

รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการศึกษาผลกระทบการเกิดสนิมของเหล็กในจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต
เสริมเหล็กที่ใช้เป็นโครงสร้างในสภาพสิ่งแวดล้อมทะเล

**A Study the Effect of Steel Corrosion in Geopolymer Concrete using the
Structure in Marine Environment**

คณะผู้วิจัย

สังกัด

ผศ.จักรพันธ์ แสงสุวรรณ

มทร.ราชมงคลพระนคร

ผศ.ดร.วันชัย ยอดสุดใจ

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

นายสรายุทธ ยอดมณี

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

นายวิศิษ แซ่ลิ่ม

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ได้รับทุนอุดหนุนวิจัยจาก
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

พ.ศ.2554

สารบัญ

| | หน้า |
|--------------------------------------------------------------------------------|------------|
| สารบัญ | i |
| สารบัญรูป | iii |
| สารบัญตาราง | v |
| บทที่ 1 บทนำ | 1-1 |
| 1.1 ความเป็นมาของโครงการ..... | 1-1 |
| 1.2 วัตถุประสงค์..... | 1-2 |
| 1.3 ขอบเขตของการวิจัย | 1-3 |
| 1.4 ประโยชน์คาดว่าจะได้รับ | 1-3 |
| 1.5 โครงสร้างของรายงาน | 1-3 |
| บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง | 2-1 |
| 2.1 แก่ถ่านหิน..... | 2-1 |
| 2.2 วัสดุดินขาว..... | 2-4 |
| 2.3 ทฤษฎีสम्मัติฐานและหรือกรอบแนวความคิดของโครงการวิจัย..... | 2-4 |
| 2.3.1 กลไกการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีต..... | 2-5 |
| 2.3.2 การเกิดสนิมของเหล็กเสริมโดยคลอไรด์ (Steel Corrosion due to Chloride)... | 2-7 |
| 2.3.3 กลไกการกัดกร่อนของเหล็กเสริม | 2-10 |
| 2.3.4 การเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นของคลอไรด์ที่สัมผัสกับสิ่งแวดล้อมคลอไรด์ | 2-13 |
| 2.3.5 กำลั้งการยึดเหนี่ยวของเหล็กเสริม | 2-14 |
| 2.3.6 จีโอโพลิเมอร์ (Geopolymer)..... | 2-16 |
| 2.3.7 คุณสมบัติของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้า และจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต..... | 2-18 |
| 2.3.8 การตรวจสอบทางไฟฟ้าเคมี (Evaluate of Electrochemical) | 2-20 |
| 2.3.9 พฤติกรรมกำลั้งรับแรงดัด..... | 2-21 |
| บทที่ 3 อุปกรณ์และวิธีการ | 3-1 |
| 3.1 อุปกรณ์ | 3-1 |
| 3.2 วิธีการ | 3-1 |
| 3.2.1 วัสดุ | 3-1 |
| 3.2.2 อัตราส่วนผสม | 3-3 |
| 3.3 การเตรียมตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตและคอนกรีต | 3-5 |
| 3.3.1 จีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจากถ้ำลอย ถ้ำแกลบ และดินขาว..... | 3-5 |
| 3.3.2 คอนกรีต..... | 3-8 |
| 3.4 การเร่งการเกิดสนิมของเหล็กเสริม..... | 3-10 |



| | | |
|----------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 3.4.1 | การติดตั้งสายไฟฟ้า | 3-10 |
| 3.4.2 | การเร่งการเกิดสนิมของเหล็กเสริม | 3-11 |
| 3.5 | การตรวจสอบแนวโน้มการเกิดสนิมของเหล็กเสริม | 3-12 |
| 3.5.1 | การเตรียมสารละลาย | 3-12 |
| 3.5.2 | การเตรียมตัวอย่างทดสอบ | 3-12 |
| 3.5.3 | การตรวจสอบแนวโน้มการเกิดสนิมของเหล็กเสริม | 3-13 |
| 3.6 | การทดสอบกำลังรับแรงอัด | 3-14 |
| 3.6.1 | การตรวจสอบขนาดและน้ำหนัก | 3-14 |
| 3.6.2 | การตกแต่งผิวหน้าให้เรียบ | 3-16 |
| 3.6.3 | การทดสอบกำลังรับแรงอัด | 3-17 |
| 3.7 | การทดสอบกำลังรับแรงดัด | 3-18 |
| 3.7.1 | การเตรียมตัวอย่างทดสอบ | 3-18 |
| 3.7.2 | การทดสอบกำลังรับแรงดัด | 3-19 |
| 3.8 | การสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริม | 3-21 |
| 3.8.1 | การเตรียมเหล็กเสริม | 3-21 |
| 3.8.2 | การขัดสนิม | 3-22 |
| 3.8.3 | การตรวจสอบน้ำหนัก | 3-23 |
| บทที่ 4 | ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง | 4-1 |
| 4.1 | วัสดุผสมจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจากถ้ำลอย ถ้ำแกลบ ดินขาว และคอนกรีต | 4-1 |
| 4.1.1 | กำลังรับแรงอัด | 4-1 |
| 4.2 | การกัดกร่อนของเหล็กเสริมในจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจากถ้ำลอย ถ้ำแกลบ ดินขาว และคอนกรีต | 4-2 |
| 4.2.1 | ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ | 4-2 |
| 4.3 | การสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริม | 4-4 |
| 4.4 | กำลังรับแรงดัดของคานจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจากถ้ำลอย ถ้ำแกลบ ดินขาวและคอนกรีต | 4-6 |
| 4.4.1 | กำลังรับแรงดัด | 4-6 |
| 4.4.2 | อิทธิพลของการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริม | 4-11 |
| บทที่ 5 | สรุปผลและข้อเสนอแนะ | 5-1 |
| 5.1 | วัสดุผสมของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจากถ้ำลอย ถ้ำแกลบ ดินขาว และคอนกรีต | 5-1 |
| 5.1.1 | กำลังรับแรงอัด | 5-1 |
| 5.2 | การกัดกร่อนของเหล็กเสริมในจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจากถ้ำลอย ถ้ำแกลบ ดินขาว และคอนกรีต | 5-1 |
| 5.2.1 | ความต่างศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ | 5-1 |
| 5.2.2 | การสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริม | 5-1 |
| 5.3 | กำลังรับแรงดัดของคานจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจากถ้ำลอย ถ้ำแกลบ ดินขาวและคอนกรีต | 5-2 |



| | | |
|-------|------------------------------------------------|-----|
| 5.3.1 | กำลังรับแรงดัด | 5-2 |
| 5.3.2 | อิทธิพลของการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริม | 5-2 |
| 5.4 | ข้อเสนอแนะ | 5-2 |
| 5.4.1 | ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ | 5-2 |
| 5.4.2 | การเร่งการเกิดสนิมของเหล็กเสริม | 5-2 |



สารบัญตาราง

| | หน้า |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|------|
| ตารางที่ 3.1 องค์ประกอบทางเคมีของเก้าอี้ถ่านหิน..... | 3-2 |
| ตารางที่ 3.2 องค์ประกอบทางเคมีของเก้าอี้ถ่านหิน..... | 3-2 |
| ตารางที่ 3.3 องค์ประกอบทางเคมีของดินขาว..... | 3-2 |
| ตารางที่ 3.4 องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์..... | 3-2 |
| ตารางที่ 3.5 คุณสมบัติของเหล็กเสริม..... | 3-3 |
| ตารางที่ 3.6 อัตราส่วนผสมซีเมนต์โพลิเมอร์คอนกรีตจากเก้าอี้ถ่านหิน..... | 3-4 |
| ตารางที่ 3.7 อัตราส่วนผสมซีเมนต์โพลิเมอร์คอนกรีตจากเก้าอี้ถ่านหิน..... | 3-4 |
| ตารางที่ 3.8 อัตราส่วนผสมซีเมนต์โพลิเมอร์คอนกรีตจากดินขาว..... | 3-4 |
| ตารางที่ 3.9 อัตราส่วนผสมของคอนกรีต..... | 3-5 |
| ตารางที่ 3.10 ความต่างศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์และแนวโน้มการเกิดสนิมของเหล็กเสริม ASTM C 876 | 3-13 |
| ตารางที่ 4.1 ความต่างศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์และแนวโน้มการเกิดสนิมของเหล็กเสริม ASTM C 876 | 4-2 |



| | | |
|-------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| รูปที่ 3.20 | วางตัวอย่างที่เคลือบผิวหน้าด้วยกัมมะถันให้แข็งตัวในอุณหภูมิปกติ..... | 3-17 |
| รูปที่ 3.21 | การทดสอบกำลังรับแรงอัด | 3-18 |
| รูปที่ 3.22 | การกำหนดระยะห่างของฐานรองรับ 30 เซนติเมตร | 3-19 |
| รูปที่ 3.23 | เครื่องทดสอบ Universal Testing Machine | 3-20 |
| รูปที่ 3.24 | รอยร้าวเนื่องจากการวิบัติของแท่งตัวอย่างทดสอบ | 3-20 |
| รูปที่ 3.25 | ตัวอย่างเหล็กเสริมที่นำออกมาจากแท่งตัวอย่างทดสอบ..... | 3-21 |
| รูปที่ 3.26 | เหล็กเสริมความยาว 20 เซนติเมตร | 3-22 |
| รูปที่ 3.27 | การขัดสนิมของเหล็กเสริม | 3-22 |
| รูปที่ 3.28 | การชั่งน้ำหนักของเหล็กเสริม | 3-23 |
| รูปที่ 4.1 | กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลีเมอร์คอนกรีตจากแก้วลอย แก้วกลบ ดินขาว และคอนกรีต..... | 4-2 |
| รูปที่ 4.2 | ความต่างศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ของจีโอโพลีเมอร์คอนกรีตจากแก้วลอย แก้วกลบ ดินขาว และคอนกรีต | 4-3 |
| รูปที่ 4.3 | ความต่างศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ของจีโอโพลีเมอร์คอนกรีตจากแก้วลอย แก้วกลบ ดินขาว และคอนกรีต | 4-3 |
| รูปที่ 4.4 | การแตกร้าวของจีโอโพลีเมอร์คอนกรีตจากแก้วลอย | 4-4 |
| รูปที่ 4.5 | การสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริม | 4-5 |
| รูปที่ 4.6 | การสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริม | 4-5 |
| รูปที่ 4.7 | ความต่างศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ต่อการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริม | 4-6 |
| รูปที่ 4.8 | การสูญเสียกำลังการยึดเหนี่ยวระหว่างจีโอโพลีเมอร์คอนกรีตต่อเหล็กเสริม | 4-7 |
| รูปที่ 4.9 | กำลังรับแรงดัดและการโก่งตัวของคานคอนกรีต OPC-CON..... | 4-7 |
| รูปที่ 4.10 | กำลังรับแรงดัดและการโก่งตัวของคานคอนกรีต PFA-CON | 4-8 |
| รูปที่ 4.11 | กำลังรับแรงดัดและการโก่งตัวของคานคอนกรีต PFA-RHA-CON..... | 4-8 |
| รูปที่ 4.12 | กำลังรับแรงดัดและการโก่งตัวของคานคอนกรีต PFA-MK-CON | 4-9 |
| รูปที่ 4.13 | กำลังรับแรงดัดและการโก่งตัวของคานคอนกรีต OPC-COR | 4-9 |
| รูปที่ 4.14 | กำลังรับแรงดัดและการโก่งตัวของคานคอนกรีต PFA-RHA-COR | 4-10 |
| รูปที่ 4.15 | กำลังรับแรงดัดและการโก่งตัวของคานคอนกรีต PFA-MK-COR..... | 4-10 |
| รูปที่ 4.16 | กำลังรับแรงดัด..... | 4-11 |
| รูปที่ 4.17 | กำลังรับแรงดัดต่อการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริม | 4-12 |
| รูปที่ 4.18 | สัมประสิทธิ์การเสื่อมสภาพกำลังรับแรงดัด | 4-13 |



บทที่ 1 บทนำ

1.1 ความเป็นมาของโครงการ

ในอดีตจนถึงปัจจุบันโครงสร้างโดยทั่วไปส่วนมากเป็นคอนกรีตเสริมเหล็กเพราะผู้ออกแบบโครงสร้างในอดีตมีความเข้าใจว่าจะมีอายุการใช้งานได้นานหากอยู่ในสภาวะปกติ แต่ในความเป็นจริงนั้น การออกแบบโดยส่วนมากจะไม่คำนึงถึงความต้านทานทางด้านความคองทนของคอนกรีต เช่น ถ้าหากโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ต้องสัมผัสกับน้ำทะเล น้ำกร่อยหรือก่อสร้างอยู่บริเวณชายฝั่งงทะเล รวมทั้งโครงสร้างใต้ดินบริเวณนั้นจะประสบปัญหาความเสียหายอย่างมากจากสภาพแวดล้อม ซึ่งจะมีผลทำให้คุณสมบัติเชิงกลของคอนกรีตถูกทำลายและการรับกำลังจะลดลงอย่างต่อเนื่อง จึงต้องแก้ปัญหาเบื้องต้นในการบำรุงรักษาและซ่อมแซมเป็นการช่วยยืดอายุให้โครงสร้างสามารถใช้งานได้ต่อไปอีก โดยทั่วไปแล้วคอนกรีตมีความสามารถในการป้องกันการเกิดสนิมเหล็กเสริมได้เป็นอย่างดี ด้วยเหตุผลที่ว่าในคอนกรีตเองมีค่าความเป็นด่าง (alkaline) ที่สูงมาก ซึ่งทำให้เกิดเป็นฟิล์มช่วยป้องกันผิวของเหล็กเสริมไว้ไม่ให้เกิดเป็นสนิมขึ้นได้โดยง่าย แต่อย่างไรก็ดีการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตก็อาจจะเกิดขึ้นเนื่องจากคุณภาพของตัวคอนกรีตเอง เช่น การปนเปื้อนของคลอไรด์ ที่มีอยู่ในวัสดุดิบที่ใช้ผสมคอนกรีต คอนกรีตมีความพรุน (porosity) มากเป็นต้น หรือโครงสร้างคอนกรีตอยู่ในสภาพแวดล้อมที่มีคลอไรด์รุนแรงซึ่งเอื้ออำนวยต่อการแพร่เข้าไปในเนื้อคอนกรีต ทั้งนี้การเกิดสนิมของเหล็กเสริมมีสาเหตุเนื่องจากปริมาณของคลอไรด์ที่แพร่เข้าไปสะสมอยู่ที่บริเวณเหล็กเสริมมีค่ามากเพียงพอที่จะทำให้ฟิล์มที่ช่วยป้องกันผิวเหล็กเสริมถูกทำลายและเกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี (Electrochemical Process) ขึ้น ส่งผลให้เหล็กเสริมสูญเสียหน้าตัดและแรงยึดเหนี่ยวระหว่างคอนกรีต กับเหล็กเสริม โดยที่ปริมาณคลอไรด์ที่มากเพียงพอที่จะทำให้เหล็กเสริมเริ่มเกิดสนิมนี้ โดยทั่วไปเรียกว่า ปริมาณคลอไรด์วิกฤต เป็นผลทำให้โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กเสื่อมสภาพและอายุการใช้งานลดน้อยลง ดังนั้นการที่จะปรับปรุงคุณภาพของคอนกรีตให้ดีขึ้นเพื่อลดปัญหาดังกล่าวและในงานวิจัยนี้ได้ใช้วัสดุเชื่อมประสานมีคุณสมบัติเป็นสารพอลิซอสลานเรียกว่าจีโอโพลิเมอร์ (Geopolymer) เพื่อใช้ทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นวัสดุเชื่อมประสานที่ใช้กันมากในการก่อสร้างโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก และเป็นที่ยอมรับกันดีอยู่แล้วว่าการผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ต้องใช้พลังงานจำนวนมากซึ่งมีผลกระทบต่อทำให้เกิดก๊าซที่มีผลต่อภาวะเรือนกระจก (Greenhouse effect) ดังนั้นในปัจจุบันจึงมีความพยายามจะใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ให้น้อยลง และได้พยายามที่จะพัฒนาสารซีเมนต์โดยใช้สารพอลิซอสลานที่ประกอบด้วยสารซิลิกาและอลูมินาเป็นองค์ประกอบในการทำวัสดุซีเมนต์ที่เรียกว่า จีโอโพลิเมอร์ (Geopolymer) ซึ่งเป็นวัสดุเชื่อมประสาน ที่สามารถใช้แทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ได้ โดยใช้หลักการของ



การทำปฏิกิริยาระหว่างซิลิกอน (Si) และอลูมิเนียม (Al) กับสารอัลคาไลที่เป็นด่างสูงและใช้ความร้อนในการกระตุ้นปฏิกิริยาโพลิคอนเดนเซชัน (Polycondensation)

การใช้จีโอโพลิเมอร์แทนที่ซีเมนต์เปสต์ในการผลิตคอนกรีต โดยผสมจีโอโพลิเมอร์ร่วมกับมวลรวมละเอียดและมวลรวมหยาบตลอดจนสารผสมเพิ่มอื่นๆ เรียกว่า จีโอโพลิเมอร์คอนกรีต (Geopolymer concrete) การผลิตจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตนี้อาจเป็นเทคโนโลยีผลิตคอนกรีตที่สามารถนำมาทดแทนการผลิตคอนกรีตด้วยปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ได้ในอนาคต แต่การที่จะนำจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตมาใช้ทดแทนคอนกรีตซึ่งมีความจำเป็นอย่างยี่งที่จะต้องทำการศึกษาคุณสมบัติทางวิศวกรรมของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต ได้แก่ กำลังและคุณสมบัติทางด้าน ความทนทานซึ่งเป็นคุณสมบัติที่สำคัญสำหรับโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กโดยทั่วไป คอนกรีตที่ดีต้องมีกำลังตามต้องการและทนต่อสภาพดินฟ้าอากาศหรือสภาวะแวดล้อมตลอดอายุการใช้งาน หากคอนกรีตไม่มีความต้านทานหรือมีความต้านทานน้อยโครงสร้างคอนกรีตจะเสื่อมสภาพก่อนเวลาอันสมควร สาเหตุทางเคมีที่ทำให้คอนกรีตในระหว่างการใช้งาน ได้แก่ การซึมผ่านของคลอไรด์ การเกิดคาร์บอนเนชัน การทำลายจากซัลเฟต การกัดกร่อนของกรด และปฏิกิริยา อัลคาไลซิลิกา ส่วนสาเหตุทางกลที่ทำให้คอนกรีตเสียหาย ได้แก่ การกระแทก การขีดสี การกัดเซาะ และการสึกกร่อน เป็นต้น

การป้องกันการเสื่อมสภาพของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก สามารถกระทำได้ โดยการปรับปรุงคุณภาพคอนกรีตและเหล็กเสริม การปรับปรุงคุณภาพคอนกรีตอาจทำได้ โดยการใช้สารปอซโซลานและสารเคมีผสมเพิ่ม การเกิดสนิมของเหล็กเสริมเป็นปัญหาของการเสื่อมสภาพของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก ผลกระทบโดยรวมของการเกิดสนิมของเหล็ก คือ กำลังรับแรงของโครงสร้างลดลงเนื่องจากพื้นที่หน้าตัดเหล็กลดลง เกิดการแตกร้าวและ หลุดออกของคอนกรีตหุ้มภายนอก ซึ่งจะเป็นผลให้เกิดความเสียหายต่อโครงสร้างมากยิ่งขึ้นและ ทำให้อายุการใช้งานของโครงสร้างลดลง

ปัญหาการเสื่อมสภาพของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ใช้คอนกรีตธรรมดาและคอนกรีตพิเศษชนิดต่างๆ ได้มีการศึกษาอย่างกว้างขวางทั้งในและต่างประเทศ แต่การศึกษากการเสื่อมสภาพของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ใช้จีโอโพลิเมอร์คอนกรีตยังไม่มีการศึกษาอย่างแพร่หลายมากนักโดยเฉพาะอย่างยิ่งในประเทศไทย ดังนั้นถ้าหากต้องการนำจีโอโพลิเมอร์มาทดแทนซีเมนต์เพื่อนำมาใช้ในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก การศึกษาปัญหาการเสื่อมสภาพของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตเสริมเหล็กโดยเฉพาะการเกิดสนิมของเหล็กเสริมจึงเป็นสิ่งที่มีความจำเป็นอย่างยี่ง

1.2 วัตถุประสงค์

- 1) วัสดุที่เหมาะสมสำหรับจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต
- 2) การเกิดสนิมของเหล็กเสริมในจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตและในคอนกรีตที่อยู่ในสภาพสิ่งแวดล้อมทะเล
- 3) พฤติกรรมการรับแรงดัดเมื่อเหล็กเสริมเกิดสนิมในคานจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตและในคานคอนกรีตที่อยู่ในสภาพสิ่งแวดล้อมทะเล



1.3 ขอบเขตของการวิจัย

การศึกษานี้จะคำนึงถึงการเกิดสนิมของเหล็กเสริม ซึ่งพบมากในอาคารโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยทั่วไป และการวิจัยนี้ทดสอบการเกิดสนิมในจีโอโพลีเมอร์คอนกรีตเสริมเหล็กด้วยการเร่งการเกิดสนิมด้วยวิธีการทางไฟฟ้า ซึ่งพฤติกรรมอาจจะแตกต่างจากสภาพจริงเนื่องจากถูกจำกัดในด้านระยะเวลา สำหรับวิธีการตรวจสอบแนวโน้มการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในจีโอโพลีเมอร์คอนกรีตใช้วิธีการของศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ และใช้วิธีทางไฟฟ้าเคมีในการลดปริมาณคลอไรด์ในคานคอนกรีตเสริมเหล็กภายใต้การควบคุมความเข้มข้นพื้นที่ผิวคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ใช้ในการศึกษาและระยะเวลาในการศึกษา

1.4 ประโยชน์คาดว่าจะได้รับ

การศึกษานี้เป็นประโยชน์และองค์ความรู้ในการวิจัยสำหรับการตัดสินใจที่จะนำเอาจีโอโพลีเมอร์คอนกรีตมาใช้ในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก เพื่อที่จะทราบความคงทนและอายุการใช้งานของจีโอโพลีเมอร์คอนกรีตเปรียบเทียบกับคอนกรีตทั่วไปและนำไปสู่การผลิตเชิงพาณิชย์ ในการที่นำวัสดุที่เหลือทิ้ง (by product) นำกลับมาใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุด ซึ่งเป็นการลดต้นทุนในการผลิตปูนปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ หรือในอีกมุมหนึ่งสามารถจะช่วยให้การวางแผนการบำรุงรักษาและซ่อมแซมโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ใช้จีโอโพลีเมอร์คอนกรีตในการก่อสร้างได้อย่างถูกต้อง นอกจากนี้งานวิจัยยังสามารถใช้เป็นฐานข้อมูลที่จำเป็นต่อไปเพื่อเป็นแนวทางในการผลิตจีโอโพลีเมอร์คอนกรีต ตลอดจนการใช้เถ้าลอย (Fly ash) เถ้าแกลบ (Rice husk ash) และดินขาว (Metakaolin) ที่มีอยู่ในประเทศไทยให้เกิดประโยชน์สูงสุด

1.5 โครงสร้างของรายงาน

การศึกษาผลกระทบการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในจีโอโพลีเมอร์คอนกรีตเสริมเหล็กที่ใช้เป็นโครงสร้างในสภาพสิ่งแวดล้อมทะเลนี้ แบ่งการนำเสนอเนื้อหาสาระในเรื่องต่างๆ ดังต่อไปนี้

- บทที่ 1 บทนำ
- บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง
- บทที่ 3 อุปกรณ์และวิธีการ
- บทที่ 4 ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง
- บทที่ 5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ



บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

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

การผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ทำให้เกิดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สู่บรรยากาศ ซึ่งมีผลทำให้เกิดภาวะเรือนกระจก (Greenhouse effect) ถึงปีละ 135,000 ล้านตัน หรือประมาณร้อยละ 7 ของก๊าซที่ปล่อยออกมาทั้งหมด (Malhotra, 2002; McCaffrey, 2002) และในปัจจุบันโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กทั่วไปนิยมใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นวัสดุเชื่อมประสาน ในการก่อสร้าง และมีปริมาณการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ดังนั้นจึงควรลดปริมาณการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ลง โดยพยายามหาสารซีเมนต์อื่นมาใช้แทน มีการวิจัยที่จะนำวัสดุเหลือทิ้งจากภาคอุตสาหกรรม เกษตรกรรม และจากธรรมชาติมาผสมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เพื่อทำปูนซีเมนต์ผสม เพื่อลดการใช้ปริมาณปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ซึ่งวัสดุที่ใช้ผสมเป็นวัสดุปอซโซลาน (Pozzolan materials) ที่ไม่มีคุณสมบัติเป็นวัสดุประสาน แต่เมื่อผสมกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Calcium hydroxide) จะสามารถก่อตัวและแข็งตัวได้ สารปอซโซลานที่ใช้กันมาก ได้แก่ ถ้ำลอย (Fly ash) นอกจากนี้ยังมีถ้ำแกลบ (Rice husk ash) ดินขาว (Metakaolin) และถ้ำภูเขาไฟ (Volcanic ash) ซึ่งคุณสมบัติด้านความคงทนของคอนกรีตที่ทำจากปูนซีเมนต์ ปอร์ตแลนด์ผสมสารปอซโซลานส่วนใหญ่จะดีขึ้น (Mehta, 2002)

2.1 ถ้ำถ่านหิน

ถ้ำถ่านหินหรือถ้ำลอยได้จากการเผาถ่านหินในโรงไฟฟ้าถ่านหิน โดยถ้ำลอยจะถูกดักจับเก็บไว้ด้วยตัวดักจับแล้วรวบรวมเก็บไว้ในไซโล ถ้ำลอยมีสีเทา เทาดำหรือน้ำตาลมีส่วนประกอบหลักเป็นอัยรูปของซิลิกาและอลูมินาสามารถทำปฏิกิริยาปอซโซลานกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration) ของซีเมนต์กับน้ำได้สารประกอบที่มีความสามารถในการเชื่อมประสานองค์ประกอบทางเคมีของถ้ำลอยประกอบด้วย องค์ประกอบออกไซด์ของแร่ธาตุต่างๆได้แก่ ซิลิกาออกไซด์ (SiO₂) อลูมินาออกไซด์ (Al₂O₃) เหล็กออกไซด์ (Fe₂O₃) แคลเซียมออกไซด์ (CaO) แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO₃) เป็นต้น



ได้มีการศึกษาคอนกรีตผสมเถ้าลอยในปริมาณสูงสำหรับใช้ในงานโครงสร้างครั้งแรกโดย The Canadian Centre for Mineral and Energy Technology (CANMET) ในปลายทศวรรษ 1980s (Malhotra, 1986) คอนกรีตชนิดนี้มีส่วนผสมเถ้าลอยมากกว่าซีเมนต์โดยน้ำหนักและปกติจะผสมที่อัตราส่วน W/B ประมาณ 0.3 กำลังของคอนกรีตในระยะต้นอยู่ในระดับที่ยอมรับได้และมีการพัฒนากำลังและโมดูลัสความยืดหยุ่นในระยะหลังมากขึ้น มีการหดตัวแห้ง (drying shrinkage) และการล้า (creep) ต่ำและมความทนทานสูงเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ปกติ (Langley et al., 1989; Carette et al., 1993; Bilodeau et al., 1994; Bisailon et al., 1994) เชื่อกันว่าในการผสมเถ้าลอยมากกว่า 50 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก เถ้าลอยจะมีผลสำคัญในการเชื่อมประสาน (Berry et al., 1994) เถ้าลอยเป็นที่รู้จักในฐานะวัสดุปอซโซลานมานานโดยตัวเถ้าลอยเองแล้วมีคุณสมบัติน้อยหรือไม่มีคุณสมบัติทางการเชื่อมประสาน (ASTM 618-94a, 1995) และไม่สามารถทำปฏิกิริยากับน้ำได้โดยตรง ซึ่งโดยทั่วไปแล้วการใช้เถ้าลอยในคอนกรีตในงานโครงสร้างมักนิยมใช้แทนที่ซีเมนต์ในช่วง 15 เปอร์เซ็นต์ ถึง 25 เปอร์เซ็นต์ (ACI Committee 211, 1993; Bery et al., 1994) แต่เมื่อมีการใช้เถ้าลอยปริมาณที่สูงจะมีผลต่อคุณสมบัติของคอนกรีตทั้งในการพัฒนากำลังและปฏิกิริยาไฮเดรชันโดยทั่วไป ปริมาณเถ้าลอยที่ผสมในคอนกรีตสำหรับใช้ในงานโครงสร้างจะจำกัดประมาณ 20 ถึง 25 เปอร์เซ็นต์ ของวัสดุประสาน (Zhang, 1995) มาตรฐานในหลายประเทศยังคงจำกัดปริมาณมากที่สุดของเถ้าลอยที่ผสมในคอนกรีตสำหรับงานโครงสร้างประมาณ 20 ถึง 25 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งในคอนกรีตผสมเถ้าลอยในปริมาณสูงปฏิกิริยาปอซโซลานอาจจะยังคงเกิดขึ้นไม่สมบูรณ์เนื่องจากปริมาณเถ้าลอยที่มีอัตราส่วนสูงเมื่อเทียบกับซีเมนต์ ซึ่งเถ้าลอยบางส่วนอาจยังคงอยู่ในสภาพเดิมโดยไม่ทำปฏิกิริยาถึงแม้เป็นระยะหลังการบ่มเป็นเวลานาน (Zhang, 1995)

Feldman et al. (1990) พบว่าในคอนกรีตผสมเถ้าลอยในปริมาณสูง เถ้าลอยจะเริ่มทำปฏิกิริยากับ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ในช่วง 3 ถึง 7 วัน แต่ยังคงมีปริมาณ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ และเถ้าลอยจำนวนมากที่ยังไม่ทำปฏิกิริยาหลัง 91 วัน ของปฏิกิริยาไฮเดรชัน ผลิตภัณฑ์หลักของปฏิกิริยาอยู่ในรูปของ calcium silicate hydrate (C-S-H) และมีอัตราส่วนแคลเซียมต่อซิลิกา (c/s) ที่ต่ำ

Berry et al. (1990) ศึกษากลไกของปฏิกิริยาไฮเดรชันในเฟสที่ใช้เถ้าลอยปริมาณสูงแทนที่ซีเมนต์ โดยทดสอบหาคุณสมบัติทางกายภาพด้านกำลังอัดของมอร์ต้า ทางรูปร่าง (morphology) โดยการใช้วิธี SEM ส่วนประกอบของส่วนของแข็ง (solid-phase) และระดับของปฏิกิริยาไฮเดรชัน โดยการใช้วิธี XRD และการวิเคราะห์ทางด้านอุณหภูมิจึง (thermal analysis) และส่วนประกอบของ pore fluid โดยวิธี high-pressure extraction พบว่าในระบบเถ้าลอยปริมาณสูง (high-volume fly ash system) ทั้งปัจจัยทางกายภาพและทางเคมีมีผลกระทบร่วมกันต่อความแน่น (density) และแรงยึดเหนี่ยวในเฟส ในช่วงต้นผลกระทบทางด้านกายภาพโดยการอุดตันช่องว่างและทางเคมีโดยมีผลต่อการเกิด ettringite หรือการเกิด sulphoaluminate เป็นปัจจัยสำคัญต่อการพัฒนา กำลัง ในระยะยาวปฏิกิริยาไฮเดรชัน มีอิทธิพลจากการเกิด silico-aluminate binder ที่เกี่ยวพันจากปฏิกิริยากับเถ้าลอย Sivasundaram et al. (1989) ศึกษาการก่อตัวเริ่มต้น (initial setting time) และการก่อตัวสุดท้าย (final setting time) ของคอนกรีตผสมเถ้าลอยในปริมาณสูง โดยมี W/C หรือ W/B เดียวกันพบว่า การก่อตัวเริ่มต้นสามารถเปรียบเทียบกันได้กับคอนกรีตควบคุมคือ 7.5 ชั่วโมง ในขณะที่การก่อตัวสุดท้ายถูกหน่วงให้ช้ากว่าคอนกรีตควบคุมประมาณ 3 ชั่วโมง Sivasundaram et al. (1991) รายงานว่าการหน่วงระยะเวลาก่อตัวสามารถเกิดขึ้นได้กับคอนกรีตผสมเถ้าลอยในปริมาณสูงที่ผสมจากเถ้าลอยบางชนิด และ



การหน่วงระยะเวลาก่อตัวนี้ยังสัมพันธ์กับความเข้ากันได้ (compatibility) ระหว่างวัสดุประสานและ superplasticizer และเมื่อใช้ superplasticizer ในปริมาณสูงอาจทำให้เกิดการหน่วงระยะเวลาก่อตัวได้

Carette et al.(1995) ศึกษาโมดูลัสความยืดหยุ่นของคอนกรีตผสมเถ้าลอยปริมาณสูงเปรียบเทียบกับ ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีตปกติที่มีกำลังเท่ากัน พบว่าคอนกรีตผสมเถ้าลอยในปริมาณสูงมีโมดูลัสความยืดหยุ่นสูงกว่าปอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีตปกติ โดยโมดูลัสความยืดหยุ่นที่สูงของอนุภาคเถ้าลอยทำให้เฟสของคอนกรีตผสมเถ้าลอยปริมาณสูงมีโมดูลัสความยืดหยุ่นที่มากกว่าเฟสของคอนกรีตที่ไม่มีการผสมเถ้าลอย และอนุภาคของเถ้าลอยยังปรับปรุงแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคในเฟสให้ดีขึ้นโดยอนุภาคของเถ้าลอยทำหน้าที่เป็นมวลรวมขนาดเล็ก (microaggregate) ที่มีโมดูลัสความยืดหยุ่นที่สูงกว่า matrix ของผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Zhang, 1995)

Jiang (1999) ศึกษา interfacial zone และแรงยึดเหนี่ยวระหว่างมวลรวมและซีเมนต์เฟสในคอนกรีตผสมเถ้าลอยในปริมาณสูง พบว่าหลังคอนกรีตอายุ 28 วัน ไม่มี transition zone ระหว่างมวลรวมและซีเมนต์เฟสให้เห็นอย่างชัดเจน และแรงยึดเหนี่ยวระหว่างมวลรวมและเฟสขึ้นกับกำลังของเฟส โดยเฟสที่มีกำลังสูงจะให้แรงยึดเหนี่ยวที่สูงตามไปด้วย

Atis (2001) ศึกษาความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชันในคอนกรีตผสมเถ้าลอยปริมาณสูงโดยวัดอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นในคอนกรีตภายใต้สภาวะการบ่มแบบ adiabatic พบว่าความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชันในเถ้าลอยคอนกรีตขึ้นกับระดับการแทนที่ซีเมนต์ของเถ้าลอยและปริมาณ Superplasticizer ที่ใช้เพื่อรักษาความสามารถในการทำงานได้ การใช้เถ้าลอยแทนที่ซีเมนต์ทำให้ลดระดับอุณหภูมิสูงสุดและเมื่อเพิ่มระดับการแทนที่ของเถ้าลอยยิ่งเป็นการลดอุณหภูมิที่เกิดขึ้นและ Superplasticizer สามารถชะลอระยะเวลาที่จะเกิดอุณหภูมิสูงสุดโดยคอนกรีตที่มีส่วนผสมเหมือนกันแสดงอุณหภูมิสูงสุดที่เท่ากันโดยไม่ขึ้นกับการใส่ superplasticizer

Lane and Best (1978) ศึกษาผลกระทบของการใช้ Superplasticizer ร่วมกับเถ้าลอยในคอนกรีต และได้สรุปว่า superplasticizer มีความเข้ากันได้กับเถ้าลอย โดยสามารถใช้ร่วมกันได้โดยไม่เกิดผลเสียในคอนกรีต โดยเปอร์เซ็นต์การลดน้ำในคอนกรีตผสมเถ้าลอยที่มีค่าความยุบตัวเท่ากันมีค่าไม่เกิน 15 เปอร์เซ็นต์ ปรับปรุงคุณสมบัติทางด้านการลดน้ำมากกว่าสารลดน้ำมาตรฐานเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ในคอนกรีตผสมเถ้าลอยให้เปอร์เซ็นต์การลดน้ำที่ต่ำกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตปกติที่มีความชื้นเหลวเท่ากันเนื่องจากในความชื้นเหลวเท่ากันคอนกรีตผสมเถ้าลอยจะมีน้ำส่วนเกินที่น้อยกว่าดังนั้นการเติมสารลดน้ำเพื่อนำส่วนเกินนี้มาใช้จึงมีผลกระทบที่น้อยกว่า

ประจित (2526) ใช้เถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะผสมกับคอนกรีต และศึกษากำลังรับแรงอัด โดยใช้อัตราส่วนของเถ้าลอยต่อปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในปริมาณ 0 ถึง 50 เปอร์เซ็นต์ อัตราส่วนของน้ำต่อซีเมนต์เป็น 0.50, 0.75, 1.00 และ 1.25 ตามลำดับจากการทดลองพบว่าสามารถเติมเถ้าลอยเข้าไปในคอนกรีตเพื่อทดแทนซีเมนต์ได้ถึง 25 และ 29 เปอร์เซ็นต์ ในคอนกรีตอายุ 28 วัน และ 45 วัน ตามลำดับ โดยคอนกรีตยังให้กำลังเท่าเดิม



ปริญญาและอินทชัย (2528) พบว่ากำลังอัดระยะแรกของปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอยลิกไนต์มีค่าลดลงตามปริมาณของเถ้าลอยที่เพิ่มขึ้นและเมื่อเวลามากขึ้นกำลังรับแรงอัดของปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอยจะดีขึ้นเพราะเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานและเสนอปริมาณการแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยที่เหมาะสมในช่วง 0 ถึง 40 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งทำให้ปฏิกิริยาปอซโซลานที่เกิดขึ้นชดเชยปฏิกิริยาของซีเมนต์ที่ถูกเถ้าลอยแทนที่ได้มีการศึกษาการใช้เถ้าลอยแม่เมาะเพื่อปรับปรุงความสามารถในการเทได้ของคอนกรีตสด และมีรายงานว่าเมื่อปริมาณการแทนที่ซีเมนต์เพิ่มขึ้นจะช่วยปรับปรุงความสามารถในการเทได้เพิ่มขึ้น แต่มีผลในการลดกำลังอัดของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน (กรกฎ, 2530)

2.2 วัสดุดินขาว

ดินขาว ($Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$) จัดเป็นวัสดุปอซโซลานที่ได้จากการนำเอาดินขาวดิบจากธรรมชาติ ($Al_2SiO_5(OH)_4$) มาปรับปรุงคุณภาพด้วยความร้อน โดยวิธีการเผาในช่วงเวลาและอุณหภูมิที่เหมาะสมซึ่งโดยทั่วไปมีผลึกเป็นลักษณะเป็นอัยรูป (Amorphous) ไม่มีรูปร่างที่แน่นอนมีลักษณะเป็นผงสีขาวหรือชมพูขึ้นอยู่กับปริมาณของธาตุเหล็กของดินขาวประกอบด้วยซิลิกาออกไซด์ (SiO_2) และอลูมินาออกไซด์ (Al_2O_3) ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักและรองลงมาเป็นเฟอร์ริกออกไซด์ (Fe_2O_3) แคลเซียมออกไซด์ (CaO) แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) เป็นต้น โดยองค์ประกอบทางเคมีเหล่านี้จะมีปริมาณที่แตกต่างกันตามแหล่งกำเนิดของดิน อนุภาคของดินขาวโดยเฉลี่ยมีขนาดประมาณ 1.5 ไมครอน (Balaguru, 2001) ตามมาตรฐาน ASTM C168 ดินขาวเป็นสารปอซโซลาน Class N (Raw or Calcined Pozzolan) เมื่อผสมในคอนกรีตดินขาวจะทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ $Ca(OH)_2$ ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันเกิดสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) และแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต (CAH) ที่มีคุณสมบัติในการเชื่อมประสานและให้กำลังแก่คอนกรีต นอกจากนี้ดินขาวยังช่วยเร่งการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์กับน้ำทำให้กำลังอัดของคอนกรีตในช่วงต้นเพิ่มขึ้น (Wild, 1996) นอกจากนี้ดินขาวยังช่วยปรับปรุงคุณภาพของคอนกรีตโดยที่อนุภาคของดินขาวจะเข้าไปแทรกในช่องว่างขนาดเล็ก (Microfiller Effect) ช่วยลดความพรุนและทำให้คอนกรีตมีความทึบแน่นเพิ่มขึ้นส่งผลให้คอนกรีตมีการรับกำลังและความคงทนที่สูงขึ้น ปริมาณดินขาวที่เหมาะสมที่สุดในการแทนที่ซีเมนต์เพื่อช่วยปรับปรุงคุณสมบัติของคอนกรีตมีค่าประมาณร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก (Wild, 1996 ; จิรวัดน์, 2546)

2.3 ทฤษฎีสम्मัติฐานและหรือกรอบแนวความคิดของโครงการวิจัย

เป็นที่ทราบกันดีว่าแล้วว่าคอนกรีตมีปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นส่วนประกอบหลักซึ่งได้จากการใช้พลังงานในการเผาไหม้ที่อุณหภูมิสูงมากประมาณ 1400-1600 องศาเซลเซียส เพื่อให้ได้สารประกอบหลักทางเคมี เช่น ซิลิกา อลูมินา และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งในขบวนการผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ต้องใช้พลังงานที่สูงมากซึ่ง จะส่งผลให้เกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สู่บรรยากาศมีผลทำให้เกิด ภาวะเรือนกระจก (Greenhouse effect) ดังนั้นจึงควรลดปริมาณการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ลง โดยในปัจจุบันได้มีการทำวิจัยกันอย่างกว้างขวางโดยพยายามใช้วัสดุที่เหลือทิ้ง (by Product) จากภาคอุตสาหกรรม เกษตรกรรมและจากธรรมชาติมาผสมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ซึ่งวัสดุที่ใช้ผสมเป็นวัสดุปอซโซลานที่ไม่มีคุณสมบัติเป็นวัสดุประสาน แต่เมื่อผสมกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์จะสามารถก่อตัวและแข็งตัวได้และที่ใช้กันมากได้แก่ เถ้าลอย (Fly ash) เถ้าแกลบ (Rice husk ash) ดินขาว (Metakaolin) และเถ้าภูเขาไฟ (Volcanic ash) ซึ่ง



คุณสมบัติด้านความคงทนของคอนกรีตที่ทำจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมสารปอซโซลานมีคุณสมบัติที่ดียิ่งขึ้น (ASTM,2001; Metha,1977)

