



ปัจจัยที่มีผลต่อการทดสอบแนวโน้มการเกิดสนิมด้วยวิธีศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์

Influences of various factors on half-cell potential testing

ศิริศิลป์ กัลยาณกุล สิริพงษ์ สุวรรณปัญญา ศิลา โยคพาจร และ วันชัย ยอดสุดใจ*

Sirisil Kalayanakoul, Sirapong Suwanpunjasil, Tada Yocapajorn, and Wanchai Yodsudjai*

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพมหานคร 10900

Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok, Thailand, 10900

Received July 2012

Accepted September 2012

บทคัดย่อ

วิธีการทดสอบการเกิดสนิมเหล็กโดยวิธีศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ นับเป็นวิธีการทดสอบการเกิดสนิมเหล็กแบบไม่ทำลายวิธีหนึ่ง
ที่เริ่มได้รับความสนใจอย่างแพร่หลาย เพราะนอกจากจะเป็นวิธีการที่ไม่ซับซ้อนแล้วยังทำให้ทราบแนวโน้มการเกิดสนิมก่อน
ที่สนิมจะปรากฏบนผิวคอนกรีตอีกด้วย แต่การใช้งานเครื่องมือชนิดนี้ในหลายๆ ครั้งพบว่า เครื่องมือจะมีความไม่แน่นอนสูง
อันเนื่องมาจากปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อเครื่องมือ งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาถึงปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อความไม่แน่นอน
ของผลการทดสอบ โดยศึกษาปัจจัยของปริมาณสารคลอไรด์ในบริเวณที่ทดสอบ ระยะหุ้มจากคอนกรีตถึงเหล็กเสริมกำลัง
รับแรงอัดของคอนกรีต และการเคลือบสารอีพอกซีที่เหล็กเสริม ผลการศึกษาพบว่าค่าความต่างศักย์มีค่าลบที่สูงขึ้น
หากปริมาณสารคลอไรด์ที่ผสมมีปริมาณมากขึ้น ในทางตรงกันข้ามค่าความต่างศักย์มีค่าลบที่ต่ำลงหากระยะหุ้มคอนกรีตและ
กำลังของคอนกรีตเพิ่มขึ้น ส่วนในเรื่องการเคลือบสารอีพอกซีพบว่า เหล็กเสริมที่มีการเคลือบสารอีพอกซีให้ค่าความต่างศักย์
ที่เป็นลบต่ำกว่าเหล็กที่ไม่ได้เคลือบ

คำสำคัญ : คอนกรีตเสริมเหล็ก วิธีศึกษาไฟฟ้าแรงเซลล์ การกัดกร่อนเหล็กเสริม การตรวจสอบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก

Abstract

Half-cell potential testing has been recommended as a non-destructive method for assessing the probability of corrosion of reinforcing steel in concrete structure before the damage is evident on the surface of concrete structure. The objective of this research was to quantify the effects of chloride concentration, concrete cover thickness, concrete compressive strength and presence of epoxy coating on half-cell potential measurements of concrete structure. The results of the testing indicated that all of the factors have important impacts on half-cell potentials over the ranges of levels investigated in this research. Half-cell potential measurements became more negative with increasing chloride concentrations and; on the other hand, it became less negative with increasing concrete cover thickness and increasing compressive strength. As expected, the uncoated rebar had more negative half-cell potential than epoxy-coated rebar.

Keywords: Reinforced Concrete, Half-cell potential, Steel corrosion, Concrete structure inspection

