



การกัดกร่อนของเหล็กเสริมโดยสารคลอไรด์ ในโครงสร้างคอนกรีตผสม

Chloride induced-corrosion of reinforcement in composite concrete structures

นฤตล พินิจพล¹ และพิชญา เผือกขาว²

¹น.ส.ปริญญาโท หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยรังสิต, e-mail: pinijpolnaruedol@gmail.com

²อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมโยธา วิทยาลัยวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยรังสิต, e-mail: pichaya@rsu.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาการแพร่กระจายของสารคลอไรด์ผ่านเนื้อโครงสร้างระบบผสมสองชั้นที่ประกอบด้วยชั้นทับหน้าชั้นแรกและชั้นโครงสร้างหลักที่เป็นคอนกรีตเป็นชั้นที่สอง โดยอาศัยสมการการแพร่กระจายของสารและกฎของ Fick เพื่อหาการเปลี่ยนแปลงของระยะเวลาที่เริ่มเกิดการกัดกร่อนของเหล็กเสริม รวมทั้งอิทธิพลของความหนาของชั้นทับหน้าและระยะหุ้มคอนกรีตของเหล็กเสริม ต่อการเปลี่ยนแปลงของระยะเวลาดังกล่าว ในการแก้ปัญหาเพื่อหาผลเฉลย ได้ประยุกต์ใช้เทคนิคการแปลงลาปลาซ โดยกำหนดให้การยึดเกาะกันระหว่างโครงสร้างชั้นแรกและชั้นที่สองมีสภาพสมบูรณ์ต่อเนื่องกันดี ชั้นโครงสร้างหลักมีความหนามากเมื่อเทียบกับชั้นทับหน้าและจำลองเป็นโครงสร้างผสมกึ่งอนันต์ สมบัติการแพร่ของวัสดุในแต่ละชั้นมีค่าคงที่ไม่แปรเปลี่ยนตามเวลา ปริมาณความเข้มข้นสะสมของคลอไรด์ที่ผิวหน้าสัมผัสกับสภาวะแวดล้อมภายนอกมีปริมาณคงที่ไม่แปรเปลี่ยนตามเวลา ความถูกต้องแม่นยำของผลเฉลยในโครงสร้างผสมกระทำโดยเปรียบเทียบค่าที่ได้เมื่อความหนาของชั้นทับหน้ามีค่าเข้าใกล้ศูนย์กับผลเฉลยของงานวิจัยในอดีตในกรณีโครงสร้างชั้นเดียว

คำสำคัญ: คลอไรด์, การแพร่กระจายของสาร, การกัดกร่อน

ABSTRACT

This research deals with diffusion of chloride in a double layer composite structure having overlay as the first layer and main concrete structure as the second layer. The present study applies the equation of diffusion of particle in conjunction with Fick's law to determine the time to initiate corrosion of reinforcement as well as the influence of the depths of overlay and concrete cover of reinforcement upon the initiation time of corrosion. The Laplace transform technique is utilized to solve the problem with the assumptions that perfect bonding exists at the interface between the two layers; the thickness of the main concrete layer is much thicker than the first layer so that the problem can be modeled as semi-infinite medium; diffusion coefficient in each layer is constant and not a function of time; the chloride concentration at the outer surface is constant and does not change with time. The validity and accuracy of the present solution are verified analytically and numerically with the existing solution of the single layer by assigning a small thickness value in the first layer.

Keywords: Chloride, Diffusion, Corrosion



1. บทนำ

ปัจจุบันนี้สิ่งปลูกสร้างส่วนใหญ่ในประเทศไทย เป็น โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก ปัญหาการกัดกร่อนของเหล็กเสริมในโครงสร้างคอนกรีตนับว่าเป็นปัญหาสำคัญที่มีผลกระทบต่ออายุการใช้งานของอาคารและสิ่งปลูกสร้าง เมื่อเหล็กเสริมถูกกัดกร่อนจะมีสนิมเกิดขึ้นและเมื่อปริมาตรของสนิมขยายตัวเพิ่มขึ้น จนทำให้เปลือกหุ้มคอนกรีตบวมและแตกร้าวหลุดร่อน ก็ยิ่งเพิ่มโอกาสการสัมผัสออกซิเจนของเหล็กเสริม และนำไปสู่การเร่งขบวนการกัดกร่อนมากยิ่งขึ้นสำหรับโครงสร้างคอนกรีตที่สัมผัสกับสารคลอไรด์อัตราการกัดกร่อนของเหล็กเสริมจะยิ่งเพิ่มมากขึ้น ทั้งนี้เพราะสารคลอไรด์ดังกล่าวจะค่อยๆ ซึมผ่านเนื้อคอนกรีตเข้าไปจนถึงผิวของเหล็กเสริม เมื่อปริมาณคลอไรด์นี้ถ้ามีความเข้มข้นมากพอคือมีค่าเกินกว่าค่าวิกฤติจะทำลายฟิล์มออกไซด์ (Oxide film) ที่ทำหน้าที่เป็น passive film โดยรอบผิวเหล็ก การกัดกร่อนของเหล็กเสริมจะเริ่มเกิดขึ้น การถูกกัดกร่อนของเหล็กเสริมโดยสารคลอไรด์ดังกล่าวนี้ นับว่าเป็นสาเหตุหลักที่ทำให้เกิดการเสื่อมสภาพของโครงสร้างคอนกรีต ในประเทศไทย โดยเฉพาะบริเวณที่ติดกับทะเล ดังนั้นการศึกษ้อัตราการแพร่กระจายของคลอไรด์ในเนื้อคอนกรีตเพื่อทำนายระยะเวลาการเริ่มเกิดการกัดกร่อนในเหล็กเสริม รวมทั้งผลของความหนาของระยะหุ้ม (Cover thickness) ต่อระยะเวลาดังกล่าวจึงมีความสำคัญที่ผ่านมาการศึกษาส่วนใหญ่มักจำกัดอยู่เฉพาะวัสดุคอนกรีตชั้นเดียว (Single layer concrete) ในขณะที่โครงสร้างคอนกรีตบางประเภทอาจมีการปูทับหรือเคลือบด้วยวัสดุอื่นที่มีคุณสมบัติต่างจากคอนกรีตเดิมอีกชั้นหนึ่ง เช่นการก่อสร้างพื้นชนิดหล่อสำเร็จที่เทพื้นหน้าด้วยคอนกรีต หรือพื้นถนนคอนกรีตที่ปูทับหน้าด้วยแอสฟัลต์ เป็นต้น ความหนาและคุณสมบัติของวัสดุดังกล่าวย่อมมีผลต่อการแพร่หรือซึมผ่านของสารคลอไรด์ ดังนั้นแนวทางการใช้วัสดุอื่นที่มีคุณสมบัติด้านการแพร่ของสารคลอไรด์ได้น้อยกว่าคอนกรีตคือมีค่าสัมประสิทธิ์ของการแพร่ต่ำกว่า และสามารถยึดเกาะกับพื้นผิวคอนกรีตเดิมได้ดี มาเคลือบที่ผิวโครงสร้างคอนกรีตเดิม (Coated concrete) หรือแม้แต่การเทพื้นหน้าด้วยวัสดุคอนกรีตอีกชั้นหนึ่ง (Overlay) จึงมีความสำคัญและน่าสนใจมาก

