

การชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนโดยการเคลือบชั้นรองพื้นนิกเกิลด้วยไฟฟ้า



นายรัฐชน์ สงวนหมู่

ศูนย์วิทยทรัพยากร

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2553

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

HOT-DIP GALVANIZATION BY PRE-COATING OF ELECTRODEPOSITED NICKEL
INTERLAYER

Mr. Run Sa-nguanmoo



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย


A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering Program in Metallurgical Engineering
Department of Metallurgical Engineering
Faculty of Engineering
Chulalongkorn University
Academic Year 2010
Copyright of Chulalongkorn University

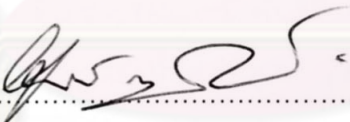
หัวข้อวิทยานิพนธ์	การชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนโดยการเคลือบชั้นรองพื้นนิกเกิลด้วยไฟฟ้า
โดย	นาย รัชชณ์ สงวนหมู่
สาขาวิชา	วิศวกรรมโลหการ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	อาจารย์ ดร. ยุทธนันท์ บุญยงมณีรัตน์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เอกสิทธิ์ นิสารัตนพร

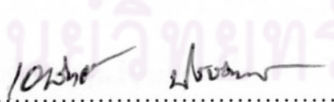
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

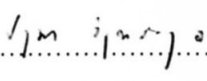
.....  คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญสม เลิศหิรัญวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....  ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. ประสงค์ ศรีเจริญชัย)

.....  อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(อาจารย์ ดร. ยุทธนันท์ บุญยงมณีรัตน์)

.....  อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เอกสิทธิ์ นิสารัตนพร)

.....  กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปฐมา วิสุทธิพิทักษ์กุล)

.....  กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(อาจารย์ ดร.ราชธีร์ เตชไพศาลเจริญกิจ)

วิทยุชนิ สงวนหมู่ : การชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนโดยการเคลือบชั้นรองพื้นนิกเกิลด้วยไฟฟ้า.
(HOT-DIP GALVANIZATION BY PRE-COATING OF ELECTRODEPOSITED
NICKEL INTERLAYER) อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : อ.ดร.ยุทธรินทร์ บุญยงมณีรัตน์,
อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม : ผศ.ดร.เอกสิทธิ์ นิสารัตนพร, 86 หน้า.

กระบวนการชุบสังกะสีโดยวิธีที่เหล็กถูกชุบนิกเกิลด้วยไฟฟ้าและจุ่มร้อนลงในเบ้าหลอมสังกะสีหลอมเหลวที่อุณหภูมิ 450°C ถูกตรวจสอบ เนื่องจากเป็นหนทางที่อาจเกิดขึ้นได้ในการบรรเทาปัญหาการโตเกินไปของชั้นเคลือบสังกะสีและช่วยปรับปรุงสมบัติความต้านทานการกัดกร่อนของเหล็กชุบสังกะสี อิทธิพลของตัวแปรในการผลิตซึ่งประกอบด้วยรูปแบบการจ่ายกระแสไฟฟ้า, ระยะเวลาในการชุบไฟฟ้าและจุ่มร้อนที่มีผลต่อการพัฒนาโครงสร้างจุลภาคและเฟสโครงสร้างและสอดคล้องกับพฤติกรรมการกัดกร่อนและสมบัติการยึดเกาะที่มีต่อเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำได้ถูกสำรวจและวิเคราะห์ ชั้นเคลือบของเหล็กชุบสังกะสีที่เตรียมด้วยการเคลือบชั้นรองพื้นนิกเกิลด้วยไฟฟ้าสามารถผลิตให้โครงสร้างมีความสม่ำเสมอ ปราศจากช่องว่างโดยรูปแบบการจ่ายกระแสแบบพัลส์ในการชุบนิกเกิล โครงสร้างจุลภาคทั่วไปของเหล็กชุบสังกะสีชนิดนี้ประกอบด้วยชั้นเคลือบอินเทอร์มีเดียตของสังกะสี-เหล็กที่ชัดเจนสองชั้นและชั้นนิกเกิลที่หลงเหลือจากการจุ่มร้อน ความสม่ำเสมอของชั้นเคลือบเหล่านี้สามารถมั่นใจได้โดยการเตรียมชั้นรองพื้นนิกเกิลที่มีความหนาที่เหมาะสมและสัมพันธ์กับระยะเวลาในการจุ่มร้อน การทดสอบการตัดโค้งแสดงให้เห็นว่าชั้นเคลือบเหล่านี้มีการยึดเกาะที่ดีกับเนื้อพื้นของเหล็กเมื่อเทียบกับชั้นเคลือบของเหล็กชุบสังกะสีโดยวิธีดั้งเดิม ผลจากการทดสอบความคงทนต่อไอเกลือแสดงให้เห็นว่าชั้นเคลือบที่มีชั้นรองพื้นนิกเกิลมีความต้านทานการกัดกร่อนที่เพิ่มขึ้นอย่างน้อย 2 เท่าเมื่อเทียบกับเหล็กชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนโดยวิธีดั้งเดิมถึงแม้ว่าชั้นเคลือบจะมีความบางกว่า 3 เท่า การศึกษาโพลาไรเซชัน-โพเทนเชียลเสนอแนะว่าการปรับปรุงสมรรถนะการกัดกร่อนเป็นผลจากอัตราการกัดกร่อนที่ต่ำและศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนที่สูงของชั้นเคลือบอินเทอร์มีเดียตของสังกะสี-เหล็กที่เกิดขึ้น

ภาควิชา.....วิศวกรรมโลหการ.....ลายมือชื่อนิสิต.....
สาขาวิชา.....วิศวกรรมโลหการ.....ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....
ปีการศึกษา.....2553.....ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม.....

5170442721 : MAJOR METALLURGICAL ENGINEERING

KEYWORDS : Hot-dip galvanization / Electrodeposited film / Nickel / Zinc / Microstructure / Corrosion

RUN SA-NGUANMOO : HOT-DIP GALVANIZATION BY PRE-COATING OF ELECTRODEPOSITED NICKEL INTERLAYER. THESIS ADVISOR : YUTTANANT BOONYONGMANEERAT, Ph.D., THESIS CO-ADVISOR : ASST. PROF. EKASIT NISARATANAPORN, Ph.D., 86 pp.

The galvanizing process whereby steel is electrodeposited with nickel and hot-dipped in a molten zinc bath at 450°C is investigated as a potential route to mitigate the zinc-coating overgrowth problem and to improve the corrosion properties of the galvanized steels. The influences of processing parameters, including electrodeposited current waveforms, and the electroplating and galvanizing durations on the evolutions of microstructure and phase structures, the corresponding corrosion behaviors, and the adhesion properties of the galvanized low-carbon steels are explored and analyzed. Galvanized coatings prepared with the electrodeposition of nickel interlayer can be produced with uniform, void-free structure using a pulse-current waveform upon nickel deposition. A typical microstructure of this type of galvanized steels consists of two apparent zinc-nickel intermediate layers and a nickel layer that survives the galvanization. The uniformity of these layers can be ensured by providing a nickel pre-coating of suitable thickness in relation to the hot dip duration. The bending test demonstrates that such coating exhibits superior adhesion as compared to the coating of conventional type. The results from the salt spray tests demonstrate that galvanized coating with nickel pre-coating exhibits at least 2 times more enhanced corrosion resistance than the conventionally-galvanized steel, even though the thickness of the coating is 3 times smaller. The polarization potential study suggests that such improved corrosion performance is attributed to a low corrosion rate and a high corrosion potential of the Zn-Ni intermediate layers thus formed.

Department : Metallurgical Engineering...
Field of Study : Metallurgical Engineering...
Academic Year : 2010

Student's Signature
Advisor's Signature
Co-Advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีจากความอนุเคราะห์ของที่อาจารย์ที่ปรึกษา วิทยานิพนธ์ทั้งสองท่านคืออาจารย์ ดร. ยุทธนันท์ บุญยงมณีรัตน์ และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เอกสิทธิ์ นิสารัตนพร ที่กรุณาอบรมให้ความรู้ ให้คำแนะนำ, ข้อคิดเห็นและสร้างเสริมประสบการณ์ในการทำงานอันมีค่ายิ่งให้แก่ข้าพเจ้า ขอขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร. ประสงค์ ศรีเจริญชัย, ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปฐมา วิสุทธิพิทักษ์กุล และอาจารย์ ดร.ราชธีร์ เตชไพศาลเจริญกิจ คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ที่กรุณาช่วยแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้มีความสมบูรณ์ นอกจากนี้ ยังขอขอบพระคุณกลุ่มงานวิจัย PORETEGE แห่งสถาบันวิจัยโลหะและวัสดุ จุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย โดยคุณกนกวรรณ แสงเกียรติยุทธ, คุณปราณี รัตนวลิตโรจน์, คุณสวลี เสนาพิทักษ์ และคุณอดิศักดิ์ ถือพลอย สำหรับความช่วยเหลือ, ความรู้และการให้คำปรึกษาที่เป็นประโยชน์ใน ส่วนของการศึกษาสมบัติความต้านทานการกัดกร่อน ขอขอบพระคุณคุณจุมพฏ วานิชสัมพันธ์ สำหรับการอบรมในส่วนของเตรียมผิวชิ้นงาน จนงานสำเร็จลุล่วง

ขอขอบพระคุณสถาบันเหล็กและเหล็กกล้าแห่งประเทศไทยสำหรับการสนับสนุนทุนวิจัย ตามสัญญา 022/2552

สุดท้ายนี้ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา สำหรับพระคุณอันล้นพ้นสำหรับ โอกาสในการศึกษา กำลังใจและกำลังสนับสนุนที่ดีตลอดมา

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฌ
สารบัญภาพ.....	ญ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	4
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
2 การศึกษาข้อมูลเบื้องต้น.....	5
2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1.1 สังกะสี.....	5
2.1.2 นิกเกิล.....	6
2.1.3 แผนภูมิสมดุลของเหล็กกับสังกะสี.....	7
2.1.4 การเกิดเฟสของเหล็กและสังกะสี.....	10
2.1.5 กระบวนการชุบสังกะสีด้วยวิธีการจุ่มร้อน.....	12
2.1.6 หลักการเบื้องต้นของการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า.....	14
2.1.7 การตรวจสอบพฤติกรรมการกัดกร่อนด้วยกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี.....	16
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	19
3 ระเบียบวิธีวิจัย.....	28
3.1 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย.....	28
3.2 ระเบียบวิธีการวิจัย.....	29

4 ผลการทดลองและการอภิปราย.....	33
4.1 ผลของตัวแปรในการผลิตชั้นรองพื้นนิกเกิลด้วยไฟฟ้า.....	33
4.2 การศึกษาการพัฒนาของโครงสร้างจุลภาคและเฟสที่เกิดขึ้น.....	35
4.2.1 การศึกษาโครงสร้างและเฟสของเหล็กชุบสังกะสีที่เปลี่ยนแปลงไป ตามความหนาของชั้นรองพื้นนิกเกิล.....	36
4.2.2 การศึกษาโครงสร้างและเฟสของเหล็กชุบสังกะสีที่เปลี่ยนแปลงไปตาม ระยะเวลาในการชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อน.....	43
4.3 การทดสอบการดัดโค้ง T-bend flexibility test.....	51
4.4 การศึกษาสมบัติความต้านทานการกัดกร่อน.....	57
4.4.1 การทดสอบความคงทนต่อละอองน้ำเกลือ (Salt spray testing).....	57
4.4.2 การทดสอบความต้านทานการกัดกร่อนโดยเทคนิคโพเทนชิโอดนามิกส์ (Potentiodynamic).....	62
4.4.3 การทดสอบความต้านทานการกัดกร่อนของแต่ละชั้นเคลือบโดยเทคนิค กัลวานอสแตติกและโพเทนชิโอดนามิกส์ (Galvanostatic and Potentiodynamic).....	64
5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	69
รายการอ้างอิง.....	71
ภาคผนวก.....	74
ภาคผนวก ก.....	75
ภาคผนวก ข.....	76
ภาคผนวก ค.....	84
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	86

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 ลักษณะของเฟสที่เกิดในโลหะผสมของเหล็กและสังกะสี.....	9
ตารางที่ 2.2 ผลการทดสอบของเหล็กกล้าปิวาไนซ์โดยวิธีการจุ่มร้อนโดยที่มีและไม่มีนิกเกิล เป็นชั้นรองพื้น.....	20
ตารางที่ 2.3 การตรวจสอบด้วยตาเปล่าของแผ่นเหล็กกล้าปิวาไนซ์ที่ผ่านการทดสอบ ด้วยการพ่นละอองเกลือ.....	20
ตารางที่ 2.4 ชนิดของน้ำยาประสาน.....	21
ตารางที่ 2.5 ขอบเขตของตัวแปรในการชุบไฟฟ้ากระแสพัลส์ในงานวิจัยของ A.M. El-Sherik et. al.....	25
ตารางที่ 4.1 ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าคาร์บอนรีดเย็น.....	33
ตารางที่ 4.2 เอกลักษณะของเหล็กชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนโดยการเคลือบชั้นรองพื้นนิกเกิล ด้วยไฟฟ้าที่ระยะเวลาในการจุ่มร้อน 1 นาที.....	40
ตารางที่ 4.3 เอกลักษณะของเหล็กชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนโดยการเคลือบชั้นรองพื้นนิกเกิล ด้วยไฟฟ้าที่ความหนา H2.....	45
ตารางที่ 4.4 ค่าคงที่ของอัตราในการโตกับเวลา, (n)และค่าคงที่ของอัตราในการโต, (K) ของชั้นเคลือบของเหล็กชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนโดยการเคลือบชั้นรองพื้นนิกเกิล ด้วยไฟฟ้า.....	49
ตารางที่ 4.5 ศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนและความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนของ กราฟโพลาริเซชันจากภาพที่ 4.24.....	64
ตารางที่ 4.6 ศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนและความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนของ กราฟโพลาริเซชันจากภาพที่ 4.27.....	68

สารบัญญภาพ

หน้า

ภาพที่ 2.1 แผนผังระบบสององค์ประกอบของเหล็กและสังกะสีในบริเวณที่มีปริมาณของสังกะสีเป็นส่วนมาก.....	8
ภาพที่ 2.2 โครงสร้างระดับจุลภาคของชั้นเคลือบสังกะสี ที่เกิดขึ้นหลังจากการจุ่มร้อนเป็นเวลา 300 วินาที ณ อุณหภูมิ 450 °C (1) เฟสแกมมา(Γ), (2) เฟสเดลตา (δ), (3) เฟสซีตา (ζ).....	10
ภาพที่ 2.3 แผนผังของการเกิดขึ้นเฟสของเหล็กและสังกะสีในเตาหลอมกัลวาไนซ์ 0.00 wt% อะลูมิเนียม-สังกะสี, t_0 หมายถึงระยะเวลาเริ่มต้นและการพัฒนาของชั้นเฟสเกิดขึ้นตามเวลา t_0 , t_1 , t_2 , t_3 และ t_4 ตามลำดับ.....	11
ภาพที่ 2.4 แผนผังของการชุบนิกเกิลด้วยไฟฟ้า.....	14
ภาพที่ 2.5 แผนผังอย่างง่ายของเครื่องโพเทนชิโอสแตทที่ใช้วัดเส้นโพลาริเซชัน.....	17
ภาพที่ 2.6 วิธีการหาค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน (E_{corr}) และ อัตราการกัดกร่อน (I_{corr}) จากเส้นโพลาริเซชัน.....	18
ภาพที่ 2.7 แสดงส่วนต่างๆ ของเส้นโพลาริเซชัน.....	19
ภาพที่ 2.8 ภาพถ่ายจาก SEM ของชิ้นงานที่เคลือบด้วยน้ำยาประสาน $CdCl_2$ ที่ละลายในน้ำ และน้ำยาประสานทั่วไป (a) $CdCl_2$ 30% ในน้ำ, (b) $CdCl_2$ 2.5% ในน้ำยาประสานทั่วไป.....	22
ภาพที่ 2.9 ภาพถ่ายจาก SEM ของชิ้นงานที่เคลือบด้วยน้ำยาประสาน $NiCl_2$ ที่ละลายในน้ำและน้ำยาประสานทั่วไป (a) $NiCl_2$ 50% (b) $NiCl_2$ 10% ในน้ำยาประสานทั่วไป.....	22
ภาพที่ 2.10 ภาพถ่ายจาก SEM ของชิ้นงานที่เคลือบด้วยน้ำยาประสาน $NiCl_2$ ที่ละลายในน้ำ (a) บริเวณที่มีเฟสซีตาผลึกเล็กกว่า (b) บริเวณที่มีเฟสซีตาผลึกใหญ่กว่า.....	22
ภาพที่ 2.11 ปริมาณของซิลิกอนเทียบกับความหนาของชั้นอัลลอยที่ได้จากการจุ่มร้อนที่อุณหภูมิ 450 °C โดยทำการเปลี่ยนแปลงเวลาในการจุ่มร้อน (a) ปราบจากชั้นของนิกเกิล (b) ทำการชุบนิกเกิลที่ความหนา 3 ไมครอน ก่อนทำการจุ่มร้อน.....	23

ภาพที่ 2.12 อิทธิพลของ T_{on} บนโครงสร้างจุลภาคที่พื้นผิวของนิกเกิลที่มีความหนา $300 \mu\text{m}$ โดยที่มี T_{off} คงที่ 15 ms ความหนาแน่นของกระแสคงที่ 400 mA/cm^2 a) $T_{on}=1 \text{ ms}$, b) $T_{on}=3 \text{ ms}$, c) $T_{on}=5 \text{ ms}$, d) $T_{on}=8 \text{ ms}$	26
ภาพที่ 2.13 อิทธิพลของ T_{off} บนโครงสร้างจุลภาคที่พื้นผิวของนิกเกิลที่มีความหนา $300 \mu\text{m}$ โดยที่มี T_{on} คงที่ 1 ms ความหนาแน่นของกระแสคงที่ 400 mA/cm^2 a) $T_{off}=5 \text{ ms}$, b) $T_{off}=15 \text{ ms}$, c) $T_{off}=22 \text{ ms}$, d) $T_{off}=32 \text{ ms}$, e) $T_{off}=42 \text{ ms}$	27
ภาพที่ 4.1 รูปแบบการจ่ายกระแสในการชุบนิกเกิลเป็นชั้นรองพื้นด้วยไฟฟ้า ก) กระแสต่อเนื่อง, ข) กระแสพัลส์.....	33
ภาพที่ 4.2 แสดงตัวอย่างของชิ้นงาน ก) แผ่นเหล็กกล้าคาร์บอนรีดเย็น, ข) แผ่นเหล็กเคลือบชั้นรองพื้นนิกเกิลด้วยไฟฟ้า, ค) แผ่นเหล็กชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อน โดยการเคลือบชั้นรองพื้นนิกเกิลด้วยไฟฟ้า.....	34
ภาพที่ 4.3 ภาพตัดขวางของเหล็กชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนโดยการเคลือบนิกเกิลเป็นชั้นรองพื้นด้วยไฟฟ้าจากห้องจุลทรรศน์แบบแสง โดยชั้นรองพื้นนิกเกิลผลิตจากการชุบด้วยไฟฟ้า ก) กระแสต่อเนื่อง และ ข) กระแสพัลส์.....	35
ภาพที่ 4.4 ภาคตัดขวางของชิ้นงานเหล็กโดยการเคลือบนิกเกิลเป็นชั้นรองพื้นด้วยไฟฟ้า ที่ความหนาโดยประมาณ ก) $3 \mu\text{m}$ (H1), ข) $6 \mu\text{m}$ (H2), ค) $9 \mu\text{m}$ (H3) และ ง) $12 \mu\text{m}$ (H4).....	37
ภาพที่ 4.5 ความหนาเฉลี่ยของชั้นรองพื้นนิกเกิลที่ผลิตด้วยไฟฟ้ากระแสพัลส์.....	37
ภาพที่ 4.6 ภาพตัดขวางจากห้องจุลทรรศน์แบบแสงของชิ้นงานเหล็กชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อน โดยการเคลือบชั้นรองพื้นนิกเกิลด้วยไฟฟ้า ในระยะเวลาในการจุ่มร้อน 1 นาที โดยที่ชั้นรองพื้นนิกเกิลมีความหนา ก) H1, ข) H2, ค) H3 และ ง) H4.....	38
ภาพที่ 4.7 โครงสร้างจุลภาคของเหล็กชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อน H4-1m โดยการเคลือบชั้นรองพื้นนิกเกิลด้วยไฟฟ้าจากห้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนนิ่งที่กำลังขยาย 2000 เท่า.....	40
ภาพที่ 4.8 แผนภาพเฟส 3 องค์ประกอบของสังกะสี นิกเกิลและเหล็กที่อุณหภูมิ $450 \text{ }^\circ\text{C}$	41

ภาพที่ 4.9 โครงสร้างจุลภาคของเหล็กชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อน H1-1m โดยการเคลือบ ชั้นรองพื้นนิกเกิลด้วยไฟฟ้า ในกรณีที่ชั้นรองพื้นนิกเกิลเกิดการแพร่ไปสู่สังกะสี หลอมเหลวจนหมดจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนนิ่งที่กำลังขยาย 1000 เท่า.....	42
ภาพที่ 4.10 ความหนาเฉลี่ยของชั้นเคลือบของเหล็กชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อน โดยการเคลือบชั้นรองพื้นนิกเกิลด้วยไฟฟ้าที่ความหนา H1 ถึง H4 และจุ่มร้อนเป็นระยะเวลา 1 นาที.....	43
ภาพที่ 4.11 ภาพตัดขวางจากกล้องจุลทรรศน์แบบแสงของชิ้นงานเหล็กชุบสังกะสี แบบจุ่มร้อนโดยการเคลือบชั้นรองพื้นนิกเกิลด้วยไฟฟ้า ในระยะเวลา ในการจุ่มร้อน ก) 10 วินาที, ข) 1 นาที, ค) 3 นาที และ ง) 6 นาที โดยที่ชั้นรองพื้นนิกเกิลมีความหนา H2.....	44
ภาพที่ 4.12 โครงสร้างจุลภาคของเหล็กชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อน H2-6m โดยการเคลือบ ชั้นรองพื้นนิกเกิลด้วยไฟฟ้า ในกรณีที่ชั้นรองพื้นนิกเกิลเกิดการแพร่ไปสู่ สังกะสีหลอมเหลวจนหมดจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนนิ่ง ที่กำลังขยาย 1000 เท่า.....	45
ภาพที่ 4.13 ความหนาเฉลี่ยของชั้นเคลือบของเหล็กชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนโดยการ เคลือบชั้นรองพื้นนิกเกิลด้วยไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงระยะเวลาในการจุ่มร้อน ในช่วง 10 วินาทีถึง 6 นาที.....	47
ภาพที่ 4.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของชั้นเคลือบต่อระยะเวลา ในการชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อน.....	48
ภาพที่ 4.15 ความหนาของชั้นรองพื้นนิกเกิลที่เปลี่ยนแปลงไปตามระยะเวลาในการ ชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อน.....	50
ภาพที่ 4.16 ลักษณะทางกายภาพของชิ้นงานเหล็กชุบสังกะสีโดยวิธีดั้งเดิมที่จุ่มร้อน เป็นระยะเวลา 1 นาที ก) ชิ้นงานก่อนทดสอบการตัดโค้ง ข) ชิ้นงานภายหลัง ทดสอบการตัดโค้ง ค) ภาพขยายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง.....	51
ภาพที่ 4.17 ลักษณะทางกายภาพของชิ้นงานเหล็กชุบสังกะสีโดยการเคลือบชั้นรองพื้นนิกเกิล ด้วยไฟฟ้า H4-1m ก) ชิ้นงานก่อนทดสอบการตัดโค้ง ข) ชิ้นงานภายหลัง ทดสอบการตัดโค้ง ค) ภาพขยายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง.....	52

ภาพที่ 4.18 ภาพตัดขวางของชิ้นงานเหล็กชุบสังกะสีโดยวิธีดั้งเดิมที่จุ่มร้อนเป็นเวลา 1 นาทีหลังจากตัดโค้งทำมุม 90 องศาที่ระนาบเดิม ก) และ	
ข) ส่วนที่ได้รับแรงอัด ค) และ ง) ส่วนที่ได้รับแรงดึง.....	53
ภาพที่ 4.19 ภาพตัดขวางของชิ้นงานเหล็กชุบสังกะสีโดยวิธีดั้งเดิมที่จุ่มร้อนเป็นเวลา 1 นาทีหลังจากตัดโค้งคั่นสู่ตำแหน่งเดิม ก)และข)ส่วนที่ได้รับแรงอัด	
ค) และ ง) ส่วนที่ได้รับแรงดึง.....	54
ภาพที่ 4.20 ภาพตัดขวางของชิ้นงานเหล็กชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนโดยการเคลือบ	
ชั้นรองพื้นนิกเกิลด้วยไฟฟ้า H4-1m ภายหลังจากตัดโค้งทำมุม 90 องศา	
ที่ระนาบเดิม ก)และข)ส่วนที่ได้รับแรงอัด ค) และ ง) ส่วนที่ได้รับแรงดึง.....	56
ภาพที่ 4.21 ภาพตัดขวางของชิ้นงานชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนโดยการเคลือบชั้นรองพื้น	
นิกเกิลด้วยไฟฟ้า H4-1m ภายหลังจากตัดโค้งคั่นสู่ตำแหน่งเดิม	
ก)และข)ส่วนที่ได้รับแรงอัด ค) และ ง) ส่วนที่ได้รับแรงดึง.....	57
ภาพที่ 4.22 ลักษณะทางกายภาพของชิ้นงานเหล็กชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนโดยวิธีดั้งเดิม	
และโดยการเคลือบชั้นรองพื้นนิกเกิลด้วยไฟฟ้า H1, H2, H3 และ H4	
โดยกำหนดระยะเวลาในการชุบสังกะสี 1 นาที ภายหลังจากการทดสอบ	
ความคงทนต่อไอเกลือที่ระยะเวลา ก) 0, ข) 100, ค) 550, ง)1100 และ	
จ) 1400 ชั่วโมง.....	58
ภาพที่ 4.23 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของสนิมเหล็กต่อระยะเวลาใน	
การทดสอบความคงทนต่อละอองน้ำเกลือของชิ้นงานเหล็กชุบสังกะสี	
แบบจุ่มร้อนโดยการเคลือบชั้นรองพื้นนิกเกิลด้วยไฟฟ้า	
และโดยวิธีดั้งเดิม.....	61
ภาพที่ 4.24 กราฟโพลาริเซชันของชิ้นงานแผ่นเหล็กชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนโดยการ	
เคลือบชั้นรองพื้นนิกเกิลด้วยไฟฟ้า H2-1m ที่ถูกเก็บไว้ใน	
สารละลายเกลือ 5% เป็นระยะเวลา 0-3 สัปดาห์	
ด้วยเทคนิคโพเทนชิโอดนามิกส์.....	63
ภาพที่ 4.25 กราฟ potential-time plot ของชิ้นงานแผ่นเหล็กชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนโดย	
การเคลือบชั้นรองพื้นนิกเกิลด้วยไฟฟ้า H2-1m ด้วยเทคนิคกัลวานอสแตติกใน	
สารละลายโซเดียมคลอไรด์ 5% โดยน้ำหนัก โดยมีค่ากระแสคงที่ 3 มิลลิแอมป์	
ต่อตารางเซนติเมตร.....	65

ภาพที่ 4.26 กราฟ potential-time plot ของชั้นงานแผ่นเหล็กชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนโดย การเคลือบชั้นรองพื้นนิกเกิลด้วยไฟฟ้า H2-1m ด้วยเทคนิคกัลวานอสแตติกใน สารละลายโซเดียมคลอไรด์ 5% โดยน้ำหนัก โดยมีค่ากระแสคงที่ที่ 3 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตรเป็นระยะเวลาต่างๆ.....	66
ภาพที่ 4.27 กราฟโพลาริเซชันของชั้นงานแผ่นเหล็กชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนโดยการ เคลือบชั้นรองพื้นนิกเกิลด้วยไฟฟ้า H2-1m ด้วยเทคนิคโพเทนชิโอดนามิกส์ ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 5% โดยน้ำหนัก (ดูภาพที่ 4.26 ประกอบ).....	68
ภาพที่ ข.1 ภาพตัดขวางจากกล้องจุลทรรศน์แบบแสงของชั้นงาน H2-10s.....	76
ภาพที่ ข.2 ภาพตัดขวางจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนนิ่งและ การวิเคราะห์ธาตุประกอบในแต่ละเฟสด้วยการวิเคราะห์การกระจาย พลังงานของชั้นงาน H2-10s.....	76
ภาพที่ ข.3 ภาพตัดขวางจากกล้องจุลทรรศน์แบบแสงของชั้นงาน H1-1m.....	77
ภาพที่ ข.4 ภาพตัดขวางจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนนิ่งและ การวิเคราะห์ธาตุประกอบในแต่ละเฟสด้วยการวิเคราะห์การกระจาย พลังงานของชั้นงาน H1-1m.....	77
ภาพที่ ข.5 ภาพตัดขวางจากกล้องจุลทรรศน์แบบแสงของชั้นงาน H2-1m.....	78
ภาพที่ ข.6 ภาพตัดขวางจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนนิ่งและ การวิเคราะห์ธาตุประกอบในแต่ละเฟสด้วยการวิเคราะห์การกระจาย พลังงานของชั้นงาน H2-1m.....	78
ภาพที่ ข.7 ภาพตัดขวางจากกล้องจุลทรรศน์แบบแสงของชั้นงาน H3-1m.....	79
ภาพที่ ข.8 ภาพตัดขวางจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนนิ่งและ การวิเคราะห์ธาตุประกอบในแต่ละเฟสด้วยการวิเคราะห์การกระจาย พลังงานของชั้นงาน H3-1m.....	79
ภาพที่ ข.9 ภาพตัดขวางจากกล้องจุลทรรศน์แบบแสงของชั้นงาน H4-1m.....	80
ภาพที่ ข.10 ภาพตัดขวางจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนนิ่งและ การวิเคราะห์ธาตุประกอบในแต่ละเฟสด้วยการวิเคราะห์การกระจาย พลังงานของชั้นงาน H4-1m.....	80
ภาพที่ ข.11 ภาพตัดขวางจากกล้องจุลทรรศน์แบบแสงของชั้นงาน H2-3m.....	81

ภาพที่ ข.12 ภาพตัดขวางจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนนิ่งและ การวิเคราะห์ธาตุประกอบในแต่ละเฟสด้วยการวิเคราะห์การกระจาย พลังงานของชิ้นงาน H2-3m.....	81
ภาพที่ ข.13 ภาพตัดขวางจากกล้องจุลทรรศน์แบบแสงของชิ้นงาน H2-6m.....	82
ภาพที่ ข.14 ภาพตัดขวางจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนนิ่งและ การวิเคราะห์ธาตุประกอบในแต่ละเฟสด้วยการวิเคราะห์การกระจาย พลังงานของชิ้นงาน H2-6m.....	82
ภาพที่ ข.15 ภาพตัดขวางจากกล้องจุลทรรศน์แบบแสงของชิ้นงานเหล็กชุบสังกะสี แบบจุ่มร้อนโดยการเคลือบนิกเกิลเป็นชั้นรองพื้นด้วยไฟฟ้ากระแสตรงเนื่องจาก ระยะเวลาในการจุ่มร้อน 1 นาที.....	83
ภาพที่ ค.1 จำลองการแพร่ของชั้นรองนิกเกิลตามระยะเวลาในการจุ่มร้อนที่ เปลี่ยนแปลงไปจาก t1 ถึง t3.....	85

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การเคลือบด้วยสังกะสีเป็นกระบวนการหนึ่งที่นิยมใช้เพื่อเพิ่มสมบัติความต้านทานต่อการกัดกร่อนให้แก่เหล็กกล้า โดยวิธีนี้มีจุดเด่นหลายด้านตัวอย่างเช่น 1. มีต้นทุนการผลิตที่ไม่สูงมากหากเปรียบเทียบกับกรรมวิธีในการเคลือบด้วยวัสดุและวิธีการอื่นๆ 2. มีค่าใช้จ่ายในการซ่อมบำรุงและค่าใช้จ่ายในระยะยาวต่ำ 3. สามารถมีอายุการใช้งานที่ยาวนานมากกว่า 50 ปีในสภาวะสิ่งแวดล้อมปกติ และ 10-30 ปีในสิ่งแวดล้อมที่มีการกัดกร่อนสูง 4. ชั้นเคลือบสังกะสีมีการยึดเกาะกับเนื้อเหล็กที่ดีเนื่องจากเกิดพันธะโลหะกับพื้นผิว 5. ชั้นเคลือบสังกะสีเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม 6. กระบวนการเคลือบสามารถทำได้รวดเร็ว[1] การเคลือบด้วยสังกะสีนั้นสามารถเพิ่มสมบัติการป้องกันการกัดกร่อนของโลหะได้โดย 2 กรรมวิธีคือเป็นชั้นป้องกัน (Barrier protection) และการป้องกันทางแคโทดิก (Cathodic protection) ในส่วนของชั้นป้องกันนั้นการเคลือบด้วยสังกะสีจะช่วยแยกเหล็กออกจากการกัดกร่อนจากสิ่งแวดล้อมซึ่งสังกะสีจะถูกกัดกร่อนก่อนที่สิ่งแวดล้อมจะเข้าถึงเนื้อเหล็ก ส่วนการป้องกันทางแคโทดิกนั้นสังกะสีจะมีความเป็นแอนโอดมากกว่าเหล็กที่สภาวะทั่วไปและจะจ่ายกระแสอิเล็กตรอนเพื่อยับยั้งการเสียอิเล็กตรอนของส่วนที่มีแนวโน้มเป็นขั้วแอนโอดในเหล็กโดยหยุดขั้นตอนปฏิกิริยา $Fe \rightarrow Fe^{2+} + 2e^-$ และทำให้กระบวนการเกิดสนิมยุติลงจึงเป็นการปกป้องชั้นเนื้อเหล็กแม้ว่าจะมีเหล็กบางส่วนไหลออกมาสู่สภาพแวดล้อมจากการถูกตัดหรือขีดข่วนของชั้นเคลือบบ้างก็ตาม[2] ซึ่งการชุบเคลือบด้วยสังกะสีนี้ได้ถูกนำไปใช้ในอุตสาหกรรมยานยนต์, เครื่องใช้ไฟฟ้าครัวเรือนและในการก่อสร้าง

ในการเคลือบด้วยสังกะสีนั้นสามารถทำได้หลายกระบวนการ โดยกระบวนการที่นิยมใช้กันได้แก่การชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อน, การพ่นเคลือบด้วยเปลวความร้อน, การยัดด้วยซีเมนต์/ฟลูอิโดสแต็บและการชุบด้วยไฟฟ้า[3] สำหรับการชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนเป็นการจุ่มชิ้นเหล็กลงในเตาหลอมสังกะสีนั้นเป็นกระบวนการที่นิยมใช้กันมากที่สุดเนื่องจากกระบวนการไม่ซับซ้อนสามารถทำได้ง่ายและรวดเร็ว ปัจจุบันวิธีการนี้ได้มีนำมาประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมยานยนต์และการก่อสร้างมากขึ้น ดังนั้นการพัฒนาระบบการชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อน เพื่อให้เหล็กชุบสังกะสีมีสมบัติและคุณภาพที่ดีจึงมีความสำคัญ ในส่วนของสมบัติเชิงกลของวัสดุนั้นเป็นที่ทราบกันดีว่าในกระบวนการชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนจะเกิดการแพร่ระหว่างเหล็กและสังกะสีเกิดขึ้นเป็นชั้นเคลือบเฟสซีตา (ζ), เดลตา (δ) และ แกมมา (Γ)[4] หรือที่เรียกว่าชั้นเคลือบอินเทอร์มีเดียต

(intermediate) โดยที่แต่ละชั้นเคลือบ intermediate ของเหล็กชุบสังกะสีที่เกิดขึ้นมีความสำคัญเป็นอย่างมากเนื่องจากชั้นเฟสที่เกิดขึ้นต่างก็มีสมบัติเชิงกลที่แตกต่างกันไป โดยปกติแล้วชั้นงานเหล็กชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนจะมีชั้นเคลือบ intermediate ที่มีความหนามาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีของเหล็กกล้าซิลิคอนซึ่งปฏิกิริยาระหว่างเหล็กและสังกะสีสามารถเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็วเป็นพิเศษซึ่งความหนาของชั้นเฟส intermediate นี้บางครั้งก็นำไปสู่ปัญหาการหลุดร่อนของชั้นเคลือบเนื่องจากความแข็งแรงเปราะของเฟสแกมมา (Γ) ที่เกิดขึ้นแสดงให้เห็นว่าการที่ได้ชั้นเคลือบที่มีความหนามากก็มีผลเสียเช่นกันและปัญหานี้ไม่สามารถแก้ไขได้ด้วยการลดระยะเวลาในการจุ่มร้อน [5-8] จากงานวิจัยของ S. Ueda et. al ได้แสดงข้อคิดเห็นว่าชั้นเฟสซีตา (ζ) ที่เป็นเฟส intermediate ด้านบนสุดดังหัวข้อ 2.1.3 นั้นเป็นปัจจัยที่ทำให้เกิดการเสียรูปถาวรของแผ่นเหล็กในอุตสาหกรรมยานยนต์ เนื่องจากเฟสซีตา (ζ) ที่เป็นชั้นเฟสด้านนอกนั้นมีความอ่อนตัวและเกิดการเสียรูปถาวรได้ ดังนั้นจึงเป็นจุดด้อยในแง่ของสมบัติเชิงกลในขณะที่ ชั้นเฟสเดลตา (δ_p) และ (δ_k) ซึ่งเป็นเฟสด้านในนั้นมีความแข็งแรงและเป็นชั้นที่เหมาะสมที่สุดที่ควรจะเป็นเฟสบนสุด[9] อีกทั้งการที่ชั้นงานเหล็กชุบสังกะสีนั้นมีความหนาของชั้นเคลือบที่มากก็ส่งผลต่อการใช้ปริมาณสังกะสีที่เกินความจำเป็นเช่นกัน ซึ่งปัญหานี้ก็ได้รับความสนใจและมีการพัฒนาแก้ไขมาโดยตลอด ตัวอย่างเช่น การเติมธาตุบางชนิดเช่นอลูมิเนียม, ตะกั่ว, นิกเกิล, ทองแดง, ดีบุกในปริมาณน้อยในสังกะสี หลอมเหลวซึ่งจะเพิ่มประสิทธิภาพในการหน่วงการเติบโตของชั้น intermediate ผลที่ได้ นอกเหนือจากการลดความหนาของชั้นเคลือบลงแล้วยังส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงต่อโครงสร้างจุลภาคของชั้นเคลือบอีกด้วย[10-12]

จากปัญหาที่กล่าวมาเพื่อที่จะควบคุมส่วนประกอบของพื้นผิวที่เหมาะสมที่สุดเพื่อให้ได้ความหนา,สมบัติเชิงกลและสมบัติความต้านทานการกัดกร่อนของชั้นเคลือบสังกะสีที่ดีนั้นจำเป็นต้องมีความเข้าใจถึงปรากฏการณ์ถ่ายโอนของเหล็ก, สังกะสีและธาตุที่เติมลงไป ในงานวิจัยของ N. Pistofidis et. al [13] และ Y. Boonyongmaneerat et. al[14] ได้แสดงให้เห็นถึงอิทธิพลของการเติมนิกเกิลที่มีต่อการลดความหนาของชั้นเคลือบสังกะสีของเหล็กโดยงานวิจัยนี้เป็นการชุบเหล็กด้วยน้ำยาประสานที่มีส่วนผสมของนิกเกิล แต่อย่างไรก็ตามงานวิจัยนี้ไม่ได้ศึกษาไปถึงเฟส intermediate ที่เกิดขึ้นและการพัฒนาของเฟส intermediate ในระบบโลหะผสมของเหล็กนิกเกิลและสังกะสีอีกทั้งนิกเกิลที่เป็นส่วนประกอบน้ำยาประสานก็สามารถที่จะแพร่ออกไปสู่สังกะสีหลอมเหลวในระหว่างการจุ่มร้อนได้อย่างรวดเร็วจึงทำให้วิธีนี้ไม่มีประสิทธิภาพเท่าที่ควร ส่วนงานวิจัยของ S.M.A. Shibli, R. Manu [15] และ C. Chunshan et. al [16] ได้แสดงให้เห็นถึงขนาดของชั้นงานเหล็กชุบสังกะสีที่มีความหนาลดลงจากการเคลือบด้วยชั้นรองพื้นนิกเกิลก่อนที่จะนำไปชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อน และอธิบายถึงอิทธิพลของการเคลือบชั้นรองพื้นนิกเกิลว่าการที่มี

นิกเกิลเป็นเฟสของแข็งระหว่างเหล็กและสังกะสีจะช่วยในการลดอัตราการแพร่ของเหล็กและสังกะสีที่เป็นเฟสของแข็งกับของเหลว ซึ่งอัตราการแพร่ที่รวดเร็วนั้นทำให้เกิดเฟสซีตา (ζ) เป็นจำนวนมากซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้ชิ้นงานที่ได้มีความหนา นอกจากนี้ยังคาดได้ว่าชั้นรองพื้นนิกเกิลจะเกิดเป็นอัลลอยกับสังกะสีและช่วยในการปรับปรุงชั้นเคลือบให้มีสมบัติต้านทานการกัดกร่อนได้ดีขึ้นด้วย ตัวอย่างเช่นในกรณีของการสังกะสี-นิกเกิลด้วยไฟฟ้าในงานวิจัยของ L. Anicai et.al[17] ได้แสดงให้เห็นว่าการที่มีนิกเกิลเป็นองค์ประกอบ 8-14 wt.% นำไปสู่การเพิ่มความต้านทานการกัดกร่อนได้สูงถึง 5 เท่าเมื่อเทียบกับสังกะสีและอัตราการกัดกร่อนของอัลลอยจะลดลงเมื่อมีนิกเกิลเป็นองค์ประกอบมากขึ้น[18-19]

ดังนั้นแนวคิดของงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นการศึกษาเพื่อลดขนาดของชั้นเคลือบสังกะสีควบคู่ไปกับการศึกษาการพัฒนาของเฟส intermediate ที่เปลี่ยนแปลงไปตามระยะเวลาในการชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อน รวมถึงผลกระทบต่อสมบัติการยึดเกาะของชั้นเคลือบต่อเนื้อเหล็กและสมบัติความต้านทานการกัดกร่อนของชิ้นงาน โดยในงานวิจัยนี้จะทำการชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนโดยการเคลือบชั้นรองพื้นนิกเกิลด้วยไฟฟ้าและเปรียบเทียบระหว่างอิทธิพลของชั้นรองพื้นนิกเกิลที่ผลิตขึ้นจากการให้กระแสไฟฟ้ากระแสต่อเนื่องและกระแสพัลส์ที่มีผลต่อชั้น intermediate ของชิ้นงานที่ได้ จากนั้นจึงศึกษาการพัฒนาของเฟส intermediate โดยมีการปรับเปลี่ยนตัวแปรการผลิตที่สำคัญ 2 ตัวคือความหนาของชั้นรองพื้นนิกเกิลและระยะเวลาในการชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนซึ่งจะมีผลโดยตรงต่อโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน รวมถึงการศึกษาสมบัติของชิ้นงานซึ่งได้แก่ความสามารถในการยึดเกาะของชั้นเคลือบที่ผลิตขึ้นต่อเนื้อพื้นเหล็กและสมบัติความต้านทานการกัดกร่อนอันเป็นผลที่เกี่ยวข้องเนื่องมาจากตัวแปรในการผลิตและโครงสร้างจุลภาคอีกด้วย

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาตัวแปรในการผลิตชั้นรองพื้นนิกเกิลที่จะส่งผลต่อโครงสร้างจุลภาคและเฟสต่าง ๆ ที่เปลี่ยนแปลงไปของเหล็กชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนโดยมีการเคลือบชั้นรองพื้นนิกเกิลด้วยการชุบไฟฟ้า

2. เพื่อศึกษาการพัฒนาของโครงสร้างจุลภาคและเฟสต่างๆของชิ้นงานตามระยะเวลาในการชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนที่เพิ่มขึ้น

3. เพื่อศึกษาความสามารถในการยึดเกาะของชั้นเคลือบบนผิวเหล็กและสมบัติความต้านทานต่อการกัดกร่อนซึ่งสัมพันธ์กับโครงสร้างจุลภาคและเฟสต่างๆที่เกิดขึ้น

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1. อุณหภูมิของบ่อสังกะสีหลอมเหลวตลอดงานวิจัยนี้จะกำหนดไว้ที่ 450 °C และทำการชุบสังกะสีแบบเป็นกะ

2. ศึกษาเฉพาะอิทธิพลของธาตุนิกเกิลที่มีผลต่อการเติบโตของชั้น intermediate ที่เกิดขึ้น

3. ศึกษาเฉพาะปริมาณของนิกเกิลและเวลาในการชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนที่เกี่ยวข้องกับความหนาของชั้นเคลือบสังกะสี

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถอธิบายถึงผลของตัวแปรของชั้นรองพื้นนิกเกิล ที่มีต่อโครงสร้างทางจุลภาคและเฟสของชั้น intermediate ที่เปลี่ยนแปลงไปรวมถึงความสามารถในการยึดเกาะของชั้นเคลือบผิวเหล็กและสมบัติความต้านทานต่อการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นได้

