

รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

อิทธิพลของโครงสร้างทางจุลภาคต่อสมบัติความต้านทานการกัดกร่อนของ
เหล็กเคลือบสังกะสีด้วยไฟฟ้า

Influence of microstructure on corrosion properties of
zinc-electroplated steels

โดย

สถาบันวิจัยโลหะและวัสดุ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

คณะผู้วิจัย

นางสาวกนกวรรณ แสงเกียรติยุทธ	หัวหน้าโครงการ
นางสาวปราณี รัตนวลิตโรจน์	นักวิจัย
ผศ.ดร.ยุทธนันท์ บุญยงมณีรัตน์	นักวิจัย
นายจุมพฏ วานิชสัมพันธ์	นักวิจัย
นายอดิศักดิ์ ถือพลอย	นักวิจัย

สิงหาคม 2558

กิตติกรรมประกาศ

การดำเนินโครงการวิจัยเรื่อง อิทธิพลของโครงสร้างทางจุลภาคต่อสมบัติความต้านทานการกัดกร่อนของเหล็กเคลือบสังกะสีด้วยไฟฟ้า (ปีที่ 1) สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี คณะผู้วิจัยขอขอบคุณสถาบันวิจัยโลหะและวัสดุ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในการสนับสนุนการดำเนินงานวิจัย

ขอขอบคุณ บริษัท บลูสโคป สตีล (ประเทศไทย) จำกัด และบริษัท เหล็กแผ่นเคลือบไทย จำกัด ที่กรุณาให้ความอนุเคราะห์แผ่นเหล็กสำหรับการศึกษาทดลอง ขอขอบคุณบริษัท ไอคูโน-ออโรเม็กซ์ (ประเทศไทย) จำกัด บริษัท โคทเท็ค จำกัด และบริษัท เอกไทยเคมี จำกัด ในความอนุเคราะห์ด้านสารเคมีชุบเคลือบที่ใช้ในการศึกษาทดลอง

ขอขอบคุณ ดร.วรรณนิภา อมาตยกุล และคุณวรากร มีจันทร์ บริษัท ไอคูโน-ออโรเม็กซ์ (ประเทศไทย) จำกัด ที่กรุณาให้ข้อมูลและคำแนะนำสำหรับการชุบเคลือบสังกะสีด้วยไฟฟ้าและการวิเคราะห์ทดสอบผิวเคลือบด้วยเครื่อง XRF และขอขอบคุณ คุณนรินทร์ จันทะพิงค์ สำหรับคำแนะนำในการวิเคราะห์ผลด้วยเครื่อง XRD

ขอขอบคุณคณะผู้ประเมินผลงานวิจัยของสถาบันวิจัยโลหะและวัสดุ ที่กรุณาให้ข้อเสนอแนะและคำแนะนำอันเป็นประโยชน์ต่อการพัฒนางานวิจัย และเนื่องจากโครงการวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนทุนวิจัยทั้งหมดจากเงินอุดหนุนทั่วไปจากรัฐบาลประจำปีงบประมาณ 2557 คณะผู้วิจัยจึงขอขอบพระคุณอย่างสูงมา ณ ที่นี้

คณะผู้วิจัย

สิงหาคม 2558

บทคัดย่อ

การศึกษาอิทธิพลของโครงสร้างทางจุลภาคของผิวเคลือบสังกะสีบนเหล็กแผ่นที่ได้จากการชุบเคลือบด้วยไฟฟ้าต่อสมบัติความต้านทานการกัดกร่อนของชิ้นงาน ทำได้โดยการเตรียมชิ้นงานเหล็กแผ่นเคลือบสังกะสีโดยใช้น้ำยาชุบเคลือบ 3 ระบบ คือ ระบบกรด ระบบด่าง และระบบโซลยอนไนต์ โดยได้ทำการศึกษาอิทธิพลของการเติม additives ในน้ำยาชุบเคลือบระบบกรดและระบบด่าง และศึกษาปัจจัยของกระแสที่ใช้ในการชุบเคลือบในน้ำยา ระบบต่าง ซึ่งได้แก่ ขนาดกระแส และรูปแบบของกระแสที่ใช้ในการชุบเคลือบ รวมทั้งทำการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของผิวเคลือบด้วยเทคนิค X-ray diffraction และตรวจสอบลักษณะผิวเคลือบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด และทำการวิเคราะห์ทดสอบสมบัติความต้านทานการกัดกร่อนด้วยเทคนิค Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS) เทคนิค Potentiodynamic polarization ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 5% โดยน้ำหนัก และวิธี Salt spray test อ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM B117

ผลการศึกษาพบว่า การเติม carrier และ brightener ในน้ำยา ระบบกรดและด่างมีผลทำให้โครงสร้างผิวเคลือบมีการเปลี่ยนแปลงโดยมีระนาบ (002) ลดลง และมีระนาบ (100) (101) และ (110) เป็นหลัก นอกจากนี้ยังเห็นได้ชัดเจนว่าโครงสร้างของผิวเคลือบมีความละเอียดและมีความสม่ำเสมอบนพื้นผิวมากขึ้น ทั้งนี้แผ่นเหล็กเคลือบสังกะสีที่ใช้น้ำยาชุบระบบต่าง มีแนวโน้มให้ความต้านทานการกัดกร่อนต่ำกว่าระบบโซลยอนไนต์ และระบบกรด สำหรับการศึกษารูปร่างด้วยระบบต่างโดยใช้ไฟฟ้ากระแสตรง พบว่า การชุบเคลือบด้วยกระแส 1 A/dm² ให้ผิวเคลือบที่มีความต้านทานการกัดกร่อนต่ำกว่าการชุบเคลือบด้วยกระแส 2 และ 4 A/dm² ส่วนการศึกษาด้านรูปแบบกระแสที่ใช้ในการชุบเคลือบพบว่า ชิ้นงานที่ชุบด้วยกระแสพัลส์มีแนวโน้มเกิดการกัดกร่อนได้เร็วกว่าการชุบด้วยกระแสตรง และกระแส Sine wave

Abstract

The study of the influence of electrodeposited zinc coatings' microstructure on their corrosion resistance is performed on 3 different sets of zinc coating specimens that are prepared from acidic, alkaline, and cyanide electrolytes. The processing parameters of concern include the additives in the acidic and cyanide electrolytes, applied current density, and applied current waveform. The microstructure and the surface morphology of the specimens are examined using x-ray diffractometry and scanning electron microscopy. The corrosion behavior of the specimens are investigated by electrochemical impedance spectroscopy, potentiodynamic polarization using 5 wt.% sodium chloride, and ASTM B117 salt spray testing.

The results show that the additions of carrier and brightener additives in the acidic and alkaline electrolytes result in the change in crystallographic orientation from (002) to (100), (101) and (110) of the zinc coatings, and help with the refinement and uniformity of their microstructure. In general, the alkaline-based zinc coatings exhibit lower corrosion resistance than other groups. Furthermore, when a low current density of 1 A/dm² is employed, the corrosion resistance is relatively low compared with 2 A/dm² and 4 A/dm². For the applied current wave form, the square-wave current pulsation produces zinc coatings with lower corrosion resistance than when direct current and sine wave current are applied.

สารบัญเรื่อง

หน้า

กิตติกรรมประกาศ	i
บทคัดย่อ	ii
Abstract	iii
สารบัญเรื่อง	iv
สารบัญตาราง	v
สารบัญรูป	vi
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 การทบทวนวรรณกรรม/สารสนเทศ (Information) ที่เกี่ยวข้อง	1
บทที่ 2 วิธีดำเนินการวิจัย	5
2.1 สารเคมี	5
2.2 วิธีการทดลอง	5
2.3 การวิเคราะห์ทดสอบ	7
บทที่ 3 ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง	9
3.1 ปัจจัยจากส่วนประกอบในน้ำยาชุบต่อโครงสร้างผิวเคลือบ	9
3.1.1 น้ำยาชุบเคลือบระบบกรด	9
3.1.2 น้ำยาชุบเคลือบระบบต่าง	11
3.2 ประเภทของน้ำยาชุบระบบกรด ระบบไฮยาไนด์ และระบบต่างต่อสมบัติของผิวเคลือบ	13
3.2.1 ผลของระยะเวลาการชุบต่อความหนาของผิวเคลือบ	13
3.2.2 ลักษณะผิวเคลือบ	14
3.2.3 องค์ประกอบของผิวเคลือบ	15
3.2.4 สมบัติความต้านทานการกัดกร่อนของผิวเคลือบ	16
3.3 ผลของการใช้กระแสไฟฟ้ารูปแบบต่างๆ ในการชุบเคลือบด้วยน้ำยาแบบต่างต่อสมบัติของผิวเคลือบ	20
3.3.1 อัตราการชุบเคลือบและลักษณะของผิวเคลือบที่ได้	20
3.3.1.1 กระแสตรง	20
3.3.1.2 กระแสแบบพัลส์ (Pulse)	21
3.3.1.3 กระแสแบบ Sine wave	23
3.3.2 สมบัติของผิวเคลือบ	24
บทที่ 4 สรุปผลการทดลอง	32
บรรณานุกรม	33
ประวัติคณะผู้วิจัย	34

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1	ส่วนประกอบในน้ำยา และภาวะที่ใช้ในการชุบสังกะสีด้วยไฟฟ้าระบบโซลาร์เซลล์ ระบบกรด และระบบต่าง	6
ตารางที่ 3.1	สัมประสิทธิ์การจัดเรียงตัวผลึกของแผ่นเหล็กชุบสังกะสีด้วยไฟฟ้าโดยใช้สารเคมีเกรดการค้าใน ระบบกรดด้วยกระแส 2 A/dm ² เป็นระยะเวลา 20 นาที	11
ตารางที่ 3.2	สัมประสิทธิ์การจัดเรียงตัวผลึกของแผ่นเหล็กชุบสังกะสีด้วยไฟฟ้าโดยใช้สารเคมีเกรดการค้าใน ระบบต่างที่กระแส 2 A/dm ² เป็นระยะเวลา 20 นาที	13
ตารางที่ 3.3	สัมประสิทธิ์การจัดเรียงตัวผลึกของแผ่นเหล็กชุบสังกะสีด้วยไฟฟ้าโดยใช้สารเคมีเกรดการค้าใน ระบบกรด ระบบโซลาร์เซลล์ และระบบต่าง ที่กระแส 2 A/dm ² 30 นาที	15
ตารางที่ 3.4	ความหนาของชั้นสังกะสีบนแผ่นเหล็กโดยใช้สารเคมีเกรดการค้าในระบบกรด ระบบโซลาร์เซลล์ และระบบต่าง ก่อนการทดสอบความต้านทานการกัดกร่อนด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมี	16
ตารางที่ 3.5	ค่าจากเส้นโพลาริเซชันของแผ่นเหล็กชุบสังกะสีด้วยไฟฟ้าโดยใช้สารเคมีเกรดการค้าระบบกรด ระบบโซลาร์เซลล์ และระบบต่าง ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 5% โดยน้ำหนัก	18
ตารางที่ 3.6	ความหนาของชั้นสังกะสีบนแผ่นเหล็กโดยใช้สารเคมีเกรดการค้าในระบบกรด ระบบโซลาร์เซลล์ และระบบต่าง ก่อนการทดสอบด้วยเครื่องทดสอบการกัดกร่อนแบบล่องเกลือบ	18
ตารางที่ 3.7	สัมประสิทธิ์การจัดเรียงตัวผลึกของแผ่นเหล็กชุบสังกะสีด้วยไฟฟ้าในน้ำยาชุบระบบต่าง จากการ ชุบด้วยรูปแบบการจ่ายกระแสไฟฟ้าที่แตกต่างกัน	25
ตารางที่ 3.8	ความหนาของชั้นสังกะสีบนแผ่นเหล็กโดยใช้สารเคมีเกรดการค้าในระบบต่าง โดยใช้ กระแสไฟฟ้ารูปแบบต่างๆ และควบคุมระยะเวลาการชุบเคลือบเพื่อให้ได้ความหนาประมาณ 8 ไมครอน ก่อนการทดสอบความต้านทานการกัดกร่อนด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมี	26
ตารางที่ 3.9	ค่าจากเส้นโพลาริเซชันของแผ่นเหล็กชุบสังกะสีด้วยไฟฟ้ากระแสตรงโดยใช้สารเคมีเกรดการค้า ระบบต่าง ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 5% โดยน้ำหนัก	28
ตารางที่ 3.10	ค่าจากเส้นโพลาริเซชันของแผ่นเหล็กชุบสังกะสีโดยใช้รูปแบบกระแสตรง กระแสพัลส์ และ กระแส Sine wave และใช้สารเคมีเกรดการค้าในระบบต่าง ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 5% โดยน้ำหนัก	30
ตารางที่ 3.11	ความหนาของชั้นสังกะสีบนแผ่นเหล็กโดยใช้รูปแบบกระแสตรง กระแสพัลส์ และกระแส Sine wave และใช้สารเคมีเกรดการค้าในระบบต่าง ก่อนการทดสอบด้วยเครื่องทดสอบการกัดกร่อน แบบล่องเกลือบ	30

สารบัญรูป

		หน้า
รูปที่ 2.1	เครื่องจ่ายกระแสไฟฟ้าและเซลล์ที่ใช้ในการชุบเคลือบสังกะสีบนแผ่นเหล็ก	6
รูปที่ 2.2	ชุดอุปกรณ์ทดสอบการกัดกร่อนด้วยเครื่องโพเทนชิโอมิเตอร์	8
รูปที่ 2.3	เครื่องทดสอบการกัดกร่อนแบบล่องเกลือและลักษณะการวางชิ้นงานทดสอบ	8
รูปที่ 3.1	ลักษณะผิวของชิ้นงานที่ได้หลังชุบสังกะสีด้วยไฟฟ้าในน้ำยาชุบระบบกรดด้วยกระแส 2 A/dm ² เป็นระยะเวลา 20 นาที โดยมีส่วนประกอบในน้ำยาชุบที่แตกต่างกัน	10
รูปที่ 3.2	ชิ้นงานที่ได้หลังจากการชุบสังกะสีด้วยไฟฟ้าในน้ำยาชุบระบบกรดด้วยกระแส 2 A/dm ² เป็นระยะเวลา 20 นาที โดยมีส่วนประกอบในน้ำยาชุบที่แตกต่างกัน	10
รูปที่ 3.3	ลักษณะผิวของชิ้นงานที่ได้หลังชุบสังกะสีด้วยไฟฟ้าในน้ำยาชุบระบบต่างด้วยกระแส 2 A/dm ² เป็นระยะเวลา 20 นาที โดยมีส่วนประกอบในน้ำยาชุบที่แตกต่างกัน	12
รูปที่ 3.4	ชิ้นงานที่ได้หลังจากการชุบสังกะสีด้วยไฟฟ้าในน้ำยาชุบระบบต่างด้วยกระแส 2 A/dm ² เป็นระยะเวลา 20 นาที โดยมีส่วนประกอบในน้ำยาชุบที่แตกต่างกัน	12
รูปที่ 3.5	ปริมาณกระแสไฟฟ้า ระยะเวลาในการชุบ และความหนาผิวเคลือบของแผ่นเหล็กชุบสังกะสีด้วยไฟฟ้าที่ใช้น้ำยาชุบในระบบกรด ระบบโซลยอน และระบบต่าง	13
รูปที่ 3.6	แผ่นเหล็กชุบสังกะสีด้วยไฟฟ้าด้วยน้ำยาชุบระบบกรด ระบบโซลยอน และระบบต่าง 2 A/dm ² 30 นาที	14
รูปที่ 3.7	ลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคของแผ่นเหล็กชุบสังกะสีด้วยไฟฟ้าด้วยน้ำยาชุบระบบกรด ระบบโซลยอน และระบบต่าง 2 A/dm ² 30 นาที	14
รูปที่ 3.8	แผ่นเหล็กชุบสังกะสีด้วยไฟฟ้าด้วยน้ำยาชุบระบบกรด ระบบโซลยอน และระบบต่าง 2 A/dm ² 30 นาที	15
รูปที่ 3.9	กราฟ Nyquist ของแผ่นเหล็กเคลือบสังกะสีด้วยไฟฟ้าที่ใช้สารเคมีเกรดการค้าระบบกรด ระบบโซลยอน และระบบต่าง โดยมีความหนาของชั้นเคลือบประมาณ 8 ไมครอน ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 5% โดยน้ำหนัก	17
รูปที่ 3.10	เส้นโพลาริเซชันของแผ่นเหล็กชุบสังกะสีด้วยไฟฟ้าโดยใช้สารเคมีเกรดการค้าเคลือบในระบบกรด ระบบโซลยอน และระบบต่าง โดยมีความหนาของชั้นเคลือบประมาณ 8 ไมครอน ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 5% โดยน้ำหนัก	17
รูปที่ 3.11	ลักษณะพื้นผิวของแผ่นเหล็กชุบสังกะสีด้วยไฟฟ้าโดยใช้สารเคมีเกรดการค้าเคลือบในระบบกรด ระบบโซลยอน และระบบต่าง โดยมีความหนาของชั้นเคลือบประมาณ 8 ไมครอนที่ระยะเวลาการทดสอบ 0, 1, 48, 120 และ 240 ชั่วโมง	19
รูปที่ 3.12	ปริมาณกระแสไฟฟ้ากระแสตรง ระยะเวลาในการชุบ และความหนาผิวเคลือบของแผ่นเหล็กชุบสังกะสีด้วยไฟฟ้าที่ใช้น้ำยาชุบในระบบต่าง	20

