



Journal of Thailand Concrete Association วารสารวิชาการสมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย

CORROSION OF REINFORCEMENT IN VARIOUS CONCRETE TYPES

การกัดกร่อนของเหล็กเสริมคอนกรีตในคอนกรีตประเภทต่างๆ

พิชิตนันท์ วันรักษ์¹ วันชัย ยอดสุดใจ²

¹นิสิตสาขาวิชาเทคโนโลยีโครงสร้างเพื่อสิ่งแวดล้อมสรรค์สร้าง ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

²ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ARTICLE INFO:

Received: May 15, 2017

Received Revised Form:

June 19, 2017

Accepted: June 20, 2017

ABSTRACT:

The purpose of this research is to investigate the effect of concrete types on the corrosion of reinforcement in concrete. The corrosion of reinforcement was evaluated by half-cell potential (HCP), corrosion current density (i_{corr}) and weight loss of steel exposed to same environment. There were 5 types of concrete used: Ordinary Portland cement concrete (OPC), High-early strength Portland concrete (HPC), fly ash concrete (PFC), Portland blast-furnace slag concrete (PBSC) and silica fume concrete (PSFC). All concrete types were designed with similar water-to-binder ratio. The corrosion testing of reinforcement in concrete was conducted by wet-dry cycles of concrete specimen following the ASTM G109-99a standard. It was found from the test results that concrete types affected the corrosion of reinforcement. The corrosion of reinforcement in silica fume concrete (PSFC) was the lowest compared to the other types of concrete.

KEYWORDS: Chloride, Corrosion, Half-Cell Potential, Corrosion Current Density

**Corresponding Author,*

Email address: g5314551446@ku.ac.th

บทคัดย่อ:

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลกระทบของประเภทคอนกรีตที่มีต่อการกัดกร่อนของเหล็กเสริมในคอนกรีตการกัดกร่อนของเหล็กเสริมประเมินโดยวิธีศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ (Half-Cell Potential, HCP) ค่าความหนาแน่นกระแสการกัดกร่อน (Corrosion Current Density, i_{corr}) และค่าการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริม ภายใต้สภาพแวดล้อมการเกิดการกัดกร่อนเดียวกัน โดยใช้คอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากัน ในการทดสอบคอนกรีตประเภทต่างๆ 5 ประเภท ได้แก่คอนกรีตปอร์ตแลนด์ธรรมดา (OPC) คอนกรีตปอร์ตแลนด์กำลังอัดสูง (HPC) คอนกรีตปอร์ตแลนด์ผสมเถ้าลอย (PFC) คอนกรีตปอร์ตแลนด์ผสมตะกรันเตาถลุงเหล็ก (PBSC) และคอนกรีตปอร์ตแลนด์ผสมซิลิกาฟุ่ม (PSFC) โดยเปรียบเทียบผลทดสอบกับคอนกรีตปอร์ตแลนด์ธรรมดา (OPC) ในการทดสอบการกัดกร่อนของเหล็กเสริมในคอนกรีตด้วยวิธีเร่งแบบวัฏจักรสภาวะเปียกสลับแห้ง (Wet-dry cycles) ตามมาตรฐาน ASTM G109-99a ผลการศึกษาพบว่า ประเภทของคอนกรีตมีผลต่อการกัดกร่อนของเหล็กเสริมในคอนกรีตคอนกรีตปอร์ตแลนด์ผสมซิลิกาฟุ่ม (PSFC) มีการกัดกร่อนของเหล็กเสริมในคอนกรีตน้อยที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตธรรมดา (OPC) และคอนกรีตอีก 4 ประเภท

คำสำคัญ: คลอไรด์, การกัดกร่อน, วิธีศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์, ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน

1. บทนำ

ปัญหาการเสื่อมสภาพของคอนกรีตเนื่องจากการกัดกร่อนของเหล็กเสริมในคอนกรีตนั้น นับเป็นปัญหาหลักที่พบได้ในงานโครงสร้างงานคอนกรีตทั่วไป และยังเป็นปัญหาสำคัญที่ทำให้สิ่งก่อสร้างต่างๆ เกิดความเสียหายเป็นอย่างมาก

ในปัจจุบันคอนกรีตพิเศษที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย ตัวอย่างเช่น คอนกรีตปอร์ตแลนด์ผสมเถ้าลอยคอนกรีตปอร์ตแลนด์ผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กและคอนกรีตปอร์ตแลนด์ผสมซิลิกาฟุ่ม คอนกรีตพิเศษเหล่านี้เป็นการรวมกันระหว่างอัตราส่วนผสมสารประกอบแร่ธาตุต่างๆ ซึ่งมีอัตราการซึมผ่านของคลอไรด์และการเกิดการกัดกร่อนของเหล็กเสริมในคอนกรีตที่ต่างกันประเภทของปูนซีเมนต์จะเป็นตัวบอกความสามารถในการซึมผ่านได้ของคอนกรีตโดยขึ้นอยู่กับทำให้คอนกรีตแน่นและเงื่อนไขการบ่ม [1]

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลกระทบของประเภทคอนกรีตที่มีต่อการกัดกร่อนของเหล็กเสริมในคอนกรีตประเภทต่างๆ การกัดกร่อนของเหล็กเสริมประเมินโดยวิธีศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ (Half-Cell Potential, HCP) ค่าความหนาแน่นกระแสการกัดกร่อน (Corrosion Current Density, i_{corr}) และค่าการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริม (Weight Loss) ภายใต้สภาพแวดล้อมการเกิดการกัด

กร่อนเดียวกัน โดยใช้คอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากัน

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 การเกิดสนิมเนื่องจากคลอไรด์

