# ประสิทธิภาพของสารยับยั้งการเกิดสนิม MCI-2020 ต่อโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก

# The Efficacy of Using Migratory Corrosion Inhibitor – 2020 (MCI-2020) for Reinforced Concrete Structure

นายกิตติทัศน์ กิติพันธยาพร
นายเกริกชัย ศรีสุโข
อาจารย์ที่ปรึกษา : รศ.ดร.วิทิต ปานสุข
*ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย จ.กรุงเทพฯ*

## บทคัดย่อ

ในปัจจุบันนั้นส่วนใหญ่โครงสร้างอาคารทั่วไป ๆจะเป็นโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กเนื่องจากราคาวัสดุก่อสร้างโดยรวมนั้นมีราคาถูกกว่าเมื่อเทียบกับโครงสร้างเหล็กทำให้ทุก ๆคนสามารถเห็นอยู่บ่อยครั้ง แต่เมื่อโคงสร้างอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กมีอายุการใช้งานที่มากขึ้น จะมีปัญหาเกี่ยวกับโครงสร้างตามมาไม่ว่าจะเป็นอาคารเกิดการทรุดตัว มีรอยแตกร้าวบริเวณต่าง ๆ หรือแม้กระทั้งเกิดสนิมในโครงสร้าง ซึ่งผลที่ตามมาคือกำลังรับแรงของโครงสร้างนั้นจะมีค่าที่น้อยลงทำให้อาคารเริ่มไม่ปลอดภัย และปัญหาส่วนใหญ่ที่เกิดขึ้นในโครงสร้างอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กคือการเกิดสนิมในโครงสร้างซึ่งในการดูแลรักษาย่อมมีหลากหลายวิธีซึ่งทางผู้ทำโครงงานเสนอวิธีแก้ไขเรื่องการเกิดสนิมในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กโดยใช้สารยับยั้งที่มีชื่อว่า Migratory Corrosion Inhibitor – 2020 หรือ MCI-2020 ซึ่งสารยับยั้งนี้สามารถป้องกันการเกิดสนิมของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก อีกทั้งยังสามารถชะลอการเกิดสนิมของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่เกิดสนิมอยู่แล้วได้โดยการใช้งานนั้นสามารถพ่นลงบนโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กหรือการทาลงบนโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กจะสามารถยับยั้งการเกิดสนิมให้กับเหล็กในคอนกรีตได้ แต่ยังมีข้อจำกัดในด้านของอุณหภูมิโดยรอบของโครงสร้าง พื้นผิวโครงสร้างที่จะใช้สารยับยั้งนี้และอื่น ๆ รวมกับการยังไม่มีการทดสอบสารยับยั้งนี้ในประเทศไทยอย่างเป็นทางการทำให้อายุการใช้งานนั้นยังเป็นแค่การคาดการณ์

คำสำคัญ: Migratory Corrosion Inhibitor – 2020 ( MCI-2020 ) ; โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก ; กัดกร่อน

## Abstract

Nowadays, most of building structures are reinforced concrete structure due to the cost of materials is way less than steel structure once reinforced concrete structure is built and used for a while ,The structure may have some defects like concrete settlement , concrete rupture including corrosion ,corrosion will reduce strength of structure then the structure begins unsafe , Corrosion is one major problem that always found in reinforced concrete structure and there are several curing method for this problem so our project team are interesting in one method that is using Migratory Corrosion Inhibitor – 2020 (MCI-2020) ,this inhibitors can reduce corrosion rate and protect structure from corrosion including slow down corrosion rate in structure that already have corrosion by low pressure spray or brush on to concrete surface but there are some limitation to use this inhibitor like temperature , surface area , etc , and also there is no official testing result about this inhibitor in Thailand yet so service life after the structure was applied by this inhibitor is just prediction.

Key words: Migratory Corrosion Inhibitor – 2020 ( MCI-2020 ) ; Reinforced Concrete ; Corrosion

## 1. บทนำ

เนื่องจากในอดีตมีงานก่อสร้างอยู่มากมายไม่ว่าจะเป็น อาคารพาณิชย์ ที่พักอาศัย ทางรถไฟฟ้า ล้วนแล้วแต่เป็นงานก่อสร้างที่ใช้คอนกรีตเสริมเหล็กเป็นส่วนใหญ่ ซึ่งจะสังเกตเห็นได้ชัดเจนในช่วงวิกฤตเศรษฐกิจต้มยำกุ้ง ปี พ.ศ. 2540 นั้นมีอาคารในกรุงเทพมหานครเป็นจำนวนมาก เป็นผลให้ในปัจจุบันอาคารเหล่านั้นมีอายุการใช้งานที่นานซึ่งก็จะมีปัญหาตามมาในส่วนของงานโครงสร้าง เช่น อาคารเกิดรอยร้าว อาคารมีสนิมเกิดขึ้นตามโครงสร้างเหล็ก ระบบไฟฟ้าเกิดขัดข้อง หรือระบบดับเพลิงเกิดขัดข้อง เป็นต้น ซึ่งอาคารทุกอาคารย่อมมีการตรวจสอบอาคารอยู่เป็นประจำเมื่อผู้ตรวจสอบมาพบเจออาจเกิดปัญหาว่าอาคารนั้นไม่เหมาะสมที่จะใช้ประโยชน์ได้ ซึ่งวิธีการแก้ไขนั้น

