

การทำนายความคงทนของคอนกรีตเสริมเหล็กในสภาวะแวดล้อมทะเล

(Prediction of durability of concrete in marine environment)

รศ.ดร. วิเชียร ชาลี

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา, wichian@buu.ac.th

1. บทนำ

โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ใช้งานในสภาวะแวดล้อมทะเล ต้องให้ความสำคัญกับการป้องกันการกัดกร่อนที่ทำลายโครงสร้างควบคู่ไปกับการรับแรงเชิงกลเพื่อให้โครงสร้างมีความแข็งแรง และมีอายุการใช้งานที่ยาวนาน ซึ่งการกัดกร่อนของโครงสร้างในสภาวะแวดล้อมดังกล่าว มีสาเหตุหลักมาจากคลอไรด์และซัลเฟต [1-3] คลอไรด์เป็นสาเหตุที่ทำให้เหล็กเสริมเป็นสนิม และขยายตัวส่งผลให้คอนกรีตแตกร้าว ในการกำหนดระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กที่ใช้ในสภาวะแวดล้อมทะเล จะพิจารณาจากการแทรกซึมของสารเคมีที่เป็นอันตรายต่อโครงสร้างเข้าสู่เนื้อคอนกรีต ได้แก่ สารประกอบคลอไรด์ และสารประกอบซัลเฟตเป็นหลัก โดยทั่วไปแล้วในกรณีของคอนกรีตเสริมเหล็ก คลอไรด์จะเป็นสารที่ส่งผลให้เกิดการทำลายได้ง่าย ดังนั้นในการกำหนดระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กที่เพียงพอ เพื่อต้านทานการกัดกร่อนเนื่องจากสารประกอบคลอไรด์จึงเป็นสิ่งที่ต้องคำนึงถึงอย่างมาก คุณสมบัติที่สำคัญของคอนกรีตที่มีผลต่อการกำหนดระยะคอนกรีตหุ้มเหล็ก คือการซึมผ่านได้ของน้ำของคอนกรีต ซึ่งจะส่งผลต่อการซึมผ่านของสารเคมีที่จะเข้าไปทำลายโครงสร้างคอนกรีตด้วย จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า การแทนที่วัสดุปอซโซลานบางส่วนในคอนกรีต ส่งผลให้คอนกรีตมีความทึบน้ำและลดการแทรกซึมของคลอไรด์ได้ดีขึ้น [4, 5] การออกแบบคอนกรีตให้สามารถต้านทานการกัดกร่อนเนื่องจากสภาวะแวดล้อมทะเล นอกจากจะทำให้อายุการใช้งานของโครงสร้างยาวนานขึ้นแล้ว ยังมีผลต่อการกำหนดระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กที่เหมาะสม เพื่อให้สอดคล้องกับรูปร่างทางสถาปัตยกรรมอีกด้วย ดังนั้นการทำนายสถานะความคงทนของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กโดยอาศัยฐานข้อมูลในสภาวะแวดล้อมจริง จึงเป็นสิ่งจำเป็นที่จะได้ทราบถึงอายุการใช้งานของโครงสร้างและการบำรุงรักษาที่จะมีขึ้นในอนาคต ตลอดจนเป็นข้อมูลประกอบในการกำหนดระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเพื่อให้สอดคล้องกับอายุการใช้งานที่ต้องการของโครงสร้างใหม่ที่กำลังจะก่อสร้างขึ้น

