อิทธิพลวัสดุเคลือบผิวเหล็กเสริม ต่อระยะเวลาเริ่มต้นการเกิดรอยร้าวของคอนกรีต อันเนื่องมาจากการกัดกร่อนของเหล็กเสริม
Influences of Coating Materials on Reinforcement Corrosion-induced Cover Cracking Time

วิษณุ สุวรรณมาโจ[1,*] และ วันชัย ยอดสุดใจ[2]

[1,2] สาขาวิชาเทคโนโลยีโครงสร้างเพื่อสิ่งแวดล้อมสรรค์สร้าง ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพมหานคร
**Corresponding author; E-mail address: wisanu.su@ku.th*

บทคัดย่อ

การป้องกันความเสียหายของโครงสร้างคอนกรีตจากการกัดกร่อนของเหล็กเสริมในโครงสร้างใหม่ทำได้หลายวิธี หนึ่งในวิธีที่ทำได้ทั่วไปและได้รับการแนะนำจาก ACI (American Concrete Institute) คือ เคลือบผิวเหล็กเสริมเพื่อให้โครงสร้างได้รับการป้องกันตั้งแต่เริ่มก่อสร้าง โดยการศึกษาครั้งนี้ได้ทดสอบหากำลังรับแรงอัดและมอดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต การทดสอบหาอิทธิพลของการยึดเกาะของเหล็กเสริม และการทดสอบเร่งปฏิกิริยาการกัดกร่อนให้เกิดสนิมเพื่อหาระยะเวลาเริ่มต้นการแตกร้าวของตัวอย่างคอนกรีตในวัสดุเคลือบผิวเหล็กเสริม 4 ประเภท คือ 1) Epoxy 2) Zinc Rich 3) Latex Slurry Cement และ 4) ไม่มีวัสดุเคลือบผิวเหล็กเสริม ผลการทดสอบ พบว่า คุณสมบัติของตัวอย่างคอนกรีตที่ทดสอบมีค่าเฉลี่ยกำลังรับแรงอัดประมาณ 250 kg/cm^2 และมีค่าเฉลี่ยมอดูลัสยืดหยุ่นประมาณ 240,400 kg/cm^2 การทดสอบแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเหล็กเสริมกับคอนกรีตของตัวอย่างคอนกรีตที่ไม่มีวัสดุเคลือบผิวเหล็กเสริมมีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเหล็กเสริมกับคอนกรีตดีที่สุด และการเคลือบผิวเหล็กเสริมด้วยวัสดุเคลือบผิวเหล็ก ประเภท Latex Slurry Cement สามารถปกป้องเหล็กเสริมจากปัจจัยที่ทำให้เกิดสนิมได้ดีกว่าวัสดุเคลือบผิวเหล็กเสริมประเภทอื่น

คำสำคัญ: คุณสมบัติของวัสดุเคลือบผิวเหล็กเสริม, การเกิดรอยร้าวของคอนกรีต, การกัดกร่อนของเหล็กเสริม

Abstract

Several methods prevent damage to concrete structures from corrosion of reinforcement in new structures. One of the most common methods recommended by the ACI (American Concrete Institute) is to coat the steel reinforcement to keep the structure protected from the start of construction. In this study, the compressive strength and modulus of elasticity of concrete were tested. Test for the influence of adhesion of reinforcing steel and corrosion accelerated testing to determine the initial cracking time of concrete samples in 4 types of reinforcement coatings, namely 1) epoxy 2) Zinc Rich 3) latex slurry cement and 4) uncoated were conducted. The concrete samples had an average compressive strength of approximately 250 kg/cm^2 and an average modulus of elasticity approximately 240,400 kg/cm^2. For test of bond between reinforcement and concrete, the sample without a coating had the best bond between reinforcement and concrete. It was found that Latex slurry cement coating can prevent corrosion of reinforcing steel in new structures better than other steel reinforcement coatings.

Keywords: Properties of reinforcement coatings, concrete cracking, reinforcement corrosion.

1. บทนำ

ความเสียหายของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กจากการกัดกร่อนสามารถพบเห็นได้ทั่วไป เนื่องจากโครงสร้างมีการสัมผัสกับสภาพแวดล้อมที่ส่งผลต่อการกัดกร่อน ทำให้ความแข็งแรงของโครงสร้างลดลงอย่างมีนัยสำคัญ การทำให้โครงสร้างมีความสามารถในการรับน้ำหนักและมีความปลอดภัยในการใช้งานตามที่ต้องการจึงต้องทำการซ่อมแซม เสริม หรือเปลี่ยนเหล็กเสริมใหม่ โดยทั่วไปการซ่อมแซมจะมีกระบวนการที่ค่อนข้างยุ่งยาก ขึ้นอยู่กับความรุนแรงของความเสียหาย ความยากง่ายในการทำงาน รวมถึงต้องพิจารณาการปิดใช้งานอาคารเพื่อซ่อมแซมอีกด้วย ซึ่งจะส่งผลต่อค่าใช้จ่ายและระยะเวลาในการซ่อมแซม สำหรับโครงสร้างใหม่ การป้องกันความเสียหายของโครงสร้างคอนกรีตอันเนื่องมาจากการกัดกร่อนของเหล็กเสริมจนเกิดสนิม สามารถทำได้ตั้งแต่เริ่มงานก่อสร้าง และยังสามารถทำได้หลากหลายวิธี ซึ่งวิธีหนึ่งที่ทำโดยทั่วไปและได้รับการแนะนำจาก ACI (American Concrete Institute) คือ การเคลือบผิวเหล็กเสริมด้วยวัสดุต่างๆ เพื่อให้วัสดุเคลือบทำหน้าที่เป็นชั้นปกป้องเหล็กเสริมจากปัจจัยที่ทำให้เกิดสนิม ได้แก่ ออกซิเจน ความชื้น และคลอไรด์ ทำให้โครงสร้างได้รับการป้องกันตั้งแต่เริ่มก่อสร้าง แต่จะทำให้การลงทุนเริ่มต้นของโครงการมีมูลค่าสูงขึ้น เจ้าของโครงการจึงต้องพิจารณาถึงข้อดีข้อเสีย เช่น ความสำคัญของอาคาร อายุการใช้งานของอาคาร ความยากง่ายในการซ่อมแซม มูลค่าการลงทุนและมูลค่างานการซ่อมแซมในอนาคต ฯลฯ เป็นข้อมูลประกอบการตัดสินใจในการลงทุน

