



การศึกษาการกัดกร่อนของเหล็กกล้าผสมต่ำในบรรยากาศจำลองของชายฝั่งทะเล

CORROSION STUDY OF LOW ALLOY STEEL IN A SIMULATED COASTAL ATMOSPHERE

ธีร์ เชาวนนทปัญญา

อาจารย์, คณะพาณิชยศาสตร์บริหารธุรกิจ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ จังหวัดชลบุรี 20230

E-mail: thee.c@ku.th, (+66)38352606-7 Ext. 2675

บทคัดย่อ

บทความนี้เสนอการศึกษาการกัดกร่อนของเหล็กกล้าผสมต่ำในบรรยากาศจำลองของชายฝั่งทะเล โดยการทดลองนี้ใช้วิธีการศึกษาอัตราความหนาของเหล็กกล้าผสมต่ำที่หายไปในช่วงการทดลอง เพื่อศึกษากระบวนการกัดกร่อน และใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) รวมทั้งเทคนิคเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน (XRD) เพื่อหาการเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้างและส่วนประกอบของชั้นสนิมเพื่อนำไปใช้อธิบายกระบวนการกัดกร่อนของเหล็กกล้าผสมต่ำ โดยผลการศึกษาพบว่า กระบวนการกัดกร่อนของเหล็กกล้าผสมต่ำแบ่งเป็นสองช่วง คือ ช่วงที่ 1 อัตราการกัดกร่อนเพิ่มขึ้น และ ช่วงที่ 2 อัตราการกัดกร่อนลดลง โดยโครงสร้างและเฟสของสนิมทั้งสองช่วงนั้นต่างกัน โดยช่วงที่ 1 ชั้นสนิมบางและประกอบไปด้วยเฟสสนิมที่ไม่เสถียร และช่วงที่ 2 ชั้นสนิมนั้นเสถียรขึ้นและมีความหนาแน่นมากขึ้น โดยชั้นสนิมที่มีโครงสร้างที่หนาแน่นและมีความเสถียรมากขึ้นนั้นจะเปลี่ยนแปลงจลนศาสตร์ของการกัดกร่อนส่งผลให้การกัดกร่อนของเหล็กกล้าผสมต่ำนั้นลดลง

คำสำคัญ : การกัดกร่อน, เหล็กกล้าผสมต่ำ, จลนศาสตร์ของการกัดกร่อน, สนิม

ABSTRACT

This article presents the corrosion study of low alloy steel in a simulated coastal atmosphere. In this study, the corrosion thickness loss was monitored to study the corrosion process of low alloy steel. Scanning Electron Microscopy (SEM) and X-ray Diffraction (XRD) were employed to observe the rust morphologies and rust constituents. The results showed that corrosion process of low alloy steel exposed to the simulated coastal environment can be divided into two stages with a higher rate in the first stage and a lower rate in the second stage. The difference in rust morphologies and rust constituents was obviously indicated. The rust was thin and unstable in the first corrosion stage, but it became denser and more stable in the second stage. The dense and stable rust formed on low alloy steel during the second process can effectively resist the diffusion of chloride and thus enhance the anti-corrosion performance of low alloy steel used in the coastal atmosphere.

KEYWORDS: Corrosion, Low Alloy Steel, Corrosion Kinetics, Rust

1. บทนำ

การกัดกร่อนของโครงสร้างเหล็กกล้าผสมต่ำที่ใช้ในบรรยากาศกลางแจ้งนั้นเป็นปัญหาทางวิศวกรรมที่สำคัญ ซึ่งส่งผลกระทบต่อความปลอดภัยของชุมชนและการพัฒนาเศรษฐกิจของหลายๆ ประเทศ [1-2] โดยพบว่า การกัดกร่อนในอุตสาหกรรมส่งผลเสียต่อการเติบโตของเศรษฐกิจในประเทศสหรัฐอเมริกา ญี่ปุ่น และ ยุโรป เป็นปริมาณ 4-5 % ของรายได้มวลรวมของประเทศ [2-3] และสำหรับประเทศไทยความสูญเสียจากการกัดกร่อนอยู่ที่ 2.5 % ของรายได้มวลรวมของประเทศ ซึ่งการสูญเสียครั้งหนึ่งนั้นเนื่องมาจากการกัดกร่อนของวัสดุโลหะที่ใช้กลางแจ้ง เช่น เหล็กกล้าและเหล็กกล้าผสมต่ำ [4]