Cady และ Weyers (1983) ศึกษาวิจัยและประเมินผลการกัดกร่อนเสียหายเนื่องจากคลอไรด์ของน้ำทะเลของสะพานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ประกอบด้วยคอนกรีตชั้นเดียว พร้อมทั้งได้วิเคราะห์ผลของรอยแตกร้าวที่ผิวคอนกรีตหุ้มต่อการกัดกร่อนด้วย ข้อมูลพื้นฐานสำหรับการประเมินผลการกัดกร่อนคือขนาดความหนาของคอนกรีตหุ้ม

Nilsson (2001) รวบรวมวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาการกัดกร่อนของคลอไรด์ในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก ประกอบด้วยผลการแพร่ของคลอไรด์เข้าสู่โครงสร้างคอนกรีต ผลกระทบของการแตกร้าวของคอนกรีตต่อการแพร่ของคลอไรด์ ศึกษาการแพร่คลอไรด์สำหรับ โครงสร้างคอนกรีตในสถานะต่างๆเช่น จุ่มแช่ และโดนน้ำทะเล กระเด็นใส่จนเปียก ถนน รวมทั้ง พื้นคอนกรีตอัดแรง ศึกษาปริมาณคลอไรด์ที่ทำให้เหล็กเสริมเริ่มถูกกัดกร่อน ศึกษาผลกระทบของรอยร้าวในคอนกรีตที่มีต่อระยะเวลาที่เหล็กเสริมเริ่มถูกกัดกร่อน ศึกษาเวลาเริ่มถูกกัดกร่อนของเหล็กเสริมสำหรับสภาพแวดล้อมต่างๆ หลายกรณี

Kassir และ Ghosn (2002) รวบรวมและศึกษาข้อมูลการกัดกร่อนของเหล็กเสริมในสะพานคอนกรีตชั้นเดียวจากการสัมผัสคลอไรด์ 15 สะพาน ในช่วงอายุการใช้งาน 15 ปี และวิเคราะห์สรุปเป็นสมการเพื่อใช้ประมาณช่วงเวลาตั้งแต่เริ่มสัมผัสคลอไรด์ จนถึงเริ่มการเกิดปฏิกิริยาการกัดกร่อนของเหล็กเสริมคอนกรีต ซึ่งมีคอนกรีตหุ้มชั้นเดียว



Phurkhao และ Kassir (2005) ศึกษาและวิเคราะห์ผลเชิงตัวเลข จากการเก็บข้อมูลการกัดกร่อนของเหล็กเสริมคอนกรีตเนื่องจากการสัมผัสคลอไรด์ที่ผิวของคอนกรีตชั้นเดียว จากการวิเคราะห์เชิงตัวเลขทำให้สามารถเชื่อได้ว่าปริมาณความเข้มข้นของคลอไรด์ที่ผิวเหล็กเสริมจะมีปริมาณเพิ่มขึ้นตามเวลาลักษณะแปรผันตรง (Linear variation) ในช่วงเวลาหนึ่ง และจะคงที่ (Constant) หลังจากนั้นผลที่ได้จากการวิเคราะห์ทำให้สามารถประมาณช่วงเวลา นับตั้งแต่เริ่มสัมผัสคลอไรด์จนถึงเริ่มการกัดกร่อนของเหล็กเสริม ซึ่งมีประโยชน์มากสำหรับงานวางแผนงบประมาณสำหรับการซ่อมบำรุงพื้นสะพานในอนาคตได้เป็นอย่างดี

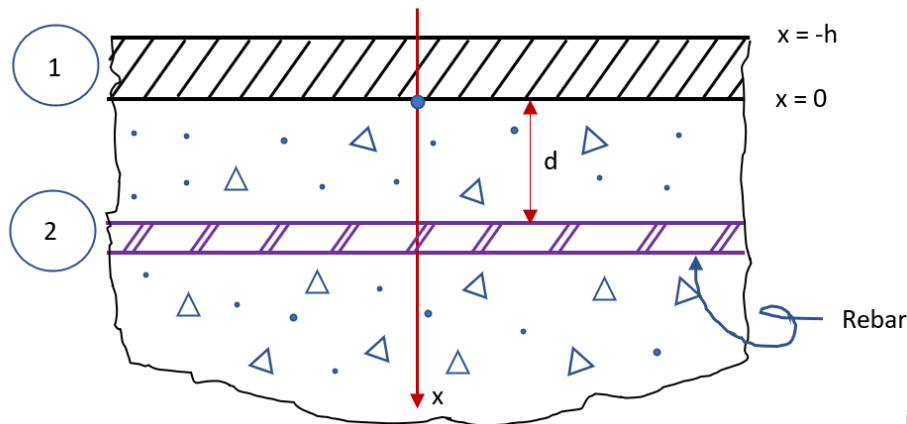
Alqam (2014) ศึกษาหาอัตราการการแพร่ของคลอไรด์ใน โครงสร้างเสาคอนกรีตเสริมเหล็กหน้าตัดรูปสี่เหลี่ยม ซึ่งพิจารณาการแพร่ของคลอไรด์จากผิวสัมผัสสองทิศทางโดยการใช้สมการพื้นฐานของ Fick และสมการเงื่อนไข พบว่า ปริมาณคลอไรด์ที่ผิวของเหล็กเสริม ณ เวลาใดๆ ซึ่งทำให้เริ่มเกิดการกัดกร่อนของเหล็กเสริมคอนกรีตเส้นที่อยู่ทั้งหมดทั้งสี่ของหน้าตัดเสาจะเกิดขึ้นภายในระยะเวลาที่เร็วกว่าเหล็กเสริมที่อยู่บริเวณไกลจากมุมเสาออกไป

Petcherdchoo (2017) ศึกษาหาสมการแสดงปริมาณคลอไรด์ที่ผิวสัมผัสของคอนกรีต ณ ระยะเวลาใดๆ ด้วยการผสมผสานสมการ การทำให้ค่าปริมาณคลอไรด์เพิ่มขึ้นแบบสัดส่วนโดยตรงกับเวลา กับ สมการคงที่ เพื่อใช้แก้ไขปัญหาความคลาดเคลื่อนของการทำนายอัตราการแพร่ของคลอไรด์ใน โครงสร้างคอนกรีตแบบเดิมที่ และได้ทดลองการทำนายอัตราการแพร่ของคลอไรด์ด้วยสมการใหม่นี้กับชิ้นตัวอย่างสามชิ้น แล้วพบว่าได้ผลการเปรียบเทียบที่สอดคล้องน่าเชื่อถือมากขึ้น

สำหรับการวิจัยนี้ ศึกษาการแพร่ของสารคลอไรด์ใน โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กระบบผสม (Composite concrete structure) โดย ใช้สมการการแพร่กระจายของสารและกฎของ Fick เพื่อหาปริมาณความเข้มข้นของสารคลอไรด์ที่ผิวเหล็กเสริม ตลอดจนอิทธิพลของชั้นวัสดุปูทับหรือชั้นทับหน้า (Coating or Overlay) และอิทธิพลความหนาของระยะหุ้ม (Protective cover thickness) ต่อการเปลี่ยนแปลงของระยะเวลาที่เริ่มเกิดการกัดกร่อนของเหล็กเสริม (Initiation period) หลังจากนั้นจะเป็นช่วงที่เกิดการกัดกร่อนอย่างต่อเนื่องและเพิ่มขึ้นตามเวลา (Corrosion period or Propagation period) จนถึงขั้นที่โครงสร้างเสื่อมกำลัง และไม่สามารถใช้งานต่อไปได้ ดังนั้นระยะเวลาดังกล่าวที่เริ่มเกิดการกัดกร่อนของเหล็กเสริมนี้ นับว่ามีความสำคัญต่อการประเมินอายุการใช้งานที่ปลอดภัย (Safe design life) ของโครงสร้างเป็นอย่างยิ่ง อย่างไรก็ตาม การยึดถือเอาเวลาที่เริ่มเกิดการกัดกร่อนของเหล็กเสริม (Initiation period) ซึ่งเป็นเวลาช่วงเริ่มต้นของการกัดกร่อน เพื่อใช้สำหรับการกำหนดระยะเวลาและความถี่ของการตรวจสอบเพื่อการบำรุงรักษา (Inspection and Maintenance) จะจึงมีความเหมาะสมกว่าเพราะเหล็กเสริมยังไม่ถูกกัดกร่อนไปมาก และสามารถทำการซ่อมแซมเพื่อยืดอายุการใช้งานของ โครงสร้างให้ยาวนานคุ้มค่าต่อไป