การศึกษานี้จะคำนึงถึงการเกิดสนิมของเหล็กเสริม ซึ่งพบมากในอาคารโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กโดยทั่วไป ทดสอบการเกิดสนิมในคอนกรีตเสริมเหล็กเพื่อหาระยะเวลาเริ่มต้นในการเกิดรอยร้าวอันเนื่องมาจากการกัดกร่อนของเหล็กเสริม โดยจำลองโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กใหม่ที่มีการทาเคลือบป้องกันการกัดกร่อนที่ผิวเหล็กเสริมด้วยวัสดุต่างๆ เปรียบเทียบกับโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กใหม่ที่ไม่มีการทาเคลือบป้องกันการกัดกร่อนที่ผิวเหล็กเสริม ทำการทดสอบด้วยวิธีการเร่งการเกิดสนิมด้วยวิธีทางไฟฟ้า โดยนำชิ้นตัวอย่างทดสอบแช่ในสารละลายที่มีคลอไรด์ผสมอยู่

ผลที่ได้จากการศึกษานี้จะสามารถหาระยะเวลาเริ่มต้นของความเสียหายของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กใหม่ที่มีการทาเคลือบป้องกันการกัดกร่อนที่ผิวเหล็กเสริมด้วยวัสดุต่างๆ เพื่อสามารถเลือกใช้วัสดุเคลือบผิวเหล็กที่เหมาะสมเพื่อลดการเกิดรอยร้าวของคอนกรีต อันเนื่องมาจากการกัดกร่อนของเหล็กเสริม

2. ทบทวนวรรณกรรม

ในช่วงหลายทศวรรษที่ผ่านมา การศึกษาเกี่ยวกับการกัดกร่อนของเหล็กในคอนกรีตมีมากมายหลายวิธี ซึ่งการกัดกร่อนของเหล็กเสริมเป็นการเสื่อมสภาพของโครงสร้างที่เกิดความเสียหายจากการสูญเสียพันธะภายในกับคอนกรีตโดยรอบ อิทธิพลจากความเค้นที่เกิดขึ้นในคอนกรีตทำให้เกิดการแพร่กระจายคลอไรด์ซึ่งเป็นปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลต่อการสูญเสียพื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริมที่ตำแหน่งวิกฤต [1] โดยระยะเวลาเริ่มต้นของการกัดกร่อนในระยะสั้นจะก่อให้เกิดรอยแตกขนาดเล็ก ระยะเวลาเริ่มต้นของรอยแตกจะไม่มีผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญต่อพฤติกรรมการกัดกร่อนโดยรวม แต่การรับน้ำหนักและความเครียดที่เพิ่มขึ้นจะมีผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญต่อพฤติกรรมการกัดกร่อนทางโครงสร้าง ซึ่งแนวโน้มการกัดกร่อนจะเกิดขึ้นมากน้อยเพียงใดขึ้นอยู่กับเงื่อนไขของระยะเวลาและการรับน้ำหนักของโครงสร้าง [2] ทั้งนี้ โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ได้รับผลกระทบจากการกัดกร่อนส่วนใหญ่มีแนวโน้มเกิดการแตกร้าวและการหลุดล่อนของคอนกรีตมากกว่าการสูญเสียความแข็งแรงของโครงสร้าง การคาดการณ์ระยะเวลาในการแตกร้าวของคอนกรีตที่เกิดจากการกัดกร่อนของเหล็กเสริม โดยใช้กลไกการแตกร้าวและการเปิดรอยแตกในคอนกรีตเป็นอีกหนึ่งวิธีที่มีศักยภาพในการยืดอายุการใช้งานของโครงสร้างคอนกรีต [3] สำหรับวิธีการประเมินอิทธิพลของกำลังรับแรงอัด มอดูลัสยืดหยุ่น และอัตราการกัดกร่อนต่อระยะเวลาของการเกิดรอยแตกร้าวอันเนื่องมาจากการเกิดการกัดกร่อนของเหล็กเสริม ชี้ให้เห็นว่า ระยะเวลาเริ่มต้นการเกิดรอยร้าวอันเนื่องมาจากการกัดกร่อนของเหล็กเสริมเพิ่มขึ้นเมื่อกำลังรับแรงอัดและมอดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตเพิ่มขึ้น และระยะเวลาเริ่มต้นการเกิดรอยร้าวอันเนื่องมาจากการกัดกร่อนของเหล็กเสริมลดลง เมื่ออัตราการกัดกร่อนเพิ่มขึ้น [4] นอกจากนี้ การกัดกร่อนของเหล็กจะเพิ่มค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาและลดประสิทธิภาพในระยะยาวของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก การใช้แท่งไฟเบอร์กลาสจะถูกจำกัดด้วยต้นทุนที่สูง โมดูลัสยืดหยุ่นต่ำและมีความเปราะบาง การใช้ Basalt Fiberglass-Reinforced Plastic (BFRP) สามารถเพิ่มความแข็งแรงให้โครงสร้างเหล็กได้ดียิ่ง และในการเพิ่มการยึดเหนี่ยวของเหล็กเสริม สามารถเคลือบด้วยทราย (sand-coating) และเพิ่มพื้นผิวที่เคลือบเป็นเกลียวจะช่วยยึดเหนี่ยวเหล็กเสริมได้ดี มีต้นทุนต่ำ [5] สำหรับการเคลือบเหล็กเส้นในขณะที่ลดอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ด้วยการเติมผงซิลิกา (silica fume) เป็นอีกวิธีหนึ่งที่ช่วยลดผลกระทบของการกัดกร่อนในตัวอย่างคอนกรีตเสริมเหล็ก[6]

