

บทที่ 2

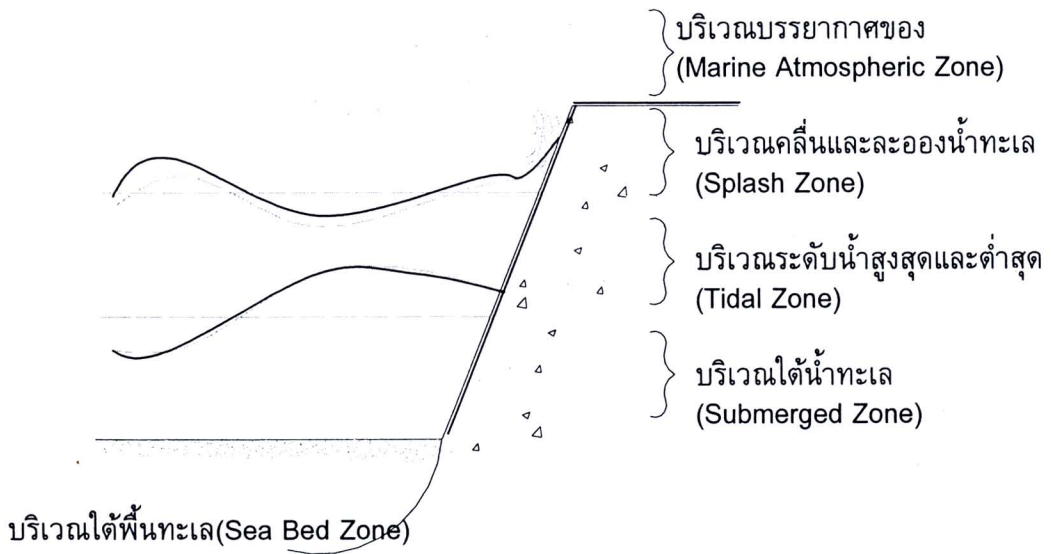
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

บทนี้กล่าวถึงผลกระทบของน้ำทะเลที่มีต่อคอนกรีต กลไกการกัดกร่อนเนื่องจากคลอไรด์ที่ส่งผลให้เหล็กเสริมในคอนกรีตเป็นสนิม การกัดกร่อนเนื่องจากซัลเฟต วัสดุปอซโซลาน ปฏิริยาปอซโซลาน เถ้าแกลบเปลือกไม้ การป้องกันการกัดกร่อนของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กบริเวณชายฝั่งทะเล และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการกัดกร่อนของน้ำทะเลต่อคอนกรีต

2.1 ผลกระทบของน้ำทะเลต่อคอนกรีตเสริมเหล็ก

ความเสียหายของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กในสภาวะแวดล้อมทะเล เกิดจากสาเหตุทางกายภาพโดยได้รับแรงกระทำจากคลื่น ทราบ กรวด ซึ่งส่งผลให้เกิดการสึกกร่อนบริเวณผิวหน้าคอนกรีต รวมไปถึงความแปรปรวนของระดับน้ำทะเล ความแรงและการพัดพาของคลื่น ส่วนสาเหตุจากกระบวนการทางเคมีจะเกิดการกัดกร่อนเนื่องจากสารประกอบเคมีต่างๆ ที่ละลายอยู่ในน้ำทะเล ซึ่งจะมีความรุนแรงแตกต่างกันไปตามประเภทของสารเคมี

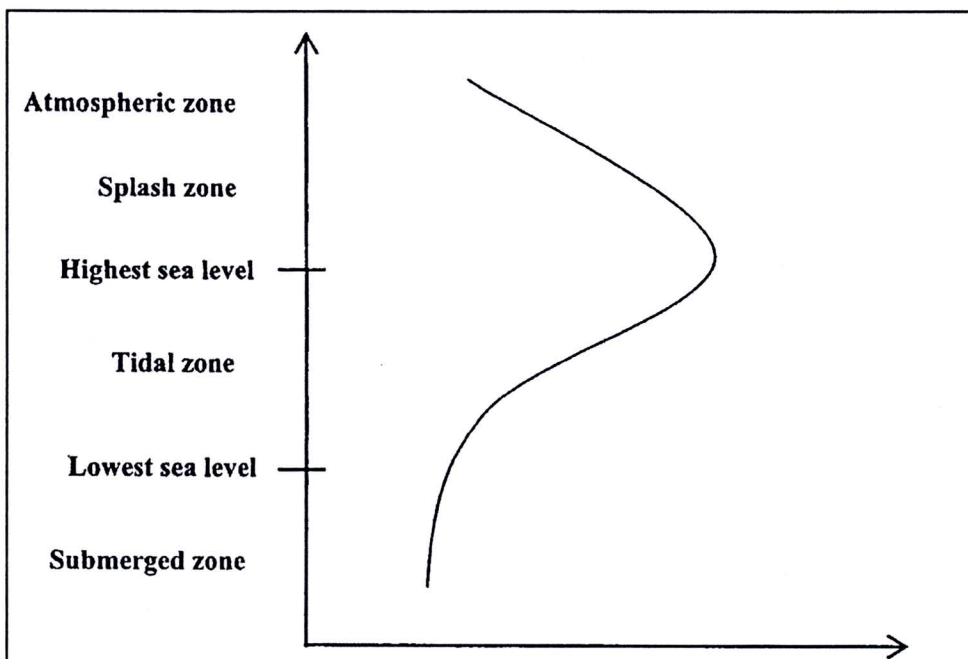
ความเสียหายและความรุนแรงของการกัดกร่อนต่อคอนกรีตอาจไม่เท่ากันตลอดทั้งโครงสร้าง คอนกรีตที่อยู่ในสภาวะเปียกสลับแห้งจะมีความเสียหายสูง เพราะบริเวณดังกล่าวมีการซัดสีของน้ำทะเลต่อคอนกรีตทั้งจากแรงกระทำของคลื่น ทิศทางลม อุณหภูมิ ความชื้น ระยะเวลาที่โครงสร้างอยู่ในสภาวะเปียกสลับแห้ง การไหลเวียนของน้ำทะเล นอกจากนี้ คอนกรีตที่สภาวะเปียกสลับแห้งมีการสะสมสารเคมีทั้งซัลเฟต คลอไรด์ และเกลือต่างๆ ในช่องว่างของคอนกรีต ทำให้มีความเข้มข้นสูงกว่าปกติ จึงเกิดการกัดกร่อนที่รวดเร็ว ในกรณีที่มีรอยแตกร้าวเล็กๆ ซึ่งเกิดจากการหดตัวเนื่องจากความร้อนของปฏิริยาไฮเดรชัน จะยิ่งทำให้คอนกรีตมีความเสียหายรวดเร็วยิ่งขึ้น โดยทั่วไปลักษณะของโครงสร้างที่อยู่ในสภาพแวดล้อมน้ำทะเล สามารถแบ่งได้ 5 บริเวณ (แสดงดังรูปที่ 2.1)



รูปที่ 2.1 ลักษณะของโครงสร้างที่อยู่ในสภาพแวดล้อมน้ำทะเล

2.2.1 บริเวณบรรยากาศทะเล (Atmospheric Zone) คอนกรีตบริเวณนี้ไม่ได้สัมผัสกับน้ำทะเลโดยตรง แต่จะสัมผัสกับละอองน้ำทะเลที่ลมพัดมา อากาศที่มีไอเกลือจากน้ำทะเลเจือปน ความเข้มข้นของเกลือจะลดลงตามระยะห่างจากน้ำทะเล โดยขึ้นอยู่กับสภาพทางธรรมชาติของชายฝั่งทะเล ทิศทาง และความแรงของกระแสลมที่จะพัดพาละอองไอเกลือ แม้โครงสร้างที่อยู่ห่างจากชายฝั่งทะเลเข้ามาหลายกิโลเมตรก็ยังมีโอกาสได้รับเกลือจากน้ำทะเลได้ ความเสียหายของคอนกรีตในบริเวณนี้ส่วนใหญ่เกิดจากการกัดกร่อนของคลอไรด์ ซึ่งทำให้เหล็กเสริมเป็นสนิม การผุกร่อนจากการตกผลึกของเกลือ โดยอาจเริ่มจากมีรอยแตกร้าวขนาดเล็กเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ ทำให้คลอไรด์สามารถแทรกซึมเข้าสู่เหล็กเสริมได้ง่ายขึ้น

2.2.2 บริเวณคลื่นและละอองน้ำทะเล (Splash Zone) บริเวณนี้เป็นบริเวณที่อยู่เหนือระดับน้ำขึ้นสูงสุด คอนกรีตบริเวณนี้จะเปียกน้ำเมื่อสัมผัสกับคลื่นและละอองน้ำทะเล เมื่ออยู่ในสภาพแห้งในช่วงน้ำลงความเสียหายของคอนกรีตบริเวณนี้จะเกิดการกัดกร่อนของคลอไรด์ค่อนข้างรุนแรง เนื่องจากในสภาพที่คอนกรีตเปียกสลับแห้งทำให้คลอไรด์แทรกซึมเข้าสู่เหล็กเสริมได้เร็วขึ้น ประกอบกับความชื้นและก๊าซออกซิเจนในช่องว่างสูงทำให้คอนกรีตเกิดสนิมได้อย่างรวดเร็ว นอกจากนี้คอนกรีตยังเกิดความเสียหายได้จากการผุกร่อนเนื่องจากการตกผลึกของเกลือ การสึกกร่อนจากการกัดเซาะเนื่องจากแรงกระแทกของคลื่น คอนกรีตในบริเวณนี้มักพบว่าเกิดความเสียหายรุนแรงกว่าส่วนอื่น ๆ (แสดงดังรูปที่ 2.2)



รูปที่ 2.2 บริเวณความเสี่ยงต่อการเกิดสนิมของเหล็กเสริมภายใน โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก
[ทวีชัย สำราญวานิช, 2552]

2.2.3 บริเวณระดับน้ำสูงสุดและต่ำสุด (Tidal Zone) บริเวณนี้เป็นบริเวณที่อยู่ระหว่างระดับน้ำขึ้นสูงสุดและน้ำลงต่ำสุด คอนกรีตบริเวณนี้จะจมอยู่ใต้น้ำในช่วงเวลาน้ำขึ้น แต่ในช่วงเวลาน้ำลง คอนกรีตจะสัมผัสกับคลื่นและละอองน้ำ และบางส่วนจะแห้งคล้ายกับบริเวณคลื่นและละอองน้ำทะเล (Splash Zone) ความเสียหายของคอนกรีตเกิดได้จากการเกิดสนิมในเหล็กเสริม การผุกร่อนจากการตกผลึกของเกลือ การกัดเซาะจากคลื่นและกระแสน้ำ การขัดสีจากทรายหรือกรวดที่ลอยอยู่ในน้ำทะเล การกัดกร่อนจากพืชและสิ่งมีชีวิต