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า	
รูปที่ 3.13	ลักษณะผิวของชิ้นงานเหล็กชุบสังกะสีด้วยไฟฟ้ากระแสตรงในน้ำยาชุบระบบต่าง ๆ ที่มีความหนาของชั้นสังกะสีประมาณ 8 ไมครอน โดยใช้กระแสไฟฟ้าและระยะเวลาต่างๆ ในการชุบ	21
รูปที่ 3.14	ลักษณะผิวของชิ้นงานเหล็กชุบสังกะสีด้วยไฟฟ้ากระแสตรงในน้ำยาชุบระบบต่าง ๆ โดยใช้กระแสชุบที่ 2 A/dm^2 ที่ระยะเวลาต่างๆ	21
รูปที่ 3.15	ปริมาณกระแสไฟฟ้าแบบพัลส์ ระยะเวลาในการชุบ และความหนาผิวเคลือบของแผ่นเหล็กชุบสังกะสีด้วยไฟฟ้าที่ใช้น้ำยาชุบในระบบต่าง ๆ	22
รูปที่ 3.16	ลักษณะผิวของชิ้นงานเหล็กชุบสังกะสีด้วยไฟฟ้ากระแสแบบพัลส์ในน้ำยาชุบระบบต่าง ๆ ที่มีความหนาของชั้นสังกะสีประมาณ 8 ไมครอนโดยใช้กระแสไฟฟ้าและระยะเวลาต่างๆ ในการชุบ	22
รูปที่ 3.17	ลักษณะผิวของชิ้นงานเหล็กชุบสังกะสีด้วยไฟฟ้ากระแสแบบพัลส์ในน้ำยาชุบระบบต่าง ๆ โดยใช้กระแสในการชุบที่ 2 A/dm^2 ที่ระยะเวลาต่างๆ	23
รูปที่ 3.18	ปริมาณกระแสไฟฟ้าแบบ Sine wave ระยะเวลาในการชุบ และความหนาผิวเคลือบของแผ่นเหล็กชุบสังกะสีด้วยไฟฟ้าที่ใช้น้ำยาชุบในระบบต่าง ๆ	23
รูปที่ 3.19	ลักษณะผิวของชิ้นงานที่ได้หลังชุบสังกะสีด้วยไฟฟ้าแบบ Sine wave ในน้ำยาชุบระบบต่าง ๆ ที่มีความหนาของชั้นสังกะสีประมาณ 8 ไมครอน โดยใช้กระแสไฟฟ้าและระยะเวลาต่างๆ ในการชุบ	24
รูปที่ 3.20	ลักษณะผิวของชิ้นงานที่ได้หลังชุบสังกะสีด้วยไฟฟ้าแบบ Sine wave ในน้ำยาชุบระบบต่าง ๆ โดยใช้กระแสในการชุบที่ 2 A/dm^2 ที่ระยะเวลาต่างๆ	24
รูปที่ 3.21	ชิ้นงานที่ได้หลังจากการชุบสังกะสีด้วยไฟฟ้าในน้ำยาชุบระบบต่าง ๆ ด้วยรูปแบบการจ่ายกระแสไฟฟ้าที่แตกต่างกัน โดยมีความหนาของชั้นสังกะสีประมาณ 8 ไมครอน	25
รูปที่ 3.22	ภาคตัดขวางของแผ่นเหล็กชุบสังกะสีด้วยไฟฟ้ากระแสตรง กระแสแบบพัลส์ และกระแสแบบ Sine wave	26
รูปที่ 3.23	กราฟ Nyquist ของแผ่นเหล็กเคลือบสังกะสีด้วยไฟฟ้าด้วยกระแสตรงที่ใช้สารเคมีเกรดการค้าในระบบต่าง ๆ โดยมีความหนาของชั้นเคลือบประมาณ 8 ไมครอน ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 5% โดยน้ำหนัก	27
รูปที่ 3.24	เส้นโพลาริเซชันของแผ่นเหล็กชุบสังกะสีด้วยไฟฟ้าด้วยกระแสตรงที่ใช้สารเคมีเกรดการค้าในระบบต่าง ๆ โดยมีความหนาของชั้นเคลือบประมาณ 8 ไมครอน ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 5% โดยน้ำหนัก	28
รูปที่ 3.25	กราฟ Nyquist ของแผ่นเหล็กเคลือบสังกะสีด้วยไฟฟ้าโดยใช้รูปแบบกระแสตรง กระแสพัลส์ และกระแส Sine wave และใช้สารเคมีเกรดการค้าเคลือบในระบบต่าง ๆ โดยมีความหนาของชั้นเคลือบประมาณ 8 ไมครอน ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 5% โดยน้ำหนัก	29

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 3.26	29
รูปที่ 3.27	31

เส้นโพลาริเซชันของแผ่นเหล็กชุบสังกะสีด้วยไฟฟ้าโดยใช้รูปแบบกระแสตรง กระแสพัลส์ และ กระแส Sine wave และใช้สารเคมีเกรดการค้าเคลือบในระบบต่าง โดยมีความหนาของชั้นเคลือบ ประมาณ 8 ไมครอน ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 5% โดยน้ำหนัก

ลักษณะพื้นผิวของแผ่นเหล็กชุบสังกะสีด้วยไฟฟ้าโดยใช้รูปแบบกระแสตรง กระแสพัลส์ และ กระแส Sine wave และใช้สารเคมีเกรดการค้าเคลือบในระบบต่าง โดยมีความหนาของชั้นเคลือบ ประมาณ 8 ไมครอน ที่ระยะเวลาการทดสอบ 0, 1, 48, 120 และ 240 ชั่วโมง

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

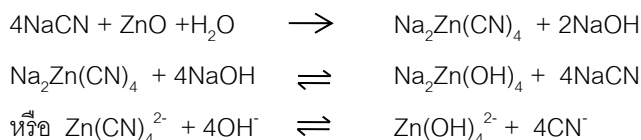
ปัจจุบันประเทศไทยมีโรงงานอุตสาหกรรมการผลิตเหล็กเคลือบสังกะสีด้วยไฟฟ้าอยู่เป็นจำนวนมากโดยมีการผลิตด้วยระบบที่ใช้ไซยาไนด์ และระบบที่ไม่ใช้ไซยาไนด์ซึ่งแบ่งออกได้เป็นแบบกรดและแบบด่าง ซึ่งเทคโนโลยีและสารเคมีที่ใช้ในกระบวนการเคลือบเป็นปัจจัยสำคัญที่มีบทบาทในการกำหนดลักษณะของผิวเคลือบ ได้แก่ ความสม่ำเสมอของผิวเคลือบ ความมันเงา อัตราเร็วในการชุบเคลือบ และยังมีผลต่อผิวเคลือบภายหลังการทำ passivation โดยข้อมูลจากการศึกษาในงานวิจัยที่ผ่านมาแสดงให้เห็นว่า เทคโนโลยีและสารเคมีที่ใช้ในกระบวนการเคลือบจะมีผลต่อลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคของผิวเคลือบ

ในงานวิจัยนี้จึงเป็นการศึกษากระบวนการชุบเคลือบสังกะสีด้วยไฟฟ้าในระบบต่างๆ ที่ใช้งานอยู่ในอุตสาหกรรมผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ โดยนำผลการวิเคราะห์ทดสอบมาหาความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างทางจุลภาคของผิวเคลือบต่อสมบัติความต้านทานการกัดกร่อนของชิ้นงาน ซึ่งผลการวิจัยดังกล่าวจะเป็นประโยชน์ต่ออุตสาหกรรมการผลิตเหล็กเคลือบสังกะสีโดยสามารถนำมาใช้เป็นแนวทางในการประเมินสมบัติความต้านทานต่อการกัดกร่อนจากโครงสร้างทางจุลภาคของเหล็กเคลือบสังกะสี นอกจากนี้ยังใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาสารเติมแต่งขึ้นในประเทศต่อไป

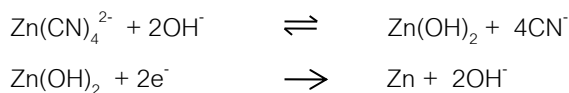
1.1 การทบทวนวรรณกรรม/สารสนเทศ (Information) ที่เกี่ยวข้อง

การชุบเคลือบสังกะสีด้วยไฟฟ้านั้น ไอออนของโลหะที่ใช้เป็นผิวเคลือบจะเกิดการเคลื่อนที่จากขั้วบวกไปยังขั้วลบ โดยกระแสไฟฟ้าที่ผ่านเข้าไปในสารละลายนั้นจะส่งผลให้ชิ้นงานที่ขั้วแคโทดถูกเคลือบโดยโลหะที่อยู่ในสารละลาย ซึ่งในที่นี้ใช้สังกะสีเป็นแอโนด และชิ้นงานเหล็กเป็นแคโทดจุ่มอยู่ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่ประกอบด้วยสารเติมแต่ง (additives) ได้แก่ สารที่ทำหน้าที่ช่วยทำให้การเคลือบติดของสังกะสีบนผิวเหล็กเป็นไปอย่างสม่ำเสมอ (carrier) และสารที่ช่วยทำให้ผิวเคลือบมีความมันเงา (brightener)

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



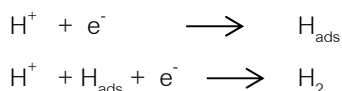
การเติม $NaOH$ ลงไปในน้ำยาจึงเป็นการลดปริมาณ cyanide zinc complex และเพิ่มปริมาณความเข้มข้น zincate ion ทั้งนี้ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นที่ขั้วคาโทดเป็นดังนี้



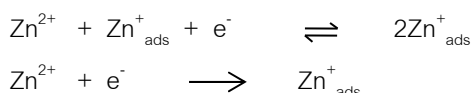
แต่ด้วยข้อจำกัดเรื่องอันตรายของสารเคมีต่อสิ่งแวดล้อม จึงทำให้มีการพัฒนาสารประเภทที่ไม่ใช่ไซยาไนด์ออกสู่ตลาดเพื่อใช้แทนสารเดิม ปัจจุบันกระบวนการชุบเคลือบสังกะสีด้วยไฟฟ้าที่ใช้ในอุตสาหกรรมส่วนใหญ่เป็นแบบไม่ใช่ไซยาไนด์ซึ่งโดยทั่วไปแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทคือ แบบกรดและแบบด่าง [1]

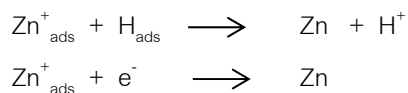
การชุบเคลือบสังกะสีแบบกรดใช้น้ำยาชุบที่แบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด คือ ชนิดคลอไรด์ซึ่งมีองค์ประกอบที่สำคัญ ได้แก่ $ZnCl_2$, KCl , NH_4Cl , boric acid, additive และชนิดซัลเฟตซึ่งมีองค์ประกอบที่สำคัญ ได้แก่ $ZnSO_4$, aluminiumsulphate, $NaCl$, boric acid, additive [3] โดยควบคุม pH อยู่ในช่วง 2-6 ที่อุณหภูมิ 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]

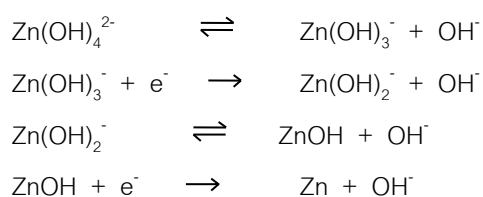


ทั้งนี้ปฏิกิริยาการชุบเคลือบของสังกะสีเกิดขึ้นจากปฏิกิริยารีดักชันของ Zinc ion ในสารละลายและ Zn^+_{ads} ที่ถูกดูดซับไว้ที่ผิวโลหะดังนี้





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, polyglycoethers และสารที่มีไนโตรเจนชนิด quaternary ส่วน brighteners ได้แก่ สารประเภท aliphatic, aromatic และ heterocyclic ที่มีหมู่คาร์บอนิล [1] ส่วนในการชุบแบบต่างนั้นสารที่มีการมุ่งพัฒนามากคือ 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 สารประกอบซัลเฟอร์ 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 0.000001 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) ผิวเคลือบมีความหยาบ (dull) เมื่อใช้ cetyltrimethylammonium bromide (CTAB) เป็น leveler มีผลทำให้เกิดโครงสร้างรูปเข็มที่มีขนาดสม่ำเสมอ ($1 \mu\text{m}$) ได้ผิวเงา แต่เมื่อใช้ CTAB ร่วมกับ brighteners คือ salicylaldehyde และ acetic acid พบว่าได้เกรนที่มีขนาดเล็กมากและมีผิวเรียบมากยิ่งขึ้น จึงได้ผิวเคลือบที่มีความมันเงา [8]

ส่วนการศึกษามูลของสารเติมแต่งต่อโครงสร้างผลึกของผิวเคลือบสังกะสีโดยวิธีชุบเคลือบด้วยไฟฟ้าแบบต่างพบว่า 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) ได้ศึกษาลักษณะทางโครงสร้างสัณฐานวิทยาและความต้านทานต่อการกัดกร่อน 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 สารเคมี

ส่วนประกอบในน้ำยาชุบสังกะสีด้วยไฟฟ้าเกรดการค้าระบบต่างๆ มีดังนี้

น้ำยาชุบระบบไซยาไนด์

Zinc oxide	30 g/L
Sodium cyanide (NaCN)	65 g/L
Sodium hydroxide (NaOH)	60 g/L
CYZN-550 (Additive)	2.5 ml/L

น้ำยาชุบระบบกรด

Zinc Chloride	50 g/L
Ammonium Chloride	210 g/L
COLSID K-251 (Carrier)	30 ml/L
COLSID K-251 (Brightener)	1.25 ml/L
pH	5.0

น้ำยาชุบระบบต่าง

Zinc metal	10.4 g/L
Sodium hydroxide	123 g/L
Zimex E-100 A (Carrier)	7.5 ml/L
Zimex E-100 B1 (Brightener)	1.0 ml/L

2.2 วิธีการทดลอง

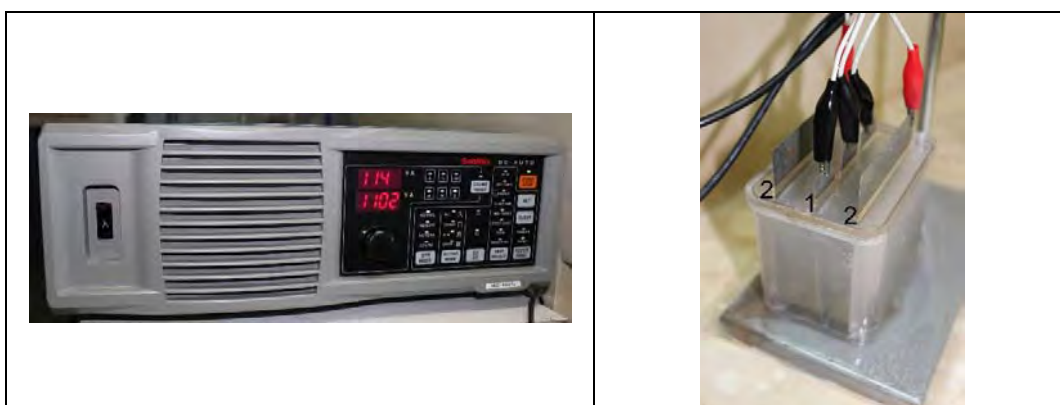
2.2.1 การเตรียมชิ้นงาน

เตรียมชิ้นงานแผ่นเหล็ก ความหนา 0.4 มิลลิเมตร ขนาด 2 x 10 เซนติเมตรทำการล้างไขมันออกจากชิ้นงานโดยแช่ใน 10% w/w NaOH ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที ล้างน้ำประปา แล้วล้างด้วยน้ำกลั่นจากนั้นทำความสะอาดแผ่นเหล็กด้วยการแช่ในสารละลาย 14% w/w HCl ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 5 นาที ล้างน้ำประปา แล้วล้างด้วยน้ำกลั่น

2.2.2 การทดลองชุบสังกะสีบนแผ่นเหล็กด้วยไฟฟ้า

เตรียมน้ำยาชุบสังกะสีระบบกรด ระบบไซยาไนด์ และระบบต่าง ปริมาตร 280 มิลลิเมตร โดยมีส่วนประกอบดังตารางที่ 2.1 นำแผ่นเหล็กที่เตรียมผิวแล้วแช่ลงในน้ำยา จากนั้นต่อวงจรไฟฟ้าเข้ากับเครื่องจ่ายกระแสไฟฟ้าเพื่อทำการชุบสังกะสี โดยหมายเลข 1 เป็นขั้วแคโทด (ขั้วลบ) ใช้แผ่นเหล็กขนาด กว้าง x ยาว เท่ากับ 2.0 x 10.0 เซนติเมตร จำนวน 3 แผ่น

สำหรับการชุบเคลือบ หมายเลข 2 เป็นขั้วแอโนด (ขั้วบวก)ซึ่งในระบบไฮยาไนต์ และระบบกรด ใช้แผ่นสังกะสีขนาด กว้าง×ยาว เท่ากับ 3.2×5.0 เซนติเมตร จำนวน 2 แผ่น เป็นขั้วแอโนด ส่วนระบบต่างใช้แผ่นเหล็กขนาด กว้าง×ยาว เท่ากับ 3.2×5.0 เซนติเมตร จำนวน 2 แผ่น เป็นขั้วแอโนด แสดงในรูปที่ 2.1ทำการชุบโดยใช้รูปแบบการจ่ายกระแสไฟฟ้า 3 ชนิด คือ กระแสตรง, กระแสแบบพัลส์ (current on time 18 ms, current off time 18 ms), กระแสแบบ Sine wave โดยใช้ ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ 1 A/dm², 2 A/dm² และ 4 A/dm² ระยะเวลาการชุบ 10, 20, 30 และ 40 นาที เมื่อชุบเสร็จ แล้วนำชิ้นงานออกจากน้ำยาชุบ ล้างน้ำ ทำให้แห้ง



รูปที่ 2.1 เครื่องจ่ายกระแสไฟฟ้าและเซลล์ที่ใช้ในการชุบเคลือบสังกะสีบนแผ่นเหล็ก

ตารางที่ 2.1 ส่วนประกอบในน้ำยา และภาวะที่ใช้ในการชุบสังกะสีด้วยไฟฟ้าระบบไฮยาไนต์ ระบบกรดและระบบต่าง

ภาวะในการชุบ	ระบบไฮยาไนต์	ระบบกรด	ระบบต่าง
Base	ZnO 30 g/L	ZnCl ₂ 50 g/L	Zinc metal 10.4 g/L
	NaCN 65 g/L	NH ₄ Cl ₂ 10 g/L	NaOH 123 g/L
	NaOH 60 g/L		
Additives	CYZN-550 2.5 ml/L	Carrier 30 ml/L	Carrier 7.5 ml/L
		Brightener 1.25 ml/L	Brightener 1.0 ml/L
Anode	Zn	Zn	Steel
Current density	1, 2, 4 A/dm ²	1, 2, 4 A/dm ²	1, 2, 4 A/dm ²
Temperature	25 °C	25 °C	25 °C
Time	10, 20, 30, 40 min	10, 20, 30, 40 min	10, 20, 30, 40 min

2.3 การวิเคราะห์ทดสอบ

2.3.1 ตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาคของชั้นเคลือบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope) จากบริษัท Jeol รุ่น JSM-6400 และวัดความหนาของชั้นเคลือบสังกะสีด้วยเครื่อง X-ray fluorescence (XRF) บริษัท Fischer รุ่น XUV773

2.3.2 วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีและโครงสร้างผลึกของชั้นเคลือบด้วยเครื่อง X-ray diffractometer จากบริษัท Philips รุ่น PW3719 ที่มุม $0 - 80$ องศา 2θ โดยใช้โปรแกรม MDI JADE 6.5 ในการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของชั้นเคลือบ จากนั้นทำการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การจัดเรียงตัวผลึก (texture coefficient, Tc) โดยใช้สมการดังนี้

$$\text{Texture coefficient} = \frac{\frac{I_{hkl}}{I_{hkl}^0}}{\frac{1}{n} \sum \frac{I_{hkl}}{I_{hkl}^0}}$$

โดยที่ I_{hkl} คือ ความสูงของพีกนั้นๆ

ส่วน I_{hkl}^0 คือ ความสูงของพีกที่ได้จากสารมาตรฐาน (ซึ่งในที่นี้หมายถึงผงสังกะสีมาตรฐาน)

