

บทที่ 3

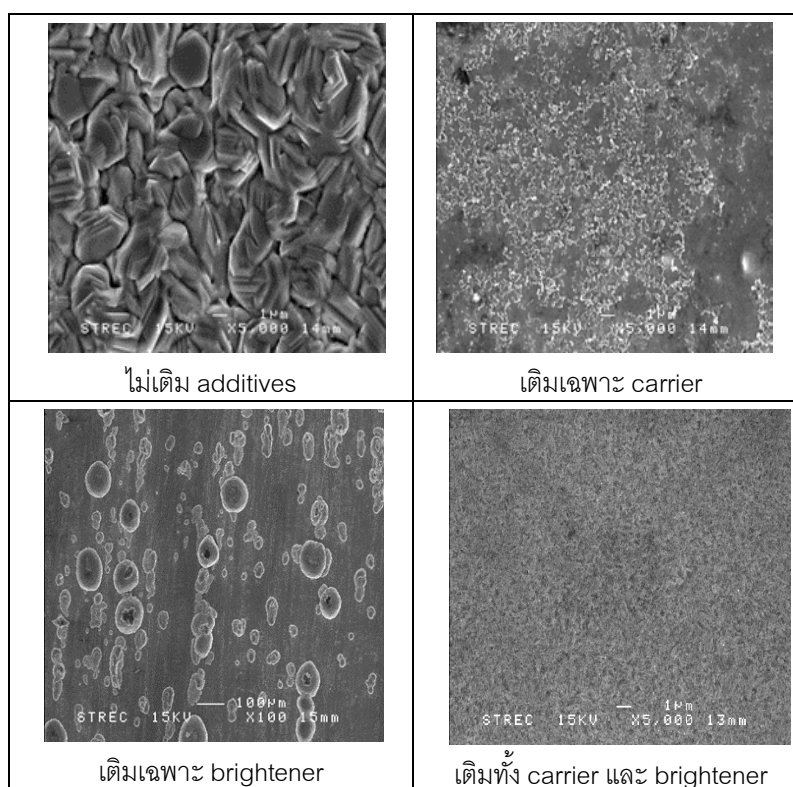
ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง

3.1 ปัจจัยจากส่วนประกอบในน้ำยาชุบต่อโครงสร้างผิวเคลือบ

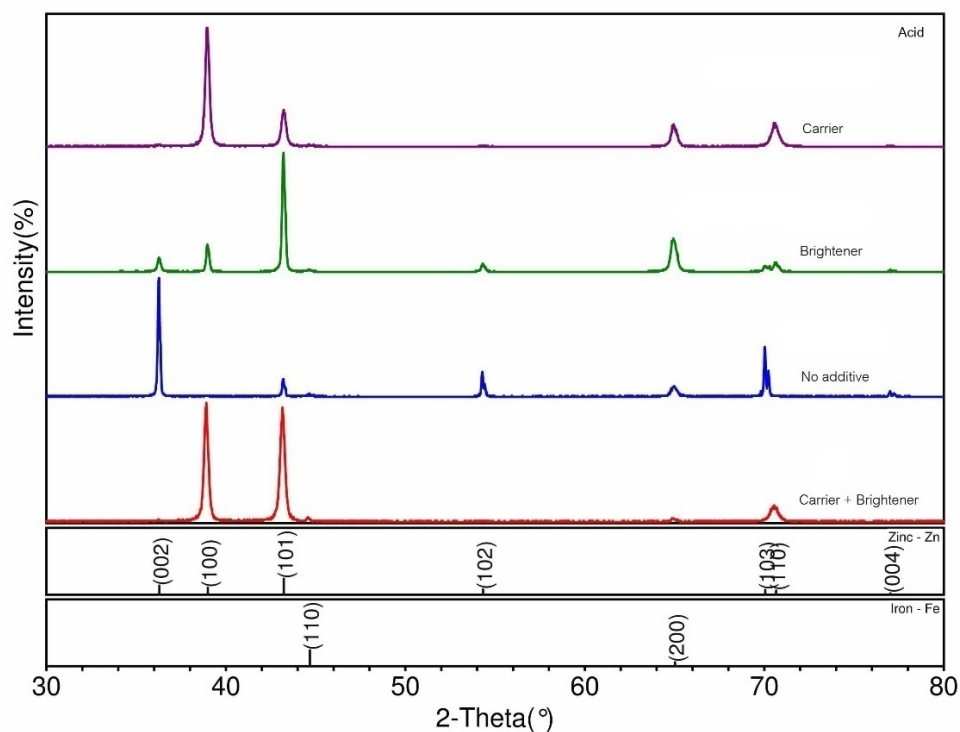
3.1.1 น้ำยาชุบเคลือบระบบกรด

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 ลักษณะผิวของชิ้นงานที่ได้หลังชุบสังกะสีด้วยไฟฟ้าในน้ำยาชุบบรรดด้วยกระแส 2A/dm^2 เป็นระยะเวลา 20 นาที โดยมีส่วนผสมในน้ำยาชุบที่แตกต่างกัน



รูปที่ 3.2 ชิ้นงานที่ได้หลังจากการชุบสังกะสีด้วยไฟฟ้าในน้ำยาชุบบรรดด้วยกระแส 2A/dm^2 เป็นระยะเวลา 20 นาที โดยมีส่วนผสมในน้ำยาชุบที่แตกต่างกัน

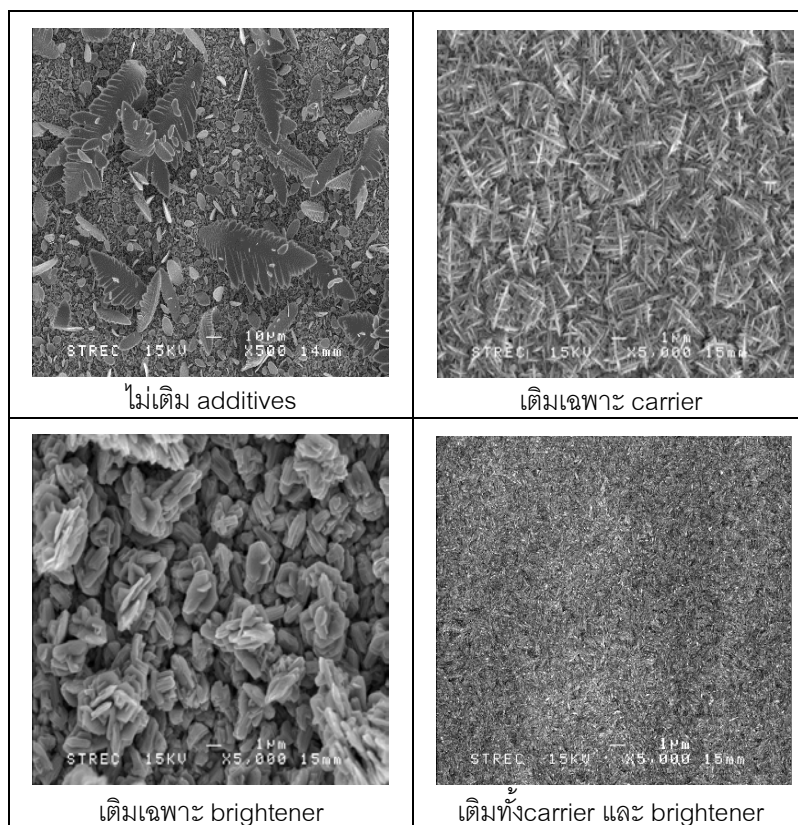
ตารางที่ 3.1 สัมประสิทธิ์การจัดเรียงตัวผลึกของแผ่นหลักชุบสังกะสีด้วยไฟฟ้าโดยใช้สารเคมีเกรดการค้าในระบบกรดด้วยกระแส 2A/dm^2 เป็นระยะเวลา 20 นาที

