

รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

อิทธิพลของโครงสร้างทางจุลภาคต่อสมบัติความต้านทานการกัดกร่อนของ
เหล็กเคลือบสังกะสีด้วยไฟฟ้า ปีที่ 2

Influence of Microstructure on Corrosion Properties of
Zinc-Electroplated Steels (Year II)

ทุนอุดหนุนการวิจัยจากเงินอุดหนุนทั่วไปจากรัฐบาล
ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2558
สัญญาเลขที่ GRB_APS_49_58_62_01

โดย

สถาบันวิจัยโลหะและวัสดุ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

คณะผู้วิจัย

นางสาวกนกวรรณ แสงเกียรติยุทธ	หัวหน้าโครงการ
นางสาวปราณี รัตนวลีดิโรจน์	นักวิจัย
รศ.ดร.ยุทธนันท์ บุญยงมณีรัตน์	นักวิจัย
นายจุมพฏ วานิชสัมพันธ์	นักวิจัย
นายอดิศักดิ์ ถือพลอย	นักวิจัย

กรกฎาคม 2559

กิตติกรรมประกาศ

การดำเนินโครงการวิจัยเรื่อง อิทธิพลของโครงสร้างทางจุลภาคต่อสมบัติความต้านทานการกัดกร่อนของเหล็กเคลือบสังกะสีด้วยไฟฟ้า (ปีที่ 2) สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ สถาบันวิจัยโลหะและวัสดุ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในการสนับสนุนการดำเนินงานวิจัย

ขอขอบคุณ บริษัท สยามยูไนเต็ดสตีล (1995) จำกัด ที่กรุณาให้ความอนุเคราะห์แผ่นเหล็กสำหรับการศึกษาทดลอง ขอขอบคุณบริษัท โอคูโน-ออโรเม็กซ์ (ประเทศไทย) จำกัด, บริษัท MacDermid (ประเทศไทย) จำกัด, บริษัท โคทเท็ค จำกัด และ บริษัท Helmut Fischer (ประเทศไทย) จำกัด ที่กรุณาให้ความอนุเคราะห์สารเคมี และเครื่องมือในการวิเคราะห์ทดสอบ ขอขอบคุณ บริษัท บีวีเค แพลตติ้ง จำกัด, บริษัท ไทยซิลเวค จำกัด, บริษัท เมืองใหม่โครเมียม อีเล็คโตร เพลตติ้ง จำกัด และ บริษัท ยูเนี่ยน ออโตพาร์ทส มานูแฟคเชอริง จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์การเยี่ยมชมกระบวนการผลิตในระดับอุตสาหกรรมและให้ข้อมูลอันเป็นประโยชน์สำหรับการศึกษาวิจัย

ขอขอบคุณคณะผู้ประเมินผลงานวิจัยของสถาบันวิจัยโลหะและวัสดุ ที่กรุณาให้ข้อเสนอแนะและคำแนะนำอันเป็นประโยชน์ต่อการพัฒนางานวิจัย และเนื่องจากโครงการวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนทุนวิจัยทั้งหมดจากเงินอุดหนุนทั่วไปจากรัฐบาลประจำปีงบประมาณ 2558 คณะผู้วิจัยจึงขอขอบพระคุณอย่างสูงมา ณ ที่นี้

คณะผู้วิจัย

กรกฎาคม 2559

บทคัดย่อ

การศึกษานิพจน์ของโครงสร้างทางจุลภาคของแผ่นเหล็กชุบสังกะสีต่อสมบัติความต้านทานการกัดกร่อนทำได้โดยการชุบเคลือบสังกะสีบนแผ่นเหล็กด้วยสารเคมีเกรดการค้าระบบต่าง โดยใช้กระแสไฟฟ้าในการเคลือบ 3 ชนิด คือ กระแสตรง กระแสพัลส์ และกระแสไซน์ หลังจากการชุบสังกะสีแล้วได้นำชิ้นงานดังกล่าวมาทำพาสซีเวชันสีดำและเคลือบด้วยสาร Top coat จากนั้นจึงทำการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของผิวเคลือบด้วยเทคนิค X-ray diffraction และตรวจสอบลักษณะผิวเคลือบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด และทำการวิเคราะห์ทดสอบสมบัติความต้านทานการกัดกร่อนด้วยวิธี Salt spray test อ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM B117 รวมทั้งเทคนิคทางเคมีไฟฟ้า ได้แก่ Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS) และเทคนิค Potentiodynamic polarization ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 5% โดยน้ำหนัก

ผลการศึกษาพบว่า เหล็กชุบสังกะสีที่ใช้กระแสตรง และกระแสไซน์ ให้โครงสร้างสังกะสีโดยมีระนาบ (110) เป็นระนาบหลัก ในขณะที่การใช้กระแสพัลส์จะมีระนาบ (100) เป็นระนาบหลัก โดยการทำพาสซีเวชันสีดำและเคลือบ Top coat ไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของสังกะสี จากการตรวจสอบลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคพบการปกคลุมอย่างสม่ำเสมอของชั้นเคลือบพาสซีเวชันและ Top coat บนผิวเคลือบสังกะสีในทุกชุดการทดลอง ทั้งนี้ผลการศึกษานิพจน์ความต้านทานการกัดกร่อนของผิวเคลือบด้วยวิธีการทดสอบทั้ง 2 วิธีคือ การทดสอบการกัดกร่อนแบบละอองเกลือและวิธีทางเคมีไฟฟ้า แสดงให้เห็นว่า โครงสร้างของผิวเคลือบสังกะสีที่เตรียมขึ้นจากการใช้รูปแบบกระแสที่ต่างกันคือ กระแสตรง กระแสพัลส์ และกระแสไซน์ ไม่ส่งผลที่เด่นชัดต่อสมบัติความต้านทานการกัดกร่อนของผิวเคลือบ แต่การทำพาสซีเวชันสีดำต่อด้วยการเคลือบ Top coat มีผลทำให้ผิวเคลือบมีสมบัติความต้านทานการกัดกร่อนที่ดีขึ้นตามลำดับ

Abstract

This research investigates the influence of microstructure of galvanized steel on its corrosion resistance. The test samples are prepared by the electrodeposition process, using a commercially-available alkaline electrolyte and 3 types of current waveforms, namely direct, pulse, and sine-curve. Subsequently, the galvanized samples are applied with a black chromate-based passivation layer and a clear top-coat layer. Their microstructure is examined using X-ray diffractometry (XRD) and scanning electron microscopy (SEM). The corrosion resistance of the samples is assessed with the salt spray test, following the ASTM B117, electrochemical impedance spectroscopy (EIS), and potentiodynamic polarization in 5 wt.% NaCl solutions.

The study shows that the specimens prepared with the direct and sine-curve currents exhibits (110) crystallographic orientation, whereas those prepared with the pulse current shows (100) preferred orientation. The passivation and top-coat layers do not affect the microstructure of the zinc layer, and cover uniformly on the zinc layer for all sets of samples. The corrosion resistant results obtained from salt spray testing and electrochemical testing revealed that the microstructure of zinc coatings prepared by using different applied current waveforms including direct, pulse, and sine-curve do not influence obviously on their corrosion resistance. While black passivation followed by top coating provide a significant improvement on corrosion resistance of the coatings, respectively.

สารบัญเรื่อง

หน้า

กิตติกรรมประกาศ	i
บทคัดย่อ	ii
Abstract	iii
สารบัญเรื่อง	iv
สารบัญตาราง	vi
สารบัญรูป	vii
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 การทบทวนวรรณกรรม/สารสนเทศ (Information) ที่เกี่ยวข้อง	1
บทที่ 2 วิธีดำเนินการวิจัย	5
2.1 การชุบสังกะสีด้วยสารเคมีกรดการคาร์บอนต่าง	5
2.1.1 การเตรียมชิ้นงาน	5
2.1.2 การเตรียมน้ำยาชุบสังกะสีกรดการคาร์บอนต่าง	5
2.1.3 การทดลองชุบสังกะสีบนแผ่นเหล็กด้วยไฟฟ้า	6
2.1.4 การเคลือบพาสซีเวชันสีดำบนแผ่นเหล็กชุบสังกะสี	6
2.1.5 การเคลือบ Top coat บนแผ่นเหล็กชุบสังกะสีที่ผ่านการทำพาสซีเวชันสีดำ	6
2.2 การศึกษาการพัฒนาสารเติมแต่งสำหรับการชุบสังกะสีด้วยไฟฟ้า	7
2.2.1 การเตรียมสารละลายชุบเคลือบ	7
2.2.2 การชุบสังกะสีบนแผ่นเหล็กด้วยไฟฟ้า	7
2.2.3 การชุบสังกะสีบนแผ่นเหล็กด้วยไฟฟ้าโดยใช้ชุด Hull cell	8
2.3 การวิเคราะห์ทดสอบ	9
บทที่ 3 ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง	11
3.1 ผลการสำรวจข้อมูลการผลิตเหล็กชุบสังกะสีด้วยไฟฟ้าในประเทศไทย	11
3.2 การชุบสังกะสีด้วยไฟฟ้าด้วยน้ำยากรดการคาร์บอนต่าง	12
3.2.1 ลักษณะของผิวเคลือบ	12
3.2.2 โครงสร้างผลึกของผิวเคลือบ	17
3.2.3 ผลการศึกษาสมบัติความต้านทานการกัดกร่อนของผิวเคลือบ	18
3.2.3.1 การทดสอบด้วยเครื่องทดสอบการกัดกร่อนแบบละอองเกลือ	18
3.2.3.2 การทดสอบด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า	20
3.3 ผลการศึกษาการพัฒนาสารเติมแต่งสำหรับการชุบสังกะสีด้วยไฟฟ้า	24
3.3.1 ลักษณะของผิวเคลือบ	24

สารบัญเรื่อง (ต่อ)

หน้า

3.3.1.1 การชุบสังกะสีบนแผ่นเหล็กด้วยระบบกรด	24
3.3.1.2 ผลการทดลองชุบด้วยชุด Hull cell	25
3.3.2 ลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคของผิวเคลือบ	25
3.3.3 ผลการทดสอบความต้านทานการกัดกร่อนของผิวเคลือบ	26
3.3.3.1 ผลการทดสอบด้วยเทคนิคทางเคมีไฟฟ้า	26
3.3.3.2 ผลการทดสอบ Salt spray test	28
บทที่ 4 สรุปผลการทดลอง	29
บรรณานุกรม	30
ภาคผนวก	31
ประวัติคณะผู้วิจัย	32

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 ส่วนประกอบน้ำยาชุบเกรดการค้ำระบบต่าง	5
ตารางที่ 2.2 ส่วนประกอบในสารละลายชุบและภาวะที่ใช้ในการชุบสังกะสีโดยใช้สารเติมแต่งที่พัฒนาขึ้น	7
ตารางที่ 2.3 ส่วนประกอบในสารละลายชุบและภาวะที่ใช้ในการชุบสังกะสีโดยใช้สารเติมแต่งเกรดการค้ำ	7
ตารางที่ 3.1 ธาตุที่เป็นองค์ประกอบบนผิวเคลือบของแผ่นเหล็กชุบสังกะสีก่อน-หลังการทำพาสซีเวชันสีด้า และหลังการทำพาสซีเวชันสีด้า + Top coat จากการวิเคราะห์ด้วย EDX	15
ตารางที่ 3.2 ค่าจากเส้นโพลาริเซชันของแผ่นเหล็กชุบสังกะสีด้วยไฟฟ้า ชุดที่ 1 และ ชุดที่ 2 โดยใช้สารเคมี เกรดการค้ำระบบต่าง ที่ใช้กระแสไฟฟ้าในการเคลือบสังกะสี 3 ชนิด คือ กระแสตรง กระแสพัลส์ และกระแสไซน์ และผ่านการทำพาสซีเวชันสีด้า ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 5% โดยน้ำหนัก	22
ตารางที่ 3.3 ค่าจากเส้นโพลาริเซชันของแผ่นเหล็กชุบสังกะสีด้วยไฟฟ้าโดยใช้สารเคมีเกรดการค้ำระบบต่าง ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 5% โดยน้ำหนัก	24
ตารางที่ 3.4 ค่าจากเส้นโพลาริเซชันของแผ่นเหล็กก่อนและหลังการชุบ ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 5% โดยน้ำหนัก	28

สารบัญรูป

		หน้า
รูปที่ 2.1	เครื่องจ่ายกระแสไฟฟ้าและเซลล์ที่ใช้ในการชุบเคลือบสังกะสีบนแผ่นเหล็ก	6
รูปที่ 2.2	แสดงการชุบสังกะสีด้วยชุด Hull cell	8
รูปที่ 2.3	เครื่องทดสอบการกัดกร่อนแบบละอองเกลือและลักษณะการวางชิ้นงานทดสอบ	9
รูปที่ 2.4	ชุดอุปกรณ์ทดสอบการกัดกร่อนด้วยเครื่องโพเทนชิโอมิเตอร์	10
รูปที่ 3.1	ลักษณะแผ่นเหล็กชุบสังกะสีที่เตรียมขึ้นจากน้ำยาชุบเกรดการค้าระบบต่าง ใช้กระแสไฟฟ้าในการชุบสังกะสี 3 ชนิด คือ กระแสตรง กระแสพัลส์ และกระแสไซน์ โดยเปรียบเทียบระหว่างการทำพาสซีเวชันสีดำ และการทำพาสซีเวชันสีดำ + Top coat	13
รูปที่ 3.2	ภาพถ่าย SEM แสดงลักษณะผิวเคลือบของแผ่นเหล็กชุบสังกะสีที่ใช้กระแสไฟฟ้าในการชุบสังกะสี 3 ชนิด คือ กระแสตรง กระแสพัลส์ และกระแสไซน์ โดยเปรียบเทียบระหว่างก่อน-หลังการทำพาสซีเวชันสีดำ และหลังการทำพาสซีเวชันสีดำ + Top coat	14
รูปที่ 3.3	ลักษณะภาคตัดขวางของแผ่นเหล็กชุบสังกะสีด้วยไฟฟ้ากระแสตรง โดยเปรียบเทียบระหว่าง a) ก่อนการทำพาสซีเวชันสีดำ b) หลังการทำพาสซีเวชันสีดำ c) หลังการทำพาสซีเวชันสีดำ + Top coat	16
รูปที่ 3.4	XRD patterns ของผิวเคลือบของแผ่นเหล็กชุบสังกะสีและผ่านการทำพาสซีเวชันสีดำ โดยเป็นชิ้นงานที่เตรียมขึ้นจากการชุบโดยใช้กระแสไฟฟ้า 3 ชนิด คือ a) กระแสตรง b) กระแสพัลส์ c) กระแสไซน์	17
รูปที่ 3.5	XRD patterns ของผิวเคลือบของแผ่นเหล็กชุบสังกะสีที่เตรียมขึ้นจากการชุบโดยใช้กระแสตรง โดยเปรียบเทียบระหว่าง a) ก่อนการทำพาสซีเวชันสีดำ b) หลังการทำพาสซีเวชันสีดำ c) หลังการทำพาสซีเวชันสีดำ + Top coat	18
รูปที่ 3.6	ลักษณะพื้นผิวของแผ่นเหล็กชุบสังกะสีด้วยไฟฟ้าที่เตรียมขึ้นจากระบบต่างๆ ภายหลังจากทดสอบ salt spray ชุดที่ 1 ที่ระยะเวลาการทดสอบ 24 และ 72 ชั่วโมง	19
รูปที่ 3.7	ลักษณะพื้นผิวของแผ่นเหล็กชุบสังกะสีด้วยไฟฟ้าที่เตรียมขึ้นจากระบบต่างๆ ภายหลังจากทดสอบ salt spray ชุดที่ 2 ที่ระยะเวลาการทดสอบ 24 ชั่วโมง	20
รูปที่ 3.8	กราฟ Nyquist และเส้นโพลาริเซชัน ของแผ่นเหล็กชุบสังกะสีชุดที่ 1 ที่เตรียมขึ้นจากน้ำยาชุบเคลือบเกรดการค้าระบบต่างที่ใช้กระแสไฟฟ้าในการเคลือบสังกะสี 3 ชนิด คือ กระแสตรง กระแสพัลส์ และกระแสไซน์ และผ่านการทำพาสซีเวชันสีดำ ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 5% โดยน้ำหนัก	21
รูปที่ 3.9	กราฟ Nyquist และเส้นโพลาริเซชัน ของแผ่นเหล็กชุบสังกะสีชุดที่ 2 ที่เตรียมขึ้นจากน้ำยาชุบเคลือบเกรดการค้าระบบต่าง ที่ใช้กระแสไฟฟ้าในการเคลือบสังกะสี 3 ชนิด คือ กระแสตรง กระแสพัลส์ และกระแสไซน์ และผ่านการทำพาสซีเวชันสีดำ ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 5% โดยน้ำหนัก	22

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 3.10	กราฟ Nyquist ของแผ่นเหล็กชุบสังกะสีด้วยไฟฟ้าที่เตรียมขึ้นจากการชุบโดยใช้กระแสตรง กระแสพัลส์ และกระแสไซน์ โดยเปรียบเทียบระหว่างหลังการทำพาสซีเวชันสีดำ และหลังการทำพาสซีเวชันสีดำ + Top coat ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 5% โดยน้ำหนัก	23
รูปที่ 3.11	เส้นโพลาริเซชันของแผ่นเหล็กชุบสังกะสีด้วยไฟฟ้าที่เตรียมขึ้นจากการชุบโดยใช้กระแสตรง กระแสพัลส์ และกระแสไซน์ โดยเปรียบเทียบระหว่างหลังการทำพาสซีเวชันสีดำและหลังการทำพาสซีเวชันสีดำ + Top coat ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 5% โดยน้ำหนัก	23
รูปที่ 3.12	ลักษณะแผ่นเหล็กที่ผ่านการชุบสังกะสีโดยใช้ CTSD เป็นสารเติมแต่งที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ โดยทำการชุบด้วยความหนาแน่นกระแส 2 A/dm^2 เป็นเวลา 10 นาที	24
รูปที่ 3.13	ภาพแสดงแผ่นเหล็กชุบสังกะสี (บน) และภาพจำลองลักษณะผิวเคลือบสังกะสีบนแผ่นเหล็ก (ล่าง) จากการศึกษาการชุบด้วยชุด Hull cell ที่กระแส 2 A/dm^2 เป็นเวลา 10 นาที โดยใช้สารเติมแต่งชนิด (a) 40 ml/L CTSD และ (b) สารเติมแต่งเกรดการค้าในสารละลายชุบเคลือบ	25
รูปที่ 3.14	ภาพถ่ายจาก SEM แสดงลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคของผิวชุบสังกะสี ที่ความหนาแน่นกระแส 2 A/dm^2 เป็นเวลา 10 นาที โดยใช้สารเติมแต่งชนิด (a) 40 ml/L CTSD และ (b) สารเติมแต่งเกรดการค้า	26
รูปที่ 3.15	กราฟ Nyquist ของ (a) แผ่นเหล็กก่อนการชุบและแผ่นเหล็กหลังการชุบสังกะสีด้วยไฟฟ้าโดยใช้สารเติมแต่งชนิด (b) สารเติมแต่งเกรดการค้า และ (c) 40 ml/L CTSD โดยทำการทดสอบในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 5% โดยน้ำหนัก	27
รูปที่ 3.16	เส้นโพลาริเซชันของ (a) แผ่นเหล็กก่อนการชุบและแผ่นเหล็กหลังการชุบสังกะสีด้วยไฟฟ้าโดยใช้สารเติมแต่งชนิด (b) สารเติมแต่งเกรดการค้า และ (c) 40 ml/L CTSD โดยทำการทดสอบในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 5% โดยน้ำหนัก	27
รูปที่ 3.17	ลักษณะแผ่นเหล็กที่ผ่านการชุบสังกะสีโดยใช้สารเติมแต่งชนิด CTSD ก่อนและหลังการทดสอบ Salt spray test อ้างอิงตามมาตรฐาน B117 ที่ระยะเวลาการทดสอบ 24, 48, 72 และ 120 ชั่วโมง	28

บทที่ 1

บทนำ

เหล็กเป็นวัสดุพื้นฐานที่สำคัญและมีการใช้งานกันมากในหลากหลายอุตสาหกรรม เช่น อุตสาหกรรมก่อสร้าง อุตสาหกรรมยานยนต์ อุตสาหกรรมเครื่องจักรกล อุตสาหกรรมเครื่องใช้ไฟฟ้า และอุตสาหกรรมบรรจุภัณฑ์อาหาร เป็นต้น ด้วยสมบัติเด่นในด้านความแข็งแรง ความเหนียว และความทนทานต่อการสึกหรอ อย่างไรก็ตามข้อด้อยที่สำคัญของเหล็ก คือ การเกิดสนิม ซึ่งจะส่งผลให้เหล็กเกิดการเสื่อมสภาพ แนวทางหนึ่งในการป้องกัน คือ การเคลือบผิวเหล็กไม่ให้สัมผัสกับบรรยากาศ ซึ่งสังกะสีเป็นโลหะที่ได้รับความนิยมในการนำมาใช้ชุบเคลือบเหล็ก เนื่องจากมีราคาถูกและสังกะสียังมีสมบัติที่ต่างจากโลหะชนิดอื่นคือ มีสมบัติในการป้องกันการกัดกร่อนแบบคาโทดิกจากการที่มีค่า standard electrode potential ที่ต่ำกว่าเหล็ก ($Zn = -0.76\text{ V}$, $Fe = -0.44\text{ V}$) ดังนั้นเมื่ออยู่ภายใต้สภาวะที่ก่อให้เกิดการกัดกร่อน ผิวเคลือบสังกะสีซึ่งมีความว่องไวต่อปฏิกิริยามากกว่าจึงเกิดการกัดกร่อนก่อนเนื้อเหล็ก

