



# วิทยานิพนธ์

การศึกษาการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในจีโอโพลิเมอร์

คอนกรีตเสริมเหล็ก

**EXPERIMENTAL STUDY ON CORROSION OF STEEL BAR  
IN GEOPOLYMER REINFORCED CONCRETE**

นายสรายุทธ ยอดมณี

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

พ.ศ. 2551



## ใบรับรองวิทยานิพนธ์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา)

ปริญญา

วิศวกรรมโยธา

สาขา

วิศวกรรมโยธา

ภาควิชา

เรื่อง การศึกษาการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตเสริมเหล็ก

Experimental Study on Corrosion of Steel Bar in Geopolymer Reinforced Concrete

نامผู้วิจัย นายสรวิทย์ ขอดมุณี

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

( ผู้ช่วยศาสตราจารย์วันชัย ขอดสุใจ, D.Eng. )

หัวหน้าภาควิชา

( รองศาสตราจารย์ก่อโชค จันทรวงูร, Ph.D. )

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

( รองศาสตราจารย์กัญญา วีระกุล, D.Agr. )

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ ..... เดือน ..... พ.ศ. ....

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การศึกษาการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตเสริมเหล็ก

Experimental Study on Corrosion of Steel Bar in Geopolymer Reinforced Concrete

โดย

นายสรายุทธ ขอดมณี

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา)

พ.ศ. 2551

สราวุฒิ ขอดมุณี 2551: การศึกษาการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในจีโอโพลิเมอร์  
คอนกรีตเสริมเหล็ก ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา)  
สาขาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก:  
ผู้ช่วยศาสตราจารย์วันชัย ขอดสุใจ, D.Eng. 161 หน้า

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในจีโอโพลิเมอร์  
คอนกรีตเสริมเหล็ก โดยศึกษาอัตราส่วน  $Na_2O.SiO_3 / NaOH$  ที่เหมาะสมในการทำจีโอโพลิเมอร์  
คอนกรีต การกักกร่อนของเหล็กเสริม กำลังการยึดเหนี่ยว และพฤติกรรมการรับแรงดัดเมื่อเกิด  
การกักกร่อนของเหล็กเสริมในจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตเสริมเหล็ก ซึ่งใช้อัตราส่วน  $Na_2O.SiO_3 / NaOH$   
เท่ากับ 0.7-1.6 โดยน้ำหนัก และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์มีความเข้มข้น 14 โมลาร์  
อุณหภูมิในการบ่มที่ 65 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ทุกอัตราส่วนผสม

ผลการศึกษาพบว่าอัตราส่วน  $Na_2O.SiO_3 / NaOH$  ที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้กำลังรับแรงอัด  
เพิ่มขึ้นแต่ความสามารถทำงานได้ลดน้อยลง ซึ่งอัตราส่วน  $Na_2O.SiO_3 / NaOH$  ระหว่าง 0.9-1.3  
โดยน้ำหนัก ให้ผลกำลังรับแรงอัดเฉลี่ยสูงสุดที่อายุ 28 วัน และเป็นอัตราส่วนที่เหมาะสมในการ  
ทำจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต สำหรับอัตราส่วน  $Na_2O.SiO_3 / NaOH$  ที่เพิ่มขึ้นมีผลกระทบต่อ  
การกักกร่อนของเหล็กเสริมที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้กำลังยึดเหนี่ยวของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตต่อเหล็ก  
เสริมลดลง เมื่อเปรียบเทียบระหว่างจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตกับคอนกรีตควบคุมพบว่ากำลังยึด  
เหนี่ยวของเหล็กเสริมในจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตมีค่ามากกว่ากำลังยึดเหนี่ยวของเหล็กเสริมใน  
คอนกรีตควบคุมในทุกอัตราส่วนผสม นอกจากนี้กำลังรับแรงดัดของคานจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต  
เสริมเหล็กและคานคอนกรีตเสริมเหล็กมีค่าความต้านทานลดน้อยลงเนื่องจากการกักกร่อนของ  
เหล็กเสริม และคานจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตเสริมเหล็กมีอัตราการกักกร่อนของเหล็กเสริมมากกว่า  
คานคอนกรีตเสริมเหล็กควบคุม

Sarawut Yodmune 2008: Experimental Study on Corrosion of Steel Bar in Geopolymer Reinforced Concrete. Master of Engineering (Civil Engineering), Major Field: Civil Engineering, Department of Civil Engineering. Thesis Advisor: Assistant Professor Wanchai Yodsudjai, D.Eng. 161 pages.

The purpose of this research is to study corrosion of steel bar in geopolymer reinforced concrete. The optimum  $Na_2O.SiO_3 / NaOH$  ratio, corrosion of reinforcement, bond strength and flexural behavior of geopolymer reinforced concrete beam are studied. The  $Na_2O.SiO_3 / NaOH$  ratio for the mix proportion of geopolymer concrete varies from 0.7 to 1.6 by weight and the concentration of the sodium hydroxide solution is 14 molar and the geopolymer concrete is cured at 65°C for 24 hours.

It is found that the compressive strength increases as the  $Na_2O.SiO_3 / NaOH$  ratio increases; however, the workability decreases as the  $Na_2O.SiO_3 / NaOH$  increases. The optimum  $Na_2O.SiO_3 / NaOH$  by weight ratio varies from 0.9 to 1.3 and with these ratios the average maximum compressive strength at 28 days is attained. There is an influence of  $Na_2O.SiO_3 / NaOH$  ratio on the corrosion of rebar in geopolymer reinforced concrete. The bond strength of corroded steel bar in geopolymer reinforced concrete decreases as the  $Na_2O.SiO_3 / NaOH$  ratio increases. In addition it is found that the bond strength between rebar and geopolymer concrete is higher than that of between rebar and control concrete in every mix proportions. The flexural capacity of geopolymer reinforced concrete beam decreases as the degree of rebar corrosion increases. It is also found that the geopolymer reinforced concrete beam has a higher corrosion rate than that of control reinforced concrete.

---

Student's signature

---

Thesis Advisor's signature

## กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วันชัย ขอดสุดใจ ประธานกรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำปรึกษาในการเรียน การค้นคว้าวิจัย ตลอดจนการแก้ไขวิทยานิพนธ์จนกระทั่งเสร็จสมบูรณ์ กราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.สุธาริน สถาปิตานนท์ และอาจารย์ ดร.วิวัฒน์ แสงเทียน ที่ได้ให้ความกรุณาตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์ให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมโยธาทุกท่าน ที่ได้อบรมสั่งสอนและมอบความรู้อันเป็นประโยชน์อย่างยิ่งในการนำไปใช้ประโยชน์ต่อไป และขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ประจำห้องปฏิบัติการวิศวกรรมโยธาและเจ้าหน้าที่ภาควิชาวิศวกรรมโยธาทุกท่าน ที่ได้ให้ความช่วยเหลือและคำแนะนำต่างๆ

ขอขอบคุณสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) บริษัทปูนซีเมนต์นครหลวงจำกัด (มหาชน) ที่ให้การสนับสนุนเงินทุนวิจัย และขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน มหาวิทยาลัยสุรธรรมภูมิ ศูนย์นนทบุรี ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์เครื่องมือทดสอบ

ด้วยความดีหรือประโยชน์อันใดเนื่องจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ขอมอบแด่คุณพ่อ คุณแม่ ที่ได้อบรมและให้กำลังใจผู้วิจัยมาตลอดในทุกเรื่อง

สราวุฒิ ขอดมุณี

พฤษภาคม 2551

## สารบัญ

### หน้า

|                                                             |     |
|-------------------------------------------------------------|-----|
| สารบัญ                                                      | (1) |
| สารบัญตาราง                                                 | (2) |
| สารบัญภาพ                                                   | (5) |
| คำนำ                                                        | 1   |
| วัตถุประสงค์                                                | 3   |
| การตรวจเอกสาร                                               | 4   |
| อุปกรณ์และวิธีการ                                           | 24  |
| อุปกรณ์                                                     | 24  |
| วิธีการ                                                     | 25  |
| ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง                                      | 45  |
| สรุปและข้อเสนอแนะ                                           | 90  |
| สรุป                                                        | 90  |
| ข้อเสนอแนะ                                                  | 92  |
| เอกสารและสิ่งอ้างอิง                                        | 93  |
| ภาคผนวก                                                     | 97  |
| ภาคผนวก ก กำลังรับแรงอัด                                    | 98  |
| ภาคผนวก ข การก่อตัวของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต                  | 114 |
| ภาคผนวก ค การซึมผ่านของสารละลายโซเดียมคลอไรด์               | 120 |
| ภาคผนวก ง ความกว้างของรอยร้าว                               | 122 |
| ภาคผนวก จ ความต่างศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์                      | 124 |
| ภาคผนวก ฉ การสูญเสียพื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริม             | 133 |
| ภาคผนวก ช กำลังการยึดเหนี่ยวของเหล็กเสริม                   | 136 |
| ภาคผนวก ซ น้ำหนักบรรทุก การ โกงตัวและการยึดตัวของเหล็กเสริม | 138 |
| ประวัติการศึกษาและการทำงาน                                  | 161 |

## สารบัญตาราง

| ตารางที่ |                                                                            | หน้า |
|----------|----------------------------------------------------------------------------|------|
| 1        | องค์ประกอบทางเคมีของเก้าอี้หนัง                                            | 25   |
| 2        | คุณสมบัติของเหล็กเสริม                                                     | 25   |
| 3        | อัตราส่วนผสมจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต                                           | 26   |
| 4        | ส่วนผสมคอนกรีตต่อปริมาตร 1 ลูกบาศก์เมตร                                    | 27   |
| 5        | โมดูลัสยืดหยุ่น                                                            | 49   |
| 6        | เปรียบเทียบค่าโมดูลัสการยืดหยุ่นจากการทดสอบกับสมการที่ 7 และสมการที่ 8     | 50   |
| 7        | กำลังรับแรงดึง                                                             | 51   |
| 8        | ค่าความต่างศักย์ของไฟฟ้าครึ่งเซลล์และความน่าจะเป็นของการกัดกร่อน ASTM C876 | 51   |
| 9        | การวิเคราะห์การรับแรงค้ำของคานาจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตและคานาคอนกรีตควบคุม    | 72   |

## ตารางผนวกที่

|     |                                                                        |     |
|-----|------------------------------------------------------------------------|-----|
| ก1  | กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต $Na_2O.SiO_3 / NaOH$ เท่ากับ 0.7 | 99  |
| ก2  | กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต $Na_2O.SiO_3 / NaOH$ เท่ากับ 0.8 | 100 |
| ก3  | กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต $Na_2O.SiO_3 / NaOH$ เท่ากับ 0.9 | 101 |
| ก4  | กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต $Na_2O.SiO_3 / NaOH$ เท่ากับ 1.0 | 102 |
| ก5  | กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต $Na_2O.SiO_3 / NaOH$ เท่ากับ 1.1 | 103 |
| ก6  | กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต $Na_2O.SiO_3 / NaOH$ เท่ากับ 1.2 | 104 |
| ก7  | กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต $Na_2O.SiO_3 / NaOH$ เท่ากับ 1.3 | 105 |
| ก8  | กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต $Na_2O.SiO_3 / NaOH$ เท่ากับ 1.4 | 106 |
| ก9  | กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต $Na_2O.SiO_3 / NaOH$ เท่ากับ 1.5 | 107 |
| ก10 | กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต $Na_2O.SiO_3 / NaOH$ เท่ากับ 1.6 | 108 |
| ก11 | กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่อายุ 1 วัน                                  | 109 |



## สารบัญตาราง (ต่อ)

| ตารางผนวกที่ |                                                                        | หน้า |
|--------------|------------------------------------------------------------------------|------|
| ก12          | กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่อายุ 3 วัน                                  | 110  |
| ก13          | กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่อายุ 7 วัน                                  | 111  |
| ก14          | กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่อายุ 14 วัน                                 | 112  |
| ก15          | กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน                                 | 113  |
| ข1           | การก่อตัวของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต อัตราส่วน $Na_2O.SiO_3 / NaOH = 0.7$  | 115  |
| ข2           | การก่อตัวของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต อัตราส่วน $Na_2O.SiO_3 / NaOH = 0.8$  | 115  |
| ข3           | การก่อตัวของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต อัตราส่วน $Na_2O.SiO_3 / NaOH = 0.9$  | 116  |
| ข4           | การก่อตัวของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต อัตราส่วน $Na_2O.SiO_3 / NaOH = 1.0$  | 116  |
| ข5           | การก่อตัวของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต อัตราส่วน $Na_2O.SiO_3 / NaOH = 1.1$  | 117  |
| ข6           | การก่อตัวของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต อัตราส่วน $Na_2O.SiO_3 / NaOH = 1.2$  | 117  |
| ข7           | การก่อตัวของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต อัตราส่วน $Na_2O.SiO_3 / NaOH = 1.3$  | 118  |
| ข8           | การก่อตัวของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต อัตราส่วน $Na_2O.SiO_3 / NaOH = 1.4$  | 118  |
| ข9           | การก่อตัวของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต อัตราส่วน $Na_2O.SiO_3 / NaOH = 1.5$  | 119  |
| ข10          | การก่อตัวของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต อัตราส่วน $Na_2O.SiO_3 / NaOH = 1.6$  | 119  |
| ค1           | การซึมผ่านของสารละลายโซเดียมคลอไรด์                                    | 121  |
| ง1           | ความกว้างของรอยร้าว                                                    | 123  |
| จ1           | ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ของคานาจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต GB0.7-W     | 125  |
| จ2           | ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ของคานาจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต GB1.0-W     | 126  |
| จ3           | ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ของคานาจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต GB1.3-W     | 127  |
| จ4           | ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ของคานาคอนกรีต CC7-W                    | 128  |
| จ5           | ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ของคานาจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต GB0.7-NaCl  | 129  |
| จ6           | ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ของคานาจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต GB1.0 -NaCl | 130  |
| จ7           | ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ของคานาจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต GB1.3-NaCl  | 131  |
| จ8           | ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ของคานาจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต CC-NaCl     | 132  |
| ฉ1           | การสูญเสียพื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริมของคานตัวอย่างแช่ในน้ำธรรมดา      | 134  |

## สารบัญตาราง (ต่อ)

| ตารางผนวกที่                                                                          | หน้า |
|---------------------------------------------------------------------------------------|------|
| ฉ2      การสูญเสียพื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริมของคานตัวอย่างแซในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ | 135  |
| ช1      กำลังการยึดเหนี่ยวของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตและคอนกรีตควบคุม                     | 137  |
| ช1      น้ำหนักบรรทุก การ โกงตัวและการยึดตัวของเหล็กเสริม GB0.7-C                     | 139  |
| ช2      น้ำหนักบรรทุก การ โกงตัวและการยึดตัวของเหล็กเสริม GB0.7-W                     | 141  |
| ช3      น้ำหนักบรรทุก การ โกงตัวและการยึดตัวของเหล็กเสริม GB0.7-NaCl                  | 143  |
| ช4      น้ำหนักบรรทุก การ โกงตัวและการยึดตัวของเหล็กเสริม GB1.0-C                     | 145  |
| ช5      น้ำหนักบรรทุก การ โกงตัวและการยึดตัวของเหล็กเสริม GB1.0-W                     | 147  |
| ช6      น้ำหนักบรรทุก การ โกงตัวและการยึดตัวของเหล็กเสริม GB1.0-NaCl                  | 149  |
| ช7      น้ำหนักบรรทุก การ โกงตัวและการยึดตัวของเหล็กเสริม GB1.3-C                     | 151  |
| ช8      น้ำหนักบรรทุก การ โกงตัวและการยึดตัวของเหล็กเสริม GB1.3-W                     | 152  |
| ช9      น้ำหนักบรรทุก การ โกงตัวและการยึดตัวของเหล็กเสริม GB1.3-NaCl                  | 154  |
| ช10     น้ำหนักบรรทุก การ โกงตัวและการยึดตัวของเหล็กเสริม CC-C                        | 155  |
| ช11     น้ำหนักบรรทุก การ โกงตัวและการยึดตัวของเหล็กเสริม CC-W                        | 157  |
| ช12     น้ำหนักบรรทุก การ โกงตัวและการยึดตัวของเหล็กเสริม CC-NaCl                     | 159  |

## สารบัญภาพ

| ภาพที่ |                                                                    | หน้า |
|--------|--------------------------------------------------------------------|------|
| 1      | โครงสร้างของสารจีโอโพลิเมอร์หรือโพลิไซอะเลต                        | 7    |
| 2      | โครงสร้างจุลภาคจีโอโพลิเมอร์                                       | 8    |
| 3      | ความเสียหายของโครงสร้างคอนกรีตเนื่องจากการเกิดสนิมของเหล็กเสริม    | 12   |
| 4      | แบบจำลองการกัดกร่อนของเหล็กเสริม                                   | 13   |
| 5      | ปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าของการกัดกร่อนของเหล็กเสริมในคอนกรีตจากคลอไรด์   | 14   |
| 6      | กลไกการเกิดสนิมของเหล็กเสริม                                       | 16   |
| 7      | โครงสร้างคอนกรีตที่สภาวะเปียกสลับแห้งด้วยน้ำทะเล                   | 18   |
| 8      | Bond stress-slip model                                             | 19   |
| 9      | การแตกร้าวของคอนกรีตเนื่องจากแรงกดอัด                              | 20   |
| 10     | ความเค้นและความเครียดบนหน้าตัดคานภายใต้แรงอัด                      | 22   |
| 11     | รูปร่างและขนาดเหล็กเสริม                                           | 27   |
| 12     | วัสดุผสมจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต                                       | 28   |
| 13     | การผสมจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต                                         | 29   |
| 14     | การผสมคอนกรีตควบคุม                                                | 29   |
| 15     | ตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต                                       | 30   |
| 16     | ตัวอย่างคอนกรีตควบคุม                                              | 30   |
| 17     | จีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่เสียบเหล็กเสริมบริเวณกลางตัวอย่าง           | 31   |
| 18     | คอนกรีตควบคุมที่เสียบเหล็กเสริมบริเวณกลางตัวอย่าง                  | 31   |
| 19     | การบ่มจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต                                         | 32   |
| 20     | ตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตหลังจากการบ่ม และเก็บไว้ในอุณหภูมิปกติ | 32   |
| 21     | กระสอบเปียกน้ำคลุมตัวอย่างคอนกรีตควบคุม เพื่อป้องกันการระเหยของน้ำ | 33   |
| 22     | การบ่มตัวอย่างคอนกรีตควบคุมด้วยน้ำ                                 | 33   |
| 23     | การเร่งการเกิดสนิมของเหล็กเสริมด้วยศักย์ไฟฟ้า 6 โวลต์              | 34   |
| 24     | การวัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ตัวอย่างรูปทรงกระบอก          | 34   |
| 25     | การทดสอบการกำลังยึดเหนี่ยว                                         | 35   |

## สารบัญภาพ (ต่อ)

| ภาพที่ |                                                                                                                            | หน้า |
|--------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 26     | การลดลงของพื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริมเนื่องจากการเกิดสนิมของ<br>ตัวอย่างรูปทรงกระบอก                                       | 36   |
| 27     | ผลกระทบของคลอไรด์ไอออน                                                                                                     | 36   |
| 28     | แบบหล่อและเหล็กเสริม                                                                                                       | 38   |
| 29     | ตัวอย่างคานจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต                                                                                            | 38   |
| 30     | ตัวอย่างคานคอนกรีตควบคุม                                                                                                   | 39   |
| 31     | กระสอบเปียกน้ำคลุมตัวอย่างคานคอนกรีตควบคุม เพื่อป้องกันการระเหย<br>ของน้ำ                                                  | 39   |
| 32     | การบ่มคานจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต                                                                                              | 40   |
| 33     | การบ่มคานคอนกรีตควบคุม                                                                                                     | 40   |
| 34     | ตัวอย่างคานจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตและคานคอนกรีตควบคุมหลังจาก<br>การบ่มและเก็บไว้ในอุณหภูมิปกติ                                | 41   |
| 35     | การวัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ตัวอย่างรูปคาน                                                                        | 42   |
| 36     | การทดสอบกำลังรับแรงดัดของตัวอย่างคานจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต<br>และคานคอนกรีตควบคุม                                            | 43   |
| 37     | การลดลงของพื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริมเนื่องจากการเกิดสนิมของ<br>ตัวอย่างรูปคาน                                             | 43   |
| 38     | กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต                                                                                      | 46   |
| 39     | อัตราส่วน $Na_2O.SiO_3 / NaOH$ ต่อกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต                                                    | 46   |
| 40     | ระยะเวลาการก่อตัวของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต                                                                                   | 47   |
| 41     | อัตราส่วน $Na_2O.SiO_3 / NaOH$ ของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตต่อแรง<br>ต้านทานการกด                                               | 48   |
| 42     | ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์                                                                                            | 52   |
| 43     | ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ของคานคอนกรีตควบคุมและ<br>คานจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตอัตราส่วน $Na_2O.SiO_3 / NaOH$ เท่ากับ 1.0 | 53   |
| 44     | รอยร้าวของคานจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตเนื่องจากการเกิดสนิมของเหล็กเสริม                                                         | 54   |

## สารบัญภาพ (ต่อ)

| ภาพที่ |                                                                                                                                                        | หน้า |
|--------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 45     | ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ของคานาจิโอโพลิเมอร์คอนกรีตแช่น้ำและเร่งการเกิดสนิม และแช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์และเร่งการเกิดสนิมเป็นระยะเวลา 28 วัน | 55   |
| 46     | อัตราส่วน $Na_2O.SiO_3 / NaOH$ ต่อการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริม                                                                                       | 56   |
| 47     | การกัดกร่อนของเหล็กเสริม                                                                                                                               | 56   |
| 48     | ความลึกการซึมผ่านของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ของคอนกรีตควบคุมและจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตอัตราส่วน $Na_2O.SiO_3 / NaOH$ เท่ากับ 1.0                            | 57   |
| 49     | ความลึกการซึมผ่านของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ในจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต                                                                                       | 58   |
| 50     | กำลังการยึดเหนี่ยวของคอนกรีตควบคุมและจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตอัตราส่วน $Na_2O.SiO_3 / NaOH$ เท่ากับ 1.0                                                    | 59   |
| 51     | กำลังการยึดเหนี่ยวของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต                                                                                                              | 60   |
| 52     | กำลังต้านทานโมเมนต์ดัดและค่าความโค้ง                                                                                                                   | 64   |
| 53     | การเกิดสนิมของเหล็กเสริมของคานาจิโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่ระยะเวลา 28 วัน                                                                                  | 65   |
| 54     | ความกว้างของรอยร้าวคานาจิโอโพลิเมอร์คอนกรีตแช่น้ำและเร่งการเกิดสนิมและในสารละลายโซเดียมคลอไรด์และเร่งการเกิดสนิม เป็นระยะเวลา 28 วัน                   | 66   |
| 55     | การวิบัติของคานาจิโอโพลิเมอร์คอนกรีต 0.7-C                                                                                                             | 68   |
| 56     | การวิบัติของคานาจิโอโพลิเมอร์คอนกรีต 0.7-W                                                                                                             | 68   |
| 57     | การวิบัติของคานาจิโอโพลิเมอร์คอนกรีต 0.7-NaCl                                                                                                          | 68   |
| 58     | การวิบัติของคานาจิโอโพลิเมอร์คอนกรีต 1.0-C                                                                                                             | 68   |
| 59     | การวิบัติของคานาจิโอโพลิเมอร์คอนกรีต 1.0-W                                                                                                             | 69   |
| 60     | การวิบัติของคานาจิโอโพลิเมอร์คอนกรีต 1.0-NaCl                                                                                                          | 69   |
| 61     | การวิบัติของคานาจิโอโพลิเมอร์คอนกรีต 1.3-W                                                                                                             | 69   |
| 62     | การวิบัติของคานาจิโอโพลิเมอร์คอนกรีต 1.3-NaCl                                                                                                          | 69   |
| 63     | การวิบัติของคานาจิโอโพลิเมอร์คอนกรีต 1.3-C                                                                                                             | 70   |
| 64     | การวิบัติของคานาจิโอโพลิเมอร์คอนกรีต CC-C                                                                                                              | 70   |
| 65     | การวิบัติของคานาจิโอโพลิเมอร์คอนกรีต CC-W                                                                                                              | 70   |

### สารบัญภาพ (ต่อ)

| ภาพที่ |                                                                                                                                                   | หน้า |
|--------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 66     | การวัดดัชนีของคานคอนกรีต CC-NaCl                                                                                                                  | 70   |
| 67     | กำลังต้านทานโมเมนต์คัตและค่าความโค้งของคานจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต<br>อัตราส่วน $Na_2O.SiO_3 / NaOH$ เท่ากับ 0.7                                      | 75   |
| 68     | กำลังต้านทานโมเมนต์คัตและค่าความโค้งของคานจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต<br>อัตราส่วน $Na_2O.SiO_3 / NaOH$ เท่ากับ 1.0                                      | 76   |
| 69     | กำลังต้านทานโมเมนต์คัตและค่าความโค้งของคานจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต<br>อัตราส่วน $Na_2O.SiO_3 / NaOH$ เท่ากับ 1.3                                      | 77   |
| 70     | กำลังต้านทานโมเมนต์คัตและค่าความโค้งของคานคอนกรีตควบคุม                                                                                           | 78   |
| 71     | เปรียบเทียบกำลังต้านทานโมเมนต์คัตสูงสุดของคานคอนกรีตควบคุม<br>และคานจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตอัตราส่วน $Na_2O.SiO_3 / NaOH$ เท่ากับ 1.0                | 79   |
| 72     | กำลังต้านทานโมเมนต์คัตสูงสุดของคานจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต                                                                                            | 80   |
| 73     | การโก่งตัวและน้ำหนักบรรทุกของคานจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต GB0.7                                                                                        | 81   |
| 74     | การโก่งตัวและน้ำหนักบรรทุกของคานจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต GB1.0                                                                                        | 82   |
| 75     | การโก่งตัวและน้ำหนักบรรทุกของคานจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต GB1.3                                                                                        | 88   |
| 76     | การโก่งตัวและน้ำหนักบรรทุกของคานคอนกรีตควบคุม CC                                                                                                  | 84   |
| 77     | สัมประสิทธิ์การเสื่อมสภาพความแข็งแรงหรือค่าสตีเฟนสของ<br>คานคอนกรีตควบคุมและคานจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต<br>อัตราส่วน $Na_2O.SiO_3 / NaOH$ เท่ากับ 1.0 | 86   |
| 78     | สัมประสิทธิ์การเสื่อมสภาพความแข็งแรงหรือค่าสตีเฟนสของคาน<br>จีโอโพลิเมอร์คอนกรีต                                                                  | 87   |
| 79     | สัมประสิทธิ์การเสื่อมสภาพการรับแรงคัตของคานคอนกรีตควบคุม<br>และคานจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตอัตราส่วน $Na_2O.SiO_3 / NaOH$ เท่ากับ 1.0                  | 88   |
| 80     | สัมประสิทธิ์การเสื่อมสภาพการรับแรงคัตของคานจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต                                                                                   | 89   |

## การศึกษาการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตเสริมเหล็ก

### Experimental Study on Corrosion of Steel Bar in Geopolymer Reinforced Concrete

#### คำนำ

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นวัสดุเชื่อมประสานที่ใช้กันมากในการก่อสร้าง โดยเฉพาะโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก แต่เป็นที่ทราบกันคืออยู่แล้วว่าการผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ทำให้เกิดก๊าซที่มีผลต่อภาวะเรือนกระจก (Greenhouse effect) ดังนั้นจึงมีความพยายามจะใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ให้น้อยลง ในปัจจุบันได้มีความพยายามที่จะพัฒนาสารซีเมนต์ที่ไม่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ขึ้น โดยใช้สารปอซโซลานประกอบด้วยสารซิลิกาและอลูมินาเป็นองค์ประกอบในการทำวัสดุซีเมนต์ที่เรียกว่า จีโอโพลิเมอร์ (Geopolymer) จีโอโพลิเมอร์เป็นวัสดุเชื่อมประสานที่สามารถใช้แทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ได้ โดยใช้หลักการของการทำปฏิกิริยาระหว่างซิลิกอน (Si) และอลูมิเนียม (Al) กับสารอัลคาไลที่เป็นด่างสูงและใช้ความร้อนในการกระตุ้นปฏิกิริยาโพลิคอนเดนเซชัน (Polycondensation)

การใช้จีโอโพลิเมอร์แทนที่ซีเมนต์เพสต์ในการผลิตคอนกรีต โดยผสมจีโอโพลิเมอร์รวมกับมวลรวมละเอียดและมวลรวมหยาบตลอดจนสารผสมเพิ่มอื่นๆ เรียกว่า จีโอโพลิเมอร์คอนกรีต (Geopolymer concrete) การผลิตจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตนี้อาจเป็นเทคโนโลยีผลิตคอนกรีตที่สามารถนำมาทดแทนการผลิตคอนกรีตด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ได้ในอนาคต แต่การที่จะนำจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตมาใช้ทดแทนคอนกรีตซึ่งมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องทำการศึกษาคุณสมบัติทางวิศวกรรมของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต ได้แก่ กำลังและคุณสมบัติทางด้านความทนทานซึ่งเป็นคุณสมบัติที่สำคัญสำหรับโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กโดยทั่วไป

ความทนทานของคอนกรีต คือ ความสามารถในการทนต่อสภาพการทำลายทั้งทางเคมีและทางกล คอนกรีตที่ดีต้องมีกำลังตามต้องการและทนต่อสภาพดินฟ้าอากาศหรือสภาวะแวดล้อมตลอดอายุการใช้งานโดยยังสามารถคงรูปร่าง คุณภาพ คุณสมบัติ และการใช้งานได้ดีเช่นเดิม หากคอนกรีตไม่มีความต้านทานหรือมีความต้านทานน้อย โครงสร้างคอนกรีตจะเสื่อมสภาพก่อนเวลาอันสมควร สาเหตุทางเคมีที่ทำลายคอนกรีตในระหว่างการใช้งาน ได้แก่ การซึมผ่านของ

คลอไรด์ การเกิดคาร์บอนเนชั่น การทำลายจากซัลเฟต การกัดกร่อนของกรด และปฏิกิริยาอัลคาไลซิลิกา ส่วนสาเหตุทางกลที่ทำให้คอนกรีตเสียหาย ได้แก่ การกระแทก การขีดสี การกัดเซาะ และการสึกกร่อน เป็นต้น

การป้องกันการเสื่อมสภาพของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก สามารถกระทำได้ โดยการปรับปรุงคุณภาพคอนกรีตและเหล็กเสริม การปรับปรุงคุณภาพคอนกรีตอาจทำได้ โดยการใช้สารปอซโซลานและสารเคมีผสมเพิ่ม การเกิดสนิมของเหล็กเสริมเป็นปัญหาของการเสื่อมสภาพของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก ผลกระทบโดยรวมของการเกิดสนิมของเหล็ก คือ กำลังรับแรงของโครงสร้างลดลงเนื่องจากพื้นที่หน้าตัดเหล็กลดลง เกิดการแตกร้าวและหลุดออกของคอนกรีตหุ้มภายนอก ซึ่งจะส่งผลให้เกิดความเสียหายต่อโครงสร้างมากยิ่งขึ้นและทำให้อายุการใช้งานของโครงสร้างลดลง

ปัญหาการเสื่อมสภาพของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ใช้คอนกรีตธรรมดาและคอนกรีตพิเศษชนิดต่างๆ ได้มีการศึกษาอย่างกว้างขวางทั้งในและต่างประเทศ แต่การศึกษาการเสื่อมสภาพของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ใช้จีโอโพลิเมอร์คอนกรีตยังไม่มีการศึกษาอย่างแพร่หลายมากนักโดยเฉพาะอย่างยิ่งในประเทศไทยซึ่งยังไม่มีศึกษาด้านนี้เลย ดังนั้นถ้าหากต้องการนำจีโอโพลิเมอร์มาทดแทนซีเมนต์เพื่อนำมาใช้ในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก การศึกษาปัญหาการเสื่อมสภาพของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตเสริมเหล็กโดยเฉพาะการเกิดสนิมของเหล็กเสริมจึงเป็นสิ่งที่มีความจำเป็นอย่างยิ่ง



## วัตถุประสงค์

1. ศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมสำหรับจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต
2. ศึกษาการกักกร่อนของเหล็กเสริมในจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตเสริมเหล็กและคอนกรีตเสริมเหล็กควบคุม
3. ศึกษาการย่นการยืดเหนียวของเหล็กเสริมในจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตและคอนกรีตควบคุม
4. ศึกษาพฤติกรรมการรับแรงคดเมื่อเหล็กเสริมเกิดการกักกร่อนในคานจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตเสริมเหล็กและคานคอนกรีตเสริมเหล็กควบคุม

## ขอบเขตการศึกษา

การศึกษาวิจัยนี้จะคำนึงถึงการกักกร่อนของเหล็กเสริม ซึ่งพบมากในอาคาร โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กโดยทั่วไป และการวิจัยนี้ทดสอบการเกิดสนิมในจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตเสริมเหล็กด้วยการเร่งการเกิดสนิมด้วยวิธีการทางไฟฟ้าซึ่งพฤติกรรมอาจจะแตกต่างจากสภาพจริงเนื่องจากความจำกัดในด้านระยะเวลา

## ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

การศึกษาวิจัยนี้จะประโยชน์ในการตัดสินใจที่จะนำจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตมาใช้ในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก เพื่อที่จะทราบความคงทน อายุการใช้งานของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตเปรียบเทียบกับคอนกรีตทั่วไป ช่วยในการวางแผนการบำรุงรักษาและซ่อมแซมโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ใช้จีโอโพลิเมอร์คอนกรีตในการก่อสร้างได้ถูกต้อง นอกจากนี้งานวิจัยยังสามารถใช้เป็นฐานข้อมูลที่เป็นต่อไปเพื่อเป็นแนวทางในการผลิตจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตตลอดจนการใช้เถาถิ่นหินในประเทศไทยให้เกิดประโยชน์สูงสุด

## การตรวจเอกสาร

คอนกรีตเป็นวัสดุที่นิยมใช้กันมากในการก่อสร้าง ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นองค์ประกอบที่สำคัญของคอนกรีตเพราะเป็นวัสดุเชื่อมประสานส่วนผสมอื่น ปูนซีเมนต์ที่ได้มาจากการเผาที่ประกอบด้วย ซิลิกา อลูมินา และแคลเซียมออกไซด์เป็นหลัก อุณหภูมิประมาณ 1400 - 1600 องศาเซลเซียส กระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จึงใช้พลังงานสูงมากตั้งแต่การระเบิดวัสดุ การย่อย การลำเลียง การเผา จนถึง การบดละเอียด

การผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ทำให้เกิดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สู่บรรยากาศซึ่งมีผลทำให้เกิดภาวะเรือนกระจก (Greenhouse effect) ถึงปีละ 135,000 ล้านตัน หรือประมาณร้อยละ 7 ของก๊าซที่ปล่อยออกมาทั้งหมด (Malhotra, 2002; McCaffrey, 2002) และในปัจจุบันโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กทั่วไปนิยมใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นวัสดุเชื่อมประสานในการก่อสร้าง และมีปริมาณการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ดังนั้นจึงควรลดปริมาณการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ลง โดยพยายามหาสารซีเมนต์อื่นมาใช้แทน มีการวิจัยที่จะนำวัสดุเหลือทิ้งจากภาคอุตสาหกรรม เกษตรกรรม และจากธรรมชาติมาผสมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เพื่อทำปูนซีเมนต์ผสม เพื่อลดการใช้ปริมาณปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ซึ่งวัสดุที่ใช้ผสมเป็นวัสดุปอซโซลาน (Pozzolanic materials) ที่ไม่มีคุณสมบัติเป็นวัสดุประสาน แต่เมื่อผสมกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Calcium hydroxide) จะสามารถก่อตัวและแข็งตัวได้ สารปอซโซลานที่ใช้กันมาก ได้แก่ เถ้าลอย (Fly ash) นอกจากนี้ยังมีเถ้าแกลบ (Rice husk ash) ดินขาว (Metakaolin) และเถ้าภูเขาไฟ (Volcanic ash) ซึ่งคุณสมบัติด้านความคงทนของคอนกรีตที่ทำจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมสารปอซโซลานส่วนใหญ่จะดีขึ้น (Mehta, 2002)

## จีโอโพลิเมอร์

การผลิตคอนกรีตโดยไม่ใช้ปูนซีเมนต์เป็นส่วนผสม โดยใช้วัสดุปอซโซลานที่ประกอบด้วยสารซิลิกา ( $\text{SiO}_2$ ) และอลูมินา ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) ในการทำวัสดุซีเมนต์ที่เรียกว่าจีโอโพลิเมอร์ (Geopolymer) จากการทำปฏิกิริยาระหว่างซิลิกอน (Si) และอลูมิเนียม (Al) ให้เป็นโมเลกุลลูกโซ่ในลักษณะของโพลิเมอร์ (Polymer) ดังสมการที่ 1 (Davidovits, 1999)

$$M_n [-(Si-O_2)_z - Al-O_2]_n \cdot wH_2O \quad (1)$$

|     |     |                                                                |
|-----|-----|----------------------------------------------------------------|
| โดย | $M$ | เป็นธาตุอัลคาไล                                                |
| -   |     | การยึดเกาะ (bound)                                             |
| $z$ |     | จำนวนโมเลกุลของ $Si-O_2$ เท่ากับ 1, 2 หรือ 3                   |
| $N$ |     | ปริมาณ โมเลกุลของการทำโมเลกุลลูกโซ่ (degree of polymerization) |
| $w$ |     | จำนวนโมเลกุลของน้ำ                                             |

การทำปฏิกิริยาลูกโซ่ของ  $Si$  และ  $Al$  จะใช้สารละลายที่เป็นด่างสูงและใช้ความร้อนเป็นตัวกระตุ้น

พบว่าสามารถใช้เถาถ่านหินที่ได้จากการเผาถ่านหินที่มีองค์ประกอบของซิลิกาและอลูมินาในการทำจีโอโพลิเมอร์ที่สามารถรับแรงได้ดีเช่นเดียวกับการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (Swanepoel and Strydom, 2002) โดยการผสมเถาถ่านหินกับสารเร่งปฏิกิริยา (Activator) และใช้ความร้อนในช่วง 60-90 องศาเซลเซียส ในการเร่งปฏิกิริยา สารเร่งที่ใช้เป็นพวกอัลคาไลไฮดรอกไซด์ (Alkali hydroxide) และอัลคาไลซิลิเกต (Alkali silicate)

สารจีโอโพลิเมอร์ (Geopolymers) หรือเรียกอีกอย่างว่า โพลีไซอะเลตส์ (Polysialates) เป็นสารประเภทหนึ่งของวัสดุอะลูมิโนซิลิเกต (Aluminosilicate) (Davidovits, 1999; Van et. al., 2002) ที่ไม่มีรูปพรรณสัณฐานที่แน่นอนประกอบกันขึ้นที่อุณหภูมิปกติหรือสูงกว่า จีโอโพลิเมอร์ประกอบด้วยหน่วยเชื่อมขวาง (Cross-linked units) ของเตตระไฮดรอล (Tetrahedral) ของ  $AlO_4$  และ  $SiO_4$  ที่มีประจุลบที่มีความสมดุล (Charge balancing cations) ซึ่งได้มาจากประจุของโลหะอัลคาไล เช่น  $Li^+$ ,  $Na^+$  และ  $K^+$  สารจีโอโพลิเมอร์จึงทำมาจากสารอลูมินาและซิลิกาที่ว่องไวต่อการทำปฏิกิริยา และใช้สารละลายของอัลคัลไล (Aqueous alkaline, MOH) โดย  $M$  คือ อัลคัลไล สารจีโอโพลิเมอร์เกิดจากการก่อตัวโดยปฏิกิริยาที่ไม่รุนแรงทำให้องค์ประกอบของเถาถ่านหินรวมตัวกัน และสารประกอบอื่นต่อปฏิกิริยาเกิดการอัดตัวทำให้แข็งแรง คล้ายกันกับการเกิดแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH)

## ปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์

สารจีโอโพลิเมอร์เป็นสารจำพวกอลูมิโนซิลิเกต (Aluminosilicate) ที่มีรูปร่างอสัณฐาน ไม่นั่นอนเป็นส่วนประกอบของสารลักษณะอสัณฐาน (Amorphous) และสารกึ่งผลึก (Semi-crystalline) สารตั้งต้นในการทำจีโอโพลิเมอร์จึงเป็นสารประกอบที่มีอลูมินาและซิลิกาที่ไวต่อการทำปฏิกิริยา เมื่อผสมสารละลายของอัลคาไลสามารถทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิปกติหรืออุณหภูมิสูงกว่า สามารถก่อตัวและให้กำลังรับแรงได้ดี ปฏิกิริยานี้ทำให้เกิดความร้อนเช่นเดียวกับปฏิกิริยาของปูนซีเมนต์กับน้ำ ปฏิกิริยาของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตสามารถแบ่งได้เป็น 2 ชั้น ดังนี้

### การชะละลาย

ถ้าลอยเมื่อผสมกับสารละลายที่มีความเป็นด่างสูง เช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์จะเกิดการชะละลายของสารประกอบต่างๆ โดยอลูมินา (Al) และซิลิกอน (Si) จะถูกชะละลายออกมาเนื่องจากเป็นสารหลัก เมื่อเกิดการชะละลายมากขึ้นส่วนหนึ่งของเกล็ดลอยจะถูกทำลายที่ผิว ทำให้เกิดเป็นช่องที่ผิวและสารละลายจะสามารถเข้าไปทำปฏิกิริยาได้ง่ายขึ้น

### การทำปฏิกิริยาถูกโซ่

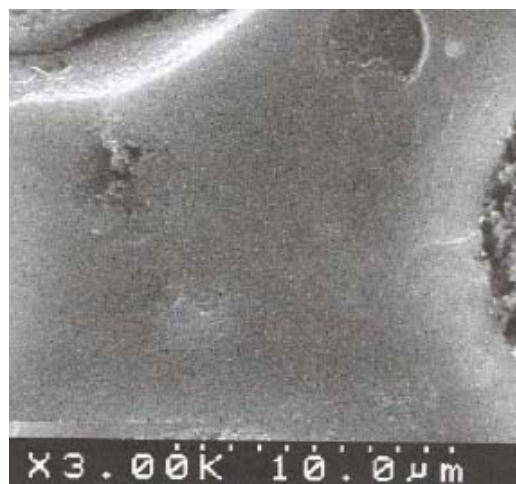
ผลผลิตของปฏิกิริยาเบื้องต้นเป็นหน่วยปิรามิดสามเหลี่ยมด้านเท่าสี่ด้านของ  $Si^{4+}$  และ  $Al^{3+}$  ที่เกิดโคออร์ดิเนตแบบ 4 แขน กับออกซิเจน หน่วยเหล่านี้จะกระจายตัวอยู่ในลักษณะของโพลิเมอร์ที่เชื่อมขวางกัน ในช่วงต้นจะได้หน่วยที่กึ่งเสถียร (Meta-stable) ซึ่งจะมีปริมาณ Al สูง เมื่อเกิดปฏิกิริยามากขึ้นหน่วยดังกล่าวจะเปลี่ยนไปเป็นหน่วยที่มี Si มากขึ้น โครงสร้างหลักจึงประกอบไปด้วย ปิรามิดสามเหลี่ยมด้านเท่าสี่ด้าน สอง สาม และสี่หน่วย ได้แก่ โพลีไฮอะเลต (Polysialate, PS) โพลีไฮอะเลตซิลอกโซ (Polysialate siloxo, PSS) และโพลีไฮอะเลตไดซิลอกโซ (Polysialate disiloxo, PSDS) ตามลำดับ ดังภาพที่ 1 ปริมาณของ  $SiO_4$  เพิ่มขึ้นจากหนึ่งเป็นสามหน่วย เมื่อปฏิกิริยาเกิดมากขึ้นการเชื่อมโยงของโพลิเมอร์ที่เชื่อมขวางกันก็จะเกิดมากขึ้น และหนาแน่นมากขึ้นทำให้เกิดโครงสร้างที่แน่นและสามารถรับแรงได้



จากปริมาณของสารละลายไม่เพียงพอหรือไม่ทั่วถึง และเมื่อปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นเม็ดลอยบางส่วนที่ยังไม่ทำปฏิกิริยาหรือทำปฏิกิริยาไม่หมดจะถูกผนวกและกลายเป็นส่วนหนึ่งของเนื้ออีโพอลิเมอร์ เม็ดลอยกลวงเมื่อทำปฏิกิริยาจะมีโพรงเหลืออยู่ดังภาพที่ 2ค และภาพที่ 2ง โพรงส่วนหนึ่งจึงมาจากฟองอากาศที่หลงเหลืออยู่ อีกส่วนหนึ่งมาจากโพรงภายในเม็ดลอยที่เป็นซินสเฟียร์และพลีโรสเฟียร์



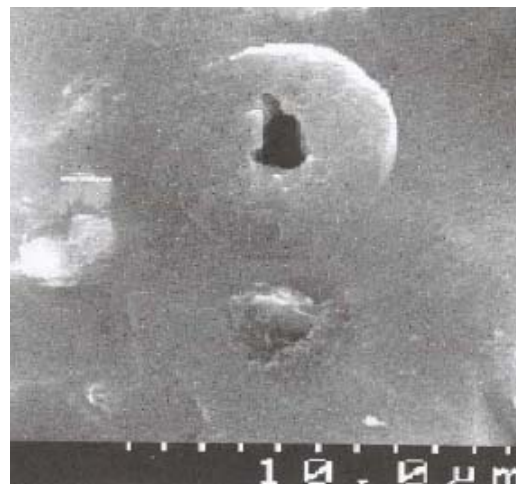
ภาพที่ ก โครงสร้างทั่วไป



ภาพที่ ข เม็ดลอยที่ทำปฏิกิริยาเกือบสมบูรณ์



ภาพที่ ค โพรงเม็ดลอยกลวงขนาดใหญ่



ภาพที่ ง โพรงจากเม็ดลอยกลวงขนาดเล็ก

ภาพที่ 2 โครงสร้างจุลภาคอีโพอลิเมอร์

ที่มา: ปริญญา (2548)

## คุณสมบัติของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้า และจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต

### ความสามารถทำงานได้ของจีโอโพลิเมอร์

ความสามารถทำงานได้ของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าและจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารละลาย  $NaOH$  และอัตราส่วนของสารละลาย  $Na_2SiO_3$  ซึ่งความเข้มข้นของสารละลาย  $NaOH$  ที่เพิ่มขึ้นทำให้มีความต้องการน้ำเพิ่มเพื่อควบคุมให้ส่วนผสมมีความสามารถทำงานได้ที่เท่ากัน และที่อัตราส่วนของสารละลาย  $Na_2SiO_3 / NaOH$  ต่ำความสามารถทำงานได้ของจีโอโพลิเมอร์จะค่อนข้างดี การเพิ่มของอัตราส่วนของสารละลาย  $Na_2SiO_3 / NaOH$  ทำให้ค่าการไหลแผ่ลดลง

การเพิ่มความสามารถทำงานได้ของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าและจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตสามารถทำได้โดยการเพิ่มปริมาณน้ำทั้งนี้จะทำให้กำลังรับแรงลดลง การเพิ่มความสามารถทำงานได้ของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าและจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตสามารถทำได้โดยการใส่สารลดน้ำพิเศษในปริมาณที่มากซึ่งจะส่งผลทำให้กำลังรับแรงอัดลดลงค่อนข้างมาก (Hardjito et al., 2004)

### กำลังรับแรงอัด

กำลังรับแรงของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าและจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจะมีค่ากำลังรับแรงอัดมากหรือน้อยนั้น ขึ้นอยู่กับอัตราส่วนผสมและการบ่มจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตเป็นหลัก ซึ่งจากการทดสอบจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตรูปทรงกระบอกขนาด  $100 \times 200$  มิลลิเมตร ทำการบ่มที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง และบ่มที่อุณหภูมิห้อง ค่ากำลังรับแรงอัดเฉลี่ยระหว่าง 40-100 เมกะปาสกาล ในขณะที่การผลิตจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าจากดินขาวเผามีกำลังรับแรงอัดสูงสุดถึง 71 เมกะปาสกาล

การผลิตจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าถ่านหินสามารถทำมอร์ต้าที่รับกำลังได้ถึง 62 เมกะปาสกาล (ปริญญา และคณะ, 2548) และในการทดสอบจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าสามารถแข็งตัวได้อย่างเร็วในอุณหภูมิห้องมีกำลังรับแรงอัดถึง 20 เมกะปาสกาล ในเวลา 4 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส และมีกำลังรับแรงอัด 70-100 เมกะปาสกาล หลังจาก 28 วัน (Comric et al., 1988)

## การคืบและการหดตัว

การคืบ (Creep) คือ การเพิ่มขึ้นของความเครียดภายใต้น้ำหนักที่กระทำค้างอยู่ ความเครียดจากการคืบอาจมีค่าสูงกว่าความเครียดในช่วงแรกที่เกิดขึ้นในตอนที่ทำให้น้ำหนักแก่ว่างอย่างหลายเท่า จากปัจจัยที่มีผลต่อการคืบของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตมีหลายอย่าง เช่น อัตราส่วนของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต ความเค้นและกำลังของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตเมื่อเริ่มให้น้ำหนัก มวลรวม คุณสมบัติของเถ้าลอย ความชื้น ขนาดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตและอุณหภูมิ จากผลการทดสอบค่าการคืบของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตรูปทรงกระบอกขนาด  $150 \times 300$  มิลลิเมตร พบว่าการคืบของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตน้อยกว่าคอนกรีตทั่วไป (Wallah and Rangan, 2006)

