บทที่ 4 ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

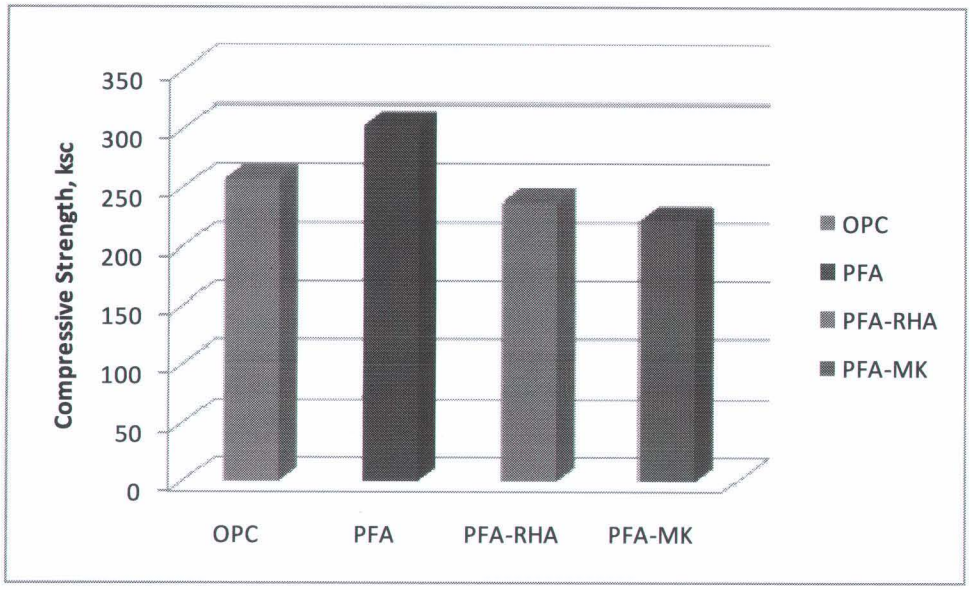
การดำเนินการศึกษาผลกระทบการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตเสริมเหล็กที่ใช้เป็นโครงสร้างในสภาพสิ่งแวดล้อมทะเล สำหรับผลและวิจารณ์ผลการทดลองดังนี้

4.1 วัสดุผสมจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าลอย เถ้าแกลบ ดินขาว และคอนกรีต

4.1.1 กำลังรับแรงอัด

การทดสอบกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าลอย เถ้าแกลบ ดินขาว และคอนกรีต จากผลการทดสอบวัสดุผสมทั้ง 3 ประเภท คือ เถ้าลอย เถ้าแกลบ และดินขาวมีผลต่อค่ากำลังรับแรงอัดซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาที่ผ่านมาโดยพบว่าอัตราส่วนของ $Na_2O.SiO_3/NaOH$ มีผลต่อค่ากำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์ ซึ่งปริมาณสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวแปรหลักที่มีผลต่อค่ากำลังรับแรงอัดและความสามารถทำงานได้ เมื่อปริมาณสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์มีปริมาณน้อยลงค่ากำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตก็เพิ่มขึ้นแต่ส่งผลต่อความสามรถทำงานได้น้อยลง การศึกษาที่ผ่านมา (ปริญญา, 2548, สราวุฒิ, 2551) พบว่าอัตราส่วนของ $Na_2O.SiO_3/NaOH$ ต่ำ เท่ากับ 0.67 และ 1.00 ให้ค่ากำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตสูงกว่าอัตราส่วน $Na_2O.SiO_3/NaOH$ สูง เท่ากับ 1.50 และ 3.00 สำหรับในการศึกษาในครั้งเป็นการบ่มจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอย เถ้าแกลบ และดินขาวด้วยอุณหภูมิปกติซึ่งให้ค่ากำลังรับแรงอัดที่น้อยกว่าการบ่มจีโอโพลิเมอร์ด้วยความร้อน และงานวิจัยโดยส่วนใหญ่อุณหภูมิที่ใช้สำหรับการบ่มจะอยู่ในช่วงระหว่าง 60 ถึง 100 องศาเซลเซียส

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



รูปที่ 4.1 กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าลอย เถ้าแกลบ ดินขาว และคอนกรีต

4.2 การกัดกร่อนของเหล็กเสริมในจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าลอย เถ้าแกลบ ดินขาว และคอนกรีต

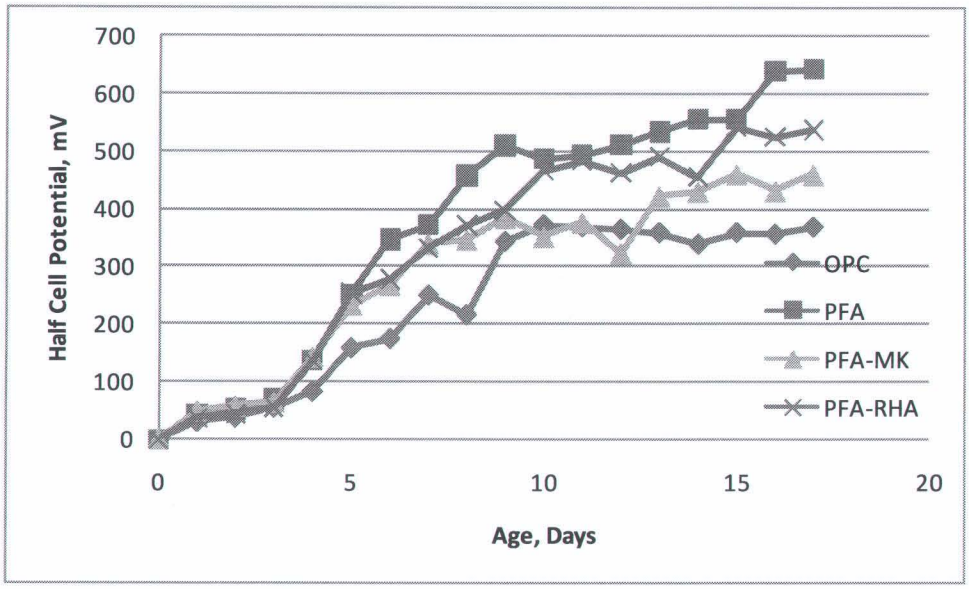
4.2.1 ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์

การเร่งการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าลอย เถ้าแกลบ ดินขาว และคอนกรีต เป็นระยะเวลา 28 วัน โดยเปรียบเทียบกับค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์มาตรฐาน ASTM C 876

ตารางที่ 4.1 ความต่างศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์และแนวโน้มการเกิดสนิมของเหล็กเสริม ASTM C 876

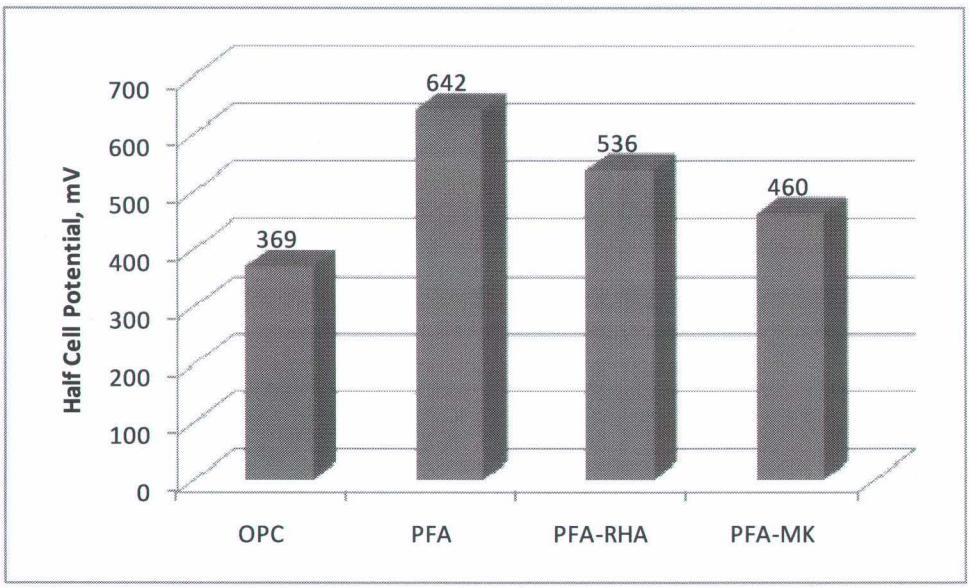
Half-cell Potential (mV)	Percentage chance of active corrosion
>-350	90%
-200 to -350	50%
>-200	10%

ผลการทดสอบการกัดกร่อนของเหล็กเสริมในจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าลอย เถ้าแกลบ ดินขาว และคอนกรีตซึ่งแช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์และเร่งการเกิดสนิมของเหล็กเสริมด้วยกระแสไฟฟ้า 6 โวทต์ จากการตรวจสอบแนวโน้มการกัดกร่อนของเหล็กเสริมด้วยค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 ความต่างศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าลอย เถ้าแกลบ ดินขาว และคอนกรีต

แนวโน้มการเกิดสนิมของเหล็กของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าลอยมีปริมาณค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์มากที่สุด เท่ากับ 642 mV จีโอโพลิเมอร์จากเถ้าแกลบมีปริมาณค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์เท่ากับ 539 mV และจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจากดินขาวมีปริมาณค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ เท่ากับ 460 mV เมื่อนำค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ไปตรวจสอบกับค่ามาตรฐานดังรูปที่ 4.3 ค่าเกินว่ามาตรฐานกำหนดไว้ คือ มีค่ามากกว่า -350 mV แสดงว่ามีแนวโน้มการเกิดสนิมของเหล็กเสริมมากกว่าร้อยละ 90



รูปที่ 4.3 ความต่างศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าลอย เถ้าแกลบ ดินขาว และคอนกรีต

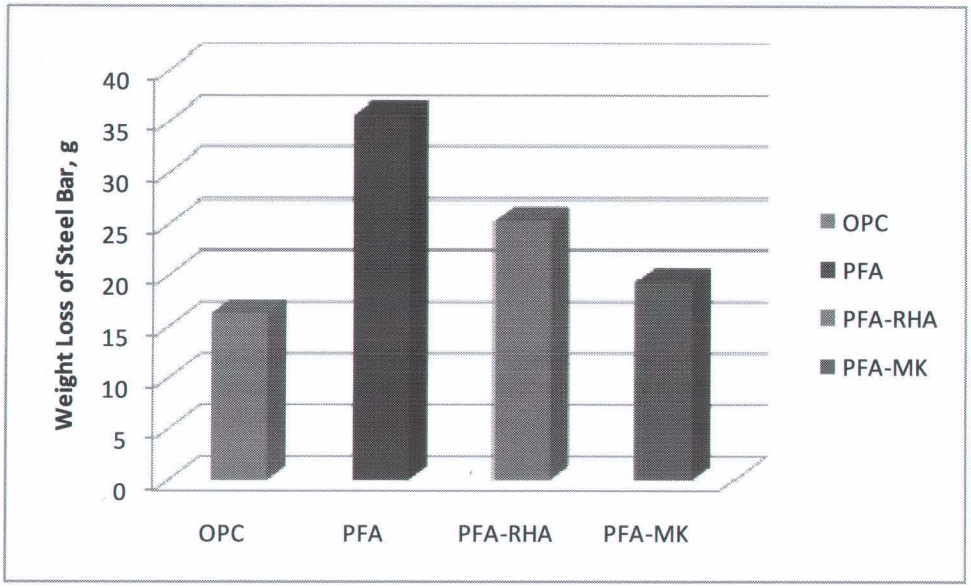
สำหรับผลการตรวจสอบค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าลอย เถ้าแกลบ ดินขาว จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าว่าอัตราส่วน $Na_2O.SiO_3$/NaOH มีผลต่าค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ เนื่องจากจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่มีอัตราส่วน $Na_2O.SiO_3$/NaOH สูงมีปริมาณของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์น้อย สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวชะละลายสารประกอบต่างๆ โดยที่จีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าลอย เถ้าแกลบ และดินขาวมีสารประกอบอลูมินา (Al) และซิลิกอน (Si) จะถูกชะออกมาเนื่องจากเป็นสารหลัก เมื่อปริมาณสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์มากขึ้นการชะละลายมากขึ้นและส่งผลไปสู่การเกิดปฏิกิริยาโพลิเมอร์ไรเซชันที่สมบูรณ์ ถ้าสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์น้อย การชะละลายก็จะส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาที่ไม่สมบูรณ์หรือทำปฏิกิริยาไม่หมดจะถูกผนวกและกลายเป็นส่วนหนึ่งของเนื้อจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต ทำให้เกิดช่องว่างหรือโพรงขนาดใหญ่เนื่องจากการทำปฏิกิริยา เมื่อมีการเร่งการเกิดสนิมของเหล็กเสริมโดยการแช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ส่งผลให้น้ำและออกซิเจนเข้าไปในช่องว่างและโพรงขนาดใหญ่ โดยมีอิออนของคลอไรด์เป็นสะพานเชื่อมให้เกิดกระบวนการทางไฟฟ้า-เคมี