จากความรู้แรงของผลกระทบของปัญหาดังกล่าวทำให้การศึกษาเรื่องการกัดกร่อนของเหล็กกล้าและเหล็กกล้าผสมต่ำมีความสำคัญและได้รับการศึกษาอย่างแพร่หลาย โดยการศึกษาโดยส่วนใหญ่เป็นการศึกษาการกัดกร่อนของเหล็กกล้าในบรรยากาศจริง โดยข้อมูลดังกล่าวนี้มีประโยชน์ในประเมินสมรรถนะของเหล็กกล้าเกรดต่างๆ [5] แต่อย่างไรก็ตาม การศึกษาการกัดกร่อนในบรรยากาศจริงนั้นใช้เวลาในการศึกษาอย่างน้อย 10-20 ปี เพื่อให้ได้ข้อมูลดังกล่าว นอกจากนี้ ยังใช้กำลังคนและค่าใช้จ่ายที่สูงด้วย [6] จากข้อจำกัดของวิธีการศึกษาการกัดกร่อนของเหล็กกล้าในบรรยากาศจริงนั้นทำให้มีการพัฒนารูปแบบของการทดสอบจากนักวิทยาศาสตร์ด้านการกัดกร่อนหลายๆ ท่าน โดยจุดมุ่งหมายเพื่อลดเวลาทดสอบและได้ผลการทำนายพฤติกรรมการกัดกร่อนที่มีความเชื่อถือได้ ซึ่งหนึ่งในวิธีการทดสอบนี้คือ “การทดสอบการกัดกร่อนในบรรยากาศจำลอง” [7] โดยการทดสอบดังกล่าวจะเป็นการเร่งการกัดกร่อนของเหล็กกล้าผสมต่ำภายใต้สภาวะจำลองของบรรยากาศต่างๆ ซึ่งทำให้ลดเวลาในการทดสอบและได้ข้อมูลที่น่าเชื่อถือในเวลาอันสั้น

จากข้อดีของการทดลองดังกล่าว การศึกษาครั้งนี้ได้ใช้วิธีการทดสอบการกัดกร่อนในบรรยากาศจำลองมาศึกษาการกัดกร่อนของเหล็กกล้าผสมต่ำในบรรยากาศชายฝั่งทะเล โดยมีการจำลองสภาวะการกัดกร่อนของเหล็กกล้าที่เกิดขึ้นจริงในบรรยากาศชายฝั่ง เช่น การกัดกร่อนภายใต้สารละลายคลอไรด์เข้มข้นแบบเปียกสลับแห้ง และมีการควบคุมอุณหภูมิที่ 30°C และ ความชื้นสัมพัทธ์ 60 ± 3 เพื่อศึกษาจลนศาสตร์จากค่าความหนาที่เปลี่ยนไปเนื่องจากการกัดกร่อนและใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดรวมทั้ง เทคนิคเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน เพื่อศึกษารูปร่างและเฟสของสนิมที่เปลี่ยนแปลงไประหว่างการทดสอบ ซึ่งความรู้จากบทความวิจัยนี้มีประโยชน์ต่อการพัฒนาการทดสอบการกัดกร่อนของเหล็กในบรรยากาศจำลองรวมทั้งช่วยเพิ่มความเข้าใจในกระบวนการกัดกร่อนของเหล็กกล้าผสมต่ำในบรรยากาศชายฝั่งอีกด้วย

2. วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการศึกษา

2.1 วัสดุ

วัสดุที่ใช้ในการทดลองนี้คือ เหล็กกล้าผสมต่ำโดยเมื่อทำการวิเคราะห์ธาตุ โดย Emission Spectrometer พบว่ามีส่วนผสมดังตารางที่ 1 โดยทำการตัดเป็นชิ้นทดสอบขนาดกว้างและยาว 3 เซนติเมตรและความหนา 0.5 เซนติเมตร ทำการเตรียมผิวโดยกระดาษทรายเบอร์ 100 ถึง 800 จากนั้นทำความสะอาดผิวและนำไปเก็บไว้ในที่เก็บชิ้นงานที่ปราศจากความชื้น