3. วิธีการวิจัยและการทดสอบตัวอย่าง

3.1 วิธีการวิจัย

3.1.1 การเตรียมตัวอย่างเพื่อทดสอบหากำลังรับแรงอัดและมอดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต

1) จัดเตรียมแบบหล่อตัวอย่างการทดสอบ จำนวน 3 ชุด โดยใช้ท่อ PVC ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 mm. ประกอบเป็นแบบหล่อทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 mm. สูง 200 mm. สำหรับใช้หล่อตัวอย่างเพื่อทดสอบหากำลังรับแรงอัดและมอดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต ดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 เตรียมแบบหล่อ

2) เตรียมคอนกรีตผสมเสร็จ และทำการทดสอบหาค่าการยุบตัวของคอนกรีต (Slump Test) ดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 ทดสอบหาค่าการยุบตัวของคอนกรีต

3) ดำเนินการหล่อตัวอย่างคอนกรีต แกะแบบหล่อชิ้นตัวอย่างหลังจากหล่อคอนกรีตได้ 2 วัน และทำการบ่มคอนกรีตโดยการแช่น้ำเป็นเวลา 28 วัน ก่อนนำไปทำการทดสอบหากำลังรับแรงอัดและมอดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต ดังแสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 3 บ่มคอนกรีตตัวอย่างโดยการแช่น้ำ

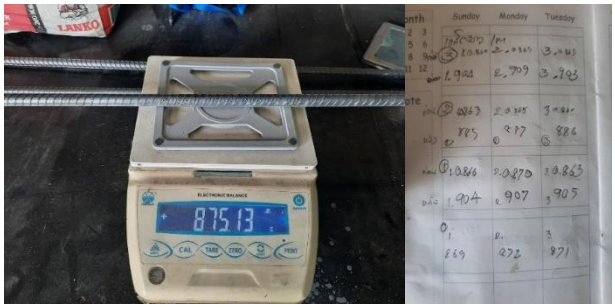
3.1.2 การเตรียมตัวอย่างเพื่อทดสอบหาอิทธิพลของการยึดเหนี่ยวของเหล็กเสริมที่เคลือบผิวป้องกันการกัดกร่อนที่มีต่อคอนกรีตโดยรอบเหล็กเสริม

1) จัดเตรียมแบบหล่อตัวอย่างการทดสอบ จำนวน 12 ชุด โดยใช้แบบหล่อคอนกรีตสำเร็จรูปทรงลูกบาศก์ขนาด 150x150x150 mm. สำหรับใช้หล่อตัวอย่างเพื่อทดสอบการยึดเหนี่ยวของเหล็กเสริม ที่มีต่อคอนกรีตโดยรอบเหล็กเสริม ดังแสดงในรูปที่ 4



รูปที่ 4 เตรียมแบบหล่อ

2) เตรียมเหล็กเส้นผิวข้ออ้อยขนาด 12 มิลลิเมตร โดยตัดขนาดยาว 100 cm. จำนวน 12 ชิ้น และทำการชั่งน้ำหนักเพื่อเก็บข้อมูลก่อนทำการเคลือบผิวเหล็กเส้น ดังแสดงในรูปที่ 5



รูปที่ 5 เตรียมเหล็กเส้น ชั่งน้ำหนักก่อนและหลังเคลือบผิวเหล็ก

3) เตรียมผิวเหล็กเส้นผิวข้ออ้อยขนาด 12 mm. ทั้ง 12 ชิ้น ดังนี้

- จำนวน 3 ชิ้น ไม่ต้องทาเคลือบผิวเหล็กเส้น
- จำนวน 3 ชิ้น ทาเคลือบผิวเหล็กเส้นด้วย Epoxy โดยเลือกใช้ SikaTop Armatec 110 Epocem (อัตราส่วนผสม Part A : B : C = 1.1 : 2.84 : 30.9 โดยปริมาตร) และทำการชั่งน้ำหนักเพื่อเก็บข้อมูลหลังทำการเคลือบผิวเหล็กเส้น
- จำนวน 3 ชิ้น ทาเคลือบผิวเหล็กเส้นด้วย Zinc Rich โดยเลือกใช้ Epicon Zinc Rich Primer B-2 (อัตราส่วนผสม Part A : B = 66 : 34 โดยปริมาตร) และทำการชั่งน้ำหนักเพื่อเก็บข้อมูลหลังทำการเคลือบผิวเหล็กเส้น
- จำนวน 3 ชิ้น ทาเคลือบผิวเหล็กเส้นด้วย Latex Slurry Cement โดยเลือกใช้ Sika MonoTop 610 T (อัตราส่วนผสม น้ำ : ผงปูน = 1 : 4 โดยปริมาตร) และทำการชั่งน้ำหนักเพื่อเก็บข้อมูลหลังทำการเคลือบผิวเหล็กเส้น

4) เตรียมคอนกรีตผสมเสร็จ และทำการทดสอบหาค่าการยุบตัวของคอนกรีต (Slump Test)

5) ดำเนินการหล่อตัวอย่างคอนกรีต โดยฝังเหล็กเส้นผิวข้ออ้อยขนาด 12 mm. ไว้ตรงกึ่งกลางตัวอย่าง และติดตั้งให้เหล็กเส้นโผล่ทะลุด้านล่างของแบบหล่อ 25 mm. ดังแสดงในรูปที่ 6



รูปที่ 6 หล่อคอนกรีตตัวอย่าง

6) แกะแบบหล่อชิ้นตัวอย่างหลังจากหล่อคอนกรีตได้ 2 วัน และทำการบ่มคอนกรีตโดยการแช่น้ำเป็นเวลา 28 วัน ก่อนนำไปทำการทดสอบการยืดเหนี่ยวของเหล็กเสริม ที่มีต่อคอนกรีตโดยรอบเหล็กเสริม ดังแสดงในรูปที่ 7



