สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ห้องสมุดงานวิจัย

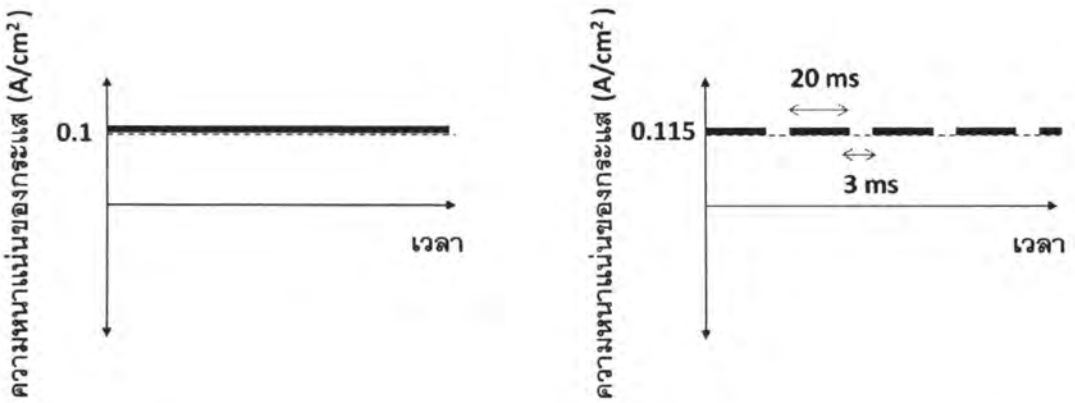
บทที่ 4
ผลการทดลองและการอภิปราย

4.1 ผลของตัวแปรในการผลิตชั้นรองพื้นนิกเกิลด้วยไฟฟ้า

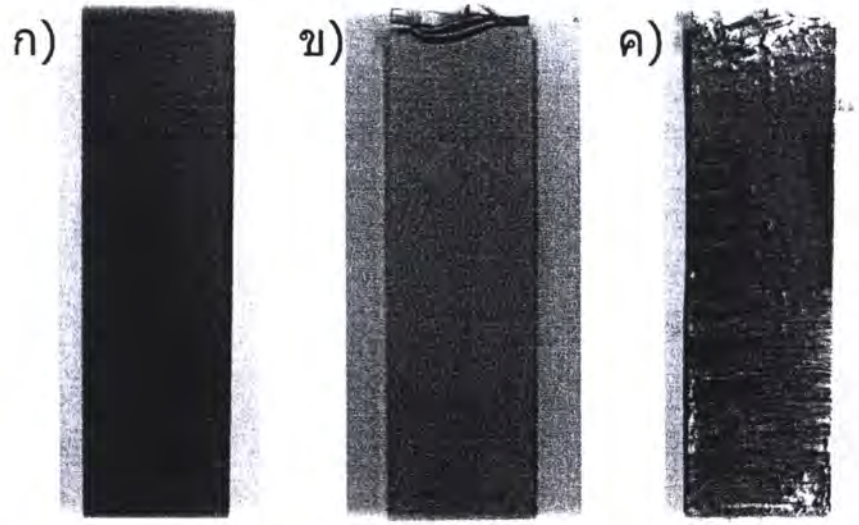
แผ่นเหล็กขนาด 5 x 2 x 0.04 ตารางเซนติเมตรที่ใช้ในงานศึกษานี้เป็นขนาดทดสอบตามมาตรฐาน ASTM A123 และเป็นเหล็กกล้าคาร์บอนรีดเย็นเนื่องจากมีการใช้มากที่สุดในกระบวนการชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนโดยมีส่วนผสมทางเคมีดังแสดงในตาราง 4.1 ซึ่งหลังจากผ่านการเตรียมผิวแล้วแผ่นเหล็กถูกนำไปผ่านกระบวนการชุบชั้นรองพื้นนิกเกิลด้วยไฟฟ้าโดยเปรียบเทียบชั้นรองพื้นที่ผลิตขึ้นโดยไฟฟ้ากระแสต่อเนื่อง และไฟฟ้ากระแสพัลส์ซึ่งมีรูปแบบการจ่ายกระแสดังภาพที่ 4.1 หลังจากนั้นแผ่นเหล็กที่ผลิตชั้นรองพื้นนิกเกิลแล้วถูกนำไปชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนต่อไปซึ่งตัวอย่างลักษณะทางกายภาพของชิ้นงานทั้งหมดแสดงไว้ดังภาพที่ 4.2

ตารางที่ 4.1 ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าคาร์บอนรีดเย็น

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



ภาพที่ 4.1 รูปแบบการจ่ายกระแสในการชุบนิกเกิลเป็นชั้นรองพื้นด้วยไฟฟ้า ก) กระแสต่อเนื่อง, ข) กระแสพัลส์

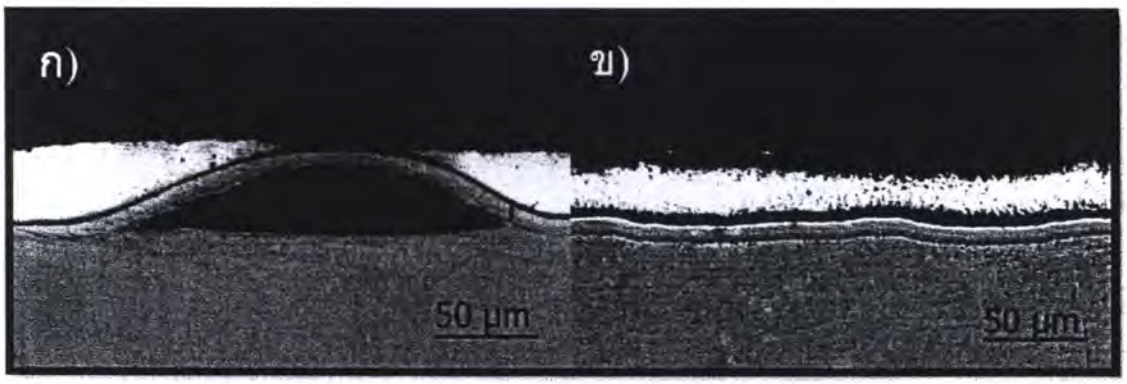


ภาพที่ 4.2 แสดงตัวอย่างของชิ้นงาน ก) แผ่นเหล็กกล้าคาร์บอนรีดเย็น, ข) แผ่นเหล็กเคลือบชั้นรองพื้นนิกเกิลด้วยไฟฟ้า, ค) แผ่นเหล็กชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนโดยการเคลือบชั้นรองพื้นนิกเกิลด้วยไฟฟ้า

ในการเปรียบเทียบตัวแปรในการผลิตชั้นรองพื้นนิกเกิลด้วยไฟฟ้ากระทำที่ความหนาของชั้นรองพื้นนิกเกิลที่ 6 ไมครอนและชุบสังกะสีเป็นเวลา 1 นาที จากนั้นนำชิ้นงานทั้งสองตัวแปรไปตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคจากภาคตัดขวางดังภาพที่ 4.3 ผลจากการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงแสดงให้เห็นว่าเหล็กชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนที่ผลิตโดยการมีนิกเกิลเป็นชั้นรองพื้นด้วยไฟฟ้าทั้งที่ผลิตด้วยด้วยไฟฟ้ากระแสต่อเนื่องและไฟฟ้ากระแสพัลส์ต่างก็ให้พื้นผิวที่มีความเรียบและมีความสม่ำเสมอตลอดจนความหนาที่เท่ากันตลอดชิ้นงาน แต่อย่างไรก็ตามเราก็พบว่าชิ้นงานที่ผลิตชั้นรองพื้นนิกเกิลด้วยไฟฟ้ากระแสต่อเนื่องนั้นมีแนวโน้มที่จะมีคุณภาพของชั้นเคลือบภายหลังการชุบสังกะสีที่ด้อยกว่าดังภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์แบบแสงที่แสดงในภาพที่ 4.3 ก) ซึ่งชิ้นงานที่ผลิตชั้นรองพื้นนิกเกิลจากไฟฟ้ากระแสต่อเนื่องสต่อเมีการหลุดร่อนออกของชั้นเคลือบเป็นช่องว่างระหว่างเนื้อเหล็กที่เป็นโลหะพื้นและชั้นเคลือบที่เกิดขึ้นจากการชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อน โดยการหลุดร่อนดังกล่าวนี้มักจะพบในชิ้นงานไฟฟ้ากระแสต่อเนื่องและพบตลอดแนวชั้นเคลือบของชิ้นงาน ทั้งนี้ภาพตัดขวางในส่วนของการหลุดร่อนของชั้นเคลือบจากผิวเหล็กแสดงเพิ่มเติมไว้ดังภาคผนวก ข

สาเหตุการหลุดร่อนของชั้นเคลือบส่วนใหญ่คาดว่าเกิดจากการเกิดขึ้นของฟองก๊าซไฮโดรเจนที่ขั้วไฟฟ้าแคโทดหรือที่ผิวของชิ้นงานที่นำมาชุบนิกเกิลดังเช่นที่ A.M. El-Sherik et. al[29] ได้เคยศึกษาไว้ โดยที่ฟองก๊าซโดรเจนนั้นเกิดมาจากน้ำที่เป็นส่วนผสมของสารละลายอิเล็กโตรไลต์และน้ำจะถูกแยกออกเป็นก๊าซไฮโดรเจนที่ขั้วไฟฟ้าแคโทดและก๊าซออกซิเจนที่ขั้วไฟฟ้า

แอโนดในขณะที่มีการจ่ายกระแสไฟฟ้าระหว่างกระบวนการชุบนิกเกิล ฟองก๊าซไฮโดรเจนที่เกิดที่ผิวชิ้นงานนั้นมีโอกาสถูกกักไว้ที่ผิวของชิ้นงานในระหว่างการชุบนิกเกิลด้วยไฟฟ้าทำให้ชิ้นงานที่ผลิตชั้นรองพื้นนิกเกิลด้วยไฟฟ้ากระแสต่อเนื่องมีฟองก๊าซไฮโดรเจนบางส่วนเป็นช่องว่างระดับไมโครที่ใต้ผิวของชั้นรองพื้นนิกเกิล หลังจากนั้นเมื่อชิ้นงานได้รับความร้อนที่อุณหภูมิสูงจากกระบวนการชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อน ก๊าซที่ถูกกักเอาไว้มีโอกาสที่จะขยายตัวขึ้นและดันชั้นเคลือบออกมาเป็นช่องว่างระหว่างชั้นเคลือบและเนื้อเหล็กได้ ในทางต่อเนื่องกันข้ามชิ้นงานที่ผลิตจากไฟฟ้ากระแสพัลส์นั้นมีชั้นเคลือบที่สม่ำเสมอและยึดติดแน่นตลอดชิ้นงาน การที่มีระยะเวลาในการหยุดจ่ายกระแสไฟฟ้าของการชุบไฟฟ้ากระแสพัลส์นั้นช่วยในการลดปริมาณของก๊าซไฮโดรเจนที่ผิวชิ้นงานเนื่องจากมีช่วงเวลาให้ก๊าซไฮโดรเจนสามารถออกไปได้จึงช่วยลดปัญหาการกักเก็บก๊าซไว้ใต้ชั้นรองพื้นนิกเกิลและปัญหาข้างต้น นอกจากนี้ยังทำให้สามารถส่งนิกเกิลอิออนที่อยู่บริเวณที่ห่างออกไปจากชิ้นงานในสารละลานอิเล็กโตรไลต์ให้ไปเกาะติดบนผิวของเหล็กได้ดีขึ้นด้วย จากการศึกษาตัวแปรในการชุบไฟฟ้าเรื่องของผลกระทบของรูปแบบการจ่ายกระแสไฟฟ้านี้แสดงให้เห็นว่าการผลิตชั้นรองพื้นนิกเกิลด้วยไฟฟ้ากระแสพัลส์นั้นทำให้ได้ชิ้นงานเหล็กชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนที่ชั้นเคลือบมีความสม่ำเสมอและยึดติดกับเนื้อเหล็กได้ดีกว่าชิ้นงานที่ผลิตชั้นรองพื้นนิกเกิลด้วยไฟฟ้ากระแสต่อเนื่อง ดังนั้นวิธีนี้จึงเป็นทางเลือกหนึ่งในการที่จะทำให้ได้ชั้นเคลือบผิวเหล็กที่มีคุณภาพดีและด้วยเหตุนี้สำหรับในการศึกษาต่อไปในงานวิจัยนี้ ชั้นรองพื้นนิกเกิลจะถูกผลิตด้วยไฟฟ้ากระแสพัลส์เท่านั้น



ภาพที่ 4.3 ภาพตัดขวางของเหล็กชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนโดยการเคลือบนิกเกิลเป็นชั้นรองพื้นด้วยไฟฟ้าจากกล้องจุลทรรศน์แบบแสง โดยชั้นรองพื้นนิกเกิลผลิตจากการชุบด้วยไฟฟ้า ก) กระแสต่อเนื่อง และ ข) กระแสพัลส์

4.2 การศึกษาการพัฒนาของโครงสร้างจุลภาคและเฟสที่เกิดขึ้น

ในกระบวนการชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนจะเกิดการแพร่ของโลหะของทั้งเหล็กไปสู่สังกะสีและสังกะสีไปสู่เหล็กและเกิดเป็นโลหะผสมเฟสต่างๆโดยที่ความหนาของแต่ละเฟสและธาตุ

ประกอบในโลหะผสมเฟสนั้นๆจะเปลี่ยนแปลงไปตามระยะเวลาในการจุ่มร้อน การที่มีนิกเกิลเป็นธาตุประกอบที่ 3 ย่อมทำให้เฟสที่เกิดขึ้นเปลี่ยนแปลงไป ในหัวข้อนี้จะศึกษาการพัฒนาของโครงสร้างจุลภาคและเฟสที่เปลี่ยนแปลงไปของเหล็กซุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนโดยมีนิกเกิลเป็นชั้นรองพื้นด้วยไฟฟ้าโดยมีตัวแปรที่ต้องการศึกษา 2 ตัวแปร

ตัวแปรแรก คือความหนาของชั้นรองพื้นนิกเกิลโดยเปลี่ยนแปลงความหนาของชั้นรองพื้นที่ 3, 6, 9 และ 12 ไมโครเมตรโดยการคำนวณจากอัตราในการชุบของนิกเกิลที่กระแสไฟฟ้า 0.1 แอมป์ต่อตารางเซนติเมตร แต่คงที่ระยะเวลาในการชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนไว้ที่ 1 นาที

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

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

โดยที่ x คือ ตำแหน่งในการแพร่มีหน่วยเป็น (ระยะทาง)เช่น เมตร,

D คือ ค่าสัมประสิทธิ์การแพรมีหน่วยเป็น (ระยะทาง^2/เวลา$^{-1}$) เช่น เมตร^2/วินาที$^{-1}$ และ

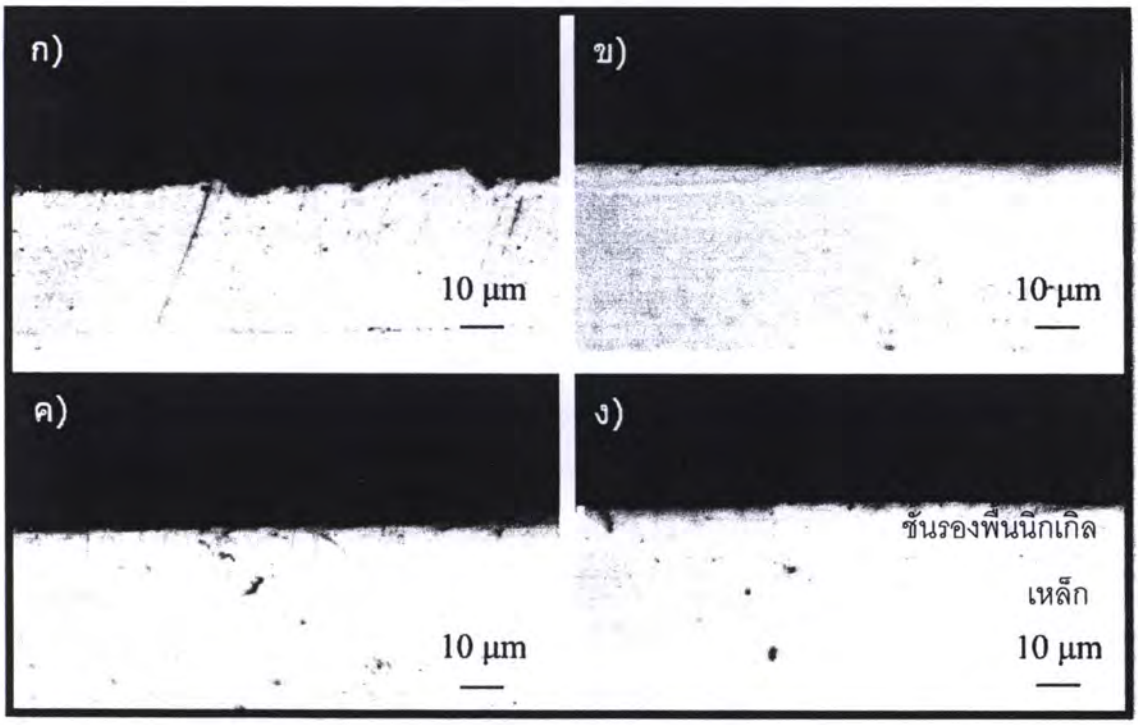
t คือ ระยะเวลาในการแพร่มีหน่วยเป็น (เวลา) เช่น วินาที

