

การพัฒนากระบวนการชุบเคลือบสังกะสีแบบจุ่มร้อน
ด้วยการชุบเคลือบชั้นรองพื้นโลหะผสมนิกเกิล-ฟอสฟอรัสแบบไม่ใช้ไฟฟ้า

นางสาวจุฬาลักษณ์ สมโภช

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2555
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)
are the thesis authors' files submitted through the Graduate School.

THE DEVELOPMENT OF HOT-DIP GALVANIZING PROCESS
WITH PRE-COATING NICKEL-PHOSPHORUS ALLOY ELECTROLESS DEPOSITION

Miss Chulaluk Somphotch

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 2012

Copyright of Chulalongkorn University

จุฬาลักษณ์ สมิโภช : การพัฒนากระบวนการชุบเคลือบสังกะสีแบบจุ่มร้อนด้วยการชุบเคลือบชั้นรองพื้นโลหะผสมนิกเกิล-ฟอสฟอรัสแบบไม่ใช้ไฟฟ้า. (THE DEVELOPMENT OF HOT-DIP GALVANIZING PROCESS WITH PRE-COATING NICKEL-PHOSPHORUS ALLOY ELECTROLESS DEPOSITION) อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผศ.ดร.ยุทธนันท์ บุญยงมณีรัตน์, อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม: ผศ.ดร.เอกสิทธิ์ นิสาร์ตนพร , 165 หน้า.

ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาการพัฒนากระบวนการชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนโดยมีชั้นเคลือบโลหะผสมนิกเกิล-ฟอสฟอรัสที่ชุบด้วยวิธีแบบไม่ใช้ไฟฟ้ารองพื้น เพื่อปรับปรุงชั้นเคลือบอินเทอร์มีเดียทที่เกิดขึ้นให้ที่เพิ่มขึ้นให้มีความหนาที่ลดลง รวมถึงปรับปรุงสมบัติด้านความต้านทานการกัดกร่อน โดยในงานวิจัยนี้ส่วนแรกจะศึกษาหาส่วนผสมทางเคมีที่เหมาะสมเพื่อให้ได้อัตราการชุบเคลือบที่สูง โดยปรับเปลี่ยนปริมาณความเข้มข้นของรีดิวซ์ซิงเอเจนท์ แหล่งจ่ายไอออนและพีเอช ผลการทดลองพบว่า อัตราการชุบเคลือบแปรผันตามปริมาณความเข้มข้นของรีดิวซ์ซิงเอเจนท์และพีเอช โดยมีรีดิวซ์ซิงเอเจนท์เป็นตัวควบคุมปฏิกิริยา ส่วนผสมที่เหมาะสมของสารละลายประกอบด้วย รีดิวซ์ซิงเอเจนท์ 0.38 โมล แหล่งจ่ายไอออน 0.15 โมลและพีเอช 9 ต่อมาในส่วนที่สองของงานวิจัยได้ชุบชั้นรองพื้นโลหะผสมนิกเกิล-ฟอสฟอรัสด้วยส่วนผสมที่กล่าวมาก่อนทำการชุบเคลือบสังกะสี โดยปรับเปลี่ยนระยะเวลาในการชุบชั้นรองพื้นและระยะเวลาในการชุบสังกะสี เพื่อศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคและเฟสที่เปลี่ยนแปลงไป พบว่าชั้นงานที่ชุบเคลือบชั้นรองพื้นก่อนชุบสังกะสีจะมีความหนาของชั้นอินเทอร์มีเดียทที่ลดลง และลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคจะมีความอัดตัวของชั้นเคลือบไม่มีรูพรุน ทั้งนี้เนื่องจากการที่ชั้นงานมีชั้นรองพื้นจะช่วยทำให้ลดการทำปฏิกิริยาระหว่างเหล็กและสังกะสีหลอมเหลวลงได้ โดยอัตราการแพร่ระหว่างนิกเกิลและสังกะสีจะมีค่าที่ต่ำกว่าสังกะสีและเหล็ก ทำให้ชั้นเคลือบที่เกิดขึ้นบางลง การทดสอบความต้านทานการกัดกร่อนด้วยเทคนิคของเกลือที่ระยะเวลารวม 800 ชั่วโมง ชั้นงานที่ผ่านการชุบเคลือบชั้นรองพื้นจะปราศจากการเกิดสนิมแดง ต่างจากชั้นงานที่ผ่านการชุบด้วยวิธีดั้งเดิมจะปรากฏการเกิดของสนิมแดงให้เห็นขึ้นบริเวณผิวชั้นงาน

ภาควิชา.....วิศวกรรมโลหการ.....ลายมือชื่อ.....
 สาขาวิชา.....วิศวกรรมโลหการ.....ลายมือชื่อ อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....
 ปีการศึกษา.....2555.....ลายมือชื่อ อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม.....

5370628321 : MAJOR METALLURGICAL ENGINEERING

KEYWORDS : Hot-dip galvanization / Electroless deposition / Nickel-Phosphorus alloys / Coatings / Kinetics / Corrosion

CHULALUK SOMPHOTCH: THE DEVELOPMENT OF HOT-DIP GALVANIZING PROCESS WITH PRE-COATING NICKEL-PHOSPHORUS ALLOYS ELECTROLESS DEPOSITION. ADVISOR: YUTTANANT BOONYONGMANEERAT, Ph.D., CO-ADVISOR: ASST. PROF. EKASIT NISARATANAPORN, Ph.D., 165 pp.

This research is concerned with the development of a hot-dip galvanizing process with electroless deposition of nickel-phosphorus alloy pre-coatings with an aim to reduce the thickness of the intermediate layer and improve the corrosion resistance of the galvanized steels. In the first part, the improvement of the deposition rate of the electroless deposition is investigated by varying the concentration of reducing agent, metal ion source, and pH. According to the experiment, the enhanced electrolyte is consisted of 0.38 mol reducing agent, 0.15 mol metal ion source and pH of 9 The deposition rate is found to vary proportionally to the concentration of pH and reducing agent, which acts as a rate controller . As for the second part, the optimized solution, obtained from the first part, is used for applying a pre-coating of nickel-phosphorus layer. As the deposition durations for pre-coating and galvanizing are varied systematically, the corresponding microstructure and phase are characterized. A typical microstructure of galvanized steels consists of a zinc-nickel intermediate layer and a pre-coating Ni-P layer that survives the galvanizing process. The intermediate layer with the pre-coating has uniform and dense microstructure. The pre-coating can effectively suppress the reaction between iron and molten zinc, minimizing the global thickness of the coatings. The result from the salt spray test after 800 hours shows that, unlike the conventional galvanized samples, the galvanizing samples with Ni-P pre-coating do not exhibit red rust suggesting improvement of the corrosion resistance.

Department :Metallurgical Engineering.....

Student's Signature

Field of Study : ..Metallurgical Engineering.....

Advisor's Signature

Academic Year :2012.....

Co-advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีจากความอนุเคราะห์ของทีอจารย์ที่ปรึกษา วิทยานิพนธ์ทั้งสองท่าน คือ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ยุทธนันท์ บุญยงมณีรัตน์และผู้ช่วย ศาสตราจารย์ ดร.เอกสิทธิ์ นิสาร์ตันพร ที่กรุณาอบรมให้ความรู้ ให้คำแนะนำข้อคิดเห็นและสร้าง เสริมประสบการณ์ในการทำงานอันมีค่ายิ่งให้แก่ข้าพเจ้า ขอขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร. ประสงค์ ศรีเจริญชัย รองศาสตราจารย์ ดร.กอบบุญ หล่อทองคำ และอาจารย์ ดร.ราชธีร์ เตช ไพศาลเจริญกิจ คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาช่วยแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้มีความ สมบูรณ์ นอกจากนี้ยังขอขอบพระคุณกลุ่มงานวิจัยเทคโนโลยีการชุบเคลือบผิว (PORETEGE research group) แห่งสถาบันวิจัยโลหะและวัสดุ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ช่วยให้ความ ช่วยเหลือและอนุเคราะห์เครื่องมือ อุปกรณ์ และสารเคมีในการทำวิจัย

ขอขอบพระคุณ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.) ในการ เชื้ออำนวยการสถานที่ในการทำงานวิจัยที่ศูนย์เทคโนโลยีและวัสดุแห่งชาติ (MTEC) รวมถึง ขอขอบพระคุณทุนวิจัย โดยได้รับทุนสนับสนุนจาก โครงการพัฒนาศักยภาพบุคลากรเพื่อการวิจัย และพัฒนา สำหรับภาคอุตสาหกรรม (NSTDA, University Industry Research Collaboration; NUI-RC) สัญญารับทุนเลขที่ NUI-RC-01-54-041

ขอขอบพระคุณบริษัทเอื้อวิทยาจำกัด ในการอนุเคราะห์ชิ้นงานในการทำวิจัย สถานที่ใน การศึกษา รวมถึงคำแนะนำต่างๆซึ่ง เป็นจุดเริ่มต้นที่เป็นประโยชน์แก่งานวิจัยสำหรับวิทยานิพนธ์ ในหัวข้อเรื่องนี้

สุดท้ายนี้ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และครอบครัว สำหรับพระคุณอันล้น พ้นสำหรับโอกาสในการศึกษา กำลังใจและกำลังสนับสนุนที่ดีตลอดมา

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฎ
บทที่	
1. บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	4
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	5
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	5
2. การศึกษาข้อมูลเบื้องต้น.....	7
2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	7
2.1.1 สังกะสี.....	7
2.1.2 หลักการเบื้องต้นของการชุบแบบไม่ใช้ไฟฟ้า.....	20
2.1.3 การตรวจสอบพฤติกรรมการกัดกร่อนด้วยกระบวนการทางไฟฟ้า.....	30
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	37
3. ระเบียบวิธีวิจัย.....	51
3.1 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย.....	51
3.2 ระเบียบวิธีการวิจัย.....	52

4. ผลการทดลองและการอภิปราย.....	56
4.1 การศึกษาผลของตัวแปรบางประการต่อระบบของการชุบเคลือบโลหะผสม นิกเกิล-ฟอสฟอรัสแบบไม่ใช้ไฟฟ้า.....	56
4.1.1 ผลของความเข้มข้นของตัวแปรบางประการในสารละลายต่ออัตรา การชุบเคลือบในการผลิตชั้นรองพื้นโลหะผสมนิกเกิล-ฟอสฟอรัสแบบไม่ใช้ ไฟฟ้า.....	56
4.1.2 จลนพลศาสตร์ของอัตราการเกิดปฏิกิริยาของกระบวนการชุบเคลือบ ผิวในการผลิตชั้นรองพื้นโลหะผสมนิกเกิล -ฟอสฟอรัสแบบไม่ใช้ไฟฟ้าที่ อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส.....	65
4.1.3 การวิเคราะห์ผลของปริมาณความเข้มข้นของรีดิวซ์ซึ่งเอเจนต์และ ความเข้มข้นของพีเอชของสารละลายต่อระบบความเสถียรของ สารละลายอิเล็กโทรไลต์.....	71
4.1.4 ผลของความเข้มข้นของตัวแปรบางประการในสารละลาย ต่อ ส่วนผสมทางเคมีและลักษณะผิวของชั้นเคลือบในการผลิตชั้นรองพื้นโลหะ ผสมนิกเกิล-ฟอสฟอรัสแบบไม่ใช้ไฟฟ้า.....	77
4.2 การศึกษาการพัฒนาของโครงสร้างจุลภาคและเฟสที่เกิดขึ้น ของเหล็กกล้า คาร์บอน JIS SS400 ที่ผ่านกระบวนการชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนที่ 450 องศา เซลเซียสโดยมีชั้นเคลือบโลหะผสมนิกเกิล-ฟอสฟอรัสรองพื้น.....	83
4.2.1 การศึกษาโครงสร้างและเฟสของเหล็กชุบสังกะสีที่เปลี่ยนแปลงไป ตามความหนาของชั้นรองพื้นโลหะผสมนิกเกิล-ฟอสฟอรัส.....	85
4.2.2 การศึกษาโครงสร้างและเฟสของเหล็กชุบสังกะสีที่เปลี่ยนแปลงไป ตามระยะเวลาในการชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อน.....	108
4.2.3 การทดสอบการดัดโค้ง T-bend flexibility test.....	118
4.2.4 การศึกษาสมบัติความต้านทานการกัดกร่อน.....	128
5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	138
รายการอ้างอิง.....	141

ภาคผนวก..... 147

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์..... 165

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1	แสดงสมบัติทางกายภาพของโลหะสังกะสี..... 9
ตารางที่ 2.2	ลักษณะของเฟสที่เกิดในโลหะผสมของเหล็กและสังกะสี..... 14
ตารางที่ 2.3	ค่าคงที่ของอัตราในการโตกับเวลาที่รวบรวมจากงานวิจัยต่างๆ..... 20
ตารางที่ 2.4	แสดงสมบัติทางกายภาพของโลหะสังกะสี..... 22
ตารางที่ 2.5	แสดงการแบ่งแยกกลุ่มของโลหะหรือโลหะผสมด้วยวิธีการชุบเคลือบแบบไม่ใช้ไฟฟ้า..... 24
ตารางที่ 2.6	แสดงแหล่งจ่ายไอออนของโลหะในกระบวนการชุบเคลือบแบบไม่ใช้ไฟฟ้า..... 25
ตารางที่ 2.7	ชนิดของคอมเพล็กซ์เชิงเอเจนท์ชนิดต่างๆที่ใช้ในสารละลายในกระบวนการชุบเคลือบแบบไม่ใช้ไฟฟ้า..... 26
ตารางที่ 2.8	แสดงผลของคอมเพล็กซ์เชิงเอเจนท์ชนิดต่างๆที่ส่งผลต่อค่าลำดับของการเกิดปฏิกิริยาและค่าพลังงานการกระตุ้นในระบบการชุบเคลือบนิกเกิลโดยมีไฮโปฟอสไฟท์เป็นรีดิวซ์เซอร์..... 29
ตารางที่ 4.1	ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าคาร์บอนรีดร้อน JIS SS400..... 56
ตารางที่ 4.2	ส่วนผสมทางเคมีของสารละลายที่ใช้สำหรับชุบโลหะผสมนิกเกิลฟอสฟอรัสแบบไม่ใช้ไฟฟ้า..... 57
ตารางที่ 4.3	แสดงค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยา k_2 จากการประมาณผลข้อมูล (Extrapolated data) เมื่อ $\beta = 0.609$ สำหรับช่วงที่มีปริมาณนิกเกิลซัลเฟตต่ำ..... 70
ตารางที่ 4.4	แสดงค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยา k_2 จากการประมาณผลข้อมูล (Extrapolated data) เมื่อ $\beta = -0.078$ สำหรับช่วงที่มีปริมาณนิกเกิลซัลเฟตสูง..... 71
ตารางที่ 4.5	ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ JIS SS400..... 84
ตารางที่ 4.6	แสดงองค์ประกอบของธาตุในชั้นเคลือบแต่ละชั้นที่ได้จากการวิเคราะห์การกระจายพลังงาน ของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการชุบสังกะสีเป็นระยะเวลา 10 วินาที (Energy dispersive spectrometry, EDS)..... 92

ตารางที่ 4.7	แสดงองค์ประกอบของธาตุในชั้นเคลือบแต่ละชั้นที่ได้จากการวิเคราะห์การกระจายพลังงานของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการชุบสังกะสีเป็นระยะเวลา 5, 10, 60, และ 100 วินาที (Energy dispersive spectrometry, EDS).....	112
ตารางที่ 4.8	ค่าคงที่ของอัตราในการโตกับเวลา , (n) และค่าคงที่ของอัตราการโต , (K) ของชั้นเคลือบของเหล็กชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนโดยการเคลือบชั้นรองพื้นโลหะผสมนิกเกิล-ฟอสฟอรัส.....	116

สารบัญภาพ

	หน้า
ภาพที่ 2.1	แสดงการเกิดการป้องกันแบบกัลวานิก (galvanic protection)..... 8
ภาพที่ 2.2	แสดงสมบัติทางกายภาพของสังกะสีเมื่อเทียบกับโลหะชนิดอื่น..... 10
ภาพที่ 2.3	แสดงแผนผังกระบวนการชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อน..... 11
ภาพที่ 2.4	แสดงแผนผังระบบสององค์ประกอบของเหล็กและสังกะสี..... 13
ภาพที่ 2.5	แสดงแผนผังระบบสององค์ประกอบของเหล็กและสังกะสีในบริเวณที่มีปริมาณของสังกะสีเป็นส่วนมาก..... 13
ภาพที่ 2.6	แสดงโครงสร้างระดับจุลภาคของชั้นเคลือบสังกะสี ที่เกิดขึ้นหลังจากการจุ่มร้อนเป็นเวลา 300 วินาที ณ อุณหภูมิ 450 °C (1) เฟสแกมมา (Γ), (2) เฟสเดลตา (δ), (3) เฟสเซตา (ζ)..... 16
ภาพที่ 2.7	แผนผังของการเกิดขึ้นเฟสของเหล็กและสังกะสีในเตาหลอมกัลวาไนซ์ 0.00 wt% อะลูมิเนียม-สังกะสี, t_0 หมายถึงระยะเวลาเริ่มต้นและการพัฒนาของชั้นเฟสเกิดขึ้นตามเวลา t_1, t_2, t_3 และ t_4 ตามลำดับ..... 18
ภาพที่ 2.8	แสดงอัตราการเติบโตของชั้นเฟสแกมมา เฟสเดลต้า เฟสเซตาที่ระยะเวลาต่างๆบนเหล็กกล้า ULC ที่ทำการชุบเคลือบสังกะสีที่อุณหภูมิ 450 °C ในบ่อชุบสังกะสีที่ไม่มีส่วนผสมของอะลูมิเนียม..... 19
ภาพที่ 2.9	แสดงสมบัติทางกายภาพของนิกเกิลเมื่อเทียบกับโลหะชนิดอื่น..... 23
ภาพที่ 2.10	แสดงแผนผังอย่างง่ายของเครื่องโพเทนชิโอสแตทที่ใช้วัดเส้นโพลาริเซชัน..... 31
ภาพที่ 2.11	แสดงเส้นกราฟโพลาริเซชันแอนอดิกและแคโทดิกของโลหะในสารละลาย deaerated acid..... 32
ภาพที่ 2.12	แสดงภาพกราฟโพลาริเซชันแบบแอคทีฟ-พาสซีฟ ของโลหะ..... 33
ภาพที่ 2.13	แสดง Wagner-Traud diagram ของกระแสไฟฟ้าสำหรับสมการกระบวนการชุบเคลือบแบบไม่ใช้ไฟฟ้า..... 34
ภาพที่ 2.14	แสดงแผนภาพความสัมพันธ์ของศักย์ไฟฟ้าและกระแสของ Evans Diagram..... 35

ภาพที่ 2.15	แสดงแผนภาพความสัมพันธ์ของศักย์ไฟฟ้าและกระแสของ Evans Diagram สำหรับกระบวนการชุบเคลือบนิเกิลแบบไม่ใช้ไฟฟ้า.....	36
ภาพที่ 2.16	แสดงตัวอย่างผลของความเข้มข้นของโซเดียมไฮโปฟอสไฟต์ที่ส่งผลต่อ กระแสแอโนดิกในกระบวนการชุบเคลือบโลหะผสมนิเกิล-ฟอสฟอรัส แบบ ไม่ใช้ไฟฟ้า.....	37
ภาพที่ 2.17	แสดง กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณซิลิกอนและความหนาของชั้น สังกะสี.....	38
ภาพที่ 2.18	แสดงความสัมพันธ์ของระยะเวลาในการจุ่มร้อนกับความหนาของชั้นสังกะสี ที่เกิดขึ้นที่ปริมาณซิลิกอนต่างๆกัน.....	39
ภาพที่ 2.19	แสดงลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคของเหล็กที่ประกอบด้วยธาตุซิลิกอน 0.06% ที่ผ่านการชุบเคลือบสังกะสีที่อุณหภูมิ 460 องศาเซลเซียส.....	39
ภาพที่ 2.20	แสดง ลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคของเหล็กที่ประกอบด้วยธาตุซิลิกอน 0.26% ที่ผ่านการชุบเคลือบสังกะสีที่อุณหภูมิ 460 องศาเซลเซียส.....	40
ภาพที่ 2.21	ปริมาณของซิลิกอนเทียบกับความหนาของชั้นอัลลอยที่ได้จากการจุ่มร้อนที่ อุณหภูมิ 450°C โดยทำการเปลี่ยนแปลงเวลาในการจุ่มร้อน (a) ปราศจาก ชั้นของนิเกิล (b) ทำการชุบนิกเกิลที่ความหนา 3 ไมครอน ก่อนทำการจุ่ม ร้อน.....	43
ภาพที่ 2.22	ความหนาเฉลี่ยของชั้นเคลือบของเหล็กชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนโดยการ เคลือบชั้นรองพื้นนิเกิลด้วยไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงระยะเวลาในการจุ่มร้อน ในช่วง 10 วินาทีถึง 6 นาที.....	44
ภาพที่ 2.23	โครงสร้างจุลภาคของเหล็กชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อน H4-1m โดยการเคลือบ ชั้นรองพื้นนิเกิลด้วยไฟฟ้าจากกล่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนนิ่งที่ กำลังขยาย 2000 เท่า.....	45
ภาพที่ 2.24	ลักษณะทางกายภาพของชิ้นงานเหล็กชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนโดยวิธีดั้งเดิม (a)และโดยการเคลือบชั้นรองพื้นนิเกิลด้วยไฟฟ้า H1(b), H2(c), H3(d) และ H4(e) โดยกำหนดระยะเวลาในการชุบสังกะสี 1 นาที และชิ้นงาน H2 ที่ผ่านการชุบสังกะสี 6 นาที(f) ผ่านการภายหลังจากการทดสอบความคงทน ต่อไอเกลือที่ระยะเวลา 1400 ชั่วโมง.....	46

ภาพที่ 2.25	กราฟโพลาริเซชันของชิ้นงานแผ่นเหล็กชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนโดยการเคลือบชั้นรองพื้นนิกเกิลด้วยไฟฟ้า H2-1m ที่ถูกเก็บไว้ในในสารละลายเกลือ 5% เป็นระยะเวลา 0-3 สัปดาห์ ด้วยเทคนิคโพเทนชิโอดนามิกส์.....	47
ภาพที่ 2.26	แสดงภาพตัดขวางของชิ้นงานที่ผ่านการชุบเคลือบนิกเกิลแบบไม่ใช้ไฟฟ้า.....	48
ภาพที่ 2.27	แสดงโครงสร้างผิวของชั้นเคลือบนิกเกิลที่ทำการชุบแบบไม่ใช้ไฟฟ้า.....	48
ภาพที่ 2.28	แสดงกราฟโพลาริเซชันของโลหะผสมแมกนีเซียม AZ91D ที่ผ่านการชุบเคลือบนิกเกิลแบบไม่ใช้ไฟฟ้า a) และไม่ผ่านการชุบไฟฟ้า b).....	49
ภาพที่ 2.29	แสดงการเปรียบเทียบระหว่างเหล็กกล้าไร้สนิมออสติเนติก a) โลหะผสมแมกนีเซียม AZ91D ที่ผ่านการชุบเคลือบนิกเกิลแบบไม่ใช้ไฟฟ้า b) โลหะผสมแมกนีเซียม AZ91D ที่ผ่านการชุบเคลือบนิกเกิลแบบไม่ใช้ไฟฟ้าที่ผ่านการเทมเปอร์ (Temper) c).....	50
ภาพที่ 4.1	แสดงตัวอย่างของชิ้นงาน ก) เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำเกรด JIS SS-400 ข) เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำเมื่อผ่านการชุบเคลือบผิวด้วยโลหะผสมนิกเกิล-ฟอสฟอรัสแบบไม่ใช้ไฟฟ้า.....	57
ภาพที่ 4.2	แสดงตัวอย่างโครงสร้างทางจุลภาคตัดขวางของเหล็กแผ่นรีดร้อนเคลือบชั้นรองพื้นโลหะผสมนิกเกิล-ฟอสฟอรัสแบบไม่ใช้ไฟฟ้าที่กำลังขยาย 500 เท่า ส่วนผสมของสารละลายประกอบด้วย นิกเกิลซัลเฟต 0.15 M, โซเดียมไฮโปฟอสไฟท์ 0.19 M, pH = 9 และส่วนผสมทางเคมีดังตารางที่ 4.2.....	58
ภาพที่ 4.3	แสดงภาพโครงสร้างทางจุลภาคแบบตัดขวางของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการชุบเคลือบโลหะผสมนิกเกิล -ฟอสฟอรัสแบบไม่ใช้ไฟฟ้า ซึ่งแปรผันตามปริมาณความเข้มข้นของโซเดียมไฮโปฟอสไฟท์ ก) 0.08 M ข) 0.19 M ค) 0.38 M ง) 0.76 M.....	59
ภาพที่ 4.4	แสดงภาพโครงสร้างทางจุลภาคแบบตัดขวางของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการชุบเคลือบโลหะผสมนิกเกิล -ฟอสฟอรัสแบบไม่ใช้ไฟฟ้าโดยมีปริมาณของนิกเกิลซัลเฟตในสารละลายสำหรับชุบเคลือบที่ความเข้มข้นต่างๆกัน ก) 0.08 M ข) 0.15 M ค) 0.30 M ง) 0.60 M	62

ภาพที่ 4.5	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนโมลในการเกิดปฏิกิริยาของ อัตราการชุบเคลือบระหว่างปริมาณความเข้มข้นของโซเดียมไฮโปฟอสเฟต และนิกเกิลซัลเฟตในระบบสารละลาย.....	63
ภาพที่ 4.6	แสดงภาพโครงสร้างทางจุลภาคแบบตัดขวางของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการ ชุบเคลือบโลหะผสมนิกเกิล -ฟอสฟอรัสแบบไม่ใช้ไฟฟ้าโดยมีค่าพีเอชของ สารละลาย ก) 8 ข) 9 ค) 10 ง) 11.....	64
ภาพที่ 4.7	แสดงกราฟระหว่างผลของความเข้มข้นของรีดิวซ์ซึ่งเอเจนท์ แหล่งจ่าย ไอออนและพีเอชของสารละลายที่ส่งผลต่ออัตราการชุบเคลือบโลหะผสม นิกเกิล-ฟอสฟอรัส ที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส.....	66
ภาพที่ 4.8	แสดงกราฟความสัมพันธ์ลอการิทึมของอัตราการชุบเคลือบซึ่งเป็นฟังก์ชัน ปริมาณความเข้มข้นของโซเดียมไฮโปฟอสเฟตที่เปลี่ยนแปลงไป.....	67
ภาพที่ 4.9	แสดงกราฟความสัมพันธ์ลอการิทึมของอัตราการชุบเคลือบซึ่งเป็นฟังก์ชัน ปริมาณความเข้มข้นของนิกเกิลซัลเฟตที่เปลี่ยนแปลงไปสำหรับช่วงที่มี ปริมาณนิกเกิลซัลเฟตต่ำ.....	68
ภาพที่ 4.10	แสดงกราฟความสัมพันธ์ลอการิทึมของอัตราการชุบเคลือบซึ่งเป็นฟังก์ชัน ปริมาณความเข้มข้นของนิกเกิลซัลเฟตที่เปลี่ยนแปลงไปสำหรับช่วงที่มี ปริมาณนิกเกิลซัลเฟตสูง.....	68
ภาพที่ 4.11	แสดงกราฟความสัมพันธ์ลอการิทึมของอัตราการชุบเคลือบซึ่งเป็นฟังก์ชัน ตามปริมาณระดับพีเอชของสารละลายที่เปลี่ยนแปลงไป.....	69
ภาพที่ 4.12	แสดงลักษณะทางกายภาพของสีของสารละลายในบีกเกอร์ทดสอบเมื่อมีค่า ความเข้มข้นของโซเดียมไฮโปฟอสเฟตในสารละลายเป็น ก) สารละลาย A และ ข) สารละลาย B ที่ระยะเวลาในการชุบเคลือบต่างๆ.....	74
ภาพที่ 4.13	แสดงลักษณะทางกายภาพของตะกอนของสารละลายด้านล่างของบีกเกอร์ ทดสอบ ก) สารละลาย A และ ข) สารละลาย B.....	75
ภาพที่ 4.14	แสดงลักษณะทางกายภาพของสีของสารละลายในบีกเกอร์ทดสอบเมื่อมีค่า ความเข้มข้นของพีเอชของสารละลายเป็น ก) สารละลาย A ข) สารละลาย C ที่ระยะเวลาในการชุบเคลือบต่างๆ.....	76

ภาพที่ 4.15	แสดงกราฟระหว่างผลของความเข้มข้นของรีดิวซ์ซิงเอเจนท์ แหล่งจ่ายไอออนและพีเอชของสารละลายที่ส่งผลต่อส่วนผสมทางเคมีของชั้นเคลือบโลหะผสมนิกเกิล-ฟอสฟอรัส.....	79
ภาพที่ 4.16	แสดงลักษณะโครงสร้างทางกายภาพของพื้นผิวชั้นเคลือบโลหะผสมนิกเกิล-ฟอสฟอรัสแบบไม่ใช้ไฟฟ้า เมื่อมีปริมาณของโซเดียมไฮโปฟอสไฟท์ในสารละลายต่างกัน	80
ภาพที่ 4.17	แสดงลักษณะโครงสร้างทางกายภาพของพื้นผิวชั้นเคลือบโลหะผสมนิกเกิล-ฟอสฟอรัสแบบไม่ใช้ไฟฟ้า เมื่อมีปริมาณของนิกเกิลซัลเฟตในสารละลายต่างกัน	81
ภาพที่ 4.18	แสดงลักษณะโครงสร้างทางกายภาพของพื้นผิวชั้นเคลือบโลหะผสมนิกเกิล-ฟอสฟอรัสแบบไม่ใช้ไฟฟ้า เมื่อมีความเข้มข้นของพีเอชของสารละลายต่างกัน ก) 8 ข) 9 ค) 10 และ ง) 11.....	82
ภาพที่ 4.19	แสดงกราฟความสัมพันธ์ของเวลาต่ออัตราการชุบเคลือบที่ระยะเวลาต่างๆ สำหรับสารละลายที่เหมาะสมซึ่งประกอบด้วย โซเดียมไฮโปฟอสไฟท์ 0.378 M และ นิกเกิลซัลเฟต 0.152 M มีค่าพีเอชของสารละลายเท่ากับ 9 ที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส.....	83
ภาพที่ 4.20	แสดงลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคตัดขวางของชิ้นงานเหล็ก AISI SS-400 ที่มีส่วนผสมของธาตุซิลิกอนในปริมาณต่ำ (LS) ที่ผ่านกระบวนการชุบเคลือบชั้นรองพื้นโลหะผสมนิกเกิล-ฟอสฟอรัส ที่ระยะเวลาต่างๆและทำการชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนเป็นระยะเวลา 10 วินาที.....	86
ภาพที่ 4.21	แสดงลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคตัดขวางของชิ้นงานเหล็ก AISI SS-400 ที่มีส่วนผสมของธาตุซิลิกอนในปริมาณสูง (HS) ที่ผ่านกระบวนการชุบเคลือบชั้นรองพื้นโลหะผสมนิกเกิล-ฟอสฟอรัสที่ระยะเวลาต่างๆและทำการชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนเป็นระยะเวลา 10 วินาที.....	87
ภาพที่ 4.22	แผนภาพเฟส3องค์ประกอบของสังกะสี นิกเกิล และเหล็ก ที่อุณหภูมิ 450 °C.....	90

ภาพที่ 4.23	โครงสร้างทางจุลภาคของเหล็กชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อน LS-20m-10s โดยการเคลือบชั้นรองพื้นโลหะผสมนิกเกิล-ฟอสฟอรัสแบบไม่ใช้ไฟฟ้าจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด.....	92
ภาพที่ 4.24	โครงสร้างทางจุลภาคของเหล็กชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อน HS-20m-10s โดยการเคลือบชั้นรองพื้นโลหะผสมนิกเกิล-ฟอสฟอรัสแบบไม่ใช้ไฟฟ้าจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด.....	93
ภาพที่ 4.25	โครงสร้างทางจุลภาคของเหล็กชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อน LS-3m-10s โดยการเคลือบชั้นรองพื้นโลหะผสมนิกเกิล -ฟอสฟอรัสแบบไม่ใช้ไฟฟ้าจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด.....	94
ภาพที่ 4.26	โครงสร้างทางจุลภาคของเหล็กชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อน HS-3m-10s โดยการเคลือบชั้นรองพื้นโลหะผสมนิกเกิล -ฟอสฟอรัสแบบไม่ใช้ไฟฟ้าจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด.....	94
ภาพที่ 4.27	ความหนาเฉลี่ยของชั้นเคลือบของเหล็กชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนโดยการเคลือบชั้นรองพื้นด้วยโลหะผสมนิกเกิล -ฟอสฟอรัสแบบไม่ใช้ไฟฟ้า และทำการชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนเป็นระยะเวลา 10 วินาที.....	95
ภาพที่ 4.28	แสดงภาพการกระจายตัวของธาตุแต่ละชนิดของชิ้นงาน LS-3m-10s ด้วยเทคนิคการวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุ ก) Zinc ข) Fe ค) Ni ง) P จ) EDS.....	97
ภาพที่ 4.29	แสดงภาพการกระจายตัวของธาตุแต่ละชนิดของชิ้นงาน LS-20m-10s ด้วยเทคนิคการวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุ ก) Zinc ข) Fe ค) Ni ง) P จ) EDS.....	98
ภาพที่ 4.30	แสดงลักษณะการวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุแต่ละชนิดด้วยเทคนิค EPMA ในโครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการชุบเคลือบชั้นรองพื้นโลหะผสมนิกเกิล-ฟอสฟอรัสและผ่านกระบวนการชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนของเหล็กชนิด hypo-sandelin UA1-3m-10 ตำแหน่งที่ 1.....	101

ภาพที่ 4.31	แสดงลักษณะการวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุแต่ละชนิดด้วยเทคนิค EPMA ในโครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการชุบเคลือบชั้นรองพื้นโลหะผสมนิกเกิล-ฟอสฟอรัสและผ่านกระบวนการชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนของเหล็กชนิด hypo-sandelinUA1-20m-10s ตำแหน่งที่.....	102
ภาพที่ 4.32	แสดงลักษณะการวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุแต่ละชนิดด้วยเทคนิค EPMA บริเวณชั้นอินเทอร์มีเดียทของเหล็กชนิด low silicon (LS).....	105
ภาพที่ 4.33	แสดงลักษณะการวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุแต่ละชนิดด้วยเทคนิค EPMA บริเวณชั้นอินเทอร์มีเดียทของเหล็กชนิด high silicon (HS).....	106
ภาพที่ 4.34	แสดงลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคตัดขวางของชิ้นงานเหล็กชนิดที่มีส่วนผสมของซิลิกอนต่ำที่ผ่านกระบวนการชุบเคลือบชั้นรองพื้นโลหะผสมนิกเกิล-ฟอสฟอรัสที่ระยะเวลา 15 นาทีเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่ผ่านการชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนแบบดั้งเดิมที่ระยะเวลาต่างๆ.....	110
ภาพที่ 4.35	แสดงลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคตัดขวางของชิ้นงานเหล็กชนิดที่มีส่วนผสมของซิลิกอนสูงที่ผ่านกระบวนการชุบเคลือบชั้นรองพื้นโลหะผสมนิกเกิล-ฟอสฟอรัสที่ระยะเวลา 15 นาทีเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่ผ่านการชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนแบบดั้งเดิมที่ระยะเวลาต่างๆ.....	111
ภาพที่ 4.36	ความหนาเฉลี่ยของชั้นเคลือบของเหล็กชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนโดยการเคลือบชั้นรองพื้นด้วยโลหะผสมนิกเกิล -ฟอสฟอรัสแบบไม่ใช้ไฟฟ้า ที่เปลี่ยนแปลงระยะเวลาในการจุ่มร้อนในช่วง 5 วินาทีถึง 100 วินาที.....	113
ภาพที่ 4.37	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของชั้นเคลือบต่อระยะเวลาในการชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนของชิ้นงานเหล็กที่มีส่วนผสมของซิลิกอนต่ำ.....	115
ภาพที่ 4.38	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของชั้นเคลือบต่อระยะเวลาในการชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนของชิ้นงานเหล็กที่มีส่วนผสมของซิลิกอนสูง.....	115
ภาพที่ 4.39	ความหนาของชั้นรองพื้นโลหะผสมนิกเกิล-ฟอสฟอรัสที่เปลี่ยนแปลงไปตามระยะเวลาในการชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนบนชิ้นงานเหล็กที่มีส่วนผสมของซิลิกอนต่ำ.....	117

ภาพที่ 4.40	ความหนาของชั้นรองพื้นโลหะผสมนิกเกิล-ฟอสฟอรัสที่เปลี่ยนแปลงไปตามระยะเวลาในการชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนบนชิ้นงานเหล็กที่มีส่วนผสมของซิลิกอนสูง.....	117
ภาพที่ 4.41	ภาพตัดขวางของชิ้นงาน LS-0m-60s ก) ส่วนที่ได้รับแรงอัด เมื่อตัดโค้งมุม 90 องศา ข) ส่วนที่ได้รับแรงดึงอัดเมื่อตัดโค้งมุม 90 องศา ค) ส่วนที่เคยได้รับแรงอัดเมื่อตัดโค้งสู่ตำแหน่งเดิม ม ง) ส่วนที่เคยได้รับแรงดึง เมื่อตัดโค้งสู่ตำแหน่งเดิม.....	119
ภาพที่ 4.42	ภาพตัดขวางของชิ้นงาน HS-0m-60s ก) ส่วนที่ได้รับแรงอัด เมื่อตัดโค้งมุม 90 องศา ข) ส่วนที่ได้รับแรงดึงอัดเมื่อตัดโค้งมุม 90 องศา ค) ส่วนที่เคยได้รับแรงอัดเมื่อตัดโค้งสู่ตำแหน่งเดิม ม ง) ส่วนที่เคยได้รับแรงดึง เมื่อตัดโค้งสู่ตำแหน่งเดิม.....	120
ภาพที่ 4.43	ภาพตัดขวางของชิ้นงาน LS-10m-10s ก) ส่วนที่ได้รับแรงอัด เมื่อตัดโค้งมุม 90 องศา ข) ส่วนที่ได้รับแรงดึงอัดเมื่อตัดโค้งมุม 90 องศา ค) ส่วนที่เคยได้รับแรงอัดเมื่อตัดโค้งสู่ตำแหน่งเดิม ม ง) ส่วนที่เคยได้รับแรงดึง เมื่อตัดโค้งสู่ตำแหน่งเดิม.....	121
ภาพที่ 4.44	ภาพตัดขวางของชิ้นงาน HS-10m-10s ก) ส่วนที่ได้รับแรงอัดเมื่อตัดโค้งมุม 90 องศา ข) ส่วนที่ได้รับแรงดึงอัดเมื่อตัดโค้งมุม 90 องศา ค) ส่วนที่เคยได้รับแรงอัดเมื่อตัดโค้งสู่ตำแหน่งเดิม ม ง) ส่วนที่เคยได้รับแรงดึง เมื่อตัดโค้งสู่ตำแหน่งเดิม.....	122
ภาพที่ 4.45	ภาพตัดขวางของชิ้นงาน LS-15m-60s ก) ส่วนที่ได้รับแรงอัด เมื่อตัดโค้งมุม 90 องศา ข) ส่วนที่ได้รับแรงดึงอัดเมื่อตัดโค้งมุม 90 องศา ค) ส่วนที่เคยได้รับแรงอัดเมื่อตัดโค้งสู่ตำแหน่งเดิม ม ง) ส่วนที่เคยได้รับแรงดึง เมื่อตัดโค้งสู่ตำแหน่งเดิม.....	123
ภาพที่ 4.46	ภาพตัดขวางของชิ้นงาน HS-15m-60s ก) ส่วนที่ได้รับแรงอัดเมื่อตัดโค้งมุม 90 องศา ข) ส่วนที่ได้รับแรงดึงอัดเมื่อตัดโค้งมุม 90 องศา ค) ส่วนที่เคยได้รับแรงอัดเมื่อตัดโค้งสู่ตำแหน่งเดิม ม ง) ส่วนที่เคยได้รับแรงดึง เมื่อตัดโค้งสู่ตำแหน่งเดิม.....	124

ภาพที่ 4.47	ลักษณะทางกายภาพของชิ้นงานเหล็กชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนโดยวิธีดั้งเดิม และโดยการเคลือบชั้นรองพื้นนิกเกิลด้วยไฟฟ้าและชั้นรองพื้นโลหะผสม นิกเกิล-ฟอสฟอรัสแบบไม่ใช้ไฟฟ้า ภายหลังจากการทดสอบความคงทนต่อ ไอเกลือที่ระยะเวลา ก) 0, ข) 100, ค.550 และ ง).800 ชั่วโมง	131
ภาพที่ 4.48	กราฟโพลาริเซชันของชิ้นงานเหล็ก low silicon ชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนโดยการเคลือบชั้นรองพื้นโลหะผสมนิกเกิล -ฟอสฟอรัสแบบไม่ใช้ไฟฟ้า (LS-10m-10s) ที่ถูกเก็บไว้ในสารละลายเกลือ 5% เป็นระยะเวลา 0-3 สัปดาห์ ด้วยเทคนิคโพเทนทิโอดนามิกส์.....	133
ภาพที่ 4.49	แสดงค่าศักย์ไฟฟ้าของการกัดกร่อนของชิ้นงานเหล็ก low silicon (LS) ที่เงื่อนไขต่างๆถูกเก็บไว้ในสารละลายเกลือ 5% เป็นระยะเวลา 1, 2 และ 3 สัปดาห์.....	134
ภาพที่ 4.50	แสดงค่าศักย์ไฟฟ้าของการกัดกร่อนของชิ้นงานเหล็ก high silicon (HS) ที่เงื่อนไขต่างๆถูกเก็บไว้ในสารละลายเกลือ 5% เป็นระยะเวลา 1, 2 และ 3 สัปดาห์.....	134
ภาพที่ 4.51	แสดงค่ากระแสของการกัดกร่อนของชิ้นงานเหล็ก low silicon (LS) ที่เงื่อนไขต่างๆถูกเก็บไว้ในสารละลายเกลือ 5% เป็นระยะเวลา 1, 2 และ 3 สัปดาห์.....	136
ภาพที่ 4.52	แสดงค่ากระแสของการกัดกร่อนของชิ้นงานเหล็ก high silicon (HS) ที่เงื่อนไขต่างๆถูกเก็บไว้ในสารละลายเกลือ 5% เป็นระยะเวลา 1, 2 และ 3 สัปดาห์.....	136
ภาพที่ ผ.1	แสดงภาพการกระจายตัวของธาตุแต่ละชนิดของชิ้นงาน LS-3m-10s ด้วยเทคนิคการวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุ (a) Zinc (b) Fe (c) Ni (d) P (e) ตำแหน่งชิ้นงาน.....	148
ภาพที่ ผ.2	แสดงภาพการกระจายตัวของธาตุแต่ละชนิดของชิ้นงาน LS-20m-10s ด้วยเทคนิคการวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุ (a) Zinc (b) Fe (c) Ni (d) P (e) ตำแหน่งชิ้นงาน.....	149

ภาพที่ ผ.3	แสดงลักษณะการวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุแต่ละชนิดด้วยเทคนิค EPMA ในโครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงาน LS-3m-10s ตำแหน่งที่ 2.....	150
ภาพที่ ผ.4	แสดงลักษณะการวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุแต่ละชนิดด้วยเทคนิค EPMA ในโครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงาน LS-3m-10s ตำแหน่งที่ 3.....	151
ภาพที่ ผ.5	แสดงลักษณะการวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุแต่ละชนิดด้วยเทคนิค EPMA ในโครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงาน LS-3m-10s ตำแหน่งที่ 4.....	152
ภาพที่ ผ.6	แสดงลักษณะการวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุแต่ละชนิดด้วยเทคนิค EPMA ในโครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงาน LS-20m-10s ตำแหน่งที่ 2.....	153
ภาพที่ ผ.7	แสดงลักษณะการวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุแต่ละชนิดด้วยเทคนิค EPMA ในโครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงาน LS-20m-10s ตำแหน่งที่ 3.....	154
ภาพที่ ผ.8	แสดงลักษณะการวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุแต่ละชนิดด้วยเทคนิค EPMA ในโครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงาน LS-20m-10s ตำแหน่งที่ 4.....	155
ภาพที่ ผ.9	ภาพตัดขวางของชิ้นงาน UA1-0m-60s ก) ส่วนที่ได้รับแรงอัดเมื่อตัดโค้งมุม 90 องศา ข) ส่วนที่ได้รับแรงดึงอัดเมื่อตัดโค้งมุม 90 องศา ค) ส่วนที่เคยได้รับแรงอัดเมื่อตัดโค้งสู่ตำแหน่งเดิม ม ง) ส่วนที่เคยได้รับแรงดี งเมื่อตัดโค้งสู่ตำแหน่งเดิม.....	156
ภาพที่ ผ.10	ภาพตัดขวางของชิ้นงาน UA4-0m-60s ก) ส่วนที่ได้รับแรงอัดเมื่อตัดโค้งมุม 90 องศา ข) ส่วนที่ได้รับแรงดึงอัดเมื่อตัดโค้งมุม 90 องศา ค) ส่วนที่เคยได้รับแรงอัดเมื่อตัดโค้งสู่ตำแหน่งเดิม ม ง) ส่วนที่เคยได้รับแรงดี งเมื่อตัดโค้งสู่ตำแหน่งเดิม.....	157
ภาพที่ ผ.11	ภาพตัดขวางของชิ้นงาน UA1-10m-10s ก) ส่วนที่ได้รับแรงอัดเมื่อตัดโค้งมุม 90 องศา ข) ส่วนที่ได้รับแรงดี งอัดเมื่อตัดโค้งมุม 90 องศา ค) ส่วนที่เคยได้รับแรงอัดเมื่อตัดโค้งสู่ตำแหน่งเดิม ง) ส่วนที่เคยได้รับแรงดี งเมื่อตัดโค้งสู่ตำแหน่งเดิม.....	158
ภาพที่ ผ.12	ภาพตัดขวางของชิ้นงาน UA4-10m-10s ก) ส่วนที่ได้รับแรงอัดเมื่อตัดโค้งมุม 90 องศา ข) ส่วนที่ได้รับแรงดี งอัดเมื่อตัดโค้งมุม 90 องศา ค) ส่วนที่เคยได้รับแรงอัดเมื่อตัดโค้งสู่ตำแหน่งเดิม ง) ส่วนที่เคยได้รับแรงดี งเมื่อตัดโค้งสู่ตำแหน่งเดิม.....	159

ภาพที่ ผ.13	ภาพตัดขวางของชิ้นงาน UA1-15m-60s ก) ส่วนที่ได้รับแรงอัด ดเมื่อตัดโค้งมุม 90 องศา ข) ส่วนที่ได้รับแรงดึงอัดเมื่อตัดโค้งมุม 90 องศา ค) ส่วนที่เคยได้รับแรงอัดเมื่อตัดโค้งสู่ตำแหน่งเดิม ง) ส่วนที่เคยได้รับแรงดึงเมื่อตัดโค้งสู่ตำแหน่งเดิม.....	160
ภาพที่ ผ.14	ภาพตัดขวางของชิ้นงาน UA4-15m-60s ก) ส่วนที่ได้รับแรงอัด ดเมื่อตัดโค้งมุม 90 องศา ข) ส่วนที่ได้รับแรงดึงอัดเมื่อตัดโค้งมุม 90 องศา ค) ส่วนที่เคยได้รับแรงอัดเมื่อตัดโค้งสู่ตำแหน่งเดิม ง) ส่วนที่เคยได้รับแรงดึงเมื่อตัดโค้งสู่ตำแหน่งเดิม.....	161
ภาพที่ ผ.15	กราฟโพลาริเซชันของชิ้นงานเหล็ก low silicon (LS0m-60s) ที่ถูกเก็บไว้ในสารละลายเกลือ 5% เป็นระยะเวลา 0-3 สัปดาห์ ด้วยเทคนิคโพเทนทิโอดินามิกส์.....	162
ภาพที่ ผ.16	กราฟโพลาริเซชันของชิ้นงานเหล็ก low silicon (LS-15m-60s) ที่ถูกเก็บไว้ในสารละลายเกลือ 5% เป็นระยะเวลา 0-3 สัปดาห์ ด้วยเทคนิคโพเทนทิโอดินามิกส์.....	162
ภาพที่ ผ.17	กราฟโพลาริเซชันของชิ้นงานเหล็ก high silicon (HS-0m-60s) ที่ถูกเก็บไว้ในสารละลายเกลือ 5% เป็นระยะเวลา 0-3 สัปดาห์ ด้วยเทคนิคโพเทนทิโอดินามิกส์.....	163
ภาพที่ ผ.18	กราฟโพลาริเซชันของชิ้นงานจาก high silicon (HS-10m-10s) ที่ถูกเก็บไว้ในสารละลายเกลือ 5% เป็นระยะเวลา 0-3 สัปดาห์ ด้วยเทคนิคโพเทนทิโอดินามิกส์.....	163
ภาพที่ ผ.19	กราฟโพลาริเซชันของชิ้นงาน high silicon (HS-15m-60s) ที่ถูกเก็บไว้ในสารละลายเกลือ 5% เป็นระยะเวลา 0-3 สัปดาห์ ด้วยเทคนิคโพเทนทิโอดินามิกส์.....	165

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันมีการใช้เหล็กเป็นวัสดุพื้นฐานสำหรับงานต่างๆ มากมาย เนื่องจากเหล็กเป็นวัสดุที่มีสมบัติในการรับแรงต่างๆ ได้ดี เช่น แรงกระแทก (Impact strength) แรงดึง (Tensile strength) แรงอัด (Compressive strength) และแรงเฉือน (Shear strength) ซึ่งข้อพิจารณาในการเลือกใช้ผลิตภัณฑ์เหล็ก นอกจากจะดูที่ความแข็งแรง ความเหนียว (Toughness) ความสามารถในการขึ้นรูปและความสามารถในการเชื่อมประกอบแล้ว เรายังต้องพิจารณาถึงความต้านทานการกัดกร่อนด้วย เพื่อให้ใช้งานเหล็กได้อย่างคุ้มค่า ลดความจำเป็นในการซ่อมบำรุงและมั่นใจในความปลอดภัย เช่น อุตสาหกรรมอาหาร การขนส่งเชื้อเพลิงโดยท่อเหล็ก อุตสาหกรรมโครงสร้าง เป็นต้น [1] กรรมวิธีในการป้องกันการกัดกร่อนของเหล็กมีอยู่หลายวิธี อาทิเช่น การป้องกันโดยใช้ระบบแคโทดิก(Cathodic protection) การเคลือบด้วยโลหะ การใช้สารกันสนิม การทาสี แต่ละวิธีขึ้นอยู่กับความเหมาะสมกับงานแต่ละชนิด [2]

การเคลือบด้วยโลหะสังกะสีเป็นกระบวนการหนึ่งที่ยอมรับใช้เพื่อเพิ่มสมบัติความต้านทานต่อการกัดกร่อนให้กับเหล็กเนื่องจาก 1. มีต้นทุนการผลิตที่ไม่สูงมากหากเปรียบเทียบกับกรรมวิธีในการเคลือบด้วยวัสดุและวิธีการอื่นๆ 2. มีค่าใช้จ่ายในการซ่อมบำรุงและค่าใช้จ่ายในระยะยาวต่ำ 3. สามารถมีอายุการใช้งานที่ยาวนานมากกว่า 50 ปีในสภาวะสิ่งแวดล้อมปกติ และ10-30 ปีในสิ่งแวดล้อมที่มีการกัดกร่อนสูง 4. ชั้นเคลือบสังกะสีมีการยึดเกาะกับเนื้อเหล็กที่ดีเนื่องจากเกิดพันธะโลหะกับพื้นผิว 5. ชั้นเคลือบสังกะสีเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม 6.กระบวนการเคลือบสามารถทำได้รวดเร็ว [3] การเคลือบสังกะสีนั้นสามารถเพิ่มสมบัติการป้องกันการกัดกร่อนของโลหะได้โดยชั้นสังกะสีที่ปิดผิวเหล็กทำให้ออกซิเจน ioni และโดยเฉพาะอย่างยิ่งคลอไรด์ (Chloride) ซึ่งมีฤทธิ์กัดกร่อนเหล็กได้ดี ไม่สามารถสัมผัสและทำปฏิกิริยากับเหล็กได้จึงเป็นการป้องกันระดับหนึ่ง นอกจากนี้ในกรณีที่ผิวเคลือบสังกะสีถูกแรงกระทำจนเกิดรอยลึกถึงเนื้อเหล็กแล้ว สังกะสีก็ยังคงสามารถป้องกันเหล็กจากการกัดกร่อนได้ เนื่องจากสังกะสีเป็นโลหะที่มีค่าศักย์ไฟฟ้าต่ำกว่าเหล็ก จึงเกิดปฏิกิริยาเคมีได้ง่ายกว่าเหล็ก ลักษณะการใช้โลหะที่มีศักย์ไฟฟ้าต่ำกว่าร่วมกับโลหะที่มีค่าศักย์ไฟฟ้าสูงกว่าเพื่อให้โลหะที่มีค่าศักย์ไฟฟ้าต่ำกว่าเกิดปฏิกิริยากัดกร่อนก่อนโลหะที่มีค่าศักย์ไฟฟ้าสูงเรียกว่า การป้องกันแบบแคโทดิก (Cathodic protection) [4]

การชุบเคลือบสังกะสีมีด้วยกันหลายวิธี เช่น การชุบเคลือบสังกะสีแบบจุ่มร้อน (Hot dip galvanizing) การเคลือบสังกะสีด้วยไฟฟ้า (Electro galvanizing) การเคลือบด้วยวิธีทางกล (Mechanical coatings) การพ่นเคลือบด้วยเปลวความร้อน (Zinc spraying) การทาสีผงสังกะสี (Zinc-rich paints) การชุบเคลือบสังกะสีแบบจุ่มร้อนด้วยกระบวนการต่อเนื่อง (Continuous hot dip galvanizing) การเคลือบด้วยเทคนิคเซอร์ราโดซิง (Sherardizing) [4]

กระบวนการชุบเคลือบสังกะสีแบบจุ่มร้อนเป็นวิธีที่นิยม เนื่องจากทำได้ง่ายและกระบวนการไม่มีความซับซ้อนเหมือนกับกระบวนการชุบเคลือบแบบอื่นๆ มักใช้ทำการชุบชิ้นส่วนต่างๆ อาทิเช่น โครงสร้างเสาไฟฟ้า โครงสร้างอาคาร หรือชิ้นส่วนยานพาหนะต่างๆ [5-6] กระบวนการชุบสังกะสีโดยวิธีจุ่มร้อนจะเป็นกระบวนการที่ได้ชั้นเคลือบของสังกะสีที่ค่อนข้างหนา (ประมาณ 50-125 ไมครอน) [7] เนื่องจากชิ้นงานต้องถูกจุ่มอยู่ในบ่อสังกะสีหลอมเหลวเป็นระยะเวลา (ประมาณ 10 -150 วินาที) ในขณะที่ผิวชิ้นเคลือบสารประกอบโลหะที่เกิดขึ้นระหว่างเหล็กและสังกะสีหรือที่เรียกว่า ชั้นอินเทอร์มีเดียท (Intermediate phases) ที่ประกอบด้วย เฟสซีตา (ζ), เดลตา (δ) และ แกมมา (Γ) ก็เกิดขึ้นก็จะหนาตามไปด้วย [8] โดยสมบัติเชิงกลของชั้นเคลือบสารประกอบโลหะที่เกิดขึ้นระหว่างเหล็กและสังกะสีแต่ละชั้นจะแตกต่างกันออกไป โดยเฟสแกมมา (Γ) จะมีความแข็งเปราะสูง เฟสซีตา (ζ) ที่เป็นชั้นเฟสด้านนอกนั้นมีความอ่อนตัวและเกิดการเสียรูปถาวรได้ง่าย แสดงให้เห็นว่าหากมีชั้นเคลือบสารประกอบโลหะที่เกิดขึ้นระหว่างเหล็กและสังกะสีที่หนามากเกินไปอาจส่งผลเสียต่อสมบัติทางกลของเหล็กกล้าชุบสังกะสีเป็นได้ เช่น การหลุดร่อนของชั้นเคลือบ การแตกหักของชั้นเคลือบ เป็นต้น [9] และสำหรับอีกปัญหาหนึ่งของการชุบเคลือบสังกะสีแบบจุ่มร้อนกับเหล็กที่มีส่วนผสมของปริมาณซิลิกอน (Si) ในเนื้อเหล็กที่แตกต่างกันจะส่งผลต่ออัตราการชุบเคลือบของโลหะสังกะสีแบบจุ่มร้อนที่แตกต่างกันออกไป ทำให้ชั้นเคลือบสังกะสีรวมถึงชั้นอินเทอร์มีเดียทมีความหนาที่แตกต่างกันออกไปแม้ว่าจะใช้ระยะเวลาในการจุ่มร้อนสังกะสีที่เท่ากันก็ตามโดยปรากฏการณ์นี้จะเรียกว่า Sandelin effect [10] ซึ่งอาจส่งผลต่อชิ้นงานที่มีการเชื่อมต่อนของเหล็กมากกว่าสองชนิดที่มีปริมาณซิลิกอนที่แตกต่างกัน ซึ่งอาจทำให้ชิ้นงานเดียวกันมีความแตกต่างหรือความไม่สม่ำเสมอของชั้นเคลือบสังกะสีที่เกิดขึ้นได้ โดยทั่วไปในการใช้งานในสภาวะปกติชั้นเคลือบสังกะสีที่เกิดขึ้นจะใช้งานที่มีความหนาของชั้นสังกะสีได้ตั้งแต่ 3 ไมครอนเป็นต้นไป [7] จะเห็นได้ว่าไม่ว่าชั้นเคลือบสังกะสีจะหนาหรือบางก็สามารถป้องกันการกัดกร่อนของเหล็กที่สภาวะทั่วไปได้ ดังนั้นการชุบเคลือบสังกะสีแบบจุ่มร้อน

อาจจะได้ชั้นเคลือบสังกะสีที่มีความหนาเกินความจำเป็น ส่งผลให้สิ้นเปลืองค่าใช้จ่าย ซึ่งในปัจจุบันปัญหานี้กำลังได้รับความสนใจและพัฒนาแก้ไขมาโดยตลอด

จากปัญหาที่กล่าวมาเพื่อที่จะได้ชั้นงานเหล็กเคลือบสังกะสีที่มีความหนาของสังกะสีและชั้นเคลือบสารประกอบโลหะที่เกิดขึ้นระหว่างเหล็กและสังกะสีที่ลดลง แต่ยังคงสมบัติความต้านทานการกัดกร่อนของเหล็ก จึงจำเป็นที่จะต้องศึกษากลไกการทำปฏิกิริยาระหว่างเหล็กสังกะสีและธาตุผสมอื่นๆ จากงานวิจัยของ S.M.A. Shibli, R. Manu [11] และ C. Chunshan et al [12] ได้แสดงให้เห็นถึงขนาดของชั้นงานเหล็กชุบสังกะสีที่มีความหนาลดลงจากการเคลือบด้วยชั้นรองพื้นนิกเกิลก่อนที่จะนำไปชุบเคลือบสังกะสีแบบจุ่มร้อน และอธิบายถึงอิทธิพลของการเคลือบชั้นรองพื้นนิกเกิลว่า การที่มีนิกเกิลเป็นเฟสของแข็งระหว่างเหล็กและสังกะสีจะช่วยให้การลดอัตราการแพร่ของเหล็กที่เป็นเฟสของแข็งและสังกะสีที่เป็นเฟสของเหลว นอกจากนี้ยังคาดได้ว่าชั้นรองพื้นนิกเกิลจะช่วยให้การปรับปรุงชั้นเคลือบให้มีสมบัติต้านทานการกัดกร่อนได้ดีขึ้นด้วยตัวอย่างเช่น การชุบเคลือบชั้นรองพื้นโลหะผสมนิกเกิล (Nickel alloy) ด้วยกระบวนการชุบเคลือบแบบไม่ใช้ไฟฟ้า (Electroless) จากการศึกษารายงานปริทัศน์ (Review paper) ของ K.Hari Krishnan et al. [13] กล่าวว่า การชุบเคลือบชั้นรองพื้นโลหะผสมนิกเกิล (นิกเกิล-ฟอสฟอรัส) ด้วยวิธีการชุบแบบไม่ใช้ไฟฟ้ามักมีการใช้งานที่หลากหลาย เนื่องจากมีสมบัติที่ดีในหลายๆด้าน เช่น มีความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อนที่สูง ทนต่อการขีดถู มีค่าความแข็งสูง ซึ่งพบว่าความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อนของชั้นรองพื้นโลหะผสมนิกเกิลที่มีส่วนผสมของฟอสฟอรัส (นิกเกิล-ฟอสฟอรัส) จะมีค่าสูงกว่าชั้นรองพื้นโลหะผสมนิกเกิล ที่มีส่วนผสมของโบรอน (นิกเกิล-โบรอน) โดยจะขึ้นอยู่กับส่วนผสมทางเคมีในสารละลายที่ใช้ในการชุบเคลือบแบบไม่ใช้ไฟฟ้า

ดังนั้นแนวคิดของงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นการศึกษาปัจจัยที่เป็นไปได้ที่มีผลต่อผลของความหนาของชั้นเคลือบสังกะสีโดยการชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อน อีกทั้งยังได้ศึกษาวิธีการปรับปรุงสมบัติของชั้นงานที่ทำการชุบเคลือบสังกะสีด้วยวิธีจุ่มร้อน โดยลดขนาดของชั้นเคลือบสังกะสีควบคู่ไปกับการศึกษาเฟสของชั้นเคลือบสารประกอบโลหะที่เกิดขึ้นระหว่างเหล็กและสังกะสีที่เปลี่ยนแปลงไป ตามระยะเวลาการชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนรวมถึงผลกระทบต่อความต้านทานการกัดกร่อน ความแข็งแรงของชั้นเคลือบสารประกอบโลหะที่เกิดขึ้นระหว่างเหล็กและสังกะสี เพื่อพัฒนาแนววิธีการชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนในวิธีดังกล่าวไปเป็นการชุบสังกะสีแบบต่อเนื่องได้ เพื่อให้ได้สมบัติตามที่ต้องการ

ซึ่งในงานวิจัยนี้จะทำการชุบเคลือบสังกะสีแบบจุ่มร้อนโดยการเคลือบชั้นรองพื้นโลหะผสมนิกเกิล (นิกเกิล-ฟอสฟอรัส) ด้วยวิธีการชุบแบบไม่ใช้ไฟฟ้า (Electroless) ก่อนทำการชุบเคลือบสังกะสีแบบจุ่มร้อน โดยขั้นแรกจะทำการศึกษาส่วนผสมทางเคมีของสารละลาย (Bath composition) ที่ใช้สำหรับการชุบแบบไม่ใช้ไฟฟ้าและระยะเวลาที่ใช้ชุบชั้นรองพื้นเพื่อให้ได้อัตราในการชุบชั้นรองพื้นที่ดี (มีอัตราการชุบชั้นรองพื้นเร็ว) เพื่อสามารถแทนขั้นตอนกระบวนการจุ่มฟลักซ์ในการชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนแบบดั้งเดิม และต่อมาจะการปรับเปลี่ยนระยะเวลาในการชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนที่ระยะเวลาต่างๆกัน เพื่อศึกษากลไกการแพร่และการทำปฏิกิริยาระหว่างชั้นรองพื้นโลหะผสมนิกเกิล (นิกเกิล-ฟอสฟอรัส) กับสังกะสีและเหล็ก โดยเลือกชิ้นงานที่ได้ทำการชุบชั้นรองพื้นโลหะผสมนิกเกิล (นิกเกิล-ฟอสฟอรัส) จากการศึกษาส่วนผสมทางเคมีของสารละลายที่ใช้และระยะเวลาที่ใช้ชุบชั้นรองพื้นสำหรับการชุบแบบไม่ใช้ไฟฟ้าที่เหมาะสมที่สุดเพื่อศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงาน รวมถึงศึกษาโครงสร้างของวัสดุหลังจากทำการชุบเคลือบสังกะสีแบบภาคตัดขวางด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical microscope ; OM) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (Scanning electron microscope ; SEM) หลังจากนั้นทำการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีของธาตุต่างๆและเฟสที่เกิดขึ้นในแต่ละชั้นเคลือบ (Intermetallic compound) โดยการใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาดโหมด Energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDS) และเครื่องวิเคราะห์ด้วยไมโครด้วยลำอิเล็กตรอน (Electron Probe Microanalysis , EPMA) รวมถึงการทดสอบความต้านทานการกัดกร่อนด้วยการจำลองสภาวะไอเกลือ (Salt spray) การทดสอบการกัดกร่อนของชั้นเคลือบสารประกอบโลหะที่เกิดขึ้นระหว่างเหล็กและสังกะสีด้วยเทคนิคเคมีไฟฟ้า (Potentiodynamic) รวมถึงทำการทดสอบเพื่อหาคุณลักษณะทางกล ด้วยวิธีการวิเคราะห์กลไกการแตกหักของชั้นเคลือบด้วยวิธีการทดสอบการดัดโค้ง (Bending)

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาส่วนผสมทางเคมีของสารละลายที่ใช้สำหรับการชุบแบบไม่ใช้ไฟฟ้าในการผลิตชั้นรองพื้นโลหะผสมนิกเกิล (นิกเกิล-ฟอสฟอรัส) เพื่อให้ได้อัตราการชุบเคลือบที่สูงรวมถึงมีความเสถียรของสารละลายชุบที่ดี

2. เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างจุลภาคและเฟสต่างๆของชิ้นงานตามระยะเวลาในการชุบเคลือบชั้นรองพื้นโลหะผสมนิกเกิลและระยะเวลาในการชุบเคลือบสังกะสีแบบจุ่มร้อน

3. เพื่อศึกษาสมบัติในการต้านทานการกัดกร่อนของเหล็กชุบสังกะสีซึ่งสัมพันธ์กับโครงสร้างทางจุลภาคและเฟสต่างๆที่เกิดขึ้น

4. เพื่อศึกษาสมบัติทางกล กลไกการแตกหักของชั้นเคลือบสารประกอบโลหะที่เกิดขึ้นระหว่างเหล็กและสังกะสีสำหรับการชุบเคลือบสังกะสีแบบจุ่มร้อนโดยมีโลหะผสมนิกเกิล (นิกเกิล-ฟอสฟอรัส) เป็นชั้นรองพื้นเทียบกับชั้นเคลือบสารประกอบโลหะที่เกิดขึ้นระหว่างเหล็กและสังกะสีที่เกิดจากการชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนแบบดั้งเดิม

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1. ศึกษาปริมาณส่วนผสมทางเคมีของสารละลายในกระบวนการชุบเคลือบแบบไม่ใช้ไฟฟ้าซึ่งได้แก่รีดิวซ์เชิงเอเจนท์และนิกเกิลซัลเฟตที่เหมาะสม ในช่วง 0.08-0.6 M และ 0.08-0.76 M ตามลำดับ ที่ค่า pH ของสารละลาย 8-11

2. ทำการทดสอบการชุบเคลือบแบบไม่ใช้ไฟฟ้าที่อุณหภูมิของสารละลายที่ 65 องศาเซลเซียสและอุณหภูมิของกระบวนการชุบเคลือบสังกะสีแบบจุ่มร้อนคงที่ 450 องศาเซลเซียส

3. ศึกษาส่วนผสมของเหล็กเฉพาะอิทธิพลของธาตุซิลิกอนที่มีผลต่อการเติบโตของชั้นเคลือบสารประกอบโลหะที่เกิดขึ้นระหว่างเหล็กและสังกะสีที่เกิดขึ้น

4. ศึกษาเฉพาะปริมาณและความหนาของชั้นเคลือบโลหะผสมนิกเกิลที่มีผลต่อความหนาของชั้นอินเทอร์มีเดียทและความหนาของชั้นสังกะสีที่เกิดขึ้น

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถอธิบายถึงอิทธิพลของส่วนผสมทางเคมีต่างๆของสารละลายที่ใช้สำหรับการชุบแบบไม่ใช้ไฟฟ้าในการผลิตชั้นรองพื้นโลหะผสมนิกเกิล (นิกเกิล-ฟอสฟอรัส) ที่ได้อัตราการชุบที่เหมาะสมในชั้นรองพื้นได้ ก่อนทำการชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อน

2. สามารถอธิบายถึงผลของตัวแปรของชั้นรองพื้นโลหะผสมนิกเกิล (นิกเกิล-ฟอสฟอรัส) ที่มีต่อโครงสร้างทางจุลภาคและเฟสของชั้นเคลือบสารประกอบโลหะที่เกิดขึ้นระหว่างเหล็กและสังกะสีที่เปลี่ยนแปลงไปและสมบัติการต้านทานการกัดกร่อน

3. สามารถอธิบายถึงสมบัติทางกล กลไกการแตกหักของชั้นเคลือบสารประกอบโลหะที่เกิดขึ้นระหว่างเหล็กและสังกะสีที่เกิดขึ้น เพื่อประมาณขอบเขต ข้อจำกัด และข้อควรระวังในการใช้งานได้

4. สามารถนำความรู้ที่ได้จากการศึกษาไปประยุกต์ใช้ในการทำนายและควบคุมโครงสร้างจุลภาคเพื่อผลิตชิ้นงานที่เกิดจากการชุบสังกะสีโดยวิธีต่อเนื่องให้เหมาะสมกับการใช้งานได้

บทที่ 2 การศึกษาข้อมูลเบื้องต้น

2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

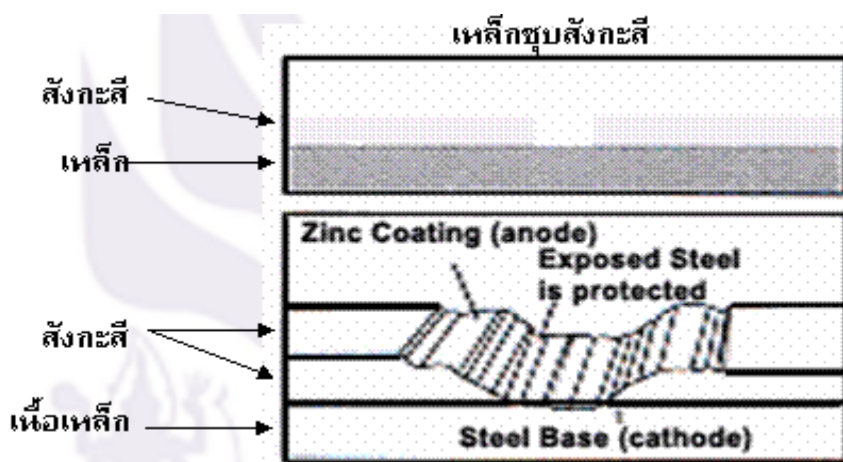
เนื้อหาในส่วนนี้จะแสดงถึงทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวข้องโดยตรงกับเนื้อหาวิทยานิพนธ์อยู่ 4 ส่วนหลักๆ ได้แก่ ในส่วนที่ 1 จะแสดงเนื้อหาทฤษฎีพื้นฐานของการชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อน ซึ่งมีรายละเอียดเนื้อหาเกี่ยวกับเฟสไดอะแกรมของเหล็กกับสังกะสี เฟสที่เกิดขึ้นจากกระบวนการชุบสังกะสีโดยวิธีทั่วไปและคุณสมบัติเฉพาะของแต่ละเฟสนั้นๆ รวมถึงกระบวนการชุบสังกะสีแบบวิธีจุ่มร้อน เป็นต้น ในส่วนที่ 2 จะกล่าวถึงหลักการเบื้องต้นของการชุบเคลือบโลหะผสมนิกเกิล แบบไม่ใช้ไฟฟ้า โดยมีรายละเอียดเนื้อหาเกี่ยวกับสารละลายสำหรับการชุบเคลือบ จลนพลศาสตร์ของอัตราการชุบเคลือบแบบไม่ใช้ไฟฟ้า เป็นต้น ในส่วนที่ 3 จะกล่าวถึงวิธีการตรวจสอบพฤติกรรมการกัดกร่อนด้วยกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี และส่วนสุดท้ายจะแสดงถึงงานวิจัยต่างๆที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์

2.1.1 ทฤษฎีพื้นฐานของการชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อน

2.1.1.1 สังกะสี

สังกะสีเป็นโลหะที่มีการใช้งานมานานกว่า 200 ปีนิยมใช้สำหรับเคลือบผิวเหล็กกล้าเพื่อป้องกันการกัดกร่อนและเพิ่มความแข็งแรงให้แก่ผิวเหล็กที่ทำการเคลือบ อีกทั้งยังเป็นโลหะที่นิยมใช้อย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรมรองจาก เหล็ก อลูมิเนียม ทองแดง [14] กลไกป้องกันการกัดกร่อนมีอยู่ 2 ลักษณะคือ เป็นชั้นป้องกันไม่ให้เหล็กผุกร่อน (Barrier protection) และผุกร่อนแทนเหล็ก (Galvanic protection) โดยวิธีการป้องกันไม่ให้เหล็กผุกร่อนจะเป็นวิธีที่ชั้นสังกะสีจะปกคลุมผิวเหล็กไม่ให้สัมผัสกับบรรยากาศที่มีการกัดกร่อนและสังกะสีจะเกิดการกัดกร่อนออกไปก่อนที่จะสัมผัสกับเหล็กเมื่อชั้นสังกะสีที่เคลือบไว้หลุดออกจนหมด และสำหรับวิธีการผุกร่อนแทนเหล็กของสังกะสี คือวิธีการที่ชั้นผิวสังกะสีช่วยป้องกันการเกิดสนิมโดยอาศัยค่าศักย์ไฟฟ้าที่แตกต่างระหว่างโลหะสังกะสีและเหล็ก กล่าวคือ เมื่อชิ้นงานชุบเคลือบสังกะสีเกิดรอยขีดข่วนจะทำให้เนื้อเหล็กเปิดออกและสัมผัสกับอากาศโดยตรงแต่โลหะสังกะสีที่เคลือบผิวอยู่ใกล้ ๆ กับเนื้อเหล็กจะแสดงคุณสมบัติเฉพาะที่เรียกว่าการป้องกันแบบกัลวานิกหรือการป้องกันแบบขั้วศักย์ไฟฟ้า (Cathodic

protection) ดังแสดงในภาพที่ 2.1 โดยโลหะสังกะสีจะปลดปล่อยอิเล็กตรอนได้ดีกว่าโลหะเหล็ก เนื่องจากโลหะสังกะสีและเหล็กมีค่าศักย์ไฟฟ้า (Electrode potential) -1.10 โวลต์ และ -0.68 โวลต์ ตามลำดับ ซึ่งการเคลือบด้วยชั้นสังกะสีจะสามารถทำได้หลายวิธี อาทิเช่น การชุบสังกะสีแบบวิธีจุ่มร้อน (Hot dip galvanized) วิธีสเปรย์ร้อน (Thermal spray) และวิธีทางไฟฟ้าเคมี (Electrodeposition) [8]



ภาพที่ 2.1 แสดงการเกิดการป้องกันแบบกัลวานิก (galvanic protection) [15]

โลหะสังกะสีเองยังสามารถเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันเป็นชั้นปกป้องของออกไซด์ก่อน จนกระทั่งสังกะสีถูกกัดกร่อนไปจนหมดเรียกว่า ฟิล์มพาทินา (Patina film; $ZnCO_3 \cdot 3Zn(OH)_2$) เพื่อปกป้องผิวโลหะสังกะสีจากสภาพบรรยากาศที่มีการกัดกร่อนได้อีกด้วย แต่หากอุณหภูมิสูงกว่า 200 องศาเซลเซียสจะเกิดซิงค์ออกไซด์อย่างรวดเร็ว [16]

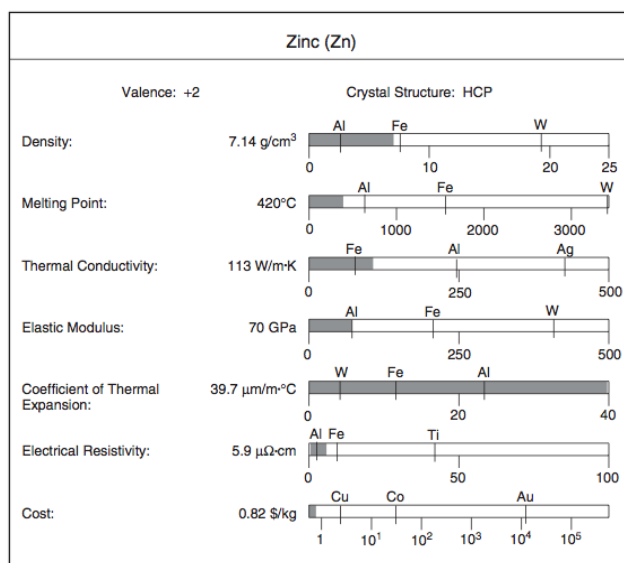
โลหะสังกะสีนี้มีจุดหลอมเหลว (Melting temperature) และค่าความแข็งตึง (Stiffness) ที่ต่ำ มีความสามารถในการหล่อขึ้นรูปได้ดี (Cast ability) มีค่าความแข็งแรงปานกลาง (Strength) อยู่ที่ประมาณ 110 MPa และราคาถูก [16] ซึ่งแสดงสมบัติทางกายภาพไว้ในตารางที่ 2.1 และภาพที่ 2.2

ตารางที่ 2.1 แสดงสมบัติทางกายภาพของโลหะสังกะสี [14]

Properties	Zinc
วาเลนซ์อิเล็กตรอน	+2
น้ำหนักอะตอม (g/mol)	65.38
ระบบผลึก (ที่อุณหภูมิ 20°C)	HCP
ความหนาแน่น (g/cm ³)	7.14
อุณหภูมิหลอมเหลว ^a (°C)	420
จุดเดือด (°C)	907
สภาพตัวนำความร้อน (W/m·K)	113
ความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอ (kJ·mol ⁻¹)	123.6
ความร้อนแฝงของการหลอมละลาย (kJ/ mol)	7.32
ยังมอดคูลัส (GPa)	70 ^b
สัมประสิทธิ์การขยายตัว (10 ⁻⁶ m/m°C)	39.7
ความต้านทานไฟฟ้า (μΩ.cm)	5.9
ราคา (\$/kg), large quantities	0.8

a Temperature at which vapor pressure equals 1 atm.

b Pure Zn is an elastic at room temperature; the 70-GPa elastic modulus is valid only for very brief time intervals.



