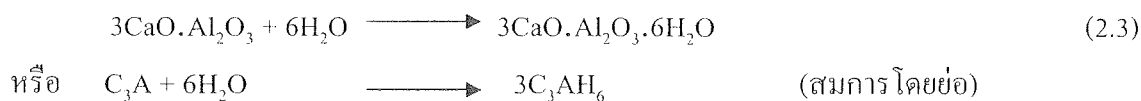
หรือ $2\text{C}_3\text{S} + 6\text{H}_2\text{O} \longrightarrow \text{C-S-H} + 3\text{Ca}(\text{OH})_2$ (สมการโดยย่อ)

ปฏิกิริยาไฮเดรชันระหว่างไดแคลเซียมซิลิเกต กับน้ำ



หรือ $2\text{C}_2\text{S} + 4\text{H}_2\text{O} \longrightarrow \text{C-S-H} + 3\text{Ca}(\text{OH})_2$ (สมการโดยย่อ)

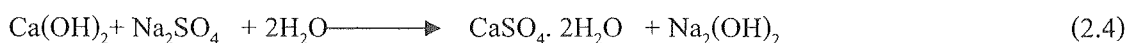
ปฏิกิริยาระหว่างไตรแคลเซียมอลูมิเนตกับน้ำ



ผลของปฏิกิริยาตามสมการที่ 2.1 และ 2.2 ได้แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต ($3\text{CaO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$) หรือชื่อย่อ C-S-H เป็นสารประกอบที่มีลักษณะเป็นเจล (gel) มีคุณสมบัติในการเชื่อมประสานและให้กำลังแก่คอนกรีตขณะที่แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) เป็นสารที่อาจก่อให้เกิดอันตรายต่อคอนกรีตเนื่องจากสารประกอบนี้จะทำปฏิกิริยากับสารละลายซัลเฟตต่างๆซึ่งกลไกการเกิดปฏิกิริยาและกระบวนการกัดกร่อนจะกล่าวต่อไป แต่อย่างไรก็ตาม $\text{Ca}(\text{OH})_2$ มีคุณสมบัติเป็นด่างอย่างมากคือมี pH ประมาณ 12.5 ซึ่งมีส่วนช่วยป้องกันการเกิดสนิมในเหล็กเสริมได้เป็นอย่างดี ส่วนปฏิกิริยาตามสมการที่ 2.3 จะได้สารแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$) หรือชื่อย่อ C-A-H เป็นสารที่มีรูปร่างเป็นแท่งลูกบาศก์และให้กำลังคอนกรีตเพียงเล็กน้อย แต่จะทำปฏิกิริยากับสารละลายซัลเฟตก่อให้เกิดปัญหาในการขยายตัวและแตกร้าวในคอนกรีต

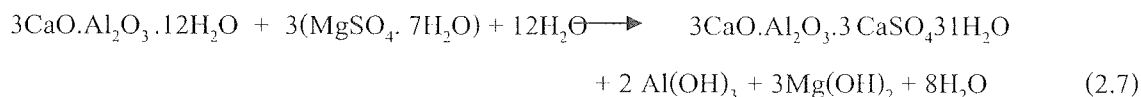
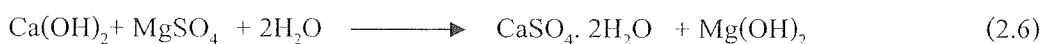
2.2.1.2 กระบวนการเกิดปฏิกิริยาของโซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) ต่อการกัดกร่อนคอนกรีต

เริ่มต้นจากปฏิกิริยาระหว่างโซเดียมซัลเฟตกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เป็นผลจากปฏิกิริยาไฮเดรชันตามสมการที่ (2.1) และ (2.2) ทำให้ได้โซเดียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Na}_2(\text{OH})_2$) และแคลเซียมซัลเฟต ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) หรือ ยิปซัม ตามสมการที่ (2.4) โดยยิปซัมจะเกิดปฏิกิริยาต่อเนื่องกับ C-A-H ซึ่งได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันตามสมการที่ (2.3) โดยปฏิกิริยาเกิดขึ้นดังสมการที่ (2.5) และบางส่วนอาจเกิดปฏิกิริยากับแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรตที่ซัลเฟตไอออนหายไป หรืออาจเกิดปฏิกิริยากับ C_3A ที่เหลือจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน ซึ่งทั้งหมดนี้ทำให้ได้แคลเซียมซัลโฟลูมิเนต ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 31\text{H}_2\text{O}$) หรือ Ettringite



2.2.1.3 กระบวนการเกิดปฏิกิริยาของแมกนีเซียมซัลเฟต (MgSO_4) ต่อการกัดกร่อนคอนกรีต

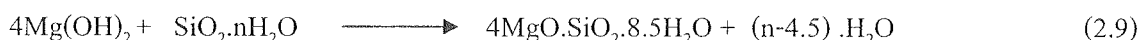
ปฏิกิริยาระหว่างแมกนีเซียมซัลเฟตกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ทำให้ได้แมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Mg}(\text{OH})_2$) และแคลเซียมซัลเฟต หรือ ยิปซัม ตามสมการที่ (2.6) จากนั้น ยิปซัมจะเกิดปฏิกิริยาต่อเนื่องกับ C-A-H ดังที่ได้กล่าวมาแล้วตามสมการที่ (2.5) ได้ผลเป็นแคลเซียมซัลโฟลูมิเนต หรือ Ettringite นอกจากนั้นแมกนีเซียมซัลเฟต (MgSO_4) ยังทำปฏิกิริยากับ C-A-H ได้เป็น แคลเซียมซัลโฟลูมิเนต อลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Al}(\text{OH})_3$) และแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Mg}(\text{OH})_2$) ตามสมการที่ (2.7) อีกด้วย



นอกจากนี้แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันยังทำปฏิกิริยากับแมกนีเซียมซัลเฟตได้เป็นยิปซัม แมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ และซิลิกาเจล ($\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$) ตามสมการที่ (2.8)



ยิปซัมที่เกิดขึ้นนี้ยังไปทำปฏิกิริยากับ C-A-H ตามสมการที่ (2.5) อีกด้วยซึ่งผลที่ได้เป็น Ettringite เหมือนเดิม ส่วนซิลิกาเจล ($\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$) ตามสมการที่ (2.8) ยังทำปฏิกิริยากับ แมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ ได้เป็น แมกนีเซียมซิลิเกตไฮเดรต ($4\text{MgO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot 8.5\text{H}_2\text{O}$) ดังสมการที่ (2.9)



โดยสรุปแล้วกระบวนการกักกร่อนทางเคมีเนื่องสารประกอบซัลเฟตที่มีต่อคอนกรีตทำให้ได้สารประกอบที่เป็นอันตรายต่อคอนกรีตดังนี้

แคลเซียมซัลโฟลูมิเนต หรือ Ettringite เป็นสารที่ไม่ละลายน้ำมีการขยายตัวทำให้คอนกรีตเกิดการแตกร้าวซึ่งโดยส่วนมากแล้วสารนี้เกิดจากสารตั้งต้นที่มีองค์ประกอบของอลูมิเนียม ดังนั้นในการผลิตปูนซีเมนต์ต้านทานซัลเฟตจึงมีเหตุผลที่ต้องจำกัดปริมาณของ C_3A และ C_4AF ให้น้อย ซึ่งสารเหล่านี้ไม่ช่วยให้กำลังคอนกรีตเพิ่มมากนักดังที่กล่าวมาแล้ว