2. สามารถนำความรู้ที่ได้จากการศึกษาไปประยุกต์ใช้ในการทำนายและควบคุมโครงสร้างจุลภาคที่สัมพันธ์กับเวลาในการจุ่มร้อนเพื่อผลิตชิ้นงานที่เหมาะสมต่อการใช้งานได้

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2 การศึกษาข้อมูลเบื้องต้น

2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ในส่วนนี้จะแสดงถึงทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวข้องโดยต่อเนื่องกับการชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อน ได้แก่ เฟสไดอะแกรมของเหล็กกับสังกะสี เฟสที่เกิดขึ้นจากกระบวนการชุบสังกะสีโดยวิธีทั่วไปและคุณสมบัติเฉพาะของแต่ละเฟสนั้นๆ และทฤษฎีในเรื่องของการชุบไฟฟ้า

2.1.1 สังกะสี

สังกะสีเป็นโลหะสีขาวปนน้ำเงินถูกค้นพบครั้งแรกในปี พ.ศ. 2289 โดยนักเคมีชาวเยอรมันที่ค้นพบสังกะสีบริสุทธิ์ สังกะสีมีจุดหลอมเหลวที่ต่ำ มีสมบัติเชิงกลคือเป็นโลหะที่มีความอ่อนที่อุณหภูมิปกติ มีความเหนียวต่ำและความแข็งแรงสามารถดึงยืดได้น้อยเนื่องจากมีโครงสร้างผลึกเป็นรูปหกเหลี่ยม แหล่งที่พบสังกะสีมากของโลกอยู่ที่ประเทศออสเตรเลีย ประเทศในทวีปเอเชีย และประเทศสหรัฐอเมริกา สำหรับในประเทศไทยแหล่งที่มีการพัฒนาเหมืองแร่สังกะสีและมีกำลังผลิตมากที่สุดในประเทศอยู่ที่บริเวณผาแดง อำเภอแม่สอด จังหวัดตากและแหล่งตะกั่ว-สังกะสีบ้านสองห้อง อำเภอทองผาภูมิ จังหวัดกาญจนบุรี แร่สังกะสีมักพบร่วมกับแร่ตะกั่วโดยสังกะสีที่พบจะอยู่ในรูปของสารประกอบหลายรูปแบบซึ่งมีทั้งซัลไฟด์ ออกไซด์ ซัลเฟต ซิลิเกต และคาร์บอนเนต แต่แร่สังกะสีที่สำคัญและนำมาใช้ในการถลุงโลหะสังกะสีได้แก่ สังกะสีซัลไฟด์ (ZnS)

ประโยชน์และการนำไปใช้ของสังกะสีเนื่องจากสังกะสีมีความต้านทานการกัดกร่อนที่ดีในสภาวะสิ่งแวดล้อมทั่วไปอีกทั้งยังเป็นธาตุที่จัดอยู่ในกลุ่มก่อกองปฏิกิริยาได้ดี (Reactive metal) อยู่ในอันดับท้ายกลุ่มซึ่งประกอบด้วย อะลูมิเนียม ไทเทเนียม และแมกนีเซียม จึงมักนำมาใช้ในการเคลือบผิวเหล็กเพื่อเพิ่มสมบัติความต้านทานการกัดกร่อนหรือป้องกันการเกิดสนิมของเหล็ก เนื่องจากสังกะสีมีความไวต่อการทำปฏิกิริยากับออกซิเจนมากกว่าเหล็กและสามารถเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันเป็นชั้นปกป้องของออกไซด์และคาร์บอนเนต $(Zn_5(OH)_6(CO_3)_2)$ ก่อนจนกระทั่งสังกะสีถูกกัดกร่อนไปจนหมด ในการชุบด้วยสังกะสีสามารถเคลือบได้หลายวิธีเช่นการชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนในอ่างสังกะสีซึ่งเป็นกระบวนการหลักที่มีการนำไปใช้ของสังกะสีมากที่สุด การเคลือบโดยไฟฟ้าเคมีและโดยการพ่น การนำไปใช้อื่นๆเช่นการผลิตแบตเตอรี่เนื่องจากสังกะสีมีศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนที่ต่ำซึ่งอยู่ที่ -0.76 โวลต์จึงเหมาะแก่การนำไปทำเป็นขั้วแอโนดของแบตเตอรี่ หรือใช้ในอุตสาหกรรมโลหะทองเหลืองซึ่งใช้สังกะสีเป็นโลหะผสมกับทองแดง นอกจากนี้จากจุดหลอมเหลวที่ต่ำของสังกะสีจึงนิยมใช้ในงานหล่อโลหะเช่นกันโดยมักผสมทองแดง อะลูมิเนียมหรือแมกนีเซียมปริมาณเล็กน้อยเป็นโลหะผสมเพื่อให้สามารถนำมาหล่อเป็นรูปทรงต่างๆ ได้ง่าย และคงขนาด

แม่นยำ จึงใช้มากในอุตสาหกรรมหล่อผลิตภัณฑ์ เช่น คาร์บูเรเตอร์ มือจับประตู บานพับประตูของเด็กเล่น เป็นต้น [20]

คุณสมบัติทั่วไปของสังกะสี

คุณสมบัติทางฟิสิกส์

น้ำหนักอะตอม	65.38 g/mol
ระบบผลึก(Crystal Structure)	HCP
ความหนาแน่น (อุณหภูมิห้อง)	7.14 g/cm ³
อุณหภูมิหลอมเหลว	692.68 K (419.53 °C, 787.15 °F)
อุณหภูมิกลายเป็นไอ	1180 K (907 °C, 1665 °F)
ความร้อนจำเพาะ (25°C)	25.470 J·mol ⁻¹ ·K ⁻¹
ความร้อนแฝงของการหลอมละลาย	7.32 kJ/ mol
ความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอ	123.6 kJ·mol ⁻¹
สัมประสิทธิ์การขยายตัว(25°C)	30.2 μm·m ⁻¹ ·K ⁻¹
ความต้านทานไฟฟ้า (20°C)	59.0 nΩ·m
สภาพตัวนำความร้อน (25°C)	116 W·m ⁻¹ ·K ⁻¹

2.1.2 นิกเกิล

นิกเกิลเป็นโลหะที่มีความมั่นคงด้านราคาเงินถูกค้นพบครั้งแรกในปี พ.ศ. 2294 ในประเทศรัสเซียโดยประเทศที่มีปริมาณของนิกเกิลมากพอที่จะใช้ในเชิงพาณิชย์นั้นมีเพียงไม่กี่ประเทศได้แก่ รัสเซีย, แคนาดา, อินโดนีเซีย, จีน, พม่าและฟิลิปปินส์ โดยนิกเกิลที่พบตามธรรมชาติจะอยู่ในรูปของนิกเกิลซัลไฟด์ซึ่งปนอยู่กับแร่ทองแดง โคบอลต์ และแร่โลหะที่อยู่ในกลุ่มของแพลทินัม กลุ่มประเทศที่มีความต้องการนิกเกิลเป็นกลุ่มประเทศในทวีปยุโรปและเอเชีย นิกเกิลมีสมบัติการนำไฟฟ้าและการนำความร้อนที่ต่ำ, มีความต้านทานต่อการสึกกร่อนที่ดีและมีสมบัติความต้านทานการกัดกร่อนที่สูงจึงนิยมใช้นิกเกิลเป็นโลหะในการชุบด้วยไฟฟ้า นิกเกิลถูกนำไปใช้ในงานชุบโลหะ เช่นการผลิตเหรียญ, การผลิตแม่เหล็ก รวมไปถึงการผลิตเครื่องใช้สอย เป็นต้น,[20]

คุณสมบัติทั่วไปของนิกเกิล

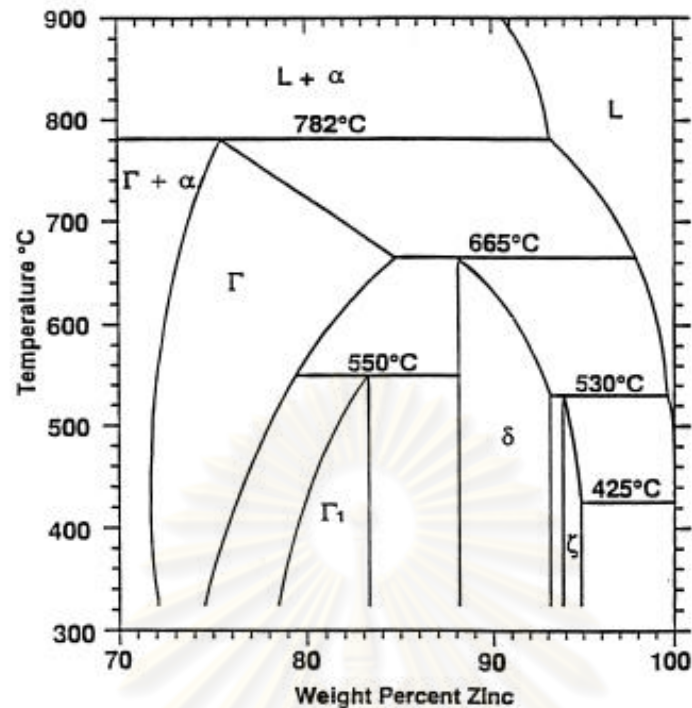
คุณสมบัติทางฟิสิกส์

น้ำหนักอะตอม	58.69 g/mol
ระบบผลึก(Crystal Structure)	FCC
ความหนาแน่น (อุณหภูมิห้อง)	8.89g/cm ³
อุณหภูมิหลอมเหลว	1728 K (1455 °C, 2651 °F)
อุณหภูมิกลายเป็นไอ	3186 K (2913 °C, 5275 °F)
ความร้อนจำเพาะ (25°C)	26.07 J·mol ⁻¹ ·K ⁻¹
ความร้อนแฝงของการหลอมละลาย	17.48 kJ·mol ⁻¹
ความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอ	377.5 kJ·mol ⁻¹
สัมประสิทธิ์การขยายตัว(25°C)	13.4 μm·m ⁻¹ ·K ⁻¹
ความต้านทานไฟฟ้า (20°C)	69.3 nΩ·m
สภาพตัวนำความร้อน (25°C)	90.9 W·m ⁻¹ ·K ⁻¹

2.1.3 แผนภูมิสมดุลของเหล็กกับสังกะสี

คำอธิบายอย่างย่อของเฟส intermediate แต่ละชั้นที่เกิดขึ้นในเหล็กชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนจะเรียงลำดับจากปริมาณของเหล็กที่เพิ่มขึ้นในแต่ละเฟส

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาพที่ 2.1 แผนผังระบบสององค์ประกอบของเหล็กและสังกะสีในบริเวณที่มีปริมาณของสังกะสีเป็นส่วนมาก

1. เฟสซีตา (zeta, ζ)

เฟสซีตา (ζ), FeZn_{13} , จะมีปริมาณของเหล็กเป็นองค์ประกอบอยู่ในช่วง 5-6 wt% เกิดจากปฏิกิริยาเพอริเทกติกระหว่างเฟสเดลตา (δ) และสังกะสีที่หลอมเหลวที่อุณหภูมิ $530 \pm 10 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ซึ่งถูกค้นพบในระหว่างงานศึกษาการควบคุมการแพร่ในระบบที่ไม่มีธาตุอะลูมิเนียม พบว่าเฟสซีตา (ζ) เกิดขึ้นระหว่างชั้นสังกะสีเฟสเอตา (eta, η) และเฟสเดลตา(δ) เฟสซีตา (ζ) นั้นเป็นผลึกที่มีรูปร่างพื้นฐานเหมือนกัน (isomorphous) โดยเป็นยูนิทเซลล์แบบโมโนคลินิกซึ่งมีโครงสร้างอะตอมที่มีอะตอมของเหล็กล้อมรอบด้วย 12 อะตอมของสังกะสีที่จุดยอดของไอโคซาดรอน (icosahedrons) ที่มีความบิดเบี้ยวเล็กน้อย โดยแต่ละไอโคซาดรอนจะเชื่อมเข้าด้วยกันเป็นและรวมเข้าด้วยกันเป็นโครงสร้างเฮกซะโกนอล

2. เฟสเดลตา (delta, δ)

เฟสเดลตา (δ), FeZn_{10} , จะมีปริมาณของเหล็กเป็นองค์ประกอบอยู่ในช่วง 7.0-11.5 wt% โครงสร้างเป็นยูนิทเซลล์เฮกซะโกนอลซึ่งเกิดจากปฏิกิริยาเพอริเทกติกอีกปฏิกิริยาหนึ่งของเฟสแกมมา (Γ) และสังกะสีที่หลอมเหลวที่อุณหภูมิ $665 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ในอดีตเฟสเดลตา (δ) ถูกแบ่งออกเป็น 2 โครงสร้างทางจุลภาคคือ เดลตา 1P, โครงสร้างที่เรียกว่า Palisade จะพบในฝั่งที่มีสังกะสีมาก

และ เดลตา 1K ซึ่งเป็นโครงสร้างที่แน่นกว่าจะพบในฝั่งที่มีเหล็กมากกว่าและจะพบมากสำหรับการชุบสังกะสีเป็นเวลานาน (4 ชั่วโมง) และอุณหภูมิสูง (553 °C) แต่ก็พบว่าโครงสร้างทางจุลภาคของทั้งสองมีโครงสร้างผลึกเหมือนกัน ปัจจุบันจึงจัดเป็นชนิดเดียวกันคือเฟสเดลตา (δ)

3. เฟสแกมมา 1 (gamma 1, Γ 1)

เฟสแกมมา 1 (Γ 1), $\text{Fe}_5\text{Zn}_{21}$, จะมีโครงสร้างเป็นลูกบาศก์แบบเฟซเซ็นเตอร์มีปริมาณของเหล็กเป็นองค์ประกอบอยู่ในช่วง 17-19.5 wt% ที่อุณหภูมิ 450 °C เกิดจากปฏิกิริยาเพอริเทกตอยด์ ระหว่างเฟสแกมมา (Γ) และเฟสเดลตา (δ) ที่อุณหภูมิ 550 ± 10 °C เฟสแกมมา 1 (Γ 1) เป็นชั้นที่ไม่ได้รับการรบกวนระหว่างเฟสแกมมาและเดลตา สามารถผลิตขึ้นได้ระหว่างการให้อุณหภูมิต่ำเป็นช่วงระยะเวลาสั้น เฟสแกมมานั้นจัดว่าเป็นชั้นที่มีความแข็งในระดับไม่ใคร่มากที่สุดดังที่รายงานไว้ในตารางที่ 2.1

4. เฟสแกมมา (gamma, Γ)

เฟสแกมมา (Γ), $\text{Fe}_3\text{Zn}_{10}$, มีโครงสร้างเป็นลูกบาศก์แบบบอดีเซ็นเตอร์และมีปริมาณของเหล็กเป็นองค์ประกอบอยู่ในช่วง 23.5-28.0 wt% ที่อุณหภูมิ 450 °C เฟสนี้เกิดจากปฏิกิริยาเพอริเทกติก ที่ 782 °C ระหว่างเหล็ก α และสังกะสีหลอมเหลว [1]

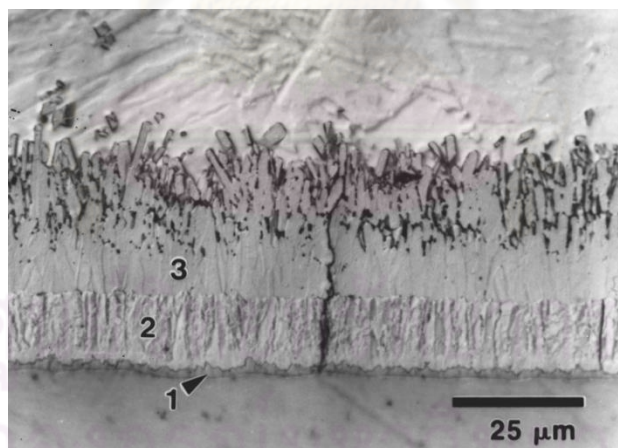
ตารางที่ 2.1 ลักษณะของเฟสที่เกิดในโลหะผสมของเหล็กและสังกะสี [1]

Phases	Formula	Crystal structure	VHN (25 mg)	VHN (25g)
αFe	$\text{Fe}(\text{Zn})$	BCC	104	86
Γ	$\text{Fe}_3\text{Zn}_{10}$	BCC	326	-
Γ_1	$\text{Fe}_5\text{Zn}_{21}$	FCC	505	-
δ	FeZn_{10}	Hexagonal	358	273
ζ	FeZn_{13}	Monoclinic	208	118
ηZn	$\text{Zn}(\text{Fe})$	HCP	52	41

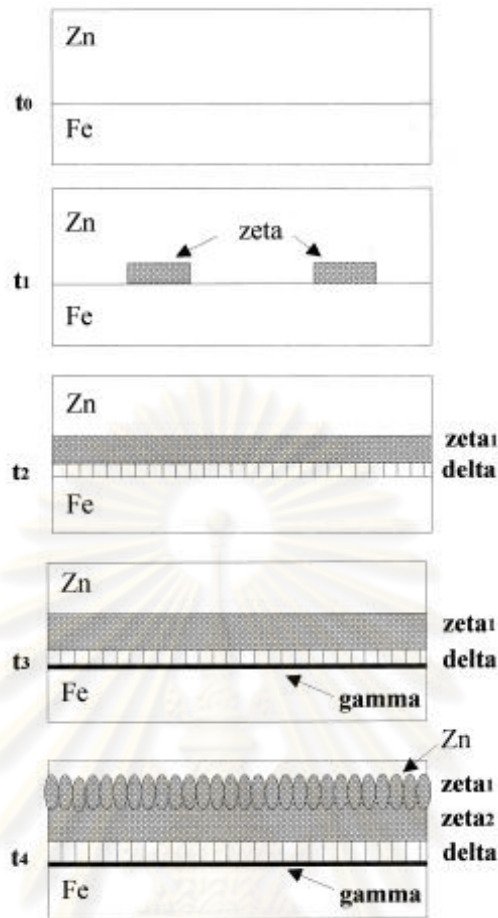
โดยอัตราการโตของชั้น intermediate จะแสดงด้วยสมการอัตราการโต power law ดังสมการ $Y = Kt^n$ โดยที่ Y คือความหนาของชั้นเคลือบ, K คือค่าคงที่ของอัตราในการโต, t คือระยะเวลาในการจุ่มร้อน, n คือค่าคงที่ของอัตราในการโตกับเวลา ซึ่งหากพิจารณาชั้นอัลลอยทุกชั้นโดยรวมแล้ว exponent จะอยู่ที่ 0.5 โดยที่ $n = 0.2-0.5$ สำหรับเฟสแกมมา (Γ), $n = 0.58-0.64$ สำหรับชั้นเฟส delta (δ) และ $n = 0.2-0.3$ สำหรับชั้นเฟสซีตา (ζ) ซึ่งจากค่าเลขชี้กำลังที่ต่างกันไปของแต่ละชั้นเฟสแสดงถึงว่าแต่ละชั้น intermediate มีอัตราการโตที่แตกต่างกัน [2]

2.1.4 การเกิดเฟสของเหล็กและสังกะสี

เมื่อเหล็กถูกจุ่มลงในสังกะสีที่หลอมเหลว ณ อุณหภูมิปกติที่ใช้ในการกล้าไนซ์ (450-490 °C) จากเฟสไดอะแกรมของเหล็กและสังกะสีจะเห็นได้ว่าชั้นที่เกิดควรเป็นไปตามลำดับดังนี้: เหล็ก α ที่มีสังกะสีอิ่มตัว, เฟสแกมมา (Γ), เฟสแกมมา 1 (Γ_1), เฟสเดลตา (δ), เฟสซีตา (ζ) และเฟสเอตา (η) แต่อย่างไรก็ตามลำดับในการเกิดนิวเคลียสหลักของเฟสเหล็กและสังกะสีที่เกิดขึ้นจริงคือที่ผิวรอยต่อจะเริ่มด้วยเฟสซีตา (ζ), เฟสเดลตา (δ) และหลังจากเวลาบ่มเพาะจะเกิดเฟสแกมมา (Γ) ดังในภาพที่ 2.2 ซึ่งเป็นภาพที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์แบบแสง ชั้นของเฟสแกมมา (Γ) จะมีความบางมากซึ่งชั้นนี้ถูกพิจารณาว่ามีทั้งเฟส Γ และ Γ_1 การพัฒนาของชั้นเฟสของเหล็กและสังกะสีนั้นได้ถูกแสดงไว้เป็นแผนผังดังภาพที่ 2.3



ภาพที่ 2.2 โครงสร้างระดับจุลภาคของชั้นเคลือบสังกะสี ที่เกิดขึ้นหลังจากการจุ่มร้อนเป็นเวลา 300 วินาที ณ อุณหภูมิ 450 °C (1) เฟสแกมมา (Γ), (2) เฟสเดลตา (δ), (3) เฟสซีตา (ζ) [1]



ภาพที่ 2.3 แผนผังของการเกิดขึ้นเฟสของเหล็กและสังกะสีในเตาหลอมกัลวานไนซ์ 0.00 wt% อะลูมิเนียม-สังกะสี, t_0 หมายถึงระยะเวลาเริ่มต้นและการพัฒนาของชั้นเฟสเกิดขึ้นตามเวลา t_0 , t_1 , t_2 , t_3 และ t_4 ตามลำดับ[21]

โดยที่ลำดับของปฏิกิริยานั้นจะเกิดขึ้นตามเวลาที่ดำเนินไป เวลาเริ่มต้นจะแสดงที่ t_0 และการพัฒนาของเฟสจะดำเนินไปตามเวลา $t_0 < t_1 < t_2 < t_3 < t_4$ ในการศึกษาบนตัวเนื้อเหล็ก (0.003 wt% C, 0.258 wt% Mn พบว่าเฟสซีตา (ζ) นั้นเกิดเป็นนิวเคลียสผลึกทันทีจากนั้นจึงตามมาด้วยการเกิดเฟสเดลตา (δ) ที่ผิวรอยต่อของเหล็ก α กับเฟสซีตา (ζ) ยังไม่มีการยืนยันชัดเจนเกี่ยวกับระยะเวลาที่จะเริ่มเกิดเฟสซีตา (ζ) หรือ เฟสเดลตา (δ) ซึ่งเฟสทั้งสองจะพบเป็นชั้นยาวต่อเนื่องหลังจากการจุ่มลงในสังกะสีเป็นเวลา 5 วินาที ในทางกลับกันเฟสแกมมา (Γ) จะถูกพบที่เวลา t_3 หลังจากเวลาดำเนินไปแล้ว 30 วินาที

โครงสร้างจุลภาคโดยทั่วไปสำหรับการชุบสังกะสีบริสุทธิ์จะแสดงดังภาพ โดยในแต่ละเฟสจะถูกยืนยันโดยการทดสอบด้วยการวิเคราะห์ด้วยอิเล็กตรอน (EPMA) ของปริมาณของเหล็ก เฟส ($\Gamma + \Gamma_1$) นั้นจะเห็นเป็นชั้นบางๆโดยมีชั้นรอยต่อระหว่างผิวเหล็กและชั้นเฟสเดลตา (δ) ที่ราบเรียบ

ในส่วนของเดลตา (δ) จะมีโครงสร้างจุลภาคเป็นคอลัมน์าร์ ซึ่งเป็นผลจากการที่มีแนวโน้มในการโตในแนวตั้งฉากกับผิวรอยต่อในทิศทาง (0001) ของระนาบฐานของโครงสร้างแบบเฮกซะโกนอลหลังจากนั้นจะเกิดรอยแตกตลอดแนวระนาบฐานของเฟสเดลตา (δ) ซึ่งจะสามารถขยายไปสู่ชั้นของเฟสซีตา (ζ) ด้านบนและเฟสแกมมา ($\Gamma + \Gamma_1$) ที่ด้านล่างได้ เฟสซีตา (ζ) นั้นมีสองชั้นซึ่งจะขึ้นอยู่กับความอิมพัลล์ของเหล็กในสังกะสีหลอมเหลว เช่นเดียวกับเฟสเดลตา (δ), เฟสซีตา (ζ) นั้นมีโครงสร้างจุลภาคแบบคอลัมน์าร์ซึ่งอิมพัลล์ด้วยเหล็ก การโตอย่างต่อเนื่องของผลึกเหล่านี้เกิดขึ้นค่อนข้างมากกว่าการเกิดผลึกใหม่ของเฟสเดลตา(δ) อย่างไรก็ตามหากสังกะสีหลอมเหลวนั้นอิมพัลล์ด้วยเหล็กและยังมีความสามารถเพียงพอในการเกิดผลึกใหม่ ผลึกของเฟสเดลตา(δ) มากมายที่มีขนาดเล็กสามารถเกิดในสังกะสีหลอมเหลวได้และจะถูกแยกกันอยู่จากการเย็นตัวของเฟสเอตา (η) [1, 21]

2.1.5 กระบวนการชุบสังกะสีด้วยวิธีการจุ่มร้อน

วิธีการจุ่มร้อนนั้นเป็นวิธีที่ใช้กันมากกว่าร้อยปีแล้วและสามารถทำได้ทั้งกระบวนการผลิตแบบเป็นกะ หรือกระบวนการผลิตแบบต่อเนื่อง โดยขั้นตอนที่สำคัญประกอบด้วยสองขั้นตอนหลักคือขั้นตอนการเตรียมชิ้นงาน ซึ่งโลหะหรือเหล็กที่จะถูกกัลวาไนซ์ต้องมีผิวที่สะอาด จากนั้นจึงตามด้วยการจุ่มลงในสังกะสีหลอมเหลวที่จะเคลือบชิ้นงานด้วยฟิล์มที่มีความยึดเกาะที่ดี กระบวนการโดยทั่วไปนิยมใช้กระบวนการผลิตแบบเป็นกะ โดยวิธีนี้สามารถใช้กับชิ้นงานได้หลากหลายรูปแบบและถ้าเป็นชิ้นส่วนประกอบก็สามารถแยกทำทีละชิ้นได้ มีช่วงเวลาในการผลิตที่สั้น สิ่งที่ต้องพิจารณาคือลดการปฏิบัติงานแบบทำด้วยมือให้ลดน้อยที่สุด โดยทั่วไปกระบวนการชุบสังกะสีด้วยวิธีการจุ่มร้อนจะแบ่งออกเป็นขั้นตอนหลักๆ ได้ดังนี้

2.1.5.1 การทำความสะอาด

ประสิทธิภาพของกระบวนการนี้ขึ้นอยู่กับ การเตรียมผิวและทำความสะอาดชิ้นงานเป็นอย่างมาก เพื่อให้เกิดการเข้ากระทำที่รวดเร็วและสม่ำเสมอของสังกะสีหลอมเหลว จึงเป็นเรื่องสำคัญที่ออกไซด์และไขมันจะต้องถูกกำจัดเพื่อให้สามารถเกิดอัลลอยได้ทั่วทั้งผิวเหล็ก โดยจะเริ่มจากการกำจัดคราบไขมันก่อน หากชิ้นงานนั้นเกิดสเกลอย่าง มากอาจจำเป็นต้องขัดโดยวิธีการพ่นขัดด้วยเม็ดคัม จากนั้นชิ้นงานจะถูกนำไปจุ่มในน้ำกรดเพื่อทำการกำจัดฟิล์มของออกไซด์ กรดไฮโดรคลอริก (โดยประมาณ 14 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)[22]

2.1.5.2 การใช้น้ำยาประสาน

หลังจากแช่ในน้ำกรดแล้วชิ้นงานจะปราศจากสเกลและฟิล์มออกไซด์ ชิ้นงานจะถูกล้างในน้ำที่มีการไหลผ่านแล้วจึงทำการเคลือบด้วย น้ำยาประสานของซิงค์แอมโมเนียมคลอไรด์

($ZnCl_2 \cdot 3NH_4Cl$) อุณหภูมิของน้ำยาชุบประสานนิยมใช้ตั้งแต่อุณหภูมิห้องถึง $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ โดยวิธีการชุบน้ำยาประสานนั้นมี 2 วิธีคือการชุบแบบแห้งและชุบแบบเปียก

ในการชุบแบบแห้งนั้นหลังจากที่ชิ้นงานได้ถูกทำความสะอาดแล้วจะนำไปจุ่มลงในสารละลายของน้ำยาประสานและจำเป็นต้องนำไปอบให้แห้งในเตาอบก่อนจะส่งไปยังเตาหลอมสังกะสี สภาวะในการอบแห้งจะอยู่ที่ประมาณ $120\text{ }^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 5 นาทีแต่ไม่ควรเกินกว่า $150\text{ }^{\circ}\text{C}$

ในขณะที่ชุบน้ำยาประสานแบบเปียกเมื่อน้ำยาประสานเกิดการสลายตัวชิ้นงานสำเร็จจะสามารถเกิดรอยปะทุของสังกะสีได้จากการจุ่มแบบเปียก ดังนั้นจึงมักนิยมใช้การชุบผ่านผ้าที่มีน้ำยาประสานที่อยู่เหนือเตาหลอมสังกะสีก่อนเพื่อกำจัดสิ่งปนเปื้อนออกจากผิวเหล็กเพื่อให้ผิวที่จะทำการจุ่มร้อนปราศจากออกไซด์ จำเป็นต้องมีการเติมขี้เถ้าหรือไขเพื่อลดการฟุ้งของฟุ้งจากการจุ่มลงในสังกะสีแต่วิธีนี้จะมีขั้นตอนน้อยกว่าแบบแห้งใช้อุปกรณ์และใช้พื้นที่น้อยกว่า เพราะเป็นการกวาดตังนั้นโดยปกติแล้วเมื่อชิ้นงานถูกดึงออกจะมีความหนาที่บางกว่าการชุบแบบแห้งและน้ำยาประสานที่ติดออกมาจะถูกเอาออกในขณะที่จุ่มในน้ำชุบ (quenching) โดยผ้าชุบน้ำยาประสานมีหน้าที่ดังนี้

- เพื่อทำความสะอาดผิวของชิ้นงานเพื่อที่เหล็กและสังกะสีหลอมเหลวจะสามารถทำปฏิกิริยากันได้
- เพื่อกวาดชิ้นงานในระหว่างถอนชิ้นงานขึ้นทำให้ได้ชั้นเคลือบที่บางลง
- เพื่อลดอันตรายจากการปะทุของสังกะสีหลอมเหลวเมื่อชิ้นงานที่เปียกถูกจุ่มลงไป
- เพื่อลดการเกิดออกซิเดชันที่ผิวของสังกะสีหลอมเหลวและลดการเกิดขี้เถ้า
- เพื่อป้องกันการไหม้หรือได้รับความร้อนสูงเกินจากการจุ่มร้อนของชิ้นงานขนาดใหญ่หรือการชุบสังกะสีรอบที่สอง (“double dipping”)
- เพื่อลดการบิดเบือนของชิ้นงานโดยการให้ความร้อนส่วนหนึ่งแก่ชิ้นงานก่อน [23]

2.1.5.3 การกลวไนซ์

เตาหลอมสังกะสีจะต้องถูกรักษาอุณหภูมิที่ $450\text{--}470\text{ }^{\circ}\text{C}$ เนื่องจากความบริสุทธิ์ของสังกะสีไม่มีผลมากนักดังนั้นจึงมักใช้สังกะสีเกรดที่มีความบริสุทธิ์ไม่มากเช่น G.O.B. หรือ Prime Western ซึ่งมีตะกั่วเป็นส่วนผสม 1.2-1.6 เปอร์เซ็นต์ ค่าการละลายของตะกั่วที่อุณหภูมินี้อยู่ที่ 1.2 เปอร์เซ็นต์ ปริมาณที่เกินกว่านี้จะอยู่ที่ก้นของเตาช่วยปกป้องเตาจากการถูกกระทำของสังกะสีและช่วยในการกำจัดกากสังกะสี ค่าการละลายของเหล็กที่อุณหภูมินี้้น้อยกว่า 0.02 เปอร์เซ็นต์ หากมีเหล็กปริมาณมากกว่านี้จะทำให้เกิดกากสังกะสีซึ่งส่วนมากประกอบด้วย $FeZn_7$ ซึ่งเกิดจากเหล็ก 4-5 เปอร์เซ็นต์ ส่วนสารปนเปื้อนอื่นๆในสังกะสีเช่นทองแดงหรือแคดเมียมมีผลเล็กน้อย การใส่ดีบุกหรือแอนติโมนี (0.001 เปอร์เซ็นต์) บางครั้งช่วยให้ควบคุมให้เกิดขนาดผลึกที่ต้องการของชั้น

เคลือบสังกะสีและทำให้เกิดเป็นดอกสังกะสี (spangle) อะลูมิเนียมนั้นบางครั้งถูกใส่ในปริมาณน้อย (0.005 เปอร์เซ็นต์) เพื่อลดการเกิดออกไซด์ (ash) บนผิวบนที่สัมผัสอากาศของสังกะสี หลอมเหลวในเตาหลอมและช่วยเพิ่มความเงางาม[22]

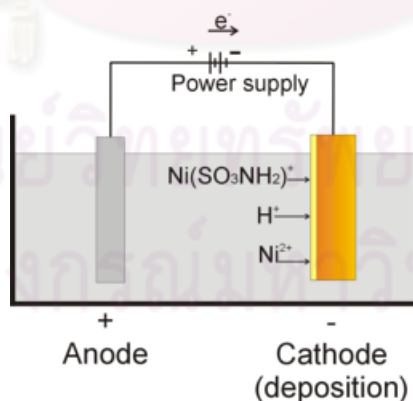
2.1.6 หลักการเบื้องต้นของการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า

ตัวนำไฟฟ้าคือวัสดุที่ประกอบด้วยประจุไฟฟ้าที่สามารถเคลื่อนที่ได้ แบ่งออกได้เป็นสองพวกคือ

พวกที่หนึ่ง เป็นตัวนำไฟฟ้าที่ประกอบด้วยประจุไฟฟ้าที่สามารถเคลื่อนที่ได้เมื่อได้มีความต่างศักย์เกิดขึ้น โดยประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนที่นี้ก็คือกระแสไฟฟ้า ตัวนำไฟฟ้าประเภทนี้จะไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีแต่เป็นเพียงสะพานเพื่อให้ไฟฟ้าผ่านได้เท่านั้น เช่นโลหะต่างๆและแกรไฟต์

พวกที่สอง เป็นตัวนำไฟฟ้าอิเล็กโทรไลต์ (Electrolytes) ซึ่งเป็นสารที่ประกอบด้วยไอออนอิสระสามารถนำไฟฟ้าได้ด้วยตัวมันเอง ตัวอย่างเช่นสารละลายไอออนิก

เมื่อผ่านกระแสไฟฟ้าเข้าไปในสารละลายของอิเล็กโทรไลต์ที่ดังภาพที่ 2.4 โลหะที่ต้องการชุบในขั้วแอโนดจะถูกออกซิไดส์ให้เป็นแคตไอออนที่มีประจุบวกและแคตไอออนเหล่านี้จะไปเข้าร่วมกับแอนไอออนในสารละลายอิเล็กโทรไลต์และในที่สุดจะถูกรีดิวส์ไปเป็นโลหะที่เคลือบอยู่บนโลหะที่ขั้วแคโทด ในขณะที่เกิดการแยกสลายในสารละลายอิเล็กโทรไลต์นั้นจะไม่เห็นการเปลี่ยนแปลงใดๆในสารละลาย แต่ปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นให้เห็นได้ที่บริเวณขั้วอิเล็กโทรดทั้งสอง ตัวอย่างเช่นในสารละลายของอิเล็กโทรไลต์บางชนิดที่มีการใช้แผ่นขั้วพลาทินัมเป็นขั้วบวกและลบ เมื่อต่อแผ่นขั้วทั้งสองเข้ากับให้ครบวงจรและมีการจ่ายกระแสไฟฟ้า จะพบว่ามีฟองแก๊สออกซิเจนเกิดขึ้นที่ขั้วบวก และมีฟองแก๊สไฮโดรเจนเกิดขึ้นที่ขั้วลบเป็นต้น [24]



ภาพที่ 2.4 แผนผังของการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า

2.1.6.1 กฎการแยกสลายด้วยไฟฟ้าของฟาราเดย์

ความสัมพันธ์เชิงปริมาณที่มีพื้นฐานมาจากการงานวิจัยทางไฟฟ้าเคมีของ ไมเคิล ฟาราเดย์ ในปี ค.ศ. 1834 เมื่อกระแสไฟฟ้าไหลผ่านสารละลายอิเล็กโทรไลต์โดยทางแคโทดและแอโนด โลหะ

จะละลายจากแอนไอออน และจะได้โลหะเกาะจับที่แคโทด โดย ฟาราเดย์ ได้ตั้งกฎความสัมพันธ์ระหว่างปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นที่ขั้วทั้งสอง, ปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ใช้และระยะเวลาที่กระแสไฟฟ้าไหลผ่านไว้ดังนี้

กฎข้อที่หนึ่งของการแยกสลายด้วยไฟฟ้า น้ำหนักของสสารที่เปลี่ยนแปลงไปที่อิเล็กโทรด ในระหว่างการแยกสลายด้วยไฟฟ้านั้นย่อมเป็นสัดส่วนโดยตรงกับปริมาณของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านที่อิเล็กโทรด โดยที่ปริมาณของกระแสไฟฟ้าหมายถึงปริมาณของประจุไฟฟ้าโดยมักตรวจวัดในหน่วยคูลอมบ์ ดังนั้นจากกฎข้อที่ 1 สามารถนำมาใช้ในการหุบโลหะได้โดยควบคุม 2 ตัวแปรคือ กระแสไฟฟ้าและระยะเวลาในการหุบโลหะกล่าวคือในการหุบโลหะที่ให้ปริมาณค่าหนึ่งจะสามารถทำได้ 2 วิธีคือใช้กระแสไฟฟ้ามากแต่ใช้เวลาสั้นๆ กับการใช้กระแสไฟฟ้าน้อยแต่ใช้เวลานานๆก็จะได้ปริมาณโลหะที่ต้องการหุบเท่ากัน

กฎข้อที่สองของการแยกสลายด้วยไฟฟ้า สำหรับปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ให้(ประจุไฟฟ้า)นั้น น้ำหนักของธาตุที่เปลี่ยนแปลงไปที่อิเล็กโทรดจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับน้ำหนักสมมูลย์ของธาตุเหล่านั้น ทำให้ทราบว่าโลหะแต่ละชนิดนั้นมีความสามารถในการแยกสลายด้วยไฟฟ้าไม่เท่ากัน [24]

2.1.6.2 ค่าของ พีเอช (pH Values)

โดยทั่วไปสำหรับน้ำบริสุทธิ์นั้นจะมีค่าพีเอชเป็นกลางโดยที่น้ำ 1 โมเลกุลจะประกอบด้วยไฮโดรเจนไฮโดรเจน 2 อะตอม และออกซิเจน 1 อะตอมและในการแยกสลายด้วยไฟฟ้า น้ำบางส่วนจะสามารถแยกสลายออกได้เป็น ไฮโดรเจน ไอออน และไฮดรอกซิล ไอออนเล็กน้อยดังสมการ $H_2O = H^+ + OH^-$ ส่งผลให้ประสิทธิภาพที่ขั้วแคโทดลดลงเนื่องจากกระแสไฟฟ้าที่ใช้ไป บางส่วนจะไปแยกสลายน้ำ ในขณะที่ประสิทธิภาพที่ขั้วแอโนดยังคงไม่เปลี่ยนแปลงซึ่งความแตกต่างของประสิทธิภาพที่ขั้วทั้งสองนี้เป็นผลให้ภายใต้สภาวะการปฏิบัติการทั่วไปความเข้มข้นของไอออนของโลหะและค่าพีเอชของสารละลายอิเล็กโทรไลต์จะค่อยๆเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาในการหุบนิกเกิดด้วยไฟฟ้า

ค่าพีเอชนั้นมีผลต่อน้ำยาหุบมาก สำหรับการหุบนิกเกิดด้วยไฟฟ้านั้นหากน้ำยาหุบมีสภาพเป็นกรดมากเกินไปหรือมีค่าพีเอชลดลงจะมีผลกระทบต่อความเงาและมีแนวโน้มที่จะเกิดรูพูนขึ้น แต่ถ้ามีค่าพีเอชสูงเกินไปนิกเกิดที่ได้จะมีความยืดหยุ่นต่ำ ดังนั้นการควบคุมค่าพีเอชของสารละลายไว้จึงมีความสำคัญมากซึ่งการลดค่า pH ลงทำได้โดยการเติมกรดซัลฟูริกหรือไฮโดรคลอริก มีข้อสังเกตว่าสารละลายนิกเกิดพิเศษบางชนิดอาจต้องใช้กรดอื่นๆเพื่อลด pH เช่น ซาตินนิกเกิดจะใช้กรดอะซิติก หรือ ซัลฟาเมต นิกเกิด จะใช้กรดซัลฟามิก

ความหนาแน่นของกระแสในการชุบโลหะด้วยไฟฟ้าตามปกติมักจะกำหนดค่าในหน่วยของแอมป์ต่อตารางฟุต หรือแอมป์ต่อตารางเดซิเมตร การคำนวณหาพื้นที่ของชิ้นงานที่จะทำการชุบโลหะงานเพื่อที่จะกำหนดปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ต้องใช้ก็แตกต่างกันออกไป เนื่องจากแต่ละชิ้นงานก็มีพื้นที่ต่าง ๆ กัน ด้วยเหตุนี้กระแสและพื้นที่จึงเป็นสิ่งที่ควรต้องพิจารณาเป็นอันดับแรกเสมอ[25]

2.1.6.3 สารละลายนิเกิลสำหรับการชุบไฟฟ้า

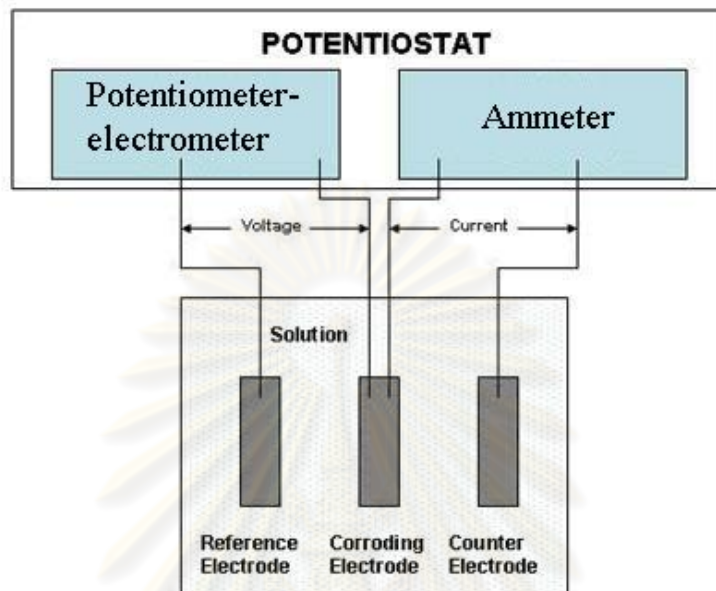
โดยทั่วไปแล้วในการชุบนิกเกิลด้วยไฟฟ้ามักจะใช้สารละลาย Watts-type ซึ่งประกอบด้วยนิเกิล ซัลเฟต ที่เป็นแหล่งของนิเกิลไอออนในการชุบซึ่งนิยมใช้เนื่องจากมีราคาถูก, นิกเกิล คลอไรด์ ที่ใส่เพื่อปรับปรุงการแยกสลายของแอนโนดโดยการทำให้ฟิล์มที่ผิวชิ้นงานแตกออกและเพิ่มค่าการนำไฟฟ้ารวมถึงความสม่ำเสมอของผิวเคลือบ และกรดบอริกเพื่อเพิ่มความเสถียรของ pH ให้อยู่ที่ 4.0 และลดแนวโน้มในการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส ทั้งนี้อาจมีการใช้สารเติมแต่งอีกเล็กน้อยเพื่อลดความเค็มและเพิ่มความเงาของผิวเคลือบที่ชุบด้วยไฟฟ้า

สำหรับสารละลายชนิดอื่น ๆ ที่มีการใช้กันตัวอย่างเช่นสารละลาย “ออล-คลอไรด์” มักจะใช้เมื่อต้องการขนาดเกรนที่ละเอียดมีขนาดสม่ำเสมอและสามารถยึดเกาะกับโลหะพื้นได้ดี สารละลายฟลูออเรตและซัลฟาเมตนั้นมีการใช้เพื่อการใช้งานที่เจาะจงโดยเฉพาะสารละลายอย่างหลังมีข้อได้เปรียบในการชุบไฟฟ้าที่ต้องการอัตราการชุบที่รวดเร็ว[26]

2.1.7 การตรวจสอบพฤติกรรมการกัดกร่อนด้วยกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี

การทดสอบการกัดกร่อนของชิ้นเคลือบที่เกิดขึ้นด้วยกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี กระทำโดยการวัดเส้นโพลาริเซชัน(Polarization curve) ของชิ้นงานทดสอบในสารละลายที่กำหนด เพื่อหาค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน(Corrosion potential; E_{corr}) และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน(Corrosion current density; I_{corr}) ซึ่งการตรวจวัดอัตราการกัดกร่อนและศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน โดยทั่วไปนิยมใช้วิธีการประมาณค่านอกช่วงทาเฟล (Tafel Extrapolation) โดยเทคนิคนี้ใช้ข้อมูลที่ได้จากการวัดแคโทดิกและแอโนดิกโพลาไรเซชัน, โดยเฉพาะอย่างยิ่งข้อมูลทางแคโทดิกโพลาไรเซชันเนื่องจากสามารถทำการทดลองตรวจวัดได้ง่าย ในการตรวจสอบพฤติกรรมการกัดกร่อนสามารถทำได้โดยต่อเซลล์ให้ครบวงจรดังเช่นแผนผังอย่างง่ายดังแสดงในภาพที่ 2.5 จะได้เซลล์กัลวานิก(galvanic cell) ชนิด 3 ขั้ว ประกอบด้วยขั้วไฟฟ้าอ้างอิง(reference electrode; RE) ขั้วไฟฟ้าวัดกระแส(counter electrode; CE) และขั้วไฟฟ้าโลหะทดสอบ(working electrode; WE) โดยชิ้นงานทดสอบที่เป็นโลหะจะทำหน้าที่เป็น working หรือ corroding electrode และกระแสแคโทดิกจะถูกส่งมาที่ชิ้นงานนี้โดยขั้วไฟฟ้าวัดกระแสที่เป็นโลหะที่มีความเฉื่อยเช่นพลาทินัม กระแสจะถูกวัดโดยแอมป์มิเตอร์และศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนจะถูกวัดค่าโดยเทียบกับขั้วไฟฟ้าอ้างอิงโดย

วงจร potentiometer-electrometer ในทางปฏิบัตินั้นค่ากระแสจะเพิ่มขึ้นได้โดยการลดค่าของตัวต้านทานโดยที่ศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนก็จะถูกวัดไปพร้อมๆกัน

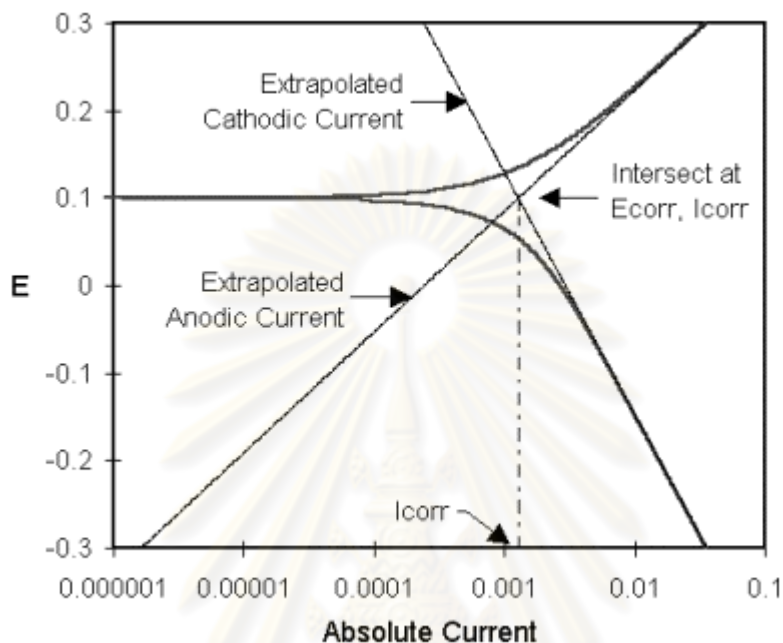


ภาพที่ 2.5 แผนผังอย่างง่ายของเครื่องโพเทนชิโอสแตทที่ใช้วัดเส้นโพลาริเซชัน

เมื่อพิจารณาจากทาลเฟลพลอต (Tafel plot) ของทั้งเส้นแคโทดิก (Cathodic curve) และเส้นแอโนดิก (Anodic curve) ซึ่งจะเป็นการพลอตระหว่างศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนเทียบกับลอการิทึมของกระแสที่จ่ายเข้าไป ดังภาพที่ 2.6 โดยเส้นกราฟที่ได้จะเริ่มไม่เป็นเป็นเส้นตรงที่กระแสต่ำ แต่ที่กระแสที่สูงกว่าเส้นกราฟจะมีความเป็นเส้นตรงบนกราฟเซมิลอการิทึมซึ่งบริเวณที่มีความเป็นเส้นตรงนี้หมายถึงบริเวณทาลเฟล (Tafel region) ในการวัดอัตราการกัดกร่อนจากการตรวจวัดทางโพลาริเซชันนั้น บริเวณทาลเฟลจะถูกประมาณค่านอกช่วงกับแกนศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน และจุดตัดของเส้นประมาณค่านอกช่วงของฝั่งแคโทดิกและแอโนดิกจะแสดงถึงค่า E_{corr} และ I_{corr} ใช้สำหรับวัดค่าอัตราการกัดกร่อน โดยสามารถแปลงค่ากระแสเป็นอัตราการสูญเสียเนื้อโลหะตามกฎของฟาราเดย์ การเปรียบเทียบค่า E_{corr} สามารถใช้ทำนายความสามารถต้านทานการกัดกร่อนแบบสม่ำเสมอของโลหะได้ กล่าวคือหากโลหะมีค่า E_{corr} ที่สูงกว่าโลหะอีกชนิดหนึ่ง โลหะชนิดนั้นจะมีความต้านทานการกัดกร่อนแบบสม่ำเสมอมากกว่าหรือมีเสถียรภาพที่มากกว่า

ข้อดีของวิธีการนี้คือเป็นเทคนิคที่สามารถวัดอัตราการกัดกร่อนที่น้อยมากๆได้และสามารถที่จะติดตามพฤติกรรมของการกัดกร่อนได้อีกทั้งยังสามารถทำได้รวดเร็วและมีความแม่นยำสูง ภายใต้สภาวะในอุดมคติเทคนิคการประมาณค่านอกช่วงทาลเฟลจะมีความแม่นยำที่มากแต่อย่างไรก็ตาม

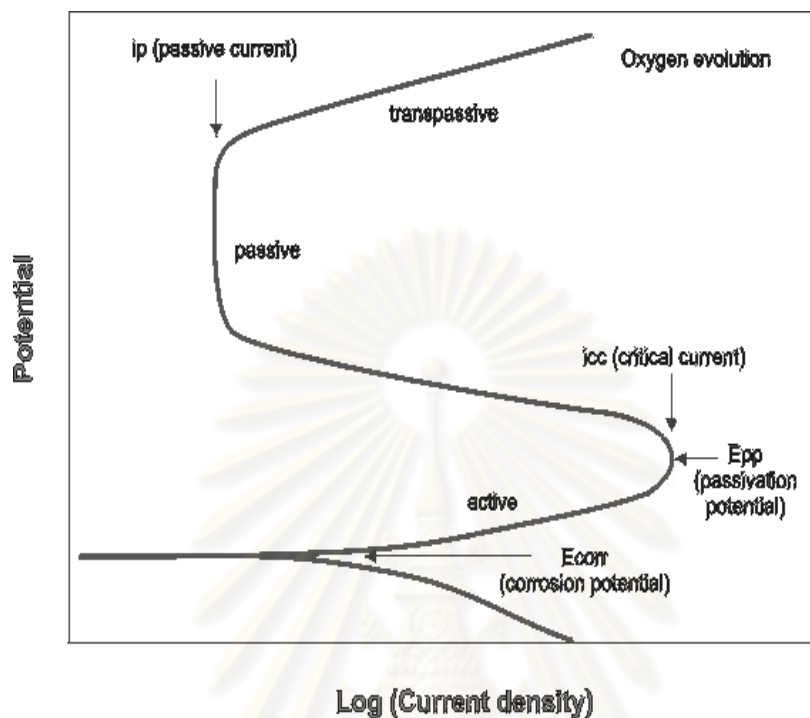
ในหลายๆระบบมักจะเกิดสิ่งรบกวนขึ้นมาเนื่องจากอาจเกิดปฏิกิริยารีดักชันมากกว่า 1 ปฏิกิริยาทำให้ทาเฟลพลอตที่ได้ถูกรบกวนและเส้นกราฟเกิดการบิดเบี้ยว แต่โดยสรุปเทคนิคนี้เป็นวิธีที่นิยมใช้กันทั่วไปเนื่องจากสะดวกและรวดเร็ว



ภาพที่ 2.6 วิธีการหาค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน (E_{corr}) และ อัตราการกัดกร่อน (I_{corr}) จากเส้นโพลาริเซชัน

จากภาพที่ 2.7 เมื่อเพิ่มศักย์ไฟฟ้าให้เกินค่า E_{corr} ค่ากระแสจะเพิ่มขึ้นตามกฎของโอห์ม ซึ่งเส้นโค้งที่เกิดขึ้นนี้เรียกว่าเส้นโค้งแอคทีฟ โดยในช่วงนี้จะเกิดการกัดกร่อนทั่วผิวหน้า (general or uniform corrosion) แต่เมื่อศักย์ไฟฟ้าเพิ่มขึ้นอีกจนถึงจุดหนึ่งจะเห็นได้ว่าค่ากระแสการกัดกร่อนกลับลดลงเนื่องชั้นฟิล์มออกไซด์ป้องกันผิว (protective oxide film) ได้เกิดขึ้นและศักย์ไฟฟ้าที่จุดนี้เป็นศักย์ไฟฟ้าที่เกิดการเปลี่ยนแปลงจากสภาวะวัสดุที่ไม่มีฟิล์มไปเป็นสภาวะเกิดฟิล์มที่ผิว (active-passive transition) หรือที่เรียกว่าศักย์ไฟฟ้าพาสซีเวชันปฐมภูมิ (primary passivation potential; E_{pp}) เมื่อเพิ่มความต่างศักย์ไปเรื่อยๆค่ากระแสก็จะค่อยๆลดลงจนในที่สุดกระแสมีค่าคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงเป็นระยะเวลาหนึ่งซึ่งช่วงกราฟที่กระแสคงที่นี้คือช่วงพาสซีฟ โดยที่โลหะแต่ละชนิดก็จะมีช่วงพาสซีฟที่แตกต่างกันออกไปเป็นลักษณะเฉพาะของโลหะนั้นๆ ซึ่งค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในช่วงพาสซีฟจะเรียกว่า กระแสพาสซีฟ (I_{pass} หรือ I_p) สุดท้ายนี้เมื่อเพิ่มความต่างศักย์ขึ้นอีกจะเข้าสู่ช่วงทรานพาสซีฟ (transpassive zone) คือชั้นฟิล์มปกป้องเกิดการแตกออกส่งผลให้การกัดกร่อนเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วและค่ากระแสการกัดกร่อนเพิ่มขึ้น เรียกศักย์ไฟฟ้าเมื่อชั้นฟิล์มพาสซีฟเริ่มแตกตัวว่า (transpassive potential; E_t) โดยเมื่อถึงจุดนี้การกัดกร่อนมักเกิด

เฉพาะที่ (localized corrosion) โดยเฉพาะการกัดกร่อนแบบรูเข็ม (pitting corrosion) เนื่องจากโครงสร้างจุลภาคของโลหะโดยส่วนใหญ่จะไม่สม่ำเสมอ [27,28]



ภาพที่ 2.7 แสดงส่วนต่างๆ ของเส้นโพลาราไรเซชัน

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องเป็นงานวิจัยที่แสดงถึงกระบวนการลดความหนาชั้นเคลือบของเหล็กชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนและมีสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้น

ในปี 2004, S.M.A. Shibli, R. Manu ได้ศึกษาการเคลือบนิกเกิลด้วยการชุบแบบไม่ใช้ไฟฟ้าที่เวลาในการเคลือบคงที่ตลอดงานวิจัยเป็นเวลา 30 นาทีให้เป็นชั้นนิกเกิลบางๆ ก่อนจะนำไปชุบสังกะสีต่อ ซึ่งเป็นการสนับสนุนต่องานวิจัยที่ผ่านมาถึงการใส่ธาตุผสมบางชนิดคือ แมกนีเซียม, อะลูมิเนียม, นิกเกิลและตะกั่วลงในบ่อสังกะสีจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของชั้นเคลือบทั้งในเรื่องของความทนทานต่อการกัดกร่อน, ความสามารถในการยึดเกาะเนื้อเหล็กของชั้นเคลือบ และสมบัติเชิงกลแต่ในงานศึกษานี้จะเปลี่ยนเป็นการเคลือบนิกเกิลที่ผิวเหล็กแทนการใส่ลงในบ่อชุบสังกะสี

ตารางที่ 2.2 ผลการทดสอบของเหล็กกล้าไนซ์โดยวิธีการจุ่มร้อนโดยที่มีและไม่มีนิกเกิลเป็นชั้นรองพื้น

Coating System	hardness (HVN)	Thickness (μm)	Adhesion
Nickel+zinc-coated coupons	73	30	Better
Pure zinc-coated coupons	57	45	Good

Porosity	Spot weldability	Mean coating weight (g/m^2)
Nonporous	Good	275
Less porous	Good	340

ตารางที่ 2.3 การตรวจสอบด้วยตาเปล่าของแผ่นเหล็กกล้าไนซ์ที่ผ่านการทดสอบด้วยการพ่นละอองเกลือ

Coating system	Number of days of exposure			Self corrosion rate ($\text{g}/\text{cm}^2/\text{h}$)
	5	20	30	
Nickel+zinc-coated coupons	20% WR	90% WR	20% BR	2×10^{-6}
Pure zinc-coated coupons	75% WR	30% BR	80% BR	10×10^{-6}

WR = White rust, BR = Brown rust

Self-corrosion rate based on weight loss during salt spray test

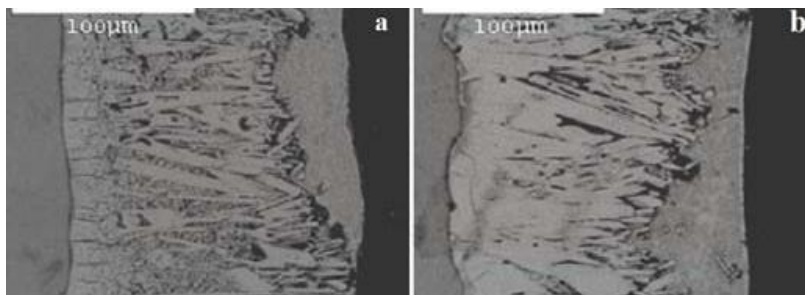
จากผลงานวิจัยก็สรุปให้เห็นว่าการมีนิกเกิลเป็นชั้นที่สุดจะช่วยส่งเสริมการแพร่ของสังกะสีทำให้ชั้นงานมีความหนาลดลง ชั้น intermediate มีความสม่ำเสมอมากขึ้นรูพรุนน้อยลง มีความสามารถในการเชื่อมที่ดี มีการยึดเกาะผิวเหล็กดีไม่หลุดร่อนดังตารางที่ 2 รวมถึงมีอัตราการกัดกร่อนที่ต่ำกว่าเมื่อเทียบกับเหล็กชุบสังกะสีโดยวิธีปกติดังตารางที่ 2.3 ซึ่งการมีนิกเกิลอยู่จะช่วยลดการแทรกซึมของประจุที่มีความรุนแรงเช่น Cl^- และ ClO_4^- [15]

ในปี 2006 N.Pistofidis et. al ได้มีความสนใจเกี่ยวกับน้ำยาประสานที่ใช้ก่อนทำการชุบสังกะสีเนื่องจากในการผลิตเชิงอุตสาหกรรมบ่อชุบน้ำยาประสานสามารถจัดการได้ง่ายกว่าบ่อชุบสังกะสีและเป็นผลดีในทางเศรษฐศาสตร์ ดังนั้นจึงศึกษาผลกระทบของน้ำยาประสานสามชนิดคือ CdCl_2 , NiCl_2 และ SnCl_2 ต่อโครงสร้างทางจุลภาคและกายภาพของเหล็กชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อน โดยมีตัวแปรคือความเข้มข้นของน้ำยาประสานและชนิดของตัวทำละลายคือน้ำกับน้ำยาประสานธรรมดา 50 wt% $\text{ZnCl}_2 \cdot 2\text{NH}_4\text{Cl}$ ดังตารางที่ 4

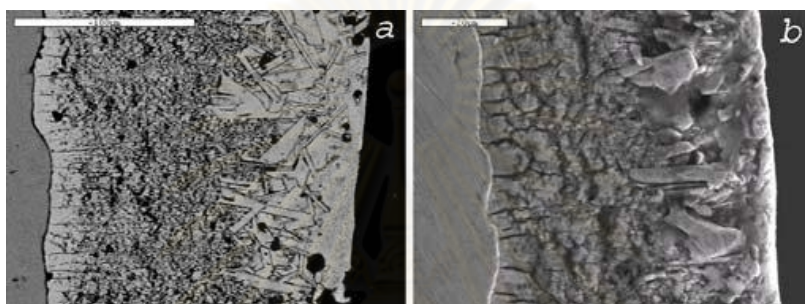
ตารางที่ 2.4 ชนิดของน้ำยาประสาน

Flux No	Salt	Salt concentration (wt.%)	Solvent
1	CdCl_2	30%	Water
2	CdCl_2	2.50%	Normal Flux
3	$\text{CdCl}_2 \cdot 2\text{NH}_4\text{Cl}$	10%	Water
4	NiCl_2	25%	Water
5	NiCl_2	50%	Water
6	NiCl_2	10%	Normal Flux
7	$\text{SnCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	10%	Water

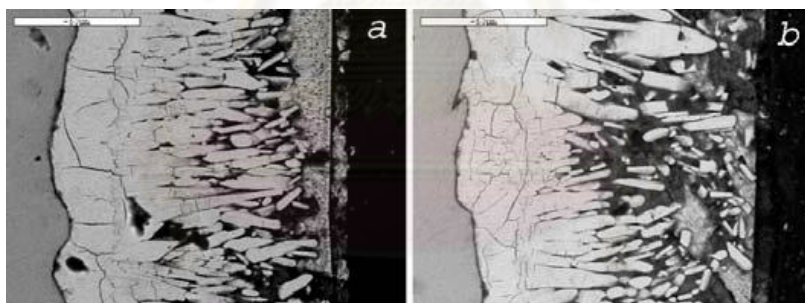
จากผลที่ได้สามารถวิเคราะห์ได้ว่าสำหรับน้ำยาประสาน CdCl_2 โครงสร้างทางจุลภาคของน้ำยาประสานที่มี Cd นั้นให้ผลที่คล้ายกันไม่ว่าที่ความเข้มข้นหรือชนิดของตัวทำละลายอื่น ๆ และคล้ายกับโครงสร้างที่ได้จากน้ำยาประสานทั่วไป ซึ่งข้อสรุปนี้สามารถยืนยันได้จากการวิเคราะห์ด้วย EDS แล้วพบว่าให้เฟสแกมมา, เดลตา, เซตา และ เอตา ที่เหมือนกับระบบเหล็ก-สังกะสี เนื่องจาก Cd และ Zn นั้นเป็นธาตุหมู่เดียวกัน (Group II_B) ดังนั้นพฤติกรรมและสมบัติเคมีจึงคล้ายกัน แต่อย่างไรก็ตามการใช้ CdCl_2 ก็มีข้อดีคือมันมีความสามารถในการกลายเป็นไอได้ยากกว่าน้ำยาประสานทั่วไป สำหรับการใช้น้ำยาประสานนี้เกิดจะให้ผลทางโครงสร้างจุลภาคที่แตกต่างออกไปโดยเฟสซีตาซึ่งจะเกิดผลึกเล็ก ๆ ขึ้นแทนผลึกที่มีลักษณะคล้ายเข็มหรือคอลัมน์ที่เป็นผลึกขนาดใหญ่กว่าที่หลงเหลืออยู่บ้างบริเวณส่วนบนของเฟสซีตา ซึ่งผลึกละเอียดนี้จะขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของ NiCl_2 ในทางกลับกันสำหรับการใช้น้ำยาประสาน SnCl_2 จะมีโครงสร้างจุลภาคคล้ายกับเหล็กที่ใช้น้ำยาประสานธรรมดา จากผลการพิสูจน์ทาง EDS และ XRD รายงานว่าเฟสที่เกิดขึ้นคล้ายกับเหล็กกล้าว่าไนซ์ธรรมดาซึ่งผลก็คือ Sn ดูเหมือนจะไม่มีผลกระทบต่อโครงสร้างของชั้นเคลือบเลย



ภาพที่ 2.8 ภาพถ่ายจาก SEM ของชิ้นงานที่เคลือบด้วยน้ำยาประสาน CdCl_2 ที่ละลายในน้ำและน้ำยาประสานทั่วไป (a) CdCl_2 30% ในน้ำ, (b) CdCl_2 2.5% ในน้ำยาประสานทั่วไป



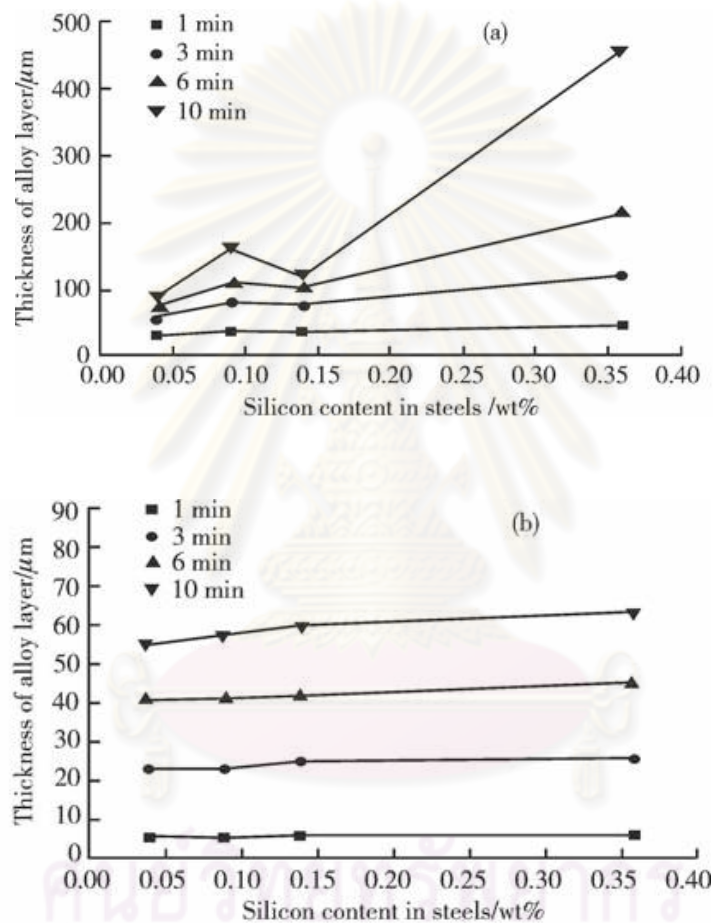
ภาพที่ 2.9 ภาพถ่ายจาก SEM ของชิ้นงานที่เคลือบด้วยน้ำยาประสาน NiCl_2 ที่ละลายในน้ำและน้ำยาประสานทั่วไป (a) NiCl_2 50% (b) NiCl_2 10% ในน้ำยาประสานทั่วไป



ภาพที่ 2.10 ภาพถ่ายจาก SEM ของชิ้นงานที่เคลือบด้วยน้ำยาประสาน NiCl_2 ที่ละลายในน้ำ (a) บริเวณที่มีเฟสซีตาผลึกเล็กกว่า (b) บริเวณที่มีเฟสซีตา ผลึกใหญ่กว่า

ในปี 2007, CHE Chunshan et. al ได้มีความพยายามที่จะยับยั้งอิทธิพลที่ไม่ต้องการของซิลิกอนที่มีต่อความหนาของเหล็กชุบสังกะสี ซึ่งในอดีตก็มีหลายวิธีและกระบวนการที่มีการนำมาใช้แก้ปัญหาแล้วเช่น polygalva, การจุ่มร้อนที่อุณหภูมิสูง และ technigalva ซึ่งในแต่ละวิธีก็มีข้อจำกัดและข้อเสียของมัน วิธีที่นิยมใช้มากที่สุดคือ technigalva ซึ่งเป็นการเติมโลหะผสมของนิกเกิลและสังกะสีลงในบ่อสังกะสีแต่วิธีนี้ทำให้เกิดกากสังกะสีที่บริเวณผิวด้านบนของสังกะสีหลอมเหลวและมีผลเฉพาะกับเหล็กที่มีซิลิกอนน้อยกว่า 0.25 เปอร์เซ็นต์ ในงานวิจัยก่อนหน้านี้ได้มีผู้สนใจศึกษาการเคลือบผิวหน้าของเหล็กด้วยนิกเกิล-ฟอสฟอรัสก่อนด้วยการชุบแบบไม่ใช้ไฟฟ้า

ซึ่งสามารถยับยั้งชั้น intermediate ที่โตเกิน แต่อย่างไรก็ตามวิธีนี้ก็ยังมีข้อจำกัดอยู่ตรงความเสถียรของสารละลายและข้อเสียของนิกเกิล-ฟอสฟอรัสที่มีต่อชั้นเคลือบ จึงนำมาสู่แนวคิดในการทำการเคลือบเหล็กก่อนด้วยนิกเกิลด้วยการชุบไฟฟ้าโดยควบคุมความหนาของนิกเกิลคงที่ตลอดการทดลองที่ 3 μm แล้วจึงชุบน้ำยาประสานที่เป็นสารละลายของ NH_4Cl และ ZnCl_2 จากนั้นจึงนำไปชุบสังกะสี โดยจะทำการเปลี่ยนปริมาณของซิลิกอนในเหล็กที่ทดสอบ และเวลาในการชุบสังกะสี แล้วจึงทำการเปรียบเทียบกับเหล็กที่ชุบสังกะสีด้วยน้ำยาประสานที่ใช้ทั่วไป



ภาพที่ 2.11 ปริมาณของซิลิกอนเทียบกับความหนาของชั้นอัลลอยที่ได้จากการจุ่มร้อนที่อุณหภูมิ $450\text{ }^{\circ}\text{C}$ โดยทำการเปลี่ยนแปลงเวลาในการจุ่มร้อน (a) ปราศจากชั้นของนิกเกิล (b) ทำการชุบนิกเกิลที่ความหนา 3 ไมครอน ก่อนทำการจุ่มร้อน

จากผลการทดลองพบว่าปริมาณของซิลิกอนตั้งแต่ 0.09% - 0.36% นั้นมีผลเพียงเล็กน้อยเมื่อทำการเคลือบเนื้อเหล็กก่อนด้วยนิกเกิล การโตของชั้น intermediate นั้นถูกหน่วงไว้เป็นอย่างดีดังภาพที่ 2.11b) โดยความหนาของทุกชั้นงานต่ำกว่า $60\text{ }\mu\text{m}$ ในขณะที่ ภาพที่ 2.11a) ที่ไม่มีการเคลือบด้วยนิกเกิลนั้นจะมีความหนาของชั้น intermediate กว่ามาก

เมื่อเหล็กที่ไม่มีนิกเกิลเคลือบถูกจุ่มร้อน เฟสแรกที่จะเกิดคือเฟสซีตาเนื่องมาจากเงื่อนไขของความเข้มข้นและการเกิดโครงสร้างและพันธะของอะตอม การเติบโตที่ผิดปกติของชั้นเฟสซีตาเป็นกุญแจสำคัญที่ทำให้เกิดการโตของชั้นเคลือบอย่างรวดเร็วในกรณีของเหล็ก แต่ในกรณีที่เหล็กถูกชุบไฟฟ้าด้วยนิกเกิลก่อนที่จะจุ่มร้อนนั้น, ชั้นเคลือบ intermediate ที่ประกอบด้วยเหล็กและสังกะสีจะไม่เกิดระหว่างเหล็กกับสังกะสีหลอมเหลวแต่จะเกิดระหว่างเหล็กกับโลหะผสมระหว่างเหล็ก-นิกเกิล-สังกะสี เนื่องจากการแพร่ของของแข็งกับของแข็งได้ช้ากว่าการแพร่ระหว่างของแข็งกับของเหลวดังนั้นจะทำให้เกิดเฟสเดลตาซึ่งมีปริมาณของเหล็กมากกว่าเฟสซีตาขึ้นมา ก่อน [14]

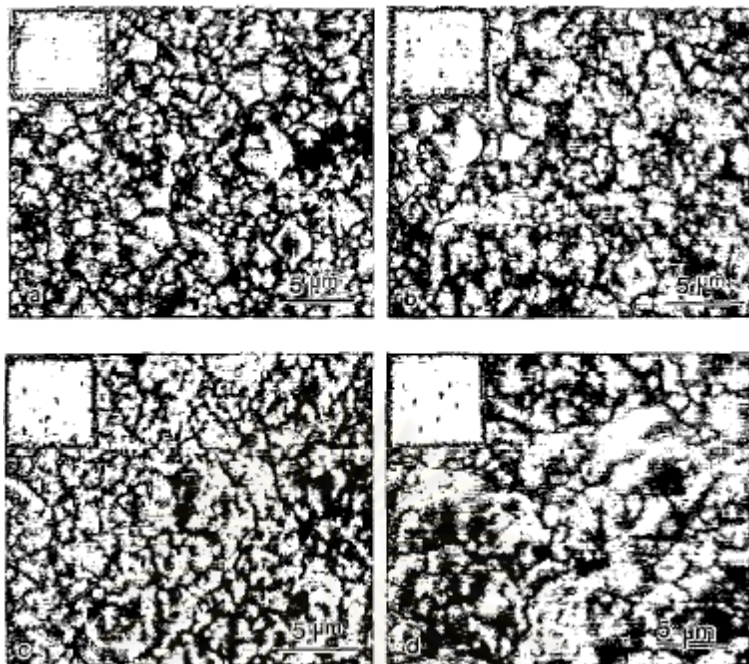
ในปี 1996, A.M. El-Sherik et. al ได้ทำการศึกษาตัวแปรในการชุบนิกเกิลด้วยไฟฟ้าด้วยการจ่ายกระแสไฟแบบพัลส์โดยมีจุดมุ่งหมายเพื่อวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคที่เปลี่ยนแปลงไปของนิกเกิลที่ผลิตด้วยตัวแปรในการชุบไฟฟ้าที่กำหนดไว้ดังตารางที่ 5 ซึ่งตัวแปรที่ผู้วิจัยทำการศึกษาคือ ระยะเวลาในการจ่ายกระแสไฟฟ้า (Pulse on-time, T_{on}), ระยะเวลาในการหยุดจ่ายกระแสไฟฟ้า (Off-time, T_{off}) และความหนาแน่นของกระแส (Peak current density) จากผลที่ได้ในส่วนหนึ่งของระยะเวลาในการจ่ายกระแสไฟฟ้า (Pulse on-time, T_{on}) พบว่าหากค่าของตัวแปรนี้เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้โครงสร้างจุลภาคที่พื้นผิวของชิ้นงานไม่เรียบ เกิดตามด (pitting) ที่ผิวมากขึ้นตามระยะเวลาของ T_{on} ที่เพิ่มขึ้นดังแสดงในภาพที่ 2.12 ซึ่งเชื่อว่าการเกิดตามดเหล่านี้เป็นผลมาจากฟองของก๊าซไฮโดรเจนที่ยังคงติดที่ผิวของวัสดุที่ทำหน้าที่เป็นคาโทด โดยที่ฟองก๊าซเหล่านี้จะเกิดมากขึ้นตามระยะเวลาในการจ่ายกระแสไฟฟ้าที่ยาวนานขึ้น

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.5 ขอบเขตของตัวแปรในการชุบไฟฟ้ากระแสพัลส์ในงานวิจัยของ A.M. El-Sherik et. al

Pulse parameters	T _{on} (ms)	T _{off} (ms)	Current density, (mA/cm ²)		Duty cycle (%)	Plating time (min)
			J _p	J _m		
Pulse on-time	1	15	400	25	6	194
	3	15	400	68	17	71
	5	15	400	100	25	48
	8	15	400	140	35	35
Off-time	1	5	400	68	14	71
	1	15	400	25	6	194
	1	22	400	17	4	215
	1	32	400	12	3	403
Peak current density	1	42	400	9	2	537
	1	15	400	25	6	194
	1	15	800	75	6	64
	1	15	1600	100	6	48

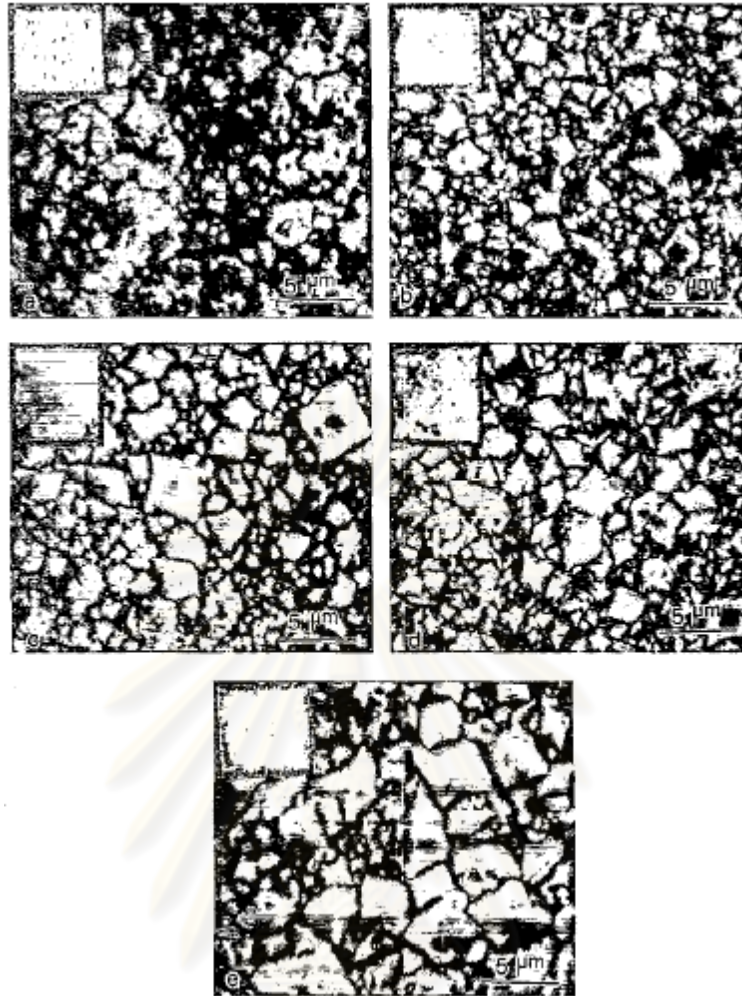
สำหรับระยะเวลาในการหยุดจ่ายกระแสไฟฟ้า (Off-time, T_{off}) พบว่ารูพรุนที่เกิดจากก๊าซไฮโดรเจน นั้นเกิดมากที่สุดที่ T_{off} ที่น้อยที่สุดคือ 5 ms ดังภาพที่ 2.13 a) ซึ่งในกรณีนี้สามารถอธิบายได้ว่า off-time เป็นระยะเวลาที่สั้นเกินไปในการที่จะเติมเต็ม Ni²⁺ cation ไปสู่ผิวที่เป็นแคโทดเป็นผลให้เกิด การลดลงของความเข้มข้นของแคตไอออนที่ pulsating diffusion layer ซึ่งนำไปสู่การเกิดปฏิกิริยาข้างเคียงที่ในกรณีคือการเกิดฟองก๊าซไฮโดรเจนมากขึ้น ในทางกลับกันการเพิ่มระยะเวลาในการหยุดจ่ายกระแสไฟฟ้าให้มากขึ้นจะเป็นการลดการเกิด pulsating diffusion layer ซึ่งจะ ทำให้สามารถเติมเต็ม Ni²⁺ แคตไอออนให้เข้าไปเกาะที่คาโทดได้มากขึ้น ในส่วนของโครงสร้างจุลภาคที่น่าสนใจคือขนาดของผลึกมีการโตขึ้นมากเมื่อมีการให้ T_{off} ที่มากขึ้น ซึ่งเกิดจากการที่มี T_{off} เป็น ระยะเวลาที่ยาวนานอะตอมของนิกเกิลจะมีระยะเวลามากขึ้นในการเคลื่อนย้ายบนผิวของผลึก ก่อนที่จะกลายเป็นของแข็ง



ภาพที่ 2.12 อิทธิพลของ T_{on} บนโครงสร้างจุลภาคที่พื้นผิวของนิกเกิลที่มีความหนา $300 \mu\text{m}$ โดยที่มี T_{off} คงที่ 15 ms ความหนาแน่นของกระแสคงที่ 400 mA/cm^2 a) $T_{on}=1 \text{ ms}$, b) $T_{on}=3 \text{ ms}$, c) $T_{on}=5 \text{ ms}$, d) $T_{on}=8 \text{ ms}$

ผลของตัวแปรความหนาแน่นของกระแส (Peak current density) โดยที่มี T_{on} คงที่ 1 ms และ T_{off} คงที่ 15 ms พบว่าที่ J_p 400 และ 800 mA/cm^2 ยังคงให้โครงสร้างจุลภาคที่เหมือนกัน หากแต่ถ้าเพิ่มความหนาแน่นของกระแสมากขึ้นเป็น $1,600 \text{ mA/cm}^2$ นิกเกิลที่ชุบไฟฟ้าได้จะมีความบิดเบี้ยวและลอกออกได้ง่ายอันเป็นผลจากการที่มีแรงเค้นภายในมากเกินไป[29]

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาพที่ 2.13 อิทธิพลของ T_{off} บนโครงสร้างจุลภาคที่พื้นผิวของนิกเกิลที่มีความหนา $300 \mu\text{m}$ โดยที่มี T_{on} คงที่ 1 ms ความหนาแน่นของกระแสคงที่ 400 mA/cm^2 a) $T_{\text{off}}=5 \text{ ms}$, b) $T_{\text{off}}=15 \text{ ms}$, c) $T_{\text{off}}=22 \text{ ms}$, d) $T_{\text{off}}=32 \text{ ms}$, e) $T_{\text{off}}=42 \text{ ms}$

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3 ระเบียบวิธีวิจัย

3.1 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้สำหรับทำงานวิจัย

ในการศึกษางานวิจัยนี้จำเป็นต้องใช้เครื่องมือต่าง ๆ ในการเตรียมชิ้นงาน การเตรียมผิวชิ้นงาน และการวิเคราะห์ตรวจสอบโครงสร้างและเฟสต่างๆ ซึ่งเครื่องมือที่มีความจำเป็นได้แก่

3.1.1 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการเตรียมชิ้นงาน ได้แก่

- 3.1.1.1 แผ่นเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ
- 3.1.1.2 เตาลอมสังกะสี
- 3.1.1.3 ต่างโซเดียมไฮดรอกไซด์ NaOH 10%wt
- 3.1.1.4 กรดไฮโดรคลอริก HCl 14%wt
- 3.1.1.5 สารละลายสำหรับชุบเคลือบนิเกิล Watts bath
- 3.1.1.6 น้ำยาประสานทั่วไป $ZnCl_2 \cdot 3NH_4Cl$
- 3.1.1.7 เครื่องจ่ายกระแสไฟฟ้า
- 3.1.1.8 แผ่นพลาสติกนิ่ม

3.1.2 อุปกรณ์ และสารเคมีที่ใช้สำหรับเตรียมผิวชิ้นงานเพื่อศึกษาโครงสร้างจุลภาค ได้แก่

- 3.1.2.1 กระดาษทรายขัด เบอร์ 320, 600, 800, 1200, 2500 และ 4000
- 3.1.2.2 ผงเพชรขนาด 3 และ 1 ไมครอน
- 3.1.2.3 เครื่องขัดผิวโลหะ
- 3.1.2.4 เครื่องตัดชิ้นตัวอย่างความเร็วต่ำ (Low speed cutting Machine)

3.1.3 เครื่องมือวิเคราะห์ตรวจสอบโครงสร้างและเฟสต่างๆ ที่เกิดขึ้นภายในและสมบัติของชิ้นงาน หลังจากชุบสังกะสี ได้แก่

- 3.1.3.1 เครื่องทดสอบความคงทนต่อละอองน้ำเกลือ (Salt Spray Tester)
- 3.1.3.2 กล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Optical Microscope, OM) ใช้ศึกษาลักษณะโครงสร้างเบื้องต้นของเฟสที่เกิดหลังการชุบสังกะสี
- 3.1.3.3 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนนิ่ง (Scanning Electron Microscope, SEM) ใช้ศึกษาลักษณะและโครงสร้างของเฟสที่เกิดขึ้น

3.1.3.4 เครื่องวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุด้วยการวิเคราะห์การกระจายพลังงาน (Energy dispersive spectroscopy, EDS) ใช้วัดปริมาณองค์ประกอบของธาตุในแต่ละเฟสของชั้น intermediate

3.1.3.5 เครื่องโพเทนชิโอมิเตอร์ (Potentiometer) และชุดอุปกรณ์ทดสอบการกัดกร่อนด้วยเครื่องโพเทนชิโอมิเตอร์เพื่อศึกษาสมบัติความต้านทานการกัดกร่อน

3.2 ระเบียบวิธีการวิจัย

ก่อนที่จะทำการผลิตสังกะสีแบบจุ่มร้อนโดยการเคลือบชั้นรองพื้นนิกเกิลด้วยไฟฟ้าทุกครั้งนั้น แผ่นเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำจะต้องผ่านการเตรียมผิวก่อนด้วยการล้างคราบไขมันซึ่งจะนำแผ่นเหล็กไปแช่ในด่างโซเดียมไฮดรอกไซด์ 10 wt% ที่อุณหภูมิ 60 °C เป็นเวลา 10 นาทีแล้วล้างด่างออกให้หมดด้วยน้ำ จากนั้นจึงนำไปกำจัดออกไซด์ของเหล็กออกด้วยการแช่ในกรดไฮโดรคลอริก 14 wt% เป็นเวลา 20 นาทีแล้วจึงล้างกรดออกให้หมดด้วยน้ำซึ่งจะทำให้ได้ผิวของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำที่บริสุทธิ์ โดยเหล็กที่ได้จะต้องนำมาผลิตชั้นรองพื้นนิกเกิลซึ่งเป็นกระบวนการต่อไปทันทีเพื่อป้องกันการกลับมาเกิดสนิม ในการผลิตชั้นรองพื้นนิกเกิลด้วยไฟฟ้าชั้นงานที่เป็นแผ่นเหล็กซึ่งผ่านการเตรียมผิวจะทำหน้าที่เป็นแคโทดและมีแผ่นแพลตินัมทำหน้าที่เป็นแอโนดซึ่งทั้งคู่จุ่มอยู่ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ Nickel Watts bath ซึ่งประกอบด้วย

นิกเกิลซัลเฟต ($\text{NiSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$)	300 g/L
นิกเกิลคลอไรด์ ($\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$)	45 g/L
กรดบอริก (H_3BO_3)	45 g/L

โดยมีการควบคุมอุณหภูมิของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ไว้ที่ 65 °C และมีการกวนสารละลายด้วย magnetic stirrer หลังจากนั้นเหล็กที่มีชั้นรองพื้นนิกเกิลจะถูกทำให้แห้งก่อนจะเข้าสู่กระบวนการชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนต่อไป

3.2.1 การศึกษากระบวนการชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนโดยมีการเคลือบชั้นรองพื้นนิกเกิลด้วยไฟฟ้า

3.2.1.1 การผลิตเหล็กชุบสังกะสีด้วยการเคลือบชั้นรองพื้นด้วยไฟฟ้ากระแสต่อเนื่อง

ทำการผลิตชั้นรองพื้นนิกเกิลด้วยการชุบไฟฟ้ากระแสต่อเนื่อง 0.1 A/cm² ให้มีความหนา 6 μm ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์นิกเกิล โดยวางชั้นงานซึ่งทำหน้าที่เป็นแคโทดให้ขนานกับแผ่นอิเล็กโทรดแพลตินัมซึ่งทำหน้าที่เป็นแอโนด

3.2.1.2 การผลิตเหล็กชุบสังกะสีด้วยการเคลือบชั้นรองพื้นด้วยไฟฟ้ากระแสพัลส์

ทำการผลิตชั้นรองพื้นนิกเกิลด้วยการชุบไฟฟ้ากระแสพัลส์ โดยกระแสประสิทธิผล 0.115 A/cm² ซึ่งมีรูปแบบการจ่ายกระแสต่อเนื่องเป็นเวลา 20 ms แล้วหยุดให้กระแส 3 ms ให้มีความหนา 6 μm โดยวางชิ้นงานซึ่งทำหน้าที่เป็นแคโทดให้ขนานกับแผ่นอิเล็กโทรดพลาตินัมซึ่งทำหน้าที่เป็นแอโนด

3.2.1.3 การผลิตเหล็กชุบสังกะสีโดยวิธีดั้งเดิมด้วยการใช้น้ำยาเชื่อมประสานทั่วไป (ZnCl₂•3NH₄Cl) เพื่อเป็นชิ้นงานเปรียบเทียบ

ผลิตเหล็กชุบสังกะสีโดยวิธีดั้งเดิมโดยแผ่นเหล็กจะถูกนำไปจุ่มในน้ำยาเชื่อมประสานและถูกอบให้แห้งก่อนนำไปชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนต่อไป

จากนั้นนำชิ้นงานที่ได้ทั้งหมด 3 ชุดมาชุบสังกะสีที่อุณหภูมิสังกะสีหลอมเหลว 450 °C เป็นเวลา 1 นาที แล้วจึงนำไปศึกษาโครงสร้างเบื้องต้น

3.2.2 การศึกษาการพัฒนาของโครงสร้างจุลภาคและเฟสที่เกิดขึ้น

3.2.2.2 การศึกษาโครงสร้างและเฟสของเหล็กชุบสังกะสีที่เปลี่ยนแปลงไปตามความหนาของชั้นรองพื้นนิกเกิล

