การประเมินปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เนื่องจากการบำรุงรักษาเพื่อยืดอายุโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่อยู่ภายใต้อิทธิพลคลอไรด์ของประเทศไทย

อรุษ เพชรเชิดชู[1]* และ ปวีณา นฤพันธุ์กุลชัย[2]

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการประเมินปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เนื่องจากการบำรุงรักษาโดยวิธีเปลี่ยนผิวคอนกรีตเพื่อยืดอายุการใช้งานโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่อยู่ภายใต้อิทธิพลคลอไรด์ของประเทศไทย ในบทความนี้อายุการใช้งานซึ่งถูกนิยามเป็นเวลาที่ทำการบำรุงรักษาจะได้รับการทำนายโดยพิจารณาการแพร่ผ่านของคลอไรด์ที่เป็นไปตามสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยของกฎข้อที่สองของฟิกส์ หลังจากการบำรุงรักษาโครงสร้างด้วยวิธีเปลี่ยนผิวคอนกรีตแล้วพบว่าการแก้สมการเชิงอนุพันธ์ย่อยมีความซับซ้อนเนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ผ่านของคลอไรด์ไม่เป็นค่าคงที่ แต่ขึ้นอยู่กับค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ผ่านในคอนกรีตเดิมและคอนกรีตบำรุงรักษา นอกจากนี้ถ้าค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ผ่านขึ้นกับเวลาอีกด้วยแล้วการแก้สมการเชิงอนุพันธ์ย่อยจะมีความซับซ้อนมากขึ้นอีก ดังนั้นบทความนี้จึงได้เสนอการคำนวณทางตัวเลขด้วยวิธีไฟไนต์ดิฟเฟอร์เรนซ์แบบ Crank-Nicolson มาช่วยแก้ปัญหา ผลการคำนวณทั้งก่อนและหลังการบำรุงรักษาแสดงอยู่ในรูปของปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตกับระยะจากผิวคอนกรีตและกับเวลา ทำให้สามารถทำนายอายุการใช้งานได้ นอกจากการบำรุงรักษาแล้ว ก๊าซปรากฏการณ์เรือนกระจกในรูปของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดจากการใช้คอนกรีตบำรุงรักษาจะได้รับการประเมินด้วยเช่นกัน การประเมินทั้งหลายเหล่านี้เป็นการพิจารณาโครงสร้างในประเทศไทย ดังนั้นจึงเน้นใช้ข้อมูลในประเทศไทย จากการศึกษาพบว่าการบำรุงรักษาที่ดีและมีประสิทธิภาพ ไม่เพียงแต่ยืดอายุการใช้งานของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กภายใต้อิทธิพลของคลอไรด์ อีกทั้งยังช่วยลดก๊าซปรากฏการณ์เรือนกระจกในรูปของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้เช่นกัน

คำสำคัญ: ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ การบำรุงรักษา อายุการใช้งาน โครงสร้างคอนกรีต อิทธิพลคลอไรด์ของประเทศไทย

[1] ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

[2] นักศึกษา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทรศัพท์ 0-2555-2000 ต่อ 8620 อีเมล: aruzp@kmutnb.ac.th

รับเมื่อ 13 สิงหาคม 2556 ตอบรับเมื่อ 17 มกราคม 2557

Assessment of CO_2 due to Repairs for Extending Service Life of Reinforced Concrete Structures under Chloride Environment in Thailand

Aruz Petcherdchoo[1]* and Paweena Narupankulchai[2]

Abstract

This paper presents the assessment of CO_2 due to repairs by concrete cover replacement for extending service life of reinforced concrete structures under chloride environment in Thailand. In the paper, the service life is predicted based on the mechanism of chloride ion diffusion which can be described using the partial differential equation (PDE) of the Fick's second law. After repairs, it is found that solving the PDE is complicated due to non-constant diffusion coefficient. Furthermore, if the diffusion coefficient is time dependent, it is even more complicated to solve the PDE. Therefore, numerical computation by the Crank-Nicolson based finite difference method is introduced as a computational tool. The computation of the chloride profiles before and after repairs can be shown, and the service life can be predicted. In addition to the prediction of the service life, the greenhouse effect gas in terms of CO_2, which occurs when using repair materials, is also considered. The assessment of CO_2 is based on the data mainly collected in Thailand. From the study, it is found that appropriate repairs can not only extend the service life of reinforced concrete structures under chloride environment, but also help reduce the amount of the greenhouse effect gas in terms of CO_2.

Keywords: CO_2, Repairs, Service Life, Concrete Structures, Chloride Environment in Thailand

[1] Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology North Bangkok.

[2] Student, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology North Bangkok.

* Corresponding Author, Tel. 0-2555-2000 Ext.8620, E-mail: aruzp@kmutnb.ac.th

Received 13 August 2013; Accepted 17 January 2014

1. บทนำ

โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่อยู่ในสภาพแวดล้อมที่มีคลอไรด์ปะปนอยู่มาก เช่น พื้นที่ใกล้น้ำทะเล เป็นต้น ผลกระทบจากคลอไรด์เป็นหนึ่งในปัจจัยสำคัญที่ก่อให้เกิดการเสื่อมสภาพของโครงสร้างในรูปของการสึกกร่อนของเหล็กเสริม โดยคลอไรด์จะค่อยๆ แพร่เข้าไปในเนื้อคอนกรีต และเมื่อคลอไรด์ที่มีปริมาณมากพอแพร่ถึงผิวของเหล็กเสริมในคอนกรีต รวมทั้งมีน้ำกับออกซิเจนในปริมาณที่เพียงพอ กระบวนการทางไฟฟ้าเคมีที่ทำให้เหล็กเสริมเกิดสนิมก็จะเริ่มต้นขึ้น โดยทั่วไปแล้วสนิมนี้จะมีปริมาตรมากกว่าสารตั้งต้น ดังนั้นบริเวณที่เกิดสนิมจะมีปริมาตรเพิ่มขึ้น ส่งผลให้เกิดแรงดันในคอนกรีตบริเวณเหล็กเสริมที่เกิดสนิม ทำให้คอนกรีตเกิดการแตกร้าว และเมื่อเหล็กเสริมเกิดสนิมแล้ว กำลังยึดเหนี่ยวระหว่างเหล็กเสริมกับคอนกรีตบริเวณที่เกิดสนิมจะลดลง รวมทั้งขนาดหน้าตัดของเหล็กเสริมจะมีขนาดลดลง ทำให้กำลังรับแรงดัดและแรงเฉือนลดน้อยลง สิ่งเหล่านี้ทำให้อายุของโครงสร้างคอนกรีตสั้นลงและเป็นอันตรายต่อการใช้งาน ดังนั้นเพื่อป้องกันการเสื่อมสภาพของโครงสร้างคอนกรีต จึงควรมีการศึกษาแนวทางในการบำรุงรักษาหรือซ่อมแซมคอนกรีตที่ดีและมีประสิทธิภาพ

แม้ว่าการบำรุงรักษาจะเป็นไปเพื่อยืดอายุการใช้งานของโครงสร้างคอนกรีต แต่ในทางกลับกันก็ก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมด้วย เช่น ปัญหาการปล่อยก๊าซเรือนกระจกโดยเฉพาะก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในกระบวนการผลิตวัสดุบำรุงรักษา เช่น ซีเมนต์ในคอนกรีต ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการศึกษาการบำรุงรักษาที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมให้น้อยที่สุด