โดยปกติแล้วเหล็กเสริมในคอนกรีตจะมีฟิล์มบางๆ (Passivation film) ของ $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ เคลือบอยู่ ฟิล์มที่ว่านี้เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration) ของซีเมนต์กับน้ำในระหว่างการพัฒนาของคอนกรีต ทำให้คอนกรีตที่ห่อหุ้มเหล็กเสริมมีความเป็นด่างสูงมีค่า pH ประมาณ 12.6 ถึง 13.5 ซึ่งสูงพอที่จะป้องกันการสูญเสียอิเล็กตรอนของเหล็กเสริม หรือไม่เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation reaction) [2]

การปนเปื้อนคลอไรด์ในคอนกรีตเป็นสาเหตุที่พบได้บ่อยที่ทำให้เกิดสนิมในเหล็กเสริม แหล่งกำเนิดคลอไรด์ส่วนมากจะพบในสภาพแวดล้อมที่อยู่ใกล้ทะเล และถนนที่มีการทับถมของคลอไรด์จากการใช้เกลือละลายน้ำแข็งซึ่งเกิดขึ้นจากหิมะในช่วงฤดูหนาวในเขตอากาศหนาวเย็น การเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตมีจุดเริ่มต้นจากคลอไรด์ที่อยู่ในคอนกรีตสัมผัสกับผิวเหล็ก จุดเริ่มต้นนี้ขึ้นอยู่กับตัวแปรหลายชนิด อย่างไรก็ตามการเกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีของเหล็กเสริมซึ่งสัมพันธ์กับปริมาณ

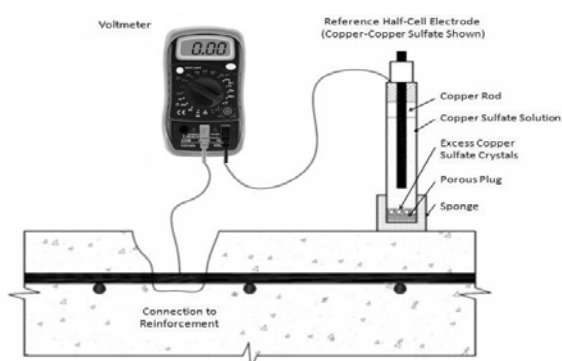
ออกซิเจนที่สามารถเข้าถึงผิวหน้าของเหล็กมีอิทธิพลมากต่อการกัดกร่อน คลอรีนในปริมาณต่ำมากๆ ก็เพียงพอต่อการเริ่มต้นการกัดกร่อนหากโครงสร้างอยู่ในชั้นบรรยากาศที่ซึ่งออกซิเจนสามารถเข้าถึงเหล็กเสริมได้ง่าย [3]

2.2 การทดสอบศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ (HCP)

เมื่อเหล็กเสริมเกิดการกัดกร่อนขึ้นในคอนกรีตจะเกิดความต่างศักย์ขึ้นระหว่างพื้นที่ผิวเหล็กเสริมด้านแอโนดและพื้นที่ผิวเหล็กเสริมด้านแคโทด ความต่างศักย์นี้ สามารถวัดได้โดยวางเซลล์คอปเปอร์-คอปเปอร์ซัลเฟต (Cu-CuSO_4) บนผิวคอนกรีต แล้ววัดค่าความต่างศักย์ระหว่างเหล็กเสริมกับเซลล์อ้างอิงที่สัมผัสผิวคอนกรีตโดยต่อกับโวลต์มิเตอร์ ซึ่งต่อกับเหล็กเสริมอีกทีหนึ่ง โวลต์มิเตอร์จะอ่านค่าความต่างศักย์บริเวณต่างๆ ที่ทำการทดสอบ ดังรูปที่ 1 การอ่านค่าในการทดสอบครั้งนี้จะประเมินโดยการเปรียบเทียบกับตารางความน่าจะเป็นของการกัดกร่อนของเหล็กเสริม ตามมาตรฐาน ASTM C876-09[4] ดังแสดงในตารางที่ 1

2.3 การทดสอบความหนาแน่นกระแสการกัดกร่อน(i_{corr})

เป็นการประเมินความรุนแรงของการกัดกร่อนในเหล็กเสริมจากการตรวจสอบค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน (i_{corr}) ตามมาตรฐาน ASTM G109-99a ด้วยวิธีแรงแบบวัฏจักรสถานะเปียกสลับแห้ง โดยประเมินที่ผิวบนคอนกรีตเพื่อนำมาตรวจสอบและหาอัตราการกัดกร่อน พร้อมหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์กับอัตราการกัดกร่อน



รูปที่ 1 การวัดค่าความต่างศักย์ระหว่างเหล็กเสริมกับเซลล์อ้างอิงที่สัมผัสผิวคอนกรีต [4]

ตารางที่ 1 ค่าความต่างศักย์ของไฟฟ้าครึ่งเซลล์และความน่าจะเป็นของการกัดกร่อน ASTM C 876 [4]

Half-cell potential reading (mV vs. CSE)	Percentage chance of active corrosion
< -250	10%
-250 to -350	50%
> -350	90%

โดยมีงานวิจัยที่ผ่านมา [5] ได้อธิบายความสัมพันธ์ของค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน (Corrosion current density, i_{corr}) กับสภาวะการกัดกร่อนของเหล็กเสริมคอนกรีตในช่วงต่างๆ ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนกับสภาวะการกัดกร่อนของเหล็กเสริม, i_{corr} [5]

Corrosion current density, i_{corr}	Corrosion classification
<0.01 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$	Passive/very low
0.01–0.1 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$	Low to moderate corrosion
>1.0 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$	High corrosion rate