ส่วนการหดตัวแห้ง (Drying shrinkage) เกิดจากการที่น้ำในจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตระเหยออกมาทำให้เกิดการหดตัว จะทำให้เกิดรอยแตกร้าวและเกิดการบิดตัวของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต ซึ่งองค์ประกอบสำคัญที่มีอิทธิพลต่อการหดตัวของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต ได้แก่ มวลรวม ปริมาณของน้ำและเถ้าถ่านหิน คุณสมบัติของเถ้าถ่านหิน รูปร่างและขนาดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต เป็นต้น จากการทดสอบ Wallah and Rangan (2006) พบว่าการหดตัวของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตน้อยมากหลังจากระยะเวลา 1 ปี คือ ประมาณ 100 ไมโครสเตรน (Micro strains)

## ความทนทานต่อการทำลายของสารซัลเฟต

ความเสียหายเนื่องจากผลกระทบของซัลเฟตต่อจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตนั้นมีความจำเป็น โดยเฉพาะในกรณีที่ต้องก่อสร้างอาคารในบริเวณหรือใกล้ทะเล เนื่องจากซัลเฟตมีอยู่ทั่วไปตามธรรมชาติทั้งในดินและในน้ำทะเล ซัลเฟตอาจเกิดจากสารอินทรีย์ที่ผุเน่าซึ่งก่อให้เกิดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ เมื่อก๊าซนี้ทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในอากาศจะกลายเป็นกรดกำมะถันหรือกรดซัลฟูริก ( $H_2SO_4$ ) และแปรสภาพเป็นซัลเฟตในที่สุด และได้มีการศึกษาการต้านทานซัลเฟตของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต (Wallah and Rangan, 2006) โดยการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต ( $H_2SO_4$ ) เป็นระยะเวลา 1 ปี จีโอโพลิเมอร์คอนกรีตรูปทรงกระบอกมีการเปลี่ยนแปลงความยาว รูปร่าง ตลอดจนกำลังรับแรงอัด เมื่อเปรียบเทียบกับ การแช่ในน้ำและในสภาพอุณหภูมิปกติ ซึ่งตัวอย่างที่แช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างน้อยกว่า 0.015 เปอร์เซ็นต์



การขยายตัวของตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตในระดับ 0.5 เปอร์เซ็นต์ น่าจะเป็นความเสียหายจากซัลเฟต Tikalsky and Carrasquillo (1992) ส่วนการเปลี่ยนแปลงความยาว 0.015 เปอร์เซ็นต์ โดยการบ่มร้อนของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตห่างจากขีดจำกัด 0.5 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งการเปลี่ยนแปลงความยาวของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตน้อยกว่าคอนกรีตทั่วไป สำหรับ (Wee et al., 2000) ได้ศึกษาการเปลี่ยนแปลงความยาวของคอนกรีตทั่วไปซึ่งอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.4-0.5 คือ ประมาณ 0.035-1 เปอร์เซ็นต์ หลัง 32 สัปดาห์ ของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต

### ความคงทนต่อการกัดกร่อนของกรด

โดยทั่วไปแล้ว คอนกรีตที่ทำจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์สามารถต้านทานต่อการกัดกร่อนของสารเคมีได้พอสมควรแต่ทนทานต่อการกัดกร่อนของกรดไม่ดีนัก เพราะคอนกรีตที่ทำจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะมีแคลเซียมไฮดรอกไซด์สูงและเกิดการกัดกร่อนจากกรดได้ง่าย การใช้วัสดุปอซโซลาน เช่น เถ้าถ่านหินในส่วนผสมคอนกรีต สามารถลดการกัดกร่อนเนื่องจากกรดได้ดีกว่าคอนกรีตที่ไม่ใช้เถ้าถ่านหิน การต้านทานกรดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตซึ่งทดสอบโดยนำตัวอย่างคอนกรีตแช่ในสารละลายกรดซัลฟูริกที่มีความเข้มข้นที่แตกต่างกันเป็นระยะเวลา 1 ปี สามารถเห็นผิวหน้าของตัวอย่างเกิดการกัดกร่อนด้วยกรดซัลฟูริก และผิวหน้าของตัวอย่างเกิดการกัดกร่อนมากขึ้น เมื่อความเข้มข้นของกรดซัลฟูริกเพิ่มขึ้น ส่วนของการเปลี่ยนแปลงขนาด (Wallah and Rangan, 2006) จากการศึกษาพบว่า การเปลี่ยนแปลงขนาดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตประมาณ 3 เปอร์เซ็นต์ หลังจาก 1 ปี และจะเพิ่มขึ้นถึงประมาณ 5 เปอร์เซ็นต์

การกัดกร่อนเนื่องจากกรดในสภาพแวดล้อมตามธรรมชาติของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต คือน้อยกว่า 3 เปอร์เซ็นต์ หลังระยะเวลา 56 วัน (Song et al., 2005) และคอนกรีตที่ทำจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มีการสูญเสียขนาดถึง 41 เปอร์เซ็นต์ หลังระยะเวลา 28 วัน นอกจากนี้ผลของการแช่ในสารละลายกรดซัลฟูริกซึ่งมีค่า  $pH$  เท่ากับ 1 การสูญเสียขนาดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตน้อยกว่า 2 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีตมีการสูญเสียขนาดถึง 11 เปอร์เซ็นต์ (Gourley and Johnson, 2005)

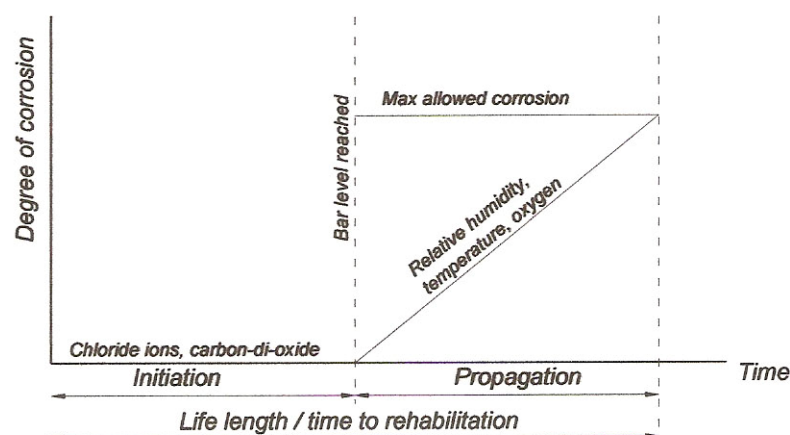
### การกัดกร่อนของเหล็กเสริม

การกัดกร่อนในเหล็กเสริมเป็นหนึ่งในความเสียหายที่เกิดขึ้นกับโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก ซึ่งส่งผลกระทบโดยรวมของการเกิดสนิมในเหล็ก คือ กำลังรับแรงของโครงสร้างลดลงเนื่องจากพื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริมน้อยลงโดยเฉพาะการต้านทานความล้า (Fatigue strength) และความสามารถในการแอ่นตัวหรือการเปลี่ยนรูปร่าง (Elongation ability) ของโครงสร้างก็ลดลงด้วย (Neal et al., 1990) นอกจากนี้การเกิดสนิมของเหล็กเสริมยังทำให้เกิดการแตกร้าวและหลุดออกของคอนกรีตหุ้มภายนอก ดังภาพที่ 3 เนื่องจากปริมาตรที่เพิ่มขึ้นของเหล็กเสริมจากการเกิดสนิม จะทำให้เกิดแรงคืบในเนื้อคอนกรีตซึ่งทำให้คอนกรีตที่มีระยะหุ้มที่มีความหนาน้อยนั้นเกิดการแตกร้าวเป็นผลให้เกิดความเสียหายกับโครงสร้างมากยิ่งขึ้น (Scannell and Sohahghpurwala, 1993)



ภาพที่ 3 ความเสียหายของโครงสร้างคอนกรีตเนื่องจากการเกิดสนิมของเหล็กเสริม

แต่โดยทั่วไปแล้ว เหล็กเสริมที่อยู่ในคอนกรีตเสริมเหล็กนั้น จะอยู่ในสภาวะที่ไม่เกิดสนิมเนื่องจากมี Passivation film ที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration) ของซีเมนต์กับน้ำในระหว่างการพัฒนากำลังของคอนกรีต ซึ่งมีความเป็นด่างสูง มีค่า  $pH$  ประมาณ 13 ซึ่งสามารถป้องกันการเกิดสนิมได้ (Bentur et al., 1997) อย่างไรก็ตามโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กทั่วไปนั้น มักจะอยู่ในสภาพแวดล้อมที่อาจจะสัมผัสสารเคมี สภาพที่เป็นกรด หรือสภาพแวดล้อมที่มีความเสี่ยงต่อการเกิดสนิม เช่น โครงสร้างที่อยู่บริเวณชายฝั่งทะเลนั้น ความเข้มข้นของคลอไรด์จะเป็นตัวทำลายสภาพความเป็นด่างของคอนกรีต เป็นต้น ซึ่งเป็นตัวเร่งให้เกิดสนิมในเหล็กเสริมเร็วขึ้น ดังแบบจำลองการกัดกร่อนของเหล็กเสริม ดังภาพที่ 4



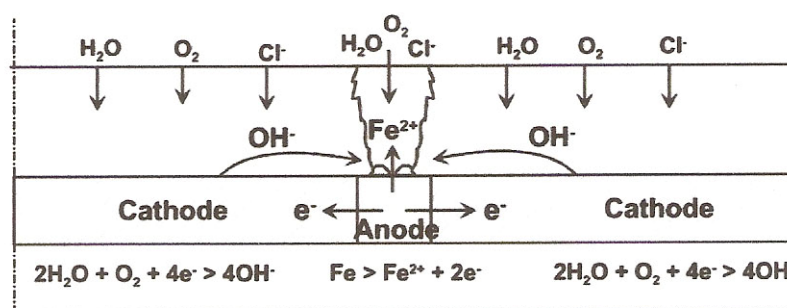
ภาพที่ 4 แบบจำลองการกัดกร่อนของเหล็กเสริม

ที่มา: Tuutti (1982)

### กลไกการกัดกร่อนของเหล็กเสริม

การกัดกร่อนในเหล็กเสริมของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กนั้น เกิดได้หลายสาเหตุด้วยกัน โดยที่สาเหตุหลักของการเกิดสนิม คือ การเกิดรอยแตกร้าวของโครงสร้าง (Pullar-Strecker, 1987) ที่มักเกิดจากการหดตัวในขณะที่คอนกรีตแข็งตัว (สำหรับโครงสร้างที่มีขนาดใหญ่) รอยต่อของคอนกรีตที่เกิดจากการก่อสร้าง สภาวะแวดล้อม หรือเกิดจากสภาวะการใช้งาน เป็นต้น โดยปกติน้ำและอากาศสามารถซึมผ่านเนื้อคอนกรีตไปถึงเหล็กเสริมได้ในปริมาณที่น้อยขึ้นอยู่กับความทึบของเนื้อคอนกรีต แต่การเกิดการแตกร้าวของโครงสร้างจะเป็นการเร่งให้น้ำและออกซิเจนเข้าไปถึงบริเวณเหล็กได้รวดเร็วและมากยิ่งขึ้น ทำให้การเกิดสนิมของเหล็กเสริมเร็วและรุนแรงมากขึ้น และอีกสาเหตุหนึ่งของการเกิดสนิมในเหล็กเสริมของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก คือ การสูญเสียสภาพการเป็นด่าง (Depassivation) เนื่องจากสภาพแวดล้อม โดยเฉพาะคาร์บอนไดออกไซด์ในอากาศและการซึมผ่านของคลอไรด์ไอออนในสารละลาย เข้าสู่ช่องว่างในคอนกรีต ทั้งสองสาเหตุนี้ (คาร์บอนไดออกไซด์และคลอไรด์ไอออน) ถ้าความเข้มข้นมากพอ จะทำให้ความเป็นด่างของคอนกรีตลดลง ซึ่งสาเหตุนี้นำไปสู่การเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตได้ (คณะอนุกรรมการคอนกรีตและวัสดุ วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย, 2543)

คลอไรด์เป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เกิดการกัดกร่อนของเหล็กเสริมได้ โดยการกัดกร่อนจะเริ่มขึ้นเมื่อคลอไรด์ไอออนมีความเข้มข้นมากพอ (Threshold concentration) ที่ผิวหน้าของเหล็กเสริม (Neville, 2002) ซึ่งจะทำให้ค่า  $pH$  ลดลงจนถึงระดับวิกฤต ทำให้สภาพการเป็นด่างของคอนกรีตที่ป้องกันการเกิดสนิมของเหล็กเสริมถูกทำลาย (Depassivation) ถ้ามีน้ำและออกซิเจนเพียงพอก็จะทำให้เหล็กเสริมเกิดสนิมได้ ดังภาพที่ 5 โดยที่คลอไรด์ในคอนกรีตมีแหล่งที่มาได้จากทั้งภายในและภายนอก แต่ปัญหาของคลอไรด์ที่กระทบต่อความทนทานของคอนกรีตนั้น ส่วนมากเป็นคลอไรด์ที่มาจากแหล่งภายนอกเข้าสู่เนื้อคอนกรีตในช่วงการใช้งาน เช่น จากน้ำทะเล พื้นดิน หรือเกลือที่ใช้ละลายน้ำแข็งในประเทศที่มีอากาศหนาวเย็น เป็นต้น



ภาพที่ 5 ปฏิกริยาเคมีไฟฟ้าของการกัดกร่อนของเหล็กเสริมในคอนกรีตจากคลอไรด์

ที่มา: Raupach (1996)

เหล็กเสริมในคอนกรีตจะเป็นสนิมได้ก็ต่อเมื่อเงื่อนไข 3 ประการดังต่อไปนี้

ความเป็นด่างในคอนกรีตลดลงจนปฏิกิริยาอะโนดิก (Anodic process) สามารถเกิดขึ้นได้ ซึ่งความเป็นด่างในระดับที่จะทำให้ปฏิกิริยาอะโนดิกเกิดขึ้นได้นั้น จะมีค่าของ  $pH$  ต่ำกว่าระดับ 9 ถึง 10 และมักจะเรียกระดับวิกฤต (Critical level) ของความเป็นด่าง

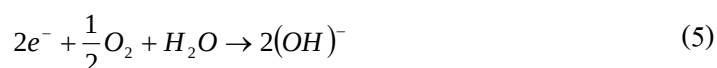
มีความชื้นเพียงพอที่ทำให้ไอออนของเหล็ก ( $Fe^{2+}$ ) เข้าสู่สภาวะสารละลายและเพียงพอที่จะทำให้เกิดปฏิกิริยาในการเกิดสนิม ซึ่งโดยปกติความชื้นมักจะเพียงพออยู่ในบริเวณคอนกรีตที่หุ้มรอบๆ เหล็กเสริมอยู่แล้ว

มีปริมาณออกซิเจนเพียงพอในการทำปฏิกิริยาเพื่อการเกิดสนิม ซึ่งปกติแล้วออกซิเจนในปริมาณที่เพียงพอในการเกิดสนิมมักจะแพร่เข้าสู่คอนกรีตบริเวณเหล็กเสริมโดยผ่านทางช่องว่างที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ (Unsaturated pores) นั่นคือแพร่ผ่านอากาศในช่องว่างแต่การแพร่ของออกซิเจนผ่านทางช่องว่างที่อิ่มตัวด้วยน้ำ (Saturated pores) จะเป็นไปได้ยาก เนื่องจากออกซิเจนละลายในน้ำได้น้อยมาก ดังนั้นคอนกรีตที่อิ่มตัวด้วยน้ำอยู่ตลอดเวลาจะไม่เกิดสนิมในเหล็กเสริม

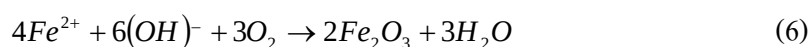
กลไกของการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีต ดังภาพที่ 6 จะเริ่มต้นด้วยการที่ความแตกต่างของคอนกรีตที่บริเวณที่หุ้มรอบๆ เหล็กเสริมอยู่ลดลงจนถึงระดับวิกฤตและมีความชื้นเพียงพอทำให้เหล็กเกิดปฏิกิริยา Electrolysis ขึ้น ดังสมการที่ 4



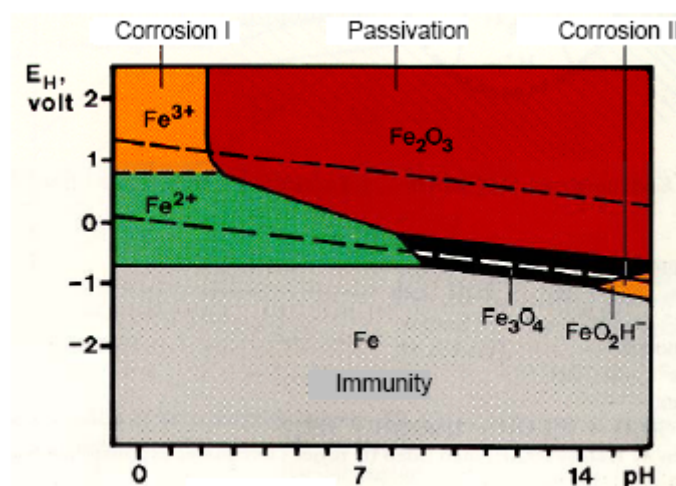
โดยเหล็กจะแตกตัวเป็นไอออน ( $Fe^{2+}$ ) และอิเล็กตรอนจะวิ่งไปตามเหล็กปฏิกิริยานี้เรียกว่ากระบวนการอะโนดิก (Anodic process) ต่อจากนั้น  $2e^-$  ที่เกิดจากปฏิกิริยาอะโนดิกจะไปรวมตัวกับน้ำและออกซิเจนทำให้เกิดเป็นไฮดรอกไซด์ไอออน ( $(OH)^-$ ) ดังสมการที่ 5



ซึ่งปฏิกิริยานี้เรียกว่ากระบวนการแคโทดิก (Cathodic process) หลังจากนั้น ปฏิกิริยาการเกิดสนิมเกิดขึ้น ดังสมการที่ 6



โดยที่  $Fe_2O_3$  คือ เฟอริกออกไซด์ หรือสนิมที่เกิดขึ้นกับเหล็กเสริม



ภาพที่ 6 กลไกการเกิดสนิมของเหล็กเสริม

ที่มา: Pourbaix (1972)

โดยทั่วไปแล้วแหล่งของคลอไรด์ ที่มีผลกระทบต่อโครงสร้างคอนกรีตนั้นมาจากน้ำทะเล สำหรับคอนกรีตที่แช่อยู่ในน้ำทะเลตลอดเวลา นั้น ถึงแม้คลอไรด์สามารถซึมผ่านเข้าไปในคอนกรีตได้ดี แต่ถ้าไม่มีออกซิเจนการเกิดสนิมของเหล็กเสริมก็ไม่สามารถเกิดขึ้นได้ จึงไม่成为ปัญหา

ความเสี่ยงที่จะเกิดการกัดกร่อนของเหล็กเสริมมากที่สุด มักพบในบริเวณคลื่นและละอองน้ำ (Splash zone) รองลงมาเป็นบริเวณบรรยากาศทะเล (Atmospheric zone) และบริเวณน้ำขึ้นน้ำลง (Tidal zone) ส่วนบริเวณใต้น้ำทะเล (Submerged zone) จะมีความเสี่ยงต่อการกัดกร่อนเหล็กเสริมน้อยมาก ในบริเวณใต้น้ำทะเลความเสี่ยงต่อการเกิดสนิมของเหล็กเสริมน้อย เนื่องจากมีความเข้มข้นของออกซิเจนน้อย และอัตราการแพร่ของออกซิเจนเข้าไปในคอนกรีตต่ำมาก เนื่องจากช่องว่างภายในคอนกรีตเป็นช่องว่างอิมมิดด้วยน้ำ ซึ่งออกซิเจนละลายน้ำได้น้อยมาก ทำให้อัตราการแพร่เกิดขึ้นน้อยถึงแม้ว่าจะมีปริมาณออกซิเจนมาก ในบริเวณน้ำขึ้นน้ำลงแต่การเกิดสนิมก็ถูกจำกัดโดยอัตราการแพร่ที่ต่ำของออกซิเจน ผ่านช่องว่างที่อิมมิดด้วยน้ำของคอนกรีตในช่วงที่คอนกรีตเปียก

ในกรณีของสภาพเปียกสลับแห้งนั้น น้ำทะเลจะเข้าสู่คอนกรีตที่แห้งโดย Absorption หรือ Capillary suction จนกระทั่งคอนกรีตอยู่ในสภาพที่อิมมิด (Saturated) เมื่อสภาพภายนอก

เปลี่ยนเป็นแห้ง น้ำที่ผิวคอนกรีตก็จะระเหยออกไปทิ้งไว้แต่คราบเกลือ เมื่ออยู่ในสภาพเปียกอีก ความเข้มข้นของคลอไรด์ที่ใกล้ผิวก็จะสูงขึ้น ดังนั้นอออนของคลอไรด์ (Chloride ions) ซึ่งมีความเข้มข้นสูงที่บริเวณผิว จะซึมเข้าสู่ภายในโดยการแพร่ ซึ่งในแต่ละรอบของการเปียกและการแห้ง จะทำให้คลอไรด์บริเวณใกล้ผิวมีความเข้มข้นสูงขึ้นเรื่อยๆ และจะเข้าไปสู่ภายในคอนกรีตและสู่บริเวณเหล็กเสริมมากขึ้น โดยปกติแล้วคอนกรีตจะเปียก (Saturated) ได้เร็ว แต่จะแห้งได้ช้ากว่ามาก และภายในของคอนกรีตนั้นไม่สามารถทำให้แห้งได้โดยสมบูรณ์ ดังนั้นการแพร่ของอออนของคลอไรด์เข้าไปในคอนกรีตที่แช่อยู่ในน้ำทะเลตลอดเวลาจึงช้ากว่าการเข้าไปของคลอไรด์โดยการเปียกสลับแห้งโดยน้ำทะเล

การเคลื่อนตัวของอออนของคลอไรด์ไปในคอนกรีตนั้น ขึ้นอยู่กับระยะเวลาของสภาพเปียกและแห้ง ซึ่งขึ้นอยู่กับสถานที่และสภาพแวดล้อม เช่น อุณหภูมิ ความชื้น การไหลของน้ำทะเล ทิศทางลม ทิศทางแสงอาทิตย์ และการใช้งานของโครงสร้าง เป็นต้น ทำให้ในโครงสร้างเดียวกัน แต่ละส่วนอาจจะประสบกับสภาวะเปียกและแห้งได้ไม่เหมือนกัน โดยทั่วไปแล้วคอนกรีตที่สภาพแห้งนานกว่าสภาพเปียกมักจะเร่งให้อออนของคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีตได้เร็วขึ้น ดังนั้นคอนกรีตที่ถูกน้ำทะเลเป็นบางครั้ง (ช่วงแห้งนาน) จะมีโอกาสเกิดปัญหาการกัดกร่อนของเหล็กเสริม มากกว่าคอนกรีตที่ประสบกับสภาวะช่วงแห้งสั้น การกัดกร่อนจะเริ่มเกิดขึ้นก็ต่อเมื่อปริมาณอออนของคลอไรด์ (Chloride ions) มีมากพอที่ผิวของเหล็กเสริม (Threshold content of chloride ions) ซึ่งทำให้ค่าความเป็นด่างของคอนกรีตลดลงจนถึงระดับวิกฤต

### การเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นของคลอไรด์ที่สัมผัสกับสิ่งแวดล้อมคลอไรด์

ความเข้มข้นของคลอไรด์บริเวณผิวของคอนกรีตที่สัมผัสกับสิ่งแวดล้อมคลอไรด์ เช่น ทะเล เป็นเวลานาน จะมีความเข้มข้นของคลอไรด์ในสารละลายที่อยู่ในช่องว่างของคอนกรีตสูงกว่าความเข้มข้นของคลอไรด์ในสิ่งแวดล้อมได้ ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า Chloride Condensation ซึ่งเกิดได้ใน 2 ลักษณะ ดังนี้

- 1) ในกรณีของสภาวะเปียกสลับกับแห้งด้วยน้ำทะเล ดังภาพที่ 7 ในขณะที่บริเวณผิวคอนกรีตแห้ง คอนกรีตจะสูญเสียเฉพาะน้ำซึ่งจะระเหยออกจากผิวของคอนกรีต ทิ้งเกลือไว้ในบริเวณผิวคอนกรีตที่แห้ง แต่พอคอนกรีตเข้าสู่สภาวะเปียก น้ำเกลือจะซึมเข้าไปในคอนกรีตอย่างรวดเร็ว เมื่อสภาวะเปียกสลับแห้งดำเนินไปหลายๆ รอบ ก็จะทำให้ความเข้มข้นของคลอไรด์ในบริเวณผิวของคอนกรีตสูงกว่าในสิ่งแวดล้อมได้

2) ในกรณีของสภาวะเปียกตลอดเวลาในน้ำทะเลหรือน้ำใต้ดินที่มีเกลือ ในกรณีนี้คลอไรด์ในสิ่งแวดล้อมสามารถถูกดึงเข้าไปในช่องว่างของคอนกรีตได้ด้วยแรงทางประจุไฟฟ้า เนื่องจากผิวของช่องว่างในคอนกรีตซึ่งมักจะเป็นผลผลิตทางไฮเดรชัน เช่น แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) จะมีคุณสมบัติทางศักย์ไฟฟ้าเป็นบวกซึ่งสามารถดึงคลอไรด์ในสิ่งแวดล้อมซึ่งมีประจุเป็นลบเข้าไปได้ อย่างไรก็ตามในสภาพของสิ่งแวดล้อมที่เปียกตลอดเวลา ถึงแม้คลอไรด์จะเข้าไปในคอนกรีตได้มากก็มักไม่เป็นอันตรายต่อเหล็กเสริม เนื่องจากไม่มีออกซิเจนเพียงพอในการเกิดสนิม ยกเว้นแต่ในบริเวณที่ติดกับคอนกรีตจะมีส่วนที่มีสภาวะแห้งได้ด้วย เช่น บริเวณผิวดินซึ่งคลอไรด์ที่เข้าไปอาจแพร่เข้าไปสู่บริเวณที่สามารถแห้งได้ ทำให้ปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตบริเวณผิวดินมีมากขึ้น และในบริเวณผิวดินซึ่งมีออกซิเจนมากเพียงพอ จึงอาจนำพาให้โครงสร้างบริเวณผิวดินเกิดสนิมในเหล็กเสริมได้



ภาพที่ 7 โครงสร้างคอนกรีตที่สภาวะเปียกสลับแห้งด้วยน้ำทะเล

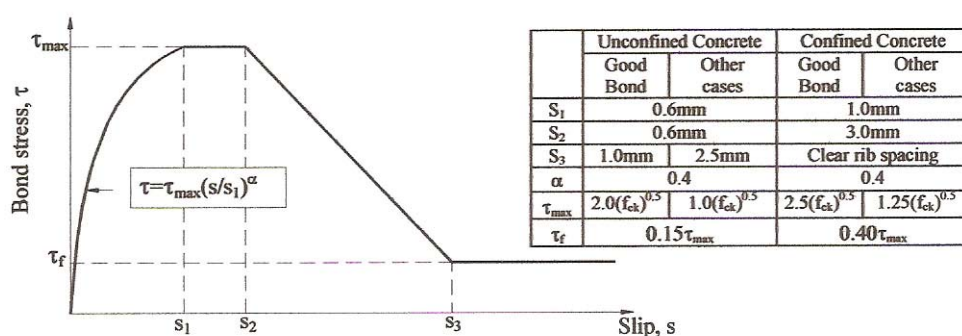
### กำลังการยึดเหนี่ยวของเหล็กเสริม

การออกแบบเพื่อหาเหล็กเสริมตามยาวที่ใช้ด้านทานโมเมนต์ดัด และเหล็กเสริมทางขวางที่ใช้เพื่อด้านทานแรงเฉือนส่วนที่เกินกว่าความต้านทานแรงเฉือนของคอนกรีต อาศัยสมมุติฐานการยึดเหนี่ยวระหว่างคอนกรีตและเหล็กเสริมเป็นไปอย่างสมบูรณ์ นั่นหมายความว่าในขณะที่โครงสร้างรับน้ำหนักบรรทุกทุกจะสมมุติว่าเหล็กเสริมไม่เกิดการครูดหรือลื่นหลุด (Slip) จากคอนกรีตที่หุ้มห่อแต่อย่างใด หรือมีการลื่นไถลเกิดขึ้นมีค่าน้อยมาก มิฉะนั้นเหล็กเสริมจะไม่มีกำลังรับแรงได้ตามต้องการอันเป็นสาเหตุให้ส่วนโครงสร้างไม่สามารถรับน้ำหนักบรรทุกได้ตามต้องการ



ความต้านทานต่อการลื่นไถลดังกล่าวได้จากแรงยึดเหนี่ยวระหว่างคอนกรีตและเหล็กเสริม ซึ่งเป็นแรงเฉือนรอบผิวสัมผัสระหว่างคอนกรีตและเหล็กเสริมในขณะที่ร่วมกันรับน้ำหนักบรรทุก กำลังยึดเหนี่ยวได้จาก ก) การยึดเกาะทางเคมี (Chemical adhesion) เมื่อคอนกรีตแข็งตัว ข) การยึดเกาะโดยอาศัยแรงเสียด (Friction) รอบผิวเหล็กเสริมกับคอนกรีต และ ค) การยึดรั้งทางกล (Mechanical anchorage) กำลังยึดเหนี่ยวสำหรับเหล็กกลมผิวเรียบกับคอนกรีตได้จากสองแบบแรกซึ่งขึ้นกับการทำคอนกรีต (การผสม การเท และการทำให้แน่น) แต่กำลังของเหล็กกลมผิวเรียบมีค่าไม่มากนัก อย่างไรก็ตามก็สามารถเพิ่มกำลังยึดเหนี่ยวให้มากขึ้นโดยการทำให้เกิดการยึดรั้งทางกล เช่น การของที่ปลายเหล็กเสริมกลมผิวเรียบและให้มีระยะฝังยึดในคอนกรีตอย่างเพียงพอ หรือการใช้เหล็กข้ออ้อย เป็นต้น

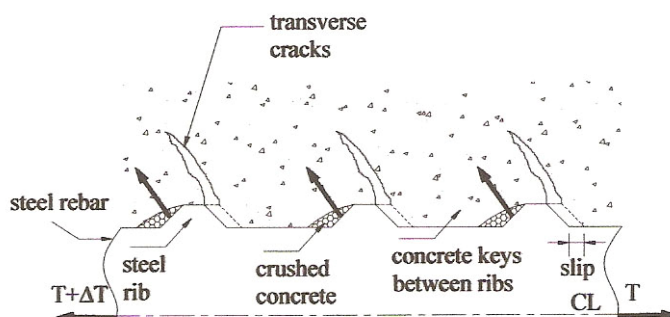
การวิบัติเนื่องจากแรงยึดเหนี่ยว (Bond failure) เป็นการปริแยกของคอนกรีต (Splitting) ตามแนวยาวของเหล็กเสริม และมักเกิดขึ้นหลังจากที่ปรากฏรอยร้าวในแนวทแยงที่เป็นผลมาจากแรงดึงทแยง ซึ่งเมื่อรวมผลของการเฉือนในเหล็กเสริม (Dowel action) ก็จะช่วยให้รอยปริแยกเคลื่อนตัวเข้าหาจุดรองรับเร็วขึ้น หากปลายของส่วนของโครงสร้างนั้นปราศจากการยึดรั้งที่เพียงพอก็จะเกิดการวิบัติหักที่ดัดแบบจำลองกำลังการยึดเหนี่ยวของเหล็กเสริม (Bond stress-slip model) ดังภาพที่ 8



ภาพที่ 8 Bond stress-slip model

ที่มา: CEB (1993)

สำหรับคานที่เสริมเหล็กข้ออ้อยซึ่งมีผิวของเหล็กเสริมเป็นข้อหรือปล้อง กำลังยึดเหนี่ยวจะมีค่ามากขึ้น เพราะเมื่อกำลังยึดเหนี่ยวที่ได้จากการยึดเกาะทางเคมีและจากแรงฝืดถูกทำลายไป ก็ยังเหลือกำลังยึดเหนี่ยวที่ได้จากส่วนของข้อหรือปล้องของเหล็กเสริมอีก กล่าวคือเมื่อเหล็กเสริมเริ่มจะเลื่อนไถล ส่วนของข้อหรือปล้องของเหล็กเสริมโดยรอบจะดันคอนกรีตที่หุ้มห่อให้ต้องรับแรงกดอัดหรือแรงแบกทาน (Bearing) และแรงเฉือน ดังภาพที่ 9 จนกว่าแรงที่กระทำนั้นมีค่าเกินกว่ากำลังต้านทานของคอนกรีต คอนกรีตในบริเวณนั้นจึงค่อยๆปริแยกและแตกออก (Wedging action) ทั้งนี้ความกว้างของรอยร้าวและการโก่งตัวจะน้อยกว่าที่เกิดขึ้นในคานที่เสริมด้วยเหล็กกลมผิวเรียบ



ภาพที่ 9 การแตกร้าวของคอนกรีตเนื่องจากแรงกดอัด

ที่มา: fib (2000)

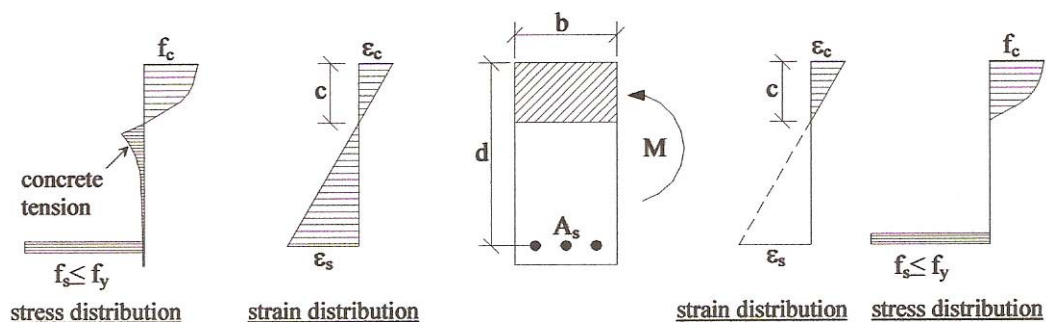
ผลจากการทดลองพบว่าปัจจัยที่สำคัญนอกเหนือจากกำลังวัสดุและขนาดของเหล็กเสริมที่ใช้ กำลังยึดเหนี่ยวยังขึ้นกับระยะคอนกรีตที่หุ้มเหล็กเสริม ระยะห่างระหว่างเหล็กเสริมและการเสริมเหล็กตามขวาง หากระยะของคอนกรีตได้หุ้มเหล็กเสริมมีค่ามากพอ คอนกรีตจะสามารถต้านทานแรงดึงได้มากขึ้นและช่วยชะลอการแตกหรือปริแยกออกในแนวตั้งได้ และเมื่อระยะห่างระหว่างเหล็กเสริมมากขึ้นซึ่งจะทำให้มีเนื้อที่คอนกรีตหุ้มเหล็กแต่ละเส้นมากขึ้นก็จะช่วยต้านทานการแตกหรือปริออกของคอนกรีตในแนวนอนได้ นอกจากนี้ หากส่วนโครงสร้างนั้นมีเหล็กเสริมทางขวาง เช่น เหล็กปลอก กำลังต้านทานแรงดึงจะมากขึ้นซึ่งช่วยชะลอการเกิดรอยร้าวจากแรงดึงได้นั้นเสมือนว่าเหล็กเสริมทางขวางช่วยชะลอการแตกหรือปริแยกออกทั้งในแนวตั้งและแนวนอน ทำให้ช่วยลดระยะที่จะต้องฝังเหล็กเสริมในคอนกรีตลงได้

### พฤติกรรมกำลังรับแรงดัด

การดัด (Flexure) เกิดจากน้ำหนักหรือแรงที่กระทำต่อองค์อาคาร ปริมาณการดัด คือ โมเมนต์ดัด (Bending moment) การดัดทำให้เกิดผลต่อองค์อาคาร ได้แก่ ความเค้นและความเครียด บนหน้าตัดคาน เรียกว่า การกระจายความเค้นและความเครียด ซึ่งอาจเป็นความเค้นดัดหรือดึง ขณะเดียวกันความเครียดอาจเป็นความเครียดซึ่งมีแนวโน้มทำให้องค์อาคารหดสั้นลง (Shortened) หรือยืดออก (Lengthened) การดัดยังทำให้เกิดหน่วยแรงเฉือนและหน่วยแรงยึดหน่วงในองค์อาคาร

หากสมมุติว่าก่อนที่จะรับน้ำหนักบรรทุกคานยังไม่แอ่นหรือโก่งตัวและยังไม่มีรอยร้าว ดังนั้นเมื่อคานเริ่มรับน้ำหนักบรรทุกที่มีค่าน้อยๆ คานจะโก่งตัวเนื่องจากโมเมนต์ดัดในลักษณะที่หลังคานถูกอัดและที่ใต้ท้องคานถูกดึง โดยมีการกระจายของหน่วยการยืด-หดตัว (Strain distribution) ดังภาพที่ 10 บนหน้าตัดของคานเป็นสัดส่วนโดยตรงกับระยะที่ห่างจากแนวแกนสะเทิน ดังนั้นการยืดตัวของเหล็กเสริมของคอนกรีตที่อยู่ตำแหน่งเดียวกันจึงมีค่าเท่ากัน ส่วนการกระจายของหน่วยแรง (Stress distribution) บนหน้าตัดของคานจะมีค่าเป็นสัดส่วนโดยตรงกับการยืด-หดตัวตามกฎของฮุก (ต่อกล, 2528) หากหน่วยแรงดึงสูงสุดที่เกิดขึ้นที่ท้องคานมีค่าน้อยและต่ำกว่ากำลังต้านทานแรงดึงของคอนกรีต ซึ่งในที่นี้คือ โมดูลัสของการแตกร้าว (Modulus of rupture,  $f_r = 2.0\sqrt{f'_c}$ ) คานจึงยังไม่ร้าว ดังนั้นหน้าตัดทั้งหมดของคานจึงสามารถรับได้ทั้งหน่วยแรงอัดและหน่วยแรงดึงที่อยู่เหนือและใต้แกนสะเทิน

เมื่อคานรับน้ำหนักบรรทุกมากขึ้น หน่วยการยืด-หดตัว บนหน้าตัดคานเพิ่มมากขึ้น แต่ยังคงเป็นสัดส่วนโดยตรงกับระยะที่ห่างจากแกนสะเทิน หน่วยแรงต่างๆบนหน้าตัดคานก็จะมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อหน่วยแรงดึงที่ท้องคานมีค่าเท่ากับโมดูลัสของการแตกร้าว ( $f_r$ ) คานจะเริ่มร้าว โมเมนต์ดัดที่ทำให้เกิดการแตกร้าวเรียกว่า โมเมนต์ดัดแตกร้าว (Cracking moment) รอยร้าวจากโมเมนต์ดัด (Flexural cracks) จะปรากฏที่บริเวณกลางคานก่อนและมีแนวตั้งฉากกับความยาวคาน ส่วนที่บริเวณปลายคานอาจมีรอยร้าวในแนวเฉียงที่เกิดจากแรงดึงทแยงอันเนื่องมาจากแรงเฉือน ซึ่งยังไม่สามารถสังเกตเห็นรอยร้าวนี้ได้ด้วยตาเปล่าเนื่องจากความกว้างของรอยร่วมน้อยมาก ตำแหน่งแนวแกนสะเทินตรงบริเวณที่เกิดรอยร้าวจะขยับสูงขึ้น สำหรับส่วนที่อยู่ระหว่างรอยร้าวและส่วนที่อยู่ต่ำกว่าแนวแกนสะเทินยังสามารถรับแรงดึงได้อีกเล็กน้อย แต่ในการวิเคราะห์ทางทฤษฎีจะไม่นำความต้านทานแรงดึงในส่วนนี้มาวิเคราะห์แต่พิจารณาให้เหล็กเสริมทำหน้าที่รับแรงดึงทั้งหมด



ภาพที่ 10 ความเค้นและความเครียดบนหน้าตัดคานภายใต้แรงดัด

ที่มา: Raed Skram Saliba Al-Sunna (2006)

ในสถานะที่คานรับน้ำหนักบรรทุกใช้งาน (Service load) หน่วยแรงอัดสูงสุดในคอนกรีตจะมีค่าไม่เกินกว่า  $0.5f'_c$  (โดยประมาณ) และหน่วยแรงดึงของเหล็กเสริมยังไม่ถึงจุดคราก (วินิต, 2545) ดังนั้นหน่วยแรงต่างๆ ที่เกิดขึ้นยังอยู่ในช่วงอีลาสติก (Elastic limit) และถือว่าคานมีพฤติกรรมแบบยืดหยุ่น

แต่ถ้าคานรับน้ำหนักบรรทุกมากขึ้นเกินกว่าน้ำหนักบรรทุกใช้งาน หน่วยการยืดหดตัวบนหน้าตัดคานเพิ่มมากขึ้นอีกแต่ยังคงเป็นส่วนโดยตรงกับระยะที่ห่างจากแกนสะเทิน ส่วนหน่วยแรงต่างๆ บนหน้าตัดคานก็มีค่าเพิ่มขึ้นและเกินกว่าค่าพิคัดยืดหยุ่นซึ่งหน่วยแรงเริ่มไม่เป็นสัดส่วนกับหน่วยการยืด-หดตัวที่เพิ่มขึ้นตามคุณสมบัติของวัสดุ (Albert, 1995) คานจึงเริ่มมีพฤติกรรมแบบไม่ยืดหยุ่น (Inelastic) ก่อนที่จะเกิดการวิบัติเมื่อรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดซึ่งเรียกน้ำหนักบรรทุกสูงสุดว่าน้ำหนักบรรทุกประลัย (Ultimate load)

การวิบัติของคานเนื่องจากโมเมนต์ดัด มีสองแบบซึ่งขึ้นอยู่กับปริมาณเหล็กเสริมที่ใช้ กล่าวคือ ถ้าใช้ปริมาณเหล็กเสริมไม่มากนัก (Moderate reinforcement) โดยที่ปริมาณเหล็กเสริมรับแรงดึงมีค่าต่ำกว่าอัตราส่วนที่สถานะสมดุล เรียกคานแบบนี้ว่า Under-reinforced concrete beams การวิบัติจะเริ่มเกิดที่ด้านรับแรงดึงก่อน โดยเหล็กเสริมถูกดึงถึงกำลังจุดครากก่อนที่คอนกรีตจะถูกอัดแตกหรือระเบิดออกมา ซึ่งก่อนที่คานจะวิบัติจะสังเกตเห็นรอยร้าวที่ปรากฏทางด้านรับแรงดึงเนื่องจากถูกดึงออกเกินกว่าหน่วยการยืดตัวที่จุดคราก อีกทั้งจำนวนรอยร้าวก็มากขึ้นทำให้ค่าสติเฟนสการดัดหรือความแข็งแรงของคานลดน้อยลงคานจึงโค้งตัวมากขึ้นตามลำดับ ส่วนการกระจายของ

หน่วยแรงอัดในคอนกรีตก่อนเกิดการวิบัติจะเป็นรูปพาราโบลา เรียกการวิบัติแบบนี้ว่า Yielding failure ส่วนการวิบัติของคานอีกแบบหนึ่งจะเกิดขึ้นที่ด้านรับแรงอัดก่อน โดยคอนกรีตถูกอัดแตกหรือระเบิดออกเมื่อหน่วยการหดตัวในคอนกรีตมีค่าประมาณ 0.003-0.004 มม./มม. ก่อนที่เหล็กจะมีกำลังถึงจุดครากเรียกการวิบัติแบบนี้ว่า Crushing failure ซึ่งเป็นการวิบัติแบบฉับพลันทันทีทันใด การวิบัติแบบนี้จะเกิดขึ้นกับคานที่มีปริมาณเหล็กเสริมมากเกินไปกว่าอัตราส่วนที่สภาวะสมดุล หรือในกรณีที่เหล็กเสริมที่มีกำลังจุดครากสูงมาก เรียกคานแบบนี้ว่า Over-reinforced concrete beams สำหรับคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ใช้ปริมาณเหล็กเสริมพอดีกับอัตราส่วนที่สภาวะสมดุล การวิบัติของคานจะเกิดขึ้นในลักษณะที่เหล็กเสริมถูกดึงถึงจุดครากพร้อมกับคอนกรีต ส่วนที่อยู่เหนือแนวแกนสะเทินถูกอัดแตกโดยคอนกรีตมีหน่วยการยืดตัวสูงสุด

นอกจากนี้พฤติกรรมการรับแรงดัดของคานจีโอโพลีเมอร์คอนกรีตเหมือนกันกับคานคอนกรีตเสริมเหล็กโดยทั่วไป (Sumajouw and Rangan, 2006) ซึ่งทำการทดสอบคานจีโอโพลีเมอร์คอนกรีตขนาด  $200 \times 300 \times 3300$  มิลลิเมตร โดยแปรผันอัตราส่วนของเหล็กเสริมรับแรงดัด เท่ากับ 0.64, 1.18, 1.84 และ 2.69 ตามลำดับ และใช้มาตรฐานในการการออกแบบตาม Australian Standard for Structures AS3600 และ American Concrete Institute Building Code ACI 318-02 พบว่าลักษณะการแตกร้าวของคานจีโอโพลีเมอร์คอนกรีตเหมือนกับคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และเกิดการวิบัติด้วยการอัดในส่วนของบริเวณรับแรงอัด สำหรับอัตราส่วนของเหล็กเสริมรับแรงดัดและกำลังอัดของจีโอโพลีเมอร์คอนกรีตที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้การรับแรงดัดเพิ่มขึ้น ตลอดจนมาตรฐานที่ใช้ในการออกแบบทั้งสองมาตรฐานสามารถใช้ในการออกแบบคานจีโอโพลีเมอร์คอนกรีตเสริมเหล็กได้

อย่างไรก็ตาม ปัญหาการเสื่อมสภาพของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กมีสาเหตุจากการเกิดสนิมเป็นสำคัญ ซึ่งการเกิดสนิมของเหล็กเสริมนั้นมีปัจจัยหลายอย่างเข้ามาเกี่ยวข้อง เช่น ความชื้น การสัมผัสกับอากาศของเหล็กเสริม อายุการใช้งานของโครงสร้างคอนกรีต และสภาวะแวดล้อมของโครงสร้างคอนกรีต ปัจจุบันยังไม่มีการศึกษาวิจัยผลของการกัดกร่อนของเหล็กเสริมต่อพฤติกรรมของคานจีโอโพลีเมอร์คอนกรีตเสริมเหล็กในประเทศไทย ดังนั้นการทําวิจัยนี้เป็นการศึกษาการเกิดสนิมของเหล็กในจีโอโพลีเมอร์คอนกรีตเสริมเหล็ก เพื่อเป็นประโยชน์ในการตัดสินใจที่จะนำจีโอโพลีเมอร์มาทดแทนซีเมนต์และนำมาใช้ในโครงสร้างคอนกรีต นอกจากนี้ยังเป็นฐานข้อมูลในการศึกษาวิจัยและพัฒนาจีโอโพลีเมอร์ต่อไป

## อุปกรณ์และวิธีการ

### อุปกรณ์

1. เครื่องทดสอบ (Universal testing machine)
2. เครื่องทดสอบกำลังอัด (Compressive testing machine)
3. เครื่องทดสอบค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ (Half-cell potential test)
4. เครื่องทดสอบการก่อดำของคอนกรีต (Penetration test)
5. เครื่องทดสอบ (Dynamic strainmeter)
6. เครื่องวัดการยืดของเหล็กเสริม (Strain gauges)
7. เครื่องแปลงกระแสไฟฟ้ากระแสตรง
8. เครื่องวัดค่าศักย์ไฟฟ้า
9. เครื่องบ่มคอนกรีตแบบบ่มร้อน
10. แบบหล่อแท่งตัวอย่างรูปทรงกระบอก ขนาด  $10 \times 20$  เซนติเมตร
11. แบบหล่อแท่งตัวอย่างรูปทรงลูกบาศก์ ขนาด  $15 \times 15$  เซนติเมตร
12. แบบหล่อแท่งตัวอย่างรูปคาน ขนาด  $10 \times 20 \times 120$  เซนติเมตร
13. เครื่องผสมคอนกรีต
14. เครื่องจี้คอนกรีต (Vibrator)
15. เครื่องชั่งน้ำหนัก สามารถอ่านค่าได้ละเอียด 0.01 กรัม
16. อุปกรณ์วัดค่าการยุบตัว (Slump test)
17. อุปกรณ์วัดความกว้างของรอยร้าว
18. อุปกรณ์สำหรับบดกรี
19. ถังสำหรับแช่ตัวอย่าง ขนาด  $120 \times 150$  เซนติเมตร
20. อุปกรณ์สำหรับผสมสารละลาย
21. แผ่นพลาสติกใส
22. เทปพันสายไฟ
23. เกรียงเหล็ก
24. นาฬิกาจับเวลา
25. ถังมือยาง

## วิธีการ

### 1. วัสดุและปฏิกิริยาส่วนผสม

#### 1.1 วัสดุในการผสมซีเมนต์คอนกรีตและคอนกรีตประกอบด้วย

##### 1.1.1 แก้วฉนวนหิน จากโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้าแม่เมาะ จ.ลำปาง ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีของแก้วฉนวนหิน

| Oxides | SiO <sub>2</sub> | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | CaO   | K <sub>2</sub> O | SO <sub>3</sub> |
|--------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|-------|------------------|-----------------|
| %      | 50.71            | 15.60                          | 9.41                           | 16.62 | 2.53             | 3.42            |