นอกจากนี้จากการเร่งการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าลอย เถ้าแกลบ และดินขาว พบว่าเมื่อเร่งการเกิดสนิมของเหล็กเสริมครบ 28 วัน เกิดรอยร้าวบนตัวอย่างคานจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าลอย เถ้าแกลบ และดินขาว โดยจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าลอยเกิดรอยร้าวจนไม่สามารถทำการทดสอบกำลังรับแรงดัดได้ดังรูปที่ 4.4

รูปที่ 4.4 การแตกร้าวของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าลอย

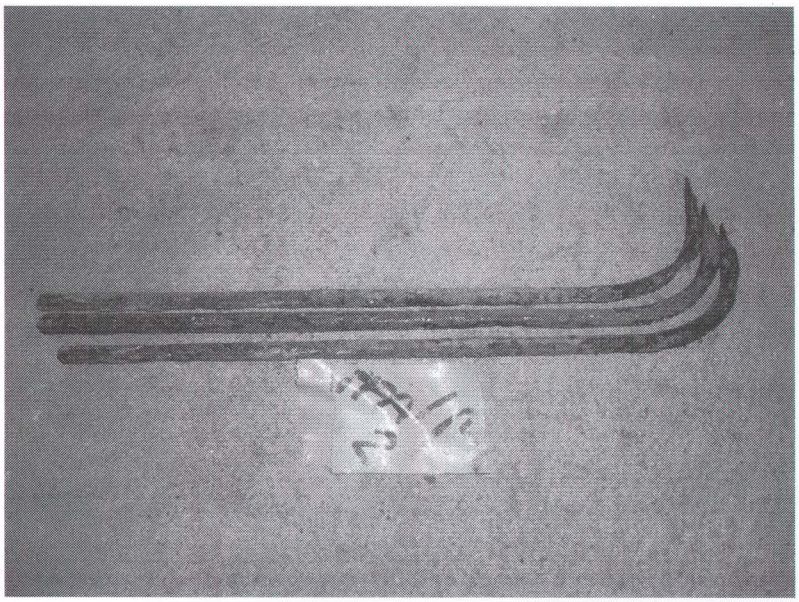
4.3 การสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริม

การเร่งการเกิดสนิมของเหล็กเสริมส่งผลให้พื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริมลดลงตามระดับของความรุนแรงของการกัดกร่อนของเหล็กเสริม ดังรูปที่ 4.5



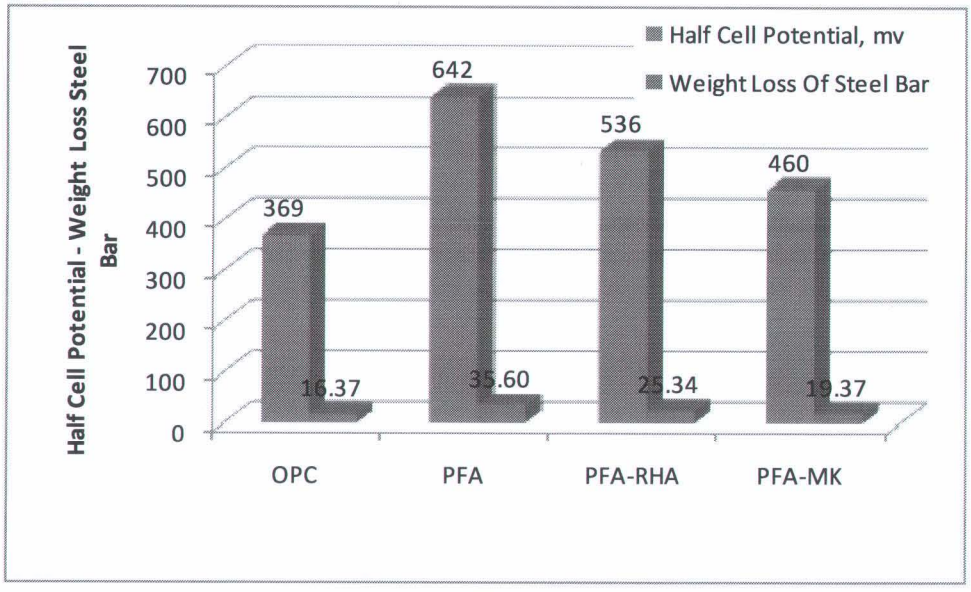
รูปที่ 4.5 การสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริม

การตรวจสอบการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมดังรูปที่ 4.6 พบว่าจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าลอยมีการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมมากที่สุด เท่ากับ 35.60 g รองลงมาคือจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าแกลบมีการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริม เท่ากับ 25.34 g และจีโอโพลิเมอร์จากดินขาวมีการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริม เท่ากับ 19.37 g อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาการสูญเสียน้ำหนักของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าลอย เถ้าแกลบ และดินขาว กับคอนกรีต คอนกรีตมีการสูญเสียพื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริมน้อยที่สุด เท่ากับ 16.37 g



รูปที่ 4.6 การสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริม

เมื่อพิจารณาค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ต่อการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริม พบว่าค่าความต่างไฟฟ้าครึ่งเซลล์มากขึ้นส่งผลต่อการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมอย่างเห็นได้อย่างชัดเจนดังรูปที่ 4.7



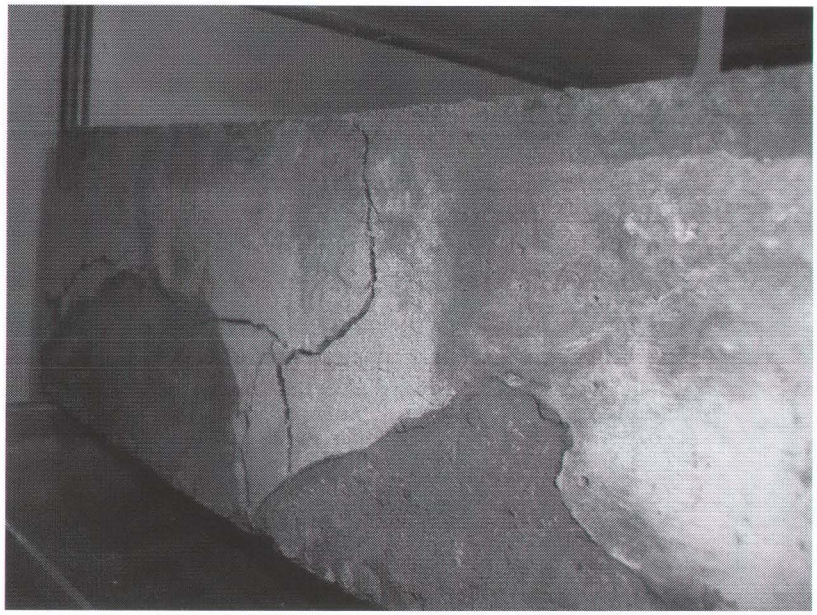
รูปที่ 4.7 ความต่างศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ต่อการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริม

4.4 กำลังรับแรงดัดของคานจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าลอย เถ้าแกลบ ดินขาว และคอนกรีต

4.4.1 กำลังรับแรงดัด

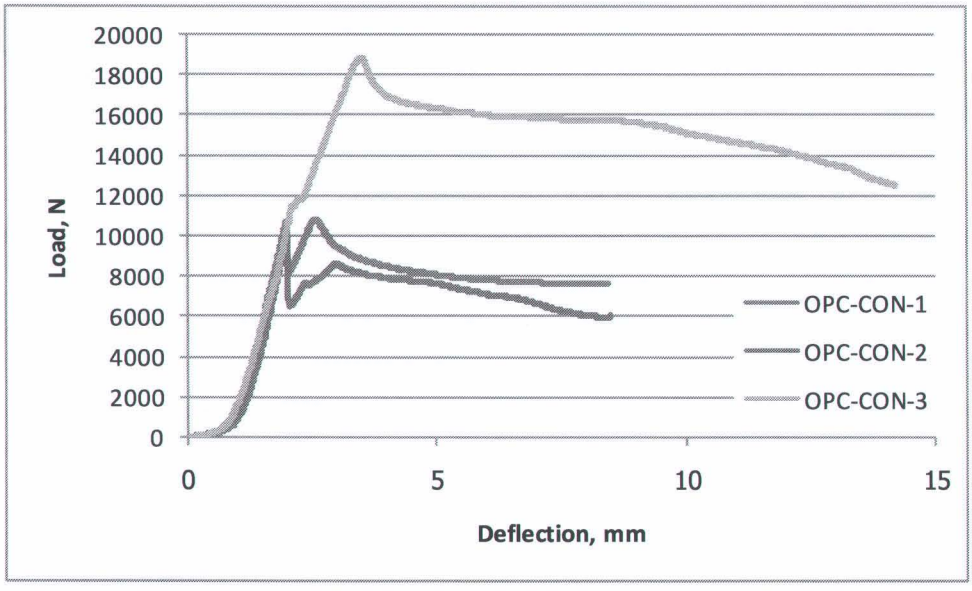
การทดสอบกำลังรับแรงดัดของคานจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าลอย เถ้าแกลบ ดินขาว และคอนกรีต ภายใต้น้ำหนักบรรทุกคงที่จนกระทั้งเกิดการวิบัติ เมื่อคานรับน้ำหนักบรรทุกลักษณะการเกิดรอยร้าวจะเกิดขึ้นบริเวณกึ่งกลางคานซึ่งเป็นลักษณะการแตกร้าวแบบโมเมนต์ดัด และเมื่อน้ำหนักบรรทุกเพิ่มขึ้นรอยร้าวจะเกิดในช่วงความยาวของคานระหว่างฐานรองรับทั้งสองข้าง สำหรับการทดสอบคานจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าลอย เถ้าแกลบ ดินขาว ที่เกิดการการกัดกร่อนของเหล็กเสริมอย่างรุนแรง การวิบัติจะเกิดเนื่องจากการสูญเสียกำลังการยึดเหนี่ยวระหว่างจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตต่อเหล็กเสริม (Debonding Failure) ดังรูปที่ 4.8