ภาพที่ 2.2 แสดงสมบัติทางกายภาพของสังกะสีเมื่อเทียบกับโลหะชนิดอื่น [14]

2.1.1.2 กระบวนการชุบสังกะสีด้วยวิธีจุ่มร้อน

2.1.1.2.1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับการชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อน [17]

การชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อน (Hot-dip galvanizing) เป็นการทำให้เหล็กมีความต้านทานต่อการเกิดสนิม โดยการจุ่มชิ้นงานเหล็กซึ่งถูกทำความสะอาดผิวลงไปในสังกะสีที่หลอมเหลว สังกะสีที่หลอมเหลวจะทำปฏิกิริยากับเนื้อเหล็กเกิดเป็นโลหะผสมเคลือบผิวของเหล็กไว้ หลักการนี้มีมาตั้งแต่อดีต และจากการค้นคว้าวิจัยผ่านมากในหลายๆแง่มุมของกระบวนการชุบทำให้การชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนในปัจจุบันสามารถควบคุมได้ในทางเทคนิค

กระบวนการชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนนี้มี 2 กระบวนการที่แตกต่างกันคือ

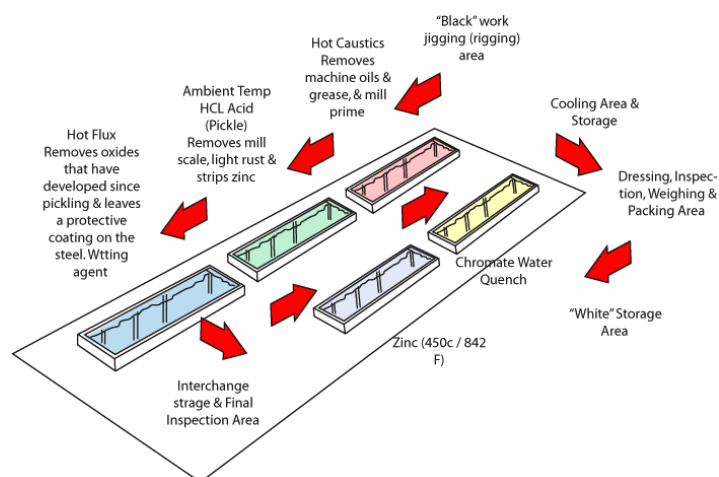
1. กระบวนการแบบเปียก (Wet Process) ชิ้นงานที่ผ่านการจุ่มกรดแล้ว จะนำมาล้างน้ำแล้วจุ่มลงในน้ำยาประสานที่ลอยอยู่บนผิวหน้าของสังกะสีที่หลอมเหลว
2. กระบวนการแบบแห้ง (Dry Process) ชิ้นงานที่ผ่านการจุ่มกรดแล้ว จะนำมาล้างน้ำแล้วนำไปจุ่มลงในน้ำยาประสานจากนั้นปล่อยให้ น้ำยาประสานแห้งบนชิ้นงาน หลังจากนั้นจึงนำชิ้นงานไปจุ่มลงในบ่อสังกะสีที่หลอมเหลวที่ไม่มีอะไรปกคลุม

2.1.1.2 กระบวนการชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อน (Hot dip galvanizing process)

กระบวนการชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนในขั้นตอนที่สำคัญจะประกอบไปด้วย การล้างคราบไขมัน การกำจัดสนิม การจุ่มน้ำยาประสาน การจุ่มสังกะสี ซึ่งแสดงได้ดังภาพที่ 2.3

1. การเตรียมผิวชิ้นงาน

ในกระบวนการชุบสังกะสีนั้นจำเป็นต้องมีขั้นตอนการเตรียมผิวชิ้นงาน จุดประสงค์เพื่อทำความสะอาดผิวชิ้นงานให้สามารถทำปฏิกิริยากับสังกะสีที่หลอมเหลวได้ ปกติแล้วผิวชิ้นงานที่เป็นคราบไขมันหรือคราบสนิมจะไม่สามารถทำปฏิกิริยากับสังกะสีที่หลอมเหลวได้ ในการเตรียมผิวชิ้นงานนั้นประกอบไปด้วยขั้นตอนหลักได้แก่ การล้างคราบไขมัน การกำจัดสนิมการล้างน้ำ การจุ่มน้ำยาประสาน



ภาพที่ 2.3 แสดงแผนผังกระบวนการชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อน [18]

2. การชุบสังกะสีหลอมเหลว

อุณหภูมิของบ่อชุบควรใช้อุณหภูมิที่ต่ำที่สุดที่ยังสามารถทำให้สังกะสีหลอมเหลวหยดจากชิ้นงานได้ เนื่องจากอุณหภูมิที่ต่ำนี้จะส่งผลให้เกิดดรอสน้อยที่สุด และยังเป็นการยืดอายุการใช้งานของบ่อชุบอีกด้วย ปริมาณดรอสที่เกิดขึ้นเมื่อจุ่มชิ้นงานลงในบ่อสังกะสีเป็นเวลา 30 วินาทีจะมีปริมาณเพิ่มขึ้นถึง 2 เท่า ถ้าอุณหภูมิของบ่อสังกะสีเพิ่มขึ้นจาก 450 องศาเซลเซียสเป็น 470 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิของบ่อชุบที่สูงขึ้นจะส่งผลให้เกิดผิวเคลือบที่มีความหนาเพิ่มขึ้น จึงควรควบคุมอุณหภูมิของบ่อชุบไว้ ถ้าต้องการชิ้นงานที่มีคุณภาพและใช้สังกะสีอย่างประหยัด

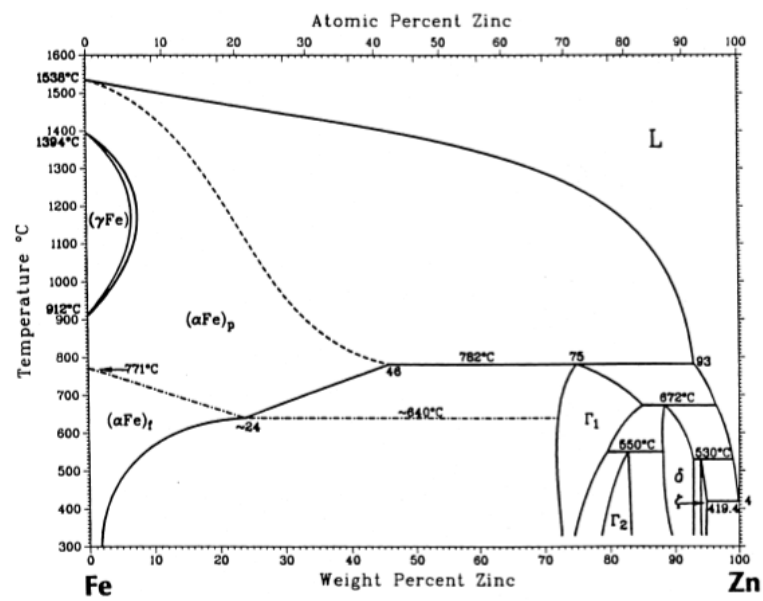
ในการจุ่มชิ้นงานควรจุ่มชิ้นงานลงบ่อสังกะสีให้เร็วที่สุดเท่าที่จะทำได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความปลอดภัยของผู้ทำงานเป็นสำคัญ สำหรับกระบวนการแบบเปียกควรทำการจุ่มชิ้นงานลงบ่ออย่างรวดเร็ว เพราะถ้าชิ้นงานสัมผัสกับ น้ำยาประสาน ที่อยู่บนผิวหน้าของสังกะสีหลอมเหลวเป็นเวลานานจะทำให้เกิดดรอสเป็นจำนวนมาก อัตราการจุ่มก็มีความสม่ำเสมอของผิวเคลือบด้วย โดยเฉพาะกับชิ้นงานที่มีความยาวมาก ซึ่งจะมีความแตกต่างระหว่างส่วนที่ลงไปบ่อครั้งแรกสุดกับส่วนที่จุ่มลงในบ่อครั้งหลังสุดซึ่งจะส่งผลให้ผิวเคลือบไม่สม่ำเสมอได้ และในการดึงชิ้นงานขึ้นจากบ่อก็ไม่ควรดึงด้วยอัตราที่เร็วกว่าการหยดของสังกะสีหลอมเหลว เพราะจะทำให้ได้ผิวเคลือบที่ไม่สม่ำเสมอได้ ในการดึงชิ้นงานขึ้นจากบ่อด้วยอัตราเร็วที่เกินกว่าที่สังกะสีหลอมเหลวจะหมดลงจากชิ้นงาน หยดสังกะสีจะแข็งตัวอยู่บนชิ้นงานและทำให้ผิวเคลือบไม่สม่ำเสมอ

อัตราการดึงชิ้นงานขึ้นจะมีผลต่อความหนาของผิวเคลือบโดยตรง จากที่กล่าวมาแล้วว่า โครงสร้างของผิวเคลือบชั้นนอกสุดจะเป็น โลหะสังกะสี 100% ผิวเคลือบชั้นนี้เกิดมาจากการไหลตัวของน้ำสังกะสีในขณะที่ดึงชิ้นงานขึ้นจากบ่อชุบ ถ้าดึงชิ้นงานขึ้นมาด้วยความรวดเร็วจะส่งผลให้ผิวเคลือบมีความหนาเนื่องจากเวลาที่น้ำสังกะสีติดขึ้นมากับชิ้นงานจะไหลกลับลงสู่บ่อมีเวลาน้อย ในทางตรงกันข้ามถ้าดึงชิ้นงานขึ้นอย่างช้า ความหนาของผิวเคลือบจะลดลงด้วยเหตุผลเดียวกัน

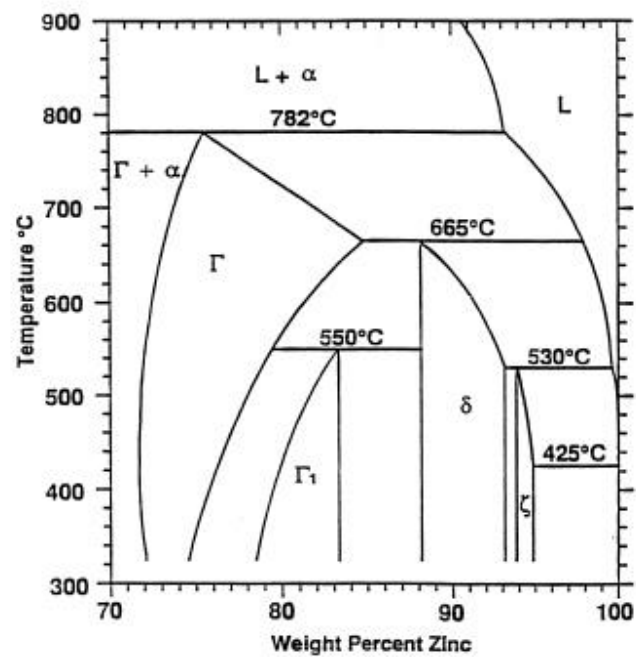
2.1.1.3 แผนภูมิสมดุลของเหล็กกับสังกะสี

ขณะที่เหล็กจุ่มลงในบ่อสังกะสีหลอมเหลว ปริมาณหรือจำนวนของการเกิดปฏิกิริยาที่ปรากฏจะขึ้นอยู่กับส่วนผสมทางเคมีของบ่อสังกะสีหลอมเหลวและส่วนผสมทางเคมีในเนื้อเหล็ก ก่อนที่จะกล่าวถึงผลกระทบต่างๆที่เกิดขึ้นจากผลของส่วนผสมทางเคมีของบ่อสังกะสีหลอมเหลว หรือส่วนผสมทางเคมีในเนื้อเหล็กเพื่อให้ช่วยได้เข้าใจมากยิ่งขึ้นจะกล่าวถึงปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างเหล็กและสังกะสีโดยสังเขป

ระบบเหล็ก -สังกะสีมีการศึกษาวิจัยและปรับปรุงอยู่หลายครั้งโดยเฉพาะเฟสแผนภูมิสมดุลเหล็ก-สังกะสีในช่วงที่มีส่วนประกอบทางเคมีของสังกะสีอยู่ค่อนข้างมาก (Zinc-rich) ซึ่งเฟสแผนภูมิสมดุลเหล็ก -สังกะสีที่นิยมใช้อย่างกว้างขวาง แสดงดังภาพที่ 2.4 ส่วนตำแหน่งที่แสดงบริเวณที่มีส่วนประกอบทางเคมีของสังกะสีอยู่ค่อนข้างมาก แสดงไว้ดังภาพที่ 2.5 ซึ่งเฟสไดอะแกรมดังกล่าวได้แสดงชนิดของเฟสที่เกิดขึ้นรวมถึงสมบัติต่างๆไว้ดังแสดงในตารางที่ 2.2



ภาพที่ 2.4 แสดงแผนผังระบบสององค์ประกอบของเหล็กและสังกะสี [8]



ภาพที่ 2.5 แสดงแผนผังระบบสององค์ประกอบของเหล็กและสังกะสีในบริเวณที่มีปริมาณของสังกะสีเป็นส่วนมาก [8]

ตารางที่ 2.2 ลักษณะของเฟสที่เกิดขึ้นในโลหะผสมของเหล็กและสังกะสี [8]

Phases	Formula	Crystal structure	VHN (25 mg)	VHN (25g)
α Fe	Fe(Zn)	BCC	104	86
Γ	Fe ₃ Zn ₁₀	BCC	326	-
Γ_1	Fe ₅ Zn ₂₁	FCC	505	-
δ	FeZn ₁₀	Hexagonal	358	273
ζ	FeZn ₁₃	Monoclinic	208	118
η Zn	Zn(Fe)	HCP	52	41

จากตารางที่ 2.2 จะเห็นได้ว่าชนิดของเฟสที่เกิดขึ้นจะมีเฟสของเซตา (ζ), เดลต้า (δ) แกมมา (Γ_1) และ แกมมา (Γ) ซึ่งปรากฏให้เห็นในเฟสแผนภูมิสมดุลเหล็ก-สังกะสีในภาพที่ 2.4 และ 2.5 แต่สำหรับเฟสที่ไม่ได้แสดงให้เห็นในเฟสแผนภูมิสมดุลเหล็ก-สังกะสีนั้นคือเฟสของ เอต้า (η) ซึ่งเป็นสารละลายของแข็ง (solid solution) ของเหล็กในสังกะสี โดยมีปริมาณของเหล็กละลายอยู่ในสังกะสีประมาณ 0.03 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก [8] โดยรายละเอียดพอสังเขปของแต่ละเฟสมีดังนี้

1. เฟสเซตา (ζ)

เฟสซีตา (ζ), FeZn₁₃ จะมีปริมาณของเหล็กเป็นองค์ประกอบอยู่ในช่วง 5-6 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เกิดจากปฏิกิริยาเพอริเทคติกระหว่างเฟสเดลต้าและสังกะสีที่หลอมเหลวที่อุณหภูมิ 530 ± 10 °C ซึ่งเกิดขึ้นขณะที่เกิดการแพร่โดยระบบนั้นปราศจากอะลูมิเนียม โดยลักษณะของโครงสร้างผลึก (unit cell) จะเป็นแบบโมโนคลินิก (Monoclinic) ซึ่งมีโครงสร้างอะตอมที่มีอะตอมของเหล็กล้อมรอบด้วย 12 อะตอมของสังกะสี

2. เฟสเดลต้า

เฟสเดลตา (δ), FeZn₁₀, จะมีปริมาณของเหล็กเป็นองค์ประกอบอยู่ในช่วง 7.0-11.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เกิดจากปฏิกิริยาเพอริเทคติกระหว่างเฟสแกมมา (Γ) และสังกะสีที่หลอมเหลวที่อุณหภูมิ 665 °C เฟสเดลตา (δ) จะถูกแบ่งโครงสร้างทางจุลภาคออกเป็น 2 แบบคือ เดลต้า_{1p} เป็นลักษณะโครงสร้างแบบพาลิเสด (Palisade) จะพบในบริเวณที่มีส่วนผสมของสังกะสี

ที่มีปริมาณมาก และโครงสร้างทางจุลภาคแบบเดลตา δ ซึ่งเป็นโครงสร้างที่มีความแน่นกว่าและพบในบริเวณที่มีส่วนผสมของเหล็กมากกว่า โดยส่วนใหญ่จะพบมากสำหรับในงานที่มีการชุบสังกะสีเป็นระยะเวลานานและอุณหภูมิสูงถึงอย่างไรก็ตามได้พบว่าโครงสร้างทางจุลภาคของทั้งสองมีโครงสร้างผลึกที่เหมือนกัน ซึ่งปัจจุบันจึงจัดเป็นเฟสชนิดเดียวกันคือเฟสเดลตา (δ) แต่สำหรับการชุบเคลือบสังกะสีเป็นระยะเวลานั้นๆ จะเห็นโครงสร้างทางกายภาพของเฟสเดลต้าเพียงเฟสเดียว

3. เฟสแกมมา 1 (Γ_1 , Γ_1)

เฟสแกมมา 1 (Γ_1), $\text{Fe}_5\text{Zn}_{21}$, จะมีลักษณะของโครงสร้างผลึกเป็นแบบเฟซเซ็นเตอร์ (Face centered cubic) มีปริมาณของเหล็กเป็นองค์ประกอบอยู่ในช่วง 17-19.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิประมาณ 450°C เฟสแกมมา 1 เกิดจากปฏิกิริยาเพอริเทกตอยด์ (peritectoid) ระหว่างเฟสแกมมาและเฟสเดลตาที่อุณหภูมิ $550 \pm 10^\circ\text{C}$ เฟสแกมมา 1 เป็นเฟสที่ไม่ปรากฏว่ามีส่วนผสมของเฟสแกมมาและเดลตา ปรากฏขึ้นได้ระหว่างการให้อุณหภูมิต่ำเป็นช่วงระยะเวลานาน เฟสแกมมานั้นจัดว่าเป็นชั้นที่มีความแข็งในระดับไม่ใคร่มากที่สุดดังที่รายงานไว้ในตารางที่ 2.2

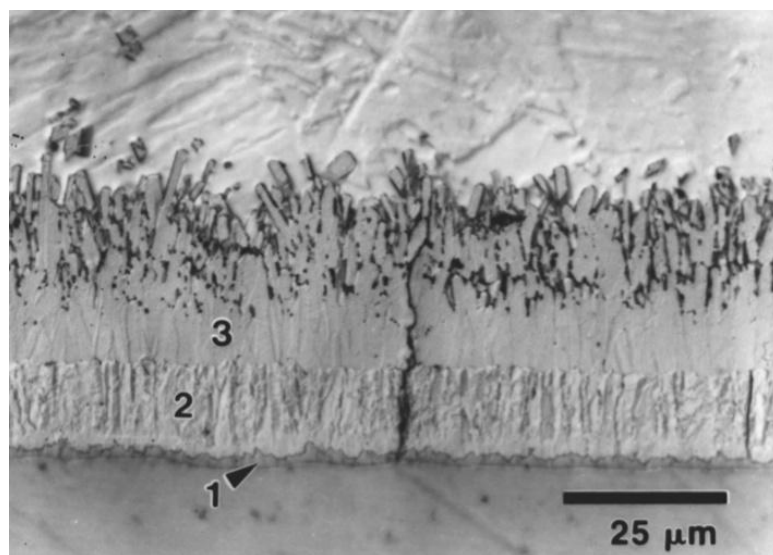
4. เฟสแกมมา (Γ , Γ)

เฟสแกมมา (Γ), $\text{Fe}_3\text{Zn}_{10}$, มีลักษณะของโครงสร้างผลึกเป็นแบบบอดีเซ็นเตอร์ (body center cubic) และมีปริมาณของเหล็กเป็นองค์ประกอบอยู่ในช่วง 23.5-28.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิประมาณ 450°C เฟสนี้เกิดจากปฏิกิริยาเพอริเทกติก ที่ 782°C ระหว่างเหล็ก α และสังกะสีหลอมเหลว รวมถึงความสามารถในการละลายของเหล็กในสังกะสีที่ลดลงจากปฏิกิริยาเพอริเทกติกที่อุณหภูมิ 665°C

2.1.1.4 การเกิดเฟสของเหล็กและสังกะสี

เมื่อเหล็กถูกจุ่มลงในบ่อสังกะสีหลอมเหลวที่อุณหภูมิในการทำกัลวานไนซ์ (โดยประมาณ $450-490^\circ\text{C}$) พบว่าเฟสแผนภูมิสมดุลเหล็ก -สังกะสีของ Horstmann แสดงให้เห็นถึงชั้นสารประกอบโลหะต่างๆที่เกิดขึ้น ได้แก่ ชั้นของเฟสเหล็ก , เฟสเซตา (ζ), เฟสเดลต้า (δ), เฟสแกมมา 1 (Γ_1), เฟสแกมมา (Γ) และเฟสเอต้า (η)

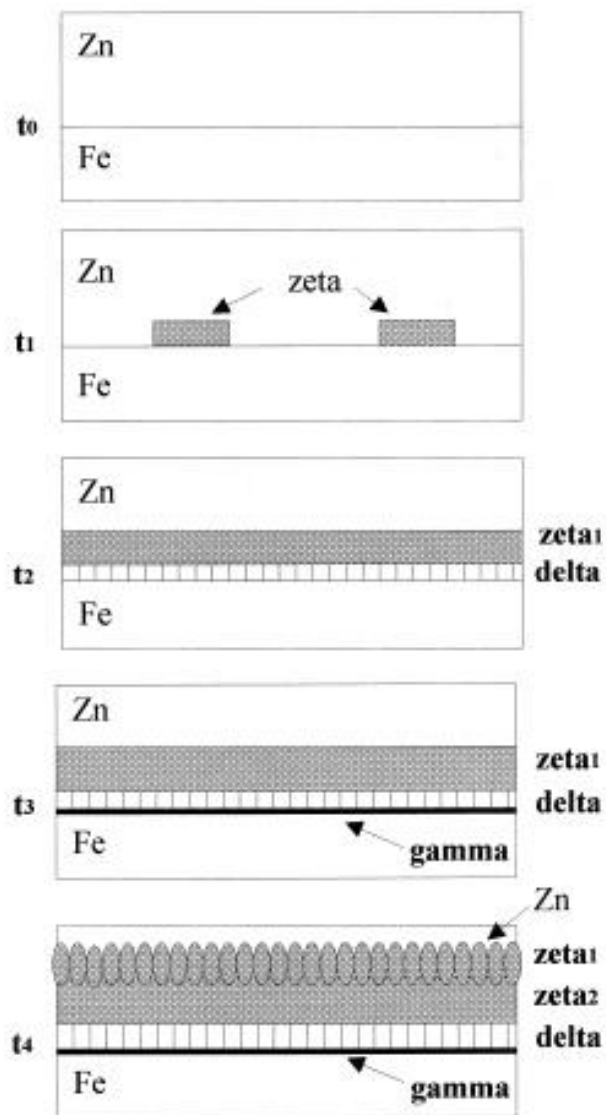
อย่างไรก็ตามลำดับในการเกิดเฟสต่างๆที่เกิดขึ้นจากปฏิกริยาระหว่างเหล็กและสังกะสีนั้นจะเริ่มปรากฏจากการเกิดของเฟสเซตา ตามด้วยเฟสเดลต้า หลังจากนั้นเมื่อให้ระยะเวลาในการจุ่มร้อนสักพักหนึ่งจะปรากฏเฟสของแกมมาขึ้นมาดังแสดงในภาพที่ 2.6 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical microscopy) พบว่าชั้นความหนาของเฟสแกมมา มีความบางมากซึ่งประกอบไปด้วยทั้งชั้นของเฟสแกมมาและแกมมา 1 ซึ่งแบบจำลองการเกิด เฟสของชั้นสารประกอบโลหะต่างๆที่เกิดจากการทำปฏิกริยาระหว่างเหล็ก-สังกะสีแสดงไว้ดังภาพที่ 2.7 โดยที่ลำดับของปฏิกริยานั้นจะเกิดขึ้นตามเวลาที่ดำเนินไป โดยที่เวลาเริ่มต้นจะแสดงด้วยสัญลักษณ์ t_0 และการพัฒนาของเฟสจะดำเนินไปตามเวลา $t_0 < t_1 < t_2 < t_3 < t_4$ ในการศึกษาบนตัวชิ้นงานเหล็ก (ประกอบด้วยคาร์บอน 0.003 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก , แมงกานีส 0.258 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) พบว่าเฟสซีตา (ζ) นั้นเกิดเป็นนิวเคลียสผลึกทันทีจากนั้นจึงตามมาด้วยการเกิดเฟสเดลต้า (δ) ที่ผิวรอยต่อของเหล็ก α กับเฟสซีตา (ζ) แต่จากการศึกษาพบว่ายังไม่มีการศึกษาที่แน่ชัดเกี่ยวกับระยะเวลาที่จะเริ่มเกิดเฟสของซีตา (ζ) หรือ เฟสเดลต้า (δ) ซึ่งเฟสสารประกอบโลหะทั้งสองนี้จะพบเป็นชั้นยาวต่อเนื่องภายหลังจากการจุ่มลงในสังกะสีเป็นเวลา 5 วินาที ในทางกลับกันเฟสแกมมา (Γ) จะถูกพบในช่วงระยะเวลา t_3 หลังจากเวลาดำเนินไปแล้วประมาณ 30 วินาที [8]



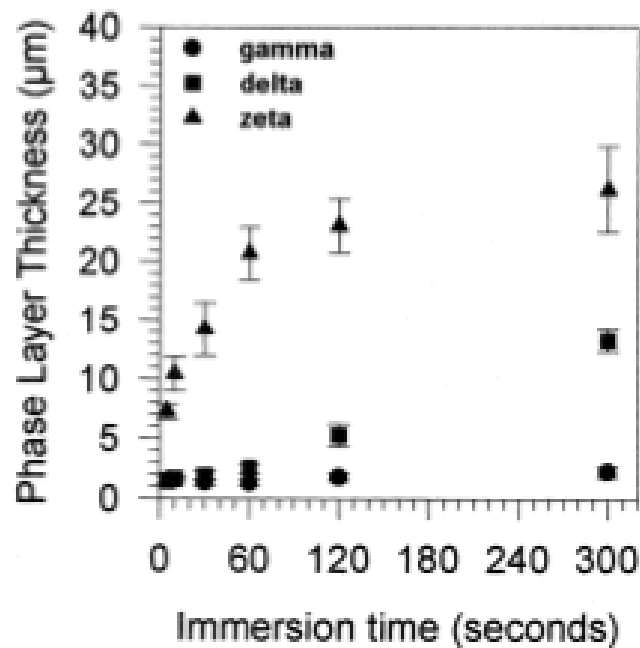
ภาพที่ 2.6 แสดงโครงสร้างระดับจุลภาคของชั้นเคลือบสังกะสี ที่เกิดขึ้นหลังจากการจุ่มร้อนเป็นเวลา 300 วินาที ณ อุณหภูมิ 450 °C (1) เฟสแกมมา (Γ), (2) เฟสเดลตา (δ), (3) เฟสเซตา (ζ) [8]

2.1.1.5 จลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาระหว่างเหล็ก-สังกะสี

แต่ละชั้นเฟสสารประกอบโลหะในกระบวนการชุบเคลือบสังกะสีมีการเติบโตทางจลนพลศาสตร์ที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของสังกะสีหลอมเหลวรวมถึงชั้นสารประกอบโลหะทั้งหมดที่เกิดขึ้นก็แปรเปลี่ยนขึ้นอยู่กับอุณหภูมิด้วยเช่นกัน ตัวอย่างเช่น หากทำการชุบเคลือบสังกะสีเป็นระยะเวลาสั้นๆจนถึงระยะเวลาประมาณ 300 วินาทีที่อุณหภูมิประมาณ 450 °C แสดงในภาพที่ 2.8 โดยพบว่าในช่วงเริ่มต้นชั้นเฟสเซตาจะมีการเติบโตเป็นอย่างรวดเร็วเป็นเฟสแรก หลังจากนั้นการเติบโตของชั้นเฟสเซตาจะมีการเติบโตที่ลดลง ขณะที่เฟสเดลต้าในช่วงแรกจะมีการเติบโตของชั้นเฟสเป็นไปอย่างช้าๆและต่อมาจะเติบโตอย่างรวดเร็ว แต่สำหรับเฟสแกมมาการเติบโตจะเป็นไปอย่างช้าๆและใช้ระยะเวลาที่นาน พบว่าความหนาสูงสุดของเฟสแกมมามีความหนาเพียง 1 ไมโครเมตร Horstmann ได้ทำการศึกษาพบว่าโดยรวมๆของการเติบโตของชั้นเฟสแกมมาจะเติบโตเข้าหาชั้นเหล็ก ในขณะที่ชั้นเฟสเซตาจะเคลื่อนที่เติบโตเข้าหาสังกะสีหลอมเหลว ส่วนเฟสเดลต้าจะเติบโตทั้งสองทิศทางทั้งการเติบโตเข้าหาชั้นเหล็กและเติบโตเข้าหาสังกะสีหลอมเหลว แต่โดยปกติจะเติบโตไปในทิศทางของสังกะสีหลอมเหลว ดังนั้นชั้นเฟสแกมมาจึงเติบโตเข้าหาชั้นเหล็ก กลไกการเกิดเฟสของสารประกอบโลหะทั้งหมดจะอยู่ภายใต้การแพร่ของสังกะสีสู่ชั้นเหล็กซึ่งอาจมีปัจจัยหรือเงื่อนไขอื่น ๆ ในการทดลองไม่ว่าจะเป็นสังกะสีหลอมเหลวหรือความสามารถในการแพร่ในสถานะของแข็ง ฯลฯ อย่างไรก็ตามก็มีความเป็นไปได้ที่เหล็กจะแพร่ออกสู่สังกะสีหลอมเหลวได้เช่นกัน แต่จะเป็นไปในอัตราที่ช้ามาก [8]



ภาพที่ 2.7 แผนผังของการเกิดชั้นเฟสของเหล็กและสังกะสีในเตาหลอมกัลวาไนซ์ 0.00 wt% อะลูมิเนียม-สังกะสี, t_0 หมายถึงระยะเวลาเริ่มต้นและการพัฒนาของชั้นเฟสเกิดขึ้นตามเวลา t_0, t_1, t_2, t_3 และ t_4 ตามลำดับ [8]



ภาพที่ 2.8 แสดงอัตราการเติบโตของชั้นเฟสแกมมา เฟสเดลต้า เฟสเซตาที่ระยะเวลาต่างๆบนเหล็กกล้า ULC ที่ทำการชุบเคลือบสังกะสีที่อุณหภูมิ 450 °C ในบ่อชุบสังกะสีที่ไม่มีส่วนผสมของอะลูมิเนียม [8]

จากการศึกษาจลนพลศาสตร์การเติบโตของชั้นเฟสสารประกอบโลหะในปฏิกิริยาเหล็ก - สังกะสีจะเป็นไปตามกฎสมการการเติบโตแบบพาวเวอร์ลอว์ (Power-law growth equation) ดังนี้

$$Y = Kt^n$$

โดยที่

Y คือความหนาของชั้นเคลือบ

K คือค่าคงที่ของอัตราในการโต

t คือระยะเวลาในการจุ่มร้อน

n คือค่าคงที่ของอัตราในการโตกับเวลา

ค่าคงที่ของอัตราในการโตกับเวลา (n) เป็นค่าที่บ่งชี้ประเภทของการควบคุมจลนพลศาสตร์ของชนิดการเติบโตของชั้นเฟสสารประกอบต่างๆ ตัวอย่างเช่น หากค่าคงที่ของอัตราในการโตกับเวลามีค่า 0.5 อัตราการแพร่จะเป็นแบบพาราโบลา (Parabolic) เป็นตัวควบคุมการเติบโตของชั้นเฟสสารประกอบโลหะ หากค่าคงที่ของอัตราในการโตกับเวลามีค่า 1.0 จะแสดงถึงจลนพลศาสตร์

ที่มีการเติบโตแบบเส้นตรงโดยการควบคุมบริเวณรอยต่อ (Interface controlled) โดยตารางที่ 2.3 จะแสดงค่าคงที่ของอัตราในการโตกับเวลาที่รวบรวมจากงานวิจัยต่างๆ [8]

ตารางที่ 2.3 จะแสดงค่าคงที่ของอัตราในการโตกับเวลาที่รวบรวมจากงานวิจัยต่างๆ

Source	Γ	δ	ζ	Total layer
Allen	0.25	0.65	0.35	0.55
Rowland	0.13	0.53	0.31	-
Blickwede	0.10	0.60	0.16	-
Horstmann and Peters	0.50	0.50	-	-
Sjoukes	0.23	0.58	0.26	-
Onishi et al.	0.23	0.49	0.36	0.43

จากตารางที่ 2.3 การศึกษา แต่ละงานวิจัยแสดงให้เห็นถึงค่าคงที่ของอัตราในการโตกับเวลาที่มีความหลากหลาย แต่อย่างไรก็ตามสามารถสรุปได้ว่า ค่าคงที่ของอัตราในการโตกับเวลาของเฟสเดลต้าและชั้นเฟสสารประกอบโลหะโดยรวมทั้งหมดจะมีค่าเท่ากับ 0.5 สำหรับเฟสเซตาและเฟสแกมมาจะมีค่าคงที่ของอัตราในการโตกับเวลาที่ต่ำกว่ามีค่า 0.35 และ 0.25 ตามลำดับ

2.1.2 หลักการเบื้องต้นของการชุบโลหะนิกเกิลอัลลอยแบบไม่ใช้ไฟฟ้า (Electroless)

2.1.2.1 นิกเกิล

นิกเกิลเป็นโลหะที่มีความมั่นคงด้วยเงินถูกค้นพบครั้งแรกในปี พ.ศ.2294 ในประเทศรัสเซียโดยประเทศที่มีปริมาณของนิกเกิลมากพอที่จะใช้ในเชิงพาณิชย์นั้นมีเพียงไม่กี่ประเทศได้แก่ รัสเซีย, แคนาดา, อินโดนีเซียจีน, พม่าและ ,ฟิลิปปินส์ โดยนิกเกิลที่พบตามธรรมชาติจะอยู่ในรูปของนิกเกิลซัลไฟด์ซึ่งปนอยู่กับแร่ทองแดง โคบอลต์ และแร่โลหะที่อยู่ในกลุ่มของแพลทินัม กลุ่มประเทศที่มีความต้องการนิกเกิลเป็นกลุ่มประเทศในทวีปยุโรปและเอเชีย [19]

นิกเกิลและโลหะผสมนิกเกิลมีสมบัติในการต้านทานต่อการกัดกร่อน (Corrosion resistance) การเกิดออกซิเดชัน (Oxidation resistance) และความต้านทานความร้อน (Heat resistance) ที่ยอดเยี่ยม รวมถึงมีสมบัติทางกล (Mechanical properties) ที่ดี ดังนั้นจึงมีการนิยม

ใช้ निकเกิลอย่างกว้างขวางในสภาพบรรยากาศที่รุนแรง อาทิเช่น กระบวนการผลิตสารเคมี การควบคุมมลพิษ เครื่องกำเนิดพลังงาน อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ อุตสาหกรรมอากาศยาน निकเกิลเป็นโลหะที่มีสมบัติค่อนข้างเหนียวสามารถทำการขึ้นรูปแบบดั้งเดิมได้ดี อาทิเช่น การหล่อขึ้นรูป การขึ้นรูปขึ้นส่วนแบบผง และการขึ้นรูปร้อนและการขึ้นรูปเย็น [16]

โลหะนิกเกิลบริสุทธิ์จะมีจุดหลอมเหลวสูงปานกลางประมาณ $1468\text{ }^{\circ}\text{C}$ ความหนาแน่น 8.89 g/cm^3 และอีลาสติคโมดูลัสประมาณ 209 GPa โลหะนิกเกิลจะนิยมใช้เป็นธาตุผสม (Alloying element) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในด้านการต้านทานการกัดกร่อนให้กับเหล็กและทองแดง โดยจะเติมลงไปประมาณ 13% สำหรับเหล็กกล้าไร้สนิมจะเติมประมาณ 60% ขึ้นไป ซึ่งมักใช้ในงานจำพวกขึ้นส่วนต้านทานความร้อนและต้านทานความกัดกร่อนรวมถึงการใช้งานด้านความเป็นฉนวนไฟฟ้า ความเป็นแม่เหล็ก หรือแม้กระทั่งใช้เป็นโลหะจำรูป (Shape memory alloys) ซึ่งแสดงสมบัติทางกายภาพไว้ในตารางที่ 2.4 และภาพที่ 2.9

ตารางที่ 2.4 แสดงสมบัติทางกายภาพของโลหะสังกะสี [19]

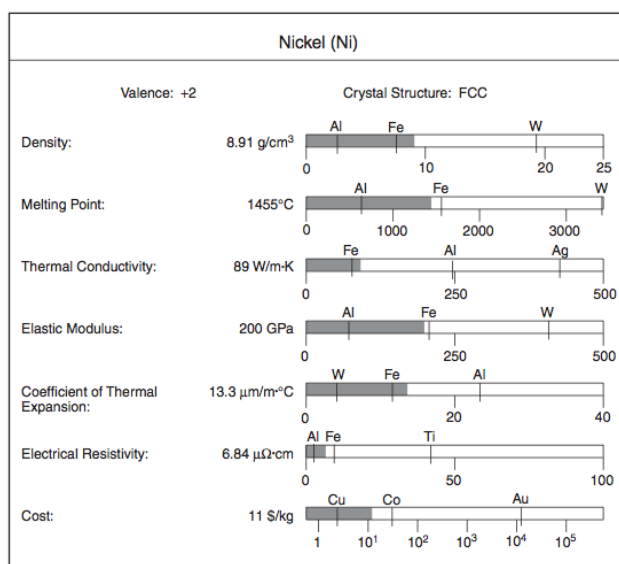
Properties	Ni
น้ำหนักอะตอม g/mol	58.69
ระบบผลึก(Crystal Structure)	FCC
ความหนาแน่น (อุณหภูมิห้อง) g/cm ³	8.89
อุณหภูมิหลอมเหลว K	1728
อุณหภูมิกลายเป็นไอ K	3186
ความร้อนจำเพาะ (25°C) J·mol ⁻¹ ·K ⁻¹	26.07
ความร้อนแฝงของการหลอมละลาย kJ·mol ⁻¹	17.48
ความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอ kJ·mol ⁻¹	377.5
สัมประสิทธิ์การขยายตัว(25°C)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

โดยส่วนมากโลหะนิกเกิลจะนิยมนำมาเคลือบลงบนผิวเหล็กกล้า ทองแดง อลูมิเนียม และสังกะสีด้วยวิธีการชุบแบบใช้ไฟฟ้า (Electroplating) และไม่ใช่ไฟฟ้า (Electroless) ในสารละลายนิกเกิลคลอไรด์ (NiCl₂) ซึ่งมีโซเดียมไฮโปฟอสไฟต์ (NaH₂PO₂) เป็นรีดิวซ์เซอร์ สำหรับโลหะนิกเกิลที่นำมาทำการชุบเคลือบลงบนผิวจะมีความแข็งสูงมาก หลายกรณีจะทำการชุบเคลือบนิกเกิลให้มีความหนาเพียงเล็กน้อยสำหรับการทำงานกับเหล็กกล้า โดยมีความหนาเพียง 0.25- 0.5 μm ใช้ในงานจำพวกชิ้นส่วนที่หนีบกระดาษ กรรไกร กุญแจ หากมีการใช้งานในสภาพแวดล้อมที่มีสภาวะการกัดกร่อนที่สูงจะทำการเคลือบชิ้นส่วนให้มีความหนาของนิกเกิลสูงถึง 25 ไมครอน [14]

2.1.2.2 หลักการเบื้องต้นของการชุบโลหะแบบไม่ใช่ไฟฟ้า (Electroless)

การชุบเคลือบผิวโลหะและโลหะผสมด้วยวิธีการแบบไม่ใช่ไฟฟ้า (Electroless deposition) เป็นเทคโนโลยีที่สำคัญและทันสมัยสำหรับการผลิตวัสดุใหม่ๆ สำหรับการใช้งานในด้านระบบอิเล็กทรอนิกส์ วัสดุที่มีความทนทานต่อการขีดถู เสียดสี หรือการทนทานต่อการกัดกร่อนที่ดี วัสดุอุปกรณ์ทางการแพทย์ แบตเตอรี่ เป็นต้น สารละลายกระบวนการชุบเคลือบผิวโลหะและโลหะผสมแบบไม่ใช่ไฟฟ้านั้นเป็นวิธีการที่เหมาะสมและดีเยี่ยมที่จะใช้กับชิ้นงานที่มี

รูปร่างที่ซับซ้อนและมีรายละเอียดของชิ้นงานสูง การชุบเคลือบด้วยกระบวนการแบบไม่ใช้ไฟฟ้านี้ จะมีชั้นเคลือบของโลหะหรือโลหะผสมที่มีความหนาแน่นสูง อีกทั้งยังมีสมบัติด้านการต้านทานการกัดกร่อนที่ดี มีสมบัติในการนำไฟฟ้าได้ อีกทั้งการชุบเคลือบแบบไม่ใช้ไฟฟ้ามียุทธศาสตร์ที่ดีกว่าการชุบเคลือบแบบใช้ไฟฟ้า (Electrodeposition) คือสามารถชุบเคลือบโลหะหรือโลหะผสมลงบนชิ้นงานที่มีสมบัติที่ไม่นำไฟฟ้าได้ เช่น แก้ว เซรามิกส์ พอลิเมอร์ เป็นต้น อีกทั้งยังสามารถเลือกบริเวณพื้นผิวของชิ้นงานเฉพาะบางบริเวณเพื่อทำการชุบเคลือบเฉพาะในส่วนที่ต้องการได้ รวมถึงกระบวนการชุบเคลือบโลหะหรือโลหะผสมแบบไม่ใช้ไฟฟ้ายังไม่อาศัยแหล่งกำเนิดไฟฟ้าจากภายนอกอีกด้วย [20]



ภาพที่ 2.9 แสดงสมบัติทางกายภาพของนิกเกิลเมื่อเทียบกับโลหะชนิดอื่น [14]

2.1.2.2.1 ประเภทของการชุบเคลือบโลหะและโลหะผสมแบบไม่ใช้ไฟฟ้า

ในช่วง 2-3 ทศวรรษที่ผ่านมา กระบวนการการชุบเคลือบผิวโลหะหรือโลหะผสมแบบไม่ใช้ไฟฟ้านี้เป็นเทคโนโลยีสมัยใหม่ สำหรับการใช้งานผลิตภัณฑ์ด้านอิเล็กทรอนิกส์ ผลิตภัณฑ์ที่ต้องการป้องกันการกัดกร่อน แบตเตอรี่ อุปกรณ์ทางการแพทย์ เป็นต้น โดยกระบวนการชุบเคลือบแบบไม่ใช้ไฟฟ้านี้ โลหะหรือโลหะผสมทั้งหมดจะอยู่ในรูปของสารละลายที่มีสถานะที่เหมาะสมสำหรับการชุบเคลือบโลหะหรือโลหะผสมแต่ละชนิด อาทิเช่น ส่วนผสมของสารละลาย

คุณหมุมิ พีเอช ตัวเร่งปฏิกิริยา พื้นผิวของชิ้นงาน เป็นต้น รวมถึงการใช้รีดิวเซอร์ (Reducing agents) ที่เหมาะสมสำหรับสารละลายในระบบนั้นๆ ตารางที่ 2.5 แสดงชนิดของโลหะและโลหะผสมของการชุบเคลือบแบบวิธีไม่ใช้ไฟฟ้าแบ่งออกเป็น 3 กลุ่ม ดังนี้ [20]

กลุ่มที่ 1 เป็นการชุบเคลือบโลหะชนิดเดียวได้แก่ นิกเกิล โคบอล ทองแดง เงิน ทองคำ และแพลทตินัม

กลุ่มที่ 2 เป็นกลุ่มของโลหะที่ไม่สามารถทำการชุบเคลือบเป็นโลหะชนิดเดียวได้ แต่จะต้องทำการชุบเคลือบร่วมกับนิกเกิลหรือโคบอล อาทิเช่นการชุบเคลือบโมลิบดีนัมและทังสแตน

กลุ่มที่ 3 แสดงกลุ่มโลหะผสมนอกเหนือจากกลุ่มที่ 1 หรือ 2 โลหะผสมในกลุ่มนี้นิยมใช้สำหรับงานชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์

ตารางที่ 2.5 แสดงการแบ่งแยกกลุ่มของโลหะหรือโลหะผสมด้วยวิธีการชุบเคลือบแบบไม่ใช้ไฟฟ้า

Single metals	Elements codeposited with Ni or CO	Other Alloy
Ni, Co, Cu, Cd, Pb, Sb, Bi, Ag, Au, Pt, Pd, Rh, Ru, Sn, Cr, In	P, B, V, Mo, W, Mn, Re, Fe, Zn, Ti	CuNi, CuCo, CuCd, CuAu, PdNiP, PdCoP, PdZnP, AuAg, AuSn, PbSn, AuIn

2.1.2.2.2 สารละลายสำหรับการชุบเคลือบโลหะและโลหะผสมแบบไม่ใช้ไฟฟ้า

สารละลายสำหรับการชุบเคลือบโลหะหรือโลหะผสมแบบไม่ใช้ไฟฟ้าโดยส่วนใหญ่มีความคล้ายคลึงกันแต่จะแตกต่างกันบ้างขึ้นอยู่กับชนิดของโลหะหรือโลหะผสมที่ต้องการชุบเคลือบ โดยส่วนประกอบหลักสำหรับสารละลายในการชุบเคลือบมีดังนี้ [20]

1. แหล่งจากไอออนของโลหะที่ต้องการชุบเคลือบ (Source of metal ions)

ตารางที่ 2.6 แสดงแหล่งจ่ายไอออนของโลหะในกระบวนการชุบเคลือบแบบไม่ใช้ไฟฟ้าโดยทั่วไป แหล่งจ่ายไอออนของโลหะจะอยู่ในรูปของสารละลายประเภท ซัลเฟต คลอไรด์ อะซีเตท ไฮยาไนด์ เป็นต้น แต่สำหรับสารละลายประเภทคลอไรด์จะมีการใช้งานในขอบเขตจำกัดเนื่องจากจะมีความเป็นพิษหากใช้ในการชุบเคลือบโลหะอะลูมิเนียมหรือเหล็กผสม

จากการศึกษาวิจัยที่ผ่านมาพบว่าสารละลายสำหรับการชุบเคลือบโลหะนิกเกิลที่ได้ผลดีที่สุด (ในด้านอัตราการชุบเคลือบที่สูง และสมบัติของชั้นโลหะที่ชุบเคลือบได้ดี) จะเป็นสารละลายประเภท นิกเกิลซัลเฟต (NiSO_4) นิกเกิลโบรไมด์ (NiBr_2) หรือ นิกเกิลไฮโปฟอสเฟต ($\text{Ni}(\text{H}_2\text{PO}_2)_2$) สำหรับชั้นเคลือบโลหะนิกเกิลที่มีความต้านทานการกัดกร่อนต่อกรดไนตริกและมีค่าความแข็งของชั้นเคลือบสูงจะใช้สารละลายนิกเกิลฟลูออไรด์ (nickel fluoride) เป็นแหล่งกำเนิดไอออนของนิกเกิล

ตารางที่ 2.6 แสดงแหล่งจ่ายไอออนของโลหะในกระบวนการชุบเคลือบแบบไม่ใช้ไฟฟ้า

Metal	Salt
Ni	NiSO_4 , NiCl_2 , $\text{Ni}(\text{H}_2\text{PO}_2)_2$, $\text{Ni}(\text{CH}_3\text{COO})_2$
Co	CoSO_4 , CoCl_2
Au	$\text{KAu}(\text{CN})_2$, KAuCl_4 , $\text{Na}_3\text{Au}(\text{SO}_3)_2$
Ag	AgNO_3 , $\text{NaAg}(\text{CN})_2$
Pd	PdCl_2 , $\text{Pd}(\text{NH}_3)_4\text{Cl}_2$
Pt	$\text{Na}_2\text{Pt}(\text{OH})_6$, $(\text{NH}_3)_2\text{Pt}(\text{NO}_2)_2$, Na_2PtCl_6

2. คอมเพล็กซ์เอเจนต์ (Complexing agent)

โดยส่วนใหญ่แล้วคอมเพล็กซ์เอเจนต์ที่ใช้ในกระบวนการชุบเคลือบโลหะหรือโลหะผสมแบบไม่ใช้ไฟฟ้านั้นส่วนใหญ่จะเป็นกรดอินทรีย์หรือเกลือของแอมโมเนีย แอมโมเนียมไอออน โดยจะถูกควบคุมการทำงานด้วยค่าพีเอชสำหรับสารละลายไอออนของนิกเกิล สิ่งแรกในการเลือกใช้ชนิดของคอมเพล็กซ์เอเจนต์คือธรรมชาติและกลไกของโลหะที่ทำการชุบเคลือบ โดยหน้าที่หลักของคอมเพล็กซ์เอเจนต์คือ การประพุดิตัวเป็นบัฟเฟอร์ การป้องกันการตกตะกอนของเกลือและไฮดรอกไซด์ เป็นตัวรีดักชันของไอออนอิสระของโลหะ (free metal ions) ในอีกส่วนหนึ่งคอมเพล็กซ์เอเจนต์ยังส่งผลต่ออัตราการรีดักชัน (reduction) ของรีดิวซ์เซอร์และสมบัติของชั้นโลหะที่ทำการชุบเคลือบ ในบางกรณีคอมเพล็กซ์เอเจนต์อาจรวมตัวกับไอออนของโลหะเกิดเป็นสารประกอบที่มีพันธะมีความแข็งแรงสูงจึงส่งผลให้ประสิทธิภาพในการรีดิวซ์ไอออนของโลหะโดยรีดิวซ์เซอร์ลดต่ำลง ชนิดของคอมเพล็กซ์เอเจนต์แสดงดังในตารางที่ 2.7 ซึ่งโดยทั่วไปในส่วนของอุตสาหกรรมชุบเคลือบนิกเกิลแบบไม่ใช้ไฟฟ้าจะมีค่าพีเอชประมาณ 4.5-6 ซึ่งตัวคอมเพล็กซ์

เอเจนต์จะมีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าพีเอชสารละลาย อย่างไรก็ตามการชุบเคลือบทองแดง ทอง เงิน พลาเดียม และนิกเกิลบางประเภท สารละลายที่ใช้ทำการชุบเคลือบจะมีค่าพีเอชประมาณ 8

ตารางที่ 2.7 ชนิดของคอมเพล็กซ์เอเจนต์ชนิดต่างๆที่ใช้ในสารละลายในกระบวนการชุบเคลือบแบบไม่ใช้ไฟฟ้า [20]

Metal	Complexing agent
Ni, Co	Acetate, Propionate, Succinate, Hydroxyacetate, Aminoacetate, Ethylenediamine, Malonate, Pyrophosphate, Malate, Citrate,
Cu	Tartrate
Au	Tartrate, Glycolic acid, Triethyl amine, EDTA, Cyanide
Ag	Cyanide*, Sulfite, Ethanolamine, Citrate, Chloride
Pd, Pt, Ru	Cyanide, Ammonium Citrate, Succinate, Acetate, Ammonium, Ethylenediamine

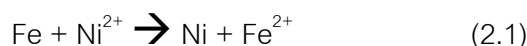
* เป็นคอมเพล็กซ์เอเจนต์ที่สามารถให้อัตราการชุบเคลือบที่ดี แม้ว่าสารละลายในการชุบเคลือบจะมีความเสถียรของระบบที่ต่ำ

3. รีดิวซ์เซอร์ (Reducing agent)

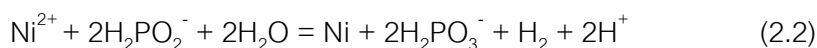
หลักการเลือกใช้รีดิวซ์เอเจนต์นั้นขึ้นอยู่กับเงื่อนไขต่างๆในการชุบเคลือบ อาทิเช่น ชนิดของโลหะหรือโลหะผสมที่ต้องการ สมบัติทางกายภาพ สมบัติทางเคมีของชั้นเคลือบ เป็นต้น รีดิวซ์เอเจนต์เป็นสารประกอบที่มีส่วนผสมของฟอสฟอรัสหรือโบรอนโดยหลีกเลี่ยงไม่ได้ ซึ่งทำให้สมบัติของชั้นเคลือบโลหะที่ได้มีความหลากหลาย มีส่วนประกอบของธาตุฟอสฟอรัสหรือโบรอนในชั้นเคลือบโลหะ ในอีกส่วนหนึ่งการชุบเคลือบโลหะบริสุทธิ์ก็สามารถทำได้เช่นกัน โดยการเลือกใช้รีดิวซ์เอเจนต์ประเภทไฮดราซีน (Hydrazine) หรือฟอร์มัลดีไฮด์ (Formaldehyde) ในที่นี้จะขอยกตัวอย่างรีดิวซ์เอเจนต์ที่นิยมใช้ในกระบวนการชุบเคลือบนิกเกิลซึ่งก็คือไฮโปฟอสไฟท์ (Hypophosphite)

ไฮโปฟอสไฟท์เป็นรีดิวซ์เซอร์ที่นิยมใช้ในระบบของการชุบเคลือบนิเกิล โคบอล และ พาลาเดียม รวมถึงโลหะผสมของธาตุที่กล่าวมา ชั้นเคลือบที่เกิดขึ้นจะไม่ใช้โลหะบริสุทธิ์จะมี ส่วนผสมของฟอสฟอรัสอยู่เล็กน้อย ประสิทธิภาพของการรีดิวซ์เซอร์ของตัวไฮโปฟอสไฟท์นั้นไม่ถึง 100 เปอร์เซ็นต์ ขึ้นอยู่กับพื้นผิวที่ต้องการชุบเคลือบ อาทิเช่น เหล็ก โคบอล นิกเกิล พาลาเดียม แพลตตินัม โลเดียม ทองคำ เป็นต้น

ปฏิกิริยาเริ่มต้นของการเกิดปฏิกิริยาการชุบเคลือบแบบไม่ใช้ไฟฟ้านั้นขึ้นอยู่กับธรรมชาติ ของโลหะที่ต้องการชุบเคลือบและตัวชิ้นงานที่ถูกชุบเคลือบ สำหรับปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในการชุบ เคลือบนิเกิลลงบนเหล็กกล้าแสดงได้ดังสมการที่ 2.1-2.2 ดังนี้



สำหรับการชุบเคลือบชั้นนิเกิล ปฏิกิริยารีดักชันจะเกิดขึ้นทันที ซึ่งปฏิกิริยาโดยรวม ของการเกิดชั้นเคลือบนิเกิลโดยมีไฮโปฟอสไฟท์เป็นรีดิวซ์เซอร์สามารถอธิบายได้ดังสมการ ด้านล่าง



โดยทั่วไปเมื่อความเข้มข้นของไฮโปฟอสไฟท์เพิ่มขึ้น ปริมาณของฟอสฟอรัสใน โลหะผสม นิกเกิล-ฟอสฟอรัส ก็จะเพิ่มขึ้นตามไปด้วย

เมื่อกำหนดส่วนประกอบอื่นของสารละลายในการชุบเคลือบรวมถึงพีเอชมีค่าคงที่ อัตราการ ชุบเคลือบของนิเกิลจะแปรผันตามความเข้มข้นของไฮโปฟอสไฟท์ โดยมีลักษณะเป็นฟังก์ชัน เส้นตรง ไม่ว่าจะเป็นสารละลายประเภทกรดหรือประเภทเบส

4. สารหน่วงปฏิกิริยา (Stabilizer and inhibitor)

สารหน่วงปฏิกิริยาเป็นสารเคมีที่ใช้ในกระบวนการชุบเคลือบแบบไม่ใช้ไฟฟ้าเพื่อป้องกันการ สลายตัว หรือการเสื่อมสภาพของสารละลายเพื่อให้มั่นใจว่าภายใต้ส่วนผสมและเงื่อนไขที่ กำหนดสามารถทำการชุบเคลือบโลหะภายในระยะเวลาที่ต้องการได้โดยที่สารละลายไม่เกิดการ เสื่อมสภาพก่อนเวลา หากสารละลายมีการตกตะกอนของโลหะจะเห็นเป็นลักษณะของอนุภาค ลอยอยู่ในสารละลาย ซึ่งอนุภาคเหล่านี้มีประสิทธิภาพสูงในเร่งปฏิกิริยารีดักชันของโลหะเนื่องจาก

มีพื้นผิวขนาดใหญ่ การเลือกใช้สารหน่วงปฏิกิริยาขึ้นกับโลหะหรือโลหะผสมที่ต้องการชุบเคลือบ และความสามารถในการเข้ากันได้ของกระบวนการ

สารหน่วงปฏิกิริยาที่ใช้สำหรับกระบวนการชุบเคลือบนิเกิลมีการแบ่งออกเป็น 4 ประเภท ดังนี้

1. สารประกอบที่ประกอบด้วยธาตุ ซัลเฟอร์ ซีลีเนียม เทลลูเรียม
2. สารประกอบที่ประกอบด้วยธาตุออกซิเจน เช่น AsO_2^- , IO_3^- , MoO_4^{2-}
3. ไอออนบวกของโลหะหนัก (Sn^{2+} , Pb^{2+} , Hg_2^{2+} , and Sb^{3+})
4. กรดอินทรีย์ที่ไม่อิ่มตัว เช่น เมลลิก ไอทาโคนิก เป็นต้น

ซึ่งความเข้มข้นของตัวหน่วงปฏิกิริยานั้นมีความสำคัญมาก สามารถบ่งชี้ถึงอัตราในการชุบเคลือบโลหะหรือโลหะผสมได้ว่ามีอัตราการชุบเคลือบที่ช้าหรือเร็วอย่างไร

2.1.2.2.3 จลนพลศาสตร์ของอัตราการชุบเคลือบแบบไม่ใช้ไฟฟ้า

การคำนวณอัตราการชุบเคลือบแบบไม่ใช้ไฟฟ้าสามารถทำได้หลากหลายวิธี อาทิเช่น การชั่งน้ำหนัก (Gravimetric) การวัดความต้านทานไฟฟ้า (Electrical resistance) การวัดการส่องผ่านของแสง (Optical transmission measurements) เป็นต้นสองวิธีการหลังจะเป็นวิธีที่ต้องทำการวัดอย่างต่อเนื่องเพื่อหาอัตราการชุบเคลือบ รวมถึงการคำนวณอัตราการชุบเคลือบด้วยวิธีเทคนิคเคมีไฟฟ้า (Polarization resistance , Impedance และ Coulostatic methods) ซึ่งขึ้นอยู่กับความเหมาะสมของแต่ละแบบ โดยกฎอัตราการชุบเคลือบแบบอีมพัริคัลสามารถอธิบายได้ดังสมการที่ 2.[20]

$$-\frac{dC_A}{dt} = KC_A^\alpha C_B^\beta C_C^\gamma \dots \left(-\frac{E_a}{RT}\right) \quad (2.3)$$

เมื่อ K คือแฟกเตอร์ความถี่จากกฎของอาร์เรเนียส (Arrhenius law)

E_a คือพลังงานการกระตุ้น (Activation energy)

T คือ อุณหภูมิ

R คือ ค่าคงที่ของแก๊ส

C_A, C_B, C_C คือ ความเข้มข้นของ A B C ตามลำดับ

α, β, γ คือ ลำดับของการเกิดปฏิกิริยา (Reaction Order)

$\frac{dC_A}{dt}, \frac{dC_B}{dt}, \frac{dC_C}{dt}$ คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงของความเข้มข้นที่เปลี่ยนไปตามเวลา
 $\alpha + \beta + \gamma$ คือ ผลรวมของลำดับของการเกิดปฏิกิริยา

จากการศึกษาข้อมูลที่ผ่านมากฎอัตราการชุบเคลือบแบบอิมพัลส์จะมีความแตกต่างกันไปออกไปตามโลหะที่ต้องการชุบเคลือบ กฎอิมพัลส์นั้นจะแตกต่างกันไปตามเงื่อนไขของกระบวนการ อาทิเช่น ส่วนผสมของสารละลายชุบเคลือบ พีเอช ชนิดของรีดิวซ์ซึ่งเอเจนต์ เป็นต้น แต่บางกรณีอาจมีความคล้ายคลึงกันได้ อัตราการชุบเคลือบจะไม่ขึ้นกับความเข้มข้นของไอออนของนิกเกิลแต่จะขึ้นกับความเข้มข้นของไฮโปฟอสไฟท์ ตัวอย่างสมการจากงานวิจัยของ Mallory and Lloyd ซึ่งเป็นสมการ 1st order ที่ขึ้นกับความเข้มข้นของไฮโปฟอสไฟท์และความเข้มข้นของ H^+ ซึ่งมีอันดับของปฏิกิริยาเท่ากับ 0.4 แสดงดังสมการที่ 2.4 สำหรับค่าลำดับของการเกิดปฏิกิริยาและค่าพลังงานการกระตุ้นซึ่งขึ้นกับสมบัติของคอมเพล็กซ์ซึ่งเอเจนต์แสดงดังตารางที่ 2.8

$$r = K_2 \frac{[H_2PO_2^-]}{[H^+]^{0.4}} \exp - \frac{E_a}{RT} \quad (2.4)$$

ตารางที่ 2.8 แสดงผลของคอมเพล็กซ์ซึ่งเอเจนต์ชนิดต่างๆที่ส่งผลต่อค่าลำดับของการเกิดปฏิกิริยาและค่าพลังงานการกระตุ้นในระบบการชุบเคลือบนิกเกิลโดยมีไฮโปฟอสไฟท์เป็นรีดิวซ์เซอร์ [20]

Complexing Agent	Reaction Order			Activation Energy/KJ mol ⁻¹
	H ₂ PO ₂ ⁻	Ni ²⁺	H ⁺	
Hydroxyacetate	0.8	0.6	-0.4	96.28
Lactate	0.8	0.6	-0.4	66.98
Aminoacetate	0.8	0.6	-0.4	71.16
α- Alanine	1.0	0.7	-0.4	54.42
Malate	0.6	0.8	-0.4	71.16
Citrate	0.4	2.0	-0.5	66.98

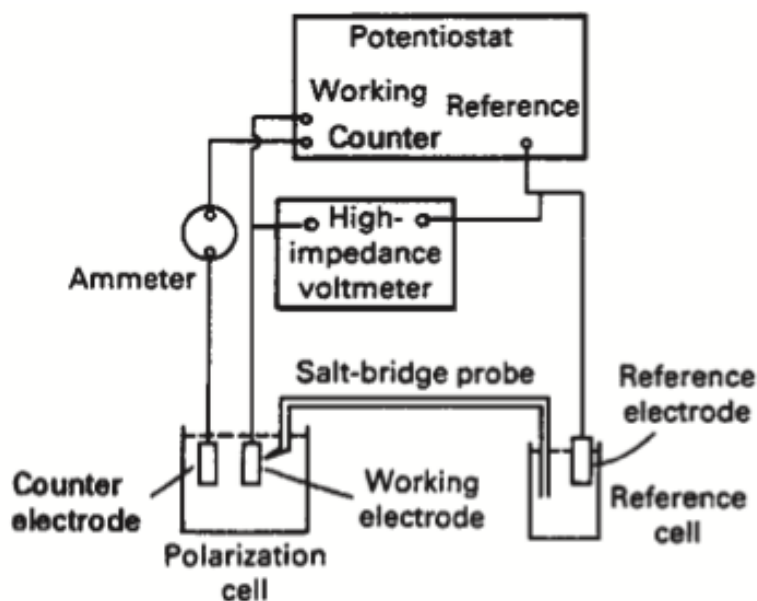
ค่าพลังงานการกระตุ้นที่เกิดจากคอมเพล็กซ์เชิงเอเจนท์ชนิดต่างๆมีค่าตั้งแต่ 50-100 KJ mol⁻¹ แต่อย่างไรก็ตามความแตกต่างของอันดับของการเกิดปฏิกิริยาจะขึ้นกับชนิดของคอมเพล็กซ์เชิงเอเจนท์หรือแม้กระทั่งชนิดของรีดิวซ์เซอร์ในแต่ระบบ

2.1.3 การตรวจสอบพฤติกรรมการกัดกร่อนด้วยกระบวนการทางไฟฟ้า

กระบวนการทดสอบด้วยกระบวนการทางไฟฟ้าโดยวิธีการวิเคราะห์ กราฟโพลาริเซชันเป็นการวัดความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ทางไฟฟ้าเคมี (Electrochemical potential) และกระแสของการกัดกร่อน (Corrosion current) กระแสของการกัดกร่อนและความต่างศักย์ทางเคมีไฟฟ้าจะขึ้นกับเซลล์ไฟฟ้าเคมีที่ถูกกำหนดศักย์ไฟฟ้าตามที่ต้องการ โดยการทดสอบจะมีสองแนวทาง แนวทางที่หนึ่งเรียกว่าเทคนิคโพเทนทิโอสแตติกคอลล (Potentiostatically) เป็นเทคนิคของการควบคุมค่าความต่างศักย์และแสดงผลออกเป็นกระแสที่เปลี่ยนแปลงไป ส่วนแนวทางที่สองเรียกว่าเทคนิคกัลวานอสแตติก (Galvanostatically) เป็นการป้อนกระแสคงที่ค่าหนึ่งเพื่อเร่งการกัดกร่อน ศักย์ไฟฟ้าจะเปลี่ยนแปลงไปตามชนิดของโลหะที่เกิดการกัดกร่อน [21]

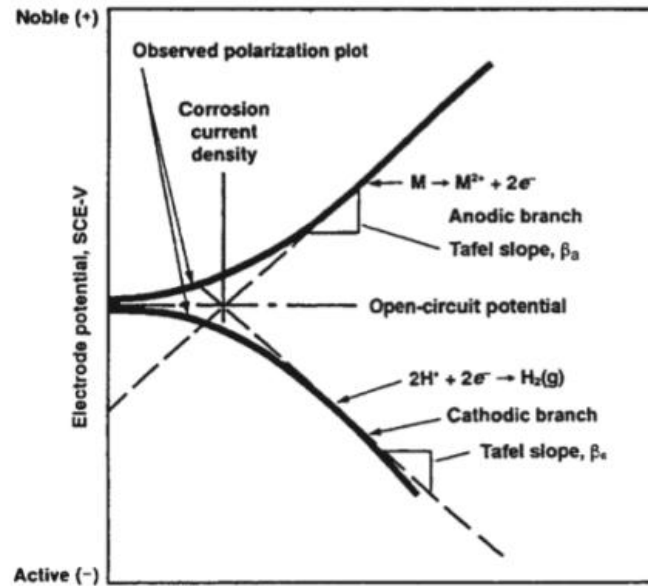
แผนผังอย่างง่ายของเครื่องทดสอบศักย์เคมีไฟฟ้าที่ใช้วัดเส้นโพลาริเซชันแสดงไว้ดังภาพที่ 2.10 เป็นเครื่องมืออิเล็กทรอนิกส์สำหรับทำการวัดการทดลองโพลาริเซชันทางเคมีไฟฟ้าโดยประกอบไปด้วยแหล่งจ่ายไฟสำหรับจ่ายกระแสให้กับเซลล์ไฟฟ้าเคมีและวงจรสำหรับวัดและควบคุมตัวแปรศักย์ไฟฟ้า ขั้วไฟฟ้าโลหะทดสอบ (Working electrode; WE) โดยขึ้นงานทดสอบที่เป็นโลหะจะทำหน้าที่เป็นขั้วทดสอบ หรือ corroding electrode ซึ่งจะถูกรัดค่าที่เกิดขึ้นเทียบกับค่าอ้างอิงจากขั้วไฟฟ้าอ้างอิง (Reference electrode; RE) ควบคุมไปกับการแสดงผลในรูปกราฟโพลาริเซชัน โดยขั้วทั้งสองจะถูกเชื่อมด้วยสะพานเกลือ (Salt-bridge probe) สะพานเกลือเป็นสิ่งจำเป็นเพื่อการวัดที่มีศักย์ภาพใกล้เคียงขั้วไฟฟ้าในการทำงาน และขั้วไฟฟ้าวัดกระแส (Counter electrode; CE) จะอยู่ในเซลล์โพลาริเซชัน ทำหน้าที่ส่งผ่านกระแสผ่านสารละลายหรือพื้นผิวของขั้วไฟฟ้าในการทำงาน [21]

การวิเคราะห์ทดสอบหาอัตราการกัดกร่อนด้วยกราฟโพลาริเซชัน จะวิเคราะห์จากเส้นกราฟแคโทดิก (Cathodic polarization curves) และเส้นกราฟแอโนดิก (Anodic polarization curves) ที่เกิดจากการวัดโลหะที่จุ่มอยู่ในสารละลาย Deaerated acid แสดงดังภาพที่ 2.11 ซึ่งเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้าของอิเล็กโทรดกับลอการิทึมของกระแสที่ได้มาจากการวัดขั้นตอนการวัดโพลาริเซชันของศักย์ไฟฟ้าเคมี



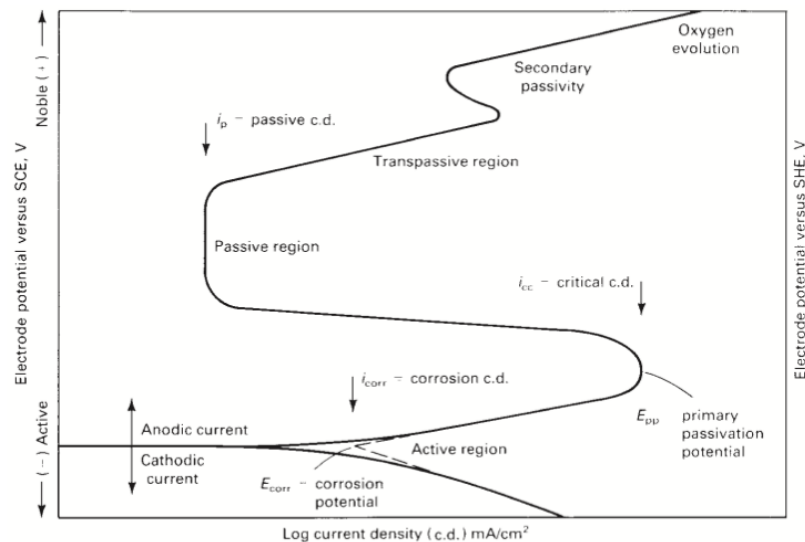
ภาพที่ 2.10 แสดงแผนผังอย่างง่ายของเครื่องโพเทนชิโอสแตทที่ใช้วัดเส้นโพลาริเซชัน [21]

เส้นทึบในภาพจะแสดงถึงเส้นโพลาริเซชันที่ได้จากการทดลอง ศักย์ไฟฟ้าของอิเล็กโทรด จะมีค่าเป็นบวกสูงกว่าเมื่อเทียบขณะทำการเปิดวงจรศักย์ไฟฟ้า (Open-circuit potential) กระแสแอโนดิกจะถูกวัดจากชิ้นงานโลหะที่ต้องการทำการทดสอบ หากศักย์ไฟฟ้าขณะใด ๆ มีค่าสูงกว่า ศักย์ไฟฟ้าขณะทำการเปิดวงจรศักย์ไฟฟ้าประมาณ 100 มิลลิโวลต์ ลักษณะของกราฟเส้นโพลาริเซชันจะเป็นเส้นตรง เส้นกราฟความชันของปฏิกิริยาออกซิเดชันจะแสดงถึงการที่โลหะนั้น กลายเป็นไอออนซึ่งเป็นลักษณะเส้นตรง ซึ่งความชันนี้จะเท่ากับกับความชันแอโนดิกของกราฟทาเฟล (Tafel plot, β_a) หากศักย์ไฟฟ้ามีค่าความเป็นบวกเพิ่มสูงขึ้นหรือสารละลายมีความสามารถในการออกซิไดซ์ที่สูงขึ้น โลหะก็จะมีความสามารถในการกลายเป็นไอออนเพิ่มสูงขึ้น [21]



ภาพที่ 2.11 แสดงเส้นกราฟโพลาริเซชันแอโนดิกและแคโทดิกของโลหะในสารละลาย deaerated acid [21]

เส้นที่ด้านล่างในภาพจะแสดงถึงเส้นโพลาริเซชันที่ได้จากการทดลองศักย์ไฟฟ้าของแคโทดิกจะมีค่าเป็นลบสูงกว่าเมื่อเทียบขณะทำการเปิดวงจรศักย์ไฟฟ้า หากศักย์ไฟฟ้าขณะใด ๆ มีค่าติดลบต่ำกว่าศักย์ไฟฟ้าขณะทำการเปิดวงจรศักย์ไฟฟ้าประมาณ 100 มิลลิโวลต์ ลักษณะของกราฟเส้นโพลาริเซชันจะเป็นเส้นตรง ซึ่งความชันนี้จะเท่ากับกับความชันแคโทดิกของกราฟทาเฟล (Tafel plot, β_c) ในสารละลาย deaerated acid ปฏิกริยารีดักชันที่ทำให้เกิดกระแสแคโทดิกจะให้ไฮโดรเจนไอออนและแก๊สไฮโดรเจน หากศักย์ไฟฟ้ามีค่าติดลบมากๆ จะทำให้อัตราของปฏิกริยารีดักชันมีไฮโดรเจนเพิ่มสูงขึ้น เส้นตรงที่ลากผ่านจากเส้นโพลาริเซชันของแคโทดิกและเส้นโพลาริเซชันของแอโนดิกนั้นและตัดกับเส้นศักย์ไฟฟ้าขณะทำการเปิดวงจรศักย์ไฟฟ้า จะได้จุดตัดและเรียกตำแหน่งจุดตัดนั้นว่าค่าความหนาแน่นของกระแสการกัดกร่อน (Corrosion current density) ซึ่งมีค่าเท่ากับอัตราการเกิดปฏิกริยาแอโนดิกหรือการกัดกร่อนที่สามารถเกิดขึ้นได้อย่างอิสระ วิธีการประมาณค่าอันตรายการกัดกร่อนของโลหะสามารถประมาณได้จากเส้นกราฟโพลาริเซชันของแคโทดิกและแอโนดิกในช่วงขอบเขตกราฟเส้นตรง [21]

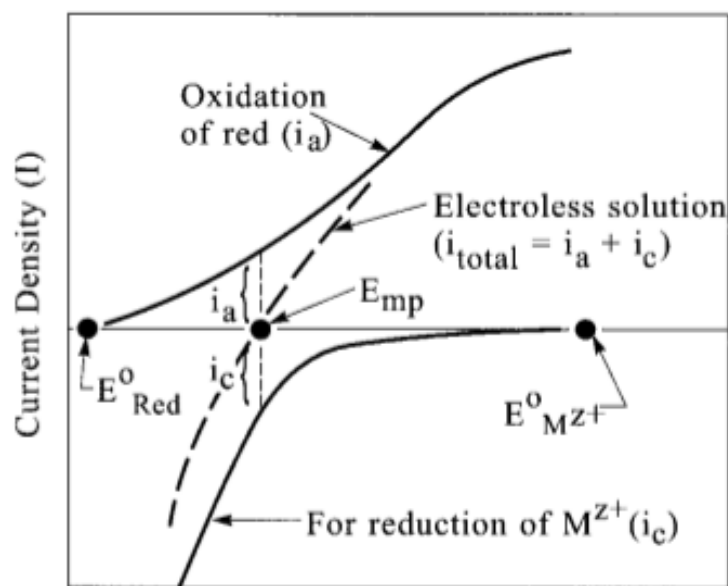


ภาพที่ 2.12 แสดงภาพกราฟโพลาร์ไรเซชันแบบแอคทีฟ-พาสซีฟ ของโลหะ [21]

จากภาพที่ 2.12 เมื่อเพิ่มศักย์ไฟฟ้าให้เกินค่า E_{corr} ค่ากระแสจะเพิ่มขึ้นตามกฎของโอห์ม ซึ่งเส้นโค้งที่เกิดขึ้นนี้เรียกว่าเส้นโค้งแอคทีฟ โดยในช่วงนี้จะเกิดการกัดกร่อนทั่วผิวหน้า (general or uniform corrosion) (แต่เมื่อศักย์ไฟฟ้าเพิ่มขึ้นอีกจนถึงจุดหนึ่งจะเห็นได้ว่าค่ากระแสการกัดกร่อนกลับลดลงเนื่องชั้นฟิล์มออกไซด์ป้องกันผิว) Protective oxide film (ได้เกิดขึ้นและศักย์ไฟฟ้าที่จุดนี้เป็นศักย์ไฟฟ้าที่เกิดการเปลี่ยนแปลงจากสภาวะวัสดุที่ไม่มีฟิล์มไปเป็นสภาวะเกิดฟิล์มที่ผิว) Active-passive transition (หรือที่เรียกว่าศักย์ไฟฟ้าพาสซีเวชันปฐมภูมิ) Primary passivation potential; E_{pp} (เมื่อเพิ่มความต่างศักย์ไปเรื่อยๆ ค่ากระแสก็จะค่อยๆ ลดลงจนในที่สุดกระแสมีค่าคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงเป็นระยะเวลาหนึ่งซึ่งช่วงกราฟที่กระแสคงที่นี้คือช่วงพาสซีฟ โดยที่โลหะแต่ละชนิดก็จะมีช่วงพาสซีฟที่แตกต่างกันออกไปเป็นลักษณะเฉพาะของโลหะนั้นๆ ซึ่งค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในช่วงพาสซีฟจะเรียกว่ากระแสพาสซีฟ (i_{pass} หรือ i_p) สุดท้ายนี้เมื่อเพิ่มความต่างศักย์ขึ้นอีกจะเข้าสู่ช่วงทรานพาสซีฟ (Tranpassive zone) คือชั้นฟิล์มปกป้องเกิดการแตกออกส่งผลให้การกัดกร่อนเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วและค่ากระแสการกัดกร่อนเพิ่มขึ้น เรียกศักย์ไฟฟ้าเมื่อชั้นฟิล์มพาสซีฟเริ่มแตกตัวว่า (Tranpassive potential; E_t) โดยเมื่อถึงจุดนี้การกัดกร่อนมักเกิดเฉพาะที่ (Localized corrosion) โดยเฉพาะการกัดกร่อนแบบรูเข็ม (Pitting corrosion) เนื่องจากโครงสร้างจุลภาคของโลหะโดยส่วนใหญ่จะไม่สม่ำเสมอ [22]