การทดสอบโดยวิธีการวัดค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์เป็นเทคนิคการบอกแนวโน้มการกัดกร่อนของเหล็กเสริมเท่านั้น จึงจำเป็นต้องหาเทคนิคต่างๆ เพื่อนำมาตรวจสอบและหาอัตราการกัดกร่อน พร้อมหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์กับค่าความหนาแน่นกระแสการกัดกร่อน (Corrosion current density, i_{corr}) ว่าค่าความหนาแน่นกระแสการกัดกร่อนมีค่าน้อยกว่า 0.1 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ให้พิจารณาว่าเหล็กเสริมไม่เกิดการกัดกร่อน แต่ถ้ามีค่ามากกว่า 0.1 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ให้พิจารณาว่าเหล็กเสริมจะมีโอกาสเกิดการกัดกร่อนซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานตามมาตรฐาน ASTM C-876 ดังภาพที่ 2 และมีความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์ของไฟฟ้าครึ่งเซลล์ HCP = -350mV.(CSE) เท่ากับค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน i_{corr} = 0.1 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ตามตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์ของไฟฟ้าครึ่งเซลล์, ค่าความหนาแน่นกระแสการกัดกร่อนและสภาวะการกัดกร่อนของเหล็กเสริม

Half-cell potential, HCP	Corrosion current density, i_{corr} (Corrosion classification)
< -250 mV (CSE)	<0.01 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ (Passive/very low)
-250 to -350 mV (CSE)	0.01–0.1 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ (Moderate corrosion)
> -350 mV (CSE)	>0.1 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ (High corrosion)

3. อุปกรณ์และวิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 วัสดุประสานและมวลรวม

การศึกษานี้ใช้วัสดุประสานและมวลรวมต่างๆ ประกอบด้วย ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1, ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 3, เถ้าลอยจากโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้าแม่เมาะ, ตะกรันเตาถลุงเหล็กจากบริษัท ปูนซีเมนต์นครหลวง จำกัด (มหาชน) และซิลิกาฟูมจากบริษัท ซิก้า (ประเทศไทย) จำกัด ซึ่งมีคุณลักษณะทางกายภาพและองค์ประกอบทางเคมีของส่วนผสมคอนกรีตต่างๆ ตามตารางที่ 4

มวลรวมหยาบที่ใช้ในการศึกษานี้ ใช้หินที่มีขนาดใหญ่มากที่สุดเท่ากับ 9.52 มม. และมีความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.68 ส่วนมวลรวมละเอียดใช้ทรายแม่น้ำที่มีค่าโมดูลัสความละเอียดเท่ากับ 2.75 และมีความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.45

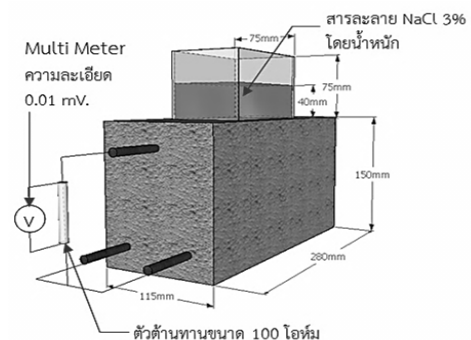
3.2 การเตรียมตัวอย่างทดสอบ

ตัวอย่างคอนกรีตที่ทดสอบออกแบบให้มีกำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีตที่ระยะเวลา 28 วัน ประมาณ 26 MPa และมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) = 0.58 ตามที่แสดงอัตราส่วนผสมในตารางที่ 5

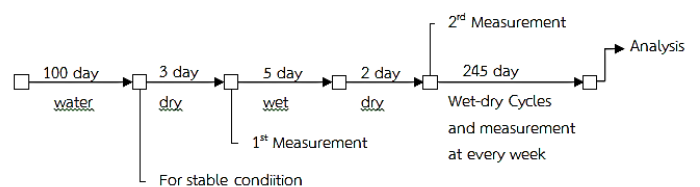
เหล็กเสริมในคอนกรีตที่ทดสอบใช้เหล็กข้ออ้อย (SD40) DB12 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มม. ความยาว 400 มม. ทำการขัดผิวเหล็กด้วยแปรงลวดแล้วล้างสารเคลือบป้องกันสนิมและคราบน้ำมันที่ผิวเหล็กด้วยอะซิโตน (Acetone) จากนั้นเคลือบผิวเหล็กเสริมจากบริเวณปลายเหล็กเข้ามาด้านละ 100 มม. ด้วยอีพ็อกซีและพันทับด้วยเทปพันสายไฟ โดยความยาวของเหล็กเสริมช่วงที่ไม่ได้ถูกเคลือบผิว ถูกจำกัดระยะไว้ไม่เกิน 180 มม.

3.3 ขั้นตอนการทดสอบ

การทดสอบทำตามมาตรฐาน ASTM G109-99a [7] ด้วยวิธีเร่งแบบวัฏจักรสภาวะเปียกสลับแห้งโดยหล่อคอนกรีตเป็นรูปทรงสี่เหลี่ยม ขนาด 115x280x150 mm³ เสริมเหล็กข้ออ้อย DB12 ที่ทำความสะอาดและเคลือบอีพ็อกซีที่ผิวปลายเหล็กทั้งสองข้างเรียบร้อยแล้ว โดยกำหนดให้มีระยะของคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริมด้านบนเท่ากับ 25 มม. แล้วบ่มด้วยความชื้นที่อุณหภูมิปกติเป็นระยะเวลา 100 วัน แล้วทิ้งไว้ให้แห้งอีกเป็นเวลา 3 วัน แล้วจึงนำมาเชื่อมต่อกับวงจรไฟฟ้า โดยเชื่อมต่อสายไฟที่ปลายเหล็กเสริมทั้งสามเส้นเข้ากับตัวต้านทานที่มีค่าความต้านทาน 100 โอห์ม และทำการประกอบติดตั้งกล่องอะคริลิกใสขนาด 75x75x150 mm³ ไว้ที่เหนือผิวด้านบนของก้อนตัวอย่างคอนกรีตเสริมเหล็กสำหรับซึ่งสารละลายโซเดียมคลอไรด์ที่มีความเข้มข้นร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก ดังรูปที่ 2 ให้ก้อนตัวอย่างคอนกรีตเสริมเหล็กเผชิญสภาวะเปียกสลับแห้งสลับไปมา เป็นระยะเวลา 245 วัน โดยกำหนดระยะเวลาของวัฏจักรสภาวะเปียกสลับแห้ง (Immersing-drying cycles test) คือให้อยู่สภาวะเปียกระยะเวลา 5 วัน และอยู่ในสภาวะแห้ง ระยะเวลา 2 วันแล้วทำการวัดค่าทุก 7 วัน ดังรูปที่ 3