การเคลือบสังกะสีบนผิวเหล็กสามารถทำได้ใน 3 วิธีการ คือ การชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อน การเคลือบสังกะสีแบบใช้ไฟฟ้า และการเคลือบสังกะสีแบบไม่ใช้ไฟฟ้า ซึ่งวิธีการเคลือบสังกะสีแบบใช้ไฟฟ้าเป็นวิธีการที่มีการใช้งานอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ และนิยมใช้ในผลิตภัณฑ์ที่ต้องการผิวเคลือบสังกะสีที่สามารถควบคุมความหนาของชั้นเคลือบได้ และมีผิวเรียบ สวยงาม

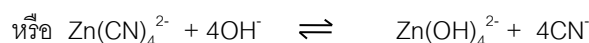
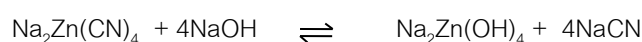
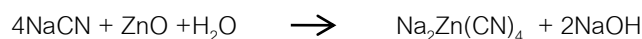
ปัจจุบันประเทศไทยมีโรงงานอุตสาหกรรมการผลิตเหล็กเคลือบสังกะสีด้วยไฟฟ้าอยู่เป็นจำนวนมากโดยมีการผลิตด้วยระบบที่ใช้ไฮยาโนด และระบบที่ไม่ใช้ไฮยาโนดซึ่งแบ่งออกได้เป็นแบบกรดและแบบด่าง ซึ่งเทคโนโลยีและสารเคมีที่ใช้ในกระบวนการเคลือบเป็นปัจจัยสำคัญที่มีบทบาทในการกำหนดลักษณะของผิวเคลือบ ได้แก่ ความสม่ำเสมอของผิวเคลือบ ความมันเงา อัตราเร็วในการชุบเคลือบ และยังมีผลต่อผิวเคลือบภายหลังการทำ passivation โดยข้อมูลจากการศึกษาในงานวิจัยที่ผ่านมาแสดงให้เห็นว่า เทคโนโลยีและสารเคมีที่ใช้ในกระบวนการเคลือบจะมีผลต่อลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคของผิวเคลือบ

สำหรับงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาสมบัติของแผ่นเหล็กชุบสังกะสีด้วยไฟฟ้าที่ใช้สารละลายชุบเคลือบกรด การค้าในระบบด่าง โดยใช้รูปแบบกระแสในการชุบ 3 ชนิด คือ กระแสตรง กระแสพัลส์ กระแสไซน์ จากนั้นจึงทำการเคลือบพาสซีวชั้นสีดำและเคลือบ Top coat โดยศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างทางจุลภาคของผิวเคลือบต่อสมบัติความต้านทานการกัดกร่อนของชิ้นงาน ซึ่งผลการวิจัยดังกล่าวจะเป็นประโยชน์ต่ออุตสาหกรรมการผลิตเหล็กเคลือบสังกะสี โดยสามารถนำมาใช้เป็นแนวทางในการประเมินสมบัติความต้านทานต่อการกัดกร่อนจากโครงสร้างทางจุลภาคของเหล็กเคลือบสังกะสี นอกจากนี้ยังได้ทำการศึกษาทดลองการใช้สารเติมแต่งที่เตรียมขึ้นในห้องปฏิบัติการสำหรับการชุบสังกะสีในระบบกรด เพื่อใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาสารเติมแต่งต่อไป

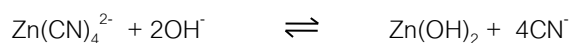
1.1 การทบทวนวรรณกรรม/สารสนเทศ (Information) ที่เกี่ยวข้อง

การชุบเคลือบสังกะสีด้วยไฟฟ้านั้น ไอออนของโลหะที่ใช้เป็นผิวเคลือบจะเกิดการเคลื่อนที่จากขั้วบวกไปยังขั้วลบ โดยกระแสไฟฟ้าที่ผ่านเข้าไปในสารละลายนั้นจะส่งผลให้ชิ้นงานที่ขั้วแคโทดถูกเคลือบโดยโลหะที่อยู่ในสารละลาย ซึ่งในที่นี้สังกะสีเป็นแอโนด และชิ้นงานเหล็กเป็นแคโทดจมอยู่ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่ประกอบด้วยสารเติมแต่ง (additives) ได้แก่ สารที่ทำหน้าที่ช่วยทำให้การเคลือบติดของสังกะสีบนผิวเหล็กเป็นไปอย่างสม่ำเสมอ (carrier) และสารที่ช่วยทำให้ผิวเคลือบมีความมันเงา (brightener)

นับตั้งแต่อดีตจนถึงช่วงปี 1970 ระบบการชุบเคลือบสังกะสีด้วยไฟฟ้ามักใช้สารประเภทที่มีไซยาไนด์เป็นองค์ประกอบ เนื่องจากเป็นสารที่มีสมบัติช่วยทำความสะอาดผิวเหล็กก่อนการชุบเคลือบไปในตัวจึงทำให้ได้ผิวชุบที่ดี มีความสวยงาม ซึ่งสารเคมีหลักที่ใช้ในบ่อชุบได้แก่ $\text{Zn}(\text{CN})_2$, ZnO , NaCN , NaOH โดยสารประกอบเชิงซ้อนของสังกะสีจะเป็นตัวให้สังกะสีไปยึดติดบนชิ้นงาน ส่วนไซยาไนด์ช่วยทำให้ชิ้นงานมีความเรียบและผิวมีความเงาใน ขณะที่ไฮดรอกไซด์จะช่วยทำให้การละลายของขั้วบวกดีขึ้น การสูญเสียของไซยาไนด์ลดลง อัตราเร็วในการเคลือบผิวสูงขึ้น โดยปฏิกิริยาการชุบเคลือบที่เกิดขึ้นเป็นดังนี้ [1, 2]



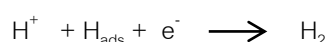
การเติม NaOH ลงไปในน้ำยาจึงเป็นการลดปริมาณ cyanide zinc complex และเพิ่มปริมาณความเข้มข้น zincate ion ทั้งนี้ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นที่ขั้วคาโทดเป็นดังนี้



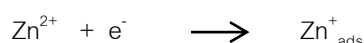
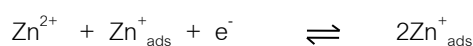
แต่ด้วยข้อจำกัดเรื่องอันตรายของสารเคมีต่อสิ่งแวดล้อม จึงทำให้มีการพัฒนาสารประเภทที่ไม่ใช่ไซยาไนด์ออกสู่ตลาดเพื่อใช้แทนสารเดิม ปัจจุบันกระบวนการชุบเคลือบสังกะสีด้วยไฟฟ้าที่ใช้ในอุตสาหกรรมส่วนใหญ่เป็นแบบไม่ใช่ไซยาไนด์ซึ่งโดยทั่วไปแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทคือ แบบกรดและแบบด่าง [1]

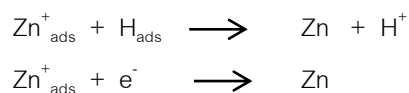
การชุบเคลือบสังกะสีแบบกรดใช้น้ำยาชุบที่แบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด คือ ชนิดคลอไรด์ซึ่งมีองค์ประกอบที่สำคัญ ได้แก่ ZnCl_2 , KCl , NH_4Cl , boric acid, additive และชนิดซัลเฟตซึ่งมีองค์ประกอบที่สำคัญ ได้แก่ ZnSO_4 , aluminiumsulphate, NaCl , boric acid, additive [3] โดยควบคุม pH อยู่ในช่วง 2-6 ที่อุณหภูมิ 15 – 55 องศาเซลเซียส [1] ทั้งนี้สารเคมีประเภทเกลือคลอไรด์ของโซเดียม อะลูมิเนียม สังกะสีหรือแอมโมเนียม ในน้ำยาชุบจะทำหน้าที่เป็นตัวเพิ่มการนำไฟฟ้าของสารละลาย กรดบอริกทำหน้าที่เป็นบัฟเฟอร์ ควบคุมค่าความเป็นกรดด่างของน้ำยาชุบ การชุบเคลือบวิธีนี้มีข้อดีคือ มีอัตราการชุบเคลือบเร็ว ได้ผิวเคลือบที่มีความเงา ต้นทุนการชุบต่ำ เหมาะสำหรับงานชุบที่เป็นเหล็กหล่อและเหล็กที่มีคาร์บอนสูง แต่มีข้อเสียคือ สนิมเคลือบที่ได้หลังจากการทำ passivation กรณีที่ต้องการทำสีดำจะได้สีที่ไม่ดำสนิท และคลอไรด์ที่มีอยู่ในระบบจะเป็นอันตรายต่อผู้ปฏิบัติงานและมีฤทธิ์กัดกร่อนโครงสร้างและอุปกรณ์ในกระบวนการผลิตของโรงงาน

สำหรับปฏิกิริยาการชุบเคลือบของการใช้น้ำยาระบบกรดนั้นได้มีการอธิบายปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นที่บริเวณขั้วคาโทดไว้ว่ามีความเกี่ยวข้องกับการดูดซับอะตอมไฮโดรเจนไว้ที่ขั้ว (H_{ads}) ดังนี้ [1]

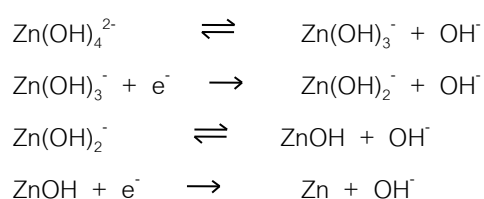


ทั้งนี้ปฏิกิริยาการชุบเคลือบของสังกะสีเกิดขึ้นจากปฏิกิริยารีดักชันของ Zinc ion ในสารละลายและ Zn^+_{ads} ที่ถูกดูดซับไว้ที่ผิวโลหะดังนี้





สำหรับการชุบเคลือบแบบต่างนั้นมีส่วนประกอบในน้ำยาชุบ ได้แก่ Zn, NaOH หรือ KOH และสารเติมแต่ง มีการควบคุมอุณหภูมิอยู่ในช่วง 15 – 45 องศาเซลเซียส ข้อเสียของกระบวนการนี้คือ มีอัตราการชุบเคลือบช้าและผิวมีความเงาน้อยกว่าการชุบแบบกรด แต่มีจุดเด่น คือ ได้ผิวเคลือบที่มีความสม่ำเสมอ โดยมีความหนาของผิวเคลือบในช่วง low และ high current density ที่ใกล้เคียงกัน และสามารถทำ passivation สีดำได้ดี นอกจากนี้ยังมีค่าใช้จ่ายในการซ่อมบำรุงเครื่องจักรและโครงสร้างโรงงานจากการกัดกร่อนต่ำกว่าการชุบเคลือบแบบกรด [4] ทั้งนี้ปฏิกิริยาของการชุบเคลือบด้วยน้ำยาแบบต่างเป็นดังนี้ [1]



การชุบให้ได้ผิวชุบเคลือบที่ดีนั้นนอกจากจะขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ ได้แก่ การเตรียมผิวชิ้นงาน ปริมาณกระแสไฟฟ้า ระยะเวลาการชุบ อุณหภูมิของบ่อชุบแล้ว ปัจจัยที่มีความสำคัญโดยเฉพาะอย่างยิ่งต่อโครงสร้างของผิวชุบเคลือบก็คือ สารเคมีที่ใช้เป็นสารเติมแต่งในน้ำยาชุบเคลือบ

สารเติมแต่งเป็นสารอินทรีย์ที่ทำหน้าที่ 2 บทบาท คือ เป็น carrier และ brightener โดยในการชุบแบบกรดนั้นสารที่ทำหน้าที่เป็น carriers ได้แก่ polyalcohol, polyamine, fatty alcohols, polyglycolethers และสารที่มีไนโตรเจนชนิด quaternary ส่วน brighteners ได้แก่ สารประเภท aliphatic, aromatic และ heterocyclic ที่มีหมู่คาร์บอนิล [1] ส่วนในการชุบแบบต่างนั้นสารที่มีการมุ่งพัฒนากันมากคือ สารที่ทำหน้าที่เป็น carrier ซึ่งได้แก่สารประเภท polyaliphatic amines, aliphatic polyamines, สารที่ได้จากปฏิกิริยาระหว่าง heterocyclic ที่มีอะตอมไนโตรเจนกับ epihalohydrin และ polyamines ซึ่งช่วยปรับปรุงด้านความมันเงาของผิวเคลือบ [5] สารพอลิเมอร์ที่ประกอบด้วย quaternary amine ซึ่งช่วยแก้ปัญหาเรื่องความสม่ำเสมอของผิวเคลือบเมื่อใช้กับสารละลายที่มีสังกะสีในปริมาณความเข้มข้นสูง [6] เป็นต้น ส่วน brightener มักเป็นสารประเภท aromatic aldehydes เช่น vanillin, anisaldehyde, veratraldehyde สารประกอบซัลเฟต เช่น thiourea และสารพอลิเมอร์ เช่น polyvinylalcohol, polyvinylpyrrolidone เป็นต้น [5, 7]

สำหรับการทำ Passivation ด้วยวิธี Chromate conversion coatings นั้น เป็นกรรมวิธีที่เพิ่มสมบัติความต้านทานการกัดกร่อนให้แก่ชิ้นงานภายหลังการชุบเคลือบสังกะสี โดยทำการจุ่มชิ้นงานลงในสารละลายที่ประกอบด้วยเกลือของโครเมต ซึ่งอาจเป็น hexavalent (Cr^{6+}) หรือ trivalent (Cr^{3+}) และ activators หรือ สารที่ทำให้เกิดฟิล์ม ซึ่งได้แก่ sulfates, phosphates, fluorides เป็นต้น ขณะที่จุ่มชิ้นงานจะเกิดปฏิกิริยาระหว่างผิวโลหะกับสารละลายได้เป็นฟิล์มที่มีความบางในระดับ 0.0000001 นิ้ว ชิ้นงานที่ผ่านการชุบโครเมตจะให้สีต่างๆ เช่น สีใส สีฟ้า สีเหลือง และสีดำ เป็นต้น ซึ่งมีผลต่อความคงทนต่อการกัดกร่อนในระดับที่แตกต่างกันออกไป [4]

ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของผิวเคลือบเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อลักษณะผิวเคลือบที่ปรากฏ รวมทั้งลักษณะสีผิวเคลือบภายหลังการทำ Passivation ตลอดจนความสามารถในการยึดติดกับสีเคลือบโดยการชุบเคลือบแบบต่างให้ลักษณะโครงสร้างผิวเคลือบแบบ columnar ในแนวตั้งฉากกับผิวเหล็ก ซึ่งแต่ละ columnar จะมีความสูงต่ำไม่เท่ากันจึงเกิดลักษณะผิวที่ไม่เรียบ ส่งผลให้สามารถยึดเกาะกับโครเมตและสีเคลือบได้ดี ในขณะที่การชุบเคลือบแบบกรดจะให้ผิวเคลือบที่มีโครงสร้างแบบ laminar (ขนานกับผิวเหล็ก) โครงสร้างผลึกจะเกาะกันอย่างแน่นหนาและมีผิวเรียบ จึงมีความมันเงาสูง แต่มีข้อเสียคือ โครเมตและสีเคลือบจะยึดเกาะบนผิวเคลือบได้ยาก [4]

ตัวอย่างการศึกษาผลของสารเติมแต่งต่อโครงสร้างผลึกของผิวเคลือบสังกะสีโดยวิธีชุบเคลือบด้วยไฟฟ้าแบบกรดจากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า โครงสร้างของผิวเคลือบในกรณีที่ไม่ใช้สารเติมแต่งมีลักษณะเป็นแผ่นบางรูปทรง hexagonal ที่เรียงซ้อนกัน (laminated) ผิวเคลือบมีความหมอง (dull) เมื่อใช้ cetyltrimethylammonium bromide (CTAB) เป็น leveler มีผลทำให้เกิดโครงสร้างรูปเข็มที่มีขนาดสม่ำเสมอ ($1\ \mu\text{m}$) ได้ผิวที่เงา แต่เมื่อใช้ CTAB ร่วมกับ brighteners คือ salicylaldehyde และ acetic acid พบว่าได้เกรนที่มีขนาดเล็กมากและมีผิวเรียบมากยิ่งขึ้น จึงได้ผิวเคลือบที่มีความมันเงา [8]

ส่วนการศึกษาผลของสารเติมแต่งต่อโครงสร้างผลึกของผิวเคลือบสังกะสีโดยวิธีชุบเคลือบด้วยไฟฟ้าแบบต่างพบว่า กรณีที่ไม่ได้ใช้สารเติมแต่งผิวเคลือบจะมีความขรุขระมาก แต่เมื่อใช้สารที่ได้จากปฏิกิริยาระหว่าง imidazole กับ epihalohydrin จะมีผลทำให้ zinc dendrites หายไปและเกิดการรวมตัวของเกรนและเมื่อใช้ polyquaternary amine salt ซึ่งมีความหนาแน่นประจุสูงจะมีผลในการช่วยชะลอการเติบโตของ dendrites ทำให้โครงสร้างของผิวเคลือบมีความสม่ำเสมอ มีความเรียบ และโครงสร้างมีการเรียงตัวกันแน่นมากยิ่งขึ้น [9]

Li และคณะ (2014) ทำการชุบสังกะสีในระบบกรดที่ใช้สารละลายอิเล็กโทรไลต์ชนิดซัลเฟตโดยใช้กระแสไฟฟ้าแบบ pulse reverse พบว่า การชุบเคลือบโดยใช้พอลิอะคริลาไมด์ (polyacrylamide) เป็น additive จะได้ชั้นเคลือบสังกะสีที่มีโครงสร้างเป็น nanocrystalline โดยมีขนาดของเกรนลดลงตามปริมาณความหนาแน่นกระแสของ forward pulse ที่ใช้ ในขณะที่กระแส reverse pulse มีส่วนช่วยทำให้ผิวเคลือบมีความเรียบขึ้น ทั้งนี้โครงสร้างที่เป็น nanocrystalline ดังกล่าวสามารถช่วยปรับปรุงสมบัติของชั้นเคลือบในด้านความแข็ง และความต้านทานการกัดกร่อนให้ดีขึ้น [10]

Khorsand และคณะ (2011) ได้ศึกษาลักษณะทางโครงสร้างพื้นฐานวิทยาและความต้านทานต่อการกัดกร่อน ของแผ่นเหล็กคาร์บอนต่ำที่ผ่านการชุบสังกะสีในระบบกรดที่ใช้สารละลายอิเล็กโทรไลต์ชนิดซัลเฟต โดยใช้ oxalic acid และ Sn^{2+} เป็น additive พบว่า การใช้ Sn^{2+} เป็น additive ในน้ำยาเพื่อทำการชุบเคลือบบนชิ้นงานที่ผ่านการเตรียมผิวด้วยวิธี electropolish จะให้โครงสร้างของผิวเคลือบสังกะสีในลักษณะรูปทรงแผ่นหกเหลี่ยมที่มีการจัดเรียงด้วยระนาบ (002) เป็นหลัก โดยโครงสร้างดังกล่าวมีการจัดเรียงซ้อนทับกัน ซึ่งลักษณะดังกล่าวให้ค่ากระแสการกัดกร่อนที่ต่ำกว่า หรือมีความต้านทานต่อการกัดกร่อนที่ดีกว่าการชุบบนชิ้นงานที่เตรียมผิวด้วยวิธีเชิงกล ที่มีผลทำให้โครงสร้างผลึกรูปทรงหกเหลี่ยมนั้นเรียงอยู่กระจัดกระจายแยกจากกัน สำหรับกรณีการใช้ oxalic acid เป็น additive พบว่า ให้โครงสร้างของผิวเคลือบสังกะสีในลักษณะเป็นเม็ด (granular) ที่มีการจัดเรียงด้วยระนาบของรูปทรงพีระมิด (101) และปริซึม (100) และ (110) ซึ่งโครงสร้างดังกล่าวเป็นรูปทรงที่มีโอกาสสัมผัสกับสารละลายที่กัดกร่อนได้ง่ายจึงมีผลทำให้ชั้นเคลือบดังกล่าวมีค่ากระแสการกัดกร่อนที่สูงได้เช่นกัน [11]

บทที่ 2

วิธีดำเนินการวิจัย

2.1 การชุบสังกะสีด้วยสารเคมีเกรดการค้าระบบต่าง

2.1.1 การเตรียมชิ้นงาน

นำแผ่นเหล็ก ความหนา 0.4 มิลลิเมตร ขนาดกว้าง×ยาว เท่ากับ 2 x 9 เซนติเมตร มาล้างไขมันด้วยการแช่ใน soak clean ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที แล้วล้างด้วยน้ำประปาและน้ำ DI จากนั้นกำจัดสนิมและทำการกระตุ้นผิวเหล็กด้วยการแช่ในสารละลาย 14% w/w HCl ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 5 นาที ล้างด้วยน้ำประปาและน้ำ DI ตามลำดับ

2.1.2 การเตรียมน้ำยาชุบสังกะสีเกรดการค้าระบบต่าง

2.1.2.1 เตรียมน้ำ Zinc ปริมาตร 1000 ml ด้วยวิธีการดังนี้

- เติมน้ำ 400 ml ลงในบีกเกอร์ขนาด 1000 ml จากนั้นเติม NaOH 120 g ลงไปพร้อมกวนให้ละลาย
- เติม ZnO 12.5 g ลงในบีกเกอร์ขนาด 250 ml จากนั้นละลาย ZnO ด้วยน้ำ DI ปริมาณน้อยๆ เพื่อให้ได้สารลักษณะเป็น paste ข้นสีขาว
- เติม paste ของ ZnO ในข้อ 2 ลงในสารละลาย NaOH พร้อมกวนจนกระทั่ง ZnO ละลายหมด
- ตั้งสารละลายทิ้งไว้เป็นเวลา 2-3 ชั่วโมง จากนั้นกรองสารละลาย
- ปรับปริมาตรสารละลายด้วยน้ำกลั่นจนครบ 1000 ml

จากวิธีการดังกล่าวจะทำให้ได้น้ำ Zinc ที่มีปริมาณ Zinc metal อยู่ในช่วง 10-12 g/L และ sodium hydroxide อยู่ในช่วง 115 – 130 g/L ซึ่งสามารถทำการวิเคราะห์ปริมาณ Zinc metal และ sodium hydroxide ได้โดยใช้วิธีการไตเตรทตามที่ระบุไว้ในภาคผนวก