ผลิตเหล็กชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนโดยการเคลือบชั้นรองพื้นนิกเกิลด้วยไฟฟ้าโดยทำการแปรเปลี่ยนความหนาของชั้นรองพื้นนิกเกิลที่ 3, 6, 9 และ 12 μm โดยที่ระยะเวลาในการจุ่มร้อนถูกคงไว้ที่ 1 นาที

3.2.2.1 การศึกษาโครงสร้างและเฟสของเหล็กชุบสังกะสีที่เปลี่ยนแปลงไปตามระยะเวลาในการชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อน

ผลิตเหล็กชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนโดยการเคลือบชั้นรองพื้นนิกเกิลด้วยไฟฟ้าโดยทำการคงที่ความหนาของชั้นรองพื้นนิกเกิลไว้ที่ค่าหนึ่งแต่แปรเปลี่ยนระยะเวลาในการชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนที่ 10 วินาที, 1 นาที, 3 นาที และ 6 นาที

ชิ้นงานทั้งหมดจะถูกนำไปทดสอบโครงสร้างจุลภาคและวิเคราะห์เฟสที่เกิดขึ้นต่อไป

3.2.3 สมบัติของเหล็กชุบสังกะสี

3.2.3.1 การทดสอบการดัดโค้ง (T-Bend Flexibility Test)

เลือกชิ้นงานเหล็กชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนโดยการเคลือบชั้นรองพื้นนิกเกิลด้วยไฟฟ้ามา 1 ตัวอย่างแล้วยึดชิ้นงานด้วยตัวจับชิ้นงาน จากนั้นจึงทำการตัดโค้งชิ้นงานไป 90 องศา แล้วทำการตัดโค้งกลับมาที่ตำแหน่งเดิมอีกครั้ง โดยโครงสร้างทางกายภาพและจุลภาคของชิ้นงานที่เปลี่ยนแปลงไปขณะถูกตัดโค้งทำมุม 90 องศาและขณะตัดโค้งกลับมาที่ตำแหน่งเดิมจะถูกศึกษาจากภาพตัดขวางของชิ้นงานเปรียบเทียบกับชิ้นงานเหล็กชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนโดยวิธีดั้งเดิม

3.2.3.2 สมบัติความต้านทานต่อการกัดกร่อน

3.2.3.2.1 การทดสอบความคงทนต่อละอองน้ำเกลือ (Salt Spray Tester)

เลือกชิ้นงานเหล็กชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนโดยการเคลือบชั้นรองพื้นนิกเกิลด้วยไฟฟ้ามา 1 ชุดเพื่อทำการเปรียบเทียบกับเหล็กชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนโดยวิธีดั้งเดิมโดยวางชิ้นงานไว้ในเครื่องทดสอบความคงทนต่อละอองน้ำเกลือ ซึ่งสภาวะและวิธีในการทดสอบเป็นไปตาม ASTM B117 และทำการเก็บชิ้นงานมาเพื่อตรวจสอบการเกิดสนิมแดงตามระยะเวลาที่เหมาะสม

3.2.3.2.2 การทดสอบความต้านทานการกัดกร่อนโดยเทคนิคโพเทนชิโอไดนามิกส์ (Potentiodynamic)

เลือกชิ้นงานมาทำการเก็บไว้ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 5 wt% เป็นระยะเวลา 0-3 สัปดาห์ ทำแล้วติดตามพฤติกรรม การกัดกร่อนของชิ้นเคลือบในแต่ละชั้นด้วยเทคนิคโพเทนชิโอไดนามิกส์ซึ่งในการทดสอบนั้นชิ้นงานขนาดพื้นที่ 2 ตารางเซนติเมตรทำหน้าที่เป็นขั้วไฟฟ้าแอโนดและมีแพลทินัมเป็นขั้วไฟฟ้าคาโทด โดยที่ขั้วไฟฟ้าทั้งสองอยู่ในสารละลายเกลือที่เป็นอิเล็กโทรไลต์โซเดียมคลอไรด์ 5 % ทดสอบเทียบกับขั้วไฟฟ้าอ้างอิงมาตรฐานชนิด Saturated Calomel Electrode, SCE โดยตั้งค่าโปรแกรมการทดสอบดังนี้

- วัดค่าศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิด (Open Circuit Potential, OCP) เป็นเวลา 900 วินาที
- กำหนดให้อัตราการเพิ่มความต่างศักย์ (Scan rate) เท่ากับ 0.001 โวลต์ต่อวินาที ค่าศักย์ไฟฟ้าเริ่มต้น (Start potential) เท่ากับ -0.250 โวลต์เทียบกับ SCE, (V v.s SCE) จากค่าศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิด และค่าศักย์ไฟฟ้าสุดท้าย (Stop potential) เท่ากับ 0.750 V v.s SCE จากค่าศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิด

3.2.3.2.3 การทดสอบความต้านทานการกัดกร่อนของแต่ละชั้นเคลือบโดยเทคนิคกัลวานอสแตติกและโพเทนชิโอไดนามิกส์ (Galvanostatic and Potentiodynamic)

เลือกชิ้นงานเพื่อเป็นตัวอย่างทดสอบสมบัติความต้านทานการกัดกร่อนของแต่ละชั้นเคลือบ จากนั้นทำการลอกชั้นเคลือบของเหล็กชุบสังกะสีออก ในแต่ละชั้นด้วยเทคนิคกัลวานอสแตติกโดยมีการจ่ายกระแสไฟฟ้า 3 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตรด้วยเครื่องโพเทนชิโอเมเตอร์ของบริษัท Eco Chemie รุ่น FRA2 μ Autolab Type III และติดตามพฤติกรรมการกัดกร่อนของชิ้น

เคลือบจนกระทั่งชิ้นงานเกิดสนิมแดงของเหล็กจึงหยุดการทดสอบ จากนั้นจึงทดสอบสมบัติความต้านทานการกัดกร่อนของชิ้นเคลือบแต่ละชิ้นการกัดกร่อนของชิ้นด้วยเทคนิค โพเทนชิโอสไตโนเมทรี โดยตั้งค่าโปรแกรมการทดสอบดังหัวข้อที่แล้ว



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4

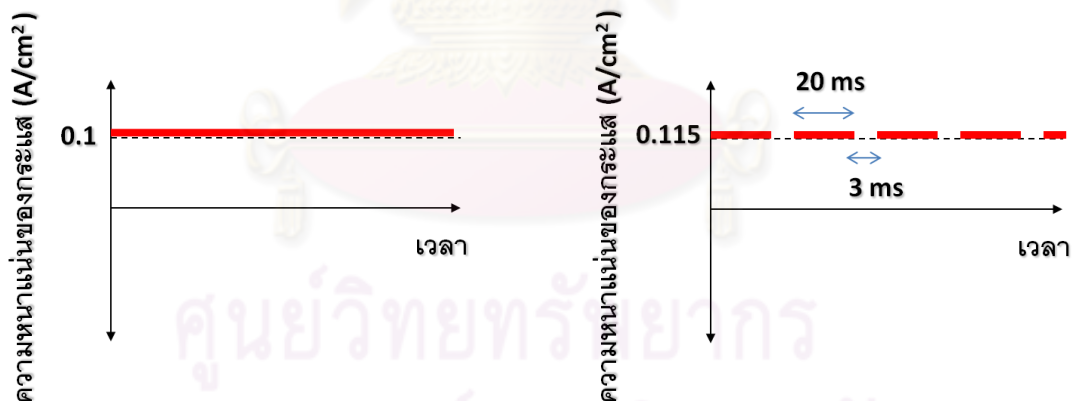
ผลการทดลองและการอภิปราย

4.1 ผลของตัวแปรในการผลิตชั้นรองพื้นนิกเกิลด้วยไฟฟ้า

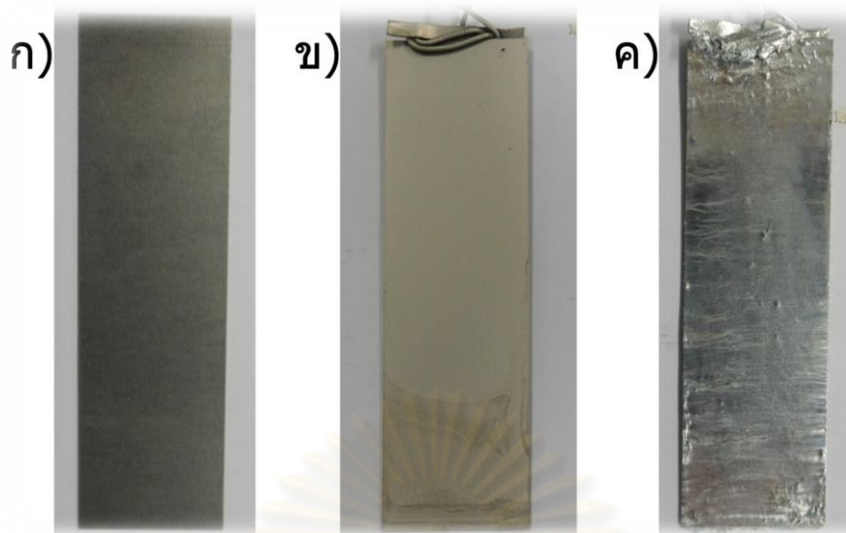
แผ่นเหล็กขนาด $5 \times 2 \times 0.04$ ตารางเซนติเมตรที่ใช้ในงานศึกษานี้เป็นขนาดทดสอบตามมาตรฐาน ASTM A123 และเป็นเหล็กกล้าคาร์บอนรีดเย็นเนื่องจากมีการใช้มากที่สุดในระบบการชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนโดยมีส่วนผสมทางเคมีดังแสดงในตาราง 4.1 ซึ่งหลังจากผ่านการเตรียมผิวแล้วแผ่นเหล็กถูกนำไปผ่านกระบวนการชุบชั้นรองพื้นนิกเกิลด้วยไฟฟ้าโดยเปรียบเทียบชั้นรองพื้นที่ผลิตขึ้นโดยไฟฟ้ากระแสต่อเนื่อง และไฟฟ้ากระแสพัลส์ซึ่งมีรูปแบบการจ่ายกระแสดังภาพที่ 4.1 หลังจากนั้นแผ่นเหล็กที่ผลิตชั้นรองพื้นนิกเกิลแล้วถูกนำไปชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนต่อไปซึ่งตัวอย่างลักษณะทางกายภาพของชิ้นงานทั้งหมดแสดงไว้ดังภาพที่ 4.2

ตารางที่ 4.1 ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าคาร์บอนรีดเย็น

ธาตุ	C	Cr	Mn	Al	N	P	S	Si
ส่วนผสม (wt.%)	0.040	0.050	0.240	0.058	0.004	0.013	0.007	0.010



ภาพที่ 4.1 รูปแบบการจ่ายกระแสในการชุบนิกเกิลเป็นชั้นรองพื้นด้วยไฟฟ้า ก) กระแสต่อเนื่อง, ข) กระแสพัลส์

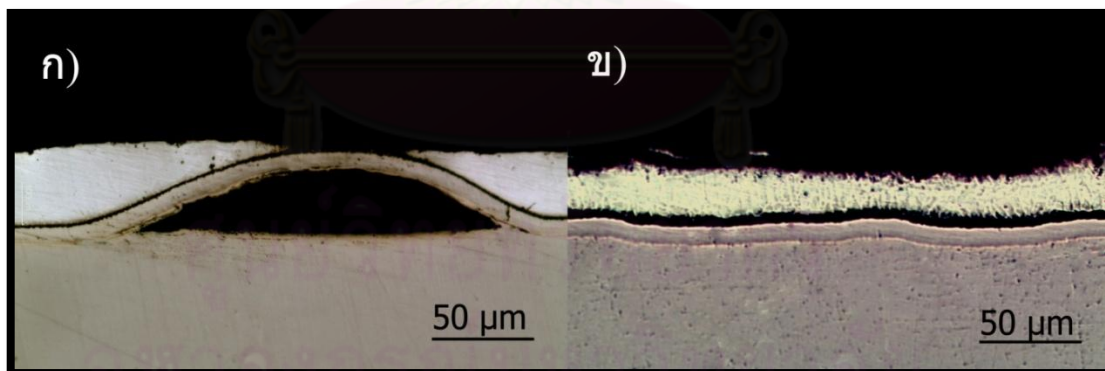


ภาพที่ 4.2 แสดงตัวอย่างของชิ้นงาน ก) แผ่นเหล็กกล้าคาร์บอนรีดเย็น, ข) แผ่นเหล็กเคลือบชั้นรองพื้นนิกิลด้วยไฟฟ้า, ค) แผ่นเหล็กชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนโดยการเคลือบชั้นรองพื้นนิกิลด้วยไฟฟ้า

ในการเปรียบเทียบตัวแปรในการผลิตชั้นรองพื้นนิกิลด้วยไฟฟ้ากระทำที่ความหนาของชั้นรองพื้นนิกิลที่ 6 ไมครอนและชุบสังกะสีเป็นเวลา 1 นาที จากนั้นนำชิ้นงานทั้งสองตัวแปรไปตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคจากภาคตัดขวางดังภาพที่ 4.3 ผลจากการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงแสดงให้เห็นว่าเหล็กชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนที่ผลิตโดยการมีนิกิลเป็นชั้นรองพื้นด้วยไฟฟ้าทั้งที่ผลิตด้วยด้วยไฟฟ้ากระแสต่อเนื่องและไฟฟ้ากระแสพัลส์ต่างก็ให้พื้นผิวที่มีความเรียบและมีความสม่ำเสมอตลอดจนความหนาที่เท่ากันตลอดชิ้นงาน แต่อย่างไรก็ตามเราก็พบว่าชิ้นงานที่ผลิตชั้นรองพื้นนิกิลด้วยไฟฟ้ากระแสต่อเนื่องนั้นมีแนวโน้มที่จะมีคุณภาพของชั้นเคลือบภายหลังจากชุบสังกะสีที่ด้อยกว่าดังภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์แบบแสงที่แสดงในภาพที่ 4.3 ก) ซึ่งชิ้นงานที่ผลิตชั้นรองพื้นนิกิลจากไฟฟ้ากระเบื้องต่อเนื่องเกิดการหลุดร่อนออกของชั้นเคลือบเป็นช่องว่างระหว่างเนื้อเหล็กที่เป็นโลหะพื้นและชั้นเคลือบที่เกิดขึ้นจากการชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อน โดยการหลุดร่อนดังกล่าวนี้มักจะพบในชิ้นงานไฟฟ้ากระแสต่อเนื่องและพบตลอดแนวชั้นเคลือบของชิ้นงาน ทั้งนี้ภาพตัดขวางในส่วนของการหลุดร่อนของชั้นเคลือบจากผิวเหล็กแสดงเพิ่มเติมไว้ดังภาคผนวก ข

สาเหตุการหลุดร่อนของชั้นเคลือบส่วนใหญ่คาดว่าเกิดจากการเกิดขึ้นของฟองก๊าซไฮโดรเจนที่ขั้วไฟฟ้าแคโทดหรือที่ผิวของชิ้นงานที่นำมาชุบนิกิลดังเช่นที่ A.M. El-Sherik et. al[29] ได้เคยศึกษาไว้ โดยที่ฟองก๊าซไฮโดรเจนนั้นเกิดมาจากน้ำที่เป็นส่วนผสมของสารละลายอิเล็กโทรไลต์และน้ำจะถูกแยกออกเป็นก๊าซไฮโดรเจนที่ขั้วไฟฟ้าแคโทดและก๊าซออกซิเจนที่ขั้วไฟฟ้า

แอนโตนีในขณะที่มีการจ่ายกระแสไฟฟ้าระหว่างกระบวนการชุบนิเกิล ฟองก๊าซไฮโดรเจนที่เกิดที่ผิวชิ้นงานนั้นมีโอกาสถูกกักไว้ที่ผิวของชิ้นงานในระหว่างการชุบนิเกิลด้วยไฟฟ้าทำให้ชิ้นงานที่ผลิตขึ้นร่องพื้นนิเกิลด้วยไฟฟ้ากระแสต่อเนื่องมีฟองก๊าซไฮโดรเจนบางส่วนเป็นช่องว่างระดับไมโครที่ได้ผิวของชั้นร่องพื้นนิเกิล หลังจากนั้นเมื่อชิ้นงานได้รับความร้อนที่อุณหภูมิสูงจากกระบวนการชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อน ก๊าซที่ถูกกักเอาไว้มีโอกาสที่จะขยายตัวขึ้นและดันชั้นเคลือบออกมาเป็นช่องว่างระหว่างชั้นเคลือบและเนื้อเหล็กได้ ในทางต่อเนื่องกันข้ามชิ้นงานที่ผลิตจากไฟฟ้ากระแสพัลส์นั้นมีชั้นเคลือบที่สม่ำเสมอและยึดติดแน่นตลอดชิ้นงาน การที่มีระยะเวลาในการหยุดจ่ายกระแสไฟฟ้าของการชุบไฟฟ้ากระแสพัลส์นั้นช่วยในการลดปริมาณของก๊าซไฮโดรเจนที่ผิวชิ้นงานเนื่องจากมีช่วงเวลาให้ก๊าซไฮโดรเจนสามารถออกไปได้จึงช่วยลดปัญหาการกักเก็บก๊าซไว้ใต้ชั้นร่องพื้นนิเกิลและปัญหาข้างต้น นอกจากนี้ยังทำให้สามารถส่งนิเกิลออกอนที่อยู่บริเวณที่ห่างออกไปจากชิ้นงานในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ให้ไปเกาะติดบนผิวของเหล็กได้ดีขึ้นด้วย จากการศึกษาตัวแปรในการชุบไฟฟ้าเรื่องของผลกระทบของรูปแบบการจ่ายกระแสไฟฟ้านี้แสดงให้เห็นว่าการผลิตชั้นร่องพื้นนิเกิลด้วยไฟฟ้ากระแสพัลส์นั้นทำให้ได้ชิ้นงานเหล็กชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนที่ชั้นเคลือบมีความสม่ำเสมอและยึดติดกับเนื้อเหล็กได้ดีกว่าชิ้นงานที่ผลิตชั้นร่องพื้นนิเกิลด้วยไฟฟ้ากระแสต่อเนื่อง ดังนั้นวิธีนี้จึงเป็นทางเลือกหนึ่งในการที่จะทำได้ชั้นเคลือบผิวเหล็กที่มีคุณภาพดีและด้วยเหตุนี้สำหรับในการศึกษาต่อไปในงานวิจัยนี้ ชั้นร่องพื้นนิเกิลจะถูกผลิตด้วยไฟฟ้ากระแสพัลส์เท่านั้น



ภาพที่ 4.3 ภาพตัดขวางของเหล็กชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนโดยการเคลือบนิเกิลเป็นชั้นร่องพื้นด้วยไฟฟ้าจากกล้องจุลทรรศน์แบบแสง โดยชั้นร่องพื้นนิเกิลผลิตจากการชุบด้วยไฟฟ้า ก) กระแสต่อเนื่อง และ ข) กระแสพัลส์

4.2 การศึกษาการพัฒนาของโครงสร้างจุลภาคและเฟสที่เกิดขึ้น

ในกระบวนการชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนจะเกิดการแพร่ของโลหะของทั้งเหล็กไปสู่สังกะสีและสังกะสีไปสู่เหล็กและเกิดเป็นโลหะผสมเฟสต่างๆโดยที่ความหนาของแต่ละเฟสและธาตุ

ประกอบในโลหะผสมเฟสนั้นๆจะเปลี่ยนแปลงไปตามระยะเวลาในการจุ่มร้อน การที่มีนิกเกิดเป็นธาตุประกอบที่ 3 ย่อมทำให้เฟสที่เกิดขึ้นเปลี่ยนแปลงไป ในหัวข้อนี้จะศึกษาการพัฒนาของโครงสร้างจุลภาคและเฟสที่เปลี่ยนแปลงไปของเหล็กชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนโดยมีนิกเกิดเป็นชั้นรองพื้นด้วยไฟฟ้าโดยมีตัวแปรที่ต้องการศึกษา 2 ตัวแปร

ตัวแปรแรก คือความหนาของชั้นรองพื้นนิกเกิดโดยเปลี่ยนแปลงความหนาของชั้นรองพื้นนี้ที่ 3, 6, 9 และ 12 ไมโครเมตรโดยการคำนวณจากอัตราในการชุบของนิกเกิดที่กระแสไฟฟ้า 0.1 แอมป์ต่อตารางเซนติเมตร แต่คงที่ระยะเวลาในการชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนไว้ที่ 1 นาที

ตัวแปรที่จะศึกษาเป็นตัวแปรที่ 2 คือระยะเวลาในการชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนซึ่งกำหนดระยะเวลาในการชุบออกเป็น 4 ช่วงคือ 10 วินาที, 1 นาที, 3 นาทีและ 6 นาที โดยมีการเลือกที่จะคงที่ความหนาของชั้นรองพื้นนิกเกิดไว้ค่าหนึ่ง ซึ่งสาเหตุที่กำหนดระยะเวลาในการชุบดังนี้เนื่องจากตามปกติในการชุบแบบกะ ในอุตสาหกรรมนิยมจุ่มร้อนเป็นเวลา 3 และ 6 นาที ส่วนระยะห่างจาก 10 วินาทีไป 1 นาที, 3 นาทีและ 6 นาทีนั้นพิจารณาจากการแพร่ของของแข็งที่จะออกมาในรูปของสมการความเข้มข้นที่แปรผันกับระยะทางและเวลาตามความสัมพันธ์ของสมการการแพร่ในหนึ่งมิติ

$$x = (Dt)^{1/2}$$

โดยที่ x คือ ตำแหน่งในการแพร่มีหน่วยเป็น (ระยะทาง)เช่น เมตร,

D คือ ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่มีหน่วยเป็น (ระยะทาง²/เวลา¹) เช่น เมตร²/วินาที¹ และ

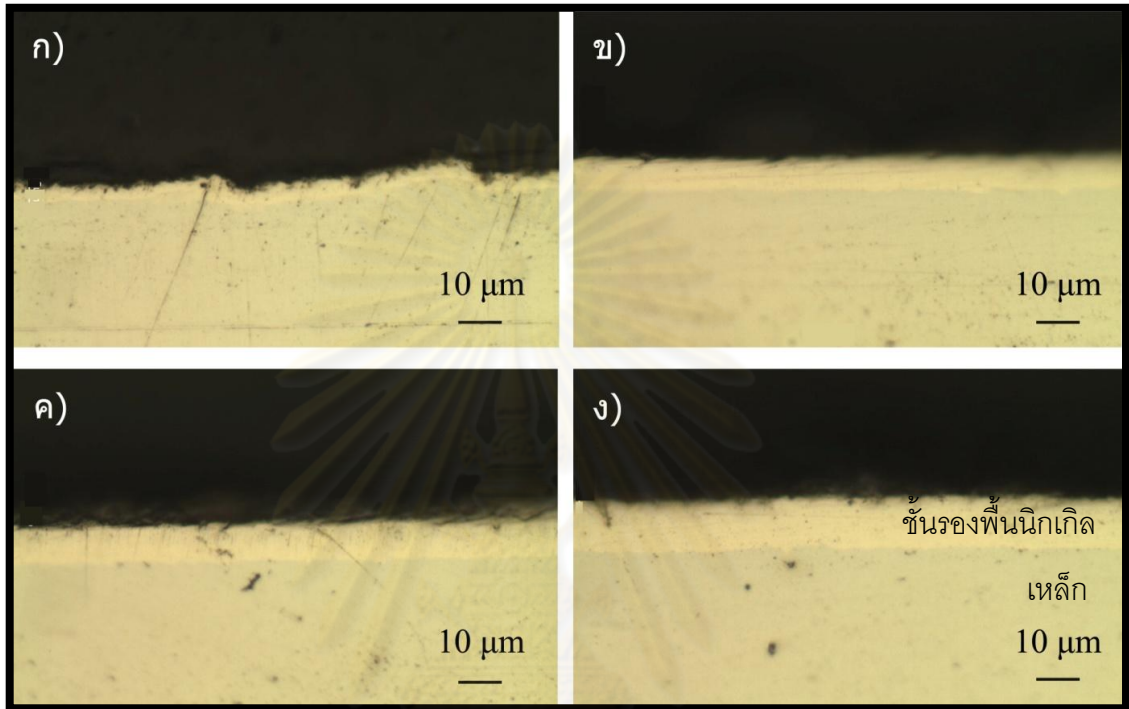
t คือ ระยะเวลาในการแพร่มีหน่วยเป็น (เวลา) เช่น วินาที

ดังนั้นเวลาในการจุ่มร้อน 10, 60, 180 และ 360 วินาทีที่เรากำหนดไว้เมื่อแทนค่าในสมการข้างต้น จะออกมาในเทอมของระยะทาง x ที่ 3, 8, 13 และ 19 หน่วย คือห่างเป็นนัยประมาณ 5 หน่วย เป็นการติดตามการพัฒนาของเฟสที่ระยะทางในการแพร่ที่มีช่วงห่างประมาณเดียวกัน

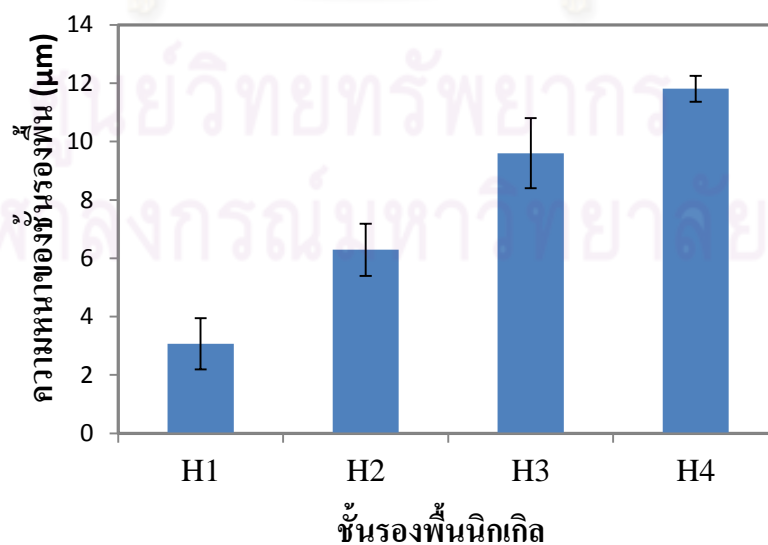
4.2.1 การศึกษาโครงสร้างและเฟสของเหล็กชุบสังกะสีที่เปลี่ยนแปลงไปตามความหนาของชั้นรองพื้นนิกเกิด

ดังที่ได้กล่าวไว้ข้างต้นในการศึกษาตัวแปรนี้ทำการเปลี่ยนแปลงความหนาของชั้นรองพื้นนิกเกิดจาก 3 ถึง 12 ไมโครเมตร จากการตรวจสอบภาคตัดขวางของชิ้นงานเหล็กที่ทำการชุบชั้นรองพื้นนิกเกิดจากภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง พบว่าชั้นรองพื้นนิกเกิดที่ได้มีความหนาค่อนข้างสม่ำเสมอทั้งชิ้นโดยภาพตัดขวางของเหล็กที่ผ่านการเคลือบชั้นรองพื้นนิกเกิดด้วยไฟฟ้า

ที่ความหนาต่างแสดงดังภาพที่ 4.4 และความหนาเฉลี่ยที่วัดได้จริงแสดงดังแผนภูมิในภาพที่ 4.5 โดยในการศึกษาต่อไปจะเรียกความหนาของชั้นรองพื้นนิกเกิลเกิดความหนาเฉลี่ย 3, 6, 9 และ 12 μm ว่า H1, H2, H3 และ H4 ตามลำดับเพื่อความกระชับในการระบุชิ้นงานที่ความหนาของชั้นรองพื้นและระยะเวลาในการชุบสังกะสีที่ความหนาและระยะเวลานั้นๆต่อไป

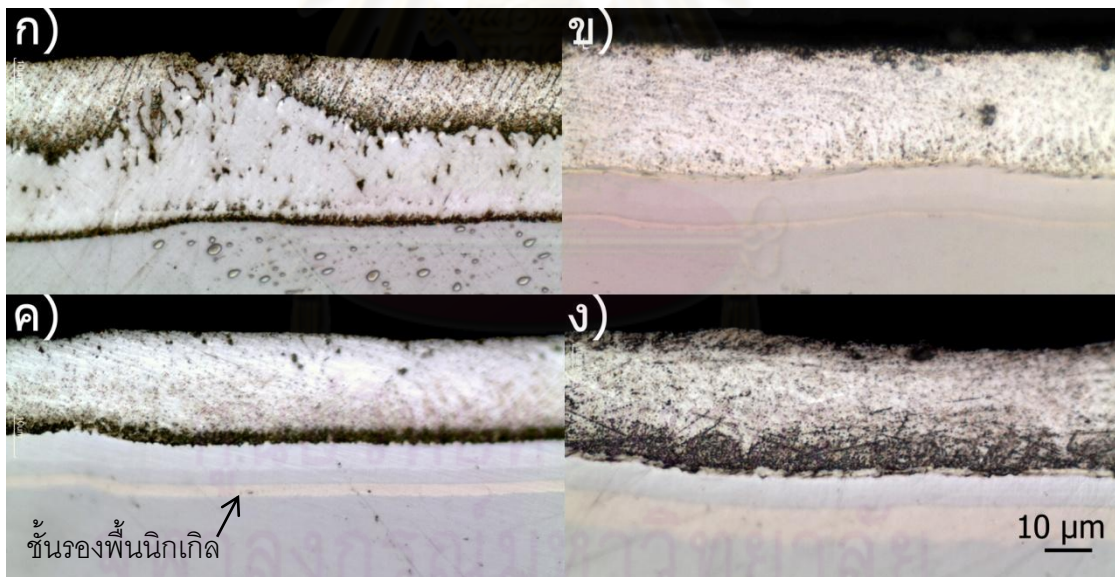


ภาพที่ 4.4 ภาคตัดขวางของชิ้นงานเหล็กโดยการเคลือบนิกเกิลเป็นชั้นรองพื้นด้วยไฟฟ้าที่ความหนาโดยประมาณ ก) 3 μm (H1), ข) 6 μm (H2), ค) 9 μm (H3) และ ง) 12 μm (H4)



ภาพที่ 4.5 ความหนาเฉลี่ยของชั้นรองพื้นนิกเกิลที่ผลิตด้วยไฟฟ้ากระแสพัลส์

ในการศึกษาตามตัวแปรที่กำหนดไว้จะเริ่มจากการเปลี่ยนแปลงความหนาของชั้นรองพื้น นิกเกิลที่ 3 μm (H1), 6 μm (H2), 9 μm (H3) และ 12 μm (H4) แล้วคงที่ระยะเวลาในการชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนไว้ที่ 1 นาที จากผลที่ได้พบว่าชิ้นงานทั้งหมดมีชั้นเคลือบบนสุดเป็นเฟส η ของสังกะสีโดยมีความหนาเฉลี่ยประมาณ 25 ไมโครเมตร ซึ่งเป็นผลจากอัตราการตั้งขึ้นที่คงที่ของทุกชิ้นงานที่ 150 เซนติเมตรต่อวินาทีโดยเครื่องจับชิ้นงานอัตโนมัติ สำหรับชิ้นงาน H2, H3 และ H4 ที่ถูกนำไปชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนเป็นเวลา 1 นาที (ต่อไปจะขอระบุให้กระชับขึ้น โดยระบุความหนาของชั้นรองพื้นนิกเกิลตามด้วยระยะเวลาในการชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อน เช่น H2-1m เป็นต้น) จากการศึกษาโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานทั้งสามคือ H2-1m, H3-1m และ H4-1m ภายหลังจากการชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนด้วยภาพตัดขวางจากกล้องจุลทรรศน์แบบแสงนั้น เป็นที่แน่นอนว่าความหนาของชั้นรองพื้นนิกเกิลของชิ้นงานทั้งสามได้ลดลงไปอันเป็นผลมาจากการแพร่ของทั้งเหล็กและนิกเกิลออกไปสู่สังกะสีตามระยะเวลาในการชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนเกิดเป็นชั้น intermediate ขึ้นดังภาพที่ 4.6 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าชั้นรองพื้นนิกเกิลยังคงปรากฏอยู่เหนือพื้นเหล็กถึงแม้ว่าจะมีความหนาที่ลดลงไปจากการแพร่ออกไปตามระยะเวลาในการชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนก็ตาม โดยความหนาของชั้นรองพื้นนิกเกิลภายหลังจากการชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนได้แสดงไว้ดังกราฟในภาพที่ 4.15



ภาพที่ 4.6 ภาพตัดขวางจากกล้องจุลทรรศน์แบบแสงของชิ้นงานเหล็กชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนโดยการเคลือบชั้นรองพื้นนิกเกิลด้วยไฟฟ้า ในระยะเวลาในการจุ่มร้อน 1 นาที โดยที่ชั้นรองพื้นนิกเกิลมีความหนา ก) H1, ข) H2, ค) H3 และ ง) H4

นอกจากนี้เมื่อวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคและองค์ประกอบของธาตุในแต่ละชั้นเคลือบของชิ้นงาน H2-1m, H3-1m และ H4-1m ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนนิ่ง (Scanning electron microscope, SEM) และการวิเคราะห์การกระจายพลังงาน (Energy

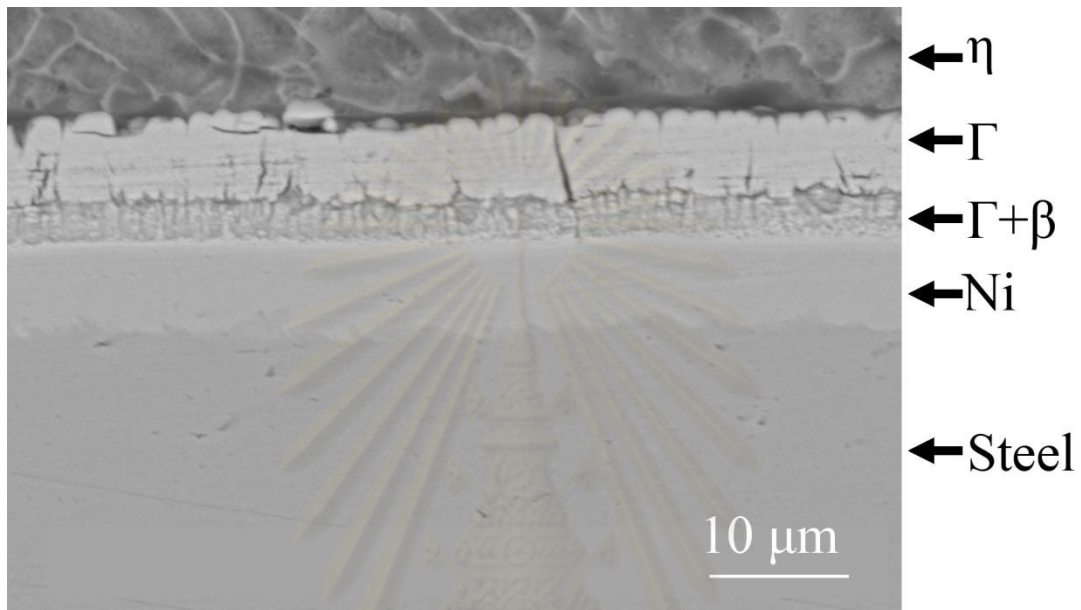
dispersive spectrometry, EDS) โดยในการระบุเฟสที่ได้จะอ้างอิงจากองค์ประกอบของธาตุในชั้นเคลือบแต่ละชั้นที่ได้จากการวิเคราะห์การกระจายพลังงานดังแสดงในตารางที่ 4.2 และแผนภาพเฟส 3 องค์ประกอบของสังกะสี นิกเกิลและเหล็ก (ternary phase diagram) ที่อุณหภูมิ 450 °C จากภาพที่ 4.8 ก็พบว่าโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานทั้งสามมีลักษณะที่เหมือนกันรวมถึงองค์ประกอบทางเคมีที่ใกล้เคียงกันมาก โดยชั้นเคลือบของเหล็กชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนโดยการเคลือบชั้นรองพื้นนิกเกิลด้วยไฟฟ้าที่ตรวจสอบพบ สามารถจำแนกจากเนื้อเหล็กที่เป็นโลหะพื้นฐานสู่ชั้นสังกะสีด้านบนได้ดังนี้

1. โลหะพื้นที่เป็นเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ
2. ชั้นรองพื้นนิกเกิลที่ยังคงปรากฏอยู่ในโครงสร้างหลังการชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อน
3. ชั้นเคลือบที่ประกอบด้วยสังกะสีและนิกเกิลเป็นส่วนใหญ่ซึ่งอยู่เหนือชั้นรองพื้นนิกเกิล เราเรียกชั้นนี้ว่าชั้นเคลือบ Intermediate I จากการวิเคราะห์เฟสด้วยองค์ประกอบทางเคมี พบว่าชั้น intermediate I นี้ประกอบด้วยเฟสของ $\Gamma + \beta$
4. ชั้นเคลือบที่ประกอบด้วยสังกะสีและนิกเกิลเป็นส่วนใหญ่ ซึ่งอยู่ถัดออกมาจากชั้นเคลือบ Intermediate I เราเรียกชั้นนี้ว่าชั้นเคลือบ Intermediate II จากการวิเคราะห์เฟสด้วยองค์ประกอบทางเคมี พบว่าชั้นประกอบด้วยเฟส Γ
5. ชั้นเคลือบที่เป็นสังกะสีบริสุทธิ์เป็นเฟส η

ชั้นเคลือบแต่ละชั้นสามารถเห็นได้ชัดเจนจากภาพตัดขวางจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนนิ่งแสดงดังแสดงในภาพที่ 4.7 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าชั้นเคลือบ Intermediate เหล่านี้มีความหนาสม่ำเสมอและมีความอัดแน่นมีความเป็นเนื้อเดียวกันสูง โดยโครงสร้างจุลภาคดังภาพ 4.7 ที่ประกอบไปด้วยชั้นรองพื้นนิกเกิล, ชั้นเคลือบ Intermediate I และ II ถือว่าเป็นโครงสร้างจุลภาคทั่วไป (typical microstructure) ของเหล็กชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนโดยการเคลือบชั้นรองพื้นนิกเกิลด้วยไฟฟ้า ทั้งนี้ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนนิ่งและการวิเคราะห์การกระจายพลังงานของชิ้นงานทั้งหมดแสดงไว้ในภาคผนวก ข

นอกจากนี้ในการวิเคราะห์ความหนาเพื่อเปรียบเทียบกับเหล็กชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนโดยวิธีดั้งเดิมดังแผนภูมิในภาพที่ 4.10 ซึ่งจะได้กล่าวต่อไปนั้น จะพิจารณาเฉพาะความหนาของชั้น intermediate I และ II เท่านั้นเนื่องจากความหนาของชั้นรองพื้นนิกเกิลสามารถควบคุมให้มีปริมาณที่เหมาะสมได้จากระยะเวลาในการชุบนิกเกิลด้วยไฟฟ้าและสำหรับชั้นเคลือบ η ที่เป็นสังกะสีบริสุทธิ์ก็สามารถที่จะควบคุมให้มีความหนาที่ค่อนข้างคงที่ได้จากความเร็วในการดึงชิ้นงาน

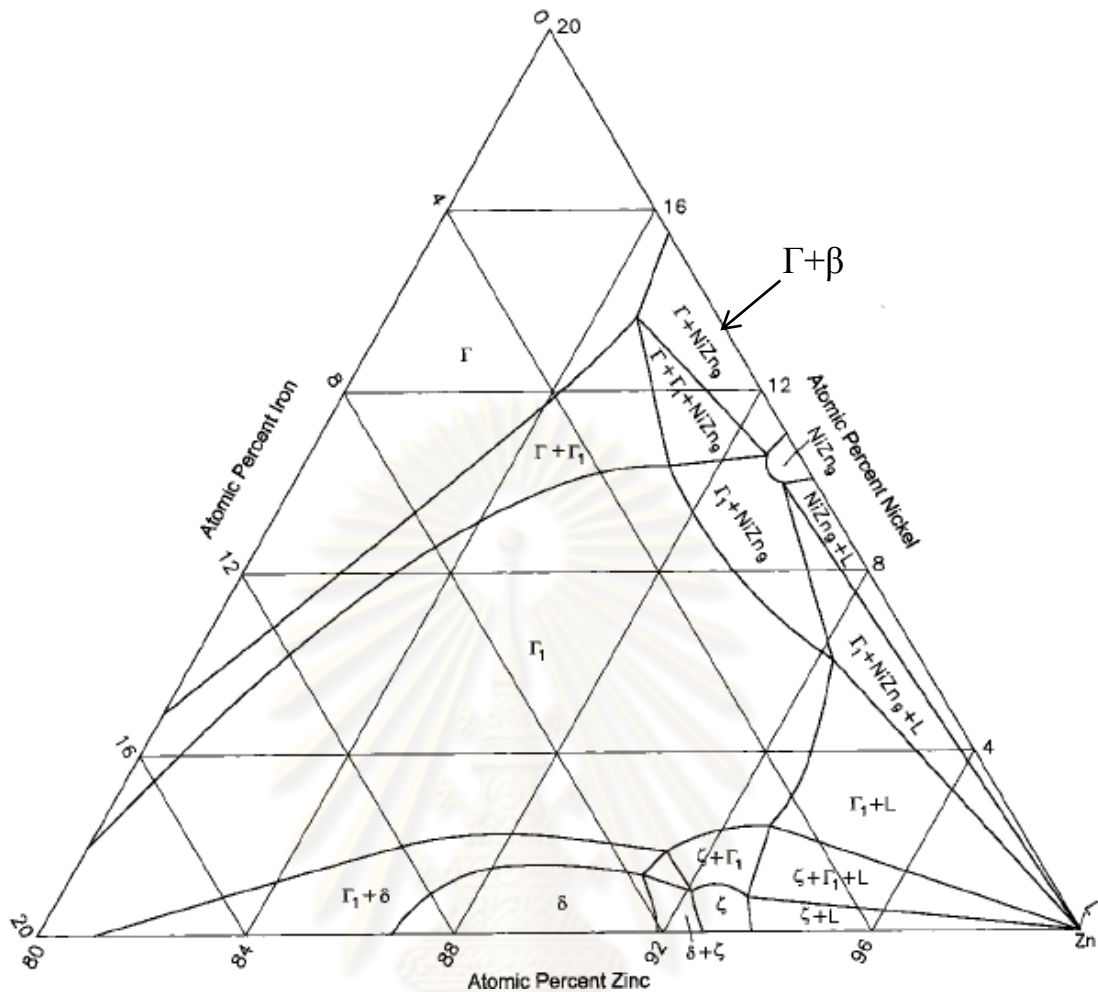
ชั้นจากสังกะสีหลอมเหลวที่ได้กล่าวไปในตอนต้น สำหรับความหนาโดยเฉลี่ยของชั้นเคลือบ intermediate ในชิ้นงาน H2-1m, H3-1m และ H4-1m นั้นพบว่าชั้นเคลือบ intermediate ของชิ้นงานทั้ง 3 ชั้นนี้มีความหนาที่ใกล้เคียงกันมากด้วยโดยที่ชั้น intermediate I หนาประมาณ 3-4 μm และชั้น intermediate II หนาประมาณ 5-6 μm โดยที่ชั้น intermediate ทั้งสองมีความหนารวมกันแล้วหนาโดยประมาณ 9 μm ดังภาพที่ 4.10



ภาพที่ 4.7 โครงสร้างจุลภาคของเหล็กชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อน H4-1m โดยการเคลือบชั้นรองพื้นนิเกิลเกิดด้วยไฟฟ้าจากกล่องจลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนนิ่งที่กำลังขยาย 2000 เท่า

ตารางที่ 4.2 เอกลักษณะของเหล็กชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนโดยการเคลือบชั้นรองพื้นนิเกิลเกิดด้วยไฟฟ้าที่ระยะเวลาในการจุ่มร้อน 1 นาที

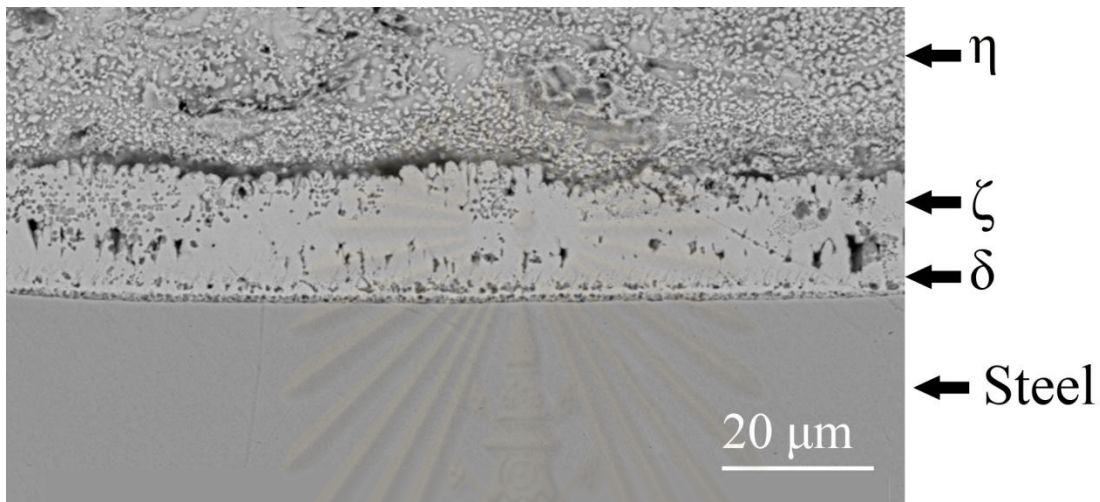
ชิ้นงาน	องค์ประกอบในชั้นเฟส Intermediate I (at%)				องค์ประกอบในชั้นเฟส Intermediate II (at%)			
	เหล็ก	นิเกิล	สังกะสี	เฟส	เหล็ก	นิเกิล	สังกะสี	เฟส
H1-1m	9.9	0	90.1	δ	7.6	0.6	91.8	$\delta+\zeta$
H2-1m	1	13.1	85.9	$\Gamma+\beta$	1.4	19	79.6	Γ
H3-1m	0	12.4	87.6	$\Gamma+\beta$	1.6	16.8	81.6	Γ
H4-1m	0.8	14.4	84.8	$\Gamma+\beta$	1.2	24.4	74.4	Γ