2. การสร้างแบบจำลองเพื่อทำนายความคงทนของคอนกรีตเสริมเหล็กในสภาวะแวดล้อมทะเล การออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กในสิ่งแวดล้อมทะเล ควรใช้ฐานข้อมูลด้านความคงทนที่ได้จากการศึกษาในสภาพแวดล้อมจริง ประกอบในการเลือกส่วนผสมคอนกรีต ซึ่งจะช่วยให้โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กสามารถต้านทานการกัดกร่อนเนื่องจากสิ่งแวดล้อมทะเลได้ดีขึ้น การกำหนดระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก เพื่อให้สอดคล้องกับส่วนผสมคอนกรีต และอายุการใช้งานของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ก่อสร้างในบริเวณชายฝั่งทะเลของประเทศไทย โดยใช้แบบจำลองด้านความคงทนที่สร้างขึ้นจากฐานข้อมูลงานวิจัยที่ผ่านมา [6, 7] ที่มีการแช่ตัวอย่างคอนกรีตเสริมเหล็กในสิ่งแวดล้อมทะเลบริเวณชายฝั่ง จะเป็นแนวทางในการกำหนดระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กและส่วนผสมคอนกรีตให้สามารถใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น โดยแบบจำลองที่นำเสนอมีดังนี้

2.1 แบบจำลองเพื่อทำนายระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กในคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหิน [6]

ระบบสมการทำนายระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กที่ต้องการ (CD) (มม.) เมื่อทราบระยะเวลาที่ต้องการออกแบบให้ป้องกันการกัดกร่อนเริ่มต้น (T) (ปี) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน ($\frac{W}{B}$) และร้อยละการแทนที่เถ้าถ่านหิน (F) โดยน้ำหนัก แสดงดังสมการที่ (1) ถึง (5)

$$CD = [\alpha(F) + \beta] \ln(T) + \gamma(F) + \delta \quad (1)$$

α , β , γ , δ คือ สัมประสิทธิ์ที่ได้จากการวิเคราะห์เชิงถดถอยเชิงพหุ (multivariate regression analysis) แสดงค่าดังนี้

$$\alpha = 6.03\left(\frac{W}{B}\right)^2 - 7.31\left(\frac{W}{B}\right) + 1.87 \quad (2)$$

$$\beta = -233.1\left(\frac{W}{B}\right)^2 + 292.09\left(\frac{W}{B}\right) - 65.67 \quad (3)$$

$$\gamma = -15.99\left(\frac{W}{B}\right)^2 + 16.76\left(\frac{W}{B}\right) - 4.29 \quad (4)$$

$$\delta = 677.65\left(\frac{W}{B}\right)^2 - 682.81\left(\frac{W}{B}\right) + 181.69 \quad (5)$$

นอกจากนั้นสามารถใช้สมการประเมินระยะเวลาเพื่อป้องกันการกัดกร่อนเริ่มต้น เมื่อกำหนดระยะคอนกรีตหุ้มเหล็ก อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน และร้อยละการแทนที่เถาถ่านหิน แสดงดังสมการที่ 6

$$T = Exp\left\{\frac{[CD - \gamma(F) - \delta]}{[\alpha(F) + \beta]}\right\} \quad (6)$$

แบบจำลองนี้ สามารถทำนายระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเพื่อป้องกันการกัดกร่อนเริ่มต้นที่ระยะเวลาแช่น้ำทะเลตั้งแต่ 2 ปี ขึ้นไป ในคอนกรีตที่ผสมเถาถ่านหินไม่เกินร้อยละ 50 และมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานในช่วง 0.45 ถึง 0.65 ด้วยข้อจำกัดของตัวอย่างทดสอบที่เก็บข้อมูลในการสร้างแบบจำลองดังกล่าว จึงทำให้แบบจำลองนี้สามารถใช้ได้กับโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีลักษณะการซึมผ่านของคลอไรด์ในทิศทางเดียว และอยู่ภายใต้สมมุติฐานที่ไม่มีการรับน้ำหนักบรรทุกทุกกระทำ ดังนั้นระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กที่ได้จากแบบจำลอง จึงเป็นระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กอย่างต่ำ ซึ่งในโครงสร้างจริงเมื่อมีน้ำหนักบรรทุกกระทำในลักษณะที่ทำให้เกิดแรงดัด อาจมีผลให้ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กที่ต้องการมากกว่าที่คำนวณได้จากแบบจำลอง ข้อมูลของปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตที่ใช้สร้างแบบจำลอง หาได้จากการเจาะทดสอบตรงตำแหน่งกึ่งกลางของคอนกรีตลูกบาศก์ขนาด 200x200x200 มม.³ ซึ่งสมมุติให้เป็นการซึมผ่านในทิศทางเดียวจากพื้นผิวของทรงลูกบาศก์ ลงไปในแนวกึ่งกลางของตัวอย่างคอนกรีต