* Corresponding author. Tel.: +66 2942 8555 ext. 1338; fax: +66 2579 7565

Email address: fengwcy@ku.ac.th

1. บทนำ

โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กเป็นโครงสร้างที่มีราคาถูกเมื่อเปรียบเทียบกับโครงสร้างอื่น และเป็นโครงสร้างที่มีความแข็งแรง ทนทานต่อสภาพแวดล้อมต่างๆ ได้ดีพอสมควร จึงเป็นโครงสร้างที่ได้รับความนิยมอย่างมาก แต่ปัญหาการเสื่อมสภาพของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กเนื่องจากการเกิดสนิมของเหล็กเสริมยังคงเป็นปัญหาที่สำคัญที่ต้องการการแก้ไข [1] ปัญหาการเสื่อมสภาพของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กเนื่องจากการเกิดสนิมของเหล็กเสริมนับเป็นปัญหาหลักที่พบได้อย่างแพร่หลายโดยทั่วไป และยังเป็นปัญหาสำคัญที่ทำให้สิ่งก่อสร้างต่างๆ เกิดความเสียหายเป็นอย่างมาก จนนำมาสู่การเสียชีวิตและทรัพย์สินในที่สุด ด้วยเหตุนี้เองทำให้มีการตรวจสอบการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยวิธีการต่างๆ อย่างมากมาย วิธีการทดสอบการเกิดสนิมเหล็กโดยวิธีศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ (Half-cell potential) นับเป็นวิธีการทดสอบการเกิดสนิมเหล็กแบบไม่ทำลาย (Non-destructive method) วิธีหนึ่งที่เราได้ให้ความสนใจอย่างแพร่หลาย เพราะนอกจากจะเป็นการทดสอบที่ไม่ทำลายโครงสร้างแล้ว ยังเป็นวิธีการที่ไม่ซับซ้อน และสามารถดำเนินการได้ง่ายอีกด้วย ถึงแม้ว่าวิธีการทดสอบนี้ได้ถูกกำหนดไว้ในมาตรฐาน ASTM C876 [2] แต่ผลของการทดสอบโดยวิธีศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ที่ออกมาในหลายๆ ครั้งพบว่า มักให้ผลการทดลองที่ไม่ค่อยแน่นอนนัก โดยความคลาดเคลื่อนเหล่านี้มักเกิดผลกระทบจากปัจจัยหลายๆ อย่าง ไม่ว่าจะเป็น ผลกระทบจากระยะชุ่มจากคอนกรีตถึงเหล็ก ผลกระทบจากความต้านทานไฟฟ้าที่ผิวของคอนกรีต ผลกระทบจากปริมาณออกซิเจน เป็นต้น การศึกษาถึงผลกระทบจากปัจจัยต่างๆ ที่มีต่อการทดสอบการเกิดสนิมโดยวิธีศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์มีอยู่พอสมควรในต่างประเทศ [3-5] แต่การวิจัยด้านนี้ยังมีไม่มากนักในประเทศไทย ทั้งที่วัสดุต่างๆ ที่ใช้ในคอนกรีต สภาพแวดล้อมและสภาพภูมิอากาศในประเทศไทยมีความแตกต่างจากต่างประเทศ ดังนั้นค่าที่ได้จากการทดสอบศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์นี้อาจมีความแตกต่างจากงานวิจัยของต่างประเทศได้

ดังนั้นงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินถึงสาเหตุที่มีผลกระทบโดยตรงต่อความไม่แน่นอนของผลการทดสอบโดยวิธีศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ในสภาพแวดล้อมของประเทศไทย ซึ่งตัวแปรที่ศึกษาได้แก่ ปริมาณคลอไรด์ในบริเวณที่ทดสอบ

ระยะชุ่มจากคอนกรีตถึงเหล็กเสริม กำลังรับแรงอัดของคอนกรีต และสุดท้ายคือการเคลือบอีพอกซี (Epoxy) ที่เหล็กเสริม

