

## ผลของสารเชื่อมประสานคอนกรีตกับวัสดุซ่อมแซมคอนกรีตต่อระยะเวลาเริ่มต้นการเกิดรอยร้าว อันเนื่องมาจากการกัดกร่อนของเหล็กเสริม

### Effect of bonding agent between concrete and repair materials on time of initial cracking due to corrosion of the reinforcement

สมเจตน์ เขียวขำ<sup>1,\*</sup> และ วันชัย ยอดสุดใจ<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup> สาขาวิชาเทคโนโลยีโครงสร้างเพื่อสิ่งแวดล้อมสรรค์สร้าง ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพมหานคร

\*Corresponding author; E-mail address: somjate.k@ku.th

#### บทคัดย่อ

บทความนี้มุ่งเน้นการตรวจสอบพฤติกรรมของการเกิดรอยร้าวอันเนื่องมาจากการกัดกร่อนของเหล็กเสริม และเปรียบเทียบประสิทธิภาพของสารเชื่อมประสานระหว่างคอนกรีตกับวัสดุซ่อมแซมที่ส่งผลต่อระยะเวลาเริ่มต้นการเกิดรอยร้าวอันเนื่องมาจากการกัดกร่อนของเหล็กเสริม โดยการจำลองการซ่อมแซมโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กและทดสอบเร่งปฏิกิริยาการกัดกร่อนในครั้งนี้ ใช้วัสดุซ่อมแซมปูนทรายชนิดฉาบซ่อม และสารเชื่อมประสาน ชนิดของเหลวประเภทอีพ็อกซีของยาสังเคราะห์ และสารเชื่อมประสาน ชนิดวัสดุประสาน 2 ส่วนผสม ประเภท Epoxy ไม่มีส่วนผสมของตัวทำละลาย ผลการศึกษาพบว่า พฤติกรรมของการเกิดรอยร้าวอันเนื่องมาจากการกัดกร่อนของเหล็กเสริมของตัวอย่างที่ทำการทดสอบให้ผลแตกต่างกันเมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของสารเชื่อมประสานกับวัสดุซ่อมแซม พบว่าตัวอย่างที่หล่อด้วยวัสดุซ่อมแซมปูนทรายชนิดฉาบซ่อมกับสารเชื่อมประสาน ชนิดวัสดุประสาน 2 ส่วนผสม ประเภท Epoxy ไม่มีส่วนผสมของตัวทำละลายมีระยะเวลาเริ่มต้นการเกิดรอยร้าวช้าที่สุด รองลงมาเป็นตัวอย่างที่หล่อด้วยวัสดุซ่อมแซมปูนทรายชนิดฉาบซ่อมทั้งก่อน และตัวอย่างที่หล่อด้วยวัสดุซ่อมแซมปูนทรายชนิดฉาบซ่อมกับสารเชื่อมประสาน ชนิดของเหลวประเภทอีพ็อกซีของยาสังเคราะห์ ตามลำดับ ส่วนตัวอย่างที่หล่อด้วยวัสดุซ่อมแซมปูนทรายชนิดฉาบซ่อมกับไม่มีสารเชื่อมประสานคอนกรีตจะมีระยะเวลาเริ่มต้นการเกิดรอยร้าวเร็วที่สุด

คำสำคัญ: สารเชื่อมประสานคอนกรีต, วัสดุซ่อมแซมคอนกรีต, การกัดกร่อนของเหล็กเสริม

#### Abstract

This article focuses on examining of behavior of cracks due to corrosion of rebar and comparing performance of the bonding agent between concrete and repair material affecting the initial corrosion cracking time due to reinforcement corrosion. The experiment simulated repairing with reinforced concrete structures and

testing the accelerated corrosion reaction. Testing used repair mortar as the repair materials and latex and epoxy as the bonding agent. The behavior of cracks due to corrosion of the reinforcing steel of the tested samples gave different results. It found that the samples cast with the repair mortar and the epoxy-bonding agent had the slowest initial cracking time when comparing the performance of the bonding agent. The next was the sample cast with a whole specimen of repair mortar material, followed by the samples cast with repair mortar material with latex bonding agent, respectively. The samples cast with repair mortar material without bonding agent have the fastest initial cracking time.

