

การกัดกร่อนในบรรยากาศของเหล็กกล้า : ทบทวนวรรณกรรมและกรณีศึกษา

Atmospheric Corrosion of Steel: A Review and Case Study

ธีร์ เชาวนทปัญญา

คณะพาณิชยศาสตร์บริหารธุรกิจ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา

*Email: thee.c@ku.th

บทคัดย่อ

ปัญหาการกัดกร่อนของเหล็กกล้าในบรรยากาศนั้นส่งกระทบโดยตรงต่อ ความปลอดภัยของชุมชน สิ่งแวดล้อม รวมทั้งการเติบโตทางเศรษฐกิจของโลก ดังนั้นความเข้าใจในเรื่องการกัดกร่อนของเหล็กกล้าในบรรยากาศจึงเป็นสิ่งจำเป็นสำหรับวิศวกร และ นักวิทยาศาสตร์ ผู้ที่ทำงานเกี่ยวข้องกับการใช้งานของเหล็กกล้า บทความนี้นำเสนอภาพรวมของการกัดกร่อนของเหล็กกล้าในบรรยากาศ เช่น กลไกและลักษณะเฉพาะของการกัดกร่อนประเภทนี้ การเปลี่ยนแปลงของชนิดสนิมบนผิวของเหล็กกล้า รวมทั้งปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อพฤติกรรมกัดกร่อนของเหล็กกล้าในบรรยากาศ นอกจากนี้ บทความนี้ยังกล่าวถึงวิธีการทำนายอัตราการกัดกร่อนของเหล็กกล้าในบรรยากาศ โดยบทความนี้มีวัตถุประสงค์ในการนำเสนอการทบทวนวรรณกรรมที่มีประโยชน์สำหรับวิศวกรและ นักวิทยาศาสตร์ เช่น การศึกษาจลนศาสตร์ของการกัดกร่อนของเหล็กกล้าในบรรยากาศ ซึ่งสามารถนำไปสู่การพัฒนาความสามารถในการป้องกันการกัดกร่อนของเหล็กประเภทนี้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

คำหลัก : การกัดกร่อนในบรรยากาศ, เหล็กกล้า, การเปลี่ยนแปลงของชนิดสนิม

Abstract

Atmospheric corrosion of steel directly affects human life and safety as well as the global economic growth. Therefore, the comprehensive understanding in this phenomenon is required for engineers and scientists involving the application of steel. This review article presents an overview of the mechanisms and the characteristics of the atmospheric corrosion of steel. The special attention is paid to the comprehension of the rust evolution of steel and environmental factors contributing to the long-term atmospheric corrosion behavior of steel. Furthermore, this paper also provides the principal knowledge to predict the atmospheric corrosion rate of steel. This paper aims to review and propose the essential knowledge which is useful to engineers and scientists such as the interpretation of the kinetics of the atmospheric corrosion occurring on the steel surface. The comprehension in this review article can further lead to the development and the use of the effective corrosion protection methods for steel.

Keywords: Atmospheric corrosion; Steel; Rust evolution

1. บทนำ

เหล็กกล้าเป็นวัสดุวิศวกรรมที่ใช้กันมากในอุตสาหกรรม เช่น เป็นเหล็กโครงสร้าง และเป็นวัสดุที่ใช้ทำท่อ หรือ ภาชนะรับแรงดัน เนื่องจากเหล็กกล้ามีสมบัติทางกลที่ดี และ ราคาถูก [1-2] โดยส่วนใหญ่เหล็กกล้าจะถูกนำไปใช้ในอุปกรณ์ หรือ โครงสร้างที่อยู่กลางแจ้ง ทำให้เหล็กกล้านั้นต้องเผชิญกับปัญหาการกัดกร่อนเนื่องจากบรรยากาศโดยตรง [3-4] ส่งผลโดยตรงต่อความแข็งแรง และ ความสามารถในการรับแรงของอุปกรณ์ หรือ โครงสร้างที่ทำจากเหล็กกล้าอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ และจะนำมาสู่ความเสี่ยงต่อการพังทลายของโครงสร้างหรือการรั่วซึมของสารเคมีจากภาชนะรับแรงดันหรือระบบท่อส่งถ่ายได้ ซึ่งส่งผลกระทบต่อความปลอดภัยของชุมชน รวมถึงสิ่งแวดล้อม [5] นอกจากนี้ การกัดกร่อนของเหล็กกล้าในสภาวะบรรยากาศยังส่งผลกระทบต่อการพัฒนาเศรษฐกิจในระดับประเทศ Ulig [6] ได้ศึกษาความสูญเสียเนื่องจากการกัดกร่อน และ ค่าใช้จ่ายเนื่องจากการปัญหาการกัดกร่อนของวัสดุวิศวกรรม จากการศึกษาพบว่าปัญหานี้สร้างความสูญเสียมีค่าถึง 5 % ของรายได้มวลรวมของประเทศสหรัฐอเมริกาและสำหรับประเทศไทยการกัดกร่อนของวัสดุสร้างความสูญเสียถึง 23,000 ล้านบาทและประเด็นที่น่าสนใจคือความสูญเสียครึ่งหนึ่งมาจากการกัดกร่อนในบรรยากาศของวัสดุวิศวกรรม ซึ่งโดยมากเป็นเหล็กกล้า[6-7]