2.3.1 กลไกการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีต

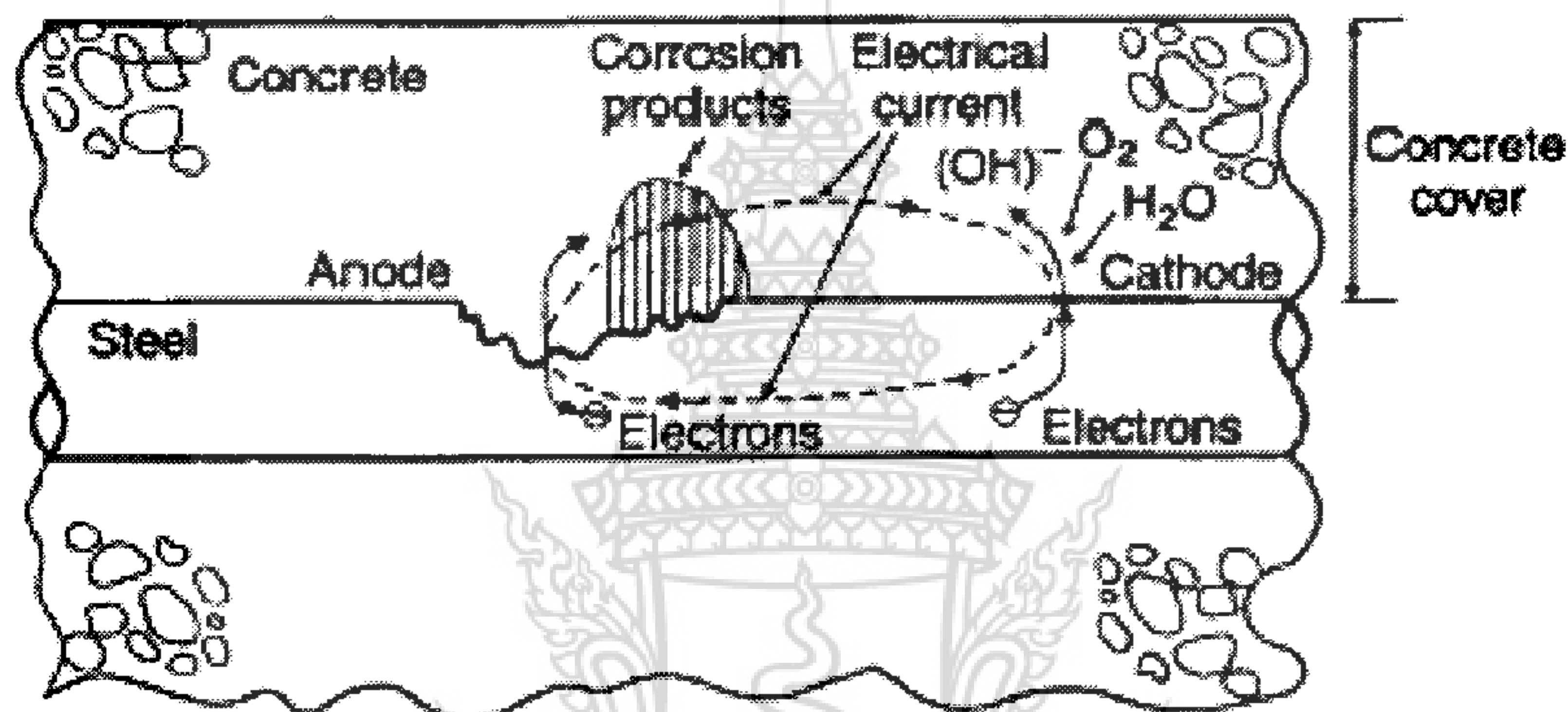
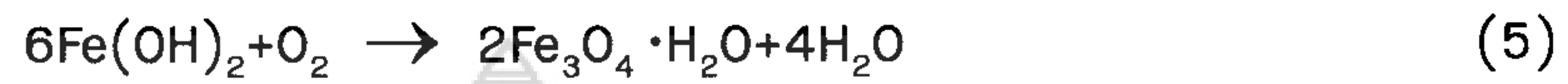
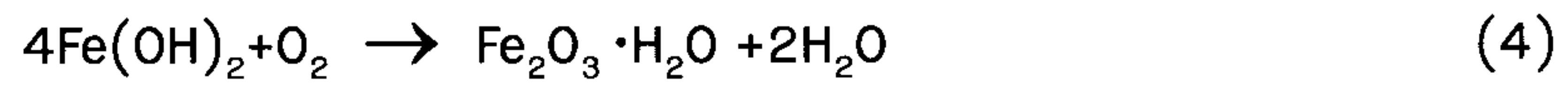
การเกิดสนิมของเหล็กเสริมเกิดจากปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี (Electrochemical Process) โดยมีส่วนประกอบที่สำคัญ 3 ส่วนคือ ปฏิกิริยา Anodic Reaction ปฏิกิริยา Cathodic Reaction และ Electrolyte กระบวนการเกิดสนิมเริ่มจากการมีความชื้นเพียงพอที่จะทำให้อะตอมของเหล็กสูญเสียอิเล็กตรอนกลายเป็น Fe^{2+} ละลายอยู่ในน้ำรอบเหล็กเสริมเรียกบริเวณนี้เป็นขั้ว Anode และอิเล็กตรอนนี้จะสะสมอยู่บริเวณผิวบนเหล็กเสริมทำให้เกิดศักย์ไฟฟ้าขึ้นและส่วนของเหล็กเสริมที่ไม่มีการแตกตัวจะมีศักย์ไฟฟ้าต่ำกว่าและทำหน้าที่เป็นขั้ว Cathode อธิบายได้ดังรูปที่ 2.1 ซึ่งเทียบได้กับการเกิดการกัดกร่อนของเหล็กเสริมในคอนกรีต ดังรูปที่ 2.1 (ก) ซึ่งเกิดจากการที่อะตอมของเหล็กเกิดการแตกตัวเป็น Fe^{2+} และเกิดการสูญเสียอิเล็กตรอนทำให้บริเวณนั้นเกิดเป็นขั้ว Anode ดังสมการที่ 1 อิเล็กตรอนนี้จะมีมากขึ้นบริเวณผิวของเหล็กเสริมทำให้เกิดศักย์ทางไฟฟ้าขึ้นในบริเวณที่ไม่เกิดการแตกตัวของเหล็กจะมีศักย์ไฟฟ้าที่ต่ำกว่าจะทำหน้าที่เป็นขั้ว Cathode อิเล็กตรอนที่เกิดจาก Anode จะเคลื่อนที่ตามเหล็กเสริมมายัง Cathode ที่มีศักย์ไฟฟ้าต่ำกว่าและทำปฏิกิริยากับออกซิเจน (O_2) และน้ำ (H_2O) ที่อยู่บริเวณนี้เกิดไฮดรอกซิลไอออน (OH^-) ขึ้น ดังสมการที่ 2 การเคลื่อนที่ของประจุไฟฟ้าเกิดขึ้นทั้งกระแสภายในเหล็กและกระแสภายนอกเหล็กเสริม กระแสภายในเหล็กเสริมเป็นการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่จาก Anode ไปสู่ Cathode ในขณะที่กระแสภายนอกเหล็กเสริมเป็นการเคลื่อนที่ของไอออน Fe^{2+} และ (OH^-) ผ่านสารละลายในช่องว่าง Pore Solution ของคอนกรีตรอบๆเหล็กเสริม (Bentur et al., 1997) ดังรูปที่ 2.1 (ข) โดยประจุลบคือ (OH^-) จะเคลื่อนที่จาก Cathode สู่ Anode และประจุบวก Fe^{2+} จะเคลื่อนที่จาก Anode สู่ Cathode การเคลื่อนที่ของไอออนผ่าน Pore Solution ของคอนกรีตเป็นปัจจัยที่สำคัญของการเกิดการกัดกร่อน สารละลายในช่องว่างส่วนใหญ่เป็นสารละลายของ Alkali และ Calcium Hydroxide เปรียบเหมือนเป็นสารละลาย Electrolyte ทำให้เกิดการครบวงจรของ Galvanic Cell และเกิดการกัดกร่อนขึ้นได้ แต่ถ้าในช่องว่างนี้แห้งหรือโครงสร้างภายในของคอนกรีตที่บ่มแน่นและช่องว่างภายในเกิดขึ้นไม่ต่อเนื่องการไหลของไอออน ผ่านจะเกิดขึ้นได้ยากขึ้นซึ่งทำให้การเกิดการกัดกร่อนช้าลงจนหยุดการกัดกร่อน



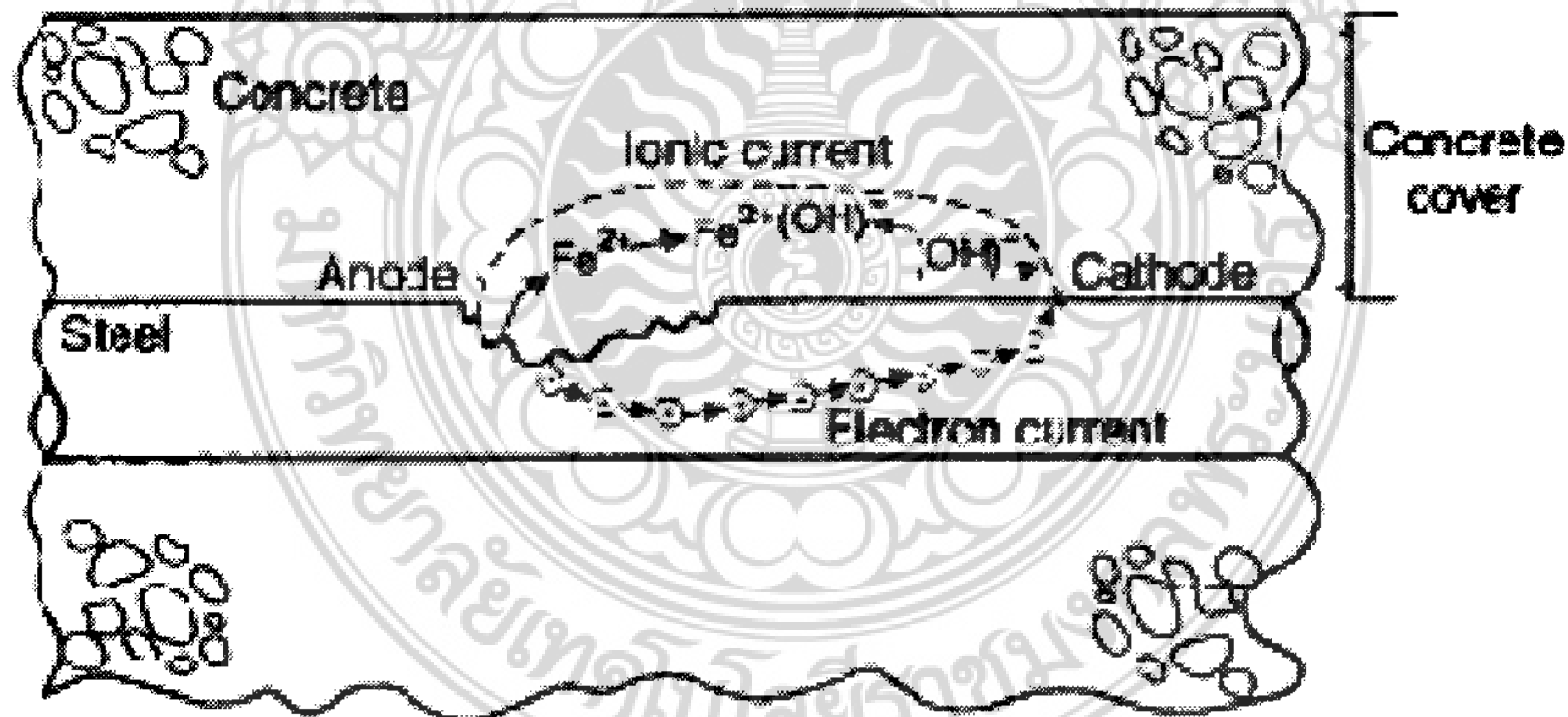
จากการที่เกิด Fe^{2+} และ OH^- จาก Anode และ Cathode ไอออนทั้งสองจะเคลื่อนที่เข้าหากันและทำปฏิกิริยาเกิดเป็น $Fe(OH)_2$ ดังสมการที่ 3 ซึ่งสามารถทำปฏิกิริยาต่อไปเป็น hydrate ferric oxide ($Fe_2O_3 \cdot H_2O$) หรือเรียกว่า red-brown rust และ black magnetite (Fe_3O_4) ซึ่งเกิดจาก Green hydrate magnetite ($Fe_3O_4 \cdot H_2O$) ดังสมการที่ 4, 5 และ 6 ผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาของการกัดกร่อนคือสนิมในรูปแบบต่างๆ ซึ่งมีปริมาณมากกว่าเหล็กก่อนเกิดปฏิกิริยา 4 ถึง 6 เท่า (Nielsen,1985) ดังรูปที่ 2.1 ซึ่งทำให้เกิดแรงดันภายในและคอนกรีตเกิดการแตกร้าวเสียหายได้ นอกจากนี้ในส่วนโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก



บางจุดเกิดการสูญเสียเนื้อที่หน้าตัดเหล็ก และหน้าตัดของเหล็กเสริมลดลงส่งผล ต่อการรับแรงของ โครงสร้างซึ่งถ้าไม่ได้ซ่อมแซมให้ถูกวิธีโครงสร้างอาจเกิดการวิบัติได้



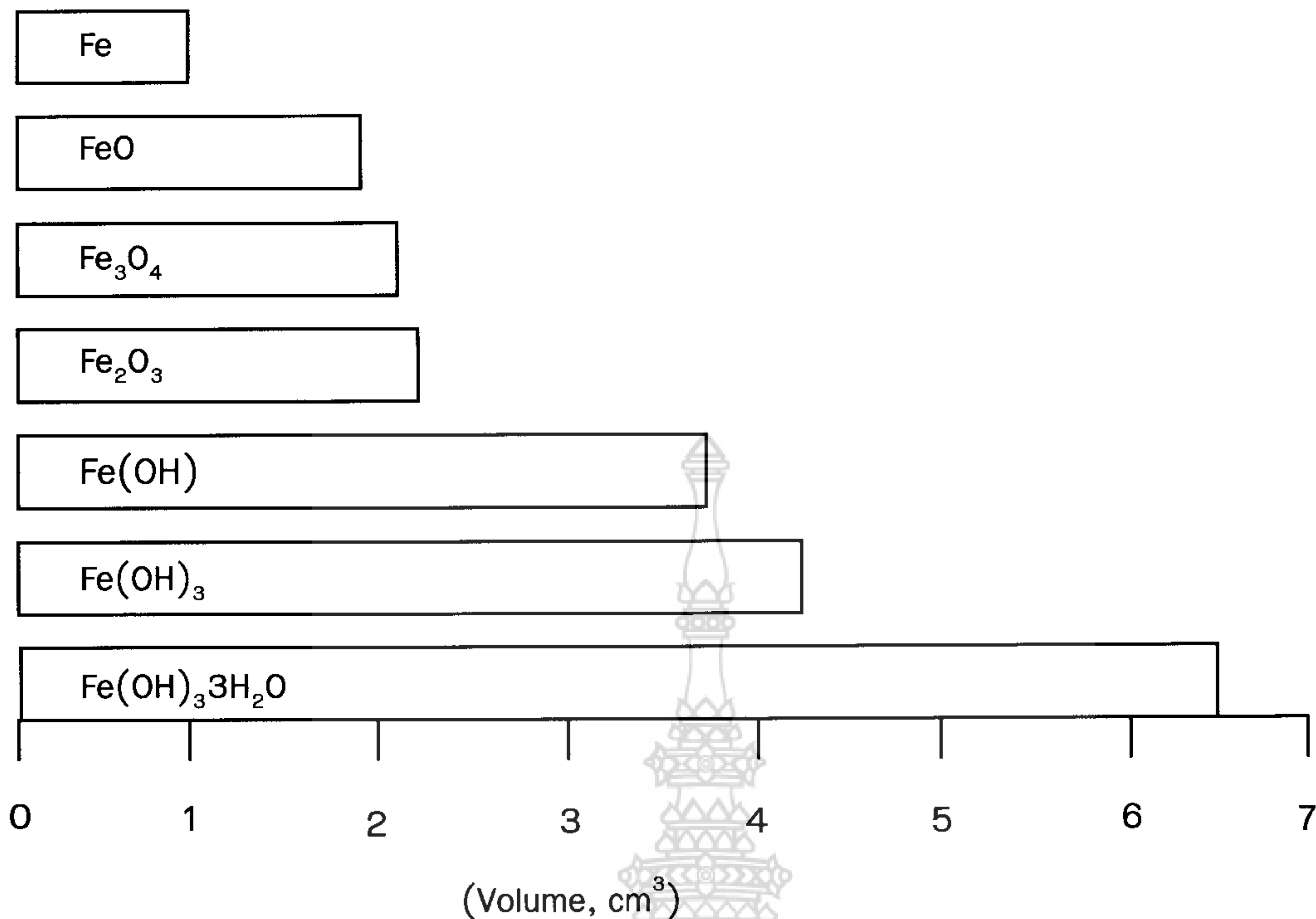
ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นที่ขั้ว Anode และ Cathode



(ข) การเคลื่อนที่ของประจุไฟฟ้าภายในและภายนอกเหล็กเสริม

รูปที่ 2.1 ปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีของการกัดกร่อนบนผิวเหล็กเสริม Bentur et al. (1997)





รูปที่ 2.2 ปริมาตรของเหล็กที่เกิดสนิม Nielsen (1985)

2.3.2 การเกิดสนิมของเหล็กเสริมโดยคลอไรด์ (Steel Corrosion due to Chloride)

การเกิดสนิมของเหล็กเสริมเนื่องจากคลอไรด์ซึ่งเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เกิดการกัดกร่อนของเหล็กเสริม โดยอิออนของคลอไรด์ (Chloride Ions) เป็นตัวที่ทำให้ความเป็นต่างของคอนกรีตที่ป้องกันเหล็กเสริมไม่ให้เกิดสนิมถูกทำลายลดลงจนถึงระดับวิกฤตและถ้ามีน้ำและออกซิเจนเพียงพอก็จะทำให้เหล็กเกิดสนิมได้ แหล่งที่มาของคลอไรด์อาจมีอยู่เองในคอนกรีต หิน ทราย หรือน้ำยาผสมคอนกรีตบางชนิด เช่นแคลเซียมคลอไรด์ที่มักมีอยู่ในสารเร่งการก่อตัว แต่ปัญหาของคลอไรด์ที่กระทบต่อความทนทานของคอนกรีตนั้น ส่วนมากจะมาจากภายนอกคอนกรีตในช่วงที่ใช้งาน เช่น จากน้ำทะเลจากดินหรือจากเกลือที่ใช้ละลายน้ำแข็งในประเทศที่มีอากาศหนาว (De-icing Salt) ซึ่งคลอไรด์อาจจะเข้าสู่คอนกรีตได้โดยวิธี การซึมผ่านเข้าไปในคอนกรีตที่แห้งของน้ำที่มีคลอไรด์ (Capillary Suction) การแพร่ของอิออนของคลอไรด์ (Chloride Ions Diffusion) จากภายนอกที่มีความเข้มข้นของคลอไรด์สูงกว่าภายในของคอนกรีต การซึมผ่านเข้าไปในคอนกรีตของน้ำที่มีคลอไรด์โดยแรงดันของน้ำ โดยทั่วไปแล้วสำหรับคอนกรีตที่แช่อยู่ในทะเลตลอดเวลาจนถึงแม้คลอไรด์จะสามารถซึมผ่านเข้าไปในคอนกรีตได้ดีแต่ถ้าไม่มีออกซิเจนการเกิดสนิมของเหล็กเสริมก็ไม่สามารถเกิดขึ้นได้ ความเสี่ยงที่จะเกิดการกัดกร่อนของเหล็กเสริมมากที่สุด มักพบในบริเวณคลื่นและละอองน้ำ (Splash Zone) รองลงมาเป็นบรรยากาศทะเล (Atmospheric Zone) และบริเวณน้ำขึ้น-น้ำลง (Tidal Zone) ส่วนบริเวณใต้น้ำทะเล (Submerged Zone) จะมีความเสี่ยงต่อการกัดกร่อนเหล็กเสริมน้อยมาก สำหรับในกรณีของสภาพเปียกสลับแห้งนั้น น้ำทะเลจะเข้าสู่คอนกรีตที่แห้งโดย Absorption หรือ Capillary Suction จนกระทั่งคอนกรีตอยู่ในสภาพอิ่มตัว เมื่อสภาพภายนอกเปลี่ยนเป็นแห้ง น้ำที่ผิวคอนกรีตก็จะระเหยออกไปทิ้งไว้แต่คราบเกลือเมื่ออยู่ในสภาพเปียกอีก ความเข้มข้นของคลอไรด์ที่ ไกลผิวก็



จะสูงขึ้น คลอไรด์ไอออนซึ่งมีความเข้มข้นสูงที่บริเวณผิวจะซึมเข้าสู่ภายในโดยการแพร่ซึ่งในแต่ละรอบของการเปียกและแห้งจะทำให้บริเวณใกล้ผิวมีความเข้มข้นสูงขึ้นเรื่อยๆ และจะเข้าไปสู่ภายในคอนกรีตและสู่บริเวณเหล็กเสริมมากขึ้น โดยปกติแล้วคอนกรีตจะเปียกได้เร็วแต่จะแห้งได้ช้ากว่ามากและภายในคอนกรีตนั้นไม่สามารถทำให้แห้งได้โดยสมบูรณ์ ดังนั้นการแพร่เข้าไปในคอนกรีตที่แช่อยู่ในน้ำทะเลตลอดเวลาจึงช้ากว่าการเข้าไปของการเปียกสลับแห้งโดยน้ำทะเล โดยทั่วไปแล้วคอนกรีตที่สภาพแห้งนานกว่าสภาพเปียกมักเร่งให้คลอไรด์ไอออนเข้าสู่คอนกรีตได้เร็ว ดังนั้นคอนกรีตที่ถูกน้ำทะเลเป็นบางครั้งหรือช่วงแห้งนานจะมีโอกาสเกิดปัญหาการกัดกร่อนของเหล็กเสริมมากกว่าคอนกรีตที่ประสบกับสภาวะช่วงแห้งสั้น การกัดกร่อนจะเริ่มเกิดขึ้นก็ต่อเมื่อปริมาณคลอไรด์ไอออน มีมากพอที่ผิวของเหล็กเสริม (Threshold Content of Chloride Ions)

สภาวะของคลอไรด์ในคอนกรีตนั้น จะมีคลอไรด์บางส่วนที่ถูกจับยึด (Fixed Chloride) โดยกลไกต่อไปนี้

- ❖ Chemical Binding คลอไรด์บางส่วนจะถูกจับโดยผลผลิตของปฏิกิริยาไฮเดรชัน
- ❖ Physical Binding คลอไรด์บางส่วนสามารถถูกยึดด้วยแรงทางกายภาพ (Surface Force) ได้บนผิวของ Hydration Product เช่น C-S-H และ C-A-H อีกทั้งสามารถถูกยึดอยู่บนผิวของวัสดุที่เป็นของแข็งที่ไม่มีปฏิกิริยาเช่น มวลรวม หรือ ผงฝุ่นหินได้ด้วย

การป้องกันการเกิดสนิมของเหล็กเสริมเนื่องจากคลอไรด์แบ่งออกเป็น 2 แนวทาง โดยการปรับปรุงคุณภาพของคอนกรีตและเหล็กเสริม อาทิเช่น

- ❖ ออกแบบและใช้คอนกรีตที่มีความชื้นน้ำต่ำมากๆ จะทำให้คลอไรด์แพร่เข้าไปในคอนกรีต ได้ยาก การใช้ปริมาณน้ำในคอนกรีตที่ต่ำ การลดอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์
- ❖ การใช้สารประเภท Filler เพื่อเพิ่มความทึบน้ำ เช่น ซิลิกาฟูม สารปอซโซลานในปริมาณที่เหมาะสม นอกจากจะช่วยให้คอนกรีตที่ทึบน้ำมากขึ้นแล้วยังช่วยจับยึดคลอไรด์ได้มากกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์อย่างเดียว
- ❖ ใช้สารเคลือบผิวคอนกรีตเช่น Epoxy เป็นต้น
- ❖ ใช้สารผสมในคอนกรีตบางชนิด เช่น Calcium หรือ Sodium Nitrite ที่สามารถช่วยทำให้ปฏิกิริยา Anodic นั้นเกิดยากขึ้น
- ❖ ออกแบบคอนกรีตไม่ให้เกิดการแตกร้าวเพราะรอยแตกร้าวจะเป็นบริเวณที่คลอไรด์สามารถเข้าไปในคอนกรีตได้ง่ายขึ้น

ป้องกันการเกิดสนิมของเหล็กเสริมโดยอาศัยขบวนการทางไฟฟ้าเคมี มี 3 วิธี ได้แก่

1) Cathodic Protection

กระบวนการลดอัตราการเกิดสนิมโดยเปลี่ยนแปลงศักย์ไฟฟ้าของขั้วลบให้เท่ากับศักย์ไฟฟ้าของขั้วบวก (วันชัย, 2548) จากกลไกของการเกิดสนิมในเหล็กเสริม พบว่าการเกิดสนิมจะเกิดขึ้นเมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหล



หมุนเวียน เพราะการเกิดสนิมเป็น (Electrochemical Process) ดังนั้นหากสามารถทำให้ทุกๆ จุดบนเหล็กเสริมมีศักย์ไฟฟ้าเท่ากันได้ ก็จะไม่เกิดการไหลของกระแสไฟฟ้าขึ้น สามารถทำได้โดย (ii) ติดโลหะซึ่งสามารถเกิดสนิมได้ง่ายกว่าเหล็ก ซึ่งสูญเสียอิเล็กตรอนได้ง่ายกว่าไว้กับ เหล็กเสริม เรียกโลหะนี้ว่า Sacrificial Anode โดยโลหะชนิดนี้จะทำหน้าที่แทนเหล็กในขบวนการ Anodic โลหะที่สูญเสียอิเล็กตรอนได้ดีกว่าเหล็กเสริมเช่น สังกะสี เป็นต้น เมื่อใช้โลหะเหล่านี้ ปฏิกิริยา Anodic จะเปลี่ยนเป็น $Zn \rightarrow Zn^{2+} + 2e^-$ ดังนั้นต้องมีการเปลี่ยนโลหะที่สูญเสียอิเล็กตรอนแทนเหล็กเมื่อโลหะชนิดนี้ผุกร่อนจนหมด

2) โดยการติดตั้งไฟฟ้ากระแสตรงสู่เหล็กเสริม

Electrodeposition เริ่มจากเมื่อผ่านกระแสไฟฟ้าสู่น้ำทะเล แคลเซียมไอออน (Ca^{2+}) และแมกนีเซียมไอออน (Mg^{2+}) ซึ่งมีประจุบวกในน้ำทะเลจะตกผลึกเป็น แคลเซียมคาร์บอเนต ($CaCO_3$) หรือแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ $Mg(OH)_2$ ที่ผิวบริเวณขั้วลบ (ขั้วคอนกรีต) เนื่องจากผลึกที่เกิดขึ้นนี้มีความสามารถละลายน้ำได้น้อยมาก และยังช่วยเพิ่มความตึงน้ำให้กับคอนกรีต จึงสามารถเป็นเครื่องป้องกันคลอไรด์ไอออนจากน้ำทะเลได้ (วันชัยและคณะ, 2548)

การกัดกร่อนในเหล็กเสริมเป็นหนึ่งในความเสียหายที่เกิดขึ้นกับโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก ซึ่งส่งผลกระทบต่อโดยรวมของการเกิดสนิมในเหล็ก คือ กำลังรับแรงของโครงสร้างลดลงเนื่องจากพื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริมน้อยลงโดยเฉพาะการต้านทานความล้า (Fatigue strength) และความสามารถในการแอ่นตัวหรือการเปลี่ยนรูปร่าง (Elongation ability) ของโครงสร้างก็ลดลงด้วย (Neal et al., 1990) นอกจากนี้การเกิดสนิมของเหล็กเสริมยังทำให้เกิดการแตกร้าวและหลุดออกของคอนกรีตหุ้มภายนอก ดังรูปที่ 2.3 เนื่องจากปริมาณที่เพิ่มขึ้นของเหล็กเสริมจากการเกิดสนิม จะทำให้เกิดแรงดึงในเนื้อคอนกรีตซึ่งทำให้คอนกรีตที่มีระยะหุ้มที่มีความหนาน้อยนั้นเกิด การแตกร้าวเป็นผลให้เกิดความเสียหายกับโครงสร้างมากยิ่งขึ้น (Scannell and Sohaghpurwala, 1993)

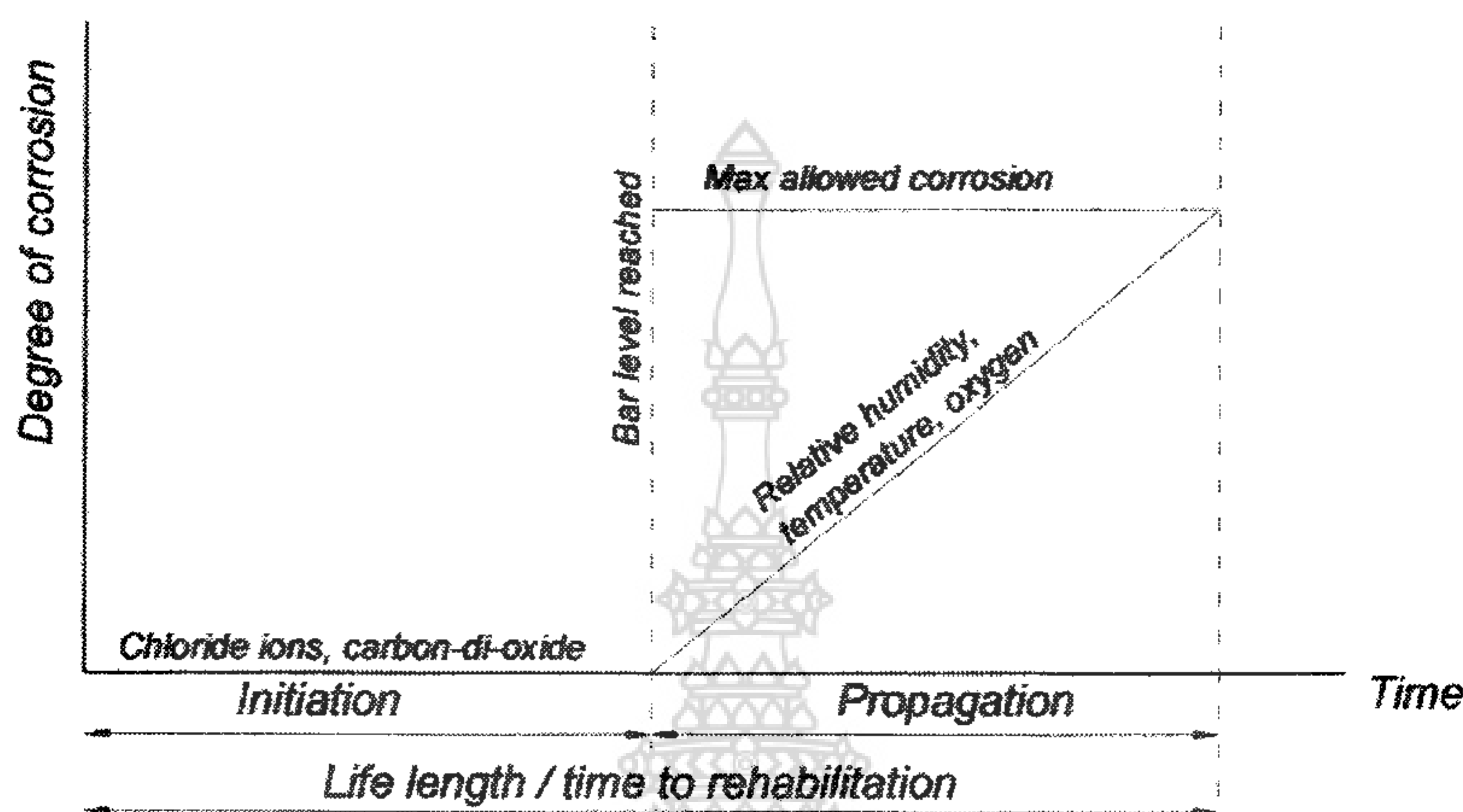


รูปที่ 2.3 ความเสียหายของโครงสร้างคอนกรีตเนื่องจากการเกิดสนิมของเหล็กเสริม

แต่โดยทั่วไปแล้ว เหล็กเสริมที่อยู่ในคอนกรีตเสริมเหล็กนั้น จะอยู่ในสถานะที่ไม่เกิดสนิมเนื่องจากมี Passivation film ที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration) ของซีเมนต์กับน้ำในระหว่างการพัฒนากำลังของ



คอนกรีต ซึ่งมีความเป็นด่างสูง มีค่า pH ประมาณ 13 ซึ่งสามารถป้องกัน การเกิดสนิมได้ (Bentur et al., 1997) อย่างไรก็ตามโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กทั่วไปนั้น มักจะอยู่ในสภาพแวดล้อมที่อาจจะสัมผัสสารเคมี สภาพที่เป็นกรด หรือสภาพแวดล้อมที่มีความเสี่ยงต่อการเกิดสนิม เช่น โครงสร้างที่อยู่บริเวณชายฝั่งทะเลนั้น ความเข้มข้นของคลอไรด์จะเป็นตัวทำลายสภาพความเป็นด่างของคอนกรีต เป็นต้น ซึ่งเป็นตัวเร่งให้การเกิดสนิมในเหล็กเสริมเร็วขึ้น ดังแบบจำลองการกัดกร่อนของเหล็กเสริม ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 แบบจำลองการกัดกร่อนของเหล็กเสริม Tuutti (1982)

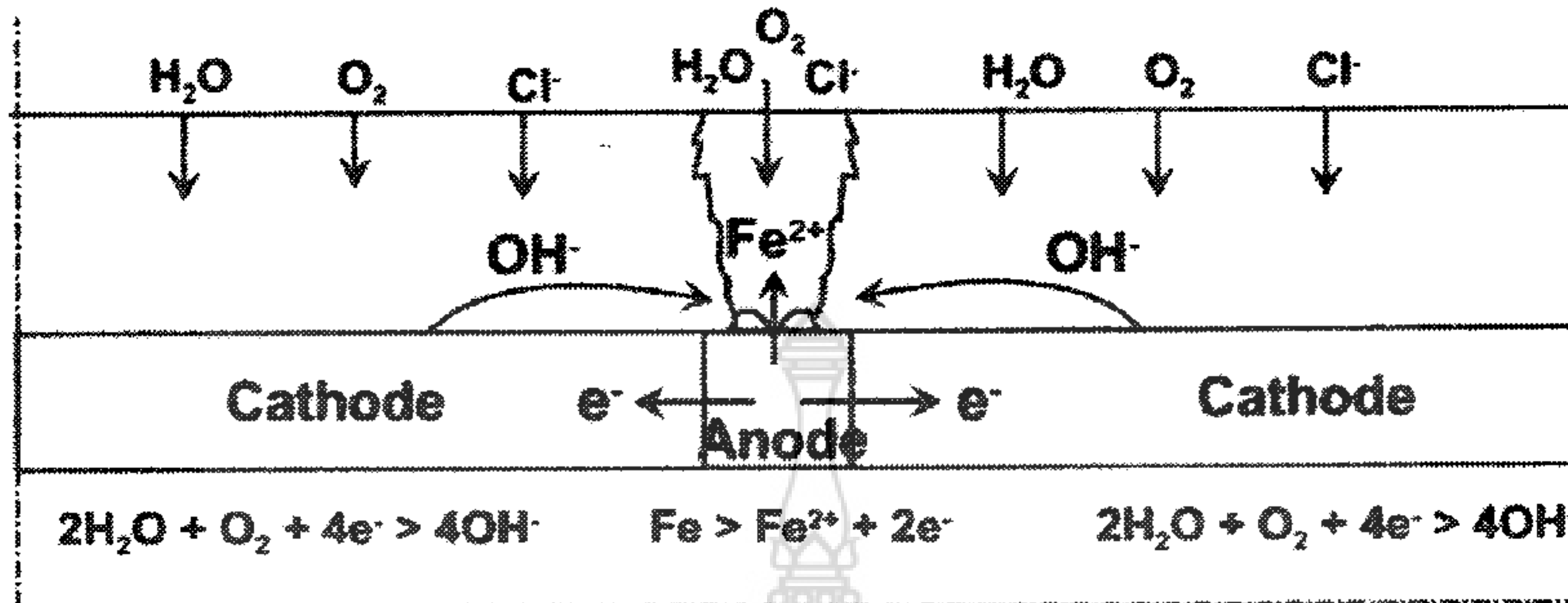
2.3.3 กลไกการกัดกร่อนของเหล็กเสริม

การกัดกร่อนในเหล็กเสริมของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กนั้น เกิดได้หลายสาเหตุด้วยกัน โดยที่สาเหตุหลักของการเกิดสนิม คือ การเกิดรอยแตกร้าวของโครงสร้าง (Pullar-Strecker, 1987) ที่มักเกิดจากการหดตัวในขณะที่คอนกรีตแข็งตัว (สำหรับโครงสร้างที่มีขนาดใหญ่) รอยต่อของคอนกรีตที่เกิดจากการก่อสร้าง สภาพแวดล้อม หรือเกิดจากสภาวะการใช้งานเป็นต้น โดยปกติแล้วและอากาศสามารถซึมผ่านเนื้อคอนกรีตไปถึงเหล็กเสริมได้ในปริมาณที่น้อยขึ้นอยู่กับความทึบของเนื้อคอนกรีต แต่การเกิดการแตกร้าวของโครงสร้างจะเป็นการเร่งให้น้ำและออกซิเจนเข้าไปถึงบริเวณเหล็กได้รวดเร็วและมากยิ่งขึ้น ทำให้การเกิดสนิมของเหล็กเสริมเร็วและรุนแรงมากขึ้น และอีกสาเหตุหนึ่งของการเกิดสนิมในเหล็กเสริมของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก คือ การสูญเสียสภาพการเป็นด่าง (Depassivation) เนื่องจากสภาพแวดล้อม โดยเฉพาะคาร์บอนไดออกไซด์ ในอากาศและการซึมผ่านของคลอไรด์ไอออนในสารละลาย เข้าสู่ช่องว่างในคอนกรีต ทั้งสองสาเหตุนี้ (คาร์บอนไดออกไซด์และคลอไรด์ไอออน) ถ้าความเข้มข้นมากพอ จะทำให้ความเป็นด่างของคอนกรีตลดลง ซึ่งสาเหตุนี้นำไปสู่การเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตได้ (คณะกรรมการคอนกรีตและวัสดุ วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย, 2543)

คลอไรด์เป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เกิดการกัดกร่อนของเหล็กเสริมได้ โดยการกัดกร่อนจะเริ่มขึ้นเมื่อคลอไรด์ไอออนมีความเข้มข้นมากพอ (Threshold concentration) ที่ผิวหน้าของเหล็กเสริม (Neville, 2002) ซึ่งจะทำให้ค่า pH ลดลงจนถึงระดับวิกฤต ทำให้สภาพการเป็นด่างของคอนกรีตที่ป้องกันการเกิดสนิมของเหล็กเสริมถูกทำลาย (Depassivation) ถ้ามีน้ำและออกซิเจนเพียงพอจะทำให้เหล็กเสริมเกิดสนิมได้ ดังรูปที่



2.5 โดยที่คลอไรด์ในคอนกรีตมีแหล่งที่มาได้จากทั้งภายในและภายนอก แต่ปัญหาของคลอไรด์ที่กระทบต่อความทนทานของคอนกรีตนั้น ส่วนมากเป็นคลอไรด์ที่มาจากแหล่งภายนอกเข้าสู่เนื้อคอนกรีตในช่วงการใช้งาน เช่น จากน้ำทะเล พื้นดิน หรือเกลือที่ใช้ละลายน้ำแข็งในประเทศที่มีอากาศหนาวเย็น เป็นต้น



รูปที่ 2.5 ปฏิกริยาเคมีไฟฟ้าของการกัดกร่อนของเหล็กเสริมในคอนกรีตจากคลอไรด์ Raupach (1996)

เหล็กเสริมในคอนกรีตจะเป็นสนิมได้ก็ต่อเมื่อเงื่อนไข 3 ประการดังต่อไปนี้

ความเป็นต่างในคอนกรีตลดลงจนปฏิกิริยาอะโนดิก (Anodic process) สามารถเกิดขึ้นได้ ซึ่งความเป็นต่างในระดับที่จะทำให้ปฏิกิริยาอะโนดิกเกิดขึ้นได้นั้น จะมีค่าของ pH ต่ำกว่าระดับ 9 ถึง 10 และมักจะเรียก ระดับวิกฤต (Critical level) ของความเป็นต่าง

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

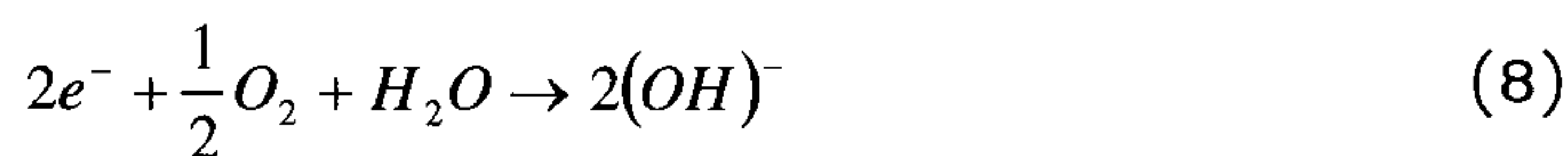
มีปริมาณออกซิเจนเพียงพอในการทำปฏิกิริยาเพื่อการเกิดสนิม ซึ่งปกติแล้วออกซิเจน ในปริมาณที่เพียงพอในการเกิดสนิมมักจะแพร่เข้าสู่คอนกรีตบริเวณเหล็กเสริมโดยผ่านทางช่องว่างที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ (Unsaturated pores) นั่นคือแพร่ผ่านอากาศในช่องว่างแต่การแพร่ของออกซิเจนผ่านทางช่องว่างที่อิ่มตัวด้วยน้ำ (Saturated pores) จะเป็นไปได้ยาก เนื่องจากออกซิเจนละลายในน้ำได้น้อยมาก ดังนั้นคอนกรีตที่อิ่มตัวด้วยน้ำอยู่ตลอดเวลาจะไม่เกิดสนิมในเหล็กเสริม

กลไกของการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีต ดังรูปที่ 2.6 จะเริ่มต้นด้วยการที่ความเป็นต่างของคอนกรีตที่บริเวณที่หุ้มรอบๆ เหล็กเสริมอยู่ลดลงจนถึงระดับวิกฤตและมีความชื้นเพียงพอทำให้เหล็กเกิดปฏิกิริยา Electrolysis ขึ้น ดังสมการที่ 7

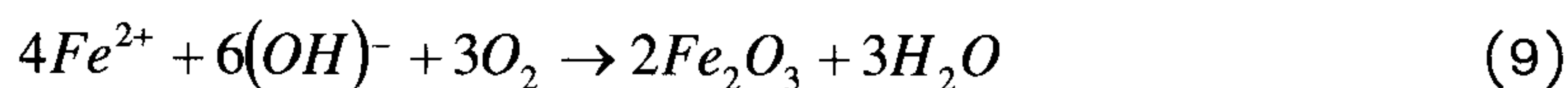


โดยเหล็กจะแตกตัวเป็นไอออน (Fe^{2+}) และอิเล็กตรอนจะวิ่งไปตามเหล็กปฏิกิริยานี้เรียกว่า กระบวนการอะโนดิก (Anodic process) ต่อจากนั้น $2e^-$ ที่เกิดจากปฏิกิริยาอะโนดิกจะไปรวมตัวกับน้ำและออกซิเจนทำให้เกิดเป็นไฮดรอกซิลไอออน ($(OH)^-$) ดังสมการที่ 8