Song et al. [1] ศึกษาอายุการใช้งานโครงสร้างคอนกรีตที่อยู่ภายใต้อิทธิพลของคลอไรด์โดยใช้ข้อมูลจากแหล่งต่างๆ ซึ่งไม่ใช่ประเทศไทย อย่างไรก็ตามถ้าต้องการศึกษาอายุการใช้งานโครงสร้างที่อยู่ภายใต้อิทธิพลคลอไรด์และมีการบำรุงรักษาในประเทศไทย ข้อมูลที่ใช้ต้องเป็นข้อมูลในประเทศไทย เพื่อให้การประเมินอายุการใช้งานมีความสอดคล้องกับอิทธิพลคลอไรด์ในประเทศไทย

Petcherdchoo [2] ศึกษาอายุการใช้งานและปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในกระบวนการบำรุงรักษาโครงสร้างอย่างเดียว อย่างไรก็ตามเพื่อให้ผลการศึกษามีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น จึงต้องพิจารณาปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นทั้งในกระบวนการผลิตวัสดุบำรุงรักษาและกระบวนการบำรุงรักษาโครงสร้าง

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นทั้งในกระบวนการผลิตวัสดุบำรุงรักษาและการบำรุงรักษาโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่อยู่ภายใต้อิทธิพลคลอไรด์ของประเทศไทย เพื่อให้บรรลุวัตถุประสงค์นี้ จะต้องพิจารณา 2 ปัญหาหลัก คือการแพร่ผ่านของคลอไรด์ในโครงสร้างคอนกรีต และการประเมินปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ดังต่อไปนี้

2. การแพร่ผ่านของคลอไรด์ในโครงสร้างคอนกรีต

2.1 โครงสร้างคอนกรีตที่ไม่มีการบำรุงรักษา

บทความนี้ประเมินอายุการใช้งานโครงสร้างคอนกรีตที่ถูกผลกระทบจากคลอไรด์ โดยพิจารณาการแพร่ผ่านของคลอไรด์จากภายนอกเข้าไปสู่โครงสร้างคอนกรีต การแพร่ผ่านนี้ถูกกำหนดให้เป็นไปตามกฎข้อที่สองของฟิกส์ (Fick's Second Laws) [3] ทำให้เขียนสมการเชิงอนุพันธ์ย่อย (PDE) ได้ดังนี้

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \tag{1}$$

โดย C คือปริมาณของคลอไรด์ที่ขึ้นอยู่กับตำแหน่ง x และเวลา t และ D คือสัมประสิทธิ์การแพร่ผ่านของคลอไรด์ในคอนกรีต

2.2 โครงสร้างคอนกรีตที่มีการบำรุงรักษา

การพิจารณาการแพร่ผ่านของคลอไรด์ในโครงสร้างคอนกรีตที่มีการบำรุงรักษาจะมี 2 ขั้นตอนหลัก [1] ดังนี้

1. ก่อนการบำรุงรักษา ปริมาณคลอไรด์จะแพร่จากด้านนอกเข้าไปในคอนกรีตเดิม ซึ่งสัมประสิทธิ์การแพร่ผ่านเป็นค่าคงที่ ทำให้สามารถใช้สมการที่ 1 ในการพิจารณาการแพร่ผ่านของคลอไรด์ในคอนกรีตได้

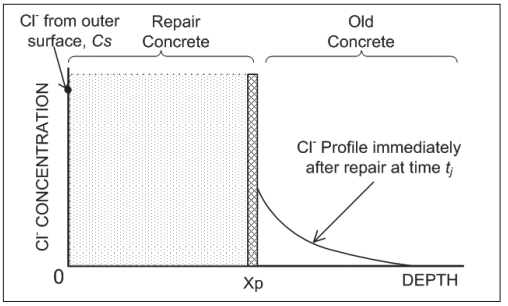
2. หลังจากที่ทำการบำรุงรักษาคอนกรีตด้วยวิธีเปลี่ยนผิวคอนกรีต (Concrete Cover Replacement) ซึ่ง REHABCON [4] ได้ให้คำนิยามว่า เป็นการเปลี่ยนผิวคอนกรีตที่มีสารคลอไรด์ปนเปื้อนออกแล้วแทนที่ด้วยวัสดุบำรุงรักษา เช่น คอนกรีต โพลิเมอร์ เป็นต้น จะพบว่าจากรูปที่ 1 ณ เวลา t_j ผิวคอนกรีตจะถูกสกัดออกเป็นระยะ x_p และถูกแทนที่ด้วยคอนกรีตบำรุงรักษา ดังนั้นปริมาณคลอไรด์ที่อยู่ในผิวคอนกรีตก็จะถูกกำจัดออกด้วย

หลังจากนั้น ขั้นตอนการแพร่ของคลอไรด์สามารถแบ่งได้เป็น 3 ขั้นตอนย่อย ดังแสดงในรูปที่ 2 คือ ขั้นตอนย่อยที่หนึ่ง ณ เวลา t_j ปริมาณของคลอไรด์ในคอนกรีตเดิมจะมีพฤติกรรมที่ไม่เป็นเชิงเส้น หรือเท่ากับ $C(x, t)$

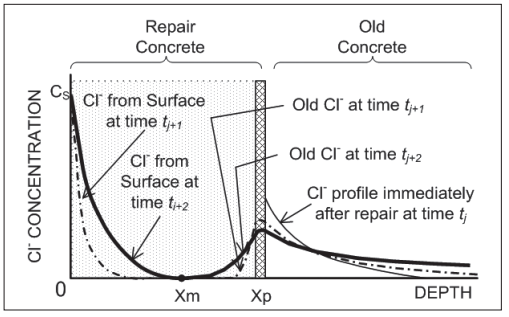
ขั้นตอนย่อยที่สอง ณ เวลา t_{j+1} คลอไรด์ที่บริเวณความลึก x_p สามารถแพร่ไปได้สองทาง คือแพร่ย้อนกลับเข้าไปในคอนกรีตบำรุงรักษาและแพร่ต่อเข้าไปในคอนกรีตเดิมที่อยู่ลึกเข้าไป เมื่อปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตเดิมแพร่ย้อนกลับเข้าไปในคอนกรีตบำรุงรักษาจะพบว่าสัมประสิทธิ์การแพร่ผ่านของคลอไรด์ขึ้นกับตำแหน่ง เนื่องจากคอนกรีตเดิมและคอนกรีตบำรุงรักษามีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ผ่านที่ต่างกัน และถ้าสัมประสิทธิ์นี้ขึ้นกับเวลาเนื่องจากอายุของโครงสร้างคอนกรีตอีกด้วยแล้ว สัมประสิทธิ์การแพร่ผ่านจะเท่ากับ $D(x, t)$ ดังนั้นสามารถเขียนสมการเชิงอนุพันธ์ย่อย [5] ได้ดังนี้

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} D(x,t) \frac{\partial C}{\partial x} \qquad (2)$$

ขั้นตอนย่อยสุดท้าย ณ เวลา t_{j+2} เมื่อคลอไรด์ที่แพร่จากผิวนอกคอนกรีตเข้ามารวมกับคลอไรด์ที่แพร่ย้อนกลับเข้ามาสู่คอนกรีตบำรุงรักษาที่จุด x_m การแก้สมการเชิงอนุพันธ์ย่อยจะซับซ้อนมากขึ้น ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเสนอการคำนวณทางตัวเลขด้วยวิธีไฟไนต์ดิฟเฟอร์เรนซ์ (Finite Difference Method) ในรูปแบบของ Crank-Nicolson [6] มาช่วยแก้ปัญหา ดังนั้นเมื่อพิจารณาสมการที่ 2 จะสามารถเขียนสมการไฟไนต์ดิฟเฟอร์เรนซ์ได้ดังนี้



รูปที่ 1 ปริมาณคลอไรด์ทันทีหลังทำการบำรุงรักษา



รูปที่ 2 ปริมาณคลอไรด์หลังทำการบำรุงรักษา

$$\frac{c_{i,j+1} - c_{i,j}}{\Delta t} = \frac{1}{2}\left\{\left[\frac{D_{i+1/2}\left(c_{i+1} - c_i\right)_{,j+1} - D_{i-1/2}\left(c_i - c_{i-1}\right)_{j+1}}{\left(\Delta x\right)^2}\right] + \left[\frac{D_{i+1/2}\left(c_{i+1} - c_i\right)_{,j} - D_{i-1/2}\left(c_i - c_{i-1}\right)_{,j}}{\left(\Delta x\right)^2}\right]\right\} \qquad (3)$$

โดย $C_{i,j}$ และ $C_{i,j+1}$ คือปริมาณของคลอไรด์ที่ตำแหน่งใดๆ i ในคอนกรีต ณ เวลา j และ $j + 1$ ตามลำดับ (ดังแสดงในรูปที่ 1 และ 2), Δx คือระยะห่างระหว่างจุดที่ใช้คำนวณปริมาณคลอไรด์ และ Δt คือระยะเวลาที่เปลี่ยนไป นอกจากนี้ $D_{i,j+1/2}$ และ $D_{i,j-1/2}$ เท่ากับ $(D_i + D_{i,j+1})/2$ และ $(D_{i-1} + D_{i,})/2$ ตามลำดับ

เมื่อผิวคอนกรีตถูกแทนที่ด้วยคอนกรีตบำรุงรักษา สัมประสิทธิ์การแพร่ผ่านของคอนกรีตจะถูกเปลี่ยนค่าเป็นสัมประสิทธิ์ของคอนกรีตบำรุงรักษา เช่น ณ ตำแหน่งที่ถูกแทนที่ x สัมประสิทธิ์การแพร่ผ่านของคอนกรีตเดิม $(D_x)_0$ จะถูกเปลี่ยนเป็นสัมประสิทธิ์ของคอนกรีตบำรุงรักษา $(D_x)_{CR}$

นอกจากนี้ยังสามารถสังเกตได้ว่า ถ้าสัมประสิทธิ์การแพร่ผ่านเป็นค่าคงที่ สมการที่ 2 จะลดรูปเป็นสมการที่ 1 และสมการที่ 3 จะลดรูปเป็นสมการที่สามารถใช้คำนวณในขั้นตอนก่อนการบำรุงรักษา (ขั้นตอนหลักที่ 1) ดังต่อไปนี้

$$\frac{c_{i,j+1}-c_{i,j}}{\Delta t}=\frac{D}{2}\left[\frac{\left(c_{i+1,j+1}-2c_{i,j+1}+c_{i-1,j+1}\right)}{(\Delta x)^2}+\frac{\left(c_{i+1,j}-2c_{i,j}+c_{i-1,j}\right)}{(\Delta x)^2}\right] \quad (4)$$

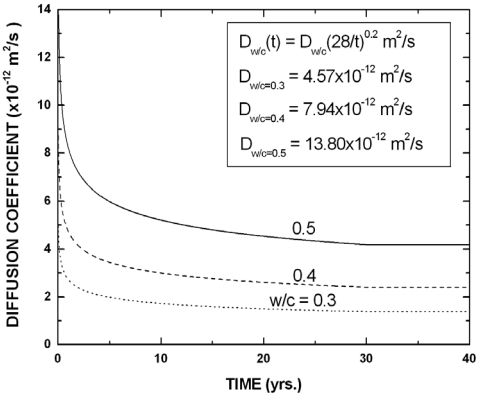
2.3 ปริมาณคลอไรด์ที่ผิว

ในการทำนายอายุการใช้งานโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่อยู่ภายใต้ผลกระทบจากคลอไรด์ ปริมาณคลอไรด์ที่ผิว (Surface Chloride) เป็นตัวแปรที่ถูกใช้คำนวณหาปริมาณคลอไรด์ที่แพร่ผ่านเข้าไปที่ผิวคอนกรีต ปริมาณของคลอไรด์ที่ผิวนี้ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง เช่น ระยะทางที่โครงสร้างห่างจากน้ำทะเล สภาพแวดล้อมภายนอกพื้นผิวโครงสร้าง (เช่น ลักษณะของอากาศ น้ำขึ้นน้ำลง การกระเซ็นของน้ำ หรือชิ้นส่วนโครงสร้างจำพวกเสาตอม่อที่อยู่ในทะเล) และคุณสมบัติของคอนกรีต งานวิจัยของ Petcherdchoo [7] ได้เลือกใช้ค่าปริมาณของคลอไรด์ที่ผิวสำหรับโครงสร้างคอนกรีตที่อยู่ติดน้ำทะเลเท่ากับ 9 กก./ลบ.ม. ซึ่งเป็นข้อกำหนดจาก JSCE [8]

งานวิจัยนี้ใช้ข้อมูลปริมาณคลอไรด์ที่ผิวที่ระบุในข้อกำหนดมาตรฐานงานคอนกรีตเมื่อพิจารณาความคงทนและอายุการใช้งานรวมทั้งสภาพแวดล้อมของโครงสร้างในประเทศไทยตาม มยผ. 1332-50 [9] โดยโครงสร้างที่ตั้งอยู่ใกล้บริเวณน้ำขึ้น-น้ำลง ให้ใช้ปริมาณคลอไรด์ที่ผิวเท่ากับ 13 กก./ลบ.ม. และโครงสร้างบนพื้นดินที่ห่างจากฝั่ง 100 ม. ใช้ปริมาณคลอไรด์ที่ผิวเท่ากับ 4.5 กก./ลบ.ม.

2.4 สัมประสิทธิ์การแพร่ผ่านของวัสดุ

การสึกกร่อนของเหล็กเสริมในโครงสร้างคอนกรีตมีความสัมพันธ์กับสัมประสิทธิ์การแพร่ผ่านในคอนกรีต กล่าวคือ ถ้าคอนกรีตมีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ผ่านสูง จะทำให้คลอไรด์แพร่ผ่านเข้าคอนกรีตได้ง่าย แต่ถ้าค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ผ่านมีค่าน้อย คลอไรด์จะแพร่ผ่านเข้าคอนกรีตได้ยาก สัมประสิทธิ์การแพร่ผ่านนี้จะมีค่าแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุ เช่น คอนกรีตโพลิเมอร์ และสารเคลือบผิวคอนกรีต เป็นต้น



รูปที่ 3 สัมประสิทธิ์การแพร่ผ่านที่ขึ้นกับเวลา

บทความนี้ใช้สัมประสิทธิ์การแพร่ผ่านที่แปรผันตามเวลาหรืออายุของคอนกรีต ที่ได้จากการศึกษาของ Song et al. [1] ดังนี้

$$D_{w/c}(t)=D_{w/c}\left(\frac{t_R}{t}\right)^{0.2} \quad t \le 30 \text{ ปี} \quad (5)$$

$$D_{w/c}(t)=D_{w/c}\left(\frac{t_R}{t_{\lim}}\right)^{0.2} \quad t > 30 \text{ ปี} \quad (6)$$

โดยค่า t_R เท่ากับ 28 วัน, $D_{w/c}=10^{(-12.06+2.4*w/c)}$, $t_{\lim}$ เท่ากับ 30 ปี และค่า *w/c* คืออัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ เมื่อ *w/c* มีค่าเท่ากับ 0.3, 0.4 และ 0.5 ซึ่งเป็นค่าคงที่ใช้ในบทความนี้ สัมประสิทธิ์การแพร่ผ่านที่แปรผันตามเวลาจะเป็นดังแสดงในรูปที่ 3 พบว่าเมื่อเวลาเพิ่มขึ้นสัมประสิทธิ์การแพร่ผ่านจะลดลง จนถึงเวลา 30 ปี จะเปลี่ยนเป็นค่าคงที่ การลดลงนี้มีสาเหตุมาจากการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์

2.5 เวลาในการบำรุงรักษา

การบำรุงรักษาด้วยวิธีเปลี่ยนผิวคอนกรีตจะถูกนำมาใช้ก็ต่อเมื่อปริมาณคลอไรด์ที่ความลึกวิกฤตมีค่าเท่ากับค่าวิกฤต ความลึกวิกฤตที่ใช้จะเป็นระยะความลึก

ของคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริม ซึ่งไม่จำเป็นต้องมีค่าเท่ากันทุกๆ โครงสร้าง แต่จะขึ้นอยู่กับโครงสร้างนั้นอยู่ในสภาวะแวดล้อมใด โดยงานวิจัยของ Petcherdchoo [7] ใช้ระยะหุ้มเหล็กเสริมเท่ากับ 80 มม. สำหรับโครงสร้างคอนกรีตที่ติดทะเล และค่านี้จะถูกใช้ในงานวิจัยนี้ ขณะที่ระยะความลึกที่ทำการบำรุงรักษา ถูกกำหนดไว้ที่ความลึกเท่ากับ 80 มม. และ 120 มม. จากผิวคอนกรีต

โดยทั่วไปแล้ว เงื่อนไขในการบำรุงรักษามีอยู่ 2 เงื่อนไขพื้นฐาน คือการบำรุงรักษาจะเกิดขึ้น เมื่อปริมาณคลอไรด์ที่ระยะหุ้มเหล็กเสริมมีค่าเท่ากับค่าวิกฤตที่ทำให้เกิดการสึกกร่อนของเหล็กเสริม และเมื่อเท่ากับค่าวิกฤตที่ทำให้คอนกรีตเกิดการแตกร้าว สำหรับค่าวิกฤตของปริมาณคลอไรด์ที่ทำให้เกิดการสึกกร่อนและแตกร้าวมีค่าเท่ากับ 1.2 [8] และ 2.0 กก./ลบ.ม. [10] ตามลำดับ

งานวิจัยนี้เลือกใช้ปริมาณคลอไรด์วิกฤตที่ทำให้เกิดการสึกกร่อนของเหล็กเสริม ซึ่งเท่ากับ 1.2 กก./ลบ.ม. เมื่อใดก็ตามที่ปริมาณคลอไรด์ที่ระยะหุ้มเหล็กเสริมมีค่าเท่ากับค่าวิกฤต จะทำการบำรุงรักษาโดยวิธีเปลี่ยนผิวคอนกรีตทันที หลังจากนั้นกระบวนการในการแพร่ผ่านของคลอไรด์ก็ยังคงดำเนินต่อไป จนกระทั่งปริมาณของคลอไรด์ที่ระยะหุ้มเหล็กเสริมมีค่าเท่ากับค่าวิกฤตอีกครั้งหนึ่ง การบำรุงรักษาเช่นเดียวกันกับครั้งแรกก็จะถูกใช้ไปเรื่อยๆ เป็นวัฏจักร จนสิ้นสุดเวลาที่ทำการพิจารณา

3. วิธีประเมินผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

การพิจารณาวัฏจักรชีวิตของโครงสร้างเป็นการพิจารณาผลกระทบทางด้านสิ่งแวดล้อมในขั้นตอนต่างๆ ที่เกิดขึ้นตลอดอายุการใช้งาน โดยเริ่มตั้งแต่การใช้วัตถุดิบการก่อสร้าง การบำรุงรักษา จนถึงการทำลายโครงสร้าง งานวิจัยนี้เน้นไปที่ขั้นตอนการบำรุงรักษาโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก ดังนั้นการประเมินผลกระทบทางด้านสิ่งแวดล้อมในรูปของปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จะเน้นไปในขั้นตอนนี้โดยใช้ข้อมูล 4 ประเภท ดังต่อไปนี้

1. ปริมาณผลกระทบในกระบวนการผลิตส่วนผสมคอนกรีต
2. ปริมาณส่วนผสมของคอนกรีต
3. ปริมาณผลกระทบในกระบวนการผสมคอนกรีต
4. ปริมาณผลกระทบในกระบวนการบำรุงรักษา

ปริมาณของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในกระบวนการผลิตส่วนผสมคอนกรีตถูกแสดงไว้ดังตารางที่ 1 [11],[12] ขณะที่ปริมาณส่วนผสมในการผลิตคอนกรีต 1 ลบ.ม. ได้ถูกแสดงไว้ในรูปของอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ (*w/c*) [13] ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 1 ปริมาณ CO_2 ในการผลิตส่วนผสมของคอนกรีต [11],[12]

ส่วนผสมคอนกรีต	ปริมาณ CO_2 (เทียบเท่าหน่วยกรัม)
ซีเมนต์ 1 กก.	847
มวลรวมละเอียด 1 กก.	3.92
มวลรวมหยาบ 1 กก.	45.9
น้ำ 1 กก.	0.11174

ตารางที่ 2 ส่วนผสมในการผลิตคอนกรีต 1 ลบ.ม. [13]

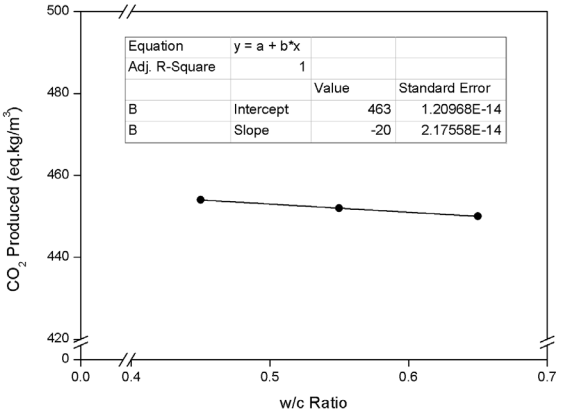
ส่วนผสม	*w/c*	ส่วนผสมคอนกรีต (กก./ลบ.ม.)			
		ซีเมนต์	มวลรวม		น้ำ
			ละเอียด	หยาบ	
I45	0.45	478	639	1024	215
I55	0.55	478	639	971	262
I65	0.65	478	639	922	311

เมื่อใช้ตารางที่ 1 และ 2 สามารถคำนวณปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของแต่ละส่วนผสมที่นำมาผลิตคอนกรีต 1 ลบ.ม. ดังแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ปริมาณ CO_2 ที่เกิดจากการผลิตส่วนผสมคอนกรีต 1 ลบ.ม.

ส่วนผสม	ปริมาณก๊าซ CO_2 (เทียบเท่าหน่วย กก./ลบ.ม.)				
	ซีเมนต์	มวลรวม		น้ำ	ผลรวม
		ละเอียด	หยาบ		
I45	405	2.50	47.00	0.0240	454
I55	405	2.50	44.57	0.0293	452
I65	405	2.50	42.32	0.0348	450

จากข้อมูลในตารางที่ 3 สามารถสร้างความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงระหว่างปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิตส่วนผสมคอนกรีต 1 ลบ.ม. และอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ (*w/c*) ได้ดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์กับ *w/c*

สมการที่ได้จากความสัมพันธ์ในรูปที่ 4 คือ

$$ICPR = 463 - 20(w/c) \quad (7)$$

โดย *ICPR* คือปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในการผลิตส่วนผสมคอนกรีต 1 ลบ.ม. ดังนั้นถ้าผลิตคอนกรีตบำรุงรักษาที่มีค่า *w/c* เท่ากับ 0.3, 0.4 และ 0.5 จำนวน 1 ลบ.ม. จะเกิดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่ากับ 457, 455 และ 453 กก. ตามลำดับ

สำหรับข้อมูลประเภทที่ 3 จะใช้ข้อมูลของ Sukontasukkul et al. [12] ที่ได้ศึกษาจนพบว่าในกระบวนการผสมคอนกรีต 1 ลบ.ม. ส่งผลให้เกิดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เท่ากับ 1.2 กก.