ภาพที่ 4.8 แผนภาพเฟส 3 องค์ประกอบของสังกะสี นิกเกิลและเหล็กที่อุณหภูมิ 450 °C[30]

ในทางกลับกันสำหรับชิ้นงาน H1 ซึ่งมีชั้นรองพื้นนิกเกิลที่มีความบางที่สุดนั้นเมื่อถูกนำไปชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนเป็นเวลา 1 นาที นั้นพบว่าไม่มีชั้นรองพื้นนิกเกิลอยู่ในโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน H1-1m อีกต่อไปดังภาพตัดขวางโดยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงซึ่งแสดงในภาพที่ 4.6 ก) และจากการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนนิ่ง และวิเคราะห์ธาตุประกอบในแต่ละเฟสด้วยการวิเคราะห์การกระจายพลังงานดังภาพที่ 4.9 ก็พบว่าทั้งโครงสร้างจุลภาคและส่วนประกอบทางเคมีของชิ้นงาน H1-1m มีความคล้ายคลึงกับชั้นเคลือบของเหล็กชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนโดยวิธีดั้งเดิมซึ่งประกอบไปด้วยเฟส δ และ ζ และชั้นเคลือบเหล่านี้ไม่มีนิกเกิลเป็นองค์ประกอบอีกต่อไปดังตารางที่ 4.2 ซึ่งเป็นการยืนยันได้ว่าชั้นรองพื้นนิกเกิลของชิ้นงาน H1-1m ได้เกิดการแพร่ออกไปจนหมดและโครงสร้างจุลภาคที่ได้มีความคล้ายกับในกรณีของเหล็กชุบสังกะสีโดยวิธีดั้งเดิม เพียงแต่สิ่งที่แตกต่างออกไปคือชั้นเคลือบแต่ละชั้นนั้นไม่สามารถที่จะระบุขอบเขตได้ชัดเจนดังเช่นในกรณีเหล็กชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนโดยวิธีดั้งเดิม ดังนั้นในการวัดความหนาโดยเฉลี่ยของชั้นเคลือบ intermediate ของชิ้นงาน H1-1m จึงวัดรวมเป็นชั้น

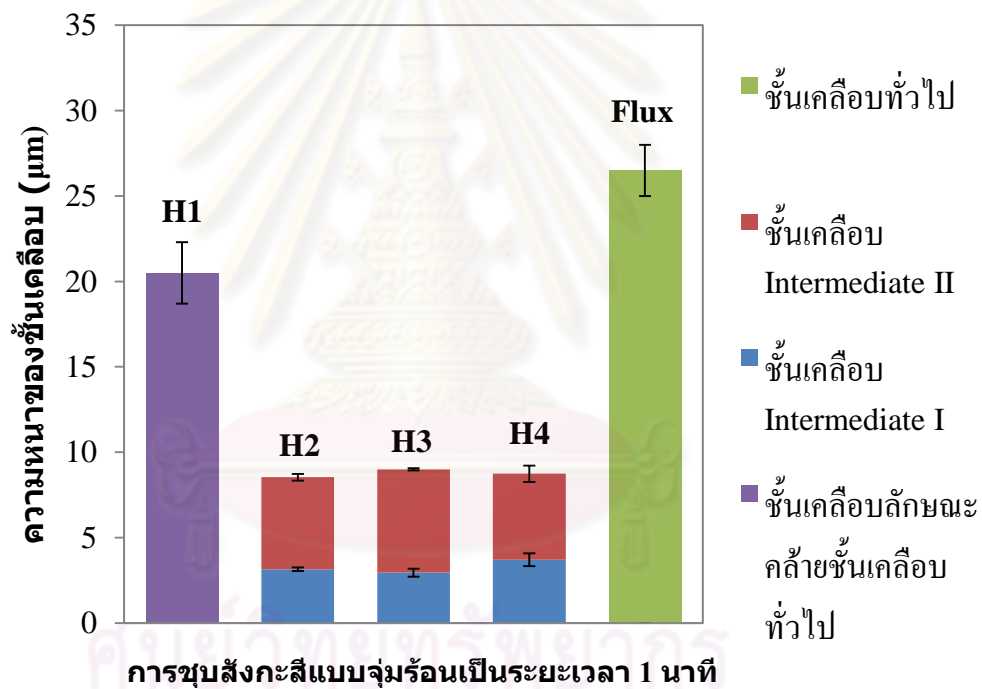
เป็นชั้นเคลือบเดียวที่เราเรียกชั้นเคลือบนี้ว่า "ชั้นเคลือบลักษณะคล้ายชั้นเคลือบดั้งเดิม" ซึ่งมีทั้งเฟสของ δ และ ζ ที่ประกอบด้วยสังกะสีและเหล็กเป็นส่วนใหญ่มีความหนารวมอยู่ที่ประมาณ $20.5 \mu\text{m}$ ดังแสดงไว้ในแผนภูมิแท่งสีม่วงในภาพที่ 4.10 ซึ่งใกล้เคียงกับชั้นงานเหล็กชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนโดยวิธีดั้งเดิมที่ระยะเวลาในการจุ่มร้อน 1 นาทีเท่ากันโดยความหนาโดยเฉลี่ยอยู่ที่ $26.5 \mu\text{m}$ ดังแสดงไว้ในภาพที่ 4.9 ซึ่งระบุในแผนภูมิว่า "Flux"



ภาพที่ 4.9 โครงสร้างจุลภาคของเหล็กชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อน H1-1m โดยการเคลือบชั้นรองพื้นนิเกิลด้วยไฟฟ้า ในกรณีที่ชั้นรองพื้นนิเกิลเกิดการแพร่ไปสู่สังกะสีหลอมเหลวจนหมดจากห้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนนิ่งที่กำลังขยาย 1000 เท่า

จากการเปลี่ยนแปลงความหนาของชั้นรองพื้นนิเกิลแต่คงเวลาในการชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนที่ 1 นาทีทำให้เห็นผลว่าสำหรับชั้นงาน H1 นั้นชั้นรองพื้นนิเกิลได้เกิดการแพร่ออกไปสู่สังกะสีหลอมเหลวในบ่อสังกะสีหมดแล้วทำให้สังกะสีและชั้นงานเหล็กสามารถเกิดการแพร่ระหว่างกันได้โดยไม่มีอะไรขวางกั้น และเนื่องจากการแพร่ระหว่างเหล็กและสังกะสีสามารถเกิดได้อย่างรวดเร็วจึงทำให้ชั้นเคลือบมีความหนาเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วและโครงสร้างจุลภาคที่ได้คล้ายกับโครงสร้างจุลภาคของเหล็กชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนโดยวิธีดั้งเดิม และจากความหนาของชั้นเคลือบ intermediate ของชั้นงาน H2-1m, H3-1m และ H4-1m ที่มีความใกล้เคียงกันคือประมาณ $9 \mu\text{m}$ ถึงแม้ว่าชั้นงานทั้งสามชั้นนี้มีความหนาของชั้นรองพื้นนิเกิลที่แตกต่างกันก็ตาม ดังนั้นจึงความเป็นไปได้ที่ชั้น intermediate ของเหล็กชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนโดยการเคลือบชั้นรองพื้นนิเกิลด้วยไฟฟ้านี้ในกรณีสำหรับชั้นงานที่มีขนาด $5 \times 2 \times 0.04$ ตารางเซนติเมตรที่ใช้ในงานศึกษานี้จะเข้าสู่สถานะคงตัว (steady state) ตั้งแต่ระยะเวลาในการชุบสังกะสีที่ 1 นาทีแล้ว ดังนั้นจึงเป็นเรื่องที่สนใจศึกษาต่อไปว่าหากเพิ่มระยะเวลาในการชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนแล้วชั้น intermediate จะมีการเติบโตไปอีกหรือไม่ จึงนำไปสู่หัวข้อในการศึกษาที่จะกล่าวถึงต่อไปที่จะศึกษาการพัฒนาของ

เฟส intermediate ที่เกิดขึ้นตามระยะเวลาในการจุ่มร้อนซึ่งเราจะเลือกที่จะคงความหนาของชั้นรองพื้นนิกเกิลไว้ที่ค่าหนึ่งแต่จากผลที่ได้ในการจุ่มร้อนเป็นระยะเวลา 1 นาทีนี้แสดงให้เห็นว่าชิ้นงานที่มีชั้นรองพื้นนิกเกิลหนา H1 ไม่เหมาะสมที่จะนำไปศึกษาตัวแปรเรื่องระยะเวลาในการชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนซึ่งจะต้องใช้ระยะเวลาในการจุ่มร้อนมากกว่าเดิม แต่ในทางกลับกันสำหรับชิ้นงาน H2, H3 และ H4 ชั้นรองพื้นนิกเกิลยังคงหลงเหลืออยู่ใต้ชั้นเคลือบของชิ้นงานเหล่านี้โดยมีความหนาภายหลังการจุ่มร้อนดังที่ได้แสดงไปแล้วดังแผนภูมิในภาพที่ 4.10 และเนื่องจากชิ้นงาน H3-1m และ H4-1m ยังคงมีเฟสของชั้นรองพื้นนิกเกิลภายหลังจากการจุ่มร้อนหนา 3 และ 4.8 μm ดังกราฟในภาพที่ 4.15 ซึ่งถือว่ามีความหนาเหมาะสมสมควร ดังนั้นในการศึกษาตัวแปรเรื่องระยะเวลาในการชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนเราจึงเลือกใช้ชิ้นงาน H2 ซึ่งมีความเหมาะสมเป็นชิ้นงานทดสอบต่อไป

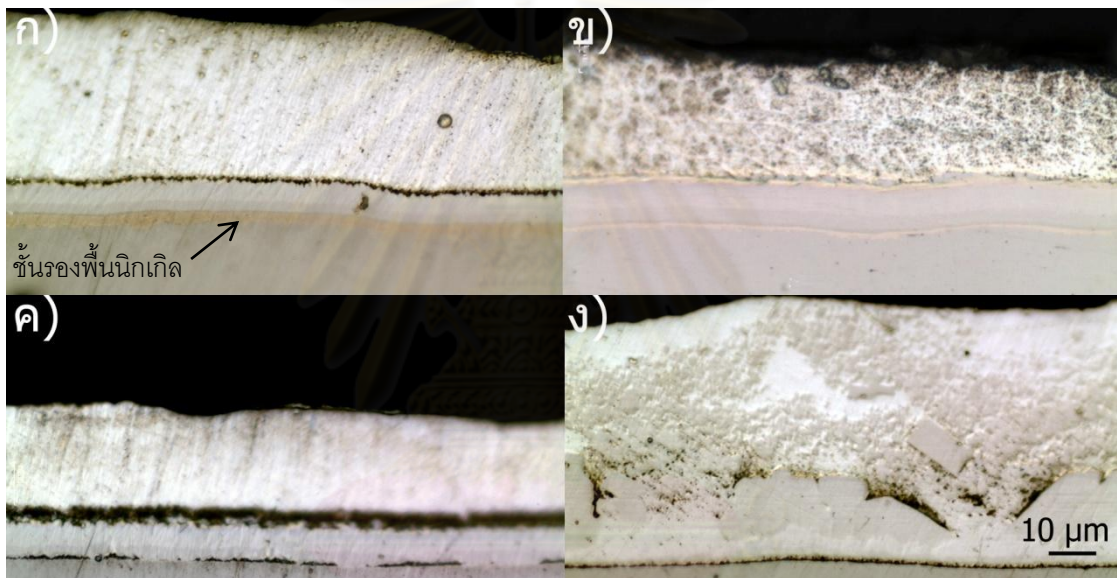


ภาพที่ 4.10 ความหนาเฉลี่ยของชั้นเคลือบของเหล็กชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนโดยการเคลือบชั้นรองพื้นนิกเกิลด้วยไฟฟ้าที่ความหนา H1 ถึง H4 และจุ่มร้อนเป็นระยะเวลา 1 นาที

4.2.2 การศึกษาโครงสร้างและเฟสของเหล็กชุบสังกะสีที่เปลี่ยนแปลงไปตามระยะเวลาในการชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อน

ชิ้นงาน H2 ถูกชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนเป็นระยะเวลา 10 วินาที, 1, 3 และ 6 นาที โดยชิ้นงานทั้งหมดได้ถูกนำมาศึกษาภาพตัดขวางของชิ้นงานด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงดังภาพที่ 4.11 ซึ่งสามารถสังเกตได้ว่าสำหรับชิ้นงาน H2 ที่มีระยะเวลาจุ่มร้อนน้อยกว่า 6 นาทีนั้นยังคงมี

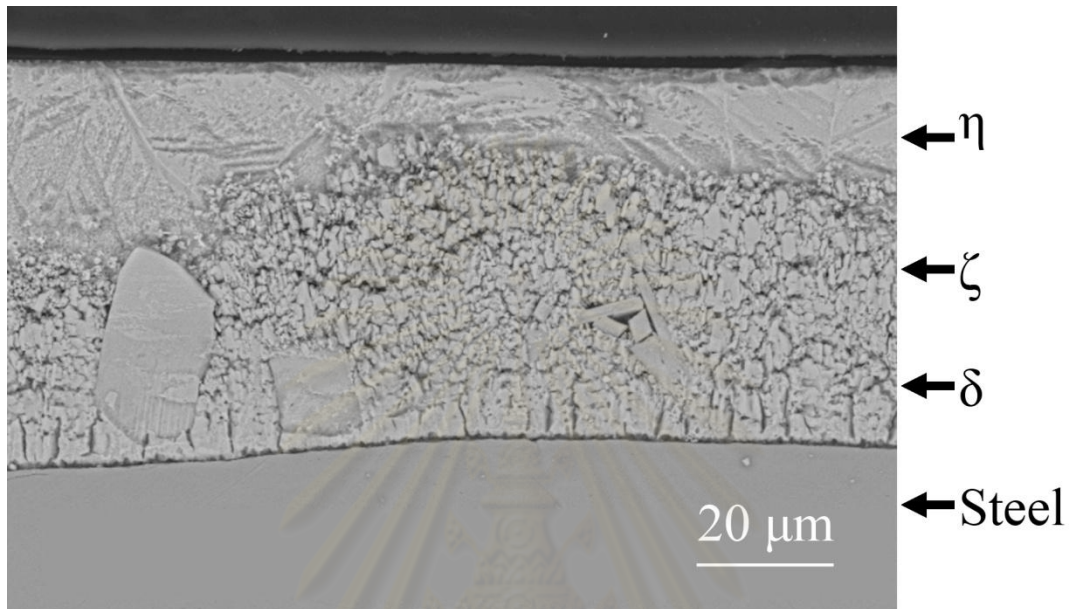
เฟสของชั้นรองพื้นนิกเกิดอยู่ในโครงสร้างอีกทั้งชั้นเคลือบ intermediate ที่ได้ก็มีความบางมาก สำหรับโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน H2-10s และ H2-3m นั้นไม่มีความแตกต่างจากในกรณีของ ชิ้นงาน H2-1m ซึ่งได้กล่าวไปแล้วก่อนหน้านี้คือต่างก็ประกอบไปด้วยชั้นรองพื้นนิกเกิด, ชั้นเคลือบ intermediate I, ชั้นเคลือบ intermediate II และชั้นเคลือบสังกะสีและมีองค์ประกอบของแต่ละเฟส ที่เหมือนกันดังแสดงไว้ในตารางที่ 4.3 โดยที่ความหนาของชั้นรองพื้นนิกเกิดที่ชุบด้วยไฟฟ้านั้นจะ ค่อยๆลดลงเรื่อยๆ จากภาพที่ 4.11 จะเห็นชั้นรองพื้นนิกเกิดเป็นสีชมพูอ่อนและสามารถเห็นได้ ชัดเจนในกรณีของชิ้นงาน H3-1m ซึ่งชั้นรองพื้นนิกเกิดนั้นเกิดการแพร่ออกไปจนใกล้หมด ซึ่งความ หนาของชั้นรองพื้นนิกเกิดที่มีอยู่ในโครงสร้างจุลภาคภายหลังการชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนแสดงไว้ดัง กราฟในภาพที่ 4.15



ภาพที่ 4.11 ภาพตัดขวางจากกล้องจุลทรรศน์แบบแสงของชิ้นงานเหล็กชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนโดย การเคลือบชั้นรองพื้นนิกเกิดด้วยไฟฟ้า ในระยะเวลาในการจุ่มร้อน ก) 10 วินาที, ข) 1 นาที, ค) 3 นาที และ ง) 6 นาที โดยที่ชั้นรองพื้นนิกเกิดมีความหนา H2

นอกจากนี้ความหนารวมของชั้นเคลือบ intermediate I และ II ยังมีความใกล้เคียงกันอีก ด้วยโดยชิ้นงาน H2-10s นั้นหนาประมาณ $7 \mu\text{m}$ ในขณะที่ชิ้นงาน H2-3m นั้นมีความหนาเฉลี่ย $9 \mu\text{m}$ เทียบเท่ากับชิ้นงาน H2-1m แสดงให้เห็นว่าจลนพลศาสตร์การเติบโต (Growth kinetics) ของ ชั้นเคลือบ intermediate ทั้งสองได้เข้าสู่สภาวะคงตัวของการแพร่เรียบร้อยแล้ว สำหรับชิ้นงาน H2-6m จากโครงสร้างจุลภาคในภาพ 4.11 ง) จะเห็นได้ว่าชั้นรองพื้นนิกเกิด H2 ที่มีความหนา ประมาณ $6 \mu\text{m}$ มีปริมาณไม่เพียงพอต่อระยะเวลาในการจุ่มร้อนที่นานถึง 6 นาทีและได้เกิดการ แพร่ออกไปจากชั้นเคลือบจนหมดทำให้โครงสร้างจุลภาคมีความคล้ายคลึงกับชิ้นงานเหล็กชุบ สังกะสีแบบจุ่มร้อนโดยวิธีดั้งเดิมที่ประกอบด้วยเฟส ζ , δ และ Γ ซึ่งสามารถยืนยันได้จากการ

วิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนนิ่งและการวิเคราะห์ธาตุประกอบในแต่ละเฟสด้วยการวิเคราะห์การกระจายพลังงานดังแสดงในภาพที่ 4.12 แต่สิ่งที่แตกต่างกันคือแต่ละชั้นเคลือบของชิ้นงาน H2-6m มีความสม่ำเสมอของเนื้อเยื่อที่แต่ละชั้นเคลือบก็ไม่สามารถแยกออกจากกันได้ด้วยการวิเคราะห์ด้วยตาเปล่าอีกต่อไป



ภาพที่ 4.12 โครงสร้างจุลภาคของเหล็กชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อน H2-6m โดยการเคลือบชั้นรองพื้นนิเกิลด้วยไฟฟ้า ในกรณีที่ชั้นรองพื้นนิเกิลเกิดการแพร่ไปสู่สังกะสีหลอมเหลวจนหมดจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนนิ่งที่กำลังขยาย 1000 เท่า

ตารางที่ 4.3 เอกลักษณะของเหล็กชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนโดยการเคลือบชั้นรองพื้นนิเกิลด้วยไฟฟ้า ที่ความหนา H2

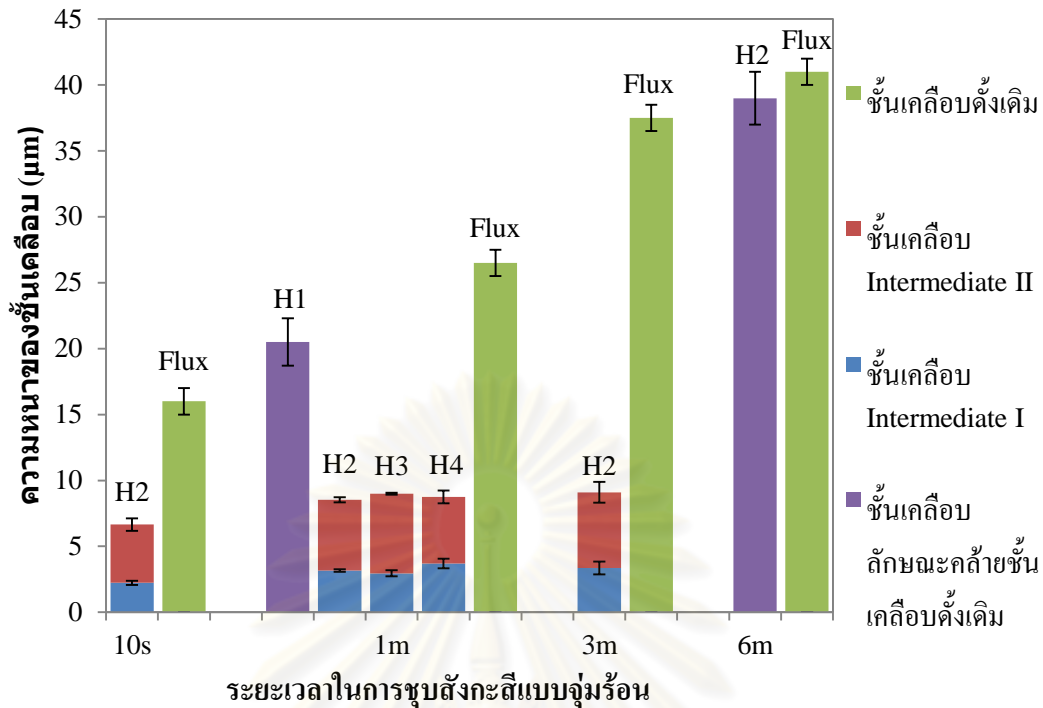
ชิ้นงาน	องค์ประกอบในชั้นเฟส Intermediate I (at%)				องค์ประกอบในชั้นเฟส Intermediate II (at%)			
	เหล็ก	นิเกิล	สังกะสี	เฟส	เหล็ก	นิเกิล	สังกะสี	เฟส
H2-10s	1.3	12.2	86.5	$\Gamma+\beta$	1.7	16.5	81.8	Γ
H2-1m	1	13.1	85.9	$\Gamma+\beta$	1.4	19	79.6	Γ
H2-3m	1.6	11.7	86.7	$\Gamma+\beta$	2.8	16.9	80.3	Γ
H2-6m	12.7	0	87.3	δ	6.3	0.8	92.9	ζ

ในการเปรียบเทียบความหนาของชั้นเคลือบสำหรับเหล็กชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนโดยการเคลือบชั้นรองพื้นนิเกิลด้วยไฟฟ้าเทียบกับเหล็กชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนโดยวิธีดั้งเดิม จากภาพที่ 4.13 เป็นที่ประจักษ์ว่าชิ้นงานเหล็กชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนโดยการเคลือบชั้นรองพื้นนิเกิลด้วย

ไฟฟ้านั้นต่างก็มีความหนาแน่นของชั้นเคลือบน้อยกว่าชั้นงานเหล็กชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนโดยวิธีดั้งเดิม (แสดงในภาพที่ 4.13 ว่า Flux) เป็นอย่างมากทั้งสิ้น ตัวอย่างเช่นความหนาของชั้นเคลือบของชั้นงาน H2-3m นั้นบางกว่าชั้นงาน Flux ที่เวลาในการจุ่มร้อน 3 นาทีเท่ากันถึง 3 เท่า ซึ่งการที่มีความแตกต่างในเรื่องความหนาเป็นอย่างมากรนี้เป็นผลจากการที่ชั้นรองพื้นนิเกิลที่ผลิตด้วยการชุบไฟฟ้าสามารถลดการเกิดปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วของเหล็กและสังกะสีทำให้ได้ชั้นเคลือบที่มีความบางและมีผลทำให้โครงสร้างจุลภาคของชั้นเคลือบเปลี่ยนแปลงไปจากการที่มีนิเกิลเพิ่มเข้ามาเป็นธาตุประกอบในแต่ละเฟสด้วย แต่อย่างไรก็ตามชั้นรองพื้นนิเกิลก็ยังคงเกิดการการแพร่ออกไปสู่สังกะสีหลอมเหลวที่อยู่ภายนอกอย่างต่อเนื่องตลอดระยะเวลาในการจุ่มร้อนและเมื่อใดก็ตามที่ชั้นรองพื้นนิเกิลได้หมดลงพื้นผิวเหล็กของชั้นงานและสังกะสีจะสามารถเกิดการแพร่ระหว่างกันด้วยจลนพลศาสตร์ที่รวดเร็วทำให้เกิดเฟส intermediate ของเหล็กและสังกะสีที่มีอัตราการเติบโตขึ้นอย่างรวดเร็วจนมีความหนาของชั้นเคลือบที่มาก

ดังนั้นในการศึกษาในหัวข้อนี้จึงทำให้ทราบว่าทราบใดที่ชั้นรองพื้นนิเกิลยังคงไม่เกิดการแพร่ออกไปจนหมดโครงสร้างจุลภาคของเหล็กชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนจะยังคงเป็นชั้นเคลือบ intermediate I และ II และสามารถควบคุมความหนาของชั้นเคลือบไว้ได้ในระดับที่ต่ำกว่า $10 \mu\text{m}$ แต่หากชั้นรองพื้นนิเกิลมีความหนาไม่เพียงพอกับระยะเวลาในการชุบจะส่งผลให้โครงสร้างจุลภาคของชั้นงานที่ได้กลับคืนเป็นชั้น intermediate ที่ประกอบไปด้วยเหล็กและสังกะสีเป็นเฟสของ ζ , δ และ Γ ซึ่งมีเฟสและความหนาเหมือนกับกรณีเหล็กชุบสังกะสีโดยวิธีดั้งเดิมเพียงแต่ความสม่ำเสมอของโครงสร้างจุลภาคของเฟสต่างๆจะลดลงแต่จะมีความอัดแน่นกันมากขึ้น สำหรับเหล็กที่มีชั้นรองพื้นนิเกิลนั้นเนื่องจากการเติบโตของชั้นเคลือบ intermediate I และ II ได้เข้าสู่สภาวะคงตัวเรียบร้อยแล้วที่ระยะเวลาในการจุ่มร้อนที่ 1 นาที ดังนั้นการเพิ่มระยะเวลาในการชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนจึงไม่เกิดประโยชน์เพราะจะเกิดการแพร่ออกไปของชั้นรองพื้นนิเกิลสู่สังกะสีหลอมเหลวภายนอกเรื่อยๆแต่ไม่ได้ทำให้ชั้นเคลือบ intermediate เกิดการพัฒนาขึ้นอีกต่อไป

นอกจากนี้ยังทำให้สามารถกำหนดความหนาของชั้นรองพื้นนิเกิลที่เหมาะสมได้อีกด้วย โดยสำหรับชั้นงานขนาดที่ทำการศึกษาความหนาที่เหมาะสมคือ $6 \mu\text{m}$ หรือ H2 ซึ่งเมื่อผ่านการชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนเป็นเวลา 1 นาทีจะทำให้มีชั้นรองพื้นนิเกิลเหลืออยู่ในโครงสร้างจุลภาคด้วยความหนาที่ไม่มากเกินไป ซึ่งการที่เราผลิตชั้นรองพื้นนิเกิลที่มีความหนาเกินความจำเป็นนั้นจะส่งผลต่อต้นทุนในการผลิต ส่วนการที่มีชั้นรองพื้นนิเกิลน้อยเกินไปก็มีโอกาสที่ชั้นรองพื้นนิเกิลจะเกิดการแพร่ออกไปจนหมดในระหว่างการจุ่มร้อนซึ่งก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคและการได้ชั้นเคลือบที่มีความหนาซึ่งเป็นสิ่งที่ไม่ต้องการ



ภาพที่ 4.13 ความหนาเฉลี่ยของชั้นเคลือบของเหล็กชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนโดยการเคลือบชั้นรองพื้นนิกเกิลด้วยไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงระยะเวลาในการจุ่มร้อนในช่วง 10 วินาทีถึง 6 นาที

จากการพัฒนาของชั้นเคลือบ intermediate ของชิ้นงาน H2 ที่ชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนเป็นระยะเวลา 10 วินาทีถึง 6 นาทีในภาพที่ 4.13 สามารถนำความหนาที่ได้ในแต่ละช่วงเวลามาประมาณจนศาสตร์ในการพัฒนาของชั้นเคลือบ intermediate โดยในการนี้ power-law growth equation จะนิยมใช้ในการทำนายอัตราการโตของชั้น intermediate ดังที่ได้กล่าวไปแล้วในหัวข้อ 2.1.3 ดังสมการ

$$Y = Kt^n$$

โดยที่ Y คือความหนาของชั้นเคลือบ,

K คือค่าคงที่ของอัตราในการโต (growth rate constant)

t คือระยะเวลาในการจุ่มร้อน,

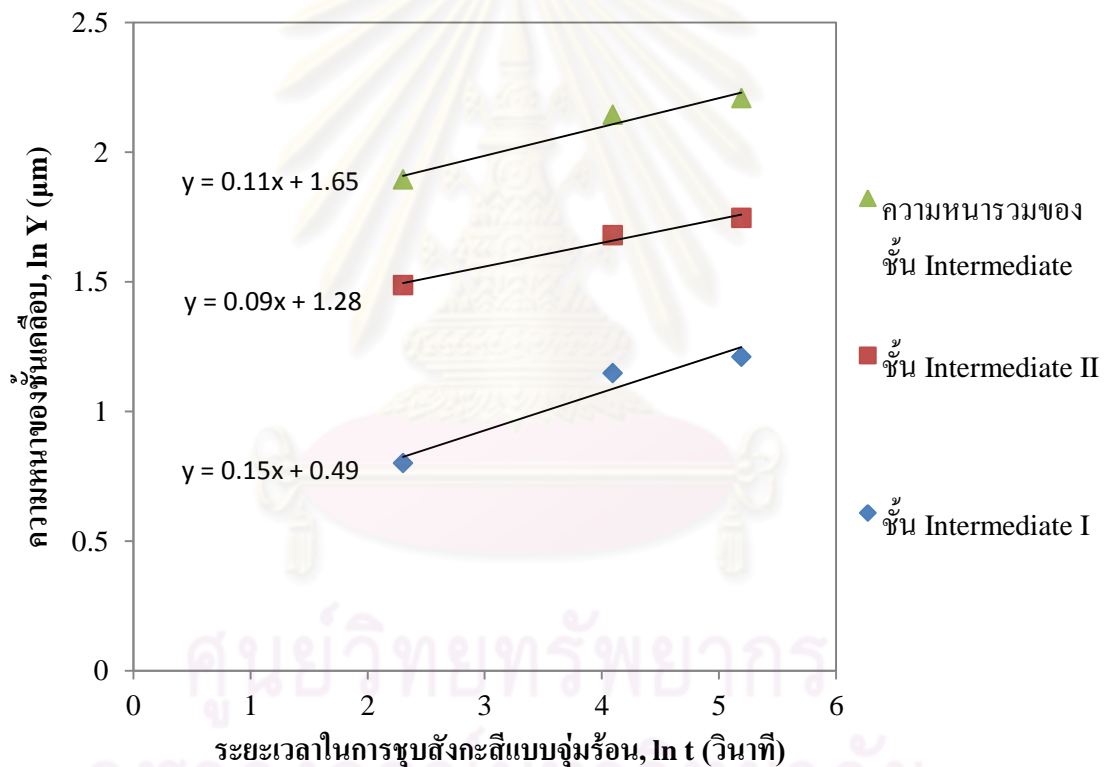
n คือค่าคงที่ของอัตราในการโตกับเวลา (growth-rate time constant)

จากสมการนี้สามารถหาค่าปริมาตรที่มรรวมชาติเพื่อที่จะลดทอนผลคูณเป็นผลบวกและแยกกำลังเป็นผลคูณได้เป็นสมการ

$$\ln Y = \ln K + n \cdot \ln t$$

เมื่อแทนค่า Y และ t ลงไปและพลอตเป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln Y$ และ $\ln t$ จากสมการเส้นตรงที่ได้นั้นจะสามารถหา $\ln K$ จากจุดตัดแกนและ n จากความชันของเส้นตรงได้

เมื่อแทนค่าทั้งหมดลงในกราฟจะได้กราฟและสมการเส้นตรงของชั้นเคลือบ intermediate I, II และชั้นเคลือบโดย intermediate รวมทั้ง I และ II ดังภาพที่ 4.14 โดยที่ค่าตัวแปร n และ K สำหรับสมการ power-law growth equation เพื่อทำนายการพัฒนาของชั้นเคลือบแต่ละชั้นตามระยะเวลาในการชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนโดยการเคลือบชั้นรองพื้นนิกเกิลเกิดด้วยไฟฟ้าจะแสดงไว้ดังตารางที่ 4.4 โดยถึงแม้ว่าค่าคงที่ของอัตราในการโตกับเวลา, (n) ที่ได้จะยังคงไม่ได้มีการศึกษาที่พิสูจน์ถึงชนิดของกลศาสตร์ในการแปรดังในกรณีของชั้นเคลือบของเหล็กชุบสังกะสีโดยวิธีดั้งเดิม แต่ค่า n ที่ได้ก็สามารถบ่งบอกได้ถึงอัตราในการโตของเฟสที่ต่ำมาก กล่าวคือสำหรับชั้นเคลือบรวมของเหล็กชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนโดยการเคลือบชั้นรองพื้นนิกเกิลเกิดด้วยไฟฟ้านั้นค่า n เท่ากับ 0.15 และเมื่อเทียบกับเหล็กชุบสังกะสีแบบดั้งเดิมซึ่งชั้นเคลือบรวมโดยทั่วไปแล้วค่า n อยู่ที่ประมาณ 0.4 ถึง 0.5 ก็พบว่าอัตราในการโตของชั้นเคลือบที่ต่ำกว่าประมาณ 3 เท่า



ภาพที่ 4.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของชั้นเคลือบต่อระยะเวลาในการชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อน

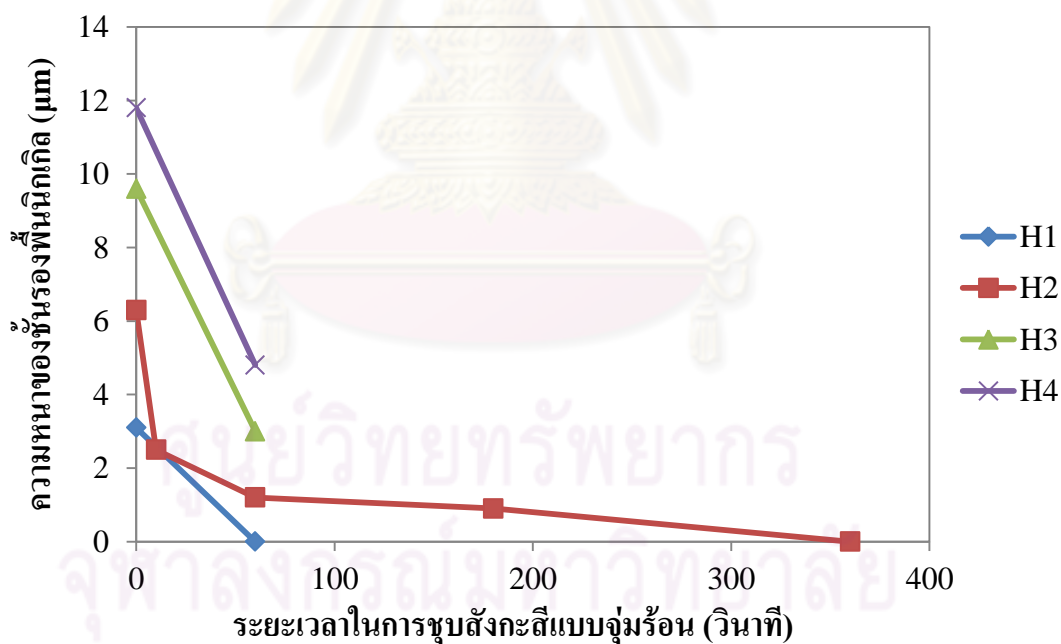
ตารางที่ 4.4 ค่าคงที่ของอัตราในการโตกับเวลา, (n) และค่าคงที่ของอัตราในการโต, (K) ของชั้นเคลือบของเหล็กชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนโดยการเคลือบชั้นรองพื้นนิกเกิลด้วยไฟฟ้า

ชั้นเคลือบโลหะผสม	ค่าของ n	ค่าของ K
Intermediate I	0.11	5.22
Intermediate II	0.09	3.61
รวม	0.15	1.63

จากความหนาของชั้นรองพื้นนิกเกิลที่เปลี่ยนแปลงไปตามระยะเวลาในการชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนดังหัวข้อที่ 4.2.1 และ 4.2.2 จะสามารถแสดงผลออกมาเป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของชั้นรองพื้นนิกเกิลกับระยะเวลาในการชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนได้ดังภาพที่ 4.15 จากความหนาของชั้นรองพื้นนิกเกิลที่แตกต่างกันคือ H1, H2, H3 และ H4 เมื่อผ่านการจุ่มร้อนเป็นเวลา 1 นาทีจะเห็นได้ว่าความหนาจะลดลงอย่างรวดเร็ว สำหรับ H2 ที่ได้เปลี่ยนแปลงระยะเวลาในการชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนจาก 10 วินาทีไปจนถึง 6 นาทีนั้นช่วยอธิบายกลไกในการแพร่ของชั้นรองพื้นนิกเกิลได้ดีขึ้น จากการที่ได้ทำการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคและวัดความหนาของชั้นรองพื้นนิกเกิลของชิ้นงาน H2-10s ทำให้มีข้อมูลมากขึ้นและแสดงถึงการแพร่ออกไปของนิกเกิลตามระยะเวลาในช่วงเริ่มต้นของการชุบสังกะสีได้ชัดเจนยิ่งขึ้นกล่าวคือในช่วง 10 วินาทีแรกนั้นความหนาของชั้นรองพื้นนิกเกิลลดลงอย่างมาก สาเหตุเนื่องจากในระหว่างการชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนนั้นทั้งเหล็กและชั้นรองพื้นนิกเกิลต่างก็เกิดการแพร่ออกไปสู่สังกะสีหลอมเหลวเพื่อเกิดเป็นชั้น intermediate แต่ในกรณีของเหล็กซึ่งอยู่ข้างในสุดนั้นจะต้องแพร่ผ่านชั้นรองพื้นนิกเกิลก่อนที่ไปสู่สังกะสีหลอมเหลวได้ ในระยะเริ่มต้นของการจุ่มร้อนนิกเกิลจึงสามารถเกิดการแพร่กับสังกะสีได้โดยตรงส่งผลให้อัตราในการแพร่ของชั้นรองพื้นนิกเกิลนั้นสูงและเป็นผลให้ความหนาของชั้นรองพื้นนิกเกิลในช่วงเวลา 10 วินาทีแรกนั้นลดลงจากความหนาเริ่มต้นอย่างมากจนกระทั่งเหล็กสามารถที่จะแพร่ผ่านชั้นรองพื้นนิกเกิลมาเกิดเป็นชั้น intermediate บนผิวชั้นรองพื้นนิกเกิลได้อัตราการแพร่ของชั้นรองพื้นนิกเกิลจึงเริ่มลดลงดังที่เห็นได้ชัดเจนในช่วง 10 วินาทีถึง 1 นาทีต่อมาว่าเส้นความหนาเริ่มมีการเปลี่ยนแปลงความชันโดยความชันลดลงแสดงถึงอัตราการแพร่ที่ลดลงด้วยเหตุผลข้างต้น จนกระทั่งช่วง 1 นาทีถึง 6 นาทีหากพิจารณาจากความชันของเส้นแนวโน้มที่ระยะเวลา 1 ถึง 3 นาทีและ 3 ถึง 6 นาทีจะเห็นได้ว่าความชันค่อนข้างคงที่ซึ่งสอดคล้องกับการพัฒนาของชั้น intermediate ที่เข้าสู่สภาวะคงตัวและมีความหนาคงที่และเพียงพอที่จะเป็นชั้นกัน

ระหว่างชั้นรองพื้นนิกเกิดกับสังกะสีหลอมเหลวจึงเป็นผลชั้นรองพื้นนิกเกิดจะค่อยๆลดลงอย่างช้าๆ ด้วยอัตราค่าค่อนข้างคงที่จนกระทั่งหมดลง

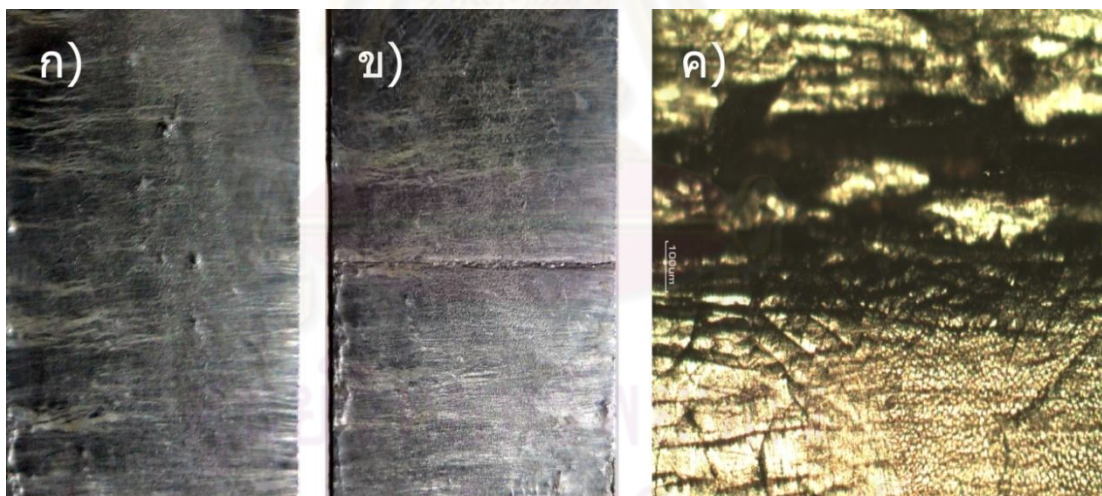
นอกจากนี้หากพิจารณาเฉพาะเส้นแนวโน้มที่ลากเชื่อมระหว่างระยะเวลาเริ่มต้นและที่ระยะเวลา 1 นาทีของชิ้นงาน H1, H2, H3 และ H4 ที่จุ่มร้อนเป็นเวลา 1 นาที จะเห็นว่าเส้นแนวโน้มของ H4 มีความชันมากที่สุด ในขณะที่ H1 มีความชันน้อยที่สุดซึ่งหมายถึงว่าชั้นรองพื้น H4 มีอัตราในการแพร่ออกไปสู่สังกะสีในช่วงแรกมากที่สุด สมมติฐานที่อาจจะเกิดขึ้นคือในขณะที่ชิ้นงานถูกจุ่มร้อนในสังกะสีหลอมเหลวนั้น เหล็กที่อยู่ด้านในสุดจะเกิดการแพร่ผ่านชั้นรองพื้นนิกเกิดเพื่อมาเกิดเป็นชั้นเคลือบ intermediate กับสังกะสี การที่ H4 มีความหนามากที่สุดจึงทำให้เหล็กต้องใช้ระยะเวลาที่มากขึ้นตามไปด้วยในการแพร่ผ่านชั้นรองพื้นนิกเกิดที่มีความหนาเพื่อมาเกิดเป็นชั้นเคลือบ intermediate ซึ่งจะกั้นระหว่างชั้นรองพื้นนิกเกิดกับสังกะสีหลอมเหลวอีกทีและทำให้อัตราในการแพร่ของนิกเกิดไปสู่สังกะสีลดลง ในทางกลับกันสำหรับชั้นรองพื้นนิกเกิด H1 ที่มีความบางมากเหล็กจะสามารถแพร่ผ่านชั้นรองพื้นนิกเกิดได้รวดเร็วและเกิดเป็นชั้นเคลือบ intermediate ได้เร็วจึงทำให้ชั้นรองพื้นนิกเกิดแพร่ออกไปด้วยอัตราที่น้อยกว่า



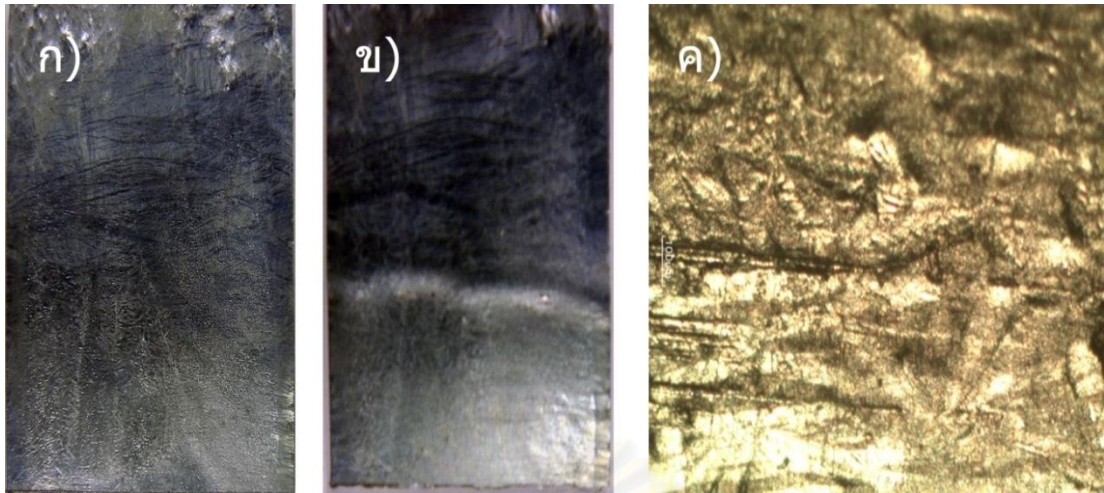
ภาพที่ 4.15 ความหนาของชั้นรองพื้นนิกเกิดที่เปลี่ยนแปลงไปตามระยะเวลาในการชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อน