รูปที่ 7 บ่มตัวอย่างคอนกรีตโดยการแช่น้ำ

3.1.3 การเตรียมตัวอย่างเพื่อทดสอบหาอิทธิพลของวัสดุเคลือบผิวเหล็กเสริม ที่มีต่อระยะเวลาเริ่มต้นการเกิดรอยร้าวอันเนื่องมาจากการกัดกร่อนในตัวอย่างทรงกระบอกที่จำลองการป้องกันเหล็กเสริม โดยใช้วัสดุเคลือบผิวเหล็กเสริม

1) จัดเตรียมแบบหล่อตัวอย่างการทดสอบ จำนวน 8 ชุด โดยใช้ท่อ PVC ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 mm. ประกอบเป็นแบบหล่อทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 mm. สูง 150 mm. สำหรับใช้หล่อตัวอย่างเพื่อเร่งปฏิกิริยาการกัดกร่อนให้เกิดสนิม ดังแสดงในรูปที่ 8



รูปที่ 8 เตรียมแบบหล่อ

2) เตรียมเหล็กเส้นผิวข้ออ้อยขนาด 12 mm. โดยตัดขนาดยาว 25 cm. จำนวน 8 ชิ้น และทำการชั่งน้ำหนักเพื่อเก็บข้อมูลก่อนทำการเคลือบผิวเหล็กเส้น ดังแสดงในรูปที่ 9



รูปที่ 9 เตรียมเหล็กเส้น ชั่งน้ำหนักก่อนและหลังเคลือบผิวเหล็ก

3) เตรียมผิวเหล็กเส้นผิวข้ออ้อยขนาด 12 mm. ทั้ง 8 ชิ้น ดังนี้

- จำนวน 2 ชิ้น ไม่ต้องทาเคลือบผิวเหล็กเส้น
- จำนวน 2 ชิ้น ทาเคลือบผิวเหล็กเส้นด้วย Epoxy โดยเลือกใช้ SikaTop Armatec 110 Epocem (อัตราส่วนผสม Part A : B : C = 1.1 : 2.84 : 30.9 โดยปริมาตร) และทำการชั่งน้ำหนักเพื่อเก็บข้อมูลหลังทำการเคลือบผิวเหล็กเส้น
- จำนวน 2 ชิ้น ทาเคลือบผิวเหล็กเส้นด้วย Zinc Rich โดยเลือกใช้ Epicon Zinc Rich Primer B-2 (อัตราส่วนผสม Part A : B = 66 : 34 โดยปริมาตร) และทำการชั่งน้ำหนักเพื่อเก็บข้อมูลหลังทำการเคลือบผิวเหล็กเส้น
- จำนวน 2 ชิ้น ทาเคลือบผิวเหล็กเส้นด้วย Latex Slurry Cement โดยเลือกใช้ Sika MonoTop 610 T (อัตราส่วนผสม น้ำ : ผงปูน = 1 : 4 โดยปริมาตร) และทำการชั่งน้ำหนักเพื่อเก็บข้อมูลหลังทำการเคลือบผิวเหล็กเส้น

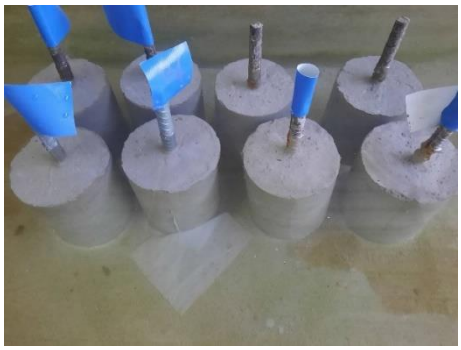
4) เตรียมคอนกรีตผสมเสร็จ และทำการทดสอบหาค่าการยุบตัวของคอนกรีต (Slump Test)

5) ดำเนินการหล่อตัวอย่างคอนกรีต โดยฝังเหล็กเส้นผิวข้ออ้อยขนาด 12 mm. ไว้ตรงกึ่งกลางตัวอย่าง และให้เหล็กเสริมอยู่สูงจากแบบล่าง 44 mm. ดังแสดงในรูปที่ 10



รูปที่ 10 หล่อตัวอย่างคอนกรีต

6) แกะแบบหล่อชิ้นตัวอย่างหลังจากหล่อคอนกรีตได้ 2 วัน และทำการบ่มคอนกรีตโดยการแช่น้ำเป็นเวลา 28 วัน ก่อนนำไปทำการเร่งปฏิกิริยาการกัดกร่อนให้เกิดสนิม ดังแสดงในรูปที่ 11



รูปที่ 11 บ่มคอนกรีตตัวอย่างโดยการแช่น้ำ

3.2 การทดสอบตัวอย่าง

3.2.1 การทดสอบหากำลังรับแรงอัดและมอดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต

ทดสอบโดยการกดตัวอย่างคอนกรีตด้วยเครื่องทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต (Compression Machine) ก่อนการทดสอบปลายทั้งสองข้างของตัวอย่างคอนกรีตต้องเรียบเป็นระนาบตั้งฉากกับแนวแกน โดยยอมให้มีความคลาดเคลื่อนได้ไม่เกิน 0.5 องศา หรือ 1 มิลลิเมตรต่อระยะ 100 มิลลิเมตร กรณีที่ปลายของตัวอย่างไม่เรียบ ให้ทำการตัดหรือเคลือบ (Capping) ผิวหน้าของตัวอย่างจนเป็นระนาบเรียบให้อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ โดยวัสดุที่ใช้ในการเคลือบผิวหน้ารับแรงอัดของตัวอย่าง (Capping Compound) ต้องสามารถรับแรงอัดได้สูงกว่าแรงอัดของตัวอย่างคอนกรีต

หลังจากทดสอบจะได้ค่าแรงกดสูงสุด ณ จุดวิบัติ และพื้นที่หน้าตัดคอนกรีตที่รับน้ำหนักของตัวอย่างทดสอบ

