

ผลกระทบจากฝนกรดที่มีต่อกำลังรับแรงเหล็กเสริมคอนกรีต

The Effects of Acid Rain to the Strength of Reinforcing Steel

Received : October 1, 2019
Revised : December 22, 2019
Accepted : December 27, 2019

พรเทพ เครืออุดม, วศ.บ. (Pornthep Kruekoon, B.Eng.)¹

พัฒนพงษ์ บุญเจือ, วศ.บ. (Phatthanaphong Bunchuea, B.Eng.)²

หวังแก้ว บุญสวน, วศ.ม. (Whangkaew Boonsuan, M.Eng.)³

ประยงค์ กীরติอุไร, วศ.ด. (Prayong Keeratiurai, D.Eng.)^{4*}

บทคัดย่อ

ฝนกรดเป็นผลที่เกิดจากมลภาวะทางอากาศจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงฟอสซิล เช่น ถ่านหิน ก๊าซธรรมชาติ และน้ำมัน ของการผลิตไฟฟ้าและอุตสาหกรรม ฝนกรดเป็นผลมาจากปฏิกิริยาเคมีของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) และก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ (NO_2) ทำปฏิกิริยากับน้ำ (H_2O) ในชั้นบรรยากาศก่อให้เกิดกรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) และกรดไนตริก (HNO_3) โครงสร้างเหล็กและโครงสร้างอาคารที่เป็นคอนกรีตเสริมเหล็กเมื่อถูกฝนกรดเป็นระยะเวลานาน ย่อมได้รับผลกระทบต่อความแข็งแรงหรืออายุการใช้งานของเหล็กเสริม

วัตถุประสงค์: งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาถึงผลกระทบจากฝนกรดที่มีผลต่อกำลังรับแรงดึงสูงสุดของเหล็กเสริม

วิธีการ: ดำเนินการวิจัยโดยการนำตัวอย่างเหล็กเสริมมาทำการแช่ในกรดไนตริกและกรดซัลฟิวริก ซึ่งถูกสังเคราะห์ที่ความเข้มข้น 0.5 เปอร์เซ็นต์ 1 เปอร์เซ็นต์ 2 เปอร์เซ็นต์ และ 3 เปอร์เซ็นต์ โดยโมลต่อปริมาตรของตัวถูกละลาย และมีระยะเวลาการแช่ที่ 15 30 45 และ 60 วัน เพื่อเปรียบเทียบค่ากำลังรับแรงดึงสูงสุดและน้ำหนักที่หายไปของเหล็กเสริม

ผลการศึกษา: พบว่าการแช่ในกรดทั้งสองชนิดที่มีความเข้มข้นมากขึ้นจะมีผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญต่อกำลังรับแรงดึงสูงสุดของเหล็กเสริมที่ลดลงตามไปด้วย ถ้าความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริกและกรดไนตริกเท่ากันและที่ระยะเวลาการแช่ในกรดเท่ากัน เหล็กเสริมที่ถูกแช่ในกรดซัลฟิวริกมีค่ากำลังรับแรงดึงลดลงอย่างมีนัยสำคัญมากกว่าเมื่อเทียบกับเหล็กเสริมที่แช่ในกรดไนตริก นอกจากนั้นจากการเปรียบเทียบค่ากำลังรับแรงดึงสูงสุดของเหล็กเสริมที่นำไปแช่ในกรดไนตริกและกรดซัลฟิวริกที่ระยะเวลาการแช่ต่างๆ สามารถสรุปได้ว่าการแช่ในกรดทั้งสองชนิดที่มีระยะเวลาการแช่หรือสัมผัสกรดมากขึ้นจะมีผลกระทบต่อกำลังรับแรงดึงของเหล็กเสริมที่ลดลงตามไปด้วย

คำสำคัญ: ฝนกรด, กำลังรับแรงดึง, เหล็กเสริมคอนกรีต

^{1,2}วิศวกร บริษัท ซีคอนโฮม จำกัด

(Engineer, Seacon Home Co., Ltd)

³อาจารย์ประจำหลักสูตรวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยวงษ์ชวลิตกุล

(Lecturer, Department of Civil Engineering Faculty of Engineering, Vongchavalitkul University)

⁴อาจารย์ประจำหลักสูตรการจัดการงานวิศวกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยวงษ์ชวลิตกุล

(Lecturer, Program in Engineering Management Faculty of Engineering, Vongchavalitkul University)

* ผู้เขียนหลัก (Corresponding author)

E-mail: prayong_kee@vu.ac.th

Abstract

The acid rain is a result of the air pollution from the burning of fossil fuels, such as coal, natural gas, and oil, from electricity production and industries. Acid rain is the result of chemical reactions of sulfur dioxide (SO_2) or nitrogen dioxides (NO_2) with moisture in the air (H_2O). It is in the form of sulfuric acid (H_2SO_4) and nitric acid (HNO_3). The reinforced concrete and the structure of steel buildings were in the acid rain for long time periods. The buildings may were affected by acid rain to their strength and life of using.

Objective: The objective of this research was to study the effects of acid rain on the maximum tensile strength of reinforcing steels.

Methods: The examples of steels were soaked in nitric acid and sulfuric acid at the concentration of 0.5 percent, 1 percent, 2 percent and 3 percent by moles per volume of solute. The samples were soaked for 15 days, 30 days, 45 days and 60 days. Then the maximum tensile strength and the lost weights of steels were compared.

Results: This study revealed that both the acids types soaking with the increasing of concentrations had a significant effect on the decreasing of the maximum tensile strength of steel. If the concentration of sulfuric acid and nitric acid were the same and the durations of immersion in both acids were equal, the maximum tensile strength of steels soaked in sulfuric acid was decreased significantly compared to those soaked in nitric acid. Comparison of the maximum tensile strength of steel soaked in nitric acid and sulfuric acid at the various immersion periods. This study also indicated that the longer the immersion time of the steel the higher the amount of the decreasing of the maximum tensile strength of steel.