ก็มีอยู่หลายวิธีเช่นกันแต่ผู้ตรวจสอบต้องรู้ให้ได้ก่อนว่าสาเหตุของปัญหาที่เกิดขึ้นนั้นเกิดจากอะไร เช่น คอนกรีตเกิดรอยร้าวสาเหตุอาจมาจากอาคารเกิดการทรุดตัว งานฉาบไม่ดี รับน้ำหนักมากเกินไป หรือเกิดสนิมในโครสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก แต่ในปัจจุบันปัญหาหลักๆที่เกิดขึ้นบ่อยครั้งนั้นก็คือการเกิดสนิมในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก ซึ่งสาเหตุการเกิดสนิมในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กนั้นเป็นไปได้หลายอย่างเช่นความเสียหายจากคาร์บอเนชัน ความเสียหายจากคลอไรด์ หรือความสียหายจากความชื้นสูง ซึ่งถ้าพิจารณาในเหตุการณ์ปัจจุบันนั้นประกอบกับในกรุงเทพมหานคร อากาศในกรุงเทพมหานครนั้นประกอบไปด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ ($CO_2$) เป็นจำนวนมากขึ้นเรื่อยๆ ทำให้โครงสร้างเกิดความเสียจากคาร์บอเนชันเป็นส่วนใหญ่ พวกเราสามารถสังเกตง่ายจากใต้สถานี BTS หรือโครงสร้างเส้นทางของ BTS นั้นจะต้องสัมผัสกับคาร์บอนไดออกไซด์ที่ปล่อยออกมาจากรถที่ใช้กัน ทำให้โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก BTS อาจมีรอยแตกร้าวซึ่งนำไปสู่การสูญเสียการรับกำลังได้

ดังนั้นทางผู้จัดทำโครงงานจึงเลือกที่จะแก้ปัญหาสนิมในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กโดยการใช้สารยับยั้งการเกิดสนิมที่มีชื่อว่า Migratory Corrosion Inhibitor – 2020 หรือ MCI-2020 ซึ่งเป็นสารยับยั้งชนิดใหม่ที่เพิ่งนำเข้ามาในประเทศไทย เพื่อช่วยในการแก้ปัญหาสนิมโดยการยับยั้งการเกิดสนิมในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก และยืดอายุการใช้งานของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กให้ใช้ได้นานยิ่งขึ้น

## 2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

*2.1 กลไกการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นในเหล็กเสริม*

*2.1.1 นิยามการกัดกร่อน*

การกัดกร่อน (Corrosion) หมายถึงการเสื่อมสภาพของโลหะที่มีปัจจัยต่างๆ ทำให้ ปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี หรือเกิดจากปฏิกิริยาทางกายภาพของโลหะ ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการเสื่อมสภาพของโลหะได้แก่สภาพแวดล้อมของการนำไปใช้งานที่แตกต่างกัน และชนิดของวัสดุและผลิตภัณฑ์

*2.1.2 ประเภทของการกัดกร่อน*

1.การกัดกร่อนแบบสม่ำเสมอ (Uniform Corrosion)

2.การกัดกร่อนเนื่องจากความต่างศักย์ (Galvanic Corrosion)

3.การกัดกร่อนแบบช่องแคบ (Crevice Corrosion)

4.การกัดกร่อนแบบเป็นหลุม (Pitting)

5.การกัดกร่อนตามขอบเกรน (Intergranular Corrosion)

6.การกัดกร่อนแบบเลือก (Selective Leaching or Dealloying)

7.การกัดกร่อนแบบกัดเซาะ (Erosion Corrosion)

8.การกัดกร่อนโดยความเค้น (Stress corrosion)

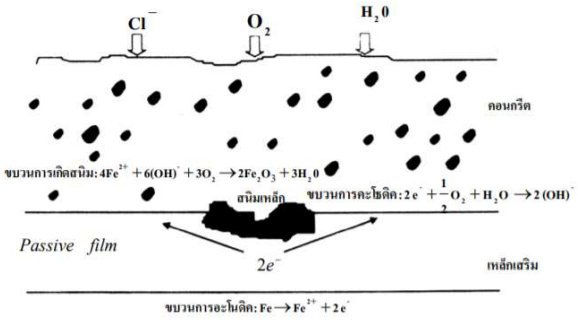
*2.1.3 การเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีต*