ข้อมูลประเภทสุดท้าย คือผลกระทบจากกระบวนการบำรุงรักษา จากการศึกษาของ Arskog et al. [14] พบว่าปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เฉลี่ยที่เกิดจากกระบวนการบำรุงรักษาคอนกรีต 1 ตร.ม. เท่ากับ 122 กก. ดังแจกแจงในตารางที่ 4

จากข้อมูลทั้งหมด สามารถคำนวณปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดจากการบำรุงรักษาจำนวน n ครั้งตลอดวัฏจักรชีวิตโดยใช้สมการดังนี้

$$CO_2 = n \cdot \left[ICPR \cdot x_r + ICPC \right] \quad (8)$$

โดยที่ *ICPR* คือปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในขั้นตอนการบำรุงรักษาคอนกรีต 1 ตร.ม. (122 กก./ตร.ม.) และ x_r คือความลึกที่ทำการบำรุงรักษา

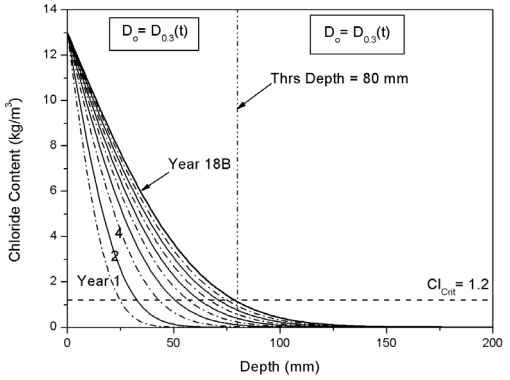
ตารางที่ 4 ปริมาณ CO_2 ที่เกิดจากกระบวนการบำรุงรักษาคอนกรีต 1 ตร.ม. [14]

ขั้นตอนการบำรุงรักษา	ปริมาณ CO_2 (เทียบเท่าหน่วย กก./ตร.ม.)
เอาคอนกรีตเดิมออก	84
ทำความสะอาดเหล็กเสริม	22
ฉีดสารเคลือบผิวเหล็กเสริม	1.4
กระบวนการเทคอนกรีต	4.4
การขนส่ง	10
ผลรวม	122

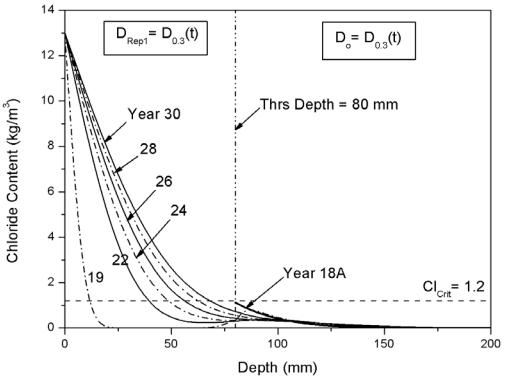
4. ตัวอย่างการประเมิน

4.1 อายุการใช้งานของโครงสร้าง

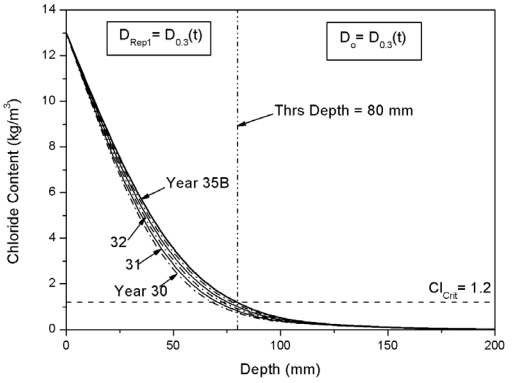
เมื่อพิจารณาโครงสร้างใกล้บริเวณน้ำขึ้น-น้ำลง แล้วปริมาณคลอไรด์ที่ผิวมีค่าเท่ากับ 13 กก./ลบ.ม. ถ้ากำหนดให้คอนกรีตเดิมและคอนกรีตบำรุงรักษามี *w/c* เท่ากับ 0.3 และความลึกที่ทำการบำรุงรักษาเท่ากับ 80 มม. รูปที่ 5 แสดงผลการศึกษาในรูปของปริมาณคลอไรด์ (Chloride Content, kg/m^3) กับความลึกจากผิวคอนกรีต (Depth, mm) จากรูปที่ 5ก ปริมาณคลอไรด์ที่ผิวมีค่าเท่ากับ 13 กก./ลบ.ม. ได้แพร่ผ่านเข้ามาในคอนกรีตเรื่อย ๆ จนกระทั่งถึงปีที่ 18B (B หรือ Before Repair หมายถึง ก่อนที่จะทำการบำรุงรักษา) พบว่าที่ความลึก 80 มม. ปริมาณคลอไรด์มีค่าเท่ากับค่าวิกฤติ คือ 1.2 กก./ลบ.ม. ทำให้เหล็กเสริมเริ่มเกิดการสึกกร่อน เพื่อป้องกันการสึกกร่อนนี้ จึงต้องทำการบำรุงรักษาโดยใช้วิธีเปลี่ยนผิวคอนกรีต ดังที่ได้แสดงในรูปที่ 5ข ทันทีหลังจากการบำรุงรักษา เส้นแสดงปริมาณคลอไรด์เป็นดังเส้นปีที่ 18A (A หรือ After Repair หมายถึง หลังการบำรุงรักษา) หลังจากนั้นคลอไรด์ในคอนกรีตเดิมสามารถแพร่ไปได้สองทาง คือแพร่ย้อนกลับเข้าไปในคอนกรีตบำรุงรักษา และแพร่ผ่านต่อไปยังคอนกรีตเดิมที่อยู่ลึกเข้าไป (สังเกตได้จากเส้นแสดงปริมาณคลอไรด์ในปีที่ 19 บริเวณความลึก 80 มม. จาก



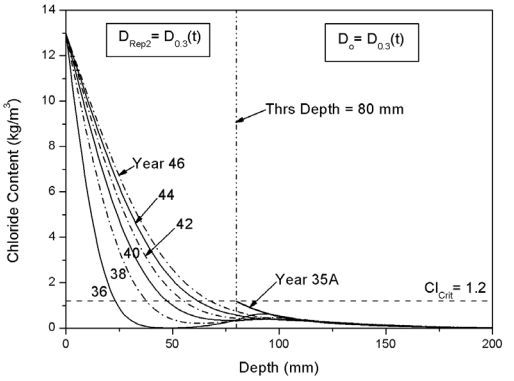
ก) ปริมาณคลอไรด์ปีที่ 1 ถึงปีที่ 18B



ข) ปริมาณคลอไรด์ปีที่ 18A ถึงปีที่ 30



ค) ปริมาณคลอไรด์ปีที่ 30 ถึงปีที่ 35B

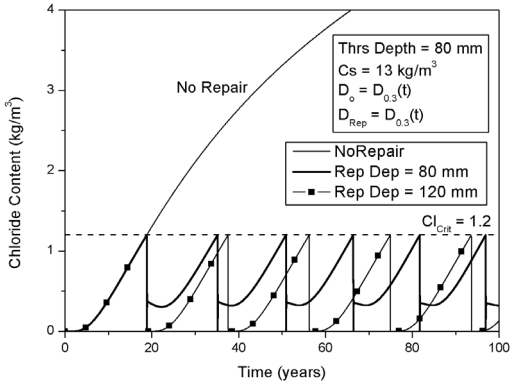


ง) ปริมาณคลอไรด์ปีที่ 35A ถึงปีที่ 46

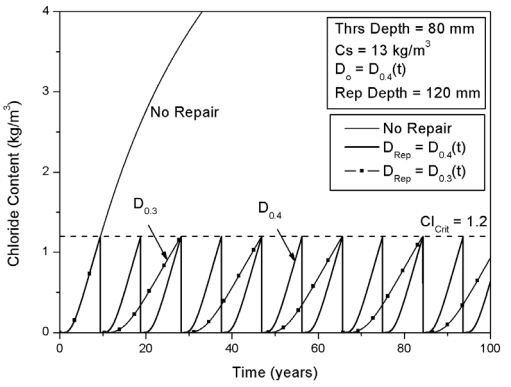
รูปที่ 5 ปริมาณคลอไรด์เทียบกับความลึกจากผิวคอนกรีต