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

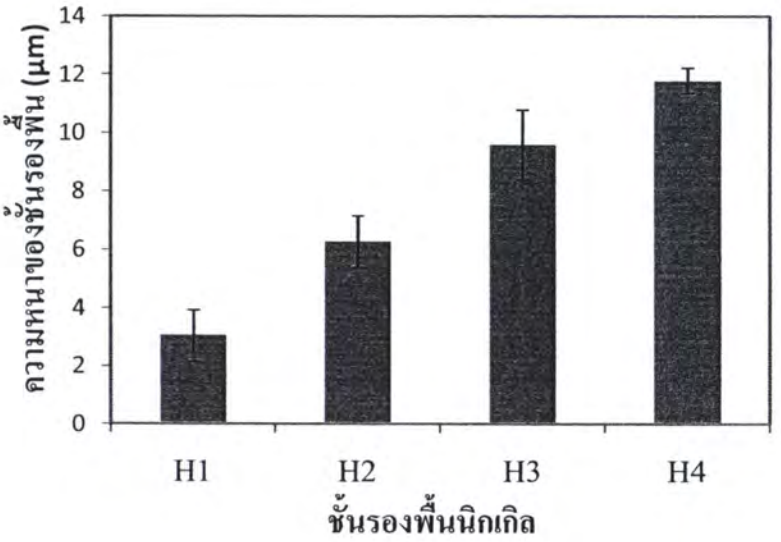
4.2.1 การศึกษาโครงสร้างและเฟสของเหล็กซุบสังกะสีที่เปลี่ยนแปลงไปตามความหนาของชั้นรองพื้นนิกเกิล

ดังที่ได้กล่าวไว้ข้างต้นในการศึกษาตัวแปรนี้ทำการเปลี่ยนแปลงความหนาของชั้นรองพื้นนิกเกิลจาก 3 ถึง 12 ไมโครเมตร จากการตรวจสอบภาคตัดขวางของชิ้นงานเหล็กที่ทำการชุบชั้นรองพื้นนิกเกิลจากภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง พบว่าชั้นรองพื้นนิกเกิลที่ได้มีความหนาค่อนข้างสม่ำเสมอทั่วทั้งชิ้นโดยภาพตัดขวางของเหล็กที่ผ่านการเคลือบชั้นรองพื้นนิกเกิลด้วยไฟฟ้า

ที่ความหนาต่างแสดงดังภาพที่ 4.4 และความหนาเฉลี่ยที่วัดได้จริงแสดงดังแผนภูมิในภาพที่ 4.5 โดยในการศึกษาต่อไปจะเรียกความหนาของชั้นรองพื้นนิกเกิลความหนาเฉลี่ย 3, 6, 9 และ12 μm ว่า H1, H2, H3 และ H4 ตามลำดับเพื่อความกระชับในการระบุชิ้นงานที่ความหนาของชั้นรองพื้นและระยะเวลาในการชุบสังกะสีที่ความหนาและระยะเวลานั้นๆต่อไป

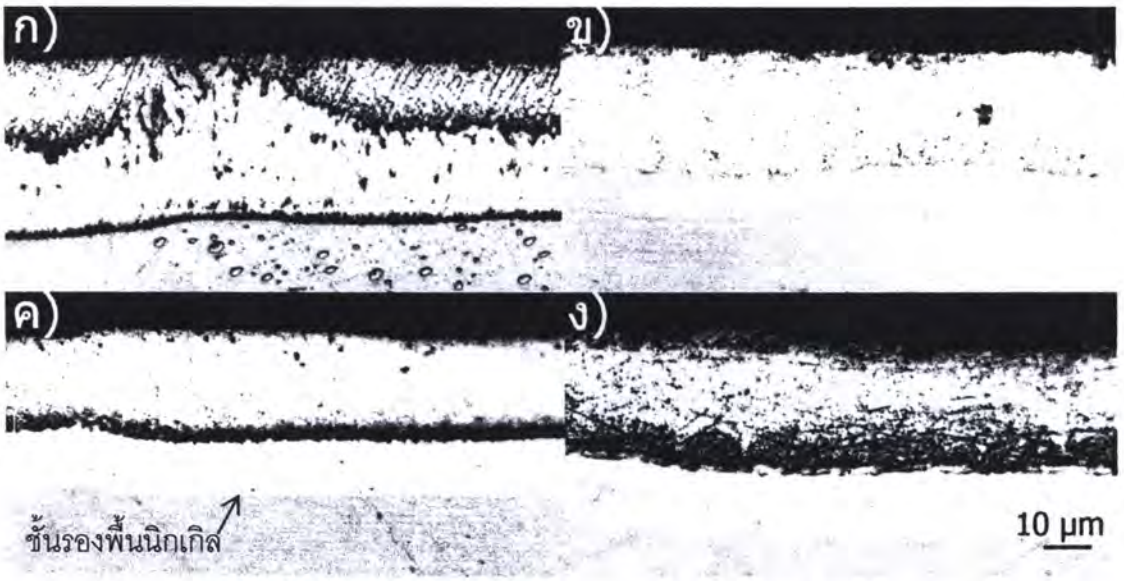


ภาพที่ 4.4 ภาคตัดขวางของชิ้นงานเหล็กโดยการเคลือบนิกเกิลเป็นชั้นรองพื้นด้วยไฟฟ้าที่ความหนาโดยประมาณ ก) 3 μm (H1), ข) 6 μm (H2), ค) 9 μm (H3) และ ง) 12 μm (H4)



ภาพที่ 4.5 ความหนาเฉลี่ยของชั้นรองพื้นนิกเกิลที่ผลิตด้วยไฟฟ้ากระแสพัลส์

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



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

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

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

1.โลหะพื้นที่เป็นเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ

2. ชั้นรองพื้นนิกเกิลที่ยังคงปรากฏอยู่ในโครงสร้างหลังการชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อน

3. ชั้นเคลือบที่ประกอบด้วยสังกะสีและนิกเกิลเป็นส่วนใหญ่ซึ่งอยู่เหนือชั้นรองพื้นนิกเกิล เราเรียกชั้นนี้ว่าชั้นเคลือบ Intermediate I จากการวิเคราะห์เฟสด้วยองค์ประกอบทางเคมี พบว่าชั้น intermediate I นี้ประกอบด้วยเฟสของ $\Gamma+\beta$

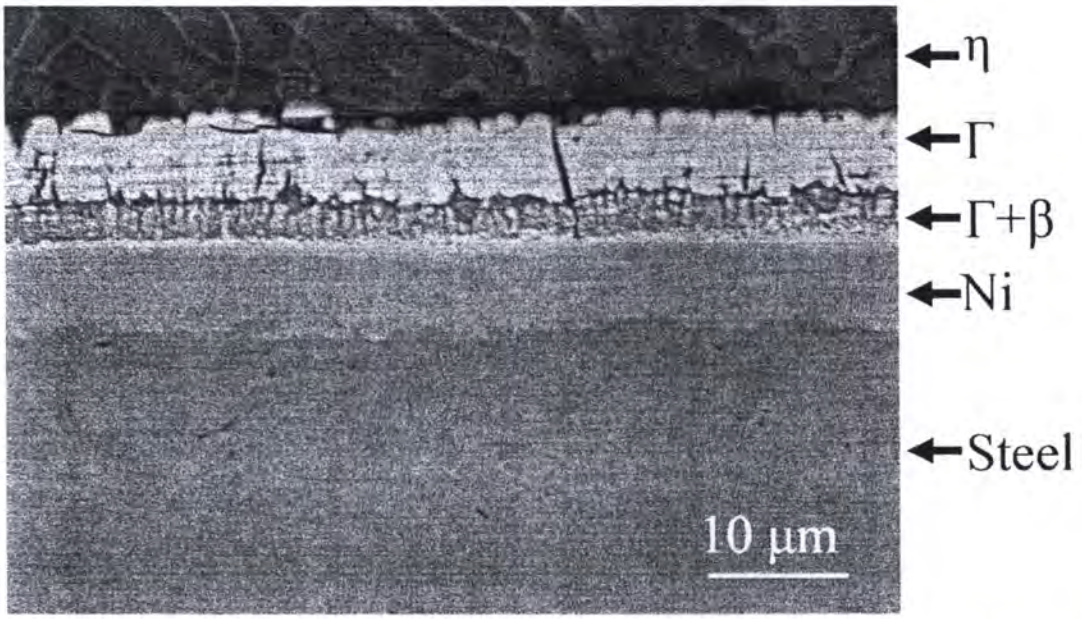
4. ชั้นเคลือบที่ประกอบด้วยสังกะสีและนิกเกิลเป็นส่วนใหญ่ ซึ่งอยู่ถัดออกมาจากชั้นเคลือบ Intermediate I เราเรียกชั้นนี้ว่าชั้นเคลือบ Intermediate II จากการวิเคราะห์เฟสด้วยองค์ประกอบทางเคมี พบว่าชั้นประกอบด้วยเฟส Γ

5. ชั้นเคลือบที่เป็นสังกะสีบริสุทธิ์เป็นเฟส η

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

นอกจากนี้ในการวิเคราะห์ความหนาเพื่อเปรียบเทียบกับเหล็กชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนโดยวิธีดั้งเดิมดังแผนภูมิในภาพที่ 4.10 ซึ่งจะได้กล่าวต่อไปนั้น จะพิจารณาเฉพาะความหนาของชั้น intermediate I และ II เท่านั้นเนื่องจากความหนาของชั้นรองพื้นนิกเกิลสามารถควบคุมให้มีปริมาณที่เหมาะสมได้จากระยะเวลาในการชุบนิกเกิลด้วยไฟฟ้าและสำหรับชั้นเคลือบ η ที่เป็นสังกะสีบริสุทธิ์ก็สามารถที่จะควบคุมให้มีความหนาที่ค่อนข้างคงที่ได้จากความเร็วในการดึงชิ้นงาน

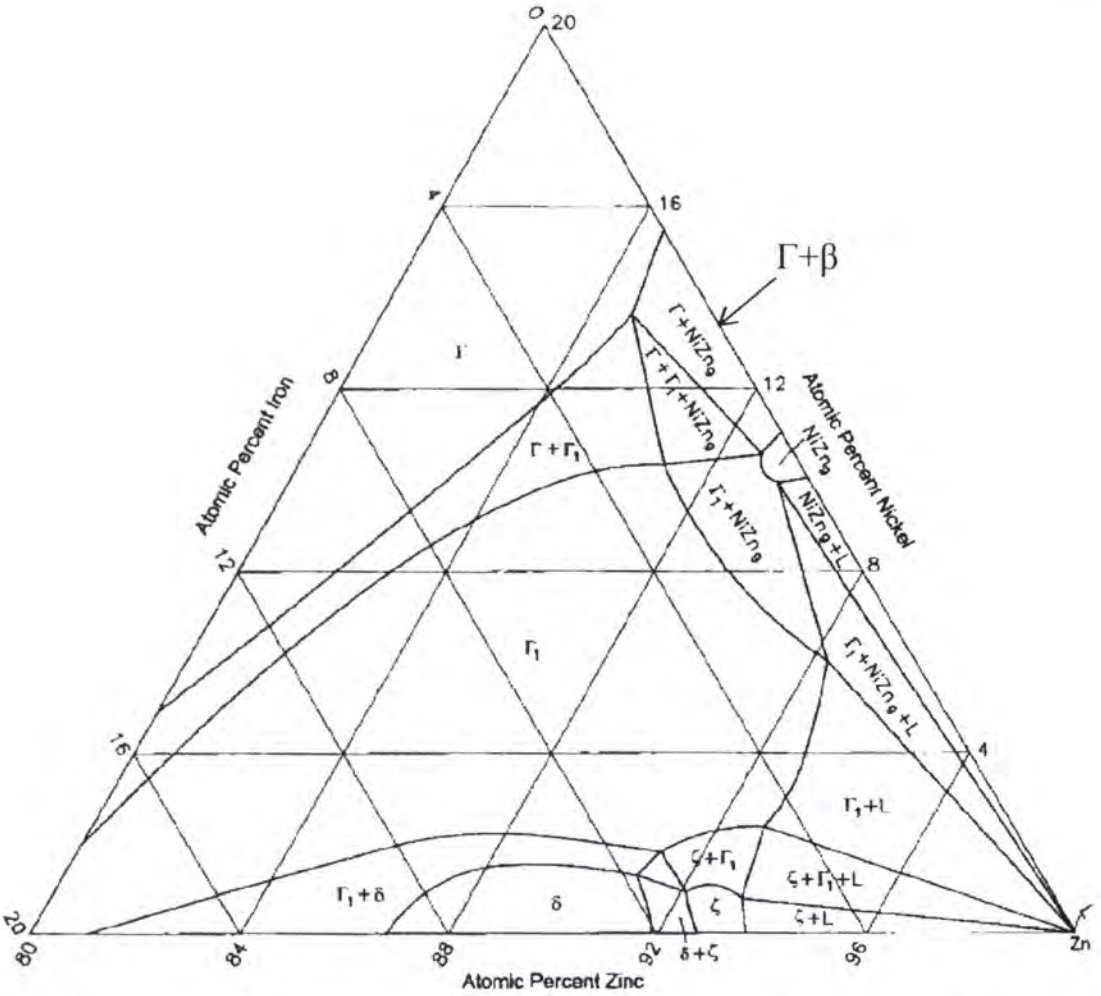
ขึ้นจากสังกะสีหลอมเหลวดังที่ได้กล่าวไปในตอนต้น สำหรับความหนาโดยเฉลี่ยของชั้นเคลือบ intermediate ในชิ้นงาน H2-1m, H3-1m และ H4-1m นั้นพบว่าชั้นเคลือบ intermediate ของชิ้นงานทั้ง 3 ชิ้นนี้มีความหนาที่ใกล้เคียงกันมากด้วยโดยที่ชั้น intermediate I หนาประมาณ 3-4 μm และชั้น intermediate II หนาประมาณ 5-6 μm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



ภาพที่ 4.7 โครงสร้างจุลภาคของเหล็กชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อน H4-1m โดยการเคลือบชั้นรองพื้นนิกเกิลด้วยไฟฟ้าจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนนิงที่กำลังขยาย 2000 เท่า

ตารางที่ 4.2 เอกลักษณ์ของเหล็กชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนโดยการเคลือบชั้นรองพื้นนิกเกิลด้วยไฟฟ้าที่ระยะเวลาในการจุ่มร้อน 1 นาที

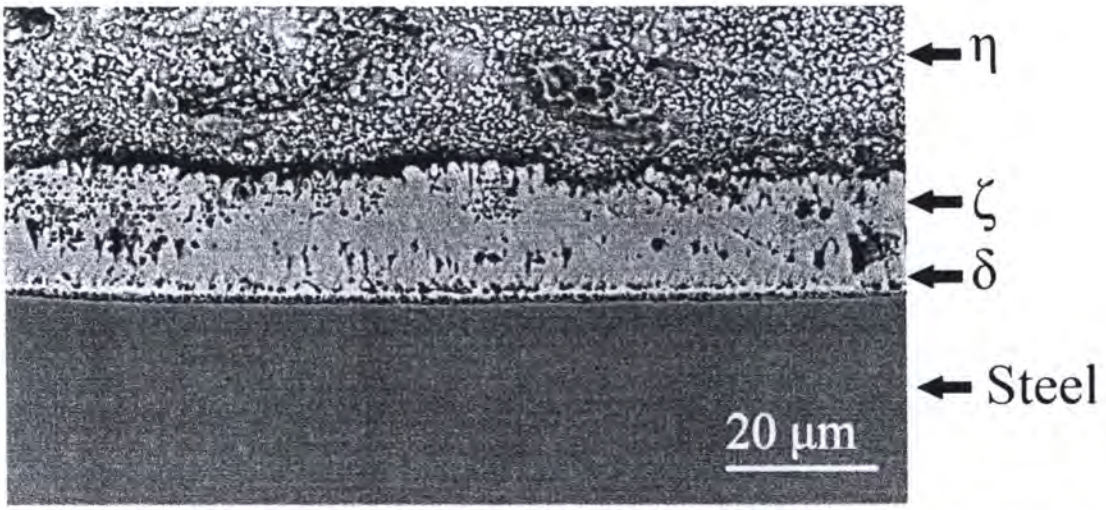
ชิ้นงาน	องค์ประกอบในชั้นเฟส Intemediate I (at%)				องค์ประกอบในชั้นเฟส Intermediate II (at%)			
	เหล็ก	นิกเกิล	สังกะสี	เฟส	เหล็ก	นิกเกิล	สังกะสี	เฟส
H1-1m	9.9	0	90.1	δ	7.6	0.6	91.8	δ+ζ
H2-1m	1	13.1	85.9	Γ+β	1.4	19	79.6	Γ
H3-1m	0	12.4	87.6	Γ+β	1.6	16.8	81.6	Γ
H4-1m	0.8	14.4	84.8	Γ+β	1.2	24.4	74.4	Γ