โดยปกติแล้วเหล็กเสริมที่อยู่ในคอนกรีต จะถูกปกป้องไม่ให้เกิดสนิมด้วยความเป็นด่างที่สูงของ คอนกรีต ทั้งนี้เนื่องจากในสภาวะความเป็นด่างที่สูง เหล็กจะไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาแอโนดิก (Anodic process) ได้ นั่นคือเหล็กจะไม่สามารถแตกตัวเป็นอิออนของเหล็ก (Fe2+) และอิเล็กตรอน (2e) ได้เลย ความเป็นด่างในคอนกรีตโดยปกติมักจะอยู่ในช่วงตั้งแต่ 12.5 ถึง 13.5 ขึ้นอยู่กับวัสดุที่ใช้ผสม และส่วนผสมของคอนกรีต คุณภาพของคอนกรีตหุ้มเหล็กก็เป็นปัจจัยสำคัญของการควบคุมความเป็นสนิม ของเหล็กเสริมด้วย เหล็กเสริมในคอนกรีตจะเป็นสนิมได้ก็ต่อเมื่อ เงื่อนไขทั้ง 3 ประการดังนี้

1. ความเป็นด่างในคอนกรีตลดลงจนถึงปฏิกิริยาแอโนดิก (Anodic process) สามารถเกิดได้ซึ่ง ความเป็นด่างในระดับที่จะทำให้ปฏิกิริยาแอโนดิก เกิดขึ้นได้นั้น จะมีค่าของ pH ต่ำกว่าระดับ 9 ถึง 10 และมักจะเรียกว่าระดับวิกฤติ (Critical level) ของความเป็นด่าง ความเป็นด่างในคอนกรีตลดลงได้ด้วย สาเหตุต่างๆดังต่อไปนี้คือ คาร์บอเนชั่น (Carbonation) การซึมผ่านของคลอไรด์เข้าไปในคอนกรีต หรือ 4 แม้แต่การชะล้างของน้ำฝนในกรณีที่คอนกรีตมีความพรุนมาก ซึ่งกลไกการทำให้ความเป็นด่างลดลงโดย แต่ละสาเหตุจะได้แยกอธิบายเป็นหัวข้อต่างหากต่อไป

2. มีความชื้นเพียงพอที่จะทำให้อิออนของเหล็ก (Fe2+) เข้าสู่สภาวะสารละลาย และเพียงพอที่จะทำปฏิกิริยาในการเกิดสนิม ซึ่งโดยปรกติความชื้นมักจะอยู่ในบริเวณคอนกรีตที่หุ้มรอบเหล็ก เสริมอยู่แล้ว

3. มีปริมาณออกซิเจนเพียงพอในการทำปฏิกิริยาเพื่อการเกิดสนิม ซึ่งปรกติแล้วออกซิเจนใน ปริมาณที่เพียงพอในการเกิดสนิมมักจะแพร่เข้าสู่คอนกรีตบริเวณเหล็กเสริมโดยผ่านทางช่องว่างที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ (Unsaturated pores) นั่นคือแพร่ผ่านอากาศในช่องว่าง แต่การแพร่ของออกซิเจนผ่านทาง ช่องว่างที่อิ่มตัวด้วยน้ำ (Saturated pores) จะเป็นไปได้ยาก เนื่องจากออกซิเจนละลายน้ำได้น้อยมาก ดังนั้นคอนกรีตที่อิ่มตัวด้วยน้ำอยู่ตลอดเวลามักจะไม่เกิดสนิมในเหล็ก กลไกของการเกิดสนิมของเหล็กเสริม (รูปที่ 2.1)




รูปที่ 2.1 กลไกการเกิดสนิมในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก
( ที่มา ผศ. ดร. อานนท์ วงษ์แก้ว)

*2.2 สารยับยั้งการเกิดสนิม*

สารยับยั้งการเกิดสนิม (Corrosion Inhibitor) เป็นสารผสมเพิ่มในคอนกรีต หรือสารทาผิวคอนกรีตประเภทหนึ่งที่สามารถลดอัตราการเกิดสนิม หรือแม้กระทั่งสามารถยับยั้งการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก ซึ่งสารผสมเพิ่มประเภทนี้มีคุณสมบัติพิเศษ ได้แก่

1.เพิ่มความต้านทานต่อการถูกทำลายเนื่องจากคลอไรด์ไอออน หรือคาร์บอเนชั่นของพาสซิพฟิล์ม ซึ่งเป็นชั้นฟิล์มที่ป้องกันการเกิดสนิมของเหล็กเสริม

2.สร้างชั้นฟิล์มพิเศษป้องกันเหล็กเสริมจากการเกิดสนิม

3. ยับยั้งการซึมผ่านของคลอไรด์อิออน หรือก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

4.เพิ่มความสามารถในการยึดจับคลอไรด์ของคอนกรีต

5. ลดปริมาณก๊าซออกซิเจนที่ละลายอยู่ในสารละลายภายในช่องว่างของคอนกรีต

6. ยับยั้งการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนผ่านช่องว่างภายในคอนกรีต

*2.3 การถ่ายโอนมวล*

การถ่ายโอนมวลสาร (Mass Transfer) เกิดจากการถ่ายโอนมวลสารในระบบของสารตั้งแต่ 2 องค์ประกอบขึ้นไป ที่มีความเข้มข้นแตกต่างกัน โดยที่โมเลกุลจะเคลื่อนที่จากความเข้มข้นมากไปยังความเข้มข้นน้อย เพื่อให้เกิดความสมดุลของโมเลกุลในระบบ ซึ่งกลไกนี้ทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนของมวลสาร

*2.3.1 กลไกการถ่ายโอนมวล*

การถ่ายเทมวลโดยการแพร่ของโมเลกุล เป็นการเคลื่อนที่ของโมเลกุลแต่ละโมเลกุลผ่านสสารด้วยพลังงานความร้อน (thermal energy) ที่มีอยู่ในโมเลกุลที่มีอุณหภูมิสูงกว่าศูนย์สัมบูรณ์ (absolute zero) โดยที่โมเลกุลแต่ละโมเลกุลจะเคลื่อนที่เป็นเส้นตรงแบบไม่เป็นระเบียบ (random motion) ด้วยความเร็วคงที่ เมื่อมีการชนกันของโมเลกุล ความเร็วและทิศทางการเคลื่อนที่จะเปลี่ยนไป ระยะทางเฉลี่ยของการเคลื่อนที่ของโมเลกุลโดยที่ไม่มีการชนกับโมเลกุลอื่นเรียกว่าเส้นทางอิสระเฉลี่ย (mean free path) และความเร็วเฉลี่ยในการเคลื่อนที่จะขึ้นกับอุณหภูมิ การถ่ายเทมวล สารแบบนี้จึงเป็นการแพร่อย่างช้าๆ

*2.3.2 ลักษณะของการแพร่*

การแพร่ เป็นการกระจายตัวของโมเลกุลของสสารจากจุดที่มีความเข้มข้นสูงกว่า ไปยังจุดที่มีความเข้มข้นต่ำกว่าด้วยการเคลื่อนที่เชิงสุ่มของโมเลกุล การแพร่จะทำให้ เกิดการผสมของวัสดุอย่างช้าๆ สำหรับเฟสหนึ่งๆของวัสดุใดๆก็ตามที่มีอุณหภูมิสม่ำเสมอ และไม่มีแรงภายนอกมากระทำกับอนุภาค กระบวนการแพร่ก็จะยังคงเกิดถึงแม้ว่าสสารจะผสมกันโดยสมบูรณ์หรือเข้าสู่ภาวะสมดุลแล้ว

*2.3.3 สัมประสิทธิ์การแพร่*

สัมประสิทธิ์การแพร่ คือ ค่าที่บ่งบอกถึงอัตราการแพร่ของสารนั้นๆในตัวกลาง ซึ่งมีหน่วยเป็น($m^2/s$) ค่านี้สามารถเปรียบเทียบได้กับค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (thermal diffusivity ) โดยขึ้นกับชนิดและส่วนผสมของระบบ ทั้งสภาพแวดล้อม เช่น ความดันและอุณหภูมิ โมเลกุลของก๊าซสามารถเคลื่อนที่ได้ง่ายเมื่อเทียบกับของเหลวซึ่งสามารถเคลื่อนที่ได้ง่ายกว่าของแข็ง ดังนั้น สัมประสิทธิ์การแพร่ของก๊าซจึงมีค่าสูงสุด โดยทั่วไปอยู่ในช่วง $5\times10^{-6}$ ถึง $10^{-5}$ $m^2/s$ สัมประสิทธิ์การแพร่ของของเหลวอยู่ในช่วงปานกลาง คือ $10^{-10}$ ถึง $10^{-9}$ $m^2/s$ ส่วนสัมประสิทธิ์การแพร่ของของแข็งมี ค่าต่ำสุดอยู่ที่ $10^{-14}$ ถึง $10^{-10}$ $m^2/s$ โดยทั่วไปแล้วสำหรับระบบที่ความเข้มข้นหรือความหนาแน่นน้อยๆ สัมประสิทธิ์การแพร่จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น เนื่องจากพลังงานความร้อนของโมเลกุลสูงขึ้น ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ได้เร็วขึ้น

## 3. การดำเนินงานวิจัย

*3.1 บทนำ*

วิธีการดำเนินงานในบทนี้จะกล่าวถึงขั้นตอนการศึกษาของ Migratory Corrosion Inhibitor – 2020 หรือ MCI-2020 ซึ่งเรื่องที่จะศึกษาประกอบไปด้วยกลไกการทำงานรวมไปถึงปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น การทดสอบประสิทธิภาพคุณสมบัติของ และวิธีการใช้งาน

*3.2 แนวทางในการดำเนินงาน*

*3.2.1 ศึกษาค้นคว้าข้อมูลที่เกี่ยงข้อง*

ศึกษาค้นคว้าข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับสารยับยั้ง MCI-2020 เพื่อให้เข้าใจถึงคุณสมบัติของสารยับยั้ง วิธีการใช้ และมาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบจากสื่อต่างๆ และหนังสือที่ให้ข้อมูลเกี่ยวกับสารยับยั้งชนิดนี้

*3.2.2 ศึกษากลไกการทำงานของ MCI-2020*

จากการศึกษาค้นคว้าข้อมูลที่เกี่ยวข้องแล้วจะดำเนินการศึกษากลไกการทำงานของ MCI-2020 ต่อโดยขั้นตอนนี้จะกล่าวถึงวิธีการที่ MCI-2020 เข้าไปทำปฏิกิริยากับเหล็กเสริมได้อย่างไรและหลังจากทำปฏิกิริยาแล้วจะส่งผลอย่างไรบ้าง

*3.2.3 ศึกษาวิธีการทดสอบประสิทธิภาพของ MCI-2020*

ในขั้นตอนนี้จะกล่าวถึงวิธีการทดสอบคุณภาพ และคุณสมบัติต่างๆ รวมไปถึงเทคโนโลยีที่ใช้ในการทดสอบ และแสดงผลการทดสอบ

*3.2.4 ศึกษาวิธีการการใช้งานของ MCI-2020*

ในขั้นตอนนี้จะกล่าวถึงวิธีการใช้ MCI-2020 กับโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กว่าใช้ได้ได้บ้าง

*3.3 สรุป*

ในการดำเนินงานขั้นนี้สามารถสรุปเป็นขั้นตอนตามลำดับได้แก่ ศึกษาค้นคว้าข้อมูลที่เกี่ยวข้องศึกษากลไกการทำงานของ MCI-2020 , ศึกษาวิธีการทดสอบประสิทธิภาพของ MCI-2020 และ ศึกษาวิธีการการใช้งานของ MCI-2020

## 4. ผลการดำเนินงานวิจัย

*4.1 กลไกการทำงานของ MCI-2020*

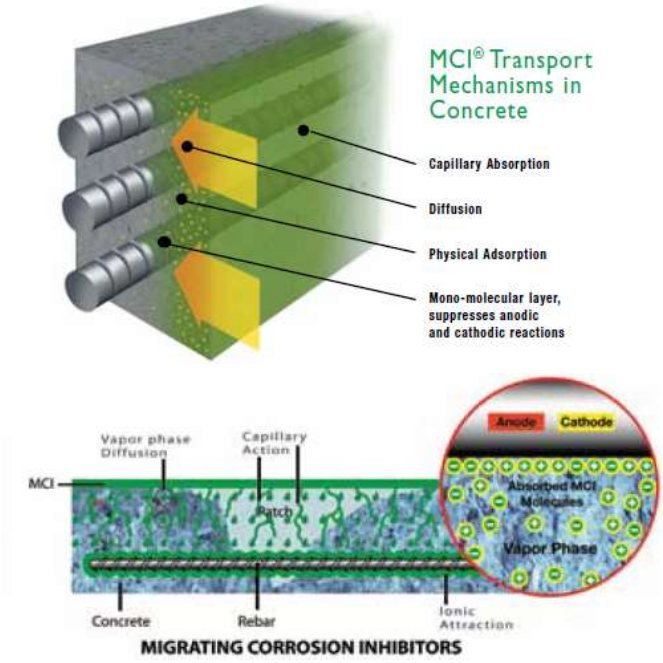
1. กลไกการทำงาน เริ่มจากการที่ MCI-2020 เคลื่อนที่จากผิวสัมผัสของคอนกรีตและเข้าสู่เนื้อคอนกรีตในรูปแบบของเหลวโดยอาศัยแรงยกตัว (capillary action) ขั้นตอนนี้เปรียบเสมือนว่าตัวคอนกรีตเป็นฟองน้ำที่มี MCI-2020 ซึมผ่านเข้าไป

2. หลังจากสารเคลื่อนที่เข้าไปแล้วMCI-2020 จะแปลงสภาพเข้าสู่รูปแบบไอ (vapor phrase) และเคลื่อนที่เข้าสู่รูพรุนในเนื้อคอนกรีต (concrete pore) การเคลื่อนนี้เป็นไปในรูปแบบสุ่มตาม Fick's law โดยเคลื่อนที่จากบริเวณที่มีความเข้มข้นมากไปสู่บริเวณที่มีความเข้มน้อย

3. เมื่อ MCI-2020 เคลื่อนที่ถึงตัวเหล็กเสริม MCI-2020 จะสร้างพันธะไอออนิกกับตัวเหล็กเสริม และเกิดเป็นชั้นโมเลกุลของ MCI-2020 เคลือบตัวเหล็กเสริมไว้ และการเคลือบของสารนี้มีความแข็งแรงมากพอที่ น้ำ,คลอไรด์ หรือ สารที่ทำให้เกิดสนิม เข้าไปได้

4. จากการทดสอบสามารถยืนยันได้ว่า MCI-2020 สามารถซึมซับไปถึงชั้นผิวเหล็กและมีความหนา 75-85 nm และเกิดความหนาของชั้น MCI-2020 อยู่ที่ 20-100 Å ในขณะที่คลอไรด์สามารถทะลวงเข้าสู่ชั้น

ของ MCI-2020 แค่ 60 nm ดังนั้น MCI-2020 จึงสามารถป้องกันการทะลวงของคลอไรด์จากผิวสัมผัสคอนกรีต และคลอไรด์เดิมที่มีอยู่ในเนื้อคอนกรีตอยู่แล้วได้




รูปที่ 4.1 กลไกการทำงานของ MCI-2020
( ที่มา www.cortecmci.com )

*4.2 การทดสอบประสิทธิภาพในการเคลื่อนตัวของ MCI-2020*

*4.2.1 การทดสอบด้วย QAC kit (Qauternary Ammonium Compound )*

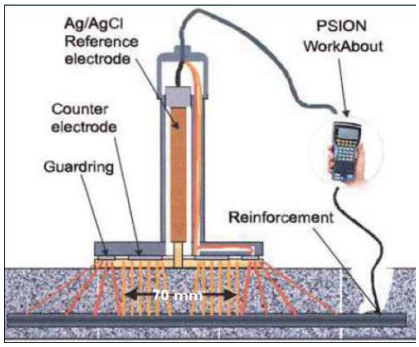
QAC เป็นการใช้กระดาษ QAC Test Paper จุ่มลงในเนื้อคอนกรีตที่สกัดออกมาแล้วเพื่อตรวจสอบความสามารถในการซึมผ่านของสาร

Use the manufacturer's instructions for the EM Quant QAC test sticks to analyze each slurry solution/extraction.

รูปที่ 4.2 การทดสอบด้วย QAC kit
( ที่มา www.preclaboratories.com/ )

*4.2.2 การทดสอบโดยอาศัยเหล็กเสริมที่อยู่ในเนื้อคอนกรีต*

สามารถทำได้โดยติดตั้งเข้ากับอุปกรณ์ทดสอบหลายชิ้น และสังเกตการผุกร่อนที่เกิดสนิมโดยอ่านค่าจาก corrosion rate sensor ที่ติดอยู่กับตัวเหล็กเสริม



รูปที่ 4.3 การทดสอบโดยอาศัยเหล็กเสริมที่อยู่ในเนื้อคอนกรีต
( ที่มา www.cortecmci.com )

*4.2.3 การทดสอบโดยเทคโนโลยี XPS (X-ray Photoelectron Spectroscopy)*

เป็นการตรวจสอบโมเลกุลของ MCI-2020 ที่เคลือบอยู่กับบนผิวเหล็กเสริมซึ่งจะเห็นเป็นภาพความหนาของของชั้นโมเลกุล MCI-2020

รูปที่ 4.4 เทคโนโลยี XPS
( ที่มา www.cortecmci.com )

*4.3 การทดสอบอัตราการแพร่ผ่านชั้นคอนกรีตของ MCI-2020*

1. ใช้คอนกรีต 2 แบบที่มีส่วนผสมต่างกันเป็นตัวอย่างในการทดสอบ

| General Composition | | T-1 | T-2 |
|---|---|---|---|
| Components | Units | | |
| Concrete | kg/m³ | 380 | 380 |
| Water | l/m³ | 209 | 171 |
| Aggregate | kg/m³ | 1720 | 1823 |
| W/C | % | 0.55 | 0.45 |
| Consistency of Settling | cm | 14.5 | 4.5 |

**Table 1** Composition of Concrete

รูปที่ 4.5 ส่วนผสมคอนกรีตที่ใช้ในการทดสอบ
( ที่มา www.cortecmci.com )

2. จัดวางคอนกรีตในรูปแบบ diffusion cell

3. วัดความเข้มข้นของ MCI-2020 ปริมาตร 15 mL ทุก 3 วัน หลังจากวัดความเข้มข้นแล้วให้นำ MCI-2020 15 mL ที่นำไปวัดความเข้มข้นใส่กลับคืน เป็นเวลา 21วัน

4.จากผลการทดสอบพบว่าความเข้มข้นของ MCI-2020 เพิ่มขึ้นตามเวลา

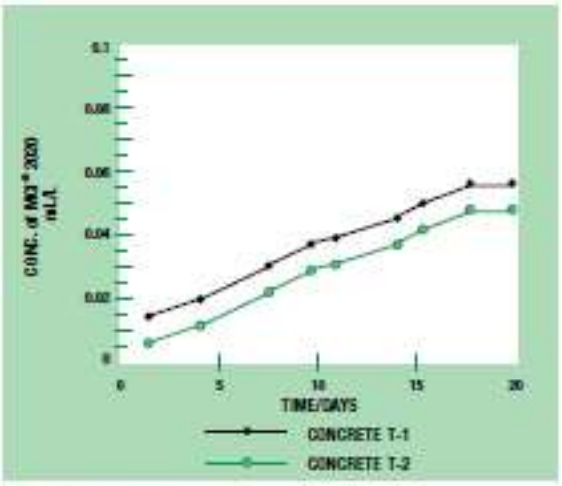



**Figure 2** Calibration Diagram

รูปที่ 4.6 กราฟผลการทดสอบ
( ที่มา www.cortecmci.com )

5. ผลการทดสอบจะได้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ดังตาราง

| Coefficient of Diffusion $cm^2/s^{-1}$ | | | |
|---|---|---|---|
| Concrete Sample | Data No. | Middle Value | Standard Deviation |
| T-1 | 5 | $1.78x10^{-12}$ | $0.30x10^{-12}$ |
| T-2 | 5 | $1.45x10^{-12}$ | $0.23x10^{-12}$ |

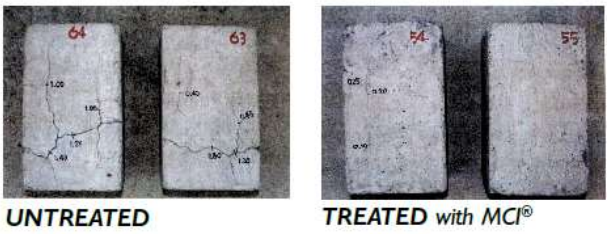
**Table 2** MCI® Coefficient of Diffusion

รูปที่ 4.7 ตารางผลการทดสอบ
( ที่มา www.cortecmci.com )

จากการทดสอบอัตราการแพร่จะพบว่าMCI-2020สามารถใช้ป้องกันคลอไรด์ และลดการผุกร่อนของเหล็กเสริมได้

*4.4 การทดสอบประสิทธิภาพโดยอาศัยการแตกร้าวของคอนกรีต*

จากการทดสอบเพิ่มเติมระหว่างตัวอย่างที่ไม่ได้ใช้ MCI-2020 และตัวอย่างที่ใช้ MCI-2020 โดยนำทั้งสองตัวอย่างมาเร่งอุณหภูมิ และความชื้นเป็นเวลา 4 ปี 6 เดือนจะพบว่า ตัวอย่างที่ใช้ MCI-2020 มีรอยแตกร้าวน้อยกว่าตัวอย่างที่ไม่ได้ใช้ MCI-2020 อย่างชัดเจน




รูปที่ 4.8 ผลการทดสอบการเร่งอุณหภูมิ และความชื้น
( ที่มา www.cortecmci.com )

*4.5 การทดสอบประสิทธิภาพการแพร่ผ่านชั้นคอนกรีตของ MCI-2020*

*4.5.1 การทดสอบประสิทธิภาพโดยอาศัยความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า*

จากการทดสอบพบว่าตัวอย่างที่ไม่ได้ใช้ MCI-2020 จะมีค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าอยู่ที่ 1.4 $mA/cm^2$ และตัวอย่างที่ใช้ MCI-2020 จะมีค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าอยู่ที่ 0.4 $mA/cm^2$ การที่ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าของตัวอย่างที่ใช้ MCI-2020 น้อยกว่านั้นหมายความว่าเหล็กเสริมมีการผุกร่อนเกิดเป็น ($Fe^{2+}$) น้อยกว่านั่นเอง และจากการทดลองสามารถคาดการณ์ได้ว่าคอนกรีตเสริมเหล็กที่ใช้ MCI-2020 นั้นสามารถมีอายุการใช้งานนานมากขึ้น 15-20 ปี

*4.5.2 จากการใช้เทคโนโลยี SEM (Scanning Electron Microscopy) และ EDX ( Energy Dispertive X-ray microanalysis) ตรวจสอบบนผิวของเหล็กเสริม*

จากการทดสอบพบว่า

1. ตัวอย่างที่ไม่ได้ใช้ MCI-2020 จะไม่พบไนโตรเจนบนผิวของเหล็กเสริม ซึ่งไนโตรเจนเป็นส่วนประกอบหนึ่งของ MCI-2020 และพบธาตุหรือสารทั่วไปที่พบเจอในคอนกรีต

2. ตัวอย่างที่ใช้ MCI-2020 จะพบไนโตรเจนบนผิวของเหล็กเสริม ดังนั้นจากการตรวจสอบนี้สามารถยืนยันได้ว่า MCI-2020 สามารถซึมผ่านผิวสัมผัสคอนกรีตจนมาเคลือบเหล็กเสริมได้

*4.6 วิธีการใช้งาน MCI-2020*

ก่อนใช้งานสารยับยั้งนี้ต้องมีการเตรียมพื้นผิวของคอนกรีตให้สะอาด แห้ง และไม่มีคราบน้ำมันหรือจารบีติดบริเวณนั้น การทำความสะอาดพื้นผิวสามารถทำได้จาก Steam Cleaning , Waterblasting หรือ Sandblasting ถ้าต้องการที่จะเคลือบผิวอีกครั้งต้องรอให้ผิวที่เคลือบครั้งแรกนั้นแห้งก่อนแล้วเริ่มทำการเคลือบผิวชั้นที่2โดยต้องทำการเคลือบให้เสร็จภายใน 15 นาที

สามารถใช้งานได้2วิธี 1.พ่นด้วยความดันต่ำบนผิวสัมผัสคอนกรีต
2.ใช้แปรงทาบนผิวสัมผัสคอนกรีต

## 5. สรุปผลการวิจัย

*5.1 การใช้งานของ MCI-2020*

ก่อนใช้งานสารยับยั้งนี้ต้องมีการเตรียมพื้นผิวของคอนกรีตให้สะอาด แห้ง และไม่มีคราบน้ำมันหรือจารบีติดบริเวณนั้น การทำความสะอาดพื้นผิวสามารถทำได้จาก Steam Cleaning , Waterblasting หรือ Sandblasting

การใช้งานนั้นสามารถใช้งานได้ 2 วิธี

1.พ่นด้วยความดันต่ำบนผิวสัมผัสคอนกรีต

2.ใช้แปรงทาบนผิวสัมผัสคอนกรีต

ถ้าต้องการที่จะเคลือบผิวอีกครั้งต้องรอให้ผิวที่เคลือบครั้งแรกนั้นแห้งก่อนแล้วเริ่มทำการเคลือบผิวชั้นที่2โดยต้องทำการเคลือบให้เสร็จภายใน 15 นาที

ซึ่งมีการใช้งานจริงในรัฐโอไฮโอ รัฐอิลลินอยส์ รัฐวอชิงตัน ประเทศสหรัฐอเมริกา และสาธารณรัฐตรินิแดดและจะมีแนวโน้มการใช้ที่มากขึ้นเรื่อยๆ

*5.2 ประโยชน์ของ MCI-2020*

1. ป้องกันการเกิดสนิมที่เกิดขึ้นจากคาร์บอเนชั่น คลอไรด์ และสารเจือจนเข้มข้น
2. สารยับยั้งพอใช้งานแล้วจะไม่กัดกร่อน ไม่มีคราบ ไม่มีสี
3. สารยับยั้งไม่มีส่วนผสมของ Calcium Nitrite
4. สารยับยั้งไม่มีส่วนผสมของ Wax
5. ง่ายต่อการใช้งานโดยจะพ่นหรือใช้แปรงทาก็ได้
6. ใช้เวลาน้อยในการให้สารยับยั้งซึมเข้าโครงสร้าง
7. มาตรฐาน ASNI / NSF รองรับ

*5.3 ข้อจำกัดของ MCI-2020*

1. สภาพอากาศโดยรอบของพื้นผิวที่จะใช้งานนั้นต้องมีอุณหภูมิระหว่าง 2 – 50 ℃

2. ห้ามใช้งานสารยับยั้งนี้ถ้าอุณหภูมิตกลงน้อยกว่า 0 ℃ ภายใน 12 ชั่วโมง หลังจากที่เคลือบพื้นผิวไปแล้ว

3.สารยับยั้งนี้ไม่สามารถซึมผ่านพื้นผิวที่มีสารกันน้ำ , ผิวเคลือบ , สี หรือยางมะตอย

4.ถ้าโครงสร้างนั้นจะต้องสัมผัสน้ำหลังจากเคลือบด้วย MCI-2020 แล้วต้องเคลือบสารกันน้ำอีกชั้นก่อนที่จะนำโครงสร้างไปสัมผัสน้ำอีกครั้ง

5.คลอไรด์ที่มากที่สุดในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่สามารถใช้สารยับยั้งนี้คือ 3.5 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

*5.4 ข้อเสนอแนะของ MCI-2020*

ในการทดสอบของสารยับยั้งนี้มีการทดสอบในต่างประเทศกันมากมายและหลากหลายสภาพอากาศที่ใช้ในการใช้งานโครงสร้างต่างๆ แต่ยังไม่มีการทดสอบในประเทศไทยอย่างเป็นทางการ ทำให้ผลที่รายงานมานั้นยังไม่มีความแน่ชัดมากนักเป็นเพียงแค่การคาดการณ์ว่าจะมีอายุการใช้งานได้เท่าไรในสภาพอากาศประเทศไทยเพราะฉะนั้นถ้าต้องการอายุการใช้งานในสภาพอากาศประเทศไทยควรจะมีการทดลองในประเทศไทยอย่างเป็นทางการเพื่อที่จะให้มีความน่าเชื่อถือมากขึ้นสำหรับผู้ใช้งาน

## เอกสารอ้างอิง


[1] อานนท์ วงษ์แก้ว (2557) , การประเมินกำลังรับแรงดัดและความเหนียวของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เหล็กเสริมเกิดสนิม , มหาวิทยาลัยบูรพา ชลบุรี . 3-5

[2] Blogger , การสูญเสียส่วนผสมบางตัว (Selective Leaching) สืบค้นเมื่อ 30 เมษายน 2563 จากเว็บไซต์ http://siamkaewkumsai.blogspot.com/2011/01/selective-leaching.html

[3] ASTM Standard G109 , 2003 , “ Chemical Admixtures for Concrete “ , ASTM International , West Conshohocken , PA , 2003

[4] MCI MIGRATION CORROSION INHIBITORS FROM GREY TO GREEN สืบค้นเมื่อ 27 เมษายน 2563 จากเว็บไซต์ https://www.cortecmci.com/product/mci-2020/

[5] CIVIL ENGINEERING FORUM สืบค้นเมื่อ 30 เมษายน 2563 จากเว็บไซต์ http://www.civilengineeringforum.me/

[6] The Mechanical Geek , What is Galvanic Corrosion สืบค้นเมื่อ 30 เมษายน 2563 จากเว็บไซต์ http://themechanicalgeek.blogspot.com/2014/07/what-is-galvanic-corrosion.html

[7] STEEL FABRICATION SERVICES , A Guide To Crevice Corrosion & How To Treat It สืบค้นเมื่อ 30 เมษายน 2563 จากเว็บไซต์ https://steelfabservices.com.au/a-guide-to-crevice-corrosion-how-to-treat-it/

[8] Intergranular Corrosion สืบค้นเมื่อ 30 เมษายน 2563 จากเว็บไซต์ https://corrosion-doctors.org/Forms-intergranular/intergranular.htm