



การใช้กรดไขมันเพื่อเป็นสารยับยั้งการกัดกร่อนสำหรับเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ

Fatty Acids as Corrosion Inhibitors for Low Carbon Steel

นวรรตน์ วรอุยชัย และ อรรถพล ตะระะ

Nawarat Worauychai and Attapon Tareh

ภาควิชาเทคโนโลยีวัสดุ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยรามคำแหง

Department of Materials Technology, Faculty of Science, Ramkhamhaeng University

Received : 1 June 2021

Revised : 25 November 2021

Accepted : 15 December 2021

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาการใช้สารยับยั้งการกัดกร่อนในกลุ่มของกรดไขมันสำหรับกระบวนการทำความสะอาดเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำในสารละลายที่เป็นกรด (acid picking) โดยใช้กรดไขมัน 2 ชนิด ได้แก่ กรดเฮกซะโนอิก (hexanoic acid; HA) และกรดออกตะโนอิก (octanoic acid; OA) ที่ความเข้มข้น 0, 1, 5 และ 20 มิลลิโมลาร์ ในสารละลายกรดซัลฟิวริก 0.1 โมลาร์ จากผลการทดลองพบว่าค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน (corrosion potential; E_{corr}) ของเหล็กกล้าที่เติมกรดออกตะโนอิกมีแนวโน้มเลื่อนไปทางด้านลบหรือด้านแคโทดิก แสดงว่ากรดนี้เป็นสารยับยั้งการกัดกร่อนชนิดแคโทดิก (cathodic inhibitor) อีกทั้งสารยับยั้งการกัดกร่อนชนิดนี้ยังสามารถลดอัตราการกัดกร่อน (corrosion rate) ในทุกความเข้มข้น ในขณะที่อัตราการกัดกร่อนของเหล็กกล้าเมื่อเติมกรดเฮกซะโนอิกที่ความเข้มข้น 1 และ 5 มิลลิโมลาร์ มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามการใช้กรดเฮกซะโนอิกความเข้มข้น 20 มิลลิโมลาร์ ในสารละลายกรดซัลฟิวริก 0.1 โมลาร์ ส่งผลให้ประสิทธิภาพการยับยั้งการกัดกร่อนเพิ่มขึ้นและลดอัตราการกัดกร่อนลงได้ โดยค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนของกรดเฮกซะโนอิกมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อย สำหรับประสิทธิภาพการยับยั้งการกัดกร่อน พบว่ากรดออกตะโนอิกความเข้มข้น 20 มิลลิโมลาร์ ในสารละลายกรดซัลฟิวริก 0.1 โมลาร์ มีประสิทธิภาพการยับยั้งการกัดกร่อนได้เท่ากับ 72.33 เปอร์เซ็นต์ และสามารถลดอัตราการกัดกร่อนได้ถึง 88.95 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่ใช้สารยับยั้งการกัดกร่อน

คำสำคัญ : สารยับยั้งการกัดกร่อน ; กรดไขมัน ; กรดเฮกซะโนอิก ; กรดออกตะโนอิก ; เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ



Abstract

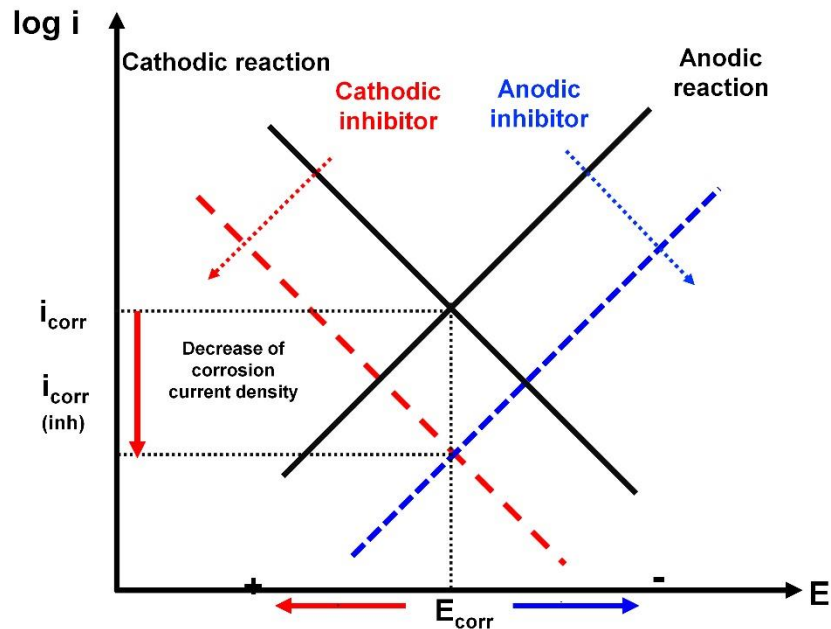
This research is to study the feasibility of two fatty acids, hexanoic acid (HA) and octanoic acid (OA), to be used as the corrosion inhibitors of low carbon steels in acid picking process. The concentrations of acids used in this work were 0, 1, 5, and 20 mM in 0.1 M H_2SO_4 . The polarization curve showed that the corrosion potential (E_{corr}) of carbon steel in H_2SO_4 contained OA shifted to a negative (cathodic) direction. Thus, OA is a cathodic inhibitor controlling cathodic reaction chiefly. The corrosion rate also decreased with OA concentration. On the other hand, H_2SO_4 contained 20 mM HA showed a slightly shift of E_{corr} to a positive direction and reduce corrosion rate. In comparison with HA, OA at a concentration of 20 mM exhibited the highest inhibition efficiency (%IE) of 72.33% and a lower corrosion rate of 88.95% when compared with the non-inhibitor condition.

Keywords : corrosion inhibitor, fatty acid, hexanoic acid, octanoic acid, low carbon steel

บทนำ

เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ (low carbon steels) นิยมนำมาผลิตเป็นชิ้นส่วนและโครงสร้างต่างๆ เนื่องจากมีสมบัติเชิงกลที่ดี และมีราคาถูก อย่างไรก็ตามเหล็กกล้าเมื่ออยู่ในสภาวะแวดล้อมที่มีความชื้น จะทำให้เกิดสนิมหรือออกไซด์ขึ้นที่ผิว ดังนั้นการนำเหล็กกล้ามาผลิตเป็นชิ้นส่วนหรือโครงสร้างต่างๆ จึงต้องเคลือบผิวก่อนที่จะนำไปใช้งาน เช่น การเคลือบผิวด้วยสังกะสีแบบจุ่มร้อน (hot dip) และการเคลือบผิวด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า (electroplating) เป็นต้น ในขั้นตอนของการเตรียมผิวเหล็กกล้าก่อนนำไปเคลือบผิวนั้น จำเป็นต้องผ่านการกำจัดออกไซด์หรือสนิม ซึ่งใช้วิธีการทำความสะอาดผิวด้วยกรด (acid picking) โดยกรดที่ใช้ในการกำจัดชั้นออกไซด์ ได้แก่ กรดไฮโดรคลอริก (hydrochloric acid) และกรดซัลฟิวริก (sulfuric acid) เป็นต้น ปัจจุบันนิยมใช้กรดซัลฟิวริกแทนกรดไฮโดรคลอริก เนื่องจากมีความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์มากกว่า (Govindasamy & Ayappan, 2015) โดยกรดเหล่านี้จะทำหน้าที่ทำความสะอาดผิวเหล็กเพื่อให้ผิวออกไซด์หรือสนิมหลุดออกอย่างไร้ที่ติตามเมื่อชั้นของออกไซด์หลุดไปแล้ว จะเกิดปฏิกิริยาการกัดกร่อนของเหล็กกล้ากับกรดที่รุนแรง ดังนั้นจึงมีการใช้สารยับยั้งการกัดกร่อนเพื่อลดหรือชะลอการเกิดปฏิกิริยาดังกล่าว โดยสารยับยั้งการกัดกร่อนมีทั้งกลุ่มของสารประกอบอินทรีย์และสารประกอบอนินทรีย์ อย่างไรก็ตามสารประกอบอินทรีย์เป็นสารที่ได้จากธรรมชาติ และมีความเป็นไปได้ที่จะนำมาใช้เป็นสารยับยั้งการกัดกร่อน เนื่องจากโครงสร้างของสารอินทรีย์ประกอบด้วยอะตอมของออกซิเจน ไนโตรเจน หรือซัลเฟอร์ ทำให้สามารถเกิดการดูดซับที่ผิวหน้าของเหล็กกล้าได้ จึงชะลอการกัดกร่อนได้ดี (Noor, 2005; Zarrouk *et al.*, 2013)

สารยับยั้งการกัดกร่อนแบ่งออกได้เป็น 3 ชนิด คือ สารยับยั้งการกัดกร่อนชนิดแอนอดิก (anodic inhibitor) ชนิดแคโทดิก (cathodic inhibitor) และชนิดแบบผสม (mixed inhibitor) ถ้าพิจารณาจากแผนภาพของอีวานส์ (Evans diagram) ดังภาพที่ 1 สามารถอธิบายได้ว่า การเติมสารยับยั้งประเภทแอนอดิก ซึ่งควบคุมปฏิกิริยาออกซิเดชันหรือปฏิกิริยาแอนอดิก นอกจากจะส่งผลให้ปฏิกิริยาแอนอดิกหรือความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าแอนอดิก (anodic current density) ลดลงแล้วยังทำให้มีการเลื่อน (shift) ของศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน (corrosion potential; E_{corr}) ไปในด้านบวกหรือด้านแอนอดิก แต่หากใช้สารยับยั้งการกัดกร่อนชนิดแคโทดิกซึ่งควบคุมปฏิกิริยารีดักชัน เป็นผลให้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าแคโทดิก (cathodic current density) ลดลง และศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนจะเลื่อนไปในด้านลบหรือด้านแคโทดิก ซึ่งการลดลงของทั้งกระแสแอนอดิกและแคโทดิก จะส่งผลให้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ารวมของการกัดกร่อนหรืออัตราการกัดกร่อนลดลงเช่นกัน สำหรับสารยับยั้งการกัดกร่อนแบบผสมจะมีการลดความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าทั้งปฏิกิริยาออกซิเดชันและรีดักชัน ดังนั้นค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน จึงเป็นอีกปัจจัยที่ใช้พิจารณาชนิดของสารยับยั้งการกัดกร่อน ภายใต้เงื่อนไขที่สารดังกล่าวสามารถลดอัตราการกัดกร่อนของโลหะในตัวอย่างได้ (Hughes *et al.*, 2016)

ภาพที่ 1 แผนภาพของอีวานส์ ดัดแปลงจาก (Hughes *et al.*, 2016)

จากรายงานวิจัยที่ผ่านมาการศึกษาการใช้สารยับยั้งการกัดกร่อนสำหรับกระบวนการทำความสะอาดด้วยกรดบนผิวเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ ส่วนใหญ่ศึกษาการใช้สารสกัดจากพืช ซึ่งจัดอยู่ในกลุ่มของสารยับยั้งการกัดกร่อนที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมตัวอย่างเช่น สารสกัดจากพริกไทยดำ (black pepper extract) คาโมมายล์ (Chamomile; *C. mixtum* L.) และกัวกัม (Guar gum) เป็นต้น โดยสารดังกล่าวให้ประสิทธิภาพการยับยั้งการกัดกร่อนสูงถึงร้อยละ 90-93.63 และเป็นสารยับยั้งชนิดผสมที่สามารถลดการเกิดปฏิกิริยาการกัดกร่อนทั้งด้านแคโทดิกและแอโนดิก (Abdallah, 2004; Abdel-Gaber *et al.*, 2006; Raja & Sethuraman, 2008) อย่างไรก็ตามการใช้สารสกัดจากพืชยังมีต้นทุนการผลิตสูง และไม่สามารถผลิตในระดับอุตสาหกรรมได้ (Zaferani *et al.*, 2013)

สำหรับกรดคาร์บอกซิลิก (carboxylic acid) เป็นกรดอินทรีย์ (organic acid) ที่อยู่ในกลุ่มของกรดไขมัน (fatty acid) นั้นประกอบด้วยหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิล (carboxyl: $-\text{COOH}$) ที่มีความสามารถในการดูดซับผิวหน้าของโลหะที่มีประจุบวกและเกิดเป็นผิวที่ไม่ชอบน้ำ (hydrophobic surface) บนผิวโลหะได้ (Wang *et al.*, 2006; Boiesier *et al.*, 2009) ทำให้สารในกลุ่มดังกล่าวมีแนวโน้มการใช้งานเป็นสารยับยั้งการกัดกร่อนได้ โดยกรดคาร์บอกซิลิกสามารถแบ่งตามความยาวของสายโซ่คาร์บอนได้ดังนี้คือ กรดไขมันสายโซ่สั้น (short chain fatty acid; $C < 8$) กรดไขมันสายโซ่ปานกลาง (medium chain fatty acid; $C8-14$) และกรดไขมันสายโซ่ยาว (long chain fatty acid; $C > 16$) (Beermann *et al.*, 2003; Young *et al.*, 2005) โดยทั่วไปสามารถพบกรดคาร์บอกซิลิกได้ในธรรมชาติ เช่น ไขมันสัตว์ (animal fat) น้ำมันเมล็ดในปาล์ม (palm kernel oil) และน้ำมันมะพร้าว (coconut oil) เป็นต้น (Badea & Radu, 2018) นอกจากนี้มีการศึกษาการใช้กรดคาร์บอกซิลิกเป็นสารยับยั้งการกัดกร่อนบนผิวทองแดงและผิวทองเหลืองในสภาวะน้ำฝนจำลอง โดยเปรียบเทียบกรด 3 ชนิด ได้แก่ กรดเฮกซะโนอิก

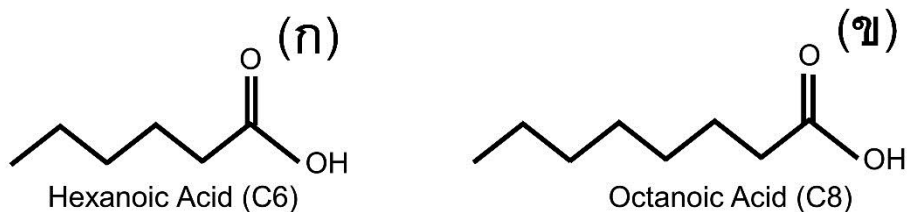
(hexanoic acid, C = 6) กรดเดคาโนอิก (decanoic, C = 10) และกรดออกตะเตเดคาโนอิก (octadecanoic acid, C = 18) พบว่า กรดคาร์บอกซิลิกทุกตัวสามารถเกิดเป็นฟิล์มที่ไม่ชอบน้ำได้ และสายโซ่คาร์บอนที่มีความยาวสูงส่งผลดีต่อการยับยั้งการกัดกร่อน (Žerjav & Milošev, 2014) สอดคล้องกับการศึกษาประสิทธิภาพการยับยั้งการกัดกร่อนของกรดคาร์บอกซิลิกที่ประกอบด้วยคาร์บอน 7 ตัว 11 ตัว และ 18 ตัว ในสารละลายต่างพบว่าประสิทธิภาพการยับยั้งการกัดกร่อนขึ้นอยู่กับความยาวสายโซ่คาร์บอนและความเข้มข้นของสารยับยั้งการกัดกร่อน (Lin & Zuo, 2019) โดยกรดคาร์บอกซิลิกจัดอยู่ในกลุ่มของสารยับยั้งการกัดกร่อนอินทรีย์ (organic inhibitor) ที่มีราคาถูก สามารถใช้ได้หลายช่วงอุณหภูมิ ละลายในน้ำได้ดี และไม่เป็นพิษ (Brycki *et al.*, 2018)

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงศึกษาการใช้กรดไขมันสายโซ่สั้น และกรดไขมันสายโซ่ปานกลาง ได้แก่ กรดเฮกซะโนอิก และกรดออกตะเตโนอิก เพื่อใช้เป็นสารยับยั้งการกัดกร่อนสำหรับเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำในกรดซัลฟิวริก

วิธีดำเนินการวิจัย

1. ชนิดของสารยับยั้งการกัดกร่อนและชิ้นงานที่ใช้ศึกษา

งานวิจัยนี้ใช้สารยับยั้งการกัดกร่อน 2 ชนิดได้แก่ กรดไขมันสายโซ่สั้น คือ กรดเฮกซะโนอิก(hexanoic acid; HA) ประกอบด้วยคาร์บอน 6 ตัว (C6) และกรดไขมันสายโซ่ปานกลาง กรดออกตะเตโนอิก (octanoic acid; OA) ประกอบด้วยคาร์บอน 8 ตัว (C8) ดังภาพที่ 2



ภาพที่ 2 โครงสร้างทางเคมีของสารยับยั้งการกัดกร่อน (ก) กรดเฮกซะโนอิก และ (ข) กรดออกตะเตโนอิก

ชิ้นงานที่ใช้ศึกษาในงานวิจัยนี้ ได้แก่ เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ เกรด AISI 1020 ที่มีองค์ประกอบเคมีดังตารางที่ 1 โดยเตรียมขัดผิวเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำด้วยกระดาษทรายเบอร์ 1200 และขัดมันด้วยผงอลูมินาขนาด 0.03 ไมครอน จากนั้นล้างด้วยเอทิลแอลกอฮอล์ (ethyl alcohol) ในเครื่องอัลตราโซนิก และทำให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำเกรด AISI1020

ชนิดของธาตุ	คาร์บอน	แมงกานีส	ฟอสฟอรัส	ซัลเฟอร์	เหล็ก
ปริมาณ (ร้อยละ)	0.220	0.450	0.030	0.035	99.265



2. การทดสอบการกัดกร่อนและการหาประสิทธิภาพของสารยับยั้งการกัดกร่อน

ทดสอบการกัดกร่อนของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำด้วยเทคนิคทางเคมีไฟฟ้าด้วยเครื่องโพเทนชิโอสแตท/กัลวานอสแตท (potentiostat/galvanostat) ยี่ห้อ Autolab รุ่น PG128N โดยเซลล์เคมีไฟฟ้าที่ใช้เป็นชนิด 3 ขั้ว ที่ประกอบด้วย ขั้วไฟฟ้าทำงาน (working electrode) ใช้เป็นเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ AISI 1020 พื้นที่วงกลมขนาด 0.471 ตารางเซนติเมตร โดยมีเส้นผ่าศูนย์กลางขนาด 0.775 เซนติเมตร ขั้วไฟฟ้าอ้างอิง (reference electrode) ชนิดซิลเวอร์/ซิลเวอร์คลอไรด์ (Ag/AgCl) และขั้วไฟฟ้าช่วย (auxiliary electrode) ทำจากโลหะแพลตินัม (Pt) ทดสอบในสารละลายกรดซัลฟิวริกความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ที่มีการแปรความเข้มข้นของสารยับยั้งการกัดกร่อนที่ความเข้มข้น 0, 1, 5 และ 20 มิลลิโมลาร์

ก่อนการทดสอบการกัดกร่อนมีการวัดค่าศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิด (open circuit potential; OCP) เป็นเวลา 120 วินาทีในสภาวะเดียวกับที่จะใช้ทดสอบ หลังจากนั้นทดสอบด้วยเทคนิคโพเทนชิโอดนามิกโพลาริเซชัน (potentiodynamic polarization) เพื่อศึกษาผลของสารยับยั้งการกัดกร่อนต่อประสิทธิภาพการยับยั้งการกัดกร่อน (inhibition efficiency: %IE) ดังสมการที่ 1 (Govindasamy & Ayappan, 2015)

$$IE (\%) = [(i_{\text{corr}(0)} - i_{\text{corr}(inh)}) / i_{\text{corr}(0)}] \times 100 \quad (1)$$

เมื่อ $i_{\text{corr}(0)}$ คือ ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าของการกัดกร่อนที่ไม่มีการเติมสารยับยั้งการกัดกร่อน (mA/cm^2)
 $i_{\text{corr}(inh)}$ คือ ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าของการกัดกร่อนที่มีการเติมสารยับยั้งการกัดกร่อน (mA/cm^2)

และสามารถคำนวณอัตราการกัดกร่อนได้จากสมการที่ 2 (Govindasamy & Ayappan, 2015)

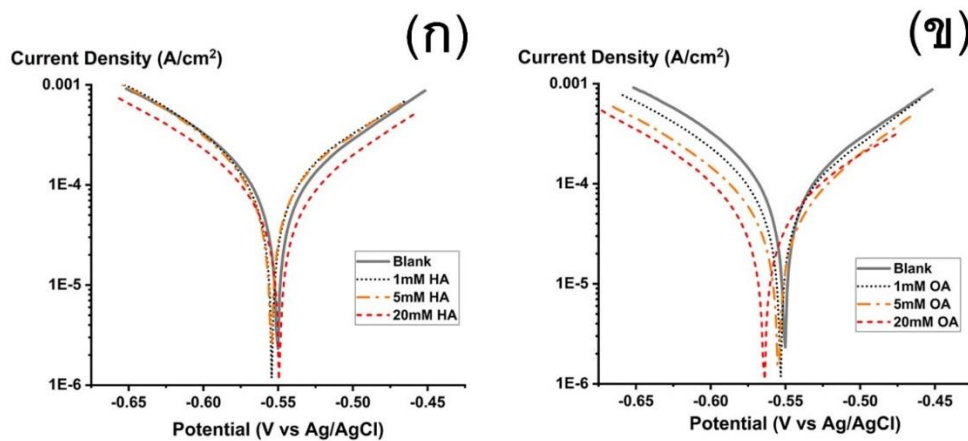
$$\text{Corrosion rate (mmpy)} = [(0.13i_{\text{corr}}(\text{E.W.}))/d] \quad (2)$$

เมื่อ i_{corr} คือ ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าของการกัดกร่อน (mA/cm^2)
 E.W. คือ น้ำหนักสมมูลของชิ้นงานที่ถูกกัดกร่อน (g)
 d คือ ความหนาแน่นของชิ้นงานที่ถูกกัดกร่อน (g/cm^3)

โดยการคำนวณน้ำหนักสมมูลของชิ้นงานที่ถูกกัดกร่อน (equivalence weight: E.W.) ที่ใช้สำหรับการวัดค่าทางเคมีไฟฟ้านั้น จากมาตรฐาน ASTM G 102-89 (1999) ใช้ธาตุผสมที่มีปริมาณมากกว่าร้อยละ 1 โดยน้ำหนักมาคำนวณเท่านั้น (Sekunowo *et al.*, 2013) ดังนั้นในกรณีของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ เกรด AISI 1020 ดังตารางที่ 1 ซึ่งมีปริมาณธาตุผสมต่ำกว่าเกณฑ์ที่กำหนด (ร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก) จึงใช้ธาตุเหล็กเพียงธาตุเดียวมาคำนวณน้ำหนักสมมูลดังกล่าว

ผลการวิจัย

จากกราฟโพลาริเซชันของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำที่มีการเติมสารยับยั้งการกัดกร่อนกรดเฮกซะโนอิกและกรดออกตะโนอิกในความเข้มข้น 0, 1, 5 และ 20 มิลลิโมลาร์ ในตัวกลางที่เป็นกรดซัลฟิวริก 0.1 โมลาร์ ดังแสดงในภาพที่ 3 พบว่าเมื่อเติมกรดเฮกซะโนอิกและกรดออกตะโนอิก ทำให้ค่าศักย์ไฟฟ้าของการกัดกร่อน (E_{corr}) ของเหล็กกล้ามีค่าลดลงหรือเลื่อนไปในด้านแคโทด เมื่อเทียบกับสถานะที่ไม่เติมสารยับยั้งการกัดกร่อน ยกเว้นที่ความเข้มข้นกรดเฮกซะโนอิก 20 มิลลิโมลาร์ พบว่าค่าศักย์ไฟฟ้าของการกัดกร่อนจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อย (0.08 มิลลิโวลต์) ดังตารางที่ 2



ภาพที่ 3 กราฟโพลาริเซชันของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำในกรดซัลฟิวริก 0.1 โมลาร์ ที่มีการเติมสารยับยั้งการกัดกร่อน ความเข้มข้น 0, 1, 5 และ 20 มิลลิโมลาร์ (ก) กรดเฮกซะโนอิก (ข) กรดออกตะโนอิก

ตารางที่ 2 การเปลี่ยนแปลงของค่าศักย์ไฟฟ้าของการกัดกร่อนเมื่อใช้สารยับยั้งการกัดกร่อนชนิดต่างๆ ในสารละลายกรดซัลฟิวริก 0.1 โมลาร์

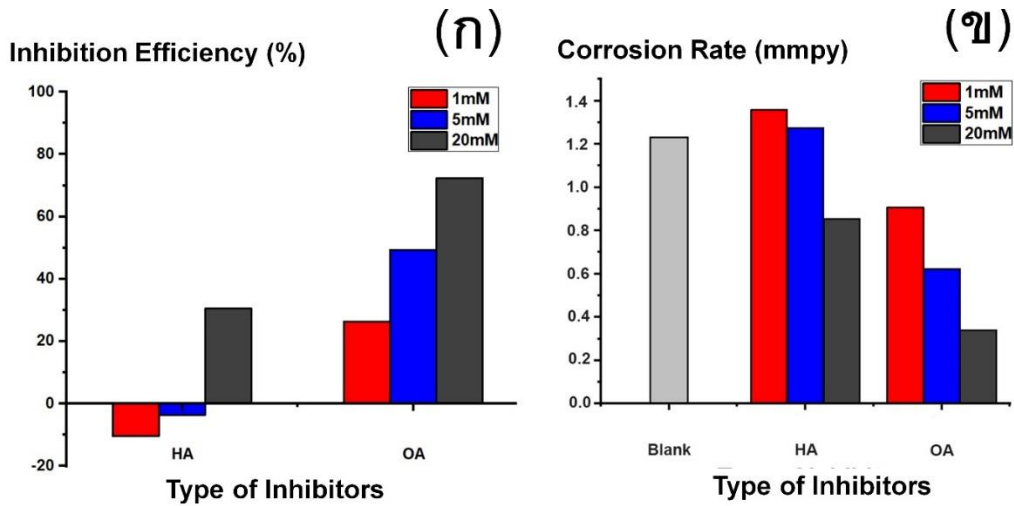
ชนิดของสารยับยั้งการกัดกร่อน	ความเข้มข้นของสารยับยั้งการกัดกร่อน (mM)	ค่าศักย์ไฟฟ้าของการกัดกร่อน (E_{corr} : V)	ค่าศักย์ไฟฟ้าของการกัดกร่อนที่เปลี่ยนแปลงเทียบกับสถานะที่ไม่ใช้สารยับยั้งการกัดกร่อน (blank) (ΔE_{corr} : mV)
Blank (0.1 M H ₂ SO ₄)	-	-0.54268	-
HA (Hexanoic acid)	1	-0.54724	-4.56
	5	-0.54616	-3.48
	20	-0.54260	+0.08
OA (Octanoic acid)	1	-0.54419	-1.51
	5	-0.54973	-7.05
	20	-0.55786	-15.18



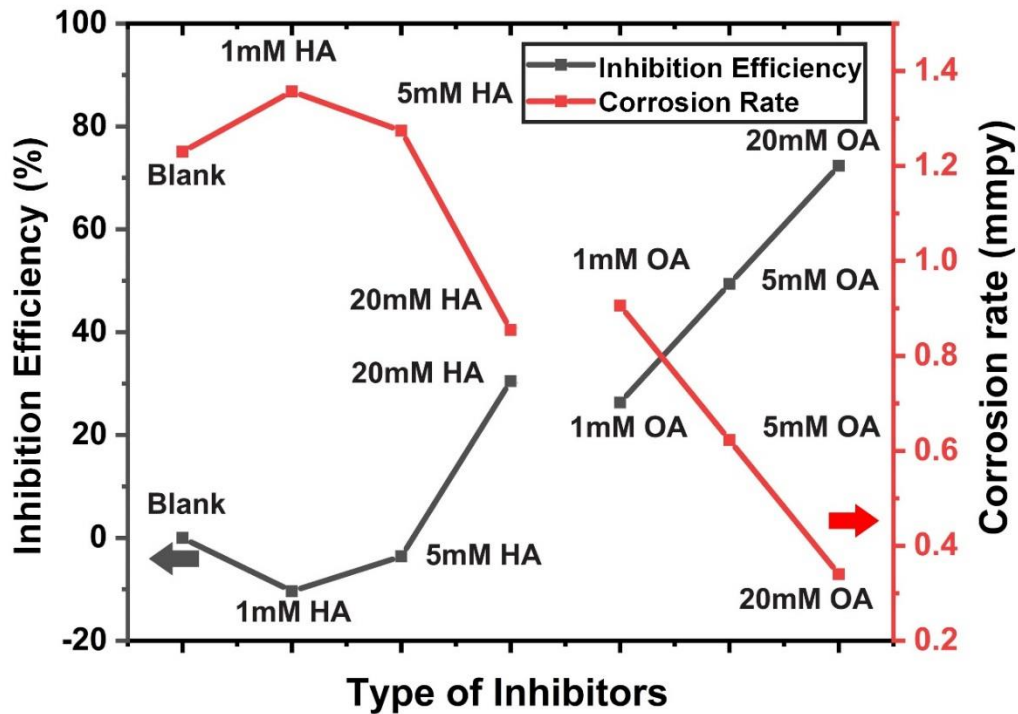
ประสิทธิภาพการยับยั้งการกัดกร่อน แสดงดังตารางที่ 3 และภาพที่ 4 (ก) พบว่าการใช้กรดเฮกซะโนอิกที่ความเข้มข้น 1 และ 5 มิลลิโมลาร์ลดประสิทธิภาพการยับยั้งการกัดกร่อน และส่งผลให้อัตราการกัดกร่อนของเหล็กกล้าในกรดซัลฟิวริก 0.1 โมลาร์เพิ่มขึ้น ดังภาพที่ 4 (ข) เนื่องจากกรดเฮกซะโนอิกมีความเข้มข้นต่ำเกินไป ทำให้สารยับยั้งไม่สามารถเข้าไปดูดซับที่ผิวของเหล็กกล้าในปริมาณที่เพียงพอ นอกจากนี้ยังเร่งให้เกิดการกัดกร่อนมากขึ้น อย่างไรก็ตามเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของกรดเฮกซะโนอิกเป็น 20 มิลลิโมลาร์ ส่งผลให้ประสิทธิภาพการยับยั้งการกัดกร่อนเพิ่มขึ้นเป็น 30.50 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการยับยั้งการกัดกร่อนของเหล็กกล้าคาร์บอน พบว่าการใช้กรดออกตะโนอิกที่ความเข้มข้นต่ำเพียง 1 มิลลิโมลาร์สามารถชะลอการกัดกร่อนได้ใกล้เคียงกับการใช้กรดเฮกซะโนอิกที่ความเข้มข้น 20 มิลลิโมลาร์ และเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของกรดออกตะโนอิก ช่วยให้ประสิทธิภาพการยับยั้งการกัดกร่อนของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำสูงขึ้น โดยกรดออกตะโนอิกความเข้มข้น 20 มิลลิโมลาร์ ให้ประสิทธิภาพการยับยั้งการกัดกร่อนของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำสูงถึง 72.33 เปอร์เซ็นต์ และลดอัตราการกัดกร่อนได้ถึง 88.95 เปอร์เซ็นต์เมื่อเทียบกับสภาวะที่ไม่ใช้สารยับยั้งการกัดกร่อน (blank) ดังภาพที่ 5

ตารางที่ 3 ประสิทธิภาพการยับยั้งการกัดกร่อนและอัตราการกัดกร่อนของสารยับยั้งการกัดกร่อนชนิดต่างๆ ในสารละลายกรดซัลฟิวริก 0.1 โมลาร์

ชนิดของสารยับยั้งการกัดกร่อน	ความเข้มข้นของสารยับยั้งการกัดกร่อน (mM)	ประสิทธิภาพการยับยั้งการกัดกร่อน (%)	อัตราการกัดกร่อน (mm/year)	ผลของการลดอัตราการกัดกร่อน (%)
Blank (0.1 M H ₂ SO ₄)	-	-	1.2297	-
HA (Hexanoic acid)	1	-10.37	1.3571	+12.74
	5	-3.63	1.2742	+4.45
	20	30.50	0.85462	-37.51
OA (Octanoic acid)	1	26.33	0.90592	-32.38
	5	49.37	0.62252	-60.72
	20	72.33	0.34019	-88.95



ภาพที่ 4 ผลการศึกษาสารยับยั้งการกัดกร่อนสำหรับเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ AISI 1021 (ก) ประสิทธิภาพการยับยั้งการกัดกร่อน และ (ข) อัตราการกัดกร่อนของกรดเฮกซะโนอิกและออกตะโนอิกที่ความเข้มข้น 1, 5 และ 20 มิลลิโมลาร์ ในสารละลายกรดซัลฟิวริก 0.1 โมลาร์



ภาพที่ 5 ประสิทธิภาพการยับยั้งการกัดกร่อนและอัตราการกัดกร่อนของสารยับยั้งการกัดกร่อนของกรดเฮกซะโนอิกและออกตะโนอิกที่ความเข้มข้น 0, 1, 5 และ 20 มิลลิโมลาร์ ในสารละลายกรดซัลฟิวริก 0.1 โมลาร์



วิจารณ์ผลการวิจัย

การจำแนกชนิดของสารยับยั้งการกัดกร่อนนั้นสามารถพิจารณาจากค่าศักย์ไฟฟ้าของการกัดกร่อนที่เปลี่ยนแปลง และการลดลงของอัตราการกัดกร่อนได้จากแผนภาพของอีวานส์ ดังภาพที่ 1 การเติมกรดออกตะโนอิกทุกความเข้มข้น ส่งผลให้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าแคโทดิก (cathodic current density) ลดลง และลดการเกิดปฏิกิริยารีดักชัน เป็นผลให้อัตราการกัดกร่อนโดยรวมของระบบลดลง นอกจากนี้รายงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า หมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิลในกรดคาร์บอกซิลิก สามารถดูดซับที่ผิวหน้าของโลหะได้ (Wang *et al.*, 2006; Boisier *et al.*, 2009) จึงช่วยขัดขวางการเกิดปฏิกิริยารีดักชันที่ขั้วแคโทด ซึ่งกล่าวได้ว่ากรดออกตะโนอิกเป็นสารยับยั้งการกัดกร่อนชนิดแคโทดิก

โดยทั่วไปกลไกการกัดกร่อนของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำในสารละลายกรดนั้น เริ่มต้นจากการโลหะละลายออกสู่ออกไซด์ ดังสมการที่ 3-6 (Abdel-Gaber, 2003)



โดยที่ขั้วแคโทดเกิดปฏิกิริยาผลิตไฮโดรเจน (hydrogen evolution) ดังสมการที่ 7-9 (Singh, 2012)

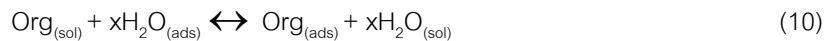


เมื่อ X⁻ คือ ไอออนประจุลบที่เริ่มต้นดูดซับบนผิวโลหะ

ads คือ ไอออนหรือสารประกอบที่ดูดซับบนผิวหน้าโลหะ

เมื่อใช้สารยับยั้งการกัดกร่อนชนิดกรดออกตะโนอิกซึ่งเป็นสารอินทรีย์ จะเกิดการดูดซับของสารยับยั้งการกัดกร่อน และเกิดเป็นฟิล์มปกคลุมบนผิวของโลหะ ซึ่งกลไกการดูดซับของสารยับยั้งการกัดกร่อนสามารถเกิดผ่านการดูดซับทางกายภาพ (physisorption) จากแรงดึงดูดไฟฟ้าสถิต (electrostatic interaction) ระหว่างประจุของผิวหน้าโลหะกับประจุของสารยับยั้งการกัดกร่อน หรืออาจเกิดการดูดซับทางเคมี (chemisorption) ซึ่งเกิดจากอันตรกิริยาของตัวให้อิเล็กตรอนและตัวรับ

อิเล็กตรอน (donor-acceptor interaction) (Brycki *et al.*, 2018) โดยโมเลกุลของสารยับยั้งการกัดกร่อนที่อยู่ในสารละลายจะเคลื่อนที่เข้าไปดูดซับแทนที่โมเลกุลของน้ำบนผิวโลหะ ดังสมการที่ 10 (Malik, 2011)



เมื่อ $\text{Org}_{(\text{sol})}$ คือ โมเลกุลของสารยับยั้งการกัดกร่อนที่ละลายในสารละลาย
 $\text{Org}_{(\text{ads})}$ คือ โมเลกุลของสารยับยั้งการกัดกร่อนที่ดูดซับบนผิวโลหะ
 $\text{H}_2\text{O}_{(\text{sol})}$ คือ โมเลกุลของน้ำที่ละลายในสารละลาย
 $\text{H}_2\text{O}_{(\text{ads})}$ คือ โมเลกุลของน้ำที่ดูดซับบนผิวโลหะ
x คือ จำนวนของโมเลกุลของน้ำที่ดูดซับบนผิวหน้าโลหะและถูกแทนที่ด้วยโมเลกุลของสารยับยั้งการกัดกร่อน

ในกรณีของการใช้กรดเฮกซะโนอิกที่ความเข้มข้นต่ำ (1 และ 0.5 มิลลิโมลาร์) มีแนวโน้มทำให้ศักย์ไฟฟ้าของการกัดกร่อนลดลงเช่นเดียวกัน แต่ไม่สามารถกล่าวได้ว่ากรดเฮกซะโนอิกเป็นสารยับยั้งการกัดกร่อนชนิดแคโทดิก เนื่องจากไม่ส่งผลให้อัตราการกัดกร่อนของเหล็กกล้าในระบบลดลง แต่มีแนวโน้มให้อัตราการกัดกร่อนเหล็กกล้าสูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับสถานะที่ไม่ใช้สารยับยั้งการกัดกร่อน (blank) อาจเนื่องมาจากการใช้สารยับยั้งที่มีความเข้มข้นต่ำเกินไป จึงไม่สามารถเกิดการดูดซับและเกิดฟิล์มปกคลุมได้ทั่วทั้งผิวหน้าของโลหะ และส่งผลให้เกิดการกัดกร่อนในบริเวณจำเพาะ (localized corrosion) ขึ้นที่ผิวหน้าของโลหะซึ่งเป็นตัวช่วยเร่งอัตราการกัดกร่อนได้ (Brycki *et al.*, 2018)

นอกจากนี้เมื่อพิจารณาการใช้สารยับยั้งการกัดกร่อนชนิดกรดเฮกซะโนอิกที่ความเข้มข้น 20 มิลลิโมลาร์ พบว่าสามารถลดอัตราการกัดกร่อนของเหล็กกล้าลงได้ เนื่องมาจากความเข้มข้นของกรดเฮกซะโนอิกสูงขึ้น จึงอาจทำให้เกิดฟิล์มปกคลุมได้อย่างทั่วถึง แต่อย่างไรก็ตามเกิดเปลี่ยนแปลงของค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนของกรดเฮกซะโนอิกไปทางด้านบวกเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ดังตารางที่ 2 จึงไม่อาจจำแนกได้อย่างชัดเจนว่าเป็นสารยับยั้งการกัดกร่อนชนิดแอโนดิก แต่อาจจัดให้กรดเฮกซะโนอิกอยู่ในกลุ่มของสารยับยั้งชนิดผสม (mixed inhibitor) ที่สามารถลดความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าทั้งปฏิกิริยาออกซิเดชันและรีดักชัน โดยอาศัยการดูดซับของสารยับยั้งบนผิวหน้าของโลหะเกิดผ่านกลไกการดูดซับทางกายภาพและ/หรือทางเคมี (physisorption/chemisorption) และมีการจัดเรียงตัวของโมเลกุลของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนในลักษณะที่หันด้านที่มีขั้ว (polar head) เข้าสู่ผิวหน้าโลหะและหันด้านที่ไม่มีขั้ว (non-polar tail) ในทิศตรงข้ามโดยจัดเรียงตัวตั้งฉากกับผิวหน้าของโลหะทำให้เกิดเป็นฟิล์มที่มีสมบัติไม่ชอบน้ำ (hydrophobic film) ซึ่งเป็นตัวช่วยปกป้องผิวหน้าของโลหะกับสภาวะแวดล้อมทำให้อัตราการกัดกร่อนลดลง (Tang, 2019)

โดยประสิทธิภาพการยับยั้งการกัดกร่อนและการลดอัตราการกัดกร่อน ขึ้นอยู่กับความยาวสายโซ่ของกรดไขมัน และความเข้มข้นของสารยับยั้งการกัดกร่อน จากรายงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าความยาวของสายโซ่คาร์บอนของกรดคาร์บอกซิลิกมีผลต่อการเพิ่มประสิทธิภาพการยับยั้งการกัดกร่อนได้ โดยกรดดังกล่าวประกอบด้วยไอออนประจุลบของคาร์บอกซิเลท (carboxylate anion: COO^-) เป็นหมู่ฟังก์ชันที่สามารถดูดซับและเกิดเป็นฟิล์มที่ผิวหน้าของโลหะ และมีสมบัติที่ไม่ชอบน้ำ



(hydrophobic) (Žerjav & Milošev, 2014) ทำให้สามารถลดอัตราการกัดกร่อนลงเมื่อใช้ในความเข้มข้นที่เหมาะสม ดังนั้นกรดออกตะโนอิกเป็นกรดคาร์บอกซิลิกที่มีสายโซ่ปานกลาง ประกอบด้วยคาร์บอน 8 ตัว จึงให้ประสิทธิภาพการยับยั้งการกัดกร่อนที่ดี และลดอัตราการกัดกร่อนได้สูง เมื่อเทียบกับกรดเฮกซะโนอิกซึ่งเป็นกรดสายโซ่สั้นที่มีคาร์บอน 6 ตัว เนื่องจากขนาดของสายโซ่และน้ำหนักโมเลกุลของสารยับยั้งการกัดกร่อนมีผลต่อประสิทธิภาพของการกัดกร่อน (Malik, 2011; Žerjav & Milošev, 2014; Lin & Zuo, 2019) ดังนั้นกรดออกตะโนอิกที่มีขนาดสายโซ่ยาวกว่าจึงสามารถชะลอการกัดกร่อนได้ดีกว่ากรดเฮกซะโนอิก

สรุปผลการวิจัย

ผลการศึกษาพบว่าสามารถใช้กรดเฮกซะโนอิก และกรดออกตะโนอิกเป็นสารยับยั้งการกัดกร่อนสำหรับเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ ในสารละลายกรดซัลฟิวริกได้ โดยกรดออกตะโนอิกเป็นสารยับยั้งการกัดกร่อนชนิดแคโทดิกที่สามารถใช้ลดปฏิกิริยาแคโทดิกเป็นหลัก ซึ่งเป็นผลให้อัตราการกัดกร่อนของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำลดลงแม้ใช้ในความเข้มข้นต่ำ ในขณะที่กรดเฮกซะโนอิกเป็นสารยับยั้งการกัดกร่อนแบบผสมที่ควบคุมทั้งปฏิกิริยาแอโนดิกและแคโทดิก โดยให้ผลในการชะลอการกัดกร่อนได้ที่มีความเข้มข้น 20 มิลลิโมลาร์ แต่ให้ประสิทธิภาพในชะลอการกัดกร่อนต่ำกว่ากรดออกตะโนอิก อย่างไรก็ตามการเพิ่มความเข้มข้นของกรดออกตะโนอิกส่งผลให้ประสิทธิภาพในการป้องกันการกัดกร่อนสูงขึ้น และสามารถลดการกัดกร่อนลงได้ถึง 88.95 เปอร์เซ็นต์ มีแนวโน้มที่สามารถไปประยุกต์ใช้ในกระบวนการจุ่มกรดเพื่อเตรียมผิวชิ้นงานสำหรับเคลือบผิวต่อไป นอกจากนี้กรดออกตะโนอิกพบในน้ำมันของสัตว์ น้ำมันมะพร้าว และน้ำมันเมล็ดปาล์ม ซึ่งสามารถนำสารจากธรรมชาติเหล่านี้มาสกัดเพื่อทดสอบประสิทธิภาพของการทำเป็นสารยับยั้งการกัดกร่อนจากธรรมชาติได้ในอนาคต

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยรามคำแหง และ Prof.Dr.Kurt Kalcher กลุ่มวิจัย Electroanalysis and Sensorics, Institute of Chemistry มหาวิทยาลัย Karl-Franzens University เมืองกราซ ประเทศออสเตรีย สำหรับการสนับสนุนสารเคมีและเครื่องมือในการทำวิจัย นอกจากนี้ขอขอบคุณ Assoc.Prof.Dr.Avni Berisha สำหรับการให้คำแนะนำในการทำวิจัย

เอกสารอ้างอิง

Abdallah, M. (2004). Guar gum as corrosion inhibitor for carbon steel in sulfuric acid solutions. *Portugaliae Electrochimica Acta*, 22(2), 161-175.

Abdel-Gaber, A.M., Abd-El-Nabey, B. A., Sidahmed, I. M., El-Zayady, A. M., & Saadawy, M. (2006). Inhibitive action of some plant extracts on the corrosion of steel in acidic media. *Corrosion Science*, 48(9), 2765-2779.



- Abdel-Gaber, A.M., Khalil, N.N., & El-Fetouh, A.A. (2003). The dissolution mechanism of steel in inorganic acids. *Anti-Corrosion Methods and Materials*, 50(6), 442-447.
- Badea, G.L., & Radu, G.L. (2018). Introductory Chapter, *Carboxylic Acids - Key Role in Life Sciences*. (pp. 1-5). London: IntechOpen.
- Beermann, C., Jelinek, J., Reinecker, T., Hauenschild, A., Boehm, G., & Klor, H.U. (2003). Short-term effects of dietary medium-chain fatty acids and n-3 long-chain polyunsaturated fatty acids on the fat metabolism of healthy volunteers. *Lipids in Health and Disease*, 2, 1-10.
- Boisier, G., Lamure, A., Pebere, N., Portail, N., & Villatte, M. (2009). Corrosion protection of AA2024 sealed anodic layers using the hydrophobic properties of carboxylic acids, *Surface, and Coating Technology*, 203(22), 3420-3426.
- Bothi Raja, P., & Sethuraman, M.G. (2008). Inhibitive effect of black pepper extract on the sulphuric acid corrosion of mild steel. *Materials Letters*, 62(17), 2977-2979.
- Brycki, B., Kowalczyk, I., Szulc, A., Kaczerewska, O., & Pakiet, M. (2018). Organic corrosion inhibitors, *Corrosion inhibitors, Principles and Recent Applications*. Mahmood Aliofkhaezrai: IntechOpen.
- Govindasamy, R., & Ayappan, S. (2015). Study of corrosion inhibitor properties of novel semicarbazones on mild steel in acidic solutions. *Journal of the Chilean Chemical Society*, 60(1), 2786-2798.
- Hughes, A.E., Mol, J.M.C., Zheludkevich, M.L., & Buchheit, R.G. (2016). *Active Protective Coatings*. Dordrecht: Springer.
- Lin, B., & Zuo, Y. (2019). Corrosion inhibition of carboxylate inhibitors with different alkylene chain lengths on carbon steel in an alkaline solution. *RSC Advances*, 9(13), 7065-7077.
- Malik, M.A., Hashim, M.A., Nabi, F., AL-Tabaiti, S.A., & Khan, Z. (2011). Anti-corrosion ability of surfactants: A Review. *International Journal of Electrochemical Science*, 6, 1927-1948.



- Noor, E.A. (2005). The inhibition of mild steel corrosion in phosphoric acid solutions by some N-heterocyclic compounds in the salt form, *Corrosion Science*, 47, 33-35.
- Sekunowo, O.I., Adeosun, S.O., & Lawal G.I. (2013). Potentiostatic polarisation responses of mild steel in seawater and acid environments, *International Journal of Scientific & Technology Research*, 2(10), 139-145.
- Singh, A.K. (2012). Inhibition of mild steel corrosion in hydrochloric acid solution by 3-(4-((Z)-indolin-3-ylideneamino) phenylimino) indolin-2-one, *Industrial & Engineering Chemistry Research* 51(8), 3215-3223.
- Tang, Z. (2019). A review of corrosion inhibitors for rust preventative fluids, *Current Opinion in Solid State and Materials Science*, 23(4), 100759.
- Wang, S., Feng L., & Jiang, L. (2006). One-step solution-immersion process for fabrication of stable bionic superhydrophobic surfaces, *Advanced Materials*, 18(6), 767-770.
- Young G.P., Hu, Y., & Le, L.R.K. (2005). Nyskohus L dietary fibre and colorectal cancer: a model for environment-gene interactions, *Molecular Nutrition & Food Research*, 49, 571-584.
- Zaferani, S., Sharifi, M., Zaarei, D. & Shishesaz, M. (2013). Application of eco-friendly products as corrosion inhibitors for metals in acid pickling processes - A review. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 1. 652-657.
- Zarrouk, A., Zarrok H., Salghi, R., Hammouti, B., Bentiss, F., Touri, R., & Bouachrine, M. (2013). Evaluation of N-containing organic compound as corrosion inhibitor for carbon steel in phosphoric acid, *Journal Materials and Environmental Science*, 4(2), 177-192.
- Žerjav, G., & Milošev, I. (2014). Carboxylic acids as corrosion inhibitors for Cu, Zn and brasses in simulated urban rain, *International Journal of Electrochemical Science*, 9, 2696-2715.