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

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

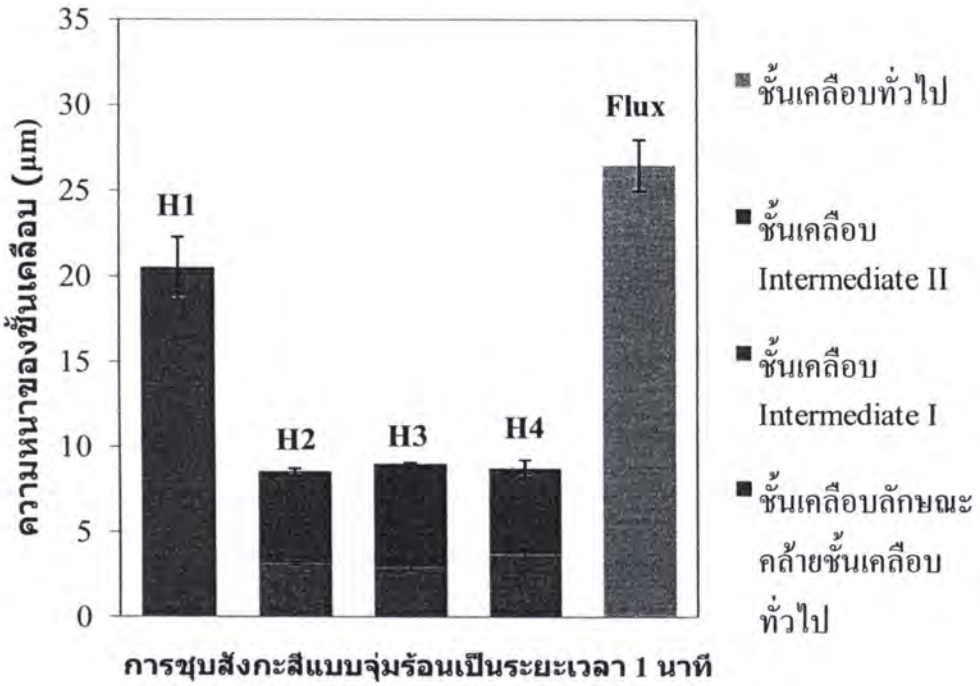
เป็นชั้นเคลือบเดียวซึ่งเราเรียกชั้นเคลือบนี้ว่า"ชั้นเคลือบลักษณะคล้ายชั้นเคลือบดั้งเดิม" ซึ่งมีทั้งเฟสของ δ และ ζ ที่ประกอบด้วยสังกะสีและเหล็กเป็นส่วนใหญ่มีความหนารวมอยู่ที่ประมาณ 20.5 μm ดังแสดงไว้ในแผนภูมิแท่งสีม่วงในภาพที่ 4.10 ซึ่งใกล้เคียงกับชิ้นงานเหล็กชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนโดยวิธีดั้งเดิมที่ระยะเวลาในการจุ่มร้อน 1 นาทีเท่ากันโดยความหนาโดยเฉลี่ยอยู่ที่ 26.5 μm ดังแสดงไว้ในภาพที่ 4.9 ซึ่งระบุในแผนภูมิว่า "Flux"



ภาพที่ 4.9 โครงสร้างจุลภาคของเหล็กชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อน H1-1m โดยการเคลือบชั้นรองพื้นนิกเกิลด้วยไฟฟ้า ในกรณีที่ชั้นรองพื้นนิกเกิลเกิดการแพร่ไปสู่สังกะสีหลอมเหลวจนหมดจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนนิงที่กำลังขยาย 1000 เท่า

จากการเปลี่ยนแปลงความหนาของชั้นรองพื้นนิกเกิลแต่คงเวลาในการชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนที่ 1 นาทีทำให้เห็นผลว่าสำหรับชิ้นงาน H1 นั้นชั้นรองพื้นนิกเกิลได้เกิดการแพร่ออกไปสู่สังกะสีหลอมเหลวในบ่อสังกะสีหมดแล้วทำให้สังกะสีและชิ้นงานเหล็กสามารถเกิดการแพร่ระหว่างกันได้โดยไม่มีอะไรขวางกั้น และเนื่องจากการแพร่ระหว่างเหล็กและสังกะสีสามารถเกิดได้อย่างรวดเร็วจึงทำให้ชั้นเคลือบมีความหนาเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วและโครงสร้างจุลภาคที่ได้คล้ายกับโครงสร้างจุลภาคของเหล็กชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนโดยวิธีดั้งเดิม และจากความหนาของชั้นเคลือบ intermediate ของชิ้นงาน H2-1m, H3-1m และ H4-1m ที่มีความใกล้เคียงกันคือประมาณ 9 μm ถึงแม้ว่าชิ้นงานทั้งสามชิ้นนี้มีความหนาของชั้นรองพื้นนิกเกิลที่แตกต่างกันก็ตาม ดังนั้นจึงมีความเป็นไปได้ที่ชั้น intermediate ของเหล็กชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนโดยการเคลือบชั้นรองพื้นนิกเกิลด้วยไฟฟ้านี้ในกรณีสำหรับชิ้นงานที่มีขนาด 5 x 2 x 0.04 ตารางเซนติเมตรที่ใช้ในงานศึกษานี้จะเข้าสู่สภาวะคงตัว (steady state) ตั้งแต่ระยะเวลาในการชุบสังกะสีที่ 1 นาทีแล้ว ดังนั้นจึงเป็นเรื่องที่สนใจศึกษาต่อไปว่าหากเพิ่มระยะเวลาในการชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนแล้วชั้น intermediate จะมีการเติบโตไปอีกหรือไม่ จึงนำไปสู่หัวข้อในการศึกษาที่จะกล่าวถึงต่อไปที่จะศึกษาการพัฒนาของ

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

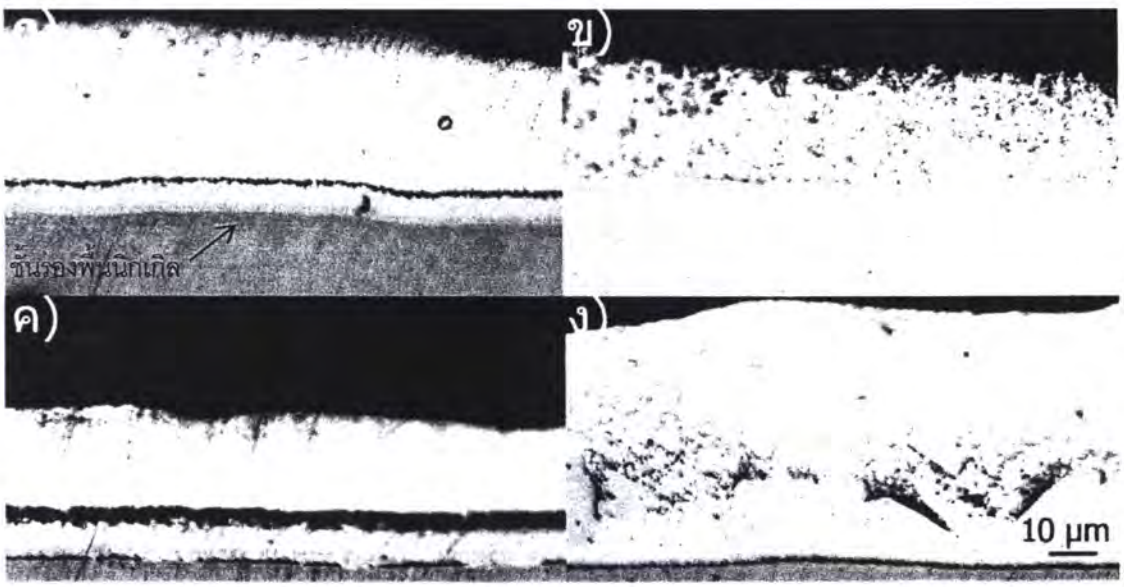


ภาพที่ 4.10 ความหนาเฉลี่ยของชั้นเคลือบของเหล็กชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนโดยการเคลือบชั้นรองพื้นนิกเกิลด้วยไฟฟ้าที่ความหนา H1 ถึง H4 และจุ่มร้อนเป็นระยะเวลา 1 นาที

4.2.2 การศึกษาโครงสร้างและเฟสของเหล็กชุบสังกะสีที่เปลี่ยนแปลงไปตามระยะเวลาในการชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อน

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

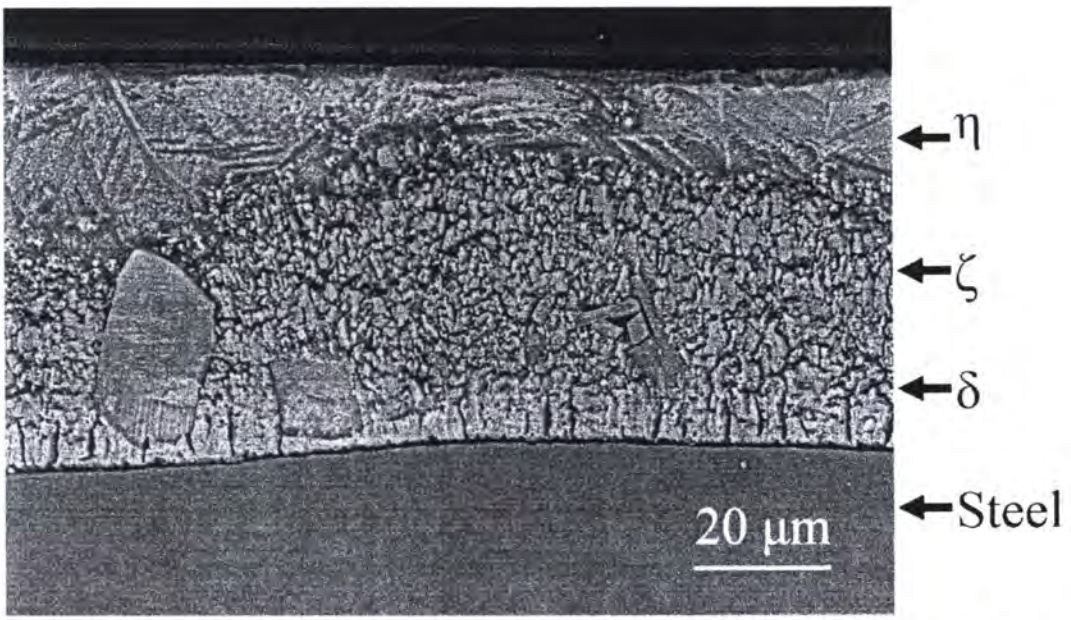
เฟสของชั้นรองพื้นนิกเกิลอยู่ในโครงสร้างอีกทั้งชั้นเคลือบ intermediate ที่ได้ก็มีความบางมาก สำหรับโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน H2-10s และ H2-3m นั้นไม่มีความแตกต่างจากในกรณีของชิ้นงาน H2-1m ซึ่งได้กล่าวไปแล้วก่อนหน้านี้คือต่างก็ประกอบไปด้วยชั้นรองพื้นนิกเกิล, ชั้นเคลือบ intermediate I, ชั้นเคลือบ intermediate II และชั้นเคลือบสังกะสีและมีองค์ประกอบของแต่ละเฟสที่เหมือนกันดังแสดงไว้ในตารางที่ 4.3 โดยที่ความหนาของชั้นรองพื้นนิกเกิลที่ชุบด้วยไฟฟ้านั้นจะค่อยๆลดลงเรื่อยๆ จากภาพที่ 4.11 จะเห็นชั้นรองพื้นนิกเกิลเป็นสีชมพูอ่อนและสามารถเห็นได้ชัดเจนในกรณีของชิ้นงาน H3-1m ซึ่งชั้นรองพื้นนิกเกิลนั้นเกิดการแพร่ออกไปจนใกล้หมด ซึ่งความหนาของชั้นรองพื้นนิกเกิลที่มีอยู่ในโครงสร้างจุลภาคภายหลังการชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนแสดงไว้ดังกราฟในภาพที่ 4.15



ภาพที่ 4.11 ภาพตัดขวางจากกล้องจุลทรรศน์แบบแสงของชิ้นงานเหล็กชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนโดยการเคลือบชั้นรองพื้นนิกเกิลด้วยไฟฟ้า ในระยะเวลาในการจุ่มร้อน ก)10 วินาที, ข) 1 นาที, ค) 3 นาที และ ง) 6 นาที โดยที่ชั้นรองพื้นนิกเกิลมีความหนา H2

นอกจากนี้ความหนารวมของชั้นเคลือบ intermediate I และ II ยังมีความใกล้เคียงกันอีกด้วยโดยชิ้นงาน H2-10s นั้นหนาประมาณ 7 µm ในขณะที่ชิ้นงาน H2-3m นั้นมีความหนาเฉลี่ย 9 µm เทียบเท่ากับชิ้นงาน H2-1m แสดงให้เห็นว่าจลนพลศาสตร์การเติบโต (Growth kinetics) ของชั้นเคลือบ intermediate ทั้งสองได้เข้าสู่สภาวะคงตัวของการแพร่เรียบร้อยแล้ว สำหรับชิ้นงาน H2-6m จากโครงสร้างจุลภาคในภาพ 4.11 ง) จะเห็นได้ว่าชั้นรองพื้นนิกเกิล H2 ที่มีความหนาประมาณ 6 µm มีปริมาณไม่เพียงพอต่อระยะเวลาในการจุ่มร้อนที่นานถึง 6 นาทีและได้เกิดการแพร่ออกไปจากชั้นเคลือบจนหมดทำให้โครงสร้างจุลภาคมีความคล้ายคลึงกับชิ้นงานเหล็กชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนโดยวิธีดั้งเดิมที่ประกอบด้วยเฟส ζ, δ และ Γ ซึ่งสามารถยืนยันได้จากการ

วิเคราะห์โครงสร้างจุลภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนนิงและการวิเคราะห์ธาตุประกอบในแต่ละเฟสด้วยการวิเคราะห์การกระจายพลังงานดังแสดงในภาพที่ 4.12 แต่สิ่งที่แตกต่างกันคือแต่ละชั้นเคลือบของชิ้นงาน H2-6m มีความสม่ำเสมอน้อยลงอีกทั้งแต่ละชั้นเคลือบก็ไม่สามารถแยกออกจากกันได้ด้วยการวิเคราะห์ด้วยตาเปล่าอีกต่อไป



ภาพที่ 4.12 โครงสร้างจุลภาคของเหล็กซุบสังกะสีแบบจุ่มร้อน H2-6m โดยการเคลือบชั้นรองพื้นนิกเกิลด้วยไฟฟ้า ในกรณีที่ชั้นรองพื้นนิกเกิลเกิดการแพร่ไปสู่สังกะสีหลอมเหลวจนหมดจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนนิงที่กำลังขยาย 1000 เท่า

ตารางที่ 4.3 เอกลักษณ์ของเหล็กซุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนโดยการเคลือบชั้นรองพื้นนิกเกิลด้วยไฟฟ้าที่ความหนา H2

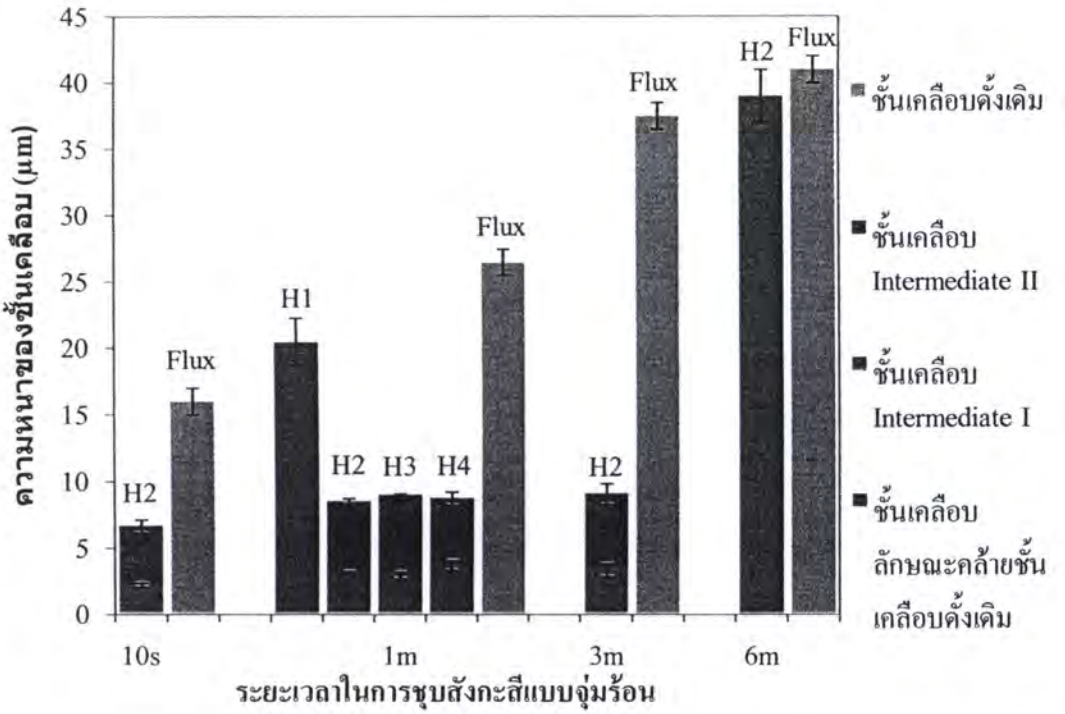
ชิ้นงาน	องค์ประกอบในชั้นเฟส Intemediate I (at%)				องค์ประกอบในชั้นเฟส Intermediate II (at%)			
	เหล็ก	นิกเกิล	สังกะสี	เฟส	เหล็ก	นิกเกิล	สังกะสี	เฟส
H2-10s	1.3	12.2	86.5	Γ+β	1.7	16.5	81.8	Γ
H2-1m	1	13.1	85.9	Γ+β	1.4	19	79.6	Γ
H2-3m	1.6	11.7	86.7	Γ+β	2.8	16.9	80.3	Γ
H2-6m	12.7	0	87.3	δ	6.3	0.8	92.9	ζ

ในการเปรียบเทียบความหนารวมของชั้นเคลือบสำหรับเหล็กซุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนโดยการเคลือบชั้นรองพื้นนิกเกิลด้วยไฟฟ้าเทียบกับเหล็กซุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนโดยวิธีดั้งเดิม จากภาพที่ 4.13 เป็นที่ประจักษ์ว่าชิ้นงานเหล็กซุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนโดยการเคลือบชั้นรองพื้นนิกเกิลด้วย

ไฟฟ้านั้นต่างก็มีความหนารวมของชั้นเคลือบน้อยกว่าชิ้นงานเหล็กชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนโดยวิธีดั้งเดิม (แสดงในภาพที่ 4.13 ว่า Flux) เป็นอย่างมากทั้งสิ้น ตัวอย่างเช่นความหนาของชั้นเคลือบของชิ้นงาน H2-3m นั้นบางกว่าชิ้นงาน Flux ที่เวลาในการจุ่มร้อน 3 นาทีเท่ากันถึง 3 เท่า ซึ่งการที่มีความแตกต่างในเรื่องความหนาเป็นอย่างมากนี้เป็นผลจากการที่ชั้นรองพื้นนิกเกิลที่ผลิตด้วยการชุบไฟฟ้าสามารถลดการเกิดปฏิกิริยาที่เกิดอย่างรวดเร็วของเหล็กและสังกะสีทำให้ได้ชั้นเคลือบที่มีความบางและมีผลทำให้โครงสร้างจุลภาคของชั้นเคลือบเปลี่ยนแปลงไปจากการที่มีนิกเกิลเพิ่มเข้ามาเป็นธาตุประกอบในแต่ละเฟสด้วย แต่อย่างไรก็ตามชั้นรองพื้นนิกเกิลก็ยังคงเกิดการการแพร่ออกไปสู่สังกะสีหลอมเหลวที่อยู่ภายนอกอย่างต่อเนื่องตลอดระยะเวลาในการจุ่มร้อนและเมื่อใดก็ตามที่ชั้นรองพื้นนิกเกิลได้หมดลงพื้นผิวเหล็กของชิ้นงานและสังกะสีจะสามารถเกิดการแพร่ระหว่างกันด้วยจลนพลศาสตร์ที่รวดเร็วทำให้เกิดเฟส intermediate ของเหล็กและสังกะสีที่มีอัตราการเติบโตขึ้นอย่างรวดเร็วจนมีความหนาของชั้นเคลือบที่มาก

ดังนั้นในการศึกษาในหัวข้อนี้จึงทำให้ทราบว่าตราบใดที่ชั้นรองนิกเกิลยังคงไม่เกิดการแพร่ออกไปจนหมดโครงสร้างจุลภาคของเหล็กชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนจะยังคงเป็นชั้นเคลือบ intermediate I และ II และสามารถควบคุมความหนาของชั้นเคลือบไว้ได้ในระดับที่ต่ำกว่า 10 μm แต่หากชั้นรองพื้นนิกเกิลมีความหนาไม่เพียงพอกับระยะเวลาในการชุบจะส่งผลให้โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ได้กลับคืนเป็นชั้น intermediate ที่ประกอบไปด้วยเหล็กและสังกะสีเป็นเฟสของ ζ, δ และ Γ ซึ่งมีเฟสและความหนาเหมือนกับกรณีเหล็กชุบสังกะสีโดยวิธีดั้งเดิมเพียงแต่ความสม่ำเสมอของโครงสร้างจุลภาคของเฟสต่างๆจะลดลงแต่จะมีความอัดแน่นกันมากขึ้น สำหรับเหล็กที่มีชั้นรองพื้นนิกเกิลนั้นเนื่องจากการเติบโตของชั้นเคลือบ intermediate I และ II ได้เข้าสู่สภาวะคงตัวเรียบร้อยแล้วที่ระยะเวลาในการจุ่มร้อนที่ 1 นาที ดังนั้นการเพิ่มระยะเวลาในการชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนจึงไม่เกิดประโยชน์เพราะจะเกิดการแพร่ออกไปของชั้นรองพื้นนิกเกิลสู่สังกะสีหลอมเหลวภายนอกเรื่อยๆแต่ไม่ได้ทำให้ชั้นเคลือบ intermediate เกิดการพัฒนาขึ้นอีกต่อไป

นอกจากนี้ยังทำให้สามารถกำหนดความหนาของชั้นรองพื้นนิกเกิลที่เหมาะสมได้อีกด้วย โดยสำหรับชิ้นงานขนาดที่ทำการศึกษานี้ความหนาที่เหมาะสมคือ 6 μm หรือ H2 ซึ่งเมื่อผ่านการชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนเป็นเวลา 1 นาทีจะทำให้มีชั้นรองพื้นนิกเกิลเหลืออยู่ในโครงสร้างจุลภาคด้วยความหนาที่ไม่มากเกินไป ซึ่งการที่เราผลิตชั้นรองพื้นนิกเกิลที่ความหนาเกินความจำเป็นนั้นจะส่งผลต่อต้นทุนในการผลิต ส่วนการที่มีชั้นรองพื้นนิกเกิลน้อยเกินไปก็มีโอกาสที่ชั้นรองพื้นนิกเกิลจะเกิดการแพร่ออกไปจนหมดในระหว่างการจุ่มร้อนซึ่งก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคและการได้ชั้นเคลือบที่มีความหนาซึ่งเป็นสิ่งที่ไม่ต้องการ



ภาพที่ 4.13 ความหนาเฉลี่ยของชั้นเคลือบของเหล็กชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนโดยการเคลือบชั้นรองพื้นนิกเกิลด้วยไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงระยะเวลาในการจุ่มร้อนในช่วง 10 วินาทีถึง 6 นาที

จากการพัฒนาของชั้นเคลือบ intermediate ของชิ้นงาน H2 ที่ชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนเป็นระยะเวลา 10 วินาทีถึง 6 นาทีในภาพที่ 4.13 สามารถนำความหนาที่ได้ในแต่ละช่วงเวลามาประมาณจลนศาสตร์ในการพัฒนาของชั้นเคลือบ intermediate โดยในการนี้ power-law growth equation จะนิยมใช้ในการทำนายอัตราการโตของชั้น intermediate ดังที่ได้กล่าวไปแล้วในหัวข้อ 2.1.3 ดังสมการ $Y = Kt^n$

โดยที่ Y คือความหนาของชั้นเคลือบ,

K คือค่าคงที่ของอัตราในการโต (growth rate constant)

t คือระยะเวลาในการจุ่มร้อน,

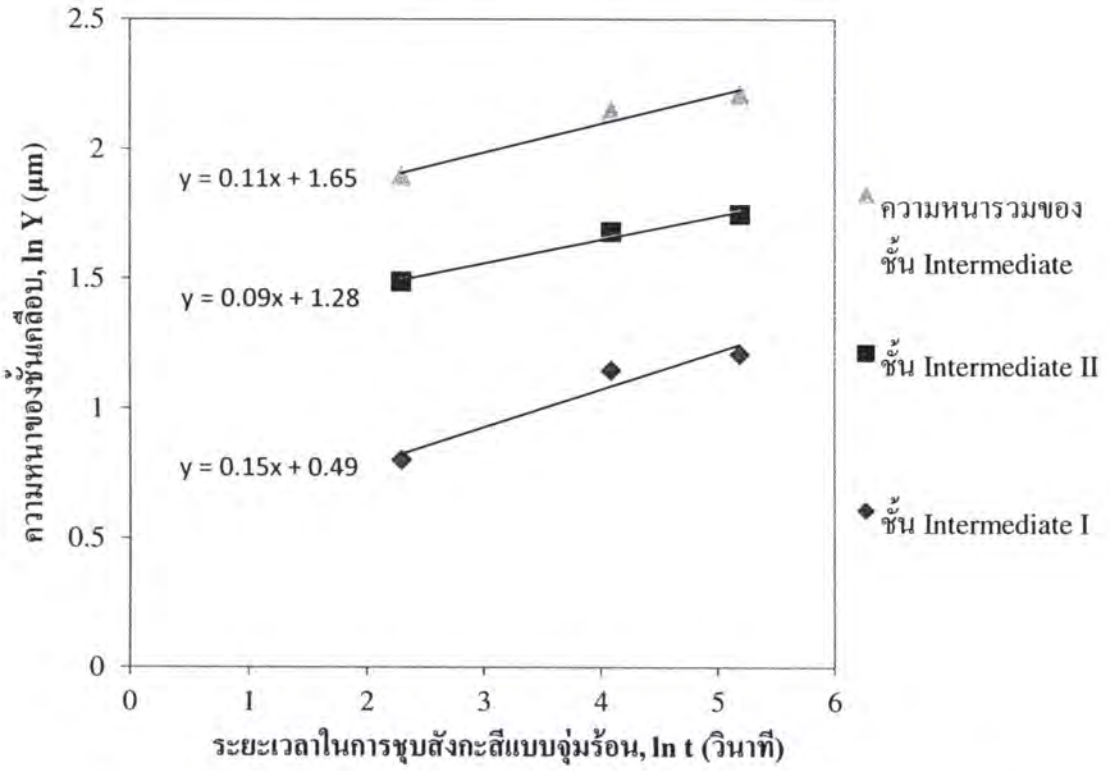
n คือค่าคงที่ของอัตราในการโตกับเวลา (growth-rate time constant)

จากสมการนี้สามารถที่ลอการิทึมธรรมชาติเพื่อที่จะลดทอนผลคูณเป็นผลบวกและเลยยกกำลังเป็นผลคูณได้เป็นสมการ

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

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

เมื่อแทนค่าทั้งหมดลงในกราฟจะได้กราฟและสมการเส้นตรงของชั้นเคลือบ intermediate I, II และชั้นเคลือบโดย intermediate รวมทั้ง I และ II ดังภาพที่ 4.14 โดยที่ค่าตัวแปร n และ K สำหรับสมการ power-law growth equation เพื่อทำนายการพัฒนาของชั้นเคลือบแต่ละชั้นตามระยะเวลาในการชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนโดยการเคลือบชั้นรองพื้นนิกเกิลด้วยไฟฟ้าจะแสดงไว้ดังตารางที่ 4.4 โดยถึงแม้ว่าค่าคงที่ของอัตราในการโตกับเวลา, (n) ที่ได้จะยังคงไม่ได้มีการศึกษาที่พิสูจน์ถึงชนิดของกลศาสตร์ในการแพร่ดังในกรณีของชั้นเคลือบของเหล็กชุบสังกะสีโดยวิธีดั้งเดิม แต่ค่า n ที่ได้ก็สามารถบ่งบอกได้ถึงอัตราในการโตของเฟสที่ต่ำมาก กล่าวคือสำหรับชั้นเคลือบรวมของเหล็กชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนโดยการเคลือบชั้นรองพื้นนิกเกิลด้วยไฟฟ้านั้นค่า n เท่ากับ 0.15 และเมื่อเทียบกับเหล็กชุบสังกะสีแบบดั้งเดิมซึ่งชั้นเคลือบรวมโดยทั่วไปแล้วค่า n อยู่ที่ประมาณ 0.4 ถึง0.5 ก็พบว่ามีอัตราในการโตของชั้นเคลือบที่ต่ำกว่าประมาณ 3 เท่า



ภาพที่ 4.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของชั้นเคลือบต่อระยะเวลาในการชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อน

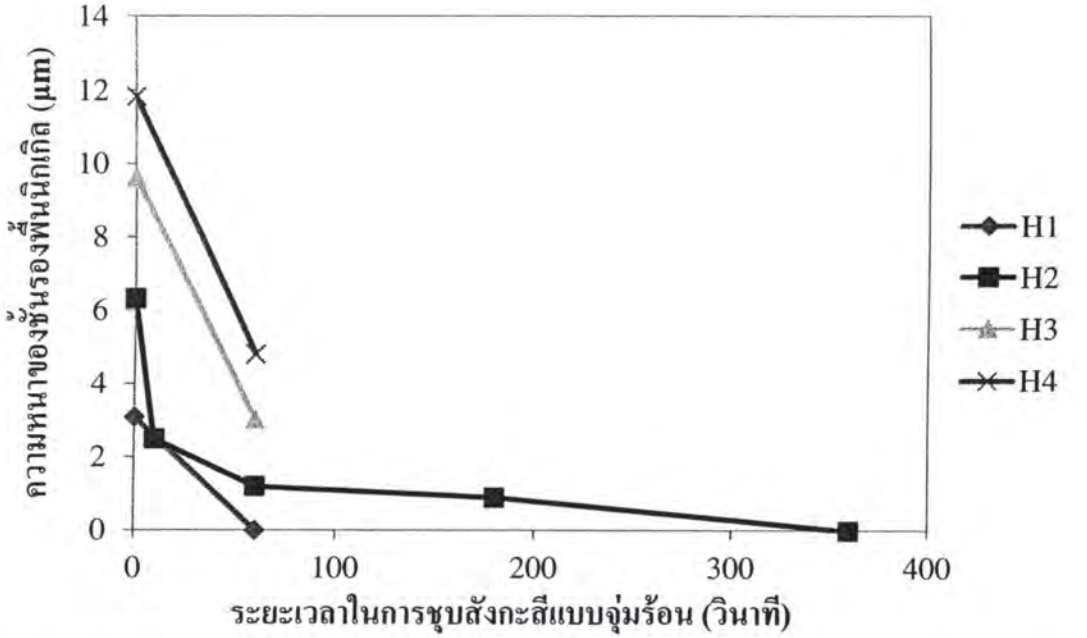
ตารางที่ 4.4 ค่าคงที่ของอัตราในการโตกับเวลา, (n)และค่าคงที่ของอัตราในการโต, (K) ของชั้นเคลือบของเหล็กซุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนโดยการเคลือบชั้นรองพื้นนิกเกิลด้วยไฟฟ้า

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

จากความหนาของชั้นรองพื้นนิกเกิลที่เปลี่ยนแปลงไปตามระยะเวลาในการซุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนดังหัวข้อที่ 4.2.1 และ 4.2.2 จะสามารถแสดงผลออกมาเป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของชั้นรองพื้นนิกเกิลกับระยะเวลาในการซุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนได้ดังภาพที่ 4.15 จากความหนาของชั้นรองพื้นนิกเกิลที่แตกต่างกันคือ H1, H2, H3 และ H4 เมื่อผ่านการจุ่มร้อนเป็นเวลา 1 นาทีจะเห็นได้ว่าความหนาจะลดลงอย่างรวดเร็ว สำหรับ H2 ที่ได้เปลี่ยนแปลงระยะเวลาในการซุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนจาก 10 วินาทีไปจนถึง 6 นาทีนั้นช่วยอธิบายกลไกในการแพร่ของชั้นรองพื้นนิกเกิลได้ดีขึ้น จากการที่ได้ทำการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคและวัดความหนาของชั้นรองพื้นนิกเกิลของชิ้นงาน H2-10s ทำให้มีข้อมูลมากขึ้นและแสดงถึงการแพร่ออกไปของนิกเกิลตามระยะเวลาในช่วงเริ่มต้นของการซุบสังกะสีได้ชัดเจนยิ่งขึ้นกล่าวคือในช่วง 10 วินาทีแรกนั้นความหนาของชั้นรองพื้นนิกเกิลลดลงอย่างมาก สาเหตุเนื่องจากในระหว่างการซุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนนั้นทั้งเหล็กและชั้นรองพื้นนิกเกิลต่างก็เกิดการแพร่ออกไปสู่สังกะสีหลอมเหลวเพื่อเกิดเป็นชั้น intermediate แต่ในกรณีของเหล็กซึ่งอยู่ข้างในสุดนั้นจะต้องแพร่ผ่านชั้นรองพื้นนิกเกิลก่อนที่ไปสู่สังกะสีหลอมเหลวได้ ในระยะเริ่มต้นของการจุ่มร้อนนิกเกิลจึงสามารถเกิดการแพร่กับสังกะสีได้โดยตรงส่งผลให้อัตราในการแพร่ของชั้นรองพื้นนิกเกิลนั้นสูงและเป็นผลให้ความหนาของชั้นรองพื้นนิกเกิลในช่วงเวลา 10 วินาทีแรกนั้นลดลงจากความหนาเริ่มต้นอย่างมากจนกระทั่งเหล็กสามารถที่จะแพร่ผ่านชั้นรองพื้นนิกเกิลมาเกิดเป็นชั้น intermediate บนผิวชั้นรองพื้นนิกเกิลได้อัตราการแพร่ของชั้นรองพื้นนิกเกิลจึงเริ่มลดลงดังที่เห็นได้ชัดเจนในช่วง 10 วินาทีถึง 1 นาทีต่อมาว่าเส้นความแนวโน้มมีการเปลี่ยนแปลงความชันโดยความชันลดลงแสดงถึงอัตราการแพร่ที่ลดลงด้วยเหตุผลข้างต้น จนกระทั่งช่วง 1 นาทีถึง 6 นาทีหากพิจารณาจากความชันของเส้นแนวโน้มที่ระยะเวลา 1 ถึง 3 นาทีและ 3 ถึง 6 นาทีจะเห็นได้ว่าความชันค่อนข้างคงที่ซึ่งสอดคล้องกับการพัฒนาของชั้น intermediate ที่เข้าสู่สภาวะคงตัวและมีความหนาคงที่และเพียงพอที่จะเป็นชั้นกั้น

ระหว่างชั้นรองพื้นนิกเกิลกับสังกะสีหลอมเหลวจึงเป็นผลชั้นรองพื้นนิกเกิลจะค่อยๆลดลงอย่างช้าๆ ด้วยอัตราค่อนข้างคงที่จนกระทั่งหมดลง

นอกจากนี้หากพิจารณาเฉพาะเส้นแนวโน้มที่ลากเชื่อมระหว่างระยะเวลาเริ่มต้นและที่ระยะเวลา 1 นาทีของชิ้นงาน H1, H2, H3 และ H4 ที่จุ่มร้อนเป็นเวลา 1 นาที จะเห็นว่าเส้นแนวโน้มของ H4 มีความชันมากที่สุดในขณะที่ H1 มีความชันน้อยที่สุดซึ่งหมายถึงว่าชั้นรองพื้น H4 มีอัตราในการแพร่ออกไปสู่สังกะสีในช่วงแรกมากที่สุด สมมติฐานที่อาจจะเกิดขึ้นคือในขณะชิ้นงานถูกจุ่มร้อนในสังกะสีหลอมเหลวนั้น เหล็กที่อยู่ด้านในสุดจะเกิดการแพร่ผ่านชั้นรองพื้นนิกเกิลเพื่อมาเกิดเป็นชั้นเคลือบ intermediate กับสังกะสี การที่ H4 มีความหนามากจึงทำให้เหล็กต้องใช้ระยะเวลาที่มากขึ้นตามไปด้วยในการแพร่ผ่านชั้นรองพื้นนิกเกิลที่มีความหนาเพื่อมาเกิดเป็นชั้นเคลือบ intermediate ซึ่งจะกั้นระหว่างชั้นรองพื้นนิกเกิลกับสังกะสีหลอมเหลวอีกทีและทำให้อัตราในการแพร่ของนิกเกิลไปสู่สังกะสีลดลง ในทางกลับกันสำหรับชั้นรองพื้นนิกเกิล H1 ที่มีความบางมากเหล็กจะสามารถแพร่ผ่านชั้นรองพื้นนิกเกิลได้รวดเร็วและเกิดเป็นชั้นเคลือบ intermediate ได้เร็วจึงทำให้ชั้นรองพื้นนิกเกิลแพร่ออกไปด้วยอัตราที่น้อยกว่า

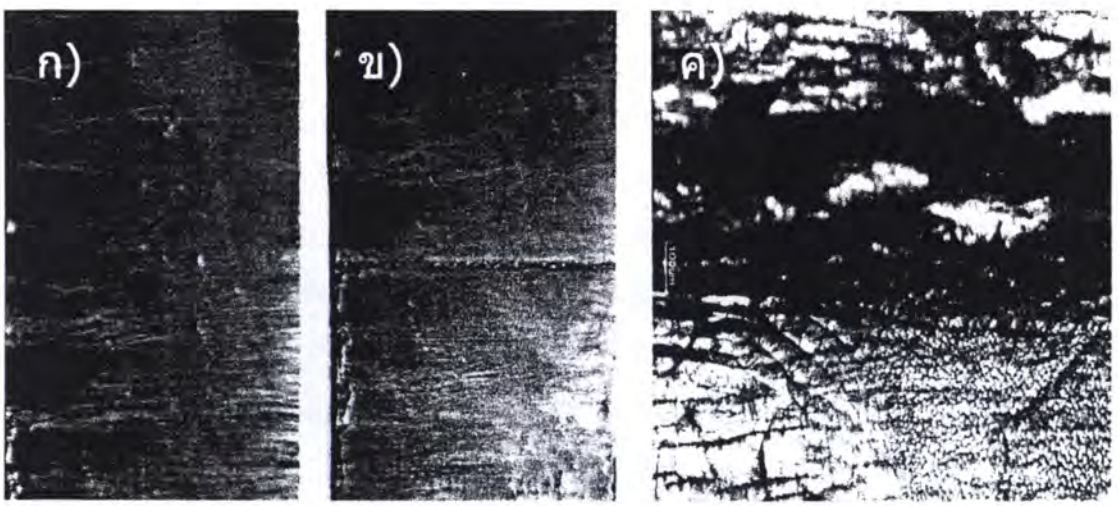


ภาพที่ 4.15 ความหนาของชั้นรองพื้นนิกเกิลที่เปลี่ยนแปลงไปตามระยะเวลาในการชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อน

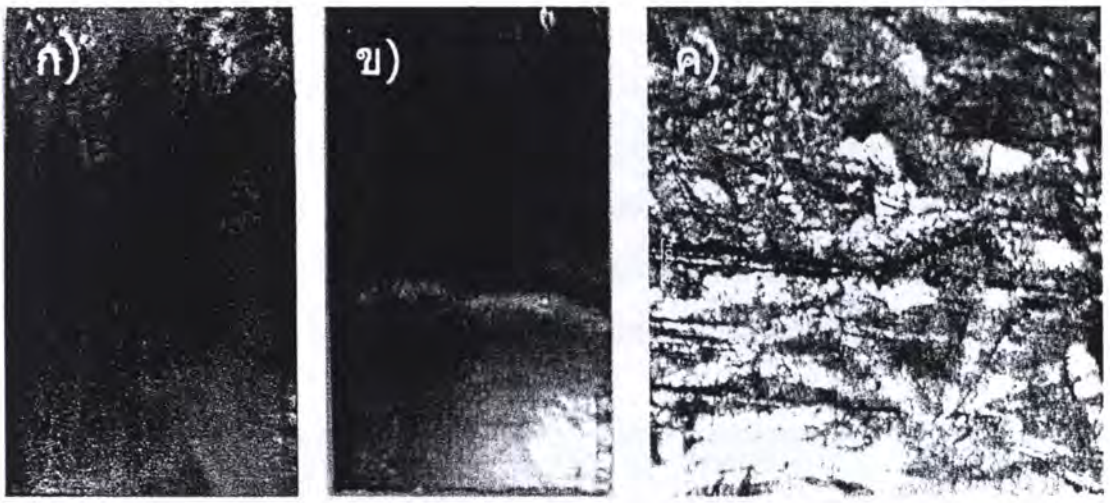
สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ห้องสมุดงานวิจัย

4.3 **การทดสอบการดัดโค้ง** T-bend flexibility test

ในส่วนของการทดสอบการดัดโค้งนี้ได้ทำเพื่อทดสอบการยึดเกาะของชั้นเคลือบผิวที่มีต่อเนื้อพื้นเหล็กและเพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานเหล็กชุบสังกะสีเมื่อได้รับแรงอัด(compression) และแรงดึง (tension) เป็นที่ทราบกันดีว่าเหล็กชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนโดยวิธีดั้งเดิมนั้นมีสมบัติการยึดเกาะของชั้นเคลือบบนผิวเหล็กที่ค่อนข้างดีเนื่องจากพันธะโลหะของเหล็กและสังกะสีมีความแข็งแรงพอสมควรแต่เนื่องจากเฟส Γ ที่อยู่ติดกับเนื้อพื้นเหล็กของเหล็กชุบสังกะสีโดยวิธีดั้งเดิมนั้นมีความแข็งเปราะมากจึงมักเกิดการหลุดร่อนออกจากเนื้อเหล็กได้เมื่อได้รับการดัดโค้ง ในขณะที่เหล็กชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนโดยการเคลือบชั้นรองพื้นนิกเกิลด้วยไฟฟ้านั้นสมบัติการยึดเกาะยังไม่เป็นที่แน่ชัด ดังนั้นการศึกษาในส่วนนี้จะทำการเปรียบเทียบระหว่างชิ้นงานเหล็กชุบสังกะสีด้วยวิธีดั้งเดิมที่ผ่านการจุ่มร้อนเป็นระยะเวลา 1 นาทีและชิ้นงานเหล็กชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนโดยการเคลือบชั้นรองพื้นนิกเกิลด้วยไฟฟ้า H4-1m ในการดัดโค้งนี้ชิ้นงานถูกยึดไว้โดยแท่นยึดและทำการดัดชิ้นงานให้ทำมุม 90 องศากับผิวหน้าตำแหน่งเดิมจากนั้นจึงดัดกลับมาที่ตำแหน่งเดิมโดยลักษณะทางกายภาพของชิ้นงานทั้งสองแสดงดังภาพที่ 4.16และภาพที่ 4.17



ภาพที่ 4.16 ลักษะทางกายภาพของชิ้นงานเหล็กชุบสังกะสีโดยวิธีดั้งเดิมที่จุ่มร้อนเป็นระยะเวลา 1 นาที ก) ชิ้นงานก่อนทดสอบการดัดโค้ง ข) ชิ้นงานภายหลังทดสอบการดัดโค้ง ค) ภาพขยายด้วยกล้องจุลทรรศ์แบบแสง

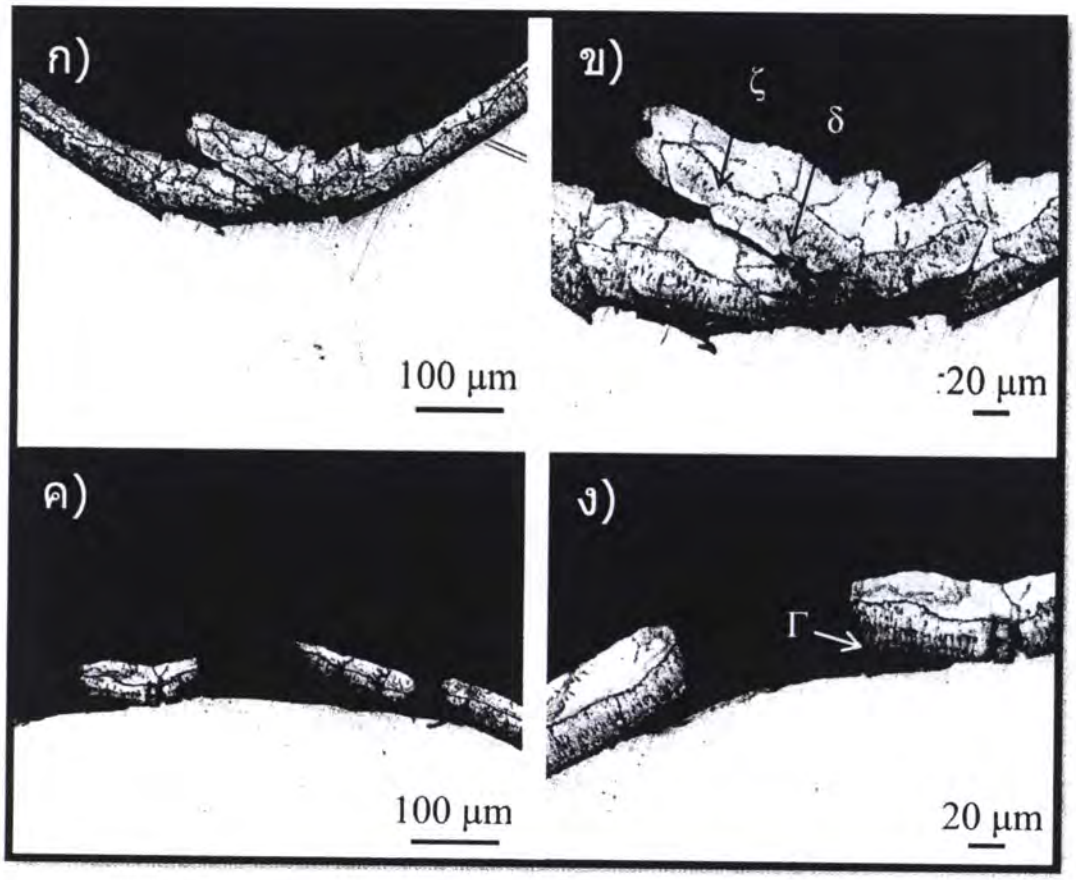


ภาพที่ 4.17 ลักษะทางกายภาพของชิ้นงานเหล็กชุบสังกะสีโดยการเคลือบชั้นรองพื้นนิกเกิลด้วยไฟฟ้า H4-1m ก) ชิ้นงานก่อนทดสอบการดัดโค้ง ข) ชิ้นงานภายหลังทดสอบการดัดโค้ง ค) ภาพขยายด้วยกล้องจุลทรรศ์แบบแสง

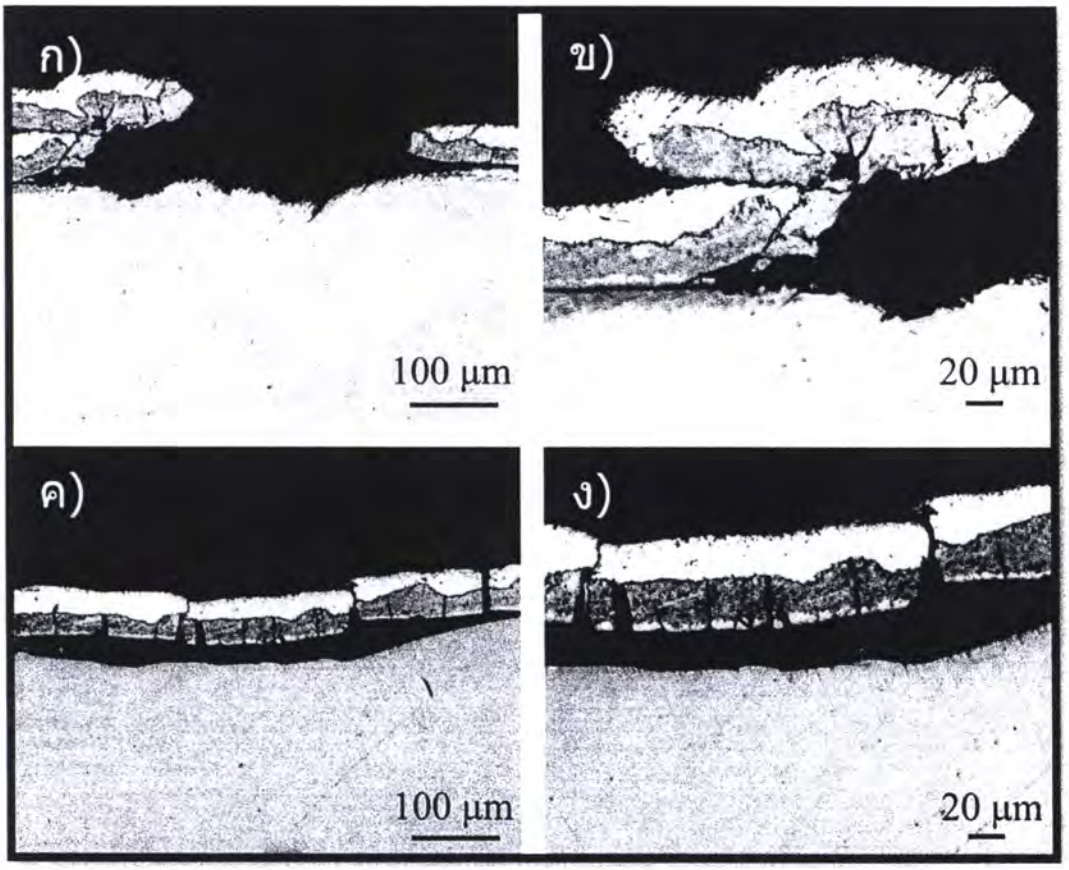
จากลักษณะทางกายภาพของชิ้นงานทั้งสองแสดงให้เห็นว่าชิ้นงาน H4-1m มีผิวหน้าส่วนรับแรงดึงที่ยังคงไม่เกิดการปริแตกให้เห็นอย่างเด่นชัดเมื่อวิเคราะห์ด้วยตาเปล่า เมื่อขยายบริเวนที่เกิดการดัดโค้งและดัดคืนรูปมาที่ตำแหน่งเดิมพบว่าผิวหน้ายังคงสามารถกลับประกบกันได้ค่อนข้างดีและชั้นเคลือบยังคงไม่มีการหลุดออกมาเป็นแผ่นเล็กๆ ในขณะที่ชิ้นงานเหล็กชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนด้วยวิธีดั้งเดิมผิวชิ้นงานส่วนที่รับแรงดึงไปและกลับไม่สามารถกลับมาประกบกันได้และเป็นเกิดร่องที่ใหญ่ชัดเจนแม้วิเคราะห์ด้วยตาเปล่าซึ่งสาเหตุหนึ่งเกิดจากความหนาของชั้นเคลือบที่แตกต่างจากชิ้นงาน H4-1m มาก ถึงแม้ชิ้นงานชิ้นนี้จะเกิดรอยแตกให้เห็นอย่างชัดเจนแต่ก็ยังไม่มีการลอกออกของชั้นเคลือบ (peel off) ซึ่งโดยมาตรฐานของเหล็กชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อน ASTM A123 และตามหลักการในการควบคุมคุณภาพที่ใช้ทั่วไปในอุตสาหกรรม ชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบสมบัติการยึดเกาะชั้นเคลือบจะต้องไม่เกิดการหลุดลอกของชั้นเคลือบ ดังนั้นชิ้นงานทั้ง 2 นี้ถือว่ามีคุณสมบัติเพียงพอ แต่อย่างไรก็ตามในการวิเคราะโดยภาพถ่ายจากด้านบนไม่สามารถแสดงให้เห็นว่าการปริแตกของชิ้นงานเกิดเข้าไปลึกเพียงใด ดังนั้นในส่วนต่อไปจึงทำการศึกษาโครงสร้างจุลภาคที่เปลี่ยนแปลงไปของชิ้นงานเมื่อได้รับแรงดึงและแรงอัดทั้งในขณะทำการดัดโค้งไป 90 องศาและภายหลังจากการดัดชิ้นงานกลับมาที่ตำแหน่งเดิม

จากภาพตัดขวางของชิ้นงานเหล็กชุบสังกะสีโดยวิธีดั้งเดิมที่ได้รับการดัดโค้งทำมุม 90 องศากับระนาบเดิมในส่วนที่ได้รับแรงอัดดังภาพ 4.18 ก) และ ข) นั้นสามารถสังเกตได้ว่าเกิดช่องว่างขึ้นตรงบริเวณมุมที่ได้รับแรงอัดและชั้นเคลือบในส่วนที่ได้รับแรงอัดสูงเกิดการโก่งเดาะเฉพาะที่ (Local Buckling) และเกิดการแตกหักทำมุมประมาณ 45 องศากับหน้าตัดของชั้นเคลือบ

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



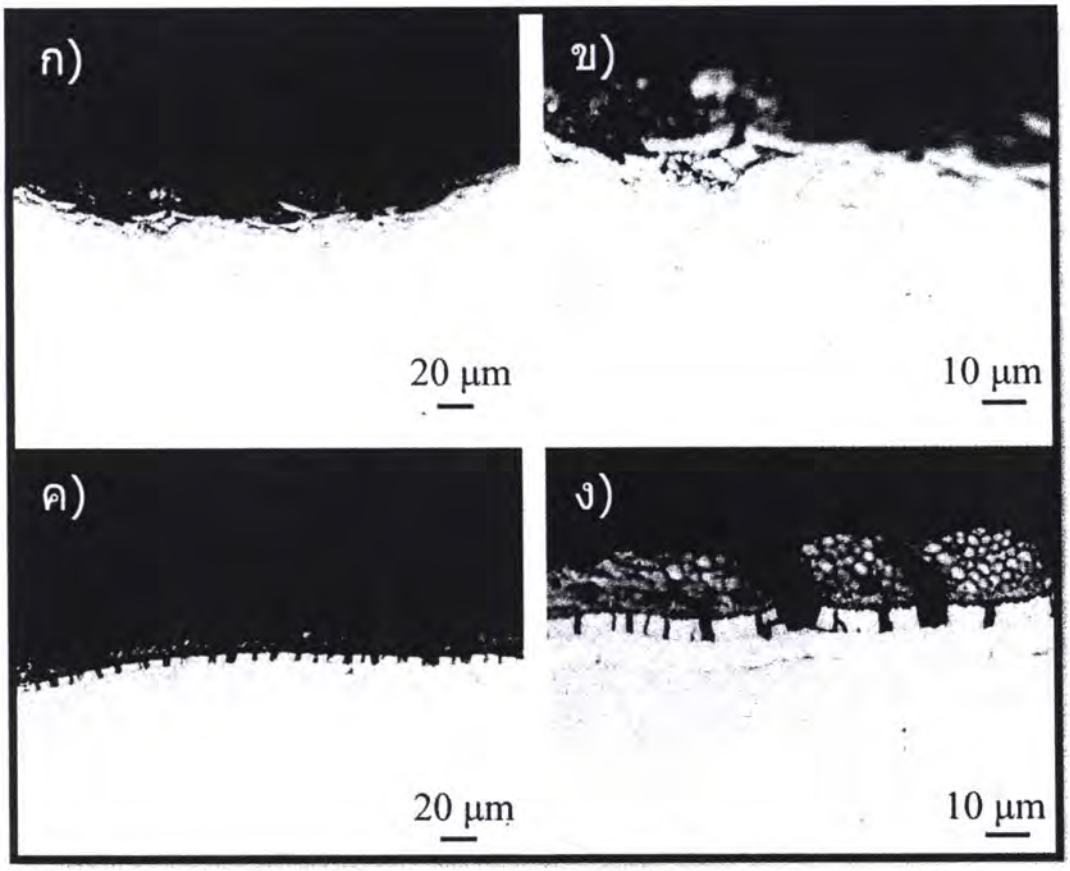
ภาพที่ 4.18 ภาพตัดขวางของชิ้นงานเหล็กชุบสังกะสีโดยวิธีดั้งเดิมที่จุ่มร้อนเป็นเวลา 1 นาที หลังจากดัดโค้งทำมุม 90 องศากับระนาบเดิม ก) และ ข) ส่วนที่ได้รับแรงอัด ค) และ ง) ส่วนที่ได้รับแรงดึง



ภาพที่ 4.19 ภาพตัดขวางของชิ้นงานเหล็กชุบสังกะสีโดยวิธีดั้งเดิมที่จุ่มร้อนเป็นเวลา 1 นาที หลังจากดัดโค้งคืนสู่ตำแหน่งเดิม ก)และข)ส่วนที่ได้รับแรงอัด ค) และ ง) ส่วนที่ได้รับแรงดึง

เมื่อวิเคราะห์เพิ่มเติมจากภาคตัดขวางของชิ้นงานที่ถูกดัดโค้งกลับมาที่ตำแหน่งเดิมใน ภาพที่ 4.19 พบว่าชั้นเคลือบทั้งสองด้านของชิ้นงานฝั่งที่รับแรงดึงและฝั่งที่รับแรงอัดต่างก็ หลุดร่อนออกจากเนื้อพื้นเหล็กอย่างสมบูรณ์ กล่าวคือในส่วนที่รับแรงอัดดังภาพ 4.19 ก) และ ข) ชั้นเคลือบได้เปิดออกให้เห็นเนื้อเหล็กอย่างชัดเจนส่วนในด้านตรงข้ามที่รับแรงดึงถึงแม้ชั้นเคลือบที่แตกเป็นท่อนๆจะกลับมาชิดกันอีกในระหว่างการดัดโค้งกลับมาตำแหน่งเดิมแต่ชั้นเคลือบก็หลุดออกจากชั้นเหล็กที่เป็นเนื้อพื้นหมดแล้วดังนั้นความสามารถในการป้องกันการกัดกร่อนของชั้นเคลือบโดยกลไกแบบเป็นชั้นป้องกันในการแทรกซึมของไอออนที่มีผลเร่งการกัดกร่อนเช่นคลอไรด์ไอออนจึงหมดไปเหลือเพียงแต่การป้องกันทางแอโนดิกในการเป็นแซ็กคริฟิเชียลแอโนดของชั้นเคลือบให้แก่เนื้อพื้นเหล็กเท่านั้น สำหรับสาเหตุของการแตกหักของชั้นเคลือบและหลุดออกจากเนื้อเหล็กบางส่วนนอกเหนือจากความหนาที่มากของชั้นเคลือบแล้วยังเกิดจากสมบัติความแข็งเปราะของเฟส Γ และ δ โดยเฉพาะเฟส Γ ซึ่งเป็นเฟสที่มีความบางและมีความแข็งเปราะมากเป็นพิเศษโดยเฟสนี้เป็นเฟสที่อยู่ถัดไปจากเนื้อพื้นเหล็ก ดังนั้นเมื่อได้รับแรงดึงหรือแรงอัดจึงสามารถที่จะแตกและหลุดออกจากเนื้อพื้นเหล็กได้ง่าย

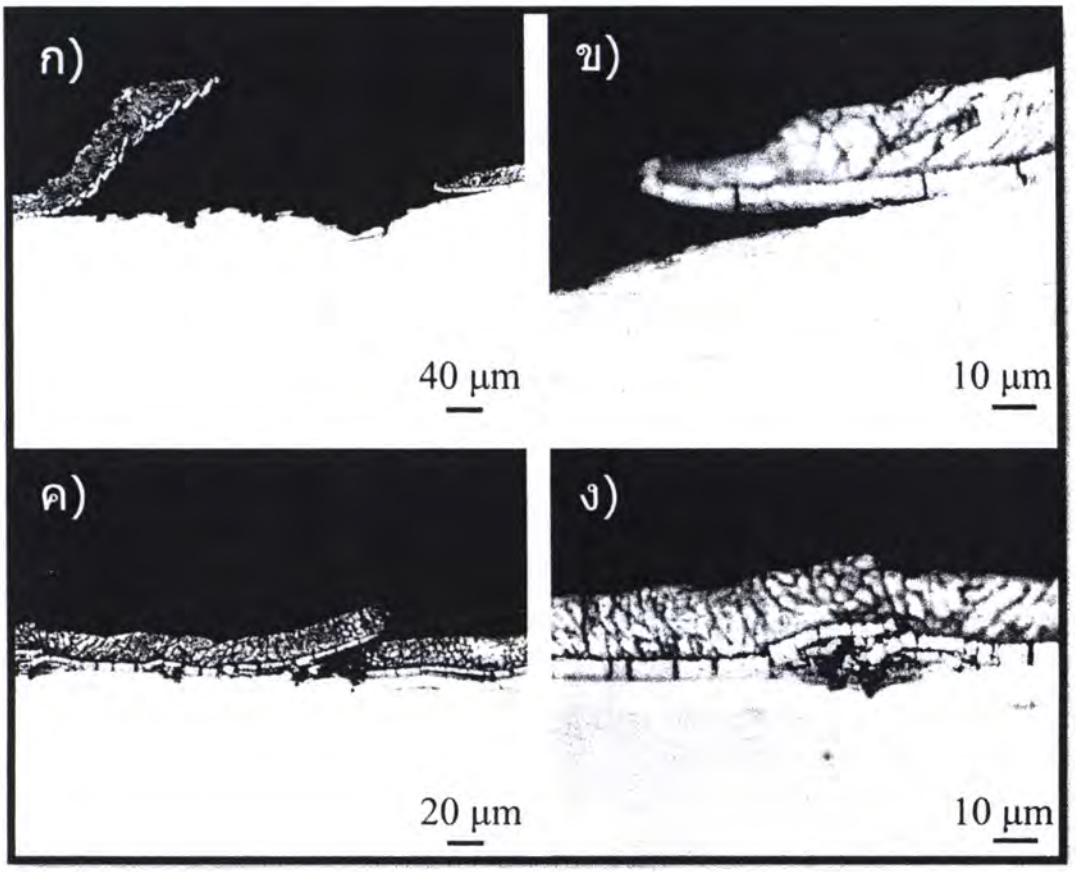
สำหรับในกรณีของเหล็กซุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนโดยการเคลือบชั้นรองพื้นนิกเกิลด้วยไฟฟ้า H4-1m นั้นหากพิจารณาภาพตัดขวางจากกล้องจุลทรรศน์แบบแสงในส่วนที่ได้รับแรงอัดที่เกิดจากการดัดโค้งทำมุม 90 องศากับแนวระนาบเดิมจะพบว่าเฟส intermediate I และ II เกิดการแตกและบางจุดที่ได้รับแรงอัดสูงมีการแตกละเอียดลักษณะเป็นเกล็ดเล็กๆโดยชั้น intermediate นี้ยังคงยึดติดกับชั้นรองพื้นนิกเกิลด้านล่างและเฟสของสังกะสีได้ดีดังภาพ 4.20 ก) และ ข) โดยเฟสของสังกะสีและชั้นรองพื้นนิกเกิลยังไม่ปรากฏเกิดการแตกหักให้เห็นอันเนื่องจากสมบัติความเหนียว (ductile) ของสังกะสีและนิกเกิลและความบางของชั้นเคลือบของเหล็กซุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนโดยการเคลือบชั้นรองพื้นนิกเกิลด้วยไฟฟ้า และเมื่อพิจารณาภาพตัดขวางในด้านตรงข้ามที่รับแรงดึงในภาพ 4.20 ค) และ ง) จะเห็นได้ว่าชั้น intermediate I และ II สามารถที่จะรับแรงดึงได้น้อยเนื่องจากความแข็งเปราะของเฟสทั้งสองซึ่งสำหรับชั้น intermediate II นั้นจากการวิเคราะห์เฟสจากองค์ประกอบของธาตุที่ได้จาก SEM-EDS ด้วยแผนภาพเฟส 3 องค์ประกอบพบว่าอยู่ในขอบเขตของเฟส Γ เช่นเดียวกับเฟส Γ ของเหล็กซุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนโดยวิธีดั้งเดิมแม้ว่าจะมีที่มีนิกเกิลเป็นองค์ประกอบด้วยก็ตาม ดังนั้นจึงคาดว่าสมบัติความแข็งเปราะควรจะใกล้เคียงกันด้วยจึงให้ผลที่คล้ายกันคือเกิดการแตกออกเป็นท่อนๆในขณะที่ชั้นเฟสของสังกะสีด้านบนส่วนใหญ่ยังคงสามารถยืดออกได้โดยไม่มีการแตกเกิดขึ้น



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

ในส่วนของภาพตัดขวางของชิ้นงานที่ถูกดัดโค้งกลับมาที่ตำแหน่งเริ่มต้นซึ่งจะทำให้เกิดความเสียหายมากที่สุดดังภาพที่ 4.21 ส่วนที่รับแรงอัดตามภาพ 4.21 ก) และ ข) จะพบว่าชั้นเคลือบตั้งแต่ intermediate II ขึ้นไปได้แตกออกและไม่คืนกลับมาที่ตำแหน่งเดิมส่งผลให้เหลือเฉพาะชั้นรองพื้นนิกเกิลเท่านั้นที่ยังคงติดอยู่กับเนื้อเหล็กเมื่อกลับมาพิจารณาอีกด้านหนึ่งที่รับแรงดึงดังภาพที่ 4.21 ค) และ ง) ชั้นเคลือบ intermediate ยังคงติดอยู่กับชั้นรองพื้นนิกเกิลและมีเพียงบางส่วนที่เกิดการซ้อนเกยกันจากการดัดโค้งกลับของชิ้นงาน ดังนั้นชั้นเคลือบบางส่วนที่รับแรงดึงจึงยังคงสามารถทำหน้าที่เป็นชั้นป้องกันให้แก่เนื้อเหล็กได้และการที่มีชั้นรองพื้นนิกเกิลเหลืออยู่ในโครงสร้างจุลภาคหลังจากผ่านกระบวนการชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนก็ยังมีประโยชน์ในการยึดติดกับชั้นเนื้อพื้นเหล็กได้อย่างดีเนื่องจากสมบัติความเหนียวของนิกเกิลและนิกเกิลมีศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนที่สูงและมีอัตราการกัดกร่อนที่ต่ำจึงเป็นประโยชน์ในการต้านทานการกัดกร่อนที่ดี อีกทั้งการที่ชั้นเคลือบของเหล็กชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนโดยการเคลือบชั้นรองพื้นนิกเกิลด้วยไฟฟ้านั้นมีความ

บางกว่าเหล็กชุบสังกะสีโดยวิธีดั้งเดิมดังนั้นความเสียหายที่เกิดจากการดัดโค้งจึงถูกลดทอนลงไปได้อีกด้วย



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

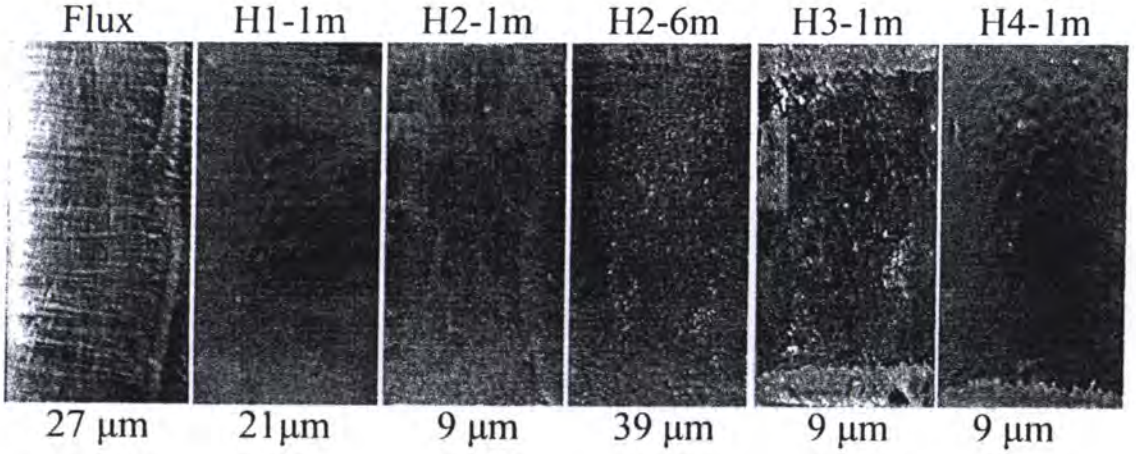
4.4 การศึกษาสมบัติความต้านทานการกัดกร่อน

4.4.1 การทดสอบความคงทนต่อละอองน้ำเกลือ (Salt spray testing)

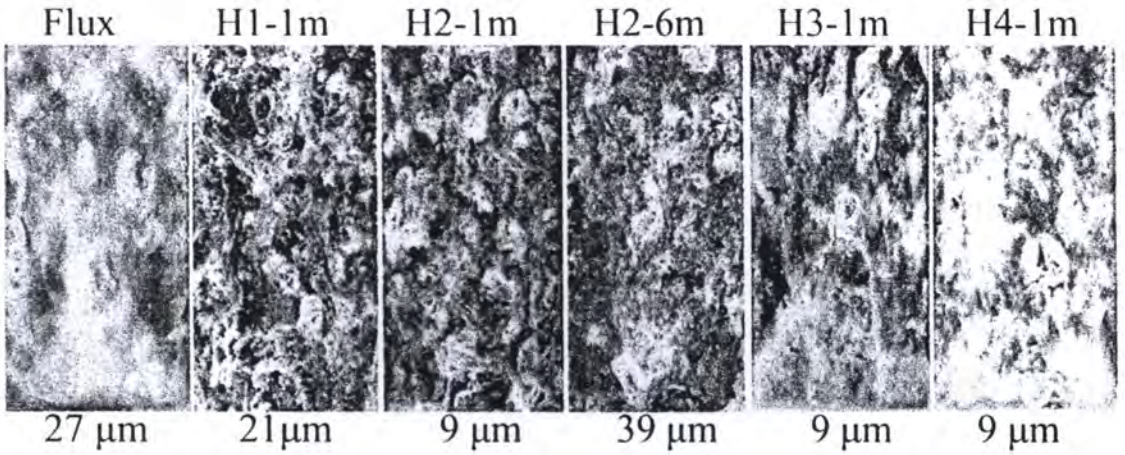
ในการทดสอบความคงทนต่อละอองน้ำเกลือ ชิ้นงานทดสอบทั้ง 6 สภาวะอันประกอบไปด้วย H1-1m, H2-1m, H3-1m, H4-1m, H2-6m และชิ้นงานเหล็กชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนโดยวิธีดั้งเดิม ถูกวางในแชมเบอร์ของเครื่องทดสอบโดยทำมุม 15-30 องศากับแนวตั้งตามมาตรฐานการทดสอบด้วยหมอกเกลือ ASTM B117 โดยใช้สารละลายเกลือที่มีความเข้มข้น 5%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

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

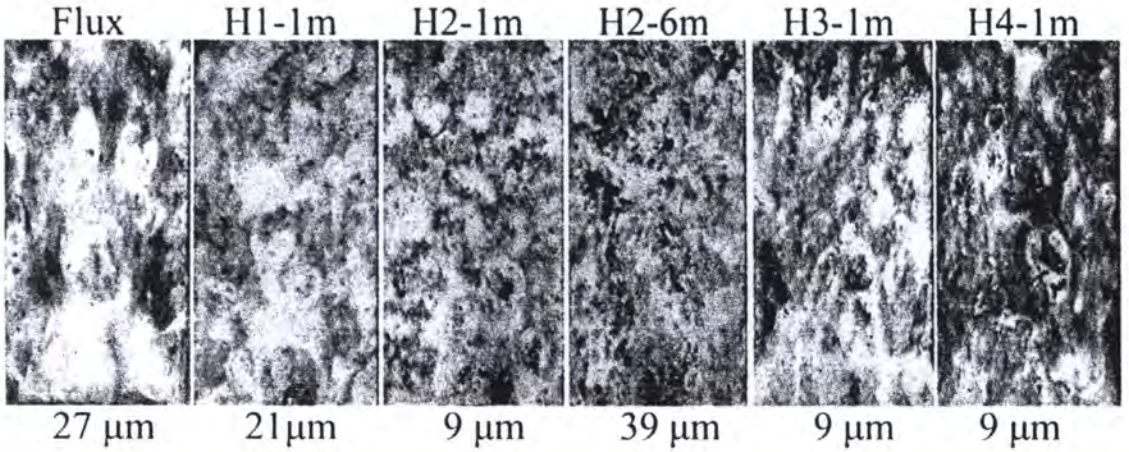
ก) 0 ชั่วโมง



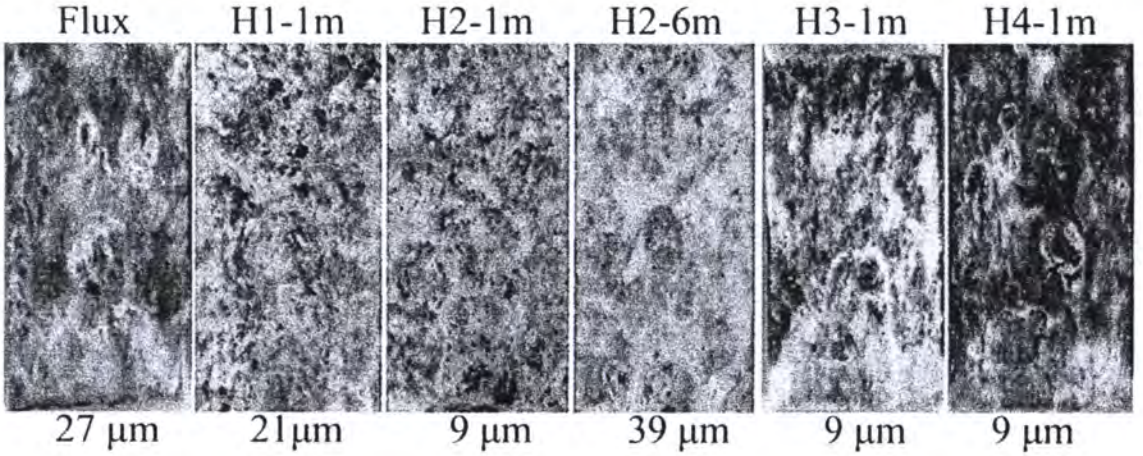
ข) 100 ชั่วโมง



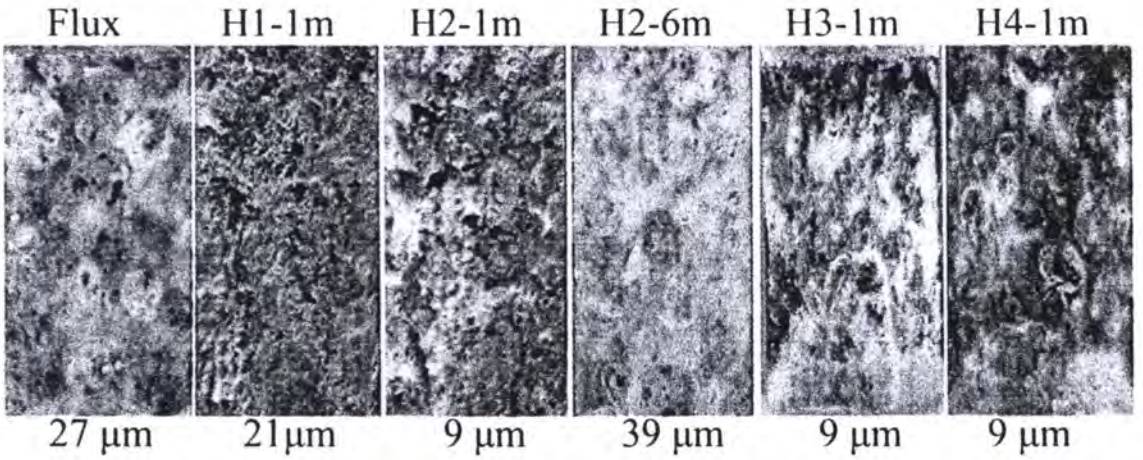
ค) 550 ชั่วโมง



ง) 1100 ชั่วโมง



จ) 1400 ชั่วโมง



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

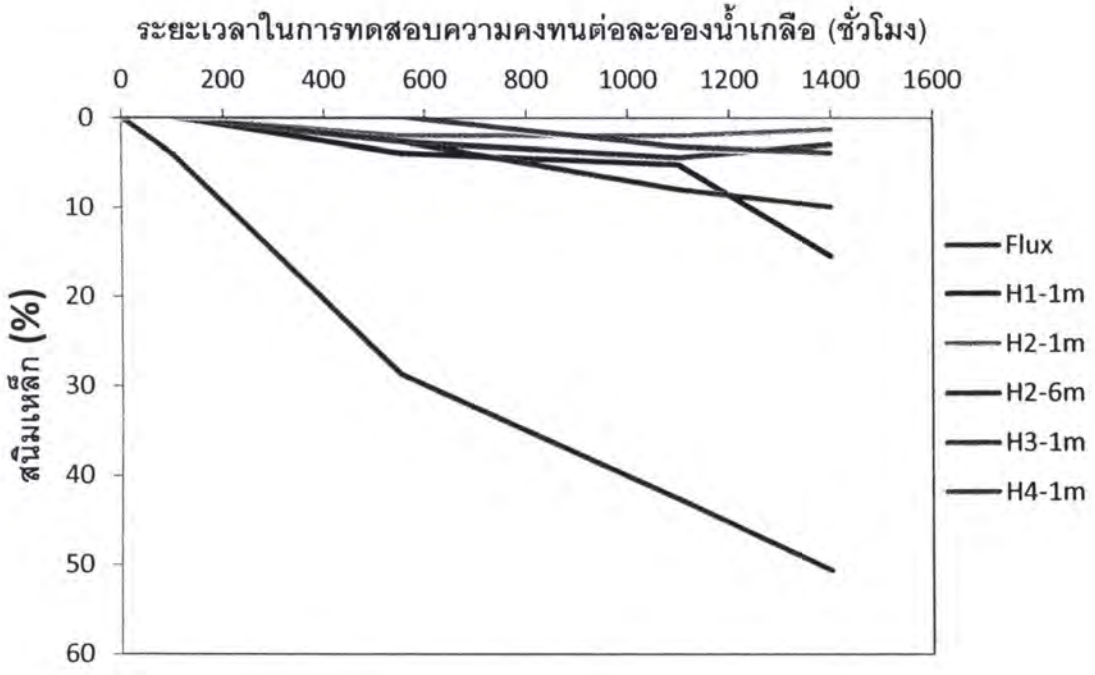
ผลการทดสอบความคงทนต่อละอองน้ำเกลือบ่งชี้ว่าถึงแม้ว่าชั้นเคลือบของเหล็กชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนโดยการเคลือบชั้นรองพื้นนิกเกิลด้วยไฟฟ้าจะมีความบางกว่าเหล็กชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนโดยวิธีดั้งเดิมมากกว่า 2 เท่าแต่สมบัติความต้านทานการกัดกร่อนจากการทดสอบความคงทนต่อละอองน้ำเกลือกลับมากกว่าถึง 2 เท่า ซึ่งส่วนหนึ่งเป็นผลจากการที่ชั้นเคลือบ intermediate ที่ประกอบด้วยสังกะสีและนิกเกิลนั้นมีความอัดแน่นมากกว่าทำให้สามารถทำหน้าที่เป็นตัวกีดขวางการแทรกซึมของไอออนที่ทำให้เกิดการกัดกร่อนรุนแรงเช่น Cl^- และ ClO^{4-} ในสภาวะแวดล้อมที่มีคลอไรด์สูง [32,33] แต่สำหรับในกรณีของเหล็กชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนโดยวิธีดั้งเดิมนั้นชั้นเคลือบเฟส ζ ถึงแม้ว่าจะมีความหนาที่มากแต่ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของเฟสนี้มีความเป็น โครงสร้างแบบคอลัมนาร์ (columnar structure) ซึ่งอิออนที่ส่งผลให้เกิดการกัดกร่อนสามารถแทรกซึมเข้าไปในโครงสร้างได้ง่าย สำหรับชิ้นงาน H1-1m และ H2-6m ซึ่งเป็นชิ้นงานที่ชั้นรองพื้นนิกเกิลเกิดการแพร่ออกไปสู่สังกะสีจนหมดและโครงสร้างจุลภาคมีลักษณะคล้ายชิ้นงานที่ผลิตโดยวิธีดั้งเดิมนั้นเห็นได้ชัดว่ายังมีความต้านทานต่อการกัดกร่อนมากกว่าเหล็กชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนโดยวิธีดั้งเดิมพอสมควรแม้ว่าเฟสที่เกิดขึ้นจะมีความคล้ายคลึงกันก็ตาม ซึ่งเป็นผลจากการที่มีนิกเกิลเป็นโลหะผสมในเฟส δ และ ζ อยู่ในโครงสร้างในปริมาณเล็กน้อย[34,35] อีกทั้งหากพิจารณาโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานทั้งสองชิ้นนี้มีเกรนที่ละเอียดกว่าและไม่สามารถแยกแต่ละชั้นเคลือบออกได้ด้วยตาเปล่าดังที่ได้กล่าวในหัวข้อที่แล้วจึงมีผลต่อการเป็นชั้นป้องกันมากกว่าชิ้นงานที่ผลิตโดยดั้งเดิมอีกด้วย

ดังนั้นความสัมพันธ์ระหว่างการเกิดสนิมแดงของเหล็กต่อระยะเวลาในการทดสอบความคงทนต่อละอองน้ำเกลือสามารถสรุปออกมาได้ดังกราฟในภาพที่ 4.23 ซึ่งสามารถแบ่งชิ้นงานออกได้ 3 กลุ่มคือ

1. ชิ้นงานเหล็กชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนโดยวิธีดั้งเดิมซึ่งเกิดการกัดกร่อนและปรากฏสนิมแดงของเหล็กขึ้นบนผิวของชิ้นงานอย่างต่อเนื่องและเมื่อสิ้นสุดการทดสอบที่ระยะเวลา 1400 ชั่วโมงนั้นเกิดสนิมแดงขึ้นกว่า 50% ของชิ้นงาน

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

3. กลุ่มชิ้นงานเหล็กชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนโดยการเคลือบชั้นรองพื้นนิกเกิลด้วยไฟฟ้าซึ่งแทบไม่เกิดสนิมแดงคือมีปริมาณเพียง 3% เท่านั้นและเกิดเฉพาะบริเวณที่ขอบของชิ้นงานทดสอบเท่านั้น



ภาพที่ 4.23 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของสนิมเหล็กต่อระยะเวลาในการทดสอบความคงทนต่อละอองน้ำเกลือของชิ้นงานเหล็กชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนโดยการเคลือบชั้นรองพื้นนิกเกิลด้วยไฟฟ้าและโดยวิธีดั้งเดิม

4.4.2 การทดสอบความต้านทานการกัดกร่อนโดยเทคนิกโพเทนชิโอไดนามิกส์ (Potentiodynamic)

ในการศึกษาส่วนนี้จะศึกษาพฤติกรรมการกัดกร่อนของชั้นเคลือบจากด้านบนของชิ้นงานที่เป็นสังกะสีบริสุทธิ์สู่ชั้นเคลือบที่อยู่ลึงลงไปด้านล่าง โดยเทคนิคโพเทนชิโอไดนามิกส์ (Potentiodynamic) และพลอตออกมาเป็นกราฟโพราไรเซชันแสดงถึงศักย์ไฟฟ้าและกระแสที่วัดได้ของชั้นเคลือบบริเวณนั้นๆ ซึ่งบ่งบอกความต้านทานการกัดกร่อนและอัตราในการกัดกร่อนเมื่อเกิดการกัดกร่อนขึ้น โดยในการทดสอบนี้ได้เลือกชิ้นงานเหล็กชุบสังกะสีที่มีความหนาของชั้นรองพื้นนิกเกิล 6 μm และทำการชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อน 1 นาที (H2-1m) เป็นตัวแทนของเหล็กชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนโดยการเคลือบชั้นรองพื้นนิกเกิลด้วยไฟฟ้าซึ่งชิ้นงาน H2-1m ที่เหมือนกันแต่ละชิ้นนี้ถูกเก็บไว้ในสารละลายเกลือที่มีความเข้มข้น 5% เช่นเดียวกับที่ใช้ในหัวข้อที่แล้วเป็นเวลา 1, 2 และ 3 สัปดาห์ และชิ้นงานที่ถูกเก็บไว้จนครบระยะเวลาดังกล่าวถูกนำมาทดสอบโพเทนชิโอไดนามิกส์ และกราฟแสดงเส้นโค้งโพลาไรเซชันที่ได้ของชิ้นงานทั้ง 3 ชิ้นนี้ถูกนำมาเปรียบเทียบกับกราฟแสดงเส้นโค้งโพลาไรเซชันของแผ่นเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ (กัดด้วยกรดก่อนทดสอบ) นิกเกิลชุบด้วยไฟฟ้า และสังกะสีชุบร้อนดังภาพที่ 4.24

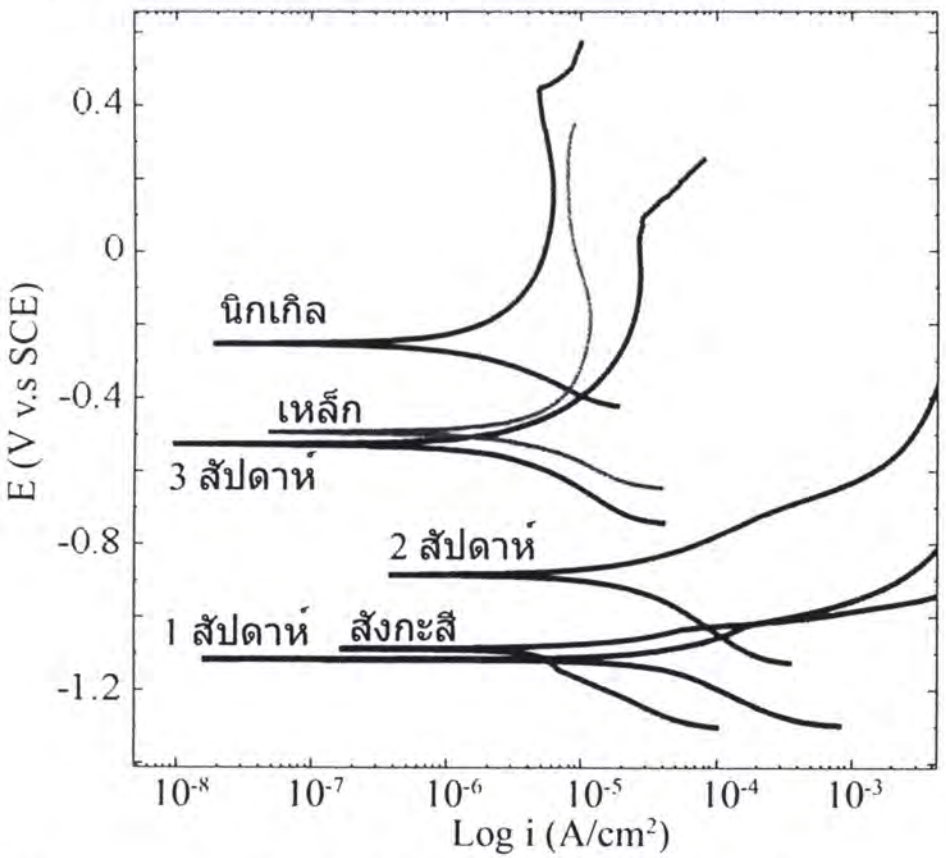
จากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มเวลาในการเก็บชิ้นงานในสารละลายเกลือส่งผลให้ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนของชิ้นงาน H2-1m เพิ่มขึ้นตามไปด้วย เริ่มจากชิ้นงานที่ถูกเก็บไว้เป็นเวลา 1 สัปดาห์เห็นได้ว่าค่าศักย์ไฟฟ้ายังคงไม่แตกต่างไปจากศักย์ไฟฟ้าของสังกะสีบริสุทธิ์ เพียงแต่มีค่ากระแสที่เพิ่มขึ้นแสดงให้เห็นว่าชิ้นงานนี้ยังคงเกิดการกัดกร่อนอยู่เพียงแค่บริเวณของชั้นเคลือบสังกะสีที่อยู่ลึกเข้าไปข้างใต้หรือถึงแค่บริเวณชั้นเคลือบ intermediate I เท่านั้น

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

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

การที่ชิ้นงานที่ถูกเก็บไว้ 3 สัปดาห์และผ่านการทดสอบโพเทนชิโอไดนามิกส์ ยังคงปราศจากสนิมแดงของเหล็ก ดังนั้นจึงสันนิษฐานได้ว่าการกัดกร่อนควรที่จะเกิดอยู่บริเวณระหว่างชั้นเคลือบ intermediate และชั้นรองพื้นนิกเกิลเท่านั้น

จากผลของกราฟแสดงเส้นโค้งโพลาไรเซชันจากการศึกษาในหัวข้อนี้ยังไม่สามารถระบุพฤติกรรมการกัดกร่อนของแต่ละชั้นเคลือบได้ชัดเจนแต่จากการพิจารณาในภาพรวมสามารถแสดงให้เห็นได้ว่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆตามระยะทางที่ลึกลงไปจากผิวชั้นเคลือบที่เป็นสังกะสีด้านบนสู่ผิวเหล็ก แต่อย่างไรก็ตามศักย์ไฟฟ้าเหล่านี้ยังคงต่ำกว่าศักย์ไฟฟ้าของนิกเกิลและเหล็กที่เป็นโลหะที่ต้องการจะป้องกันการกัดกร่อน และการที่ชั้นเคลือบด้านในมีศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนที่สูงกว่าชั้นเคลือบด้านนอกทำให้ชั้นเคลือบด้านนอกสามารถทำหน้าที่เป็นแซ็กคริฟิเชียลแอโนดป้องกันการกัดกร่อนแบบคาโทดิกให้กับชั้นเคลือบด้านในได้ ซึ่งสอดคล้องกับสมบัติความต้านทานการกัดกร่อนที่ดีเยี่ยมของชั้นเคลือบสังกะสี-นิกเกิลที่ผลิตจากการผลิตชั้นรองพื้นและผลจากการทดสอบความคงทนต่อละอองน้ำเกลือ ดังนั้นเพื่อที่จะอธิบายพฤติกรรมการกัดกร่อนของชั้นเคลือบแต่ละชั้นให้ชัดเจนยิ่งขึ้นจึงนำไปสู่การศึกษาในหัวข้อต่อไป



ภาพที่ 4.24 กราฟโพลาไรเซชันของชิ้นงานแผ่นเหล็กชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนโดยการเคลือบชั้นรองพื้นนิกเกิลด้วยไฟฟ้า H2-1m ที่ถูกเก็บไว้ในในสารละลายเกลือ 5% เป็นระยะเวลา 0-3 สัปดาห์ ด้วยเทคนิคโพเทนชิโอไดนามิกส์

ตารางที่ 4.5 ศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนและความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนของกราฟโพลาไรเซชันจากภาพที่ 4.24

ระยะเวลา (สัปดาห์)	E_{cor} (V v.s SCE)	I_{cor} x10^{-5} (A/cm^2)
0 (สังกะสี)	-1.10	0.43
1	-1.11	3.10
2	-0.88	2.17
3	-0.53	0.27

4.4.3 การทดสอบความต้านทานการกัดกร่อนของแต่ละชั้นเคลือบโดยเทคนิคกัลวาโนสแตติกและโพเทนชิโอไดนามิกส์ (Galvanostatic and Potentiodynamic)

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

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

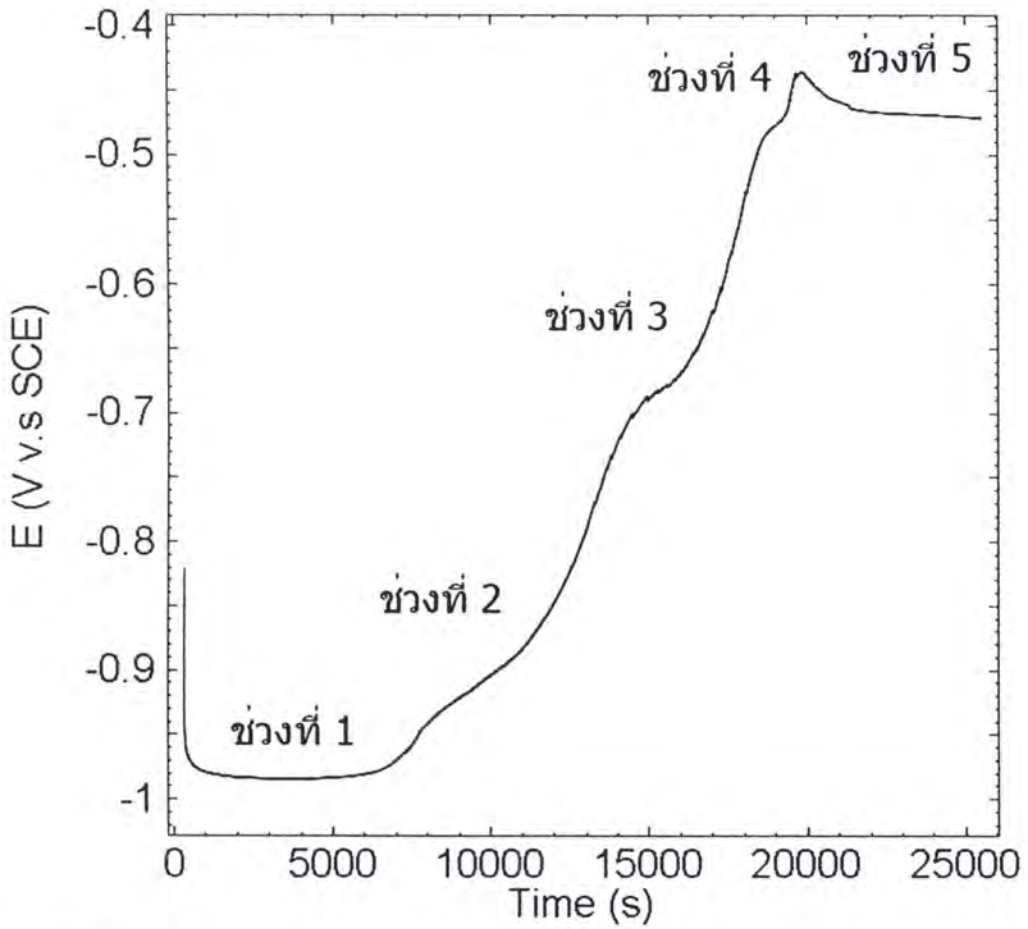
ในช่วง 7,000 วินาทีแรก ค่าศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นมีค่าเกือบคงที่ที่ประมาณ -0.99 V v.s SCE ซึ่งค่าศักย์ไฟฟ้านี้เป็นผลจากการให้กระแสคงที่ 3 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตรแก่ชิ้นงานและชั้นสังกะสีซึ่งเป็นชั้นเคลือบผิวชั้นแรกสุดถูกลอกออกให้ออกมาอยู่ในสารละลายทดสอบ

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

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

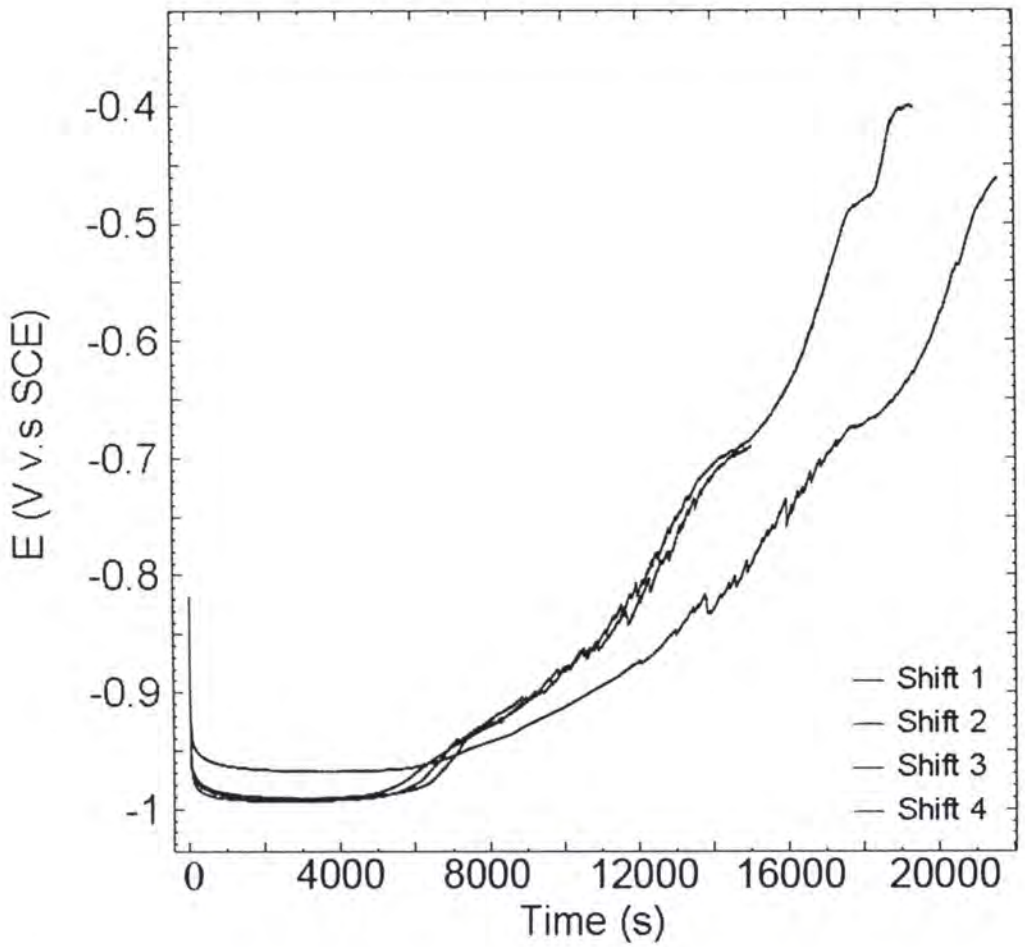
เกิดการเปลี่ยนแปลงศักย์ไฟฟ้าอีกครั้งหนึ่งจนเข้าสู่ช่วงที่ 4 ที่ระยะ 19,000 - 20,000 วินาที ศักย์ไฟฟ้าคงที่ที่ -0.47 V v.s SCE และมีช่วงค่อนข้างแคบจึงมีความเป็นไปได้ที่อาจมีชั้นเฟส Intermediate ที่สาม เกิดขึ้นเป็นชั้นเฟสที่มีความหนาค่อนข้างน้อยอีกหนึ่งชั้น

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



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

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



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

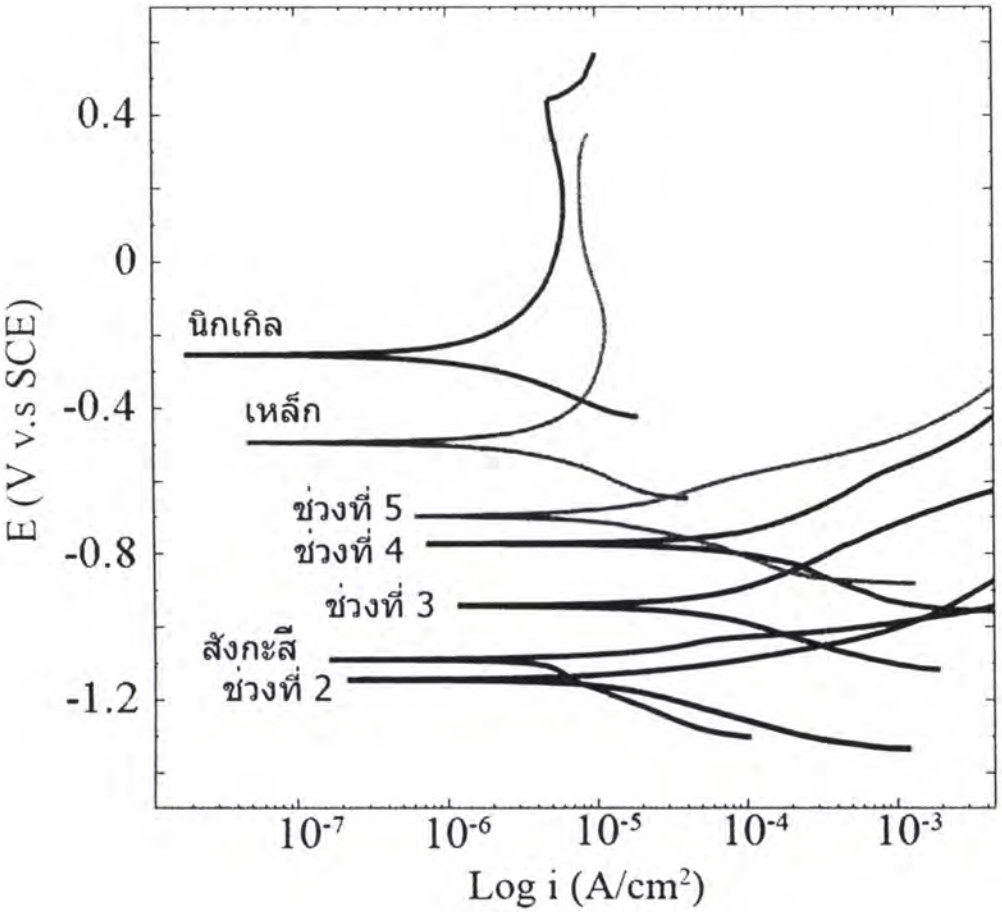
ภาพที่ 4.27 แสดงผลจากการทดสอบโพลาไรเซชันหลังจากชิ้นงานแต่ละชิ้นถูกลอกชั้นเคลือบออกทีละชั้น ทั้งนี้ได้ทำการทดสอบโพเทนชิโอไดนามิกส์กับแผ่นเหล็ก (กัดด้วยกรดก่อนทดสอบ) นิกเกิลซุบด้วยไฟฟ้า และสังกะสีจากการจุ่มร้อน เพื่อเปรียบเทียบค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นเช่นเดียวกับในหัวข้อที่แล้ว ผลที่ได้จากกราฟแสดงเส้นโค้งโพลาไรเซชันแสดงให้เห็นว่า ศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนของสังกะสีหรือชั้นเคลือบช่วงที่ 1 หรือบริเวณที่เป็นสังกะสีบริสุทธิ์นั้นมี

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

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

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

จากผลกราฟโพลาไรเซชันในหัวข้อนี้แสดงให้เห็นว่าชั้นเคลือบ intermediate II ที่อยู่ด้านนอกนั้นมีความสามารถในการเป็นแซ็กคริฟิเชียลแอโนด ให้แก่ชั้นเคลือบ intermediate I ที่อยู่ด้านในและค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนของชั้นเคลือบ intermediate I ที่อยู่ด้านในที่เกิดขึ้นก็ยังคงมีค่าต่ำกว่าค่าศักย์ไฟฟ้าของนิกเกิลและเหล็กที่เป็นโลหะที่ต้องการป้องกันการกัดกร่อน ดังนั้นจึงหมายความว่าความสามารถในการเป็นแซ็กคริฟิเชียลแอโนดของชั้นเคลือบให้กับชิ้นงานเหล็กยังคงมีอยู่ถึงแม้ศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนจะสูงมากเมื่อเทียบกับกรณีของสังกะสี



ภาพที่ 4.27 กราฟโพลาไรเซชันของชิ้นงานแผ่นเหล็กชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อนโดยการเคลือบชั้นรองพื้นนิกเกิลด้วยไฟฟ้า H2-1m ด้วยเทคนิคโพเทนชิโอไดนามิกส์ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 5% โดยน้ำหนัก (ดูภาพที่ 4.26 ประกอบ)

ตารางที่ 4.6 ศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนและความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนของกราฟโพลาไรเซชันจากภาพที่ 4.27

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