Keywords: bonding agent, concrete repair material, reinforcement corrosion

#### 1. บทนำ

การกัดกร่อนของเหล็กเป็นหนึ่งในกลไกการเสื่อมสภาพที่สำคัญของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก ปัญหาการเสื่อมสภาพจากการกัดกร่อนของเหล็กก่อให้เกิดสนิมในเหล็กเสริมภายในโครงสร้างคอนกรีต ส่งผลให้ความสามารถในการรับกำลังของคอนกรีตเสริมเหล็กลดลง อย่างไรก็ตามโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กก็ยังเป็นโครงสร้างหลักที่นิยมใช้งานอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน เพราะมีความทนทานแข็งแรง สามารถรับน้ำหนักได้มาก มีอายุการใช้งานยาวนาน และมีต้นทุนในการก่อสร้างต่ำ เมื่อเทียบกับโครงสร้างชนิดอื่นๆ ทั้งนี้ ในกรณีเกิดการกัดกร่อนของเหล็กในโครงสร้างคอนกรีตจึงมักทำการสกัดคอนกรีต (Concrete Removal) ที่เสียหายและทำการซ่อมแซมด้วยวิธีการต่างๆ ตามสภาพของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ได้รับ ความเสียหาย [1] เพื่อยืดอายุการใช้งาน

ในการยืดอายุการใช้งานของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ผ่านมา นักวิชาการหลายท่านได้คาดการณ์อายุการใช้งานและทดสอบประสิทธิภาพของโครงสร้างคอนกรีต โดยเสนอแบบจำลองเพื่อคาดการณ์ระยะเวลาของ

การกักต่อนจนก่อให้เกิดรอยร้าวของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยวิธีการต่างๆ เช่น การพัฒนาแบบจำลองทรงกระบอกกลวง (Thick walled cylinder model) เพื่อเปรียบเทียบและหาความสัมพันธ์ของการสูญเสียมวลเหล็กกับแรงดันในแนวรัศมีที่เกิดการขยายตัวของสนิมของเหล็กเสริมในโครงสร้าง โดยใช้กฎของฟาราเดย์ (Faraday's Law) [2] การคาดการณ์ระยะเวลาการเกิดรอยร้าวของคอนกรีตเสริมเหล็กจากค่าความน่าจะเป็นของการเกิดชั้นสนิมบนรอยแตกในชั้นระยะหุ้ม [3] การศึกษาเกี่ยวกับระยะเวลาการเริ่มต้นการเกิดรอยร้าวอันเนื่องมาจากการกักต่อนของเหล็กเสริมที่อยู่ในคอนกรีต มอร์ตาร์ และ ซีเมนต์เพสต์ ในการประเมินอิทธิพลของกำลังรับแรงอัดมวลดูลัสยืดหยุ่น และอัตราการกักต่อนต่อระยะเวลาของการแตกร้าวจากการเกิดการกักต่อนของเหล็กเสริม [4] การทดลองการเร่งการกักต่อนด้วยปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีของแบบจำลองโครงสร้างที่ถูกซ่อมแซมด้วยวัสดุซ่อมแซมคอนกรีต 3 ชนิด คือ คอนกรีต ปูนทรายสูตรพิเศษชนิดฉาบซ่อม (Repair Mortar) และซีเมนต์เกร้าท์ชนิดไม่หดตัว (Non-shrink cement grout) ที่ส่งผลต่อระยะเวลาเริ่มต้นการเกิดรอยร้าวอันเนื่องมาจากการกักต่อนของเหล็กเสริม [5] การวิเคราะห์อิทธิพลของรอยร้าวและระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริมที่มีต่อค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ของเหล็กเสริมในคอนกรีตภายใต้อิทธิพลของคลอรีน [6] เป็นต้น โดยแบบจำลองการคาดการณ์ระยะเวลาของการกักต่อนจนถึงการแตกร้าวแต่ละวิธีให้ประสิทธิผลในการในการยืดอายุการใช้งานของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กได้อย่างสมเหตุสมผล

แม้ว่าในปัจจุบันจะมีศึกษาเกี่ยวกับการคาดการณ์ระยะเวลาในการเริ่มต้นของการกักต่อนจนเกิดการแตกร้าวจากการกักต่อนของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กแล้ว แต่เนื่องจากกลไกการเสื่อมสภาพที่นำไปสู่การกัดกร่อนของเหล็กมีความหลากหลาย ตลอดจนการพัฒนาวัสดุซ่อมแซมและสารเชื่อมประสานคอนกรีตที่มีอยู่ในปัจจุบันมีคุณสมบัติที่เหมาะสมในสภาพการซ่อมแซมที่แตกต่างกันและยังเป็นปัจจัยสำคัญอย่างหนึ่งซึ่งส่งผลต่อการยืดระยะเวลาในการใช้งานของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก

การศึกษานี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อตรวจสอบพฤติกรรมของการเกิดรอยร้าวอันเนื่องมาจากการกักต่อนของเหล็กเสริมที่ใช้สารเชื่อมประสาน (Bonding Agent) ชนิดของเหลวประเภทอิมัลชันของยางสังเคราะห์ (Synthetic Rubber Emulsion) และวัสดุประสาน 2 ส่วนผสม ประเภท Epoxy ไม่มีส่วนผสมของตัวทำละลายกับวัสดุซ่อมแซมปูนทรายชนิดฉาบซ่อม (Repair Mortar) ในการซ่อมแซม และเปรียบเทียบประสิทธิภาพของสารเชื่อมประสาน (Bonding Agent) ชนิดของเหลวประเภทอิมัลชันของยางสังเคราะห์ (Synthetic Rubber Emulsion) และวัสดุประสาน 2 ส่วนผสม ประเภท Epoxy ไม่มีส่วนผสมของตัวทำละลายกับวัสดุซ่อมแซมปูนทรายชนิดฉาบซ่อม (Repair Mortar) ที่ส่งผลต่อระยะเวลาเริ่มต้นการเกิดรอยร้าวอันเนื่องมาจากการกักต่อนของเหล็กเสริม

ซึ่งการศึกษานี้จะช่วยในการประเมินสภาพคอนกรีตและสามารถเลือกวิธีการซ่อมแซมที่ถูกต้องเหมาะสมกับสภาพโครงสร้างคอนกรีตที่เสียหายให้สามารถใช้งานได้ต่อเนื่องยาวนานขึ้น และหากสามารถคาดการณ์ระยะเวลา

ของการกักต่อนจนถึงเวลาที่คอนกรีตหุ้มเหล็กเสริมถูกดันแตกได้จะส่งผลให้สามารถวางแผนซ่อมแซมและบำรุงรักษาได้อย่างเหมาะสมและทันเวลาที่

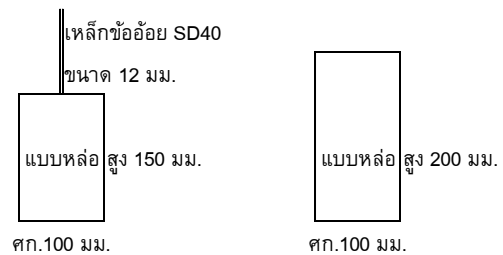
## 2. วิธีดำเนินการ

### 2.1 ตัวอย่างการทดสอบ

ตัวอย่างการทดสอบที่ใช้ในการศึกษานี้ ประกอบด้วย 4 องค์กรประกอบ ได้แก่ แบบหล่อทรงกระบอก เหล็กข้ออ้อย วัสดุทดสอบการเร่งปฏิกิริยาการกักต่อนให้เกิดสนิม และสารเชื่อมประสานคอนกรีต

#### 2.1.1 แบบหล่อทรงกระบอก

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มิลลิเมตร ความสูง 150 มิลลิเมตร สำหรับใช้หล่อตัวอย่างเพื่อเร่งปฏิกิริยาการกักต่อนให้เกิดสนิม และแบบหล่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มิลลิเมตร ความสูง 200 มิลลิเมตร สำหรับทดสอบหาคุณสมบัติของวัสดุซ่อม ดังแสดงในรูปที่ 1



แบบหล่อสำหรับทดสอบเร่งปฏิกิริยาการกักต่อน

แบบหล่อสำหรับทดสอบคุณสมบัติของวัสดุซ่อม

รูปที่ 1 ขนาดของแบบหล่อตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงกระบอก

#### 2.1.2 เหล็กข้ออ้อย

ขนาด 12 มิลลิเมตร โดยตัดยาว 250 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 เหล็กข้ออ้อยขนาด 12 มิลลิเมตร ความยาว 250 มิลลิเมตร

#### 2.1.3 วัสดุทดสอบการเร่งปฏิกิริยาการกักต่อนให้เกิดสนิม

วัสดุทดสอบการเร่งปฏิกิริยาการกักต่อนให้เกิดสนิมที่นำมาใช้ในการศึกษานี้ ได้แก่ ปูนทรายสูตรพิเศษชนิดฉาบซ่อม (Repair Mortar)

### 2.1.4 สารเชื่อมประสานคอนกรีต

สารเชื่อมประสานคอนกรีตที่ใช้ในการทดสอบมี 2 ชนิด ได้แก่

- 1) สารเชื่อมประสาน (Bonding Agent) ชนิดของเหลวประเภทอิมัลชันของยางสังเคราะห์ (Synthetic Rubber Emulsion)
- 2) สารเชื่อมประสาน (Bonding Agent) ชนิดวัสดุประสาน 2 ส่วนผสม ประเภท Epoxy ไม่มีส่วนผสมของตัวทำละลาย