##### 1.1.2 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 ตราร้าง ของบริษัท ปูนซีเมนต์ไทย จำกัด (มหาชน)

##### 1.1.3 มวลรวมหยาบ หินปูนย่อย (Crushed limestone) ขนาด 3/8 นิ้ว (SSD)

##### 1.1.4 มวลรวมละเอียด ทรายแม่น้ำร้อนผ่านตะแกรงเบอร์ 4 (SSD)

##### 1.1.5 น้ำ น้ำที่ใช้ในการทดสอบเป็นน้ำประปา

##### 1.1.6 เหล็กผิวเรียบและเหล็กข้ออ้อย ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร และ 10 มิลลิเมตร คุณสมบัติของเหล็ก ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 คุณสมบัติของเหล็กเสริม

| Diameter<br>(mm) | Cross section area<br>(mm <sup>2</sup> ) | Yield strength<br>(ksc) | Ultimate strength<br>(ksc) |
|------------------|------------------------------------------|-------------------------|----------------------------|
| RB6              | 28.274                                   | 1244                    | 1669                       |
| DB10             | 78.593                                   | 4570                    | 6858                       |

### 1.1.7 สารละลาย

1.1.7.1 สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide,  $NaOH$ ) ความเข้มข้น 14 โมลาร์ โดยเตรียมไว้ล่วงหน้า 24 ชั่วโมง ก่อนทำการผสม

1.1.7.2 สารละลายโซเดียมซิลิเกต (Sodium silicate,  $Na_2SiO_2$ ) มี  $Na_2O$  ร้อยละ 14.7,  $SiO_2$  ร้อยละ 29.4,  $H_2O$  ร้อยละ 55.9 โดยมวล

1.1.7.3 สารละลายโซเดียมคลอไรด์ (Sodium chloride,  $NaCl$ )

1.1.7.4 สารละลายซิลเวอร์ไนเตรท (Silver nitrate,  $AgNO_3$ )

## 1.2 ปฏิภาศส่วนผสมอิโพลิเมอร์คอนกรีต

การศึกษานี้เป็นการศึกษาการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในอิโพลิเมอร์คอนกรีตเสริมเหล็กซึ่งใช้อัตราส่วน  $Na_2O.SiO_3 / NaOH$  เท่ากับ 0.7-1.6 โดยน้ำหนัก และใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ( $NaOH$ ) ความเข้มข้น 14 โมลาร์ ทุกอัตราส่วนผสม ดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 อัตราส่วนส่วนผสมอิโพลิเมอร์คอนกรีต

| Ratio<br>$Na_2O.SiO_3 / NaOH$ | Materials (kg/m <sup>3</sup> ) |      |         |               |      |      |
|-------------------------------|--------------------------------|------|---------|---------------|------|------|
|                               | Aggregates                     | Sand | Fly ash | $Na_2O.SiO_3$ | NaOH | W/B  |
| 0.7                           | 1190                           | 640  | 404     | 102           | 145  | 0.61 |
| 0.8                           | 1190                           | 640  | 404     | 102           | 127  | 0.56 |
| 0.9                           | 1190                           | 640  | 404     | 102           | 113  | 0.53 |
| 1.0                           | 1190                           | 640  | 404     | 102           | 102  | 0.50 |
| 1.1                           | 1190                           | 640  | 404     | 102           | 93   | 0.48 |
| 1.2                           | 1190                           | 640  | 404     | 102           | 85   | 0.46 |
| 1.3                           | 1190                           | 640  | 404     | 102           | 78   | 0.44 |
| 1.4                           | 1190                           | 640  | 404     | 102           | 73   | 0.43 |
| 1.5                           | 1190                           | 640  | 404     | 102           | 68   | 0.42 |
| 1.6                           | 1190                           | 640  | 404     | 102           | 64   | 0.40 |

W/B คือ อัตราส่วนโดยน้ำหนักของสารละลายโซเดียมซิลิเกตและโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อเถ้าลอย



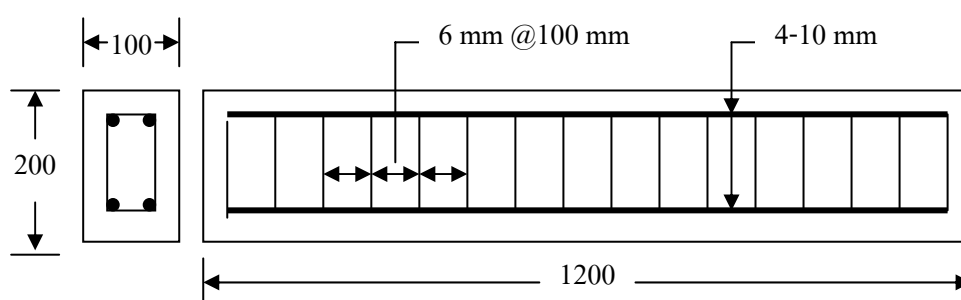
### 1.3 ปฏิภาณส่วนผสมคอนกรีตควบคุม

ออกแบบส่วนผสมคอนกรีตที่มีกำลังรับแรงอัด 500 กก./ตร.ซม.<sup>2</sup> ซึ่งค่ากำลังอัดที่นำมาออกแบบจะเท่ากับค่ากำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่อัตราส่วน  $Na_2O.SiO_3 / NaOH$  เท่ากับ 1.0 โดยน้ำหนัก ดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ส่วนผสมคอนกรีตต่อปริมาตร 1 ลูกบาศก์เมตร

| Material              | Mass (kg) |
|-----------------------|-----------|
| Cement                | 500       |
| Aggregates 3/8"       | 736       |
| Sand                  | 832       |
| Water                 | 150       |
| Super plasticizer     | 7.5       |
| Slump (cm)            | 3-5       |
| Water cement ratio    | 0.3       |
| Design strength (ksc) | 500       |

### 1.4 รายละเอียดเหล็กเสริมคานจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตและคานคอนกรีตควบคุม



ภาพที่ 11 รูปร่างและขนาดเหล็กเสริม

## 2. การเตรียมตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตและคอนกรีตควบคุม

### 2.1 การเตรียมตัวอย่างรูปทรงกระบอก

2.1.1 การเตรียมตัวอย่างทดสอบของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตและคอนกรีตควบคุม โดยให้ค่ากำลังอัดของคอนกรีตทั้งสองประเภทเท่ากัน โดยหล่อตัวอย่างทดสอบคอนกรีตรูปทรงกระบอกขนาด  $100 \times 200$  มิลลิเมตร โดยเสียบเหล็กเสริมข้ออ้อยที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร และลึกลงประมาณ 150 มิลลิเมตร ยื่นออกมาจากตัวอย่างประมาณ 200 มิลลิเมตร

2.1.1.1 เตรียมสารละลายโซเดียมซิลิเกต โซเดียมไฮดรอกไซด์ หิน ทราย และ ถ้ำถ่านหิน ซึ่งสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์มีปริมาณความเข้มข้น 14 โมลาร์ โดยเตรียมล่วงหน้าเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ก่อนการผสม ดังภาพที่ 12



ภาพที่ 12 วัสดุผสมจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต

2.1.1.2 นำถ้ำถ่านหินและทรายใส่ลงในเครื่องผสมคอนกรีต ทำการผสมให้เข้ากันโดยใช้เวลาในการผสม 3-5 นาที หลังจากนั้นจึงใส่สารละลายทั้งสองลงไปผสมให้เข้ากันอีกครั้งพร้อมใส่หิน ทำการผสมจนกว่าส่วนผสมเข้ากันได้ดี ดังภาพที่ 13 สำหรับการผสมคอนกรีตควบคุมนำปูนซีเมนต์และทรายใส่ลงในเครื่องผสมคอนกรีต ทำการผสมให้เข้ากันโดยใช้เวลา

ในการผสม 3-5 นาที หลังจากนั้นจึงใส่น้ำลงไปผสมให้เข้ากันอีกครั้งพร้อมใส่หิน ทำการผสมจนกว่าส่วนผสมเข้ากันได้ดี ดังภาพที่ 14



ภาพที่ 13 การผสมจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต



ภาพที่ 14 การผสมคอนกรีตควบคุม

2.1.1.3 นำจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตและคอนกรีตควบคุมเทลงแบบหล่อทรงกระบอก ขนาด  $100 \times 200$  มิลลิเมตร โดยแบ่งใส่ 3 ชั้น แต่ละชั้นมีปริมาตร  $1/3$  ของปริมาตรแบบหล่อทรงกระบอกและกระทุ้งชั้นละ 25 ครั้ง ดังภาพที่ 15 และภาพที่ 16 จากนั้นเสียบเหล็กเสริมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร ดังภาพที่ 17 และภาพที่ 18 ปิดผิวหน้าให้เรียบและหุ้มด้วยถุงพลาสติกเพื่อป้องกันการระเหยของน้ำ และเก็บไว้ในอุณหภูมิปกติเป็นเวลา 12 ชั่วโมง



ภาพที่ 15 ตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต



ภาพที่ 16 ตัวอย่างคอนกรีตควบคุม





ภาพที่ 17 จีโพลิเมอร์คอนกรีตที่เสียบเหล็กเสริมบริเวณกลางตัวอย่าง



ภาพที่ 18 คอนกรีตควบคุมที่เสียบเหล็กเสริมบริเวณกลางตัวอย่าง

2.1.1.4 ถอดแบบหล่อและหุ้มด้วยถุงพลาสติกอีกครั้ง หลังจากนั้นนำไปบ่มด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ดังภาพที่ 19 และเก็บไว้ในอุณหภูมิปกติ ดังภาพที่ 20 สำหรับคอนกรีตควบคุมใช้กระสอบเปียกน้ำคลุมเพื่อป้องกันการระเหยของน้ำ และเก็บไว้ในอุณหภูมิปกติ เป็นเวลา 12 ชั่วโมง หลังจากนั้นทำการบ่มคอนกรีตควบคุมด้วยน้ำเป็นระยะเวลา 28 วัน และเก็บไว้ในอุณหภูมิปกติ ดังภาพที่ 21 และภาพที่ 22



ภาพที่ 19 การบ่มจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต



ภาพที่ 20 ตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตหลังจากการบ่ม และเก็บไว้ในอุณหภูมิปกติ



ภาพที่ 21 กระสอบเปียกน้ำคลุมตัวอย่างคอนกรีตควบคุม เพื่อป้องกันการระเหยของน้ำ



ภาพที่ 22 การบ่มตัวอย่างคอนกรีตควบคุมด้วยน้ำ

2.1.2 หลังจากบ่มจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตด้วยความร้อนอุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส ที่ระยะเวลา 1 วัน และทิ้งไว้ในอุณหภูมิปกติ สำหรับคอนกรีตควบคุมบ่มด้วยน้ำเป็นระยะเวลา 28 วัน ทำการเร่งการเกิดสนิมโดยการเชื่อมต่อกระแสไฟฟ้าขั้วบวกกับแท่งทองแดงและขั้วลบกับเหล็กเสริมที่อยู่ในคอนกรีตวางแท่งทดสอบไว้ในน้ำ ผ่านกระแสไฟฟ้ากระแสตรงเป็นระยะเวลา 28 วัน ด้วยความต่างศักย์ไฟฟ้า 6 โวลต์ ดังภาพที่ 23 โดยแช่ตัวอย่างในน้ำและในสารละลาย โซเดียมคลอไรด์ที่ความเข้มข้น 3 เปอร์เซ็นต์ และทำการวัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ ซึ่งใช้เครื่องมือที่ใช้วัดคือ Half-cell potential test ตามมาตรฐาน ASTM C 876 วัดที่ระยะ 50, 100



และ 150 มิลลิเมตร จากปลายด้านบนตัวอย่าง ทำการวัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ทุก 1 วัน ใน 7 วันแรก และวัดทุก 2 วัน จนครบ 28 วัน ดังภาพที่ 24



ภาพที่ 23 การเร่งการเกิดสนิมของเหล็กเสริมด้วยศักย์ไฟฟ้า 6 โวลต์



ภาพที่ 24 การวัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ตัวอย่างรูปทรงกระบอก



### 2.1.3 บันทึกการเปลี่ยนแปลงของตัวอย่างทดสอบดังต่อไปนี้

2.1.3.1 ลักษณะการเกิดรอยร้าว (Crack pattern)

2.1.3.2 ระยะเวลาที่เกิดรอยร้าว

2.1.3.3 จำนวน ความกว้างและความยาวของรอยร้าว

2.1.4 เมื่อครบกำหนดการผ่านกระแสไฟฟ้าแล้ว นำตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตและคอนกรีตควบคุมไปทดสอบกำลังการยึดเหนี่ยวของเหล็กเสริมกับคอนกรีต (Bonding test) ดังภาพที่ 25 โดยนำตัวอย่างทดสอบมาเปรียบเทียบกับตัวอย่างที่ไม่ได้ผ่านการเร่งการเกิดสนิม



ภาพที่ 25 การทดสอบกำลังการยึดเหนี่ยว

2.1.5 หลังจากทำการทดสอบกำลังการยึดเหนี่ยวของเหล็กเสริมกับจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตและคอนกรีตควบคุมแล้ว นำตัวอย่างคอนกรีตมาผ่าเพื่อดูสภาพของเหล็กเสริมที่เกิดสนิมและวัดน้ำหนักของเหล็กเสริมที่ลดลงหลังจากการกัดกร่อนของเหล็กเสริม ดังภาพที่ 26



ภาพที่ 26 การลดลงของพื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริมเนื่องจากการเกิดสนิมของตัวอย่างรูปทรงกระบอก

2.1.6 ทำการทดสอบการซึมผ่านของสารละลายโซเดียมคลอไรด์เพื่อศึกษาผลกระทบของคลอไรด์ไอออน ด้วยการพ่นสารละลายซิลเวอร์ไนเตรด 0.1 N และวัดระดับความลึกของขอบเขตสีที่แตกต่างกัน ดังภาพที่ 27



ภาพที่ 27 ผลกระทบของคลอไรด์ไอออน

## 2.2 การเตรียมตัวอย่างรูปคาน

2.2.1 การเตรียมตัวอย่างทดสอบคานจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตและคอนกรีตควบคุม โดยให้กำลังอัดของคอนกรีตทั้งสองประเภทเท่ากัน โดยการหล่อตัวอย่างทดสอบคอนกรีตรูปคาน ขนาด  $10 \times 20 \times 120$  เซนติเมตร เสริมเหล็กข้ออ้อยที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร ให้มี ระยะหุ้มคอนกรีตด้านข้างประมาณ 2.5 เซนติเมตร

2.2.1.1 เตรียมสารละลายโซเดียมซิลิเกต โซเดียมไฮดรอกไซด์ หิน ทราย และ ฝ้าฉาบฉวย ซึ่งสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์มีความเข้มข้น 14 โมลาร์ โดยเตรียมล่วงหน้า เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ก่อนการผสม

2.2.1.2 นำฝ้าฉาบฉวยและทรายใส่ลงในเครื่องผสมคอนกรีต ทำการผสมให้ เข้ากันโดยใช้เวลาในการผสม 3-5 นาที หลังจากนั้นจึงใส่สารละลายทั้งสองลงไปผสมให้เข้ากันอีก ครั้งพร้อมใส่หิน ทำการผสมจนกว่าส่วนผสมเข้ากันได้ดี สำหรับการผสมคอนกรีตควบคุมนำ ปูนซีเมนต์และทรายใส่ลงในเครื่องผสมคอนกรีต ทำการผสมให้เข้ากันโดยใช้เวลาในการผสม 3-5 นาที หลังจากนั้นจึงใส่น้ำลงไปผสมให้เข้ากันอีกครั้งพร้อมใส่หิน ทำการผสมจนกว่าส่วนผสม เข้ากันได้ดี

2.2.1.3 นำจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตและคอนกรีตควบคุมเทลงแบบหล่อรูปคาน ขนาด  $10 \times 20 \times 120$  เซนติเมตร ปาดผิวหน้าให้เรียบแล้วหุ้มด้วยถุงพลาสติกเพื่อป้องกันการระเหย ของน้ำ และเก็บไว้ในอุณหภูมิปกติเป็นเวลา 12 ชั่วโมง ดังภาพที่ 28 และภาพที่ 29 สำหรับคอนกรีต ควบคุมใช้กระสอบเปียกน้ำคลุมเพื่อป้องกันการระเหยของน้ำ และเก็บไว้ในอุณหภูมิปกติ เป็นเวลา 12 ชั่วโมง ดังภาพที่ 30 และภาพที่ 31



ภาพที่ 28 แบบหล่อและเหล็กเสริม



ภาพที่ 29 ตัวอย่างคานจีโอโพลีเมอร์คอนกรีต



ภาพที่ 30 ตัวอย่างคานคอนกรีตควบคุม



ภาพที่ 31 กระสอบเปียกน้ำคลุมตัวอย่างคานคอนกรีตควบคุม เพื่อป้องกันการระเหยของน้ำ

2.2.1.4 ถอดแบบหล่อและหุ้มพลาสติกอีกครั้ง หลังจากนั้นนำคานจีโอโพลีเมอร์คอนกรีตไปบ่มด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ดังภาพที่ 32 และเก็บไว้ในอุณหภูมิปกติ สำหรับคานคอนกรีตควบคุมทำการบ่มคานคอนกรีตควบคุมด้วยน้ำเป็นระยะเวลา 28 วัน และเก็บไว้ในอุณหภูมิปกติ ดังภาพที่ 33 และ ภาพที่ 34





ภาพที่ 32 การบ่มคานจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต



ภาพที่ 33 การบ่มคานคอนกรีตควบคุม



**ภาพที่ 34** ตัวอย่างคานจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตและคานคอนกรีตควบคุมหลังจากการบ่ม และเก็บไว้ในอุณหภูมิปกติ

2.2.2 หลังจากบ่มจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตด้วยความร้อนอุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส ที่ระยะเวลา 1 วัน และทิ้งไว้ในอุณหภูมิปกติ สำหรับคอนกรีตควบคุมบ่มด้วยน้ำเป็นระยะเวลา 28 วัน ทำการเร่งการเกิดสนิมโดยการเชื่อมต่อกระแสไฟฟ้าขั้วบวกกับแท่งทองแดงและขั้วลบกับเหล็กเสริมที่อยู่ในคอนกรีตวางแท่งทดสอบไว้ในน้ำ ผ่านกระแสไฟฟ้ากระแสตรงเป็นระยะเวลา 28 วัน ด้วยความต่างศักย์ไฟฟ้า 6 โวลต์ โดยแช่ตัวอย่างในน้ำและในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ที่ความเข้มข้น 3 เปอร์เซ็นต์ และทำการวัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า ซึ่งใช้เครื่องมือที่ใช้วัดคือ Half-cell potential test ตามมาตรฐาน ASTM C 876 ทำการวัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าทุก 1 วัน ใน 7 วันแรก และวัดทุก 2 วัน จนครบ 28 วัน ดังภาพที่ 35



ภาพที่ 35 การวัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ตัวอย่างรูปคาน

### 2.2.3 ทำการบันทึกการเปลี่ยนแปลงของตัวอย่างทดสอบดังต่อไปนี้

2.2.3.1 ลักษณะการเกิดรอยร้าว (Crack pattern)

2.2.3.2 ระยะเวลาที่เกิดรอยร้าว

2.2.3.3 จำนวน ความกว้างและความยาวของรอยร้าว

2.2.4 เมื่อครบกำหนดการผ่านกระแสไฟฟ้าแล้วนำตัวอย่างคานจีโอโพลิเมอร์ คอนกรีตคานคอนกรีตควบคุม ทดสอบกำลังรับแรงดัดด้วยเครื่องทดสอบ (Universal testing machine) ด้วยอัตราความเร็วที่ 0.001 มิลลิเมตรต่อวินาที โดยนำตัวอย่างทดสอบมาเปรียบเทียบกับกำลังรับแรงดัดกับตัวอย่างที่ไม่ได้ผ่านการเร่งการเกิดสนิม ดังภาพที่ 36





**ภาพที่ 36** การทดสอบกำลังรับแรงดัดของตัวอย่างคานจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตและคานคอนกรีต  
ควบคุม

2.2.5 หลังจากทำการทดสอบกำลังรับแรงดัดแล้ว นำตัวอย่างมาผ่าเพื่อดูสภาพของเหล็กเสริมที่เกิดการกัดกร่อน และวัดน้ำหนักของเหล็กเสริมที่ลดลงหลังจากการกัดกร่อนของเหล็กเสริม ดังภาพที่ 37



**ภาพที่ 37** การลดลงของพื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริมเนื่องจากการเกิดสนิมของตัวอย่างรูปคาน

2.2.6 ทำการทดสอบการซึมผ่านของสารละลายโซเดียมคลอไรด์เพื่อศึกษาผลกระทบของคลอไรด์ไอออน ด้วยการพ่นสารละลายซิลเวอร์ไนเตรด 0.1 N และวัดระดับความลึกของขอบเขตสีที่แตกต่างกัน

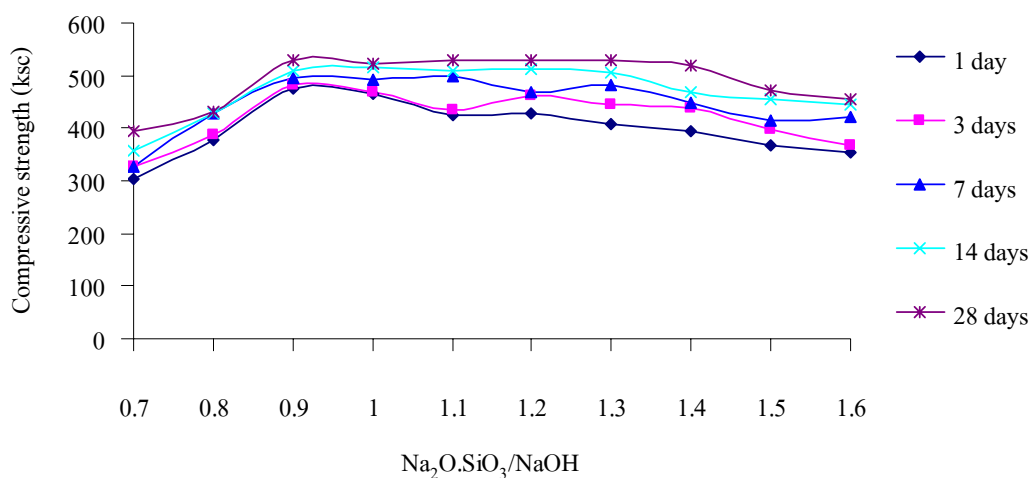
## ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

### 1. อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{O}.\text{SiO}_3 / \text{NaOH}$ ที่เหมาะสมสำหรับจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต

#### 1.1 กำลังรับแรงอัด

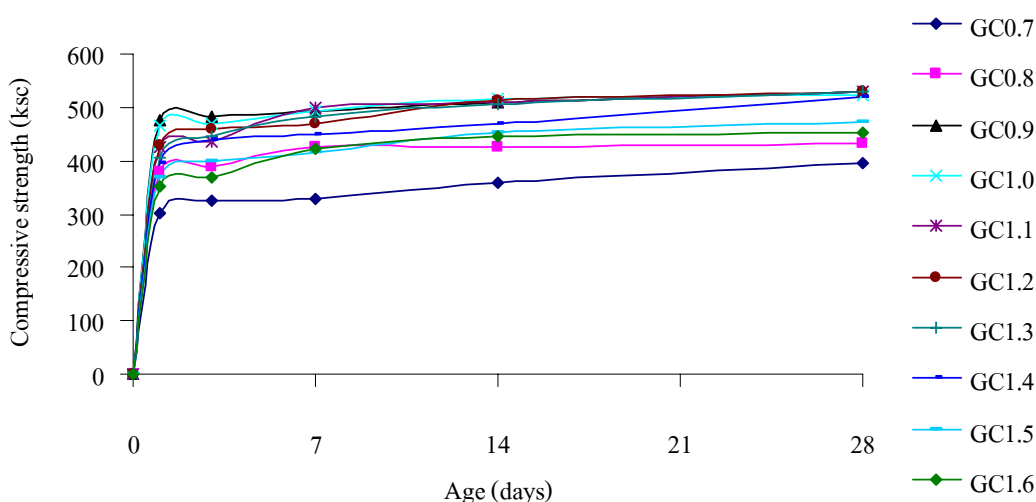
ผลการทดสอบพบว่าอัตราส่วน  $\text{Na}_2\text{O}.\text{SiO}_3 / \text{NaOH}$  มีผลต่อกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต โดยปริมาณสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวแปรหลักที่มีผลต่อกำลังรับแรงอัดและความสามารถทำงานได้ เมื่อปริมาณสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์มีปริมาณลดลง กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตก็เพิ่มขึ้นแต่จะส่งผลกระทบต่อความสามารถทำงานได้น้อยลง สอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา (ปริญญา, 2548) พบว่าอัตราส่วน  $\text{Na}_2\text{O}.\text{SiO}_3 / \text{NaOH}$  ต่ำ เท่ากับ 0.67 และ 1.00 จะให้ค่ากำลังรับแรงอัดสูงกว่าที่อัตราส่วน  $\text{Na}_2\text{O}.\text{SiO}_3 / \text{NaOH}$  สูง เท่ากับ 1.50 และ 3.00 และโดยทั่วไปมีแนวโน้มว่าความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ในช่วงนี้มีผลต่อค่ากำลังอัดไม่มาก สำหรับอุณหภูมิของการบ่มซึ่งมีผลต่อค่ากำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต อุณหภูมิเป็นตัวเร่งการเกิดปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ไรเซชัน (Geopolymerization) โดยส่วนใหญ่ อุณหภูมิที่ใช้ในการบ่มจะอยู่ในช่วง 60 ถึง 100 องศาเซลเซียส ซึ่งในการทดสอบใช้อุณหภูมิที่ 65 องศาเซลเซียส เนื่องจากการบ่มอุณหภูมิที่สูงขึ้นส่งผลให้เกิดการสูญเสียน้ำที่ผิวของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตเกิดการแตกร้าวจากการแห้ง (ปริญญา, 2548)

สำหรับผลการทดสอบเห็นได้ว่าอัตราส่วน  $\text{Na}_2\text{O}.\text{SiO}_3 / \text{NaOH}$  เท่ากับ 1.3 ให้ผลกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่อายุ 28 วัน สูงที่สุด เท่ากับ 530 กก./ซม.<sup>2</sup> ในขณะที่อัตราส่วน  $\text{Na}_2\text{O}.\text{SiO}_3 / \text{NaOH}$  ที่น้อยลงส่งผลให้กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่ลดลง ซึ่งอัตราส่วน  $\text{Na}_2\text{O}.\text{SiO}_3 / \text{NaOH}$  เท่ากับ 0.7 ให้ผลกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่อายุ 28 วัน น้อยที่สุด เท่ากับ 394 กก./ซม.<sup>2</sup> อย่างไรก็ตามอัตราส่วน  $\text{Na}_2\text{O}.\text{SiO}_3 / \text{NaOH}$  ระหว่าง 0.9 – 1.2 ให้ผลกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่ใกล้เคียงกัน ดังภาพที่ 38



ภาพที่ 38 กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต

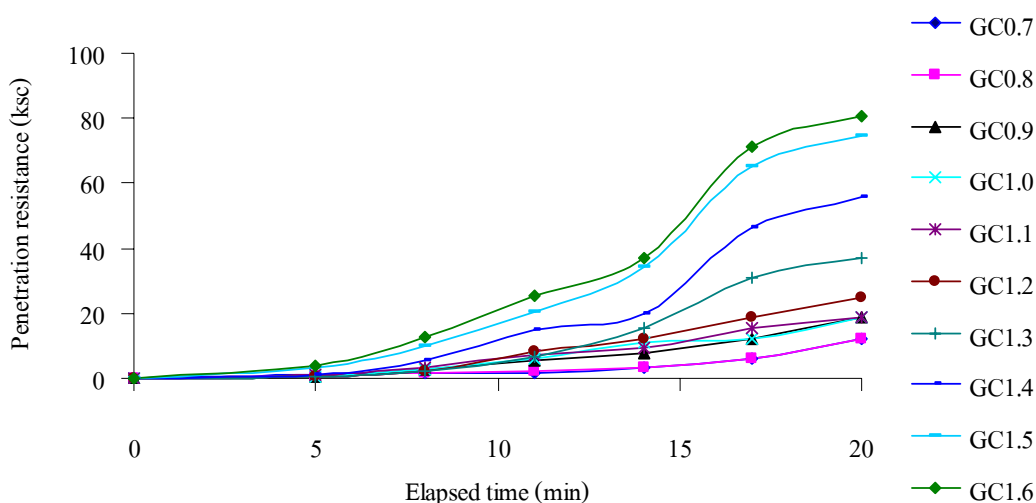
นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบผลของกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่อายุ 3, 7, 14 และ 28 วัน ดังภาพที่ 39 พบว่าการพัฒนากำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงระยะเวลาที่เริ่มผสมจนถึงอายุ 1 วัน หลังจากนั้นการพัฒนากำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจะคงที่และมีกำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยจนถึงอายุ 28 วัน นั้นแสดงว่าการบ่มจีโอโพลิเมอร์ตั้งแต่อายุน้อยเป็นสิ่งสำคัญอย่างยิ่งต่อกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตและการเกิดปฏิกิริยาโพลิเมอร์ไรเซชันที่สมบูรณ์ ซึ่งหลังจากได้แรงให้ การเกิดปฏิกิริยาสมบูรณ์แล้วการทำปฏิกิริยานั้นจะทำให้ช้าลง และส่งผลให้กำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นไม่มากนัก



ภาพที่ 39 อัตราส่วน  $Na_2O.SiO_3 / NaOH$  ต่อกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต

## 1.2 ระยะเวลาการก่อตัว

ระยะเวลาการก่อตัวของจีโพลิเมอร์คอนกรีต ดังภาพที่ 40 พบว่าอัตราส่วน  $Na_2O.SiO_3 / NaOH$  ที่เพิ่มขึ้น ส่งผลต่อระยะเวลาการก่อตัวของจีโพลิเมอร์คอนกรีตเร็วขึ้น และมีค่าความต้านทานการกด (Penetration resistance, PR) สูงสุด เท่ากับ 80 กก./ซม.<sup>2</sup> ที่ระยะเวลาการก่อตัว 20 นาที ของจีโพลิเมอร์คอนกรีตอัตราส่วน  $Na_2O.SiO_3 / NaOH$  เท่ากับ 1.6 ซึ่งในการทดสอบระยะเวลาการก่อตัวจะทำการทดสอบในช่วงระยะเวลา 3 นาที จนถึง 20 นาที เนื่องจากหลังจาก 20 นาที จีโพลิเมอร์คอนกรีตแข็งตัวไปแล้วไม่สามารถทำการทดสอบระยะเวลาการก่อตัวได้

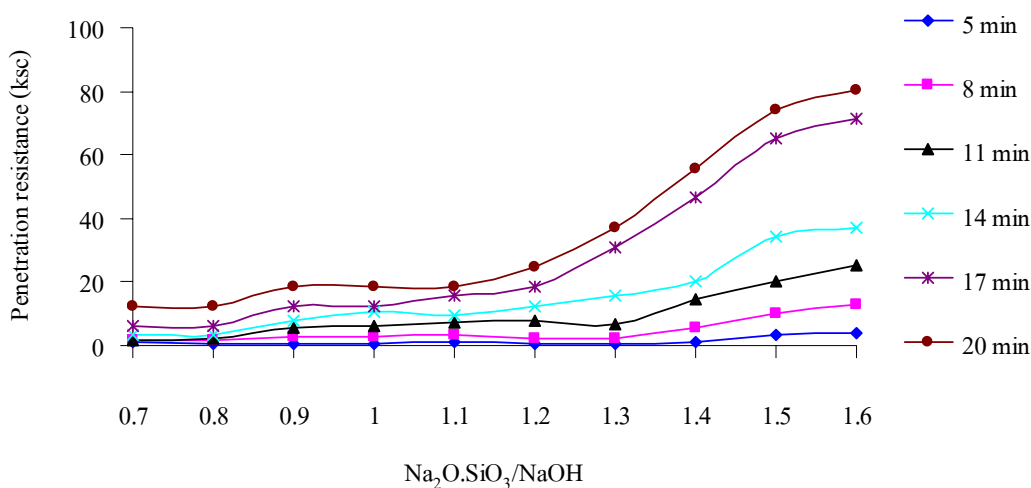


ภาพที่ 40 ระยะเวลาการก่อตัวของจีโพลิเมอร์คอนกรีต

เมื่อพิจารณาจุดเริ่มแข็งตัว ที่แรงต้านทานการกด (Penetration resistance, PR) เท่ากับ 5 กก./ซม.<sup>2</sup> (70 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว) และอัตราส่วน  $Na_2O.SiO_3 / NaOH$  เท่ากับ 0.7-1.6 โดยน้ำหนัก พบว่าจุดเริ่มแข็งตัวของจีโพลิเมอร์คอนกรีตที่ระยะเวลา 14.74, 14.68, 11.08, 10.05, 9.45, 9.44, 9.40, 7.63, 5.90 และ 5.09 นาที ตามลำดับ โดยมีค่าเฉลี่ย เท่ากับ 9.89 นาที

จากผลการทดสอบระยะเวลาการก่อตัว เมื่ออัตราส่วน  $Na_2O.SiO_3 / NaOH$  สูงขึ้น ค่าการก่อตัวของจีโพลิเมอร์คอนกรีตรวดเร็วขึ้นและส่งผลให้มีค่าความต้านทานการกดที่มากขึ้น ซึ่งอัตราส่วน  $Na_2O.SiO_3 / NaOH$  มากกว่า 1.3 มีค่าความต้านทานการกดเพิ่มขึ้นตามลำดับ จากภาพที่ 41 พบว่าอัตราส่วน  $Na_2O.SiO_3 / NaOH$  ต่ำกว่า 1.3 ค่าความต้านทานการกดเพิ่มขึ้น

อย่างช้าๆ และอัตราส่วน  $\text{Na}_2\text{O}.\text{SiO}_3 / \text{NaOH}$  มากกว่า 1.3 ที่เวลาตั้งแต่ 14 นาที ความต้านทานการกดเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว นั้นหมายความว่าความสามารถในการทำงานได้ของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่อัตราส่วน  $\text{Na}_2\text{O}.\text{SiO}_3 / \text{NaOH}$  มากกว่า 1.3 น้อยลง และอัตราส่วน  $\text{Na}_2\text{O}.\text{SiO}_3 / \text{NaOH}$  ที่เพิ่มขึ้นนี้ยังส่งผลให้กำลังรับแรงอัดน้อยลงด้วยเช่นกันดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น



ภาพที่ 41 อัตราส่วน  $\text{Na}_2\text{O}.\text{SiO}_3 / \text{NaOH}$  ของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตต่อแรงต้านทานการกด

### 1.3 โมดูลัสยืดหยุ่น

อัตราส่วนระหว่างความเค้นและความเครียดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตในช่วงที่มีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรง เรียกว่า โมดูลัสยืดหยุ่น (Young's modulus of elasticity) ซึ่งเป็นตัวบ่งชี้ถึงความต้านทานต่อการเสียรูปของวัสดุ โดยหาจากอัตราส่วนของหน่วยแรงต่อหน่วยการหดตัว ซึ่งเกิดจากการกระทำของหน่วยแรงนั้นหรือกำลังอัดประลัย

โมดูลัสยืดหยุ่นบ่งบอกความต้านทานต่อการเปลี่ยนรูปของวัสดุ คือ ความลาดชันของเส้นความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด โดยส่วนใหญ่ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตขึ้นอยู่กับความแกร่งหรือคุณสมบัติการเสียรูปของจีโอโพลิเมอร์เฟสตัว มวลรวม และการยึดเกาะระหว่างจีโอโพลิเมอร์เฟสตัวของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต สำหรับผลการทดสอบค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตอัตราส่วน  $\text{Na}_2\text{O}.\text{SiO}_3 / \text{NaOH}$  เท่ากับ 0.7, 1.0 และ 1.3 ดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 โมดูลัสยืดหยุ่น

| Mix ID | Mean<br>Compressive strength<br>(ksc) | Age of geopolymer<br>concrete<br>(day) | Modulus of<br>elasticity<br>(MPa) |
|--------|---------------------------------------|----------------------------------------|-----------------------------------|
| GC0.7  | 418                                   | 180                                    | 25130                             |
| GC1.0  | 533                                   | 180                                    | 37530                             |
| GC1.3  | 548                                   | 180                                    | 54370                             |

สำหรับคอนกรีตที่ใช้มวลรวมน้ำหนักปกติ (ไม่ใช้มวลรวมเบา) ซึ่งมีค่าหน่วยน้ำหนัก 2300 ถึง 2400 กก./ม.<sup>3</sup> ACI 318 ได้แนะนำการคำนวณหาโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต ดังสมการที่ 7

$$4.73\sqrt{f'_c} \quad (7)$$

ACI committee 363 รายงานว่า ค่าโมดูลัสที่ได้จากการคำนวณจากสมการที่ 7 จะใช้ได้กับคอนกรีตที่มีกำลังรับแรงอัดไม่เกิน 41.3 เมกะปาสกาล สำหรับคอนกรีตที่มีค่าสูงกว่านี้ ACI 363 (1992) ได้แนะนำการคำนวณหาโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต ดังสมการที่ 8 และมีกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตไม่เกิน 82.7 เมกะปาสกาล

$$E_c = 3320\sqrt{f'_c} + 6900 \quad (8)$$

เมื่อเปรียบเทียบระหว่างผลการทดสอบค่าโมดูลัสการยืดหยุ่นของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตกับการคำนวณค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต จากสมการที่ 7 และสมการที่ 8 ดังตารางที่ 6

ตารางที่ 6 เปรียบเทียบค่าโมดูลัสการยืดหยุ่นจากการทดสอบกับสมการที่ 7 และสมการที่ 8

| Mean Compressive<br>strength (ksc) | Ec (measured)<br>(MPa) | Ec (สมการที่ 7)<br>(MPa) | Ec (สมการที่ 8)<br>(MPa) |
|------------------------------------|------------------------|--------------------------|--------------------------|
| 418                                | 25130                  | 30283                    | 27515                    |
| 533                                | 30530                  | 34196                    | 30902                    |
| 548                                | 31370                  | 34674                    | 31283                    |

จากตารางที่ 6 ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่ได้จากการทดสอบน้อยกว่าค่าโมดูลัสของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่คำนวณจากสมการที่ 7 และสมการที่ 8 ซึ่งจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่มีค่ากำลังรับแรงอัด 418 กก./ซม.<sup>2</sup> มีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นน้อยที่สุด เท่ากับ 25130 MPa และจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่มีค่ากำลังรับแรงอัด 548 กก./ซม.<sup>2</sup> มีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นมากที่สุด เท่ากับ 31530 MPa

#### 1.4 กำลังรับแรงดึง

กำลังรับแรงดึงของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต ซึ่งทำการทดสอบโดยวิธีผ่าซีก (Splitting tensile test) จากความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงดึงและกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต (Neville, 2002) ได้แนะนำการคำนวณค่ากำลังรับแรงดึง ดังสมการที่ 9

$$f'_{ct} = 0.3(f'_{cm})^{2/3} \quad (9)$$

สำหรับผลการทดสอบค่ากำลังรับแรงดึงของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตกับการคำนวณค่ากำลังรับแรงดึงของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต จากสมการที่ 9 ดังตารางที่ 7



ตารางที่ 7 กำลังรับแรงดึง

| Mix ID | Mean<br>Compressive strength<br>(ksc) | Mean Indirect<br>Tensile strength<br>(MPa) | Splitting strength<br>(สมการที่ 9)<br>(MPa) |
|--------|---------------------------------------|--------------------------------------------|---------------------------------------------|
| GC0.7  | 418                                   | 0.884                                      | 3.571                                       |
| GC1.0  | 533                                   | 1.184                                      | 4.193                                       |
| GC1.3  | 548                                   | 1.226                                      | 4.272                                       |

จากตารางที่ 7 ผลการทดสอบค่ากำลังรับแรงดึงของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต มีความสัมพันธ์กับค่ากำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต ซึ่งค่ากำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่ากำลังรับแรงดึงเพิ่มขึ้นด้วยเช่นเดียวกัน เมื่อพิจารณาผลการทดสอบกำลังรับแรงดึงของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตเปรียบเทียบกับค่าคำนวณสมการที่ 9 พบว่าผลการทดสอบค่ากำลังรับแรงดึงของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตมีค่าน้อยกว่าการคำนวณทุกตัวอย่างการทดสอบ

## 2. การกัดกร่อนของเหล็กเสริมในจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตและคอนกรีตควบคุม

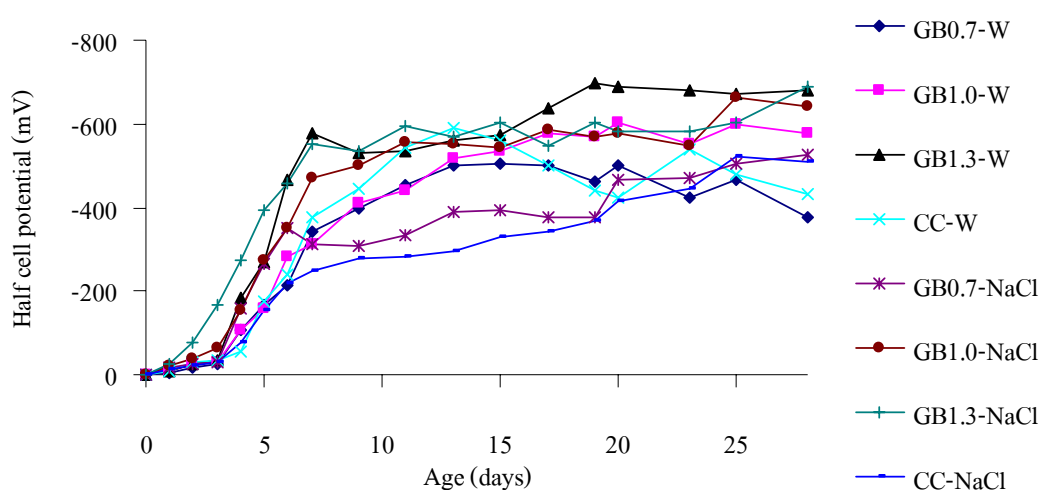
### 2.1 ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์

การเร่งการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคานจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตเสริมเหล็กและคานคอนกรีตเสริมเหล็กควบคุมเป็นระยะเวลา 28 วัน โดยเปรียบเทียบกับค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์มาตรฐาน ASTM C 876 ดังตารางที่ 8

ตารางที่ 8 ค่าความต่างศักย์ของไฟฟ้าครึ่งเซลล์และแนวโน้มจะเป็นของการกัดกร่อน ASTM C 876

| Half-cell potential (mV) | Percentage chance of active corrosion |
|--------------------------|---------------------------------------|
| < - 350                  | 90%                                   |
| - 200 to - 350           | 50%                                   |
| > - 200                  | 10%                                   |

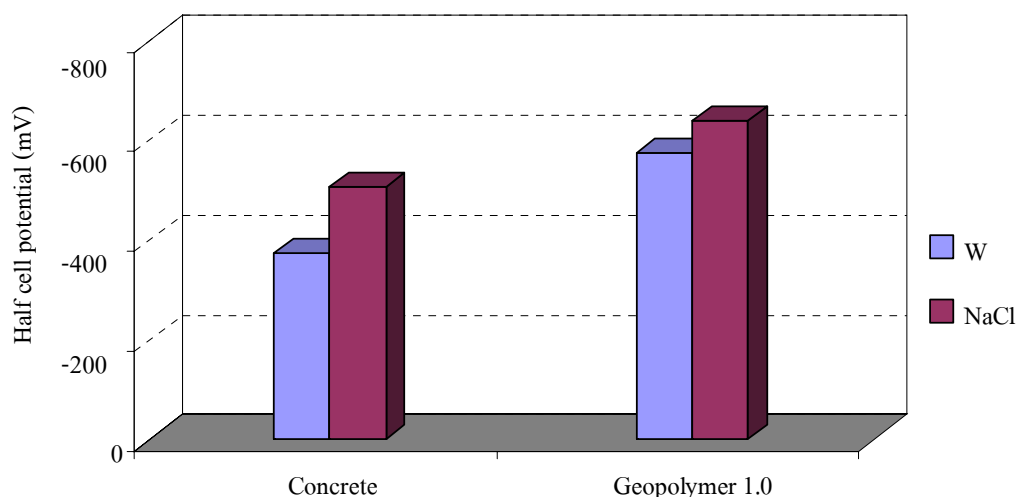
ผลการทดสอบค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ของคานจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตแช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์และเร่งการเกิดสนิม ซึ่งทำการวัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์เช่นเดียวกับคานจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตแช่ในน้ำและเร่งการเกิดสนิม พบว่าการเร่งการเกิดสนิมของเหล็กเสริมของคานจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตในช่วงระยะเวลา 7 วัน ค่าความต่างศักย์ของไฟฟ้าครึ่งเซลล์มีอัตราเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อเปรียบเทียบกับคานจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตแช่ในน้ำและเร่งการเกิดสนิม ดังภาพที่ 42 ทั้งนี้เนื่องจากสารละลายโซเดียมคลอไรด์เป็นตัวเร่งให้ปฏิกิริยาการเกิดสนิมได้เร็วกว่าน้ำ และส่งผลให้ความกว้างของรอยร้าวมีความกว้างมากกว่าคานจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่แช่ในน้ำด้วยเช่นเดียวกัน



ภาพที่ 42 ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์

เมื่อพิจารณาค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ของคานคอนกรีตควบคุมกับคานจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต พบว่ามีค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์เกินกว่ามาตรฐานกำหนดไว้ คือ มีค่ามากกว่า -350 mV ซึ่งแสดงว่ามีความน่าจะเป็นของการกัดกร่อนมากกว่า 90 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ของคานคอนกรีตควบคุมกับคานจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตอัตราส่วน  $Na_2O.SiO_3 / NaOH$  เท่ากับ 1.0 พบว่าคานจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตแช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์และเร่งการเกิดสนิมกับคานจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตแช่ในน้ำและเร่งการเกิดสนิม มีค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์มากกว่าคานคอนกรีตควบคุม ดังภาพที่ 43 นอกจากนี้เมื่อพิจารณาค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ของคานคอนกรีตควบคุมแช่ในน้ำและเร่งการเกิดสนิมกับค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ของคานคอนกรีตควบคุมแช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์และเร่งการเกิดสนิม มีค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์เพิ่มขึ้น 35.73 เปอร์เซ็นต์

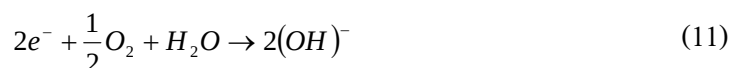
และสำหรับค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ของคานจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตอัตราส่วน  $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{SiO}_3 / \text{NaOH}$  เท่ากับ 1.0 แช่น้ำและเร่งการเกิดสนิมกับค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ของคานจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตแช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์และเร่งการเกิดสนิม มีค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์เพิ่มขึ้น 11.45 เปรอร์เซ็นต์ ตามลำดับ



ภาพที่ 43 ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ของคานคอนกรีตควบคุมและคานจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตอัตราส่วน  $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{SiO}_3 / \text{NaOH}$  เท่ากับ 1.0

สำหรับผลการทดสอบค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ของคานจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต พบว่าอัตราส่วน  $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{SiO}_3 / \text{NaOH}$  มีผลต่อค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ เนื่องจากคานจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่มีอัตราส่วน  $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{SiO}_3 / \text{NaOH}$  สูง มีปริมาณของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่น้อย ซึ่งสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์จะเป็นตัวการชะละลายสารประกอบต่างๆ โดยที่จีโอโพลิเมอร์คอนกรีตมีสารประกอบอลูมิเนียม ( $\text{Al}$ ) และซิลิกอน ( $\text{Si}$ ) จะถูกชะละลายออกมาเนื่องจากเป็นสารหลัก เมื่อปริมาณสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มากขึ้น การชะละลายก็จะมากขึ้นและส่งผลไปสู่การเกิดปฏิกิริยาโพลิเมอร์ไรเซชันที่สมบูรณ์ แต่เมื่อปริมาณสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์น้อย การชะละลายก็จะน้อยส่งผลให้การเกิดปฏิกิริยาที่ไม่สมบูรณ์หรือทำปฏิกิริยาไม่หมดจะถูกผนวกและกลายเป็นส่วนหนึ่งของเนื้อจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต ทำให้จีโอโพลิเมอร์คอนกรีตมีช่องว่างหรือโพรงขนาดใหญ่เนื่องจากการทำปฏิกิริยาของเถ้าลอยเมื่อเร่งการเกิดสนิมและแช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ส่งผลให้โครงสร้างภายในมีรูพรุนหรือช่องว่างซึ่งเป็นตัวส่งผ่านของน้ำและออกซิเจน โดยมีไอออนของคลอไรด์เป็นสะพานเชื่อมให้เกิด

กระบวนการทางไฟฟ้า-เคมี กระบวงจรและเกิดการไหลของอิเล็กตรอนขึ้น ดังสมการที่ 10 และสมการที่ 11



นอกจากนี้ผลการทดสอบค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ของคานจิโอโพลิเมอร์คอนกรีตแช่น้ำและเร่งการเกิดสนิม ซึ่งทำการวัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ ทุก 1 วัน ใน 7 วันแรก และวัดทุก 2 วัน จนครบระยะเวลา 28 วัน พบว่าการเร่งการเกิดสนิมของเหล็กเสริมของคานจิโอโพลิเมอร์คอนกรีตเสริมเหล็กในช่วงระยะเวลา 7 วัน ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์มีอัตราเพิ่มขึ้นอย่างสม่ำเสมอ และสามารถสังเกตเห็นรอยร้าวเนื่องจากการเกิดสนิมของเหล็กเสริมตลอดจนคราบสนิมที่ไหลซึมออกมานอกคานจิโอโพลิเมอร์คอนกรีต เมื่อเร่งการเกิดสนิมของเหล็กเสริมจนครบระยะเวลา 28 วัน ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์เพิ่มขึ้นและรอยร้าวก็มีความกว้างมากขึ้นเนื่องจากการเกิดสนิมของเหล็กเสริม ดังภาพที่ 44