กำลังรับแรงอัดประลัย (kg/cm^2) = แรงกดสูงสุด ณ จุดวิบัติ (kg) / พื้นที่หน้าตัดคอนกรีต (cm^2)

3.2.2 การทดสอบหาอิทธิพลของการยึดเหนี่ยวของเหล็กเสริม

ทดสอบโดยทำการดึงเหล็กเสริมที่ฝังในตัวอย่างคอนกรีตออกด้วยเครื่องทดสอบแรงดึง (Universal Testing Machine) ดังแสดงในรูปที่ 12 เพื่อหาแรงยึดเหนี่ยวสูงสุดของคอนกรีตกับเหล็กเสริม และติดตั้ง Dial gauge ที่ปลายเหล็กเสริม เพื่อวัดระยะการเคลื่อนที่ของเหล็กเสริม ดังแสดงในรูปที่ 13

กำลังในการยึดเหนี่ยวสูงสุด (Maximum Bond Strength) = แรงดึงสูงสุด (kg) / พื้นที่ของเหล็กเสริมที่สัมผัสกับคอนกรีต (cm^2)



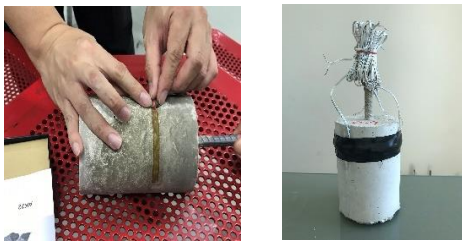
รูปที่ 12 เครื่องทดสอบแรงดึง (Universal Testing Machine)



รูปที่ 13 ติดตั้ง Dial gauge วัดระยะการเคลื่อนที่ของเหล็กเสริม

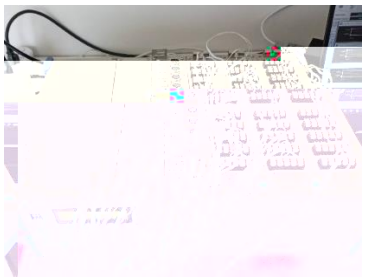
3.2.3 การทดสอบเร่งปฏิกิริยาการกัดกร่อนให้เกิดสนิมเพื่อหาระยะเวลาเริ่มต้นการแตกร้าวของตัวอย่างคอนกรีต

1) นำตัวอย่างคอนกรีตที่บ่มในน้ำเป็นเวลา 28 วันแล้ว มาติดตั้งแถบวัดความเครียด (Strain gauge) โดยรอบผิวตัวอย่างในตำแหน่งที่ระยะ 25 มิลลิเมตรจากผิวบน เพื่อใช้ในการวัดการขยายตัวของผิวตัวอย่างขณะเร่งปฏิกิริยาการกัดกร่อนเพื่อให้เกิดสนิมของเหล็กเสริมด้วยกระแสไฟฟ้า ดังแสดงในรูปที่ 14



รูปที่ 14 ติดตั้งแถบวัดความเครียด (Strain gauge)

2) เตรียมการทดสอบการเร่งปฏิกิริยาการกัดกร่อนด้วยไฟฟ้าเพื่อหาระยะเวลาเริ่มต้นการเกิดรอยร้าวโดยต่อสายแถบวัดความเครียดที่ติดตั้งบนก้อนตัวอย่างเข้ากับเครื่องเก็บข้อมูล (Data Logger) ดังแสดงในรูปที่ 15



รูปที่ 15 การต่อสายแถบวัดความเครียดเข้ากับเครื่องเก็บข้อมูล

3) ดำเนินการเร่งปฏิกิริยาการกัดกร่อนเพื่อให้เกิดสนิมในเหล็กเสริม โดยต่อวงจรกระแสไฟฟ้าความต่างศักย์ 15 โวลต์จากเครื่องจ่ายไฟฟ้า นำขั้วบวกต่อเข้ากับเหล็กเสริม และขั้วลบต่อเข้ากับแผ่นเหล็ก โดยติดตั้งมัลติมิเตอร์ซึ่งต่อแบบอนุกรมกับวงจรเพื่อเก็บค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ยตลอดการทดสอบ นำตัวอย่างแช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์เข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ต่อแถบวัดความเครียดที่ติดตั้งบนก้อนตัวอย่างเข้ากับเครื่องเก็บข้อมูล (Data logger) ซึ่งแปลงสัญญาณเป็นข้อมูลการขยายตัวของตัวอย่างผ่านโปรแกรม DCS100A โดยใช้เครื่องคอมพิวเตอร์ บันทึกค่ากระแสไฟฟ้าและสังเกตการเกิดรอยร้าวของก้อนตัวอย่างคอนกรีตในแต่ละก้อน ดังแสดงในรูปที่ 16



รูปที่ 16 การทดสอบเร่งปฏิกิริยาการกัดกร่อนให้เกิดสนิม

4) หลังจากเสร็จสิ้นขั้นตอนการเร่งปฏิกิริยาการกัดกร่อน ให้เอาเหล็กเสริมที่อยู่ในตัวอย่างคอนกรีตออก นำเหล็กเสริมมาแช่ในสารละลายกรดไฮโดรคลอริก (HCl) เข้มข้นร้อยละ 3 โดยน้ำหนักเป็นระยะเวลา 30 นาที เพื่อกำจัดคราบสนิม แล้วจึงนำเหล็กไปชั่งหาน้ำหนักเหล็กเสริมที่คงเหลืออยู่ เพื่อนำไปหาปริมาณเหล็กเสริมที่สูญเสียจากการกัดกร่อนและสรุปผลต่อไป

4. ผลการทดสอบ

4.1 ผลการทดสอบหากำลังรับแรงอัดและมอดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต

ตารางที่ 1 แสดงคุณสมบัติของตัวอย่าง (ทรงกระบอก ศก.100 มม. สูง 200 มม.)