ผิวคอนกรีต) ในขณะเดียวกันคลอไรด์ที่ผิวจะแพร่ผ่านเข้ามาสู่คอนกรีตบำรุงรักษา (สังเกตได้จากเส้นแสดงปริมาณคลอไรด์ในปีที่ 19 ณ บริเวณผิวคอนกรีต) จนกระทั่งถึงปีที่ 35B (Before Repair) ดังรูปที่ 5ค ที่ความลึก 80 มม. ปริมาณคลอไรด์มีค่าเท่ากับค่าวิกฤตอีกครั้งหนึ่ง ดังนั้นจึงได้ทำการบำรุงรักษาอีกครั้งทันทีเหมือนกับครั้งแรก จากนั้นคลอไรด์ก็ยังคงแพร่ผ่านเข้าไปในคอนกรีต ดังรูปที่ 5ง โดยกลไกการแพร่ผ่านของคลอไรด์และระยะเวลาที่ต้องทำการบำรุงรักษาจะเกิดขึ้นเป็นวัฏจักรแบบนี้ต่อไปเรื่อยๆ จนสิ้นสุดเวลาที่พิจารณา 100 ปี

เมื่อทำการเปรียบเทียบระหว่างกรณีที่ไม่มีการบำรุงรักษา (No Repair) กับกรณีของการมีการบำรุงรักษาที่ความลึก 80 และ 120 มม. โดยพิจารณาปริมาณคลอไรด์ ณ ความลึกวิกฤต 80 มม. เทียบกับเวลา ดังรูปที่ 6 พบว่าในกรณีที่ไม่มีการบำรุงรักษา ปริมาณคลอไรด์จะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ แต่ในกรณีที่มีการบำรุงรักษา เมื่อคลอไรด์แพร่ผ่านเข้ามาจนกระทั่งปริมาณคลอไรด์เท่ากับค่าวิกฤต เหล็กเสริมจะเริ่มเกิดการสึกกร่อนในปีที่ 18 ถ้ามีการบำรุงรักษาที่ระยะความลึกเท่ากับ 80 มม. ปริมาณคลอไรด์จะลดลงเป็นศูนย์เนื่องจากมีการแทนที่ด้วยคอนกรีตบำรุงรักษา และเพิ่มขึ้นทันทีเนื่องจากการแพร่ย้อนกลับของคลอไรด์จากคอนกรีตเดิม หลังจากนั้นอีก 17 ปี นั่นคือในปีที่ 35 ปริมาณคลอไรด์จะเท่ากับค่าวิกฤตอีกครั้งหนึ่ง การบำรุงรักษาแบบเดียวกันนี้จะถูกกระทำ หลังจากนั้นการแพร่ผ่านของคลอไรด์และการบำรุงรักษาจะเกิดขึ้นเป็นวัฏจักรตลอดอายุของโครงสร้าง



รูปที่ 6 ปริมาณคลอไรด์เทียบกับระยะเวลาเมื่อความลึกในการบำรุงรักษาต่างกัน

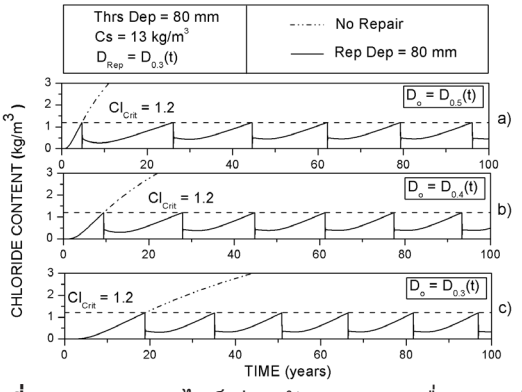


รูปที่ 7 ปริมาณคลอไรด์เทียบกับระยะเวลาเมื่อคอนกรีตบำรุงรักษาต่างกัน

ถ้าเลือกบำรุงรักษาที่ความลึก 120 มม. พบว่าปริมาณคลอไรด์จะลดลงเป็นศูนย์เนื่องจากมีการแทนที่ด้วยคอนกรีตบำรุงรักษา และเพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ เนื่องจากของคลอไรด์จากคอนกรีตเดิมต้องใช้เวลาในการแพร่ย้อนกลับมาที่ความลึกวิกฤตนานขึ้น ทำให้สามารถยืดอายุการใช้งานได้อีก 19 ปี โดยปราศจากการสึกกร่อนของเหล็กเสริม นั่นคือในปีที่ 37 การบำรุงรักษาแบบเดียวกันนี้จะถูกกระทำ หลังจากนั้นการแพร่ผ่านของคลอไรด์และการบำรุงรักษาจะเกิดขึ้นตลอดอายุของโครงสร้าง

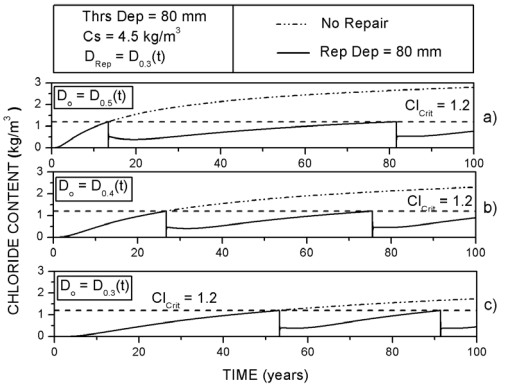
ถ้าเปรียบเทียบกันในระยะเวลา 100 ปี พบว่าการบำรุงรักษาที่ความลึก 80 และ 120 มม. จะต้องทำการบำรุงรักษา 6 และ 5 ครั้งตามลำดับ ดังนั้นการบำรุงรักษาที่ความลึกมากกว่าจะสามารถลดจำนวนครั้งในการบำรุงรักษา เนื่องจากการยืดอายุการใช้งานระหว่างการบำรุงรักษาได้นานขึ้น

เมื่อเปรียบเทียบในด้านของคอนกรีตบำรุงรักษาที่มี *w/c* เท่ากับ 0.3 และ 0.4 โดยคอนกรีตเดิมมี *w/c* เท่ากับ 0.4 และบำรุงรักษาที่ความลึกเท่ากับ 120 มม. จะเป็นดังแสดงในรูปที่ 7 เมื่อใช้คอนกรีตบำรุงรักษาที่มี *w/c* เท่ากับ 0.4 จำนวนครั้งในการบำรุงรักษาเท่ากับ 10 ครั้ง แต่ถ้าเลือกใช้คอนกรีตบำรุงรักษาที่มี *w/c* เท่ากับ 0.3 การบำรุงรักษาลดลงเหลือเพียง 5 ครั้ง ดังนั้นการเลือกใช้คอนกรีตบำรุงรักษาที่มี *w/c* ต่ำกว่า สามารถลดจำนวนครั้งในการบำรุงรักษาให้น้อยลง เพราะสามารถยืดอายุการใช้งานระหว่างการบำรุงรักษาได้มากกว่าการใช้คอนกรีตบำรุงรักษาที่มี *w/c* สูง

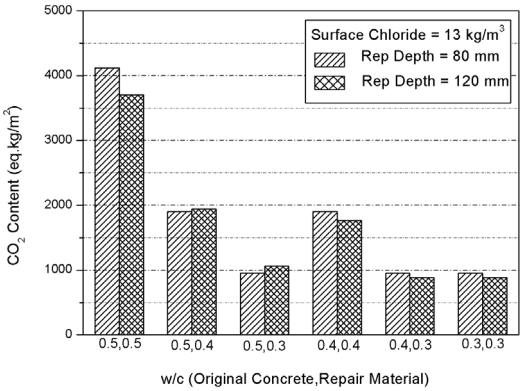


รูปที่ 8 ปริมาณคลอไรด์เทียบกับระยะเวลาเมื่อคอนกรีตเดิมมีค่า *w/c* ต่างกัน (Cs = 13 กก./ลบ.ม.)

รูปที่ 8 แสดงการเปรียบเทียบปริมาณคลอไรด์ในกรณีที่ค่า *w/c* ของคอนกรีตเดิมมีค่าต่างกัน แต่ *w/c* ของคอนกรีตบำรุงรักษามีค่าเท่ากับ 0.3 และความลึกวิกฤตและบำรุงรักษาเท่ากับ 80 มม. จากรูปพบว่าถ้าคอนกรีตเดิมมี *w/c* ต่ำกว่า เวลาที่ปริมาณคลอไรด์เท่ากับค่าวิกฤตในครั้งแรกจะช้ากว่า ตัวอย่างเช่น ปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตเดิมที่มี *w/c* เท่ากับ 0.3 (รูปที่ 8c) จะมีค่าเท่ากับค่าวิกฤตในครั้งแรกช้ากว่าคอนกรีตเดิมที่มี *w/c* เท่ากับ 0.4 และ 0.5 (รูปที่ 8b และ 8a ตามลำดับ) ดังนั้นการเลือกใช้คอนกรีตเดิมที่มี *w/c* ต่ำกว่า จะสามารถยืดเวลาในการบำรุงรักษาครั้งแรกให้ยาวกว่า



รูปที่ 9 ปริมาณคลอไรด์เทียบกับระยะเวลาเมื่อคอนกรีตเดิมมีค่า *w/c* ต่างกัน (Cs = 4.5 กก./ลบ.ม.)



รูปที่ 10 ปริมาณ CO_2 ที่เกิดจากการบำรุงรักษาโดยใช้คอนกรีตบำรุงรักษาและความลึกที่ต่างกัน (Cs = 13 กก./ลบ.ม.)

หลังจากที่ทำการบำรุงรักษาครั้งแรกแล้ว พบว่าคอนกรีตเดิมที่มี *w/c* เท่ากับ 0.3 จะมีช่วงเวลาระหว่างการบำรุงรักษาสั้นกว่า เช่น ระหว่างครั้งแรกและครั้งที่สองสั้นกว่าคอนกรีตเดิมที่มี *w/c* เท่ากับ 0.4 และ 0.5 เนื่องจากคอนกรีตเดิมที่มี *w/c* เท่ากับ 0.3 จะมีความทึบมากกว่า เนื่องจากสัมประสิทธิ์การแพร่ผ่านที่มีค่าต่ำกว่า (ดูรูปที่ 3) ทำให้คอนกรีตเดิมนี้ทำหน้าที่เป็นตัวป้องกันคลอไรด์ที่แพร่จากคอนกรีตบำรุงรักษาสู่คอนกรีตเดิม ดังนั้นทำให้คลอไรด์ถูกสะสมไว้ในคอนกรีตบำรุงรักษาและเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ณ ความลึกวิกฤต แต่ถ้าคอนกรีตเดิมมีคุณภาพด้อยกว่าคอนกรีตบำรุงรักษา จะพบว่าช่วงเวลาระหว่างการบำรุงรักษาจะยาวกว่า เนื่องจากคลอไรด์จะไม่ถูกสะสมไว้ที่ ณ ความลึกวิกฤต

เมื่อพิจารณาโครงสร้างคอนกรีตที่ห่างจากฝั่ง 100 ม. ปริมาณคลอไรด์ที่ผิวจะเท่ากับ 4.5 กก./ลบ.ม. รูปที่ 9 แสดงการเปรียบเทียบในกรณีที่ *w/c* ของคอนกรีตเดิมเท่ากับต่างกัน คอนกรีตบำรุงรักษามี *w/c* เท่ากับ 0.3 และความลึกวิกฤตและบำรุงรักษาเท่ากับ 80 มม. จะพบว่ามีข้อสังเกตเหมือนรูปที่ 8

4.2 ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

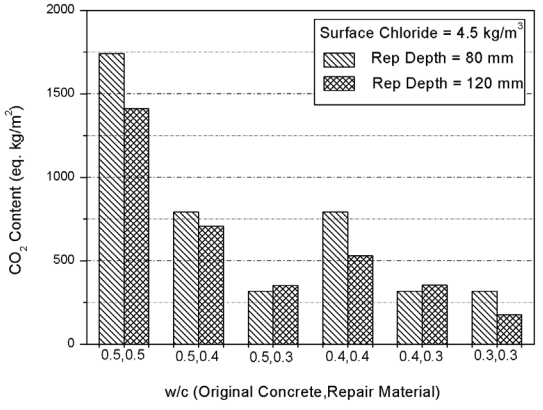
เมื่อพิจารณาโครงสร้างบริเวณน้ำขึ้น-น้ำลง ที่มีปริมาณคลอไรด์ที่ผิวเท่ากับ 13 กก./ลบ.ม. แล้วกำหนดให้คอนกรีตเดิมและคอนกรีตบำรุงรักษามีค่า *w/c* เท่ากับ 0.3, 0.4 และ 0.5 และความลึกที่ทำการบำรุงรักษาเท่ากับ 80 มม. และ 120 มม. จะสามารถคำนวณหาปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดจากกระบวนการผลิตและขั้นตอนการบำรุงรักษาโดยใช้สมการที่ 8 และสามารถแสดงผลได้ดังตารางที่ 5 จะสังเกตได้ว่าคอนกรีตบำรุงรักษามีคุณภาพเท่ากับหรือดีกว่าคอนกรีตเดิม นั่นคือมี *w/c* เท่ากับหรือน้อยกว่าคอนกรีตเดิม

จากผลการประเมินในตารางที่ 5 พบว่าปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นเนื่องจากการบำรุงรักษาขึ้นอยู่กับคุณภาพของคอนกรีตบำรุงรักษา จำนวนครั้งในการบำรุงรักษาและความลึกที่ทำการบำรุงรักษา

เมื่อนำผลการประเมินในตารางที่ 5 มาเปรียบเทียบดังแสดงในรูปที่ 10 พบว่าเมื่อคอนกรีตเดิมมีค่า *w/c* เท่ากับ 0.5 แล้ว จะทำให้ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จะมีค่าสูงสุดในกรณีที่ใช้คอนกรีตบำรุงรักษาที่มีค่า *w/c* เท่ากับ 0.5 และลดลงมาที่คอนกรีตบำรุงรักษาที่มีค่า *w/c* เท่ากับ 0.4 และ 0.3 ตามลำดับ แสดงว่าคอนกรีตบำรุงรักษาที่มีคุณภาพด้อยกว่าเป็นสาเหตุให้ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เกิดขึ้นมากกว่า แต่เมื่อเทียบกันในด้านของความลึกที่บำรุงรักษาระหว่าง 80 มม. และ 120 มม. พบว่าปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์แตกต่างกันเล็กน้อย

ตารางที่ 5 ปริมาณก๊าซ CO_2 ที่เกิดจากการบำรุงรักษาสำหรับปริมาณคลอไรด์ที่ผิวเท่ากับ 13 กก./ลบ.ม.

w/c (คอนกรีตเดิม, คอนกรีตบำรุงรักษา)	จำนวนครั้งที่บำรุงรักษา (n)	ความลึกที่บำรุงรักษา (x_m : มม.)	ปริมาณ CO_2 (เทียบเท่า กก./ตร.ม.)
0.5,0.5	26	80	4,116.74
0.5,0.5	21	120	3,706.58
0.5,0.4	12	80	1,900.03
0.5,0.4	11	120	1,941.54
0.5,0.3	6	80	950.02
0.5,0.3	6	120	1,059.02
0.4,0.4	12	80	1,901.95
0.4,0.4	10	120	1,767.44
0.4,0.3	6	80	950.98
0.4,0.3	5	120	883.72
0.3,0.3	6	80	951.94
0.3,0.3	5	120	884.92



รูปที่ 11 ปริมาณ CO_2 ที่เกิดจากการบำรุงรักษาโดยใช้คอนกรีตบำรุงรักษาและความลึกที่ต่างกัน (Cs = 4.5 กก./ลบ.ม.)

เมื่อพิจารณาปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดจากการบำรุงรักษาโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ห่างจากชายฝั่ง 100 ม. ที่มีปริมาณคลอไรด์ที่ผิวเท่ากับ 4.5 กก./ลบ.ม. ดังรูปที่ 11 พบว่ามีข้อสังเกตเหมือนกับกรณีที่มีปริมาณคลอไรด์ที่ผิวเท่ากับ 13 กก./ลบ.ม. กล่าวคือ คอนกรีตบำรุงรักษาที่มีคุณภาพด้อยกว่าจะเป็นสาเหตุให้ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดจากการบำรุงรักษามีมากขึ้น แต่อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาในด้านของความลึกที่ทำการบำรุงรักษาในบางกรณี เช่น ถ้าคอนกรีตเดิมและคอนกรีตบำรุงรักษามีค่า *w/c* เท่ากับ 0.4 และความลึกที่ทำการบำรุงรักษาเท่ากับ 80 มม. พบว่าเกิดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มากกว่าการบำรุงรักษาที่ความลึก 120 มม. เนื่องจากการบำรุงรักษาที่ความลึก 80 มม. ส่งผลให้ต้องทำการบำรุงรักษาบ่อยกว่า ทำให้เกิดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มากกว่า

5. สรุป

จากการศึกษาการประเมินปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เนื่องจากการบำรุงรักษาโดยวิธีเปลี่ยนผิวคอนกรีต เพื่อยืดอายุการใช้งานโครงสร้างคอนกรีตที่อยู่ภายใต้อิทธิพลคลอไรด์ของประเทศไทย โดยการคำนวณทางตัวเลขด้วยวิธีไฟไนต์ดิฟเฟอร์เรนซ์แบบ Crank-Nicolson สำหรับปริมาณคลอไรด์ที่ผิวแบบค่าคงที่และค่าสัมประสิทธิ์ในการแพร่ขึ้นกับเวลา พบว่า

1. การบำรุงรักษาที่ความลึกมากกว่า และใช้คอนกรีตบำรุงรักษาที่มีคุณภาพดีกว่าสามารถลดจำนวนครั้งในการบำรุงรักษาและยืดอายุการใช้งานโครงสร้างได้นานกว่า

2. การเลือกใช้คอนกรีตเดิมที่มีคุณภาพดีกว่าสามารถยืดเวลาในการบำรุงรักษาครั้งแรกให้นานขึ้น

3. เมื่อทำการบำรุงรักษาที่ความลึกวิกฤตแล้ว การที่คอนกรีตเดิมมีคุณภาพดีกว่าหรือ *w/c* ต่ำกว่าคอนกรีตบำรุงรักษา จะทำให้ช่วงเวลาระหว่างการบำรุงรักษาสั้นกว่า เนื่องจากความทึบของคอนกรีตเดิมที่มี *w/c* ต่ำ จะทำหน้าที่ป้องกันการแพร่ผ่านของคลอไรด์ ทำให้คลอไรด์ถูกสะสมไว้ที่ความลึกวิกฤตและเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว

4. การเลือกคอนกรีตบำรุงรักษาที่มีคุณภาพดีกว่าหรือ *w/c* ต่ำกว่า จะสามารถลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดในกระบวนการผลิตและบำรุงรักษาได้ ขณะที่ความลึกที่ทำการบำรุงรักษาไม่มีความสัมพันธ์ที่แน่ชัดกับปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนจากโครงการวิศวกรรมที่พัฒนาร่วมกับภาคอุตสาหกรรมปี 2555 คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือและบริษัท เรปคอน เซอร์วิส จำกัด

เอกสารอ้างอิง

[1] H.W. Song, H. B. Shim, A. Petcherdchoo, and S.K. Park, "Service life prediction of repaired concrete structures under chloride environment using finite difference method," *Cement and Concrete Composites*, vol.31, pp.120-127, 2009.

[2] A. Petcherdchoo, "Assessment of service life and environmental impacts of chloride exposed concrete structures with repairs by cover replacement," Numerical Modeling Strategies for Sustainable Concrete Structures (SSCS2012), 2012.

[3] J. Crank, *The mathematics of diffusion*, Oxford: The Clarendon Press, 1975.

[4] REHABCON, Final report on the evaluation of alternative repair and upgrading options: Strategy for maintenance and rehabilitation in concrete structures, EC Inn. and SME prog. proj. no. IPS-2000-0063, Dep. Of Build. Mat., LIT, Sweden, 2004.

[5] D.U. Von Rosenberg, *Methods for the numerical solution of partial differential equations*, Elsevier Publishing Co., 1969.

[6] W.H. Press, S.A. Teukolsky, W.T. Vetterling, and B.P. Flannery, *Numerical recipes in C: the art of scientific computing*, Cambridge University Press, Second Edition, 1999.

[7] A. Petcherdchoo, "Predicting service life and cost of chloride exposed concrete structures with repairs by cover replacement or silane treatment," in *Proc. of the 17th Nat. Conv. on Civ. Eng.*, 2012.

[8] Japan Society of Civil Engineers (JSCE), Standard specification for durability of concrete. Concr. Lib., 2002 (in Japanese).

[9] Ministry of Interior, Standard of Concrete Structures with considering Durability and Service Life (1332-50), Dept. of Public Works and Town & Country Plan., Thailand, 2007 (in Thai).

[10] A. Moriwake, "Study on durability and maintenance of reinforced concrete jetty deck against chloride induced deterioration," Ph.D. thesis, Tokyo Inst. of Tech., Tokyo, Japan, 1996.

[11] T.H. Hong, C.Y. Ji, and H.S. Park, "Integrated model for assessing the cost and CO_2 emission (IMACC) for sustainable structural design in ready-mix concrete," *J. of Environmental Management*, vol.103, pp.1-8, 2012.

[12] P. Sukontasukkul, T. Panussubsuk, and W. Jakrapiyanun, "A Case study on CO_2 emission from concrete production of single housing project (case-in-place system) based on TCA recommendations," in *The 5th International Conference of Asian Concrete Federation*, 2012.

[13] W. Chalee, C. Jaturapitakkul, and P. Chindaprasirt, "Predicting the chloride penetration of fly ash concrete in seawater," *Marine Structures*, vol.22, pp.341-53, 2009.

[14] V. Arskog, S. Fossdal, and O.E. Gjorv, "Life-cycle assessment of repair and maintenance systems for concrete structures," *International workshop on sustainable development and concrete technology*, Beijing, May, pp.193-200, 2004.