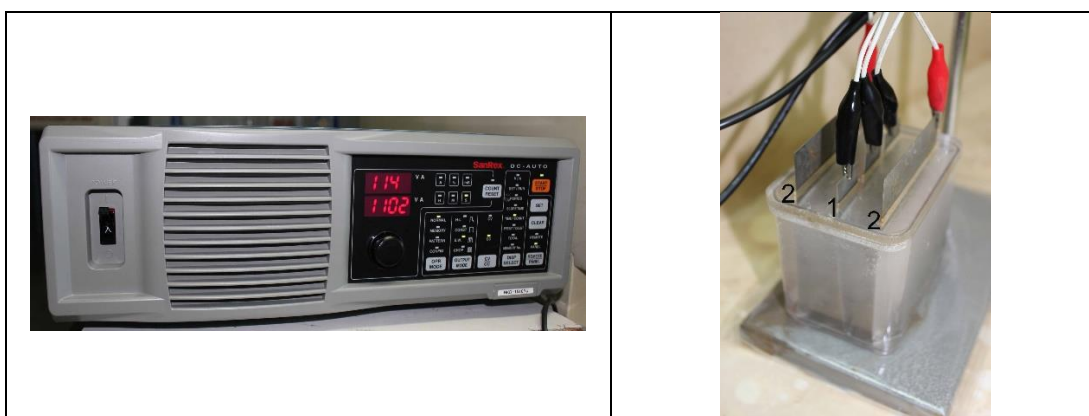
2.1.2.2 เติม Additive และ Brightener เกรดการค้าลงในน้ำ Zinc ด้วยความเข้มข้นดังแสดงในตารางที่ 2.1 ทั้งนี้ในกรณีที่ต้องการเตรียมน้ำยาชุบปริมาตร 1000 ml สามารถทำได้โดยการเติม Additive ปริมาตร 7.5 ml และ Brightener ปริมาตร 1.0 ml ลงในน้ำ Zinc ปริมาตร 800 ml แล้วกวนสารละลายให้เข้ากัน จากนั้นจึงปรับปริมาตรให้ครบ 1000 ml ด้วยน้ำ Zinc

ตารางที่ 2.1 ส่วนประกอบน้ำยาชุบเกรดการค้าระบบต่าง

น้ำ Zinc * ซึ่งประกอบด้วย	
- Zinc metal (10 – 14 g/L)	10.4 g/L
- Sodium hydroxide (120 – 140 g/L)	123 g/L
Envirozin 120 Additive	7.5 ml/L
Envirozin 120 Brightener	1.0 ml/L

2.1.3 การทดลองชุบสังกะสีบนแผ่นเหล็กด้วยไฟฟ้า

นำแผ่นเหล็กที่เตรียมผิวแล้วแช่ลงในน้ำยาชุบเคลือบ ปริมาตร 280 มิลลิลิตร จากนั้นต่อวงจรไฟฟ้าเข้ากับเครื่องจ่ายกระแสไฟฟ้า (SANREX: Model HKD-1510FU) เพื่อทำการชุบสังกะสี โดยหมายเลข 1 เป็นขั้วแคโทด (ขั้วลบ) ใช้แผ่นเหล็กขนาด กว้าง×ยาว เท่ากับ 2.0×10.0 เซนติเมตร จำนวน 3 แผ่น สำหรับทำการชุบเคลือบ หมายเลข 2 เป็นขั้วแอโนด (ขั้วบวก) ใช้แผ่นเหล็กขนาด กว้าง×ยาว เท่ากับ 3.2×5.0 เซนติเมตร จำนวน 2 แผ่น เป็นขั้วแอโนด แสดงในรูปที่ 2.1 ทำการชุบโดยใช้รูปแบบการจ่ายกระแสไฟฟ้า 3 ชนิด คือ กระแสตรง, กระแสแบบพัลส์ (current on time 18 ms, current off time 18 ms), กระแสแบบ Sine wave ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 2 A/dm^2 ระยะเวลาการชุบของกระแสไฟฟ้า 3 ชนิด เท่ากับ 26, 47 และ 23 นาที ตามลำดับ เพื่อควบคุมความหนาของชั้นเคลือบสังกะสีให้เท่ากัน และมีความหนาของชั้นเคลือบสังกะสีประมาณ 10 ไมครอน เมื่อชุบเสร็จแล้วนำชิ้นงานออกจากร้าน้ำยาชุบ ล้างน้ำ แล้วใช้ Dryer เป่าชิ้นงานให้แห้ง



รูปที่ 2.1 เครื่องจ่ายกระแสไฟฟ้าและเซลล์ที่ใช้ในการชุบสังกะสีบนแผ่นเหล็ก

2.1.4 การเคลือบพาสซีเวชันสีดำบนแผ่นเหล็กชุบสังกะสี

เตรียมสารละลายพาสซีเวชันสีดำเกรดการค้า (ES Coat Black SOP) ปริมาตร 1000 ml โดยให้มีค่า pH อยู่ในช่วง 2.0-2.5 แล้วนำชิ้นงานเหล็กที่ผ่านการชุบสังกะสีมากระตุ้นผิว โดยจุ่มใน 1%v/v HNO_3 ที่อุณหภูมิห้อง 10 วินาที แล้วล้างชิ้นงานด้วยน้ำประปา และน้ำ DI ตามลำดับ จากนั้น จุ่มชิ้นงานลงในน้ำยาพาสซีเวชันสีดำเกรดการค้า ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 45 วินาที ล้างด้วยน้ำประปาและน้ำ DI แล้วใช้ Dryer เป่าชิ้นงานให้แห้ง

2.1.5 การเคลือบ Top coat บนแผ่นเหล็กชุบสังกะสีที่ผ่านการทำพาสซีเวชันสีดำ

เตรียมสารละลาย Top coat เกรดการค้า (Sealmex 400W) ความเข้มข้น 100 ml/L ปริมาตร 1000 ml ค่า pH อยู่ในช่วง 8.5 - 9.5 ขณะทำการชุบ กวนสารละลายด้วยแท่งแม่เหล็ก ความเร็วรอบ 150 รอบ/นาที นำชิ้นงานชุบสังกะสีและผ่านการทำพาสซีเวชันสีดำในหัวข้อ 2.1.4 มาจุ่มในน้ำยา Top coat เป็นเวลา 1 นาที ยกชิ้นงานขึ้น แล้วปล่อยให้สารละลาย Top coat ไหลลงสู่ด้านล่างชิ้นงานเป็นเวลา 90 วินาที จากนั้นใช้ Dryer เป่าชิ้นงานให้แห้ง นำชิ้นงานไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 นาที

2.2 การศึกษาการพัฒนาสารเติมแต่งสำหรับการชุบสังกะสีด้วยไฟฟ้า

ในโครงการวิจัยนี้ได้ทำการพัฒนาสารเติมแต่งขึ้นสำหรับใช้เติมในสารละลายชุบสังกะสีระบบกรด โดยที่สารดังกล่าวจัดอยู่ในประเภทอนุพันธ์ของไคโตซาน (chitosan derivative, CTSD) โดยได้ทำการศึกษาทดลองการใช้ CTSD เติมลงในสารละลายชุบเคลือบที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ ในการชุบสังกะสีด้วยไฟฟ้ากระแสตรง โดยทำการเปรียบเทียบกับผิวเคลือบที่เตรียมได้จากการใช้สารเติมแต่งเกรดการค้า

2.2.1 การเตรียมสารละลายชุบเคลือบ

ทำการเตรียมสารละลายชุบเคลือบโดยใช้ส่วนประกอบดังตารางที่ 2.2 ในกรณีที่ใช้ CTSD เป็นสารเติมแต่ง และใช้ส่วนประกอบดังตารางที่ 2.3 ในกรณีที่ใช้สารเติมแต่งเกรดการค้า โดยทั้ง 2 กรณี ใช้สังกะสีเป็นขั้วแอโนด ทำการชุบที่อุณหภูมิห้อง ที่ความหนาแน่นกระแส 2 A/dm^2 เป็นเวลา 10 นาที

ตารางที่ 2.2 ส่วนประกอบในสารละลายชุบและภาวะที่ใช้ในการชุบสังกะสีโดยใช้สารเติมแต่งที่พัฒนาขึ้น

ส่วนประกอบในสารละลาย / ปัจจัยในการชุบ	ปริมาณความเข้มข้น / ภาวะในการชุบ
$\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	80 g/L
NH_4Cl	150 g/L
สารเติมแต่ง : สารละลาย CTSD*	5, 10, 20, 40 ml/L
pH	3 (ปรับด้วยสารละลาย 10% H_2SO_4 or Na_2CO_3)

*สารละลาย CTSD เตรียมได้โดยนำสาร CTSD ปริมาณ 1.00 g ละลายใน 3 M acetic acid ปริมาตร 20 ml

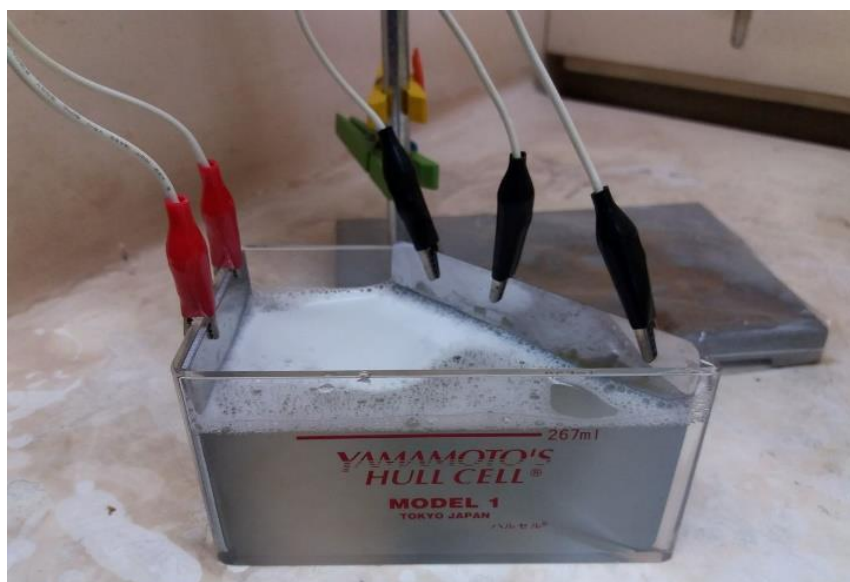
ตารางที่ 2.3 ส่วนประกอบในสารละลายชุบและภาวะที่ใช้ในการชุบสังกะสีโดยใช้สารเติมแต่งเกรดการค้า

ส่วนประกอบในสารละลาย / ปัจจัยในการชุบ	ปริมาณความเข้มข้น / ภาวะในการชุบ
ZnCl_2	50 g/L
NH_4Cl	210 g/L
COLSID K251 Carrier	30 ml/L
COLSID K251 Brightener	1.25 ml/L
pH	5.0 (ปรับด้วย 14%v/v NH_4OH)

2.2.2 การชุบสังกะสีบนแผ่นเหล็กด้วยไฟฟ้า

- เตรียมผิวแผ่นเหล็กขนาดกว้าง×ยาว เท่ากับ 2×9 เซนติเมตร เช่นเดียวกับวิธีการในข้อ 2.1.1
- นำสารละลายชุบเคลือบ ปริมาตร 228 ml เทใส่ในบีกเกอร์ขนาด 250 ml
- นำแผ่นสังกะสีขนาดกว้าง×ยาว เท่ากับ 2×9 เซนติเมตร จำนวน 2 แผ่น มาใช้เป็นขั้วแอโนด แच्छลงในสารละลายชุบให้มีระยะห่างของขั้วแอโนดกับแผ่นเหล็กเท่ากับ 2 เซนติเมตร โดยวางตรงกลางระหว่าง anode ทั้ง 2 แผ่น
- นำขั้วบวกมาต่อเข้ากับแผ่นสังกะสีแอโนด และนำขั้วลบมาต่อเข้ากับแผ่นเหล็กที่ต้องการชุบ
- ตั้งค่าเครื่องจ่ายกระแสไฟฟ้าให้มีค่าความหนาแน่นกระแส 2 A/dm^2 โดยทำการชุบเป็นเวลา 10 นาที

- เมื่อทำการชุบด้วยไฟฟ้าเสร็จเรียบร้อยแล้ว ให้นำชิ้นงานออกมาล้างด้วยน้ำประปา และน้ำ DI ตามลำดับ
 - เป่าลมร้อนบนชิ้นงานจนกระทั่งแห้งสนิท
- 2.2.3 การชุบสังกะสีบนแผ่นเหล็กด้วยไฟฟ้าโดยใช้ชุด Hull cell
- นำแผ่นเหล็กเคลือบสังกะสีที่ใช้สำหรับการทดสอบ Hull cell ซึ่งมีขนาด $10 \times 7 \text{ cm}^2$ (ใช้พื้นที่ชุบเคลือบรวม 2 ด้านเท่ากับ 100 cm^2) มาจุ่มใน 14% HCl เพื่อขจัดสังกะสีโดยจุ่มแช่ไว้จนกระทั่งหมดฟองก๊าซ จากนั้นล้างด้วยน้ำประปาและน้ำ DI ตามลำดับ
 - นำสารละลายชุบปริมาตร 267 ml เทในกล่อง Hull cell
 - นำแผ่นสังกะสีแอโนดขนาดกว้าง×ยาว เท่ากับ 6.4×6.4 เซนติเมตร วางในแนวตั้ง ชิดขอบด้านข้างของกล่อง Hull cell และนำแผ่นเหล็กที่เตรียมผิวแล้วมาวางแนวตั้งชิดขอบด้านที่เอียงเป็นรูปสี่เหลี่ยมคางหมู ดังรูปที่ 2.2
 - นำขั้วบวกมาต่อเข้ากับแผ่นสังกะสีแอโนด และขั้วลบมาต่อเข้ากับแผ่นเหล็กที่ต้องการชุบ
 - ตั้งค่าเครื่องจ่ายกระแสไฟฟ้าให้มีกระแสที่ 2.0 A ทำการชุบเป็นเวลา 10 นาที แล้วนำชิ้นงานออกมาล้างด้วยน้ำประปา และน้ำ DI ตามลำดับ
 - เป่าลมร้อนจนกระทั่งชิ้นงานแห้งสนิท
 - ตรวจสอบผิวเคลือบด้วยสายตา ควบคู่กับการใช้ไม้มบรทัด Hull cell เพื่ออ่านค่าความหนาแน่นกระแส ณ บริเวณผิวเคลือบลักษณะต่างๆ



รูปที่ 2.2 แสดงการชุบสังกะสีด้วยชุด Hull cell

2.3 การวิเคราะห์ทดสอบ

2.3.1 ตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาคและลักษณะของชั้นเคลือบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope) จากบริษัท Jeol รุ่น JSM-6400

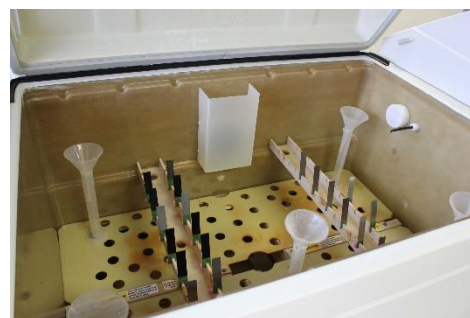
2.3.2 วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีและโครงสร้างผลึกของชั้นเคลือบด้วยเครื่อง X-ray diffractometer จากบริษัท Bruker AXS Model D8 Discover : Target = Cu, Voltage = 40 kV, Current = 40 mA, Angle 5 – 80 degree, Increment = 0.02 degree/step, Scan speed = 0.2 sec/step

2.3.3 ตรวจสอบลักษณะของชั้นเคลือบโดยตัดชิ้นงานทดสอบภาคตัดขวาง แล้วอัดขึ้นรูปชิ้นงานแบบร้อนเพื่อขัดเตรียมชิ้นงานดูโครงสร้างทางจุลภาค ทำการขัดด้วยกระดาษทรายจนถึงเบอร์ 2500 ตามด้วยผ้าขัดและผงขัดเพชรขนาด 1 ไมครอนในน้ำมัน

2.3.4 ตรวจสอบสมบัติความต้านทานการกัดกร่อนของชิ้นงาน ด้วย 2 วิธีการ คือ

2.3.4.1 การทดสอบความต้านทานการกัดกร่อนแบบละอองเกลือ

นำชิ้นงานทดสอบวางในเครื่อง Salt spray บริษัท Q-FOG Model CCT600 (รูปที่ 2.3) โดยอ้างอิงตามมาตรฐานการทดสอบตาม ASTM B117 โดยก่อนการทดสอบ ตรวจสอบลักษณะผิวและคราบสนิมบนชิ้นงาน จากนั้นวางชิ้นงานทำมุม 30 องศาบนชั้นวางอุปกรณ์ โดยใช้สารละลายโซเดียมคลอไรด์ 5% โดยน้ำหนัก ค่าความเป็นกรดต่างในช่วง 6.5 ถึง 7.2 เป็นสารละลายในการทดสอบ ควบคุมอุณหภูมิให้อยู่ในช่วง 35 ± 1 องศาเซลเซียส เมื่อเวลาการทดสอบผ่านไปทุกๆ 24 ชั่วโมง ตรวจพิจารณาการเปลี่ยนแปลงบนพื้นผิวชิ้นงาน โดยนำชิ้นงานออกจากเครื่องทดสอบ ทำความสะอาดชิ้นงานด้วยน้ำอุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส



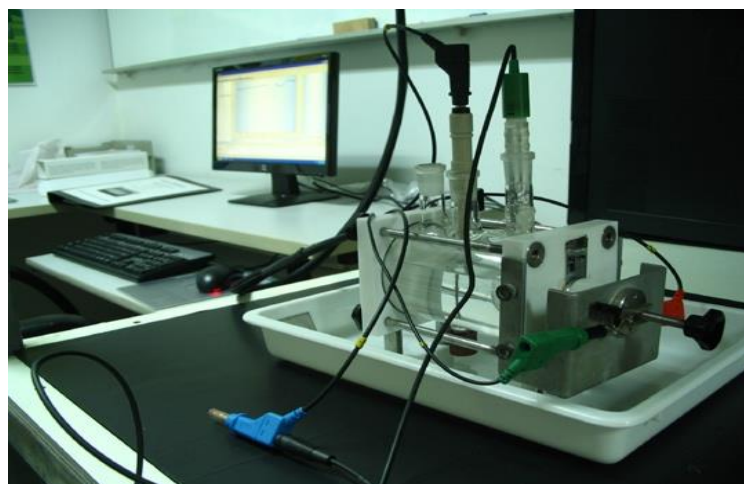
รูปที่ 2.3 เครื่องทดสอบการกัดกร่อนแบบละอองเกลือและลักษณะการวางชิ้นงานทดสอบ

2.3.4.2 การทดสอบความต้านทานการกัดกร่อนด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า

■ ตรวจสอบสมบัติความต้านทานการกัดกร่อนของชิ้นงานทดสอบในสารละลายไฮเดียมคลอไรด์ 5% โดยน้ำหนัก ด้วยเทคนิค Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS) และ Linear polarization โดยใช้เครื่อง Potentiostat Model : μ Autolab Type III โดยใช้โปรแกรม NOVA version 1.11.2 โดยมีค่าพารามิเตอร์ ดังนี้

- วัดค่าศักย์ไฟฟ้าวงจรมืด (OCP) เป็นเวลา 600 วินาที
- ความถี่การวัดในช่วง 0.01 – 100,000 Hz, ค่าแอมพลิจูด 0.01 โวลต์, Integration time 0.125 วินาที
- การวัดค่าศักย์ไฟฟ้าวงจรมืด (OCP) เป็นเวลา 300 วินาที
- ค่าศักย์ไฟฟ้าเริ่มต้น (start potential) เท่ากับ -0.25 โวลต์จากค่าศักย์ไฟฟ้าวงจรมืด
- ค่าศักย์ไฟฟ้าสิ้นสุด (stop potential) 1.5 โวลต์จากค่าศักย์ไฟฟ้าวงจรมืด
- อัตราการเพิ่มความต่างศักย์ (scan rate) 0.001 โวลต์/วินาที

■ ติดตั้งชิ้นงานที่เซลล์ทดสอบ โดยใช้ Platinum Rod เป็น Counter electrode ใช้ Saturated calomel electrode (SCE) เป็น Reference electrode และติดตั้งผ่านสะพานเกลือ (Salt bridge) แล้วเทสารละลาย NaCl ปริมาตร 300 ml ลงในเซลล์ทดสอบ (รูปที่ 2.4)



