

บทความวิจัย**การศึกษาพฤติกรรมการกัดกร่อนของโลหะแมกนีเซียม ไทเทเนียม
และเหล็กกล้าไร้สนิมโดยเทคนิคเคมีไฟฟ้า****อรรถทัย ใจบุญ^{1*} วุฒิชัย พรหมวงศ์² วิภาดา สุวรรณไตรย์³ และวรางคณา วังคะฮาด⁴**¹ภาคฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี²แผนกวิชาสามัญสัมพันธ์ วิทยาลัยเทคนิคเดชอุดม³หมวดวิทยาศาสตร์ โรงเรียนนารีวิทยา สัตหีบ⁴หมวดวิทยาศาสตร์ โรงเรียนอัสสัมชัญอุบลราชธานี

*Email: oruethai.j@ubu.ac.th

รับบทความ: 9 ธันวาคม 2562 บทความแก้ไข: 28 ธันวาคม 2562 ยอมรับตีพิมพ์: 29 ธันวาคม 2562

บทคัดย่อ

ปัจจุบันแมกนีเซียมอัลลอย ไทเทเนียมอัลลอย และเหล็กกล้าไร้สนิมเป็นวัสดุที่ถูกนำมาใช้กันอย่างแพร่หลาย โดยเฉพาะในอุตสาหกรรมยานยนต์และอากาศยาน เนื่องจากมีน้ำหนักเบา และมีความแข็งแรงต่อน้ำหนักสูง ทำให้ประหยัดเชื้อเพลิง ลดปัญหามลพิษจากการปล่อยไอเสียของเครื่องยนต์ แต่ยังสามารถรักษาความปลอดภัยของผู้โดยสารได้ แต่ปัญหาที่สำคัญในการใช้งานวัสดุประเภทโลหะคือการกัดกร่อน ในงานวิจัยนี้จึงศึกษาพฤติกรรมการกัดกร่อนของโลหะแมกนีเซียมบริสุทธิ์ ไทเทเนียมบริสุทธิ์ และเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 304 โดยใช้เทคนิคเคมีไฟฟ้า 2 วิธี ได้แก่ การวัดการเปลี่ยนแปลงศักย์วงจรเปิดเทียบกับเวลา และการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับศักย์ไฟฟ้า โดยจะทำการศึกษาการกัดกร่อนในน้ำปราศจากไอออน และในสารละลายที่มีคลอไรด์ ไอออนผสมอยู่ ผลการทดลองจากทั้ง 2 วิธีให้ผลไปในทางเดียวกันว่าวัสดุทั้ง 3 ชนิดมีพฤติกรรมการกัดกร่อนที่แตกต่างกันดังต่อไปนี้ โดยแมกนีเซียมจะพบการกัดกร่อนแบบสม่ำเสมอ และการกัดกร่อนแบบสม่ำเสมอจะรุนแรงขึ้นเมื่อในสารละลายมีคลอไรด์ไอออนผสมอยู่ สำหรับไทเทเนียมพบว่าในน้ำปราศจากไอออนมีการสร้างฟิล์มเฉื่อยเพื่อป้องกันผิวจากการกัดกร่อน และในสารละลายที่มีคลอไรด์ไอออนผสมอยู่พบการกัดกร่อนแบบ metastable pitting ที่ไม่รุนแรง ส่วนเหล็กกล้าไร้สนิมพบการกัดกร่อนแบบ metastable pitting อย่างรุนแรงเมื่ออยู่ในสารละลายที่มีคลอไรด์ไอออนผสมอยู่ นอกจากนี้เมื่อป้อนศักย์ไฟฟ้าเพียงเล็กน้อยให้กับเหล็กกล้าไร้สนิมการกัดกร่อนสามารถพัฒนาไปเป็นการกัดกร่อนแบบ stable pitting corrosion ได้ ซึ่งเทคนิคไฟฟ้าเคมีทั้ง 2 วิธีให้ผลไปในทางเดียวกัน แต่การวัดการเปลี่ยนแปลงศักย์วงจรเปิดเทียบกับเวลาเป็นเทคนิคที่ไม่ต้องให้ศักย์ไฟฟ้าหรือกระแสไฟฟ้าภายนอกเพื่อรบกวนระบบ เทคนิคนี้จึงจัดเป็นการทดสอบโดยไม่ทำลายที่น่าจะสามารถพัฒนาไปใช้ในการตรวจสอบสถานะการกัดกร่อนของโลหะแบบทันทีได้ โดยเฉพาะกับโลหะที่เกิดการกัดกร่อนแบบรูเข็ม

คำสำคัญ: โลหะ วัสดุน้ำหนักเบา การกัดกร่อน โพลาริเซชัน ศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิด**อ้างอิงบทความนี้**

อรรถทัย ใจบุญ วุฒิชัย พรหมวงศ์ วิภาดา สุวรรณไตรย์ และวรางคณา วังคะฮาด. (2562). การศึกษาพฤติกรรมการกัดกร่อนของโลหะแมกนีเซียม ไทเทเนียมและเหล็กกล้าไร้สนิมโดยเทคนิคเคมีไฟฟ้า. วารสารวิทยาศาสตร์และวิทยาศาสตร์ศึกษา, 2(2), 116-126.

Research Article

Study of corrosion behavior of magnesium, titanium and stainless steel by electrochemical techniques

Oruethai Jaiboon^{1,*}, Wuttichai Promwong², Wangkaha Wankahad³ and Wipada Suwannatrai⁴

¹Physics Department, Faculty of Science, Ubonratchathani University

²General Subject Department, Det-udom Technical College

³Science Department, Maryvit Sattahip School

⁴Science Department, Assumption College Ubonratchathani

*Email: oruethai.j@ubu.ac.th

Received <9 December 2019>; Revised <28 December 2019>; Accepted <29 December 2019>

Abstract

Nowadays, magnesium alloys, titanium alloys and stainless steel are extensively used in automotive and aerospace industries because they are light in weight and exhibit high strength-to-weight ratio. Due to their excellent properties, fuel consumption and exhaust emission of vehicle can be reduced while its safety capability can be conserved. However, a major problem in the use of metals in many industries is corrosion. Therefore, this research is aimed at investigating corrosion behavior of pure magnesium, pure titanium and stainless steel AISI 304 in deionized water and solution containing aggressive Cl⁻ ions by using 2 electrochemical techniques: measurement of open circuit potential with time and polarization measurement. It was found that both techniques provided the same results that all 3 materials exhibit different corrosion behavior. Magnesium underwent uniform corrosion in deionized water and this uniform corrosion was escalated into more serious in solution containing chloride ions. For titanium, passive oxide film was formed on its surface when immersion in deionized water but in solution contain chloride ions, its passive surface was attacked by few metastable pitting corrosions. For Stainless steel AISI 304, serious metastable pitting corrosion was observed when it was immersed in solution containing chloride ions and the stable pitting corrosion of stainless steel as well can be easily activated by applying low voltage. Both electrochemical techniques lead to the same results, but measurement of open circuit potential with time requires no external perturbation so it is considered as a nondestructive technique and can be applied to a real time corrosion monitoring system, especially for pitting corrosion.

Keywords: Metal, lightweight material, Corrosion, Polarization curve, Open circuit potential

Cite this article:

Jaiboon, O., Promwong, W., Wangkahad, W. and Suwannatrai W. (2019). Study of corrosion behavior of magnesium, titanium and stainless steel by electrochemical techniques (in Thai). **Journal of Science and Science Education**, 2(2), 116-126.

บทนำ

ปัจจุบันการวิจัยและพัฒนาวัสดุให้มีคุณสมบัติเฉพาะตัวได้รับความนิยมเป็นอย่างมาก เนื่องจากสามารถนำไปใช้งานในอุตสาหกรรมต่าง ๆ ได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น สำหรับอุตสาหกรรมการบินยานยนต์และอากาศยาน วัสดุที่จะนำมาใช้ควรมีน้ำหนักเบา เพื่อลดการใช้พลังงานเชื้อเพลิงในการขับเคลื่อน และยังช่วยลดการปล่อยควันเสียจากเครื่องยนต์อีกด้วย นอกจากนี้ต้องมีน้ำหนักเบาแล้ววัสดุเหล่านี้จะต้องมีความแข็งแรงสูงด้วย เพื่อช่วยเพิ่มความปลอดภัยให้ผู้โดยสาร ดังนั้นวัสดุที่จะนำมาใช้ในอุตสาหกรรมการบินยานยนต์และอากาศยานจะต้องมีความแข็งแรงต่อน้ำหนัก (strength-to-weight ratio) สูงนั่นเอง ตัวอย่างวัสดุที่นำมาใช้งานในอุตสาหกรรมเหล่านี้ได้แก่ ไทเทเนียมอัลลอย แมกนีเซียมอัลลอย เหล็กกล้าไร้สนิม เป็นต้น (Mallick, 2010) แต่ปัญหาสำคัญและสูญเสียค่าใช้จ่ายในการนำชิ้นส่วนที่ทำจากโลหะหรือโลหะผสมไปใช้งานจริงคือ การกัดกร่อน (corrosion) เพื่อลดการเสียหายของการกัดกร่อนจึงจำเป็นต้องศึกษาการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นกับโลหะต่าง ๆ และนำข้อมูลที่ได้ไปพัฒนาวิธีการตรวจสอบการกัดกร่อนที่เกิดจากชิ้นงานที่ทำจากวัสดุนั้น ๆ ต่อไป การตรวจสอบการกัดกร่อนสามารถทำได้หลายวิธี ยกตัวอย่างเช่น การวัดน้ำหนักที่หายไป (weight loss measurement) การวัดการเปลี่ยนแปลงศักย์วงจรเปิดเทียบกับเวลา (measurement of open circuit potential with time) และการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้ากับกระแสไฟฟ้า (polarization measurement) การศึกษาพฤติกรรมความต้านทานการกัดกร่อนของโลหะโดยการให้ศักย์ไฟฟ้ากระแสสลับแก่เซลล์ไฟฟ้าเคมี (electrochemical impedance) และ การวัดสัญญาณรบกวนทางเคมีไฟฟ้า (electrochemical noise measurement) เป็นต้น (Vargel, 2004) ซึ่งวิธีแต่ละวิธีนอกจากจะมีกระบวนการวัดที่แตกต่างกันแล้ว ชนิดข้อมูลที่ได้ยังแตกต่างกันอีกด้วย ยกตัวอย่างเช่น การวัดการเปลี่ยนแปลงศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิดเทียบกับเวลา ข้อมูลที่ได้จากวิธีการนี้จะบอกถึงชนิดของการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นกับโลหะในธรรมชาติโดยไม่ต้องป้อนศักย์ไฟฟ้าหรือกระแสไฟฟ้าไปรบกวนระบบ ส่วนการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและศักย์ไฟฟ้า โดยการให้ศักย์ไฟฟ้าค่าต่าง ๆ กับโลหะที่ศึกษาแล้ววัดกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้น เมื่อนำข้อมูลที่ได้มาเขียนเส้นโค้งโพลาริเซชัน เส้นโค้งนี้นอกจากสามารถบอกชนิดการกัดกร่อนที่จะเกิดขึ้นกับโลหะได้แล้ว ยังสามารถบอกค่ากระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน (corrosion current) ซึ่งสัมพันธ์กับอัตราการกัดกร่อน (corrosion rate) อีกด้วย (Bard, Stratmann and Frankel, 2003)

งานวิจัยนี้จึงเริ่มจากการศึกษารูปแบบการกัดกร่อนของโลหะแมกนีเซียมบริสุทธิ์ และโลหะไทเทเนียมบริสุทธิ์ เพื่อนำข้อมูลที่ได้ไปใช้กับการศึกษารูปแบบการกัดกร่อนของแมกนีเซียมอัลลอยด์ และไทเทเนียมอัลลอยด์อื่น ๆ ต่อไป และเหล็กกล้าไร้สนิมที่เลือกในงานวิจัยนี้คือเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 304 เนื่องจากหาซื้อได้ง่าย ซึ่งในงานวิจัยนี้จะศึกษาการกัดกร่อนในสารละลายที่มีคลอไรด์ไอออนผสมอยู่ เนื่องจากคลอไรด์ไอออนเป็นไอออนรุนแรงที่กระตุ้นการกัดกร่อนแบบรูเข็ม (pitting corrosion) ที่เป็นการกัดกร่อนเฉพาะที่ (localized corrosion) แบบหนึ่ง การกัดกร่อนแบบนี้เป็นการสร้างรูเข็มเล็ก ๆ ลึกลงไปในเนื้อของโลหะ จึงตรวจสอบได้ยาก และกว่าจะตรวจพบก็ส่งผลเสียหายอย่างรุนแรงแก่ชิ้นงาน ต่างจากการกัดกร่อนทั่วผิวหน้า (uniform corrosion) ซึ่งเป็นการสูญเสียพื้นผิวของโลหะไปเรื่อย ๆ เป็นบริเวณกว้างหรือทั่วผิวหน้า ทำให้โลหะบางลงเรื่อย ๆ ซึ่งการกัดกร่อนแบบนี้ไม่ค่อยก่อปัญหามากนัก เนื่องจากตรวจสอบง่ายโดยวิธีการหาน้ำหนักที่หายไป เป็นต้น (Vargel, 2004) นอกจากนี้ยังมีการค้นพบว่าการวัดศักย์ไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าของระบบที่มีการกัดกร่อน (corroding system) โดยไม่ต้องให้ศักย์ไฟฟ้าหรือกระแสไฟฟ้าภายนอกกับโลหะที่สนใจ สามารถระบุการกัดกร่อนในธรรมชาติของโลหะนั้น ๆ ได้ ซึ่งสัญญาณที่ได้จากการวัดศักย์ไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่เกิดจากการกัดกร่อนทั่วทั้งผิวหน้า และการกัดกร่อนแบบรูเข็ม มีลักษณะแตกต่างกัน ทำให้เทคนิคนี้สามารถระบุชนิดของการกัดกร่อน และ อัตราการกัดกร่อนชั่วขณะ (instant corrosion rate) ได้ (Caines et al., 2017 ;Xia et al., 2017) ทำให้วิธีการนี้มีศักยภาพที่จะพัฒนาไปเป็นเทคนิคในการตรวจสอบสถานะการกัดกร่อนของโลหะแบบทันทีได้ โดยเฉพาะกับโลหะที่เกิดการกัดกร่อนแบบรูเข็มที่ยากต่อการตรวจสอบ เช่น การกัดกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิม การกัดกร่อนภายใต้ฉนวนของท่อขนส่งน้ำมันดิบ (Caines et al., 2017) และการกัดกร่อนแบบกัลวานิกของอะลูมิเนียมอัลลอยด์ที่สัมผัสกับคอมโพสิตเสริมแรงเส้นใยคาร์บอน

(Wang and Li , 2018) เป็นต้น แต่อย่างไรก็ตามเทคนิคนี้ยังต้องได้รับการพัฒนาเพื่อให้ง่ายต่อการตรวจสอบการกัดกร่อนของโลหะเหล่านี้ในการใช้งานจริงที่แตกต่างกันในอุตสาหกรรมต่าง ๆ ต่อไป

วัตถุประสงค์การวิจัย

งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นที่จะศึกษารูปแบบการกัดกร่อนของโลหะแมกนีเซียมบริสุทธิ์ ไทเทเนียมบริสุทธิ์ และเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 304 โดยใช้วิธีทางเคมีไฟฟ้า 2 วิธี คือ การวัดการเปลี่ยนแปลงศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิดเทียบกับเวลา และการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและศักย์ไฟฟ้า เพื่อหารูปแบบการกัดกร่อนของโลหะแต่ละชนิดในสารละลายที่มีคลอไรด์ไอออนผสมอยู่เปรียบเทียบกับ การกัดกร่อนที่เกิดขึ้นในน้ำปราศจากไอออน และเปรียบเทียบข้อมูลที่ได้จากวิธีทางเคมีไฟฟ้า 2 วิธี เพื่อศึกษาว่าวิธีการวัดการเปลี่ยนแปลงศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิดเทียบกับเวลาสามารถระบุรูปแบบการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นกับโลหะที่ศึกษาได้เช่นเดียวกับวิธีการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและศักย์ไฟฟ้าหรือไม่

วิธีดำเนินการวิจัย

(1) การวัดการเปลี่ยนแปลงศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิดเทียบกับเวลา

การวัดการเปลี่ยนแปลงศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิดเทียบกับเวลาเป็นการวัดค่าศักย์ไฟฟ้าของโลหะที่สนใจเทียบกับอิเล็กโทรดอ้างอิง โดยไม่มีการป้อนศักย์ไฟฟ้าหรือกระแสไฟฟ้าภายนอกให้แก่โลหะ ซึ่งโลหะที่สนใจได้แก่ โลหะแมกนีเซียมบริสุทธิ์ 99.95% โลหะไทเทเนียมบริสุทธิ์ 99.99% และเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 304 โดยวิธีการทดลองเริ่มจากทำความสะอาดโลหะที่ต้องการวัดด้วยอะซิโตน (acetone) หลังจากนั้นนำโลหะที่ต้องการจะศึกษามาต่อเข้ากับเครื่องโพเทนชิโอสแตท (potentiostat) รุ่น PGSTAT302N ของบริษัท Metrohm โดยโลหะที่ต้องการวัดจะทำหน้าที่เป็นอิเล็กโทรดตัวอย่าง (working electrode) ส่วนอิเล็กโทรด Ag/AgCl จะทำหน้าที่เป็นอิเล็กโทรดอ้างอิง (reference electrode) จากนั้นจุ่มอิเล็กโทรดทั้งสองในน้ำปราศจากไอออนหรือสารละลายโซเดียมคลอไรด์ เครื่องโพเทนชิโอสแตทจะทำการวัดศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิดของโลหะในสารละลายเป็นเวลา 3 ชั่วโมง ค่าที่วัดได้จะนำมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้ากับเวลา จากกราฟสามารถแปลงผลมาเป็นข้อมูลเกี่ยวกับปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นกับโลหะเมื่ออยู่ในสารละลาย ซึ่งจะช่วยให้ทราบรูปแบบการกัดกร่อนที่จะเกิดขึ้นจริงกับโลหะในธรรมชาตินั้น ๆ ได้

(2) การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและศักย์ไฟฟ้า

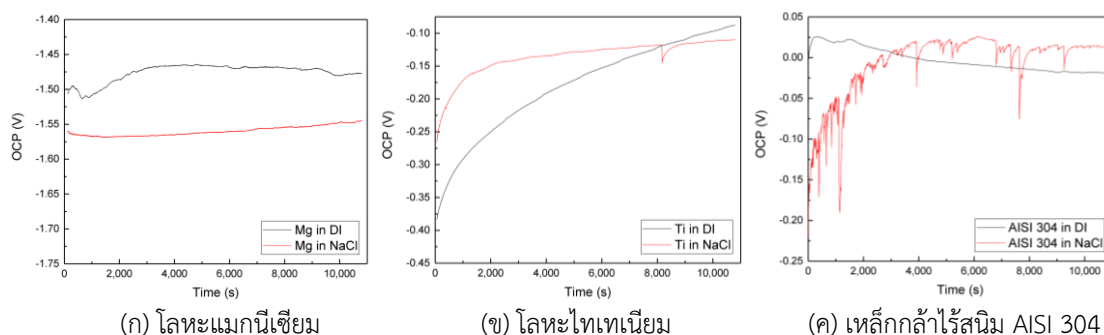
การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าเป็นการวัดกระแสไฟฟ้าขณะกระตุ้นให้เกิดการกัดกร่อนโดยการป้อนศักย์ไฟฟ้าค่าบวกให้กับโลหะที่สนใจ โดยวิธีการทดลองเริ่มจากทำความสะอาดโลหะที่ต้องการวัดด้วยอะซิโตน (acetone) หลังจากนั้นนำโลหะที่ต้องการจะศึกษามาต่อเข้ากับเครื่องโพเทนชิโอสแตท โดยโลหะที่ต้องการวัดจะทำหน้าที่เป็นอิเล็กโทรดตัวอย่าง (working electrode) ส่วนอิเล็กโทรด Ag/AgCl จะทำหน้าที่เป็นอิเล็กโทรดอ้างอิง (reference electrode) และแท่งแพลทินัม (Platinum) จะทำหน้าที่เป็นอิเล็กโทรดกระแส (counter electrode) จากนั้นจุ่มอิเล็กโทรดทั้งสามในน้ำปราศจากไอออนหรือสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ซึ่งเครื่องโพเทนชิโอสแตทจะเริ่มต้นด้วยการวัดค่าศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิด (OCP) ของโลหะที่สนใจเมื่อเทียบกับอิเล็กโทรดอ้างอิงเป็นเวลา 30 นาที หลังจากนั้นเครื่องโพเทนชิโอสแตทจะป้อนความต่างศักย์ไฟฟ้าค่าต่าง ๆ ให้กับอิเล็กโทรดตัวอย่าง โดยเริ่มจากค่าศักย์ไฟฟ้าที่ต่ำกว่าค่า OCP ประมาณ 0.2 V และเพิ่มค่าศักย์ไฟฟ้าขึ้นเรื่อย ๆ ที่ละ 0.001 V/s จนถึงค่าศักย์ไฟฟ้าที่สูงกว่า OCP ประมาณ 1.0 V หรือ 2.0 V แล้วทำการวัดกระแสไฟฟ้าที่ไหลระหว่างอิเล็กโทรดตัวอย่างกับอิเล็กโทรดกระแส (counter electrode) สำหรับค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าต่าง ๆ ที่ป้อนให้กับอิเล็กโทรดตัวอย่าง เมื่อนำข้อมูลที่ได้มาสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าทั้งสองจะได้กราฟที่เรียกว่า “เส้นโค้งโพลาไรเซชัน (polarization curve)” จากกราฟเส้นโค้งโพลาไรเซชันนี้จะได้ค่าสำคัญต่าง ๆ เช่น ศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน (corrosion potential: E_{corr}) กระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน (corrosion current) และศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนแบบรูเข็ม (pitting corrosion potential) นอกจากค่าต่าง ๆ ที่กล่าวมาข้างต้น ลักษณะของเส้นโค้งโพลาไรเซชันยังบอกถึง

ปฏิกิริยาต่าง ๆ ที่สามารถเกิดขึ้นบนพื้นผิวของโลหะในสารละลายนั้น ๆ ได้อีกด้วย ซึ่งในงานวิจัยนี้จะเน้นศึกษา ลักษณะของเส้นโค้งโพลาริเซชันเพื่อบอกถึงรูปแบบการกัดกร่อนที่จะเกิดขึ้นได้กับโลหะเท่านั้น

ผลการวิจัย

(1) การวัดการเปลี่ยนแปลงศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิดเทียบกับเวลา

การวัดการเปลี่ยนแปลงศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิดเทียบกับเวลาของโลหะต่าง ๆ กระทำทั้งในน้ำปราศจากไอออน (DI) และในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ เพื่อเปรียบเทียบว่าเมื่อโลหะนั้น ๆ เมื่ออยู่ในสารละลายที่มีคลอไรด์ไอออน ผสมอยู่ ไอออนรุนแรงนี้จะกระตุ้นให้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปแบบการกัดกร่อนของโลหะได้หรือไม่ ดังที่แสดงใน ภาพที่ 1 จะเห็นว่า โลหะแต่ละชนิดเมื่ออยู่ในสารละลายที่มีคลอไรด์ไอออนผสมอยู่ กราฟการเปลี่ยนแปลงศักย์วงจร เปิดเทียบกับเวลาจะแตกต่างจากในน้ำปราศจากไอออน



ภาพที่ 1 การเปลี่ยนแปลงศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิด (OCP) เทียบกับเวลาของโลหะต่างๆ
ในน้ำปราศจากไอออน (DI) และสารละลายโซเดียมคลอไรด์ (NaCl)

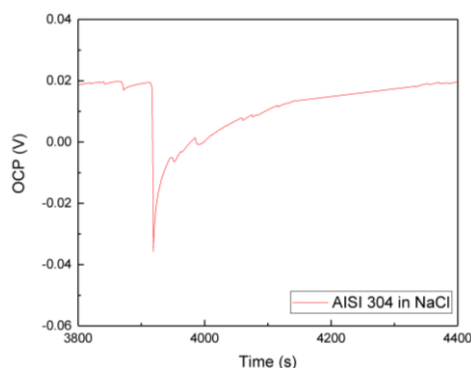
ภาพที่ 1ก แสดงการเปลี่ยนแปลงศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิดเทียบกับเวลาของโลหะแมกนีเซียมในน้ำปราศจากไอออน (DI) และในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 0.1 M พบว่าศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิดของโลหะแมกนีเซียมในน้ำปราศจากไอออนมีค่าต่ำมากอยู่ที่ประมาณ -1.50 V แสดงว่าผิวของโลหะแมกนีเซียมไวต่อปฏิกิริยา (active surface) และค่าศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิดนี้ค่อนข้างคงที่ตลอด 3 ชั่วโมง แสดงว่าไม่มีการเปลี่ยนแปลงใด ๆ ที่ส่งผลต่อ ศักย์ไฟฟ้าเกิดขึ้นบนผิวของโลหะแมกนีเซียมนี้ หมายความว่าผิวโลหะสัมผัสกับน้ำปราศจากไอออนตลอดการทดลอง หรือกล่าวได้ว่ามีการกัดกร่อนแบบสม่ำเสมอ (uniform corrosion) เกิดขึ้นบนผิวของโลหะแมกนีเซียมแม้อยู่ในน้ำ ปราศจากไอออน และเมื่อโลหะแมกนีเซียมอยู่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิดมีค่าน้อยลงอยู่ที่ ประมาณ -1.55 V และเกือบคงที่ตลอด 3 ชั่วโมง แสดงว่าในสารละลายที่มีคลอไรด์ไอออนผสมอยู่ ผิวของโลหะ แมกนีเซียมเกิดการกัดกร่อนแบบสม่ำเสมอ โดยไม่มีการสร้างฟิล์มเฉื่อยมาปกป้องผิวของโลหะ เช่นเดียวกับในน้ำ ปราศจากไอออน ซึ่งได้มีงานวิจัยกล่าวว่า ในโลหะสำหรับงานโครงสร้างทั้งหมด แมกนีเซียมจัดเป็นโลหะที่ไวต่อ ปฏิกิริยาทางเคมีไฟฟ้าที่สุด เนื่องจากเมื่อโลหะแมกนีเซียมอยู่ในสารละลาย จะมีการสร้างฟิล์มบางของแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ (Magnesium hydroxide, $Mg(OH)_2$) บนผิวของโลหะ ซึ่งฟิล์มแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์นี้จะเสถียรใน สารละลายที่มี pH 11 ดังนั้นเมื่ออยู่ในสารละลายที่เป็นกลาง ฟิล์มบางนี้จะถูกทำลาย ทำให้ผิวของโลหะสัมผัสกับ สารละลายเรื่อย ๆ กลายเป็นการกัดกร่อนแบบสม่ำเสมออย่างต่อเนื่อง (Inoue et al., 2001)

ภาพที่ 1ข แสดงการเปลี่ยนแปลงศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิดเทียบกับเวลาของโลหะไทเทเนียมในน้ำปราศจาก ไอออน (DI) และในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 1 M พบว่าศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิดของโลหะไทเทเนียมในน้ำ ปราศจากไอออนเริ่มต้นที่ -0.43 V ซึ่งค่อนข้างสูง และมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วง 1,000 s แรก หลังจากนั้นค่า ศักย์ไฟฟ้ายังคงมีค่าเพิ่มขึ้นด้วยอัตราที่ช้าลงจนสิ้นสุดการทดลอง 3 h ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิดอยู่ที่ -0.09 V จากค่าศักย์ไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นแสดงว่าในน้ำปราศจากไอออน ไทเทเนียมมีการสร้างฟิล์มเฉื่อย (passive film) ขึ้นมา

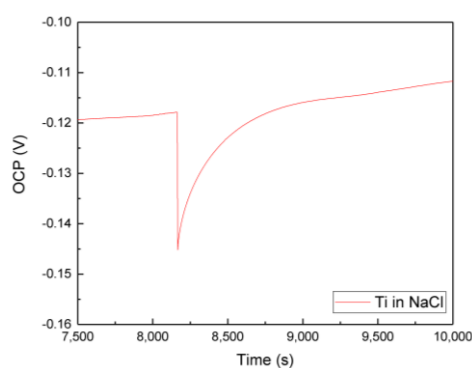
ปกป้องผิวอย่างต่อเนื่องตลอดเวลา และเมื่อโลหะไทเทเนียมอยู่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ค่าศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิดเริ่มต้นที่ -0.27 แล้วเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงต้น หลังจากผ่านไปประมาณ 2,000 s อัตราการเพิ่มขึ้นลดลงอย่างเห็นได้ชัดจนไปถึงสิ้นสุดที่ค่า -0.11 V ค่าศักย์ไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นตลอด 3 h แสดงให้เห็นว่ามีการสร้างฟิล์มเฉื่อยขึ้นบนผิวของโลหะไทเทเนียมถึงแม้ว่าจะอยู่ในสารละลายที่มีคลอไรด์ไอออนผสมอยู่ก็ตาม เมื่อเปรียบเทียบกับศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิดของไทเทเนียมระหว่างในน้ำปราศจากไอออนและในสารละลายโซเดียมคลอไรด์พบว่า ในน้ำปราศจากไอออนไทเทเนียมมีการสร้างฟิล์มเฉื่อยอย่างต่อเนื่อง ในขณะที่สารละลายโซเดียมคลอไรด์มีการสร้างฟิล์มเฉื่อยขึ้นอย่างรวดเร็วแค่ในช่วงแรกๆ เท่านั้น และเมื่อเปรียบเทียบกับศักย์ไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นตลอด 3 h พบว่าในน้ำปราศจากไอออนค่าศักย์ไฟฟ้าเพิ่มขึ้น 0.34 V แต่สารละลายโซเดียมคลอไรด์ค่าศักย์ไฟฟ้าเพิ่มขึ้นเพียง 0.16 V แสดงว่าฟิล์มเฉื่อยที่สร้างขึ้นในน้ำปราศจากไอออนเสถียรกว่าหรือเฉื่อยกว่าในสารละลายที่มีคลอไรด์ไอออนผสมอยู่ ซึ่งอาจเป็นผลมาจากคลอไรด์ไอออนในสารละลายเข้าไปรวมตัวในฟิล์มเฉื่อยทำให้ฟิล์มเฉื่อยเสถียรน้อยลง และอาจทำให้เกิดการแตกของฟิล์มเฉื่อย (breakdown of passive film) ได้ง่าย ซึ่งเห็นได้จากศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิดของไทเทเนียมในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ในช่วง 8,000 ถึง 9,000 s พบการเปลี่ยนแปลงค่าศักย์ไฟฟ้าขึ้นในช่วงสั้น ๆ เรียกว่า “สัญญาณชั่วขณะ (short transient)” ซึ่งเมื่อขยายลักษณะสัญญาณชั่วขณะดังภาพที่ 2 (ก) จะเห็นได้ว่าค่าศักย์ไฟฟ้ามีค่าลดลงอย่างรวดเร็วจาก -0.118 V ไปเป็น -0.145 V และไม่กี่วินาทีหลังจากนั้นค่าศักย์ไฟฟ้าค่อย ๆ มีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ จนกลับเข้าสู่ศักย์ไฟฟ้าเดิมหลังจากผ่านไป 834 วินาที ซึ่งค่าศักย์ไฟฟ้าที่ลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงเริ่มต้นของสัญญาณชั่วขณะนี้แสดงว่ามีการแตกของฟิล์มเฉื่อยที่ปกป้องผิวของโลหะไทเทเนียม ทำให้โลหะไทเทเนียมสัมผัสกับสารละลายโซเดียมคลอไรด์โดยตรง เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของโลหะหรือทำให้เกิดการกัดกร่อนเฉพาะจุด (localized corrosion) เจาะเป็นรูเข็มลึกลงไปบนผิวของโลหะ เพียงชั่วขณะหลังจากนั้นศักย์ไฟฟ้าค่อย ๆ เพิ่มขึ้น แสดงว่าผลิตภัณฑ์ (by product) จากการกัดกร่อนค่อย ๆ ปกคลุมปากของรอยแตกนั้น จนปากของรอยแตกปิดสนิทเกิดเป็นฟิล์มเฉื่อยปกป้องผิวของโลหะจากการกัดกร่อนอีกครั้ง (Sasaki and Isaacs, 2004) การเปลี่ยนแปลงชั่วขณะที่เกิดขึ้นนี้จึงเรียกว่า “metastable pitting corrosion” เพราะเกิดรูเข็มขนาดเล็กบนผิวของโลหะจากการกัดกร่อนในระยะสั้น ๆ (Cottis, 2006) ผลการทดลองนี้แสดงให้เห็นว่าโลหะไทเทเนียมมีความเสถียรมากเมื่ออยู่ในน้ำปราศจากไอออน และถึงแม้จะอยู่ในสารละลายที่มีไอออนที่สามารถกระตุ้นการกัดกร่อนอย่างคลอไรด์ไอออน โลหะไทเทเนียมยังมีความเสถียรอยู่มาก แต่อาจเกิดการกัดกร่อนแบบรูเข็มได้บ้างแต่เกิดขึ้นไม่บ่อยนัก โดยมีงานวิจัยที่แสดงให้เห็นว่าไทเทเนียมจัดเป็นโลหะเฉื่อย (passive metal) ที่เมื่ออยู่ในสารละลายที่มีออกซิเจนผสมอยู่ จะมีการสร้างฟิล์มเฉื่อยที่เสถียร (stable passive film) ของออกไซด์ (TiO_2) บนผิวของโลหะไทเทเนียม ซึ่งฟิล์มเฉื่อยนี้จะช่วยป้องกันผิวของไทเทเนียมจากการกัดกร่อน และถ้าในสารละลายมีคลอไรด์ไอออนผสมด้วย คลอไรด์ไอออนจะไปรวมอยู่ในฟิล์มกลายเป็นฟิล์มของ oxochlorocomplex ซึ่งไม่เสถียรเท่าฟิล์มของออกไซด์ ทำให้ฟิล์มแตกเฉพาะที่ และสามารถพัฒนาไปเป็นการกัดกร่อนแบบรูเข็มต่อไปได้ (Palit and Elayaperumal, 1978; Fekry, 2009)

ภาพที่ 1ค แสดงการเปลี่ยนแปลงศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิดเทียบกับเวลาของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด AISI 304 ในน้ำปราศจากไอออน (DI) และในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 0.1 M พบว่าค่าศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิดเริ่มต้นของเหล็กกล้าไร้สนิมในน้ำปราศจากไอออนอยู่ที่ 0.025 V และเมื่อสิ้นสุดการทดลอง 3 h ค่าศักย์ไฟฟ้าลดลงเพียงเล็กน้อยไปอยู่ที่ -0.018 V แสดงว่ามีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยเกิดขึ้นบนผิวเหล็กกล้าไร้สนิมในน้ำปราศจากไอออน นอกจากนี้จะเห็นได้ว่าเส้นฐานหรือเส้นโค้งหลักเมื่อไม่พิจารณาสัญญาณชั่วขณะ (baseline) ของศักย์ไฟฟ้าสามารถเห็นได้อย่างชัดเจนและไม่พบสัญญาณชั่วขณะใด ๆ เกิดขึ้น แต่เมื่อเหล็กกล้าไร้สนิมอยู่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ เส้นฐานของศักย์ไฟฟ้ามีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในช่วง 4,000 s แรก แล้วหลังจากนั้นเส้นฐานค่อนข้างคงที่ แสดงว่ามีการสร้างฟิล์มเฉื่อยขึ้นบนผิวจนได้ความหนาหรือความเฉื่อยระดับหนึ่ง แต่อย่างไรก็ตามมีสัญญาณชั่วขณะเกิดขึ้นจำนวนมากตลอดเวลา 3 h ทำให้เห็นเส้นฐานไม่ชัดเจนอย่างในน้ำปราศจากไอออน ซึ่งเมื่อขยายสัญญาณชั่วขณะจะมีลักษณะดังภาพที่ 2ข ซึ่งมีการลดลงของศักย์ไฟฟ้าอย่างรวดเร็ว แล้วหลังจากนั้นศักย์ไฟฟ้าค่อย ๆ กลับคืนสู่เส้นฐานเดิมหลังจากผ่านไป 411 s สัญญาณที่ตรวจพบนี้เกิดจากการแตกของฟิล์มเฉื่อย และเกิดเป็น metastable pitting corrosion การแตกของฟิล์มเฉื่อยนี้อาจเกิดขึ้นหลายครั้ง ทำให้เกิดรูเข็มขนาดเล็กหลายรู หรือเกิดหลาย ๆ รูเข็ม

พร้อม ๆ กันบนผิวของเหล็กกล้าทำให้เป็นรูเข็มที่มีขนาดใหญ่ขึ้น ผลการทดลองนี้แสดงให้เห็นว่าเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 304 ในสารละลายที่มีคลอไรด์ไอออนผสมอยู่จะมีการสร้างฟิล์มเฉื่อยมาปกป้องผิว แต่ฟิล์มเฉื่อยนี้อาจไม่เสถียรทำให้มีการแตกของฟิล์มเฉพาะจุด และเกิดการร่อนแบบ metastable pitting corrosion จำนวนมากได้ ซึ่งมีงานวิจัยที่ตรวจสอบพบสัญญาณชั่วขณะของกระแสไฟฟ้าที่บ่งบอกว่าการเกิด metastable pitting corrosion บนผิวของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด AISI 304 ได้ แม้ที่ศักย์ไฟฟ้าต่ำกว่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน (Feng et al, 2016)



(ก) เหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304

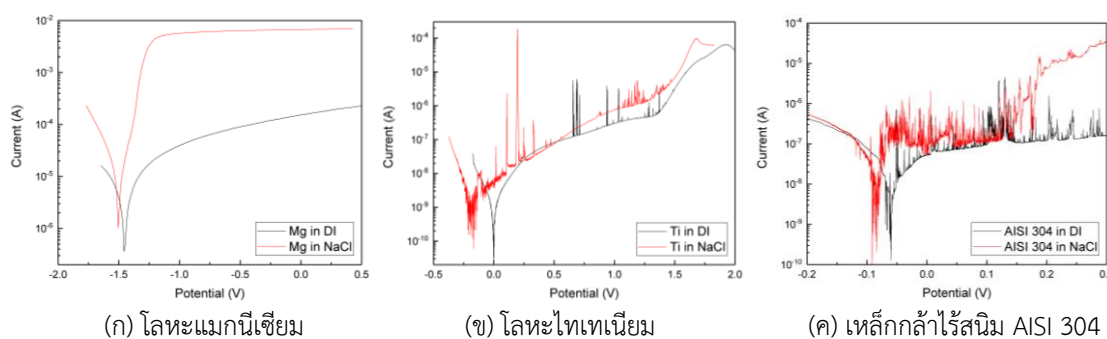


(ข) โลหะไทเทเนียม

ภาพที่ 2 สัญญาณชั่วขณะ “short transient” ของศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิดของโลหะต่างๆ

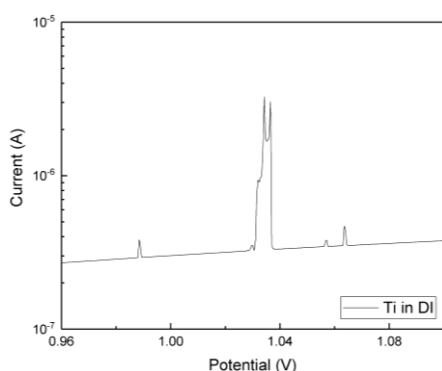
(2) การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและศักย์ไฟฟ้า

การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและศักย์ไฟฟ้าเป็นศึกษาการกัดกร่อนที่สามารถจะเกิดขึ้นได้กับโลหะนั้น ๆ โดยการวัดกระแสไฟฟ้าเมื่อมีการป้อนค่าศักย์ไฟฟ้าค่าบวกให้แก่โลหะที่ต้องการจะศึกษา เพื่อกระตุ้นให้เกิดปฏิกิริยาแอโนดิก (anodic reaction) บนผิวของโลหะ รูปที่ 3ก คือเส้นโค้งโพลาไรเซชันของโลหะแมกนีเซียมบริสุทธิ์ในน้ำปราศจากไอออนและสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 0.1 M พบว่าในน้ำปราศจากไอออน เมื่อป้อนศักย์ไฟฟ้าให้กับโลหะแมกนีเซียมใกล้เคียงศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน ($E_{\text{corr}} \approx -1.5 \text{ V}$) กระแสไฟฟ้าที่วัดได้เป็นบวกและมีค่าค่อนข้างสูงอยู่ที่ประมาณ 10^{-4} A และเมื่อป้อนศักย์ไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ค่ากระแสไฟฟ้าก็เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง แสดงว่าเมื่ออยู่ในน้ำปราศจากไอออน มีการกัดกร่อนที่ค่อนข้างรุนแรงเกิดขึ้นบนผิวของโลหะแมกนีเซียม และอัตราการกัดกร่อนของโลหะแมกนีเซียมเพิ่มขึ้นตามศักย์ไฟฟ้าด้วย ซึ่งการกัดกร่อนที่ว่าเป็นการกัดกร่อนแบบสม่ำเสมอและไม่มี การสร้างฟิล์มบางขึ้นมาปกป้องผิวของโลหะจากการกัดกร่อน และเมื่ออยู่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ เมื่อป้อน ศักย์ไฟฟ้าใกล้เคียงศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน กระแสไฟฟ้าที่วัดได้มีค่าสูงมากอยู่ที่ประมาณ 10^{-2} A ซึ่งสูงกว่าในน้ำ ปราศจากไอออนประมาณ 100 เท่า และเมื่อป้อนศักย์ไฟฟ้าให้กับโลหะแมกนีเซียมมากขึ้นกระแสไฟฟ้าค่อนข้างคงที่ แสดงว่ามีการกัดกร่อนอย่างสม่ำเสมอที่รุนแรงมากทั่วทั้งผิวหน้าของโลหะที่ศักย์ไฟฟ้าใกล้เคียงศักย์ไฟฟ้าการกัด กร่อน ทำให้เมื่อป้อนศักย์ไฟฟ้าเพิ่มขึ้น อัตราการกัดกร่อนไม่สามารถเพิ่มขึ้นได้อีก ดังนั้นผลการทดลองนี้แสดงให้เห็น ว่าโลหะแมกนีเซียมมีผิวที่ไวต่อปฏิกิริยาอย่างมาก (active surface) ทำให้เกิดการกัดกร่อนอย่างสม่ำเสมอที่ค่อนข้าง รุนแรงแม้ในน้ำปราศจากไอออน โดยไม่มีการสร้างฟิล์มเฉื่อยมาปกป้องผิวของโลหะ และเมื่ออยู่ในสารละลายที่มี ไอออนรุนแรงอย่างคลอไรด์ไอออน การกัดกร่อนแบบสม่ำเสมอถูกกระตุ้นให้รุนแรงยิ่งขึ้น

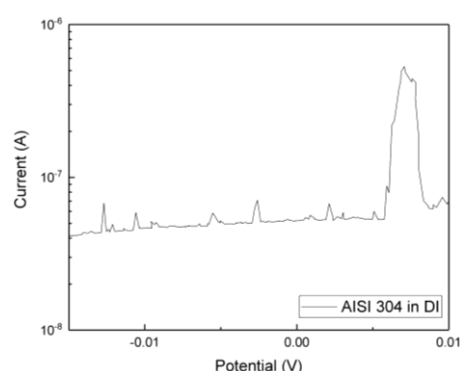


ภาพที่ 3 เส้นโค้งโพลาริเซชันของโลหะต่างๆ ในน้ำปราศจากไอออน (DI) และสารละลายโซเดียมคลอไรด์ (NaCl)

เส้นโค้งโพลาริเซชันของโลหะไทเทเนียมแสดงในรูปที่ 3 (ข) พบว่าในน้ำปราศจากไอออน เส้นฐานของเส้นโค้งโพลาริเซชันสามารถเห็นได้อย่างชัดเจน เมื่อป้อนศักย์ไฟฟ้าให้กับโลหะไทเทเนียมสูงกว่าค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน ($E_{\text{corr}} \approx -2.3 \text{ V}$) เล็กน้อย ค่ากระแสไฟฟ้าที่วัดได้ค่อนข้างต่ำมากในระดับ 10^{-7} A และเมื่อค่อย ๆ เพิ่มศักย์ไฟฟ้าที่ป้อนให้กับโลหะไทเทเนียม กระแสไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย แสดงว่าการสร้างฟิล์มเฉื่อยขึ้นมาปกป้องผิวของโลหะไทเทเนียมจากการกัดกร่อน และเมื่อศักย์ไฟฟ้าที่ป้อนให้ค่อย ๆ เพิ่มขึ้น ฟิล์มเฉื่อยค่อย ๆ บางลงจนถึงศักย์ไฟฟ้าที่ $E = 1.332 \text{ V}$ เกิดปฏิกิริยาบางอย่างที่ทำให้กระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วอาจเป็น stable pitting corrosion หรือ oxygen evolution ที่เกิดขึ้นกับฟิล์มเฉื่อยของโลหะไทเทเนียมก็ได้ นอกจากนี้ยังพบสัญญาณชั่วขณะหลังจากป้อนศักย์ไฟฟ้าให้กับโลหะไทเทเนียมจนมีศักย์ไฟฟ้าสูงกว่า $E = 0.6 \text{ V}$ ซึ่งสัญญาณชั่วขณะที่เกิดขึ้นมีลักษณะดังแสดงในภาพที่ 4(ก) จะเห็นได้ว่าการเพิ่มขึ้นของกระแสไฟฟ้าอย่างรวดเร็วเพียงช่วงเวลาสั้น ๆ การเพิ่มขึ้นของกระแสไฟฟ้านี้แสดงว่ามีการแตกของฟิล์มเฉื่อย ทำให้ผิวของโลหะไทเทเนียมสัมผัสกับน้ำปราศจากไอออนโดยตรง เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของโลหะชั่วขณะ เจาะเป็นรูเข็มเล็ก ๆ ลึกลงไป ปฏิกิริยาออกซิเดชันสร้างอิเล็กตรอนอิสระจำนวนมากในโลหะ อิเล็กตรอนเหล่านี้จะเคลื่อนที่ไปยังอิเล็กโทรดกระแส ทำให้กระแสไฟฟ้าที่วัดได้มีค่าเพิ่มขึ้นชั่วขณะ หลังจากนั้นกระแสไฟฟ้าลดลงสู่เส้นฐานอีกครั้ง แสดงว่าปฏิกิริยาออกซิเดชันหยุดลง เนื่องจากผลิตภัณฑ์จากการกัดกร่อนปกปิดปากของรอยแตกกลายเป็นฟิล์มเฉื่อยปกป้องผิวของโลหะ ลักษณะสัญญาณชั่วขณะแบบนี้แสดงว่ามีการกัดกร่อนแบบ metastable pitting corrosion เกิดขึ้น (Bard, Stratmann and Frankel, 2003) แสดงว่าโลหะไทเทเนียมเมื่ออยู่ในน้ำปราศจากไอออนจะมีการสร้างฟิล์มบางขึ้นมาปกป้องผิวของโลหะจากการกัดกร่อน ซึ่งฟิล์มเฉื่อยนี้อาจมีการแตกเฉพาะจุด ทำให้เกิด metastable pitting corrosion ขึ้นได้แต่เกิดขึ้นน้อยครั้งนัก แต่เมื่อโลหะไทเทเนียมอยู่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ พบว่าที่ศักย์ไฟฟ้าใกล้เคียงศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน เส้นฐานเห็นได้ไม่ชัดเจนเนื่องจากมีสัญญาณชั่วขณะจำนวนจำนวนหนึ่ง และกระแสไฟฟ้าที่วัดได้ค่อนข้างต่ำมากในระดับ 10^{-7} A แสดงว่ามีการสร้างฟิล์มเฉื่อยขึ้นมาปกป้องผิวของโลหะไทเทเนียม แต่ฟิล์มเฉื่อยนั้นไม่ค่อยแข็งแรงจึงเกิดการแตกเฉพาะจุด ทำให้ metastable pitting corrosion เกิดขึ้นบนผิวของโลหะไทเทเนียม และเมื่อป้อนศักย์ไฟฟ้าสูงขึ้น พบว่ากระแสไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ แสดงว่าฟิล์มเฉื่อยบางลงหรือเฉื่อยน้อยลงเรื่อย ๆ เนื่องจากมีคลอไรด์ไอออนเข้าไปแทรกอยู่ในฟิล์มเฉื่อยด้วย นอกจากนี้ยังพบสัญญาณชั่วขณะของ metastable pitting corrosion เกิดขึ้นด้วย และที่ศักย์ไฟฟ้าที่ $E = 1.332 \text{ V}$ กระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วและไม่ลดลงอีกเลย แต่เนื่องจากมีปรากฏการณ์เช่นเดียวกันนี้เกิดขึ้นในน้ำปราศจากไอออนที่ศักย์ไฟฟ้าเดียวกัน จึงแสดงว่าไม่ใช่การกัดกร่อนแบบ stable pitting corrosion แต่เป็น oxygen evolution ของฟิล์มเฉื่อย ดังนั้นผลการทดลองนี้แสดงให้เห็นว่าโลหะไทเทเนียมมีผิวที่ค่อนข้างเฉื่อยต่อปฏิกิริยา (passive surface) เนื่องจากการสร้างฟิล์มเฉื่อยขึ้นมาปกป้องผิว แต่เมื่ออยู่ในสารละลายที่มีคลอไรด์ไอออนผสมอยู่ฟิล์มเฉื่อยนี้อาจเกิดการแตก ทำให้การกัดกร่อนเฉพาะที่เกิดขึ้นได้ แต่การกัดกร่อนนี้จะเป็นการกัดกร่อนแบบ metastable pitting corrosion เพราะผลิตภัณฑ์จากการกัดกร่อนจะค่อย ๆ ปกคลุมรอยแตกทำให้รอยแตกปิดสนิทกลายเป็นฟิล์มเฉื่อยอีกครั้ง



(ก) โลหะไทเทเนียม



(ข) เหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304

ภาพที่ 4 สัญญาณ “short transient” ที่เกิดขึ้นบนเส้นโค้งโพลาริเซชันของโลหะต่างๆ ในน้ำปราศจากไอออน

เส้นโค้งโพลาริเซชันของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 304 ในน้ำปราศจากไอออน ดังแสดงในภาพที่ 3ค เมื่อพิจารณาเส้นฐานพบว่า ศักย์ไฟฟ้าใกล้เคียงศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน ($E_{\text{corr}} \approx -0.05 \text{ V}$) กระแสไฟฟ้าค่อนข้างต่ำมากในระดับ 10^{-7} A และเมื่อป้อนศักย์ไฟฟ้าเพิ่มขึ้นกระแสไฟฟ้าค่อนข้างคงที่ แสดงว่ามีการสร้างฟิล์มเฉื่อยขึ้นมาปกป้องผิวของโลหะอย่างรวดเร็ว และฟิล์มนี้ไม่ทำปฏิกิริยากับน้ำปราศจากไอออนทำให้ความหนาของฟิล์มค่อนข้างคงที่แม้ศักย์ไฟฟ้าที่ป้อนให้กับโลหะเพิ่มขึ้น แต่อย่างไรก็ตามมีสัญญาณชั่วขณะจำนวนมากเกิดขึ้นตลอดเวลา ภาพขยายสัญญาณชั่วขณะนี้แสดงอยู่ในภาพที่ 4ข ซึ่งกระแสไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วแล้วตกกลับเข้าสู่เส้นฐาน เช่นเดียวกับสัญญาณชั่วขณะของโลหะไทเทเนียม แสดงว่ามีการกัดกร่อนแบบ metastable pitting corrosion เกิดขึ้นบนผิวของเหล็กกล้าไร้สนิมแม้ในน้ำปราศจากไอออน และเมื่อเหล็กกล้าไร้สนิมอยู่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 0.1 M ที่ศักย์ไฟฟ้าใกล้เคียงศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน กระแสไฟฟ้าค่อนข้างต่ำ และเกือบคงที่เมื่อป้อนศักย์ไฟฟ้าให้กับโลหะไม่สูงมากนัก แสดงว่ามีการสร้างฟิล์มเฉื่อยขึ้นมาปกป้องผิวของโลหะถึงแม้ว่าจะอยู่ในสารละลายที่มีคลอไรด์ไอออนผสมอยู่ก็ตาม แต่มีสัญญาณชั่วขณะเกิดขึ้นจำนวนมาก ซึ่งมีจำนวนมากกว่าในน้ำปราศจากไอออน แสดงว่าคลอไรด์ไอออนกระตุ้นให้เกิดการกัดกร่อนแบบ metastable pitting corrosion มากขึ้น นอกจากนี้เมื่อป้อนศักย์ไฟฟ้าค่าสูงมากจนกระทั่งศักย์ไฟฟ้ามีค่า $E=0.18 \text{ V}$ กระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง แสดงว่ามี stable pitting corrosion หรือ oxygen evolution เกิดขึ้น แต่เนื่องจากไม่มีปรากฏการณ์นี้เกิดขึ้นในน้ำปราศจากไอออนแสดงว่าการเพิ่มขึ้นของกระแสไฟฟ้าอย่างต่อเนื่องนี้เกิดจาก stable pitting corrosion (Enos and Scriber, 1997) ดังนั้นผลการทดลองนี้แสดงให้เห็นว่า ผิวของเหล็กกล้าไร้สนิมมีการสร้างฟิล์มเฉื่อยขึ้นมาปกป้องผิว แต่ฟิล์มเฉื่อยนี้ไม่เสถียรทำให้เกิดการแตกเฉพาะจุด เกิดเป็น metastable pitting corrosion แม้ในน้ำปราศจากไอออน และคลอไรด์ไอออนในสารละลายสามารถกระตุ้นให้การกัดกร่อนแบบ metastable pitting corrosion รุนแรงขึ้นได้ และในเงื่อนไขที่เหมาะสมการกัดกร่อนนี้อาจพัฒนาไปเป็นการกัดกร่อนแบบ stable pitting corrosion ได้ จึงกล่าวได้ว่าเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 304 จัดเป็นโลหะที่ไวต่อการเกิดการกัดกร่อนแบบรูเข็ม (pitting corrosion) มากที่สุดเมื่อเทียบกับโลหะไทเทเนียมบริสุทธิ์ และ โลหะแมกนีเซียมบริสุทธิ์ ซึ่งอาจจะสามารถอธิบายได้จากการที่เหล็กกล้าไร้สนิมเป็นเหล็กที่ถูกเจือด้วยโลหะอื่น ๆ เช่นโครเมียม และนิกเกิล เมื่อสัมผัสกับอากาศหรือสารละลาย โลหะเหล่านี้จะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน เกิดเป็นออกไซด์ของโลหะและสร้างเป็นฟิล์มเฉื่อยขึ้นมาเพื่อปกป้องผิวของโลหะจากการกัดกร่อนต่อไป แต่เนื่องจากฟิล์มเฉื่อยนี้ประกอบจากออกไซด์ของโลหะต่างชนิดกัน ทำให้ฟิล์มเฉื่อยมีความไม่ต่อเนื่องกันและไม่เสถียร จึงง่ายต่อการแตกเฉพาะจุด ทำให้เกิดการกัดกร่อนแบบรูเข็มได้ง่าย โดยเฉพาะเมื่อถูกกระตุ้นด้วยไอออนรุนแรงอย่างคลอไรด์ไอออน

อภิปรายผลการวิจัย

ในการศึกษาการพหุติกรรมการกัดกร่อนของโลหะ 3 ชนิด โดยใช้วิธีทางเคมีไฟฟ้า 2 วิธี ได้แก่ การวัดการเปลี่ยนแปลงศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิดเทียบกับเวลา และการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและศักย์ไฟฟ้า ซึ่งการวัดการเปลี่ยนแปลงศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิดเทียบกับเวลาจะให้ข้อมูลเกี่ยวกับรูปแบบการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติจริง ๆ ของโลหะในสารละลายที่กำหนด แต่การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและศักย์ไฟฟ้าเป็นการให้ศักย์ไฟฟ้าที่สูงกว่าศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิดของโลหะนั้น ๆ เพื่อกระตุ้นให้เกิดปฏิกิริยาแอโนดิกบนผิวของโลหะ ทำให้ได้ข้อมูลเกี่ยวกับรูปแบบและอัตราเร็วของการกัดกร่อนที่สามารถเกิดขึ้นได้ในเงื่อนไขที่เหมาะสมของโลหะในสารละลายที่กำหนด ซึ่งเมื่อพิจารณาเฉพาะบริเวณศักย์ไฟฟ้าที่ใกล้กับศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนของโลหะ รูปแบบการกัดกร่อนที่ได้จากการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและศักย์ไฟฟ้าสอดคล้องกับข้อมูลที่ได้จากการวัดการเปลี่ยนแปลงศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิดเทียบกับเวลา แต่การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าจะต้องรบกวนระบบโดยการให้ศักย์ไฟฟ้าหรือกระแสไฟฟ้าภายนอกแก่โลหะ ในขณะที่การวัดการเปลี่ยนแปลงศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิดเทียบกับเวลาไม่ต้องรบกวนระบบเลย แต่สามารถตรวจสอบหารูปแบบการกัดกร่อนโดยธรรมชาติที่เกิดขึ้นจริง ๆ ได้ ดังนั้นเทคนิคการวัดการเปลี่ยนแปลงศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิดเทียบกับเวลานี้จึงจัดเป็นการทดสอบโดยไม่ทำลาย (non-destructive technique) ที่น่าจะสามารถพัฒนาไปใช้ในการตรวจสอบสถานะการกัดกร่อนของโลหะแบบทันที (real-time corrosion monitoring) ได้ แต่เทคนิคการวัดการเปลี่ยนแปลงศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิดเทียบกับเวลานี้มีข้อเสียคือ ไม่สามารถบอกอัตราการกัดกร่อนชั่วขณะที่เกิดขึ้นได้ ซึ่งได้มีงานวิจัยกล่าวว่าสามารถตรวจสอบอัตราการกัดกร่อนชั่วขณะของการเกิดการกัดกร่อนแบบรูเข็มได้จากการศึกษาการเปลี่ยนแปลงกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นกับระบบที่ถูกกัดกร่อนเทียบกับเวลาควบคุมไปด้วย หรือที่เรียกว่า “การวัดสัญญาณรบกวนทางเคมีไฟฟ้า (electrochemical noise measurement)” (Xia et al., 2017)

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะจากการวิจัย

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาการกัดกร่อนที่เป็นไปได้ของโลหะแมกนีเซียมบริสุทธิ์ โลหะไทเทเนียมบริสุทธิ์ และเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 304 โดยใช้เทคนิคเคมีไฟฟ้า 2 วิธี ได้แก่การวัดการเปลี่ยนแปลงศักย์วงจรเปิดเทียบกับเวลา และการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับศักย์ไฟฟ้า ซึ่งทำการศึกษาในน้ำปราศจากไอออน และในสารละลายที่มีไอออนที่กระตุ้นการกัดกร่อนอย่างคลอไรด์ไอออนผสมอยู่ ผลการทดลองจากทั้ง 2 วิธีให้ผลไปในทางเดียวกันว่า วัสดุทั้ง 3 ชนิดมีพหุติกรรมการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นเองในธรรมชาติที่แตกต่างกันดังต่อไปนี้ โลหะแมกนีเซียมจัดเป็นโลหะที่ไวต่อการกัดกร่อนมาก โดยไม่มีการสร้างฟิล์มเฉื่อยขึ้นมาปกป้องผิวของโลหะ ทำให้เกิดการกัดกร่อนแบบสม่ำเสมอในน้ำปราศจากไอออน และการกัดกร่อนแบบสม่ำเสมอจะรุนแรงขึ้นในสารละลายที่มีคลอไรด์ไอออนผสมอยู่ ส่วนโลหะไทเทเนียมจัดเป็นโลหะที่มีผิวที่เฉื่อยต่อปฏิกิริยามากที่สุด เนื่องจากการสร้างฟิล์มเฉื่อยขึ้นมาปกป้องผิวต่อการกัดกร่อน และในสารละลายที่มีคลอไรด์ไอออนผสม ฟิล์มเฉื่อยนี้อาจเกิดการแตกเป็นจุดๆ แต่ไม่บ่อยนัก กลายเป็นการกัดกร่อนเฉพาะที่แบบ metastable pitting corrosion ที่ไม่รุนแรง เพราะผลิตภัณฑ์จากการกัดกร่อนจะค่อยๆ ปกคลุมรอยแตกทำให้รอยแตกปิดสนิทกลายเป็นฟิล์มเฉื่อยอีกครั้ง ส่วนผิวของเหล็กกล้าไร้สนิมมีการสร้างฟิล์มเฉื่อยขึ้นมาปกป้องผิวเช่นเดียวกับโลหะไทเทเนียม แต่ฟิล์มเฉื่อยของเหล็กกล้าไร้สนิมนี้ไม่เสถียรทำให้เกิดการแตกเฉพาะจุดได้ง่าย กลายเป็น metastable pitting corrosion ได้แม้อยู่ในน้ำปราศจากไอออน และคลอไรด์ไอออนในสารละลายสามารถกระตุ้นให้การกัดกร่อนแบบ metastable pitting corrosion รุนแรงขึ้น และเมื่อป้อนศักย์ไฟฟ้าให้เพียงพอกับโลหะนี้ การกัดกร่อนแบบ metastable pitting corrosion นี้อาจพัฒนาไปเป็นการกัดกร่อนแบบ stable pitting corrosion ที่รุนแรงได้ แสดงว่าเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 304 จัดเป็นโลหะที่ไวต่อการเกิดการกัดกร่อนแบบรูเข็ม (pitting corrosion) นอกจากนี้การวัดการเปลี่ยนแปลงศักย์วงจรเปิดเทียบกับเวลาเป็นเทคนิคการทดสอบโดยไม่ทำลาย ที่น่าจะสามารถพัฒนาไปเป็นระบบการตรวจสอบสถานะการกัดกร่อนของโลหะแบบทันทีได้

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากเงินสนับสนุนจากโครงการพิเศษของนักศึกษาระดับปริญญาตรี หลักสูตร ฟิสิกส์ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

เอกสารอ้างอิง

- Bard, A.J., Stratmann, M. and Frankel, G.S. (2003). **Encyclopedia of Electrochemistry**. Michigan: Wiley.
- Caines S., I Khan, F., Zhang, Y. and Shirokoff, J. (2017). Simplified electrochemical potential noise method to predict corrosion and corrosion rate. **Journal of Loss Prevention in the Process Industries**, 47, 72-84.
- Cottis, R.A. (2006). Sources of Electrochemical noise in corroding systems. **Russian Journal of Electrochemistry**, 42(5), 497-505.
- Enos, D.G. and Scribner, L. (1997). **The potentiodynamic polarization scan: Technical report 33**. Hampshire: Solartron.
- Fekry, A.M. (2009). The influence of chloride and sulphate ions on the corrosion behavior of Ti and Ti-6Al-4V alloy in oxalic acid. **Electrochimica Acta**, 54, 3480-3489.
- Feng, X., Lu, X., Zuo, Yu., Zhuang, N. and Chen, D. (2016). The effect of deformation on metastable pitting of 304 stainless steel in chloride contaminated concrete pore solution. **Corrosion Science**, 103, 223-229.
- Inoue, H., Sugahaea, K., Yamamoto, A. and Tsubakino, H. (2001). Corrosion rate of magnesium and its alloys in buffered chloride solutions. **Corrosion Science**, 44, 603-610.
- Mallick, P.A. (2010). **Material, Design and Manufacturing for lightweight Vehicles**. Cambridge: Woodhead Publishing.
- Palit, G.C. and Elayaperumal, K. (1978). Passivity and pitting of corrosion resistant pure metal Ta, Nb, Ti, Zr Cr and Al in Chloride solution. **Corrosion Science**, 18, 169-179.
- Sasaki, K. and Isaacs, H.S. (2004). Origins of Electrochemical noise during pitting corrosion of aluminium. **Journal of Electrochemical society**, 151, 124-133.
- Vargel, C. (2004). **Corrosion of aluminium**. Boston: Elsevier, 2004.
- Xia, D.-H., Ma, C., Song, S., Ma, L., Wang, J., Gao, Z., and Hu, W. (2017). Assessing atmospheric corrosion of metals by a novel electrochemical sensor combining with a thin insulating net using electrochemical noise technique. **Sensors and Actuators B: Chemical**, 252, 353–358.