$\sum I_{hkl}$ และ $\sum I_{hkl}^0$ คือ ผลรวมของความสูงของทุกพีกที่ปรากฏบน diffractogram

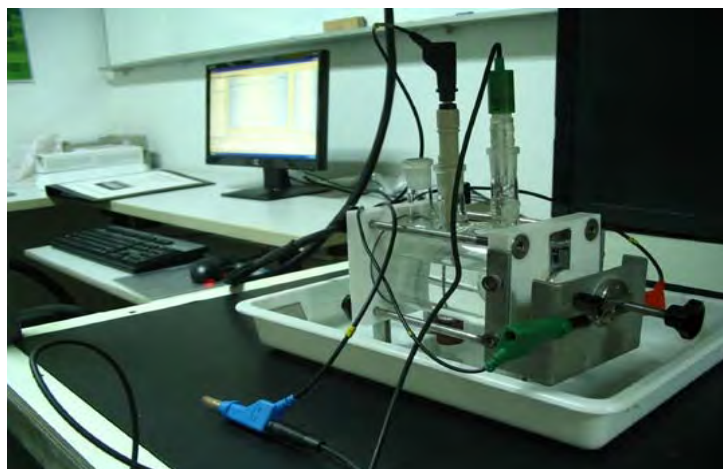
n คือ จำนวนพีกที่ปรากฏบน diffractogram

2.3.3 การทดสอบความต้านทานการกัดกร่อนด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า

■ ทดสอบความต้านทานการกัดกร่อนของแผ่นเหล็กชุบสังกะสีด้วยไฟฟ้าที่ใช้สารเคมีเชิงพาณิชย์ในระบบไฮยาโนด์ ระบบกรด และระบบต่าง ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 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 2.2 ชุดอุปกรณ์ทดสอบการกัดกร่อนด้วยเครื่องโพเทนชิโอมิเตอร์

2.3.4 การทดสอบความต้านทานการกัดกร่อนด้วยวิธีจำลองสถานะในเครื่อง Salt spray อ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM B117

ทดสอบความต้านทานการกัดกร่อนของแผ่นเหล็กชุบสังกะสีด้วยไฟฟ้าที่ใช้สารเคมีเชิงพาณิชย์ในระบบกรดระบบโซลาร์ไนต์และระบบต่าง ด้วยเครื่องทดสอบการกัดกร่อนแบบละอองเกลือ (Q-FOG, CCT600) อ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM B117 เป็นระยะเวลา 240 ชั่วโมง โดยก่อนการทดสอบ ตรวจสอบลักษณะผิวและคราบสนิมบนชิ้นงาน จากนั้นวางชิ้นงานท่ามุม 30 องศาบนชั้นวางอุปกรณ์ โดยใช้สารละลายโซเดียมคลอไรด์ 5% โดยน้ำหนักค่าความเป็นกรดต่างในช่วง 6.5 ถึง 7.2 เป็นสารละลายในการทดสอบ ควบคุมอุณหภูมิให้อยู่ในช่วง 35 ± 1 องศาเซลเซียส เมื่อเวลาการทดสอบผ่านไป ทุก ๆ 24 ชั่วโมง ตรวจสอบพิจารณาเปลี่ยนแปลงบนพื้นผิวชิ้นงาน โดยนำชิ้นงานออกจากเครื่องทดสอบ ทำความสะอาดชิ้นงานด้วยน้ำอุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส ถ่ายรูปชิ้นงานที่เวลาการทดสอบผ่านไป 1, 48, 120 และ 240 ชั่วโมงตามลำดับ



รูปที่ 2.3 เครื่องทดสอบการกัดกร่อนแบบละอองเกลือและลักษณะการวางชิ้นงานทดสอบ

บทที่ 3

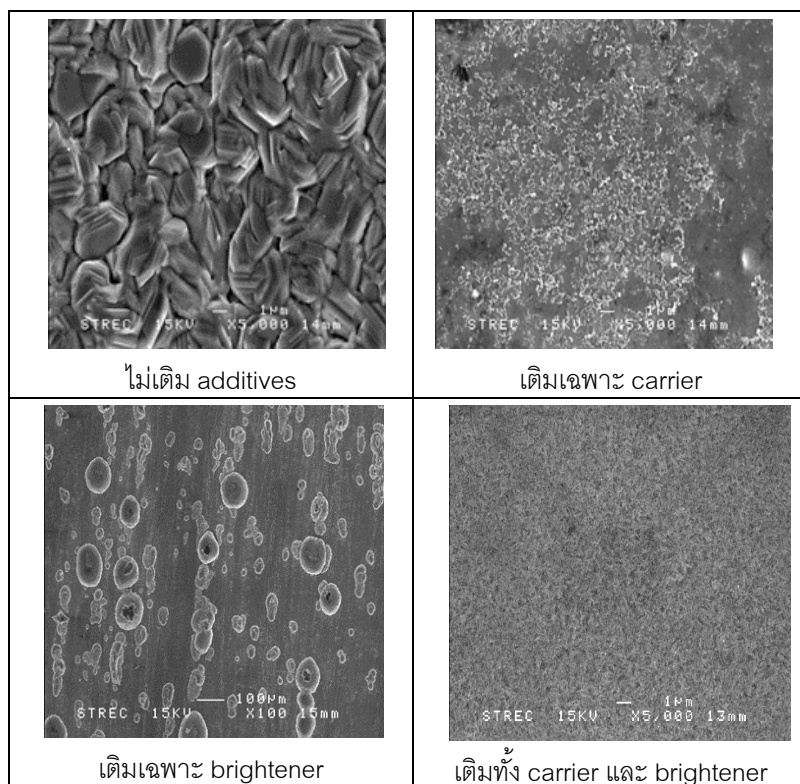
ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง

3.1 ปัจจัยจากส่วนประกอบในน้ำยาชุบต่อโครงสร้างผิวเคลือบ

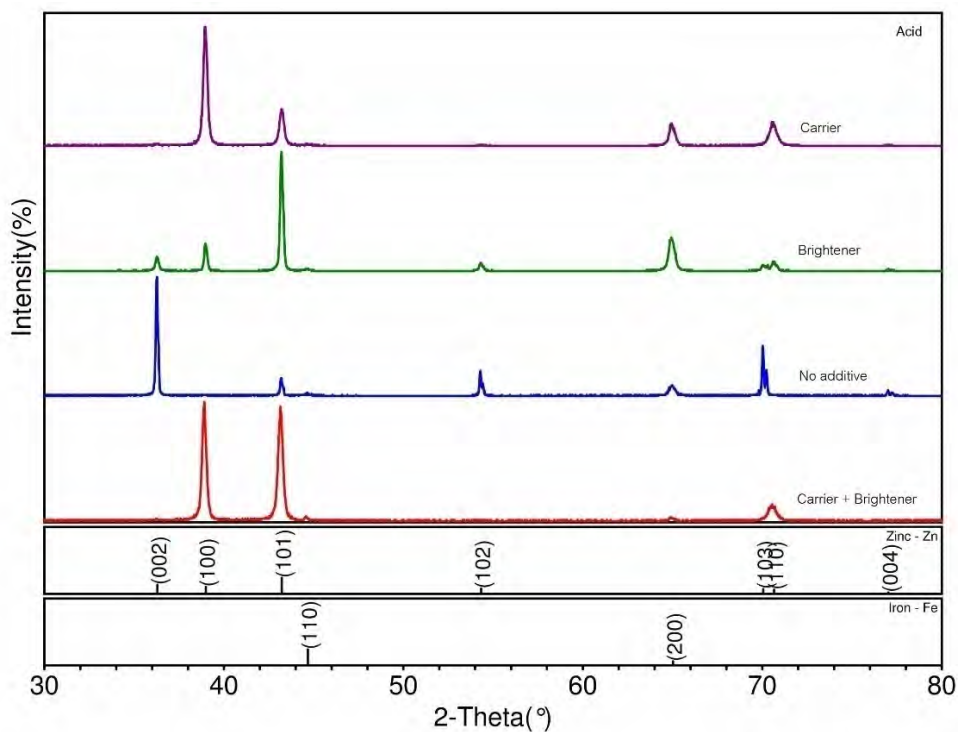
3.1.1 น้ำยาชุบเคลือบระบบกรด

จากการศึกษาอิทธิพลขององค์ประกอบแต่ละส่วนในน้ำยาชุบเคลือบเกรดการค้าในระบบกรด โดยทำการชุบสังกะสีลงบนแผ่นเหล็กด้วยไฟฟ้า ผลการทดลองพบว่า การชุบด้วยน้ำยาที่ไม่ได้เติม additives ซึ่งหมายถึงน้ำยาที่มีเฉพาะสารเคมีพื้นฐาน ได้แก่ สารประกอบสังกะสี ร่วมกับ NH_4Cl จะทำให้ผิวเคลือบมีลักษณะเป็นผงละเอียด (powdery) สีขาวขุ่น และเกาะติดผิวได้ไม่ดี เมื่อทำการเติม carrier ลงในน้ำยาพบว่า ผิวเคลือบมีสีเงินและมีความมันเงา ส่วนชุดที่เติมเฉพาะ brightener นั้น ชิ้นงานมีสีเทาปนขาว สำหรับชุดที่เติมทั้ง carrier และ brightener พบว่าผิวเคลือบมีสีเงินและมีความมันเงามากที่สุด เมื่อตรวจสอบผิวชุบด้วย SEM พบว่า แผ่นเหล็กชุบสังกะสีด้วยน้ำยาที่ไม่ได้เติม additives มีโครงสร้างหยาบโดยเป็นรูปทรงเหลี่ยมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 1-5 ไมครอน ที่อยู่กันอย่างหนาแน่น ในขณะที่แผ่นเหล็กที่มีการเติมเฉพาะ carrier ลงในน้ำยาพบว่า โครงสร้างมีความละเอียดมากขึ้นแต่ยังคงมีความไม่สม่ำเสมอโดยมีกลุ่มอนุภาคขนาดเล็กกระจายอยู่ทั่วไปบนพื้นผิว ส่วนแผ่นเหล็กที่มีการเติมเฉพาะ brightener พบว่า มีอนุภาคทรงกลมขนาดใหญ่ประมาณ 10-100 ไมครอน กระจายตัวอยู่ทั่วไปบนพื้นผิว สำหรับแผ่นเหล็กที่มีการเติมทั้ง carrier และ brightener ลงในน้ำยาพบว่า พื้นผิวมีโครงสร้างขนาดเล็กที่มีความละเอียดและมีความหนาแน่นสม่ำเสมอทั่วพื้นผิวแสดงดังในรูปที่ 3.1

กราฟ XRD ของแผ่นเหล็กชุบสังกะสีด้วยน้ำยาชุบเคลือบระบบกรด แสดงในรูปที่ 3.2 พบว่า แผ่นเหล็กชุบสังกะสีที่ผ่านการชุบในน้ำยาที่ไม่มีการเติม additives และแผ่นเหล็กชุบสังกะสีที่ผ่านการชุบจากน้ำยาที่มีการเติม additives ใน 3 รูปแบบ คือ เติมเฉพาะ carrier เติมเฉพาะ brightener และเติมทั้ง carrier กับ brightener นั้นพบว่า ชิ้นงานทุกชิ้นมีเฟสเดียวกัน คือ สังกะสี ซึ่งประกอบด้วยระนาบที่สำคัญคือ (002), (100), (101), (102) และ (110) โดยพบว่า แผ่นเหล็กชุบสังกะสีที่ผ่านการชุบในน้ำยาที่ไม่มีการเติม additives จะมีโครงสร้าง (002) เป็นระนาบหลัก และมีเฟสของเหล็กปรากฏขึ้นด้วยส่วนกรณีแผ่นเหล็กที่ชุบโดยเติมเฉพาะ brightener นั้นพบว่า มี (101) เป็นระนาบหลัก ในขณะที่การชุบด้วยน้ำยาที่เติมเฉพาะ carrier พบว่ามีระนาบ (100) เป็นระนาบหลัก ซึ่งทั้งสองระบบนี้ยังคงมีโครงสร้างของเหล็กปรากฏขึ้นด้วย ซึ่งแสดงถึงความไม่สม่ำเสมอในการเคลือบปกคลุมทั่วพื้นผิวแผ่นเหล็ก สำหรับแผ่นเหล็กที่ชุบด้วยน้ำยาที่เติมทั้ง carrier และ brightener พบว่า มีโครงสร้างประกอบด้วย (100), (101) และ (110) เป็นระนาบหลัก โดยที่ระนาบ (100) มีค่าสัมประสิทธิ์การจัดเรียงตัวผลึกสูงสุดแสดงในตารางที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ลักษณะผิวของชิ้นงานที่ได้หลังชุบสังกะสีด้วยไฟฟ้าในน้ำยาชุบระบบกรดด้วยกระแส $2A/dm^2$ เป็นระยะเวลา 20 นาที โดยมีส่วนผสมในน้ำยาชุบที่แตกต่างกัน



รูปที่ 3.2 ชิ้นงานที่ได้หลังจากการชุบสังกะสีด้วยไฟฟ้าในน้ำยาชุบระบบกรดด้วยกระแส $2A/dm^2$ เป็นระยะเวลา 20 นาที โดยมีส่วนผสมในน้ำยาชุบที่แตกต่างกัน

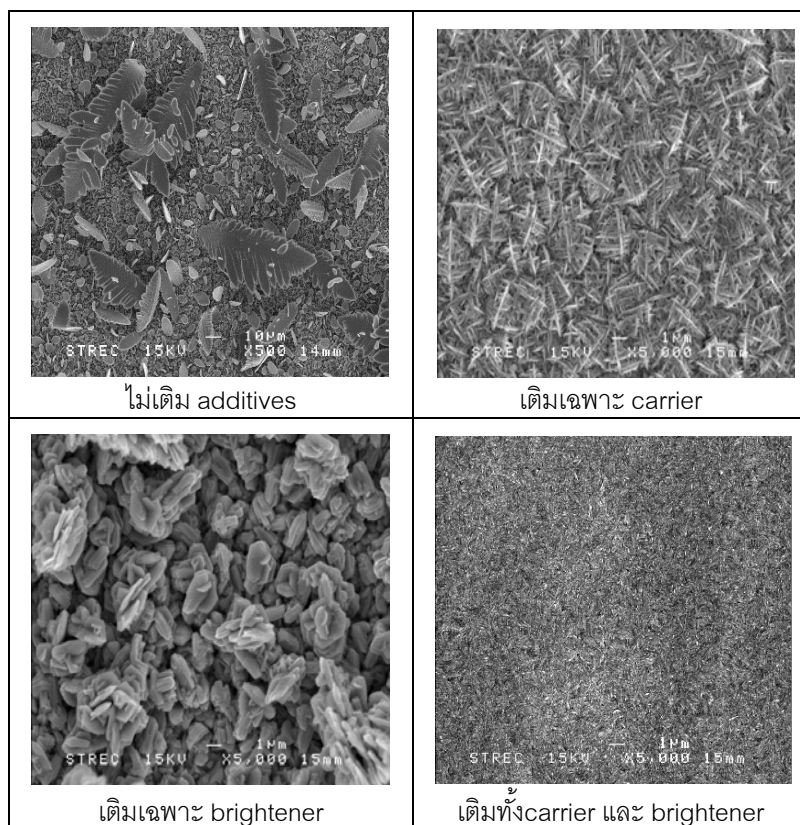
ตารางที่ 3.1 สัมประสิทธิ์การจัดเรียงตัวผลึกของแผ่นเหล็กชุบสังกะสีด้วยไฟฟ้าโดยใช้สารเคมีเกรดการค้าในระบบกรดด้วยกระแส $2A/dm^2$ เป็นระยะเวลา 20 นาที

ส่วนประกอบในน้ำยาชุบ	สัมประสิทธิ์การจัดเรียงตัวผลึกที่ระนาบต่างๆ				
	(002)	(100)	(101)	(102)	(110)
ไม่เติม additives	3.663	0.055	0.255	0.971	0.057
เติมเฉพาะ Carrier	0.069	3.690	0.411	0.046	0.785
เติมเฉพาะ Brightener	0.573	1.346	2.104	0.436	0.541
เติม Carrier+ Brightener	0.062	3.329	1.145	0.030	0.433

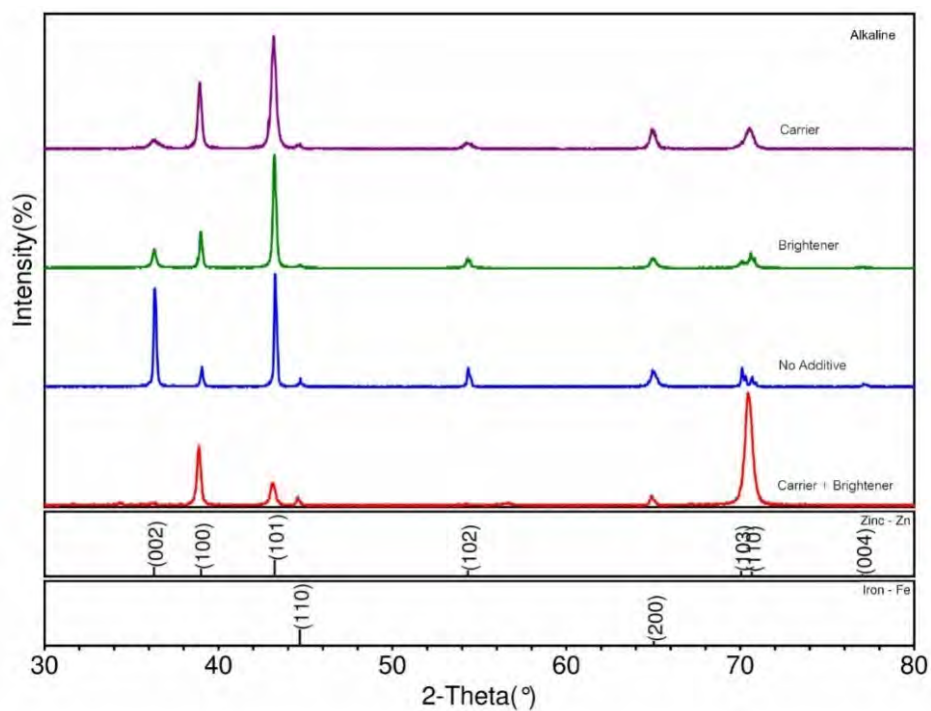
3.1.2 น้ำยาชุบเคลือบระบบต่าง

จากการศึกษาอิทธิพลขององค์ประกอบแต่ละส่วนในน้ำยาชุบเคลือบเกรดการค้าในระบบต่าง โดยทำการชุบสังกะสีลงบนแผ่นเหล็กด้วยไฟฟ้า ผลการทดลองพบว่า การชุบด้วยน้ำยาที่ไม่ได้เติม additives ซึ่งหมายถึงน้ำยาที่มีเฉพาะสารเคมีพื้นฐานได้แก่ สารประกอบสังกะสี ร่วมกับ NaOH จะได้ผิวเคลือบสีเทาปนขาวมีลักษณะเป็นผงละเอียดและเกาะติดผิวได้ไม่ดี เมื่อทำการเติม carrier ลงในน้ำยาพบว่า ผิวเคลือบมีสีเหลืองน้ำตาล ส่วนชุดที่เติมเฉพาะ brightener นั้นพบว่า มีสีเทาดำ สำหรับชุดที่เติมทั้ง carrier และ brightener พบว่าผิวเคลือบมีสีเหลืองน้ำตาลและมีความมันเงาเมื่อตรวจสอบผิวชุบจากระบบต่างด้วย SEM พบว่า การชุบแผ่นเหล็กด้วยน้ำยาที่ไม่ได้เติม additives ผิวเคลือบมีลักษณะโครงสร้างหยาบ โดยมีอนุภาคเป็นแผ่นคล้ายขนนกขนาดความยาวในช่วง 1-10 ไมครอน ปะปนอยู่กับแผ่นรูปทรงเหลี่ยมขนาดประมาณ 1-5 ไมครอน ส่วนแผ่นเหล็กที่มีการเติมเฉพาะ carrier ลงในน้ำยาจะมีโครงสร้างเป็นรูปเข็มขนาดความยาวประมาณ 1-3 ไมครอนที่มีกิ่งก้านเกาะกลุ่มอยู่ทั่วไป ส่วนแผ่นเหล็กที่มีการเติมเฉพาะ brightener มีโครงสร้างลักษณะเป็นแผ่นทรงเหลี่ยมขนาด 1-3 ไมครอนที่เกาะกลุ่มกันอยู่ สำหรับแผ่นเหล็กที่มีการเติมทั้ง carrier และ brightener ลงในน้ำยานั้นพบว่า โครงสร้างของผิวเคลือบมีความเล็กละเอียด โดยมีลักษณะเป็นรูปทรงเรียวยาวซ้อนทับไปมาอย่างหนาแน่นทั่วพื้นผิว แสดงดังในรูปที่ 3.3