2. การแพร่ของคลอไรด์ในโครงสร้างผสมกึ่งอนันต์

โครงสร้างผสม 2 ชั้น ดังรูปที่ 1 โดยที่แต่ละชั้นมีคุณสมบัติต่างกันสามารถจำลองการแพร่ของคลอไรด์ในรูปของสมการทางคณิตศาสตร์โดยอาศัยกฎของ Fick



รูปที่ 1 โครงสร้างผสม 2 ชั้น

สำหรับโครงสร้างชั้นที่ 1 มีความหนาเท่ากับ h และผิวนอกสุดสัมผัสโดยตรงกับสภาวะแวดล้อมภายนอก การแพร่ของคลอไรด์ในชั้นนี้จะถูกควบคุมโดยสมการ

$$\frac{\partial C_1}{\partial t} = D_1 \frac{\partial^2 C_1}{\partial x^2}, \quad -h < x < 0, \quad t > 0 \quad (1)$$

โดยที่ $C_1(x,t)$ เป็นความเข้มข้นของคลอไรด์ D_1 เป็นสัมประสิทธิ์ของการแพร่และมีค่าคงที่ ส่วน t เป็นตัวแปรแทนเวลา

$$\frac{\partial C_2}{\partial t} = D_2 \frac{\partial^2 C_2}{\partial x^2}, \quad x > 0, \quad t > 0 \quad (2)$$

สมการ (2) เป็นสมการควบคุมการแพร่ของคลอไรด์ในชั้นที่ 2 ที่มีความเข้มข้นของคลอไรด์ $C_2(x,t)$ และสัมประสิทธิ์คงที่ของการแพร่ D_2 ในชั้นนี้จะสมมุติว่ามีความหนามากกว่าชั้นที่ 1 มาก

กำหนดให้ค่าความเข้มข้นของคลอไรด์ ที่เวลาเริ่มต้น ($t = 0$) ทุกที่ในโครงสร้างผสมเป็นศูนย์ เมื่อ $t > 0$ การสะสมของปริมาณความเข้มข้นของคลอไรด์ที่ผิวนอกสุด ($x = -h$) มีค่าคงที่

$$C_1(-h,t) = C_0, \quad t > 0 \quad (3)$$

สำหรับรอยต่อของโครงสร้างผสมที่เชื่อมติดกันแน่นและสมบูรณ์ ความเข้มข้นและปริมาณฟลักซ์ของคลอไรด์ (ปริมาณของคลอไรด์ที่เคลื่อนย้ายผ่านหน้าตัดหนึ่งหน่วยพื้นที่ภายในหนึ่งหน่วยเวลา) ที่ผิวสัมผัสระหว่างทั้งสอง ($x = 0$) จะต้องมีความต่อเนื่องดังสมการ

$$C_1(0,t) = C_2(0,t), \quad t > 0 \quad (4)$$

$$D_1 \frac{\partial C_1}{\partial x} \Big|_{x=0} = D_2 \frac{\partial C_2}{\partial x} \Big|_{x=0}, \quad t > 0 \quad (5)$$

นอกจากนั้นปริมาณความเข้มข้นของคลอไรด์จะต้องมีค่าลดลงเมื่อค่า x เพิ่มขึ้นและมีค่าเป็นศูนย์เมื่อ $x \rightarrow \infty$ ที่ตำแหน่งที่ไกลจากผิวนอกสุด

$$C_2(\infty,t) = 0, \quad t > 0 \quad (6)$$

การหาผลเฉลย สามารถกระทำโดยอาศัยทฤษฎีของการแปลงลาปลาซ (Laplace transform) เพื่อจัดตัวแปรเวลา t

$$\hat{F}(p) = \int_0^{\infty} F(t)e^{-pt} dt \quad (7a)$$



โดยที่ p เป็นพารามิเตอร์ของการแปลงลาปลาซ (Laplace transform) และส่วนกลับของการแปลงลาปลาซหรือการแปลงลาปลาซผกผัน (Inversion of Laplace transform) คือ (Hildebrand, 1976)

$$L^{-1}\{\hat{F}(p)\} \equiv F(t) = \frac{1}{2\pi i} \int_{c-i\infty}^{c+i\infty} \hat{F}(p)e^{pt} dp. \quad (7b)$$

ดังนั้น ถ้าประยุกต์ทฤษฎีของการแปลงลาปลาซ สมการ (1) และ (2) จะถูกแปลงอยู่ในรูปดังต่อไปนี้

$$\frac{\partial^2 \hat{C}_1}{\partial x^2} - q_1^2 \hat{C}_1 = 0, \quad -h < x < 0, \quad (8)$$

$$\frac{\partial^2 \hat{C}_2}{\partial x^2} - q_2^2 \hat{C}_2 = 0, \quad x > 0. \quad (9)$$

โดยที่

$$q_i = (p / D_i)^{1/2}, \quad i = 1, 2 \quad (10)$$

ในทำนองเดียวกัน เงื่อนไข (3) ถึง (6) ในรูปของการแปลงลาปลาซ คือ

$$\hat{C}_1(-h, p) = \frac{C_0}{p} \quad (11)$$

$$\hat{C}_1(0, p) = \hat{C}_2(0, p) \quad (12)$$

$$D_1 \frac{d\hat{C}_1}{dx} \Big|_{x=0} = D_2 \frac{d\hat{C}_2}{dx} \Big|_{x=0} \quad (13)$$

$$\hat{C}_2(\infty, p) = 0 \quad (14)$$

สมการ (11) ให้ผลเฉลยทั่วไป (General solution) ในรูป

$$\hat{C}_1(x, p) = A_1(p)e^{q_1 x} + B_1(p)e^{-q_1 x} \quad (15)$$

ในที่นี้ A_1 และ B_1 เป็นเป็นค่าคงที่ใด ๆ ที่ยังไม่ทราบค่า

เงื่อนไข (11) ให้สมการความสัมพันธ์ระหว่าง A_1 และ B_1

$$B_1(p) = \left[\frac{C_0}{p} - A_1(p)e^{-q_1 h} \right] \frac{1}{e^{q_1 h}} \quad (16)$$

ถ้าแทน B_1 ลงในสมการ (15) จะได้

$$\hat{C}_1(x, p) = \frac{C_0}{p} e^{-q_1(x+h)} + \frac{A_1(p)}{e^{q_1 h}} (e^{q_1(x+h)} - e^{-q_1(x+h)}) \quad (17)$$

ในทำนองเดียวกัน ผลเฉลยทั่วไปของสมการ (9) สามารถเขียนได้ในรูป

$$\hat{C}_2(x, p) = A_2(p)e^{q_2 x} + B_2(p)e^{-q_2 x} \quad (18)$$

โดยที่ A_2 และ B_2 เป็นเป็นค่าคงที่ใด ๆ ที่ยังไม่ทราบค่า สามารถหาได้จากเงื่อนไขที่ $x=0$ และ $x=\infty$