2. วิธีการดำเนินการ

2.1 ปัจจัยด้านปริมาณคลอไรด์ในบริเวณที่ทดสอบ

ปัจจัยด้านปริมาณคลอไรด์มีความสำคัญเนื่องจากคลอไรด์เป็นสาเหตุหลักที่ทำให้เหล็กเสริมเป็นสนิม มีงานวิจัยหลายชิ้นในประเทศไทยที่ใช้คุณสมบัติด้านการต้านทานคลอไรด์ของคอนกรีตเป็นปัจจัยที่แสดงถึงความทนทานของคอนกรีต [6-7] สำหรับงานวิจัยนี้ดำเนินการทดสอบผลของปริมาณคลอไรด์โดยแบ่งตัวอย่างคอนกรีตออกเป็น 3 กลุ่ม กลุ่มละ 3 ตัวอย่าง โดยที่แต่ละกลุ่มมีความเข้มข้นของปริมาณคลอไรด์ที่แตกต่างกันคือ ร้อยละ 3 ร้อยละ 6 และร้อยละ 9 โดยนำหนักของปูนซีเมนต์ โดยนำโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ผสมลงในน้ำที่ใช้สำหรับผสมคอนกรีตก่อน หลังจากนั้นดำเนินการผสมคอนกรีตตามปกติ และดำเนินการหล่อตัวอย่างคอนกรีต ซึ่งได้มีการจัดวางเหล็กเสริมไว้ในแบบหล่อแล้วก่อนการเทคอนกรีตดังแสดงในรูปที่ 1

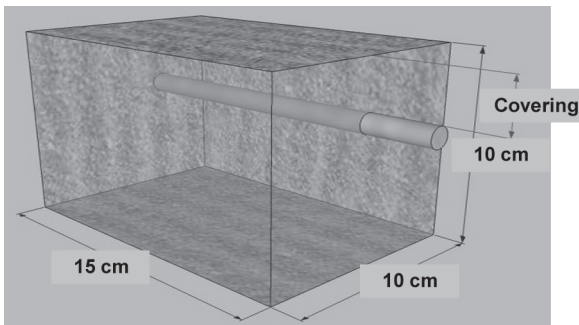


รูปที่ 1 แบบหล่อตัวอย่างคอนกรีต

2.2 ปัจจัยด้านระยะชุ่มจากคอนกรีตถึงเหล็กเสริม

ปัจจัยด้านระยะชุ่มจากผิวคอนกรีตถึงเหล็กเสริมมีความสำคัญเนื่องจากระยะชุ่มเป็นสิ่งป้องกันการแทรกซึมของสารอันตรายต่างๆ ที่เข้ามาทำลายเหล็กเสริมในคอนกรีตจากการศึกษาของจงศิลป์และคณะ [8] พบว่าระยะชุ่มมีผลต่อแนวโน้มค่าความวิตติของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก

กล่าวคือ โครงสร้างที่มีระยะหุ้มคอนกรีตน้อยกว่ามีแนวโน้มของค่าความวิบัติมากกว่าโครงสร้างที่มีระยะหุ้มคอนกรีตมากกว่า สำหรับงานวิจัยนี้ แบ่งคอนกรีตที่ใช้ในการทดลองออกเป็น 3 กลุ่ม กลุ่มละ 3 ตัวอย่างเช่นกัน โดยที่แต่ละกลุ่มมีระยะหุ้มแตกต่างกันคือ 2.5 เซนติเมตร 5.0 เซนติเมตร และ 7.5 เซนติเมตร ตามลำดับ สำหรับการเตรียมตัวอย่างคอนกรีตนั้นได้ดำเนินการเตรียมลูกปูนที่มีความสูง 2.5 และ 5.0 เซนติเมตรไว้ เพื่อใช้สำหรับเป็นที่ยึดเหล็กเสริมให้อยู่ในตำแหน่งที่มีระยะหุ้มตามที่กำหนดไว้ โดยระยะหุ้มวัดจากผิวบนของตัวอย่างคอนกรีตดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 ระยะหุ้มจากผิวคอนกรีตถึงเหล็กเสริม

2.3 ปัจจัยด้านกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต

เพื่อให้เห็นถึงผลของปัจจัยด้านกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตต่อค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ การทดลองในงานวิจัยนี้แบ่งกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตออกเป็น 3 ระดับ ระดับละ 3 ตัวอย่าง ได้แก่ คอนกรีตกำลังสูง คอนกรีตกำลังปกติ และคอนกรีตกำลังต่ำ ซึ่งมีค่ากำลังรับแรงอัดที่ได้จากการทดสอบเท่ากับ 312 กก./ซม.² 267 กก./ซม.² และ 142 กก./ซม.² ตามลำดับดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่ใช้ในการทดสอบ