2.1.4 ทฤษฎีศักย์ไฟฟ้าผสม (Mix potential theory)

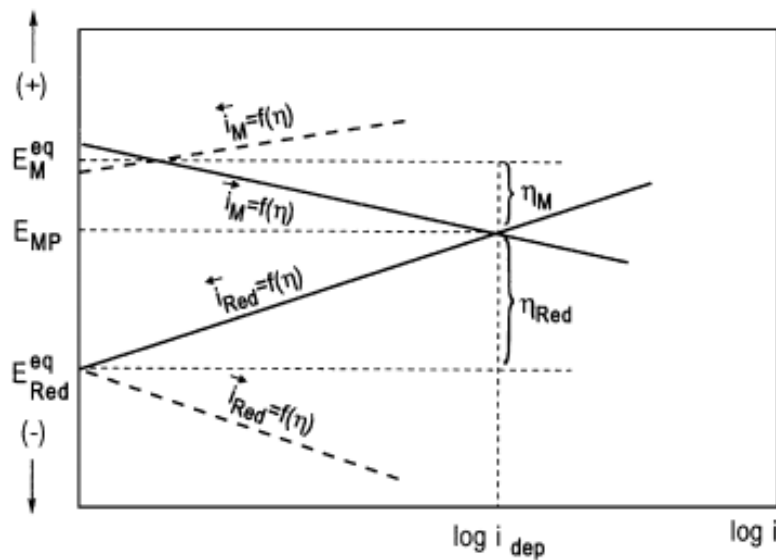
สำหรับปฏิกิริยาของกระบวนการชุบเคลือบแบบไม่ใช้ไฟฟ้านั้นสามารถอธิบายได้จากหลักการทางไฟฟ้าเคมีของปฏิกิริยาออกซิเดชันและปฏิกิริยารีดักชัน ซึ่งแบบจำลองทางเคมีไฟฟ้าสำหรับกระบวนการชุบเคลือบแบบไม่ใช้ไฟฟ้าได้มีการศึกษาโดย Paunovic [23] และ Saito ซึ่งเป็นแบบทฤษฎีจำลองแบบผสมระหว่างศักย์ไฟฟ้าของสมการแอนอดิกและศักย์ไฟฟ้าของสมการแคโทดิก โดยใช้หลักการของสมการการเกิดการกัดกร่อนในการอธิบายทฤษฎี ซึ่งสามารถอธิบายได้อย่างเป็นระบบโดยใช้แผนภาพ Wagner and Traud Diagram



ภาพที่ 2.13 แสดง Wagner-Traud diagram ของกระแสไฟฟ้าสำหรับสมการกระบวนการชุบเคลือบแบบไม่ใช้ไฟฟ้า

จากภาพที่ 2.13 แสดงให้เห็นถึงหลักทั่วไปในกระบวนการชุบเคลือบแบบไม่ใช้ไฟฟ้าโดยใช้ทฤษฎีของ mixed potential theory กราฟโพลาร์ไรเซชันแสดงให้เห็นถึงเส้นสมการปฏิกิริยาแอนอดิกและแคโทดิก) เส้นที่บ (และเส้นสมการของผลรวมปฏิกิริยาทั้งสอง) เส้นประ (โดยศักย์ไฟฟ้าสมดุลของรีดิวชันซึ่งเอเจนท์ $E_{eq,Re}$ จะต้องมีค่าศักย์ไฟฟ้าที่เป็นลบที่มากกว่าศักย์ไฟฟ้าสมดุลของอิเล็กโทรดโลหะ $E_{eq,M}$ จึงจะสามารถทำให้รีดิวชันซึ่งเอเจนท์ชนิดนั้นทำหน้าที่ให้อิเล็กตรอนและมี M^{Z+} เป็นตัวรับอิเล็กตรอน ซึ่งเส้นสมการโพลาร์ไรเซชันของสมการแอนอดิกและสมการแคโทดิกนั้นจะตัดกับแกนของศักย์ไฟฟ้า จะได้ค่าศักย์ไฟฟ้าสมดุลของแต่ละสมการแอนอดิกและแคโทดิกแทนด้วยสัญลักษณ์ E_{Re}^0 และ $E_{M^{Z+}}^0$ ตามลำดับ โดยศักย์ไฟฟ้าสมดุลที่ทำให้สมการของกระบวนการชุบเคลือบเกิดขึ้นและสามารถทำการชุบเคลือบในระบบนั้นได้จะต้องมีค่าเท่ากับ mixed potential,

E_{mp} [24] อีกหนึ่งทฤษฎีที่สำคัญและเป็นที่ยอมรับใช้ในการวิเคราะห์กระบวนการชุบเคลือบแบบไม่ใช้ไฟฟ้านั้นก็คือ ทฤษฎีของ Evans Diagram เป็นกราฟค่าความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและความต่างศักย์ของกระบวนการชุบเคลือบแบบไม่ใช้ไฟฟ้าซึ่งแสดงดังในรูปภาพที่ 2.14

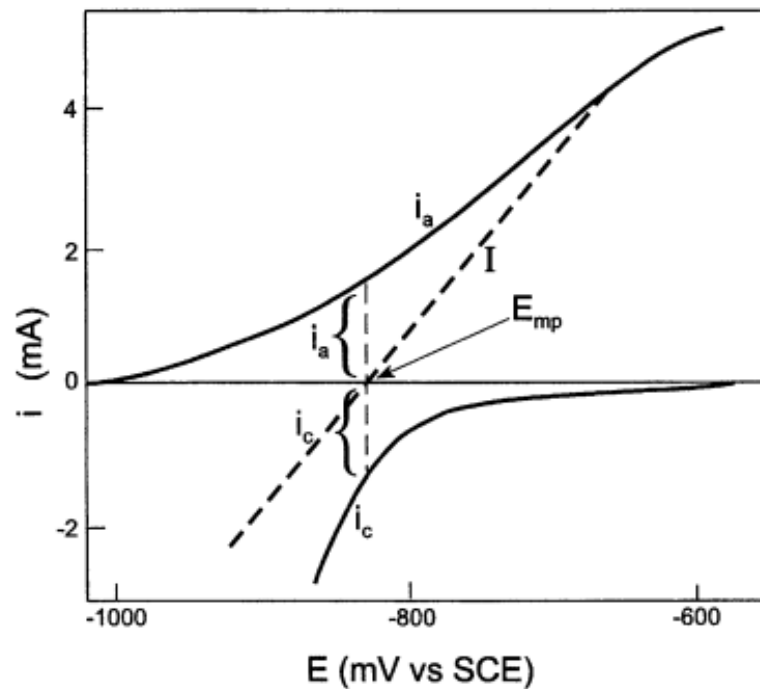


ภาพที่ 2.14 แสดงแผนภาพความสัมพันธ์ของศักย์ไฟฟ้าและกระแสของ Evans Diagram

จากแผนภาพจะแสดงให้เห็นทฤษฎีศักย์ไฟฟ้า mixed-potential ที่มีค่ากระแสของแคโทดซึ่งก็คือกระแสของอเล็กโทรด $i_c = i_M = f(E)$ และค่ากระแสของแอโนดซึ่งก็คือกระแสของรีดิวซ์ซิงเอเจนท์ $i_a = i_{red} = f(E)$ ซึ่งกระแสทั้งคู่เป็นฟังก์ชันของศักย์ไฟฟ้า โดยจากแผนภาพจุดตัดสมดุลในตำแหน่งของกราฟสามารถแสดงถึงความหนาแน่นกระแสในการชุบเคลือบ (deposition current density; i_{dep}) (โดยสามารถแสดงถึงอัตราการชุบเคลือบแบบไม่ใช้ไฟฟ้าในเทอม mA/cm^2 หรือ mg/h.cm^2 ตามกฎของฟาราเดย์) Faraday's law; $r = i \times 1.09 \text{ mg/h.cm}^2$) [Mallory, #4; Paunovic, 2006 #5; Paunovic, 2006 #5; Mallory, #4] และค่าศักย์ไฟฟ้าที่ตำแหน่ง i_{dep} ก็คือ mixed potential, E_{mp} ซึ่งก็คือทฤษฎีศักย์ไฟฟ้า mixed-potential นั้นเอง

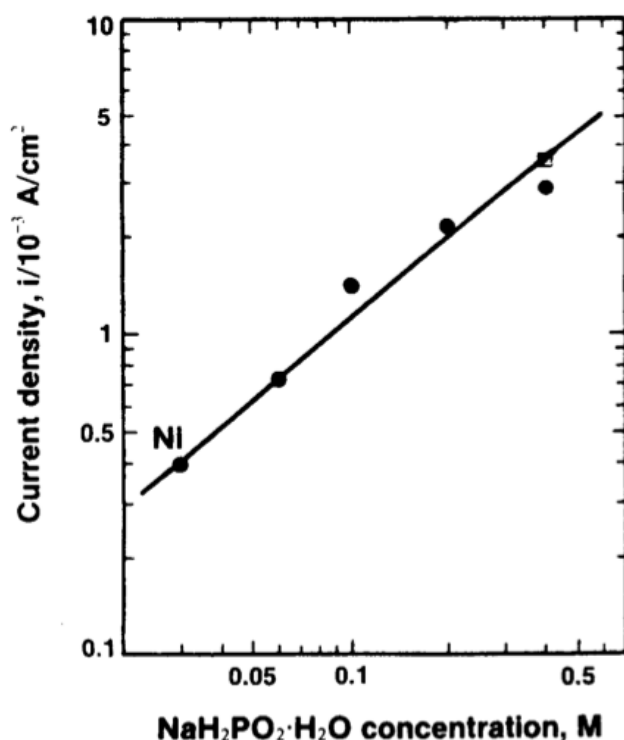
ภาพที่ 2.15 แสดงตัวอย่างกราฟ Wagner-Traud diagram ของกระบวนการชุบเคลือบนิเกิลแบบไม่ใช้ไฟฟ้าซึ่งในการทดลองจะใช้วิธีในการทดสอบเพื่อยืนยันผลด้วยเทคนิค potentiodynamic method , Wagner-Traud และ Evans diagrams โดยสารละลายสำหรับกระบวนการชุบเคลือบนิเกิลแบบไม่ใช้ไฟฟ้าในที่นี้จะประกอบไปด้วย NiSO_4 39.4 g/l, sodium citrate 20 g/L, %85 lactic acid 10 g/L, and dimethylamine borane (DMAB) 2 g/L, สำหรับใช้

เป็นรีดิวซ์เชิงเอเจนท์ โดยทำการชุบเคลือบที่อุณหภูมิประมาณ $40\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0.5$ และ pH 7 โดยการปรับ pH ของสารละลายด้วย NH_4OH ศักย์ไฟฟ้าในการใช้ทดสอบเท่ากับ -0.85 V เทียบกับ SCE บริเวณในการทดสอบมีค่า 0.68 cm^2



ภาพที่ 2.15 แสดงแผนภาพความสัมพันธ์ของศักย์ไฟฟ้าและกระแสของ Evans Diagram สำหรับกระบวนการชุบเคลือบนิเกิลแบบไม่ใช้ไฟฟ้า

เมื่อผลรวมของกระแสทั้งสองปฏิกิริยาเท่ากับศูนย์ ศักย์ไฟฟ้าที่ตำแหน่งนั้นก็คือ mixed potential, E_{mp} ซึ่งมีค่าประมาณจากกราฟเท่ากับ -840 mV เทียบกับ SCE จากภาพจะได้ค่าอัตราการชุบเคลือบ 1.38 mA หรือ 2.03 mA/cm^2 ซึ่งสามารถแปลงให้อยู่ในหน่วย mg/h.cm^2 ตามกฎของฟาราเดย์ได้ ($r = i \times 1.09\text{ mg/h.cm}^2$) ซึ่งจะได้ค่าอัตราการชุบเคลือบมีค่า 2.2 mg/h.cm^2 ซึ่งผลที่ได้ก็สอดคล้องกับ Evans diagrams โดยตัวอย่างผลของรีดิวซ์เชิงเอเจนท์ซึ่งก็คือโซเดียมไฮโปฟอสไฟท์ที่ส่งผลต่อค่าศักย์ไฟฟ้าของปฏิกิริยาแสดงได้ดังภาพ 2.16

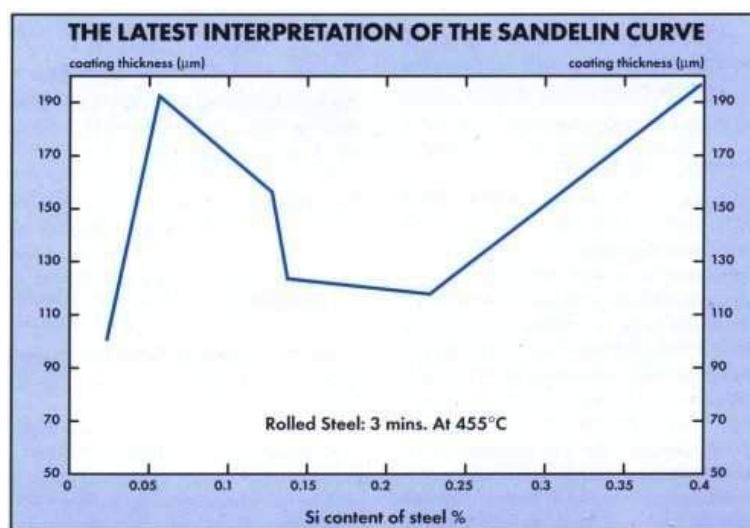


ภาพที่ 2.16 แสดงตัวอย่างผลของความเข้มข้นของโซเดียมไฮโปฟอสไฟต์ที่ส่งผลต่อกระแสแอโนดิกในกระบวนการชุบเคลือบโลหะผสมนิกเกิล-ฟอสฟอรัส แบบไม่ใช้ไฟฟ้า

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

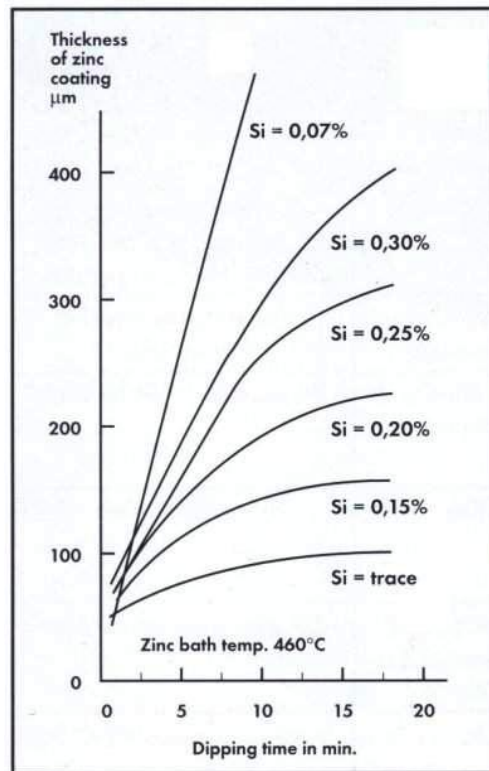
จุดเริ่มต้นของงานวิจัยในวิทยานิพนธ์เรื่องนี้เริ่มจากการวิเคราะห์ปัญหาจากภาคอุตสาหกรรมที่มีกระบวนการชุบสังกะสีด้วยวิธีจุ่มร้อน โดยปัญหาที่พบในกระบวนการชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนนี้ ได้แก่ ความหนาของชั้นสังกะสีที่ไม่เท่ากันของเหล็ก 2 ชนิด (เหล็กหล่อและเหล็กฉาก) ที่ผ่านการจุ่มร้อนเป็นระยะเวลาที่เท่ากัน รวมถึงชั้นความหนาของสังกะสีที่ได้มีความหนาเกินความต้องการ โดยความแตกต่างทางกายภาพของเหล็กทั้งสองชนิดนั้นจะอยู่ความเรียบผิวของชิ้นงาน และส่วนผสมทางเคมีของเหล็กแต่ละชนิด อาทิเช่น ปริมาณของธาตุซิลิกอน ฟอสฟอรัส เป็นต้น ซึ่งจากการศึกษาพบว่าทั้งธาตุซิลิกอนและฟอสฟอรัสนั้นจะส่งผลต่ออัตราการทำปฏิกิริยาระหว่างเหล็กและสังกะสี ทำให้ชั้นความหนาของชั้นเคลือบสังกะสีและความหนาของชั้นสารประกอบโลหะสังกะสี-เหล็ก (Intermediate) ที่ได้ มีความหนาแตกต่างกันออกไปตามส่วนผสมทางเคมีของเหล็ก [10] ซิลิกอนเป็นธาตุที่เจือปนอยู่ในเหล็กชนิดหนึ่งที่มีผลทำให้เหล็กและสังกะสีทำปฏิกิริยากันอย่างรวดเร็ว ซึ่งธาตุซิลิกอนเป็นธาตุเจือปนมาขณะทำการผลิตเหล็กในกระบวนการกำจัดออกซิเจน ภาพที่ 2.17 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณซิลิกอนและ

ความหนาของชั้นสังกะสีที่ผ่านการจุ่มร้อนเป็นระยะเวลา 3 นาทีที่อุณหภูมิสังกะสีหลอมเหลว 455 องศาเซลเซียส ซึ่งปริมาณซิลิกอนที่ส่งผลให้เกิดความหนาของชั้นสังกะสีมากที่สุดจะอยู่ในช่วง 0.05-0.125%Si เรียกผลของซิลิกอนที่มีต่อความหนาของชั้นสังกะสีในช่วงนี้ว่าแซนด์ไลน์เอฟเฟกต์ (Sandelin Effect) และใน ภาพที่ 2.18 แสดงความสัมพันธ์ของระยะเวลาในการจุ่มร้อนกับความหนาของชั้นสังกะสีที่เกิดขึ้นที่ปริมาณซิลิกอนต่างๆกัน

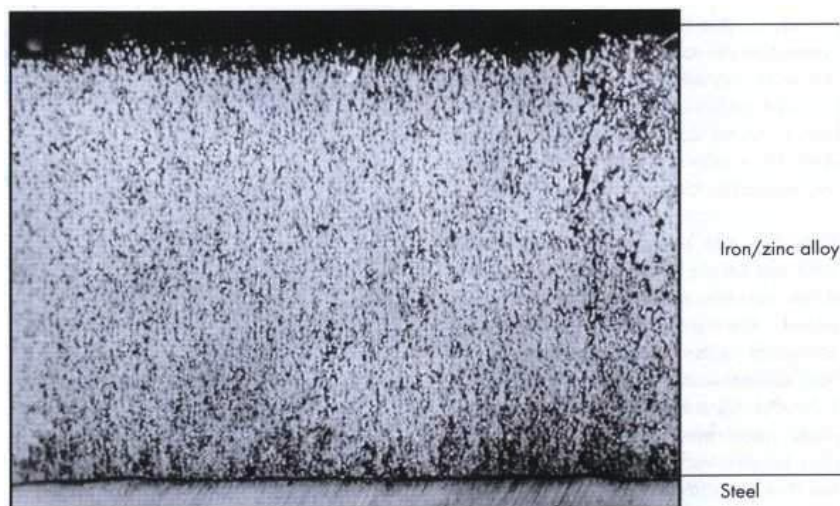


ภาพที่ 2.17 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณซิลิกอนและความหนาของชั้นสังกะสี

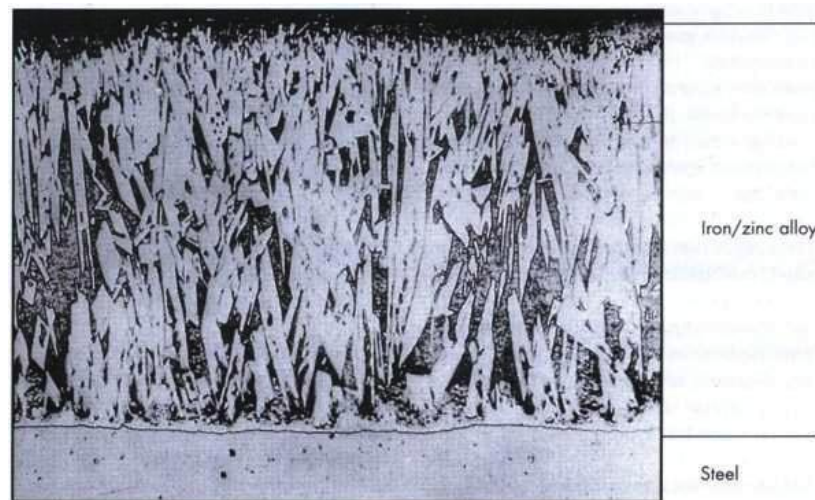
จากผลรายงานวิจัยที่ผ่านมายืนยันได้ว่าธาตุซิลิกอนเป็นธาตุที่ส่งผลต่อการทำปฏิกิริยาระหว่างสังกะสีและเหล็ก รวมถึงยังส่งผลต่อโครงสร้างทางจุลภาคของชั้นสารประกอบโลหะเฟสเซต้า ซึ่งลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคจะมีขนาดเกรนของเฟสเซต้าที่เล็กหามีปริมาณของซิลิกอนอยู่น้อยและจะมีเกรนที่มีรูปร่างขนาดที่ยาวหากมีปริมาณซิลิกอนอยู่มาก ดังภาพที่ 2.19 และ 2.20 อย่างไรก็ตามผลกระทบจากธาตุซิลิกอนไม่ได้ส่งผลกระทบเพิ่มขึ้นเป็นรูปแบบเส้นตรงแต่แสดงผลกระทบของปริมาณซิลิกอนดังภาพที่ 2.17



ภาพที่ 2.18 แสดงความสัมพันธ์ของระยะเวลาในการจุ่มร้อนกับความหนาของชั้นสังกะสีที่เกิดขึ้นที่ปริมาณซิลิกอนต่างๆกัน



ภาพที่ 2.19 แสดงลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคของเหล็กที่ประกอบด้วยธาตุซิลิกอน 0.06% ที่ผ่านการชุบเคลือบสังกะสีที่อุณหภูมิ 460 องศาเซลเซียส



ภาพที่ 2.20 แสดงลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคของเหล็กที่ประกอบด้วยธาตุซิลิกอน 0.26% ที่ผ่านการชุบเคลือบสังกะสีที่อุณหภูมิ 460 องศาเซลเซียส

และจากงานวิจัยต่อมาพบว่าธาตุที่ส่งผลต่อการทำปฏิกิริยาระหว่างสังกะสีและเหล็กอีกชนิดหนึ่งนั่นคือธาตุฟอสฟอรัสซึ่งเรียกผลกระทบของการทำปฏิกิริยาระหว่างโลหะและสังกะสีจากธาตุชนิดนี้ว่าตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งส่งผลกระทบต่อปฏิกิริยาใกล้เคียงกับธาตุซิลิกอน [10, 12] โดยในช่วง 30 ปีที่ผ่านมาได้มีความพยายามในการพัฒนาเหล็กชุบสังกะสีอย่างต่อเนื่อง ทั้งในด้านขั้นตอนการผลิต ตลอดจนลักษณะองค์ประกอบและสมบัติของวัสดุ ตัวอย่างเทคโนโลยีการชุบสังกะสีได้รับการพัฒนาขึ้น ซึ่งในบางส่วนได้เริ่มนำไปใช้อย่างแพร่หลายแล้วนั้น มีดังนี้ [25]

1. เทคนิคัลลวานีล (Galvanneal) เป็นเทคนิคการนำเหล็กชุบสังกะสีไปอบความร้อนที่อุณหภูมิประมาณ 500 องศาเซลเซียส ให้เกิดโครงสร้างเฟสเหล็ก-สังกะสีอินเทอร์เมทัลลิกโดยสม่ำเสมอในชั้นเคลือบ วัสดุที่ได้มีชั้นเคลือบที่มีความแข็งและยึดติดกับผิวได้ดี นำไปเชื่อมได้ง่ายและผิวด้านนอกสามารถยึดเกาะกับสีทาได้ดี

2. เทคนิคัลลวาลูม (Galvalume) เป็นเทคนิคการชุบสังกะสีในบ่อสังกะสีที่มีอะลูมิเนียมผสมอยู่ในปริมาณร้อยละ 55 ที่อุณหภูมิใกล้ 600 องศาเซลเซียส ไอร์ออน-อะลูมิเนียม-ซิงค์ อินเทอร์เมทัลลิกอัลลอย (Fe-Al-Zn intermetallic alloy) ที่เกิดขึ้นในชั้นเคลือบ ส่งผลให้เหล็ก Galvalume มีความต้านทานการกัดกร่อนที่สูงกว่าเหล็กชุบสังกะสีแบบทั่วไปถึง 5 เท่าเมื่อเทียบที่การใช้งาน 10 ปี และสูงกว่า 2 เท่าเมื่อใช้งานไป 30 ปี อย่าวไรก็ดี ประสิทธิภาพของเหล็ก Galvalume ในเชิงการป้องกันแบบแคโทดิกนั้นต่ำกว่าเหล็กชุบสังกะสีแบบทั่วไป

3. เทคนิคัลฟาน (Galvan) เป็นเทคนิคการชุบสังกะสีในบ่อสังกะสีที่มีอะลูมิเนียมผสมอยู่ในปริมาณร้อยละ 5 ที่อุณหภูมิ 425 องศาเซลเซียส ชั้นเคลือบที่เกิดขึ้นมีสังกะสีเป็นหลักและไม่มีชั้นเหล็ก-สังกะสีอินเทอร์เมทัลลิก ส่งผลให้เหล็ก Galvan มีประสิทธิภาพในการตัดและขึ้นรูปที่ดี เฟสยูเทกติก (eutectic phase) ในชั้นเคลือบซึ่งประกอบด้วยสังกะสีและอะลูมิเนียมนั้นมีการสร้างพาสซีฟ ทำให้มีความต้านทานการกัดกร่อนที่สูง โดยหลังจากผ่านไป 10 ปี พบว่า เหล็ก Galvan ทนต่อการกัดกร่อนกว่าเหล็กชุบสังกะสีทั่วไปถึง 2 เท่า

4. เทคนิคัลปีวา (Technigalva) เป็นเทคนิคการชุบสังกะสีที่มีการผสมนิกเกิลในปริมาณร้อยละ 0.5 ในบ่อสังกะสี เพื่อช่วยลดอัตราการเกิดปฏิกิริยาที่รวดเร็วของเหล็กและสังกะสีในขณะชุบร้อน หรือที่เรียกว่า Sandelin effect โดยมักพบปัญหาในการชุบชิ้นงานเหล็กที่มีปริมาณซิลิกอนสูงอยู่ในช่วงร้อยละประมาณร้อยละ 0.07-0.15 โดยน้ำหนัก ซึ่งทำให้ได้ชั้นเหล็ก-สังกะสีอินเทอร์เมทัลลิกของชั้นเคลือบมีความหนาได้มากกว่า 400 ไมโครเมตร ส่งผลให้ใช้สังกะสีในปริมาณมากเกินไป

5. การเติมธาตุผสม (Alloying element addition) ได้มีการศึกษาพัฒนาเทคนิคการชุบสังกะสีโดยมีการเจือธาตุชนิดต่างๆในบ่อสังกะสีเพื่อปรับปรุงสมบัติน้ำสังกะสี เช่น อะลูมิเนียม ไทเทเนียม นิกเกิล-บิสมาท สำหรับช่วยลดอัตราการโตของชั้นเคลือบ แมงกานีสสำหรับเพิ่มประสิทธิภาพการป้องกันการกัดกร่อน พลวงสำหรับลดความเหนียวและลดแรงดึงผิวของน้ำสังกะสี เป็นต้น

6. เทคนิคการชุบชั้นรองพื้น (Galvanizing with pre coating) เป็นเทคนิคการชุบสังกะสีที่มีการเคลือบชั้นนิกเกิลรองพื้นให้กับเหล็กก่อนการชุบสังกะสี โดยเทคนิคนี้สามารถลดอัตราการทำปฏิกิริยาที่รวดเร็วของเหล็กและสังกะสีได้ดี ให้ชั้นเคลือบสังกะสีที่บางกว่าปกติประมาณ 3 เท่า นอกจากนี้ ชั้นอินเทอร์เมทัลลิกที่เกิดขึ้นมีซิงค์-นิกเกิล เป็นองค์ประกอบซึ่งมีความต้านทานต่อการกัดกร่อนที่สูง เมื่อเทียบกับเหล็กชุบสังกะสีแบบทั่วไปแล้ว เหล็กชุบสังกะสีชนิดนี้มีความต้านทานการกัดกร่อนที่สูงกว่าอย่างน้อย 4 เท่า

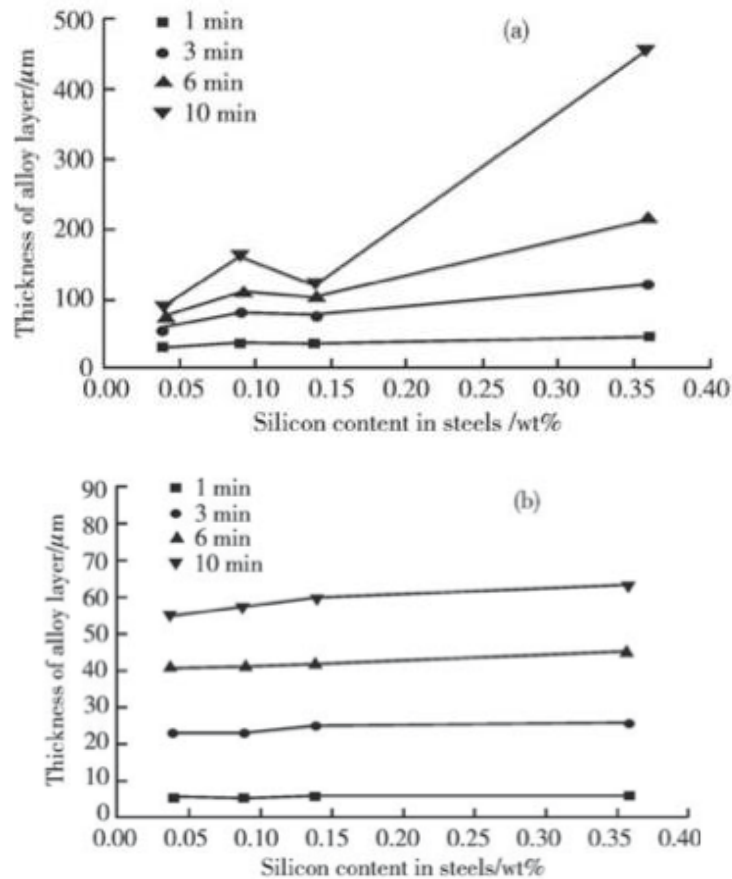
ต่อมาในปี 2007 CHE Chunshan et. Al [12] ได้ศึกษางานวิจัยและพบว่าผลของธาตุซิลิกอนนั้นส่งผลกระทบต่อการทำปฏิกิริยาระหว่างเหล็กและสังกะสีส่งผลให้ความหนาของชั้นเคลือบที่หนาเกินไป จึงได้มีการศึกษาการยับยั้งความหนาของสังกะสีที่เกิดจากปัจจัยของธาตุซิลิกอน โดยพบว่ามียุทธศาสตร์ที่สามารถใช้ยับยั้งปฏิกิริยาระหว่างเหล็กและสังกะสีที่

รวดเร็วจากผลของซิลิกอน อาทิเช่น Polygalva , กระบวนการจุ่มร้อนที่อุณหภูมิสูง และ Techicgalva ซึ่งเป็นกระบวนการที่นิยมมากที่สุดโดยเป็นการเติมโลหะผสมของธาตุ निकเกิด - สังกะสีลงไปบ่อสังกะสีหลอมเหลวแต่วิธีนี้จะทำให้เกิดกากของสังกะสี (dross) บริเวณผิวของ บ่อสังกะสีหลอมเหลวเป็นจำนวนมากอีกทั้งยังสามารถใช้กระบวนการนี้ได้กับเหล็กที่มีปริมาณ ซิลิกอนเป็นองค์ประกอบไม่เกิน 0.25 เปอร์เซนต์จะเห็นได้ว่าแต่ละกระบวนการก็จะมีข้อจำกัดและ ข้อเสียของแต่ละกระบวนการ

โดยในงานวิจัยก่อนหน้านี้ได้มีผู้สนใจศึกษาการเคลือบผิวหน้าของเหล็กด้วย निकเกิด - ฟอสฟอรัสโดยใช้วิธีการชุบแบบไม่ใช้ไฟฟ้าก่อนทำการชุบเคลือบสังกะสีด้วยวิธีการจุ่มร้อน ซึ่ง สามารถยับยั้งชั้นสารประกอบโลหะเหล็ก-สังกะสี (intermediate) ที่โตเกินไปได้ แต่อย่างไรก็ตาม วิธีนี้ก็ยังมีความข้อจำกัดอยู่ตรงความเสถียรของสารละลายที่ใช้ในการชุบเคลือบและข้อเสียของ निकเกิด - ฟอสฟอรัสที่มีต่อชั้นเคลือบ จึงนำมาสู่แนวคิดในการทำการชุบเคลือบเหล็กด้วย निकเกิด โดยใช้ กระบวนการชุบไฟฟ้าโดยควบคุมความหนาของชั้นรองพื้น निकเกิดคงที่ตลอดการทดลองที่ความ หนา 3 ไมครอน จากนั้นจึงนำไปชุบสังกะสี โดยจะทำการเปลี่ยนปริมาณของซิลิกอนในเหล็กที่ ทดสอบ และเวลาในการชุบสังกะสี แล้วจึงทำการเปรียบเทียบกับเหล็กที่ไม่ได้ผ่านการชุบเคลือบ รองพื้นด้วย निकเกิด

จากภาพที่ 2.21(a) แสดงให้เห็นถึงผลของซิลิกอนในเหล็กกล้าในกระบวนการชุบเคลือบ สังกะสีด้วยวิธีจุ่มร้อนที่อุณหภูมิในการชุบ 450 องศาเซลเซียส แสดงให้เห็นถึงผลจากความเป็น Sandelin ซึ่งชั้นเคลือบอัลลอยของชั้นงานที่ไม่ได้ผ่านการชุบเคลือบชั้น निकเกิดรองพื้นจะมีความ หนาที่สูงเมื่อเหล็กประกอบไปด้วยซิลิกอนตั้งแต่ 0.09% ถึง 0.36%Si และเมื่อทำการชุบเคลือบชั้น รองพื้น निकเกิดด้วยวิธีการชุบไฟฟ้าเป็นความหนา 3 ไมครอน จะพบว่าความหนาของชั้นเคลือบอัล ลอยจะลดลงอย่างมากดังแสดงในรูปภาพที่ 2.21 (b) ซึ่งความหนาของชั้นเคลือบอัลลอยโดยเฉลี่ย จะมีค่าน้อยกว่า 60 ไมครอน หากทำการชุบเคลือบเหล็กด้วยสังกะสีโดยปราศจากชั้น निकเกิดรอง พื้นนั้นสารประกอบทางโลหะที่เกิดขึ้นเป็นเฟสแรกได้แก่ เฟสเซต้า เนื่องจากเป็นไปตามสูตรของ สารประกอบ พันธะเคมี การเติบโตของเฟสเซต้าที่เป็นกลุ่มก้อนผิดปกติ เป็นอีกเหตุผลหนึ่งที่ทำให้ สังกะสีทำปฏิกิริยากับเหล็กได้อย่างรวดเร็วทำให้ชั้นความหนาเพิ่มขึ้น เมื่อทำการชุบเคลือบชั้นรอง พื้น निकเกิดก่อนทำการชุบเคลือบสังกะสีแล้ว สารประกอบเชิงโลหะจากปฏิกิริยาระหว่างสังกะสี และเหล็กจะยังไม่เกิดขึ้นระหว่างชั้นเหล็กและสังกะสีหลอมเหลวแต่จะเกิดขึ้นระหว่างชั้นเหล็ก Γ_2 -

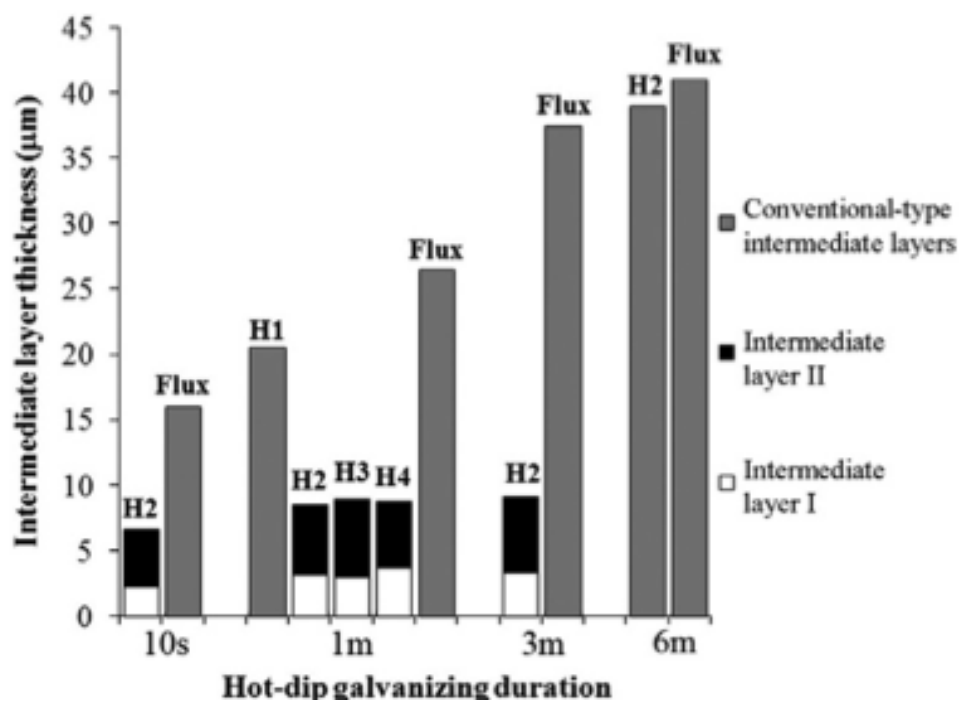
Fe-Zn-Ni แทน เนื่องจากการแพร่ระหว่างของแข็งและของแข็งนั้นมีอัตราการแพร่ที่ช้ากว่าการแพร่ระหว่างของแข็งและของเหลวจึงทำให้การแพร่ของสังกะสีช้าลง



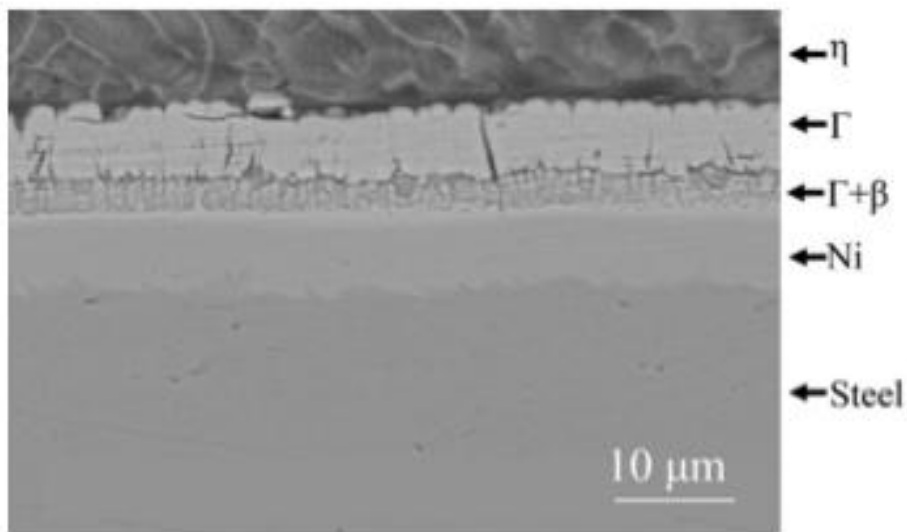
ภาพที่ 2.21 ปริมาณของซิลิกอนเทียบกับความหนาของชั้นอัลลอยที่ได้จากการจุ่มร้อนที่อุณหภูมิ 450°C โดยทำการเปลี่ยนแปลงเวลาในการจุ่มร้อน (a) ปราบจากชั้นของนิกเกิล (b) ทำการชุบนิกเกิลที่ความหนา 3 ไมครอน ก่อนทำการจุ่มร้อน

อีกวิธีที่สามารถใช้ชุบเคลือบชั้นรองพื้นนิกเกิลได้ก็คือการชุบเคลือบแบบใช้ไฟฟ้าสามารถให้ผลคล้ายคลึงกับวิธีการชุบแบบไม่ใช้ไฟฟ้า คือชั้นรองพื้นนิกเกิลสามารถควบคุมและยับยั้งการเกิดปฏิกิริยาระหว่างเหล็กและสังกะสีหลอมเหลวได้ทำให้ชั้นเคลือบโลหะผสมเหล็กและสังกะสีหลอมเหลวลดลงได้ อีกทั้งยังปรับปรุงสมบัติด้านการต้านทานการกัดกร่อนดีเพิ่มขึ้นอีกด้วย โดยในงานวิจัยของ Sa-nguanmoo et. al ได้แสดงการศึกษางานวิจัยไว้ว่า เมื่อทำการชุบเคลือบสังกะสีหลอมเหลวบนชิ้นงานที่ผ่านการชุบเคลือบชั้นรองพื้นนิกเกิลแล้วนั้น ชั้นสารประกอบโลหะเหล็ก -

สังกะสี (Intermediate) มีความหนาที่ลดลงอย่างมากดังแสดงในภาพที่ 2.22 และ 2.23 โดยชิ้นงาน H2 เป็นชิ้นงานที่ผ่านการชุบเคลือบชั้นรองพื้นนิกเกิลที่มีความหนา 6 ไมครอน และผ่านการชุบเคลือบสังกะสีแบบจุ่มร้อนเป็นระยะเวลา 10 วินาที 1 นาที 3 นาที และ 6 นาที ตามลำดับ แต่เมื่อระยะเวลาในการชุบเคลือบสังกะสีเพิ่มขึ้นจนถึงระยะเวลา 6 นาที ชั้นรองพื้นนิกเกิลจะละลายสู่ข้อชุบสังกะสีจนหมด ทำให้เกิดปฏิกิริยาอย่างรวดเร็วระหว่างเหล็กและสังกะสีหลอมเหลวอีกครั้งหนึ่ง

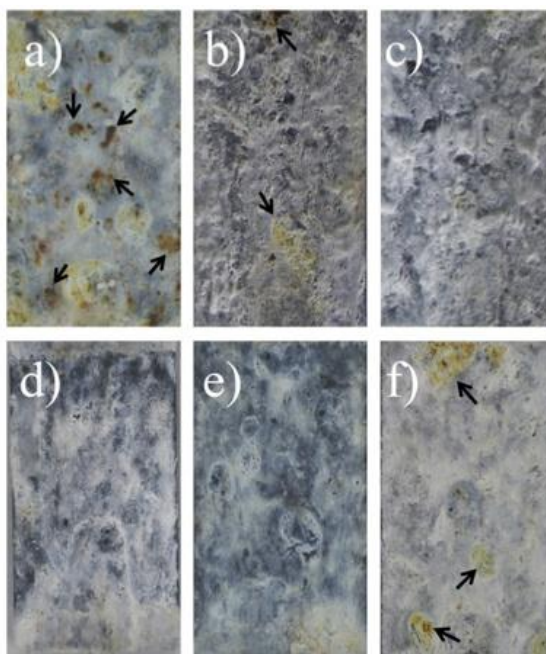


ภาพที่ 2.22 ความหนาเฉลี่ยของชั้นเคลือบของเหล็กชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนโดยการเคลือบชั้นรองพื้นนิกเกิลด้วยไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงระยะเวลาในการจุ่มร้อนในช่วง 10 วินาทีถึง 6 นาที



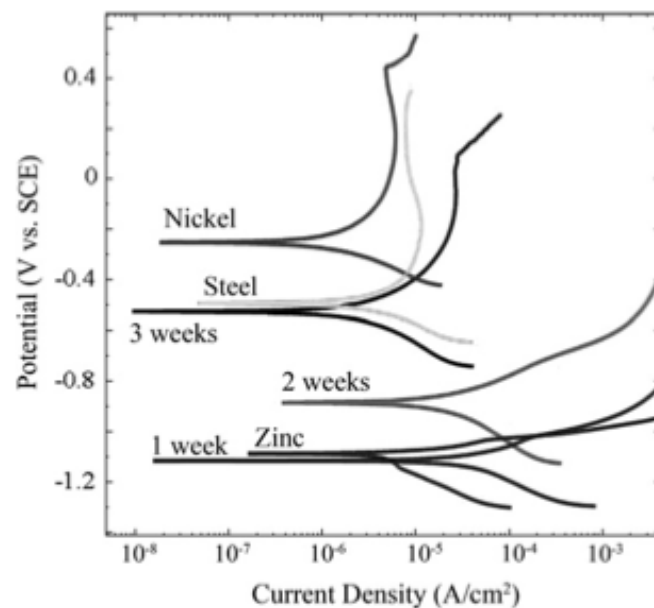
ภาพที่ 2.23 โครงสร้างจุลภาคของเหล็กชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อน H4-1m โดยการเคลือบชั้นรองพื้น นิกเกิลด้วยไฟฟ้าจากกล่องจูลทอร์ศนอเล็กตรอนแบบสแกนนิ่งที่กำลังขยาย 2000 เท่า

อีกปัจจัยหลักที่มีการเริ่มพัฒนาระบบการเคลือบผิวหน้าของเหล็กด้วยนิกเกิลดังกล่าวมาแล้วนั้นคือ ชั้นสารประกอบโลหะที่เกิดขึ้นมีซิงค์-นิกเกิล เป็นองค์ประกอบซึ่งมีความต้านทานต่อการกัดกร่อนที่สูงกว่าการชุบเคลือบสังกะสีแบบจุ่มร้อนทั่วไปอีกด้วย ซึ่ง ผลการทดสอบความคงทนต่อละอองน้ำเกลือบ่งชี้ว่าถึงแม้ว่าชั้นเคลือบของเหล็กชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อน โดยการเคลือบชั้นรองพื้นนิกเกิลด้วยไฟฟ้าจะมีความบางกว่าเหล็กชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนโดยวิธีดั้งเดิมมากกว่า 2 เท่าแต่สมบัติความต้านทานการกัดกร่อนจากการทดสอบความคงทนต่อละอองน้ำเกลือกลับมากกว่าถึง 2 เท่า ซึ่งส่วนหนึ่งเป็นผลจากการที่ชั้นเคลือบสารประกอบโลหะที่เกิดขึ้นระหว่างเหล็กและสังกะสีที่ประกอบด้วยสังกะสีและนิกเกิลนั้นมีความอัดแน่นมากกว่าทำให้สามารถทำหน้าที่เป็นตัวกีดขวางการแทรกซึมของไอออนที่ทำให้เกิดการกัดกร่อนรุนแรงเช่น Cl^- และ ClO_4^- ในสภาวะแวดล้อมที่มีคลอไรด์สูง [3]



ภาพที่ 2.24 ลักษณะทางกายภาพของชิ้นงานเหล็กชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนโดยวิธีดั้งเดิม(a)และโดยการเคลือบชั้นรองพื้นนิกเกิลด้วยไฟฟ้า H1(b), H2(c), H3(d) และ H4(e) โดยกำหนดระยะเวลาในการชุบสังกะสี 1 นาที และชิ้นงาน H2 ที่ผ่านการชุบสังกะสี 6 นาที(f) ผ่านการภายหลังจากการทดสอบความคงทนต่อไอเกลือที่ระยะเวลา 1400 ชั่วโมง

จากผลของกราฟแสดงเส้นโค้งโพลาริเซชันในภาพที่ 2.25 จากการพิจารณาในภาพรวมสามารถแสดงให้เห็นได้ว่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆตามระยะทางที่ลึกลงไปจากผิวชั้นเคลือบที่เป็นสังกะสีด้านบนสู่ผิวเหล็ก แต่อย่างไรก็ตามศักย์ไฟฟ้าเหล่านี้ยังคงต่ำกว่าศักย์ไฟฟ้าของนิกเกิลและเหล็กที่เป็นโลหะที่ต้องการจะป้องกันการกัดกร่อน และการที่ชั้นเคลือบด้านในมีศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนที่สูงกว่าชั้นเคลือบด้านนอกทำให้ชั้นเคลือบด้านนอกสามารถทำหน้าที่เป็นแซ็กคริฟิเชียลแอนโนดป้องกันการกัดกร่อนแบบคาโทดิกให้กับชั้นเคลือบด้านในได้ ซึ่งสอดคล้องกับสมบัติความต้านทานการกัดกร่อนที่ดีเยี่ยมของชั้นเคลือบสังกะสี-นิกเกิลที่ผลิตจากการผลิตชั้นรองพื้นและผลจากการทดสอบความคงทนต่อละอองน้ำเกลือ [3]

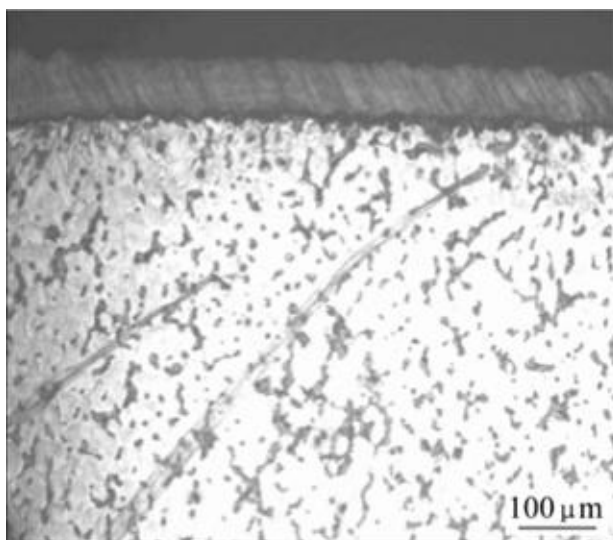


ภาพที่ 2.25 กราฟโพลาริเซชันของชิ้นงานแผ่นเหล็กชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนโดยการเคลือบชั้นรองพื้นนิกเกิลด้วยไฟฟ้า H2-1m ที่ถูกเก็บไว้ในในสารละลายเกลือ 5% เป็นระยะเวลา 0-3 สัปดาห์ ด้วยเทคนิคโพเทนชิโอดินามิกส์

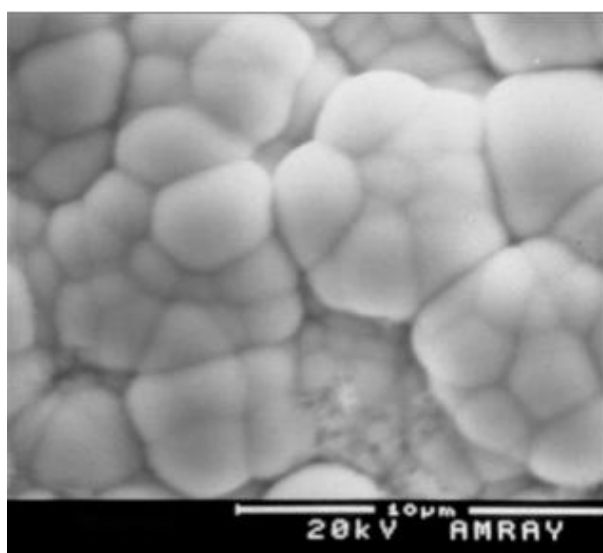
ในปี 2008 LI Zhong-hou et. al [26] ได้ศึกษาการต้านทานการกัดกร่อนของชั้นเคลือบ นิกเกิลฟอสฟอรัสที่ทำการชุบเคลือบบนโลหะผสมแมกนีเซียม AD91D ด้วยวิธีการชุบแบบไม่ใช้ ไฟฟ้าโดยมีตัวแปรในการชุบไฟฟ้างานวิจัยของ LI Zhong-hou et. Al และมีบางชิ้นงานภาย หลังจากการชุบเคลือบไฟฟ้าจะถูกการเทมเปอร์ (Temper) เพื่อเปรียบเทียบคุณสมบัติ โดยจะทำการเปรียบเทียบสมบัติด้านต้านทานการกัดกร่อนกับชิ้นงานที่ไม่ได้ผ่านการชุบเคลือบ นิกเกิล ฟอสฟอรัสและออสติเนติกสแตนเลสสตีล (Austenite stainless steel) โดยทำการวิเคราะห์ด้วย เทคนิคเคมีไฟฟ้าโพเทนทิโอดินามิกในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 3.5% และระยะเวลาในการ ทดสอบจะทดสอบจนชิ้นงานนั้นเริ่มมีการเปลี่ยนสีหรือมีจุดการกัดกร่อนเกิดขึ้นจึงหยุดการทดสอบ ทันที

รูพรุนเล็กๆขนาด 0.25 ตารางเซนติเมตรที่เกิดภายหลังจากการชุบเคลือบแบบไม่ใช้ไฟฟ้า ดังแสดงในรูปภาพที่ 2.26 และ 2.27 ซึ่งแสดงภาพตัดขวางและโครงสร้างผิวของชั้นเคลือบ ตามลำดับ ซึ่งจากภาพตัดขวางแสดงให้เห็นว่าชั้นเคลือบนิกเกิลนั้นมีความหนาแน่นมาก ไม่พบจุด ต่ำหนิต่างๆ ความหนาของชั้นเคลือบหนาประมาณ 50 ไมครอนประกอบด้วยปริมาณของ

ฟอสฟอรัสประมาณ 10 เปอร์เซ็นต์จากการตรวจสอบด้วย GDS (Glow discharge spectrometry) เมื่อใช้กำลังขยายสูงวิเคราะห์โครงสร้างพื้นผิวของชั้นเคลือบพบว่าภายในหนึ่งเกรนจะประกอบไปด้วยอนุภาคเป็นจำนวนมากและไม่พบรอยตำหนิบริเวณรอยต่อของขอบเกรน ดังภาพที่ 2.26 [26]



ภาพที่ 2.26 แสดงภาพตัดขวางของชั้นงานที่ผ่านการชุบเคลือบนิกเกิลแบบไม่ใช้ไฟฟ้า

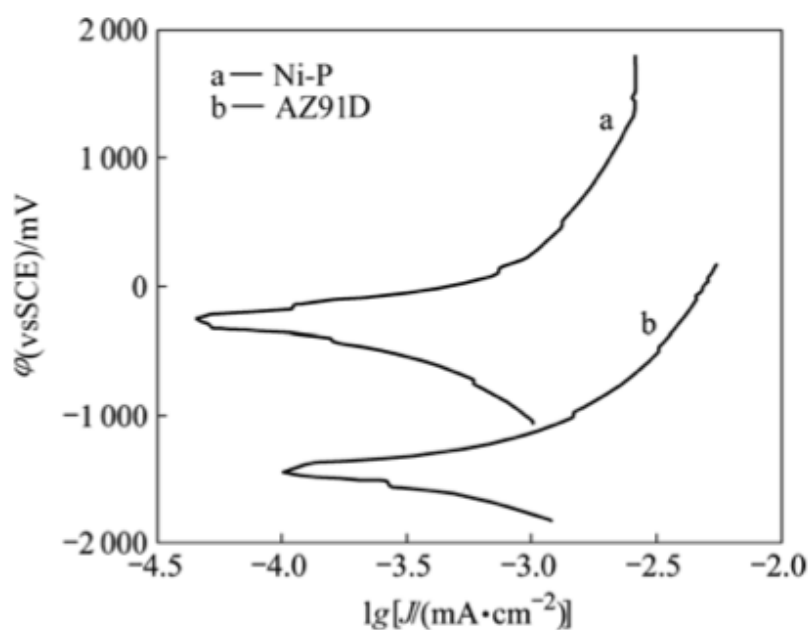


ภาพที่ 2.27 แสดงโครงสร้างผิวของชั้นเคลือบนิกเกิลที่ทำการชุบแบบไม่ใช้ไฟฟ้า

เมื่อทำการทดสอบความต้านทานการกัดกร่อนโดยทำการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคเคมีไฟฟ้า โปเทนทิโอสแตติกในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 3.5% เป็นระยะเวลาหนึ่งพบว่าชั้นเคลือบนั้นไม่

มีการเปลี่ยนสีของชั้นเคลือบจนกระทั่งจุ่มชิ้นงานเป็นระยะเวลา 4 วัน จึงมีการเปลี่ยนแปลงของสีของชั้นเคลือบเกิดขึ้น และจุดตำหนิเริ่มต้นของการกัดกร่อนจะพบหลังจากชิ้นงานจุ่มอยู่ในสารละลายเป็นระยะเวลา 5 วัน [26]

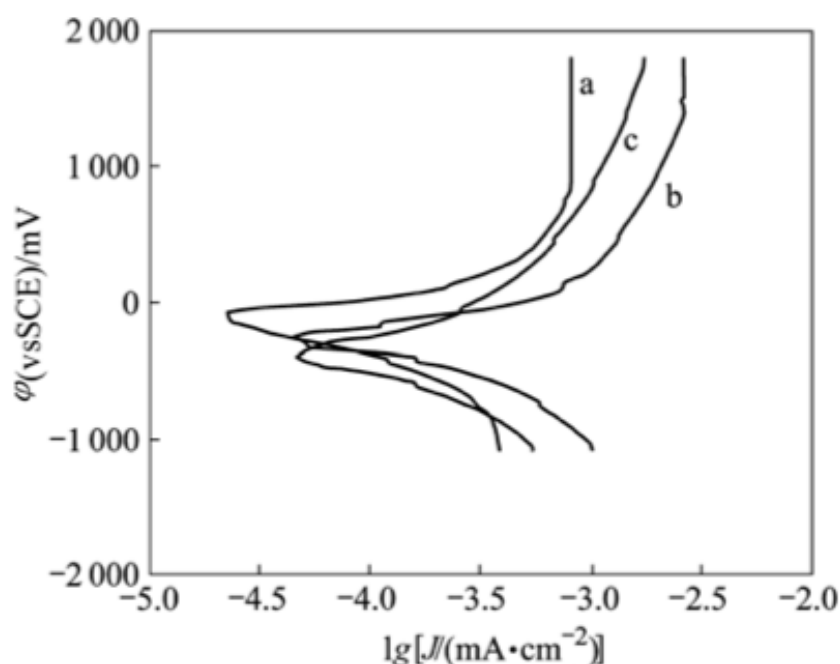
ภาพที่ 2.28 แสดงกราฟโพลาไรเซชันของโลหะผสมแมกนีเซียม AZ91D และโลหะผสมแมกนีเซียม AZ91D ที่ผ่านการชุบเคลือบนิกเกิลแบบไม่ใช้ไฟฟ้า และสำหรับกราฟโพลาไรเซชันที่แสดงในภาพที่ 2.28 จะเป็นการเปรียบเทียบระหว่างโลหะผสมแมกนีเซียม AZ91D ที่ผ่านการชุบเคลือบนิกเกิลแบบไม่ใช้ไฟฟ้า โลหะผสมแมกนีเซียม AZ91D ที่ผ่านการชุบเคลือบนิกเกิลแบบไม่ใช้ไฟฟ้าที่ผ่านการเทมเปอร์ (Temper) และเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนติก (Austenite stainless steel)



ภาพที่ 2.28 แสดงกราฟโพลาไรเซชันของโลหะผสมแมกนีเซียม AZ91D ที่ผ่านการชุบเคลือบนิกเกิลแบบไม่ใช้ไฟฟ้า a) และไม่ผ่านการชุบไฟฟ้า b)

จากรูปภาพที่ 2.28 พบว่าศักย์ไฟฟ้าของการกัดกร่อนจะเพิ่มขึ้นจาก -1500 mV ไปเป็น -250 mV ภายหลังจากทำการชุบเคลือบนิกเกิลแบบไม่ใช้ไฟฟ้ารวมถึงกระแสโพลาไรเซชันจะมีค่าน้อยกว่าโลหะแมกนีเซียม AZ91D ที่ไม่ได้ผ่านการชุบเคลือบชั้นนิกเกิลที่ตำแหน่งศักย์ไฟฟ้าเดียวกัน จากกราฟโพลาไรเซชันจะเห็นว่าไม่ปรากฏบริเวณพาสซีฟ (Passivation) ในชิ้นงานโลหะแมกนีเซียม AZ91D ที่ไม่ผ่านการชุบเคลือบนิกเกิลแต่สำหรับชิ้นงานที่ผ่านการชุบเคลือบนั้นจะ

ปรากฏบริเวณพาสซีฟที่ศักย์ไฟฟ้าประมาณ 1350 mV ซึ่งสามารถบ่งบอกได้ว่าโลหะแมกนีเซียม AZ91D ที่ผ่านการชุบเคลือบนิเกิลแบบไม่ใช้ไฟฟ้าจะมีความทนทานต่อการกัดกร่อนที่สูงกว่าโลหะแมกนีเซียม AZ91D ที่ไม่ได้ผ่านการชุบเคลือบชั้นนิเกิล ชั้นเคลือบที่มีความหนาแน่นสูงของนิเกิลฟอสฟอรัสนั้นมีเป็นชั้นที่ปกป้องโลหะผสมแมกนีเซียม ZA91D จากการกัดกร่อนปานกลางที่มีปริมาณรูพรุนในเนื้อโลหะอยู่เล็กน้อยได้เป็นอย่างดี



ภาพที่ 2.29 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างเหล็กกล้าไร้สนิมออสติเนติก a) โลหะผสมแมกนีเซียม AZ91D ที่ผ่านการชุบเคลือบนิเกิลแบบไม่ใช้ไฟฟ้า b) โลหะผสมแมกนีเซียม AZ91D ที่ผ่านการชุบเคลือบนิเกิลแบบไม่ใช้ไฟฟ้าที่ผ่านการเทมเปอร์ (Temper) c)

รูปภาพที่ 2.29 แสดงศักย์ไฟฟ้าของการกัดกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิมออสติเนติกอยู่ที่ -100 mV โลหะผสมแมกนีเซียม AZ91D ที่ผ่านการชุบเคลือบนิเกิลแบบไม่ใช้ไฟฟ้าอยู่ที่ -300 โลหะผสมแมกนีเซียม AZ91D ที่ผ่านการชุบเคลือบนิเกิลแบบไม่ใช้ไฟฟ้าที่ผ่านการเทมเปอร์อยู่ที่ -350 และสำหรับกระแสไฟฟ้าของการกัดกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิมออสติเนติกจะน้อยกว่าชั้นเคลือบนิเกิลฟอสฟอรัส และกระแสไฟฟ้าของการกัดกร่อนของชิ้นงานโลหะแมกนีเซียมที่ผ่านการชุบเคลือบชั้นนิเกิลนั้นจะมีค่าเท่ากับชิ้นงานที่ผ่านการชุบเคลือบชั้นนิเกิลและผ่านการเทมเปอร์ด้วย ซึ่งแสดงให้เห็นว่าผลของการทำเทมเปอร์ชิ้นงานภายหลังจากการชุบเคลือบชั้นนิเกิลส่งผลต่อความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อนเพียงเล็กน้อย [26]

บทที่ 3 ระเบียบวิธีวิจัย

3.1 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้สำหรับทำงานวิจัย

ในการศึกษางานวิจัยนี้จำเป็นต้องใช้เครื่องมือต่างๆ ในการเตรียมชิ้นงาน การเตรียมผิวชิ้นงาน และการวิเคราะห์ตรวจสอบโครงสร้างและเฟสต่างๆ ซึ่งเครื่องมือที่มีความจำเป็นได้แก่

3.1.1 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการเตรียมชิ้นงาน ได้แก่

- 3.1.1.1 เหล็กแผ่น hypo-sandelin และเหล็กฉาก hyper-sandelin JIS G3101 SS400
- 3.1.1.2 เตาลอหมสังกะสี
- 3.1.1.3 ด่างโซเดียมไฮดรอกไซด์ NaOH 10 %wt
- 3.1.1.4 กรดไฮโดรคลอริก HCl 14 %wt
- 3.1.1.5 เอทานอล (Ethanol)
- 3.1.1.6 สารละลายสำหรับชุบเคลือบโลหะผสมนิกเกิล-ฟอสฟอรัสแบบไม่ใช้ไฟฟ้า
- 3.1.1.7 อ่างให้ความร้อนสำหรับทำการชุบเคลือบ

3.1.2 อุปกรณ์ และสารเคมีที่ใช้สำหรับเตรียมผิวชิ้นงานเพื่อศึกษาโครงสร้างจุลภาค ได้แก่

- 3.1.2.1 กระดาษทรายขัด เบอร์ 180 , 240 , 400 , 800 และ 1200
- 3.1.2.2 ผงเพชรขนาด 3 ไมครอน และ 6 ไมครอน
- 3.1.2.3 เครื่องขัดผิวโลหะ
- 3.1.2.4 เครื่องตัดชิ้นตัวอย่างความเร็วต่ำ (Low speed cutting machine)

3.1.3 เครื่องมือวิเคราะห์ตรวจสอบโครงสร้างและเฟสต่างๆ ที่เกิดขึ้นภายในและสมบัติของชิ้นงานหลังจากชุบสังกะสี ได้แก่

- 3.1.3.1 เครื่องทดสอบความคงทนต่อละอองน้ำเกลือ (Salt Spray Tester)
- 3.1.3.2 กล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Optical microscope ,OM) ใช้ศึกษาลักษณะของโครงสร้างเบื้องต้นของเฟสที่เกิดขึ้น
- 3.1.3.3 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนนิ่ง (Scanning electron microscope, SEM) ใช้ศึกษาลักษณะและโครงสร้างของเฟสที่เกิดขึ้น

- 3.1.3.4 เครื่องวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุด้วยการวิเคราะห์การกระจายพลังงาน (Energy dispersive spectroscopy, EDS) ใช้วัดปริมาณองค์ประกอบของธาตุในแต่ละเฟสของชั้นเคลือบสารประกอบโลหะที่เกิดขึ้นระหว่างเหล็กและสังกะสี
- 3.1.3.5 เครื่องวิเคราะห์ด้วยไมโครด้วยลำอิเล็กตรอน (Electron Probe Microanalysis , EPMA) ใช้วิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุในแต่ละเฟสของชั้นเคลือบสารประกอบโลหะที่เกิดขึ้นระหว่างเหล็กและสังกะสี
- 3.1.3.6 เครื่องโพเทนชิโอมิเตอร์ (Potentiometer) และชุดอุปกรณ์ทดสอบการกัดกร่อนด้วยเครื่องโพเทนชิโอมิเตอร์เพื่อศึกษาสมบัติความต้านทานการกัดกร่อน

3.2 ระเบียบวิธีการวิจัย

ก่อนที่จะทำการผลิตสังกะสีแบบจุ่มร้อนโดยการเคลือบชั้นรองพื้นโลหะผสมนิกเกิลแบบไม่ใช้ไฟฟ้าทุกครั้งนั้น แผ่นเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำจะต้องผ่านการเตรียมผิวก่อนด้วยการกำจัดคราบสนิมหรือสิ่งสกปรกที่ติดมากับชิ้นงานในเบื้องต้นด้วยการขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์ 180 แล้วล้างด้วยเอทานอลในเครื่องอัลตราโซนิคเป็นเวลา 5 นาที หลังจากนั้นทำการล้างคราบไขมันซึ่งจะนำแผ่นเหล็กไปแช่ในด่างโซเดียมไฮดรอกไซด์ 10 wt% ที่อุณหภูมิ 60 °C เป็นเวลา 10 นาทีแล้วล้างด่างออกให้หมดด้วยน้ำ จากนั้นจึงนำไปกำจัดออกไซด์ของเหล็กออกด้วยการแช่ในกรดไฮโดรคลอริก 14 wt% เป็นเวลา 20 นาทีแล้วจึงล้างกรดออกให้หมดด้วยน้ำซึ่งจะทำให้ได้ผิวของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำที่บริสุทธิ์ โดยเหล็กที่ได้จะต้องนำมาผลิตชั้นรองพื้นโลหะผสมนิกเกิลซึ่งเป็นกระบวนการต่อไปทันทีเพื่อป้องกันการกลับมาเกิดสนิม ในการผลิตชั้นรองพื้นโลหะผสมนิกเกิลแบบไม่ใช้ไฟฟ้า ชิ้นงานที่เป็นแผ่นเหล็กจะถูกจุ่มอยู่ในสารละลายสำหรับการชุบเคลือบโลหะผสมนิกเกิลแบบไม่ใช้ไฟฟ้า

3.2.1 การศึกษากระบวนการชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนโดยมีการชุบเคลือบชั้นรองพื้นโลหะผสมนิกเกิล-ฟอสฟอรัส แบบไม่ใช้ไฟฟ้า

เตรียมสารละลายปริมาตร 150 มิลลิลิตร เพื่อทำการชุบแบบไม่ใช้ไฟฟ้าในบีกเกอร์ขนาด 150 มิลลิลิตร ใส่น้ำกลั่นปริมาตร 100 มิลลิลิตร ลงในบีกเกอร์ จากนั้นชั่งสารเคมีนำมาละลายในบีกเกอร์ดังกล่าว เรียงตามลำดับ

โซเดียมซีเทรต ($\text{Na}_3\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)	0.12 M
แอมโมเนียมซัลเฟต ($(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$)	0.28 M
นิกเกิลซัลเฟต ($\text{NiSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$)	0.08-0.6 M
ไทโอยูเรีย (Thiourea)	0.8 ppm
โซเดียมไฮโปฟอสไฟต์ ($\text{NaH}_2\text{PO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$)	0.08-0.76 M

จากนั้น วัด pH ของสารละลายและปรับ pH ของสารละลายด้วย 10% NaOH (w/w) ตาม pH ที่ต้องการศึกษา (pH= 8,9,10,11) และปรับปริมาตรของสารละลายให้ครบ 150 มิลลิลิตร ด้วยน้ำกลั่น นำปฏิกิริยาสารละลาย electroless แช่ใน water bath ปิดด้วยกระจกนาฬิกา รอจนกระทั่งได้อุณหภูมิที่คงที่ 60 ± 2 องศาเซลเซียส จากนั้นนำชิ้นงานจุ่มลงในสารละลาย ที่เตรียมไว้ ให้สารละลายท่วมทั้งชิ้นงาน ปิดด้วยกระจกนาฬิกา จะสังเกตเห็นว่ามีฟองก๊าซเกิดขึ้นโดยปูดขึ้นที่ผิวชิ้นงานและลอยขึ้นสู่น้ำตลอดเวลา แช่ชิ้นงานทิ้งไว้ตามระยะเวลาที่กำหนดและนำชิ้นงานขึ้นจากสารละลาย ล้างด้วยน้ำ ทำให้แห้งด้วย Dryer นำไปชั่งน้ำหนักและวัดความหนาของชั้นเคลือบ จากนั้นนำชิ้นงานที่ได้ทั้งหมดมาชุบสังกะสีที่อุณหภูมิสังกะสีหลอมเหลว 450°C เป็นเวลาตามที่กำหนด แล้วจึงนำไปศึกษาโครงสร้างเบื้องต้น

3.2.2 การผลิตเหล็กชุบสังกะสีโดยวิธีดั้งเดิมด้วยการใช้น้ำยาเชื่อมประสานทั่วไป ($\text{ZnCl}_2 \cdot 3\text{NH}_4\text{Cl}$) เพื่อเป็นชิ้นงานเปรียบเทียบ

ผลิตเหล็กชุบสังกะสีโดยวิธีดั้งเดิม ที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส โดยแผ่นเหล็กจะถูกนำไปจุ่มในน้ำยาเชื่อมประสานและถูกอบให้แห้งก่อนนำไปชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนต่อไป

3.2.3 การศึกษาการพัฒนาของโครงสร้างจุลภาคและเฟสที่เกิดขึ้น

3.2.3.1 การศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคที่เปลี่ยนแปลงไปตามความหนาของชั้นรองพื้นโลหะผสมนิกเกิล

ทำการชุบเคลือบชั้นรองพื้นนิกเกิลแบบไม่ใช้ไฟฟ้าโดยทำการแปรเปลี่ยนระยะเวลาในการชุบชั้นรองพื้นโลหะผสมนิกเกิลเป็นระยะเวลา 1 นาที, 3 นาที, 10 นาที, 15 นาที และ 20 นาที ชิ้นงานทั้งหมดจะถูกนำไปทดสอบโครงสร้างจุลภาคและวิเคราะห์เฟสที่เกิดขึ้นด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาดและกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงต่อไป

3.2.3.2 การศึกษาโครงสร้างและเฟสของเหล็กชุบสังกะสีที่เปลี่ยนแปลงไปตามระยะเวลาในการชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อน

ทำการเคลือบชั้นรองพื้นโลหะผสมนิกเกิลแบบไม่ใช้ไฟฟ้าโดยทำการคงที่แบบจุ่มร้อนโดยผลิตเหล็กชุบสังกะสีความหนาชั้นโลหะผสมนิกเกิลไว้ที่ค่าหนึ่ง แต่แปรเปลี่ยนระยะเวลาในการชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนที่ 5 วินาที, 10 วินาที, 60 วินาที และ 100 วินาที ซึ่งงานทั้งหมดจะถูกนำไปทดสอบโครงสร้างจุลภาคและวิเคราะห์เฟสที่เกิดขึ้นด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาดและกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงต่อไป

3.2.3.3 การวิเคราะห์ด้วยไมโครด้วยลำอิเล็กตรอน (Electron Probe Microanalysis, EPMA)

เลือกชิ้นงานเหล็กชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนโดยการเคลือบชั้นรองพื้นนิกเกิลแบบไม่ใช้ไฟฟ้ามา 1 ชุดตัวอย่าง และทำการวิเคราะห์หาองค์ประกอบของธาตุ ด้วยเครื่องวิเคราะห์รุ่น 1610 (Shimadzu)

3.2.4 การทดสอบการดัดโค้ง (T-Bend Flexibility Test)

เลือกชิ้นงานเหล็กชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนโดยการเคลือบชั้นรองพื้นนิกเกิลแบบไม่ใช้ไฟฟ้ามา 1 ตัวอย่างแล้วยึดชิ้นงานด้วยตัวจับชิ้นงาน จากนั้นจึงทำการดัดโค้งชิ้นงานไป 90 องศา แล้วทำการดัดโค้งกลับมาที่ตำแหน่งเดิมอีกครั้ง โดยโครงสร้างทางกายภาพและจุลภาคของชิ้นงานที่เปลี่ยนแปลงไปขณะถูกดัดโค้งทำมุม 90 องศาและขณะดัดโค้งกลับมาที่ตำแหน่งเดิมจะถูกศึกษาจากภาพตัดขวางของชิ้นงานเปรียบเทียบกับชิ้นงานเหล็กชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนโดยวิธีดั้งเดิม

3.2.5 การทดสอบสมบัติความต้านทานต่อการกัดกร่อน

3.2.5.1 การทดสอบความคงทนต่อละอองน้ำเกลือ (Salt Spray Tester)

เลือกชิ้นงานเหล็กชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนโดยการเคลือบชั้นรองพื้นนิกเกิลด้วยแบบไม่ใช้ไฟฟ้ามา 1 ชุดเพื่อทำการเปรียบเทียบกับเหล็กชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนโดยวิธีดั้งเดิมโดยวางชิ้นงานไว้ในเครื่องทดสอบความคงทนต่อละอองน้ำเกลือ ซึ่งสภาวะและวิธีในการทดสอบเป็นไปตาม ASTM B117 และทำการเก็บชิ้นงานมาเพื่อตรวจสอบการเกิดสนิมแดงตามระยะเวลาที่เหมาะสม

3.2.5.2 การทดสอบ ความต้านทานการกัดกร่อนโดยเทคนิคโพเทนชิโอดีนามิกส์ (Potentiodynamic)

เลือกชิ้นงานมาทำการเก็บไว้ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 5 wt% เป็นระยะเวลา 0-3 สัปดาห์ ทำแล้วติดตามพฤติกรรม การกัดกร่อนของชิ้นเคลือบในแต่ละชั้นด้วยเทคนิคโพเทนชิโอดีนามิกส์ซึ่งในการทดสอบนั้นชิ้นงานขนาดพื้นที่ ตารางเซนติเมตรทำหน้าที่เป็นขั้วไฟฟ้า 2 แอโนดและมีแพลทินัมเป็นขั้วไฟฟ้าคาโทด โดยที่ขั้วไฟฟ้าทั้งสองอยู่ในสารละลายเกลือที่เป็นอิเล็กโทรไลต์โซเดียมคลอไรด์ % 5ทดสอบเทียบกับขั้วไฟฟ้าอ้างอิงมาตรฐานชนิด Saturated Calomel Electrode, SCE โดยตั้งค่าโปรแกรมการทดสอบดังนี้ [22]

- วัดค่าศักย์ไฟฟ้าวงจรมืด (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) จากค่าศักย์ไฟฟ้าวงจรมืด และค่าศักย์ไฟฟ้าสุดท้าย (Stop potential) เท่ากับ 0.750 V v.s SCE จากค่าศักย์ไฟฟ้าวงจรมืด

บทที่ 4 ผลการทดลองและการอภิปราย

4.1 การศึกษาผลของตัวแปรบางประการต่อระบบของการชุบเคลือบโลหะผสมนิกเกิล-ฟอสฟอรัสแบบไม่ใช้ไฟฟ้า

4.1.1 ผลของความเข้มข้นของตัวแปรบางประการในสารละลายต่ออัตราการชุบเคลือบในการผลิตชิ้นร่องพื้นโลหะผสมนิกเกิล-ฟอสฟอรัสแบบไม่ใช้ไฟฟ้า

เหล็กแผ่นขนาด 5 x 2 x 0.20 ตารางเซนติเมตร ที่ใช้ในงานศึกษานี้เป็นเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด JIS SS-400 ซึ่งเป็นเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ มีการใช้สำหรับงานโครงสร้างทั่วไป โดยมีส่วนผสมทางเคมีดังแสดงในตารางที่ 4.1 ซึ่งหลังจากผ่านการเตรียมผิวแล้ว แผ่นเหล็กจะถูกนำไปผ่านกระบวนการชุบโลหะผสมนิกเกิล -ฟอสฟอรัสแบบไม่ใช้ไฟฟ้า โดยมีชนิดและปริมาณของสารในสารละลายที่ศึกษาและถูกปรับเปลี่ยนดังแสดงในตารางที่ 4.2 ซึ่งตัวอย่างลักษณะทางกายภาพของชิ้นงานเบื้องต้นแสดงไว้ดังภาพที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าคาร์บอนรีดร้อน JIS SS400

ธาตุ	C	Cr	Mn	Al	N	P	S	Si	Fe
(wt.%)	0.151	0.07	0.45	0.56	0.00080	0.00463	0.011	0.005	Bal.

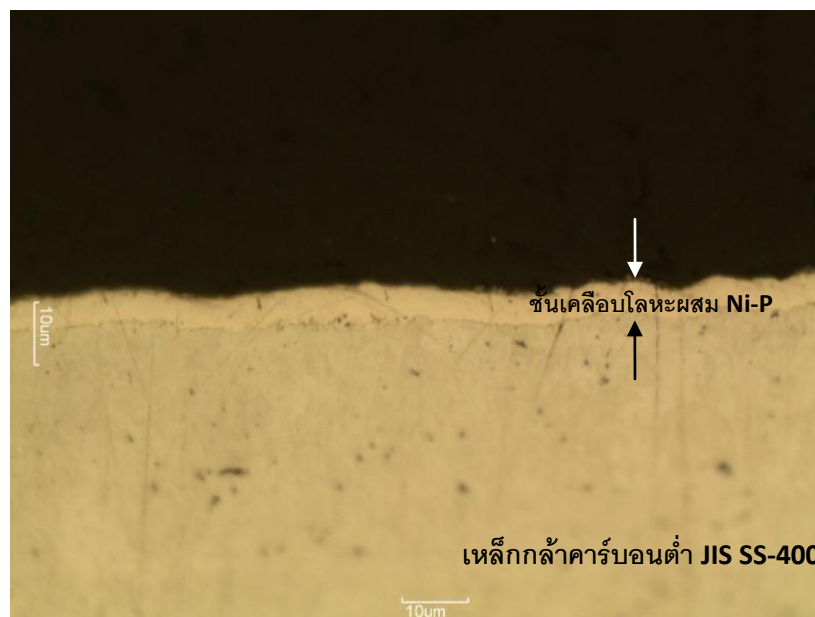
ในงานวิจัยนี้จะมุ่งเน้นทำการศึกษาค่าตัวแปรบางชนิดของกระบวนการผลิตที่มีผลต่ออัตราการชุบเคลือบโลหะผสมนิกเกิล-ฟอสฟอรัสแบบไม่ใช้ไฟฟ้าที่คงที่ที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นอุณหภูมิในกระบวนการผลิตที่ค่อนข้างต่ำเมื่อเทียบกับกระบวนการชุบเคลือบผิวแบบไม่ใช้ไฟฟ้าด้วยกระบวนการปกติแต่ยังคงสภาวะการให้อัตราการชุบเคลือบที่สูง โดยทำการปรับเปลี่ยนส่วนผสมและความเข้มข้นของสารแต่ละชนิดจากสารละลายที่มีส่วนผสมทางเคมีตามตารางที่ 4.2 ซึ่งได้แก่ปริมาณของรีดิวซ์ซิงเจนท์ แหล่งกำเนิดไอออนของโลหะ และพีเอชของสารละลาย ซึ่งผลการวิเคราะห์ทดลองเบื้องต้นได้แสดงตัวอย่างภาคตัดขวางของโครงสร้าง ทางจุลภาคของชิ้นงานเหล็กแผ่นรีดร้อนที่ผ่านการชุบเคลือบโลหะผสมนิกเกิล-ฟอสฟอรัสแบบไม่ใช้ไฟฟ้าได้ดังภาพที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ส่วนผสมทางเคมีของสารละลายที่ใช้สำหรับชุบโลหะผสมนิกเกิล-ฟอสฟอรัสแบบไม่ใช้ไฟฟ้า

หน้าที่ของสาร	ชนิดของสาร	ปริมาณความเข้มข้น
Nickel Source	Nickel Sulphate ($\text{NiSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$)	0.08, 0.15, 0.30, 0.60 M
Reducing Agent	Sodium Hypophosphite	0.08, 0.19, 0.38, 0.76 M
Complexing Agent	($\text{NaH}_2\text{PO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$)	0.12 M
Buffer	Sodium Citrate ($\text{Na}_3\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)	0.28 M
Stabilizer	Ammoniums Sulphate ($(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$)	0.8 ppm
	Thiourea ($\text{CS}(\text{NH}_2)_2$)	8, 9, 10, 11
	pH	65 °C
	Temperature	

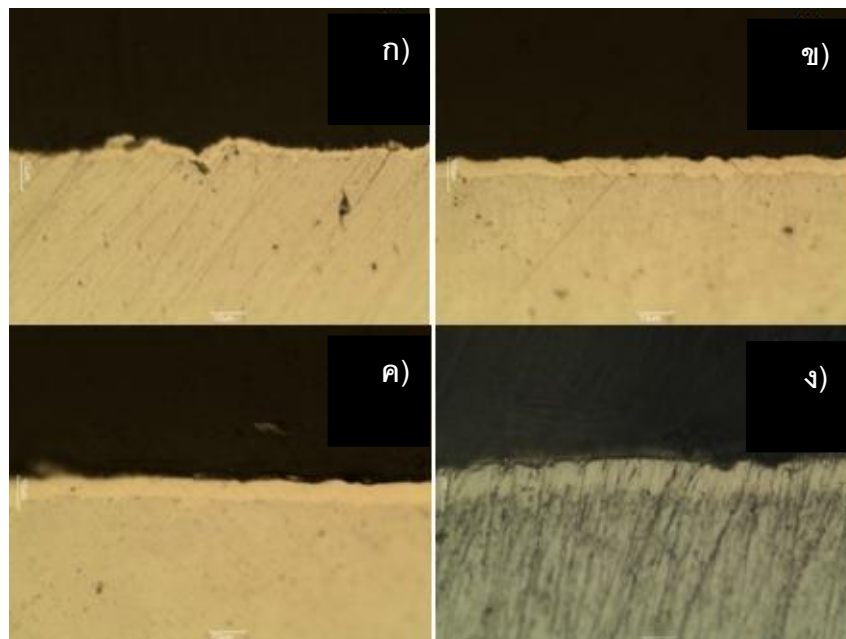


ภาพที่ 4.1 แสดงตัวอย่างของชิ้นงาน ก) เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำเกรด JIS SS-400 ข) เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำเมื่อผ่านการชุบเคลือบผิวด้วยโลหะผสมนิกเกิล-ฟอสฟอรัสแบบไม่ใช้ไฟฟ้า



ภาพที่ 4.2 แสดงตัวอย่างโครงสร้างทางจุลภาคตัดขวางของเหล็กแผ่นรีดร้อนเคลือบชั้นรองพื้นโลหะผสมนิกเกิล-ฟอสฟอรัสแบบไม่ใช้ไฟฟ้าที่กำลังขยาย 500 เท่า ส่วนผสมของสารละลายประกอบด้วย นิกเกิลซัลเฟต 0.15 M, โซเดียมไฮโปฟอสไฟท์ 0.19 M, pH = 9 และส่วนผสมทางเคมีดังตารางที่ 4.2

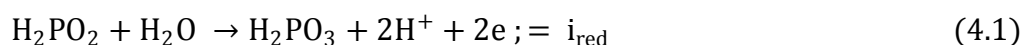
ในการศึกษาผลของตัวแปรต่างๆต่ออัตราการชุบเคลือบในการผลิตชั้นรองพื้นโลหะผสมนิกเกิล-ฟอสฟอรัสแบบไม่ใช้ไฟฟ้านั้น จะเริ่มต้นศึกษาผลของปริมาณความเข้มข้นของโซเดียมไฮโปฟอสไฟท์ ซึ่งทำหน้าที่เป็นรีดิวซ์ซึ่งเอเจนท์ให้กับระบบการเกิดปฏิกิริยาของการชุบเคลือบที่ความเข้มข้น 0.08 M, 0.19 M, 0.38 M, 0.76 M ตามลำดับ โดยจะคงที่ปริมาณของ metal ions sources หรือแหล่งกำเนิดไอออนของโลหะ ซึ่งในที่นี้ใช้เป็นนิกเกิลซัลเฟตปริมาณความเข้มข้น 0.15 M และส่วนผสมอื่นๆตามตารางที่ 4.2 โดยทำการทำการชุบเคลือบชิ้นงานที่ผ่านการเตรียมผิวชิ้นงานเรียบร้อยแล้วที่อุณหภูมิคงที่ที่ 65 องศาเซลเซียส มีค่าพีเอชของสารละลายเท่ากับ 9 เป็นระยะเวลา 20 นาที จากนั้นนำชิ้นงานทั้งไปวัดความหนาของชั้นเคลือบโดยดาร์ตตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคจากภาคตัดขวางซึ่งแสดงผลได้ดัง ภาพที่ 4.3 ผลจากการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงแสดงให้เห็นว่าค่าความหนาของชั้นเคลือบโลหะผสมนิกเกิล-ฟอสฟอรัสจะแปรผันตามปริมาณความเข้มข้นของไฮโปฟอสไฟท์ในสารละลายที่เพิ่มขึ้น โดยค่าความหนาของชั้นเคลือบที่ได้มีค่า 2.14 , 4.17, 6.56 และ 8.91 ไมครอน ตามลำดับ



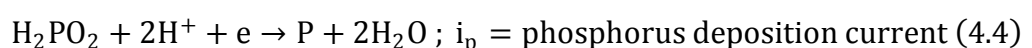
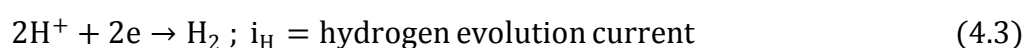
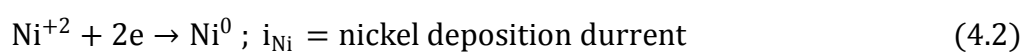
ภาพที่ 4.3 แสดงภาพโครงสร้างทางจุลภาคแบบตัดขวางของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการชุบเคลือบโลหะผสมนิกเกิล-ฟอสฟอรัสแบบไม่ใช้ไฟฟ้า ซึ่งแปรผันตามปริมาณความเข้มข้นของโซเดียมไฮโปฟอสไฟท์ ก) 0.08 M ข) 0.19 M ค) 0.38 M ง) 0.76 M

จากผลการทดลองข้างต้นสามารถอธิบายถึงผลของความเข้มข้นของโซเดียมไฮโปฟอสไฟท์ซึ่งทำหน้าที่เป็นรีดิวซ์ซึ่งเอเจนต์ได้ในทฤษฎีของปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีของกระบวนการชุบเคลือบแบบไม่ใช้ไฟฟ้า ซึ่งประกอบด้วยปฏิกิริยาครึ่งส่วนแคโทดิกหรือปฏิกิริยารีดักชันไฮดรอกไซด์ของโลหะและปฏิกิริยาครึ่งส่วนแอโนดิกหรือปฏิกิริยาออกซิเดชันของรีดิวซ์ซึ่งเอเจนต์ โดยอิเล็กตรอนสำหรับใช้ในปฏิกิริยารีดักชันจะได้รับมาจากปฏิกิริยาออกซิเดชันของรีดิวซ์ซึ่งเอเจนต์ ซึ่งทำให้ไฮดรอกไซด์ของนิกเกิลเปลี่ยนรูปไปอยู่ในรูปของแข็งนิกเกิลชุบเคลือบลงบนผิวชิ้นงานดังแสดงได้ดังสมการที่ 4.1-4.4 [23]

ปฏิกิริยาออกซิเดชัน : กระแสปฏิกิริยาออกซิเดชันของไฮโปฟอสไฟท์



ปฏิกิริยารีดักชัน : กระแสปฏิกิริยารีดักชันของนิกเกิลไฮดรอกไซด์



เมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงของค่าความเข้มข้นของสารแต่ละชนิดในระบบไปจากระบบ สมดุลของระบบปฏิกิริยา จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงไปของศักย์ไฟฟ้าของระบบปฏิกิริยา ซึ่งในที่นี่เกิดการปรับเปลี่ยนค่าความเข้มข้นของไฮโปฟอสไฟท์ (H_2PO_2) ซึ่งเป็นสารตั้งต้นในระบบสมการออกซิเดชัน จะทำให้ศักย์ไฟฟ้าของระบบสมการนั้นเปลี่ยนแปลงไปจากเดิมโดยมีค่า ศักย์ไฟฟ้าที่สูงขึ้นเมื่อปริมาณไฮโปฟอสไฟท์สูงขึ้นตามหลักการของ Nernst's equation , $E = E_0 - \left(\frac{RT}{zF}\right) \ln\left(\frac{[\text{red}]}{[\text{ox}]}\right)$ ซึ่งการเปลี่ยนแปลงไปของศักย์ไฟฟ้านี้ยังสามารถส่งผลถึงค่ากระแส โดยรวมของสมการ ซึ่งเป็นกระแสที่บ่งบอกถึงค่าความสามารถหรืออัตราเร็วของการชุบเคลือบ กระบวนการโลหะผสมนิกเกิล -ฟอสฟอรัส ซึ่งการอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างกระแสโดยรวมของ ปฏิกิริยาและศักย์ไฟฟ้าสามารถอธิบายได้โดยใช้หลักการของทฤษฎีศักย์ไฟฟ้าผสม (Mix potential theory) ที่จะทำให้ทราบค่าของกระแสที่เกิดขึ้นเมื่อศักย์ไฟฟ้าเกิดการเปลี่ยนแปลงไป ซึ่งในที่นี่ศักย์ไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไปได้แก่ศักย์ไฟฟ้าของระบบสมการออกซิเดชันที่เพิ่มขึ้น ซึ่งส่งผลให้กระแสของระบบสมการแอโนดิก (i_a) มีค่าสูงเพิ่มขึ้นด้วย [27] จึงทำให้กระแสโดยรวมของ ระบบสมการของปฏิกิริยาเพิ่มสูงขึ้นซึ่งความสัมพันธ์ของกระแสในการชุบเคลือบสามารถแสดงได้ ดังสมการที่ 4.5 [23]

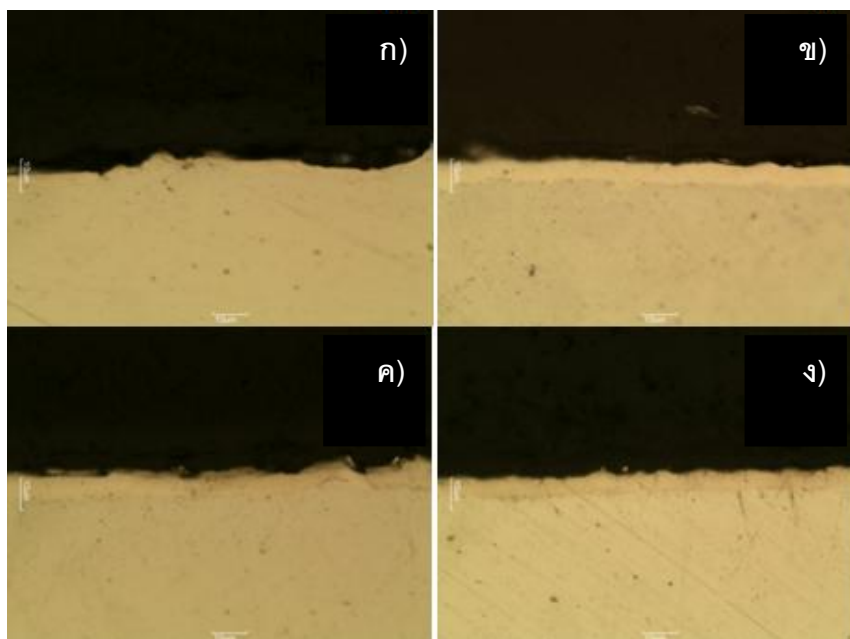
$$i_{\text{deposition}} = i_{\text{reducing}} = i_{\text{Ni}} + i_{\text{H}} + i_{\text{P}} \quad (4.5)$$

กระแสของการชุบเคลือบหรือกระแสโดยรวมที่เกิดขึ้นได้ของปฏิกิริยานั้นมีความสัมพันธ์ กับอัตราการชุบเคลือบตามหลักสมการของฟาราเดย์ (Faraday's Law) ซึ่งสามารถแสดงถึงอัตราการ ชุบเคลือบของนิกเกิลที่ขึ้นกับกระแสของการชุบเคลือบได้ความสัมพันธ์ของสมการ ดังสมการที่ 4.6

$$\text{Rate} \left(\frac{\text{mg}}{\text{cm}^2 \text{hr}}\right) = 1.09 \times i_{\text{dep}} \left(\frac{\text{mA}}{\text{cm}^2}\right) \quad (4.6)$$

โดยจากสมการจะแสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการชุบเคลือบที่เปลี่ยนแปลง ไปซึ่งมีความสัมพันธ์ที่แปรผันตามค่ากระแสของการชุบเคลือบ ดังนั้นเมื่อกระแสรวมของปฏิกิริยา ของการชุบเคลือบเพิ่มสูงขึ้นก็จะทำให้อัตราการชุบเคลือบเพิ่มสูงขึ้นด้วย ดังนั้นจึงเป็นเหตุผลที่ว่า เมื่อเพิ่มปริมาณของไฮโปฟอสไฟท์ให้แก่ระบบจึงเปรียบเสมือนการเพิ่มศักย์ไฟฟ้าให้แก่ ระบบทำให้กระแสของกระบวนการชุบเคลือบเพิ่มสูงขึ้นซึ่งเป็นผลให้อัตราการชุบเคลือบเพิ่มสูงขึ้น ด้วย

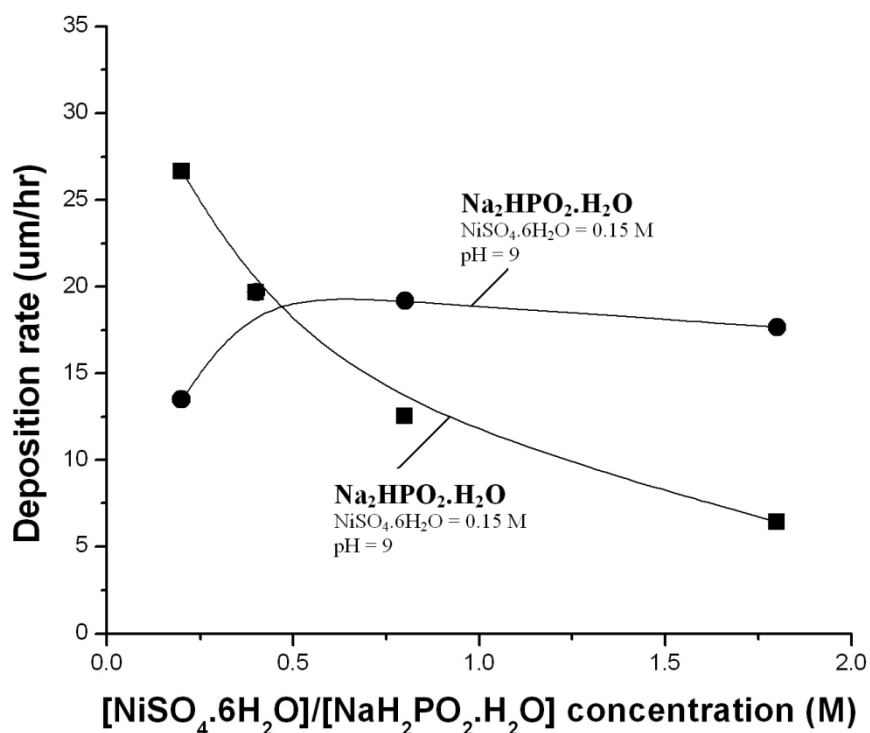
ในขั้นตอนถัดไปได้ทำการวิเคราะห์ ถึงผลของปริมาณของแหล่งกำเนิดไอออนของโลหะ นิกเกิล (metal ions source) ซึ่งในที่นี้ใช้เป็นนิกเกิลซัลเฟต ถูกพิจารณาและเลือกทำการวิเคราะห์ ที่ความเข้มข้นต่างๆกันที่ 0.08 M, 0.15 M, 0.30 M และ 0.60 M ตามลำดับ โดยจะใช้ปริมาณของ วัสดุซึ่งเอเจนท์ซึ่งก็คือ โซเดียมไฮโปฟอสไฟท์ที่ 0.38 M และส่วนผสมอื่นๆตามตารางที่ 4.2 ทำ การชุบเคลือบที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 20 นาที ที่มีค่าพีเอชของสารละลายเท่ากับ 9 จากนั้นนำชิ้นงานทั้งหมดไปตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคจากภาคตัดขวางเพื่อวัดความหนาของ ชั้นเคลือบได้ผลแสดงดังภาพที่ 4.4 ซึ่งผลจากการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง แสดงให้ เห็นว่าค่าความหนาของชั้นเคลือบโลหะผสมนิกเกิล-ฟอสฟอรัสจะที่ได้มีค่า 4.47 , 6.56, 6.39 และ 5.89 ไมครอน ตามลำดับ จากค่าความหนาของชั้นเคลือบที่เกิดขึ้นพบว่าในช่วงแรกเมื่อเพิ่ม ปริมาณของนิกเกิลซัลเฟตจะทำให้อัตราการชุบเคลือบนั้นเพิ่มสูงขึ้น ทั้งนี้เป็นเพราะเนื่องจากการ เพิ่มปริมาณของนิกเกิลซัลเฟตจะเสมือนเป็นการเพิ่มนิกเกิลไอออน (สารตั้งต้น) ให้แก่สารละลาย เพื่อใช้ในปฏิกิริยารีดักชันที่เปลี่ยนจากนิกเกิลไอออนเป็นของแข็งนิกเกิลได้มากขึ้นดังสมการ ปฏิกิริยารีดักชันที่ 4.2 ซึ่งทำให้อัตราการชุบเคลือบสูงขึ้นได้ แต่หลังจากที่เพิ่มปริมาณนิกเกิล ซัลเฟตในระบบให้เพิ่มสูงขึ้นอีกกลับพบว่าอัตราการชุบเคลือบนั้นไม่ได้มีค่าสูงขึ้นแต่อย่างใด แต่ กลับพบว่าอัตราการชุบเคลือบมีค่าค่อนข้างที่จะคงที่ ทั้งนี้เนื่องจากในระบบถูกกำหนดให้การ เกิดปฏิกิริยารีดักชันของไอออนนิกเกิลนั้น จะเกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่อได้รับอิเล็กตรอนซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ ที่มาจากปฏิกิริยาออกซิเดชันของโซเดียมไฮโปฟอสไฟท์ หากในระบบของสารละลายมีปริมาณ อิเล็กตรอนที่เพียงพอ เมื่อเพิ่มปริมาณของนิกเกิลซัลเฟตก็จะทำให้อัตราการชุบเคลือบเพิ่มสูงขึ้น ได้ แต่ทั้งนี้หากปริมาณของอิเล็กตรอนไม่เพียงพอซึ่งเกิดจากการเติมสัดส่วนที่ไม่เหมาะสมระหว่าง โซเดียมไฮโปฟอสไฟท์และนิกเกิลซัลเฟตอาจจะทำให้อัตราการชุบเคลือบนั้นไม่เพิ่มสูงขึ้นแม้ว่าจะมี การเพิ่มปริมาณของนิกเกิลซัลเฟตให้กับระบบก็ตาม ทั้งนี้เป็นเพราะปริมาณวัสดุซึ่งเอเจนท์หรือ โซเดียมไฮโปฟอสไฟท์มีค่าคงที่ทำให้ปริมาณของวัสดุซึ่งเอเจนท์ไม่เพียงพอต่อการจ่ายอิเล็กตรอน เพื่อเปลี่ยนนิกเกิลไอออนทั้งหมดในระบบที่เพิ่มสูงขึ้นให้เป็นอนุภาคนิกเกิลชุบเคลือบลงบน ผิวชิ้นงานได้ เนื่องจากโซเดียมไฮโปฟอสไฟท์ถูกใช้ในระบบจนหมด อัตราการชุบเคลือบจึงสามารถ เพิ่มขึ้นได้ในช่วงระยะเวลาที่มีวัสดุซึ่งเอเจนท์อยู่ในระบบเท่านั้น [28] ซึ่งโดยปกติแล้วหากความ เข้มข้นของนิกเกิลซัลเฟตมากกว่า 5 g/l หรือ 0.085 M ขึ้นไปนั้นจะส่งผลต่ออัตราการชุบเคลือบ เพียงเล็กน้อยหรือไม่ส่งผลเลย ซึ่งลำดับของอัตราการเกิดปฏิกิริยาจะถือว่าเป็นศูนย์ [23]



ภาพที่ 4.4 แสดงภาพโครงสร้างทางจุลภาคแบบตัดขวางของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการชุบเคลือบ โลหะผสมนิกเกิล-ฟอสฟอรัสแบบไม่ใช้ไฟฟ้าโดยมีปริมาณของนิกเกิลซัลเฟตในสารละลายสำหรับ ชุบเคลือบที่ความเข้มข้นต่างๆกัน ก) 0.08 M ข) 0.15 M ค) 0.30 M ง) 0.60 M

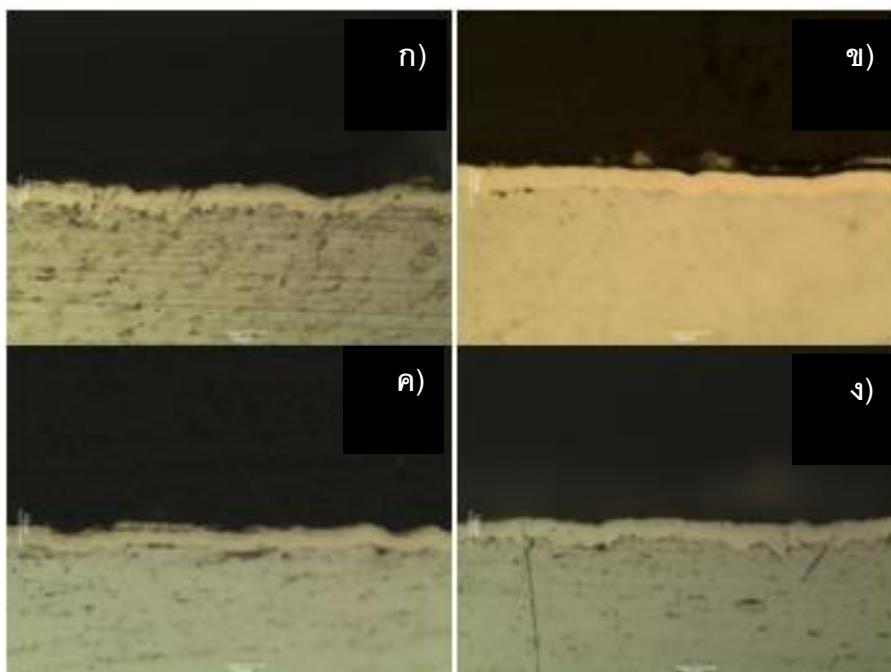
และเมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ของอัตราส่วนโมลที่เหมาะสมระหว่างโซเดียมไฮโปฟอสไฟท์และนิกเกิลซัลเฟต ซึ่งแสดงได้ดังกราฟในภาพที่ 4.5 จะแสดงให้เห็นว่าอัตราการชุบเคลือบจะสูงขึ้นเมื่อปริมาณโซเดียมไฮโปฟอสไฟท์สูงขึ้นในระบบแม้ว่าจะมีปริมาณของนิกเกิลซัลเฟตที่คงที่ก็ตาม แต่ในทางกลับกันหากมีปริมาณโซเดียมไฮโปฟอสไฟท์คงที่ การเพิ่มปริมาณนิกเกิลซัลเฟตในระบบในช่วงแรกจะทำให้อัตราการชุบเคลือบเพิ่มสูงขึ้น แต่ภายหลังจากนั้นอัตราการชุบเคลือบจะค่อนข้างคงที่ หากพิจารณาที่อัตราส่วนโดยโมลของโซเดียมไฮโปฟอสไฟท์และนิกเกิลซัลเฟตที่เท่ากันจะพบว่า สารละลายที่มีปริมาณโซเดียมไฮโปฟอสไฟท์สูงกว่าจะให้อัตราการชุบเคลือบที่สูงกว่า ซึ่งสามารถวิเคราะห์สรุปผลเบื้องต้นได้ว่าโซเดียมไฮโปฟอสไฟท์จะเป็นตัวควบคุมระบบปฏิกิริยาของอัตราการชุบเคลือบโลหะผสมนิกเกิล-ฟอสฟอรัส โดยทำหน้าที่จ่ายอิเล็กตรอนให้กับปฏิกิริยารีดักชันของนิกเกิล จากการทดลองเมื่อวิเคราะห์ถึงตัวแปรที่ส่งผลต่ออัตราการชุบเคลือบที่เหมาะสมของสัดส่วนโดยโมลระหว่างปริมาณของโซเดียมไฮโปฟอสไฟท์และปริมาณของนิกเกิลซัลเฟตแล้วพบว่า ระบบของสารละลายที่ให้อัตราการชุบเคลือบที่ดีที่สุดพร้อมกับยังคงความเสถียรของสารละลายในระบบที่ดีที่สุดด้วย จะประกอบไปด้วยปริมาณของโซเดียมไฮโปฟอสไฟท์ 0.38 M และ

ปริมาณของนิกเกิลซัลเฟต 0.15 M หรือที่อัตราส่วนโดยโมลของนิกเกิลซัลเฟตต่อโซเดียมไฮโปฟอสไฟท์ที่ 0.4 เท่า



ภาพที่ 4.5 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนโมลในการเกิดปฏิกิริยาของอัตราการชุบเคลือบระหว่างปริมาณความเข้มข้นของโซเดียมไฮโปฟอสไฟท์และนิกเกิลซัลเฟตในระบบสารละลาย

ตัวแปรสุดท้ายที่ทำการวิเคราะห์ถึงผลของความเข้มข้นต่ออัตราการชุบเคลือบในการผลิตชั้นรองพื้นโลหะผสมนิกเกิล - ฟอสฟอรัสแบบไม่ใช้ไฟฟ้า นั้นได้แก่ พีเอชของสารละลาย ซึ่งทำการศึกษาค่าความเข้มข้นของพีเอชของสารละลาย โดยปรับเปลี่ยนพีเอชของสารละลายที่ 8, 9, 10 และ 11 ตามลำดับ ซึ่งจะทำการปรับพีเอชของสารละลายด้วย 10% NaOH ซึ่งจะใช้ปริมาณสัดส่วนที่เหมาะสมจากผลการทดลองก่อนหน้านี้ของ โซเดียมไฮโปฟอสไฟท์ 0.38 M และ ปริมาณของนิกเกิลซัลเฟต 0.15 M รวมถึงส่วนผสมอื่นๆตามตารางที่ 4.2 โดยการชุบเคลือบที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 20 นาที จากนั้นนำชิ้นงานทั้งหมดไปตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคจากภาคตัดขวางเพื่อวัดค่าความหนาของชั้นเคลือบได้ผลแสดงดังภาพที่ 4.6 ผลจากการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงแสดงให้เห็นว่าค่าความหนาของชั้นเคลือบโลหะผสมนิกเกิล - ฟอสฟอรัสจะที่ได้มีค่า 5.08 , 6.56, 6.62 และ 6.81 ไมครอน ตามลำดับ

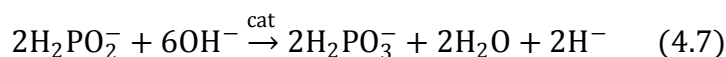


ภาพที่ 4.6 แสดงภาพโครงสร้างทางจุลภาคแบบตัดขวางของชั้นงานที่ผ่านกระบวนการชุบเคลือบโลหะผสมนิกเกิล-ฟอสฟอรัสแบบไม่ใช้ไฟฟ้าโดยมีค่าพีเอชของสารละลาย ก) 8 ข) 9 ค) 10 ง) 11

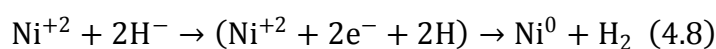
เมื่อพีเอชของสารละลายเพิ่มสูงขึ้นจะทำให้แนวโน้มของอัตราการชุบเคลือบเพิ่มสูงขึ้นไปด้วย โดยในช่วงที่พีเอชของสารละลายมีค่าเท่ากับ 8 อัตราการชุบเคลือบจะมีค่าที่ค่อนข้างต่ำเมื่อเทียบกับสารละลายที่มีค่าพีเอชอื่นๆ แต่เมื่อหลังจากเพิ่มพีเอชของสารละลายให้มีค่าเท่ากับ 9 อัตราการชุบเคลือบจะเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็วทั้งนี้เป็นเพราะการปรับพีเอชของสารละลายให้สูงขึ้นเสมือนเป็นการเพิ่มความเข้มข้นของสารตั้งต้นในปฏิกิริยาแอนอดิกซึ่งแสดงได้ดังสมการที่ 4.7 ซึ่งในขั้นตอนของกระบวนการชุบเคลือบผิวนี้นี้ปฏิกิริยาแอนอดิกจะสร้างผลิตภัณฑ์ออกมาในรูปของไฮโดรเจน (H^-) ซึ่งไฮโดรเจนจะถูกนำไปใช้ในขั้นตอนปฏิกิริยาการถ่ายเทประจุ (Charge transfer step) ของปฏิกิริยารีดักชันนิกเกิลไฮดรอกไซด์เพื่อเปลี่ยนเป็นนิกเกิล [24] ซึ่งแสดงได้ดังสมการที่ 4.8 ดังนั้นเมื่อทำการเพิ่มความเข้มข้นของพีเอชของสารละลายขึ้นเป็น 10 และ 11 จึงเป็นเหตุให้อัตราการชุบเคลือบเพิ่มสูงขึ้นด้วยตามเหตุผลดังกล่าว และด้วยอีกเหตุผลหนึ่งเมื่อพีเอชของสารละลายเกิดการเปลี่ยนแปลงจะทำให้ค่าของศักย์ไฟฟ้าในระบบสมการเปลี่ยนแปลงไป ซึ่งผลของศักย์ไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไปจะทำให้กระแสรวมของการชุบเคลือบเปลี่ยนแปลงไปด้วย ซึ่งเป็น

เหตุผลที่สอดคล้องตามหลักศัลยกรรมไฟฟ้าผสมและกฎของฟาราเดย์ตามที่เคยกล่าววิเคราะห์ไปก่อนหน้านี้

ปฏิกิริยาแอนโอดิก



ปฏิกิริยารีดักชันของนิกเกิลไฮดรอกไซด์



4.1.2 จลนพลศาสตร์ของอัตราการเกิดปฏิกิริยาของกระบวนการชุบเคลือบผิวในการผลิตชั้นรองพื้นโลหะผสมนิกเกิล -ฟอสฟอรัสแบบไม่ใช้ไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส

ในการศึกษาผลของตัวแปรต่างๆต่ออัตราการชุบเคลือบในการผลิตชั้นรองพื้นโลหะผสมนิกเกิล -ฟอสฟอรัสแบบไม่ใช้ไฟฟ้านั้นสามารถอธิบายได้ตามกฎอัตราของสมการอิมพีริคัล (Empirical rate law) โดยสมการได้แสดงผลของปัจจัยต่างๆที่มีผลต่ออัตราการชุบเคลือบโลหะผสมแบบไม่ใช้ไฟฟ้าได้ดังสมการด้านล่าง [20, 23]

$$\text{Rate} = \frac{d\text{Ni}^0}{dt} = K_1 [\text{H}_2\text{PO}_2^-]^\alpha [\text{Ni}^{+2}]^\beta [\text{L}]^\delta [\text{H}^+]^\gamma [\text{H}_2\text{PO}_3^-]^\epsilon \exp - \left(\frac{E_a}{RT} \right) \quad (4.9)$$

เมื่อ	$[\text{H}_2\text{PO}_2^-]$	คือ	ความเข้มข้นของรีดิวซ์ซึ่งเอเจนท์
	$[\text{Ni}^{+2}]$	คือ	ความเข้มข้นของนิกเกิลไฮดรอกไซด์
	$[\text{L}]$	คือ	ความเข้มข้นของคอมเพล็กซ์ซึ่งเอเจนท์
	$[\text{H}^+]$	คือ	ความเข้มข้นของพีเอช

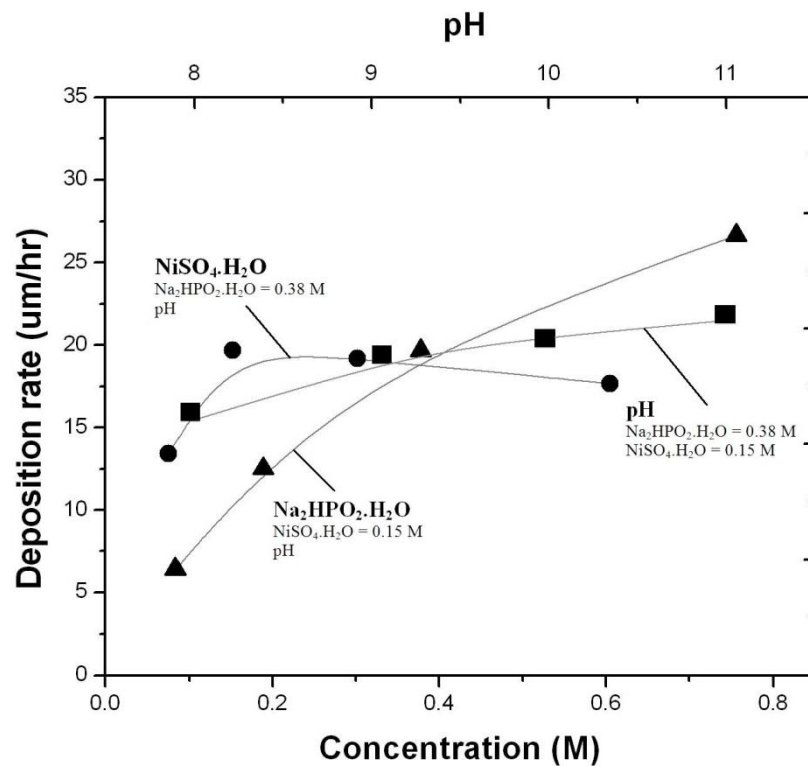
ในที่นี้จะกำหนดให้ออร์โทฟอสไฟท์ (H_2PO_3^-) เป็นผลพลอยได้ของปฏิกิริยาในกระบวนการชุบเคลือบผิวและสะสมอยู่ในระบบของสารละลาย ดังนั้นผลกระทบของออร์โทฟอสไฟท์ต่ออัตราการชุบเคลือบจึงสามารถละเว้นได้ ดังนั้นจึงเขียนสมการได้ดังสมการที่ 4.10 หรือสามารถเขียนสมการในรูปของลอการิทึมดังสมการที่ 4.11

$$\text{Rate} = \frac{d\text{Ni}^0}{dt} = K_1 [\text{H}_2\text{PO}_2^-]^\alpha [\text{Ni}^{+2}]^\beta [\text{L}]^\delta [\text{H}^+]^\gamma \exp - \left(\frac{E_a}{RT} \right) \quad (4.10)$$

$$\log v = \log K_1 + \alpha \log [\text{H}_2\text{PO}_2^-] + \delta \log [\text{L}] + \beta \log [\text{Ni}^{+2}] + \gamma \log [\text{H}^+] - E_a/RT \quad (4.11)$$

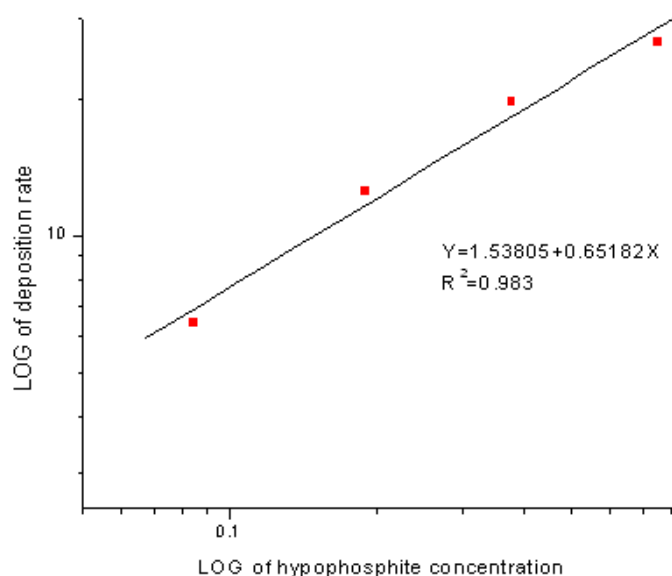
เมื่อ V คือ อัตราการชุบเคลือบในหน่วย ไมครอน/ชั่วโมง (α, δ, β และ γ คือลำดับของการเกิดปฏิกิริยา) T คือ อุณหภูมิในหน่วยเคลวิน E_a คือ พลังงานก่อกัมมันต์

สำหรับค่าลำดับของการเกิดปฏิกิริยานั้นสามารถหาได้จากกราฟความสัมพันธ์ลอการิทึม (logarithm) ระหว่างความเข้มข้นของตัวแปรที่พิจารณาต่ออัตราการชุบเคลือบที่เปลี่ยนแปลงไป ซึ่งจากการวิเคราะห์ผลการทดลองในหัวข้อที่ 4.1.1 เกี่ยวกับผลของตัวแปรต่ออัตราการชุบเคลือบของสารละลายสามารถแสดงข้อมูลในรูปความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของรีดิวซ์ซึ่งเอเจนท์แหล่งจ่ายไอออนและพีเอชของสารละลาย รวมถึงสารละลายอื่นๆดังแสดงในตารางที่ 4.2 ที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส ต่ออัตราการชุบเคลือบโลหะผสมนิกเกิล-ฟอสฟอรัสในหน่วยชั่วโมงที่เปลี่ยนแปลงไปได้ดังกราฟที่แสดงในภาพที่ 4.7

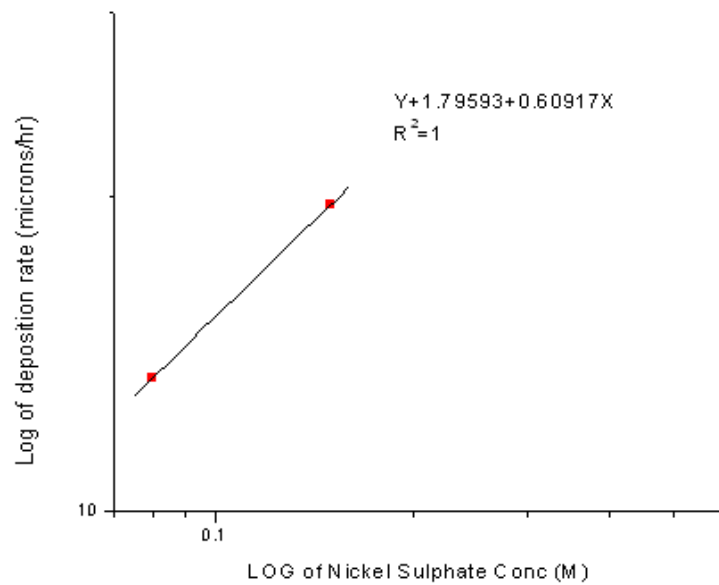


ภาพที่ 4.7 แสดงกราฟระหว่างผลของความเข้มข้นของรีดิวซ์ซึ่งเอเจนท์ แหล่งจ่ายไอออนและพีเอชของสารละลายที่ส่งผลต่ออัตราการชุบเคลือบโลหะผสมนิกเกิล-ฟอสฟอรัส ที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส

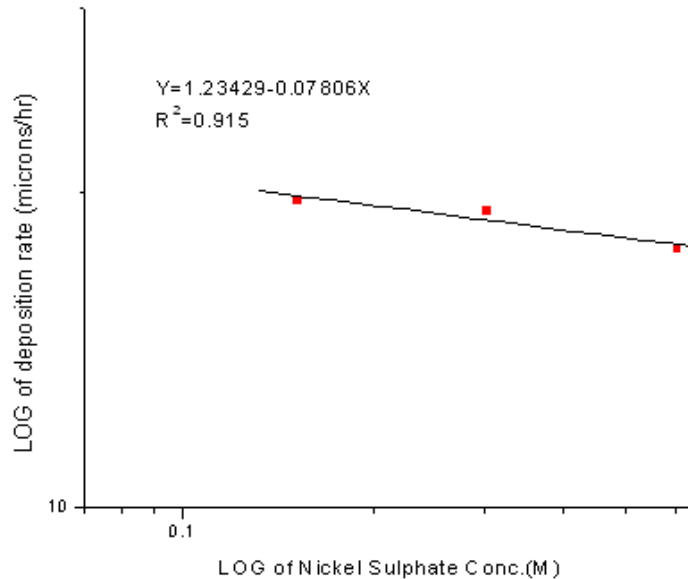
กราฟความสัมพันธ์ลอการิทึมระหว่างความเข้มข้นของโซเดียมไฮโปฟอสไฟต์และความเข้มข้นของนิกเกิลซัลเฟตต่ออัตราการชุบเคลือบที่เปลี่ยนแปลงไปตามลำดับ จากภาพที่ 4.8 แสดงให้เห็นถึงเส้นตรงในกราฟ โดยจะได้ค่าลำดับของการเกิดปฏิกิริยาของโซเดียมไฮโปฟอสไฟต์ ($\alpha = 0.65$) โดยหาค่าได้จากความชันของกราฟเส้นตรงลอการิทึม และในแนวทางเดียวกันจะได้ค่าของลำดับของการเกิดปฏิกิริยาของนิกเกิลซัลเฟต ซึ่งถูกแบ่งวิเคราะห์ออกเป็น 2 ช่วง สำหรับช่วงที่มีปริมาณนิกเกิลซัลเฟตต่ำมีค่า $\beta = 0.609$ และสำหรับช่วงที่มีปริมาณนิกเกิลซัลเฟตต่ำมีค่า -0.078 ซึ่งแสดงกราฟความสัมพันธ์ลอการิทึมได้ดังภาพที่ 4.9 และ 4.10



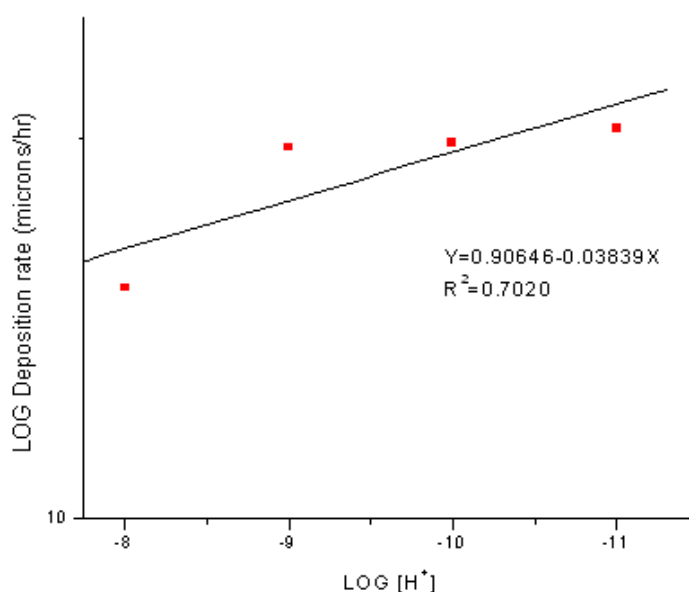
ภาพที่ 4.8 แสดงกราฟความสัมพันธ์ลอการิทึมของอัตราการชุบเคลือบซึ่งเป็นฟังก์ชันปริมาณความเข้มข้นของโซเดียมไฮโปฟอสไฟต์ที่เปลี่ยนแปลงไป



ภาพที่ 4.9 แสดงกราฟความสัมพันธ์ลอการิทึมของอัตราการชุบเคลือบซึ่งเป็นฟังก์ชันปริมาณความเข้มข้นของนิกเกิลซัลเฟตที่เปลี่ยนแปลงไปสำหรับช่วงที่มีปริมาณนิกเกิลซัลเฟตต่ำ



ภาพที่ 4.10 แสดงกราฟความสัมพันธ์ลอการิทึมของอัตราการชุบเคลือบซึ่งเป็นฟังก์ชันปริมาณความเข้มข้นของนิกเกิลซัลเฟตที่เปลี่ยนแปลงไปสำหรับช่วงที่มีปริมาณนิกเกิลซัลเฟตสูง



ภาพที่ 4.11 แสดงกราฟความสัมพันธ์ลอการิทึมของอัตราการชุบเคลือบซึ่งเป็นฟังก์ชันตามปริมาณระดับพีเอชของสารละลายที่เปลี่ยนแปลงไป

ในงานวิจัยนี้สารละลายสำหรับกระบวนการชุบเคลือบจะปรับพีเอชให้อยู่ในช่วง 8 ถึง 11 เพื่อศึกษาผลของพีเอชของสารละลายต่ออัตราการชุบเคลือบ จากภาพที่ 4.11 แสดงค่าลำดับของปฏิกิริยาของพีเอชจากความชันของกราฟเส้นตรงลอการิทึมได้ค่า $\gamma = -0.0338$ โดยในการศึกษาในที่นี้เราจะกำหนดให้ความเข้มข้นของคอมเพล็กซ์เชิงเอเจนที่มีค่าคงที่ (และตัวแปรอื่น ๆ ที่มีค่าคงที่) ($[L] = 1$) ในสมการที่ 4.10 และ 4.11 ดังนั้นสมการแสดงอัตราการชุบเคลือบทั้งเมื่อพิจารณาแยกออกเป็นสองช่วงตามความสัมพันธ์ของอัตราการชุบเคลือบกับปริมาณความเข้มข้นของนิกเกิลซัลเฟต เมื่อขึ้นกับลำดับสุทธิของอัตราการเกิดปฏิกิริยา ที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส แสดงได้ดังสมการที่ 4.12 และ 4.13

$$v = K_1 [\text{HPO}_2^-]^{0.652} [\text{Ni}^{2+}]^{0.609} [\text{H}^+]^{-0.038} \quad (4.12)$$

$$v = K_1 [\text{HPO}_2^-]^{0.652} [\text{Ni}^{2+}]^{-0.078} [\text{H}^+]^{-0.038} \quad (4.13)$$

ในสมการที่ 4.12 และ 4.13 แสดงสมการอัตราการชุบเคลือบโลหะผสมนิกเกิล-ฟอสฟอรัสสำหรับสารละลายที่อยู่ในช่วงเบส ซึ่งส่วนผสมทางเคมีของสารละลายจะประกอบไปด้วย นิกเกิลซัลเฟต โซเดียมไฮโปฟอสไฟท์ แอมโมเนียมซัลเฟต และ ไตร -โซเดียมซิเตรต โดยที่ค่าคงที่ k_1 สามารถคำนวณได้จากการประมาณค่าจากกราฟความสัมพันธ์ลอการิทึมในภาพที่ 4.7 โดยให้ค่า

ความชันในสมการเท่ากับศูนย์ ซึ่งสามารถเขียนสมการความสัมพันธ์ที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส
จะได้สมการความสัมพันธ์ดังสมการที่ 4.14-4.20 ดังนี้

เมื่อ $\beta=0.609$; สำหรับช่วงที่มีปริมาณนิกเกิลซัลเฟตต่ำ

$$v = K_1 [Ni^{2+}]^{0.609} [H^+]^{-0.038} \quad [H_2PO_2^-] = 1 \quad (4.14)$$

$$v = K_1 [HPO_2^-]^{0.652} [H^+]^{-0.038} \quad [Ni^{2+}] = 1 \quad (4.15)$$

$$v = K_1 [HPO_2^-]^{0.652} [Ni^{2+}]^{0.609} \quad [H^+] = 1 \quad (4.16)$$

เมื่อ $\beta=-0.078$; สำหรับช่วงที่มีปริมาณนิกเกิลซัลเฟตสูง

$$v = K_1 [Ni^{2+}]^{-0.078} [H^+]^{-0.038} \quad [H_2PO_2^-] = 1 \quad (4.17)$$

$$v = K_1 [HPO_2^-]^{0.652} [H^+]^{-0.038} \quad [Ni^{2+}] = 1 \quad (4.18)$$

$$v = K_1 [HPO_2^-]^{0.652} [Ni^{2+}]^{-0.078} \quad [H^+] = 1 \quad (4.19)$$

เมื่อทำการแทนค่าความเข้มข้นต่างๆลงในระบบสมการเพื่อประมาณค่านอกช่วงของอัตราการ
การชุบเคลือบที่สภาวะต่างๆและหลังจากนั้นทำการหาค่าคงที่ของอัตราในแต่ละสมการซึ่งแสดง
ข้อมูลได้ดังตารางในกราฟที่ 4.3 และ 4.4

ตารางที่ 4.3 แสดงค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยา k_2 จากการประมาณผลข้อมูล (Extrapolated
data) เมื่อ $\beta = 0.609$ สำหรับช่วงที่มีปริมาณนิกเกิลซัลเฟตต่ำ

Concentration	Rate ($\mu\text{m/hr}$) (Extrapolated)	Rate Constant (k_2)
$[H_2PO_2^-] = 1$	34.514	49.52
$[Ni^{2+}] = 1$	63.096	54.14
$[H^+] = 1$	8.504	47.93
		Average = 50.53

ตารางที่ 4.4 แสดงค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยา k_2 จากการประมาณผลข้อมูล (Extrapolated data) เมื่อ $\beta = -0.078$ สำหรับช่วงที่มีปริมาณนิกเกิลซัลเฟตสูง

Concentration	Rate ($\mu\text{m/hr}$) (Extrapolated)	Rate Constant (k_2)
$[\text{H}_2\text{PO}_4^-] = 1$	34.514	13.57
$[\text{Ni}^{2+}] = 1$	17.134	14.70
$[\text{H}^+] = 1$	8.504	13.12
		Average = 13.80

จากกฎสมการอิมพีริคัลสำหรับกระบวนการชุบเคลือบโลหะผสมนิกเกิล - ฟอสฟอรัส แบบไม่ใช้ไฟฟ้า ที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียสในระบบที่ประกอบด้วยส่วนผสมทางเคมีของสารละลายดังตารางที่ 4.2 สามารถเขียนสรุปแยกออกเป็นสองช่วงของสมการได้ดังสมการที่ 4.20-4.21

ช่วงที่ 1 เมื่อ $\beta=0.609$; สำหรับช่วงที่มีปริมาณนิกเกิลซัลเฟตต่ำ

$$v = 50.53[\text{HPO}_4^{2-}]^{0.652} [\text{Ni}^{2+}]^{0.609} [\text{H}^+]^{-0.038} \quad (4.20)$$

ช่วงที่ 2 เมื่อ $\beta=-0.078$; สำหรับช่วงที่มีปริมาณนิกเกิลซัลเฟตสูง

$$v = 13.80[\text{HPO}_4^{2-}]^{0.652} [\text{Ni}^{2+}]^{-0.078} [\text{H}^+]^{-0.038} \quad (4.21)$$

4.1.3 การวิเคราะห์ผลของปริมาณความเข้มข้นของรีดอกซ์ซึ่งเอเจนท์และความเข้มข้นของพีเอชของสารละลายต่อระบบความเสถียรของสารละลายอิเล็กโตรไลต์

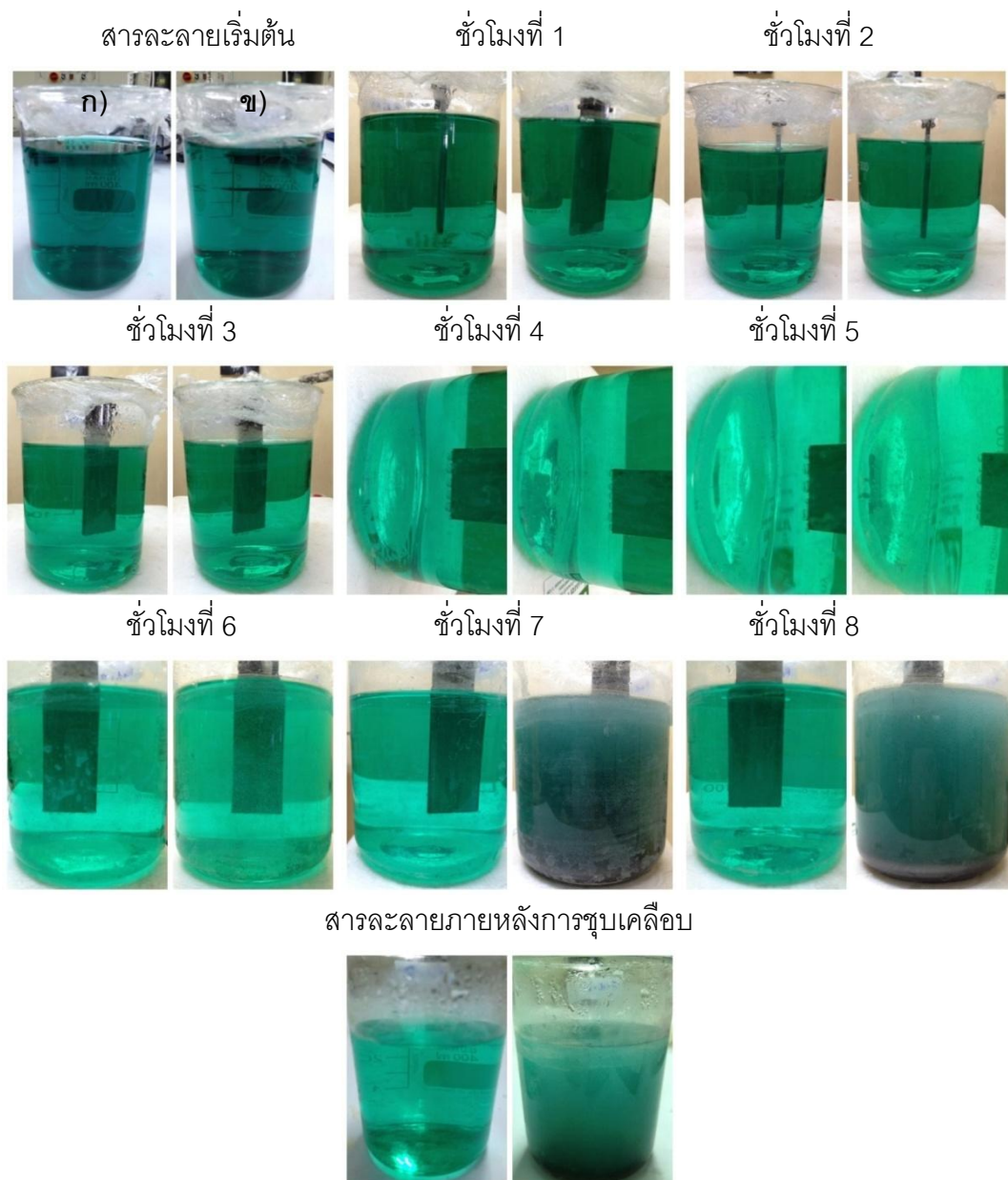
สำหรับการวิเคราะห์ผลปริมาณความเข้มข้นของรีดอกซ์ซึ่งเอเจนท์หรือโซเดียมไฮโปฟอสไฟท์ที่สูงขึ้นต่ออัตราการชุบเคลือบโลหะผสมนิกเกิล - ฟอสฟอรัสพบว่าสามารถทำให้อัตราการชุบเคลือบเพิ่มสูงขึ้นได้จริง แต่ในขณะเดียวกันนั้นระบบของปฏิกิริยาจะมีบางส่วนที่เกิดระบบของแก๊สไฮโดรเจนในปฏิกิริยาด้วยตามความสัมพันธ์ของระบบสมการที่ 4.1 และ 4.3 ซึ่งการเกิดแก๊สไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นนี้จะส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงความเสถียรของสารละลายที่ใช้สำหรับการชุบเคลือบ ดังนั้นถึงแม้ว่าระบบจะให้อัตราการชุบเคลือบที่เพิ่มสูงขึ้นแต่ในขณะเดียวกันจะมีการเกิดแก๊สไฮโดรเจนขึ้นมาจำนวนมากด้วยเช่นกัน ซึ่งอาจจะส่งผลกระทบต่อระบบความเสถียรของสารละลายได้ ในขั้นตอนต่อมาของงานวิจัยจึงพยายามที่จะวิเคราะห์ทดสอบและเปรียบเทียบความเสถียรของสารละลายที่มีปริมาณความเข้มข้นของโซเดียมไฮโปฟอสไฟท์ที่แตกต่างกันเพื่อ

ประเมินอายุการใช้งานของสารละลาย โดยเลือกสารละลายที่มีส่วนผสมที่แตกต่างกันของ โซเดียมไฮโปฟอสไฟท์ 2 ส่วนผสม ซึ่งประกอบไปด้วยสารละลายที่มีปริมาณของโซเดียมไฮโปฟอสไฟท์ 0.38 M (แทนด้วยชื่อสารละลาย A) และ 0.76 M (แทนด้วยชื่อสารละลาย B) ตามลำดับ ซึ่งในการทดสอบนี้จะทำการชุบเคลือบชิ้นงานชนิดเดียวกันที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส โดยทดสอบระยะเวลาของการชุบเคลือบจนกว่าจะพบการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นในระบบการชุบ โดยจะทำการสังเกตลักษณะสีและการเกิดอนุภาคในระบบสารละลาย

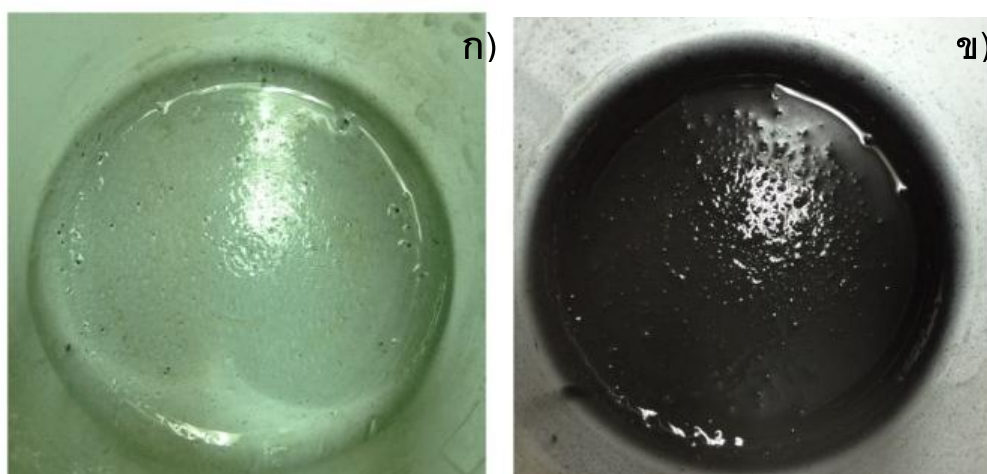
เมื่อทำการชุบเคลือบสารละลายจะพบการเกิดฟองของไฮโดรเจนเกิดขึ้นบริเวณผิวชิ้นงานที่ทำการชุบเคลือบควบคู่ไปด้วย โดยปริมาณแก๊สไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นในระบบของสารละลาย B จะสังเกตเห็นว่ามีปริมาณสูงกว่าในระบบของสารละลาย A เมื่อทำการชุบเคลือบถึงระยะเวลาที่ 6 ชั่วโมงพบว่ายังไม่ปรากฏอนุภาคการตกตะกอนใดๆที่แสดงถึงความไม่เสถียรของสารละลายเกิดขึ้น พบเพียงแต่การเปลี่ยนแปลงของสีของสารละลายทั้งสองชนิดที่มีความเข้มลดลงจากสีเขียวเข้มหลายเป็นสีเขียวใสเป็นผลเนื่องจากในระบบสารละลายมีปริมาณของไฮดรอกไซด์ที่เกิดจากการเปลี่ยนสถานะเป็นอนุภาคนิกเกิลชุบเคลือบลงบนผิวชิ้นงานเท่านั้น เมื่อถึงระยะเวลาในการชุบเคลือบชั่วโมงที่ 7 ได้พบการเปลี่ยนพบว่าสารละลาย B มีการเกิดการตกตะกอนของอนุภาคนิกเกิลหรือสารประกอบนิกเกิลฟอสไฟด์ (Ni_xP_y) [24, 29] และสีของสารละลายจะเปลี่ยนเป็นสีคล้ำขึ้นจากเดิมดังแสดงในภาพที่ 4.12 ในขณะที่สารละลาย A ยังไม่มีการตกตะกอนของสารละลายแต่สีของสารละลายจะจางลงจากการเกิดปฏิกิริยาการชุบเคลือบผิว และเมื่อเทสารละลายออกภาชนะ จะพบเห็นตะกอนสีดำที่เกิดขึ้นบริเวณด้านล่างของบีกเกอร์ที่ทำการบรรจุสารละลาย B อยู่เป็นจำนวนมากและมากกว่าบีกเกอร์บรรจุสารละลาย A อย่างเห็นได้ชัด ซึ่งลักษณะตะกอนที่กล่าวมาได้แสดงดังภาพที่ 4.13 จึงแสดงให้เห็นว่าความเสถียรของของสารละลาย B ถึงแม้จะมีอัตราการชุบที่ต่ำกว่าเล็กน้อยแต่ยังคงจะมีอายุการใช้งานหรือความเสถียรของสารละลายที่นานกว่า

ซึ่งความเสถียรของสารละลายสำหรับกระบวนการชุบเคลือบแบบไม่ใช้ไฟฟ้านั้นจะขึ้นตัวแปรหลายชนิด อาทิ เช่น พีเอช อุณหภูมิ และปริมาณแก๊สไฮโดรเจนในระบบ เป็นต้น [13] ซึ่งจากผลการวิเคราะห์ความเสถียรของสารละลายข้างต้นพบว่า การตกตะกอนของสารประกอบนิกเกิลฟอสไฟด์ในสารละลายที่เกิดขึ้นทั้งนี้เนื่องจาก ความไม่เสถียรของสารละลายที่เกิดจากอัตราการชุบเคลือบที่สูงมากเกินไป ซึ่งในขณะที่เกิดปฏิกิริยาชุบเคลือบจะมีการเกิดไฮโดรเจนแก๊สเกิดขึ้นควบคู่ไปด้วย ซึ่งการเกิดไฮโดรเจนแก๊สที่มากจนเกินไปนี้จะเกิดขึ้นเกาะบริเวณผิวของชิ้นงาน หาก

มีปริมาณไฮโดรเจนที่เกาะบริเวณผิวชิ้นงานที่มากเกินไป จะทำตัวเสมือนไปตัวกั้นขวางบริเวณผิวของชิ้นงาน ทำให้อนุภาคของนิกเกิลไม่สามารถเข้ามาเกาะบริเวณผิวชิ้นงานได้ [30] ซึ่งอนุภาคเหล่านั้นจะเกิดการตกตะกอนลงสู่ด้านล่างของปีกเกอร์ โดยอนุภาคนิกเกิลเหล่านี้จะทำเสมือนเป็นอนุภาคที่มีลักษณะเป็น Active site ซึ่งจะเป็นอนุภาคที่ละเอียดทำให้มีปริมาณ surface area ที่สูง จึงสามารถทำให้ดึงอนุภาคของนิกเกิลต่อมาตกตะกอนเกาะติดกับอนุภาคตะกอนด้านล่างเพิ่มขึ้นได้อีก เป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดการตกตะกอนของนิกเกิลหรือนิกเกิลฟอสไฟด์เพิ่มขึ้นได้ ทำให้สารละลายมีความเสถียรและอัตราการชุบเคลือบต่ำลง



ภาพที่ 4.12 แสดงลักษณะทางกายภาพของสีของสารละลายในบีกเกอร์ทดสอบเมื่อมีค่าความเข้มข้นของโซเดียมไฮโปฟอสไฟท์ในสารละลายเป็น ก) สารละลาย A และ ข) สารละลาย B ที่ระยะเวลาในการชุบเคลือบต่างๆ



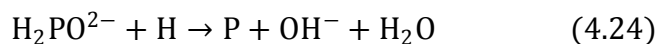
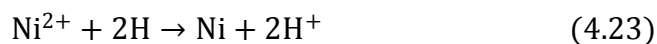
ภาพที่ 4.13 แสดงลักษณะทางกายภาพของตะกอนของสารละลายด้านล่างของบีกเกอร์ทดสอบ
ก) สารละลาย A และ ข) สารละลาย B

และอีกหนึ่งตัวแปรที่ทำการศึกษาถึงผลกระทบต่อระบบความเสถียรของสารละลายได้แก่ ค่าความเข้มข้นของพีเอชของสารละลาย เนื่องจากหลายงานวิจัยก่อนหน้านี้พบว่า หากสารละลาย สำหรับกระบวนการชุบเคลือบโลหะผสมนิกเกิล -ฟอสฟอรัสมีค่าความเข้มข้นของพีเอชที่สูงมากเกินไป โดยเฉพาะสำหรับสารละลายในสภาวะเบสจะมีความเสถียรของสารละลายในการชุบเคลือบที่ค่อนข้างต่ำซึ่งอาจเกิดการตกตะกอนเกิดขึ้นทำให้สารละลายไม่อยู่ในสภาวะที่สามารถชุบเคลือบต่อไปได้ โดยเฉพาะกระบวนการที่มีอุณหภูมิในกระบวนการที่ค่อนข้างสูงประมาณ 85-90 องศาเซลเซียส [13] ถึงแม้ในงานวิจัยนี้จะทำการชุบเคลือบชั้นโลหะผสมนิกเกิล -ฟอสฟอรัสที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียสซึ่งถือว่าเป็นช่วงอุณหภูมิที่ค่อนข้างต่ำเมื่อเทียบกับหลายงานวิจัยก่อนหน้านี้ แต่ถึงอย่างไรก็ดีเพื่อความแน่ชัดจึงได้ทำการทดสอบผลของการปรับค่าพีเอชต่อความเสถียรของสารละลาย ซึ่งทำการทดสอบโดยทำการชุบเคลือบชิ้นงานในสารละลายที่มีค่าพีเอชเท่ากับ 9 หรือสารละลาย A ในการทดสอบวิเคราะห์ก่อนหน้านี้ และ สารละลายที่มีค่าพีเอช 11 (แทนด้วยสารละลาย C) เนื่องจากให้ผลของค่าอัตราการชุบเคลือบที่ไม่แตกต่างกันอย่างมากนัก ซึ่งจะใช้ปริมาณของ โซเดียมไฮโปฟอสไฟท์ 0.38 M และ ปริมาณของนิกเกิลซัลเฟต 0.15 M รวมถึงส่วนผสมอื่นๆตามตารางที่ 4.2 โดยทำการชุบเคลือบเป็นระยะเวลาอย่างน้อย 8 ชั่วโมง เพื่อสังเกตและวิเคราะห์ผลที่เกิดขึ้นเช่นเดียวกับการวิเคราะห์ก่อนหน้านี้ โดยผลการทดลองแสดงได้ดังรูปภาพที่ 4.14

จากผลการทดสอบความเสถียรของสารละลาย A และสารละลาย B พบว่าลักษณะสีของสารละลายจะจางลงเมื่อระยะเวลาในการชุบเคลือบเพิ่มขึ้นแต่ ทั้งนี้เป็นเพราะเมื่อระยะเวลาเพิ่มขึ้นไอออนของนิกเกิลในสารละลายจะค่อยๆเปลี่ยนเป็นอนุภาคนิกเกิลทำให้ความเข้มข้นของไอออนนิกเกิลในสารละลายลดลงจึงทำให้สีของสารละลายจางลง แต่ทั้งนี้ไม่พบการตกตะกอนในสารละลายทั้งสารละลาย A และสารละลาย C แม้ว่าจะมีการปรับพีเอชที่ค่อนข้างสูง ทั้งนี้สันนิษฐานได้ว่าสารละลายทั้ง 2 สามารถให้อัตราการชุบเคลือบที่สูงในสภาวะที่เหมาะสม อัตราการชุบเคลือบไม่สูงมากจนเกินไป ซึ่งไม่ก่อให้เกิดแก๊สไฮโดรเจนจากการชุบเคลือบในปริมาณที่สูงเกินขีดความสามารถดูดซับของวัสดุชิ้นงาน ทำให้การชุบเคลือบติดของอนุภาคนิกเกิลยังเป็นไปได้ดี ไม่มีการตกตะกอนของอนุภาคนิกเกิลหรืออนุภาคนิกเกิลฟอสไฟท์ขึ้น ทำให้ระบบของสารละลายยังคงความเสถียรได้ดีและไม่เกิดการตกตะกอนขึ้น

4.1.4 ผลของความเข้มข้นของตัวแปรบางประการในสารละลาย ต่อส่วนผสมทางเคมีและลักษณะผิวของชั้นเคลือบในการผลิตชิ้นรองพื้นโลหะผสมนิกเกิล -ฟอสฟอรัสแบบไม่ใช้ไฟฟ้า

ในส่วนของงานวิเคราะห์ปัจจัยที่ส่งผลต่อส่วนผสมทางเคมีของชั้นเคลือบนั้นจะทำการศึกษาผลของปริมาณความเข้มข้นของสารละลายในระบบซึ่งได้แก่ ริดิวซ์ซึ่งเอเจนท์ นิกเกิลซัลเฟต และพีเอชของสารละลาย โดยใช้เทคนิคการการวัดการกระจายพลังงานด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาดโหมด EDS โดยเริ่มต้นจากการศึกษาถึงผลของปริมาณริดิวซ์ซึ่งเอเจนท์ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ต่อปริมาณส่วนผสมของนิกเกิล -ฟอสฟอรัสกับปริมาณของไฮเดียมไฮโปฟอสไฟท์โดยมีความเข้มข้นต่างๆเช่นเดียวกับการวิเคราะห์ทดลองในหัวข้อที่ 4.1.1 แสดงผลการทดลองได้ดังกราฟในภาพที่ 4.15 จากผลการทดลองที่แสดงในภาพพบว่า เมื่อปริมาณริดิวซ์ซึ่งเอเจนท์เพิ่มสูงขึ้นจะทำให้ส่วนผสมทางเคมีของชั้นเคลือบประกอบไปด้วยปริมาณฟอสฟอรัสที่เพิ่มสูงขึ้น โดยมีค่าเป็น 1.93 at%, 8.23 at%, 8.57at% และ 9.76 at% ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากไฮโปฟอสไฟท์ซึ่งทำหน้าที่เป็นริดิวซ์ซึ่งเอเจนท์ในระบบมีส่วนประกอบของธาตุฟอสฟอรัสเป็นส่วนประกอบ ซึ่งกลไกของการเกิดธาตุฟอสฟอรัสสามารถอธิบายได้ตามระบบสมการที่ 4.22-4.24 [31]

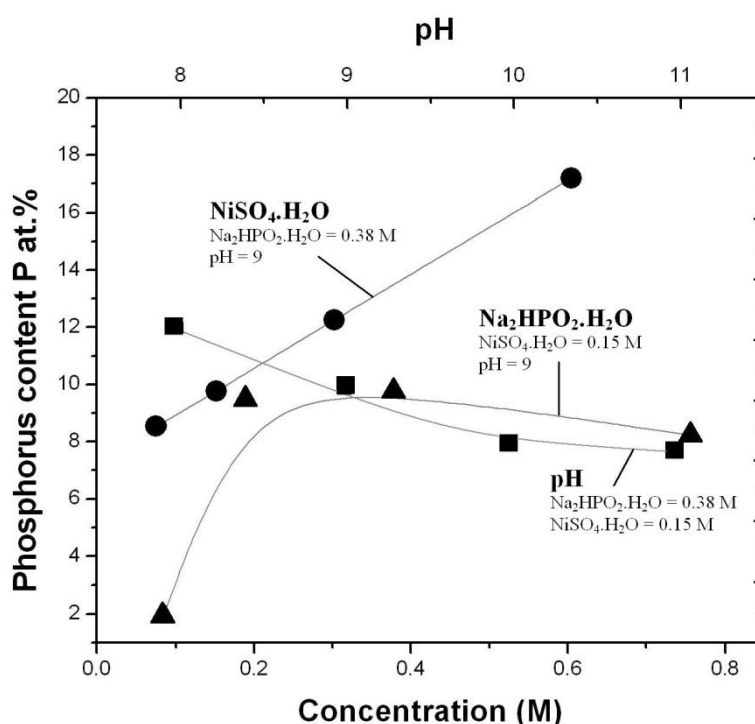


ในระบบของปฏิกิริยาจะเริ่มจากไฮเดียมไฮโปฟอสไฟท์เมื่อเกิดการแตกตัวจะเกิดเป็นไอออนของไฮเดียมและไฮโปฟอสไฟท์ไอออนขึ้น ในส่วนของไฮโปฟอสไฟท์ไอออนนี้จะรวมตัวกับน้ำและกลายเป็นออร์โทฟอสไฟท์ ไฮโดรเจนไอออน และอะตอมของไฮโดรเจนเกิดขึ้น ซึ่งอะตอมของไฮโดรเจนนี้จะเกิดการรวมตัวในขั้นตอนที่ 2 กับไฮโปฟอสไฟท์ (II) ไอออน และกลายมาเป็นผลิตภัณฑ์ซึ่งได้แก่ ฟอสฟอรัสอะตอม ไฮดรอกไซด์ไอออน และน้ำ ดังนั้นเมื่อมีการเพิ่มปริมาณของไฮเดียมไฮโปฟอสไฟท์จึงเปรียบเสมือนการเพิ่มสารตั้งต้นให้กับระบบในสมการที่ 4.24 กลายเป็นอะตอมของไฮโดรเจนอะตอมได้เพิ่มขึ้นและเมื่อรวมตัวกับไฮโปฟอสไฟท์ (II) ไอออน จึงมีปริมาณของฟอสฟอรัสที่เพิ่มสูงขึ้น

สำหรับการศึกษาผลของปริมาณนิกเกิลซัลเฟตในสารละลายต่อส่วนผสมทางเคมีของชั้นเคลือบโลหะผสมนิกเกิล - ฟอสฟอรัส ซึ่งทำการปรับเปลี่ยนส่วนผสมของนิกเกิลซัลเฟตในสารละลาย ระบบที่ทำการศึกษา เช่นเดียวกับการวิเคราะห์ทดลองในหัวข้อที่ 4.1 ในส่วนของ การวิเคราะห์ปริมาณนิกเกิลซัลเฟตที่ส่งผลต่ออัตราการชุบเคลือบ ซึ่งผลของการวัดการกระจายพลังงานของธาตุแสดงผลการทดลองได้ดังกราฟเช่นเดียวกันในภาพที่ 4.15 ซึ่งโดยปกติแล้วการเพิ่มความเข้มข้นของนิกเกิลซัลเฟตหรือสารที่ให้ไอออนของโลหะนิกเกิลที่ต้องการชุบเคลือบนั้นจะทำให้ปริมาณของธาตุฟอสฟอรัสในชั้นเคลือบนั้นมีค่าลดลง แต่จากผลการทดลองกลับพบว่าปริมาณของธาตุฟอสฟอรัสกลับมามีค่าแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น โดยมีค่า 8.54 at% 9.76 at% 12.26 at% 17.2 at% ตามลำดับทั้งนี้สันนิษฐานว่าอาจจะเป็นผลมาจากการใช้อัตราส่วนของฟอสฟอรัสต่อปริมาณนิกเกิลที่สูงกว่าปกติ จึงทำให้ระบบมีปริมาณฟอสฟอรัสในระบบเพิ่มสูงขึ้น

และตัวแปรสุดท้ายที่ทำการศึกษาถึงผลของส่วนผสมทางเคมีของชั้นเคลือบได้แก่ ค่าความเข้มข้นของฟิเชอของสารละลาย โดยในที่นี้จะทำการศึกษาฟิเชอของสารละลายที่ 8, 9, 10 และ 11 ตามลำดับ โดยจากผลการทดลองการวิเคราะห์การกระจายพลังงานของธาตุพบว่าปริมาณของฟอสฟอรัสในชั้นเคลือบที่เกิดขึ้นนั้นมีปริมาณฟอสฟอรัสในชั้นเคลือบลดลง เมื่อปริมาณค่าฟิเชอของสารละลายสูง ซึ่งมีค่าปริมาณฟอสฟอรัสอยู่ 12.22%at, 8.57%at, 7.32%at และ 7.48%at ตามลำดับ โดยพิจารณาจากโอกาสของการเกิดอะตอมของธาตุฟอสฟอรัสในชั้นเคลือบ

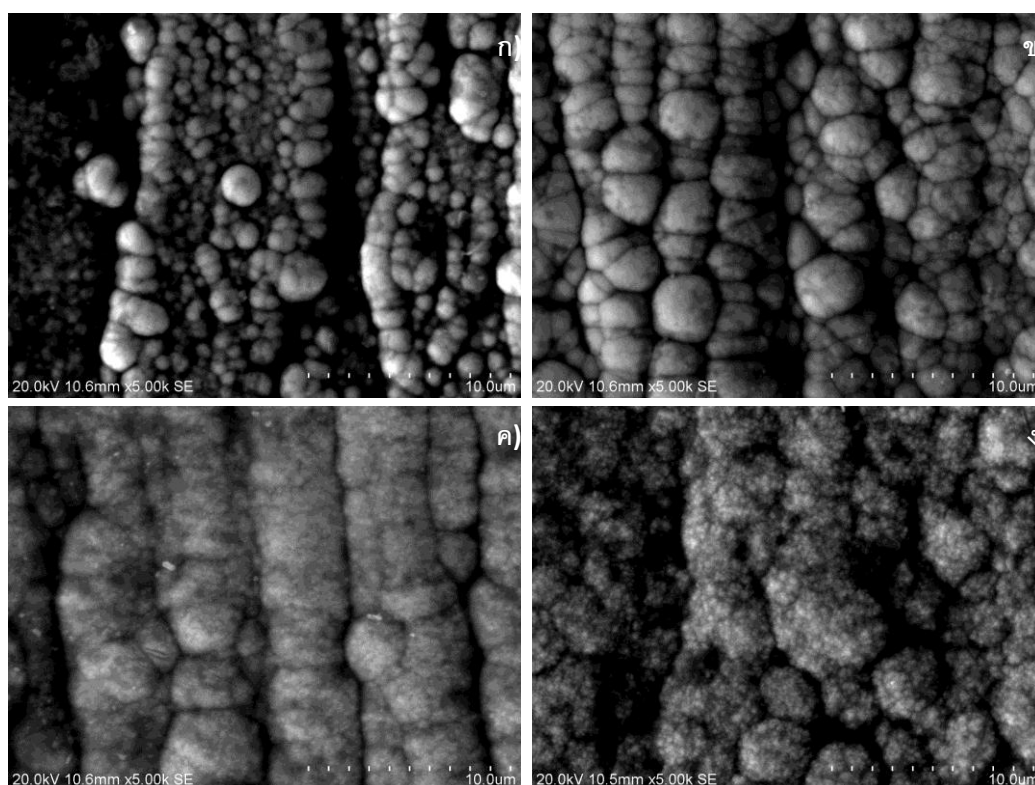
ได้จากระบบสมการของการเกิดปฏิกิริยาที่ 4.24 จากสมการพบว่าเมื่อเพิ่มพีเอชให้กับสารละลายเปรียบเสมือนเป็นการเพิ่มความเข้มข้นของ OH^- ให้แก่ระบบปฏิกิริยา ทำให้ระบบปฏิกิริยามีค่าความเข้มข้นของ OH^- ที่เกิดสมดุลของปฏิกิริยา ซึ่งตามหลักของ เลอ ชาเตอลิเ (Le Chatelier principle) แล้ว ระบบต้องปรับสมดุลเป็นปฏิกิริยาย้อนกลับ ทำให้ปริมาณของอะตอมของธาตุฟอสฟอรัสในระบบลดลง จึงส่งผลต่ออะตอมของธาตุฟอสฟอรัสที่จะมาชุบเคลือบลงบนผิวชิ้นงานลดลงไปด้วย



ภาพที่ 4.15 แสดงกราฟระหว่างผลของความเข้มข้นของรีดิวซ์ซิงเอเจนท์ แหล่งจ่ายไอออนและพีเอชของสารละลายที่ส่งผลต่อส่วนผสมทางเคมีของชั้นเคลือบโลหะผสมนิกเกิล-ฟอสฟอรัส

และเมื่อพิจารณาถึงลักษณะโครงสร้างทางกายภาพของพื้นผิวชั้นเคลือบเมื่อปรับเปลี่ยนความเข้มข้นของส่วนผสมทางเคมีต่างๆ 3 ชนิดตามที่ศึกษามาขั้นต้น ด้วยการวิเคราะห์เทคนิคการใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาดโหมด Secondary electron นั้น พบว่าปัจจัยของความเข้มข้นของโซเดียมไฮโปฟอสไฟท์ที่มีต่อลักษณะโครงสร้างทางกายภาพได้แสดงในภาพที่ 4.16 จะแนวโน้มในภาพรวมของขนาดของโนดูลนั้นมีขนาดที่ค่อนข้างใหญ่ขึ้นเมื่อปริมาณความเข้มข้นโซเดียมไฮโปฟอสไฟท์สูงขึ้นโดยมีขนาดเฉลี่ยตั้งแต่ 0.5-5 ไมครอนตามลำดับ โดยเป็นผลเนื่องจากปริมาณของฟอสฟอรัสในชั้นเคลือบที่ส่งผลต่อการสร้างของโนดูลในชั้นเคลือบด้วย ซึ่ง

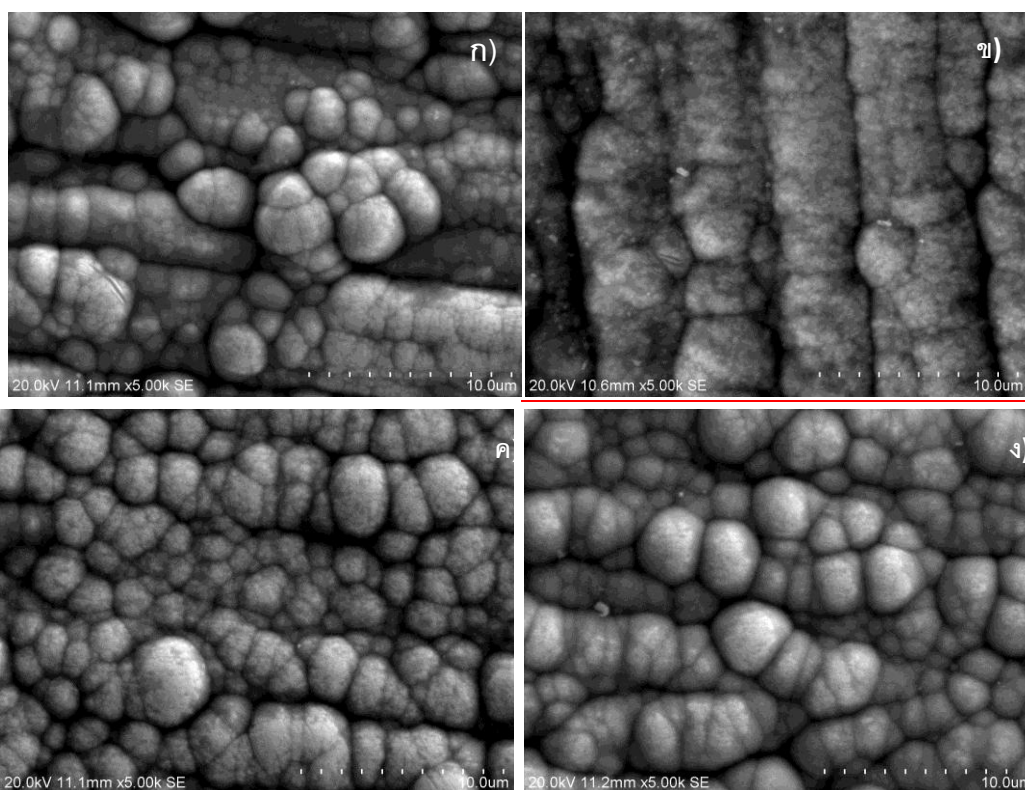
รายละเอียดยังไม่มีการวิเคราะห์กลไกเป็นที่แน่ชัดถึงอิทธิพลของธาตุฟอสฟอรัสต่อลักษณะโครงสร้าง แต่โดยปกติแล้วเมื่อปริมาณฟอสฟอรัสในระบบเพิ่มขึ้นจะทำให้แนวโน้มของขนาดของโนดูลมีขนาดที่ใหญ่ขึ้น ตามลำดับ[28] ซึ่งผลการวิเคราะห์ที่ได้มีความสอดคล้องกับผลการทดลองก่อนหน้านี้ที่ปริมาณฟอสฟอรัสจะเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ขนาดของโนดูลซึ่งแปรผันตามปริมาณของฟอสฟอรัสจึงมีขนาดใหญ่เพิ่มขึ้นตามปริมาณของฟอสฟอรัส อีกทั้งเหตุผลประกอบในแง่ของอัตราการชุบเคลือบที่เพิ่มสูงขึ้นจากการที่เติมปริมาณรีดิวซ์ซึ่งเอเจนท์ในระบบสูงขึ้นทำให้ชิ้นงานมีอัตราการชุบเคลือบผิวที่สูงจึงทำให้เกิดการสร้างโนดูลที่มีขนาดใหญ่ขึ้น



ภาพที่ 4.16 แสดงลักษณะโครงสร้างทางกายภาพของพื้นผิวชั้นเคลือบโลหะผสมนิกเกิล - ฟอสฟอรัสแบบไม่ใช้ไฟฟ้า เมื่อมีปริมาณของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในสารละลายต่างกัน ก) 0.08 M ข) 0.19 M ค) 0.38 M และ ง) 0.76 M

และเมื่อพิจารณาลักษณะโครงสร้างทางพื้นผิวซึ่งชิ้นงานที่ทำการปรับเปลี่ยนปริมาณนิกเกิลซัลเฟตในสารละลายพบว่าลักษณะของโครงสร้างทางกายภาพของพื้นผิวนั้นไม่แสดงความแตกต่างอย่างเห็นได้ชัดจนเท่าใดนัก ซึ่งลักษณะของพื้นผิวเมื่อมีปริมาณนิกเกิลซัลเฟตในระบบ

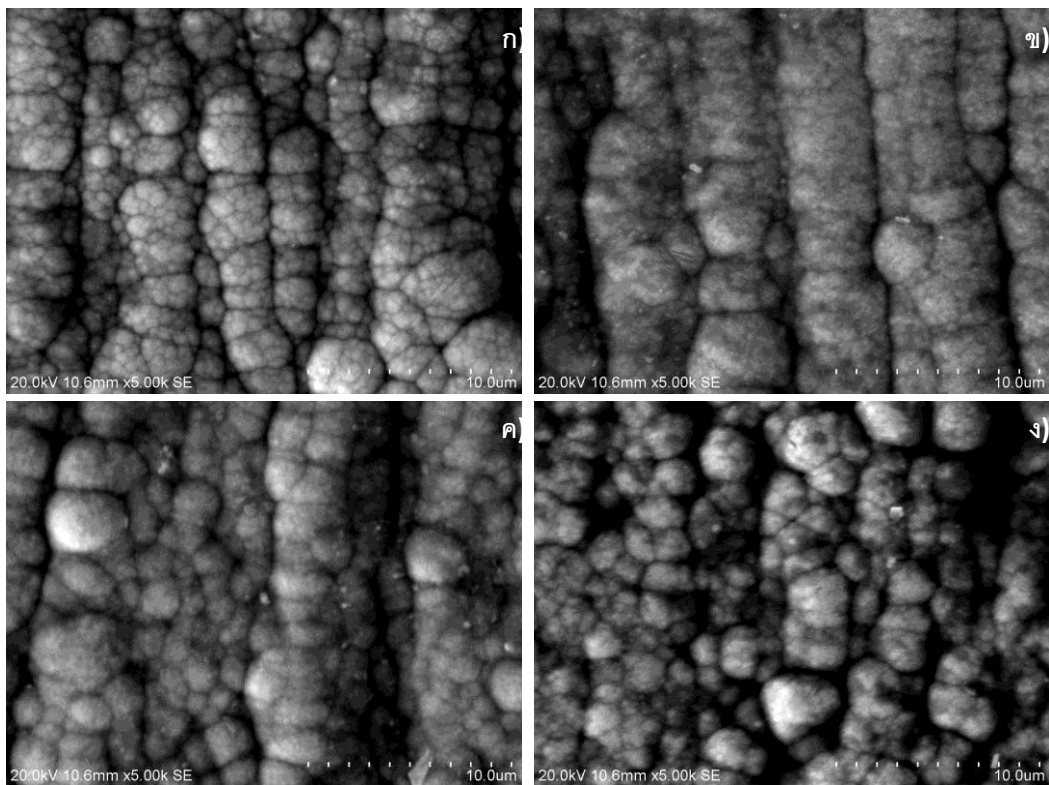
0.08 M จะมีลักษณะการกระจุกตัวของโนดูลเล็กๆ ไม่สม่ำเสมอ แต่เมื่อเพิ่มปริมาณของนิกเกิลซัลเฟตสูงขึ้นเป็น 0.15 M ขนาดของโนดูลมีขนาดที่ใหญ่ขึ้น และในช่วงสุดท้ายเมื่อเพิ่มปริมาณนิกเกิลซัลเฟตในระบบเป็น 0.38 และ 0.76 M ลักษณะของโนดูลจะมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอและแต่ยังคงมีขนาดโนดูลที่หลากหลาย โดยมีขนาดประมาณ 2-4 ไมครอน ซึ่งแสดงลักษณะทางกายภาพของชั้นเคลือบไว้ดังภาพที่ 4.17



ภาพที่ 4.17 แสดงลักษณะโครงสร้างทางกายภาพของพื้นผิวชั้นเคลือบโลหะผสมนิกเกิลฟอสฟอรัสแบบไม่ใช้ไฟฟ้า เมื่อมีปริมาณของความเข้มข้นของนิกเกิลซัลเฟตในสารละลายต่างกัน
 ก) 0.08 M ข) 0.15 M ค) 0.30 M และ ง) 0.06 M

ต่อมาได้ทำการทดสอบผล ของค่าความเข้มข้นของพีเอชของสารละลายต่อการเปลี่ยนแปลงลักษณะของพื้นผิวและส่วนผสมทางเคมีของชั้นเคลือบในที่นี้จะทำการศึกษการเปรียบเทียบที่ค่าพีเอชของสารละลายมีค่าเท่ากับ 8, 9, 10 และ 11 เช่นเดียวกับการทดลองก่อนหน้านี้ โดยให้มีส่วนผสมทางเคมีอื่นๆที่เหมือนกัน และใช้ระยะเวลาในกระบวนการชุบเคลือบผิวเป็นระยะเวลา 20 นาที ซึ่งผลการทดลองจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาดที่แสดงในภาพที่ 4.18 แสดงให้เห็นว่าแนวโน้มเมื่อพีเอชของสารละลายเพิ่มขึ้นหรือสภาวะความเป็นเบสใน

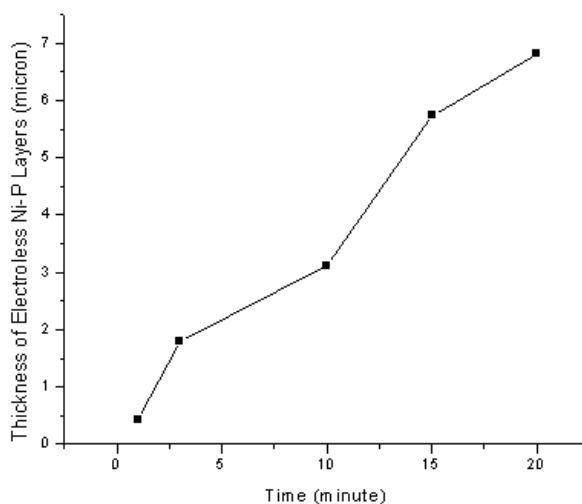
สารละลายสูงชันจะทำให้ลักษณะผิวของชั้นเคลือบมีโนดูลที่มีขนาดเล็กลง โดยสามารถอธิบายได้โดยหลักการของปริมาณของอะตอมของธาตุฟอสฟอรัสในชั้นเคลือบดังที่เคยได้อธิบายไปก่อนหน้านี้ ทั้งนี้ที่ขนาดของโนดูลที่แตกต่างกันสืบเนื่องมาจากผลของปริมาณของฟอสฟอรัสในชั้นเคลือบ หากมีปริมาณฟอสฟอรัสในชั้นเคลือบลดลงจะทำให้ลักษณะโนดูลมีทิศทางแนวโน้มที่มีขนาดเล็กลง ซึ่งสอดคล้องกับปริมาณของฟอสฟอรัสในชั้นเคลือบที่ลดลงเมื่อค่าพีเอชมีความเข้มข้นสูงชันจึงทำให้โนดูลมีขนาดเล็กลงโดยมีขนาดเฉลี่ยตั้งแต่ 3.5-7 ไมครอน แต่สำหรับชิ้นงานที่สารละลายมีค่าพีเอชเท่ากับ 8 นั้น ควรจะต้องมีขนาดของโนดูลที่ใหญ่กว่าชิ้นงานอื่นๆ แต่ผลที่ได้ไม่ได้เป็นเช่นนั้น ทั้งนี้สันนิษฐานว่าเป็นผลเนื่องมาจากอัตราการชุบเคลือบที่ค่อนข้างต่ำทำให้การชุบเคลือบผิวได้ชั้นเคลือบที่มีการปกคลุมได้ไม่สม่ำเสมอเท่าที่ควรโดยมีค่าเฉลี่ยขนาดของโนดูลประมาณ 3 ไมครอน



ภาพที่ 4.18 แสดงลักษณะโครงสร้างทางกายภาพของพื้นผิวชั้นเคลือบโลหะผสมนิกเกิล - ฟอสฟอรัสแบบไม่ใช้ไฟฟ้า เมื่อมีความเข้มข้นของพีเอชของสารละลายต่างกัน ก) 8 ข) 9 ค) 10 และ ง) 11

4.2 การศึกษาการพัฒนาของโครงสร้างจุลภาคและเฟสที่เกิดขึ้นของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ JIS SS400 ที่ผ่านกระบวนการชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนที่ 450 องศาเซลเซียสโดยมีชั้นเคลือบโลหะผสมนิกเกิล-ฟอสฟอรัสรองพื้น

เมื่อทำการวิเคราะห์หาตัวแปรที่เหมาะสมต่ออัตราการชุบเคลือบของสารละลายในกระบวนการชุบเคลือบโลหะผสมนิกเกิล-ฟอสฟอรัสตามการวิเคราะห์ในหัวข้อที่ 4.1.1 ซึ่งประกอบด้วย โซเดียมไฮโปไฟต์ 0.38 M และ นิกเกิลซัลเฟต 0.15 M และเลือกค่าพีเอชของสารละลายเท่ากับ 9 เนื่องจากให้อัตราการชุบเคลือบที่ใกล้เคียงกับค่าพีเอชที่เท่ากับ 10 และ 11 แต่ใช้ปริมาณการเติม 10 % NaOH เพื่อปรับพีเอชของสารละลายที่น้อยกว่าถึง 2 เท่า และส่วนผสมทางเคมีอื่น ๆ ดังตารางที่ 4.2 โดยกระทำการชุบเคลือบที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส โดยได้นำชิ้นงานมาทำการชุบเคลือบที่ระยะเวลา 1, 3, 10, 15 และ 20 นาที ตามลำดับ โดยที่อัตราการชุบเคลือบนั้นจะแปรผันตามระยะเวลาในการชุบเคลือบซึ่งแสดงได้ดังกราฟในภาพที่ 4.19 ซึ่งเมื่อระยะเวลาเพิ่มขึ้นจะทำให้ความหนาของชั้นเคลือบเพิ่มสูงขึ้นตามลำดับ โดยได้ความหนาของชั้นเคลือบโลหะผสมนิกเกิล-ฟอสฟอรัสเป็น 0.5, 1.85, 3.02, 5.85 และ 6.56 ไมครอนต่อชั่วโมง เพื่อใช้สำหรับการทดลองขั้นตอนต่อไป



ภาพที่ 4.19 แสดงกราฟความสัมพันธ์ของเวลาต่ออัตราการชุบเคลือบที่ระยะเวลาต่างๆ สำหรับสารละลายที่เหมาะสมซึ่งประกอบด้วย โซเดียมไฮโปไฟต์ 0.378 M และ นิกเกิลซัลเฟต 0.152 M มีค่าพีเอชของสารละลายเท่ากับ 9 ที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 4.5 ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ JIS SS400

(wt.%)	C	Cr	Mn	Al	N	P	S	Si	Fe
LS	0.151	0.0652	0.452	0.557	0.0008	0.00463	0.0109	0.00502	Bal.
HS	0.216	0.217	0.665	0.00326	0.0008	0.0163	0.0338	0.227	Bal.

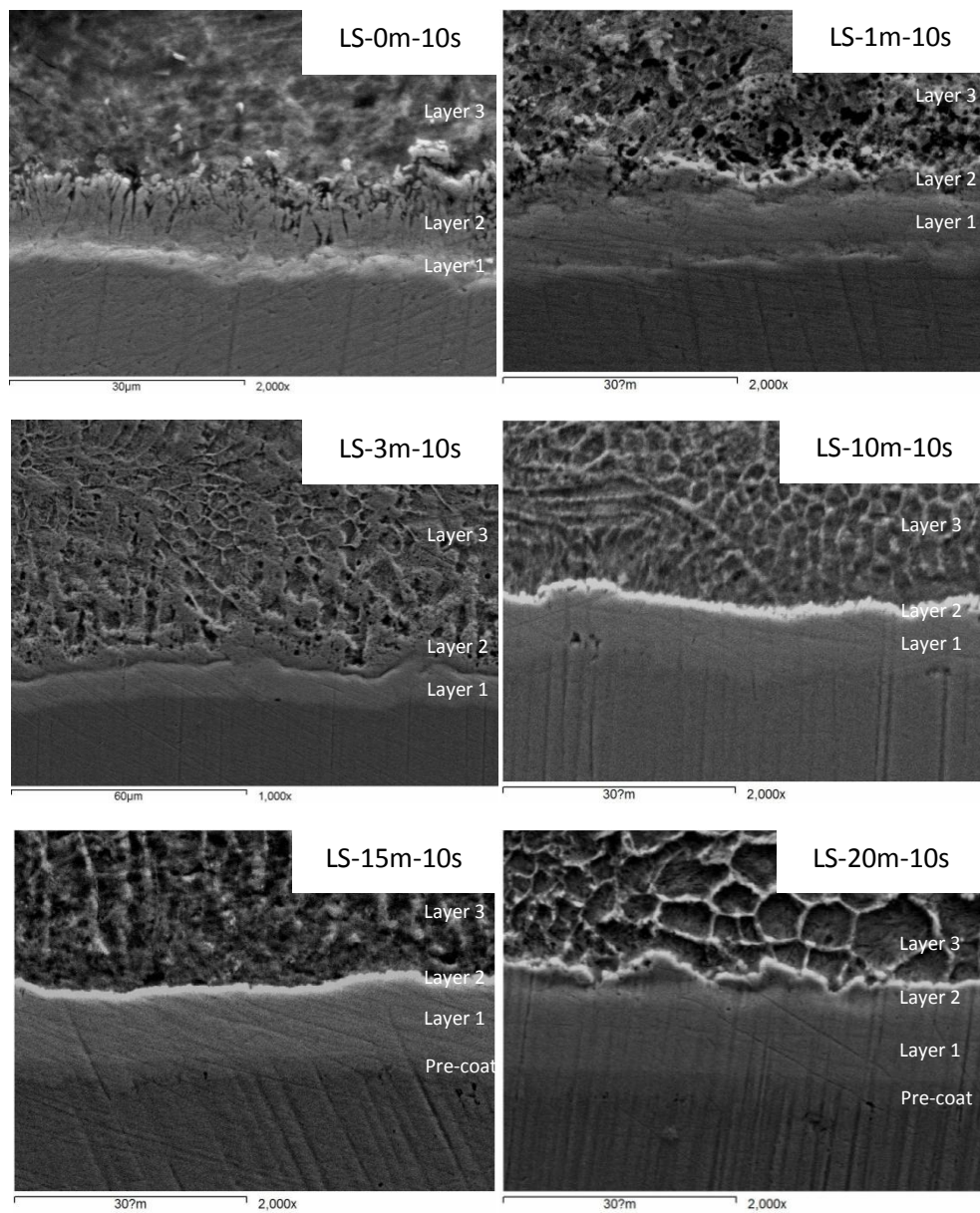
ในงานวิจัยนี้จะทำการศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคและเฟสที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อมีการพัฒนากระบวนการชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนโดยมีชั้นเคลือบโลหะผสมนิกเกิล-ฟอสฟอรัสรองพื้นที่มีอัตราการชุบเคลือบที่สูงแต่ทำการชุบเคลือบได้ที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียสจากการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีให้หัวข้อที่ 4.1 และ 4.2 เพื่อแทนขั้นตอนการจุ่มน้ำยาประสานก่อนผ่านกระบวนการชุบเคลือบสังกะสีแบบจุ่มร้อนที่ 450 องศาเซลเซียส เพื่อเปรียบเทียบกับโครงสร้างทางจุลภาคและเฟสที่เกิดขึ้นของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนโดยใช้น้ำยาประสานแบบดั้งเดิม พร้อมทั้งวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคและเฟสที่เกิดขึ้น โดยชิ้นงานที่ใช้ได้แก่เหล็กสองชนิดคือ เหล็กที่มีปริมาณส่วนผสมของธาตุซิลิกอนในปริมาณที่แตกต่างกันซึ่งได้แสดงส่วนผสมของธาตุในชิ้นงานได้ดังตารางที่ 4.5 ทั้งนี้ในการศึกษาวิเคราะห์เปรียบเทียบตัวอย่างชิ้นงานที่มีส่วนผสมของธาตุซิลิกอนที่แตกต่างกันนั้น เนื่องจากอิทธิพลของธาตุซิลิกอนในเนื้อเหล็กจะส่งผลต่อความสามารถในการทำปฏิกิริยาระหว่างเหล็กกับสังกะสีหลอมเหลวที่แตกต่างกัน ทำให้ค่าความหนาของชั้นเคลือบสังกะสีที่เกิดขึ้นมีค่าแตกต่างกันออกไปด้วย เพื่อความสะดวกต่อเข้าใจจึงขออนุญาตเหล็กที่มีปริมาณส่วนผสมของธาตุซิลิกอนในปริมาณที่ต่ำด้วย LS และ เหล็กที่มีปริมาณส่วนผสมของธาตุซิลิกอนในปริมาณที่สูงด้วย HS

โดยมีตัวแปรที่ต้องการศึกษา 2 ตัวแปร ได้แก่

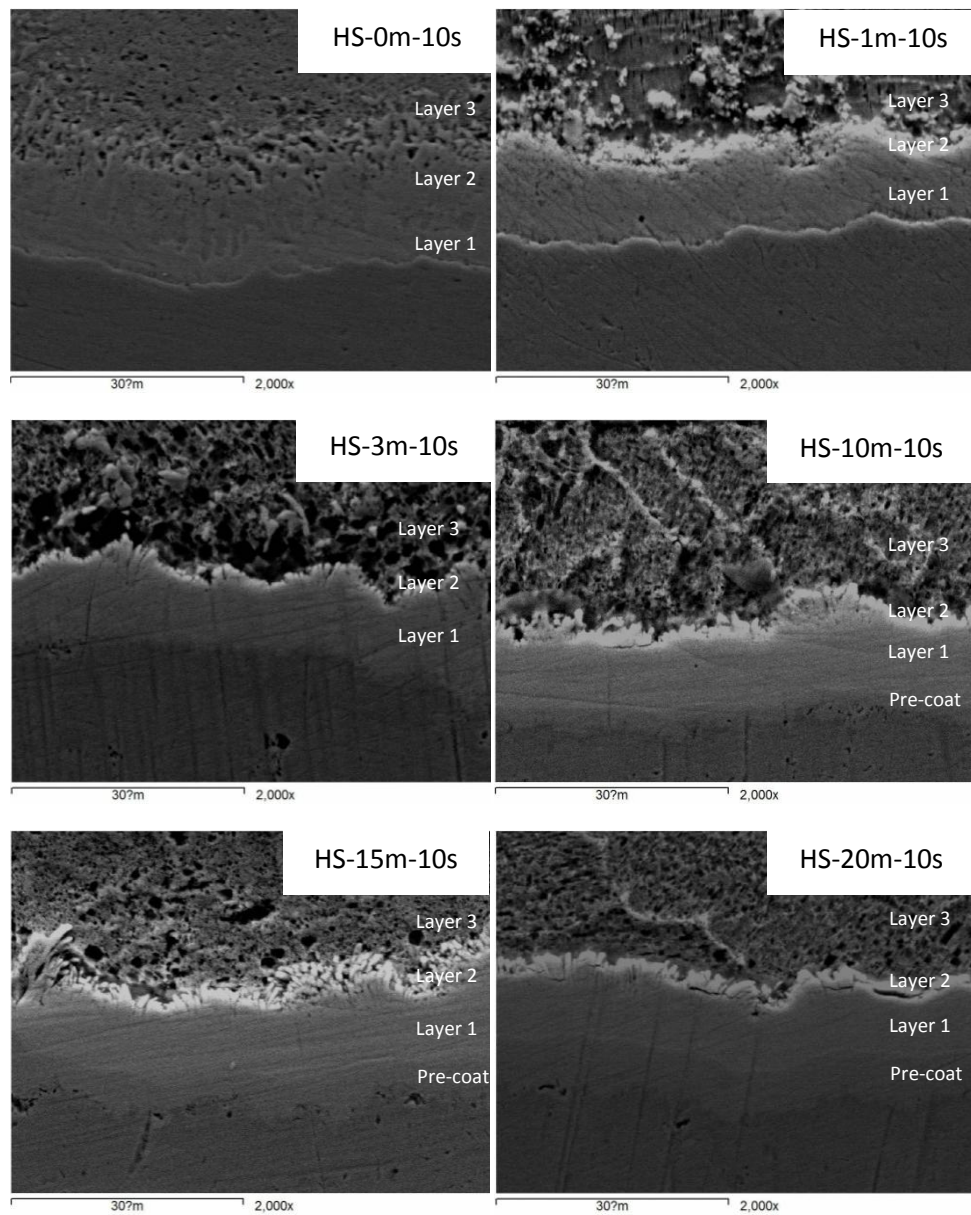
1. ความหนาของชั้นรองพื้นโลหะผสมนิกเกิล -ฟอสฟอรัส โดยปรับเปลี่ยนระยะเวลาในขั้นตอนการชุบเคลือบโลหะผสมนิกเกิล -ฟอสฟอรัสที่ 1, 3, 10, 15 และ 20 นาที และทำการคงที่ระยะเวลาสำหรับกระบวนการชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียสเป็นระยะเวลา 10 วินาที เพื่อศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคและเฟสที่เปลี่ยนแปลงไป
2. ระยะเวลาของกระบวนการชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส ที่ 5, 10, 60 และ 100 วินาที โดยมีการเลือกค่าความหนาคงที่ไว้ค่าหนึ่งที่เหมาะสมจากการศึกษาตัวแปรตัวที่ 1 เพื่อศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคและเฟสที่เปลี่ยนแปลงไป

4.2.1 การศึกษาโครงสร้างและเฟสของเหล็กชุบสังกะสีที่เปลี่ยนแปลงไปตามความหนาของชั้นรองพื้นโลหะผสมนิกเกิล-ฟอสฟอรัส

จากที่กล่าวในข้างต้นในที่นี่จะทำการชุบเคลือบชั้นรองพื้นโลหะผสมนิกเกิล -ฟอสฟอรัส ก่อนนำเข้าสู่กระบวนการชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อน ลงบนชิ้นงานซึ่งเป็นเหล็ก 2 ชนิด เกรด JIS SS400 ที่มีปริมาณส่วนผสมของซิลิกอน (Si) ที่แตกต่างกันเพื่อศึกษาควบคุมกับอิทธิพลของปริมาณซิลิกอนในเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำต่อความหนาของชั้นสังกะสีที่เกิดขึ้นด้วย ซึ่งโดยปกติแล้วหากเหล็กมีส่วนผสมของธาตุซิลิกอนที่แตกต่างกันจะทำให้ความหนาของชั้นเคลือบโลหะผสมและชั้นเคลือบสังกะสีที่เกิดขึ้นมีความหนาที่แตกต่างกันออกไปด้วย โดยทำการชุบเคลือบชั้นรองพื้นโลหะผสมนิกเกิล-ฟอสฟอรัสเป็นระยะเวลา 1, 3, 10, 15 และ 20 นาที ซึ่งใช้ส่วนผสมทางเคมีของสารละลายที่เหมาะสมจากขั้นตอนการวิเคราะห์ในหัวข้อที่ 4.1 และ 4.2 โดยได้ความหนาของชั้นเคลือบโลหะผสมนิกเกิล -ฟอสฟอรัสเป็น 0.5, 1.85, 3.02, 5.85 และ 6.56 ไมครอน ตามลำดับ หลังจากนั้นจึงทำการชุบเคลือบสังกะสีแบบจุ่มร้อนที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลาคงที่ 10 วินาที เพื่อความเข้าใจได้ง่ายและสะดวกจะขอใช้สัญลักษณ์ย่อเพื่อแทนตัวอย่างชิ้นงาน ได้แก่ LS-1m-10s หมายความว่าชิ้นงานเหล็กซึ่งมีปริมาณส่วนผสมของซิลิกอนต่ำ (HS คือเหล็กที่มีปริมาณส่วนผสมของซิลิกอนสูง) ผ่านกระบวนการชุบเคลือบชั้นรองพื้นโลหะผสมนิกเกิล -ฟอสฟอรัสแบบไม่ใช้ไฟฟ้าเป็นระยะเวลา 1 นาที และผ่านกระบวนการชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนเป็นระยะเวลา 10 วินาที ตามลำดับ โดยลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงานทั้งสองชนิดที่ผ่านกระบวนการชุบเคลือบโลหะผสมนิกเกิล -ฟอสฟอรัสและกระบวนการชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนของเหล็กทั้ง 2 ชนิด แสดงได้ดังภาพที่ 4.20 และ 4.21



ภาพที่ 4.20 แสดงลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคตัดขวางของชิ้นงานเหล็ก JIS SS-400 ที่มี ส่วนผสมของธาตุซิลิกอนในปริมาณต่ำ (LS) ที่ผ่านกระบวนการชุบเคลือบชั้นรองพื้นโลหะผสม นิกเกิล-ฟอสฟอรัส ที่ระยะเวลาต่างๆและทำการชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนเป็นระยะเวลา 10 วินาที



ภาพที่ 4.21 แสดงลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคตัดขวางของชิ้นงานเหล็ก AISI SS-400 ที่มี ส่วนผสมของธาตุซิลิกอนในปริมาณสูง (HS) ที่ผ่านกระบวนการชุบเคลือบชั้นรองพื้นโลหะผสม นิกเกิล-ฟอสฟอรัสที่ระยะเวลาต่างๆและทำการชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนเป็นระยะเวลา 10 วินาที

จากภาพที่ 4.20 และ 4.21 ภายหลังจากชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนด้วยภาพตัดขวางจากกล้องจุลทรรศน์ อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด นั้นแสดงให้เห็นว่าชิ้นงานเหล็กทั้ง 2 ชนิดที่ผ่านกระบวนการชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนโดยมีชั้นรองพื้นโลหะผสมนิกเกิล-ฟอสฟอรัสนั้นจะมีลักษณะโครงสร้างที่ค่อนข้างจะแตกต่างต่างจากชิ้นงานที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการชุบชั้นรองพื้นโลหะผสมนิกเกิล-ฟอสฟอรัส โดยชิ้นงานที่ผ่านการชุบเคลือบชั้นรองพื้นนั้นจะมีลักษณะความอัดตัวกันอย่างหนาแน่นของชั้นอินเทอร์มีเดียทที่สูงและมีความสม่ำเสมอของชั้นเคลือบที่ดีเมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่ไม่ได้ผ่านการชุบชั้นรองพื้น (LS-0m-10s และ HS-0m-10s) ซึ่งจะมีลักษณะเป็นโครงสร้างที่เกิดขึ้นในชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการชุบสังกะสีแบบทั่วๆไป ซึ่งมีลักษณะเป็นคอลัมน์ (columnar) และมีช่องว่างซึ่งแสดงให้เห็นถึงการอัดตัวที่ไม่แน่นสม่ำเสมอของชั้นอินเทอร์มีเดียทที่เกิดขึ้น และหากเปรียบเทียบเฉพาะการชุบสังกะสีแบบดั้งเดิมของเหล็กทั้งสองชนิด (LS-0m-10s และ HS-0m-10s) โดยปราศจากชั้นเคลือบรองพื้นโลหะผสมนิกเกิล-ฟอสฟอรัสนั้นจะพบว่า เหล็กชนิด HS จะมีชั้นโลหะผสม Γ , δ , ζ ที่เกิดขึ้นจากการทำปฏิกิริยาของเหล็กและสังกะสีหลอมเหลวนั้น มีค่าชั้นเคลือบที่เกิดขึ้นโดยรวม 18 ไมครอน ซึ่งมากกว่าชั้นโลหะผสมของเหล็ก LS ที่มีค่าความหนาชั้นเคลือบ Γ , δ , ζ ที่เกิดขึ้น 15.5 ไมครอนซึ่งทั้งนี้ เป็นผลมาจากการปริมาณซิลิกอนในเนื้อเหล็กซึ่งทำให้มีความสามารถในการทำปฏิกิริยาของเหล็กกับสังกะสีแตกต่างกัน (Sandelin effect) โดยในงานวิจัยนี้เหล็กที่ประกอบไปด้วยธาตุของซิลิกอนในปริมาณที่สูงกว่า จะมีปริมาณซิลิกอนที่ทำให้อัตราการชุบติดหรือความว่องไวในการทำปฏิกิริยาระหว่างเหล็กและสังกะสีหลอมเหลวอยู่ในช่วงที่ให้อัตราการชุบเคลือบสังกะสีที่สูงกว่าเหล็กที่มีปริมาณธาตุนิกเกิลในปริมาณที่ต่ำกว่า และเป็นที่น่าอนว่าสำหรับชิ้นงานที่ผ่านการชุบเคลือบชั้นรองพื้นโลหะผสมนิกเกิล-ฟอสฟอรัสของชิ้นงาน ได้มีความหนาของชั้นรองพื้นลดลงไป อันเป็นผลมาจากการแพร่ของชั้นเคลือบโลหะผสมนิกเกิล-ฟอสฟอรัส ออกไปสู่สังกะสีตามระยะเวลาในการชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อน จนเกิดปฏิกิริยาและกลายเป็นชั้น intermediate ชั้น ซึ่งชิ้นงาน LS-1m-10s, LS-3m-10s, LS-10m-10s, HS-1m-10s และ HS-3m-10s นั้นไม่ปรากฏชั้นรองพื้นหลงเหลืออยู่ในโครงสร้าง แต่ลักษณะของชั้นอินเทอร์มีเดียทที่เกิดขึ้นนั้นกลับมีลักษณะที่อัดตัวกันแน่นคล้ายกับชิ้นงานที่ยังคงมีชั้นรองพื้นปรากฏอยู่ นอกเหนือจากการวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงานทั้งหมดแล้ว ในขั้นการวิเคราะห์ต่อมาจะทำการตรวจสอบองค์ประกอบของธาตุและชนิดของเฟสที่เกิดขึ้นในเนื้อชิ้นเคลือบด้วยเทคนิคการใช้ กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนนิ่ง (Scanning electron microscope) และการวิเคราะห์การกระจายพลังงาน (Energy dispersive spectrometry, EDS)

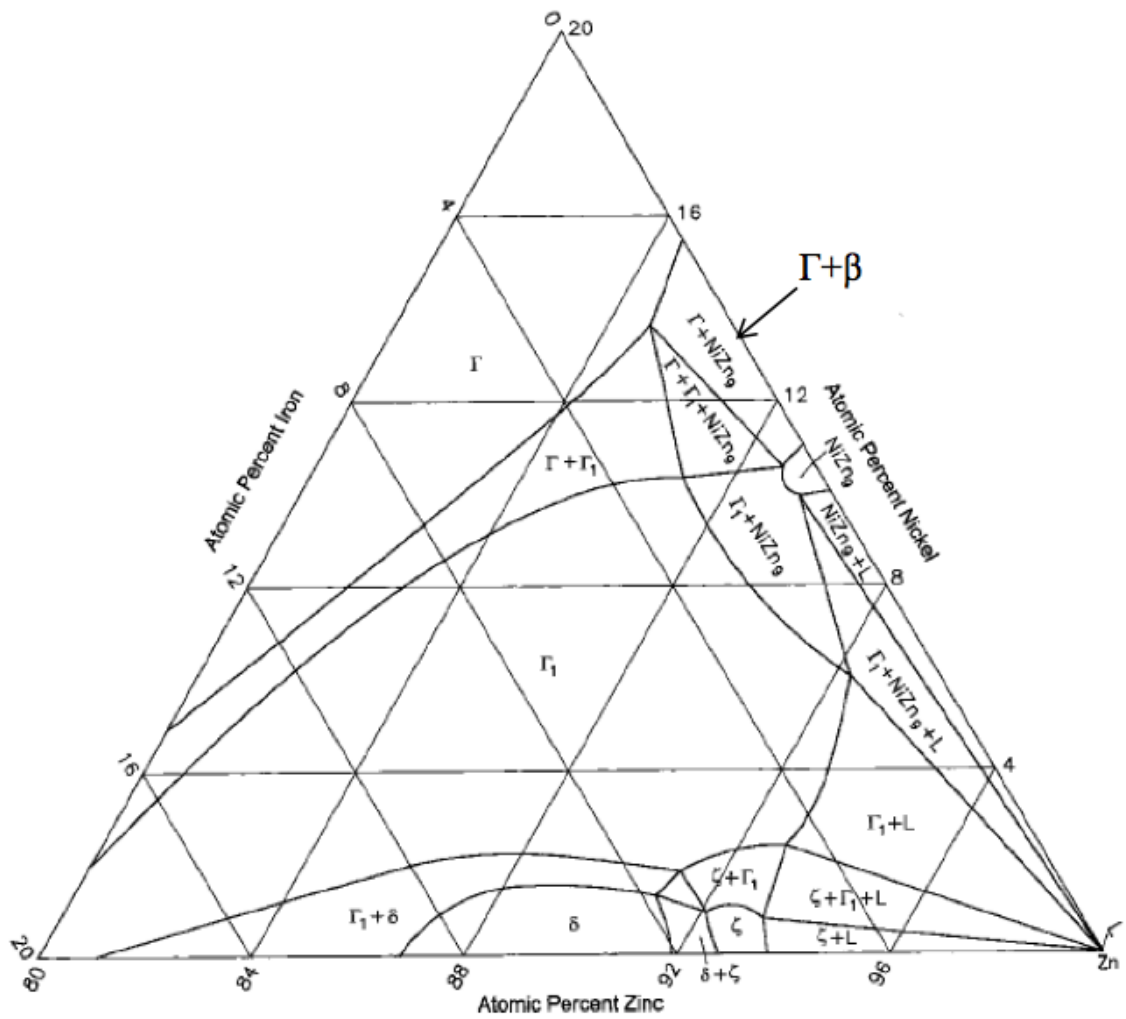
โดยในการระบุเฟสที่ได้จะอ้างอิงจากองค์ประกอบของธาตุในชั้นเคลือบแต่ละชั้นที่ได้จากการวิเคราะห์การกระจายพลังงานดังแสดงในตารางที่ 4.6

เนื่องจากในที่นี่ส่วนผสมทางเคมีในแต่ละเฟสของระบบจะประกอบไปด้วยธาตุของ เหล็ก สังกะสี และนิกเกิลเป็นหลัก พร้อมทั้งมีธาตุฟอสฟอรัสอยู่เล็กน้อย เนื่องจากเริ่มต้นแล้วชั้นเคลือบรองพื้นโลหะผสมนิกเกิล-ฟอสฟอรัสนั้นมีปริมาณของฟอสฟอรัสประกอบอยู่น้อยมาก เพื่อต่อการเข้าใจและทำการศึกษาค้นคว้าที่จะศึกษาพิจารณาในส่วนเฉพาะธาตุสำคัญ 3 ธาตุหลักดังกล่าวเท่านั้น โดยในที่นี้การบ่งชี้ชนิดของเฟสจะใช้ แผนภาพ เฟส 3 องค์ประกอบของสังกะสี นิกเกิลและเหล็ก (ternary phase diagram) ที่อุณหภูมิ 450 °C ดังภาพที่แสดงที่ 4.22 หากพิจารณาลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงานทั้งหมดดังภาพที่ 4.20 และ 4.21 จะพบลักษณะของการกระจายตัวของชั้นเคลือบและเฟสที่คล้ายคลึงกัน และมีองค์ประกอบทางเคมีที่ใกล้เคียงกัน ซึ่งจากภาพจะสามารถแบ่งเฟสที่สนใจได้ทั้งหมด ดังนี้

1. เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำในที่นี้คือชิ้นงานทดสอบ
2. ชั้นรองพื้นโลหะผสมนิกเกิล-ฟอสฟอรัสที่ยังคงปรากฏอยู่ในโครงสร้างจุลภาคภายหลังทำการชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนที่ 450 °C
3. ชั้นเคลือบที่เป็นชั้นโลหะผสมระหว่างสังกะสีและชั้นรองพื้นนิกเกิลเป็นส่วนใหญ่ อยู่เหนือชั้นรองพื้นโลหะผสมนิกเกิล -ฟอสฟอรัส ซึ่งเรียกให้คำจำกัดความแก่โลหะผสมชั้นนี้ว่า อินเทอร์มีเดียท I
4. ชั้นเคลือบที่เป็นชั้นโลหะผสมระหว่างสังกะสีและชั้นรองพื้นนิกเกิลเป็นส่วนใหญ่ อยู่เหนือชั้นรองพื้นโลหะผสมอินเทอร์มีเดียท I ซึ่งเรียกให้คำจำกัดความแก่โลหะผสมชั้นนี้ว่า อินเทอร์มีเดียท II
5. ชั้นเคลือบที่เป็นสังกะสีบริสุทธิ์เป็นเฟส η

จากการพิจารณาลักษณะโครงสร้างของชิ้นงานนั้นจะเห็นได้ว่าชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการชุบเคลือบชั้นรองพื้นโลหะผสมนิกเกิล-ฟอสฟอรัสนั้นจะประกอบไปด้วยเฟสที่สนใจทั้งหมด 5 เฟส ซึ่งในที่นี้จะพิจารณาเฉพาะ 3 เฟสที่สำคัญ โดยเฟสเหล่านี้จะขึ้นกับกฎอัตรากการแพร่ได้แก่ ชั้นโลหะผสมนิกเกิล-ฟอสฟอรัส ชั้นอินเทอร์มีเดียท I และ ชั้นอินเทอร์มีเดียท II สำหรับชั้นของสังกะสี

บริสุทธิ์นั้นในที่นี้จะขอยกเว้นการพิจารณา เนื่องจากว่าทั้งนี้ความหนาของชั้นสังกะสีบริสุทธิ์สามารถควบคุมได้จากปัจจัยภายนอก นั่นก็คืออัตราความเร็วในการตั้งขึ้นงานขึ้นจากบ่อสังกะสีหลอมเหลว



ภาพที่ 4.22 แผนภาพเฟส3องค์ประกอบของสังกะสี นิกเกิล และเหล็ก ที่อุณหภูมิ 450 °C [32]

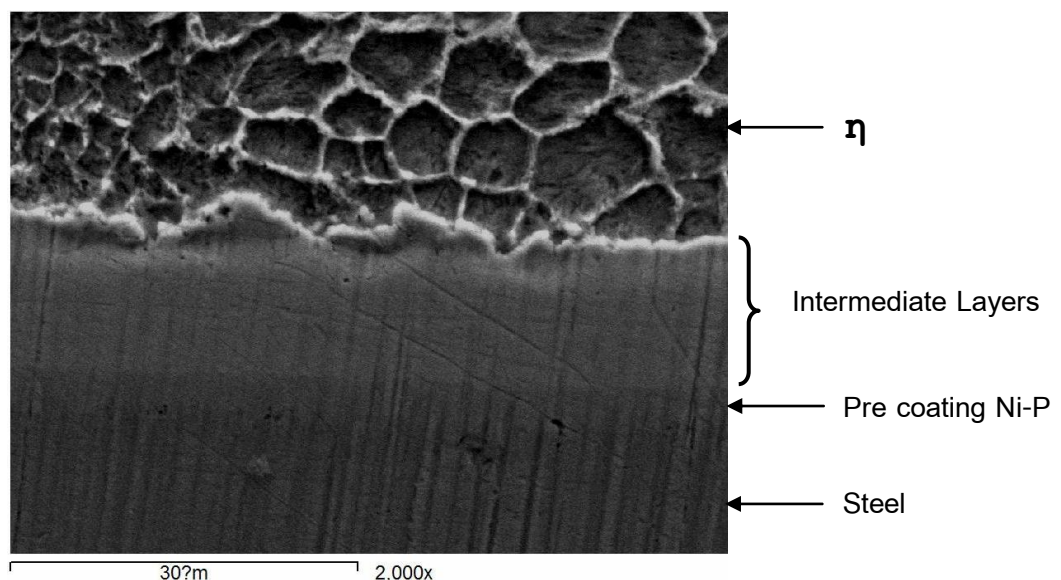
ตารางที่ 4.6 แสดงองค์ประกอบของธาตุในชั้นเคลือบแต่ละชั้นที่ได้จากการวิเคราะห์ การกระจายพลังงาน ของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการชุบสังกะสีเป็นระยะเวลา 10 วินาที (Energy dispersive spectrometry, EDS)

ชุด	Pre-coating Duration	Pre-coat				Layer 1				Layer 2					Layer 3					
		Fe	Zn	Ni	P	Fe	Zn	Ni	P	Pha	Fe	Zn	Ni	P	Pha	Fe	Zn	Ni	P	Pha
		[%atomic]n				[%atomic]				[%atomic]					[%atomic]					
LS	0 min	n	n	n	n	10.23	89.77	0	0	δ	7.71	92.29	0	0	δ	0	100	0	0	η
	1 min	n	n	n	n	8.23	90.40	1.37	0	δ+ζ	4.32	92.97	2.72	0	Γ	0	100	0	0	η
	3 min	n	n	n	n	3.31	87.32	9.37	0	Γ ₁ +β	2.31	95.38	2.62	0	Γ	1.32	98.68	0	0	η
	10 min	n	n	n	n	1.40	85.53	13.08	0	Γ+β	0	94.43	5.57	0	Γ ₁	0	100	0	0	η
	15 min	3.20	2.52	86.56	7.73	1.86	85.01	12.33	1.80	n/a	0	97.61	2.39	0	Γ ₁	0	97.93	2.07	0	η
	20 min	2.16	5.49	81.62	10.74	0	85.48	12.29	2.23	n/a	0.87	77.00	2.40	19.73	n/a	0	100	0	0	η
HS	0 min	n	n	n	n	7.97	92.23	0	0	δ	5.67	94.33	0	0	ζ	0	100	0	0	η
	1 min	n	n	n	n	9.28	90.72	0	0	δ	7.27	90.51	2.22	0	Γ ₁	1.74	96.04	2.22	0	η
	3 min	41.34	0	55.97	0	0	86.57	13.43	0	Γ+β	0	91.05	8.95	0	Γ ₁	0	100	0	0	η
	10 min	24.8	3.44	71.76	0	0	88.28	11.72	0	Γ+β	0	97.04	2.6	0	Γ ₁	0	100	0	0	η
	15 min	1.84	0	95.53	0	0	87.99	12.01	0	Γ+β	1.09	98.91	0	0	ζ	0	100	0	0	η
	20 min	1.43	1.94	91.23	5.40	0	87.71	12.29	0	Γ+β	0	98.13	1.87	0	Γ ₁	0	100	0	0	η

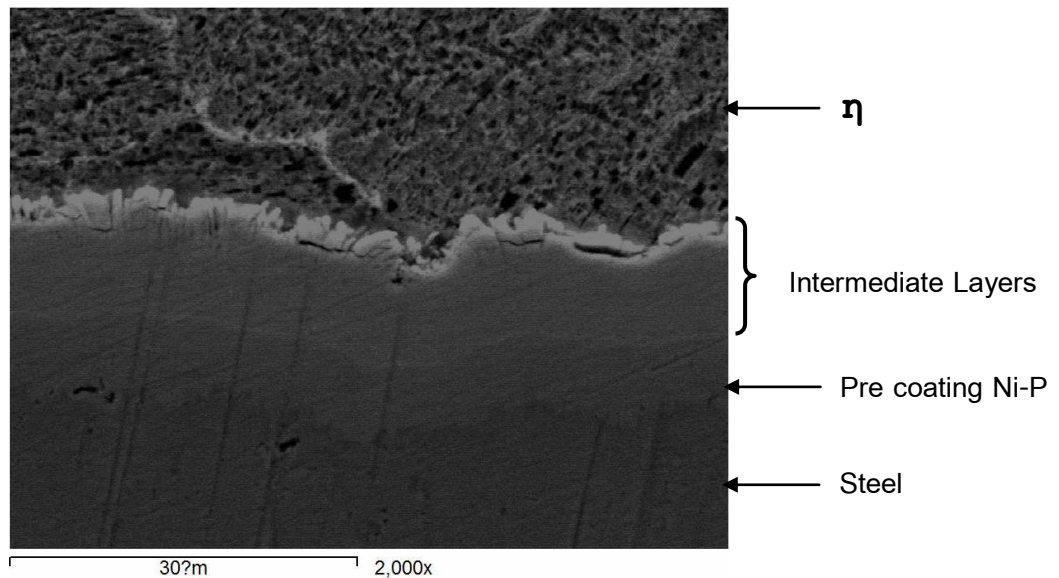
n/a คือ ไม่สามารถระบุเฟสตามข้อมูลเฟสไดอะแกรมได้

n คือ ไม่ผ่านการชุบเคลือบชั้นรองพื้น

ลักษณะและความหนาของชั้นโลหะผสมต่างๆที่เกิดขึ้นนั้นสำหรับชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการชุบเคลือบชั้นรองพื้นโลหะผสมนิกเกิล - ฟอสฟอรัสที่เกิดขึ้นนั้นพบว่า ทั้งในกรณีของชิ้นงานของเหล็กทั้งสองชนิด ซึ่งได้แก่ LS-15m-10s, LS-20m-10s, HS-10m-10s, HS-15m-10s และ HS-20m-10s จะมีค่าความหนาของชั้นโลหะผสมโดยรวมทั้งอินเทอร์มีเดียท I และ II มีความหนาโดยรวมที่น้อยกว่าชั้นเคลือบโลหะผสมสังกะสี-เหล็กที่เกิดจากการชุบสังกะสีแบบดั้งเดิมหรือการใช้ยาประสาน (Flux) เนื่องจากกระบวนการชุบสังกะสีแบบดั้งเดิมนั้น ตัวสังกะสีหลอมเหลวสามารถทำปฏิกิริยาเกิดเป็นชั้นโลหะผสมได้อย่างรวดเร็ว แต่การที่มีชั้นเคลือบโลหะผสมนิกเกิล - ฟอสฟอรัสรองพื้น ซึ่งเป็นเฟสของแข็งนั้นจะเป็นตัวกั้นปฏิกิริยาระหว่างสังกะสีหลอมเหลวและเหล็กไม่ให้เกิดปฏิกิริยากันโดยตรงหรือหน่วงให้เกิดช้าลงได้ ทำให้เกิดชั้นอินเทอร์มีเดียทของสังกะสีและนิกเกิลซึ่งมีค่าความหนาที่น้อยกว่าการเกิดปฏิกิริยาระหว่างสังกะสีและเหล็กโดยตรงในกระบวนการชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนแบบดั้งเดิม ซึ่งปรากฏผลกับเหล็กทั้งสองชนิดโดยมีค่าความหนาของชั้นอินเทอร์มีเดียทที่เกิดขึ้นประมาณ 9.5-12 ไมครอน โดยตัวอย่างของชิ้นงานที่มีลักษณะโครงสร้างที่มีชั้นรองพื้นโลหะผสมนิกเกิล - ฟอสฟอรัสเหลืออยู่และเกิดชั้นอินเทอร์มีเดียทขึ้น ของชิ้นงานทั้ง 2 ชนิดแสดงได้ดังภาพที่ 4.23 และ 4.24



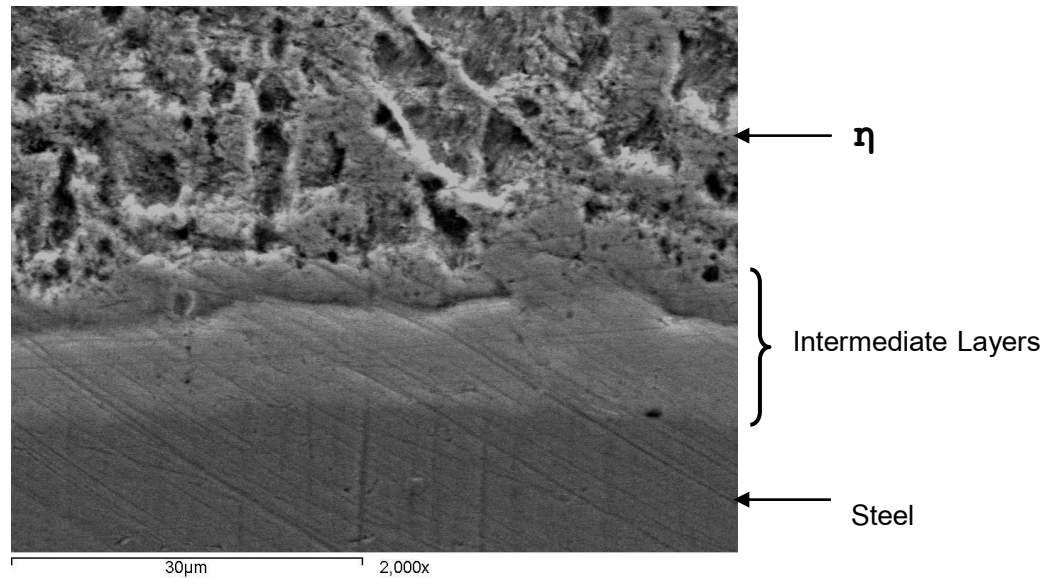
ภาพที่ 4.23 โครงสร้างทางจุลภาคของเหล็กชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อน LS-20m-10s โดยการเคลือบชั้นรองพื้นโลหะผสมนิกเกิล - ฟอสฟอรัสแบบไม่ใช้ไฟฟ้าจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด



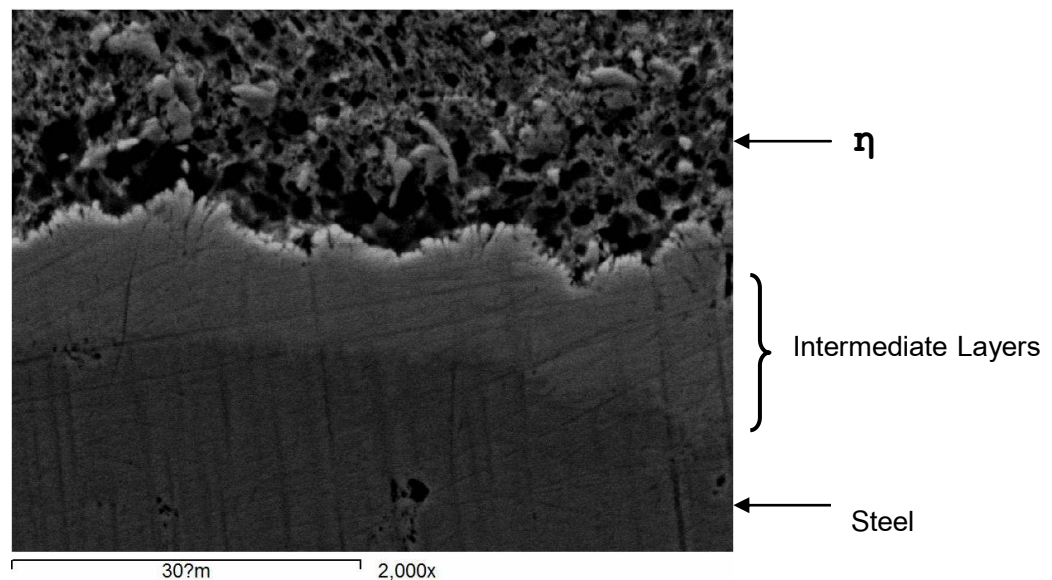
ภาพที่ 4.24 โครงสร้างทางจุลภาคของเหล็กชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อน HS-20m-10s โดยการเคลือบชั้นรองพื้นโลหะผสมนิกเกิล-ฟอสฟอรัสแบบไม่ใช้ไฟฟ้าจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด

เมื่อพิจารณาชิ้นงาน LS-1m-10s, LS-3m-10s, LS-10m-10s, HS-1m-10s และ HS-3m-10s แม้จะไม่พบชั้นรองพื้นของโลหะผสมนิกเกิล-ฟอสฟอรัสอยู่ในโครงสร้างแสดงถึงว่าชั้นเคลือบรองพื้นนั้นได้แพร่ลงบ่อชุบเคลือบสังกะสีแบบจุ่มร้อนจนหมดแล้ว เนื่องจากชิ้นงานมีชั้นเคลือบรองพื้นที่มีความบาง ทำให้เกิดการแพร่ออกสู่บ่อชุบสังกะสีหลอมเหลวจนไม่ปรากฏให้เห็นในโครงสร้างซึ่งแสดงดังภาพที่ 4.25 และ 4.26 แต่อย่างไรก็ตามลักษณะของชั้นอินเทอร์มีเดียทจะมีความหนาแน่นและคล้ายกับลักษณะโครงสร้างของชิ้นงานที่ยังคงมีชั้นรองพื้นโลหะผสมนิกเกิล-ฟอสฟอรัสเหลืออยู่ โดยชั้นอินเทอร์มีเดียทที่เกิดขึ้นจะเป็นชั้นโลหะผสมของสังกะสีและนิกเกิลซึ่งดูได้จากส่วนผสมทางเคมีของเฟสที่ปรากฏในตารางที่ 4.7 จะพบว่าปริมาณเหล็กในชั้นเคลือบนั้นมีค่าน้อยมากหรือไม่มีเลยในบางชิ้นงาน แสดงให้เห็นถึงว่าลักษณะของชั้นอินเทอร์มีเดียทที่เกิดขึ้นนั้นมีลักษณะทางกายภาพและทางเคมีที่คล้ายกับชิ้นงานที่ยังคงมีชั้นรองพื้นเหลืออยู่ และเมื่อพิจารณาเฟสที่เกิดขึ้นจาก เฟส 3 องค์ประกอบของสังกะสี นิกเกิลและเหล็ก พบว่าเฟสที่เกิดขึ้นยังคงเป็นเฟสชนิดเดียวกับชิ้นงานที่ยังคงมีชั้นรองพื้นเหลืออยู่ ซึ่งเฟสอินเทอร์มีเดียท I ก็คือเฟส $\Gamma + \beta$ และเฟสอินเทอร์มีเดียท II คือเฟส Γ' โดยมีค่าความหนาของชั้นอินเทอร์มีเดียทโดยเฉลี่ยประมาณ 10-12 ไมครอน โดยจะเรียกชั้นอินเทอร์มีเดียทของชิ้นงานที่ไม่มีชั้นรองพื้นโลหะผสม

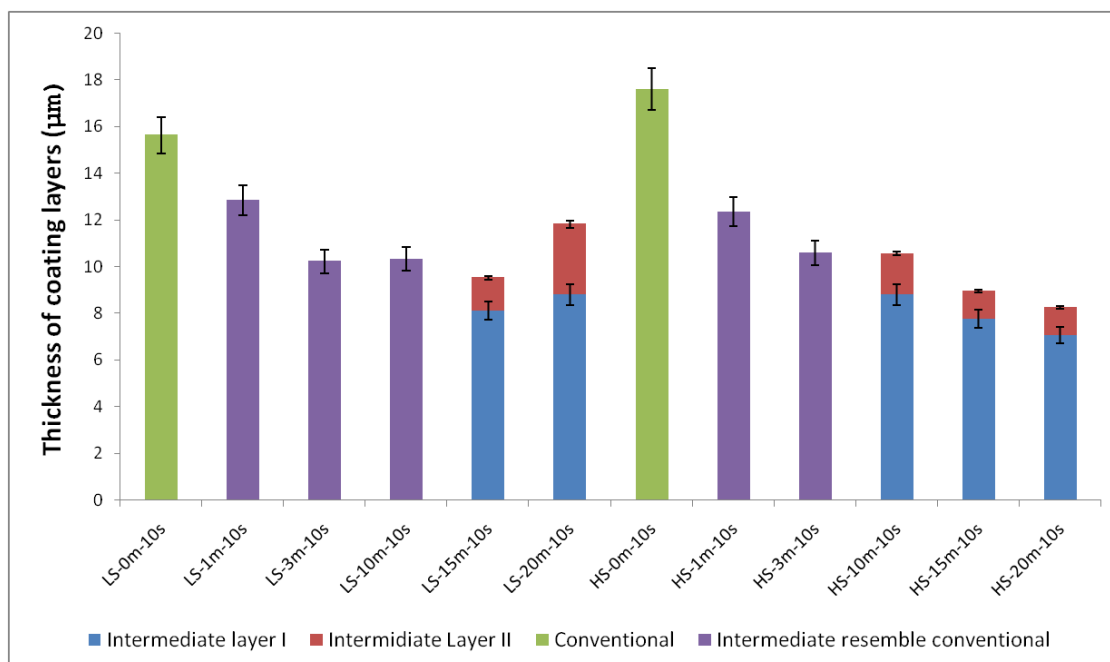
นิกเกิล-ฟอสฟอรัสหลงเหลืออยู่นี้ว่า “ชั้นเคลือบปราศจากชั้นรองพื้น” โดยค่าความหนาเฉลี่ยของชั้นเคลือบแต่ละชนิดที่เกิดขึ้นแสดงได้ดังกราฟในภาพที่ 4.30



ภาพที่ 4.25 โครงสร้างทางจุลภาคของเหล็กชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อน LS-3m-10s โดยการเคลือบชั้นรองพื้นโลหะผสมนิกเกิล-ฟอสฟอรัสแบบไม่ใช้ไฟฟ้าจากกล่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด



ภาพที่ 4.26 โครงสร้างทางจุลภาคของเหล็กชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อน HS-3m-10s โดยการเคลือบชั้นรองพื้นโลหะผสมนิกเกิล-ฟอสฟอรัสแบบไม่ใช้ไฟฟ้าจากกล่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด

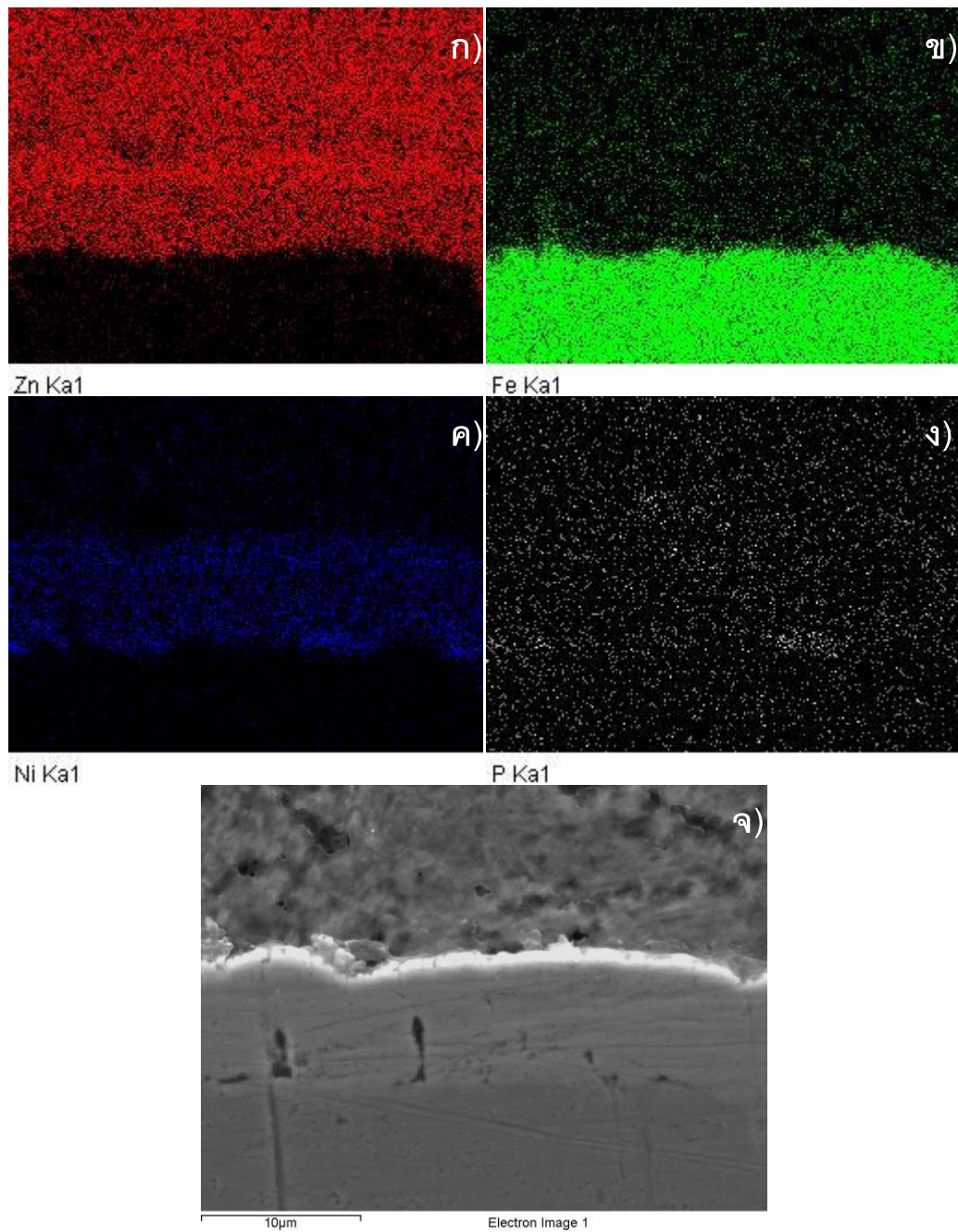


ภาพที่ 4.27 ความหนาเฉลี่ยของชั้นเคลือบของเหล็กชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนโดยการเคลือบชั้นรองพื้นด้วยโลหะผสมนิกเกิล -ฟอสฟอรัสแบบไม่ใช้ไฟฟ้า และทำการชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนเป็นระยะเวลา 10 วินาที

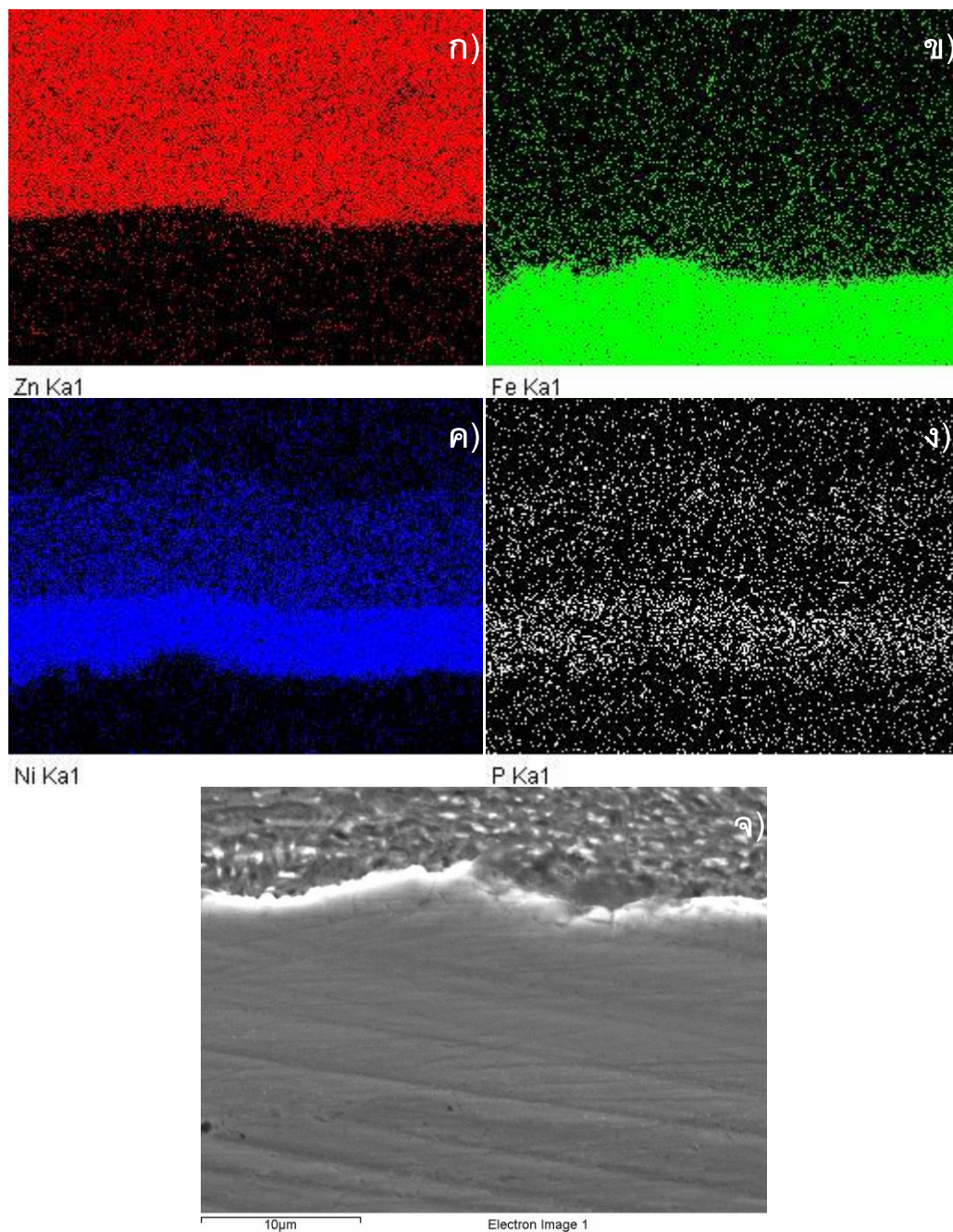
แต่ทั้งนี้จากกราฟแสดงค่าความหนาของชั้นเคลือบอินเทอร์มีเดียทที่เกิดขึ้นดังภาพที่ 4.30 จะแสดงให้เห็นค่าความหนาของชั้นเคลือบต่างๆที่เกิดขึ้น โดยชั้นงานที่ไม่ได้ผ่านการชุบเคลือบชั้นรองพื้นจะมีค่าชั้นอินเทอร์มีเดียทที่สูงกว่าชั้นงานที่ผ่านการชุบเคลือบชั้นรองพื้นเสมอ ทั้งในกรณีเหล็กที่มีปริมาณซิลิกอนสูงและซิลิกอนต่ำ ซึ่งแสดงให้เห็นถึงผลของการชุบเคลือบชั้นรองพื้นโลหะผสมนิกเกิล-ฟอสฟอรัสที่สามารถควบคุมการเกิดชั้นอินเทอร์มีเดียทให้มีค่าความหนาที่ลดลงได้ จากการกันของชั้นเคลือบรองพื้นที่มีสถานะเป็นของแข็งเพื่อป้องกันการทำปฏิกิริยาระหว่างเหล็กและสังกะสีหลอมเหลวโดยตรง เพื่อเป็นการศึกษาวิเคราะห์เพิ่มเติมในรายละเอียดของลักษณะเฟสและการกระจายตัวของธาตุที่ปรากฏในโครงสร้างทางจุลภาคของชั้นงานที่ผ่านกระบวนการชุบเคลือบชั้นรองพื้นโลหะผสมนิกเกิล -ฟอสฟอรัส ทั้งกรณีสำหรับชั้นงานที่ปรากฏชั้นรองพื้นและไม่ปรากฏชั้นรองพื้นในโครงสร้าง แต่ลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคยังคงมีลักษณะโครงสร้างเป็นลักษณะการอัดตัวกันแน่นไม่มีช่องว่างคล้ายเป็นลักษณะของคอลลอยด์ จึงได้ทำการศึกษาความเข้มของการกระจายตัวของธาตุด้วยเทคนิค EDS-Mapping ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด เพื่อดูลักษณะของการกระจายตัวของธาตุแต่ละชนิดในโครงสร้างที่เกิดขึ้น โดยเลือกตัวแทนชั้นงาน 2 ชนิดเพื่อเปรียบเทียบความชัดเจนของโครงสร้างได้แก่ ชั้นงานตัวแทนเหล็กที่มี

ปริมาณซิลิกอนต่ำ LS-3m-10s และ LS-20m-10s ซึ่งผลการกระจายตัวของธาตุแต่ละชนิดซึ่งได้แก่ เหล็ก นิกเกิล ฟอสฟอรัส และ สังกะสี แสดงได้ดังภาพที่ 4.28 และ 4.29

จากภาพที่ 4.28 เป็นภาพการกระจายตัวของธาตุทั้ง 4 ชนิดของชิ้นงาน LS-3m-10s ซึ่งเป็นชิ้นงานที่ไม่ปรากฏชั้นรองพื้นโลหะผสมนิกเกิล -ฟอสฟอรัสอยู่ในโครงสร้าง แต่ทั้งนี้ยังคงลักษณะโครงสร้างเป็นคอลัมน์คล้ายกับโครงสร้างที่ยังปรากฏชั้นรองพื้นหลงเหลืออยู่ ซึ่งจากภาพจะแสดงให้เห็นถึงการกระจายตัวของธาตุนิกเกิลและธาตุฟอสฟอรัสในโครงสร้าง ซึ่งแสดงได้ดังภาพที่ 4.28 ค), ง) ตามลำดับ โดยธาตุนิกเกิลจะแสดงการกระจายตัวของจุดสีน้ำเงินในลักษณะเป็นแถบบางๆ ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับภาพที่ 4.28 จ) จากโหมด EDS พบว่าบริเวณที่มีแถบการกระจายตัวของธาตุนิกเกิลนั้นคือชั้นสารประกอบระหว่างโลหะผสมนิกเกิล -ฟอสฟอรัสกับสังกะสี หรือชั้นอินเทอร์มีเดียทที่เกิดขึ้นมีลักษณะคล้ายชั้นอินเทอร์มีเดียทในโครงสร้างที่ยังคงปรากฏชั้นรองพื้นอยู่ และสำหรับธาตุฟอสฟอรัสซึ่งมีอยู่ในโครงสร้างเล็กน้อยจะเห็นการกระจายตัวของจุดสีขาวบางๆ ในภาพที่ 4.28 ง) และมีความเข้มของชั้นที่บริเวณตำแหน่งเดียวกับที่ปรากฏชั้นอินเทอร์มีเดียทที่เกิดขึ้น ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการที่ชั้นรองพื้นโลหะผสมนิกเกิล -ฟอสฟอรัสมีการทำปฏิกิริยากับสังกะสีหลอมเหลว โดยบริเวณที่พบธาตุสังกะสีจะแสดงได้ดังแถบสีแดงเข้มในภาพที่ 4.28 ก) แสดงให้เห็นถึงปริมาณของธาตุสังกะสีในโครงสร้างจำนวนมากโดยการกระจายตัวของจุดสีแดงจะเริ่มจากบริเวณชั้นอินเทอร์มีเดียทซึ่งเป็นบริเวณซ้อนทับกับบริเวณการกระจายตัวของธาตุนิกเกิล ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการเข้าทำปฏิกิริยา และความเข้มของจุดสีแดงจะเข้มขึ้นเรื่อยๆ เมื่อการกระจายตัวของธาตุอยู่ในบริเวณที่เป็นชั้นสังกะสีบริสุทธิ์ สำหรับการกระจายตัวของธาตุเหล็กแสดงได้ในภาพที่ 4.28 ข) จะพบว่าบริเวณแถบการกระจายตัวของจุดสีเขียวจะเข้มที่สุดบริเวณที่แสดงถึงชิ้นงานซึ่งเป็นเหล็กในโครงสร้างมากที่สุด และการกระจายตัวของธาตุเหล็กจะค่อยๆ จางลงและเปลี่ยนเป็นการกระจายตัวเป็นแบบกระจายตัวซึ่งไม่ได้มีลักษณะเป็นแถบชั้นเหมือนกับธาตุนิกเกิล ซึ่งแสดงให้เห็นถึงทราปที่ชั้นอินเทอร์มีเดียทที่เกิดขึ้นนั้นเป็นสารประกอบระหว่างสังกะสีหลอมเหลวและชั้นรองพื้นโลหะผสมนิกเกิล -ฟอสฟอรัส ไม่ใช่สารประกอบระหว่างสังกะสีหลอมเหลวและเหล็ก ทั้งนี้จึงเป็นสาเหตุที่โครงสร้างของชิ้นงานที่ปราศจากชั้นเคลือบรองพื้นในโครงสร้างนั้น ยังมีลักษณะโครงสร้างที่อัดตัวกันแน่นของชั้นอินเทอร์มีเดียทคล้ายกับชิ้นงานที่ยังคงมีชั้นรองพื้นปรากฏอยู่ในโครงสร้าง



ภาพที่ 4.28 แสดงภาพการกระจายตัวของธาตุแต่ละชนิดของชิ้นงาน LS-3m-10s ด้วยเทคนิคการวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุ ก) Zinc ข) Fe ค) Ni ง) P จ) EDS

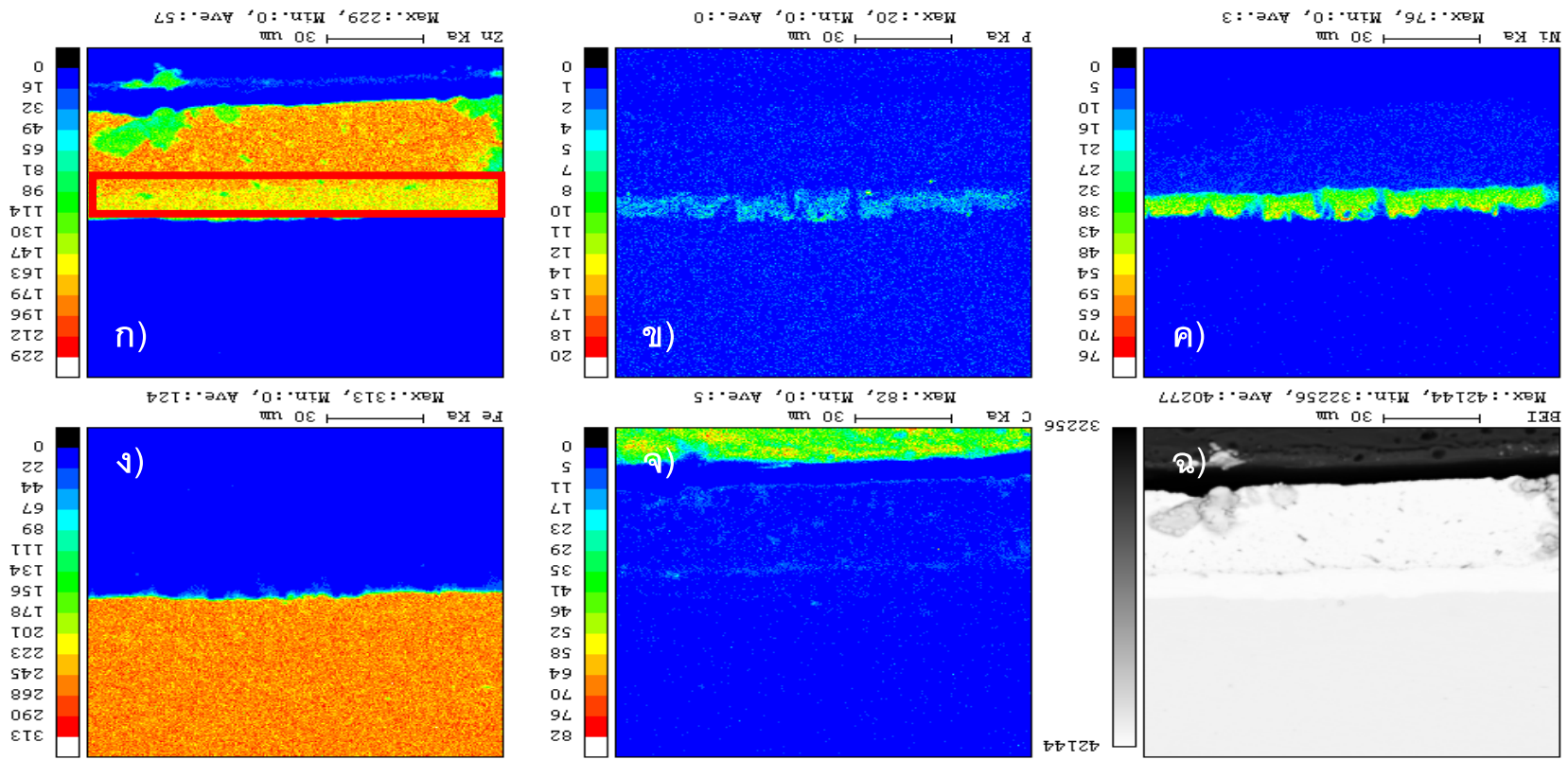


ภาพที่ 4.29 แสดงภาพการกระจายตัวของธาตุแต่ละชนิดของชิ้นงาน LS-20m-10s ด้วยเทคนิคการวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุ ก) Zinc ข) Fe ค) Ni ง) P จ) EDS

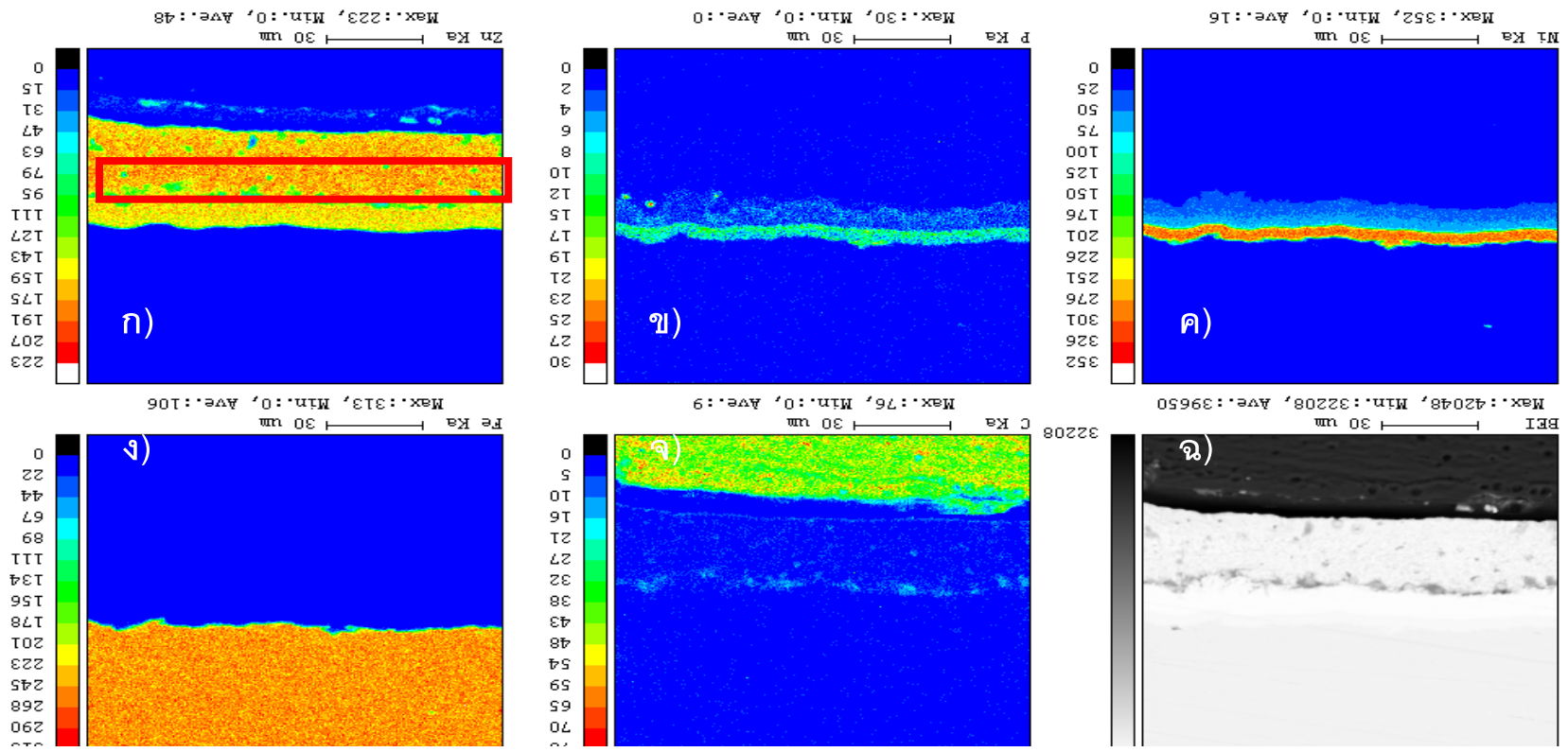
เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบให้เห็นถึงการกระจายตัวของธาตุอย่างชัดเจน จึงได้ทำการตรวจสอบการกระจายตัวของธาตุเหล็ก สังกะสี นิกเกิล และฟอสฟอรัส ในชิ้นงาน LS-20m-10s โดยเป็นชิ้นงานที่ยังคงปรากฏให้เห็นชั้นร่องพื้นโลหะผสมนิกเกิล-ฟอสฟอรัสในโครงสร้างดังแสดงในภาพที่ 4.29 จากภาพจะเห็นลักษณะการกระจายตัวของธาตุต่างๆคล้ายกับการกระจายตัวของธาตุในชิ้นงานที่ไม่มีการปรากฏชั้นร่องพื้นดังที่อธิบายก่อนหน้านี โดยจากภาพที่ 4.29 ค) แสดงให้เห็นถึงการกระจายตัวของน้ำเงินของธาตุนิกเกิลซึ่งจะเห็นเป็นลักษณะแถบสีน้ำเงินเข้มที่ชัดเจนซึ่งแสดงให้เห็นว่าบริเวณนั้นมีปริมาณนิกเกิลอยู่เป็นจำนวนมากหรือคือชั้นร่องพื้นโลหะผสมนิกเกิล - ฟอสฟอรัสที่ปรากฏในโครงสร้าง ในส่วนด้านบนบริเวณแถบสีน้ำเงินเข้มจะเห็นการกระจายตัวของธาตุนิกเกิลที่เบาบางลง ทั้งนี้ส่วนบริเวณนั้นได้แก่ชั้นอินเทอร์มีเดียทที่ประกอบไปด้วยสังกะสีเป็นหลักและมีส่วนผสมของนิกเกิลในส่วนหนึ่ง และสำหรับธาตุฟอสฟอรัสจะเห็นการกระจายตัวสีขาวอยู่ในโครงสร้างซึ่งพบหนาแน่นบริเวณแถบที่แสดงถึงชั้นร่องพื้นโลหะผสมนิกเกิล - ฟอสฟอรัสบริเวณเดียวกับที่พบธาตุนิกเกิลอยู่อย่างหนาแน่นและมีการกระจายตัวที่เบาบางลงเมื่อถึงบริเวณของชั้นอินเทอร์มีเดียท ส่วนการกระจายตัวของธาตุสังกะสีนั้นแสดงได้ดังการกระจายตัวของสีแดงดังภาพที่ 4.29ก) ซึ่งจะเห็นแถบสีแดงเข้มสุดบริเวณชั้นสังกะสีบริสุทธิ์และชั้นอินเทอร์มีเดียทคล้ายกับชิ้นงาน LS-3m-10s แต่ถึงอย่างไรก็ตามการกระจายตัวของธาตุเหล็กซึ่งแสดงด้วยภาพที่ 4.29 บริเวณสีเขียวย่อมเฉพาะบริเวณชิ้นงานเท่านั้น แต่ไม่พบการกระจายตัวที่เข้มในบริเวณชั้นอินเทอร์มีเดียท นั้นแสดงให้เห็นถึงว่าชั้นอินเทอร์มีเดียทที่เกิดขึ้นเป็นสารประกอบระหว่างสังกะสีและชั้นโลหะผสมนิกเกิล-ฟอสฟอรัสโดยส่วนใหญ่

เมื่อนำชิ้นงานทั้งสองชิ้นข้างต้นซึ่งได้แก่ชิ้นงาน LS-3m-10s และ LS-20m-10s มาทำการวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุในโครงสร้างทางจุลภาคที่เกิดขึ้น เพื่อยืนยันลักษณะการกระจายตัวของเฟสที่เกิดขึ้นให้ชัดเจนด้วยเทคนิค electron probe micro analyzer (EPMA) ซึ่งผลของการวิเคราะห์แสดงได้ดังภาพที่ 4.30 และ 4.31 จากภาพจะแสดงให้เห็นถึงความเข้มของสีซึ่งแสดงถึงปริมาณของธาตุแต่ละชนิดที่พิจารณาในแต่ละบริเวณของโครงสร้างทางจุลภาค เมื่อพิจารณาภาพที่ 4.30 ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการกระจายตัวของธาตุในชิ้นงาน LS-3m-10s โดยภาพที่ 4.30 ก) จะแสดงลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงานในโหมด EDS ซึ่งเมื่อพิจารณาภาพ 4.30 ข) แสดงขอบเขตของธาตุคาร์บอนจากการจับยึดชิ้นงานด้วยเรซิน ซึ่งจากเดิมนั้นการวิเคราะห์ภายในโครงสร้าง LS-3m-10s ด้วยเทคนิค EDS-Mapping แม้ว่าจะไม่ปรากฏชั้นร่องพื้นภายในชิ้นงานแต่ชิ้นงานยังคงปรากฏชั้นอินเทอร์มีเดียทระหว่างสังกะสีและโลหะผสมนิกเกิล - ฟอสฟอรัส ที่มีความ

อัดตัวกันแน่นคล้ายกับโครงสร้างของชิ้นงานที่มีชั้นรองพื้น ซึ่งคาดการณ์ว่าในช่วงระยะเวลาในการชุบสังกะสี 10 วินาทีนี้ จะทำให้การแพร่ของชั้นรองพื้นโลหะผสมนิกเกิล - ฟอสฟอรัสมีการแพร่ออกไปจนเกือบหมด แต่ยังคงมีชั้นเคลือบบางๆ บางส่วนหลงเหลืออยู่ในโครงสร้างเพียงเล็กน้อย ซึ่งจากการทดลองผลของ EPMA ในภาพที่ 4.30 ง) แสดงให้เห็นถึงการกระจายตัวของธาตุนิกเกิล ซึ่งพบการกระจายตัวของแถบธาตุในระดับสีเขียว ซึ่งแสดงให้เห็นถึงปริมาณของนิกเกิลในระดับปานกลาง (95-133) ซึ่งก็คือบริเวณชั้นอินเทอร์มีเดียท แต่จะพบความเข้มข้นของการกระจายตัวของธาตุนิกเกิลในระดับสูง (228-247) ซึ่งแสดงได้ในบางจุดสีแดงเข้มในภาพซึ่งแสดงให้เห็นถึงชั้นรองพื้นที่ยังคงหลงเหลืออยู่ในปริมาณเล็กน้อย และมีการกระจายตัวของความเข้มข้นของชั้นนิกเกิลบางลงเรื่อยๆ เมื่อเข้าไปใกล้ชั้นของสังกะสีมากขึ้น รวมถึงการกระจายตัวของธาตุฟอสฟอรัส แม้ว่าจะมีปริมาณความเข้มข้นไม่สูงและมองเห็นไม่ชัดเจนเท่ากับการกระจายตัวของธาตุนิกเกิล แต่จากภาพที่ 4.30 จ) จะแสดงให้เห็นถึงบริเวณที่ยังคงปรากฏชั้นรองพื้นบางส่วนมีธาตุของฟอสฟอรัสปะปนอยู่ส่วนหนึ่งและมีการกระจายตัวที่เบาบางลงบริเวณชั้นอินเทอร์มีเดียท ซึ่งอีกเหตุผลหนึ่งที่สนับสนุนว่าชั้นอินเทอร์มีเดียทนั้นเป็นชั้นสารประกอบระหว่างโลหะผสมนิกเกิล - ฟอสฟอรัสและสังกะสี เนื่องจากเมื่อพิจารณาการกระจายตัวของธาตุเหล็ก ดังภาพที่ 4.30 ค) จะเห็นได้ว่าไม่พบการกระจายตัวของธาตุเหล็กในบริเวณของชั้นอินเทอร์มีเดียท พบความเข้มข้นของการกระจายตัวของธาตุเหล็กที่ชัดเจนในบริเวณพื้นผิวของชิ้นงานเท่านั้น ซึ่งเป็นการยืนยันได้อีกทางหนึ่งว่าชั้นรองพื้นโลหะผสมนิกเกิล - ฟอสฟอรัสสามารถป้องกันการทำปฏิกิริยาระหว่างสังกะสีและเหล็กได้ และสำหรับการวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุสังกะสีจะพบว่ามีการกระจายตัวอย่างชัดเจนบริเวณชั้นอินเทอร์มีเดียท สำหรับชั้นอินเทอร์มีเดียทในบริเวณที่อยู่ติดกับชั้นรองพื้นหรือชั้นอินเทอร์มีเดียท I นั้นจะมีความเข้มข้นของธาตุสังกะสีที่น้อยกว่า ซึ่งจะเห็นเป็นลักษณะของสีเหลืองอ่อน โดยหากพิจารณาควบคู่กับผลของการวิเคราะห์ธาตุด้วยเทคนิค EDS จะพบว่า ชั้นอินเทอร์มีเดียท I จะมีส่วนผสมของธาตุแต่สังกะสี นิกเกิลและเหล็กซึ่งปรากฏใน ternary phase diagram เป็นเฟสของ $\Gamma_1 + \beta$ (ภาพประกอบที่ 4.28) ซึ่งจะมีปริมาณของธาตุสังกะสีอยู่ 87.32% ในชั้นเคลือบที่น้อยกว่าชั้นอินเทอร์มีเดียท II ซึ่งมีปริมาณอยู่ 95.38% โดยเฟสที่เกิดขึ้นได้แก่ก็คือเฟสแกมมา (Γ) ซึ่งจากภาพจะเห็นได้ถึงถึงความเข้มข้นของธาตุสังกะสีที่สูงกว่าชั้นอินเทอร์มีเดียท ซึ่งแสดงถึงการเข้าทำปฏิกิริยาเพื่อเกิดเป็นชั้นอินเทอร์มีเดียทขึ้น สำหรับความเข้มข้นของการกระจายตัวของธาตุสังกะสีที่พบได้ชัดเจนที่สุดนั้น จะเป็นบริเวณของชั้นเคลือบสังกะสีบริสุทธิ์ซึ่งเป็นชั้นเคลือบอยู่บริเวณด้านบนสุดของชิ้นงาน จะเห็นได้ชัดเจนของลักษณะความเข้มข้นของสีแดง แสดงถึงความเข้มข้นของการกระจายธาตุสังกะสีที่สูงกว่าบริเวณอื่นๆ ซึ่งประกอบไปด้วยปริมาณของธาตุสังกะสี 100 %



ภาพที่ 4.30 แสดงลักษณะการวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุแต่ละชนิดด้วยเทคนิค EPMA ในโครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการชุบเคลือบชั้นรองพื้นโลหะผสมนิกเกิล - ฟอสฟอรัส และผ่านกระบวนการชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนของเหล็กชนิด low silicon LS-3m-10s ตำแหน่งที่ 1 ก). สังกะสี ข). ฟอสฟอรัส ค). นิกเกิล ง). เหล็ก จ). คาร์บอน ฉ). ตำแหน่ง EDS

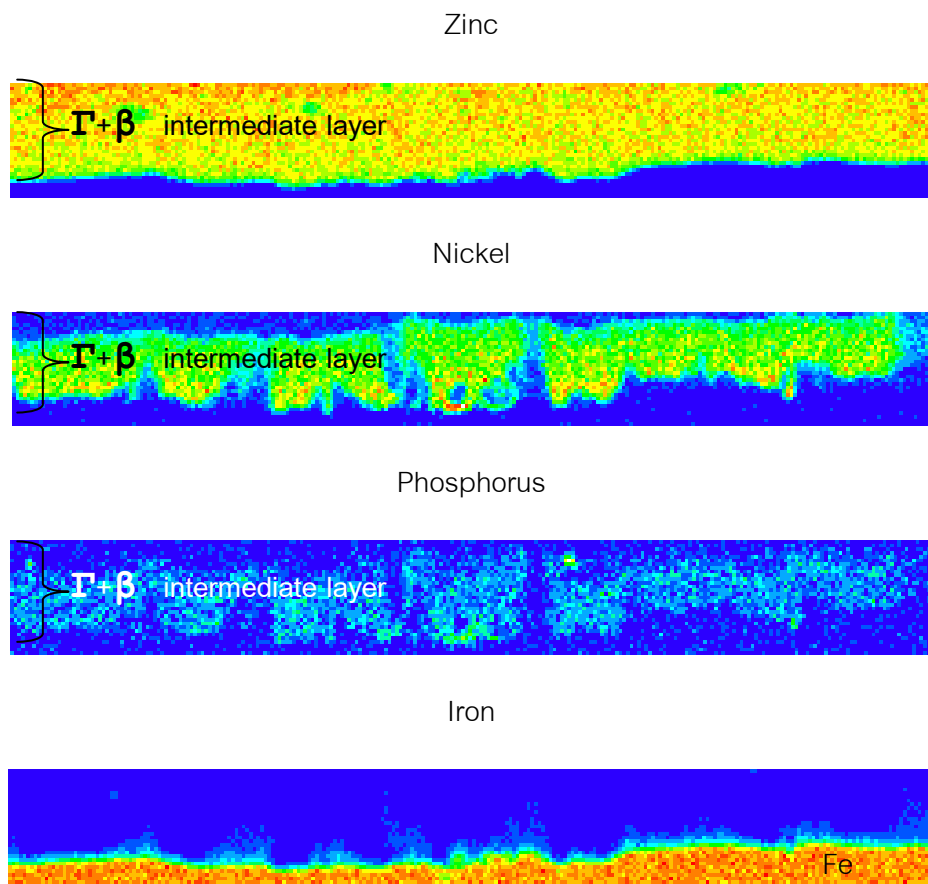


ภาพที่ 4.31 แสดงลักษณะการวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุแต่ละชนิดด้วยเทคนิค EPMA ในโครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการชุบเคลือบชั้นรองพื้นโลหะผสมนิกเกิล - ฟอสฟอรัสและผ่านกระบวนการชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนของเหล็กชนิด high silicon HS-20m-10s ตำแหน่งที่ 1 ก). สังกะสี ข). ฟอสฟอรัส ค). นิกเกิล ง). เหล็ก จ). คาร์บอน ฉ). ตำแหน่ง EDS

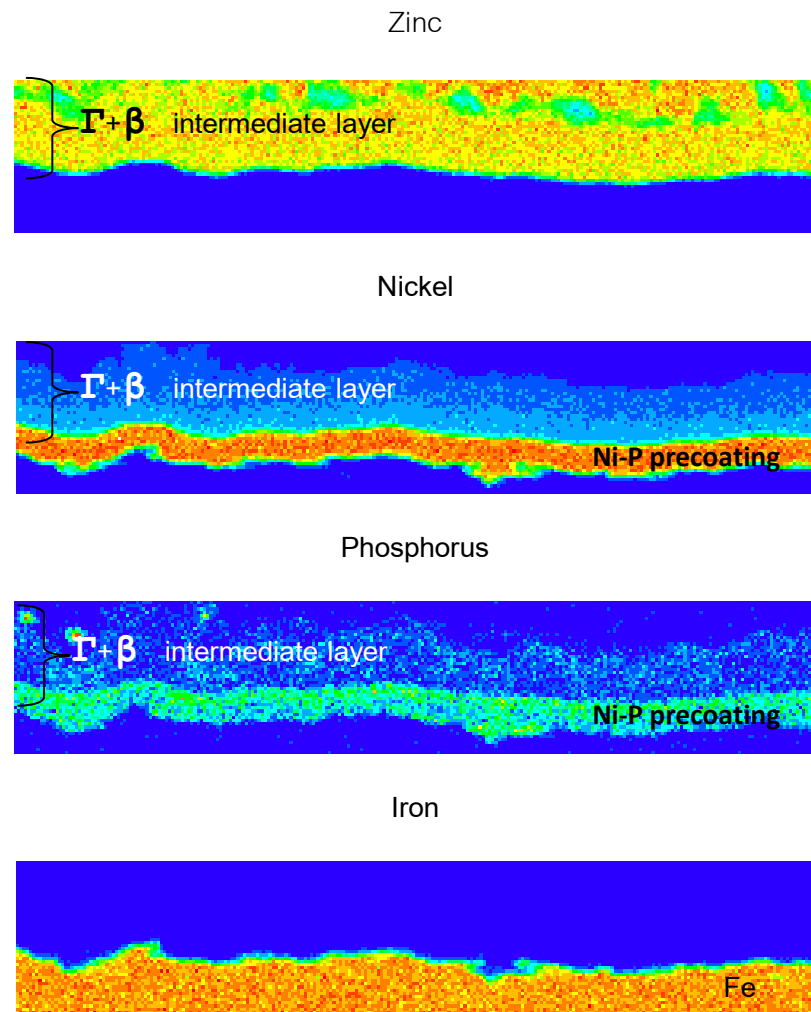
เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบการกระจายตัวของธาตุต่างๆในชิ้นงาน LS-20m-10s ที่ยังคงมีชั้นรองพื้นเหลือปรากฏอยู่ในโครงสร้างนั้น ผลของการวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุด้วยเทคนิค EPMA ในชิ้นงานที่ยังคงปรากฏชั้นรองพื้นนั้นแสดงได้ดังภาพที่ 4.31 โดยภาพที่ 4.31 ก) จะแสดงลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงานในโหมด EDS ซึ่งเมื่อพิจารณาภาพ 4.31 ข) แสดงขอบเขตของธาตุคาร์บอนจากการจับยึดชิ้นงานด้วยเรซิน ซึ่งความเข้มข้นการกระจายตัวของธาตุนิกเกิลในชั้นเคลือบรองพื้นที่เหลืออยู่แสดงได้ดังภาพย่อยที่ 4.31ง) จะเห็นแถบชั้นระดับความเข้มของสีแดงในระดับสูง (276-352) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าบริเวณนั้นมีนิกเกิลอยู่เป็นจำนวนมาก สอดคล้องกับตำแหน่งบริเวณที่ยังคงปรากฏชั้นรองพื้นดังแสดงในภาพ 4.31 ก) ซึ่งลักษณะการกระจายตัวของธาตุนิกเกิลจะเบาบางลงในบริเวณของชั้นอินเทอร์มีเดียท I โดยจะเห็นลักษณะของการกระจายตัวของธาตุเป็นชั้นสีเหลือง ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับผลของการวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุด้วยเทคนิค EDS จะพบว่าบริเวณของชั้นอินเทอร์มีเดียท I ซึ่งอยู่ติดกับบริเวณชั้นรองพื้นมีปริมาณของธาตุนิกเกิลผสมอยู่ 12.29% และความเข้มข้นของการกระจายตัวของธาตุจะลดลงเมื่อเข้าสู่บริเวณของชั้นอินเทอร์มีเดียท II ซึ่งอยู่ถัดออกมาจากบริเวณชั้นอินเทอร์มีเดียท I จะมีปริมาณของธาตุนิกเกิลอยู่ 2.40% ซึ่งจะแสดงเป็นแถบสีเขียวอ่อนในโครงสร้างและจางลงเรื่อยๆเมื่อเข้าไปใกล้ชั้นสังกะสีบริสุทธิ์ โดยที่ชั้นรองพื้นที่เหลืออยู่ยังคงพบการกระจายตัวของธาตุฟอสฟอรัสในบริเวณชั้นเคลือบผสมอยู่เล็กน้อย (10-17) ดังแสดงในภาพที่ 4.31 จ) และสำหรับความเข้มข้นของการกระจายตัวของธาตุเหล็กดังภาพที่ 4.31 ค) ในโครงสร้างนั้นจะไม่พบการกระจายตัวของธาตุในบริเวณของชั้นอินเทอร์มีเดียทและชั้นรองพื้นเช่นเดียวกับชิ้นงาน LS-3m-10s ซึ่งแสดงให้เห็นว่าไม่มีการเกิดการทำปฏิกิริยาระหว่างเหล็กและสังกะสีหลอมเหลวเพื่อเกิดเป็นชั้นอินเทอร์มีเดียทขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากการที่ชั้นรองพื้นโลหะผสมสามารถกั้นขวางการทำปฏิกิริยาของเหล็กและสังกะสีหลอมเหลวได้ ทำให้เกิดเป็นชั้นอินเทอร์มีเดียทแบบใหม่แทนการเกิดชั้นสารประกอบระหว่างเหล็กและสังกะสีแบบดั้งเดิม ซึ่งชั้นอินเทอร์มีเดียทที่เกิดขึ้นจะประกอบไปด้วยธาตุสังกะสีเป็นหลัก โดยเห็นการกระจายตัวสีแดงเข้มที่ชัดเจน (159-175) ดังแสดงในภาพที่ 4.31 ฉ) สำหรับชั้นอินเทอร์มีเดียทในบริเวณที่อยู่ติดกับชั้นรองพื้นหรือชั้นอินเทอร์มีเดียท I และ II นั้น มีปริมาณของความเข้มข้นของการกระจายตัวของธาตุสังกะสีที่ไม่แตกต่างกันมากนัก โดยที่ค่า 85.48% และ 87.00% สำหรับชั้นอินเทอร์มีเดียท I และ II ตามลำดับ โดยที่ชั้นอินเทอร์มีเดียททั้ง 2 ชั้นมีปริมาณส่วนผสมของธาตุฟอสฟอรัสในชั้นเคลือบด้วย ทำให้ไม่สามารถที่จะระบุเฟสที่แท้จริงได้จาก ternary phase diagram (ภาพประกอบที่ 4.22) แต่ถึงอย่างไรก็ดีการที่ลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงานยังคงปรากฏชั้นรองพื้นภายในโครงสร้างนั้น สามารถยังคงช่วยยับยั้งการทำ

ปฏิกิริยาของเหล็กและสังกะสีหลอมเหลวได้และไม่ปรากฏพบการกระจายตัวของธาตุเหล็กในชั้นอินเทอร์มีเดียท แต่สำหรับความเข้มของการกระจายตัวของธาตุสังกะสีที่พบได้ชัดเจนที่สุดนั้น จะเป็นบริเวณของชั้นเคลือบสังกะสีบริสุทธิ์เช่นเดียวกับชิ้นงาน LS-3m-10s

เมื่อพิจารณาเฉพาะชั้นอินเทอร์มีเดียทที่เกิดขึ้นเพื่อหาการกระจายตัวของธาตุและทิศทางการแพร่เพื่อประเมินความเป็นไปได้ของตำแหน่งเฟสที่เกิดขึ้น ซึ่งภาพขยายตำแหน่งบริเวณของชั้นอินเทอร์มีเดียทที่เกิดขึ้นของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการชุบเคลือบชั้นรองพื้น LS-3m-10s และ LS-20m-10S แสดงได้ดังภาพที่ 4.32 และ 4.33 ซึ่งจากภาพพบว่า การกระจายตัวของธาตุสังกะสีในโครงสร้างของชิ้นงานทั้งสองจะมีการกระจายตัวเป็นลักษณะของจุดสีแดงเข้มบนเนื้อพื้นที่มีปริมาณของความเข้มของสังกะสีที่น้อยกว่า เป็นบริเวณที่มีการรวมตัวกันของเฟสที่มีปริมาณของสังกะสีที่แตกต่างกัน ซึ่งสอดคล้องกับผลของ EDS ที่บ่งบอกว่าในบริเวณของชั้นอินเทอร์มีเดียทนี้เป็นเฟสของ $\Gamma + \beta$ โดยที่ชั้นอินเทอร์มีเดียทนี้ยังประกอบไปด้วยธาตุนิเกิลและฟอสฟอรัส โดยจะพบการกระจายตัวของธาตุและปริมาณความเข้มที่แตกต่างกันในแต่ละบริเวณ โดยความเข้มของธาตุฟอสฟอรัสและนิเกิลที่ปรากฏในโครงสร้างของชิ้นงาน LS-20m-10s จะมีความเข้มของการกระจายตัวที่เด่นชัดกว่า เนื่องจากยังคงเหลือชั้นรองพื้นปรากฏให้เห็นในโครงสร้าง ซึ่งลักษณะการกระจายตัวของธาตุบ่งบอกถึงลักษณะของการแพร่ของชั้นเคลือบรองพื้นที่มีแนวโน้มของการแพร่ของชั้นเคลือบเข้าสู่ชั้นสังกะสีมากกว่าที่จะแพร่เข้าสู่เนื้อเหล็ก เกิดเป็นชั้นอินเทอร์มีเดียทที่ประกอบด้วยธาตุนิเกิลและสังกะสีเป็นหลัก โดยความแตกต่างของชิ้นงานทั้งสองที่ทำการวิเคราะห์จะพบแค่ความเข้มของการกระจายตัวของธาตุนิเกิลที่แตกต่างกันตามที่ได้วิเคราะห์ผลก่อนหน้านี้นี้ แต่ถึงอย่างไรก็ดี ไม่ว่าจะเป็ชิ้นงาน LS-3m-10s หรือ LS-10m-10S กลับไม่ปรากฏการกระจายตัวของธาตุเหล็กให้เห็น ซึ่งสามารถยืนยันได้อีกทางหนึ่งว่าไม่เกิดการแพร่ของเหล็กเข้าสู่ชั้นอินเทอร์มีเดียท ซึ่งเป็นผลมาจากการชุบเคลือบชั้นรองพื้นที่ป้องกันการแพร่ระหว่างสังกะสีหลอมเหลวและเหล็กได้



ภาพที่ 4.32 แสดงลักษณะการวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุแต่ละชนิดด้วยเทคนิค EPMA บริเวณชั้นอินเทอร์มีเดียทของเหล็กชนิด low silicon (LS) LS-3m-10s



ภาพที่ 4.33 แสดงลักษณะการวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุแต่ละชนิดด้วยเทคนิค
บริเวณชั้นอินเทอร์มีเดียทของเหล็กชนิด high silicon (HS) LS-20m-10s

EPMA

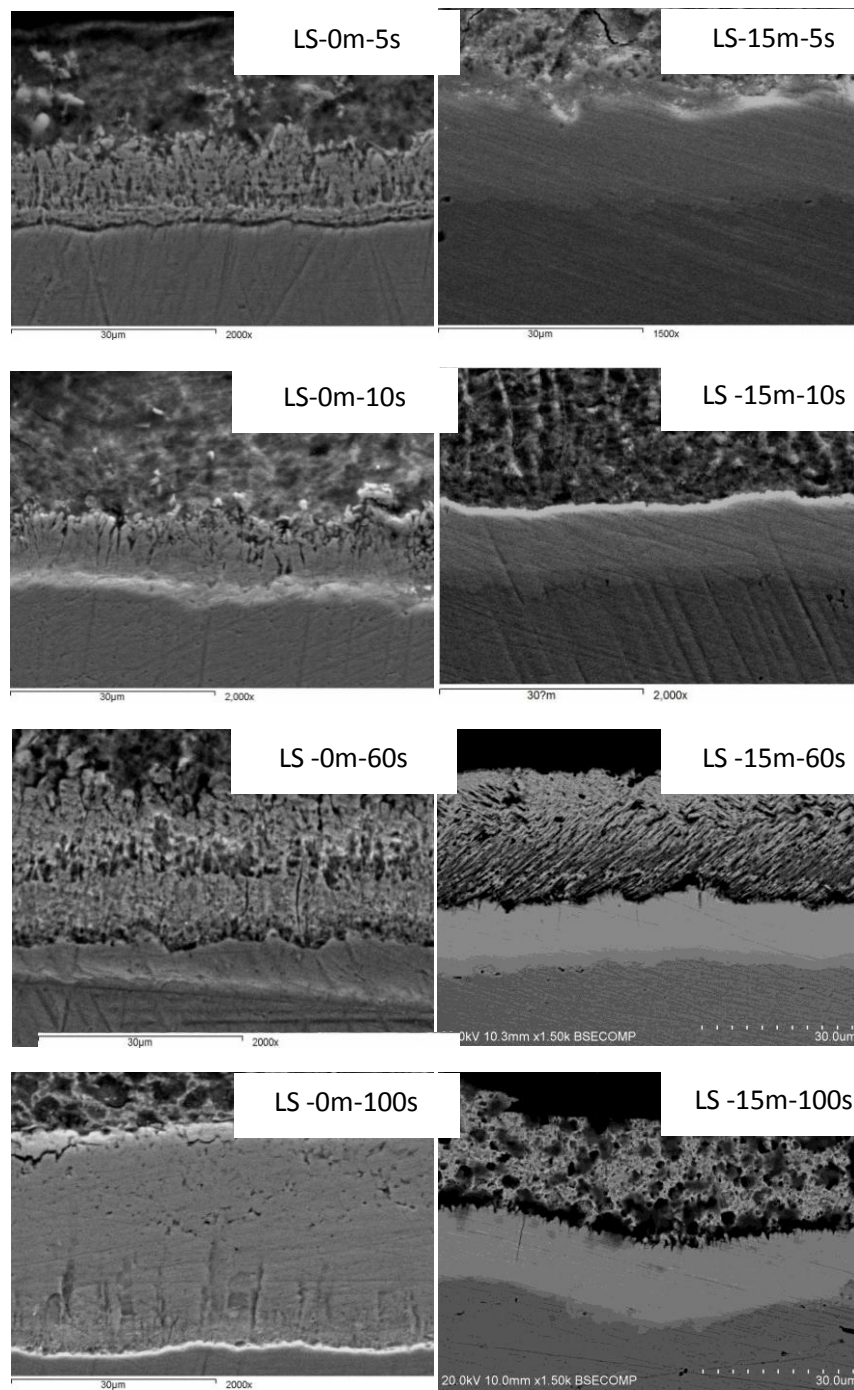
จากการศึกษาโครงสร้างและเฟสของเหล็กชุบสังกะสีที่เปลี่ยนแปลงไปตามความหนาของชั้นรองพื้นโลหะผสม นิกเกิล-ฟอสฟอรัส จะพบว่าชิ้นงานซึ่งก็คือ LS-1m-10s, LS-3m-10s, LS-10m-10s, HS-1m-10s และ HS-3m-10s ที่ทำการชุบเคลือบชั้นรองพื้นโลหะผสมนิกเกิล - ฟอสฟอรัสหากมีชั้นเคลือบที่บางจนเกินไปจะทำให้ชั้นเคลือบเกิดการแพร่สู่บ่อสังกะสีหลอมเหลว จนไม่ปรากฏอยู่ในโครงสร้าง แต่ทั้งนี้ชั้นเคลือบที่ปราศจากชั้นรองพื้นที่เกิดขึ้นนั้นกลับพบส่วนผสมของธาตุนิกเกิลอยู่ภายในโครงสร้างและเมื่อตรวจสอบชนิดของเฟสของอินเทอร์มีเดียทที่เกิดขึ้น พบว่าเป็นเฟสชนิดเดียวกันกับชิ้นงานที่ยังคงมีชั้นรองพื้นเหลืออยู่ และสำหรับชิ้นงานที่ยังคงปรากฏชั้นรองพื้นอยู่ในโครงสร้างนั้นจะมีค่าความหนาของชั้นอินเทอร์มีเดียทเฉลี่ย 9.5-12 ไมครอน ซึ่งสังเกตว่าค่าความหนาชั้นอินเทอร์มีเดียทของแต่ละชิ้นงานจะมีความหนาต่างกันเล็กน้อย ซึ่งสันนิษฐานว่าปฏิกิริยาในกระบวนการชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนเป็นระยะเวลา 10 วินาที นั้น อาจจะยังไม่เข้าสู่การแพร่ในสภาวะคงตัว (steady state) เพื่อการศึกษาหาสภาวะคงตัวของปฏิกิริยาในขั้นตอนต่อไป จึงจะทำการศึกษาผลของระยะเวลาอื่นๆในกระบวนการชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนว่าส่งผลต่อการเติบโตของชั้นอินเทอร์มีเดียท อย่างไรบ้าง ซึ่งในที่นี้จะเลือกกำหนดค่าคงที่ความหนาของชั้นรองพื้นที่เหมาะสม โดยหากพิจารณาจากผลการทดลองข้างต้นจะพบว่าชิ้นงานที่ไม่พบชั้นรองพื้นนิกเกิลเหลืออยู่นั้นไม่เหมาะสมสำหรับการนำมาศึกษาในกรณีที่จะต้องชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนในระยะเวลาที่ยาวนานขึ้น แต่สำหรับชิ้นงานที่มีความหนาของชั้นรองพื้นคงปรากฏอยู่ในชิ้นงานเพียงพอแล้ว อาทิเช่น LS-20m-10s และ HS-20m-10s นั้นก็จะไม่เลือกนำมาพิจารณา ทั้งนี้จึงได้เลือกชิ้นงานที่เหมาะสมนั้นคือ LS-15m และ HS-15m เพื่อทำการศึกษาในขั้นตอนต่อไป

4.2.2 การศึกษาโครงสร้างและเฟสของเหล็กชุบสังกะสีที่เปลี่ยนแปลงไปตามระยะเวลาในการชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อน

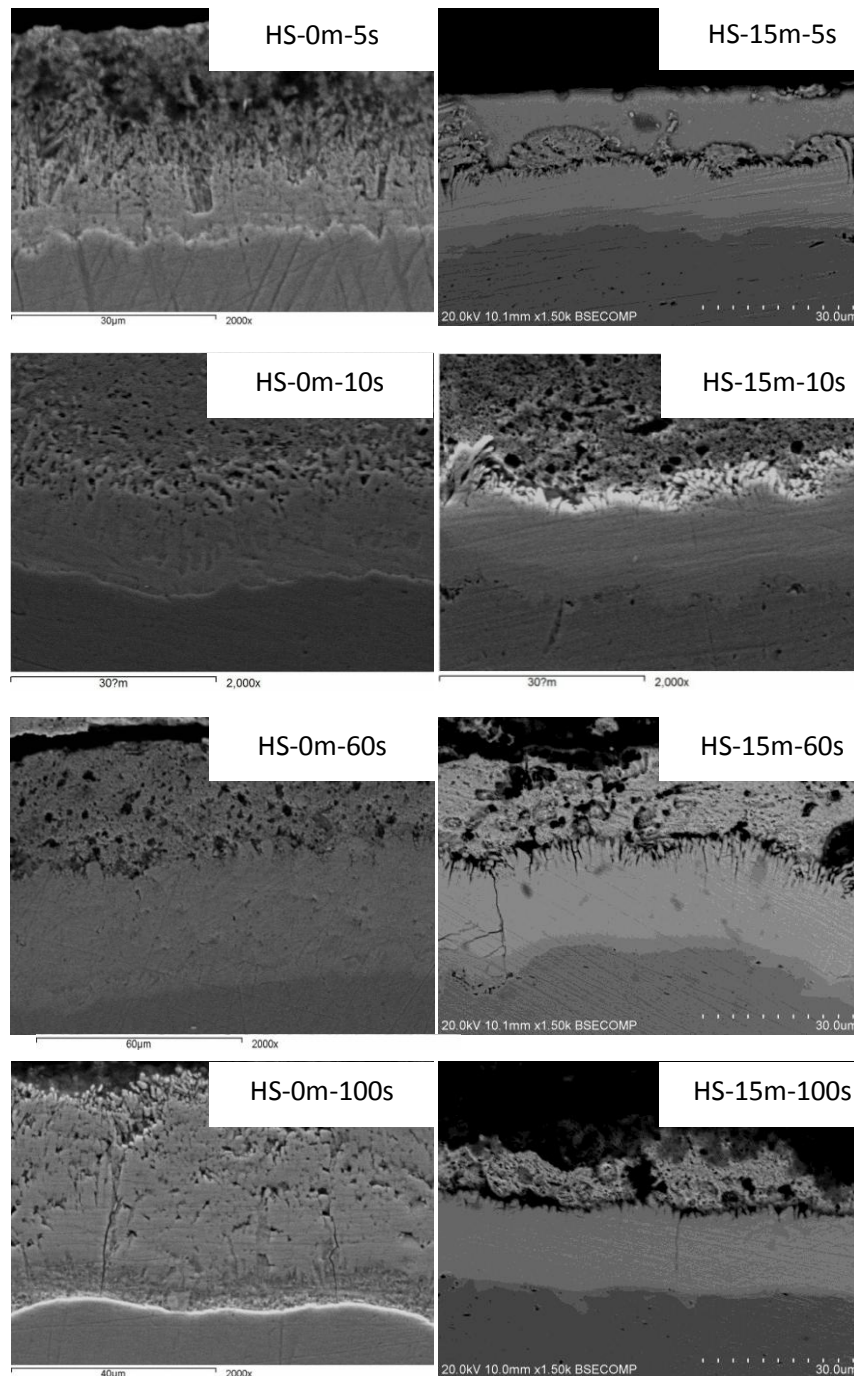
ชิ้นงานเหล็กที่มีส่วนผสมของธาตุซิลิกอนต่ำ LS-15m และเหล็กซึ่งมีส่วนผสมของธาตุซิลิกอนที่สูง HS-15m ถูกชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนเป็นระยะเวลา 5, 10, 60 และ 100 วินาที และทำการศึกษาลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคด้วยภาพตัดขวางจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาดแสดงดังภาพที่ 4.34 และภาพที่ 4.35 ซึ่งแสดงให้เห็นถึงลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงานทั้งสองชนิดที่ผ่านการชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนเป็นระยะเวลาต่างๆ ซึ่งเปรียบเทียบระหว่างการชุบแบบใช้ฟลักซ์แบบปกติกับชิ้นงานที่ผ่านการชุบเคลือบชั้นรองพื้นโลหะผสมนิกเกิล - ฟอสฟอรัสเป็นระยะเวลา 15 นาที พบว่าชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการชุบเคลือบชั้นรองพื้นนั้น ยังคงปรากฏมีชั้นรองพื้นหลงเหลืออยู่ภายในโครงสร้างแต่มีความหนาของชั้นรองพื้นที่ลดลง สังเกตได้จากชั้นสีเทาอ่อนซึ่งคือชั้นรองพื้นโลหะผสมนิกเกิล-ฟอสฟอรัสที่ปรากฏในภาพ โดยความหนาของชั้นรองพื้นจะลดลงแปรผันตามระยะเวลาในการชุบสังกะสี พร้อมทั้งปรากฏชั้นอินเทอร์มีเดียท I และ อินเทอร์มีเดียท II ในโครงสร้าง

เมื่อพิจารณาลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคประกอบกับชนิดของเฟสที่เกิดขึ้น ซึ่งวิเคราะห์ผลด้วยการวิเคราะห์การกระจายพลังงาน ของชิ้นงานทั้งสองชนิด พบว่า ชนิดของเฟสที่เกิดขึ้นสำหรับชิ้นงานที่ผ่านการชุบเคลือบชั้นรองพื้นนั้นจะมีชั้นรองพื้นเหลือภายในโครงสร้างและจะมีชั้นอินเทอร์มีเดียท I ที่เกิดขึ้นเป็นชนิดเดียวกันคือเฟสของ $\Gamma + \beta$ และสำหรับชั้นอินเทอร์มีเดียท II จะมีชนิดของเฟสที่ใกล้เคียงกันคือ เฟสเซต้า (ζ) และเฟสแกมมา (Γ) ขึ้นอยู่กับส่วนผสมทางเคมีของเฟสนั้นๆ ซึ่งแสดงชนิดของเฟสและส่วนผสมทางเคมีของเฟสที่เกิดขึ้นแสดงได้ดังตารางที่ 4.7 ซึ่งชั้นอินเทอร์มีเดียททั้ง 2 จะมีปริมาณส่วนผสมของเหล็กอยู่น้อยมาก ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความสามารถในการขวางกั้นการทำปฏิกิริยาระหว่างเหล็กและสังกะสีได้จากผลของการเคลือบชั้นรองพื้นโลหะผสมนิกเกิล - ฟอสฟอรัสก่อนนำไปผ่านกระบวนการชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อน ซึ่งความหนาโดยรวมของชั้นอินเทอร์มีเดียท I และ II นั้น จะมีค่าประมาณ 14, 9, 21 และ 19 ไมครอน สำหรับชิ้นงานเหล็กที่มีส่วนผสมของธาตุซิลิกอนต่ำและมีค่าประมาณ 16, 9, 22 และ 19 ไมครอน สำหรับชิ้นงานเหล็กที่มีส่วนผสมของธาตุซิลิกอนสูงเมื่อถูกจุ่มลงในบ่อสังกะสีหลอมเหลวเป็นระยะเวลา 5, 10, 60 และ 100 นาทีตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่าความหนาของชั้นเคลือบที่เกิดขึ้นโดยส่วนใหญ่จะมีค่าความหนาที่น้อยกว่าชั้นโลหะผสมที่เกิดขึ้นในชิ้นงานที่ผ่านการชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนด้วยวิธีแบบดั้งเดิม ซึ่งแสดงได้ดังกราฟในภาพที่ 4.36

จากผลการทดลองข้างต้นทั้งหมดที่กล่าวมาสามารถสรุปผลเบื้องต้นได้ว่าชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการชุบเคลือบชั้นรองพื้นก่อนทำการชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนนั้นจะมีความหนาโดยรวมของชั้นอินเทอร์มีเดียทที่บางกว่าชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการชุบแบบดั้งเดิมเสมอ ไม่ว่าจะเป็นเหล็กซึ่งมีส่วนผสมของซิลิกอนในชิ้นงานต่างก็เช่นกัน ซึ่งผลของความหนาที่แตกต่างกันของชั้นอินเทอร์มีเดียทที่เกิดขึ้นนั้นมาจากผลของชั้นรองพื้นโลหะผสมนิกเกิล - ฟอสฟอรัสซึ่งเป็นเฟสของแข็ง ทำหน้าที่กั้นการทำปฏิกิริยาระหว่างเหล็กและสังกะสีหลอมเหลวได้ ทำให้ความสามารถในการทำปฏิกิริยาระหว่างเหล็กและสังกะสีลดลงและเกิดเป็นชั้นโลหะผสมสังกะสี - นิกเกิลขึ้นแทน แต่สำหรับชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการชุบเคลือบแบบดั้งเดิมนั้น ชั้นเคลือบที่เกิดขึ้นจะมีความหนาที่มาก ทั้งนี้เนื่องจากการแพร่อย่างรวดเร็วของปฏิกิริยาของสังกะสีหลอมเหลวกับเหล็ก เกิดเป็นชั้นโลหะผสมสังกะสี-เหล็กขึ้นที่มีการเติบโตของชั้นเคลือบอย่างรวดเร็ว จึงทำให้เกิดเป็นชั้นเคลือบที่มีความหนา โดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับเหล็กที่มีปริมาณของซิลิกอนที่ส่งผลต่ออัตราการชุบเคลือบของสังกะสีที่สูงอยู่ในช่วง sandelin-effect



ภาพที่ 4.34 แสดงลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคตัดขวางของชิ้นงานเหล็กชนิดที่มีส่วนผสมของซิลิกอนต่ำที่ผ่านกระบวนการชุบเคลือบชั้นรองพื้นโลหะผสมนิกเกิล -ฟอสฟอรัสที่ระยะเวลา 15 นาทีเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่ผ่านการชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนแบบดั้งเดิมที่ระยะเวลาต่างๆ



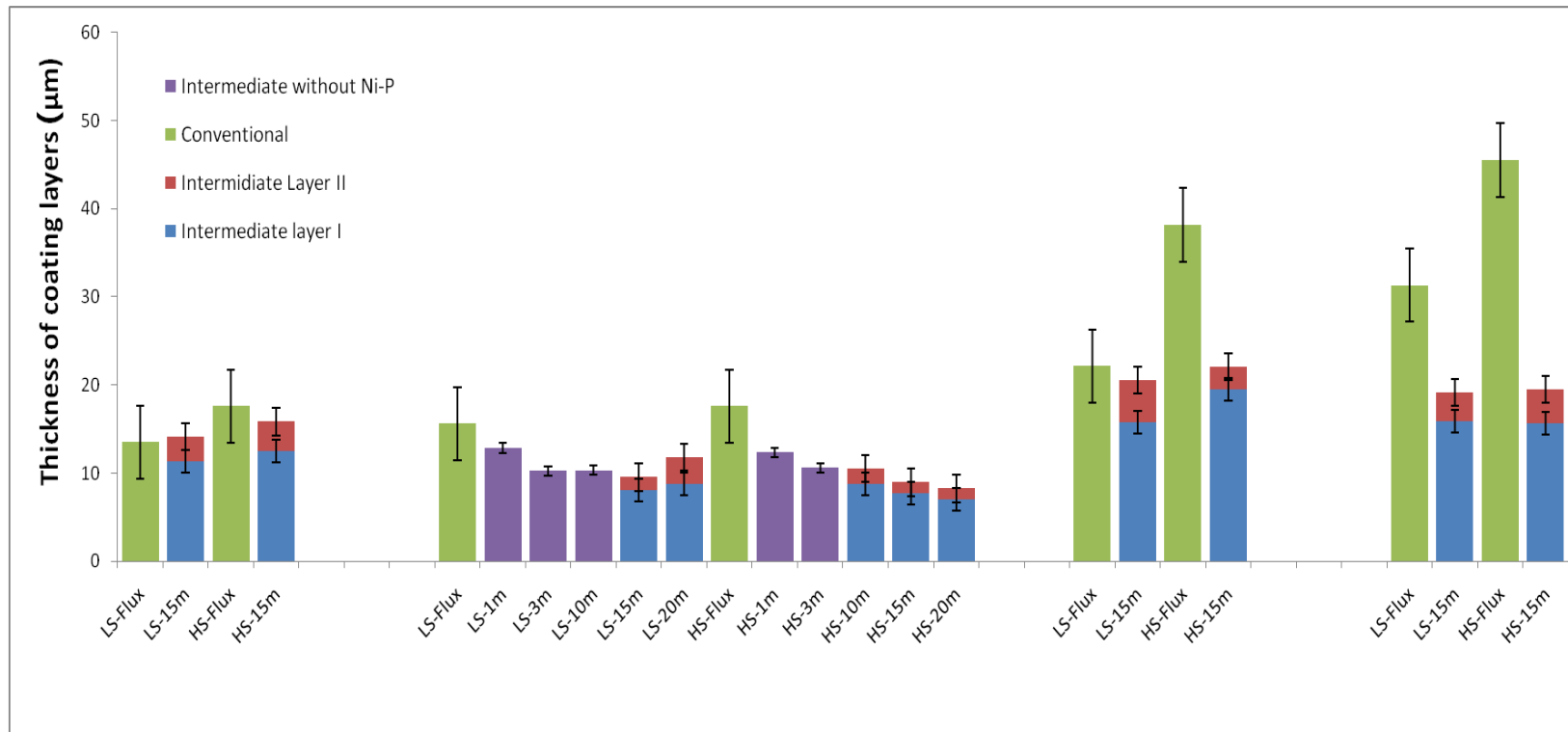
ภาพที่ 4.35 แสดงลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคตัดขวางของชิ้นงานเหล็กชนิดที่มีส่วนผสมของซิลิกอนสูงที่ผ่านกระบวนการชุบเคลือบชั้นรองพื้นโลหะผสมนิกเกิล - ฟอสฟอรัสที่ระยะเวลา 15 นาทีเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่ผ่านการชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนแบบดั้งเดิมที่ระยะเวลาต่างๆ

ตารางที่ 4.6 แสดงองค์ประกอบของธาตุในชั้นเคลือบแต่ละชั้นที่ได้จากการวิเคราะห์ การกระจายพลังงาน ของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการชุบสังกะสีเป็นระยะเวลา 5, 10, 60, และ 100 วินาที (Energy dispersive spectrometry, EDS)

ชุด	Hot-Dip Galvanize d Time	Pre-coat				Layer 1					Layer 2					Layer 3					
		Fe	Zn	Ni	P	Fe	Zn	Ni	P	Pha	Fe	Zn	Ni	P	Pha	Fe	Zn	Ni	P	Pha	
		[%atomic]				[%atomic]					[%atomic]					[%atomic]					
LS	5 s	N	N	N	N	14.97	85.03	0	0	Γ	7.06	92.94	0	0	δ	0	100	0	0	η	
	10 s	N	N	N	N	10.23	89.77	0	0	δ	7.71	92.29	0	0	δ	0	100	0	0	η	
	60 s	N	N	N	N	10.42	89.58	0	0	δ	6.22	93.78	0	0	ζ	0	100	0	0	η	
	100 s	N	N	N	N	11.12	88.88	0	0	δ	6.58	93.46	0	0	ζ	0.91	99.09	0	0	η	
	5 s	7.08	0	84.12	8.8	0	86.56	13.44	0	Γ+β	6.22	93.78	0	0	ζ	4.69	95.31	0	0	η	
	10 s	3.20	2.52	86.56	7.73	1.86	85.01	12.33	1.80	n/a	0	97.61	2.39	0	Γ ₁	0	97.93	2.07	0	η	
	60 s	3.16	9.53	79.18	8.13	0	87.46	12.54	0	Γ+β	6.73	93.27	0	0	ζ	0	100	0	0	η	
	100 s	4.91	0	84.81	10.28	0	86.34	13.66	0	Γ+β	0	87.23	12.77	0	Γ+β	0	100	0	0	η	
	HS	5s	N	N	N	N	6.47	93.53	0	0	Γ	5.31	94.69	0	0	ζ	0	100	0	0	η
		10 s	N	N	N	N	7.97	92.23	0	0	δ	5.67	94.33	0	0	ζ	0	100	0	0	η
60 s		N	N	N	N	6.06	93.94	0	0	δ	1.22	98.82	0	0	η	0	100	0	0	η	
100 s		N	N	N	N	11.56	88.44	0	0	δ	6.91	93.09	0	0	ζ	0	100	0	0	η	
5 s		3.01	5.8	82.36	8.83	0	85.11	14.89	0	Γ+β	0	97.42	2.58	0	Γ ₁	0	100	0	0	η	
10 s		1.84	0	95.53	0	0	87.99	12.01	0	Γ+β	1.09	98.91	0	0	η	0	100	0	0	η	
60 s		3.36	4.79	83.77	8.09	0	87.72	12.28	0	Γ+β	0	90.54	9.46	0	Γ ₁	0	100	0	0	η	
100 s		4.02	15.87	72.62	7.49	0	87.14	12.86	0	Γ+β	0	92.92	7.08	0	Γ ₁	0	100	0	0	η	

n/a คือ ไม่สามารถระบุเฟสตามข้อมูลเฟสไดอะแกรมได้

n คือ ไม่ผ่านการชุบเคลือบชั้นรองพื้น



ภาพที่ 4.36 ความหนาเฉลี่ยของชั้นเคลือบของเหล็กชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนโดยการเคลือบชั้นรองพื้นด้วยโลหะผสมนิกเกิล -ฟอสฟอรัสแบบไม่ใช้ไฟฟ้า ที่เปลี่ยนแปลงระยะเวลาในการจุ่มร้อนในช่วง 5 วินาทีถึง 100 วินาที

เมื่อนำผลการทดลองมาพิจารณาในแง่ของจลศาสตร์ของการเกิดขึ้นเคลือบอินเทอร์มีเดียท I และ II ที่เกิดขึ้นทั้งหมดที่ผ่านการชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนที่ระยะเวลา 5, 10, 60 และ 100 วินาที ตามสมการของ power-law growth เพื่อหาค่าคงที่ของอัตราการโตของชั้นเคลือบ เพื่อทำนายอัตราการโตของชั้นอินเทอร์มีเดียทที่เกิดขึ้น ดังนี้

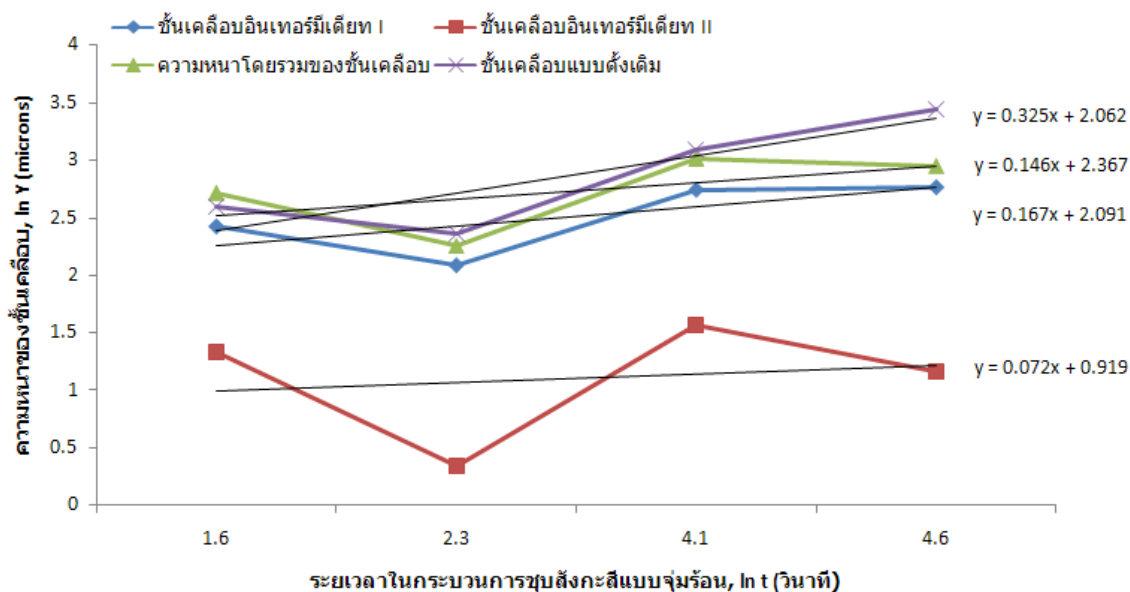
$$Y = Kt^n$$

โดยที่	Y	คือ ความหนาของชั้นเคลือบ
	K	คือ ค่าคงที่ของอัตราการการโต (growth rate constant)
	t	คือ ระยะเวลาในการจุ่มร้อน
	n	คือ ค่าคงที่ของอัตราในการโตกับเวลา (growth rate time constant)

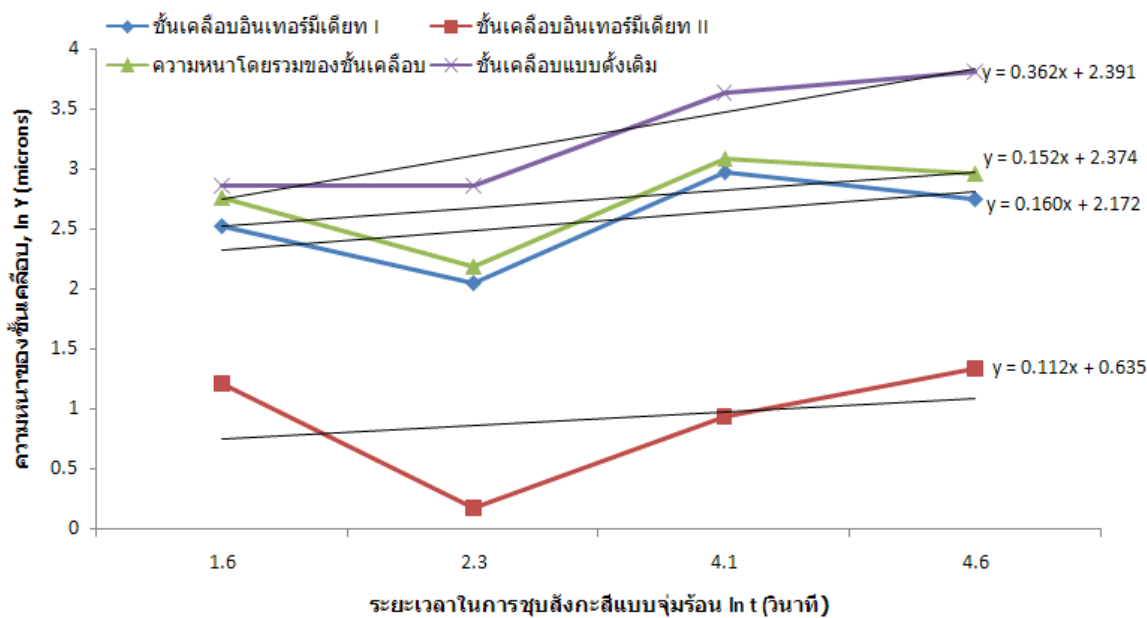
เมื่อจัดรูปให้อยู่ในระบบสมการลอการิทึมเพื่อหาค่า n จะได้รูปของระบบสมการลอการิทึม ดังนี้

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

หลังจากนั้นแทนค่าตัวแปรทั้งหมดลงในระบบสมการเส้นตรงลอการิทึมของชั้นเคลือบอินเทอร์มีเดียท I และอินเทอร์มีเดียท II รวมถึงความหนาโดยรวมของชั้นอินเทอร์มีเดียทที่เกิดขึ้นดังแสดง จะได้กราฟความสัมพันธ์ของระยะเวลาที่เปลี่ยนแปลงไปต่อชั้นเคลือบอินเทอร์มีเดียทต่างๆ ที่เกิดขึ้นของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการชุบเคลือบสังกะสีแบบจุ่มร้อนที่ระยะเวลาต่างๆ ที่มีชั้นรองพื้นและปราศจากชั้นรองพื้นตามสมการ สมการของ power-law growth ซึ่งแสดงข้อมูลได้ดังกราฟในภาพที่ 4.37 และ 4.38 และข้อมูลดังตารางที่ 4.8



ภาพที่ 4.37 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของชั้นเคลือบต่อระยะเวลาในการชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนของชิ้นงานเหล็กที่มีส่วนผสมของซิลิกอนต่ำ

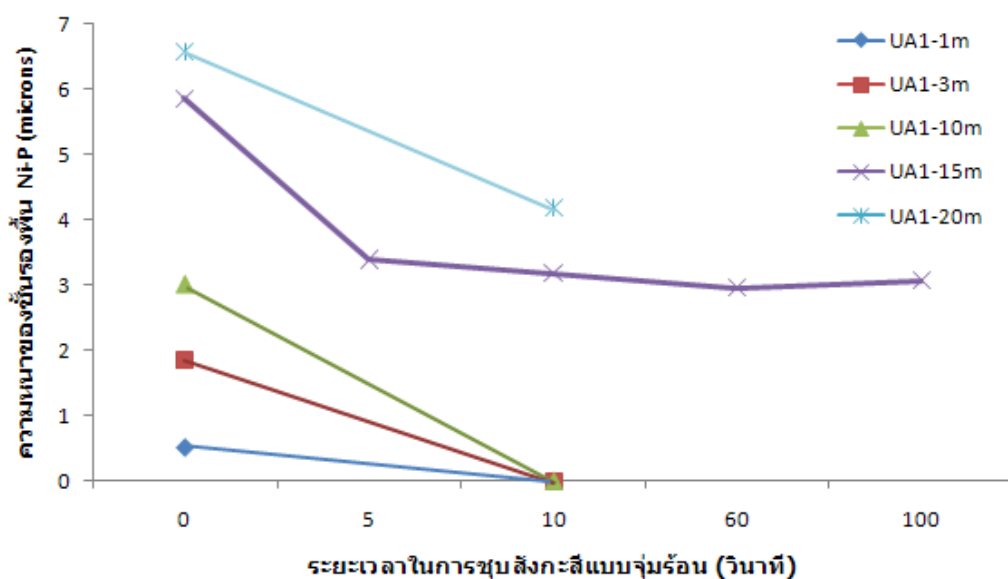


ภาพที่ 4.38 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของชั้นเคลือบต่อระยะเวลาในการชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนของชิ้นงานเหล็กที่มีส่วนผสมของซิลิกอนสูง

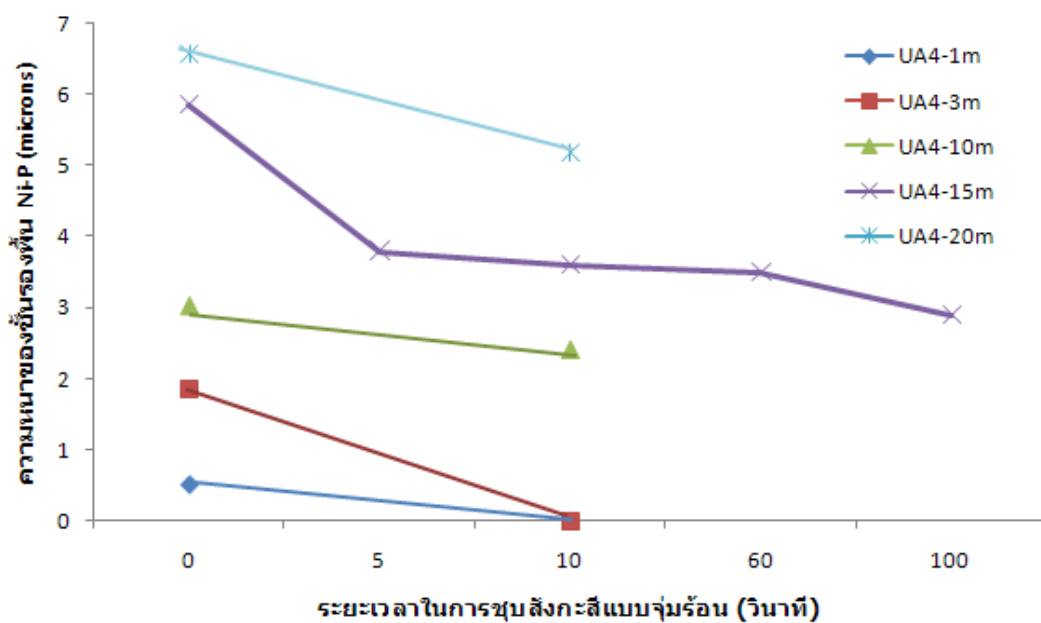
ตารางที่ 4.8 ค่าคงที่ของอัตราในการโตกับเวลา, (n) และค่าคงที่ของอัตราการโต, (K) ของชั้นเคลือบของเหล็กชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนโดยการเคลือบชั้นรองพื้นโลหะผสมนิกเกิล-ฟอสฟอรัส

ชนิดของเหล็ก	ชั้นเคลือบโลหะผสม	ค่าของ n	ค่าของ K
เหล็ก Low silicon (LS)	ชั้นอินเทอร์มีเดียท I	0.17	8.09
	ชั้นอินเทอร์มีเดียท II	0.07	2.51
	ความหนาโดยรวม	0.15	10.67
	ชั้นเคลือบแบบดั้งเดิม	0.33	7.86
เหล็ก high silicon (HS)	ชั้นอินเทอร์มีเดียท I	0.16	8.77
	ชั้นอินเทอร์มีเดียท II	0.11	1.88
	ความหนาโดยรวม	0.15	10.74
	ชั้นเคลือบแบบดั้งเดิม	0.36	10.92

จากการวิเคราะห์จลนพลศาสตร์ของการเติบโตของชั้นเคลือบพบว่าค่า K ของชั้นงานเหล็กแผ่นของชั้นงานที่ผ่านการชุบเคลือบชั้นรองพื้นจะมีค่าสูงกว่าชั้นงานที่ผ่านการชุบเคลือบสังกะสีแบบดั้งเดิม และสำหรับค่า K ของชั้นงานเหล็กฉากของชั้นงานที่ผ่านการชุบเคลือบชั้นรองพื้นนั้นมีค่าที่ใกล้เคียงกัน แต่ทั้งนี้อย่างไรก็ตามค่า n ซึ่งแสดงถึงอัตราการเจริญเติบโตของชั้นเคลือบทั้งหมดนั้น ชั้นงานที่ผ่านการชุบเคลือบชั้นรองพื้นจะมีค่าน้อยกว่า 2 เท่า สำหรับทั้งชั้นงานเหล็กแผ่นและเหล็กหล่อ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าจลนพลศาสตร์ของการเจริญเติบโตของชั้นเคลือบที่มีการชุบเคลือบชั้นรองพื้นก่อนทำการชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนนั้นจะมีอัตราการโตของชั้นอินเทอร์มีเดียทที่ต่ำกว่า จึงทำให้มีค่าความหนาของชั้นเคลือบที่บางกว่าชั้นเคลือบที่ผ่านกระบวนการชุบสังกะสีแบบดั้งเดิม และสำหรับค่าความหนาของชั้นเคลือบรองพื้นโลหะผสมนิกเกิล-ฟอสฟอรัสที่เหลืออยู่จากการชุบเคลือบสังกะสีแบบจุ่มร้อนที่แสดงได้ดังภาพที่ 4.39 และ 4.40 นั้น จะมีค่าความหนาของชั้นรองพื้นที่ลดลงแปรผกผันกับระยะเวลาในการชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อน ซึ่งชั้นรองพื้นที่หายไปเกิดการจากที่ชั้นรองพื้นโลหะผสมนิกเกิล-ฟอสฟอรัสทำปฏิกิริยากับสังกะสีหลอมเหลวและมีการแพร่ของชั้นเคลือบสู่อสังกะสีหลอมเหลว



ภาพที่ 4.39 ความหนาของชั้นรองพื้นโลหะผสมนิกเกิล-ฟอสฟอรัสที่เปลี่ยนแปลงไปตามระยะเวลาในการชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนบนชิ้นงานเหล็กที่มีส่วนผสมของซิลิกอนสูง



ภาพที่ 4.40 ความหนาของชั้นรองพื้นโลหะผสมนิกเกิล-ฟอสฟอรัสที่เปลี่ยนแปลงไปตามระยะเวลาในการชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนบนชิ้นงานเหล็กที่มีส่วนผสมของซิลิกอนสูง

4.2.3 การทดสอบการดัดโค้ง T-bend flexibility test

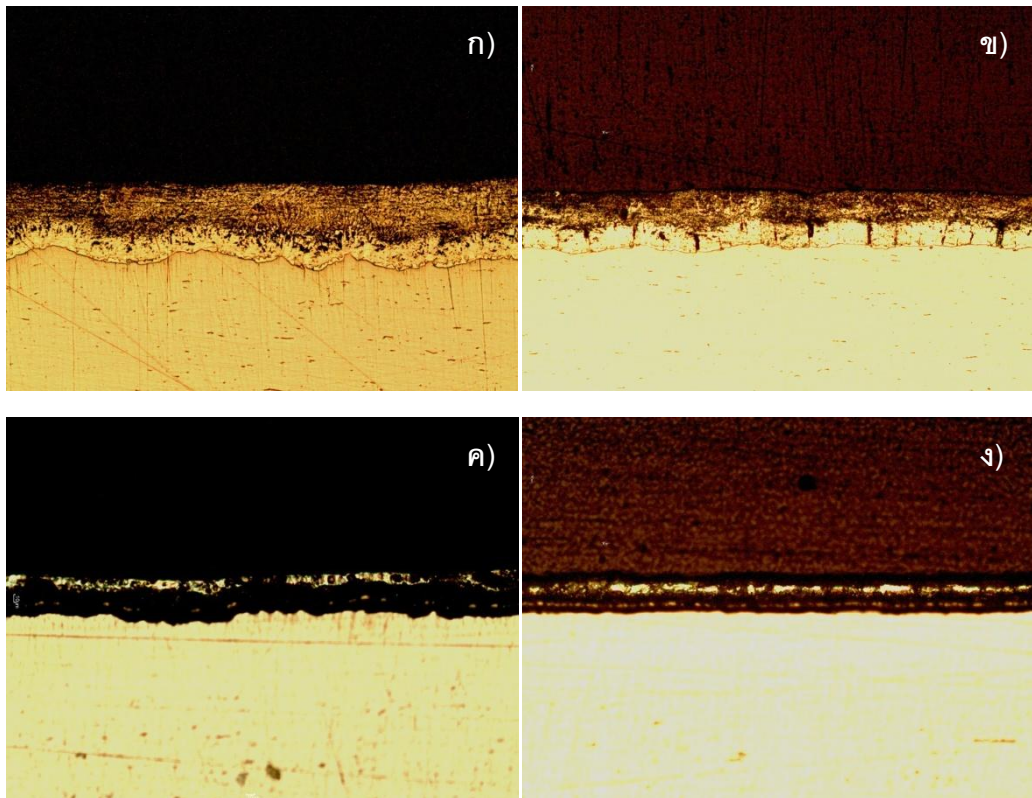
สมบัติทางกลเป็นสมบัติที่ศึกษาและให้ความสำคัญของข้อมูลแก่ชิ้นงานประเภทเหล็กที่ผ่านกระบวนการชุบเคลือบสังกะสีด้วยวิธีจุ่มร้อน โดยเฉพาะอย่างยิ่งการยึดเกาะติดของชั้นเคลือบแต่ละชั้นเมื่อได้รับแรงทั้งในสภาวะแรงกด (compression) หรือสภาวะแรงดึง (tension) การทดสอบการดัดโค้งจึงเป็นแนววิธีที่นำมาทดสอบการยึดเกาะติดระหว่างชั้นเคลือบได้ ซึ่งโดยปกติแล้วเหล็กที่ผ่านกระบวนการชุบเคลือบสังกะสีแบบจุ่มร้อนโดยทั่วไปจะมีสมบัติด้านการยึดเกาะระหว่างชั้นเคลือบที่ค่อนข้างดี เพื่อเป็นการศึกษาถึงรายละเอียดของโครงสร้างเมื่อได้รับแรงกดและแรงดึงกับชิ้นงาน เปรียบเทียบสำหรับชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนด้วยวิธีดั้งเดิม และชิ้นงานที่พัฒนากระบวนการชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนด้วยวิธีแบบใหม่ที่มีชั้นเคลือบโลหะผสมนิกเกิล-ฟอสฟอรัสรองพื้น ดังนั้นในการทดสอบการดัดโค้งจึงเลือกชิ้นงานเพื่อทำการวิเคราะห์ทดสอบเป็นจำนวนทั้งสิ้น 6 ซึ่งเป็นชิ้นงานเปรียบเทียบระหว่างชิ้นงานที่มีค่าความหนาของชั้น intermediate ที่แตกต่างกันซึ่งผ่านการชุบเคลือบชั้นรองพื้นโลหะผสมนิกเกิล -ฟอสฟอรัสและชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการชุบแบบดั้งเดิม

เงื่อนไขดังนี้

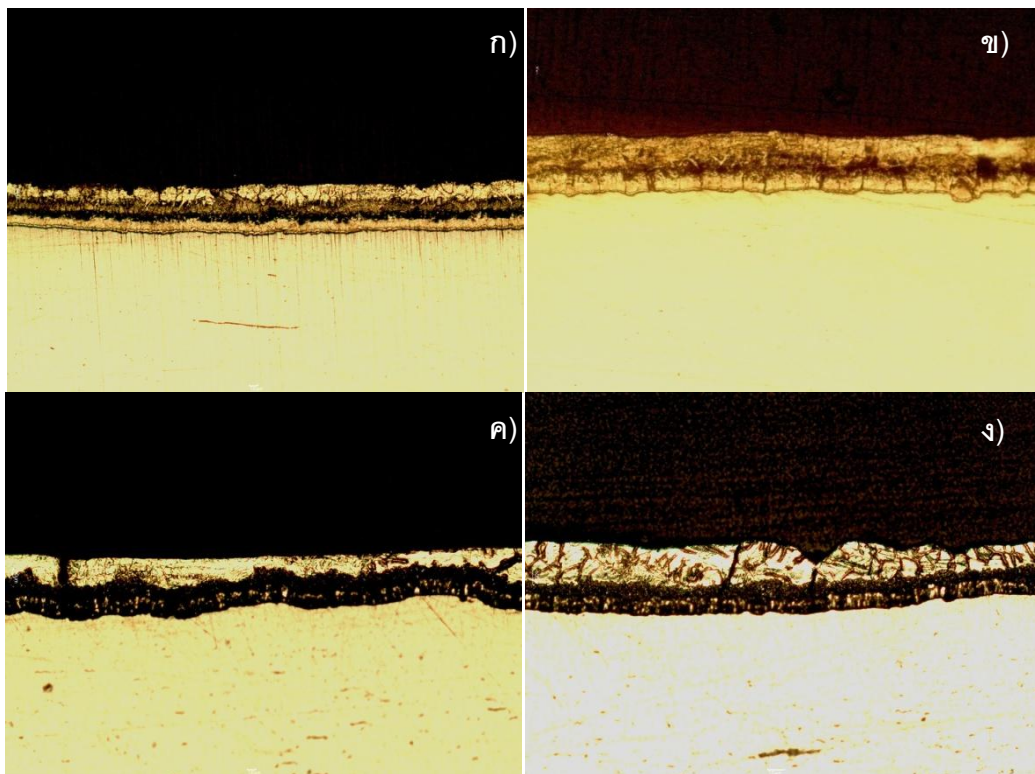
1. ชิ้นงานเหล็ก low silicon (LS) ที่ผ่านกระบวนการชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนด้วยวิธีดั้งเดิม โดยทำการชุบสังกะสีเป็นระยะเวลา 60 วินาที (LS-0m-60s)
2. ชิ้นงานเหล็ก high silicon (HS) ที่ผ่านกระบวนการชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนด้วยวิธีดั้งเดิม โดยทำการชุบสังกะสีเป็นระยะเวลา 60 วินาที (HS-0m-60s)
3. ชิ้นงานเหล็ก low silicon (LS) ที่มีการชุบเคลือบชั้นรองพื้นเป็นระยะเวลา 10 นาทีและผ่านกระบวนการชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนเป็นระยะเวลา 10 วินาที (LS-10m-10s)
4. ชิ้นงานเหล็ก high silicon (HS) ที่มีการชุบเคลือบชั้นรองพื้นเป็นระยะเวลา 10 นาทีและผ่านกระบวนการชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนเป็นระยะเวลา 10 วินาที (HS-10m-10s)
5. ชิ้นงานเหล็ก low silicon (LS) ที่มีการชุบเคลือบชั้นรองพื้นเป็นระยะเวลา 15 นาทีและผ่านกระบวนการชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนเป็นระยะเวลา 60 วินาที (LS-15m-60s)

6. ชั้นงานเหล็ก high silicon (HS) ที่มีการชุบเคลือบชั้นรองพื้นเป็นระยะเวลา 15 นาที และผ่านกระบวนการชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนเป็นระยะเวลา 60 วินาที (HS-15m-60s)

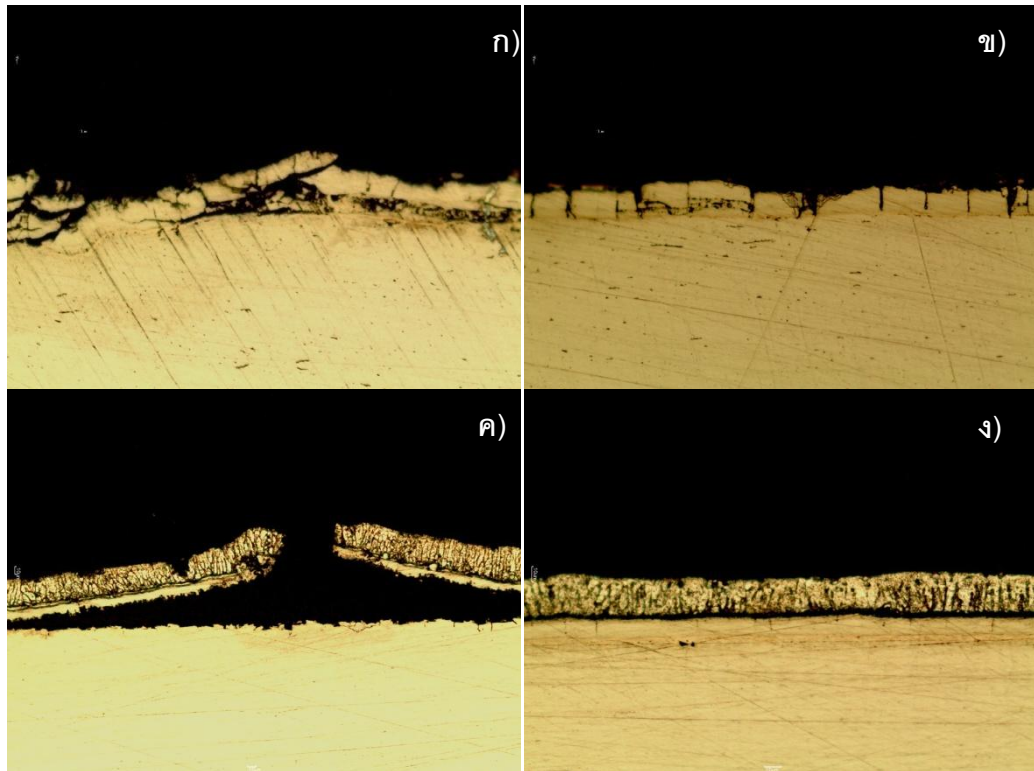
ซึ่งชั้นงานทั้งหมดจะถูกทำการตัดโค้งเป็นมุมองศา 90 องศา จากตำแหน่งเดิมและหลังจากนั้นชั้นงานจะถูกทำการตัดโค้งคืนสู่ตำแหน่งเริ่มต้น ซึ่งลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคของชั้นงานแสดงได้ดังภาพที่ 4.41 -4.46



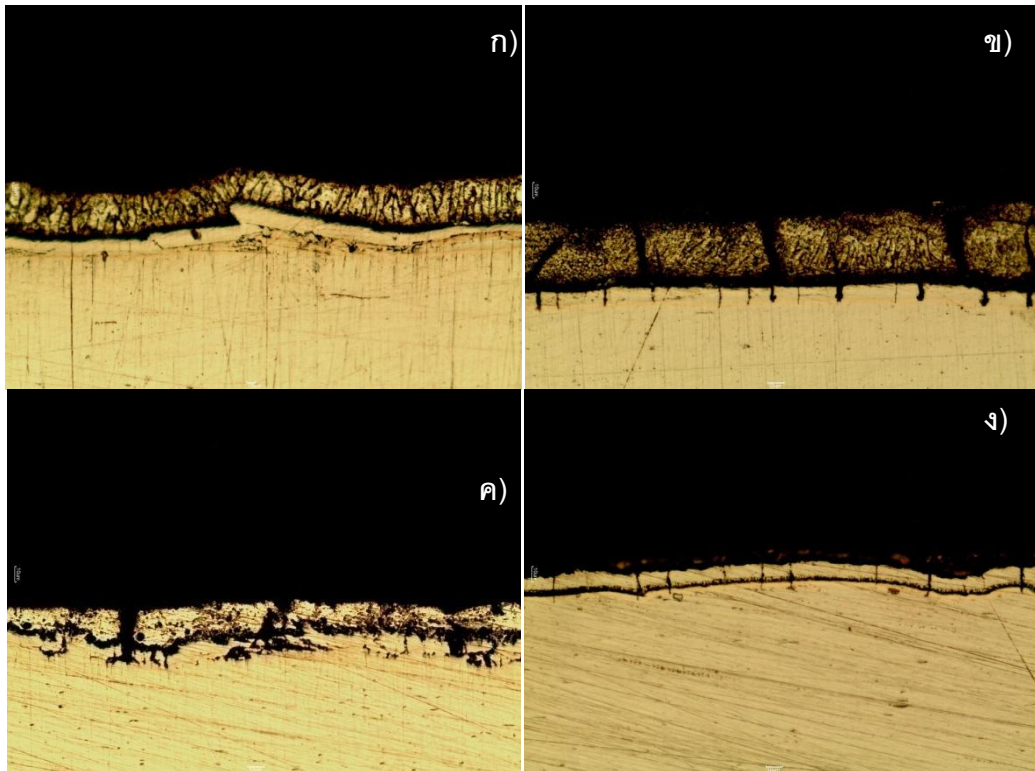
ภาพที่ 4.41 ภาพตัดขวางของชั้นงาน LS-0m-60s ก) ส่วนที่ได้รับแรงอัด เมื่อตัดโค้งมุม 90 องศา ข) ส่วนที่ได้รับแรงดึงอัดเมื่อตัดโค้งมุม 90 องศา ค) ส่วนที่เคยได้รับแรงอัดเมื่อตัดโค้งสู่ตำแหน่งเดิม ง) ส่วนที่เคยได้รับแรงดึงเมื่อตัดโค้งสู่ตำแหน่งเดิม



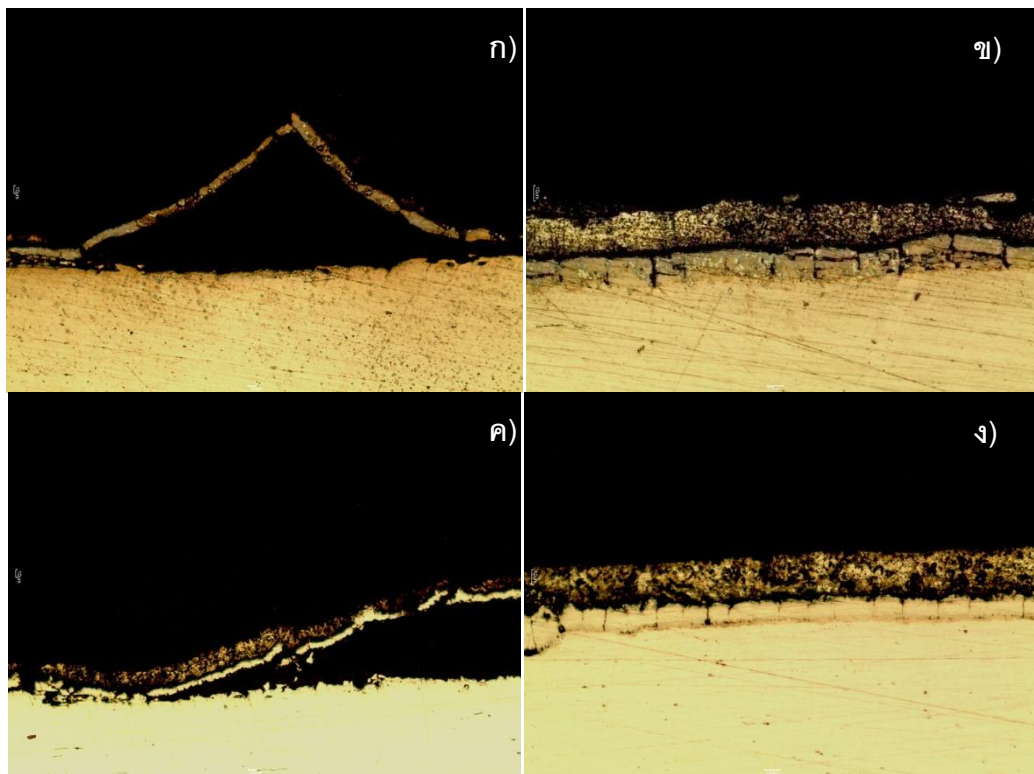
ภาพที่ 4.42 ภาพตัดขวางของชิ้นงาน HS-0m-60s ก) ส่วนที่ได้รับแรงอัด เมื่อตัดโค้งมุม 90 องศา ข) ส่วนที่ได้รับแรงดึงอัดเมื่อตัดโค้งมุม 90 องศา ค) ส่วนที่เคยได้รับแรงอัดเมื่อตัดโค้งสู่ตำแหน่งเดิม ง) ส่วนที่เคยได้รับแรงดึงเมื่อตัดโค้งสู่ตำแหน่งเดิม



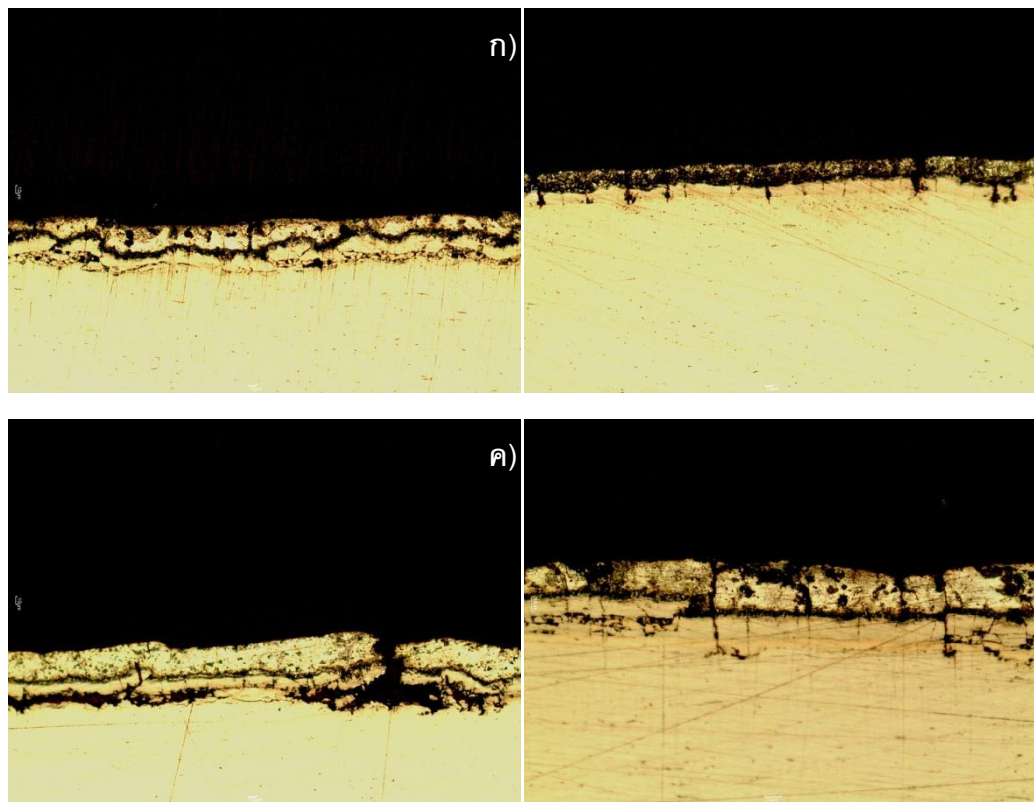
ภาพที่ 4.43 ภาพตัดขวางของชิ้นงาน LS-10m-10s ก) ส่วนที่ได้รับแรงอัด เมื่อตัดโค้งมุม 90 องศา ข) ส่วนที่ได้รับแรงดึงอัดเมื่อตัดโค้งมุม 90 องศา ค) ส่วนที่เคยได้รับแรงอัดเมื่อตัดโค้งสู่ตำแหน่งเดิม ง) ส่วนที่เคยได้รับแรงดึงเมื่อตัดโค้งสู่ตำแหน่งเดิม



ภาพที่ 4.44 ภาพตัดขวางของชิ้นงาน HS-10m-10s ก) ส่วนที่ได้รับแรงอัด เมื่อตัดโค้งมุม 90 องศา ข) ส่วนที่ได้รับแรงดึงอัดเมื่อตัดโค้งมุม 90 องศา ค) ส่วนที่เคยได้รับแรงอัดเมื่อตัดโค้งสู่ตำแหน่งเดิม ง) ส่วนที่เคยได้รับแรงดึงเมื่อตัดโค้งสู่ตำแหน่งเดิม



ภาพที่ 4.45 ภาพตัดขวางของชิ้นงาน LS-15m-60s ก) ส่วนที่ได้รับแรงอัด ไม้ดัดโค้งมุม 90 องศา ข) ส่วนที่ได้รับแรงดึงอัดไม้ดัดโค้งมุม 90 องศา ค) ส่วนที่เคยได้รับแรงอัดไม้ดัดโค้งสู่ตำแหน่งเดิม ง) ส่วนที่เคยได้รับแรงดึงไม้ดัดโค้งสู่ตำแหน่งเดิม



ภาพที่ 4.46 ภาพตัดขวางของชิ้นงาน HS-15m-60s ก) ส่วนที่ได้รับแรงอัด ดึงเมื่อตัดโค้งมุม 90 องศา ข) ส่วนที่ได้รับแรงดึงอัดเมื่อตัดโค้งมุม 90 องศา ค) ส่วนที่เคยได้รับแรงอัดเมื่อตัดโค้งสู่ตำแหน่งเดิม ง) ส่วนที่เคยได้รับแรงดึงเมื่อตัดโค้งสู่ตำแหน่งเดิม

โดยปกติแล้วการยึดติดระหว่างสังกะสีและเหล็กของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการชุบสังกะสีนั้น จะมีการยึดเกาะติดที่ดียิ่งแล้ว เนื่องจากชั้นสังกะสีจะยึดติดกับผิวเหล็กอย่างเหนียวแน่นเชิงโลหะเนื่องจากในกระบวนการชุบจะมีชั้นโลหะผสมระหว่างเหล็กกับสังกะสีเกิดขึ้น จากการทำปฏิกิริยาระหว่างเหล็กและสังกะสีหลอมเหลวที่รวดเร็ว [8] ซึ่งจากการพิจารณาโครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงานจากภาพที่ 4.41-4.46 ชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนที่ระยะเวลา 10 และ 60 วินาที ของชิ้นงานทั้งที่ผ่านและไม่ผ่านกระบวนการชุบเคลือบชั้นรองพื้นด้วยโลหะผสมนิกเกิล-ฟอสฟอรัสนั้น พบว่าชิ้นงานทั้งเหล็กทั้งสองชนิด จากภาพที่ 4.41-4.42 ที่ทำการชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนแบบวิธีดั้งเดิมเป็นระยะเวลา 60 วินาทีนั้น เมื่อทำการทดสอบการตัดโค้งชิ้นงานเป็นมุม 90 องศา ในส่วนที่ได้รับแรงกดไม่ปรากฏรอยแตกที่ เกิดขึ้นบริเวณชั้นอินเทอร์มีเดียท Γ, δ และ ζ รวมถึงชั้นสังกะสีบริสุทธิ์ ซึ่งเหล็กยังคงมีการยึดเกาะกับสังกะสีและชั้นอินเทอร์มีเดียทที่ดี และสำหรับส่วนบริเวณที่ได้รับแรงดึงนั้นจะปรากฏรอยแตกที่สามารถมองเห็นได้อย่างชัดเจนทั้งในส่วนบริเวณชั้นสังกะสีบริสุทธิ์และชั้นอินเทอร์มีเดียท Γ, δ และ ζ มีลักษณะเป็นแนวเส้นตรงและเกิดขึ้นอย่างสม่ำเสมอในบริเวณผิวชั้นเคลือบและชั้นอินเทอร์มีเดียท เมื่อทำการตัดโค้งชิ้นงานคืนสู่ตำแหน่งเดิมพบว่าโครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงานเหล็ก low silicon ในส่วนบริเวณที่ได้รับแรงกดไม่มีการโก่งงอของชั้นเคลือบเกิดขึ้นแต่จะพบรอยแตกซึ่งมีลักษณะเป็นเส้นตรงตั้งฉากกับผิวชั้นเคลือบได้เล็กน้อยบริเวณชั้นเคลือบสังกะสีบริสุทธิ์เช่นเดียวกับลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคของเหล็ก high silicon บริเวณในส่วนที่ได้รับแรงกดที่มีรอยแตกขนาดใหญ่ บริเวณชั้นเคลือบสังกะสีบริสุทธิ์ที่เกิดขึ้นอย่างเห็นได้ชัดจนกว่า และในส่วนบริเวณชิ้นงานที่ได้รับแรงดึงนั้น ชิ้นงาน low silicon จะมีลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงานที่ลักษณะของชั้นอินเทอร์มีเดียทและชั้นสังกะสีไม่มีการโก่ง หรือซ้อนทับกันของชั้นเกิดขึ้น อีกทั้งยังไม่พบรอยแตกที่เกิดขึ้นในบริเวณชั้นเคลือบอีกด้วย แต่สำหรับชิ้นงานเหล็ก high silicon จะพบรอยแตกและการปิดตัวที่ไม่สนิทของชั้นเคลือบอินเทอร์มีเดียทและชั้นสังกะสีบริสุทธิ์

สำหรับในกรณีของเหล็กชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนโดยการเคลือบชั้นรองพื้นโลหะผสมนิกเกิล-ฟอสฟอรัสแบบไม่ใช้ไฟฟ้าเป็นระยะเวลา 10 และ 15 นาที โดยผ่านกระบวนการชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนเป็นระยะเวลา 10 และ 60 วินาทีตามลำดับ ซึ่งโครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงานเหล็ก low silicon LS-10m-10s ในภาพที่ 4.43 พบว่าบริเวณของชิ้นงานที่ได้รับแรงกดหลังจากที่ทำการทดสอบการตัดโค้งที่ 90 องศาจะปรากฏลักษณะรอยแตกตามบริเวณชั้นเคลือบสังกะสีและมีการหลุดร่อนของชั้นเคลือบบริเวณชั้นอินเทอร์มีเดียทซึ่งปรากฏอนุภาครอยแตกขนาดเล็กกระจาย

อยู่บริเวณใต้ชั้นเคลือบรวมถึงมีการเกยซ้อนทับกันของชั้นเคลือบอีกด้วย ส่วนในบริเวณที่ได้รับแรงดึงนั้นถึงแม้จะไม่ปรากฏการหลุดร่อนของชั้นเคลือบให้เห็นได้ชัดเช่นเดียวกับบริเวณที่ได้รับแรงกด แต่ยังสามารถให้เห็นถึงลักษณะของรอยแตกเป็นเส้นตรงในส่วนบริเวณชั้นของสังกะสีและชั้นอินเทอร์มีเดียที่ตั้งฉากกับผิวของชั้นเคลือบอย่างเห็นได้ชัดเจน หลังจากเมื่อตัดโค้งขึ้นงานเข้าสู่ตำแหน่งเริ่มต้น ในส่วนบริเวณที่ได้รับแรงอัดนั้น จะเห็นลักษณะของการหลุดร่อนและแยกออกของชั้นเคลือบได้อย่างชัดเจน ชั้นสังกะสีและชั้นอินเทอร์มีเดียที่มีการแตกหักที่รุนแรงและชัดเจนและเกิดการโก่งตัวขึ้นด้วย ซึ่งการหลุดร่อนของชั้นเคลือบจะเกิดขึ้นบริเวณรอยต่อของชั้นอินเทอร์มีเดียและชั้นรองพื้นโลหะผสมนิกเกิล-ฟอสฟอรัส แต่ในส่วนบริเวณที่ได้รับแรงดึงนั้นเมื่อขึ้นงานถูกตัดโค้งสู่ตำแหน่งเดิมจะมีการประสานกันของชั้นเคลือบสังกะสีบริสุทธิ์ได้ดี แต่ยังคงมีการหลุดร่อนของชั้นเคลือบบริเวณรอยต่อของชั้นอินเทอร์มีเดียและชั้นสังกะสีจนเกิดแนวช่องว่างภายในโครงสร้างที่แสดงดังภาพที่ 4.43 ง). ส่วนบริเวณชั้นอินเทอร์มีเดียจะพบเพียงลักษณะของรอยแตกเกิดขึ้นแต่ยังไม่ลึกถึงชั้นรองพื้นและยังคงมีการประสานระหว่างชั้นอินเทอร์มีเดียและชั้นงานที่ดี

สำหรับโครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงานเหล็ก high silicon HS-10m-10s ในส่วนบริเวณของชิ้นงานที่ได้รับแรงกดจากการทดสอบการตัดโค้งพบว่า ชั้นอินเทอร์มีเดียที่เกิดขึ้นมีการหลุดร่อนแยกจากชั้นของสังกะสีบริสุทธิ์และมีการเกยซ้อนทับกันของชั้นอินเทอร์มีเดีย แต่ไม่ปรากฏรอยแตกตั้งฉากกับผิวของชั้นเคลือบทั้งในส่วนของชั้นสังกะสีบริสุทธิ์และชั้นอินเทอร์มีเดีย แต่สำหรับชั้นรองพื้นยังคงยึดเกาะกับชิ้นงานเหล็กได้ดีและยังไม่ปรากฏการหลุดร่อนจากชิ้นงานแต่อย่างใด ใส่ส่วนของบริเวณที่ได้รับแรงดึงนั้น จะเห็นลักษณะรอยการหลุดร่อนระหว่างชั้นอินเทอร์มีเดียและชั้นสังกะสีบริสุทธิ์ขึ้นและมีรอยแตกตั้งฉากที่ชัดเจนทะลุทั้งบริเวณสังกะสีบริสุทธิ์และบริเวณชั้นอินเทอร์มีเดียทั้งหมด แต่รอยแตกนี้จะหยุดการเติบโตของรอยแตกเมื่อถึงบริเวณชั้นเคลือบโลหะผสมนิกเกิล-ฟอสฟอรัสอีกเท่านั้น เมื่อทำการตัดโค้งขึ้นงานคืนสู่ตำแหน่งเดิมพบว่า ในส่วนบริเวณที่ได้รับแรงอัดนั้นจะมีรอยแตกเล็กและมีขนาดใหญ่เกิดขึ้นผ่านบริเวณชั้นสังกะสีบริสุทธิ์ถึงชั้นอินเทอร์มีเดีย และชั้นอินเทอร์มีเดียจะมีลักษณะการขาดหรือเกิดรอยแตกระหว่างชั้นอินเทอร์มีเดียด้วยตัวเอง ทำให้เห็นลักษณะรอยแตกที่ชัดเจน รวมถึงเกิดการหลุดร่อนระหว่างชั้นอินเทอร์มีเดียและสังกะสี แต่ในส่วนของชั้นเคลือบโลหะผสมนิกเกิล -ฟอสฟอรัสนั้นไม่ปรากฏรอยแตกที่เห็นได้อย่างชัดเจน แต่ในส่วนบริเวณที่ได้รับแรงดึงนั้นจะพบการเกิดรอยแตกที่เห็นได้ชัด ซึ่งรอยแตกนี้จะเจริญเติบโตได้จนถึงบริเวณของชั้นเคลือบโลหะผสมนิกเกิล -ฟอสฟอรัสในบางส่วน

แต่บริเวณชั้นอินเทอร์มีเดียทแต่ยังคงมีความราบเรียบของชั้นอินเทอร์มีเดียทที่ดีกว่าในส่วนบริเวณที่ได้รับแรงอัดและไม่พบลักษณะของอนุภาคที่แตกหลุดร่อนออกมาแต่อย่างใด

เมื่อศึกษาโครงสร้างของชิ้นงานเหล็ก low silicon LS-15m-60s ในส่วนบริเวณที่ได้รับแรงอัดเมื่อทำการตัดโค้งทำมุม 90 องศาพบว่ามี การหลุดร่อนของชั้นเคลือบ ซึ่งชั้นเคลือบมีลักษณะเกิดการโก่งตัวจากการถูกแรงอัด โดยการหลุดร่อนของชั้นเคลือบนี้เกิดขึ้นบริเวณชั้นเคลือบอินเทอร์มีเดียทและชั้นรองพื้นโลหะผสมนิกเกิล-ฟอสฟอรัสและพบเศษของอนุภาคของชั้นอินเทอร์มีเดียทที่แตกหักกระจายตัวในบริเวณรอยต่อของชั้นเคลือบระหว่างชั้นอินเทอร์มีเดียทและชั้นสังกะสีอีกด้วย ส่วนในบริเวณที่ได้รับแรงดึงนั้น ชิ้นงานจะปรากฏลักษณะโครงสร้างและรอยแตกบริเวณของชั้นอินเทอร์มีเดียทเป็นส่วนใหญ่ ซึ่งจะมีลักษณะการแตกหักเป็นท่อนๆภายในชั้นเคลือบแต่ชิ้นส่วนที่แตกหักยังคงปรากฏเป็นชั้นของอินเทอร์มีเดียทได้โดยรวมถึงมีการหลุดร่อนของชั้นอินเทอร์มีเดียทออกจากชั้นสังกะสี แต่ถึงอย่างไรก็ดีจะสังเกตได้ว่าชั้นสังกะสีบริสุทธิ์จะมีการเกิดรอยแตกที่น้อยมากไม่เหมือนกับชิ้นงานเหล็ก low silicon LS-10m-10s และเหล็ก high silicon HS-10m-10s และถึงแม้จะมีรอยแตกเกิดขึ้นภายในชั้นอินเทอร์มีเดียท แต่ลักษณะของรอยแตกจะเจริญเติบโตจนถึงชั้นรองพื้นเท่านั้น เมื่อทำการตัดโค้งชิ้นงานคืนสู่ตำแหน่งเดิม ในส่วนของบริเวณที่ได้รับแรงอัดจะเกิดการโก่งตัวของชั้นเคลือบได้อย่างชัดเจน มีการหลุดร่อนของชั้นเคลือบบริเวณชั้นอินเทอร์มีเดียท ซึ่งลักษณะการหลุดร่อนจะเป็นผิวขรุขระและบริเวณของชั้นอินเทอร์มีเดียทบางส่วนยังคงมีติดอยู่กับชั้นรองพื้นโลหะผสมนิกเกิล-ฟอสฟอรัส แต่รอยแตกจะไม่ปรากฏให้เห็นในบริเวณของชั้นเคลือบรองพื้นแต่อย่างใด เมื่อพิจารณาในส่วนที่ได้รับแรงดึง ชั้นเคลือบสามารถประสานกันได้ดี แต่ยังคงปรากฏให้เห็นถึงรอยแตกบริเวณชั้นเคลือบอินเทอร์มีเดียทอยู่ และมีการหลุดร่อนของชั้นเคลือบระหว่างชั้นอินเทอร์มีเดียทและชั้นสังกะสีบริสุทธิ์เล็กน้อย แต่ถึงอย่างไรก็ดี รอยแตกบริเวณชั้นสังกะสีบริสุทธิ์จะพบน้อยมากหรือแทบไม่มีเลย

เมื่อทำการศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงานเหล็ก high silicon HS-15m-60s บริเวณที่ได้รับแรงกดเมื่อทำการตัดโค้งไปเป็นมุม 90 องศาพบว่าจะเกิดรอยแตกบริเวณผิวของชั้นสังกะสีเกิดขึ้นและบริเวณของชั้นรอยต่อระหว่างสังกะสีและชั้นอินเทอร์มีเดียทมีการหลุดร่อนเกิดขึ้น รวมถึงบริเวณชั้นรอยต่อระหว่างชั้นรองพื้นและชั้นอินเทอร์มีเดียทยังพบการหลุดร่อนและมีลักษณะเศษของอนุภาครอยแตกของชั้นอินเทอร์มีเดียทเกิดขึ้น ซึ่งจะสังเกตได้ว่าการหลุดร่อนระหว่างชั้นจะมีความขรุขระ ส่วนบริเวณชิ้นงานด้านที่ได้รับแรงดึงนั้นจะมีลักษณะกลไกการแตกหักบริเวณอย่างชัดเจนของชั้นอินเทอร์มีเดียทและในชั้นสังกะสีเล็กน้อย เมื่อทำการตัดโค้งคืน

ผู้ตำแหน่งเดิม ในส่วนที่ได้รับแรงอัดจะพบรอยแตกและการไม่ประสานกันของชั้นเคลือบได้อย่างชัดเจน โดยรอยแตกนี้จะเริ่มตั้งแต่ชั้นสังกะสีบริสุทธิ์จนถึงชั้นอินเทอร์มีเดียทในที่สุด โดยการยึดติระหว่างชั้นก็จะเกิดการหลุดร่อนระหว่างชั้นอินเทอร์มีเดียทและชั้นสังกะสีไปด้วย ซึ่งเกิดเป็นเศษอนุภาคแตกในบริเวณรอยต่อของชั้นเคลือบอย่างเห็นได้ชัดเจน แต่สำหรับชั้นรองพื้นยังคงปรากฏให้เห็นอยู่ในโครงสร้างและยังไม่มีอาการหลุดร่อนอย่างชัดเจนเทียบเท่ากับชั้นอินเทอร์มีเดียทแต่อย่างใด สำหรับบริเวณที่ได้รับแรงดึงนั้นจะปรากฏเห็นรอยแตกบริเวณของชั้นสังกะสีได้บ้าง แต่ชั้นเคลือบยังคงสามารถประสานกันได้ดี ไม่มีการรื้อถอนของชั้นเคลือบ รอยแตกเกิดขึ้นบริเวณชั้นอินเทอร์มีเดียทบ้างเล็กน้อย แต่ยังคงปรากฏการหลุดร่อนเพียงเล็กน้อยระหว่างชั้นเคลือบสังกะสีและชั้นอินเทอร์มีเดียท แต่ไม่ส่งผลถึงชั้นรองพื้นโลหะผสมนิกเกิล -ฟอสฟอรัสแต่อย่างใด อีกทั้งชั้นอินเทอร์มีเดียทยังคงเห็นเป็นชั้นสม่ำเสมอและมีความราบเรียบมากกว่าในส่วนบริเวณที่ได้รับแรงกด ซึ่งจากการวิเคราะห์ผลการทดลองเบื้องต้นทำให้ทราบว่า การที่ชั้นเคลือบของชิ้นงานที่ผ่านการชุบเคลือบชั้นรองพื้นโลหะผสมนิกเกิล-ฟอสฟอรัสนั้นมีการแตกหักระหว่างชั้นอินเทอร์มีเดียท ซึ่งเป็นผลมาจากค่าความแข็งของชั้นรองพื้นโลหะผสมนิกเกิล -ฟอสฟอรัสแบบไม่ใช้ไฟฟ้าที่มีสมบัติเฉพาะตัวซึ่งมีความแข็งสูงกว่าการชุบนิกเกิลด้วยวิธีแบบใช้ไฟฟ้า [33-34] เมื่อทำปฏิกิริยากับสังกะสีเกิดเป็นชั้นโลหะผสมสังกะสี-นิกเกิลนั้น จะทำให้ชั้นเคลือบอินเทอร์มีเดียทที่เกิดขึ้นนี้ยังคงมีสมบัติที่มีความแข็งของชั้นเคลือบโลหะผสมนี้อยู่ ซึ่งมีค่าสูงกว่าชั้นอินเทอร์มีเดียทระหว่างเหล็กและสังกะสีด้วยการชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนด้วยวิธีแบบดั้งเดิม ทำให้มีความเปราะของของชั้นเคลือบที่สูง เป็นสาเหตุให้ไม่สามารถทนต่อแรงดัดโค้งได้ และเกิดการแตกหักระหว่างชั้นเคลือบเกิดขึ้น

4.2.4 การศึกษาสมบัติการต้านทานการกัดกร่อน

4.2.4.1 การทดสอบความคงทนต่อละอองน้ำเกลือ (Salt spray testing)

ในการทดสอบความคงทนต่อละอองน้ำเกลือในงานวิจัยนี้จะทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM b 117 โดยชิ้นงานจะถูกวางในตู้สภาวะปิดท่ามุม 15-30 องศากับแนวตั้งมาตรฐานที่มีไอเกลือซึ่งเตรียมจากสารละลายโซเดียมคลอไรด์ในน้ำความเข้มข้น 5% ฟันละอองอยู่ตลอดเวลา เพื่อจำลองและประเมินอายุการใช้งานคล้ายคลึงจากสภาวะจริง ซึ่งชิ้นงานทดสอบจะใช้ตัวอย่างแทนกลุ่มชิ้นงานเป็นหลักแผ่นคาร์บอนรีดเย็นขนาดทดสอบ 5x2x0.04 ตารางเซนติเมตร (LS) ตามมาตรฐาน ASTM A123 โดยชิ้นงานจะถูกชุบเคลือบชั้นรองพื้นนิกเกิลด้วยวิธีแบบใช้ไฟฟ้า

เปรียบเทียบกับชิ้นงานที่ผ่านการชุบชั้นรองพื้นด้วยโลหะผสมนิกเกิล -ฟอสฟอรัสแบบไม่ใช้ไฟฟ้า ตามการศึกษาข้างต้น จากนั้นทำการชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนเป็นระยะเวลาต่างๆเพื่อเปรียบเทียบสมบัติการต้านทานการกัดกร่อนของชิ้นงานแต่ละชนิด โดยจะถูกแบ่งออกเป็น 4 ประเภท ดังนี้

1. เหล็กแผ่นคาร์บอนทำการชุบสังกะสีแบบดั้งเดิมเป็นระยะเวลา 60 วินาที (LS-0m-60s)
2. เหล็กแผ่นคาร์บอนทำการชุบชั้นรองพื้นโลหะนิกเกิลด้วยวิธีแบบใช้ไฟฟ้า [3] และทำการชุบสังกะสีเป็นระยะเวลา 60 วินาที (LS_{ep}^{*}-5m-60s)
3. เหล็กแผ่นคาร์บอนทำการชุบเคลือบชั้นรองพื้นโลหะผสมนิกเกิล -ฟอสฟอรัสเป็นระยะเวลา 10 นาทีและทำการชุบสังกะสีเป็นระยะเวลา 10 วินาที (LS^{*}-10m-10s)
4. เหล็กแผ่นคาร์บอนทำการชุบเคลือบชั้นรองพื้นโลหะผสมนิกเกิล -ฟอสฟอรัสเป็นระยะเวลา 15 นาทีและทำการชุบสังกะสีเป็นระยะเวลา 60 วินาที (LS^{*}-15m-60s)

จากการทดสอบชิ้นงานพบว่าในระยะ 1-2 วันแรกจะสังเกตเห็นลักษณะคราบสีขาวเกิดขึ้นบริเวณผิวของชิ้นงานทดสอบเล็กน้อย ซึ่งของแข็งสีขาวที่เกิดขึ้นนั้นได้แก่สนิมขาว (White rust) หรือ ซิงค์ไฮดรอกไซด์ ($Zn(OH)_2$) [35] ซึ่งเป็นปรากฏการณ์การกัดกร่อนเฉพาะที่ชนิดหนึ่ง ซึ่งเกิดจากการที่ชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการชุบสังกะสีอยู่ในสภาวะที่มีความชื้น ซึ่งในที่นี้ก็คือความชื้นจากสารละลายโซเดียมคลอไรด์ในระบบทดสอบ เมื่อชิ้นงานอยู่ในระบบทดสอบไอเกลือเป็นระยะเวลา 100 ชั่วโมง (4 วัน) จะเห็นลักษณะของคราบสีขาวของสนิมขาวชัดเจนเพิ่มขึ้นบนผิวชิ้นงานทั้ง 4 ชิ้นดังแสดงในภาพที่ 4.47 ข). ซึ่งลักษณะชั้นเคลือบสังกะสีของชิ้นงานทั้ง 4 ชิ้น ไม่พบการเกิดสนิมแดงขึ้น

และเมื่อทำการทดสอบเป็นระยะเวลา 550 ชั่วโมงพบว่า ชิ้นงานที่ทำการชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนด้วยวิธีดั้งเดิมนั้นจะสังเกตเห็นพบจุดของสนิมแดงเกิดขึ้นบริเวณผิวของชั้นเคลือบสังกะสี ดังแสดงในภาพที่ 4.47 ค). แต่ชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการชุบเคลือบชั้นรองพื้นก่อนนั้นไม่พบการเกิดของสนิมแดงบริเวณชั้นเคลือบสังกะสี เมื่อระยะเวลาทำการทดสอบครบ 800 ชั่วโมงนั้นพบว่า ชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการชุบสังกะสีแบบวิธีดั้งเดิมนั้นจะเกิดปริมาณของสนิมแดงกระจายตัวในชิ้นงานเพิ่มมากขึ้น ซึ่งแสดงได้ดังภาพที่ 4.47 ง). โดยสนิมแดงจะ ขึ้นเมื่อมีเหล็กสัมผัสกับน้ำ (H_2O) หรือความชื้นและออกซิเจน (O_2) ผู้ทดสอบละอองเกลือ กลายเป็นสารประกอบเหล็กออกไซด์ ($Fe_2O_3 \cdot xH_2O$) ซึ่งมีลักษณะเป็นสีแดงซึ่งไม่สามารถเกาะอยู่บนผิวของเหล็กได้อย่าง

เหนียวแน่น สามารถหลุดออกไปได้ง่าย ทำให้เนื้อเหล็กที่อยู่ชั้นในสามารถเกิดสนิมต่อไปจนกระทั่งหมดทั้งชิ้น ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการเกิดการกัดกร่อนในชิ้นงานที่ไม่ได้ผ่านการชุบเคลือบชั้นรองพื้นนั้นจะเริ่มจากการเกิดสนิมขาวและกัดกร่อนชั้นเคลือบสังกะสีหลุดร่อนออกไปเรื่อยๆจนกระทั่งถึงภายในเนื้อเหล็กจนเกิดเป็นสนิมแดงเกิดขึ้นได้ดังที่กล่าวข้างต้น ซึ่งการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นได้ง่ายกว่าชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการชุบเคลือบชั้นรองพื้นนี้เป็นเพราะว่าลักษณะของโครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนด้วยวิธีดั้งเดิมนั้นจะมีลักษณะเป็นของโครงสร้างแบบคอลัมน์ (Columnar) ซึ่งแสดงลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคไว้ดังภาพก่อนหน้านี้ ซึ่งโครงสร้างแบบคอลัมน์นั้นจะทำให้ความชื้นและคลอไรด์จากสารละลายโซเดียมคลอไรด์นั้นแทรกซึ่งเข้าสู่ชิ้นงานได้ง่าย ซึ่งก่อให้เกิดการกัดกร่อนเป็นสนิมแดงขึ้นได้

แต่สำหรับชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการชุบชั้นรองพื้นโลหะนิกเกิลด้วยวิธีแบบใช้ไฟฟ้าและชุบเคลือบชั้นรองพื้นโลหะผสมนิกเกิล-ฟอสฟอรัสแบบไม่ใช้ไฟฟ้านั้น ไม่พบสนิมแดงเกิดขึ้นบริเวณผิวชั้นเคลือบ มีเพียงสนิมขาวที่เกิดจากการทำปฏิกิริยาของสังกะสีกับความชื้น โดยเหตุผลที่ชิ้นงานที่ผ่านการชุบเคลือบชั้นรองพื้นไม่มีสนิมแดงเกิดขึ้นนั้นเนื่องจากว่าความชื้นและอากาศไม่สามารถเข้าทำปฏิกิริยากับเนื้อเหล็กได้ ทั้งนี้เนื่องจากว่าชั้นโลหะผสมหรือชั้นอินเทอร์มีเดียทที่เกิดขึ้นนั้นเป็นสารประกอบระหว่างสังกะสีและนิกเกิลเป็นส่วนใหญ่ ซึ่งมีลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคที่มีการอัดตัวกันอย่างหนาแน่น [36-37] ซึ่งแสดงลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคไว้ดังภาพก่อนหน้านี้ ทำให้ไม่มีช่องว่างให้คลอไรด์และความชื้นเข้าสู่ภายในโครงสร้างได้ อีกทั้งสารประกอบระหว่างสังกะสีและนิกเกิลนี้ ยังคงมีสมบัติในด้านการต้านทานการกัดกร่อนที่ดีเยี่ยมอีกด้วย เนื่องจากสารประกอบระหว่างสังกะสีและนิกเกิลในชิ้นงานที่มีการชุบเคลือบชั้นรองพื้นนั้นมีค่าศักย์ไฟฟ้าที่สูงกว่าสารประกอบระหว่างสังกะสีและเหล็กในโครงสร้างของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนด้วยวิธีดั้งเดิม [38] จึงทำให้ชิ้นงานที่ผ่านการชุบเคลือบชั้นรองพื้นมีความต้านทานการกัดกร่อนที่ดีกว่าแม้ว่าจะมีความหนาของชั้นอินเทอร์มีเดียท (สังกะสี-นิกเกิล) ที่เกิดขึ้นบางกว่าชั้นโลหะผสมสังกะสี-เหล็กที่เกิดขึ้นในชิ้นงานที่ผ่านการชุบสังกะสีด้วยวิธีดั้งเดิมก็ตาม

ก). 0 ชั่วโมง

LS-0m-60s



LS^{*}_{EP} 15m-60s



LS^{*}-0m-10s



LS^{*} 15m-60s



ข). 100 ชั่วโมง

LS-0m-60s



LS^{*}_{EP} 15m-60s



LS^{*}-0m-10s



LS^{*} 15m-60s

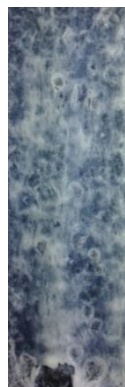


ค). 550 ชั่วโมง

LS-0m-60s



LS^{*}_{EP} 15m-60s

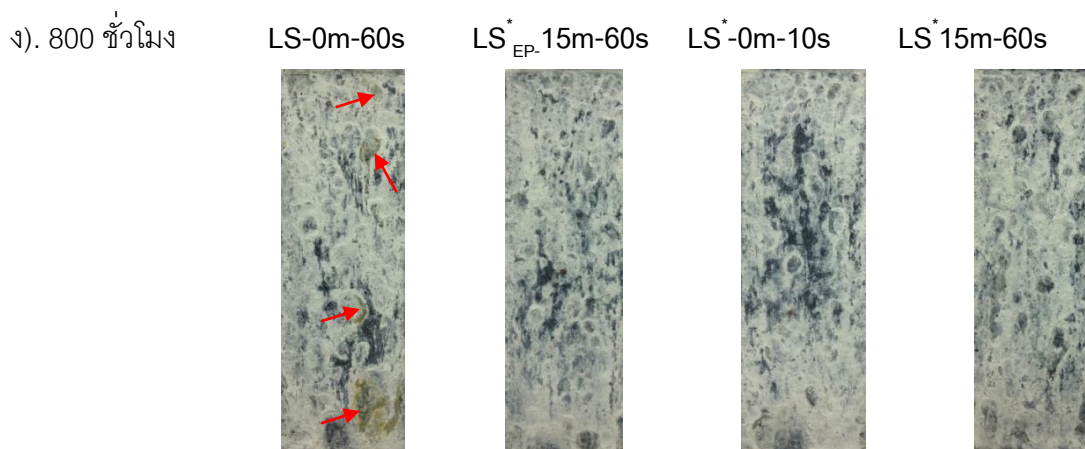


LS^{*}-0m-10s



LS^{*} 15m-60s



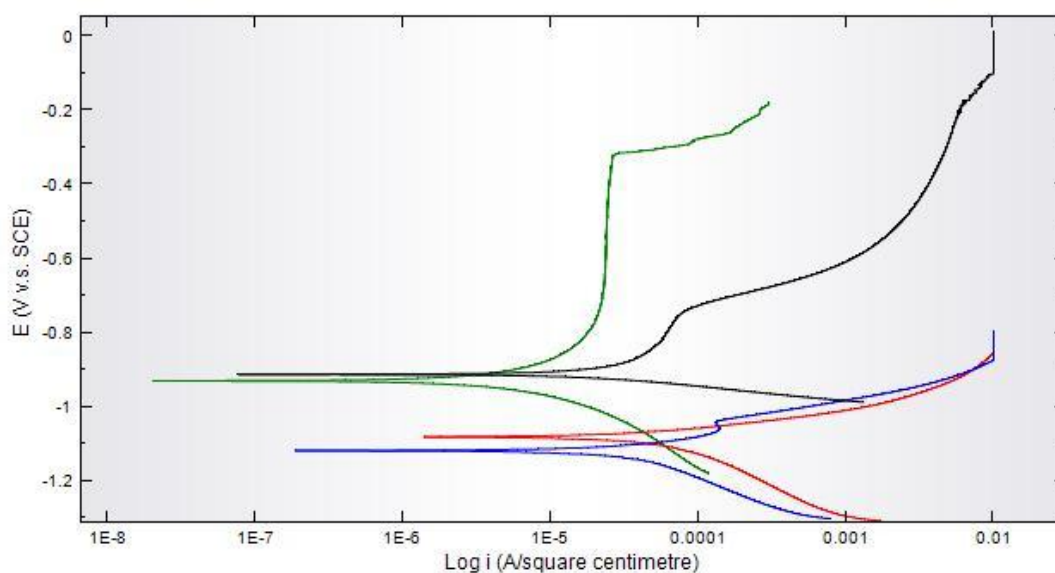


ภาพที่ 4.47 ลักษณะทางกายภาพของชิ้นงานเหล็กชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนโดยวิธีดั้งเดิมและโดยการเคลือบชั้นรองพื้นนิกเกิลด้วยไฟฟ้าและชั้นรองพื้นโลหะผสมนิกเกิล-ฟอสฟอรัสแบบไม่ใช้ไฟฟ้า ภายหลังจากการทดสอบความคงทนต่อไอเกลือที่ระยะเวลา ก) 0, ข) 100, ค.550 และ ง). 800 ชั่วโมง

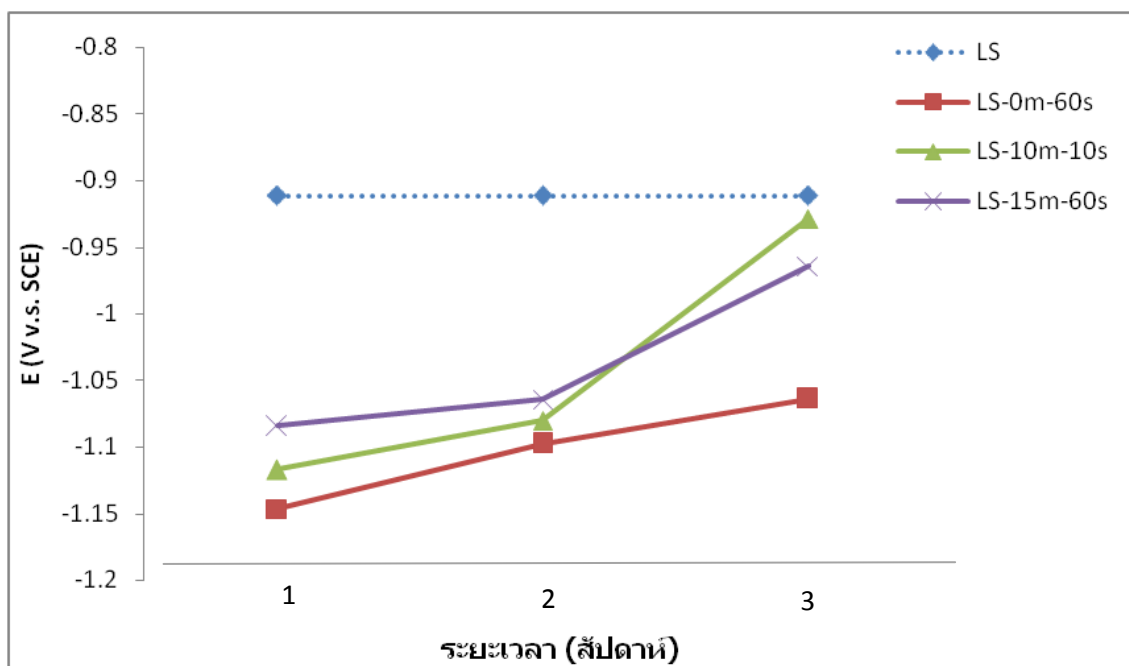
4.2.4.2 การทดสอบความต้านทานการกัดกร่อนโดยเทคนิคโพเทนชิโอไดนามิกส์ (Potentiodynamic)

ในการศึกษาส่วนนี้จะศึกษาพฤติกรรมการกัดกร่อนของชั้นเคลือบด้านนอกสุด ที่เป็นชั้นสังกะสีบริสุทธิ์และเข้าสู่ชั้นเคลือบที่ถัดเข้ามาภายใน ด้วยเทคนิค โพเทนชิโอไดนามิกส์ (Potentiodynamic) ซึ่งแสดงผลการทดสอบเป็นกราฟโพลาไรเซชันแสดงถึงศักย์ไฟฟ้าและกระแสที่วัดได้ของชั้นเคลือบบริเวณนั้นๆซึ่งบ่งบอกความต้านทานการกัดกร่อนด้วยค่าศักย์ไฟฟ้าและอัตราในการกัดกร่อนเมื่อเกิดการกัดกร่อนขึ้นด้วยค่ากระแสของการกัดกร่อน ในการทดสอบการกัดกร่อนด้วยเทคนิคโพเทนชิโอไดนามิกส์นี้ ได้เลือกเงื่อนไขตัวอย่างชิ้นงานเช่นเดียวกับการทดสอบการตัดโค้งตามหัวข้อที่ 4.5 แต่ละชั้นนี้ถูกเก็บไว้ในสารละลายเกลือที่มีความเข้มข้น 5%เป็นเวลา 1, 2 และ 3 สัปดาห์โดยชิ้นงานที่ถูกเก็บไว้จนครบระยะเวลาดังกล่าว จะถูกนำมาทดสอบโพเทนชิโอไดนามิกส์ ซึ่งกราฟแสดงเส้นโค้งโพลาไรเซชันที่ได้ของชิ้นงานทั้ง 3 ชั้นนี้ถูกนำมาเปรียบเทียบกับกราฟแสดงเส้นโค้งโพลาไรเซชันของเหล็กแผ่นและเหล็กฉากที่ปราศจากการชุบเคลือบใดๆ ซึ่งแสดงตัวอย่างผลการทดลองที่ได้แสดงดังกราฟโพลาไรเซชันในภาพที่ 4.48

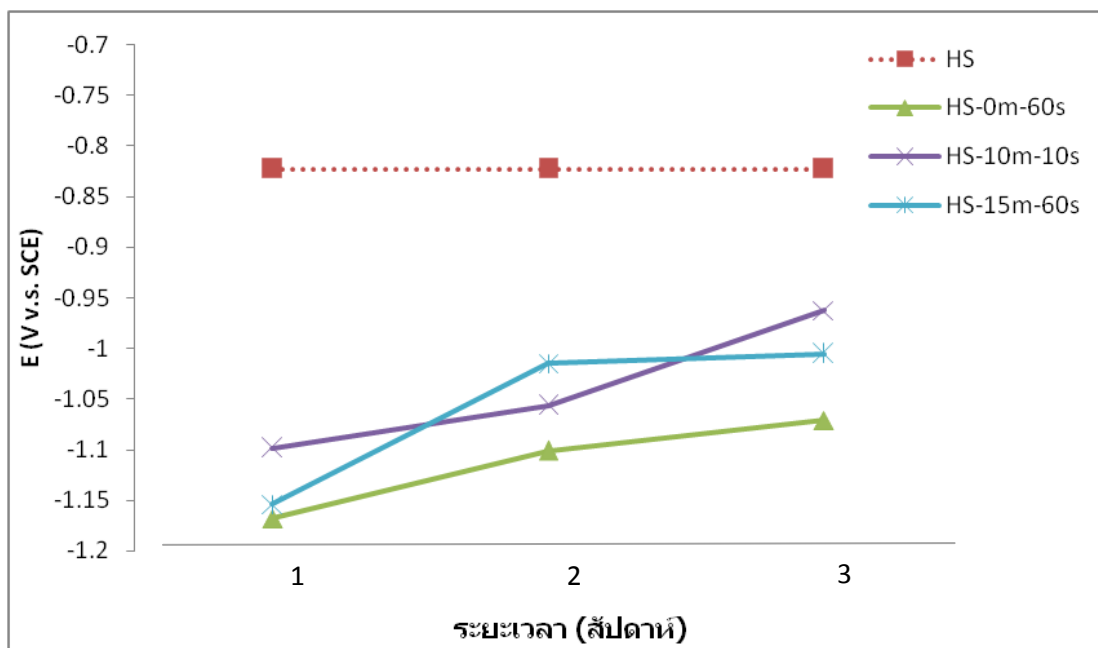
จากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มเวลาในการเก็บชิ้นงานเป็นระยะเวลา 1, 2 และ 3 สัปดาห์ในสารละลายเกลือ เมื่อนำมาทดสอบด้วยเทคนิคโพเทนทิโอดินามิกส์พบว่าค่าศักย์ไฟฟ้าของการกัดกร่อนและค่ากระแสของการกัดกร่อนนั้น มีการเปลี่ยนแปลงไปต่างกันในแต่ละสัปดาห์ ซึ่งแนวโน้มของค่าศักย์ไฟฟ้าของการกัดกร่อนนั้นพบว่าเมื่อระยะเวลาในการเก็บชิ้นงานไว้ในสารละลายเกลือ 5% นานขึ้น จะทำให้ค่าศักย์ไฟฟ้ามีแนวโน้มที่มีค่าสูงขึ้นหรือเกิดการกัดกร่อนได้ยากขึ้น แต่สำหรับค่ากระแสของการกัดกร่อนนั้นจะมีแนวโน้มการเพิ่มขึ้นและลดลงที่ไม่คงที่เพื่อความสะดวกและง่ายต่อการวิเคราะห์จึงขอทำการสรุปค่าศักย์ไฟฟ้าของการกัดกร่อนและค่ากระแสของการกัดกร่อนของชิ้นงานแต่ละเงื่อนไขที่เปลี่ยนแปลงไปตามระยะเวลาในการเก็บชิ้นงาน ซึ่งแสดงกราฟข้อมูลได้ดังภาพที่ 4.49-4.52



ภาพที่ 4.48 กราฟโพลาริเซชันของชิ้นงานเหล็ก hypo-sandelin ชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนโดยการเคลือบชั้นรองพื้นโลหะผสมนิกเกิล -ฟอสฟอรัสแบบไม่ใช้ไฟฟ้า (UA1-10m-10s) ที่ถูกเก็บไว้ในสารละลายเกลือ 5% เป็นระยะเวลา 0-3 สัปดาห์ ด้วยเทคนิคโพเทนทิโอดินามิกส์

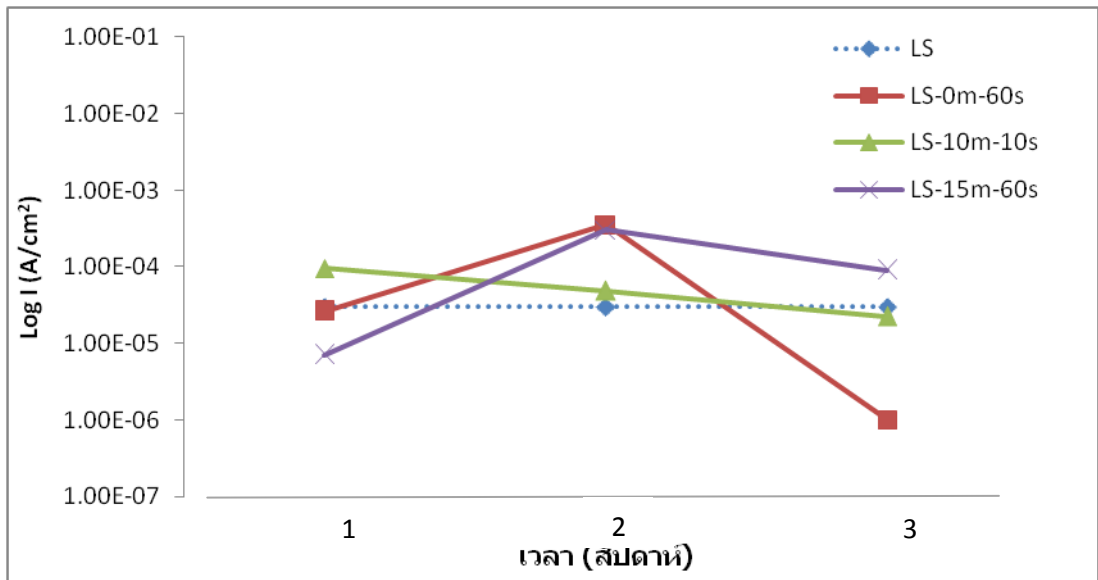


ภาพที่ 4.49 แสดงค่าศักย์ไฟฟ้าของการกัดกร่อนของชิ้นงานเหล็ก low silicon (LS) ที่เงื่อนไขต่างๆ ถูกเก็บไว้ในสารละลายเกลือ 5% เป็นระยะเวลา 1, 2 และ 3 สัปดาห์

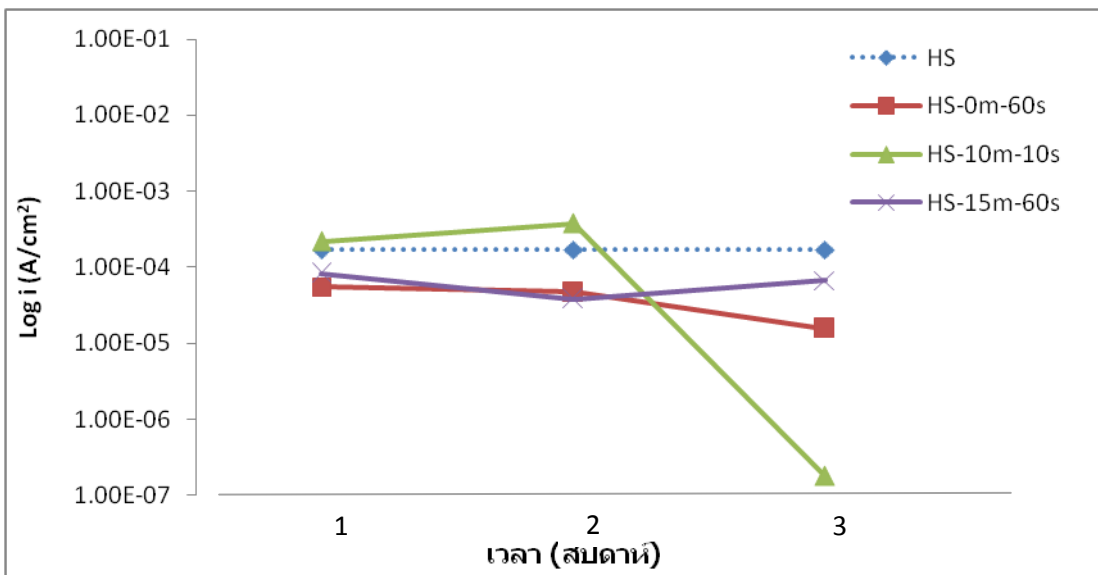


ภาพที่ 4.50 แสดงค่าศักย์ไฟฟ้าของการกัดกร่อนของชิ้นงานเหล็ก high silicon (HS) ที่เงื่อนไขต่างๆ ถูกเก็บไว้ในสารละลายเกลือ 5% เป็นระยะเวลา 1, 2 และ 3 สัปดาห์

จากภาพที่ 4.49-52 จะแสดงให้เห็นว่าค่าศักย์ไฟฟ้าของการกัดกร่อนนั้นมีแนวโน้มที่มีค่าที่สูงขึ้นในทุกตัวอย่างชิ้นงาน สำหรับชิ้นงานเหล็ก low silicon และเหล็ก high silicon ที่ไม่ผ่านกระบวนการชุบเคลือบผิวใดๆจะแสดงค่าของศักย์ไฟฟ้าของการกัดกร่อนที่สูงที่สุด แต่สำหรับชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการชุบเคลือบสังกะสีนั้น ในระยะเริ่มต้นที่ 1 สัปดาห์จะมีค่าของศักย์ไฟฟ้าที่ต่ำกว่าเหล็กทั้ง 2 ชนิด เนื่องจากบริเวณที่ทำการวัดนั้นเป็นชั้นของสังกะสีเป็นส่วนใหญ่ ซึ่งโดยปกติแล้วสมบัติของสังกะสีที่มีค่าศักย์ไฟฟ้าของการกัดกร่อนที่ต่ำกว่าของเหล็ก จากชิ้นงาน LS-0m-60s และ HS-0m-60s เป็นชิ้นงานที่ปราศจากชั้นรองพื้นจะเห็นว่ามีค่าของศักย์ไฟฟ้าต่ำสุด เนื่องจากเป็นบริเวณของชั้นสังกะสีบริสุทธิ์ แต่ชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการชุบเคลือบชั้นรองพื้น ซึ่งได้แก่ LS-10m-10s และ LS-15m-60s รวมถึง HS-10m-10s และ HS-15m-60s จะมีแนวโน้มของศักย์ไฟฟ้าที่สูงกว่า ทั้งนี้เนื่องจากว่าชิ้นงานมีการชุบเคลือบชั้นรองพื้นซึ่งมีส่วนผสมของโลหะผสมนิกเกิล-ฟอสฟอรัสนั้น อาจทำให้มีธาตุนิกเกิลซึ่งมีค่าศักย์ไฟฟ้าที่สูงและสามารถทนการกัดกร่อนได้ดีกระจายตัวเพียงเล็กน้อยในชั้นสังกะสีนี้ได้ ทำให้ศักย์ไฟฟ้ามีแนวโน้มที่สูงกว่าชั้นสังกะสีบริสุทธิ์ แต่ถึงอย่างไรก็ตามค่าศักย์ไฟฟ้าของชิ้นงานทั้ง 3 ประเภท นั้นไม่ได้แตกต่างกันมาก เมื่อชิ้นงานทดสอบถูกเก็บไว้ที่ระยะเวลา 2 สัปดาห์พบว่า แนวโน้มค่าศักย์ไฟฟ้าของการกัดกร่อนของทุกชิ้นงานเพิ่มสูงขึ้น โดยมีศักย์ไฟฟ้าที่สูงขึ้นเนื่องจากคลอไรด์ไอออนจากสารละลายเกลืออนันต์ได้ทำการแทรกซึมลงเข้าสู่ชั้นที่มีธาตุนิกเกิลกระจายตัวอยู่ซึ่งก็คือชั้นอินเทอร์มีเดียทที่ประกอบด้วยชั้นโลหะสังกะสีและนิกเกิล ทำให้ศักย์ไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้น แต่สำหรับชิ้นงานที่ปราศจากชั้นเคลือบ LS-0m-60s และ HS-0m-60s นั้นมีค่าศักย์ไฟฟ้าที่สูงขึ้นเนื่องจากผลของธาตุเหล็กที่ผสมอยู่ในชั้นอินเทอร์มีเดียทระหว่างเหล็กและสังกะสี สุดท้ายเมื่อชิ้นงานทดสอบถูกเก็บไว้ที่ระยะเวลา 3 สัปดาห์พบว่าชิ้นงานที่ผ่านการชุบเคลือบชั้นรองพื้นนั้นจะมีค่าศักย์ไฟฟ้าที่เพิ่มสูงขึ้นมากอย่างชัดเจน เนื่องจากคลอไรด์ไอออนนั้นได้แทรกซึมเข้าสู่ชั้นอินเทอร์มีเดียทที่มีส่วนผสมของธาตุนิกเกิลอยู่ในปริมาณสูง อิทธิพลของธาตุนิกเกิลจึงทำให้ชั้นเคลือบมีความต้านทานการกัดกร่อนที่ดีขึ้น จึงทำให้ศักย์ไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้นอย่างชัดเจน แต่สำหรับชิ้นงานที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการชุบเคลือบใดๆ ศักย์ไฟฟ้าของชิ้นงานจะเพิ่มสูงขึ้นจากเดิมเล็กน้อยตามปริมาณของเหล็กที่เพิ่มสูงขึ้นในชั้นอินเทอร์มีเดียท



ภาพที่ 4.51 แสดงค่ากระแสของการกัดกร่อนของชิ้นงานเหล็ก low silicon (LS) ที่เงื่อนไขต่างๆ ถูกเก็บไว้ในสารละลายเกลือ 5% เป็นระยะเวลา 1, 2 และ 3 สัปดาห์



ภาพที่ 4.52 แสดงค่ากระแสของการกัดกร่อนของชิ้นงานเหล็ก high silicon (HS) ที่เงื่อนไขต่างๆ ถูกเก็บไว้ในสารละลายเกลือ 5% เป็นระยะเวลา 1, 2 และ 3 สัปดาห์

แต่สำหรับค่ากระแสของการกัดกร่อนของชิ้นงานเหล็ก low silicon และ high silicon นั้น ดังแสดงดังภาพที่ 4.51 และ 4.52 พบว่า ชิ้นงานเหล็ก hypo-sandelin ที่ผ่านกระบวนการชุบเคลือบชั้นรองพื้นโลหะผสมนิกเกิล-ฟอสฟอรัสและการชุบเคลือบชั้นสังกะสีจะมีค่าของกระแสของการกัดกร่อนโดยภาพรวมที่สูงกว่า ชิ้นงานที่ผ่านการเก็บไว้ในสารละลายเกลือเป็นระยะเวลา 1 สัปดาห์กระแสของการกัดกร่อนของชิ้นงานโดยส่วนใหญ่จะมีค่าใกล้เคียงกันยกเว้นชิ้นงาน LS-10m-10s ที่มีค่ากระแสของการกัดกร่อนที่สูงกว่าชิ้นงานตัวอย่างอื่นๆ แต่เมื่อนำชิ้นงานที่ถูกเก็บไว้ในสารละลายเกลือเป็นระยะเวลา 2 สัปดาห์มาทดสอบกลับพบว่าค่ากระแสของการกัดกร่อนของชิ้นงาน LS-10m-10s มีค่าที่ลดลง แต่ชิ้นงาน LS-10m-60s และ LS-15m-60s กลับมีค่าของกระแสของการกัดกร่อนที่เพิ่มสูงขึ้นอย่างมาก สุดท้ายเมื่อชิ้นงานถูกเก็บไว้ในสารละลายเกลือเป็นระยะเวลา 3 สัปดาห์ ชิ้นงานทั้งหมดกลับมามีค่ากระแสของการกัดกร่อนลดลงหรือมีความต้านทานการกัดกร่อนที่สูงขึ้น สำหรับชิ้นงานเหล็ก high silicon พบว่า ค่ากระแสของการกัดกร่อนสำหรับชิ้นงานที่ถูกเก็บไว้ในสารละลายเกลือเป็นระยะเวลา 1 สัปดาห์พบว่า ค่ากระแสของการกัดกร่อนของชิ้นงาน HS-0m-60s และ HS-15m-60s นั้นมีค่าของกระแสของการกัดกร่อนที่ต่ำกว่าเหล็ก high silicon ที่ผ่านการชุบเคลือบใดๆ ยกเว้นชิ้นงาน HS-10m-10s ที่มีค่ากระแสของการกัดกร่อนที่เพิ่มสูงขึ้น ต่อมาเมื่อทำการวิเคราะห์ชิ้นงานที่ถูกเก็บไว้ในสารละลายเกลือเป็นระยะเวลา 2 สัปดาห์พบว่า ค่ากระแสของการกัดกร่อนของชิ้นงาน HS-0m-60s และ HS-15m-60s มีค่าลดลงเล็กน้อย แต่สำหรับชิ้นงาน HS-10m-10s กลับมีค่ากระแสของการกัดกร่อนเพิ่มสูงขึ้นอย่างมาก และสุดท้ายเมื่อทำการวัดค่ากระแสของการกัดกร่อนของชิ้นงานที่ถูกเก็บไว้ในสารละลายเกลือเป็นระยะเวลา 3 สัปดาห์พบว่าชิ้นงานทั้งหมดจะมีแนวโน้มของกระแสของการกัดกร่อนที่มีค่าลดลงต่ำกว่าชิ้นงานเหล็ก high silicon ที่ปราศจากการชุบเคลือบใดๆ

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาตัวแปรที่ส่งผลต่ออัตราการชุบเคลือบโลหะผสมนิกเกิล - ฟอสฟอรัสแบบไม่ใช้ไฟฟ้าเพื่อให้ได้อัตราการชุบเคลือบที่สูง โดยใช้เป็นชั้นรองพื้นแทนขั้นตอนของการชุบฟลักซ์ก่อนการชุบสังกะสีเพื่อลดการแพร่ที่รวดเร็วของเหล็กและสังกะสีซึ่งจะนำไปสู่การเกิดชั้นเคลือบที่มีความหนา รวมถึงศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคที่เปลี่ยนแปลงไป สมบัติการต้านทานการกัดกร่อนและสมบัติการยึดเกาะของชั้นเคลือบ จึงได้ศึกษาการผลิตเหล็กชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนโดยการเคลือบชั้นรองพื้นโลหะผสมนิกเกิล - ฟอสฟอรัสแบบไม่ไฟฟ้าเพื่อเป็นทางเลือกในการทดแทนการเหล็กชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนโดยวิธีดั้งเดิม โดยจากการศึกษาพบว่า

1. อัตราการชุบเคลือบของโลหะผสมนิกเกิล - ฟอสฟอรัสแบบไม่ใช้ไฟฟ้าถูกวิเคราะห์ว่าขึ้นกับปัจจัยของส่วนผสมทางเคมีของสารละลาย ในที่นี้ได้แก่ ริดิวซ์ซิงเอเจนท์ สารกำเนิดไอออนของโลหะนิกเกิลและฟิเอซของสารละลาย โดยอัตราการชุบเคลือบของปฏิกิริยาจะถูกควบคุมด้วยปริมาณริดิวซ์ซิงเอเจนท์เป็นหลัก ซึ่งเมื่อเพิ่มปริมาณริดิวซ์ซิงเอเจนท์และฟิเอซของสารละลายจะทำให้อัตราการชุบเคลือบเพิ่มสูงขึ้น สำหรับการเพิ่มปริมาณของแหล่งกำเนิดไอออนของโลหะในช่วงแรกจะทำให้อัตราการชุบเคลือบเพิ่มสูงขึ้นได้ แต่เมื่อเพิ่มปริมาณของแหล่งกำเนิดไอออนจนเลยจุดเหมาะสมโดยโมลระหว่างริดิวซ์ซิงเอเจนท์และสารกำเนิดไอออนของโลหะ อัตราการชุบเคลือบจะคงที่และมีแนวโน้มลดลง

2. การผลิตชั้นรองพื้นโลหะผสมนิกเกิล-ฟอสฟอรัสเป็นชั้นเคลือบกั้นกลางระหว่างชั้นเหล็กและสังกะสีหลอมเหลวสามารถลดอัตราการแพร่ที่รวดเร็วระหว่างสังกะสีหลอมเหลวและเหล็กที่มีส่วนผสมของธาตุซิลิกอนที่แตกต่างกัน ทำให้ชั้นเคลือบอินเทอร์มีเดียตสังกะสี-นิกเกิล มีความหนาโดยรวมที่ลดลงถึง 2 เท่าเมื่อเทียบกับการชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนด้วยวิธีดั้งเดิม

3. ลักษณะของโครงสร้างทางจุลภาคและเฟสที่เกิดขึ้นของชั้นอินเทอร์มีเดียตนั้น จะแตกต่างไปจากชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการชุบเคลือบแบบดั้งเดิม ซึ่งชนิดของเฟสที่เกิดขึ้นของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการชุบเคลือบชั้นรองพื้นจะเป็นเฟสของ $\Gamma + \beta$ ซึ่งมีส่วนผสมของธาตุนิกเกิลและสังกะสีเป็นหลัก และลักษณะทางโครงสร้างทางจุลภาคจะมีความหนาแน่นที่สูงกว่าและไม่มีรูพรุน แตกต่างจากชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนด้วยวิธีดั้งเดิมซึ่งจะมีลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคเป็นลักษณะแบบคอดัมมาร์

4. เมื่อทำการทดสอบสมบัติการต้านทานการกัดกร่อนด้วยเทคนิคของเกลือพบว่า ชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการชุบเคลือบชั้นรองพื้นโลหะผสมนิกเกิล-ฟอสฟอรัสจะมีค่าคงทนต่อการกัดกร่อนที่สูงกว่าแม้จะมีค่าความหนาของชั้นอินเทอร์มีเดียทและชั้นสังกะสีที่น้อยกว่าโดยไม่พบการเกิดสนิมแดงเมื่อทดสอบในละอองเกลือถึงระยะเวลา 800 ชั่วโมง ขณะที่ชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการชุบแบบวิธีดั้งเดิมจะพบลักษณะของการเกิดสนิมแดงเกิดขึ้นแล้ว ซึ่งสันนิษฐานจากผลธาตุ निकเกิดซึ่งมีค่าศักย์ไฟฟ้าของการกัดกร่อนที่สูง ทำให้โครงสร้างมีความต้านทานการกัดกร่อนที่ดี รวมถึงลักษณะของโครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงานที่ผ่านการชุบเคลือบชั้นรองพื้นที่มีการอัดตัวกันแน่นภายในโครงสร้างมากกว่าโครงสร้างทางจุลภาคที่ผ่านการชุบแบบดั้งเดิมที่มีลักษณะโครงสร้างเป็นแบบคอลัมน์นาร์ ซึ่งทำให้การแทรกซึมของคลอไรด์ไอออนเป็นไปได้ง่ายกว่า

5. สมบัติทางกลของชั้นเคลือบเมื่อทดสอบชิ้นงานที่ผ่านการชุบเคลือบชั้นรองพื้นก่อนทำการชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนด้วยการทดสอบการดัดโค้งทำมุม 90 องศา พบว่า การยึดเกาะของชั้นเคลือบนั้นมีการเกิดรอยแตกระหว่างชั้น ซึ่งเกิดบริเวณชั้นอินเทอร์มีเดียทระหว่างนิกเกิลและสังกะสี ซึ่งเป็นผลมาจากค่าความแข็งของชั้นอินเทอร์มีเดียทของสารประกอบนิกเกิล-สังกะสีที่มีค่าความแข็งสูง จึงทำให้ชั้นอินเทอร์มีเดียทมีความเปราะสูงทำให้ไม่สามารถทนแรงกดและแรงอัดที่เกิดขึ้นจากการดัดโค้งชิ้นงาน

ข้อเสนอแนะ

จากการศึกษาสมบัติด้านต่างๆของชั้นเคลือบที่เกิดขึ้นสำหรับชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการชุบเคลือบชั้นรองพื้นโลหะผสมนิกเกิล-ฟอสฟอรัส พบว่า สมบัติด้านความต้านทานการกัดกร่อนมีแนวโน้มที่มีความต้านทานการกัดกร่อนที่ดีขึ้น แต่สมบัติทางกลในการทดสอบการต้านทานแรงดัดโค้งกลับพบว่ายังมีข้อด้อยบางประการ ซึ่งควรมีศึกษาเพิ่มเติมในส่วนหัวข้อถัดไปดังต่อไปนี้

1. การศึกษาสมบัติเชิงกลอื่นๆได้แก่การ ทดสอบความแข็งและการทดสอบความสึกหรอของชั้นเคลือบอินเทอร์มีเดียทแต่ละชั้น
2. การศึกษาความสม่ำเสมอของชั้นเคลือบสำหรับการชุบเคลือบบนชิ้นงานที่มีรูปร่างซับซ้อน
3. การทดสอบความต้านทานการกัดกร่อนของแต่ละชั้นที่เกิดขึ้นเคลือบด้วยเทคนิคัลควาโนสแตติก

4. การวิเคราะห์ต้นทุนของการผลิตเหล็กชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนโดยการเคลือบชั้นรองพื้น
โลหะผสมนิกเกิล-ฟอสฟอรัสแบบไม่ใช้ไฟฟ้า

เอกสารอ้างอิง

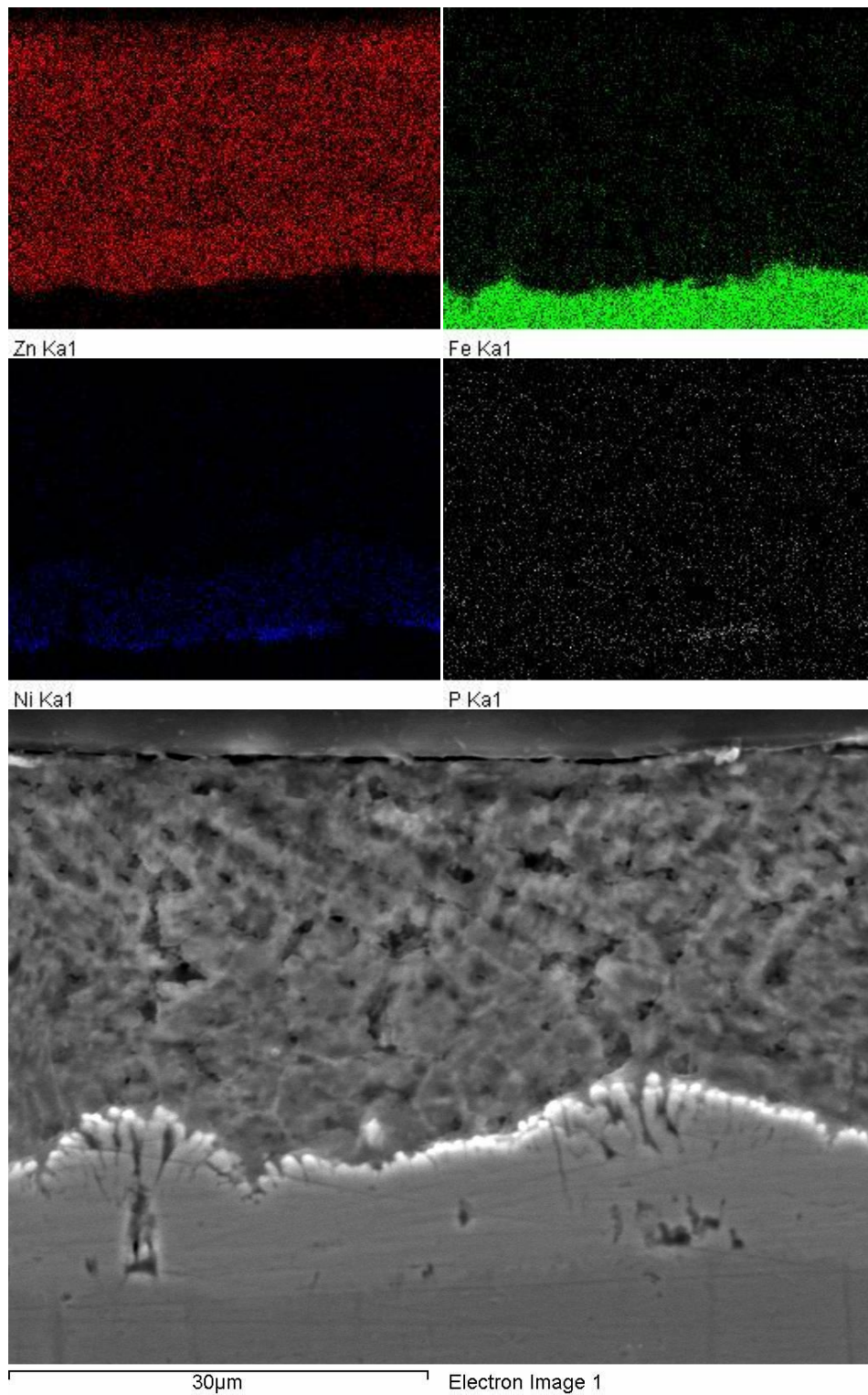
- [1] LPN PLATE MILL. ความรู้เกี่ยวกับเหล็ก ก. [ออนไลน์].2548 .แหล่งที่มา : <http://www.lpnpm.co.th/th/knowledge.php> [24 กุมภาพันธ์ 2554]
- [2] ณรงค์ฤทธิ์ หอมดวง. การป้องกันการกัดกร่อนของโลหะ. [ออนไลน์].2551 .แหล่งที่มา : <http://www.naewna.com/news.asp?ID=135996>. [24 กุมภาพันธ์ 2554]
- [3] Sa-nguanmoo, R., E. Nisaratanaporn, and Y. Boonyongmaneerat. Hot-dip galvanization with pulse-electrodeposited nickel pre-coatings. Corrosion Science 53 (september2011):122-126.
- [4] มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ธัญบุรี. ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับเหล็กชุบเคลือบสังกะสี. [ออนไลน์].2551.แหล่งที่มา :<http://www.neutron.rmutphysics.com> [24 กุมภาพันธ์ 2554]
- [5] Asgari, H., M.R. Toroghinejad, and M.A. Golozar, Effect of coating thickness on modifying the texture and corrosion performance of hot-dip galvanized coatings. Current Applied Physics 9 (October 2007): 59-66.
- [6] Vagge, S.T., V.S. Raja, and R.G. Narayanan, Effect of deformation on the electrochemical behavior of hot-dip galvanized steel sheets. Applied Surface Science 253 (August 2007): 8415-8421.
- [7] บริษัทผาแดงอินดัสตรี. ชุบเคลือบเหล็ก. [ออนไลน์].2551.แหล่งที่มา :<http://www.zincinfothailand.com>. [24 กุมภาพันธ์ 2554]
- [8] A.R, M., The metallurgy of zinc-coated steel. Progress in Materials Science 45 (June 2000) :191-271.
- [9] Ueda, S., et al., Growth kinetics of intermediate phase layers in an early stage of hot dip galvanizing at 450 °C. Journal of Materials Science 43 (August 2008): 5666-5668.
- [10] Steel Protection By Hot Dip Galvanizing & Duplex Systems. The Reactions Between Iron & Zinc. [Online]. 2000. Available from: www.ckit.co.za [24, Feb 2012]

- [11] Shibli, S.M.A. and R. Manu, Process and performance improvement of hot dip zinc coating by dispersed nickel in the under layer. Surface and Coatings Technology 1 (December 2005) : 103-108.
- [12] Che, C., et al., Influence of Ni-electrodeposited pretreatment on galvanized coatings of reactive steels. Journal of Wuhan University of Technology--Materials Science Edition 22 (July 2007): 221-224.
- [13] Krishnan, K., et al., An overall aspect of electroless Ni-P depositions. A review article. Metallurgical and Materials Transactions A 37(June 2006): 1917-1926.
- [14] Russell, A.M. and K.L. Lee, Structure-Property Relation in Nonferrous Metal. 1. New Jersey: A JOHN WILEY & SONS, INC., PUBLICATION. 2005.
- [15] กรมโรงงานอุตสาหกรรม. อุตสาหกรรมชุบโลหะ. [ออนไลน์]. 2549.แหล่งที่มา : <http://www.2.diw.go.th> [24 กุมภาพันธ์ 2554]
- [16] International, A.. Elements of Metallurgy and Engineering Alloys. 1. Ohio USA: ASM International. 2008.
- [17] ชุมพล มณฑาทิพย์กุล. การพัฒนาระบบควบคุมคุณภาพสำหรับกระบวนการชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อน, วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ วิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2539.
- [18] Industrial Galvanizers. Hot dip galvanizing. [online]. 2006 Available from: <http://www.ingal.com.au/IGSM/12.htm>. [24, Feb 2001]
- [19] มนต์ สติระจินดา , โลหะนอกกลุ่มเหล็ก. กรุงเทพมหานคร :สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2543.
- [20] Djokic, S.S., Electroless Deposition of Metals and Alloys. Modern Aspects of Electrochemistry 35 (2002) : 51-133.
- [21] J.R. Davis, Corrosion understanding the basics. Ohio: ASM International, 2000
- [22] รัชชณี สงวนหมู่ , การชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนโดยการเคลือบชั้นรองพื้นนิกเกิลด้วยไฟฟ้า. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ วิศวกรรมโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2553.

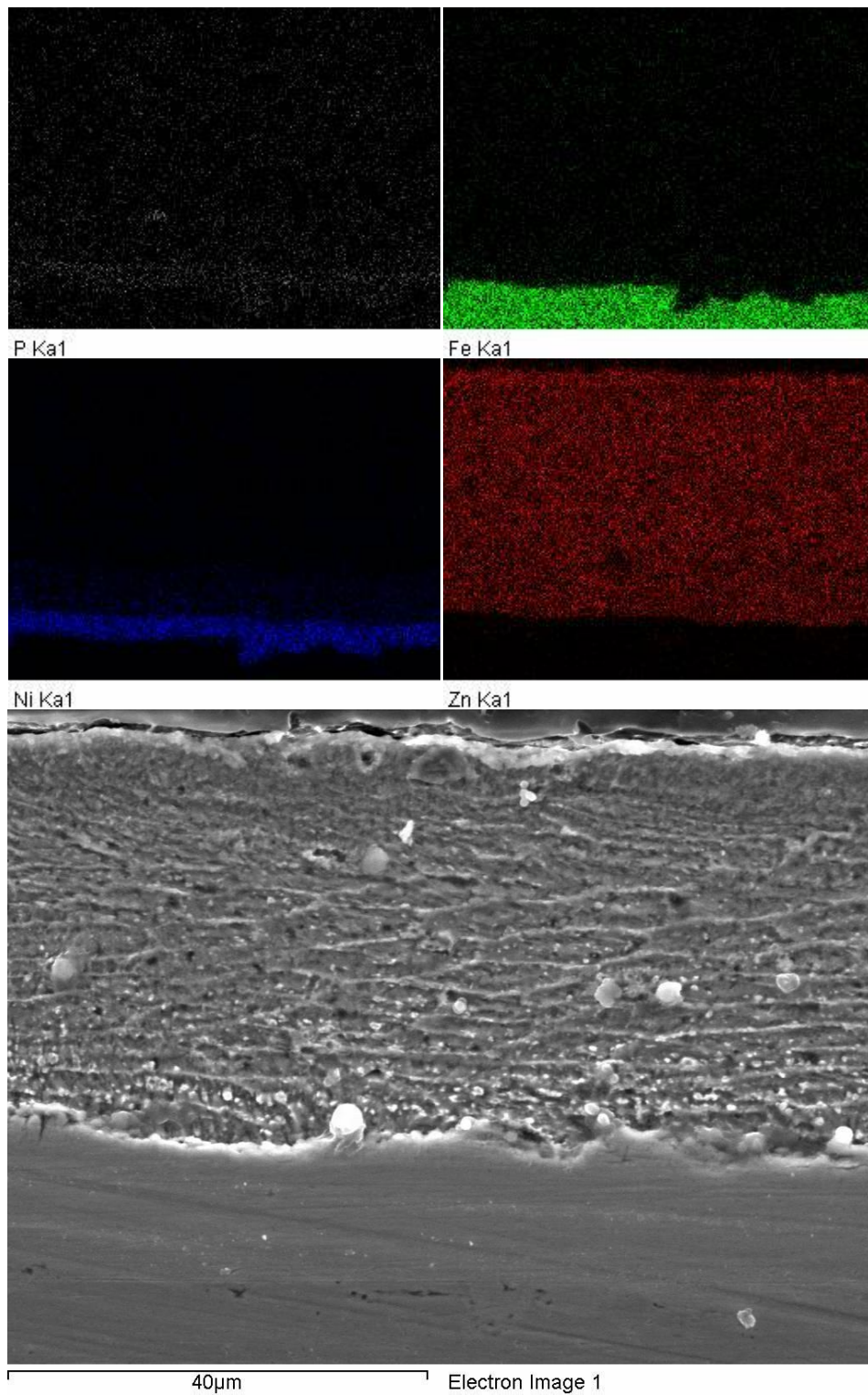
- [23] Glenn O. Mallory and J.B. Hajdu, Electroless Plating : Fundamental And Applications. Florida: American Electroplaters and Surface Finishers Society, 2010.
- [24] Mordechay Schlesinger, Electroless deposition of nickel, Modern Electroplating, Mordechay Schlesinger and Milan Paunovic, John Wiley & Sons, 2010.
- [25] ยุทธนันท์ บุญยงมณีรัตน์ . เทคโนโลยีการชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อน : ประสิทธิภาพและแนวทางการพัฒนา. เทคโนโลยีวัสดุ ศูนย์เทคโนโลยีและวัสดุแห่งชาติ 2554.
- [26] LI, Z.-h., et al., Corrosion and wear properties of electroless Ni-P plating layer on AZ91D magnesium alloy. Transactions of Nonferrous Metals Society of China. 18 (September 1007) : 2570-2576.
- [27] Eugene J. O'Sullivan, Fundamental and Practical Aspects of the Electroless Deposition Reaction. Advances in Electrochemical Science and Engineering 14 (Agust 2009) : 226-270.
- [28] SHARTAL, K.M. and G.J. KIPOUROS, Electroless Nickel Phosphorus Plating on AZ31. The Minerals, Metals & Materials Society and ASM International 40 (Febuary 2009) : 208-222
- [29] Ke Wang, Liang Hong, and Zhao-Lin Liu, Exploring the Water-Soluble Phosphine Ligand as the Environmentally Friendly Stabilizer for Electroless Nickel Plating. Ind. Eng. Chem. Res 48 (Januaty 2009) 1727-1734.
- [30] Abner Brenner, Electroless Plating Comes of Age. Metal Finishing 52 (December 1954) : p. 61-68.
- [31] M. Moniruzzaman and Subrata Roy, Effect of pH on electroless Ni-P coating of conductive and nonconductive materials. International Journal of Automotive and Mechanical Engineering 4 (December 2011) : 481-489.
- [32] V. Raghavan, Section II: Phase Diagram Evaluations Fe-Ni-Zn (Iron-Nickel-Zinc). Journal of Phase Equilibria 24 (December 2003) : 558-560.

- [33] K.G. Keong, W. Sha, and S. Malinov, Hardness evolution of electroless nickel–phosphorus deposits with thermal processing. Surface and Coatings Technology 168 (May 2003) : 263–274.
- [34] Rajagopal, I., Electroless and electrodeposition of nickel boron composites. Bulletin of Materials Science 5 (August & October 1983 : 323-331.
- [35] D. de la Fuente, J.G. Castan, and M. Morcillo, Long-term atmospheric corrosion of zinc. Corrosion Science 49 (March 2007) : 1420–1436.
- [36] S.M.A. Shibli, R. Manu, and V.S. Dilimon, Effect of nickel-rich barrier layer on improvement of hot-dip zinc coating. Applied Surface Science 245 (December 2005) : 179-185.
- [37] Z. Abdel Hamida, et al., Process and performance of hot dip zinc coatings containing ZnO and Ni–P under layers as barrier protection. Applied Surface Science 256 (August 2010) : 4166–4170.
- [38] J.B. Bajat, et al., Corrosion behaviour of epoxy coatings electrodeposited on galvanized steel and steel modified by Zn–Ni alloys. Progress in Organic Coatings 39 (September 2000) : 127-135.

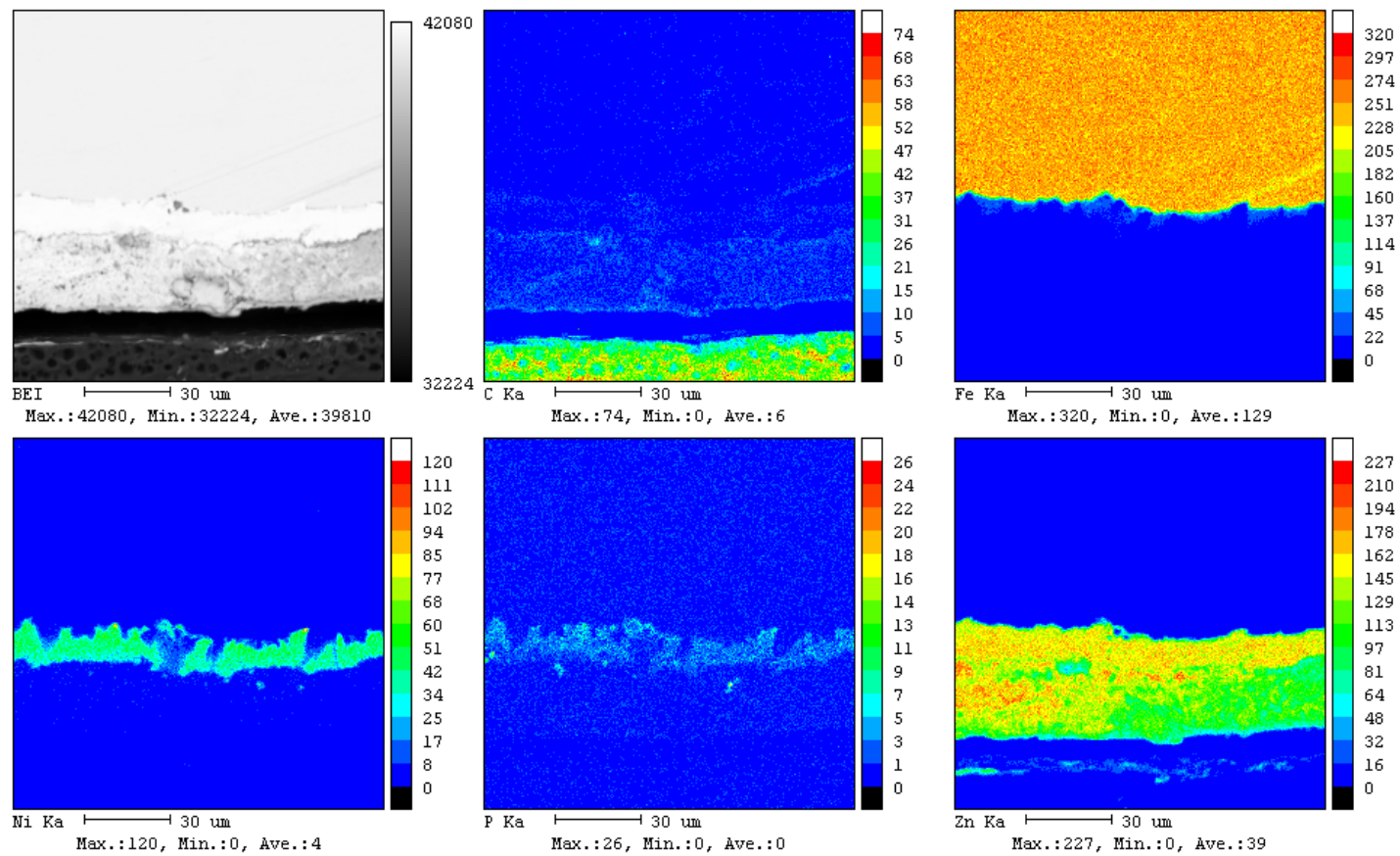
ภาคผนวก



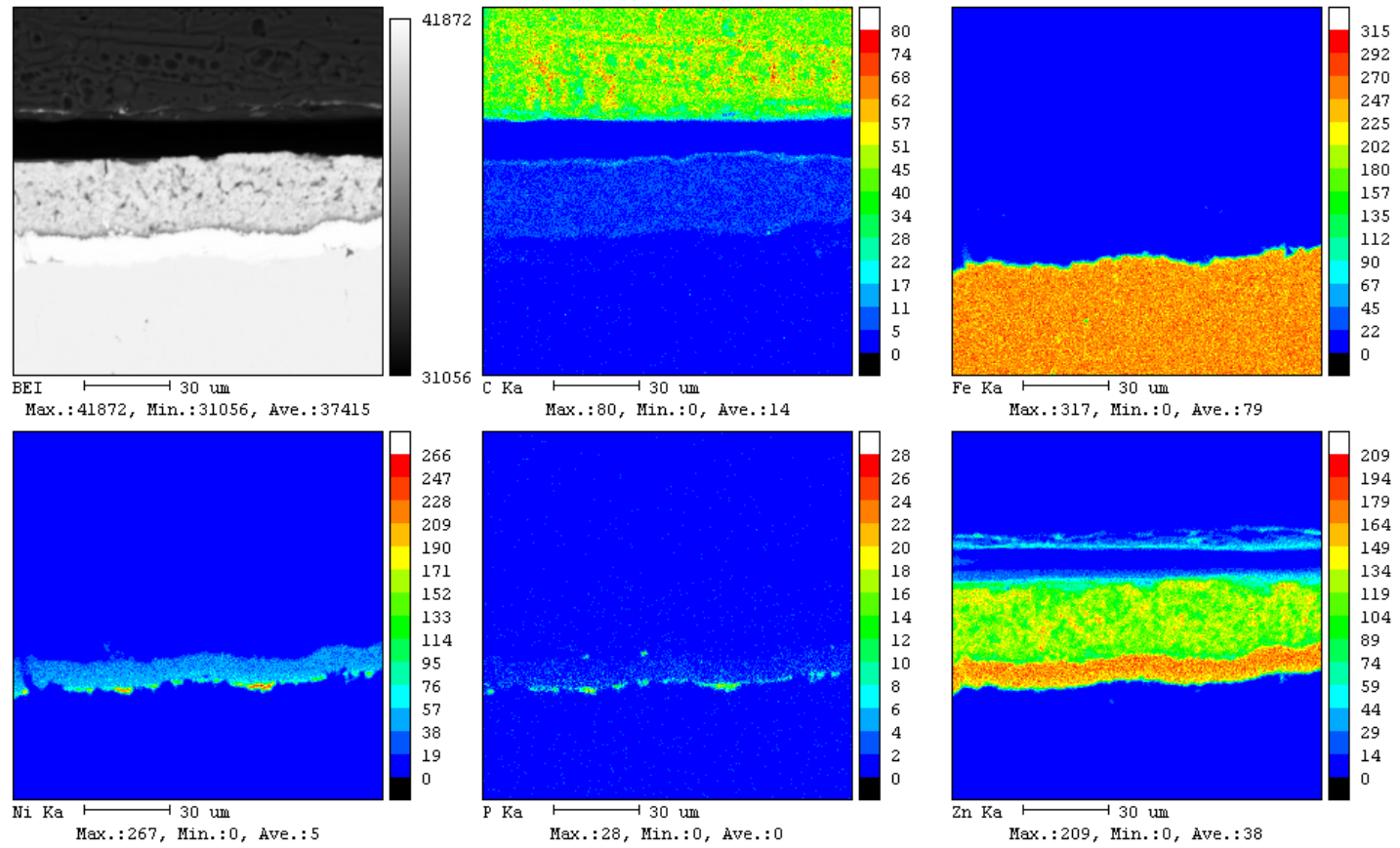
ภาพที่ ผ.1 แสดงภาพการกระจายตัวของธาตุแต่ละชนิดของชั้นงาน LS-3m-10s ด้วยเทคนิคการวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุ (a) Zinc (b) Fe (c) Ni (d) P (e) ตำแหน่งชั้นงาน



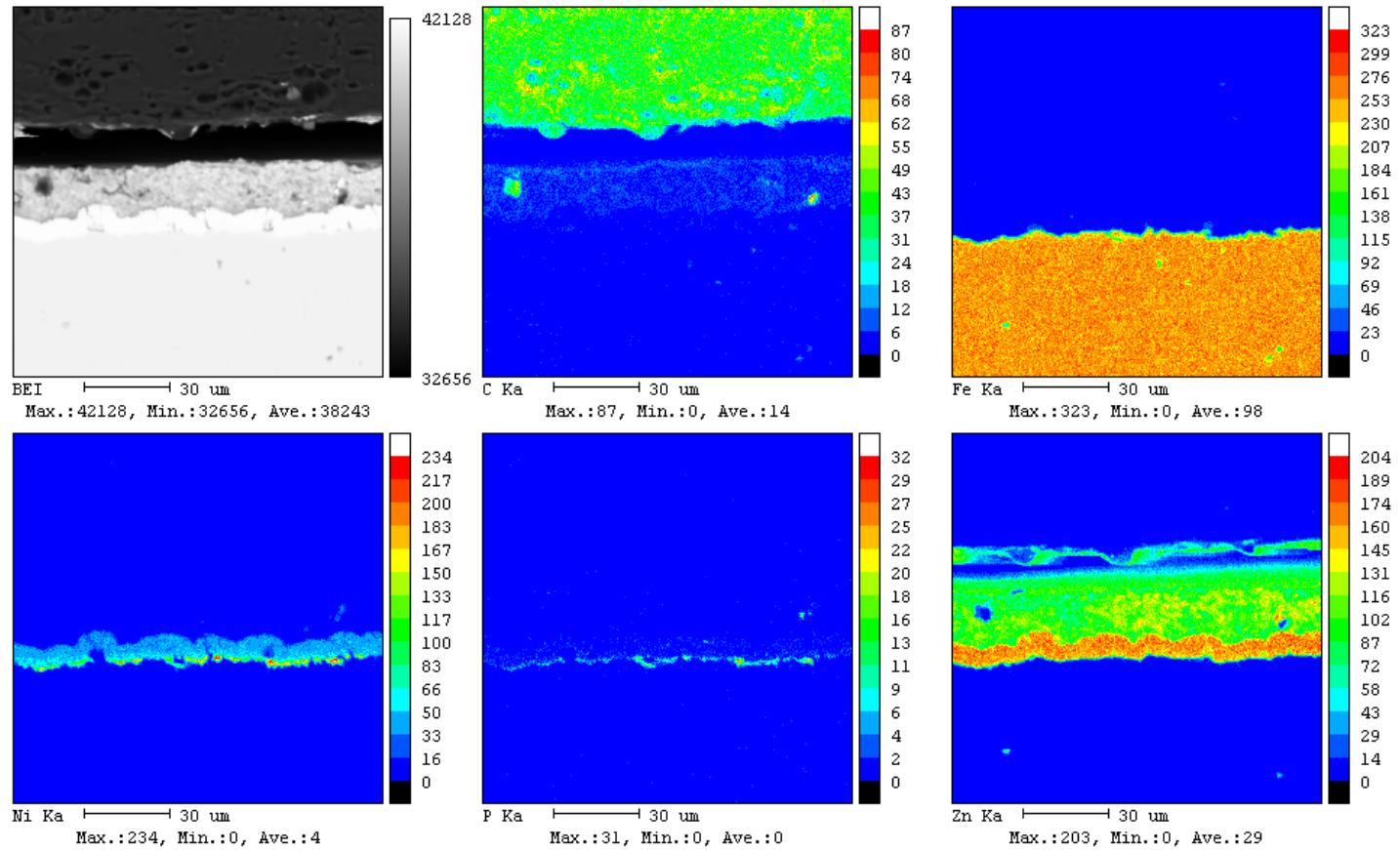
ภาพที่ ๒.2 แสดงภาพการกระจายตัวของธาตุแต่ละชนิดของชิ้นงาน LS-20m-10s ด้วยเทคนิคการวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุ (a) Zinc (b) Fe (c) Ni (d) P (e) ตำแหน่งชิ้นงาน



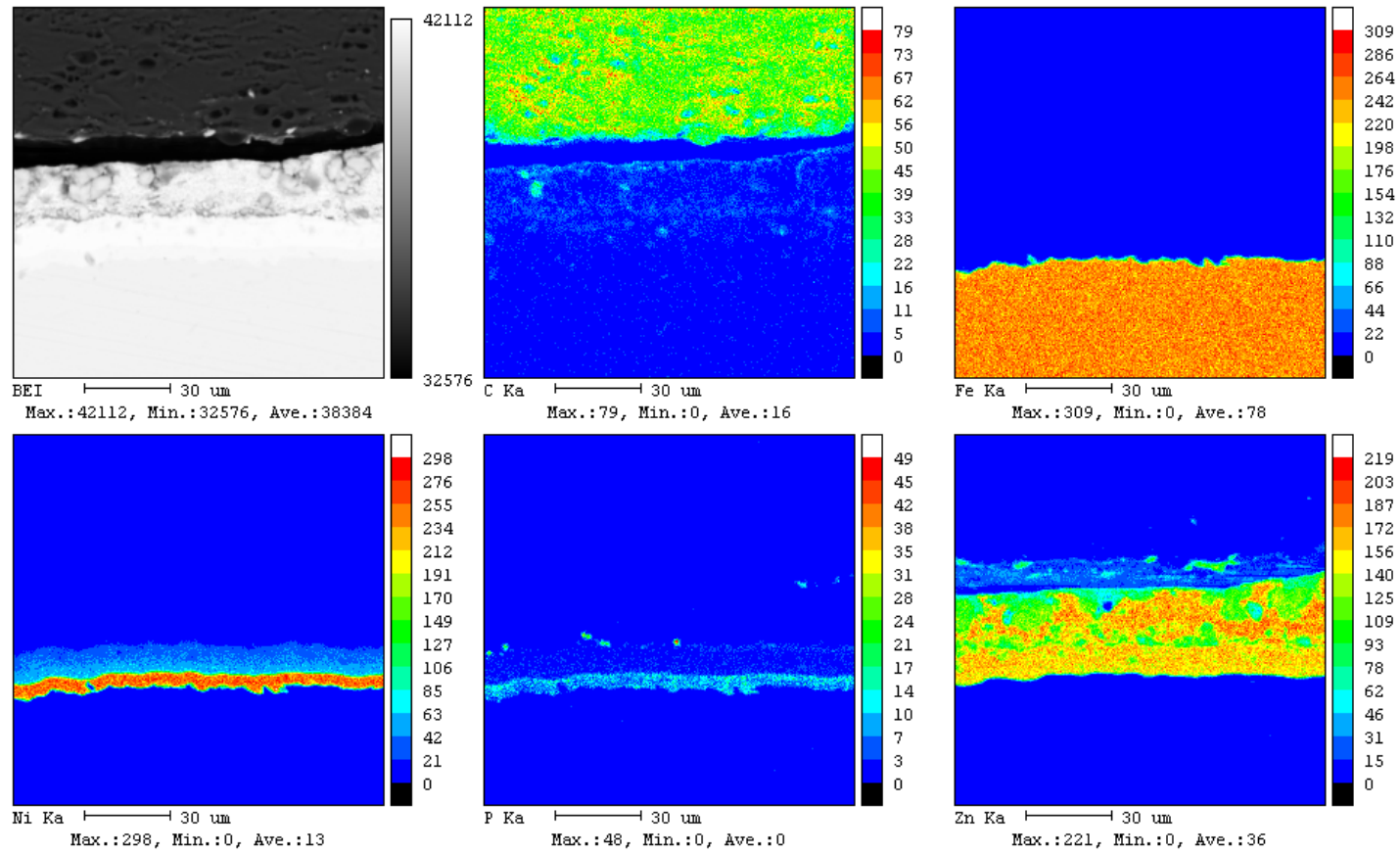
ภาพที่ ผ.3 แสดงลักษณะการวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุแต่ละชนิดด้วยเทคนิค EPMA ในโครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงาน LS-3m-10s ตำแหน่งที่ 2
 ก) EDS ข) ธาตุ C ค) ธาตุ Fe ง) ธาตุ Ni จ) ธาตุ P ฉ) ธาตุ Zn



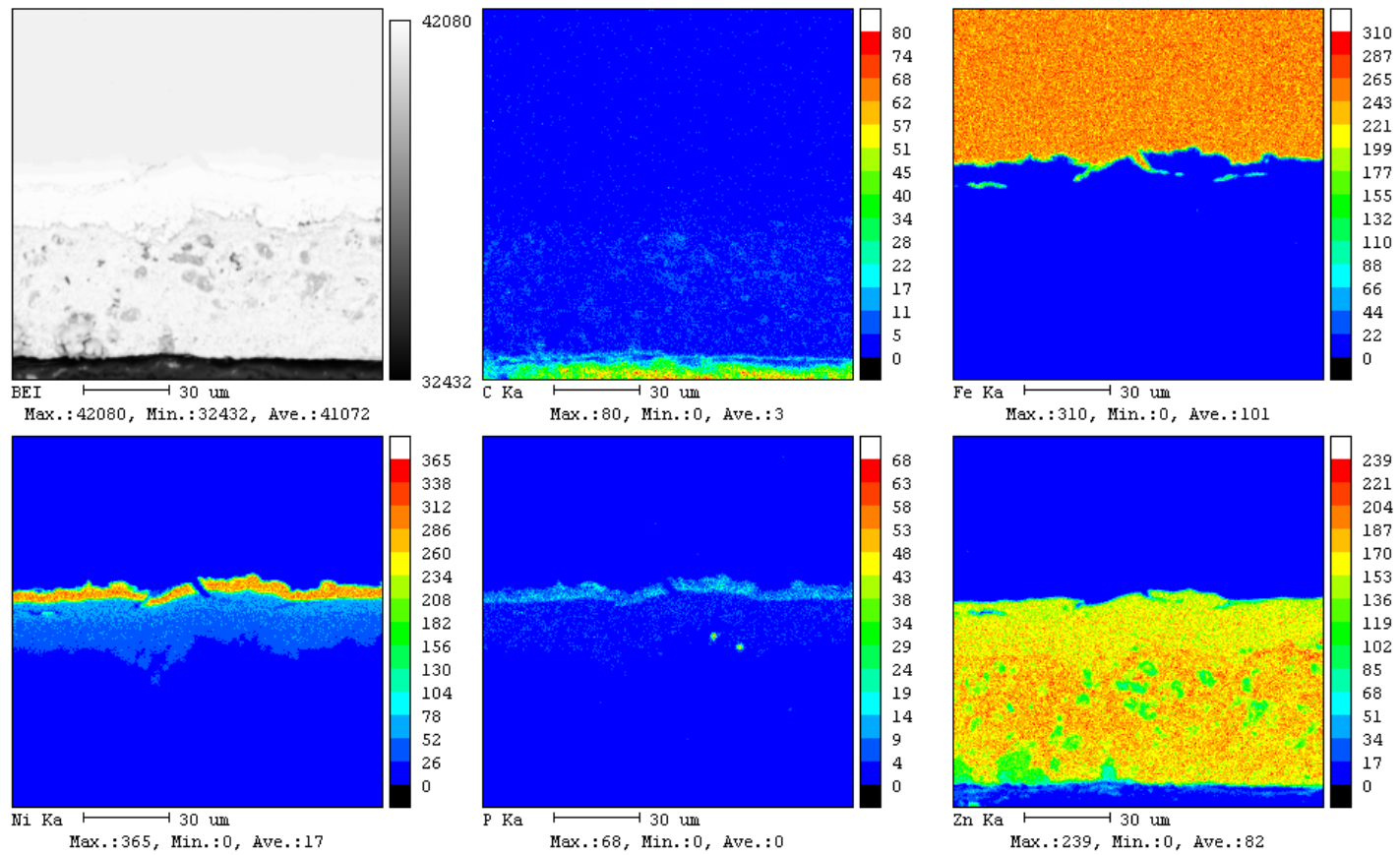
ภาพที่ ผ.4 แสดงลักษณะการวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุแต่ละชนิดด้วยเทคนิค EPMA ในโครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงาน LS-3m-10s ตำแหน่งที่ 3 ก) EDS ข) ธาตุ C ค) ธาตุ Fe ง) ธาตุ Ni จ) ธาตุ P ฉ) ธาตุ Zn



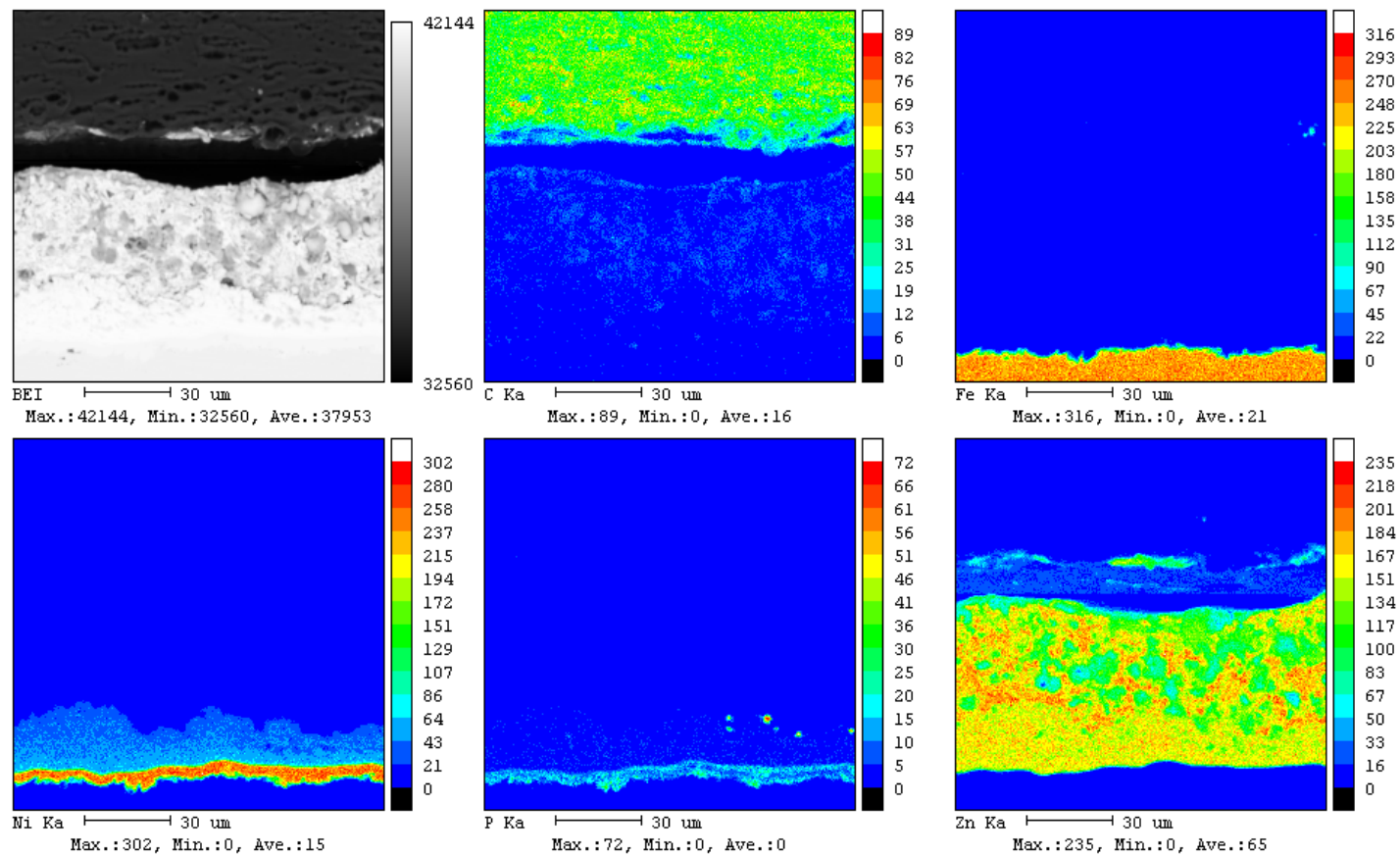
ภาพที่ ๕.5 แสดงลักษณะการวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุแต่ละชนิดด้วยเทคนิค EPMA ในโครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงาน LS-3m-10s ตำแหน่งที่ 4 ก) EDS ข) ธาตุ C ค) ธาตุ Fe ง) ธาตุ Ni จ) ธาตุ P ฉ) ธาตุ Zn



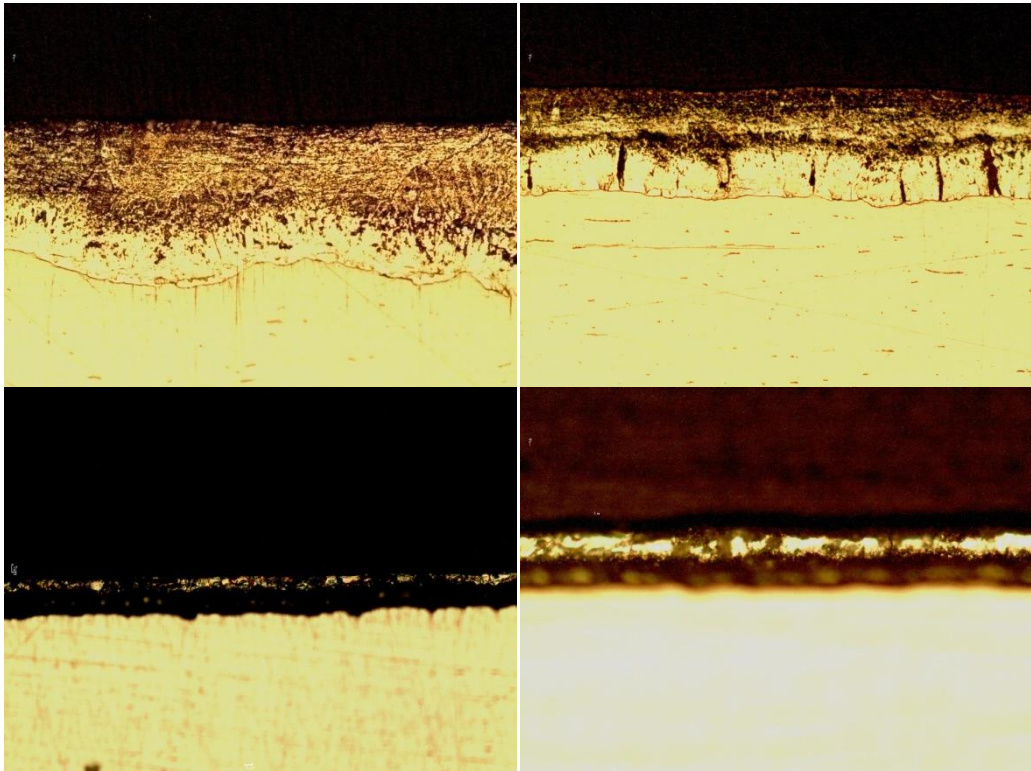
ภาพที่ ๘.6 แสดงลักษณะการวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุแต่ละชนิดด้วยเทคนิค EPMA ในโครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงาน LS-20m-10s ตำแหน่งที่ 2 ก) EDS ข) ธาตุ C ค) ธาตุ Fe ง) ธาตุ Ni จ) ธาตุ P ฉ) ธาตุ Zn



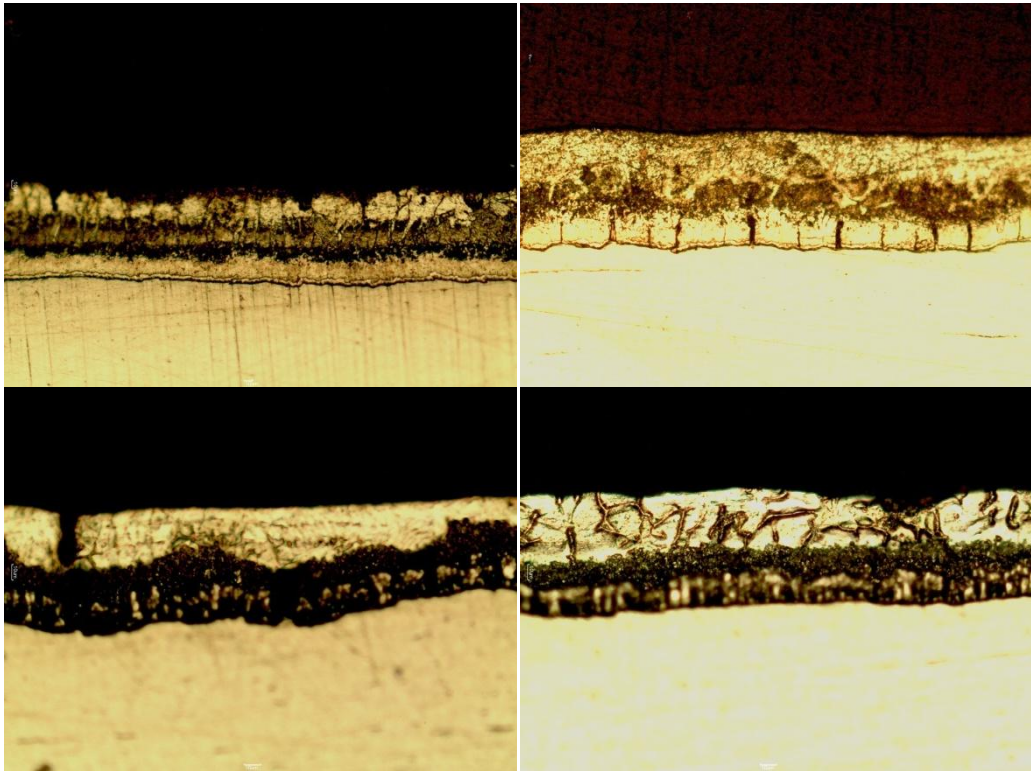
ภาพที่ ๗.7 แสดงลักษณะการวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุแต่ละชนิดด้วยเทคนิค EPMA ในโครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงาน LS-20m-10s ตำแหน่งที่ 3 ก) EDS ข) ธาตุ C ค) ธาตุ Fe ง) ธาตุ Ni จ) ธาตุ P ฉ) ธาตุ Zn



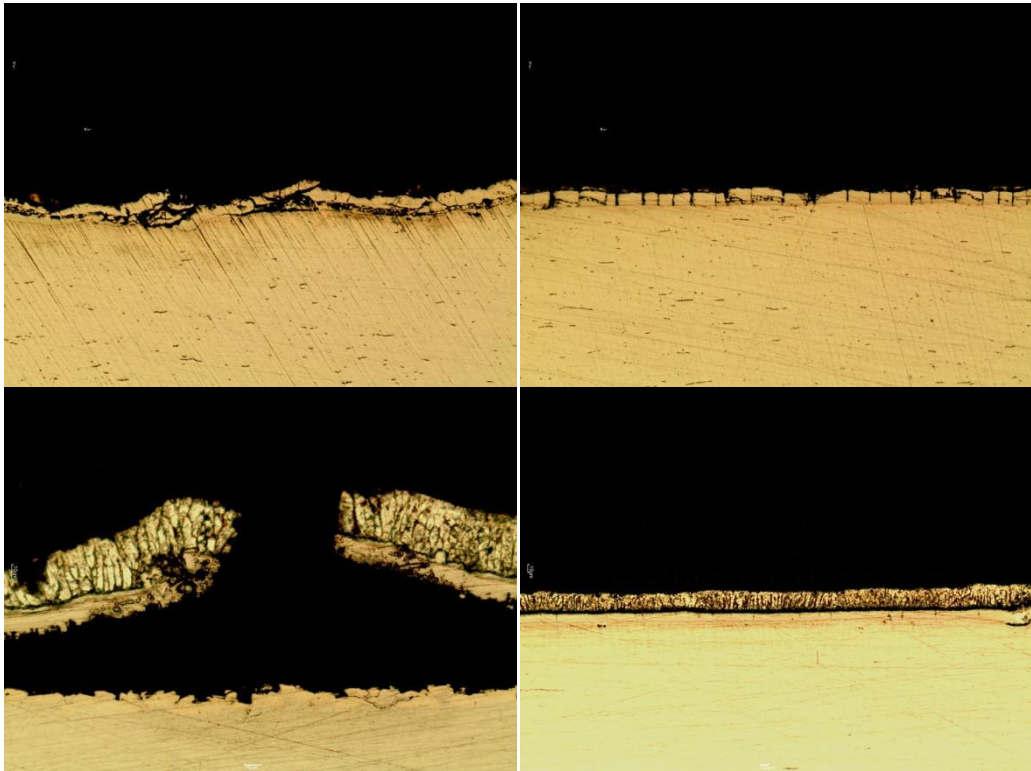
ภาพที่ ๘.8 แสดงลักษณะการวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุแต่ละชนิดด้วยเทคนิค EPMA ในโครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงาน LS-20m-10s ตำแหน่งที่ 4 ก) EDS ข) ธาตุ C ค) ธาตุ Fe ง) ธาตุ Ni จ) ธาตุ P ฉ) ธาตุ Zn



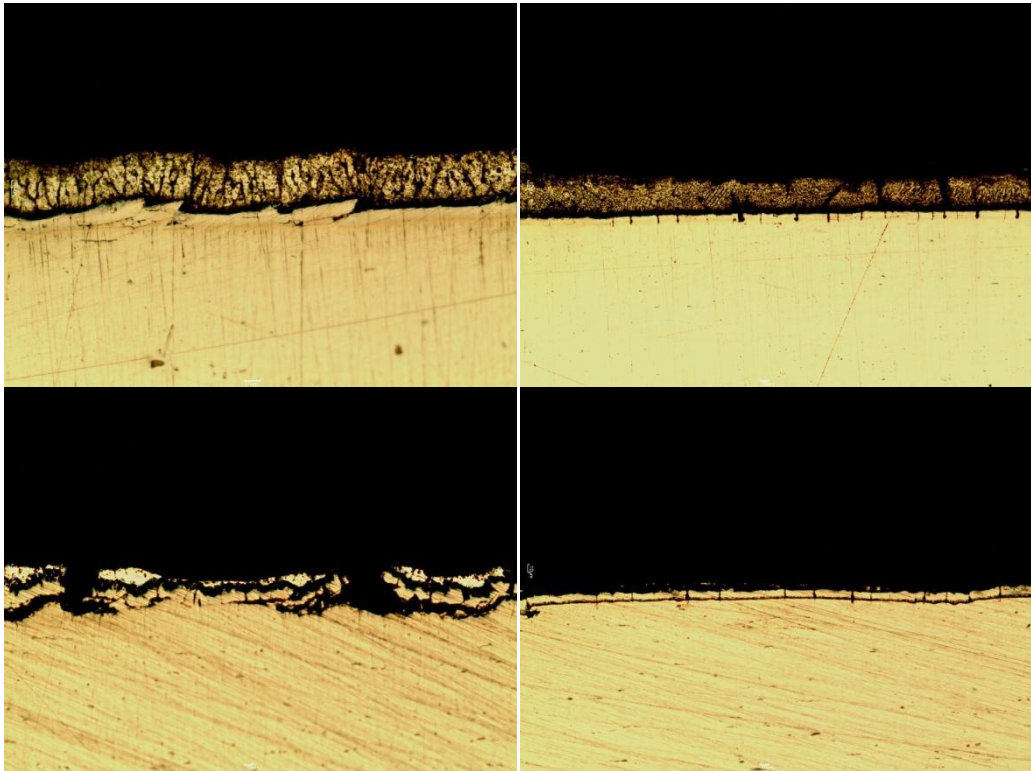
ภาพที่ ๘.๙ ภาพตัดขวางของชิ้นงาน UA1-0m-60s ก) ส่วนที่ได้รับแรงอัด เมื่อตัดโค้งมุม 90 องศา ข) ส่วนที่ได้รับแรงดึงอัดเมื่อตัดโค้งมุม 90 องศา ค) ส่วนที่เคยได้รับแรงอัดเมื่อตัดโค้งสู่ตำแหน่งเดิม ง) ส่วนที่เคยได้รับแรงดึงเมื่อตัดโค้งสู่ตำแหน่งเดิม



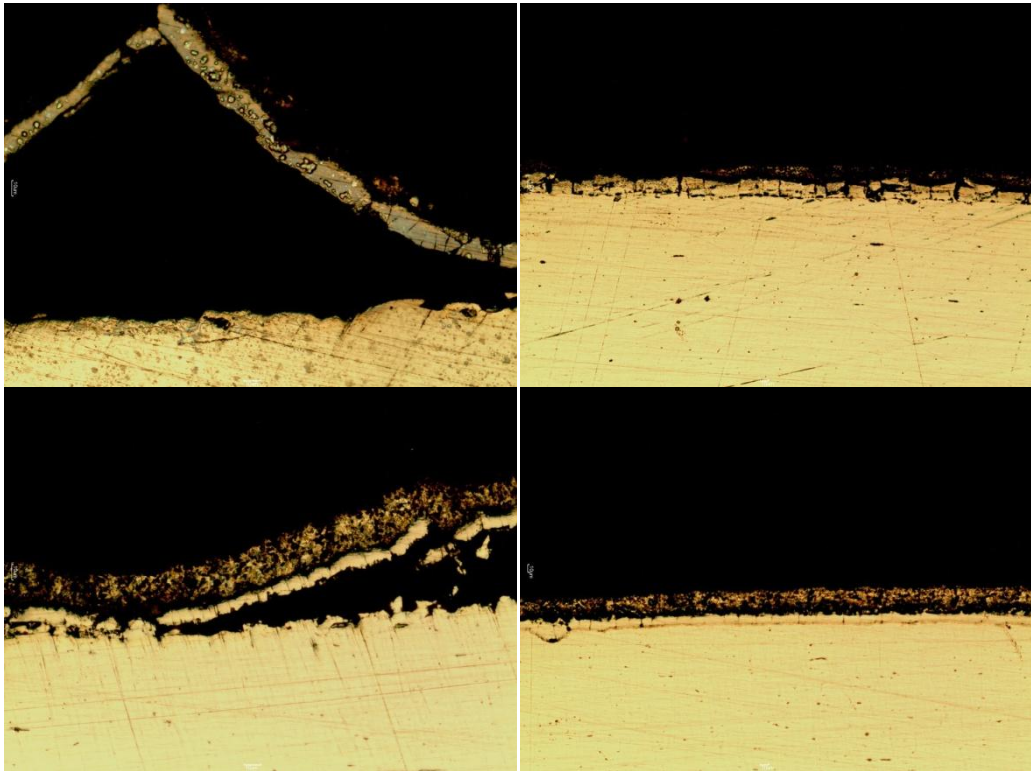
ภาพที่ ผ.10 ภาพตัดขวางของชิ้นงาน UA4-0m-60s ก) ส่วนที่ได้รับแรงอัดเมื่อตัดโค้งมุม 90 องศา ข) ส่วนที่ได้รับแรงดึงอัดเมื่อตัดโค้งมุม 90 องศา ค) ส่วนที่เคยได้รับแรงอัดเมื่อตัดโค้งสู่ตำแหน่งเดิม ง) ส่วนที่เคยได้รับแรงดึงเมื่อตัดโค้งสู่ตำแหน่งเดิม



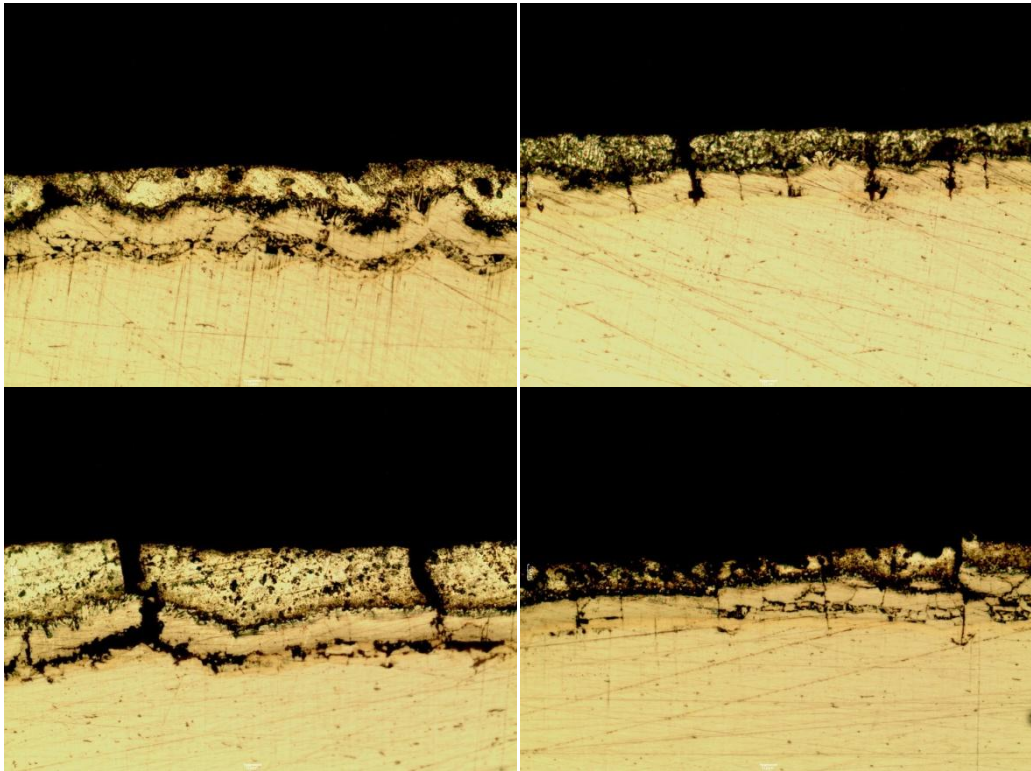
ภาพที่ ผ.11 ภาพตัดขวางของชั้นงาน UA1-10m-10s ก) ส่วนที่ได้รับแรงอัดเมื่อตัดโค้งมุม 90 องศา
 ข) ส่วนที่ได้รับแรงดึงอัดเมื่อตัดโค้งมุม 90 องศา ค) ส่วนที่เคยได้รับแรงอัดเมื่อตัดโค้งสู่ตำแหน่งเดิม
 ง) ส่วนที่เคยได้รับแรงดึงเมื่อตัดโค้งสู่ตำแหน่งเดิม



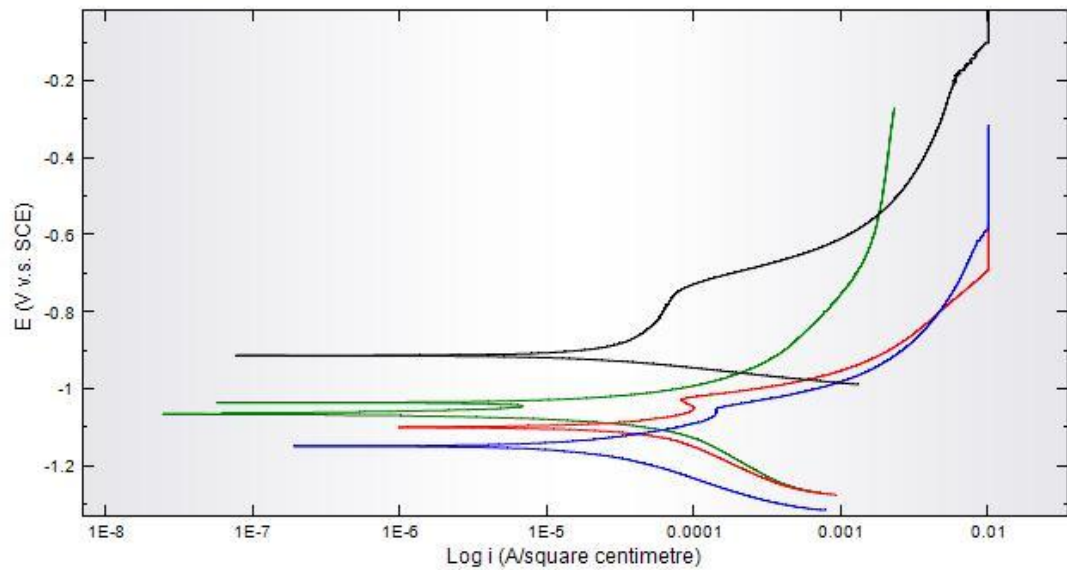
ภาพที่ ผ.12 ภาพตัดขวางของชั้นงาน UA4-10m-10s ก) ส่วนที่ได้รับแรงอัดเมื่อตัดโค้งมุม 90 องศา ข) ส่วนที่ได้รับแรงดึงอัดเมื่อตัดโค้งมุม 90 องศา ค) ส่วนที่เคยได้รับแรงอัดเมื่อตัดโค้งสู่ตำแหน่งเดิม ง) ส่วนที่เคยได้รับแรงดึงเมื่อตัดโค้งสู่ตำแหน่งเดิม



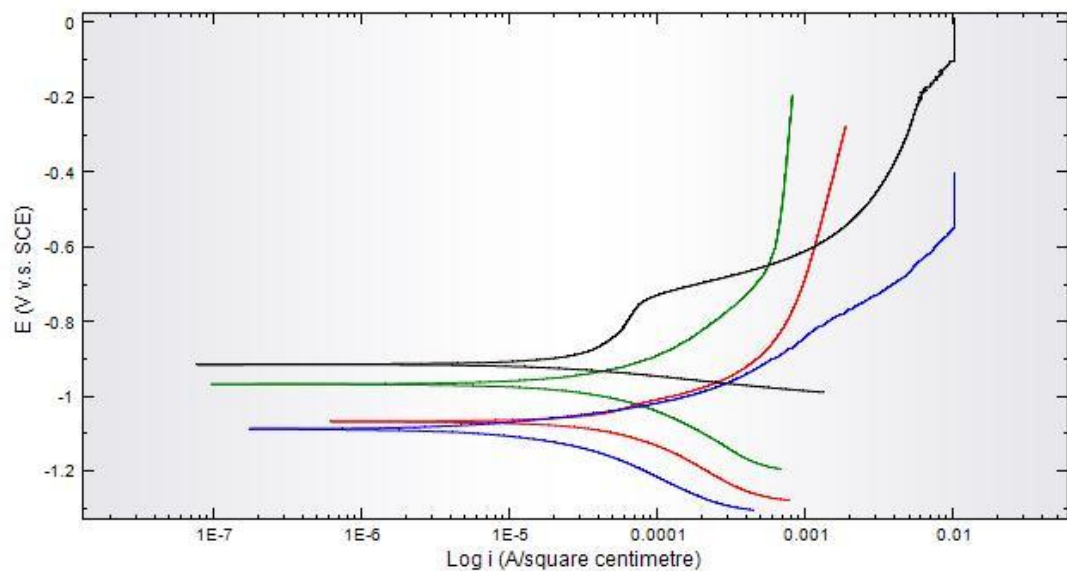
ภาพที่ ผ.13 ภาพตัดขวางของชิ้นงาน UA1-15m-60s ก) ส่วนที่ได้รับแรงอัดเมื่อตัดโค้งมุม 90 องศา ข) ส่วนที่ได้รับแรงดึงอัดเมื่อตัดโค้งมุม 90 องศา ค) ส่วนที่เคยได้รับแรงอัดเมื่อตัดโค้งสู่ตำแหน่งเดิม ง) ส่วนที่เคยได้รับแรงดึงเมื่อตัดโค้งสู่ตำแหน่งเดิม



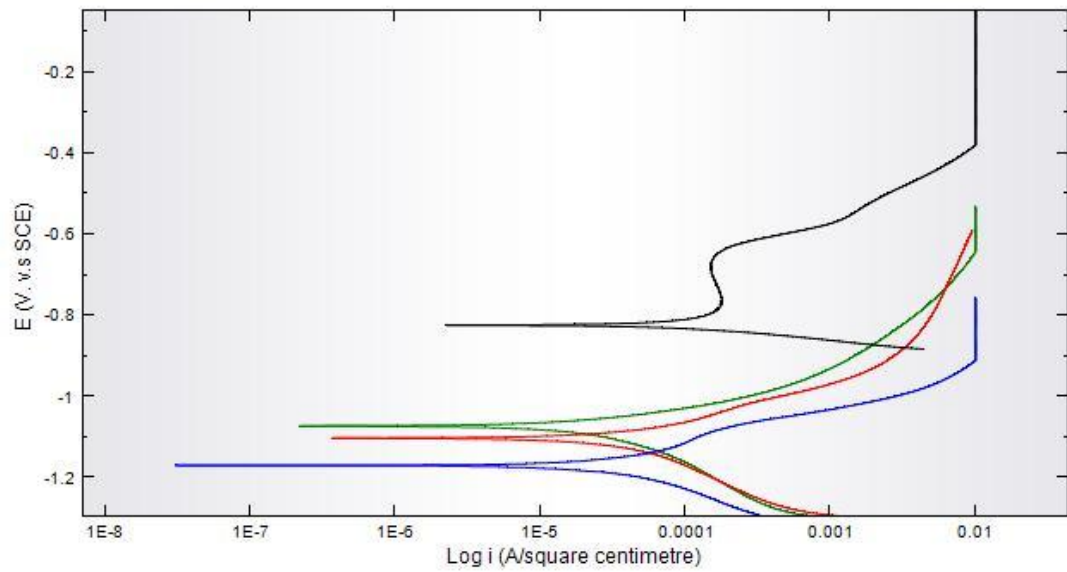
ภาพที่ ผ.14 ภาพตัดขวางของชั้นงาน UA4-15m-60s ก) ส่วนที่ได้รับแรงอัดเมื่อตัดโค้งมุม 90 องศา
 ข) ส่วนที่ได้รับแรงดึงอัดเมื่อตัดโค้งมุม 90 องศา ค) ส่วนที่เคยได้รับแรงอัดเมื่อตัดโค้งสู่ตำแหน่งเดิม
 ง) ส่วนที่เคยได้รับแรงดึงเมื่อตัดโค้งสู่ตำแหน่งเดิม



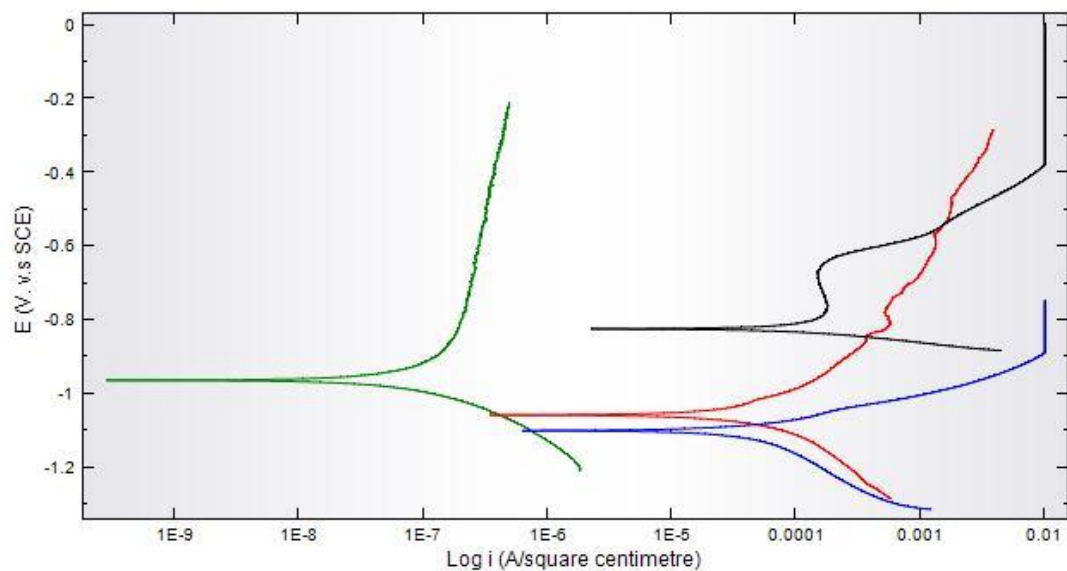
ภาพที่ ๑๕ กราฟโพลาร์ไรเซชันของขั้วงานเหล็ก hypo-sandelin ชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนด้วยวิธีดั้งเดิม (UA1-0m-60s) ที่ถูกเก็บไว้ในสารละลายเกลือ 5% เป็นระยะเวลา 0-3 สัปดาห์ ด้วยเทคนิคโพเทนทิโอดนามิกส์



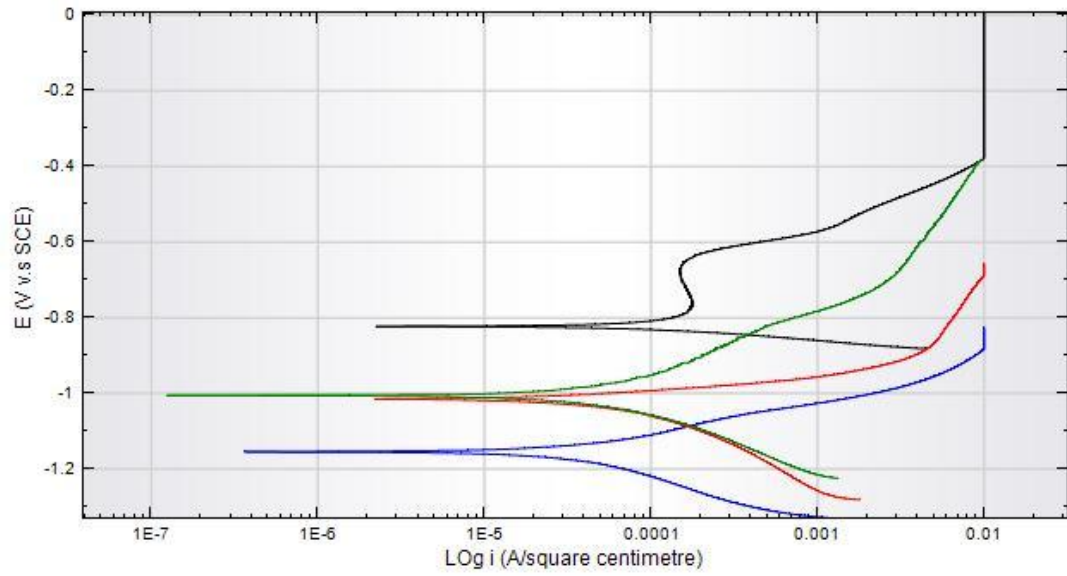
ภาพที่ ๑๖ กราฟโพลาร์ไรเซชันของขั้วงานเหล็ก hypo-sandelin ชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนโดยการเคลือบชั้นรองพื้นโลหะผสมนิกเกิล -ฟอสฟอรัสแบบไม่ใช้ไฟฟ้า (UA1-15m-60s) ที่ถูกเก็บไว้ในสารละลายเกลือ 5% เป็นระยะเวลา 0-3 สัปดาห์ ด้วยเทคนิคโพเทนทิโอดนามิกส์



ภาพที่ ๑๗.17 กราฟโพลาริเซชันของชิ้นงานเหล็ก hyper-sandelin ชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนด้วยวิธีดั้งเดิม (UA4-0m-60s) ที่ถูกเก็บไว้ในสารละลายเกลือ 5% เป็นระยะเวลา 0-3 สัปดาห์ ด้วยเทคนิคโพเทนทิโอดนามิกส์



ภาพที่ ๑๗.18 กราฟโพลาริเซชันของชิ้นงานฉาก hyper-sandelin ชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนโดยการเคลือบชั้นรองพื้นโลหะผสมนิกเกิล -ฟอสฟอรัสแบบไม่ใช้ไฟฟ้า (UA4-10m-10s) ที่ถูกเก็บไว้ในสารละลายเกลือ 5% เป็นระยะเวลา 0-3 สัปดาห์ ด้วยเทคนิคโพเทนทิโอดนามิกส์



ภาพที่ ผ.19 กราฟโพลาริเซชันของชิ้นงาน hyper-sandelin แผ่นชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนโดยการเคลือบชั้นรองพื้นโลหะผสมนิกเกิล -ฟอสฟอรัสแบบไม่ใช้ไฟฟ้า (UA4-15m-60s) ที่ถูกเก็บไว้ในสารละลายเกลือ 5% เป็นระยะเวลา 0-3 สัปดาห์ ด้วยเทคนิคโพเทนทิโอดินามิกส์

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

ชื่อ – นามสกุล นางสาวจุฬาลักษณ์ สมโภช

วัน – เดือน – ปีเกิด 21 พฤษภาคม 2530

ที่อยู่ 151/49 ม.8 ตำบลรอบเมือง อำเภอเมือง จังหวัดปราจีนบุรี 25000

วุฒิการศึกษา มัธยมศึกษาตอนปลาย

โรงเรียนปราจีนกัลยาณี ปีการศึกษา 2548

วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมวัสดุ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ปีการศึกษา 2552

โทรศัพท์ติดต่อ 037-216848