รูปที่ 2.4 ชุดอุปกรณ์ทดสอบการกัดกร่อนด้วยเครื่องโพเทนชิโอมิเตอร์

บทที่ 3

ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง

3.1 ผลการสำรวจข้อมูลการผลิตเหล็กชุบสังกะสีด้วยไฟฟ้าในประเทศไทย

จากการสอบถามผู้จำหน่ายสารเคมีและผู้รับจ้างผลิตเหล็กชุบสังกะสีด้วยไฟฟ้าในประเทศไทย พบว่า ชี้นส่วนยานยนต์และชี้นส่วนเครื่องใช้ไฟฟ้าเป็นกลุ่มอุตสาหกรรมหลักที่มีการใช้เหล็กเคลือบสังกะสีด้วยไฟฟ้า โดย น้ำยาที่ใช้ในการชุบเคลือบสังกะสีแบบใช้ไฟฟ้า แบ่งออกเป็น 3 ชนิด คือ ระบบไซยาไนด์ ระบบกรด และระบบต่าง ซึ่ง สารเคมีทั้ง 3 ชนิดนี้มีข้อดี ข้อด้อยที่แตกต่างกัน กล่าวคือ ไซยาไนด์เป็นระบบดั้งเดิมที่มีการใช้งานมายาวนาน สามารถเคลือบชิ้นงานได้เงางาม สม่ำเสมอ และเคลือบชิ้นงานที่ซับซ้อนได้ดี โดยมีอัตราการสิ้นเปลืองน้ำยาค่อนข้างต่ำ ไซยาไนด์ที่ใช้ในระบบมีความเป็นพิษ และไม่เป็นมิตรสิ่งแวดล้อม ทำให้ปัจจุบันผู้ผลิตหลายรายเลิกใช้ระบบนี้ สำหรับระบบกรด สามารถเคลือบชิ้นงานได้เรียบ มีความมันเงาสูง และสามารถชุบเคลือบได้เร็ว แต่เนื่องจาก ความเป็นกรด จึงทำให้เครื่องจักรและอุปกรณ์เกิดความเสียหายต้องเปลี่ยนอุปกรณ์และซ่อมบำรุงอยู่บ่อยครั้ง ปัจจุบันผู้ผลิตในภาคอุตสาหกรรมหลายรายจึงนิยมใช้น้ำยาชุบในระบบต่างเนื่องจากสามารถเข้าซอกชิ้นงานได้ดี แต่มี ข้อด้อยในเรื่องอัตราการชุบต่ำและสีผิวชุบไม่สวยงาม อย่างไรก็ตามในปัจจุบันมีการพัฒนาสารเติมแต่งที่ทำให้ได้ผิวชุบที่มีความมันเงาเทียบเคียงได้กับระบบกรด และได้ผิวเคลือบที่มีความหนาสม่ำเสมอ จากการสอบถามข้อมูลพบว่า โรงงานแต่ละแห่งเลือกใช้ระบบสารเคมีในการชุบตามความถนัดและความเชี่ยวชาญของตนเอง โดยปัจจุบันลูกค้ารายใหญ่มักจะเป็นผู้กำหนดคุณภาพของผลิตภัณฑ์เช่น ความหนาของผิวชุบ ความทนทานต่อการกัดกร่อน เป็นต้น ทำให้ โรงงานขนาดใหญ่หลายแห่งต้องปรับตัวให้สามารถผลิตชิ้นงานตามที่ถูกค้าต้องการได้

สำหรับพาสซีเวชันซึ่งเป็นขั้นตอนภายหลังการเคลือบสังกะสีด้วยไฟฟ้า พบว่า ผู้ผลิตส่วนใหญ่มีการนำเข้าสู่ สารเคมีจากต่างประเทศ เช่น ญี่ปุ่น เยอรมัน ไต้หวัน สหรัฐอเมริกา เป็นต้น โดยสารเคมีในน้ำยาพาสซีเวชันมักมี Hexavalent chromium เป็นองค์ประกอบหลัก แต่ในช่วง 10 ปีที่ผ่านมาได้มีการนำ Trivalent chromium มาทดแทน เนื่องจากHexavalent chromium ถูกจัดให้อยู่ในกลุ่มสารที่เป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อม สำหรับสีของฟิล์มพาสซีเวชันที่มีการใช้งานในชี้นส่วนยานยนต์ ได้แก่ สีเหลือง สีฟ้า สีรุ้ง และสีดำ ซึ่งแต่ละสีจะมีสมบัติและความสามารถในการ ป้องกันการเกิดสนิมขาวและสนิมแดงแตกต่างกัน โดยทั่วไปพบว่าความต้านทานการเกิดสนิมขาวของเหล็กเคลือบสังกะสีที่มีพาสซีเวชันสีรุ้งเมื่อทดสอบด้วยเครื่องทดสอบการกัดกร่อนแบบละอองเกลือจะต้านทานได้ดีกว่าพาสซีเวชันสีฟ้าและสีเหลือง ตามลำดับ ซึ่งข้อกำหนดและมาตรฐานการทดสอบของผู้ผลิตแต่ละรายจะแตกต่างกันออกไป ตัวอย่างเช่น เหล็กเคลือบสังกะสีด้วยไฟฟ้าที่ความหนาประมาณ 10 ไมครอน ได้กำหนดให้พาสซีเวชันสีรุ้งต้องไม่เกิดสนิมขาวเมื่อการทดสอบผ่านไป 72 ชั่วโมง และต้องไม่เกิดสนิมแดงเมื่อการทดสอบผ่านไป 240 ชั่วโมง

3.2 การชุบสังกะสีด้วยไฟฟ้าด้วยน้ำยาเกรดการค้าระบบต่าง

3.2.1 ลักษณะของผิวเคลือบ

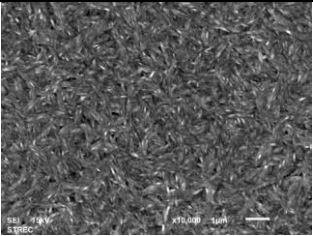
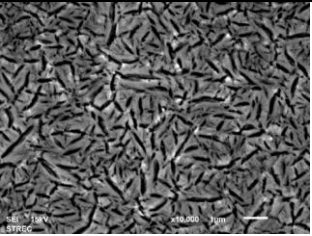
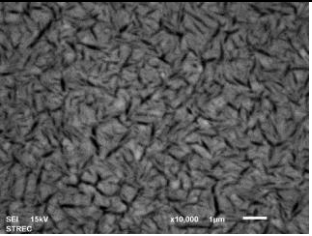
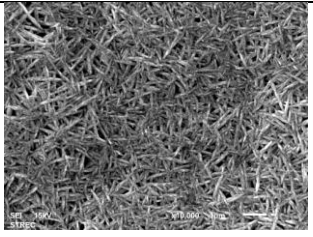
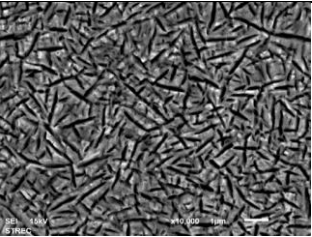
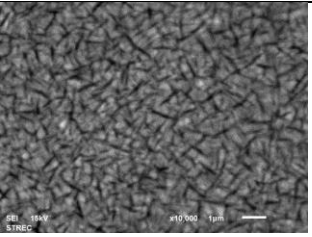
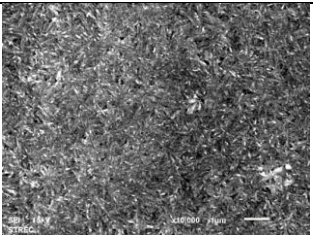
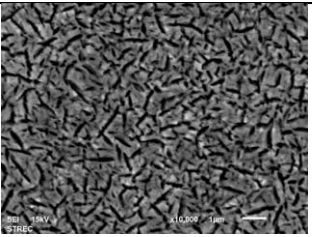
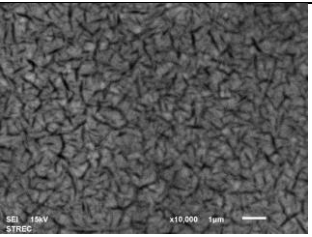
เมื่อนำแผ่นเหล็กชุบสังกะสีที่เตรียมขึ้นจากน้ำยาชุบเคลือบเกรดการค้าระบบต่างที่ใช้กระแสไฟฟ้าในการเคลือบสังกะสี 3 ชนิด คือ กระแสตรง กระแสพัลส์ และกระแสไซน์ มาทำการเคลือบพาสซีเวชันสีดำพบว่า ชิ้นงานทั้ง 3 ชนิดให้ผิวเคลือบสีดำสนิท ผิวเคลือบมีลักษณะด้าน สามารถหลุดลอกออกได้ง่ายเมื่อเกิดการขัดสี อย่างไรก็ตามหลังจากที่นำชิ้นงานเหล่านี้มาทำการเคลือบ Top coat พบว่า ผิวเคลือบมีความมันเงาเพิ่มขึ้น และยึดติดกับชิ้นงานได้ดี แสดงในรูปที่ 3.1

เมื่อตรวจสอบผิวเคลือบสังกะสีก่อนการทำพาสซีเวชันด้วย SEM พบว่า แผ่นเหล็กเคลือบสังกะสีที่ชุบด้วยกระแสไฟฟ้าทั้ง 3 ชนิด ให้ผิวเคลือบที่มีลักษณะโครงสร้างรูปทรงเรียวยาวคล้ายคลึงกันโดยมีการเรียงตัวแบบไรทิศทางซ้อนทับกันไปมา ทั้งนี้สามารถสังเกตเห็นได้ว่าการชุบด้วยไฟฟ้ากระแสตรงและกระแสไซน์ให้ผิวเคลือบที่มีโครงสร้างหนาแน่นกว่ากระแสพัลส์ เมื่อทำการเคลือบพาสซีเวชันสีดำและเคลือบ Top coat พบว่า ชิ้นงานทั้ง 3 ชนิดให้ผิวเคลือบที่มีลักษณะโครงสร้างคล้ายกันโดยมีลักษณะเป็นชั้นเคลือบที่มีพื้นผิวเป็นรอยหยักยื่นปกคลุมทั่วชิ้นงาน โดยกรณีของผิวเคลือบที่ผ่านการทำ Top coat หลังการเคลือบพาสซีเวชันจะสังเกตเห็นว่าภาพถ่าย SEM มีความสว่างกว่าชิ้นงานที่ไม่ได้ผ่านการทำ Top coat ซึ่งเป็นผลมาจากการปกคลุมของชั้นฟิล์ม Top coat บนผิวเคลือบพาสซีเวชัน (รูปที่ 3.2) เมื่อทำการวิเคราะห์ธาตุบนผิวเคลือบ ด้วย EDS ตรวจพบว่า แผ่นเหล็กชุบสังกะสีมีธาตุ Zn เป็นส่วนใหญ่ โดยพบ O และ Fe ในปริมาณเล็กน้อย ซึ่งคาดว่าเป็นผลมาจากสารประกอบออกไซด์ของสังกะสีบนชิ้นงานและมีการปกคลุมของชั้นเคลือบสังกะสีไม่ทั่วถึงในบางบริเวณ ตามลำดับ สำหรับแผ่นเหล็กชุบสังกะสีที่ผ่านการทำพาสซีเวชันสีดำ พบว่า ผิวเคลือบประกอบด้วยธาตุ P, S และ Cr ซึ่งเป็นผลจากน้ำยาเคลือบพาสซีเวชันสีดำมีธาตุเหล่านี้เป็นองค์ประกอบ ส่วนแผ่นเหล็กชุบสังกะสีที่ผ่านการทำพาสซีเวชันสีดำและมี Top coat ตรวจพบธาตุ Si บนผิวเคลือบแสดงว่า น้ำยา Top coat มีส่วนผสมของธาตุ Si เป็นองค์ประกอบสำคัญ (ตารางที่ 3.1)

ทั้งนี้ลักษณะภาคตัดขวางของแผ่นเหล็กชุบสังกะสีด้วยไฟฟ้ากระแสตรงก่อน-หลังการทำพาสซีเวชันสีดำและหลังการทำพาสซีเวชันสีดำ + Top coat แสดงในรูปที่ 3.3 โดยแผ่นเหล็กชุบสังกะสีด้วยไฟฟ้ามีพื้นผิวเรียบ ความหนาประมาณ 10 ไมครอน ลักษณะภาคตัดขวางของชิ้นงานแสดงให้เห็นว่า ผิวเคลือบสังกะสีจากการชุบด้วยน้ำยา ระบบต่างด้วยไฟฟ้ากระแสตรงมีลักษณะเป็น columnar ซึ่งส่งผลให้มีการติดสีได้ดีขณะทำการเคลือบพาสซีเวชันสีดำ ดังที่กล่าวไว้ในข้อ 3.2.1 ซึ่งผลดังกล่าวสอดคล้องกับงานวิจัยของ Loto (2012) อย่างไรก็ตามเมื่อผ่านการทำพาสซีเวชันสีดำแล้วพบว่า ความหนาของชั้นเคลือบลดลง และพบว่าพื้นผิวมีการหลุดล่อนได้ง่ายขณะขัดเตรียมชิ้นงานเพื่อดูโครงสร้างทางจุลภาค โดยแผ่นเหล็กชุบสังกะสีที่ทำพาสซีเวชันสีดำและเคลือบ Top coat ผิวเคลือบมีการหลุดล่อนน้อยกว่า

ชนิดกระแสนี้ใช้ในการชุบ	พาสซีเวชันสีดำ	พาสซีเวชันสีดำ + Top coat
กระแสตรง		
กระแสพัลส์		
กระแสไซน์		

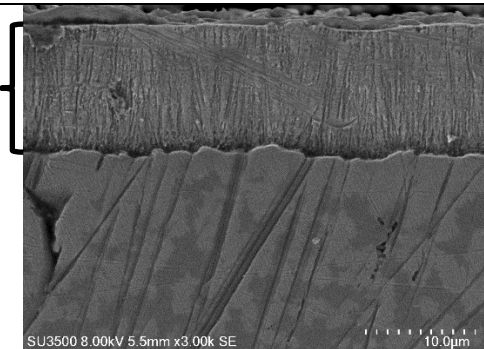
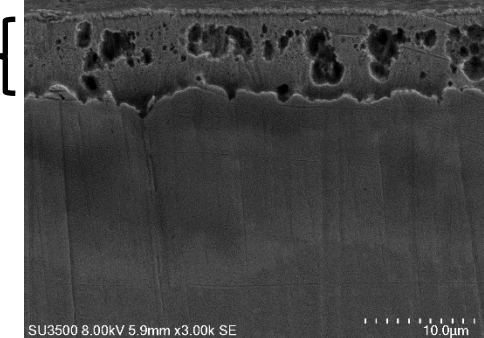
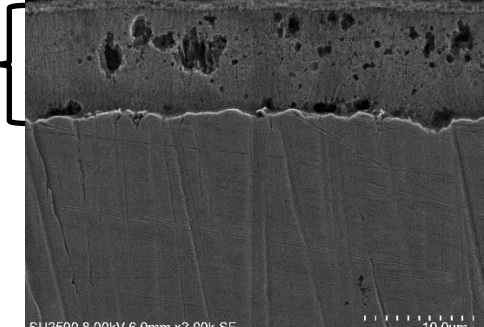
รูปที่ 3.1 ลักษณะแผ่นเหล็กชุบสังกะสีที่เตรียมขึ้นจากน้ำยาชุบเกรดการค้าระบบต่าง ใช้กระแสไฟฟ้าในการชุบสังกะสี 3 ชนิด คือ กระแสตรง กระแสพัลส์ และกระแสไซน์ โดยเปรียบเทียบระหว่างการทำพาสซีเวชันสีดำ และการทำพาสซีเวชันสีดำ + Top coat

ชนิดกระแส ที่ใช้ในการชุบ	เหล็กชุบสังกะสี		
	ก่อนการทำพาสซีเวชันสีดำ	หลังการทำพาสซีเวชันสีดำ	หลังการทำพาสซีเวชันสีดำ + Top coat
กระแสตรง			
กระแสพัลส์			
กระแสไซน์			

รูปที่ 3.2 ภาพถ่าย SEM แสดงลักษณะผิวเคลือบของแผ่นเหล็กชุบสังกะสีที่ใช้กระแสไฟฟ้าในการชุบสังกะสี 3 ชนิด คือ กระแสตรง กระแสพัลส์ และกระแสไซน์ โดยเปรียบเทียบระหว่างก่อน-หลังการทำพาสซีเวชันสีดำ และหลังการทำพาสซีเวชันสีดำ + Top coat

ตารางที่ 3.1 วัสดุที่เป็นองค์ประกอบบนผิวเคลือบของแผ่นเหล็กชุบสังกะสีก่อน-หลังการทำพาสซีเวชันสีดำ และหลังการทำพาสซีเวชันสีดำ + Top coat จากการวิเคราะห์ด้วย EDX

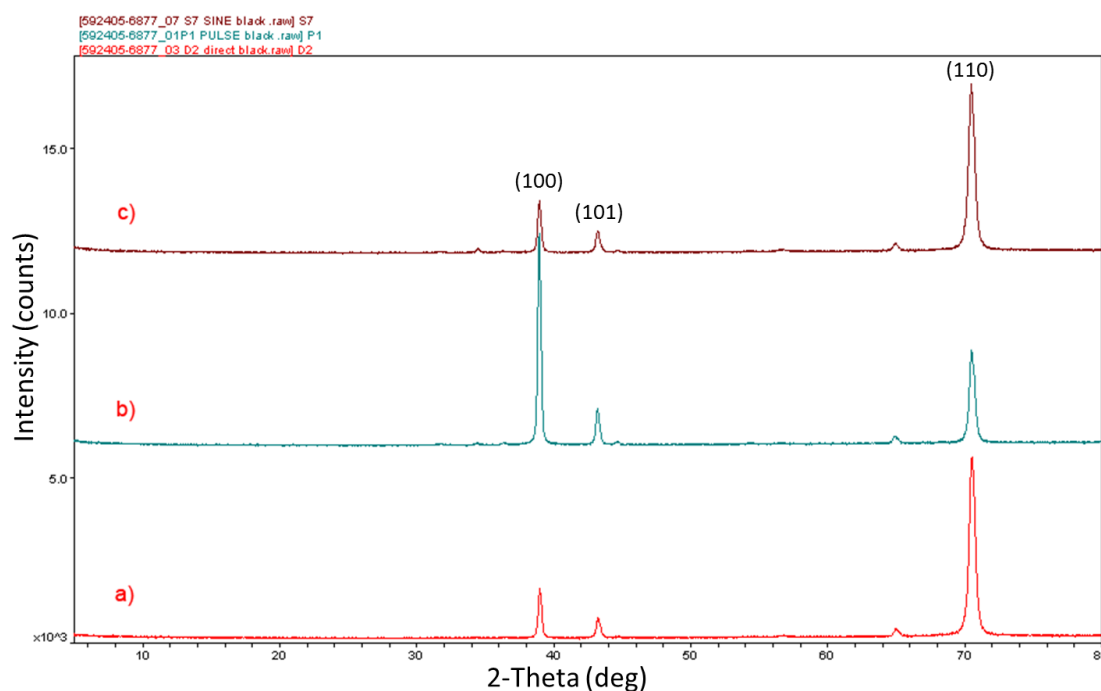
รูปแบบกระแสที่ใช้ ในการชุบสังกะสี	ผิวเคลือบ หลังการชุบสังกะสี	วัสดุที่เป็นองค์ประกอบ (% โดยน้ำหนัก)						
		Zn	O	Fe	P	S	Cr	Si
กระแสดร	-	96.55	3.45					
กระแสดร	พาสซีเวชันสีดำ	80.02	14.18	0.84	2.00	1.53	1.43	
กระแสดร	พาสซีเวชันสีดำ + Top coat	76.10	16.39	1.30	1.70	1.53	1.78	1.21
กระแสปัลส์	-	96.48	2.79	0.72				
กระแสปัลส์	พาสซีเวชันสีดำ	84.41	11.16	0.97	0.87	1.93	0.66	
กระแสปัลส์	พาสซีเวชันสีดำ + Top coat	79.85	13.45	0.94	0.95	1.91	0.94	1.97
กระแสไน	-	96.01	2.79	1.20				
กระแสไน	พาสซีเวชันสีดำ	81.23	12.99	1.59	0.99	1.88	1.32	
กระแสไน	พาสซีเวชันสีดำ + Top coat	79.45	14.77		1.08	1.50	1.30	1.90

เหล็กชุบสังกะสี	ลักษณะภาคตัดขวางของชั้นเคลือบสังกะสี
ก่อนการทำพาสซีเวชันสีดำ	
หลังการทำพาสซีเวชันสีดำ	
หลังการทำพาสซีเวชันสีดำ + Top coat	

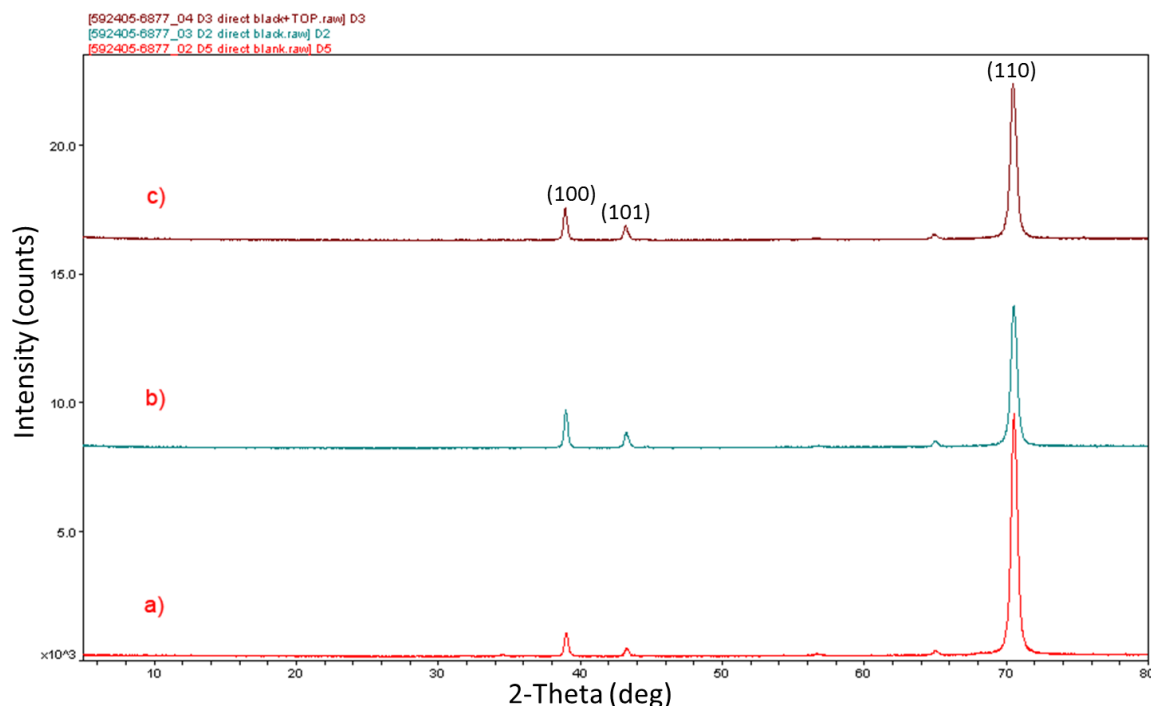
รูปที่ 3.3 ลักษณะภาคตัดขวางของแผ่นเหล็กชุบสังกะสีด้วยไฟฟ้ากระแสตรง โดยเปรียบเทียบระหว่าง a) ก่อนการทำพาสซีเวชันสีดำ b) หลังการทำพาสซีเวชันสีดำ c) หลังการทำพาสซีเวชันสีดำ + Top coat