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

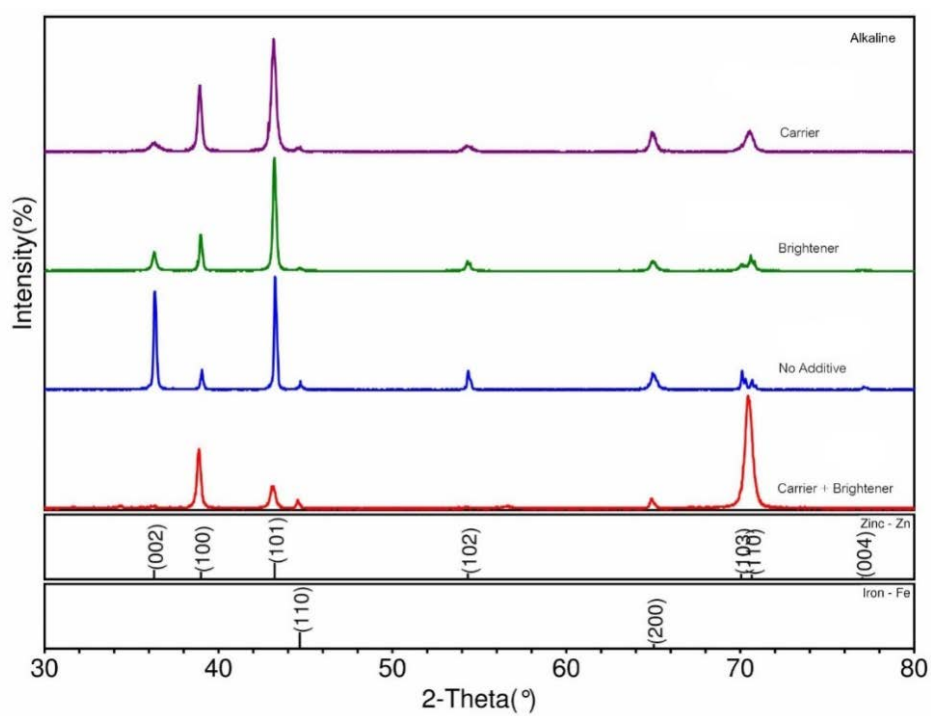
3.1.2 น้ำยาชุบเคลือบระบบต่าง

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 ของแผ่นหลักชุบสังกะสีด้วยน้ำยาชุบเคลือบระบบต่างแสดงในรูปที่ 3.4 พบว่า แผ่นหลักชุบสังกะสีที่ผ่านการชุบในน้ำยาที่ไม่มีการเติม additives และแผ่นหลักชุบสังกะสีที่ผ่านการชุบจากน้ำยาที่มีการเติม additives ใน 3 รูปแบบ คือ เติมเฉพาะ carrier เติมเฉพาะ brightener และเติมทั้ง carrier กับ brightener นั้นพบว่า ขึ้นงานทุกชิ้นมีเฟสเดียวกัน คือ สังกะสี ซึ่งประกอบด้วยระนาบที่สำคัญคือ (002), (100), (101), (102) และ (110) ซึ่งเมื่อนำค่าสัมประสิทธิ์การจัดเรียงตัวผลึกในตารางที่ 3.2 มาพิจารณาประกอบจะพบว่า แผ่นหลักชุบสังกะสีที่ผ่านการชุบในน้ำยาที่ไม่มีการเติม additives จะมีโครงสร้าง (002) และ (101) เป็นระนาบหลัก ส่วนกรณีแผ่นหลักที่ชุบโดยเติมเฉพาะ carrier และเติมเฉพาะ brightener นั้นพบว่า โครงสร้างดังกล่าวมีระนาบ (100) และ (101) เป็นระนาบหลัก สำหรับแผ่นหลักที่ชุบด้วยน้ำยาที่เติมทั้ง carrier และ brightener พบว่า มีโครงสร้างประกอบด้วย (100) และ (110) เป็นระนาบหลัก โดยที่ระนาบ (110) มีค่าสัมประสิทธิ์การจัดเรียงตัวผลึกสูงที่สุดทั้งนี้เป็นที่สังเกตว่า ทุกระบบยังคงตรวจพบเฟสของเหล็กบนโครงสร้างผิวเคลือบ



รูปที่ 3.3 ลักษณะผิวของชิ้นงานที่ได้หลังชุบสังกะสีด้วยไฟฟ้าในน้ำยาชุบระบบต่างด้วยกระแส 2A/dm^2 เป็นระยะเวลา 20 นาที โดยมีส่วนผสมในน้ำยาชุบที่แตกต่างกัน



รูปที่ 3.4 ชิ้นงานที่ได้หลังจากการชุบสังกะสีด้วยไฟฟ้าในน้ำยาชุบระบบต่างด้วยกระแส 2A/dm^2 เป็นระยะเวลา 20 นาที โดยมีส่วนผสมในน้ำยาชุบที่แตกต่างกัน

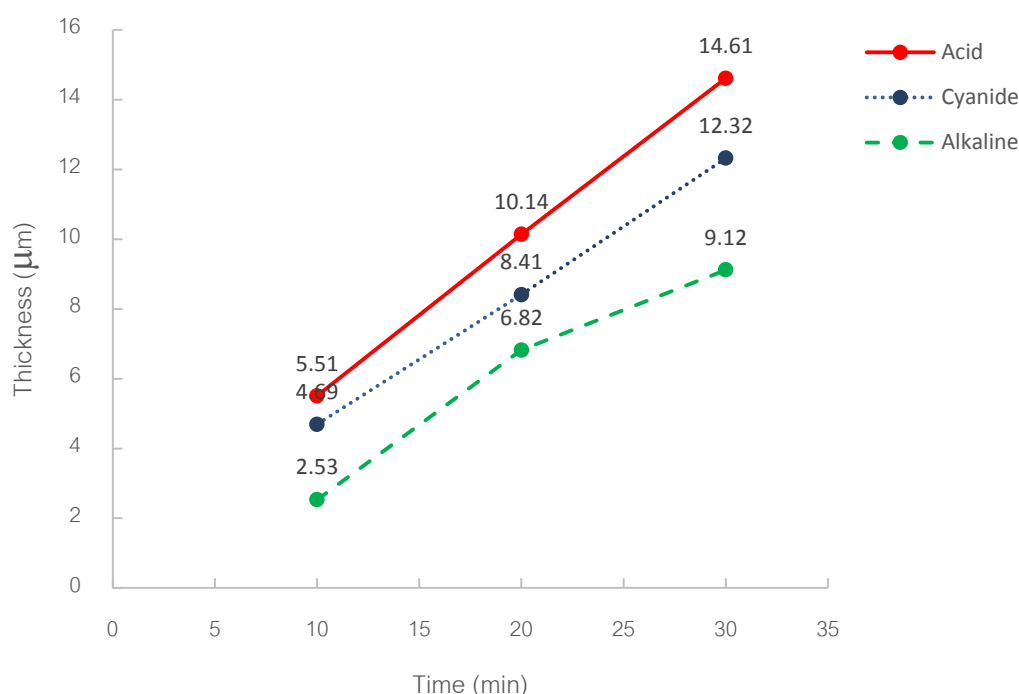
ตารางที่ 3.2 สัมประสิทธิ์การจัดเรียงตัวผลึกของแผ่นเหล็กชุบสังกะสีด้วยไฟฟ้าโดยใช้สารเคมีเกรดการค้าในระบบต่าง ๆ ที่กระแส 2 A/dm^2 เป็นระยะเวลา 20 นาที

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

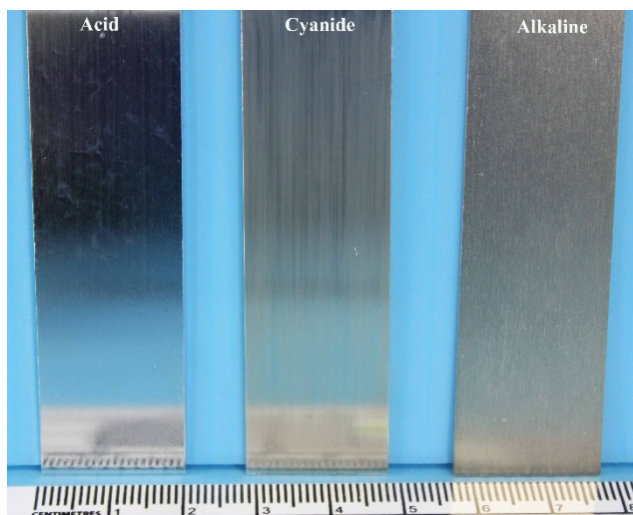
จากการใช้ไฟกระแสตรงขนาด 2 A/dm^2 เคลือบแผ่นเหล็กด้วยสังกะสี ที่ระยะเวลา 10, 20 และ 30 นาที โดยใช้น้ำยาในการชุบแตกต่างกันจำนวน 3 ระบบ คือ ระบบกรด ระบบไซยาไนด์ และ ระบบต่าง ๆ ที่มีการเติม additives แล้ว พบว่า การชุบเคลือบทั้ง 3 ระบบให้ความหนาของผิวเคลือบที่แปรผันตรงตามระยะเวลาในการชุบ โดยการใช้ น้ำยาชุบระบบกรดมีอัตราเร็วในการเคลือบผิวสูงกว่าระบบไซยาไนด์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