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ห้องสมุดงานวิจัย

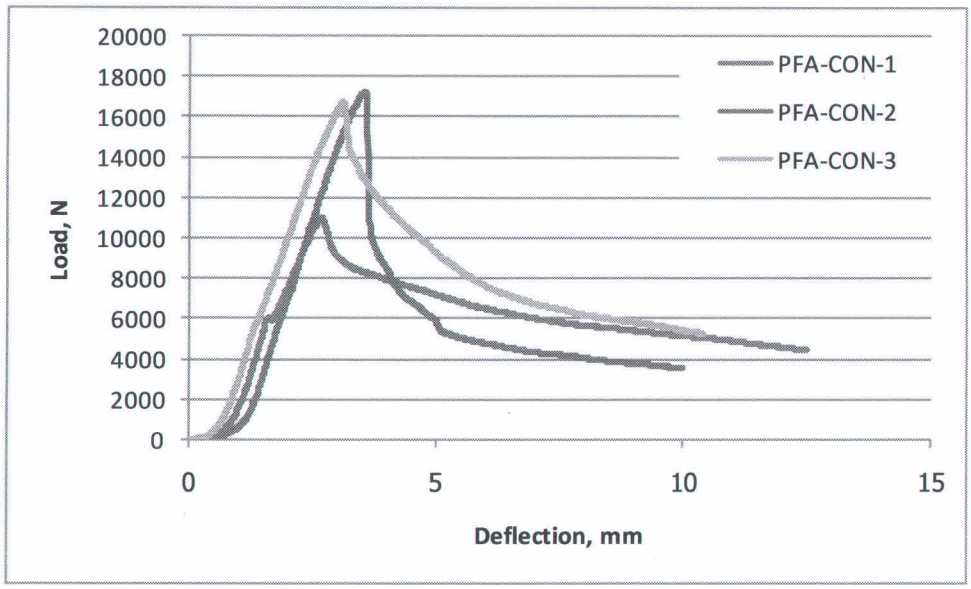


รูปที่ 4.8 การสูญเสียกำลังการยึดเหนี่ยวระหว่างจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตต่อเหล็กเสริม

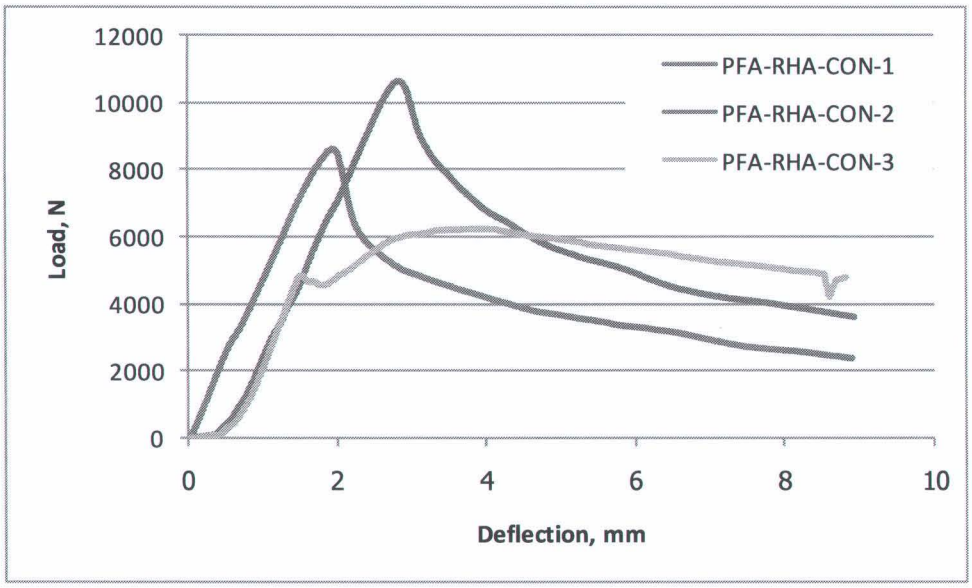
การทดสอบกำลังรับแรงดัดของคานจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าลอย เถ้าแกลบ ดินขาว และคอนกรีต สามารถนำค่ากำลังรับแรงดัดและค่าการโก่งตัวที่สภาวะต่างๆ มาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงดัดและการโก่งตัวดังรูปที่ 4.9 ถึงรูปที่ 4.15



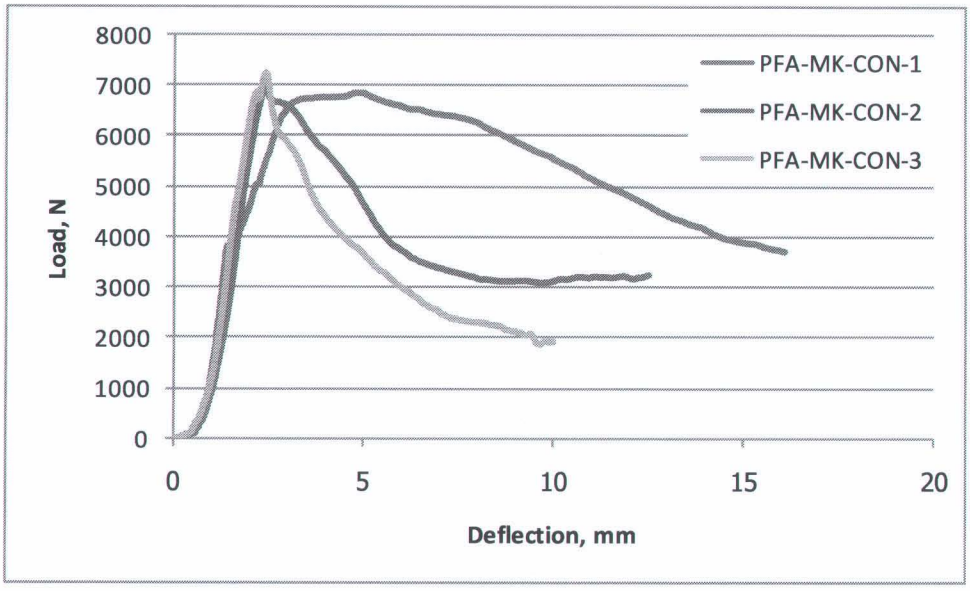
รูปที่ 4.9 กำลังรับแรงดัดและการโก่งตัวของคานคอนกรีต OPC-CON



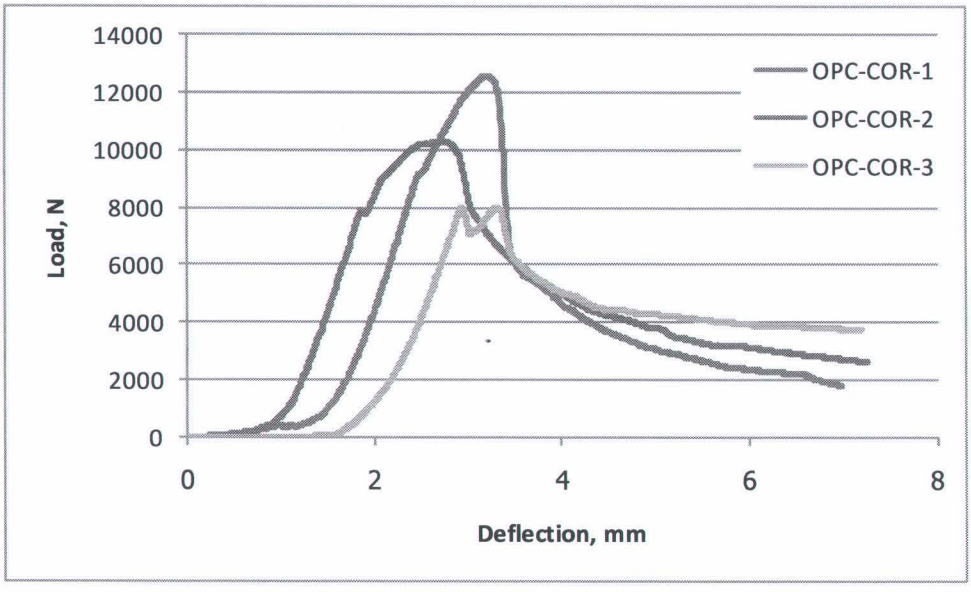
รูปที่ 4.10 กำลังรับแรงดัดและการโก่งตัวของคานคอนกรีต PFA-CON



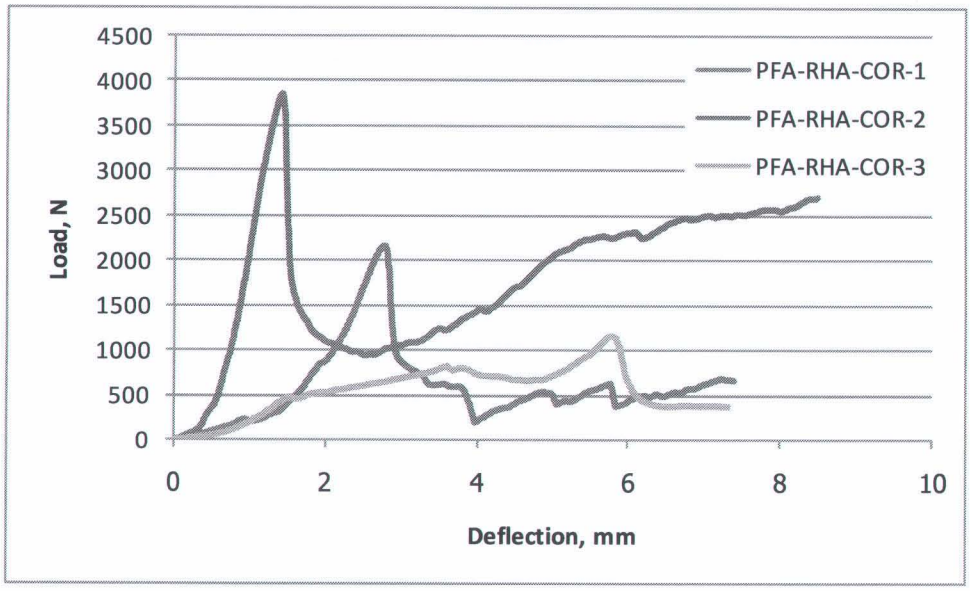
รูปที่ 4.11 กำลังรับแรงดัดและการโก่งตัวของคานคอนกรีต PFA-RHA-CON



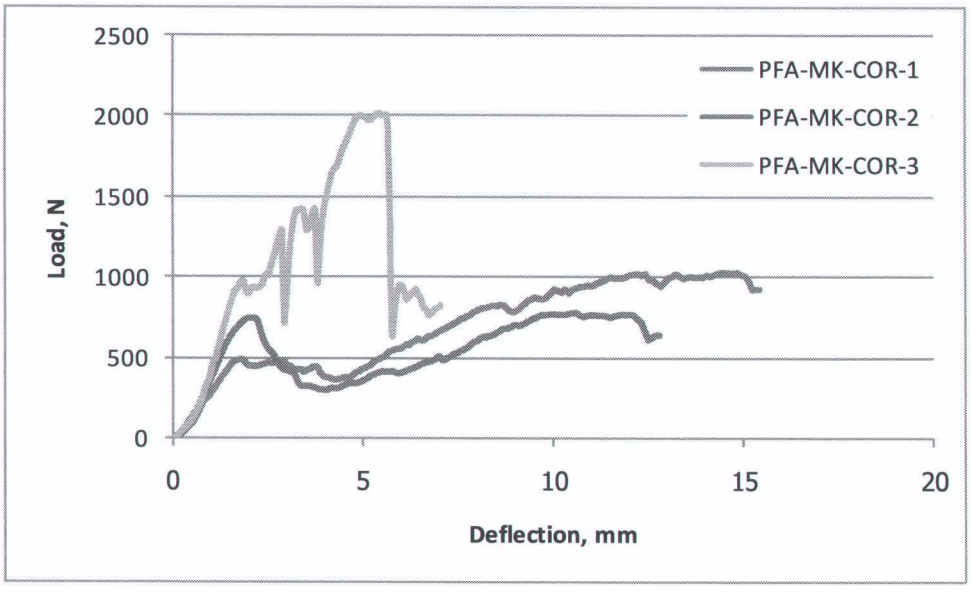
รูปที่ 4.12 กำลังรับแรงดัดและการโก่งตัวของคานคอนกรีต PFA-MK-CON



รูปที่ 4.13 กำลังรับแรงดัดและการโก่งตัวของคานคอนกรีต OPC-COR



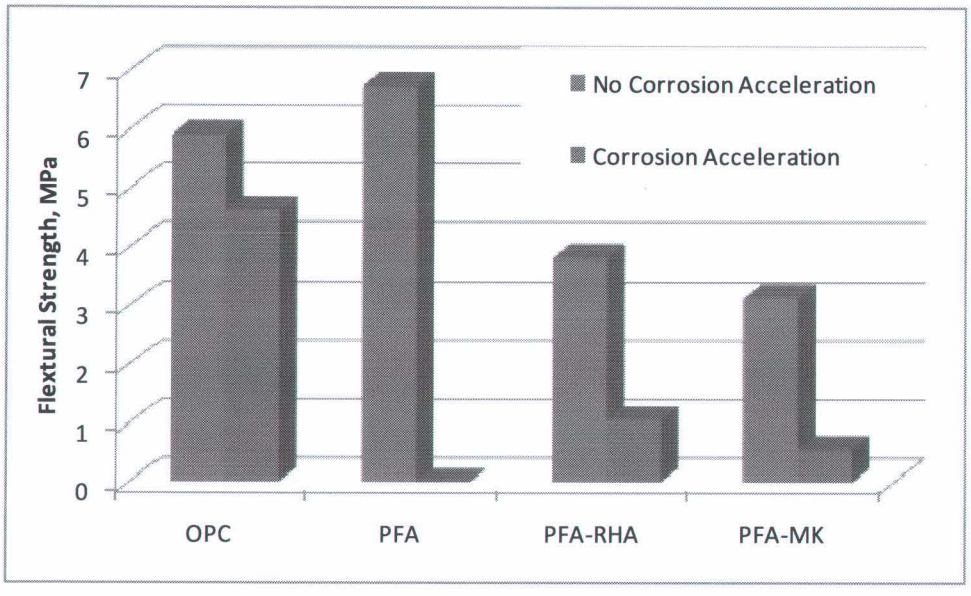
รูปที่ 4.14 กำลังรับแรงดัดและการโก่งตัวของคานคอนกรีต PFA-RHA-COR



รูปที่ 4.15 กำลังรับแรงดัดและการโก่งตัวของคานคอนกรีต PFA-MK-COR

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการโก่งตัวของคานจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอย เถ้าแกลบ ดินขาว และคอนกรีตที่ไม่ได้ผ่านการเร่งการเกิดสนิมของเหล็กเสริม พบว่าคานจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าลอย PFA-CON มีกำลังรับแรงดัดมากที่สุด เท่ากับ 6.74 MPa รองลงมาคานจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าแกลบ PFA-RHA-CON กำลังรับแรงดัดเท่ากับ 3.83 MPa และน้อยที่สุดคานจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจาก

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

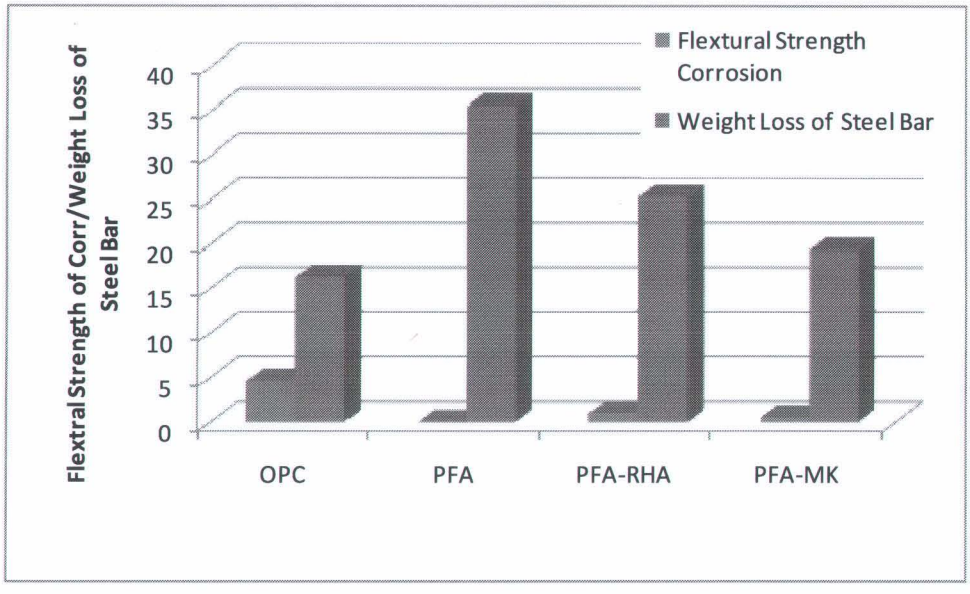


รูปที่ 4.16 กำลังรับแรงดัด

เมื่อพิจารณากราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการโก่งตัวของคานจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอย เถ้าแกลบ ดินขาว และคอนกรีตที่ผ่านการเร่งการเกิดสนิมของเหล็กเสริม พบว่าคานจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าแกลบ PFA-RHA-COR มีกำลังรับแรงดัดมากที่สุด เท่ากับ 1.07 MPa รองลงมาคานจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจากดินขาว PFA-MK-COR กำลังรับแรงดัดเท่ากับ 0.57 MPa และคานจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าลอย PFA-COR ไม่สามารถทำการทดสอบได้เนื่องจากมีรอยร้าวจำนวนมากจนตัวอย่างคานจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าลอยการวิบัติ สำหรับคานคอนกรีตมีกำลังรับแรงดัด เท่ากับ 4.63 MPa ซึ่งมีค่ากำลังรับแรงดัดมากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับคานจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าลอย เถ้าแกลบ และดินขาว

4.4.2 อิทธิพลของการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริม

กำลังรับแรงดัดของคานจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าลอย เถ้าแกลบ ดินขาว และคอนกรีตมีค่ากำลังรับแรงดัดลดลงอย่างเห็นได้อย่างชัดเจนเมื่อมีการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมจากการเกิดสนิมของเหล็กเสริม เนื่องจากการเกิดสนิมของเหล็กทำให้สูญเสียแรงยึดเหนี่ยวระหว่างจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตกับเหล็กเสริม จากรูปที่ 4.17 กำลังรับแรงดัดต่อการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมมีความสัมพันธ์กัน การสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริมในคานจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าลอยมากที่สุดส่งผลให้กำลังรับแรงดัดลดลงอย่างมากจนไม่สามารถทำการทดสอบได้ สำหรับการลดลงของกำลังรับแรงดัดเนื่องจากอิธิพลการสูญสียน้ำหนักของเหล็กเสริมของคานจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าแกลบ ร้อยละ 72.06 และคานจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจากดินขาว ร้อยละ 81.90 และคานคอนกรีตร้อยละ 21.65 ซึ่งมีการลดลงของกำลังรับแรงดัดน้อยที่สุด



รูปที่ 4.17 กำลังรับแรงดัดต่อการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเสริม

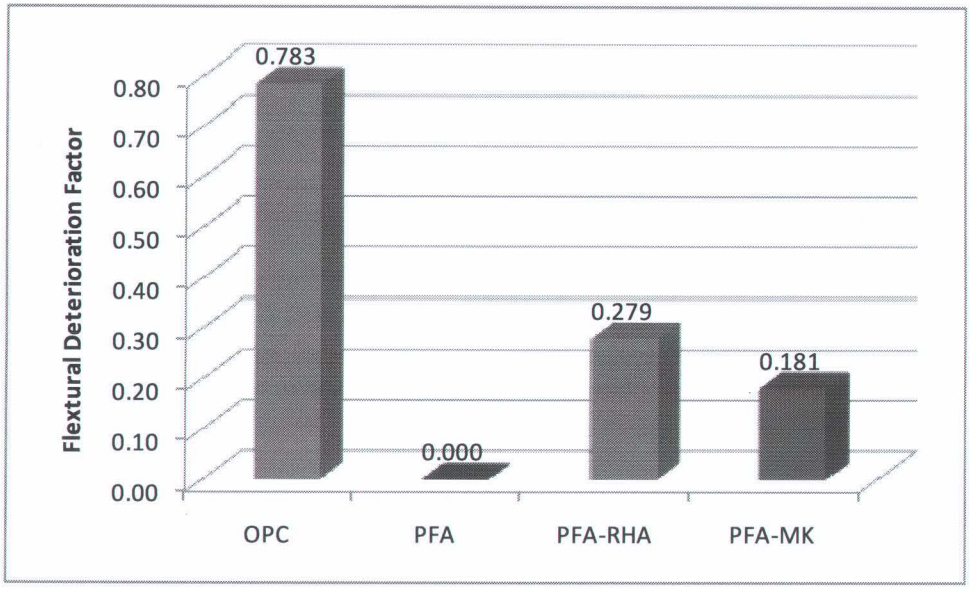
การพิจารณาการลดลงของกำลังรับแรงดัดของคานจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าลอย เถ้าแกลบ ดินขาว และคอนกรีต ซึ่งอัตราการลดลงของค่ากำลังรับแรงดัดจะอยู่ในรูปของค่าสัมประสิทธิ์การเสื่อมสภาพกำลังรับแรงดัดสามารถคำนวณได้ดังสมการ

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

เมื่อ $\varphi(t)$ สัมประสิทธิ์การเสื่อมสภาพกำลังรับแรงดัด

M_{cor} กำลังรับแรงดัดสูงสุดเนื่องจากการกัดกร่อนของเหล็กเสริม

M_{con} กำลังรับแรงดัดสูงสุดที่ไม่มีการกัดกร่อนของเหล็กเสริม



รูปที่ 4.18 สัมประสิทธิ์การเสื่อมสภาพกำลังรับแรงดัด

สัมประสิทธิ์การเสื่อมสภาพกำลังรับแรงดัดของคานจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าลอย เถ้าแกลบ ดินขาว และคอนกรีต ดังรูปที่ 4.18 พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การเสื่อมสภาพกำลังรับแรงดัดของคานจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอยมีการลดลงมากที่สุด รองลงมาค่าสัมประสิทธิ์การเสื่อมสภาพกำลังรับแรงดัดของคานจีโอโพลิเมอร์จากดินขาวและค่าสัมประสิทธิ์การเสื่อมสภาพจากเถ้าแกลบ ส่วนค่าสัมประสิทธิ์การเสื่อมสภาพของคอนกรีตมีค่าน้อยที่สุด

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ห้องสมุดงานวิจัย