กราฟ XRD ของแผ่นเหล็กชุบสังกะสีด้วยน้ำยาชุบเคลือบระบบต่างแสดงในรูปที่ 3.4 พบว่า แผ่นเหล็กชุบสังกะสีที่ผ่านการชุบในน้ำยาที่ไม่มีการเติม additives และแผ่นเหล็กชุบสังกะสีที่ผ่านการชุบจากน้ำยาที่มีการเติม additives ใน 3 รูปแบบ คือ เติมเฉพาะ carrier เติมเฉพาะ brightener และเติมทั้ง carrier กับ brightener นั้นพบว่า ชั้นงานทุกชั้นมีเฟสเดียวกัน คือ สังกะสี ซึ่งประกอบด้วยระนาบที่สำคัญคือ (002), (100), (101), (102) และ (110) ซึ่งเมื่อนำค่าสัมประสิทธิ์การจัดเรียงตัวผลึกในตารางที่ 3.2 มาพิจารณาประกอบจะพบว่า แผ่นเหล็กชุบสังกะสีที่ผ่านการชุบในน้ำยาที่ไม่มีการเติม additives จะมีโครงสร้าง (002) และ (101) เป็นระนาบหลัก ส่วนกรณีแผ่นเหล็กที่ชุบโดยเติมเฉพาะ carrier และเติมเฉพาะ brightener นั้นพบว่า โครงสร้างดังกล่าวมีระนาบ (100) และ (101) เป็นระนาบหลัก สำหรับแผ่นเหล็กที่ชุบด้วยน้ำยาที่เติมทั้ง carrier และ brightener พบว่า มีโครงสร้างประกอบด้วย (100) และ (110) เป็นระนาบหลัก โดยที่ระนาบ (110) มีค่าสัมประสิทธิ์การจัดเรียงตัวผลึกสูงสุดทั้งนี้เป็นที่สังเกตว่า ทุกระบบยังคงตรวจพบเฟสของเหล็กบนโครงสร้างผิวเคลือบ



รูปที่ 3.3 ลักษณะผิวของชิ้นงานที่ได้หลังชุบสังกะสีด้วยไฟฟ้าในน้ำยาชุบระบบต่างด้วยกระแส $2\text{A}/\text{dm}^2$ เป็นระยะเวลา 20 นาที โดยมีส่วนผสมในน้ำยาชุบที่แตกต่างกัน



รูปที่ 3.4 ชิ้นงานที่ได้หลังจากการชุบสังกะสีด้วยไฟฟ้าในน้ำยาชุบระบบต่างด้วยกระแส $2\text{A}/\text{dm}^2$ เป็นระยะเวลา 20 นาที โดยมีส่วนผสมในน้ำยาชุบที่แตกต่างกัน

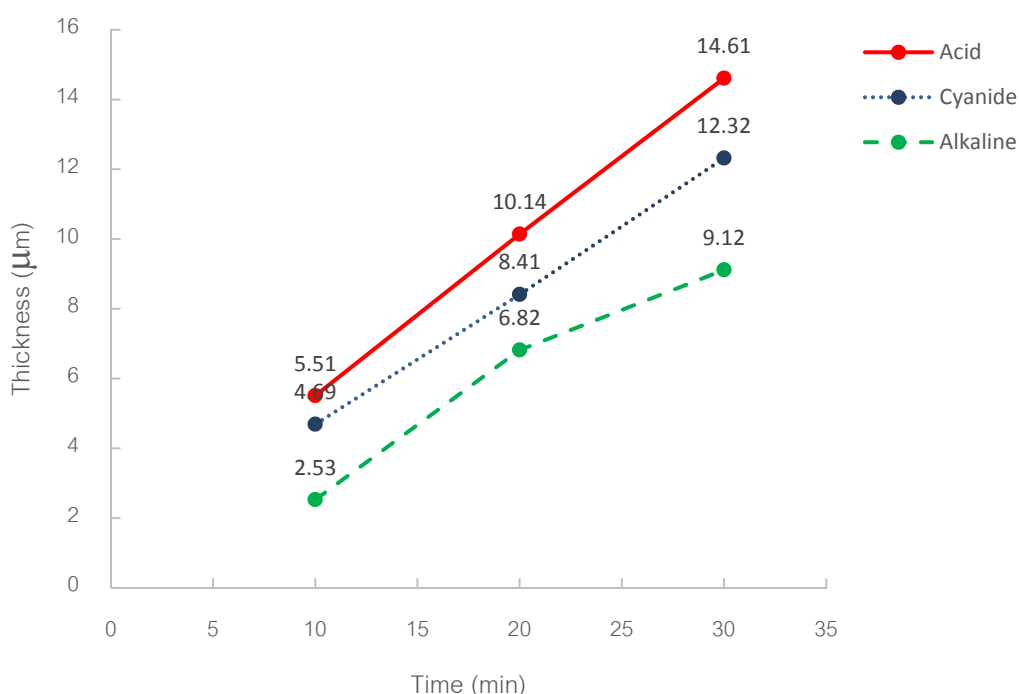
ตารางที่ 3.2 สัมประสิทธิ์การจัดเรียงตัวผลึกของแผ่นเหล็กชุบสังกะสีด้วยไฟฟ้าโดยใช้สารเคมีเกรดการค้าในระบบต่าง ๆ ที่กระแส 2 A/dm^2 เป็นระยะเวลา 20 นาที

ส่วนประกอบในน้ำยาชุบ	สัมประสิทธิ์การจัดเรียงตัวผลึกที่ระนาบต่างๆ				
	(002)	(100)	(101)	(102)	(110)
ไม่เติม additives	2.282	0.618	1.171	0.573	0.356
เติมเฉพาะ Carrier	0.259	2.302	1.404	0.235	0.799
เติมเฉพาะ Brightener	0.647	1.506	1.699	0.422	0.726
เติม Carrier+ Brightener	0.063	1.527	0.209	0.053	3.148

3.2 ประเภทของน้ำยาชุบระบบกรด ระบบไซยาไนด์ และระบบต่าง ๆ ต่อสมบัติของผิวเคลือบ

3.2.1 ผลของระยะเวลาการชุบต่อความหนาของผิวเคลือบ

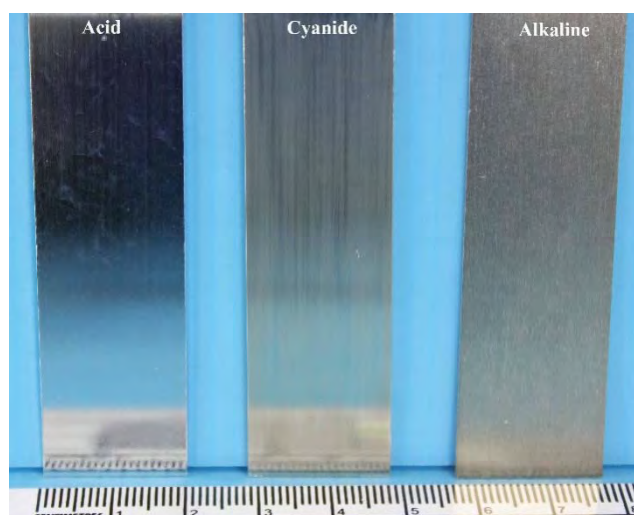
จากการใช้ไฟกระแสตรงขนาด 2 A/dm^2 เคลือบแผ่นเหล็กด้วยสังกะสี ที่ระยะเวลา 10, 20 และ 30 นาที โดยใช้น้ำยาในการชุบแตกต่างกันจำนวน 3 ระบบ คือ ระบบกรด ระบบไซยาไนด์ และ ระบบต่าง ๆ ที่มีการเติม additives แล้ว พบว่า การชุบเคลือบทั้ง 3 ระบบให้ความหนาของผิวเคลือบที่แปรผันตรงตามระยะเวลาในการชุบ โดยการใช้ น้ำยาชุบระบบกรดมีอัตราเร็วในการเคลือบผิวสูงกว่าระบบไซยาไนด์ และระบบต่าง ๆ ตามลำดับ แสดงในรูปที่ 3.5



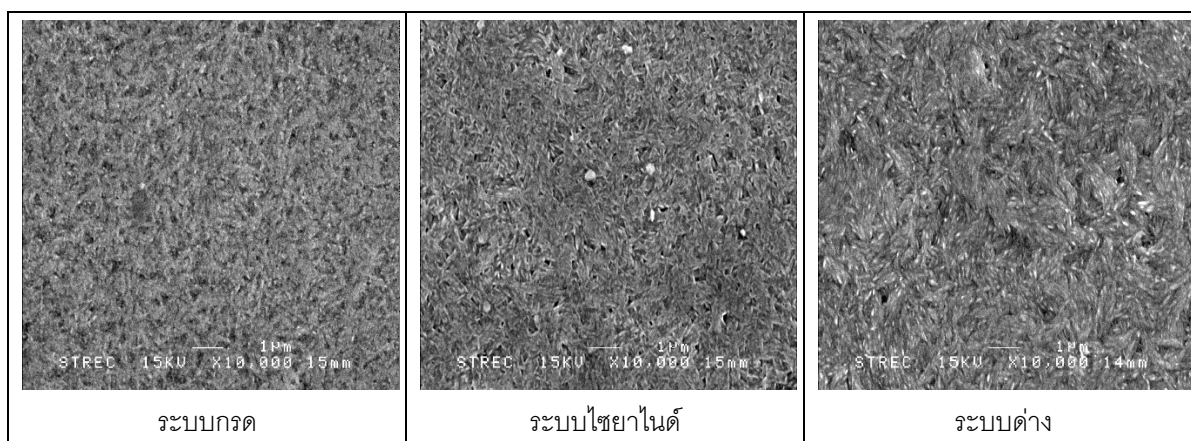
รูปที่ 3.5 ปริมาณกระแสไฟฟ้า ระยะเวลาในการชุบ และความหนาผิวเคลือบของแผ่นเหล็กชุบสังกะสีด้วยไฟฟ้าที่ใช้น้ำยาชุบในระบบกรด ระบบไซยาไนด์ และระบบต่าง ๆ

3.2.2 ลักษณะผิวเคลือบ

ผิวเคลือบที่ผ่านการชุบด้วยระบบกรดให้ผิวเคลือบสีเงิน มีความมันเงา ส่วนผิวเคลือบในระบบโซลยอนและระบบต่างให้ผิวเคลือบสีเหลืองน้ำตาลอ่อน มีความมันเงา แสดงในรูปที่ 3.6 โครงสร้างทางจุลภาคของเหล็กเคลือบสังกะสีจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน แสดงให้เห็นว่าพื้นผิวของเหล็กเคลือบสังกะสีในระบบกรดและระบบโซลยอนมีความละเอียดและเรียบกว่าระบบต่างแสดงในรูปที่ 3.7



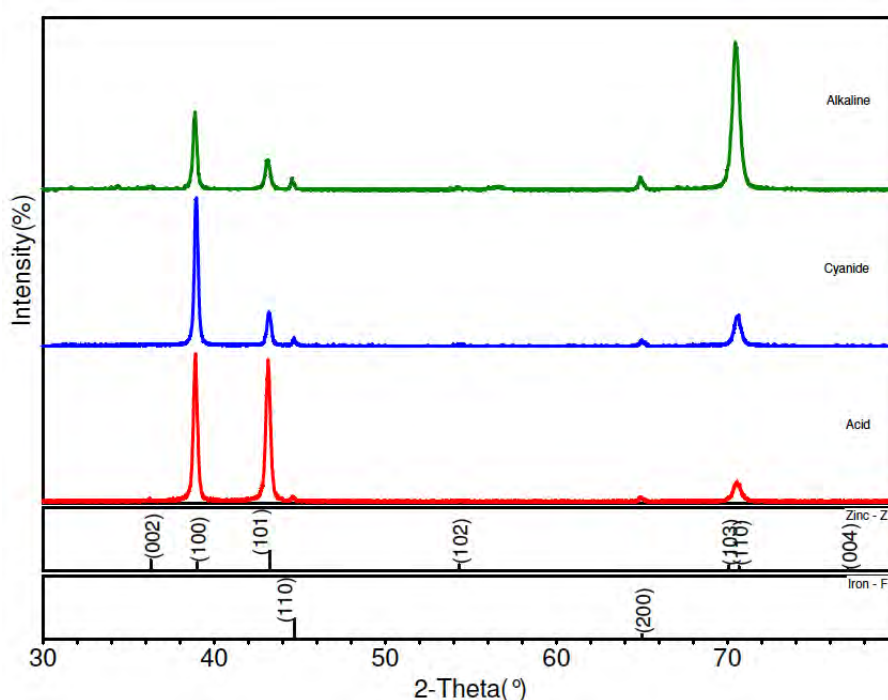
รูปที่ 3.6 แผ่นเหล็กชุบสังกะสีด้วยไฟฟ้าด้วยน้ำยาชุบระบบกรด ระบบโซลยอนและระบบต่าง 2 A/dm² 30 นาที



รูปที่ 3.7 ลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคของแผ่นเหล็กชุบสังกะสีด้วยไฟฟ้าด้วยน้ำยาชุบระบบกรด ระบบโซลยอนและระบบต่าง โดยใช้กระแส 2 A/dm² 30 นาที

3.2.3 องค์ประกอบของผิวเคลือบ

กราฟ XRD ของแผ่นเหล็กชุบสังกะสีด้วยน้ำยาชุบเคลือบระบบกรด ระบบไซยาไนด์ และระบบต่างแสดงในรูปที่ 3.8 พบว่า ชั้นงานทุกชั้นมีเฟสเดียวกัน คือ สังกะสี ซึ่งเมื่อนำค่าสัมประสิทธิ์การจัดเรียงตัวผลึกในตารางที่ 3.3 มาพิจารณาประกอบจะพบว่า แผ่นเหล็กชุบสังกะสีในระบบกรดมีระนาบ (100 และ (101) เป็นระนาบหลัก ในขณะที่การชุบในระบบไซยาไนด์มี (100) เป็นระนาบหลัก ส่วนการชุบในระบบต่างจะได้โครงสร้างผิวเคลือบที่มี (110) และ (100) เป็นระนาบหลักนอกจากนี้ยังสังเกตได้ว่า ยังคงตรวจพบเฟสของเหล็กบนโครงสร้างผิวเคลือบได้ค่อนข้างชัดเจนในกรณีการชุบในระบบต่างและไซยาไนด์



รูปที่ 3.8 แผ่นเหล็กชุบสังกะสีด้วยไฟฟ้าด้วยน้ำยาชุบระบบกรด ระบบไซยาไนด์ และระบบต่าง 2 A/dm² 30 นาที

ตารางที่ 3.3 สัมประสิทธิ์การจัดเรียงตัวผลึกของแผ่นเหล็กชุบสังกะสีด้วยไฟฟ้าโดยใช้สารเคมีเกรดการค้าในระบบกรด ระบบไซยาไนด์ และระบบต่างที่กระแส 2 A/dm² 30 นาที

แผ่นเหล็กชุบสังกะสีด้วยไฟฟ้า	สัมประสิทธิ์การจัดเรียงตัวผลึกที่ระนาบต่างๆ				
	(002)	(100)	(101)	(102)	(110)
ระบบกรด	0.062	3.329	1.145	0.030	0.433
ระบบไซยาไนด์	0.027	3.780	0.313	0.032	0.848
ระบบต่าง	0.063	1.527	0.209	0.053	3.148

3.2.4 สมบัติความต้านทานการกัดกร่อนของผิวเคลือบ

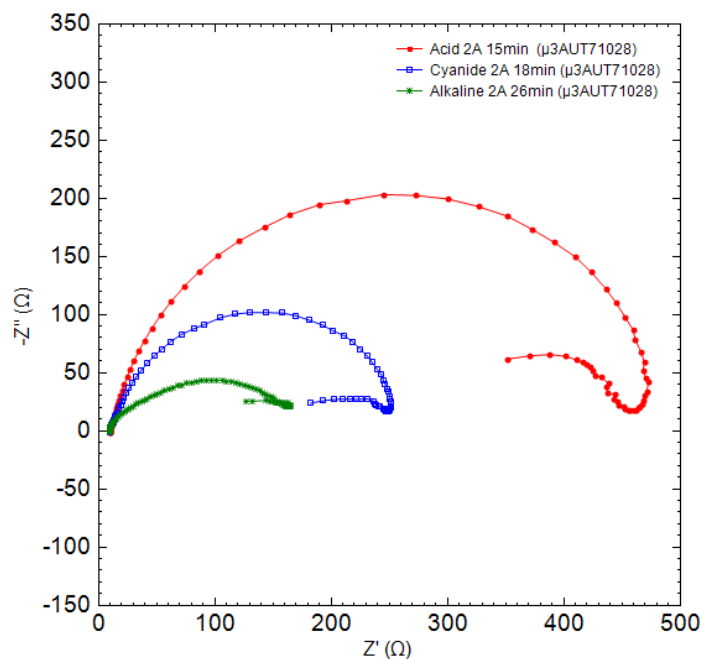
การศึกษาสมบัติของแผ่นเหล็กชุบสังกะสีด้วยไฟฟ้า โดยเฉพาะสมบัติความต้านทานการกัดกร่อนจำเป็นต้องใช้ชิ้นงานที่มีความหนาของชั้นสังกะสีเท่ากัน แต่ในทางปฏิบัติการเตรียมแผ่นเหล็กให้ได้ความหนาของชั้นเคลือบสังกะสีเท่ากันในทุกตำแหน่งและทุกชิ้นงานที่เตรียมนั้นทำได้ค่อนข้างยาก ดังนั้นจึงจำเป็นต้องตรวจวัดความหนาของแผ่นเหล็กชุบสังกะสีทุกชิ้นงานด้วยเครื่อง XRF แล้วเลือกตัวแทนของชิ้นงานที่มีความหนาใกล้เคียงกันมาทำการทดสอบความต้านทานการกัดกร่อน (ตารางที่ 3.4) ซึ่งการศึกษาวิจัยในครั้งนี้ใช้ความหนาของชั้นเคลือบสังกะสีประมาณ 8 ไมครอน ซึ่งพบว่า ระยะเวลาในการชุบเคลือบที่กระแส 2 A/dm^2 ในแต่ละระบบซึ่งให้ความหนาดังกล่าวได้แก่ การชุบเคลือบระบบกรด ระบบโซลาร์ไนต์ และระบบต่าง ด้วยระยะเวลา 15, 18 และ 26 นาที ตามลำดับ

ตารางที่ 3.4 ความหนาของชั้นสังกะสีบนแผ่นเหล็กโดยใช้สารเคมีกรดการค้าในระบบกรด ระบบโซลาร์ไนต์ และระบบต่าง ก่อนการทดสอบความต้านทานการกัดกร่อนด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมี

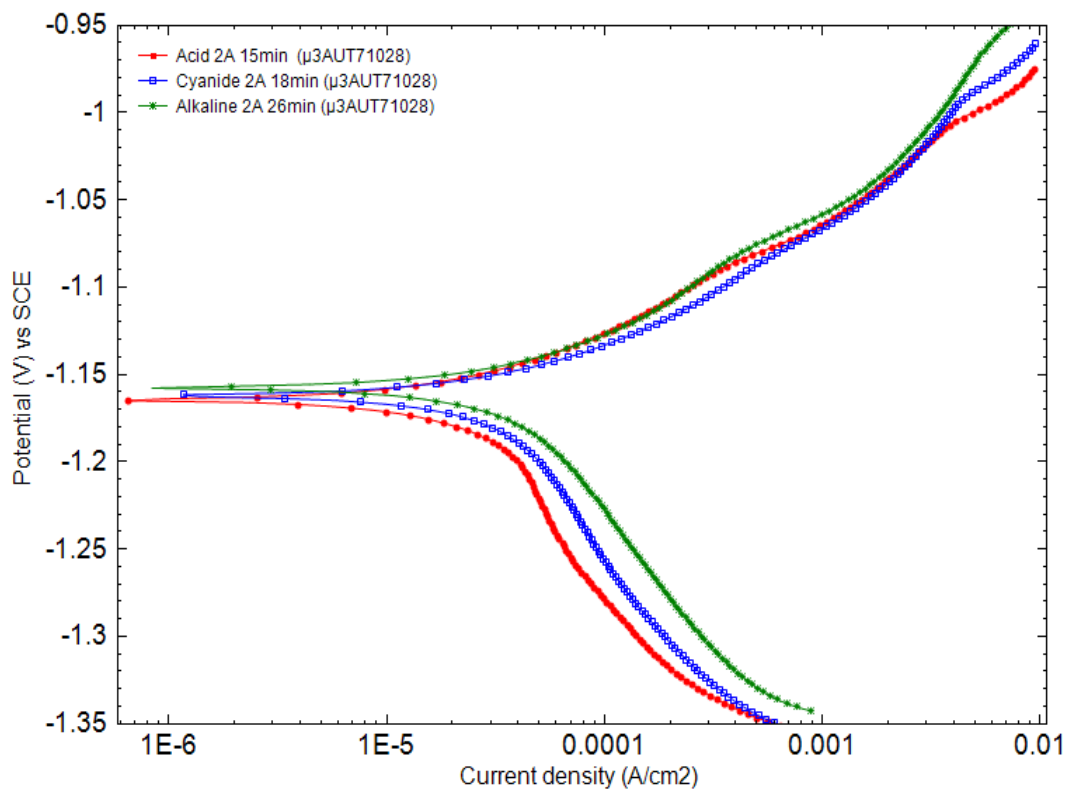
แผ่นเหล็กเคลือบสังกะสี	ความหนา (ไมครอน)			ความหนาเฉลี่ย (ไมครอน)
	ตำแหน่งบน	ตำแหน่งกลาง	ตำแหน่งล่าง	
ระบบกรด 2 A/dm^2 15 min	7.06	7.56	8.15	7.59 ± 0.55
ระบบโซลาร์ไนต์ 2 A/dm^2 18 min	7.76	7.98	7.87	7.87 ± 0.11
ระบบต่าง 2 A/dm^2 26 min	8.14	7.91	7.97	8.01 ± 0.12

ผลการทดสอบด้วยเทคนิค Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS) ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 5% โดยน้ำหนัก พบว่า แผ่นเหล็กเคลือบสังกะสีด้วยไฟฟ้าที่ใช้สารชุบกรดการค้าในระบบกรด ระบบโซลาร์ไนต์ และระบบต่างมีลักษณะกราฟ Nyquist เป็นครึ่งวงกลมซึ่งมีความกว้างแตกต่างกัน โดยแผ่นเหล็กเคลือบสังกะสีที่ใช้สารชุบกรดการค้าในระบบกรดให้ความกว้างของกราฟครึ่งวงกลมอยู่ที่ระดับ 500Ω ซึ่งมากกว่าการชุบเคลือบสังกะสีในระบบโซลาร์ไนต์ และระบบต่าง ซึ่งอยู่ที่ระดับ 250 และ 180Ω ตามลำดับ (รูปที่ 3.9)

ผลการทดสอบด้วยเทคนิค Potentiodynamic polarization ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 5% โดยน้ำหนัก แสดงให้เห็นว่า แผ่นเหล็กเคลือบสังกะสีที่ใช้สารชุบกรดการค้าในระบบกรดมีค่าความหนาแน่นกระแสการกัดกร่อนต่ำกว่าการใช้สารในระบบโซลาร์ไนต์ และระบบต่าง ตามลำดับซึ่งแสดงให้เห็นว่า แผ่นเหล็กเคลือบสังกะสีที่ใช้สารชุบกรดการค้าในระบบกรดมีความต้านทานการกัดกร่อนมากกว่าระบบโซลาร์ไนต์ และระบบต่าง โดยมีค่าอัตราการกัดกร่อนของระบบกรด ระบบโซลาร์ไนต์ และระบบต่าง อยู่ที่ 0.36, 0.65 และ 0.96 mm/year ตามลำดับ (รูปที่ 3.10, ตารางที่ 3.5)



รูปที่ 3.9 กราฟ Nyquist ของแผ่นเหล็กเคลือบสังกะสีด้วยไฟฟ้าที่ใช้สารเคมีกรดการค้ำระบบกรด ระบบไซยาไนด์ และระบบต่าง โดยมีความหนาของชั้นเคลือบประมาณ 8 ไมครอน ในสารละลายไซเตียมคลอไรด์ 5% โดยน้ำหนัก



รูปที่ 3.10 เส้นโพลาริเซชันของแผ่นเหล็กชุบสังกะสีด้วยไฟฟ้าโดยใช้สารเคมีกรดการค้ำระบบกรด ระบบไซยาไนด์ และระบบต่าง โดยมีความหนาของชั้นเคลือบประมาณ 8 ไมครอน ในสารละลายไซเตียมคลอไรด์ 5% โดยน้ำหนัก
















ตารางที่ 3.5 ค่าจากเส้นโพลาร์ไรเซชันของแผ่นเหล็กชุบสังกะสีด้วยไฟฟ้าโดยใช้สารเคมีกรดการดำระบบกรด ระบบไฮยาไนต์ และระบบต่าง ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 5% โดยน้ำหนัก

แผ่นเหล็กเคลือบสังกะสี	Corrosion parameter			
	E_{corr} (V)	I_{corr} ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)	R_p (Ω)	Corrosion rate (mm/year)
ระบบกรด	-1.162	31.19	655.86	0.36
ระบบไฮยาไนต์	-1.161	56.04	462.66	0.65
ระบบต่าง	-1.157	82.25	431.80	0.96

เมื่อนำชิ้นงานแผ่นเหล็กชุบสังกะสีด้วยไฟฟ้า จากการชุบด้วยสารละลายระบบกรด ระบบไฮยาไนต์ และระบบต่าง โดยใช้กระแส $2\text{ A}/\text{dm}^2$ และควบคุมระยะเวลาการชุบเพื่อให้ได้ชิ้นงานในแต่ละระบบที่มีความหนาของชั้นสังกะสีประมาณ 8 ไมครอน (ตารางที่ 3.6) แล้วนำไปทดสอบความต้านทานการกัดกร่อนด้วยวิธี Salt spray test อ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM B117 พบว่า ก่อนการทดสอบพื้นผิวของชิ้นงานทุกชิ้นไม่มีตำหนิและไม่มีคราบสนิม เมื่อเวลาทดสอบผ่านไป 1 ชั่วโมงพบว่า พื้นผิวของชิ้นงานทุกชิ้นมีสนิมขาวเกิดขึ้นกระจายทั่วบริเวณ โดยมีปริมาณสนิมขาวเพิ่มหนาแน่นมากขึ้นเมื่อระยะเวลาการทดสอบนานขึ้น เมื่อระยะเวลาการทดสอบผ่านไป 240 ชั่วโมงพบว่า ชิ้นงานที่ผ่านการชุบด้วยระบบต่างมีสนิมสีน้ำตาลแดงเกิดขึ้นบนพื้นผิว ส่วนแผ่นเหล็กที่ชุบสังกะสีด้วยระบบกรดและระบบไฮยาไนต์นั้น ยังไม่ปรากฏสนิมสีน้ำตาลแดงอย่างชัดเจนมีเพียงสนิมสีน้ำตาลแดงเกิดขึ้นบริเวณขอบมุมของชิ้นงานในระบบกรดเล็กน้อย (รูปที่ 3.11) แสดงให้เห็นว่า การชุบเคลือบสังกะสีด้วยระบบต่างให้ความต้านทานการกัดกร่อนน้อยกว่าระบบไฮยาไนต์ และระบบกรด ซึ่งผลดังกล่าวสอดคล้องกับการตรวจวัดด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมี

ตารางที่ 3.6 ความหนาของชั้นสังกะสีบนแผ่นเหล็กโดยใช้สารเคมีกรดการดำในระบบกรด ระบบไฮยาไนต์ และระบบต่าง ก่อนการทดสอบด้วยเครื่องทดสอบการกัดกร่อนแบบละอองเกลือ

แผ่นเหล็กเคลือบสังกะสี	ความหนา (ไมครอน)			ความหนาเฉลี่ย (ไมครอน)
	ตำแหน่งบน	ตำแหน่งกลาง	ตำแหน่งล่าง	
ระบบกรด $2\text{ A}/\text{dm}^2$ 15 min	7.23	7.98	8.56	7.92 ± 0.67
ระบบไฮยาไนต์ $2\text{ A}/\text{dm}^2$ 18 min	8.33	8.85	8.16	8.45 ± 0.36
ระบบต่าง $2\text{ A}/\text{dm}^2$ 26 min	8.80	8.40	8.48	8.56 ± 0.21

ระยะเวลาการทดสอบ	ระบบกรด	ระบบโซลาร์เซลล์	ระบบต่าง
ก่อนการทดสอบ			
1 ชั่วโมง			
48 ชั่วโมง			
120 ชั่วโมง			
240 ชั่วโมง			

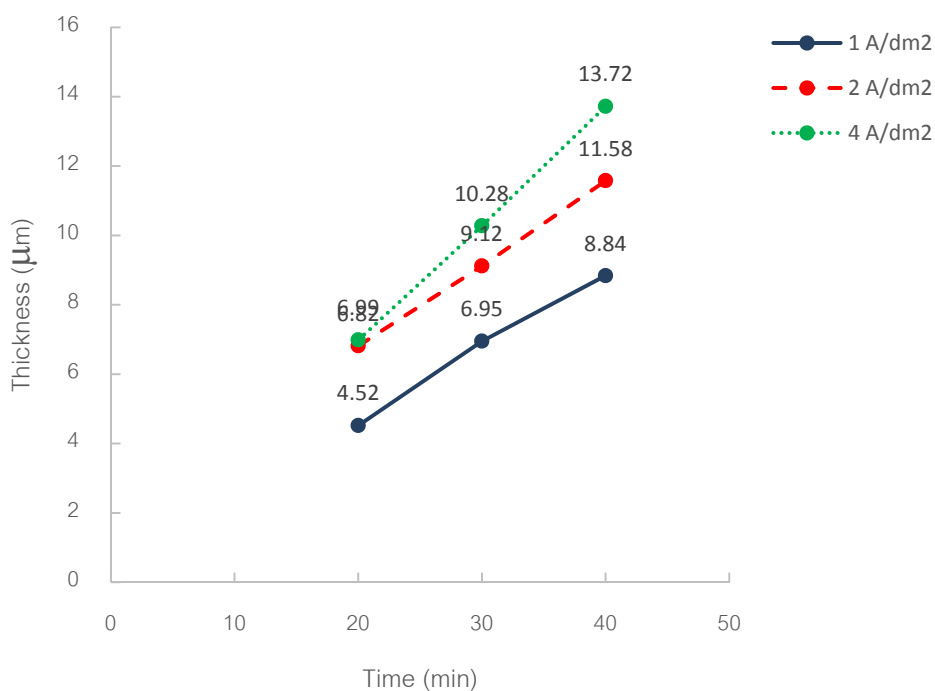
รูปที่ 3.11 ลักษณะพื้นผิวของแผ่นเหล็กชุบสังกะสีด้วยไฟฟ้าโดยใช้สารเคมีกรดการค้ำระบบกรด ระบบโซลาร์เซลล์ และระบบต่าง โดยมีความหนาของชั้นเคลือบประมาณ 8 ไมครอนที่ระยะเวลาการทดสอบ 0, 1, 48, 120 และ 240 ชั่วโมง

3.3 ผลของการใช้กระแสไฟฟ้ารูปแบบต่างๆ ในการชุบเคลือบด้วยน้ำยาระบบต่างต่อสมบัติของผิวเคลือบ

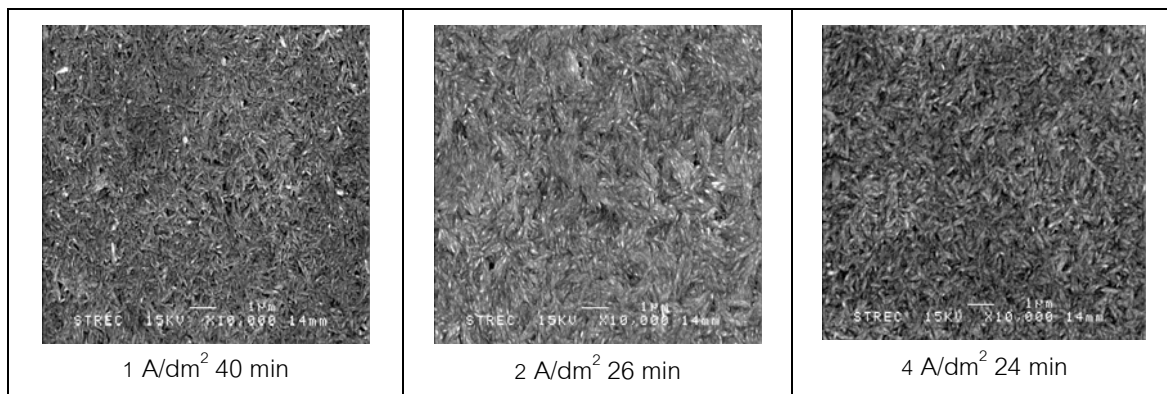
3.3.1 อัตราการชุบเคลือบและลักษณะของผิวเคลือบที่ได้

3.3.1.1 กระแสตรง

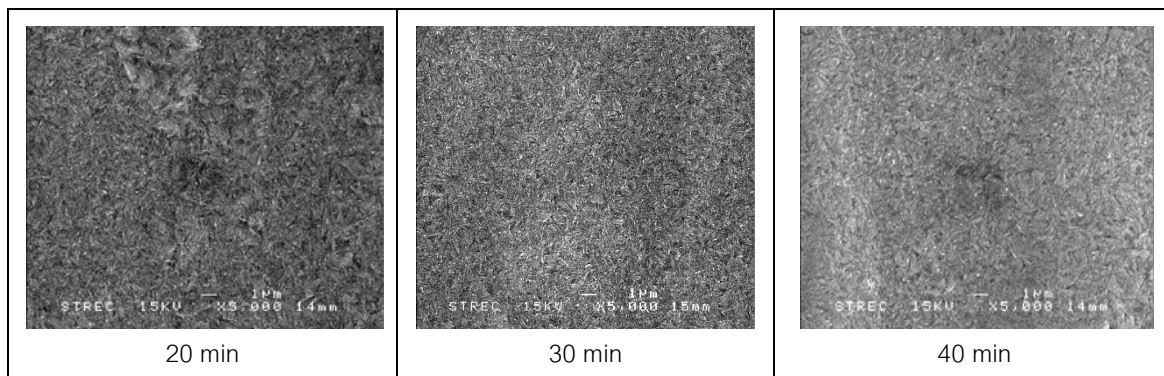
จากการใช้ไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 1 A/dm^2 , 2 A/dm^2 และ 4 A/dm^2 ในการชุบเคลือบแผ่นเหล็กด้วยสังกะสีที่ระยะเวลา 20, 30 และ 40 นาที โดยใช้น้ำยาในการชุบในระบบต่าง พบว่า เมื่อใช้เวลาในการชุบเพิ่มขึ้น มีผลทำให้ความหนาของชั้นสังกะสีเพิ่มขึ้นแบบเป็นเส้นตรง (รูปที่ 3.12) โดยการใช้กระแสไฟฟ้า 4 A/dm^2 ให้ความหนาของชั้นเคลือบสูงกว่าที่ 2 A/dm^2 และ 1 A/dm^2 ตามลำดับ ซึ่งภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนดังในรูปที่ 3.13 แสดงให้เห็นว่า การเพิ่มกระแสไฟฟ้าในการชุบมีแนวโน้มทำให้โครงสร้างของสังกะสีที่มีลักษณะเป็นรูปทรงเรียวยาวนั้นมีความละเอียดมากขึ้นส่วนการเพิ่มระยะเวลาในการชุบที่กระแส 2 A/dm^2 ในไม่มีความแตกต่างการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของโครงสร้างอย่างเห็นได้ชัดแต่มีแนวโน้มที่ทำให้โครงสร้างผิวเคลือบมีความหนาแน่นมากขึ้น (รูปที่ 3.14)



รูปที่ 3.12 ปริมาณกระแสไฟฟ้ากระแสตรง ระยะเวลาในการชุบ และความหนาผิวเคลือบของแผ่นเหล็กชุบสังกะสีด้วยไฟฟ้าที่ใช้น้ำยาชุบในระบบต่าง



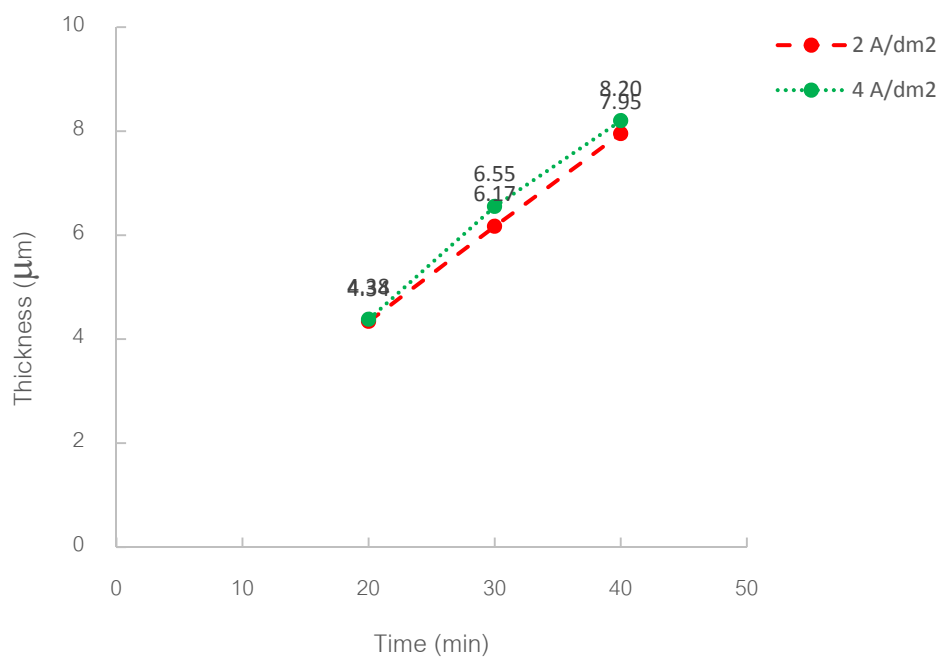
รูปที่ 3.13 ลักษณะผิวของชิ้นงานเหล็กชุบสังกะสีด้วยไฟฟ้ากระแสตรงในน้ำยาชุบระบบต่าง ที่มีความหนาของชั้นสังกะสีประมาณ 8 ไมครอน โดยใช้กระแสไฟฟ้าและระยะเวลาต่างๆ ในการชุบ



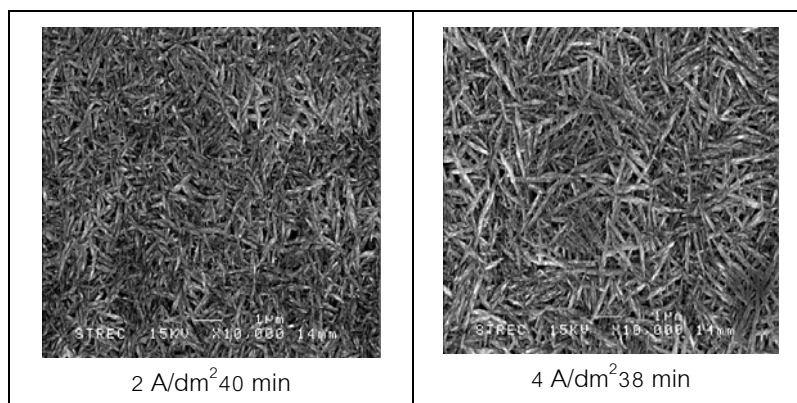
รูปที่ 3.14 ลักษณะผิวของชิ้นงานเหล็กชุบสังกะสีด้วยไฟฟ้ากระแสตรงในน้ำยาชุบระบบต่าง โดยใช้กระแสชุบที่ 2 A/dm² ที่ระยะเวลาต่างๆ

3.3.1.2 กระแสแบบพัลส์ (Pulse)

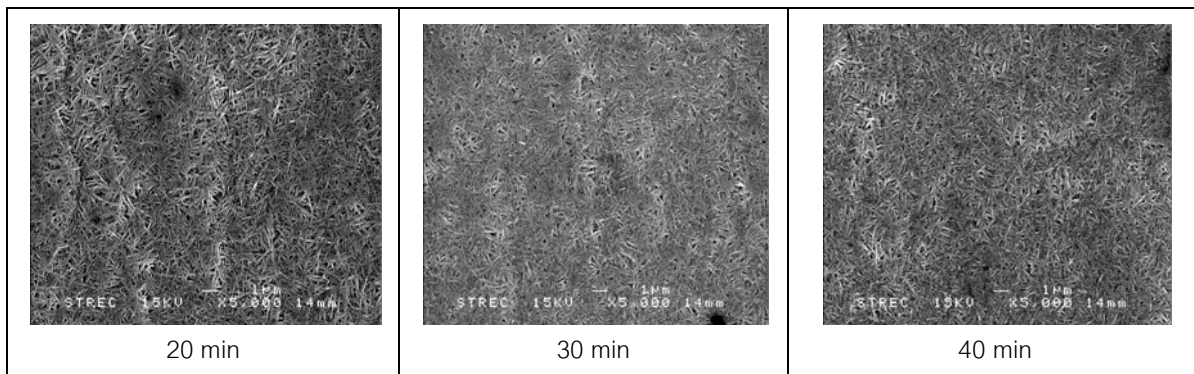
จากการใช้กระแสไฟฟ้าแบบพัลส์ขนาด 2 A/dm² และ 4 A/dm² ชุบเคลือบแผ่นเหล็กด้วยสังกะสีที่ระยะเวลา 20, 30 และ 40 นาที โดยใช้น้ำยาในการชุบในระบบต่าง พบว่า เมื่อใช้ระยะเวลาในการชุบเพิ่มขึ้น มีผลทำให้ความหนาของชั้นสังกะสีเพิ่มขึ้นแบบเป็นเส้นตรง (รูปที่ 3.15) ทั้งนี้การใช้กระแสไฟฟ้าที่ 2 A/dm² และ 4 A/dm² ให้ความหนาของชั้นเคลือบที่ใกล้เคียงกัน ซึ่งภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนดังในรูปที่ 3.16 แสดงให้เห็นว่าการชุบด้วยกระแสไฟฟ้าขนาด 2 A/dm² และ 4 A/dm² ให้โครงสร้างของชั้นเคลือบสังกะสีที่มีลักษณะไม่แตกต่างกันคือมีรูปร่างเรียวยาวซ้อนทับไปมาบนพื้นผิว ซึ่งเมื่อเพิ่มระยะเวลาในการชุบจะมีผลทำให้โครงสร้างดังกล่าวมีการเรียงซ้อนทับกันอย่างหนาแน่นมากขึ้น อย่างไรก็ตามสามารถสังเกตเห็นได้ชัดว่า ชิ้นงานที่ผ่านการชุบด้วยกระแสแบบพัลส์มีความพรุนตัวของโครงสร้างสังกะสีสูงกว่าการชุบด้วยไฟฟ้ากระแสตรง (รูปที่ 3.17)



รูปที่ 3.15 ปริมาณกระแสไฟฟ้าแบบพัลส์ ระยะเวลาในการชุบ และความหนาผิวเคลือบของแผ่นเหล็กชุบสังกะสีด้วยไฟฟ้าที่ใช้น้ำยาชุบในระบบต่าง



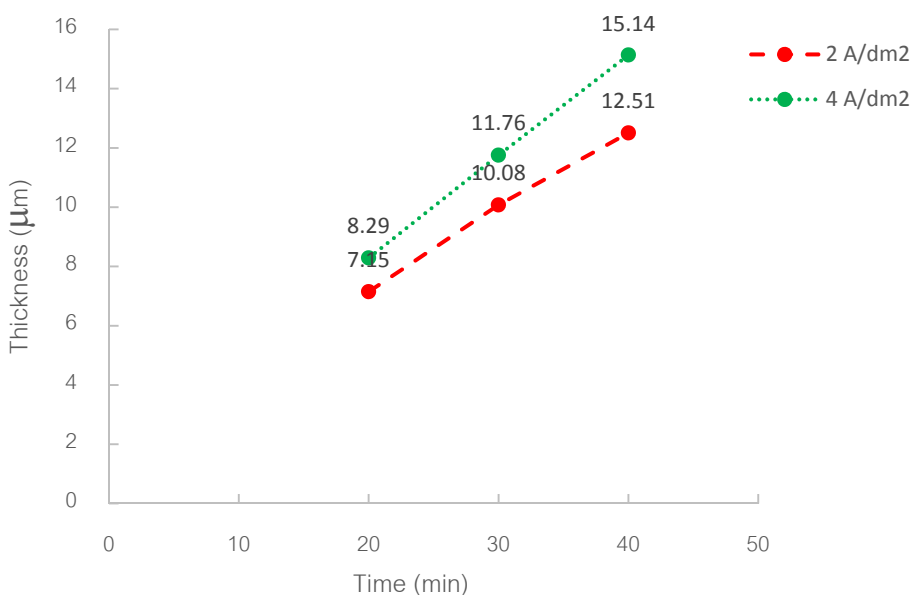
รูปที่ 3.16 ลักษณะผิวของชิ้นงานเหล็กชุบสังกะสีด้วยไฟฟ้ากระแสแบบพัลส์ในน้ำยาชุบระบบต่าง ที่มีความหนาของชั้นสังกะสีประมาณ 8 ไมครอน โดยใช้กระแสไฟฟ้าและระยะเวลาต่างๆ ในการชุบ



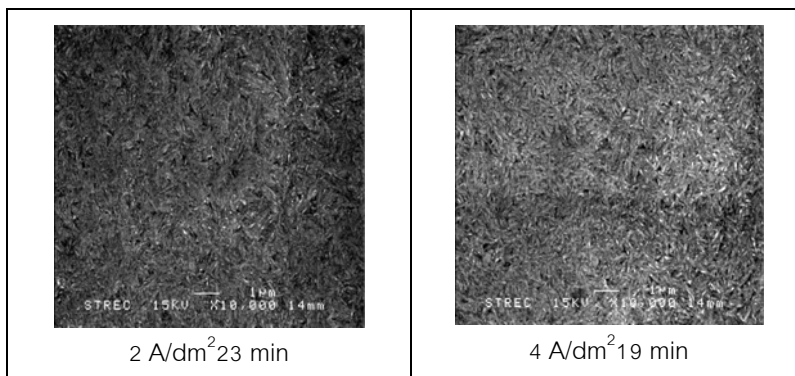
รูปที่ 3.17 ลักษณะผิวของชั้นงานเหล็กชุบสังกะสีด้วยไฟฟ้ากระแสแบบพัลส์ในน้ำยาชุบระบบต่าง โดยใช้กระแสในการชุบที่ 2 A/dm² ที่ระยะเวลาต่างๆ

3.3.1.3 กระแสแบบ Sine wave

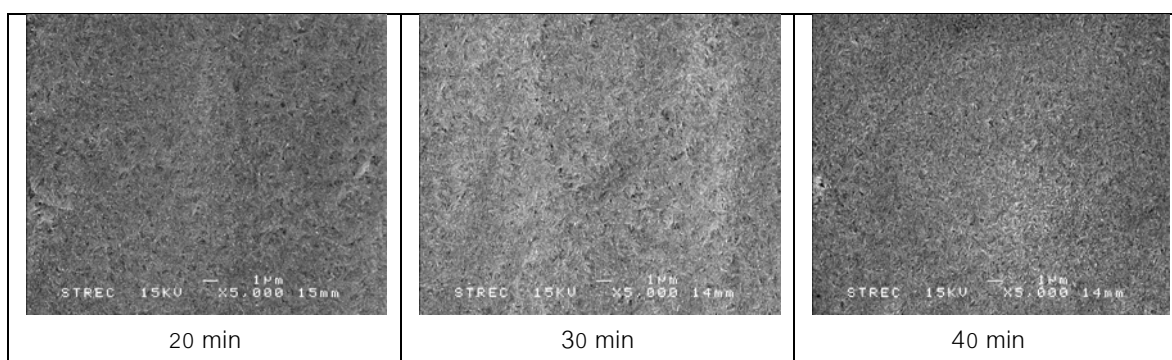
จากการใช้กระแสไฟฟ้าแบบ Sine wave ขนาด 2 A/dm² และ 4 A/dm² ชุบเคลือบแผ่นเหล็กด้วยสังกะสีที่ระยะเวลา 20, 30 และ 40 นาที โดยใช้ น้ำยาในการชุบในระบบต่าง พบว่า เมื่อใช้เวลาในการชุบยาวนานขึ้น มีผลทำให้ความหนาของชั้นสังกะสีเพิ่มขึ้นแบบเป็นเส้นตรง (รูปที่ 3.18) ทั้งนี้การใช้กระแสไฟฟ้า 4 A/dm² ให้ความหนาของชั้นเคลือบที่มากกว่าการชุบที่กระแส 2 A/dm² โดยภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนดังในรูปที่ 3.19 แสดงให้เห็นว่า การชุบสังกะสีด้วยกระแสไฟฟ้าแบบ Sine wave ให้โครงสร้างของชั้นเคลือบสังกะสีในลักษณะเป็นรูปทรงเรียวยาวที่ซ้อนทับกันไปมาอย่างหนาแน่นกว่าการชุบด้วยกระแสแบบพัลส์ โดยการชุบด้วยกระแส Sine wave ขนาด 4 A/dm² ให้โครงสร้างที่มีความละเอียดมากกว่าการชุบที่กระแส 2 A/dm² สำหรับการศึกษาการเพิ่มระยะเวลาในการชุบที่กระแส 2 A/dm² พบว่า ไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างทางจุลภาคของชั้นเคลือบสังกะสีอย่างเห็นได้ชัด (รูปที่ 3.20)



รูปที่ 3.18 ปริมาณกระแสไฟฟ้าแบบ Sine wave ระยะเวลาในการชุบ และความหนาผิวเคลือบของแผ่นเหล็กชุบสังกะสีด้วยไฟฟ้าที่ใช้น้ำยาชุบในระบบต่าง



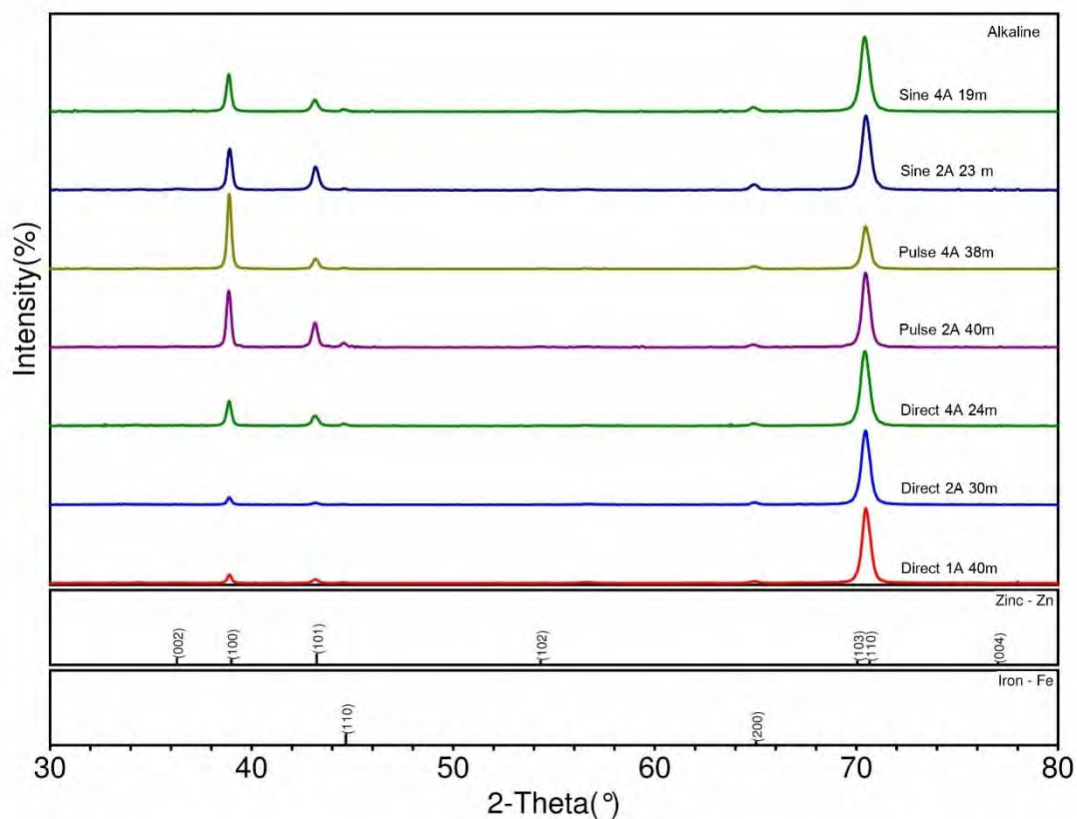
รูปที่ 3.19 ลักษณะผิวของชิ้นงานที่ได้หลังชุบสังกะสีด้วยไฟฟ้าแบบ Sine wave ในน้ำยาชุบระบบต่าง ที่มีความหนาของชั้นสังกะสีประมาณ 8 ไมครอน โดยใช้กระแสไฟฟ้าและระยะเวลาต่างๆ ในการชุบ



รูปที่ 3.20 ลักษณะผิวของชิ้นงานที่ได้หลังชุบสังกะสีด้วยไฟฟ้าแบบ Sine wave ในน้ำยาชุบระบบต่าง โดยใช้กระแสในการชุบที่ 2 A/dm^2 ที่ระยะเวลาต่างๆ

3.3.2 สมบัติของผิวเคลือบ

กราฟ XRD ของแผ่นเหล็กชุบสังกะสีด้วยน้ำยาชุบเคลือบระบบต่างภายใต้รูปแบบกระแสและปริมาณกระแสที่แตกต่างกันแสดงในรูปที่ 3.21 พบว่า ชิ้นงานที่ได้จากการชุบทุกระบบให้โครงสร้างผลึกของสังกะสีปรากฏที่ตำแหน่งระนาบหลักเดียวกันคือ (100) (101) และ (110) โดยกรณีการใช้กระแสตรงพบว่า ระนาบ (110) ให้ค่าสัมประสิทธิ์การจัดเรียงตัวผลึกสูงกว่าระนาบอื่นๆ อย่างเห็นได้ชัด สำหรับการใช้กระแสพัลส์ให้ค่าสัมประสิทธิ์การจัดเรียงตัวผลึกของระนาบ (100) ใกล้เคียงกับระนาบ (110) ส่วนการใช้กระแส Sine wave ให้โครงสร้างผิวเคลือบที่ประกอบด้วยระนาบ (110) มากกว่าระนาบ (100) ทั้งนี้ในกรณีของการชุบด้วยกระแสตรงและกระแสพัลส์จะสังเกตเห็นว่าการเพิ่มขนาดกระแสมีแนวโน้มทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การจัดเรียงตัวผลึกของระนาบ (100) เพิ่มขึ้น (ตารางที่ 3.7)



รูปที่ 3.21 ชิ้นงานที่ได้หลังจากการชุบสังกะสีด้วยไฟฟ้าในน้ำยาชุบระบบต่างด้วยรูปแบบการจ่ายกระแสไฟฟ้าที่แตกต่างกันโดยมีความหนาของชั้นสังกะสีประมาณ 8 ไมครอน

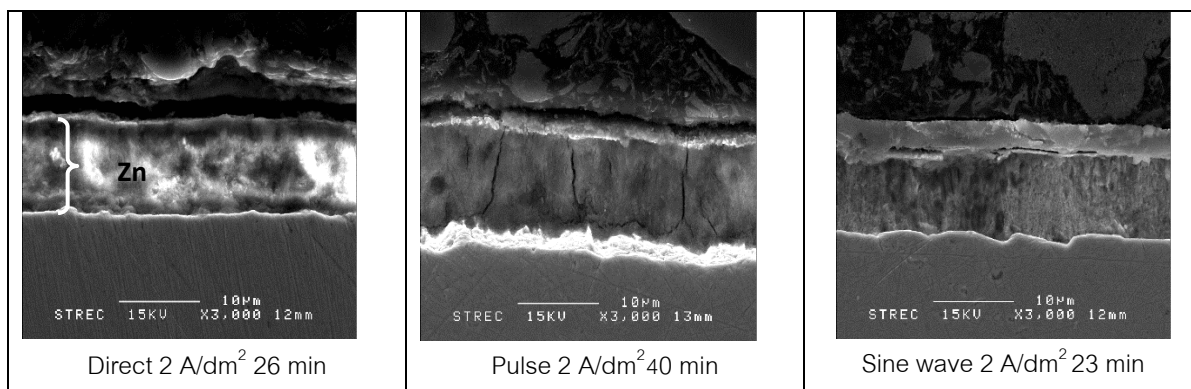
ตารางที่ 3.7 สัมประสิทธิ์การจัดเรียงตัวผลึกของแผ่นเหล็กชุบสังกะสีด้วยไฟฟ้าในน้ำยาชุบระบบต่าง จากการชุบด้วยรูปแบบการจ่ายกระแสไฟฟ้าที่แตกต่างกัน

ชิ้นงาน	สัมประสิทธิ์การจัดเรียงตัวผลึกที่ระนาบต่างๆ				
	(002)	(100)	(101)	(103)	(110)
Direct 1 A/dm ² 40 min	0.000	0.477	0.075	0.000	4.448
Direct 2 A/dm ² 26 min	0.020	0.411	0.040	0.000	4.529
Direct 4 A/dm ² 24 min	0.000	1.124	0.167	0.017	3.692
Pulse 2 A/dm ² 40 min	0.000	1.938	0.298	0.000	2.764
Pulse 4 A/dm ² 38 min	0.000	2.996	0.145	0.015	1.844
Sine 2 A/dm ² 23 min	0.000	1.572	0.318	0.043	3.067
Sine 4 A/dm ² 19 min	0.000	1.530	0.170	0.015	3.285

เนื่องจากการศึกษาสมบัติความต้านทานการกัดกร่อนจำเป็นต้องใช้ชิ้นงานที่มีความหนาของชั้นสังกะสีเท่ากัน ทั้งนี้ได้นำชิ้นงานที่มีความหนาของชั้นสังกะสีประมาณ 8 ไมครอน มาใช้ในการศึกษาความต้านทานการกัดกร่อนด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมี แสดงในตารางที่ 3.8 โดยแสดงภาพถ่ายภาคตัดขวางของแผ่นเหล็กชุบสังกะสีด้วยไฟฟ้ากระแสตรง กระแสแบบพัลส์ และกระแสแบบ Sine wave ในรูปที่ 3.22

ตารางที่ 3.8 ความหนาของชั้นสังกะสีบนแผ่นเหล็กจากการชุบเคลือบด้วยสารเคมีเกรดการค้าในระบบต่างโดยใช้กระแสไฟฟ้ารูปแบบต่างๆ และควบคุมระยะเวลาการชุบเคลือบเพื่อให้ได้ความหนาประมาณ 8 ไมครอน ก่อนการทดสอบความต้านทานการกัดกร่อนด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมี

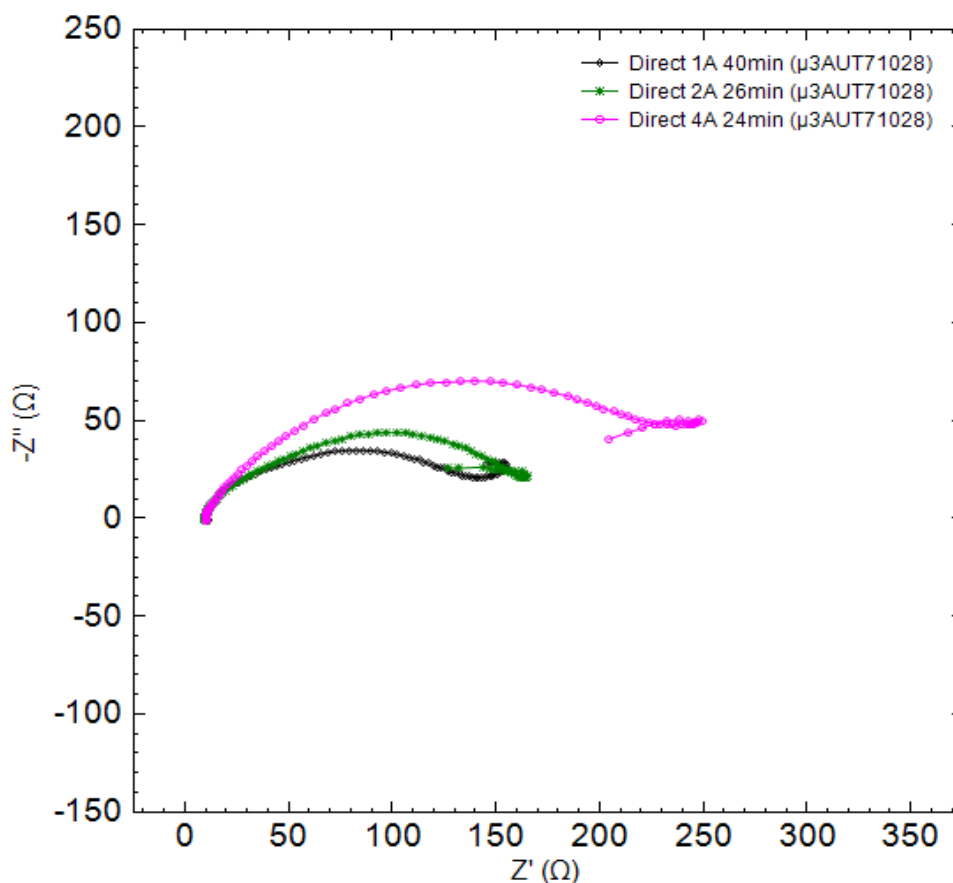
ชิ้นงาน	รูปแบบกระแส	ความหนา (ไมครอน)			ความหนาเฉลี่ย (ไมครอน)
		ตำแหน่งบน	ตำแหน่งกลาง	ตำแหน่งล่าง	
1 A/dm ² 40 min	Direct	7.85	7.87	8.62	8.11 ± 0.44
2 A/dm ² 26 min	Direct	8.14	7.91	7.97	8.01 ± 0.12
4 A/dm ² 24 min	Direct	7.95	8.18	8.16	8.10 ± 0.13
2 A/dm ² 40 min	Pulse	8.14	8.10	8.37	8.20 ± 0.15
2 A/dm ² 23 min	Sine wave	8.02	8.10	8.02	8.05 ± 0.05



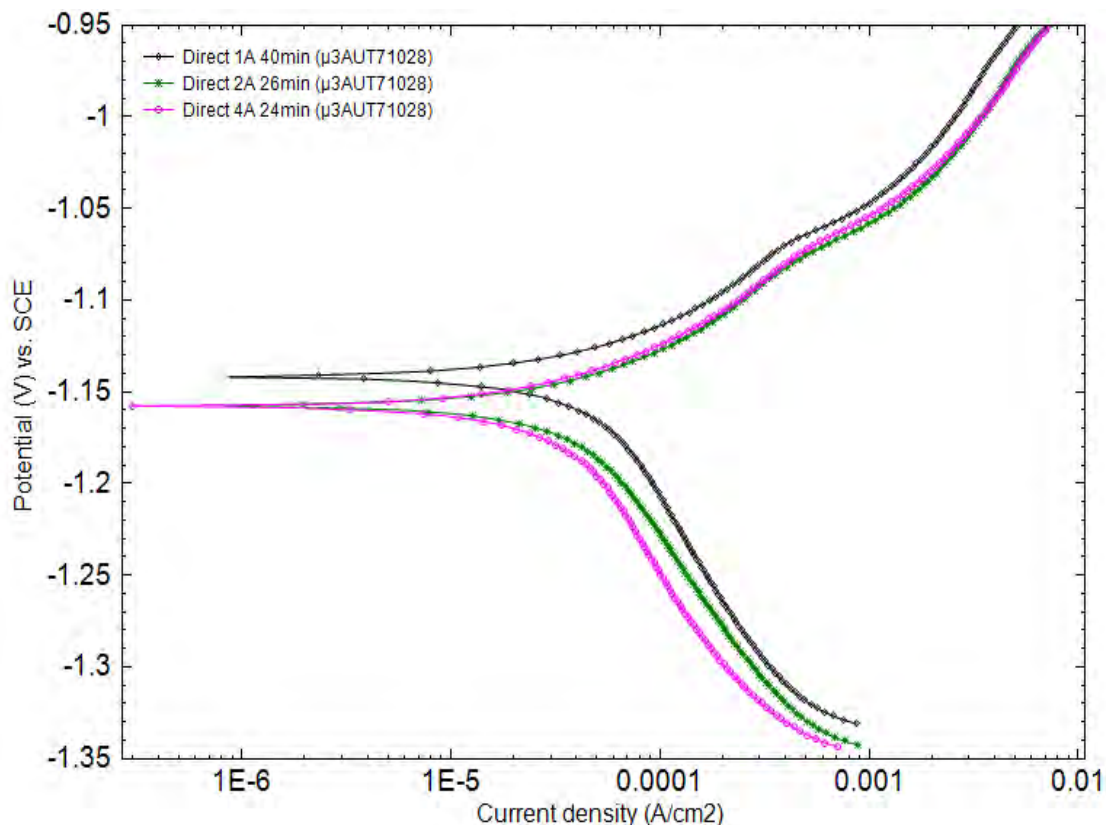
รูปที่ 3.22 ภาคตัดขวางของแผ่นเหล็กชุบสังกะสีด้วยไฟฟ้ากระแสตรง กระแสแบบพัลส์ และกระแสแบบ Sine wave

ผลการทดสอบด้วยเทคนิค EIS ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 5% โดยน้ำหนัก พบว่า แผ่นเหล็กเคลือบสังกะสีด้วยไฟฟ้ากระแสตรงที่ใช้สารชุบเกรดการค้าในระบบต่างมีลักษณะกราฟ Nyquist เป็นครึ่งวงกลม (รูปที่ 3.23) โดยการใช้กระแสไฟฟ้าที่ 4 A/dm^2 ให้ความกว้างของกราฟมากกว่าการใช้กระแสไฟฟ้าที่ 2 A/dm^2 และ 1 A/dm^2 แสดงให้เห็นว่าการใช้กระแสไฟฟ้ากระแสตรงในการชุบที่ 4 A/dm^2 ให้ความต้านทานที่มากกว่า 2 A/dm^2 และ 1 A/dm^2 ตามลำดับ

ผลการทดสอบด้วยเทคนิค Potentiodynamic polarization ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 5% โดยน้ำหนัก แสดงให้เห็นว่า แผ่นเหล็กเคลือบสังกะสีที่ใช้สารชุบเกรดการค้าในระบบต่างโดยใช้กระแสไฟฟ้าในการชุบ 1 A/dm^2 มีค่าความหนาแน่นกระแสการกัดกร่อนสูงกว่าการใช้กระแสไฟฟ้าในการชุบที่ 2 A/dm^2 และ 4 A/dm^2 (รูปที่ 3.24) ส่งผลให้แผ่นเหล็กเคลือบสังกะสีที่ใช้กระแสไฟฟ้าในการชุบที่ 1 A/dm^2 มีอัตราการกัดกร่อนสูงกว่าที่ 2 A/dm^2 และ 4 A/dm^2 โดยมีค่าอัตราการกัดกร่อนของกระแสที่ 1 A/dm^2 , 2 A/dm^2 และ 4 A/dm^2 อยู่ที่ 1.35, 0.96 และ 0.73 mm/year ตามลำดับ (ตารางที่ 3.9)



รูปที่ 3.23 กราฟ Nyquist ของแผ่นเหล็กเคลือบสังกะสีด้วยไฟฟ้าด้วยกระแสตรงที่ใช้สารเคมีเกรดการค้าในระบบต่าง โดยมีความหนาแน่นของชั้นเคลือบประมาณ 8 ไมครอน ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 5% โดยน้ำหนัก

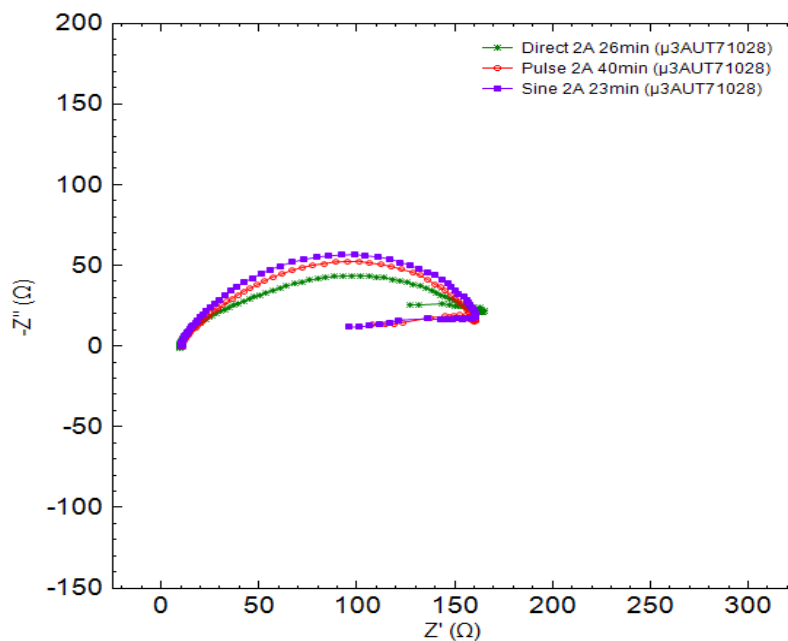


รูปที่ 3.24 เส้นโพลาริเซชันของแผ่นเหล็กชุบสังกะสีด้วยไฟฟ้าด้วยกระแสตรงที่ใช้สารเคมีเกรดการค้าในระบบต่าง โดยมี ความหนาของชั้นเคลือบประมาณ 8 ไมครอน ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 5% โดยน้ำหนัก

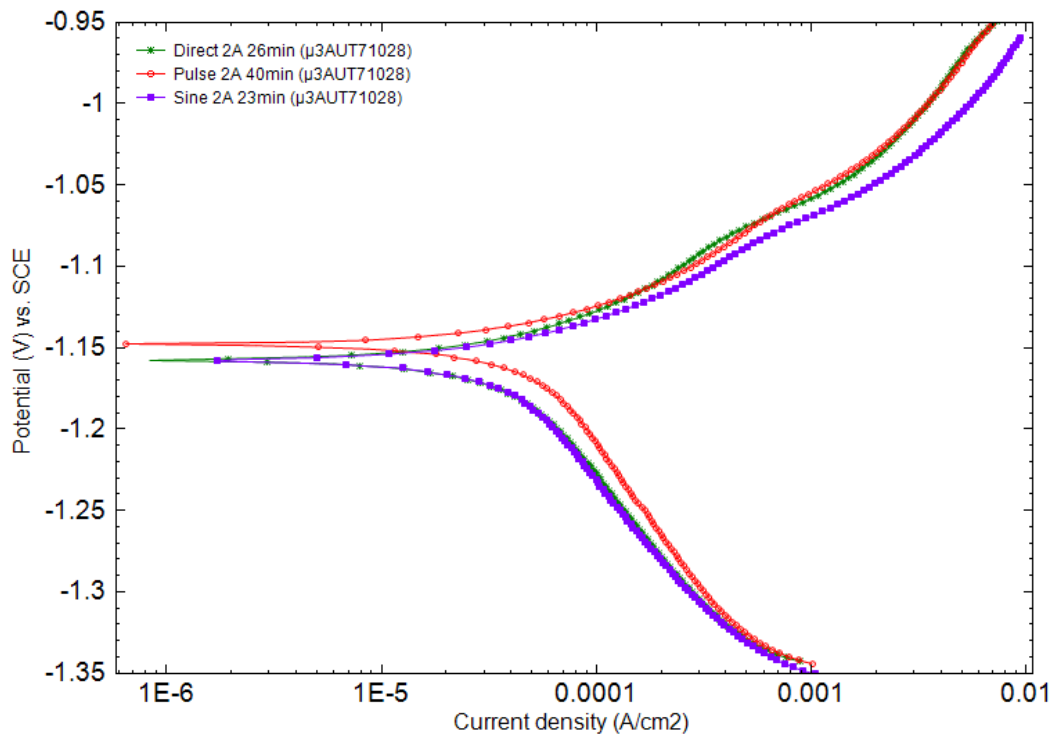
ตารางที่ 3.9 ค่าจากเส้นโพลาริเซชันของแผ่นเหล็กชุบสังกะสีด้วยไฟฟ้ากระแสตรงโดยใช้สารเคมีเกรดการค้าระบบ ต่าง ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 5% โดยน้ำหนัก

ชิ้นงาน	Corrosion parameter			
	E_{corr} (V)	I_{corr} ($\mu A/cm^2$)	R_p (Ω)	Corrosion rate (mm/year)
1 A/dm ² 40 min	-1.137	116.32	382.70	1.35
2A/dm ² 26 min	-1.157	82.25	431.80	0.96
4A/dm ² 24 min	-1.157	63.01	528.62	0.73