3.2.2 โครงสร้างผลึกของผิวเคลือบ

ผลจากการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของผิวเคลือบบนแผ่นเหล็กชุบสังกะสีระบบต่างที่ผ่านการทำพาสซีเวชันสีดำ โดยใช้กระแสไฟฟ้าในการชุบสังกะสี 3 ชนิด คือ กระแสตรง กระแสพัลส์ และกระแสไซน์ ด้วย XRD ซึ่งแสดงผล XRD patterns ไว้ดังรูปที่ 3.4 พบว่า แผ่นเหล็กชุบสังกะสีที่ผ่านการทำพาสซีเวชันสีดำทั้ง 3 ชนิดกระแส มีเฟสเดียวกัน คือ สังกะสี ซึ่งประกอบด้วยระนาบที่สำคัญคือ (100), (101) และ (110) โดยเหล็กชุบสังกะสีที่ใช้กระแสตรงและกระแส ไซน์ ให้โครงสร้างสังกะสีโดยมีระนาบ (110) เป็นระนาบหลัก ในขณะที่การชุบสังกะสีด้วยกระแสพัลส์จะมีระนาบ (100) เป็นระนาบหลัก ทั้งนี้ผลของการเปรียบเทียบ XRD pattern ของกรณีเหล็กชุบสังกะสีที่ใช้กระแสตรงก่อน-หลังการทำพาสซีเวชันสีดำ และหลังการทำพาสซีเวชันสีดำ+การเคลือบ Top coat จะเห็นได้ว่ามีตำแหน่งพีคที่ตรงกันมีเฟสเดียวกัน แสดงให้เห็นว่า การทำพาสซีเวชันสีดำ และการเคลือบ Top coat ไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผลึกของผิวเคลือบเหล็กชุบสังกะสี (รูปที่ 3.5)



รูปที่ 3.4 XRD patterns ของผิวเคลือบของแผ่นเหล็กชุบสังกะสีและผ่านการทำพาสซีเวชันสีดำ โดยเป็นชิ้นงานที่เตรียมขึ้นจากการชุบโดยใช้กระแสไฟฟ้า 3 ชนิด คือ a) กระแสตรง b) กระแสพัลส์ c) กระแสไซน์



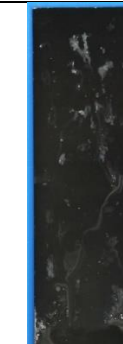
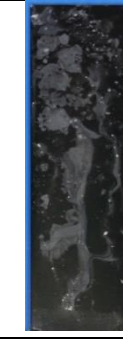
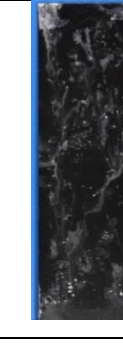
รูปที่ 3.5 XRD patterns ของผิวเคลือบของแผ่นเหล็กชุบสังกะสีที่เตรียมขึ้นจากการชุบโดยใช้กระแสตรง โดยเปรียบเทียบระหว่าง a) ก่อนการทำพลาสมาเวชันสีดำ b) หลังการทำพลาสมาเวชันสีดำ c) หลังการทำพลาสมาเวชันสีดำ + Top coat

3.2.3 ผลการศึกษาสมบัติความต้านทานการกัดกร่อนของผิวเคลือบ

3.2.3.1 การทดสอบด้วยเครื่องทดสอบการกัดกร่อนแบบละอองเกลือ

เมื่อนำแผ่นเหล็กชุบสังกะสีระบบต่างที่มีความหนาของชั้นเคลือบสังกะสีประมาณ 10 ไมครอน โดยใช้กระแสไฟฟ้าในการชุบสังกะสี 3 ชนิด คือ กระแสตรง กระแสพัลส์ และกระแสไซน์ ก่อน-หลังการทำพลาสมาเวชันสีดำ และหลังการทำพลาสมาเวชันสีดำ+Top coat ไปทดสอบความต้านทานการกัดกร่อนด้วย Salt spray test อ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM B117 พบว่า ก่อนการทดสอบ พื้นผิวของชิ้นงานทุกชิ้น ไม่มีดำหนิ และไม่มีคราบสนิม เมื่อเวลาการทดสอบผ่านไป 24 ชั่วโมง พบว่า ชิ้นงานทุกชิ้นมีสนิมขาวเกิดขึ้นบนพื้นผิว ยกเว้น ชิ้นงาน 2 ชนิด คือ แผ่นเหล็กชุบสังกะสีด้วยไฟฟ้ากระแสตรงที่ผ่านการทำพลาสมาเวชันสีดำ และแผ่นเหล็กชุบสังกะสีด้วยไฟฟ้ากระแสตรงที่ผ่านการทำพลาสมาเวชันสีดำ + Top coat ที่ไม่พบสนิมขาวบนพื้นผิวชิ้นงาน โดยพบว่า การทำพลาสมาเวชันสีดำ + Top coat ให้สมบัติความต้านทานการกัดกร่อนที่ดีกว่าการทำพลาสมาเวชันสีดำเพียงอย่างเดียว เมื่อเวลาการทดสอบผ่านไป 72 ชั่วโมง พบว่า สนิมขาวมีปริมาณเพิ่มขึ้น โดยยังคงพบว่า แผ่นเหล็กชุบสังกะสีด้วยไฟฟ้ากระแสตรงและผ่านการทำพลาสมาเวชันสีดำมีความต้านทานการกัดกร่อนมากกว่าแผ่นเหล็กชุบสังกะสีด้วยไฟฟ้ากระแสไซน์และพัลส์ที่ผ่านการทำพลาสมาเวชันสีดำ ตามลำดับ (รูปที่ 3.6)

อย่างไรก็ตาม เมื่อทำการทดสอบซ้ำในชุดที่ 2 เพื่อยืนยันสมบัติความต้านทานการกัดกร่อนของชิ้นงาน (รูปที่ 3.7) พบว่า การทำพาสซีเวชันสีดำ + Top coat ยังคงให้สมบัติความต้านทานการกัดกร่อนที่ดีกว่าการทำพาสซีเวชันสีดําเพียงอย่างเดียว แต่แผ่นเหล็กชุบสังกะสีด้วยไฟฟ้ากระแสพัลส์ที่ผ่านการทำพาสซีเวชันสีดํากลับให้ผลที่บ่งชี้ให้เห็นว่ามีความต้านทานการกัดกร่อนดีกว่าแผ่นเหล็กชุบสังกะสีด้วยไฟฟ้ากระแสตรงและกระแสไซน์ที่ผ่านการทำพาสซีเวชันสีดํา ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่า โครงสร้างของผิวเคลือบสังกะสีที่เตรียมขึ้นจากการใช้รูปแบบกระแสที่ต่างกันไม่ มีผลต่อสมบัติความต้านทานการกัดกร่อนอย่างชัดเจน แต่การทำพาสซีเวชันสีดําคือการเคลือบ Top coat จะมีผลทำให้ผิวเคลือบมีสมบัติความต้านทานการกัดกร่อนดีขึ้นตามลำดับ

ระยะ เวลา การ ทดสอบ	กระแสที่ใช้ในการชุบสังกะสี & ผิวเคลือบหลังการชุบสังกะสี					
	กระแสตรง & พาสซีเวชันสีดํา	กระแสพัลส์ & พาสซีเวชันสีดํา	กระแสไซน์ & พาสซีเวชันสีดํา	กระแสตรง & พาสซีเวชันสี ดํา+Top coat	กระแสพัลส์ & พาสซีเวชันสีดํา +Top coat	กระแสไซน์ & พาสซีเวชันสี ดํา+Top coat
24 ชั่วโมง						
72 ชั่วโมง						

รูปที่ 3.6 ลักษณะพื้นผิวของแผ่นเหล็กชุบสังกะสีด้วยไฟฟ้าที่เตรียมขึ้นจากระบบต่างๆ ภายหลังจากการทดสอบ salt spray ชุดที่ 1 ที่ระยะเวลาการทดสอบ 24 และ 72 ชั่วโมง

ระยะ เวลา การ ทดสอบ	กระแสที่ใช้ในการชุบสังกะสี & ผิวเคลือบหลังการชุบสังกะสี					
	กระแสตรง & พาสซีวชั้นสีดำ	กระแสพัลส์ & พาสซีวชั้นสีดำ	กระแสไซน์ & พาสซีวชั้นสีดำ	กระแสตรง & พาสซีวชั้นสี ดำ+Top coat	กระแสพัลส์ & พาสซีวชั้นสีดำ +Top coat	กระแสไซน์ & พาสซีวชั้นสี ดำ+Top coat
24 ชั่วโมง						

รูปที่ 3.7 ลักษณะพื้นผิวของแผ่นเหล็กชุบสังกะสีด้วยไฟฟ้าที่เตรียมขึ้นจากระบบต่างๆ ภายหลังจากการทดสอบ salt spray ชุดที่ 2 ที่ระยะเวลาการทดสอบ 24 ชั่วโมง

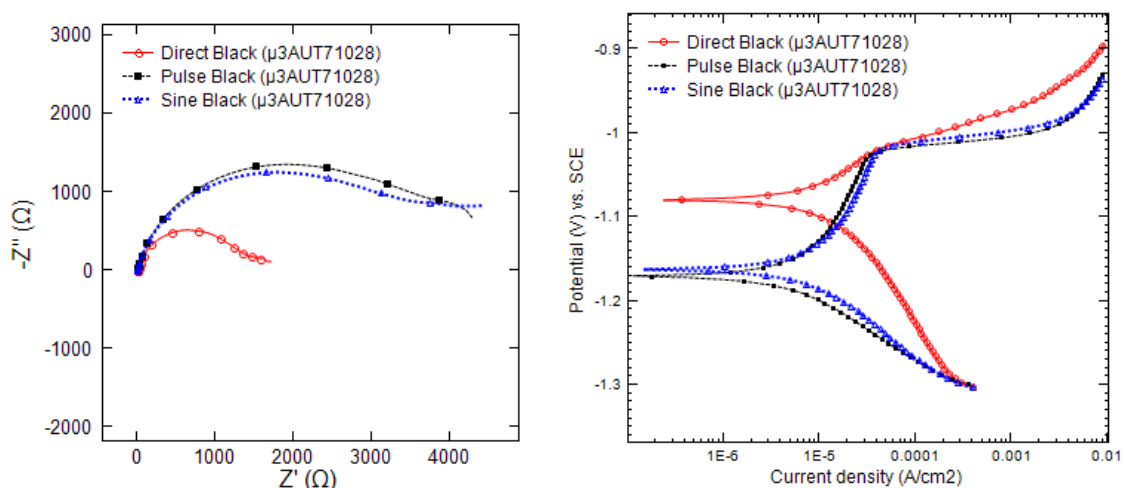
3.2.3.2 การทดสอบด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า

เมื่อนำแผ่นเหล็กชุบสังกะสีชุดที่ 1 ที่เตรียมขึ้นจากน้ำยาชุบเคลือบเกรดการค้าระบบต่างที่ใช้กระแสไฟฟ้าในการเคลือบสังกะสี 3 ชนิด คือ กระแสตรง กระแสพัลส์ และกระแสไซน์ และผ่านการทำพาสซีวชั้นสีดำ มาทำการทดสอบด้วยเทคนิค Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS) ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 5% โดยน้ำหนัก พบว่า ลักษณะกราฟ Nyquist ของแผ่นเหล็กชุบสังกะสีด้วยกระแสพัลส์และกระแสไซน์ที่ผ่านการเคลือบพาสซีวชั้นสีดำมีความกว้างของ capacitive loop มากกว่าแผ่นเหล็กชุบสังกะสีด้วยกระแสตรงที่ผ่านการทำพาสซีวชั้นสีดำ นอกจากนี้ ผลการทดสอบด้วยเทคนิค Potentiodynamic polarization ของชิ้นงานชุดที่ 1 ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 5% โดยน้ำหนัก แสดงให้เห็นว่า แผ่นเหล็กชุบสังกะสีด้วยกระแสตรงและผ่านการทำพาสซีวชั้นสีดำ มีค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน (E_{corr}) เท่ากับ -1.074 โวลต์ ซึ่งสูงกว่าค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนของแผ่นเหล็กชุบสังกะสีด้วยกระแสพัลส์และกระแสไซน์ที่ผ่านการทำพาสซีวชั้นสีดำ โดยอัตราการกัดกร่อนของชิ้นงานทั้ง 3 ชนิดมีค่าอัตราการกัดกร่อนเท่ากับ 0.27, 0.04 และ 0.13 mm/year ตามลำดับ (รูปที่ 3.8, ตารางที่ 3.2)

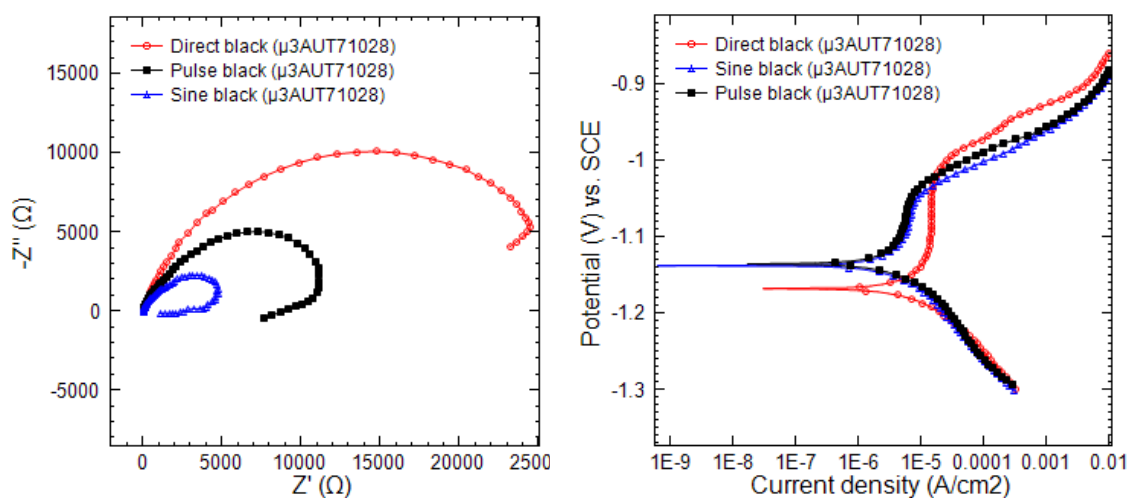
อย่างไรก็ตาม เมื่อทำการทดสอบด้วยเทคนิค Electrochemical Impedance Spectroscopy สำหรับชิ้นงานชุดที่ 2 ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 5% โดยน้ำหนัก พบว่า ลักษณะกราฟ Nyquist ของแผ่นเหล็กชุบสังกะสีด้วยกระแสตรงที่ผ่านการทำพาสซีเวชันสีด้ามีความกว้างของ capacitive loop มากกว่าแผ่นเหล็กชุบสังกะสีด้วยพัลส์ และกระแสไซน์ที่ผ่านการเคลือบพาสซีเวชันสีด้ากระแสตรง ตามลำดับ สำหรับการทดสอบด้วยเทคนิค Potentiodynamic polarization ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 5% โดยน้ำหนัก พบว่า E_{corr} ของแผ่นเหล็กชุบสังกะสีด้วยกระแสตรงที่ผ่านการทำพาสซีเวชันสีด้ามีค่าเท่ากับ -1.169 โวลต์ ซึ่งต่ำกว่า E_{corr} ของแผ่นเหล็กชุบสังกะสีด้วยกระแสพัลส์และกระแสไซน์ที่ผ่านการทำพาสซีเวชันสีด้า โดยมีค่าอัตราการกัดกร่อนเท่ากับ 0.14, 0.04 และ 0.03 mm/year ตามลำดับ (รูปที่ 3.9, ตารางที่ 3.2)

จากการทดสอบชิ้นงานทั้ง 2 ชุด จะเห็นได้ว่า การทดสอบความต้านทานการกัดกร่อนของชิ้นงานทั้ง 2 ชุด ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้าให้ผลที่ไม่ตรงกัน แสดงให้เห็นว่า รูปแบบกระแสที่ใช้ในการชุบแผ่นเหล็กทั้งกรณี กระแสตรง กระแสพัลส์ และกระแสไซน์ ไม่ส่งผลที่เด่นชัดต่อสมบัติความต้านทานการกัดกร่อนของชิ้นงานเหล็กชุบสังกะสีที่ผ่านการทำพาสซีเวชันสีด้า

ทั้งนี้ การตรวจสอบด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้าใช้พื้นที่ชิ้นงานในการทดสอบเพียง 1 ตารางเซนติเมตร หากผิวเคลือบ ณ บริเวณตำแหน่งที่ทดสอบ มีความไม่สม่ำเสมอ มีความหนาของผิวเคลือบที่แตกต่างกัน รวมทั้งรูปแบบของกระแสที่ใช้ในการชุบยังไม่ส่งผลที่เด่นชัดต่อสมบัติความต้านทานการกัดกร่อนของชิ้นงาน ก็จะสามารถทำให้ผลการทดสอบในแต่ละตำแหน่งบนชิ้นงานมีความแตกต่างกัน โดยการควบคุมความหนาของชั้นเคลือบและการควบคุมคุณภาพในแต่ละขั้นตอนของการเตรียมชิ้นงาน เช่น การชุบสังกะสีด้วยไฟฟ้า ความสะอาดของพื้นผิวแอโนด-แคโทด การกระตุ้นผิวสังกะสีด้วยกรดไนตริก การเคลือบด้วยพาสซีเวชันสีด้า การเคลือบด้วย Top coat ล้วนเป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อคุณภาพและความสม่ำเสมอของผิวเคลือบ



รูปที่ 3.8 กราฟ Nyquist และเส้นโพลาริเซชัน ของแผ่นเหล็กชุบสังกะสีชุดที่ 1 ที่เตรียมขึ้นจากน้ำยาชุบเคลือบเกรดการค้าระบบต่างที่ใช้กระแสไฟฟ้าในการเคลือบสังกะสี 3 ชนิด คือ กระแสตรง กระแสพัลส์ และกระแสไซน์ และผ่านการทำพาสซีเวชันสีด้า ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 5% โดยน้ำหนัก



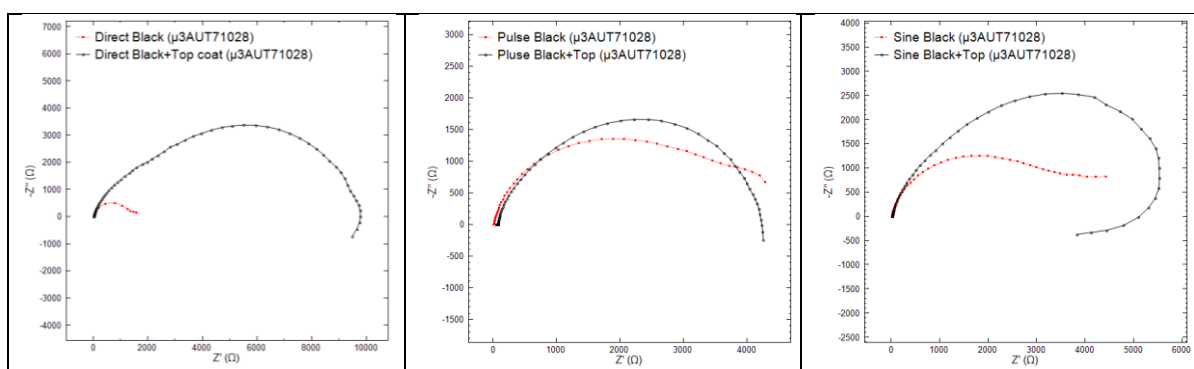
รูปที่ 3.9 กราฟ Nyquist และเส้นโพลาริเซชัน ของแผ่นเหล็กชุบสังกะสีชุดที่ 2 ที่เตรียมขึ้นจากน้ำยาชุบเคลือบเกรดการค้าระบบต่าง ที่ใช้กระแสไฟฟ้าในการเคลือบสังกะสี 3 ชนิด คือ กระแสตรง กระแสพัลส์ และกระแสไซน์ และผ่านการทำพาสซีเวชันสีดำ ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 5% โดยน้ำหนัก

ตารางที่ 3.2 ค่าจากเส้นโพลาริเซชันของแผ่นเหล็กชุบสังกะสีด้วยไฟฟ้า ชุดที่ 1 และ ชุดที่ 2 โดยใช้สารเคมีเกรดการค้าระบบต่าง ที่ใช้กระแสไฟฟ้าในการเคลือบสังกะสี 3 ชนิด คือ กระแสตรง กระแสพัลส์ และกระแสไซน์ และผ่านการทำพาสซีเวชันสีดำ ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 5% โดยน้ำหนัก