ตัวอย่างที่	แรงอัด (kN)	กำลังรับแรงอัด (kg/cm^2)	มอดูลัสยืดหยุ่น (kg/cm^2)
1	194.22	252.15	239,776.40
2	197.89	256.92	242,033.74
3	193.64	251.40	239,419.54
ค่าเฉลี่ย	195.25	253.49	240,409.89

จากตารางที่ 1 แสดงให้เห็นว่า คุณสมบัติของตัวอย่างคอนกรีตที่ทดสอบ มีค่าเฉลี่ยกำลังรับแรงอัดประมาณ 250 kg/cm^2 และมีค่าเฉลี่ยมอดูลัสยืดหยุ่น คำนวณจากความสัมพันธ์ Ec=15100*√fc' มีค่าประมาณ 240,400 kg/cm^2

4.2 ผลการทดสอบหาอิทธิพลของการยึดเหนี่ยวของเหล็กเสริม

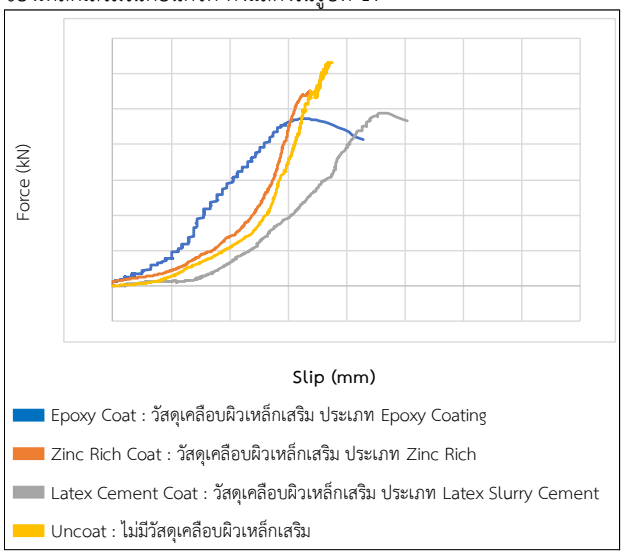
ผลการทดสอบหาอิทธิพลของการยึดเหนี่ยวระหว่างเหล็กเสริมกับคอนกรีต ด้วยวัสดุเคลือบผิวเหล็กเสริมประเภท Epoxy, Zinc Rich, Latex Slurry Cement และไม่มีวัสดุเคลือบผิวเหล็กเสริม สามารถอธิบายผลการทดสอบได้ดังแสดงไว้ในตารางที่ 2 และรูปที่ 17

ตารางที่ 2 ผลการทดสอบแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเหล็กเสริมกับคอนกรีต

ที่	วัสดุเคลือบผิวเหล็กเสริม	รูปแบบการวิบัติของตัวอย่างคอนกรีต	แรงดึงสูงสุดเฉลี่ย		ระยะเลื่อนไถลเฉลี่ย ณ จุดแรงดึงสูงสุดเฉลี่ย (mm.)
			(kN)	(kg)	
1	Epoxy	คอนกรีตแตก	47.3	4,823	1.60
2	Zinc Rich	คอนกรีตแตก	54.0	5,506	1.70
3	Latex Slurry Cement	คอนกรีตแตก	48.5	4,946	2.25
4	ไม่มีวัสดุเคลือบผิวเหล็กเสริม	คอนกรีตแตก	63.0	6,424	1.85

จากตารางที่ 2 แสดงให้เห็นว่า แรงยึดเหนี่ยวระหว่างเหล็กเสริมกับคอนกรีต ตัวอย่างคอนกรีตที่เคลือบผิวเหล็กเสริมด้วย Epoxy เกิดการวิบัติในรูปแบบคอนกรีตแตก ระยะการเลื่อนไถลเฉลี่ย ณ จุดแรงดึงสูงสุดเฉลี่ย 1.6 mm. รับแรงดึงได้สูงสุดเฉลี่ย 47.3 kN (4,823 kg) ตัวอย่างคอนกรีตที่เคลือบผิวเหล็กเสริมด้วย Zinc Rich เกิดการวิบัติในรูปแบบคอนกรีตแตก ระยะการเลื่อนไถลเฉลี่ย ณ จุดแรงดึงสูงสุดเฉลี่ย 1.7 mm. รับแรงดึงได้สูงสุดเฉลี่ย 54.0 kN (5,506 kg) ตัวอย่างคอนกรีตที่เคลือบผิวเหล็กเสริมด้วย Latex Slurry Cement เกิดการวิบัติในรูปแบบคอนกรีตแตก ระยะ

การเลื่อนไถลเฉลี่ย ณ จุดแรงดึงสูงสุดเฉลี่ย 2.25 mm. รับแรงดึงได้สูงสุดเฉลี่ย 48.5 kN (4,946 kg) ตัวอย่างคอนกรีตที่ไม่มีวัสดุเคลือบผิวเหล็กเสริม เกิดการวิบัติในรูปแบบคอนกรีตแตก ระยะการเลื่อนไถลเฉลี่ย ณ จุดแรงดึงสูงสุดเฉลี่ย 1.85 มม. รับแรงดึงได้สูงสุดเฉลี่ย 63.0 kN (6,424 kg) และไม่มีตัวอย่างคอนกรีตที่เกิดวิบัติในรูปแบบการเลื่อนไถลของเหล็กเสริม จากผลการทดสอบจะได้ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดึงกับระยะการเลื่อนไถลของเหล็กเสริมในคอนกรีต ดังแสดงในรูปที่ 17



รูปที่ 17 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดึงกับระยะการเลื่อนไถลของเหล็กเสริมในคอนกรีต