รูปที่ 2 ตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้ในการทดสอบการกัดกร่อนของเหล็กเสริมภายในคอนกรีต



รูปที่ 3 กระบวนการทดสอบการวัดค่าการกัดกร่อนของเหล็กเสริมในคอนกรีตด้วยวิธีเร่งแบบวัฏจักรสภาวะเปียกสลับแห้ง (Time Line of Wet-Dry Cycles)

ตารางที่ 4 คุณสมบัติทางกายภาพและองค์ประกอบทางเคมีของส่วนผสมคอนกรีต

Chemical Compositions	Cement Type 1	Cement Type3	Fly Ash	GGBF Slag	Silica Fume
CaO (%)	62.8	64.89	11.18	36.05	0.2
SiO ₂ (%)	20.6	20.73	43.88	34.06	92
Al ₂ O ₃ (%)	4.13	4.49	24.31	16.27	0.7
Fe ₂ O ₃ (%)	2.99	3.32	12.51	1.7	1.2
SO ₃ (%)	2.56	2.76	0.78	2.16	-
MgO (%)	2.99	1.25	2.75	7.38	0.2
L.O.I. ¹ (%)	2.53	1.23	0.17	1.44	-
B.F. ² (m. ² /kg.)	452.7	477	346	460	22,500
S.G. ³	3.15	3.22	2.08	2.96	2.2

¹ Loss on ignition² Blaine fineness³ Specific gravity

ตารางที่ 5 ปฏิภาณส่วนผสมของตัวอย่างคอนกรีตทดสอบ

Type of Concrete	Cement (kg/m ³)	Pozzolans (kg/m ³)	Coarse Aggregate (kg/m ³)	Fine Aggregate (kg/m ³)	Water (kg/m ³)
OPC ¹	284	-	1135	815	163
HPC ²	284	-	1135	815	163
PFC ³	227	57	1135	815	163
PBSC ⁴	170	114	1135	815	163
PSFC ⁵	256	28	1135	815	163

¹ คอนกรีตปอร์ตแลนด์ควมคุม⁴ คอนกรีตปอร์ตแลนด์ผสมตะกรันเตาถลุงเหล็ก 25 %² คอนกรีตปอร์ตแลนด์กำลังอัดสูง⁵ คอนกรีตปอร์ตแลนด์ผสมซิลิกาฟูม10 %³ คอนกรีตปอร์ตแลนด์ผสมเถ้าลอย40 %

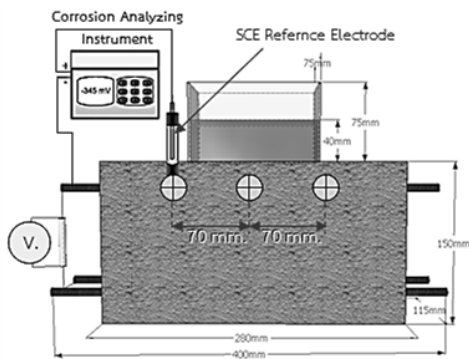
3.3.1 การวัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ (HCP)

หลังจากผ่านสภาวะแห้งแล้ว 48 ชั่วโมงแล้ว จึงเริ่มทำการวัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ที่ผิวด้านข้างก่อนตัวอย่างคอนกรีตจำนวน 3 จุด เพื่อประเมินการเกิดสนิมของเหล็กเสริมโดยต่อปลายสายไฟฟ้าไว้กับเหล็กเสริมบนและใช้ขั้วไฟฟ้าอ้างอิง

Cu/CuSO₄ วัดที่ผิวด้านข้างของคอนกรีตตามมาตรฐาน ASTM C876-09 ดังรูปที่ 4

3.3.2 การวัดค่าความหนาแน่นกระแสการกัดกร่อน (i_{corr})

ทำการวัดค่าศักย์ไฟฟ้าพร้อมตัวต้านทาน 100 โอห์ม ที่ต่อสายระหว่างปลายเหล็กเสริมด้านบนและด้านล่าง วัดด้วยมัลติมิเตอร์หรือโวลต์มิเตอร์ที่มีความละเอียดในการวัด 0.01 mV แล้วนำไปคำนวณค่าความหนาแน่นกระแสการกัดกร่อน (i_{corr}) ที่เกิดจากการกัดกร่อนของเหล็กเสริมภายในคอนกรีตได้จากสมการที่ (1) และ (2)



รูปที่ 4 ตำแหน่งวัดค่าความต่างศักย์ทางไฟฟ้าระหว่างจุด 3 จุด บนแท่งตัวอย่างคอนกรีต

$$V = IR \quad (1)$$

เมื่อ V คือ ค่าศักย์ไฟฟ้าที่วัดพร้อมตัวต้านทาน (โวลต์), I คือ ค่ากระแสไฟฟ้า (แอมแปร์), R คือ ค่าความต้านทานมีค่าเท่ากับ 100 โอห์ม จากนั้นคำนวณหาค่าความหนาแน่นกระแสการกัดกร่อน (i_{corr}) ตามที่แสดงในสมการที่ 2

$$i_{corr} = \frac{I}{A} \quad (2)$$

โดยที่ i_{corr} เป็นค่าความหนาแน่นกระแสการกัดกร่อน ($\mu A/cm^2$) และ A คือพื้นที่ผิวสัมผัสของเหล็กเสริมที่สัมผัสกับเนื้อคอนกรีต ในการศึกษาชิ้นเหล็กมีพื้นที่ผิวสัมผัสเท่ากับ $67.85 cm^2$ (พื้นที่ผิวของส่วนตรงกลางที่ไม่เคลือบอีพ็อกซี)

เมื่อทดสอบจนครบกำหนด 356 วันแล้วทุบก้อนคอนกรีตให้แตก จากนั้นนำเหล็กเสริมเส้นที่อยู่ด้านบนในคอนกรีต ออกมาทำความสะอาด โดยนำเหล็กเสริมมาแช่ในสารละลายกรดไฮโดรคลอริก (HCl) ที่มีความเข้มข้นร้อยละ 12 โดยปริมาตร ที่ระยะเวลา 30 นาที ต่อจากนั้นนำมาแช่ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ที่มีความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ที่ระยะเวลา 5 นาที แล้ว

นำมาล้างด้วยน้ำสะอาดอีกครั้งเช็ดให้แห้ง แล้วนำเหล็กเสริมมาชั่งน้ำหนักเพื่อคำนวณหาค่าสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมดังแสดงในสมการที่ (3) [8]

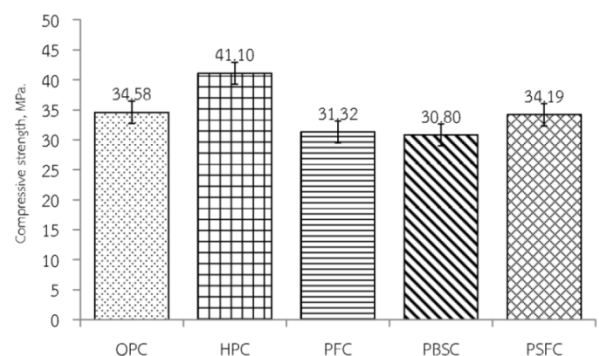
$$\eta_s = \frac{(m_o - m_c)}{m_o} \times 100\% \quad (3)$$

โดยที่ η_s คือ อัตราค่าสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมในคอนกรีต (ร้อยละ), m_o คือ น้ำหนักของเหล็กเสริมในคอนกรีตก่อนเกิดการกัดกร่อน (กรัม) และ m_c คือ น้ำหนักของเหล็กเสริมในคอนกรีตหลังเกิดการกัดกร่อน (กรัม)

4. ผลการทดสอบ

4.1 การทดสอบกำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีต

จากการทดสอบกำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีต พบว่าคอนกรีตที่มีค่ากำลังต้านทานแรงอัดเฉลี่ยมากกว่าคอนกรีตปอร์ตแลนด์ธรรมดา (OPC) (Control) ได้แก่ คอนกรีตปอร์ตแลนด์กำลังอัดสูง (HPC) โดยมีค่ากำลังอัดเฉลี่ยมากที่สุดตามรูปที่ 5



รูปที่ 5 ค่าเฉลี่ยกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่ 28 วัน

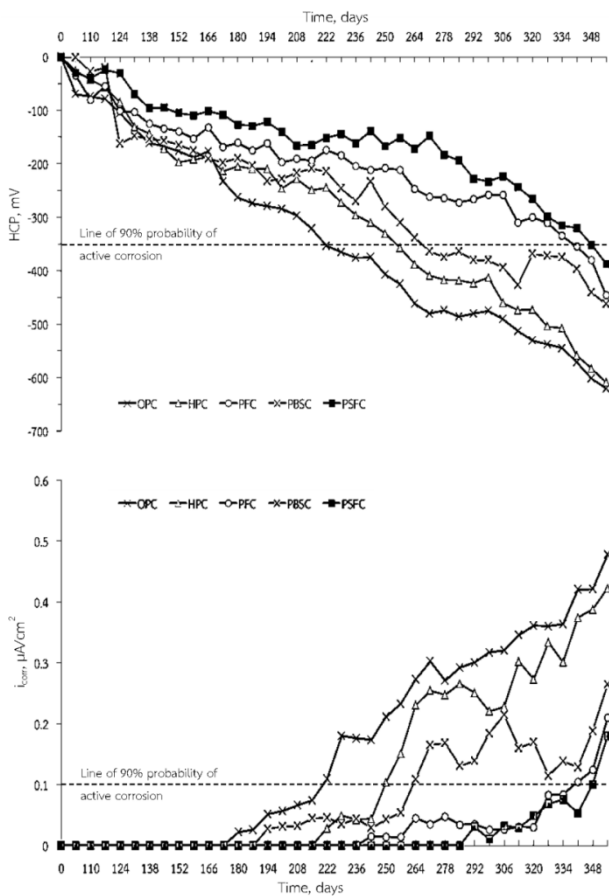
4.2 การทดสอบความต่างศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ (HCP)

จากผลการทดสอบวัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ (HCP) ของคอนกรีตตัวอย่าง พบว่า ค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ มีค่าติดลบเพิ่มขึ้นตามระยะเวลา ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา [9, 10] โดยเหล็กเสริมในคอนกรีต OPC HPC PFC และ PSFC มีค่า HCP เกิดขึ้นตั้งแต่ครั้งแรกที่เริ่มวัดค่าเมื่อคอนกรีตมีอายุ 104 วัน และค่า HCP ของเหล็กเสริมในคอนกรีตทั้งหมดมีอัตราการติดลบเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องสม่ำเสมอ และเมื่อทดสอบต่อมาจนเหล็กเสริมในคอนกรีตเกิดการกัดกร่อน (ค่า HCP < -350 mV) พบว่าเหล็กเสริมในคอนกรีต OPC HPC PFC และ PSFC มีความเป็นไปได้

ได้ของการเกิดการกัดกร่อนร้อยละ 90 เมื่อคอนกรีตมีอายุ 222, 257, 266, 340 และ 349 ตามลำดับดังรูปที่ 6

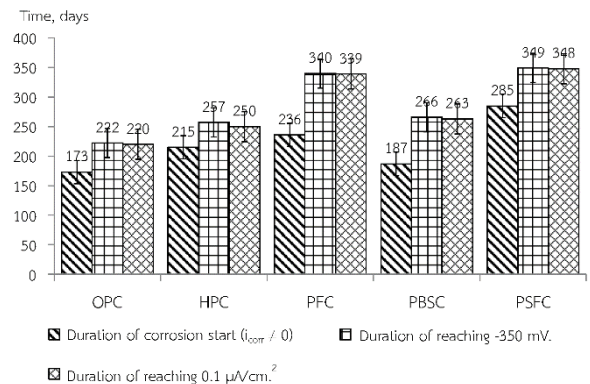
4.3 การทดสอบความหนาแน่นกระแสการกัดกร่อน (i_{corr})

จากรูปที่ 6 จะเห็นได้ว่าในช่วงก่อนระยะเริ่มการกัดกร่อน (Initial period) ค่า i_{corr} ของเหล็กเสริมในคอนกรีต OPC HPC PFC และ PSFC มีค่า = 0 ใกล้เคียงกันแต่มีระยะเวลาเริ่มการกัดกร่อน (Duration until starting corrosion) หรือระยะเวลาที่ค่า $i_{\text{corr}} \neq 0$ ต่างกันโดยมีระยะเวลา Duration of corrosion start ของ OPC = 173 วัน (เกิดเร็วสุด), PBSC = 187 วัน, HPC = 215 วัน, PFC = 236 วันและ PSFC = 285 วัน (เกิดช้าสุด) และเมื่อทดสอบต่อมาจนเหล็กเสริมในคอนกรีตเริ่มเกิดการกัดกร่อน (ค่า $i_{\text{corr}} \geq 0.1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$) พบว่าเหล็กเสริมในคอนกรีต OPC เริ่มมีโอกาสดำเนินการกัดกร่อนก่อนเมื่ออายุ 220 วันต่อมาเป็นเหล็กเสริมในคอนกรีต HPC PBSC PFC และ PSFC ซึ่งเกิดก่อนเมื่ออายุ 250, 263, 339 และ 348 วัน ตามลำดับซึ่งค่า i_{corr} มีความสอดคล้องกับค่า HCP ของเหล็กเสริมในคอนกรีตในหัวข้อ 4.2



รูปที่ 6 ค่า HCP และค่า i_{corr} ของเหล็กเสริมในคอนกรีต

จากนั้นนำระยะเวลาต่างๆ ในช่วงการทดสอบการกัดกร่อนของเหล็กเสริมที่อยู่ภายในคอนกรีตประเภทต่างๆ แต่ละชนิดที่ได้จากผลการทดสอบในหัวข้อ 4.2 และ 4.3 มาเปรียบเทียบกับกัน ดังแสดงในรูปที่ 7

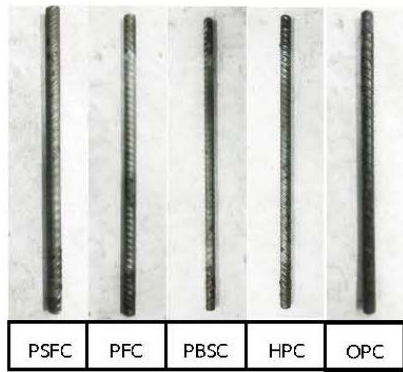


รูปที่ 7 ระยะเวลา Initial period ของเหล็กเสริมในคอนกรีตประเภทต่างๆ

จากรูปที่ 7 พบว่า จำนวนวันนับจากเริ่มสัมผัสสารละลายคลอไรด์จนเริ่มเกิดการกัดกร่อนที่วัดได้จากค่า HCP และค่า i_{corr} มีความสอดคล้องกัน แนวโน้มเป็นไปในทิศทางเดียวกัน และเมื่อนำระยะเวลาก่อนเกิดการกัดกร่อนของเหล็กเสริมถึงระยะแรกเริ่มการกัดกร่อน (Initial period) ของเหล็กเสริมในคอนกรีตต่างๆ มาเปรียบเทียบกับกัน ซึ่งพบว่าเหล็กเสริมในคอนกรีตที่ทำการทดสอบมีระยะเวลา Initial period ต่างกัน ได้แก่ OPC = 173 วัน (เกิดเร็วสุด), PBSC = 187 วัน, HPC = 215 วัน, PFC = 236 วันและ PSFC = 285 วัน (เกิดช้าสุด) ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาที่ผ่านมาที่แสดงว่า ความสามารถในการซึมผ่านได้ของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ผสมสารปอซโซลานที่บ่มอย่างดียิ่งมีค่าต่ำกว่าคอนกรีตที่ไม่ผสมสารปอซโซลานที่มีอัตราส่วนผสมเหมือนกัน [11] ทั้งนี้ปริมาณคลอไรด์วิกฤตของคอนกรีตจะมีค่าลดลงเมื่อปริมาณอัตราการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยสูงขึ้น และมีค่าลดลงตามอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่มากขึ้น

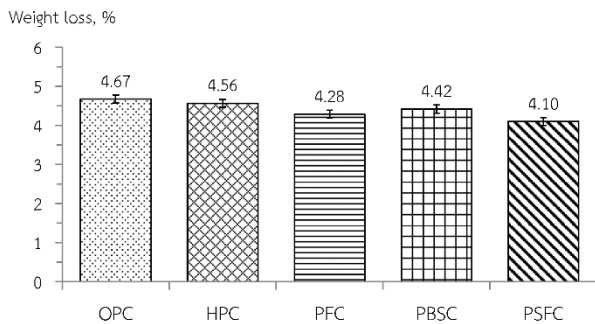
4.4 การหาค่าสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริม

จากรูปที่ 8 เมื่อนำเหล็กเสริมส่วนที่ฝังในคอนกรีตก่อนทำความสะอาดและเหล็กเสริมส่วนที่ฝังในคอนกรีตหลังทำความสะอาดมาชั่งน้ำหนักเปรียบเทียบกับกันพบว่า เหล็กเสริมในคอนกรีต OPC HPC PFC PBSC และ PSFC หลังทำความสะอาดแล้ว มีการสูญเสียของน้ำหนักประมาณร้อยละ 4.67, 4.56, 4.28, 4.42 และ 4.10 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ

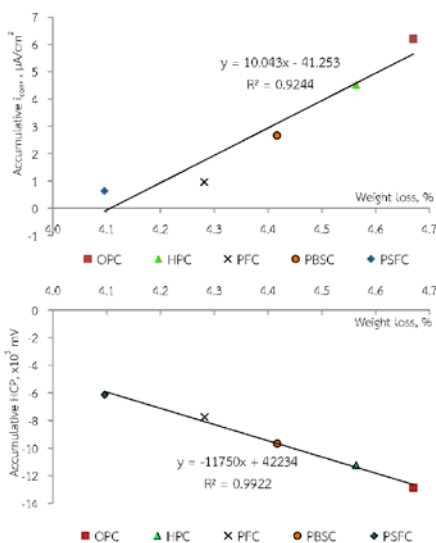


รูปที่ 8 เหล็กเสริมในคอนกรีตหลังจากการทดสอบกัดกร่อน และทำความสะอาดด้วยสารละลายไฮโดรคลอริกและขัดด้วย แปรงทองเหลืองหลังทำความสะอาด

จากรูปที่ 9 แสดงให้เห็นว่าค่า Weight loss ของเหล็กเสริมในคอนกรีต PSFC มีค่าสูญเสียน้ำหนักน้อยที่สุด ส่วนเหล็กในคอนกรีต OPC มีค่าสูงที่สุด ซึ่งมีค่าสอดคล้องกันกับค่า HCP และค่า i_{corr} แสดงให้เห็นว่าค่า Weight loss มีความสัมพันธ์กับค่า HCP และค่า i_{corr}



รูปที่ 9 ค่า Weight loss ของเหล็กเสริมในคอนกรีต



รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า HCP, i_{corr} และ Weight loss

จากรูปที่ 10 แสดงให้เห็นความสัมพันธ์ระหว่างค่า HCP สะสม, ค่า i_{corr} สะสม และค่า Weight loss ของเหล็กเสริมในคอนกรีต ณ ช่วงเวลาดังแต่วันที่เริ่มทดสอบ (คอนกรีตอายุ 103 วัน) จนถึงวันที่สิ้นสุดการทดสอบ (คอนกรีตอายุ 355 วัน) มาพิจารณา ซึ่งงานวิจัยนี้ได้กำหนดขอบเขตให้สอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา [12] และการทดสอบ พบว่า ค่า Weight loss ของเหล็กเสริมในคอนกรีต PSFC มีค่าสูญเสียน้อยที่สุด ซึ่งมีค่าสอดคล้องกันกับค่า HCP ที่ติดลบน้อยที่สุด และค่า i_{corr} ต่ำที่สุด ส่วนเหล็กเสริมในคอนกรีต OPC มีค่า Weight loss สูงที่สุด สอดคล้องกันกับค่า HCP ที่ติดลบมากที่สุดและค่า i_{corr} สูงที่สุด แสดงให้เห็นว่าค่า Weight loss มีความสัมพันธ์กับค่า HCP และค่า i_{corr} เนื่องจากเถ้าลอย (FA), ซิลิกาฟุ่ม (SF) และตะกรันเตาถลุงเหล็ก (GGBFS) ได้ทำปฏิกิริยาปอซโซลานกับโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ละลายอยู่ในน้ำในโพรงของคอนกรีต ทำให้สามารถลดปริมาณคลอไรด์ที่จำเป็นในการเริ่มต้นการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นได้

นอกจากนี้สารปอซโซลานยังช่วยเพิ่ม C-S-H ที่เกิดจากปฏิกิริยาปอซโซลานระหว่างเถ้าลอย (FA), ซิลิกาฟุ่ม (SF) และตะกรันเตาหลอมโลหะพื้น (GGBFS) กับ Ca(OH)_2 สามารถป้องกันการเกิดโพรงช่องว่างในคอนกรีตได้ เนื่องจากขนาดอนุภาคขนาดเล็ก ($<0.1\mu\text{m}$) ของซิลิกาฟุ่มส่วนที่เหลือที่ไม่เกิดปฏิกิริยาจะช่วยลดความพรุนของโพรงคาปิ ลารีและทำให้ชะลอความสามารถในการซึมผ่านของคลอไรด์ในคอนกรีตได้ซึ่งจะช่วยยืดระยะเวลาเริ่มต้นในการเกิดการกัดกร่อนออกไป ดังนั้นคอนกรีต PBSC และ PSFC จึงมีความสามารถต้านทานการซึมผ่านของคลอไรด์ได้ดีกว่าคอนกรีต OPC [13]-[15]

5. สรุปผลการทดสอบ

1. เหล็กเสริมที่อยู่ในคอนกรีตผสมซิลิกาฟุ่ม 10 % (PSFC) มีค่า HCP ติดลบน้อยที่สุด สอดคล้องกับค่า i_{corr} มีค่าต่ำที่สุด และมีค่า Weight loss ของเหล็กเสริมในคอนกรีตน้อยที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตชนิดต่างๆ อีก 4 ชนิด ส่วนเหล็กเสริมที่อยู่ในคอนกรีตปอร์ตแลนด์ธรรมดา (OPC) มีค่า HCP ติดลบมากที่สุด สอดคล้องกับค่า i_{corr} มีค่าสูงที่สุด และมีค่า Weight loss ของเหล็กเสริมในคอนกรีตมากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตชนิดต่างๆ อีก 4 ชนิด

2. สรุปความสัมพันธ์ระหว่างค่า HCP สะสม, i_{corr} สะสม และค่า Weight loss ของเหล็กเสริมในคอนกรีตได้ว่าค่า HCP สะสม

จะแปรผกผันระหว่างค่า i_{corr} สะสมและค่า Weight loss ของเหล็กเสริมในคอนกรีต ส่วนค่า i_{corr} สะสมจะแปรผันตรงกับค่า Weight loss ของเหล็กเสริมในคอนกรีตกล่าวคือเมื่อเหล็กเสริมในคอนกรีตมีค่า HCP สะสมติดลบมากขึ้น พบว่าค่า i_{corr} สะสมจะมีค่าสูงขึ้นสอดคล้องกับค่า Weight loss ของเหล็กเสริมในคอนกรีตที่มีแนวโน้มเป็นไปตามทิศทางเดียวกันคือมีค่ามากขึ้นตาม และเมื่อเหล็กเสริมในคอนกรีต มีค่า HCP สะสมติดลบน้อยลง ซึ่งจะมีค่า i_{corr} สะสมที่ต่ำลงมาส่วนค่า Weight loss ของเหล็กเสริมในคอนกรีตจะมีแนวโน้มมีค่าน้อยลงตามเช่นกัน

6. กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณสาขาวิชาเทคโนโลยีโครงสร้าง เพื่อสิ่งแวดล้อมสรรค์สร้าง ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ที่ให้การสนับสนุนเงินทุนสำหรับการดำเนินงานวิจัยนี้

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] R.F.M. Bakker, "Initiation period," in *Corrosion of Steel in Concrete*, P. Schiessl, Ed., London, UK: Chapman and Hall, pp. 22-55, 1988.
- [2] A. Benturet *et al.*, "Mechanism of steel corrosion," in *Steel Corrosion in Concrete: Fundamentals and Civil Engineering Practise*, 1st Ed. London, UK: Chapman and Hall, pp. 7-18, 1997.
- [3] L. Bertolini *et al.*, "General aspects," in *Corrosion of Steel in Concrete: Prevention, Diagnosis, Repair*, 2nd Ed. Weinheim, Germany: Wiley-VCH, pp. 71-76, 2013.
- [4] *Standard Test Method for Half-Cell Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete*, ASTM C876-09, 2009.
- [5] C. Andrade *et al.*, "An initial effort to use the corrosion rate measurements for estimating rebar durability," in *Corrosion Rates of Steel in Concrete*, ASTM STP 1065, N. S. Berke *et al.*, Eds. Philadelphia, PA: American Society for Testing and Materials, pp. 29-37, 1990.
- [6] S. Feliú *et al.*, "Electrochemical methods for on-site determinations of corrosion rates of rebars," in *Techniques to Assess the Corrosion Activity of Steel Reinforced Concrete Structures*, ASTM STP 1276, N. S. Berke *et al.*, Eds. Philadelphia, PA: American Society for Testing and Materials, pp. 107-118, 1996.
- [7] *Determining the Effects of Chemical Admixtures on the Corrosion of Embedded Steel Reinforcement in Concrete Exposed to Chloride Environments*, ASTM G109-99a, 1999.
- [8] S.H. Xu and B. Qiu, "Experimental study on fatigue behavior of corroded steel," *Materials Science & Engineering*, no. 584, pp. 163-169, 2013.
- [9] A. J. Al-Tayyib and M. M. Al-Zahrani, "Corrosion of Steel Reinforcement in Polypropylene Fiber Reinforced Concrete Structures," *ACI Materials Journal*, vol. 87, no. 2, pp. 108-113, 1990.
- [10] V. C. O. Pereira *et al.*, "Influence of cement type in reinforcement corrosion of mortars under action of chlorides," *Construction and Building Materials*, vol. 40, pp. 710-718, 2013.
- [11] P.K. Mehta, "Causes of deterioration of concrete in seawater," in *Concrete in the Marine Environment*, 1st Ed., London, UK: Taylor & Francis Ltd., pp. 73-101, 1991.
- [12] D. Cusson and S. Qian, "Ten-Year Field Evaluation of Corrosion-Inhibiting Systems in Concrete Bridge Barrier Walls," *ACI Materials Journal*, vol. 106, no. 3, pp. 291-300, 2009.
- [13] C. M. Hansson *et al.*, "Corrosion of reinforcing bars in concrete." in *Research and Development Information, PCA R&D Serial No. 3013*, Illinois: Portland Cement Association, 2007.
- [14] S. Jenjirapanya and P. Krammart, "A Study on Properties of Cementitious Material Using Industrial Waste," *The Journal of Industrial Technology*, vol. 12, no. 2, pp. 77-86, 2016.

- [15] J. Najarn and P. Krammart, "A Study of Properties of Concrete with Ground Granulated Blast-Furnace Slag," *The RMUTT journal of engineering*, vol. 2, no. 2, pp.47-57, 2012.