ผลการทดสอบด้วยเทคนิค EIS ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 5% โดยน้ำหนัก พบว่า แผ่นเหล็กเคลือบสังกะสีด้วยไฟฟ้าที่ใช้สารชุบเกรดการค้าในระบบต่างโดยใช้รูปแบบของกระแสไฟฟ้าในการชุบต่างกันให้กราฟ Nyquist มีลักษณะเป็นครึ่งวงกลมที่คล้ายกันและมีความกว้างของกราฟที่ใกล้เคียงกัน (รูปที่ 3.25) นอกจากนี้ผลการทดสอบด้วยเทคนิค Potentiodynamic polarization ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 5% โดยน้ำหนัก ยังแสดงให้เห็นว่า อัตราการกัดกร่อนของแผ่นเหล็กเคลือบสังกะสีซึ่งใช้รูปแบบของกระแสไฟฟ้าที่แตกต่างกันมีอัตราการกัดกร่อนใกล้เคียงกัน โดยมีค่าอัตราการกัดกร่อนของการชุบด้วยกระแสตรง กระแสแบบพัลส์และกระแสแบบ Sine wave อยู่ที่ 0.96, 0.90 และ 0.64 mm/year ตามลำดับซึ่งแสดงให้เห็นว่าการใช้รูปแบบของกระแสไฟฟ้าในการชุบที่แตกต่างกันไม่มีผลต่อสมบัติความต้านทานการกัดกร่อนของผิวเคลือบอย่างเห็นได้ชัด (รูปที่ 3.26, ตารางที่ 3.10)



รูปที่ 3.25 กราฟ Nyquist ของแผ่นเหล็กเคลือบสังกะสีด้วยไฟฟ้าโดยใช้รูปแบบกระแสตรง กระแสพัลส์ และกระแส Sine wave และใช้สารเคมีกรดการดำเคลือบในระบบต่าง โดยมีความหนาของชั้นเคลือบประมาณ 8 ไมครอน ในสารละลายไฮเดียมคลอไรด์ 5% โดยน้ำหนัก



รูปที่ 3.26 เส้นโพลาริเซชันของแผ่นเหล็กชุบสังกะสีด้วยไฟฟ้าโดยใช้รูปแบบกระแสตรงกระแสพัลส์ และกระแส Sine wave และใช้สารเคมีกรดการดำเคลือบในระบบต่าง โดยมีความหนาของชั้นเคลือบประมาณ 8 ไมครอน ในสารละลายไฮเดียมคลอไรด์ 5% โดยน้ำหนัก


























ตารางที่ 3.10 ค่าจากเส้นโพลาร์ไรเซชันของแผ่นเหล็กชุบสังกะสีโดยใช้รูปแบบกระแสตรงกระแสพัลส์ และกระแส Sine wave และใช้สารเคมีกรดการค้ำในระบบต่างในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 5% โดยน้ำหนัก

ชิ้นงาน	Corrosion parameter			
	E_{corr} (V)	I_{corr} ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)	R_p (Ω)	Corrosion rate (mm/year)
Direct $2\text{A}/\text{dm}^2$ 26 min	-1.157	82.25	431.80	0.96
Pulse $2\text{A}/\text{dm}^2$ 40 min	-1.140	72.99	336.46	0.90
Sinewave $2\text{A}/\text{dm}^2$ 23 min	-1.152	55.02	397.54	0.64

เมื่อนำชิ้นงานแผ่นเหล็กชุบสังกะสีด้วยไฟฟ้า โดยใช้รูปแบบการจ่ายกระแสไฟฟ้าขณะชุบที่แตกต่างกัน และควบคุมระยะเวลาการชุบเพื่อให้ได้ชิ้นงานที่มีความหนา 8 ไมครอน (ตารางที่ 3.11) ซึ่งได้แก่ ชิ้นงานที่ชุบด้วยกระแสตรงขนาด $1\text{A}/\text{dm}^2$, $2\text{A}/\text{dm}^2$ และ $4\text{A}/\text{dm}^2$ เคลือบแผ่นเหล็กด้วยสังกะสีที่ระยะเวลา 40, 26 และ 24 นาที ตามลำดับชิ้นงานที่ชุบด้วยกระแสพัลส์ ขนาด $2\text{A}/\text{dm}^2$ ที่ระยะเวลา 40 นาที และชิ้นงานที่ชุบด้วยกระแส Sine wave ที่ระยะเวลา 23 นาที ไปทำการทดสอบความต้านทานการกัดกร่อนด้วยวิธี Salt spray test พบว่า ก่อนการทดสอบพื้นผิวของชิ้นงานทุกชิ้นไม่มีตำหนิ และไม่มีคราบสนิม เมื่อเวลาทดสอบผ่านไป 1 ชั่วโมงพบว่า พื้นผิวของชิ้นงานทุกชิ้นมีสนิมขาวเกิดขึ้นกระจายทั่วบริเวณ โดยมีปริมาณสนิมขาวเพิ่มหนาแน่นมากขึ้นเมื่อระยะเวลาการทดสอบนานขึ้น เมื่อระยะเวลาการทดสอบผ่านไป 168 ชั่วโมง พบว่า มีการปรากฏของสนิมสีน้ำตาลแดงบนชิ้นงานที่ชุบด้วยกระแสตรงขนาด $1\text{A}/\text{dm}^2$ และชิ้นงานที่ชุบด้วยกระแสพัลส์ ขนาด $2\text{A}/\text{dm}^2$ โดยชิ้นงานที่ชุบด้วยกระแสตรงขนาด $1\text{A}/\text{dm}^2$ มีปริมาณสนิมสีน้ำตาลแดงเกิดขึ้นมากกว่าและมีปริมาณสนิมสีน้ำตาลแดงเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาการทดสอบเพิ่มขึ้น (รูปที่ 3.27) ส่วนชิ้นงานที่ชุบด้วยกระแสตรงขนาด $2\text{A}/\text{dm}^2$ และ $4\text{A}/\text{dm}^2$ พบว่ามีสนิมสีน้ำตาลแดงเกิดขึ้นบนพื้นผิวเมื่อเวลาการทดสอบผ่านไป 240 ชั่วโมงสำหรับการศึกษาการชุบโดยใช้กระแสขนาด $2\text{A}/\text{dm}^2$ ในรูปแบบกระแสต่างๆ นั้น พบว่า การใช้กระแสแบบ Sine wave และกระแสตรงให้ผิวเคลือบที่มีความต้านทานการกัดกร่อนสูงกว่าการใช้กระแสแบบพัลส์ ซึ่งอาจเป็นผลจากลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคของการใช้กระแสแบบ Sine wave และ กระแสตรงที่ให้ลักษณะโครงสร้างของสังกะสีเรียงตัวกันอย่างหนาแน่นมากกว่าการใช้กระแสแบบพัลส์

ตารางที่ 3.11 ความหนาของชั้นสังกะสีบนแผ่นเหล็กโดยใช้รูปแบบกระแสตรงกระแสพัลส์ และกระแส Sine wave และใช้สารเคมีกรดการค้ำในระบบต่างก่อนการทดสอบด้วยเครื่องทดสอบการกัดกร่อนแบบละอองเกลือ

ชิ้นงาน	ความหนา (ไมครอน)			ความหนาเฉลี่ย (ไมครอน)
	ตำแหน่งบน	ตำแหน่งกลาง	ตำแหน่งล่าง	
กระแสตรง $1\text{A}/\text{dm}^2$ 40 min	8.32	8.74	9.05	8.70 ± 0.37
กระแสตรง $2\text{A}/\text{dm}^2$ 26 min	8.80	8.40	8.48	8.56 ± 0.21
กระแสตรง $4\text{A}/\text{dm}^2$ 24 min	8.37	8.37	8.21	8.32 ± 0.09
กระแสพัลส์ $2\text{A}/\text{dm}^2$ 40 min	8.02	8.11	8.48	8.20 ± 0.24
กระแส Sine wave $2\text{A}/\text{dm}^2$ 23 min	8.41	8.14	8.19	8.25 ± 0.14

ระยะเวลาการทดสอบ	Direct 1 A/dm ² 40 min	Direct 2 A/dm ² 26 min	Direct 4 A/dm ² 24 min	Pulse 2 A/dm ² 40 min	Sine wave 2 A/dm ² 23 min
ก่อนการทดสอบ					
1 ชั่วโมง					
48 ชั่วโมง					
120 ชั่วโมง					
240 ชั่วโมง					

รูปที่ 3.27 ลักษณะพื้นผิวของแผ่นเหล็กชุบสังกะสีด้วยไฟฟ้าโดยใช้รูปแบบกระแสตรง กระแสพัลส์ และกระแส Sine wave และใช้สารเคมีกรดการดำเคลือบในระบบต่าง โดยมีความหนาของชั้นเคลือบประมาณ 8 ไมครอนที่ระยะเวลาการทดสอบ 0, 1, 48, 120 และ 240 ชั่วโมง

บทที่ 4 สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาผลขององค์ประกอบในน้ำยาชุบเคลือบในระบบกรดและต่างพบว่า การเติม carrier และ brightener นั้นมีบทบาทสำคัญต่อการเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้างของผิวเคลือบ จากเดิมซึ่งผิวเคลือบที่ได้จากการชุบ โดยใช้น้ำยาที่ไม่เติม additives นั้นพบว่า มีระนาบ (002) เป็นหลัก แต่หลังจากการเติม carrier และ brightener แล้วพบว่า กรณีของน้ำยาระบบกรดจะเกิดการเปลี่ยนแปลงไปสู่โครงสร้างที่มีระนาบ (100) และ (101) เป็นหลัก ในขณะที่ระบบต่างจะเปลี่ยนไปสู่โครงสร้างที่มีระนาบ (110) และ (100) เป็นหลัก ในขณะที่ระบบโซลยาไนต์พบว่า มีระนาบ (100) เป็นระนาบหลักเช่นกัน ซึ่งลักษณะทางกายภาพของผิวเคลือบที่ปรากฏคือ การเปลี่ยนจากลักษณะโครงสร้างหยาบในลักษณะที่เป็นผง (powdery) เคลือบติดบนชิ้นงาน ไปสู่ผิวเคลือบที่มีโครงสร้างขนาดเล็กละเอียดรูปทรงเรียวยาวที่เรียงสลับทับซ้อนกันและมีการจัดเรียงอย่างหนาแน่นมากขึ้น ซึ่งสังเกตได้ด้วยสายตาว่า ผิวเคลือบมีความมันเงาและเคลือบติดบนชิ้นงานได้ดี

จากผลการศึกษาพบว่า น้ำยาชุบระบบกรดมีอัตราเร็วในการชุบเคลือบสูงกว่าระบบโซลยาไนต์ และระบบต่างตามลำดับ โดยผลการทดสอบสมบัติความต้านทานการกัดกร่อนด้วยเทคนิค Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS) เทคนิค Potentiodynamic polarization ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 5% โดยน้ำหนัก และการทดสอบด้วยวิธี Salt spray test อ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM B117 พบว่า แผ่นเหล็กที่ผ่านการชุบเคลือบสังกะสีด้วยระบบต่างซึ่งมีโครงสร้างหยาบกว่าระบบกรดและโซลยาไนต์ โดยมีระนาบ (110) เป็นระนาบหลักและยังคงปรากฏเฟสของเหล็กในโครงสร้าง มีแนวโน้มให้ความต้านทานการกัดกร่อนต่ำกว่าระบบโซลยาไนต์ และระบบกรด

จากการศึกษาการชุบด้วยระบบต่างโดยใช้ไฟฟ้ากระแสตรง พบว่า การเพิ่มขนาดกระแสมีแนวโน้มทำให้โครงสร้างของสังกะสีที่มีลักษณะเป็นรูปทรงเรียวยาวนั้นมีความละเอียดมากขึ้น และได้โครงสร้างในระนาบ (100) เพิ่มขึ้น ซึ่งผลการทดสอบสมบัติความต้านทานการกัดกร่อนด้วยเทคนิคทางเคมีไฟฟ้าและ Salt spray test พบว่าการชุบเคลือบด้วยกระแส 1 A/dm^2 ให้ผิวเคลือบที่มีความต้านทานการกัดกร่อนต่ำกว่าการชุบเคลือบด้วยกระแส 2 และ 4 A/dm^2

ผลการศึกษารูปแบบกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการชุบแผ่นเหล็กด้วยน้ำยาระบบต่าง พบว่า ชิ้นงานที่ผ่านการชุบด้วยกระแสทั้ง 3 รูปแบบคือ กระแสตรง กระแสพัลส์ และกระแส Sine wave มีโครงสร้างที่ประกอบด้วยระนาบหลักคือ (100)(101) และ (110) โดยการเพิ่มขนาดกระแสในกรณีการชุบด้วยกระแสตรงและกระแสพัลส์มีผลทำให้มีระนาบ (100) ในโครงสร้างเพิ่มขึ้น ทั้งนี้ผลจากการทดสอบด้วยเทคนิคทางเคมีไฟฟ้าไม่พบความแตกต่างที่ชัดเจนของสมบัติความต้านทานการกัดกร่อนของชิ้นงานที่ได้จากการชุบในแต่ละรูปแบบ แต่ผลจากการทดสอบ Salt spray test พบว่า ชิ้นงานที่ชุบด้วยกระแสพัลส์มีแนวโน้มเกิดการกัดกร่อนได้เร็วกว่าการชุบด้วยกระแสตรง และกระแส Sine wave ซึ่งอาจเป็นผลเนื่องมาจากการที่ชิ้นงานดังกล่าวมีความพรุนตัวของโครงสร้างสังกะสีสูงกว่า

บรรณานุกรม

1. R. Winand, Modern electroplating, 5th ed., M. Schlesinger and M. Paunovic, Eds., John Wiley & Sons, Inc., 2010, pp. 285-289.
2. สาโรช พันธุ์แพ อภิชชาติ 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.

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 การวิเคราะห์ความต้านทานการกัดกร่อนของโลหะด้วยเทคนิคทางไฟฟ้าเคมีและเครื่องทดสอบการกัดกร่อนแบบลัดวงจร

6. ผลงานวิจัย

ผลงานตีพิมพ์ในวารสารวิชาการ

- 1) Y. Boonyongmaneerat, K. Saengkiattiyut, P. Rattanawaleedirojn, C.Angkaprasert, J. Wanichsampan, and S. Saenapitak. Layer formation of hot-dip galvanized steels as influenced by NiCl₂-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. Eutrarak, 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.

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 6nd 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.

สิทธิบัตร / อนุสิทธิบัตร

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

ผู้ร่วมวิจัย

1. ชื่อ-สกุล (ภาษาไทย) นางสาวปราณี 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	วิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์ และเทคโนโลยีสิ่งทอ	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย	2539
วิทยาศาสตรบัณฑิต	เคมี	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์	2536

5. สาขาวิชาการที่มีความชำนาญพิเศษ

การเคลือบผิววัสดุด้วยกระบวนการทางเคมี เช่น การตกตะกั่วสำเร็จสิ่งทอ การเคลือบผิวโลหะแบบไม่ใช้ไฟฟ้า

6. ผลงานวิจัย

ผลงานตีพิมพ์ในวารสารวิชาการ

- 1) Y. Boonyongmaneerat, K. Saengkiattiyut, P. Rattanawaleedirojn, C.Angkaprasert, J. Wanichsampan, and S. Saenapitak. Layer formation of hot-dip galvanized steels as influenced by NiCl₂-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.*

สิทธิบัตร / อนุสิทธิบัตร

- 1) ชื่อสิทธิบัตร : เหล็กชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนที่ประกอบด้วยชั้นเคลือบสังกะสีที่ก่อให้เกิดความต้านทานการกัดกร่อนสูง.
 ชื่อเจ้าของสิทธิบัตร : ยุทธนันท์ บุญยงมณีรัตน์, กนกวรรณ แสงเกียรติยุทธ, **ปราณี รัตนวลิตโรจน์**, สวลี เสนาพิทักษ์ และรัญชน์ สงวนหมู่
 เลขที่สิทธิบัตร : สิทธิบัตรไทย เลขที่ขอขึ้นจดสิทธิบัตร 1001000114, กุมภาพันธ์ 2553
- 2) ชื่อสิทธิบัตร : กรรมวิธีการเตรียมพอลิเมอร์ดูดซับน้ำที่มีสมบัติยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์
 ชื่อเจ้าของสิทธิบัตร : กนกวรรณ แสงเกียรติยุทธ, **ปราณี รัตนวลิตโรจน์**, ธนิต สิงหนุญพงศ์
 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

1. ชื่อ-สกุล (ภาษาไทย) ผศ.ดร.ยุทธานันท์ บุญยงมณีรัตน์
(ภาษาอังกฤษ) Assist Prof. Dr. Yuttanant Boonyongmaneerat
2. ตำแหน่งปัจจุบัน อาจารย์
3. หน่วยงานที่สังกัดและสถานที่อยู่ที่ติดต่อได้สะดวก
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

1. R. Sa-nguanmoo, E. Nisarattanaporn, Y. Boonyongmaneerat, "Hot-dip galvanization with pulse-electrodeposited nickel pre-coatings," *Corrosion Science*, 53, pp. 122-126, 2011.
2. 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.
3. 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.
4. 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.
5. 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. Techapiesancharoenkij, "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. Techapiesancharoenkij, 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. Techapiesancharoenkij, 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. Praserthdam, 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. Visuttipitukul, "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," *Advanced Materials Research*, 970, pp. 240-243, 2014.

29. J. Qin, X. Zhang, Y. Xue, M.K. Das, A. Thuepoy, 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. Praserthdam, 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 วานิชสัมพันธ์
(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	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี	2552
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต	เหมืองแร่	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่	2534

5. สาขาวิชาการที่มีความชำนาญพิเศษ

ปรากฏการณ์เทอร์โมอิเล็กทริกส์ การวิเคราะห์วัสดุด้วยเครื่อง SEM และ EDX การเตรียมตัวอย่างโลหะและเซรามิกสำหรับการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค

6. ผลงานตีพิมพ์ในวารสารวิชาการ

Y. Boonyongmaneerat, K. Saengkiattiyut, P. Rattanawaleedirojn, C.Angkaprasert, J. Wanichsampan, and S. Saenapitak. Layer formation of hot-dip galvanized steels as influenced by NiCl₂-base fluxes. *Journal of Iron and Steel Research International*. 17(1) (2010): 74-78.

ผู้ร่วมวิจัย

1. ชื่อ-สกุล (ภาษาไทย) นายอดิศักดิ์ ถือพลอย
(ภาษาอังกฤษ) Mr. Adisak Thueploy
2. ตำแหน่งปัจจุบัน เจ้าหน้าที่บริการวิทยาศาสตร์
3. 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
วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต	เทคโนโลยีเซรามิก	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย	2552
ครุศาสตรบัณฑิตสาขารวมบัณฑิต	วิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ และโทรคมนาคม	สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน	2546

5. สาขาวิชาการที่มีความชำนาญพิเศษ

งานอิเล็กทรอนิกส์ และ System control การวิเคราะห์ทดสอบความต้านทานการกัดกร่อนของโลหะด้วยเครื่องทดสอบการกัดกร่อนแบบละอองเกลือ และเทคนิคทางไฟฟ้าเคมี

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, Rattapol Rangkupan, Poomrat Rattanarat, 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.