Keywords: acid rain, tensile strength, reinforcing steel

1. ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ฝนกรดเป็นผลมาจากก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO₂) และก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ (NO₂) โดยก๊าซทั้งสองชนิดนี้มักจะเกิดจากการเผาผลาญเชื้อเพลิงฟอสซิล เช่น ถ่านหิน ก๊าซธรรมชาติ และน้ำมัน ซึ่งก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO₂) และก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ (NO₂) ทั้งสองชนิดนี้จะทำปฏิกิริยากับออกซิเจนและความชื้น (H₂O) ในชั้นบรรยากาศก่อให้เกิดกรดซัลฟิวริก (H₂SO₄) และกรดไนตริก (HNO₃) แล้วตกกลับสู่พื้นดิน และแขวนลอยในบรรยากาศจะถูกพัดพาไปโดยลมและตกสะสมบนผิวสิ่งก่อสร้าง (กรมควบคุมมลพิษ, 2562 และ Weathers KC, and Likens GE, 2006). กรมควบคุมมลพิษ (2562) กล่าวว่าก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ของซัลเฟอร์ และก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ของไนโตรเจน เมื่อลอยเข้าสู่บรรยากาศจะกลายสภาพเป็นสารกรด และถูกพัดพาไปได้ไกล ส่งผลให้หมอก น้ำค้าง ฝน เป็นกรด กลายเป็นปัญหาสิ่งแวดล้อมของภูมิภาคและของโลก สารกรดหรือฝนกรดในบรรยากาศทำความเสียหายต่อสุขภาพ ทรัพย์สิน แหล่งผลิตอาหารและทรัพยากรธรรมชาติ ประเทศไทยเป็นประเทศหนึ่งที่กำลังมีการพัฒนาด้านเศรษฐกิจและสังคมในอัตราที่สูง ทำให้ชุมชนเมือง อุตสาหกรรม และการคมนาคมขนส่งมีการขยายตัวอย่างรวดเร็ว เป็นผลให้มีการใช้พลังงานจากเชื้อเพลิงฟอสซิลเพิ่มขึ้นเป็นจำนวนมาก ปัญหาเรื่องฝนกรดในบรรยากาศจึงได้เริ่มปรากฏขึ้นแล้ว โดยในบางครั้งตรวจพบว่าน้ำฝนที่ตกลงมาในเขตเมือง และเขตอุตสาหกรรมมีความเป็นกรดสูงกว่าน้ำฝนธรรมชาติ สำหรับประเทศไทยปัญหานี้อาจทวีความรุนแรงขึ้นได้ในอนาคต เช่นเดียวกับที่เกิดในประเทศอุตสาหกรรมที่พัฒนาแล้ว สารมลพิษที่เป็นตัวการทำให้เกิดฝนกรดในบรรยากาศที่สำคัญๆ มีอยู่ 2 ชนิด ชนิดแรก คือ ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ของซัลเฟอร์ ซึ่งรวมถึงก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO₂) และก๊าซซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO₃) และชนิดที่สอง คือ ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ของไนโตรเจน (NO_x) ซึ่งรวมถึงก๊าซไนตริกออกไซด์ (NO) และก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ (NO₂) กรมควบคุมมลพิษ (2559) ได้ทำการสำรวจสภาพมลพิษทางอากาศของประเทศไทยเป็นรายภูมิภาคในปี 2557-2559 พบว่า ค่าของ SO₂ และ NO₂ ในอากาศ มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นทุกปีอย่างมีนัยสำคัญ โดยปี 2557 ในเขตภาคกลางมีค่าของ SO₂ และ NO₂ สูงที่สุดเมื่อเทียบกับภาคอื่นๆ ของประเทศไทย ซึ่งที่จังหวัดสมุทรสาครและกรุงเทพมหานครมีค่าของ SO₂ เท่ากับ 13 ppb (part per billion) และ ค่าของ NO₂ เท่ากับ 68 ppb โดยค่า SO₂ สูงสุดที่บริเวณแขวงการทางจ.สมุทรสาคร ในขณะที่ ค่า NO₂ สูงสุดที่บริเวณการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย จ.กรุงเทพมหานคร กรมควบคุมมลพิษ. (2562)

กล่าวได้ว่าค่า pH มีความสัมพันธ์ที่ยุ่งยากซับซ้อนกับความเข้มข้นของกรด หรืออีกนัยหนึ่งปริมาณไฮโดรเจนไอออน (H⁺) ที่มีอยู่ในของเหลว โดยที่ค่า pH ต่ำๆ จะยังมีปริมาณไฮโดรเจนไอออนมากขึ้นเป็นทวีคูณ และตัวเลขของค่า pH แต่ละหนึ่งค่าที่ลดลงจะมีความเป็นกรดหรือปริมาณไฮโดรเจนไอออนเพิ่มขึ้น 10 เท่า กล่าวคือ น้ำฝนที่มีค่า pH 4 มีความเป็นกรดเป็น 10 เท่าของน้ำฝนที่มีค่า pH 5 และมีความเป็นกรดเป็น 100 เท่าของน้ำฝนที่มีค่า pH 6 โดยทั่วไปหยดน้ำฝนที่เกิดจากการควบแน่นในบรรยากาศควรจะมีค่าความเป็นกรดต่าง หรือค่า pH ใกล้เคียง 7 อย่างไรก็ตาม ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ที่มีอยู่ตามธรรมชาติในบรรยากาศเมื่อละลายเข้าไปในหยดน้ำฝนกลายเป็นกรดอ่อนคาร์บอนิก หยดน้ำฝนจึงมีค่า pH ต่ำลง หยดน้ำฝนตามธรรมชาติจึงมีค่า pH เท่ากับ 5.6 อย่างไรก็ตาม สารกรดที่อยู่ในบรรยากาศก็ละลายเข้าไปในหยดน้ำฝนได้เช่นกัน ทำให้เกิดเป็นกรดกำมะถันหรือกรดซัลฟิวริก (H₂SO₄) และกรดดินประสิวหรือกรดไนตริก (HNO₃) ซึ่งเป็นกรดแก่และจะทำให้ค่า pH ของหยดน้ำฝนมีค่าต่ำลงไปอีก คือ มีความเป็นกรดมากขึ้นกว่าที่เป็นอยู่ตามธรรมชาติ เมื่อตกลงมาในแหล่งน้ำและผืนดิน ก็จะทำให้ น้ำและดินมีความเป็นกรดมากขึ้น เกิดผลกระทบเสียหายต่อพืช สัตว์ และระบบนิเวศวิทยา นอกจากนี้ ความเป็นกรดของน้ำฝนยังก่อให้เกิดการสึกกร่อนของวัสดุสิ่งก่อสร้างต่างๆ อีกด้วย

ฝนกรดทำความเสียหายอย่างรุนแรงกับสิ่งปลูกสร้างได้ โดยเฉพาะที่ใช้เหล็กเป็นองค์ประกอบหลัก โดยสิ่งที่เห็นได้ชัดที่สุดคือเนื้อคอนกรีตที่บวมแตกออกมา จากการที่คอนกรีตมีรอยร้าวซึ่งเกิดขึ้นเป็นปกติและถูกฝนกรดซึมเข้าไปกัดกร่อนเหล็กเส้นที่เสริมอยู่ในเนื้อคอนกรีตละลายออกมา ทำให้เกิดความเสียหายที่ยากจะซ่อมแซมได้ในบางกรณี ซึ่งสิ่งนี้กำลังเป็นปัญหาใหญ่ในการปกป้องสิ่งปลูกสร้างเก่าๆ และสถานที่สำคัญขอประวัติศาสตร์ ฝนกรดจะกัดกร่อนทำลายพวกโลหะ เหล็กเป็นสนิมเร็วขึ้น เช่น โครงสร้างอาคารที่เป็นเหล็ก อาทิ ป้ายโฆษณาขนาดใหญ่ โกดัง โครงหลังคาเหล็ก หรือแม้แต่โครงสร้างอาคารที่เป็นคอนกรีตเสริมเหล็ก ทำให้เหล็กโครงสร้างดังกล่าวสูญเสียความสามารถในการรับแรงตามที่วิศวกรได้ออกแบบและควบคุมการก่อสร้างไว้ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐาน และพังถล่มลงมาจากเหล็กโครงสร้างที่ถูกกัดกร่อน ทำให้สูญเสียความสามารถในการรับแรงตามที่ได้ออกแบบไว้ ดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 ป้ายโฆษณาขนาดใหญ่ริมถนนพหลโยธิน ช่วงอำเภอน้อย จังหวัดพระนครศรีอยุธยา ได้รับความเสียหายจากเหตุสึนามิ โดยภาพด้านซ้ายแสดงป้ายที่พังทลายลงมา และภาพด้านขวาแสดงป้ายที่ยังคงตั้งอยู่แต่มีรอยร้าวและเสียหายอย่างเห็นได้ชัด