### 2.2 วิธีการทดสอบ

#### 2.2.1 การหล่อส่วนผสมวัสดุซ่อมตัวอย่างและการจำลองการซ่อมแซมโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก

ในการจำลองการซ่อมแซมโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กใช้อัตราส่วนผสมของวัสดุซ่อมแซมที่ใช้ในการหล่อตัวอย่างดังแสดงไว้ในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ปริมาณส่วนผสมวัสดุซ่อมที่ใช้ในการหล่อตัวอย่างคอนกรีต

วัสดุ	ปริมาณส่วนผสมต่อลูกบาศก์เมตร (kg/m <sup>3</sup> )				วัสดุซ่อม
	น้ำ	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	มวลรวมหยาบ	มวลรวมละเอียด	
คอนกรีต	175	390	1,070	800	
ปูนทรายชนิดฉาบซ่อม	422				1,691

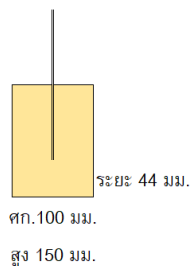
โดยผลการทดสอบกำลังอัดของตัวอย่างวัสดุ 2 ชนิด ได้แก่ คอนกรีต และปูนทรายชนิดฉาบซ่อม ผลที่ได้ดังแสดงไว้ในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 คุณสมบัติของตัวอย่าง (ทรงกระบอก ศก.100 มม. สูง 200 มม.)

ตัวอย่างวัสดุ	แรงอัด (kN)	กำลังรับแรงอัด (kg/cm <sup>2</sup> )	มอดูลัสยืดหยุ่น (kg/cm <sup>2</sup> )
คอนกรีต	195.25	253.49	240,413.83
ปูนทรายชนิดฉาบซ่อม	125.17	162.51	192,492.60

สำหรับการหล่อส่วนผสมวัสดุซ่อมตัวอย่างและการจำลองการซ่อมแซมโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กดำเนินการตามขั้นตอน ดังนี้

- 1) หล่อคอนกรีตลงในแบบหล่อทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มิลลิเมตร สูง 150 มิลลิเมตร ครึ่งก่อนในแนวตั้ง โดยฝังเหล็กข้ออ้อยเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มิลลิเมตร ความยาว 250 มิลลิเมตร ไว้ตรงกึ่งกลางตัวอย่าง ระยะหุ้มเหล็กจากผิวล่างของตัวอย่าง 44 มิลลิเมตร จำนวน 3 ตัวอย่าง ดังแสดงในรูปที่ 3 รอให้คอนกรีตแข็งตัวครบ 24 ชั่วโมง นำออกจากแบบหล่อ แล้วนำไปปรมในอ่างน้ำ 3 วัน แล้วนำขึ้นมาผึ่งให้แห้ง



รูปที่ 3 รูปแบบการฝังเหล็กข้ออ้อยในแบบหล่อ

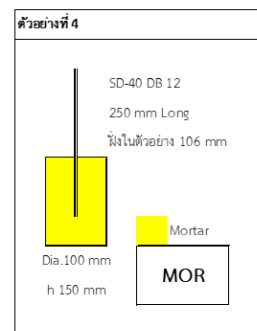
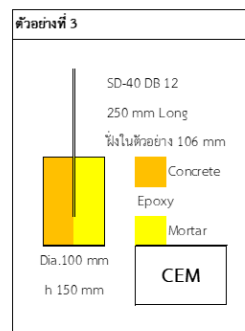
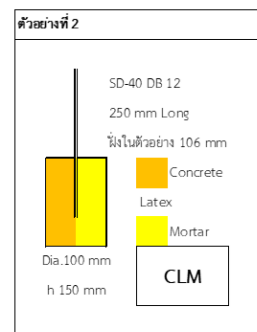
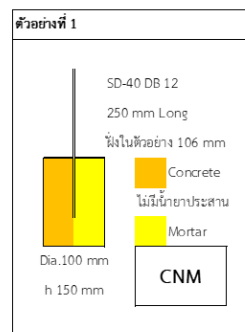
- 2) เมื่อตัวอย่างคอนกรีตแห้งสนิท นำตัวอย่างที่ได้มาทำการจำลองการซ่อมแซมคอนกรีต โดยแบ่งเป็น 4 ตัวอย่าง ดังแสดงในรูปที่ 4 และมีรายละเอียดดังนี้