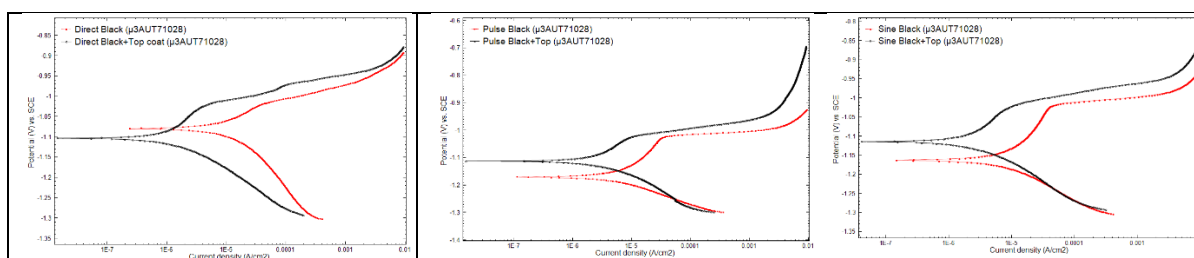
ชิ้นงาน	รูปแบบกระแสที่ใช้ในการชุบสังกะสี	ผิวเคลือบหลังการชุบสังกะสี	Corrosion parameter			
			E_{corr} (V)	I_{corr} ($\mu A/cm^2$)	R_p ($k\Omega$)	Corrosion rate (mm/year)
ชุดที่ 1	กระแสตรง	พาสซีเวชันสีดำ	-1.074	23.02	1.95	0.27
ชุดที่ 1	กระแสพัลส์	พาสซีเวชันสีดำ	-1.173	3.31	3.82	0.04
ชุดที่ 1	กระแสไซน์	พาสซีเวชันสีดำ	-1.167	11.57	2.78	0.13
ชุดที่ 2	กระแสตรง	พาสซีเวชันสีดำ	-1.169	12.20	2.31	0.14
ชุดที่ 2	กระแสพัลส์	พาสซีเวชันสีดำ	-1.138	3.20	4.63	0.04
ชุดที่ 2	กระแสไซน์	พาสซีเวชันสีดำ	-1.137	2.91	4.68	0.03

อย่างไรก็ตาม เมื่อตรวจสอบความต้านทานการกัดกร่อนของแผ่นเหล็กชุบสังกะสีที่ชุบด้วยรูปแบบกระแสไฟฟ้า 3 ชนิด คือกระแสตรง กระแสพัลส์ และกระแสไซน์ โดยเปรียบเทียบระหว่างชิ้นงานที่ผ่านการเคลือบพาสซีเวชันสีดำ และชิ้นงานที่ผ่านการพาสซีเวชันสีดำ + Top coat ด้วยเทคนิค EIS ในสารละลายไฮเดียมคลอไรด์ 5% โดยน้ำหนัก พบว่า ลักษณะกราฟ Nyquist ของแผ่นเหล็กชุบสังกะสีที่ผ่านการพาสซีเวชันสีดำ กับแผ่นเหล็กชุบสังกะสีที่ผ่านการพาสซีเวชันสีดำ + Top coat ให้ผลการทดสอบที่มีแนวโน้มเดียวกันสำหรับการใช้กระแสในการชุบสังกะสีทั้ง 3 ชนิด กล่าวคือ capacitive loop ของแผ่นเหล็กชุบสังกะสีที่ผ่านการพาสซีเวชันสีดำ+Top coat มีความกว้างมากกว่าแผ่นเหล็กชุบสังกะสีที่ผ่านการพาสซีเวชันสีดำเพียงอย่างเดียว แสดงให้เห็นว่า ผิวเคลือบแผ่นเหล็กชุบสังกะสีที่ผ่านการพาสซีเวชันสีดำ+Top coat มีแนวโน้มให้ความต้านทานของผิวเคลือบสูงกว่าแผ่นเหล็กชุบสังกะสีที่ผ่านการพาสซีเวชันสีดำเพียงอย่างเดียว (รูปที่ 3.10)

สำหรับผลการทดสอบด้วยเทคนิค Potentiodynamic polarization ในสารละลายไฮเดียมคลอไรด์ 5% โดยน้ำหนัก พบว่า แผ่นเหล็กชุบสังกะสีที่ผ่านการพาสซีเวชันสีดำ+Top coat ในทุกชุดการทดลอง มีค่ากระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน (i_{corr}) ที่ต่ำกว่า แผ่นเหล็กชุบสังกะสีที่ผ่านการพาสซีเวชันสีดำเพียงอย่างเดียวเช่นกัน (รูปที่ 3.11, ตารางที่ 3.3) แสดงให้เห็นว่า การเคลือบ Top coat บนแผ่นเหล็กชุบสังกะสีที่ผ่านการพาสซีเวชันมีความต้านทานการกัดกร่อนมากกว่าการเคลือบพาสซีเวชันสีดำเพียงอย่างเดียว



รูปที่ 3.10 กราฟ Nyquist ของแผ่นเหล็กชุบสังกะสีด้วยไฟฟ้าที่เตรียมขึ้นจากการชุบโดยใช้กระแสตรง กระแสพัลส์ และกระแสไซน์ โดยเปรียบเทียบระหว่างหลังการทำพาสซีเวชันสีดำ และหลังการทำพาสซีเวชันสีดำ + Top coat ในสารละลายไฮเดียมคลอไรด์ 5% โดยน้ำหนัก



รูปที่ 3.11 เส้นโพลาริเซชันของแผ่นเหล็กชุบสังกะสีด้วยไฟฟ้าที่เตรียมขึ้นจากการชุบโดยใช้กระแสตรง กระแสพัลส์ และกระแสไซน์ โดยเปรียบเทียบระหว่างหลังการทำพาสซีเวชันสีดำและหลังการทำพาสซีเวชันสีดำ + Top coat ในสารละลายไฮเดียมคลอไรด์ 5% โดยน้ำหนัก

ตารางที่ 3.3 ค่าจากเส้นโพลาริเซชันของแผ่นเหล็กชุบสังกะสีด้วยไฟฟ้าโดยใช้สารเคมีกรดการค้ำระบบ ต่าง ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 5% โดยน้ำหนัก

รูปแบบกระแสที่ใช้ในการชุบสังกะสี	ผิวเคลือบหลังการชุบสังกะสี	Corrosion parameter			
		E_{corr} (V)	I_{corr} ($\mu A/cm^2$)	R_p ($k\Omega$)	Corrosion rate (mm/year)
กระแสตรง	พาสซีเวชันสีดำ	-1.079	23.02	1.95	0.27
กระแสตรง	พาสซีเวชันสีดำ + Top coat	-1.103	4.66	15.57	0.05
กระแสพัลส์	พาสซีเวชันสีดำ	-1.174	8.65	3.57	0.10
กระแสพัลส์	พาสซีเวชันสีดำ + Top coat	-1.114	3.37	7.74	0.04
กระแสไซน์	พาสซีเวชันสีดำ	-1.164	23.00	2.73	0.27
กระแสไซน์	พาสซีเวชันสีดำ + Top coat	-1.115	3.08	8.25	0.04

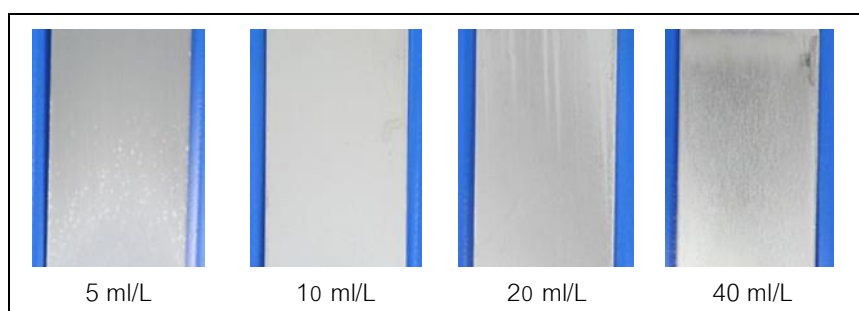
3.3 ผลการศึกษาการพัฒนาสารเติมแต่งสำหรับการชุบสังกะสีด้วยไฟฟ้า

ในโครงการวิจัยนี้ได้ทำการพัฒนาสารเติมแต่งขึ้นสำหรับใช้เติมในสารละลายชุบสังกะสีระบบกรด โดยที่สารดังกล่าวจัดอยู่ในประเภทอนุพันธ์ของไคโตซาน (CTSD) โดยได้ทำการศึกษาทดลองเปรียบเทียบลักษณะและสมบัติของผิวเคลือบที่เตรียมได้กับการใช้สารเติมแต่งกรดการค้ำ

3.3.1 ลักษณะของผิวเคลือบ

3.3.1.1 การชุบสังกะสีบนแผ่นเหล็กด้วยระบบกรด

จากการศึกษาการใช้ CTSD ที่เตรียมขึ้นจากห้องปฏิบัติการเป็นสารเติมแต่งในการชุบสังกะสีด้วยไฟฟ้า กระแสตรงในระบบกรด โดยทำการชุบบนแผ่นเหล็กด้วยความหนาแน่นกระแส $2 A/dm^2$ เป็นเวลา 10 นาที พบว่า ผิวเคลือบมีลักษณะพื้นผิวเรียบ สีเทาเข้ม โดยพบว่า การเพิ่มปริมาณความเข้มข้นของ CTSD มีแนวโน้มทำให้พื้นผิวมีความมันเงาเพิ่มขึ้น ซึ่งในการทดลองนี้พบว่า การเติมสารละลาย CTSD ที่ความเข้มข้น 40 ml/L ให้ผิวที่มีความมันเงามากที่สุด จากผลการทดลองดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า การใช้ CTSD เป็นสารเติมแต่งในสารละลายชุบสามารถทำให้เกิดการเคลือบติดของชั้นเคลือบสังกะสีบนชิ้นงานแผ่นเหล็กได้

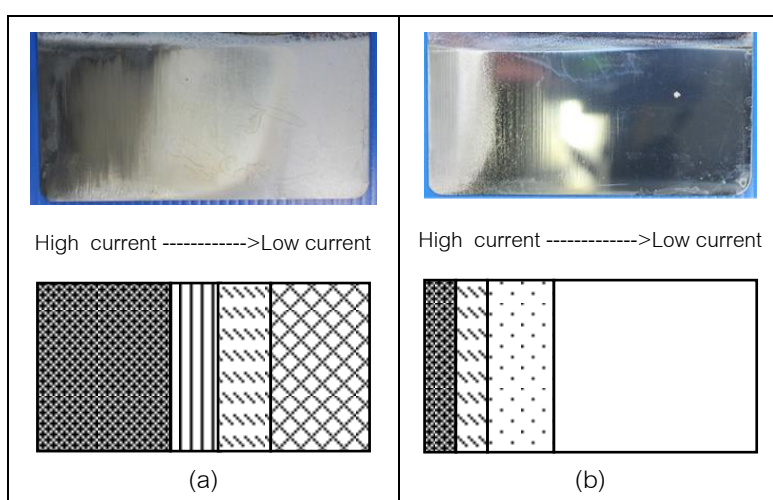


รูปที่ 3.12 ลักษณะแผ่นเหล็กที่ผ่านการชุบสังกะสีโดยใช้ CTSD เป็นสารเติมแต่งที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ โดยทำการชุบด้วยความหนาแน่นกระแส $2 A/dm^2$ เป็นเวลา 10 นาที

3.3.1.2 ผลการทดลองชุบด้วยชุด Hull cell

ในการทดสอบประสิทธิภาพของสารละลายชุบสังกะสีด้วยชุด Hull cell โดยทำการศึกษาการใช้ CTSD ที่ระดับความเข้มข้น 40 ml/L เป็นสารเติมแต่งในสารละลายชุบสังกะสีเปรียบเทียบกับสารเติมแต่งเกรดการค้า โดยทำการชุบด้วยความหนาแน่นกระแส 2 A/dm² เป็นเวลา 10 นาที พบว่า ผิวเคลือบที่ปรากฏบนชิ้นงานมีลักษณะผิวดำไหม้ (burnt) เป็นช่วงกว้างโดยเริ่มตั้งแต่ความหนาแน่นกระแสที่สูงกว่า 4 A/dm² เป็นต้นไป และให้ผิวเคลือบที่ดีที่สุดในลักษณะกึ่งมันวาว (semi bright) ในช่วง 1.6 – 2.5 A/dm² ส่วนการใช้สารเติมแต่งเกรดการค้า พบว่า ให้ผิวเคลือบลักษณะมันเงาคล้ายกระจกเงา (mirror bright) เป็นช่วงกว้างคือในช่วงกระแสต่ำกว่า 4 A/dm² เป็นต้นไป (รูปที่ 3.13)

จากผลการทดสอบการชุบด้วย Hull cell ดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า การใช้สาร CTSD ที่พัฒนาขึ้นดังกล่าวยังคงให้ลักษณะผิวเคลือบที่มีความมันเงาเล็กน้อยและมีช่วงความหนาแน่นกระแสที่แคบกว่าสารเกรดการค้ามาก

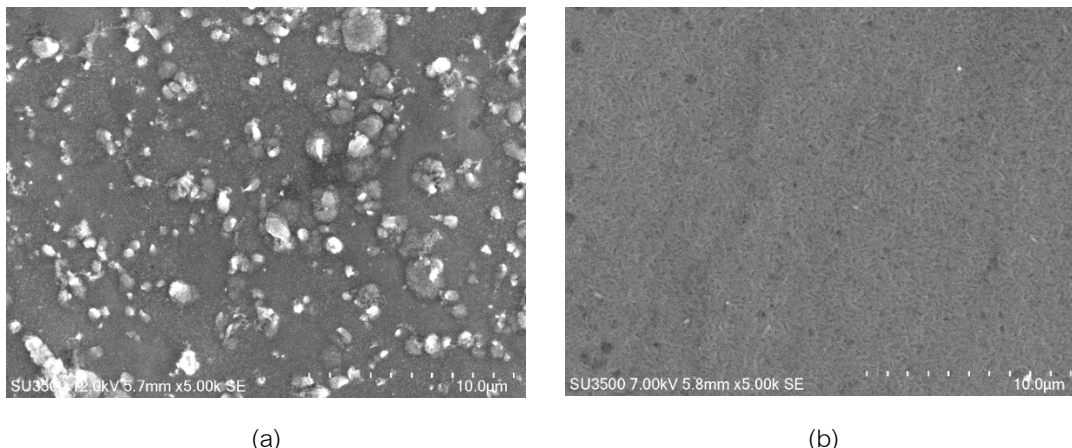


รูปที่ 3.13 ภาพแสดงแผ่นเหล็กชุบสังกะสี (บน) และภาพจำลองลักษณะผิวเคลือบสังกะสีบนแผ่นเหล็ก (ล่าง) จากการศึกษาการชุบด้วยชุด Hull cell ที่กระแส 2 A/dm² เป็นเวลา 10 นาที โดยใช้สารเติมแต่งชนิด (a) 40 ml/L CTSD และ (b) สารเติมแต่งเกรดการค้าในสารละลายชุบเคลือบ (■ = burnt, ▨ = dull with streaks, ▩ = semi bright, □ = dull, □ = bright, □ = mirror bright)

3.3.2 ลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคของผิวเคลือบ

เมื่อนำแผ่นเหล็กที่ผ่านการชุบสังกะสีด้วยไฟฟ้าในระบบบกรด ที่ค่าความหนาแน่นกระแส 2 A/dm² เป็นเวลา 10 นาที โดยใช้สารเติมแต่งชนิด CTSD และสารเติมแต่งเกรดการค้า มาทำการตรวจสอบลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน พบว่า บนผิวชุบสังกะสีที่ได้จากการใช้ 40 ml/L CTSD เป็นสารเติมแต่งสามารถตรวจพบอนุภาคลักษณะเป็นเม็ดรูปร่างไม่แน่นอนขนาดประมาณ 0.1 – 3 μm แทรกตัวอยู่บนพื้นผิวที่มีเกรนขนาดเล็กความละเอียดสูง สำหรับผิวชุบที่เตรียมได้จากการใช้สารเติมแต่งเกรดการค้าพบว่า มีโครงสร้างทางจุลภาคเป็นรูปเข็มขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางไม่เกิน 0.2 μm สานกันไปตามแบบไรทิศทางปกคลุมอยู่บนพื้นผิว โดยมีการจัดเรียงชิดกันแน่นจนไม่พบว่ามีช่องว่างระหว่างโครงสร้างรูปเข็ม (รูปที่ 3.14)

ทั้งนี้ สิ่งที่เกิดขึ้นได้จากการศึกษาครั้งนี้คือ การใช้ CTSD เป็นสารเติมแต่งให้ลักษณะผิวเคลือบที่ไม่สม่ำเสมอ แต่พื้นผิวโดยทั่วไปของผิวเคลือบนั้นประกอบไปด้วยเกรนที่มีความละเอียดสูงกว่าโครงสร้างที่ได้จากการใช้สารเกรดการค้ำ จึงเป็นประเด็นที่น่าสนใจที่ควรจะได้ทำการศึกษาและพัฒนาการใช้สารนี้ในการชุบสังกะสีต่อไป



(a)

(b)

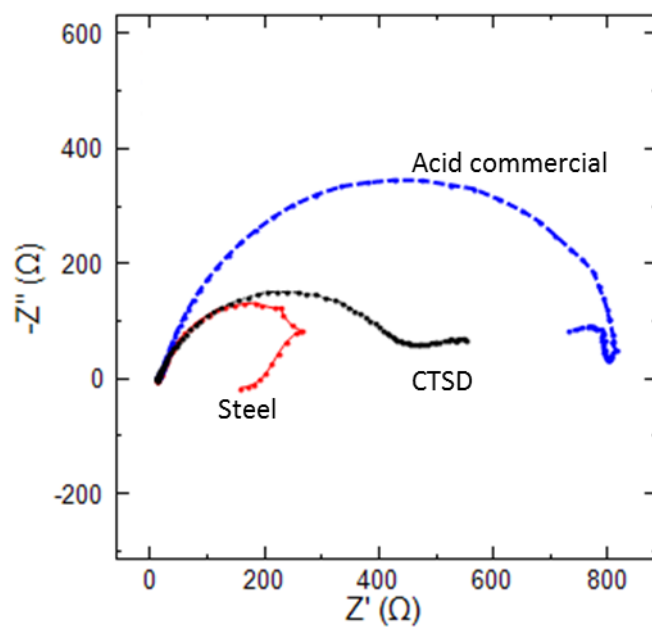
รูปที่ 3.14 ภาพถ่ายจาก SEM แสดงลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคของผิวชุบสังกะสี ที่ความหนาแน่นกระแส 2 A/dm^2 เป็นเวลา 10 นาที โดยใช้สารเติมแต่งชนิด (a) 40 ml/L CTSD และ (b) สารเติมแต่งเกรดการค้ำ

3.3.3 ผลการทดสอบความต้านทานการกัดกร่อนของผิวเคลือบ

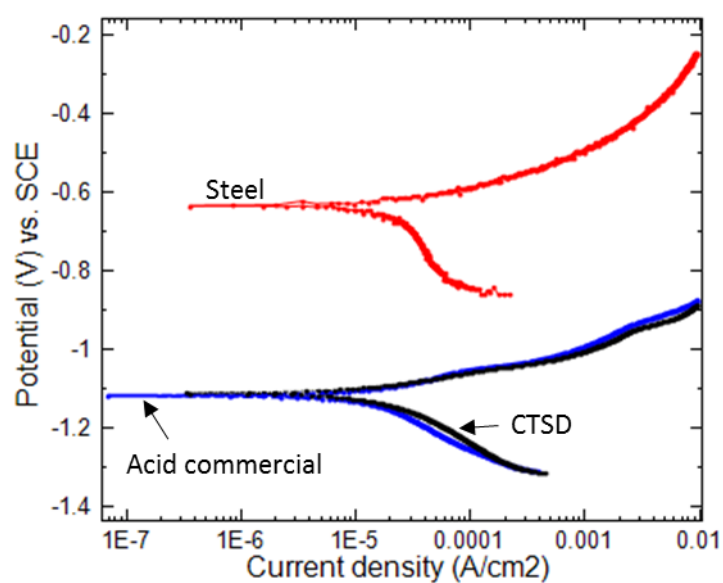
3.3.3.1 ผลการทดสอบด้วยเทคนิคทางเคมีไฟฟ้า

จากการนำแผ่นเหล็กที่ผ่านการชุบสังกะสีด้วยความหนาแน่นกระแส 2 A/dm^2 เป็นเวลา 10 นาที โดยใช้สารเติมแต่งชนิด 40 ml/L CTSD และสารเติมแต่งเกรดการค้ำ เปรียบเทียบกับแผ่นเหล็กก่อนการชุบเคลือบสังกะสี มาทำการทดสอบสมบัติความต้านทานการกัดกร่อนด้วยเทคนิคทางเคมีไฟฟ้า โดยทำการทดสอบด้วยเทคนิค EIS ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 5% โดยน้ำหนัก พบว่า ลักษณะกราฟ Nyquist ของแผ่นเหล็กที่ผ่านการชุบเคลือบสังกะสี จะมี capacitive loop ในลักษณะเป็นกราฟครึ่งวงกลมโดยมีความกว้างกว่า capacitive loop ของแผ่นเหล็กก่อนการชุบเคลือบ ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ชิ้นงานหลังการชุบเคลือบนั้นมีค่าความต้านทานมากกว่าแผ่นเหล็กก่อนการชุบเคลือบ โดยแผ่นเหล็กที่ใช้สารเติมแต่งชนิด CTSD ให้ capacitive loop ที่แคบกว่าการใช้สารเติมแต่งเกรดการค้ำ ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ผิวเคลือบจากการชุบโดยใช้ CTSD มีค่าความต้านทานที่ต่ำกว่าการใช้สารเกรดการค้ำ

ผลการทดสอบด้วยเทคนิค Potentiodynamic polarization ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 5% โดยน้ำหนัก แสดงให้เห็นว่า แผ่นเหล็กที่ผ่านการชุบสังกะสีมีค่า E_{corr} อยู่ที่ประมาณ -1.1 V ซึ่งต่ำกว่าแผ่นเหล็กก่อนการชุบ ($E_{\text{corr}} = -0.636 \text{ V}$) โดยพบว่า ค่า E_{corr} และ I_{corr} ของชิ้นงานที่ผ่านการชุบโดยใช้สารเติมแต่งชนิด CTSD และสารเกรดการค้ำ มีค่าใกล้เคียงกัน โดยแผ่นเหล็กที่ใช้สารเติมแต่งชนิด CTSD มีแนวโน้มให้ค่าความหนาแน่นกระแสการกัดกร่อนต่ำกว่าสารเติมแต่งเกรดการค้ำเล็กน้อย คือมีค่าอยู่ที่ 8.53 และ $18.95 \mu\text{A/cm}^2$ ตามลำดับ ซึ่งส่งผลให้ค่าอัตราการกัดกร่อนที่คำนวณได้ของแผ่นเหล็กที่ใช้สารเติมแต่งชนิด CTSD มีค่าต่ำกว่าแผ่นเหล็กที่ใช้สารเติมแต่งเกรดการค้ำเล็กน้อยคือมีค่าอยู่ที่ 0.10 และ 0.22 mm/year (รูปที่ 3.16, ตารางที่ 3.4)