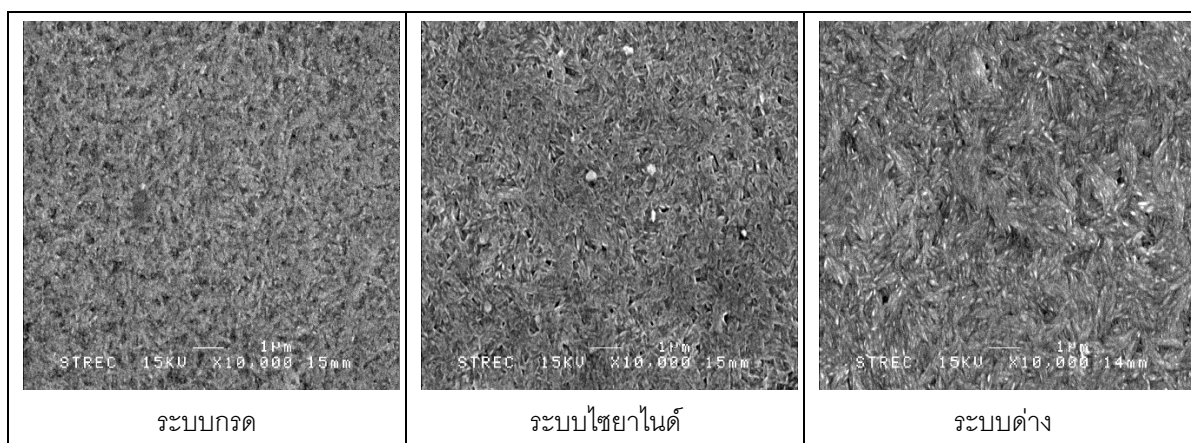
รูปที่ 3.5 ปริมาณกระแสไฟฟ้า ระยะเวลาในการชุบ และความหนาผิวเคลือบของแผ่นเหล็กชุบสังกะสีด้วยไฟฟ้าที่ใช้ น้ำยาชุบในระบบกรด ระบบไซยาไนด์ และระบบต่าง ๆ

3.2.2 ลักษณะผิวเคลือบ

ผิวเคลือบที่ผ่านการชุบด้วยระบบกรดให้ผิวเคลือบสีเงิน มีความมันเงา ส่วนผิวเคลือบในระบบโซยาไนต์และระบบต่างให้ผิวเคลือบสีเหลืองน้ำตาลอ่อน มีความมันเงา แสดงในรูปที่ 3.6 โครงสร้างทางจุลภาคของเหล็กเคลือบสังกะสีจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน แสดงให้เห็นว่าพื้นผิวของเหล็กเคลือบสังกะสีในระบบกรดและระบบโซยาไนต์มีความละเอียดและเรียบกว่าระบบต่างแสดงในรูปที่ 3.7



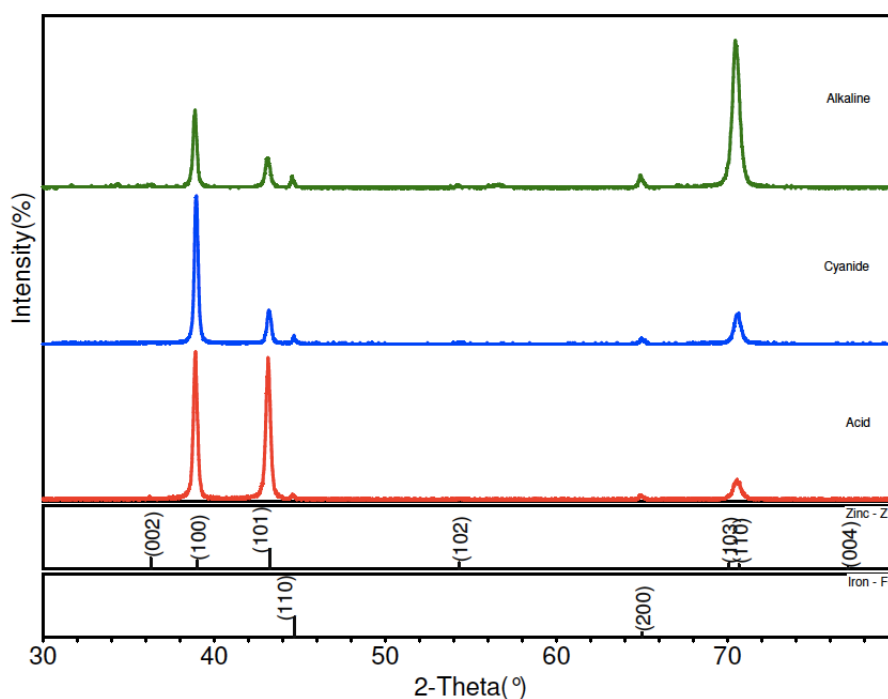
รูปที่ 3.6 แผ่นเหล็กชุบสังกะสีด้วยไฟฟ้าด้วยน้ำยาชุบระบบกรด ระบบโซยาไนต์และระบบต่าง 2 A/dm² 30 นาที



รูปที่ 3.7 ลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคของแผ่นเหล็กชุบสังกะสีด้วยไฟฟ้าด้วยน้ำยาชุบระบบกรด ระบบโซยาไนต์และระบบต่าง 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 สัมประสิทธิ์การจัดเรียงตัวผลึกของแผ่นเหล็กชุบสังกะสีด้วยไฟฟ้าโดยใช้สารเคมีกรดการค้าในระบบกรด 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

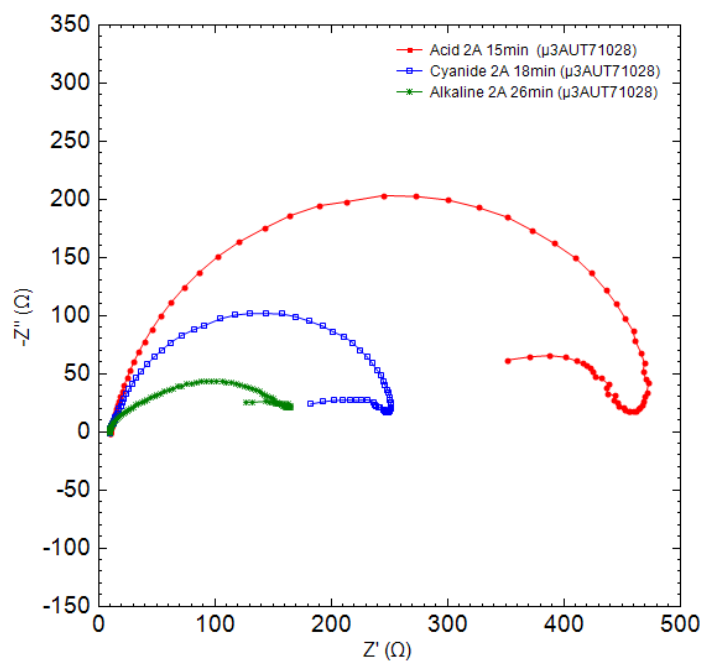
การศึกษาสมบัติของแผ่นเหล็กชุบสังกะสีด้วยไฟฟ้า โดยเฉพาะสมบัติความต้านทานการกัดกร่อนจำเป็นต้องใช้ชิ้นงานที่มีความหนาของชั้นสังกะสีเท่ากัน แต่ในทางปฏิบัติการเตรียมแผ่นเหล็กให้ได้ความหนาของชั้นเคลือบสังกะสีเท่ากันในทุกตำแหน่งและทุกชิ้นงานที่เตรียมนั้นทำได้ค่อนข้างยาก ดังนั้นจึงจำเป็นต้องตรวจวัดความหนาของแผ่นเหล็กชุบสังกะสีทุกชิ้นงานด้วยเครื่อง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

ตารางที่ 3.4 ความหนาของชั้นสังกะสีบนแผ่นเหล็กโดยใช้สารเคมีกรดการค้าในระบบกรด ระบบโซลาร์ไนต์ และระบบต่าง ก่อนการทดสอบความต้านทานการกัดกร่อนด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมี

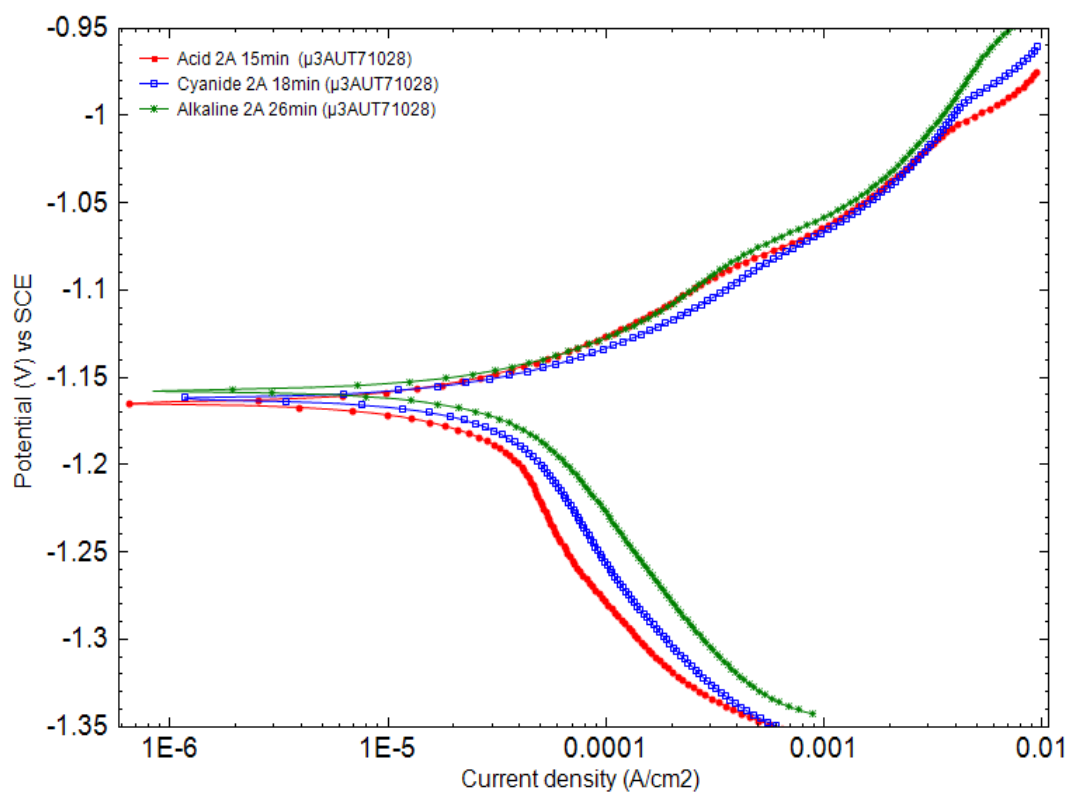
แผ่นเหล็กเคลือบสังกะสี	ความหนา (ไมครอน)			ความหนาเฉลี่ย (ไมครอน)
	ตำแหน่งบน	ตำแหน่งกลาง	ตำแหน่งล่าง	
ระบบกรด 2 A/dm^2 15 min	7.06	7.56	8.15	7.59 ± 0.55
ระบบโซลาร์ไนต์ 2 A/dm^2 18 min	7.76	7.98	7.87	7.87 ± 0.11
ระบบต่าง 2 A/dm^2 26 min	8.14	7.91	7.97	8.01 ± 0.12

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 ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 5% โดยน้ำหนัก



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

ตารางที่ 3.5 ค่าจากเส้นโพลาริเซชันของแผ่นเหล็กชุบสังกะสีด้วยไฟฟ้าโดยใช้สารเคมีกรดการค้าระบบกรด 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 ความหนาของชั้นสังกะสีบนแผ่นเหล็กโดยใช้สารเคมีกรดการค้าในระบบกรด 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	ระบบไฮยาไนต์	ระบบต่าง
ก่อนการทดสอบ			
1 ชั่วโมง			
48 ชั่วโมง			
120 ชั่วโมง			
240 ชั่วโมง			

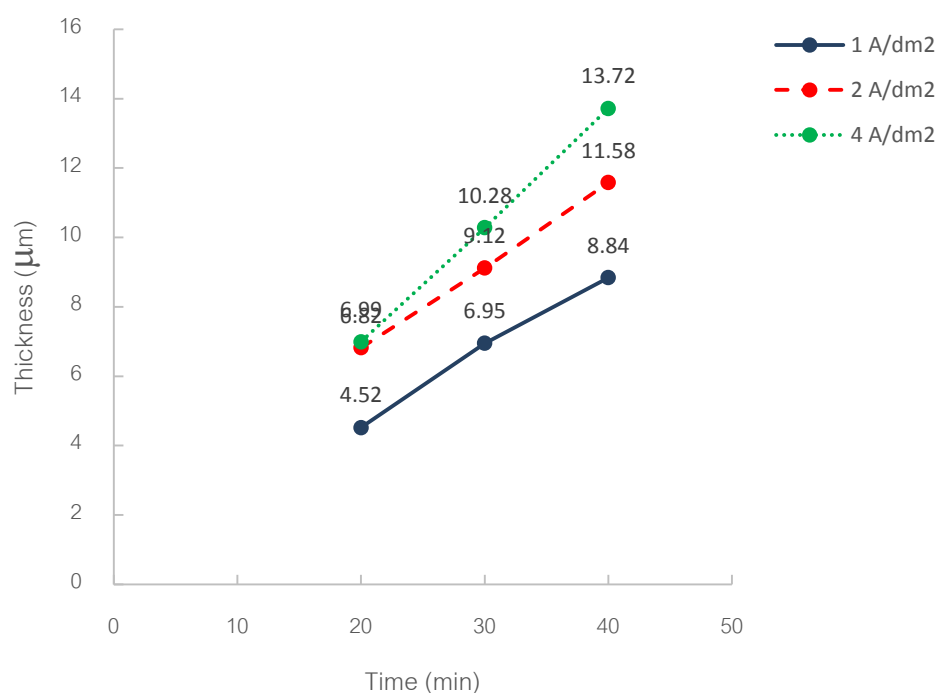
รูปที่ 3.11 ลักษณะพื้นผิวของแผ่นหลักชุบสังกะสีด้วยไฟฟ้าโดยใช้สารเคมีเกรดการค้าระบบกรด ระบบไฮยาไนต์ และระบบต่าง โดยมีความหนาของชั้นเคลือบประมาณ 8 ไมครอนที่ระยะเวลาการทดสอบ 0, 1, 48, 120 และ 240 ชั่วโมง

3.3 ผลของการใช้กระแสไฟฟ้ารูปแบบต่างๆ ในการชุบเคลือบด้วยน้ำยาระบบต่างต่อสมบัติของผิวเคลือบ

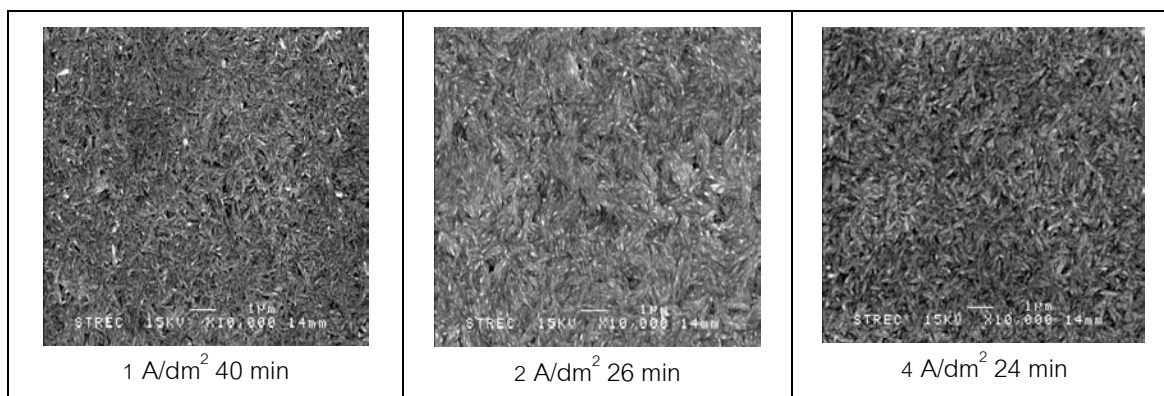
3.3.1 อัตราการชุบเคลือบและลักษณะของผิวเคลือบที่ได้