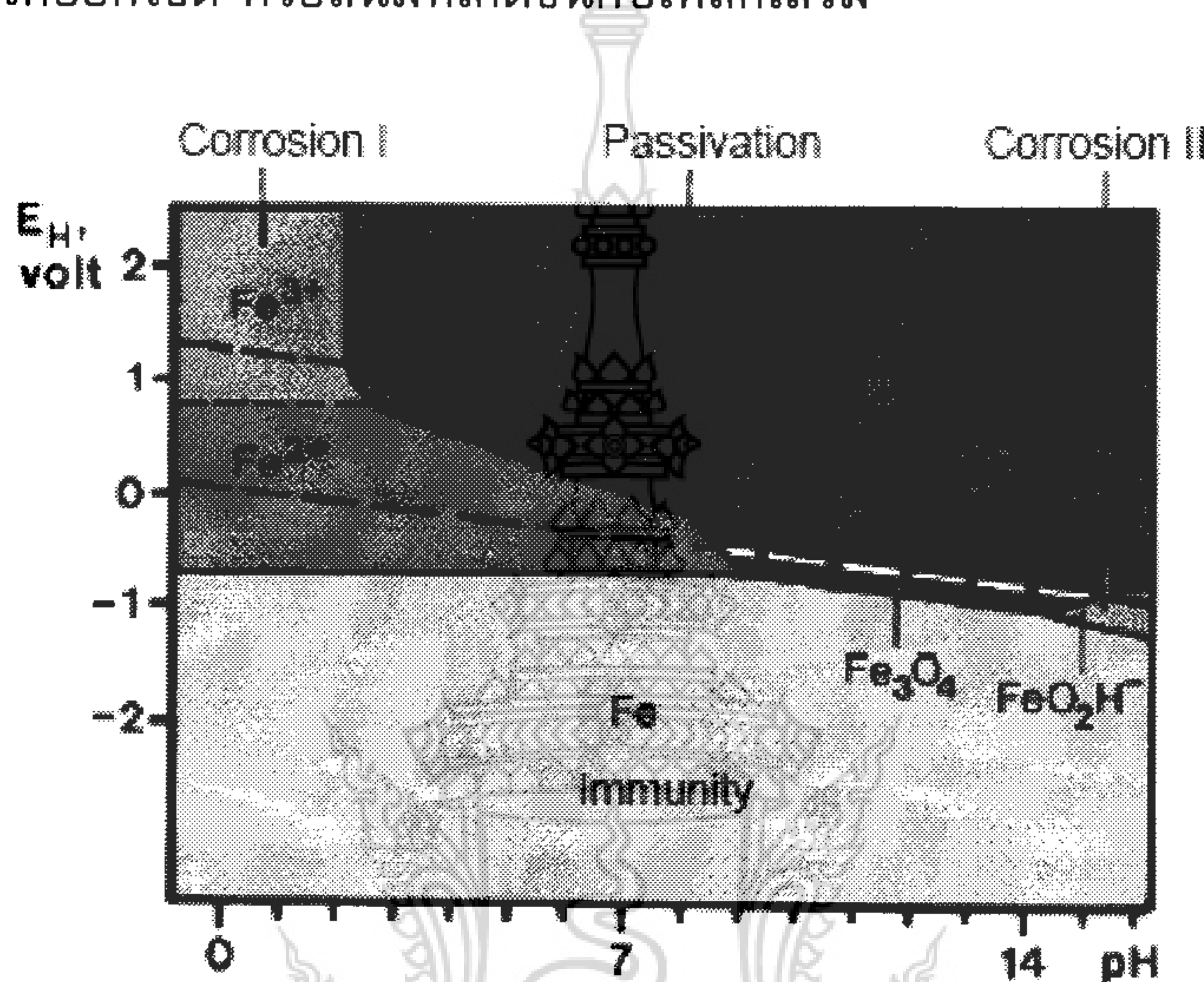




ซึ่งปฏิกิริยานี้เรียกว่ากระบวนการแคโทดิก (Cathodic process) หลังจากนั้น ปฏิกิริยาการเกิดสนิมเกิดขึ้น ดังสมการที่ 9



โดยที่ Fe_2O_3 คือ เฟอริกออกไซด์ หรือสนิมที่เกิดขึ้นกับเหล็กเสริม



รูปที่ 2.6 กลไกการเกิดสนิมของเหล็กเสริม Pourbaix (1972)

โดยทั่วไปแล้วแหล่งของคลอไรด์ ที่มีผลกระทบต่อโครงสร้างคอนกรีตนั้นมาจากน้ำทะเล สำหรับคอนกรีตที่แช่อยู่ในน้ำทะเลตลอดเวลา นั้น ถึงแม้คลอไรด์สามารถซึมผ่านเข้าไปในคอนกรีตได้ดี แต่ถ้าไม่มีออกซิเจน การเกิดสนิมของเหล็กเสริมก็ไม่สามารถเกิดขึ้นได้ จึงไม่เป็นปัญหานัก

ความเสี่ยงที่จะเกิดการกัดกร่อนของเหล็กเสริมมากที่สุด มักพบในบริเวณคลื่นและละอองน้ำ (Splash zone) รองลงมาเป็นบริเวณบรรยากาศทะเล (Atmospheric zone) และบริเวณน้ำขึ้นน้ำลง (Tidal zone) ส่วนบริเวณใต้น้ำทะเล (Submerged zone) จะมีความเสี่ยงต่อการกัดกร่อนเหล็กเสริมน้อยมาก ในบริเวณใต้น้ำทะเล ความเสี่ยงต่อการเกิดสนิมของเหล็กเสริมมีน้อย เนื่องจากมีความเข้มข้นของออกซิเจนน้อย และอัตราการแพร่ของออกซิเจนเข้าไปในคอนกรีตต่ำมาก เนื่องจากช่องว่างภายในคอนกรีตเป็นช่องว่างอิมมิดด้วยน้ำ ซึ่งออกซิเจนละลายน้ำได้น้อยมากทำให้อัตราการแพร่เกิดขึ้นน้อยถึงแม้ว่าจะมีปริมาณออกซิเจนมาก ในบริเวณน้ำขึ้นน้ำลง แต่การเกิดสนิมก็ถูกจำกัดโดยอัตราการแพร่ที่ต่ำของออกซิเจนผ่านช่องว่างที่อิมมิดด้วยน้ำของคอนกรีตในช่วงที่คอนกรีตเปียก



ในกรณีของสภาพเปียกสลับแห้งนั้น น้ำทะเลจะเข้าสู่คอนกรีตที่แห้งโดย Absorption หรือ Capillary suction จนกระทั่งคอนกรีตอยู่ในสภาพที่อิ่มตัว (Saturated) เมื่อสภาพภายนอกเปลี่ยนเป็นแห้ง น้ำที่ผิวคอนกรีตก็จะระเหยออกไปทิ้งไว้แต่คราบเกลือ เมื่ออยู่ในสภาพเปียกอีก ความเข้มข้นของคลอไรด์ที่ใกล้ผิวก็จะสูงขึ้น ดังนั้นไอออนของคลอไรด์ (Chloride ions) ซึ่งมีความเข้มข้นสูงที่บริเวณผิว จะซึมเข้าสู่ภายในโดยการแพร่ ซึ่งในแต่ละรอบของการเปียกและการแห้ง จะทำให้คลอไรด์บริเวณใกล้ผิวมีความเข้มข้นสูงขึ้นเรื่อยๆ และจะเข้าไปสู่ภายในคอนกรีตและสู่บริเวณเหล็กเสริมมากขึ้น โดยปกติแล้วคอนกรีตจะเปียก (Saturated) ได้เร็ว แต่จะแห้งได้ช้ากว่ามาก และภายในของคอนกรีตนั้นไม่สามารถทำให้แห้งได้โดยสมบูรณ์ ดังนั้นการแพร่ของไอออนของคลอไรด์เข้าไปในคอนกรีตที่แช่อยู่ในน้ำทะเลตลอดเวลาจึงช้ากว่าการเข้าไปของคลอไรด์โดยการเปียกสลับแห้งโดยน้ำทะเล

การเคลื่อนตัวของไอออนของคลอไรด์ไปในคอนกรีตนั้น ขึ้นอยู่กับระยะเวลาของสภาพเปียกและแห้ง ซึ่งขึ้นอยู่กับสถานที่และสภาพแวดล้อม เช่น อุณหภูมิ ความชื้น การไหลของน้ำทะเล ทิศทางลม ทิศทางแสงอาทิตย์ และการใช้งานของโครงสร้าง เป็นต้น ทำให้ในโครงสร้างเดียวกัน แต่ละส่วนอาจจะประสบกับสภาวะเปียกและแห้งได้ไม่เหมือนกัน โดยทั่วไปแล้วคอนกรีตที่สภาพแห้งนานกว่าสภาพเปียกมักจะเร่งให้อิออนของคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีตได้เร็วขึ้น ดังนั้นคอนกรีตที่ถูกน้ำทะเลเป็นบางครั้ง (ช่วงแห้งนาน) จะมีโอกาสเกิดปัญหาการกัดกร่อนของเหล็กเสริม มากกว่าคอนกรีตที่ประสบกับสภาวะช่วงแห้งสั้น การกัดกร่อนจะเริ่มเกิดขึ้นก็ต่อเมื่อ ปริมาณไอออนของคลอไรด์ (Chloride ions) มีมากพอที่ผิวของเหล็กเสริม (Threshold content of chloride ions) ซึ่งทำให้ค่าความเป็นด่างของคอนกรีตลดลงจนถึงระดับวิกฤต

2.3.4 การเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นของคลอไรด์ที่สัมพันธ์กับสิ่งแวดล้อมคลอไรด์

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

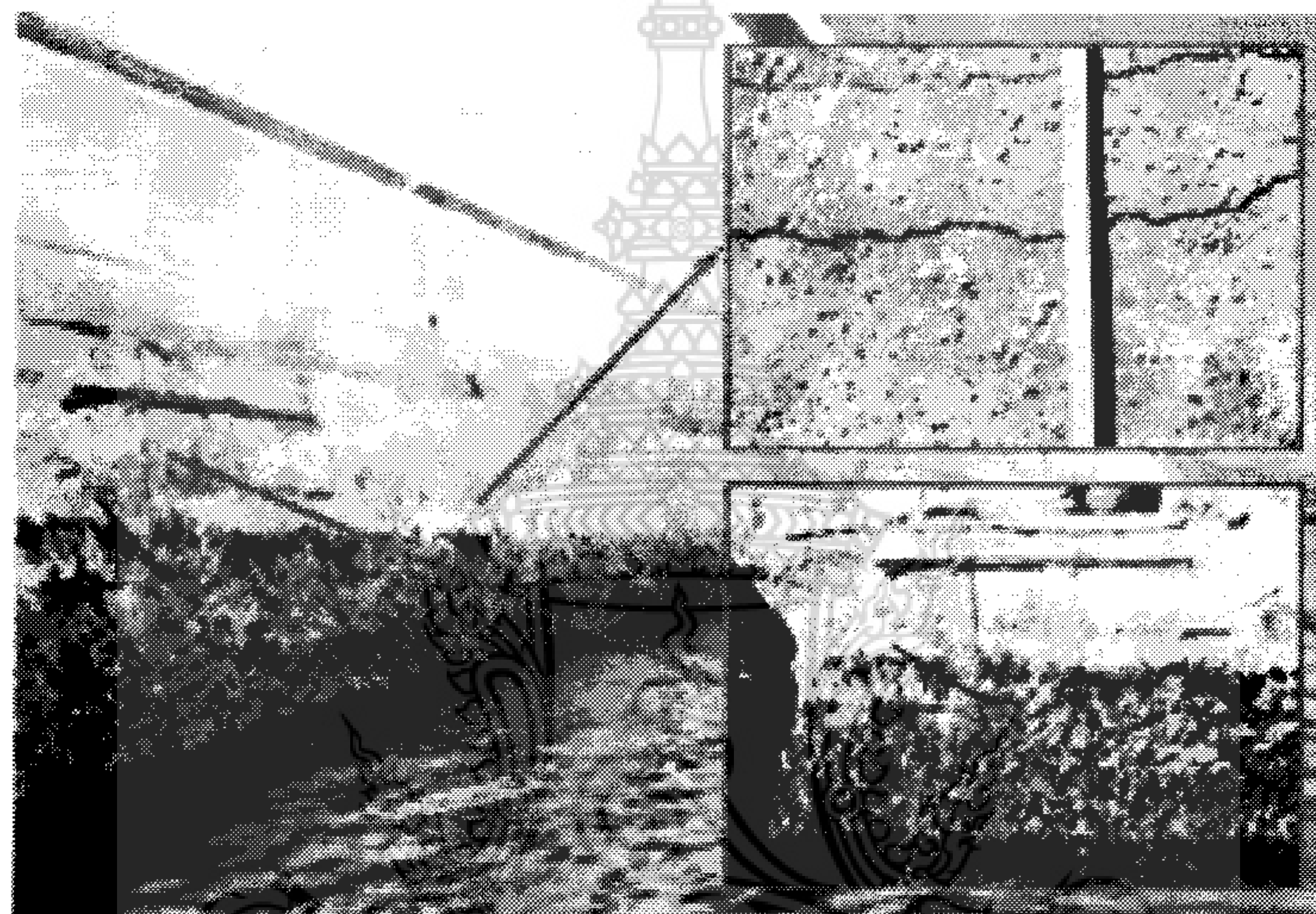
1) ในกรณีของสภาวะเปียกสลับกับแห้งด้วยน้ำทะเล

ดังรูปที่ 2.7 ในขณะที่บริเวณผิวคอนกรีตแห้ง คอนกรีตจะสูญเสียเฉพาบน้ำซึ่งจะระเหยออกจากผิวของคอนกรีต ทิ้งเกลือไว้ ในบริเวณผิวคอนกรีตที่แห้ง แต่พอคอนกรีตเข้าสู่สภาวะเปียก น้ำเกลือจะซึมเข้าไปในคอนกรีตอย่างรวดเร็ว เมื่อสภาวะเปียกสลับแห้งดำเนินไปหลายๆ รอบ ก็จะทำให้ความเข้มข้นของคลอไรด์ในบริเวณผิวของคอนกรีตสูงกว่าในสิ่งแวดล้อมได้

2) ในกรณีของสภาวะเปียกตลอดเวลาในน้ำทะเลหรือน้ำใต้ดินที่มีเกลือ



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



รูปที่ 2.7 โครงสร้างคอนกรีตที่สภาวะเปียกสลับแห้งด้วยน้ำทะเล

2.3.5 กำลังการยึดเหนี่ยวของเหล็กเสริม

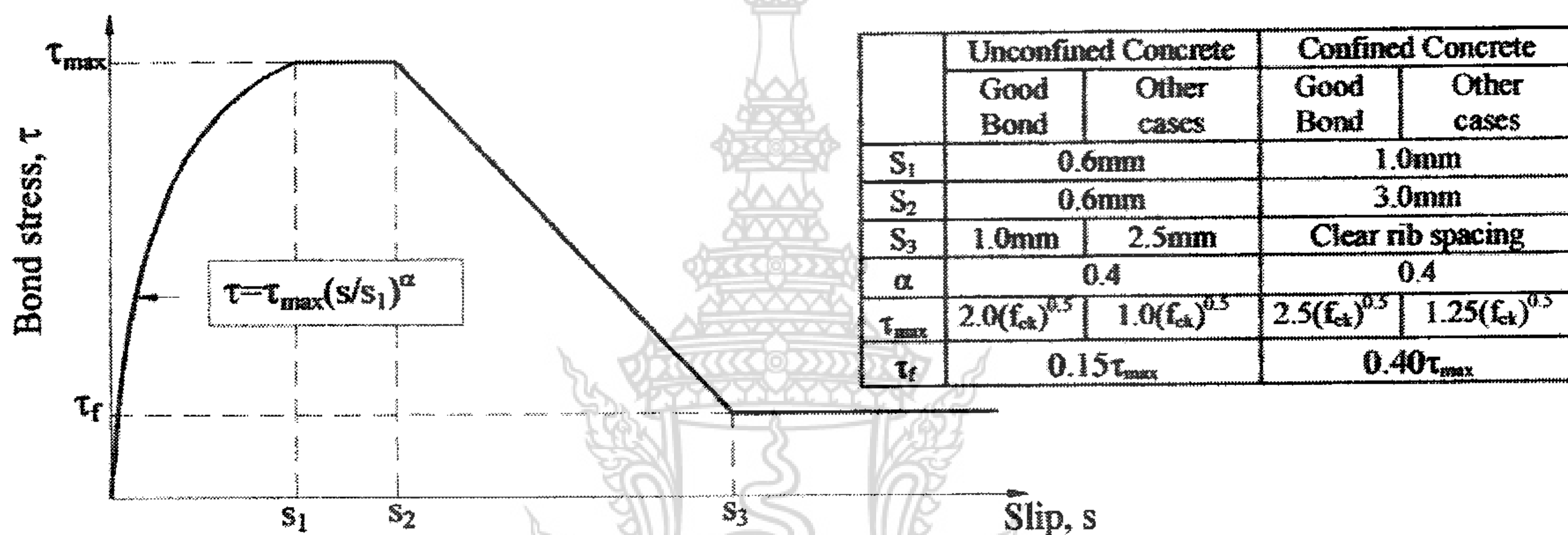
การออกแบบเพื่อหาเหล็กเสริมตามยาวที่ใช้ต้านทานโมเมนต์ดัด และเหล็กเสริมทางขวาง ที่ใช้เพื่อต้านทานแรงเฉือนส่วนที่เกินกว่าความต้านทานแรงเฉือนของคอนกรีต อาศัยสมมุติฐานการยึดเหนี่ยวระหว่างคอนกรีตและเหล็กเสริมเป็นไปอย่างสมบูรณ์ นั้นหมายความว่าในขณะที่โครงสร้างรับน้ำหนักบรรทุกจะสมมุติว่าเหล็กเสริมไม่เกิดการครูดหรือลื่นหลุด (Slip) จากคอนกรีตที่หุ้มห่อแต่อย่างใด หรือมีการลื่นไถลเกิดขึ้นมีค่าน้อยมาก มิฉะนั้นเหล็กเสริมจะไม่มีกำลังรับแรงได้ตามต้องการอันเป็นสาเหตุให้ส่วนโครงสร้างไม่สามารถรับน้ำหนักบรรทุกได้ตามต้องการ

ความต้านทานต่อการลื่นไถลดังกล่าวได้จากแรงยึดเหนี่ยวระหว่างคอนกรีตและเหล็กเสริม ซึ่งเป็นแรงเฉือนรอบผิวสัมผัสระหว่างคอนกรีตและเหล็กเสริมในขณะที่ยึดกันรับน้ำหนักบรรทุก กำลังยึดเหนี่ยวได้จาก ก) การยึดเกาะทางเคมี (Chemical adhesion) เมื่อคอนกรีตแข็งตัว ข) การยึดเกาะโดยอาศัยแรงเสียด (Friction) รอบผิวเหล็กเสริมกับคอนกรีต และ ค) การยึดรั้งทางกล (Mechanical anchorage) กำลังยึดเหนี่ยวสำหรับเหล็กกลมผิวเรียบกับคอนกรีตได้จากสองแบบแรกซึ่งขึ้นกับ การทำคอนกรีต (การผสม การเท และการทำ



ให้แน่น) แต่กำลังของเหล็กกลมผิวเรียบมีค่าไม่มากนัก อย่างไรก็ตามก็สามารถเพิ่มกำลังยึดเหนี่ยวให้มากขึ้น โดยการทำให้เกิดการยึดรั้งทางกล เช่น การของอที่ปลายเหล็กเสริมกลมผิวเรียบและให้มีระยะฝังยึดในคอนกรีตอย่างเพียงพอ หรือการใช้เหล็กข้ออ้อย เป็นต้น

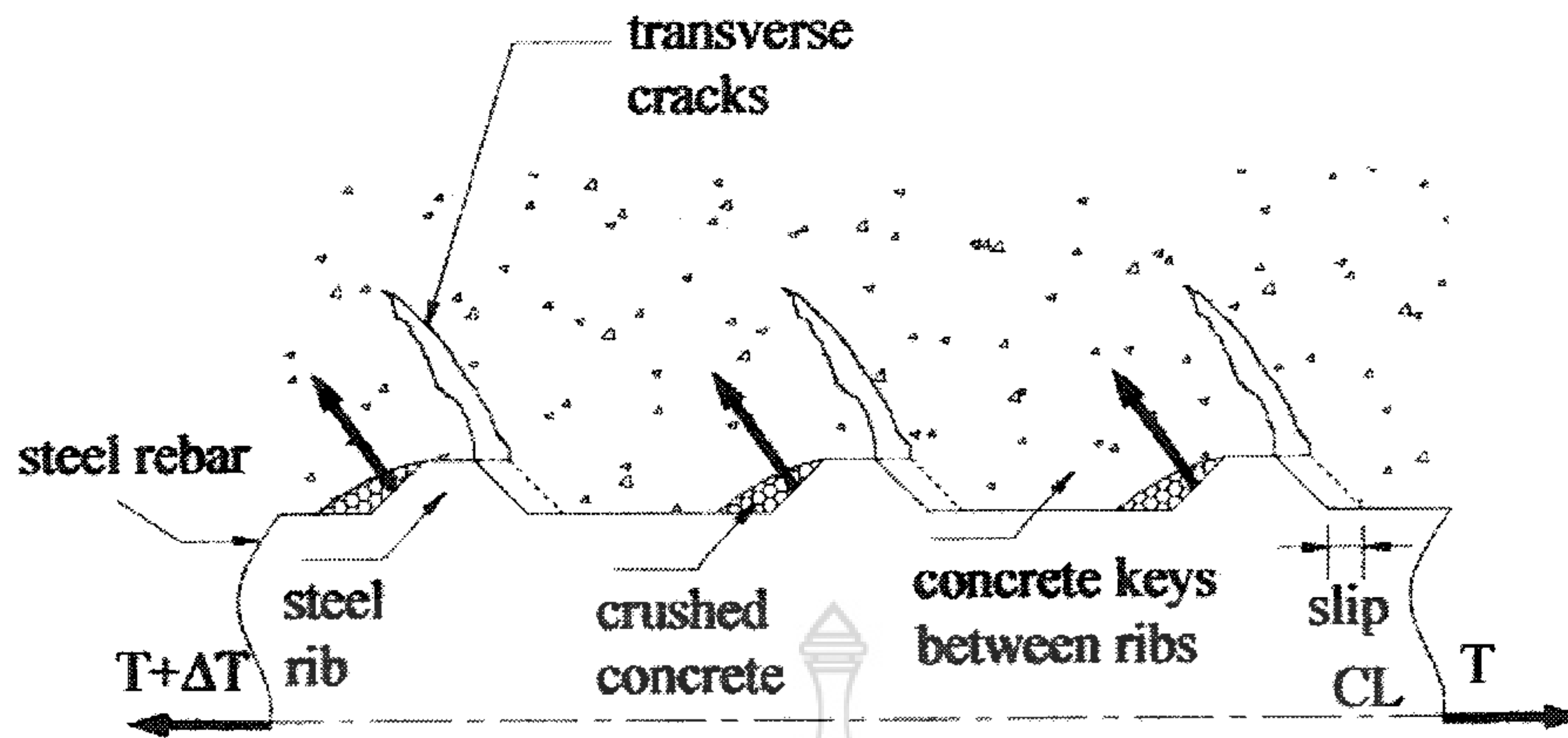
การวิบัติเนื่องจากแรงยึดเหนี่ยว (Bond failure) เป็นการปริแยกของคอนกรีต (Splitting) ตามแนวยาวของเหล็กเสริม และมักเกิดขึ้นหลังจากที่ปรากฏรอยร้าวในแนวทแยงที่เป็นผลมาจากแรงดึงทแยง ซึ่งเมื่อรวมผลของการเฉือนในเหล็กเสริม (Dowel action) ก็จะช่วยให้รอยปริแยกเคลื่อนตัวเข้าหาจุดรองรับเร็วขึ้น หากปลายของส่วนของโครงสร้างนั้นปราศจากการยึดรั้งที่เพียงพอก็จะเกิดการวิบัติทันทีที่ดัดแบบจำลองกำลังการยึดเหนี่ยวของเหล็กเสริม (Bond stress-slip model) ดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 Bond stress-slip model CEB (1993)

สำหรับคานที่เสริมเหล็กข้ออ้อยซึ่งมีผิวของเหล็กเสริมเป็นข้อหรือปล้อง กำลังยึดเหนี่ยว จะมีค่ามากขึ้น เพราะเมื่อกำลังยึดเหนี่ยวที่ได้จากการยึดเกาะทางเคมีและจากแรงเสียดทานหายไป ก็จะมีเหลือกำลังยึดเหนี่ยวที่ได้จากส่วนของข้อหรือปล้องของเหล็กเสริมอีก กล่าวคือเมื่อเหล็กเสริมเริ่มจะเลื่อนไถล ส่วนของข้อหรือปล้องของเหล็กเสริมโดยรอบจะดันคอนกรีตที่หุ้มห่อให้ต้องรับแรงกดอัดหรือแรงแบกทาน (Bearing) และแรงเฉือน ดังรูปที่ 2.9 จนกว่าแรงที่กระทำนั้นมีค่าเกินกว่ากำลังต้านทานของคอนกรีต คอนกรีตในบริเวณนั้นจึงค่อยๆปริแยกและแตกออก (Wedging action) ทั้งนี้ความกว้างของรอยร้าวและการโก่งตัวจะน้อยกว่าที่เกิดขึ้นในคานที่เสริมด้วยเหล็กกลมผิวเรียบ





รูปที่ 2.9 การแตกร้าวของคองกรตเนื่องจากแรงกดอัด fib (2000)

ผลจากการทดลองพบว่าปัจจัยที่สำคัญนอกเหนือจากกำลังวัสดุและขนาดของเหล็กเสริมที่ใช้ กำลังยึดเหนี่ยวยังขึ้นกับระยะคองกรตที่หุ้มเหล็กเสริม ระยะห่างระหว่างเหล็กเสริมและเสริมเหล็กตามขวาง หากระยะของคองกรตใต้เหล็กเสริมมีค่ามากพอ คองกรตจะสามารถต้านทานแรงดึงได้มากขึ้นและช่วยชะลอการแตกหรือปริแยกออกในแนวตั้งได้ และเมื่อระยะห่างระหว่างเหล็กเสริมมากขึ้นซึ่งจะทำให้มีเนื้อที่คองกรตหุ้มเหล็กแต่ละเส้นมากขึ้นก็จะช่วยต้านทานการแตกหรือปริออกของคองกรตในแนวนอนได้ นอกจากนี้ หากส่วนโครงสร้างนั้นมีเหล็กเสริมทางขวาง เช่น เหล็กปลอก กำลังต้านทานแรงดึงจะมากขึ้นซึ่งช่วยชะลอการเกิดรอยร้าวจากแรงดึงได้ นั้นเสมือนว่าเหล็กเสริมทางขวางช่วยชะลอการแตกหรือปริแยกออกทั้งในแนวตั้งและแนวนอน ทำให้ช่วยลดระยะที่จะต้องฝังเหล็กเสริมในคองกรตลงได้

2.3.6 จโโพลโเมอร์ (Geopolymer)

การผลิตคองกรตโดยไม่ใช้ปูนซีเมนต์เป็นส่วนผสม โดยใช้วัสดุปอซโซลานที่ประกอบด้วยสารซิลิกา (SiO₂) และอลูมินา (Al₂O₃) ในการทำวัสดุซีเมนต์ที่เรียกว่า จโโพลโเมอร์ (Geopolymer) จากการทำปฏิกิริยาระหว่างซิลิกอน (Si) และอลูมิเนียม (Al) ให้เป็นโมเลกุลลูกโซ่ในลักษณะของโพลโเมอร์ (Polymer) ดังสมการที่ 10 (Davidovits, 1999)



โดย M เป็นธาตุอัลคาไล

- การยึดเกาะ (bound)

Z จำนวนโมเลกุลของ Si - O₂ เท่ากับ 1, 2 หรือ 3

N ปริมาณโมเลกุลของการทำโมเลกุลลูกโซ่ (degree of polymerization)

w จำนวนโมเลกุลของน้ำ



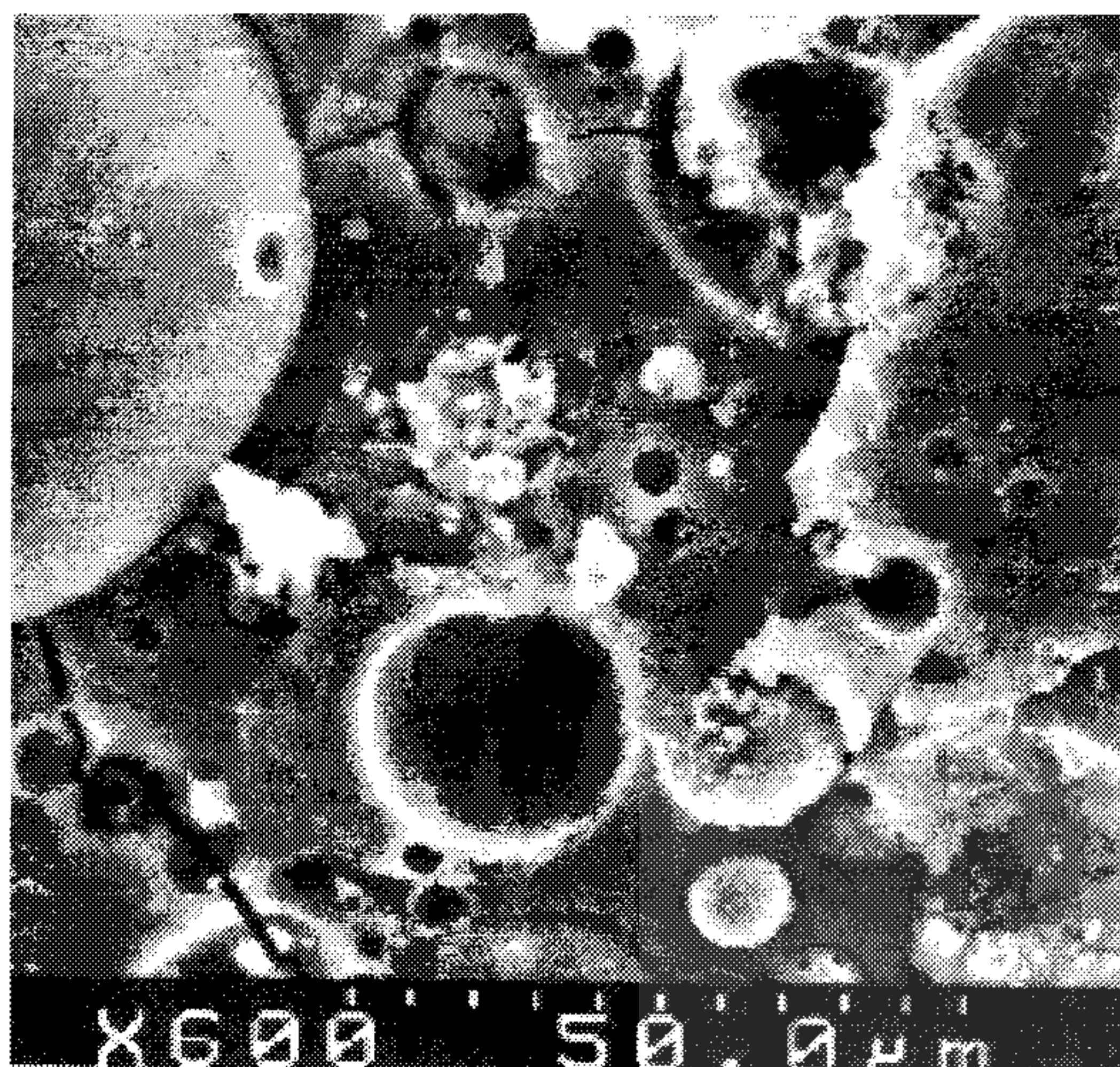
การทำปฏิกิริยาถูกโซของ Si และ Al จะใช้สารละลายที่เป็นด่างสูงและใช้ความร้อนเป็นตัวกระตุ้น จากงานวิจัยพบว่าสามารถใช้แก้วด้านหินที่ได้จากการเผาถ่านหินที่มีองค์ประกอบของซิลิกาและอลูมินาในการทำอิโพลีเมอร์ที่สามารถรับแรงได้ดีเช่นเดียวกับการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (Swanepoel and Strydom, 2002) โดยการผสมแก้วด้านหินกับสารเร่งปฏิกิริยา (Activator) และใช้ความร้อนในช่วง 60-90 องศาเซลเซียส ในการเร่งปฏิกิริยา สารเร่งที่ใช้เป็นพวกอัลคาไลไฮดรอกไซด์ (Alkali hydroxide) และอัลคาไลซิลิเกต (Alkali silicate)

สารจีโพลีเมอร์ (Geopolymers) หรือเรียกอีกอย่างว่า โพลีไซอะเลตส์ (Polysialates) เป็นสารประเภทหนึ่งของวัสดุอลูมิโนซิลิเกต (Aluminosilicate) (Davidovits, 1999; Van et. al., 2002) ที่ไม่มีรูปพรรณสัณฐานที่แน่นอนประกอบกันขึ้นที่อุณหภูมิปกติหรือสูงกว่า จีโพลีเมอร์ประกอบด้วยการเชื่อมขวาง (Cross-linked units) ของเตตระไฮดรอล (Tetrahedral) ของ AlO_4 และ SiO_4 ที่มีประจุลบที่มีความสมดุล (Charge balancing cations) ซึ่งได้มาจากประจุของโลหะ อัลคาไล เช่น Li^+ , Na^+ และ K^+ สารจีโพลีเมอร์จึงทำมาจากสารอลูมินาและซิลิกาที่ไวต่อการทำปฏิกิริยา และใช้สารละลายของอัลคัลไล (Aqueous alkaline, MOH) โดย M คืออัลคัลไล สารจีโพลีเมอร์เกิดจากการก่อตัวโดยปฏิกิริยาที่ไม่รุนแรงทำให้องค์ประกอบของแก้วลอยรวมตัวกัน และสารประกอบอื่นต่อปฏิกิริยาเกิดการอัดตัวทำให้แข็งแรง คล้ายกันกับการเกิดแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH)

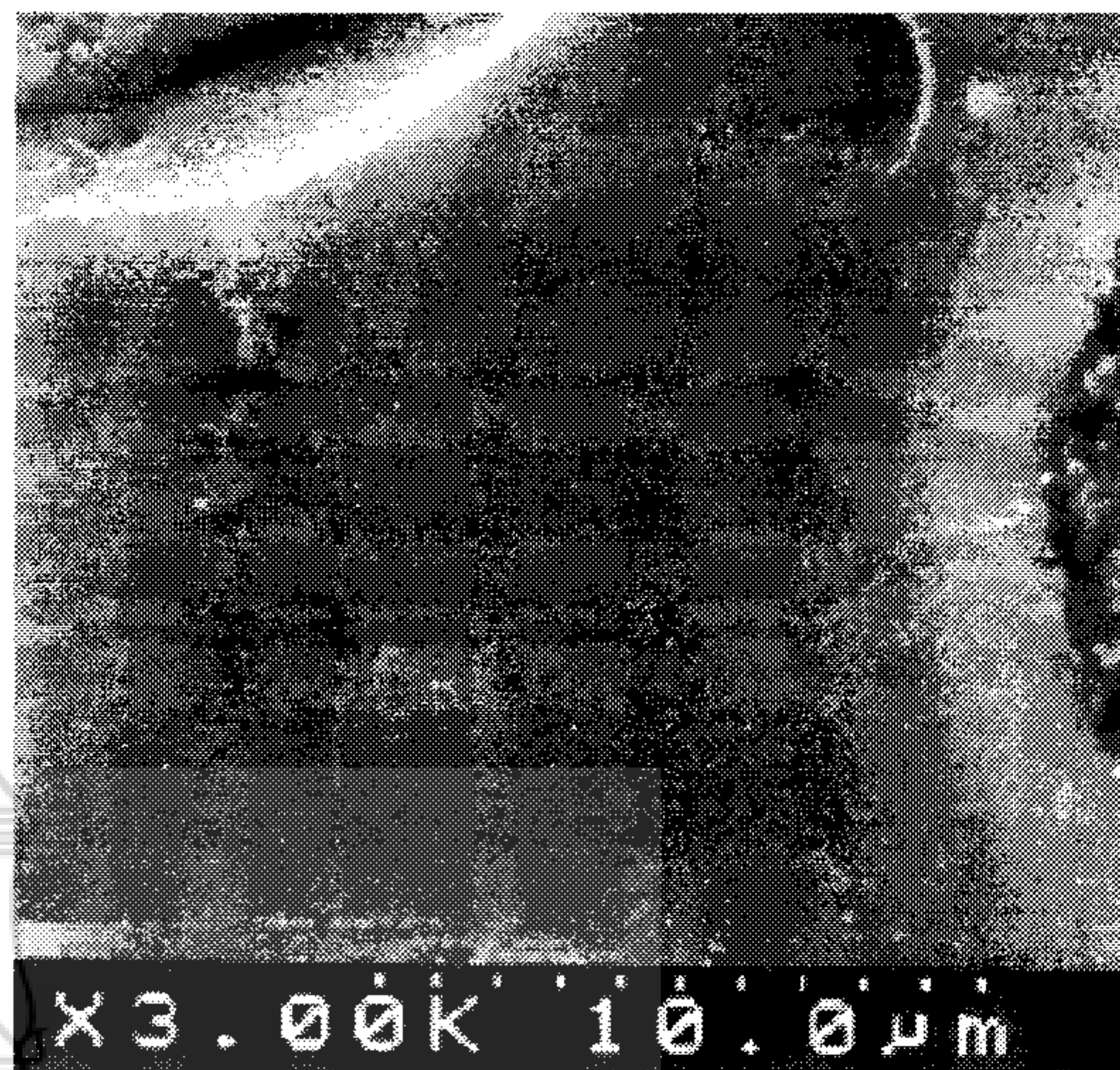
1) โครงสร้างจุลภาค

รูปที่ 2.10 แสดงภาพถ่าย SEM ของจีโพลีเมอร์เกลออยเฟสต์ รูปที่ 2.10 ก แสดงเนื้อเฟสต์ ที่แน่นโพรงอากาศ รอยแตก และแก้วลอยที่เหลืออยู่จากการทำปฏิกิริยาในชั้นต่างกัน รูปที่ 2.10 ข แสดงภาพขยายใหญ่ขึ้น และสามารถมองเห็นแก้วลอยที่ทำปฏิกิริยาเกือบสมบูรณ์เกือบเป็นเนื้อเดียวทั้งหมด แต่ยังมีร่องรอยของความกลมของแก้วลอยหลงเหลือให้เห็นอยู่ในเนื้อของจีโพลีเมอร์ อย่างไรก็ตามแก้วลอยบางส่วนจะทำปฏิกิริยาไม่หมดและบางส่วนยังคงทำปฏิกิริยา สาเหตุหลักมาจากปริมาณของสารละลายไม่เพียงพอหรือไม่ทั่วถึง และเมื่อปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นแก้วลอยบางส่วนที่ยังไม่ทำปฏิกิริยาหรือทำปฏิกิริยาไม่หมดจะถูกผนวกและกลายเป็นส่วนหนึ่งของเนื้อจีโพลีเมอร์ แก้วลอยกลางเมื่อทำปฏิกิริยาจะมีโพรงเหลืออยู่รูปที่ 2.10 ค และรูปที่ 2.10 ง โพรงส่วนหนึ่งจึงมาจากโพรงอากาศที่หลงเหลืออยู่ อีกส่วนหนึ่งมาจากโพรงภายในแก้วลอยที่เป็นซิโนสเฟียร์และพลีโรสเฟียร์

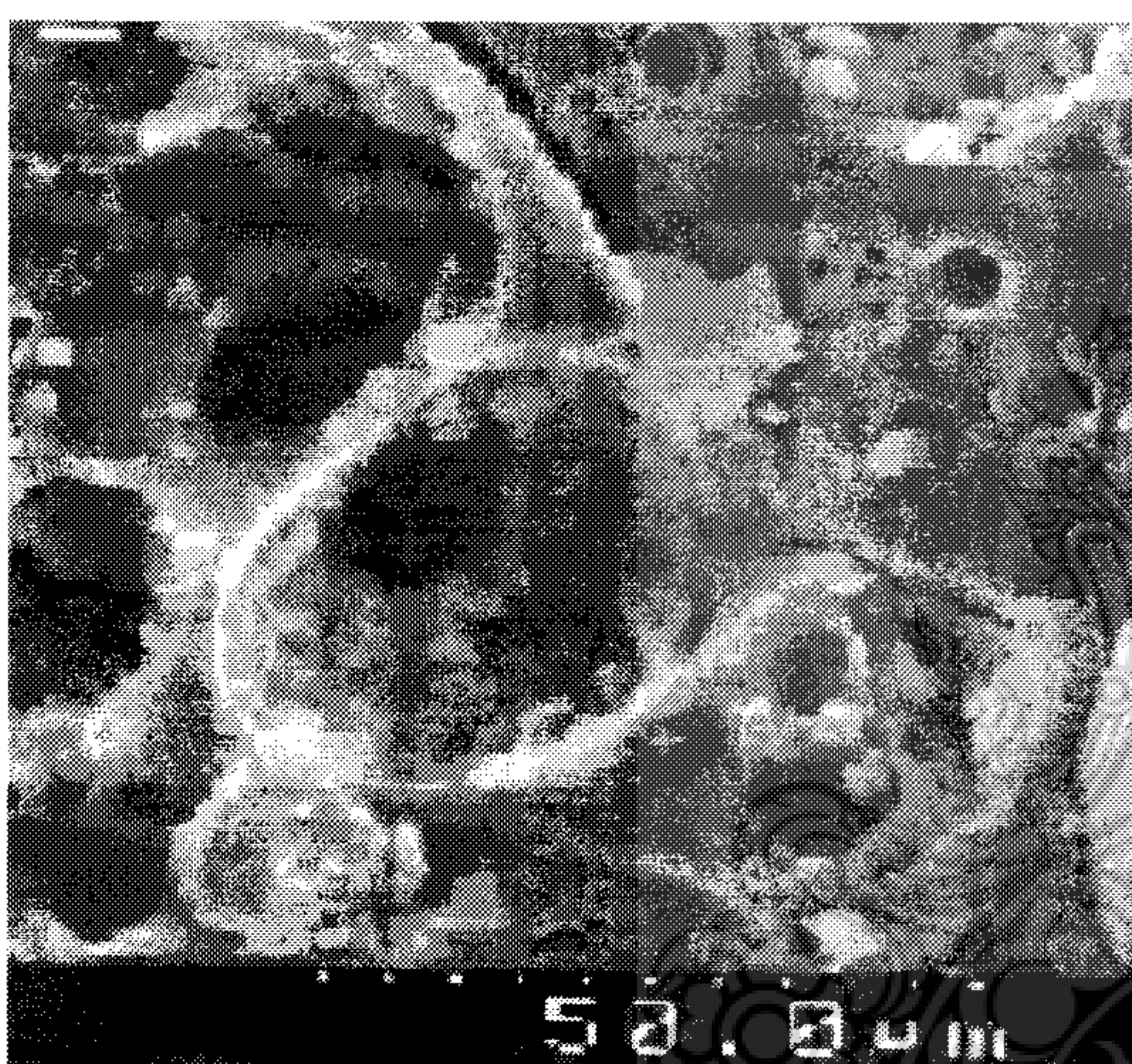




ภาพที่ ก โครงสร้างทั่วไป



ภาพที่ ข แก้วลอยที่ทำปฏิกิริยาเกือบสมบูรณ์



ภาพที่ ค โพรงแก้วลอยกลวงขนาดใหญ่



ภาพที่ ง โพรงจากแก้วลอยกลวงขนาดเล็ก

รูปที่ 2.10 โครงสร้างจุลภาคจีโอโพลิเมอร์ ปรีญญา (2548)

2.3.7 คุณสมบัติของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้า และจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต

1) ความสามารถทำงานได้ของจีโอโพลิเมอร์

ความสามารถทำงานได้ของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าและจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารละลาย NaOH และอัตราส่วนของสารละลาย Na_2SiO_3 ซึ่งความเข้มข้นของสารละลาย NaOH ที่เพิ่มขึ้นทำให้มีความต้องการน้ำเพิ่มเพื่อควบคุมให้ส่วนผสมมีความสามารถทำงานได้ที่เท่ากัน และที่อัตราส่วนของสารละลาย $\text{Na}_2\text{SiO}_3 / \text{NaOH}$ ต่ำความสามารถทำงานได้ของจีโอโพลิเมอร์จะค่อนข้างดี การเพิ่มของอัตราส่วนของสารละลาย $\text{Na}_2\text{SiO}_3 / \text{NaOH}$ ทำให้ค่าการไหลแผ่ลดลง การเพิ่มความสามารถทำงานได้ของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าและจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต สามารถทำได้โดยการเพิ่มปริมาณน้ำทั้งนี้จะทำให้กำลังรับแรงลดลง การเพิ่มความสามารถทำงานได้ของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าและจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตสามารถทำได้



โดยการใส่สารลดน้ำพิเศษ ในปริมาณที่มากซึ่งจะส่งผลทำให้กำลังรับแรงอัดลดลงค่อนข้างมาก (Hardjito et al., 2004)

2) กำลังรับแรงอัด

กำลังรับแรงของจีโอโพลีเมอร์มอร์ต้าและจีโอโพลีเมอร์คอนกรีตจะมีค่ากำลังรับแรงอัดมากหรือน้อยนั้น ขึ้นอยู่กับอัตราส่วนผสมและการบ่มจีโอโพลีเมอร์คอนกรีตเป็นหลัก ซึ่งจากการทดสอบ จีโอโพลีเมอร์คอนกรีตรูปทรงกระบอกขนาด 100 × 200 มิลลิเมตร ทำการบ่มที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง และบ่มที่อุณหภูมิห้อง ค่ากำลังรับแรงอัดเฉลี่ยระหว่าง 40-100 เมกะปาสกาล ในขณะที่การผลิตจีโอโพลีเมอร์มอร์ต้าจากดินขาวเผามีกำลังรับแรงอัดสูงสุดถึง 71 เมกะปาสกาล

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

3) การคืบและการหดตัว

การคืบ (Creep) คือ การเพิ่มขึ้นของความเครียดภายใต้น้ำหนักที่กระทำค้างอยู่ ความเครียดจากการคืบอาจมีค่าสูงกว่าความเครียดในช่วงแรกที่เกิดขึ้นในตอนที่ทำให้น้ำหนักแก่ตัวอย่างหลายเท่า จากปัจจัยที่มีผลต่อการคืบของจีโอโพลีเมอร์คอนกรีตมีหลายอย่าง เช่น อัตราส่วนของจีโอโพลีเมอร์คอนกรีต ความเค้นและกำลังของจีโอโพลีเมอร์คอนกรีตเมื่อเริ่มให้น้ำหนัก มวลรวม คุณสมบัติของเถ้าลอย ความชื้น ขนาดของจีโอโพลีเมอร์คอนกรีตและอุณหภูมิ จากผลการทดสอบค่าการคืบของจีโอโพลีเมอร์คอนกรีตรูปทรงกระบอกขนาด 150 × 300 มิลลิเมตร พบว่าการคืบของจีโอโพลีเมอร์คอนกรีตน้อยกว่าคอนกรีตทั่วไป (Wallah and Rangan, 2006)

ส่วนการหดตัวแห้ง (Drying shrinkage) เกิดจากการที่น้ำในจีโอโพลีเมอร์คอนกรีตระเหยออกมาทำให้เกิดการหดตัว จะทำให้เกิดรอยแตกร้าวและเกิดการบิดตัวของจีโอโพลีเมอร์คอนกรีต ซึ่งองค์ประกอบสำคัญที่มีอิทธิพลต่อการหดตัวของจีโอโพลีเมอร์คอนกรีต ได้แก่ มวลรวม ปริมาณของน้ำและเถ้าถ่านหิน คุณสมบัติของเถ้าถ่านหิน รูปร่างและขนาดของจีโอโพลีเมอร์คอนกรีตเป็นต้น จากการทดสอบ Wallah and Rangan (2006) พบว่าการหดตัวของจีโอโพลีเมอร์คอนกรีตน้อยมากหลังจากระยะเวลา 1 ปี คือ ประมาณ 100 ไมโครสเตรน (Micro strains)

4) ความทนทานต่อการทำลายของสารซัลเฟต (Sulfate Resistance)

ความเสียหายเนื่องจากผลกระทบของซัลเฟตต่อจีโอโพลีเมอร์คอนกรีตนั้นมีความจำเป็น โดยเฉพาะในกรณีที่ต้องก่อสร้างอาคารในบริเวณหรือใกล้ทะเล เนื่องจากซัลเฟตมี อยู่ทั่วไปตามธรรมชาติทั้งในดินและในน้ำทะเล ซัลเฟตอาจเกิดจากสารอินทรีย์ที่ผุเน่าซึ่งก่อให้เกิดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ เมื่อก๊าซนี้ทำปฏิกิริยากับ



ออกซิเจนในอากาศจะกลายเป็นกรดกำมะถันหรือกรดซัลฟูริก (H_2SO_4) และแปรสภาพเป็นซัลเฟตในที่สุด และได้มีการศึกษาการต้านทานซัลเฟตของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต (Wallah and Rangan, 2006) โดยการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต (H_2SO_4) เป็นระยะเวลา 1 ปี จีโอโพลิเมอร์คอนกรีตรูปทรงกระบอกมีการเปลี่ยนแปลงความยาวรูปร่างตลอดจนกำลังรับแรงอัด เมื่อเปรียบเทียบกับการแช่ในน้ำและในสภาพอุณหภูมิปกติ ซึ่งตัวอย่างที่แช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างน้อยกว่า 0.015 เปอร์เซ็นต์

Tikalsky and Carrasquillo (1992) พบว่าการขยายตัวของตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตในระดับ 0.5 เปอร์เซ็นต์ น่าจะเป็น ความเสียหายจากซัลเฟต 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

5) ความคงทนต่อการกัดกร่อนของกรด (Acid Resistance)

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)

2.3.8 การตรวจสอบทางไฟฟ้าเคมี (Evaluate of Electrochemical)

1) ชนิดของคลอไรด์ในคอนกรีต

ชนิดของคลอไรด์ในคอนกรีตประกอบไปด้วย Bound Chloride คือคลอไรด์ที่ถูกจับยึดอยู่ในปฏิกิริยาไฮเดรชันและเกิดปฏิกิริยาเปลี่ยนแปลงในรูปของ CAH หรือถูกดูดซับด้วยผิวของGel Pore ซึ่งคลอไรด์ส่วนนี้จะไม่ส่งผลต่อการเกิดสนิมและคลอไรด์อิสระ Free Chloride คือคลอไรด์ที่ละลายอยู่ในโพรงของคอนกรีตซึ่ง



สามารถแพร่กระจายเข้าไปในคอนกรีตและทำให้ความเป็นด่างลดลงทำให้เหล็กเสริมในคอนกรีตเสริมเหล็กเกิดสนิมได้ สำหรับการวัดระยะที่คลอไรด์ซึมผ่านเข้าสู่คอนกรีตทำได้โดยใช้น้ำยาซิลเวอร์ไนเตรดฉีดลงบนผิวคอนกรีตที่สกัดไว้แล้วและระยะที่คลอไรด์ซึมผ่านจะปรากฏเป็นสีเทาที่ผิวของคอนกรีตที่มีคลอไรด์อยู่ ซึ่งในการหาปริมาณการซึมผ่านของคลอไรด์ในคอนกรีตมีวิธีการที่ง่ายและสะดวกโดยการใช้ส่วานเจาะคอนกรีตที่ระดับความลึกต่างๆ และนำผงคอนกรีตที่ได้มาทดสอบหาปริมาณของคลอไรด์ไอออนและเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ปริมาณคลอไรด์ไอออนเปรียบเทียบกับระดับความลึกต่างๆซึ่งจะทำให้สามารถประมาณระยะเวลาที่เหล็กอยู่ก่อนที่เหล็กเสริมจะเกิดสนิม

2) การตรวจสอบด้วยวิธีไฟฟ้าครึ่งเซลล์ (The Half-Cell Potential Measurement)

เนื่องจากการเกิดสนิมจากคลอไรด์นั้นมีลักษณะเป็นจุดเล็กๆ ที่ยากจะสังเกตเห็นด้วยตาเปล่าจึงต้องใช้วิธีการตรวจสอบด้วยวิธีศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ โดยวิธีนี้จะเป็นการตรวจสอบการเกิดสนิมของเหล็กโดยประมาณโดยจะใช้ด้านที่ต่อกับเหล็กเสริมเป็นขั้วบวก (Anode) และใช้ด้านที่ไม่เกิดการกัดกร่อนเป็นขั้วลบ (Cathode) โดยต่อกับผิวคอนกรีตและปล่อยกระแสไฟฟ้าความต่างศักย์ประมาณ 0.5 V หรือมากกว่าเข้าไปจะทำให้เกิดปฏิกิริยา (Anode) และ (Cathode) ซึ่งช่วยวัดค่าและประมาณค่าการเกิดสนิมของเหล็กเสริมได้โดยพิจารณา จาก ค่าความต่างศักย์ที่มากกว่า -200 mV จะมีโอกาสร้อยละ 90 ที่จะไม่เกิดการกัดกร่อน ถ้าความต่างศักย์ที่วัดได้มีค่าอยู่ระหว่าง -200 ถึง -350 mV มีโอกาสสึกกร่อนเพิ่มขึ้นต่อไป และถ้าความต่างศักย์ที่วัดได้มีค่าน้อยกว่า -350 mV มีโอกาส 90เปอร์เซ็นต์ ที่เกิดการสึกกร่อนไปแล้ว

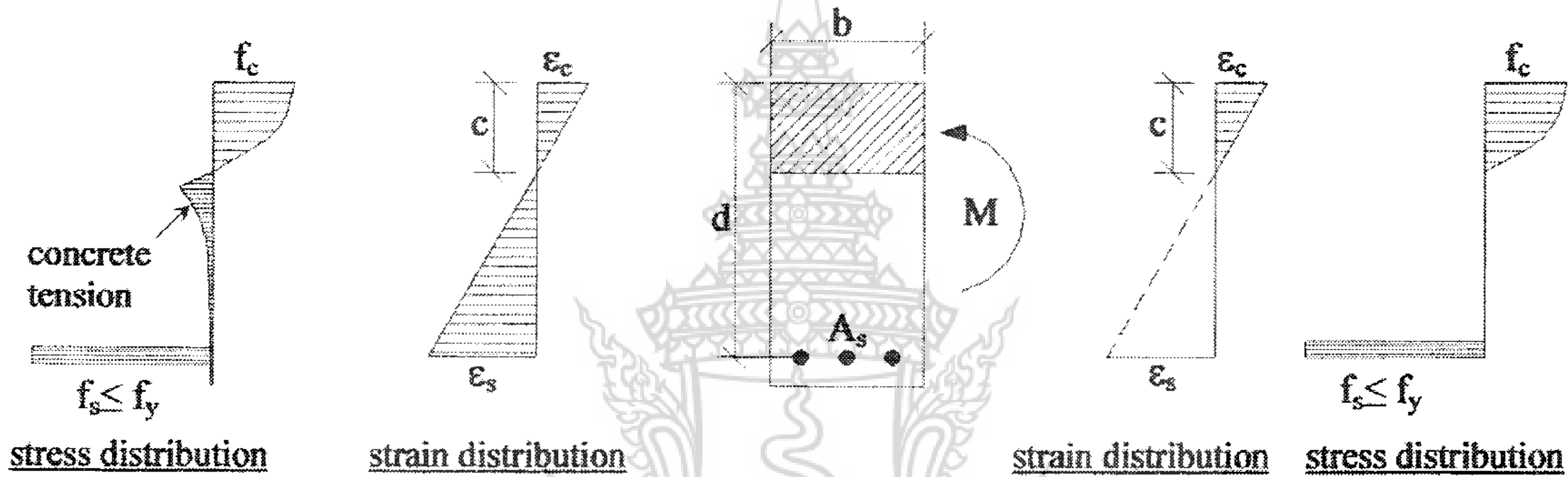
2.3.9 พฤติกรรมกำลังรับแรงดัด

การดัด (Flexure) เกิดจากน้ำหนักหรือแรงที่กระทำต่อองค์อาคาร ปริมาณการดัด คือ โมเมนต์ดัด (Bending moment) การดัดทำให้เกิดผลต่อองค์อาคารได้แก่ ความเค้นและความเครียดบนหน้าตัดคาน เรียกว่า การกระจายความเค้นและความเครียด ซึ่งอาจเป็นความเค้นดัดหรือดึงขณะเดียวกันความเครียดอาจเป็นความเครียดซึ่งมีแนวโน้มทำให้องค์อาคารหดสั้นลง (Shortened) หรือยืดออก (Lengthened) การดัดยังทำให้เกิดหน่วยแรงเฉือนและหน่วยแรงยึดหยุ่นในองค์อาคาร

หากสมมุติว่าก่อนที่คานจะรับน้ำหนักบรรทุกคานยังไม่แอ่นหรือโก่งตัวและยังไม่มีรอยร้าว ดังนั้นเมื่อคานเริ่มรับน้ำหนักบรรทุกที่มีค่าน้อยๆ คานจะโก่งตัวเนื่องจากโมเมนต์ดัดในลักษณะที่หลังคานถูกอัดและที่ใต้ท้องคานถูกดึง โดยมีการกระจายของหน่วยการยืด-หดตัว (Strain distribution) ดังรูปที่ 2.11 บนหน้าตัดของคานเป็นสัดส่วนโดยตรงกับระยะที่ห่างจากแนวแกนสะเทิน ดังนั้นการยืดตัวของเหล็กเสริมของคอนกรีตที่อยู่ตำแหน่งเดียวกันจึงมีค่าเท่ากัน ส่วนการกระจายของหน่วยแรง (Stress distribution) บนหน้าตัดของคานจะมีค่าเป็นสัดส่วนโดยตรงกับการยืด-หดตัวตามกฎของฮุก (ต่อกุล, 2528) หากหน่วยแรงดึงสูงสุดที่เกิดขึ้นที่ท้องคานมีค่าน้อยและต่ำกว่ากำลังต้านทานแรงดึงของคอนกรีต ซึ่งในที่นี้คือโมดูลัสของการแตกร้าว (Modulus of rupture, $f_r = 2.0\sqrt{f'_c}$) คานจึงยังไม่ร้าว ดังนั้นหน้าตัดทั้งหมดของคานจึงสามารถรับได้ทั้งหน่วยแรงอัดและหน่วยแรงดึงที่อยู่เหนือและใต้แกนสะเทิน



เมื่อคานรับน้ำหนักบรรทุกมากขึ้น หน่วยการยืด-หดตัว บนหน้าตัดคานเพิ่มมากขึ้น แต่ยังคงเป็นสัดส่วนโดยตรงกับระยะที่ห่างจากแกนสะเทิน หน่วยแรงต่างๆบนหน้าตัดคานก็จะมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อหน่วยแรงดึงที่ห้องคานมีค่าเท่ากับโมดูลัสของการแตกร้าว (f_r) คานจะเริ่มร้าว โมเมนต์ดัดที่ทำให้เกิดการแตกร้าว เรียกว่าโมเมนต์ดัดแตกร้าว (Cracking moment) รอยร้าวจากโมเมนต์ดัด (Flexural cracks) จะปรากฏที่บริเวณกลางคานก่อนและมีแนวตั้งฉากกับความยาวคาน ส่วนที่บริเวณปลายคานอาจมีรอยร้าวในแนวเฉียงที่เกิดจากแรงดึงทแยงอันเนื่องมาจากแรงเฉือน ซึ่งยังไม่สามารถสังเกตเห็นรอยร้าวนี้ได้ด้วยตาเปล่า เนื่องจากความกว้างของรอยร้าวน้อยมาก ตำแหน่งแนวแกนสะเทินตรงบริเวณที่เกิดรอยร้าวจะขยับสูงขึ้น สำหรับส่วนที่อยู่ระหว่าง รอยร้าวและส่วนที่อยู่ต่ำกว่าแนวแกนสะเทินยังสามารถรับแรงดึงได้อีกเล็กน้อย แต่ในการวิเคราะห์ทางทฤษฎีจะไม่นำความต้านทานแรงดึงในส่วนนี้มาวิเคราะห์แต่พิจารณาให้เหล็กเสริมทำหน้าที่รับแรงดึงทั้งหมด



รูปที่ 2.11 ความเค้นและความเครียดบนหน้าตัดคานภายใต้แรงดัด Raed Skram Saliba Al-Sunna (2006)

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

แต่ถ้าคานรับน้ำหนักบรรทุกมากขึ้นเกินกว่าน้ำหนักบรรทุกใช้งาน หน่วยการยืดหดตัวบนหน้าตัดคานเพิ่มมากขึ้นอีกแต่ยังคงเป็นสัดส่วนโดยตรงกับระยะที่ห่างจากแกนสะเทิน ส่วนหน่วยแรงต่างๆ บนหน้าตัดคานก็มีค่าเพิ่มขึ้นและเกินกว่าค่าพิกัดยืดหยุ่นซึ่งหน่วยแรงเริ่มไม่เป็นสัดส่วนกับหน่วยการยืด-หดตัวที่เพิ่มขึ้นตามคุณสมบัติของวัสดุ (Albert, 1995) คานจึงเริ่มมีพฤติกรรมแบบไม่ยืดหยุ่น (Inelastic) ก่อนที่จะเกิดการวิบัติเมื่อรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดซึ่งเรียกน้ำหนักบรรทุกสูงสุดว่าน้ำหนักบรรทุกประลัย (Ultimate load)

การวิบัติของคานเนื่องจากโมเมนต์ดัด มีสองแบบซึ่งขึ้นอยู่กับปริมาณเหล็กเสริมที่ใช้ กล่าวคือ ถ้าใช้ปริมาณเหล็กเสริมไม่มากนัก (Moderate reinforcement) โดยที่ปริมาณเหล็กเสริมรับแรงดึงมีค่าต่ำกว่าอัตราส่วนที่สภาวะสมดุล เรียกคานแบบนี้ว่า Under-reinforced concrete beams การวิบัติจะเริ่มเกิดที่ด้านรับแรงดึงก่อน โดยเหล็กเสริมถูกดึงถึงกำลังจุดครากก่อนที่คอนกรีตจะถูกอัดแตกหรือระเบิดออกมา ซึ่งก่อนที่คานจะวิบัติจะสังเกตเห็นรอยร้าวที่ปรากฏทางด้านรับแรงดึงเนื่องจากถูกดึงออกเกินกว่าหน่วยการยืดตัวที่จุดคราก อีกทั้งจำนวนรอยร้าวก็มากขึ้นทำให้ค่าสติเฟเนส การดัดหรือความแข็งแรงของคานลดน้อยลงคานจึงโค้งตัว



มากขึ้นตามลำดับ ส่วนการกระจายของหน่วยแรงดัดในคอนกรีตก่อนเกิดการวิบัติจะเป็นรูปพาราโบลา เรียกการวิบัติแบบนี้ว่า Yielding failure ส่วนการวิบัติของคานอีกแบบหนึ่งจะเกิดขึ้นที่ด้านรับแรงดัดก่อน โดยคอนกรีตถูกอัดแตกหรือระเบิดออกเมื่อหน่วยการหดตัวในคอนกรีตมีค่าประมาณ 0.003-0.004 มม./มม. ก่อนที่เหล็กจะมีกำลังถึงจุดครากเรียกการวิบัติแบบนี้ว่า Crushing failure ซึ่งเป็นการวิบัติแบบฉับพลันทันทีทันใด การวิบัติแบบนี้จะเกิดขึ้นกับคานที่มีปริมาณเหล็กเสริมมากเกินไปกว่าอัตราส่วนที่สภาวะสมดุล หรือในกรณีที่ใช้เหล็กเสริมที่มีกำลังจุดครากสูงมาก เรียกคานแบบนี้ว่า Over-reinforced concrete beams สำหรับคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ใช้ปริมาณเหล็กเสริมพอดีกับอัตราส่วนที่สภาวะสมดุล การวิบัติของคานจะเกิดขึ้นในลักษณะที่เหล็กเสริมถูกดึงถึงจุดครากพร้อมกับคอนกรีต ส่วนที่อยู่เหนือแนวแกนสะเทินถูกอัดแตกโดยคอนกรีตมีหน่วยการยึดตัวสูงสุด

นอกจากนี้พฤติกรรมการรับแรงดัดของคานจีโอโพลีเมอร์คอนกรีตเหมือนกันกับคานคอนกรีตเสริมเหล็กโดยทั่วไป (Sumajouw and Rangan, 2006) ซึ่งทำการทดสอบคานจีโอโพลีเมอร์คอนกรีตขนาด 200 × 300 × 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 พบว่าลักษณะการแตกร้าวของคานจีโอโพลีเมอร์คอนกรีตเหมือนกันกับคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และเกิดการวิบัติด้วยการอัดในส่วนของบริเวณรับแรงดัด สำหรับอัตราส่วนของเหล็กเสริมรับแรงดัดและกำลังอัดของจีโอโพลีเมอร์คอนกรีตที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้การรับแรงดัดเพิ่มขึ้น ตลอดจนมาตรฐานที่ใช้ในการออกแบบทั้งสองมาตรฐานสามารถใช้ในการออกแบบคาน จีโอโพลีเมอร์คอนกรีตเสริมเหล็กได้

จากที่ได้กล่าวมาข้างต้นหากนำเอาวัสดุพอลิโพรพิลีนซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งจากโรงงานภาคอุตสาหกรรมมาประยุกต์ใช้เป็นวัสดุจีโอโพลีเมอร์คอนกรีตที่มีคุณสมบัติที่เหมาะสมในหลายด้านโดยเฉพาะในด้านความคงทนและคุณสมบัติทางกล ดังนั้นในการนำวัสดุจีโอโพลีเมอร์มาพัฒนาเพื่อเป็นวัสดุสำหรับใช้ในโครงสร้างคอนกรีตให้มีความคงทนต่อในสภาพสิ่งแวดล้อมทะเล จึงน่าจะเป็นไปได้อย่างมาก หากมีการทำวิจัยกันอย่างจริงจังในประเทศไทยซึ่งเป็นประโยชน์อย่างมากในวงการก่อสร้างสามารถที่จะลดค่าใช้จ่ายและงบประมาณในด้านการบูรณะและซ่อมแซมได้เป็นอย่างดี



บทที่ 3 อุปกรณ์และวิธีการ

การดำเนินการศึกษาผลกระทบการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตเสริมเหล็กที่ใช้เป็นโครงสร้างในสภาพสิ่งแวดล้อมทะเล สำหรับอุปกรณ์และวิธีการทดลองดังนี้

3.1 อุปกรณ์

1. เครื่องทดสอบ (Universal testing machine)
2. เครื่องทดสอบกำลังอัด (Compressive testing machine)
3. เครื่องทดสอบค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ (Half-cell potential test)
4. เครื่องแปลงกระแสไฟฟ้ากระแสตรง
5. เครื่องวัดค่าศักย์ไฟฟ้า
6. แบบหล่อแท่งตัวอย่างรูปทรงกระบอก ขนาด 10×20 เซนติเมตร
7. แบบหล่อแท่งตัวอย่างรูปคาน ขนาด $10 \times 10 \times 40$ เซนติเมตร
8. เครื่องผสมคอนกรีต
9. เครื่องจี้คอนกรีต (Vibrator)
10. เครื่องชั่งน้ำหนัก สามารถอ่านค่าได้ละเอียด 0.01 กรัม
11. อุปกรณ์สำหรับบัดกรี
12. ถังสำหรับแช่ตัวอย่าง ขนาด 120×150 เซนติเมตร
13. อุปกรณ์สำหรับผสมสารละลาย
14. แผ่นพลาสติกใส
15. เทปพันสายไฟ
16. เกรียงเหล็ก
17. ถูมือยาง

3.2 วิธีการ

3.2.1 วัสดุ

วัสดุสำหรับการศึกษาผลกระทบการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตเสริมเหล็กที่ใช้เป็นโครงสร้างในสภาพสิ่งแวดล้อมทะเลประกอบด้วย



1) **เถ้าถ่านหิน**

เถ้าถ่านหินจากโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง ซึ่งมีองค์ประกอบทางเคมีดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าถ่านหิน

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

2) **เถ้าแกลบ**

เถ้าแกลบ (Rice husk ash) จังหวัดสุพรรณบุรี ซึ่งมีองค์ประกอบทางเคมีดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าแกลบ

| Oxides | SiO ₂ | Fe ₂ O ₃ | CaO | MgO | Na ₂ O | K ₂ O |
|--------|------------------|--------------------------------|------|------|-------------------|------------------|
| % | 91.93 | 0.39 | 0.69 | 0.08 | 0.20 | 0.51 |

3) **ดินขาว**

ดินขาว (Metakaolin) จังหวัดลำปาง ซึ่งมีองค์ประกอบทางเคมีดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 องค์ประกอบทางเคมีของดินขาว

| Oxides | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | Fe ₂ O ₃ | CaO | MgO | Na ₂ O | K ₂ O |
|--------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|------|------|-------------------|------------------|
| % | 44.85 | 37.98 | 0.97 | 0.06 | 0.12 | 0.04 | 1.23 |

4) **ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์**

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 บริษัท ปูนซีเมนต์ไทย จำกัด (มหาชน) ซึ่งมีองค์ประกอบทางเคมีดังตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

| Oxides | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | Fe ₂ O ₃ | CaO | MgO | Na ₂ O | K ₂ O | SO ₃ |
|--------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|-----|------|-------------------|------------------|-----------------|
| % | 20 | 5 | 3 | 60 | 1.10 | 1.50 | 2.40 | 2 |

5) **มวลรวม**

5.1) **มวลรวมหยาบ**

หินปูนย่อย (Crushed limestone) ขนาด 3/8 นิ้ว (SSD)



5.2) มวลรวมละเอียด

ทรายแม่น้ำร้อนผ่านตะแกรงเบอร์ 4 (SSD) อิมตัวผิวแห้ง

6) เหล็กเสริม

เหล็กผิวเรียบและเหล็กข้ออ้อย ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 9 มิลลิเมตร และ 10 มิลลิเมตร คุณสมบัติของเหล็ก ดังตารางที่ 3.5

ตารางที่ 3.5 คุณสมบัติของเหล็กเสริม

| Diameter | Cross section area | Yield strength | Ultimate strength |
|----------|--------------------|----------------|-------------------|
| (mm) | (cm ²) | (ksc) | (ksc) |
| RB9 | 0.63 | 4379 | 5520 |

7) สารละลาย

7.1) สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide, NaOH)

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

7.2) สารละลายโซเดียมซิลิเกต (Sodium silicate, Na₂SiO₂)

สารละลายโซเดียมซิลิเกต (Sodium silicate, Na₂SiO₂) มี Na₂O ร้อยละ 14.7, SiO₂ ร้อยละ 29.4, H₂O ร้อยละ 55.9 โดยมวล

7.3) สารละลายโซเดียมคลอไรด์ (Sodium chloride, NaCl)

สารละลายโซเดียมคลอไรด์ (Sodium chloride, NaCl) มีความเข้มข้นร้อยละ 3 ของปริมาตรน้ำ

3.2.2 อัตราส่วนผสม

การศึกษาผลกระทบการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตเสริมเหล็กที่ใช้เป็นโครงสร้างในสภาพสิ่งแวดล้อมทะเล ซึ่งมีอัตราส่วนผสมโดยใช้วัสดุปอซโซลานของ ถ้ำลอย (Fly ash) ถ้ำแกลบ (Rice husk ash) และดินขาว (Metakaolin) ใช้อัตราส่วนผสมตัวอย่างที่เหมาะสมดังตารางที่ 3.6, ตารางที่ 3.7 และ ตารางที่ 3.8 ตามลำดับ และอัตราส่วนของตัวอย่างคอนกรีตดังตารางที่ 3.9



1) จีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าลอย

อัตราส่วนผสมของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าลอยได้อ้างอิงจากงานวิจัยที่ผ่านมาของการศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต (สรารุณี, 2550) เป็นหลักและงานวิจัยอื่นๆ ที่เกี่ยวข้อง ดังตารางที่ 3.6

ตารางที่ 3.6 อัตราส่วนผสมจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าลอย

| Ratio | | Materials (kg/m ³) | | | | | |
|------------------------------------------|------------|--------------------------------|---------|------------------------------------|------|------|--|
| Na ₂ O.SiO ₃ /NaOH | Aggregates | Sand | Fly ash | Na ₂ O.SiO ₃ | NaOH | W/B | |
| 1.0 | 1190 | 640 | 400 | 102 | 102 | 0.51 | |

2) จีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าแกลบ

อัตราส่วนผสมของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าแกลบ ได้ทำการหาอัตราส่วนที่เหมาะสมสำหรับจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าแกลบโดยอ้างอิงจากงานวิจัยที่ผ่านมาดังตารางที่ 3.7

ตารางที่ 3.7 อัตราส่วนผสมจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าแกลบ

| Ratio | | Materials (kg/m ³) | | | | | |
|------------------------------------------|------------|--------------------------------|---------|---------------|------------------------------------|------|------|
| Na ₂ O.SiO ₃ /NaOH | Aggregates | Sand | Fly ash | Rice husk ash | Na ₂ O.SiO ₃ | NaOH | W/B |
| 1.0 | 1190 | 640 | 400 | 120 | 102 | 102 | 0.39 |

3) จีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจากดินขาว

อัตราส่วนผสมของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจากดินขาว ได้ทำการหาอัตราส่วนที่เหมาะสมสำหรับจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจากดินขาวโดยอ้างอิงจากงานวิจัยที่ผ่านมาดังตารางที่ 3.8

ตารางที่ 3.8 อัตราส่วนผสมจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจากดินขาว

| Ratio | | Materials (kg/m ³) | | | | | |
|------------------------------------------|------------|--------------------------------|---------|------------|------------------------------------|------|------|
| Na ₂ O.SiO ₃ /NaOH | Aggregates | Sand | Fly ash | Metakaolin | Na ₂ O.SiO ₃ | NaOH | W/B |
| 1.0 | 1190 | 640 | 400 | 120 | 102 | 102 | 0.39 |

4) คอนกรีต

สำหรับงานวิจัยนี้ได้ดำเนินการออกแบบอัตราส่วนผสมของคอนกรีตที่กำลังรับแรงอัดคอนกรีตที่อายุ 28 วัน 240 กก./ซม² ดังตารางที่ 3.9



ตารางที่ 3.9 อัตราส่วนผสมของคอนกรีต

| Compressive Strength (ksc) | Materials (kg/m ³) | | | | Slump (cm) | Water Cement Ratio |
|-------------------------------|--------------------------------|--------------------|------|-------|---------------|--------------------------|
| | Cement | Aggregates 3/8" | Sand | Water | | |
| 240 | 381 | 994 | 626 | 180 | 3-5 | 0.47 |

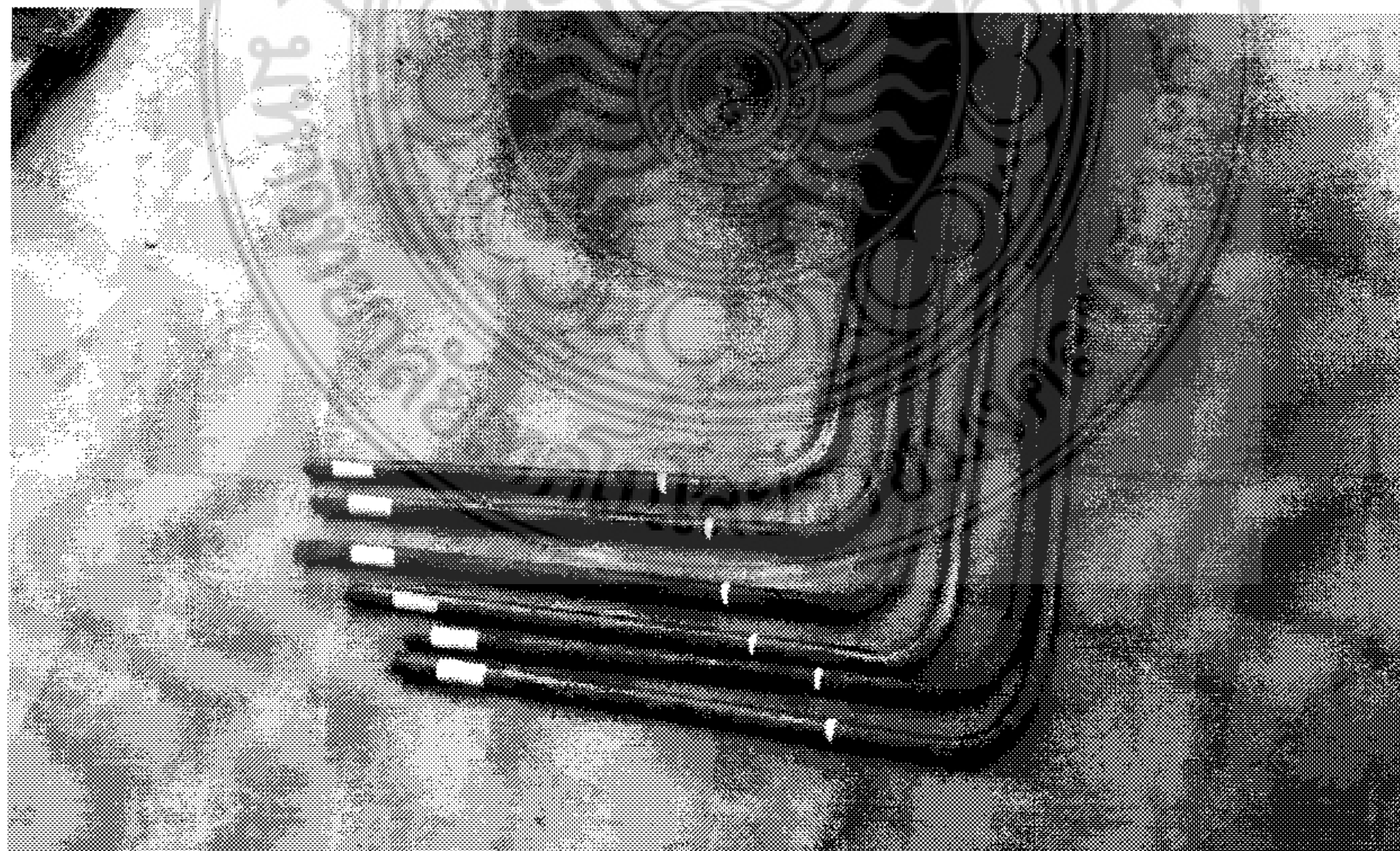
3.3 การเตรียมตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตและคอนกรีต

3.3.1 จีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจากถ้ำลอย ถ้ำแกลบ และดินขาว

การดำเนินการเตรียมตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจากถ้ำลอย ถ้ำแกลบ และดินขาว ประกอบด้วย 2 ส่วนดังนี้

- ❖ ตัวอย่างรูปคาน
- ❖ ตัวอย่างรูปทรงกระบอก

การเตรียมตัวอย่างทดสอบคานจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจากถ้ำลอย ถ้ำแกลบ และดินขาว ซึ่งตัวอย่างทดสอบคอนกรีตรูปคานขนาด 10×10×40 เซนติเมตร และตัวอย่างรูปทรงกระบอกขนาด 10 ×20 เซนติเมตร เพื่อทดสอบหาค่ากำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจากถ้ำลอย ถ้ำแกลบ และดินขาว สำหรับตัวอย่างรูปคานจะทำการเร่งการเกิดสนิมของเหล็กเสริม โดยเสียบเหล็กเสริมเส้นกลมที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 9 มิลลิเมตร และยาวประมาณ 30 เซนติเมตร ซึ่งอยู่ระหว่างกลางของตัวอย่างและยื่นออกมาจากตัวอย่างประมาณ 20 เซนติเมตร ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 เหล็กเสริมเส้นกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 9 มิลลิเมตร

1) การเตรียมสารละลายและวัสดุผสม

การเตรียมสารละลายโซเดียมซิลิเกต โซเดียมไฮดรอกไซด์ หิน ททราย ถ้ำถ่านหิน ถ้ำแคลบ และดินขาว ตามอัตราส่วนผสมที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น โดยให้หินและทรายอยู่ในสภาวะอิ่มตัวผิวแห้งเพื่อป้องกันการดูดซึมสารละลายที่ผสมลงไปดังรูปที่ 3.3 ทำให้สารละลายไม่เพียงพอและส่งผลต่อระยะเวลาการก่อตัวของจีโอฟิลเมอร์คอนกรีต และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์มีปริมาณความเข้มข้น 10 โมลาร์ โดยเตรียมล่วงหน้าเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ก่อนการผสม ดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 การเตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

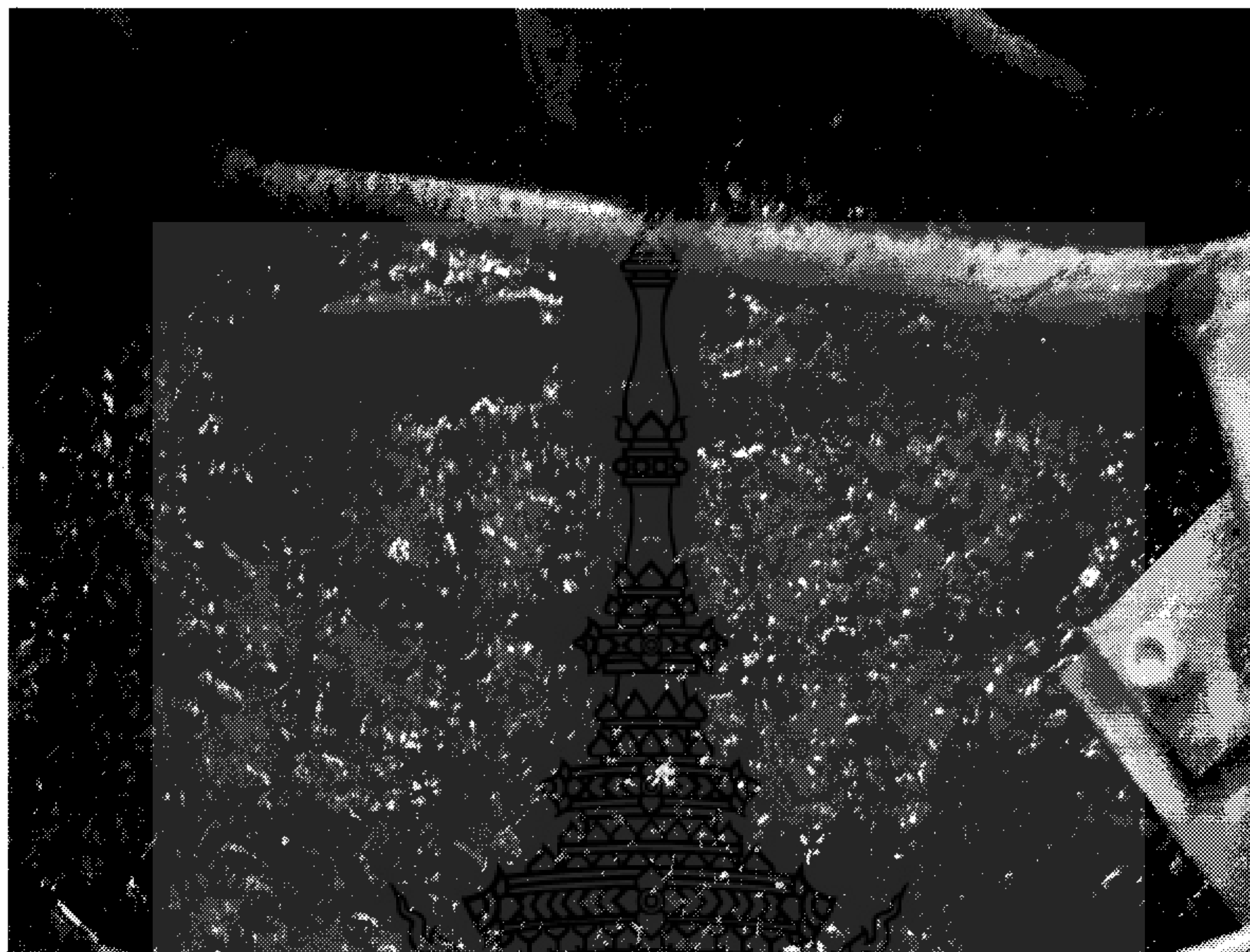


รูปที่ 3.3 วัสดุผสมจีโอฟิลเมอร์คอนกรีต



2) การผสม

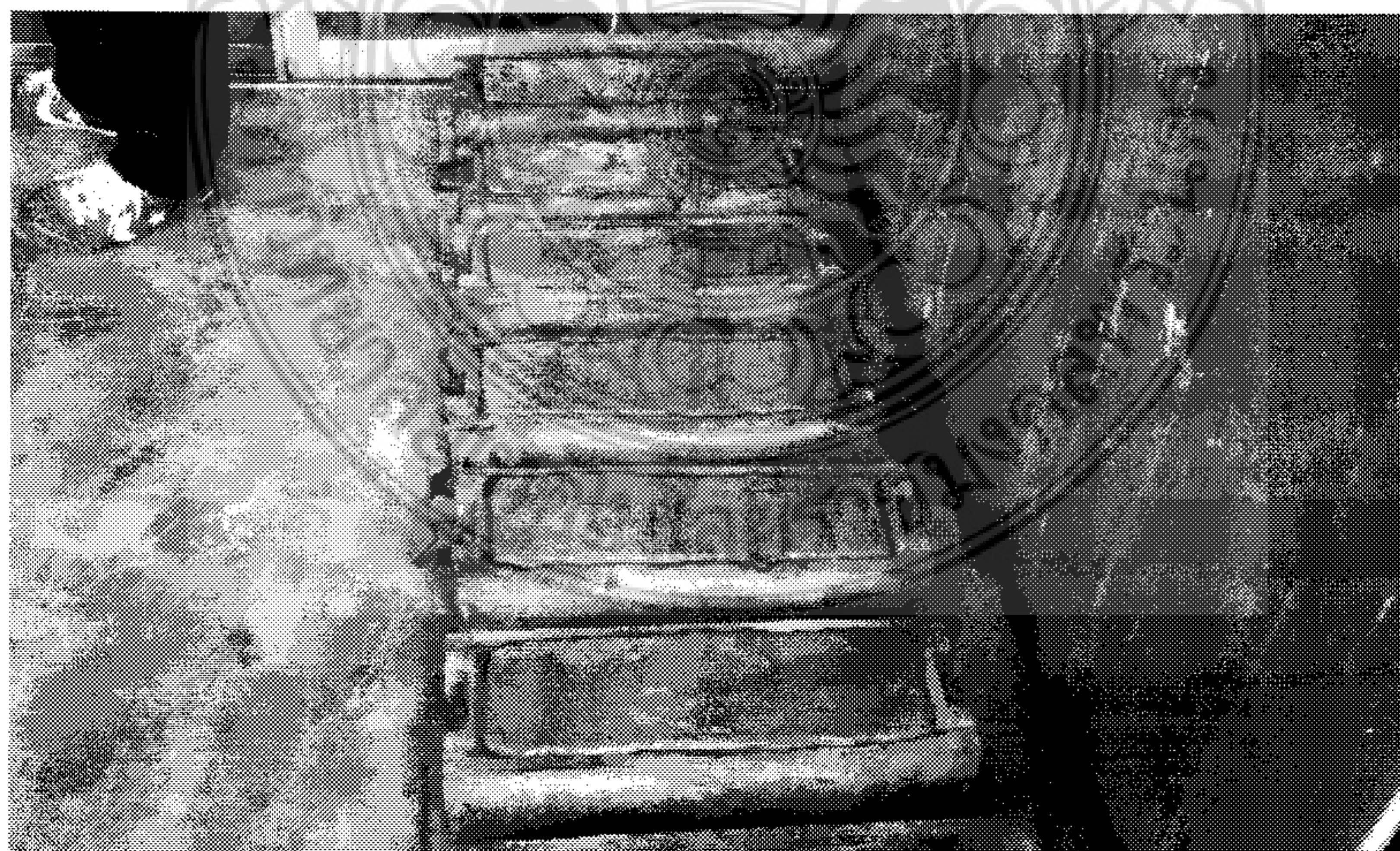
นำส่วนผสมใส่ลงในอุปกรณ์ผสมคอนกรีต ทำการผสมให้เข้ากันโดยใช้เวลาในการผสม 3-5 นาที หลังจากนั้นจึงใส่สารละลายทั้งสองลงไปผสมให้เข้ากันอีกครั้งพร้อมใส่หิน ทำการผสมจนกว่าส่วนผสมเข้ากันได้ดีดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 การผสมจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าลอย เถ้าแกลบ และดินขาว

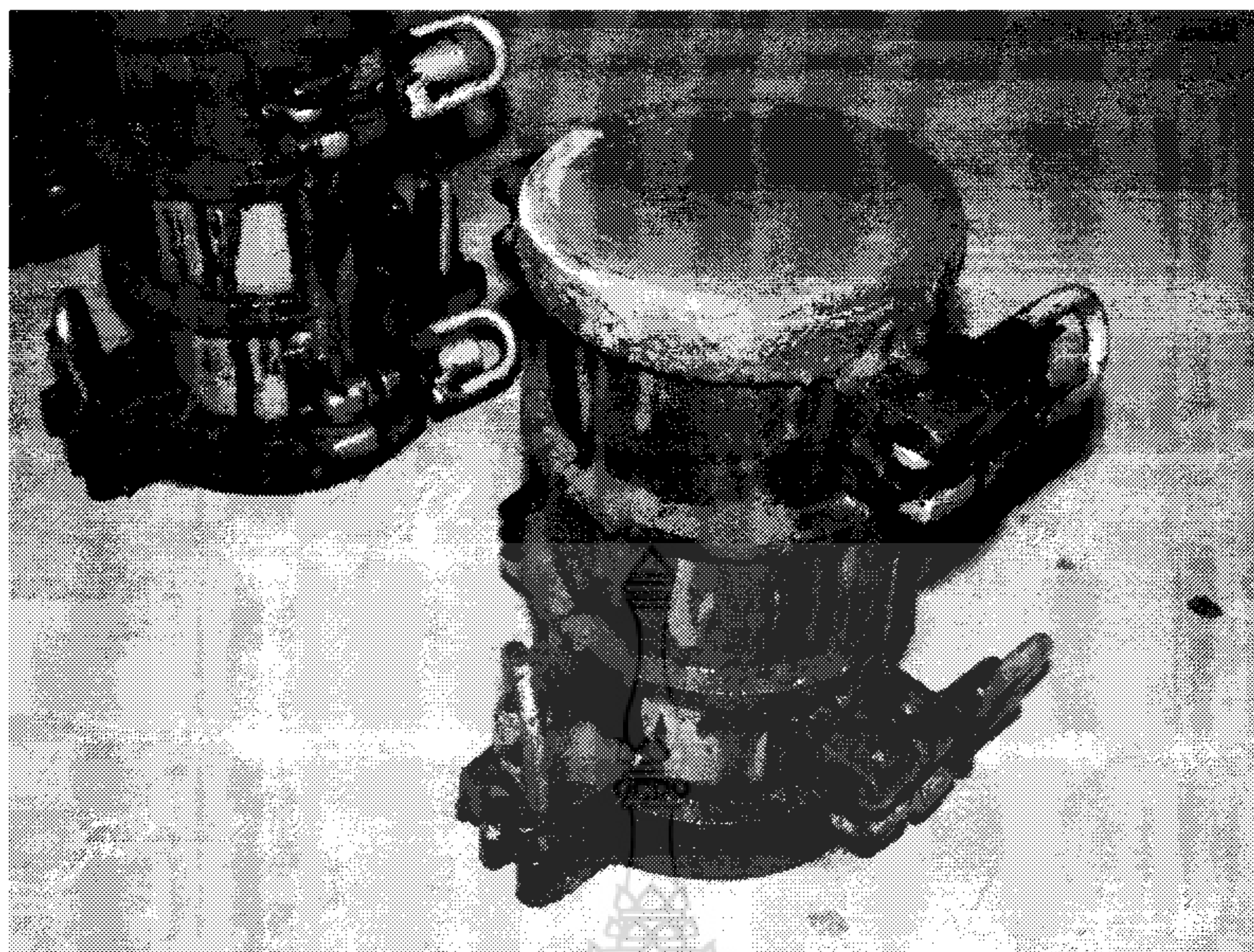
3) การเทลงแบบหล่อ

นำจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าลอย เถ้าแกลบ และดินขาว เทลงแบบหล่อรูปคานขนาด 10×10×40 เซนติเมตร ดังรูปที่ 3.5 และแบบหล่อรูปทรงกระบอกขนาด 10 × 20 เซนติเมตร ดังรูปที่ 3.6 และเก็บไว้ในอุณหภูมิปกติเป็นเวลา 12 ชั่วโมง



รูปที่ 3.5 ตัวอย่างรูปคาน





รูปที่ 3.6 ตัวอย่างรูปทรงกระบอก

4) การบ่ม

การบ่มตัวอย่างรูปคานจีโพลิเมอร์จากถ้ำลอย ถ้ำกลบ และดินขาว เลือกการบ่มตัวอย่างด้วยการหุ้มตัวอย่างแผ่นพลาสติกใสเพื่อป้องกันการระเหยของน้ำระยะเวลา 28 วัน ดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 การบ่มตัวอย่างจีโพลิเมอร์คอนกรีตด้วยการหุ้มแผ่นพลาสติกใส

3.3.2 คอนกรีต

การดำเนินการเตรียมตัวอย่างคอนกรีตที่มีลักษณะเดียวกันกับจีโพลิเมอร์จากถ้ำลอย ถ้ำกลบ และดินขาว ประกอบด้วย 2 ส่วน ดังนี้



- ❖ ตัวอย่างรูปคาน
- ❖ ตัวอย่างรูปทรงกระบอก

1) การเตรียมวัสดุผสม

การเตรียมหิน ทราย ซีเมนต์และน้ำ ตามอัตราส่วนผสมของคอนกรีตที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น โดยให้หินและทรายอยู่ในสภาวะอิ่มตัวผิวแห้งเพื่อป้องกันการดูดของน้ำ

2) การผสม

นำส่วนผสมใส่ลงในอุปกรณ์ผสมคอนกรีต ทำการผสมให้เข้ากันโดยใช้เวลาในการผสม 3-5 นาที หลังจากนั้นจึงใส่น้ำลงไปผสมให้เข้ากันอีกครั้งพร้อมใส่หิน ทำการผสมจนกว่าส่วนผสมเข้ากันได้ดี ดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 การผสมคอนกรีต

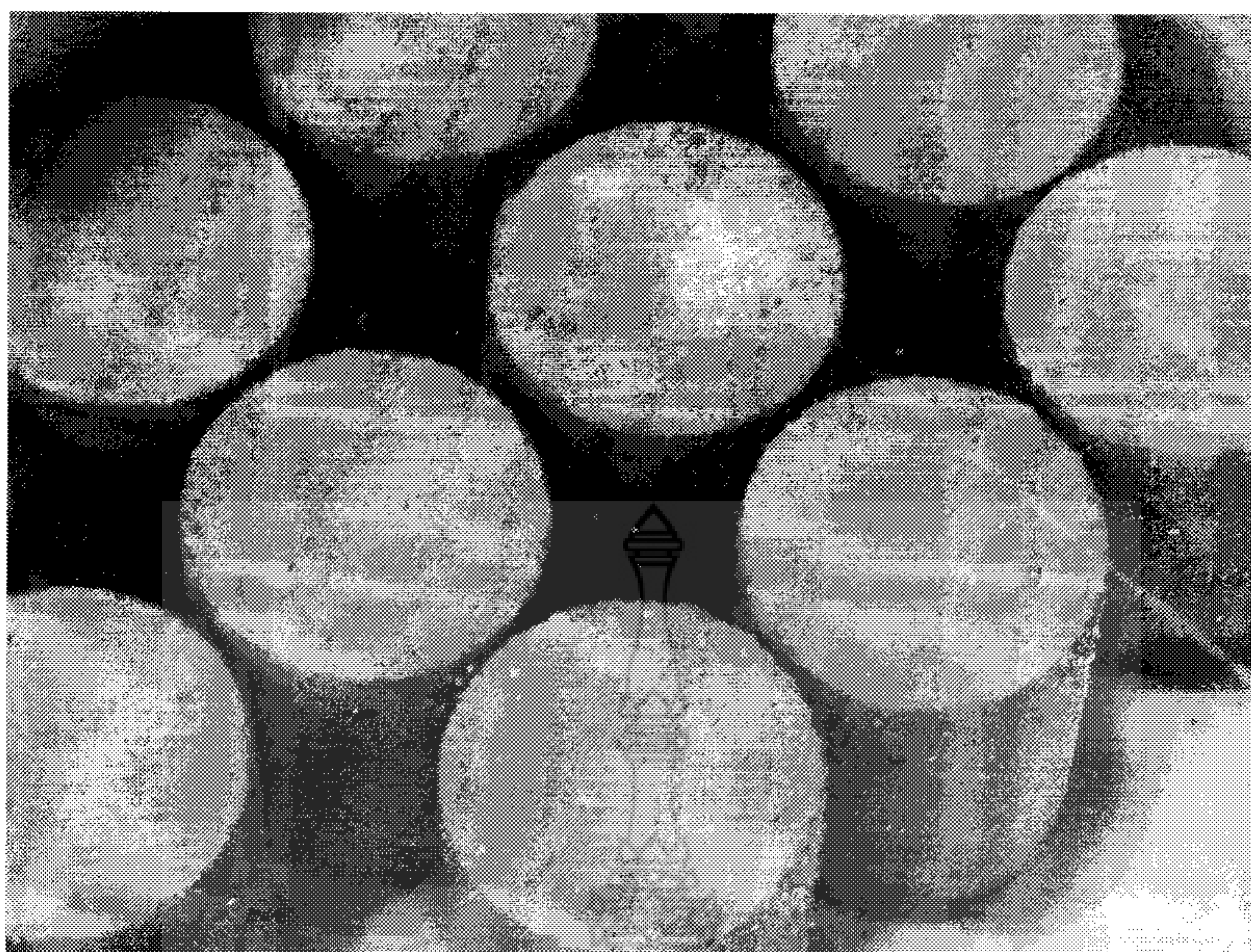
3) การเทลงแบบหล่อ

นำคอนกรีตเทลงแบบหล่อรูปคานขนาด $10 \times 10 \times 40$ เซนติเมตร และแบบหล่อรูปทรงกระบอกขนาด 10×20 เซนติเมตร เก็บไว้ในอุณหภูมิปกติเป็นเวลา 12 ชั่วโมง

4) การบ่ม

การบ่มตัวอย่างรูปคานคอนกรีตและคอนกรีตรูปทรงกระบอก เลือกการบ่มตัวอย่างด้วยน้ำระยะเวลา 28 วัน ดังรูปที่ 3.9





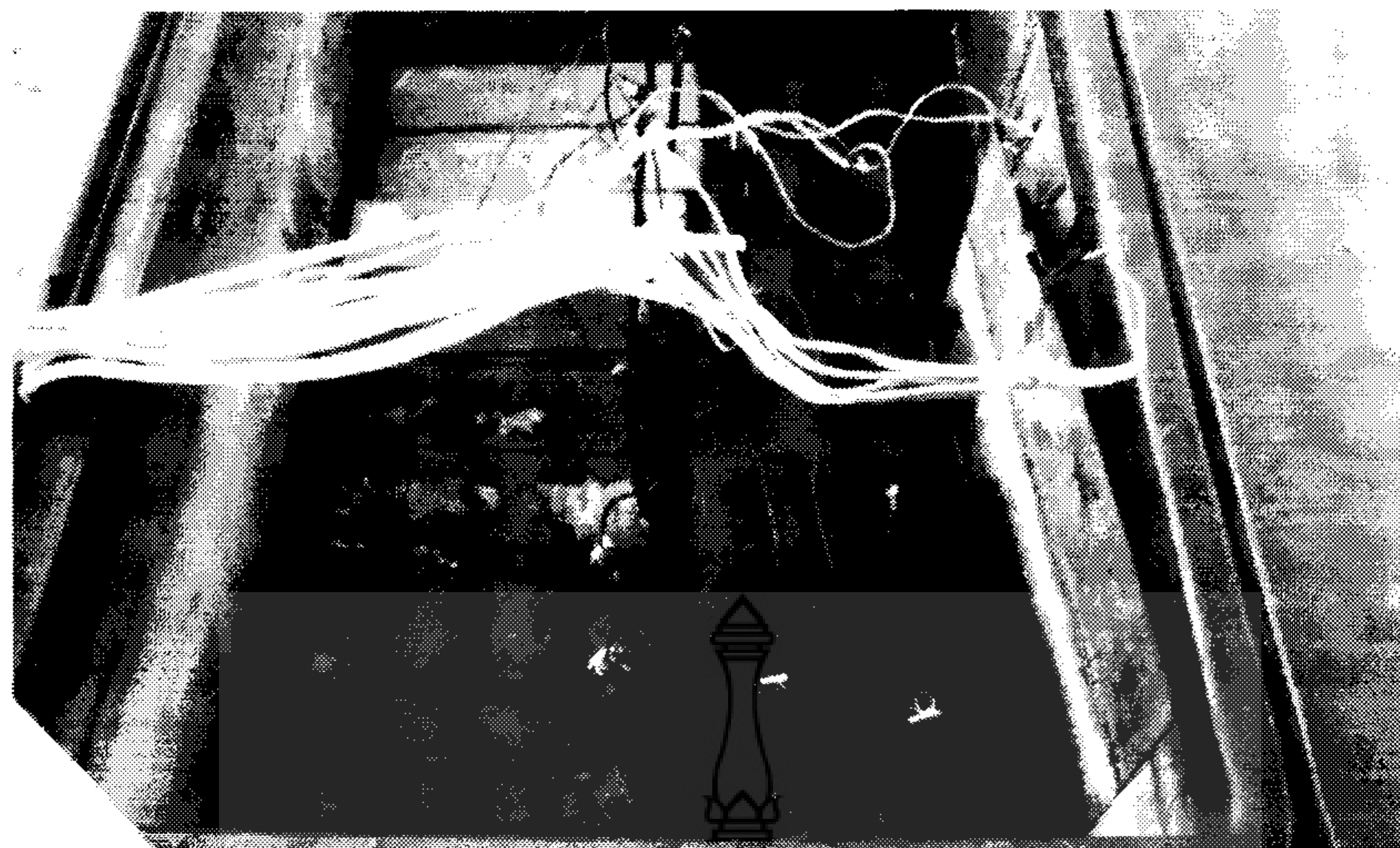
รูปที่ 3.9 การบ่มคอนกรีตด้วยน้ำ

3.4 การเร่งการเกิดสนิมของเหล็กเสริม

การเร่งการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจากถ้ำลอย ถ้ำกลบ ดินขาว และคอนกรีต เนื่องจากสภาพความเป็นจริงการเกิดสนิมของเหล็กเสริมตามธรรมชาติของโครงสร้างสิ่งแวดล้อมทะเลมีระยะเวลานาน ซึ่งในการวิจัยครั้งนี้ได้ดำเนินการเร่งการเกิดสนิมของเหล็กเสริมด้วยไฟฟ้ากระแสตรงโดยอ้างอิงจากงานวิจัยที่ผ่านมา

3.4.1 การติดตั้งสายไฟฟ้า

การติดตั้งสายไฟฟ้าเพื่อเชื่อมต่อกระแสไฟฟ้าขั้วบวกกับแท่งทองแดงและขั้วลบกับเหล็กเสริมที่อยู่ในตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจากถ้ำลอย ถ้ำกลบ ดินขาว และตัวอย่างคอนกรีตรูปคานดังรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 การติดตั้งสายไฟเข้ากับแท่งตัวอย่างทดสอบ

3.4.2 การเร่งการเกิดสนิมของเหล็กเสริม

การเร่งการเกิดสนิมของเหล็กเสริมโดยการจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงอย่างสม่ำเสมอเป็นระยะเวลา 28 วัน ด้วยความต่างศักย์ไฟฟ้า 6 โวลต์ ดังรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 การเร่งการเกิดสนิมของเหล็กเสริม





รูปที่ 3.12 การตรวจสอบความสม่ำเสมอของกระแสไฟฟ้า

3.5 การตรวจสอบแนวโน้มการเกิดสนิมของเหล็กเสริม

การตรวจสอบแนวโน้มการเกิดสนิมของเหล็กเสริม โดยทำการวัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่อยู่ในตัวอย่างทดสอบจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจากถ้ำลอย ถ้ำแกลบ ดินขาว และคอนกรีต ซึ่งใช้เครื่องมือตรวจสอบแนวโน้มการเกิดสนิมของเหล็กเสริม Half Cell Potential Test ตามมาตรฐาน ASTM C 876

3.5.1 การเตรียมสารละลาย

สารละลายคอมเปอร์ซัลเฟต (Copper Sulfate) ในการเตรียมสารละลายนั้นทุกครั้งในการผสมสารละลาย ต้องทำการผสมให้สารละลายอิ่มตัวก่อนที่จะนำสารละลายไปใช้ในการทดสอบ

3.5.2 การเตรียมตัวอย่างทดสอบ

นำตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจากถ้ำลอย ถ้ำแกลบ ดินขาว และคอนกรีตรูปคานขึ้นจากการให้กระแสไฟฟ้า ทำความสะอาดตัวอย่างด้วยน้ำ ดังรูปที่ 3.13



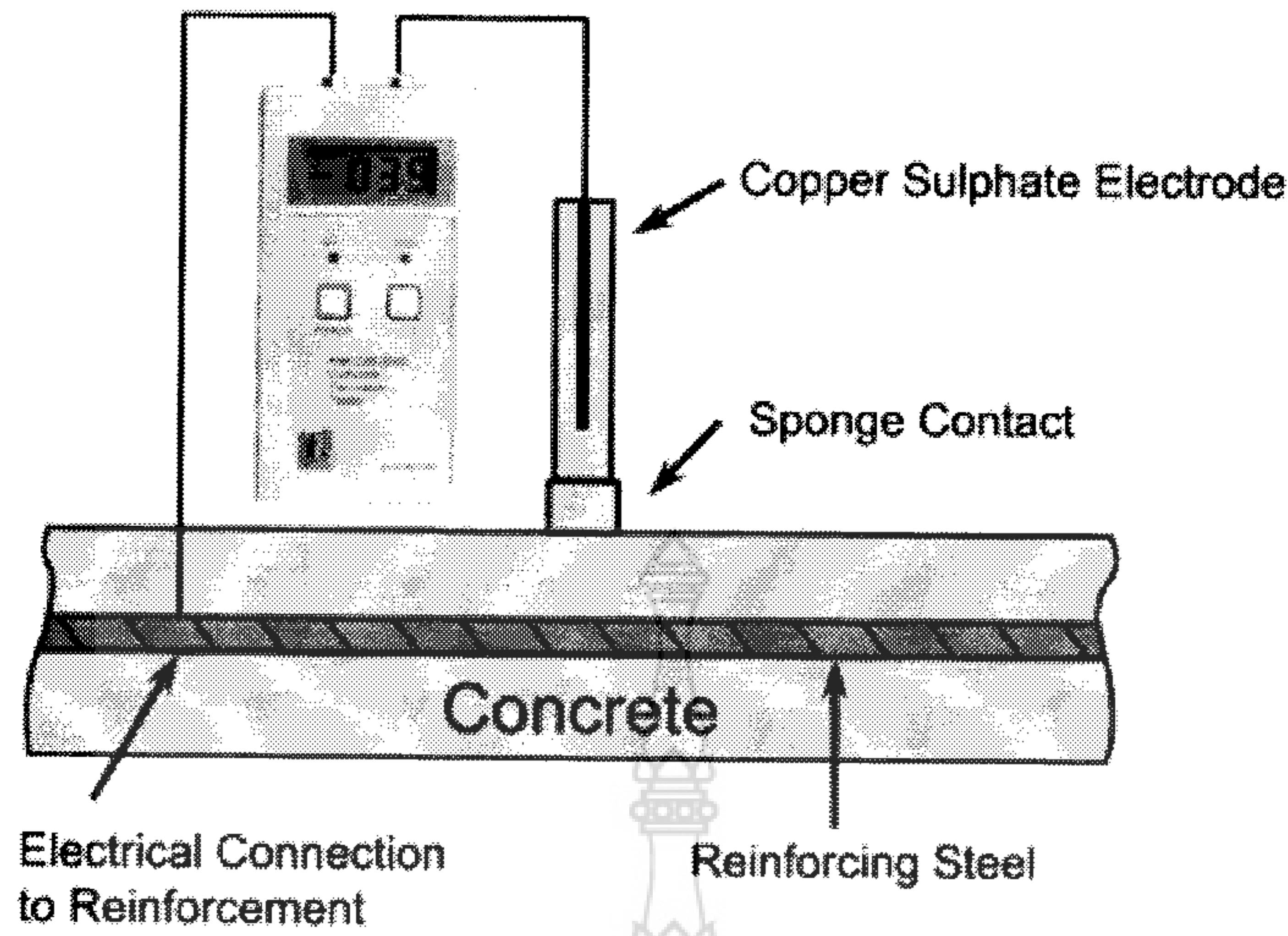
รูปที่ 3.13 การเตรียมตัวอย่างทดสอบ

3.5.3 การตรวจสอบแนวโน้มการเกิดสนิมของเหล็กเสริม

การตรวจสอบแนวโน้มการเกิดสนิมของเหล็กเสริมของตัวอย่างจีโอโพลีเมอร์คอนกรีตจากถ้ำลอย ถ้ำแกลบ ดินขาว และคอนกรีต ทำการตรวจสอบค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าต้านบนของตัวอย่าง ทำการวัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า จนครบ 28 วัน ดังรูปที่ 3.15 จากการตรวจสอบค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า ตามมาตรฐานการทดสอบ ASTM C 876 สามารถแบ่งระดับของการเกิดสนิมของเหล็กเสริมดังตารางที่ 3.10

ตารางที่ 3.10 ความต่างศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์และแนวโน้มการเกิดสนิมของเหล็กเสริม ASTM C 876

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



รูปที่ 3.14 การเชื่อมต่อสายไฟฟ้าขั้วบวกและขั้วลบกับตัวอย่างทดสอบ



รูปที่ 3.15 การตรวจสอบแนวโน้มการเกิดสนิมของเหล็กเสริมด้วยเครื่องมือ Half-cell Potential Test

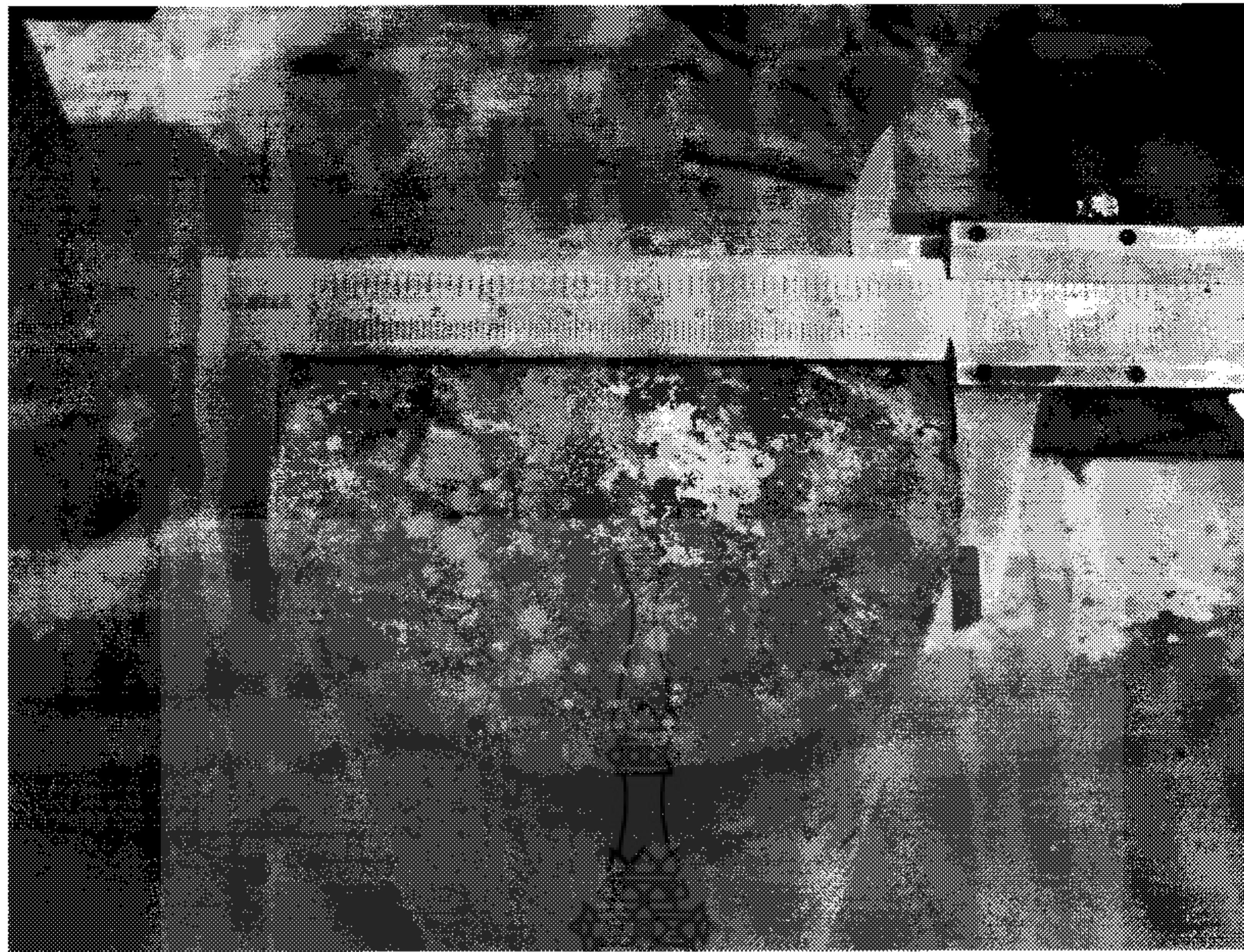
3.6 การทดสอบกำลังรับแรงอัด

การดำเนินการทดสอบกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลีเมอร์คอนกรีตจากถ้ำลอย ถ้ำกลบ ดินขาว และคอนกรีต โดยการนำตัวอย่างที่บ่มไว้เป็นระยะเวลา 28 วัน มาทำการทดสอบกำลังรับแรงอัดของวัสดุแต่ละชนิด ซึ่งมีขั้นตอนการทดสอบดังนี้

3.6.1 การตรวจสอบขนาดและน้ำหนัก

การตรวจสอบขนาดและน้ำหนักของตัวอย่างทดสอบ ทำการตรวจสอบขนาด ความกว้าง ความสูง และน้ำหนัก โดยใช้เวอร์เนียคาลิปเปอร์ ที่มีความละเอียด 0.02 มิลลิเมตร และเครื่องชั่งน้ำหนักสามารถอ่านค่าได้ละเอียด 0.01 กรัม ดังรูปที่ 3.16 ถึงรูปที่ 3.18

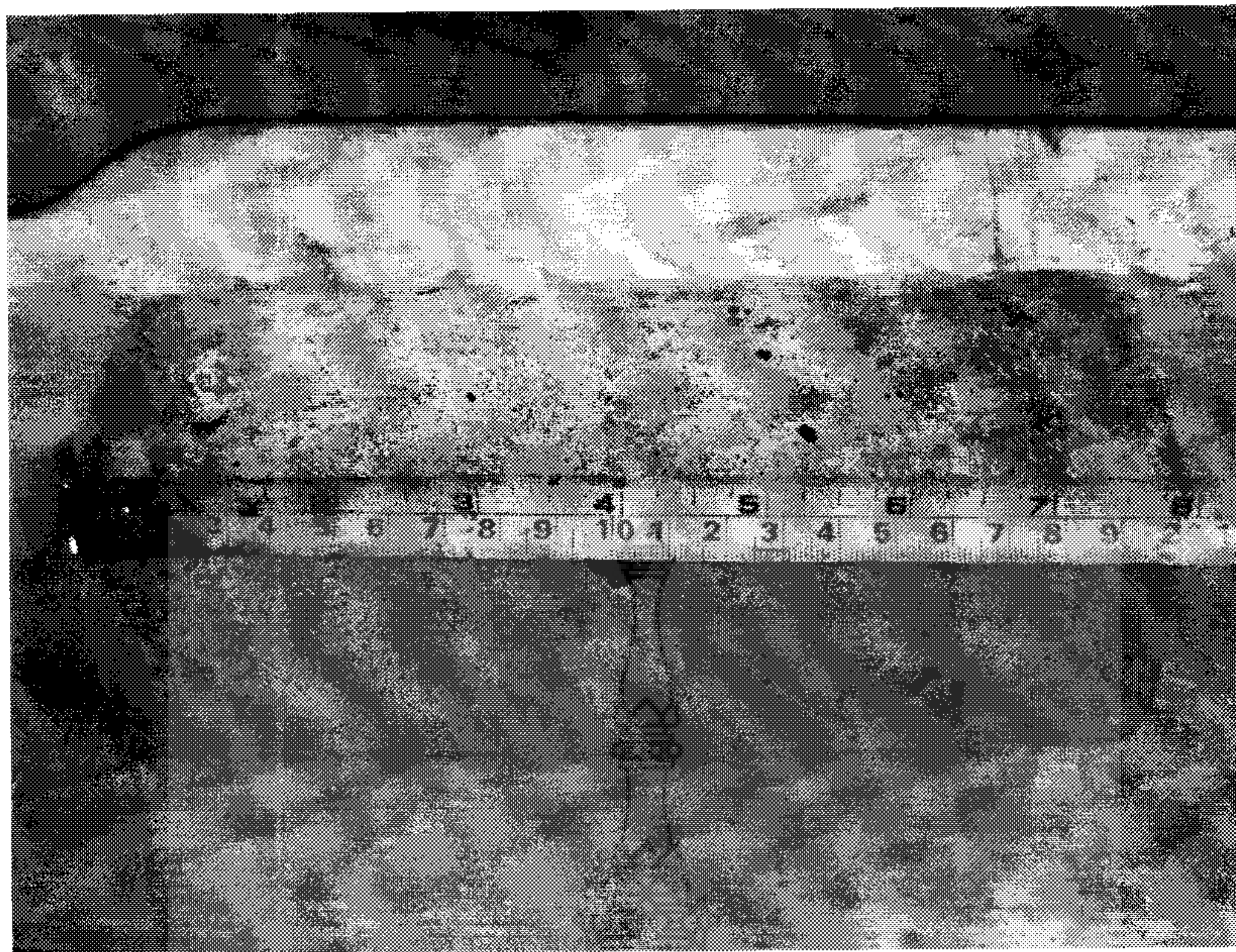




รูปที่ 3.16 การตรวจสอบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง



รูปที่ 3.17 การตรวจสอบน้ำหนัก



รูปที่ 3.18 การตรวจสอบขนาดความสูง

3.6.2 การตกแต่งผิวหน้าให้เรียบ

การตกแต่งผิวหน้าให้เรียบด้วยกำมะถัน ทำการต้มกำมะถันให้ละลายด้วยความร้อนหลังจากนั้นเทกำมะถันลงในแบบหล่อและตามด้วยการวางแท่งตัวอย่างทดสอบดังรูปที่ 3.19 ในการวางแท่งตัวอย่างทดสอบตั้งให้ได้แนวตั้งเพื่อป้องกันมิให้ผิวหน้าของตัวอย่างทดสอบเกิดการเอียง ดังรูปที่ 3.20



รูปที่ 3.19 การเคลือบผิวด้านบนตัวอย่างด้วยกำมะถัน

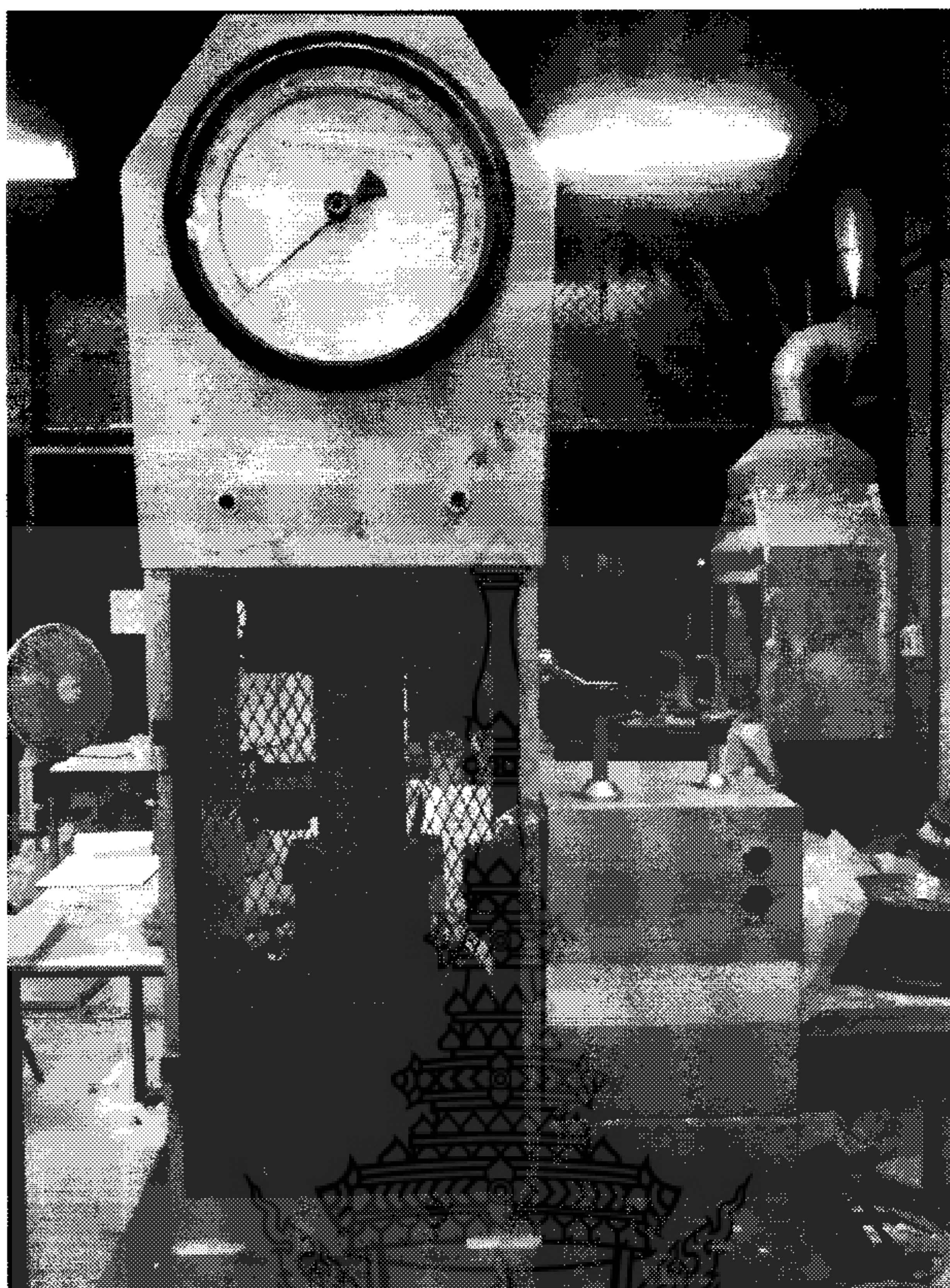


รูปที่ 3.20 วางตัวอย่างที่เคลือบผิวหน้าด้วยกัมมะถันให้แข็งตัวในอุณหภูมิปกติ

3.6.3 การทดสอบกำลังรับแรงอัด

การดำเนินการทดสอบกำลังรับแรงอัดของตัวอย่างทดสอบด้วยเครื่องทดสอบ Compression Machine ด้วยความเร็วคงที่และสม่ำเสมอตั้งรูปที่ 3.21 ทำการทดสอบจนแท่งตัวอย่างทดสอบเกิดความวิบัติไม่สามารถรับแรงได้พร้อมบันทึกค่าแรงสูงสุด และนำค่าแรงสูงสุดไปหาค่ากำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจากถ้ำลอย ถ้ำแกลบ ดินขาว และคอนกรีต





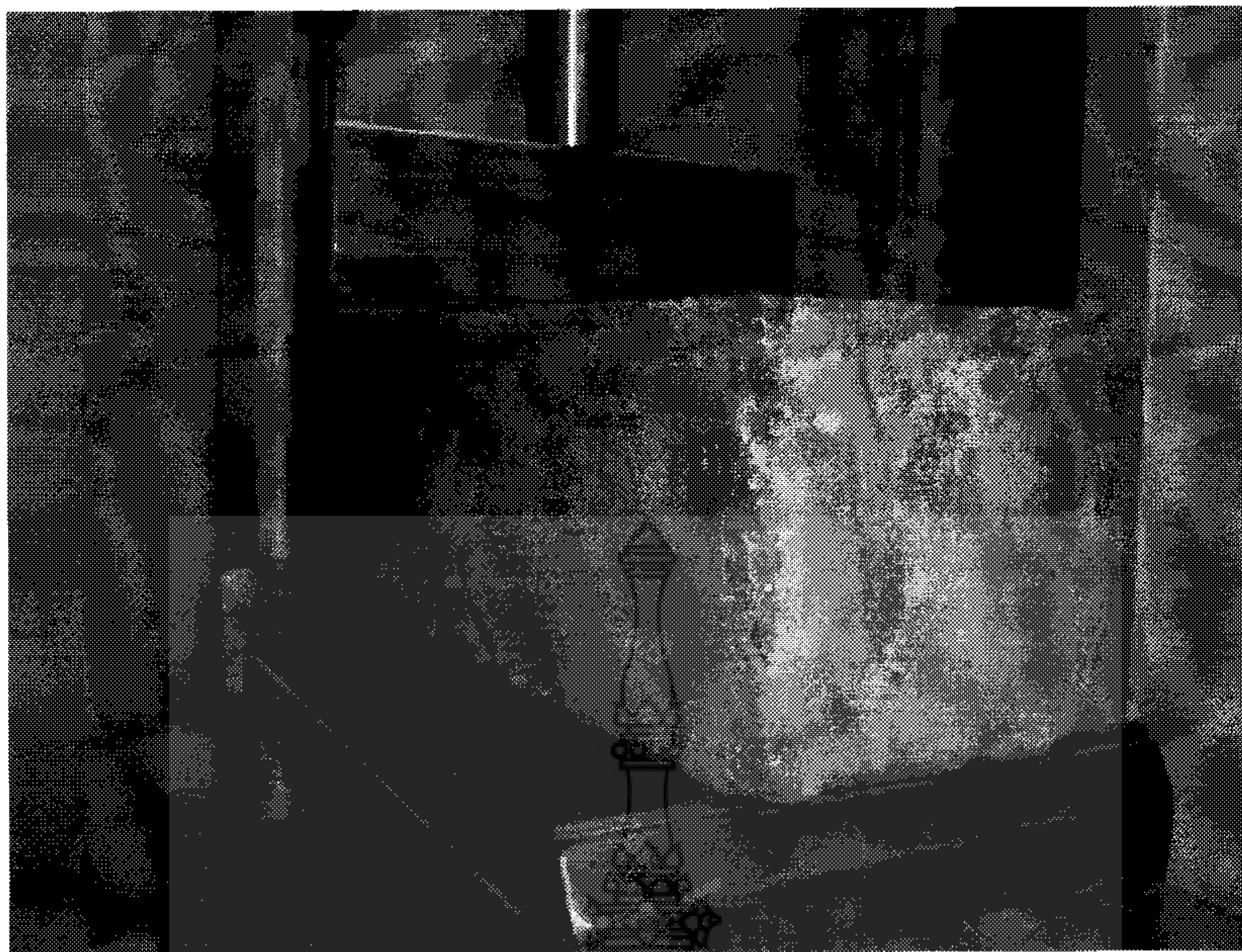
รูปที่ 3.21 การทดสอบกำลังรับแรงอัด

3.7 การทดสอบกำลังรับแรงดัด

การทดสอบกำลังรับแรงดัดของจีไอโพลีเมอร์คอนกรีตจากถ้ำลอย ถ้ำแกลบ ดินขาว และคอนกรีตรูปคาน โดยการนำตัวอย่างที่ดำเนินการให้ไฟฟ้ากระแสตรงเป็นระยะเวลา 28 วัน และตัวอย่างที่ไม่ได้ผ่านการให้กระแสไฟฟ้ามาทำการทดสอบกำลังรับแรงดัดของวัสดุแต่ละชนิด ซึ่งมีขั้นตอนการทดสอบดังนี้

3.7.1 การเตรียมตัวอย่างทดสอบ

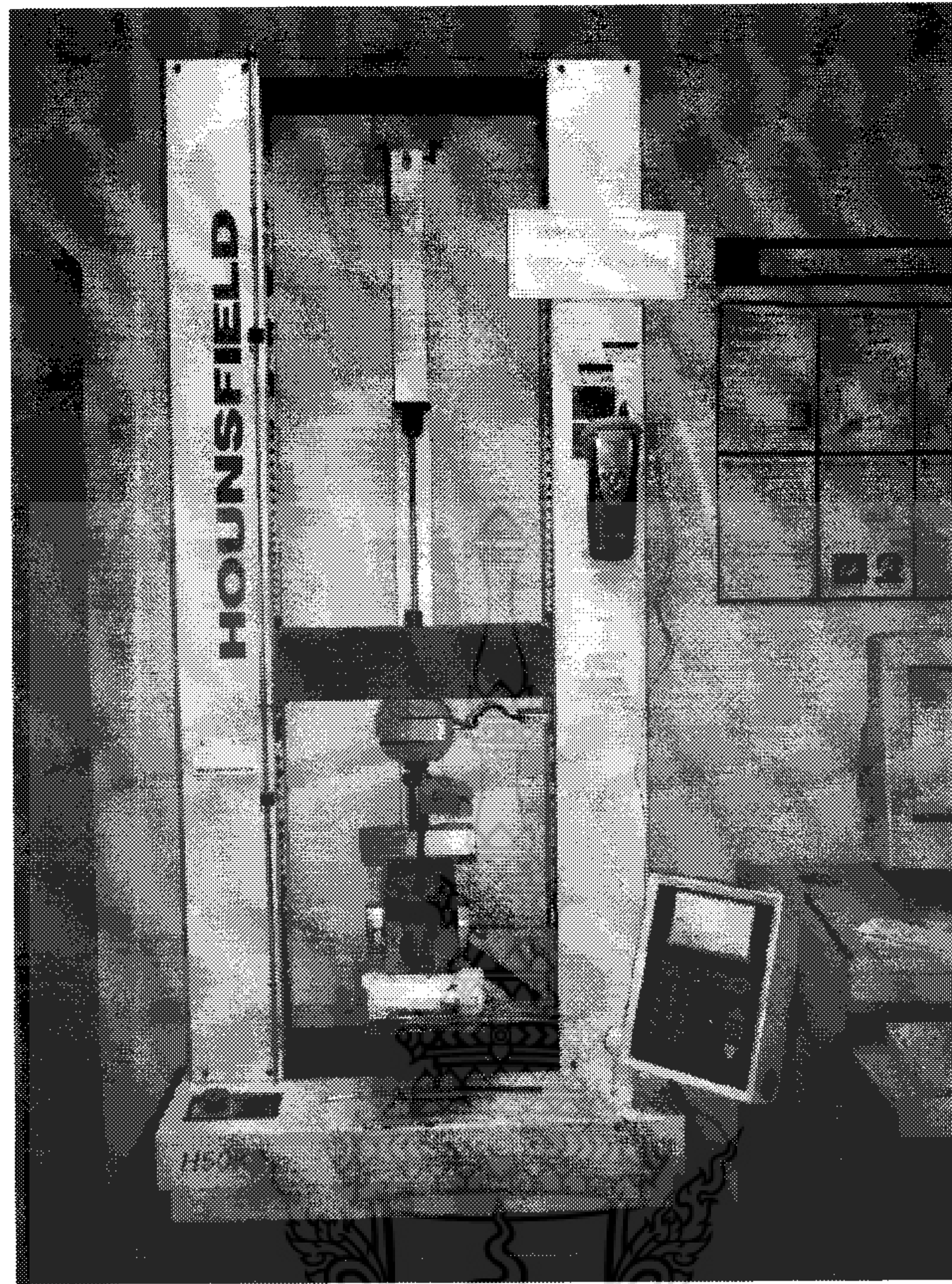
การเตรียมตัวอย่างทดสอบให้ทำความสะอาดพร้อมทั้งกำหนดช่วงความยาวสำหรับฐานรองรับ ซึ่งในการทดสอบได้กำหนดระยะห่างของฐานรองรับที่ระยะ 30 เซนติเมตร ดังรูปที่ 3.22 พร้อมตรวจสอบขนาดความกว้างและความหนาของตัวอย่างทดสอบ



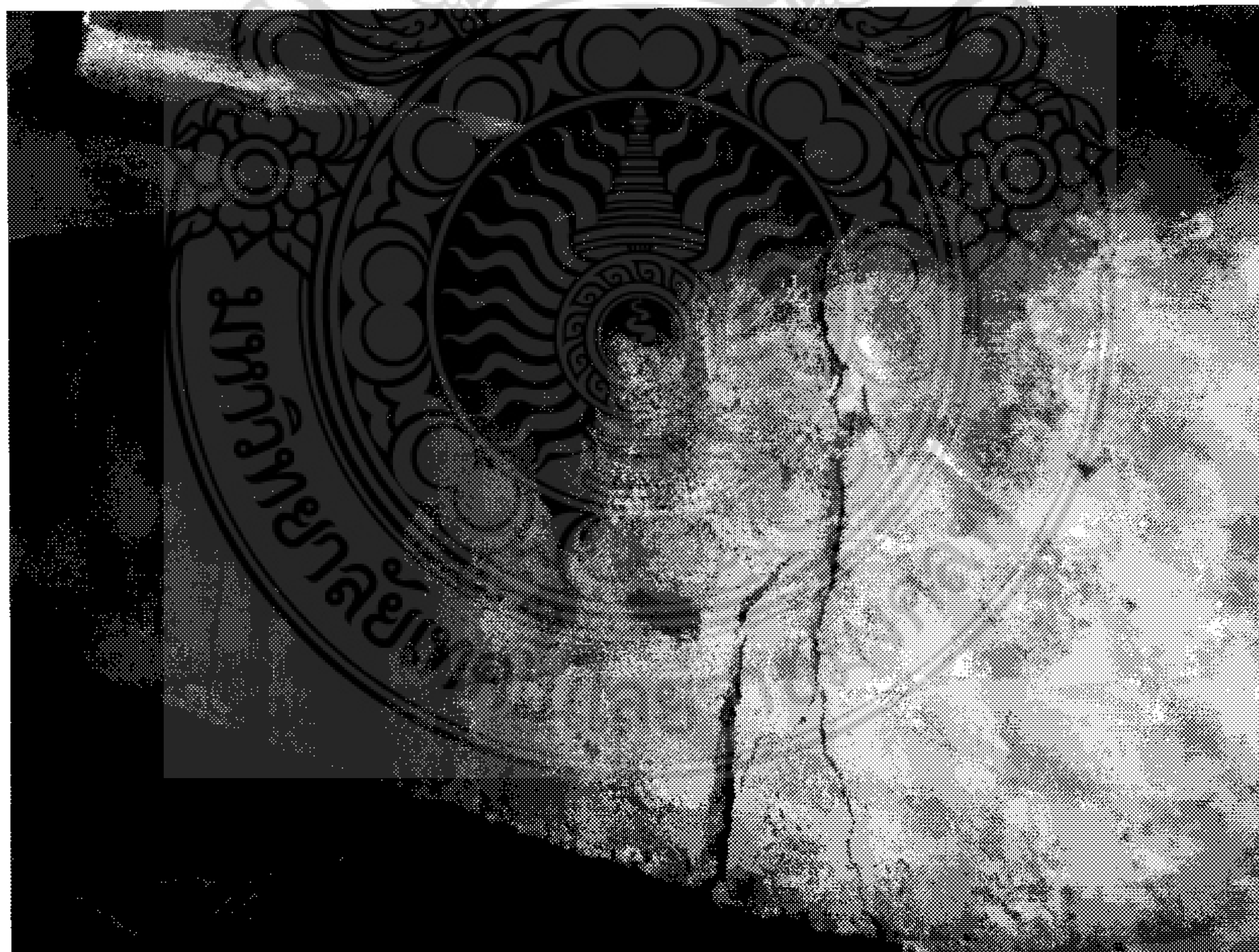
รูปที่ 3.22 การกำหนดระยะห่างของฐานรองรับ 30 เซนติเมตร

3.7.2 การทดสอบกำลังรับแรงดัด

การทดสอบกำลังรับแรงดัดเมื่อครบกำหนดการผ่านกระแสไฟฟ้าแล้วนำตัวอย่างคานจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจากถ้ำลอย ถ้ำกลบ ดินขาว และคอนกรีตรูปคาน ทำการทดสอบกำลังรับแรงดัดด้วยเครื่องทดสอบ (Universal Testing Machine) ด้วยอัตราความเร็วที่ 0.001 มิลลิเมตรต่อวินาที โดยนำตัวอย่างทดสอบมาเปรียบเทียบกำลังรับแรงดัดกับตัวอย่างที่ไม่ได้ผ่านการเร่งการเกิดสนิมของเหล็กเสริม ดังรูปที่ 3.23 และรูปที่ 3.24



รูปที่ 3.23 เครื่องทดสอบ Universal Testing Machine



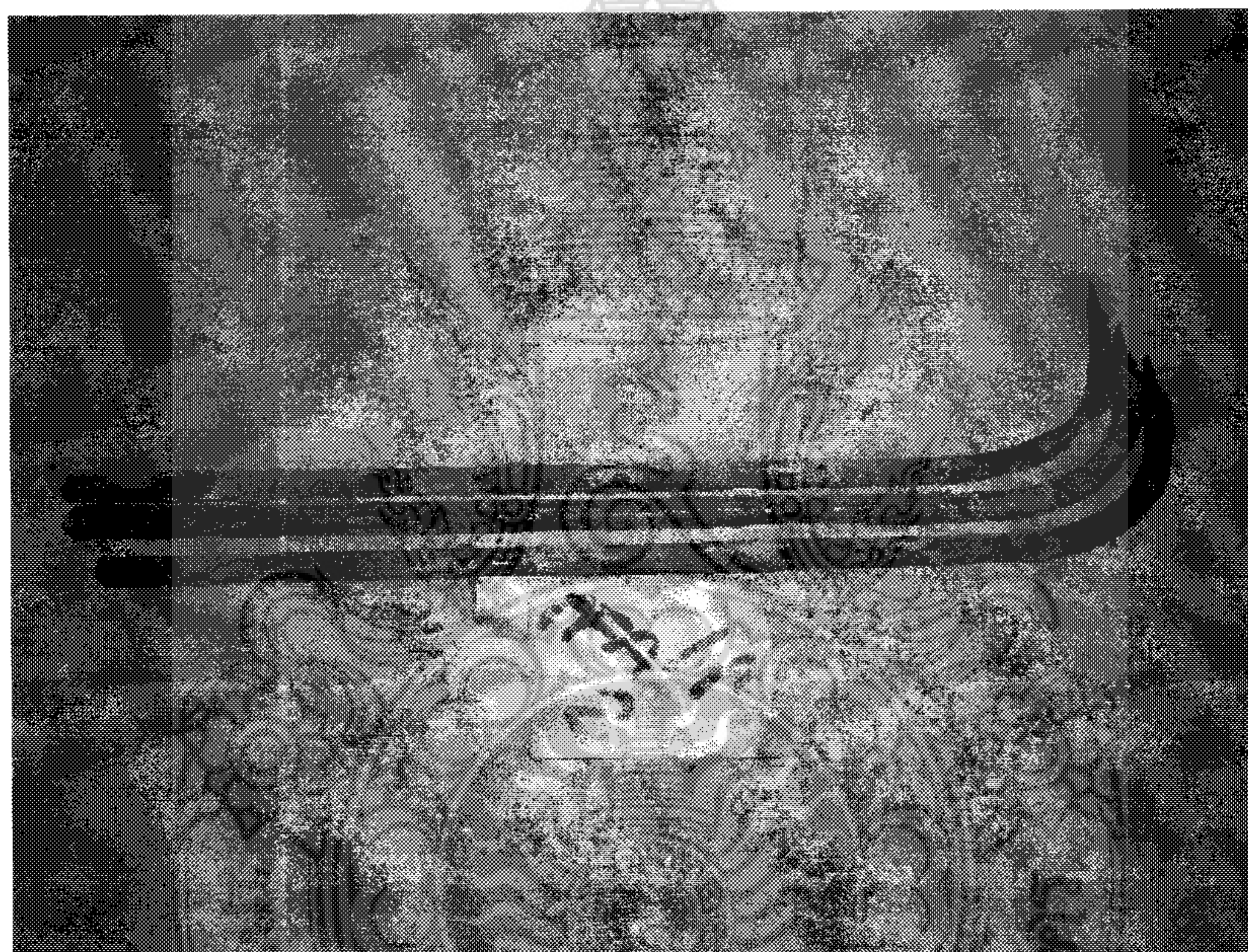
รูปที่ 3.24 รอยร้าวเนื่องจากการวิบัติของแท่งตัวอย่างทดสอบ

3.8 การสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริม

การตรวจสอบการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมจะดำเนินการตรวจสอบหลังจากที่ทำการทดสอบกำลังรับแรงดัดแล้ว นำตัวอย่างมาผ่าเพื่อตรวจสอบสภาพของเหล็กเสริมที่เกิดการกัดกร่อนเนื่องจากการเกิดสนิมของเหล็กเสริม และดำเนินการตรวจสอบวัดน้ำหนักของเหล็กเสริมที่ลดลงหลังจากการกัดกร่อนของเหล็กเสริมดังนี้

3.8.1 การเตรียมเหล็กเสริม

การเตรียมตัวอย่างเหล็กเสริมหลังจากดำเนินการทดสอบกำลังรับแรงดัดแล้ว ทำการทุบตัวอย่างเพื่อนำเหล็กออกจากตัวอย่างโดยทำการตัดชิ้นตัวอย่างของเหล็กเสริมให้มีความยาวขนาด 20 เซนติเมตร ดังรูปที่ 3.25 และรูปที่ 3.26



รูปที่ 3.25 ตัวอย่างเหล็กเสริมที่นำออกมาจากแท่งตัวอย่างทดสอบ



รูปที่ 3.26 เหล็กเสริมความยาว 20 เซนติเมตร

3.8.2 การขัดสนิม

การขัดสนิมของเหล็กเสริมโดยการใส่แปร่งลวดทองเหล็ก 2 ขนาด ดังรูปที่ 3.27 ทำการขัดสนิมที่ติดอยู่บริเวณโดยรอบของเหล็กเสริม

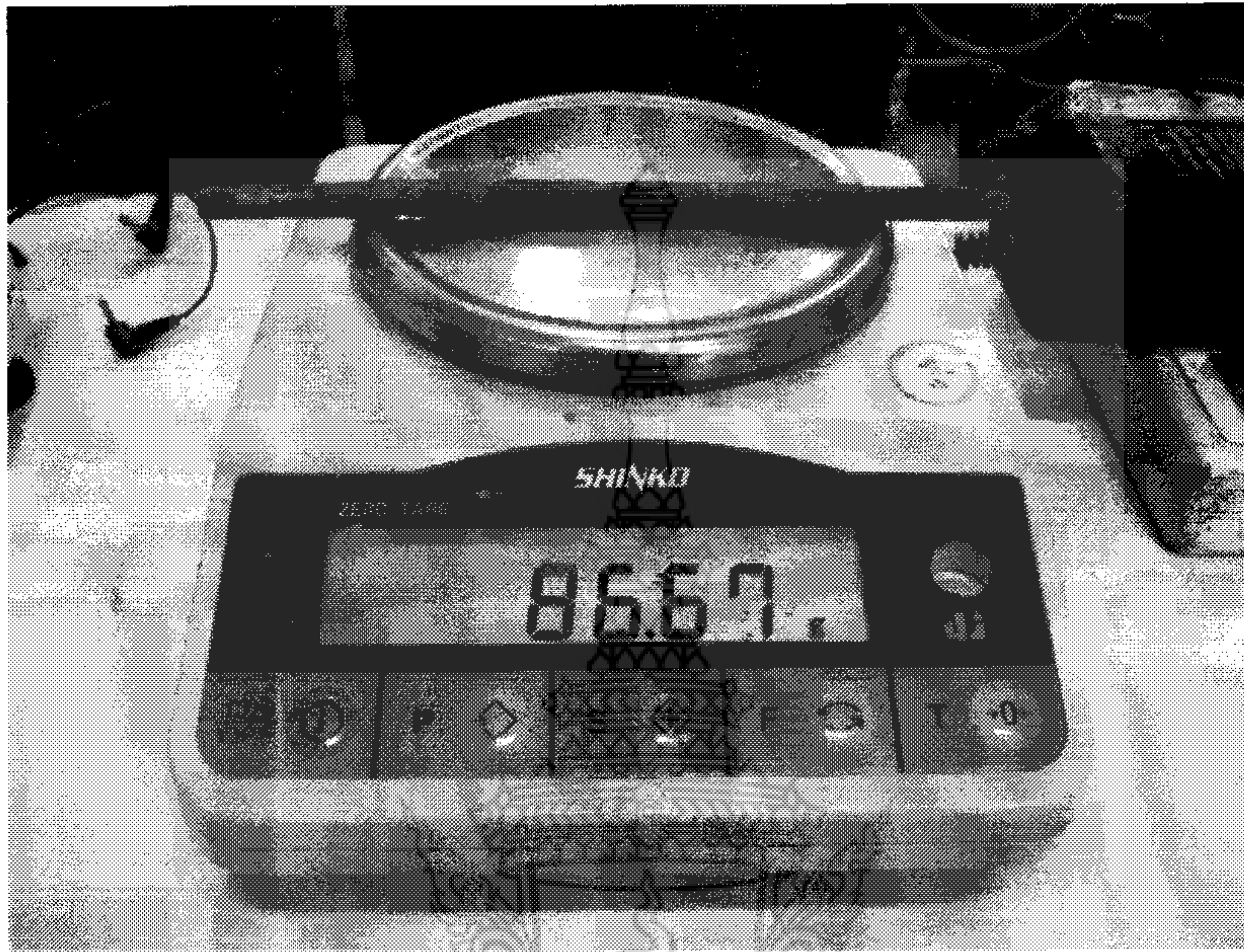


รูปที่ 3.27 การขัดสนิมของเหล็กเสริม



3.8.3 การตรวจสอบน้ำหนัก

การตรวจสอบน้ำหนักของเหล็กเสริมโดยการชั่งน้ำหนักของเหล็กเสริมและเครื่องชั่งน้ำหนักสามารถอ่านค่าได้ละเอียด 0.01 กรัม ดังรูปที่ 3.28



รูปที่ 3.28 การชั่งน้ำหนักของเหล็กเสริม



บทที่ 4 ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

การดำเนินการศึกษาผลกระทบการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตเสริมเหล็กที่ใช้เป็นโครงสร้างในสภาพสิ่งแวดล้อมทะเล สำหรับผลและวิจารณ์ผลการทดลองดังนี้

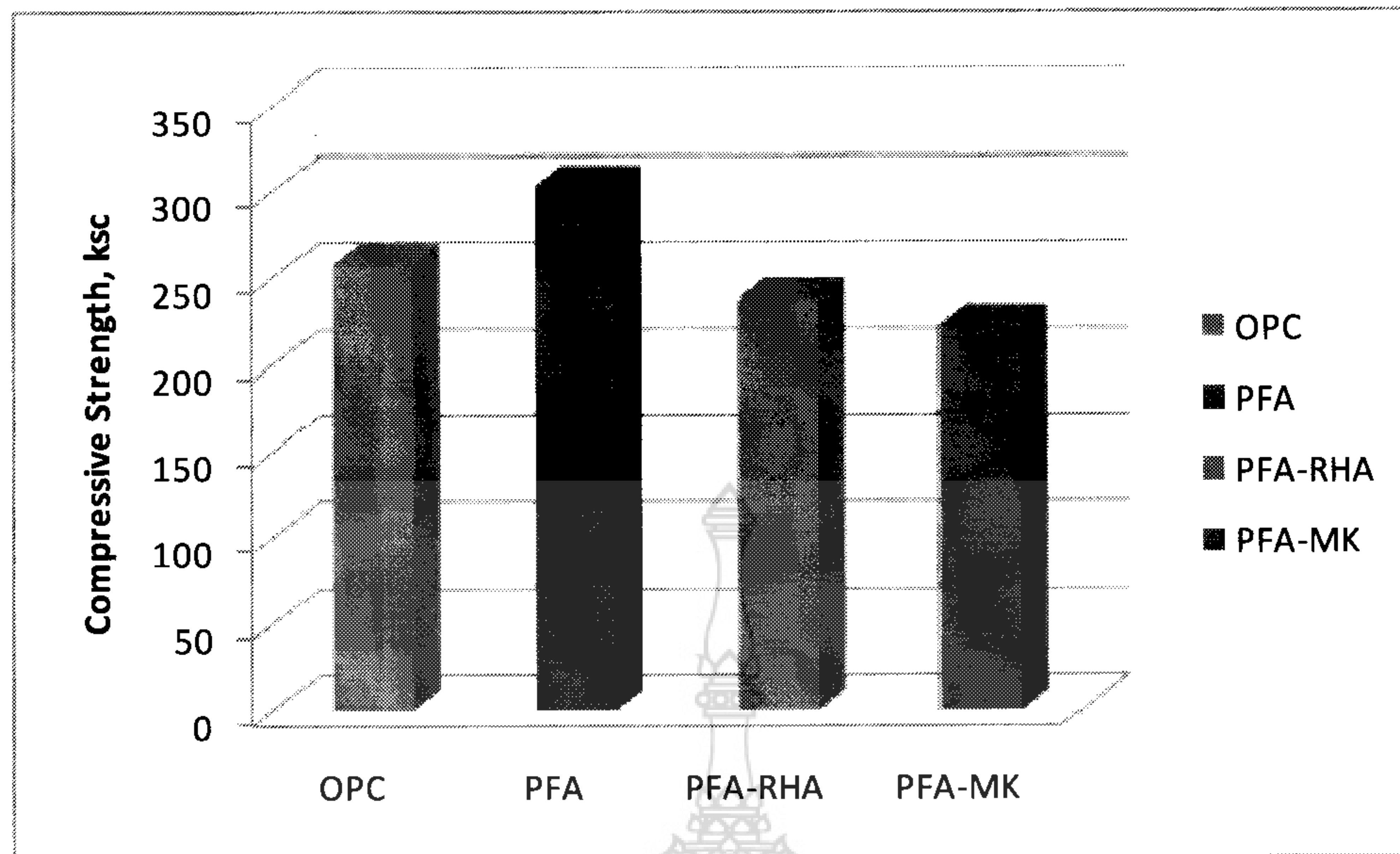
4.1 วัสดุผสมจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าลอย เถ้าแกลบ ดินขาว และคอนกรีต

4.1.1 กำลังรับแรงอัด

การทดสอบกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าลอย เถ้าแกลบ ดินขาว และคอนกรีต จากผลการทดสอบวัสดุผสมทั้ง 3 ประเภท คือ เถ้าลอย เถ้าแกลบ และดินขาวมีผลต่อค่ากำลังรับแรงอัดซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาที่ผ่านมาโดยพบว่าอัตราส่วนของ $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{SiO}_3 / \text{NaOH}$ มีผลต่อค่ากำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์ ซึ่งปริมาณสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวแปรหลักที่มีผลต่อค่ากำลังรับแรงอัดและความสามารถทำงานได้ เมื่อปริมาณสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์มีปริมาณน้อยลงค่ากำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตก็เพิ่มขึ้นแต่ส่งผลต่อความสามารถทำงานได้น้อยลง การศึกษาที่ผ่านมา (ปริญา, 2548, สราวุฒิ, 2551) พบว่าอัตราส่วนของ $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{SiO}_3 / \text{NaOH}$ ต่ำ เท่ากับ 0.67 และ 1.00 ให้ค่ากำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตสูงกว่าอัตราส่วน $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{SiO}_3 / \text{NaOH}$ สูง เท่ากับ 1.50 และ 3.00 สำหรับในการศึกษาในครั้งนี้เป็นการบ่มจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอย เถ้าแกลบ และดินขาวด้วยอุณหภูมิปกติซึ่งให้ค่ากำลังรับแรงอัดที่น้อยกว่าการบ่มจีโอโพลิเมอร์ด้วยความร้อน และงานวิจัยโดยส่วนใหญ่อุณหภูมิที่ใช้สำหรับการบ่มจะอยู่ในช่วงระหว่าง 60 ถึง 100 องศาเซลเซียส

กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าลอย เถ้าแกลบ ดินขาว และคอนกรีต จากผลการทดสอบเห็นได้ว่าจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าลอยค่ากำลังรับแรงอัดมากที่สุด เท่ากับ 303.54 กก./ cm^2 รองลงมาคือจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าแกลบ เท่ากับ 237.93 กก./ cm^2 และจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจากดินขาวค่ากำลังรับแรงอัดน้อยที่สุด เท่ากับ 223.43 กก./ cm^2 ดังรูปที่ 4.1 เมื่อเปรียบเทียบค่ากำลังรับแรงอัดกับคอนกรีต พบว่าจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าลอยมีค่ากำลังรับแรงอัดมากกว่าคอนกรีต ซึ่งคอนกรีตควบคุมมีค่ากำลังรับแรงอัด เท่ากับ 257.91 กก./ cm^2





รูปที่ 4.1 กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าลอย เถ้าแกลบ ดินขาว และคอนกรีต

4.2 การกัดกร่อนของเหล็กเสริมในจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าลอย เถ้าแกลบ ดินขาว และคอนกรีต

4.2.1 ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์

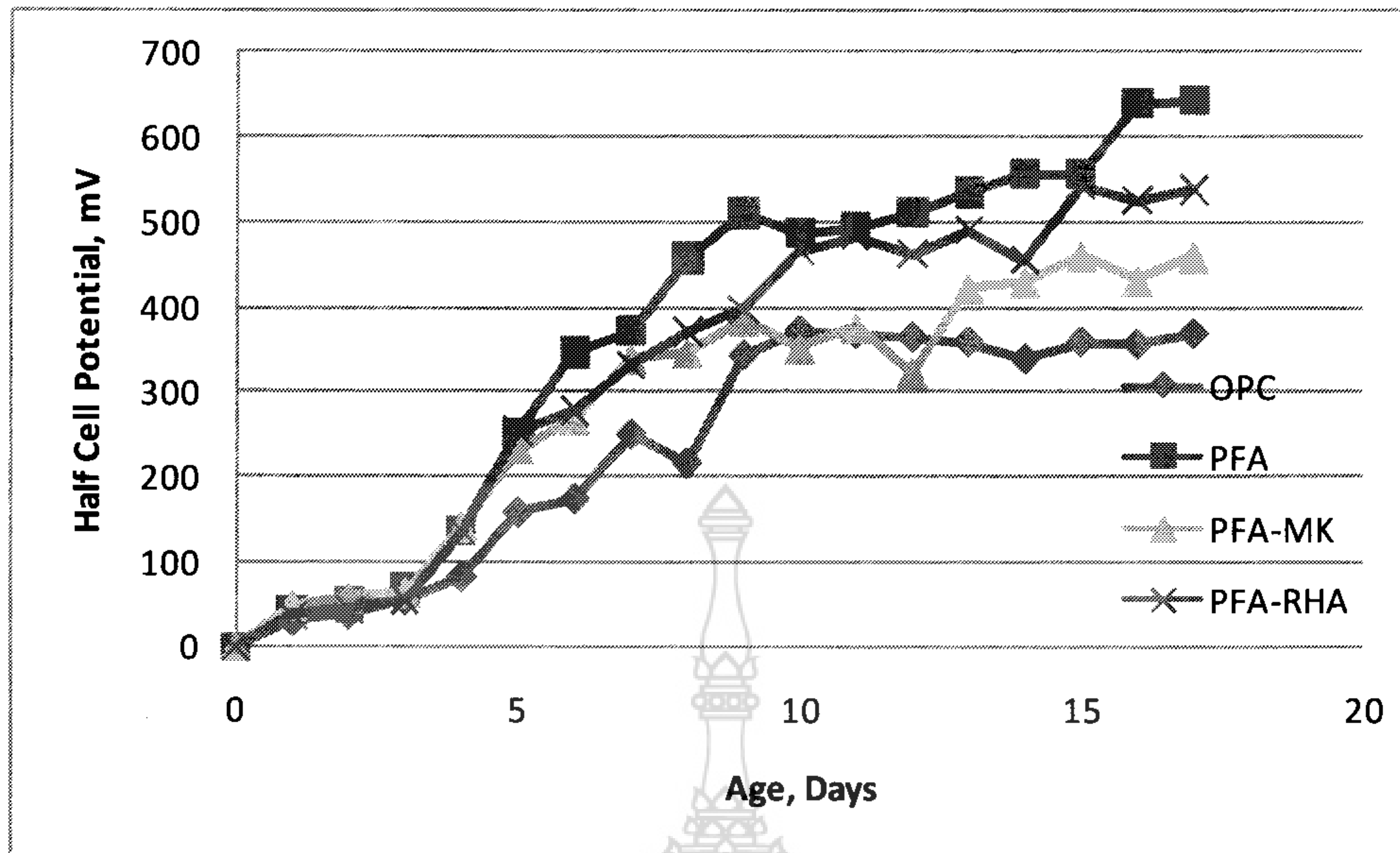
การเร่งการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าลอย เถ้าแกลบ ดินขาว และคอนกรีต เป็นระยะเวลา 28 วัน โดยเปรียบเทียบกับค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์มาตรฐาน ASTM C 876

ตารางที่ 4.1 ความต่างศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์และแนวโน้มการเกิดสนิมของเหล็กเสริม ASTM C 876

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

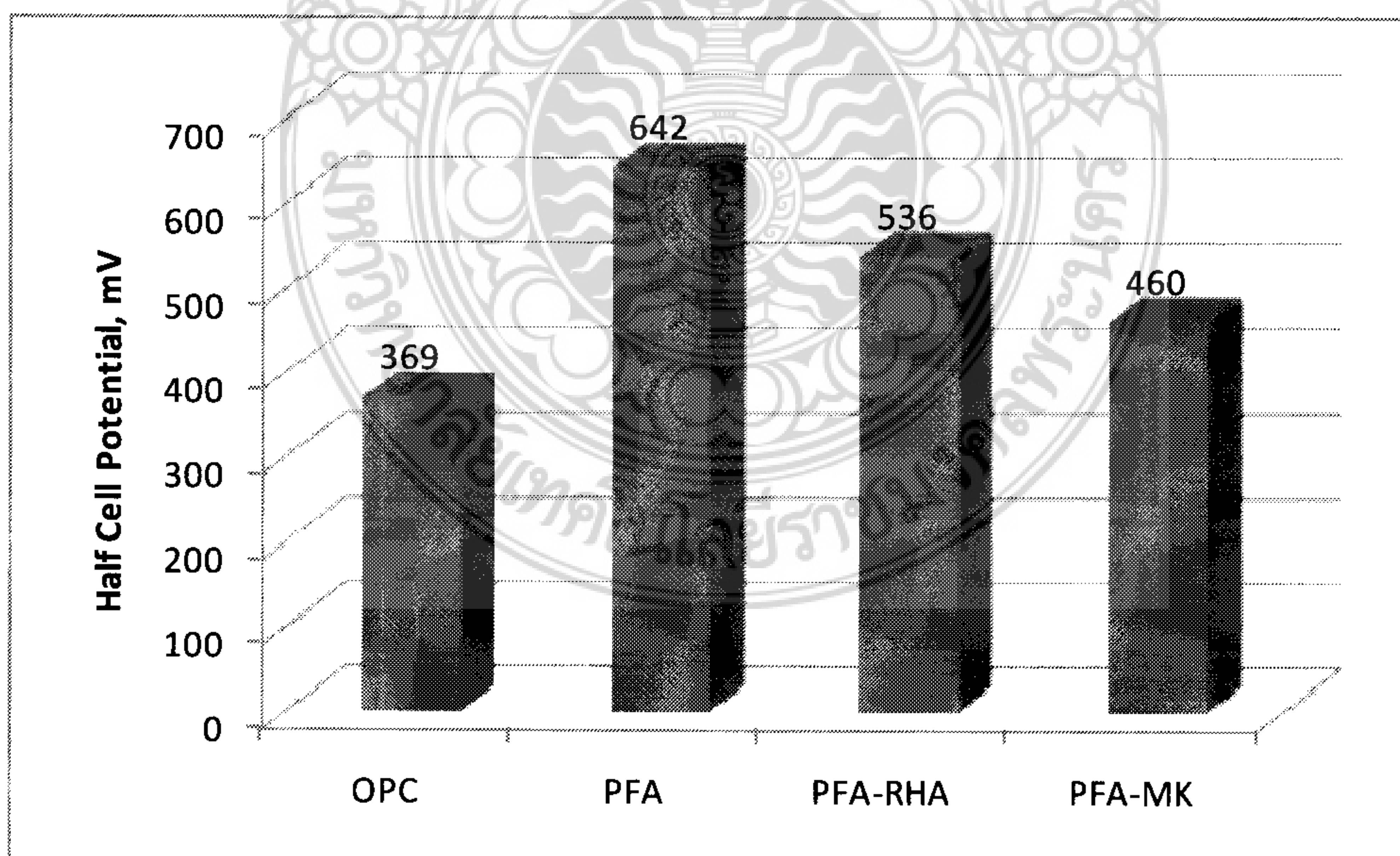
ผลการทดสอบการกัดกร่อนของเหล็กเสริมในจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าลอย เถ้าแกลบ ดินขาว และคอนกรีตซึ่งแช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์และเร่งการเกิดสนิมของเหล็กเสริมด้วยกระแสไฟฟ้า 6 โวลต์ จากการตรวจสอบแนวโน้มการกัดกร่อนของเหล็กเสริมด้วยค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ดังรูปที่ 4.2





รูปที่ 4.2 ความต่างศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจากถ้ำลอย ถ้ำเกลบ ดินขาว และคอนกรีต

แนวโน้มการเกิดสนิมของเหล็กของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจากถ้ำลอยมีปริมาณค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์มากที่สุด เท่ากับ 642 mV จีโอโพลิเมอร์จากถ้ำเกลบมีปริมาณค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ เท่ากับ 539 mV และจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจากดินขาวมีปริมาณค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ เท่ากับ 460 mV เมื่อนำค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ไปตรวจสอบกับค่ามาตรฐานดังรูปที่ 4.3 ค่าเกินว่ามาตรฐานกำหนดไว้ คือ มีค่ามากกว่า -350 mV แสดงว่ามีแนวโน้มการเกิดสนิมของเหล็กเสริมมากกว่า ร้อยละ 90

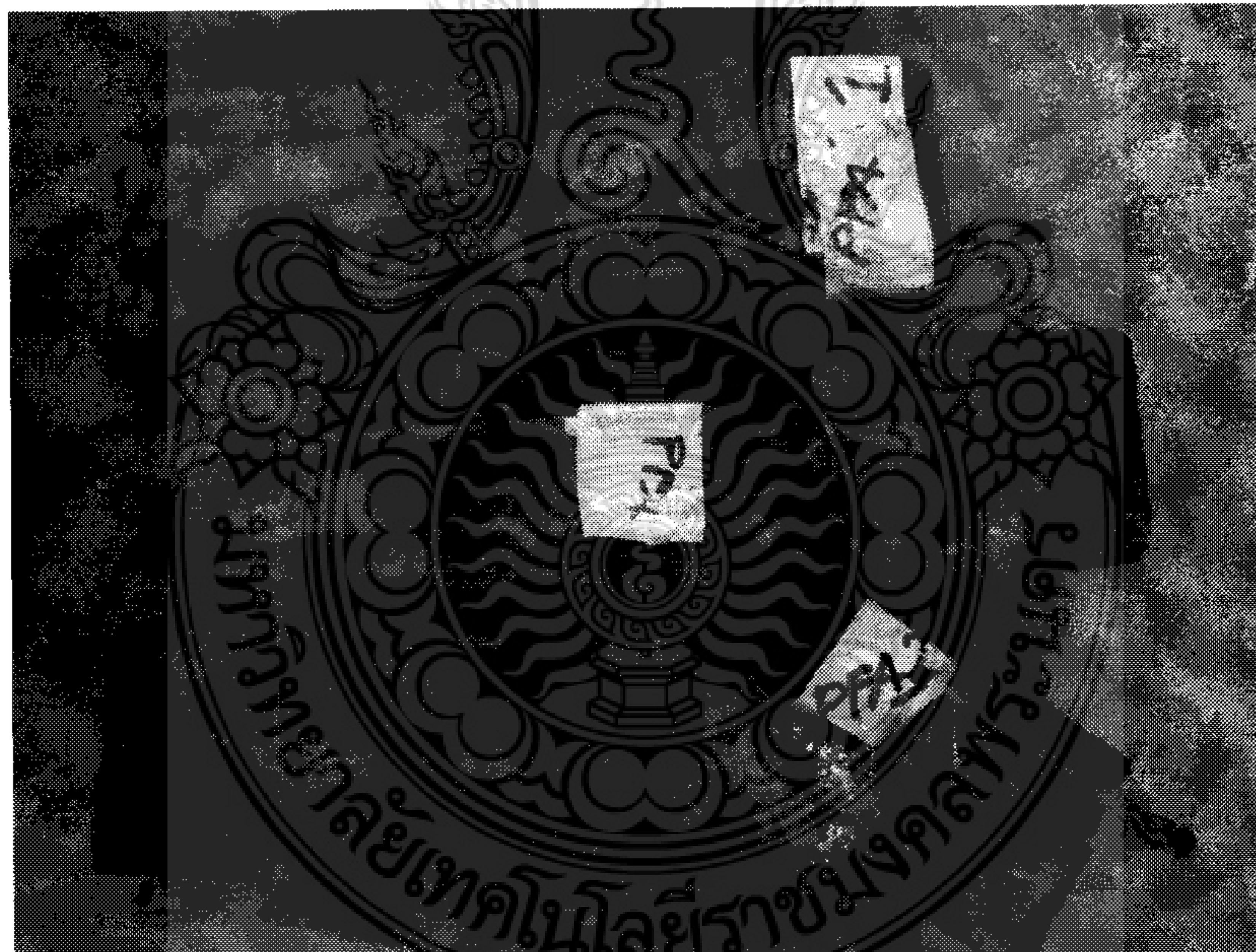


รูปที่ 4.3 ความต่างศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจากถ้ำลอย ถ้ำเกลบ ดินขาว และคอนกรีต



สำหรับผลการตรวจสอบค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจากถ้ำลอย ถ้ำแกลบ ดินขาว จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าอัตราส่วน $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{SiO}_3 / \text{NaOH}$ มีผลต่อค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ เนื่องจากจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่มีอัตราส่วน $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{SiO}_3 / \text{NaOH}$ สูงมีปริมาณของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์น้อย สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวชะละลายสารประกอบต่างๆ โดยที่จีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจากถ้ำลอย ถ้ำแกลบ และดินขาวมีสารประกอบอลูมินา (Al) และซิลิกอน (Si) จะถูกชะออกมา เนื่องจากเป็นสารหลัก เมื่อปริมาณสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์มากขึ้นการชะละลายมากขึ้นและส่งผลไปสู่การเกิดปฏิกิริยาโพลิเมอร์ไรเซชันที่สมบูรณ์ ถ้าสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์น้อย การชะละลายก็จะส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาที่ไม่สมบูรณ์หรือทำปฏิกิริยาไม่หมดจะถูกผนวกและกลายเป็นส่วนหนึ่งของเนื้อจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต ทำให้เกิดช่องว่างหรือโพรงขนาดใหญ่เนื่องจากการทำปฏิกิริยา เมื่อมีการเร่งการเกิดสนิมของเหล็กเสริมโดยการแช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ส่งผลให้น้ำและออกซิเจนเข้าไปในช่องว่างและโพรงขนาดใหญ่ โดยมีอิออนของคลอไรด์เป็นสะพานเชื่อมให้เกิดกระบวนการทางไฟฟ้า-เคมี

นอกจากนี้จากการเร่งการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจากถ้ำลอย ถ้ำแกลบ และดินขาว พบว่าเมื่อเร่งการเกิดสนิมของเหล็กเสริมครบ 28 วัน เกิดรอยร้าวบนตัวอย่างคานจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจากถ้ำลอย ถ้ำแกลบ และดินขาว โดยจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจากถ้ำลอยเกิดรอยร้าวจนไม่สามารถทำการทดสอบกำลังรับแรงดัดได้ดังรูปที่ 4.4

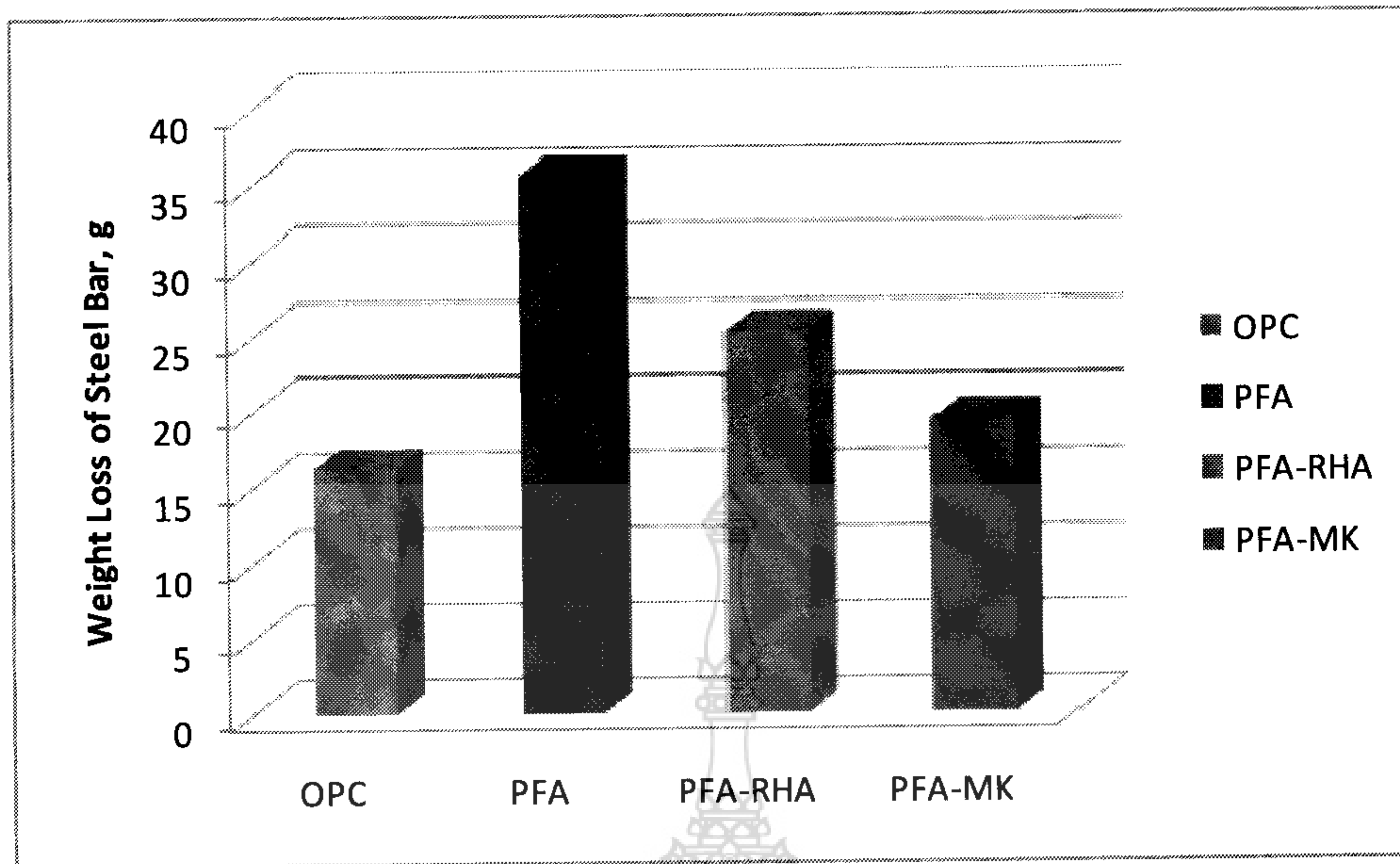


รูปที่ 4.4 การแตกร้าวของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจากถ้ำลอย

4.3 การสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริม

การเร่งการเกิดสนิมของเหล็กเสริมส่งผลให้พื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริมลดลงตามระดับของความรุนแรงของการกัดกร่อนของเหล็กเสริม ดังรูปที่ 4.5





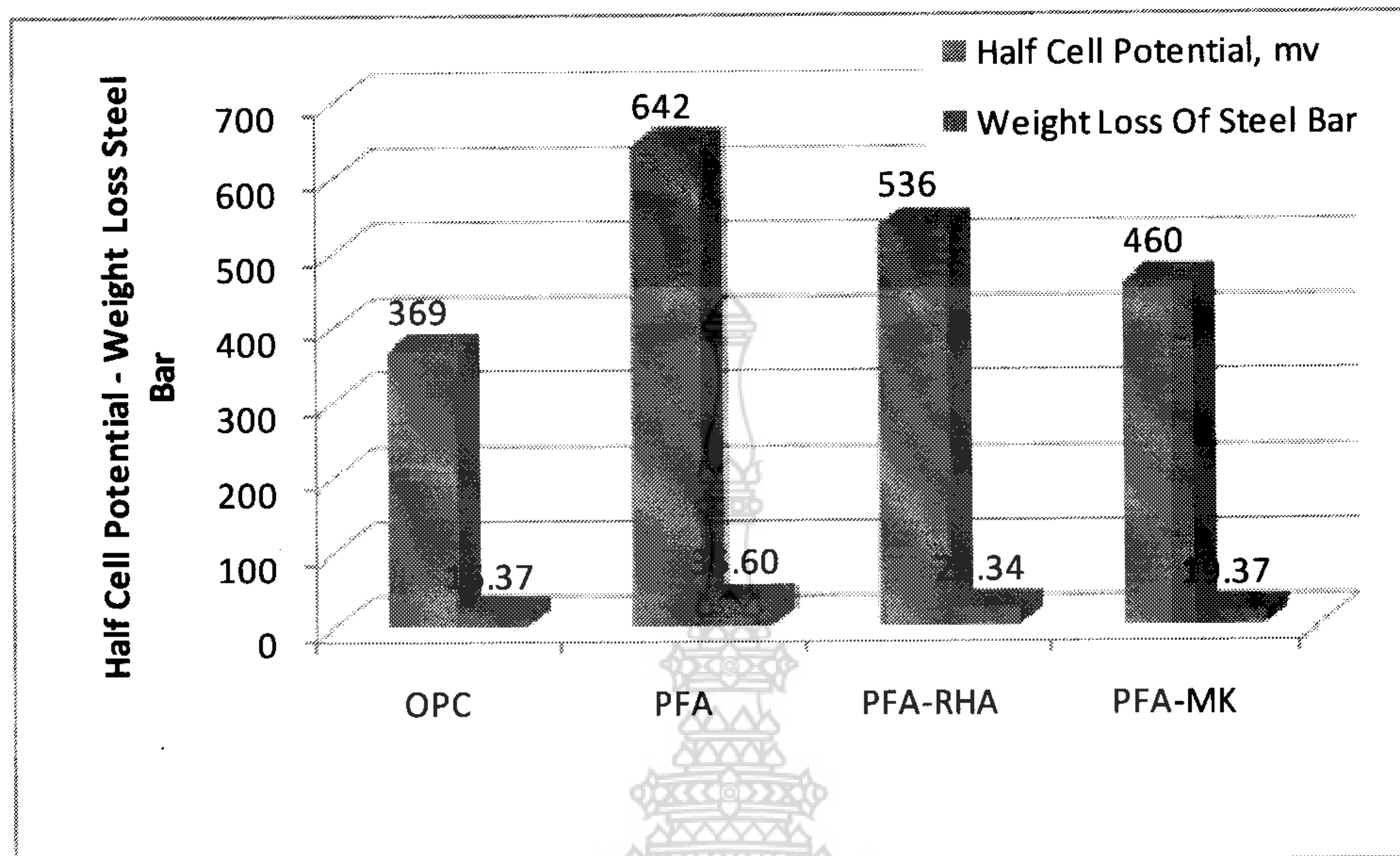
รูปที่ 4.5 การสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริม

การตรวจสอบการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมดังรูปที่ 4.6 พบว่าจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจากถ้ำลอยมีการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมมากที่สุด เท่ากับ 35.60 g รองลงมาคือจีโอโพลิเมอร์จากถ้ำแกลบมีการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริม เท่ากับ 25.34 g และจีโอโพลิเมอร์จากดินขาวมีการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริม เท่ากับ 19.37 g อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาการสูญเสียน้ำหนักของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจากถ้ำลอย ถ้ำแกลบ และดินขาว กับคอนกรีต คอนกรีตมีการสูญเสียพื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริมน้อยที่สุด เท่ากับ 16.37 g



รูปที่ 4.6 การสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริม

เมื่อพิจารณาค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ต่อการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริม พบว่าค่าความต่างไฟฟ้าครึ่งเซลล์มากขึ้นส่งผลต่อการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมอย่างเห็นได้อย่างชัดเจนดังรูปที่ 4.7



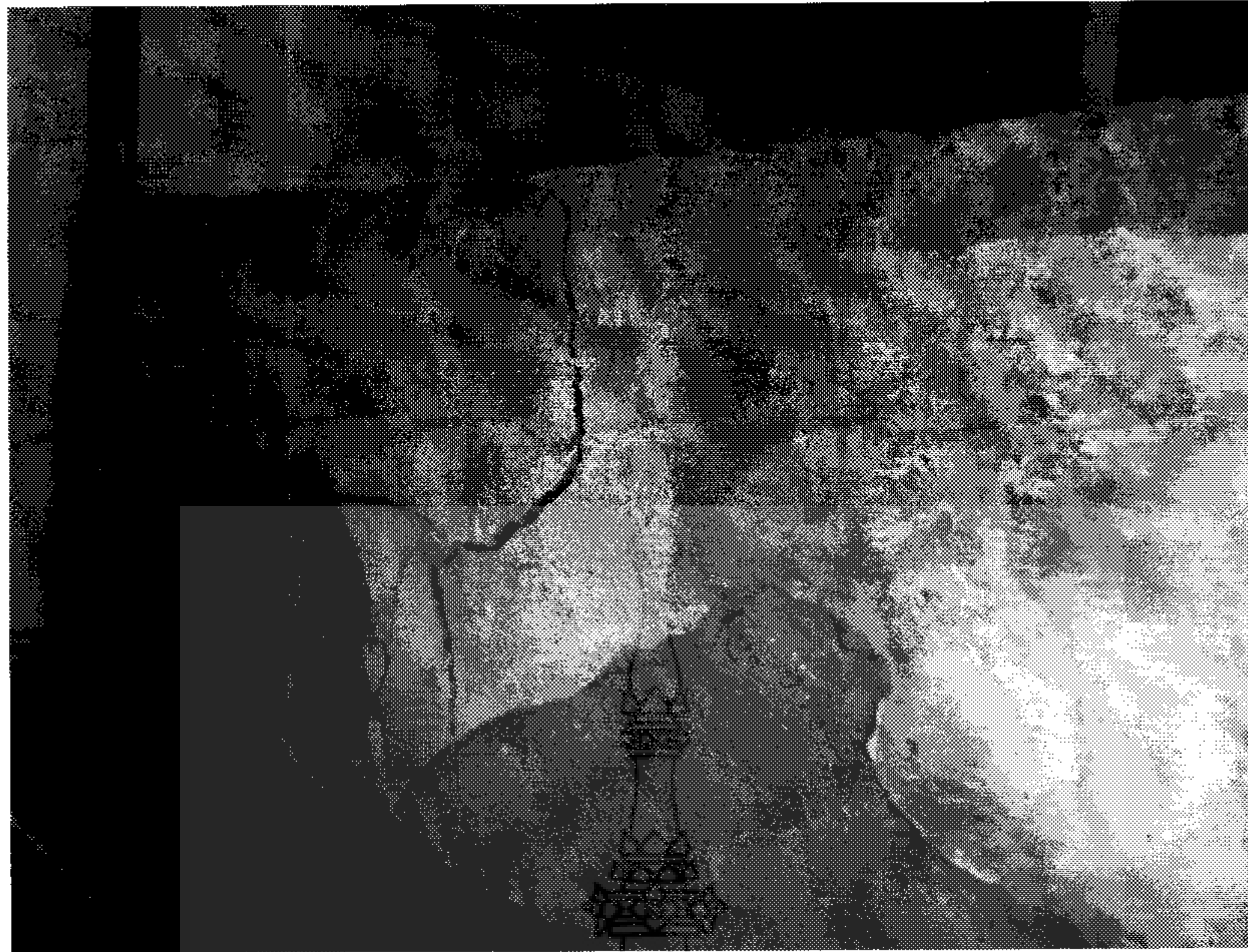
รูปที่ 4.7 ความต่างศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ต่อการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริม

4.4 กำลังรับแรงดัดของคานจีโอโพลีเมอร์คอนกรีตจากถ้ำลอย ถ้ำแกลบ ดินขาว และคอนกรีต

4.4.1 กำลังรับแรงดัด

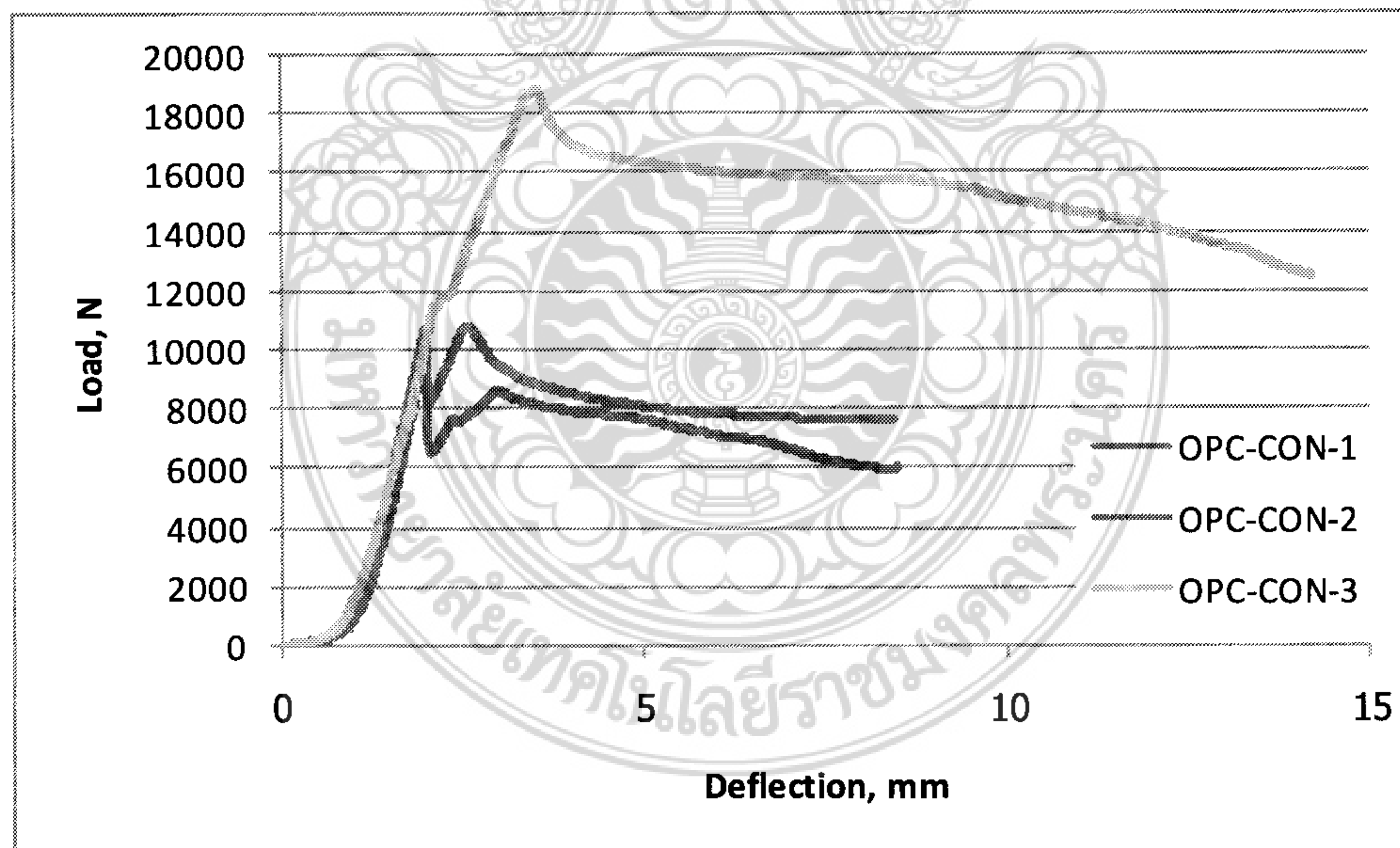
การทดสอบกำลังรับแรงดัดของคานจีโอโพลีเมอร์คอนกรีตจากถ้ำลอย ถ้ำแกลบ ดินขาว และคอนกรีต ภายใต้น้ำหนักบรรทุกคงที่จนกระทั่งเกิดการวิบัติ เมื่อคานรับน้ำหนักบรรทุกลักษณะการเกิดรอยร้าวจะเกิดขึ้นบริเวณกึ่งกลางคานซึ่งเป็นลักษณะการแตกร้าวแบบโมเมนต์ดัด และเมื่อน้ำหนักบรรทุกเพิ่มขึ้นรอยร้าวจะเกิดในช่วงความยาวของคานระหว่างฐานรองรับทั้งสองข้าง สำหรับการทดสอบคานจีโอโพลีเมอร์คอนกรีตจากถ้ำลอย ถ้ำแกลบ ดินขาว ที่เกิดการการกัดกร่อนของเหล็กเสริมอย่างรุนแรง การวิบัติจะเกิดเนื่องจากการสูญเสียกำลังการยึดเหนี่ยวระหว่างจีโอโพลีเมอร์คอนกรีตต่อเหล็กเสริม (Debonding Failure) ดังรูปที่ 4.8





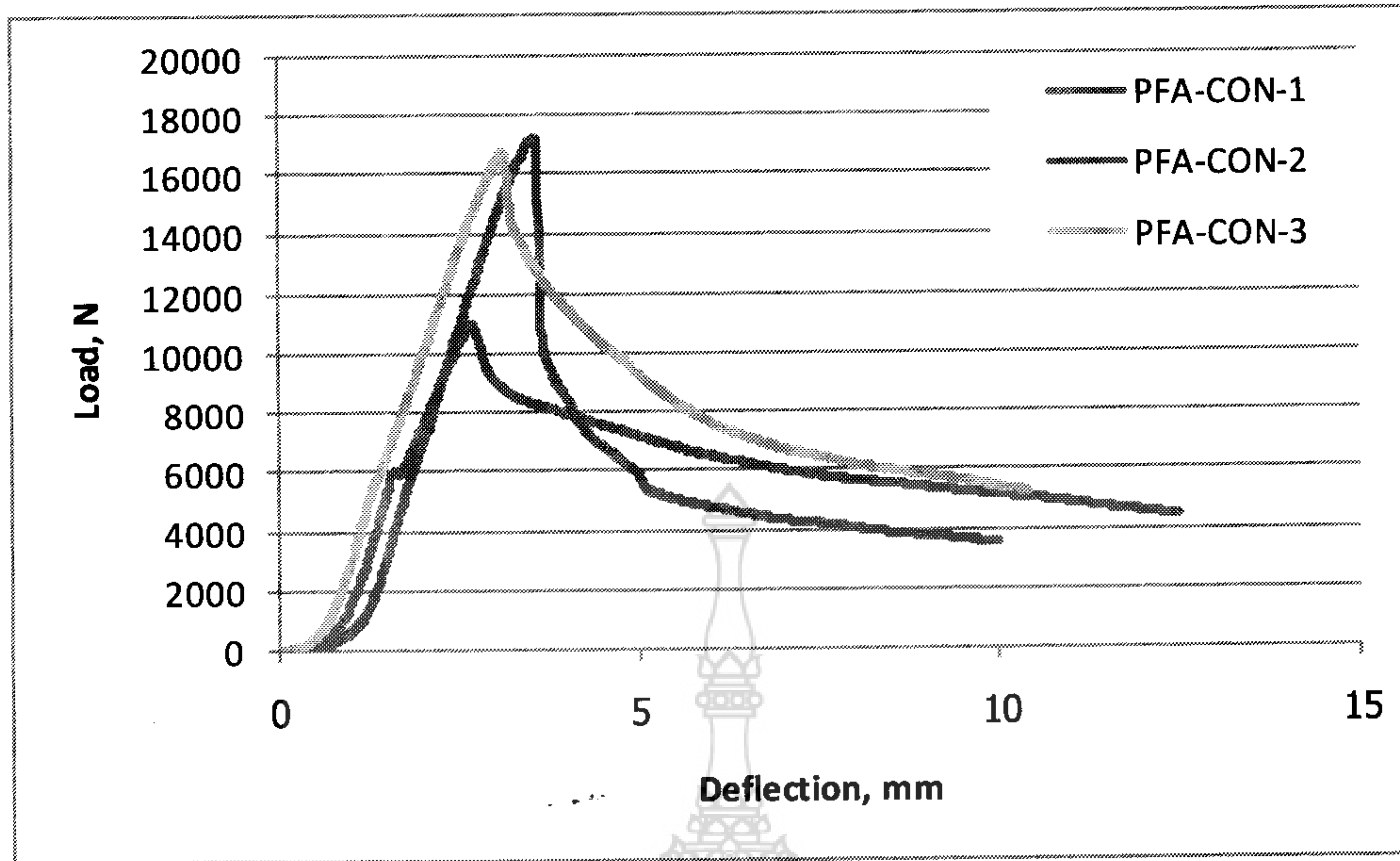
รูปที่ 4.8 การสูญเสียกำลังการยึดเหนี่ยวระหว่างจีโพลิเมอร์คอนกรีตต่อเหล็กเสริม

การทดสอบกำลังรับแรงดัดของคานจีโพลิเมอร์คอนกรีตจากถ้ำลอย ถ้ำกลบ ดินขาว และคอนกรีต สามารถนำค่ากำลังรับแรงดัดและค่าการโก่งตัวที่สภาวะต่างๆ มาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง กำลังรับแรงดัดและการโก่งตัวดังรูปที่ 4.9 ถึงรูปที่ 4.15

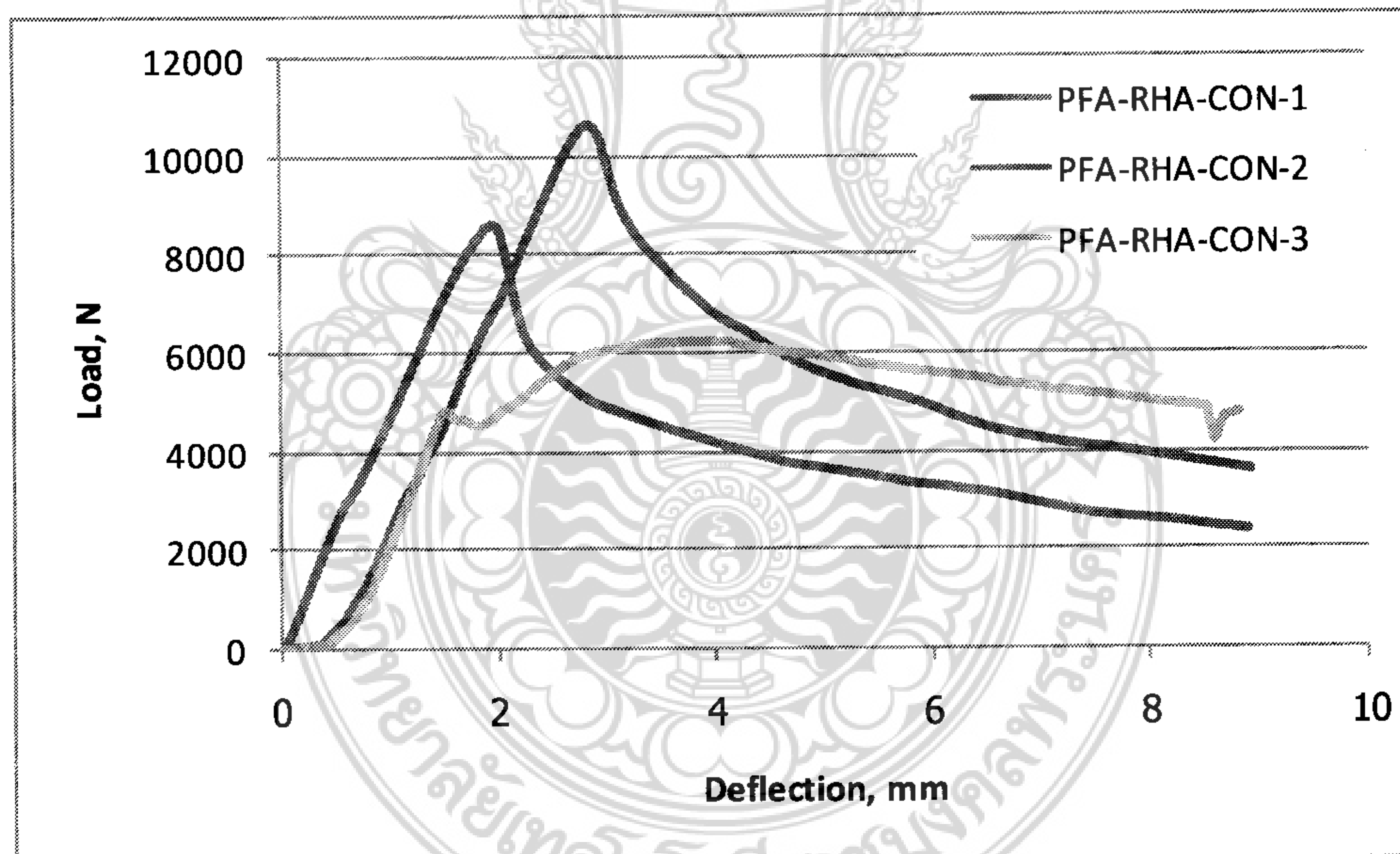


รูปที่ 4.9 กำลังรับแรงดัดและการโก่งตัวของคานคอนกรีต OPC-CON



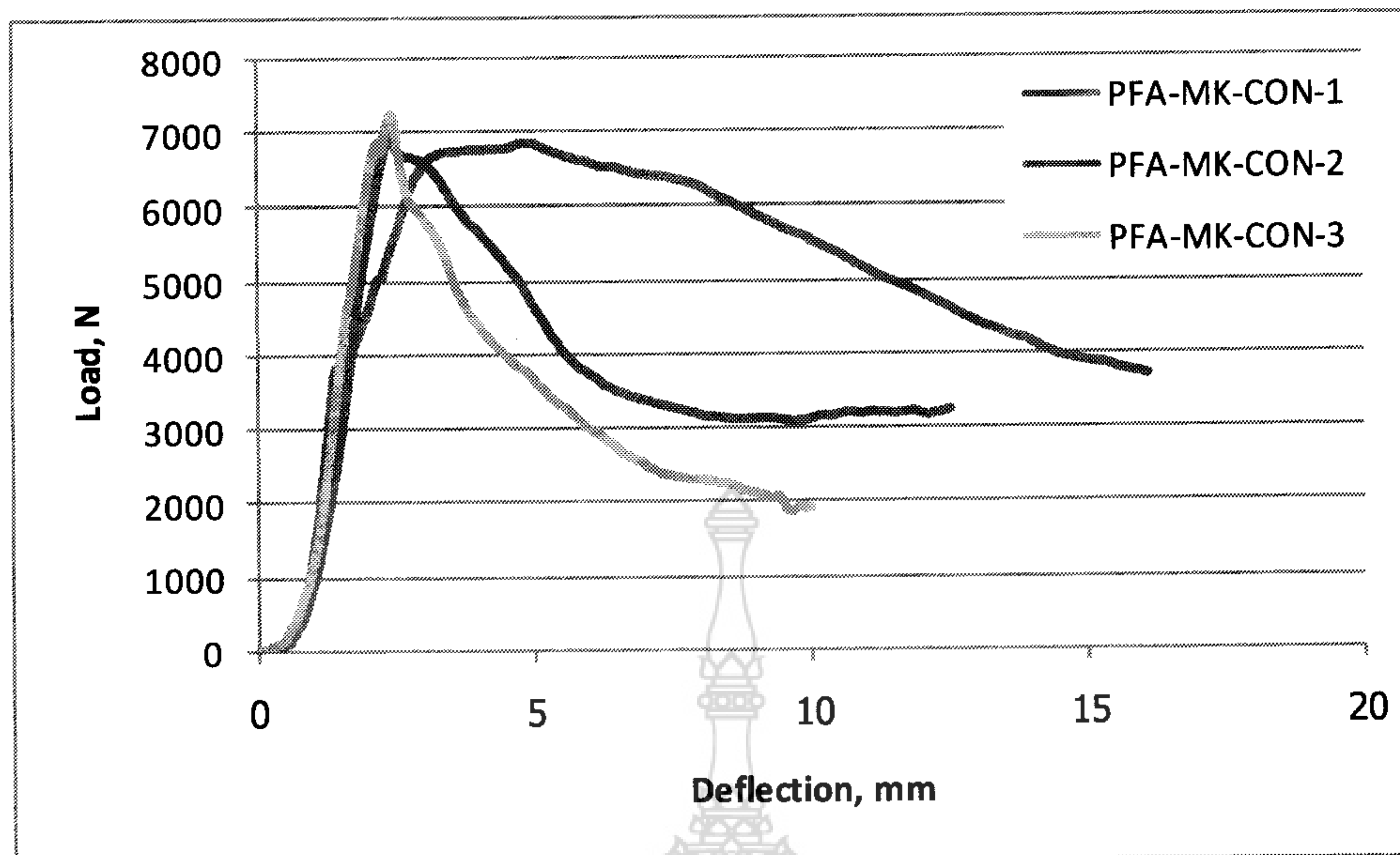


รูปที่ 4.10 กำลังรับแรงดัดและการโก่งตัวของคานคอนกรีต PFA-CON

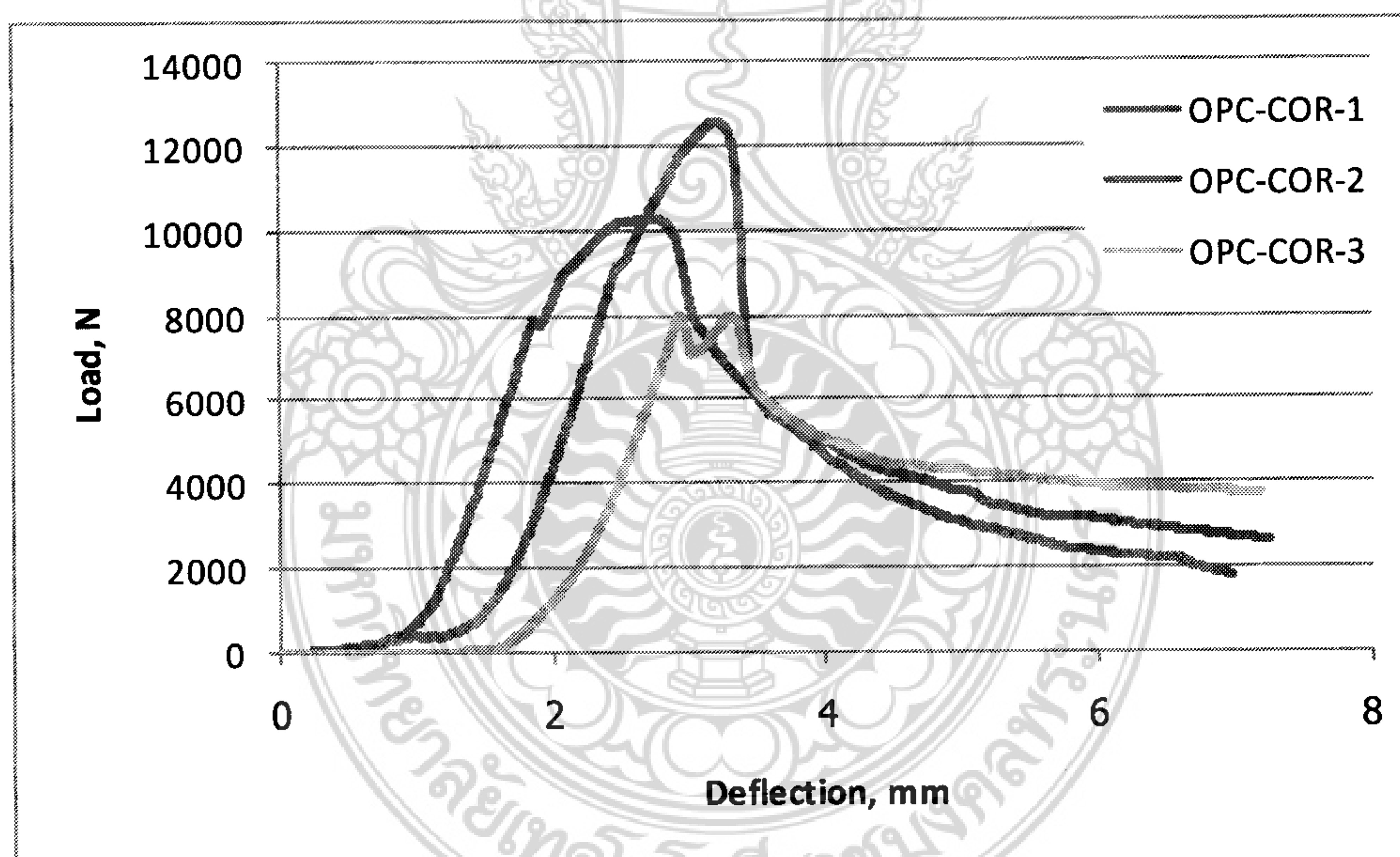


รูปที่ 4.11 กำลังรับแรงดัดและการโก่งตัวของคานคอนกรีต PFA-RHA-CON



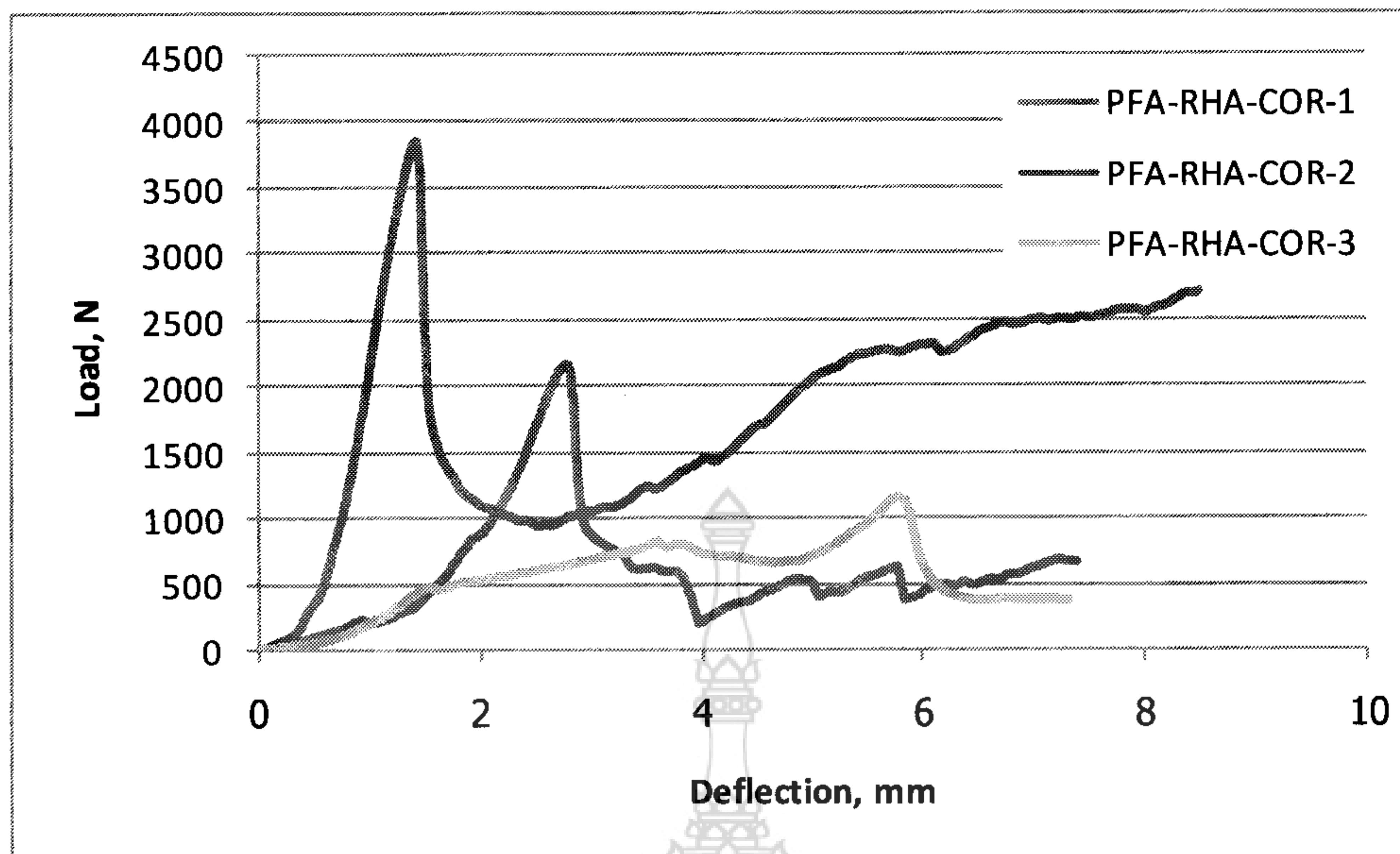


รูปที่ 4.12 กำลังรับแรงดัดและการโก่งตัวของคานคอนกรีต PFA-MK-CON

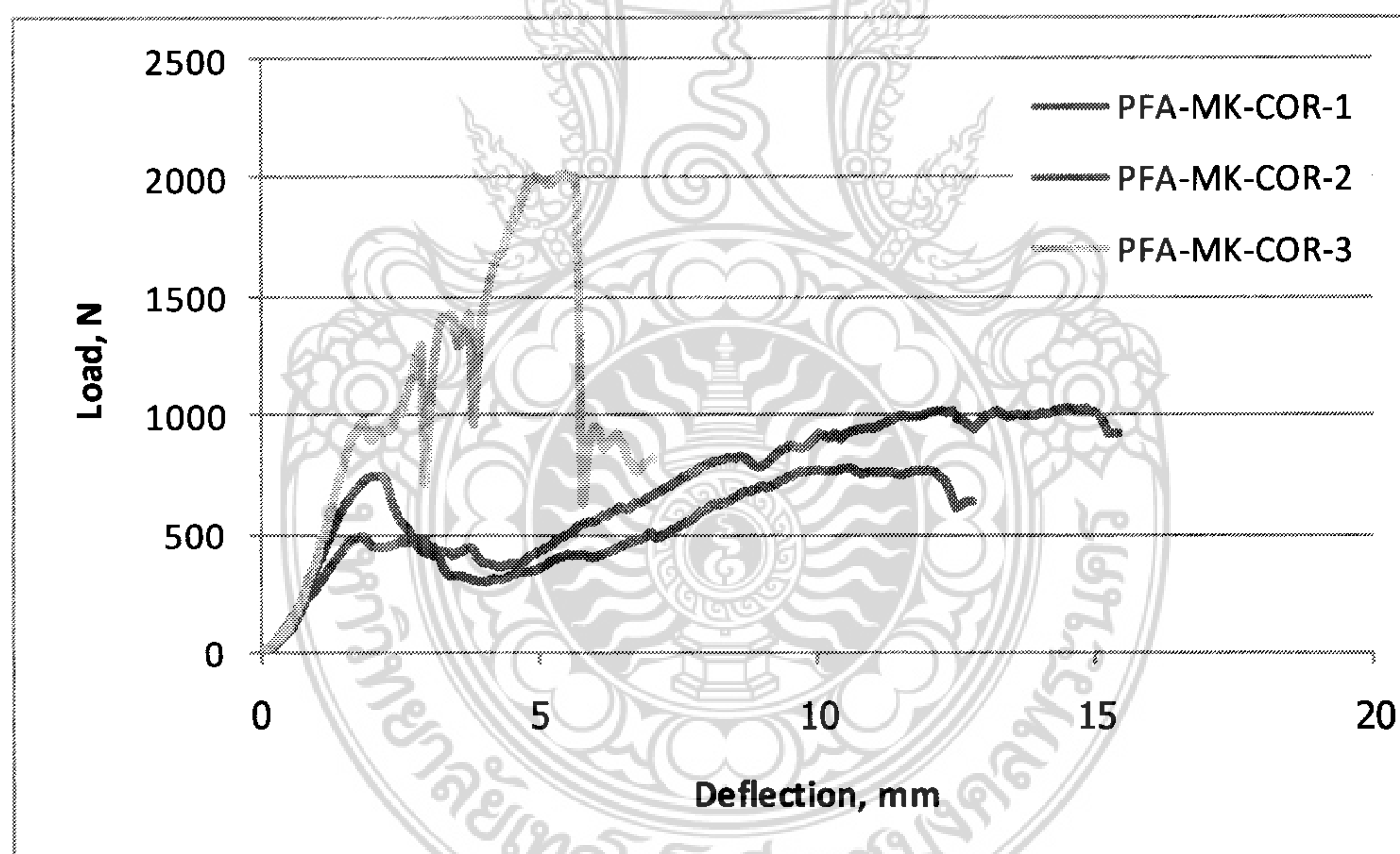


รูปที่ 4.13 กำลังรับแรงดัดและการโก่งตัวของคานคอนกรีต OPC-COR





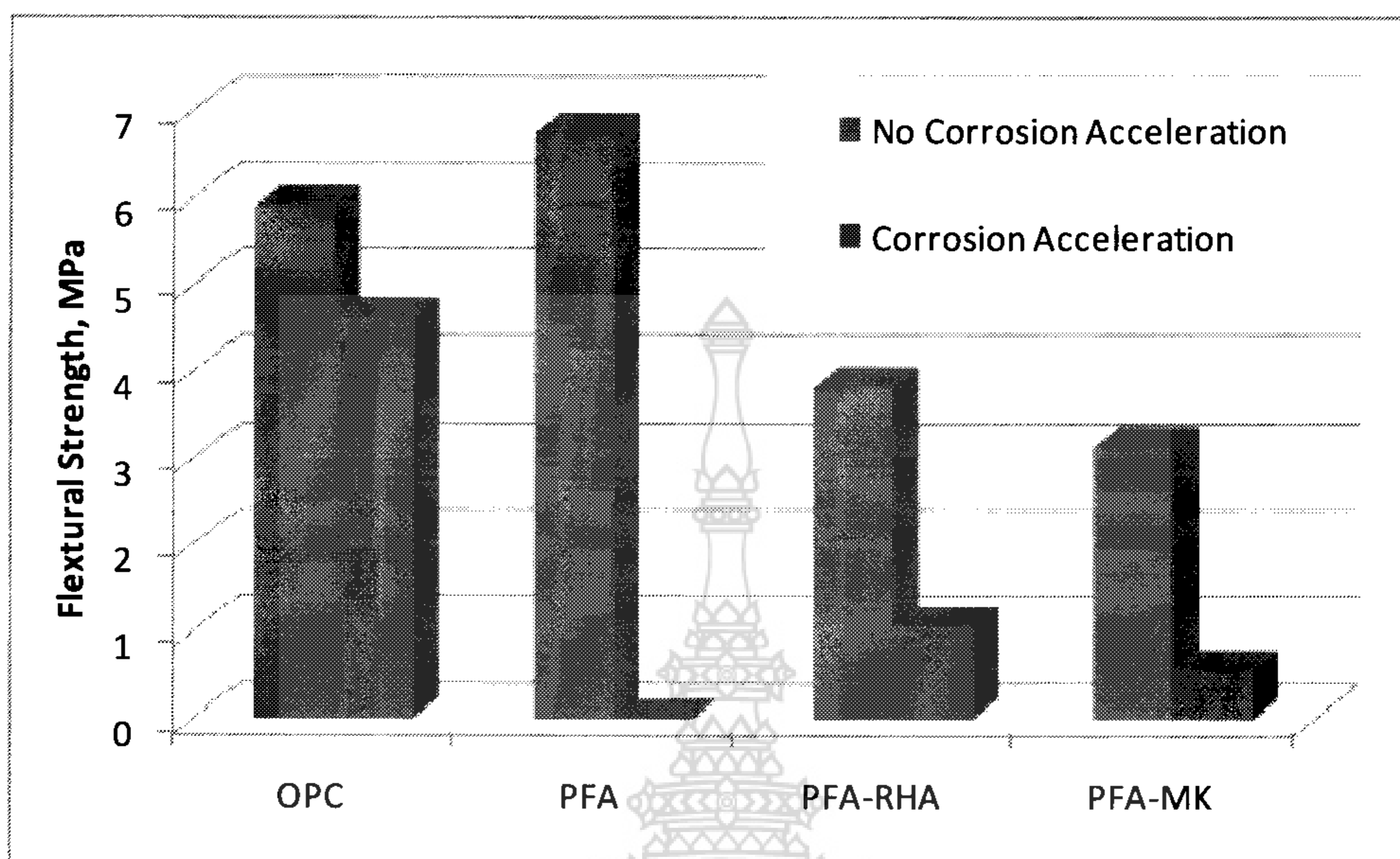
รูปที่ 4.14 กำลังรับแรงดัดและการโก่งตัวของคานคอนกรีต PFA-RHA-COR



รูปที่ 4.15 กำลังรับแรงดัดและการโก่งตัวของคานคอนกรีต PFA-MK-COR

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการโก่งตัวของคานจีโอฟิล์มเมอร์จากถ้ำลอย ถ้ำกลบดินขาว และคอนกรีตที่ไม่ได้ผ่านการเร่งการเกิดสนิมของเหล็กเสริม พบว่าคานจีโอฟิล์มเมอร์คอนกรีตจากถ้ำลอย PFA-CON มีกำลังรับแรงดัดมากที่สุด เท่ากับ 6.74 MPa รองลงมาคานจีโอฟิล์มเมอร์คอนกรีตจากถ้ำกลบ PFA-RHA-CON กำลังรับแรงดัดเท่ากับ 3.83 MPa และน้อยที่สุดคานจีโอฟิล์มเมอร์คอนกรีตจาก

ดินขาว PFA-MK-CON กำลังรับแรงดัด เท่ากับ 3.15 MPa สำหรับคานคอนกรีตมีกำลังรับแรงดัด เท่ากับ 5.91 MPa ซึ่งมีค่ากำลังรับแรงดัดน้อยกว่าคานจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจากถ้ำลอย