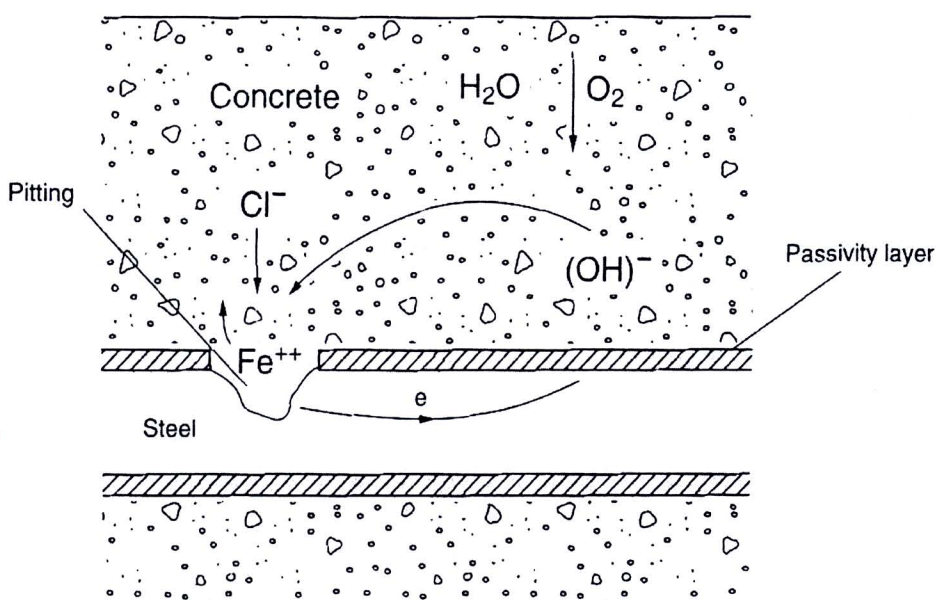
2.2.4 บริเวณใต้น้ำทะเล (Submerged Zone) เป็นบริเวณที่อยู่ต่ำกว่าระดับน้ำทะเลต่ำสุด คอนกรีตในบริเวณนี้จะแช่อยู่ในน้ำทะเลตลอดเวลา ความเสียหายของคอนกรีตบริเวณนี้เกิดจากการกัดกร่อนโดยซัลเฟต การกัดกร่อนจากพืชและสิ่งมีชีวิตบางชนิด การเน่าเปื่อยทางชีวภาพ การเกิดสนิมในเหล็กเสริมจะพบได้น้อย เนื่องจากไม่มีก๊าซออกซิเจนเพียงพอที่ทำให้เกิดสนิม

2.2.5 บริเวณใต้พื้นทะเล (Seabed Zone) เป็นบริเวณใต้พื้นทรายหรือพื้นดินใต้น้ำทะเล ความเสียหายของคอนกรีตเกิดได้จากการกัดกร่อนโดยซัลเฟต การเน่าเปื่อยทางชีวภาพ การกัดกร่อนจากพืช และสิ่งมีชีวิตบางชนิด

การกัดกร่อนทางเคมีของน้ำทะเลต่อคอนกรีตเกิดจากคลอไรด์และซัลเฟต ที่อยู่ในน้ำทะเล ซึ่งส่งผลต่อความทนทานของคอนกรีต สารละลายส่วนใหญ่ที่มีอยู่ในน้ำทะเล ได้แก่ โซเดียมคลอไรด์ (NaCl) แมกนีเซียมคลอไรด์ ($MgCl_2$) แมกนีเซียมซัลเฟต ($MgSO_4$) แคลเซียมซัลเฟต ($CaSO_4$) โพแทสเซียมคลอไรด์ (KCl) และโพแทสเซียมซัลเฟต (K_2SO_4) เป็นต้น ซึ่งน้ำทะเลแต่ละบริเวณมีความเข้มข้นของสารละลายเหล่านี้แตกต่างกัน เนื่องจากสภาพแวดล้อมทางภูมิศาสตร์และภูมิอากาศ โดยทั่วไปปริมาณผลรวมของสารละลายเกลือทั้งหมดมีค่าประมาณ 35 กรัมต่อลิตร นอกจากนี้ยังมีก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ละลายอยู่ในน้ำทะเลอีกด้วย ค่า pH ของน้ำทะเลอยู่ระหว่าง 7.5 ถึง 8.4 [Neville, 1996] การแทรกซึมของน้ำทะเลเข้าไปในคอนกรีตสามารถทำให้ค่า pH ของคอนกรีตลดลงเหลือ 12 ได้ [Gjorv และ Vennesland, 1976]

2.2 การกัดกร่อนเนื่องจากคลอไรด์

การกัดกร่อนเนื่องจากคลอไรด์แตกต่างจากการกัดกร่อนทางเคมีอื่นตรงที่คลอไรด์ทำให้เหล็กเสริมเป็นสนิม และคอนกรีตบริเวณรอบ ๆ เหล็กเสริมเท่านั้นที่เสียหาย เนื่องจากการขยายตัวของเหล็กเสริมและเป็นสาเหตุหลักที่ทำให้ลายของค้ำอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก หลังการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันจะเกิดผลิตภัณฑ์อย่างหนึ่งเกิดขึ้นนั่นคือ แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นด่าง ทำให้ซีเมนต์เพสต์หรือคอนกรีตที่แข็งตัวแล้วมีความเป็นด่างสูง คือ มีค่า pH ประมาณ 12.5 ถึง 13.5 ความเป็นด่างของคอนกรีตจะช่วยป้องกันเหล็กเสริมภายในคอนกรีตไม่ให้เกิดสนิม โดยจะเกิดชั้นฟิล์มบาง ๆ ของ $\gamma-Fe_2O_3$ เคลือบผิวเหล็กเสริมไว้ ซึ่งสามารถป้องกันน้ำและก๊าซออกซิเจนไม่ให้มาทำปฏิกิริยากับเหล็กเสริม จึงไม่เกิดสนิมขึ้น อย่างไรก็ตามอิออนของคลอไรด์ก็สามารถทำลายฟิล์มนี้ได้ และเมื่อน้ำและออกซิเจนมาสัมผัสกับเหล็กเสริมบริเวณที่ไม่มีฟิล์มออกไซด์ปกป้องกันอยู่ เหล็กก็จะเป็นสนิม (แสดงดังรูปที่ 2.3)



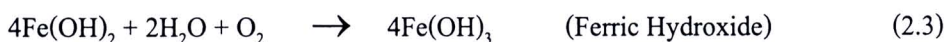
รูปที่ 2.3 การเกิดสนิมเหล็กเนื่องจากปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีเมื่อมีคลอไรด์ในคอนกรีต [Neville, 1996]

ความเป็นต่างของคอนกรีตอาจลดลงได้จากหลายสาเหตุ การแทรกซึมของคลอไรด์ก็เป็นอีกสาเหตุหนึ่ง และหากค่าความเป็นต่างของคอนกรีตลดลงจนค่า pH ต่ำกว่า 9 หรือ 10 กลไกการเกิดสนิมเหล็กจะเกิดขึ้น เมื่อคลอไรด์จากน้ำทะเลสามารถแทรกซึมเข้าสู่คอนกรีตจนถึงชั้นของเหล็กเสริมและทำลายชั้นฟิล์มดังกล่าว ประกอบกับมีน้ำหรือความชื้นและก๊าซออกซิเจนภายในคอนกรีต ทำให้กระบวนการเกิดสนิมจากปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีเกิดขึ้นในลักษณะของเซลล์กัลวานิก (Galvanic Cell) เนื่องจากเกิดความต่างศักย์ไฟฟ้าที่บริเวณผิวของเหล็กเสริม ซึ่งมีสาเหตุจากความแตกต่างของสภาพแวดล้อมของคอนกรีต ความแตกต่างของความชื้น ความแตกต่างของความเข้มข้นของสารละลายเกลือภายในช่องว่างคอนกรีต ฯลฯ ทำให้เกิดสภาพขั้วบวกและขั้วลบ (Cathode and Anode) เกิดการไหลของกระแสไฟฟ้าโดยมีสารละลายของเกลือคลอไรด์ในช่องว่างคอนกรีตเป็นสื่ออิเล็กโทรไลต์ให้อิเลคตรอนวิ่งผ่าน

กระบวนการไฟฟ้าเคมี (Electrolysis) ของกระบวนการเกิดสนิมจะเริ่มจากขั้วบวก (Anode) เหล็กจะแตกตัวเป็นเฟอร์รัสไอออน (Fe^{2+}) เข้าสู่สภาพสารละลาย ดังสมการ 2.1 ส่วนอิเล็กตรอน (e^-) จะวิ่งผ่านไปตามเหล็กเสริมเข้าสู่ขั้วลบ (Cathode) โดยมีน้ำที่มีคลอไรด์ทำหน้าที่เป็นสื่ออิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte) ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นนี้ เรียกว่า ปฏิกิริยาแอโนดิก (Anodic Reaction) จากนั้นอิเล็กตรอน (e^-) จากปฏิกิริยาแอโนดิกจะไปรวมตัวกับน้ำและก๊าซออกซิเจนจนเกิดเป็น ไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) ซึ่งเรียกว่าปฏิกิริยาแคโทดิก (Cathodic Reaction) ดังสมการ 2.4 และเมื่อ Fe^{2+}

รวมตัวกับ $(OH)^-$ จะเกิดเป็นเฟอร์รัสไฮดรอกไซด์ ($Fe(OH)_2$) ดังสมการ 2.2 และเมื่อทำปฏิกิริยากับ น้ำและออกซิเจนเกิดเป็นเฟอร์ริกไฮดรอกไซด์ ($Fe(OH)_3$) หรือสนิมเหล็กในที่สุด ดังสมการ 2.3 [Broomfield, 1997]

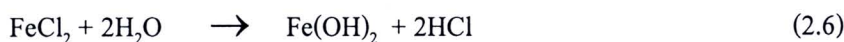
Anodic Reaction:



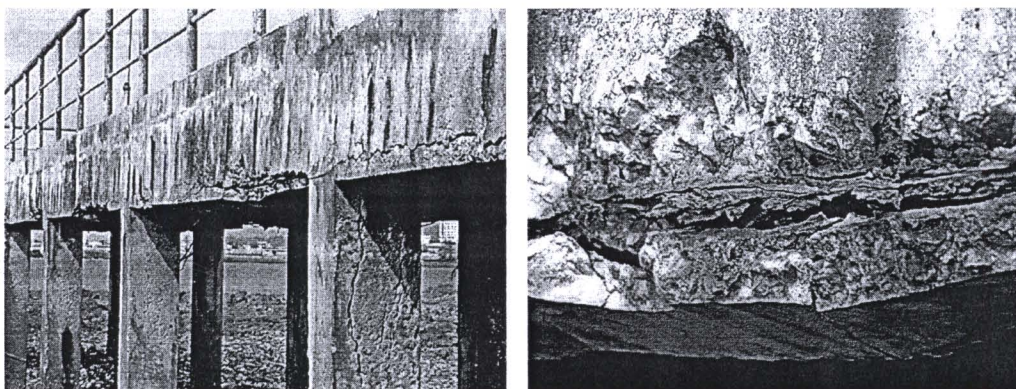
Cathodic Reaction:



