

## บทคัดย่อ

ปัญหาสำคัญอันหนึ่งของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก ที่ก่อสร้างใกล้บริเวณชายฝั่งทะเล คือการเกิดสนิมในเหล็กเสริม กระบวนการเกิดสนิมนี้เกิดจากปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างเหล็กเสริมกับไอทะเลซึ่งสารประกอบคลอไรด์ ขณะที่เหล็กเสริมเกิดสนิมจะเกิดอาการบวมและดันให้คอนกรีตที่ผิวเกิดรอยแตกร้าวและในที่สุดเกิดการหลุดร่อน ทำให้โครงสร้างสูญเสียความสามารถในการรับกำลังของโครงสร้างประเภทนั้นๆไป วัตถุประสงค์ของการศึกษา 1) เพื่อศึกษากำลังรับแรงดัดของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก (ค.ส.ล.) เมื่อเหล็กเสริมหลักและเหล็กปลอกเกิดสนิม 2) เพื่อเปรียบเทียบกำลังรับแรงดัดของคานในสถานะแวดล้อมเกลือคลอไรด์ เทียบกับในสถานะแวดล้อมปกติ 3) เพื่อศึกษาเปรียบเทียบกำลังรับแรงดัดที่ได้จากการทดสอบและการคำนวณ ตัวอย่างคาน ค.ส.ล. ที่ใช้ในการทดลองเป็นคานช่วงเดียวจำนวน 3 ชุด ชุดแรกมีขนาดหน้าตัด 150x250 มิลลิเมตร ยาว 1200 มิลลิเมตร ชุดสองขนาดหน้าตัด 200x400 มิลลิเมตร ยาว 2400 มิลลิเมตร ชุดสามขนาดหน้าตัด 250x500 มิลลิเมตร ยาว 2400 มิลลิเมตร เมื่อผ่านกระบวนการเร่งปฏิกิริยาสนิมจนน้ำหนักของเหล็กเสริมในคานลดลงถึงค่าที่กำหนดไว้ 3 ระดับคือระดับต่ำ ระดับปานกลาง และระดับรุนแรง โดยใช้น้ำหนักเหล็กเสริมที่สูญเสียไป 15% 30% และ 50% ของน้ำหนักเหล็กเสริมเริ่มต้นเป็นตัวกำหนดความเสียหายตามลำดับ ทำการทดสอบกำลังรับแรงดัดของคานเปรียบเทียบระหว่างคานที่เหล็กเสริมเกิดสนิมเนื่องจากกระบวนการเร่งปฏิกิริยาสนิมกับคานที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการเร่งปฏิกิริยาสนิม (คานควบคุม) ผลการทดสอบพบว่าคาน ค.ส.ล. ที่สูญเสียเหล็กเสริมเนื่องจากการเร่งปฏิกิริยาสนิมจะมีกำลังรับแรงดัดลดลงขึ้นอยู่กับระดับการสูญเสียเหล็กเสริมที่เกิดในเหล็กเสริม เมื่อเหล็กเสริมเกิดสนิมมากขึ้นกำลังรับแรงดัดของคานจะลดลงมากขึ้นด้วย สำหรับคานชุดที่ 1 (หน้าตัดขนาดเล็ก) พฤติกรรมการวิบัติของคาน ค.ส.ล. ที่เหล็กเสริมเกิดสนิมไม่แตกต่างจากคานควบคุม ซึ่งยังคงแสดงพฤติกรรมการวิบัติแบบเหนียว อย่างไรก็ตามสำหรับคานหน้าตัดใหญ่ขึ้น (ชุด 2 และชุด 3) เมื่อเหล็กเสริมเกิดสนิมในระดับปานกลางถึงรุนแรงจะแสดงพฤติกรรมการพังแบบเปราะเมื่อรับแรง และมีระยะการแอ่นตัวลดลงอย่างมากเมื่อเทียบกับคานควบคุม นอกจากนี้ลักษณะรอยร้าวที่เกิดขึ้นกับคานที่เหล็กเสริมเกิดสนิมในระดับปานกลางและสูงมีขนาดใหญ่และกว้างมากกว่าคานที่เหล็กเสริมเกิดสนิมในระดับต่ำ ค่ากำลังรับโมเมนต์ของหน้าตัดคานที่ได้จากการทดสอบมีค่ามากกว่าค่าโมเมนต์ระบุที่ได้จากการคำนวณด้วยสมการตาม ACI-318 ประมาณ 30% ถึง 56% ยกเว้นคาน B2E50

คำสำคัญ : คานคอนกรีตเสริมเหล็ก (คาน ค.ส.ล.), เหล็กเสริมเกิดสนิม, กำลังรับแรงดัด

## กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัย เรื่องผลของการเกิดสนิมในเหล็กเสริมต่อพฤติกรรมการรับแรงของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ก่อสร้างบริเวณชายฝั่งทะเล ได้รับทุนสนับสนุนโครงการวิจัย ประจำปีงบประมาณ 2557 จาก สำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษาผู้วิจัยขอขอบคุณมา ณ. ที่นี้