4.3 การทดสอบการดัดโค้ง T-bend flexibility test

ในส่วนของการทดสอบการดัดโค้งนี้ได้ทำเพื่อทดสอบการยึดเกาะของชั้นเคลือบผิวที่มีต่อเนื้อพื้นเหล็กและเพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานเหล็กชุบสังกะสีเมื่อได้รับแรงอัด (compression) และแรงดึง (tension) เป็นที่ทราบกันดีว่าเหล็กชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนโดยวิธีดั้งเดิมนั้นมีสมบัติการยึดเกาะของชั้นเคลือบบนผิวเหล็กที่ค่อนข้างดีเนื่องจากพันธะโลหะของเหล็กและสังกะสีมีความแข็งแรงพอสมควรแต่เนื่องจากเฟส Γ ที่อยู่ติดกับเนื้อพื้นเหล็กของเหล็กชุบสังกะสีโดยวิธีดั้งเดิมนั้นมีความแข็งแรงประมาทจึงมักเกิดการหลุดร่อนออกจากเนื้อเหล็กได้เมื่อได้รับการดัดโค้ง ในขณะที่เหล็กชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนโดยการเคลือบชั้นรองพื้นนิเกิลเกิดด้วยไฟฟ้านั้นสมบัติการยึดเกาะยังไม่เป็นที่แน่ชัด ดังนั้นการศึกษาในส่วนนี้จะทำการเปรียบเทียบระหว่างชิ้นงานเหล็กชุบสังกะสีด้วยวิธีดั้งเดิมที่ผ่านการจุ่มร้อนเป็นระยะเวลา 1 นาทีและชิ้นงานเหล็กชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนโดยการเคลือบชั้นรองพื้นนิเกิลเกิดด้วยไฟฟ้า H4-1m ในการดัดโค้งนี้ชิ้นงานถูกยึดไว้โดยแท่นยึดและทำการดัดชิ้นงานให้ทำมุม 90 องศากับผิวหน้าตำแหน่งเดิม จากนั้นจึงดัดกลับมาที่ตำแหน่งเดิมโดยลักษณะทางกายภาพของชิ้นงานทั้งสองแสดงดังภาพที่ 4.16 และภาพที่ 4.17



ภาพที่ 4.16 ลักษณะทางกายภาพของชิ้นงานเหล็กชุบสังกะสีโดยวิธีดั้งเดิมที่จุ่มร้อนเป็นระยะเวลา 1 นาที ก) ชิ้นงานก่อนทดสอบการดัดโค้ง ข) ชิ้นงานภายหลังทดสอบการดัดโค้ง ค) ภาพขยายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง

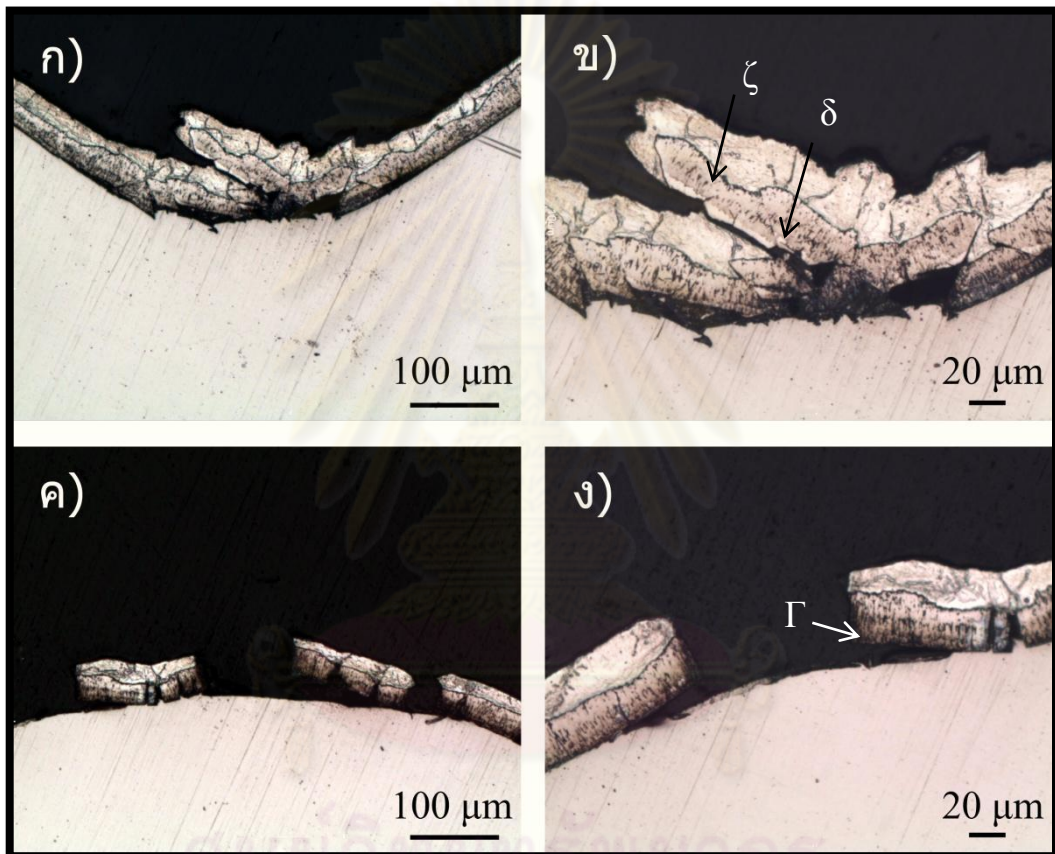


ภาพที่ 4.17 ลักษณะทางกายภาพของชิ้นงานเหล็กชุบสังกะสีโดยการเคลือบชั้นรองพื้นนิกเกิลด้วยไฟฟ้า H4-1m ก) ชิ้นงานก่อนทดสอบการดัดโค้ง ข) ชิ้นงานภายหลังจากทดสอบการดัดโค้ง ค) ภาพขยายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง

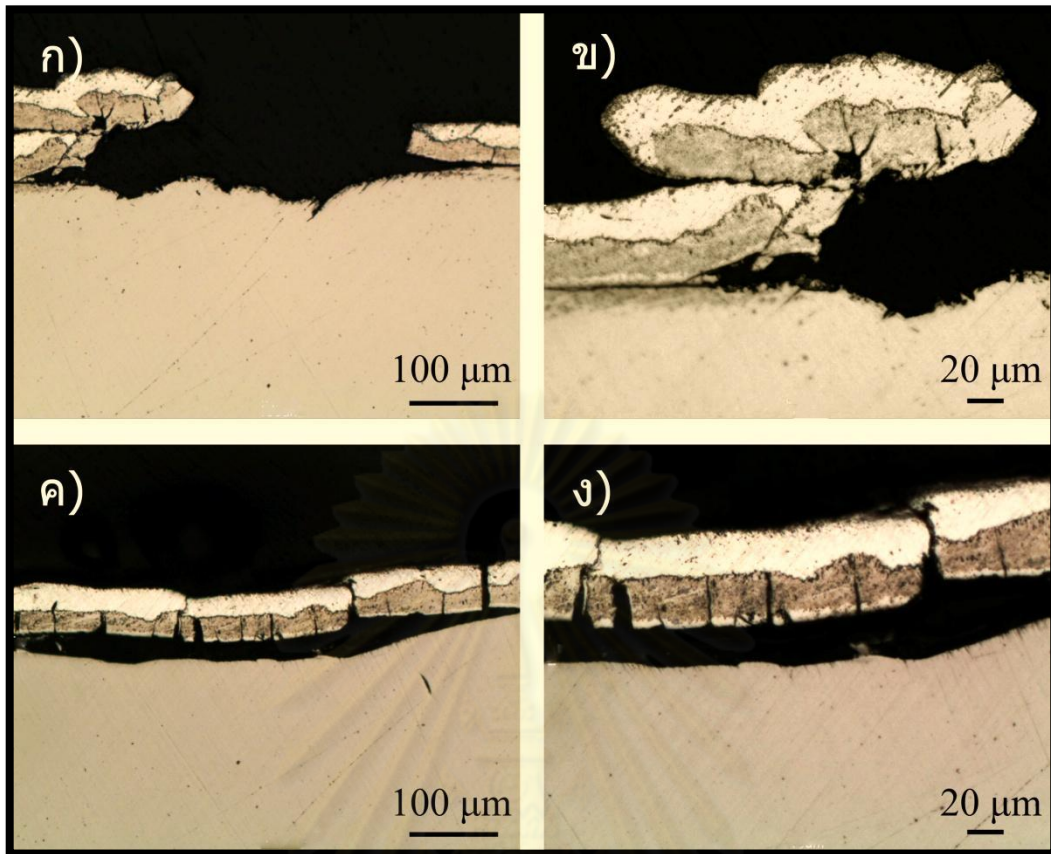
จากลักษณะทางกายภาพของชิ้นงานทั้งสองแสดงให้เห็นว่าชิ้นงาน H4-1m มีผิวหน้าส่วนรับแรงดึงที่ยังคงไม่เกิดการปริแตกให้เห็นอย่างเด่นชัดเมื่อวิเคราะห์ด้วยตาเปล่า เมื่อขยายบริเวณที่เกิดการดัดโค้งและดัดคืนรูปมาที่ตำแหน่งเดิมพบว่าผิวหน้ายังคงสามารถกลับประกบกันได้ค่อนข้างดีและชั้นเคลือบยังคงไม่มีการหลุดออกมาเป็นแผ่นเล็กๆ ในขณะที่ชิ้นงานเหล็กชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนด้วยวิธีดั้งเดิมผิวชิ้นงานส่วนที่รับแรงดึงไปและกลับไม่สามารถกลับมาประกบกันได้และเป็นเกิดร่องที่ใหญ่ชัดเจนแม้วิเคราะห์ด้วยตาเปล่าซึ่งสาเหตุหนึ่งเกิดจากความหนาของชั้นเคลือบที่แตกต่างจากชิ้นงาน H4-1m มาก ถึงแม้ชิ้นงานชิ้นนี้จะเกิดรอยแตกให้เห็นอย่างชัดเจนแต่ก็ยังไม่มีการลอกออกของชั้นเคลือบ (peel off) ซึ่งโดยมาตรฐานของเหล็กชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อน ASTM A123 และตามหลักการในการควบคุมคุณภาพที่ใช้ทั่วไปในอุตสาหกรรม ชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบสมบัติการยึดเกาะชั้นเคลือบจะต้องไม่เกิดการหลุดลอกของชั้นเคลือบ ดังนั้นชิ้นงานทั้ง 2 นี้ถือว่ามีคุณสมบัติเพียงพอ แต่อย่างไรก็ตามในการวิเคราะห์โดยภาพถ่ายจากด้านบนไม่สามารถแสดงให้เห็นว่าการปริแตกของชิ้นงานเกิดเข้าไปลึกเพียงใด ดังนั้นในส่วนต่อไปจึงทำการศึกษาโครงสร้างจุลภาคที่เปลี่ยนแปลงไปของชิ้นงานเมื่อได้รับแรงดึงและแรงอัดทั้งในขณะที่ทำการดัดโค้งไป 90 องศาและภายหลังจากการดัดชิ้นงานกลับมาที่ตำแหน่งเดิม

จากภาพตัดขวางของชิ้นงานเหล็กชุบสังกะสีด้วยวิธีดั้งเดิมที่ได้รับการดัดโค้งทำมุม 90 องศากับระนาบเดิมในส่วนที่ได้รับแรงอัดดังภาพ 4.18 ก) และ ข) นั้นสามารถสังเกตเห็นได้ว่าการเกิดช่องว่างขึ้นตรงบริเวณมุมที่ได้รับแรงอัดและชั้นเคลือบในส่วนที่ได้รับแรงอัดสูงเกิดการโก่งเดาะเฉพาะที่ (Local Buckling) และเกิดการแตกหักทำมุมประมาณ 45 องศากับหน้าตัดของชั้นเคลือบ

ด้วยตัวเองนอกจากนี้ยังเกิดการแยกทับกันขึ้นไปตามแนวการแตกหักซึ่งแสดงให้เห็นว่าในจุดที่รับแรงสูงสุดนั้นชั้นเคลือบ ζ , δ และ Γ ได้เกิดการแตกหักทุกชั้นแล้ว ในส่วนของบริเวณฝั่งตรงข้ามที่ได้รับแรงดึงในภาพ 4.18 ค) และ ง) ชั้นเคลือบเกิดการแตกหักตามกลศาสตร์การแตกหักรูปแบบที่ 1 (Mode I crack – Opening mode) ซึ่งเป็นการแตกหักที่ผิวหน้าของรอยแตกเคลื่อนที่ตั้งฉากกับตัวมันเอง ซึ่งจะเห็นว่าชั้นเคลือบสามารถยึดตัวได้น้อยจึงแตกออกเป็นท่อนๆ และแยกออกจากกัน อีกทั้งชั้นเคลือบบางส่วนก็ยังเกิดการหลุดร่อนของชั้นเฟส Γ ที่อยู่ติดกับเหล็กออกจากเนื้อพื้นของเหล็กอีกด้วย



ภาพที่ 4.18 ภาพตัดขวางของชิ้นงานเหล็กชุบสังกะสีโดยวิธีดั้งเดิมที่จุ่มร้อนเป็นเวลา 1 นาที หลังจากตัดโค้งทำมุม 90 องศาที่ระนาบเดิม ก) และ ข) ส่วนที่ได้รับแรงอัด ค) และ ง) ส่วนที่ได้รับแรงดึง

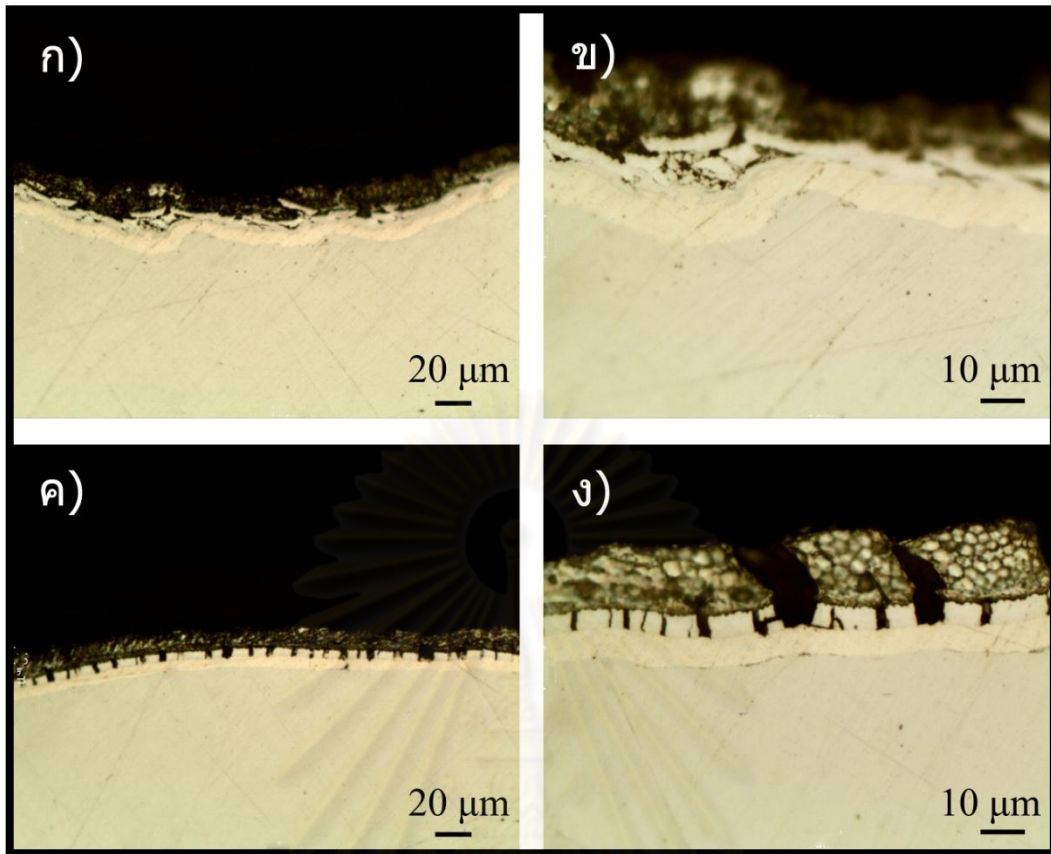


ภาพที่ 4.19 ภาพตัดขวางของชิ้นงานเหล็กชุบสังกะสีโดยวิธีดั้งเดิมที่จุ่มร้อนเป็นเวลา 1 นาที หลังจากตัดโค้งคืนสู่ตำแหน่งเดิม ก) และ ข) ส่วนที่ได้รับแรงอัด ค) และ ง) ส่วนที่ได้รับแรงดึง

เมื่อวิเคราะห์เพิ่มเติมจากภาคตัดขวางของชิ้นงานที่ถูกตัดโค้งกลับมาที่ตำแหน่งเดิมในภาพที่ 4.19 พบว่าชั้นเคลือบทั้งสองด้านของชิ้นงานฝั่งที่รับแรงดึงและฝั่งที่รับแรงอัดต่างกัน หลุดร่อนออกจากเนื้อพื้นเหล็กอย่างสมบูรณ์ กล่าวคือในส่วนที่รับแรงอัดดังภาพ 4.19 ก) และ ข) ชั้นเคลือบได้เปิดออกให้เห็นเนื้อเหล็กอย่างชัดเจนส่วนในด้านตรงข้ามที่รับแรงดึงถึงแม้ชั้นเคลือบที่แตกเป็นท่อนๆจะกลับมาชิดกันอีกในระหว่างการตัดโค้งกลับมาตำแหน่งเดิมแต่ชั้นเคลือบก็หลุดออกจากชั้นเหล็กที่เป็นเนื้อพื้นหมดแล้วดังนั้นความสามารถในการป้องกันการกัดกร่อนของชั้นเคลือบโดยกลไกแบบเป็นชั้นป้องกันในการแทรกซึมของไอออนที่มีผลเร่งการกัดกร่อนเช่นคลอไรด์ ไอออนจึงหมดไปเหลือเพียงแต่การป้องกันทางแอโนดิกในการเป็นแคโทดรีเฟียลแอโนดของชั้นเคลือบให้แก่เนื้อพื้นเหล็กเท่านั้น สำหรับสาเหตุของการแตกหักของชั้นเคลือบและหลุดออกจากเนื้อเหล็กบางส่วนนอกเหนือจากความหนาที่มากของชั้นเคลือบแล้วยังเกิดจากสมบัติความแข็งแรงเปราะของเฟส Γ และ δ โดยเฉพาะเฟส Γ ซึ่งเป็นเฟสที่มีความบางและมีความแข็งแรงเปราะมากเป็นพิเศษโดยเฟสนี้เป็นเฟสที่อยู่ถัดไปจากเนื้อพื้นเหล็ก ดังนั้นเมื่อได้รับแรงดึงหรือแรงอัดจึงสามารถที่จะแตกและหลุดออกจากเนื้อพื้นเหล็กได้ง่าย

สำหรับในกรณีของเหล็กชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนโดยการเคลือบชั้นรองพื้นนิกเกิลด้วยไฟฟ้า H4-1m นั้นหากพิจารณาภาพตัดขวางจากกล้องจุลทรรศน์แบบแสงในส่วนที่ได้รับแรงอัดที่เกิดจากการตัดโค้งทำมุม 90 องศา กับแนวระนาบเดิมจะพบว่าเฟส intermediate I และ II เกิดการแตกและบางจุดที่ได้รับแรงอัดสูงมีการแตกละเอียดลักษณะเป็นเกล็ดเล็กๆ โดยชั้น intermediate นี้ยังคงยึดติดกับชั้นรองพื้นนิกเกิลด้านล่างและเฟสของสังกะสีได้ดีดังภาพ 4.20 ก) และ ข) โดยเฟสของสังกะสีและชั้นรองพื้นนิกเกิลยังไม่ปรากฏเกิดการแตกหักให้เห็นอันเนื่องจากสมบัติความเหนียว (ductile) ของสังกะสีและนิกเกิลและความบางของชั้นเคลือบของเหล็กชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนโดยการเคลือบชั้นรองพื้นนิกเกิลด้วยไฟฟ้า และเมื่อพิจารณาภาพตัดขวางในด้านตรงข้ามที่รับแรงดึงในภาพ 4.20 ค) และ ง) จะเห็นได้ว่าชั้น intermediate I และ II สามารถที่จะรับแรงดึงได้น้อยเนื่องจากความแข็งแรงของเฟสทั้งสองซึ่งสำหรับชั้น intermediate II นั้นจากการวิเคราะห์เฟสจากองค์ประกอบของธาตุที่ได้จาก SEM-EDS ด้วยแผนภาพเฟส 3 องค์ประกอบพบว่าอยู่ในขอบเขตของเฟส Γ เช่นเดียวกับเฟส Γ ของเหล็กชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนโดยวิธีดั้งเดิมแม้ว่าจะมีที่นิกเกิลเป็นองค์ประกอบด้วยก็ตาม ดังนั้นจึงคาดว่าสมบัติความแข็งแรงควรจะใกล้เคียงกันด้วย จึงให้ผลที่คล้ายกันคือเกิดการแตกออกเป็นท่อนๆ ในขณะที่ชั้นเฟสของสังกะสีด้านบนส่วนใหญ่ยังคงสามารถยึดออกได้โดยไม่มีการแตกเกิดขึ้น

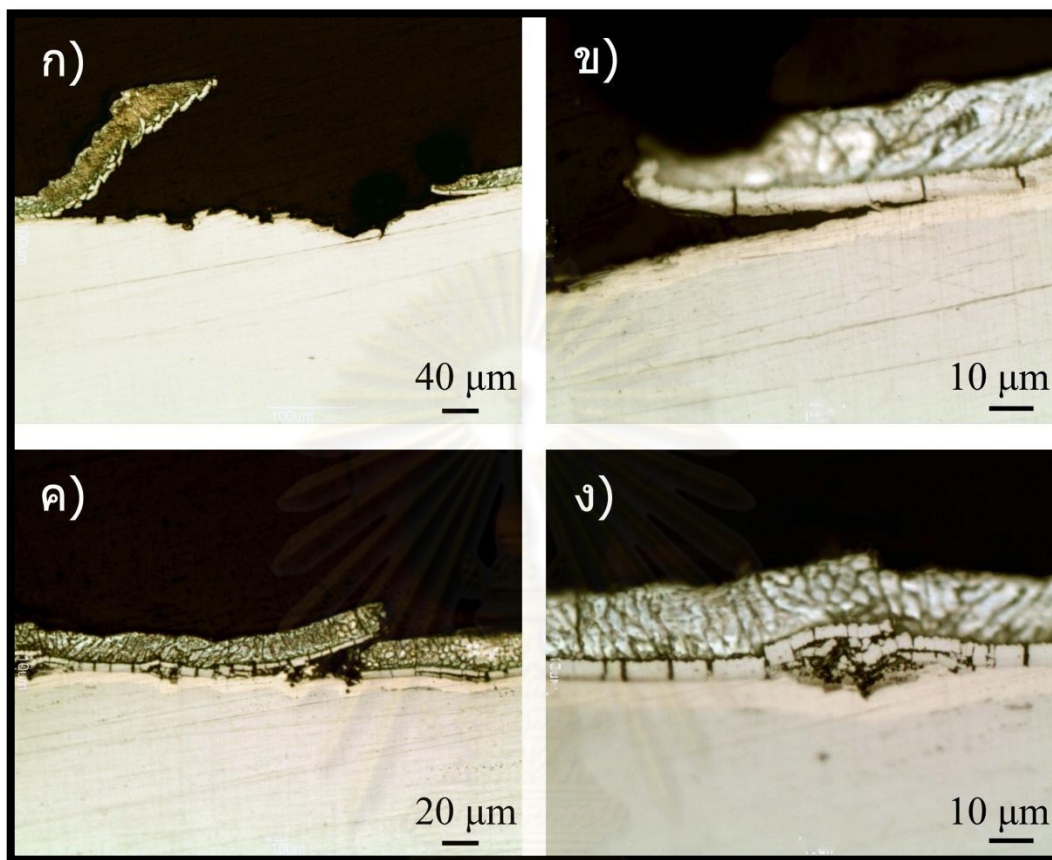
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาพที่ 4.20 ภาพตัดขวางของชิ้นงานเหล็กชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนโดยการเคลือบชั้นรองพื้นนิกเกิลด้วยไฟฟ้า H4-1m ภายหลังจากตัดโค้งทำมุม 90 องศาที่ระนาบเดิม ก)และข) ส่วนที่ได้รับแรงอัด ค) และ ง) ส่วนที่ได้รับแรงดึง

ในส่วนของภาพตัดขวางของชิ้นงานที่ถูกตัดโค้งกลับมาที่ตำแหน่งเริ่มต้นซึ่งจะทำให้เกิดความเสียหายมากที่สุดดังภาพที่ 4.21 ส่วนที่รับแรงอัดตามภาพ 4.21 ก) และ ข) จะพบว่าชั้นเคลือบตั้งแต่ intermediate II ขึ้นไปได้แตกออกและไม่คืนกลับมาที่ตำแหน่งเดิมส่งผลให้เหลือเฉพาะชั้นรองพื้นนิกเกิลเท่านั้นที่ยังคงติดอยู่กับเนื้อเหล็กเมื่อกลับมาพิจารณาอีกด้านหนึ่งที่รับแรงดึงดังภาพที่ 4.21 ค) และ ง) ชั้นเคลือบ intermediate ยังคงติดอยู่กับชั้นรองพื้นนิกเกิลและมีเพียงบางส่วนที่เกิดการรื้อถอนจากการตัดโค้งกลับของชิ้นงาน ดังนั้นชั้นเคลือบบางส่วนที่รับแรงดึงจึงยังคงสามารถทำหน้าที่เป็นชั้นป้องกันให้แก่เนื้อเหล็กได้และการที่มีชั้นรองพื้นนิกเกิลเหลืออยู่ในโครงสร้างจุลภาคหลังจากผ่านกระบวนการชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนก็ยังมีประโยชน์ในการยึดติดกับชั้นเนื้อพื้นเหล็กได้อย่างดีเนื่องจากสมบัติความเหนียวของนิกเกิลและนิกเกิลมีศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนที่สูงและมีอัตราการกัดกร่อนที่ต่ำจึงเป็นประโยชน์ในการต้านทานการกัดกร่อนที่ดี อีกทั้งการที่ชั้นเคลือบของเหล็กชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนโดยการเคลือบชั้นรองพื้นนิกเกิลด้วยไฟฟ้านั้นมีความ

บางกว่าเหล็กชุบสังกะสีโดยวิธีดั้งเดิมดังนั้นความเสียหายที่เกิดจากการตัดโค้งจึงถูกลดทอนลงไปได้อีกด้วย



ภาพที่ 4.21 ภาพตัดขวางของชิ้นงานชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนโดยการเคลือบชั้นรองพื้นนิกเกิลด้วยไฟฟ้า H4-1m ภายหลังจากตัดโค้งคืนสู่ตำแหน่งเดิม ก)และข)ส่วนที่ได้รับแรงอัด ค) และ ง) ส่วนที่ได้รับแรงดึง

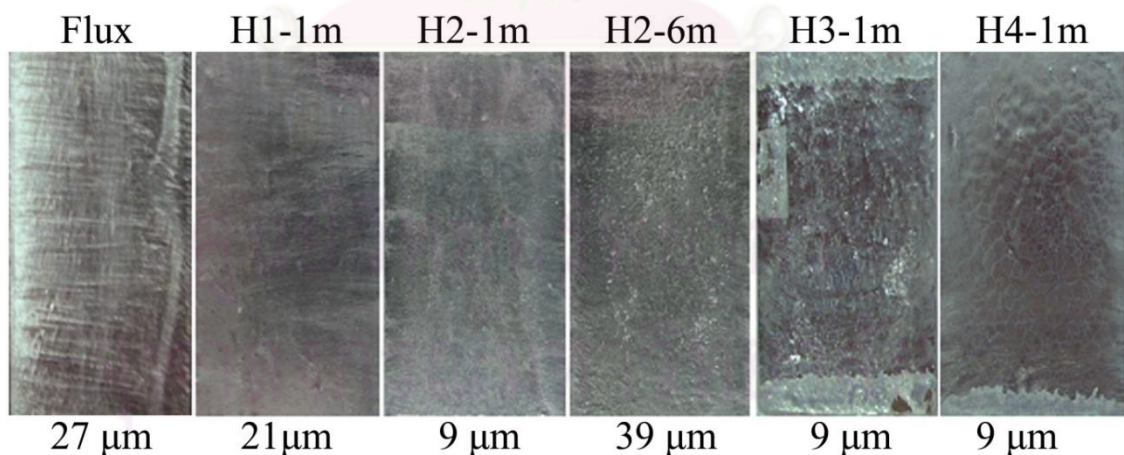
4.4 การศึกษาสมบัติความต้านทานการกัดกร่อน

4.4.1 การทดสอบความคงทนต่อละอองน้ำเกลือ (Salt spray testing)

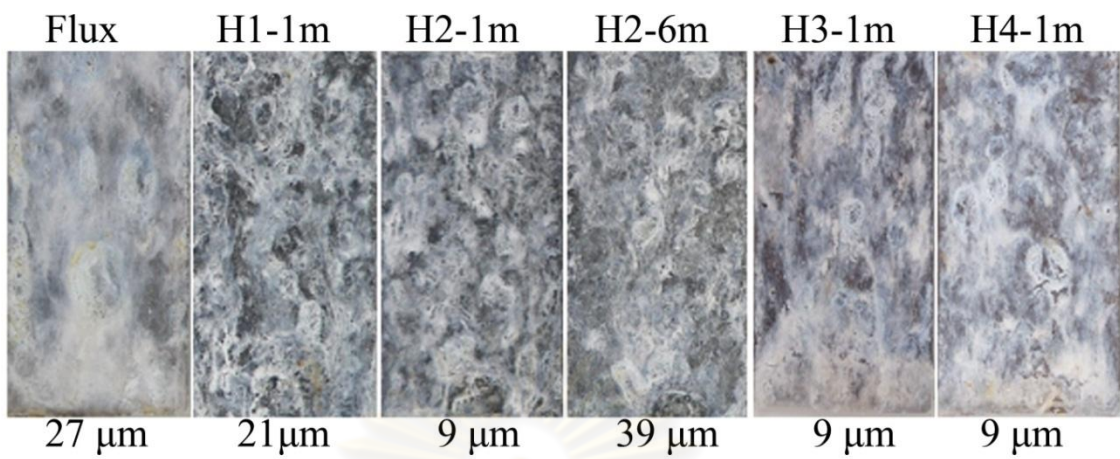
ในการทดสอบความคงทนต่อละอองน้ำเกลือ ชิ้นงานทดสอบทั้ง 6 สภาวะอันประกอบไปด้วย H1-1m, H2-1m, H3-1m, H4-1m, H2-6m และชิ้นงานเหล็กชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนโดยวิธีดั้งเดิม ถูกวางในแชมเบอร์ของเครื่องทดสอบโดยทำมุม 15-30 องศา กับแนวตั้งตามมาตรฐานการทดสอบด้วยหมอกเกลือ ASTM B117 โดยใช้สารละลายเกลือที่มีความเข้มข้น 5% ซึ่งเตรียมจากสารละลายโซเดียมคลอไรด์ในน้ำ เนื่องจากสังกะสีเป็นวัสดุที่มีความไวต่อการทำปฏิกิริยาสูงจากการทดสอบพบว่าชิ้นงานทั้งหมดเกิดสนิมขาวขึ้นบนพื้นผิวอย่างรวดเร็วภายในเวลา 2-3 วันของการทดสอบซึ่งเป็นการเกิดซิงค์ไฮดรอกไซด์, $Zn(OH)_2$ ที่เกิดจากความชื้นบริเวณผิวของชั้นเคลือบ

ด้านบนสุดที่เป็นสังกะสีบริสุทธิ์[31] โดย $Zn(OH)_2$ นี้เป็นฟิล์มที่ไม่เสถียรและสามารถหลุดออกได้ง่ายและหลุดออกได้เอง หากเก็บชิ้นงานไว้ในสภาวะบรรยากาศปกติชั้นเคลือบที่เป็นสังกะสีจะกลายเป็นซิงค์คาร์บอเนต, $ZnCO_3$ ที่มีสมบัติเป็นแพสซีเวชันและเป็นฟิล์มที่มีความเสถียรสามารถป้องกันการกัดกร่อนชั่วคราวให้แก่ชั้นเคลือบได้ แต่เนื่องจากการทดสอบความคงทนต่อละอองน้ำเกลือชิ้นงานสัมผัสกับละอองเกลือตลอดเวลา ดังนั้นชั้นเคลือบสังกะสีจึงเกิดแต่ $Zn(OH)_2$ เท่านั้นและเกิดการกัดกร่อนกินลึกเข้าไปในชั้นเคลือบเรื่อยๆ หลังจากติดตามการทดสอบที่เวลา 550 ชั่วโมงพบว่าเกิดสนิมแดงขึ้นที่ชิ้นงานเหล็กชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนโดยวิธีดั้งเดิมดังภาพที่ 4.22 ค) โดยสนิมแดงที่เกิดขึ้นนั้นเป็นผลผลิตผลของการกัดกร่อนที่แทรกซึมลึกเข้าไปถึงเนื้อเหล็กซึ่งหมายความว่าชั้นเคลือบสังกะสีและชั้น intermediate ของชิ้นงานที่ผลิตโดยวิธีดั้งเดิมไม่สามารถทำหน้าที่เป็นตัวป้องกันทางเซลล์ไฟฟ้าไม่ให้เกิดการกัดกร่อนแก่เนื้อเหล็กได้อีกต่อไป ต่อมาที่เวลาประมาณ 1000 ชั่วโมงของการทดสอบพบการเกิดของสนิมแดงเป็นบางจุดจำนวนเล็กน้อยบนผิวของชิ้นงาน H1-1m และ H2-6m ซึ่งชิ้นงานทั้ง 2 สภาวะนี้ชั้น intermediate ประกอบไปด้วยเฟสของสังกะสีและเหล็ก และในท้ายที่สุดได้ติดตามการเปลี่ยนแปลงของผิวหน้าชิ้นงานจนกระทั่งครบ 1400 ชั่วโมงของการทดสอบดังภาพที่ 4.22 จ) ซึ่งก็พบว่าชิ้นงานเหล็กชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนโดยมีนิกเกิลเป็นชั้นรองพื้นด้วยไฟฟ้า 3 ตัวอย่างคือ H2-1m, H3-1m และ H4-1m ทั้งหมดยังคงปราศจากสนิมแดง

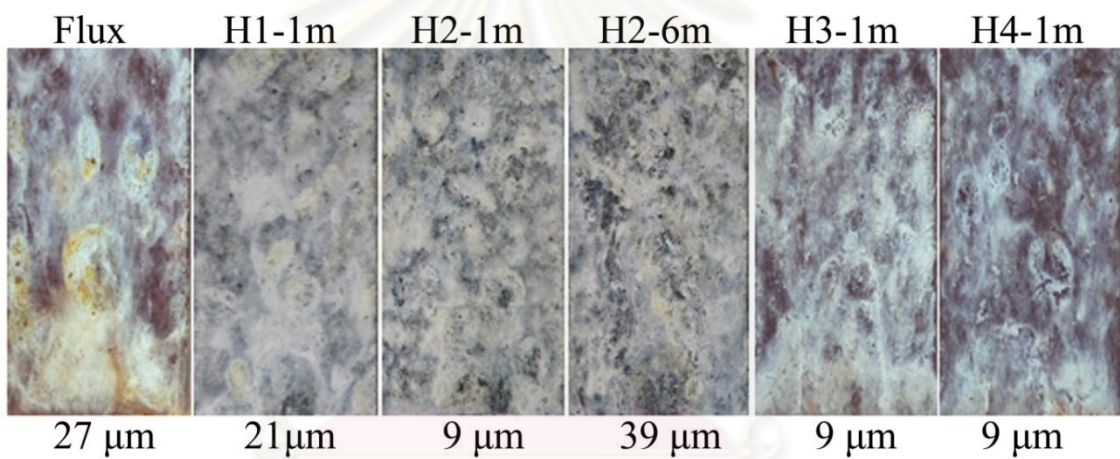
ก) 0 ชั่วโมง



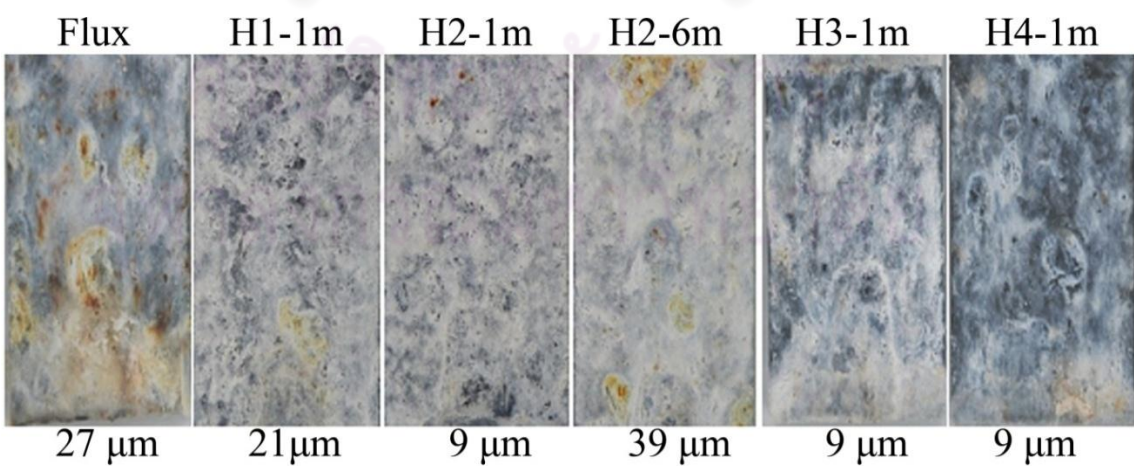
ข) 100 ชั่วโมง



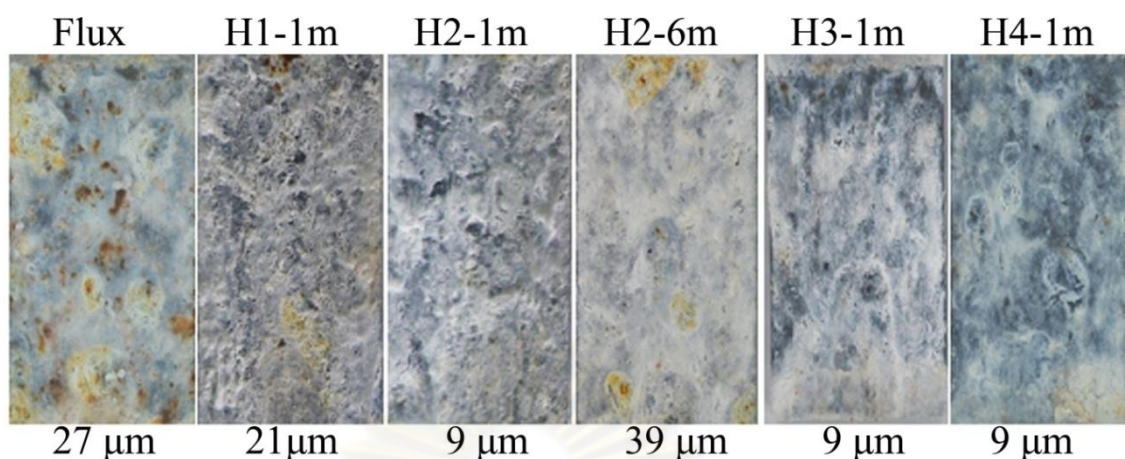
ค) 550 ชั่วโมง



ง) 1100 ชั่วโมง



จ) 1400 ชั่วโมง



ภาพที่ 4.22 ลักษณะทางกายภาพของชิ้นงานเหล็กชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนโดยวิธีดั้งเดิมและโดยการเคลือบชั้นรองพื้นนิกเกิดด้วยไฟฟ้า H1, H2, H3 และ H4 โดยกำหนดระยะเวลาในการชุบสังกะสี 1 นาที ภายหลังจากการทดสอบความคงทนต่อไอเกลือที่ระยะเวลา ก) 0, ข) 100, ค) 550, ง) 1100 และ จ) 1400 ชั่วโมง

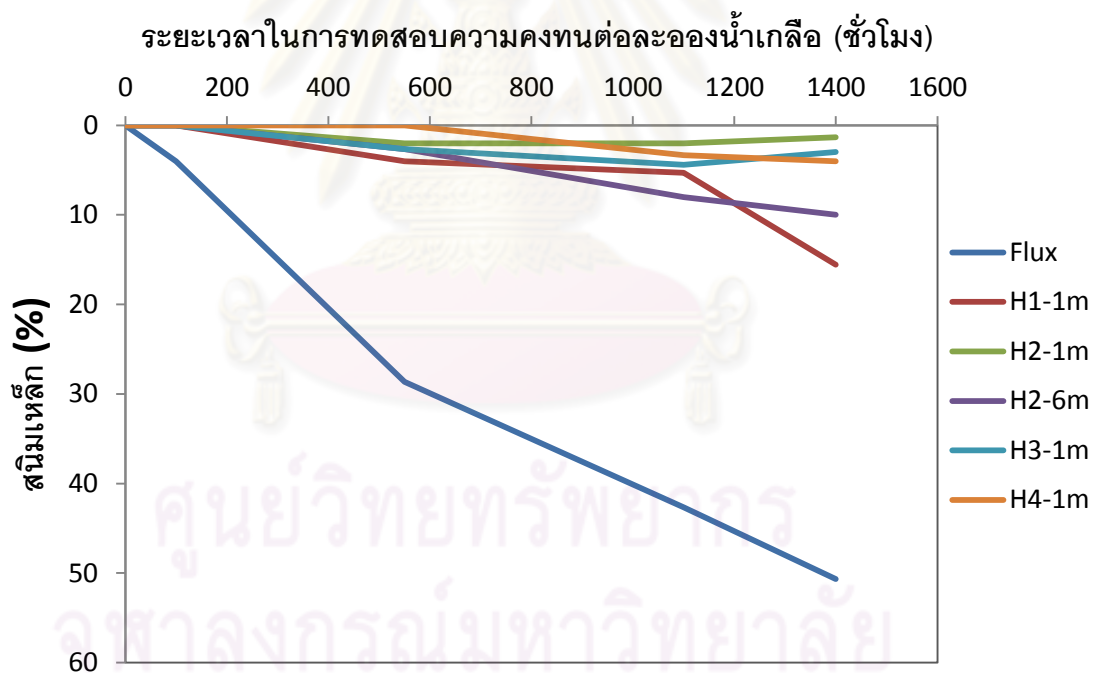
ผลการทดสอบความคงทนต่อละอองน้ำเกลือบ่งชี้ว่าถึงแม้ว่าชั้นเคลือบของเหล็กชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนโดยการเคลือบชั้นรองพื้นนิกเกิดด้วยไฟฟ้าจะมีความบางกว่าเหล็กชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนโดยวิธีดั้งเดิมมากกว่า 2 เท่า แต่สมบัติความต้านทานการกัดกร่อนจากการทดสอบความคงทนต่อละอองน้ำเกลือกลับมากกว่าถึง 2 เท่า ซึ่งส่วนหนึ่งเป็นผลจากการที่ชั้นเคลือบ intermediate ที่ประกอบด้วยสังกะสีและนิกเกิดนั้นมีความอัดแน่นมากกว่าทำให้สามารถทำหน้าที่เป็นตัวกีดขวางการแทรกซึมของไอออนที่ทำให้เกิดการกัดกร่อนรุนแรงเช่น Cl^- และ ClO_4^- ในสภาวะแวดล้อมที่มีคลอไรด์สูง [32,33] แต่สำหรับในกรณีของเหล็กชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนโดยวิธีดั้งเดิมนั้นชั้นเคลือบเฟส ζ ถึงแม้ว่าจะมีความหนาที่มากแต่ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของเฟสนี้มีความเป็น โครงสร้างแบบคอลัมน์นาร์ (columnar structure) ซึ่งไอออนที่ส่งผลให้เกิดการกัดกร่อนสามารถแทรกซึมเข้าไปในโครงสร้างได้ง่าย สำหรับชิ้นงาน H1-1m และ H2-6m ซึ่งเป็นชิ้นงานที่ชั้นรองพื้นนิกเกิดเกิดการแพร่ออกไปสู่สังกะสีจนหมดและโครงสร้างจุลภาคมีลักษณะคล้ายชิ้นงานที่ผลิตโดยวิธีดั้งเดิมนั้นเห็นได้ชัดว่ายังมีความต้านทานต่อการกัดกร่อนมากกว่าเหล็กชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนโดยวิธีดั้งเดิมพอสมควรแม้ว่าเฟสที่เกิดขึ้นจะมีความคล้ายคลึงกันก็ตาม ซึ่งเป็นผลจากการที่มีนิกเกิดเป็นโลหะผสมในเฟส δ และ ζ อยู่ในโครงสร้างในปริมาณเล็กน้อย[34,35] อีกทั้งหากพิจารณาโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานทั้งสองชิ้นนี้มีเกรนที่ละเอียดกว่าและไม่สามารถแยกแต่ละชั้นเคลือบออกได้ด้วยตาเปล่าดังที่ได้กล่าวในหัวข้อที่แล้วจึงมีผลต่อการเป็นชั้นป้องกันมากกว่าชิ้นงานที่ผลิตโดยดั้งเดิมอีกด้วย