จากกราฟในรูปที่ 17 แสดงให้เห็นว่า ตัวอย่างคอนกรีตที่เคลือบผิวเหล็กเสริมด้วย Epoxy ค่าแรงดึงกับระยะการเลื่อนไถลของเหล็กเสริมมีค่าเพิ่มขึ้นสัมพันธ์กัน ได้แรงดึงสูงสุดเฉลี่ย 47.3 kN (4,823 kg) ระยะการเลื่อนไถลเฉลี่ย ณ จุดแรงดึงเฉลี่ยสูงสุด 1.6 mm. จากนั้นค่าแรงดึงมีอัตราลดลง แต่ระยะการเลื่อนไถลมีอัตรามากขึ้น ซึ่งเป็นผลจากตัวอย่างคอนกรีตเกิดการวิบัติในรูปแบบคอนกรีตแตก ตัวอย่างคอนกรีตที่เคลือบผิวเหล็กเสริมด้วย Zinc Rich ค่าแรงดึงกับระยะการเลื่อนไถลของเหล็กเสริมมีค่าเพิ่มขึ้นสัมพันธ์กัน ได้แรงดึงสูงสุดเฉลี่ย 54.0 kN (5,506 kg) ระยะการเลื่อนไถลเฉลี่ย ณ จุดแรงดึงเฉลี่ยสูงสุด 1.7 mm. จากนั้นตัวอย่างคอนกรีตเกิดการวิบัติในรูปแบบคอนกรีตแตก ตัวอย่างคอนกรีตที่เคลือบผิวเหล็กเสริมด้วย Latex Slurry Cement ค่าแรงดึงกับระยะการเลื่อนไถลของเหล็กเสริมมีค่าเพิ่มขึ้นสัมพันธ์กัน ได้แรงดึงสูงสุดเฉลี่ย เฉลี่ย 48.5 kN (4,946 kg) ระยะการเลื่อนไถล ณ จุดแรงดึงเฉลี่ยสูงสุด 2.25 mm. จากนั้นค่าแรงดึงมีค่าลดลง แต่ระยะการเลื่อนไถลมีค่ามากขึ้น ซึ่งเป็นผลจากตัวอย่างคอนกรีตเกิดการวิบัติในรูปแบบคอนกรีตแตก ตัวอย่างคอนกรีตที่ไม่มีวัสดุเคลือบผิวเหล็กเสริม ค่าแรงดึงกับระยะการเลื่อนไถลของเหล็กเสริมมีค่าเพิ่มขึ้นสัมพันธ์กัน ได้แรงดึงสูงสุดเฉลี่ย เฉลี่ย 63.0 kN (6,424 kg) ระยะการเลื่อนไถล ณ จุดแรงดึงเฉลี่ยสูงสุด 1.85 mm. จากนั้นตัวอย่างคอนกรีตเกิดการวิบัติในรูปแบบคอนกรีตแตก

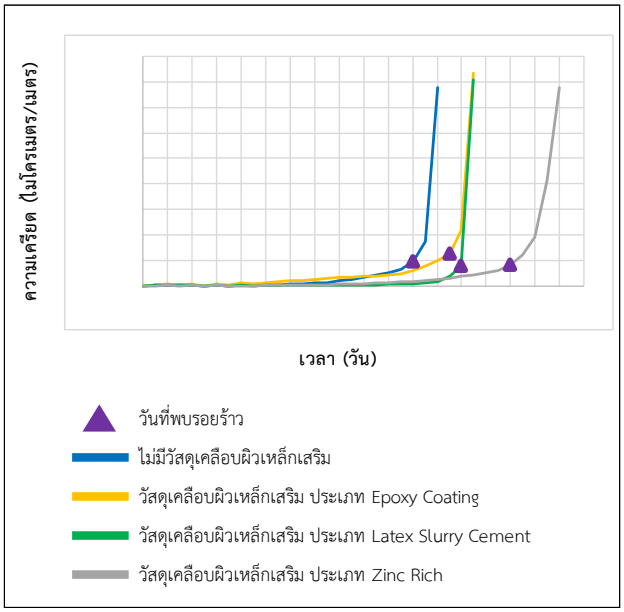
4.3 ผลการทดสอบเร่งปฏิกิริยาการกัดกร่อนให้เกิดสนิมเพื่อหาระยะเวลาเริ่มต้นการแตกร้าวของตัวอย่างคอนกรีต

ในการหาระยะเวลาเริ่มต้นการแตกร้าวของคอนกรีต จะพิจารณาจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับเวลา ที่ได้จากการทดสอบเร่งปฏิกิริยาการกัดกร่อนให้เกิดสนิม โดยพิจารณาเวลา ณ จุดที่ความเครียดเริ่มมีค่าเพิ่มขึ้นแบบฉับพลัน หรือจุดที่เริ่มเกิดการเปลี่ยนแปลงความชันของกราฟนั่นเอง โดยสามารถสรุประยะเวลาเริ่มต้นการแตกร้าวของตัวอย่างทั้ง 4 ตัวอย่างได้ดังแสดงไว้ในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 สรุประยะเวลาเริ่มต้นการแตกร้าวของตัวอย่างทั้ง 4 ตัวอย่าง

ตัวอย่างที่	วัสดุ	ระยะเวลาเริ่มต้นการเกิดรอยร้าว (ชั่วโมง)
1	ไม่มีวัสดุเคลือบผิวเหล็กเสริม	264
2	วัสดุเคลือบผิวเหล็กเสริม ประเภท Epoxy	300
3	วัสดุเคลือบผิวเหล็กเสริม ประเภท Latex Slurry Cement	312
4	วัสดุเคลือบผิวเหล็กเสริม ประเภท Zinc Rich	360

จากตารางที่ 3 แสดงให้เห็นว่า การเร่งการกัดกร่อนด้วยไฟฟ้าทำให้ก้อนตัวอย่างเกิดการแตกร้าว พบว่า ก้อนตัวอย่างที่ไม่มีวัสดุเคลือบผิวเหล็กเสริมมีระยะเวลาเริ่มต้นการเกิดรอยร้าว 264 ชั่วโมง วัสดุเคลือบผิวเหล็กเสริม ประเภท Epoxy มีระยะเวลาเริ่มต้นการเกิดรอยร้าว 300 ชั่วโมง วัสดุเคลือบผิวเหล็กเสริม ประเภท Latex Slurry Cement มีระยะเวลาเริ่มต้นการเกิดรอยร้าว 312 ชั่วโมง และ วัสดุเคลือบผิวเหล็กเสริม ประเภท Zinc Rich มีระยะเวลาเริ่มต้นการเกิดรอยร้าว 360 ชั่วโมง โดยกราฟที่ได้จากการทดสอบเร่งปฏิกิริยาการกัดกร่อนให้เกิดสนิมดังแสดงในรูปที่ 18



รูปที่ 18 ผลการทดสอบเร่งปฏิกิริยาการกัดกร่อนให้เกิดสนิม

จากรูปที่ 18 สรุปได้ว่า การเร่งการกัดกร่อนด้วยไฟฟ้าทำให้ก้อนตัวอย่างเกิดการแตกร้าว ไม่มีวัสดุเคลือบผิวเหล็ก เกิดรอยร้าวเร็วที่สุดตามมาด้วยวัสดุเคลือบผิวเหล็ก ประเภท Epoxy วัสดุเคลือบผิวเหล็ก ประเภท Latex Slurry Cement และวัสดุเคลือบผิวเหล็กเสริม ประเภท Zinc Rich ตามลำดับ โดยก้อนตัวอย่างมีการขยายตัวก่อนที่จะแตกร้าวที่ความเครียดประมาณ 2,000 ไมโครเมตร/เมตร

5. บทสรุป

การป้องกันความเสียหายของโครงสร้างคอนกรีตอันเนื่องมาจากการกัดกร่อนของเหล็กเสริมจนเกิดสนิมในโครงสร้างใหม่ ด้วยวิธีการเคลือบผิวเหล็กเสริมด้วยวัสดุเคลือบผิวเหล็ก ประเภท Zinc Rich เป็นชั้นปกป้อง

เหล็กเสริมจากปัจจัยที่ทำให้เกิดสนิม โดยคอนกรีตมีค่าเฉลี่ยกำลังรับแรงอัดประมาณ 250 kg/cm^2 และมีค่าเฉลี่ยมอดูลัสยืดหยุ่นคำนวณจากความสัมพันธ์ประมาณ 240,400 kg/cm^2 และมีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเหล็กเสริมกับคอนกรีตได้ดีกว่าการใช้วัสดุเคลือบผิวเหล็กเสริมประเภท Latex Slurry Cement และ Epoxy ความเสียหายของโครงสร้างเกิดจากการที่คอนกรีตแตก แสดงว่าแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเหล็กเสริมกับคอนกรีตของวัสดุเคลือบผิวเหล็กเสริม Zinc Rich , Latex Slurry Cement และ Epoxy มีค่าสูงกว่ากำลังของคอนกรีต สำหรับกรณีของแบบไม่มีวัสดุเคลือบผิวเหล็กแม้จะมีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเหล็กเสริมกับคอนกรีตดีที่สุด แต่ไม่สามารถป้องกันการเกิดการแตกร้าวของคอนกรีต อันเนื่องมาจากการกัดกร่อนของเหล็กเสริมในอัตราที่สูงเมื่อเทียบกับการเคลือบผิวเหล็กเสริมด้วย Zinc Rich, Latex Slurry Cement และ Epoxy

การเคลือบผิวเหล็กเสริม เป็นชั้นปกป้องเหล็กเสริมจากปัจจัยที่ทำให้เกิดสนิม ได้แก่ ออกซิเจน ความชื้น และคลอไรด์ สามารถนำไปใช้ได้ทั้งงานก่อสร้างคอนกรีตใหม่ และงานซ่อมแซมคอนกรีต เช่น การป้องกันสนิมในเหล็กเสริมคอนกรีตใต้พื้นสะพาน โดยทำการเคลือบผิวเหล็กเสริมก่อนการเทคอนกรีต การเลือกใช้วัสดุเคลือบผิวเหล็กเสริมในงานแต่ละประเภท จะขึ้นอยู่กับสิ่งแวดล้อม การที่คอนกรีตต้องสัมผัสถูกกับสิ่งต่างๆ อิทธิพลของวัสดุเคลือบที่มีผลต่อคุณสมบัติทางกลของคอนกรีต ความสำคัญของสิ่งก่อสร้าง และงบประมาณในการก่อสร้าง

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่สนับสนุนเครื่องมือเพื่อใช้ในการศึกษาวิจัย และขอขอบคุณผู้มีส่วนเกี่ยวข้องในการศึกษานี้จนลุล่วงไปด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

[1] Melchers, R. E., Li, C. Q., & Lawanwisut, W. (2006). Modelling deterioration of structural behaviour of reinforced concrete beams under saline environment corrosion. *Magazine of Concrete Research*, 58(9), 575-587.

[2] Melchers, R. E., & Li, C. Q. (2006). Phenomenological modeling of reinforcement corrosion in marine environments. *ACI Materials Journal*, 103(1), 25.

[3] Li, C. Q., Zheng, J. J., Lawanwisut, W., & Melchers, R. E. (2007). Concrete delamination caused by steel reinforcement corrosion. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 19(7), 591-600.

[4] วันชัย ยอดสุดใจ และคณะ. (2558). การศึกษาทดลองระยะเวลาเริ่มต้นการเกิดรอยร้าวอันเนื่องมาจากการกัดกร่อนของเหล็กเสริมที่อยู่ในคอนกรีต มอร์ตาร์ และซีเมนต์เพสต์. *วารสารวิชาการสมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย*, 3(2), 17-23.

[5] Ma, G., Huang, Y., Aslani, F., & Kim, T. (2019). Tensile and bonding behaviours of hybridized BFRP–steel bars as concrete reinforcement. *Construction and Building Materials,* 201, 62-71.

[6] Abou Shakra, J., Joumblat, R., Khatib, J., & Elkordi, A. (2020). Corrosion of coated and uncoated steel reinforcement in concrete. *BAU Journal-Science and Technology*, 2(1), 4.