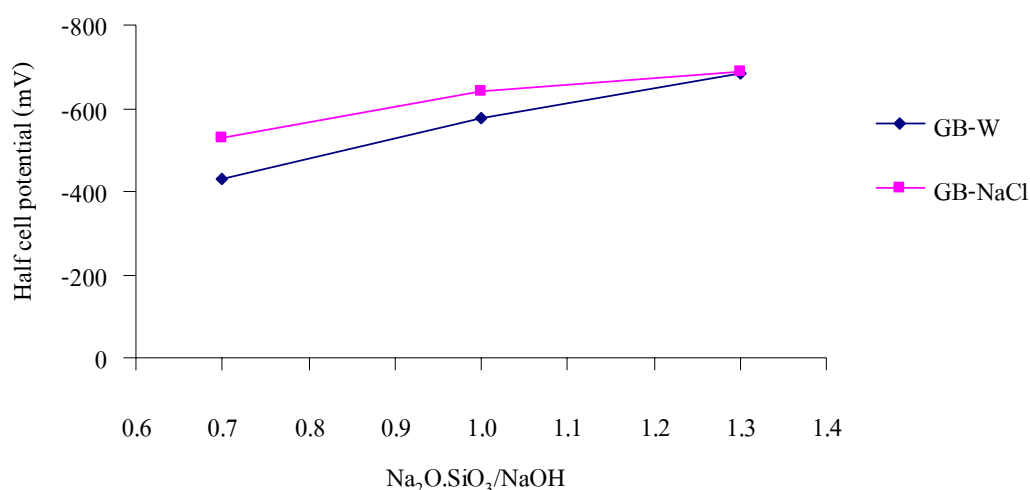


ภาพที่ 44 รอยร้าวของคานจิโอโพลิเมอร์คอนกรีตเนื่องจากการเกิดสนิมของเหล็กเสริม

เมื่อเปรียบเทียบผลการทดสอบค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ของคานจิโอโพลิเมอร์ที่อัตราส่วน  $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{SiO}_2 / \text{NaOH}$  เท่ากับ 0.7, 1.0 และ 1.3 พบว่าค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ของคานจิโอโพลิเมอร์คอนกรีตแช่น้ำสารละลายโซเดียมคลอไรด์และเร่งการเกิดสนิมมีค่ามากกว่า

คานจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตแช่น้ำและเร่งการเกิดสนิม โดยที่คานจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่อัตราส่วน  $Na_2O.SiO_3 / NaOH$  เท่ากับ 1.3 และแช่น้ำและเร่งการเกิดสนิมมีค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์มากที่สุด เท่ากับ -690 mV รองลงมา คือ คานจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่อัตราส่วน  $Na_2O.SiO_3 / NaOH$  เท่ากับ 1.0 และ 0.7 ซึ่งมีค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ เท่ากับ -642 mV และ -527 mV ตามลำดับ ส่วนคานจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตอัตราส่วน  $Na_2O.SiO_3 / NaOH$  เท่ากับ 1.3 และแช่น้ำและเร่งการเกิดสนิมมีค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ เท่ากับ -682 mV รองลงมา คือ คานจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่อัตราส่วน  $Na_2O.SiO_3 / NaOH$  เท่ากับ 1.0 และ 0.7 ซึ่งซึ่งมีค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ เท่ากับ -576 mV และ -431 mV ตามลำดับ จากค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์เห็นได้ว่า ที่อายุการทดสอบ 28 วัน มีค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ไม่แตกต่างกันมากทั้งคานจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตแช่น้ำและเร่งการเกิดสนิมและคานจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตแช่น้ำและเร่งการเกิดสนิม

ดั่งภาพที่ 45

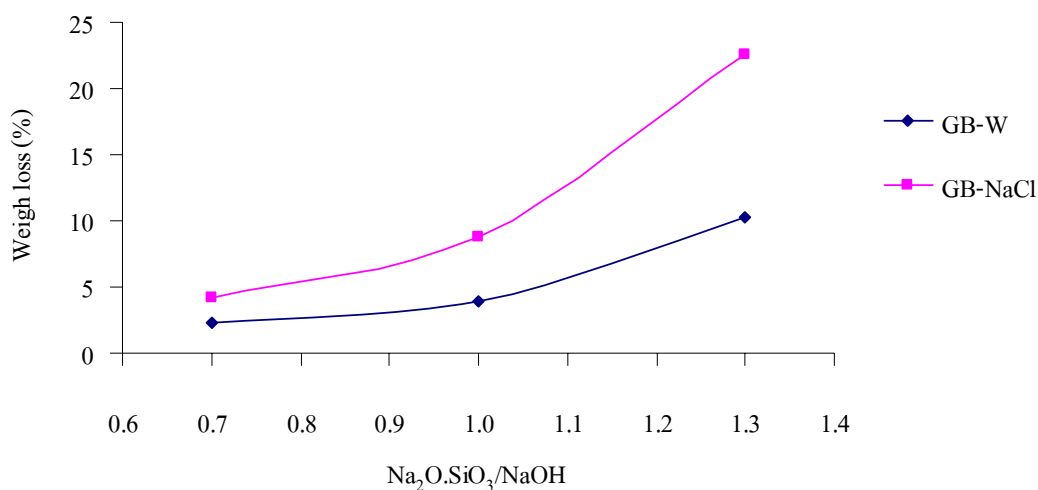


ภาพที่ 45 ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ของคานจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตแช่น้ำและเร่งการเกิดสนิม และแช่น้ำและเร่งการเกิดสนิมเป็นระยะเวลา 28 วัน

## 2.2 การสูญเสียพื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริม

การเร่งการเกิดสนิมของเหล็กเสริมทำให้พื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริมลดลงตามระดับของการกัดกร่อนที่เกิดขึ้น ซึ่งอัตราส่วน  $Na_2O.SiO_3 / NaOH$  ของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตมีผลต่อการสูญเสียพื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริม จากผลการทดสอบพบว่าคานจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตแช่น้ำ

สารละลายโซเดียมคลอไรด์และมีการเร่งการเกิดสนิมที่ระยะเวลา 28 วัน มีการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมมากที่สุด เท่ากับ 22.51, 8.78 และ 4.23 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมีอัตราส่วน  $Na_2O.SiO_3 / NaOH$  เท่ากับ 1.3, 1.0 และ 0.7 ตามลำดับ ดังภาพที่ 46



ภาพที่ 46 อัตราส่วน  $Na_2O.SiO_3 / NaOH$  ต่อการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริม

เมื่อพิจารณาการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมของคานาจีโพลิเมอร์คอนกรีตแช่ในน้ำและเร่งการเกิดสนิมของเหล็กเสริม พบว่ามีการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมน้อยกว่าของคานาจีโพลิเมอร์คอนกรีตแช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์และเร่งการเกิดสนิมที่ระยะเวลา 28 วัน ซึ่งมีการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริม เท่ากับ 10.26, 3.87 และ 2.33 เปอร์เซ็นต์ ดังภาพที่ 47 ซึ่งมีอัตราส่วน  $Na_2O.SiO_3 / NaOH$  ของจีโพลิเมอร์คอนกรีต เท่ากับ 1.3, 1.0 และ 0.7 ตามลำดับ

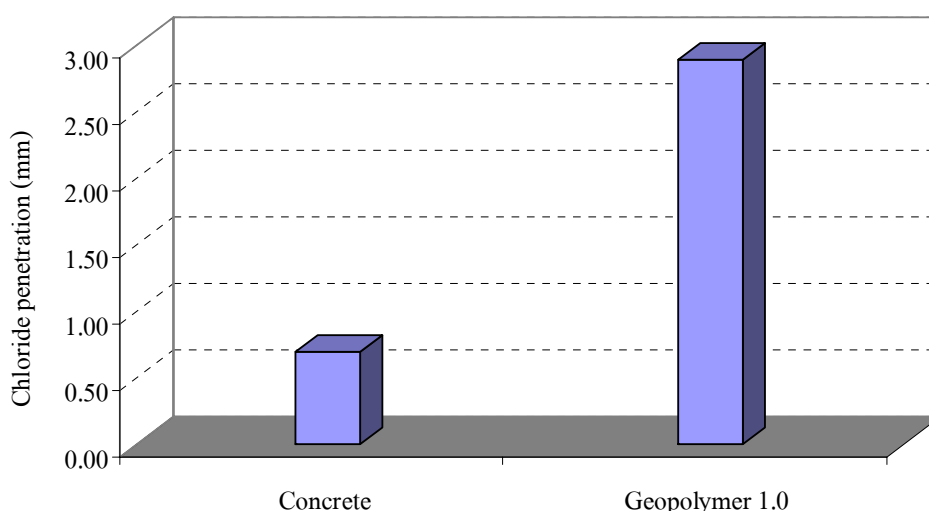


ภาพที่ 47 การกัดกร่อนของเหล็กเสริม

### 2.3 การซึมผ่านของสารละลายโซเดียมคลอไรด์

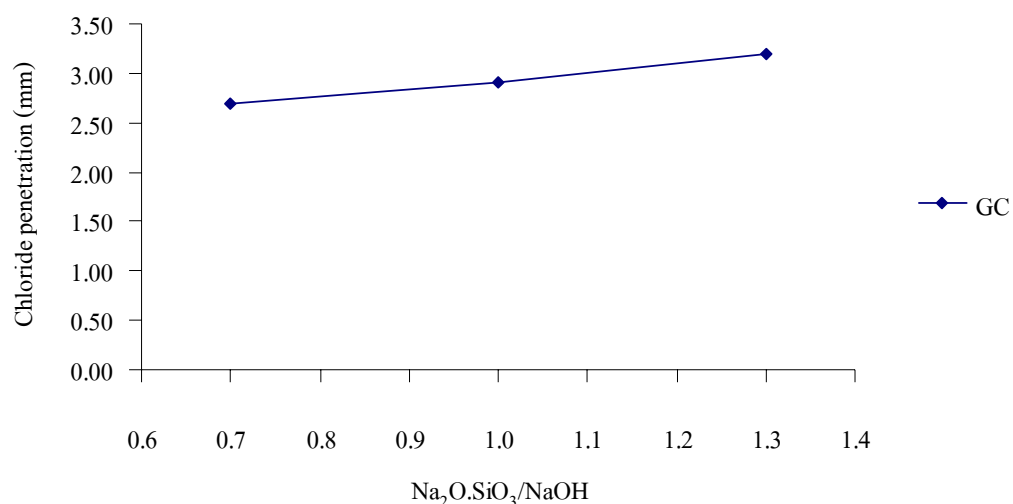
การวัดระดับความลึกของคลอไรด์ด้วยการพ่นสารละลายซิลเวอร์ไนเตรดและวัดระดับความลึกของขอบเขตสีที่แตกต่างกัน โดยนำตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตและคอนกรีตควบคุมแช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์เป็นระยะเวลา 28 วัน ให้ศักย์ไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 6 โวลต์ กดให้แตกตามแนวเส้นผ่านศูนย์กลางออกเป็นสองส่วนและฉีดพ่นสารละลายซิลเวอร์ไนเตรดบนผิวด้านในของตัวอย่าง สารละลายซิลเวอร์ไนเตรดสามารถทำปฏิกิริยากับคลอไรด์ให้สีม่วงดำ จึงทำให้มองเห็นแถบสีม่วงดำบนผิวดตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตและคอนกรีตควบคุม ระยะความลึกของคลอไรด์ที่วัดได้สามารถบ่งชี้ถึงคุณสมบัติด้านความต้านทานการซึมผ่านของคลอไรด์ที่สามารถมองเห็นด้วยตาได้โดยความลึกการซึมผ่านของคลอไรด์ส่งผลให้มีการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตเกิดขึ้น

ผลการทดสอบการซึมผ่านของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ดังภาพที่ 48 เมื่อเปรียบเทียบการซึมผ่านของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ของคอนกรีตควบคุมกับจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตอัตราส่วน  $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{SiO}_3 / \text{NaOH}$  เท่ากับ 1.0 พบว่าการซึมผ่านของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ของคอนกรีตมีค่าน้อยกว่าการซึมผ่านของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตอัตราส่วน  $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{SiO}_3 / \text{NaOH}$  เท่ากับ 1.0 ถึง 78.12 เปอร์เซ็นต์



ภาพที่ 48 ความลึกการซึมผ่านของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ของคอนกรีตควบคุม และจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตอัตราส่วน  $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{SiO}_3 / \text{NaOH}$  เท่ากับ 1.0

สำหรับผลการทดสอบการซึมผ่านของคลอไรด์ พบว่าอัตราส่วน  $Na_2O.SiO_3 / NaOH$  ของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต เท่ากับ 0.7 มีค่าการซึมผ่านของคลอไรด์น้อยที่สุด และอัตราส่วน  $Na_2O.SiO_3 / NaOH$  เท่ากับ 1.0 และ 1.3 ตามลำดับ ดังภาพที่ 49



ภาพที่ 49 ความลึกการซึมผ่านของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ในจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต

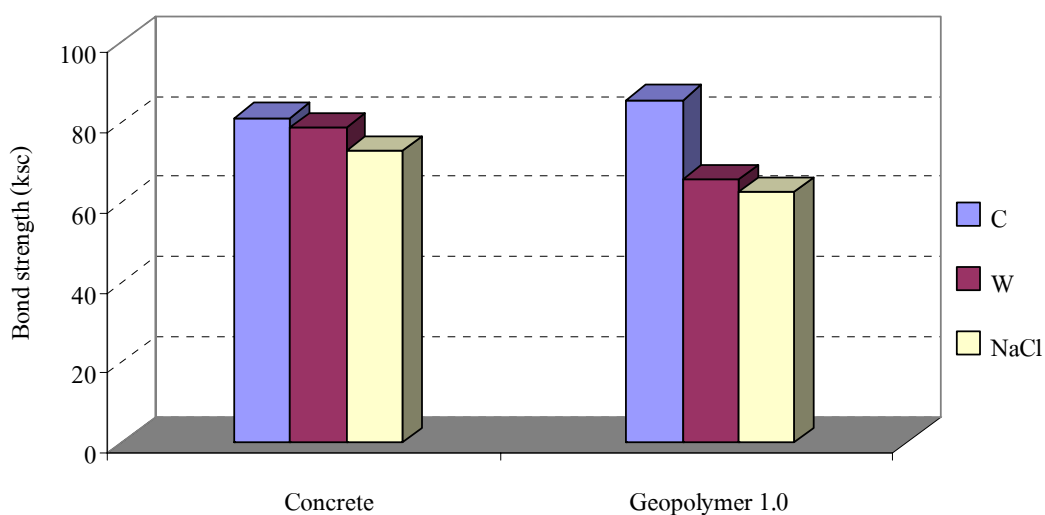
เมื่อพิจารณาค่าการซึมผ่านของคลอไรด์ของตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต อัตราส่วน  $Na_2O.SiO_3 / NaOH$  เท่ากับ 0.7, 1.0 และ 1.3 ดังภาพที่ 49 สามารถอธิบายได้ว่า อัตราส่วน  $Na_2O.SiO_3 / NaOH$  ที่เพิ่มขึ้นของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต มีผลต่อระดับความลึกของการซึมผ่านของคลอไรด์ เมื่อเปรียบเทียบการซึมผ่านของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตอัตราส่วน  $Na_2O.SiO_3 / NaOH$  เท่ากับ 1.0 และ 1.3 กับการซึมผ่านของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตอัตราส่วน  $Na_2O.SiO_3 / NaOH$  เท่ากับ 0.7 พบว่าการซึมผ่านของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตอัตราส่วน  $Na_2O.SiO_3 / NaOH$  เท่ากับ 1.0 เพิ่มขึ้น เท่ากับ 7.41 เปอร์เซ็นต์ และการซึมผ่านของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตอัตราส่วน  $Na_2O.SiO_3 / NaOH$  เท่ากับ 1.3 เพิ่มขึ้น เท่ากับ 18.51 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ซึ่งการซึมผ่านของสารละลายโซเดียมคลอไรด์นี้ส่งผลให้เกิดการกัดกร่อนของเหล็กเสริมในจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต



### 3. กำลังการยึดเหนี่ยวของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตและคอนกรีตควบคุม

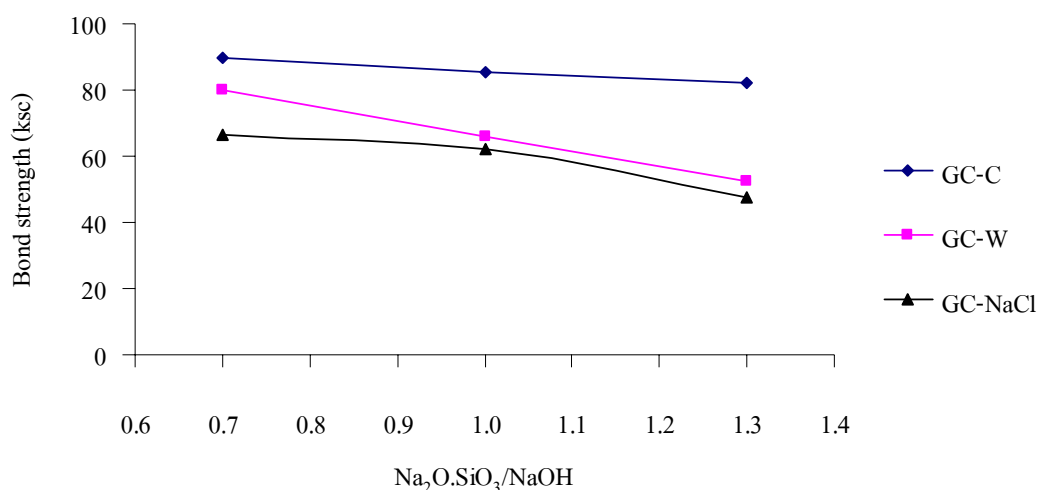
#### 3.1 กำลังการยึดเหนี่ยว

กำลังการยึดเหนี่ยวของคอนกรีตควบคุมและจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตอัตราส่วน  $Na_2O.SiO_3 / NaOH$  เท่ากับ 1.0 ดังภาพที่ 50 พบว่ากำลังการยึดเหนี่ยวของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตมากกว่ากำลังการยึดเหนี่ยวของคอนกรีตควบคุม เท่ากับ 5.21 เปอร์เซ็นต์ ของคอนกรีตควบคุม เมื่อพิจารณากำลัง การยึดเหนี่ยวจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตและคอนกรีตควบคุมแช่ในน้ำและแรงการเกิดสนิม และจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตและคอนกรีตควบคุมแช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์และแรงการเกิดสนิม พบว่าจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตมีค่ากำลังการยึดเหนี่ยวลดลงมากกว่าคอนกรีตควบคุม โดยที่จีโอโพลิเมอร์คอนกรีตแช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์และแรงการเกิดสนิมมีค่ากำลังการยึดเหนี่ยวลดลงมากที่สุด เท่ากับ 27.14 เปอร์เซ็นต์ และเมื่อเปรียบเทียบกำลังการยึดเหนี่ยวของคอนกรีตควบคุมแช่ในน้ำและแรงการเกิดสนิม และคอนกรีตควบคุมแช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์และแรงการเกิดสนิมกับคอนกรีตควบคุมที่ไม่ผ่านการแรงการเกิดสนิม พบว่ามีค่ากำลังการยึดเหนี่ยวลดลง เท่ากับ 3.11 และ 10.12 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ



ภาพที่ 50 กำลังการยึดเหนี่ยวของคอนกรีตควบคุมและจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต  
อัตราส่วน  $Na_2O.SiO_3 / NaOH$  เท่ากับ 1.0

อัตราส่วน  $\text{Na}_2\text{O}.\text{SiO}_3 / \text{NaOH}$  มีผลต่อกำลังการยึดเหนี่ยวของเหล็กเสริมในจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต พบว่าอัตราส่วน  $\text{Na}_2\text{O}.\text{SiO}_3 / \text{NaOH}$  ที่เพิ่มขึ้นของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต ตลอดจนการทดสอบโดยการแช่จีโอโพลิเมอร์คอนกรีตในน้ำและแรงการเกิดสนิม และการแช่จีโอโพลิเมอร์คอนกรีตในสารละลายโซเดียมคลอไรด์และแรงการเกิดสนิม มีผลต่อกำลังการยึดเหนี่ยวของเหล็กเสริม ดังภาพที่ 51 เมื่อเปรียบเทียบกำลังการยึดเหนี่ยวของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต พบว่ากำลังการยึดเหนี่ยวของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตอัตราส่วน  $\text{Na}_2\text{O}.\text{SiO}_3 / \text{NaOH}$  เท่ากับ 0.7, 1.0 และ 1.3 โดยจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตแช่ในน้ำและแรงการเกิดสนิม มีค่ากำลังการยึดเหนี่ยวลดลง เท่ากับ 10, 38 และ 20 เปอร์เซ็นต์ สำหรับจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตแช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์และแรงการเกิดสนิม มีค่ากำลังการยึดเหนี่ยวลดลงมากที่สุด เท่ากับ 25, 44 และ 24 เปอร์เซ็นต์



ภาพที่ 51 กำลังการยึดเหนี่ยวของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต

เมื่อพิจารณาการลดลงของค่ากำลังการยึดเหนี่ยวของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตและคอนกรีตควบคุม พบว่าการเกิดสนิมของเหล็กเสริมส่งผลให้ค่ากำลังการยึดเหนี่ยวลดลง โดยที่ตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตและคอนกรีตควบคุมแช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์และแรงการเกิดสนิม มีอัตราการเกิดสนิมมากกว่าตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตและคอนกรีตควบคุมแช่ในน้ำและแรงการเกิดสนิมในทุกตัวอย่างทดสอบ

จากผลการทดสอบกำลังการยึดเหนี่ยวของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตและคอนกรีตควบคุม เมื่อเปรียบเทียบการเกิดสนิมของเหล็กเสริมเนื่องจากการแช่ตัวอย่างในสารละลายโซเดียมคลอไรด์และแช่ในน้ำและเร่งการเกิดสนิม พบว่าการแช่ตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตและคอนกรีตควบคุมในสารละลายโซเดียมคลอไรด์และเร่งการเกิดสนิม มีอัตราการเกิดสนิมมากกว่าการแช่ตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตและคอนกรีตควบคุมในน้ำและเร่งการเกิดสนิม เนื่องจากคลอไรด์เป็นตัวเร่งกระบวนการเกิดสนิมของเหล็กเสริม โดยไอออนของคลอไรด์ (Chloride ions) ทำให้ความเป็นด่างที่ป้องกันไม่ให้เกิดสนิมของเหล็กเสริมลดลง และส่งผลกระทบต่อกำลังการยึดเหนี่ยวของเหล็กเสริมให้น้อยลง

#### 4. พฤติกรรมการรับแรงดัดเมื่อเกิดการกักกร่อนของเหล็กเสริม

##### 4.1 การวิเคราะห์กำลังต้านทาน โมเมนต์ดัด

การทดสอบตัวอย่างคานจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตเสริมเหล็กภายใต้การเพิ่มขึ้นของน้ำหนักบรรทุกจนกระทั่งเกิดการวิบัติ ซึ่งสามารถวิเคราะห์กำลังต้านทานโมเมนต์ดัดของคานจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่สภาวะต่างๆ ตามพฤติกรรมของน้ำหนักบรรทุก และยังสามารถหาค่าของความโค้ง (Curvature  $\phi$ ) ซึ่งเป็นความชันของเส้นแสดงหน่วยการยึดหดตัวที่สอดคล้องกับโมเมนต์ดัดที่สภาวะต่างๆ ดังนี้

กำลังต้านทานโมเมนต์ดัดแตกร้าว (Section uncrack) เมื่อคานรับน้ำหนักบรรทุกเพียงเล็กน้อย ในช่วงนี้การเพิ่มของโมเมนต์ดัดเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความโค้ง เนื่องจากหน้าตัดของคานยังไม่เกิดการแตกร้าวเพราะหน่วยแรงดึงของคานตัวอย่างยังไม่เกินค่าโมดูลัสของการแตกร้าว (Modulus of rupture) สำหรับหน้าตัดที่ยังไม่แตกร้าวจะสามารถต้านทานหน่วยแรงดึงและให้ค่าความแกร่ง (Rigidity) ได้เต็มที่ ซึ่งสามารถวิเคราะห์ได้โดยทฤษฎียึดหยุ่นและหน้าตัดแปลง (Transformed section) ดังสมการที่ 12 และสมการที่ 13 (ต่อกุล, 2528)

$$M_{cr} = \frac{\left(2.0\sqrt{f'_c}\right)It}{y_{bottom}} \quad (12)$$

$$\phi_{cr} = \frac{\varepsilon_r}{y_{bottom}} = \frac{\left(2.0\sqrt{f'_c}\right)/E_g, E_c}{y_{bottom}} \quad (13)$$

|                 |   |                                                                   |
|-----------------|---|-------------------------------------------------------------------|
| $E_c$           | = | โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต                                         |
| $E_g$           | = | โมดูลัสยืดหยุ่นของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต                            |
| $f'_c$          | = | กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตและคอนกรีต                   |
| $I_t$           | = | โมเมนต์อินเนอร์เซียของหน้าตัดแปลง                                 |
| $M_{cr}$        | = | โมเมนต์ดัดที่ทำให้เกิดพิกัดที่หน้าตัด เนื่องจากน้ำหนักบรรทุกกระทำ |
| $y_{bottom}$    | = | ตำแหน่งแนวแกนสะเทินของหน้าตัดแปลง                                 |
| $\phi_{cr}$     | = | ความโค้งเมื่อคานเริ่มร้าว                                         |
| $\varepsilon_r$ | = | หน่วยแรงการยืดตัวเมื่อคานเริ่มร้าว                                |

กำลังต้านทาน โมเมนต์ดัดเมื่อเหล็กเสริมเริ่มร้าว (Section cracked) คานจะร้าวเมื่อรับน้ำหนักบรรทุกเพิ่มขึ้น เพราะหน่วยแรงดึงในคานตัวอย่างที่ท้องคานมีค่ามากกว่าค่าโมดูลัสของการแตกร้าวและส่งผลต่อความเหนียวแกร่งของคานลดลง ซึ่งสามารถวิเคราะห์ได้โดยใช้ทฤษฎียืดหยุ่น ดังสมการที่ 14 และสมการที่ 15 (ต่อกุล, 2528)

$$M_y = A_s f_y jd \quad (14)$$

$$\phi_y = \frac{\varepsilon_y}{d - kd} = \frac{f_y / E_s}{d - kd} \quad (15)$$

|       |   |                                                                      |
|-------|---|----------------------------------------------------------------------|
| $A_s$ | = | พื้นที่ภาคตัดขวางของเหล็กเสริมรับแรงดึง                              |
| $d$   | = | ระยะจากขอบนอกสุดด้านรับแรงอัดไปยังจุดศูนย์กลางของเหล็กเสริมรับแรงดึง |
| $E_s$ | = | โมดูลัสยืดหยุ่นของเหล็กเสริม                                         |
| $M_y$ | = | โมเมนต์ดัดที่เหล็กเริ่มร้าว เนื่องจากน้ำหนักบรรทุกกระทำ              |
| $f_y$ | = | กำลังครากที่กำหนดของเหล็กเสริม                                       |
| $j.d$ | = | แขนโมเมนต์ของแรงคู่ควบ (แรงดึงและแรงอัด)                             |
| $k$   | = | ตัวคูณความยาวประสิทธิผลสำหรับองค์อาคารรับแรงดัด                      |

$$\begin{aligned}\phi_y &= \text{ความโค้งที่จุดคราก} \\ \varepsilon_y &= \text{หน่วยแรงการยืดตัวเมื่อเหล็กเสริมเริ่มคราก}\end{aligned}$$

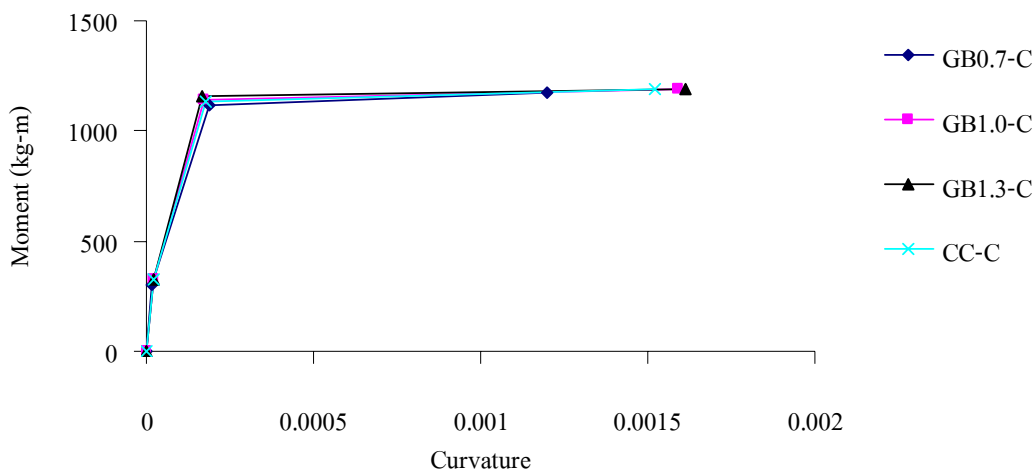
กำลังต้านทานโมเมนต์ดัดสูงสุด (Ultimate moment) หลังจากเหล็กเสริมตามยาวรับแรงดึงถึงจุดครากนั้นแรงดึงในเหล็กเสริมตามยาวรับแรงดึงคงที่ ขณะที่โมเมนต์เพิ่มขึ้นแกนสะเทินตำแหน่งแกนสะเทินก็สูงขึ้นและการกระจายหน่วยแรงอัดจริงยังเป็นรูปพาราโบลา ดังนั้นเพื่อให้การวิเคราะห์ง่ายขึ้นจะให้การกระจายของหน่วยแรงอัดในแกนเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าเทียบเท่า (Equivalent rectangular stress distribution) ซึ่งอ้างอิงการศึกษาของ Whitney โดยให้ความเครียดที่ผิวบนรับแรงอัดของแกนที่สภาวะประลัยมีค่าการหดตัวสูงสุดเท่ากับ 0.003 ตามมาตรฐาน ACI และสามารถวิเคราะห์ค่ากำลังต้านทานโมเมนต์ดัดสูงสุดได้ ดังสมการที่ 16 และสมการที่ 17

$$M_u = T(j_u d) = A_s f_y \left( d - \frac{a}{2} \right) \quad (16)$$

$$\phi_u = \frac{\varepsilon_u}{c} = \frac{\varepsilon_u \beta_1}{a} \quad (17)$$

$$\begin{aligned}a &= \text{ความลึกของหน่วยแรงรูปกล่องสี่เหลี่ยมผืนผ้าเทียบเท่า} \\ c &= \text{ระยะจากขอบนอกสุดด้านรับแรงอัดไปยังแกนสะเทิน} \\ j_u \cdot d &= \text{แขนโมเมนต์แรงคู่ควบ (แรงดึงและแรงอัด)} \\ M_u &= \text{โมเมนต์ดัดสูงสุด (โมเมนต์ที่คูณด้วยตัวคูณแล้วที่หน้าตัด)} \\ T &= \text{แรงดึง} \\ \phi_u &= \text{ความโค้งสูงสุด} \\ \varepsilon_u &= \text{หน่วยการยืดตัวเมื่อเหล็กเสริมคราก} \\ \beta_1 &= \text{ตัวคูณที่ใช้คำนวณของหน่วยแรงรูปกล่องสี่เหลี่ยมในหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้าเทียบเท่า}\end{aligned}$$

จากสมการข้างต้นสามารถวิเคราะห์ค่ากำลังต้านทานโมเมนต์ดัดและค่าความโค้งของแกนจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตอัตราส่วน  $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{SiO}_3 / \text{NaOH}$  เท่ากับ 0.7, 1.0 และ 1.3 และแกนคอนกรีตควบคุมที่ยังไม่ได้ผ่านการเร่งการเกิดสนิมของเหล็กเสริมที่สภาวะต่างๆ ได้ ดังภาพที่ 52



ภาพที่ 52 กำลังต้านทานโมเมนต์ดัดและค่าความโค้ง

เมื่อพิจารณาค่ากำลังต้านทานโมเมนต์ดัดและค่าความโค้ง จากการวิเคราะห์ลักษณะการวิบัติของคานาจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตทุกอัตราส่วนผสมรวมทั้งคานคอนกรีตควบคุม โดยพิจารณาจากอัตราส่วนของเหล็กเสริมที่สภาวะสมดุล พบว่าคานาจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตและคานคอนกรีตควบคุมวิบัติจากเหล็กเสริมถูกดึงถึงจุดคราก (Yielding failure) ที่ด้านรับแรงดึง ซึ่งคานาจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตอัตราส่วน  $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{SiO}_3 / \text{NaOH}$  เท่ากับ 1.3 มีค่ากำลังต้านทานโมเมนต์ดัดสูงสุด รองลงมาคานาจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตอัตราส่วน  $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{SiO}_3 / \text{NaOH}$  เท่ากับ 1.0 และคานคอนกรีตเสริมเหล็กควบคุมตามลำดับ ส่วนคานาจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตอัตราส่วน  $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{SiO}_3 / \text{NaOH}$  เท่ากับ 0.7 มีค่ากำลังต้านทานโมเมนต์ดัดน้อยที่สุด

## 4.2 การแตกร้าวและการวิบัติ

### 4.2.1 ความกว้างการแตกร้าวเนื่องจากการกักร่อนของเหล็กเสริม

การกักร่อนในเหล็กเสริมของคานาจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตเสริมเหล็ก โดยสาเหตุหลักของการเกิดสนิม คือ การเกิดรอยร้าวของคานาจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตเสริมเหล็ก เนื่องจากปริมาตรของเหล็กเสริมเพิ่มขึ้นและดันให้คอนกรีตปริออก และความกว้างของรอยร้าวจะเพิ่มขึ้นตามระดับการเกิดสนิมของเหล็กเสริม ดังภาพที่ 53 โดยรอยร้าวจะเริ่มแตกตามแนวของเหล็กเสริมแต่มีความกว้างของรอยร่วมน้อยมากที่ระยะเวลาเริ่มต้น รอยร้าวมีขนาดความกว้างมากขึ้น

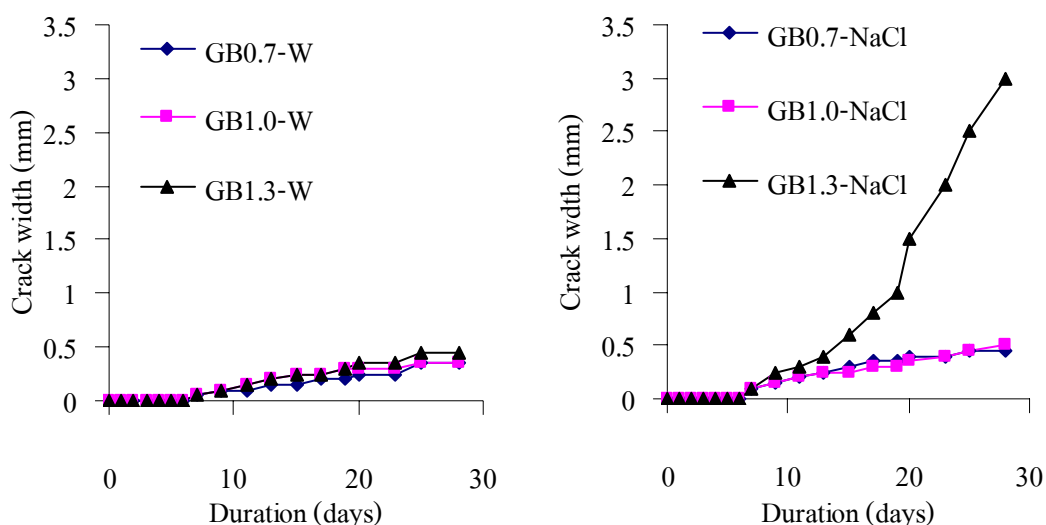
และทั่วตลอดทั้งคานจิโอโพลิเมอร์คอนกรีตจนถึงอายุการทดสอบที่ระยะเวลา 28 วัน ส่วนคานคอนกรีตควบคุมไม่พบรอยร้าวเนื่องจากการเกิดสนิมของเหล็กเสริม



ภาพที่ 53 การเกิดสนิมของเหล็กเสริมของคานจิโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่ระยะเวลา 28 วัน

จากผลการทดสอบพบว่าอัตราส่วน  $Na_2O.SiO_3 / NaOH$  ของจิโอโพลิเมอร์คอนกรีตมีผลต่อการแตกร้าวของคานจิโอโพลิเมอร์คอนกรีต ซึ่งความกว้างของรอยร้าวในช่วงเริ่มต้นมีค่าความกว้างประมาณ 0.075 มิลลิเมตร สำหรับ 7 วันแรก ของการเร่งการเกิดสนิมของเหล็กเสริมด้วยศักย์ไฟฟ้า 6 โวลต์ หลังจากนั้นความกว้างของรอยร้าวจะเพิ่มขึ้นและสามารถมองเห็นด้วยตาเปล่าได้อย่างชัดเจน เนื่องจากมีสนิมของเหล็กเสริมไหลออกมาสู่ภายนอกของคานจิโอโพลิเมอร์คอนกรีต โดยเฉพาะคานจิโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่แช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ และเร่งการเกิดสนิมจะมีความกว้างของรอยร้าวมากกว่าคานจิโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่แช่ในน้ำและเร่งการเกิดสนิม

ความกว้างของรอยร้าวของคานจิโอโพลิเมอร์คอนกรีตแช่ในน้ำและเร่งการเกิดสนิมมีความกว้างของรอยร่วมน้อยกว่าคานจิโอโพลิเมอร์คอนกรีตแช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์และเร่งการเกิดสนิมทุกตัวอย่าง เพราะเนื่องจากสารละลายโซเดียมคลอไรด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาและการกัดกร่อนของเหล็กเสริมให้เร็วขึ้น ส่งผลให้ความกว้างของรอยร้าวเพิ่มขึ้นด้วย ซึ่งจิโอโพลิเมอร์คอนกรีตอัตราส่วน  $Na_2O.SiO_3 / NaOH$  เท่ากับ 1.3 มีค่าความกว้างของรอยร้าวมากที่สุด เท่ากับ 0.45, 0.35 และ 0.30 มิลลิเมตร ของจิโอโพลิเมอร์คอนกรีตอัตราส่วน  $Na_2O.SiO_3 / NaOH$  เท่ากับ 1.0 และจิโอโพลิเมอร์คอนกรีตอัตราส่วน  $Na_2O.SiO_3 / NaOH$  เท่ากับ 0.7 ตามลำดับ ดังภาพที่ 54



ภาพที่ 54 ความกว้างของรอยร้าวคานจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตแช่ในน้ำและเร่งการเกิดสนิมและในสารละลายโซเดียมคลอไรด์และเร่งการเกิดสนิม เป็นระยะเวลา 28 วัน

เมื่อพิจารณาความกว้างของรอยร้าว พบว่าคานจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตแช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์และเร่งการเกิดสนิม ดังภาพที่ 54 ซึ่งคานจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตอัตราส่วน  $Na_2O.SiO_3 / NaOH$  เท่ากับ 1.3 มีค่าความกว้างของรอยร้าวมากที่สุด เท่ากับ 3.00, 0.50 และ 0.45 มิลลิเมตร ของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตอัตราส่วน  $Na_2O.SiO_3 / NaOH$  เท่ากับ 1.0 และจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตอัตราส่วน  $Na_2O.SiO_3 / NaOH$  เท่ากับ 0.7 ตามลำดับ ซึ่งจากค่าความกว้างของรอยร้าวนี้ยังสอดคล้องกับค่าการสูญเสียพื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริม กำลังการยึดเหนี่ยวของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตต่อเหล็กเสริม โดยความกว้างของรอยร้าวที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้สารละลายโซเดียมคลอไรด์สัมผัสเหล็กเสริมได้ ทำให้เกิดการกัดกร่อนอย่างรุนแรงและสูญเสียพื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริม กำลังการยึดเหนี่ยวของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตต่อเหล็กเสริมลดลงตามไปด้วย

#### 4.2.2 การวิบัติ

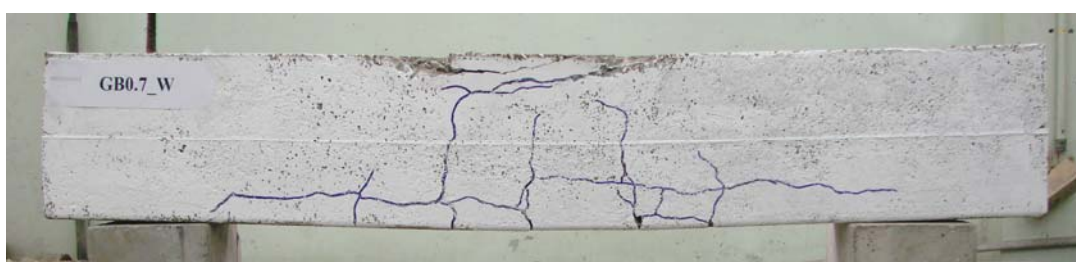
เมื่อคานรับน้ำหนักบรรทุกทุกลักษณะของการเกิดรอยร้าวจะเกิดบริเวณกึ่งกลางคาน ซึ่งเป็นลักษณะการแตกร้าวเนื่องจากโมเมนต์ดัด และเมื่อน้ำหนักบรรทุกเพิ่มขึ้นรอยร้าวจะเกิดในช่วงความยาวของคานระหว่างฐานรองรับทั้งสองข้าง นอกจากนี้จากการทดสอบตัวอย่างคานจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตและคานคอนกรีตควบคุม พบว่าบางตัวอย่างรอยร้าวที่เกิดขึ้นจะเป็นลักษณะรอยร้าวแบบการคด (Bending) หลังจากนั้นเมื่อน้ำหนักกระทำเพิ่มขึ้นรอยร้าวที่กึ่งกลางคานเริ่ม



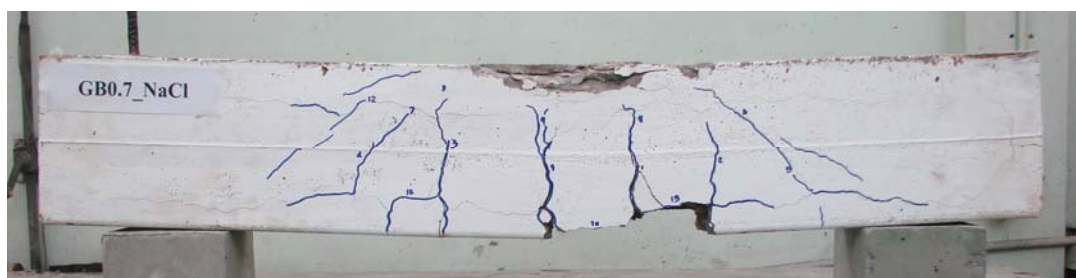
ขยายกว้างขึ้นจนถึงจุดวิกฤตคานจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตและคอนกรีตควมจะถูกอัดแตก (Crushing failure) จากผลการทดสอบกำลังรับแรงค้คพบว่าคานจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตและคานคอนกรีตควมที่มีการก้คกร่อนของเหล็กเสริมรุนแรง การวิบัติจะเกิดเนื่องจากการสูญเสียกำลังการยึดเหนี่ยวระหว่างจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตและคอนกรีตควมต่อเหล็กเสริม (Debonding failure) สำหรับลักษณะการวิบัติของคานจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตและคานคอนกรีตควม ดังภาพที่ 55 ถึง ภาพที่ 66 และผลการวิเคราะห์การรับแรงค้คของคานจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตและคานคอนกรีตควม ดังตารางที่ 9



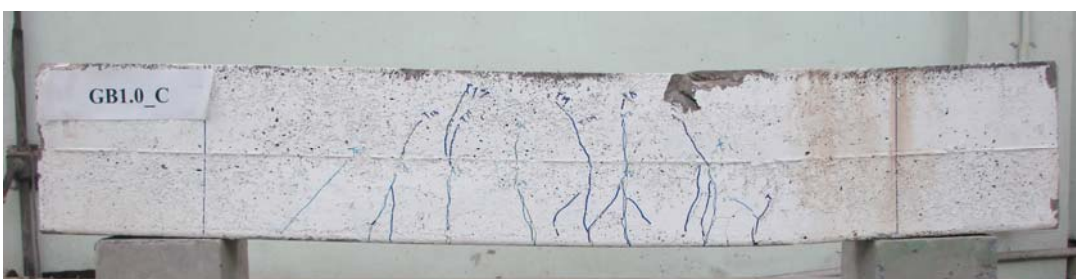
ภาพที่ 55 การวิบัติของคานจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต 0.7-C



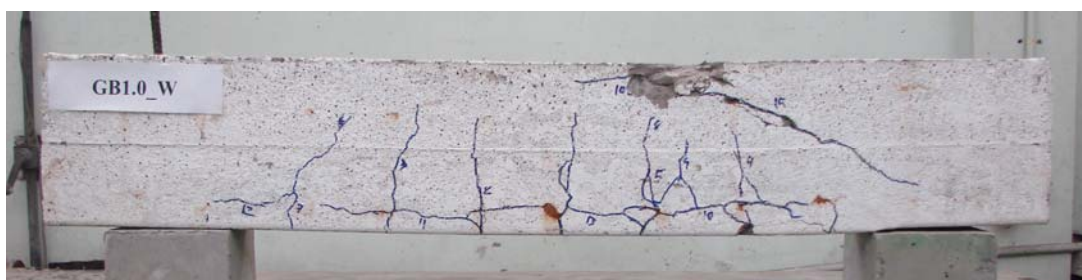
ภาพที่ 56 การวิบัติของคานจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต 0.7-W



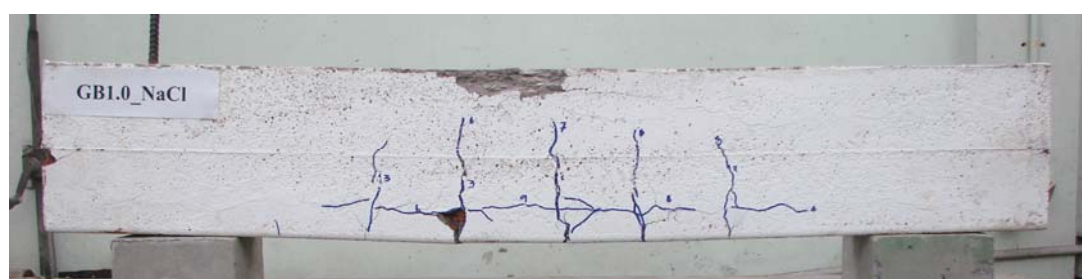
ภาพที่ 57 การวิบัติของคานจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต 0.7-NaCl



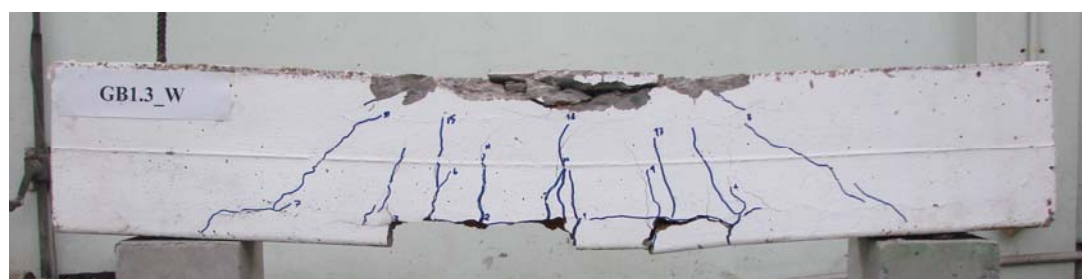
ภาพที่ 58 การวิบัติของคานจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต 1.0-C



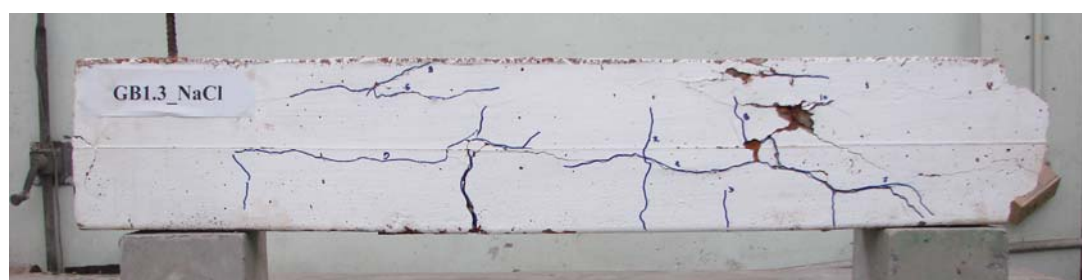
ภาพที่ 59 การวัดของคานจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต 1.0-W



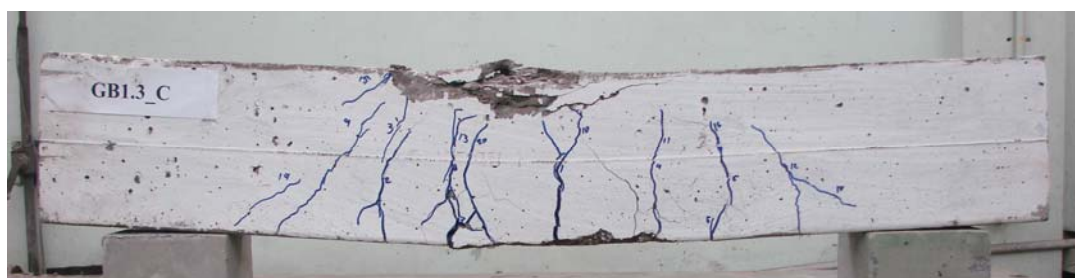
ภาพที่ 60 การวัดของคานจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต 1.0-NaCl