2.2 การทดสอบในบรรยากาศจำลอง

สำหรับการทดสอบการกัดกร่อนในสภาวะบรรยากาศจำลองของการทดลองนี้จะทำที่ตู้อบซึ่งจำลองสภาวะอากาศ ณ อุณหภูมิที่ $30 \pm 2^{\circ}\text{C}$ และ ความชื้นสัมพัทธ์ 60 ± 3 % โดยสารละลายที่ใช้คือ สารละลาย NaCl ความเข้มข้น 0.05 % โดยโมล ทำการทดสอบต่อหนึ่งรอบการกัดกร่อนดังนี้ (1) โดยชั่งและบันทึกน้ำหนักชิ้นงานก่อนทำการทดสอบโดยเครื่องชั่งน้ำหนัก 4 ตำแหน่ง (2) ทำการ

จำลองการกัดกร่อนโดยฉีดสารละลายชั้นบางลงบนผิวหน้าชิ้นงาน (0.05 มิลลิเมตรต่อตารางเซนติเมตร) (3) นำชิ้นงานทั้งหมดเข้าตู้อบและปล่อยให้แห้งเป็นเวลา 1 วัน และเมื่อครบเวลาจะล้างผิวหน้าชิ้นงานด้วยน้ำกลั่น

ตารางที่ 1 ส่วนผสมทางเคมีของชิ้นทดสอบ

ธาตุ	C	Cu	Cr	Mn	Si	P	S	Fe
เปอร์เซ็นต์โดยมวล	0.15	0.21	0.14	0.61	0.25	0.02	0.041	Balance

เมื่อชิ้นงานแห้ง จึงทำการฉีดสารละลายชั้นบาง ลงบนผิวชิ้นงานอีกครั้ง (4) สำหรับชิ้นงานในรอบการกัดกร่อนอื่นๆ นั้น ทำการทดลองตามขั้นตอน (2)-(4)

2.3 การศึกษาความหนาที่หายไปเนื่องจากการกัดกร่อน

การกัดกร่อนของเหล็กกล้าผสมต่ำในบรรยากาศนั้นเป็นการกัดกร่อนแบบสม่ำเสมอ ดังนั้นเพื่อให้สอดคล้องกับการนำไปใช้งานทางวิศวกรรมได้ การทดลองนี้จะแสดงผลในอัตราการกัดกร่อนที่เป็นความหนาที่หายไปต่อรอบการกัดกร่อน (T) โดยสมการที่ใช้นั้นแสดงในสมการที่ 1

$$T = W / D \quad (1)$$

โดย W คือ มวลที่หายไปเนื่องจากการกัดกร่อนต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ (กรัมต่อตารางเซนติเมตร) และ D คือ ความหนาแน่นของเหล็ก (7.8 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)

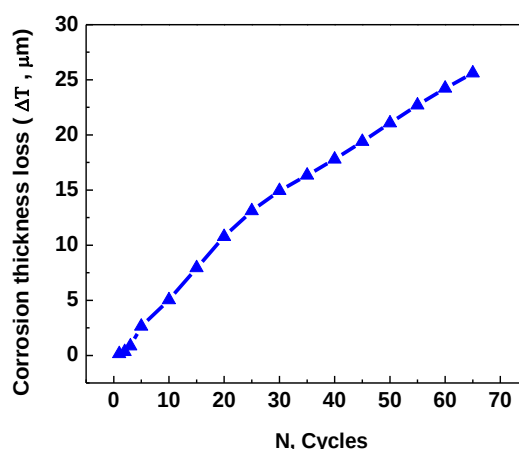
2.4 การศึกษา โครงสร้างและเฟสของสนิม

การศึกษานี้ใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของสนิมและใช้ศึกษาการเปลี่ยนแปลงของเฟสสนิมโดยเตรียมผงสนิมที่ได้จากการทดลองและวิเคราะห์โดยเครื่อง เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟร็กโตมิเตอร์ รุ่น Rigaku-D/max 2000 โดยมี Cu Ka target 50 kV, 250 mA ย่านการวัดที่ $2\theta = 5-40$ องศา ด้วยอัตรา 2 องศาต่อนาที

3. ผลการทดลองและวิจารณ์

3.1 การทดสอบการกัดกร่อนในบรรยากาศจำลอง

รูปที่ 1 แสดงถึงการสูญเสียความหนาของชิ้นงานเหล็กกล้าผสมต่ำในแต่ละรอบการทดสอบแบบเปียกแห้ง (Cycle) โดยพบว่า การสูญเสียความหนานั้นเพิ่มขึ้นเมื่อรอบการทดสอบเพิ่มขึ้น