**ตัวอย่างที่ 1** ใช้วัสดุซ่อมแซมคอนกรีต ปูนทรายสูตรพิเศษชนิดฉาบซ่อม (Repair Mortar) แต่ไม่ใช้สารเชื่อมประสานคอนกรีต

**ตัวอย่างที่ 2** ใช้วัสดุซ่อมแซมคอนกรีต ปูนทรายสูตรพิเศษชนิดฉาบซ่อม (Repair Mortar) และใช้สารเชื่อมประสาน (Bonding Agent) ชนิดของเหลวประเภทอิมัลชันของยางสังเคราะห์ (Synthetic Rubber Emulsion) ทาผิวคอนกรีตก่อนทำการซ่อมแซม

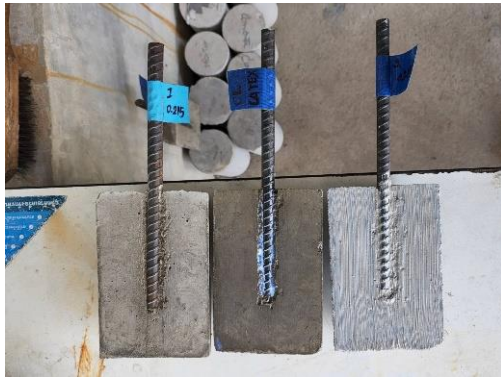
**ตัวอย่างที่ 3** ใช้วัสดุซ่อมแซมคอนกรีต ปูนทรายสูตรพิเศษชนิดฉาบซ่อม (Repair Mortar) และใช้สารเชื่อมประสาน (Bonding Agent) ชนิดวัสดุประสาน 2 ส่วนผสม ประเภท Epoxy ไม่มีส่วนผสมของตัวทำละลายทาผิวคอนกรีตก่อนทำการซ่อมแซม

**ตัวอย่างที่ 4** ใช้วัสดุซ่อมแซมคอนกรีต ปูนทรายสูตรพิเศษชนิดฉาบซ่อม (Repair Mortar) เพียงอย่างเดียว



รูปที่ 4 รูปแบบของตัวอย่างที่ใช้ในการจำลองการซ่อมแซมคอนกรีต

เมื่อทำการทาสารเชื่อมประสานคอนกรีตลงบนผิวคอนกรีต ดังแสดงในรูปที่ 5 และทิ้งไว้ตามระยะเวลาของสารเชื่อมประสานแต่ละชนิดแล้วนำตัวอย่างที่ได้ใส่แบบหล่อและทำการหล่อตัวอย่างอีกครั้งก่อนด้วยปูนทรายสูตรพิเศษชนิดฉาบซ่อม (Repair Mortar) รอให้ปูนทรายแข็งตัวครบ 24 ชั่วโมง นำออกจากแบบหล่อ แล้วนำไปปรมในอ่างน้ำ 28 วัน แล้วนำขึ้นมาผึ่งให้แห้ง ดังแสดงในรูปที่ 6



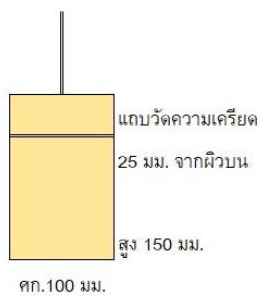
**รูปที่ 5** ตัวอย่างที่ได้หลังจากทาสารเชื่อมประสานคอนกรีต แบบไม่ทาสารเชื่อมประสานคอนกรีต ทาสีสุประสาน 2 ส่วนผสม ประเภท Epoxy ไม่มีส่วนผสมของตัวทำละลาย และทาของเหลวประเภทอีมีลชันของยางสังเคราะห์ (Synthetic Rubber Emulsion) ตามลำดับ (ซ้ายไปขวา)



**รูปที่ 6** ตัวอย่างที่ได้หลังจากทำการจำลองการซ่อมแซม

2.2.2 การทดสอบแรงปฏิบัติการกัดกร่อนให้เกิดสนิม

หลังจากที่บ่มตัวอย่างในน้ำเป็นเวลา 28 วัน นำตัวอย่างมาติดตั้งแถบวัดความเครียด (Strain Gauge) โดยรอบผิวตัวอย่างในตำแหน่งที่ระยะ 25 มิลลิเมตรจากผิวบน ดังแสดงในรูปที่ 7 และรูปที่ 8 เพื่อใช้ในการวัดระยะการขยายตัวของผิวตัวอย่างขณะเร่งปฏิบัติการกัดกร่อนเพื่อให้เกิดสนิมของเหล็กเสริมด้วยไฟฟ้าเคมี