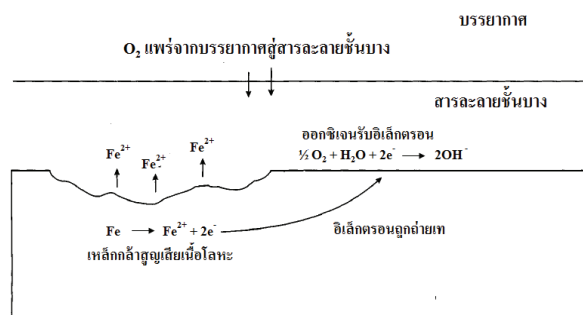
จากความรุนแรงของปัญหาดังกล่าว ทำให้มีการศึกษาและวิจัย การกัดกร่อนของเหล็กกล้าในบรรยากาศในเชิงลึกกันอย่างแพร่หลาย ในหลายๆ ประเทศ จากการศึกษาดังกล่าว ได้มีการเสนอกลไกการกัดกร่อนของเหล็กกล้าในหลายๆ ทฤษฎี รวมทั้งความรู้จากการวิจัยที่น่าสนใจในหลายๆ แง่มุม ซึ่งมีประโยชน์อย่างมากต่อความเข้าใจในปัญหาการกัดกร่อนของเหล็กกล้าในบรรยากาศ และสามารถนำไปสู่การประยุกต์ในการแก้ไขหรือบรรเทาความรุนแรงของปัญหานี้ได้ ในบทความนี้จะนำเสนอภาพรวมของการกัดกร่อนของการกัดกร่อนของเหล็กกล้าในบรรยากาศ เช่น กลไกการกัดกร่อน ปัจจัยที่มีผลต่อพฤติกรรมกัดกร่อนของเหล็กกล้าในบรรยากาศ นอกจากนี้

บทความนี้ยังกล่าวถึงวิธีการทำนายอัตราการกัดกร่อนของเหล็กกล้าในบรรยากาศอีกด้วย

2. กลไกการกัดกร่อน

การกัดกร่อนของเหล็กกล้าในบรรยากาศ นั้นนิยามได้ว่าเป็น การเสื่อมสภาพของเหล็กกล้า โดยกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี ซึ่งเกิดขึ้นระหว่างเหล็กกล้ากับบรรยากาศ[8-9] การกัดกร่อนในบรรยากาศของเหล็กกล้าจะเกิดขึ้นเมื่อ ผิวของเหล็กกล้านั้นถูกเคลือบด้วยสารละลาย โดยสารละลายนี้ก็คือน้ำที่กลั่นตัวจากบรรยากาศ ซึ่งโดยทั่วไป น้ำที่กลั่นตัวจากบรรยากาศจะละลายสารที่มีฤทธิ์กัดกร่อนซึ่งอยู่ในบรรยากาศ เช่น ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ในบรรยากาศอุตสาหกรรม และคลอไรด์ในบรรยากาศชายฝั่ง [8-10] โดยสารละลายดังกล่าวเคลือบผิวของเหล็กกล้าในลักษณะชั้นบาง จะส่งผลให้เกิดการกัดกร่อนของเหล็กกล้า โดยการกัดกร่อนจะดำเนินไปจนกระทั่งสารละลายชั้นบางนั้นระเหยกลับสู่บรรยากาศอย่างสมบูรณ์ [11-12]

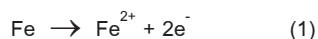
2.1 กระบวนการกัดกร่อนของเหล็กกล้า



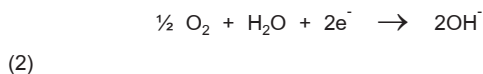
รูปที่ 1 แผนภาพอย่างง่ายของกระบวนการ กัดกร่อนของเหล็กกล้าในบรรยากาศ [13]

เมื่อผิวเหล็กกล้าถูกเคลือบด้วยสารละลายที่กลั่นตัวจากบรรยากาศ กระบวนการกัดกร่อนดังแสดงในรูปที่ 1. จะเริ่มขึ้น [13] โดย เหล็กกล้าจะสูญเสียเนื้อโลหะ และกลายเป็นเฟอร์รัสไอออน (Fe^{2+}) ซึ่งละลายในสารละลายดังสมการที่(1) ในขณะที่ออกซิเจนที่ละลายในสารละลายจะรับอิเล็กตรอนจากการที่การสูญเสียเนื้อโลหะของเหล็กกล้า ดังสมการที่ (2) [13-15]

เหล็กกล้าสูญเสียเนื้อโลหะ :



การรับอิเล็กตรอนของออกซิเจน :

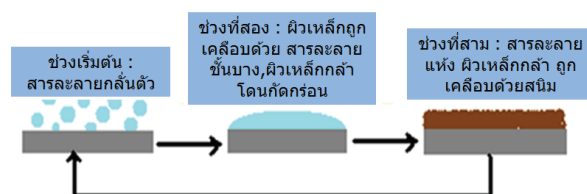


โดยผลของการกัดกร่อนของเหล็กกล้าในบรรยากาศ คือ สนิม ซึ่งจะเคลือบติดผิวหน้าของเหล็กกล้า โดยสนิมจะประกอบไปด้วย สารประกอบออกไซด์ และ สารประกอบ ไฮดรอกไซด์ หรือ สารประกอบอื่นๆ ที่เกิดการรวมตัวกันของเหล็กและสารที่มีฤทธิ์กัดกร่อนในบรรยากาศ [16-17] โดยลักษณะทางกายภาพรวมทั้งสมบัติทางพฤติกรรมทางไฟฟ้าเคมี เช่น ความหนาแน่น ความสามารถในการยึดเกาะผิว ความแข็งแรง ความเสถียรทางไฟฟ้า และการนำไฟฟ้า มีผลอย่างมากต่อพฤติกรรมเชิงการกัดกร่อนของเหล็กกล้า [18-19] หรืออาจจะกล่าวได้ว่า ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของสนิมนั้นกำหนดพฤติกรรมเชิงการกัดกร่อน รวมทั้งอายุการใช้งานของเหล็กกล้าที่สัมผัสกับบรรยากาศโดยตรง

2.2 ลักษณะเฉพาะของกระบวนการกัดกร่อนของเหล็กกล้าในบรรยากาศ

การกัดกร่อนของเหล็กกล้าในบรรยากาศเป็นกระบวนการทางไฟฟ้าเคมีที่ซับซ้อนและมีลักษณะพิเศษ กล่าวคือ กระบวนการกัดกร่อนของเหล็กกล้าในบรรยากาศนั้นจะเกิดในลักษณะที่เป็นคาบและขึ้นกับเงื่อนไขของอุณหภูมิและความชื้นของบรรยากาศที่จะทำให้ผิวของเหล็กกล้าเปียกหรือแห้ง[20] ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังรูปที่ 2. จากรูปที่สองในช่วงเริ่มต้นของการกัดกร่อนประเภทนี้ บรรยากาศจะมีสภาพอุณหภูมิที่ต่ำและความชื้นสูง ดังนั้นสารละลายจะสามารถกลั่นตัวจากบรรยากาศและเคลือบผิวของเหล็กกล้า เมื่อผิวหน้าของเหล็กกล้าได้ถูกเคลือบด้วยสารละลายชั้นบางเรียบร้อยแล้วดังช่วงที่ 2 ของรูปที่ 2 การกัดกร่อนจะดำเนินขึ้น โดยผิวหน้าของเหล็กกล้าจะสูญเสียเนื้อโลหะและอิเล็กตรอน และออกซิเจนที่ละลายในสารละลายนั้นจะรับอิเล็กตรอน ดังสมการที่

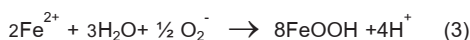
(1) และ(2) ตามลำดับ[21] โดยเมื่อบรรยากาศมีสภาพอุณหภูมิที่สูงและความชื้นต่ำลง สารละลายชั้นบางนั้นจะเริ่มระเหย โดยความหนาของสารละลายจะเริ่มบางลง ซึ่งส่งผลในการเร่งกลไกการกัดกร่อน โดยอัตราการกัดกร่อนจะเพิ่มสูงขึ้นและจะมีค่าสูงสุดก่อนที่ ผิวเหล็กกล้าจะแห้งอย่างสมบูรณ์ [22-23] ในช่วงที่สารละลายนั้นบางลง ความเข้มข้นของสารที่เกิดเนื่องจากการกัดกร่อนจะเพิ่มมากขึ้น และสามารถตกตะกอนที่หน้าผิวของเหล็กกล้า [23-24] ดังในช่วงที่ 3 ของรูปที่ 2 สำหรับสารประกอบที่ได้จากการกัดกร่อนของเหล็กกล้าก็คือ สนิม และเมื่อสารละลายระเหยหมด กระบวนการกัดกร่อนจะสิ้นสุดพร้อมกับผิวของเหล็กกล้าจะถูกเคลือบด้วยสนิมบางๆ โดยกระบวนการกัดกร่อนของเหล็กกล้าจะเกิดขึ้นทุกวันตามการเปลี่ยนแปลงเงื่อนไขทางอุณหภูมิและความชื้นของบรรยากาศ[21-24] และเมื่อกระบวนการกัดกร่อนสิ้นสุดในแต่ละรอบเปียกและแห้งของผิวเหล็กกล้า ชั้นสนิมที่ปกคลุมพื้นผิวเหล็กกล้านั้นจะมีการเปลี่ยนแปลงในเชิง ส่วนผสมทางเคมี โครงสร้างผลึก ความหนา รวมทั้งสมบัติด้านไฟฟ้าเคมี โดยการเปลี่ยนแปลงสมบัติดังกล่าวของชั้นสนิมนั้นส่งผลอย่างมากต่อพฤติกรรมการกัดกร่อนของเหล็กกล้าในบรรยากาศอีกด้วย นอกจากนี้สภาวะความชื้นและอุณหภูมิของบรรยากาศมีผลต่อการเกิดและสิ้นสุดของกระบวนการกัดกร่อนของเหล็กกล้า โดยช่วงเวลาที่ผิวเหล็กกล้าถูกเคลือบด้วยสารละลาย จะเรียกว่า เวลาแห่งความเปียก (Time of Wetness, TOW) [23-25] ซึ่งช่วงเวลาแห่งความเปียกนั้นจะแตกต่างกันไปในละภูมิภาค โดยช่วงเวลาแห่งความเปียกเป็นปัจจัยสำคัญอีกปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติของชั้นสนิมที่ปกคลุมพื้นผิวของเหล็กกล้า



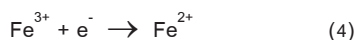
รูปที่ 2 ลักษณะเฉพาะของกระบวนการกัดกร่อนของเหล็กกล้าในบรรยากาศ [19]

3. กลไกการเกิดและการเปลี่ยนแปลงสมบัติของชั้นสนิม

เมื่อเหล็กกล้าในบรรยากาศเกิดการกัดกร่อนผิวเหล็กจะถูกปกคลุมด้วย สนิมที่เรียกว่าเฟอร์ริออกไซด์ไฮดรอกไซด์ (FeOOH) ซึ่งสนิมชนิดนี้เกิดจากปฏิกิริยาออกซิเดชันของเฟอร์รัสไอออน (Fe^{2+}) ดังสมการ(3) [26-27]



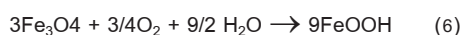
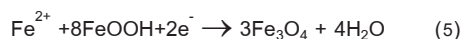
โดย FeOOH จะประกอบไปด้วยสนิมชนิดต่างๆ กันไป เช่น $\gamma\text{-FeOOH}$, $\alpha\text{-FeOOH}$ หรือ Fe_3O_4 ซึ่งการเปลี่ยนแปลงชนิดของสนิม FeOOH ไปสู่ชนิดสนิมที่เสถียรนั้นมีความสำคัญต่อพฤติกรรมการกัดกร่อนของเหล็กกล้า สำหรับผิวเหล็กที่มีสนิมที่ไม่เสถียรเคลือบ นอกจากผิวเหล็กจะเสียอิเล็กตรอนให้ออกซิเจนที่ละลายในน้ำแล้ว ผิวเหล็กยังสูญเสียอิเล็กตรอนของให้ เฟอร์ริก ไอออน (Fe^{3+})ในสนิมที่ไม่เสถียรอีกด้วย ดังสมการที่ (4)



ในกระบวนการกัดกร่อนโดยบรรยากาศของเหล็กกล้านั้น อัตราการกัดกร่อนจะลดลง เมื่อสนิมของเหล็กมีความหนาแน่นและเสถียรขึ้น [28-30]โดยเมื่อชั้นสนิมมีความหนาแน่นและเสถียร ชั้นสนิมจะต้านทานการเคลื่อนที่ของออกซิเจน และสารกัดกร่อนอื่นๆ เช่น คลอไรด์ และ ซัลไฟด์ ไอออน ไม่ให้กัดกร่อนผิวหน้าของเหล็กกล้าได้อีก ทั้งในสนิมที่เสถียรขึ้น อัตราการรับอิเล็กตรอนในสมการที่(4) จะน้อยลงด้วย [29] ในงานวิจัยของ Misawa [32-33] พบว่า $\gamma\text{-FeOOH}$ เป็นสนิมที่เกิดขึ้นในช่วงแรกๆ และสนิมชนิดนี้จะกลายเป็น $\alpha\text{-FeOOH}$ โดย $\alpha\text{-FeOOH}$ นั้นเสถียรมากกว่า และมีการเกาะกับผิวเหล็กได้ดีกว่า ดังนั้นสนิมชนิดนี้สามารถช่วยเพิ่มความสามารถในการป้องกันการกัดกร่อนของชั้นสนิมได้ นอกจากนี้ Misawa [34]

ยังแสดงผลงานวิจัยที่ชี้ให้เห็นว่า ความสามารถในการละลายของ $\alpha\text{-FeOOH}$ นั้นมีค่าน้อยกว่า $\gamma\text{-FeOOH}$ ประมาณ 10 เท่า ดังนั้น $\alpha\text{-FeOOH}$ จึงเป็นสนิมที่ช่วยป้องกันการกัดกร่อน

สำหรับเหล็กกล้าที่ถูกใช้ในบรรยากาศชายฝั่ง นอกจากสนิมชนิดดังกล่าว สนิมของเหล็กกล้ายังประกอบไปด้วย $\beta\text{-FeOOH}$ ซึ่งสนิมชนิดนี้จะมี คลอไรด์ เป็นส่วนประกอบ และเมื่อผิวโลหะถูกเคลือบด้วยสารละลาย คลอไรด์จะถูกละลายออกมา และกัดกร่อนผิวหน้าเหล็กกล้า ซึ่งส่งผลให้อัตราการกัดกร่อนสูงขึ้น Fe_3O_4 ก็ถูกพบมากในชั้นสนิมของเหล็กกล้า และมีบทบาทในการต้านทานการกัดกร่อน โดย Evan [35-37] ได้เสนอกลไกการเกิดของ Fe_3O_4 ดังสมการที่ (5) และ (6)



จากสมการที่ (5) Fe_3O_4 จะเกิดจาก ชั้นสนิม FeOOH และ Fe_3O_4 จะอยู่ในชั้นสนิม แต่อย่างไรก็ตามจากสมการที่ (6) ถ้าโครงสร้างของชั้นสนิมยังไม่แน่นหนาพอที่จะต้านออกซิเจน Fe_3O_4 ในส่วนที่ทำปฏิกิริยากับออกซิเจนและน้ำ จะเปลี่ยนเป็นสนิม FeOOH จนกระทั่ง ชั้นสนิมหนาแน่นพอ Fe_3O_4 จะเสถียร และมีปริมาณมากพอที่จะป้องกันการกัดกร่อนให้กับผิวเหล็กกล้าได้

3.1 ปัจจัยที่มีผลต่อการกัดกร่อนในบรรยากาศของเหล็กกล้า

เนื่องจากการป้องกันการกัดกร่อนของผิวเหล็กนั้นขึ้นกับการเปลี่ยนแปลงของชั้นสนิม ซึ่งการเกิดและ ขยาย รวมทั้งการเปลี่ยนแปลงของชนิดสนิมนั้นได้รับอิทธิพลโดยตรงจาก สภาพของบรรยากาศ เช่น การเปลี่ยนแปลงของ อุณหภูมิ และ ความชื้น รวมทั้งประเภทและปริมาณของสารกัดกร่อนที่ปนในบรรยากาศ เช่น คลอไรด์ และ ซัลไฟด์ ในงานวิจัยของ Antony และ คณะ [38] เสนอว่า FeOOH สามารถเปลี่ยนเป็น $\gamma\text{-FeOOH}$ Misawa [32-33] นั้นชี้ว่า $\gamma\text{-}$

FeOOH นั้นเปลี่ยนเป็น α -FeOOH ได้ยากในสภาวะบรรยากาศที่มีความชื้นสูง เนื่องจาก ผิวของเหล็กกล้า นั้นถูกเคลือบด้วยสารละลายเป็นเวลานาน Ch.Thee [23-25] พบว่า เวลาแห่งความเปียกที่นาน ส่งผลให้การพัฒนาความต้านทานของสนิมเป็นไปในอัตราที่ช้า Nishimura และคณะ [39] พบ β -FeOOH ในสนิมของเหล็กกล้าที่ใช้ในบรรยากาศชายฝั่ง โดยสนิมชนิดนี้สามารถกัดกร่อนเหล็กกล้าที่ใช้ในบรรยากาศชายฝั่ง สำหรับเหล็กกล้า เมื่อถูกใช้ในบรรยากาศที่ความรุนแรงในการกัดกร่อนสูง เช่น ในบรรยากาศชายฝั่ง หรือในบรรยากาศอุตสาหกรรม ที่สภาวะอากาศมีความชื้นที่สูง นั้นจะไม่สามารถสร้างชั้นสนิมที่ป้องกันการกัดกร่อนได้ โดยสนิมของเหล็กกล้าในสภาวะบรรยากาศที่รุนแรงจะไม่ยึดเกาะกับผิวเหล็กและจะมีรูพรุน จึงไม่สามารถต้านทานการกัดกร่อนได้ ในการเพิ่มความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อนของเหล็กประเภทนี้ คือการเติม ธาตุผสม เช่น ทองแดง โครเมียม นิกเกิล โดย X.H. Chen และ คณะ [40] เสนอว่า เหล็กกล้าที่มีการนิกเกิลจะเกิดชั้นสนิมที่เป็นประจุลบ และ ก่อให้การต้าน ไอออนคลอไรด์ M. Stratmann และ คณะ เสนอ [41] ว่า ทองแดงจะก่อให้เกิดสนิมชั้นบางเกาะที่ชั้นผิวของเหล็กกล้า และ โครเมียมมีส่วนทำให้ชั้นสนิมมีความหนาแน่นขึ้น โดยทั่วไป จะมีการเติมธาตุผสมดังกล่าวในปริมาณที่รวมกันประมาณ 3-5 % [42-43] เพื่อให้ชั้นสนิมของเหล็กกล้าแข็งแรงขึ้น และสามารถต้านทานการกัดกร่อนได้ดี ซึ่งเราจะเรียกเหล็กประเภทนี้ว่า Weathering steel

3.2 การทำนายอัตราการกัดกร่อน

ข้อมูลที่สำคัญสำหรับ นักวิทยาศาสตร์ และ วิศวกร สำหรับการใช้งานเหล็กกล้าในบรรยากาศ จำเพาะ รวมทั้งการประดิษฐ์ เหล็กกล้าผสมต่ำ เกรดใหม่ นั่นก็คือ การทราบระยะเวลาที่เหล็กกล้า หรือ เหล็กกล้าผสมนั้นๆ จะสามารถใช้งานในบรรยากาศ จำเพาะได้ ซึ่งการจะทราบข้อมูลดังกล่าวได้นั้น เราจำเป็นต้องทราบ อัตราการกัดกร่อนโดยประมาณ สำหรับการกัดกร่อนของเหล็กกล้าในบรรยากาศ เราจะประยุกต์ Liner Bilogarithmic law [44] เพื่อทำนาย

อัตราการกัดกร่อนของเหล็กประเภทนี้ โดย Liner Bilogarithmic law เป็นหาความสัมพันธ์ของ มวลสารของเหล็กกล้าที่สูญเสียไปเนื่องจากการกัดกร่อน และ เวลาที่เหล็กกล้านั้นถูกใช้ในบรรยากาศนั้นๆ ดังสมการที่ (7)

$$\Delta W = At^n \quad (7)$$

โดย ΔW คือ มวลสารของเหล็กกล้าที่สูญเสีย (มิลลิกรัม) หรือความหนาที่หายไป (มิลลิเมตร) เนื่องจากการกัดกร่อน , t คือ เวลา , A ในสมการนี้คือ ค่าคงที่ และ หมายถึงอัตราการกัดกร่อนในช่วงแรก ของเหล็กกล้า ในสมการ (8) ค่า n แสดงถึง จลน์ศาสตร์ของกระบวนการกัดกร่อน ในการหาค่าอัตราการกัดกร่อนเฉลี่ย[45-46] เราสามารถทำได้ดังสมการที่ 8

$$\log(\Delta W/t) = A+(n-1)\log(t) \quad (8)$$

เนื่องจากพฤติกรรมการกัดกร่อนของเหล็กกล้าจะขึ้นกับความสามารถในการป้องกันการกัดกร่อนของชั้นสนิมดังนั้น ค่า n นอกจากจะระบุจลน์ศาสตร์ของกระบวนการกัดกร่อนแล้ว ค่า n ยังบ่งชี้ความสามารถต้านทานการกัดกร่อนของชั้นสนิมได้อีกด้วย [29-31] โดย เมื่อ n มากกว่า 1 หมายถึง เหล็กกล้าถูกกัดกร่อนในอัตราที่เพิ่มขึ้นและชั้นสนิมไม่สามารถป้องกันการกัดกร่อนได้ แต่ ถ้า n น้อยกว่า 1 ชี้ว่า เหล็กกล้าถูกกัดกร่อนในอัตราที่ลดลงและชั้นสนิมช่วยป้องกันการกัดกร่อน ในขณะที่ n เท่ากับ 1 หมายถึง อัตราการกัดกร่อนที่คงที่ โดย กฎ Liner Bilogarithmic law นั้นได้ถูกนำไปใช้กันอย่างแพร่หลายในงานทดสอบ เหล็กกล้าในสภาวะจริงโดยนักวิทยาศาสตร์ เช่น K.Barton [4], M. Morcillo [47] , S.W. Dean [48] และการทดสอบเหล็กกล้าในสภาวะจำลอง โดย นักวิทยาศาสตร์เช่น T. Nishimura [39], Junhua Dong [1,17] , Ch.Thee [23-24] , Long Hao [29-31] สำหรับความถูกต้องและความน่าเชื่อถือของข้อมูลซึ่งได้จากการประยุกต์ของกฎ Liner Bilogarithmic law จะ

ครอบคลุมระยะเวลาที่เหล็กกล้าถูกใช้งานในบรรยากาศเป็นเวลา 20-30 ปี [45]

4. บทสรุป

บทความนี้ได้กล่าวถึงภาพรวมของปัญหาการกัดกร่อนของเหล็กกล้าในบรรยากาศ ในเชิงกลไกการกัดกร่อนของเหล็กกล้าในบรรยากาศ ซึ่งมุ่งเน้นให้เห็นความสำคัญของลักษณะเฉพาะตัวของการกัดกร่อนประเภทนี้ รวมทั้งการเปลี่ยนแปลงชั้นสนิมต่อพฤติกรรมการกัดกร่อนในระยะยาวของเหล็กกล้าในบรรยากาศ เช่น กลไกของการเกิดสนิมของ Evan และการเกิด $\gamma\text{-FeOOH}$ และ $\alpha\text{-FeOOH}$ นอกจากนี้บทความนี้ยังนำเสนอ วิธีการทำนายอัตราการกัดกร่อนของเหล็กประเภทนี้ โดยการประยุกต์ของ Linear Bilogarithmic law ซึ่งทำให้นักวิทยาศาสตร์เข้าใจพฤติกรรมการกัดกร่อนของเหล็กกล้าในบรรยากาศที่จำเพาะ และสามารถนำมาใช้เพื่อทำนายอายุการใช้ของเหล็กกล้า ซึ่งความรู้ดังกล่าวสามารถนำไปสู่การพัฒนาประสิทธิภาพในการป้องกันการกัดกร่อนของเหล็กประเภทนี้ได้ นอกจากนี้ยังช่วยให้วิศวกร ทราบระยะเวลาที่เหล็กกล้าสามารถใช้ในบรรยากาศนั้นๆ ได้ และสามารถเตรียมแผนการบำรุงรักษาหรือเปลี่ยนเหล็กกล้าที่เสื่อมสภาพในระยะเวลาที่เหมาะสมได้อีกด้วย

เอกสารอ้างอิง

- [1] J.H. Dong, E.H. Han, K. Wei, **“Introduction to atmospheric corrosion research in China”**, Science and Technology of Advanced Materials 8 , 2007, pp. 559-565.
- [2] S. Syed, **“Atmospheric corrosion of Materials”**, Emirates Journal of Engineering Research, 11, pp. 1-24.
- [3] C. Leygraf, T. Graedel, **“Atmospheric corrosion”**, New York ,John Wiley& Sons. Inc., 2000.
- [4] K. Barton, **“Protection Against Atmospheric Corrosion”**, New York , John Wiley& Sons, Inc., 1976
- [5] Mars G. Fontana, **“Corrosion Engineering”**, 3rd Edition, Singapore , McGraw-hill book company , 1987.
- [6] S. Nivitchanyong , W. Pongsaksawad , E. Viyanit ,N.Palsson , A.Chianpairot . Aspects of corrosion costs in Thailand . **Thailand Corrosion and Prevention Conference 2015** , October 2015.
- [7] T. Chowwanonthapunya, C. Peeratatsuan and W. Suphamitmongkol , **“Review of Corrosion of Carbon Steel in CO₂ – Containing Environment of the Oil and Gas Industry: Mechanism Understanding to Prediction Model”** Pathumwan Academic Journal, Vol. 5, No. 14, September - December 2015: 31 – 41
- [8] R.W. Revie, H.H. Uhlig , **“An introduction to Corrosion Science and Engineering”** , 4th edition, New Jersey, John Wiley& Sons, Inc.1994.
- [9] K. Wei, J.H. Dong, **“ Study on the rusting evolution and the performance of resisting to atmospheric corrosion for Mn-Cu Steel ”**, ACTA METALLURGICA SINICA 46, 2010, pp. 1365-1378.
- [10] M. Stratmann, H. Streckel, **“On the atmospheric corrosion of metal which are covered with thin electrolyte layers– I, verification of the experimental technique”**, Corrosion Science 30, 1990 , pp. 681-696.
- [11] M. Stratmann, H. Streckel, **“On the atmospheric corrosion of metal which are covered with thin electrolyte layers–**

- II, Exp. Results**", Corrosion Science 30, 1990, pp. 697–714.
- [12] M. Stratmann, H. Streckel, K.T. Kim, S. Crockett, **"On the atmospheric corrosion of metal which are covered with thin electrolyte layers–III. The measurement of polarization curves on metal surfaces which are covered by thin electrolyte layers"**, Corrosion Science 30, 1990, pp. 715–734.
- [13] M. Stratmann, J. Müller, **"The mechanism of the oxygen reduction on rust-covered metal substrates"**, Corrosion Science 36, 1994, pp. 327–359.
- [14] M. Tullmin, **Atmospheric Corrosion**, in: R.W. Revie (Ed.), Uhlig's Corrosion Handbook, John Wiley & Sons, Inc., 2000.
- [15] S. Hoerle, F. Mazaudier, Ph. Dillmann, **"Advances in understanding atmospheric corrosion of iron II. Mechanistic modelling of wet–dry cycles"**, Corrosion Science 46, 2004, pp. 1431–1465.
- [16] M. Yamashita, H. Miyuki, H. Nagaro, T. Misawa, **"The long term growth of the protective rust later formed on weathering steel by atmospheric corrosion during a quarter of a century"**, Corrosion Science 36, 1994, pp. 283–290.
- [17] J. Dong, J.H. Dong, E.H. Han, **"Rusting evolvement of mild steel under wet/dry cyclic condition with pH 4 NaHSO₃ solution"**, Corrosion Science and Protection Technology 21, 2009, pp. 1–4.
- [18] I. Suzuki, N. Masuko, T. Hisamatsu, **"Electrochemical properties of iron rust"**, Corrosion Science 19, 1979, pp. 521–535.
- [19] I. Matsushima, T. Ueno, **"On the protective nature of atmospheric rust on low alloy steel"**, Corrosion Science 11, 1971, pp. 129–140.
- [20] T. Tsuru, A. Nishikata, J. Wang, **"Electrochemical studies on corrosion under a water film"**, Material Science and Engineering A 198, 1995, pp. 161–168.
- [21] J.H. Dong and W. Ke, **"A Fundamental of study on Developing Cost Effective Weathering Steel"**, 2009 International symposium on steels and infrastructure, China, 2009, pp. 321–329.
- [22] N.D. Tomashov, **"Development of the Electrochemical Theory of Metallic Corrosion"**, Corrosion 20, 1964, pp. 7–14.
- [23] Ch. Thee, L. Hao, J.H. Dong, X. Wie, X.F. Li, W. Ke, **"Atmospheric corrosion monitoring of a weathering under an electrolyte film in cyclic wet-dry condition"**, Corrosion Science 78, 2014, pp. 130–137.
- [24] Ch. Thee, Long Hao, Junhua Dong, Mu Xin, Wei Ke, **"One numerical approach for atmospheric corrosion monitoring based on EIS of a weathering steel"**, Acta Metallurgica Sinica (English Letter), 2014. DOI 10.1007/s40195-014-0193-5.
- [25] X.X. Fu, J.H. Dong, E.H. Han, W. Ke, **"A new experimental method for in situ new experimental method for in situ corrosion monitoring under alternate wet- dry conditions"**, Sensors 9, 2009, pp. 10400–10410.

- [26] L.L. Shreir, R.A. Jarman, G.T. Burstein, **“Corrosion vol.2 : Corrosion Control”**, Oxford, Butterworth Heinemann, 3rd Edition, 2000, pp.62-85.
- [27] M. Pourbaix, **“Thermodynamics and Corrosion”**, Corrosion Science 30, 1990, pp.963-988
- [28] H. Okada, Y. Hosoi and H. Naito, **“Electrochemical reduction of thick rust layers, formed on steel surfaces”**, Corrosion 26, 1970, pp. 429-430.
- [29] L. Hao, S.X. Zhang, J.H. Dong, W. Ke, **“Evolution of atmospheric corrosion of MnCuP weathering steel in a simulated coastal-industrial atmosphere”**, Corrosion Science 59, 2012, pp. 270–276.
- [30] L. Hao, S.X. Zhang, J.H. Dong, W. Ke, **“Atmospheric corrosion resistance of MnCuP weathering steel in simulated environments”**, Corrosion Science 53, 2011, pp. 4187-4192.
- [31] L. Hao, S.X. Zhang, J.H. Dong, W. Ke, **“Corrosion evolution of MnCuP weathering steel submitted to wet/dry cyclic tests in a simulated coastal atmosphere”**, Corrosion Science 58, 2012, pp. 175–180.
- [32] T.Misawa, T. Kyuno, W. Suetaka, S. Shimodaira, **“The mechanism of atmospheric rusting and the effect of Cu and P on the rust formation of low alloy steel”**, Corrosion Science 11, 1971, pp. 33–48.
- [33] T. Misawa, K. Hashimoto and S.Shimodaira, **“The mechanism of formation of iron oxide and oxyhydroxides in aqueous solutions at room temperature”**, Corrosion Science 14, 1974, pp.131-149.
- [34] T.Misawa, **“The thermodynamics consideration for Fe-H₂O at 25”**, Corrosion Science 14, 1973, pp.639-644.
- [35] U.R.Evans, **“Electrochemical Mechanism for Atmospheric Rusting”**, Nature, Vol206, June 1965, Nature 206, 1965, pp. 980-982.
- [36] U.R. Evans, **“Mechanism of atmospheric rusting”**, Corrosion Science 9, 1969, pp. 813-82.
- [37] U. R. Evans, C.A. J Taylor, **“Mechanism of atmospheric rusting”**. Corrosion Science 12, 1972, p 227-246.
- [38] H. Antony, L. Legrand, L. Maréchal, S. Perrin, Ph. Dillmann, A. Chaussé. **Study of lepidocrocite and FeOOH electrochemical reduction in neutral and slightly alkaline solutions at 25 °C**. Electrochim. Acta, 2005, 50 : 745-753
- [39] T. Nishimura, I. Tanaka and Y. Shimizu, **“Effect of NaCl on the rusting of steel in wet/dry corrosion cycle”**, Tetsuto-Hagane 81, 1995, pp. 1.079-1.084.
- [40] X.H. Chen, J.H. Dong, E.H. Han, W. Ke. **The influence of Ni alloying on corrosion behaviour of low alloy steels under wet/dry cyclic conditions**. Canadian Metallurgical Quarterly, 2007, 46: 195-205
- [41] M. Stratmann, K. Bohnenkamp, H.J. Engell. **An electrochemical study of phase-transitions in rust layers**. Corrosion Science, 1983, 23(9): 969-985
- [42] T.Murata, **“Weathering Steel”**, in: R.W Revie (Ed.), Uhlig's Corrosion Handbook, John Wiley& Sons, Inc., 2000

- [43] A. Nishikata, F. Suzuki, T. Tsuru. **Corrosion monitoring of nickel-containing steels in marine atmospheric environment.** Corrosion Science, 2005, 47(10): 2578–2588.
- [44] M. Pourbaix, “**The Linear Bilogarithmic Law for Atmospheric Corrosion**” , in: W.H.Ailor (Ed.), Atmospheric Corrosion , Wiley New York, 1980.
- [45] M. Pourbaix, J.V. Muylder, A. Pourbaix, “**Atmospheric corrosion** ”, John Wiley New York, 1982.
- [46] J.H. Dong, K. Wei, “ **Fitting and Evolution of Atmospheric Corrosion of Low alloy steel under wet/dry corrosion test** ”, The 8th Pacific Rim International Conference on Advanced Material and Processing conference, USA, 2013
- [47]M. Morcillo, J. Simancas and S.Feliu, **Long-term atmospheric corrosion in Spain: results after 13 to 16 years of exposure and comparison with worldwide data,** In: Atmospheric Corrosion, H.H. Lawson (Ed.), ASTM STP 1239, Philadelphia, 1995.
- [48] S.W. Dean and D.B. Reiser, **Analysis of long-term atmospheric corrosion results from CORBAG Program,** In: Outdoor Atmospheric Corrosion, H.E. Townsend (Ed.), ASTM 1421, Philadelphia, 2002.