รูปที่ 1 ความหนาที่ลดลงของชิ้นทดสอบ

เราใช้สมการ Bi-logarithmic เพื่ออธิบายถึงจลนศาสตร์ของการกัดกร่อนของเหล็กกล้าผสมต่ำ ดังสมการที่ 2 [8] โดย ΔT คือความหนาที่สูญเสียไปของเหล็กกล้าผสมต่ำ A คือ ค่าคงที่ และ N คือ รอบของการเป็ยกแห้งที่ทดลอง

$$\log(\Delta T) = \log A + n \log(N) \quad (2)$$

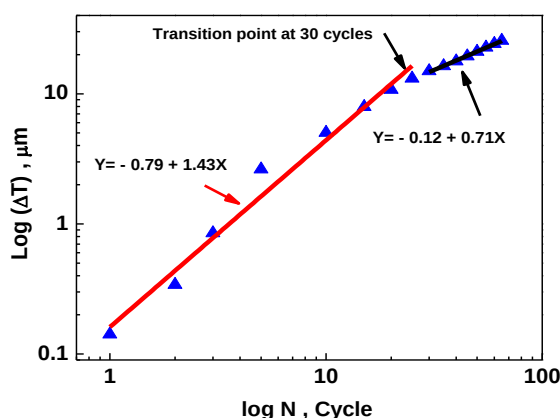
ค่า n ในสมการที่ 2 นั้นแสดงถึงจลนศาสตร์ของกระบวนการกัดกร่อน กล่าวคือ เมื่อ n มากกว่า 1 อัตราการกัดกร่อนจะเพิ่มขึ้น ในขณะที่ n น้อยกว่า 1 อัตราการกัดกร่อนน้อยลง [9] เมื่อนำข้อมูลความหนาที่หายไปมาพล็อตในสเกล Log ตามสมการที่ 2 เราจะได้ข้อมูลที่แสดงในรูปที่ 2 และได้สมการการสูญเสียความหนาของเหล็กกล้าผสมต่ำในช่วงช่วงการทดสอบดังแสดงในสมการที่ 3 และ 4

เมื่อรอบการทดลองน้อยกว่าหรือเท่ากับ 30

$$\log(\Delta T) = -0.79 + 1.43 \log(N) \quad (3)$$

เมื่อรอบการทดลองมากกว่า 30

$$\log(\Delta T) = -0.12 + 0.71 \log(N) \quad (4)$$



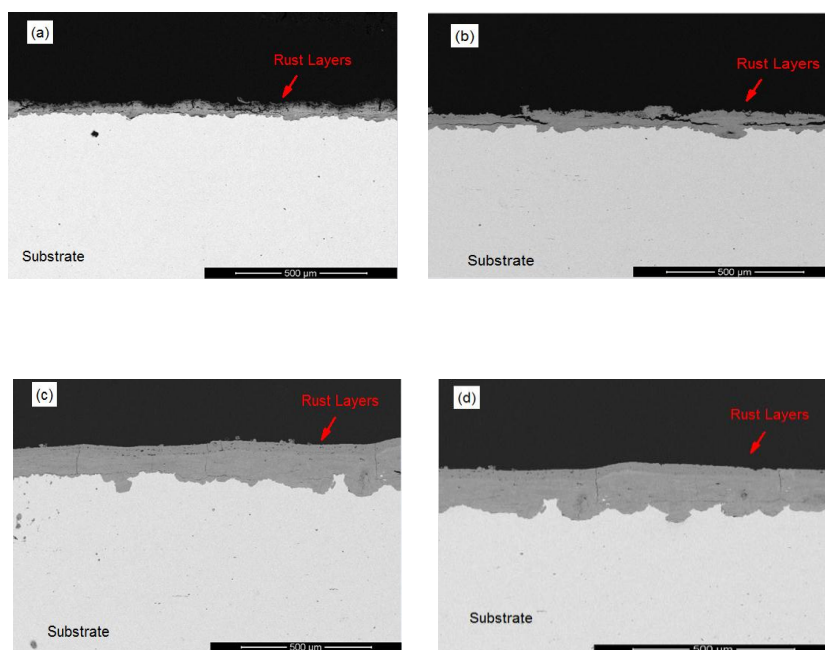
รูปที่ 2 จลนศาสตร์ของการกัดกร่อนโดยจากการประมาณ