Fe^{2+} ที่เกิดขึ้นอีกส่วนหนึ่งจะทำปฏิกิริยากับ Cl^- เกิดเป็นเฟอร์ริกคลอไรด์ ($FeCl_2$) ซึ่งเมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำจะกลายเป็นสนิมเหล็กเช่นกัน ดังสมการ 2.5 และ 2.6



การกัดกร่อนที่เกิดขึ้นส่งผลให้เกิดการขยายตัว เนื่องจากเหล็กเสริมมีปริมาตรมากกว่า เนื้อเหล็กเดิมหลายเท่า ซึ่งอาจมากถึง 4-6 เท่า และดันคอนกรีตให้แตกร้าวเสียหาย (แสดงดังรูปที่ 2.4) โดยระยะทางที่เกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีอาจยาวตั้งแต่ 10 มิลลิเมตร จนถึง 6 เมตร ทำให้สนิมอาจเกิดต่างบริเวณกับจุดที่เกิดการกัดกร่อนของเนื้อเหล็ก และเมื่อเหล็กเสริมเกิดการผุกร่อนจากสนิมมากขึ้นเรื่อย ๆ คอนกรีตที่หุ้มเหล็กเสริมจะเกิดการแตกร้าวตามแนวของเหล็กเสริม (Splitting Crack) จนในที่สุดก็จะหลุดล่อน (Spalling) ออกมา รอยร้าวที่เกิดขึ้นยังเป็นการเร่งให้น้ำและออกซิเจนเข้าไปถึงบริเวณเหล็กเสริมได้เร็วและมากยิ่งขึ้น ทำให้เร่งการเกิดสนิมของเหล็กเสริมให้เร็วและรุนแรงยิ่งขึ้นด้วย หากเหล็กเสริมเกิดสนิมเหล็กอย่างรุนแรงคอนกรีตที่หุ้มเหล็กเสริมอาจหลุดกะเทาะออกมาเป็นบริเวณกว้าง นอกจากนี้ในสภาวะแวดล้อมที่มีความเข้มข้นของคลอไรด์สูงอย่างเช่นน้ำทะเล เหล็กเสริมอาจถูกกัดกร่อนเป็นรอยลึกขนาดใหญ่ที่เรียกว่า Pitting Corrosion ซึ่งจะทำให้พื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริมลดลงอย่างมากและส่งผลกระทบต่อการใช้งานรับกำลังของคอนกรีตเสริมเหล็ก



รูปที่ 2.4 การแตกร้าว หลุดร่อนของคอนกรีตเนื่องจากการเกิดสนิมเหล็ก

2.3 ประเภทของคลอไรด์ในเนื้อคอนกรีต

การที่คลอไรด์ไอออนสามารถซึมผ่านเข้าไปในเนื้อของคอนกรีตได้นั้น จะขึ้นกับปัจจัยต่าง ๆ หลายปัจจัยด้วยกัน เช่น ชนิดของปูนซีเมนต์ สภาพการบ่มคอนกรีต อุณหภูมิ ความเข้มข้นของเกลือคลอไรด์ ชนิดของแคทไอออน (Cation) และสภาพแวดล้อมที่โครงสร้างนั้น ๆ เผชิญ เป็นต้น โดยปริมาณ คลอไรด์ที่อยู่ภายในเนื้อของคอนกรีต (Total chloride) นั้น เป็นผลรวมของคลอไรด์ 2 ประเภท [คณะอนุกรรมการคอนกรีตและวัสดุ, 2543] ได้แก่

1) คลอไรด์ที่ถูกยึดจับ (Fixed chloride) คลอไรด์เมื่ออยู่ในคอนกรีตจะถูกยึดจับโดยกลไกดังต่อไปนี้ คือ

1.1 Chemical binding คลอไรด์บางส่วนจะถูกยึดจับโดยผลผลิตจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration products) เช่น ผลผลิตของ C_3A และ C_4AF ในรูปของ $3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot CaCl_2 \cdot 10H_2O$ (Friedel's salt) หรือ $3CaO \cdot Fe_2O_3 \cdot CaCl_2 \cdot 10H_2O$ (Calcium Chloroferrite)

1.2 Physical binding คลอไรด์บางส่วนสามารถถูกยึดด้วยแรงทางกายภาพ (Surface force) ได้บนผิวของผลผลิตไฮเดรชัน เช่น C-S-H และ C-A-H เป็นต้น อีกทั้งยังสามารถถูกยึดอยู่บนผิวของวัสดุที่เป็นของแข็งที่ไม่มีปฏิกิริยา เช่น ทราย หิน หรือผงฝุ่นหินได้ด้วย ถึงแม้จะเป็นปริมาณน้อยมากก็ตาม

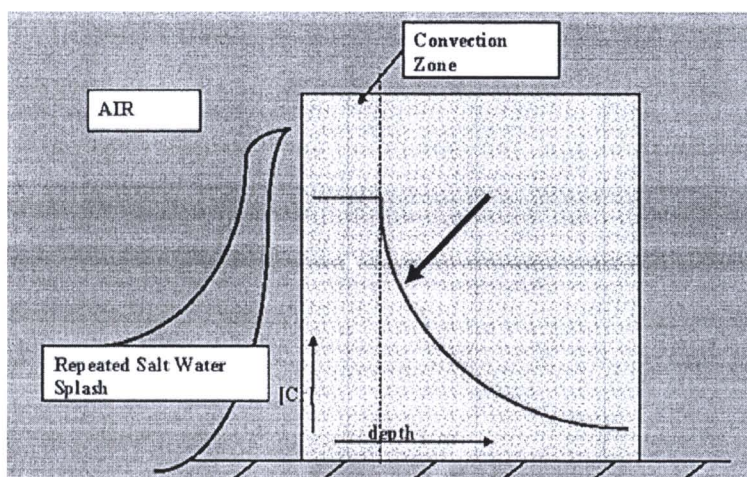
2) คลอไรด์อิสระ (Free chloride) คือ คลอไรด์ที่ละลายอยู่ในน้ำภายในโพรงช่องว่างของคอนกรีต (Pore solution) โดยคลอไรด์นี้เป็นส่วนหนึ่งของคลอไรด์ที่สามารถแพร่เข้าไปยังคอนกรีตที่มีความเข้มข้นของคลอไรด์อิสระต่ำกว่า ดังนั้น ถ้าสามารถยึดจับคลอไรด์อิสระนี้ไว้ได้ก็จะสามารถยืดระยะเวลาของการเกิดสนิมในเหล็กเสริมของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กออกไปได้

2.4 ผลกระทบของคลอไรด์ต่อคอนกรีตเสริมเหล็ก

คลอไรด์เป็นสาเหตุหลักที่ทำให้เหล็กเสริมในคอนกรีตเป็นสนิม โดยอิออนของคลอไรด์ (Chloride Ions) ซึมเข้าไปในคอนกรีตทำให้ค่าความเป็นด่างของคอนกรีตมีค่าลดลง เมื่อมีน้ำและออกซิเจนเพียงพอก็จะทำให้เหล็กเกิดสนิม และสนิมเหล็กก็ขยายตัวดันคอนกรีตบริเวณรอบ ๆ เหล็กเสริมให้แตกร้าวในที่สุดคลอไรด์ของเนื้อของคอนกรีตนั้นอาจมีอยู่ในคอนกรีตเองหรือมาจากภายนอกโครงสร้างคอนกรีต [วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์, 2543] โดยคลอไรด์ที่มีอยู่ในคอนกรีตเองนั้นอาจมาจากน้ำที่ใช้ในการผสมคอนกรีต หิน ทราย โดยเฉพาะอย่างยิ่ง หิน ทราย จากแหล่งที่อยู่ใกล้ทะเล หรือน้ำยาผสมคอนกรีตบางชนิด เช่น แคลเซียมคลอไรด์ (CaCl_2) ซึ่งจะมียอยู่ในสารเร่งการก่อตัว แต่ปัญหาของคลอไรด์ที่กระทบต่อความทนทานของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กนั้น ส่วนมากจะมาจาก คลอไรด์ภายนอกคอนกรีตในช่วงที่ใช้งาน เช่น คลอไรด์ที่มาจากสภาวะแวดล้อมทะเล จากดิน หรือจากเกลือที่ใช้ในการละลายน้ำแข็งในประเทศที่มีอากาศหนาว (De-icing salt) ซึ่งคลอไรด์จะเข้าสู่คอนกรีตได้โดยวิธีการแทรกซึมเข้าไปในคอนกรีตด้วยกระบวนการต่อไปนี้

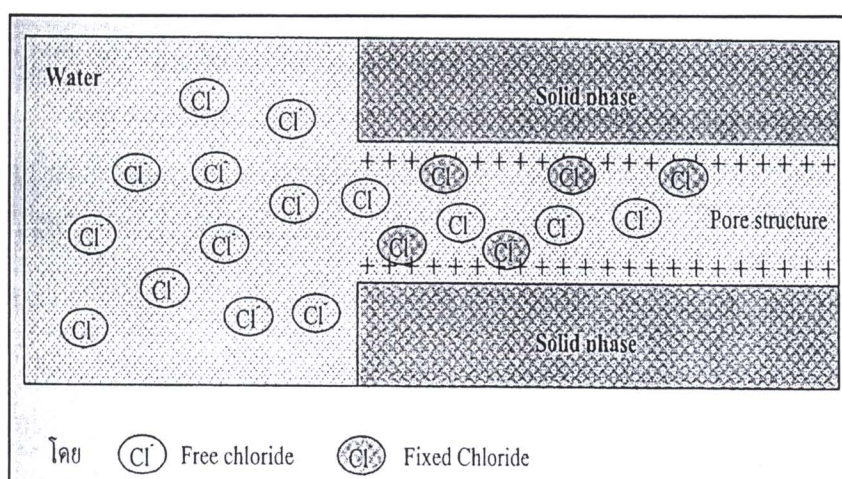
การแพร่ (Diffusion) โดยการแพร่นี้จะเป็นการเคลื่อนที่ของคลอไรด์อิออนเข้าไปยังโพรงของคอนกรีตที่อึดตัว แรงขับเคลื่อนของคลอไรด์อิออนในกลไกนี้จะเกิดจากความเข้มข้นของอิออน โดยคลอไรด์อิออนจะแพร่จากบริเวณที่มีความเข้มข้นของคลอไรด์อิออนสูงไปยัง บริเวณที่มีความเข้มข้นของคลอไรด์อิออนต่ำ

การดึงดูดแบบแคปิลลารี (Capillary suction) โดยการดึงดูดแบบแคปิลลารีนี้สามารถดึงน้ำเกลือผ่านเข้าไปยังโพรงที่แห้งเล็ก ๆ ในเนื้อบริเวณผิวของคอนกรีต (แสดงดังรูปที่ 2.5) โดยทั่วไปแล้วโครงสร้างที่อยู่ในบริเวณสิ่งแวดล้อมทะเลจะอยู่ในสภาพเปียกสลับแห้ง เมื่อคอนกรีตที่อยู่ในสภาพแห้งถูกทำให้เปียกด้วยน้ำทะเล น้ำทะเลจะถูกดึงเข้าไปยังโพรงที่แห้งเล็ก ๆ ที่อยู่ในเนื้อของคอนกรีต โดยกลไกการดึงดูดแบบแคปิลลารี ซึ่งกลไกนี้จะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว ใช้ระยะเวลาอันสั้น