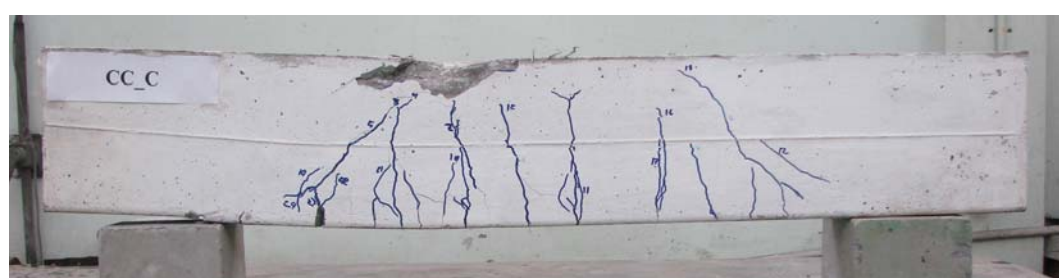
ภาพที่ 61 การวัดของคานจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต 1.3-W



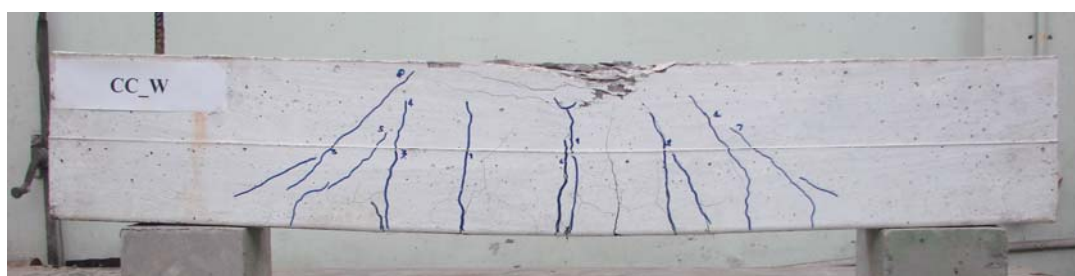
ภาพที่ 62 การวัดของคานจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต 1.3-NaCl



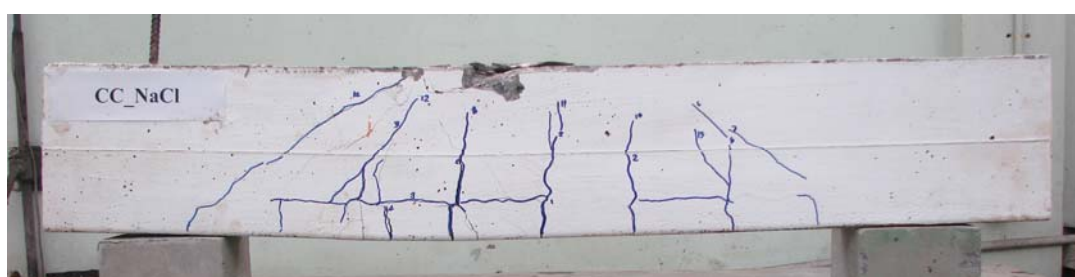
ภาพที่ 63 การวิบัติของคานจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต 1.3-C



ภาพที่ 64 การวิบัติของคานคอนกรีต CC-C



ภาพที่ 65 การวิบัติของคานคอนกรีต CC-W



ภาพที่ 66 การวิบัติของคานคอนกรีต CC-NaCl

|             |   |                                                                                                      |
|-------------|---|------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| หมายเหตุ GC | = | จีโอโพลิเมอร์คอนกรีต                                                                                 |
| CC          | = | คอนกรีต                                                                                              |
| GC-C        | = | จีโอโพลิเมอร์คอนกรีตควบคุมไม่ผ่านการเร่งการเกิดสนิม                                                  |
| GC-W        | = | จีโอโพลิเมอร์คอนกรีตแช่น้ำและเร่งการเกิดสนิมของเหล็กเสริมด้วยศักย์ไฟฟ้า 6 โวลต์                      |
| GC-NaCl     | = | จีโอโพลิเมอร์คอนกรีตแช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์และเร่งการเกิดสนิมของเหล็กเสริมด้วยศักย์ไฟฟ้า 6 โวลต์ |
| 0.7         | = | อัตราส่วน $Na_2O.SiO_3 / NaOH$ เท่ากับ 0.7                                                           |
| 1.0         | = | อัตราส่วน $Na_2O.SiO_3 / NaOH$ เท่ากับ 1.0                                                           |
| 1.3         | = | อัตราส่วน $Na_2O.SiO_3 / NaOH$ เท่ากับ 1.3                                                           |

ตารางที่ 9 การวิเคราะห์การรับแรงดัดของคานจีโอโพลีเมอร์คอนกรีตและคานคอนกรีตควบคุม

| $\frac{Na_2O.SiO_3}{NaOH}$ | Beam | $P_{cr}$<br>(kg) | $P_u$<br>(kg) | $M_{cr}$<br>(kg-m) | $M_u$<br>(kg-m) | $\phi_{cr}$ | $\phi_u$    | $\Delta_{cr}$<br>(mm) | $\Delta_u$<br>(mm) | $EI$ | $\frac{EI_{cor}}{EI_c}$ | $\frac{M_{cor}}{M_c}$ | MF |
|----------------------------|------|------------------|---------------|--------------------|-----------------|-------------|-------------|-----------------------|--------------------|------|-------------------------|-----------------------|----|
| 0.7                        | C    | 2832             | 4907          | 849                | 1472            | $1.45^{-5}$ | $71.3^{-5}$ | 1.21                  | 10.80              | 5878 | 1.000                   | 1.000                 | CR |
|                            | W    | 2596             | 4503          | 778                | 1351            | $2.52^{-5}$ | $36.5^{-5}$ | 2.40                  | 11.20              | 5201 | 0.884                   | 0.884                 | DE |
|                            | NaCl | 1578             | 4306          | 476                | 1235            | $7.63^{-6}$ | $14.7^{-5}$ | 3.60                  | 10.80              | 5159 | 0.877                   | 0.877                 | DE |
| 1.0                        | C    | 5172             | 6467          | 1551               | 1902            | $8.60^{-6}$ | $15.3^{-5}$ | 4.20                  | 11.40              | 7338 | 1.000                   | 1.000                 | CR |
|                            | W    | 3240             | 5756          | 972                | 1726            | $5.24^{-6}$ | $10.4^{-5}$ | 2.80                  | 11.80              | 6310 | 0.859                   | 0.859                 | DE |
|                            | NaCl | 2079             | 5494          | 623                | 1648            | $7.03^{-6}$ | $61.4^{-5}$ | 2.20                  | 11.80              | 6024 | 0.820                   | 0.820                 | DE |
| 1.3                        | C    | 1844             | 5011          | 553                | 1503            | $2.70^{-6}$ | $6.59^{-5}$ | 3.00                  | 7.00               | 9259 | 1.000                   | 1.000                 | CR |
|                            | W    | 1532             | 4806          | 459                | 1442            | $1.25^{-6}$ | $2.64^{-5}$ | 2.60                  | 11.80              | 5270 | 0.569                   | 0.596                 | DE |
|                            | NaCl | 787              | 2936          | 236                | 880             | $1.71^{-6}$ | $47.7^{-5}$ | 1.20                  | 9.40               | 4041 | 0.436                   | 0.436                 | DE |
| (w/c) 0.3                  | C    | 2165             | 5873          | 649                | 1762            | $6.11^{-6}$ | $14.3^{-5}$ | 3.00                  | 11.20              | 6783 | 1.000                   | 1.000                 | CR |
|                            | W    | 1613             | 5863          | 484                | 1759            | $1.04^{-6}$ | $17.6^{-5}$ | 1.60                  | 11.80              | 6428 | 0.947                   | 0.947                 | CR |
|                            | NaCl | 1672             | 5788          | 501                | 1736            | $4.32^{-6}$ | $21.9^{-5}$ | 2.00                  | 12.80              | 4850 | 0.862                   | 0.862                 | DE |

หมายเหตุ MF = Mode of failure CR = Crushing DE = Debonding

#### 4.3 กำลังต้านทานโมเมนต์ดัด

การทดสอบกำลังต้านทานโมเมนต์ดัดของคานาจีโอโพลีเมอร์คอนกรีตและคานคอนกรีตควบคุม ซึ่งสามารถคำนวณค่ากำลังต้านทานโมเมนต์ดัดและค่าความโค้ง (Curvature  $\phi$ ) ที่สถานะต่างๆ ได้ ดังสมการที่ 18 ถึง สมการที่ 23 (ต่อกุล, 2528) การวิเคราะห์จะใช้วิธีพื้นที่ความโค้ง ซึ่งสามารถวิเคราะห์คานในช่วงพฤติกรรมแบบยืดหยุ่น (Elastic) และพฤติกรรมแบบไม่ยืดหยุ่น (Inelastic)

กำลังต้านทานโมเมนต์ดัดเมื่อคานยังไม่ร้าว (Section uncracked)

$$M_{cr} = P_{cr} \times a \quad (18)$$

$$\phi_{cr} = \frac{\varepsilon_r}{y_{bottom}} \quad (19)$$

|                 |   |                                                                   |
|-----------------|---|-------------------------------------------------------------------|
| $a$             | = | ระยะจากน้ำหนักบรรทุกถึงฐานรองรับ                                  |
| $M_{cr}$        | = | โมเมนต์ดัดที่ทำให้เกิดพิกัดที่หน้าตัด เนื่องจากน้ำหนักบรรทุกกระทำ |
| $P_{cr}$        | = | น้ำหนักบรรทุกเมื่อคานเริ่มร้าว                                    |
| $y_{bottom}$    | = | ตำแหน่งแนวแกนสะเทินของหน้าตัดแปลง                                 |
| $\phi_{cr}$     | = | ความโค้งเมื่อคานเริ่มร้าว                                         |
| $\varepsilon_r$ | = | หน่วยแรงการยืดตัวเมื่อคานเริ่มร้าว                                |

กำลังต้านทานโมเมนต์ดัดเมื่อเหล็กเสริมเริ่มร้าว (Section cracked)

$$M_y = P_y \times a \quad (20)$$

$$\phi_y = \frac{\varepsilon_y}{d - kd} \quad (21)$$

|                 |   |                                                                      |
|-----------------|---|----------------------------------------------------------------------|
| $a$             | = | ระยะจากน้ำหนักบรรทุกถึงฐานรองรับ                                     |
| $d$             | = | ระยะจากขอบนอกสุดด้านรับแรงอัดไปยังจุดศูนย์ถ่วงของเหล็กเสริมรับแรงดึง |
| $M_y$           | = | โมเมนต์ดัดที่เหล็กเริ่มร้าว เนื่องจากน้ำหนักบรรทุกกระทำ              |
| $P_y$           | = | น้ำหนักบรรทุกเมื่อคานเริ่มร้าว                                       |
| $f_y$           | = | กำลังครากที่กำหนดของเหล็กเสริม                                       |
| $k$             | = | ตัวคูณความยาวประสิทธิผลสำหรับองค์อาคารรับแรงดัด                      |
| $\phi_y$        | = | ความโค้งที่จุดคราก                                                   |
| $\varepsilon_y$ | = | หน่วยแรงการยืดตัวเมื่อเหล็กเสริมเริ่มร้าว                            |

กำลังต้านทานโมเมนต์ดัดสูงสุด (Ultimate moment)

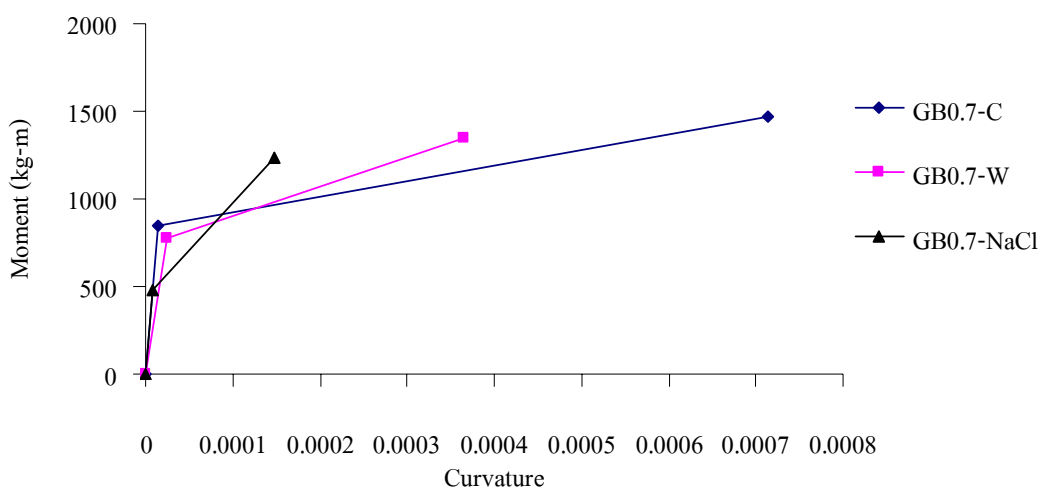
$$M_u = P_u \times a \quad (22)$$

$$\phi_u = \frac{\varepsilon_u}{c} \quad (23)$$

|                 |   |                                                          |
|-----------------|---|----------------------------------------------------------|
| $a$             | = | ระยะจากน้ำหนักบรรทุกถึงฐานรองรับ                         |
| $c$             | = | ระยะจากขอบนอกสุดด้านรับแรงอัดไปยังแกนสะเทิน              |
| $M_u$           | = | โมเมนต์ดัดสูงสุด (โมเมนต์ที่คูณด้วยตัวคูณแล้วที่หน้าดัด) |
| $\phi_u$        | = | ความโค้งสูงสุด                                           |
| $\varepsilon_u$ | = | หน่วยการยืดตัวเมื่อเหล็กเสริมคราก                        |

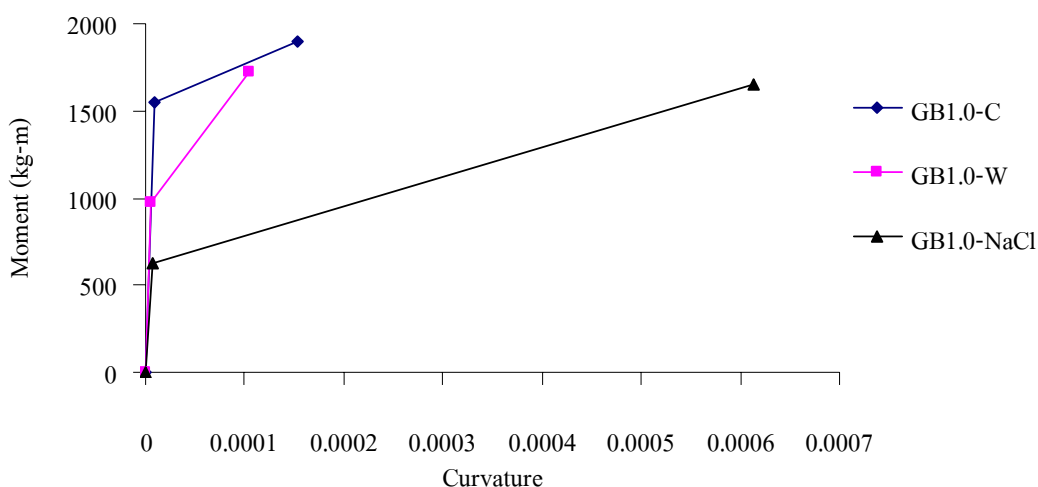
การวิเคราะห์พฤติกรรมของคานจีโอโพลีเมอร์คอนกรีตและคานคอนกรีตควบคุมสามารถนำค่ากำลังต้านทานโมเมนต์ดัดและค่าความโค้ง ที่สภาวะต่างๆ มาเขียนเป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ดัดและความโค้ง ดังภาพที่ 67 ถึง ภาพที่ 70





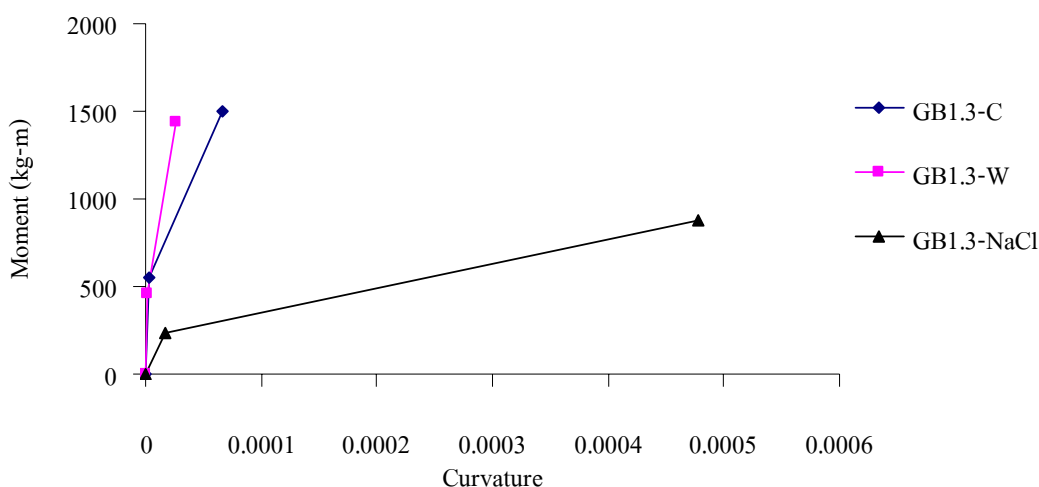
ภาพที่ 67 กำลังต้านทานโมเมนต์ดัดและค่าความโค้งของคานาจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต  
อัตราส่วน  $Na_2O.SiO_3 / NaOH$  เท่ากับ 0.7

กำลังต้านทานโมเมนต์ดัดและค่าความโค้งของคานาจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตอัตราส่วน  $Na_2O.SiO_3 / NaOH$  เท่ากับ 0.7 ดังภาพที่ 67 พบว่าการคานาจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตแช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์และแรงการเกิดสนิม มีค่ากำลังต้านทานโมเมนต์ดัดน้อยกว่าคานาจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตแช่ในน้ำและแรงการเกิดสนิม เนื่องจากระดับของการกัดกร่อนของเหล็กเสริมที่มากกว่า เมื่อเปรียบเทียบค่ากำลังต้านทานโมเมนต์ดัดสูงสุดและค่าความโค้งของคานาจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตควบคุมกับคานาจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตแช่ในน้ำและแรงการเกิดสนิมและคานาจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตแช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์และแรงการเกิดสนิม มีค่ากำลังต้านทานโมเมนต์ดัดสูงสุดลดลง  $M_u$  เท่ากับ 2.11 และ 16.07 เปอร์เซ็นต์ สำหรับค่าความโค้งสูงสุดลดลง  $\phi_u$  เท่ากับ 48.756 และ 79.32 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ



ภาพที่ 68 กำลังต้านทานโมเมนต์ดัดและค่าความโค้งของคานาจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต  
อัตราส่วน  $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{SiO}_3 / \text{NaOH}$  เท่ากับ 1.0

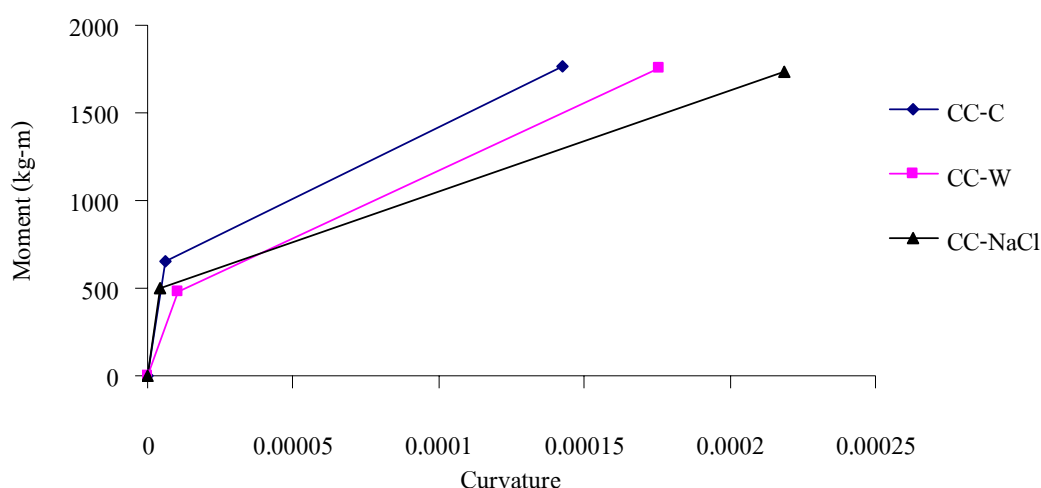
สำหรับกำลังต้านทานโมเมนต์ดัดและค่าความโค้งของคานาจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตอัตราส่วน  $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{SiO}_3 / \text{NaOH}$  เท่ากับ 1.0 ดังภาพที่ 68 พบว่าคานาจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตแช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์และเร่งการเกิดสนิม มีค่ากำลังต้านทานโมเมนต์ดัดน้อยกว่าคานาจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตแช่ในน้ำและเร่งการเกิดสนิม เมื่อเปรียบเทียบกำลังต้านทานโมเมนต์ดัดสูงสุดและค่าความโค้งของคานาจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตควบคุมที่ยังไม่ผ่านการเร่งการเกิดสนิม โดยคานาจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตแช่ในน้ำและเร่งการเกิดสนิมกับคานาจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตแช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์และเร่งการเกิดสนิม มีค่ากำลังต้านทานโมเมนต์ดัดสูงสุดลดลง  $M_u$  เท่ากับ 9.23 และ 13.35 เปอร์เซ็นต์ สำหรับค่าความโค้งสูงสุดลดลง  $\phi_u$  เท่ากับ 31.98 เปอร์เซ็นต์ ส่วนค่าความโค้งของคานาจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตแช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์และเร่งการเกิดสนิมมีค่าความโค้งมากที่สุดเนื่องจากการเกิดสนิมของเหล็กเสริมที่รุนแรงกว่าคานาจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตแช่ในน้ำและเร่งการเกิดสนิม ซึ่งคานาจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตแช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์และเร่งการเกิดสนิมมีการสูญเสียหน้าหนึ่งของเหล็กเสริม ถึง 8.78 เปอร์เซ็นต์



ภาพที่ 69 กำลังต้านทานโมเมนต์ดัดและค่าความโค้งของคานาจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต อัตราส่วน  $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{SiO}_3 / \text{NaOH}$  เท่ากับ 1.3

เมื่อพิจารณาค่ากำลังต้านทานโมเมนต์ดัดและค่าความโค้งของคานาจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตอัตราส่วน  $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{SiO}_3 / \text{NaOH}$  เท่ากับ 1.3 ดังภาพที่ 69 พบว่าคานาจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตแช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์และแรงการเกิดสนิม มีค่ากำลังต้านทานโมเมนต์ดัดน้อยกว่าคานาจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตแช่ในน้ำและแรงการเกิดสนิม เนื่องจากคานาจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตเกิดสนิมของเหล็กเสริมและสูญเสียพื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริมมากที่สุดทุกคานาจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่ใช้ในการทดสอบ เมื่อเปรียบเทียบค่ากำลังต้านทานโมเมนต์ดัดสูงสุดและค่าความโค้งของคานาจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตควบคุมกับคานาจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตแช่ในน้ำและแรงการเกิดสนิมกับคานาจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตแช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์และแรงการเกิดสนิม มีค่ากำลังต้านทานโมเมนต์ดัดสูงสุดลดลง  $M_u$  เท่ากับ 4.08 และ 41.40 เปอร์เซ็นต์ สำหรับค่าความโค้งสูงสุดลดลง  $\phi_u$  เท่ากับ 18.85 เปอร์เซ็นต์ ส่วนค่าความโค้งของคานาจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตแช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์และแรงการเกิดสนิม มีค่าความโค้งมากที่สุดเนื่องจากการเกิดสนิมของเหล็กเสริมที่รุนแรงกว่าคานาจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตแช่ในน้ำและแรงการเกิดสนิม ซึ่งคานาจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตแช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์และแรงการเกิดสนิมมีการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมถึง 22.51 เปอร์เซ็นต์

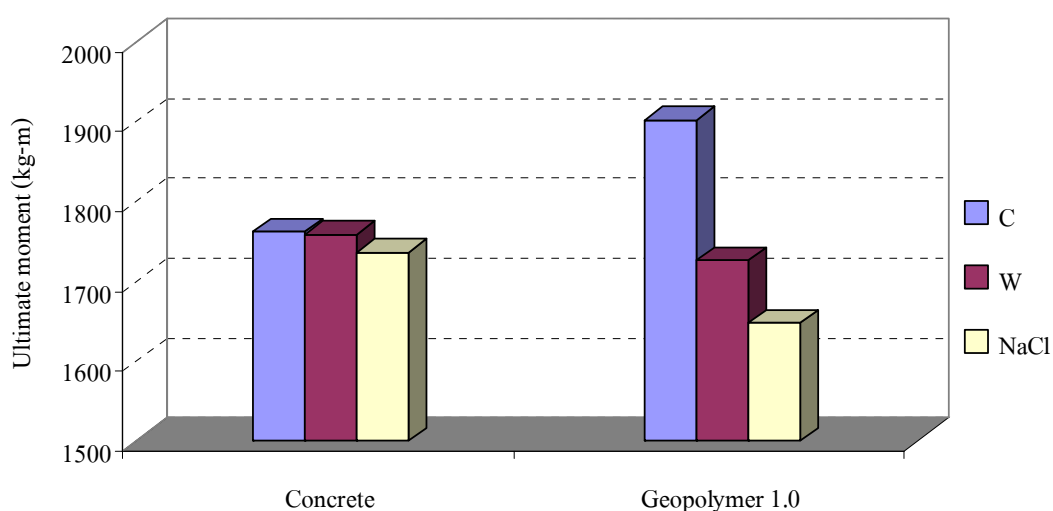
นอกจากนี้เมื่อพิจารณาผลของค่าโมเมนต์ดัดและค่าความโค้งของคานคอนกรีตควบคุม ดังภาพที่ 70 พบว่าคานคอนกรีตควบคุมแช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์และแรงการเกิดสนิมมีค่ากำลังต้านทานโมเมนต์ดัดน้อยกว่าคานคอนกรีตควบคุมแช่น้ำและแรงการเกิดสนิมเล็กน้อยเนื่องจากคานคอนกรีตควบคุมมีการเกิดสนิมของเหล็กเสริมและสูญเสียพื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริมน้อยที่สุดทุกคานคอนกรีตควบคุมที่ใช้ในการทดสอบ เมื่อเปรียบเทียบค่ากำลังต้านทานโมเมนต์ดัดสูงสุดและค่าความโค้งของคานคอนกรีตควบคุมกับคานคอนกรีตควบคุมแช่น้ำและแรงการเกิดสนิม และคานคอนกรีตควบคุมแช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์และแรงการเกิดสนิม มีค่ากำลังต้านทานโมเมนต์ดัดสูงสุดลดลง  $M_u$  เท่ากับ 0.68 และ 1.28 เปอร์เซ็นต์ สำหรับค่าความโค้งสูงสุดลดลง  $\phi_u$  เท่ากับ 18.85 เปอร์เซ็นต์ ส่วนค่าความโค้งของคานคอนกรีตควบคุมแช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์และแรงการเกิดสนิม มีค่าความโค้งมากที่สุดเนื่องจากมีการเกิดสนิมของเหล็กเสริมที่รุนแรงกว่าคานจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตแช่น้ำและแรงการเกิดสนิม



ภาพที่ 70 กำลังต้านทานโมเมนต์ดัดและค่าความโค้งของคานคอนกรีตควบคุม

อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณากำลังต้านทานโมเมนต์ดัดสูงสุดของคานคอนกรีตควบคุมกับคานจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตควบคุมอัตราส่วน  $Na_2O.SiO_3 / NaOH$  เท่ากับ 1.0 พบว่ากำลังต้านทานโมเมนต์ดัดสูงสุดของคานจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตควบคุมมากกว่ากำลังต้านทานโมเมนต์ดัดสูงสุดของคานคอนกรีตควบคุม เท่ากับ 7.36 เปอร์เซ็นต์ นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบคานจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตอัตราส่วน  $Na_2O.SiO_3 / NaOH$  เท่ากับ 1.0 แช่น้ำและแรงการเกิดสนิมกับคานคอนกรีตควบคุมแช่น้ำและแรงการเกิดสนิม ให้ค่ากำลังต้านทานโมเมนต์ดัดสูงสุดใกล้เคียงกัน แต่เมื่อคานจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตอัตราส่วน  $Na_2O.SiO_3 / NaOH$  เท่ากับ 1.0 แช่ในสารละลาย

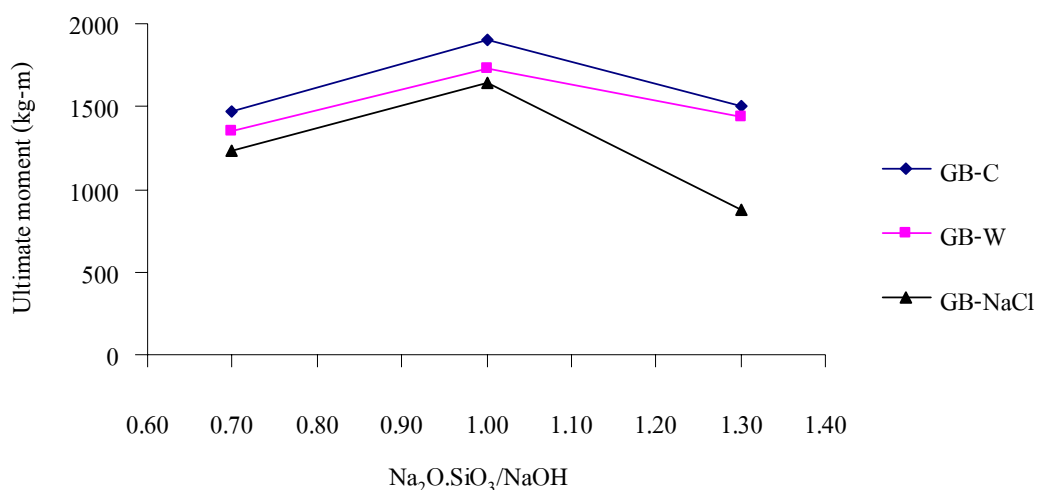
โซเดียมคลอไรด์และแรงการเกิด มีกำลังต้านทานโมเมนต์คัตน้อยกว่ากำลังต้านทานโมเมนต์คัตสูงสุดของคานคอนกรีตควบคุมแช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์และแรงการเกิดสนิม ซึ่งมีค่ากำลังต้านทานโมเมนต์คัตสูงสุดลดลง 5.06 เปอร์เซ็นต์ ดังภาพที่ 71 และเมื่อเปรียบเทียบค่ากำลังต้านทานโมเมนต์คัตสูงสุดของคานจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตควบคุมอัตราส่วน  $Na_2O.SiO_3 / NaOH$  เท่ากับ 1.0 พบว่าคานจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตอัตราส่วน  $Na_2O.SiO_3 / NaOH$  เท่ากับ 1.0 แช่ในน้ำและแรงการเกิดสนิมมีกำลังต้านทานโมเมนต์คัตสูงสุดลดลง เท่ากับ 9.25 เปอร์เซ็นต์ และคานจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตอัตราส่วน  $Na_2O.SiO_3 / NaOH$  เท่ากับ 1.0 แช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์และแรงการเกิดสนิม มีกำลังต้านทานโมเมนต์คัตสูงสุดลดลง เท่ากับ 13.35 เปอร์เซ็นต์ ส่วนกำลังต้านทานโมเมนต์คัตสูงสุดของคานคอนกรีตควบคุมมีกำลังต้านทานโมเมนต์คัตสูงสุดที่ใกล้เคียงกัน ทั้งคานคอนกรีตควบคุมที่แช่ในน้ำและแรงการเกิดสนิมกับคานคอนกรีตควบคุมที่แช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์และแรงการเกิดสนิม เนื่องจากการกัดกร่อนของเหล็กเสริมในคานคอนกรีตควบคุมมีค่าน้อยกว่าการกัดกร่อนของเหล็กเสริมในคานจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตควบคุมอัตราส่วน  $Na_2O.SiO_3 / NaOH$  เท่ากับ 1.0



ภาพที่ 71 เปรียบเทียบกำลังต้านทานโมเมนต์คัตสูงสุดของคานคอนกรีตควบคุม และคานจีโอโพลิเมอร์ คอนกรีตอัตราส่วน  $Na_2O.SiO_3 / NaOH$  เท่ากับ 1.0

ส่วนค่ากำลังต้านทานโมเมนต์คัตสูงสุดของคานจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตอัตราส่วน  $Na_2O.SiO_3 / NaOH$  เท่ากับ 0.7, 1.0 และ 1.3 ดังภาพที่ 72 พบว่าคานจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตควบคุมอัตราส่วน  $Na_2O.SiO_3 / NaOH$  เท่ากับ 0.7, 1.0 และ 1.3 มีกำลังต้านทานโมเมนต์คัตสูงสุดมากกว่าคานจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตแช่ในน้ำและแรงการเกิดสนิม สำหรับคานจีโอโพลิเมอร์

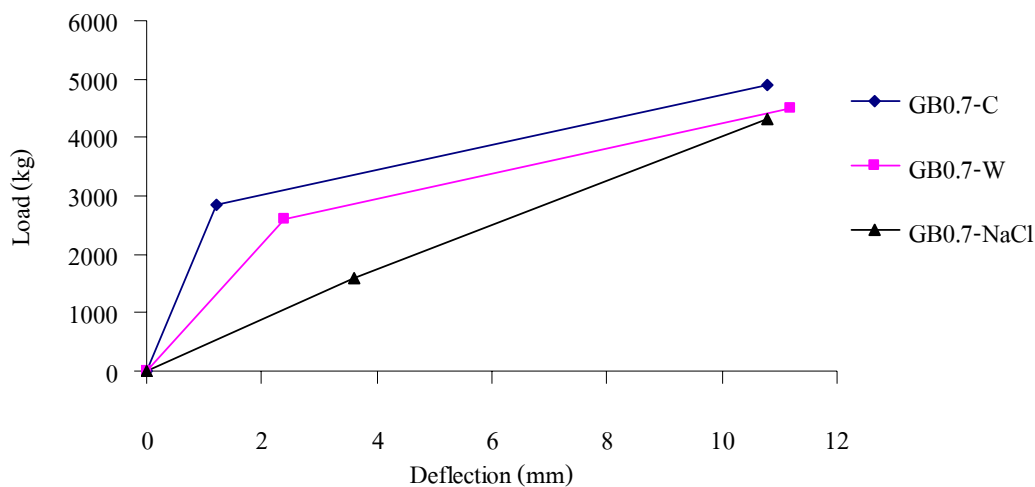
คอนกรีตแช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์และเร่งการเกิดสนิมให้ค่ากำลังต้านทานโมเมนต์ดัดสูงสุดน้อยที่สุด ตามลำดับ ซึ่งกำลังต้านทานโมเมนต์ดัดสูงสุดของคานจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตอัตราส่วน  $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{SiO}_3 / \text{NaOH}$  เท่ากับ 1.0 มีค่ากำลังต้านทานโมเมนต์ดัดสูงสุดมากที่สุดทุกการทดสอบ ทั้งคานจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่แช่ในน้ำและเร่งการเกิดสนิม และคานจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่แช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์และเร่งการเกิดสนิม



ภาพที่ 72 กำลังต้านทานโมเมนต์ดัดสูงสุดของคานจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต

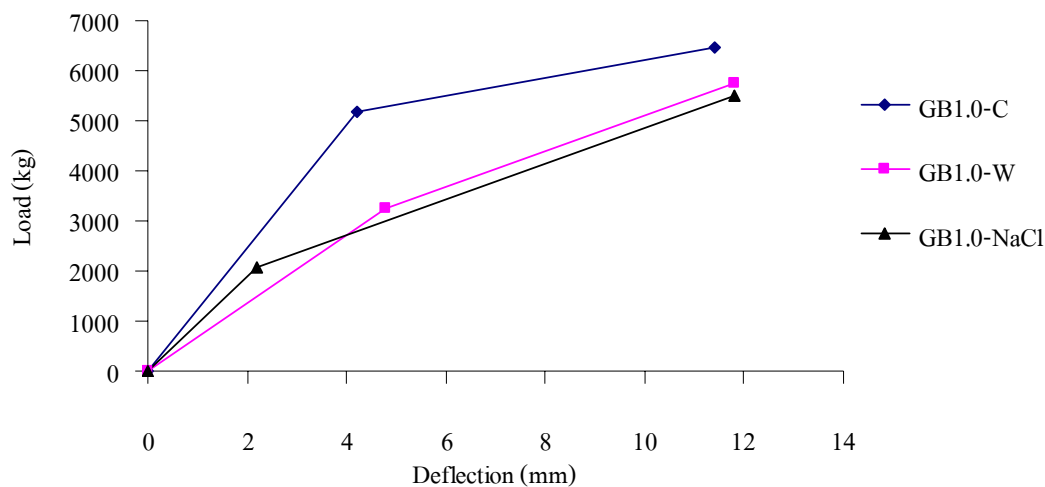
#### 4.4 การโก่งตัว

เมื่อน้ำหนักบรรทุกกระทำต่อคานจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตและคานคอนกรีตควบคุม การโก่งตัวที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกที่เพิ่มขึ้น ดังภาพที่ 73 ถึง ภาพที่ 76



ภาพที่ 73 การโค้งตัวและน้ำหนักบรรทุกของคานาจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต GB0.7

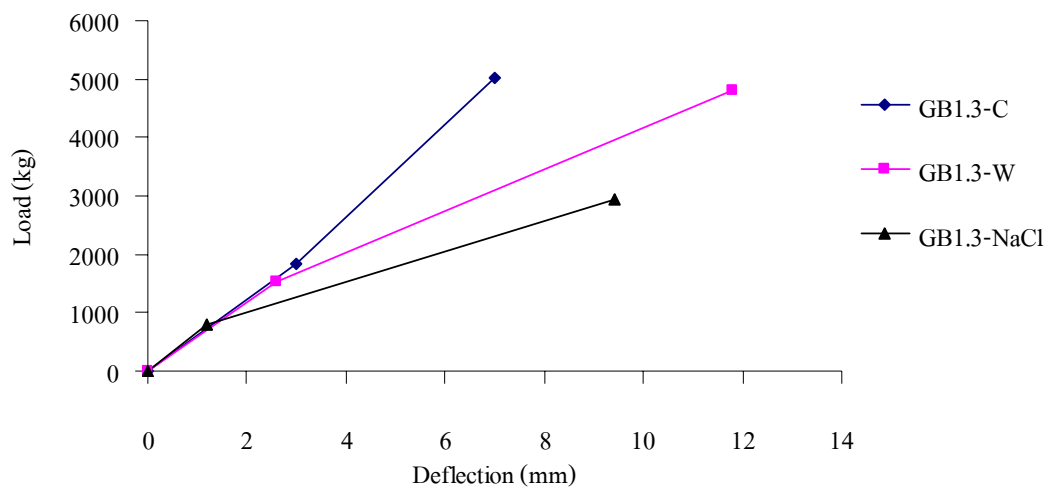
ผลการทดสอบการโค้งตัวและน้ำหนักบรรทุกของคานาจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตอัตราส่วน  $Na_2O.SiO_3 / NaOH$  เท่ากับ 0.7 ดังภาพที่ 73 พบว่าคานาจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตควบคุม GB0.7-C มีความสามารถรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดเท่ากับ 4907.38 กก. และให้ค่าการโค้งตัวเท่ากับ 10.80 มม. รองลงมาคานาจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต GB0.7-W แช่ในน้ำและเร่งการเกิดสนิม มีความสามารถรับน้ำหนักบรรทุก 4503.40 กก. การโค้งตัว 11.20 มม. และคานาจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต GB0.7-NaCl แช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์และเร่งการเกิดสนิม มีความสามารถรับน้ำหนักบรรทุกน้อยที่สุดเท่ากับ 4306.78 กก. การโค้งตัว 10.80 มม. เมื่อเปรียบเทียบค่าน้ำหนักบรรทุกสูงสุดของคานาจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตอัตราส่วน  $Na_2O.SiO_3 / NaOH$  เท่ากับ 0.7 โดยคานาจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตแช่ในน้ำและเร่งการเกิดสนิม และคานาจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตแช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์และเร่งการเกิดสนิม มีค่าน้ำหนักบรรทุกสูงสุดลดลง  $P_u$  เท่ากับ 8.23 และ 12.23 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ



ภาพที่ 74 การโค้งตัวและน้ำหนักบรรทุกของคานาจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต GB1.0

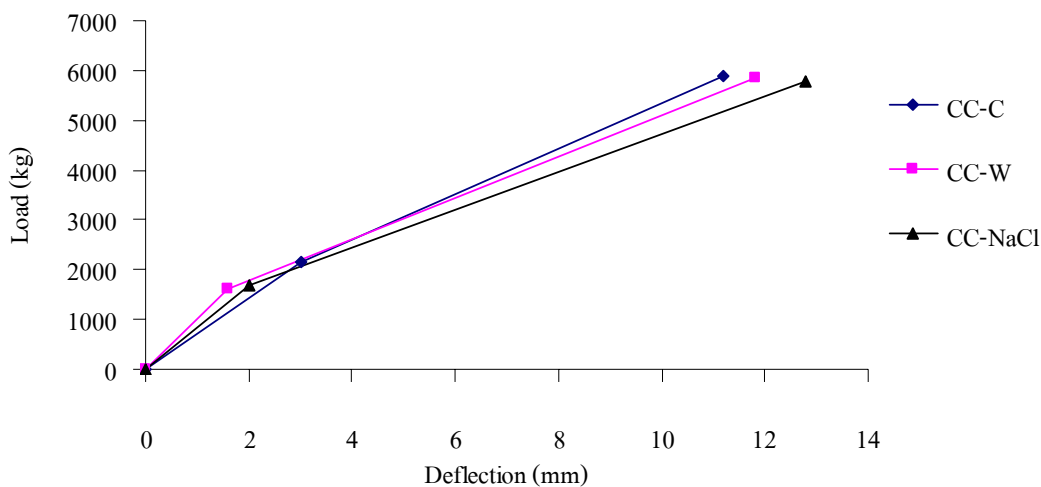
สำหรับการโค้งตัวและน้ำหนักบรรทุกของคานาจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตอัตราส่วน  $Na_2O.SiO_3 / NaOH$  เท่ากับ 1.0 ดังภาพที่ 74 พบว่าคานาจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตควบคุม GB1.0-C มีความสามารถรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดเท่ากับ 6467.75 กก. และให้ค่าการโค้งตัวเท่ากับ 11.40 มม. รองลงมาคานาจีโอโพลิเมอร์ GB1.0-W แช่ในน้ำและเร่งการเกิดสนิม มีความสามารถรับน้ำหนักบรรทุก 5756.03 กก. การโค้งตัว 11.80 มม. และคานาจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต GB1.0-NaCl แช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์และเร่งการเกิดสนิม มีความสามารถรับน้ำหนักบรรทุกน้อยที่สุด คือ 5494.03 กก. การโค้งตัว 11.80 มม. เมื่อเปรียบเทียบค่าน้ำหนักบรรทุกสูงสุดของคานาจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตอัตราส่วน  $Na_2O.SiO_3 / NaOH$  เท่ากับ 1.0 โดยคานาจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตแช่ในน้ำและเร่งการเกิดสนิม และคานาจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตแช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์และเร่งการเกิดสนิม มีค่าน้ำหนักบรรทุกสูงสุดลดลง  $P_u$  เท่ากับ 11.00 และ 15.05 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ





ภาพที่ 75 การโก่งตัวและน้ำหนักบรรทุกของคานจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต GB1.3

เมื่อพิจารณาการโก่งตัวและน้ำหนักบรรทุกของคานจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตอัตราส่วน  $Na_2O.SiO_3 / NaOH$  เท่ากับ 1.3 ดังภาพที่ 75 พบว่าคานจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตควบคุม GB1.3-C มีความสามารถรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดเท่ากับ 5011.37 กก. และให้ค่าการโก่งตัวเท่ากับ 7.00 มม. รองลงมาคานจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต GB1.3-W แช่ในน้ำและเร่งการเกิดสนิมของเหล็กเสริม มีความสามารถรับน้ำหนักบรรทุก 4806.76 กก. การโก่งตัว 11.80 มม. และคานจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต GB1.3-NaCl แช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์และเร่งการเกิดสนิม มีความสามารถรับน้ำหนักบรรทุกน้อยที่สุด เท่ากับ 2936.72 กก. การโก่งตัว 9.40 มม. เมื่อเปรียบเทียบค่าน้ำหนักบรรทุกสูงสุดของคานจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตอัตราส่วน  $Na_2O.SiO_3 / NaOH$  เท่ากับ 1.3 โดยคานจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตแช่ในน้ำและเร่งการเกิดสนิม และคานจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตแช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์และเร่งการเกิดสนิม มีค่าน้ำหนักบรรทุกสูงสุดลดลง  $P_u$  เท่ากับ 4.08 และ 41.39 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ



ภาพที่ 76 การโก่งตัวและน้ำหนักบรรทุกของคานคอนกรีตควบคุม CC

นอกจากนี้เมื่อพิจารณาค่าการโก่งตัวและน้ำหนักบรรทุกของคานคอนกรีตควบคุม ดังภาพที่ 76 พบว่าคานคอนกรีตควบคุมมีความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกที่ใกล้เคียงกัน โดยคานคอนกรีตควบคุม CC-C มีความสามารถรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุด คือ 5873.43 กก. และให้ค่าการโก่งตัวเท่ากับ 11.20 มม. รองลงมากานคอนกรีตควบคุม CC-W แช่ในน้ำและเร่งการเกิดสนิม มีความสามารถรับน้ำหนักบรรทุก 5863.37 กก. การโก่งตัว 11.80 มม. และคานคอนกรีตควบคุม CC-NaCl แช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์และเร่งการเกิดสนิม มีความสามารถรับน้ำหนักบรรทุกน้อยที่สุด เท่ากับ 5788.18 กก. การโก่งตัว 12.80 มม. เมื่อเปรียบเทียบค่าน้ำหนักบรรทุกสูงสุดของคานคอนกรีตควบคุม โดยคานคอนกรีตควบคุมแช่ในน้ำและเร่งการเกิดสนิม และคานคอนกรีตควบคุมแช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์และเร่งการเกิดสนิม มีค่าน้ำหนักบรรทุกสูงสุดลดลง  $P_u$  เท่ากับ 0.17 และ 1.45 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

ดังนั้นจากผลการทดสอบค่าการโก่งตัวและน้ำหนักบรรทุกของคานจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตและคานคอนกรีตควบคุม โดยสรุปได้ว่าการแช่คานจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตและคานคอนกรีตควบคุมในน้ำและเร่งการเกิดสนิม และในสารละลายโซเดียมคลอไรด์และเร่งการเกิดสนิม ส่งผลต่อระดับการกัดกร่อนของเหล็กเสริม น้ำหนักบรรทุกและการโก่งตัวของคานจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตและคานคอนกรีตควบคุม ซึ่งตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตควบคุมและคานคอนกรีตควบคุมมีความสามารถในการรับน้ำหนักมากที่สุด รองลงมาคือคานจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตและคานคอนกรีตแช่ในน้ำและเร่งการเกิดสนิม และคานจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตและคานคอนกรีตแช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์และเร่งการเกิดสนิม

#### 4.5 ความแข็งแรงหรือค่าสติฟเนส

โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กโดยทั่วไปที่มีความเสถียรภาพ เมื่อถูกแรงหรือน้ำหนักกระทำส่งผลให้โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กเกิดการโก่งตัวหรือเกิดการเปลี่ยนตำแหน่งของโครงสร้าง (Displacement  $\delta$ ) ทำให้ความมีเสถียรภาพลดน้อยลง (สมโพธิ, 2543) ซึ่งค่าความแข็งแรงหรือค่าสติฟเนส (Stiffness) เป็นค่าที่มีความสำคัญมากต่อการวิบัติของโครงสร้าง โดยที่ค่าความแข็งแรงหรือค่าสติฟเนสของโครงสร้างมากแสดงว่าโครงสร้างมีความแข็งแรงมั่นคง และเมื่อค่าสติฟเนสของโครงสร้างลดลงก็แสดงว่าโครงสร้างมีความแข็งแรงมั่นคงน้อยลงตามลำดับ ซึ่งการลดลงของค่าความแข็งแรงหรือค่าสติฟเนสของโครงสร้างขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ เช่น การแตกร้าว การกัดกร่อนของเหล็กเสริม และการสูญเสียกำลังยึดเหนี่ยวระหว่างคอนกรีตและเหล็กเสริม เป็นต้น

โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กโดยทั่วไปในการใช้งานต้องออกแบบให้มีพฤติกรรมแบบเหนียว (Ductile) ก่อนที่จะเกิดการวิบัติหรือมีค่าสติฟเนสที่เพียงพอ (วินิต, 2545) จากผลการทดสอบการรับแรงดัดของคานาจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตและคานาคอนกรีตควบคุม ซึ่งค่าความแข็งแรงของคานาหรือค่าสติฟเนสจะอยู่ในรูป  $EI$  และสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 24

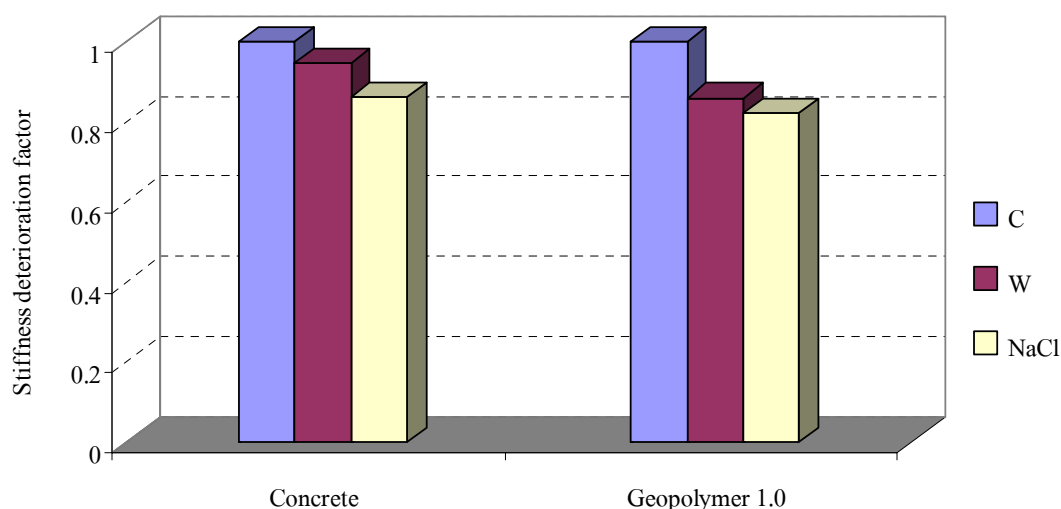
$$EI = \frac{Pa}{24\Delta_{\max}}(3l^2 - 4a^2) \quad (24)$$

|                 |   |                                     |
|-----------------|---|-------------------------------------|
| $a$             | = | ระยะจากน้ำหนักบรรทุกทุกถึงฐานรองรับ |
| $l$             | = | ระยะจากฐานรองรับถึงฐานรองรับ        |
| $EI$            | = | ความแข็งแรงหรือค่าสติฟเนส           |
| $\Delta_{\max}$ | = | การโก่งตัวสูงสุด                    |

สำหรับการลดลงของค่าความแข็งแรงหรือค่าสติฟเนสของคานาจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตและคานาคอนกรีตควบคุม ซึ่งการลดลงของค่าความแข็งแรงหรือค่าสติฟเนสดังกล่าวจะอยู่ในรูปของค่าสัมประสิทธิ์การเสื่อมสภาพความแข็งแรงหรือค่าสติฟเนส สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 25

$$\phi(t) = \frac{EI_{cor}}{EI_c} \quad (25)$$

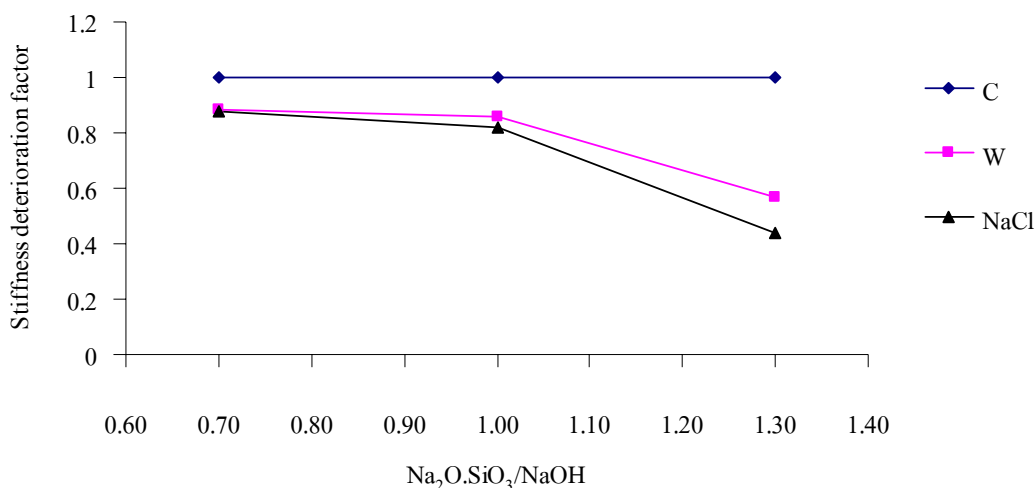
$\phi(t)$  = สัมประสิทธิ์การเสื่อมสภาพความแข็งแรงหรือค่าสติฟเนส  
 $EI_{cor}$  = ความแข็งแรงหรือค่าสติฟเนสเนื่องจากการกัดกร่อนของเหล็กเสริม  
 $EI_c$  = ความแข็งแรงหรือค่าสติฟเนสที่ไม่มีการกัดกร่อนของเหล็กเสริม



ภาพที่ 77 สัมประสิทธิ์การเสื่อมสภาพความแข็งแรงหรือค่าสติฟเนสของคานคอนกรีตควบคุม และคานจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตอัตราส่วน  $Na_2O.SiO_3 / NaOH$  เท่ากับ 1.0

จากภาพที่ 77 เมื่อเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การเสื่อมสภาพความแข็งแรงหรือค่าสติฟเนสของคานจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตอัตราส่วน  $Na_2O.SiO_3 / NaOH$  เท่ากับ 1.0 กับคานคอนกรีตควบคุม พบว่ามีค่าสัมประสิทธิ์การเสื่อมสภาพความแข็งแรงหรือค่าสติฟเนสของคานจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตควบคุมต่ำกว่า เท่ากับ 9.26 เปอร์เซ็นต์ ของคานคอนกรีตควบคุม เมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การเสื่อมสภาพความแข็งแรงหรือค่าสติฟเนสของคานจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตและคานคอนกรีตควบคุมที่แช่น้ำและเร่งการเกิดสนิม และคานจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตและคานคอนกรีตควบคุมแช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์และเร่งการเกิดสนิม พบว่าคานจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตมีอัตราการลดลงของค่าสัมประสิทธิ์การเสื่อมสภาพความแข็งแรงหรือค่าสติฟเนสมากกว่าคานคอนกรีตควบคุม โดยที่คานจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตแช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์และเร่งการเกิดสนิมมีอัตราการลดลงของค่าสัมประสิทธิ์การเสื่อมสภาพความแข็งแรงหรือค่าสติฟเนส เท่ากับ 17.91 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์การเสื่อมสภาพ

ความแข็งแรงและค่าสตีเฟนลดลงมากกว่าคานคอนกรีตควบคุมแช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ และเร่งการเกิดสนิม สำหรับค่าสัมประสิทธิ์การเสื่อมสภาพความแข็งแรงหรือค่าสตีเฟนของคานคอนกรีตควบคุมแช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์และเร่งการเกิดสนิมมีอัตราการลดลงของค่าสัมประสิทธิ์ความแข็งแรงหรือค่าสตีเฟน เท่ากับ 13.75 เปอร์เซ็นต์



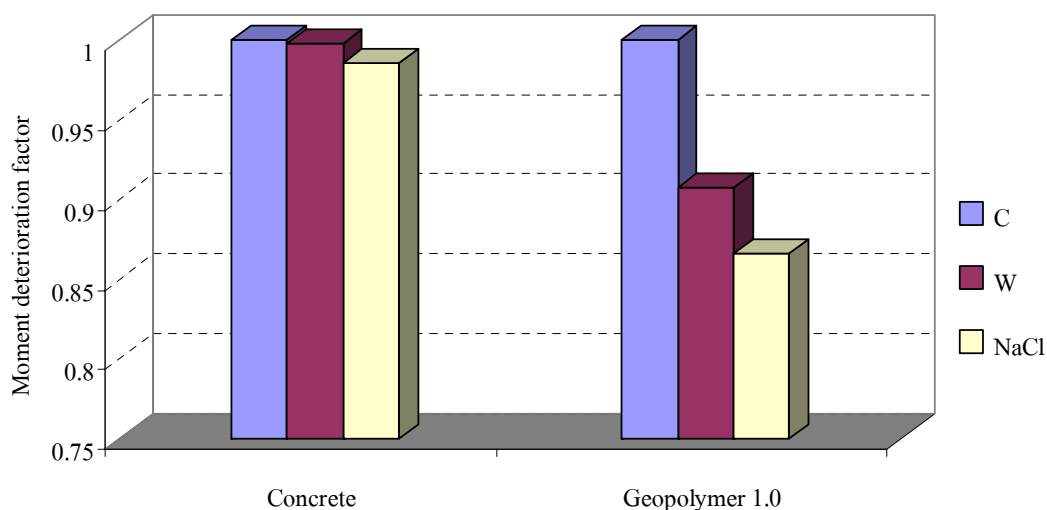
ภาพที่ 78 สัมประสิทธิ์การเสื่อมสภาพความแข็งแรงหรือค่าสตีเฟนของคานจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต

เมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การเสื่อมสภาพความแข็งแรงหรือค่าสตีเฟนของคานจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตอัตราส่วน  $Na_2O.SiO_3 / NaOH$  เท่ากับ 0.7, 1.0 และ 1.3 ดังภาพที่ 78 พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การเสื่อมสภาพความแข็งแรงหรือค่าสตีเฟนของคานจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตอัตราส่วน  $Na_2O.SiO_3 / NaOH$  เท่ากับ 1.3 เมื่อเปรียบเทียบกับจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตควบคุม มีค่าสัมประสิทธิ์การเสื่อมสภาพความแข็งแรงหรือค่าสตีเฟนลดลงมากที่สุด เท่ากับ 43.64 เปอร์เซ็นต์ ของคานจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตแช่น้ำและเร่งการเกิดสนิม และค่าสัมประสิทธิ์การเสื่อมสภาพความแข็งแรงหรือค่าสตีเฟนลดลง เท่ากับ 56.35 เปอร์เซ็นต์ ของตัวอย่างแช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์และเร่งการเกิดสนิม สำหรับคานจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตอัตราส่วน  $Na_2O.SiO_3 / NaOH$  เท่ากับ 0.7 และ 1.0 มีค่าสัมประสิทธิ์การเสื่อมสภาพความแข็งแรงหรือค่าสตีเฟนที่ใกล้เคียงกัน ซึ่งจากค่าสัมประสิทธิ์การเสื่อมสภาพความแข็งแรงหรือค่าสตีเฟนของคานจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต พบว่าอัตราส่วนของ  $Na_2O.SiO_3 / NaOH$  ของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต การกักกร่อนของเหล็กเสริม มีผลทำให้ค่าความแข็งแรงหรือค่าสตีเฟนลดลง ตามลำดับ

การลดลงของการรับแรงดัดของคานจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตและคานคอนกรีตควบคุม ซึ่งการลดลงของค่าการรับแรงดัดจะอยู่ในรูปของค่าสัมประสิทธิ์การเสื่อมสภาพการรับแรงดัด สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 26

$$\varphi(t) = \frac{M_{cor}}{M_c} \quad (26)$$

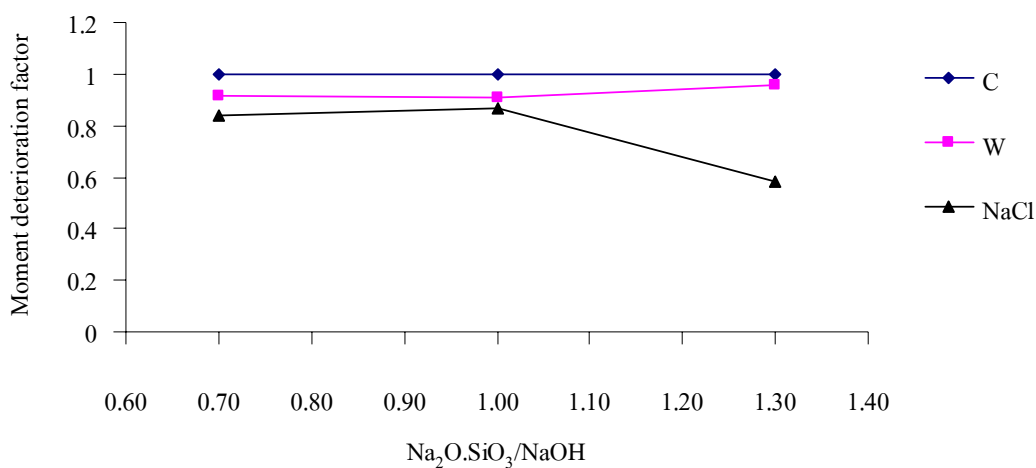
- $\varphi(t)$  = สัมประสิทธิ์การเสื่อมสภาพการรับแรงดัด  
 $M_{cor}$  = กำลังต้านทานโมเมนต์ดัดสูงสุดเนื่องจากการกัดกร่อนของเหล็กเสริม  
 $M_c$  = กำลังต้านทานโมเมนต์ดัดสูงสุดที่ไม่มีการกัดกร่อนของเหล็กเสริม



ภาพที่ 79 สัมประสิทธิ์การเสื่อมสภาพการรับแรงดัดของคานคอนกรีตควบคุม และคานจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตอัตราส่วน  $Na_2O.SiO_3 / NaOH$  เท่ากับ 1.0

สำหรับค่าสัมประสิทธิ์การเสื่อมสภาพการรับแรงดัด ดังภาพที่ 79 เมื่อเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การเสื่อมสภาพการรับแรงดัดของคานจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตอัตราส่วน  $Na_2O.SiO_3 / NaOH$  เท่ากับ 1.0 กับคานคอนกรีตควบคุม พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การเสื่อมสภาพการรับแรงดัดของคานจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตมีอัตราการลดลงที่มากกว่าคานคอนกรีตควบคุม โดยที่คานจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตแช่น้ำและเร่งการเกิดสนิม มีค่าสัมประสิทธิ์การรับแรงดัดลดลง เท่ากับ 9.23 เปอร์เซ็นต์ และคานจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตแช่ในสารละลาย

โซเดียมคลอไรด์และเร่งการเกิดสนิม มีค่าสัมประสิทธิ์การเสื่อมสภาพการรับแรงดัดลดลงมากที่สุด เท่ากับ 13.36 เปอร์เซ็นต์



ภาพที่ 80 สัมประสิทธิ์การเสื่อมสภาพการรับแรงดัดของคานจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต

นอกจากนี้เมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การเสื่อมสภาพการรับแรงดัดของคานจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตอัตราส่วน  $Na_2O.SiO_3 / NaOH$  เท่ากับ 0.7, 1.0 และ 1.3 ดังภาพที่ 80 ซึ่งคานจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตอัตราส่วน  $Na_2O.SiO_3 / NaOH$  เท่ากับ 0.7 และ 1.0 มีค่าสัมประสิทธิ์การเสื่อมสภาพการรับแรงดัดที่ใกล้เคียงกันทั้งคานจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตแช่น้ำและเร่งการเกิดสนิม และคานจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตแช่น้ำสารละลายโซเดียมคลอไรด์และเร่งการเกิดสนิม สำหรับคานจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตอัตราส่วน  $Na_2O.SiO_3 / NaOH$  เท่ากับ 1.3 พบว่าเมื่อเปรียบเทียบกับคานจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตควบคุม ค่าสัมประสิทธิ์การเสื่อมสภาพการรับแรงดัดลดลงมากที่สุด เท่ากับ 41.40 เปอร์เซ็นต์ ของคานจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตแช่น้ำสารละลายโซเดียมคลอไรด์และเร่งการเกิดสนิม

## สรุปและข้อเสนอแนะ

### สรุป

#### 1. อัตราส่วนที่เหมาะสมสำหรับการทำจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต

1.1 อัตราส่วน  $Na_2O.SiO_3 / NaOH$  ที่สูงขึ้น ส่งผลให้ค่ากำลังอัดเพิ่มขึ้น โดยอัตราส่วน  $Na_2O.SiO_3 / NaOH$  ระหว่าง 0.9 -1.3 โดยน้ำหนัก เป็นอัตราส่วนที่เหมาะสมสำหรับการทำจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต

1.2 อัตราส่วน  $Na_2O.SiO_3 / NaOH$  มีผลต่อระยะเวลาการก่อตัวและความสามารถทำงานได้ของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต ซึ่งอัตราส่วน  $Na_2O.SiO_3 / NaOH$  ที่สูงขึ้นส่งผลให้ระยะเวลาการก่อตัวและความสามารถทำงานได้น้อยลง

#### 2. การกักกร่อนของเหล็กเสริม

2.1 การกักกร่อนของเหล็กเสริมทำให้พื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริมลดลงตามระดับของสนิมที่เกิดขึ้น ซึ่งจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่มีอัตราส่วน  $Na_2O.SiO_3 / NaOH$  สูงขึ้น และการแช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์และเร่งการเกิดสนิม มีอัตราการสูญเสียพื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริมเพิ่มขึ้นมากกว่าการแช่ในน้ำและเร่งการเกิดสนิม ส่วนคอนกรีตควบคุมมีอัตราการกักกร่อนของเหล็กเสริมน้อยกว่าจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต

2.2 การกักกร่อนของเหล็กเสริมในจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต ส่งผลให้จีโอโพลิเมอร์คอนกรีตเกิดการแตกร้าว ซึ่งจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตแช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์และเร่งการเกิดสนิมเป็นระยะเวลา 28 วัน มีแนวโน้มการแตกร้าวที่มากกว่าจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตแช่ในน้ำและเร่งการเกิดสนิม สำหรับคอนกรีตแช่ในน้ำและแช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์และเร่งการเกิดสนิมเป็นระยะเวลา 28 วัน ไม่พบการแตกร้าว

2.3 ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ในจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต มีค่ามากกว่าค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ในคอนกรีตควบคุม ซึ่งคานจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตแช่ในสารละลายโซเดียม



คลอไรด์และเร่งการเกิดสนิม มีค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์มากกว่าคานาจิโอโพลิเมอร์คอนกรีต  
แช่น้ำและเร่งการเกิดสนิม สำหรับค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ของคานาคอนกรีตควบคุมมีค่า  
น้อยกว่าค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ของคานาจิโอโพลิเมอร์คอนกรีต

### 3. กำลังการยึดเหนี่ยว

3.1 กำลังการยึดเหนี่ยวของจิโอโพลิเมอร์คอนกรีตควบคุมทุกอัตราส่วนผสม มีค่ามากกว่า  
กำลังการยึดเหนี่ยวของคอนกรีตควบคุมสำหรับตัวอย่างที่ยังไม่ได้ผ่านการเร่งการเกิดสนิมและ  
เมื่อเร่งการเกิดสนิมในจิโอโพลิเมอร์คอนกรีต คอนกรีตควบคุมที่เร่งการเกิดสนิมมีค่ากำลัง  
การยึดเหนี่ยวมากกว่าจิโอโพลิเมอร์คอนกรีตทุกอัตราส่วนผสมเช่นกัน

### 4. พฤติกรรมการรับแรงดัด

4.1 การรับแรงดัดของคานาจิโอโพลิเมอร์คอนกรีตและคานาคอนกรีตควบคุม พบว่า  
เมื่อยังไม่เกิดการกัดกร่อนของเหล็กเสริม ค่าการรับแรงดัดของคานาจิโอโพลิเมอร์คอนกรีตมากกว่า  
การรับแรงดัดของคานาคอนกรีตควบคุม และเมื่อเกิดการกัดกร่อนของเหล็กเสริม คานาคอนกรีต  
ควบคุมมีการรับแรงดัดลดลงน้อยกว่าคานาจิโอโพลิเมอร์คอนกรีต

4.2 สัมประสิทธิ์การเสื่อมสภาพความแข็งแรงหรือค่าสดีฟเนสของคานาจิโอโพลิเมอร์  
คอนกรีตและคานาคอนกรีตควบคุมมีค่าลดลงเมื่อเกิดการกัดกร่อนของเหล็กเสริม โดยคานาจิโอโพลิ  
เมอร์คอนกรีตอัตราส่วน  $Na_2O.SiO_3 / NaOH$  ที่สูงขึ้น มีค่าสัมประสิทธิ์การเสื่อมสภาพความ  
แข็งแรงหรือค่าสดีฟเนสที่จะลดลงมากขึ้น สำหรับคานาจิโอโพลิเมอร์คอนกรีตและคานาคอนกรีต  
ควบคุมที่แช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์และเร่งการเกิดสนิม ค่าสัมประสิทธิ์การเสื่อมสภาพ  
ความแข็งแรงหรือค่าสดีฟเนสของคานาจิโอโพลิเมอร์คอนกรีตและคานาคอนกรีตควบคุมจะลดลง  
อย่างชัดเจนเมื่อเปรียบเทียบกับคานาที่แช่น้ำและเร่งการเกิดสนิม

4.3 สัมประสิทธิ์การเสื่อมสภาพการรับแรงดัดของคานาจิโอโพลิเมอร์คอนกรีตและคานา  
คอนกรีตควบคุมมีค่าลดลงเมื่อเกิดการกัดกร่อนของเหล็กเสริม โดยคานาจิโอโพลิเมอร์คอนกรีต  
อัตราส่วน  $Na_2O.SiO_3 / NaOH$  ที่สูงขึ้น มีค่าสัมประสิทธิ์การเสื่อมสภาพการรับแรงดัดก็จะลดลง  
มากขึ้น สำหรับคานาจิโอโพลิเมอร์คอนกรีตและคานาคอนกรีตควบคุมที่แช่ในสารละลายโซเดียม

คลอไรด์และเร่งการเกิดสนิม ค่าสัมประสิทธิ์การเสื่อมสภาพการรับแรงคดของคานจีโอโพลิเมอร์ คอนกรีตและคานคอนกรีตควบคุมจะลดลงอย่างชัดเจนเมื่อเปรียบเทียบกับคานจีโอโพลิเมอร์ คอนกรีตและคานคอนกรีตควบคุมที่แช่น้ำและเร่งการเกิดสนิม

### ข้อเสนอแนะ

1. ระยะเวลาการก่อตัวของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตมีผลต่อความสามารถทำงานได้ ดังนั้นควรทำการศึกษาหรือหาสารผสมเพิ่มที่หน่วงระยะเวลาการก่อตัว เพื่อให้มีความสามารถในการทำงานได้มากขึ้น
2. การวัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์สำหรับการทดสอบการเกิดสนิมของเหล็กเสริมค่อนข้างมีความแปรปรวนของข้อมูลเนื่องจากปัจจัยจากสภาวะแวดล้อม เช่น ความชื้น อุณหภูมิ ดังนั้นเพื่อต้องการลดความแปรปรวนของข้อมูลดังกล่าวควรใช้วิธีการเก็บข้อมูลเป็นจำนวนมาก
3. ควรมีการศึกษาเพิ่มเติมในการนำจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตไปซ่อมแซมผิวถนนหรือโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก เนื่องจากจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตมีคุณสมบัติกำลังยึดเหนี่ยวดีกว่าคอนกรีต

## เอกสารและสิ่งอ้างอิง

- คณะกรรมการคอนกรีตและวัสดุ ภายใต้คณะกรรมการวิชาการสาขาวิศวกรรมโยธา  
วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์. 2543. ความคงทนของคอนกรีต.  
พิมพ์ครั้งที่ 1. บริษัทจุดทอง จำกัด, กรุงเทพฯ.
- ปริญญา จินดาประเสริฐ. 2548. เถ้าลอยในงานคอนกรีต. พิมพ์ครั้งที่ 2. สมาคมคอนกรีตไทย,  
กรุงเทพฯ.
- ต่อกุล กาญจนาลัย. 2528. พฤติกรรมของคอนกรีตเสริมเหล็ก. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์,  
กรุงเทพฯ.
- วินิต ช่อวิเชียร. 2545. การออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก. พิมพ์ครั้งที่ 5. จุฬาลงกรณ์  
มหาวิทยาลัยศิลปากร, กรุงเทพฯ.
- สมโพธิ วิวิธเกียรรวงศ์. 2543. การวิเคราะห์โครงสร้างด้วยวิธีเมตริกซ์. พิมพ์ครั้งที่ 2.  
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.
- ACI Committee 363. 1992. **State of Art Report on High-Strength Concrete.** American  
Concrete Institute, Detroit, USA.
- Albert Fuentes. 1995. **Reinforced Concrete After Cracking.** Oxford & IBH Publishing Co.  
Pvt. Ltd., USA.
- Bentur, A., S. Diamond and N.S. Berke. 1997. **Steel Corrosion in Concrete: Fundamentals  
and Civil Engineering Practice.** E & FN Spon, an imprint of Chapman & Hall,  
London.
- CEB. 1993. CEB-FIP Model Code 1990. **Comite Euro-International du Beton.** Thomas  
Telford Service Ltd.

- Comric, D. C., J. H. Paterson and D. J. Ritchey. 1988. **Geopolymer Technologies in Toxic Waste Management. Paper presented at the Geopolymer.** First European Conference on Soft Mineralurgy, Compiègne, France.
- Davidovits, J. 1999. Chemistry of geopolymer systems. **Terminology in Geopolymer 99 International Conference.** France.
- fib. 2000. Bond of Reinforcement in Concrete, Bulletin 10. **Federation Internationale du Beton, Task Group Bond Models,** Lausanne, Switzerland.
- Gourley, J. T. and G. B. Johnson. 2005. Development in Geopolymer Precast Concrete. **Paper presented at the International Workshop on Geopolymers and Geopolymer Concrete,** Perth, Australia.
- Hardjito, D., S.E. Wallah, M.J. Sumajouw and B.V. Rangan. 2004. On the Development of Fly Ash-Based Geopolymer Concrete. **ACI Material Journal** **101.** 467-472.
- Malhotra, V. M. 2002. Introduction: Sustainable Development and Concrete Technology. **ACI Concrete International** 24 (7): 22.
- McCaffrey, R. 2002. Climate Change and Cement Industry. **Global Cement and Lime Magazine** (Environmental Special Issue): 15-19
- Mehta, P. K. 2002. Greening of the Concrete Industry for Sustainable Development. **ACI Concrete International** 24 (7): 23-28.
- Neal, S. B., C. Victor and W. David. 1990. **Corrosion Rate of Steel in Concrete.** American Society For Testing and Materials.

- Neville, A.M. 2002. **Properties of Concrete**. 4<sup>th</sup> and Final Edition. John Wiley and Sons, Inc., New York.
- Pullar-Strcker. 1987. **Corrosion Damaged Concrete Assessment and Repair**. Construction Industry Research and Information Association. Anchor Brendon Ltd, Tiptree, Essex. London.
- Pourbaix, M. 1972. **Atlas of electrochemical equilibria in aqueous solutions**. Pergamon press, Oxford, NACE, Houston.
- Raed Akram Saliba Al-Sunna. 2006. **Deflection Behaviour of FRP Reinforced Concrete Flexural Members**. Department of Civil and Structural Engineering The University of Sheffield.
- Raupach, M. 1996. Chloride-induced macrocell corrosion of steel in concrete theoretical background and practical consequences. **Construction and building materials** 10 (5): 329-338.
- Scannell, W.T. and A. Sohaghpurwala. 1993. Cathodic protection as a corrosion control alternative. **Concrete Corrosion Specialists**, Concorr, Inc.
- Song, X. J., Marosszeky, M M. Brungs and R. Munn. 2005. Durability of fly ash-based Geopolymer concrete against sulphuric acid attack. **Paper presented at the 10DBMC International Conference on Durability of Building Materials and Component**, Lyon France.
- Sumajouw, M.J.D. and B.V. Rangan. 2006. Low-Calcium Fly Ash Geopolymer Concrete; Reinforced Beam and Columns. **Research Report GC3**. Curtin University of Technology, Australia.

- Swanepoel, J. C. and C. A. Strydom. 2002. Utilisation of fly ash in a geopolymeric material. **Applied Geochemistry** 17(8): 1143-1148.
- Tikal'sky, P. J. and R. L. Carrasquillo. 1992. Influence of Fly Ash on the Sulfate Resistance of Concrete. **ACI Materials Journal**. 89 (1): 69-75.
- Tuutti, K. 1982. **Corrosion of steel in concrete**. Stockholm: Cement-ochbetonginst.
- Van Jaarsveld, J. G. S., J. S. J. van Deventer and G. C. Lukey. 2002. The Effect of Composition and Temperature on the Properties of Fly Ash and Kaolinite-based Geopolymer. **Chemical Engineering Journal** 89 (1-3): 63-73.
- Walloh, S.E. and B. V. Rangan. 2006. Low-Calcium Fly Ash Geopolymer Concrete ; Long-Term Properties. **Research Report GC2**. Curtin University of Technology, Australia.
- Wee, T. H., A. K. Suryavanshi, S. F. Wong and A. K. M. A. Rahman. 2000. Sulfate Resistance of Concrete Containing Mineral Admixtures. **ACI Material Journal** 97 (5): 536-549.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก  
กำลังรับแรงอัด



ตารางผนวกที่ ก1 กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต อัตราส่วน  $Na_2O.SiO_3 / NaOH$  เท่ากับ 0.7

| Mix No. | Diameter | Height | Weight | Age  | Cross section area | Max load | Comp strength | Avg comp strength | Avg comp strength |
|---------|----------|--------|--------|------|--------------------|----------|---------------|-------------------|-------------------|
|         | cm       | cm     | g      | days | cm <sup>2</sup>    | Tons     | ksc           | ksc               | MPa               |
| GC0.7-1 | 10       | 20.2   | 3762.8 | 1    | 78.540             | 30.0     | 342.715       |                   |                   |
| GC0.7-2 | 10       | 20.6   | 3817.4 | 1    | 78.540             | 30.4     | 347.936       | 301.819           | 29.598            |
| GC0.7-3 | 10       | 20.2   | 3774.3 | 1    | 78.540             | 20.2     | 214.807       |                   |                   |
| GC0.7-1 | 10       | 20.3   | 3825.5 | 3    | 78.540             | 28.5     | 323.137       |                   |                   |
| GC0.7-2 | 10       | 20.2   | 3782.4 | 3    | 78.540             | 30.4     | 347.936       | 326.618           | 32.030            |
| GC0.7-3 | 10       | 20.2   | 3753.0 | 3    | 78.540             | 27.4     | 308.780       |                   |                   |
| GC0.7-1 | 10       | 20.2   | 3764.6 | 7    | 78.540             | 26.0     | 290.508       |                   |                   |
| GC0.7-2 | 10       | 20.3   | 3792.3 | 7    | 78.540             | 30.0     | 342.715       | 327.923           | 32.158            |
| GC0.7-3 | 10       | 20.2   | 3771.9 | 7    | 78.540             | 30.6     | 350.546       |                   |                   |
| GC0.7-1 | 10       | 20.8   | 3824.1 | 14   | 78.540             | 27.6     | 311.391       |                   |                   |
| GC0.7-2 | 10       | 20.2   | 3810.1 | 14   | 78.540             | 31.4     | 360.988       | 357.507           | 35.059            |
| GC0.7-3 | 10       | 20.6   | 3802.8 | 14   | 78.540             | 34.4     | 400.143       |                   |                   |
| GC0.7-1 | 10       | 20.1   | 3774.5 | 28   | 78.540             | 32.5     | 375.345       |                   |                   |
| GC0.7-2 | 10       | 20.1   | 3754.5 | 28   | 78.540             | 35.8     | 418.416       | 394.052           | 38.643            |
| GC0.7-3 | 10       | 20.2   | 3774.4 | 28   | 78.540             | 33.5     | 388.396       |                   |                   |

ตารางผนวกที่ ก2 กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต อัตราส่วน  $Na_2O.SiO_3 / NaOH$  เท่ากับ 0.8

| Mix No. | Diameter | Height | Weight | Age  | Cross section area | Max load | Comp strength | Avg comp strength | Avg comp strength |
|---------|----------|--------|--------|------|--------------------|----------|---------------|-------------------|-------------------|
|         | cm       | cm     | g      | days | cm <sup>2</sup>    | Tons     | ksc           | ksc               | MPa               |
| GC0.8-1 | 10       | 20.5   | 3801.6 | 1    | 78.540             | 34.6     | 402.753       |                   |                   |
| GC0.8-2 | 10       | 20.4   | 3775.4 | 1    | 78.540             | 32.2     | 371.429       | 377.520           | 37.022            |
| GC0.8-3 | 10       | 20.8   | 3787.8 | 1    | 78.540             | 31.2     | 358.377       |                   |                   |
| GC0.8-1 | 10       | 20.8   | 3761.1 | 3    | 78.540             | 34.2     | 397.533       |                   |                   |
| GC0.8-2 | 10       | 20.6   | 3777.5 | 3    | 78.540             | 32.4     | 374.039       | 387.961           | 38.046            |
| GC0.8-3 | 10       | 20.3   | 3798.1 | 3    | 78.540             | 33.8     | 392.312       |                   |                   |
| GC0.8-1 | 10       | 20.8   | 3851.7 | 7    | 78.540             | 35.4     | 413.195       |                   |                   |
| GC0.8-2 | 10       | 20.4   | 3828.3 | 7    | 78.540             | 37.0     | 434.078       | 427.117           | 41.886            |
| GC0.8-3 | 10       | 20.6   | 3800.4 | 7    | 78.540             | 37.0     | 434.078       |                   |                   |
| GC0.8-1 | 10       | 20.3   | 3785.2 | 14   | 78.540             | 36.0     | 421.026       |                   |                   |
| GC0.8-2 | 10       | 20.5   | 3828.7 | 14   | 78.540             | 36.4     | 426.247       | 427.117           | 41.886            |
| GC0.8-3 | 10       | 20.2   | 3779.5 | 14   | 78.540             | 37.0     | 434.078       |                   |                   |
| GC0.8-1 | 10       | 20.2   | 3775.9 | 28   | 78.540             | 36.2     | 423.636       |                   |                   |
| GC0.8-2 | 10       | 20.2   | 3788.2 | 28   | 78.540             | 34.4     | 400.143       | 432.338           | 42.398            |
| GC0.8-3 | 10       | 20.2   | 3763.7 | 28   | 78.540             | 40.0     | 473.233       |                   |                   |

ตารางผนวกที่ ก3 กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต อัตราส่วน  $Na_2O.SiO_3 / NaOH$  เท่ากับ 0.9

| Mix No. | Diameter | Height | Weight | Age  | Cross section area | Max load | Comp strength | Avg comp strength | Avg comp strength |
|---------|----------|--------|--------|------|--------------------|----------|---------------|-------------------|-------------------|
|         | cm       | cm     | g      | days | cm <sup>2</sup>    | Tons     | ksc           | ksc               | MPa               |
| GC0.9-1 | 10       | 20.4   | 3795.1 | 1    | 78.540             | 40.6     | 481.064       |                   |                   |
| GC0.9-2 | 10       | 20.4   | 3794.7 | 1    | 78.540             | 37.8     | 444.519       | 476.714           | 46.750            |
| GC0.9-3 | 10       | 20.6   | 3746.5 | 1    | 78.540             | 42.4     | 504.558       |                   |                   |
| GC0.9-1 | 10       | 20.1   | 3784.9 | 3    | 78.540             | 42.6     | 507.168       |                   |                   |
| GC0.9-2 | 10       | 20.0   | 3781.5 | 3    | 78.540             | 40.6     | 481.064       | 481.064           | 47.176            |
| GC0.9-3 | 10       | 20.3   | 3824.5 | 3    | 78.540             | 38.6     | 454.961       |                   |                   |
| GC0.9-1 | 10       | 20.1   | 3785.2 | 7    | 78.540             | 39.8     | 470.623       |                   |                   |
| GC0.9-2 | 10       | 20.8   | 3774.5 | 7    | 78.540             | 42.0     | 499.337       | 494.116           | 48.456            |
| GC0.9-3 | 10       | 20.1   | 3797.8 | 7    | 78.540             | 43.0     | 512.389       |                   |                   |
| GC0.9-1 | 10       | 20.4   | 3774.5 | 14   | 78.540             | 44.4     | 530.661       |                   |                   |
| GC0.9-2 | 10       | 20.2   | 3775.7 | 14   | 78.540             | 40.0     | 473.233       | 510.648           | 50.078            |
| GC0.9-3 | 10       | 20.2   | 3782.1 | 14   | 78.540             | 44.2     | 528.051       |                   |                   |
| GC0.9-1 | 10       | 20.3   | 3794.1 | 28   | 78.540             | 42.6     | 507.168       |                   |                   |
| GC0.9-2 | 10       | 20.3   | 3788.1 | 28   | 78.540             | 45.0     | 538.492       | 528.921           | 51.869            |
| GC0.9-3 | 10       | 20.2   | 3796.1 | 28   | 78.540             | 45.2     | 541.103       |                   |                   |

ตารางผนวกที่ ก4 กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต อัตราส่วน  $Na_2O.SiO_3 / NaOH$  เท่ากับ 1.0

| Mix No. | Diameter | Height | Weight | Age  | Cross section area | Max load | Comp strength | Avg comp strength | Avg comp strength |
|---------|----------|--------|--------|------|--------------------|----------|---------------|-------------------|-------------------|
|         | cm       | cm     | g      | days | cm <sup>2</sup>    | Tons     | ksc           | ksc               | MPa               |
| GC1.0-1 | 10       | 20.8   | 3783.5 | 1    | 78.540             | 39.7     | 469.318       |                   |                   |
| GC1.0-2 | 10       | 20.4   | 3781.3 | 1    | 78.540             | 40.6     | 481.064       | 464.967           | 45.598            |
| GC1.0-3 | 10       | 20.5   | 3765.2 | 1    | 78.540             | 37.8     | 444.519       |                   |                   |
| GC1.0-1 | 10       | 20.2   | 3767.4 | 3    | 78.540             | 42.8     | 509.778       |                   |                   |
| GC1.0-2 | 10       | 20.8   | 3774.6 | 3    | 78.540             | 35.2     | 410.584       | 468.013           | 45.896            |
| GC1.0-3 | 10       | 20.4   | 3778.5 | 3    | 78.540             | 40.8     | 483.675       |                   |                   |
| GC1.0-1 | 10       | 20.1   | 3774.9 | 7    | 78.540             | 42.6     | 507.168       |                   |                   |
| GC1.0-2 | 10       | 20.1   | 3788.9 | 7    | 78.540             | 42.0     | 499.337       | 493.246           | 48.371            |
| GC1.0-3 | 10       | 20.0   | 3768.1 | 7    | 78.540             | 40.0     | 473.233       |                   |                   |
| GC1.0-1 | 10       | 20.4   | 3788.2 | 14   | 78.540             | 42.0     | 499.337       |                   |                   |
| GC1.0-2 | 10       | 20.8   | 3787.9 | 14   | 78.540             | 44.6     | 533.272       | 515.869           | 50.589            |
| GC1.0-3 | 10       | 20.2   | 3785.6 | 14   | 78.540             | 43.2     | 514.999       |                   |                   |
| GC1.0-1 | 10       | 20.3   | 3773.9 | 28   | 78.540             | 43.0     | 512.389       |                   |                   |
| GC1.0-2 | 10       | 20.2   | 3776.2 | 28   | 78.540             | 46.0     | 551.544       | 523.700           | 51.357            |
| GC1.0-3 | 10       | 20.6   | 3825.7 | 28   | 78.540             | 42.6     | 507.168       |                   |                   |

ตารางผนวกที่ ก5 กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต อัตราส่วน  $Na_2O.SiO_3 / NaOH$  เท่ากับ 1.1

| Mix No. | Diameter | Height | Weight | Age  | Cross section area | Max load | Comp strength | Avg comp strength | Avg comp strength |
|---------|----------|--------|--------|------|--------------------|----------|---------------|-------------------|-------------------|
|         | cm       | cm     | g      | days | cm <sup>2</sup>    | Tons     | ksc           | ksc               | MPa               |
| GC1.1-1 | 10       | 20.4   | 3818.3 | 1    | 78.540             | 34.2     | 397.533       |                   |                   |
| GC1.1-2 | 10       | 20.2   | 3809.5 | 1    | 78.540             | 39.0     | 460.181       | 425.377           | 41.715            |
| GC1.1-3 | 10       | 20.4   | 3797.0 | 1    | 78.540             | 35.8     | 418.416       |                   |                   |
| GC1.1-1 | 10       | 20.8   | 3779.3 | 3    | 78.540             | 29.4     | 334.884       |                   |                   |
| GC1.1-2 | 10       | 20.6   | 3796.7 | 3    | 78.540             | 40.6     | 481.064       | 435.818           | 42.739            |
| GC1.1-3 | 10       | 20.6   | 3705.1 | 3    | 78.540             | 41.4     | 491.506       |                   |                   |
| GC1.1-1 | 10       | 20.2   | 3799.9 | 7    | 78.540             | 45.0     | 538.492       |                   |                   |
| GC1.1-2 | 10       | 20.2   | 3785.0 | 7    | 78.540             | 37.2     | 436.688       | 498.467           | 48.883            |
| GC1.1-3 | 10       | 20.3   | 3792.7 | 7    | 78.540             | 43.6     | 520.220       |                   |                   |
| GC1.1-1 | 10       | 20.2   | 3779.5 | 14   | 78.540             | 40.0     | 473.233       |                   |                   |
| GC1.1-2 | 10       | 20.4   | 3763.7 | 14   | 78.540             | 44.8     | 535.882       | 510.648           | 50.078            |
| GC1.1-3 | 10       | 20.6   | 3832.9 | 14   | 78.540             | 43.8     | 522.830       |                   |                   |
| GC1.1-1 | 10       | 20.2   | 3786.0 | 28   | 78.540             | 42.4     | 504.558       |                   |                   |
| GC1.1-2 | 10       | 20.3   | 3772.7 | 28   | 78.540             | 45.8     | 548.934       | 528.921           | 51.869            |
| GC1.1-3 | 10       | 20.2   | 3773.4 | 28   | 78.540             | 44.6     | 533.272       |                   |                   |

ตารางผนวกที่ 6 กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต อัตราส่วน  $Na_2O.SiO_3 / NaOH$  เท่ากับ 1.2

| Mix No. | Diameter | Height | Weight | Age  | Cross section area | Max load | Comp strength | Avg comp strength | Avg comp strength |
|---------|----------|--------|--------|------|--------------------|----------|---------------|-------------------|-------------------|
|         | cm       | cm     | g      | days | cm <sup>2</sup>    | Tons     | ksc           | ksc               | MPa               |
| GC1.2-1 | 10       | 20.3   | 3796.8 | 1    | 78.540             | 36.4     | 426.247       |                   |                   |
| GC1.2-2 | 10       | 20.3   | 3791.5 | 1    | 78.540             | 36.2     | 423.636       | 427.987           | 41.971            |
| GC1.2-3 | 10       | 20.1   | 3766.3 | 1    | 78.540             | 37.0     | 434.078       |                   |                   |
| GC1.2-1 | 10       | 20.3   | 3813.5 | 3    | 78.540             | 37.0     | 434.078       |                   |                   |
| GC1.2-2 | 10       | 20.3   | 3810.6 | 3    | 78.540             | 41.2     | 488.895       | 460.181           | 45.128            |
| GC1.2-3 | 10       | 20.6   | 3865.3 | 3    | 78.540             | 38.8     | 457.571       |                   |                   |
| GC1.2-1 | 10       | 20.2   | 3808.4 | 7    | 78.540             | 40.8     | 483.675       |                   |                   |
| GC1.2-2 | 10       | 20.4   | 3789.6 | 7    | 78.540             | 38.4     | 452.350       | 469.753           | 46.067            |
| GC1.2-3 | 10       | 20.4   | 3773.8 | 7    | 78.540             | 40.0     | 473.233       |                   |                   |
| GC1.2-1 | 10       | 20.6   | 3769.9 | 14   | 78.540             | 43.4     | 517.609       |                   |                   |
| GC1.2-2 | 10       | 20.2   | 3778.7 | 14   | 78.540             | 43.6     | 520.220       | 512.389           | 50.248            |
| GC1.2-3 | 10       | 20.2   | 3776.2 | 14   | 78.540             | 42.0     | 499.337       |                   |                   |
| GC1.2-1 | 10       | 20.2   | 3838.5 | 28   | 78.540             | 42.4     | 504.558       |                   |                   |
| GC1.2-2 | 10       | 20.2   | 3810.0 | 28   | 78.540             | 45.8     | 548.934       | 528.921           | 51.869            |
| GC1.2-3 | 10       | 20.2   | 3802.2 | 28   | 78.540             | 44.6     | 533.272       |                   |                   |

ตารางผนวกที่ ก7 กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต อัตราส่วน  $Na_2O.SiO_3 / NaOH$  เท่ากับ 1.3

| Mix No. | Diameter | Height | Weight | Age  | Cross section area | Max load | Comp strength | Avg somp strength | Avg comp strength |
|---------|----------|--------|--------|------|--------------------|----------|---------------|-------------------|-------------------|
|         | cm       | cm     | g      | days | cm <sup>2</sup>    | Tons     | ksc           | ksc               | MPa               |
| GC1.3-1 | 10       | 20.2   | 3748.4 | 1    | 78.540             | 32.4     | 374.039       |                   |                   |
| GC1.3-2 | 10       | 20.4   | 3761.8 | 1    | 78.540             | 38.6     | 454.961       | 407.104           | 39.923            |
| GC1.3-3 | 10       | 20.1   | 3773.1 | 1    | 78.540             | 33.8     | 392.312       |                   |                   |
| GC1.3-1 | 10       | 20.4   | 3775.3 | 3    | 78.540             | 39.2     | 462.792       |                   |                   |
| GC1.3-2 | 10       | 20.2   | 3818.8 | 3    | 78.540             | 37.6     | 441.909       | 445.389           | 43.678            |
| GC1.3-3 | 10       | 20.2   | 3806.2 | 3    | 78.540             | 36.8     | 431.467       |                   |                   |
| GC1.3-1 | 10       | 20.2   | 3784.1 | 7    | 78.540             | 41.4     | 491.506       |                   |                   |
| GC1.3-2 | 10       | 20.6   | 3772.4 | 7    | 78.540             | 43.2     | 514.999       | 483.675           | 47.432            |
| GC1.3-3 | 10       | 20.6   | 3774.4 | 7    | 78.540             | 37.8     | 444.519       |                   |                   |
| GC1.3-1 | 10       | 20.2   | 3813.5 | 14   | 78.540             | 43.4     | 517.609       |                   |                   |
| GC1.3-2 | 10       | 20.2   | 3810.6 | 14   | 78.540             | 41.8     | 496.727       | 504.558           | 49.480            |
| GC1.3-3 | 10       | 20.4   | 3865.3 | 14   | 78.540             | 42.0     | 499.337       |                   |                   |
| GC1.3-1 | 10       | 20.2   | 3816.4 | 28   | 78.540             | 44.4     | 530.661       |                   |                   |
| GC1.3-2 | 10       | 20.6   | 3850.7 | 28   | 78.540             | 42.6     | 507.168       | 529.791           | 51.955            |
| GC1.3-3 | 10       | 20.3   | 3814.9 | 28   | 78.540             | 46.0     | 551.544       |                   |                   |

ตารางผนวกที่ ๘ กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต อัตราส่วน  $Na_2O.SiO_3 / NaOH$  เท่ากับ 1.4

| Mix No. | Diameter | Height | Weight | Age  | Cross section area | Max load | Comp strength | Avg comp strength | Avg comp strength |
|---------|----------|--------|--------|------|--------------------|----------|---------------|-------------------|-------------------|
|         | cm       | cm     | g      | days | cm <sup>2</sup>    | Tons     | ksc           | ksc               | MPa               |
| GC1.4-1 | 10       | 20.2   | 3758.7 | 1    | 78.540             | 30.6     | 350.546       |                   |                   |
| GC1.4-2 | 10       | 20.4   | 3775.9 | 1    | 78.540             | 39.4     | 465.402       | 394.922           | 38.729            |
| GC1.4-3 | 10       | 20.3   | 3749.9 | 1    | 78.540             | 32.0     | 368.819       |                   |                   |
| GC1.4-1 | 10       | 20.2   | 3765.3 | 3    | 78.540             | 39.0     | 460.181       |                   |                   |
| GC1.4-2 | 10       | 20.8   | 3753.4 | 3    | 78.540             | 35.8     | 418.416       | 437.558           | 42.910            |
| GC1.4-3 | 10       | 20.6   | 3771.8 | 3    | 78.540             | 37.0     | 434.078       |                   |                   |
| GC1.4-1 | 10       | 20.2   | 3824.0 | 7    | 78.540             | 40.2     | 475.844       |                   |                   |
| GC1.4-2 | 10       | 20.3   | 3829.3 | 7    | 78.540             | 40.8     | 483.675       | 468.883           | 45.982            |
| GC1.4-3 | 10       | 20.7   | 3869.5 | 7    | 78.540             | 38.0     | 447.130       |                   |                   |
| GC1.4-1 | 10       | 20.2   | 3824.0 | 14   | 78.540             | 40.2     | 475.844       |                   |                   |
| GC1.4-2 | 10       | 20.3   | 3829.3 | 14   | 78.540             | 40.8     | 483.675       | 468.883           | 45.982            |
| GC1.4-3 | 10       | 20.7   | 3869.5 | 14   | 78.540             | 38.0     | 447.130       |                   |                   |
| GC1.4-1 | 10       | 20.3   | 3795.5 | 28   | 78.540             | 44.4     | 530.661       |                   |                   |
| GC1.4-2 | 10       | 20.2   | 3802.8 | 28   | 78.540             | 43.2     | 514.999       | 519.350           | 50.931            |
| GC1.4-3 | 10       | 20.2   | 3815.5 | 28   | 78.540             | 43.0     | 512.389       |                   |                   |



ตารางผนวกที่ ๑๑ กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต อัตราส่วน  $Na_2O.SiO_3 / NaOH$  เท่ากับ 1.5

| Mix No. | Diameter | Height | Weight | Age  | Cross section area | Max load | Comp strength | Avg comp strength | Avg comp strength |
|---------|----------|--------|--------|------|--------------------|----------|---------------|-------------------|-------------------|
|         | cm       | cm     | g      | days | cm <sup>2</sup>    | Tons     | ksc           | ksc               | MPa               |
| GC1.5-1 | 10       | 20.3   | 3802.7 | 1    | 78.540             | 31.4     | 360.988       |                   |                   |
| GC1.5-2 | 10       | 20.3   | 3812.3 | 1    | 78.540             | 34.4     | 400.143       | 368.819           | 36.169            |
| GC1.5-3 | 10       | 20.4   | 3791.4 | 1    | 78.540             | 30.2     | 345.325       |                   |                   |
| GC1.5-1 | 10       | 20.4   | 3819.8 | 3    | 78.540             | 33.6     | 389.702       |                   |                   |
| GC1.5-2 | 10       | 20.2   | 3760.9 | 3    | 78.540             | 35.0     | 407.974       | 399.273           | 39.155            |
| GC1.5-3 | 10       | 20.4   | 3767.8 | 3    | 78.540             | 34.4     | 400.143       |                   |                   |
| GC1.5-1 | 10       | 20.4   | 3764.4 | 7    | 78.540             | 35.6     | 415.805       |                   |                   |
| GC1.5-2 | 10       | 20.4   | 3761.9 | 7    | 78.540             | 36.8     | 431.467       | 415.805           | 40.777            |
| GC1.5-3 | 10       | 20.2   | 3747.6 | 7    | 78.540             | 34.4     | 400.143       |                   |                   |
| GC1.5-1 | 10       | 20.2   | 3767.6 | 14   | 78.540             | 40.0     | 473.233       |                   |                   |
| GC1.5-2 | 10       | 20.4   | 3773.8 | 14   | 78.540             | 39.6     | 468.013       | 454.091           | 44.531            |
| GC1.5-3 | 10       | 20.3   | 3757.3 | 14   | 78.540             | 36.0     | 421.026       |                   |                   |
| GC1.5-1 | 10       | 20.2   | 3777.6 | 28   | 78.540             | 38.6     | 454.961       |                   |                   |
| GC1.5-2 | 10       | 20.2   | 3802.2 | 28   | 78.540             | 42.8     | 509.778       | 473.233           | 46.408            |
| GC1.5-3 | 10       | 20.3   | 3795.9 | 28   | 78.540             | 38.6     | 454.961       |                   |                   |

ตารางผนวกที่ ก10 กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต อัตราส่วน  $Na_2O.SiO_3 / NaOH$  เท่ากับ 1.6

| Mix No. | Diameter | Height | Weight | Age  | Cross section area | Max load | Comp strength | Avg comp strength | Avg comp strength |
|---------|----------|--------|--------|------|--------------------|----------|---------------|-------------------|-------------------|
|         | cm       | cm     | g      | days | cm <sup>2</sup>    | Tons     | ksc           | ksc               | MPa               |
| GC1.6-1 | 10       | 20.3   | 3771.4 | 1    | 78.540             | 28.0     | 316.611       |                   |                   |
| GC1.6-2 | 10       | 20.2   | 3767.6 | 1    | 78.540             | 31.8     | 366.208       | 353.156           | 34.633            |
| GC1.6-3 | 10       | 20.3   | 3773.4 | 1    | 78.540             | 32.6     | 376.650       |                   |                   |
| GC1.6-1 | 10       | 20.3   | 3760.2 | 3    | 78.540             | 35.2     | 410.584       |                   |                   |
| GC1.6-2 | 10       | 20.3   | 3773.9 | 3    | 78.540             | 30.4     | 347.936       | 367.078           | 35.998            |
| GC1.6-3 | 10       | 20.2   | 3768.0 | 3    | 78.540             | 30.0     | 342.715       |                   |                   |
| GC1.6-1 | 10       | 20.4   | 3769.6 | 7    | 78.540             | 36.8     | 431.467       |                   |                   |
| GC1.6-2 | 10       | 20.3   | 3778.5 | 7    | 78.540             | 37.2     | 436.688       | 421.026           | 41.289            |
| GC1.6-3 | 10       | 20.3   | 3763.5 | 7    | 78.540             | 34.0     | 394.922       |                   |                   |
| GC1.6-1 | 10       | 20.6   | 3771.5 | 14   | 78.540             | 39.4     | 465.402       |                   |                   |
| GC1.6-2 | 10       | 20.3   | 3744.3 | 14   | 78.540             | 37.0     | 434.078       | 444.519           | 43.592            |
| GC1.6-3 | 10       | 20.1   | 3772.9 | 14   | 78.540             | 37.0     | 434.078       |                   |                   |
| GC1.6-1 | 10       | 20.2   | 3798.0 | 28   | 78.540             | 42.8     | 509.778       |                   |                   |
| GC1.6-2 | 10       | 20.6   | 3854.7 | 28   | 78.540             | 36.2     | 423.636       | 454.091           | 44.531            |
| GC1.6-3 | 10       | 20.3   | 3801.4 | 28   | 78.540             | 36.6     | 428.857       |                   |                   |

ตารางผนวกที่ ก11 กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่อายุ 1 วัน

| No.   | Diameter | Height | Weight | Age  | Cross section area | Max load | Comp strength | Avg comp strength | Avg comp strength |
|-------|----------|--------|--------|------|--------------------|----------|---------------|-------------------|-------------------|
|       | cm       | cm     | g      | days | cm <sup>2</sup>    | Tons     | ksc           | ksc               | MPa               |
| CC-1  | 10       | 20.0   | 3766.8 | 1    | 78.540             | 28.7     | 325.748       |                   |                   |
| CC-2  | 10       | 20.0   | 3789.0 | 1    | 78.540             | 26.3     | 294.423       |                   |                   |
| CC-3  | 10       | 20.0   | 3845.2 | 1    | 78.540             | 29.2     | 332.274       |                   |                   |
| CC-4  | 10       | 20.3   | 3839.5 | 1    | 78.540             | 27.4     | 308.780       |                   |                   |
| CC-5  | 10       | 19.8   | 3840.9 | 1    | 78.540             | 31.0     | 355.767       | 312.565           | 30.652            |
| CC-6  | 10       | 20.8   | 3792.7 | 1    | 78.540             | 25.4     | 282.677       |                   |                   |
| CC-7  | 10       | 20.3   | 3765.1 | 1    | 78.540             | 26.9     | 302.254       |                   |                   |
| CC-8  | 10       | 20.4   | 3780.9 | 1    | 78.540             | 27.1     | 304.865       |                   |                   |
| CC-9  | 10       | 20.6   | 3812.6 | 1    | 78.540             | 28.4     | 321.832       |                   |                   |
| CC-10 | 10       | 20.9   | 3823.2 | 1    | 78.540             | 26.5     | 297.034       |                   |                   |

ตารางผนวกที่ ก12 กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่อายุ 3 วัน

| No.   | Diameter | Height | Weight | Age  | Cross section area | Max load | Comp strength | Avg comp strength | Avg comp strength |
|-------|----------|--------|--------|------|--------------------|----------|---------------|-------------------|-------------------|
|       | cm       | cm     | g      | days | cm <sup>2</sup>    | Tons     | ksc           | ksc               | MPa               |
| CC-1  | 10       | 20.2   | 3795.3 | 3    | 78.540             | 29.8     | 340.105       |                   |                   |
| CC-2  | 10       | 20.0   | 3790.1 | 3    | 78.540             | 30.3     | 346.631       |                   |                   |
| CC-3  | 10       | 20.0   | 3766.8 | 3    | 78.540             | 31.6     | 363.598       |                   |                   |
| CC-4  | 10       | 20.7   | 3777.2 | 3    | 78.540             | 33.6     | 389.702       |                   |                   |
| CC-5  | 10       | 20.0   | 3795.6 | 3    | 78.540             | 30.2     | 345.325       | 361.640           | 35.465            |
| CC-6  | 10       | 20.4   | 3754.3 | 3    | 78.540             | 29.5     | 336.189       |                   |                   |
| CC-7  | 10       | 20.6   | 3788.6 | 3    | 78.540             | 32.4     | 374.039       |                   |                   |
| CC-8  | 10       | 20.6   | 3785.4 | 3    | 78.540             | 32.8     | 379.260       |                   |                   |
| CC-9  | 10       | 20.1   | 3780.9 | 3    | 78.540             | 33.9     | 393.617       |                   |                   |
| CC-10 | 10       | 20.9   | 3810.2 | 3    | 78.540             | 30.4     | 347.936       |                   |                   |

ตารางผนวกที่ ก13 กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่อายุ 7 วัน

| No.   | Diameter | Height | Weight | Age  | Cross section area | Max load | Comp strength | Avg comp strength | Avg comp strength |
|-------|----------|--------|--------|------|--------------------|----------|---------------|-------------------|-------------------|
|       | cm       | cm     | g      | days | cm <sup>2</sup>    | Tons     | ksc           | ksc               | MPa               |
| CC-1  | 10       | 20.0   | 3755.3 | 7    | 78.540             | 39.4     | 465.402       |                   |                   |
| CC-2  | 10       | 20.4   | 3790.7 | 7    | 78.540             | 40.2     | 475.844       |                   |                   |
| CC-3  | 10       | 20.6   | 3798.5 | 7    | 78.540             | 38.7     | 456.266       |                   |                   |
| CC-4  | 10       | 20.4   | 3775.3 | 7    | 78.540             | 39.5     | 466.707       |                   |                   |
| CC-5  | 10       | 20.2   | 3799.7 | 7    | 78.540             | 40.9     | 484.980       | 466.968           | 45.794            |
| CC-6  | 10       | 20.2   | 3810.9 | 7    | 78.540             | 41.3     | 490.201       |                   |                   |
| CC-7  | 10       | 20.6   | 3806.3 | 7    | 78.540             | 38.2     | 449.740       |                   |                   |
| CC-8  | 10       | 20.6   | 3821.4 | 7    | 78.540             | 39.6     | 468.013       |                   |                   |
| CC-9  | 10       | 20.9   | 3775.2 | 7    | 78.540             | 40.1     | 474.538       |                   |                   |
| CC-10 | 10       | 20.6   | 3796.5 | 7    | 78.540             | 37.3     | 437.993       |                   |                   |

ตารางผนวกที่ ก14 กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่อายุ 14 วัน

| No.   | Diameter | Height | Weight | Age  | Cross section area | Max load | Comp strength | Avg comp strength | Avg comp strength |
|-------|----------|--------|--------|------|--------------------|----------|---------------|-------------------|-------------------|
|       | cm       | cm     | g      | days | cm <sup>2</sup>    | Tons     | ksc           | ksc               | MPa               |
| CC-1  | 10       | 19.8   | 3766.1 | 14   | 78.540             | 40.6     | 481.064       |                   |                   |
| CC-2  | 10       | 20.0   | 3811.8 | 14   | 78.540             | 41.2     | 488.895       |                   |                   |
| CC-3  | 10       | 20.2   | 3798.6 | 14   | 78.540             | 39.8     | 470.623       |                   |                   |
| CC-4  | 10       | 20.4   | 3676.4 | 14   | 78.540             | 41.8     | 496.727       |                   |                   |
| CC-5  | 10       | 20.4   | 3824.5 | 14   | 78.540             | 42.0     | 499.337       | 486.024           | 47.663            |
| CC-6  | 10       | 20.7   | 3787.4 | 14   | 78.540             | 40.0     | 473.233       |                   |                   |
| CC-7  | 10       | 20.3   | 3810.8 | 14   | 78.540             | 40.7     | 482.370       |                   |                   |
| CC-8  | 10       | 20.9   | 3564.8 | 14   | 78.540             | 41.3     | 490.201       |                   |                   |
| CC-9  | 10       | 20.5   | 3804.6 | 14   | 78.540             | 40.9     | 484.980       |                   |                   |
| CC-10 | 10       | 20.4   | 3787.9 | 14   | 78.540             | 41.5     | 492.811       |                   |                   |

ตารางผนวกที่ ก15 กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน

| No.   | Diameter | Height | Weight | Age  | Cross section area | Max load | Comp strength | Avg comp strength | Avg comp strength |
|-------|----------|--------|--------|------|--------------------|----------|---------------|-------------------|-------------------|
|       | cm       | cm     | g      | days | cm <sup>2</sup>    | Tons     | ksc           | ksc               | MPa               |
| CC-1  | 10       | 20.0   | 3753.8 | 28   | 78.540             | 42.2     | 501.947       |                   |                   |
| CC-2  | 10       | 20.0   | 3779.1 | 28   | 78.540             | 41.2     | 488.895       |                   |                   |
| CC-3  | 10       | 20.0   | 3768.8 | 28   | 78.540             | 44.2     | 528.051       |                   |                   |
| CC-4  | 10       | 20.3   | 3825.5 | 28   | 78.540             | 42.2     | 501.947       |                   |                   |
| CC-5  | 10       | 20.0   | 3755.6 | 28   | 78.540             | 41.4     | 491.506       | 500.903           | 49.122            |
| CC-6  | 10       | 20.0   | 3763.4 | 28   | 78.540             | 41.6     | 494.116       |                   |                   |
| CC-7  | 10       | 20.0   | 3790.0 | 28   | 78.540             | 41.0     | 486.285       |                   |                   |
| CC-8  | 10       | 20.1   | 3766.3 | 28   | 78.540             | 42.8     | 509.778       |                   |                   |
| CC-9  | 10       | 20.2   | 3764.3 | 28   | 78.540             | 43.2     | 514.999       |                   |                   |
| CC-10 | 10       | 20.0   | 3772.4 | 28   | 78.540             | 41.4     | 491.506       |                   |                   |

**ภาคผนวก ข**

การก่อตัวของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต



ตารางผนวกที่ ข1 การก่อตัวของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต อัตราส่วน  $Na_2O.SiO_3 / NaOH = 0.7$

| Mix No. | Elapsed time | Needles, face areas | Load | Penetration resistance, PR |       |
|---------|--------------|---------------------|------|----------------------------|-------|
|         | min          | cm <sup>2</sup>     | kg   | ksc                        | MPa   |
| GC0.7   | 5            | 6.452               | 7    | 1.085                      | 0.106 |
|         | 8            | 3.226               | 6    | 1.860                      | 0.182 |
|         | 11           | 1.613               | 3    | 1.860                      | 0.182 |
|         | 14           | 0.6452              | 2    | 3.100                      | 0.304 |
|         | 17           | 0.3226              | 2    | 6.200                      | 0.608 |
|         | 20           | 0.1613              | 2    | 12.399                     | 1.216 |

ตารางผนวกที่ ข2 การก่อตัวของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต อัตราส่วน  $Na_2O.SiO_3 / NaOH = 0.8$

| Mix No. | Elapsed time | Needles, face areas | Load | Penetration resistance, PR |       |
|---------|--------------|---------------------|------|----------------------------|-------|
|         | min          | cm <sup>2</sup>     | kg   | ksc                        | MPa   |
| GC0.8   | 5            | 6.452               | 3    | 0.465                      | 0.046 |
|         | 8            | 3.226               | 6    | 1.860                      | 0.182 |
|         | 11           | 1.613               | 4    | 2.480                      | 0.243 |
|         | 14           | 0.6452              | 2    | 3.100                      | 0.304 |
|         | 17           | 0.3226              | 2    | 6.200                      | 0.608 |
|         | 20           | 0.1613              | 2    | 12.399                     | 1.216 |

ตารางผนวกที่ ข3 การก่อตัวของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต อัตราส่วน  $Na_2O.SiO_3 / NaOH = 0.9$

| Mix No. | Elapsed time<br>min | Needles, face<br>areas<br>cm <sup>2</sup> | Load<br>kg | Penetration resistance, PR |       |
|---------|---------------------|-------------------------------------------|------------|----------------------------|-------|
|         |                     |                                           |            | ksc                        | MPa   |
| GC0.9   | 5                   | 6.452                                     | 2          | 0.310                      | 0.030 |
|         | 8                   | 3.226                                     | 9          | 2.790                      | 0.274 |
|         | 11                  | 1.613                                     | 9          | 5.580                      | 0.547 |
|         | 14                  | 0.6452                                    | 5          | 7.750                      | 0.760 |
|         | 17                  | 0.3226                                    | 4          | 12.399                     | 1.216 |
|         | 20                  | 0.1613                                    | 3          | 18.599                     | 1.824 |

ตารางผนวกที่ ข4 การก่อตัวของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต อัตราส่วน  $Na_2O.SiO_3 / NaOH = 1.0$

| Mix No. | Elapsed time<br>min | Needles, face<br>areas<br>cm <sup>2</sup> | Load<br>kg | Penetration resistance, PR |       |
|---------|---------------------|-------------------------------------------|------------|----------------------------|-------|
|         |                     |                                           |            | ksc                        | MPa   |
| GC1.0   | 5                   | 6.452                                     | 4          | 0.620                      | 0.061 |
|         | 8                   | 3.226                                     | 9          | 2.790                      | 0.274 |
|         | 11                  | 1.613                                     | 10         | 6.200                      | 0.608 |
|         | 14                  | 0.6452                                    | 7          | 10.849                     | 1.064 |
|         | 17                  | 0.3226                                    | 4          | 12.399                     | 1.216 |
|         | 20                  | 0.1613                                    | 3          | 18.599                     | 1.824 |

ตารางผนวกที่ ข5 การก่อตัวของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต อัตราส่วน  $Na_2O.SiO_3 / NaOH = 1.1$

| Mix No. | Elapsed time<br>min | Needles, face<br>areas<br>cm <sup>2</sup> | Load<br>kg | Penetration resistance, PR |       |
|---------|---------------------|-------------------------------------------|------------|----------------------------|-------|
|         |                     |                                           |            | ksc                        | MPa   |
| GC1.1   | 5                   | 6.452                                     | 6          | 0.930                      | 0.091 |
|         | 8                   | 3.226                                     | 10         | 3.100                      | 0.304 |
|         | 11                  | 1.613                                     | 12         | 7.440                      | 0.730 |
|         | 14                  | 0.6452                                    | 6          | 9.299                      | 0.912 |
|         | 17                  | 0.3226                                    | 5          | 15.499                     | 1.520 |
|         | 20                  | 0.1613                                    | 3          | 18.599                     | 1.824 |

ตารางผนวกที่ ข6 การก่อตัวของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต อัตราส่วน  $Na_2O.SiO_3 / NaOH = 1.2$

| Mix No. | Elapsed time<br>min | Needles, face<br>areas<br>cm <sup>2</sup> | Load<br>kg | Penetration resistance, PR |       |
|---------|---------------------|-------------------------------------------|------------|----------------------------|-------|
|         |                     |                                           |            | ksc                        | MPa   |
| GC1.2   | 5                   | 6.452                                     | 2          | 0.310                      | 0.030 |
|         | 8                   | 3.226                                     | 7          | 2.170                      | 0.213 |
|         | 11                  | 1.613                                     | 13         | 8.060                      | 0.790 |
|         | 14                  | 0.6452                                    | 8          | 12.399                     | 1.216 |
|         | 17                  | 0.3226                                    | 6          | 18.599                     | 1.824 |
|         | 20                  | 0.1613                                    | 4          | 24.799                     | 2.432 |

ตารางผนวกที่ ข7 การก่อตัวของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต อัตราส่วน  $Na_2O.SiO_3 / NaOH = 1.3$

| Mix No. | Elapsed time<br>min | Needles, face<br>areas<br>cm <sup>2</sup> | Load<br>kg | Penetration resistance, PR |       |
|---------|---------------------|-------------------------------------------|------------|----------------------------|-------|
|         |                     |                                           |            | ksc                        | MPa   |
| GC1.3   | 5                   | 6.452                                     | 2          | 0.310                      | 0.030 |
|         | 8                   | 3.226                                     | 7          | 2.170                      | 0.213 |
|         | 11                  | 1.613                                     | 11         | 6.820                      | 0.669 |
|         | 14                  | 0.6452                                    | 10         | 15.499                     | 1.520 |
|         | 17                  | 0.3226                                    | 10         | 30.998                     | 3.040 |
|         | 20                  | 0.1613                                    | 6          | 37.198                     | 3.648 |

ตารางผนวกที่ ข8 การก่อตัวของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต อัตราส่วน  $Na_2O.SiO_3 / NaOH = 1.4$

| Mix No. | Elapsed time<br>min | Needles, face<br>areas<br>cm <sup>2</sup> | Load<br>kg | Penetration resistance, PR |       |
|---------|---------------------|-------------------------------------------|------------|----------------------------|-------|
|         |                     |                                           |            | ksc                        | MPa   |
| GC1.4   | 5                   | 6.452                                     | 8          | 1.240                      | 0.122 |
|         | 8                   | 3.226                                     | 18         | 5.580                      | 0.547 |
|         | 11                  | 1.613                                     | 24         | 14.879                     | 1.459 |
|         | 14                  | 0.6452                                    | 13         | 20.149                     | 1.976 |
|         | 17                  | 0.3226                                    | 15         | 46.497                     | 4.560 |
|         | 20                  | 0.1613                                    | 9          | 55.797                     | 5.472 |

ตารางผนวกที่ ข9 การก่อตัวของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต อัตราส่วน  $Na_2O.SiO_3 / NaOH = 1.5$

| Mix No. | Elapsed time<br>min | Needles, face<br>areas<br>cm <sup>2</sup> | Load<br>kg | Penetration resistance, PR |       |
|---------|---------------------|-------------------------------------------|------------|----------------------------|-------|
|         |                     |                                           |            | ksc                        | MPa   |
| GC1.5   | 5                   | 6.452                                     | 20         | 3.100                      | 0.304 |
|         | 8                   | 3.226                                     | 32         | 9.919                      | 0.973 |
|         | 11                  | 1.613                                     | 33         | 20.459                     | 2.006 |
|         | 14                  | 0.6452                                    | 22         | 34.098                     | 3.344 |
|         | 17                  | 0.3226                                    | 21         | 65.096                     | 6.384 |
|         | 20                  | 0.1613                                    | 12         | 74.396                     | 7.296 |

ตารางผนวกที่ ข10 การก่อตัวของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต อัตราส่วน  $Na_2O.SiO_3 / NaOH = 1.6$

| Mix No. | Elapsed time<br>min | Needles, face<br>areas<br>cm <sup>2</sup> | Load<br>kg | Penetration resistance, PR |       |
|---------|---------------------|-------------------------------------------|------------|----------------------------|-------|
|         |                     |                                           |            | ksc                        | MPa   |
| GC1.6   | 5                   | 6.452                                     | 26         | 4.030                      | 0.395 |
|         | 8                   | 3.226                                     | 41         | 12.709                     | 1.246 |
|         | 11                  | 1.613                                     | 41         | 25.418                     | 2.493 |
|         | 14                  | 0.6452                                    | 24         | 37.198                     | 3.648 |
|         | 17                  | 0.3226                                    | 23         | 71.296                     | 6.992 |
|         | 20                  | 0.1613                                    | 13         | 80.595                     | 7.904 |

**ภาคผนวก ก**

การซึมผ่านของสารละลายโซเดียมคลอไรด์

ตารางผนวกที่ ค1 การซึมผ่านของสารละลายโซเดียมคลอไรด์

| Group no.  | Specimens | Chloride penetration, cm |     |     |     |     | Average | Remark |
|------------|-----------|--------------------------|-----|-----|-----|-----|---------|--------|
|            |           | 0                        | 5   | 10  | 15  | 20  |         |        |
| GC0.7-NaCl | 1         | 3.8                      | 1.5 | 5.0 | 1.8 | 4.0 | 3.2     | 2.7    |
|            | 2         | 3.0                      | 1.8 | 1.6 | 1.4 | 4.0 | 2.4     |        |
|            | 3         | 4.4                      | 1.0 | 1.4 | 1.3 | 3.0 | 2.2     |        |
|            | 4         | 3.6                      | 2.4 | 3.0 | 1.7 | 3.5 | 2.8     |        |
|            | 5         | 3.6                      | 3.2 | 3.6 | 2.8 | 1.3 | 2.9     |        |
| GC1.0-NaCl | 1         | 2.8                      | 0.7 | 2.1 | 1.4 | 4.0 | 2.2     | 2.9    |
|            | 2         | 3.6                      | 3.4 | 3.5 | 3.3 | 3.8 | 3.5     |        |
|            | 3         | 3.4                      | 3.8 | 4.0 | 3.2 | 4.0 | 3.7     |        |
|            | 4         | 4.3                      | 3.9 | 1.2 | 2.6 | 4.1 | 3.2     |        |
|            | 5         | 2.8                      | 1.0 | 1.2 | 2.2 | 3.3 | 2.1     |        |
| GC1.3-NaCl | 1         | 3.7                      | 1.0 | 1.9 | 1.4 | 3.9 | 2.4     | 3.2    |
|            | 2         | 2.0                      | 3.4 | 3.6 | 3.2 | 4.1 | 3.3     |        |
|            | 3         | 4.1                      | 3.3 | 4.2 | 2.8 | 4.4 | 3.8     |        |
|            | 4         | 3.0                      | 2.7 | 2.6 | 2.1 | 3.4 | 2.8     |        |
|            | 5         | 3.7                      | 3.9 | 3.8 | 3.2 | 4.2 | 3.8     |        |
| CC-NaCl    | 1         | 1.4                      | 0.9 | 0.5 | 1.2 | 1.3 | 1.1     | 0.7    |
|            | 2         | 0.5                      | 0.3 | 0.6 | 0.5 | 0.4 | 0.5     |        |
|            | 3         | 0.8                      | 0.3 | 0.6 | 0.8 | 0.8 | 0.7     |        |
|            | 4         | 0.5                      | 0.4 | 0.3 | 0.5 | 1.0 | 0.5     |        |
|            | 5         | 1.1                      | 0.6 | 0.4 | 0.8 | 1.6 | 0.9     |        |

ภาคผนวก ง  
ความกว้างของรอยร้าว



ตารางผนวกที่ ง1 ความกว้างของรอยร้าว

| Duration<br>days | Crack width, mm |       |       |       |       |       |    |      |
|------------------|-----------------|-------|-------|-------|-------|-------|----|------|
|                  | GC0.7           | GC0.7 | GC1.0 | GC1.0 | GC1.3 | GC1.3 | CC | CC   |
|                  | W               | NaCl  | W     | NaCl  | W     | NaCl  | W  | NaCl |
| 1                | NC              | NC    | NC    | NC    | NC    | NC    | NC | NC   |
| 2                | NC              | NC    | NC    | NC    | NC    | NC    | NC | NC   |
| 3                | NC              | NC    | NC    | NC    | NC    | NC    | NC | NC   |
| 4                | NC              | NC    | NC    | NC    | NC    | NC    | NC | NC   |
| 5                | NC              | NC    | NC    | NC    | NC    | NC    | NC | NC   |
| 6                | NC              | NC    | NC    | NC    | NC    | NC    | NC | NC   |
| 7                | 0.05            | 0.10  | 0.05  | 0.10  | 0.05  | 0.10  | NC | NC   |
| 9                | 0.10            | 0.15  | 0.10  | 0.15  | 0.10  | 0.25  | NC | NC   |
| 11               | 0.10            | 0.20  | 0.15  | 0.20  | 0.15  | 0.30  | NC | NC   |
| 13               | 0.15            | 0.25  | 0.20  | 0.25  | 0.20  | 0.40  | NC | NC   |
| 15               | 0.15            | 0.30  | 0.25  | 0.25  | 0.25  | 0.60  | NC | NC   |
| 17               | 0.20            | 0.35  | 0.25  | 0.30  | 0.25  | 0.80  | NC | NC   |
| 19               | 0.20            | 0.35  | 0.30  | 0.30  | 0.30  | 1.00  | NC | NC   |
| 20               | 0.25            | 0.40  | 0.30  | 0.35  | 0.35  | 1.50  | NC | NC   |
| 23               | 0.25            | 0.40  | 0.30  | 0.40  | 0.35  | 2.00  | NC | NC   |
| 25               | 0.35            | 0.45  | 0.35  | 0.45  | 0.45  | 2.50  | NC | NC   |
| 28               | 0.35            | 0.45  | 0.35  | 0.50  | 0.45  | 3.00  | NC | NC   |

หมายเหตุ NC หมายถึง ตัวอย่างที่ไม่เกิดรอยร้าว

**ภาคผนวก จ**  
**ความต่างศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์**

ตารางผนวกที่ จ1 ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ของคานาจิโอโพลิเมอร์คอนกรีต GB0.7-W

| Duration | Half-Cell Potential, mV |      |      |       |      |      |       |      |      |       |      |      |       |      |      |        |      |      |        |      |      | Avg  |
|----------|-------------------------|------|------|-------|------|------|-------|------|------|-------|------|------|-------|------|------|--------|------|------|--------|------|------|------|
|          | 0 cm                    |      |      | 20 cm |      |      | 40 cm |      |      | 60 cm |      |      | 80 cm |      |      | 100 cm |      |      | 120 cm |      |      |      |
| day      |                         |      |      |       |      |      |       |      |      |       |      |      |       |      |      |        |      |      |        |      |      |      |
| 1        | -2                      | -5   | -9   | -6    | -8   | -8   | -2    | -3   | -5   | -4    | -6   | -8   | -10   | -4   | -12  | -6     | -7   | -3   | -5     | -7   | -9   | -6   |
| 2        | -11                     | -14  | -18  | -22   | -14  | -18  | -24   | -19  | -22  | -15   | -18  | -11  | -22   | -20  | -24  | -16    | -15  | -17  | -26    | -20  | -23  | -18  |
| 3        | -41                     | -26  | -35  | -20   | -28  | -22  | -18   | -20  | -18  | -33   | -14  | -31  | -27   | -22  | -49  | -14    | -30  | -36  | -22    | -12  | -23  | -25  |
| 4        | -106                    | -124 | -110 | -98   | -117 | -106 | -100  | -96  | -112 | -105  | -95  | -127 | -106  | -94  | -100 | -110   | -111 | -94  | -105   | -110 | -123 | -107 |
| 5        | -168                    | -171 | -185 | -155  | -185 | -168 | -164  | -175 | -176 | -172  | -173 | -162 | -151  | -166 | -165 | -146   | -161 | -177 | -180   | -182 | -160 | -169 |
| 6        | -229                    | -266 | -236 | -202  | -216 | -206 | -215  | -214 | -202 | -206  | -215 | -198 | -197  | -206 | -199 | -201   | -201 | -239 | -223   | -222 | -227 | -215 |
| 7        | -333                    | -338 | -342 | -341  | -339 | -345 | -337  | -343 | -349 | -342  | -345 | -349 | -339  | -346 | -348 | -337   | -341 | -346 | -338   | -345 | -343 | -342 |
| 9        | -396                    | -404 | -402 | -371  | -378 | -373 | -364  | -353 | -374 | -379  | -388 | -392 | -397  | -393 | -392 | -403   | -406 | -395 | -441   | -460 | -457 | -396 |
| 11       | -477                    | -480 | -498 | -458  | -413 | -434 | -463  | -397 | -422 | -470  | -380 | -383 | -481  | -426 | -445 | -484   | -445 | -459 | -502   | -511 | -525 | -455 |
| 13       | -493                    | -511 | -527 | -548  | -490 | -508 | -522  | -456 | -458 | -421  | -449 | -402 | -564  | -500 | -494 | -542   | -497 | -481 | -541   | -549 | -555 | -500 |
| 15       | -521                    | -530 | -542 | -533  | -493 | -482 | -494  | -466 | -475 | -505  | -462 | -460 | -511  | -485 | -505 | -525   | -485 | -494 | -535   | -553 | -550 | -505 |
| 17       | -558                    | -562 | -556 | -484  | -461 | -475 | -487  | -462 | -480 | -482  | -457 | -470 | -500  | -465 | -491 | -494   | -466 | -483 | -549   | -565 | -577 | -501 |
| 19       | -448                    | -440 | -443 | -418  | -446 | -438 | -413  | -433 | -444 | -503  | -509 | -515 | -502  | -497 | -482 | -502   | -525 | -498 | -423   | -442 | -413 | -464 |
| 20       | -536                    | -510 | -535 | -481  | -487 | -483 | -479  | -481 | -486 | -499  | -505 | -509 | -500  | -489 | -489 | -484   | -486 | -472 | -501   | -541 | -547 | -500 |
| 23       | -451                    | -454 | -445 | -391  | -392 | -390 | -384  | -397 | -403 | -410  | -419 | -428 | -427  | -419 | -414 | -410   | -419 | -419 | -453   | -477 | -480 | -423 |
| 25       | -444                    | -497 | -495 | -436  | -447 | -449 | -440  | -447 | -450 | -457  | -465 | -468 | -463  | -455 | -461 | -463   | -460 | -454 | -502   | -518 | -518 | -466 |
| 28       | -427                    | -425 | -417 | -383  | -337 | -347 | -366  | -329 | -343 | -378  | -320 | -321 | -387  | -337 | -354 | -387   | -346 | -363 | -424   | -439 | -440 | -375 |

ตารางผนวกที่ จ2 ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ของคานาจิโอโพลิเมอร์คอนกรีต GB1.0-W

| Duration |      | Half-Cell Potential, mV |      |       |      |      |       |      |      |       |      |      |       |      |      |        |      |      |        |      |      | Avg  |
|----------|------|-------------------------|------|-------|------|------|-------|------|------|-------|------|------|-------|------|------|--------|------|------|--------|------|------|------|
| day      | 0 cm |                         |      | 20 cm |      |      | 40 cm |      |      | 60 cm |      |      | 80 cm |      |      | 100 cm |      |      | 120 cm |      |      |      |
| 1        | -5   | -8                      | -4   | -7    | -11  | -12  | -6    | -9   | -9   | -15   | -13  | -11  | -3    | -4   | -2   | -7     | -12  | -9   | -11    | -6   | -7   | -8   |
| 2        | -21  | -44                     | -35  | -10   | -41  | -33  | -42   | -38  | -34  | -15   | -18  | -23  | -11   | -15  | -17  | -9     | -21  | -15  | -17    | -21  | -26  | -24  |
| 3        | -41  | -26                     | -35  | -20   | -28  | -22  | -18   | -20  | -18  | -33   | -14  | -61  | -27   | -22  | -49  | -14    | -30  | -36  | -40    | -53  | -25  | -30  |
| 4        | -115 | -110                    | -110 | -101  | -88  | -95  | -97   | -102 | -103 | -109  | -135 | -118 | -100  | -105 | -107 | -113   | -100 | -106 | -112   | -102 | -107 | -106 |
| 5        | -167 | -175                    | -183 | -163  | -163 | -159 | -171  | -183 | -165 | -141  | -141 | -145 | -129  | -148 | -133 | -132   | -139 | -150 | -173   | -191 | -182 | -159 |
| 6        | -266 | -271                    | -273 | -263  | -286 | -251 | -266  | -265 | -302 | -295  | -305 | -298 | -297  | -295 | -291 | -303   | -299 | -294 | -275   | -282 | -275 | -283 |
| 7        | -306 | -314                    | -319 | -310  | -313 | -316 | -308  | -314 | -314 | -309  | -320 | -318 | -306  | -317 | -318 | -313   | -315 | -316 | -314   | -317 | -315 | -314 |
| 9        | -441 | -454                    | -475 | -366  | -339 | -374 | -412  | -400 | -395 | -401  | -396 | -366 | -380  | -363 | -361 | -453   | -383 | -382 | -485   | -474 | -483 | -409 |
| 11       | -456 | -462                    | -515 | -435  | -382 | -443 | -437  | -385 | -423 | -403  | -357 | -375 | -437  | -475 | -389 | -489   | -420 | -447 | -516   | -505 | -515 | -441 |
| 13       | -506 | -506                    | -535 | -589  | -542 | -517 | -577  | -485 | -461 | -557  | -461 | -398 | -561  | -491 | -447 | -597   | -521 | -550 | -535   | -527 | -521 | -518 |
| 15       | -595 | -600                    | -615 | -511  | -473 | -522 | -537  | -529 | -537 | -484  | -480 | -457 | -492  | -485 | -515 | -570   | -522 | -533 | -602   | -577 | -604 | -535 |
| 17       | -625 | -617                    | -633 | -522  | -530 | -557 | -583  | -574 | -591 | -554  | -570 | -538 | -558  | -554 | -551 | -581   | -550 | -575 | -617   | -594 | -624 | -576 |
| 19       | -561 | -554                    | -563 | -572  | -544 | -546 | -571  | -554 | -572 | -573  | -584 | -568 | -581  | -554 | -591 | -583   | -575 | -588 | -594   | -581 | -581 | -571 |
| 20       | -623 | -625                    | -623 | -594  | -599 | -594 | -603  | -608 | -607 | -591  | -595 | -586 | -600  | -609 | -607 | -587   | -596 | -605 | -592   | -604 | -611 | -603 |
| 23       | -577 | -588                    | -592 | -529  | -558 | -563 | -529  | -526 | -571 | -537  | -553 | -551 | -514  | -540 | -556 | -511   | -535 | -566 | -564   | -582 | -586 | -554 |
| 25       | -609 | -610                    | -609 | -556  | -591 | -587 | -592  | -604 | -611 | -595  | -601 | -595 | -564  | -602 | -599 | -586   | -603 | -615 | -590   | -619 | -621 | -598 |
| 28       | -578 | -583                    | -581 | -566  | -577 | -579 | -567  | -583 | -589 | -555  | -556 | -562 | -560  | -584 | -581 | -559   | -581 | -590 | -574   | -595 | -601 | -576 |

ตารางผนวกที่ จ3 ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ของคานาจิโอโพลิเมอร์คอนกรีต GB1.3-W

| Duration | Half-Cell Potential, mV |      |      |       |      |      |       |      |      |       |      |      |       |      |      |        |      |      |        |      |      | Avg  |
|----------|-------------------------|------|------|-------|------|------|-------|------|------|-------|------|------|-------|------|------|--------|------|------|--------|------|------|------|
| day      | 0 cm                    |      |      | 20 cm |      |      | 40 cm |      |      | 60 cm |      |      | 80 cm |      |      | 100 cm |      |      | 120 cm |      |      |      |
| 1        | -5                      | -7   | -12  | -3    | -6   | -4   | -12   | -16  | -6   | -17   | -2   | -5   | -8    | -4   | -8   | -18    | -15  | -14  | -17    | -14  | -7   | -9   |
| 2        | -32                     | -15  | -15  | -34   | -24  | -25  | -35   | -22  | -26  | -33   | -39  | -29  | -28   | -19  | -33  | -34    | -31  | -26  | -22    | -28  | -31  | -27  |
| 3        | -46                     | -33  | -38  | -36   | -33  | -24  | -23   | -31  | -29  | -34   | -32  | -31  | -32   | -41  | -36  | -35    | -36  | -44  | -35    | -31  | -30  | -33  |
| 4        | -187                    | -195 | -191 | -182  | -184 | -185 | -184  | -181 | -187 | -179  | -184 | -176 | -189  | -180 | -178 | -183   | -175 | -170 | -175   | -180 | -177 | -182 |
| 5        | -263                    | -267 | -263 | -238  | -249 | -252 | -240  | -236 | -251 | -295  | -291 | -301 | -292  | -276 | -294 | -283   | -282 | -300 | -267   | -268 | -273 | -271 |
| 6        | -448                    | -440 | -443 | -418  | -446 | -438 | -413  | -433 | -444 | -503  | -509 | -515 | -502  | -497 | -513 | -482   | -502 | -525 | -423   | -442 | -413 | -464 |
| 7        | -566                    | -571 | -578 | -577  | -579 | -575 | -576  | -577 | -575 | -578  | -578 | -578 | -575  | -579 | -578 | -575   | -578 | -578 | -576   | -579 | -579 | -576 |
| 9        | -602                    | -643 | -655 | -457  | -442 | -513 | -476  | -486 | -579 | -454  | -470 | -522 | -478  | -490 | -576 | -490   | -447 | -521 | -601   | -626 | -629 | -531 |
| 11       | -564                    | -582 | -602 | -527  | -517 | -530 | -533  | -516 | -498 | -523  | -510 | -488 | -546  | -530 | -510 | -525   | -520 | -499 | -576   | -573 | -572 | -535 |
| 13       | -585                    | -643 | -642 | -478  | -471 | -544 | -490  | -536 | -602 | -520  | -542 | -581 | -497  | -534 | -590 | -538   | -514 | -574 | -629   | -638 | -646 | -562 |
| 15       | -613                    | -614 | -610 | -628  | -615 | -608 | -631  | -633 | -625 | -521  | -529 | -526 | -530  | -508 | -509 | -526   | -553 | -573 | -573   | -571 | -567 | -574 |
| 17       | -650                    | -652 | -666 | -574  | -594 | -631 | -610  | -633 | -637 | -607  | -631 | -647 | -622  | -636 | -654 | -621   | -627 | -643 | -671   | -672 | -673 | -636 |
| 19       | -691                    | -709 | -701 | -692  | -703 | -661 | -697  | -703 | -695 | -694  | -704 | -697 | -695  | -702 | -701 | -703   | -705 | -702 | -692   | -701 | -694 | -697 |
| 20       | -677                    | -680 | -694 | -681  | -690 | -685 | -685  | -694 | -681 | -679  | -693 | -690 | -682  | -694 | -691 | -680   | -694 | -686 | -686   | -695 | -693 | -687 |
| 23       | -672                    | -673 | -671 | -677  | -680 | -679 | -678  | -688 | -680 | -678  | -687 | -685 | -681  | -685 | -680 | -675   | -697 | -680 | -674   | -673 | -675 | -679 |
| 25       | -668                    | -670 | -665 | -667  | -680 | -670 | -678  | -686 | -673 | -682  | -691 | -683 | -674  | -669 | -668 | -670   | -662 | -670 | -669   | -665 | -670 | -673 |
| 28       | -682                    | -680 | -682 | -686  | -689 | -688 | -686  | -689 | -674 | -688  | -690 | -678 | -686  | -685 | -675 | -683   | -684 | -674 | -680   | -675 | -670 | -682 |

ตารางผนวกที่ จ4 ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ของคานคอนกรีตควบคุม CC-W

| Duration | Half-Cell Potential, mV |      |       |      |       |      |       |      |       |      |        |      |        |      |      |      |      |      |      |      | Avg  |      |
|----------|-------------------------|------|-------|------|-------|------|-------|------|-------|------|--------|------|--------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
|          | 0 cm                    |      | 20 cm |      | 40 cm |      | 60 cm |      | 80 cm |      | 100 cm |      | 120 cm |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| day      |                         |      |       |      |       |      |       |      |       |      |        |      |        |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| 1        | -2                      | -2   | -7    | -8   | -9    | -13  | -4    | -6   | -8    | -7   | -15    | -2   | -7     | -4   | -11  | -9   | -11  | -3   | -4   | -8   | -11  | -7   |
| 2        | -13                     | -55  | -60   | -20  | -28   | -33  | -14   | -16  | -20   | -26  | -28    | -31  | -4     | -11  | -5   | -51  | -44  | -23  | -31  | -37  | -41  | -28  |
| 3        | -28                     | -33  | -25   | -28  | -16   | -36  | -22   | -14  | -22   | -14  | -28    | -17  | -44    | -53  | -54  | -52  | -53  | -51  | -44  | -48  | -54  | -35  |
| 4        | -86                     | -89  | -94   | -83  | -89   | -89  | -70   | -82  | -85   | -90  | -94    | -90  | -86    | -77  | -87  | -77  | -65  | -80  | -70  | -98  | -108 | -85  |
| 5        | -155                    | -150 | -159  | -188 | -195  | -182 | -153  | -175 | -181  | -147 | -166   | -180 | -133   | -171 | -187 | -188 | -203 | -219 | -179 | -210 | -191 | -177 |
| 6        | -202                    | -240 | -236  | -209 | -224  | -213 | -217  | -210 | -204  | -263 | -268   | -259 | -251   | -259 | -262 | -257 | -251 | -244 | -246 | -248 | -234 | -238 |
| 7        | -423                    | -442 | -413  | -379 | -381  | -379 | -364  | -393 | -370  | -369 | -374   | -369 | -364   | -361 | -351 | -355 | -346 | -354 | -380 | -392 | -389 | -378 |
| 9        | -406                    | -412 | -406  | -437 | -462  | -490 | -493  | -488 | -491  | -405 | -493   | -495 | -405   | -490 | -402 | -472 | -477 | -400 | -415 | -408 | -400 | -445 |
| 11       | -503                    | -525 | -531  | -560 | -593  | -519 | -508  | -515 | -544  | -504 | -505   | -513 | -599   | -590 | -600 | -577 | -580 | -586 | -500 | -510 | -504 | -541 |
| 13       | -602                    | -635 | -631  | -511 | -587  | -613 | -600  | -607 | -595  | -609 | -603   | -596 | -594   | -588 | -591 | -543 | -564 | -558 | -580 | -607 | -591 | -591 |
| 15       | -585                    | -551 | -579  | -433 | -513  | -556 | -566  | -581 | -576  | -576 | -578   | -591 | -577   | -567 | -573 | -546 | -548 | -581 | -575 | -569 | -563 | -561 |
| 17       | -612                    | -600 | -557  | -477 | -515  | -569 | -569  | -556 | -579  | -583 | 578    | -579 | -564   | -558 | -577 | -507 | -512 | -538 | -539 | -554 | -569 | -502 |
| 19       | -436                    | -433 | -439  | -453 | -443  | -447 | -425  | -420 | -441  | -461 | -454   | -452 | -459   | -445 | -458 | -453 | -457 | -434 | -430 | -424 | -426 | -442 |
| 20       | -442                    | -436 | -433  | -445 | -426  | -442 | -424  | -413 | -421  | -414 | -397   | -410 | -417   | -406 | -403 | -404 | -399 | -412 | -455 | -449 | -450 | -424 |
| 23       | -506                    | -575 | -516  | -427 | -452  | -486 | -511  | -513 | -511  | -530 | -531   | -533 | -516   | -514 | -520 | -466 | -477 | -498 | -482 | -505 | -512 | -504 |
| 25       | -478                    | -485 | -491  | -415 | -431  | -450 | -480  | -472 | -473  | -513 | -502   | -501 | -521   | -498 | -494 | -450 | -457 | -483 | -506 | -491 | -489 | -480 |
| 28       | -467                    | -483 | -485  | -400 | -432  | -455 | -506  | -482 | -479  | -516 | -502   | -500 | -494   | -492 | -485 | -455 | -444 | 477  | -490 | -479 | -480 | -431 |

ตารางผนวกที่ ๑5 ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ของคานาจิโอโพลิเมอร์คอนกรีต GB0.7-NaCl

| Duration | Half-Cell Potential, mV |      |      |       |      |      |       |      |      |       |      |      |       |      |      |        |      |      |        |      | Avg  |      |
|----------|-------------------------|------|------|-------|------|------|-------|------|------|-------|------|------|-------|------|------|--------|------|------|--------|------|------|------|
| day      | 0 cm                    |      |      | 20 cm |      |      | 40 cm |      |      | 60 cm |      |      | 80 cm |      |      | 100 cm |      |      | 120 cm |      |      |      |
| 1        | -16                     | -17  | -19  | -15   | -18  | -11  | -16   | -16  | -10  | -16   | -12  | -17  | -14   | -18  | -18  | -15    | -14  | -13  | -11    | -18  | -12  | -15  |
| 2        | -25                     | -26  | -34  | -22   | -36  | -18  | -22   | -19  | -24  | -24   | -27  | -18  | -12   | -19  | -23  | -21    | -44  | -35  | -10    | -21  | -23  | -24  |
| 3        | -41                     | -26  | -35  | -20   | -28  | -22  | -18   | -20  | -18  | -33   | -14  | -31  | -27   | -22  | -29  | -24    | -30  | -36  | -40    | -53  | -25  | -28  |
| 4        | -144                    | -152 | -156 | -147  | -151 | -159 | -152  | -144 | -160 | -154  | -155 | -155 | -171  | -169 | -160 | -171   | -171 | -155 | -154   | -145 | -160 | -156 |
| 5        | -234                    | -240 | -226 | -235  | -246 | -240 | -236  | -237 | -228 | -234  | -234 | -237 | -231  | -320 | -320 | -330   | -311 | -319 | -321   | -308 | -314 | -267 |
| 6        | -370                    | -364 | -366 | -362  | -358 | -356 | -337  | -338 | -342 | -372  | -368 | -366 | -362  | -358 | -352 | -342   | -344 | -337 | -336   | -339 | -332 | -352 |
| 7        | -334                    | -325 | -349 | -262  | -298 | -311 | -267  | -280 | -309 | -274  | -333 | -368 | -288  | -289 | -275 | -289   | -294 | -307 | -303   | -397 | -402 | -312 |
| 9        | -328                    | -335 | -339 | -251  | -280 | -331 | -264  | -268 | -282 | -262  | -290 | -358 | -280  | -278 | -283 | -257   | -279 | -307 | -434   | -360 | -369 | -306 |
| 11       | -359                    | -365 | -358 | -297  | -303 | -349 | -318  | -322 | -338 | -305  | -338 | -370 | -312  | -315 | -320 | -306   | -303 | -292 | -378   | -386 | -397 | -335 |
| 13       | -385                    | -384 | -366 | -365  | -369 | -430 | -369  | -353 | -407 | -379  | -370 | -462 | -370  | -355 | -405 | -368   | -344 | -443 | -383   | -467 | -374 | -388 |
| 15       | -404                    | -440 | -435 | -384  | -391 | -425 | -383  | -360 | -403 | -394  | -383 | -428 | -366  | -344 | -385 | -362   | -337 | -401 | -394   | -442 | -381 | -392 |
| 17       | -394                    | -402 | -411 | -373  | -384 | -402 | -363  | -374 | -397 | -319  | -333 | -330 | -339  | -332 | -320 | -339   | -340 | -338 | -476   | -463 | -474 | -376 |
| 19       | -388                    | -394 | -414 | -336  | -365 | -366 | -344  | -348 | -359 | -334  | -384 | -423 | -355  | -356 | -375 | -357   | -358 | -369 | -409   | -432 | -407 | -375 |
| 20       | -450                    | -430 | -460 | -482  | -482 | -475 | -478  | -474 | -475 | -487  | -484 | -482 | -482  | -475 | -473 | -481   | -455 | -447 | -449   | -410 | -436 | -465 |
| 23       | -460                    | -440 | -479 | -457  | -465 | -475 | -477  | -446 | -458 | -485  | -455 | -502 | -462  | -440 | -477 | -464   | -447 | -475 | -495   | -546 | -483 | -471 |
| 25       | -496                    | -486 | -498 | -493  | -472 | -504 | -523  | -496 | -503 | -519  | -488 | -524 | -520  | -486 | -508 | -521   | -489 | -513 | -527   | -521 | -506 | -504 |
| 28       | -519                    | -518 | -509 | -517  | -499 | -521 | -536  | -515 | -522 | -556  | -521 | -555 | -539  | -509 | -527 | -532   | -514 | -530 | -546   | -553 | -531 | -527 |