เมื่อพิจารณาจากสมการที่ 3 และ 4 พบว่า กระบวนการกัดกร่อนของเหล็กกล้าแบ่งเป็นสองช่วง โดยช่วงแรกที่มีจำนวนรอบการทดลองที่น้อยกว่าหรือเท่ากับ 30 ค่า n เท่ากับ 1.43 ซึ่งมีค่ามากกว่า 1 ดังนั้น การกัดกร่อนเพิ่มขึ้น และช่วงที่ 2 จำนวนรอบที่มากกว่า 30 ค่า n มีค่า 0.71 ซึ่งมีค่าน้อยกว่า 1 การกัดกร่อนลดลง

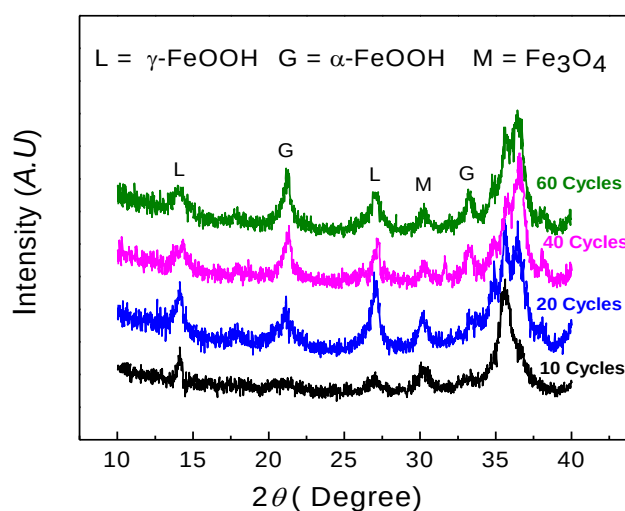
3.2 รูปร่างและการเปลี่ยนแปลงเฟสของชั้นสนิม

รูปที่ 3 แสดงภาพตัดขวางของชั้นสนิมที่เกิดขึ้นบนเหล็กกล้าผสมต่ำ ชั้นสนิมในช่วงกระบวนการกัดกร่อนที่ 1 แสดงในรูปที่ 3(a) และ (b) โดยในรูป 3(a) เป็นชั้นสนิมของเหล็กกล้าผสมต่ำที่ผ่านกระบวนการกัดกร่อนในรอบที่ 10 โดยพบว่า ชั้นสนิมนั้นบางและยังไม่ยึดกับผิวเหล็ก สำหรับชั้นสนิมในรอบที่ 20 แสดงในรูป 3(b) นั้นหนาขึ้นแต่ทว่ามีรอยแยกของสนิม ซึ่งลักษณะสนิมในกระบวนการกัดกร่อนที่ 1 นั้นไม่สามารถต้านทานการแพร่ของคลอไรด์และออกซิเจนในบรรยากาศได้ ซึ่งส่งผลให้อัตราการกัดกร่อนในช่วงนี้สูงขึ้น [10] สำหรับลักษณะชั้นสนิมในช่วงที่ 2 แสดงในรูปที่ 3 (c) และ (d) โดยพบว่า ชั้นสนิมในรอบที่ 40 และ 60 นั้นประกอบไปด้วยชั้นสนิม 2 ชั้น โดยชั้นสนิมภายนอกจะมีความพรุนแต่ชั้นสนิมภายในหนาและหนาแน่นรวมทั้งยึดติดกับพื้นผิวของเหล็กกล้าได้ดี ดังนั้น ชั้นสนิมที่เกิดขึ้นในช่วงที่ 2 ของการกัดกร่อนจึงเป็นสนิมที่สามารถต้านทานการแพร่ของคลอไรด์ที่เข้ามาเพื่อกัดกร่อนพื้นผิวเหล็กได้ [11]

การเปลี่ยนแปลงของเฟสของสนิมที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวเหล็กกล้าผสมต่ำแสดงในรูปที่ 4 โดยพบว่าเฟสของชั้นสนิมประกอบไปด้วย γ -FeOOH (L) α -FeOOH (G) และ Fe_3O_4 (M) โดยปริมาณของเฟสดังกล่าวจะเปลี่ยนแปลงไปตามรอบของการทดลอง ในกระบวนการกัดกร่อนในช่วงที่ 1 เช่น ในรอบการทดลองที่ 10 และ 20 สนิมบนพื้นผิวของเหล็กกล้าผสมต่ำมีส่วนประกอบของ γ -FeOOH เป็นส่วนประกอบหลักและส่วนประกอบของสนิมส่วนใหญ่ในกระบวนการกัดกร่อนในช่วงที่ 2 เช่น รอบการทดลองที่ 40 และ 60 นั่นคือ α -FeOOH ดังนั้น การเพิ่มขึ้นของปริมาณ α -FeOOH และลดลงของปริมาณ γ -FeOOH จึงมีผลถึงการเปลี่ยนแปลงจลนศาสตร์ของกระบวนการกัดกร่อนของเหล็กกล้าผสมต่ำในบรรยากาศจำลองชายฝั่งทะเล



รูปที่ 3 ภาพตัดขวางของชั้นสนิม (a) 10 รอบ (b) 20 รอบ (c) 40 รอบ และ (d) 60 รอบ



รูปที่ 4 เฟสของสนิมบนผิวของเหล็กกล้าผสมต่ำในขณะทดสอบการกัดกร่อนในสภาวะจำลอง

3.3 กลไกของการกัดกร่อนและอิทธิพลของสนิม

การเกิดการกัดกร่อนของเหล็กกล้าภายใต้บรรยากาศ นั้นเป็นปฏิกิริยาทางไฟฟ้าเคมี โดยพื้นผิวจะสัมผัสกับสารละลายที่กลั่นตัวจากบรรยากาศ ก่อให้เกิดเซลล์การกัดกร่อน ดังสมการที่ 5 และ 6

เหล็กกล้าสูญเสียเนื้อโลหะ:



การรับอิเล็กตรอนของออกซิเจน:



โดยปฏิกิริยาออกซิเดชันของเฟอร์รัสไอออน(Fe^{2+})ที่ได้จากสมการที่ 1 นั้นจะก่อให้เกิดเฟอร์ริกออกไซด์ไฮดรอกไซด์ (FeOOH) [8] จากการวิเคราะห์เฟสของสนิมในรูปที่ 4 พบว่า ในช่วงกระบวนการกัดกร่อนที่ 1 นั้น $\gamma\text{-FeOOH}$ เป็นส่วนประกอบหลักของสนิมซึ่งไม่เสถียรและสามารถถูกรีดิวส์แล้วเกิด Fe_3O_4 ดังสมการที่ 7 [12]



โดยสมการที่ 7 นั้นถือเป็นปฏิกิริยาคาโทดิกที่สำคัญอีกหนึ่งปฏิกิริยา ซึ่งทำให้ผิวเหล็กสูญเสียเนื้อเหล็กมากขึ้น [9] นอกจากนี้ ผลการทดลองเรื่องรูปร่างของชั้นสนิม ในรูป 3(a) และ (b) ยังแสดงถึงชั้นสนิมที่ไม่สมบูรณ์ ดังนั้น การเกิดชั้นสนิมที่มี $\gamma\text{-FeOOH}$ เป็นส่วนประกอบหลักและชั้นสนิมที่บางและมีรอยแยกจำนวนมาก นำไปสู่กระบวนการกัดกร่อนแบบเร่งดังแสดงในรูป 1 และเมื่อทำการทดลองเพิ่มจำนวนรอบของการเปียกและแห้งมากขึ้น ชั้นสนิมมีความหนาขึ้นและยึดกับผิวเหล็กได้ดีขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 3(c) และ (d) โดยชั้นสนิมในกระบวนการกัดกร่อนช่วงที่ 2 มีปริมาณ $\alpha\text{-FeOOH}$ เพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 3 โดย $\alpha\text{-FeOOH}$ นั้นได้มาจากการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของ Fe_3O_4 ดังแสดงในสมการที่ 8 [13]



โดยปริมาณ $\alpha\text{-FeOOH}$ ที่เพิ่มขึ้นและปริมาณที่ลดลงของ $\gamma\text{-FeOOH}$ รวมทั้งการเกิดโครงสร้างสนิมที่หนาและยึดติดผิวเหล็กที่ดีขึ้น ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงจลนศาสตร์และส่งผลให้เกิดการลดลงของการกัดกร่อนดังแสดงในรูปที่ 1 และ 2

4. สรุปผลการทดลอง

บทความนี้ได้ทำการศึกษากัดกร่อนของเหล็กกล้าผสมต่ำในบรรยากาศจำลองของชายฝั่งทะเล โดยพบว่าเมื่อเหล็กกล้าผสมต่ำถูกกัดกร่อนในระยะแรกจะเกิดชั้นสนิมที่ไม่สมบูรณ์และไม่เสถียร ซึ่งการเปลี่ยนแปลงของเฟส $\gamma\text{-FeOOH}$ และชั้นสนิมที่บาง ทำให้เหล็กกล้าผสมต่ำถูกกัดกร่อนในอัตราที่สูงขึ้น แต่อย่างไรก็ตาม เมื่อดำเนินการทดลองโดยเพิ่มจำนวนรอบของวัฏจักรการเปียกแห้งทำให้ชั้นสนิมของเหล็กกล้าผสมต่ำนั้นสมบูรณ์มากขึ้น โดยปริมาณเฟส $\gamma\text{-FeOOH}$ ลดลง และปริมาณของ $\alpha\text{-FeOOH}$ มากขึ้น โดยสนิมที่มีโครงสร้างที่หนาแน่นและมีความเสถียรมากขึ้นนั้นจะเปลี่ยนแปลงจลนศาสตร์ของการกัดกร่อน และทำให้การกัดกร่อนของเหล็กกล้าผสมต่ำนั้นลดลง

กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณ Assoc.Prof.Dr. Mu Xin, Shenyang Institute of Metal Research และ Prof.Dr. Dawei Zhang, University of Science and Technology Beijing สำหรับความอนุเคราะห์ในการวิเคราะห์ขั้นทดสอบ

เอกสารอ้างอิง

- [1] C. Leygraf, T. Graedel, Atmospheric corrosion, 1st Edition. John Wiley & Sons. Inc., New York, 2000.
- [2] Thee Chowwanonthapunya, Surames Piriyawat and Warawut Suphamitmongkol (2016). An Economic Consideration Guideline for the Selection of Corrosion -Control Strategies. SWU Engineering Journal , Vol. 11 , No.2, 133-139
- [3] Chowwanonthapunya, T., Peeratatsuan, C., and Suphamitmongkol, W. (2015) . CO₂ Corrosion of Steel. Pathumwan Academic Journal, Vol.5 , no. 14,31-41.
- [4] S. Nivitchanyong, W. Pongsaksawad, E. Viyanit, N.Palsson and A.Chianpairot. Aspects of corrosion costs in Thailand, Thailand Corrosion and Prevention Conference, 2015, 50-55.
- [5] T. Chowwanonthapunya (2016). Study on Anti-Atmospheric corrosion Performance of Steel in Coastal and Urban Atmosphere in Thailand. Journal of Materials Science and Applied Energy, Vol. 5, NO.3, 61- 65.
- [6] L. Hao, S.X. Zhang, J.H. Dong, W. Ke (2012). Evolution of atmospheric corrosion of MnCuP weathering steel in a simulated coastal-industrial atmosphere. Corrosion Science, Vol. 59, 270–276.
- [7] J.H. Dong, E.H. Han, K. Wei (2007). Introduction to atmospheric corrosion research in China. Science and Technology of Advanced Materials, Vol. 8, 559-565.
- [8] M. Pourbaix. The Linear Bilogarithmic Law for Atmospheric Corrosion., in Atmospheric Corrosion (W.H.Ailor (ed.)). Wiley New York, 1980.
- [9] Ch. Thee, Long Hao, Junhua Dong, Mu Xin, Wei Ke (2014). One numerical approach for atmospheric corrosion monitoring based on EIS of a weathering steel. Acta Metallurgica Sinica (English Letter), DOI 10.1007/s40195-014-0193-5.
- [10] Ch.Thee, L. Hao, J.H. Dong, X. Wie, X.F. Li, W. Ke (2014). Atmospheric corrosion monitoring of a weathering under an electrolyte film in cyclic wet-dry condition. Corrosion Science, Vol.78,130-137
- [11] J.Dong , J.H. Dong, E.H. Han, K. Wei (2009). Rusting evolvement of mild steel under wet/dry cyclic condition with pH 4 NaHSO₃ Solution. Corrosion Science and Protection Technology, vol.21, 1-4.
- [12] T. Nishimura, K. Noda, T. Kodama, H. Katayama (2000). Electrochemical behavior of rust formed on carbon steel in a wet/dry environment containing chloride ions. Corrosion, Vol.56, 935-941.
- [13] Q.C. Zhang, J.S. Wu, J.J. Wang, W.L.Zheng, A.B. Li (2002). Corrosion behavior of weathering steel in marine atmosphere. Materials Chemistry and Physics, Vol.77, 603–608.