จากเงื่อนไข (14) จะได้ $A_2(p) = 0$ ดังนั้น

$$\hat{C}_2(x, p) = B_2(p)e^{-q_2 x} \quad (19)$$

และจากเงื่อนไขที่เหลือ (12) และ (13) จะให้

$$B_2(p) = \frac{2C_0 k e^{-q_1 h}}{p(k+1)(1 - \alpha e^{-2q_1 h})} \quad (20)$$

ในที่นี้



$$k = \sqrt{\frac{D_1}{D_2}}, \quad \alpha = \frac{1-k}{1+k}$$

(21)

หลังจากแทน $B_2(p)$ จากสมการ (20) ลงในสมการ (19) จะได้ผลเฉลย \hat{C}_2 ในรูป

$$\hat{C}_2(x, p) = \frac{2C_0 k e^{-q_1 h - q_2 x}}{p(k+1)(1 - \alpha e^{-2q_1 h})} \quad (22)$$

สมการนี้สามารถเขียนให้อยู่ในรูปที่สะดวกต่อการแปลงลาปลาซผกผัน โดยแทน (Carslaw และ Jaeger, 1959)

$$\frac{1}{1 - \alpha e^{-2q_1 h}} = \sum_{n=0}^{\infty} \alpha^n e^{-2nq_1 h} \quad (23)$$

ลงในสมการ (22) จะได้

$$\hat{C}_2(x, p) = \frac{2C_0 k}{(k+1)p} \sum_{n=0}^{\infty} \alpha^n e^{-q_1[(2n+1)h + kx]} \quad (24)$$

ในที่นี้ $k = q_1/q_2$

ผลเฉลย C_2 ในโดเมน t สามารถหาได้โดยอาศัยทฤษฎีการแปลงลาปลาซผกผัน (7b) หรือจากผลลัพธ์ (Carslaw และ Jaeger, 1959)

$$L^{-1} \left\{ \frac{e^{-q_1[(2n+1)h + kx]}}{p} \right\} = \text{erfc} \frac{(2n+1)h + kx}{2\sqrt{D_1 t}} \quad (25)$$

จะได้ผลเฉลยในโดเมนของเวลาปกติ t ที่ต้องการ

$$C_2(x, t) = \frac{2C_0 k}{k+1} \sum_{n=0}^{\infty} \alpha^n \text{erfc} \frac{(2n+1)h + kx}{2\sqrt{D_1 t}} \quad (26)$$

ในที่นี้ $\text{erfc}(x) = 1 - \text{erf}(x)$ คือ Complementary of the error function โดยที่

$$\text{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-u^2} du \quad (27)$$

สมการ (26) ซึ่งตรงกับสมการ ที่ได้โดย Crank (1975) และ สมการการส่งผ่านความร้อน (Conduction of Heat in Solids) โดย Carslaw และ Jaeger (1959) สามารถนำไปประยุกต์ใช้หาระยะเวลาที่เหล็กเสริมเกิดสนิม ในคอนกรีตที่เคลือบผิวด้วยวัสดุอื่น หรือวัสดุอื่น

ถ้ากำหนดให้ d เป็นระยะหุ้มของคอนกรีตวัดจากผิวเหล็กไปถึงตำแหน่ง $x=0$ และ C_{cr} เป็นค่าความเข้มข้นของคลอไรด์ที่ทำให้เหล็กเกิดสนิม ดังนั้นระยะเวลา Initiation period (t_i) ที่เหล็กเกิดสนิม สามารถหาได้จากรากของสมการ

$$\frac{C_{cr}}{C_0} = \frac{2k}{k+1} \sum_{n=0}^N \alpha^n \text{erfc} \frac{(2n+1)h + kd}{2\sqrt{D_1 t_i}} \quad (28)$$

โดยการเพิ่มจำนวนเทอม N ในอนุกรมจะได้ความแม่นยำของผลลัพธ์ที่ต้องการ

เพื่อที่จะแสดงให้เห็นว่าสมการ (28) ที่เป็นสมการสำหรับโครงสร้าง 2 ชั้น สามารถลดรูปเป็นสมการของโครงสร้างชั้นเดียว ดังนั้นสมการ (28) จะถูกจัดใหม่ให้อยู่ในรูป



$$\frac{C_{cr}}{C_0} = \frac{2k}{k+1} \sum_{n=0}^N \alpha^n \operatorname{erfc} \frac{(2n+1)h+kd}{2k\sqrt{D_2t_i}} \quad (29)$$

ในลิมิตเมื่อ $h \rightarrow 0$, $D_1/D_2 \rightarrow 1$ ($k \rightarrow 1$, $\alpha \rightarrow 0$) แล้วคงไว้เฉพาะเทอมที่เด่นเทอมแรก สมการ (28) ลดรูปเป็น

$$\frac{C_{cr}}{C_0} = \operatorname{erfc} \frac{d}{2\sqrt{D_2t_i}} \quad (30)$$

จะเห็นได้ว่าสมการนี้ตรงกับสมการสำหรับหาเวลาที่เริ่มเกิดการกัดกร่อนของเหล็กเสริมในโครงสร้างชั้นเดียว (Cady และ Weyers (1983) ; Kassir และ Ghosn (2002))

จากสมการข้างต้นจะสังเกตเห็นได้ว่าปัจจัยที่มีผลต่อเวลาเริ่มเกิดการกัดกร่อนของเหล็กเสริม นอกจากความหนาของระยะหุ้มคอนกรีตและความหนาของชั้นทับหน้า ยังขึ้นอยู่กับค่าสัมประสิทธิ์ของการแพร่ในวัสดุ ทั้งนี้ค่าสัมประสิทธิ์ของการแพร่ดังกล่าว โดยเฉพาะในคอนกรีตจะขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย ปัจจัยหนึ่งคืออัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ (Water-cement ratio, w/c) สำหรับปูนซีเมนต์ชนิด Ordinary Portland Cement ความสัมพันธ์ดังกล่าวสามารถแสดงด้วยสมการ (Nilsson (2001), p239)

$$\operatorname{Log}(D) = 4.5(w/c)^2 + 0.14(w/c) - 8.47 \quad (31)$$

3. ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

ในการหาระยะเวลาที่เหล็กเสริมในโครงสร้างเริ่มถูกกัดกร่อนจะคำนวณจากสมการ (28) โดยใช้ค่า C_{cr} และ C_0 เดียวกันกับงานวิจัยของ Kassir และ Ghosn (2002) คือ $C_{cr} = 5.818$ นิวตัน/ลบ.ม และ $C_0 = 52.362$ นิวตัน/ลบ.ม (อัตราส่วนความเข้มข้น $C_{cr}/C_0 = 0.11$) ส่วนความหนาของโครงสร้างชั้นทับหน้า (h) และความหนาของคอนกรีตหุ้ม (d) จะกำหนดหลายค่าดังนี้ h (ม) = 1E-12, 0.025, 0.05, 0.075, 0.10 d (ม) = 0.0445, 0.0508, 0.0572, 0.0635, 0.0699, 0.0762 ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่กระจายของโครงสร้างคอนกรีตหลักชั้นที่ 2 D_2 (ตร.ม/ปี) = 3.87E-05 1.29E-04 และ ค่าอัตราส่วนสัมประสิทธิ์การแพร่กระจายของโครงสร้างชั้นทับหน้ากับสัมประสิทธิ์การแพร่กระจายของโครงสร้างคอนกรีตหลัก $D_1/D_2 = 0.25, 0.50, 1.0, 2.0$ ดังแสดงในตารางและรูปภาพความสัมพันธ์ตามข้างล่างนี้