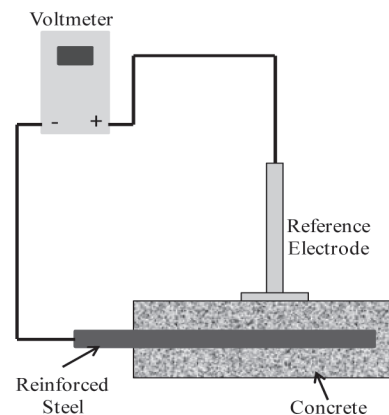
ระดับของกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต	กำลังต่ำ	กำลังปกติ	กำลังสูง
กำลังรับแรงอัดที่ได้จากการทดสอบ (กก./ซม. ²)	142	267	312

2.4 ปัจจัยด้านการเคลือบอีพอกซีที่เหล็กเสริม

การใช้เหล็กเคลือบอีพอกซีเพื่อแก้ปัญหาการเสื่อมสภาพของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กเนื่องจากการเกิดสนิมของเหล็กเสริมพบในต่างประเทศ [9] และถึงแม้ว่าการ

ใช้เหล็กเสริมที่เคลือบอีพอกซีซึ่งยังไม่ได้มีการใช้งานมากนักในประเทศไทย แต่จากปัญหาการเสื่อมสภาพของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่พบมากขึ้นในปัจจุบันอาจทำให้การใช้อีพอกซีเคลือบเหล็กมีมากขึ้นในประเทศไทย สำหรับงานวิจัยนี้แบ่งตัวอย่างคอนกรีตออกเป็น 2 กลุ่ม กลุ่มละ 3 ตัวอย่าง ซึ่งกลุ่มแรกเหล็กเสริมเคลือบด้วยอีพอกซี และกลุ่มที่สองไม่ได้เคลือบ โดยการดำเนินการเคลือบเหล็กด้วยอีพอกซีก่อนการติดตั้งเหล็กเสริมในแบบหล่อและเทคอนกรีต

รูปที่ 3 แสดงการวัดค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ของตัวอย่างคอนกรีต โดยการวัดค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์กระทำในช่วงอายุต่างๆ ของคอนกรีต ซึ่งการวัดนั้นดำเนินการในตัวอย่างคอนกรีตที่แช่ในน้ำสะอาดมาก่อนประมาณ 5-10 นาที แล้วจึงค่อยนำมาแช่ผิวคอนกรีตให้แห้งดังระบุไว้ในมาตรฐาน ASTM C876 [2]



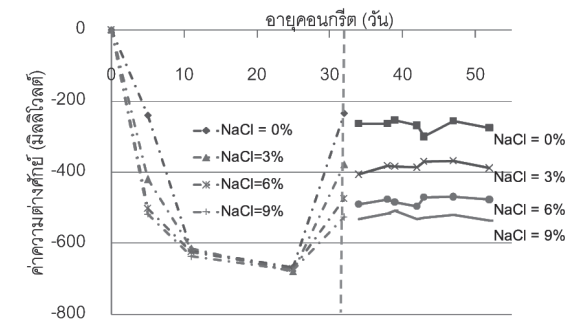
รูปที่ 3 การวัดค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์

3. ผลการวิจัย

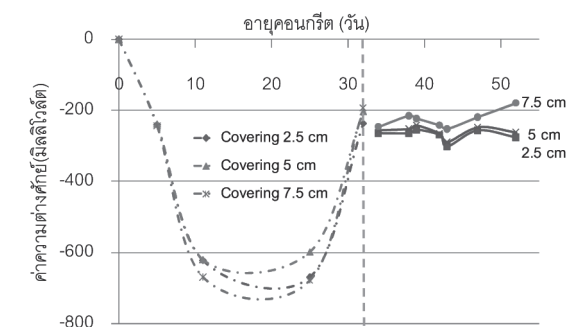
รูปที่ 4 แสดงผลของปริมาณคลอไรด์ต่อค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ จากรูปเห็นได้ว่าจะสามารถแบ่งกราฟออกเป็น 2 ช่วงตามอายุของคอนกรีตได้แก่ ช่วงแรกที่ค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์เป็นลบสูงมาก (เส้นประ) เนื่องจากคอนกรีตยังอยู่ในช่วงการพัฒนา กำลัง ทำให้ความต้านทานไฟฟ้าของคอนกรีตมีค่าต่ำ ส่งผลให้ค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์มีค่าที่เป็นลบสูง [10] นอกจากนี้ยังพบว่าค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์มีค่าลดลงเมื่อปริมาณคลอไรด์สูงขึ้น แต่ความแตกต่างนี้ยังเห็นได้ไม่เด่นชัดมากนักเมื่อเทียบกับช่วงหลัง ซึ่งได้แก่คอนกรีตที่อายุมากกว่า 32 วันและได้รับการบ่มด้วยน้ำ พบว่าปริมาณคลอไรด์มีผลต่อค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์อย่างชัดเจน โดยค่าศักย์ไฟฟ้า

ครึ่งเซลล์เป็นลบที่มากขึ้นเมื่อปริมาณของโซเดียมคลอไรด์ที่ผสมอยู่มีค่าสูงขึ้น ซึ่งผลการทดสอบนี้มีแนวโน้มที่ตรงกับรายงานของ Utah Department of Transportation Research Division [10] ที่พบว่า การเพิ่มขึ้นของปริมาณคลอไรด์ส่งผลให้ค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์มีค่าเป็นลบมากขึ้น เนื่องจากมีแนวโน้มการเกิดสนิมที่มากขึ้น และตรงกับผลการศึกษาของวิเชียรและคณะ [11] ที่พบว่าสภาวะการกัดกร่อนของเหล็กเสริมคอนกรีตจะมีความรุนแรงมากขึ้นเมื่อร้อยละปริมาณคลอไรด์ที่อยู่ในคอนกรีตมีมากขึ้น

นอกจากนี้ยังพบการผ่นผวนของค่าที่วัดได้ในงานวิจัยนี้มีเพียงเล็กน้อย ซึ่งอาจเกิดจากปัจจัยภายนอกต่างๆ ที่ส่งผลต่อการทดลอง ไม่ว่าจะเป็น สภาพอากาศในขณะทำการทดลอง ตำแหน่งเชื่อมเหล็กเพื่อต่อวงจรสำหรับการทดสอบ ตำแหน่งที่ทำกรวัดค่าความต่างศักย์ที่ผิวคอนกรีต เป็นต้น หากพิจารณาโดยรวมแล้วก็ถือว่าปัจจัยต่างๆ เหล่านี้มีผลกระทบต่อผลการทดลองเพียงเล็กน้อยเท่านั้นเมื่อเปรียบเทียบผลของปัจจัยด้านปริมาณของคลอไรด์

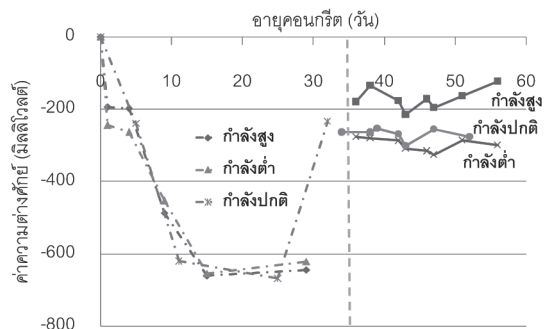


รูปที่ 4 ผลของปริมาณคลอไรด์ต่อค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์



รูปที่ 5 ผลของระยะหุ้มต่อค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์

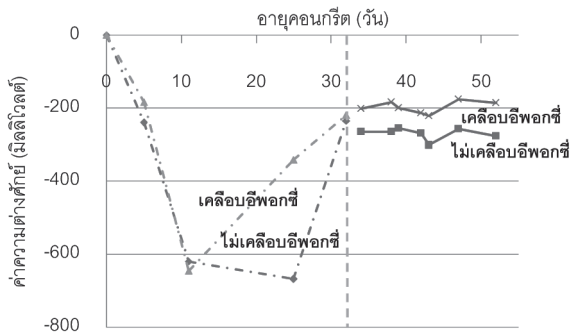
รูปที่ 5 แสดงผลของระยะหุ้มจากคอนกรีตถึงเหล็กเสริมที่มีต่อค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ จากรูปพบเช่นเดียวกันกับผลของปริมาณคลอไรด์ กล่าวคือสามารถแบ่งกราฟออกเป็น 2 ช่วง ได้แก่ ช่วงแรก (คอนกรีตอายุต่ำกว่า 32 วัน) และช่วงหลัง (คอนกรีตอายุสูงกว่า 32 วัน) ช่วงแรกค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์มีค่าเป็นลบที่สูงมากเนื่องจากคอนกรีตอยู่ในช่วงเริ่มต้นของการพัฒนากำลัง ทำให้ค่าที่วัดได้ไม่สามารถบอกแนวโน้มการเกิดสนิมเหล็กที่ถูกต้องได้ นอกจากนี้ยังไม่สามารถระบุผลของระยะหุ้มต่อค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ได้อย่างชัดเจน กล่าวคือ ค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์มีค่าต่ำสุดเมื่อมีระยะหุ้มเท่ากับ 7.5 เซนติเมตร 2.5 เซนติเมตร และ 5 เซนติเมตรตามลำดับ ส่วนช่วงหลัง พบว่าค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ยังคงมีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก อย่างไรก็ตามสามารถระบุได้ว่าค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์มีค่าเป็นลบมากขึ้นเมื่อระยะหุ้มมีค่าน้อยลงตามลำดับ ทั้งนี้อาจเป็นผลมาจากการเพิ่มระยะหุ้มคอนกรีตทำให้ความต้านทานคอนกรีตสูงขึ้น [12-13] ซึ่งส่งผลให้ค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์สูงขึ้น กล่าวคือมีค่าเป็นลบน้อยลงนั่นเอง ผลของระยะหุ้มต่อค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ของงานวิจัยนี้ตรงกับการศึกษาของหนานโซ่งผู้เขียนหลักและทีมงาน ที่พบว่าผลของระยะหุ้มคอนกรีตมีต่อค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ยังไม่ค่อยเห็นผลชัดเจนนัก [14]



รูปที่ 6 ผลของกำลังรับแรงอัดคอนกรีตต่อค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์

รูปที่ 6 แสดงผลของกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตต่อค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ จากรูปพบว่าช่วงแรกกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตยังไม่มีผลต่อค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ หากพิจารณาช่วงหลังที่อายุคอนกรีตมากกว่า 32 วันแล้ว พบว่าคอนกรีตที่มีกำลังสูง มีแนวโน้มการเกิดสนิมเหล็กที่ต่ำกว่าคอนกรีตกำลังปกติ และคอนกรีตกำลังต่ำตามลำดับ กล่าวคือค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ของคอนกรีตกำลังสูงมีค่ามากที่สุด

(เป็นลบน้อยที่สุด) ตามมาด้วยคอนกรีตกำลังปกติและคอนกรีตกำลังต่ำตามลำดับ ทั้งนี้ยังพบว่าความแตกต่างของค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ของคอนกรีตกำลังสูงและคอนกรีตกำลังปกติมีค่ามากกว่า ความแตกต่างของค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ของคอนกรีตกำลังปกติและคอนกรีตกำลังต่ำอีกด้วย ผลของการกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตต่อค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์มีสาเหตุมาจากคอนกรีตที่กำลังสูงกว่าจะมีค่าความต้านทานไฟฟ้าสูงกว่าคอนกรีตที่มีกำลังต่ำกว่า เนื่องจากมีความหนาแน่นมากกว่า ทั้งนี้การศึกษาของ Polder [15] ระบุว่าอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่มากกว่าในคอนกรีตที่มีกำลังต่ำกว่าจะส่งผลให้มีปริมาณน้ำในคอนกรีตมากขึ้น ทำให้ความต้านทานทางไฟฟ้าของคอนกรีตน้อยลง ดังนั้นจึงส่งผลถึงค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ของคอนกรีตที่เป็นลบมากขึ้น



รูปที่ 7 ผลของการเคลือบอีพอกซีต่อค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์

รูปที่ 7 แสดงผลของการเคลือบสารอีพอกซีที่ผิวเหล็กต่อค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ จากรูปพบว่าที่อายุประมาณ 10 วัน ค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ของคอนกรีตที่มีเหล็กเสริมเคลือบด้วยอีพอกซีมีค่าใกล้เคียงกับคอนกรีตปกติที่ไม่ได้มีการเคลือบเหล็กด้วยอีพอกซี แต่หลังจากอายุ 10 วัน พบว่าค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ของเหล็กเสริมที่เคลือบด้วยอีพอกซีเริ่มมีค่ามากกว่า (เป็นลบน้อยกว่า) เมื่อเทียบกับคอนกรีตที่มีเหล็กเสริมปกติ ทั้งนี้เนื่องจากการเคลือบเหล็กเสริมด้วยอีพอกซีจะช่วยป้องกันการสูญเสียอิเล็กตรอนของเหล็กเสริม จึงทำให้ค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์มีค่าสูงกว่านั่นเอง และเมื่อพิจารณาคอนกรีตหลังจากอายุ 32 วันพบว่า ค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ของคอนกรีตที่มีเหล็กเสริมที่เคลือบด้วยอีพอกซียังคงมีค่ามากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตที่มีเหล็กเสริมปกติ ดังนั้นการเคลือบอีพอกซีที่ผิวเหล็กเสริมจึงเป็นการช่วยป้องกันการเกิดสนิมที่เหล็กเสริมได้เป็นอย่างดี โดยทำให้ค่าแนวโน้มการ

เกิดสนิมลดลงนั่นเอง โดยผลการศึกษาของงานวิจัยนี้ตรงกับรายงานของ Utah Department of transportation research division [10] ที่ระบุว่า การเคลือบอีพอกซีทำให้ค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์มีค่าเป็นลบน้อยกว่าการไม่เคลือบอีพอกซี

4. สรุป

4.1 การวัดค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์เพื่อทดสอบแนวโน้มการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในช่วงการพัฒนากำลังของคอนกรีต ค่าความต่างศักย์ที่วัดได้มีค่าสูงเกินจริง โดยผลของตัวแปรต่างๆ ต่อค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์เป็นดังนี้

- ค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์มีค่าลดลงเมื่อปริมาณคลอไรด์สูงขึ้น
- ผลของระยะหุ้มต่อค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ยังไม่ชัดเจน

- กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตยังไม่มีผลต่อค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์

- ค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ของคอนกรีตที่มีเหล็กเสริมเคลือบด้วยอีพอกซีที่มีค่าใกล้เคียงกับคอนกรีตปกติที่ไม่ได้มีการเคลือบเหล็กด้วยอีพอกซีที่อายุก่อน 10 วัน แต่หลังจากอายุ 10 วัน ค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ของเหล็กเสริมที่เคลือบด้วยอีพอกซีมีค่าสูงกว่าเหล็กเสริมปกติ

4.2 หลังจากคอนกรีตมีการพัฒนากำลังเต็มที่แล้วผลของตัวแปรต่างๆ ต่อค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์เป็นดังนี้

- คอนกรีตที่มีปริมาณคลอไรด์ที่สูงกว่า ให้ค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ที่ต่ำกว่า (เป็นลบสูงกว่า) คอนกรีตที่มีปริมาณคลอไรด์น้อยกว่า ซึ่งแสดงถึงแนวโน้มการเกิดสนิมเหล็กที่มากกว่า

- คอนกรีตที่มีระยะหุ้มมากกว่า ให้ค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์มีค่าสูงกว่า (มีค่าเป็นลบน้อยกว่า) คอนกรีตที่มีระยะหุ้มน้อย

- คอนกรีตที่มีกำลังรับแรงอัดสูงกว่า ให้ค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ที่มีค่าสูงกว่า (มีค่าเป็นลบน้อยกว่า) คอนกรีตที่มีกำลังต่ำกว่า แสดงถึงแนวโน้มการเกิดสนิมเหล็กที่น้อยกว่า

- คอนกรีตที่มีเหล็กเสริมที่เคลือบผิวด้วยอีพอกซี ให้ค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์สูงกว่า (มีค่าเป็นลบน้อยกว่า) คอนกรีตที่มีเหล็กเสริมไม่ได้เคลือบอีพอกซี กล่าวคือมีแนวโน้มการเกิดสนิมเหล็กที่ต่ำกว่า

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (Kasetsart University Research and Development Institute, KURDI) ที่สนับสนุนทุนวิจัยภายใต้โครงการวิจัยเรื่องปัจจัยที่มีผลต่อการทดสอบแนวโน้มการเกิดสนิมด้วยวิธีความต่างศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Chaimoon K. Concrete reinforced with FRP bars: Alternative for noncorrosive structures. *KKU Engineering Journal*. 2010;37(3): 237-245. (In Thai).
- [2] American Society for Testing and Materials (ASTM). Standard test method for half-cell potentials of uncoated reinforcing steel in concrete. ASTM C 876-91. Philadelphia; 1999.
- [3] Gu P, Beaudoin JJ. Obtaining effective half-cell potential measurements in reinforced concrete structures. *Construction Technology Update*. National Research Council Canada. 1998; July No.18. Available from: URL: <http://www.nrc-cnrc.gc.ca/eng/ibp/irc/ctus/ctus-n18.html>.
- [4] Hussian RR. Underwater half-cell corrosion potential bench mark measurements of corroding steel in concrete influenced by a variety of material science and environmental variables. *Measurement*. 2011;14(1): 274-280.
- [5] Leelalerkiet V, Kyung J, Otsu M, Yokota M. Analysis of half-cell potential measurement for corrosion of reinforced concrete. *Construction and Building Materials*. 2004;18(3): 155-162.
- [6] Chotetanorm C, Bubphachot B, Chindaprasirt P. A study of chloride penetration of concrete containing classified fly ash. *KMUTT Research and Development Journal*. 2006;29(2): 203-214. (In Thai).
- [7] Rukzon S, Chindaprasirt P. Strength and chloride penetration of mortar with mixture proportioning in ternary cementitious system. *KMUTT Research and Development Journal*. 2008;31(4): 859-869. (In Thai).
- [8] Sookoomjariyapong C, Vongchavalitkul S, Sayamipuk S. Guideline for assessment of reinforced concrete structure attacked by chloride. *KKU Engineering Journal*. 2009;36(1): 69-76. (In Thai).
- [9] Powers RG. Corrosion of epoxy coated rebar, Keys segmental bridges Monroe County. Corrosion Report No. 88-8A, Florida Department of Transportation, Gainesville, Florida. 1988.
- [10] Guthrie WS, Pinkerton TM, Egget DL. Sensitivity of half-cell potential measurements to properties of concrete bridge decks. Report No. UT-08.21, Utah Department of Transportation Research Division; October 2008; 92.
- [11] Chalee W, Teekavanit M, Jaturapitakkul, C, Ausapanit, P. Effect of seawater on compressive strength, chloride penetration and corrosion of steel in fly ash concrete for 4-year exposure in marine environment. *KMUTT Research and Development Journal*. 2007;30(1): 153-166. (In Thai).
- [12] Elsener B. Half-cell potential mapping to assess repair work on RC structure. *Construction and Building Materials*. 2001;15(2-3): 133-139.
- [13] Pour-Ghaz M, Isgor OB, Ghods P. Quantitative interpretation of half-cell potential measurements in concrete structures. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 2009;21(9): 467-475.
- [14] Pattarakittam T, Suwanvitaya P, Yodsudjai W. Factors influencing half-cell potential measurement analysis in reinforced concrete. *Proceedings of International Conference on Highway Engineering 2012: Sustainable Innovation Toward Green Highways*; 2010 April 1-20; Bangkok, Thailand, pp. 443-448.
- [15] Polder RB. Test method for on-site measurement of resistivity of concrete- a RILEM TC-154 technical recommendation. *Construction and Building Materials*; 2001;15(2-3): 125-131.