3.3.1.1 กระแสตรง

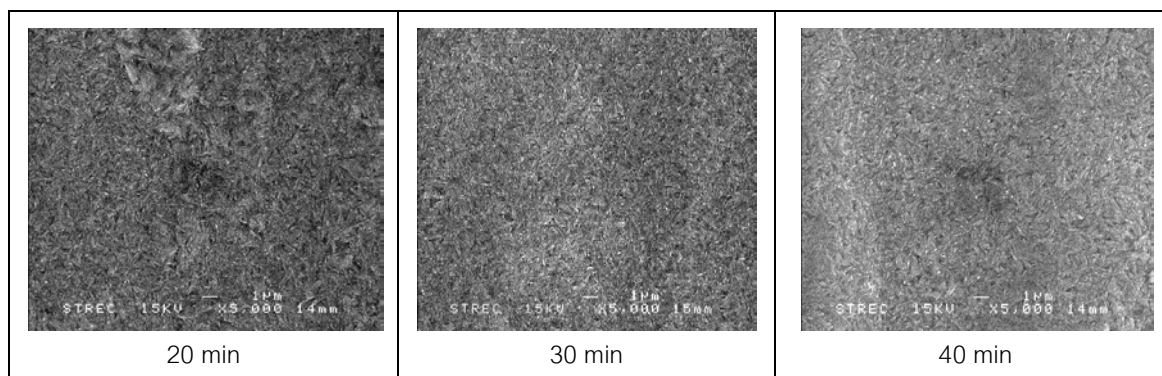
จากการใช้ไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 1 A/dm^2 , 2 A/dm^2 และ 4 A/dm^2 ในการชุบเคลือบแผ่นเหล็กด้วยสังกะสีที่ระยะเวลา 20, 30 และ 40 นาที โดยใช้น้ำยาในการชุบในระบบต่าง พบว่า เมื่อใช้เวลาในการชุบเพิ่มขึ้น มีผลทำให้ความหนาของชั้นสังกะสีเพิ่มขึ้นแบบเป็นเส้นตรง (รูปที่ 3.12) โดยการใช้กระแสไฟฟ้า 4 A/dm^2 ให้ความหนาของชั้นเคลือบสูงกว่าที่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



รูปที่ 3.12 ปริมาณกระแสไฟฟ้ากระแสตรง ระยะเวลาในการชุบ และความหนาผิวเคลือบของแผ่นเหล็กชุบสังกะสีด้วยไฟฟ้าที่ใช้น้ำยาชุบในระบบต่าง



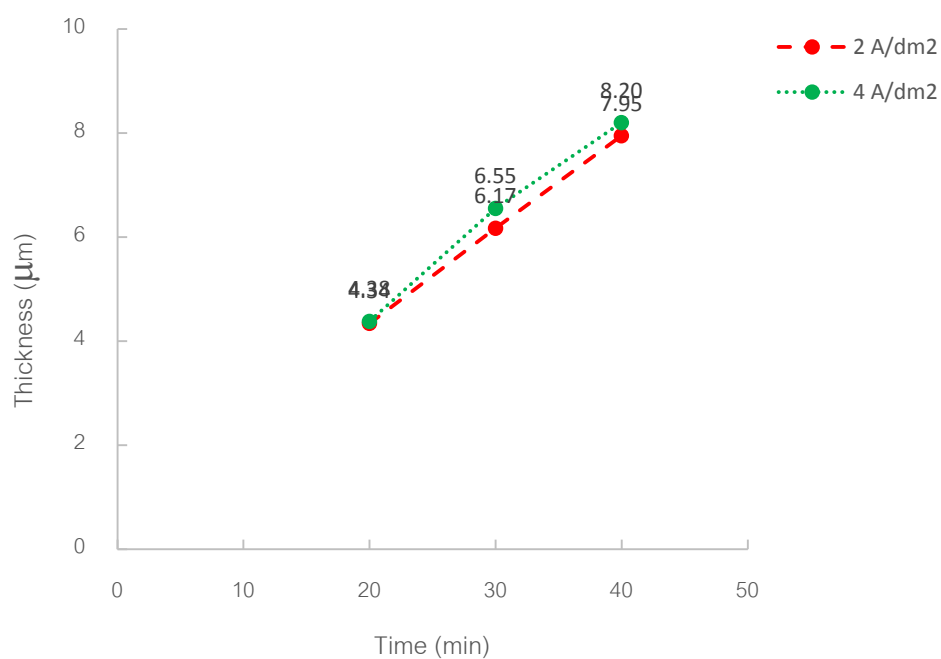
รูปที่ 3.13 ลักษณะผิวของขั้วงานเหล็กชุบสังกะสีด้วยไฟฟ้ากระแสตรงในน้ำยาชุบระบบต่าง ที่มีความหนาของชั้นสังกะสีประมาณ 8 ไมครอน โดยใช้กระแสไฟฟ้าและระยะเวลาต่างๆ ในการชุบ



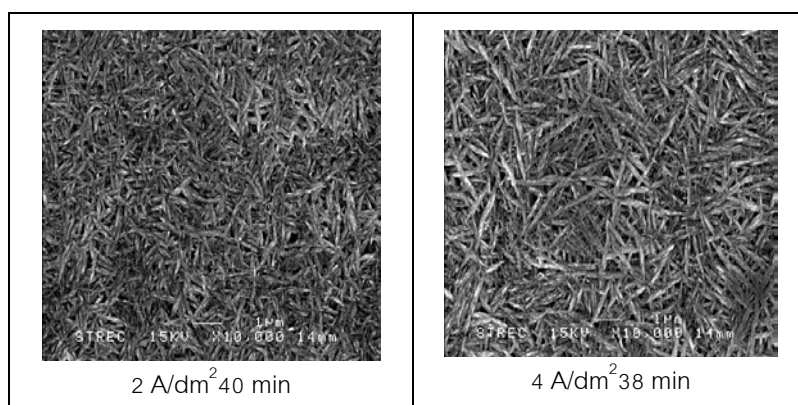
รูปที่ 3.14 ลักษณะผิวของขั้วงานเหล็กชุบสังกะสีด้วยไฟฟ้ากระแสตรงในน้ำยาชุบระบบต่าง โดยใช้กระแสชุบที่ 2 A/dm² ที่ระยะเวลาต่างๆ

3.3.1.2 กระแสแบบพัลส์ (Pulse)

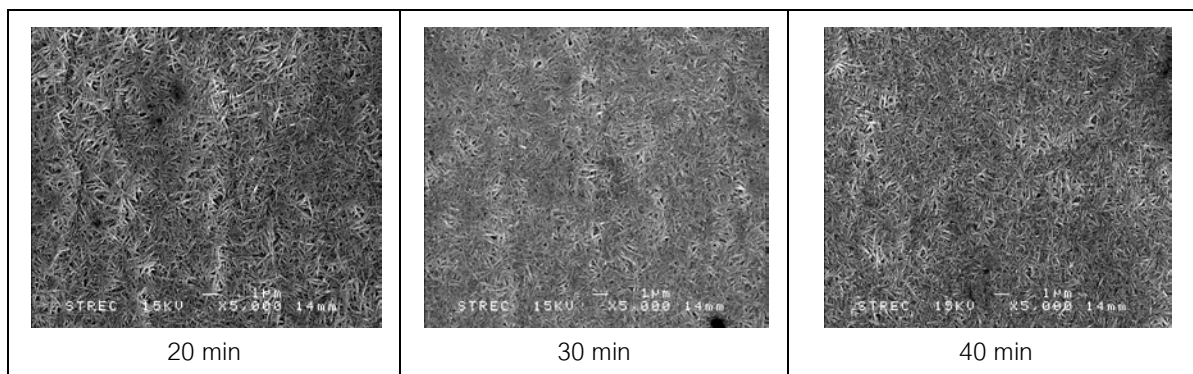
จากการใช้กระแสไฟฟ้าแบบพัลส์ขนาด 2 A/dm² และ 4 A/dm² ชุบเคลือบแผ่นเหล็กด้วยสังกะสีที่ระยะเวลา 20, 30 และ 40 นาที โดยใช้น้ำยาในการชุบในระบบต่าง พบว่า เมื่อใช้เวลาในการชุบเพิ่มขึ้น มีผลทำให้ความหนาของชั้นสังกะสีเพิ่มขึ้นแบบเป็นเส้นตรง (รูปที่ 3.15) ทั้งนี้การใช้กระแสไฟฟ้าที่ 2 A/dm² และ 4 A/dm² ให้ความหนาของชั้นเคลือบที่ใกล้เคียงกัน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



รูปที่ 3.15 ปริมาณกระแสไฟฟ้าแบบพัลส์ ระยะเวลาในการชุบ และความหนาผิวเคลือบของแผ่นเหล็กชุบสังกะสีด้วยไฟฟ้าที่ใช้น้ำยาชุบในระบบต่าง



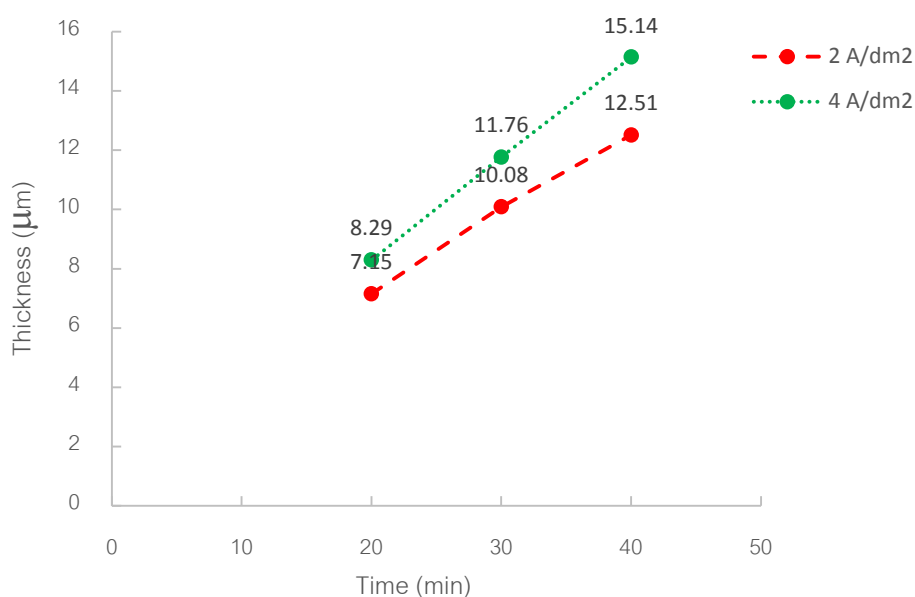
รูปที่ 3.16 ลักษณะผิวของชิ้นงานเหล็กชุบสังกะสีด้วยไฟฟ้ากระแสแบบพัลส์ในน้ำยาชุบระบบต่าง ที่มีความหนาของชั้นสังกะสีประมาณ 8 ไมครอน โดยใช้กระแสไฟฟ้าและระยะเวลาต่างๆ ในการชุบ



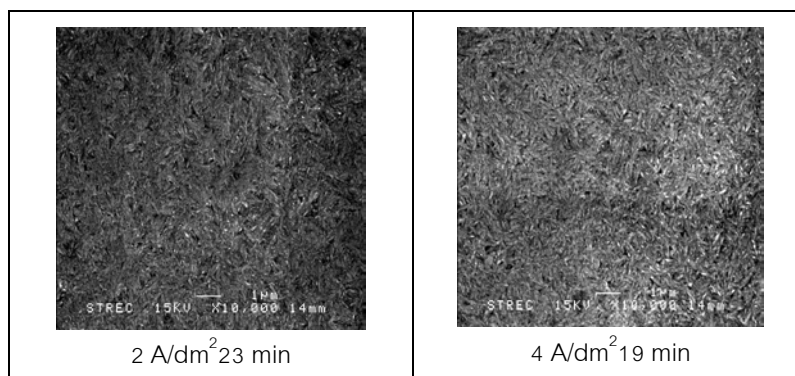
รูปที่ 3.17 ลักษณะผิวของชิ้นงานหลักชุบสังกะสีด้วยไฟฟ้ากระแสแบบพัลส์ในน้ำยาชุบระบบต่าง โดยใช้กระแสในการชุบที่ 2 A/dm^2 ที่ระยะเวลาต่างๆ

3.3.1.3 กระแสแบบ Sine wave

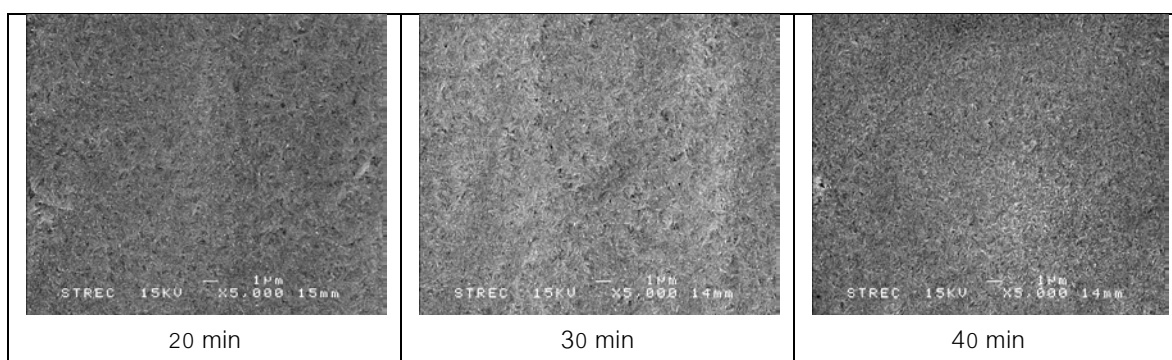
จากการใช้กระแสไฟฟ้าแบบ Sine wave ขนาด 2 A/dm^2 และ 4 A/dm^2 ชุบเคลือบแผ่นเหล็กด้วยสังกะสีที่ระยะเวลา 20, 30 และ 40 นาที โดยใช้น้ำยาในการชุบในระบบต่าง พบว่า เมื่อใช้เวลาในการชุบยาวนานขึ้น มีผลทำให้ความหนาของชั้นสังกะสีเพิ่มขึ้นแบบเป็นเส้นตรง (รูปที่ 3.18) ทั้งนี้การใช้กระแสไฟฟ้า 4 A/dm^2 ให้ความหนาของชั้นเคลือบที่มากกว่าการชุบที่กระแส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



รูปที่ 3.18 ปริมาณกระแสไฟฟ้าแบบ Sine wave ระยะเวลาในการชุบ และความหนาผิวเคลือบของแผ่นเหล็กชุบสังกะสีด้วยไฟฟ้าที่ใช้น้ำยาชุบในระบบต่าง



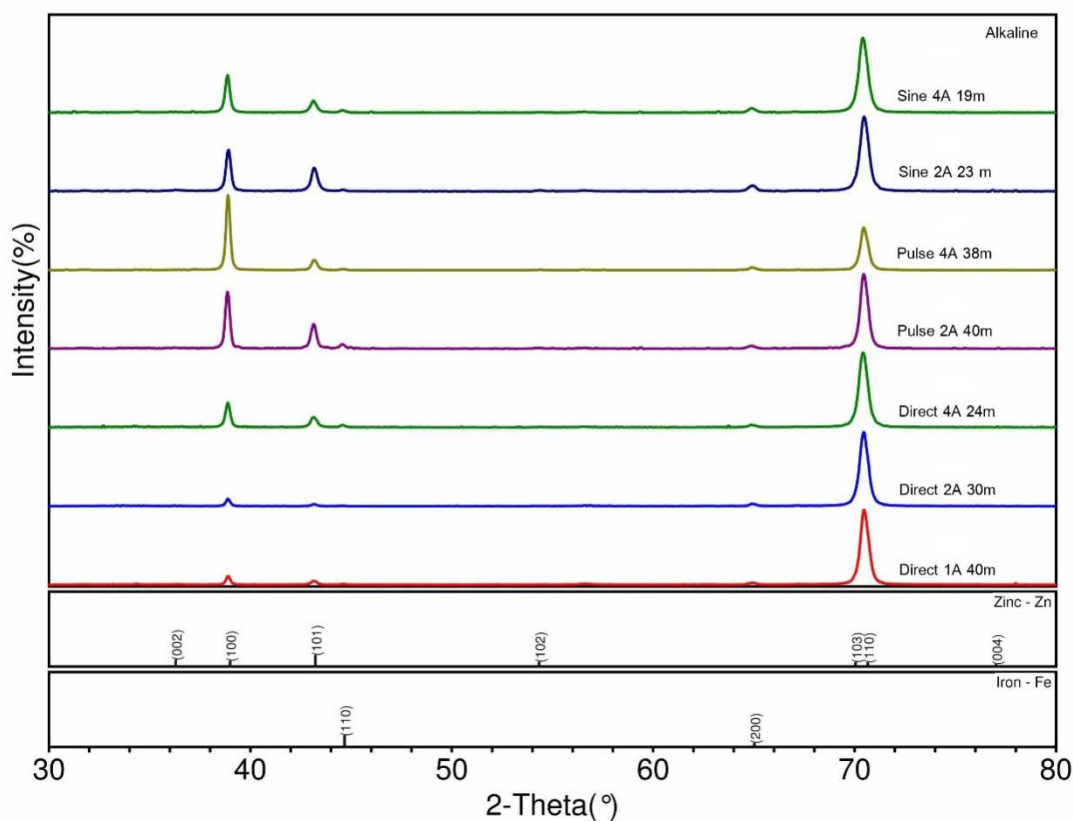
รูปที่ 3.19 ลักษณะผิวของชั้นงานที่ได้หลังชุบสังกะสีด้วยไฟฟ้าแบบ Sine wave ในน้ำยาชุบระบบต่าง ที่มีความหนาของชั้นสังกะสีประมาณ 8 ไมครอน โดยใช้กระแสไฟฟ้าและระยะเวลาต่างๆ ในการชุบ



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

3.3.2 สมบัติของผิวเคลือบ

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



รูปที่ 3.21 ชิ้นงานที่ได้หลังจากการชุบสังกะสีด้วยไฟฟ้าในน้ำยาชุบระบบต่างด้วยรูปแบบการจ่ายกระแสไฟฟ้าที่แตกต่างกันโดยมีความหนาของชั้นสังกะสีประมาณ 8 ไมครอน

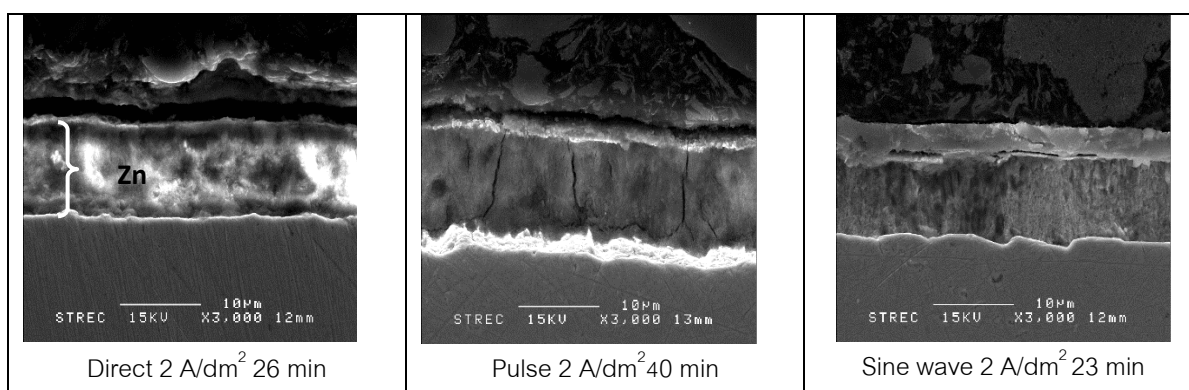
ตารางที่ 3.7 สัมประสิทธิ์การจัดเรียงตัวผลึกของแผ่นเหล็กชุบสังกะสีด้วยไฟฟ้าในน้ำยาชุบระบบต่าง จากการชุบด้วยรูปแบบการจ่ายกระแสไฟฟ้าที่แตกต่างกัน

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

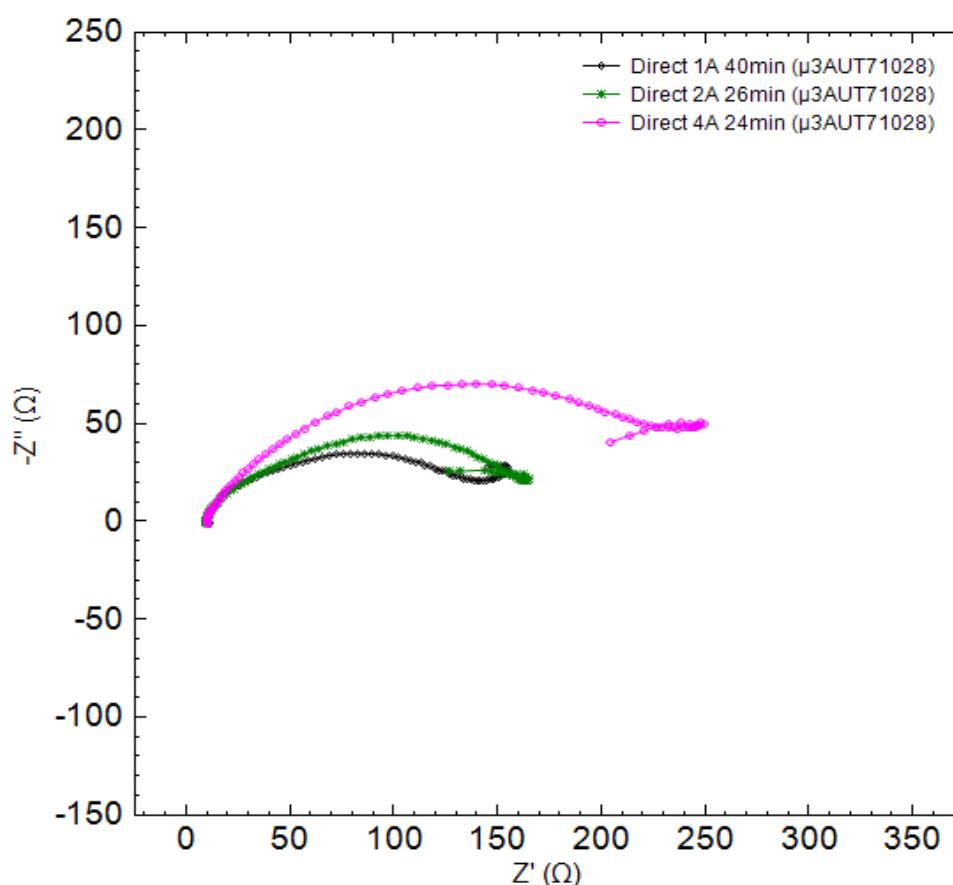
ชิ้นงาน	รูปแบบกระแส	ความหนา (ไมครอน)			ความหนาเฉลี่ย (ไมครอน)
		ตำแหน่งบน	ตำแหน่งกลาง	ตำแหน่งล่าง	
1 A/dm ² 40 min	Direct	7.85	7.87	8.62	8.11 ± 0.44
2 A/dm ² 26 min	Direct	8.14	7.91	7.97	8.01 ± 0.12
4 A/dm ² 24 min	Direct	7.95	8.18	8.16	8.10 ± 0.13
2 A/dm ² 40 min	Pulse	8.14	8.10	8.37	8.20 ± 0.15
2 A/dm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



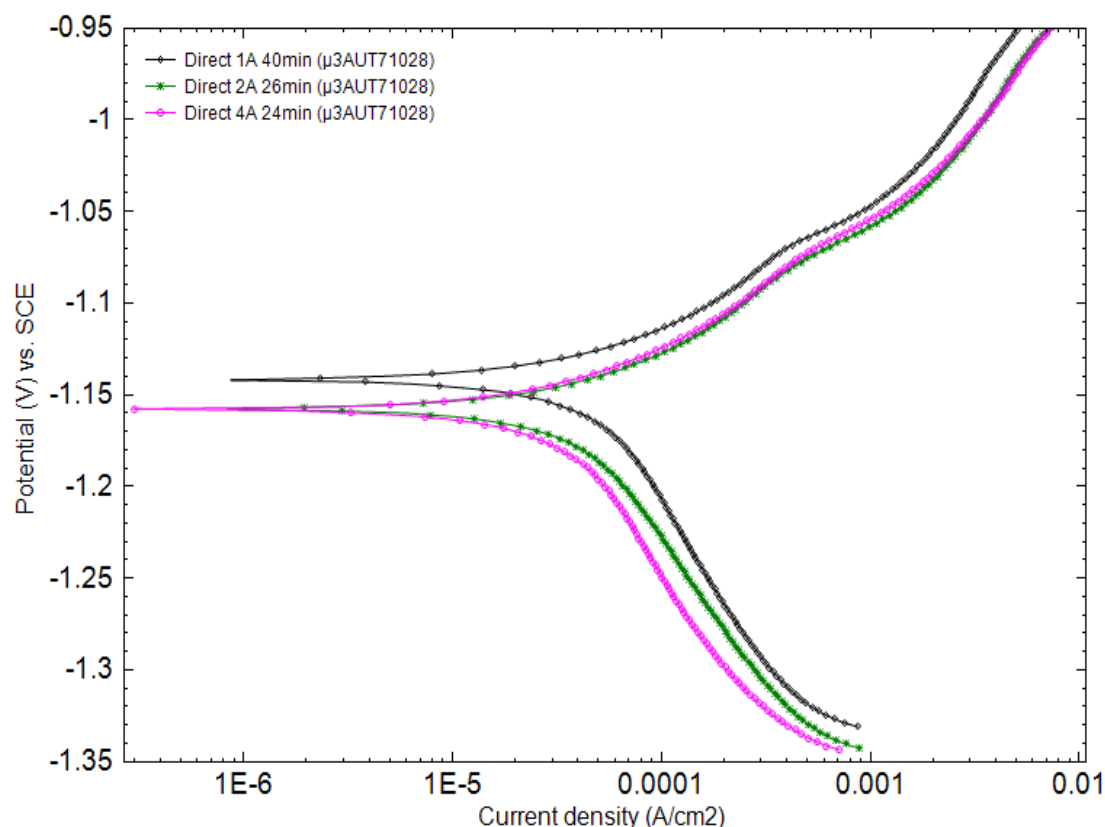
รูปที่ 3.22 ภาคตัดขวางของแผ่นเหล็กชุบสังกะสีด้วยไฟฟ้ากระแสตรง กระแสแบบพัลส์ และกระแสแบบ Sine wave

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 โดยมีความหนาของชั้นเคลือบประมาณ 8 ไมครอน ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 5% โดยน้ำหนัก

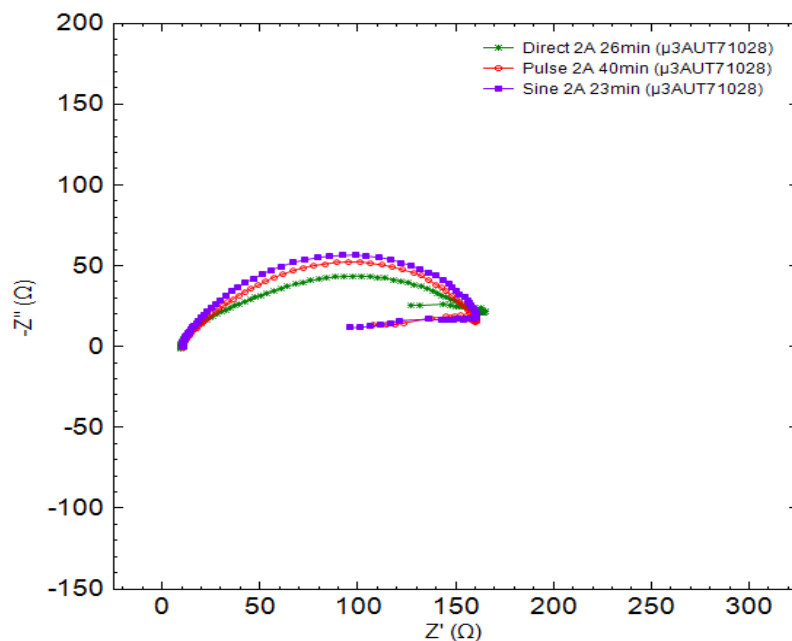


รูปที่ 3.24 เส้นโพลาริเซชันของแผ่นเหล็กชุบสังกะสีด้วยไฟฟ้าด้วยกระแสตรงที่ใช้สารเคมีกรดการดำในระบบต่าง โดยมี ความหนาของชั้นเคลือบประมาณ 8 ไมครอน ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 5% โดยน้ำหนัก

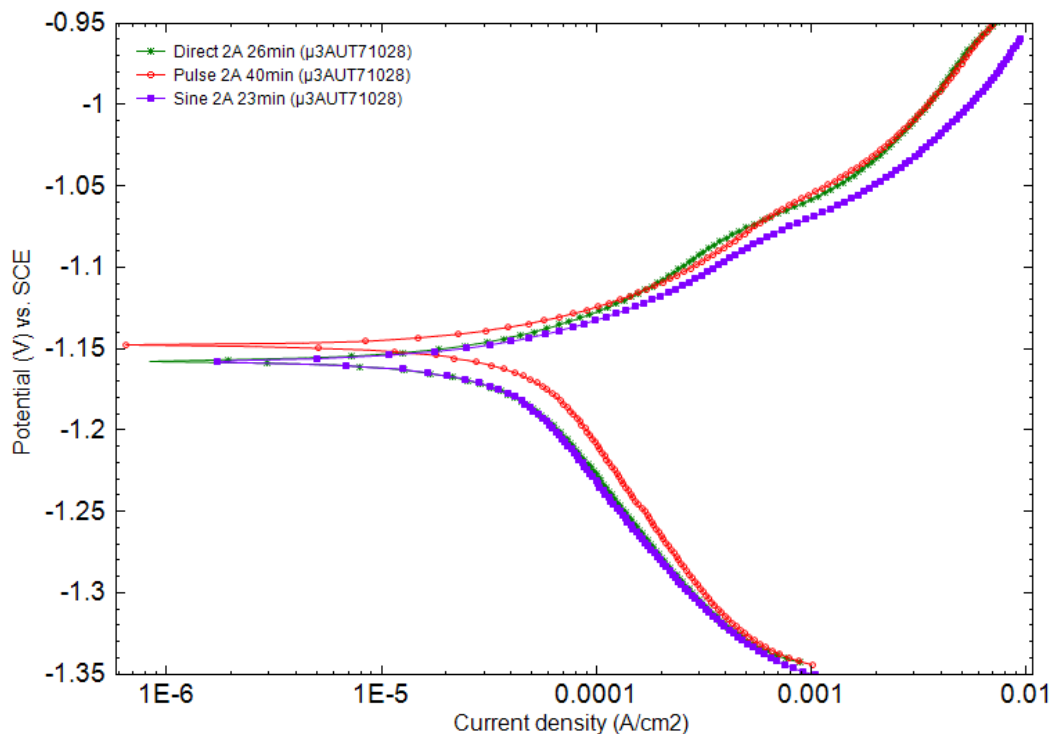
ตารางที่ 3.9 ค่าจากเส้นโพลาริเซชันของแผ่นเหล็กชุบสังกะสีด้วยไฟฟ้ากระแสตรงโดยใช้สารเคมีกรดการดำระบบ ต่าง ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 5% โดยน้ำหนัก

ชิ้นงาน	Corrosion parameter			
	E_{corr} (V)	I_{corr} ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)	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 แผ่นเหล็กเคลือบสังกะสีด้วยไฟฟ้าที่ใช้สารชุบกรดการดำในระบบต่างโดยใช้รูปแบบของกระแสไฟฟ้าในการชุบต่างกันให้กราฟ 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 และใช้สารเคมีกรดการดำในระบบต่าง โดยมีความหนาของชั้นเคลือบประมาณ 8 ไมครอน ในสารละลายไฮเดียมคลอไรด์ 5% โดยน้ำหนัก

ตารางที่ 3.10 ค่าจากเส้นโพลาริเซชันของแผ่นเหล็กชุบสังกะสีโดยใช้รูปแบบกระแสตรงกระแสพัลส์ และกระแส Sine wave และใช้สารเคมีกรดการค้าในระบบต่างในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 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 $1\text{ A}/\text{dm}^2$ มีปริมาณสนิมสีน้ำตาลแดงเกิดขึ้นมากกว่าและมีปริมาณสนิมสีน้ำตาลแดงเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาการทดสอบเพิ่มขึ้น (รูปที่ 3.27) ส่วนชิ้นงานที่ชุบด้วยกระแสตรงขนาด $2\text{ A}/\text{dm}^2$ และ $4\text{ A}/\text{dm}^2$ พบว่ามีสนิมสีน้ำตาลแดงเกิดขึ้นบนพื้นผิวเมื่อระยะเวลาการทดสอบผ่านไป 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 และใช้สารเคมีกรดการค้าในระบบต่างก่อนการทดสอบด้วยเครื่องทดสอบการกัดกร่อนแบบละอองเกลือ

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 และใช้สารเคมีกรดการค่าเคลือบในระบบต่าง โดยมีความหนาของชั้นเคลือบประมาณ 8 ไมครอนที่ระยะเวลาการทดสอบ 0, 1, 48, 120 และ 240 ชั่วโมง