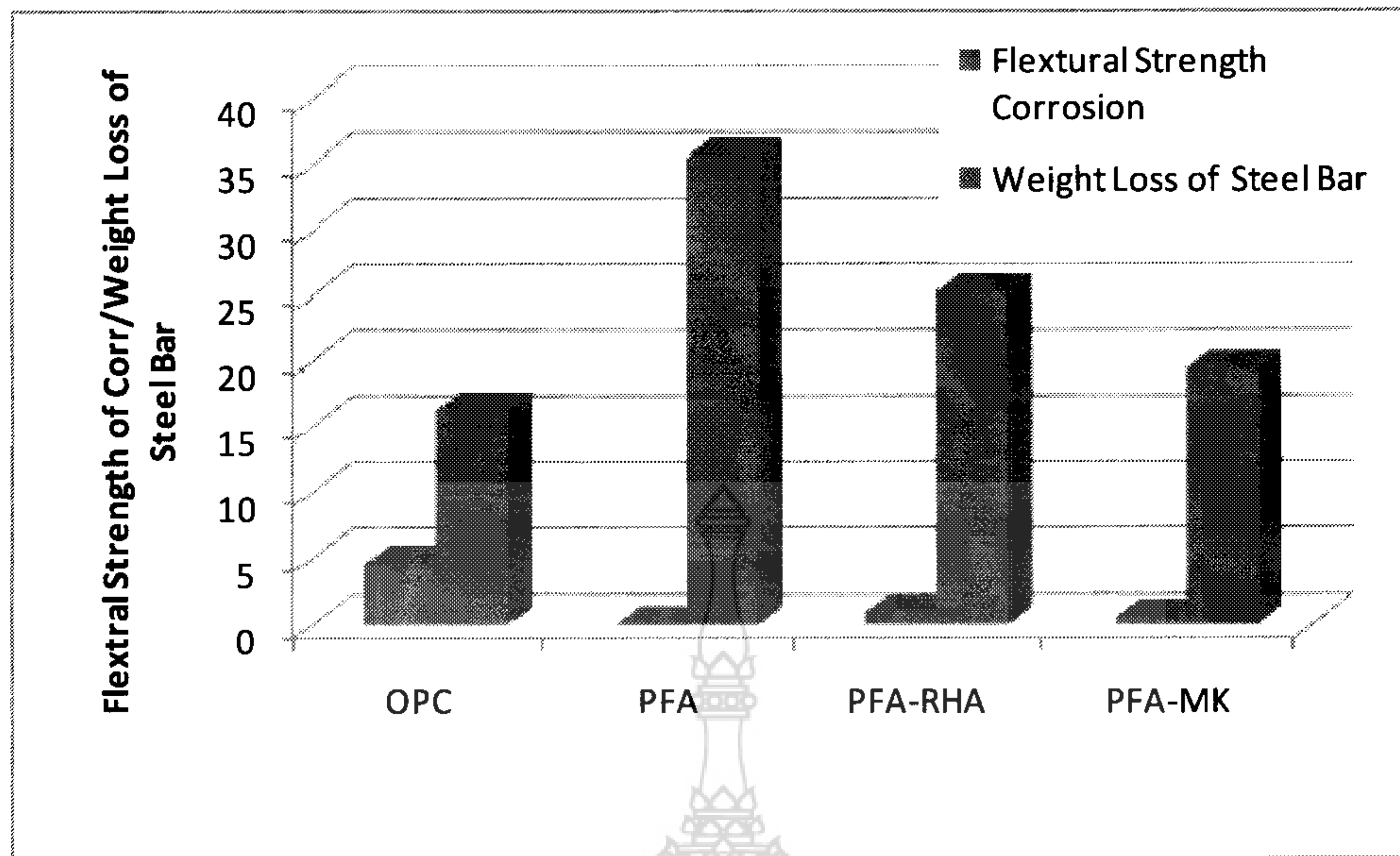
รูปที่ 4.16 กำลังรับแรงดัด

เมื่อพิจารณารูปความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการโก่งตัวของคานจีโอโพลิเมอร์จากถ้ำลอย ถ้ำกลบ ดินขาว และคอนกรีตที่ผ่านการเร่งการเกิดสนิมของเหล็กเสริม พบว่าคานจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจากถ้ำกลบ PFA-RHA-COR มีกำลังรับแรงดัดมากที่สุด เท่ากับ 1.07 MPa รองลงมาคานจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจากดินขาว PFA-MK-COR กำลังรับแรงดัดเท่ากับ 0.57 MPa และคานจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจากถ้ำลอย PFA-COR ไม่สามารถทำการทดสอบได้เนื่องจากมีรอยร้าวจำนวนมากจนตัวอย่างคานจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจากถ้ำลอยการวิบัติ สำหรับคานคอนกรีตมีกำลังรับแรงดัด เท่ากับ 4.63 MPa ซึ่งมีค่ากำลังรับแรงดัดมากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับคานจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจากถ้ำลอย ถ้ำกลบ และดินขาว

4.4.2 อิทธิพลของการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริม

กำลังรับแรงดัดของคานจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจากถ้ำลอย ถ้ำกลบ ดินขาว และคอนกรีตมีค่ากำลังรับแรงดัดลดลงอย่างเห็นได้ชัดอย่างชัดเจนเมื่อมีการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมจากการเกิดสนิมของเหล็กเสริม เนื่องจากการเกิดสนิมของเหล็กทำให้สูญเสียแรงยึดเหนี่ยวระหว่างจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตกับเหล็กเสริม จากรูปที่ 4.17 กำลังรับแรงดัดต่อการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมมีความสัมพันธ์กัน การสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมในคานจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจากถ้ำลอยมากที่สุดส่งผลให้กำลังรับแรงดัดลดลงอย่างมากจนไม่สามารถทำการทดสอบได้ สำหรับการลดลงของกำลังรับแรงดัดเนื่องจากอิทธิพลการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมของคานจีโอโพลิเมอร์จากถ้ำกลบ ร้อยละ 72.06 และคานจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจากดินขาว ร้อยละ 81.90 และคานคอนกรีตร้อยละ 21.65 ซึ่งมีการลดลงของกำลังรับแรงดัดน้อยที่สุด





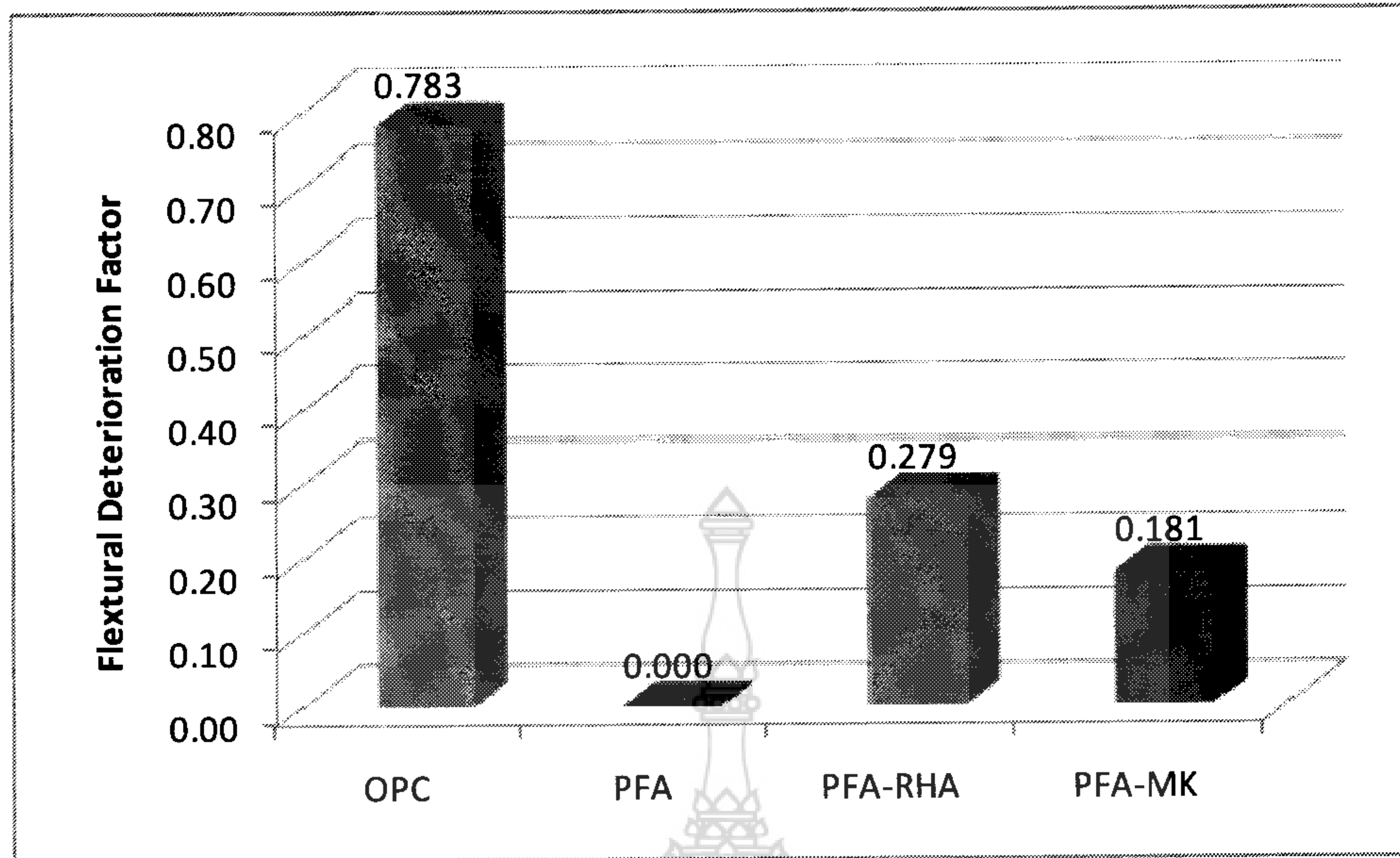
รูปที่ 4.17 กำลังรับแรงดัดต่อการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริม

การพิจารณาการลดลงของกำลังรับแรงดัดของคานจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจากถ้ำลอย ถ้ำกลบ ดินขาว และคอนกรีต ซึ่งอัตราการลดลงของค่ากำลังรับแรงดัดจะอยู่ในรูปของค่าสัมประสิทธิ์การเสื่อมสภาพกำลังรับแรงดัดสามารถคำนวณได้ดังสมการ

$$\varphi(t) = \frac{M_{cor}}{M_{con}}$$

| | | |
|-------|--------------|-------------------------------------------------------|
| เมื่อ | $\varphi(t)$ | สัมประสิทธิ์การเสื่อมสภาพกำลังรับแรงดัด |
| | M_{cor} | กำลังรับแรงดัดสูงสุดเนื่องจากการกัดกร่อนของเหล็กเสริม |
| | M_{con} | กำลังรับแรงดัดสูงสุดที่ไม่มีการกัดกร่อนของเหล็กเสริม |





รูปที่ 4.18 สัมประสิทธิ์การเสื่อมสภาพกำลังรับแรงดัด

สัมประสิทธิ์การเสื่อมสภาพกำลังรับแรงดัดของคานจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจากถ้ำลอย ถ้ำแกลบ ดินขาว และคอนกรีต ดังรูปที่ 4.18 พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การเสื่อมสภาพกำลังรับแรงดัดของคานจีโอโพลิเมอร์จากถ้ำลอยมีการลดลงมากที่สุด รองลงมาค่าสัมประสิทธิ์การเสื่อมสภาพกำลังรับแรงดัดของคานจีโอโพลิเมอร์จากดินขาวและค่าสัมประสิทธิ์การเสื่อมสภาพจากถ้ำแกลบ ส่วนค่าสัมประสิทธิ์การเสื่อมสภาพของคอนกรีตมีค่าน้อยที่สุด



บทที่ 5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ

5.1 วัสดุผสมของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าลอย เถ้าแกลบ ดินขาว และคอนกรีต

5.1.1 กำลังรับแรงอัด

กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าลอย ค่ากำลังรับแรงอัดมากที่สุด เท่ากับ 303.54 กก./ cm^2 รองลงมาคือจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าแกลบ เท่ากับ 237.93 กก./ cm^2 และจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจากดินขาว ค่ากำลังรับแรงอัดน้อยที่สุด เท่ากับ 223.43 กก./ cm^2 เมื่อเปรียบเทียบค่ากำลังรับแรงอัดกับคอนกรีต พบว่าจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าลอยมีค่ากำลังรับแรงอัดมากกว่าคอนกรีต ซึ่งคอนกรีตควบคุมมีค่ากำลังรับแรงอัด เท่ากับ 257.91 กก./ cm^2

5.2 การกัดกร่อนของเหล็กเสริมในจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าลอย เถ้าแกลบ ดินขาว และคอนกรีต

5.2.1 ความต่างศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์

แนวโน้มการเกิดสนิมของเหล็กของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าลอยมีปริมาณค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์มากที่สุด เท่ากับ 642 mV จีโอโพลิเมอร์จากเถ้าแกลบมีปริมาณค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ เท่ากับ 539 mV และจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจากดินขาวมีปริมาณค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ เท่ากับ 460 mV เมื่อนำค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ไปตรวจสอบกับค่ามาตรฐาน ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์เกินกว่ามาตรฐานกำหนดไว้ คือ มีค่ามากกว่า -350 mV แสดงว่ามีแนวโน้มการเกิดสนิมของเหล็กเสริมมากกว่า 90 เปอร์เซ็นต์ ส่วนคอนกรีตมีค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์น้อยที่สุด เท่ากับ 369 mV

5.2.2 การสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริม

การสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริม พบว่าจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าลอยมีการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมมากที่สุด เท่ากับ 35.60 g รองลงมาคือจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าแกลบมีการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริม เท่ากับ 25.34 g และจีโอโพลิเมอร์จากดินขาวมีการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริม เท่ากับ 19.37 g คอนกรีตมีการสูญเสียพื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริมน้อยที่สุด เท่ากับ 16.37 g



5.3 กำลังรับแรงดัดของคานจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจากถ้ำลอย ถ้ำกลบ ดินขาว และคอนกรีต

5.3.1 กำลังรับแรงดัด

กำลังรับแรงดัดของคานจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจากถ้ำลอยมีค่ากำลังรับแรงดัดมากที่สุด รองลงคือจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจากถ้ำกลบ และจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจากดินขาวตามลำดับ ส่วนกำลังรับแรงดัดของคอนกรีตมีค่าน้อยกว่าจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจากถ้ำลอย

5.3.2 อิทธิพลของการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริม

ค่าสัมประสิทธิ์การเสื่อมสภาพกำลังรับแรงดัดของคานจีโอโพลิเมอร์จากถ้ำลอยมีการลดลงมากที่สุด รองลงมาค่าสัมประสิทธิ์การเสื่อมสภาพกำลังรับแรงดัดของคานจีโอโพลิเมอร์จากดินขาวและค่าสัมประสิทธิ์การเสื่อมสภาพจากถ้ำกลบ ส่วนค่าสัมประสิทธิ์การเสื่อมสภาพของคอนกรีตมีค่าน้อยที่สุด

5.4 ข้อเสนอแนะ

5.4.1 ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์

การตรวจวัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์สำหรับการทดสอบแนวโน้มการเกิดสนิมของเหล็กเสริมค่อนข้างมีความแปรปรวนของข้อมูล เนื่องจากปัจจัยสภาวะแวดล้อม เช่น ความชื้น อุณหภูมิ เพื่อลดความแปรปรวนของข้อมูลควรเพื่อจำนวนของข้อมูลให้มากขึ้น

5.4.2 การเร่งการเกิดสนิมของเหล็กเสริม

การเร่งการเกิดสนิมของเหล็กเสริมควรมีการแปรเปลี่ยนของไฟฟ้ากระแสตรงหลายระดับ เพื่อเปรียบเทียบอิทธิพลของไฟฟ้ากระแสตรง



เอกสารและสิ่งอ้างอิง

คณะอนุกรรมการคอนกรีตและวัสดุ ภายใต้คณะกรรมการวิชาการสาขาวิศวกรรมโยธา วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์. 2543. **ความคงทนของคอนกรีต**. พิมพ์ครั้งที่ 1. บริษัทจุดทอง จำกัด, กรุงเทพฯ.

ปริญญา จินดาประเสริฐ. 2548. **ถ้ำลอยในงานคอนกรีต**. พิมพ์ครั้งที่ 2. สมาคมคอนกรีตไทย, กรุงเทพฯ.

ต่อกุล กาญจนาลัย. 2528. **พฤติกรรมของคอนกรีตเสริมเหล็ก**. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

วินิต ช่อวิเชียร. 2545. **การออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก**. พิมพ์ครั้งที่ 5. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยศิลปากร, กรุงเทพฯ.

สมโพธิ วิวิธเกยูรวงศ์. 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**. 4th 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. Sohangpurwala. 1993. Cathodic protection as a corrosion control alternative. **Concrete Corrosion Specialists**, Concorr, Inc.

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 s geopolymeric material. **Applied Geochemistry** 17(8): 1143-1148.

Tikalsky, 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.

Wallah, 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.





ตารางผนวกที่ 1 กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลีเมอร์คอนกรีตจากแก้วลอย PFA

| No. | Diameter | Height | Weight | Cross Section Area | Compressive Strength | Averages Compressive Strength |
|-----|----------|--------|--------|--------------------|----------------------|-------------------------------|
| | cm | cm | kg | Cm ² | ksc | ksc |
| 1 | 9.98 | 20.18 | 3.622 | 78.23 | 306.78 | |
| 2 | 9.97 | 20.06 | 3.673 | 78.07 | 286.92 | 303.54 |
| 3 | 10.05 | 20.13 | 3.590 | 79.33 | 316.92 | |

ตารางผนวกที่ 2 กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลีเมอร์คอนกรีตจากแก้วเคลือบ PFA-RHA

| No. | Diameter | Height | Weight | Cross Section Area | Compressive Strength | Averages Compressive Strength |
|-----|----------|--------|--------|--------------------|----------------------|-------------------------------|
| | cm | cm | kg | Cm ² | ksc | ksc |
| 1 | 9.96 | 20.03 | 3.495 | 77.91 | 246.42 | |
| 2 | 10.01 | 20.16 | 3.578 | 78.69 | 238.91 | 237.93 |
| 3 | 9.96 | 20.10 | 3.497 | 77.91 | 228.46 | |

ตารางผนวกที่ 3 กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลีเมอร์คอนกรีตจากดินขาว PFA-MK

| No. | Diameter | Height | Weight | Cross Section Area | Compressive Strength | Averages Compressive Strength |
|-----|----------|--------|--------|--------------------|----------------------|-------------------------------|
| | cm | cm | kg | Cm ² | ksc | ksc |
| 1 | 10.08 | 20.21 | 3.536 | 79.80 | 208.02 | |
| 2 | 10.22 | 20.14 | 3.580 | 82.03 | 209.66 | 223.43 |
| 3 | 10.09 | 20.19 | 3.492 | 79.96 | 252.62 | |



ตารางผนวกที่ 4 กำลังรับแรงอัดของคอนกรีต OPC

| No. | Diameter | Height | Weight | Cross Section Area | Compressive Strength | Averages Compressive Strength |
|-----|----------|--------|--------|--------------------|----------------------|-------------------------------|
| | cm | cm | kg | Cm ² | ksc | ksc |
| 1 | 9.93 | 20.13 | 3.703 | 77.44 | 258.26 | |
| 2 | 9.97 | 20.08 | 3.743 | 78.07 | 263.86 | 257.91 |
| 3 | 10.01 | 20.11 | 3.742 | 78.69 | 251.62 | |

ตารางผนวกที่ 5 การสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมในจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจากถ้ำลอย PFA

| No. | Length | Weight | Weight Loss of Corrosion | Weight Loss of Steel Bar | Averages Weight Loss of Steel Bar |
|-----|--------|---------|--------------------------|--------------------------|-----------------------------------|
| | cm | Kg/m | g | g | g |
| 1 | 20.134 | 0.10047 | 67.73 | 32.74 | |
| 2 | 20.116 | 0.10038 | 66.80 | 33.58 | 35.60 |
| 3 | 20.294 | 0.10127 | 60.77 | 40.50 | |

ตารางผนวกที่ 6 การสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมในจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจากถ้ำลอย PFA-RHA

| No. | Length | Weight | Weight Loss of Corrosion | Weight Loss of Steel Bar | Averages Weight Loss of Steel Bar |
|-----|--------|---------|--------------------------|--------------------------|-----------------------------------|
| | cm | Kg/m | g | g | g |
| 1 | 20.112 | 0.10036 | 74.58 | 25.78 | |
| 2 | 19.982 | 0.09971 | 75.35 | 24.36 | 25.34 |
| 3 | 20.182 | 0.10071 | 74.84 | 25.87 | |

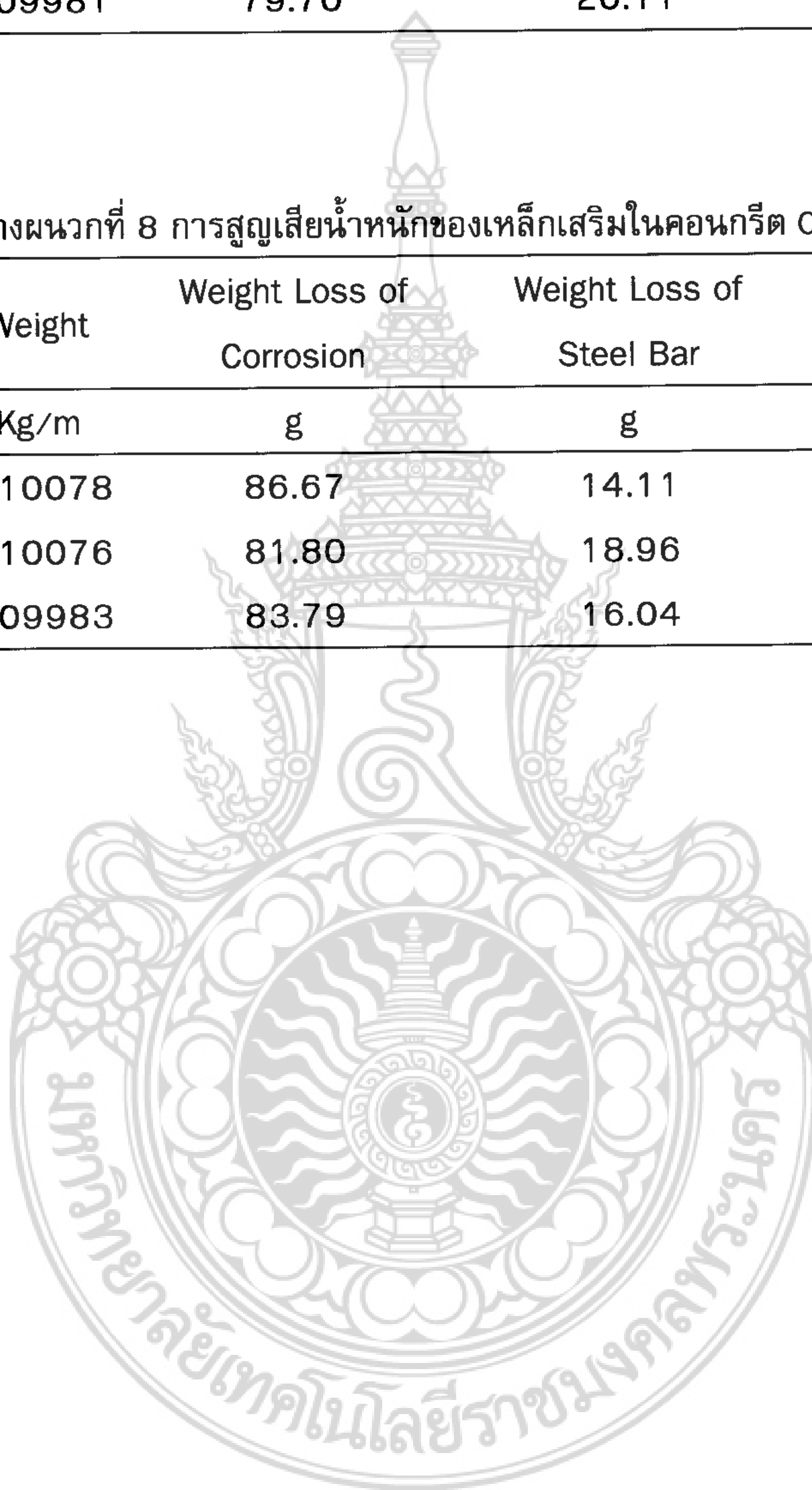


ตารางผนวกที่ 7 การสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมในจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจากถ้ำลอย PFA-MK

| No. | Length cm | Weight Kg/m | Weight Loss of Corrosion g | Weight Loss of Steel Bar g | Averages Weight Loss of Steel Bar g |
|-----|--------------|----------------|----------------------------------|----------------------------------|-------------------------------------------|
| 1 | 19.894 | 0.09927 | 80.67 | 18.60 | |
| 2 | 20.214 | 0.10087 | 81.47 | 19.40 | 19.37 |
| 3 | 20.002 | 0.09981 | 79.70 | 20.11 | |

ตารางผนวกที่ 8 การสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมในคอนกรีต OPC

| No. | Length cm | Weight Kg/m | Weight Loss of Corrosion g | Weight Loss of Steel Bar g | Averages Weight Loss of Steel Bar g |
|-----|--------------|----------------|----------------------------------|----------------------------------|-------------------------------------------|
| 1 | 20.196 | 0.10078 | 86.67 | 14.11 | |
| 2 | 20.192 | 0.10076 | 81.80 | 18.96 | 16.37 |
| 3 | 20.007 | 0.09983 | 83.79 | 16.04 | |



ตารางผนวกที่ 9 ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ของคอนกรีต OPC-COR

| Duration (Days) | Half Cell Potential | | | Averages Half Cell Potential (mV) |
|--------------------|---------------------|--------|--------|-----------------------------------------|
| | 1 | 2 | 3 | |
| 16 June 54 | 23.90 | 34.20 | 31.90 | 34.10 |
| | 25.90 | 37.40 | 32.70 | |
| | 29.20 | 30.90 | 36.50 | |
| 17 June 54 | 37.60 | 39.40 | 38.40 | 37.72 |
| | 38.60 | 37.30 | 37.30 | |
| | 37.90 | 36.50 | 36.50 | |
| 20 June 54 | 54.50 | 59.40 | 54.00 | 55.41 |
| | 53.40 | 58.60 | 53.20 | |
| | 57.90 | 54.70 | 53.00 | |
| 21 June 54 | 89.30 | 82.20 | 84.80 | 83.58 |
| | 83.20 | 86.20 | 84.90 | |
| | 80.40 | 81.20 | 80.00 | |
| 22 June 54 | 168.30 | 105.90 | 199.00 | 159.04 |
| | 165.20 | 103.50 | 193.60 | |
| | 189.90 | 115.60 | 190.40 | |
| 23 June 54 | 166.70 | 189.10 | 159.60 | 174.89 |
| | 181.10 | 190.40 | 150.60 | |
| | 198.20 | 181.50 | 156.80 | |
| 24 June 54 | 234.90 | 250.40 | 239.30 | 250.62 |
| | 236.50 | 277.50 | 266.70 | |
| | 235.10 | 272.60 | 242.60 | |
| 27 June 54 | 208.20 | 279.20 | 138.10 | 216.53 |
| | 249.90 | 311.80 | 155.90 | |
| | 209.90 | 253.30 | 142.50 | |
| 28 June 54 | 322.00 | 368.50 | 323.80 | 343.86 |
| | 328.00 | 427.90 | 259.00 | |
| | 320.70 | 370.20 | 374.60 | |
| 29 June 54 | 301.60 | 393.60 | 412.60 | 372.18 |
| | 323.30 | 385.90 | 403.90 | |
| | 326.10 | 400.00 | 402.60 | |



| Duration (Days) | Half Cell Potential | | | Averages Half Cell Potential (mV) |
|--------------------|---------------------|--------|--------|-----------------------------------------|
| | 1 | 2 | 3 | |
| 30 June 54 | 390.20 | 348.90 | 392.20 | 369.90 |
| | 319.60 | 365.10 | 410.70 | |
| | 389.60 | 362.40 | 350.40 | |
| 1 July 54 | 326.40 | 446.40 | 392.70 | 365.40 |
| | 339.80 | 337.50 | 396.30 | |
| | 336.40 | 352.80 | 360.30 | |
| 4 July 54 | 304.60 | 382.70 | 382.00 | 358.80 |
| | 307.50 | 376.50 | 392.00 | |
| | 345.70 | 374.20 | 364.00 | |
| 5 July 54 | 366.70 | 328.60 | 323.00 | 339.68 |
| | 365.80 | 331.80 | 313.00 | |
| | 371.80 | 314.40 | 342.00 | |
| 6 July 54 | 326.70 | 360.90 | 389.00 | 359.22 |
| | 320.60 | 367.90 | 385.00 | |
| | 339.70 | 343.20 | 400.00 | |
| 7 July 54 | 359.00 | 403.30 | 310.00 | 356.77 |
| | 356.00 | 403.50 | 315.00 | |
| | 353.70 | 389.40 | 321.00 | |
| 8 July 54 | 367.00 | 411.20 | 330.00 | 369.08 |
| | 361.00 | 410.80 | 332.00 | |
| | 370.50 | 405.20 | 334.00 | |



ตารางผนวกที่ 10 ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ของคอนกรีต PFA-COR

| Duration (Days) | Half Cell Potential | | | Averages Half Cell Potential (mV) |
|--------------------|---------------------|--------|--------|-----------------------------------------|
| | 1 | 2 | 3 | |
| 16 June 54 | 48.20 | 40.80 | 54.90 | 44.20 |
| | 46.40 | 42.90 | 51.70 | |
| | 25.70 | 43.40 | 43.80 | |
| 17 June 54 | 55.40 | 52.70 | 64.60 | 53.18 |
| | 58.90 | 62.90 | 47.20 | |
| | 49.40 | 49.40 | 38.10 | |
| 20 June 54 | 75.20 | 74.20 | 59.30 | 69.70 |
| | 74.10 | 76.40 | 61.40 | |
| | 68.40 | 72.00 | 66.30 | |
| 21 June 54 | 128.00 | 136.30 | 152.20 | 138.23 |
| | 128.50 | 127.80 | 149.30 | |
| | 139.00 | 128.00 | 155.00 | |
| 22 June 54 | 228.10 | 278.30 | 246.20 | 252.13 |
| | 226.40 | 277.10 | 246.10 | |
| | 241.40 | 278.20 | 247.40 | |
| 23 June 54 | 327.80 | 378.20 | 332.00 | 346.54 |
| | 325.40 | 375.70 | 334.70 | |
| | 333.80 | 379.10 | 332.20 | |
| 24 June 54 | 373.20 | 371.20 | 367.40 | 372.53 |
| | 373.60 | 371.90 | 368.40 | |
| | 381.40 | 373.30 | 372.40 | |
| 27 June 54 | 450.30 | 468.20 | 453.50 | 457.93 |
| | 448.80 | 470.80 | 454.90 | |
| | 456.90 | 467.20 | 450.80 | |
| 28 June 54 | 494.00 | 551.50 | 486.80 | 508.62 |
| | 491.50 | 554.80 | 486.40 | |
| | 484.70 | 542.20 | 485.70 | |
| 29 June 54 | 455.40 | 535.30 | 462.90 | 486.84 |
| | 456.20 | 557.60 | 461.70 | |
| | 458.70 | 531.20 | 462.60 | |



| Duration (Days) | Half Cell Potential | | | Averages Half Cell Potential (mV) |
|--------------------|---------------------|--------|--------|-----------------------------------------|
| | 1 | 2 | 3 | |
| 30 June 54 | 479.20 | 513.20 | 490.90 | 493.86 |
| | 479.70 | 512.00 | 490.80 | |
| | 478.00 | 511.70 | 489.20 | |
| 1 July 54 | 466.40 | 513.00 | 546.40 | 493.86 |
| | 464.90 | 513.30 | 556.10 | |
| | 469.40 | 509.30 | 556.30 | |
| 4 July 54 | 487.10 | 528.00 | 591.00 | 510.57 |
| | 485.00 | 533.00 | 594.00 | |
| | 474.00 | 518.00 | 588.00 | |
| 5 July 54 | 532.00 | 540.00 | 599.00 | 533.12 |
| | 549.00 | 561.00 | 595.00 | |
| | 509.00 | 530.00 | 595.00 | |
| 6 July 54 | 562.00 | 535.00 | 572.00 | 556.67 |
| | 575.00 | 557.00 | 574.00 | |
| | 534.00 | 525.00 | 570.00 | |
| 7 July 54 | 508.00 | 692.00 | 695.00 | 639.33 |
| | 523.00 | 694.00 | 696.00 | |
| | 560.00 | 694.00 | 692.00 | |
| 8 July 54 | 540.00 | 695.00 | 691.00 | 641.67 |
| | 550.00 | 696.00 | 693.00 | |
| | 517.00 | 698.00 | 695.00 | |



ตารางผนวกที่ 11 ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจากถ้ำเกลือ PFA-RHA-COR

| Duration (Days) | Half Cell Potential | | | Averages Half Cell Potential (mV) |
|--------------------|---------------------|--------|--------|-----------------------------------------|
| | 1 | 2 | 3 | |
| 16 June 54 | 39.20 | 37.90 | 36.70 | 37.20 |
| | 33.80 | 35.20 | 40.40 | |
| | 35.90 | 38.50 | 37.20 | |
| 17 June 54 | 42.00 | 45.00 | 47.80 | 44.86 |
| | 45.00 | 45.80 | 43.20 | |
| | 48.90 | 41.80 | 44.20 | |
| 20 June 54 | 53.60 | 59.50 | 58.30 | 56.52 |
| | 54.00 | 58.60 | 58.70 | |
| | 55.50 | 57.10 | 53.40 | |
| 21 June 54 | 132.70 | 135.90 | 136.20 | 136.73 |
| | 135.60 | 138.40 | 132.90 | |
| | 142.30 | 139.60 | 137.00 | |
| 22 June 54 | 249.60 | 242.20 | 256.70 | 253.17 |
| | 249.20 | 253.50 | 267.10 | |
| | 250.10 | 254.50 | 255.60 | |
| 23 June 54 | 278.00 | 281.90 | 271.60 | 277.19 |
| | 274.20 | 286.10 | 277.60 | |
| | 285.60 | 273.60 | 266.10 | |
| 24 June 54 | 313.30 | 347.40 | 301.60 | 331.92 |
| | 311.50 | 348.70 | 304.90 | |
| | 321.60 | 344.00 | 394.30 | |
| 27 June 54 | 375.00 | 321.00 | 399.00 | 370.29 |
| | 375.30 | 326.00 | 399.30 | |
| | 383.50 | 359.60 | 393.90 | |
| 28 June 54 | 402.30 | 455.00 | 332.20 | 397.80 |
| | 405.40 | 457.90 | 339.40 | |
| | 415.80 | 449.30 | 322.90 | |
| 29 June 54 | 470.10 | 411.80 | 497.70 | 466.22 |
| | 471.80 | 417.10 | 505.50 | |
| | 476.00 | 456.40 | 489.60 | |



| Duration (Days) | Half Cell Potential | | | Averages Half Cell Potential (mV) |
|--------------------|---------------------|--------|--------|-----------------------------------------|
| | 1 | 2 | 3 | |
| 30 June 54 | 479.80 | 429.60 | 532.80 | 482.18 |
| | 479.70 | 432.50 | 542.80 | |
| | 485.80 | 428.50 | 528.10 | |
| 1 July 54 | 473.60 | 420.40 | 487.10 | 461.66 |
| | 467.90 | 425.40 | 493.70 | |
| | 485.00 | 417.60 | 484.20 | |
| 4 July 54 | 484.00 | 508.00 | 479.00 | 489.44 |
| | 484.00 | 507.00 | 477.00 | |
| | 488.00 | 500.00 | 478.00 | |
| 5 July 54 | 408.00 | 494.00 | 464.00 | 541.89 |
| | 406.00 | 489.00 | 460.00 | |
| | 434.00 | 480.00 | 459.00 | |
| 6 July 54 | 505.00 | 574.00 | 525.00 | 541.33 |
| | 596.00 | 587.00 | 520.00 | |
| | 521.00 | 513.00 | 531.00 | |
| 7 July 54 | 520.00 | 535.00 | 518.00 | 525.44 |
| | 518.00 | 528.00 | 517.00 | |
| | 511.00 | 552.00 | 530.00 | |
| 8 July 54 | 525.00 | 553.00 | 525.00 | 536.22 |
| | 521.00 | 551.00 | 527.00 | |
| | 526.00 | 560.00 | 538.00 | |



ตารางผนวกที่ 12 ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจากดินขาว PFA-MK-COR

| Duration (Days) | Half Cell Potential | | | Averages Half Cell Potential (mV) |
|--------------------|---------------------|--------|--------|-----------------------------------------|
| | 1 | 2 | 3 | |
| 16 June 54 | 50.60 | 41.30 | 50.10 | 49.82 |
| | 49.40 | 54.70 | 53.80 | |
| | 49.80 | 47.90 | 50.80 | |
| 17 June 54 | 64.20 | 56.60 | 58.20 | 58.16 |
| | 58.90 | 59.10 | 54.60 | |
| | 53.90 | 59.60 | 58.30 | |
| 20 June 54 | 62.90 | 67.70 | 62.50 | 65.01 |
| | 65.10 | 67.20 | 67.30 | |
| | 61.20 | 65.00 | 66.20 | |
| 21 June 54 | 144.10 | 146.60 | 135.80 | 143.11 |
| | 149.80 | 147.90 | 146.00 | |
| | 118.50 | 147.20 | 152.10 | |
| 22 June 54 | 218.30 | 232.50 | 243.00 | 233.56 |
| | 228.50 | 234.20 | 243.70 | |
| | 222.10 | 231.80 | 247.90 | |
| 23 June 54 | 274.30 | 264.50 | 250.00 | 267.77 |
| | 272.90 | 272.50 | 261.60 | |
| | 277.50 | 275.80 | 260.80 | |
| 24 June 54 | 305.50 | 335.60 | 375.30 | 340.07 |
| | 304.10 | 336.40 | 375.90 | |
| | 311.50 | 336.80 | 379.50 | |
| 27 June 54 | 364.60 | 323.40 | 352.40 | 347.26 |
| | 363.20 | 322.50 | 353.80 | |
| | 367.80 | 324.80 | 352.80 | |
| 28 June 54 | 381.20 | 333.90 | 433.50 | 385.14 |
| | 388.70 | 326.70 | 438.60 | |
| | 375.60 | 337.50 | 450.60 | |
| 29 June 54 | 363.90 | 327.90 | 361.90 | 352.59 |
| | 363.60 | 325.30 | 365.20 | |
| | 361.80 | 333.40 | 370.30 | |



| Duration (Days) | Half Cell Potential | | | Averages Half Cell Potential (mV) |
|--------------------|---------------------|--------|--------|-----------------------------------------|
| | 1 | 2 | 3 | |
| 30 June 54 | 377.20 | 313.40 | 431.40 | 376.93 |
| | 383.40 | 316.70 | 426.90 | |
| | 372.90 | 319.80 | 450.70 | |
| 1 July 54 | 362.40 | 331.40 | 264.20 | 323.97 |
| | 361.30 | 330.30 | 256.40 | |
| | 359.00 | 332.80 | 317.90 | |
| 4 July 54 | 393.00 | 456.00 | 414.00 | 422.89 |
| | 390.00 | 449.00 | 416.00 | |
| | 406.00 | 464.00 | 418.00 | |
| 5 July 54 | 385.00 | 475.00 | 423.00 | 430.89 |
| | 384.00 | 476.00 | 427.00 | |
| | 401.00 | 478.00 | 429.00 | |
| 6 July 54 | 406.00 | 481.00 | 484.00 | 460.89 |
| | 391.00 | 483.00 | 485.00 | |
| | 452.00 | 485.00 | 481.00 | |
| 7 July 54 | 367.00 | 451.00 | 474.00 | 431.89 |
| | 363.00 | 435.00 | 478.00 | |
| | 386.00 | 456.00 | 477.00 | |
| 8 July 54 | 398.00 | 475.00 | 498.00 | 460.00 |
| | 393.00 | 478.00 | 496.00 | |
| | 435.00 | 473.00 | 494.00 | |



ตารางผนวกที่ 13 กำลังรับแรงดัดของคานคอนกรีต OPC-CON

| No. | MOE (MPa) | Deflection at Max Load (mm) | Ultimate Load (N) | Flextural Strength (MPa) | Averages Flextural Strength (MPa) |
|-----|--------------|-----------------------------------|-------------------------|--------------------------------|-----------------------------------------|
| 1 | 429.40 | 2.54 | 10850 | 4.88 | |
| 2 | 390.90 | 1.95 | 9670 | 4.35 | 5.91 |
| 3 | 353.00 | 3.46 | 18860 | 8.49 | |

ตารางผนวกที่ 14 กำลังรับแรงดัดของคานคอนกรีต OPC-COR

| No. | MOE (MPa) | Deflection at Max Load (mm) | Ultimate Load (N) | Flextural Strength (MPa) | Averages Flextural Strength (MPa) |
|-----|--------------|-----------------------------------|-------------------------|--------------------------------|-----------------------------------------|
| 1 | 460.10 | 3.18 | 12570 | 5.66 | |
| 2 | 482.40 | 2.72 | 10300 | 4.64 | 4.63 |
| 3 | 301.80 | 3.00 | 8010 | 3.60 | |

ตารางผนวกที่ 15 กำลังรับแรงดัดของคานคอนกรีต PFA-CON

| No. | MOE (MPa) | Deflection at Max Load (mm) | Ultimate Load (N) | Flextural Strength (MPa) | Averages Flextural Strength (MPa) |
|-----|--------------|-----------------------------------|-------------------------|--------------------------------|-----------------------------------------|
| 1 | 416.50 | 2.66 | 10963 | 4.93 | |
| 2 | 505.00 | 3.53 | 17240 | 7.76 | 6.74 |
| 3 | 490.80 | 3.10 | 16740 | 7.53 | |

ตารางผนวกที่ 16 กำลังรับแรงดัดของคานคอนกรีต PFA-RHA-CON

| No. | MOE (MPa) | Deflection at Max Load (mm) | Ultimate Load (N) | Flextural Strength (MPa) | Averages Flextural Strength (MPa) |
|-----|--------------|-----------------------------------|-------------------------|--------------------------------|-----------------------------------------|
| 1 | 335.50 | 1.92 | 8640 | 3.89 | |
| 2 | 302.70 | 2.80 | 10650 | 4.79 | 3.83 |
| 3 | 289.00 | 3.70 | 6270 | 2.82 | |



ตารางผนวกที่ 17 กำลังรับแรงดัดของคานคอนกรีต PFA-RHA-COR

| No. | MOE (MPa) | Deflection at Max Load (mm) | Ultimate Load (N) | Flextural Strength (MPa) | Averages Flextural Strength (MPa) |
|-----|--------------|-----------------------------------|-------------------------|--------------------------------|-----------------------------------------|
| 1 | 34.55 | 2.77 | 2150 | 0.97 | |
| 2 | 183.70 | 1.42 | 1154 | 1.73 | 1.07 |
| 3 | 30.07 | 5.75 | 3848 | 0.52 | |

ตารางผนวกที่ 18 กำลังรับแรงดัดของคานคอนกรีต PFA-MK-CON

| No. | MOE (MPa) | Deflection at Max Load (mm) | Ultimate Load (N) | Flextural Strength (MPa) | Averages Flextural Strength (MPa) |
|-----|--------------|-----------------------------------|-------------------------|--------------------------------|-----------------------------------------|
| 1 | 275.90 | 4.76 | 6848 | 3.08 | |
| 2 | 230.70 | 2.39 | 6938 | 3.12 | 3.15 |
| 3 | 233.30 | 2.41 | 7245 | 3.26 | |

ตารางผนวกที่ 19 กำลังรับแรงดัดของคานคอนกรีต PFA-MK-COR

| No. | MOE (MPa) | Deflection at Max Load (mm) | Ultimate Load (N) | Flextural Strength (MPa) | Averages Flextural Strength (MPa) |
|-----|--------------|-----------------------------------|-------------------------|--------------------------------|-----------------------------------------|
| 1 | 24.28 | 14.40 | 1034 | 0.47 | |
| 2 | 25.91 | 10.59 | 775 | 0.35 | 0.57 |
| 3 | 48.00 | 5.42 | 2018 | 0.91 | |