ดังนั้นความสัมพันธ์ระหว่างการเกิดสนิมแดงของเหล็กต่อระยะเวลาในการทดสอบความคงทนต่อละอองน้ำเกลือสามารถสรุปออกมาได้ดังกราฟในภาพที่ 4.23 ซึ่งสามารถแบ่งชิ้นงานออกได้ 3 กลุ่มคือ

1. ชิ้นงานเหล็กชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนโดยวิธีดั้งเดิมซึ่งเกิดการกัดกร่อนและปรากฏสนิมแดงของเหล็กขึ้นบนผิวของชิ้นงานอย่างต่อเนื่องและเมื่อสิ้นสุดการทดสอบที่ระยะเวลา 1400 ชั่วโมงนั้นเกิดสนิมแดงขึ้นกว่า 50% ของชิ้นงาน

2. ชิ้นงานที่มีโครงสร้างคล้ายโครงสร้างที่ผลิตด้วยวิธีดั้งเดิมคือชิ้นงาน H1-1m และ H2-6m ซึ่งมีเริ่มปรากฏสนิมแดงขึ้นในช่วงท้ายของการทดสอบและเมื่อสิ้นสุดการทดสอบเกิดสนิมแดงที่ผิวชิ้นงานประมาณ 10-15% และ

3. กลุ่มชิ้นงานเหล็กชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนโดยการเคลือบชั้นรองพื้นนิกเกิลด้วยไฟฟ้าซึ่งแทบไม่เกิดสนิมแดงคือมีปริมาณเพียง 3% เท่านั้นและเกิดเฉพาะบริเวณที่ขอบของชิ้นงานทดสอบเท่านั้น



ภาพที่ 4.23 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของสนิมเหล็กต่อระยะเวลาในการทดสอบความคงทนต่อละอองน้ำเกลือของชิ้นงานเหล็กชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนโดยการเคลือบชั้นรองพื้นนิกเกิลด้วยไฟฟ้าและโดยวิธีดั้งเดิม

4.4.2 การทดสอบความต้านทานการกัดกร่อนโดยเทคนิคโพเทนชิโอดีนามิกส์ (Potentiodynamic)

ในการศึกษาส่วนนี้จะศึกษาพฤติกรรมการกัดกร่อนของชั้นเคลือบจากด้านบนของชิ้นงานที่เป็นสังกะสีบริสุทธิ์สู่ชั้นเคลือบที่อยู่ลึกลงไปด้านล่าง โดยเทคนิคโพเทนชิโอดีนามิกส์ (Potentiodynamic) และพลอตออกมาเป็นกราฟโพลาริเซชันแสดงถึงศักย์ไฟฟ้าและกระแสที่วัดได้ของชั้นเคลือบบริเวณนั้นๆ ซึ่งบ่งบอกความต้านทานการกัดกร่อนและอัตราในการกัดกร่อนเมื่อเกิดการกัดกร่อนขึ้น โดยในการทดสอบนี้ได้เลือกชิ้นงานเหล็กชุบสังกะสีที่มีความหนาของชั้นรองพื้น นิกเกิล 6 μm และทำการชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อน 1 นาที่ (H2-1m) เป็นตัวแทนของเหล็กชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนโดยการเคลือบชั้นรองพื้นนิกเกิลด้วยไฟฟ้าซึ่งชิ้นงาน H2-1m ที่เหมือนกันแต่ละชิ้นนี้ถูกเก็บไว้ในสารละลายเกลือที่มีความเข้มข้น 5% เช่นเดียวกับที่ใช้ในหัวข้อที่แล้วเป็นเวลา 1, 2 และ 3 สัปดาห์ และชิ้นงานที่ถูกเก็บไว้จนครบระยะเวลาดังกล่าวถูกนำมาทดสอบโพเทนชิโอดีนามิกส์ และกราฟแสดงเส้นโค้งโพลาริเซชันที่ได้ของชิ้นงานทั้ง 3 ชิ้นนี้ถูกนำมาเปรียบเทียบกับกราฟแสดงเส้นโค้งโพลาริเซชันของแผ่นเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ (กัดด้วยกรดก่อนทดสอบ) นิกเกิลชุบด้วยไฟฟ้า และสังกะสีชุบร้อนดังภาพที่ 4.24

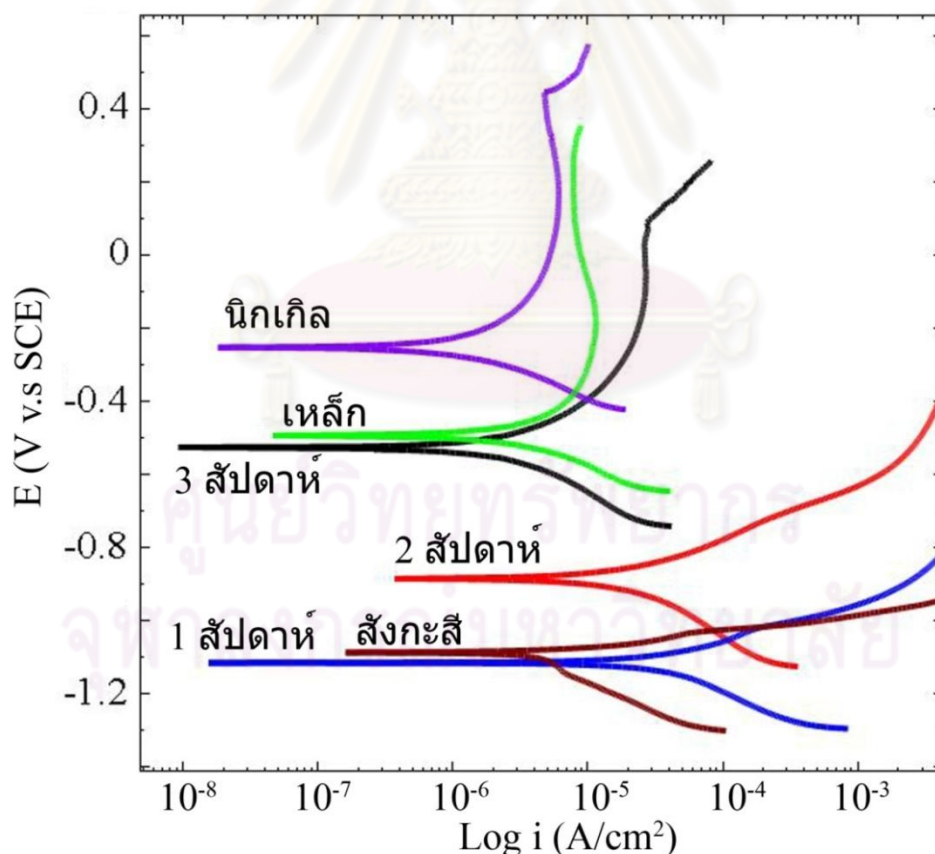
จากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มเวลาในการเก็บชิ้นงานในสารละลายเกลือส่งผลให้ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนของชิ้นงาน H2-1m เพิ่มขึ้นตามไปด้วย เริ่มจากชิ้นงานที่ถูกเก็บไว้เป็นเวลา 1 สัปดาห์เห็นได้ว่าค่าศักย์ไฟฟ้ายังคงไม่แตกต่างไปจากศักย์ไฟฟ้าของสังกะสีบริสุทธิ์เพียงแต่มีค่ากระแสที่เพิ่มขึ้นแสดงให้เห็นว่าชิ้นงานนี้ยังคงเกิดการกัดกร่อนอยู่เพียงแค่อบริเวณของชั้นเคลือบสังกะสีที่อยู่ลึกเข้าไปข้างใต้หรือถึงแค่อบริเวณชั้นเคลือบ intermediate I เท่านั้น

จนกระทั่งเมื่อเก็บชิ้นงาน 2 สัปดาห์มาทดสอบ พบว่าศักย์ไฟฟ้าได้เพิ่มขึ้นซึ่งคาดว่าลอไรด์ไอออนได้แทรกซึมเข้าไปถึงชั้นเคลือบ intermediate I และ II และมีความเป็นไปได้ที่การกัดกร่อนได้แทรกซึมไปถึงชั้นเคลือบ intermediate I ที่อยู่ด้านในซึ่งเป็นชั้นเคลือบที่ประกอบด้วยสังกะสีและนิกเกิลเป็นส่วนใหญ่ แต่อย่างไรก็ตามค่ากระแสการกัดกร่อนก็ได้เพิ่มมากขึ้นด้วย แสดงให้เห็นว่าถึงแม้ชั้น intermediate เหล่านี้จะมีความต้านทานการกัดกร่อนที่ดีกว่าชั้นเคลือบสังกะสีด้านนอกจากศักย์ไฟฟ้าที่สูงขึ้น แต่เมื่อเกิดการกัดกร่อนก็จะมีอัตราการกัดกร่อนที่เพิ่มขึ้นด้วย

สุดท้ายนี้สำหรับชิ้นงานที่ถูกเก็บไว้ 3 สัปดาห์ในสารละลายเกลือพบว่าค่าศักย์ไฟฟ้าสูงขึ้นกว่าชิ้นงานที่ถูกเก็บไว้ในสารละลายเกลือเป็นเวลา 1 และ 2 อาทิตย์เป็นอย่างมาก อีกทั้งชิ้นงานดังกล่าวยังมีค่ากระแสกัดกร่อนที่ต่ำลงกว่าลวง ซึ่งหมายถึงว่าชั้นผิวของชั้นเคลือบในขณะนี้สามารถถูกกัดกร่อนได้ยากและมีอัตราในการกัดกร่อนที่ต่ำ โดยค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน (E_{corr}) และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน (I_{corr}) แสดงข้อมูลไว้ดังตารางที่ 4.5 นอกจากนี้จาก

การที่ชิ้นงานที่ถูกเก็บไว้ 3 สัปดาห์และผ่านการทดสอบโพเทนชิโอดินามิกส์ ยังคงปราศจากสนิมแดงของเหล็ก ดังนั้นจึงสันนิษฐานได้ว่าการกัดกร่อนครวที่จะเกิดอยู่บริเวณระหว่างชั้นเคลือบ intermediate และชั้นรองพื้นนิกเกิลเท่านั้น

จากผลของกราฟแสดงเส้นโค้งโพลาราไรเซชันจากการศึกษาในหัวข้อนี้ยังไม่สามารถระบุพฤติกรรมการกัดกร่อนของแต่ละชั้นเคลือบได้ชัดเจนแต่จากการพิจารณาในภาพรวมสามารถแสดงให้เห็นได้ว่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆตามระยะทางที่ลึกลงไปจากผิวชั้นเคลือบที่เป็นสังกะสีด้านบนสู่ผิวเหล็ก แต่อย่างไรก็ตามศักย์ไฟฟ้าเหล่านี้ยังคงต่ำกว่าศักย์ไฟฟ้าของนิกเกิลและเหล็กที่เป็นโลหะที่ต้องการจะป้องกันการกัดกร่อน และการที่ชั้นเคลือบด้านในมีศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนที่สูงกว่าชั้นเคลือบด้านนอกทำให้ชั้นเคลือบด้านนอกสามารถทำหน้าที่เป็นแซ็กครีฟิเชียลแอนโอดป้องกันการกัดกร่อนแบบคาโทดิกให้กับชั้นเคลือบด้านในได้ ซึ่งสอดคล้องกับสมบัติความต้านทานการกัดกร่อนที่ดีเยี่ยมของชั้นเคลือบสังกะสี-นิกเกิลที่ผลิตจากการผลิตชั้นรองพื้นและผลจากการทดสอบความคงทนต่อละอองน้ำเกลือ ดังนั้นเพื่อที่จะอธิบายพฤติกรรมการกัดกร่อนของชั้นเคลือบแต่ละชั้นให้ชัดเจนยิ่งขึ้นจึงนำไปสู่การศึกษาในหัวข้อต่อไป



ภาพที่ 4.24 กราฟโพลาราไรเซชันของชิ้นงานแผ่นเหล็กชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนโดยการเคลือบชั้นรองพื้นนิกเกิลด้วยไฟฟ้า H2-1m ที่ถูกเก็บไว้ในในสารละลายเกลือ 5% เป็นระยะเวลา 0-3 สัปดาห์ ด้วยเทคนิคโพเทนชิโอดินามิกส์

ตารางที่ 4.5 ศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนและความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนของกราฟโพลาริเซชันจากภาพที่ 4.24

ระยะเวลา (สัปดาห์)	E_{cor} (V v.s SCE)	$I_{cor} \times 10^{-5}$ (A/cm ²)
0 (สังกะสี)	-1.10	0.43
1	-1.11	3.10
2	-0.88	2.17
3	-0.53	0.27

4.4.3 การทดสอบความต้านทานการกัดกร่อนของแต่ละชั้นเคลือบโดยเทคนิคกัลวานอสแตติกและโพเทนชิโอดีนามิกส์ (Galvanostatic and Potentiodynamic)

การศึกษาพฤติกรรมการกัดกร่อนของชั้นเคลือบแต่ละชั้นที่เกิดขึ้นของเหล็กชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนโดยมีนิกเกิลเป็นชั้นรองพื้นด้วยไฟฟ้านั้น ได้เลือกทำการทดสอบชิ้นงาน H2-1m เช่นเดียวกับในหัวข้อที่แล้วเป็นชิ้นงานตัวแทนในการศึกษา โดยชิ้นงานทดสอบถูกวิเคราะห์ด้วยเทคนิคกัลวานอสแตติกและโพเทนชิโอดีนามิกส์สำหรับในขั้นตอนแรกนั้นชิ้นงานถูกทดสอบด้วยเทคนิคกัลวานอสแตติก potential-time เพื่อลอกชั้นเคลือบของเหล็กชุบสังกะสีออก

ผลของความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้ากับเวลาที่ได้ (potential-time plot) ดังภาพที่ 4.25 ซึ่งให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงของศักย์ไฟฟ้าที่เด่นชัดอยู่ 5 ช่วง ทำให้สามารถใช้เทคนิคนี้ในการลอกชั้นเคลือบออกทีละชั้นเพื่อที่จะศึกษาสมบัติความต้านทานการกัดกร่อนของแต่ละชั้นเคลือบได้และสามารถจำแนกจำนวนเฟสของชั้นเคลือบที่เกิดขึ้นได้จากจำนวนของการเปลี่ยนศักย์ไฟฟ้า (potential shift) ที่เกิดขึ้น โดยการเปลี่ยนศักย์ไฟฟ้า 5 ช่วงนี้ สัมพันธ์กับโครงสร้างจุลภาคโดยดั้งเดิมของเหล็กชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนโดยการเคลือบชั้นรองพื้นนิกเกิลด้วยไฟฟ้าที่ประกอบไปด้วยเฟสของสังกะสี, เฟส intermediate I, เฟส intermediate II, เฟสของชั้นรองพื้นนิกเกิล และชั้นเนื้อเหล็ก ดังภาพที่ 4.7 ที่แสดงไว้ในหัวข้อที่ 4.2 ที่ผ่านมา โดยหากพิจารณาจาก potential time plot สามารถสันนิษฐานได้ว่าดังนี้

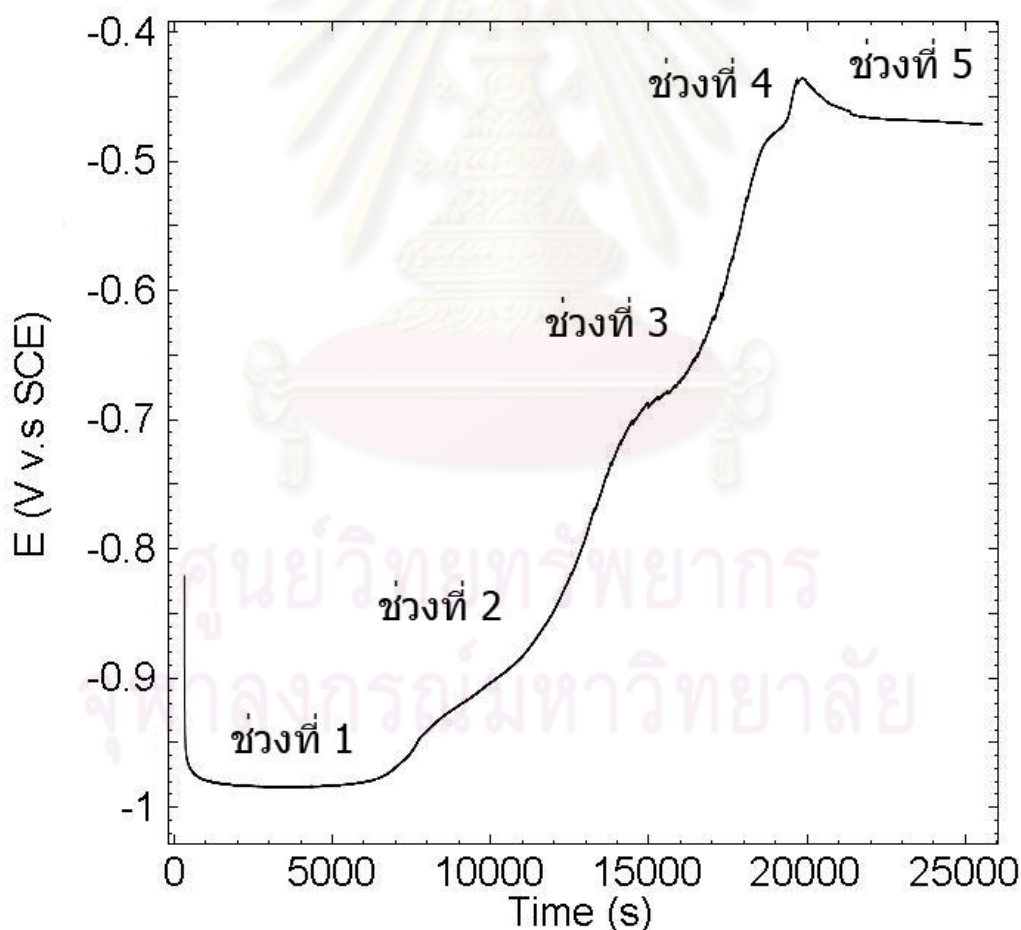
ในช่วง 7,000 วินาทีแรก ค่าศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นมีค่าเกือบคงที่ที่ประมาณ -0.99 V v.s SCE ซึ่งค่าศักย์ไฟฟ้านี้เป็นผลจากการให้กระแสคงที่ 3 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตรแก่ชิ้นงานและชั้นสังกะสีซึ่งเป็นชั้นเคลือบผิวชั้นแรกสุดถูกลอกออกให้ออกมาอยู่ในสารละลายทดสอบ

ต่อมาในช่วงที่ 2 ที่ระยะเวลาตั้งแต่ 9,000 - 11,000 วินาที เริ่มมีการกัดกร่อนในเฟสของชั้นเคลือบ intermediate II ซึ่งมีศักย์ไฟฟ้าเกือบคงที่อยู่ที่ประมาณ -0.90 V v.s SCE

จากนั้นในช่วงที่ 3 ที่ระยะเวลาตั้งแต่ 14,000 - 16,000 วินาที การกัดกร่อนในเฟสของชั้นเคลือบ intermediate I ซึ่งอยู่ในช่วงศักย์ไฟฟ้าเกือบคงที่ที่ -0.68 V v.s SCE

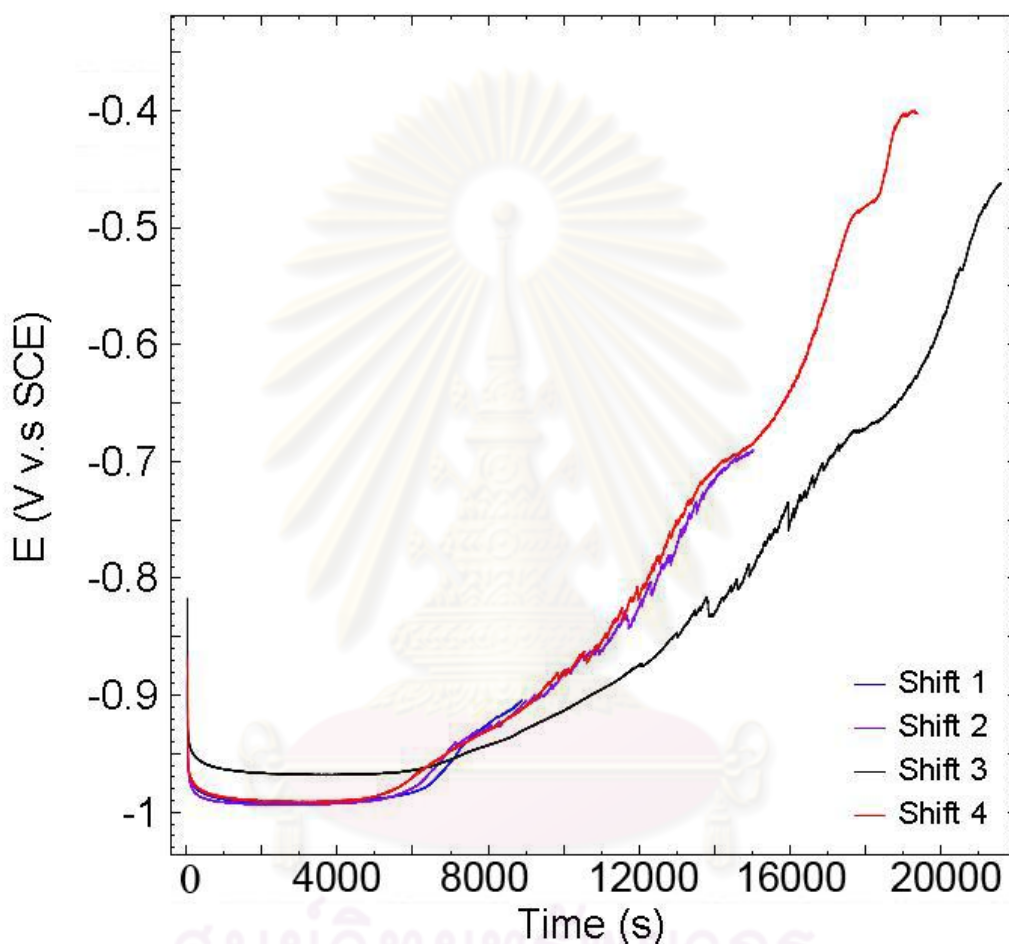
เกิดการเปลี่ยนแปลงศักย์ไฟฟ้าอีกครั้งหนึ่งจนเข้าสู่ช่วงที่ 4 ที่ระยะ 19,000 - 20,000 วินาที ศักย์ไฟฟ้าคงที่ที่ -0.47 V v.s SCE และมีช่วงค่อนข้างแคบจึงมีความเป็นไปได้ที่อาจมีชั้นเฟส Intermediate ที่สาม เกิดขึ้นเป็นชั้นเฟสที่มีความหนาค่อนข้างน้อยอีกหนึ่งชั้น

ในช่วงที่ 5 ซึ่งเป็นช่วงสุดท้ายที่ระยะเวลา 21,000 วินาที เป็นต้นไป ค่าศักย์ไฟฟ้ามีค่าเกือบคงที่ที่ประมาณ -0.45 V v.s SCE โดยในช่วงนี้คาดว่ามีการลอกออกของชั้นรองพื้นนิกเกิลที่ยังหลงเหลืออยู่หลังผ่านกระบวนการชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อน (-0.43 V v.s SCE) ซึ่งในช่วงนี้สารละลายทดสอบจะเริ่มเปลี่ยนเป็นสีเขียวเข้มและสีน้ำตาลแดงในที่สุด



ภาพที่ 4.25 กราฟ potential-time plot ของชิ้นงานแผ่นเหล็กชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนโดยการเคลือบชั้นรองพื้นนิกเกิลเกิดด้วยไฟฟ้า H2-1m ด้วยเทคนิคกัลวานอสแตติกในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 5% โดยน้ำหนัก โดยมีค่ากระแสคงที่ 3 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร

หลังจากนั้นได้ใช้เทคนิคกัลวานอสแตติกโดยให้ค่ากระแสไฟฟ้าคงที่ 3 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร เป็นระยะเวลาต่างๆ และหยุดจ่ายกระแสไฟเมื่อเส้นกราฟ Potential-time plot เริ่มมีค่าคงที่ในแต่ละช่วง ทั้งนี้เพื่อให้ได้ชิ้นงานที่มีผิวหน้าเป็นเฟสชั้นเคลือบชนิดต่างๆ ดังแสดงในภาพที่ 4.26 และชิ้นงานที่ถูกลอกชั้นเคลือบเหล่านี้ถูกนำไปทดสอบด้วยเทคนิคโพเทนชิโอไดนามิกส์ต่อไป



ภาพที่ 4.26 กราฟ potential-time plot ของชิ้นงานแผ่นเหล็กชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนโดยการเคลือบชั้นรองพื้นนิกเกิลด้วยไฟฟ้า H2-1m ด้วยเทคนิคกัลวานอสแตติกในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 5% โดยน้ำหนัก โดยมีค่ากระแสคงที่ที่ 3 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตรเป็นระยะเวลาต่างๆ

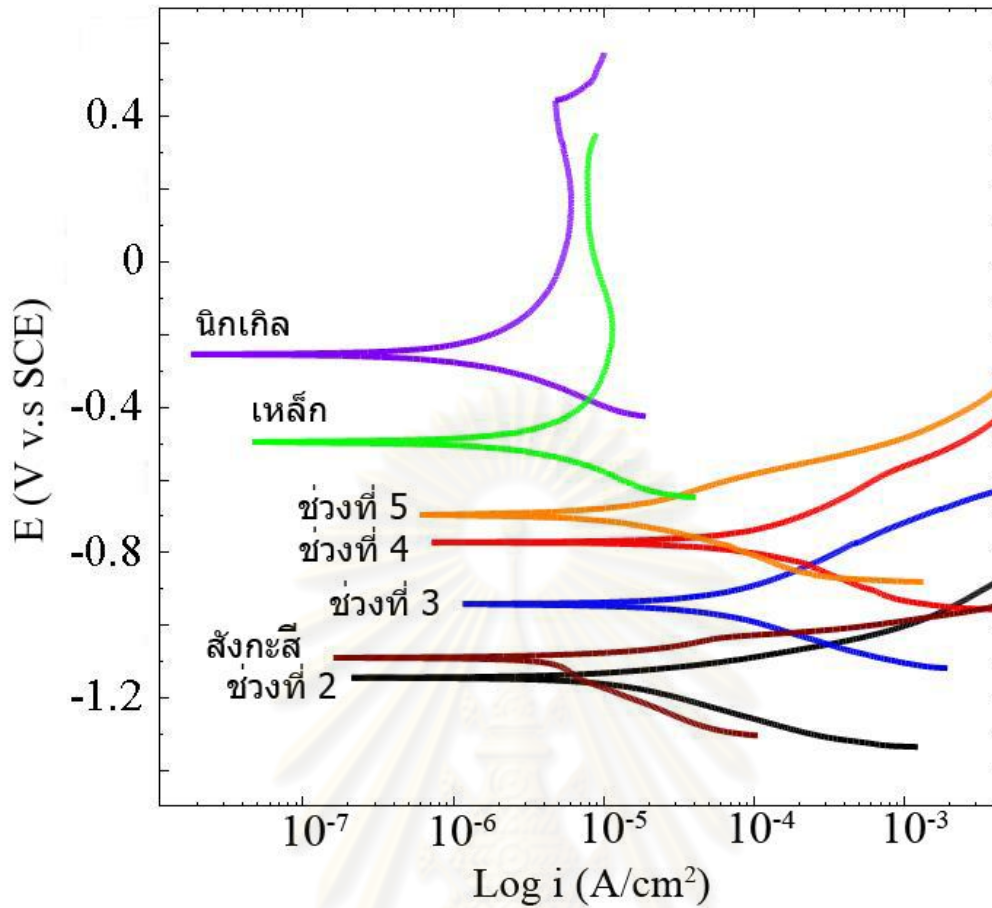
ภาพที่ 4.27 แสดงผลจากการทดสอบโพลาริเซชันหลังจากชิ้นงานแต่ละชิ้นถูกลอกชั้นเคลือบออกทีละชั้น ทั้งนี้ได้ทำการทดสอบโพเทนชิโอไดนามิกส์กับแผ่นเหล็ก (กัดด้วยกรดก่อนทดสอบ) นิกเกิลชุบด้วยไฟฟ้า และสังกะสีจากการจุ่มร้อน เพื่อเปรียบเทียบค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นเช่นเดียวกับในหัวข้อที่แล้ว ผลที่ได้จากกราฟแสดงเส้นโค้งโพลาริเซชันแสดงให้เห็นว่า ศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนของสังกะสีหรือชั้นเคลือบช่วงที่ 1 หรือบริเวณที่เป็นสังกะสีบริสุทธิ์นั้นมี

ค่าประมาณ -1.10 V v.s SCE ซึ่งสูงกว่าชั้นเคลือบช่วงที่ 2 และมีอัตราการกัดกร่อนที่ต่ำกว่าเล็กน้อยดังค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน (E_{corr}) และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน (I_{corr}) ซึ่งแสดงไว้ในตารางที่ 4.6 ทั้งนี้สามารถเชื่อมโยงสอดคล้องกับชิ้นงานที่เก็บไว้ในสารละลายเกลือเป็นเวลา 1 สัปดาห์ที่มีค่า E_{corr} 1.11 V v.s SCE แสดงถึงการกัดกร่อนบริเวณระหว่างชั้นสังกะสีกับชั้นเคลือบ intermediate II

จากการทดสอบโพเทนชิโอสแตติกกับชั้นเคลือบช่วงที่ 3, และ 4 พบว่าค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนมีค่าสูงขึ้นและค่า E_{corr} มีค่า -0.95 และ 0.77 V v.s SCE ตามลำดับซึ่งสอดคล้องกับชิ้นงานที่เก็บไว้ในสารละลายเกลือเป็นเวลา 2 สัปดาห์ซึ่งมีค่า E_{corr} อยู่ที่ -0.88 V v.s SCE และสามารถยืนยันได้ถึงการกัดกร่อนที่เข้าไปถึงชั้น intermediate I ตามที่ได้กล่าวอ้างไว้ในหัวข้อ 4.4.2

สำหรับช่วงที่ 5 นั้นพบว่าค่า E_{corr} ยังคงสูงขึ้นโดยมีค่า -0.69 V v.s SCE ซึ่งคาดว่าเกิดการกัดกร่อนไปสู่ชั้นรองพื้นนิกเกิลและเหล็กแต่การที่ค่า E_{corr} นั้นอาจเป็นเพราะการกัดกร่อนของบริเวณที่ทดสอบในส่วนที่เป็นขอบของชิ้นงานจะได้รับศักย์ไฟฟ้ามากกว่าจึงเกิดการกัดกร่อนที่ขอบมากกว่าจึงทำให้ค่า E_{corr} ค่อนข้างต่ำ

จากผลกราฟโพลาริเซชันในหัวข้อนี้แสดงให้เห็นว่าชั้นเคลือบ intermediate II ที่อยู่ด้านบนนั้นมีความสามารถในการเป็นแคโทดรีเฟียลแอโนด ให้แก่ชั้นเคลือบ intermediate I ที่อยู่ด้านล่างและค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนของชั้นเคลือบ intermediate I ที่อยู่ด้านล่างที่เกิดขึ้นก็ยังคงมีค่าต่ำกว่าค่าศักย์ไฟฟ้าของนิกเกิลและเหล็กที่เป็นโลหะที่ต้องการป้องกันการกัดกร่อน ดังนั้นจึงหมายความว่าความสามารถในการเป็นแคโทดรีเฟียลแอโนดของชั้นเคลือบให้กับชิ้นงานเหล็กยังคงมีอยู่ถึงแม้ศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนจะสูงมากเมื่อเทียบกับกรณีของสังกะสี



ภาพที่ 4.27 กราฟโพลาริเซชันของชิ้นงานแผ่นเหล็กชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนโดยการเคลือบชั้นรองพื้นนิกเกิลด้วยไฟฟ้า H2-1m ด้วยเทคนิคโพเทนชิโอดินามิกส์ในสารละลายไฮเดียมคลอไรด์ 5% โดยน้ำหนัก (ดูภาพที่ 4.26 ประกอบ)

ตารางที่ 4.6 ศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนและความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนของกราฟโพลาริเซชันจากภาพที่ 4.27

ชั้นเคลือบช่วงที่	E_{cor} (V v.s. SCE)	$I_{cor} \times 10^{-5}$ (A/cm ²)
1	-1.10	0.43
2	-1.15	2.40
3	-0.95	9.98
4	-0.77	19.10
5	-0.69	2.74

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้เพื่อที่จะลดการแพร่ที่รวดเร็วของเหล็กและสังกะสีซึ่งนำไปสู่การเกิดขึ้นเคลือบที่มีความหนาและการใช้ปริมาณของสังกะสีที่เกินความจำเป็น รวมถึงศึกษาสมบัติการยึดเกาะของชั้นเคลือบต่อเนื้อเหล็กและเพื่อปรับปรุงสมบัติความต้านทานการกัดกร่อนของชั้นเคลือบ จึงได้ทำการศึกษาการผลิตเหล็กชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนโดยการเคลือบชั้นรองพื้นนิกเกิลด้วยไฟฟ้าเพื่อเป็นทางเลือกในการทดแทนการเหล็กชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนโดยวิธีดั้งเดิม โดยจากการศึกษาพบว่า

1. โครงสร้างจุลภาคของเหล็กชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนซึ่งมีชั้นเคลือบที่มีความหนาสม่ำเสมอและสามารถยึดติดกับเนื้อเหล็กได้ตลอดทั่วชิ้นงาน สามารถกระทำได้โดยการผลิตชั้นรองพื้นนิกเกิลด้วยไฟฟ้ากระแสพัลส์ เนื่องจากสามารถลดการสะสมของฟองก๊าซไฮโดรเจนบนผิวของชิ้นงานแผ่นเหล็กได้ โดยคาดว่าฟองก๊าซนี้เป็นสาเหตุของการหลุดร่อนเป็นช่องว่างระหว่างชั้นเคลือบกับเนื้อเหล็กในกรณีของชั้นรองพื้นนิกเกิลที่ผลิตด้วยไฟฟ้ากระแสต่อเนื่อง

2. การผลิตชั้นรองพื้นนิกเกิลเป็นเฟสกั้นกลางระหว่างเหล็กและสังกะสีสามารถลดอัตราการแพร่ที่รวดเร็วของโลหะทั้งสองได้ ส่งผลให้ชั้นเคลือบ intermediate ที่เกิดขึ้นมีนิกเกิลและสังกะสีเป็นองค์ประกอบส่วนใหญ่และมีความหนาที่ลดลงมากกว่า 2.5 เท่าเมื่อเทียบกับเหล็กชุบสังกะสีโดยวิธีดั้งเดิมและความแตกต่างนี้จะเพิ่มมากขึ้นตามระยะเวลาในการจุ่มร้อน

3. ความหนาของชั้นรองพื้นนิกเกิลที่ผลิตต้องมีความสัมพันธ์กับระยะเวลาในการจุ่มร้อนจากการศึกษานี้พบว่าเหล็กชุบสังกะสี H2-1m เป็นชิ้นงานที่มีความสัมพันธ์ดังกล่าวเหมาะสมที่สุดซึ่งจะทำให้มีนิกเกิลหลงเหลืออยู่ในโครงสร้างจุลภาคไม่มากหรือน้อยจนเกินไป เนื่องจากชั้น intermediate ของเหล็กชุบสังกะสีโดยการเคลือบชั้นรองพื้นนิกเกิลนั้นมีความหนาคงที่ 9 μm ตั้งแต่ระยะเวลาในการจุ่มร้อน 1 นาที การจุ่มร้อนเป็นระยะเวลาที่เพิ่มขึ้นจะไม่ทำให้ชั้น intermediate เกิดการโตขึ้นอีกแต่จะทำให้ชั้นรองพื้นนิกเกิลเกิดการแพร่ออกไปสู่สังกะสีหลอมเหลวภายนอกอย่างต่อเนื่องและเมื่อชั้นรองพื้นถูกใช้ไปจนหมดเหล็กและสังกะสีจะสามารถเกิดการแพร่เข้าหากันได้โดยอิสระ ส่งผลให้โครงสร้างจุลภาคที่ได้มีลักษณะคล้ายเหล็กชุบสังกะสีโดยวิธีดั้งเดิม

4. เฟสของชั้นรองพื้นนิกเกิลที่หลงเหลืออยู่ในโครงสร้างจุลภาคยังคงสามารถยึดติดกับเนื้อเหล็กและยังคงเป็นชั้นปกป้องให้แก่เนื้อเหล็กได้โดยไม่เกิดการแตกหักและหลุดร่อน จากการที่ชิ้นงานได้รับแรงดึงและแรงอัดด้วยการดัดโค้งทำมุม 90 องศาและดัดโค้งกลับมาที่ตำแหน่งเริ่มต้น ในขณะที่ชั้น intermediate เกิดการแตกหักจากแรงกระทำที่ได้รับ

5. เหล็กซุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนโดยการเคลือบชั้นรองพื้นนิกเกิดด้วยไฟฟ้ามีความต้านทานต่อการกัดกร่อนมากกว่าเหล็กซุบสังกะสีโดยวิธีดั้งเดิมมากกว่า 2 เท่าถึงแม้ว่าชั้นเคลือบจะมีความบางกว่า 2.5 เท่า โดยส่วนหนึ่งเป็นผลมาจากการที่โครงสร้างจุลภาคนั้นมีความอัดแน่นมากกว่าจึงช่วยป้องกันการแทรกซึมของ Cl^- และ ClO^- ซึ่งเป็นไอออนก่อปฏิกิริยาที่ช่วยเร่งการกัดกร่อน อีกทั้งการที่มีนิกเกิดเป็นองค์ประกอบของชั้นเคลือบ intermediate ทำให้ชั้นเคลือบมีศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนที่สูงจึงทำให้มีสมบัติความต้านทานการกัดกร่อนที่ดี

ข้อเสนอแนะ

จากการศึกษาสมบัติเชิงกลด้านการยึดเกาะของชั้นเคลือบและการพัฒนาของเฟสที่เปลี่ยนแปลงไปตามระยะเวลาในการชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนของเหล็กซุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนโดยการเคลือบชั้นรองพื้นนิกเกิดด้วยไฟฟ้าแสดงให้เห็นว่าชั้นเคลือบ intermediate เข้าสู่สภาวะคงตัวที่เวลาประมาณ 1 นาทีของการจุ่มร้อน ดังนั้นข้อเสนอแนะสำหรับการศึกษาเพิ่มคือ

1. การศึกษาสมบัติเชิงกลอื่นๆได้แก่การทดสอบความแข็งและการทดสอบความสึกหรอของชั้นเคลือบ intermediate แต่ละชั้น
2. การศึกษาการพัฒนาของเฟสที่เปลี่ยนแปลงไปตามระยะเวลาในการจุ่มร้อนในช่วงที่น้อยกว่า 1 นาที รวมถึงจลนศาสตร์ในการแพร่ของเหล็กซุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนที่มีเหล็กนิกเกิดและสังกะสีเป็นธาตุองค์ประกอบ
3. การศึกษาองค์ประกอบของชั้นเคลือบ intermediate ด้วยการวิเคราะห์ด้วยอิเล็กตรอน (Electron probe analysis)
4. การวิเคราะห์ต้นทุนของการผลิตเหล็กซุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนโดยการเคลือบชั้นรองพื้นนิกเกิดด้วยไฟฟ้า

ศูนย์วิจัยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

- [1] Marder, A.R. The metallurgy of zinc-coated steel. Progress in Materials Science 45 (2000) : 191-271.
- [2] Kainuma, R., Ishida K. Reactive Diffusion between Solid Fe and Liquid Zn at 723K. ISIJ International 47 (2007) : 740-744.
- [3] Vourlias, G., Pistofidis, N., Chrissafis, K., Pavlidou, E., Stergioudis, G. Mechanism and kinetics of the formation of zinc pack coatings. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry 91 (2008) : 497-501
- [4] Bicao, P., Jianhua, W., Xuping, S., Zhi, L., Fucheng, Y. Effects of zinc bath temperature on the coatings of hot-dip galvanizing. Surface and Coatings Technology 202 (2008) : 1785-1788.
- [5] Tang, N.Y. Control of Silicon Reactivity in General Galvanizing. Journal of Phase Equilibrium and Diffusion 29 (2008) : 337-344.
- [6] Fratesi, R., Ruffini, N., Malavolta, M., Bellezze, T. Contemporary use of Ni and Bi in hot-dip galvanizing. Surface and Coatings Technology 157 (2002) : 34-39.
- [7] Kozdras, M.S., Niessen, P. Silicon-induced destabilization of galvanized coatings in the sandelin peak region. Metallography 22 (1989) : 253-267.
- [8] Reumont, G., Perrot, P., Foct, J. Thermodynamic study of the galvanizing process in a Zn-0.1%Ni bath. Journal of Materials Science 33 (1998) : 4759-4768.
- [9] Ueda, S., Taguch, O., Iijima, Y., Takahashi, G., Yamaguchi, K. Growth kinetics of intermediate phase layers in an early stage of hot dip galvanizing at 450°C. Journal of Materials Science 43 (2008) : 5666-5668.
- [10] Vourlias, G., Pistofidis, N., Stergioudis, G., Tzipas, D. The effect of alloying elements on the crystallization behavior and on the properties of galvanized coatings. Crystal Research and Technology 39 (2004) : 23-29.
- [11] Shih, H.C., Hsu, J.W., Sun, C.N., Chung, S.C. The lifetime assessment of hot-dip 5% Al-Zn coatings in chloride environments. Surface and Coatings Technology 150 (2002) : 70-75.
- [12] Pistofidis N., Vourlias, G., Konidaris, S., Pavlidou, El., Stergiou, A., Stergioudis, G. The effect of bismuth on the structure of zinc hot-dip galvanized coatings. Materials Letters 61 (2007) : 994-997.

- [13] Pistofidis, N. The effect of preflux bath additives on the morphology and structure of the hot-dip galvanized coatings. Crystal Research and Technology 41 (2006) : 759-765.
- [14] Boonyongmaneerat, Y., Saengkiattiyut, K., Rattanawaleedirojn, P., Angkaprasert, C., Wanichsampan, J., Saenapitak, S. Layer formation of hot-dip galvanized steels as influenced by NiCl₂-base fluxes. Journal of Iron and Steel Research, International 17(8) (2010) : 74-78.
- [15] Shibli, S.M.A., Manu, R. Process and performance improvement of hot dip zinc coating by dispersed nickel in the under layer. Surface and Coatings Technology 197 (2004) : 103-108.
- [16] Chunshan, C., Jingtang, L., Gang, K., Qiaoyu, X., Runzhou, S. Influence of Ni-electrodeposited Pretreatment on Galvanized Coatings of Reactive Steels. Journal of Wuhan University of Technology-Materials Science Editorial Board (2007) : 221-224.
- [17] Anicai, L., Siteavu, M., Grunwald, E. Corrosion behaviour of zinc and zinc alloy depositions. Corrosion Prevention Control 39(4) (1992) : 89-93.
- [18] Baldwin, K.R., Robinson, M.J., Smith, C.J.E. Corrosion rate measurements of electrodeposited zinc-nickel alloy coatings. Corrosion Science 36(7) (1994) : 1115-1131.
- [19] Wilcox, G.D., Gabe, D.R. Electrodeposited zinc alloy coatings. Corrosion Science 35 (1993) : 1251-1258.
- [20] มนต์ สติระจินดา. โลหะนอกกลุ่มเหล็ก. กรุงเทพมหานคร : สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2543.
- [21] Jordan, C.E., Marder, A.R. Fe-Zn phase formation in interstitial-free steels hot-dip galvanized at 450°C part I 0.00 wt% Al-Zn baths. Journal of Materials Science 32(21) (1997) : 5593-5602.
- [22] Morgan, S.W.K. Zinc and its Alloys. 1st edition. London : Macdonald & Evans Ltd., 1977.
- [23] General Galvanizing Practice. London : Hot Dip Galvanizers Association, 1965.
- [24] อนันต์ ทองมอญ. ชุบโลหะด้วยไฟฟ้า. กรุงเทพมหานคร : สำนักพัฒนาอุตสาหกรรมสนับสุนน , 2544

- [25] Norris, P., Allen, R. The Canning Handbook on Electroplating. 22nd edition. Birmingham : W.Canning Limited, 1982
- [26] Gabe, D.R. Principles of metal surface treatment and protection. vol.28. International series on materials science & technology. New York : Pergamon press, 1978
- [27] Fontana, M.G., Greene, N.D. Corrosion Engineering, New York : McGraw-Hill book company, 1967.
- [28] Roberge, P.R. Corrosion Engineering Principles and Practice, New York : McGraw-Hill book company, 2008.
- [29] El-Sherik, A.M., Erb, U., Page, J. Microstructural evolution in pulse plated nickel electrodeposits. Surface and Coatings Technology 88 (1996) : 70-78.
- [30] Raghavan, V. Fe-Ni-Zn (Iron-Nickel-Zinc). Journal of Phase Equilibria 24 (2003) : 558
- [31] Fuente, D., Castaño, J.G., Morcillo, M. Long-term atmospheric corrosion of zinc. Corrosion Science 49 (2007) : 1420-1436.
- [32] Hamid, Z.A., Aal, A.A., Hassan, H.B., Shaaban, A. Process and performance of hot dip zinc coatings containing ZnO and Ni-P under layers as barrier protection. Applied Surface Science 256 (2010) : 4166-4170.
- [33] Shibli, S.M.A., Manu, R., Dillimon, V.S. Effect of nickel-rich barrier layer on improvement of hot-dip zinc coating. Applied Surface Science 245 (2005) : 179-185.
- [34] Bellezze, T., Malavolta, M., Quaranta, A., Ruffini, N., Roventi, G. Corrosion behaviour in concrete of three differently galvanized steel bars. Cement and Concrete Composites 28 (2006) : 246-255.
- [35] Bajat, J.B., Kacarevic-Popovic, Z., Miškovic-Stankovic, V.B., Maksimovic, M.D. Corrosion behaviour of epoxy coatings electrodeposited on galvanized steel and steel modified by Zn-Ni alloys. Progress in Organic Coatings 39 (2000) : 127-135.