รูปที่ 3.15 กราฟ Nyquist ของ (a) แผ่นเหล็กก่อนการชุบและแผ่นเหล็กหลังการชุบสังกะสีด้วยไฟฟ้าโดยใช้สารเติมแต่งชนิด (b) สารเติมแต่งเกรดการค้า และ (c) 40 ml/L CTSD โดยทำการทดสอบในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 5% โดยน้ำหนัก



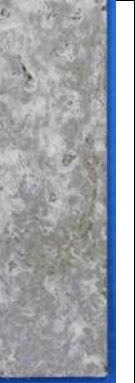
รูปที่ 3.16 เส้นโพลาริเซชันของ (a) แผ่นเหล็กก่อนการชุบและแผ่นเหล็กหลังการชุบสังกะสีด้วยไฟฟ้าโดยใช้สารเติมแต่งชนิด (b) สารเติมแต่งเกรดการค้า และ (c) 40 ml/L CTSD โดยทำการทดสอบในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 5% โดยน้ำหนัก

ตารางที่ 3.4 ค่าจากเส้นโพลาริเซชันของแผ่นเหล็กก่อนและหลังการชุบในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 5% โดยน้ำหนัก

ชิ้นงาน	corrosion parameter			
	$E_{\text{corr}}(\text{V})$	$I_{\text{corr}}(\mu\text{A}/\text{cm}^2)$	$R_p(\Omega)$	Corrosion rate (mm/year)
แผ่นเหล็ก	-0.636	103.03	995.59	1.20
CTSD	-1.111	8.53	1.40	0.10
เกรดการค้า	-1.118	18.95	1377.40	0.22

3.3.3.2 ผลการทดสอบ Salt spray test

จากการทดลองนำแผ่นเหล็กที่ผ่านการชุบสังกะสีโดยใช้สารเติมแต่งชนิด CTSD มาทำการทดสอบ salt spray test ภายใต้บรรยากาศของเกลือ อ้างอิงตามมาตรฐาน B117 (รูปที่ 3.17) พบว่า ชิ้นงานเริ่มปรากฏสนิมขาว ซึ่งเป็น corrosion product ของชั้นเคลือบสังกะสีภายในระยะเวลา 24 ชั่วโมงหลังการทดสอบ และเมื่อระยะเวลาทดสอบผ่านไป 48, 72, 96 และ 120 ชั่วโมง พบว่าปริมาณสนิมขาวมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อย โดยเมื่อสิ้นสุดระยะเวลาการทดสอบที่ 120 ชั่วโมง พบว่ายังคงไม่มีสนิมแดงปรากฏบนชิ้นงานแต่อย่างใด แสดงให้เห็นว่า การชุบเคลือบสังกะสีระบบกรดด้วยความหนาแน่นกระแส $2 \text{ A}/\text{dm}^2$ เป็นเวลา 10 นาที โดยใช้สารเติมแต่งชนิด CTSD ให้ผิวเคลือบที่มีประสิทธิภาพในการป้องกันการกัดกร่อนของแผ่นเหล็กได้ไม่ต่ำกว่า 120 ชั่วโมง

ชนิดสารเติมแต่ง	ระยะเวลาการทดสอบ				
	0 hr	24 hrs	48 hrs	72 hrs	120 hrs
CTSD					

รูปที่ 3.17 ลักษณะแผ่นเหล็กที่ผ่านการชุบสังกะสีโดยใช้สารเติมแต่งชนิด CTSD ก่อนและหลังการทดสอบ Salt spray test อ้างอิงตามมาตรฐาน B117 ที่ระยะเวลาการทดสอบ 24, 48, 72 และ 120 ชั่วโมง

บทที่ 4

สรุปผลการทดลอง

การศึกษาอิทธิพลของโครงสร้างทางจุลภาคของแผ่นเหล็กชุบสังกะสีต่อสมบัติความต้านทานการกัดกร่อนทำได้โดยการใช้รูปแบบกระแสไฟฟ้า 3 ชนิด คือ กระแสตรง กระแสพัลส์ และกระแสไซน์ ในการชุบเคลือบสังกะสีบนแผ่นเหล็กด้วยน้ำยาชุบเคลือบกรดการกัดกร่อนแบบต่าง จากนั้นจึงนำชิ้นงานดังกล่าวมาทำการเคลือบพาสซีเวชันสีดำและเคลือบ Top coat ผลจากการศึกษาพบว่า

- ชิ้นงานที่ผ่านการชุบด้วยรูปแบบกระแสไฟฟ้าทั้ง 3 ชนิด และทำการเคลือบพาสซีเวชันสีดำต่อด้วยการเคลือบ Top coat ให้ผิวเคลือบสีดำสนิท และความมันเงาเล็กน้อย
- ผลการตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาคของแผ่นเหล็กเคลือบสังกะสีที่ชุบด้วยกระแสไฟฟ้าทั้ง 3 ชนิด พบว่า ผิวเคลือบมีลักษณะโครงสร้างรูปทรงเรียวยาวซ้อนทับกันไปมา โดยการชุบด้วยไฟฟ้ากระแสตรง และกระแสไซน์ให้ผิวเคลือบที่มีโครงสร้างหนาแน่นกว่ากระแสพัลส์ ทั้งนี้ตรวจสอบพบว่ามีสารประกอบอย่างทั่วถึงของชั้นเคลือบพาสซีเวชันสีดำและ Top coat บนผิวเคลือบสังกะสี โดยมีธาตุ Cr, P และ S เป็นองค์ประกอบที่สำคัญบนชั้นเคลือบพาสซีเวชันสีดำ และมีธาตุ Si เป็นองค์ประกอบที่สำคัญบนผิวเคลือบ Top coat
- ผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของผิวเคลือบพบว่า แผ่นเหล็กชุบสังกะสีที่ใช้กระแสตรงและกระแสไซน์ให้โครงสร้างสังกะสีโดยมีระนาบ (110) เป็นระนาบหลัก ในขณะที่การใช้กระแสพัลส์จะมีระนาบ (100) เป็นระนาบหลัก ทั้งนี้ การทำพาสซีเวชันสีดำ และการเคลือบ Top coat ไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผลึกของผิวเคลือบเหล็กชุบสังกะสี
- ผลการศึกษาสมบัติความต้านทานการกัดกร่อนของผิวเคลือบด้วยวิธีการทดสอบทั้ง 2 วิธีคือ การทดสอบการกัดกร่อนแบบละอองเกลือและวิธีทางเคมีไฟฟ้า แสดงให้เห็นว่า โครงสร้างของผิวเคลือบสังกะสีที่เตรียมขึ้นจากการใช้รูปแบบกระแสที่ต่างกันคือ กระแสตรง กระแสพัลส์ และกระแสไซน์ ไม่ส่งผลที่เด่นชัดต่อสมบัติความต้านทานการกัดกร่อนของผิวเคลือบ แต่การทำพาสซีเวชันสีดำต่อด้วยการเคลือบ Top coat จะมีผลทำให้ผิวเคลือบมีสมบัติความต้านทานการกัดกร่อนที่ดีขึ้นตามลำดับ

สำหรับการพัฒนาสาร CTSD ขึ้นในห้องปฏิบัติการเพื่อทดลองใช้เป็นสารเติมแต่งในการชุบเคลือบสังกะสีบนแผ่นเหล็กด้วยไฟฟ้าโดยใช้สารละลายระบบกรดพบว่า ได้ผิวเคลือบสังกะสีที่มีสมบัติต้านทานการกัดกร่อนของแผ่นเหล็กได้ดี แต่ยังคงต้องมีการพัฒนาปรับปรุงเพื่อให้มีคุณภาพทัดเทียมกับสารเติมแต่งกรดการค้าต่อไป

บรรณานุกรม

1. R. Winand, Modern electroplating, 5th ed., M. Schlesinger and M. Paunovic, Eds., John Wiley & Sons, Inc., 2010, pp. 285-289.
2. สโรช พันธุ์แพ อภิชาติ ธรรมวิทย์กุล การชุบผิวโลหะด้วยไฟฟ้า พิมพ์ครั้งที่ 1 เมษายน 2526 ห้างหุ้นส่วนจำกัด โรงพิมพ์ชวนพิมพ์.
3. R. Holland, The use of alkaline cyanide-free zinc plating under paint and powder coatings. Proceedings. Coating 2003, Indianapolis, Indiana. 2003.
4. C.A.. Loto, Electrodeposition of zinc from acid based solutions: A review and experimental study. Asian Journal of Applied Sciences 5 (2012): 314-326.
5. S. Shanmugasigamani, and M. Pushpavanam, Voltammetric studies on the role of additives in bright zinc electrodeposition from an alkaline non-cyanide bath. Portugaliae Electrochimica Acta 27 (2009): 725-735.
6. S. Acimovic, K.H. Lindemann, V.G. Kunz, US patent no. 4397717 (1983)
7. Pearson, T., Swales, A. EP 1075553B1 (2004)
8. J.C. Hsieh, C.C. Hu, T.C. Lee, Effects of polyamines on the deposition behavior and morphology of zinc electroplated at high-current densities in alkaline cyanide-free baths. Surface & Coatings Technology 203 (2009): 3111-3115.
9. K.O. Nayana, T.V. Venkatesha, Synergistic effects of additives on morphology, texture and discharge mechanism of zinc during electrodeposition. Journal of Electroanalytical Chemistry 663 (2011): 98-107.
10. Q. Li, Z. Feng, J. Zhang, P. Yang, F. Li, M. An. Pulse reverse electrodeposition and characterization of nanocrystalline zinc coatings. RSC Adv. 4 (2014): 52562-52570.
11. S. Khorsan, K. Raeissi, M.A. Golozar. An investigation on the role of texture and surface morphology in the corrosion resistance of zinc electrodeposits. Corrosion Science 53 (2011): 2676-2678.

ภาคผนวก

วิธีการไตเตรทหาปริมาณความเข้มข้น NaOH ในน้ำ Zinc

1. ปิเปิดน้ำ Zinc มา 10 ml ใส่ในขวดรูปชมพู่ แล้วเติม indicator คือ indigocarmine (CAS 860-22-0) ประมาณ 20 mg (เดิมจนกระทั่งสารละลายมีสีเหลืองอ่อน หากเข้มข้นมากจะมองเห็นการเปลี่ยนแปลงสีขณะไตเตรทได้ยาก)
2. ทำการไตเตรทหาปริมาณความเข้มข้น NaOH โดยใช้ 1 M HCl เป็น titrant โดยสังเกตจุดยุติได้จากการที่สารละลายเปลี่ยนจากสีเหลืองอ่อนเป็นสีฟ้า จากนั้นคำนวณปริมาณความเข้มข้น NaOH คำนวณจากความเข้มข้น NaOH = ปริมาตร HCl ที่ใช้ไป $\times 4 \times$ ความเข้มข้นของ Std. HCl (อยู่ข้างขวด)
ตัวอย่างเช่น ใช้ HCl = 30.3 ml
ดังนั้น ความเข้มข้น NaOH = $30.3 \times 4 \times 1.02563 = 124.306 \text{ g/L}$

วิธีการไตเตรทหาปริมาณความเข้มข้น Zn ในน้ำ Zinc

1. ปิเปิดน้ำ Zinc มา 1 ml ใส่ในขวดรูปชมพู่ เติมสารละลายของ (Ammonium chloride + Ammonium solution) = 20 ml และเติมน้ำกลั่น 180 ml แล้วเติม indicator No.6 ซึ่งเป็นสารละลายผสมของ Erlichrome Black T, ethanol และ Hydroxylamine hydrochloride ปริมาณ 3-4 หยด ซึ่งจะทำให้สารละลายมีสีม่วงอ่อน
2. ทำการไตเตรทหาปริมาณความเข้มข้น Zn โดยใช้ 0.05 M EDTA (S-A) เป็น titrant โดยสังเกตจุดยุติได้จากการที่สารละลายเปลี่ยนจากสีม่วงอ่อนเป็นสีน้ำเงิน จากนั้นทำการคำนวณปริมาณความเข้มข้นของ Zn ได้จาก
ความเข้มข้น Zn = ปริมาณ EDTA ที่ใช้ไป $\times 3.269 \times$ ความเข้มข้นของ Std. EDTA (อยู่ข้างขวด)
ตัวอย่างเช่น ใช้ EDTA = 4.2 ml
ดังนั้น ความเข้มข้น Zn = $4.2 \times 3.269 \times 0.99501 = 13.66 \text{ g/L}$

ประวัติคณะผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการ

1. ชื่อ-สกุล (ภาษาไทย) นางสาวกนกวรรณ แสงเกียรติยุทธ
(ภาษาอังกฤษ) Miss Kanokwan Saengkiattiyut
2. ตำแหน่งปัจจุบัน นักวิจัย (ชำนาญการ) P5
3. หน่วยงานที่สังกัดและสถานที่ติดต่อ
สถาบันวิจัยโลหะและวัสดุ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ซอยจุฬาลงกรณ์ 12 ถนนพญาไท แขวงวังใหม่
เขตปทุมวัน กรุงเทพฯ 10330
โทร. 0-2218-4233 โทรสาร 0-2611-7586 E-mail : Kanokwan.s@chula.ac.th

4. ประวัติการศึกษา

ปริญญา	สาขาวิชา	มหาวิทยาลัย	ปีที่ได้รับ
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต	วิศวกรรมโลหการ	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย	2542
วิทยาศาสตร์บัณฑิต	วัสดุศาสตร์	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่	2538

5. สาขาวิชาการที่มีความชำนาญพิเศษ

การกัดกร่อนและการป้องกันการกัดกร่อน การวิเคราะห์ทดสอบความแข็งของวัสดุ การวิเคราะห์ความต้านทานการกัดกร่อนของโลหะด้วยเทคนิคทางไฟฟ้าเคมีและเครื่องทดสอบการกัดกร่อนแบบละอองเกลือ

6. ผลงานวิจัย

ผลงานตีพิมพ์ในวารสารวิชาการ

- 1) Y. Boonyongmaneerat, K. Saengkiattiyut, P. Rattanawaleedirojn, C. Angkprasert, J. Wanichsampan, and S. Saenapitak. Layer formation of hot-dip galvanized steels as influenced by NiCl_2 -base fluxes. *Journal of Iron and Steel Research International*. 17(1) (2010): 74-78.
- 2) N. Chuankrerkkul, Y. Boonyongmaneerat, K. Saengkiattiyut, P. Rattanawaleedirojn and S. Saenapitak. Injection Moulding of Tungsten Carbide-Nickel Powders Prepared by Electroless Deposition. *Key Engineering Materials*. 545(2013): 148-152.
- 3) P. Eutrirak, V. Srimaneepong and K. Saengkiattiyut*. Corrosion behavior of soldered and laser-welded Ni-free Co-Cr alloy joints in sodium chloride solution. *Advanced Materials Research*. 970(2014): 93-96.
- 4) P. Rattanawaleedirojn, K. Saengkiattiyut, Y. Boonyongmaneerat, N. Chuankrerkkul, and S. Saenapitak. Effects of Complexing Agent Concentration and Bath pH on Electroless Nickel Deposition for Tungsten Carbide Powders. *Advanced Materials Research*. 970(2014): 240-243.

- 5) Y. Boonyongmaneerat, K. Saengkiattiyut, S. Saenapitak. S. Sangsuk Corrosion behavior of reverse-pulse electrodeposited Zn-Ni alloys in saline environment. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 23(2014): 302-307.
- 6) P. Eutirak, V. Srimaneepong and K. Saengkiattiyut. Corrosion behavior of soldered and laser-welded Ni-free Co-Cr alloy joints in sodium chloride solution. *Advanced Materials Research*. 970 (2014) 93-96.
- 7) W. Asumpinwong, K. Saengkiattiyut and V. Srimaneepong. Different constant voltages of anodization on the corrosion behavior of Ti-6Al-4V Alloy. *Chiang Mai Journal of Science*. 42(1) (2015) 238-247.

ผลงานวิจัยที่นำเสนอในที่ประชุมวิชาการ

- 1) Pranee Rattanawaleedirojn and Kanokwan Saengkiattiyut. Recovery of zinc from ash and dross generated in galvanizing process. *The 5th Thailand Metallurgy Conference, January, 2012, Thailand*.
- 2) Supin Sangsuk, Kanokwan Saengkiattiyut and Umaporn Pie-raham. Sol-gel titania coating on steel for corrosion protection. *The 5th Thailand Metallurgy Conference, January, 2012, Thailand*.
- 3) Kanokwan Saengkiattiyut, Yuttanant Boonyongmaneerat, Sawalee Saenapitak, and Pranee Rattanawaleedirojn*. Effects of Acid Solution's Temperature on Inhibition Activity of Chitosan-based Inhibitor for Steel. *The 6th Thailand Metallurgy Conference, December, 2012, Thailand*. 196-200.
- 4) Viriyah Chobaomsup, Kanokwan Saengkiattiyut, Sawalee Saenapitak, Pranee Rattanawaleedirojn and Supin Sangsuk*. Effect of Titania Sol-Gel Coating on Steel for Corrosion Protection. *The 6th Thailand Metallurgy Conference, December, 2012, Thailand*. 113.
- 5) Theerajit Pornprutthipan, Kanokwan Saengkiattiyut and Supin Sangsuk*. Hybrid Sol-Gel Coating on Galvanized Steel for Corrosion Protection. *The 6th Thailand Metallurgy Conference, December, 2012, Thailand*. 201-203.
- 6) Pranee Rattanawaleedirojn, Kanokwan Saengkiattiyut and Tanit Singhaboonpong. Preparation and properties of carboxymethyl cellulose hydrogels chemically crosslinked by citric acid. *Proceeding in Asian International Conference on Materials, Minerals and Polymer 2012*, March 23 – 24, 2012. Vistana Hotel, Penang, Malaysia.
- 7) Kanokwan Saengkiattiyut, Pranee Rattanawaleedirojn, Yuttanant Boonyongmaneerat and Sawalee Saenapitak. Corrosion Inhibition of Mild Steel by Chitosan in Hydrochloric Acid Solution. *Proceeding in Asian International Conference on Materials, Minerals and*

Polymer 2012, March 23 – 24, 2012. Vistana Hotel, Penang, Malaysia. (Best Poster Award)

- 8) S Sangsuk, **K Saengkiattiyut** and P Laiwan. Sol-gel Titanai and Silica Coating on Steel for Corrosion Protection. *Proceeding in Asian International Conference on Materials, Minerals and Polymer 2012*, March 23 – 24, 2012. Vistana Hotel, Penang, Malaysia.
- 9) Jutatip Namahoot, Chor. Wayakorn Phetphaisit and **Kanokwan Saengkiattiyut**. Physical properties of steel coated with polyester polyurethane elastomer. *6th Pure and Applied Chemistry International Conference 2012*, 11-13 January 2012, The Empress convention center, Chiang Mai, Thailand.
- 10) Nutthita Chuankrerkkul, Yuttanant Boonyongmaneerat, **Kanokwan Saengkiattiyut**, Pranee Rattanawaleedirojn, Sawalee Saenapitak. Injection Moulding of Tungsten Carbide-Nickel Powders Prepared by Electroless Deposition. *Abstract book in 7th International Conference on Materials Science and Technology*. 7-8 June 2012, Swissotel Le Concorde, Bangkok, Thailand.
- 11) **K. Saengkiattiyut**, P. Rattanawaleedirojn, A. Thueploy, J. Wanichsampan and Boonyongmaneerat Y. Influence of Plating Formulations on Microstructure and Corrosion Resistance of Electrodeposited Zinc Coatings. *2nd International Conference on Smart Materials & Surfaces*, 23-25 March 2016, Songdo Convensia, Incheon, Korea.

สิทธิบัตร / อนุสิทธิบัตร

- 1) ชื่อสิทธิบัตร : เหล็กชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนที่ประกอบด้วยชั้นเคลือบสังกะสีที่เกิดความต้านทานการกัดกร่อนสูง.
 ชื่อเจ้าของสิทธิบัตร : ยุทธนันท์ บุญยมณีรัตน์, **กนกวรรณ แสงเกียรติยุทธ**, ปราณี รัตนวลีดิโรจน์, สวลี เสนาพิทักษ์ และรัชชนิ สงวนหมู่
 เลขที่สิทธิบัตร : สิทธิบัตรไทย เลขที่ขอขึ้นจดสิทธิบัตร 1001000114, กุมภาพันธ์ 2553
- 2) ชื่อสิทธิบัตร : กรรมวิธีการเตรียมพอลิเมอร์ดูดซับน้ำที่มีสมบัติยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์
 ชื่อเจ้าของสิทธิบัตร : **กนกวรรณ แสงเกียรติยุทธ**, ปราณี รัตนวลีดิโรจน์, ธนิต สิงหนุญพงศ์
 เลขที่สิทธิบัตร : สิทธิบัตรไทย เลขที่ขอขึ้นจดสิทธิบัตร 1101000207, กุมภาพันธ์ 2554
- 3) ชื่ออนุสิทธิบัตร : สารยับยั้งการกัดกร่อนของโลหะ
 ชื่อเจ้าของอนุสิทธิบัตร : ปราณี รัตนวลีดิโรจน์, **กนกวรรณ แสงเกียรติยุทธ**, ยุทธนันท์ บุญยมณีรัตน์ และ สวลี เสนาพิทักษ์.
 เลขที่อนุสิทธิบัตร : 6449, 4 สิงหาคม 2554

ผู้ร่วมวิจัย

1. ชื่อ-สกุล (ภาษาไทย) นางสาวปรานี รัตนวลีดิโรจน์
(ภาษาอังกฤษ) Miss Pranee Rattanawaleedirojn
2. ตำแหน่งปัจจุบัน นักวิจัย (ชำนาญการ) P5
3. หน่วยงานที่สังกัดและสถานที่ติดต่อ
สถาบันวิจัยโลหะและวัสดุ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ซอยจุฬาลงกรณ์ 12 ถนนพญาไท แขวงวังใหม่
เขตปทุมวัน กรุงเทพฯ 10330
โทร. 0-2218-4221 โทรสาร 0-2611-7586 E-mail : Pranee.r@chula.ac.th

4. ประวัติการศึกษา

ปริญญา	สาขาวิชา	มหาวิทยาลัย	ปีที่ได้รับ
วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต	วิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย	2539
วิทยาศาสตรบัณฑิต	เคมี	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์	2536

5. สาขาวิชาการที่มีความชำนาญพิเศษ

การเคลือบผิววัสดุด้วยกระบวนการทางเคมี เช่น การตกตะกอนสำเร็จสิ่งทอ การเคลือบผิวโลหะแบบไม่ใช้ไฟฟ้า

6. ผลงานวิจัย

ผลงานตีพิมพ์ในวารสารวิชาการ

- 1) Y. Boonyongmaneerat, K. Saengkiattiyut, P. Rattanawaleedirojn, C. Angkprasert, J. Wanichsampan, and S. Saenapitak. Layer formation of hot-dip galvanized steels as influenced by NiCl_2 -base fluxes. *Journal of Iron and Steel Research International*. 17(1) (2010): 74-78.
- 2) N. Chuankrerkkul, Y. Boonyongmaneerat, K. Saengkiattiyut, P. Rattanawaleedirojn and S. Saenapitak. Injection Moulding of Tungsten Carbide-Nickel Powders Prepared by Electroless Deposition. *Key Engineering Materials*. 545(2013): 148-152.
- 3) P. Rattanawaleedirojn, K. Saengkiattiyut, Y. Boonyongmaneerat, N. Chuankrerkkul, and S. Saenapitak. Effects of Complexing Agent Concentration and Bath pH on Electroless Nickel Deposition for Tungsten Carbide Powders. *Advanced Materials Research* 970(2014) 240-243.