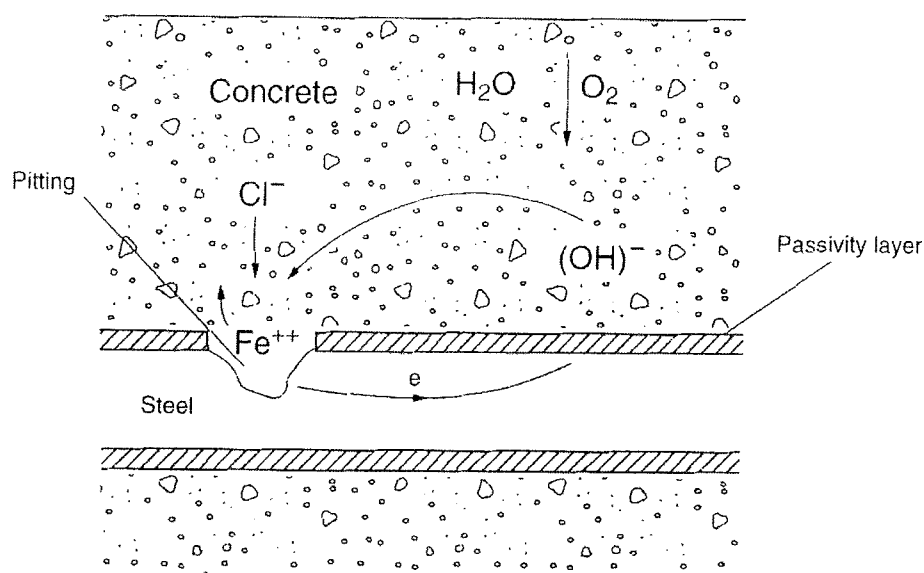
แคลเซียมซัลเฟตหรือ ยิปซัม เป็นผลจากปฏิกิริยาระหว่าง แคลเซียมไฮดรอกไซด์กับแมกนีเซียมซัลเฟต โดยยิปซัมจะมีการขยายตัวมากกว่าแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งเป็นสารดั้งเดิม ถึง 2.2 เท่า เป็นผลทำให้คอนกรีตเกิดการขยายตัวและแตกร้าว นอกจากนั้นยังทำให้คอนกรีตสูญเสียความสามารถในการยึดเกาะระหว่างซีเมนต์เพสต์กับมวลรวม อันเนื่องมาจากเกลือที่เกิดขึ้นสามารถชะล้างออกไปได้ง่ายส่งผลให้เนื้อคอนกรีตหายไปและมวลรวมหลุดออกจากคอนกรีตได้ง่าย โดยในกระบวนการผลิตคอนกรีตสามารถลดปริมาณของยิปซัมลงได้โดยการเติมสารที่มีคุณสมบัติเป็นปอซโซลานเพื่อลด C_3S และ C_2S ซึ่งเป็นสารที่ก่อให้เกิดแคลเซียมไฮดรอกไซด์ และจะเป็นแนวทางการศึกษาในงานวิจัยในครั้งนี้

แมกนีเซียมซิลิเกตไฮเดรต เป็นสารประกอบที่เป็นผลจากปฏิกิริยาระหว่างซิลิกาเจลกับแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ โดยสารนี้มีลักษณะเป็นสีขาวและส่งผลให้กำลังอัดของคอนกรีตลดลง

2.3 การกัดกร่อนเนื่องจากคลอไรด์

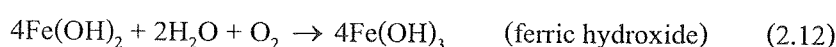
คลอไรด์เป็นตัวการหลัก ที่ทำให้เกิดการกัดกร่อนของเหล็กเสริม และเป็นผลให้คอนกรีตบริเวณรอบเหล็กเสริมเสียหายเนื่องจากการขยายตัวของเหล็กเสริมที่เป็นสนิม กลไกการกัดกร่อนเริ่มต้นจาก เมื่อปูนซีเมนต์ทำปฏิกิริยากับน้ำ จะเกิดฟิล์มบางๆของ $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ เคลือบผิวเหล็กที่ฝังในคอนกรีตไว้ ฟิล์มออกไซด์นี้จะทำหน้าที่ป้องกันการเกิดสนิม อย่างไรก็ตามไอออนของคลอไรด์ก็สามารถทำลายฟิล์มนี้ได้ และเมื่อน้ำและออกซิเจนมาสัมผัสกับเหล็กเสริมบริเวณที่ไม่มีฟิล์มออกไซด์ปกป้องกันอยู่ เหล็กก็จะเป็นสนิม

การเกิดสนิมในเหล็กเกิดจากความต่างศักย์ทางไฟฟ้าของเหล็กเสริมในคอนกรีต ทำให้เกิดเซลล์ไฟฟ้าเคมีขึ้น มีขั้วบวก (Anode) และขั้วลบ (Cathode) เชื่อมกันโดยน้ำซึ่งมีคลอไรด์ในโพรงของซีเมนต์ ทำหน้าที่เป็นสื่ออิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte) ประจุไฟฟ้าบวกเฟอร์รัสไอออน Fe^{++} ที่ขั้วบวกจะวิ่งไปสู่สื่ออิเล็กโทรไลต์ ขณะที่อิเล็กตรอนที่มีประจุไฟฟ้าลบ e^- วิ่งตามเหล็กเสริมไปที่ขั้วลบ อิเล็กตรอนเหล่านี้จะรวมกับน้ำและออกซิเจนทำให้เกิดไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) ซึ่งจะวิ่งผ่านสื่ออิเล็กโทรไลต์ไปรวมกับ Fe^{++} ทำให้เกิด $\text{Fe}(\text{OH})_2$ และทำปฏิกิริยาออกซิเดชันจนทำให้เกิดสนิม ดังรูปที่ 2.2 ปฏิกิริยาดังกล่าว แสดงดังสมการต่อไปนี้



รูปที่ 2.2 การเกิดสนิมเหล็กเนื่องจากปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีเมื่อมีคลอไรด์ในคอนกรีต

Anodic reactions:



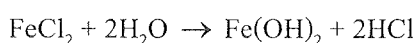
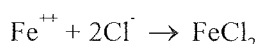
Cathodic reaction:



จากสมการข้างต้น เมื่อออกซิเจนถูกใช้จนหมดไป น้ำก็สามารถทำปฏิกิริยาขึ้นมาใหม่ได้ แต่จำเป็นต้องอาศัยกระบวนการเกิดที่ต่อเนื่อง ด้วยเหตุนี้จึงไม่เกิดการกัดกร่อนในคอนกรีตที่แห้งตลอดเวลา ซึ่งมีความชื้นสัมพัทธ์ (Relative humidity) ต่ำกว่าร้อยละ 60 หรือคอนกรีตที่จมอยู่ในน้ำทะเล ซึ่งไม่มีโอกาสได้สัมผัสกับอากาศ ค่าความชื้นสัมพัทธ์ที่เหมาะสมที่จะเกิดการกัดกร่อน อยู่ในช่วงร้อยละ 70 ถึง 80 ถ้าความชื้นสัมพัทธ์สูงกว่านี้ จะทำให้ออกซิเจนแพร่เข้าไปในคอนกรีตได้น้อยลง

ความต่างศักย์ของปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี สามารถเกิดขึ้น เมื่อคอนกรีตมีสภาพที่แตกต่างกัน เช่น ส่วนหนึ่งของคอนกรีตจมในน้ำทะเลตลอดเวลา แต่อีกส่วนหนึ่งต้องสัมผัสกับน้ำทะเลในสภาพเปียกสลับแห้งเป็นระยะๆ ในบางกรณีความต่างของระยะหุ้มคอนกรีตส่งผลถึงการเชื่อมต่อของลวดไฟฟ้าเคมี มีผลทำให้เกิดความต่างศักย์ รวมไปถึงความแตกต่างของความเข้มข้นของเกลือของน้ำในโพรงคอนกรีตด้วย

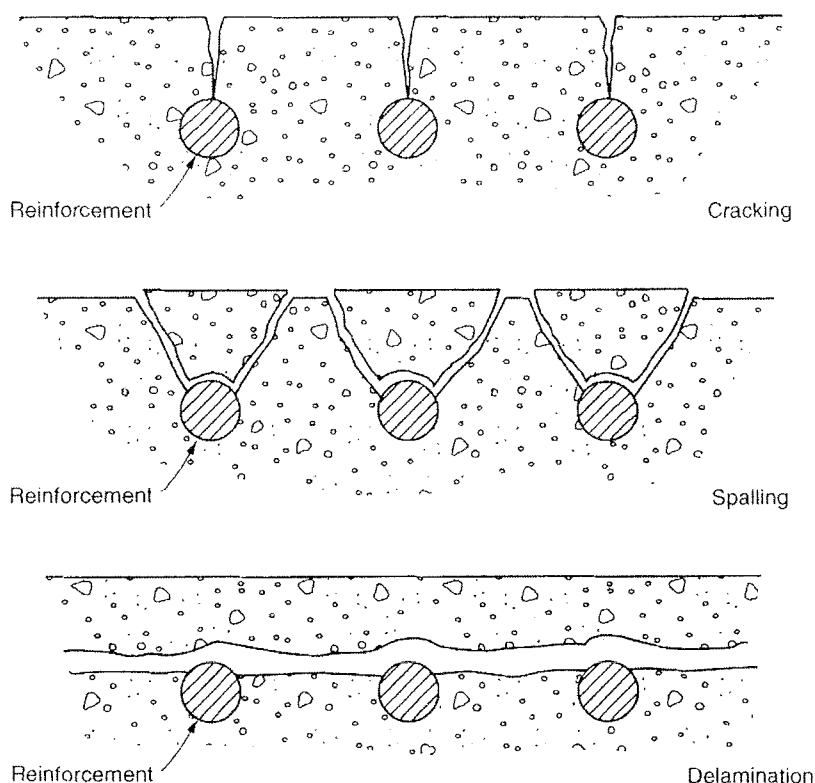
สำหรับการกัดกร่อนในช่วงต้น ฟิสิมบางจะถูกเจาะ โดยคลอไรด์ไอออนจะกระตุ้นให้ผิวเหล็กเสริมกลายเป็นขั้วบวก พื้นผิวด้านที่ไม่ถูกกระตุ้นก็จะมีสภาพเป็นขั้วลบ ดังสมการต่อไปนี้



เนื่องจาก คลอไรด์ไอออนเป็นเป็นตัวก่อให้เกิดปฏิกิริยาอีกครั้ง ดังนั้น สนิมเหล็กที่เกิดขึ้นจึงไม่มีคลอไรด์เป็นองค์ประกอบ แม้ว่าเฟอร์สคลอไรด์จะเกิดขึ้นระหว่างกระบวนการเกิดปฏิกิริยา

เซลล์ไฟฟ้าเคมี มีความจำเป็นต้องใช้น้ำในโพรงของคอนกรีตเป็นตัวกลางเชื่อมระหว่างขั้วบวกและขั้วลบ ระบบโพรงของซีเมนต์เพสต์ที่แข็งตัวในคอนกรีตเป็นปัจจัยหลักที่มีผลต่อการกัดกร่อน เนื่องจากเซลล์ไฟฟ้าเคมีจะเกิดขึ้นได้ต้องอาศัยน้ำที่อยู่ในโพรงเป็นสื่ออิเล็กโทรไลต์

การกัดกร่อนที่เกิดขึ้น ทำให้เหล็กเสริมเกิดการขยายตัว ปริมาตรเพิ่มขึ้น ทำให้เกิดรอยแตก (Cracking) การหลุดร่อน (Spalling) ไปจนถึงคอนกรีตกับเหล็กเสริมไม่มีแรงยึดเหนี่ยวต่อกัน (Delamination) (รูปที่ 2.3) ในขณะที่เกิดการกัดกร่อนพื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริมที่ทำหน้าที่เป็นขั้วบวกจะมีขนาดเล็กลง เนื่องจากเกิดการสูญเสียประจุไฟฟ้า ทำให้เกิดรูขนาดเล็กบนเหล็กเสริม



รูปที่ 2.3 รูปแบบความเสียหายของคอนกรีตเนื่องจากเหล็กเสริมเป็นสนิม

2.3.1 ปริมาณคลอไรด์ในปฏิภาคส่วนผสม

ปริมาณคลอไรด์ที่พบในคอนกรีต อาจมีสาเหตุมาจากการใช้มวลรวมที่ไม่สะอาด หรือคอนกรีตนั้นสัมผัสกับน้ำทะเล น้ำกร่อย หรือการใช้สารเคมีผสมเพิ่มที่มีคลอไรด์เป็นองค์ประกอบจากสาเหตุข้างต้นทำให้ มาตรฐานการออกแบบคอนกรีตเสริมเหล็กของประเทศต่างๆ อนุญาตให้มีปริมาณคลอไรด์ขั้นต่ำไม่เกินค่าที่กำหนด เช่น BS 8110 Part 1 กำหนดปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด (Total chloride-ion) ในคอนกรีตเสริมเหล็กไม่เกินร้อยละ 0.40 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ ACI 318-89 ใช้ปริมาณคลอไรด์ที่ละลายในน้ำ (Water-soluble Chloride ions) เป็นตัวหลักในการพิจารณา โดยกำหนดให้ปริมาณคลอไรด์ไม่ควรเกินร้อยละ 0.15 โดยน้ำหนักของของปูนซีเมนต์ โดยหลักใหญ่ใจความ ค่าทั้งสองนี้ ไม่มีความแตกต่างกัน เนื่องจาก ปริมาณคลอไรด์ที่ละลายในน้ำเป็นส่วนหนึ่งของปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด บางครั้งคลอไรด์ที่ละลายในน้ำ ถูกเรียกว่า คลอไรด์อิสระ (Free chloride) ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดสามารถหาได้โดยวิธีทดสอบหาปริมาณคลอไรด์ที่ละลายในกรด (Acid-soluble chloride) ตามมาตรฐาน ASTM C 1152-90 หรือ BS 1881 Part 124

ส่วนประกอบของปฏิภาคส่วนผสมคอนกรีตที่สามารถพบปริมาณคลอไรด์ เริ่มต้นจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ พบว่ามีปริมาณคลอไรด์น้อยมาก คือ น้อยกว่าร้อยละ 0.01 โดยน้ำหนัก น้ำดื่มสามารถพบปริมาณคลอไรด์ 250 พีพีเอ็ม ในส่วนของมวลรวม BS 882 กำหนดค่าปริมาณคลอไรด์

ทั้งหมดสูงสุด เพื่อให้สอดคล้องกับมาตรฐาน BS 5328 Part 1 และ BS 8110 Part 1 นั่นคือ ปริมาณคลอไรด์ของมวลรวมในคอนกรีตเสริมเหล็กไม่ควรเกินร้อยละ 0.05 โดยน้ำหนักของมวลรวมทั้งหมด และไม่ควรเกินร้อยละ 0.03 เมื่อใช้ปูนซีเมนต์ประเภททนซัลเฟต สำหรับคอนกรีตอัดแรงอนุญาตให้มีปริมาณคลอไรด์ในมวลรวมไม่เกินร้อยละ 0.01 ปริมาณคลอไรด์ที่ถูกกำหนดขึ้นข้างต้น เป็นค่าที่ทำให้มั่นใจได้ว่า จะไม่ทำให้เกิดการกัดกร่อนเนื่องจากคลอไรด์ เว้นแต่มีคลอไรด์ซึมเข้ามาเพิ่มเติมในคอนกรีต ขณะที่คอนกรีตนั้นถูกใช้งาน

2.3.2 การซึมผ่านของคลอไรด์

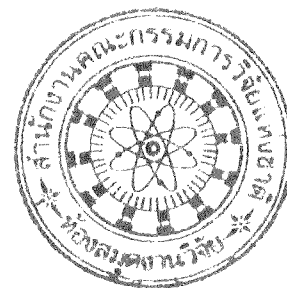
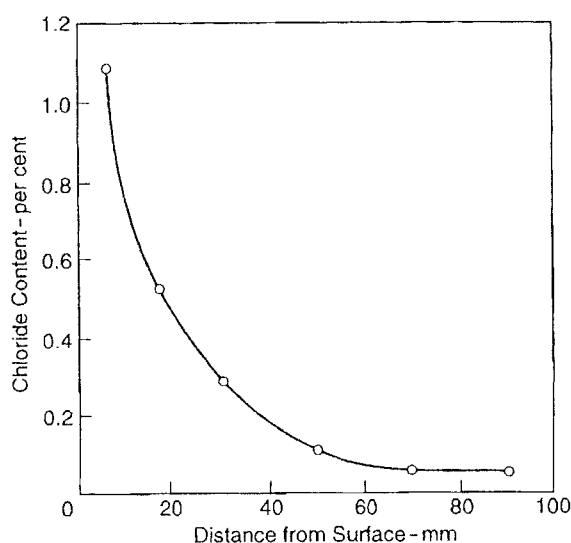
ปัญหาการกัดกร่อนเนื่องจากคลอไรด์สามารถเกิดขึ้นได้เสมอ เมื่อคลอไรด์สามารถซึมผ่านเข้ามาในคอนกรีต โดยเฉพาะในกรณีที่คอนกรีตนั้นสัมผัสกับน้ำทะเล คลอไรด์ที่พบนั้น มีแหล่งที่มาจากน้ำทะเลนั่นเอง โดยคลอไรด์จะตกค้างบนผิวหน้าคอนกรีตในรูปของไอเกลือของน้ำทะเลที่มีขนาดเล็ก ซึ่งถูกพัดพามากับคลื่นและกระแสนลม หรืออาจอยู่ในรูปของละอองน้ำทะเล ซึ่งทำให้คอนกรีตมีสภาพเปียกชื้นเนื่องจากละอองน้ำทะเล (Wetted by dew) ไอของคลอไรด์ (Air-borne chloride) สามารถถูกพัดพาไปได้ไกลถึง 2 กิโลเมตร ซึ่งขึ้นอยู่กับกระแสนลมและสภาพภูมิประเทศ

น้ำใต้ดิน หรือน้ำกร่อย (Brackish groundwater) ที่สัมผัสกับคอนกรีต ก็ล้วนเป็นแหล่งที่มาของคลอไรด์

อย่างไรก็ตาม คลอไรด์สามารถซึมผ่านเข้ามาในคอนกรีตได้ โดยอาศัยน้ำเป็นตัวนำพา และเมื่อคลอไรด์สามารถซึมผ่านเข้ามาในคอนกรีตอย่างต่อเนื่อง มีผลทำให้บริเวณผิวเหล็กเสริมเกิดการสะสมของคลอไรด์ไอออนในปริมาณที่สูง เมื่อคอนกรีตจมอยู่ในน้ำทะเลตลอดเวลา ก็ย่อมเกิดการซึมผ่านของคลอไรด์ แต่บริเวณใต้น้ำทะเลมีความเข้มข้นของออกซิเจนน้อยและอัตราการแพร่ของออกซิเจนเข้าไปในคอนกรีตต่ำมาก เนื่องจากช่องว่างภายในคอนกรีตเป็นช่องว่างที่อึดอัดด้วยน้ำ ทำให้ไม่มีออกซิเจนที่จะไปรวมตัวกับน้ำและอิเล็กตรอนที่ขั้วลบ สำหรับคอนกรีตที่อยู่ในสภาพเปียกสลับแห้ง ปริมาณคลอไรด์ที่พบในคอนกรีตจะสูงขึ้น ซึ่งจะพบมากกับโครงสร้างที่ตั้งอยู่ตามชายฝั่งในสภาพภูมิอากาศร้อนชื้น

เมื่อคอนกรีตเริ่มสัมผัสกับน้ำทะเล คอนกรีตจะดูดซับน้ำทะเลจนกระทั่งคอนกรีตนั้นอิ่มตัวไปด้วยน้ำ และถ้าหากสภาพภายนอกคอนกรีตเปลี่ยนเป็นสภาพแห้ง ทิศทางการเคลื่อนที่ของน้ำจะเกิดการเคลื่อนที่ย้อนกลับ และระเหยออกจากคอนกรีต ทำให้เกลือเกลือตกค้างในช่องว่าง เมื่อคอนกรีตอยู่ในสภาพเปียกอีกครั้ง ความเข้มข้นของเกลือบริเวณใกล้ผิวหน้าจะสูงขึ้น โดยเกลือที่มีความเข้มข้นสูงที่บริเวณผิวจะเกิดการถ่ายเทไปยังบริเวณภายในที่มีความเข้มข้นน้อยกว่า เรียกการถ่ายเทชนิดนี้ว่าการแพร่ ซึ่งในแต่ละรอบของการเปียกและแห้ง ส่งผลให้เกลือยังสามารถแพร่เข้าไปในคอนกรีตและเข้าไปสู่บริเวณเหล็กเสริมมากขึ้น ความสามารถในการแพร่ของเกลือขึ้น ขึ้นอยู่กับความชื้นสัมพัทธ์ภายนอกคอนกรีต และช่วงระยะเวลาที่คอนกรีตแห้งตัว

โดยทั่วไป คอนกรีตจะเปื่อยได้เร็ว แต่จะแห้งได้ช้ากว่ามาก ทำให้ภายในของคอนกรีตไม่สามารถแห้งโดยสมบูรณ์ ดังนั้นการแพร่ของไอออนของคลอไรด์เข้าไปในคอนกรีตที่แช่ในน้ำทะเลตลอดเวลา จึงเกิดขึ้นได้ช้ากว่าคอนกรีตที่อยู่ในสภาพเปียกสลับแห้ง



รูปที่ 2.4 ตัวอย่างรูปตัดตามยาวของปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดที่ซึมเข้าไปในคอนกรีต

โดยแสดงในหน่วยร้อยละของน้ำหนักของปูนซีเมนต์ [2]

รูปที่ 2.4 แสดงตัวอย่างปริมาณคลอไรด์ที่ซึมผ่านคอนกรีต ที่ระดับความลึกต่างๆ จากผิวหน้าพบว่า เคลือสามารถซึมผ่านเข้าไปในคอนกรีตได้อย่างต่อเนื่อง ภายใต้สภาวะเปียกสลับแห้ง ซึ่งการหาปริมาณคลอไรด์ สามารถหาได้จากการวิเคราะห์ผงตัวอย่างคอนกรีตที่ระดับความลึกต่างๆ ทางเคมี ในบางครั้งพบว่า คอนกรีตที่ผ่านการแช่ในน้ำทะเลเป็นเวลา 10 ปี มีปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตสูงกว่าความเข้มข้นของน้ำทะเล นั่นคือ เมื่อเวลาผ่านไป การสะสมของคลอไรด์ย่อมมีปริมาณมากเพียงพอที่จะซึมเข้ามาถึงบริเวณเหล็กเสริม

อย่างที่ได้อธิบายมาแล้ว สภาวะเปียกสลับแห้งมีอิทธิพลโดยตรงต่อการซึมผ่านของคลอไรด์ รวมไปถึงการได้รับผลกระทบเนื่องจาก ทิศทางการพัดพาของน้ำทะเล กระแสลม อุณหภูมิ ความชื้น แสงอาทิตย์ และลักษณะการใช้งานของโครงสร้าง ซึ่งแต่ละส่วนของโครงสร้างก็ย่อมมีโอกาสสัมผัสกับสภาวะเปียกสลับแห้งที่แตกต่างกัน ดังนั้น จึงมีความจำเป็นต้องพิจารณาถึงสภาพแวดล้อมที่ก่อให้เกิดความเสียหายเนื่องจากการกัดกร่อนของแต่ละส่วนของโครงสร้าง การที่คอนกรีตอยู่ในสภาพแห้งนานกว่าสภาพเปียก เป็นการเร่งให้คลอไรด์สามารถซึมเข้าสู่คอนกรีตได้เร็วขึ้น ด้วยเหตุนี้ คอนกรีตบริเวณน้ำขึ้นน้ำลง (Tidal zone) จึงเกิดการกัดกร่อนของคลอไรด์น้อยกว่าบริเวณคลื่นและละอองน้ำทะเล (Splash zone) คอนกรีตที่สัมผัสน้ำทะเลเป็นบางครั้งบางครั้งมีความเสี่ยงต่อการกัด

ด้วยอำนาจการปกครองของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
 วันที่ 20 ก.พ. 2555
 เลขที่ 244085
 เลขประจำตัว
 เลขประจำตัว

ก่อนเนื่องจากน้ำทะเล เช่น คอนกรีตบริเวณหลักสำหรับผูกเชือก คอนกรีตบริเวณหัวดับเพลิงที่ใช้น้ำทะเล พื้นที่โรงงานอุตสาหกรรมที่ใช้น้ำทะเลในการซักล้าง เป็นต้น

2.3.3 ปริมาณคลอไรด์ที่กระตุ้นให้เหล็กเริ่มเกิดสนิม

กระบวนการการกัดกร่อนของเหล็กเสริม จะเริ่มต้นเมื่อมีปริมาณคลอไรด์เพียงเล็กน้อยที่ผิวเหล็ก แต่เป็นการยากที่จะกล่าวว่า ปริมาณหรือความเข้มข้นของคลอไรด์เท่าใด ที่จะกระตุ้นให้เหล็กเสริมเป็นสนิม เนื่องจากขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย ซึ่งยังไม่สามารถอธิบายให้ชัดเจนได้ ยิ่งไปกว่านั้น การแพร่ของคลอไรด์เข้าไปยังซีเมนต์เพสต์ที่แข็งตัวแล้ว มีรูปแบบที่ไม่แน่นอน ภายในห้องปฏิบัติการมีการทดลองเพื่อศึกษาลักษณะการซึมผ่านของคลอไรด์ในรูปของรูปตัดตามยาว (Chloride profiles) โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อหาวิธีป้องกันการเกิดสนิมอันเนื่องจากการซึมผ่านของคลอไรด์ ซึ่งจะใช้วิธีพิจารณาหาระยะหุ้มที่เหมาะสมสำหรับเหล็กเสริม

ในปริมาณคลอไรด์ที่เท่ากัน คอนกรีตที่มีคลอไรด์ผสมอยู่ในปฏิภาคส่วนผสมตั้งแต่เริ่มต้น จะเกิดอัตราการกัดกร่อนของเหล็กเสริมสูงกว่าคอนกรีตที่มีการซึมผ่านของคลอไรด์หลังจากคอนกรีตนั้นมีการใช้งานไปแล้ว

ขณะที่เกิดกระบวนการซึมผ่านของคลอไรด์ ปริมาณคลอไรด์ที่สามารถซึมผ่านเข้าไปในคอนกรีต ขึ้นอยู่กับ ความสามารถในการต้านทานของซีเมนต์เพสต์ที่แข็งตัวแล้ว, การเปลี่ยนแปลงความชื้น และปริมาณออกซิเจนที่มีอยู่ ซึ่งปัจจัยเหล่านี้เป็นผลเนื่องมาจากลักษณะของการแช่คอนกรีต

ในกรณีทั่วไป ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดไม่ได้เป็นตัวบ่งชี้ถึงความรุนแรงของการกัดกร่อน แต่คลอไรด์ทั้งหมดสามารถจำแนกออกได้ 3 ส่วน คือ Chemically bound ซึ่งถูกรวมอยู่ในผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ อีกส่วนหนึ่ง คือ Physically bound ซึ่งติดอยู่ที่ผิวโพรงของเจล (Gel pores) และส่วนสุดท้าย เรียกว่า คลอไรด์อิสระ ซึ่งจะมีอิทธิพลต่อการเกิดสนิมของเหล็กอย่างสูง อย่างไรก็ตาม การกระจายตัวของคลอไรด์ไอออนทั้ง 3 ชนิด จะไม่สามารถคงอยู่ได้ในสถานะเดิมตลอดเวลา แต่จะสามารถปรับเปลี่ยนเพื่อให้ไอออนทั้งหมดอยู่ในสภาวะสมดุล เช่น ตามปกติคลอไรด์อิสระจะพบตามน้ำที่อยู่ในช่องว่าง (Pore water) ของคอนกรีต ถ้าคลอไรด์อิสระมีปริมาณที่มากเกินไปจนความจำเป็น คลอไรด์อิสระนั้นจะกลายสภาพไปเป็นคลอไรด์ยึดจับ เพื่อให้ไอออนอื่นๆ อยู่ในสภาวะสมดุล

2.3.4 การดักจับคลอไรด์ไอออน

การดักจับคลอไรด์ไอออนอยู่ในรูปปฏิกิริยาเคมีกับ C_3A ก่อให้เกิดแคลเซียม คลอโรอูมิเนต ($3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot CaCl_2 \cdot 10H_2O$) บางครั้งเรียกว่า เกลือของฟรีเดล (Friedel's salt) ในลักษณะเดียวกัน คลอไรด์ก็ถูกดักจับโดย C_4AF ผลที่ได้คือ แคลเซียม คลอโรเฟอร์ไรต์ ($3CaO \cdot Fe_2O_3 \cdot CaCl_2 \cdot 10H_2O$) ดังนั้น จากปฏิกิริยาข้างต้นคลอไรด์ไอออนจะถูกดักจับเมื่อปูนซีเมนต์มีปริมาณ C_3A สูง หรือ ปฏิภาค

ส่วนผสมคอนกรีตใช้ปูนซีเมนต์ในปริมาณมาก ด้วยเหตุนี้ การใช้ปูนซีเมนต์ที่มีปริมาณ C_3A สูง จะช่วยต้านทานการกัดกร่อนเนื่องจากคลอไรด์ได้ดี

ในขณะเดียวกัน การป้องกันการกัดกร่อนเนื่องจากซัลเฟต มีความต้องการปริมาณ C_3A ต่ำ ดังนั้น จึงมีความจำเป็นต้องพิจารณาถึงปริมาณ C_3A ในปูนซีเมนต์ที่เหมาะสม เพื่อป้องกันความเสียหายจากซัลเฟต และเพื่อป้องกันอันตรายจากคลอไรด์ในน้ำทะเลควบคู่กันไป ขณะที่ปัจจุบัน ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ดัดแปลง (ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทสอง) ซึ่งสามารถทนซัลเฟตได้ปานกลาง และให้ความร้อนไม่สูงมากนัก เป็นอีกตัวเลือกในการนำไปใช้งาน บางครั้งการใช้ปูนซีเมนต์ผสมตะกอนเตาถลุงเหล็กบดละเอียด (Ground granulated blastfurnace slag) ก็สามารถช่วยในการดักจับคลอไรด์ไอออน โดยอนุภาคน้ำที่อยู่ในตะกอน (Slag) ทำหน้าที่ในการดักจับ แต่งานวิจัยที่ศึกษาในเรื่องนี้ยังมีจำนวนน้อย

ความเป็นไปได้ที่จะใช้ปูนซีเมนต์ที่มีปริมาณ C_3A สูงนั้น มีข้อจำกัดตรงที่ เมื่อ C_3A มีปริมาณสูงย่อมทำให้เกิดความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชันสูง พฤติกรรมดังกล่าวจึงกลายเป็นข้อด้อย และเป็นอันตรายต่อการก่อสร้างโครงสร้างคอนกรีตขนาดใหญ่ที่ต้องสัมผัสกับน้ำทะเล

หลายมาตรฐานการออกแบบ เช่น BS 8110 Part 1 กำหนดปริมาณคลอไรด์ขั้นต่ำในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภททนซัลเฟต โดยมีแนวความคิดที่อยู่บนสมมติฐานที่ว่า คลอไรด์ส่งผลเสียต่อกระบวนการต้านทานซัลเฟต ซึ่งปัจจุบันได้มีการตรวจสอบสมมติฐานดังกล่าวแล้วว่าเป็นเท็จ

เมื่อกลับมาพิจารณาในเรื่อง ความเข้มข้นคลอไรด์ในน้ำที่อยู่ในช่องว่างของคอนกรีต พบว่าที่สถานะสมดุล ความเข้มข้นของคลอไรด์จะขึ้นอยู่กับไอออนอื่นๆที่กระจายตัวอยู่ในน้ำตามช่องว่าง เช่น ที่ค่าปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดค่าหนึ่ง ถ้าไฮดรอกไซด์ไอออนมีความเข้มข้นสูง คลอไรด์อิสระก็จะมีความเข้มข้นสูงด้วย ด้วยเหตุนี้ในบางครั้ง อัตราส่วนระหว่าง Cl^-/OH^- อาจจะถูกใช้ในการพิจารณาถึงความก้าวหน้าของการกัดกร่อน แต่ไม่ได้เป็นค่ามาตรฐานในการพิจารณาเรื่องดังกล่าว อีกทั้งมีการพบว่า ปริมาณคลอไรด์ที่อยู่ในภูมิภาคส่วนผสม เกลือโซเดียมคลอไรด์ ($NaCl$) จะมีปริมาณคลอไรด์อิสระสูงกว่า เกลือแคลเซียมคลอไรด์ ($CaCl_2$) อย่างมีนัยสำคัญ นั่นหมายความว่า น้ำทะเลซึ่งมีเกลือโซเดียมคลอไรด์ละลายอยู่ จะเกิดกัดกร่อนของเหล็กเสริมอย่างแน่นอน

เนื่องจากปัจจัยที่มีความหลากหลาย สัดส่วนของคลอไรด์ยึดจับจึงมีค่าเปลี่ยนแปลงอยู่ในช่วงร้อยละ 50 ถึง 80 หรืออาจต่ำกว่าร้อยละ 50 ของคลอไรด์ทั้งหมด ดังนั้น อาจจะไม่เป็นความจริงที่คลอไรด์ยึดจับที่อยู่ในคลอไรด์ทั้งหมดจะไม่ก่อให้เกิดการกัดกร่อน จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า ผลของความต้องการสถานะสมดุลของน้ำในโพรงคอนกรีตที่แตกต่างกัน ทำให้น้ำหนักของคลอไรด์ยึดจับซึ่งมีความสัมพันธ์กับน้ำหนักของปูนซีเมนต์ ไม่ขึ้นอยู่กับอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์

2.4 อิทธิพลของปูนซีเมนต์ผสมวัสดุปอซโซลานต่อการกัดกร่อน

ในหัวข้อก่อนหน้านี้ได้มีการกล่าวถึงอิทธิพลทางเคมีของปูนซีเมนต์ประเภทต่างๆ ที่มีต่อคลอไรด์ไอออน ขณะเดียวกันการใช้ปูนซีเมนต์ผสมวัสดุปอซโซลานก็ย่อมมีอิทธิพลต่อโครงสร้างโพรง (Pore structure) ในซีเมนต์เพสต์เช่นกัน ทั้งในแง่ของป้องกันการซึมผ่าน และการต้านทานการกัดกร่อน

เถ้าถ่านหิน ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด และซิลิกาฟูม เป็นวัสดุปอซโซลานที่มีความน่าสนใจ ซึ่งเมื่อนำมาแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนในปฏิกิริยาคส่วนผสม ส่งผลให้คอนกรีตสามารถลดการซึมผ่านของสารเคมี เพิ่มการต้านทานการกัดกร่อน อีกทั้งช่วยลดอัตราการกัดกร่อน ในส่วนของซิลิกาฟูม ให้ผลทางด้านบวกต่อโครงสร้างโพรงของซีเมนต์เพสต์ซึ่งมีความแน่นขึ้น ทำให้ความต้านทานเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ ซิลิกาฟูมสามารถลดความเป็นกรด-ด่างของน้ำในโพรง ซึ่งเป็นผลมาจากการทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)_2)

เมื่อพิจารณาถึงความสามารถเทได้ (Workability) ของคอนกรีต การใช้ซิลิกาฟูม หรือซูเปอร์พลาสติไซเซอร์ (Superplasticizer) ต่างก็เป็นสารผสมเพิ่มที่ช่วยให้สามารถทำงานได้ง่ายขึ้นเหมือนกัน แต่ซิลิกาฟูมมีข้อได้เปรียบตรงที่ ทำให้โครงสร้างโพรงของซีเมนต์เพสต์แน่นขึ้น ซึ่งการใช้ซูเปอร์พลาสติไซเซอร์ จะไม่ส่งผลต่อโครงสร้างโพรงภายในคอนกรีต ดังนั้น เมื่อใช้ซูเปอร์พลาสติไซเซอร์จึงไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงกระบวนการกัดกร่อน

การใช้วัสดุประสานตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไป ช่วยทำให้คอนกรีตที่มีโอกาสเกิดการกัดกร่อนในสภาพภูมิอากาศร้อน มีความทนทานมากขึ้น กว่าการใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานเพียงอย่างเดียว

2.5 แนวทางการใช้เถ้าถ่านหินในการป้องกันการกัดกร่อนเนื่องจากรั่วไหล

ความเสียหายที่เกิดขึ้นในโครงสร้างคอนกรีตที่ก่อสร้างในบริเวณที่เสี่ยงต่อการถูกทำลาย เป็นสิ่งที่วงการก่อสร้างต้องตระหนักและให้ความสำคัญถึงแนวทางการศึกษาที่จะป้องกันและปรับปรุงคุณภาพของคอนกรีต ภายใต้ความเหมาะสมทางเศรษฐศาสตร์โดยเฉพาะสภาพแวดล้อมบริเวณน้ำทะเลและน้ำเสียในสถานะจริงซึ่งมีความแปรปรวนของสภาพแวดล้อมที่มีอิทธิพลต่อการทำลายโครงสร้างคอนกรีตค่อนข้างสูงแต่โดยสรุปแล้ว การทำลายเกิดขึ้นใน 2 ลักษณะคือ การกัดกร่อนทางกายภาพและการกัดกร่อนทางเคมี โดยการกัดกร่อนทางกายภาพนั้นเกิดขึ้นเนื่องจากแรงกระแทกโดยตรง ได้แก่ การขัดสี ซึ่งการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นจะมีหลายลักษณะ เช่น การเลื่อนไถล การขีดถู ขูดขีด การชะล้างด้วยกระแสน้ำกรวดทรายเป็นต้น ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นลักษณะการกัดกร่อนที่ผิวหน้าของคอนกรีต ลักษณะการกัดกร่อนทางกายภาพอีกแบบคือการแตกตัวของฟองอากาศ ซึ่งจะเป็นการสึกกร่อนของผิวคอนกรีตที่เกิดจากการแตกตัวหรือระเบิดของฟองอากาศที่อยู่ในน้ำ ลักษณะการกัดกร่อนจะเป็นการเกิดหลุมบ่อที่มีขนาดเล็กบนผิวคอนกรีต จากความเสียหายที่เกิดขึ้นเนื่องจากสภาพแวดล้อมทางกายภาพจะส่งผลให้เกิดความอ่อนแอในเนื้อคอนกรีตและเป็นสาเหตุทำให้ถูกกัด

กร่อนเนื่องจากกระบวนการทางเคมีได้ง่ายขึ้น โดยในกระบวนการกัดกร่อนทางเคมีนั้นส่วนใหญ่แล้วในสิ่งแวดล้อมที่เป็นน้ำเสียและน้ำทะเลจะเกิดการกัดกร่อนจากสารประกอบของคลอไรด์ ซัลเฟต และกรดซัลฟูริกที่ได้จากกระบวนการทางชีววิทยาดังที่ได้กล่าวมาแล้ว ซึ่งคลอไรด์จะมีผลอย่างมากในกรณีของคอนกรีตเสริมเหล็ก

อย่างไรก็ตามการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นมีผลของสภาพแวดล้อมทางกายภาพเข้ามาเกี่ยวพันให้การกัดกร่อนในกระบวนการทางเคมีเป็นไปได้ง่ายและมีความรุนแรงมากขึ้น แตกต่างจากการทดลองในห้องปฏิบัติการที่จะมีผลเนื่องจากกระบวนการทางเคมีเพียงอย่างเดียว โดยกระบวนการกัดกร่อนเกิดจากการที่ซัลเฟตและกรดสามารถที่จะซึมผ่านเข้าไปในเนื้อคอนกรีตและเกิดปฏิกิริยาการกัดกร่อนส่งผลให้โครงสร้างเกิดความเสียหายได้ ดังนั้นการพัฒนาคอนกรีตให้มีความทนน้ำมีความสามารถในการซึมผ่านต่ำและทนทานต่อสภาพแวดล้อมทางกายภาพน่าจะเป็นแนวทางในการป้องกันการกัดกร่อนได้ดี และเมื่อศึกษาลงไปลึกถึงกระบวนการเกิดปฏิกิริยาที่แสดงในรูปของสมการเคมีจะเห็นว่า ปริมาณของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันระหว่าง C_3S และ C_2S กับน้ำมีอิทธิพลต่อการเกิดการกัดกร่อนเนื่องจากซัลเฟต ดังนั้นการลดปริมาณของ C_3S และ C_2S ลงได้ก็เป็นการลดปริมาณของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ลงด้วยซึ่งจะทำให้การกัดกร่อนเนื่องจากซัลเฟตลงด้วยเช่นกัน

นอกจากนั้นปริมาณของ C_3A และ C_4AF ก็เป็นสารประกอบตั้งต้นที่ก่อให้เกิดการกัดกร่อนของซัลเฟตมากขึ้นด้วย การใช้เถ้าถ่านหินแทนที่ปูนซีเมนต์จะทำให้คอนกรีตมีความทนทานต่อซัลเฟตมากขึ้น เนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานจะลดปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งเป็นตัวสำคัญที่จะทำปฏิกิริยากับซัลเฟตดังที่กล่าวมาแล้ว นอกจากนี้การผสมเถ้าถ่านหินลงในคอนกรีตยังเป็นการลด C_3A ในวัสดุประสาน เพราะจะใช้ปูนซีเมนต์น้อยลงและการใช้เถ้าถ่านหินในปริมาณที่เหมาะสม ยังช่วยให้คอนกรีตมีความแน่นและทึบน้ำมากขึ้นซึ่งทำให้ซัลเฟตและสารประกอบเคมีอื่นๆ ซึมผ่านเข้าไปในเนื้อคอนกรีตได้ยากขึ้นทำให้การกัดกร่อนเกิดน้อยลง ส่งผลให้คอนกรีตมีความทนทานมากขึ้น ดังนั้นการใช้เถ้าถ่านหินในการป้องกันการกัดกร่อนเนื่องจากซัลเฟตในน้ำทะเลและน้ำเสียน่าจะเป็นแนวทางที่เป็นไปได้สูงและควรมีการทดสอบในสภาพจริงเพื่อรองรับในการนำไปใช้งาน

2.6 ระยะหุ้มของเหล็กเสริมคอนกรีต

ระยะหุ้มของเหล็กเสริมคอนกรีตเป็นปัจจัยสำคัญที่ควบคุมการส่งผ่านคลอไรด์ไอออนเข้าไปในคอนกรีต การมีระยะหุ้มที่เหมาะสมกับระยะเวลาการใช้งานคอนกรีต จะช่วยให้คลอไรด์ไม่สามารถเดินทางมาถึงผิวของเหล็กเสริมได้ ฉะนั้นความทึบน้ำของคอนกรีตและระยะหุ้มจึงเป็นปัจจัยอันดับต้นๆที่ควรคำนึงถึง ด้วยเหตุนี้ มาตรฐานการออกแบบเกือบทุกมาตรฐานจึงกำหนดทั้งระยะหุ้มขั้นต่ำ และกำลังของคอนกรีตที่ควรมีกำลังสูงกว่าปกติควบคู่กันไป

อย่างไรก็ตาม ข้อจำกัดในเรื่องระยะหุ้ม อันดับแรก คือ ระยะหุ้มจะไม่มีประโยชน์ต่อการป้องกันเหล็กเสริม ถ้าคอนกรีตที่ใช้มีความพรุนสูง จนสารเคมีต่างๆสามารถซึมเข้าไปได้ หนึ่ง จุดประสงค์ของการกำหนดระยะหุ้ม ไม่ได้มีไว้เพื่อป้องกันเหล็กเสริมเพียงอย่างเดียว แต่ช่วยทำให้มั่นใจได้ว่าโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กสามารถรับแรงกระทำได้ รวมไปถึงการป้องกันอันตรายจากเพลิงไหม้ หรือด้านทานการสึกกร่อน การมีระยะหุ้มที่มากเกินไป เป็นผลมาจากคอนกรีตมีปริมาณมาก ซึ่งเสมือนว่าคอนกรีตนั้นไม่มีการเสริมกำลังด้วยเหล็กเสริม นอกจากนี้ ระยะหุ้มของเหล็กยังช่วยควบคุม การหดตัว (Shrinkage) และความเค้นเนื่องจากอุณหภูมิ (Thermal stresses) รวมไปถึงช่วยป้องกันรอยแตกที่อาจเกิดขึ้นจากความเค้น เมื่อเกิดรอยแตกขึ้น ระยะหุ้มที่มีความหนามากถูกพิสูจน์แล้วว่าก่อให้เกิดความเสียหายต่อโครงสร้าง ในทางปฏิบัติ ความหนาของระยะหุ้มควรมีค่าไม่เกิน 80 ถึง 100 มม. (3 ถึง 4 นิ้ว) ซึ่งการตัดสินใจเลือกใช้ระยะหุ้ม ควรพิจารณาตามมาตรฐานการออกแบบที่กำหนดไว้

การเลือกใช้ระยะหุ้มที่มีความหนาน้อย อาจทำให้คลอไรด์สามารถซึมเข้าไปถึงเหล็กเสริมได้ง่าย เนื่องจากคอนกรีตที่ใช้อาจไม่มีความทึบน้ำ เกิดรอยแตก หรือในระหว่างการก่อสร้างวางเหล็กเสริมผิดพลาด

2.7 การป้องกันการกัดกร่อนของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กบริเวณชายฝั่งทะเล

คอนกรีตที่สัมผัสกับน้ำทะเล จำเป็นต้องกำหนดคุณภาพของคอนกรีตให้มีความทนทานสูงเป็นพิเศษ โดยพิจารณาถึงสภาพแวดล้อมทางภูมิประเทศและภูมิอากาศประกอบในการออกแบบคอนกรีตดังกล่าวต้องเป็นคอนกรีตที่มีความหนาแน่นสูง มีคุณสมบัติการซึมผ่านน้ำต่ำ ซึ่งหมายถึงการใช้คอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ต่ำ มีการทำให้แน่นและบ่มคอนกรีตอย่างดียุ่ด้วยระยะเวลาที่นานเพียงพอ ในกรณีที่เป็คอนกรีตเสริมเหล็กต้องมีความหนาของระยะหุ้มเหล็กที่มากพอ รอยต่อของคอนกรีตต้องมีการออกแบบและก่อสร้างอย่างถูกวิธี ก็ย้อมได้คอนกรีตที่มีคุณภาพดี

ความเสียหายและความรุนแรงของการกัดกร่อนต่อคอนกรีตอาจไม่เท่ากันตลอดทั้งโครงสร้างของคอนกรีต บริเวณคอนกรีตที่น้ำขึ้น-ลงมีการเสียหายสูง เพราะบริเวณดังกล่าวมีการขัดสีของน้ำทะเลต่อคอนกรีตทั้งจากการกระแทกของคลื่นและการไหลเวียนของน้ำทะเล นอกจากนี้ คอนกรีตในบริเวณน้ำขึ้น-ลงมีการสะสมสารเคมีทั้งคลอไรด์ ซัลเฟต และเกลือต่างๆในช่องว่างของคอนกรีต ทำให้ความเข้มข้นสูงกว่าปกติจึงเกิดการกัดกร่อนที่รวดเร็ว

การใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ห้า สามารถทนทานต่อสารละลายซัลเฟตได้ดี แต่การป้องกันเหล็กเสริมจากการเป็นสนิมเนื่องจากการแพร่ของคลอไรด์จะมีน้อยกว่าปูนซีเมนต์ประเภทอื่น การใช้ปูนซีเมนต์ผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดก็มีความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อน

เนื่องจากคลอไรด์และซัลเฟตได้สูง ด้วยเหตุนี้ การเลือกปูนซีเมนต์ที่เหมาะสม และการใช้วัสดุปอซโซลานผสมลงในคอนกรีต จึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่น่าสนใจ

มาตรฐาน ACI 201.2R ได้กำหนดให้คอนกรีตที่อยู่ในสภาพแวดล้อมที่มีซัลเฟตและคลอไรด์สูง มีค่าอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ไม่เกิน 0.40 ถึง 0.45 และให้มีระยะหุ้มเหล็กเสริมไม่น้อยกว่า 5 ถึง 6 ซม. เพื่อลดความเสี่ยงของการเกิดสนิมในเหล็กเสริม

อย่างไรก็ตาม ในทางปฏิบัติแล้ว การป้องกันหรือเพิ่มความทนทานต่อการกัดกร่อนของซัลเฟตและคลอไรด์อาจมีวิธีการอื่นๆ อีกหลายวิธี ซึ่งวิธีการเหล่านี้อาจใช้ร่วมกันได้เพื่อให้เกิดผลดีที่สุด ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับการพิจารณาตามความเหมาะสม เช่น ความสำคัญของโครงสร้าง อายุและลักษณะการใช้งาน ค่าใช้จ่ายในการก่อสร้าง การซ่อมแซมบำรุงรักษา เป็นต้น

2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ปริญญญา และอุกฤษฏ์ [1] ได้หาล่อคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยและเถ้าแกลบในปริมาณร้อยละ 40 ถึง 80 แล้วทดสอบความสามารถในการต้านทานการซึมผ่านของคลอไรด์ ตามมาตรฐาน ASTM C 1202 พบว่า คอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยและเถ้าแกลบสามารถต้านทานการซึมผ่านได้ดีกว่าคอนกรีตควบคุม การเพิ่มปริมาณเถ้าลอยและเถ้าแกลบทำให้ความสามารถในการต้านทานดีขึ้น ส่วนความสามารถในการรับกำลังอัด คอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยและเถ้าแกลบในอัตราส่วนร้อยละ 20 ที่อายุ 28 วัน จะให้กำลังอัดที่ใกล้เคียงกับคอนกรีตควบคุม และที่อายุ 90 วัน กำลังอัดเพิ่มสูงขึ้นกว่าคอนกรีตควบคุม ทั้งนี้เนื่องจาก อิทธิพลของการเกี่ยวพันกัน (Synergic effect) ระหว่างวัสดุปอซโซลานทั้งสอง

มณฑิธร และคณะ [2] พบว่า คอนกรีตที่อยู่ในสภาวะแวดล้อมทางทะเลเปื่อยสลับแห้งเป็นเวลา 3 ปี กำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหิน มีความสามารถในการพัฒนากำลังอัดอย่างต่อเนื่องในทางกลับกัน คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทหนึ่ง และประเภทห้า เป็นวัสดุประสานเพียงอย่างเดียว มีค่ากำลังอัดต่ำกว่าร้อยละ 20 ของกำลังอัดที่อายุ 28 วัน ซึ่งแสดงให้เห็นว่า คอนกรีตควบคุมเริ่มมีปัญหาในเรื่องกำลังอัดที่มีค่าต่ำลง ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อองค์อาคารที่ใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานเพียงอย่างเดียว

Bai และคณะ [3] ได้ทดลองหาล่อคอนกรีต ซึ่งใช้ปูนซีเมนต์, เถ้าถ่านหิน และดินขาวเผา (Metakaolin) เป็นวัสดุประสาน เพื่อศึกษาการซึมผ่านของคลอไรด์ และกำลังอัดของคอนกรีตที่แช่น้ำทะเลสังเคราะห์เป็นเวลา 18 เดือน พบว่า การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าถ่านหินในอัตราส่วนร้อยละ 30 ช่วยให้ความเข้มข้นและความสามารถในการซึมผ่านของคลอไรด์ลดลง ซึ่งสามารถเห็นผลได้ชัดเจนขึ้นเมื่อระยะเวลาการแช่น้ำทะเลนานขึ้น

Thomas และ Matthews [5] ได้ทำการเก็บข้อมูลคอนกรีตที่อยู่ในสภาวะแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 10 ปี คอนกรีตดังกล่าวแช่น้ำทะเลอยู่ที่ Building Research Establishment (BRE) บริเวณปากแม่น้ำ Thames Estuary เมือง Shoeburyness ประเทศอังกฤษ มีปริมาณสารประกอบคลอไรด์และซัลเฟตใกล้เคียงกับน้ำทะเลในประเทศไทย แต่น้ำทะเล BRE มีอุณหภูมิ 10 °C ซึ่งมีความแตกต่าง

จากอุณหภูมิของน้ำทะเลในเขตพื้นที่ร้อนชื้นอย่างประเทศไทยโดยสิ้นเชิง ดังนั้น สภาพการกัดกร่อนเนื่องจากน้ำทะเลต่อคอนกรีตย่อมมีความแตกต่างกันหลายประเด็น ซึ่งในเบื้องต้น Thomas รายงานว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินช่วยต้านทานปริมาณคลอไรด์ที่พยายามซึมเข้าในคอนกรีตได้ดีกว่าคอนกรีตที่ไม่ผสมเถ้าถ่านหิน และการบ่มคอนกรีตให้นานขึ้น มีผลต่อการซึมผ่านของคลอไรด์เพียงเล็กน้อยเมื่อคอนกรีตนั้นแช่อยู่ในน้ำทะเลเป็นเวลานาน ขณะที่ผลกระทบของการเพิ่มกำลังอัดที่มีต่อการต้านทานคลอไรด์ มีอิทธิพลน้อยกว่าการเพิ่มปริมาณเถ้าถ่านหินในปฏิภาคส่วนผสม