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงทำการศึกษถึงผลกระทบจากฝนกรดต่อกำลังรับแรงดึงสูงสุดของเหล็กเสริม โดยศึกษาเปรียบเทียบระหว่างค่ากำลังรับแรงดึงสูงสุดของเหล็กเสริมคอนกรีตที่นำไปแช่ในน้ำกรดไนตริกและน้ำกรดซัลฟิวริกที่ร้อยละของความเข้มข้นโดยโมลต่อปริมาตรของตัวถูกละลาย และที่ระยะเวลาการแช่ต่างๆ โดยเปรียบเทียบกับค่ากำลังรับแรงดึงสูงสุดของเหล็กเสริมที่ไม่ได้สัมผัสกับน้ำกรดทั้งสองชนิด

2. วัตถุประสงค์

1. เพื่อประเมินผลกระทบของฝนกรดที่ความเข้มข้นต่างๆ ต่อกำลังรับแรงดึงสูงสุดของเหล็กเสริม
2. เพื่อประเมินความสัมพันธ์ระหว่างเวลา กับผลกระทบของฝนกรดที่ความเข้มข้นต่างๆ ต่อกำลังรับแรงดึงสูงสุดของเหล็กเสริม

3. ขอบเขตการศึกษา

1. ฝนกรดที่ใช้ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ ผู้วิจัยได้ทำการสังเคราะห์ขึ้นมา โดยใช้กรดไนตริก และกรดซัลฟิวริก ที่ร้อยละของความเข้มข้นโดยโมลต่อปริมาตรของตัวถูกละลาย (Al-Amieri, et al., 2014, Berisha, et al., 2015 and Mehmeti and Berisha, 2017) ซึ่งถูกสังเคราะห์ที่ความเข้มข้น 0.5 เปอร์เซ็นต์ หรือเทียบเท่า 5 ppb, 1 เปอร์เซ็นต์ หรือเทียบเท่า 10 ppb, 2 เปอร์เซ็นต์ หรือเทียบเท่า 20 ppb และ 3 เปอร์เซ็นต์ หรือเทียบเท่า 30 ppb โดยโมลต่อปริมาตรของตัวถูกละลาย ซึ่งสัมพันธ์กับสภาพมลพิษทางอากาศของประเทศไทยเป็นรายภูมิภาคในปี 2557-2559 (กรมควบคุมมลพิษ, 2559)

2. วัสดุที่เลือกใช้ในการศึกษานี้คือ เหล็กเสริมคอนกรีต ประเภทเหล็กข้ออ้อยขนาด DB10 ชั้นคุณภาพ SD40

3. ทดสอบเฉพาะกำลังรับแรงดึงสูงสุดของเหล็กเสริมเท่านั้น

4. ศึกษาผลกระทบของความเข้มข้นของฝนกรด 4 ระยะ คือ 15 วัน 30 วัน 45 วัน และ 60 วัน

5. ผลกระทบที่ศึกษามี 3 ข้อ ได้แก่

5.1 น้ำหนักเหล็กเสริมคอนกรีตที่หายไป (โดยการชั่ง)

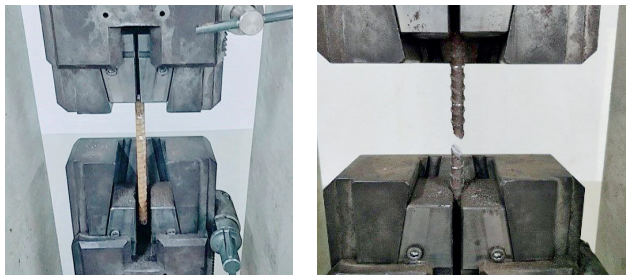
5.2 ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของเหล็กเสริมที่ลดลง

5.3 กำลังรับแรงดึงสูงสุดที่ลดลง

4. วิธีดำเนินงานวิจัย

4.1 ระเบียบวิธีวิจัย

งานวิจัยนี้ศึกษาเกี่ยวกับผลกระทบจากฝนกรดที่มีผลต่อกำลังรับแรงดึงสูงสุดของเหล็ก โดยนำเหล็กเส้นมาตัด ให้ได้ขนาด 30 เซนติเมตร ซึ่งน้ำหนักและเปลี่ยนค่าน้ำหนักเป็นเส้นผ่าศูนย์กลางเหล็ก แล้วกำหนดตำแหน่งช่วงความยาวพิกัดตามที่ American Society for Testing and Material (1995) กำหนดใน ASTM A615 เหล็กเส้นที่ใช้เป็นประเภทเหล็กข้ออ้อยขนาด DB10 ชั้นคุณภาพ SD40 จำนวน 96 ตัวอย่าง มาทำการแช่ในกรดไนตริกและกรดซัลฟิวริกที่ความเข้มข้น 0.5% (5 ppb), 1% (10 ppb), 2% (20 ppb) และ 3% (30 ppb) โดยโมลต่อปริมาตรของตัวถูกละลาย ซึ่งมีระยะเวลาการแช่ที่ 15 วัน 30 วัน 45 วัน และ 60 วัน โดยทำการสังเคราะห์ความเข้มข้นของกรดไนตริกและกรดซัลฟิวริกขึ้นใหม่ที่ระยะเวลาของการแช่เหล็กในน้ำกรดทุกๆ 15 วัน ของวันทำการทดสอบ โดยเป็นการประยุกต์วิธีการทดสอบซึ่งกำหนดโดย ASTM C267 (American Society for Testing and Material, 1979) เมื่อครบกำหนดเวลาการแช่เหล็ก ได้ทำการทดสอบหาลำลังรับแรงดึงสูงสุด เปรียบเทียบกับกำลังรับแรงดึงสูงสุดของเหล็กเสริมที่ไม่ได้ถูกแช่ในน้ำกรดทั้งสองชนิด โดยใช้เครื่องทดสอบแรงดึงเหล็ก (Universal Testing Machine) ดังรูปที่ 2 และดำเนินการทดสอบตามที่กำหนดโดย ASTM A370 (American Society for Testing and Material, 1995) เมื่อได้ค่าแรงดึงสูงสุดของเหล็กจากการทดสอบแล้ว นำมาวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงดึงสูงสุด ความเข้มข้นของกรด และอายุการสัมผัสน้ำกรดของเหล็กเสริม



รูปที่ 2 การทดสอบกำลังรับแรงดึงสูงสุดของเหล็กเสริม

4.2 วิธีการเก็บข้อมูล

1) การชั่งน้ำหนักและการเปลี่ยนค่าน้ำหนักเป็นเส้นผ่านศูนย์กลาง
เนื่องจากเหล็กที่ใช้ในการดำเนินงานวิจัยนี้ เป็นเหล็กเสริมคอนกรีตประเภทเหล็กข้ออ้อย ซึ่งไม่สามารถวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางได้โดยตรง จึงจำเป็นต้องหาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเหล็กเสริมคอนกรีตที่ใช้ในการดำเนินการวิจัยจากการชั่งน้ำหนัก ด้วยเครื่องชั่งน้ำหนักดิจิทัล ที่มีความละเอียดทศนิยม 3 หลัก และทำการวัดค่าความยาวของเส้นเหล็กด้วยเวอร์เนียร์คาลิเปอร์ แล้วจึงเปลี่ยนค่าน้ำหนักเป็นเส้นผ่านศูนย์กลางจากสมการ (มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2559)

$$D_0 = \sqrt{\frac{162 \times W}{L}}$$

โดย D_0 = เส้นผ่านศูนย์กลางของเหล็กข้ออ้อย (มม.)
 W = น้ำหนักของเส้นเหล็ก (กก.)
 L = ความยาวของเส้นเหล็ก (ม.)

2) การทดสอบกำลังรับแรงดึงสูงสุด

ขั้นตอนการทดสอบตัวอย่างเหล็กเสริมคอนกรีต

American Society for Testing and Material (1995) กำหนดขั้นตอนการทดสอบกำลังรับแรงดึงสูงสุดตัวอย่างเหล็กเสริมฯ ตาม ASTM A370 ดังนี้

1. นำชิ้นตัวอย่างทดสอบจากถังแช่น้ำกรด เช็ดผิวให้แห้งและชั่งน้ำหนัก
2. จากการเปลี่ยนค่าน้ำหนักเป็นเส้นผ่านศูนย์กลาง กำหนดช่วงความยาวพิคัดของตัวอย่างโดย ความยาวพิคัดเดิมหรือความยาวการวัด (Gauge Length) เท่ากับ 5D และความยาวของส่วนขนานหรือความห่างของหัวจับเหล็กเท่ากับ 5.5D
3. นำตัวอย่างเข้าติดตั้งในเครื่องทดสอบ (Universal Testing Machine) โดยให้ระยะหัวจับได้มาตรฐานที่กำหนด
4. ติดตั้งเครื่องมือวัดการยืดตัว (Extensometer)

5. เพิ่มแรงดึงโดยสม่ำเสมอประมาณ 80 กก./ตร.ซม. ต่อวินาที ก่อนถึงจุดคราก อ่านและบันทึกค่าแรงทุกๆ การยืด 0.50 มม.

6. หลังจากจุดครากให้อ่านและบันทึกค่าแรงทุกๆ การยืด 0.50 มม. (แรงดึงที่จุดครากสังเกตจากการที่แรงดึงคงที่อยู่ระยะเวลาหนึ่งแล้วเพิ่มขึ้นได้อีก ในขณะที่การยืดตัวเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ)

7. เพิ่มแรงและบันทึกค่าแรงจนถึงจุดวิบัติ นำชิ้นตัวอย่างมาต่อกันแล้ววัดความยาวหลังจากวิบัติ

5. ผลการวิจัยและอภิปรายผลการวิจัย

5.1 ผลการทดสอบแรงดึงและกำลังรับแรงดึงของเหล็กที่ไม่ได้แช่กรดทั้ง 2 ชนิด

จากการทดสอบตัวอย่างเหล็กประเภทเหล็กข้ออ้อยขนาด DB10 ชั้นคุณภาพ SD40 โดยนำตัวอย่างเหล็กที่ไม่ได้แช่กรดทั้ง 2 ชนิดมาทำการทดสอบหาแรงดึงและกำลังรับแรงดึงเพื่อเปรียบเทียบกับแรงดึงสูงสุดและกำลังรับแรงดึงสูงสุดของตัวอย่างเหล็กที่แช่กรดไนตริก (HNO_3) และกรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) แสดงไว้ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ค่าแรงดึงสูงสุดเฉลี่ย $\pm$ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของเหล็กและค่ากำลังรับแรงดึงสูงสุดเฉลี่ย $\pm$ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของเหล็กที่ไม่ได้ถูกแช่ในน้ำกรดทั้ง 2 ชนิดที่ทำการศึกษา

เหล็ก	แรงดึงสูงสุดของเหล็ก (kg)	กำลังรับแรงดึงสูงสุดของเหล็ก (ksc)
DB10 (SD40)	4926.95 $\pm$ 58.85	6862.51 $\pm$ 64.77

5.2 การเปรียบเทียบผลกระทบต่อเหล็กเส้น จากระดับความเข้มข้นของกรดไนตริก (HNO_3) และกรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) ที่ความเข้มข้นและระยะเวลาการแช่ต่างๆ

การทดสอบตัวอย่างเหล็กประเภทเหล็กข้ออ้อยขนาด DB10 ชั้นคุณภาพ SD40 โดยการแช่ในกรดไนตริก (HNO_3) และกรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) ซึ่งถูกสังเคราะห์ที่ความเข้มข้น 0.5 เปอร์เซ็นต์ 1 เปอร์เซ็นต์ 2 เปอร์เซ็นต์ และ 3 เปอร์เซ็นต์ โดยมอลต่อปริมาตรของตัวถูกละลาย ที่ระยะเวลา 15 วัน 30 วัน 45 วัน และ 60 วัน ดังรูปที่ 3 จะเห็นว่าเหล็กที่ถูกแช่ในกรดซัลฟิวริกจะสึกกร่อนมากกว่าเหล็กที่ถูกแช่อยู่ในกรดไนตริก ตารางที่ 2 พบว่า น้ำหนักที่หายไปของเหล็กที่แช่ในกรดไนตริกจะน้อยกว่าน้ำหนักที่หายไปของเหล็กที่แช่ในกรดซัลฟิวริก โดยเปอร์เซ็นต์ความเข้มข้นต่างๆ ของกรดไนตริกและกรดซัลฟิวริก

รวมทั้งระยะเวลาการแช่หรือสัมผัสกรดจะแปรผันตรงกับน้ำหนักของเหล็กที่หายไป นั่นคือที่เปอร์เซ็นต์ความเข้มข้นสูงของกรดทั้งสองชนิดและระยะเวลาการแช่หรือสัมผัสกรดที่ยาวนาน น้ำหนักของเหล็กที่หายไปก็จะมากตามไปด้วย เมื่อทำการทดสอบหาแรงดึงสูงสุดของเหล็ก พบว่าตัวอย่างเหล็กที่แช่ด้วยกรดไนตริก ค่าแรงดึงสูงสุดจะมีค่าสูงกว่าตัวอย่างเหล็กที่แช่ด้วยกรดซัลฟิวริก และจากการวิเคราะห์น้ำหนักที่หายไปของเหล็กสามารถบอกได้ว่าการกัดกร่อนมีฤทธิ์กัดกร่อนเหล็กมากกว่ากรดไนตริก ซึ่งข้อมูลเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยน้ำหนักที่หายไปของเหล็ก และค่าเฉลี่ยแรงดึงสูงสุดของเหล็กที่ถูกแช่ในน้ำกรดทั้ง 2 ชนิดในแต่ละเปอร์เซ็นต์ความเข้มข้นและที่ระยะเวลาการแช่ต่างๆ แสดงไว้ดังตารางที่ 2 และ 3 ตามลำดับ

แช่กรดH₂SO₄แช่กรดHNO₃

รูปที่ 3 ตัวอย่างเหล็กข้ออ้อยขนาด DB10 หลังถูกแช่ในกรดซัลฟิวริก (H₂SO₄)และกรดไนตริก (HNO₃)

ตารางที่ 2 ค่าเฉลี่ยน้ำหนักที่หายไปของเหล็ก จำแนกตามเปอร์เซ็นต์ความเข้มข้นต่าง ๆ ของกรดไนตริกและกรดซัลฟิวริกและตามระยะเวลาการแช่หรือสัมผัสกรด

ระยะเวลาการแช่กรด (วัน)	น้ำหนักที่หายไปของเหล็กที่แช่ในกรดไนตริกและกรดซัลฟิวริก (กิโลกรัม)							
	เปอร์เซ็นต์ความเข้มข้นของกรดไนตริกที่แช่				เปอร์เซ็นต์ความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริกที่แช่			
	0.5%	1%	2%	3%	0.5%	1%	2%	3%
15	0.000	0.000	0.000	0.000	0.007	0.018	0.067	0.101
30	0.000	0.000	0.000	0.000	0.064	0.091	0.164	0.163
45	0.000	0.000	0.001	0.023	0.164	0.165	0.163	0.164
60	0.000	0.002	0.006	0.057	0.164	0.165	0.163	0.164

ตารางที่ 3 ค่าเฉลี่ยแรงดึงสูงสุดของเหล็ก จำแนกตามเปอร์เซ็นต์ความเข้มข้นต่างๆ ของกรดไนตริกและกรดซัลฟิวริก และตามระยะเวลาการแช่หรือสัมผัสกรด

ระยะเวลาการแช่กรด (วัน)	แรงดึงสูงสุดของเหล็กที่แช่ในกรดไนตริก และกรดซัลฟิวริก (kg)							
	เปอร์เซ็นต์ความเข้มข้นของกรดไนตริกที่แช่				เปอร์เซ็นต์ความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริกที่แช่			
	0.5%	1%	2%	3%	0.5%	1%	2%	3%
15	4892.97 (±0.00)	4858.99 ±58.85	4825.01 ±117.71	4757.05 ±117.71	4587.16 ±0.00	4383.28 ± 0.00	2854.23 ± 0.00	2446.48 ± 0.00
30	4757.05 ± 117.71	4689.09 ± 0.00	4621.13 ± 58.85	4587.16 ± 0.00	2786.27 ± 117.71	2480.46 ± 58.85	N/A	N/A
45	4689.09 ± 0.00	4655.11 ± 58.85	4519.20 ± 58.85	4077.47 ± 0.00	N/A	N/A	N/A	N/A
60	4621.13 ± 58.85	4553.18 ± 58.85	4349.30 ± 117.71	3941.56 ± 117.71	N/A	N/A	N/A	N/A

หมายเหตุ : N/A หมายถึงไม่สามารถตรวจวัดได้ เพราะเหล็กถูกกรดกัดกร่อนจนเสียรูป ดังรูปที่ 4

ผลการวิเคราะห์ตามตารางที่ 3 แสดงค่าเฉลี่ยแรงดึงสูงสุดของเหล็กที่แช่กรดไนตริกและกรดซัลฟิวริก ที่ระดับความเข้มข้น 0.5 เปอร์เซ็นต์ 1 เปอร์เซ็นต์ 2 เปอร์เซ็นต์ และ 3 เปอร์เซ็นต์ โดยไม่ล่อต่อปริมาตรของตัวถูกละลาย ที่ระยะเวลาการแช่ 15 วัน 30 วัน 45 วัน และ 60 วัน เปรียบเทียบผลกระทบแรงดึงสูงสุดของเหล็กจากกรดทั้ง 2 ชนิด พบว่ากรดไนตริกและกรดซัลฟิวริกมีฤทธิ์กัดกร่อนเหล็กทำให้ค่าแรงดึงสูงสุดของเหล็กลดลง โดยเหล็กที่แช่ด้วยกรดซัลฟิวริกมีค่าแรงดึงสูงสุดลดลงมากกว่าเมื่อเทียบกับเหล็กที่แช่ด้วยกรดไนตริก เมื่อมีความเข้มข้นของกรดและระยะเวลาการแช่เท่ากัน ผลจากการศึกษายังพบด้วยว่าระดับความเข้มข้นต่างๆ ของกรดไนตริกและกรดซัลฟิวริก มีผลต่อค่าแรงดึงสูงสุดของเหล็ก นั่นคือเมื่อเหล็กสัมผัสกับกรดทั้ง 2 ชนิดที่มีความเข้มข้นมากขึ้นทำให้แรงดึงสูงสุดของเหล็กลดลงตามไปด้วย โดยรูปที่ 4(ก) แสดงตัวอย่างเหล็กที่ถูกกัดกร่อนด้วยกรดซัลฟิวริกที่ความเข้มข้นต่ำสุด 0.5 เปอร์เซ็นต์ และรูปที่ 4(ข) แสดงตัวอย่างเหล็กที่ถูกกัดกร่อนด้วยกรดซัลฟิวริกที่ความเข้มข้นสูงสุด 3 เปอร์เซ็นต์



(ก)



(ข)

ซึ่งเมื่อพิจารณาผลกระทบจากระยะเวลาการแช่หรือสัมผัสกรดทั้ง 2 ชนิดของเหล็กพบว่าสอดคล้องไปในทางเดียวกัน นั่นคือระยะเวลาการแช่หรือสัมผัสกรดไนตริกและกรดซัลฟิวริก มีผลกระทบต่อแรงดึงสูงสุดของเหล็กและน้ำหนักของเหล็กที่หายไป โดยระยะเวลาการสัมผัสกรดทั้ง 2 ชนิดยิ่งมากจะทำให้แรงดึงสูงสุดของเหล็กลดลงมากและน้ำหนักของเหล็กลดลงมากตามไปด้วย โดยตัวอย่างเหล็กที่ถูกแช่ในกรดซัลฟิวริกความเข้มข้นต่าง ๆ ที่ทำการศึกษา ที่ระยะเวลาการแช่หรือสัมผัสน้ำกรดซัลฟิวริกตั้งแต่ 45 วันขึ้นไป จะไม่สามารถทำการวัดค่าแรงดึงสูงสุดและวิเคราะห์กำลังรับแรงดึงสูงสุดได้ เนื่องจากเหล็กถูกกัดกร่อนจนเสียรูป ดังรูปที่ 4

5.3 เปอร์เซ็นต์การลดลงของค่าแรงดึงสูงสุดของเหล็ก

ผลการทดสอบค่าแรงดึงสูงสุดของตัวอย่างเหล็กที่ไม่ได้แช่ในน้ำกรดและตัวอย่างเหล็กที่ถูกแช่ในกรดไนตริก (HNO_3) และกรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) ที่ความเข้มข้น 0.5 เปอร์เซ็นต์ 1 เปอร์เซ็นต์ 2 เปอร์เซ็นต์ และ 3 เปอร์เซ็นต์ โดยไม่ล่อต่อปริมาตรของตัวถูกละลาย โดยการทดสอบตัวอย่างเหล็กที่อายุ 15 วัน 30 วัน 45 วัน และ 60 วัน พบว่ากรดไนตริกและกรดซัลฟิวริกมีฤทธิ์กัดกร่อนเหล็กและทำให้ค่าแรงดึงสูงสุดของเหล็กลดลง โดยใช้ค่าแรงดึงสูงสุดของเหล็กที่ไม่ได้แช่ในน้ำกรดเป็นเกณฑ์ในการคำนวณเพื่อคิดออกมาเป็นเปอร์เซ็นต์ของแรงดึงสูงสุดที่ลดลง ดังแสดงไว้ในตารางที่ 4 และ 5

ตารางที่ 4 เปอร์เซ็นต์ค่าแรงดึงสูงสุดของเหล็กที่ลดลง จำแนกตามเปอร์เซ็นต์ความเข้มข้นและระยะเวลาการแช่ในกรดไนตริก

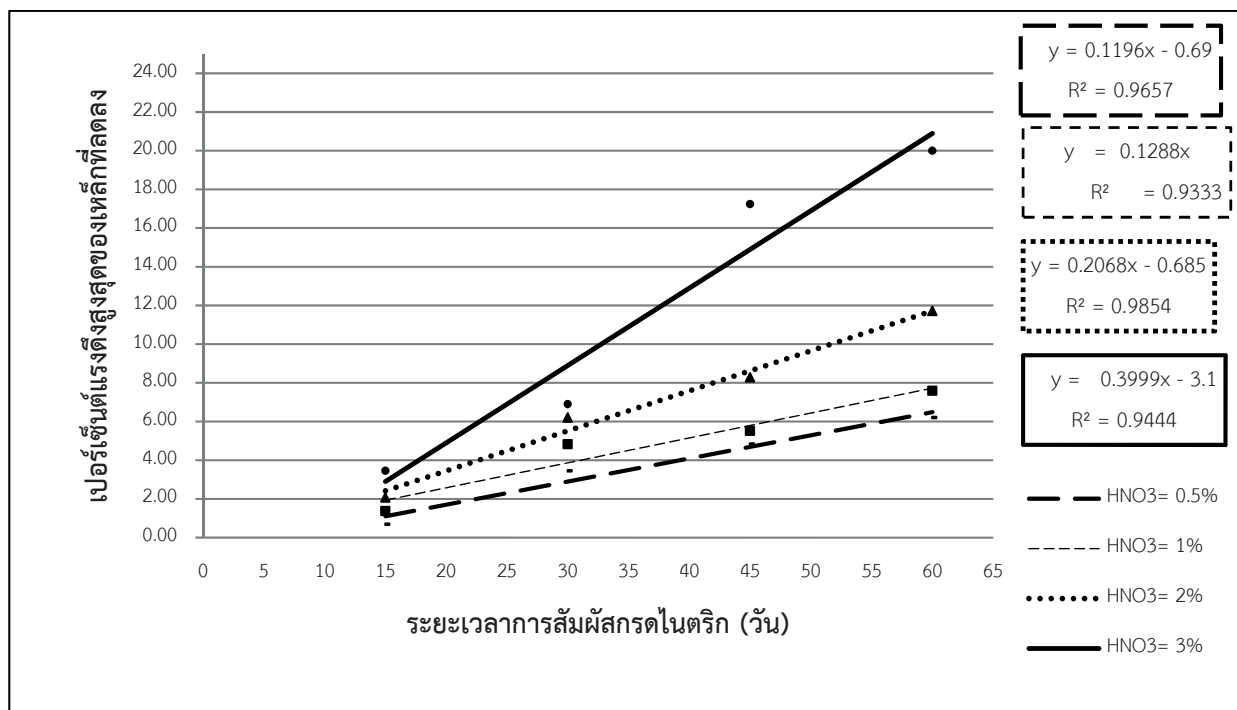
ระยะเวลาการแช่กรด (วัน)	เปอร์เซ็นต์ค่าแรงดึงสูงสุดของเหล็กที่ลดลง ที่เปอร์เซ็นต์ความเข้มข้นต่างๆ ของกรดไนตริกที่แช่			
	HNO_3 (0.5%)	HNO_3 (1%)	HNO_3 (2%)	HNO_3 (3%)
15	0.69%	1.38%	2.07%	3.45%
30	3.45%	4.83%	6.21%	6.90%
45	4.83%	5.52%	8.28%	17.24%
60	6.21%	7.59%	11.72%	20.00%

ตารางที่ 5 เปอร์เซ็นต์ค่าแรงดึงสูงสุดของเหล็กที่ลดลง จำแนกตามเปอร์เซ็นต์ความเข้มข้นและระยะเวลาการแช่ในกรดซัลฟิวริก

ระยะเวลาการแช่กรด (วัน)	เปอร์เซ็นต์ค่าแรงดึงสูงสุดของเหล็กที่ลดลง ที่เปอร์เซ็นต์ความเข้มข้นต่างๆ ของกรดซัลฟิวริกที่แช่			
	H ₂ SO ₄ (0.5%)	H ₂ SO ₄ (1%)	H ₂ SO ₄ (2%)	H ₂ SO ₄ (3%)
15	6.90%	11.03%	42.07%	50.34
30	43.45%	49.66%	N/A	N/A
45	N/A	N/A	N/A	N/A
60	N/A	N/A	N/A	N/A

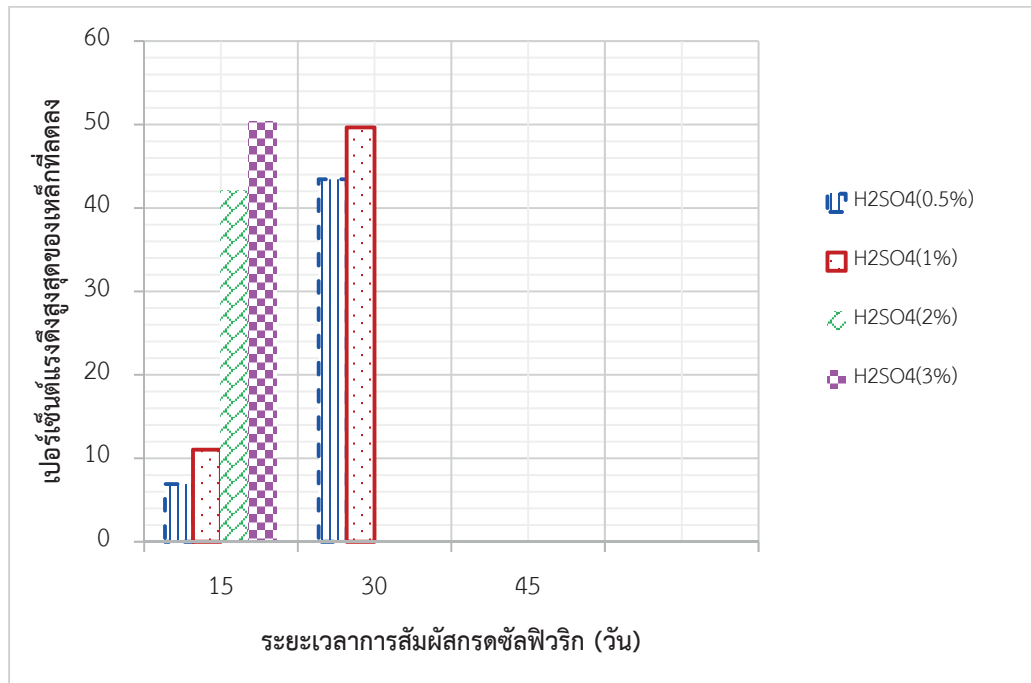
หมายเหตุ : N/A หมายถึงไม่สามารถวิเคราะห์ได้ เพราะเหล็กถูกกรดกัดกร่อนจนเสียรูป ดังรูปที่ 4

จากผลการวิเคราะห์ตามตารางที่ 4 และ 5 เป็นการศึกษาในช่วงเวลาที่เหล็กเสริมคอนกรีตถูกแช่ในน้ำกรดทั้งสองชนิด ตั้งแต่ 15 วัน จนถึงสูงสุดไม่เกิน 60 วัน พบว่าเปอร์เซ็นต์ค่าแรงดึงสูงสุดของเหล็กที่ลดลงแปรผันตรงกับเปอร์เซ็นต์ความเข้มข้นที่เพิ่มขึ้นของน้ำกรด นั่นคือ ยิ่งกรดมีความเข้มข้นมากขึ้นยิ่งส่งผลทำให้ค่าแรงดึงสูงสุดของเหล็กยิ่งลดลงมากขึ้นตามไปด้วย ซึ่งจากตารางที่ 5 จะสังเกตเห็นได้ว่าเหล็กเมื่อถูกแช่หรือสัมผัสกับกรดซัลฟิวริกที่ความเข้มข้น 2% ขึ้นไป เป็นเวลานานเพียงแค่ 30 วันเท่านั้น เหล็กก็จะไร้ความสามารถในการรับแรงดึง หรือเปอร์เซ็นต์ค่าแรงดึงสูงสุดของเหล็กที่ลดลงมากถึง 100% นอกจากนี้ ผลการศึกษายังพบว่าระยะเวลาการสัมผัสกรดไนตริกและกรดซัลฟิวริกของเหล็กมีผลกระทบต่อความสามารถในการรับแรงดึงสูงสุดของเหล็ก นั่นคือระยะเวลาที่แช่เหล็กในกรดไนตริกและกรดซัลฟิวริกมากขึ้น ก็มีผลทำให้เปอร์เซ็นต์ค่าแรงดึงสูงสุดของเหล็กที่ลดลงเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน



รูปที่ 5 เปอร์เซ็นต์ค่าแรงดึงสูงสุดของเหล็กที่ลดลง ที่ความเข้มข้น (%) และระยะเวลาการสัมผัสกรดไนตริก

จากรูปที่ 5 พบว่าความเข้มข้นของกรดไนตริกที่มากขึ้นจะมีผลต่อเปอร์เซ็นต์ของการลดลงของแรงดึงเหล็กที่มากขึ้นตามไปด้วย และความสำคัญของระยะเวลาการสัมผัสกรดที่มากขึ้นจะมีผลต่อเปอร์เซ็นต์ของการลดลงของแรงดึงเหล็กที่มากขึ้นตามไปด้วยเช่นกัน นอกจากนั้นผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ของการลดลงของกำลังรับแรงดึงสูงสุดของเหล็กและระยะเวลาการสัมผัสกรด เป็นกราฟเส้นตรงตามสมการ ($y = mx + c$, R^2) จะเห็นว่าที่ความเข้มข้นกรดไนตริก 3% มีความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ของการลดลงของกำลังรับแรงดึงสูงสุดของเหล็กและระยะเวลาการสัมผัสกรด มีค่าความชันมากที่สุดดังสมการ $y = 0.3999x - 3.1$ ที่ $R^2 = 0.9444$ และที่ความเข้มข้นกรดไนตริกที่ 0.5% มีความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ของการลดลงของกำลังรับแรงดึงสูงสุดของเหล็กและระยะเวลาการสัมผัสกรด มีค่าความชันต่ำที่สุดดังสมการ $y = 0.1196x - 0.69$ ที่ $R^2 = 0.9657$ โดยที่เป็นการศึกษาในช่วงเวลาที่เหล็กเสริมคอนกรีตถูกแช่ในกรดไนตริกตั้งแต่ 15 วัน จนถึงสูงสุดไม่เกิน 60 วัน



รูปที่ 6 เปอร์เซนต์ค่าแรงดึงสูงสุดของเหล็กที่ลดลง ที่ความเข้มข้น (%) และระยะเวลาการสัมผัสกรดซัลฟิวริก

จากรูปที่ 6 แสดงให้เห็นว่าความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริกที่มากขึ้นจะมีผลต่อเปอร์เซ็นต์ของการลดลงของแรงดึงสูงสุดของเหล็กที่มากขึ้นตามไปด้วย ในขณะที่ระยะเวลาการสัมผัสกรดที่มากขึ้นจะมีผลต่อเปอร์เซ็นต์ของการลดลงของแรงดึงเหล็กที่มากขึ้นตามไปด้วยเช่นกัน จากผลการศึกษาพบว่าเหล็กเมื่อถูกแช่สัมผัสกับกรดซัลฟิวริกที่ความเข้มข้น 2% ขึ้นไป เป็นระยะเวลาเพียงแค่ 30 วันเท่านั้น เหล็กก็จะไร้ความสามารถในการรับแรงดึง จึงไม่สามารถวิเคราะห์เปอร์เซ็นต์ค่าแรงดึงสูงสุดของเหล็กที่ลดลงได้ และที่ระยะเวลาการแช่หรือสัมผัสน้ำกรดซัลฟิวริกตั้งแต่ 45 วันขึ้นไป จะไม่สามารถทำการวิเคราะห์เปอร์เซ็นต์ค่าแรงดึงสูงสุดของเหล็กที่ลดลงได้เช่นกัน เนื่องจากเหล็กถูกกรดซัลฟิวริกกัดกร่อนจนเสียรูป ผลการศึกษายังพบว่าที่ความเข้มข้นกรดซัลฟิวริกที่ 3% และ 2% ระยะเวลาการสัมผัสกรด 15 วัน มีเปอร์เซ็นต์ของการลดลงของแรงดึงสูงสุดของเหล็กคือ 50.34 และ 42.07 ตามลำดับ โดยที่ไม่สามารถวิเคราะห์ผลการศึกษาที่ระยะเวลาการสัมผัสกรดที่ 30 45 และ 60 วันได้

6. สรุปและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุปและอภิปรายผลการศึกษา

งานวิจัยนี้ศึกษาถึงผลกระทบจากฝนกรดที่มีผลต่อกำลังรับแรงดึงสูงสุดของเหล็กเสริม เพื่อประเมินผลกระทบของฝนกรดที่ความเข้มข้นและระยะเวลาต่างๆ ต่อกำลังรับแรงดึงสูงสุดของเหล็กเสริม ซึ่งฝนกรดนั้นเป็นผลมาจากก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) และก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ (NO_2) ในบรรยากาศ โดยก๊าซทั้งสองชนิดนี้มักจะเกิดจากการเผาผลาญเชื้อเพลิงฟอสซิลเมื่อก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) และก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ (NO_2) ในบรรยากาศนี้ทำปฏิกิริยากับออกซิเจนและความชื้น (H_2O) ในชั้นบรรยากาศก็จะก่อให้เกิดกรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) และกรดไนตริก (HNO_3) แล้วตกกลับสู่พื้นดิน หรือแขวนลอยในบรรยากาศ และจะถูกพัดพาไปโดยลมและตกสะสมบนผิวสิ่งก่อสร้าง ฝนกรดจึงสามารถทำความเสียหายกับสิ่งปลูกสร้างได้ โดยเฉพาะโครงสร้างที่ใช้เหล็กเป็นองค์ประกอบหลัก โดยฝนกรดที่ใช้ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ ผู้วิจัยได้ทำการสังเคราะห์ขึ้นมา โดยใช้กรดไนตริก และกรดซัลฟิวริก ที่ร้อยละของความเข้มข้นต่างๆ โดยโมลต่อปริมาตรของตัวถูกละลาย ซึ่งฝนกรดที่สังเคราะห์ขึ้นมาจากน้ำกรดทั้งสองชนิดถูกสังเคราะห์ขึ้นมาที่ความเข้มข้น 0.5 เปอร์เซ็นต์ หรือเทียบเท่า 5 ppb, 1 เปอร์เซ็นต์ หรือเทียบเท่า 10 ppb, 2 เปอร์เซ็นต์ หรือเทียบเท่า 20 ppb และ 3 เปอร์เซ็นต์ หรือเทียบเท่า 30 ppb โดยโมลต่อปริมาตรของตัวถูกละลาย ซึ่งสัมพันธ์กับสภาพมลพิษทางอากาศของประเทศไทย โดยก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) และก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ (NO_2) ในบรรยากาศของประเทศไทยมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นทุกปีอย่างมีนัยสำคัญ ผลจากการศึกษาสามารถสรุปและอภิปรายผลได้ว่า กรดไนตริกและกรดซัลฟิวริกมีฤทธิ์กัดกร่อนเหล็กทำให้ค่าแรงดึงสูงสุดของเหล็กลดลง โดยเหล็กที่แช่ด้วยกรดซัลฟิวริกมีค่าแรงดึงสูงสุดลดลงมากกว่าเมื่อเทียบกับเหล็กที่แช่ด้วยกรดไนตริก เมื่อมีความเข้มข้นของกรดและระยะเวลาการแช่เท่ากัน ผลจากการศึกษาพบว่าระดับความเข้มข้นต่างๆ ของกรดไนตริกและกรดซัลฟิวริกมีผลต่อค่าแรงดึงสูงสุดของเหล็ก นั่นคือเมื่อเหล็กสัมผัสกับกรดทั้ง 2 ชนิดที่มีความเข้มข้นมากขึ้นจะทำให้แรงดึงสูงสุดของเหล็กลดลงมากตามไปด้วย และจากการเปรียบเทียบค่ากำลังรับแรงดึงสูงสุดของเหล็กเสริมที่นำไปแช่ในกรดไนตริกและกรดซัลฟิวริกที่ระยะเวลาการแช่ตั้งแต่ 15 วัน จนถึงสูงสุดไม่เกิน 60 วัน สามารถสรุปได้ว่าการแช่ในกรดทั้ง 2 ชนิดที่มีระยะเวลาการแช่หรือสัมผัสกรดมากขึ้น จะมีผลกระทบต่อกำลังรับแรงดึงสูงสุดของเหล็กเสริมที่ลดลงตามไปด้วย โดยเหล็กเมื่อถูกแช่สัมผัสกับกรดซัลฟิวริกที่ความเข้มข้น 2% ขึ้นไป เป็นระยะเวลา

เพียงแค่ 30 วันเท่านั้น เหล็กก็จะไร้ความสามารถในการรับแรงดึง จึงไม่สามารถวิเคราะห์เปอร์เซ็นต์ค่าแรงดึงสูงสุดของเหล็กที่ลดลงได้ และที่ระยะเวลาการแช่หรือสัมผัสน้ำกรดซัลฟิวริกตั้งแต่ 45 วันขึ้นไป จะไม่สามารถทำการวิเคราะห์เปอร์เซ็นต์ค่าแรงดึงสูงสุดของเหล็กที่ลดลงได้เช่นกัน เนื่องจากเหล็กถูกกรดซัลฟิวริกกัดกร่อนจนเสียรูป ผลการศึกษาจึงพบว่าที่ความเข้มข้นกรดซัลฟิวริกที่ 3% และ 2% ระยะเวลาการสัมผัสกรด 15 วัน มีเปอร์เซ็นต์ของการลดลงของแรงดึงสูงสุดของเหล็กคือ 50.34 และ 42.07 ตามลำดับ โดยที่ไม่สามารถวิเคราะห์ผลการศึกษาที่ระยะเวลาการสัมผัสกรดที่ 30 45 และ 60 วันได้

6.2 ข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้มีข้อเสนอแนะสำหรับการศึกษาค้นคว้าต่อไป

1. ควรศึกษาผลกระทบของเหล็กเสริมคอนกรีตที่ฝังอยู่ในคอนกรีตที่มีระยะหุ้ม (Covering) ต่างๆ ว่ามีผลกระทบจากการกัดกร่อนมากน้อยเพียงใด

2. ควรศึกษาผลกระทบของเหล็กโครงสร้าง (Steel Structure) ที่ใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมซึ่งได้รับผลกระทบจากฝนกรดโดยตรง

7. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยเรื่องผลกระทบจากฝนกรดที่มีผลต่อกำลังรับแรงของเหล็กเสริม ได้รับความช่วยเหลืออย่างสูงจากอาจารย์ในสาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยวงษ์ชวลิตกุล ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำและตรวจสอบการวิจัย ผู้วิจัยขอขอบคุณ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยวงษ์ชวลิตกุลเป็นอย่างสูง ที่สนับสนุนอุปกรณ์ และสถานที่ในการทำวิจัยนี้

เอกสารอ้างอิง

1. กรมควบคุมมลพิษ. (2562). *สารกรดในบรรยากาศ : มลพิษไร้พรมแดน*. [ออนไลน์] สืบค้น 18 ธันวาคม 2562, จาก: <http://www.pcd.go.th>
2. กรมควบคุมมลพิษ. (2559). *ฝนกรด*. [ออนไลน์] สืบค้น 11 กรกฎาคม 2559, จาก: <http://aqmthai.com/>
3. มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (2559). *มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม เหล็กเส้นเสริมคอนกรีต : เหล็กข้ออ้อย (มอก.24 – 2559)*. [ออนไลน์] สืบค้น 21 ธันวาคม 2562, จาก: <https://www.tisi.go.th>
4. Al-Amiry, A. A., Kadhum, A. A. H., Kadihum, A., Mohamad, A. B., How, C. K., and Junaedi, S. (2014). Inhibition of mild steel corrosion in sulfuric acid solution by new Schiff base. *Materials*, 7, 787–804. doi: 10.3390/ma7020787
5. American Society for Testing and Material. (1995). *Annual Book of ASTM Standard 1996 Section 4 Volume 4.01, 4.02, 4.03, and 4.05*. Easton, Md., USA. : American Society for Testing and Material.
6. American Society for Testing and Material. (1979). *Annual Book of ASTM Standard 1979 part 13, 14 and 41*. Easton, Md., USA. : American Society for Testing and Material.
7. Berisha, A., Podvorica, F., Mehmeti, V., Sylja, F., and Vataj, D. (2015). Theoretical and experimental studies of the corrosion behavior of some thiazole derivatives toward mild steel in sulfuric acid media. *Macedonian Journal of Chemistry and Chemical Engineering*, 34, 287–294. doi: 10.20450/mjce.2015.576
8. Mehmeti, V. V. and Berisha, A. R. (2017) Corrosion Study of Mild Steel in Aqueous Sulfuric Acid Solution Using 4-Methyl-4H-1,2,4-Triazole-3-Thiol and 2-Mercaptopyridine—An Experimental and Theoretical Study. *Frontiers in Chemistry*, 5:61. doi: 10.3389/fchem.2017.00061
9. Weathers, K. C. and Likens, G. E. (2006). Acid rain. In: W. N. Rom (Ed.). *Environmental and Occupational Medicine (4th ed.)*. Philadelphia: Lippincott-Raven Publ. pp. 1549–1561.