ผลงานวิจัยที่นำเสนอในที่ประชุมวิชาการ

- 1) **Pranee Rattanawaleedirojn** and Kanokwan Saengkiattiyut. One-step synthesis and characterization of hydrophobic zinc borate. *The 37th Congress on Science and Technology of Thailand, October 10-12, 2011, Thailand.*
- 2) Kanokwan Saengkiattiyut, **Pranee Rattanawaleedirojn** and Tanit Singhaboonpong. Preparation and antimicrobial activity of silver nanoparticles stabilized by polyvinylpyrrolidone. *The 37th Congress on Science and Technology of Thailand, October 10-12, 2011, Thailand.*
- 3) **Pranee Rattanawaleedirojn**, Kanokwan Saengkiattiyut and Tanit Singhaboonpong. Preparation and properties of carboxymethyl cellulose hydrogels chemically crosslinked by citric acid". *Proceeding in "Asian International Conference on Materials, Minerals and Polymer 2012, March 23 – 24, 2012. Vistana Hotel, Penang, Malaysia.*
- 4) Kanokwan Saengkiattiyut, **Pranee Rattanawaleedirojn**, Yuttanant Boonyongmaneerat and Sawalee Saenapitak. Corrosion Inhibition of Mild Steel by Chitosan in Hydrochloric Acid Solution, *Proceeding in Asian International Conference on Materials, Minerals and Polymer 2012, March 23 – 24, 2012. Vistana Hotel, Penang, Malaysia. (Best Poster Award)*
- 5) **Pranee Rattanawaleedirojn** and Kanokwan Saengkiattiyut. Recovery of zinc from ash and dross generated in galvanizing process. *The 5th Thailand Metallurgy Conference, January, 2012, Thailand.*
- 6) Kanokwan Saengkiattiyut, Yuttanant Boonyongmaneerat, Sawalee Saenapitak, and **Pranee Rattanawaleedirojn**^{*}. Effects of Acid Solution's Temperature on Inhibition Activity of Chitosan-based Inhibitor for Steel. *The 6th Thailand Metallurgy Conference, December, 2012, Thailand. 196-200.*
- 7) Viriyah Chobaomsup, Kanokwan Saengkiattiyut, Sawalee Saenapitak, **Pranee Rattanawaleedirojn** and Supin Sangsuk^{*}. Effect of Titania Sol-Gel Coating on Steel for Corrosion Protection. *The 6th Thailand Metallurgy Conference, December, 2012, Thailand. 113.*
- 8) Nutthita Chuankrerkkul, Yuttanant Boonyongmaneerat, Kanokwan Saengkiattiyut, **Pranee Rattanawaleedirojn**, Sawalee Saenapitak. Injection Moulding of Tungsten Carbide-Nickel Powders Prepared by Electroless Deposition. *Abstract book in 7th International Conference on Materials Science and Technology. 7-8 June 2012, Swissotel Le Concorde, Bangkok, Thailand.*
- 9) K. Saengkiattiyut, **P. Rattanawaleedirojn**, A. Thueploy, J. Wanichsampan and Boonyongmaneerat Y. Influence of Plating Formulations on Microstructure and

Corrosion Resistance of Electrodeposited Zinc Coatings. 2nd International Conference on Smart Materials & Surfaces, 23-25 March 2016, Songdo Convensia, Incheon, Korea.

สิทธิบัตร / อนุสิทธิบัตร

- 1) ชื่อสิทธิบัตร : เหล็กชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนที่ประกอบด้วยชั้นเคลือบสังกะสีที่เกิดความต้านทานการกัดกร่อนสูง.
 ชื่อเจ้าของสิทธิบัตร : ยุทธนันท์ บุญยงมณีรัตน์, กนกวรรณ แสงเกียรติยุทธ, **ปราณี รัตนวลิตโรจน์**, สวลี เสนาพิทักษ์ และรัชชณ์ สงวนหนู
 เลขที่สิทธิบัตร : สิทธิบัตรไทย เลขที่ขอขึ้นจดสิทธิบัตร 1001000114, กุมภาพันธ์ 2553
- 2) ชื่อสิทธิบัตร : กรรมวิธีการเตรียมพอลิเมอร์ดูดซับน้ำที่มีสมบัติยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์
 ชื่อเจ้าของสิทธิบัตร : กนกวรรณ แสงเกียรติยุทธ, **ปราณี รัตนวลิตโรจน์**, ธนิต สิงห์บุญพงศ์
 เลขที่สิทธิบัตร : สิทธิบัตรไทย เลขที่ขอขึ้นจดสิทธิบัตร 1101000207, กุมภาพันธ์ 2554
- 3) ชื่ออนุสิทธิบัตร : สารยับยั้งการกัดกร่อนของโลหะ
 ชื่อเจ้าของอนุสิทธิบัตร : **ปราณี รัตนวลิตโรจน์**, กนกวรรณ แสงเกียรติยุทธ, ยุทธนันท์ บุญยงมณีรัตน์ และ สวลี เสนาพิทักษ์.
 เลขที่อนุสิทธิบัตร : 6449, 4 สิงหาคม 2554

ผู้ร่วมวิจัย

- ชื่อ-สกุล (ภาษาไทย) รศ.ดร.ยุทธนันท์ บุญยงมณีรัตน์
(ภาษาอังกฤษ) Assoc. Prof. Dr. Yuttanant Boonyongmaneerat
- ตำแหน่งปัจจุบัน อาจารย์
- หน่วยงานที่สังกัดและสถานที่อยู่ติดต่อได้สะดวก
สถาบันวิจัยโลหะและวัสดุ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ซอยจุฬาลงกรณ์ 12 ถนนพญาไท แขวงวังใหม่
เขตปทุมวัน กรุงเทพฯ 10330
โทร. 0-2218-4243 โทรสาร 0-2611-7586 E-mail : Yuttanant.b@chula.ac.th

4. ประวัติการศึกษา

ปริญญา	สาขาวิชา	มหาวิทยาลัย	ปีที่ได้รับ
Doctor of Philosophy	Materials Science and Engineering	Massachusetts Institute of Technology, USA	2549
Bachelor of Science	Materials Science and Engineering	Brown University, USA	2545

5. สาขาวิชาการที่มีความชำนาญพิเศษ

วิศวกรรมวัสดุ (Materials Engineering); โฟมโลหะ (Metallic Foam); เทคโนโลยีการเคลือบผิวโลหะ (Surface Coating Technology)

6. ผลงานตีพิมพ์ในวารสารวิชาการ

- R. Sa-nguanmoo, E. Nisarattanaporn, Y. Boonyongmaneerat, "Hot-dip galvanization with pulse-electrodeposited nickel pre-coatings," *Corrosion Science*, 53, pp. 122-126, 2011.
- S. Sukkasi, U. Sahapatsombut, C. Sukjamsri, S. Saenapitak, Y. Boonyongmaneerat, "Electroless Ni-based coatings for biodiesel containers," *Journal of Coatings Technology and Research*, [Vol. 8 \(1\)](#), pp. 141-147, 2011.
- Y. Boonyongmaneerat, U. Sahapatsombut, C. Sukjamsri, S. Saenapitak, S. Sukkasi, "Investigation of Electrodeposited Ni-based Coatings for Biodiesel Storage," *Applied Energy*, 88, pp. 909-913, 2011.
- A. Issariyapat, P. Swangsak, Y. Boonyongmaneerat, P. Visuttiptukul, "Effects of Heat Treatment on the Interfacial Structure of Nickel-Aluminum Coating Composites," *Advanced Materials Research*, Vol. 154-155, pp. 1462-1467, 2011.
- A. Chianpairot, G. Lothongkum, C.A. Schuh, and Y. Boonyongmaneerat, "Corrosion of nanocrystalline Ni-W alloys in alkaline and acidic 3.5 wt.% NaCl solutions," *Corrosion Science*, 53, pp. 1066-1071, 2011.

6. N. Sunwang, P. Wangyao, Y. Boonyongmaneerat, "The Effects of heat treatments on hardness and wear Resistance in Ni-W alloy coatings," *Surface and Coating Technology*, 206(6), pp. 1096-1101, 2011.
7. S. Akamphon, S. Sukkasi, Y. Boonyongmaneerat, "Reduction of zinc consumption with enhanced corrosion protection in hot-dip galvanized coatings: A process-based cost analysis," *Resources, Conservation and Recycling*, 58, pp.1-7, 2012.
8. S. Ploypech, Y. Boonyongmaneerat, P. Jearanaisilawong, "Crack initiation and propagation of galvanized coatings hot-dipped at 450°C under bending loads," *Surface and Coatings Technology*, 206(18), pp. 3758-3763, 2012.
9. A. Changvittaya, Y. Boonyongmaneerat, P. Anuntvoranich, "Value creation through design: Goal and constraint – Case study Thailand's furniture industry, *International Journal of the Computer, the Internet, and Management*, 19 (2) pp. 10-15, 2011.
10. E. Wichianrat, Y. Boonyongmaneerat, S. Asavavisithchai, "Microstructural examination and mechanical properties of replicated aluminium composite foams," *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 22(7), pp. 1674-1679, 2012.
11. E. Wichianrat, Y. Boonyongmaneerat, S. Asavavisithchai, "A comparative study of replicated pure Al and AC3A composite foams," *Procedia Engineering*, 32, pp. 621-627, 2012.
12. Y. Boonyongmaneerat, P. Jearanaisilawong, S. Ploypech, "Crack initiation and propagation of galvanized coatings under bending loads," *AISTech*, pp. 1839-1845, 2012.
13. S. Srikomol, Y. Boonyongmaneerat, R. Techapiesanchaoenkij, "Electrochemical codeposition and heat treatment of nickel-titanium alloy layers," *Metallurgical and Materials Transactions B: Process Metallurgy and Materials Processing Science*, 44(1), pp. 53-62, 2013.
14. N. Chuankrerkkul, Y. Boonyongmaneerat, k. Saengkiattiyut, P. Rattanawaleedirojn, S. Saenapitak, "Injection moulding of tungsten carbide-nickel powders prepared by electroless deposition," *Key Engineering Materials*, 5454, pp.148-152, 2013.
15. S. Ploypech, P. Jearanaisilawong, Y. Boonyongmaneerat, "Influence of thickness of intermetallic layers on fracture resistance of galvanized coatings," *Surface and Coatings Technology*, 223, pp.1-5, 2013.
16. R. Techapiesanchaoenkij, P. Janetaisong, Y. Boonyongmaneerat, A. Laobuthee, "Electrochemical codeposition of Ti-dispersed Ni-matrix layers by pulse-form current," *PRICM* 8, 3, pp. 1909-1916, 2013.
17. P. Janetaisong, R. Techapiesanchaoenkij, Y. Boonyongmaneerat, "Microstructural and corrosion characterizations of nickel-titanium coatings produced by electrochemical codeposition and heat treatment," *PRICM* 8, 3, pp. 2075-2082, 2013.

18. K. Theeratatpong, S. Danchaivijit, Y. Boonyongmaneerat, "Effects of Co content and heat treatment on mechanical properties of electrolessly deposited Ni-Co-P alloys," *Surface and Interface Analysis*, 46, 4, pp. 276-282, 2014.
19. Y. Boonyongmaneerat, K. Saengkiattiyut, S. Saenapitak, S. Sangsuk, "Corrosion behavior of reverse-pulse electrodeposited Zn-Ni alloys in saline environment," *Journal of Materials Engineering and Performance*, 23, 1, pp. 302-307, 2014.
20. C. Somphotch, E. Nisarattanaporn, Y. Boonyongmaneerat, "Influence of bath formulations on low-temperature electroless deposition of Ni-P alloys," *Chiang Mai Journal of Science*, 41(5.2), pp. 1332-1340, 2014.
21. W. Janphongsri, Y. Boonyongmaneerat, P. Jearanaisilawong, "Compressive response of polyurethane open-cell foam with electrodeposited copper coatings," *Advanced Materials Research*, 931-932, pp. 381-385, 2014.
22. J. Sittikun, Y. Boonyongmaneerat, P. Weerachawanasak, P. Praserttham, J. Panpranot, "Pd/TiO₂ catalysts prepared by electroless deposition with and without SnCo₂ sensitization for the liquid-phase hydrogenation of 3-hexyn-1-ol," *Reaction Kinetics, Mechanisms and Catalysis*, 111, 1, pp. 123-135, 2014.
23. S. Riyapan, Y. Boonyongmaneerat, O. Mekasuwandumrong, H. Yoshida, S.-I. Fujita, M. Arai, J. Panpranot, "Improved catalytic performance of Pd/TiO₂ in the selective hydrogenation of acetylene by using H₂-treated sol-gel TiO₂," *Journal of Molecular Catalysis A: Chemical*, 383-384, pp. 182-187, 2014.
24. L. Kanapa, Y. Boonyongmaneerat, M. Supradist, "Finite difference kinetics modeling for galvanized steels with post heat treatments," *Advanced Materials Research*, 1025-1026, pp. 723-730, 2014.
25. T. Chotibhawaris, T. Luangvaranunt, P. Jantaratana, Y. Boonyongmaneerat, "Influence of the electrodeposited Co-Fe alloys' characteristics on their magnetic properties," *Advanced Materials Research*, 1025-1026, pp. 709-716, 2014.
26. N. Udompanit, P. Wangyao, S. Henpraserttae, Y. Boonyongmaneerat, "Wear response of composition-modulated multilayer Ni-W coatings," *Advanced Materials Research*, 1025-1026, pp. 302-309, 2014.
27. T. Lertjirakul, Y. Boonyongmaneerat, P. Visuttiptikul, "Effect of Cr plating and plasma nitriding on hardness and corrosion resistance of H13 steel," *Advanced Materials Research*, 1025-1026, pp. 737-744, 2014.
28. P. Rattanawaleedirogn, K. Saengkiattiyut, Y. Boonyongmaneerat, N. Chuankrerkkul, S. Saenapitak, "Effects of complexing agent concentration and bath pH on electroless nickel deposition for tungsten carbide powders," *970*, pp. 240-243, 2014.

29. J. Qin, X. Zhang, Y. Xue, M.K. Das, A. Thueploy, S. Limpanart, Y. Boonyongmaneerat, M. Ma, R. Liu, "The high concentration and uniform distribution of diamond particles in Ni-diamond composite coatings by sediment co-deposition," Surface and Interface Analysis, 2014 (In print).
30. S. Riyapan, Y. Boonyongmaneerat, O. Mekasuwandumrong, P. Praserttham, J. Panpranot, "Effect of surface Ti³⁺ on the sol-gel derived TiO₂ in the selective acetylene hydrogenation on Pd/TiO₂ catalysts," Catalysis Today, 2014 (In print).

สิทธิบัตร / อนุสิทธิบัตร

1. Y. Boonyongmaneerat, T.W. Eagar, and C.A. Schuh, "Transient Migrating Phase Low Temperature Joining of Co-Sintered Particulate Materials Including a Chemical Reaction," Provisional patent, U.S.S.N 60/646,808, 25 Jan. 2005.
2. P. Müllner, D.C. Dunand, Y. Boonyongmaneerat, and M. Chmielus, "Magnetic shape-memory foams with large magnetically-induced deformation" Patent No.: US 7,964,290 B2, 21 Jun., 2011.
3. Y. Boonyongmaneerat, K. Saengkiattiyut, P. Rattanawaleedirojn, S. Saenapitak, and Run Sanguanmoo, "Hot-dip galvanized steels with high corrosion resistant zinc-nickel layer and processing method thereof" Thai patent pending, filed Feb. 2010 (1001000114).
4. P. Rattanawaleedirojn, K. Saengkiattiyut, , S. Saenapitak, Y. Boonyongmaneerat, "Chemical Inhibiting Corrosion in Metals" Thai petty patent, #1003000720, 9 Aug. 2010.
5. P. Müllner, M. Chmielus, C. Witherspoon, D.C. Dunand, X.X. Zhang, and Y. Boonyongmaneerat, "Polycrystalline Foams Exhibiting Giant Magnetic-Field-Induced Deformation and Methods of Making and Using Same" US 8586194, 19 Nov. 2013

ผู้ร่วมวิจัย

1. ชื่อ-สกุล (ภาษาไทย) นายจุมพฏ วานิชสัมพันธุ์
(ภาษาอังกฤษ) Mr. Jumpot Wanichsampan
2. ตำแหน่งปัจจุบัน เจ้าหน้าที่วิจัย
3. หน่วยงานที่สังกัดและสถานที่ติดต่อ
สถาบันวิจัยโลหะและวัสดุ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ซอยจุฬาลงกรณ์ 12 ถนนพญาไท แขวงวังใหม่
เขตปทุมวัน กรุงเทพฯ 10330
โทร. 0-2218-4223 โทรสาร 0-2611-7586 E-mail: wjumpot@chula.ac.th

4. ประวัติการศึกษา

ปริญญา	สาขาวิชา	มหาวิทยาลัย	ปีที่ได้รับ
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต	เทคโนโลยีวัสดุ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี พระจอมเกล้าธนบุรี	2552
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต	เหมืองแร่	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่	2534

5. สาขาวิชาการที่มีความชำนาญพิเศษ

ปรากฏการณ์เทอร์โมอิเล็กทริกส์ การวิเคราะห์วัสดุด้วยเครื่อง SEM และ EDX การเตรียมตัวอย่างโลหะและเซรามิกสำหรับการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค

6. ผลงานตีพิมพ์ในวารสารวิชาการ

Y. Boonyongmaneerat, K. Saengkiettiyut, P. Rattanawaleedirojn, C. Angkprasert, J. Wanichsampan, and S. Saenapitak. Layer formation of hot-dip galvanized steels as influenced by NiCl_2 -base fluxes. *Journal of Iron and Steel Research International*. 17(1) (2010): 74-78.

ผู้ร่วมวิจัย

- ชื่อ-สกุล (ภาษาไทย) นายอดิศักดิ์ ถือพลอย
(ภาษาอังกฤษ) Mr. Adisak Thueploy
- ตำแหน่งปัจจุบัน เจ้าหน้าที่บริการวิทยาศาสตร์
- หน่วยงานที่สังกัดและสถานที่ติดต่อ
สถาบันวิจัยโลหะและวัสดุ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ซอยจุฬาลงกรณ์ 12 ถนนพญาไท แขวงวังใหม่
เขตปทุมวัน กรุงเทพฯ 10330
โทร. 0-2218-4241 โทรสาร 0-2611-7586 E-mail : Adisak.t@chula.ac.th

4. ประวัติการศึกษา

ปริญญา	สาขาวิชา	มหาวิทยาลัย	ปีที่ได้รับ
วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต	เทคโนโลยีเซรามิก	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย	2552
ครุศาสตรอุตสาหกรรมบัณฑิต	วิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ และโทรคมนาคม	สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน	2546

5. สาขาวิชาการที่มีความชำนาญพิเศษ

งานอิเล็กทรอนิกส์ และ System control การวิเคราะห์ทดสอบความต้านทานการกัดกร่อนของโลหะด้วยเครื่องทดสอบการกัดกร่อนแบบละอองเกลือ

6. ผลงานตีพิมพ์ในวารสารวิชาการ

1. J. Qin, X. Zhang, Y. Xue, M.K. Das, A. Thueploy, S. Limpanart, Y. Boonyongmaneerat, M. Ma, R. Liu. The high concentration and uniform distribution of diamond particles in Ni-diamond composite coatings by sediment co-deposition. *Surface and Interface Analysis* 47, 2015 : 331-339.

2. Wangyao, P., Suwanchai, P., Chuankrerkkul, N., Krongtong, V., Thueploy, A., and Homkrajai, W. The high concentration and uniform distribution of diamond particles in Ni-diamond composite coatings by sediment co-deposition. *High Temperature Materials and Processes*. 29(4), 2010 : 277-285.

ผลงานวิจัยที่น่าสนใจในประชุมวิชาการ

1. Nadtinan Promphet, Ratthapol Rangkupan, Poomrat Rattanasat, Adisak Thueploy, Nadnudda Rodthongkum, Orawon Chailapakul. Electrospun graphene/polyaniline modified carbon electrode for heavy metal detection. *Pure and Applied Chemistry International Conference*. 8-10 January, 2014. Thailand.