รูปที่ 2.5 แผนภาพแสดงการตั้งคูดแบบแคปิวลารี

การตั้งคูดไอออน (Ion adsorption) ในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่อยู่ใต้น้ำทะเลตลอดเวลาพบว่าความเข้มข้นของคลอไรด์ที่อยู่บริเวณใกล้กับผิวของคอนกรีตจะมีความเข้มข้นของคลอไรด์สูงกว่าความเข้มข้นของคลอไรด์ที่สารละลายโดยรอบของน้ำทะเล ปรากฏการณ์การนี้ไม่สามารถอธิบายได้โดยกลไกการแพร่ เพราะการแพร่จะยุติเมื่อความเข้มข้นของคลอไรด์ในคอนกรีตเท่ากับความเข้มข้นของคลอไรด์ของสิ่งแวดล้อมภายนอก แต่กลไกตั้งคูดไอออนจะเกิดขึ้นเนื่องจาก บริเวณผิวของโพรงในคอนกรีตที่มีประจุไฟฟ้าบวกบริเวณที่ผิวของโพรงช่องว่างในคอนกรีต จะตั้งคูดคลอไรด์ไอออน ซึ่งมีประจุเป็นลบจากสิ่งแวดล้อมภายนอกเข้ามาในคอนกรีตและสะสมอยู่ในบริเวณนั้น (แสดงดังรูปที่ 2.6)



รูปที่ 2.6 แผนภาพแสดงการตั้งคูดไอออนเข้าไปในคอนกรีต [ทวีชัย สำราญวานิช, 2552]



สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
ห้องสมุดงานวิจัย
วันที่..... - 3 ต.ค. 2555
เลขทะเบียน..... 245654
เลขเรียกหนังสือ.....

แรงดันน้ำ (Hydraulic pressure) โครงสร้างที่อยู่ภายใต้แรงดันน้ำ เช่น กำแพงกันดิน อุโมงค์ ฯลฯ ความแตกต่างของ Hydraulic head สามารถทำให้น้ำซึ่งมีคลอไรด์ไอออน เคลื่อนที่ผ่านเข้าไปภายในคอนกรีตจากบริเวณที่มี Hydraulic head สูงไปยังบริเวณที่มี Hydraulic head ต่ำ

ในกรณีของสภาพเปียกสลับแห้งนั้น น้ำทะเลจะเข้าสู่คอนกรีตที่แห้งโดยการแพร่ หรือการซึมผ่านจนกระทั่งคอนกรีตอยู่ในสภาพที่อิ่มตัว (Saturated) เมื่อสภาพภายนอกเปลี่ยนเป็นแห้ง น้ำที่ผิวคอนกรีตก็จะระเหยออกไปทิ้งไว้แต่คราบเกลือ เมื่อคอนกรีตอยู่ในสภาพเปียกอีกความเข้มข้นของคลอไรด์ที่ผิวก็จะสูงขึ้น ดังนั้น ไอออนของคลอไรด์ซึ่งมีความเข้มข้นสูงที่บริเวณผิวคอนกรีตจะซึมเข้าสู่ภายในคอนกรีตโดยการแพร่ ซึ่งในแต่ละรอบของการเปียกสลับแห้งจะทำให้คลอไรด์บริเวณใกล้ผิวคอนกรีตมีความเข้มข้นสูงขึ้นเรื่อย ๆ และเข้าไปสู่ภายในคอนกรีตและสู่บริเวณเหล็กเสริมมากขึ้น โดยปกติแล้วคอนกรีตเปียกได้เร็วแต่แห้งได้ช้ากว่ามาก และภายในของคอนกรีตไม่สามารถทำให้แห้งได้โดยสมบูรณ์ ดังนั้นการแพร่ของไอออนคลอไรด์เข้าไปในคอนกรีตที่แช่อยู่ในน้ำทะเลตลอดเวลาจึงช้ากว่าการเข้าไปของคลอไรด์โดยการเปียกสลับแห้งโดยน้ำทะเล

การเคลื่อนตัวของไอออนคลอไรด์เข้าไปในคอนกรีต ขึ้นอยู่กับระยะเวลาของสภาพเปียกสลับแห้ง สถานที่และสภาพแวดล้อม เช่น อุณหภูมิ ความชื้น การไหลของน้ำทะเล ทิศทางลม ทิศทางแสงอาทิตย์ และการใช้งานของโครงสร้าง เป็นต้น ทำให้ในโครงสร้างเดียวกันแต่ละส่วนอาจประสบกับสภาวะเปียกและแห้งไม่เหมือนกัน โดยทั่วไปแล้วคอนกรีตที่สภาพแห้งนานกว่าสภาพเปียกมักจะเร่งให้ ไอออนของคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีตได้เร็วขึ้น ดังนั้นคอนกรีตสัมผัสน้ำทะเลเป็นบางครั้ง (ช่วงแห้งนาน) มีโอกาสเกิดปัญหาการกัดกร่อนของเหล็กเสริมมากกว่าคอนกรีตที่ประสบกับสภาวะช่วงแห้งสั้น การกัดกร่อนจะเริ่มเกิดขึ้นก็ต่อเมื่อปริมาณไอออนของคลอไรด์มีมากพอที่ผิวของเหล็กเสริม ซึ่งทำให้ค่าความเป็นด่างของคอนกรีตลดลงจนถึงระดับวิกฤต

คลอไรด์เมื่อซึมเข้าสู่คอนกรีตบางส่วนจะถูกจับตัวเพื่อทำปฏิกิริยากับ C_3A ได้ Calcium Chloro-Aluminate ($3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot CaCl_2 \cdot 10H_2O$) ซึ่งเรียกว่า Friedel's Salt และยังทำปฏิกิริยากับ C_4AF ได้ Calcium Chloroferrite ($3CaO \cdot Fe_2O_3 \cdot CaCl_2 \cdot 10H_2O$) คลอไรด์ส่วนที่ไม่ถูกจับยึดเรียกว่า คลอไรด์อิสระ (Free Chloride) มีสภาพเป็นสารละลายอยู่ในน้ำที่อยู่ภายในช่องว่างของคอนกรีต (Pore Solution) คลอไรด์อิสระนี้เป็นส่วนของคลอไรด์ที่สามารถแพร่เข้าไปยังคอนกรีตที่มีความเข้มข้นของคลอไรด์อิสระต่ำกว่า และเป็นส่วนที่ทำให้ความเป็นด่างในคอนกรีตลดลง ดังนั้นถ้าสามารถจับยึดคลอไรด์ไว้เป็นจำนวนมากได้ จะสามารถยืดเวลาของการเกิดสนิมในเหล็กเสริมออกไปได้ และเป็นที่ทราบกันดีว่าการใช้ปูนซีเมนต์ที่มีปริมาณ C_3A สูง จะสามารถต้านทานการกัดกร่อนเนื่องจากคลอไรด์ได้ดี แต่การใช้ปูนซีเมนต์ที่มี C_3A สูงจะทำให้เกิดความร้อนสูงซึ่งไม่เหมาะสมกับงานคอนกรีตหยาบ และในน้ำทะเลไม่ได้มีสารละลายคลอไรด์เพียงอย่างเดียวแต่ยังมีสารละลาย

ซัลเฟตอยู่ด้วย ซึ่งการต้านทานการกัดกร่อนของซัลเฟตนั้นต้องใช้ปูนซีเมนต์ที่ C_3A ต่ำ ซึ่งเป็นสิ่งที่ขัดแย้งกันอยู่ ดังนั้น ในต่างประเทศจึงใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 2 ที่มีปริมาณ C_3A อยู่ปานกลาง

2.5 ระยะเวลาคอนกรีตหุ้มเหล็ก

ระยะเวลาคอนกรีตหุ้มเหล็กเป็นปัจจัยสำคัญที่ควบคุมการส่งผ่านคลอไรด์ไอออนเข้าไปในคอนกรีต การมีระยะเวลาคอนกรีตหุ้มเหล็กที่เหมาะสมกับระยะเวลาการใช้งานคอนกรีต จะช่วยให้คลอไรด์ไม่สามารถเดินทางมาถึงผิวของเหล็กเสริมได้ ฉะนั้นความทึบน้ำของคอนกรีตและระยะเวลาคอนกรีตหุ้มเหล็กจึงเป็นปัจจัยอันดับต้น ๆ ที่ควรคำนึงถึง ด้วยเหตุนี้ มาตรฐานการออกแบบเกือบทุกมาตรฐานจึงกำหนดทั้งระยะเวลาคอนกรีตหุ้มเหล็กขั้นต่ำ และกำลังอัดของคอนกรีตที่ควรมีกำลังสูงกว่าปกติควบคู่กันไป เมื่อคอนกรีตต้องสัมผัสกับน้ำทะเล

อย่างไรก็ตาม ข้อจำกัดในเรื่องระยะเวลาคอนกรีตหุ้มเหล็ก อันดับแรก คือ ระยะเวลาคอนกรีตหุ้มเหล็กจะไม่มีประโยชน์ต่อการป้องกันเหล็กเสริม ถ้าคอนกรีตที่ใช้มีความพรุนสูง จนสารเคมีต่าง ๆ สามารถซึมเข้าไปได้ อนึ่ง จุดประสงค์ของการกำหนดระยะเวลาคอนกรีตหุ้มเหล็กไม่ได้มีไว้เพื่อป้องกันเหล็กเสริมเพียงอย่างเดียว แต่ช่วยทำให้มั่นใจได้ว่าโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กสามารถรับแรงกระทำได้ รวมไปถึงการป้องกันอันตรายจากเพลิงไหม้ หรือต้านทานการสึกกร่อน การมีระยะเวลาคอนกรีตหุ้มเหล็กที่มากเกินไป เป็นผลมาจากคอนกรีตมีปริมาณมาก ซึ่งเสมือนว่าคอนกรีตนั้นไม่มีการเสริมกำลังด้วยเหล็กเสริม นอกจากนั้น ระยะเวลาคอนกรีตหุ้มเหล็กยังช่วยควบคุมการหดตัว (Shrinkage) และความเค้นเนื่องจากอุณหภูมิ (Thermal stresses) รวมไปถึงช่วยป้องกันรอยแตกที่อาจเกิดขึ้นจากความเค้น เมื่อเกิดรอยแตกขึ้น ระยะเวลาคอนกรีตหุ้มเหล็กที่มีความหนาเกินไปพิสูจน์แล้วว่าก่อให้เกิดความเสียหายต่อโครงสร้าง ในทางปฏิบัติ ความหนาของระยะเวลาคอนกรีตหุ้มเหล็กควรมีค่าไม่เกิน 80 ถึง 100 มม. (3 ถึง 4 นิ้ว) ซึ่งการตัดสินใจเลือกใช้ระยะเวลาคอนกรีตหุ้มเหล็ก ควรพิจารณาตามมาตรฐานการออกแบบที่กำหนดไว้