เพื่อให้มั่นใจว่าผลเฉลยที่ได้สำหรับโครงสร้าง 2 ชั้นมีความถูกต้องแม่นยำ จำเป็นต้องทำการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์เมื่อ h ที่ค่าน้อยมาก ในที่นี้ใช้ค่า $h = 1E-12$ กับผลงานวิจัยของ Kassir และ Ghosn (2002) ที่ไม่มีชั้นทับหน้า พบว่าจำนวนเทอมไม่เกิน 10 ในอนุกรมในสมการ (28) ให้ค่าระยะเวลาเริ่มการกัดกร่อนของเหล็กเสริมดังตารางที่ 1 เท่ากันกับ ค่าระยะเวลาที่ได้จากการจำลองโครงสร้างชั้นเดียวในงานวิจัยของ Kassir และ Ghosn (2002)

ตารางที่ 1 ระยะเวลา t (ปี) ที่เหล็กเสริมเริ่มถูกกัดกร่อน เมื่อไม่มีโครงสร้างชั้นทับหน้า $h = 1\text{E-}12$ ม.

$D_2(\text{m}^2/\text{yr})$ (m^2/yr)	D_1/D_2	d (m), $h = 1\text{E-}12$ m.					
		0.0445 (1.75 in)	0.0508 (2.00 in)	0.0572 (2.25 in)	0.0635 (2.50 in)	0.0699 (2.75 in)	0.0762 (3.00 in)
3.87E-05 (0.06)	0.25	10.1	13.1	16.6	20.5	24.8	29.6
	0.50	10.1	13.1	16.6	20.5	24.8	29.6
	1.00	10.1	13.1	16.6	20.5	24.8	29.6
5.16E-05 (0.08)	2.00	10.1	13.1	16.6	20.5	24.8	29.6
	2.00	7.5	9.9	12.5	15.4	18.6	22.2
	0.50	7.5	9.9	12.5	15.4	18.6	22.2
6.45E-05 (0.10)	1.00	7.5	9.9	12.5	15.4	18.6	22.2
	2.00	7.5	9.9	12.5	15.4	18.6	22.2
	0.50	6.0	7.9	10.0	12.3	14.9	17.7
7.74E-05 (0.12)	1.00	6.0	7.9	10.0	12.3	14.9	17.7
	2.00	6.0	7.9	10.0	12.3	14.9	17.7
	0.50	5.0	6.6	8.3	10.3	12.4	14.8
	1.00	5.0	6.6	8.3	10.3	12.4	14.8
	2.00	5.0	6.6	8.3	10.3	12.4	14.8

ตารางที่ 2 ระยะเวลา t (ปี) ที่เหล็กเสริมเริ่มถูกกัดกร่อน เมื่อโครงสร้างชั้นทับหน้าหนา $h = 0.025$ ม. และ 0.05 ม.

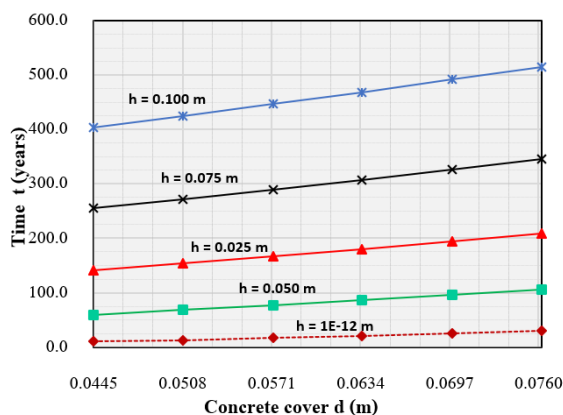
$D_2(\text{m}^2/\text{yr})$ (m^2/yr)	D_1/D_2	d (m), $h = 0.025$ m.						d (m), $h = 0.05$ m.					
		0.0445 (1.75 in)	0.0508 (2.00 in)	0.0572 (2.25 in)	0.0635 (2.50 in)	0.0699 (2.75 in)	0.0762 (3.00 in)	0.0445 (1.75 in)	0.0508 (2.00 in)	0.0572 (2.25 in)	0.0635 (2.50 in)	0.0699 (2.75 in)	0.0762 (3.00 in)
3.87E-05 (0.06)	0.25	59.9	68.0	76.7	85.8	95.4	105.5	140.7	153.3	166.4	180.0	194.1	208.7
	0.50	36.5	42.5	48.9	55.8	63.1	70.8	76.3	84.9	94.0	103.5	113.5	123.9
	1.00	24.5	29.2	34.3	39.9	45.8	52.1	45.4	51.7	58.4	65.6	73.1	81.1
5.16E-05 (0.08)	2.00	18.0	22.0	26.3	31.1	36.2	41.8	29.5	34.5	39.8	45.4	51.5	58.0
	0.25	44.9	51.0	57.5	64.4	71.6	79.1	105.5	115.0	124.8	135.0	145.6	156.5
	0.50	27.4	31.9	36.7	41.8	47.3	53.1	57.2	63.7	70.5	77.6	85.1	92.9
6.45E-05 (0.10)	1.00	18.4	21.9	25.8	29.9	34.3	39.1	34.1	38.8	43.8	49.2	54.8	60.8
	2.00	13.5	16.5	19.7	23.3	27.2	31.3	22.2	25.8	29.8	34.1	38.6	43.5
	0.25	35.9	40.8	46.0	51.5	57.2	63.3	84.4	92.0	99.8	108.0	116.5	125.2
7.74E-05 (0.12)	0.50	21.9	25.5	29.3	33.5	37.8	42.5	45.8	50.9	56.4	62.1	68.1	74.3
	1.00	14.7	17.5	20.6	23.9	27.5	31.3	27.2	31.0	35.1	39.3	43.9	48.6
	2.00	10.8	13.2	15.8	18.6	21.7	25.1	17.7	20.7	23.9	27.3	30.9	34.8
9.03E-05 (0.14)	0.25	29.9	34.0	38.3	42.9	47.7	52.7	70.4	76.6	83.2	90.0	97.0	104.3
	0.50	18.3	21.2	24.5	27.9	31.5	35.4	38.1	42.5	47.0	51.8	56.7	61.9
	1.00	12.3	14.6	17.2	19.9	22.9	26.1	22.7	25.9	29.2	32.8	36.6	40.5
1.03E-04 (0.16)	2.00	9.0	11.0	13.2	15.5	18.1	20.9	14.8	17.2	19.9	22.7	25.8	29.0
	0.25	25.7	29.2	32.9	36.8	40.9	45.2	60.3	65.7	71.3	77.1	83.2	89.4
	0.50	15.6	18.2	21.0	23.9	27.0	30.3	32.7	36.4	40.3	44.4	48.6	53.1
1.16E-04 (0.18)	1.00	10.5	12.5	14.7	17.1	19.6	22.3	19.5	22.2	25.0	28.1	31.3	34.7
	2.00	7.7	9.4	11.3	13.3	15.5	17.9	12.7	14.8	17.0	19.5	22.1	24.9
	0.25	22.4	25.5	28.8	32.2	35.8	39.6	52.8	57.5	62.4	67.5	72.8	78.3
1.29E-04 (0.20)	0.50	13.7	15.9	18.3	20.9	23.6	26.5	28.6	31.8	35.2	38.8	42.6	46.5
	1.00	9.2	11.0	12.9	14.9	17.2	19.5	17.0	19.4	21.9	24.6	27.4	30.4
	2.00	6.8	8.2	9.9	11.6	13.6	15.7	11.1	12.9	14.9	17.0	19.3	21.8
	0.25	20.0	22.7	25.6	28.6	31.8	35.2	46.9	51.1	55.5	60.0	64.7	69.6
	0.50	12.2	14.2	16.3	18.6	21.0	23.6	25.4	28.3	31.3	34.5	37.8	41.3
	1.00	8.2	9.7	11.4	13.3	15.3	17.4	15.1	17.2	19.5	21.9	24.4	27.0
	2.00	6.0	7.3	8.8	10.4	12.1	13.9	9.8	11.5	13.3	15.1	17.2	19.3
	0.25	18.0	20.4	23.0	25.7	28.6	31.6	42.2	46.0	49.9	54.0	58.2	62.6
	0.50	11.0	12.7	14.7	16.7	18.9	21.2	22.9	25.5	28.2	31.1	34.0	37.2
	1.00	7.4	8.8	10.3	12.0	13.7	15.6	13.6	15.5	17.5	19.7	21.9	24.3
	2.00	5.4	6.6	7.9	9.3	10.9	12.5	8.9	10.3	11.9	13.6	15.5	17.4

ตารางที่ 2 - 3 แสดงระยะเวลาที่เหล็กเสริมในโครงสร้างเริ่มถูกกัดกร่อน สำหรับค่า h (ม) = 0.025, 0.05 และ h (ม) = 0.075, 0.10 ตามลำดับ นอกจากนี้ ค่าในตารางดังกล่าวได้ถูกนำไปเขียนในรูปกราฟ ดังแสดงในรูปที่ 2 ถึง 13 จะเห็นว่าเมื่อโครงสร้างมีชั้นทับหน้าหรือเคลือบผิวใด ๆ จะทำให้เหล็กเสริมมีระยะเวลาเริ่มการถูกกัดกร่อนยาวนานขึ้นอย่างชัดเจน นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่อความหนาของคอนกรีตหุ้มเพิ่มขึ้นจะยิ่งทำให้สามารถยืดระยะเวลาการถูกกัดกร่อนของเหล็กเสริมได้ยาวนานขึ้นอย่างชัดเจนเช่นเดียวกัน โดยทั่วไปหากพิจารณาสภาพการสัมผัสคลอไรด์ที่มีอัตราส่วนความเข้มข้น $C_s/C_o = 0.11$ และคอนกรีตมีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่กระจาย D_2 มากกว่าหรือเท่ากับ $3.87\text{E-}05$ ตร.ม/ปี เหล็กเสริมคอนกรีตจะเริ่มถูกกัดกร่อนภายในระยะเวลาไม่เกิน 10 ปี แต่หากเราเคลือบคอนกรีตนั้นด้วยวัสดุที่มีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้น้อยกว่าเพียง 2 เท่าของคอนกรีตนั้น ๆ นั่นคือ $D_1/D_2 = 0.5$ และเคลือบหนา 0.025 ม. ก็จะทำให้สามารถยืดระยะเวลาการถูกกัดกร่อนของเหล็กเสริมไปได้เกือบเท่าตัว คือประมาณ 36 ปี

หรือแม้แต่การเคลือบด้วยวัสดุที่ด้อยกว่า เช่น วัสดุนั้นมีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน เป็น 2 เท่าของคอนกรีตนั้นคือ $D_1/D_2 = 2.0$ และเคลือบหนา 0.025 ม. ก็จะทำได้สามารถยืดระยะเวลาการถูกกัดกร่อนของเหล็กเสริมไปได้เป็นเวลา 18 ปีโดยประมาณ สำหรับค่าอัตราส่วนความเข้มข้น C_s/C_o อื่นๆสามารถคำนวณหาระยะเวลาการถูกกัดกร่อนของเหล็กเสริมได้ไม่ยาก โดยอาศัยวิธีและสมการเดิม

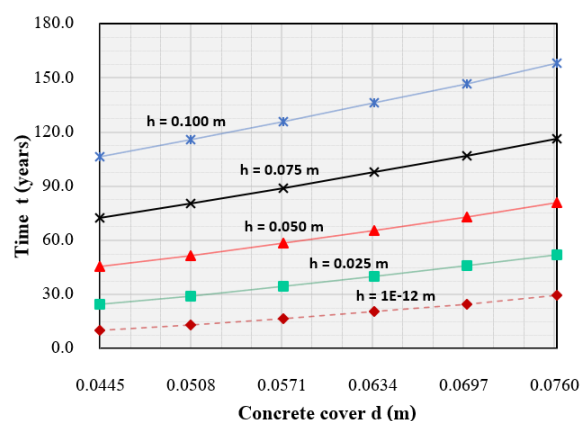
ตารางที่ 3 ระยะเวลา t (ปี) ที่เหล็กเสริมเริ่มถูกกัดกร่อน เมื่อโครงสร้างชั้นทับหน้าหนา h = 0.075 ม. และ 0.10 ม.

D_2 (m ² /yr)	D_1/D_2	d (m), h = 0.075 m.						d (m), h = 0.1 m.					
		0.0445	0.0508	0.0572	0.0635	0.0699	0.0762	0.0445	0.0508	0.0572	0.0635	0.0699	0.0762
(in ² /yr)		(1.75 in)	(2.00 in)	(2.25 in)	(2.50 in)	(2.75 in)	(3.00 in)	(1.75 in)	(2.00 in)	(2.25 in)	(2.50 in)	(2.75 in)	(3.00 in)
3.87E-05 (0.06)	0.25	255.2	272.1	289.5	307.5	325.9	344.9	403.5	424.6	446.4	468.6	491.4	514.7
	0.50	130.4	141.6	153.3	165.4	178.0	191.1	198.9	212.7	226.9	241.7	256.9	272.5
	1.00	72.6	80.5	88.9	97.6	106.8	116.4	106.2	115.7	125.7	136.1	146.8	158.0
5.16E-05 (0.08)	0.25	44.0	50.0	56.3	63.0	70.1	77.5	61.4	68.4	75.7	83.5	91.6	100.0
	0.50	191.4	204.1	217.1	230.6	244.4	258.7	302.6	318.5	334.8	351.5	368.6	386.0
	1.00	97.8	106.2	115.0	124.1	133.5	143.3	149.1	159.5	170.2	181.3	192.6	204.4
6.45E-05 (0.10)	0.25	33.0	37.5	42.2	47.2	52.5	58.1	46.1	51.3	56.8	62.6	68.7	75.0
	0.50	153.1	163.3	173.7	184.5	195.6	206.9	242.1	254.8	267.8	281.2	294.8	308.8
	1.00	78.2	85.0	92.0	99.3	106.8	114.6	119.3	127.6	136.2	145.0	154.1	163.5
7.74E-05 (0.12)	0.25	26.4	30.0	33.8	37.8	42.0	46.5	36.9	41.0	45.4	50.1	54.9	60.0
	0.50	127.6	136.1	144.8	153.7	163.0	172.5	201.7	212.3	223.2	234.3	245.7	257.4
	1.00	65.2	70.8	76.6	82.7	89.0	95.5	99.4	106.3	113.5	120.8	128.4	136.3
9.03E-05 (0.14)	0.25	22.0	25.0	28.1	31.5	35.0	38.8	30.7	34.2	37.9	41.7	45.8	50.0
	0.50	109.4	116.6	124.1	131.8	139.7	147.8	172.9	182.0	191.3	200.8	210.6	220.6
	1.00	55.9	60.7	65.7	70.9	76.3	81.9	85.2	91.1	97.3	103.6	110.1	116.8
1.03E-04 (0.16)	0.25	18.9	21.4	24.1	27.0	30.0	33.2	26.3	29.3	32.5	35.8	39.2	42.9
	0.50	95.7	102.0	108.6	115.3	122.2	129.3	151.3	159.2	167.4	175.7	184.3	193.0
	1.00	48.9	53.1	57.5	62.0	66.8	71.6	74.6	79.8	85.1	90.6	96.3	102.2
1.16E-04 (0.18)	0.25	16.5	18.7	21.1	23.6	26.3	29.1	23.0	25.6	28.4	31.3	34.3	37.5
	0.50	85.1	90.7	96.5	102.5	108.6	115.0	134.5	141.5	148.8	156.2	163.8	171.6
	1.00	43.5	47.2	51.1	55.1	59.3	63.7	66.3	70.9	75.6	80.6	85.6	90.8
1.29E-04 (0.20)	0.25	14.7	16.7	18.8	21.0	23.4	25.8	20.5	22.8	25.2	27.8	30.5	33.3
	0.50	76.6	81.6	86.9	92.2	97.8	103.5	121.0	127.4	133.9	140.6	147.4	154.4
	1.00	39.1	42.5	46.0	49.6	53.4	57.3	59.7	63.8	68.1	72.5	77.1	81.8
	2.00	21.8	24.2	26.7	29.3	32.0	34.9	31.9	34.7	37.7	40.8	44.1	47.4
	2.00	13.2	15.0	16.9	18.9	21.0	23.3	18.4	20.5	22.7	25.0	27.5	30.0



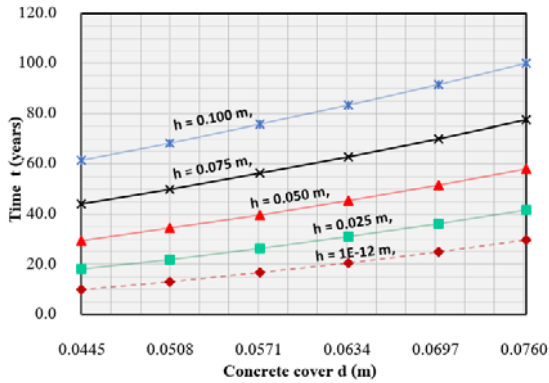
รูปที่ 2 เวลาที่เริ่มเกิดการกัดกร่อนของเหล็กเสริม

$D_2 = 3.87E-05 \text{ m}^2/\text{year}$, $D_1/D_2 = 0.25$

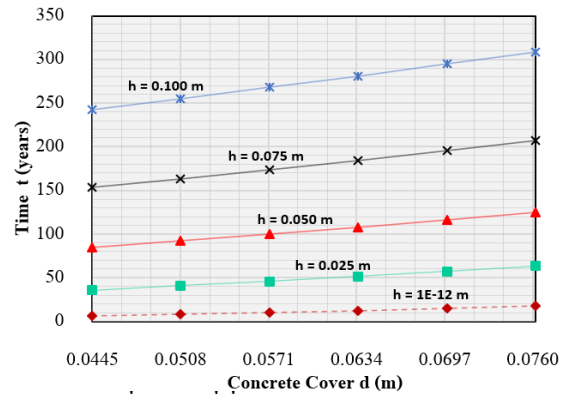


รูปที่ 3 เวลาที่เริ่มเกิดการกัดกร่อนของเหล็กเสริม

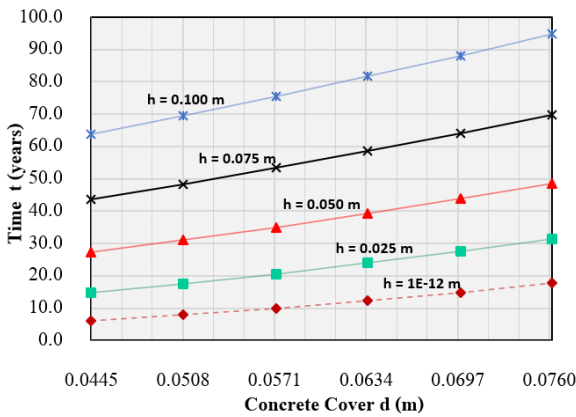
$D_2 = 3.87E-05 \text{ m}^2/\text{year}$, $D_1/D_2 = 1.00$



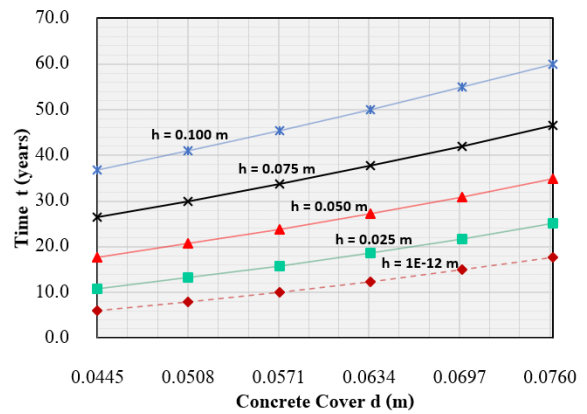
รูปที่ 4 เวลาที่เริ่มเกิดการกัดกร่อนของเหล็กเสริม
 $D2 = 3.87E-05 \text{ m}^2/\text{year}$, $D1/D2 = 2.00$



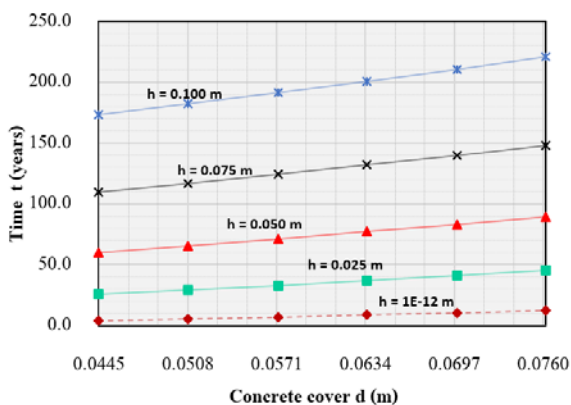
รูปที่ 5 เวลาที่เริ่มเกิดการกัดกร่อนของเหล็กเสริม
 $D2 = 6.45E-05 \text{ m}^2/\text{year}$, $D1/D2 = 0.25$



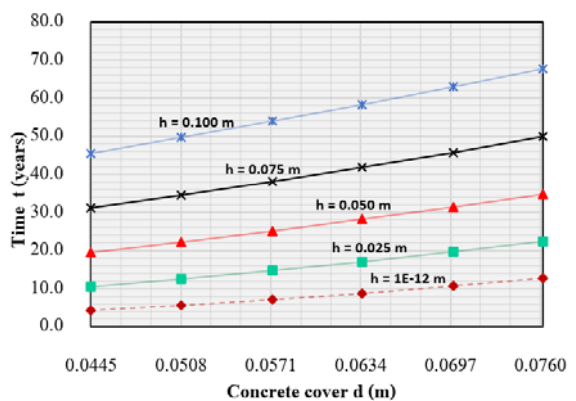
รูปที่ 6 เวลาที่เริ่มเกิดการกัดกร่อนของเหล็กเสริม
 $D2 = 6.45E-05 \text{ m}^2/\text{year}$, $D1/D2 = 1.00$



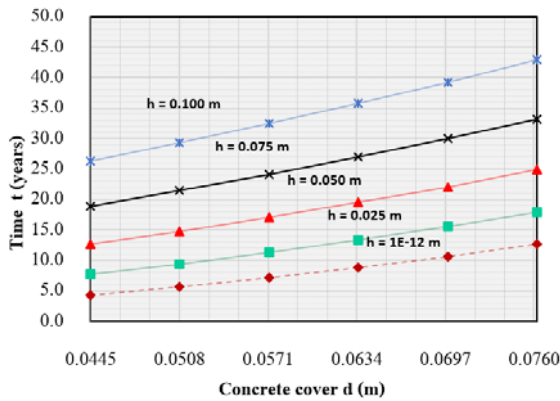
รูปที่ 7 เวลาที่เริ่มเกิดการกัดกร่อนของเหล็กเสริม
 $D2 = 6.45E-05 \text{ m}^2/\text{year}$, $D1/D2 = 2.00$



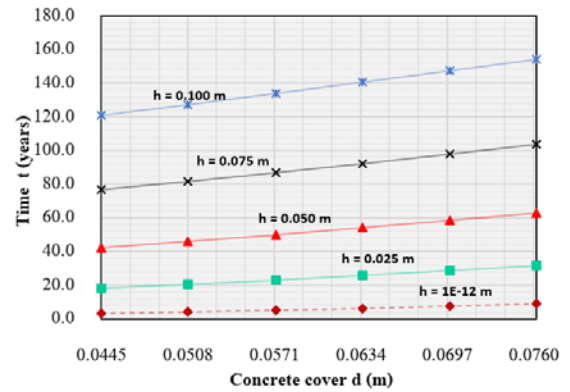
รูปที่ 8 เวลาที่เริ่มเกิดการกัดกร่อนของเหล็กเสริม
 $D2 = 9.03E-05 \text{ m}^2/\text{year}$, $D1/D2 = 0.25$



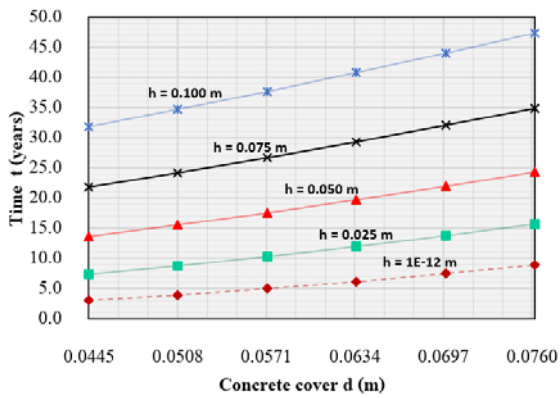
รูปที่ 9 เวลาที่เริ่มเกิดการกัดกร่อนของเหล็กเสริม
 $D2 = 9.03E-05 \text{ m}^2/\text{year}$, $D1/D2 = 1.00$



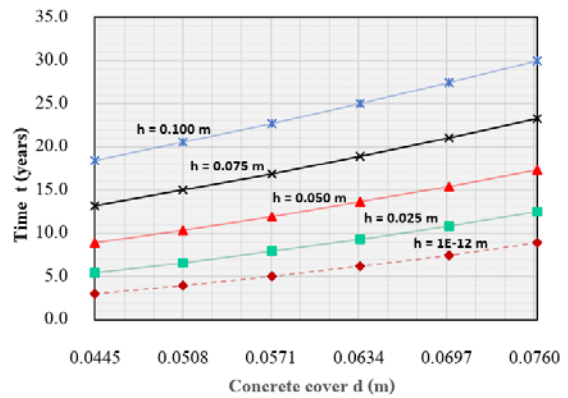
รูปที่ 10 เวลาที่เริ่มเกิดการกัดกร่อนของเหล็กเสริม
 $D2 = 9.03E-05 \text{ m}^2/\text{year}$, $D1/D2 = 2.00$



รูปที่ 11 เวลาที่เริ่มเกิดการกัดกร่อนของเหล็กเสริม
 $D2 = 1.29E-04 \text{ m}^2/\text{year}$, $D1/D2 = 0.25$



รูปที่ 12 เวลาที่เริ่มเกิดการกัดกร่อนของเหล็กเสริม
 $D2 = 1.29E-04 \text{ m}^2/\text{year}$, $D1/D2 = 1.00$



รูปที่ 13 เวลาที่เริ่มเกิดการกัดกร่อนของเหล็กเสริม
 $D2 = 1.29E-04 \text{ m}^2/\text{year}$, $D1/D2 = 2.00$

4. บทสรุปและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้ได้นำเอาทฤษฎีการแพร่ของสารตามกฎของ Fick มาประยุกต์ใช้ในงานคอนกรีตเสริมเหล็กเพื่อหาระยะเวลาที่เหล็กเสริมในโครงสร้างผสม 2 ชั้นเริ่มถูกกัดกร่อนโดยสารคลอไรด์ที่สะสมที่ผิวหน้าของโครงสร้างรวมทั้งผลของชั้นวัสดุปูทับหรือชั้นทับหน้าและความหนาของคอนกรีตที่หุ้มเหล็กเสริมต่อการเปลี่ยนแปลงของระยะเวลาดังกล่าว โดยใช้เทคนิคการแปลงลาปลาซในการหาผลเฉลยของสมการเชิงอนุพันธ์ของการแพร่ที่ค่าสัมประสิทธิ์ของการแพร่ไม่แปรเปลี่ยนตามเวลา และการสะสมของคลอไรด์ที่ผิวหน้าของที่ จากการวิจัยนี้สามารถสรุปได้ว่าการมีวัสดุปูทับหรือชั้นทับหน้ามีผลอย่างมากต่อระยะเวลาการเริ่มเกิดสนิมของเหล็ก ระยะเวลาดังกล่าวแปรเปลี่ยนขึ้นอยู่กับความหนาของชั้นทับหน้าและค่าสัมประสิทธิ์ของการแพร่ในวัสดุ

ความรู้ที่ได้จากงานวิจัยนี้สามารถนำไปศึกษาต่อยอดในกรณีที่มีสัมประสิทธิ์ของการแพร่ไม่คงที่ เพื่อให้ได้ผลการประเมินระยะเวลาการกัดกร่อนได้แม่นยำยิ่งขึ้น



เอกสารอ้างอิง

- Alqam, M. (2014). Transient Chloride Ion Diffusion in a Homogeneous Concrete Column. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 39, 3633-3640.
- Cady, P. D., Weyers, R. E. (1983). Chloride penetration and the deterioration of concrete bridge decks. *Cement, Concrete and Aggregates*, 5, 81-87.
- Carslaw, H. S., Jaeger, J. C. (1959). *Conduction of heat in solids* (2nd ed.). Clarendon Press, Oxford, England.
- Crank, J. (1975). *The mathematics of diffusion* (2nd ed.). Clarendon Press, Oxford, England.
- Hildebrand, F. B. (1976). *Advanced Calculus for Application* (2nd ed.). Prentice-Hall, U.S.A.
- Kassir, M. K., Ghosn, M. (2002). Chloride-induced corrosion of reinforced concrete bridge decks. *Journal of Cement and Concrete Research*, 32, 139-143.
- Nilsson, L. (2001). *Prediction models for Chloride ingress and corrosion initiation in Concrete structures* (1st ed.). Goteborg, Sweden: Chalmers University of Technology.
- Petcherdchoo, A. (2017). Closed-form solution for bilinear surface chloride functions applied to concrete exposed to deicing salts. *Cement and Concrete research*, 136-148.
- Phurkhao, P., Kassir, M. K. (2005). Note on chloride-induced corrosion of reinforced concrete bridge decks. *Journal of Engineering Mechanics ASCE*, 131, 97-99.