ตารางผนวกที่ ๖6 ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ของคานาจิโอโพลิเมอร์คอนกรีต GB1.0-NaCl

| Duration |      | Half-Cell Potential, mV |       |      |       |      |       |      |       |      |        |      |        |      |      |      |      |      |      |      |      | Avg  |
|----------|------|-------------------------|-------|------|-------|------|-------|------|-------|------|--------|------|--------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| day      | 0 cm |                         | 20 cm |      | 40 cm |      | 60 cm |      | 80 cm |      | 100 cm |      | 120 cm |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| 1        | -30  | -19                     | -30   | -22  | -25   | -23  | -17   | -24  | -23   | -15  | -15    | -32  | -26    | -31  | -28  | -34  | -24  | -25  | -18  | -15  | -11  | -23  |
| 2        | -44  | -41                     | -32   | -35  | -22   | -33  | -37   | -46  | -43   | -46  | -45    | -41  | -36    | -32  | -36  | -28  | -32  | -29  | -45  | -42  | -41  | -37  |
| 3        | -67  | -72                     | -84   | -64  | -66   | -72  | -57   | -55  | -56   | -60  | -71    | -63  | -52    | -54  | -50  | -44  | -53  | -56  | -77  | -81  | -94  | -64  |
| 4        | -161 | -163                    | -154  | -160 | -142  | -138 | -143  | -137 | -130  | -167 | -130   | -163 | -156   | -133 | -125 | -133 | -129 | -147 | -189 | -208 | -219 | -154 |
| 5        | -286 | -284                    | -272  | -283 | -272  | -272 | -282  | -284 | -275  | -276 | -262   | -270 | -275   | -256 | -274 | -272 | -262 | -273 | -277 | -293 | -277 | -275 |
| 6        | -340 | -334                    | -330  | -338 | -333  | -330 | -320  | -335 | -319  | -390 | -389   | -302 | -395   | -373 | -365 | -363 | -385 | -391 | -356 | -351 | -336 | -351 |
| 7        | -508 | -516                    | -517  | -513 | -525  | -522 | -529  | -531 | -526  | -525 | -532   | -524 | -522   | -523 | -514 | -522 | -516 | 505  | -531 | -524 | -490 | -472 |
| 9        | -542 | -536                    | -529  | -515 | -489  | -461 | -509  | -482 | -462  | -471 | -478   | -489 | -445   | -466 | -489 | -476 | -497 | -485 | -544 | -556 | -559 | -499 |
| 11       | -593 | -586                    | -577  | -573 | -553  | -521 | -590  | -560 | -527  | -553 | -550   | -554 | -509   | -509 | -522 | -541 | -555 | -542 | -590 | -596 | -590 | -557 |
| 13       | -573 | -532                    | -529  | -573 | -564  | -532 | -557  | -555 | -522  | -562 | -553   | -529 | -569   | -562 | -530 | -591 | -569 | -547 | -553 | -552 | -528 | -552 |
| 15       | -553 | -550                    | -551  | -548 | -537  | -504 | -557  | -530 | -484  | -550 | -544   | -525 | -535   | -532 | -519 | -537 | -546 | -527 | -589 | -583 | -571 | -542 |
| 17       | -590 | -592                    | -601  | -583 | -585  | -555 | -607  | -603 | -562  | -594 | -586   | -571 | -579   | -580 | -546 | -584 | -587 | -561 | -619 | -613 | -597 | -585 |
| 19       | -540 | -548                    | -549  | -536 | -549  | -548 | -549  | -562 | -549  | -598 | -597   | -575 | -592   | -582 | -571 | -585 | -617 | -571 | -570 | -573 | -546 | -567 |
| 20       | -577 | -586                    | -584  | -573 | -564  | -563 | -581  | -585 | -574  | -573 | -566   | -564 | -575   | -573 | -570 | -580 | -585 | -576 | -603 | -605 | -573 | -578 |
| 23       | -555 | -561                    | -559  | -546 | -550  | -544 | -548  | -550 | -542  | -548 | -554   | -544 | -543   | -548 | -540 | -551 | -544 | -517 | -564 | -566 | -552 | -549 |
| 25       | -669 | -572                    | -661  | -683 | -686  | -673 | -680  | -679 | -664  | -667 | -674   | -661 | -678   | -672 | -662 | -681 | -653 | -658 | -670 | -667 | -654 | -665 |
| 28       | -522 | -501                    | -472  | -642 | -630  | -629 | -601  | -697 | -696  | -601 | -699   | -696 | -698   | -698 | -696 | -698 | -699 | -695 | -612 | -603 | -693 | -642 |



ตารางผนวกที่ ๗ ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ของคานาจิโอโพลิเมอร์คอนกรีต GB1.3-NaCl

| Duration | Half-Cell Potential, mV |      |      |       |      |      |       |      |      |       |      |      |       |      |      |        |      |      |        |      | Avg  |      |
|----------|-------------------------|------|------|-------|------|------|-------|------|------|-------|------|------|-------|------|------|--------|------|------|--------|------|------|------|
| day      | 0 cm                    |      |      | 20 cm |      |      | 40 cm |      |      | 60 cm |      |      | 80 cm |      |      | 100 cm |      |      | 120 cm |      |      |      |
| 1        | -36                     | -41  | -41  | -18   | -22  | -24  | -17   | -34  | -27  | -21   | -21  | -23  | -25   | -24  | -25  | -31    | -30  | -35  | -33    | -24  | -27  | -27  |
| 2        | -72                     | -74  | -99  | -82   | -97  | -92  | -88   | -94  | -79  | -65   | -63  | -76  | -74   | -63  | -81  | -66    | -75  | -71  | -74    | -78  | -75  | -78  |
| 3        | -172                    | -167 | -179 | -169  | -169 | -180 | -177  | -174 | -183 | -167  | -167 | -164 | -154  | -158 | -155 | -147   | -146 | -164 | -175   | -180 | -177 | -168 |
| 4        | -279                    | -274 | -269 | -273  | -261 | -260 | -261  | -268 | -263 | -289  | -294 | -285 | -279  | -276 | -275 | -276   | -270 | -297 | -274   | -281 | -267 | -275 |
| 5        | -298                    | -304 | -302 | -460  | -470 | -462 | -436  | -452 | -446 | -458  | -448 | -464 | -369  | -374 | -369 | -364   | -362 | -351 | -355   | -346 | -354 | -393 |
| 6        | -471                    | -461 | -423 | -453  | -424 | -408 | -460  | -470 | -466 | -456  | -453 | -435 | -450  | -456 | -443 | -456   | -452 | -447 | -501   | -508 | -494 | -457 |
| 7        | -594                    | -608 | -598 | -601  | -607 | -614 | -600  | -611 | -538 | -547  | -528 | -521 | -519  | -531 | -522 | -522   | -531 | -510 | -506   | -510 | -509 | -554 |
| 9        | -592                    | -511 | -510 | -536  | -531 | -522 | -539  | -542 | -542 | -543  | -541 | -539 | -537  | -538 | -536 | -531   | -540 | -530 | -530   | -529 | -543 | -536 |
| 11       | -602                    | -616 | -593 | -587  | -590 | -573 | -601  | -601 | -586 | -590  | -591 | -574 | -595  | -599 | -587 | -600   | -601 | -589 | -601   | -587 | -602 | -594 |
| 13       | -620                    | -601 | -578 | -570  | -556 | -530 | -557  | -554 | -522 | -547  | -542 | -528 | -541  | -540 | -574 | -555   | -601 | -603 | -613   | -610 | -611 | -569 |
| 15       | -622                    | -621 | -597 | -621  | -609 | -543 | -615  | -627 | -599 | -611  | -605 | -585 | -598  | -607 | -569 | -610   | -607 | -569 | -622   | -614 | -594 | -602 |
| 17       | -570                    | -527 | -495 | -558  | -542 | -522 | -559  | -563 | -548 | -552  | -528 | -505 | -555  | -552 | -525 | -562   | -556 | -539 | -591   | -583 | -569 | -548 |
| 19       | -627                    | -613 | -602 | -620  | -608 | -582 | -617  | -633 | -615 | -620  | -615 | -587 | -617  | -615 | -595 | -612   | -619 | -607 | -527   | -522 | -605 | -603 |
| 20       | -661                    | -675 | -670 | -628  | -647 | -651 | -619  | -644 | -640 | -632  | -658 | -655 | -623  | -640 | -632 | -631   | -646 | -654 | -656   | -632 | 654  | -583 |
| 23       | -593                    | -583 | -565 | -537  | -569 | -546 | -585  | -593 | -583 | -582  | -583 | -575 | -577  | -579 | -578 | -583   | -582 | -581 | -608   | -610 | -591 | -580 |
| 25       | -618                    | -625 | -597 | -610  | -597 | -562 | -611  | -617 | -628 | -609  | -594 | -587 | -607  | -594 | -576 | -609   | -590 | -577 | -614   | -612 | -602 | -602 |
| 28       | -692                    | -683 | -683 | -693  | -697 | -688 | -697  | -700 | -688 | -699  | -640 | -695 | -691  | -700 | -692 | -693   | -700 | -692 | -691   | -689 | -687 | -690 |

ตารางผนวกที่ ๖8 ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ของคานคอนกรีต CC-NaCl

| Duration | Half-Cell Potential, mV |      |       |      |       |      |       |      |       |      |        |      |        |      |      |      |      |      |      |      | Avg  |      |
|----------|-------------------------|------|-------|------|-------|------|-------|------|-------|------|--------|------|--------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
|          | 0 cm                    |      | 20 cm |      | 40 cm |      | 60 cm |      | 80 cm |      | 100 cm |      | 120 cm |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| day      |                         |      |       |      |       |      |       |      |       |      |        |      |        |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| 1        | -5                      | -7   | -4    | -12  | -8    | -10  | -16   | -17  | -14   | -7   | -9     | -7   | -13    | -17  | -14  | -10  | -7   | -8   | -14  | -18  | -13  | -11  |
| 2        | -21                     | -12  | -13   | -22  | -28   | -16  | -18   | -21  | -11   | -25  | -21    | -22  | -26    | -28  | -21  | -26  | -27  | -28  | -23  | -26  | -28  | -22  |
| 3        | -25                     | -32  | -26   | -34  | -25   | -34  | -33   | -26  | -22   | -32  | -34    | -37  | -38    | -31  | -35  | -33  | -32  | -31  | -38  | -32  | -37  | -31  |
| 4        | -88                     | -96  | -84   | -69  | -75   | -68  | -54   | -71  | -83   | -69  | -82    | -71  | -60    | -98  | -61  | -52  | -67  | -82  | -82  | -92  | -80  | -75  |
| 5        | -182                    | -157 | -138  | -168 | -160  | -170 | -157  | -167 | -158  | -143 | -136   | -148 | -137   | -151 | -149 | -138 | -153 | -146 | -165 | -183 | -154 | -155 |
| 6        | -211                    | -177 | -199  | -240 | -219  | -223 | -212  | -229 | -245  | -233 | -217   | -225 | -178   | -187 | -205 | -194 | -185 | -185 | -245 | -321 | -233 | -217 |
| 7        | -273                    | -275 | -277  | -269 | -268  | -273 | -271  | -261 | -265  | -231 | -229   | -230 | -227   | -225 | -219 | -216 | -211 | -217 | -267 | -265 | -271 | -250 |
| 9        | -253                    | -238 | -256  | -295 | -269  | -269 | -282  | -283 | -299  | -286 | -272   | -284 | -239   | -256 | -263 | -255 | -253 | -264 | -314 | -405 | -319 | -279 |
| 11       | -251                    | -247 | -255  | -291 | -322  | -351 | -304  | -337 | -330  | -253 | -341   | -298 | -240   | -301 | -292 | -275 | -304 | -259 | -241 | -232 | -237 | -284 |
| 13       | -299                    | -282 | -281  | -343 | -322  | -362 | -294  | -312 | -283  | -278 | -297   | -283 | -207   | -273 | -257 | -216 | -374 | -365 | -231 | -308 | -323 | -295 |
| 15       | -334                    | -335 | -330  | -381 | -347  | -324 | -331  | -325 | -325  | -324 | -307   | -306 | -306   | -287 | -292 | -317 | -342 | -361 | -351 | -342 | -393 | -331 |
| 17       | -328                    | -333 | -350  | -381 | -365  | -382 | -358  | -378 | -390  | -323 | -330   | -355 | -301   | -291 | -311 | -289 | -317 | -329 | -341 | -379 | -359 | -342 |
| 19       | -404                    | -389 | -380  | -390 | -358  | -359 | -362  | -358 | -364  | -376 | -360   | -369 | -353   | -358 | -363 | -345 | -356 | -359 | -375 | -385 | -387 | -369 |
| 20       | -445                    | -451 | -403  | -441 | -427  | -388 | -418  | -420 | -408  | -419 | -430   | -417 | -381   | -426 | -419 | -377 | -419 | -425 | -397 | -416 | -429 | -417 |
| 23       | -450                    | -464 | -432  | -472 | -477  | -435 | -400  | -474 | -465  | -459 | -466   | -426 | -408   | -466 | -459 | -405 | -463 | -481 | -393 | -425 | -458 | -447 |
| 25       | -508                    | -515 | -497  | -533 | -550  | -509 | -542  | -564 | -559  | -543 | -560   | -549 | -488   | -535 | -543 | -473 | -513 | -529 | -481 | -487 | -526 | -524 |
| 28       | -516                    | -514 | -501  | -520 | -516  | -494 | -528  | -515 | -492  | -533 | -523   | -495 | -528   | -527 | -514 | -488 | -497 | -501 | -490 | -485 | -520 | -509 |

**ภาคผนวก ข**

การสูญเสียพื้นที่น้ำตักของเหล็กเสริม

ตารางผนวกที่ ๑๑ การสูญเสียพื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริมของคานตัวอย่างแช่ในน้ำ

| Group no. | Specimens | Pre    | Rear   | Weight | Degree | Average |
|-----------|-----------|--------|--------|--------|--------|---------|
|           |           | Weight | Weight | loss   |        |         |
|           |           | kg     | kg     | kg     | %      |         |
| GC0.7-W   | 1         | 0.601  | 0.586  | 0.016  | 2.627  | 2.339   |
|           | 2         | 0.608  | 0.598  | 0.009  | 1.564  |         |
|           | 3         | 0.651  | 0.635  | 0.016  | 2.488  |         |
|           | 4         | 0.639  | 0.622  | 0.017  | 2.678  |         |
| GC1.0-W   | 1         | 0.601  | 0.580  | 0.021  | 3.492  | 3.874   |
|           | 2         | 0.552  | 0.531  | 0.021  | 3.788  |         |
|           | 3         | 0.564  | 0.537  | 0.027  | 4.856  |         |
|           | 4         | 0.589  | 0.569  | 0.020  | 3.362  |         |
| GC1.3-W   | 1         | 0.577  | 0.524  | 0.053  | 9.105  | 10.260  |
|           | 2         | 0.645  | 0.572  | 0.073  | 11.337 |         |
|           | 3         | 0.682  | 0.600  | 0.082  | 12.023 |         |
|           | 4         | 0.589  | 0.539  | 0.051  | 8.574  |         |
| CC-W      | 1         | 0.601  | 0.588  | 0.014  | 2.278  | 2.737   |
|           | 2         | 0.651  | 0.634  | 0.017  | 2.581  |         |
|           | 3         | 0.651  | 0.629  | 0.022  | 3.441  |         |
|           | 4         | 0.589  | 0.573  | 0.016  | 2.649  |         |

ตารางผนวกที่ ๑๒ การสูญเสียพื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริมของคานตัวอย่างแช่ในสารละลาย โซเดียมคลอไรด์

| Group no.  | Specimens | Pre    | Rear   | Weight | Degree | Average |
|------------|-----------|--------|--------|--------|--------|---------|
|            |           | Weight | Weight | loss   | %      |         |
|            |           | kg     | kg     | kg     | %      |         |
| GC0.7-NaCl | 1         | 0.632  | 0.603  | 0.030  | 4.728  | 4.243   |
|            | 2         | 0.608  | 0.588  | 0.019  | 3.160  |         |
|            | 3         | 0.601  | 0.574  | 0.027  | 4.523  |         |
|            | 4         | 0.645  | 0.615  | 0.029  | 4.560  |         |
| GC1.0-NaCl | 1         | 0.608  | 0.575  | 0.033  | 5.382  | 8.786   |
|            | 2         | 0.608  | 0.571  | 0.036  | 5.958  |         |
|            | 3         | 0.608  | 0.556  | 0.051  | 8.443  |         |
|            | 4         | 0.676  | 0.572  | 0.104  | 15.360 |         |
| GC1.3-NaCl | 1         | 0.595  | 0.520  | 0.075  | 12.634 | 22.511  |
|            | 2         | 0.632  | 0.509  | 0.123  | 19.513 |         |
|            | 3         | 0.595  | 0.378  | 0.217  | 36.509 |         |
|            | 4         | 0.645  | 0.507  | 0.138  | 21.386 |         |
| CC-NaCl    | 1         | 0.614  | 0.593  | 0.021  | 3.340  | 3.773   |
|            | 2         | 0.608  | 0.586  | 0.022  | 3.604  |         |
|            | 3         | 0.601  | 0.584  | 0.017  | 2.860  |         |
|            | 4         | 0.670  | 0.634  | 0.035  | 5.287  |         |

ภาคผนวก ข  
กำลังการขีดเหนี่ยวของเหล็กเสริม

ตารางผนวกที่ ข1 กำลังการยึดเหนี่ยวของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตและคอนกรีตควบคุม

| Mix No.    | Slip, mm | Bond Strength, ksc |
|------------|----------|--------------------|
| GC0.7-C    | 4.132    | 89.971             |
| GC0.7-W    | 2.804    | 80.088             |
| GC0.7-NaCl | 1.970    | 66.639             |
| GC1.0-C    | 3.954    | 85.543             |
| GC1.0-W    | 1.109    | 52.283             |
| GC1.0-NaCl | 0.986    | 47.747             |
| GC1.3-C    | 3.360    | 82.414             |
| GC1.3-W    | 1.326    | 65.684             |
| GC1.3-NaCl | 1.183    | 62.321             |
| CC1.0-C    | 2.896    | 81.083             |
| CC1.0-W    | 2.666    | 78.560             |
| CC1.0-NaCl | 2.215    | 72.870             |

**ภาคผนวก ข**

นำนักบรรทุก การ โกงตัวและการยึดตัวของเหล็กเสริม



ตารางผนวกที่ ข1 น้ำหนักบรรทุก การ โกงตัวและการยืดตัวของเหล็กเสริม GB0.7-C

| Load (kg) | Deflection (mm) | Strain x 10 <sup>-6</sup> |
|-----------|-----------------|---------------------------|
| 0.000     | 0.000           | 0.000                     |
| 735.856   | 0.402           | 62.413                    |
| 1207.978  | 0.802           | 103.340                   |
| 1587.017  | 1.200           | 139.150                   |
| 2128.322  | 1.602           | 181.100                   |
| 2623.086  | 2.000           | 224.073                   |
| 3035.668  | 2.402           | 276.254                   |
| 3471.731  | 2.802           | 318.204                   |
| 3842.385  | 3.200           | 374.478                   |
| 4078.865  | 3.602           | 443.030                   |
| 4273.416  | 4.000           | 512.605                   |
| 4308.636  | 4.402           | 584.227                   |
| 4410.943  | 4.802           | 656.872                   |
| 4462.935  | 5.200           | 737.702                   |
| 4483.062  | 5.602           | 812.393                   |
| 4553.503  | 6.000           | 901.408                   |
| 4612.203  | 6.400           | 977.122                   |
| 4669.226  | 6.802           | 1029.304                  |
| 4709.479  | 7.202           | 1072.277                  |
| 4719.541  | 7.602           | 1117.296                  |
| 4758.116  | 8.000           | 1161.292                  |
| 4796.692  | 8.400           | 1211.427                  |
| 4840.298  | 8.802           | 1255.423                  |
| 4847.006  | 9.202           | 1289.187                  |
| 4870.486  | 9.602           | 1335.230                  |
| 4893.967  | 10.000          | 1404.805                  |
| 4904.030  | 10.402          | 1488.704                  |

ตารางผนวกที่ ข1 (ต่อ)

| Load (kg) | Deflection (mm) | Strain x 10 <sup>-6</sup> |
|-----------|-----------------|---------------------------|
| 4907.384  | 10.800          | 1563.396                  |
| 4702.769  | 11.202          | 1630.924                  |
| 4563.565  | 11.600          | 1709.708                  |
| 4521.636  | 12.002          | 1782.353                  |
| 4484.739  | 12.402          | 1861.136                  |
| 4446.164  | 12.800          | 1937.874                  |
| 4439.455  | 13.202          | 2019.727                  |
| 4452.872  | 13.602          | 2091.348                  |
| 4467.967  | 14.000          | 2170.132                  |
| 4478.030  | 14.402          | 2245.846                  |
| 4491.447  | 14.800          | 2330.769                  |
| 4506.541  | 15.202          | 2406.483                  |
| 4526.668  | 15.600          | 2476.058                  |
| 4546.794  | 16.000          | 2543.587                  |
| 4565.242  | 16.402          | 2621.348                  |
| 4587.046  | 16.802          | 2699.108                  |
| 4501.510  | 17.202          | 2758.452                  |
| 4436.101  | 17.600          | 2832.120                  |
| 4419.329  | 17.794          | 2865.884                  |

ตารางผนวกที่ ข2 น้ำหนักบรรทุก การ โกงตัวและการยืดตัวของเหล็กเสริม GB0.7-W

| Load (kg) | Deflection (mm) | Strain x 10 <sup>-6</sup> |
|-----------|-----------------|---------------------------|
| 0.000     | 0.000           | 0.000                     |
| 745.919   | 0.402           | 78.784                    |
| 1215.944  | 0.804           | 110.502                   |
| 1605.466  | 1.200           | 139.150                   |
| 2148.448  | 1.602           | 178.031                   |
| 2638.180  | 2.002           | 209.749                   |
| 3057.471  | 2.400           | 242.490                   |
| 3500.243  | 2.800           | 283.417                   |
| 3875.927  | 3.202           | 318.204                   |
| 4082.219  | 3.602           | 359.131                   |
| 4280.124  | 4.000           | 401.081                   |
| 4322.053  | 4.400           | 444.053                   |
| 4405.911  | 4.800           | 468.609                   |
| 4464.612  | 5.202           | 495.212                   |
| 4494.802  | 5.604           | 516.698                   |
| 4560.211  | 6.000           | 541.254                   |
| 4615.557  | 6.402           | 566.833                   |
| 4660.841  | 6.802           | 599.574                   |
| 4685.998  | 7.204           | 622.084                   |
| 4701.092  | 7.600           | 643.571                   |
| 4736.314  | 8.000           | 674.265                   |
| 4722.896  | 8.402           | 716.215                   |
| 4786.628  | 10.800          | 758.165                   |
| 4803.400  | 11.202          | 801.138                   |
| 4779.920  | 11.602          | 853.319                   |
| 4655.809  | 12.000          | 903.454                   |
| 4617.234  | 12.402          | 940.288                   |

ตารางผนวกที่ ข2 (ต่อ)

| Load (kg) | Deflection (mm) | Strain x 10 <sup>-6</sup> |
|-----------|-----------------|---------------------------|
| 4444.486  | 12.800          | 994.516                   |
| 4437.777  | 13.202          | 1042.605                  |
| 4454.550  | 13.600          | 1090.693                  |
| 4471.321  | 14.000          | 1140.829                  |
| 4483.062  | 14.402          | 1189.940                  |
| 4484.739  | 14.802          | 1227.798                  |
| 4405.911  | 15.202          | 1273.840                  |
| 4213.038  | 15.600          | 1320.905                  |
| 4120.793  | 16.000          | 1363.878                  |
| 3793.747  | 16.402          | 1400.712                  |
| 2629.794  | 16.934          | 1458.010                  |

ตารางผนวกที่ ข3 น้ำหนักบรรทุก การโก่งตัวและการยืดตัวของเหล็กเสริม GB0.7-NaCl

| Load (kg) | Deflection (mm) | Strain x 10 <sup>-6</sup> |
|-----------|-----------------|---------------------------|
| 0.000     | 0.000           | 0.000                     |
| 141.935   | 0.400           | 5.789                     |
| 242.984   | 0.802           | 17.367                    |
| 725.169   | 1.200           | 27.016                    |
| 1120.560  | 1.600           | 30.875                    |
| 1354.944  | 2.000           | 41.488                    |
| 1735.660  | 2.402           | 52.102                    |
| 2089.542  | 2.804           | 56.926                    |
| 2357.889  | 3.200           | 68.504                    |
| 2596.046  | 3.602           | 73.328                    |
| 2891.227  | 4.002           | 77.188                    |
| 3204.857  | 4.400           | 83.941                    |
| 3429.597  | 4.800           | 98.414                    |
| 3650.983  | 5.202           | 98.414                    |
| 3629.180  | 5.602           | 110.957                   |
| 3758.321  | 6.000           | 117.711                   |
| 3835.471  | 6.400           | 133.149                   |
| 3890.818  | 6.800           | 149.551                   |
| 3971.321  | 7.202           | 159.199                   |
| 4045.116  | 7.604           | 168.848                   |
| 4103.817  | 8.000           | 174.637                   |
| 4154.132  | 8.402           | 196.828                   |
| 4180.967  | 8.802           | 208.407                   |
| 4197.738  | 9.204           | 214.197                   |
| 4229.604  | 9.600           | 251.829                   |
| 4244.699  | 10.000          | 270.165                   |
| 4295.014  | 10.404          | 292.351                   |

ตารางผนวกที่ ข3 (ต่อ)

| Load (kg) | Deflection (mm) | Strain x 10 <sup>-6</sup> |
|-----------|-----------------|---------------------------|
| 4306.755  | 10.800          | 319.369                   |
| 4241.345  | 11.202          | 337.704                   |
| 4140.715  | 11.600          | 365.681                   |
| 4105.494  | 12.002          | 390.767                   |
| 4023.313  | 12.404          | 416.817                   |
| 4026.668  | 12.800          | 430.323                   |
| 4031.699  | 13.202          | 448.658                   |
| 4048.471  | 13.602          | 454.447                   |
| 4046.794  | 14.000          | 485.317                   |
| 4051.825  | 14.402          | 500.763                   |
| 4066.919  | 14.800          | 510.406                   |
| 4056.857  | 15.202          | 536.457                   |
| 4061.888  | 15.600          | 561.537                   |
| 4080.337  | 16.000          | 575.053                   |
| 4085.369  | 17.402          | 677.325                   |
| 4108.848  | 17.802          | 706.272                   |
| 4127.297  | 18.200          | 721.710                   |
| 4145.746  | 18.600          | 749.689                   |
| 4157.486  | 19.000          | 812.403                   |
| 4159.163  | 19.402          | 847.139                   |
| 4159.163  | 19.802          | 868.368                   |
| 4167.549  | 20.200          | 883.803                   |
| 4187.675  | 20.600          | 933.009                   |
| 4211.156  | 21.000          | 960.027                   |
| 4226.250  | 21.402          | 977.392                   |
| 4229.604  | 21.804          | 993.792                   |
| 4212.833  | 22.200          | 1031.417                  |

ตารางผนวกที่ ข4 น้ำหนักบรรทุก การ โกงตัวและการยืดตัวของเหล็กเสริม GB1.0-C

| Load (kg) | Deflection (mm) | Strain x 10 <sup>-6</sup> |
|-----------|-----------------|---------------------------|
| 0.000     | 0.000           | 0.000                     |
| 198.744   | 0.400           | 10.232                    |
| 568.559   | 0.802           | 12.278                    |
| 1076.740  | 1.200           | 20.463                    |
| 1595.822  | 1.600           | 32.741                    |
| 2356.416  | 2.000           | 36.834                    |
| 3069.212  | 2.402           | 47.066                    |
| 3716.597  | 2.802           | 54.228                    |
| 4218.115  | 3.200           | 62.413                    |
| 4727.927  | 3.602           | 68.552                    |
| 5039.880  | 4.002           | 84.923                    |
| 5182.438  | 4.400           | 86.969                    |
| 5284.745  | 4.800           | 96.177                    |
| 5455.813  | 5.202           | 106.409                   |
| 5591.665  | 5.602           | 116.641                   |
| 5719.129  | 6.000           | 121.757                   |
| 5789.571  | 6.400           | 134.035                   |
| 5821.438  | 6.800           | 143.243                   |
| 5846.594  | 7.202           | 155.521                   |
| 5918.713  | 7.602           | 172.915                   |
| 5987.478  | 8.000           | 181.100                   |
| 6081.399  | 8.402           | 188.262                   |
| 6078.044  | 8.802           | 199.517                   |
| 6166.933  | 9.202           | 211.795                   |
| 6234.020  | 9.600           | 219.980                   |
| 6280.978  | 10.000          | 239.421                   |
| 6341.360  | 10.402          | 252.722                   |

ตารางผนวกที่ ๗4 (ต่อ)

| Load (kg) | Deflection (mm) | Strain x 10 <sup>-6</sup> |
|-----------|-----------------|---------------------------|
| 6381.608  | 10.800          | 487.026                   |
| 6447.018  | 11.202          | 603.667                   |
| 6463.792  | 11.600          | 714.169                   |
| 6066.302  | 12.002          | 823.648                   |
| 4929.187  | 12.402          | 946.427                   |
| 4573.628  | 12.800          | 1053.860                  |
| 4394.172  | 13.202          | 1160.269                  |
| 4246.581  | 13.602          | 1256.446                  |
| 4159.368  | 14.000          | 1363.878                  |
| 4080.542  | 14.402          | 1456.986                  |



ตารางผนวกที่ ข5 น้ำหนักบรรทุก การโก่งตัวและการยืดตัวของเหล็กเสริม GB1.0-W

| Load (kg) | Deflection (mm) | Strain x 10 <sup>-6</sup> |
|-----------|-----------------|---------------------------|
| 0.000     | 0.000           | 0.000                     |
| 12.579    | 0.402           | 10.232                    |
| 64.990    | 0.800           | 20.463                    |
| 125.368   | 1.200           | 25.579                    |
| 205.453   | 1.600           | 28.649                    |
| 300.213   | 2.002           | 30.695                    |
| 555.561   | 2.400           | 35.811                    |
| 776.946   | 2.802           | 38.880                    |
| 1224.330  | 3.200           | 40.927                    |
| 1596.241  | 3.602           | 42.973                    |
| 2213.857  | 4.000           | 45.019                    |
| 2703.589  | 4.400           | 49.112                    |
| 3240.282  | 4.800           | 51.158                    |
| 3716.597  | 5.202           | 56.274                    |
| 4122.471  | 5.602           | 60.367                    |
| 4597.109  | 6.000           | 66.506                    |
| 4746.376  | 6.400           | 71.622                    |
| 4905.707  | 6.802           | 76.737                    |
| 5016.399  | 7.202           | 87.992                    |
| 5028.140  | 7.602           | 93.108                    |
| 5182.438  | 8.000           | 106.409                   |
| 5276.358  | 8.402           | 120.733                   |
| 5353.510  | 8.800           | 137.104                   |
| 5428.979  | 9.202           | 141.197                   |
| 5474.265  | 9.600           | 149.382                   |
| 5514.513  | 10.002          | 155.521                   |
| 5591.665  | 10.402          | 158.591                   |

ตารางผนวกที่ ๕ (ต่อ)

| Load (kg) | Deflection (mm) | Strain x 10 <sup>-6</sup> |
|-----------|-----------------|---------------------------|
| 5640.305  | 10.800          | 160.637                   |
| 5693.973  | 11.202          | 164.730                   |
| 5740.931  | 11.602          | 168.822                   |
| 5750.995  | 12.000          | 178.031                   |
| 5709.065  | 12.402          | 186.216                   |
| 5650.365  | 12.800          | 199.517                   |
| 5657.074  | 13.202          | 216.911                   |
| 5620.176  | 13.600          | 239.421                   |
| 5596.697  | 14.000          | 248.629                   |
| 5499.421  | 14.402          | 263.976                   |
| 5259.584  | 14.802          | 289.556                   |
| 4984.533  | 15.202          | 318.204                   |
| 4726.250  | 15.600          | 348.899                   |
| 4702.769  | 16.000          | 361.177                   |
| 3904.439  | 16.348          | 383.687                   |

ตารางผนวกที่ ข6 น้ำหนักบรรทุก การ โกงตัวและการยืดตัวของเหล็กเสริม GB1.0-NaCl

| Load (kg) | Deflection (mm) | Strain x 10 <sup>-6</sup> |
|-----------|-----------------|---------------------------|
| 0.000     | 0.000           | 0.000                     |
| 105.661   | 0.400           | 17.394                    |
| 392.457   | 0.800           | 29.672                    |
| 656.190   | 1.202           | 36.834                    |
| 1175.692  | 1.600           | 51.158                    |
| 1771.086  | 2.000           | 60.367                    |
| 2389.960  | 2.400           | 73.668                    |
| 2983.676  | 2.802           | 90.038                    |
| 3548.880  | 3.200           | 109.479                   |
| 4000.038  | 3.602           | 130.965                   |
| 4414.298  | 4.000           | 155.521                   |
| 4382.432  | 4.402           | 197.471                   |
| 4494.802  | 4.800           | 253.745                   |
| 4560.211  | 5.202           | 345.830                   |
| 4610.526  | 5.602           | 414.382                   |
| 4701.092  | 6.002           | 450.192                   |
| 4773.211  | 6.400           | 489.073                   |
| 4801.723  | 6.800           | 522.837                   |
| 4897.321  | 7.202           | 560.694                   |
| 4944.282  | 7.602           | 594.459                   |
| 5014.723  | 8.000           | 627.200                   |
| 5075.100  | 8.402           | 660.964                   |
| 5080.132  | 8.800           | 689.613                   |
| 5140.507  | 9.202           | 724.401                   |
| 5157.281  | 9.600           | 758.165                   |
| 5254.557  | 10.000          | 818.532                   |
| 5321.644  | 10.402          | 870.713                   |

ตารางผนวกที่ ๖ (ต่อ)

| Load (kg) | Deflection (mm) | Strain x 10-6 |
|-----------|-----------------|---------------|
| 5370.279  | 10.802          | 918.802       |
| 5422.270  | 11.204          | 956.659       |
| 5474.265  | 11.600          | 989.400       |
| 5256.234  | 12.000          | 1027.257      |
| 5408.855  | 12.402          | 1059.999      |
| 4281.802  | 12.800          | 1089.670      |
| 4452.872  | 13.202          | 1123.435      |
| 4523.313  | 13.600          | 1145.944      |
| 4582.014  | 14.002          | 1178.686      |
| 4615.557  | 14.350          | 1203.242      |

ตารางผนวกที่ ข7 น้ำหนักบรรทุก การโก่งตัวและการยืดตัวของเหล็กเสริม GB1.3-C

| Load (kg) | Deflection (mm) | Strain x 10 <sup>-6</sup> |
|-----------|-----------------|---------------------------|
| 0.000     | 0.000           | 0.000                     |
| 65.829    | 0.400           | 4.093                     |
| 194.132   | 0.802           | 14.324                    |
| 522.437   | 1.200           | 17.394                    |
| 723.696   | 1.600           | 18.417                    |
| 981.561   | 2.000           | 21.486                    |
| 1202.108  | 2.402           | 22.510                    |
| 1623.915  | 2.804           | 25.579                    |
| 2074.652  | 3.200           | 27.625                    |
| 2611.345  | 3.602           | 28.649                    |
| 3252.022  | 4.002           | 29.672                    |
| 3825.613  | 4.400           | 29.672                    |
| 4293.542  | 4.800           | 30.695                    |
| 4657.486  | 5.202           | 34.788                    |
| 4816.817  | 5.602           | 48.089                    |
| 4905.707  | 6.000           | 60.367                    |
| 4962.731  | 6.400           | 77.761                    |
| 4997.951  | 6.800           | 96.177                    |
| 4969.439  | 7.202           | 117.664                   |
| 4697.738  | 7.604           | 139.150                   |
| 4734.636  | 8.000           | 167.799                   |
| 4737.991  | 8.402           | 191.332                   |
| 4736.314  | 8.802           | 222.027                   |
| 4764.825  | 9.204           | 249.652                   |
| 4758.116  | 9.600           | 253.745                   |
| 4779.920  | 10.000          | 262.953                   |
| 4816.817  | 10.402          | 268.069                   |

ตารางผนวกที่ ข8 น้ำหนักบรรทุก การโก่งตัวและการยืดตัวของเหล็กเสริม GB1.3-W

| Load (kg) | Deflection (mm) | Strain x 10 <sup>-6</sup> |
|-----------|-----------------|---------------------------|
| 0.000     | 0.000           | 0.000                     |
| 93.921    | 0.400           | 5.116                     |
| 176.102   | 0.802           | 5.116                     |
| 288.892   | 1.200           | 6.139                     |
| 641.515   | 1.600           | 6.139                     |
| 840.679   | 2.000           | 7.162                     |
| 1325.798  | 2.402           | 10.232                    |
| 1708.192  | 2.804           | 12.278                    |
| 1957.251  | 3.200           | 12.278                    |
| 2334.613  | 3.602           | 14.324                    |
| 2673.401  | 4.002           | 16.371                    |
| 2914.912  | 4.400           | 17.394                    |
| 3174.873  | 4.800           | 18.417                    |
| 3475.085  | 5.202           | 19.440                    |
| 3795.424  | 5.602           | 20.463                    |
| 4010.101  | 6.000           | 20.463                    |
| 4040.290  | 6.400           | 20.463                    |
| 4177.817  | 6.800           | 21.486                    |
| 4238.195  | 7.202           | 22.510                    |
| 4369.014  | 7.604           | 25.579                    |
| 4419.329  | 8.000           | 26.602                    |
| 4493.125  | 8.402           | 28.649                    |
| 4563.565  | 8.802           | 28.649                    |
| 4622.266  | 9.204           | 30.695                    |
| 4667.549  | 9.600           | 35.811                    |
| 4659.163  | 10.000          | 37.857                    |
| 4706.124  | 10.404          | 38.880                    |

ตารางผนวกที่ ข8 (ต่อ)

| Load (kg) | Deflection (mm) | Strain x 10 <sup>-6</sup> |
|-----------|-----------------|---------------------------|
| 4739.668  | 10.800          | 42.973                    |
| 4734.636  | 11.202          | 47.066                    |
| 4788.305  | 11.600          | 48.089                    |
| 4798.369  | 12.002          | 56.274                    |
| 4726.250  | 12.404          | 62.413                    |
| 4618.912  | 12.800          | 70.598                    |
| 4597.109  | 13.202          | 74.691                    |
| 4518.282  | 13.602          | 87.992                    |
| 4528.345  | 14.000          | 97.201                    |
| 4536.731  | 14.402          | 106.409                   |
| 4545.116  | 14.800          | 112.548                   |
| 4548.471  | 15.202          | 118.687                   |
| 4555.179  | 15.600          | 121.757                   |
| 4571.951  | 16.000          | 124.826                   |
| 4545.116  | 16.402          | 127.896                   |
| 4546.794  | 16.802          | 127.896                   |
| 4556.857  | 17.204          | 129.942                   |
| 4553.503  | 17.600          | 129.942                   |
| 4563.565  | 18.000          | 135.058                   |
| 4578.660  | 18.402          | 144.266                   |
| 4605.494  | 18.804          | 158.591                   |
| 4627.297  | 19.200          | 170.868                   |
| 4642.392  | 19.600          | 188.262                   |
| 4657.486  | 20.002          | 205.656                   |
| 4657.486  | 20.404          | 227.143                   |
| 4654.132  | 20.802          | 247.606                   |
| 4664.195  | 21.200          | 266.023                   |

ตารางผนวกที่ ข9 น้ำหนักบรรทุก การโก่งตัวและการยืดตัวของเหล็กเสริม GB1.3-NaCl

| Load (kg) | Deflection (mm) | Strain x 10 <sup>-6</sup> |
|-----------|-----------------|---------------------------|
| 0.000     | 0.000           | 0.000                     |
| 368.138   | 0.400           | 89.015                    |
| 563.108   | 0.800           | 129.942                   |
| 787.848   | 1.200           | 168.822                   |
| 1015.104  | 1.600           | 213.841                   |
| 1245.714  | 2.000           | 252.722                   |
| 1437.749  | 2.400           | 291.602                   |
| 1617.625  | 2.802           | 330.482                   |
| 1858.298  | 3.200           | 358.108                   |
| 2083.039  | 3.602           | 365.270                   |
| 2244.046  | 4.000           | 375.501                   |
| 2361.448  | 4.400           | 378.571                   |
| 2446.984  | 4.800           | 380.617                   |
| 2571.093  | 5.202           | 392.895                   |
| 2571.093  | 5.604           | 402.104                   |
| 2680.109  | 6.000           | 415.405                   |
| 2735.455  | 6.400           | 438.938                   |
| 2775.707  | 6.800           | 469.633                   |
| 2832.731  | 7.204           | 512.605                   |
| 2842.794  | 7.602           | 561.717                   |
| 2883.046  | 8.000           | 613.899                   |
| 2889.755  | 8.402           | 672.219                   |
| 2921.621  | 8.800           | 725.424                   |
| 2926.652  | 9.202           | 760.211                   |
| 2918.267  | 9.600           | 798.068                   |
| 2827.700  | 10.000          | 847.180                   |
| 2745.519  | 10.404          | 895.269                   |



ตารางผนวกที่ ข10 <sup>๗</sup>น้ำหนักบรรทุก การ โกงตัวและการยืดตัวของเหล็กเสริม CC-C

| Load (kg) | Deflection (mm) | Strain x 10 <sup>-6</sup> |
|-----------|-----------------|---------------------------|
| 0.000     | 0.000           | 0.000                     |
| 87.632    | 0.402           | 29.672                    |
| 164.362   | 0.800           | 35.811                    |
| 272.120   | 1.200           | 38.880                    |
| 469.606   | 1.600           | 42.973                    |
| 703.571   | 2.002           | 45.019                    |
| 1393.724  | 2.400           | 51.158                    |
| 1819.723  | 2.802           | 59.344                    |
| 2413.440  | 3.200           | 60.367                    |
| 3057.471  | 3.602           | 66.506                    |
| 3538.818  | 4.000           | 71.622                    |
| 4196.266  | 4.400           | 83.899                    |
| 4815.140  | 4.800           | 94.131                    |
| 4952.667  | 5.202           | 102.316                   |
| 5073.423  | 5.604           | 108.455                   |
| 5160.636  | 6.000           | 108.455                   |
| 5301.515  | 6.400           | 115.618                   |
| 5397.113  | 6.802           | 122.780                   |
| 5442.399  | 7.204           | 137.104                   |
| 5506.131  | 7.602           | 150.405                   |
| 5601.729  | 8.000           | 163.706                   |
| 5650.365  | 8.402           | 174.961                   |
| 5683.909  | 8.800           | 190.309                   |
| 5717.452  | 9.202           | 201.563                   |
| 5777.829  | 9.600           | 211.795                   |
| 5813.050  | 10.002          | 217.934                   |
| 5799.636  | 10.404          | 228.166                   |

ตารางผนวกที่ ข10 (ต่อ)

| Load (kg) | Deflection (mm) | Strain x 10 <sup>-6</sup> |
|-----------|-----------------|---------------------------|
| 5811.373  | 10.800          | 241.467                   |
| 5861.691  | 11.202          | 246.583                   |
| 5781.184  | 11.602          | 251.698                   |
| 5437.367  | 12.000          | 267.046                   |
| 5417.242  | 12.402          | 271.139                   |
| 5439.044  | 12.800          | 279.324                   |
| 5487.679  | 13.202          | 281.370                   |
| 5479.297  | 13.600          | 282.393                   |
| 5482.652  | 14.000          | 284.440                   |
| 5423.947  | 14.402          | 294.671                   |
| 5380.344  | 14.802          | 302.857                   |
| 5403.823  | 15.204          | 304.903                   |
| 5432.334  | 15.600          | 313.088                   |
| 5434.012  | 16.000          | 320.251                   |
| 5200.884  | 16.402          | 325.366                   |
| 4971.117  | 16.804          | 328.436                   |
| 4818.494  | 17.200          | 333.552                   |
| 4783.274  | 17.600          | 336.621                   |

ตารางผนวกที่ ข11 <sup>๗</sup>น้ำหนักบรรทุก การ โกงตัวและการยืดตัวของเหล็กเสริม CC-W

| Load (kg) | Deflection (mm) | Strain x 10 <sup>-6</sup> |
|-----------|-----------------|---------------------------|
| 0.000     | 0.000           | 0.000                     |
| 446.126   | 0.400           | 66.506                    |
| 803.362   | 0.800           | 78.784                    |
| 1156.405  | 1.202           | 89.015                    |
| 1613.432  | 1.600           | 101.293                   |
| 2264.172  | 2.000           | 112.548                   |
| 2997.093  | 2.400           | 122.780                   |
| 3416.384  | 2.802           | 128.919                   |
| 3954.754  | 3.200           | 145.289                   |
| 4394.172  | 3.602           | 153.475                   |
| 4783.274  | 4.000           | 164.730                   |
| 4935.896  | 4.402           | 173.938                   |
| 4914.093  | 4.800           | 174.961                   |
| 5049.943  | 5.202           | 182.123                   |
| 5145.539  | 5.602           | 193.378                   |
| 5259.584  | 6.002           | 203.610                   |
| 5378.666  | 6.400           | 213.841                   |
| 5472.587  | 6.800           | 224.073                   |
| 5537.997  | 7.202           | 234.305                   |
| 5616.821  | 7.602           | 240.444                   |
| 5645.333  | 8.000           | 253.745                   |
| 5729.194  | 8.402           | 263.976                   |
| 5782.862  | 8.800           | 276.254                   |
| 5823.115  | 9.202           | 292.625                   |
| 5841.561  | 9.600           | 296.718                   |
| 5704.032  | 10.000          | 306.949                   |
| 5685.586  | 10.202          | 315.135                   |

ตารางผนวกที่ ข11 (ต่อ)

| Load (kg) | Deflection (mm) | Strain x 10-6 |
|-----------|-----------------|---------------|
| 5707.387  | 10.402          | 323.320       |
| 4598.785  | 10.802          | 333.552       |
| 4784.951  | 11.204          | 344.806       |
| 5021.432  | 11.800          | 363.223       |
| 5013.045  | 12.202          | 372.432       |
| 5068.392  | 12.600          | 385.733       |
| 4914.093  | 13.000          | 389.826       |
| 4964.408  | 13.402          | 403.127       |
| 4961.054  | 13.800          | 413.358       |
| 5031.494  | 14.204          | 418.474       |
| 4873.841  | 14.600          | 427.683       |
| 4680.967  | 15.000          | 434.845       |

ตารางผนวกที่ ข12 <sup>๗</sup>น้ำหนักบรรทุก การ โกงตัวและการยืดตัวของเหล็กเสริม CC-NaCl

| Load (kg) | Deflection (mm) | Strain x 10 <sup>-6</sup> |
|-----------|-----------------|---------------------------|
| 0.000     | 0.000           | 0.000                     |
| 129.073   | 0.402           | 0.402                     |
| 279.519   | 0.800           | 0.800                     |
| 775.278   | 1.200           | 1.200                     |
| 1051.444  | 1.600           | 1.600                     |
| 1672.505  | 2.002           | 2.002                     |
| 2435.630  | 2.400           | 2.400                     |
| 3166.487  | 2.802           | 2.802                     |
| 3694.514  | 3.200           | 3.200                     |
| 4304.678  | 3.602           | 3.602                     |
| 4683.517  | 4.000           | 4.000                     |
| 4903.109  | 4.400           | 4.400                     |
| 4963.455  | 4.800           | 4.800                     |
| 5119.348  | 5.202           | 5.202                     |
| 5191.429  | 5.604           | 5.604                     |
| 5261.828  | 5.800           | 5.800                     |
| 5322.174  | 6.000           | 6.000                     |
| 5439.517  | 6.400           | 6.400                     |
| 5553.502  | 6.802           | 6.802                     |
| 5633.965  | 7.204           | 7.204                     |
| 5701.012  | 7.602           | 7.602                     |
| 5593.734  | 8.000           | 8.000                     |
| 5654.079  | 8.402           | 8.402                     |
| 5667.491  | 8.800           | 8.800                     |
| 5664.138  | 9.202           | 9.202                     |
| 5704.365  | 9.600           | 9.600                     |
| 5563.561  | 10.002          | 10.002                    |

ตารางผนวกที่ ข12 (ต่อ)

| Load (kg) | Deflection (mm) | Strain x 10 <sup>-6</sup> |
|-----------|-----------------|---------------------------|
| 5637.318  | 10.404          | 10.404                    |
| 5659.108  | 10.800          | 10.800                    |
| 5690.958  | 11.202          | 11.202                    |
| 5704.365  | 11.602          | 11.602                    |
| 5751.303  | 12.000          | 12.000                    |
| 5786.506  | 12.402          | 12.402                    |
| 5788.182  | 12.800          | 12.800                    |
| 5141.138  | 13.202          | 13.202                    |
| 5159.580  | 13.600          | 13.600                    |
| 5191.429  | 14.000          | 14.000                    |
| 5176.340  | 14.402          | 14.402                    |

## ประวัติการศึกษา และการทำงาน

|                      |                                                                                                                                             |
|----------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| ชื่อ                 | นายสรายุติ ยอดมณี                                                                                                                           |
| เกิดวันที่           | 26 มิถุนายน 2523                                                                                                                            |
| สถานที่เกิด          | อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา                                                                                                                   |
| ประวัติการศึกษา      | วศ.บ. (วิศวกรรมโยธา) มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์                                                                                                 |
| ทุนการศึกษาที่ได้รับ | ทุนวิจัยมหาบัณฑิต สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย<br>และบริษัท ปูนซีเมนต์นครหลวง จำกัด (มหาชน)<br>สาขาวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม (พ.ศ. 2549) |