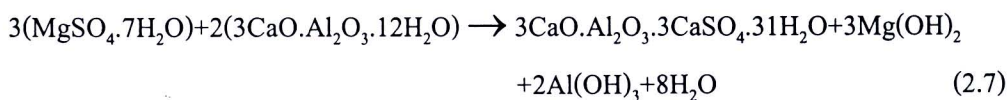
การเลือกใช้ระยะเวลาคอนกรีตหุ้มเหล็กที่มีความหนาน้อย อาจทำให้คลอไรด์สามารถซึมเข้าไปถึงเหล็กเสริมได้ง่าย เนื่องจากคอนกรีตที่ใช้อาจไม่มีความทึบน้ำ เกิดรอยแตก หรือในระหว่างการก่อสร้างอาจวางเหล็กเสริมผิดตำแหน่ง

2.6 การกักกร่อนเนื่องจากซัลเฟต

เกลือซัลเฟตมีอยู่ทั่วไปตามธรรมชาติทั้งในดินและในน้ำใต้ดิน เช่น โซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) โพแทสเซียมซัลเฟต (K_2SO_4) แมกนีเซียมซัลเฟต (MgSO_4) และแคลเซียมซัลเฟต (CaSO_4) อำนาจการทำลายของซัลเฟต ต่อคอนกรีตขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของซัลเฟต และความชื้น การทำลายของซัลเฟตจะไม่แสดงออกเมื่อคอนกรีตอยู่ในสภาพแห้ง แต่มีอำนาจรุนแรงเมื่อคอนกรีตเปียกชื้น และรุนแรงมากในกรณีที่อยู่ในสภาพเปียกสลับแห้ง โดยสารละลายจะค่อย ๆ ซึมเข้าไปภายในช่องว่างของเนื้อคอนกรีตและทำปฏิกิริยากับซีเมนต์เพสต์ ทำให้เกิดการขยายตัวและแตกร้าว จนไม่สามารถรับกำลังได้

สารละลายซัลเฟตในน้ำทะเลที่กักกร่อนคอนกรีตโดยตรงและรุนแรงคือ แมกนีเซียมซัลเฟต (MgSO_4) ซึ่งมีความเข้มข้นสูง และมีคุณสมบัติละลายน้ำได้ดีกว่าเกลือซัลเฟต อื่น ๆ เมื่อแมกนีเซียมซัลเฟต (MgSO_4) จากน้ำทะเลแพร่กระจายเข้ามาในโพรงหรือช่องว่างระหว่างคอนกรีตจะทำปฏิกิริยากับผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน ดังต่อไปนี้ [Mather, 1966]

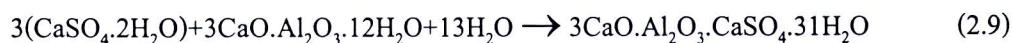
แมกนีเซียมซัลเฟตจะทำปฏิกิริยากับแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต ได้สารประกอบ คือ แคลเซียมซัลโฟลูมิเนต แมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ อลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ และน้ำ ดังสมการที่ 2.7



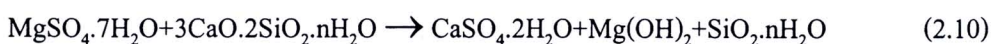
แมกนีเซียมซัลเฟตจะทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ได้เป็นแคลเซียมซัลเฟตหรือยิปซัม ดังสมการที่ 2.8



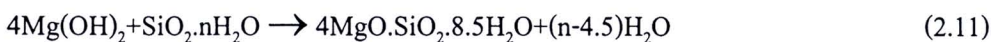
แคลเซียมซัลเฟตหรือยิปซัมที่ได้ สามารถทำปฏิกิริยากับแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรตได้เป็นแคลเซียมซัลโฟลูมิเนต ดังสมการที่ 2.9



นอกจากนี้ แมกนีเซียมซัลเฟตยังทำปฏิกิริยากับแคลเซียมซิลิเกตไฮดรต ปฏิกิริยานี้เป็นการดึงแคลเซียม (Decalcification) จาก C-S-H ได้สารประกอบใหม่ คือ แคลเซียมซัลเฟต แมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ และซิลิกาเจล ดังสมการที่ 2.10



แคลเซียมซัลเฟตที่เกิดขึ้นในสมการที่ 2.10 สามารถทำปฏิกิริยากับแคลเซียมอลูมิเนตไฮดรต ดังสมการที่ 2.9 ได้อีก ในที่สุดแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์จะทำปฏิกิริยากับซิลิกาเจล เกิดเป็นแมกนีเซียมซิลิเกตไฮดรต ดังสมการที่ 2.11



ยิปซัมที่เกิดตามสมการที่ 2.8 และ 2.10 และแคลเซียมซัลโฟลูมิเนตที่เกิดตามสมการที่ 2.7 และ 2.9 มีความถ่วงจำเพาะต่ำกว่าสารประกอบเดิม มีการขยายตัวทำให้มีปริมาณมากขึ้น และเกิดแรงดันภายในคอนกรีตเป็นผลให้คอนกรีตแตกร้าวในที่สุด ส่วนซิลิกาเจลและแมกนีเซียมซิลิเกตไฮดรต ซึ่งเกิดตามสมการที่ 2.10 และ 2.11 เป็นสารที่ไม่แข็งแรงเท่ากับแคลเซียมซิลิเกตไฮดรตที่สูญเสียไปตามสมการที่ 2.10 ทำให้กำลังของคอนกรีตลดลง การลดปริมาณของ C_3A ให้น้อยลง จะทำให้ปริมาณของแคลเซียมอลูมิเนตไฮดรตลดลง ส่งผลให้ปริมาณการเกิดยิปซัม แคลเซียมซัลโฟลูมิเนต และแมกนีเซียมซิลิเกตไฮดรตลดลงตามไปด้วย จึงทำให้การกักคร่อนของซัลเฟตลดลง ดังนั้น การใช้ปูนซีเมนต์ที่มี C_3A ต่ำ จึงสามารถลดการกักคร่อนเนื่องจากซัลเฟตได้

2.7 วัสดุปอซโซลาน

วัสดุปอซโซลาน (Pozzolan Materials) ตามคำจำกัดความของ ASTM C 618 หมายถึง วัสดุที่ประกอบด้วยออกไซด์ของซิลิกา (Siliceous) หรือ ซิลิกาและอลูมินา (Siliceous and aluminous) เป็นองค์ประกอบหลัก โดยทั่วไปแล้ววัสดุปอซโซลานมีคุณสมบัติของวัสดุประสานน้อยมากหรือไม่มีเลย แต่เมื่อมีความละเอียดที่เหมาะสมและมีความชื้นที่เพียงพอจะสามารถทำปฏิกิริยากับด่างหรือแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) ที่อุณหภูมิห้อง ทำให้ได้สารประกอบที่มีคุณสมบัติในการยึดประสานได้คล้ายกับปูนซีเมนต์ เรียกปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นนี้ว่า ปฏิกิริยาปอซโซลาน (Pozzolan reaction) โดยทั่วไปวัสดุปอซโซลานที่มีอยู่ในปัจจุบันแบ่งได้ 2 ประเภทใหญ่ ๆ คือ วัสดุปอซโซลานธรรมชาติ (Natural Pozzolans) ซึ่งเกิดจากกระบวนการตามธรรมชาติ

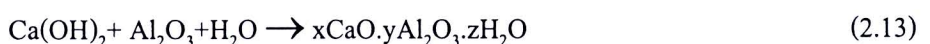
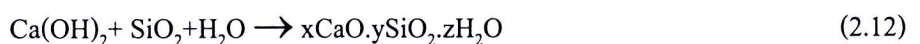
เช่น เถ้าภูเขาไฟ และดินขาวเผา (Met kaolin) เป็นต้น ส่วนอีกประเภทหนึ่ง คือ วัสดุปอซโซลานสังเคราะห์ (Artificial Pozzolans) ซึ่งส่วนใหญ่เป็นวัสดุพลอยได้ที่เกิดจากกระบวนการผลิตในงานอุตสาหกรรม เช่น ซิลิกาฟุ้ง เถ้าถ่านหิน เถ้าแกลบ เถ้าแกลบ-เปลือกไม้ เถ้าชานอ้อย เถ้าปาล์ม น้ำมัน ตะกรันเตาถลุงเหล็ก ดินขาวเผา เป็นต้น

ปัจจุบันวัสดุปอซโซลานนิยมนำมาใช้ในงานคอนกรีตในรูปของการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์บางส่วน เนื่องจากวัสดุปอซโซลานมีคุณสมบัติช่วยปรับปรุงคุณภาพของคอนกรีตให้ดีขึ้นทั้งในด้านความสามารถรับแรงอัด ความทนทานต่อการกัดกร่อน และความคุ้มทุนทางด้านเศรษฐศาสตร์ เนื่องจากวัสดุปอซโซลานมีราคาถูกกว่าปูนซีเมนต์ ส่งผลให้สามารถลดต้นทุนในการผลิตคอนกรีตได้

2.8 ปฏิกิริยาปอซโซลาน

เมื่อปูนซีเมนต์รวมตัวกับน้ำทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน และมีผลิตภัณฑ์ที่สำคัญจากปฏิกิริยา คือ แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต ($3\text{CaO}\cdot 2\text{SiO}_2\cdot 3\text{H}_2\text{O}$ หรือ C-S-H) แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) และแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต ($3\text{CaO}\cdot \text{Al}_2\text{O}_3\cdot 6\text{H}_2\text{O}$ หรือ C-A-H)

ปฏิกิริยาปอซโซลาน เป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นภายหลังจากการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์กับน้ำ โดยใช้แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) เป็นสารตั้งต้นทำปฏิกิริยาร่วมกับซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) และอลูมินาไดรอกไซด์ (Al_2O_3) ในวัสดุปอซโซลาน ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยาปอซโซลาน คือ แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) และแคลเซียมอลูมิเนียมไฮเดรต (C-A-H) ดังสมการที่ 2.12 และ 2.13 ซึ่งทั้ง C-S-H และ C-A-H ที่เกิดจากปฏิกิริยาปอซโซลานนี้ทำให้กำลังอัดของคอนกรีตเพิ่มขึ้น และลดช่องว่างระหว่างอนุภาคของปูนซีเมนต์ลง ทำให้คอนกรีตมีเนื้อแน่นขึ้น โดยปฏิกิริยาปอซโซลานจะเริ่มเกิดขึ้นเมื่ออายุประมาณ 7 วัน [Fraay, et al., 1989] และทำปฏิกิริยาต่อไปเรื่อย ๆ แม้ว่าคอนกรีตมีอายุมากกว่า 3 ปีครั้งก็ตาม [Hansen, 1990]