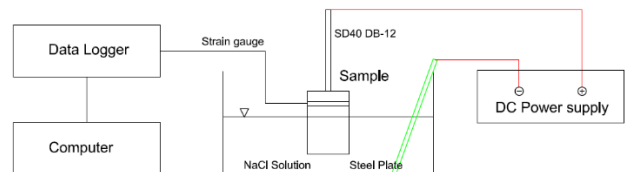
**รูปที่ 7** การติดตั้งแถบวัดความเครียดเพื่อวัดการขยายตัว



การติดแถบวัดความเครียด (Strain gauge)

**รูปที่ 8** ขั้นตอนการติดตั้งแถบวัดความเครียด (Strain gauge)

จากนั้นนำตัวอย่างไปทดสอบการเร่งปฏิบัติการกัดกร่อนเพื่อให้เกิดสนิมในเหล็กเสริม โดยการต่อวงจรกระแสไฟฟ้าความต่างศักย์ 15 โวลต์ จากเครื่องจ่ายไฟฟ้า นำขั้วบวกต่อเข้ากับเหล็กเสริม และขั้วลบต่อเข้ากับแผ่นเหล็ก โดยติดตั้งมัลติมิเตอร์ซึ่งต่อแบบอนุกรมกับวงจรเพื่อเก็บค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ยตลอดการทดสอบ นำตัวอย่างแช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์เข้มข้นร้อยละ 5 โดยมวล ต่อแถบวัดความเครียดที่ติดตั้งบนก้อนตัวอย่างเข้ากับเครื่องเก็บข้อมูล (Data Logger) ซึ่งแปลงสัญญาณเป็นข้อมูลการขยายตัวของตัวอย่างผ่านโปรแกรม DCS 100 A โดยใช้เครื่องคอมพิวเตอร์บันทึกค่ากระแสไฟฟ้าและสังเกตการเกิดรอยร้าวของก้อนตัวอย่างแต่ละก้อน ดังแสดงในรูปที่ 9 และ รูปที่ 10



**รูปที่ 9** วงจรเร่งปฏิบัติการไฟฟ้าเคมี เพื่อเร่งปฏิบัติการกัดกร่อนของเหล็กเสริม



**รูปที่ 10** การทดสอบแรงปฏิบัติการไฟฟ้าเคมีเพื่อเร่งการเกิดสนิมในเหล็กเสริม

ในการทดสอบแรงปฏิบัติการกัดกร่อนให้เกิดสนิมนี้จะพิจารณาระยะเวลาเริ่มต้นการแตกร้าวของคอนกรีต จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับเวลา ที่ได้จากการทดสอบเร่งปฏิบัติการกัดกร่อนให้เกิดสนิม

โดยพิจารณาเวลา ณ จุดที่ความเครียดเริ่มมีค่าเพิ่มขึ้นแบบฉับพลัน หรือจุดที่เริ่มเกิดการเปลี่ยนแปลงความชันของกราฟ

### 3. ผลการทดสอบและวิเคราะห์ผล

#### 3.1 ผลการวิเคราะห์พฤติกรรมของการเกิดรอยร้าวอันเนื่องมาจากการกักกร่อนของเหล็กเสริม

จากการจำลองการซ่อมแซมโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กและการเร่งการกักกร่อนด้วยไฟฟ้า พบว่า การเกิดรอยร้าวอันเนื่องมาจากการกักกร่อนของเหล็กเสริมของตัวอย่าง จำนวน 4 ตัวอย่าง

พฤติกรรมของการเกิดรอยร้าวเร็วที่สุดไปน้อยสุด คือ ตัวอย่างที่ 1 ตัวอย่างที่ 2 ตัวอย่างที่ 4 และตัวอย่างที่ 3 มีระยะเวลาเริ่มต้นการเกิดรอยร้าวที่ 31, 84, 120 และ 180 ชั่วโมง ตามลำดับ ดังแสดงไว้ในตารางที่ 3

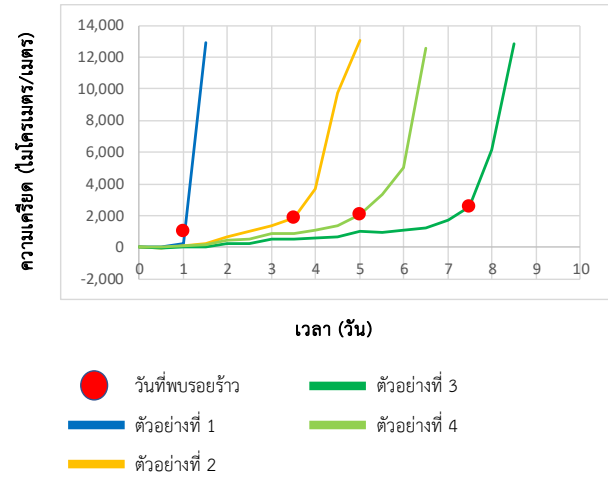
ตารางที่ 3 สรุประยะเวลาเริ่มต้นการแตกร้าวของตัวอย่างทั้ง 4 ตัวอย่าง

ตัวอย่างที่	วัสดุ	ระยะเวลาเริ่มต้นการเกิดรอยร้าว (ชั่วโมง)
1	คอนกรีต+ปูนทรายชนิดฉาบซ่อม	31
2	คอนกรีต+สารเชื่อมประสานชนิดของเหลวประเภทอิมัลชันของยางสังเคราะห์ (Synthetic Rubber Emulsion)+ปูนทรายชนิดฉาบซ่อม	84
3	คอนกรีต+สารเชื่อมประสานชนิดวัสดุประสาน 2 ส่วนผสม ประเภท Epoxy ไม่มีส่วนผสมของตัวทำละลาย+ปูนทรายชนิดฉาบซ่อม	180
4	ปูนทรายชนิดฉาบซ่อม	120

#### 3.2 ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของสารเชื่อมประสานกับวัสดุซ่อมแซมที่ส่งผลกระทบต่อระยะเวลาเริ่มต้นการเกิดรอยร้าวอันเนื่องมาจากการกักกร่อนของเหล็กเสริม

จากผลการวิเคราะห์พฤติกรรมของการเกิดรอยร้าวอันเนื่องมาจากการกักกร่อนของเหล็กเสริม แล้วนำมาเปรียบเทียบประสิทธิภาพของสารเชื่อมประสานกับวัสดุซ่อมแซมที่ส่งผลกระทบต่อระยะเวลาเริ่มต้นการเกิดรอยร้าว พบว่า พฤติกรรมของการเกิดรอยร้าวของตัวอย่างมีระยะเวลาในการเกิดรอยร้าวที่แตกต่างกัน โดยวัสดุซ่อมแซมด้วยปูนทรายชนิดฉาบซ่อมมีสารเชื่อมประสาน (Bonding Agent) ชนิดวัสดุประสาน 2 ส่วนผสม ประเภท Epoxy ไม่มีส่วนผสมของตัวทำละลายเกิดรอยร้าวช้าที่สุด ตามมาด้วยวัสดุซ่อมแซมด้วยปูนทรายชนิดฉาบซ่อม (ไม่มีสารเชื่อม) วัสดุซ่อมแซมด้วยปูนทรายชนิดฉาบซ่อมมีสารเชื่อมประสาน (Bonding Agent) ชนิดของเหลวประเภทอิมัลชันของยางสังเคราะห์ (Synthetic Rubber Emulsion) และวัสดุซ่อมแซมด้วยปูนทรายชนิดฉาบซ่อมไม่มีสารเชื่อมประสาน โดยวัสดุซ่อมแซมด้วยปูนทรายชนิดฉาบซ่อมไม่มีสารเชื่อมประสานมีการขยายตัวก่อนที่จะแตกร้าวที่ความเครียดประมาณ 1,000 ไมโครเมตร/เมตร และ

วัสดุซ่อมแซมด้วยปูนทรายชนิดฉาบซ่อมมีสารเชื่อมประสานมีการขยายตัวก่อนที่จะแตกร้าวที่ความเครียดประมาณ 2,000 ไมโครเมตร/เมตร ดังแสดงในรูปที่ 11



รูปที่ 11 กราฟการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของสารเชื่อมประสานกับวัสดุซ่อมแซมที่ส่งผลกระทบต่อระยะเวลาเริ่มต้นการเกิดรอยร้าวอันเนื่องมาจากการกักกร่อนของเหล็กเสริม

ผลการวิเคราะห์พฤติกรรมของการเกิดรอยร้าวและการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของสารเชื่อมประสานกับวัสดุซ่อมแซมที่ส่งผลกระทบต่อระยะเวลาเริ่มต้นการเกิดรอยร้าวอันเนื่องมาจากการกักกร่อนของเหล็กเสริมดังกล่าวชี้ให้เห็นว่า การซ่อมแซมโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยใช้วัสดุซ่อมแซมคอนกรีต ปูนทรายสูตรพิเศษชนิดฉาบซ่อม (Repair Mortar) และใช้สารเชื่อมประสาน (Bonding Agent) ชนิดวัสดุประสาน 2 ส่วนผสม ประเภท Epoxy ไม่มีส่วนผสมของตัวทำละลายมีประสิทธิภาพในการซ่อมแซมดีกว่า การซ่อมแซมด้วยวัสดุซ่อมแซมด้วยปูนทรายชนิดฉาบซ่อม (ไม่มีสารเชื่อม) และการซ่อมแซมด้วยวัสดุซ่อมแซมคอนกรีต ปูนทรายสูตรพิเศษชนิดฉาบซ่อม (Repair Mortar) กับ สารเชื่อมประสาน (Bonding Agent) ชนิดของเหลวประเภทอิมัลชันของยางสังเคราะห์ (Synthetic Rubber Emulsion)