2.2 แบบจำลองเพื่อทำนายการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ผสมเถาถ่านหิน-เปลือกไม้บดละเอียด [7]

การศึกษาที่ผ่านมา [7] ได้สร้างระบบสมการเพื่อทำนายการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ผสมเถาถ่านหิน-เปลือกไม้บดละเอียดภายใต้สภาวะแวดล้อมทะเล โดยสร้างแบบจำลองจากข้อมูลการแทรกซึมของคลอไรด์ ที่ได้จากตัวอย่างคอนกรีตที่แช่น้ำทะเลเป็นเวลา 2, 3, 5, 7 และ 9 ปี ในการสร้างแบบจำลองใช้หลักการการวิเคราะห์เชิงถดถอยแบบพหุคูณ ในกฎการแพร่ข้อที่ 2 ของฟิคส์ ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาได้แก่ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (ในช่วง 0.45 ถึง 0.65), ปริมาณเถาถ่านหิน-เปลือกไม้ในคอนกรีต (ร้อยละ 0 ถึง 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน), ระยะจากผิวหน้าคอนกรีต และระยะเวลาในการแช่คอนกรีต (มากกว่า 2 ปี)

สมการที่ (7) สามารถใช้หาปริมาณคลอไรด์ ($C_{x,t}$) ร้อยละโดยน้ำหนักวัสดุประสาน ที่แทรกซึมเข้าไปในคอนกรีตที่ระยะจากผิวหน้าคอนกรีต x (มม.) และระยะเวลาที่แช่คอนกรีตในสิ่งแวดล้อมคลอไรด์ t ปี

$$C_{x,t} = C_o \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{\frac{(31536000t)^{(1-\eta)}}{(1-\eta)}}} \right) \right] \quad (7)$$

เมื่อ erf = ฟังก์ชันค่าผิดพลาด (Error function)

การหาปริมาณคลอไรด์ที่แทรกซึมเข้าไปในคอนกรีตตามสมการที่ (7) จำเป็นต้องทราบค่าสัมประสิทธิ์ η และ ความเข้มข้นของคลอไรด์ที่ผิวคอนกรีต (C_0) ซึ่งในการสร้างแบบจำลองครั้งนี้ ได้ใช้หลักการวิเคราะห์เชิงถดถอย ในข้อมูลการแทรกซึมของคลอไรด์ที่ได้จากการแช่ตัวอย่างคอนกรีตในน้ำทะเลระยะเวลา 9 ปี การวิเคราะห์เชิงถดถอยในความสัมพันธ์ระหว่าง η กับ ปริมาณการแทนที่เถ้าแกลบ-เปลือกไม้บดละเอียด (GRBA) ได้ความสัมพันธ์ในรูปแบบของสมการโพลีโนเมียลดีกรีสอง ดังสมการที่ (8) และคำนวณหา C_0 ได้ดังสมการที่ (9)

$$\eta = (-7 \times 10^{-5})(GRBA)^2 + [(-0.0005)(W/B) + 0.0031] (GRBA) + (-0.605)(W/B) + 0.7990 \quad (8)$$

$$C_0 = [(-0.501)(W/B) + 3.4752] \ln(t) + (2.436)(W/B) + 0.4895 \quad (9)$$

โดย GRBA คือ ร้อยละการแทนที่เถ้าแกลบ-เปลือกไม้บดละเอียดในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และ W/B คืออัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน

แบบจำลองนี้สามารถใช้ทำนายปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด (total chloride) ที่ตำแหน่งใดๆ จากผิวหน้าคอนกรีตและระยะเวลาแช่น้ำทะเลตั้งแต่ 2 ปี ขึ้นไป ในคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้บดละเอียดไม่เกินร้อยละ 50 และมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานในช่วง 0.45 ถึง 0.65

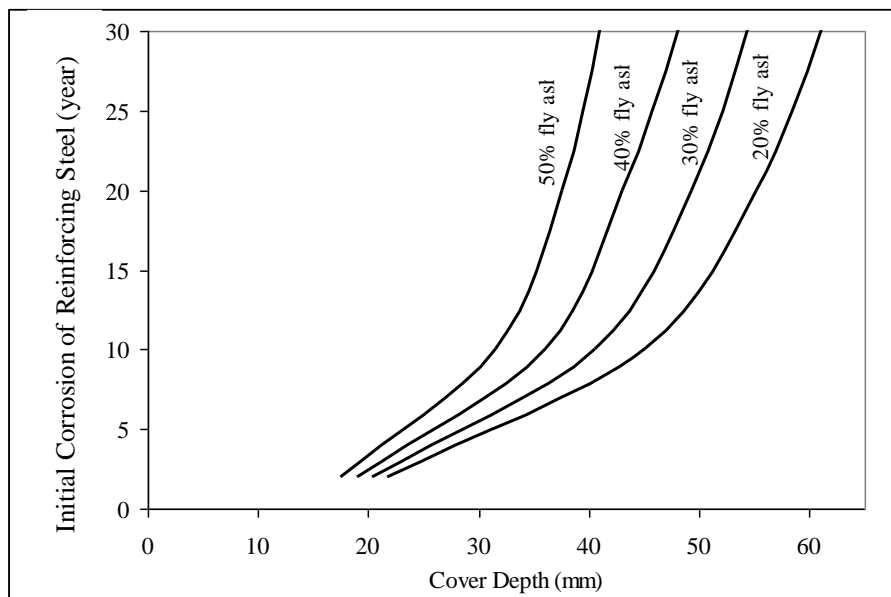
3. การประยุกต์ใช้แบบจำลอง

การสร้างแบบจำลองเพื่อทำนายอายุการใช้งานของคอนกรีตในสภาพแวดล้อมที่รุนแรงมีวัตถุประสงค์เพื่อตรวจสอบอายุการใช้งานของโครงสร้างที่ได้ก่อสร้างไว้แล้ว และใช้เป็นข้อมูลประกอบการออกแบบโครงสร้างใหม่ให้มีความคงทนต่อการถูกทำลายและมีอายุการใช้งานที่ยาวนานขึ้น

แบบจำลองที่ใช้ทำนายระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กในคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหิน และการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบเปลือกไม้บดละเอียดตั้งที่กล่าวมาข้างต้น สามารถใช้ได้กับโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ไม่มีรอยแตกและมีลักษณะการซึมผ่านของคลอไรด์ในทิศทางเดียวเท่านั้น เนื่องจากข้อมูลของปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตหาได้จากตัวอย่างที่เจาะตรงตำแหน่งกึ่งกลางของคอนกรีตลูกบาศก์ขนาด 200x200x200 มม.³ ซึ่งสมมุติให้เป็นการซึมผ่านในทิศทางเดียวจากพื้นผิวของทรงลูกบาศก์

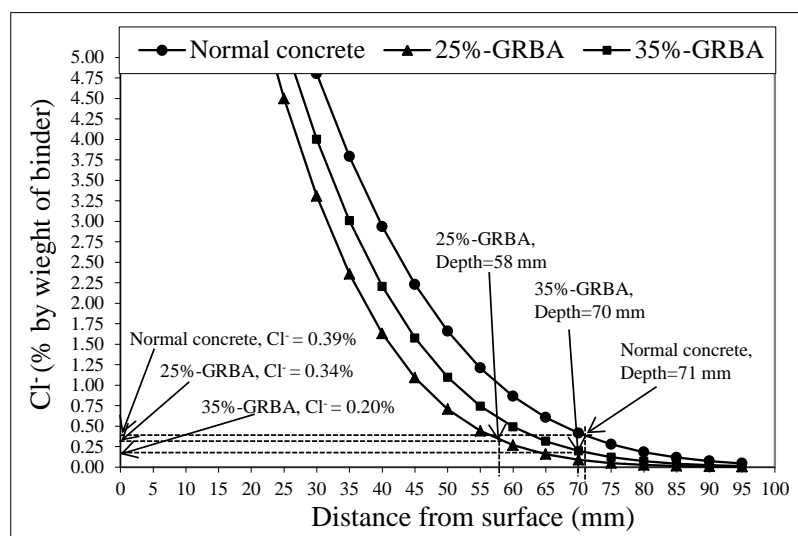
ลงไปในแนวตั้งของตัวอย่างคอนกรีต โดยโครงสร้างที่เหมาะสมในการใช้แบบจำลองนี้ได้แก่ พื้นฐานราก หรือโครงสร้างอื่นๆที่มีลักษณะการซึมเข้าของคลอไรด์ในโครงสร้างคอนกรีตในลักษณะทิศทางเดียว การใช้แบบจำลองดังกล่าวจะต้องพิจารณาควบคู่กับการรับแรงเชิงกลที่เหมาะสมด้วย โดยกำลังอัดของคอนกรีตที่อายุ 28 วันไม่ควรต่ำกว่า 350 กก/ซม² นอกจากนี้ข้อจำกัดด้านอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานของแบบจำลองจะเห็นว่า แบบจำลองนี้เหมาะสมในการเลือกส่วนผสมคอนกรีตที่ใช้ถ้าถ่านหิน หรือถ้าเกลือเปลือกไม้บดละเอียด เป็นส่วนผสมในการปรับปรุงคุณสมบัติของคอนกรีตเท่านั้น เนื่องจากต้องเลือกอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานในช่วง 0.45 ถึง 0.65 โดยในคอนกรีตธรรมดาที่ไม่ได้ผสมถ่านหินจะถือว่ามีค่าที่สูงและไม่เหมาะสมที่จะนำมาใช้ในคอนกรีตที่ผสมน้ำทะเล ซึ่งในกรณีของคอนกรีตธรรมดา ACI 201.2R -7 ได้แนะนำให้ใช้คอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานไม่เกิน 0.45

แบบจำลองที่ใช้ทำนายระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กในคอนกรีตที่ผสมถ่านหิน สามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็ก กับระยะเวลาที่คอนกรีตแช่ในสภาวะแวดล้อมทะเลก่อนที่จะเริ่มมีการกัดกร่อนเหล็กเสริมขึ้น ในคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.45 ดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กกับระยะเวลาที่คอนกรีตแช่ในสภาวะแวดล้อมทะเลก่อนที่การกัดกร่อนเหล็กเสริมจะเกิดขึ้นในคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45 [6]

ส่วนแบบจำลองที่ใช้ทำนายปริมาณของคลอไรด์ทั้งหมด ที่แทรกซึมเข้าไปในคอนกรีตที่ผสม แก้วกลบ-เปลือกไม้บดละเอียดภายใต้สิ่งแวดล้อมทะเลบริเวณชายฝั่ง มีประโยชน์ในการกำหนดระยะ คอนกรีตหุ้มเหล็กเพื่อให้สอดคล้องกับอายุการใช้งาน ของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่อยู่ในสิ่งแวดล้อม ทะเล ในช่วงเวลาก่อนการกัดกร่อนเริ่มต้น ตัวอย่างการใช้งานของแบบจำลองแสดงดังรูปที่ 2 ที่ได้แสดงการ กำหนดระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเพื่อป้องกันการกัดกร่อนเริ่มต้น จากข้อมูลการแทรกซึมของคลอไรด์ที่ได้จาก แบบจำลองในคอนกรีตธรรมดา คอนกรีตที่ผสมแก้วกลบ-เปลือกไม้บดละเอียดร้อยละ 25 และ 35 โดย น้ำหนักวัสดุประสาน ที่มี $W/B=0.45$ และแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 40 ปี จากงานวิจัยที่ผ่านมา [8] พบว่า คอนกรีตธรรมดาคอนกรีตที่ผสมแก้วกลบ-เปลือกไม้บดละเอียดร้อยละ 25 และ 35 โดยน้ำหนักวัสดุ ประสาน ที่มี $W/B=0.45$ มีปริมาณคลอไรด์วิกฤติ เท่ากับร้อยละ 0.39, 0.34 และ 0.20 โดยน้ำหนักวัสดุ ประสาน ตามลำดับ จากปริมาณคลอไรด์วิกฤติของคอนกรีตที่ผสมแก้วกลบ-เปลือกไม้ดังกล่าว สามารถใช้ กำหนดระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเพื่อป้องกันการกัดกร่อนเริ่มต้นในคอนกรีตกลุ่มนี้ หลังแช่ในสิ่งแวดล้อมทะเล บริเวณชายฝั่งเป็นเวลา 40 ปี ได้เท่ากับ 71, 58 และ 70 มม. ตามลำดับ ข้อมูลการแทรกซึมของคลอไรด์ เนื่องจากน้ำทะเล เข้าไปในคอนกรีตในระยะยาว ยังสามารถใช้ทำนายอายุการใช้งานของโครงสร้างคอนกรีต เสริมเหล็ก ตลอดจนเป็นข้อมูลประกอบการเลือกส่วนผสมคอนกรีต ที่ต้องการก่อสร้างในสิ่งแวดล้อมทะเลให้ สามารถใช้งานได้ตามอายุการใช้งานที่ต้องการได้ อย่างไรก็ตามแบบจำลองนี้ได้สร้างจากฐานข้อมูล ที่แช่ ตัวอย่างคอนกรีตในสิ่งแวดล้อมทะเล ที่ไม่อยู่ในสภาวะการรับแรงเชิงกล ดังนั้นผลที่ได้จากการทำนายเมื่อ เทียบกับการใช้งานจริง ที่อยู่ภายใต้การรับแรงของโครงสร้างอาจแตกต่างกันได้



รูปที่ 2 การกำหนดระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเพื่อป้องกันการกัดกร่อนเริ่มต้น จากผลการทำนาย ปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้บดละเอียด ที่มี W/B=0.45 และแช่น้ำ ทะเลเป็นเวลา 40 ปี [7]

4. สรุปและข้อเสนอแนะ

ความเสียหายของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กภายใต้สภาวะแวดล้อมที่รุนแรงจะเกิดขึ้นใน 2 สถานะ ได้แก่ สถานะที่เริ่มมีการกัดกร่อน (corrosion initiation) และสถานะที่การกัดกร่อนขยายอย่างต่อเนื่อง (corrosion propagation) โดยความเสียหายที่เกิดขึ้นทั้ง 2 สถานะจะพิจารณาจากการเกิดสนิมเหล็กในคอนกรีตเสริมเหล็กเพียงอย่างเดียว ทั้งนี้เนื่องจากในสภาวะแวดล้อมที่มีความรุนแรง การเกิดสนิมของเหล็กเสริมคอนกรีตเป็นความเสียหายหลักที่เกิดขึ้นเร็วและค่อนข้างรุนแรง สถานะที่คอนกรีตเสริมเหล็กเริ่มมีการกัดกร่อน คือ สถานะที่เกลือคลอไรด์แทรกซึมเข้าไปในคอนกรีตจนมีความเข้มข้นถึงระดับคลอไรด์วิกฤติ (chloride threshold) ซึ่งฟิล์มบางรอบผิวเหล็กในคอนกรีตยังไม่ถูกทำลาย แต่เริ่มจะถูกทำลาย หลังจากนั้นเมื่อความเข้มข้นของคลอไรด์อยู่ในระดับที่สูงกว่าปริมาณคลอไรด์วิกฤติ เหล็กเสริมสูญเสียการป้องกันจากฟิล์มบางรอบผิวเหล็ก ส่งผลให้เหล็กเสริมคอนกรีตเริ่มเกิดสนิมเหล็กขึ้น และมีการเกิดอย่างต่อเนื่อง ซึ่งเข้าสู่สถานะที่การกัดกร่อนขยายอย่างต่อเนื่อง

การศึกษาที่ผ่านมาพบว่าการเสนอแบบจำลองเพื่อใช้ในการทำนายอายุการใช้งานของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กในสภาพแวดล้อมทะเล ซึ่งพิจารณาความเสียหายที่เกิดกับเหล็กเสริมคอนกรีตเป็นหลัก ตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับการสร้างแบบจำลองขึ้นกับ (1) ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็ก (2) ส่วนผสมของคอนกรีต ได้แก่ ปริมาณวัสดุปอซโซลานและอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน และ (3) สมบัติของคอนกรีต ได้แก่ สัมประสิทธิ์การการแพร่ของคลอไรด์ ระดับคลอไรด์วิกฤติ และความเข้มข้นของคลอไรด์ที่ผิว เป็นต้น ในการเลือกใช้แบบจำลองเพื่อประกอบในการเลือกส่วนผสมคอนกรีต ที่ใช้ในการก่อสร้างในสิ่งแวดล้อมทะเล ควรคำนึงถึงข้อจำกัดการใช้งานของแบบจำลองนั้นๆ อย่างมาก เนื่องจากแบบจำลองจะมีความถูกต้องได้ ต้องถูกสร้างมาจากข้อมูลที่มีความน่าเชื่อถือ และสอดคล้องกับลักษณะการใช้งานของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่จะถูกสร้างขึ้นในอนาคต

5. เอกสารอ้างอิง

[1] Chalee W, Jaturapitakkul C., Effect of W/B ratios and fly ash finenesses on chloride diffusion coefficient of concrete in marine environment. Mater Struct 2009; 42: 505-515.

[2] Thomas MDA, Matthews JD. Performance of pfa concrete in a marine environment-10-year results. Cem Concr Res 2004; 26: 5-20.

[3] Cheewaket T, Jaturapitakkul C, Chalee W., Long term performance of chloride binding capacity in fly ash concrete in a marine environment. Constr Build Mater 2010; 24: 1352-1357.

[4] Chindaprasirt P., Chotithanorm C., Cao, H.T. and Sirivivatnanon V., Influence of Fly Ash Fineness on the Chloride Penetration of Concrete. Construction and Building Materials 2007, Vol. 21, pp. 356-361.

[5] Somna R., Jaturapitakkul C., Rattanachu P and Chalee W., Effect of ground bagasse ash on mechanical and durability properties of recycled aggregate concrete. Materials and Design 2012, 36, pp.597-603,

[6] Chalee W, Ausapanit P, Jaturapitakkul C., Utilization of fly ash concrete in marine environment for long term design life analysis. Mater Design 2010;3:1242-1249.

[7] ชัย จาตุรพิทักษ์กุล และ วิเชียร ชาลี, 2559 “การทำนายการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ภายใต้สภาวะแวดล้อมทะเล” วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ 26(1), หน้า 1-12

[8] วิเชียร ชาลี, 2556, “ระดับคลอไรด์วิกฤติในคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบเปลือกไม้ที่แช่ในสภาวะแวดล้อมทะเล”วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา 18(2), หน้า 132-143