## สารบัญ

|                                                                    | หน้า |
|--------------------------------------------------------------------|------|
| บทคัดย่อ                                                           | ก    |
| กิตติกรรมประกาศ                                                    | ข    |
| สารบัญ                                                             | ค    |
| สารบัญตาราง                                                        | ฉ    |
| สารบัญรูป                                                          | ช    |
| <b>บทที่ 1 บทนำ</b>                                                |      |
| 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา                                 | 1    |
| 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย                                        | 2    |
| 1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย                                          | 2    |
| 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ                                      | 2    |
| <b>บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง</b>                       |      |
| 2.1 การเสื่อมสภาพของคอนกรีต                                        | 3    |
| 2.2 การเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีต                              | 3    |
| 2.3 ผลกระทบของการเกิดสนิมในเหล็กเสริมต่อโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก | 4    |
| 2.4 การเร่งปฏิกิริยาการเกิดสนิมในเหล็กเสริม                        | 6    |
| 2.5 ลักษณะการวิบัติของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก                         | 8    |
| 2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง                                          | 9    |

### **บทที่ 3 วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการทดลอง**

|                                                  |    |
|--------------------------------------------------|----|
| 3.1 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง                        | 11 |
| 3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง                      | 15 |
| 3.3 การเตรียมตัวอย่างคาน ค.ส.ล. ที่ใช้ในการศึกษา | 17 |
| 3.4 การเตรียมวัสดุที่ใช้การทดสอบ                 | 19 |
| 3.5 การหล่อคานคอนกรีตเสริมเหล็ก                  | 20 |
| 3.6 การบ่มคอนกรีต                                | 21 |

### **บทที่ 4 ผลการเร่งปฏิกิริยาสนิมในเหล็กเสริมของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก**

|                                                                                                       |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 4.1 กระบวนการเร่งปฏิกิริยาสนิมในเหล็กเสริมของคาน ค.ส.ล.                                               | 23 |
| 4.2 การคำนวณค่าน้ำหนักเหล็กที่สูญเสียจากกระบวนการเร่งปฏิกิริยาสนิม                                    | 25 |
| 4.3 ผลการเร่งปฏิกิริยาสนิมในตัวอย่างคานคอนกรีตเสริมเหล็ก<br>ที่ระดับความเสียหายต่ำ ปานกลาง และ รุนแรง | 28 |
| 4.4 การซ่อมแซมคานคอนกรีตที่แตกร้าวเนื่องจากการเร่งปฏิกิริยาสนิมในเหล็กเสริม                           | 33 |

### **บทที่ 5 ผลการทดสอบกำลังรับแรงดัดคาน**

|                                                                                          |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 5.1 การทดสอบการรับกำลังดัดของคานคอนกรีต<br>ด้วยวิธีวิธี Third-Point Loading (ASTM C1609) | 35 |
| 5.2 ผลการทดสอบคานคอนกรีตเสริมเหล็กชุดที่ 1<br>หน้าตัดคาน 15x25 ซม. ยาว 140 ซม.           | 38 |
| 5.3 ผลการทดสอบคานคอนกรีตเสริมเหล็กชุดที่ 2<br>หน้าตัดคาน 20x40 ซม. ยาว 240 ซม.           | 42 |
| 5.4 ผลการทดสอบคานคอนกรีตเสริมเหล็กชุดที่ 3                                               |    |

|                                                                                                         |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| หน้าตัดคาน 25x50 ซม. ยาว 240 ซม.                                                                        | 46 |
| บทที่ 6 สรุปผลการศึกษา                                                                                  | 50 |
| เอกสารอ้างอิง                                                                                           | 51 |
| ภาคผนวก: แผ่น poster งานประชุมวิชาการ HERP3                                                             | 53 |
| ผลของการเกิดสนิมในเหล็กเสริมต่อพฤติกรรมการรับแรงของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก<br>ที่ก่อสร้างบริเวณชายฝั่งทะเล |    |

## สารบัญตาราง

|                                                                              | หน้า |
|------------------------------------------------------------------------------|------|
| ตารางที่ 3.1 ขนาดคละของหิน                                                   | 11   |
| ตารางที่ 3.2 ขนาดคละของทราย                                                  | 13   |
| ตารางที่ 3.3 จำนวนตัวอย่างคาน ค.ส.ล. ที่ใช้ในการศึกษา                        | 19   |
| ตารางที่ 3.4 อัตราส่วนผสมคอนกรีต                                             | 20   |
| ตารางที่ 4.1 ค่าเฉลี่ยน้ำหนักที่สูญเสียจากการเร่งปฏิกิริยาสนิมของคาน ค.ส.ล.  | 28   |
| ตารางที่ 5.1 การเปรียบเทียบค่าการสูญเสียน้ำหนักเหล็กและค่าโมเมนต์ของคานทดสอบ | 49   |

## สารบัญรูป

|                                                                                              | หน้า |
|----------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| รูปที่ 2.1 การเกิดแรงดึงในคอนกรีตบริเวณที่เหล็กเสริมเกิดสนิม                                 | 5    |
| รูปที่ 2.2 การแตกร้าวของคาน ค.ส.ล.                                                           | 6    |
| รูปที่ 2.3 การเกิดกระบวนการ Electrolysis of Molten NaCl                                      | 6    |
| รูปที่ 3.1 ร้อยละสะสมที่ผ่านบนตะแกรงขนาดต่าง ๆ ของหิน<br>เทียบกับขนาดผลตามมาตรฐาน ASTM C 33  | 12   |
| รูปที่ 3.2 ร้อยละสะสมที่ผ่านบนตะแกรงขนาดต่าง ๆ ของทราย<br>เทียบกับขนาดผลตามมาตรฐาน ASTM C 33 | 14   |
| รูปที่ 3.3 อุปกรณ์วัดการยึดตัวของวัสดุที่ใช้ในการทดลอง                                       | 14   |
| รูปที่ 3.4 ซีเมนต์พิเศษให้กำลังอัดสูงและไม่หดตัว SikaGrout -212-11                           | 15   |
| รูปที่ 3.5 แบบหล่อขึ้นตัวอย่าง                                                               | 15   |
| รูปที่ 3.6 เครื่องควบคุมกระแสไฟฟ้าและกระจายกระแสไฟฟ้าเพื่อเร่งปฏิกิริยาสนิม                  | 16   |
| รูปที่ 3.7 อุปกรณ์วัดค่ากระแสไฟฟ้า                                                           | 16   |
| รูปที่ 3.8 หน้าตัดคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ใช้เป็นคานชุดที่ 1, 2, และ 3                        | 18   |
| รูปที่ 3.9 เหล็กเสริมที่ใช้ในการหล่อตัวอย่างคาน ค.ส.ล.                                       | 20   |
| รูปที่ 3.10 การเข้าแบบเหล็กและวิธีการหล่อคาน                                                 | 21   |
| รูปที่ 3.11 การบ่มคานคอนกรีต                                                                 | 22   |
| รูปที่ 4.1 การเร่งปฏิกิริยาสนิมคาน ค.ส.ล.ในบ่อ และเครื่องควบคุมกระแสไฟฟ้าคงที่               | 24   |
| รูปที่ 4.2 การประมาณค่าด้วยวิธีสี่เหลี่ยมคางหมู                                              | 26   |
| รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณกระแสไฟฟ้ากับระยะเวลา<br>สำหรับตัวอย่างคาน ค.ส.ล.        | 27   |

|                                                                      |    |
|----------------------------------------------------------------------|----|
| รูปที่ 4.4 รอยร้าวที่เกิดขึ้นของคานค.ส.ล. ที่ความเสียหายระดับต่ำ     | 30 |
| รูปที่ 4.5 รอยร้าวที่เกิดขึ้นของคานค.ส.ล. ที่ความเสียหายระดับปานกลาง | 31 |
| รูปที่ 4.6 รอยร้าวที่เกิดขึ้นของคานค.ส.ล. ที่ความเสียหายระดับรุนแรง  | 32 |
| รูปที่ 4.7 การซ่อมแซมคาน ค.ส.ล. ที่เสียหายในขั้นรุนแรง               | 34 |
| รูปที่ 5.1 การติดตั้งอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบคาน                      |    |
| ไดอะแกรมแรงเฉือนและไดอะแกรมโมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้นบนคาน                | 36 |
| รูปที่ 5.2 การติดตั้งอุปกรณ์และการทดสอบคาน ค.ส.ล.                    | 37 |
| รูปที่ 5.3 พฤติกรรมการรับแรงดัดคานชุดที่ 1                           | 38 |
| รูปที่ 5.4 ลักษณะการวิบัติของคาน B1, B1E15, B1E50                    | 41 |
| รูปที่ 5.5 พฤติกรรมการรับแรงดัดคานชุดที่ 2                           | 42 |
| รูปที่ 5.6 ลักษณะการวิบัติของคาน B2, B2E15                           | 44 |
| รูปที่ 5.7 ลักษณะการวิบัติของคาน B2E30, B2E50                        | 45 |
| รูปที่ 5.8 พฤติกรรมการรับแรงดัดคานชุดที่ 3                           | 46 |
| รูปที่ 5.9 ลักษณะการวิบัติของคาน B2E30, B2E50                        | 48 |