เมื่อเปรียบเทียบพฤติกรรมของการเกิดรอยร้าวและประสิทธิภาพของสารเชื่อมประสานกับวัสดุซ่อมแซมที่ส่งผลกระทบต่อระยะเวลาเริ่มต้นการเกิดรอยร้าวอันเนื่องมาจากการกักกร่อนของเหล็กเสริมกับทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง พบว่า ประสิทธิภาพของสารเชื่อมประสานจะส่งผลให้พฤติกรรมของการเกิดรอยร้าวของวัสดุซ่อมแซมคอนกรีต ปูนทรายสูตรพิเศษชนิดฉาบซ่อม (Repair Mortar) ช้าลง ดังนั้น การใช้สารเชื่อมประสานในการซ่อมแซมคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยวัสดุซ่อมแซมคอนกรีต ปูนทรายสูตรพิเศษชนิดฉาบซ่อม (Repair Mortar) มีประสิทธิภาพมากขึ้น

### 4. บทสรุป

การซ่อมแซมโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยใช้สารเชื่อมประสาน (Bonding Agent) ชนิดวัสดุประสาน 2 ส่วนผสม ประเภท Epoxy ไม่มี

ส่วนผสมของตัวทำละลายทาผิวคอนกรีตก่อนใช้วัสดุซ่อมแซมคอนกรีต ปูนทรายสูตรพิเศษชนิดฉาบซ่อม มีประสิทธิภาพในการซ่อมแซมดีกว่าการซ่อมแซมด้วยการใช้วัสดุซ่อมฉาบโดยไม่มีการซ่อม และดีกว่าการซ่อมแซมด้วยวัสดุซ่อมแซมคอนกรีต ปูนทรายสูตรพิเศษชนิดฉาบซ่อม (Repair Mortar) กับสารเชื่อมประสาน (Bonding Agent) ชนิดของเหลวประเภทอิมัลชันของยางสังเคราะห์ (Synthetic Rubber Emulsion) ตามลำดับสำหรับการซ่อมโดยไม่มีการใช้วัสดุเชื่อมประสานเลยมีประสิทธิภาพน้อยที่สุด

## เอกสารอ้างอิง

- [1] กรมโยธาธิการและผังเมือง. 2551. *มาตรฐานปฏิบัติในการซ่อมแซมคอนกรีต (พิมพ์ครั้งที่ 1)*. สำนักวิศวกรรมโครงสร้างและงานระบบ กรมโยธาธิการและผังเมือง.
- [2] El Maaddawy, T., & Soudki, K. (2007). A model for prediction of time from corrosion initiation to corrosion cracking. *Cement and concrete composites*, 29(3), 168-175.
- [3] Lu, C., Jin, W., & Liu, R. (2011). Reinforcement corrosion-induced cover cracking and its time prediction for reinforced concrete structures. *Corrosion Science*, 53(4), 1337-1347.
- [4] วันชัย ยอดสุดใจ และคณะ. (2558). การศึกษาทดลองระยะเวลาเริ่มต้นการเกิดรอยร้าวอันเนื่องมาจากการกัดกร่อนของเหล็กเสริมที่อยู่ในคอนกรีต มอร์ตาร์ และซีเมนต์เพสต์. *วารสารวิชาการสมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย, พ.ศ.2558*, หน้า 17-23.
- [5] พลพันธ์ เศรษฐพิทยากุล. (2559). *อิทธิพลของคุณสมบัติของวัสดุซ่อมแซมคอนกรีตต่อระยะเวลาเริ่มต้นการเกิดรอยร้าวอันเนื่องมาจากการกัดกร่อนของเหล็กเสริม*. วิทยานิพนธ์ ระดับปริญญาโท มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพมหานคร.
- [6] ประมินทร์ บุญยะเดช. (2562) *อิทธิพลของรอยร้าวและระยะหุ้มเหล็กเสริมที่มีต่อค่าศักยภาพไฟฟ้าครึ่งเซลล์ของเหล็กเสริมในคอนกรีตภายใต้อิทธิพลของคลอรีน*. วิทยานิพนธ์ ระดับปริญญาโท มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพมหานคร.