

พฤติกรรมทางไฟฟ้าเคมีบนผิวขัดลาดเอียงของเหล็กชุบเคลือบ โลหะผสมอลูมิเนียมรีไซเคิลด้วยวิธีการจุ่มร้อน

Electrochemical Behavior on Gradient Polished Surface of Hot Dipped Aluminum Recycle Coated Steel.

ลลิตา เพียรราษฎร์ พนมกร ขาวทอง อภิชาติ อาจนเสียว
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาพฤติกรรมทางไฟฟ้าเคมีในระดับจุลภาคบนผิวขัดลาดเอียงของเหล็กชุบเคลือบโลหะผสมอลูมิเนียมรีไซเคิลด้วยวิธีการจุ่มร้อน ที่ทำการศึกษาระดับต่าง ๆ ของชั้นเคลือบที่ได้จากการขัดทำมุมน้อยกว่า 6 องศา เพื่อเปิดผิวของชั้นเคลือบให้เห็นบริเวณ intermetallic compound, บริเวณ interface และบริเวณ coating โดยทำการศึกษาโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของโครงสร้างด้วยเทคนิค energy dispersive x – ray spectroscopy ศึกษาพฤติกรรมทางไฟฟ้าเคมีด้วยเทคนิค anodic polarization measurement และ open circuit potential ผลการทดลองพบว่า บริเวณ intermetallic compound มีความไวในการทำปฏิกิริยาค่าต่ำที่สุดในขณะที่บริเวณ coating มีความไวในการเกิดปฏิกิริยามากที่สุด และจากข้อมูลของ anodic polarization curve แสดงให้เห็นว่าบริเวณต่าง ๆ ของชั้นเคลือบมีความสามารถในการป้องกันการกัดกร่อนแบบพาสซีฟฟิล์ม

คำสำคัญ : พฤติกรรมทางไฟฟ้าเคมี เหล็กชุบเคลือบอลูมิเนียมรีไซเคิล โพเทนชิโอสแตท อลูมิเนียมรีไซเคิล

Abstract

This research is study the localized coating regions of hot-dipped aluminum coated steel from recycled aluminum. The specimens were polished with an angle lower than 6° to display intermetallic compound region, interface region and coating region. The microstructure and phase constitution were characterized by scanning electron microscope and energy dispersive x – ray spectroscopy, respectively. The electrochemical behavior was investigated using an open circuit potential and anodic polarization measurement. The results showed that the intermetallic compound region has the less noble. The coating region was more susceptible to corrosion than the other regions. Hot-dipped aluminum coated steel can show passive film ability, shown in anodic polarization curve.

Keywords : Electrochemical behavior, Aluminum coated steel, Potentiostat, Aluminum recycle

1. บทนำ

ความต้องการในการใช้เหล็กชุบเคลือบสังกะสีในปัจจุบันมีปริมาณที่เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง เนื่องจากสามารถนำไปประยุกต์ใช้ประโยชน์ในงานด้านอุตสาหกรรมได้หลายประเภท เช่น อุตสาหกรรมเหล็ก อุตสาหกรรมก่อสร้าง อุตสาหกรรมพวกโครงสร้างเหล็ก และอุตสาหกรรมอื่น ๆ เป็นต้น อีกทั้งโลหะสังกะสีมีราคาถูก

และมีความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อนได้ดี แต่อย่างไรก็ตาม ปริมาณสังกะสีมีอยู่อย่างจำกัด [1-5] โลหะผสมอลูมิเนียมจึงเป็นวัสดุทางเลือกใหม่ที่เหมาะสมจะใช้เคลือบผิวเหล็กแทนสังกะสี เนื่องจากอลูมิเนียม เป็นโลหะที่สามารถนำรีไซเคิลได้อย่างไม่สิ้นสุด มีความแข็งแรง ทนทานต่อการกัดกร่อนได้เป็นอย่างดี เพราะอลูมิเนียมทำปฏิกิริยากับออกซิเจนเกิดเป็นชั้นสารประกอบออกไซด์หรือไฮดรอกไซด์ สามารถใช้ป้องกันการกัดกร่อนได้ [2] อย่างไรก็ตามถึงแม้อลูมิเนียมจะสามารถสร้างฟิล์มป้องกันตัวเองได้ แต่อลูมิเนียมไม่มีความสามารถในการป้องกันการกัดกร่อนแบบแคโทดิกเมื่อเทียบกับเหล็ก (Cathodic protection) [2, 4-5]

จากงานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการศึกษาและพัฒนาผิวเคลือบอลูมิเนียม เพื่อเพิ่มความสามารถในการป้องกันการกัดกร่อนแบบเป็นตัวเลขสละแทน ด้วยวิธีการเดิมธาตุอื่น ๆ ลงไปในอลูมิเนียมหลอมเหลว [1-6, 8] หรือการชุบเคลือบผิวด้วยวิธีต่าง ๆ เช่น การจุ่มร้อน (Hot dip process) [2, 5, 7-8] และการเคลือบผิวแข็งด้วยไอระเหยทางกายภาพ (PVD) [1, 3] เป็นต้น Enokida และคณะ [4] ศึกษาอิทธิพลของปริมาณซิลิกอนต่อความสามารถในการเป็นตัวเลขสละของโลหะผสม Al-Mg-Si พบว่าปริมาณซิลิกอนที่เพิ่มขึ้นมีผลให้ความสามารถในการป้องกันแบบเป็นตัวเลขสละเพิ่มขึ้นและมีการเกิดรูเข็มน้อยลง Chihara และคณะ [5] อธิบายว่าผิวเคลือบโลหะผสมอลูมิเนียมที่มีปริมาณแมกนีเซียมและซิลิกอนน้อย จะมีความต้านทานการกัดกร่อนสูง เนื่องจากมีอนุภาค Mg_2Si น้อย Birbilis และ Buchheit [5] อธิบายว่าค่าศักย์ไฟฟ้ากัดกร่อน (E_{corr}) และศักย์ไฟฟ้าการเกิดรูเข็ม (E_{pit}) มีการเปลี่ยนแปลงไปตามองค์ประกอบของ intermetallic นั้น ๆ

Kruehong และคณะ [7] อธิบายว่าการกระจายตัวของซิลิกอนและเหล็กมีความสำคัญต่อพฤติกรรมการกัดกร่อนของผิวเคลือบ และมีอิทธิพลต่อความไวของการเกิดรูเข็ม

อลูมิเนียมรีไซเคิลมีธาตุอื่น ๆ ผสมอยู่ ซึ่งธาตุบางชนิด เช่น แมกนีเซียม และซิลิกอนมีส่วนช่วยในการเพิ่มคุณสมบัติด้านการต้านทานการกัดกร่อน ในงานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาเหล็กชุบเคลือบโลหะผสมอลูมิเนียมจากอลูมิเนียมรีไซเคิลด้วยกระบวนการจุ่มร้อน ทำการตรวจสอบพฤติกรรมทางไฟฟ้าเคมีที่บริเวณต่าง ๆ ที่ได้จากการจัดเปิดผิวแบบลาดเอียง ใช้เซลล์ไฟฟ้าเคมีขนาดไมครอนในการทดสอบโดยใช้เทคนิค open circuit potential และ anodic polarization measurement ในการศึกษา

2. วิธีการทดลอง

2.1 เหล็กชุบเคลือบโลหะผสมอลูมิเนียมรีไซเคิล

นำแผ่นเหล็กขาว (0.077 wt.% C) ขนาด 70 x 35 x 0.7 มิลลิเมตร ด้านบนเจาะรูตรงกลางมีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 2 มิลลิเมตร มาล้างคราบไขมันด้วย NaOH เข้มข้น 1 M แล้วล้างทำความสะอาดด้วยเอทานอลและน้ำในเครื่องล้างความถี่สูง ก่อนจะนำไปกระตุ้นผิวด้วย H_2SO_4 เข้มข้น 1 M แล้วล้างด้วยเอทานอลและน้ำอีกครั้ง ก่อนเป่าให้แห้ง

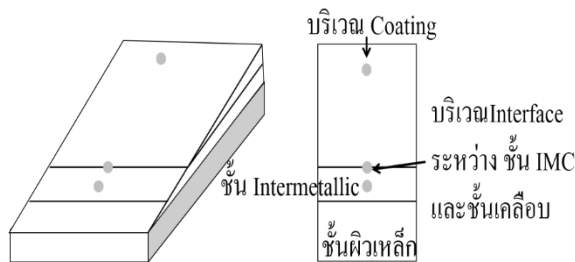
ทำการหลอมโลหะผสมอลูมิเนียมด้วยอลูมิเนียมรีไซเคิลที่มีองค์ประกอบของธาตุต่าง ๆ ดังแสดงในตารางที่ 1 ใช้อุณหภูมิเตาหลอม 700 องศาเซลเซียส ภายใต้สภาวะบรรยากาศก๊าซอาร์กอนแล้วจุ่มแผ่นเหล็กลงในอลูมิเนียมหลอมเหลวเป็นเวลา 3 นาที จากนั้นทำให้ชิ้นงานเย็นตัวที่อุณหภูมิห้อง

ตารางที่ 1 องค์ประกอบของปริมาณธาตุในโลหะผสมอลูมิเนียมรีไซเคิล

ธาตุ	เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก
อลูมิเนียม	87.76
สังกะสี	4.03
เหล็ก	3.57
ทองแดง	2.31
ซิลิกอน	0.95
แมงกานีส	0.65
อื่นๆ	0.73

2.2 การเตรียมผิวชิ้นงาน

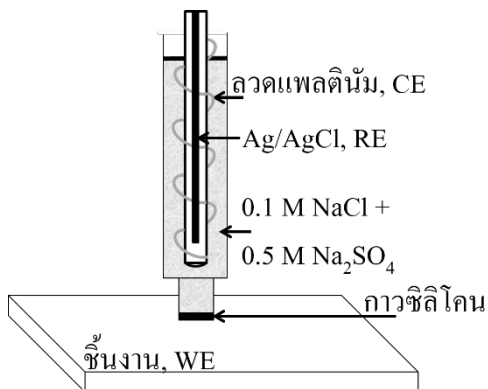
ขัดผิวชิ้นงานให้ทำมุมน้อยกว่า 6 องศา [8] ด้วยกระดาษทรายเบอร์ 1000 และ 2000 ตามลำดับ โดยใช้น้ำเป็นตัวหล่อลื่น แล้วขัดละเอียดด้วยผงอลูมินาขนาด 0.05 ไมครอน ล้างทำความสะอาดด้วย เอทานอลในเครื่องสั่นความถี่สูง ก่อนจะเป่าให้แห้ง จากนั้นถ่ายภาพโครงสร้างจุลภาคของบริเวณต่าง ๆ บนชิ้นงานดังแสดงในรูปที่ 1 ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด และวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของโครงสร้างจุลภาคที่บริเวณนั้นด้วยเทคนิคการวิเคราะห์แบบ EDX



รูปที่ 1 แผนภาพชิ้นงานหลังการขัดผิว

2.3 การตรวจสอบพฤติกรรมทางไฟฟ้าเคมี

เซลล์ไฟฟ้าเคมีที่ใช้ในงานวิจัยนี้ทำจากหลอดแก้ว ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหลายขนาด (3, 1 และ 0.2 มม.) เซลล์ไฟฟ้าเคมีประกอบด้วยลวดแพลตินัมเป็นขั้วตรงข้าม (CE), ขั้วทำงาน (WE) และขั้วอ้างอิงชนิดซิลเวอร์-ซิลเวอร์คลอไรด์ (RE) ทำการติดตั้งชุดทดสอบตามรูปที่ 2 โดยใช้สารละลายผสมระหว่าง $0.5 \text{ M Na}_2\text{SO}_4 + 0.1 \text{ M NaCl}$ เป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ในการทดสอบ



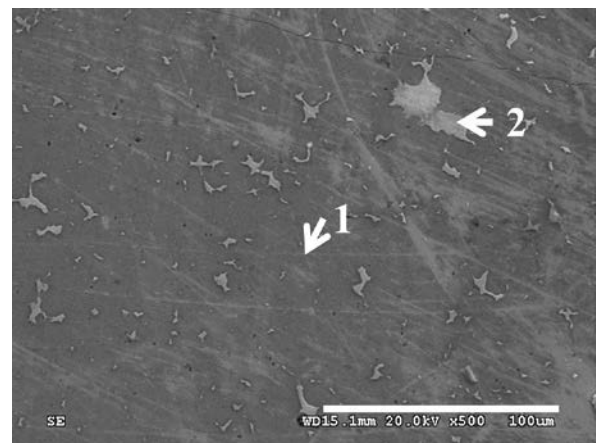
รูปที่ 2 การติดตั้งชุดทดสอบพฤติกรรมทางไฟฟ้าเคมี

ด้วยวิธี Micro - electrochemical cell

3. ผลการทดลอง

3.1 โครงสร้างจุลภาค (Microstructure)

บริเวณ Intermetallic compound (IMC) เกิดจากธาตุเหล็ก (Fe) ในพื้นผิวเหล็ก ทำปฏิกิริยากับอลูมิเนียมหลอมเหลว กลายเป็นชั้นสารประกอบเชิงโลหะของอลูมิเนียม – เหล็ก ในรูปที่ 3 แสดงให้เห็นโครงสร้างพื้น (สีเทาเข้ม) และ second phase (สีเทาสว่าง) กระจายอยู่ทั่วโครงสร้างพื้น เมื่อทำการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDX ในตารางที่ 2 แสดงให้เห็นว่าตำแหน่งที่ 1 มีปริมาณของอลูมิเนียม 52.15 %wt. ปริมาณของเหล็ก 38.49 %wt. เป็นสารประกอบเชิงโลหะชนิด Al-Fe (Al-Fe IMC) และตำแหน่งที่ 2 มีปริมาณของเหล็ก 93.70 %wt. เป็นเฟสของเหล็ก (Fe phase) โดยจากรูปที่ 3 การกระจายตัวของ Al-Fe IMC และ Fe phase สอดคล้องกับงานวิจัยของ Kruehong และคณะ [7] ที่พบว่าบริเวณ IMC ประกอบด้วย Al-Fe IMC และ Fe phase ประมาณ 30 %

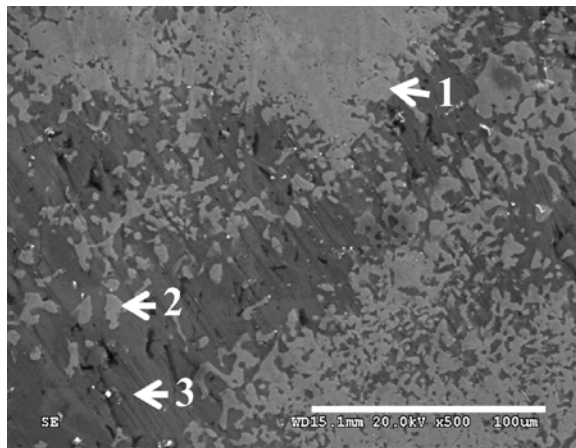


รูปที่ 3 โครงสร้างจุลภาคของบริเวณ IMC

ตารางที่ 2 องค์ประกอบของธาตุที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDX ตามตำแหน่งในรูปที่ 3

ตำแหน่ง ที่	องค์ประกอบของธาตุ (Wt.%)			
	C	Fe	Al	Si
1	6.55	38.49	52.15	2.81
2	6.30	93.70	-	-

รูปที่ 5 แสดงโครงสร้างบริเวณ Interface ซึ่งบริเวณระหว่างชั้น IMC และชั้น Coating จากรูปจะพบโครงสร้างพื้น (สีเทาเข้ม) บริเวณสีเทาสว่างที่เป็นแผ่น และอนุภาคที่กระจายตัวออกมา ทำการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDX ดังแสดงในตารางที่ 3 พบว่าตำแหน่งที่ 1 และตำแหน่งที่ 2 มีปริมาณของอลูมิเนียมใกล้เคียงกัน โดยที่ตำแหน่งที่ 1 มีปริมาณของเหล็กสูงกว่าแต่มีปริมาณของซิลิกอนน้อยกว่า จึงสามารถบ่งชี้ได้ว่าตำแหน่งที่ 1 เป็นสารประกอบเชิงโลหะชนิด Al-Fe ในขณะที่ตำแหน่งที่ 2 มีปริมาณของซิลิกอนสูงถึง 6.93 %wt. เป็นสารประกอบเชิงโลหะชนิด Al-Fe-Si [9] และตำแหน่งที่ 3 เป็นโครงสร้างพื้นอลูมิเนียม เนื่องจากมีปริมาณของอลูมิเนียมสูงถึง 89.60 %wt.

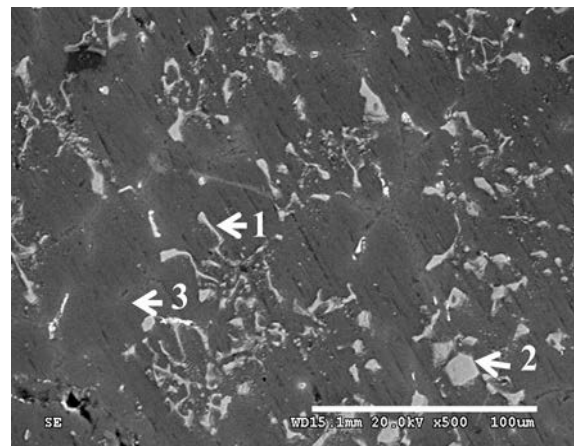


รูปที่ 4 โครงสร้างจุลภาคของบริเวณ Interface

ตารางที่ 3 องค์ประกอบของธาตุที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDX ตามตำแหน่งในรูปที่ 4

ตำแหน่ง ที่	องค์ประกอบของธาตุ (Wt.%)				
	C	Fe	Al	Si	O
1	3.70	32.98	60.39	2.93	-
2	5.42	24.23	63.82	6.93	-
3	5.43	2.61	89.60	0.57	1.79

โครงสร้างจุลภาคของบริเวณ Coating ในรูปที่ 7 ปรากฏโครงสร้างลักษณะคล้ายเข็ม (Needle-like) และโครงสร้างลักษณะคล้ายหกเหลี่ยม (Hexagonal like) บนโครงสร้างพื้น เมื่อทำการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDX พบว่าโครงสร้างลักษณะคล้ายเข็มในตำแหน่งที่ 1 และโครงสร้างลักษณะคล้ายหกเหลี่ยมในตำแหน่งที่ 2 มีปริมาณของอลูมิเนียม (62.29 และ 64.18 %wt.) ปริมาณของเหล็ก (26.02 และ 23.39 %wt.) และปริมาณของซิลิกอน (7.32 และ 8.51 %wt.) อยู่ในช่วงใกล้เคียงกัน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าตำแหน่งที่ 1 และตำแหน่งที่ 2 นั้นถึงจะมีลักษณะโครงสร้างที่แตกต่างกันก็เป็นสารประกอบเชิงโลหะชนิด Al-Fe-Si เช่นเดียวกัน [9] โดยที่ลักษณะโครงสร้างคล้ายเข็มมีปริมาณของเหล็กมากกว่าโครงสร้างลักษณะคล้ายหกเหลี่ยม ส่วนตำแหน่งที่ 3 ที่มีปริมาณของอลูมิเนียมสูงถึง 92.84 %wt. แสดงว่าเป็นบริเวณของโครงสร้างพื้นอลูมิเนียม



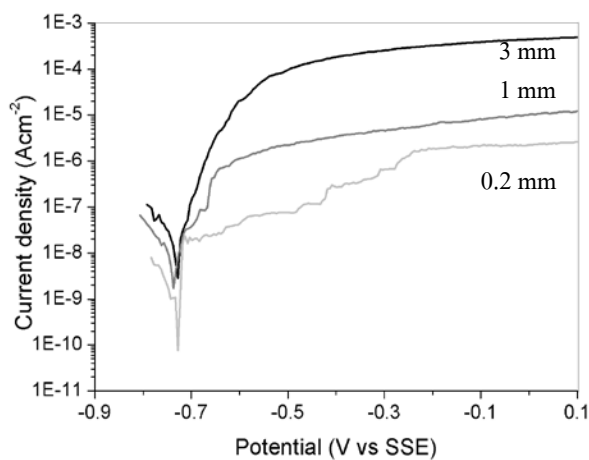
รูปที่ 5 โครงสร้างจุลภาคของบริเวณ Coating

ตารางที่ 4 องค์ประกอบของธาตุที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDX ตามตำแหน่งในรูปที่ 5

ตำแหน่ง ที่	องค์ประกอบของธาตุ (Wt.%)				
	C	Fe	Al	Si	O
1	4.07	26.02	62.29	7.32	-
2	3.92	23.39	64.18	8.51	-
3	3.63	-	92.84	1.09	2.44

2.2 พฤติกรรมทางไฟฟ้าเคมีของผิวเคลือบโลหะผสมอลูมิเนียมเมื่อขนาดอิเล็กโทรดต่างกัน

การศึกษาอิทธิพลของขนาดพื้นที่ต่อพฤติกรรมทางไฟฟ้าเคมี โดยใช้ขั้วอิเล็กโทรดต่างกันสามขนาด คือ ขนาด 3 , 1 และ 0.2 มิลลิเมตร รูปที่ 6 แสดงเส้นโค้ง แอโนดิกโพลาไรซ์เซชัน (Anodic polarization curve) ของบริเวณ Coating พบว่าค่าศักย์ไฟฟ้ากักกร่อนทั้งสามมีค่าประมาณ -730 mV ซึ่งจากผลที่ได้ทำให้สามารถสรุปได้ว่าบริเวณ Coating มีการกระจายตัวของ defect อย่างสม่ำเสมอ ทำให้ค่าศักย์ไฟฟ้ากักกร่อนใกล้เคียงกัน

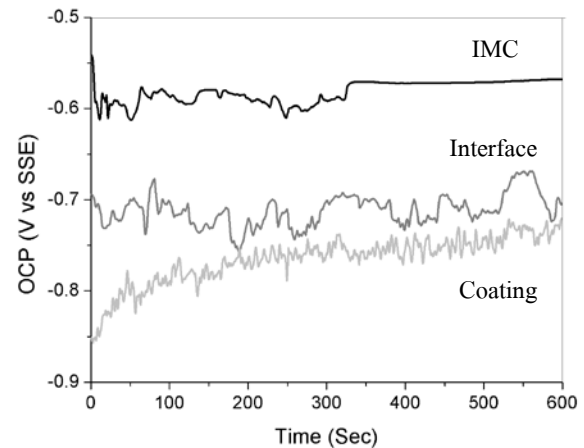


รูปที่ 6 Anodic polarization curve บริเวณ Coating ด้วยขั้วอิเล็กโทรดขนาด 3, 1 และ 0.2 มม.

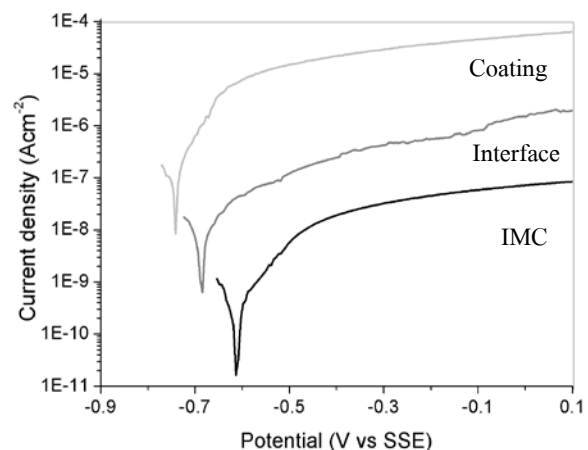
2.3 พฤติกรรมทางไฟฟ้าเคมีในระดับจุลภาค

การทดสอบค่าศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิด (OCP) ของบริเวณ IMC, บริเวณ Interface และบริเวณ Coating ในรูปที่ 7 พบว่าที่บริเวณ IMC มีค่าศักย์ไฟฟ้าที่มีความว่องไวในการทำปฏิกิริยาค้ำ (noble) กว่าทุกบริเวณ คือ -540 mV และบริเวณ Coating มีค่าศักย์ไฟฟ้าที่ลดลงมากที่สุด คือ -850 mV ซึ่งแสดงถึงความว่องไว (active) ของการเกิดปฏิกิริยาที่บริเวณนี้มากกว่าบริเวณ Interface และบริเวณ IMC ตามลำดับ นอกจากนี้ความผันผวนที่เกิดขึ้นของศักย์ไฟฟ้าทั้งสามบริเวณเกิดจากความไม่เสถียรของพาสซีฟฟิล์ม (passive film) ซึ่ง Hariyanti และคณะ [10] อธิบายว่าเกิดจากการแข่งขันระหว่างการเกิดการกัดกร่อน (pitting) และ การเกิดฟิล์มเคลือบซ้ำ (re-passivation) ไปจนถึงสิ้นสุดการทดสอบสำหรับบริเวณ interface และบริเวณ

Coating ในขณะที่บริเวณ IMC เริ่มคงที่ในเวลา 330 วินาที เนื่องจากถูกกัดกร่อนไปจนทะลุถึงเนื้อเหล็กแล้วไม่สามารถเกิดฟิล์มเคลือบซ้ำได้อีก เพราะเหล็กจะกลายเป็นตัวที่ถูกกัดกร่อนแทนอลูมิเนียม



รูปที่ 7 ค่า OCP ที่บริเวณ IMC, บริเวณ Interface และบริเวณ Coating



รูปที่ 8 Anodic Polarization Curve ที่บริเวณ IMC, บริเวณ Interface และบริเวณ Coating

รูปที่ 8 แสดงเส้นโค้งแอโนดิกโพลาไรซ์เซชัน (Anodic polarization curve) ที่บริเวณ IMC, บริเวณ Interface และบริเวณ Coating จากข้อมูลพบว่าบริเวณ Coating มีค่าศักย์ไฟฟ้ากักกร่อนเลื่อนไปด้านลบมากที่สุด (-750 mV) ซึ่งชี้ให้เห็นถึงความสามารถในการป้องกันแบบแคโทดิก (Cathodic protection) [4] ต่อพื้นผิวเหล็กมากกว่าบริเวณ interface และบริเวณ IMC ตามลำดับ นอกจากนี้จากพฤติกรรมของเส้นโค้งแอโนดิกโพลาไรซ์เซชันในรูปที่ 8 ที่แสดงให้เห็นเพียงช่วงคงที่ของกระแสที่แม้จะเพิ่ม

ศักย์ไฟฟ้ามากขึ้น ค่าความหนาแน่นของกระแสก็ยังคงที่ไม่เปลี่ยนแปลง ทำให้สามารถอธิบายลักษณะของการป้องกันได้ว่า เป็นการป้องกันการกัดกร่อนแบบพาสซีฟฟิล์ม (Passive film)

4. สรุปผลการทดลอง

1. บริเวณ IMC ปรากฏสารประกอบเชิงโลหะชนิด Al-Fe ในขณะที่บริเวณ Interface พบทั้งสารประกอบเชิงโลหะชนิด Al-Fe, Al-Fe-Si และบริเวณ Coating พบสารประกอบเชิงโลหะชนิด Al-Fe-Si เท่านั้น

2. บริเวณ Coating มีการกระจายตัวของ defect อย่างสม่ำเสมอ

3. บริเวณ IMC มีความเฉื่อยในการเกิดปฏิกิริยามากที่สุดในขณะที่บริเวณ Coating มีความไวต่อการเกิดปฏิกิริยามากที่สุด

4. บริเวณ Coating มีความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อนมากที่สุด รองลงมาคือบริเวณ Interface และบริเวณ IMC

5. บริเวณ IMC, บริเวณ Interface และบริเวณ Coating มีความสามารถในการป้องกันการกัดกร่อนแบบพาสซีฟฟิล์ม

5. เอกสารอ้างอิง

- [1] Y.Kyo, A.P. Yadav, A. Nishikata, T. Tsuru, "Hydrogen Entry Behavior of Newly Developed Al-Mg-Si Coating by Physical Vapor Deposition," Corrosion Science, Vol.53, pp. 3043 – 3047, July, 2011.
- [2] Y.Kyo, A.P. Yadav, A. Nishikata, T. Tsuru, "Hydrogen Entry Behavior of Hot-Dip Al-Mg-Si Coated Steel," Corrosion Science, Vol.53, pp. 3866-3871, July, 2011.
- [3] Hariyanti, G.A. El-Mahdy, A.Nishikata, T. Tsuru, "Electrochemical Behavior of Al-Mg-Si PVD Coating," Proceedings of Japan-China join seminar on marine corrosion, pp. 38 – 41, October, 2008.
- [4] M.Enokida, Y. Kyo, G.A. El-Mahdy, A.Nishikata, T. Tsuru, "Effect of Mg and Si Content on the Electrochemical Behavior of Al-Mg-Si Alloy," Proceedings of Japan-China join seminar on marine corrosion October, pp. 87 - 92, 2008.
- [5] K. Chihara, Y. Kyo, E. Tada, A.Nishikata, T. Tsuru, "Corrosion Behavior and Sacrificial Ability of Hot – Dip Al-Mg-Si Coated Steel," Proceedings of the sixth Japan-China joint seminar on marine corrosion and control, pp. 229 -232, March, 2012.
- [6] N. Birbilis and R.G. Buchheit, "Electrochemical Characteristics of Intermetallic Phases in Aluminum Alloys," Journal of Electrochemical Society, Vol.152, No. 4, pp. B140 – B151, March, 2005.
- [7] C. Kruehong, G.A. El-Mahdy, A.Nishikata, T. Tsuru, "Electrochemical Behavior of Gradient Polished Surface of Hot Dipped Al-Si Coated Steel," Electrochemistry, Vol. 78, No. 3, pp. 188 – 190, December, 2009.
- [8] C. Kruehong, G.A. El-Mahdy, A.Nishikata, T. Tsuru, "Influence of Second Phases on the Electrochemical Behavior of Hot-Dipped Al-Mg-Si Coated Steel," Corrosion Science, Vol. 52, pp. 2379-2386, July, 2010.
- [9] N.A. Belov, D.G. Eskin, A.A. Aksenov, "Multicomponent Phase Diagrams: Application for Commercial Aluminum Alloys," Elsevier Science, First edition, 2005.
- [10] Hariyanti, G.A. El-Mahdy, A.Nishikata, T. Tsuru, "Effect of Scratching of Coating Surface on the Electrochemical Behavior of PVD Al-Mg-Si Coated Steel," Electrochemistry, Vol. 80, No. 4, pp. 214 – 217, April, 2012.