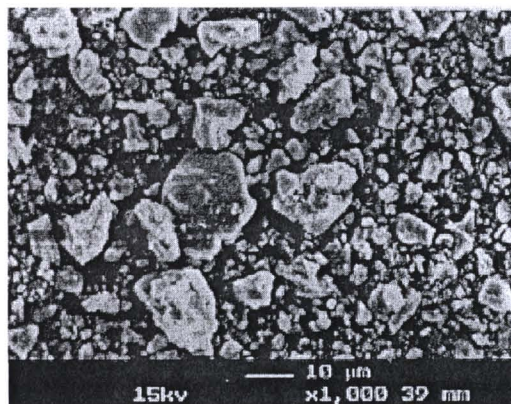
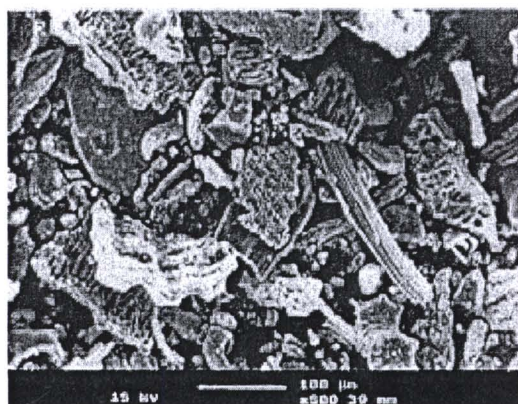


2.9 เถ้าแกลบ – เปลือกไม้ (Rice husk-bark ash)

เถ้าแกลบ-เปลือกไม้เป็นผลพลอยได้จากโรงไฟฟ้าชีวมวลที่ใช้แกลบที่ได้จากโรงสีข้าวและเปลือกไม้ยูคาลิปตัสที่ได้จากโรงงานผลิตเยื่อกระดาษ มีอัตราส่วนระหว่างแกลบต่อเปลือกไม้ก่อนการเผาเท่ากับ 65:35 โดยน้ำหนัก และมีอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาที่ประมาณ 800 – 900 องศา

เซลเซียส หลังจากการเผาเถ้าแกลบ-เปลือกไม้จะทิ้งลงมาตามปล่องทิ้ง และมีการรดน้ำเพื่อลดอุณหภูมิรวมถึงป้องกันการฟุ้งกระจายก่อนขนไปทิ้งยังพื้นที่ทิ้งต่อไป

องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ มีองค์ประกอบรวมของ ซิลิกา อลูมินา และ เฟอร์ริก-ออกไซด์ ($\text{SiO}_2, \text{Al}_2\text{O}_3, \text{Fe}_2\text{O}_3$) ประมาณร้อยละ 85 ซึ่งมากกว่าร้อยละ 70 และมีปริมาณของ SO_3 และ LOI เท่ากับร้อยละ 0.60 และ 3.72 ตามลำดับ ลักษณะทางกายภาพของเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ รุปร่างไม่แน่นอน อนุภาคมีความพรุนสูงดังแสดงในรูปที่ 2.4 ค่าร้อยละของน้ำหนักที่ค้างบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 จะน้อยลงเมื่อผ่านการบดละเอียดซึ่งจะมีค่าประมาณร้อยละ 3.8-32.6 ทั้งนี้ขึ้นกับระยะเวลาในการบด ความถ่วงจำเพาะจะมีค่าสูงขึ้นตามความละเอียดที่เพิ่มขึ้น เพราะการบดจะไปทำลายรูพรุนและ โครงอากาศในอนุภาคทำให้ค่าความถ่วงจำเพาะสูงขึ้น มีค่าประมาณ 2.1-2.3 รูปที่ 2.7 แสดงภาพขยายของอนุภาคของเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ก่อนและหลังการบด



ก. เถ้าแกลบ-เปลือกไม้ก่อนการบด

ข. เถ้าแกลบ-เปลือกไม้หลังการบด

รูปที่ 2.7 ภาพขยายของอนุภาคของเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ก่อนและหลังการบด

2.10 การศึกษาเกี่ยวกับการใช้เถ้าแกลบเปลือกไม้ในงานคอนกรีต

โดยทั่วไปแล้วเถ้าแกลบเปลือกไม้ที่ไม่ผ่านการบดจะมีอนุภาคที่หยาบ มีความพรุนสูงและไม่เหมาะที่จะนำมาใช้ในงานคอนกรีต โดยจากการศึกษาที่ผ่านมา [วลัยลักษณ์ และคณะ 2550] พบว่า คอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ ก่อนบด (ค่ากลางของอนุภาคเท่ากับ 75.3 ไมครอน) ทุกอัตราการแทนที่ และทุกอายุการทดสอบมีค่ากำลังอัดต่ำกว่าคอนกรีตซีเมนต์ล้วนอย่างชัดเจน โดยกำลังอัดจะมีค่าลดลง เมื่อมีการแทนที่เถ้าแกลบ - เปลือกไม้ก่อนบดมากขึ้นเหตุที่เป็นเช่นนี้เพราะว่าเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ก่อนบด มีอนุภาคขนาดใหญ่จึงทำปฏิกิริยาปอซโซลานได้น้อย และมีความ

พรมสูงทำให้คอนกรีตต้องการน้ำในส่วนผสมสูงขึ้น เมื่อเพิ่มปริมาณการแทนที่เถ้าแกลบ-เปลือกไม้จึงเป็นการเพิ่มอัตราส่วนระหว่างน้ำต่อวัสดุประสานจึงส่งผลให้กำลังอัดลดลง

เมื่อแทนที่เถ้าแกลบ-เปลือกไม้ที่มีความละเอียดมากขึ้น (ค่ากลางของอนุภาคเท่ากับ 27.5 ไมครอน) พบว่าสามารถพัฒนากำลังอัดให้สูงขึ้นได้เมื่อเทียบกับคอนกรีตผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ก่อนบด คอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ร้อยละ 10 มีกำลังอัดมากกว่าคอนกรีตซีเมนต์ล้วนที่อายุ 90 วัน แต่เมื่อมีการเพิ่มปริมาณการแทนที่มากขึ้น ค่ากำลังอัดของคอนกรีตมีค่าลดลง

ส่วนการแทนที่เถ้าแกลบ-เปลือกไม้ที่มีความละเอียดสูง (ค่ากลางของอนุภาคเท่ากับ 10.9 ไมครอน) ในอัตราร้อยละ 10 และ 20 มีค่ากำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตซีเมนต์ล้วนทั้งที่อายุ 28 และ 90 วัน ค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ที่มีความละเอียดสูงจะมีค่าเพิ่มขึ้น เกิดเนื่องจากความละเอียดของเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ที่สูงขึ้น สามารถทำปฏิกิริยาปอซโซลานได้ดี และอนุภาคที่มีความละเอียดสูงสามารถแทรกอุดช่องว่างของเพสต์ส่งผลให้คอนกรีตมีเนื้อแน่นขึ้น กำลังอัดจึงสูงขึ้น

ผลของกำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ทั้ง 3 ความละเอียดแสดงให้เห็นว่าการปรับปรุงคุณภาพของเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ โดยการบดให้มีความละเอียดเพิ่มขึ้นหรือมีขนาดอนุภาคที่เล็กลงเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลโดยตรงต่อการพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตให้ดีขึ้น

ส่วนคุณสมบัติด้านการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ วิทยาลัยและคณะ (2550) พบว่า คอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ก่อนบด (ค่ากลางของอนุภาคเท่ากับ 75.3 ไมครอน) มีค่าการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตสูงกว่าคอนกรีตซีเมนต์ล้วนทุกอายุการทดสอบ ทั้งนี้เนื่องจากขนาดอนุภาคที่มีขนาดใหญ่กว่าปูนซีเมนต์และมีความพรุนสูงจึงมีความต้องการน้ำในส่วนผสมสูงกว่าคอนกรีตซีเมนต์ล้วน ส่งผลทำให้คอนกรีตมีช่องว่างมากขึ้น ค่าการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตจึงสูงกว่าคอนกรีตซีเมนต์ล้วน และเมื่อใช้เถ้าแกลบ-เปลือกไม้ที่มีความละเอียดสูง (ค่ากลางของอนุภาคเท่ากับ 10.9 ไมครอน) ผสมคอนกรีตพบว่า ในทุกอัตรการแทนที่มีค่าการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตต่ำกว่าคอนกรีตซีเมนต์ล้วนทุกอายุการทดสอบ เหตุที่เป็นเช่นนี้เพราะการบดเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ให้ความละเอียดมากขึ้นมีผลทำให้อนุภาคเล็กลง เมื่อแทนที่ในคอนกรีตจะแทรกตัวในช่องว่างของคอนกรีต ทำให้คอนกรีตมีความแน่นมากขึ้น ค่าการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตจึงต่ำลง

เมื่อพิจารณาผลของปริมาณการแทนที่ของเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ต่อค่าการซึมผ่านน้ำของคอนกรีตที่อายุ 90 วัน คอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ที่มีความละเอียดปานกลางและความละเอียดสูง ให้ผลในทิศทางเดียวกันกับคอนกรีตผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ก่อนบด คือ การแทนที่ในอัตราร้อยละ 10 มีค่าการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตที่ต่ำที่สุด และมีค่าสูงขึ้นเมื่อการแทนที่เพิ่มขึ้น

ทั้งนี้เนื่องจากเจ้าแกลบ-เปลือกไม้มีความพรุนเหลืออยู่ ดังนั้นเมื่อเพิ่มปริมาณการแทนที่มากขึ้น ความต้องการน้ำในอัตราส่วนผสมจึงมากขึ้น ทำให้ค่าการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตสูงขึ้นด้วย

ดังนั้นจากการศึกษาที่ผ่านมาจะเห็นได้ว่า คอนกรีตที่มีการแทนที่ด้วยเจ้าแกลบ-เปลือกไม้ที่มีความละเอียดสูงไม่เกินร้อยละ 20 เป็นคอนกรีตที่มีทั้งคุณสมบัติในด้านกำลังอัดที่สูงกว่า และค่าการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตที่ต่ำกว่าคอนกรีตซีเมนต์ล้วน ส่วนคอนกรีตที่มีการแทนที่ด้วยเจ้าแกลบ-เปลือกไม้ร้อยละ 30 และ 40 ที่อายุ 90 วัน มีกำลังอัดใกล้เคียงกับคอนกรีตซีเมนต์ล้วนและมีค่าการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตต่ำกว่าคอนกรีตซีเมนต์ล้วน และในการศึกษาครั้งนี้จึงมุ่งประเด็นไปที่การขยายผลของการศึกษาที่ผ่านมาที่พบว่า การใช้เจ้าแกลบเปลือกไม้ที่มีความละเอียดสูงผสมในคอนกรีตในปริมาณที่เหมาะสมสามารถลดการซึมผ่านน้ำได้ ประกอบกับมีการพัฒนากำลังอัดไปในทิศทางที่ดี จึงน่าจะให้ผลดีต่อการต้านทานการทำลายเนื่องจากสิ่งแวดล้อมทะเลได้

2.11 การป้องกันการกัดกร่อนโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กในสภาวะแวดล้อมทะเล

การออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก คุณสมบัติด้านกำลังอัดเป็นสิ่งที่สำคัญในการออกแบบ ปัจจุบันพบว่าความทนทานเป็นอีกปัจจัยที่มีความสำคัญและจำเป็นอย่างยิ่งเช่นกัน เนื่องจากโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กจะสามารถรับกำลังได้ตามที่ออกแบบ จำเป็นต้องมีความทนทานด้วย หากโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กมีความทนทานต่อสภาพแวดล้อมน้อยจะส่งผลให้กำลังของโครงสร้างลดลงด้วย โดยเฉพาะโครงสร้างที่ต้องอยู่ในสภาวะแวดล้อมน้ำทะเล ซึ่งเกิดปัญหาการกัดกร่อนทั้งทางกายภาพและสารเคมี จึงจำเป็นต้องออกแบบให้โครงสร้างมีความทนทานต่อสภาวะแวดล้อมเหล่านี้ คุณสมบัติโดยทั่วไปของโครงสร้างคอนกรีตในสภาวะแวดล้อมทะเล ควรทนทานต่อการกัดกร่อนจากคลอไรด์และซัลเฟตได้ดี ซึ่งหมายถึงการที่คลอไรด์และซัลเฟตสามารถแทรกซึมเข้าไปในคอนกรีตได้ยาก

ดังนั้นควรออกแบบคอนกรีตให้มีความหนาแน่นสูง มีคุณสมบัติการซึมน้ำผ่านคอนกรีตต่ำ ซึ่งหมายถึงออกแบบคอนกรีตให้มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่ำ มีอัตราส่วนผสมที่เหมาะสม ทำคอนกรีตให้แน่นและมีการบ่มคอนกรีตที่ดี ทำให้ได้คอนกรีตที่มีคุณภาพดี มีความทนทานต่อการกัดกร่อนได้ดีในระดับหนึ่ง ตามมาตรฐาน ACI 201.2R กำหนดให้คอนกรีตที่อยู่ในสภาพแวดล้อมที่มีคลอไรด์หรือซัลเฟตสูง มีค่า อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานอยู่ในช่วง 0.40 ถึง 0.45 ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริมไม่น้อยกว่า 50 ถึง 60 มม. และใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 เพื่อลดความเสี่ยงของการกัดกร่อนเนื่องจากซัลเฟต (กรณีที่คอนกรีตดังกล่าวสัมผัสกับซัลเฟต)

การใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 แม้ว่าจะต้านทานการกัดกร่อนซัลเฟตได้ดี แต่การต้านทานการเป็นสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตเนื่องจากคลอไรด์ยังน้อยกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เนื่องจากมี C_3A น้อยกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ดังนั้นการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 เพียงอย่างเดียวอาจไม่เพียงพอสำหรับสภาวะที่มีการกัดกร่อนรุนแรงอย่างเช่นสภาวะแวดล้อมทะเล

การทำให้คอนกรีตมีความทนทานนั้นมีหลายวิธี เช่น การเคลือบผิวคอนกรีตด้วยโพลีเมอร์อีพ็อกซี โพลียูรีเทน เป็นต้น หรือการเคลือบผิวเหล็กเสริมด้วยอีพ็อกซีหรือสังกะสี ก็นับเป็นอีกวิธีที่ช่วยป้องกันการกัดกร่อนได้ดีแต่เป็นวิธีที่ยุ่งยากและมีค่าใช้จ่ายสูง การใช้วัสดุปอซโซลาน เช่น เถ้าถ่านหิน ในส่วนผสมคอนกรีตนับเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่น่าสนใจ โดยมีงานวิจัยจำนวนมากสนับสนุนว่าวัสดุปอซโซลานสามารถช่วยเพิ่มความทนทานต่อการกัดกร่อนของสารเคมีต่างๆ ได้ดี และยังช่วยประหยัดค่าใช้จ่ายเนื่องจากวัสดุปอซโซลานส่วนใหญ่เป็นผลพลอยได้จากการผลิตและเป็นวัสดุเหลือทิ้ง

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

2.12 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการกัดกร่อนของน้ำทะเลต่อคอนกรีต

Saadoun และคณะ (1993) ได้ทำการฝั่งแท่งเหล็กลงในตัวอย่างคอนกรีตแล้วแช่ตัวอย่างคอนกรีตในสารละลายโซเดียมคลอไรด์เป็นเวลา 1,000 วัน ปรากฏว่าคอนกรีตที่แทนที่เถ้าถ่านหินร้อยละ 30 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน สามารถต้านทานการกัดกร่อนได้ดีกว่าคอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และ 5 ถึง 2 และ 3 เท่า ตามลำดับ และระยะเวลาการกัดกร่อนเริ่มต้นของคอนกรีตที่มีปริมาณ C_3A ร้อยละ 9, 11 และ 14 มีค่ามากกว่าคอนกรีตที่มีปริมาณ C_3A ร้อยละ 2 เท่ากับ 1.75, 1.93 และ 2.45 เท่า ตามลำดับ

Thomas และคณะ (1994) ได้ทำการฝั่งแท่งเหล็กลงในตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้เถ้าถ่านหินแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ร้อยละ 0 ถึง 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน และระยะเวลาบ่มตัวอย่างแตกต่างกัน หลังจากบ่มจึงนำตัวอย่างคอนกรีตแช่ในสภาวะแวดล้อมทะเล เมื่อครบอายุการแช่จึงนำตัวอย่างคอนกรีตมาทดสอบหาค่าการแทรกซึมของคลอไรด์ และน้ำหนักเหล็กที่สูญหายจากตัวอย่างที่แช่ในสภาวะแวดล้อมทะเล 1 และ 2 ปี พบว่าอัตราการแพร่กระจายและการกัดกร่อนของเหล็กเสริมมีค่าลดลงเมื่อระยะเวลาการบ่มเพิ่มขึ้น แต่เมื่อแช่ในสภาวะแวดล้อมทะเลนาน

ขึ้นผลไม่แตกต่างกันมาก อัตราการแพร่กระจายของคลอไรด์และน้ำหนักเหล็กที่สูญหายจากการกัดกร่อนในคอนกรีตผสมเถ้าถ่านหินมีค่าน้อยกว่าคอนกรีตควบคุม และการแทนที่เถ้าถ่านหินในปริมาณที่มากขึ้นสามารถลดอัตราการแพร่กระจายของคลอไรด์และการกัดกร่อนของเหล็กเสริมได้

Tarun และคณะ (1994) ได้ทำการศึกษาค่าการซึมผ่านน้ำผ่านคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหิน Class C ในปริมาณมาก คือ แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในอัตราส่วนร้อยละ 50 และ 70 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ผลการทดสอบ พบว่าระยะต้นกำลังอัดมีค่าต่ำลงเมื่อแทนที่เถ้าถ่านหินในปริมาณที่สูงขึ้น และกำลังอัดต่ำกว่าคอนกรีตควบคุม เมื่อคอนกรีตอายุ 28 วันขึ้นไป คอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินมีการพัฒนากำลังอัดได้ดีกว่าคอนกรีตควบคุม เมื่ออายุมากขึ้นคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินมีค่าการซึมผ่านน้ำผ่านคอนกรีตต่ำลง โดยการแทนที่เถ้าถ่านหินในปูนซีเมนต์ร้อยละ 50 ให้ค่าการซึมผ่านน้ำผ่านคอนกรีตต่ำที่สุดที่อายุ 90 วัน เนื่องจากเถ้าถ่านหินมีขนาดอนุภาคเล็กกว่าปูนซีเมนต์จึงเข้าไปอุดแทรกช่องว่างภายในคอนกรีต อีกทั้งปฏิกิริยาปอซโซลานยังช่วยส่งผลให้คอนกรีตแน่นขึ้น ค่าการซึมผ่านน้ำผ่านคอนกรีตจึงลดลง

สมนึก ตั้งเต็มสิริกุล และคณะ (1999) ได้ศึกษาถึงความสามารถในการกักเก็บคลอไรด์ของซีเมนต์เพสต์ผสมเถ้าลอย โดยใช้เถ้าลอย 2 ชนิด คือ ชนิดแคลเซียมออกไซด์ต่ำ และชนิดแคลเซียมออกไซด์สูง แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 0, 30 และ 50 แซ่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์เข้มข้นร้อยละ 2, 4 และ 6 โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 ผลการทดสอบความสามารถในการกักเก็บคลอไรด์พบว่า ซีเมนต์เพสต์ที่ใช้เถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยอัตราต่ำ ๆ สามารถกักเก็บคลอไรด์ได้ดีกว่า ซีเมนต์เพสต์ที่ใช้ปูนซีเมนต์เพียงอย่างเดียว และซีเมนต์เพสต์ที่ใช้เถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยอัตราสูง ๆ มีความสามารถกักเก็บคลอไรด์ต่ำกว่า ซีเมนต์เพสต์ที่ใช้ปูนซีเมนต์เพียงอย่างเดียว ให้ผลที่สอดคล้องกันทั้งเถ้าลอยทั้ง 2 ชนิด และในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ทุกระดับความเข้มข้น

Bai และคณะ (2003) ได้ทดลองหล่อคอนกรีต ซึ่งใช้ปูนซีเมนต์ เถ้าถ่านหิน และดินขาวเผา (Met kaolin) เป็นวัสดุประสาน เพื่อศึกษาการซึมผ่านของคลอไรด์ และกำลังอัดของคอนกรีตที่แช่ในน้ำทะเลสังเคราะห์เป็นเวลา 18 เดือน พบว่า การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าถ่านหินในอัตราส่วนร้อยละ 30 ช่วยให้ความเข้มข้นและความสามารถในการซึมผ่านของคลอไรด์ลดลง ซึ่งสามารถเห็นผลได้ชัดเจนขึ้นเมื่อระยะเวลาการแช่ในน้ำทะเลนานขึ้น

Thomas และ Matthews (2004) ได้ทำการเก็บข้อมูลคอนกรีตที่อยู่ในสภาวะแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 10 ปี คอนกรีตดังกล่าวแช่ในน้ำทะเลอยู่ที่ Building Research Establishment (BRE) บริเวณปากแม่น้ำ Thames Estuary เมือง Shoeburyness ประเทศอังกฤษ มีปริมาณสารประกอบคลอไรด์และซัลเฟตใกล้เคียงกับน้ำทะเลในประเทศไทย แต่น้ำทะเลที่ประเทศอังกฤษมีอุณหภูมิ 10 °C ซึ่งมี

ความแตกต่างจากอุณหภูมิของน้ำทะเลในเขตพื้นที่ร้อนชื้นอย่างประเทศไทยโดยสิ้นเชิง ดังนั้นสถานะการกัดกร่อนเนื่องจากน้ำทะเลต่อคอนกรีตย่อมมีความแตกต่างกันหลายประเด็น ซึ่งในเบื้องต้น Thomas รายงานว่า คอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินช่วยต้านทานปริมาณคลอไรด์ที่พยายามซึมเข้าในคอนกรีตได้ดีกว่าคอนกรีตที่ไม่ผสมเถ้าถ่านหิน และการบ่มคอนกรีตให้นานขึ้น มีผลต่อการซึมผ่านของคลอไรด์เพียงเล็กน้อยเมื่อคอนกรีตนั้นแช่อยู่ในน้ำทะเลเป็นเวลานาน ขณะที่ผลกระทบของการเพิ่มกำลังอัดที่มีต่อการต้านทานคลอไรด์ มีอิทธิพลน้อยกว่าการเพิ่มปริมาณเถ้าถ่านหินในปฏิภาคส่วนผสม

ปริญญา จินดาประเสริฐ และอุกฤษฏ์ โชศรี (2005) ได้ทำการหล่อคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินและเถ้าแกลบในอัตราส่วนผสมร้อยละ 40 ถึง 80 จากนั้นทดสอบความสามารถในการต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ ตามมาตรฐาน ASTM C 1202 พบว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินและเถ้าแกลบ สามารถต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ได้ดีกว่าคอนกรีตควบคุม การแทนที่เถ้าถ่านหินและเถ้าแกลบในปริมาณที่เพิ่มขึ้น สามารถต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ได้มากขึ้นเช่นกัน ด้านกำลังอัดพบว่าที่อายุ 28 วัน คอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินและเถ้าแกลบในอัตราส่วนอย่างละร้อยละ 20 (เถ้าถ่านหินร้อยละ 20 ผสมเถ้าแกลบร้อยละ 20) ให้กำลังอัดใกล้เคียงกับคอนกรีตควบคุม และที่อายุ 90 วัน มีกำลังอัดมากกว่าคอนกรีตควบคุมเนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานของเถ้าถ่านหินและเถ้าแกลบ

มณฑิธร ทัชมาณิช และคณะ (2005) ได้ทำการแช่ตัวอย่างคอนกรีตในสภาวะแวดล้อมทะเลในสภาพเปียกสลับแห้งเป็นเวลา 3 ปี พบว่ากำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินสามารถพัฒนา กำลังอัดอย่างต่อเนื่อง ขณะที่คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และ 5 เป็นวัสดุประสาน มีค่ากำลังอัดต่ำลง แสดงให้เห็นว่าคอนกรีตควบคุมมีปัญหาการสูญเสียกำลังอัดเมื่อแช่ในสภาวะแวดล้อมทะเลเป็นระยะเวลาานาน

กิตติศักดิ์ คงชนเกษมพร และคณะ (2005) ได้ศึกษากำลังรับแรงอัดและความต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ ในคอนกรีตผสมเถ้าลอย เถ้าก้นเตา ดินขาวเผา และเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ โดยแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในอัตราส่วนร้อยละ 35 โดยน้ำหนักเปรียบเทียบกับคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์อย่างเดียวเป็นตัวควบคุม อัตราส่วนน้ำต่อสารซีเมนต์เท่ากับ 0.47 ทุกส่วนผสม จากการศึกษาพบว่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ มีกำลังรับแรงอัดที่ 28 และ 90 วัน สูงกว่าคอนกรีตควบคุม ส่วนคอนกรีตผสมเถ้าลอย เถ้าก้นเตา และดินขาวเผา กำลังรับแรงอัดจะต่ำกว่าคอนกรีตควบคุมที่ทุกอายุของคอนกรีต ความสามารถในการต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์คอนกรีตทุกส่วนผสมจะต้านทานได้ดีกว่าคอนกรีตควบคุม ซึ่งคอนกรีตผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ จะต้านทานได้ดีที่สุด

วิเชียร ชาลี และคณะ (2006) ได้ศึกษาผลของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่มีผลต่อระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กของคอนกรีตในสภาวะแวดล้อมทะเล พบว่าคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.65 และแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าถ่านหินในอัตราส่วนร้อยละ 35 และ 50 ช่วยป้องกันเหล็กเสริมไม่ให้เกิดสนิมได้ดีกว่าคอนกรีตควบคุมที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45 และคอนกรีตที่มีค่ากำลังอัด 30 เมกะปาสกาล (อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.65) สามารถลดระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กที่ใช้ป้องกันการกัดกร่อนของเหล็กเสริมเนื่องจากน้ำทะเลจาก 50 มม. เหลือ 30 มม. เมื่อผสมเถ้าถ่านหินในอัตราส่วนร้อยละ 50

ปริญญา จินดาประเสริฐ และคณะ (2006) ได้ทำการผสมคอนกรีตที่แทนที่ด้วยเถ้าลอยแม่เมาะขนาดต่าง ๆ กันโดยใช้ปริมาณการแทนที่ของเถ้าลอยต่อสารซีเมนต์เท่ากับร้อยละ 30 จากนั้นจึงแช่คอนกรีตในสารละลายโซเดียมคลอไรด์เข้มข้นร้อยละ 3 และทดสอบความสามารถในการต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ตามมาตรฐาน ASTM C 1202 พบว่าที่อายุการแช่สารละลายโซเดียมคลอไรด์ 3 และ 6 เดือน คอนกรีตผสมเถ้าลอยที่ละเอียดสามารถต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ได้ดีกว่าคอนกรีตผสมเถ้าลอยที่หยาบ และคอนกรีตที่ไม่ได้ผสมเถ้าลอย

วิเชียร ชาลี และคณะ (2007) ได้หล่อคอนกรีตทรงลูกบาศก์ขนาด 200X200 มม. ที่ทำจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และ ประเภทที่ 5 สำหรับคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีการแทนที่ด้วยเถ้าถ่านหินแม่เมาะไม่แยกขนาด และแยกขนาดละเอียดซึ่งเป็นเถ้าถ่านหินที่เผาที่อุณหภูมิสูง และมีคุณภาพดี ในอัตราส่วนร้อยละ 0, 15, 25, 35 และ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน กำหนดให้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.65 และทำการฝังเหล็กเส้นกลมที่ระยะหุ้ม 10, 20, 50 และ 75 มม. แล้วนำไปแช่น้ำทะเลในสภาวะเปียกสลับแห้งเป็นเวลา 4 ปี พบว่าการใช้เถ้าถ่านหินแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในอัตราที่สูงขึ้นสามารถลดการแทรกซึมของคลอไรด์ และการเกิดสนิมของเหล็กเสริมได้ อีกทั้งยังพบว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินแยกขนาดละเอียดมีการแทรกซึมของคลอไรด์น้อยกว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินไม่แยกขนาด

ธวัชชัย สาสกุล (2007) ได้หล่อคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหิน เอ็น.พี.เอส. ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 โดยแทนที่ในอัตราส่วนร้อยละ 0 ถึง 50 หลังจากนั้นจึงนำคอนกรีตไปแช่ในน้ำทะเลที่สภาวะเปียกสลับแห้ง พบว่าเมื่อแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 1 ปี คอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินมีกำลังอัดมากกว่าคอนกรีตควบคุม สามารถต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ และลดการเกิดสนิมเหล็กได้ดีกว่าคอนกรีตควบคุม

ปิยพงษ์ สุวรรณมณีโชติ (2007) ได้หล่อคอนกรีตผสมเถ้าถ่านหิน เอ็น.พี.เอส. ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 0 ถึง 50 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน

เท่ากับ 0.45, 0.55 และ 0.65 นำคอนกรีตไปแช่ในน้ำทะเลสภาวะเปียกสลัดแห้ง พบว่าผลการทดสอบให้ผลในทิศทางเดียวกับงานวิจัยของ รัชชัย สาสกุล (2007) และคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่ำ (W/B ratio 0.45) จะมีกำลังอัด ความสามารถด้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์และลดการเกิดสนิมได้ดีกว่าคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานสูง (W/B ratio 0.65)

ปริญญา จินดาประเสริฐ และสำเร้ง รักซ้อน (2008) ได้ศึกษาถึงความสามารถในการต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ของมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน และเถ้าถ่านหินแม่เมาะละเอียด ในอัตราส่วนร้อยละ 0 ถึง 40 โดยน้ำหนักของวัสดุประสานและใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.50 และใช้สารลดน้ำพิเศษ (SP) ปรับให้อัตราไหลแผ่ของมอร์ตาร์อยู่ในช่วงร้อยละ 110±5 โดยใช้มอร์ตาร์จากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 อย่างเดียวเป็นตัวควบคุม ผลการทดสอบกำลังอัด การแทรกซึมของคลอไรด์ตามมาตรฐาน ASTM C 39 และ ASTM C 1202 ตามลำดับ พบว่าที่อายุ 90 วัน มอร์ตาร์ทุกอัตราส่วนผสมมีกำลังอัดมากกว่ามอร์ตาร์ควบคุม และสามารถต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ได้ดีกว่ามอร์ตาร์ควบคุม

จากงานวิจัยที่ผ่านมา พบว่า งานวิจัยด้านความทนทานของคอนกรีตในสภาวะแวดล้อมทะเลของประเทศไทยซึ่งมีสภาพอากาศแบบร้อนชื้นยังมีน้อย ผู้ศึกษาจึงมีแนวความคิดสร้างผลการศึกษากลับมาเกี่ยวกับการกัดกร่อนในสภาวะแวดล้อมทะเล เพื่อศึกษาปัญหาความเสียหายของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กบริเวณชายฝั่งทะเล โดยการนำเถ้าถ่านหินที่มีมากในประเทศมาใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุด เพื่อเพิ่มความทนทานให้กับคอนกรีต ซึ่งเถ้าถ่านหินเป็นทางเลือกที่น่าสนใจและเป็นที่ยอมรับกันในวงการวิศวกรรม แนวความคิดในการนำเถ้าถ่านหิน ซึ่งเป็นวัสดุพอซโซลานมาผสมร่วมกับปูนซีเมนต์เพื่อปรับปรุงคุณภาพคอนกรีตให้ดีขึ้น สามารถศึกษาและทำการวิจัยจนประสบความสำเร็จมาแล้ว ดังนั้น การทดลองนำเถ้าแกลบเปลือกไม้ซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งจากโรงไฟฟ้าชีวมวล และมีคุณสมบัติที่สามารถเป็นวัสดุพอซโซลานได้ โดยนำมาผสมร่วมกับปูนซีเมนต์เพื่อปรับปรุงคุณภาพคอนกรีตให้สามารถต้านทานการกัดกร่อนจากน้ำทะเล และมุ่งประเด็นความสำคัญไปที่การกัดกร่อนเหล็กเสริมในคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบเปลือกไม้ ทั้งนี้จากข้อมูลเบื้องต้นพบว่า เถ้าแกลบเปลือกไม้มีซิลิกาที่ไม่เป็นผลึก สามารถที่จะทำปฏิกิริยาพอซโซลานจึงมีผลต่อการเพิ่มกำลังอัดและความทึบน้ำของคอนกรีต ซึ่งน่าจะช่วยป้องกันเหล็กเสริมเป็นสนิมได้ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาผลของเถ้าแกลบเปลือกไม้ต่อการป้องกันการกัดกร่อนเหล็กเสริมในคอนกรีตที่สัมผัสกับน้ำทะเล