ภาคผนวก

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก

การคำนวณค่ากระแสยอดคลื่น (peak current valve) สำหรับการจ่ายกระแสไฟฟ้าแบบพัลส์

ค่าประสิทธิผล (effective หรือ root mean square valve) คือค่าแรงดันหรือกระแสไฟฟ้าสลับที่ก่อให้เกิดผลทางความร้อนเท่ากับค่าแรงดันของไฟฟ้ากระแสตรง โดยในที่นี้ต้องการคำนวณค่ากระแสไฟฟ้าแบบพัลส์เพื่อให้เกิดผลทางความร้อนเท่ากับค่ากระแสต่อเนื่อง ซึ่งงานวิจัยนี้ทำการผลิตชั้นรองพื้นนิกเกิลด้วยไฟฟ้ากระแสต่อเนื่อง 0.1 A/cm^2 ดังนั้นจึงต้องคำนวณหาค่ากระแสยอดคลื่นของไฟฟ้ากระแสพัลส์เพื่อให้เกิดผลเช่นเดียวกันจากสมการการคำนวณค่ากระแสยอดคลื่นดังนี้

$$I_p = \frac{I_{eff}}{\theta}$$

โดยที่ I_{eff} หมายถึงค่ากระแสประสิทธิผล (Effective current) โดยในที่นี้หมายถึงค่าไฟฟ้ากระแสต่อเนื่อง 0.1 A/cm^2

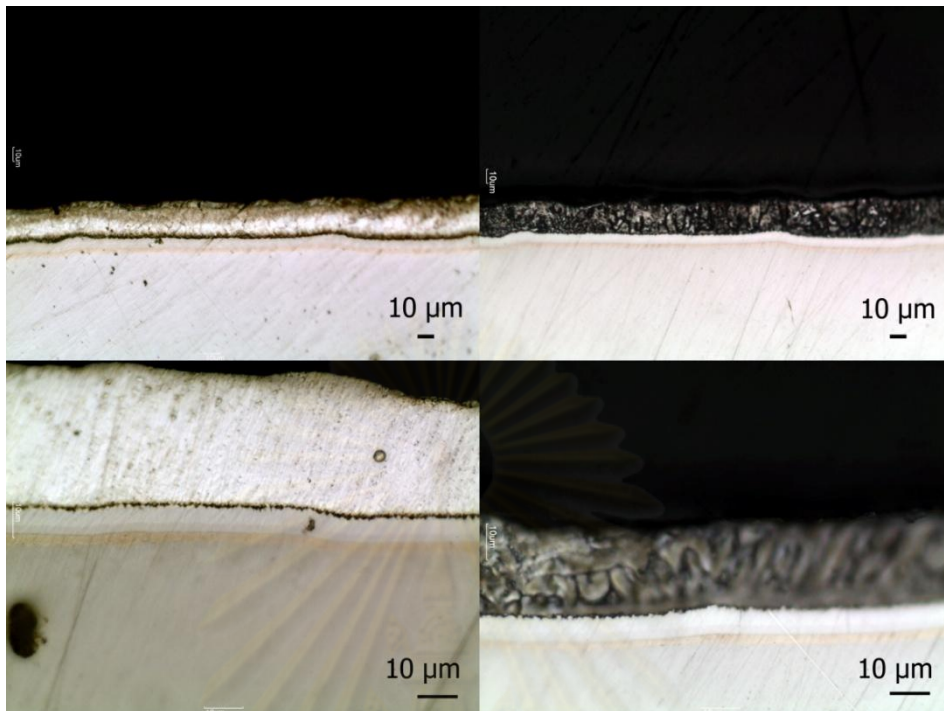
I_p หมายถึงค่ากระแสยอดคลื่น (peak current valve) หมายถึงค่าสูงสุดของรูปคลื่นกระแสพัลส์

θ หมายถึง duty cycle โดยที่ $\theta = \frac{t_{on}}{t_{on}+t_{off}}$ หรือสัดส่วนของระยะเวลาในการจ่ายกระแสไฟฟ้าต่อระยะเวลาทั้งหมดใน 1 รอบ ซึ่งในงานวิจัยนี้ การจ่ายไฟฟ้ากระแสพัลส์ใน 1 รอบมีรูปแบบการจ่ายกระแสต่อเนื่องเป็นเวลา 20 ms แล้วหยุดให้กระแส 3 ms ดังนั้นค่า duty cycle ที่ได้คือ 0.87

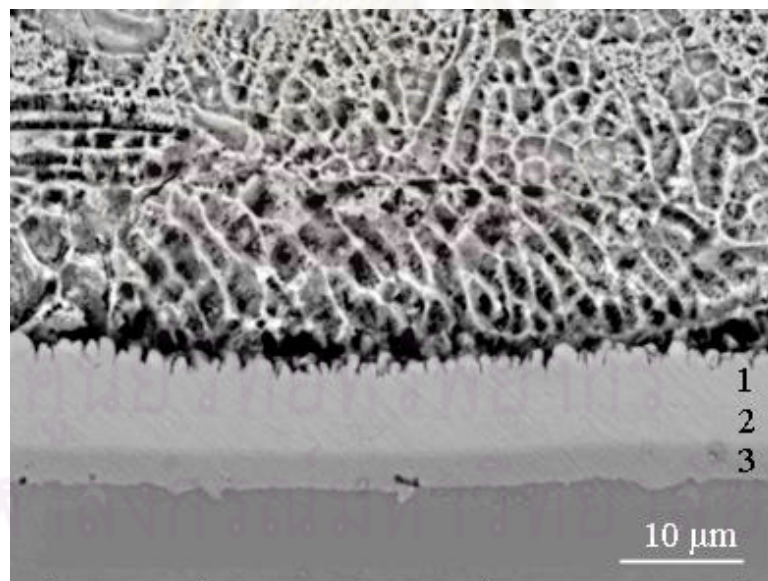
เมื่อแทนค่าข้อมูลลงในสมการการคำนวณค่ากระแสยอดคลื่นจะได้ $I_p = 0.115 \text{ A/cm}^2$ ซึ่งเป็นค่ากระแสที่ใช้สำหรับการผลิตชั้นรองพื้นนิกเกิลด้วยไฟฟ้ากระแสพัลส์ในงานวิจัยนี้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ข

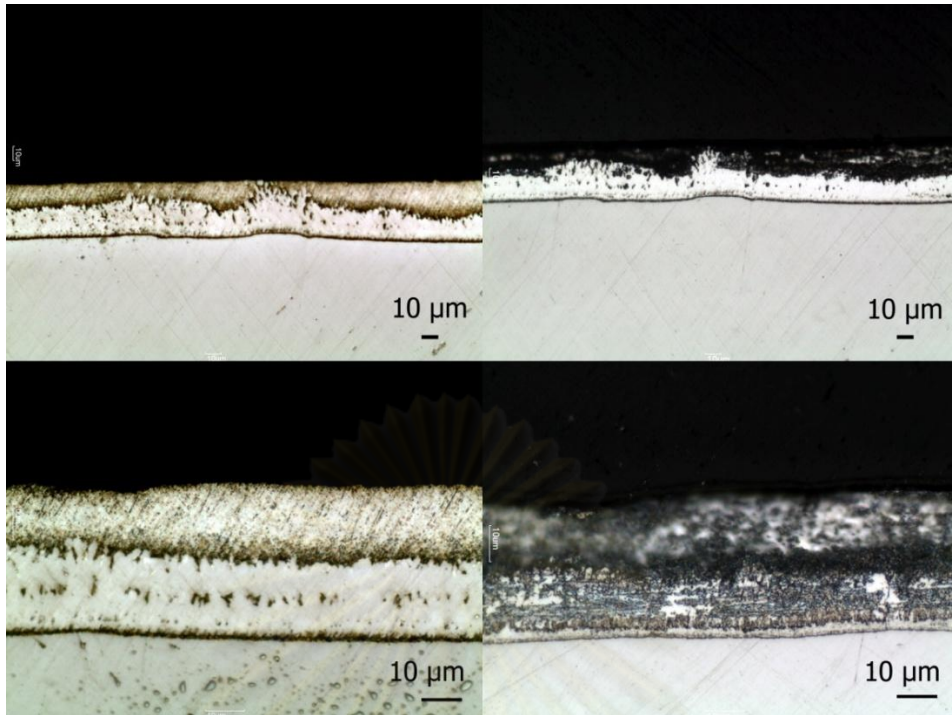


ภาพที่ ข.1 ภาพตัดขวางจากกล้องจุลทรรศน์แบบแสงของชิ้นงาน H2-10s

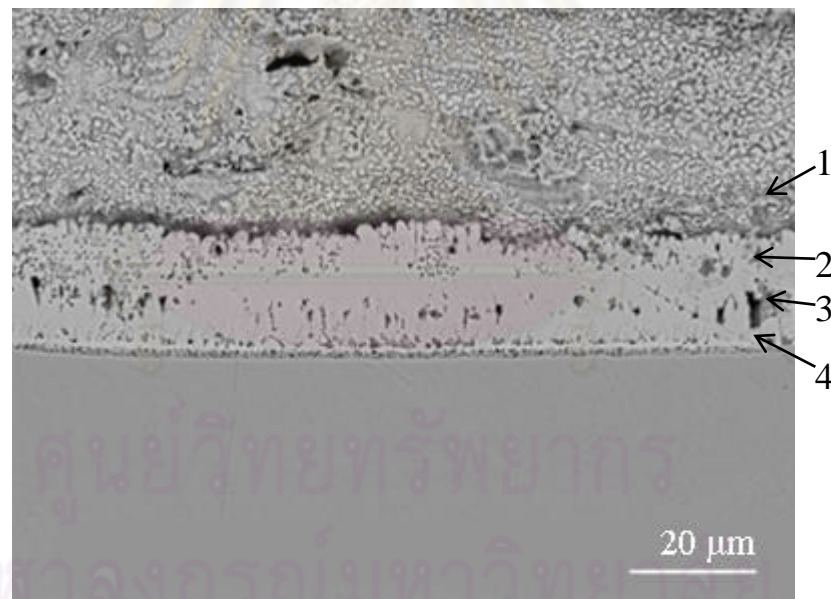


ตำแหน่งที่	องค์ประกอบในชั้นเฟส (at%)			
	เหล็ก	นิกเกิล	สังกะสี	เฟส
1	1.3	12.2	86.5	$\Gamma + \beta$
2	1.7	16.5	81.8	Γ
3	3.2	82.8	14.1	Ni

ภาพที่ ข.2 ภาพตัดขวางจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนนิ่งและการวิเคราะห์ธาตุประกอบในแต่ละเฟสด้วยการวิเคราะห์การกระจายพลังงานของชิ้นงาน H2-10s

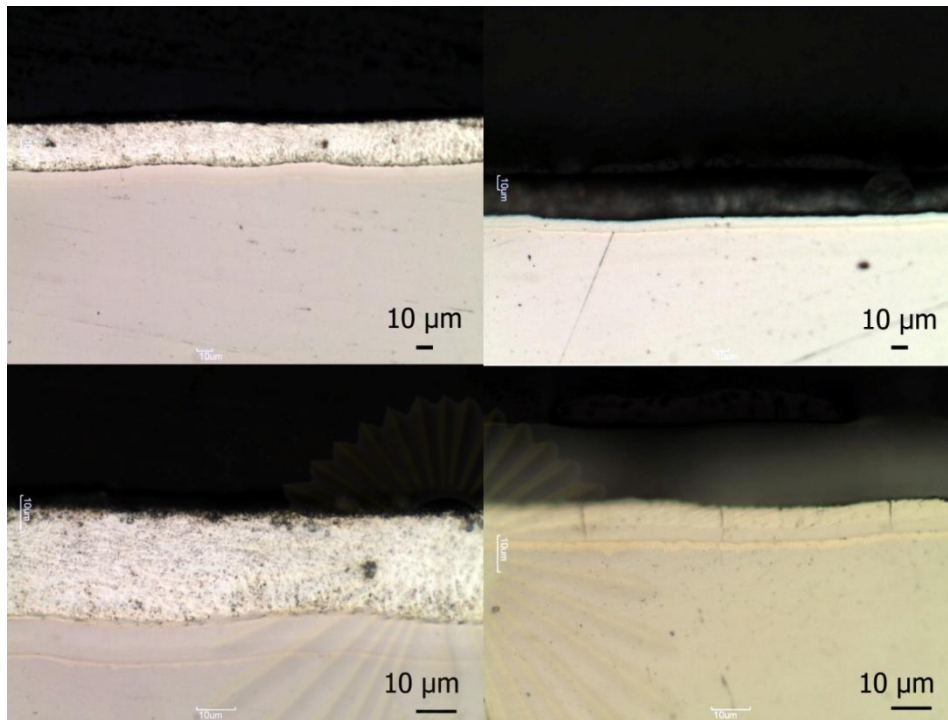


ภาพที่ 3.3 ภาพตัดขวางจากกล้องจุลทรรศน์แบบแสงของชิ้นงาน H1-1m

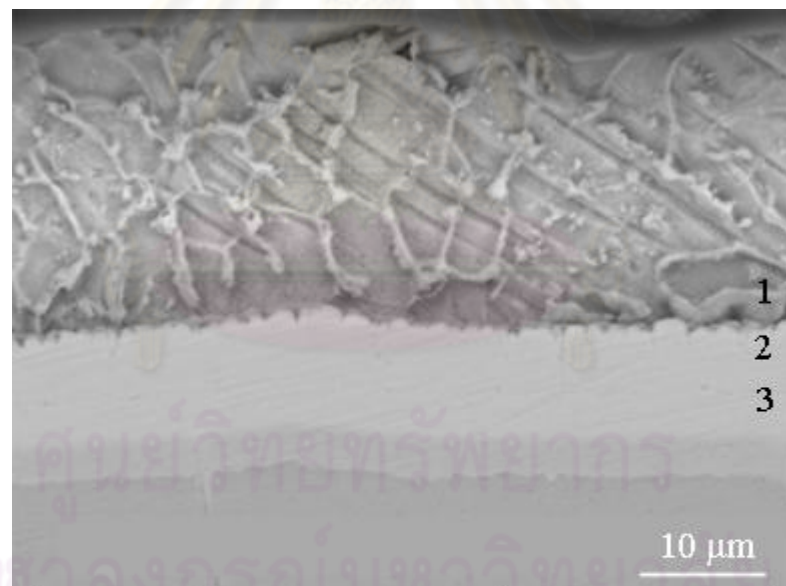


ตำแหน่งที่	องค์ประกอบในชั้นเฟส (at%)			
	เหล็ก	นิกเกิล	สังกะสี	เฟส
1	0	0	100	Zn
2	7.6	0	92.4	$\delta+\zeta$
3	8.2	0	91.8	δ
4	9.9	0	90	δ

ภาพที่ 3.4 ภาพตัดขวางจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนนิ่งและการวิเคราะห์ธาตุประกอบในแต่ละเฟสด้วยการวิเคราะห์การกระจายพลังงานของชิ้นงาน H1-1m

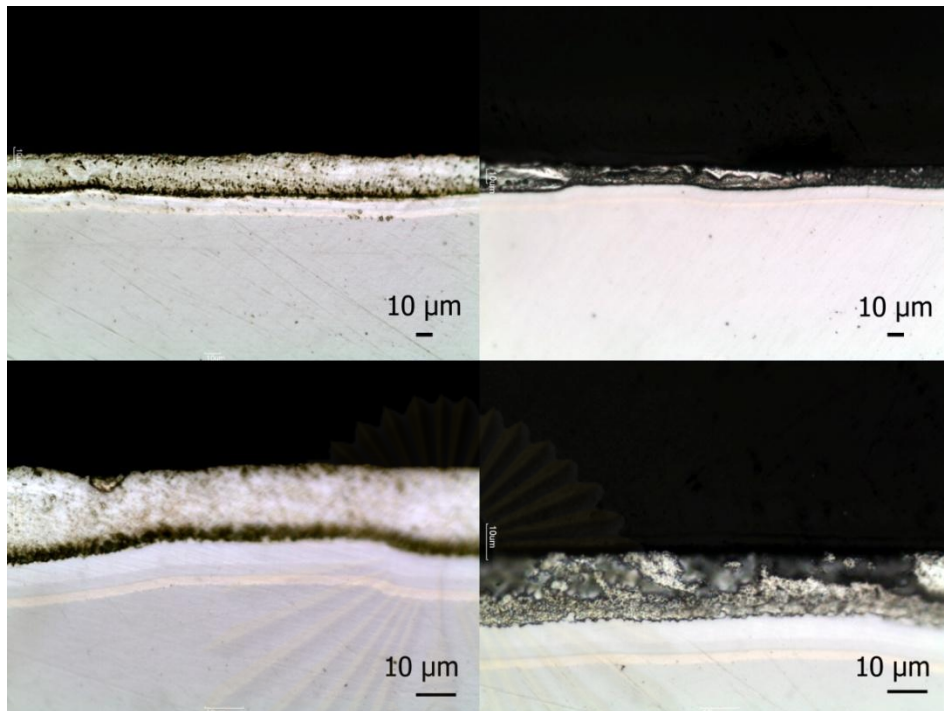


ภาพที่ ๕.5 ภาพตัดขวางจากกล้องจุลทรรศน์แบบแสงของชิ้นงาน H2-1m

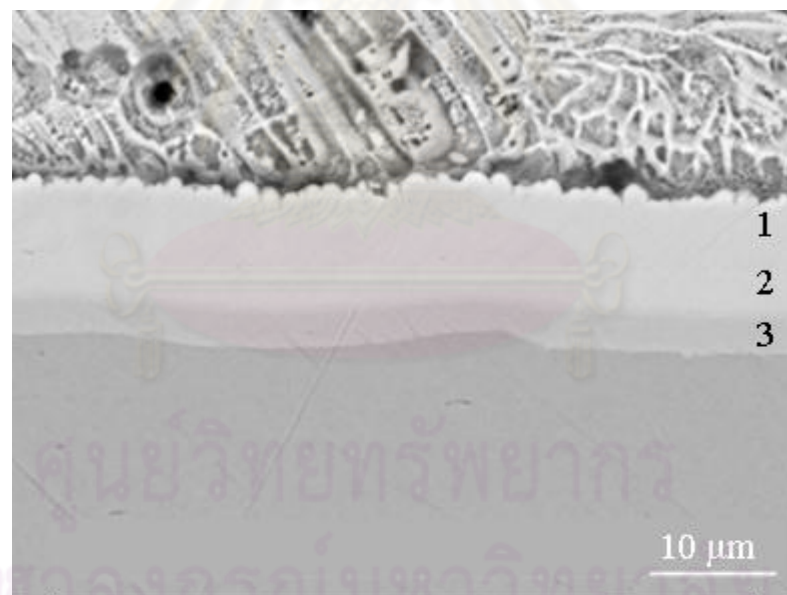


ตำแหน่งที่	องค์ประกอบในชั้นเฟส (at%)			
	เหล็ก	นิกเกิล	สังกะสี	เฟส
1	0.5	3.1	96.1	$\Gamma+\beta+\text{Zn}$
2	1	13.1	85.9	$\Gamma+\beta$
3	1.4	18.9	79.6	Γ

ภาพที่ ๕.6 ภาพตัดขวางจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนนิ่งและการวิเคราะห์ธาตุประกอบในแต่ละเฟสด้วยการวิเคราะห์การกระจายพลังงานของชิ้นงาน H2-1m

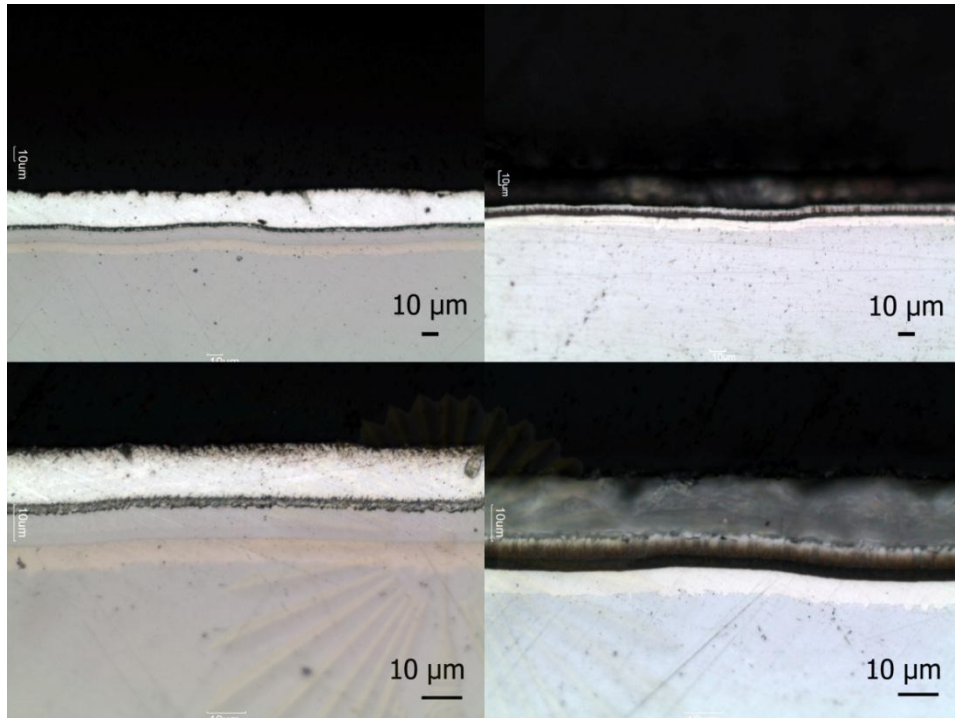


ภาพที่ ๗.7 ภาพตัดขวางจากกล้องจุลทรรศน์แบบแสงของชิ้นงาน H3-1m

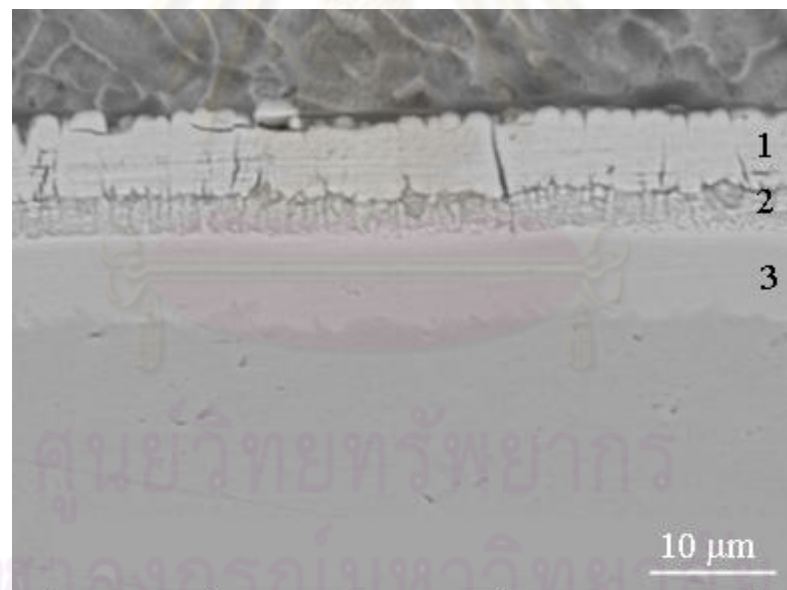


ตำแหน่งที่	องค์ประกอบในชั้นเฟส (at%)			
	เหล็ก	นิกเกิล	สังกะสี	เฟส
1	0	12.3	87.7	$\Gamma+\beta$
2	1.6	16.8	81.7	Γ
3	3.2	93.1	3.8	Ni

ภาพที่ ๗.8 ภาพตัดขวางจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนนิ่งและการวิเคราะห์ธาตุประกอบในแต่ละเฟสด้วยการวิเคราะห์การกระจายพลังงานของชิ้นงาน H3-1m

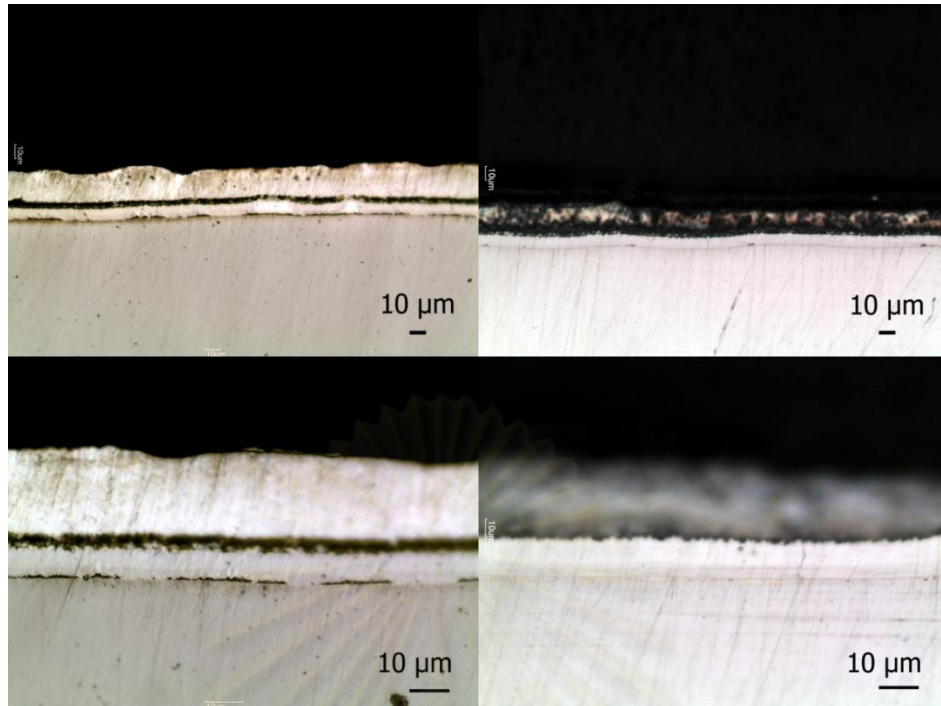


ภาพที่ ข.9 ภาพตัดขวางจากกล้องจุลทรรศน์แบบแสงของชิ้นงาน H4-1m

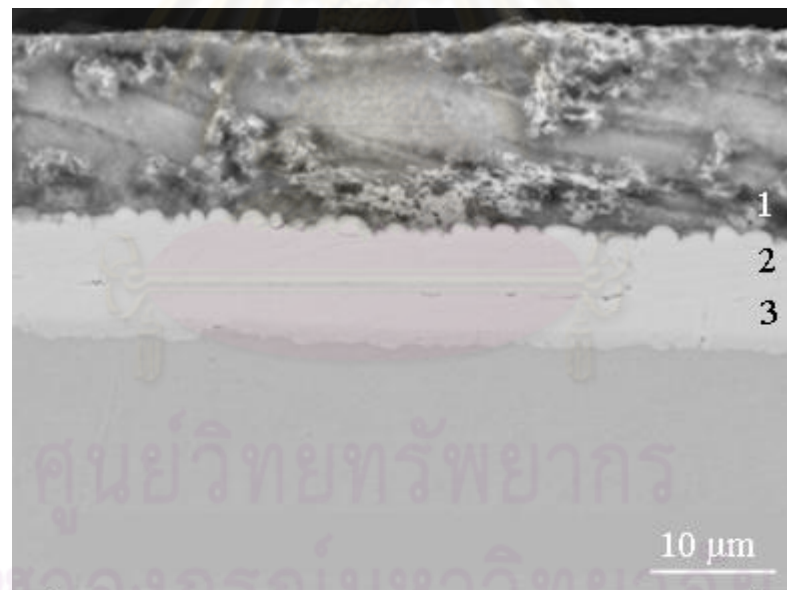


ตำแหน่งที่	องค์ประกอบในชั้นเฟส (at%)			
	เหล็ก	นิกเกิล	สังกะสี	เฟส
1	0.8	14.5	84.8	$\Gamma+\beta$
2	1.2	24.4	74.4	Γ
3	2.2	96.2	1.6	Ni

ภาพที่ ข.10 ภาพตัดขวางจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนนิ่งและการวิเคราะห์ธาตุประกอบในแต่ละเฟสด้วยการวิเคราะห์การกระจายพลังงานของชิ้นงาน H4-1m

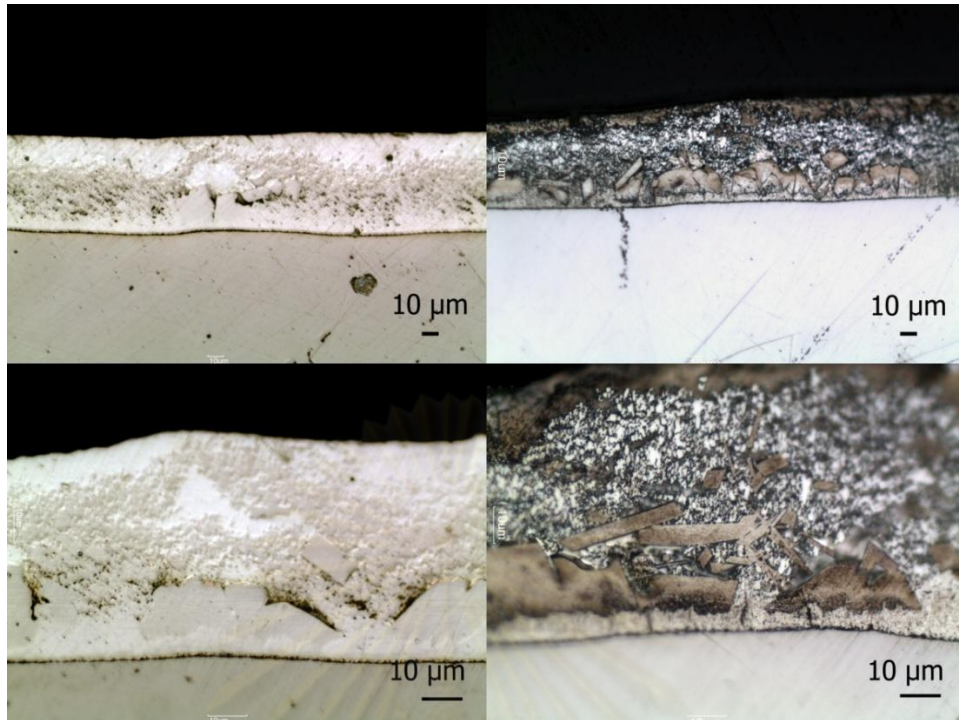


ภาพที่ ข.11 ภาพตัดขวางจากกล้องจุลทรรศน์แบบแสงของชิ้นงาน H2-3m

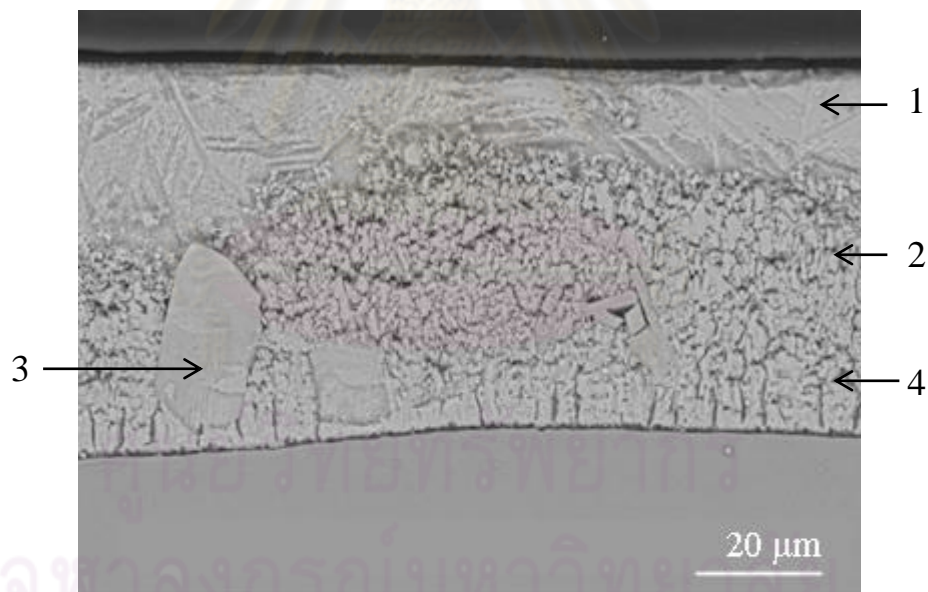


ตำแหน่งที่	องค์ประกอบในชั้นเฟส (at%)			
	เหล็ก	นิกเกิล	สังกะสี	เฟส
1	1.2	0.7	98.1	$\Gamma_1 + \text{Zn}$
2	1.6	11.7	86.7	$\Gamma + \beta$
3	2.8	16.9	80.3	Γ

ภาพที่ ข.12 ภาพตัดขวางจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนนิ่งและการวิเคราะห์ธาตุประกอบในแต่ละเฟสด้วยการวิเคราะห์การกระจายพลังงานของชิ้นงาน H2-3m

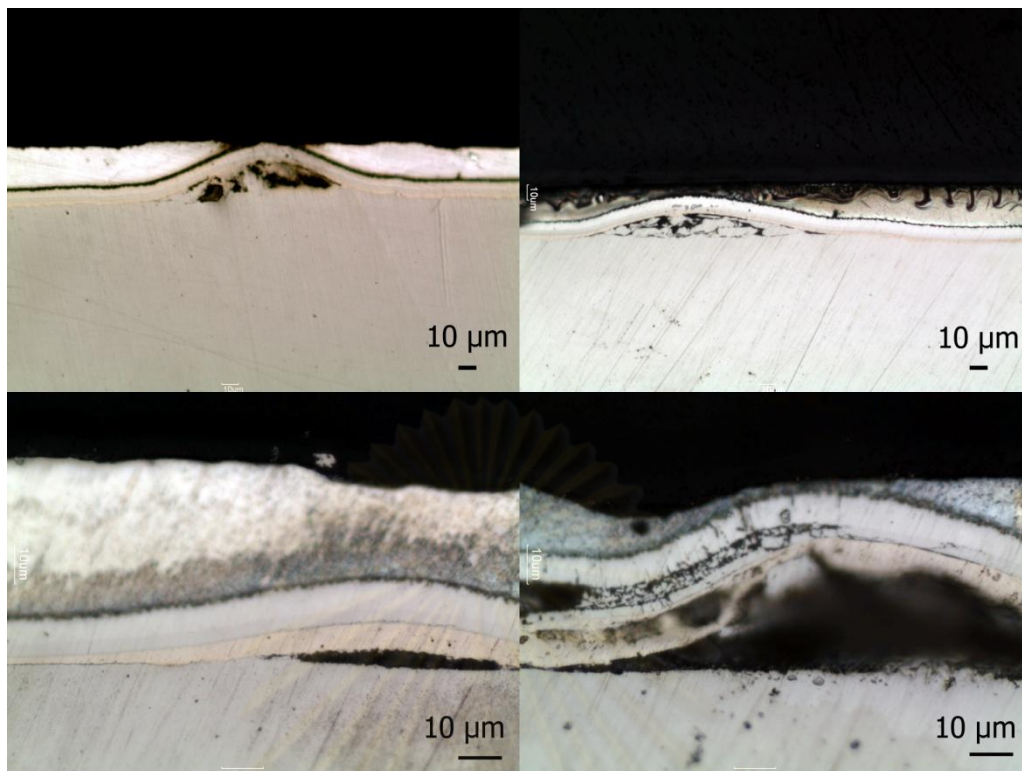


ภาพที่ ข.13 ภาพตัดขวางจากกล้องจุลทรรศน์แบบแสงของชิ้นงาน H2-6m



ตำแหน่งที่	องค์ประกอบในชั้นเฟส (at%)			
	เหล็ก	นิกเกิล	สังกะสี	เฟส
1	0.2	0	99.1	Zn
2	6.3	0.8	93	ζ
3	7.7	0.5	91.8	δ+ζ
4	12.7	0	87.3	δ

ภาพที่ ข.14 ภาพตัดขวางจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนนิ่งและการวิเคราะห์ธาตุประกอบในแต่ละเฟสด้วยการวิเคราะห์การกระจายพลังงานของชิ้นงาน H2-3m



ภาพที่ ข.15 ภาพตัดขวางจากกล้องจุลทรรศน์แบบแสงของชิ้นงานเหล็กชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนโดยการเคลือบนิกเกิดเป็นชั้นรองพื้นด้วยไฟฟ้ากระแสตรงที่ระยะเวลาในการจุ่มร้อน 1 นาที

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

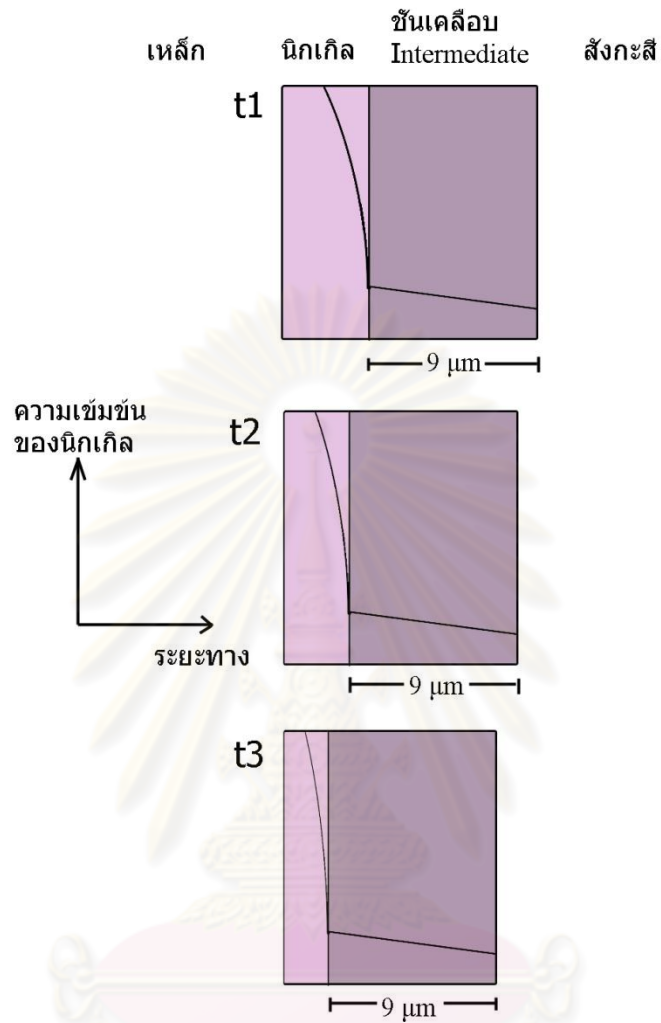
ภาคผนวก ค

จลนศาสตร์ในการแพร่ของเหล็ก, นิกเกิลและสังกะสี

จากการวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุในส่วนของชั้นเคลือบ intermediate ดังที่แสดงไว้แล้วในตารางที่ 4.3 พบว่าชั้นเคลือบ intermediate I และ II ต่างก็ประกอบด้วยนิกเกิลและสังกะสีเป็นส่วนใหญ่คือมีนิกเกิลเป็นธาตุประกอบประมาณ 20 และ 13 at% ตามลำดับ จึงอาจประมาณได้ว่าการแพร่เกิดขึ้นระหว่างร่องพื้นนิกเกิลและสังกะสีหลอมเหลวเท่านั้น ในการศึกษาการพัฒนาโครงสร้างจุลภาคและเฟสที่เปลี่ยนแปลงไปตามระยะเวลาในการจุ่มร้อนและเปรียบเทียบความหนาของชั้นเคลือบที่เกิดขึ้นดังรูปที่ 4.13 แสดงให้เห็นว่าความหนาของชั้นเคลือบ intermediate นี้จะเข้าสู่สภาวะคงตัวเมื่อถูกจุ่มร้อนเป็นระยะเวลา 1 นาทีและมีความหนาคงที่ประมาณ $9 \mu\text{m}$ ซึ่งเมื่อเพิ่มระยะเวลาในการจุ่มร้อนความหนาของชั้นเคลือบนี้จะไม่เปลี่ยนแปลงแต่ในทางตรงกันข้ามชั้นร่องพื้นนิกเกิลจะเกิดการแพร่ออกไปและมีความหนาลดลงเรื่อยๆจนหมด จากปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นสามารถเสนอแบบจำลองการแพร่ของชั้นร่องพื้นนิกเกิลที่อาจเกิดขึ้นจริงได้ดังภาพที่ 4.16 โดยที่แบบจำลองการแพร่นี้แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของนิกเกิล (แกนตั้ง) และระยะทางในการแพร่ (แกนนอน) ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่า

t_1 เป็นระยะเวลาที่เหล็กเคลือบชั้นร่องพื้นนิกเกิลถูกจุ่มร้อนจนกระทั่งชั้นเคลือบ intermediate เกิดการพัฒนาเข้าสู่สภาวะคงตัวและมีความหนาคงที่ เส้นโค้งในเฟสของชั้นร่องพื้นนิกเกิลแสดงถึงเกรดเดียนต์ของความเข้มข้นนิกเกิลที่ลดลงอย่างมากจาก 100 at% ลงมาถึงประมาณ 20 at% ของนิกเกิลที่บริเวณรอยต่อกับเฟส intermediate และในเฟสชั้นเคลือบ intermediate นี้ก็จะมีเส้นตรงที่มีความชันลดลง แสดงถึงเกรดเดียนต์ของความเข้มข้นนิกเกิลที่ชั้นเคลือบนี้ในสภาวะคงตัวที่ซึ่งจะลดลงจากประมาณ 20 at% จนถึง 13 at% และในที่สุดนิกเกิลก็จะสามารถแพร่ออกไปสู่สังกะสีหลอมเหลวภายนอกได้

เมื่อระยะเวลาในการจุ่มร้อนเพิ่มขึ้นเป็น t_2 ชั้นร่องพื้นนิกเกิลมีความหนาที่ลดลง ในขณะที่ความหนาของชั้นเคลือบ intermediate ยังคงมีความหนาคงที่เท่าเดิมแต่อย่างไรก็ตามคาดว่าตำแหน่งของชั้นเคลือบมีการขยับไปทางซ้ายของแกนนอนมากขึ้น ในส่วนนี้มีสมมติฐานว่าบริเวณบางส่วนของที่เคยเป็นเฟสของชั้นร่องพื้นนิกเกิลที่เวลา t_1 นั้นการแพร่ของสังกะสีสามารถแพร่เข้ามาเกิดเป็นชั้นเคลือบ intermediate ที่เวลา t_2 ได้ ในทำนองเดียวกันสำหรับบริเวณบางส่วนของที่เคยเป็นชั้นเคลือบ intermediate ที่เวลา t_1 ก็ได้เกิดการละลายออกไปสู่สังกะสีหลอมเหลวในเวลา t_2 จึงทำให้ชั้นเคลือบ intermediate นั้นเสมือนว่าเกิดการขยับเลื่อนเข้าไปตามความหนาของชั้นร่องพื้นนิกเกิลที่ลดลงและจะเกิดขึ้นเรื่อยๆเมื่อระยะเวลาในการจุ่มร้อนเพิ่มขึ้นเป็น t_3 จนกระทั่งชั้นร่องพื้นนิกเกิลเกิดการแพร่ออกไปจนหมด



ภาพที่ ค.1 จำลองการแพร่ของชั้นรองนิกเกิลตามระยะเวลาในการจุ่มร้อนที่เปลี่ยนแปลงไปจาก t1 ถึง t3

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

ชื่อ – นามสกุล	นายรัชชณ์ สงวนหมู่
วัน – เดือน – ปีเกิด	24 มีนาคม 2529
ที่อยู่	56/25 ซ.ติวานนท์ 30 ถ.ติวานนท์ ต.บางกระสอบ อ.เมือง จ.นนทบุรี 11000
วุฒิการศึกษา	มัธยมศึกษาตอนปลาย โรงเรียนสวนกุหลาบวิทยาลัย นนทบุรี ปีการศึกษา 2546 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาปิโตรเคมีและวัสดุพอลิเมอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร ปีการศึกษา 2550
โทรศัพท์ติดต่อ	086-561-3824

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย