

ผลของการทำไนตรายดิงแบบก๊าซ, อ่างเกลือ และพลาสมา
ต่อความต้านทานการกัดกร่อนของเหล็กกล้าเครื่องมือทำงานร้อน H13



นายธนกร เลิศจิระกุล

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CHULALONGKORN UNIVERSITY

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2556

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)

เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

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 University Graduate School.

EFFECTS OF GASEOUS, SALT BATH AND PLASMA NITRIDING
ON CORROSION RESISTANCE OF HOT WORK TOOL STEEL H13



Mr. Tanakorn Lertjirakul

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CHULALONGKORN UNIVERSITY

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 2013

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ผลของการทำไนตรรายดิงแบบก๊าซ, อ่างเกลือ และ พลาสมาต่อความต้านทานการกัดกร่อนของเหล็กกล้า เครื่องมือทำงานร้อน H13
โดย	นายธนกร เลิศจิระกุล
สาขาวิชา	วิศวกรรมโลหการ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปฐมา วิสุทธิพิทักษ์กุล
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ยุทธนันท์ บุญยงมณีรัตน์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.บัณฑิต เอื้ออาภรณ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.ประสงค์ ศรีเจริญชัย)
.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปฐมา วิสุทธิพิทักษ์กุล)
.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ยุทธนันท์ บุญยงมณีรัตน์)
.....กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.กอบบุญ หล่อทองคำ)
.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ดร.สิริณี ไทยวัฒนา)

ธนกร เลิศจิระกุล : ผลของการทำไนตรายดิงแบบก๊าซ, อ่างเกลือ และพลาสมาต่อความต้านทานการกัดกร่อนของเหล็กกล้าเครื่องมือทำงานร้อน H13. (EFFECTS OF GASEOUS, SALT BATH AND PLASMA NITRIDING ON CORROSION RESISTANCE OF HOT WORK TOOL STEEL H13) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผศ. ดร.ปฐมา วิสุทธิพิทักษ์กุล, อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม: ผศ. ดร.ยุทธนันท์ บุญยมณีรัตน์, 152 หน้า.

งานวิจัยนี้ ศึกษาเกี่ยวกับผลกระทบต่อความต้านทานการกัดกร่อนของเหล็กกล้าเครื่องมือทำงานร้อน H13 ที่ผ่านการปรับปรุงผิวด้วยการทำไนตรายดิงแบบก๊าซ อ่างเกลือ และพลาสมา โดยใช้สภาวะเดียวกับที่ใช้โดยทั่วไปในอุตสาหกรรมไทย พบว่า H13 ที่ผ่านการทำไนตรายดิงแบบก๊าซ (AG) อ่างเกลือ (AS) และพลาสมา (AP) มีความแข็งผิวเพิ่มขึ้นจาก 709 HV_{0.05} เป็น 1039 1215 และ 1410 HV_{0.05} ตามลำดับ เนื่องจากเกิดสารประกอบ Fe₂₋₃N ชั้นที่ผิว จากโครงสร้างจุลภาคภาคตัดขวางพบว่าชิ้นงานแบ่งออกได้เป็นสองกลุ่ม คือ กลุ่มที่มีชั้นสารประกอบที่ผิวชิ้นงาน (AG, AS) และกลุ่มที่ไม่มีชั้นสารประกอบที่ผิวชิ้นงาน (AP) เมื่อทดสอบสมบัติด้านการกัดกร่อนชิ้นงานทุกกลุ่มด้วยเทคนิคโพเทนชิโอไดนามิกส์ ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ความเข้มข้นร้อยละ 0.9 โดยมวลต่อปริมาตร ที่อุณหภูมิห้อง พบว่ากลุ่มชิ้นงานที่มีชั้นสารประกอบ (AG, AS) มีค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนลดลงมาก มีอัตราการกัดกร่อนสูงชันมาก เมื่อเทียบกับ H13 (AR) และเกิดช่วงแพลตฟอของชั้นสารประกอบขึ้นในเส้นโค้งโพลาริเซชัน จากภาพถ่ายพื้นผิวชิ้นงานภายหลังการทดสอบพบว่า เกิดการกัดกร่อนบริเวณซอกซึ่งสอดคล้องกับผิวชิ้นงานภายหลังการปรับปรุงผิวที่มีรูพรุนระดับจุลภาคอยู่จำนวนมาก ในขณะที่กลุ่มชิ้นงานที่ไม่มีชั้นสารประกอบ (AP) มีค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนลดลงเล็กน้อย มีอัตราการกัดกร่อนที่สูงชันเล็กน้อย เมื่อเทียบกับ H13 (AR) และไม่พบช่วงแพลตฟอ โดยจากภาพถ่ายพื้นผิวชิ้นงานภายหลังการทดสอบพบว่า เกิดการกัดกร่อนแบบสม่ำเสมอ แต่เมื่อทำการทดสอบด้วยเทคนิคโพเทนชิโอสแตติก ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ความเข้มข้นร้อยละ 0.9 โดยมวลต่อปริมาตร ที่อุณหภูมิห้อง โดยตั้งค่าศักย์ไฟฟ้าทดสอบที่ -300 และ 0 มิลลิโวลต์ ซึ่งเป็นช่วงปฏิกิริยาแอนอดิกเป็นเวลา 5 ชั่วโมง 30 นาที พบว่ากลุ่มชิ้นงานที่มีชั้นสารประกอบที่มีความต้านทานสูงอยู่ที่ผิว (AG, AS) มีกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนที่ต่ำกว่ากลุ่มชิ้นงานที่ไม่มีชั้นสารประกอบ (AP)

จากนั้น ศึกษาความเป็นไปได้ในการปรับปรุงกระบวนการให้สามารถเพิ่มความแข็งผิวและความต้านทานการกัดกร่อนของ H13 โดยเพิ่มการชุบโครเมียมด้วยไฟฟ้า และการสูญเสียคาร์บอนที่ผิวประกอบด้วยกลุ่ม H13 ที่ชุบโครเมียมด้วยไฟฟ้าตามด้วยทำไนตรายดิงแบบพลาสมา (EP) H13 ที่ทำไนตรายดิงแบบพลาสมาตามด้วยชุบโครเมียมด้วยไฟฟ้า (PE) H13 ที่สูญเสียคาร์บอนที่ผิวตามด้วยทำไนตรายดิงแบบพลาสมา (DP) และ H13 ที่สูญเสียคาร์บอนที่ผิวตามด้วยทำไนตรายดิงแบบพลาสมาตามด้วยชุบโครเมียมด้วยไฟฟ้า (DPE) จากผลวิเคราะห์และทดสอบพบว่า H13 ที่ทำไนตรายดิงแบบพลาสมาตามด้วยชุบโครเมียมด้วยไฟฟ้า (PE) ทำให้ความแข็งผิวเพิ่มขึ้น และความต้านทานการกัดกร่อนลดลงเล็กน้อย

ภาควิชา วิศวกรรมโลหการ

ลายมือชื่อนิสิต

สาขาวิชา วิศวกรรมโลหการ

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ปีการศึกษา 2556

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

5370249121 : MAJOR METALLURGICAL ENGINEERING

KEYWORDS: H13 / NITRIDING / ELECTROPLATING / DECARBURIZING / CORROSION RESISTANCE

TANAKORN LERTJIRAKUL: EFFECTS OF GASEOUS, SALT BATH AND PLASMA NITRIDING ON CORROSION RESISTANCE OF HOT WORK TOOL STEEL H13. ADVISOR: ASST. PROF. PATAMA VISUTTIPITUKUL, Ph.D., CO-ADVISOR: ASST. PROF. YUTTANANT BOONYONGMANEERAT, Ph.D., 152 pp.

This research aims to study the effect of corrosion resistance in hot work tool steel H13 after applying gaseous, salt bath, and plasma nitriding surface modification under the same condition as generally employed in Thai industries. It was found that H13 after treatment of gaseous (AG), salt bath (AS), and plasma (AP) nitriding had improvement in surface hardness from 709 HV_{0.05} to 1039, 1215, and 1410 HV_{0.05} respectively, which resulted from the formation of Fe₂₋₃N on the surface. From the cross-sectional microstructure, specimens could be divided into 2 groups: the group with compound layer on the surface (AG, AS) and the group without compound layer (AP) on the surface. From the corrosion resistance tested by potentiodynamics technique in 0.9 %m/v NaCl solution under room temperature, it was found that the group with compound layer (AG, AS) had low corrosion potential and high corrosion rate, as compared to the H13 without nitriding (AR). The passive region could be observed in the polarization curve. The surface images after the test revealed the crevice corrosion, which corresponded to the specimens after the surface treatment that had micropores. On the other hand, the group without compound layer (AP) showed small reduction of corrosion potential and slight increase of corrosion rate compared to the H13. The passive region could not be identified. The surface images after the test showed uniform corrosion. However, the potentiostatics technique test in 0.9 %m/v NaCl solution under room temperature tested for 5 hours 30 minutes and the anodic potential of -300 and 0 mV which tested only anodic reaction, revealed that the group with high corrosion resistance compound layer (AG, AS) had lower corrosion current than those without compound layer (AP).

Subsequently, the possibility of improving hardness and corrosion resistance of H13 was explored by implementing chromium electroplating and surface decarburizing processes. The groups obtained were H13 with chromium electroplating followed by plasma nitriding (EP), H13 with plasma nitriding followed by chromium electroplating (PE), H13 with decarburizing followed by plasma nitriding (DP), and H13 with decarburizing followed by plasma nitriding and followed by chromium electroplating (DPE). From the characterizations and discussions, it can be concluded that H13 with plasma nitriding followed by chromium electroplating (PE) could gain surface hardness with minimal reduction in corrosion resistance.

Department: Metallurgical Engineering

Student's Signature

Field of Study: Metallurgical Engineering

Advisor's Signature

Academic Year: 2013

Co-Advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

กระผมมีความยินดีอย่างยิ่งที่วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงอย่างสมบูรณ์ โดยในระหว่างที่ได้ศึกษาในระดับปริญญาโทมาบัดนี้ กระผมได้พบกับบุคคลและหน่วยงานหลายส่วนที่คอยให้ความรู้ ให้ความช่วยเหลือ ให้คำแนะนำ และเป็นกำลังใจที่ดีเสมอมา โดยกระผมรู้สึกซาบซึ้งใจในการกระทำ และสำนึกในความหวังดีของบุคคลและหน่วยงานเหล่านั้น ซึ่งประกอบด้วย

กระผมขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปฐมา วิสุทธิพิทักษ์กุล (อาจารย์ที่ปรึกษา) และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ยุทธนันท์ บุญยงมณีรัตน์ (อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม) ผู้ให้ความรู้ แนวคิด วิเคราะห์ วิธีการดำเนินงานวิจัย ตลอดจนเป็นแบบอย่างที่ดีสำหรับการทำงาน of กระผม

กระผมขอขอบพระคุณ คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่าน อันประกอบด้วย รองศาสตราจารย์ ดร.ประสงค์ ศรีเจริญชัย, รองศาสตราจารย์ ดร.กอบบุญ หล่อทองคำ และ ดร.สิริณี ไทยวัฒนา ผู้ซึ่งยินดีรับฟังเนื้อหาวิทยานิพนธ์และแสดงความคิดเห็นที่มีคุณค่าต่อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

กระผมขอขอบพระคุณ คุณวณภรณ์ คณิตนันท์รักษ์ และบริษัท ไทยปาร์คเกอร์โรซิง จำกัด ผู้ให้การสนับสนุนด้านการทำในตารางดิงแบบต่างๆ ตลอดจนให้ความอนุเคราะห์เครื่องมือทดสอบ

กระผมขอขอบพระคุณ คุณกนกวรรณ แสงเกียรติยุทธ จากสถาบันวิจัยโลหะและวัสดุ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (MMRI) ผู้สอนวิธีการใช้เครื่องมือทดสอบด้านการกัดกร่อน

กระผมขอขอบพระคุณ ศูนย์วิจัยทันตวัสดุศาสตร์ คณะทันตแพทยศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ผู้ให้ความอนุเคราะห์ในการบริการเครื่องมือทดสอบ

กระผมขอขอบพระคุณ ดร.เรืองเดช ธงศรี และ คุณมนภาส มรกฏจินดา ผู้ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เตาไฮโดรเจนที่ห้องปฏิบัติการเทคโนโลยียานยนต์ และ คุณณัฐกร กิรติไพบูลย์ ผู้ให้บริการ Glow Discharge Optical Emission Spectrometer ที่ห้องปฏิบัติการวิเคราะห์สารปนเปื้อนในวัสดุ ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC)

กระผมขอขอบพระคุณ คณาจารย์และเจ้าหน้าที่ประจำภาควิชาวิศวกรรมโลหการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ผู้ประสาวิชา-แนวคิดต่างๆ ตลอดจนให้คำแนะนำในการดำเนินชีวิตที่ดี

กระผมขอขอบคุณ นายชัยวัฒน์ ตั้งพัฒน์เจริญ, นายธนพัฒน์ แก้วมณีกุล, น.ส.อมฤตา อิศริยภัทร์, น.ส.ณัฐนิชา เต็งอำนาจ, น.ส.เพ็ญภัทร์ อารี, น.ส.กุลนรี ฤทธิ์แดง, นายหลักชัย ชันธณภา, น.ส.กิงเพชร อัมมาอภินันท์, น.ส.ธนาภา แซ่อึ้ง และนายณัฐพจน์ เกษมโกเมศ นิสิตจากภาควิชาวิศวกรรมโลหการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ผู้ช่วยเติมเต็มวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

กระผมขอกราบขอบพระคุณ บิดา-มารดา และครอบครัวของกระผมที่ให้การสนับสนุนในทุกด้าน ผู้ซึ่งให้กำเนิดชีวิต ให้ความรัก-ความเอาใจใส่ และให้การศึกษาแก่กระผม

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฎ
สารบัญภาพ.....	ฏ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 วรรณกรรมปริทัศน์.....	4
2.1 เหล็กกล้าเครื่องมือทำงานร้อน AISI H13 (Hot Work Tool Steel AISI H13) [1; 2].....	4
2.2 กระบวนการไนตรายดิง (Nitriding Processes) [2; 6].....	7
2.2.1 กระบวนการไนตรายดิงแบบก๊าซ (Gaseous Nitriding).....	9
2.2.2 กระบวนการไนตรายดิงแบบอ่างเกลือ (Salt Bath Nitriding).....	11
2.2.3 กระบวนการไนตรายดิงแบบพลาสมา (Plasma Nitriding).....	13
2.2.4 สมบัติและโครงสร้างจุลภาคที่ได้ภายหลังการทำไนตรายดิง.....	18
2.3 การชุบโครเมียมด้วยไฟฟ้า (Chromium Electroplating) [7-10].....	21
2.4 การสูญเสียคาร์บอนที่ผิว (Surface Decarburization) [11-15].....	25
2.5 ความต้านทานการกัดกร่อน (Corrosion Resistance) [17-21].....	30
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	39
3.1 วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย.....	39
3.1.1 วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมชิ้นงานก่อนการปรับปรุงผิวชิ้นงาน.....	39
3.1.2 วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการปรับปรุงผิวชิ้นงานด้วยการทำไนตรายดิงแบบต่างๆ.....	39
3.1.3 วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการปรับปรุงผิวชิ้นงานด้วยการชุบโครเมียมด้วยไฟฟ้า.....	40
3.1.4 วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการปรับปรุงผิวชิ้นงานด้วยการสูญเสียคาร์บอนที่ผิว.....	40

3.1.5	วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมชิ้นงานเพื่อวิเคราะห์สมบัติต่างๆ ของชิ้นงาน.....	40
3.2	เครื่องมือทดสอบที่ใช้ในการวิจัย.....	40
3.3	วิธีดำเนินการวิจัย	41
3.3.1	การเตรียมชิ้นงานก่อนทำการปรับปรุงผิวแบบต่างๆ.....	41
3.3.2	การปรับปรุงผิวชิ้นงานด้วยกระบวนการไนตรายดิงแบบต่างๆ.....	42
3.3.3	การปรับปรุงผิวชิ้นงานด้วยการชุบโครเมียมด้วยไฟฟ้า.....	43
3.3.4	การปรับปรุงผิวชิ้นงานด้วยการสูญเสียคาร์บอนที่ผิว	44
3.3.5	การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคและสารประกอบที่เกิดขึ้นที่ผิวของชิ้นงาน	45
3.3.6	การทดสอบหาความแข็งผิวและความลึกชั้นผิวแข็ง	45
3.3.7	การทดสอบหากระจายตัวของธาตุที่มีความลึกต่างๆ จากผิว.....	45
3.3.8	การทดสอบหาความขรุขระผิว	45
3.3.9	การทดสอบหาความต้านทานการกัดกร่อน.....	45
บทที่ 4	ผลการทดลองและการอภิปราย	47
4.1	กลุ่มที่ 1 กลุ่มชิ้นงานเหล็กกล้า H13 ที่ผ่านการทำไนตรายดิงแบบต่างๆ	48
4.1.1	การหาคุณลักษณะทางผิว (Surface Characterizations).....	48
4.1.1.1	โครงสร้างมหภาค (Macrostructure).....	48
4.1.1.2	โครงสร้างจุลภาค (Microstructure)	49
4.1.1.3	ความแข็ง (Hardness).....	51
4.1.1.4	เฟสและสารประกอบที่เกิดขึ้น.....	52
4.1.2	ความต้านทานการกัดกร่อน (Corrosion Resistance).....	54
4.1.2.1	เทคนิคโพเทนชิโอดนามิกส์ (Potentiodynamics Technique).....	54
4.1.2.2	โครงสร้างมหภาค/จุลภาคภายหลังการทดสอบโดยเทคนิคโพเทนชิโอดนามิกส์.....	57
4.1.2.3	ศึกษาฟิล์มแพสซีฟที่เกิดขึ้นในการทดสอบโดยเทคนิคโพเทนชิโอดนามิกส์ของชิ้นงาน H13 ที่ทำไนตรายดิงแบบก๊าซและอ่างเกลือ	61
4.1.2.4	เทคนิคโพเทนชิโอสแตติก (Potentiostatics Technique).....	64
4.1.3	ความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติด้านการกัดกร่อนกับสมบัติทางพื้นผิวของกลุ่มชิ้นงานเหล็กกล้า H13 ที่ผ่านการทำไนตรายดิงแบบต่างๆ.....	71

4.2	กลุ่มที่ 2	กลุ่มชิ้นงานเหล็กกล้า H13 ที่ผ่านการชุบโครเมียมร่วมกับการทำไนตรายดิงแบบพลาสมา.....	73
4.2.1		การหาคุณลักษณะทางผิว (Surface Characterizations).....	73
4.2.1.1		โครงสร้างมหภาค (Macrostructure).....	73
4.2.1.2		โครงสร้างจุลภาค (Microstructure).....	74
4.2.1.3		ความแข็ง (Hardness).....	76
4.2.1.4		การกระจายตัวของธาตุที่ความลึกต่างๆ จากผิวของชิ้นงาน H13 ที่ผ่านการชุบโครเมียมร่วมกับการทำไนตรายดิงแบบพลาสมา.....	77
4.2.1.5		เฟสและสารประกอบที่เกิดขึ้น.....	78
4.2.2		ความต้านทานการกัดกร่อน (Corrosion Resistance).....	79
4.2.2.1		เทคนิคโพเทนชิโอดนามิกส์ (Potentiodynamics Technique).....	79
4.2.2.2		โครงสร้างมหภาค/จุลภาคภายหลังการทดสอบโดยเทคนิคโพเทนชิโอดนามิกส์.....	83
4.2.2.3		เทคนิคโพเทนชิโอสแตติก (Potentiostatics Technique).....	86
4.2.3		ความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติด้านการกัดกร่อนกับสมบัติทางพื้นผิวของกลุ่มชิ้นงาน H13 ที่ผ่านการชุบโครเมียมร่วมกับการทำไนตรายดิงแบบพลาสมา.....	92
4.3	กลุ่มที่ 3	กลุ่มชิ้นงานเหล็กกล้า H13 ที่ผ่านการสูญเสียคาร์บอนที่ผิวก่อนทำการปรับปรุงผิว.....	94
4.3.1		การหาคุณลักษณะทางผิว (Surface Characterizations).....	94
4.3.1.1		โครงสร้างมหภาค (Macrostructure).....	94
4.3.1.2		โครงสร้างจุลภาค (Microstructure).....	95
4.3.1.3		ศึกษาการเกิดบริเวณไนตรายด์ที่ผิวของชิ้นงานในบางบริเวณ.....	97
4.3.1.4		ความแข็ง (Hardness).....	98
4.3.1.5		เฟสและสารประกอบที่เกิดขึ้น.....	99
4.3.2		ความต้านทานการกัดกร่อน (Corrosion Resistance).....	100
4.3.2.1		เทคนิคโพเทนชิโอดนามิกส์ (Potentiodynamics Technique).....	100
4.3.2.2		โครงสร้างมหภาค/จุลภาคภายหลังการทดสอบโดยเทคนิคโพเทนชิโอดนามิกส์.....	104
4.3.2.3		เทคนิคโพเทนชิโอสแตติก (Potentiostatics Technique).....	107

4.3.3 ความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติด้านการกัดกร่อนกับสมบัติทางพื้นผิวของกลุ่มชิ้นงาน H13 ที่ผ่านการสูญเสียคาร์บอนที่ผิวก่อนทำการปรับปรุงผิว.....	113
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง และ ข้อเสนอแนะ	114
รายการอ้างอิง.....	116
ภาคผนวก.....	118
ภาคผนวก ก การหามวลสมมูล (Equivalent Weight) ของ H13.....	119
ภาคผนวก ข การวัดความแข็งผิวแบบไมโครวิกเกอร์	120
ภาคผนวก ค เปรียบเทียบความแข็งผิวแบบไมโครวิกเกอร์	129
ภาคผนวก ง ผลการทดสอบการกัดกร่อนโดยเทคนิคโพเทนชิโอดนามิกส์	130
ภาคผนวก จ เปรียบเทียบผลการทดสอบการกัดกร่อนโดยเทคนิคโพเทนชิโอดนามิกส์.....	135
ภาคผนวก ฉ วิธีการประมาณนอกค่าทาเฟล (Tafel Extrapolation).....	137
ภาคผนวก ช เปรียบเทียบผลการทดสอบการกัดกร่อนโดยเทคนิคโพเทนชิโอสแตติก ทดสอบโดยใช้ ศักย์ไฟฟ้าคงที่ เท่ากับ -300 mV, Ag-AgCl เป็นเวลา 5.5 ชั่วโมง	139
ภาคผนวก ซ เปรียบเทียบผลการทดสอบการกัดกร่อนโดยเทคนิคโพเทนชิโอสแตติก ทดสอบโดยใช้ ศักย์ไฟฟ้าคงที่ เท่ากับ 0 mV, Ag-AgCl เป็นเวลา 5.5 ชั่วโมง.....	144
ภาคผนวก ฌ ความขรุขระผิวของชิ้นงานกลุ่มต่างๆ.....	149
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	152

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1 ชื่อเกรดเทียบเท่าของเหล็กกล้าเครื่องมือทำงานร้อน H13 เทียบกับ ระบบมาตรฐาน ของชาติต่างๆ.....	4
ตารางที่ 2.2 ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าเครื่องมือทำงานร้อน H13.....	4
ตารางที่ 2.3 แสดงสมบัติทางกายภาพของเหล็กกล้าเครื่องมือทำงานร้อน H13.....	5
ตารางที่ 2.4 แสดงสมบัติทางความร้อนของเหล็กกล้าเครื่องมือทำงานร้อน H13.....	5
ตารางที่ 2.5 แสดงสมบัติทางกลของเหล็กกล้าเครื่องมือทำงานร้อน H13.....	6
ตารางที่ 2.6 วิธีการทดลองการกัดกร่อนด้วยเทคนิคทางเคมีไฟฟ้าแบบต่างๆ.....	32
ตารางที่ 2.7 แสดงค่าคงที่และหน่วยที่ใช้หาอัตราการกัดกร่อน.....	35
ตารางที่ 2.8 แสดงการเปรียบเทียบค่าอัตราการกัดกร่อนในหน่วยต่างๆ ของเหล็ก.....	35
ตารางที่ 2.9 แสดงพฤติกรรมการกัดกร่อนของชิ้นงานที่ผ่านการทำไนตรายดิงที่อุณหภูมิ และเวลา ในการทำไนตรายดิงแบบพลาสมาที่ต่างกัน.....	36
ตารางที่ 4.1 แสดงความแข็งของเฟสสีดำและเฟสสีเทาที่เกิดขึ้นที่ผิวของชิ้นงานที่ผ่านการสูญเสีย คาร์บอนที่ผิว ตามด้วยการทำไนตรายดิงแบบพลาสมา.....	97

สารบัญภาพ

	หน้า
ภาพที่ 2.1 กระบวนการผลิตและอบชุบเหล็กกล้าเครื่องมือทำงานร้อน H13	5
ภาพที่ 2.2 แผนภูมิสมดุลระหว่างเหล็กกับไนโตรเจน.....	8
ภาพที่ 2.3 ผลของการเติมธาตุผสมต่อความแข็งภายหลังการทำไนตรายดิง	8
ภาพที่ 2.4 ภาพร่างของเตาสำหรับทำไนตรายดิงแบบก๊าซ	10
ภาพที่ 2.5 แบบจำลองของการแพร่แบบแทรกที่ของอะตอมไนโตรเจนซึ่งเกิดจากการแตกตัวของ ก๊าซแอมโมเนียในกระบวนการไนตรายดิงแบบก๊าซ.....	11
ภาพที่ 2.6 ลักษณะของเตาแบบต่างๆ สำหรับทำไนตรายดิงแบบอ่างเกลือ	13
ภาพที่ 2.7 ภาพร่างของเตาสำหรับทำไนตรายดิงแบบพลาสมา.....	14
ภาพที่ 2.8 แสดงผลของความดันต่อการเกิดโกลดิสชาร์ต โดยมีการจ่ายกระแสไฟฟ้าระหว่างขั้วทั้ง สองในท่อแก้วปิดที่บรรจุก๊าซไว้ภายใน	15
ภาพที่ 2.9 เส้นโค้งพาสเชน (Paschen curve) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้ากับค่า กระแสไฟฟ้า ส่งผลให้เกิดปรากฏการณ์โกลดิสชาร์ต (glow discharge) แบบต่างๆ.....	16
ภาพที่ 2.10 แบบจำลองโคเอลเบล (Koelbel's model) แสดงกลไกการเกิดโกลดิสชาร์ต ใน กระบวนการไนตรายดิงแบบพลาสมา	17
ภาพที่ 2.11 จำลองการเกิดนิวเคลียสของเฟส γ' และเฟส ϵ บนผิวของเหล็กเมื่อทำไนตรายดิง	19
ภาพที่ 2.12 แสดงชั้นผิวแข็งไนตรายดิงที่ประกอบด้วยบริเวณต่างๆ	19
ภาพที่ 2.13 แสดงอุปกรณ์สำหรับการชุบโลหะด้วยไฟฟ้ากระแสตรง	22
ภาพที่ 2.14 แสดงอุปกรณ์ชุบทองแดงด้วยไฟฟ้า โดยใช้ขั้วแอโนดแบบกันกร่อน	23
ภาพที่ 2.15 แสดงอุปกรณ์การชุบโครเมียมด้วยไฟฟ้า โดยใช้แอโนดแบบถาวร คือ แท่งตะกั่ว.....	25
ภาพที่ 2.16 แผนภูมิสมดุลระหว่างเหล็กกับคาร์บอนอธิบายการสูญเสียคาร์บอนที่ผิว	27
ภาพที่ 2.17 แผนภาพแสดงการสูญเสียคาร์บอนที่ผิวส่งผลต่อความแข็งจากการเกิดเฟสที่ต่างกัน....	27
ภาพที่ 2.18 ผลจากการสูญเสียคาร์บอนที่ผิวส่งผลต่อการกระจายตัวของความเค้นตกค้าง (residual stress distribution) ในชั้นสูญเสียคาร์บอน.....	28
ภาพที่ 2.19 กราฟของ Stansel แสดงสมดุลที่เกิดจากอัตราส่วนของก๊าซ $\text{CH}_4:\text{H}_2$ $\text{CO}_2:\text{CO}$ และ $\text{H}_2\text{O}:\text{H}_2$ ที่อุณหภูมิต่างๆ.....	28
ภาพที่ 2.20 กราฟของ Schenk แสดงสมดุลของก๊าซไฮโดรเจน (H_2) และก๊าซมีเทน (CH_4).....	29
ภาพที่ 2.21 แสดงโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แสง กำลังขยาย 100 เท่า ของชิ้นงาน H13 ที่ผ่านการทำไนตรายดิงแบบพลาสมา.....	30
ภาพที่ 2.22 เซลเคมีไฟฟ้าการกัดกร่อน.....	31

ภาพที่ 2.23	แผนภาพแสดงการทำงานของเครื่อง Potentiostat.....	32
ภาพที่ 2.24	แสดงโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด จาก ภาคตัดขวางของเหล็กกล้าเครื่องมือ H13 ที่ผ่านการทำไนตรายดิงแบบพัลส์พลาสมาที่ อุณหภูมิ 520 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง	36
ภาพที่ 2.25	แสดงผลวิเคราะห์ XRD ของชิ้นงานเหล็กกล้าเครื่องมือ H13 ที่ผ่านการทำไนตรายดิง แบบพลาสมาเป็นเวลา 4 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิต่างกัน.....	37
ภาพที่ 2.26 (A)	กราฟแสดง OCP ต่อเวลาที่เปลี่ยนไป และ (B) กราฟ cyclic potentiodynamic polarization ของชิ้นงานเหล็กกล้าเครื่องมือ H13 ภายหลังจากทำ ไนตรายดิง เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิต่างกัน ซึ่งทดสอบในสารละลาย 0.9% NaCl.....	37
ภาพที่ 3.1	ชิ้นงานเหล็กกล้าเครื่องมือทำงานร้อน H13 ที่ใช้ในงานวิจัย.....	39
ภาพที่ 3.2	บ่อชุบสำหรับชุบโครเมียมด้วยไฟฟ้ากระแสตรง โดยใช้แอโนดแบบถาวร	43
ภาพที่ 3.3	เตาไฮโดรเจนใช้สำหรับการสูญเสียคาร์บอนที่ผิว	44
ภาพที่ 3.4	น้ำยาทาเล็บที่ใช้ในการเตรียมผิวชิ้นงานก่อนทดสอบสมบัติการกัดกร่อน	46
ภาพที่ 4.1	โครงสร้างมหภาคของชิ้นงาน H13 ภายหลังจากทำไนตรายดิงแบบต่างๆ	48
ภาพที่ 4.2	โครงสร้างจุลภาคที่ผิวและภาคตัดขวางจากฝั่งผิวของชิ้นงาน H13 ที่ทำไนตรายดิงแบบ ต่างๆ จากกล้องจุลทรรศน์แสง	49
ภาพที่ 4.3	โครงสร้างจุลภาคภาคตัดขวางจากฝั่งผิวของชิ้นงาน H13 ที่ทำไนตรายดิงแบบต่างๆ จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด	50
ภาพที่ 4.4	ผลการวัดความแข็งตามแนวตัดขวางจากฝั่งผิวลึกเข้าไปในเนื้อชิ้นงานตามแนวแกน X ของชิ้นงาน H13 ที่ทำไนตรายดิงแบบต่างๆ.....	51
ภาพที่ 4.5 (ก)	ความแข็งผิว และ (ข) ความลึกชั้นผิวแข็ง ของชิ้นงาน H13 ที่ผ่านการทำไนตราย ดิงแบบต่างๆ	51
ภาพที่ 4.6	ผลการวิเคราะห์เฟสและสารประกอบ โดยเครื่องมือวิเคราะห์รูปแบบการเลี้ยวเบนของ รังสีเอ็กซ์ แบบ GIXD จากฝั่งผิวของชิ้นงาน H13 ที่ทำไนตรายดิงแบบต่างๆ.....	52
ภาพที่ 4.7	เส้นโค้งโพลาริเซชันเปรียบเทียบกันของชิ้นงาน H13 ที่ทำไนตรายดิงแบบต่างๆ ที่ ทดสอบ โดยเทคนิคโพเทนชิโอดนามิกส์.....	54
ภาพที่ 4.8	ค่าพารามิเตอร์แสดงสมบัติด้านการกัดกร่อน (corrosion parameters) เปรียบเทียบ กัน ของชิ้นงาน H13 ที่ทำไนตรายดิงแบบต่างๆ.....	55
ภาพที่ 4.9	โครงสร้างมหภาคของชิ้นงาน H13 ที่ทำไนตรายดิงแบบต่างๆ ก่อนและหลังทดสอบ การกัดกร่อนโดยเทคนิคโพเทนชิโอดนามิกส์	57

ภาพที่ 4.10 โครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด แสดงภาพพื้นผิวของ ชิ้นงาน H13 ที่ทำไนตรายดิงแบบต่างๆ ก่อนและหลังทดสอบการกัดกร่อนโดยเทคนิคโพ เทนชิโอไดนามิกส์.....	59
ภาพที่ 4.11 การกระจายตัวของธาตุที่มีความลึกต่างๆ จากผิววิเคราะห์โดยเครื่อง Glow Discharge Spectroscopy ของชิ้นงาน H13 ที่ทำไนตรายดิงแบบก๊าซและผ่านการ ทดสอบการกัดกร่อน โดยเทคนิคโพเทนชิโอไดนามิกส์ โดยหยุดทดสอบในบริเวณก่อนเกิด ช่วงแพสซีฟ.....	61
ภาพที่ 4.12 การกระจายตัวของธาตุที่มีความลึกต่างๆ จากผิววิเคราะห์โดยเครื่อง Glow Discharge Spectroscopy ของชิ้นงาน H13 ที่ทำไนตรายดิงแบบก๊าซและผ่านการ ทดสอบการกัดกร่อน โดยเทคนิคโพเทนชิโอไดนามิกส์ โดยหยุดทดสอบในบริเวณที่เกิด ช่วงแพสซีฟ.....	62
ภาพที่ 4.13 การกระจายตัวของธาตุที่มีความลึกต่างๆ จากผิววิเคราะห์โดยเครื่อง Glow Discharge Spectroscopy ของชิ้นงาน H13 ที่ทำไนตรายดิงแบบอ่างเกลือและผ่านการ ทดสอบการกัดกร่อน โดยเทคนิคโพเทนชิโอไดนามิกส์ โดยหยุดทดสอบในบริเวณที่เกิด ช่วงแพสซีฟ.....	63
ภาพที่ 4.14 เส้นโค้งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้า (current) ในแกน y กับ เวลา (time) ในแกน x เปรียบเทียบกันของชิ้นงาน H13 ที่ทำไนตรายดิงแบบต่างๆ ที่ทดสอบ โดยเทคนิคโพเทนชิโอสแตติก โดยตั้งค่าศักย์ไฟฟ้าในการทดสอบ เท่ากับ -300 มิลลิโวลต์ (Ag-AgCl) ทดสอบเป็นเวลา 5 ชั่วโมง 30 นาที.....	65
ภาพที่ 4.15 โครงสร้างมหภาคของชิ้นงาน H13 ที่ทำไนตรายดิงแบบต่างๆ ก่อนและหลังทดสอบ การกัดกร่อนโดยเทคนิคโพเทนชิโอสแตติก โดยตั้งค่าศักย์ไฟฟ้าในการทดสอบ เท่ากับ - 300 มิลลิโวลต์ (Ag-AgCl) ทดสอบเป็นเวลา 5 ชั่วโมง 30 นาที.....	66
ภาพที่ 4.16 เส้นโค้งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้า (current) ในแกน y กับ เวลา (time) ในแกน x เปรียบเทียบกันของชิ้นงาน H13 ที่ทำไนตรายดิงแบบต่างๆ ที่ทดสอบ โดยเทคนิคโพเทนชิโอสแตติก โดยตั้งค่าศักย์ไฟฟ้าในการทดสอบ เท่ากับ 0 มิลลิโวลต์ (Ag-AgCl) ทดสอบเป็นเวลา 5 ชั่วโมง 30 นาที.....	68
ภาพที่ 4.17 โครงสร้างมหภาคของชิ้นงาน H13 ที่ทำไนตรายดิงแบบต่างๆ ก่อนและหลังทดสอบ การกัดกร่อน โดยเทคนิคโพเทนชิโอสแตติก โดยตั้งค่าศักย์ไฟฟ้าในการทดสอบ เท่ากับ 0 มิลลิโวลต์ (Ag-AgCl) ทดสอบเป็นเวลา 5 ชั่วโมง 30 นาที.....	69

ภาพที่ 4.18 โครงสร้างมหภาคของชิ้นงาน H13 ที่ผ่านการชุบโครเมียมร่วมกับการทำไนตรายดิงแบบพลาสมา	73
ภาพที่ 4.19 โครงสร้างจุลภาคที่ผิวและภาคตัดขวางจากฝั่งผิวของชิ้นงาน H13 ที่ผ่านการชุบโครเมียมร่วมกับการทำไนตรายดิงแบบพลาสมา	74
ภาพที่ 4.20 โครงสร้างจุลภาคภาคตัดขวางจากฝั่งผิวของชิ้นงาน H13 ที่ผ่านการชุบโครเมียมร่วมกับการทำไนตรายดิงแบบพลาสมา จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด	75
ภาพที่ 4.21 ผลการวัดความแข็งตามแนวตัดขวางจากฝั่งผิวลึกเข้าไปในเนื้อชิ้นงานตามแนวแกน X ของชิ้นงาน H13 ที่ผ่านการชุบโครเมียมร่วมกับการทำไนตรายดิงแบบพลาสมา.....	76
ภาพที่ 4.22 (ก) ความแข็งผิว และ (ข) ความลึกชั้นผิวแข็งของชิ้นงาน H13 ที่ผ่านการชุบโครเมียมร่วมกับการทำไนตรายดิงแบบพลาสมา.....	76
ภาพที่ 4.23 การกระจายตัวของธาตุที่ความลึกต่างๆ จากผิวของชิ้นงาน H13 ที่ผ่านการชุบโครเมียม ร่วมกับการทำไนตรายดิงแบบพลาสมา วิเคราะห์โดยเครื่อง Glow Discharge Spectroscopy.....	77
ภาพที่ 4.24 ผลการวิเคราะห์เฟสและสารประกอบ โดยเครื่องมือวิเคราะห์รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ แบบ GIXD จากฝั่งผิวของชิ้นงาน H13 ที่ผ่านการชุบโครเมียมร่วมกับการทำไนตรายดิงแบบพลาสมา.....	78
ภาพที่ 4.25 เส้นโค้งโพลาริเซชันเปรียบเทียบกันของชิ้นงาน H13 ที่ผ่านการชุบโครเมียมร่วมกับการทำไนตรายดิงแบบพลาสมาที่ทดสอบโดยเทคนิคโพเทนชิโอดินามิกส์	80
ภาพที่ 4.26 ค่าพารามิเตอร์แสดงสมบัติด้านการกัดกร่อน (corrosion parameters) เปรียบเทียบกันของชิ้นงาน H13 ที่ผ่านการชุบโครเมียมร่วมกับการทำไนตรายดิงแบบพลาสมา	81
ภาพที่ 4.27 โครงสร้างมหภาคของชิ้นงาน H13 ที่ผ่านการชุบโครเมียมร่วมกับการทำไนตรายดิงแบบพลาสมา ก่อนและหลังทดสอบการกัดกร่อนโดยเทคนิคโพเทนชิโอดินามิกส์.....	83
ภาพที่ 4.28 โครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด แสดงภาพพื้นผิวของชิ้นงาน H13 ที่ผ่านการชุบโครเมียมร่วมกับการทำไนตรายดิงแบบพลาสมา ก่อนและหลังทดสอบการกัดกร่อนโดยเทคนิคโพเทนชิโอดินามิกส์	85
ภาพที่ 4.29 เส้นโค้งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้า (current) ในแกน y กับ เวลา (time) ในแกน x เปรียบเทียบกันของชิ้นงาน H13 ที่ผ่านการชุบโครเมียมร่วมกับการทำไนตรายดิงแบบพลาสมา ที่ทดสอบโดยเทคนิคโพเทนชิโอสแตติก โดยตั้งค่าศักย์ไฟฟ้าในการทดสอบ เท่ากับ -300 มิลลิโวลต์ (Ag-AgCl) ทดสอบเป็นเวลา 5 ชั่วโมง 30 นาที.....	87

ภาพที่ 4.30 โครงสร้างมหภาคของชิ้นงาน H13 ที่ผ่านการชุบโครเมียมร่วมกับการทำไนตรายดิงแบบพลาสมา ก่อนและหลังทดสอบการกัดกร่อนโดยเทคนิคโพเทนชิโอสแตติก โดยตั้งค่าศักย์ไฟฟ้าในการทดสอบ เท่ากับ -300 มิลลิโวลต์ (Ag-AgCl) ทดสอบเป็นเวลา 5 ชั่วโมง 30 นาที.....	88
ภาพที่ 4.31 เส้นโค้งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้า (current) ในแกน y กับ เวลา (time) ในแกน x เปรียบเทียบกันของชิ้นงาน H13 ที่ผ่านการชุบโครเมียมร่วมกับการทำไนตรายดิงแบบพลาสมา ที่ทดสอบโดยเทคนิคโพเทนชิโอสแตติก โดยตั้งค่าศักย์ไฟฟ้าในการทดสอบ เท่ากับ 0 มิลลิโวลต์ (Ag-AgCl) ทดสอบเป็นเวลา 5 ชั่วโมง 30 นาที.....	90
ภาพที่ 4.32 โครงสร้างมหภาคของชิ้นงาน H13 ที่ผ่านการชุบโครเมียมร่วมกับการทำไนตรายดิงแบบพลาสมา ก่อนและหลังทดสอบการกัดกร่อนโดยเทคนิคโพเทนชิโอสแตติก โดยตั้งค่าศักย์ไฟฟ้าในการทดสอบ เท่ากับ 0 มิลลิโวลต์ (Ag-AgCl) ทดสอบเป็นเวลา 5 ชั่วโมง 30 นาที.....	91
ภาพที่ 4.33 โครงสร้างมหภาคของชิ้นงาน H13 ที่ผ่านการสูญเสียคาร์บอนที่ผิวก่อนทำการปรับปรุงผิว.....	94
ภาพที่ 4.34 โครงสร้างจุลภาคที่ผิวและภาคตัดขวางจากฝั่งผิวของชิ้นงาน H13 ที่ผ่านการสูญเสียคาร์บอนที่ผิวก่อนทำการปรับปรุงผิว จากกล้องจุลทรรศน์แสง.....	95
ภาพที่ 4.35 โครงสร้างจุลภาคภาคตัดขวางจากฝั่งผิวของชิ้นงาน H13 ที่ผ่านการสูญเสียคาร์บอนที่ผิวก่อนทำการปรับปรุงผิว จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด.....	96
ภาพที่ 4.36 โครงสร้างจุลภาคภาคตัดขวางแสดงการวัดความแข็งเพสส์ด้าและเพสส์เทอบนผิวของชิ้นงาน ที่ผ่านการสูญเสียคาร์บอนที่ผิวตามด้วยการทำไนตรายดิงแบบพลาสมา.....	97
ภาพที่ 4.37 ผลการวัดความแข็งตามแนวตัดขวางจากฝั่งผิวลึกเข้าไปในเนื้อชิ้นงานตามแนวแกน X ของชิ้นงาน H13 ที่ผ่านการสูญเสียคาร์บอนที่ผิวก่อนทำการปรับปรุงผิว.....	98
ภาพที่ 4.38 (ก) ความแข็งผิว และ (ข) ความลึกชั้นผิวแข็ง ของชิ้นงาน H13 ที่ผ่านการสูญเสียคาร์บอนที่ผิว ก่อนทำการปรับปรุงผิว.....	98
ภาพที่ 4.39 ผลการวิเคราะห์เฟสและสารประกอบ โดยเครื่องมือวิเคราะห์รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ แบบ GIXD จากฝั่งผิวของชิ้นงาน H13 ที่ผ่านการสูญเสียคาร์บอนที่ผิวก่อนทำการปรับปรุงผิว.....	99
ภาพที่ 4.40 เส้นโค้งโพลาริเซชันเปรียบเทียบกันของชิ้นงาน H13 ที่ผ่านการสูญเสียคาร์บอนที่ผิวก่อนทำการปรับปรุงผิว.....	101

ภาพที่ 4.41 ค่าพารามิเตอร์แสดงสมบัติด้านการกัดกร่อน (corrosion parameters) เปรียบเทียบ กันของชิ้นงาน H13 ที่ผ่านการสูญเสียคาร์บอนที่ผิวก่อนทำการปรับปรุงผิว	102
ภาพที่ 4.42 โครงสร้างมหภาคของชิ้นงาน H13 ที่ผ่านการสูญเสียคาร์บอนที่ผิวก่อนทำการ ปรับปรุงผิว ก่อนและหลังทดสอบการกัดกร่อนโดยเทคนิคโพเทนชิโอดินามิกส์	104
ภาพที่ 4.43 โครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด แสดงภาพพื้นผิว ของชิ้นงาน H13 ที่ผ่านการสูญเสียคาร์บอนที่ผิวก่อนทำการปรับปรุงผิว ก่อนและหลัง ทดสอบการกัดกร่อนโดยเทคนิคโพเทนชิโอดินามิกส์	106
ภาพที่ 4.44 เส้นโค้งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้า (current) ในแกน y กับ เวลา (time) ในแกน x เปรียบเทียบกันของชิ้นงาน H13 ที่ผ่านการสูญเสียคาร์บอนที่ผิวก่อน ทำการปรับปรุงผิว ที่ทดสอบโดยเทคนิคโพเทนชิโอสแตติก โดยตั้งค่าศักย์ไฟฟ้าในการ ทดสอบ เท่ากับ -300 มิลลิโวลต์ (Ag-AgCl) ทดสอบเป็นเวลา 5 ชั่วโมง 30 นาที.....	108
ภาพที่ 4.45 โครงสร้างมหภาคของชิ้นงาน H13 ที่ผ่านการสูญเสียคาร์บอนที่ผิวก่อนทำการ ปรับปรุงผิว ก่อนและหลังทดสอบการกัดกร่อนโดยเทคนิคโพเทนชิโอสแตติก โดยตั้งค่า ศักย์ไฟฟ้าในการทดสอบ เท่ากับ -300 มิลลิโวลต์ (Ag-AgCl) ทดสอบเป็นเวลา 5 ชั่วโมง 30 นาที.....	109
ภาพที่ 4.46 เส้นโค้งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้า (current) ในแกน y กับ เวลา (time) ในแกน x เปรียบเทียบกันของชิ้นงาน H13 ที่ผ่านการสูญเสียคาร์บอนที่ผิวก่อน ทำการปรับปรุงผิว ที่ทดสอบโดยเทคนิคโพเทนชิโอสแตติก โดยตั้งค่าศักย์ไฟฟ้าในการ ทดสอบ เท่ากับ 0 มิลลิโวลต์ (Ag-AgCl) ทดสอบเป็นเวลา 5 ชั่วโมง 30 นาที.....	110
ภาพที่ 4.47 โครงสร้างมหภาคของชิ้นงาน H13 ที่ผ่านการสูญเสียคาร์บอนที่ผิวก่อนทำการ ปรับปรุงผิว ก่อนและหลังทดสอบการกัดกร่อนโดยเทคนิคโพเทนชิโอสแตติก โดยตั้งค่า ศักย์ไฟฟ้าในการทดสอบ เท่ากับ 0 มิลลิโวลต์ (Ag-AgCl) ทดสอบเป็นเวลา 5 ชั่วโมง 30 นาที.....	112

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบัน เหล็กกล้าเครื่องมือทำงานร้อน H13 เป็นวัสดุที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมไทย เพื่อนำวัสดุชนิดนี้มาทำเป็นแม่พิมพ์สำหรับงานขึ้นรูปโลหะชนิดต่างๆ เช่น แม่พิมพ์ฉีดขึ้นรูปอะลูมิเนียม-สังกะสี-แมกนีเซียม (die casting dies) แม่พิมพ์ทุบขึ้นรูปร้อน (hot forging die) แม่พิมพ์อัดขึ้นรูปร้อน (hot extrusion die) แม่พิมพ์ฉีดพลาสติก (plastic mold dies) และเครื่องมือตัดเฉือน (cutting tools) เป็นต้น เหล็กกล้าเครื่องมือ H13 จัดอยู่ในประเภทเหล็กกล้าเครื่องมือทำงานร้อนแบบโครเมียม (chromium hot work tool steel) โดยสมบัติที่สำคัญของวัสดุนี้ คือ มีความสามารถในการชุบแข็งสูง (high hardenability) มีความแกร่งที่ดีเยี่ยม (excellent toughness) มีความต้านทานการล้าที่อุณหภูมิสูงที่ดี (high temperature fatigue resistance) และมีราคาปานกลาง สามารถใช้งานที่อุณหภูมิสูง 540 ถึง 650 องศาเซลเซียส

เนื่องจากเหล็กกล้าเครื่องมือทำงานร้อน H13 มีความแข็งระดับปานกลาง อยู่ระหว่าง 38 ถึง 53 HRC ส่งผลให้เมื่อนำไปใช้งานที่ต้องรับแรงกระทำหรือที่อุณหภูมิสูง รวมถึงสภาพก่อให้เกิดการกัดกร่อน จะทำให้ผิวของวัสดุเกิดการสึกหรอและเกิดการกัดกร่อน จึงต้องนำเหล็กกล้าเครื่องมือทำงานร้อน H13 มาทำการปรับปรุงผิวของชิ้นงานโดยการทำไนตรายดิงแบบต่างๆ ได้แก่ แบบก๊าซ (gaseous nitriding) แบบอ่างเกลือ (salt bath nitriding) และแบบพลาสมา (plasma nitriding) เพื่อเพิ่มปริมาณไนโตรเจนบริเวณผิวของเหล็กกล้าเครื่องมือทำงานร้อน H13 ส่งผลให้ความแข็งเพิ่มขึ้นจากกลไกการตกตะกอน (precipitation hardening) ของสารประกอบไนไตรด์ (nitride compound) เช่น $Fe_{2-3}N$ Fe_4N และ CrN เป็นต้น และมีการบิดเบี้ยว (distortion) น้อยเนื่องจากใช้อุณหภูมิไม่สูงในกระบวนการปรับปรุงผิว โดยการปรับปรุงผิวของเหล็กกล้าเครื่องมือทำงานร้อน H13 ด้วยการทำไนตรายดิงแบบต่างๆ นั้น ทำให้โครเมียมในเนื้อพื้นของเหล็กกล้าเครื่องมือทำงานร้อน H13 ไปรวมตัวกับไนโตรเจนเกิดเป็นสารประกอบไนไตรด์ อาจส่งผลให้ความแข็งผิวและความต้านทานการสึกหรอดีขึ้น (wear resistance) แต่ส่งผลเสียต่อความต้านทานการกัดกร่อนก็ได้ (corrosion resistance) ดังนั้นจึงต้องทำการศึกษาความต้านทานการกัดกร่อนของเหล็กกล้าเครื่องมือ H13 ที่ผ่านการทำไนตรายดิงแบบต่างๆ และศึกษาผลจากการเพิ่มกระบวนการปรับปรุงผิว ได้แก่ การชุบโครเมียมด้วยไฟฟ้า (chromium electroplating) และการสูญเสียคาร์บอนที่ผิว (surface decarburizing) ต่อความต้านทานการกัดกร่อน

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อหาความต้านทานการกัดกร่อนของเหล็กกล้าเครื่องมือทำงานร้อน H13 ที่ผ่านการทำไนตรายดิงแบบก๊าซ อ่างเกลือ และพลาสมา

1.2.2 เพื่อหาผลของการชุบโครเมียมด้วยไฟฟ้า และการสูญเสียคาร์บอนที่ผิวต่อความต้านทานการกัดกร่อนของเหล็กกล้าเครื่องมือทำงานร้อน H13 ที่ผ่านการทำไนตรายดิงแบบพลาสมา

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1 การทำไนตรายดิงแบบก๊าซ ในสภาวะก๊าซแอมโมเนีย ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เวลา 60 นาที โดยใช้สภาวะเช่นเดียวกับการใช้งานในอุตสาหกรรม

1.3.2 การทำไนตรายดิงแบบอ่างเกลือ ในอ่างเกลือไซยาไนด์ ที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส เวลา 90 นาที โดยใช้สภาวะเช่นเดียวกับการใช้งานในอุตสาหกรรม

1.3.3 การทำไนตรายดิงแบบพลาสมา ที่อัตราส่วนความดันของก๊าซไนโตรเจนต่อก๊าซไฮโดรเจน เป็น 1 ต่อ 3 ($N_2:H_2 = 1:3$) ความต่างศักย์ไฟฟ้า 150 โวลต์ อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส เวลา 9 ชั่วโมง โดยใช้สภาวะเช่นเดียวกับการใช้งานในอุตสาหกรรม

1.3.4 การชุบโครเมียมด้วยไฟฟ้า ในน้ำยาชุบโครเมียม ที่อุณหภูมิห้อง ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 0.26 แอมป์ต่อตารางเซนติเมตร (A/cm^2)

1.3.5 การสูญเสียคาร์บอนที่ผิว โดยทำในบรรยากาศก๊าซไฮโดรเจน 90 เปอร์เซ็นต์ ต่อ ก๊าซอาร์กอน 10 เปอร์เซ็นต์ (90% H_2 : 10% Ar) ที่อุณหภูมิ 1,020 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที

1.3.6 ทดสอบหาความต้านทานการกัดกร่อนด้วยเทคนิคโพเทนชิโอดนามิกส์ (Potentiodynamic Technique) ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ความเข้มข้นร้อยละ 0.9 โดยมวลต่อปริมาตร โดยใช้ขั้วมาตรฐานอ้างอิง (standard reference electrode) คือ ซิลเวอร์-ซิลเวอร์คลอไรด์ (Ag-AgCl)

1.3.7 ทดสอบหาความต้านทานการกัดกร่อนด้วยเทคนิคโพเทนชิโอสแตติก (Potentiostatics Technique) ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ความเข้มข้นร้อยละ 0.9 โดยมวลต่อปริมาตร โดยใช้ขั้วมาตรฐานอ้างอิง (standard reference electrode) คือ ซิลเวอร์-ซิลเวอร์คลอไรด์ (Ag-AgCl)

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ทราบถึงความแตกต่างในความต้านทานการกักความร้อนของเหล็กกล้าเครื่องมือทำงานร้อน H13 ที่ผ่านการปรับปรุงผิวชิ้นงานด้วยกระบวนการไนตรายดิงแบบต่างๆ ได้แก่ แบบก๊าซ อ่างเกลือ และพลาสมา

1.4.2 สามารถเลือกประเภทของการปรับปรุงผิวชิ้นงานเหล็กกล้าเครื่องมือทำงานร้อน H13 ด้วยกระบวนการไนตรายดิงได้อย่างเหมาะสม โดยได้ความแข็งผิวที่เพิ่มขึ้น มีอายุการใช้งานที่นานขึ้น แต่ไม่ส่งผลกระทบต่อความต้านทานการกักความร้อน

1.4.3 ทราบถึงความเป็นไปได้ในการปรับปรุงความต้านทานการกักความร้อนของเหล็กกล้าเครื่องมือทำงานร้อน H13 ที่ผ่านการทำไนตรายดิงแบบพลาสมา ด้วยการชุบโครเมียมด้วยไฟฟ้า และการสูญเสียคาร์บอนที่ผิวของชิ้นงาน

บทที่ 2 วรรณกรรมปริทัศน์

2.1 เหล็กกล้าเครื่องมือทำงานร้อน AISI H13 (Hot Work Tool Steel AISI H13) [1; 2]

เหล็กกล้าเครื่องมือทำงานร้อน AISI H13 ถูกจัดอยู่ในประเภทเหล็กกล้าเครื่องมือทำงานร้อนแบบโครเมียม (chromium hot work tool steel) ซึ่งมีธาตุคาร์บอน (carbon, C) ระดับปานกลาง โดยมีการเติมธาตุผสมหลัก คือ โครเมียม (chromium, Cr) มากกว่า 5% โดยน้ำหนัก และมีการเติมธาตุผสมอื่นๆ ลงไปด้วย ได้แก่ ซิลิกอน (silicon, Si) โมลิบดีนัม (molybdenum, Mo) และวานาเดียม (vanadium, V) เพื่อเพิ่มความสามารถในการชุบแข็ง (hardenability) และรวมตัวกับคาร์บอนเกิดเป็นคาร์ไบด์ ทำให้ความต้านทานการสึกหรอเพิ่มขึ้น (wear resistance) โดยเหล็กกล้าเครื่องมือทำงานร้อน H13 เป็นเหล็กกล้าที่สามารถเพิ่มความแข็งภายหลังการขึ้นรูปได้จากกรรมวิธีทางความร้อน หรือเพิ่มความแข็งในขั้นทุติยภูมิ (secondary hardening) ซึ่ง เหล็กกล้าเครื่องมือทำงานร้อน H13 เป็นเกรดเหล็กที่เป็นไปตามมาตรฐานของ American Iron and Steel Institute หรือ AISI ซึ่งสามารถเทียบเท่าได้กับมาตรฐานของชาติต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 2.1 และมีส่วนผสมทางเคมี ดังแสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.1 ชื่อเกรดเทียบเท่าของเหล็กกล้าเครื่องมือทำงานร้อน H13 เทียบกับระบบมาตรฐานของชาติต่างๆ [2]

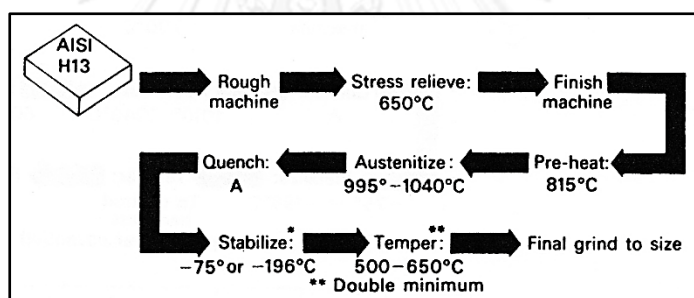
National Systems	Designations
United States (AISI)	H13
United States Navy (USN)	T20813
Germany (DIN)	1.2344
Japan (JIS)	G4404 SKD61
Great Britain (B.S.)	4659 BH13, 4659 H13
France (AFNOR)	A35-590 3433 Z40CDV5
Sweden (SS ₁₄)	2242

ตารางที่ 2.2 ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าเครื่องมือทำงานร้อน H13, %A โดยน้ำหนัก [3]

USN Designation ^B	Type	C	Mn ^C	P	S ^D	Si	Cr	V	Mo
T20813	H13	0.32 - 0.45	0.20 - 0.60	0.030 max	0.030 max	0.80 - 1.25	4.75 - 5.50	0.80 - 1.20	1.10 - 1.75

A Chemistry limits include product analysis tolerances. Unless otherwise specified, nickel plus copper equal 0.75 % max for all types.
B New designation established in accordance with Practice E 527 and SAE J1086.
C Manganese limit is 1.0 % max for H13 resulfurized.
D Where specified, sulfur may be 0.06 to 0.15 % to improve machinability.

เหล็กกล้าเครื่องมือทำงานร้อน H13 เป็นวัสดุที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมไทย เพื่อนำวัสดุชนิดนี้มาทำเป็น แม่พิมพ์สำหรับงานขึ้นรูปโลหะชนิดต่างๆ เช่น แม่พิมพ์ฉีดขึ้นรูป อะลูมิเนียม-สังกะสี-แมกนีเซียม (die casting dies) แม่พิมพ์ทุบขึ้นรูปร้อน (hot forging die) แม่พิมพ์อัดขึ้นรูปร้อน (hot extrusion die) แม่พิมพ์ฉีดพลาสติก (plastic mold dies) และ เครื่องมือตัดเฉือน (cutting tools) เป็นต้น เนื่องจากมีสมบัติที่สำคัญ คือ มีความสามารถในการชุบแข็งสูง (high hardenability) มีความแข็งระดับปานกลาง (medium hardness) มีความแกร่งที่ดีเยี่ยม (excellent toughness) มีความต้านทานการล้าที่อุณหภูมิสูงที่ดี (high temperature fatigue resistance) มีความต้านทานการต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างฉับพลัน (good thermal shock resistance) เกิดการบิดเบี้ยวหลังการอบชุบทางความร้อนน้อย (resistance to heat treatment distortion) และมีราคาปานกลาง สามารถใช้งานที่อุณหภูมิสูง 540 - 650 องศาเซลเซียส โดยจะมีขั้นตอนการผลิตและกรรมวิธีอบชุบเหล็กกล้าเครื่องมือทำงานร้อน H13 ดังแสดงในภาพที่ 2.1 และสมบัติทางกายภาพ ทางความร้อน และทางกลของเหล็กกล้าเครื่องมือทำงานร้อน H13 แสดงในตารางที่ 2.3 ถึง ตารางที่ 2.5 ตามลำดับ



ภาพที่ 2.1 กระบวนการผลิตและอบชุบเหล็กกล้าเครื่องมือทำงานร้อน H13 [4]

ตารางที่ 2.3 แสดงสมบัติทางกายภาพของเหล็กกล้าเครื่องมือทำงานร้อน H13 [5]

Physical Properties		
Properties	Value	Comments
Density	7.80 g/cm ³	-

ตารางที่ 2.4 แสดงสมบัติทางความร้อนของเหล็กกล้าเครื่องมือทำงานร้อน H13 [5]

Thermal Properties		
Properties	Value	Comments
CTE, linear	11.0 $\mu\text{m}/\text{m}\cdot\text{C}$	at 25.0 - 95.0 $^{\circ}\text{C}$
	11.5 $\mu\text{m}/\text{m}\cdot\text{C}$	at 25.0 - 205.0 $^{\circ}\text{C}$
	12.4 $\mu\text{m}/\text{m}\cdot\text{C}$	at 25.0 - 540.0 $^{\circ}\text{C}$
Specific Heat Capacity	0.460 J/g $\cdot\text{C}$	at 0.0 - 100.0 $^{\circ}\text{C}$

ตารางที่ 2.4 (ต่อ) แสดงสมบัติทางความร้อนของเหล็กกล้าเครื่องมือทำงานร้อน H13 [5]

Thermal Properties		
Properties	Value	Comments
Thermal Conductivity	24.4 W/m-K	at 350 °C
	24.3 W/m-K	at 475 °C
	24.7 W/m-K	at 605 °C
	24.3 W/m-K	at 215 °C
	24.4 W/m-K	at 350 °C

ตารางที่ 2.5 แสดงสมบัติทางกลของเหล็กกล้าเครื่องมือทำงานร้อน H13 [5]

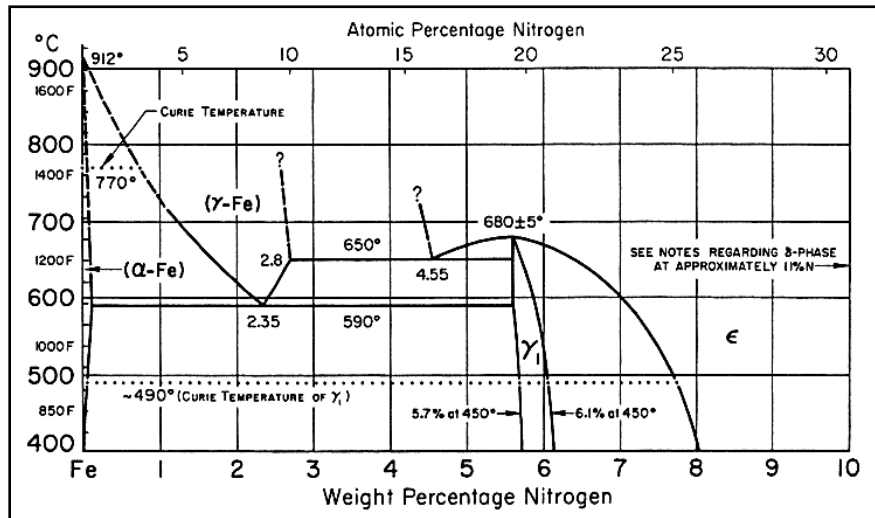
Mechanical Properties		
Properties	Value	Comments
Hardness, Rockwell C	28.0 - 30.0	air or oil quenched and tempered at 705°C (1300°F).
	31.0 - 33.0	air or oil quenched and tempered at 675°C (1250°F).
	39.0 - 41.0	air or oil quenched and tempered at 650°C (1200°F).
	45.0 - 47.0	air or oil quenched and tempered at 620°C (1150°F).
	49.0 - 51.0	air or oil quenched and tempered at 595°C (1100°F).
	51.0 - 53.0	air quenched from 1025°C (1875°F) or oil quenched from 1010°C (1850°F) with no temper, or tempered for 1 hour at 315°C (600°F), 425°C (800°F), and 480°C (900°F).
	51.0 - 53.0	air or oil quenched and tempered at 565°C (1050°F).
	52.0 - 54.0	air or oil quenched and tempered at 510°C (950°F) and 540°C (1000°F).
Tensile Strength, Ultimate	1,990 MPa	at HRC = 55 (air or oil quenched from 995 -1025°C)
Tensile Strength, Yield	1,650 MPa	
Elongation at Break	9.00 %	
Modulus of Elasticity	210 GPa	-
Bulk Modulus	140 GPa	Typical for steel.
Poissons Ratio	0.300	Calculated
Machinability	50 %	Based on 1% carbon steel. as 100% machinability
Shear Modulus	81.0 GPa	Estimated from elastic modulus

เนื่องจากเหล็กกล้าเครื่องมือทำงานร้อน H13 มีความแข็งอยู่ในระดับปานกลาง อยู่ระหว่าง 38 ถึง 53 HRC ส่งผลให้เมื่อนำไปใช้งานที่ต้องรับแรงกระทำ, ที่อุณหภูมิสูง จะทำให้ผิวของวัสดุเกิดการสึกหรอได้ง่าย จึงต้องนำเหล็กกล้าเครื่องมือทำงานร้อน H13 มาทำการปรับปรุงผิวของชิ้นงาน เพื่อเพิ่มความแข็งและเพิ่มความต้านทานการสึกหรอ ซึ่งสามารถทำได้หลายวิธี ได้แก่ คาร์บูไรซิง (carburizing) คาร์โบไนตรายดิง (carbonitriding) และไนตรายดิง (nitriding) โดยการทำให้ไนตรายดิง เป็นกระบวนการที่นิยมทำในอุตสาหกรรมในการปรับปรุงผิวของเหล็กกล้าเครื่องมือทำงานร้อน H13 เนื่องจากเป็นกระบวนการที่ใช้อุณหภูมิต่ำ ส่งผลให้เกิดการบิดตัวของชิ้นงานน้อยกว่ากระบวนการอื่นๆ ซึ่งการทำไนตรายดิงสามารถทำได้หลายวิธี ได้แก่ แบบก๊าซ (gaseous nitriding) แบบอ่างเกลือ (salt bath nitriding) และแบบพลาสมา (plasma nitriding) ซึ่งการทำไนตรายดิงแบบต่างๆ จะทำให้ได้โครงสร้างชั้นผิวแข็งที่ต่างกันออกไป และจะส่งผลต่อความต้านทานการสึกหรอต่างกัน

2.2 กระบวนการไนตรายดิง (Nitriding Processes) [2; 6]

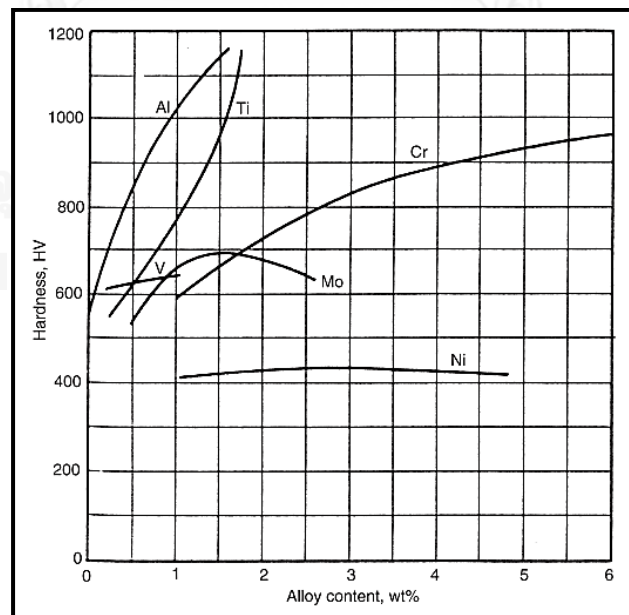
กระบวนการไนตรายดิงถูกพัฒนาขึ้นมาครั้งแรกในต้นศตวรรษที่ 20 เพื่อนำไปใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตอากาศยาน (aircraft) แบริ่ง (bearings) ชิ้นส่วนยานยนต์ (automotive components) เครื่องจักรทอผ้า (textile machinery) และระบบกังหันกำเนิดไฟฟ้า (turbine generation systems) ซึ่งกระบวนการไนตรายดิงมีจุดเด่น คือ ไม่มีการแปลงเฟสไปมาระหว่างเฟอร์ไรต์ (ferrite) – ออสเตนไนต์ (austenite) – มาร์เทนไซต์ (martensite) เพื่อเพิ่มความแข็ง เช่นเดียวกับกระบวนการคาร์บูไรซิง (carburizing processes) อีกทั้งภายหลังจากการทำไนตรายดิงสามารถทำให้ชิ้นงานเย็นตัวในอากาศได้ ไม่ต้องทำให้ชิ้นงานเย็นตัวอย่างรวดเร็วหรือการชุบ (quenching) จะก่อให้เกิดผลดี คือ ชิ้นงานจะเกิดการบิดตัวน้อย และมีขนาดเปลี่ยนแปลงน้อย

กระบวนการไนตรายดิงเป็นกระบวนการปรับปรุงผิวด้วยการเปลี่ยนส่วนผสมทางเคมีโดยอาศัยความร้อน เพื่อเพิ่มปริมาณไนโตรเจนบริเวณผิวของวัสดุจากกลไกการแพร่ (ซึ่งขึ้นอยู่กับความสามารถในการละลายของไนโตรเจนในเหล็ก ดังจะเห็นได้ในแผนภูมิสมดุลระหว่างเหล็กกับไนโตรเจน ภาพที่ 2.2) ทำให้เกิดการตกตะกอนของสารประกอบไนตรายด์ของเหล็ก ซึ่งมักเกิดเฟส เอปไซลอน (ϵ , $Fe_{2-3}N$) และเฟสแกมมาไพร์ม (γ' , Fe_4N) เป็นหลัก นอกจากนี้ยังอาจเกิดสารประกอบไนตรายด์ของธาตุผสมที่เติมลงในเหล็กด้วย เช่น โครเมียมไนตรายด์ (CrN) เป็นต้น ส่งผลให้ความแข็งผิวที่ถูกปรับปรุงด้วยวิธีนี้เพิ่มขึ้นจากกลไกการตกตะกอน (precipitation hardening) และนิยมทำไนตรายดิงกับเหล็กกล้าในสภาพเหล็กเฟอร์ไรต์หรือเทมเปอร์มาร์เทนไซต์ เนื่องจากมีอัตราการแพร่ของไนโตรเจนที่สูงที่อุณหภูมิต่ำ โดยอุณหภูมิในการทำไนตรายดิงจะไม่สูงมาก (อยู่ในช่วง 500 ถึง 600 องศาเซลเซียส)



ภาพที่ 2.2 แผนภูมิสมดุระหว่างเหล็กกับไนโตรเจน

กระบวนการไนตรายดิงเป็นที่นิยมในการเพิ่มความแข็งผิวแก่เหล็กกล้าที่มีปริมาณคาร์บอนปานกลาง ที่มีธาตุผสมที่สามารถเกิดเป็นสารประกอบไนตรายด์ได้ง่าย เช่น โครเมียม (Cr) อะลูมิเนียม (Al) และไทเทเนียม (Ti) ก่อให้เกิดสารประกอบไนตรายด์ของธาตุผสมดังกล่าวที่มีความเสถียรและมีความแข็งสูง นอกจากนี้สารประกอบที่ตกผลึกเหล่านี้สามารถคงสภาพอยู่ถึงอุณหภูมิ 525 องศาเซลเซียส ทำให้เหล็กกล้าที่ผ่านการปรับปรุงด้วยวิธีนี้สามารถคงความแข็งที่อุณหภูมิขณะใช้งาน เช่น แม่พิมพ์งานขึ้นรูปร้อน โดยความแข็งที่เพิ่มขึ้นจากการเติมธาตุผสมเป็นไปตามปริมาณและชนิดของธาตุผสม ดังภาพที่ 2.3



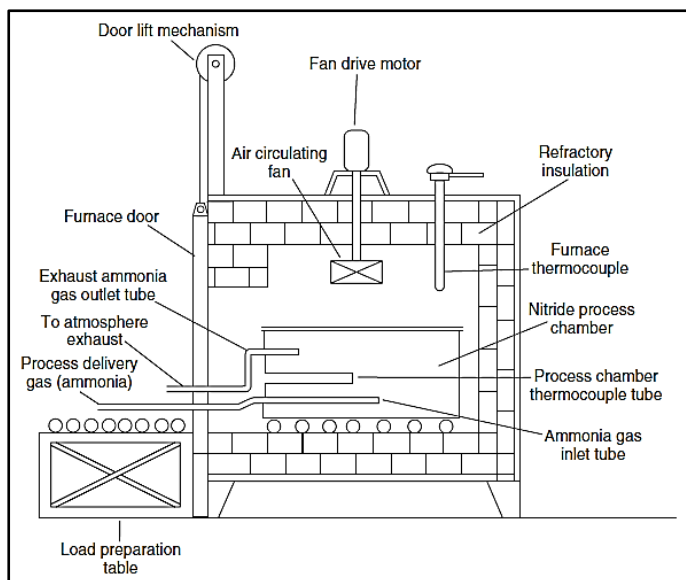
ภาพที่ 2.3 ผลของการเติมธาตุผสมต่อความแข็งภายหลังการทำไนตรายดิง

โดยข้อดีของกระบวนการไนตรายดิง มีดังนี้

- เป็นกระบวนการที่ใช้อุณหภูมิต่ำ (ประมาณ 500 องศาเซลเซียส) เมื่อเทียบกับกระบวนการปรับปรุงผิวแบบอื่นๆ เช่น คาร์บูไรซิง (ประมาณ 970 องศาเซลเซียส) คาร์โบไนตรายดิง (ประมาณ 870 องศาเซลเซียส) เป็นต้น โดยทำในเหล็กสภาพเฟอร์ไรต์ หรือ เคมเปอร์มาร์เทนไซต์
- เป็นกระบวนการที่สามารถควบคุมได้ง่าย จากการกำหนดตัวแปรของกระบวนการ
- สามารถเพิ่มความต้านทานการสึกหรอให้กับ เหล็กกล้าผสมอะลูมิเนียม-โครเมียม เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ-ปานกลาง เหล็กกล้าเครื่องมือ กลุ่ม A-M-H และเหล็กกล้าไร้สนิม กลุ่มออสเทนนิติก-มาร์เทนซิติก-PH
- สามารถเพิ่มความต้านทานการกัดกร่อนในเหล็กกล้าผสมต่ำ (low-alloy steel) และเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ (low-carbon steel) ในน้ำ น้ำทะเล และความชื้น ได้ (ยกเว้นกลุ่มเหล็กกล้าไร้สนิมที่ความต้านทานการกัดกร่อนจะลดลง)
- จะไม่ส่งผลต่อความแข็งแรงภายในเนื้อพื้น (core) ซึ่งความแข็งแรงเนื้อพื้นจะมีผลมาจากการชุบผิวแข็งก่อน (prehardening) และการอบคืนตัว (tempering) เท่านั้น
- ภายหลังจากทำไนตรายดิง ไม่ต้องมีการชุบ (quenching) ส่งผลให้เกิดการบิดตัวของชิ้นงานต่ำ
- เป็นกระบวนการที่ใช้ต้นทุนต่ำกว่า เมื่อเทียบกับกระบวนการคาร์บูไรซิง

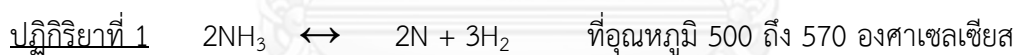
2.2.1 กระบวนการไนตรายดิงแบบก๊าซ (Gaseous Nitriding)

ในต้นศตวรรษที่ 20 หรือประมาณปี ค.ศ.1900 Adolph Machlet วิศวกรโลหการของบริษัท American Gas Company เมือง Elizabeth รัฐ New Jersey ประเทศสหรัฐอเมริกา ได้คิดค้นเทคนิคปรับปรุงความแข็งแรงผิวมาทดแทนกระบวนการคาร์บูไรซิงที่ก่อให้เกิดปัญหาการบิดเบี้ยวของชิ้นงาน ซึ่งเขาค้นพบว่าไนโตรเจนสามารถละลายในเหล็กได้ และการแพร่ของไนโตรเจนสามารถสร้างชั้นผิวแข็งบนเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำและเหล็กกล้าผสมต่ำ อีกทั้งยังเพิ่มความต้านทานการกัดกร่อนได้อีกด้วย โดยกระบวนการนี้เรียกว่า “ไนตรายดิง (nitriding)”

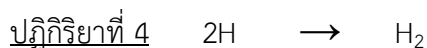
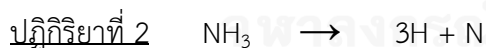


ภาพที่ 2.4 ภาพร่างของเตาสำหรับทำไนตรายดิงแบบก๊าซ

กระบวนการไนตรายดิงแบบก๊าซ (gaseous nitriding) ถูกคิดค้นเป็นแบบแรกในกระบวนการไนตรายดิง โดยอาศัยการแตกตัวของก๊าซแอมโมเนีย (ammonia gas) เกิดเป็นอะตอมของไนโตรเจนและแพร่เข้าไปสู่นื้อชิ้นงาน ซึ่งอะตอมของไนโตรเจนจะเกิดปฏิกิริยากับอะตอมของเหล็ก (Fe) หรือธาตุผสม (ได้แก่ Cr Al และ Ti) เกิดเป็นสารประกอบไนตรายด์ (nitride compound) ที่เสถียรและมีความแข็งสูง ในชั้นสารประกอบ (compound zone) และชั้นการแพร่ (diffusion zone) โดยการแตกตัวของก๊าซแอมโมเนียเป็นไปตามปฏิกิริยาที่ 1 ดังนี้

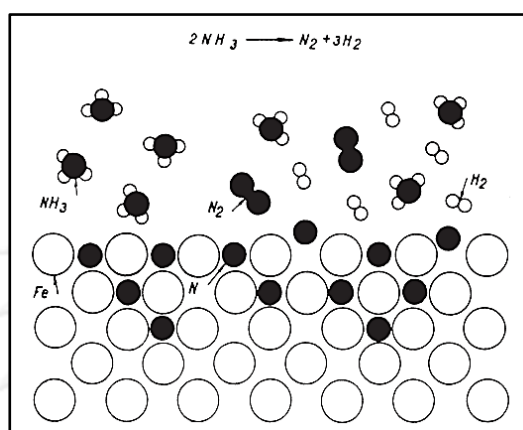


แต่ที่ผิวของเหล็กจะเกิดปฏิกิริยาเคมีย่อย 3 ปฏิกิริยา ตามปฏิกิริยาที่ 2 ถึง 4



โดยปกติการแพร่ของอะตอมไนโตรเจนในเหล็กจะช้ามาก ซึ่งอุณหภูมิในการทำไนตรายดิงแบบก๊าซที่เหมาะสมที่สุด คือ 500 องศาเซลเซียส การเพิ่มอุณหภูมิของกระบวนการจะทำให้อะตอมไนโตรเจนในเหล็กแพร่ได้เร็วขึ้นและสามารถแพร่ลงสู่เนื้อที่ลึกขึ้น แต่อาจเกิดความเสี่ยงของการเกิดโครงข่ายไนตรายด์ (nitride networks) ซึ่งเป็นสาเหตุของการแตกร้าว (cracking) และการลอก (exfoliation) ของผิวเหล็กกล้า ซึ่งอะตอมไนโตรเจนจะแพร่เข้าไปในเนื้อเหล็กแบบแทรกที่ (interstitial positions) ในตำแหน่ง octahedral ซึ่งจากแผนภูมิสมดุลงของเหล็กกับไนโตรเจนจะสามารถเกิดเป็นเฟสต่างๆ ดังนี้

- body-centered cubic α iron ซึ่งมีไนโตรเจนละลายอยู่ 0.001% ที่อุณหภูมิห้อง และ 0.115% ที่อุณหภูมิ 590 องศาเซลเซียส
- face-centered cubic γ' nitride, Fe_4N ซึ่งมีไนโตรเจนละลายอยู่ 5.7 ถึง 6.1%
- hexagonal (epsilon) ϵ nitride, Fe_{2-3}N ซึ่งปรากฏในช่วงไนโตรเจน 8 ถึง 11%
- orthorhombic (zeta) ζ nitride, Fe_2N จะเกิดที่อุณหภูมิต่ำกว่า 500 องศาเซลเซียส และมีปริมาณไนโตรเจนเกิน 11% ซึ่งจะไม่เกิดในกระบวนการไนตรายดิง



ภาพที่ 2.5 แบบจำลองของการแพร่แบบแทรกที่ของอะตอมไนโตรเจนซึ่งเกิดจากการแตกตัวของก๊าซแอมโมเนียในกระบวนการไนตรายดิงแบบก๊าซ

ระดับการแตกตัวของก๊าซแอมโมเนีย (degrees of ammonia's dissociation) จะส่งผลกระทบต่อการทำไนตรายดิง ถ้ามีระดับการแตกตัวที่สูงจะทำให้บรรยากาศไนตรายดิงเข้าใกล้สภาวะสมดุลแต่จะทำให้เกิดการไนตรายดิงที่ต่ำ ซึ่งปกติจะใช้ระดับการแตกตัวที่คงที่ (ประมาณ 30%) แต่บางครั้งจะใช้กระบวนการ 2 สภาวะ (two-stage procedure) จากการปรับอุณหภูมิและระดับการแตกตัวของก๊าซแอมโมเนีย เพื่อการควบคุมชั้นสารประกอบที่เกิดขึ้นบนผิวของเหล็ก

2.2.2 กระบวนการไนตรายดิงแบบอ่างเกลือ (Salt Bath Nitriding)

ในช่วงกลางปี ค.ศ.1930 กระบวนการไนตรายดิงถูกพัฒนาขึ้น ให้มีความสม่ำเสมอและสมบัติทางโลหการของชิ้นผิวแข็งที่ดีขึ้น ซึ่งใช้ของเหลวเป็นแหล่งกำเนิดอะตอมไนโตรเจนและสัมผัสกับผิวเหล็กแทนก๊าซ โดยความลึกและคุณภาพของชิ้นผิวแข็งสามารถควบคุมได้โดยตรงจากส่วนผสมทางเคมีของของเหลวนั้น และการให้ความร้อนยังเป็นสิ่งสำคัญเพื่อช่วยให้อะตอมไนโตรเจนสามารถแพร่ผ่านผิวเหล็กได้ ซึ่งกระบวนการนี้ถูกพัฒนาขึ้นมานั้น มีชื่อว่า กระบวนการไนตรายดิงแบบอ่างเกลือ (salt bath nitriding) ซึ่งกระบวนการนี้ถูกใช้ในงานในการปรับปรุงความแข็ง ความต้านทานการสึกหรอ และความต้านทานการกัดกร่อนของชิ้นส่วนยานยนต์ที่ทำจากเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ

เกลือไซยาไนด์ (cyanide-based salt) ถูกนำมาใช้เป็นตัวกลางในการทำไนตรายดิงแบบอ่างเกลือ โดยทำให้หลอมเหลวภายในอ่างเกลือที่อุณหภูมิประมาณ 565 ถึง 585 องศาเซลเซียส ส่งผลให้เกลือไซยาไนด์แตกตัวเป็นเกลือไซยาเนตและอะตอมไนโตรเจนที่แพร่เข้าสู่เหล็ก ซึ่งสามารถควบคุมการแตกตัวของเกลือไซยาไนด์ได้จากการควบคุมอุณหภูมิ บ่อยครั้งที่ส่วนผสมของเกลือหลอมเหลวถูกใช้เป็นตัวนำธาตุคาร์บอนและไนโตรเจนเข้าสู่ผิวชิ้นงานจึงเรียกว่าไนโตรคาร์บูไรซิง (nitrocarburizing) โดยทั่วไปแล้วเหล็กกล้าเครื่องมือทำงานร้อนจะทำไนตรายดิงในอ่างเกลือที่มีปริมาณโซเดียมไซยาไนด์ (NaCN) ไม่ต่ำกว่า 25%

ตัวอย่างส่วนผสมของสูตรเกลือหลอมเหลวที่ใช้ในการทำไนตรายดิงแบบอ่างเกลือ

สูตรที่ 1	NaCN	30%	KCl	39%
	Na ₂ CO ₃ หรือ K ₂ CO ₃	25%	moisture	2%
สูตรที่ 2	NaCN	60%	KCl	24%
	K ₂ CO ₃	15%	moisture	1%

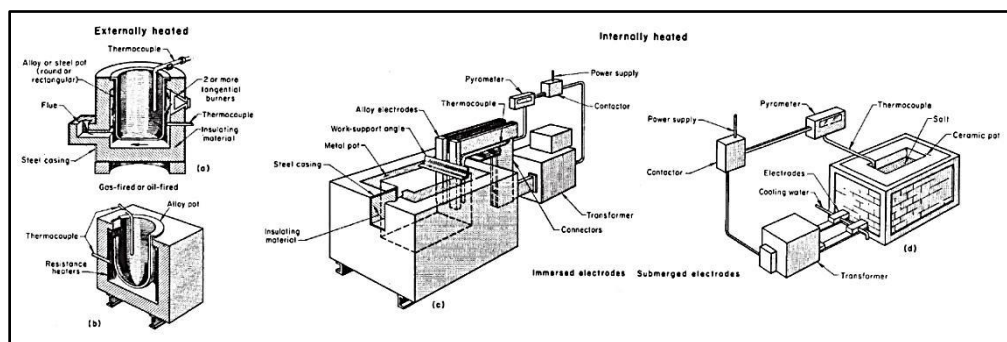
ในปี ค.ศ.1950 กระบวนการไนตรายดิงแบบอ่างเกลือเป็นที่นิยมและถูกใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมเนื่องจากมีข้อดีเมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการไนตรายดิงแบบก๊าซ ดังนี้

- ค่าอุปกรณ์ และค่าใช้จ่ายของกระบวนการต่ำกว่า
- อุณหภูมิของกระบวนการสูงกว่า เกิดไนตรายดิงได้เร็วกว่า
- การบำรุงรักษาต่ำ และสามารถทำไนตรายดิงแบบอ่างเกลือได้ง่าย ไม่ซับซ้อน
- เป็นกระบวนการที่ทำแบบกะ (batch system) หรือทำแบบต่อเนื่อง (continuous system) ก็ได้

ขั้นตอนการทำไนตรายดิงแบบอ่างเกลือ ถูกกำหนดไว้ตามมาตรฐาน AMS 2755 ของ Society of Automotive Engineers (AMS) โดยมีขั้นตอนหลักๆ ดังนี้

- ทำความสะอาดผิวชิ้นงานให้ปราศจากความชื้น (moisture) น้ำมัน (oil) จาระบี (grease) สี (paint) ออกไซด์ (oxides) และสารปนเปื้อน (contaminants)
- ให้ความร้อนแก่ชิ้นงาน (preheating)
- จุ่มชิ้นงานลงในอ่างเกลือหลอมเหลว
- ทำให้ชิ้นงานเย็นลงในอากาศหรือชุบในตัวกลางที่เหมาะสม
- ทำการล้างชิ้นงานในภายหลัง (postwashing)
- สามารถทำการขัดเงา (polishing) หรือ เคลือบน้ำมัน (oiling) ผิวชิ้นงานได้

กระบวนการไนตรายดิงแบบอ่างเกลือสามารถทำแบบกะ (batch system) หรือแบบต่อเนื่อง (continuous system) โดยแหล่งให้ความร้อนอาจมาจากไฟฟ้าหรือก๊าซ (ดังภาพที่ 2.6) กระบวนการนี้จะใช้เวลาประมาณ 60 ถึง 90 นาทีที่อุณหภูมิทำไนตรายดิง จากนั้นจึงทำการจุ่มลงไปอ่างออกซิไดซ์ (oxidizing bath) ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส แล้วจึงนำไปชุบน้ำ อาจทำการขัดผิวด้วยแรงทางกลแล้วต่อด้วยการจุ่มลงไปอ่างออกซิไดซ์อีกรอบหนึ่ง ซึ่งจะได้ผิวชิ้นงานสุดท้ายเป็นลักษณะสีดำด้านซึ่งต้านทานต่อการกัดกร่อน



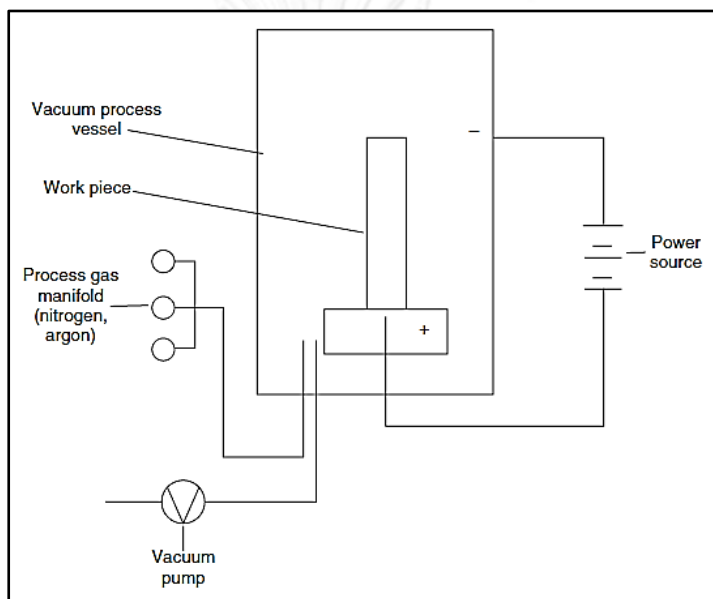
ภาพที่ 2.6 ลักษณะของเตาแบบต่างๆ สำหรับทำไนตรายดิงแบบอ่างเกลือ โดยภาพ (a) gas-filled or oil-filled กับ (b) resistance heated เป็นการให้ความร้อนจากภายนอก (externally heated) และภาพ (c) immersed electrodes กับ (d) submerged electrodes เป็นการให้ความร้อนจากภายใน (internally heated)

2.2.3 กระบวนการไนตรายดิงแบบพลาสมา (Plasma Nitriding)

กระบวนการไนตรายดิงแบบพลาสมาใช้หลักการทางเคมีเช่นเดียวกับกระบวนการไนตรายดิงแบบก๊าซ แต่อาศัยการปลดปล่อยพลาสมาจากปฏิกิริยาเคมีของก๊าซเป็นตัวกลางในการให้ความร้อนแก่ผิวเหล็ก และเป็นแหล่งกำเนิดไอออนไนโตรเจนสำหรับการทำไนตรายดิง ซึ่งเทคนิคการปลดปล่อยพลาสมาถูกใช้ในกระบวนการทางโลหการครั้งแรก ในปี ค.ศ. 1932 โดย Dr. Wehneldt นักฟิสิกส์ชาวเยอรมัน ซึ่งเขาเรียกกระบวนการนี้ว่า โกลดิสชาร์ต (glow discharge) แต่เขาไม่สามารถควบคุมกระบวนการดังกล่าวได้เนื่องจากความไม่เสถียรของโกลดิสชาร์ต ต่อมา Dr. Wehneldt และ Dr. Bernhard Berghaus นักฟิสิกส์ชาวสวิส ได้ร่วมมือกันพัฒนาและควบคุมกระบวนการดังกล่าวให้สามารถใช้ได้ทางอุตสาหกรรม โดยจะต้องควบคุมตัวแปรหลัก ได้แก่ ความดันต่ำ ศักย์ไฟฟ้า และส่วนผสมของก๊าซที่ใช้ นอกจากนี้กระบวนการไนตรายดิงแบบพลาสมา ยังเป็นที่รู้จักกันในชื่อต่างๆ ดังนี้

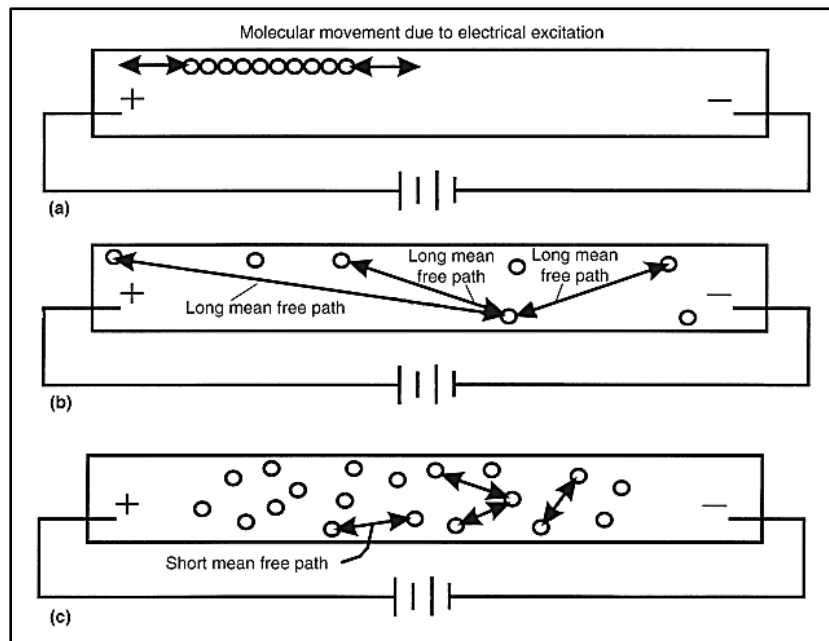
- plasma nitriding
- ion nitriding
- glow discharge nitriding
- plasma ion nitriding

เทคนิคพลาสมาถูกนำมาใช้ในประเทศสหรัฐอเมริกาครั้งแรกในช่วงปี ค.ศ. 1950 ที่บริษัท General Electric ซึ่งนำโดยวิศวกรได้แก่ Dr. Claude Jones, Derek Sturges และ Stuart Martin พวกเขาสามารถประยุกต์ใช้เทคนิคนี้ในการทำไนตรายดิงแบบพลาสมาในวัสดุที่หลากหลาย และต่อมาในช่วงกลางปี ค.ศ. 1970 การทำไนตรายดิงแบบพลาสมาเริ่มเป็นที่นิยมในยุโรปอีกครั้งหนึ่ง เนื่องจากนักวิทยาศาสตร์จากมหาวิทยาลัย Aachen ประเทศเยอรมัน สามารถควบคุมการเกิด glow discharge ได้ดีขึ้น และค้นพบการเกิด arc discharge อีกทั้งยังมีการพัฒนาเทคนิค pulsed dc current อีกด้วย โดยเตาไนตรายดิงแบบพลาสมามีลักษณะดังภาพที่ 2.7



ภาพที่ 2.7 ภาพร่างของเตาสำหรับทำไนตรายดิงแบบพลาสมา

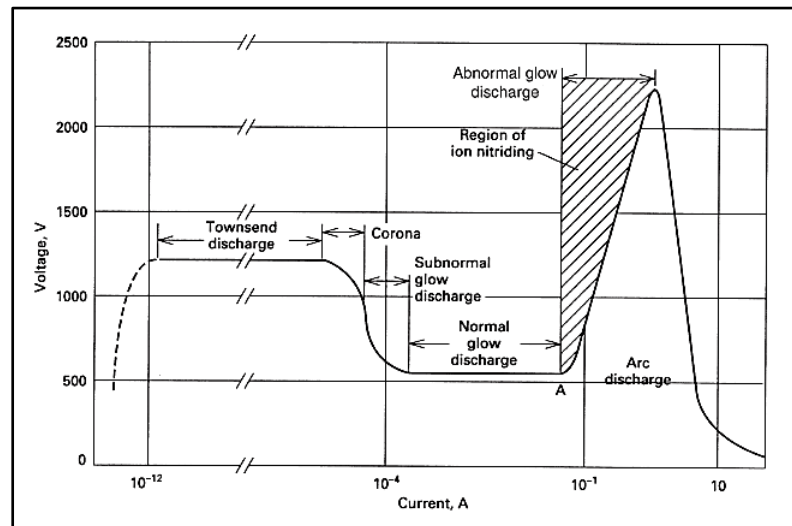
ในกระบวนการไนตรายดิงแบบพลาสมา ไม่ได้อาศัยการแตกตัวของก๊าซแอมโมเนียเพื่อเกิดเป็นก๊าซไนโตรเจนที่ผิวเหล็ก แต่เกิดจากการไอออนไนเซชัน (ionization) ของก๊าซโมเลกุลเดี่ยว (ซึ่งในที่นี้คือก๊าซไนโตรเจน) จากการให้พลังงานแก่ก๊าซทำให้อะตอมของก๊าซเกิดการสูญเสียอิเล็กตรอน และอยู่ในสภาวะไอออนหรือพลาสมา ซึ่งหลักการสร้างพลาสมาเกิดจากการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้ไหลผ่านระหว่างขั้ว (electrode) ทั้งสอง ในสภาวะบรรยากาศที่ปิด ซึ่งก๊าซที่บรรจุในสภาวะปิดจะประพุดตัวเป็นตัวนำไฟฟ้าและลำเลียงกระแสไฟฟ้าจากอิเล็กโทรดขั้วหนึ่งไปยังอีกขั้วหนึ่ง โดยโมเลกุลของก๊าซจะถูกกระตุ้นให้ขับเคลื่อนในเส้นทางอิสระเฉลี่ยที่สั้นมาก (mean free path) และเกิดการปะทะกันกับอีกโมเลกุลหนึ่ง ส่งผลให้เกิดการคายพลังงานออกมาและเกิดแสงปรากฏขึ้น เป็นที่มาของชื่อ “กระบวนการไนตรายดิงที่ปล่อยแสง (glow discharge nitriding)” และสีของแสงที่ปรากฏมานั้นขึ้นอยู่กับชนิดของก๊าซที่ใช้ในกระบวนการ ดังภาพที่ 2.8



ภาพที่ 2.8 แสดงผลของความดันต่อการเกิดโกลดิสชาร์ต โดยมีการจ่ายกระแสไฟฟ้าระหว่างขั้วทั้งสองในท่อแก้วปิดที่บรรจุก๊าซไว้ภายใน (a) ที่อุณหภูมิต่ำและความดันบรรยากาศ (≈ 100 kPa) ทำให้ก๊าซปล่อยแสงสว่างออกมา แต่ปล่อยพลังงานออกมาไม่มาก (b) ที่ความดันต่ำ (≈ 0.013 kPa) ความถี่ในการชนของโมเลกุลของก๊าซจะมีความถี่ต่ำ ทำให้แสงที่ปล่อยออกมามีลักษณะเหมือนกลุ่มหมอก (c) ที่ความดันสูง (≈ 1.3 ถึง 13 kPa) โมเลกุลของก๊าซจะเคลื่อนที่อย่างอิสระและมีความถี่สูงในการชนกันของโมเลกุลของก๊าซ ทำให้ก๊าซปล่อยพลังงานในการทำพลาสมา มากพอ อีกทั้งยังปล่อยแสงเจ็ดจำที่มีลักษณะเป็นคลื่น

การทำไนตรายดิงแบบพลาสมาที่อุณหภูมิต่ำและความดันบรรยากาศปกติจะส่งผลให้ได้พลังงานที่คายตัวออกมาจากการปะทะกันของโมเลกุลไม่เพียงพอในให้ความร้อนแก่เหล็ก แต่เมื่อลดความดันให้อยู่ในช่วง 0.1 Pa จะทำให้เส้นทางอิสระเฉลี่ยยาวขึ้น จะทำให้การชนกันของโมเลกุลปล่อยพลังงานที่เพิ่มขึ้น แต่ความถี่ของการชนกันจะลดลงเนื่องจากโมเลกุลของก๊าซหนึ่งจะวิ่งปะทะอีกโมเลกุลได้ยากขึ้น ส่งผลให้ไม่สามารถให้ความร้อนที่เพียงพอแก่ชิ้นงาน โดยค่าความดันที่เหมาะสมจะอยู่ในช่วง 50 ถึง 500 Pa โดยการควบคุมความดันต้องพิจารณาถึงชนิดและรูปร่างของชิ้นงาน ถ้าใช้ความดันที่สูงเกินไป จะทำให้พลาสมาเกิดบริเวณที่ไม่ต่อเนื่องขึ้น ซึ่งชิ้นงานบริเวณที่ไม่สัมผัสกับพลาสมาจะไม่เกิดการไนตรายดิง ซึ่งหมายความว่าค่าศักย์ไฟฟ้าไม่สนับสนุนให้เกิดพลาสมาที่ความดันนั้น นอกจากนี้จะเกิดอุณหภูมิสูงบริเวณมุมแหลมส่งผลให้เกิดชิ้นงานไหม้ ถ้าใช้ความดันที่ต่ำเกินไป พลาสมาจะเกิดเป็นกลุ่มหมอกปกคลุมชิ้นงานจะทำให้ไม่สามารถทำไนตรายดิงในพื้นที่ผิวภายใน เช่น รูหรือโพรงของชิ้นงาน เป็นต้น ซึ่งความดันเป็นตัวแปรหลักที่ต้องควบคุมแต่ค่าศักย์ไฟฟ้าก็เป็นตัวแปรที่ต้องคำนึงถึงด้วย ถ้ากระบวนการใช้ความดันที่ถูกต้องแต่มีค่าศักย์ไฟฟ้าที่สูงเกินไป จะเกิดการปลดปล่อยปรากฏการณ์เหมือนฟ้าผ่า ซึ่งถูกเรียกว่า arc discharge แต่ถ้าค่าศักย์ไฟฟ้าต่ำเกินไปและความดันที่สูงเกินไปจะไม่เกิดพลาสมาและชิ้นงานจะไม่ถูกไนตรายดิง โดยทั่วไปแล้ว การสร้างพลาสมาจะต้องอ้างอิงจากเส้นโค้งพาสเชน (Paschen curve) ซึ่งเป็นกราฟที่เปรียบเทียบ

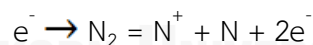
ปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นบนผิวเหล็ก ซึ่งพิจารณาระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้าที่ป้อนเข้าไป (input voltage) กับความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า (current density) ดังภาพที่ 2.9 และการจะได้ผลจากการทำไนตรายดิงแบบพลาสมาที่ดี จำเป็นต้องควบคุมตัวแปรหลักให้เหมาะสมด้วย ได้แก่ ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า กำลังไฟฟ้า ความดันภายในเตาที่ทำไนตรายดิง และส่วนผสมของก๊าซที่ใช้ในกระบวนการ



ภาพที่ 2.9 เส้นโค้งพาสเชน (Paschen curve) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้ากับค่ากระแสไฟฟ้า ส่งผลให้เกิดปรากฏการณ์โกลดิสชาร์ต (glow discharge) แบบต่างๆ

ในระหว่างการทำไนตรายดิงแบบพลาสมา ผิวของชิ้นงานที่ทำไนตรายดิงจะเกิดปฏิกิริยาทางเคมีขึ้น 4 ปฏิกิริยา ดังนี้

ปฏิกิริยาที่ 1 ยิงอิเล็กตรอนปะทะกับโมเลกุลของก๊าซไนโตรเจนเกิดการไอออนไนเซชันเกิดเป็นไอออนของไนโตรเจนและอะตอมของไนโตรเจน



ปฏิกิริยาที่ 2 อะตอมเหล็กและสารปนเปื้อนจะถูกกำจัดออกจากผิวชิ้นงาน หรือเรียกว่าชิ้นงานเกิดการสปัตเตอริง (sputtering) จากการชนปะทะของไอออนไนโตรเจนจนเกิดการระเบิดของผิว (nitrogen ions bombarding)



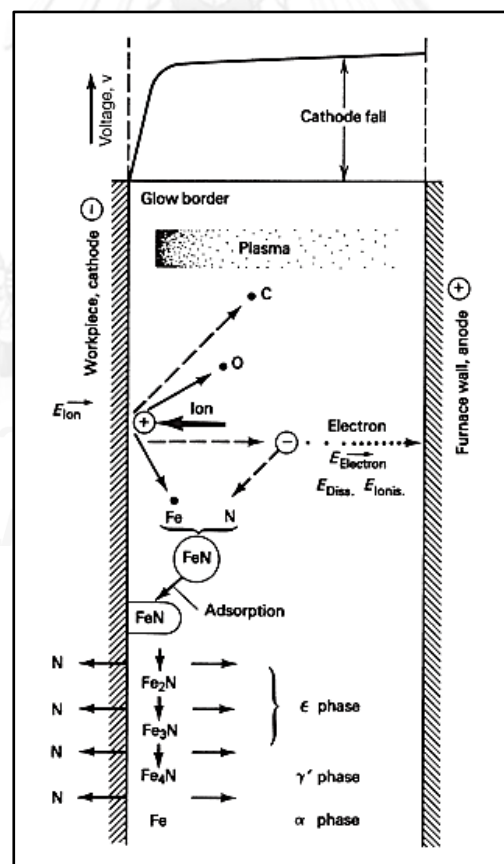
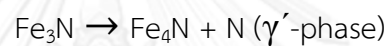
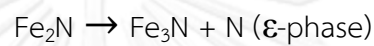
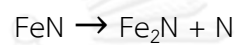
ซึ่งสารปนเปื้อนที่หลุดออกจากผิวชิ้นงานจะถูกดูดออกด้วยระบบสุญญากาศ โดยการกำจัดสารปนเปื้อนเหล่านี้จะเป็นการทำความสะอาดผิวชิ้นงาน ทำให้อะตอมไนโตรเจนสามารถแพร่เข้าสู่เนื้อชิ้นงานได้

ปฏิกิริยาที่ 3 ผลจากการปะทะซึ่งทำให้เกิดอะตอมเหล็กขึ้นมาและรวมตัวกับอะตอมของไนโตรเจน จึงเริ่มเกิดสารประกอบเหล็กไนตรายด์ขึ้นที่ผิวของชิ้นงาน



และมีการทำความสะอาดผิวภายในของชิ้นงานจากการสปัตเตอร์ที่ที่เกิดขึ้นบนผิวของชิ้นงาน

ปฏิกิริยาที่ 4 ที่ผิวของชิ้นงานเริ่มเกิดการแตกตัวของ FeN จากการระเหิดผิวด้วยพลาสมาอย่างต่อเนื่อง ส่งผลให้เกิดความไม่เสถียรของ FeN จนเริ่มแตกตัวเป็นเฟสเอปซิลอน (ϵ) ตามด้วยเฟสแกมมาไพรม์ (γ') และชั้นสารประกอบ Fe/N ดังภาพที่ 2.10



ภาพที่ 2.10 แบบจำลองโคเอลเบล (Koelbel's model) แสดงกลไกการเกิดโกลดิซซาร์ดในกระบวนการไนตรายด์แบบพลาสมา

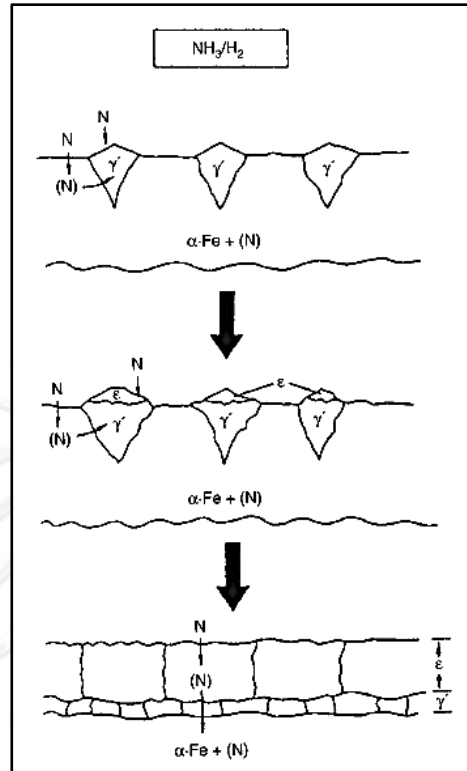
ในปัจจุบัน กระบวนการไนตรายดิงแบบพลาสมาเริ่มเป็นที่นิยมในอุตสาหกรรมเนื่องจากมีข้อดีเมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการไนตรายดิงแบบก๊าซ และอ่างเกลือ ดังนี้

- เป็นวิธีที่ไม่ก่อมลภาวะ และไม่มีความเสี่ยงในการเกิดเพลิงไหม้
- ใช้เวลาในการทำไนตรายดิงที่สั้นกว่า และมีค่าใช้จ่ายต่ำกว่า
- เป็นกระบวนการที่สามารถทำให้ซ้ำได้ (repeatable process) และได้สมบัติทางโลหการเหมือนเดิมจากการกำหนดค่าตัวแปรของกระบวนการ
- เตาไนโตรเจนแบบพลาสมาสามารถทำงานได้อย่างต่อเนื่องเป็นเวลานาน และไม่ต้องบำรุงรักษามากนัก
- สามารถทำไนตรายดิงกับวัสดุที่หลากหลายมากขึ้น ได้แก่ เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ เหล็กบริสุทธิ์ เหล็กกล้าไร้สนิม กลุ่มออสเตนนิติก-มาร์เทนซิติก โลหะกลุ่มเหล็กที่ผ่านกรรมวิธีโลหะผง เหล็กกล้าเครื่องมือ และโลหะทนไฟ (refractory metals)

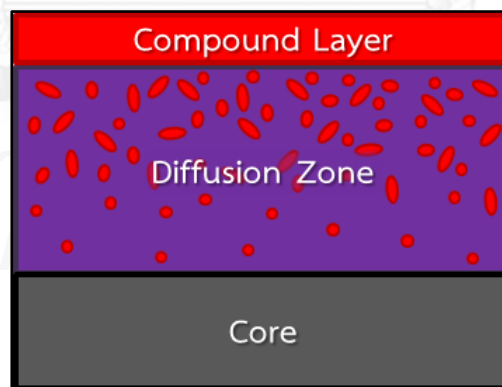
2.2.4 สมบัติและโครงสร้างจุลภาคที่ได้ภายหลังการทำไนตรายดิง

ในกระบวนการไนตรายดิงแบบต่างๆ จะเริ่มเกิดชั้นผิวแข็งไนตรายด์เมื่อมีการเกิดนิวเคลียส (nucleation) และการโตขึ้นของเฟสต่างๆ (growth) บางบริเวณของผิวเหล็ก ซึ่งบริเวณแรกที่เกิดขึ้นจะเรียกว่า ชั้นสารประกอบ (compound layer) หรือ ชั้นสีขาว (white layer) ที่มีความแข็งสูง (hard) แต่เปราะ (brittle) และมีส่วนประกอบจากการผสมกันของสองเฟส ได้แก่ เฟสเอปซิลอน (ϵ , $Fe_{2-3}N$) และเฟสแกมมาไพร์ม (γ' , Fe_4N) โดยจะเริ่มเกิดชั้นของเฟส γ' ขึ้นมาก่อนแล้วตามด้วยเฟส ϵ ดังแสดงในภาพที่ 2.11 ซึ่งสามารถควบคุมปริมาณของเฟสทั้งสองได้จากการควบคุมปริมาณธาตุคาร์บอนในเนื้อพื้นของเหล็กที่นำมาปรับปรุงผิวด้วยไนตรายดิง (ถ้าปริมาณคาร์บอนสูง จะเป็นการเพิ่มปริมาณเฟส ϵ และลดปริมาณเฟส γ' โดยทั่วไปถ้านำเหล็กกล้าที่มีปริมาณคาร์บอน 0.4% โดยน้ำหนัก มาทำไนตรายดิงแบบก๊าซจะได้ชั้นสารประกอบที่มีเฟส ϵ และ เฟส γ' ปริมาณเท่ากัน) โดยชั้นสารประกอบนี้จะอยู่ที่ผิวของเหล็กและความหนาของชั้นสารประกอบจะขึ้นกับอุณหภูมิ เวลา ส่วนผสมและความดันของก๊าซ แต่จะไม่ขึ้นกับปริมาณคาร์บอนในเหล็ก ต่อมาอะตอมของไนโตรเจนจะแพร่ผ่านผิวชั้นงานรวมถึงชั้นสารประกอบ (การแพร่ผ่านชั้นสารประกอบจะมีอัตราการแพร่ที่ช้ากว่าการแพร่ในเนื้อพื้น) และทำปฏิกิริยากับเหล็กและธาตุผสมต่างๆ ได้แก่ Cr Al และ Ti เกิดเป็นสารประกอบไนตรายด์ที่มีความเสถียรและมีความแข็งสูงกระจายอยู่ทั่วทั้งชิ้น ซึ่งสามารถเพิ่มความแข็งให้กับเหล็กจากกลไกการชุบแข็งแบบตกตะกอน (precipitation hardening) ซึ่งบริเวณนี้จะเรียกว่า ชั้นการแพร่ (diffusion zone) และบริเวณที่ถดถอยไปจากชั้นการแพร่ ซึ่งไม่มีผลกระทบจากการทำไนตรายดิงและมีสมบัติเหมือนเดิมทุกประการ กล่าวคือยังคงสภาพโครงสร้างจุลภาคของ

เทมเปอร์มาร์เทนไซต์ จะเรียกว่า เนื้อพื้น (core) ซึ่งทั้งสามบริเวณ ได้แก่ ชั้นสารประกอบ ชั้นการแพร่ และเนื้อพื้น แสดงในภาพที่ 2.12



ภาพที่ 2.11 จำลองการเกิดนิเวศของเฟส γ' และเฟส ϵ บนผิวของเหล็กเมื่อทำไนตรายดิง



ภาพที่ 2.12 แสดงชั้นผิวแข็งไนตรายดิงที่ประกอบด้วยบริเวณต่างๆ

การควบคุมความหนาของชั้นสารประกอบเป็นสิ่งจำเป็น เนื่องจากชั้นสารประกอบอาจก่อให้เกิดความเสียหายเมื่อนำไปใช้งานจากการที่มีความแข็งสูงแต่มีความเปราะ ซึ่งจะนำไปสู่การแตกหักของชั้นสารประกอบขณะใช้งาน โดยสามารถควบคุมความหนาของชั้นสารประกอบได้หลายวิธี ดังนี้

- วิธีที่ 1 Dilution สามารถกระทำได้ในการทำไนตรายดิงแบบก๊าซ โดยการเติมก๊าซไฮโดรเจน (H_2) เพื่อเจือจางก๊าซไนโตรเจน (N_2) ทำให้ปริมาณอะตอมไนโตรเจนที่จะแพร่เข้าสู่เนื้อเหล็กลดลง ซึ่งเป็นการควบคุมความหนาและส่วนผสมของชั้นสารประกอบ
- วิธีที่ 2 Two-stage Process ถูกคิดค้นเพื่อใช้กับการทำไนตรายดิงแบบก๊าซ โดย Dr.Carl Floe ในปี ค.ศ.1942 ซึ่งจะประกอบด้วย 2 ขั้นตอน ได้แก่
 - ขั้นตอนแรก ทำไนตรายดิงที่อุณหภูมิไนตรายดิงปกติ คือ 500 องศาเซลเซียส และระดับการแตกตัวของก๊าซแอมโมเนียปกติ คือ 15 ถึง 30%
 - ขั้นตอนที่สอง ทำไนตรายดิงที่อุณหภูมิสูงขึ้น อยู่ในช่วง 540 ถึง 565 องศาเซลเซียส และระดับการแตกตัวของก๊าซแอมโมเนียที่สูง คือ 75 ถึง 80%
 - ซึ่งกระบวนการดังกล่าวจะทำให้ได้ชั้นสารประกอบที่บางลง จากการลดปริมาณไนโตรเจนที่จะแพร่เข้าสู่เหล็ก และการแพร่ด้วยอัตราเร็วขึ้นจากการเพิ่มอุณหภูมิของขั้นตอนที่สอง ซึ่งถ้าอุณหภูมิของขั้นตอนที่สองสูงเกินไปอาจทำให้เกิดโครงข่ายบริเวณขอบเกรน (grain boundary networking) ของเหล็กไนตรายด์ ก่อให้เกิดความเสียหายบริเวณมุมแหลมขณะใช้งาน
- วิธีที่ 3 Plasma Nitriding เป็นอีกแบบหนึ่งของกระบวนการไนตรายดิงที่ถูกพัฒนามาจากการไนตรายดิงแบบก๊าซ ซึ่งอาศัยการเกิดพลาสมาจากการไอออไนเซชันของก๊าซภายใต้สภาวะสุญญากาศ ซึ่งสามารถควบคุมตัวแปรในการทำไนตรายดิงที่หลากหลายยิ่งขึ้น ส่งผลให้สามารถควบคุมความหนาและส่วนผสมของชั้นสารประกอบให้เกิดเฟสเดียวหรือสองเฟสก็ได้ อีกทั้งยังสามารถควบคุมชั้นการแพร่ได้อีกด้วย

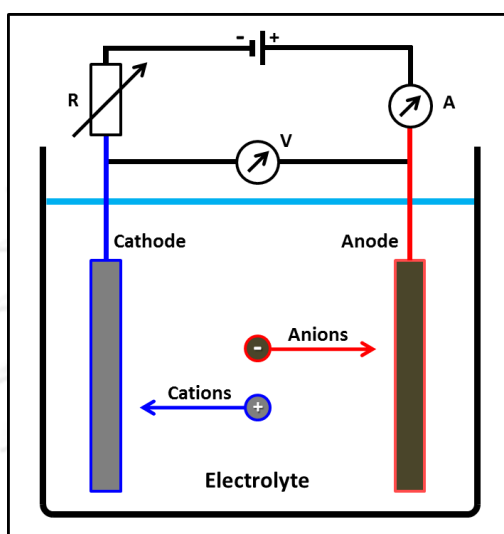
ซึ่งการทำไนตรายดิงแบบต่างๆ จะให้ความหนาของชั้นสารประกอบแตกต่างกันไป กล่าวคือการทำไนตรายดิงแบบก๊าซจะมีชั้นสารประกอบที่หนามาก แบบอ่างเกลือจะมีชั้นสารประกอบที่มีความหนาปานกลาง และแบบพลาสมาสามารถกำหนดความหนาของชั้นสารประกอบได้หรืออาจจะทำให้ไม่เกิดชั้นสารประกอบเลยก็ได้ นอกจากนี้ชนิดของเหล็กที่นำมาทำไนตรายดิงก็ส่งผลต่อความหนาของชั้นสารประกอบเช่นเดียวกัน โดยชั้นสารประกอบของเหล็กกล้าคาร์บอน (plain carbon steel) จะหนากว่าของเหล็กกล้าผสม (alloy steel) ที่ผ่านการทำไนตรายดิงสภาวะเดียวกัน เนื่องจากสารประกอบไนตรายด์ที่เกิดมาจากการเกิดปฏิกิริยากับธาตุผสม (alloying elements) ในเหล็กกล้าผสมจะต้องใช้อะตอมไนโตรเจนในการเกิดปฏิกิริยามากกว่าเหล็กในเหล็กกล้าคาร์บอน และความแข็งที่ได้จากไนตรายด์ของธาตุผสมจะสูงกว่าไนตรายด์ของเหล็ก ส่งผลให้ความแข็งภายหลังการทำไนตรายดิงของเหล็กกล้าคาร์บอนจะอยู่ที่ 400 ถึง 700 $HV_{0.2}$ เหล็กกล้าผสมจะมีความแข็ง 700 ถึง 1000 $HV_{0.2}$ และเหล็กกล้าไร้สนิมจะมีความแข็งได้ถึง 1500 $HV_{0.2}$

2.3 การชุบโครเมียมด้วยไฟฟ้า (Chromium Electroplating) [7-10]

การชุบโลหะด้วยไฟฟ้า (metal electroplating) คือ การทำให้โลหะชนิดหนึ่งสามารถไปเกาะติดบนผิวของชิ้นงานอีกชิ้นหนึ่งซึ่งอาจจะเป็นโลหะชนิดเดียวกันหรือต่างชนิดกันก็ได้ โดยอาศัยหลักการทางเคมีไฟฟ้าในกระบวนการชุบโลหะ จากการจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง (direct current) เข้าสู่เซลล์ไฟฟ้าเคมีผ่านขั้วทั้งสองที่จุ่มอยู่ในอิเล็กโทรไลต์ ซึ่งเซลล์ไฟฟ้าเคมีสำหรับการชุบโลหะด้วยไฟฟ้าประกอบด้วย

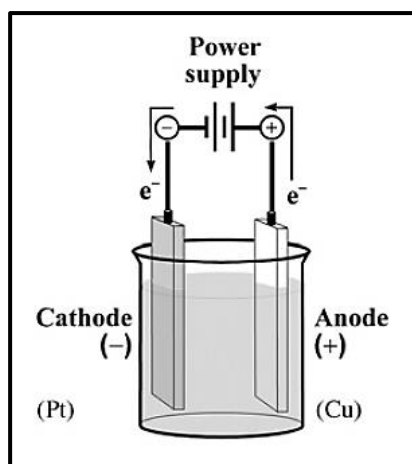
- ขั้วแคโทด (cathode electrode) หรือ ขั้วลบ ซึ่งในที่นี้คือ ชิ้นงานที่จะมีโลหะไปเคลือบติดที่ผิวระหว่างการชุบด้วยไฟฟ้า และถูกต้องเข้ากับแหล่งจ่ายอิเล็กตรอน (electron source) ในวงจรไฟฟ้ากระแสตรง โดยอิเล็กตรอนจะถูกป้อนสู่ชิ้นงานที่ขั้วแคโทด ทำให้ขั้วแคโทดมีประจุลบสะสมอยู่มาก และจะดึงดูดไอออนบวกของโลหะ (metal cations) ใน อิเล็กโทรไลต์ (electrolyte) ให้มาเกาะติดกับขั้วแคโทด เกิดเป็นการเกาะติดของโลหะที่ขั้วแคโทด (cathodic metal deposition)
- ขั้วแอโนด (anode electrode) หรือ ขั้วบวก ซึ่งในที่นี้คือ ขั้วที่ทำหน้าที่กำจัดไอออนลบ (anions) ที่เหลือค้างจากการที่ไอออนบวกของโลหะถูกดึงออกจากอิเล็กโทรไลต์ไปเกาะติดบนผิวชิ้นงานขั้วแคโทด ก่อให้เกิดสมดุลของประจุ (charge neutrality) ในอิเล็กโทรไลต์ และยังทำหน้าที่เป็นแหล่งกำเนิดไอออนบวกของโลหะใหม่เพื่อไปแทนที่ไอออนบวกใน อิเล็กโทรไลต์ที่เสียไปจากการชุบที่ผิวของขั้วแคโทด ในที่นี้ขั้วแอโนดถูกต้องเข้ากับแหล่งรับอิเล็กตรอน (electron sink) ในวงจรไฟฟ้ากระแสตรง โดยอิเล็กตรอนถูกดึงออกจากขั้วแอโนด ทำให้ขั้วแอโนดมีประจุบวกสะสมอยู่มาก ซึ่งขั้วแอโนดยังถูกแบ่งออกเป็น 2 ชนิด ดังนี้
 - แอโนดกันกร่อน (sacrificial anode) จะทำมาจากโลหะชนิดเดียวกับโลหะชิ้นเคลือบบนขั้วแคโทด เช่น ทองแดง เป็นต้น ซึ่งแอโนดชนิดนี้จะมีการละลายไปเรื่อยๆ (anodic metal dissolution) ระหว่างทำการชุบด้วยไฟฟ้า เพื่อเติมไอออนบวกของโลหะลงไปแทนไอออนบวกที่เคลือบบนขั้วแคโทด
 - แอโนดถาวร (permanent anode) จะทำมาจากโลหะที่มีความเสถียรสูง เช่น แพลตินัมเคลือบด้วยไททาเนียม เป็นต้น แต่แอโนดชนิดนี้จะไม่มีการละลายในระหว่างทำการชุบ เพราะฉะนั้นจะต้องมีการดูแลสภาพของอิเล็กโทรไลต์ให้เหมาะสมตลอดเวลา โดยการเติมสารเคมีลงไปเพื่อเพิ่มปริมาณไอออนบวกของอิเล็กโทรไลต์ที่สูญเสียไประหว่างการชุบ

- อิเล็กโทรไลต์ (electrolyte) คือ สารละลายหรือของเหลวซึ่งสามารถแตกตัวเป็นไอออนได้บางส่วนหรือทั้งหมด และยอมให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านได้ เช่น คอปเปอร์ (ii) ซัลเฟต เป็นต้น ซึ่งในการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า ขั้วแคโทดและขั้วแอโนดจะถูกต่อเข้ากับแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง และจุ่มลงในสารละลายอิเล็กโทรไลต์เกิดเป็นวงจรไฟฟ้าขึ้น และกระบวนการดังกล่าวจะต้องควบคุมสภาพของอิเล็กโทรไลต์ให้เหมาะสมตลอดเวลา ทั้งความเข้มข้น อุณหภูมิ และความเป็นกรด-ด่างของอิเล็กโทรไลต์



ภาพที่ 2.13 แสดงอุปกรณ์สำหรับการชุบโลหะด้วยไฟฟ้ากระแสตรง

ตัวอย่างการชุบทองแดงด้วยไฟฟ้า มีการใช้แผ่นแพลตตินัม (Pt) เป็นขั้วแคโทด (ขั้วลบ) และใช้แผ่นทองแดงบริสุทธิ์ (Cu) เป็นขั้วแอโนด (ขั้วบวก) โดยขั้วทั้งสองถูกจุ่มอยู่ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์คอปเปอร์ (ii) ซัลเฟต, CuSO_4 และมีการต่อขั้วทั้งสองเข้ากับแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง ทำให้อิเล็กโทรไลต์เกิดการแตกตัวเป็นไอออน 2 ชนิด ได้แก่ ไอออนคอปเปอร์ (Cu^{2+}) ซึ่งมีประจุบวก และไอออนซัลเฟต (SO_4^{2-}) ซึ่งมีประจุลบ โดยไอออนคอปเปอร์ (Cu^{2+}) จะวิ่งเข้าสู่แผ่นแพลตตินัม (Pt) ซึ่งเป็นขั้วแคโทด (ขั้วลบ) เกิดการเกาะติดของทองแดงบนผิวแพลตตินัม และไอออนซัลเฟต (SO_4^{2-}) จะวิ่งเข้าสู่แผ่นทองแดง (Cu) ซึ่งเป็นขั้วแอโนด (ขั้วบวก) เกิดปฏิกิริยากับทองแดงกลายเป็นคอปเปอร์ซัลเฟต ละลายลงสู่อิเล็กโทรไลต์เพื่อแทนที่คอปเปอร์ซัลเฟตที่หายไปจากการแตกตัวเป็นไอออน และคอปเปอร์ซัลเฟตในอิเล็กโทรไลต์ก็ยังคงแตกตัวเป็นไอออนคอปเปอร์ (Cu^{2+}) และ ไอออนซัลเฟต (SO_4^{2-}) หมุนเวียนไปและเกิดการชุบทองแดงที่ขั้วแคโทดทราบเท่าที่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่าน ดังแสดงในภาพที่ 2.14



ภาพที่ 2.14 แสดงอุปกรณ์ชุบทองแดงด้วยไฟฟ้า โดยใช้ขั้วแอโนดแบบกันกร่อน [8]

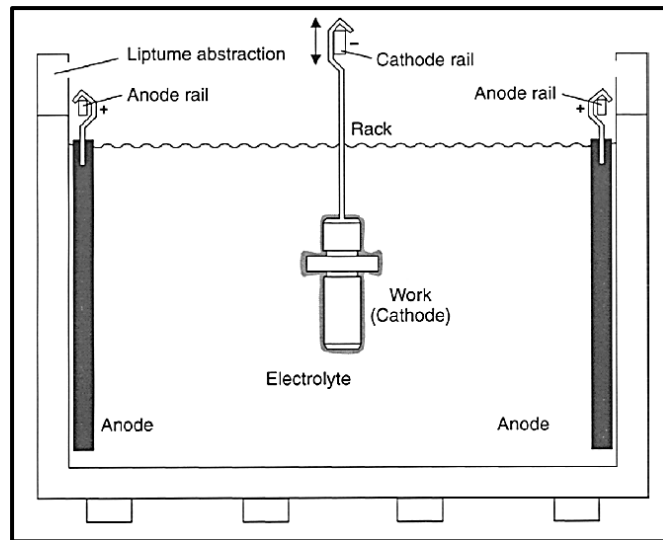
ในปี ค.ศ. 1835 ไมเคิล ฟาราเดย์ (Michael Faraday) นักเคมีและนักฟิสิกส์ชาวอังกฤษ ได้คิดค้นกระบวนการทางเคมีไฟฟ้า ซึ่งเขาได้ศึกษาและออกแบบเครื่องมือที่ใช้ในงานชุบโลหะด้วยไฟฟ้า ได้แก่ ขั้วแคโทด ขั้วแอโนด อิเล็กโทรไลต์ และแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง และค้นพบว่าปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นที่ขั้วไฟฟ้า (electrode) จะมีความสัมพันธ์โดยตรงกับปริมาณและระยะเวลาที่กระแสไฟฟ้าไหลผ่านสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ซึ่งเขาได้ตั้งกฎความสัมพันธ์ระหว่างปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นที่ขั้วทั้งสอง ปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ใช้และระยะเวลาที่ให้กระแสไหลผ่าน ดังนี้

- กฎข้อที่ 1 “น้ำหนักของโลหะที่มากาที่ขั้วแคโทดและน้ำหนักของโลหะที่ละลายออกจากขั้วแอโนดเป็นสัดส่วนโดยตรงกับปริมาณของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านสารละลายอิเล็กโทรไลต์” ซึ่งสามารถนำมาใช้ในการควบคุมความหนาของชั้นเคลือบได้จากการควบคุมกระแสไฟฟ้าที่ใช้หรือระยะเวลาที่ใช้ในการชุบ ถ้าเราต้องการชั้นเคลือบที่มีความหนาเท่าหนึ่ง สามารถเลือกได้สองวิธี คือ จ่ายกระแสไฟฟ้าปริมาณมากและใช้เวลาสั้นในการชุบ หรือ จ่ายกระแสไฟฟ้าปริมาณน้อยและใช้เวลานานในการชุบ
- กฎข้อที่ 2 “น้ำหนักของโลหะต่างชนิดกันที่ได้จากสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่ต่างกัน โดยผ่านกระแสไฟฟ้าเข้าไปในปริมาณที่เท่ากัน จะเป็นสัดส่วนกับสมมูลไฟฟ้าเคมีของโลหะนั้นๆ” หมายความว่าโลหะแต่ละชนิดมีคุณสมบัติการแยกสลายไม่เหมือนกัน เมื่อผ่านกระแสไฟฟ้าปริมาณเท่ากัน โลหะบางชนิดจะแยกสลายออกมามาก แต่โลหะบางชนิดจะแยกสลายออกมาน้อย ซึ่งขึ้นอยู่กับลักษณะเฉพาะหรือสมมูลไฟฟ้าเคมี (electrochemical equivalent, mg/A.s, g/A.hrs) ของโลหะชนิดนั้นๆ

การชุบโครเมียมด้วยไฟฟ้า (chromium electroplating) เป็นขั้นตอนที่มีความสำคัญและนิยมมาทำผิวสุดท้าย (final deposit) ของชิ้นงานในอุตสาหกรรม เนื่องจากสมบัติที่ดีของโครเมียมทั้งทางกายภาพ ทางกล และทางเคมีไฟฟ้า กล่าวคือ โครเมียมมีสีขาวนวล สุกใส และมีความสวยงาม

เหมาะสำหรับเคลือบผิวสุดท้ายของชิ้นงาน นอกจากนี้โครเมียมยังมีความแข็งสูง (800-1000 VHN) มีความต้านทานต่อการสึกหรอ-การกัดกร่อน-การหมองที่ดี (good wear-corrosion-tarnish resistance) มีค่าสัมประสิทธิ์ของความเสียดทานต่ำ (low coefficient of friction) และยังเป็นธาตุที่นำไฟฟ้าได้ดีส่งผลให้สามารถชุบติดลงบนโลหะอื่นได้ง่าย เช่น เหล็กกล้า (steel) อะลูมิเนียม (aluminum) ทองแดงผสม (copper alloy) และสังกะสีผสม (zinc alloy) เป็นต้น เนื่องจากการชุบโครเมียมด้วยไฟฟ้าสามารถนำไปใช้ประโยชน์แบ่งออกเป็น 2 ประเภทตามการใช้งาน ดังนี้

- การชุบเพื่อการตกแต่งผิว (decorative deposits) จะชุบโครเมียมให้มีความหนาไม่เกิน 0.8 ไมครอน (<800 nm) โดยจะเป็นการชุบโครเมียมบางเพื่อการตกแต่งผิวสุดท้ายของชิ้นงานให้มีความสวยงาม เป็นผิวเงาของชั้นโครเมียม โดยจะก่อให้เกิดความต้านทานการกัดกร่อน (corrosion resistance) ความลื่นผิว (lubricity) และความทนทานในการใช้งาน (durability) โดยปกติแล้วการชุบเพื่อตกแต่งผิวมักจะชุบโครเมียมลงบนชิ้นงานที่ผ่านการชุบเคลือบโลหะอื่นมาก่อนแล้วเพื่อความสวยงามและสมบัติที่ดีกว่าการชุบโครเมียมบางลงบนชิ้นงานโดยตรง เช่น นำชิ้นงานไปชุบรองพื้นด้วยทองแดง (Cu) ตามด้วยนิกเกิล (Ni) และค้อยชุบโครเมียม (Cr) เป็นชั้นสุดท้าย แต่บางกรณีอาจชุบโครเมียมลงบนชิ้นงานโดยตรงได้เลย โดยการชุบเพื่อตกแต่งผิวนิยมใช้ในการผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ (automotive parts) เครื่องมือช่าง (hand tools) ก๊อกน้ำ (faucets) เครื่องเรือนทำจากโลหะ (metal furniture) และจักรยาน (bicycles) เป็นต้น
- การชุบเพื่อการใช้งาน (functional deposits) หรือเป็นที่รู้จักกันในชื่อ การชุบฮาร์ดโครม (hard chrome) จะชุบโครเมียมให้มีความหนามากกว่า 0.8 ไมครอน (>800 nm) เพื่อเพิ่มความหนาให้กับชิ้นส่วนของเครื่องจักรที่ผ่านการใช้งานจนสึกหรอ เช่น เครื่องมือตัดเฉือน (cutting tools) แกนไฮดรอลิก (hydraulic bar) เป็นต้น ซึ่งภายหลังจากการชุบโครเมียมหนาจะนำไปเจียรระไนให้ได้ขนาดที่ต้องการและสามารถนำชิ้นส่วนกลับไปใช้งานได้ดังเดิม ในที่นี้ชั้นโครเมียมจะช่วยเพิ่มสมบัติที่ผิวของชิ้นงาน ได้แก่ เพิ่มความแข็ง (hardness) มีความต้านทานความร้อน-การสึกหรอ-การกัดกร่อน-การกัดเซาะ (thermal-wear-corrosion-erosion resistance) และมีค่าสัมประสิทธิ์ของความเสียดทานต่ำ (low coefficient of friction) และการชุบโครเมียมแบบหนามักจะชุบโครเมียมลงบนชิ้นงานโดยตรง



ภาพที่ 2.15 แสดงอุปกรณ์การชุบโครเมียมด้วยไฟฟ้า โดยใช้แอโนดแบบถาวร คือ แท่งตะกั่ว [7]

เนื่องจากโครเมียมเป็นโลหะที่แข็งมาก แต่เปราะ ส่งผลให้ความเค้นของชั้นเคลือบและก๊าซไฮโดรเจนที่ผสมอยู่โครเมียมเกิดการหลุดออกขณะทำการชุบ ทำให้ชั้นโครเมียมที่ได้มีลักษณะแตกร้าวหรือเป็นรูพรุน ถ้าความหนาของชั้นโครเมียมน้อยกว่า 20 ไมครอน จะไม่เกิดการแตกร้าวแต่จะเกิดรูพรุนกระจายอยู่ทั่วชั้นโครเมียม แต่ถ้าความหนาชั้นโครเมียมมากกว่า 20 ไมครอน จะเกิดการแตกร้าวแต่ไม่เกิดรูพรุนอยู่บนชั้นโครเมียม ดังนั้นการชุบโครเมียมบางกว่า 20 ไมครอน จะทำให้โครเมียมซึ่งมีรูพรุนกระจายอยู่ไม่สามารถป้องกันการกัดกร่อนได้ จึงต้องทำการชุบโลหะอื่น (เช่น ทองแดง นิกเกิล) รองพื้นก่อนชุบโครเมียมเพื่อไม่ให้เกิดการกัดกร่อนบริเวณรูพรุนของโครเมียมได้ แต่สำหรับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยต้องการให้ชั้นโครเมียมเกิดรูพรุนหรือรอยแตก เพื่อให้อะตอมไนโตรเจนสามารถแพร่เข้าสู่เนื้อพื้นของชิ้นงานได้ดียิ่งขึ้น จึงทำการชุบโครเมียมบางลงบนชิ้นงานเหล็กกล้าเครื่องมือ H13 โดยตรง

2.4 การสูญเสียคาร์บอนที่ผิว (Surface Decarburization) [11-15]

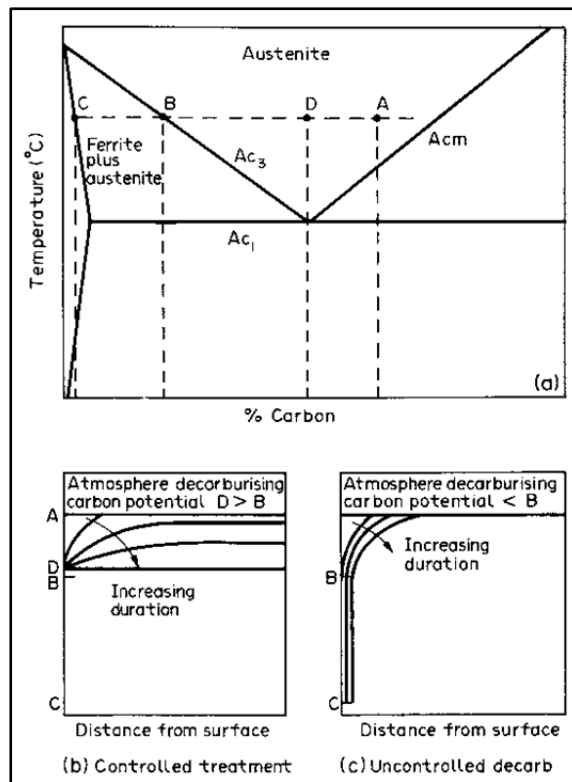
การสูญเสียคาร์บอน (decarburization) จะเกิดขึ้นในเหล็กกล้าคาร์บอนเป็นหลัก เมื่อมีการใช้งานหรือทำกระบวนการทางความร้อนที่อุณหภูมิสูงกว่า 700 องศาเซลเซียสในบรรยากาศที่ไม่เหมาะสม กล่าวคือ บรรยากาศที่ก่อให้เกิดการสูญเสียคาร์บอน (decarburizing atmosphere) ได้แก่ ไฮโดรเจน (H_2), คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) และไอน้ำ (H_2O) ซึ่งการสูญเสียคาร์บอนจะลดความแข็งแรง ความแข็ง และสมบัติต่างๆ ของเหล็กกล้าคาร์บอนจากการแพร่ของอะตอมคาร์บอนออกจากผิวชิ้นงานสู่บรรยากาศ โดยในเหล็กกล้าคาร์บอนสูงจะเกิดผลเสียจากการสูญเสียคาร์บอนมากกว่าเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ ซึ่งการสูญเสียคาร์บอนจะเกิดจากปฏิกิริยา ดังนี้





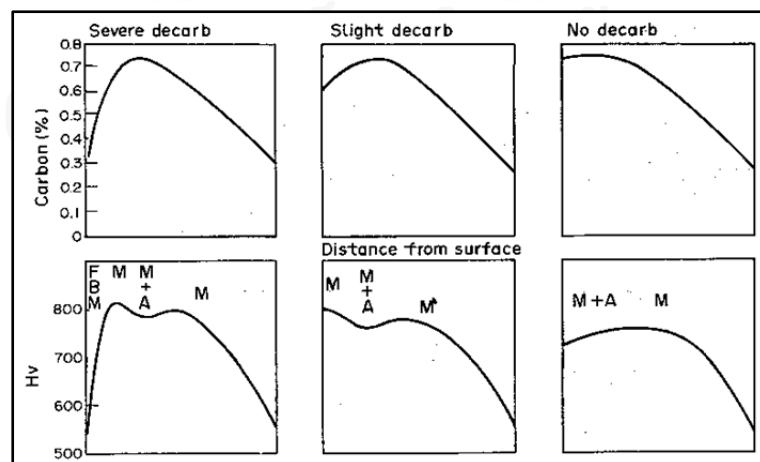
ความแตกต่างระหว่างบรรยากาศที่ก่อให้เกิดการสูญเสียคาร์บอนแบบมีการควบคุม (controlled decarburization) และแบบไม่มีการควบคุม (uncontrolled decarburization) จะถูกอธิบายในภาพที่ 2.16 โดยภาพที่ 2.16 (a) จะแสดงแผนภูมิสมมูลระหว่างเหล็กกับคาร์บอน ถ้าเหล็กกล้ามีปริมาณคาร์บอนที่ผิวเท่ากับ A อยู่ในบรรยากาศที่มีศักย์คาร์บอนสมมูล (carbon potential equivalent) เท่ากับ D ดังนั้นปริมาณคาร์บอนที่ผิวของเหล็กกล้าจะลดลงเพื่อเข้าสู่ค่า D และที่จุด A กับ D จากแผนภูมิสมมูล เหล็กกล้ามีสภาพเป็นออสเตนไนต์ (γ) ทั้งคู่ ไม่มีการแปลงเฟสใดๆ ดังแสดงในภาพที่ 2.16 (b) อีกทั้งการสูญเสียคาร์บอนที่ผิวจะต้องพิจารณาระยะเวลา อุณหภูมิ และส่วนผสมของบรรยากาศ แต่ถ้าเหล็กกล้ามีปริมาณคาร์บอนที่ผิวเท่ากับ A อยู่ในบรรยากาศที่มีศักย์คาร์บอนอยู่ระหว่าง B กับ C ดังนั้นปริมาณคาร์บอนที่ผิวของเหล็กกล้าจะลดลงเพื่อเข้าสู่ช่วงดังกล่าว ดังแสดงในภาพที่ 2.16 (c) จากแผนภูมิสมมูลจะพบว่าช่วงระหว่างจุด B และ C ตกอยู่ในบริเวณที่มีสภาพสองเฟส คือ ออสเตนไนต์ (γ) ซึ่งมีปริมาณคาร์บอนเท่ากับ B กับเฟอร์ไรต์ (α) ซึ่งมีปริมาณคาร์บอนเท่ากับ C แต่ถ้าเหล็กกล้าอยู่ในบรรยากาศที่มีศักย์คาร์บอนใกล้เคียงค่าศูนย์ (ต่ำกว่า C) และมีข้อสันนิษฐานว่าไม่เกิดสเกล (scale) จะทำให้เกิดชั้นของเฟอร์ไรต์อย่างต่อเนื่องเริ่มจากผิวของเหล็กกล้า และเมื่อเวลาผ่านไปความหนาของชั้นที่สูญเสียคาร์บอน (decarburized layer) จะหนาเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ โดยการสูญเสียคาร์บอนที่ผิวสามารถตรวจสอบได้จากการวิเคราะห์ปริมาณคาร์บอนที่ความลึกต่างๆ และการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของภาคตัดขวางชิ้นงานที่สูญเสียคาร์บอนที่ผิว

การสูญเสียคาร์บอนแบบรุนแรง (severe decarburization) จะเกิดขึ้นเมื่อมีการลดลงของปริมาณคาร์บอนที่ผิวอย่างมาก ส่งผลให้สภาพผิวของเหล็กกล้ามีสภาพเป็นเฟอร์ไรต์กับเบนไนต์ ดังแสดงในภาพที่ 2.17 (a) ซึ่งการสูญเสียคาร์บอนแบบนี้จะไม่เป็นที่ยอมรับเนื่องจากจะส่งผลต่อโครงสร้างจุลภาคของผิวที่เปลี่ยนไปอย่างสิ้นเชิง มีความแข็งผิวลดลงอย่างมาก และยังมีผลกระทบต่อสมบัติอื่นๆ ของเหล็กกล้า เช่น จะเกิดความเค้นตกค้างระดับมหภาค (macro-residual stresses) จะเป็นความเค้นแรงดึง (tensile) แทนที่จะเป็นความเค้นแรงอัด (compressive) ดังแสดงในภาพที่ 2.18 ส่งผลให้ความแข็งแรงความล้า (fatigue strength) ลดลงกว่า 40% ทำให้ไม่สามารถนำไปใช้งานที่ต้องการได้

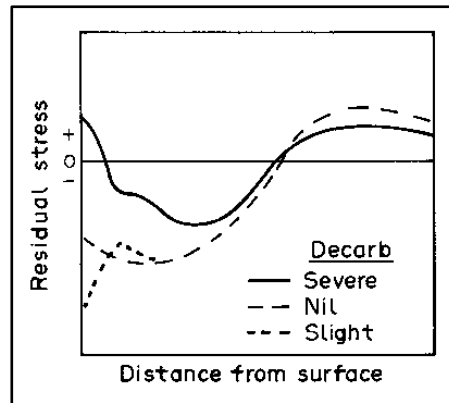


ภาพที่ 2.16 แผนภูมิสมดุระหว่างเหล็กกับคาร์บอนอธิบายการสูญเสียคาร์บอนที่ผิว [14]

การสูญเสียคาร์บอนแบบเล็กน้อย (slight decarburization) จะเกิดขึ้นเมื่อมีการลดลงของปริมาณคาร์บอนที่ผิวของเหล็กกล้าเหลือ 0.6% ส่งผลให้ผิวของสภาพของผิวเหล็กกล้าเกิดเป็น มาร์เทนไซต์ซึ่งมีความแข็งสูง ดังแสดงในภาพที่ 2.17 (b) และภายใต้ผิวของเหล็กกล้าซึ่งมีปริมาณคาร์บอนที่สูงกว่า โดยมีสภาพเป็นออสเตนไนต์ที่มีความแข็งที่ไม่สูงนักและรับแรงได้มากกว่าผิว ซึ่งในกรณีนี้เหล็กกล้าสามารถนำไปใช้งานได้

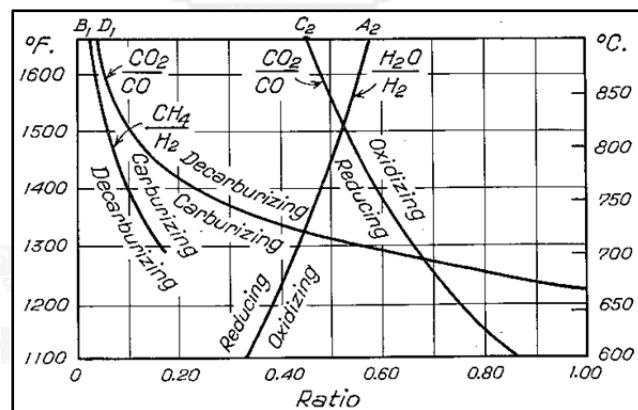


ภาพที่ 2.17 แผนภาพแสดงการสูญเสียคาร์บอนที่ผิวส่งผลต่อความแข็งจากการเกิดเฟสที่ต่างกัน โดย F = เฟอร์ไรต์, B = เบนไนต์, M = มาร์เทนไซต์, A = ออสเตนไนต์ [14]



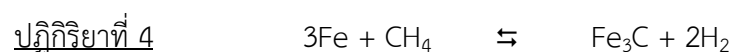
ภาพที่ 2.18 ผลจากการสูญเสียคาร์บอนที่ผิวส่งผลต่อการกระจายตัวของความเค้นตกค้าง (residual stress distribution) ในชั้นสูญเสียคาร์บอน [14]

N. R. Stansel ทำการวิจัยเรื่อง “Industrial Electric Heating” ซึ่งมีการสร้างกราฟของ Stansel แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนก๊าซที่สมดุลกับอุณหภูมิที่ต่างกัน ส่งผลต่อบรรยากาศที่จะเกิดขึ้นว่าเป็นแบบคาร์บูไรซิง (carburizing) หรือ แบบเกิดการสูญเสียคาร์บอน (decarburizing) ได้แก่ สัดส่วนของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ต่อก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ ($\text{CO}_2:\text{CO}$) และ สัดส่วนของก๊าซมีเทนต่อก๊าซไฮโดรเจน ($\text{CH}_4:\text{H}_2$) และบรรยากาศที่จะเกิดขึ้นแบบรีดิวซิง (reducing) หรือ แบบออกซิไดซิง (oxidizing) ได้แก่ สัดส่วนของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ต่อก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ ($\text{CO}_2:\text{CO}$) และสัดส่วนของไอน้ำต่อก๊าซไฮโดรเจน ($\text{H}_2\text{O}:\text{H}_2$) ดังแสดงในภาพที่ 2.19

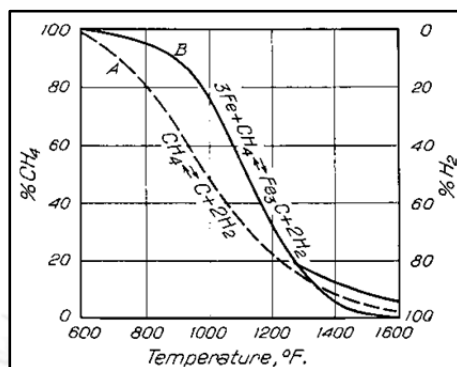


ภาพที่ 2.19 กราฟของ Stansel แสดงสมดุลที่เกิดจากอัตราส่วนของก๊าซ $\text{CH}_4:\text{H}_2$ $\text{CO}_2:\text{CO}$ และ $\text{H}_2\text{O}:\text{H}_2$ ที่อุณหภูมิต่างๆ [12]

นอกจากนี้ งานวิจัยของ Schenk ได้ค้นพบว่าการทำคาร์บูไรซิงและการสูญเสียคาร์บอนยังสามารถเกิดได้จากปฏิกิริยาเคมีอีกปฏิกิริยา คือ



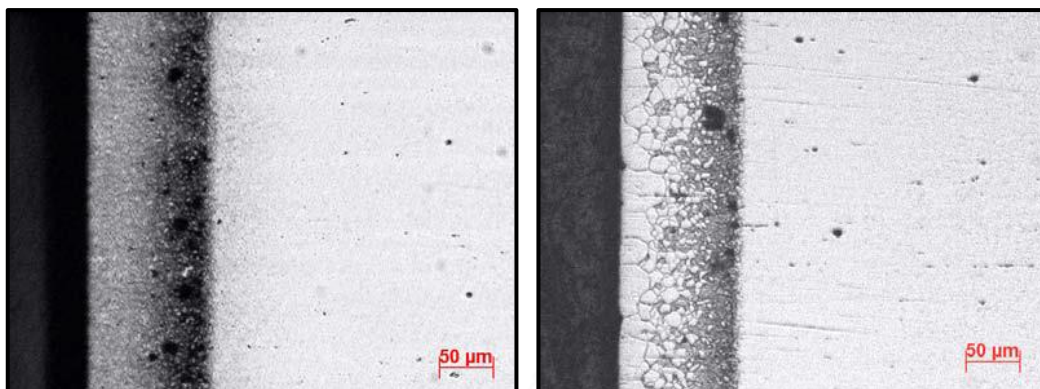
โดยในที่นี้ก๊าซมีเทน (CH_4) ทำหน้าที่เป็นก๊าซคาร์บูไรซิง และก๊าซไฮโดรเจน (H_2) ทำหน้าที่เป็นก๊าซสูญเสียคาร์บอน และวาดกราฟแสดงสัดส่วนของก๊าซทั้งสอง ณ อุณหภูมิต่างๆ ที่จะเกิดปฏิกิริยาเดินหน้าหรือย้อนหลัง ดังแสดงในภาพที่ 2.20



ภาพที่ 2.20 กราฟของ Schenk แสดงสมดุลของก๊าซไฮโดรเจน (H_2) และก๊าซมีเทน (CH_4) [11]

ในกรณีที่เกิดการสูญเสียคาร์บอนขึ้นที่ผิวของเหล็กกล้าจะต้องหาสาเหตุและที่มาของปัญหาดังกล่าว เช่น อุปกรณ์มีประสิทธิภาพที่ต่ำลง พนักงานปฏิบัติงานไม่ละเอียด เป็นต้น และจะต้องมีการแก้ไขปัญหาดังกล่าวโดยเร็ว ในชิ้นงานเหล็กกล้าที่เกิดการสูญเสียคาร์บอนที่ผิวไปแล้วจะต้องตรวจสอบควบคุมคุณภาพโดยการพิจารณาถึงสมบัติผิวที่เปลี่ยนไปว่ายังสามารถนำไปใช้งานได้หรือไม่ ถ้าเกิดการสูญเสียคาร์บอนปริมาณมาก อาจจะนำเหล็กกล้าไปเข้าขั้นตอนการผลิตใหม่แต่แรก แต่ถ้าเกิดการสูญเสียคาร์บอนปริมาณน้อย อาจจะนำเหล็กกล้าไปผ่านการขัดผิวที่เกิดการสูญเสียคาร์บอนออกจากชิ้นงาน หรือนำไปเข้ากระบวนการเพิ่มปริมาณคาร์บอน (carbon restoration treatment) อีกครั้งหนึ่ง

จากวิทยานิพนธ์ระดับปริญญาโทบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปี พ.ศ.2548 ของ นางสาวชวีพรีย์ ป่าไร่ เรื่อง “การหาคุณลักษณะของเหล็กกล้าเครื่องมือ H13 ที่ทำไนตรายดิงแบบพลาสมา” ได้ทำการศึกษาผลของเวลา อุณหภูมิในการทำไนตรายดิงแบบพลาสมาและการสูญเสียคาร์บอนที่ผิวของชิ้นงานเหล็กกล้าเครื่องมือ H13 โดยจากการวิจัยพบว่า ถ้าเวลาหรืออุณหภูมิในการทำไนตรายดิงเพิ่มขึ้น จะทำให้ชั้นไนตรายด์ที่ได้หนาขึ้น และโครงสร้างจุลภาคของชั้นไนตรายด์ในชิ้นงานปกติ จะเกิดเฟส Fe_4N Fe_3N และ CrN ทั่วทั้งชั้น แต่โครงสร้างจุลภาคของชั้นไนตรายด์ในชิ้นงานที่สูญเสียคาร์บอนที่ผิว จะแบ่งออกเป็นสองชั้น ได้แก่ ชั้นที่ใกล้ผิวชิ้นงานจะมีโครงสร้างจุลภาคเป็นสีขาว ประกอบด้วยเฟส Fe_4N Fe_3N เท่านั้น แต่บริเวณที่อยู่ลึกลงไปจะมีโครงสร้างจุลภาคเป็นสีเทาดำ ประกอบด้วยเฟส Fe_4N Fe_3N และ CrN ซึ่งบริเวณที่พบ CrN นั้น เป็นบริเวณเดียวกับที่มี Cr_7C_3 อยู่ก่อน จึงเป็นไปได้ว่า CrN เกิดจากการที่อะตอมไนโตรเจนเข้าไปแทนที่อะตอมคาร์บอนของ Cr_7C_3 ทำให้โครงสร้างจุลภาคที่ได้มีความแตกต่างจากชิ้นงานปกติ ดังแสดงในภาพที่ 2.21



ภาพที่ 2.21 แสดงโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แสง กำลังขยาย 100 เท่า ของชิ้นงาน H13 ที่ผ่านการทำไนตรายดิงแบบพลาสมา (รูปซ้าย) ชิ้นงานปกติ (รูปขวา) ชิ้นงานผ่านการสูญเสียคาร์บอนที่ผิว ก่อนทำไนตรายดิง [16]

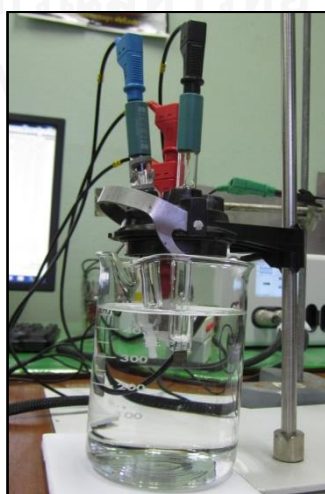
ซึ่งการสูญเสียคาร์บอนที่ผิวก่อนทำไนตรายดิงแบบพลาสมาจะส่งผลให้ได้โครงสร้างจุลภาคที่ต่างจากชิ้นงานปกติที่ทำไนตรายดิงแบบพลาสมา ทำให้ชิ้นงานดังกล่าวมีความต้านทานการกัดกร่อนที่ต่างออกไปด้วย เนื่องจากเกิดขึ้นไนตรายดิงที่ไม่เหมือนกัน จึงนำมาศึกษาต่อในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ซึ่งอาจนำมาปรับปรุงความต้านทานการกัดกร่อนของชิ้นงานเหล็กกล้าเครื่องมือ H13 ที่ผ่านการทำไนตรายดิงได้

2.5 ความต้านทานการกัดกร่อน (Corrosion Resistance) [17-21]

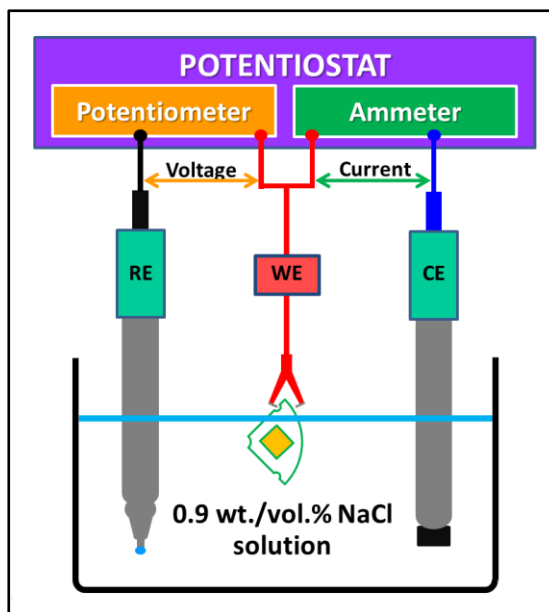
การกัดกร่อน (corrosion) หมายถึงการเสื่อมสภาพจากการเกิดปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้า (electrochemical reaction) ของโลหะกับสิ่งแวดล้อม ซึ่งในที่นี้จะมีการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนในสารละลายของน้ำ โดยการกัดกร่อนของโลหะนั้นสามารถเกิดได้หลายรูปแบบ เช่น การกัดกร่อนแบบทั่วผิวหน้า (uniform corrosion) การกัดกร่อนแบบกัลวานิก (galvanic corrosion) การกัดกร่อนแบบรูเข็ม (pitting corrosion) เป็นต้น ซึ่งเมื่อเกิดการกัดกร่อนของโลหะปริมาณมากจนถึงระดับหนึ่ง จะทำให้เกิดความเสียหายของโลหะ (metal failure) และไม่สามารถนำไปใช้งานได้ตามปกติ จึงต้องมีเครื่องมือวัดความต้านทานการกัดกร่อน (corrosion resistance) เพื่อเป็นตัวบ่งชี้รูปแบบ ระดับ ความรุนแรงของการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นของโลหะ และนำข้อมูลที่ได้จากการทดสอบมาแปลงเป็นอัตราการกัดกร่อนของโลหะ (corrosion rate) เพื่อหาระยะเวลาที่โลหะนั้นยังสามารถทำงานได้ภายใต้สภาวะการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นในการทำงาน โดยความต้านทานการกัดกร่อนสามารถหาได้หลายวิธี ตั้งแต่การวัดความหนาที่ลดลงของโลหะที่เกิดการกัดกร่อน การทดสอบทางเคมี จนถึงการทดสอบด้วยวิธีทางกล แต่ความต้านทานการกัดกร่อนจัดเป็นสมบัติทางเคมีไฟฟ้า ซึ่งสามารถทดสอบด้วยวิธีเคมีไฟฟ้า (electrochemical testing) ที่ใช้เวลาในการทดสอบที่สั้นกว่าวิธีอื่นและให้ผลทดสอบที่แม่นยำสูง จากการป้อนพลังงานไฟฟ้าเร่งการกัดกร่อนด้วยเครื่องทดสอบ Potentiostat หรือ Galvanostat โดยการป้อนศักย์ไฟฟ้าหรือกระแสไฟฟ้า เพื่อเร่งให้เกิดการกัดกร่อนแล้วทำการวัด

ค่าพารามิเตอร์การกัดกร่อน (corrosion parameters) ซึ่งจะแสดงสมบัติก้านการกัดกร่อนของโลหะที่นำมาทดสอบโดยใช้เป็นขั้วแอโนด (anode electrode) ในเซลล์เคมีไฟฟ้าของการกัดกร่อน (electrochemical corrosion cell) ที่มีสารละลายที่สัมผัสโลหะเป็นอิเล็กโทรไลต์ (electrolyte) โดยจะต้องควบคุมสารละลายให้มีความเข้มข้น อุณหภูมิ ปริมาณออกซิเจน และการกวน ตามมาตรฐานการทดสอบหรือตามสถานะสารละลายจริงที่ใช้ในอุตสาหกรรม เกิดผลทดสอบจากวิธีเคมีไฟฟ้าเพื่อเปรียบเทียบสมบัติและพฤติกรรมการกัดกร่อนของโลหะหรือโลหะผสมได้เป็นอย่างดีทั้งการกัดกร่อนแบบเกิดทั่วผิวหน้าโลหะและแบบเกิดเฉพาะที่แบบต่าง ๆ โดยการทดสอบหาความต้านทานการกัดกร่อนด้วยวิธีเคมีไฟฟ้าจะทำในเซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบ 3 ขั้ว ได้แก่

- ขั้วแอโนด (anode electrode) ในที่นี้คือชิ้นงานโลหะตัวอย่าง (working electrode) เป็นขั้วที่เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (oxidation reaction) ซึ่งมีการจ่ายอิเล็กตรอนให้กับสารละลายอิเล็กโทรไลต์ กล่าวคือเกิดการกัดกร่อน
- ขั้วแคโทด (cathode electrode) ในที่นี้คือขั้วมาตรฐานอ้างอิง (standard reference electrode) เป็นขั้วที่เกิดปฏิกิริยารีดักชัน (reduction reaction) ซึ่งมีการรับอิเล็กตรอนจากสารละลายอิเล็กโทรไลต์ มีหน้าที่เป็นตัวเปรียบเทียบในการหาค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน (corrosion potential, E_{corr}) เนื่องจากเป็นขั้วที่มีค่าศักย์ไฟฟ้าคงที่ เช่น saturated calomel electrode (SCE) หรือ ซิลเวอร์-ซิลเวอร์คลอไรด์ (Ag-AgCl)
- ขั้วจ่ายกระแส (counter electrode, auxiliary electrode) ทำหน้าที่ป้อนศักย์ไฟฟ้าให้แก่เซลล์ไฟฟ้าเคมีเพื่อเร่งการกัดกร่อนของขั้วแอโนด และทำให้เครื่องมือวัดสามารถหาสมบัติทางเคมีไฟฟ้าเพื่อแปลงค่าหาความต้านทานการกัดกร่อน ซึ่งนิยมใช้โลหะที่เสถียร ได้แก่ แพลทินัม (platinum) กราไฟต์ (graphite) และ เหล็กกล้าไร้สนิม (stainless steel)



ภาพที่ 2.22 เซลล์เคมีไฟฟ้าการกัดกร่อน



ภาพที่ 2.23 แผนภาพแสดงการทำงานของเครื่อง Potentiostat ในงานวิจัยนี้

ข้อมูลที่ได้จากการทดลองมีตั้งแต่ ศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน (corrosion potential, E_{corr}) ที่ใช้ในการเรียงลำดับกลวานิกเพื่อการเลือกใช้โลหะที่เหมาะสม อัตราการกัดกร่อน (corrosion rate) ของการกัดกร่อนแบบเกิดทั่วผิวหน้า ความต้านทานการกัดกร่อน (corrosion resistance) เช่น ความต้านทานการเกิดการกัดกร่อนแบบรูเข็ม (pitting resistance) ความต้านทานการเกิดการกัดกร่อนบริเวณซอก (crevice resistance) เป็นต้น การเกิดฟิล์มบางป้องกันตนเอง (passivity) ของโลหะหรือโลหะผสมที่มีสมบัติ active-passive และยังมีข้อมูลอื่นที่สามารถหาได้จากการทดลองด้วยเทคนิคต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6 วิธีการทดลองการกัดกร่อนด้วยเทคนิคทางเคมีไฟฟ้าแบบต่างๆ [20]

เทคนิค	วิธีทำ	ผลการทดลองและข้อมูลที่ได้
Tafel	- ป้อนศักย์หรือกระแสรอบค่า E_{corr} รว ± 250 mV และสร้างเส้นกราฟของ E & $\log i$	- ได้ polarization curve หาค่า E_{corr} และ i_{corr} - นำค่า i_{corr} คำนวณหาอัตราการกัดกร่อนตามกฎฟาราเดย์
Linear Polarization	- ป้อนศักย์หรือกระแสรอบค่า E_{corr} รว ± 250 mV และสร้างเส้นกราฟของ ΔE & ΔI โดยมีลักษณะเป็นเส้นตรง	- ได้ค่า polarization resistance หรือ PR หรือ R_p จากความชันของกราฟเส้นตรง นำไปหาอัตราการกัดกร่อนได้
E_{corr} & Time	- วัดค่าศักย์ของโลหะตัวอย่างในสารละลายที่กำหนดและสร้างกราฟของ E_{corr} & Time จนศักย์ไฟฟ้าคงที่	- ได้ค่าศักย์ไฟฟ้าของการกัดกร่อน (E_{corr}) ที่ใช้เรียงลำดับกลวานิกได้

ตารางที่ 2.6 (ต่อ) วิธีการทดลองการกัดกร่อนด้วยเทคนิคทางเคมีไฟฟ้าแบบต่างๆ [20]

เทคนิค	วิธีทำ	ผลการทดลองและข้อมูลที่ได้
Potentiodynamics Polarization	- ป้อนศักย์ไฟฟ้าจากช่วงแอนดิกไปยังช่วงแคโทดิกเทียบกับ E_{corr} วัดกระแส สร้างเส้นกราฟของ E & $\log i$ จนถึงจุดที่มีกระแสพุ่งสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว	- ได้ polarization curve ที่แสดงสภาพ passivity ที่แสดงสมบัติต้านทานการกัดกร่อน - ได้ค่าศักย์ที่ฟิล์มแตก (E_{pit})
Cyclic Polarization	- ป้อนศักย์ไฟฟ้าจาก -100 mV จาก E_{corr} ไปทางบวกจนเกิดฟิล์มและจนฟิล์มแตก แล้วจึงป้อนศักย์ไฟฟ้าย้อนสู่ค่า E_{corr}	- ได้ polarization curve ที่แสดงความต้านทานการกัดกร่อนและความสามารถซ่อมแซมฟิล์มที่แตก
Potentiostatics	- ป้อนศักย์ไฟฟ้าคงที่ค่าหนึ่ง วัดค่ากระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้น สร้างเส้นกราฟ i & Time	- ได้เวลาที่ฟิล์มยังคงทนทานและเวลาของการซ่อมฟิล์มที่แตก
Galvanostatic	- ป้อนกระแสไฟฟ้าคงที่ค่าหนึ่ง วัดศักย์ไฟฟ้าที่เปลี่ยนไป สร้างเส้นกราฟ E & Time	- ได้เวลาที่ฟิล์มโลหะละลายออก คำนวณความหนาของชั้นโลหะ
Reactivation	- ป้อนศักย์ไฟฟ้าจากค่าที่มีฟิล์มถอยหลังเข้าสู่ค่า E_{corr} แล้ววัดกระแสไฟฟ้า สร้างเส้นกราฟของ E & $\log i$ โดยชิ้นงานจะต้องมี sensitized	- ได้ polarization curve แสดง activity peak ที่ใช้หาปริมาณการเกิด sensitization ได้
Electrochemical Impedance Spectroscopy	- ป้อนความถี่ไฟฟ้าในช่วง 10^{-2} ถึง 10^5 Hz ป้อนแอมพลิจูดในช่วง 5 ถึง 10 mV	- ได้ Nyquist และ Bode plot - ศึกษาความต้านทานการกัดกร่อนที่ผิวสัมผัสของโลหะกับสารละลายจากวงจรสมมูล (equivalent circuit) เพื่อหาค่า impedance parameter

โดยในงานวิจัยนี้จะใช้การทดสอบหาความต้านทานการกัดกร่อนด้วยการทดสอบทางเคมีไฟฟ้า ด้วยเทคนิคสองเทคนิค ดังนี้

- เทคนิคโพเทนซิโอดนามิกส์ (Potentiodynamics Technique) เป็นการทดสอบที่มีการป้อนศักย์ไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นระหว่างการทดสอบให้แก่เซลล์การกัดกร่อนในสภาวะทดสอบ

โดยเริ่มจากการทดสอบหาคักย์ไฟฟ้าเปิดวงจร (Open Circuit Potential, E_{OCP}) ซึ่งไม่มีการป้อนพลังงานไฟฟ้าใดๆ แก่เซลล์ทดสอบ เป็นเวลา 1,800 วินาที เพื่อวัดค่าเฉลี่ยของ E_{OCP} จากนั้นจึงทำการทดสอบด้วยเทคนิคโพเทนชิโอไดนามิกส์ โดยป้อนศักย์ไฟฟ้าเริ่มต้น (start potential) เท่ากับ -1.00 โวลต์ (Ag-AgCl) ศักย์ไฟฟ้าสุดท้าย (stop potential) เท่ากับ +2.00 โวลต์ (Ag-AgCl) เทียบกับ E_{OCP} และอัตราการเพิ่มศักย์ไฟฟ้า (scan rate) เท่ากับ 0.001 โวลต์ต่อวินาที ซึ่งเป็นการทดสอบที่เริ่มจากช่วงปฏิกิริยาแคโทดิก เข้าสู่ช่วงสมดุล และช่วงปฏิกิริยาแอโนดิก จากนั้นจะได้เส้นโค้งโพลาริเซชัน (polarization curve) เพื่อไปทำการประมาณนอกค่าทาเฟล (Tafel extrapolation) พิจารณาค่าพารามิเตอร์การกัดกร่อน (corrosion parameters) เพื่อเปรียบเทียบเป็นสมบัติด้านการกัดกร่อน

- เทคนิคโพเทนชิโอสแตติก (Potentiostatics Technique) เป็นการทดสอบที่มีการป้อนศักย์ไฟฟ้าคงที่ซึ่งเป็นศักย์ไฟฟ้าที่ก่อให้เกิดปฏิกิริยาแอโนดิก (anodic potential) ให้แก่เซลล์ทดสอบ เพื่อวัดกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้น ซึ่งแสดงถึงว่าชิ้นงานที่มีกระแสไฟฟ้าสูง จะมีความต้านทานการกัดกร่อนต่ำ

อัตราการกัดกร่อนเป็นอัตราการสูญเสียโลหะในสารเคมีที่กำหนดในมาตรฐานการทดสอบในช่วงเวลาหนึ่ง โดยหน่วยที่นิยมใช้ คือ อัตราการบางลงของโลหะ (Penetration rate) เช่น ใช้หน่วยเป็น mpy (mils per year) โดย 1 mil = 0.001 นิ้ว หรืออาจใช้หน่วยเป็น mm/yr (millimeter per year) ก็ได้โดยนำค่ากระแสไฟฟ้าของการกัดกร่อน ที่ได้จากการทดสอบด้วยเทคนิค potentiodynamic polarization มาเข้าสู่สูตรของฟาราเดย์เพื่อคำนวณหาอัตราการกัดกร่อน ดังนี้

สูตรการหาอัตราการกัดกร่อน [18]

$$CR = K_1 \frac{i_{corr}}{\rho} EW$$

CR	คือ อัตราการกัดกร่อน (corrosion rate)
K_1	คือ ค่าคงที่ของการกัดกร่อน (corrosion constant)
i_{corr}	คือ ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน (current density)
ρ	คือ ความหนาแน่นของวัสดุ ในที่นี้ คือ H13 เท่ากับ 7.80 g/cm ³
EW	คือ ค่ามวลสมมูล ในที่นี้ คือ H13 เท่ากับ 26.95 g

ตารางที่ 2.7 แสดงค่าคงที่และหน่วยที่ใช้หาอัตราการกัดกร่อน [18]

Rate				
penetration rate unit (CR)	I_{corr} Unit	ρ Unit	K_1	units of K_1
mpy	$\mu\text{A}/\text{cm}^3$	g/cm^3	0.1288	mpy $\text{g}/\mu\text{A cm}$
mm/yr	$\mu\text{A}/\text{cm}^3$	g/cm^3	3.27×10^{-3}	mm $\text{g}/\mu\text{A cm yr}$

นอกจากนี้ยังได้มีการรวบรวมข้อมูลค่าอัตราการกัดกร่อนและจัดกลุ่มขนาดความรุนแรงของการกัดกร่อนตามค่าความต้านทานการกัดกร่อน ดังนี้

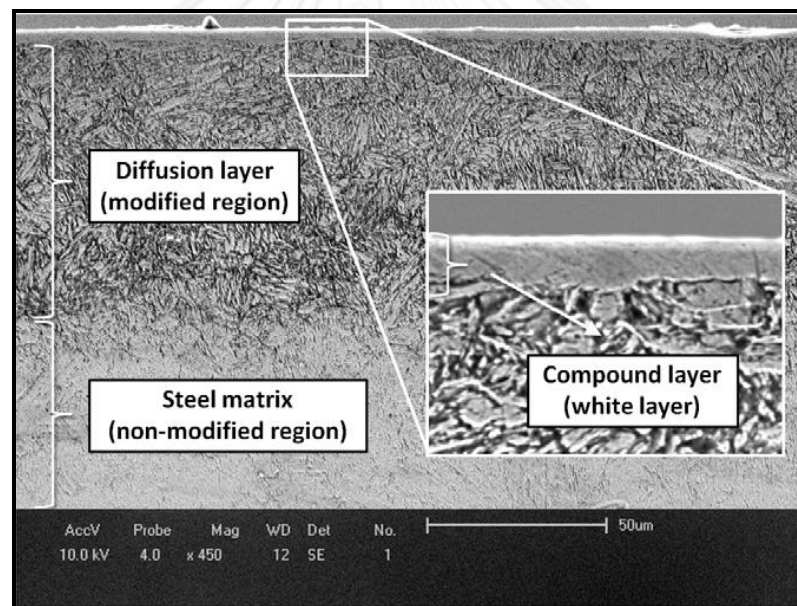
ตารางที่ 2.8 แสดงการเปรียบเทียบค่าอัตราการกัดกร่อนในหน่วยต่างๆ ของเหล็ก [18]

relative corrosion resistance	(mils/yr)	(mm/yr)	($\mu\text{m}/\text{yr}$)	(nm/h)	(pm/s)
outstanding	< 1	< 0.02	< 25	< 2	< 1
excellent	1 – 5	0.02 – 0.1	25 – 100	2 – 10	1 – 5
good	5 – 20	0.1 – 0.5	100 – 500	10 – 50	20 – 50
fair	20 – 50	0.5 – 1	500 – 1000	50 – 150	20 – 50
poor	50 – 200	1 – 5	1000 – 5000	150 – 500	50 – 200
unacceptable	200 +	5 +	5000 +	500 +	200 +

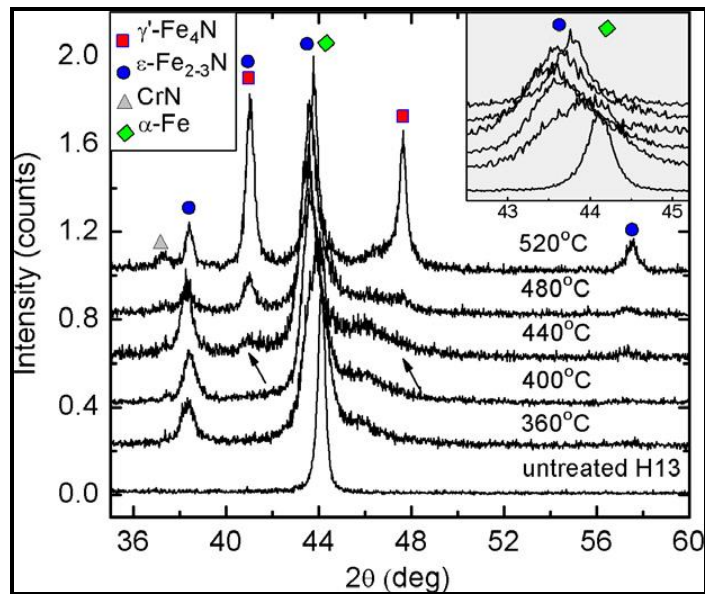
จากงานวิจัยของ Cristiano Giacomelli และคณะ ได้ทำการวิจัยเรื่อง Microstructure and corrosion behaviour of pulsed plasma-nitrided AISI H13 tool steel ซึ่งศึกษาผลของอุณหภูมิและระยะเวลาการทำไนตรายดิงแบบพัลส์พลาสมา (pulsed plasma nitriding) ต่อโครงสร้างจุลภาคและพฤติกรรมการกัดกร่อนแบบรูเข็ม (OCP, E_{pit}) บนเหล็กกล้าเครื่องมือ H13 ซึ่งทำการทดสอบพฤติกรรมการกัดกร่อนในสารละลาย 0.9% NaCl ด้วยเทคนิค cyclic polarization โดยแบ่งชิ้นงานออกเป็น 11 กลุ่ม ดังตารางที่ 2.9 และได้แสดงโครงสร้างจุลภาค ผลวิเคราะห์ XRD และวิเคราะห์พฤติกรรมการกัดกร่อน ในภาพที่ 2.24 ถึงภาพที่ 2.26 ตามลำดับ

ตารางที่ 2.9 แสดงพฤติกรรมการกัดกร่อนของชิ้นงานที่ผ่านการทำไนตรายดิงที่อุณหภูมิ และเวลาในการทำไนตรายดิงแบบพลาสมาที่ต่างกัน [22]

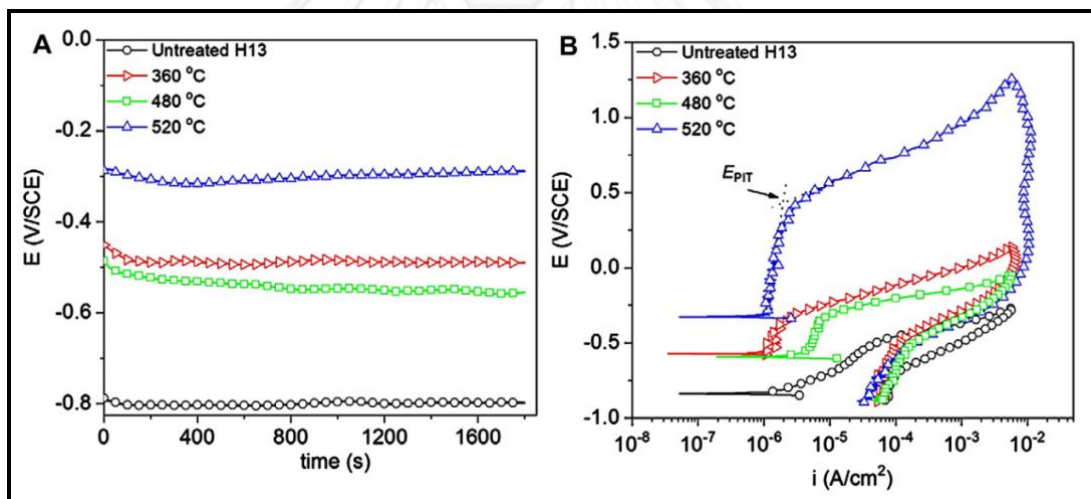
Entry	Nitriding time (h)	Substrate temperature (°C)	OCP (V/SCE)	E_{pit} (V/SCE)
1-H13	-	-	-0.797	-0.472
2	4	360	-0.529	-0.292
3	4	400	-0.490	+0.062
4	4	440	-0.265	+0.445
5	4	480	-0.555	-0.288
6	4	520	-0.288	+0.787
7	1	400	-0.520	-0.241
8	4	400	-0.490	+0.062
9	9	400	-0.357	+0.665
10	16	400	-0.395	+0.725
11	36	400	-0.424	+0.580



ภาพที่ 2.24 แสดงโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด จากภาคตัดขวางของเหล็กกล้าเครื่องมือ H13 ที่ผ่านการทำไนตรายดิงแบบพลาสมาที่อุณหภูมิ 520 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง [22]



ภาพที่ 2.25 แสดงผลวิเคราะห์ XRD ของชิ้นงานเหล็กกล้าเครื่องมือ H13 ที่ผ่านการทำโนตรายดิงแบบพลาสมา เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิต่างกัน [22]



ภาพที่ 2.26 (A) กราฟแสดง OCP ต่อเวลาที่เปลี่ยนไป และ (B) กราฟ cyclic potentiodynamic polarization ของชิ้นงานเหล็กกล้าเครื่องมือ H13 ภายหลังจากการทำโนตรายดิง เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิต่างกัน ซึ่งทดสอบในสารละลาย 0.9% NaCl [22]

ผลการวิจัยพบว่า เมื่อทำโนตรายดิงแบบพลาสมาที่อุณหภูมิต่างกัน (360, 400, 440, 480, 520 องศาเซลเซียส) จะได้โครงสร้างจุลภาคที่ผิวแตกต่างกันออกไป เมื่อทำโนตรายดิงที่อุณหภูมิต่ำกว่า 400 องศาเซลเซียสจะเกิดเฟส ϵ - Fe_{2-3}N เป็นเฟสหลักซึ่งทำหน้าที่เพิ่มศักย์ไฟฟ้าที่ฟิล์มแตก (E_{pit} , pitting potential) ต่อมาทำโนตรายดิงที่อุณหภูมิตั้งแต่ 400 องศาเซลเซียส จะเกิดชั้นสารประกอบที่ไม่แน่น (non-compact compound layer) ของเฟส ϵ - Fe_{2-3}N และ γ' - Fe_4N อีกทั้งที่อุณหภูมิตั้งแต่ 440 องศาเซลเซียสจะเริ่มเกิดการตกตะกอนของโครเมียมโนตรายด์ (CrN) ส่งผลให้ความต้านทานต่อการเกิดการกัดกร่อนแบบรูเข็มลดลง แต่เมื่อทำโนตรายดิงที่อุณหภูมิตั้งแต่ 480 องศาเซลเซียส จะเกิด

520 องศาเซลเซียสจะกลับมาเกิดเป็นเกิดชั้นสารประกอบที่แน่น (compact compound layer) ของเฟส ϵ - Fe_{2-3}N และ γ - Fe_4N ส่งผลให้ชิ้นงานมีความต้านทานต่อการกัดกร่อนแบบรูเข็มที่ดีเยี่ยม

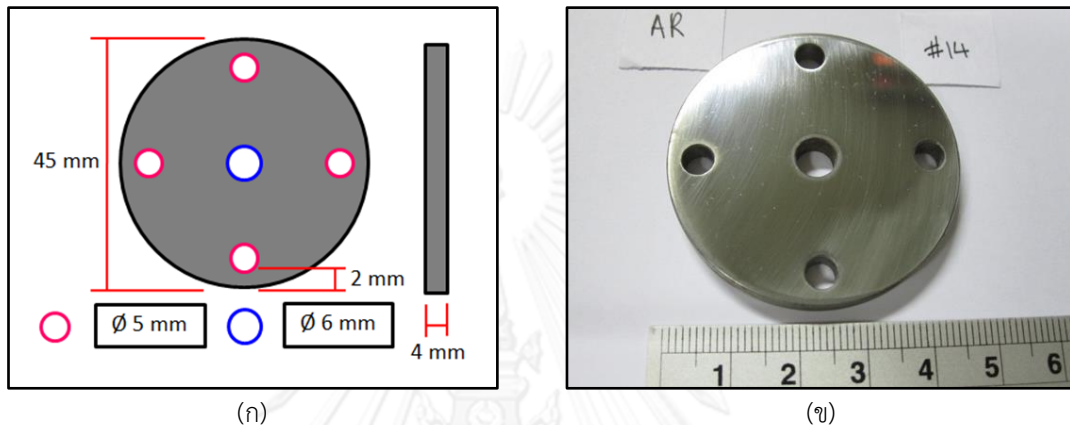
ซึ่งจากงานวิจัยของ Cristiano Giacomelli และคณะ สามารถสรุปได้ว่าโครงสร้างจุลภาคของชิ้นไนตรายด์ที่เกิดขึ้นที่ผิวของชิ้นงานที่ผ่านการทำไนตรายด์จะส่งผลต่อสมบัติด้านการกัดกร่อนโดยชิ้นไนตรายด์ (ชั้นสารประกอบและชั้นการแพร่) ที่แตกต่างกันออกไปจะทำให้มีความต้านทานการกัดกร่อนที่แตกต่างกันด้วย

งานวิจัยฉบับนี้ จึงทำการศึกษาผลของโครงสร้างจุลภาคของชิ้นไนตรายด์ที่แตกต่างกันของชิ้นงาน H13 ที่ผ่านการปรับปรุงผิวแบบต่างๆ และผลกระทบที่เกิดขึ้นต่อความต้านทานการกัดกร่อนและสมบัติทางกลที่เกิดขึ้น

บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

3.1.1 วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมชิ้นงานก่อนการปรับปรุงผิวชิ้นงาน



ภาพที่ 3.1 ชิ้นงานเหล็กกล้าเครื่องมือทำงานร้อน H13 ที่ใช้ในงานวิจัย (ก) ภาพร่างชิ้นงาน (ข) ภาพชิ้นงานจริง

- เหล็กกล้าเครื่องมือทำงานร้อน AISI H13 ลักษณะเป็นจานวงกลม หนา 4 มิลลิเมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 45 มิลลิเมตร
- เครื่องทำความสะอาดโดยใช้คลื่นอัลตราโซนิก (ultrasonic cleaner)
- เครื่องขัด และกระดาษทราย เบอร์ 320 600 800 1200 และ 2000
- ผงอะลูมินา (Al_2O_3) ขนาดอนุภาค 1 ไมครอน และ ผ้าสักหลาด
- ปากคีบชิ้นงาน
- สารละลายอะซิโตน (acetone, C_3H_6O)

3.1.2 วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการปรับปรุงผิวชิ้นงานด้วยการทำไนตรายดิงแบบต่าง ๆ

- เตาสำหรับทำไนตรายดิงแบบก๊าซ (gaseous nitriding furnace)
- ก๊าซแอมโมเนีย (ammonia gas, NH_3)
- เตาสำหรับทำไนตรายดิงแบบอ่างเกลือ (salt bath nitriding furnace)
- สารละลายเกลือไซยาไนด์ (cyanide-based salt)
- เตาสำหรับทำไนตรายดิงแบบพลาสมา (plasma nitriding furnace)
- ก๊าซไนโตรเจน (N_2), ก๊าซไฮโดรเจน (H_2) และก๊าซอาร์กอน (Ar)

3.1.3 วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการปรับปรุงผิวชิ้นงานด้วยการชุบโครเมียมด้วยไฟฟ้า

- สารละลายในการชุบโครเมียมด้วยไฟฟ้า
- ลวดทองแดง และกรรไกรตัดลวด
- น้ำยาชุบโครเมียม

3.1.4 วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการปรับปรุงผิวชิ้นงานด้วยการสูญเสียคาร์บอนที่ผิว

- เตาเผาไฮโดรเจน (hydrogen furnace)
- ก๊าซไฮโดรเจน (H_2) และก๊าซอาร์กอน (Ar)

3.1.5 วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมชิ้นงานเพื่อวิเคราะห์สมบัติต่างๆ ของชิ้นงาน

- เครื่องชั่งดิจิตอล
- โซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ชนิด analytical grade และ ซ้อนตัก
- น้ำปราศจากไอออน (deionized water) และบีกเกอร์
- น้ำยาทาเล็บ
- ขั้วมาตรฐานอ้างอิง (standard reference electrode) แบบซิลเวอร์-ซิลเวอร์คลอไรด์ (Ag-AgCl)
- ขั้วจ่ายกระแส (counter electrode) แบบแผ่นแพลตินัม (Pt plate)
- เครื่องเตรียมเรซินแบบ hot mount และผงเบกาไลท์ (bekalite)
- สารละลายไนตริก 2% ($2\% HNO_3$)
- เครื่องตัดแบบละเอียด (Struers Accutom-5)

3.2 เครื่องมือทดสอบที่ใช้ในการวิจัย

3.2.1 เครื่องทดสอบสมบัติทางเคมีไฟฟ้า (potentiostat/galvanostat) รุ่น PGSTAT302N โดยใช้โปรแกรมวิเคราะห์ NOVA เพื่อทดสอบหาความต้านทานการกัดกร่อนของชิ้นงานที่ผ่านการปรับปรุงผิวแบบต่างๆ

3.2.2 กล้องถ่ายภาพโครงสร้างมหภาคโดยใช้โปรแกรม DINO เพื่อตรวจสอบโครงสร้างมหภาคก่อนและหลังทำการทดสอบสมบัติทางเคมีไฟฟ้า

3.2.3 กล้องจุลทรรศน์แสง (OM, optical microscope) เพื่อตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคที่ผิวของชิ้นงานที่ผ่านการปรับปรุงผิวแบบต่างๆ

3.2.4 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (SEM, scanning electron microscope) ใช้เพื่อตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคที่ผิวและภาคตัดขวางของชิ้นงานที่ผ่านการปรับปรุงผิวแบบต่างๆ

3.2.5 เครื่องมือวิเคราะห์รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD, x-ray diffractometer) แบบ GIXD, glancing incident-angle x-ray diffraction ใช้ในการวิเคราะห์ที่ผิวชิ้นงานที่ผ่านการปรับปรุงผิวแบบต่างๆ

3.2.6 เครื่องวิเคราะห์ปริมาณธาตุต่างๆ (GDS, glow discharge spectroscopy) ใช้เพื่อวิเคราะห์ปริมาณธาตุต่างๆ ที่ผิวของชิ้นงานบางกลุ่มชิ้นงาน

3.2.7 เครื่องทดสอบความแข็งแบบไมโครวิกเกอร์ (Vickers hardness tester) ใช้เพื่อตรวจสอบความแข็งที่ระดับความลึกต่างๆ ของชิ้นงานที่ผ่านการปรับปรุงผิวแบบต่างๆ

3.2.8 เครื่องวัดความขรุขระผิว (surface roughness tester) ใช้เพื่อหาความหยาบผิวของชิ้นงานกลุ่มต่างๆ

3.3 วิธีดำเนินการวิจัย

3.3.1 การเตรียมชิ้นงานก่อนทำการปรับปรุงผิวแบบต่างๆ

เตรียมผิวชิ้นงานเหล็กกล้าเครื่องมือทำงานร้อน H13 โดยการขัดหยาบด้วยกระดาษทรายเบอร์ 320 600 800 1200 และ 2000 ตามลำดับ จากนั้นทำการขัดละเอียดด้วยผงอะลูมินา ขนาด 1 ไมครอน และล้างผิวชิ้นงานให้สะอาดด้วยสารละลายอะซีโตน ด้วยเครื่องทำความสะอาดโดยใช้คลื่นอัลตราโซนิก จากนั้นจึงทำการแบ่งชิ้นงานออกเป็น 4 กลุ่มหลัก 8 กลุ่มย่อย ดังนี้

- กลุ่มชิ้นงานเหล็กกล้า H13 ที่ไม่ทำการปรับปรุงผิวใดๆ
 - (AR) ชิ้นงาน H13 ที่ไม่ทำการปรับปรุงผิว (as-received)
- กลุ่มชิ้นงานเหล็กกล้า H13 ที่ผ่านการทำไนตรายดิงแบบต่างๆ
 - (AG) ชิ้นงาน H13 ที่ผ่านการทำไนตรายดิงแบบก๊าซ (gaseous nitriding)
 - (AS) ชิ้นงาน H13 ที่ผ่านการทำไนตรายดิงแบบอ่างเกลือ (salt bath nitriding)
 - (AP) ชิ้นงาน H13 ที่ผ่านการทำไนตรายดิงแบบพลาสมา (plasma nitriding)

- กลุ่มชิ้นงานเหล็กกล้า H13 ที่ผ่านการชุบโครเมียมด้วยไฟฟ้าร่วมกับการทำไนตรายดิงแบบพลาสมา
 - (EP) ชิ้นงาน H13 ที่ผ่านการชุบโครเมียมด้วยไฟฟ้า (Cr electroplating) ตามด้วยการทำไนตรายดิงแบบพลาสมา (plasma nitriding)
 - (PE) ชิ้นงาน H13 ที่ผ่านการทำไนตรายดิงแบบพลาสมา (plasma nitriding) ตามด้วยการชุบโครเมียมด้วยไฟฟ้า (Cr electroplating)
- กลุ่มชิ้นงานเหล็กกล้า H13 ที่ผ่านการสูญเสียคาร์บอนที่ผิวก่อนทำการปรับปรุงผิว
 - (DP) ชิ้นงาน H13 ที่ผ่านการสูญเสียคาร์บอนที่ผิว (surface decarburizing) ตามด้วยการทำไนตรายดิงแบบพลาสมา (plasma nitriding)
 - (DPE) ชิ้นงาน H13 ที่ผ่านการสูญเสียคาร์บอนที่ผิว (surface decarburizing) ตามด้วยการชุบโครเมียมด้วยไฟฟ้า (Cr electroplating) และตามด้วยการทำไนตรายดิงแบบพลาสมา (plasma nitriding)

3.3.2 การปรับปรุงผิวชิ้นงานด้วยกระบวนการไนตรายดิงแบบต่างๆ

3.3.2.1 การทำไนตรายดิงแบบก๊าซ

นำชิ้นงานกลุ่ม (AG) ไปทำไนตรายดิงแบบก๊าซ ในสภาวะก๊าซแอมโมเนีย (NH_3) ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เวลา 60 นาที โดยใช้สภาวะเช่นเดียวกับการใช้งานในอุตสาหกรรม ซึ่งทำไนตรายดิงแบบก๊าซที่บริษัท ไทยปาร์คเกอร์โรซิง จำกัด (Thai Parkerizing Co., Ltd.)

3.3.2.2 การทำไนตรายดิงแบบอ่างเกลือ

นำชิ้นงานกลุ่ม (AS) ไปทำไนตรายดิงแบบอ่างเกลือ ในอ่างเกลือโซเดียมไซยาไนด์ (NaCN) ที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส เวลา 90 นาที โดยใช้สภาวะเช่นเดียวกับการใช้งานในอุตสาหกรรม ซึ่งทำไนตรายดิงแบบอ่างเกลือที่บริษัท ไทยปาร์คเกอร์โรซิง จำกัด (Thai Parkerizing Co., Ltd.)

3.3.2.3 การทำไนตรายดิงแบบพลาสมา

นำชิ้นงานกลุ่ม (AP) (EP) (PE) (DP) และ (DPE) ไปทำไนตรายดิงแบบพลาสมา ตามลำดับขั้นตอนของแต่ละกลุ่มชิ้นงาน ที่อัตราส่วนความดันของก๊าซไนโตรเจนต่อก๊าซไฮโดรเจน เป็น 1 ต่อ 3 ($\text{N}_2:\text{H}_2 = 1:3$) ความต่างศักย์ไฟฟ้า 150 โวลต์ อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส เวลา 9 ชั่วโมง โดยใช้สภาวะเช่นเดียวกับการใช้งานในอุตสาหกรรม ซึ่งทำไนตรายดิงแบบพลาสมาที่บริษัท ไทยปาร์คเกอร์โรซิง จำกัด (Thai Parkerizing Co., Ltd.)

3.3.3 การปรับปรุงผิวชิ้นงานด้วยการชุบโครเมียมด้วยไฟฟ้า



ภาพที่ 3.2 บ่อชุบสำหรับชุบโครเมียมด้วยไฟฟ้ากระแสตรง โดยใช้แอโนดแบบถาวร

นำชิ้นงานกลุ่ม (EP) (PE) และ (DPE) ไปทำการชุบโครเมียมด้วยไฟฟ้า ตามลำดับขั้นตอนของแต่ละกลุ่มชิ้นงาน โดยทำการชุบโครเมียมด้วยไฟฟ้าด้วยบ่อชุบโครเมียมซึ่งภายในบรรจุน้ำยาชุบโครเมียมอยู่ และทำการแขวนชิ้นงานไว้ที่ขั้วแคโทด (ขั้วลบ) ซึ่งต่อกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง สภาวะการชุบทำที่อุณหภูมิห้อง ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 0.26 แอมป์ต่อตารางเซนติเมตร (A/cm^2) ซึ่งทำการชุบโครเมียมด้วยไฟฟ้าที่สถาบันวิจัยโลหะและวัสดุจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (MMRI)

ขั้นตอนการชุบโครเมียมด้วยไฟฟ้า มีดังนี้

- นำลวดทองแดงผูกติดกับชิ้นงาน
- ล้างไขมันออกจากชิ้นงานด้วยน้ำยาล้างจาน
- ล้างไขมันออกจากชิ้นงานด้วยกรดกำมะถัน หรือ กรดซัลฟิวริก (2% H_2SO_4)
- ล้างชิ้นงานด้วยน้ำเปล่า
- นำลวดทองแดงที่ผูกติดกับชิ้นงานไปคล้องกับขั้วแคโทด
- เปิดเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง
- ตั้งค่ากระแสไฟฟ้า เท่ากับ 10 แอมป์ (A) เพราะต้องการความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า เท่ากับ 0.26 แอมป์ต่อตารางเซนติเมตร (A/cm^2) และชิ้นงานมีพื้นที่ผิวเท่ากับ 39 ตารางเซนติเมตร (cm^2)
- กดปุ่มเริ่มทำการชุบ โดยทำการชุบเป็นเวลา 15 วินาที
- กดปุ่มหยุดทำการชุบ
- เอาชิ้นงานออกจากขั้วแคโทด
- ปิดเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง

- ล้างชิ้นงานด้วยน้ำเปล่า
- เป่าชิ้นงานด้วยลมร้อนให้แห้ง
- เก็บชิ้นงานให้เรียบร้อย

ส่วนผสมและสภาวะของน้ำยาชุบโครเมียม ได้แก่

- TVC Base Compound 410 g/l
- TVC Catalyst 60 ml/l
- TVC - MS 3 ml/l
- TVC - EXT 1 ml/l
- ความเป็นกรด-ด่าง (pH) 2.8
- อุณหภูมิห้อง

3.3.4 การปรับปรุงผิวชิ้นงานด้วยการสูญเสียคาร์บอนที่ผิว



ภาพที่ 3.3 เตาไฮโดรเจนใช้สำหรับการสูญเสียคาร์บอนที่ผิว

นำชิ้นงานกลุ่ม (DP) และ (DPE) ไปทำการสูญเสียคาร์บอนที่ผิว ตามลำดับขั้นตอนของแต่ละกลุ่มชิ้นงาน โดยทำในบรรยากาศก๊าซไฮโดรเจน 90 เปอร์เซ็นต์ ต่อ ก๊าซอาร์กอน 10 เปอร์เซ็นต์ (90% H₂ : 10% Ar) ด้วยเตาไฮโดรเจน (hydrogen furnace) ซึ่งมีโมลิบดีนัมเป็นวัสดุกำเนิดความร้อน (heating element) โดยทำการเผาชิ้นงานให้ถึงอุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส จากนั้นจึงเริ่มปล่อยก๊าซไฮโดรเจนเข้าสู่เตา และเร่งอุณหภูมิเตาด้วยอัตรา 5 องศาเซลเซียสต่อนาที จนถึงอุณหภูมิ 1020 องศาเซลเซียส แล้วเผาชิ้นงานที่อุณหภูมิดังกล่าวเป็นเวลา 30 นาที และปล่อยให้ชิ้นงานเย็นตัวในเตา ซึ่งทำการสูญเสียคาร์บอนที่ผิวที่ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC)

3.3.5 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคและสารประกอบที่เกิดขึ้นที่ผิวของชิ้นงาน

นำชิ้นงานทุกกลุ่มไปตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคที่ผิวและภาคตัดขวางชิ้นงานเพื่อวัดความหนาของชั้นไนไตรด์ ชั้นเคลือบโครเมียม และชั้นที่เกิดการสูญเสียคาร์บอนที่ผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์แสง (OM, optical microscope) และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (SEM, scanning electron microscope) จากนั้นจึงทำการวิเคราะห์ชั้นสารประกอบที่เกิดขึ้นด้วยเครื่องมือวิเคราะห์รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD, x-ray diffractometer) แบบ GIXD (glancing incident-angle x-ray diffraction)

3.3.6 การทดสอบหาความแข็งผิวและความลึกชั้นผิวแข็ง

นำชิ้นงานทุกกลุ่มไปทดสอบหาความแข็งที่ระดับความลึกต่างๆ เพื่อหาค่าความแข็งผิว (surface hardness) และความลึกชั้นผิวแข็ง (case depth) ด้วยเครื่องทดสอบความแข็งแบบไมโครวิกเกอร์ (Vickers hardness tester)

3.3.7 การทดสอบหากระจายตัวของธาตุที่ความลึกต่างๆ จากผิว

นำชิ้นงานกลุ่มที่สนใจไปทำการวิเคราะห์หาการกระจายตัวของธาตุที่ความลึกต่างๆ จากผิววิเคราะห์โดยเครื่อง Glow Discharge Spectroscopy

3.3.8 การทดสอบหาความขรุขระผิว

นำชิ้นงานทุกกลุ่มไปทำการทดสอบหาความขรุขระผิวโดยเครื่องวัดความขรุขระผิว (surface roughness tester)

3.3.9 การทดสอบหาความต้านทานการกัดกร่อน

เตรียมผิวชิ้นงานทุกกลุ่มก่อนทำการทดสอบหาความต้านทานการกัดกร่อน โดยเลือกบริเวณที่ต้องการทดสอบ เนื่องจากการปรับปรุงผิวบางวิธีจะทำให้ได้ผิวที่ปรับปรุงเพียงด้านเดียว โดยกำหนดให้ใช้พื้นที่ทดสอบ เท่ากับ 1 ตารางเซนติเมตร และใช้น้ำยาทาเล็บซึ่งเป็นวัสดุอีพอกซี (epoxy) ทาลงบนผิวชิ้นงานที่ไม่ใช้ทดสอบ โดยน้ำยาทาเล็บจะทำหน้าที่เป็นฉนวนกันสารละลายอิเล็กโทรไลต์ไม่ให้สัมผัสกับผิวชิ้นงานทำให้ไม่เกิดการกัดกร่อนในบริเวณดังกล่าว



ภาพที่ 3.4 น้ำยาทาเล็บที่ใช้ในการเตรียมผิวชิ้นงานก่อนทดสอบสมบัติการกัดกร่อน

จากนั้น นำชิ้นงานทุกกลุ่มไปทดสอบหาความต้านทานการกัดกร่อนของชิ้นงานทุกกลุ่มด้วยเครื่องทดสอบสมบัติทางเคมีไฟฟ้า (potentiostat/galvanostat) รุ่น PGSTAT302N ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ความเข้มข้นร้อยละ 0.9 โดยมวลต่อปริมาตร โดยใช้ขั้วมาตรฐานอ้างอิง (standard reference electrode) คือ ซิลเวอร์-ซิลเวอร์คลอไรด์ (Ag-AgCl) โดยใช้โปรแกรมวิเคราะห์ NOVA โดยการทดสอบในงานวิจัยนี้จะทดสอบด้วย 2 เทคนิค ดังนี้

- เทคนิคโพเทนชิโอดนามิกส์ (Potentiodynamics Polarization Technique)

เป็นเทคนิคที่จะสร้างเส้นกราฟโพลาริเซชัน (polarization curve) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้า (potential, E) และลอการิทึมของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (logarithm of current density, $\log i$) และจะแสดงพฤติกรรมการกัดกร่อนของชิ้นงานว่าเกิดแอคทีฟ-พาสซีฟ (active-passive) ตลอดจนสามารถใช้วิธีการประมาณค่านอกช่วงทาเฟล (Tafel extrapolation) เพื่อหาค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน (corrosion potential, E_{corr}) และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน (corrosion current density, i_{corr}) ซึ่งสามารถแปลงเป็นอัตราการกัดกร่อน (corrosion rate) และความต้านทานโพลาริเซชัน (polarization resistance, R_p) ซึ่งเป็นค่าพารามิเตอร์แสดงถึงความต้านทานการกัดกร่อนของชิ้นงานกลุ่มต่างๆ ได้

- เทคนิคโพเทนชิโอสแตติก (Potentiostatics Technique)

เป็นเทคนิคที่จะสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้า (current, I) ต่อเวลาที่ดำเนินไป (time) โดยจะป้อนค่าศักย์ไฟฟ้า (potential, E) ให้คงที่ค่าหนึ่งตลอดการทดสอบ โดยศักย์ไฟฟ้าที่ป้อนจะต้องอยู่ในช่วงแอโนดิกหรือเกิดปฏิกิริยาแอโนดิก โดยผลที่ได้จากเทคนิคนี้ คือ ค่ากระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้น และระยะเวลาก่อนที่ชิ้นงานจะมีกระแสไฟฟ้าเกิดขึ้น ซึ่งเป็นค่าพารามิเตอร์แสดงถึงความต้านทานการกัดกร่อนของชิ้นงานกลุ่มต่างๆ ได้

บทที่ 4

ผลการทดลองและการอภิปราย

ในงานวิจัยนี้แบ่งชิ้นงานเหล็กกล้าเครื่องมือ H13 ตามวิธีการปรับปรุงผิวของชิ้นงาน ซึ่งออกเป็น 4 กลุ่มหลัก 8 กลุ่มย่อย ดังที่กล่าวไปในบทที่ 3 แต่เนื่องจากในการวิเคราะห์และอภิปรายผลนั้น จะต้องมีการเปรียบเทียบสมบัติต่างๆ ของชิ้นงานแต่ละกลุ่ม จึงนำกลุ่มชิ้นงานหลัก คือ กลุ่มชิ้นงานเหล็กกล้าเครื่องมือ H13 ที่ไม่ทำการปรับปรุงผิวใดๆ (AR, as-received H13) ไปเปรียบเทียบกับกลุ่มชิ้นงานหลักที่เหลือ ซึ่งจะส่งผลให้ในบทนี้แบ่งกลุ่มชิ้นงานหลักออกเป็น 3 กลุ่ม ดังนี้

กลุ่มที่ 1

กลุ่มชิ้นงานเหล็กกล้า H13 ที่ผ่านการทำไนตรายดิงแบบต่างๆ

- (AG) ชิ้นงาน H13 ที่ผ่านการทำไนตรายดิงแบบก๊าซ
- (AS) ชิ้นงาน H13 ที่ผ่านการทำไนตรายดิงแบบอ่างเกลือ
- (AP) ชิ้นงาน H13 ที่ผ่านการทำไนตรายดิงแบบพลาสติก

กลุ่มที่ 2

กลุ่มชิ้นงานเหล็กกล้า H13 ที่ผ่านการชุบโครเมียมร่วมกับการทำไนตรายดิงแบบพลาสติก

- (EP) ชิ้นงาน H13 ที่ผ่านการชุบโครเมียมด้วยไฟฟ้าตามด้วยการทำไนตรายดิงแบบพลาสติก
- (PE) ชิ้นงาน H13 ที่ผ่านการทำไนตรายดิงแบบพลาสติกตามด้วยการชุบโครเมียมด้วยไฟฟ้า

กลุ่มที่ 3

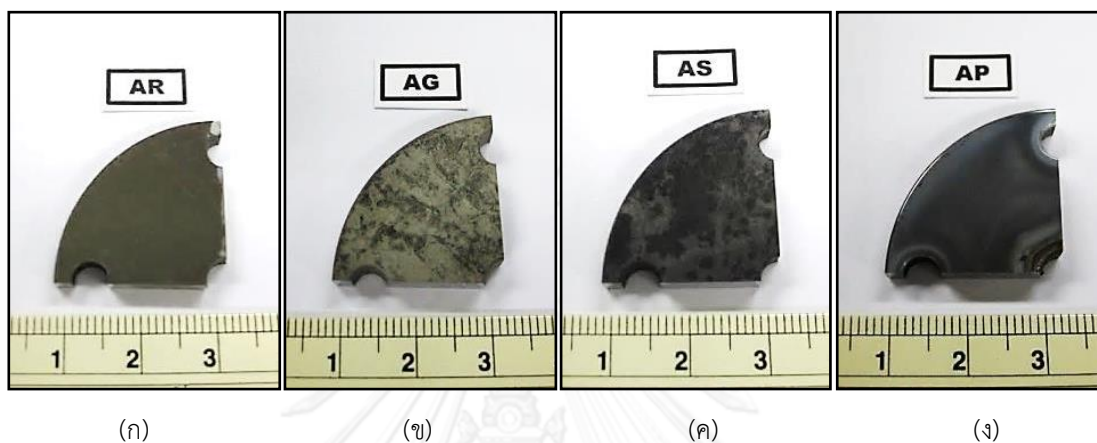
กลุ่มชิ้นงานเหล็กกล้า H13 ที่ผ่านการสูญเสียคาร์บอนที่ผิวก่อนทำการปรับปรุงผิว

- (DP) ชิ้นงาน H13 ที่ผ่านการสูญเสียคาร์บอนที่ผิวตามด้วยการทำไนตรายดิงแบบพลาสติก
- (DPE) ชิ้นงาน H13 ที่ผ่านการสูญเสียคาร์บอนที่ผิวตามด้วยการทำไนตรายดิงแบบพลาสติกและตามด้วยการชุบโครเมียมด้วยไฟฟ้า

4.1 กลุ่มที่ 1 กลุ่มชิ้นงานเหล็กกล้า H13 ที่ผ่านการทำไนตรายดิงแบบต่างๆ

4.1.1 การหาคุณลักษณะทางผิว (Surface Characterizations)

4.1.1.1 โครงสร้างมหภาค (Macrostructure)



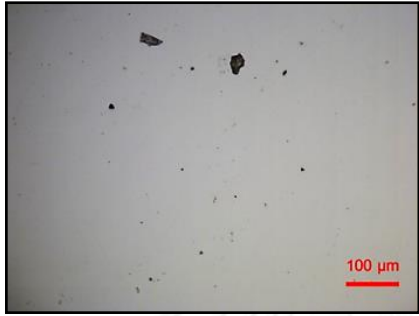
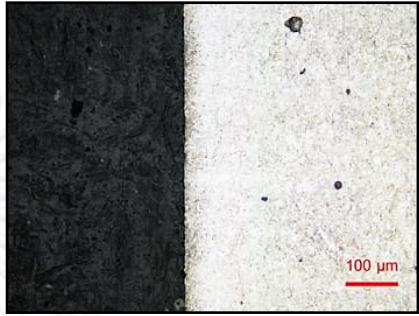
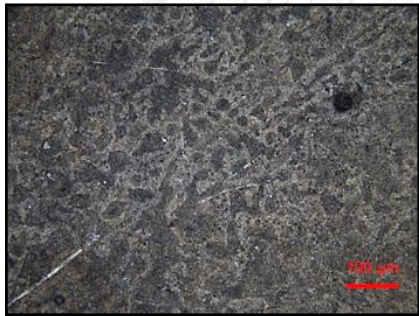
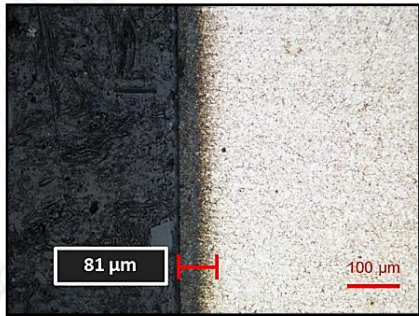
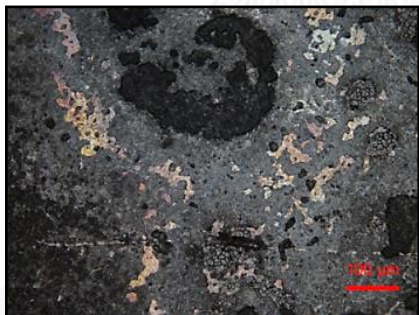
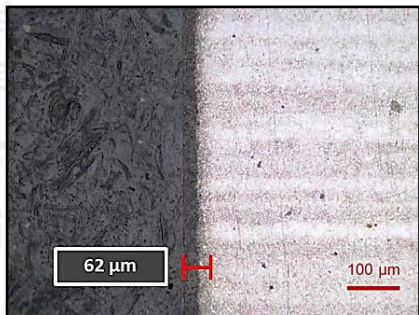

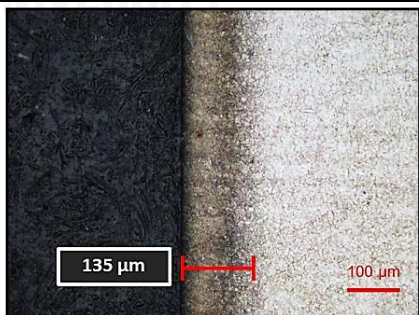
ภาพที่ 4.1 โครงสร้างมหภาคของชิ้นงาน H13 ภายหลังจากการทำไนตรายดิงแบบต่างๆ

- (ก) ชิ้นงานกลุ่ม AR : H13 ที่ไม่ทำการปรับปรุงผิว
- (ข) ชิ้นงานกลุ่ม AG : H13 ที่ทำไนตรายดิงแบบก๊าซ
- (ค) ชิ้นงานกลุ่ม AS : H13 ที่ทำไนตรายดิงแบบอ่างเกลือ
- (ง) ชิ้นงานกลุ่ม AP : H13 ที่ทำไนตรายดิงแบบพลาสมา

จากภาพที่ 4.1 พบว่า พื้นผิวชิ้นงานที่ผ่านการทำไนตรายดิงแบบต่างๆ มีลักษณะผิวที่แตกต่างกันออกไป โดยชิ้นงานตั้งต้นของทุกกลุ่มนั้นมีลักษณะพื้นผิวเช่นเดียวกับภาพที่ 4.1 (ก) ซึ่งเป็นพื้นผิวของ H13 ที่ไม่ทำการปรับปรุงผิว แต่มีการเตรียมผิวชิ้นงานโดยทำการขัดหยาบและละเอียดจนมีผิวเงาลักษณะคล้ายกระจก จากภาพที่ 4.1 (ข) เมื่อนำชิ้นงาน H13 ไปทำไนตรายดิงแบบก๊าซ จะได้ลักษณะผิวที่ไม่เรียบ และไม่เงาเป็นกระจก มีพื้นผิวเป็นสีเทาอ่อนและมีลักษณะเป็นเส้นแถบสีเข้มในบางบริเวณ จากภาพที่ 4.1 (ค) เมื่อนำชิ้นงาน H13 ไปทำไนตรายดิงแบบอ่างเกลือ พบว่าพื้นผิวชิ้นงานมีลักษณะผิวที่ไม่เรียบ เป็นสีดำเป็นส่วนใหญ่ (ผลมาจากปริมาณโซเดียมไนไตรต์ที่มีปริมาณมากในอ่างเกลือ) และมีสีเทาเข้มในบางบริเวณ จากภาพที่ 4.1 (ง) เมื่อนำชิ้นงาน H13 ไปทำไนตรายดิงแบบพลาสมา พบว่าพื้นผิวชิ้นงานยังคงมีความเรียบใกล้เคียงกับ H13 ที่ไม่ได้ทำการปรับปรุงผิว ยังมีลักษณะเงาคล้ายกระจกแต่เกิดเป็นฝ้าขึ้นบ้าง ที่ผิวของชิ้นงาน

4.1.1.2 โครงสร้างจุลภาค (Microstructure)

- โครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์แสง (Optical Microscope; OM)

ชิ้นงาน	ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคที่ผิวและภาคตัดขวางจากกล้องจุลทรรศน์แสง	
	พื้นผิว	ภาคตัดขวาง ผิว----->เนื้อพื้น
AR		
AG		
AS		
AP		

ภาพที่ 4.2 โครงสร้างจุลภาคที่ผิวและภาคตัดขวางจากฝั่งผิวของชิ้นงาน H13 ที่ทำในตารางดังแบบต่างๆ จากกล้องจุลทรรศน์แสง

จากภาพที่ 4.2 แสดงโครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์แสง โดยภาพพื้นผิวของชิ้นงานที่ผ่านการทำไนตรายดิงแบบต่างๆ พบว่า ลักษณะพื้นผิวมีโครงสร้างจุลภาคที่เปลี่ยนแปลงไปจาก H13 เดิม กล่าวคือ มีการเกิดเฟสที่มีลักษณะและสี รวมถึงความขรุขระแตกต่างไปจากลักษณะพื้นผิวเดิมที่แสดงแต่เนื้อพื้น H13 ที่มีแต่เฟสเทมเปอร์มาร์เทนไซต์และมีเฟสสารประกอบคาร์ไบด์สีเข้มเป็นอนุภาคเล็กปริมาณน้อย และเมื่อนำชิ้นงานไปทำการตัดขวาง ชัดเตรียมผิวและกัดกรดด้วยสารละลายไนตอล 2% พบว่าโครงสร้างจุลภาคตรงผิวชิ้นงานที่ผ่านการทำไนตรายดิงแบบก๊าซ อ่างเกลือ และพลาสมาจะปรากฏชั้นไนตรายด์ขึ้น ความหนาเท่ากับ 81 62 และ 135 ไมครอนตามลำดับ

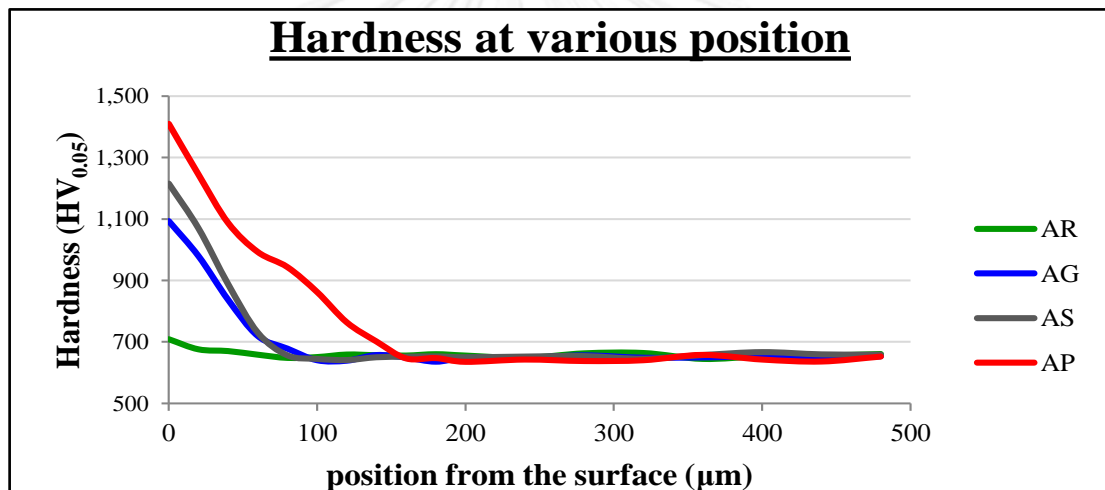
- โครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด
(Scanning Electron Microscope; SEM)

ชิ้นงาน	โครงสร้างจุลภาคภาคตัดขวางจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด	
	ภาพถ่าย	แบบจำลอง
	ผิว----->เนื้อพื้น	ผิว----->เนื้อพื้น
AG		
AS		
AP		

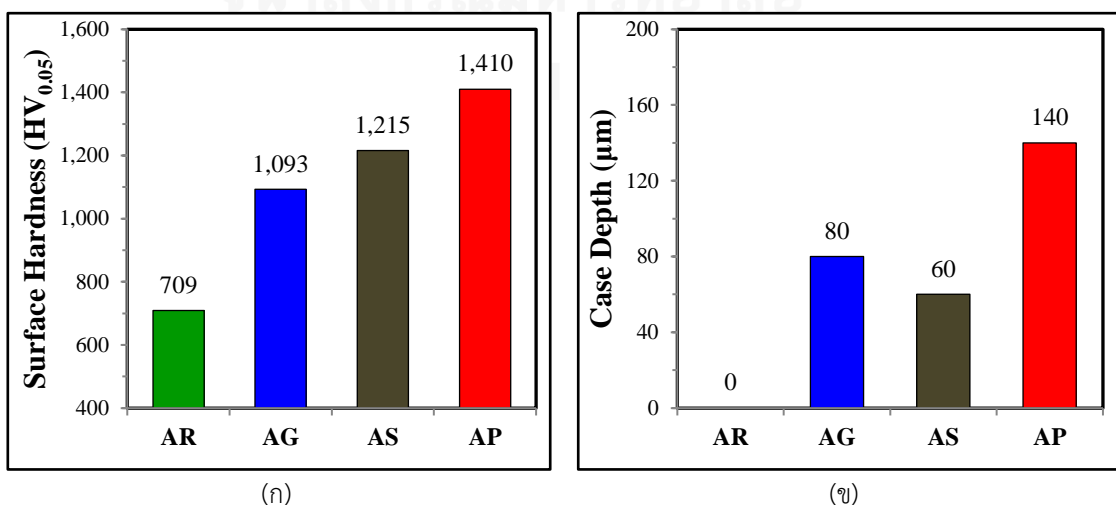
ภาพที่ 4.3 โครงสร้างจุลภาคภาคตัดขวางจากฝั่งผิวของชิ้นงาน H13 ที่ทำไนตรายดิงแบบต่างๆ จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด

จากภาพที่ 4.3 แสดงโครงสร้างจุลภาคภาคตัดขวางจากฝั่งผิวของชิ้นงาน H13 ที่ผ่านการทำไนตรายดิงแบบก๊าซ อ่างเกลือ และพลาสติก จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด พบว่าชิ้นงานที่ผ่านการทำไนตรายดิงแบบก๊าซและอ่างเกลือ นั้น มีชั้นสารประกอบ (compound layer) เกิดขึ้นที่ผิวของชิ้นงาน ซึ่งมีความหนาประมาณ 2 ไมครอนทั้งสองกลุ่มชิ้นงาน และถัดจากชั้นสารประกอบ จะพบชั้นการแพร่ (diffusion zone) เกิดขึ้นที่มีเฟสรูปร่างลักษณะคล้ายเข็มกระจายอยู่ทั่วทั้งชั้นการแพร่ ในขณะที่ชิ้นงานที่ผ่านการทำไนตรายดิงแบบพลาสติก ไม่พบชั้นสารประกอบเกิดขึ้น พบเพียงชั้นการแพร่ที่มีเฟสรูปร่างลักษณะคล้ายเข็มกระจายอยู่ทั่วผิวชิ้นงาน ดังแสดงในภาพแบบจำลอง

4.1.1.3 ความแข็ง (Hardness)



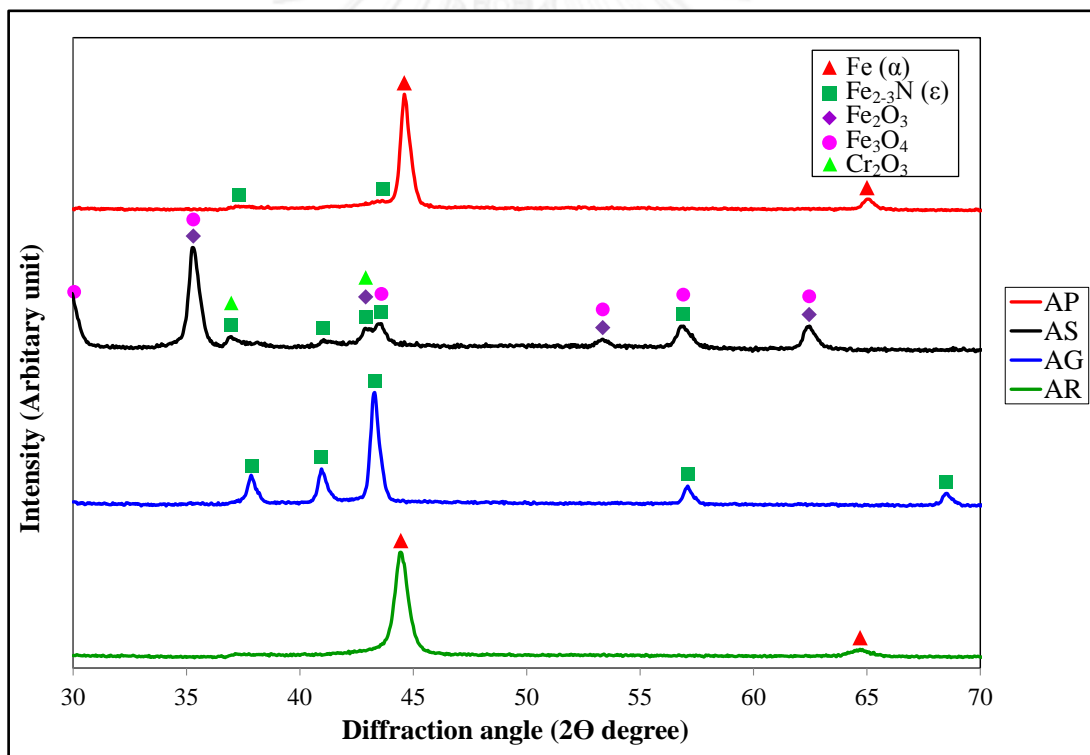
ภาพที่ 4.4 ผลการวัดความแข็งตามแนวตัดขวางจากฝั่งผิวลึกเข้าไปในเนื้อชิ้นงานตามแนวแกน X ของชิ้นงาน H13 ที่ทำไนตรายดิงแบบต่างๆ



ภาพที่ 4.5 (ก) ความแข็งผิว และ (ข) ความลึกชั้นผิวแข็ง ของชิ้นงาน H13 ที่ผ่านการทำไนตรายดิงแบบต่างๆ

เมื่อนำชิ้นงานที่ผ่านการทำไนตรายดิงแบบต่างๆ ที่ทำการตัดขวางและขัดเตรียมผิว จึงนำมาวัดความแข็งโดยเริ่มวัดจากฝั่งผิวชิ้นงาน และวัดลึกเข้าไปยังเนื้อพื้น ด้วยเครื่องวัดความแข็งแบบไมโครวิกเกอร์ โดยใช้น้ำหนักกด 50 กรัม ดังแสดงผลในภาพที่ 4.4 และความแข็งผิวกับความลึกชั้นผิวแข็งที่ได้ แสดงในภาพที่ 4.5 พบว่าชิ้นงาน H13 ที่ผ่านการทำไนตรายดิงแบบก๊าซ อ่างเกลือ และพลาสมา มีความแข็งผิวสูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัด โดยมีความแข็งผิวสูงถึง 1,093 1,215 และ 1,410 $HV_{0.05}$ ตามลำดับ เมื่อเทียบกับ H13 ที่ไม่ทำการปรับปรุงผิว ซึ่งมีความแข็งผิวเพียง 709 $HV_{0.05}$ และความแข็งยังเพิ่มสูงขึ้น ณ ตำแหน่งต่างๆ โดยแสดงจากความลึกชั้นผิวแข็งของชิ้นงานที่ผ่านการทำไนตรายดิงแบบก๊าซ อ่างเกลือ และพลาสมา ที่สามารถเพิ่มความแข็งได้ลึกถึง 80 60 และ 140 ไมครอนตามลำดับ ซึ่งค่าความแข็งผิวและความลึกชั้นผิวแข็งถูกแสดงอีกครั้งเพื่อเปรียบเทียบสมบัติทางกลของชิ้นงานภายหลังการทำไนตรายดิงแบบต่างๆ ในภาพที่ 4.5

4.1.1.4 เฟสและสารประกอบที่เกิดขึ้น



ภาพที่ 4.6 ผลการวิเคราะห์เฟสและสารประกอบ โดยเครื่องมือวิเคราะห์รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ แบบ GIXD จากฝั่งผิวของชิ้นงาน H13 ที่ทำไนตรายดิงแบบต่างๆ

จากภาพที่ 4.6 แสดงการตรวจสอบชิ้นงาน โดยเครื่องมือวิเคราะห์รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ แบบ GIXD ด้วยมุมตกกระทบ 1 องศา พบเฟสและสารประกอบต่างๆ เปรียบเทียบกับข้อมูลในมาตรฐานของ JCPDS คือ ในชิ้นงานที่ผ่านการทำไนตรายดิงแบบก๊าซ พบเพียงสารประกอบเหล็กไนตรายด์แบบเอปซิลอน (ϵ : $Fe_{2-3}N$ ตามมาตรฐาน หมายเลข #830877) ที่ผิว ส่วนในชิ้นงานที่

ผ่านการทำไนตรายดิงแบบอ่างเกลือ นอกจากพบสารประกอบเหล็กไนตรายด์แบบเอปซิลอน (ϵ : Fe_{2-3}N) เช่นเดียวกันแต่มีปริมาณที่น้อยกว่า ยังพบสารประกอบของเหล็กออกไซด์ในรูปแบบต่างๆ และโครเมียมออกไซด์ (Fe_2O_3 ตามมาตรฐาน หมายเลข #882359, Fe_3O_4 ตามมาตรฐาน หมายเลข #890688, Cr_2O_3 ตามมาตรฐานหมายเลข #850730) ที่ผิวด้วย และในชิ้นงานที่ผ่านการทำไนตรายดิงแบบพลาสมา พบสารประกอบเหล็กไนตรายด์แบบเอปซิลอน (ϵ : Fe_{2-3}N) เพียงเล็กน้อย และพบเป็นเหล็กแอลฟา (α : Fe ตามมาตรฐาน หมายเลข #851410) เป็นหลักที่ผิว

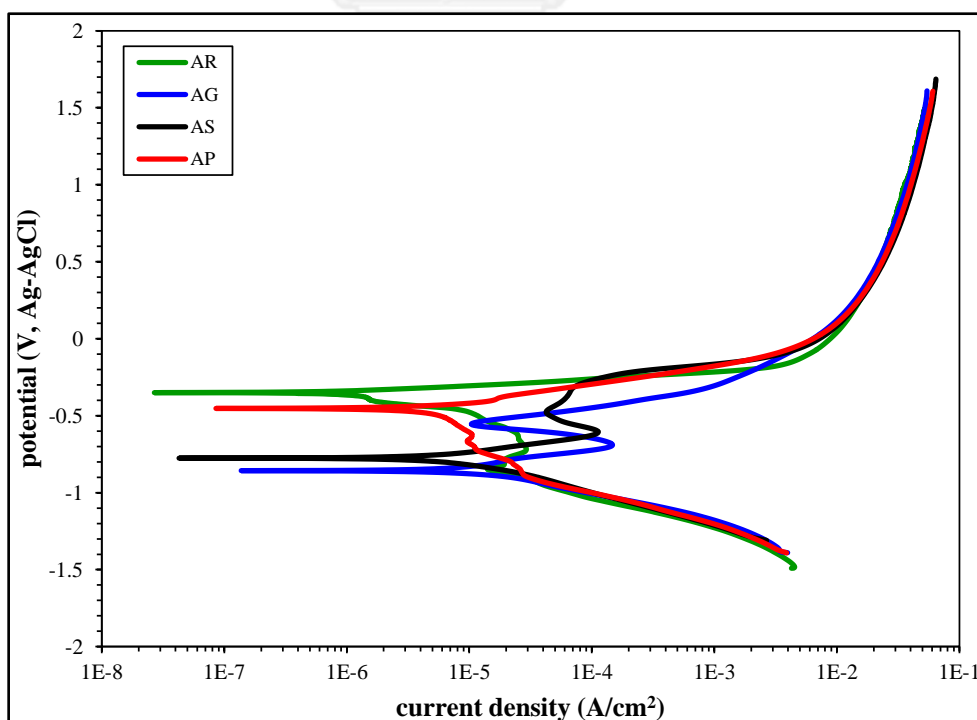
จากผลวิเคราะห์คุณลักษณะทางผิวของกลุ่มชิ้นงานเหล็กกล้า H13 ที่ผ่านการทำไนตรายดิงแบบต่างๆ จะพบว่า H13 ที่ผ่านการทำไนตรายดิงแบบก๊าซ อ่างเกลือ และพลาสมามีชั้นผิวแข็งเกิดขึ้นโดยมีความหนาเท่ากับ 81 62 และ 135 ไมครอน ตามลำดับ อีกทั้งยังตรวจพบว่า H13 ที่ทำไนตรายดิงแบบก๊าซ และอ่างเกลือมีชั้นสารประกอบเกิดขึ้นที่ผิวของชิ้นงาน หนาประมาณ 2 ไมครอน และมีชั้นการแพร่อยู่ลึกลงไป ในขณะที่ H13 ที่ทำไนตรายดิงแบบพลาสมาจะไม่มีชั้นสารประกอบเกิดขึ้น เนื่องจากสถานะในการทำไนตรายดิงแบบพลาสมา ในงานวิจัยนี้กำหนดให้ศักย์ของไนโตรเจนที่ต่ำ (low nitrogen potential) และมีปริมาณไนโตรเจนที่ผิวน้อย จึงพบแค่ชั้นการแพร่ ซึ่งจากการทดสอบหาความแข็งผิว พบว่า H13 ที่ผ่านการทำไนตรายดิงแบบก๊าซ อ่างเกลือ และพลาสมามีความแข็งผิวสูงขึ้น เท่ากับ 1093 1215 และ 1410 $\text{HV}_{0.05}$ ตามลำดับ และมีความลึกชั้นผิวแข็งเท่ากับ 80 60 และ 140 ไมครอน ตามลำดับ ซึ่งความลึกชั้นผิวแข็งจากการทดสอบหาความแข็งผิวนั้นมีค่าสอดคล้องกับความหนาของชั้นผิวแข็งที่ได้จากโครงสร้างจุลภาค อีกทั้งความแข็งที่ได้มาจากกลไกการตกตะกอนของเหล็กไนตรายด์แบบเอปซิลอน (ϵ , Fe_{2-3}N) ที่ชั้นผิวแข็ง ซึ่งสามารถตรวจพบจากผลวิเคราะห์เฟสและสารประกอบโดยเครื่องมือวิเคราะห์รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ แบบ GIXD ที่ผิวของชิ้นงานทุกกลุ่ม โดย H13 ที่ทำไนตรายดิงแบบก๊าซจะตรวจพบเฟส Fe_{2-3}N เพียงอย่างเดียวและมีปริมาณมาก ไม่พบเฟสของ Fe (α) เนื่องจากที่ผิวเป็นชั้นสารประกอบของเฟส Fe_{2-3}N ทั่วทั้งชั้น ในขณะที่ H13 ที่ทำไนตรายดิงแบบอ่างเกลือจะพบเฟส Fe_{2-3}N แต่พบในปริมาณที่น้อยลง และพบเฟสเหล็กออกไซด์และโครเมียมออกไซด์ (Fe_2O_3 , Fe_3O_4 , Cr_2O_3) ด้วย โดยไม่พบเฟสของ Fe (α) เนื่องจากที่ผิวเป็นชั้นสารประกอบของเหล็กไนตรายด์, เหล็กออกไซด์ และโครเมียมออกไซด์เป็นหลัก ส่วน H13 ที่ทำไนตรายดิงแบบพลาสมานั้นจะพบเฟส Fe_{2-3}N ปริมาณน้อยมาก และพบเฟส Fe (α) เป็นส่วนใหญ่ เนื่องจากไม่เกิดชั้นสารประกอบ เกิดแต่ชั้นการแพร่ซึ่งมีสารประกอบเหล็กไนตรายด์ตกตะกอนอยู่ทั่วทั้งชั้นการแพร่ซึ่งปนอยู่ในเนื้อพื้นเหล็ก

4.1.2 ความต้านทานการกัดกร่อน (Corrosion Resistance)

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการทดสอบเพื่อหาความต้านทานการกัดกร่อนของชิ้นงาน โดยใช้พื้นที่ทดสอบ 1 ตารางเซนติเมตร ด้วยเครื่องทดสอบสมบัติทางเคมีไฟฟ้า (potentiostat/galvanostat) ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ความเข้มข้นร้อยละ 0.9 โดยมวลต่อปริมาตร โดยใช้ขั้วมาตรฐานอ้างอิง (standard reference electrode) คือ ซิลเวอร์-ซิลเวอร์คลอไรด์ (Ag-AgCl) และใช้ขั้วจ่ายกระแส (counter electrode) คือ แพลตินัมแบบแผ่น (platinum plate) โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ในการทดสอบและวิเคราะห์ คือ โปรแกรม NOVA รุ่น 1.9

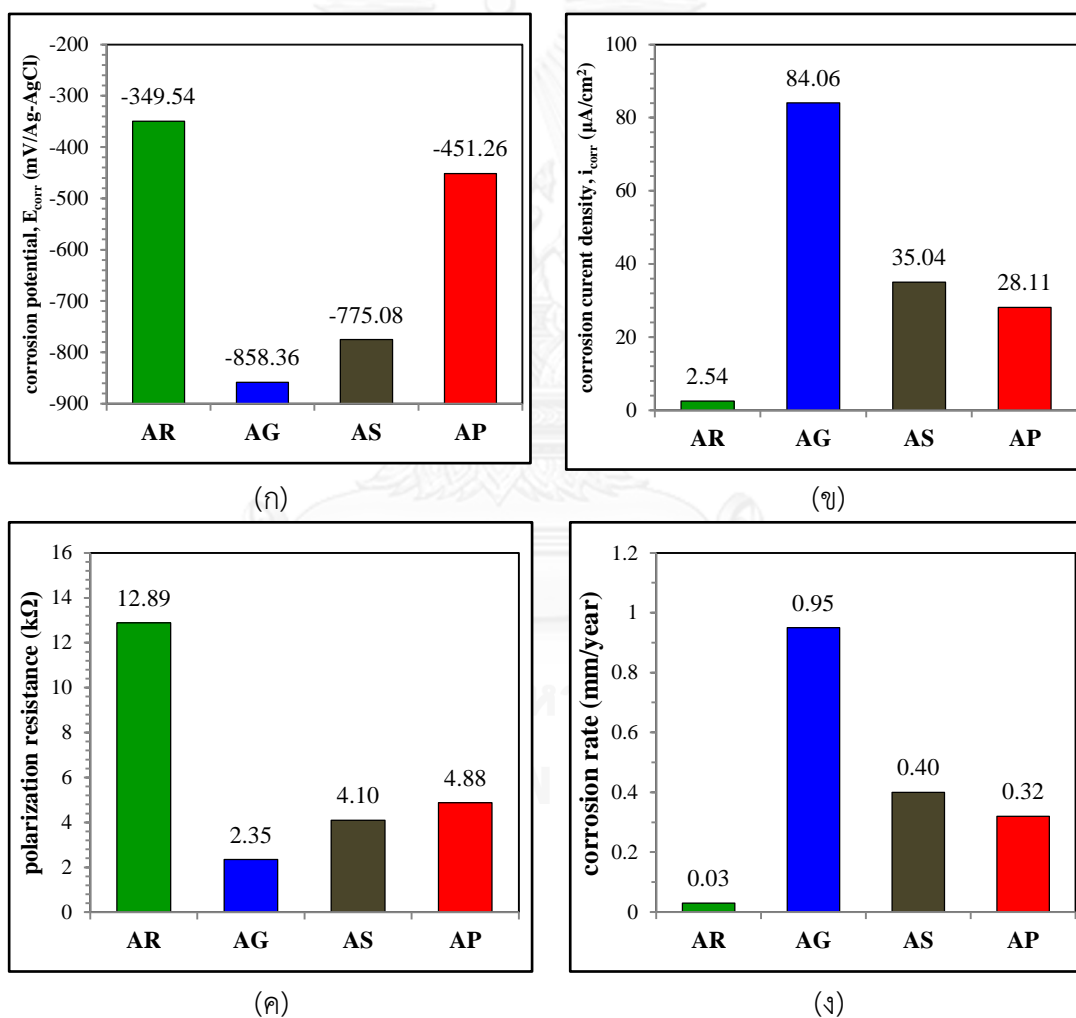
4.1.2.1 เทคนิคโพเทนซิโอดนามิกส์ (Potentiodynamics Technique)

การทดสอบนี้เป็นกระบวนการทดสอบสมบัติด้านการกัดกร่อนของโลหะและวัสดุ โดยในการทดสอบนี้จะต้องทำการทดสอบการเปิดวงจรเพื่อหาค่าศักย์ไฟฟ้าแบบเปิดวงจร (E_{OCP} , open circuit potential) ซึ่งใช้เวลาทดสอบ 1,800 วินาที จากนั้นเครื่องทดสอบจะมีการป้อนศักย์ไฟฟ้า โดยเริ่มตั้งแต่ (start potential) -1.00 โวลต์ จนถึง (stop potential) +2.00 โวลต์ โดยมีอัตราการเพิ่มของศักย์ไฟฟ้า (scan rate) เท่ากับ 0.001 โวลต์ต่อวินาที ซึ่งจะได้อ่านค่าโพลาริเซชันแสดงความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้า (E , potential) กับลอการิทึมความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า ($\log i$, logarithm of current density)



ภาพที่ 4.7 เส้นโค้งโพลาริเซชันเปรียบเทียบกันของชิ้นงาน H13 ที่ทำโนตรงายดิงแบบต่างๆ ที่ทดสอบโดยเทคนิคโพเทนซิโอดนามิกส์

จากภาพที่ 4.7 แสดงเส้นโค้งโพลาริเซชัน (potentiodynamics polarization curve) ของชิ้นงาน H13 ที่ทำไนตรรายดิงแบบต่างๆ พบว่าชิ้นงาน H13 ที่ผ่านการทำไนตรรายดิงทั้งสามแบบ มีความแตกต่างกันในสมบัติด้านการกัดกร่อน โดยจะเห็นได้จากลักษณะของเส้นโค้งโพลาริเซชันว่า H13 ที่ผ่านการทำไนตรรายดิงแบบก๊าซ และแบบอ่างเกลือ มีค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนลดลงอย่างมาก เมื่อเทียบกับ H13 ที่ไม่ได้ทำการปรับปรุงผิว และยังปรากฏบริเวณแพสซีฟ (passive region) เกิดขึ้นในช่วงแอนดิกอีกด้วย แต่เมื่อพิจารณา H13 ที่ผ่านการทำไนตรรายดิงแบบพลาสมา จะพบว่า ศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนลดลงเพียงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับ H13 ที่ไม่ได้ทำการปรับปรุงผิว โดยไม่พบบริเวณแพสซีฟเกิดขึ้นในเส้นโค้งโพลาริเซชัน



ภาพที่ 4.8 ค่าพารามิเตอร์แสดงสมบัติด้านการกัดกร่อน (corrosion parameters) เปรียบเทียบกันของชิ้นงาน H13 ที่ทำไนตรรายดิงแบบต่างๆ (ก) ศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน (corrosion potential) (ข) ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน (corrosion current density) (ค) ความต้านทานโพลาริเซชัน (polarization resistance) (ง) อัตราการกัดกร่อน (corrosion rate)

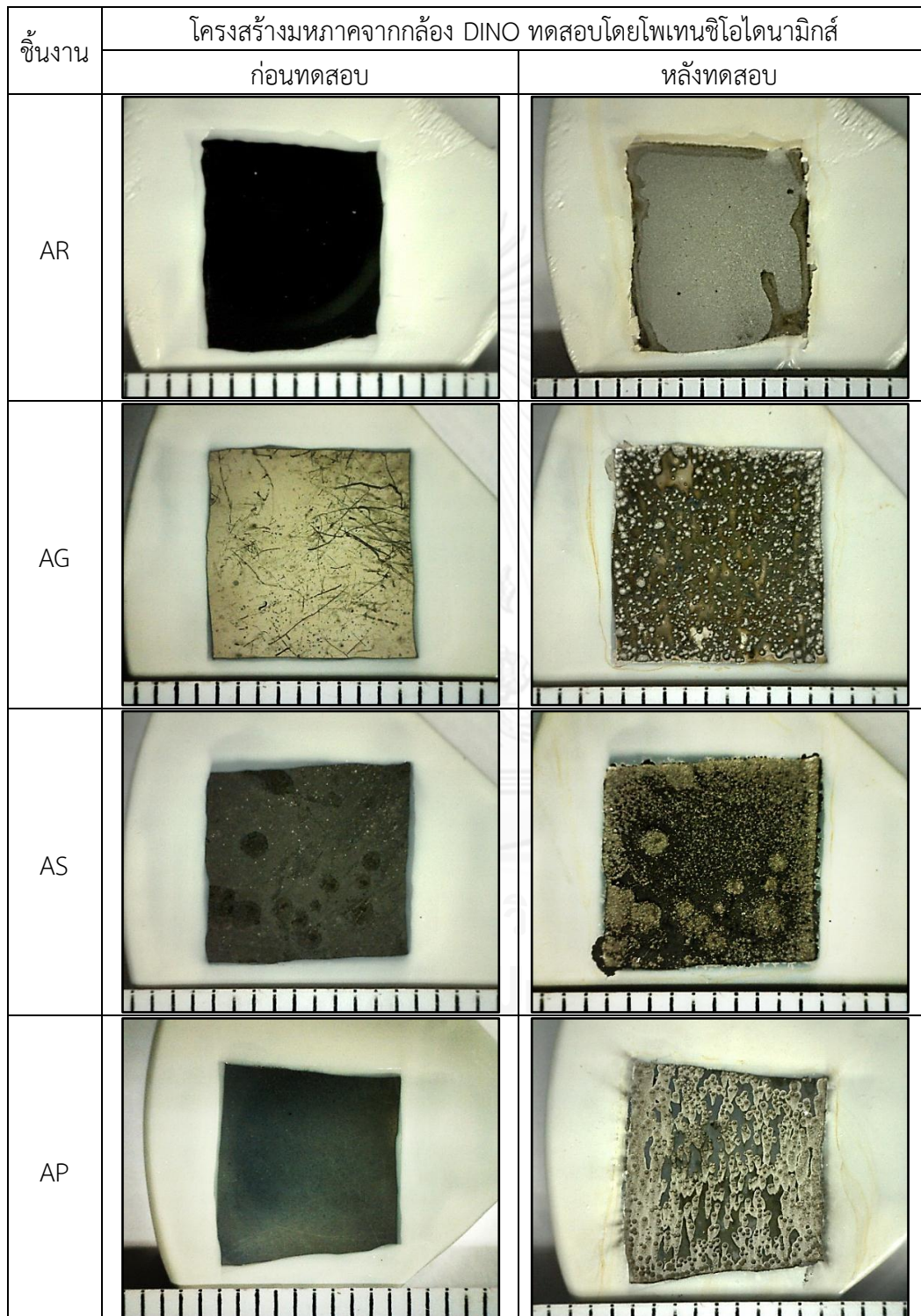
จากภาพที่ 4.8 เมื่อนำเส้นโค้งโพลาไรเซชัน (polarization curve) ไปทำการประมาณนอกช่วงทาเฟล (tafel extrapolation) เพื่อวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์แสดงสมบัติด้านการกัดกร่อน (corrosion parameters) จะพบว่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน (E_{corr} , corrosion potential) มีการลดลงเมื่อมีการทำโนตรายดิงแบบต่างๆ บนชิ้นงาน H13 โดยชิ้นงาน H13 ที่ทำโนตรายดิงแบบก๊าซและอ่างเกลือมีการลดลงของศักย์ไฟฟ้าอย่างมาก ในขณะที่ชิ้นงาน H13 ที่ทำโนตรายดิงแบบพลาสติกมีการลดลงของศักย์ไฟฟ้าเพียงเล็กน้อย เมื่อเทียบกับ H13 ที่ไม่ได้ทำการปรับปรุงผิว

เมื่อพิจารณาค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน (i_{corr} , corrosion current density) ซึ่งเป็นค่าพารามิเตอร์ที่มีความสัมพันธ์เดียวกันกับอัตราการกัดกร่อน (corrosion rate) จะพบว่าชิ้นงาน H13 ที่ผ่านการทำโนตรายดิงแบบต่างๆ มีค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนและอัตราการกัดกร่อนที่เพิ่มขึ้นอย่างมากเมื่อเทียบกับ H13 ที่ไม่ได้ทำการปรับปรุงผิว โดย H13 ที่ผ่านการทำโนตรายดิงแบบก๊าซ มีค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนและอัตราการกัดกร่อนสูงที่สุด ตามด้วย H13 ที่ผ่านการทำโนตรายดิงแบบอ่างเกลือ และ H13 ที่ผ่านการทำโนตรายดิงแบบพลาสติก

จากนั้นเมื่อพิจารณาค่าความต้านทานโพลาไรเซชัน (R_p , polarization resistance) ซึ่งสามารถนำมาเป็นตัวแทนของความต้านทานการกัดกร่อนได้ จะพบว่า ชิ้นงาน H13 ที่ไม่ได้ทำการปรับปรุงผิวมีความต้านทานโพลาไรเซชันสูงที่สุด ตามด้วยชิ้นงาน H13 ที่ทำโนตรายดิงแบบพลาสติก ตามด้วยชิ้นงาน H13 ที่ทำโนตรายดิงแบบอ่างเกลือ และชิ้นงาน H13 ที่ทำโนตรายดิงแบบก๊าซมีความต้านทานโพลาไรเซชันต่ำที่สุด

4.1.2.2 โครงสร้างมหภาค/จุลภาคภายหลังการทดสอบโดยเทคนิคโพเทนซิโอดีนามิกส์



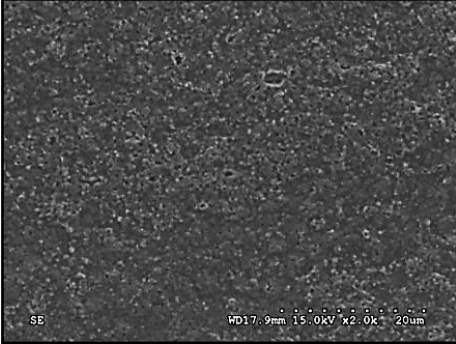
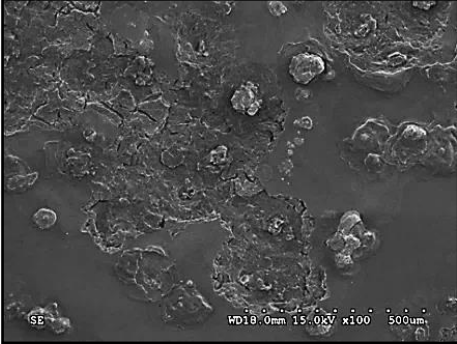

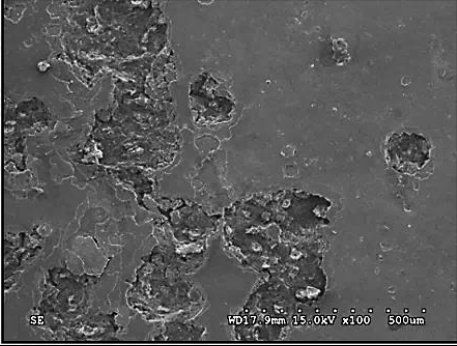
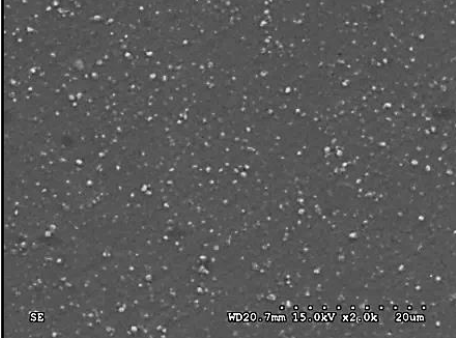

- โครงสร้างมหภาคภายหลังการทดสอบโดยเทคนิคโพเทนซิโอดีนามิกส์



ภาพที่ 4.9 โครงสร้างมหภาคของชิ้นงาน H13 ที่ทำในตารางดังแบบต่างๆ ก่อนและหลังทดสอบการกักความร้อนโดยเทคนิคโพเทนซิโอดีนามิกส์

จากภาพที่ 4.9 เมื่อพิจารณาโครงสร้างมหภาคของชิ้นงาน H13 ที่ผ่านการทำในทรายดิงแบบต่างๆ ก่อนและหลังการทดสอบทดสอบการกัดกร่อนโดยเทคนิคโพเทนชิโอดีนามิกส์จะพบว่า โครงสร้างมหภาคภายหลังการทดสอบชิ้นงาน H13 ที่ไม่ได้ทำการปรับปรุงผิว มีผิวที่มีความเรียบสูง ไม่ปรากฏบริเวณที่ขรุขระ มีพื้นผิวสีเทาซึ่งเป็นสีของเนื้อพื้นเหล็ก แต่ความเงาเป็นกระจกได้หายไป ซึ่งกล่าวได้ว่า ชิ้นงาน H13 ที่ไม่ผ่านการทำในทรายดิง เกิดการกัดกร่อนแบบทั่วผิวหน้า (uniform corrosion) แต่เมื่อพิจารณาโครงสร้างมหภาคภายหลังการทดสอบชิ้นงาน H13 ที่ผ่านการทำในทรายดิงแบบก๊าซ และอ่างเกลือ จะพบว่าพื้นผิวของชิ้นงานถูกกัดกร่อนหลายบริเวณ โดยเกิดการกัดกร่อนทุกบริเวณซึ่งมีความรุนแรงไม่เท่ากันในแต่ละบริเวณ ผิวมีความขรุขระสูง และพื้นผิวมีหลายสี โดยไม่สามารถระบุได้ว่า เป็นเนื้อพื้นของเหล็กทั้งหมด ซึ่งกล่าวได้ว่า ชิ้นงาน H13 ที่ผ่านการทำในทรายดิงแบบก๊าซ และอ่างเกลือ เกิดการกัดกร่อนแบบเฉพาะที่ (localized corrosion) เมื่อพิจารณาโครงสร้างมหภาคภายหลังการทดสอบชิ้นงาน H13 ที่ผ่านการทำในทรายดิงแบบพลาสมา จะพบว่าพื้นผิวของชิ้นงานถูกกัดกร่อนหลายบริเวณ โดยเหลือบางบริเวณที่ไม่เกิดการกัดกร่อน ซึ่งยังคงสภาพของพื้นผิวหน้าแบบเดิม ผิวมีความขรุขระสูง เมื่อตรวจสอบในบริเวณที่เกิดการกัดกร่อนนั้น จะพบว่ามีพื้นผิวสีเทาของเนื้อพื้นเหล็กเช่นเดียวกันกับ H13 ที่ไม่ได้ทำการปรับปรุงผิว โดยชิ้นงานกลุ่มนี้ไม่สามารถระบุได้ว่าเกิดการกัดกร่อนชนิดใด

- โครงสร้างจุลภาคภายหลังการทดสอบโดยเทคนิคโพเทนชิโอดินามิกส์

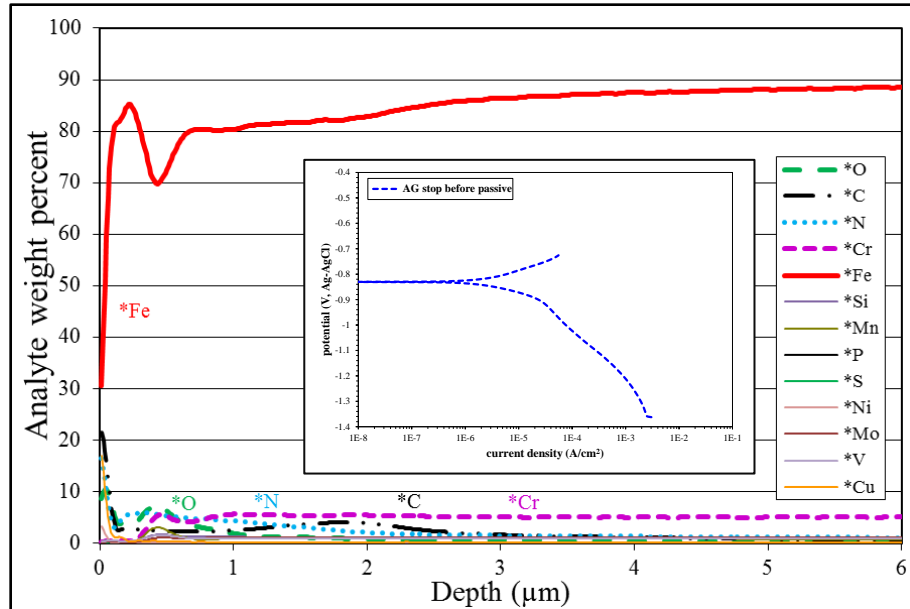
ชิ้นงาน	โครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด ทดสอบโดยโพเทนชิโอดินามิกส์	
	ก่อนทดสอบ	หลังทดสอบ
AR		
AG		
AS		
AP		

ภาพที่ 4.10 โครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด แสดงภาพพื้นผิวของชิ้นงาน H13 ที่ทำในตารางดิงแบบต่างๆ ก่อนและหลังทดสอบการกัดกร่อนโดยเทคนิคโพเทนชิโอดินามิกส์

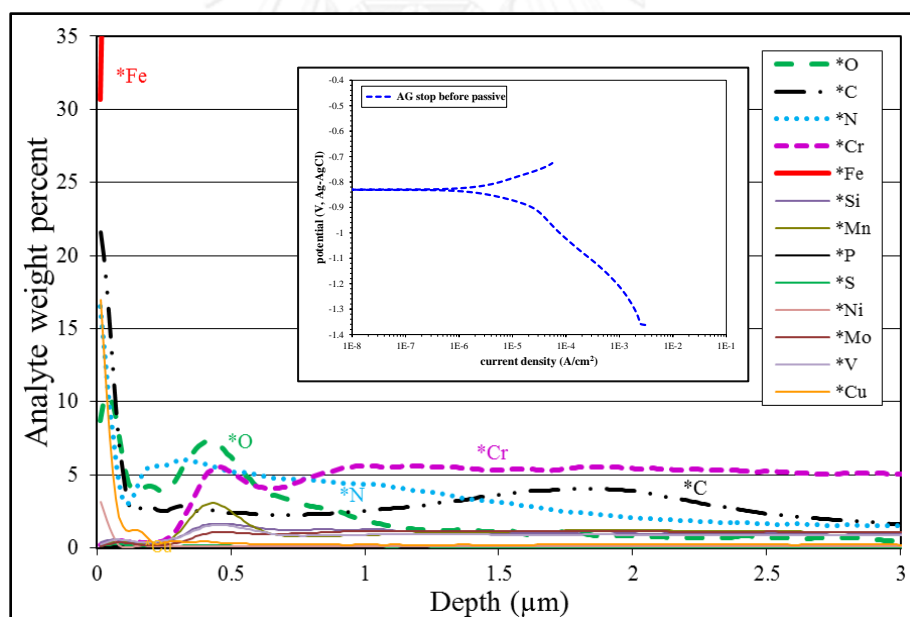
จากภาพที่ 4.10 เมื่อนำชิ้นงาน H13 ที่ผ่านการทำไนตรายดิงแบบต่างๆ มาทำการศึกษาเพิ่มเติม โดยพิจารณาโครงสร้างจุลภาคก่อนและหลังการทดสอบการกัดกร่อนโดยเทคนิคโพเทนชิโอดีนามิกส์จะพบว่าโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน H13 ที่ไม่ได้ทำการปรับปรุงผิว ก่อนทดสอบจะมีพื้นผิวชิ้นงานที่เรียบสูง มีความสม่ำเสมอ และหลังทดสอบพบว่าพื้นผิวเกิดความขรุขระขึ้นเล็กน้อย แต่ยังคงเรียบอยู่แม้จะเกิดการกัดกร่อนแล้ว ซึ่งกล่าวได้ว่า ชิ้นงาน H13 ที่ไม่ผ่านการทำไนตรายดิง เกิดการกัดกร่อนแบบทั่วผิวหน้า (uniform corrosion) แต่เมื่อพิจารณาโครงสร้างจุลภาคภายหลังการทดสอบชิ้นงาน H13 ที่ผ่านการทำไนตรายดิงแบบก๊าซ และอ่างเกลือ จะพบว่าก่อนทดสอบพบรูพรุนระดับจุลภาคกระจายอยู่ทั่วผิวชิ้นงาน และหลังทดสอบพบว่าพื้นผิวเกิดความขรุขระขึ้นอย่างมาก มีการกัดกร่อนเกิดขึ้นโดยมีบางบริเวณเกิดการกัดกร่อนแบบรุนแรง ซึ่งกล่าวได้ว่า ชิ้นงาน H13 ที่ผ่านการทำไนตรายดิงแบบก๊าซ และอ่างเกลือ เกิดการกัดกร่อนแบบเฉพาะที่ (localized corrosion) เมื่อพิจารณาโครงสร้างจุลภาคภายหลังการทดสอบชิ้นงาน H13 ที่ผ่านการทำไนตรายดิงแบบพลาสติก จะพบว่าก่อนทดสอบผิวของชิ้นงานมีความเรียบสูง มีอนุภาคสีขาวกระจายอยู่ทั่วทั้งผิวชิ้นงาน และหลังทดสอบพื้นผิวของชิ้นงานแบ่งออกเป็นสองบริเวณ คือ บริเวณที่ไม่เกิดการกัดกร่อน กับบริเวณเกิดการกัดกร่อน ซึ่งบริเวณที่เกิดการกัดกร่อนนั้น มีความรุนแรงน้อย มีลักษณะใกล้เคียงกับพื้นผิวภายหลังการทดสอบของ H13 ที่ไม่ได้ทำการปรับปรุงผิว ซึ่งกล่าวได้ว่า ชิ้นงาน H13 ที่ผ่านการทำไนตรายดิงแบบพลาสติก เกิดการกัดกร่อนแบบทั่วผิวหน้า (uniform corrosion)

จากการทดสอบโดยเทคนิคโพเทนชิโอดีนามิกส์ พบว่า ชิ้นงาน H13 ที่ไม่ได้ทำการปรับปรุงผิว มีความต้านทานการกัดกร่อนสูงกว่า ชิ้นงาน H13 ที่ผ่านการทำไนตรายดิงแบบพลาสติก ชิ้นงาน H13 ที่ผ่านการทำไนตรายดิงแบบอ่างเกลือ และ ชิ้นงาน H13 ที่ผ่านการทำไนตรายดิงแบบก๊าซ ตามลำดับ อีกทั้งชิ้นงานที่มีชั้นสารประกอบที่มีรูพรุนระดับจุลภาค คือ H13 ที่ผ่านการทำไนตรายดิงแบบก๊าซและอ่างเกลือ จะมีค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนที่ลดลงอย่างมีนัยยะสำคัญ เป็นลักษณะเฉพาะของการกัดกร่อนบริเวณซอก (crevice corrosion) [23] มีความต้านทานการกัดกร่อนต่ำ

4.1.2.3 ศึกษาฟิล์มแพสซีฟที่เกิดขึ้นในการทดสอบโดยเทคนิคโพเทนซิโอดินามิกส์ของ
ชิ้นงาน H13 ที่ทำไนตรายดิงแบบก๊าซและอ่างเกลือ



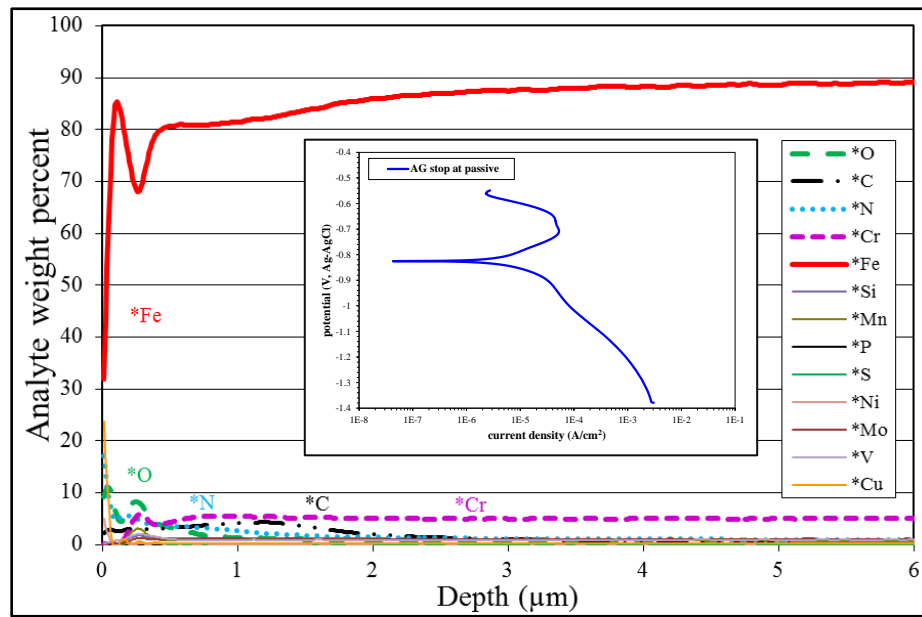
(ก)



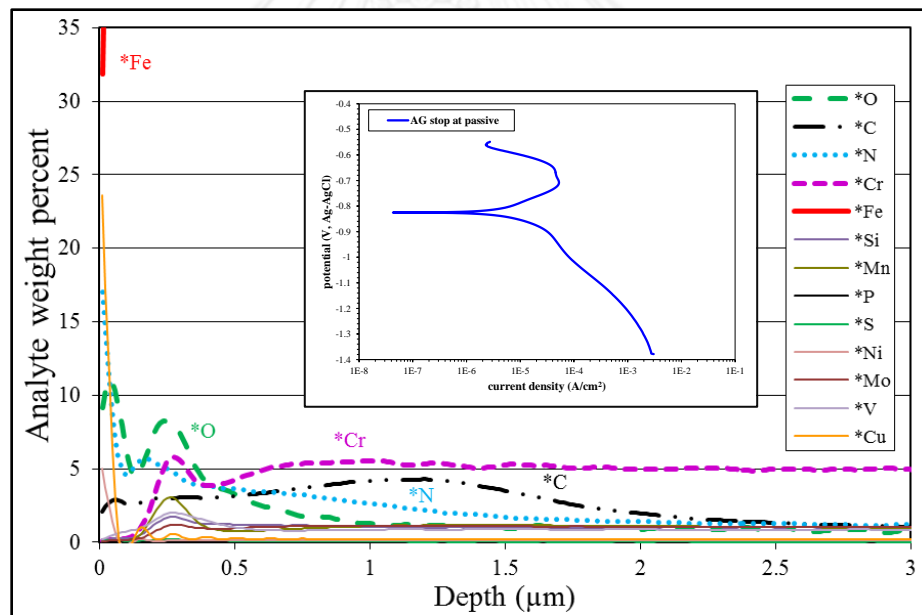
(ข)

ภาพที่ 4.11 การกระจายตัวของธาตุที่มีความลึกต่างๆ จากผิววิเคราะห์โดยเครื่อง Glow Discharge Spectroscopy
ของชิ้นงาน H13 ที่ทำไนตรายดิงแบบก๊าซและผ่านการทดสอบการกัดกร่อน
โดยเทคนิคโพเทนซิโอดินามิกส์ โดยหยุดทดสอบในบริเวณก่อนเกิดช่วงแพสซีฟ

(ก) เต็มสเกล (ข) ขยายสเกล



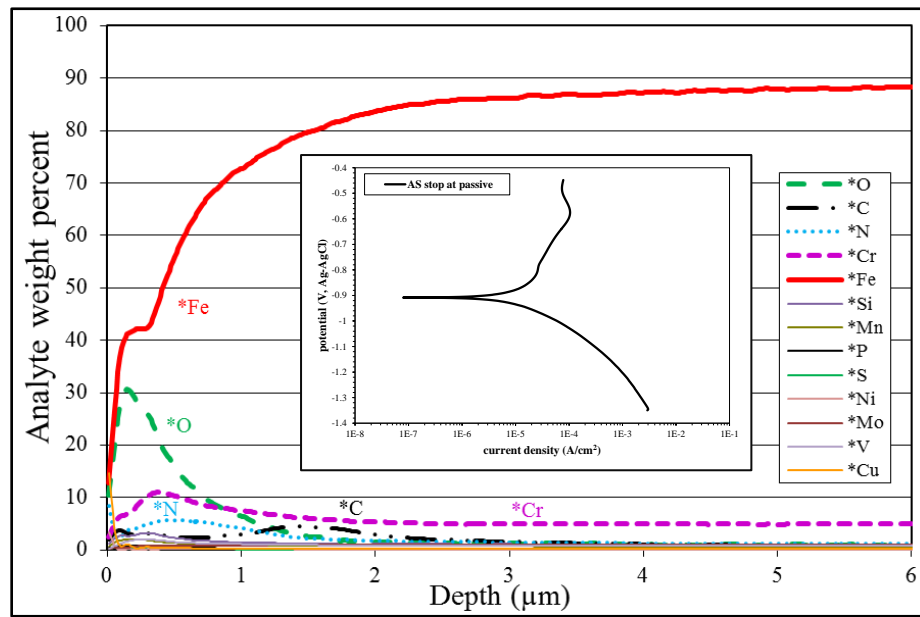
(ก)



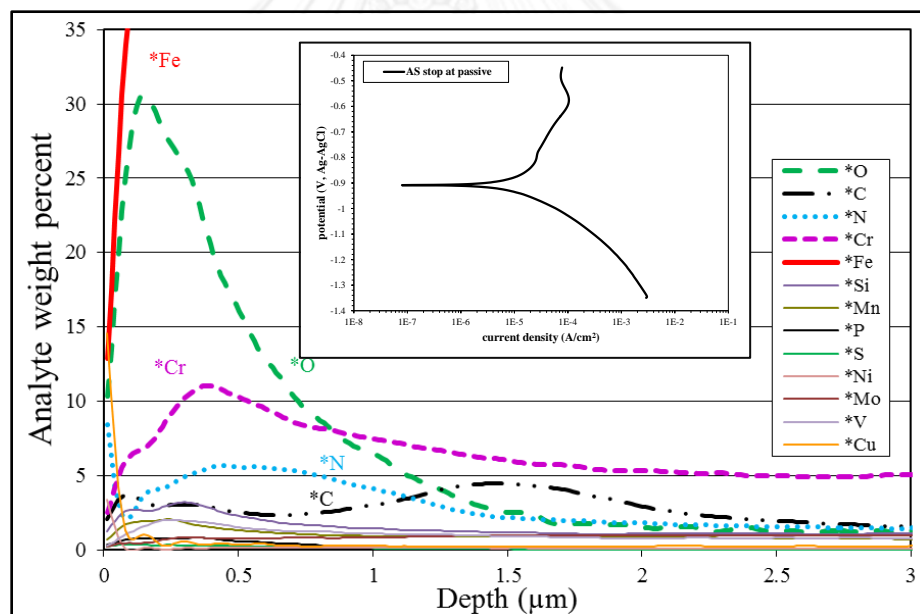
(ข)

ภาพที่ 4.12 การกระจายตัวของธาตุที่มีความลึกต่างๆ จากผิววิเคราะห์โดยเครื่อง Glow Discharge Spectroscopy ของชิ้นงาน H13 ที่ทำไนตรายดิงแบบก๊าซและผ่านการทดสอบการกัดกร่อน โดยเทคนิคโพเทนชิโตนามิกส์ โดยหยุดทดสอบในบริเวณที่เกิดช่วงแพสซีฟ

(ก) เต็มสเกล (ข) ขยายสเกล



(ก)



(ข)

ภาพที่ 4.13 การกระจายตัวของธาตุที่มีความลึกต่างๆ จากผิววิเคราะห์โดยเครื่อง Glow Discharge Spectroscopy ของชิ้นงาน H13 ที่ทำไนตรายดิงแบบอ่างเกลือและผ่านการทดสอบการกัดกร่อน โดยเทคนิคโพเทนชิโตนามิกส์ โดยหยุดทดสอบในบริเวณที่เกิดช่วงแพสซีฟ

(ก) เต็มสเกล (ข) ขยายสเกล

เนื่องจากในผลทดสอบด้วยเทคนิคโพเทนชิโตนามิกส์ พบว่า ชิ้นงาน H13 ที่ทำไนตรายดิงแบบก๊าซ และอ่างเกลือ จะมีบริเวณแพสซีฟเกิดขึ้นระหว่างการทดสอบ ซึ่งกล่าวได้ว่าเกิดเป็นชั้นฟิล์มแพสซีฟขึ้นมาปกคลุมผิวชิ้นงาน โดยจะทำให้ค่ากระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนลดลงในช่วงแพสซีฟ จึงทำการศึกษาว่าฟิล์มแพสซีฟที่เกิดขึ้นฟิล์มชนิดใด โดยทำการตรวจสอบดังนี้

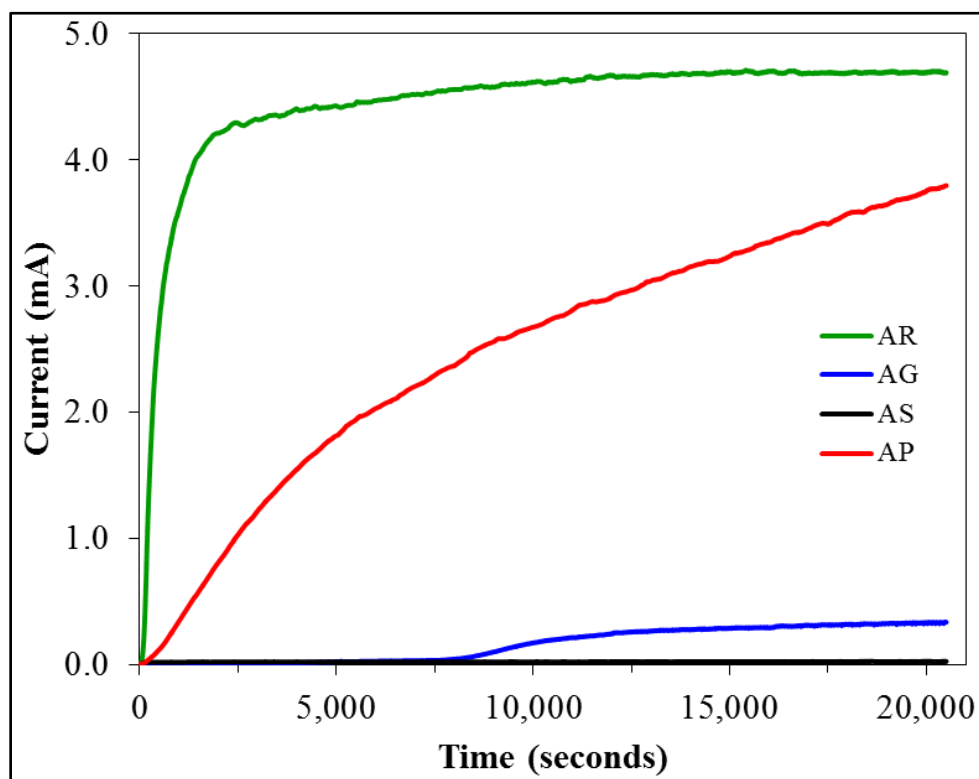
H13 ที่ทำในทรายดิงแบบก๊าซ จะมีชั้นฟิล์มแพสซีฟเกิดขึ้นขณะทดสอบด้วยเทคนิคโพเทนซิโอดีนามิกส์ โดยพิจารณาการกระจายตัวของธาตุที่ความลึกต่างๆ จากผิวของชิ้นงานวิเคราะห์โดยเครื่อง Glow Discharge Spectroscopy เมื่อตรวจสอบที่ช่วงก่อนเข้าสู่ช่วงแพสซีฟในภาพที่ 4.11 เปรียบเทียบกับช่วงแพสซีฟในภาพที่ 4.12 พบว่าก่อนเกิดแพสซีฟ ที่ผิวชิ้นงานมีธาตุเหล็กเป็นหลัก และมีธาตุคาร์บอนอยู่ปริมาณมาก และเมื่อพิจารณาตอนเกิดแพสซีฟ พบว่าจะมีธาตุเหล็กเป็นหลัก ปริมาณธาตุคาร์บอนลดลงมาก และมีธาตุออกซิเจนปริมาณมากเกิดขึ้น โดยคาดว่าฟิล์มแพสซีฟที่เกิดขึ้นนั้นเป็นฟิล์มของเหล็กออกไซด์ หรือ เหล็กไฮดรอกไซด์ ซึ่งเป็นฟิล์มแพสซีฟที่ไม่เสถียร ปรากฏขึ้นที่ผิวชิ้นงานในช่วงสั้นๆ ของการทดสอบด้วยเทคนิคโพเทนซิโอดีนามิกส์

H13 ที่ทำในทรายดิงแบบอ่างเกลือ จะมีชั้นฟิล์มแพสซีฟเกิดขึ้นขณะทดสอบด้วยเทคนิคโพเทนซิโอดีนามิกส์ โดยพิจารณาการกระจายตัวของธาตุที่ความลึกต่างๆ จากผิวของชิ้นงานวิเคราะห์โดยเครื่อง Glow Discharge Spectroscopy เมื่อตรวจสอบที่ช่วงแพสซีฟในภาพที่ 4.13 จะพบธาตุเหล็กเป็นหลัก ธาตุโครเมียมและธาตุออกซิเจนปริมาณมาก ในที่นี้คาดว่าฟิล์มแพสซีฟที่เกิดขึ้นนั้นเป็นฟิล์มของเหล็กออกไซด์ หรือ เหล็กไฮดรอกไซด์ ซึ่งเป็นฟิล์มแพสซีฟที่ไม่เสถียร หรือ อาจเป็น โครเมียมออกไซด์ ที่ตรวจพบที่ผิวในหัวข้อ 4.1.1.4 โดยฟิล์มแพสซีฟปรากฏขึ้นที่ผิวชิ้นงานในช่วงสั้นๆ ของการทดสอบด้วยเทคนิคโพเทนซิโอดีนามิกส์

4.1.2.4 เทคนิคโพเทนซิโอสแตติก (Potentiostatics Technique)

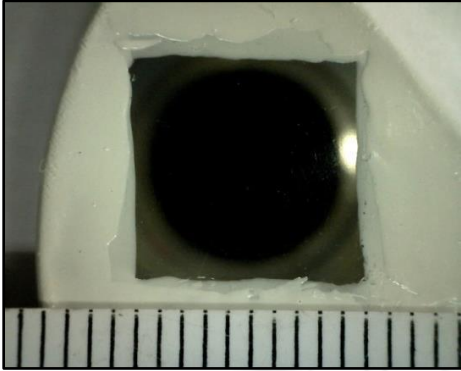
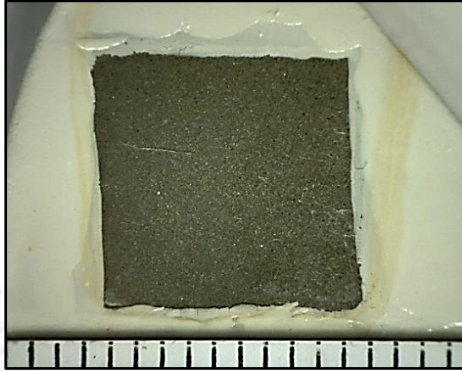
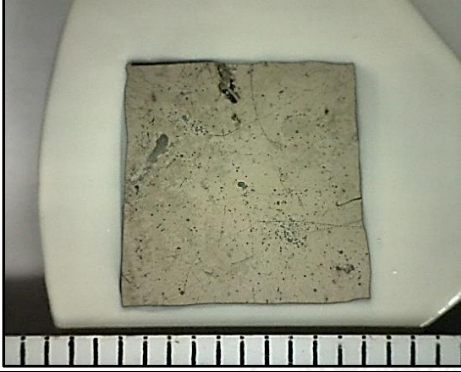



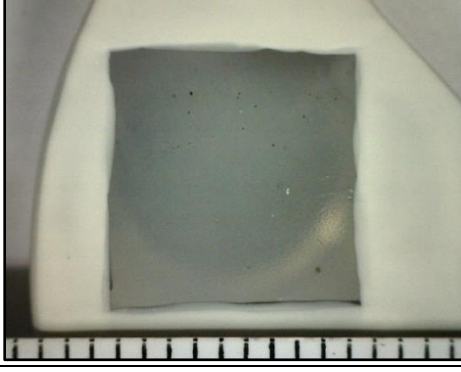
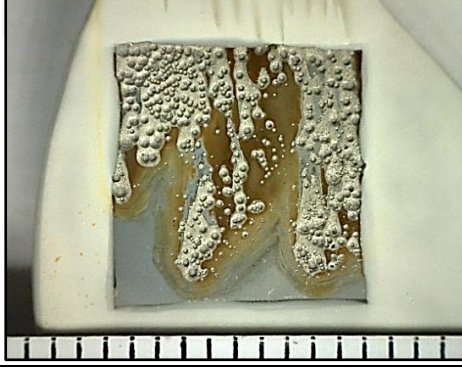
การทดสอบนี้เป็นกระบวนการทดสอบสมบัติด้านการกัดกร่อนของโลหะและวัสดุ โดยการทดสอบนี้จะมีการป้อนศักย์ไฟฟ้าทดสอบ (set potential) ที่มีค่าคงที่ตลอดการทดสอบ ซึ่งการเลือกศักย์ไฟฟ้าที่เหมาะสมนั้นจะต้องอยู่ในบริเวณแอนอดิก จากผลการทดสอบโดยเทคนิคโพเทนซิโอดีนามิกส์ (potentiodynamics technique) ซึ่งเป็นการจำลองการกัดกร่อนเมื่อใช้งานที่สถานะที่มีการป้อนศักย์ไฟฟ้าคงที่กับชิ้นงาน จากการทดสอบจะได้เส้นโค้งแสดงความสัมพันธ์ของกระแสไฟฟ้า (current) หรือการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นเทียบกับเวลา (time) โดยสามารถนำผลทดสอบมาเปรียบเทียบกันในแต่ละชิ้นงานว่า มีความต้านทานการกัดกร่อนสูงกว่าเมื่อมีการป้อนศักย์ไฟฟ้าคงที่ หรือ มีกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นต่ำกว่าเมื่อมีการป้อนศักย์ไฟฟ้าคงที่ โดยในงานวิจัยทำการทดสอบโดยโพเทนซิโอสแตติกที่ศักย์ไฟฟ้าคงที่ เท่ากับ -300 และ 0 มิลลิโวลต์ (Ag-AgCl) ทดสอบเป็นเวลา 5 ชั่วโมง 30 นาที

- ทดสอบที่ -300 มิลลิโวลต์ (Ag-AgCl) ทดสอบเป็นเวลา 5 ชั่วโมง 30 นาที



ภาพที่ 4.14 เส้นโค้งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้า (current) ในแกน y กับ เวลา (time) ในแกน x เปรียบเทียบกันของชิ้นงาน H13 ที่ทำในตรายดิงแบบต่างๆ ที่ทดสอบโดยเทคนิคโพเทนชิโอสแตติก โดยตั้งค่าศักย์ไฟฟ้าในการทดสอบ เท่ากับ -300 มิลลิโวลต์ (Ag-AgCl) ทดสอบเป็นเวลา 5 ชั่วโมง 30 นาที

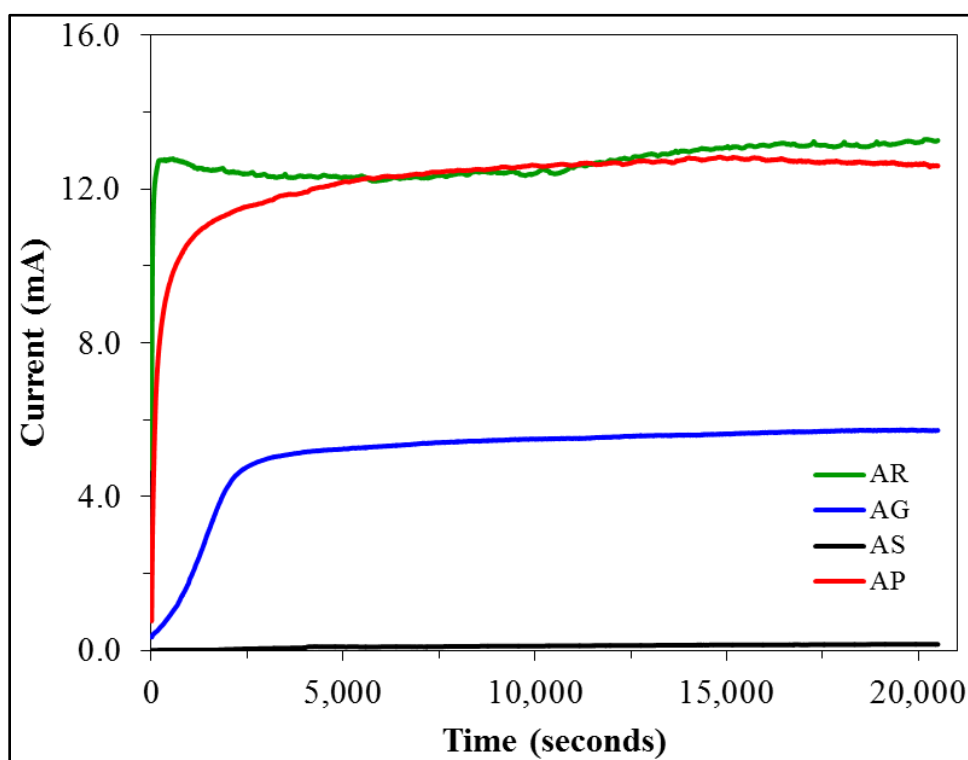
จากภาพที่ 4.14 เมื่อทดสอบโดยเทคนิคโพเทนชิโอสแตติก ที่ศักย์ไฟฟ้าคงที่ -300 มิลลิโวลต์ (Ag-AgCl) ทดสอบเป็นเวลา 5 ชั่วโมง 30 นาที ได้เส้นโค้งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับเวลาของชิ้นงาน H13 ที่ทำในตรายดิงแบบต่างๆ พบว่าชิ้นงาน H13 ที่ไม่ได้ทำการปรับปรุงผิวนั้นมีค่ากระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นจาก 0 มิลลิแอมแปร์ในช่วงเวลาสั้นๆ (ประมาณ 2000 วินาที) จากนั้นกระแสไฟฟ้ามีค่าคงที่ตลอดการทดสอบเท่ากับ 4.5 มิลลิแอมแปร์ ซึ่งมีค่าสูงที่สุดในทุกกลุ่มชิ้นงาน เมื่อพิจารณา H13 ที่ทำในตรายดิงแบบพลาสติกพบว่ากระแสไฟฟ้าจะมีค่าเพิ่มขึ้นตลอดการทดสอบ แต่จะมีค่าน้อยกว่า H13 ที่ไม่ได้ทำการปรับปรุงผิว ในทุกช่วงเวลา โดยค่ากระแสไฟฟ้าของชิ้นงาน H13 ที่ทำในตรายดิงแบบพลาสติกที่เวลา 20000 วินาที มีค่า 3.8 มิลลิแอมแปร์ เมื่อพิจารณาชิ้นงาน H13 ที่ทำในตรายดิงแบบก๊าซ พบว่าในช่วง 6000 วินาทีแรกไม่มีกระแสไฟฟ้าเกิดขึ้นในการทดสอบ (ไม่เกิดการกัดกร่อน) จากนั้นกระแสไฟฟ้าก็เริ่มเกิดขึ้นโดยมีค่าเพิ่มขึ้นทีละน้อยและค่อนข้างจะคงที่อยู่ที่ 0.3 มิลลิแอมแปร์จนจบการทดสอบ เมื่อพิจารณาชิ้นงาน H13 ที่ทำในตรายดิงแบบอ่างเกลือ พบว่าตลอดการทดสอบ 20000 วินาที ไม่มีกระแสไฟฟ้าเกิดขึ้น (ไม่เกิดการกัดกร่อน)

ชิ้นงาน	โครงสร้างมหภาคจากกล้อง DINO ทดสอบโดยโพเทนชิโอสแตติก	
	ก่อนทดสอบ	หลังทดสอบ
AR		
AG		
AS		
AP		

ภาพที่ 4.15 โครงสร้างมหภาคของชิ้นงาน H13 ที่ทำในตรายติงแบบต่างๆ ก่อนและหลังทดสอบการกัดกร่อนโดยเทคนิคโพเทนชิโอสแตติก โดยตั้งค่าศักย์ไฟฟ้าในการทดสอบ เท่ากับ -300 มิลลิโวลต์ (Ag-AgCl) ทดสอบเป็นเวลา 5 ชั่วโมง 30 นาที

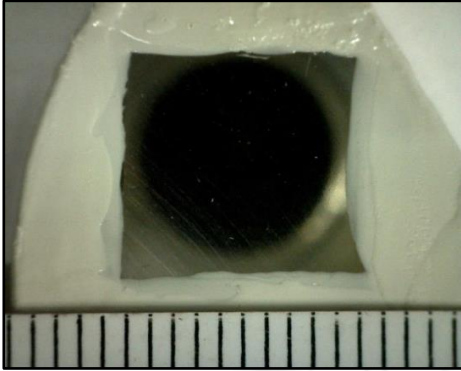
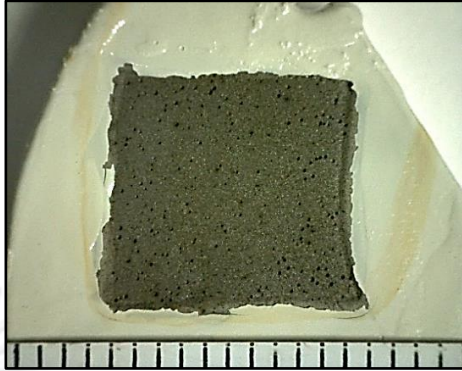
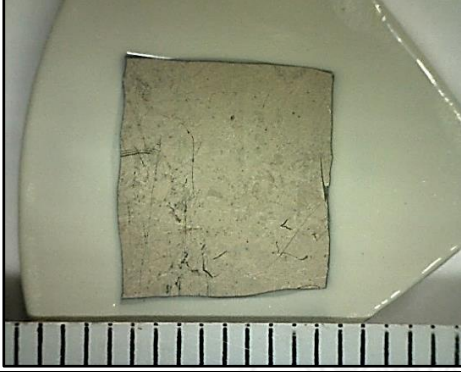
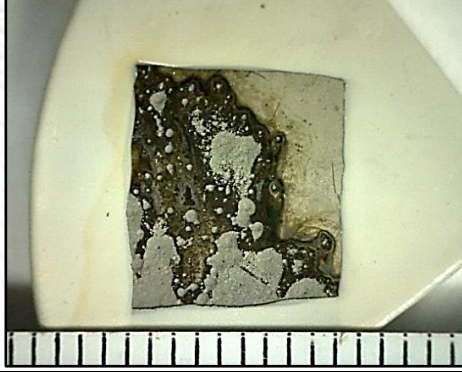
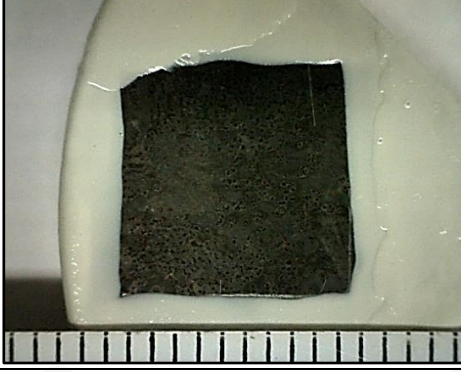
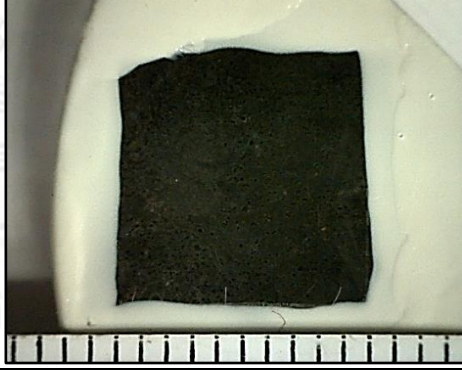
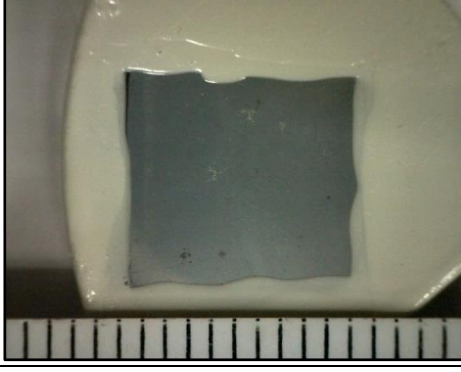
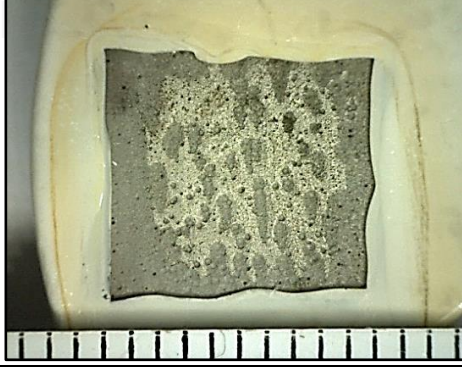
จากภาพที่ 4.15 เมื่อพิจารณาโครงสร้างมหภาคของชิ้นงาน H13 ที่ผ่านการทำไนตรรายดิงแบบต่างๆ ก่อนและหลังการทดสอบการกัดกร่อนโดยเทคนิคโพเทนชิโอสแตติก ที่ศักย์ไฟฟ้าคงที่ -300 มิลลิโวลต์ (Ag-AgCl) ทดสอบเป็นเวลา 5 ชั่วโมง 30 นาที จะพบว่า โครงสร้างมหภาคภายหลังจากการทดสอบชิ้นงาน H13 ที่ไม่ได้ทำการปรับปรุงผิว มีผิวที่เรียบ ไม่ปรากฏบริเวณที่ขรุขระเกิดการกัดกร่อนทุกบริเวณ มีพื้นผิวสีเทาซึ่งเป็นสีของเนื้อพื้นเหล็ก แต่ความเงาเป็นกระจกได้หายไป ซึ่งกล่าวได้ว่า ชิ้นงาน H13 ที่ไม่ได้ทำการปรับปรุงผิว เกิดการกัดกร่อนจนไม่เหลือพื้นผิวเดิม แต่เมื่อพิจารณาโครงสร้างมหภาคภายหลังจากการทดสอบชิ้นงาน H13 ที่ผ่านการทำไนตรรายดิงแบบก๊าซ จะพบว่าพื้นผิวของชิ้นงานถูกกัดกร่อนที่ตำแหน่งเดียว โดยบริเวณอื่นของผิวชิ้นงานนั้นยังคงสภาพเดิมเช่นเดียวกับก่อนทดสอบ ซึ่งกล่าวได้ว่า ชิ้นงาน H13 ที่ผ่านการทำไนตรรายดิงแบบก๊าซ มีผิวที่ต้านทานต่อการกัดกร่อนที่ดีเมื่อทดสอบที่ศักย์ไฟฟ้าคงที่เท่ากับ -300 มิลลิโวลต์ (Ag-AgCl) เมื่อพิจารณาโครงสร้างมหภาคภายหลังจากการทดสอบชิ้นงาน H13 ที่ผ่านการทำไนตรรายดิงแบบอ่างเกลือ จะพบว่าพื้นผิวของชิ้นงานไม่เกิดการกัดกร่อน โดยทุกบริเวณของผิวชิ้นงานนั้นยังคงสภาพเดิมเช่นเดียวกับก่อนทดสอบ ซึ่งกล่าวได้ว่า ชิ้นงาน H13 ที่ผ่านการทำไนตรรายดิงแบบอ่างเกลือ มีผิวที่ต้านทานต่อการกัดกร่อนที่ดีเยี่ยมเมื่อทดสอบที่ศักย์ไฟฟ้าคงที่เท่ากับ -300 มิลลิโวลต์ (Ag-AgCl) เมื่อพิจารณาโครงสร้างมหภาคภายหลังจากการทดสอบชิ้นงาน H13 ที่ผ่านการทำไนตรรายดิงแบบพลาสติก จะพบว่าพื้นผิวของชิ้นงานถูกกัดกร่อนหลายบริเวณ โดยเหลือบางบริเวณที่ไม่เกิดการกัดกร่อน ซึ่งยังคงสภาพของพื้นผิวหน้าแบบเดิม ผิวมีความขรุขระสูง กล่าวได้ว่า ชิ้นงาน H13 ที่ทำไนตรรายดิงแบบพลาสติก มีผิวที่ต้านทานต่อการกัดกร่อนที่ไม่ดีนักเมื่อทดสอบที่ศักย์ไฟฟ้าคงที่เท่ากับ -300 มิลลิโวลต์ (Ag-AgCl) แต่ยังคงดีกว่าเมื่อเทียบกับ H13 ที่ไม่ได้ทำการปรับปรุงผิว

- ทดสอบที่ 0 มิลลิโวลต์ (Ag-AgCl) ทดสอบเป็นเวลา 5 ชั่วโมง 30 นาที



ภาพที่ 4.16 เส้นโค้งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้า (current) ในแกน y กับ เวลา (time) ในแกน x เปรียบเทียบกันของชิ้นงาน H13 ที่ทำในตรายดิงแบบต่างๆ ที่ทดสอบโดยเทคนิคโพเทนชิโอสแตติก โดยตั้งค่าศักย์ไฟฟ้าในการทดสอบ เท่ากับ 0 มิลลิโวลต์ (Ag-AgCl) ทดสอบเป็นเวลา 5 ชั่วโมง 30 นาที

จากภาพที่ 4.16 เมื่อทดสอบโดยเทคนิคโพเทนชิโอสแตติก ที่ศักย์ไฟฟ้าคงที่ 0 มิลลิโวลต์ (Ag-AgCl) ทดสอบเป็นเวลา 5 ชั่วโมง 30 นาที ได้เส้นโค้งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับ เวลาของชิ้นงาน H13 ที่ทำในตรายดิงแบบต่างๆ โดยเมื่อเพิ่มค่าศักย์ไฟฟ้าที่ทดสอบจาก -300 เป็น 0 มิลลิโวลต์ (Ag-AgCl) จะพบว่ากระแสไฟฟ้าที่วัดได้มีค่าสูงขึ้นทุกกลุ่ม พบว่าชิ้นงาน H13 ที่ไม่ได้ทำการปรับปรุงผิวนั้นมีค่ากระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นจาก 0 มิลลิแอมแปร์ในช่วงเวลาสั้นๆ (น้อยกว่า 500 วินาที) จากนั้นกระแสไฟฟ้ามีค่าคงที่ตลอดการทดสอบเท่ากับ 13 มิลลิแอมแปร์ ซึ่งมีค่าสูงสุดในทุกกลุ่มชิ้นงาน เมื่อพิจารณา H13 ที่ทำในตรายดิงแบบพลาสติกพบว่ากระแสไฟฟ้าจะมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 0 มิลลิแอมแปร์ในช่วงเวลาสั้นๆ (ประมาณ 5000 วินาที) จากนั้นกระแสไฟฟ้ามีค่าคงที่ตลอดการทดสอบเท่ากับ 13 มิลลิแอมแปร์ เช่นเดียวกับ H13 ที่ไม่ได้ทำการปรับปรุงผิว เมื่อพิจารณาชิ้นงาน H13 ที่ทำในตรายดิงแบบก๊าซ พบว่ากระแสไฟฟ้าจะมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 0 มิลลิแอมแปร์ในช่วงเวลาสั้นๆ (ประมาณ 2500 วินาที) จากนั้นกระแสไฟฟ้ามีค่าคงที่ตลอดการทดสอบเท่ากับ 5 มิลลิแอมแปร์ เมื่อพิจารณาชิ้นงาน H13 ที่ทำในตรายดิงแบบอ่างเกลือ พบว่าตลอดการทดสอบ 20000 วินาที ไม่มีกระแสไฟฟ้าเกิดขึ้น (ไม่เกิดการกัดกร่อน)

ชิ้นงาน	โครงสร้างมหภาคจากกล้อง DINO ทดสอบโดยโพเทนชิโอสแตติก	
	ก่อนทดสอบ	หลังทดสอบ
AR		
AG		
AS		
AP		

ภาพที่ 4.17 โครงสร้างมหภาคของชิ้นงาน H13 ที่ทำไนตรายดิงแบบต่างๆ ก่อนและหลังทดสอบการกัดกร่อน โดยเทคนิคโพเทนชิโอสแตติก โดยตั้งค่าศักย์ไฟฟ้าในการทดสอบ เท่ากับ 0 มิลลิโวลต์ (Ag-AgCl) ทดสอบเป็นเวลา 5 ชั่วโมง 30 นาที

จากภาพที่ 4.17 เมื่อพิจารณาโครงสร้างมหภาคของชิ้นงาน H13 ที่ผ่านการทำไนตรายดิงแบบต่างๆ ก่อนและหลังการทดสอบการกัดกร่อนโดยเทคนิคโพเทนซิโอสแตติก ที่ศักย์ไฟฟ้าคงที่ 0 มิลลิโวลต์ (Ag-AgCl) ทดสอบเป็นเวลา 5 ชั่วโมง 30 นาที พบว่า โครงสร้างมหภาคภายหลังการทดสอบชิ้นงาน H13 ที่ไม่ได้ทำการปรับปรุงผิว มีผิวที่เรียบ ไม่ปรากฏบริเวณที่ขรุขระเกิดการกัดกร่อนทุกบริเวณ มีพื้นผิวสีเทาซึ่งเป็นสีของเนื้อพื้นเหล็ก แต่ความเงาเป็นกระจกได้หายไป ซึ่งกล่าวได้ว่า ชิ้นงาน H13 ที่ไม่ได้ทำการปรับปรุงผิว เกิดการกัดกร่อนจนไม่เหลือพื้นผิวเดิม แต่เมื่อพิจารณาโครงสร้างมหภาคภายหลังการทดสอบชิ้นงาน H13 ที่ผ่านการทำไนตรายดิงแบบก๊าซ จะพบว่าพื้นผิวของชิ้นงานถูกกัดกร่อนในบริเวณที่กว้างขึ้น ซึ่งเกิดการกัดกร่อนที่มีความรุนแรงแตกต่างกันออกไปตามสีที่เกิดขึ้น และปรากฏบางบริเวณที่เป็นพื้นผิวสีเทาเป็นสีของเนื้อพื้นเหล็ก โดยจะเหลือบริเวณที่ไม่เกิดการกัดกร่อนเพียงเล็กน้อย ซึ่งกล่าวได้ว่า ชิ้นงาน H13 ที่ผ่านการทำไนตรายดิงแบบก๊าซ มีผิวที่ต้านทานต่อการกัดกร่อนปานกลางเมื่อทดสอบที่ศักย์ไฟฟ้าคงที่เท่ากับ 0 มิลลิโวลต์ (Ag-AgCl) เมื่อพิจารณาโครงสร้างมหภาคภายหลังการทดสอบชิ้นงาน H13 ที่ผ่านการทำไนตรายดิงแบบอ่างเกลือ จะพบว่าพื้นผิวของชิ้นงานไม่เกิดการกัดกร่อน โดยทุกบริเวณของผิวชิ้นงานนั้นยังคงสภาพเดิมเช่นเดียวกับก่อนทดสอบ ซึ่งกล่าวได้ว่า ชิ้นงาน H13 ที่ผ่านการทำไนตรายดิงแบบอ่างเกลือ มีผิวที่ต้านทานต่อการกัดกร่อนที่ดีเยี่ยมเมื่อทดสอบที่ศักย์ไฟฟ้าคงที่เท่ากับ 0 มิลลิโวลต์ (Ag-AgCl) เมื่อพิจารณาโครงสร้างมหภาคภายหลังการทดสอบชิ้นงาน H13 ที่ผ่านการทำไนตรายดิงแบบพลาสติก จะพบว่าพื้นผิวของชิ้นงานเกิดการกัดกร่อนทุกบริเวณ มีพื้นผิวสีเทาซึ่งเป็นสีของเนื้อพื้นเหล็ก แต่พื้นผิวหลังทดสอบมีสีเทาอ่อนบางบริเวณ ซึ่งกล่าวได้ว่า ชิ้นงาน H13 ที่ทำไนตรายดิงแบบพลาสติก เกิดการกัดกร่อนจนไม่เหลือพื้นผิวเดิม มีผิวที่ต้านทานต่อการกัดกร่อนต่ำเมื่อทดสอบที่ศักย์ไฟฟ้าคงที่เท่ากับ 0 มิลลิโวลต์ (Ag-AgCl)

จากการทดสอบโดยเทคนิคโพเทนซิโอสแตติก พบว่า ชิ้นงาน H13 ที่ผ่านการทำไนตรายดิงแบบอ่างเกลือ มีความต้านทานการกัดกร่อนสูงกว่า ชิ้นงาน H13 ที่ผ่านการทำไนตรายดิงแบบก๊าซ ชิ้นงาน H13 ที่ผ่านการทำไนตรายดิงแบบพลาสติก และ ชิ้นงาน H13 ที่ไม่ได้ทำการปรับปรุงผิวตามลำดับ เนื่องจากชิ้นงานที่มีชั้นสารประกอบที่ผิว ได้แก่ ชิ้นงาน H13 ที่ผ่านการทำไนตรายดิงแบบอ่างเกลือและก๊าซ ซึ่งชั้นสารประกอบเป็นชั้นเซรามิกส์จะมีความต้านทานการกัดกร่อนสูงแม้มีรูพรุนอยู่แต่ในการทดสอบโดยเทคนิคนี้จะคำนึงถึงสัดส่วนของพื้นที่เป็นสำคัญ ต่อมาชิ้นงานที่มีเพียงชั้นการแพร่ ได้แก่ ชิ้นงาน H13 ที่ผ่านการทำไนตรายดิงแบบพลาสติก จะมีอนุภาคไนตรายด์ซึ่งเป็นสารประกอบเซรามิกส์ที่มีความต้านทานการกัดกร่อนสูงกระจายอยู่ทั่วชั้นการแพร่ แต่พื้นที่ส่วนใหญ่ยังคงเป็นเนื้อเหล็กซึ่งเกิดการกัดกร่อนได้ง่าย ทำให้ชิ้นงานมีความต้านทานการกัดกร่อนปานกลาง และชิ้นงาน H13 ที่ไม่ได้ทำการปรับปรุงผิว มีเพียงเนื้อเหล็ก ไม่มีชั้นหรืออนุภาคสารประกอบอยู่ที่ผิว ทำให้ชิ้นงานมีความต้านทานการกัดกร่อนต่ำ

4.1.3 ความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติด้านการกัดกร่อนกับสมบัติทางพื้นผิวของกลุ่มชิ้นงาน เหล็กกล้า H13 ที่ผ่านการทำไนตรายดิงแบบต่างๆ

จากหัวข้อ 4.1.1 การหาคุณลักษณะทางผิว (Surface Characterization) พบว่าที่ผิวของชิ้นงานที่ทำไนตรายดิงแบบต่างๆ มีสี ความแข็ง เฟสและสารประกอบที่เกิดขึ้นที่ต่างกัน โดยที่ผิวของ H13 ที่ทำไนตรายดิงแบบก๊าซ และอ่างเกลือ จะมีชั้นสารประกอบอยู่ที่ผิว ซึ่งชั้นสารประกอบของชิ้นงานดังกล่าวมีรูพรุนระดับจุลภาคกระจายอยู่ทั่วทุกบริเวณผิวของชิ้นงาน เป็นจุดอ่อนที่สามารถเกิดการกัดกร่อนได้ง่าย ในขณะที่ H13 ที่ทำไนตรายดิงแบบพลาสมา ไม่มีชั้นสารประกอบอยู่ที่ผิวชิ้นงาน มีเพียงชั้นการแพร์ ต่อมาในหัวข้อ 4.1.2 เมื่อนำชิ้นงานมาทดสอบด้านการกัดกร่อนโดยเทคนิคโพเทนชิโอดนามิกส์ที่มีหลักการ คือ มีการป้อนศักย์ไฟฟ้า และมีการเพิ่มศักย์ไฟฟ้าที่ละขั้นตอนทดสอบจากช่วงแคโทดิกไปยังช่วงแอโนดิก เพื่อจำลองการกัดกร่อนที่จะเกิดขึ้นในการใช้งานวัสดุให้ใกล้เคียงกับสภาวะการใช้งานจริง พบว่า H13 ที่ทำไนตรายดิงแบบต่างๆ มีสมบัติด้านการกัดกร่อนที่แย่ง โดยส่งผลคือ ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนต่ำลง กระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนสูงขึ้น อัตราการกัดกร่อนสูงขึ้น และความต้านทานโพลาไรเซชันลดลง ซึ่ง H13 ที่ทำไนตรายดิงแบบก๊าซ จะทำให้ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ แย่งที่สุดในกลุ่ม อีกทั้งผลของการมีชั้นสารประกอบ (ที่มีรูพรุนกระจายอยู่ที่ผิว) ของ H13 ที่ทำไนตรายดิงแบบก๊าซ และอ่างเกลือ จะทำให้เกิดการกัดกร่อนแบบเฉพาะที่ (localized corrosion) และทำให้ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนลดลงอย่างมาก (>300 มิลลิโวลต์) ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะของการเกิดการกัดกร่อนบริเวณซอก (crevice corrosion) ในขณะที่ H13 ที่ทำไนตรายดิงแบบพลาสมาไม่มีชั้นสารประกอบ การกัดกร่อนเกิดแบบทั่วผิวหน้า (uniform corrosion) และสมบัติการกัดกร่อนที่ลดลงไม่มาก แต่เมื่อทดสอบด้านการกัดกร่อนโดยเทคนิคโพเทนชิโอสแตติก ซึ่งจะมีการป้อนศักย์ไฟฟ้าคงที่ในช่วงแอโนดิก โดยหลักการจะต่างกับเทคนิคโพเทนชิโอดนามิกส์ ในการทดสอบนี้จะจำลองสภาวะการใช้งานที่มีการป้อนศักย์ไฟฟ้าคงที่ให้กับชิ้นงาน เป็นกระบวนการย้อนกลับของการชุบด้วยไฟฟ้า จะได้ผลทดสอบเป็นค่ากระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นเทียบกับเวลา โดยปริมาณกระแสไฟฟ้านั้นจะเป็นตัวแทนของปริมาณอิเล็กตรอนที่ออกจากเนื้อโลหะด้วยปฏิกิริยาแอโนดิก สามารถนำมาใช้เปรียบเทียบเป็นปริมาณการกัดกร่อนได้โดยตรง โดยการทดสอบโดยเทคนิคโพเทนชิโอสแตติก พบว่าชิ้นงาน H13 ที่ทำไนตรายดิงแบบก๊าซ และอ่างเกลือ ซึ่งมีชั้นสารประกอบอยู่ที่ผิวนั้น มีกระแสไฟฟ้าเกิดขึ้นต่ำ ในขณะที่ H13 ที่ทำไนตรายดิงแบบพลาสมา ที่ไม่มีชั้นสารประกอบอยู่ที่ผิว มีเพียงสารประกอบไนตรายดิงในชั้นการแพร์เท่านั้น มีกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นมากกว่า และ H13 ที่ไม่ได้ทำการปรับปรุงผิว มีกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นมากที่สุด เป็นผลมาจากชั้นสารประกอบในชิ้นงาน H13 ที่ทำไนตรายดิงแบบก๊าซ และอ่างเกลือ เป็นชั้นเซรามิกส์ซึ่งมีความต้านทานการกัดกร่อนที่ได้อยู่แล้ว และการทดสอบนี้จะไม่มีการเปลี่ยนแปลงผิวในช่วงแคโทดิกและผลทดสอบจะคำนึงถึงสัดส่วนโดยพื้นที่ (area fraction) เป็นสำคัญ ซึ่งจะพบแต่ชั้นสารประกอบเกือบทุกพื้นที่

(เมื่อเปรียบเทียบพื้นที่ รูปทรงระดับจุลภาคมีพื้นที่น้อย) ส่วน H13 ที่ทำไนตรายดิงแบบพลาสติก
มีสารประกอบไนตรายดิงที่มีความต้านทานสูงกระจายอยู่แต่ไม่ได้ประพฤติตัวเป็นชั้นสารประกอบ
การกักร้อนจึงเกิดได้ในเนื้อพื้นเหล็ก สูดท้าย H13 ที่ไม่ได้ทำการปรับปรุงผิว จะไม่มีเฟสหรือชั้นที่มี
ความต้านทานการกักร้อนสูงที่สุด ทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าขึ้นมากที่สุด หรือเกิดการกักร้อนมากใน
การทดสอบ

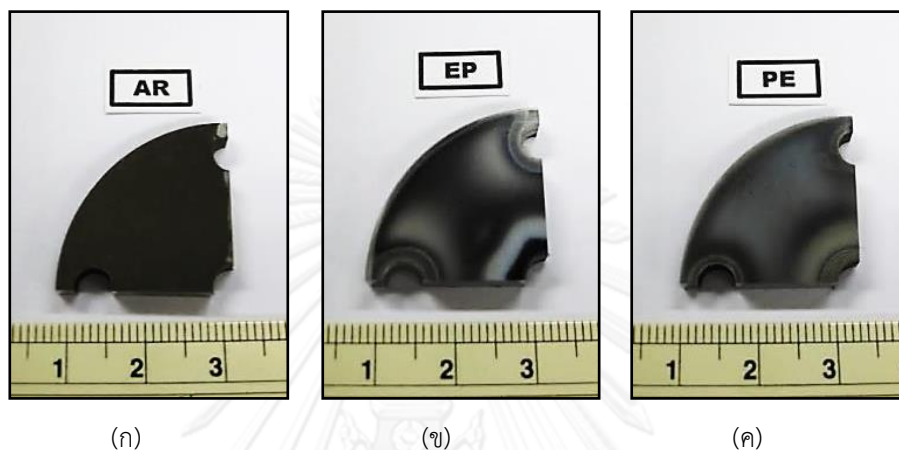


จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

4.2 กลุ่มที่ 2 กลุ่มชิ้นงานเหล็กกล้า H13 ที่ผ่านการชุบโครเมียมร่วมกับการทำไนตรายดิงแบบพลาสมา

4.2.1 การหาคุณลักษณะทางผิว (Surface Characterizations)

4.2.1.1 โครงสร้างมหภาค (Macrostructure)



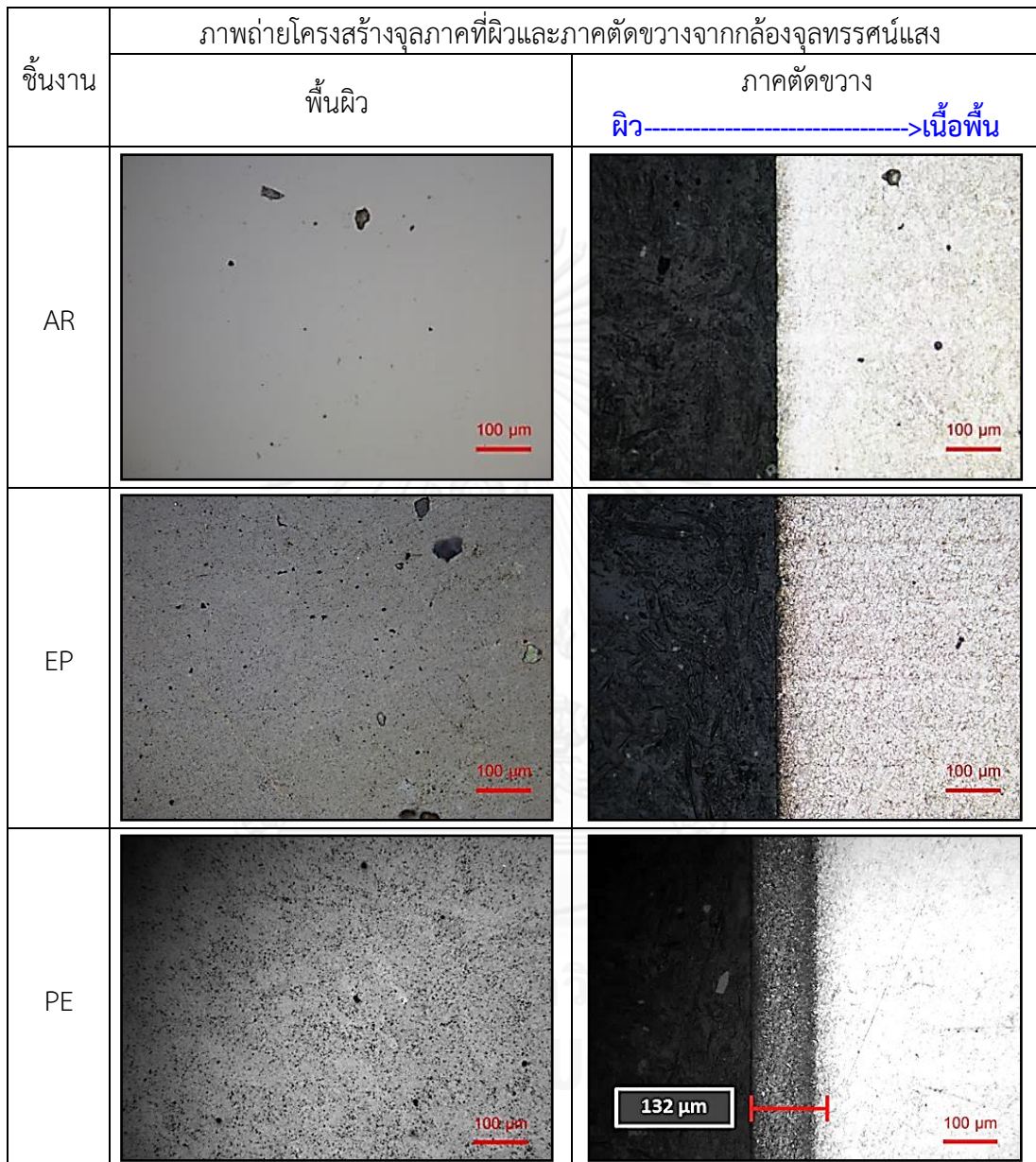
ภาพที่ 4.18 โครงสร้างมหภาคของชิ้นงาน H13 ที่ผ่านการชุบโครเมียมร่วมกับการทำไนตรายดิงแบบพลาสมา

- (ก) ชิ้นงานกลุ่ม AR : H13 ที่ไม่ได้ทำการปรับปรุงผิว
 (ข) ชิ้นงานกลุ่ม EP : H13 ที่ผ่านการชุบโครเมียมด้วยไฟฟ้าตามด้วยการทำไนตรายดิงแบบพลาสมา
 (ค) ชิ้นงานกลุ่ม PE : H13 ที่ผ่านการทำไนตรายดิงแบบพลาสมาตามด้วยการชุบโครเมียมด้วยไฟฟ้า

จากภาพที่ 4.18 พบว่าพื้นผิวชิ้นงานที่ผ่านการชุบโครเมียมร่วมกับการทำไนตรายดิงแบบพลาสมา มีลักษณะผิวที่แตกต่างกันออกไป โดยชิ้นงานตั้งต้นของทุกกลุ่มนั้นมีลักษณะพื้นผิวเช่นเดียวกับภาพที่ 4.18 (ก) ซึ่งเป็นพื้นผิวของ H13 ที่ไม่ได้ทำการปรับปรุงผิว แต่มีการเตรียมผิวชิ้นงานโดยทำการขัดหยาบและละเอียดจนมีผิวเงาลักษณะคล้ายกระจก จากภาพที่ 4.18 (ข) เมื่อนำชิ้นงาน H13 ไปทำการชุบโครเมียมด้วยไฟฟ้าตามด้วยการทำไนตรายดิงแบบพลาสมา พบว่าพื้นผิวชิ้นงานยังคงมีความเรียบใกล้เคียงกับ H13 ที่ไม่ได้ทำการปรับปรุงผิว ยังมีลักษณะเงาคล้ายกระจกแต่เกิดเป็นฝ้าที่ผิวของชิ้นงาน และมีสีขาวเด่นชัดขึ้นจากการทำไนตรายดิงแบบพลาสมา และจากภาพที่ 4.18 (ค) เมื่อนำชิ้นงาน H13 ไปทำไนตรายดิงแบบพลาสมาตามด้วยการชุบโครเมียมด้วยไฟฟ้า พบว่าพื้นผิวชิ้นงานยังคงมีความเรียบใกล้เคียงกับ H13 ที่ไม่ได้ทำการปรับปรุงผิว ยังมีลักษณะเงาคล้ายกระจกแต่เกิดเป็นฝ้าขึ้นบางๆ ที่ผิวของชิ้นงานจากการทำไนตรายดิงแบบพลาสมา อีกทั้งพื้นผิวยังมีสีเทาที่เข้มขึ้นจากการชุบโครเมียมด้วยไฟฟ้า

4.2.1.2 โครงสร้างจุลภาค (Microstructure)

- โครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์แสง (Optical Microscope; OM)

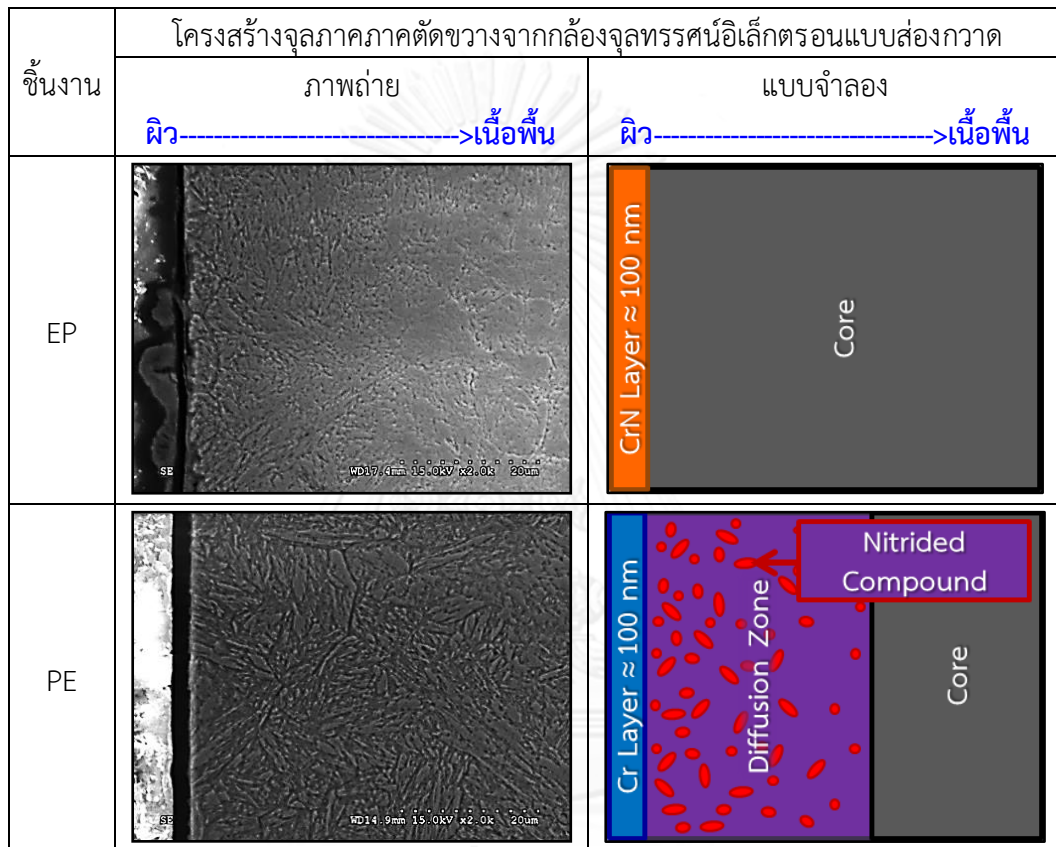


ภาพที่ 4.19 โครงสร้างจุลภาคที่ผิวและภาคตัดขวางจากฝั่งผิวของชิ้นงาน H13 ที่ผ่านการชุบโครเมียมร่วมกับการทำไนตรายดิงแบบพลาสมา

จากภาพที่ 4.19 แสดงโครงสร้างจุลภาค จากกล้องจุลทรรศน์แสง โดยภาพพื้นผิวของชิ้นงาน H13 ที่ผ่านการชุบโครเมียมร่วมกับการทำไนตรายดิงแบบพลาสมา พบว่า ลักษณะพื้นผิวมีโครงสร้างจุลภาคที่เปลี่ยนแปลงไปจาก H13 ที่ไม่ได้ทำการปรับปรุงผิว กล่าวคือ มีการเกิดเฟสที่มีลักษณะและสีรวมถึงความขรุขระแตกต่างไปจากลักษณะพื้นผิวเดิมที่แสดงแต่เนื้อเหล็กและมีเฟสสีเข้มเป็นจุดเล็กๆ เพียงเล็กน้อย และเมื่อนำชิ้นงานไปทำการตัดขวาง ชัดเตรียมผิวและกัดกรดด้วยสารละลายไนตอล

2% พบว่าโครงสร้างจุลภาคที่ผิวชิ้นงานที่ผ่านการชุบโครเมียมด้วยไฟฟ้าตามด้วยการทำไนตรายดิงแบบพลาสมา ไม่ปรากฏชั้นไนตรายด์ แต่ชิ้นงานที่ผ่านการทำไนตรายดิงแบบพลาสมาตามด้วยการชุบโครเมียมด้วยไฟฟ้า จะปรากฏชั้นไนตรายด์ขึ้น ความหนาเท่ากับ 132 ไมครอน

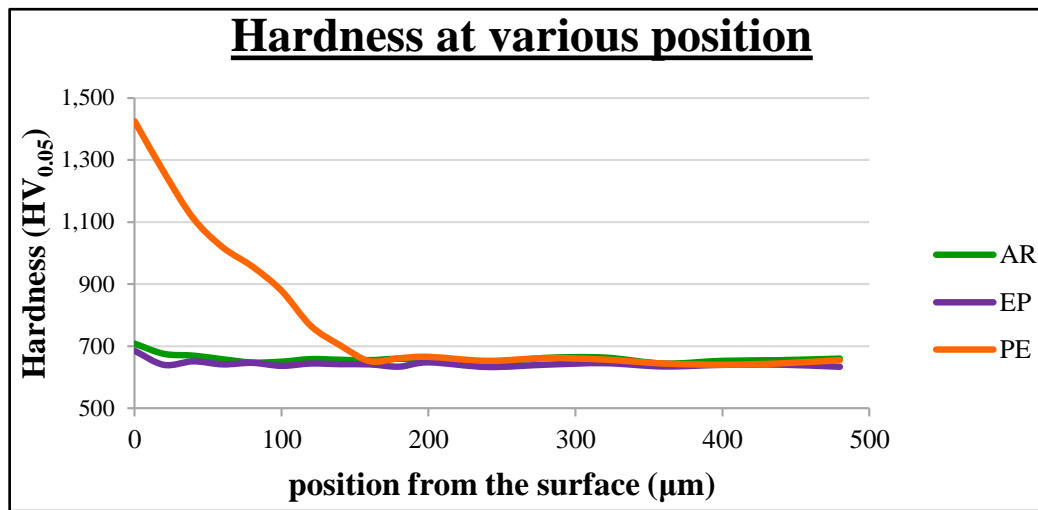
- โครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (Scanning Electron Microscope; SEM)



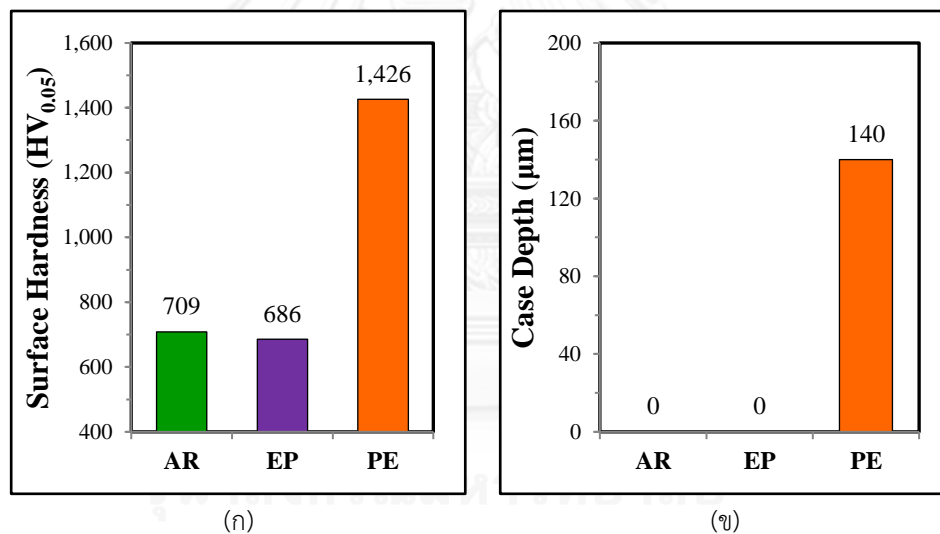
ภาพที่ 4.20 โครงสร้างจุลภาคภาคตัดขวางจากฝั่งผิวของชิ้นงาน H13 ที่ผ่านการชุบโครเมียม ร่วมกับการทำไนตรายดิงแบบพลาสมา จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด

จากภาพที่ 4.20 แสดงโครงสร้างจุลภาคภาคตัดขวางจากฝั่งผิวของชิ้นงาน H13 ที่ผ่านการชุบโครเมียมร่วมกับการทำไนตรายดิงแบบพลาสมา จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด พบว่า ชิ้นงานที่ผ่านการชุบโครเมียมด้วยไฟฟ้าตามด้วยการทำไนตรายดิงแบบพลาสมานั้น ไม่พบว่าเกิดชั้นไนตรายด์เกิดขึ้น แต่เมื่อนำไปทดสอบด้วย Glow Discharge Spectroscopy ในหัวข้อถัดไป จะพบว่ามีชั้นโครเมียมไนตรายด์ (CrN) ความหนา 100 นาโนเมตรอยู่ที่ผิวของชิ้นงาน ในขณะที่ชิ้นงานที่ผ่านการทำไนตรายดิงแบบพลาสมาตามด้วยการการชุบโครเมียมด้วยไฟฟ้า ปรากฏเป็นลักษณะโครงสร้างจุลภาคของชิ้นการแพร่ลึกเข้าไปในเนื้อพื้น ในทำนองเดียวกัน ก็มีชั้นโครเมียมบาง ประมาณ 100 นาโนเมตร อยู่ที่ผิวของชิ้นงานด้วย ดังแสดงโดยภาพแบบจำลอง

4.2.1.3 ความแข็ง (Hardness)



ภาพที่ 4.21 ผลการวัดความแข็งตามแนวตัดขวางจากฝั่งผิวลึกเข้าไปในเนื้อชิ้นงานตามแนวแกน X ของชิ้นงาน H13 ที่ผ่านการชุบโครเมียมร่วมกับการทำไนตรายดิงแบบพลาสมา



(ก)

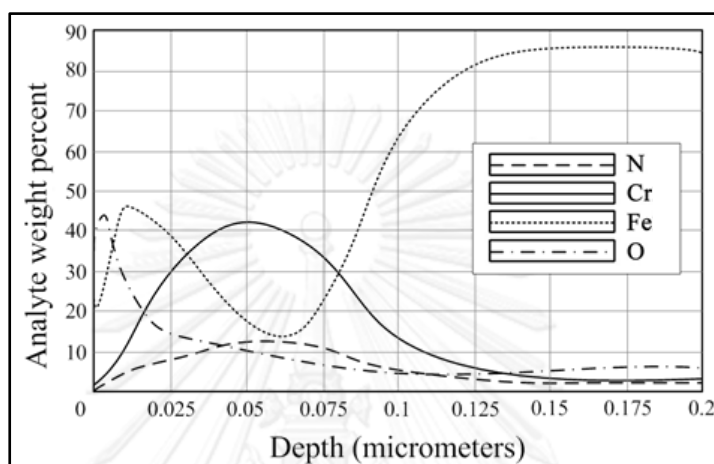
(ข)

ภาพที่ 4.22 (ก) ความแข็งผิว และ (ข) ความลึกชั้นผิวแข็งของชิ้นงาน H13 ที่ผ่านการชุบโครเมียมร่วมกับการทำไนตรายดิงแบบพลาสมา

เมื่อนำชิ้นงาน H13 ที่ผ่านการชุบโครเมียมร่วมกับการทำไนตรายดิงแบบพลาสมา ที่ทำการตัดขวางและขัดเตรียมผิว จึงนำมาวัดความแข็งโดยเริ่มวัดจากฝั่งผิวชิ้นงาน และวัดลึกเข้าไปยังเนื้อพื้นด้วยเครื่องวัดความแข็งแบบไมโครวิกเกอร์ โดยใช้น้ำหนักกด 50 กรัม ดังแสดงผลในภาพที่ 4.21 และความแข็งผิวกับความลึกชั้นผิวแข็งที่ได้ แสดงในภาพที่ 4.22 พบว่าชิ้นงาน H13 ที่ผ่านการชุบโครเมียมด้วยไฟฟ้าตามด้วยการทำไนตรายดิงแบบพลาสมา มีความแข็งผิวเท่ากับ 686 HV_{0.05} ซึ่งลดลงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับ H13 ที่ไม่ได้ทำการปรับปรุงผิวที่มีค่าเท่ากับ 709 HV_{0.05} ส่วนชิ้นงานที่ผ่านการทำไนตรายดิงแบบพลาสมาตามด้วยการชุบโครเมียมด้วยไฟฟ้า มีความแข็งผิวและความลึก

ชั้นผิวแข็งสูงชันมาก คือ 1,426 HV_{0.05} และ 140 ไมครอนตามลำดับ โดยความแข็งที่ได้มาจากการทำไนตรายดิงแบบพลาสมาเป็นหลัก

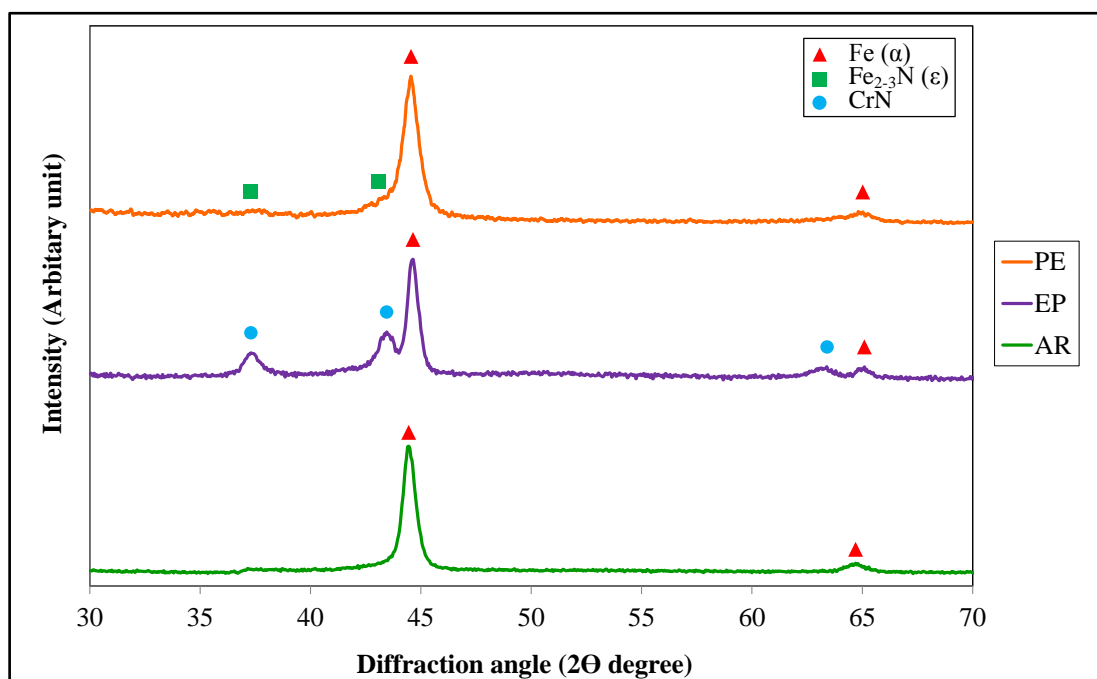
4.2.1.4 การกระจายตัวของธาตุที่ความลึกต่างๆ จากผิวของชิ้นงาน H13 ที่ผ่านการชุบโครเมียมร่วมกับการทำไนตรายดิงแบบพลาสมา



ภาพที่ 4.23 การกระจายตัวของธาตุที่ความลึกต่างๆ จากผิวของชิ้นงาน H13 ที่ผ่านการชุบโครเมียมร่วมกับการทำไนตรายดิงแบบพลาสมา วิเคราะห์โดยเครื่อง Glow Discharge Spectroscopy

จากภาพที่ 4.23 แสดงการกระจายตัวของธาตุที่ความลึกต่างๆ จากผิวของชิ้นงาน H13 ที่ผ่านการชุบโครเมียมร่วมกับการทำไนตรายดิงแบบพลาสมา วิเคราะห์โดยเครื่อง Glow Discharge Spectroscopy จะพบว่าจากผิวชิ้นงานพบธาตุโครเมียมมีปริมาณเพิ่มขึ้นจนถึงความลึก 0.05 ไมครอน จึงมีปริมาณลดลงเรื่อยๆ ที่ตำแหน่งลึกลงไปเนื้อพื้น ซึ่งความลึกที่มีธาตุโครเมียมมากนั้นเป็นบริเวณที่มีไนโตรเจนมากด้วย เมื่อนำปริมาณธาตุทั้งสองปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักไปแปลงค่าให้อยู่ในรูปปริมาณร้อยละโดยอะตอม พบว่าเป็นสารประกอบโครเมียมไนตรายด์ (CrN) มีลักษณะเป็นชั้นที่มีความหนา 100 นาโนเมตร เกิดจากชั้นเคลือบของโครเมียมจากการชุบด้วยไฟฟ้ารวมตัวกับอะตอมไนโตรเจนที่มาจากไนตรายดิงแบบพลาสมา และจากผลวิเคราะห์ยังพบว่าที่ความลึกมากกว่า 100 นาโนเมตรจากผิว ปริมาณธาตุไนโตรเจนลดลงอย่างมาก ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าชั้นโครเมียมไนตรายด์ที่เกิดขึ้นนั้นทำให้อะตอมไนโตรเจนแพร่เข้าสู่เนื้อพื้นของชิ้นงานได้ช้าลง ทำให้การทำไนตรายดิงไม่เกิดขึ้นใต้ชั้นโครเมียมไนตรายด์ ส่งผลให้ความแข็งผิวไม่เพิ่มขึ้นในชิ้นงานกลุ่มนี้

4.2.1.5 เฟสและสารประกอบที่เกิดขึ้น



ภาพที่ 4.24 ผลการวิเคราะห์เฟสและสารประกอบ โดยเครื่องมือวิเคราะห์รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ แบบ GIXD จากฝั่งผิวของชิ้นงาน H13 ที่ผ่านการชุบโครเมียมร่วมกับการทำไนตรายดิงแบบพลาสมา

จากภาพที่ 4.24 แสดงการตรวจสอบชิ้นงาน โดยเครื่องมือวิเคราะห์รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ แบบ GIXD ด้วยมุมตกกระทบ 1 องศา พบเฟสและสารประกอบต่างๆ เปรียบเทียบกับข้อมูลในมาตรฐานของ JCPDS คือ ในชิ้นงานที่ผ่านการชุบโครเมียมด้วยไฟฟ้าตามด้วยการทำไนตรายดิงแบบพลาสมา พบเพียงสารประกอบโครเมียมไนตรายด์ (CrN ตามมาตรฐาน หมายเลข #762494) ที่ผิว ส่วนในชิ้นงานที่ผ่านการทำไนตรายดิงแบบพลาสมาตามด้วยการชุบโครเมียมด้วยไฟฟ้า พบสารประกอบเหล็กไนตรายด์แบบเอปซิลอน (ϵ : Fe_{2.3}N ตามมาตรฐาน หมายเลข #830877) ที่ผิว และในชิ้นงานทุกกลุ่มที่ผ่านการชุบโครเมียมด้วยไฟฟ้าร่วมกับการทำไนตรายดิงแบบพลาสมา พบเหล็กแอลฟา (α : Fe ตามมาตรฐาน หมายเลข #851410) เป็นหลักที่ผิว

จากผลวิเคราะห์คุณลักษณะทางผิวของกลุ่มชิ้นงานเหล็กกล้า H13 ที่ผ่านการชุบโครเมียมร่วมกับการทำไนตรายดิงแบบพลาสมา จะพบว่า H13 ที่ผ่านการชุบโครเมียมร่วมกับการทำไนตรายดิงแบบพลาสมาจะไม่มีชั้นผิวแข็งเกิดขึ้นในโครงสร้างจุลภาค เมื่อนำไปวิเคราะห์ผิวด้วยเครื่อง Glow Discharge Spectroscopy (GDS) จะพบชั้นที่คาดว่าจะจะเป็นชั้นโครเมียมไนตรายด์หนาประมาณ 100 นาโนเมตร (ซึ่งมาจากชั้นโครเมียมบางที่ได้จากการชุบด้วยไฟฟ้า เป็นเวลา 15 วินาที) ซึ่งสอดคล้องกับผลวิเคราะห์เฟสและสารประกอบของชิ้นงานกลุ่มนี้ที่พบเฟสโครเมียมไนตรายด์ (CrN) อยู่ที่ผิวของชิ้นงาน และเมื่อนำไปวัดความแข็งผิว พบว่าชิ้นงาน H13 ที่ผ่าน

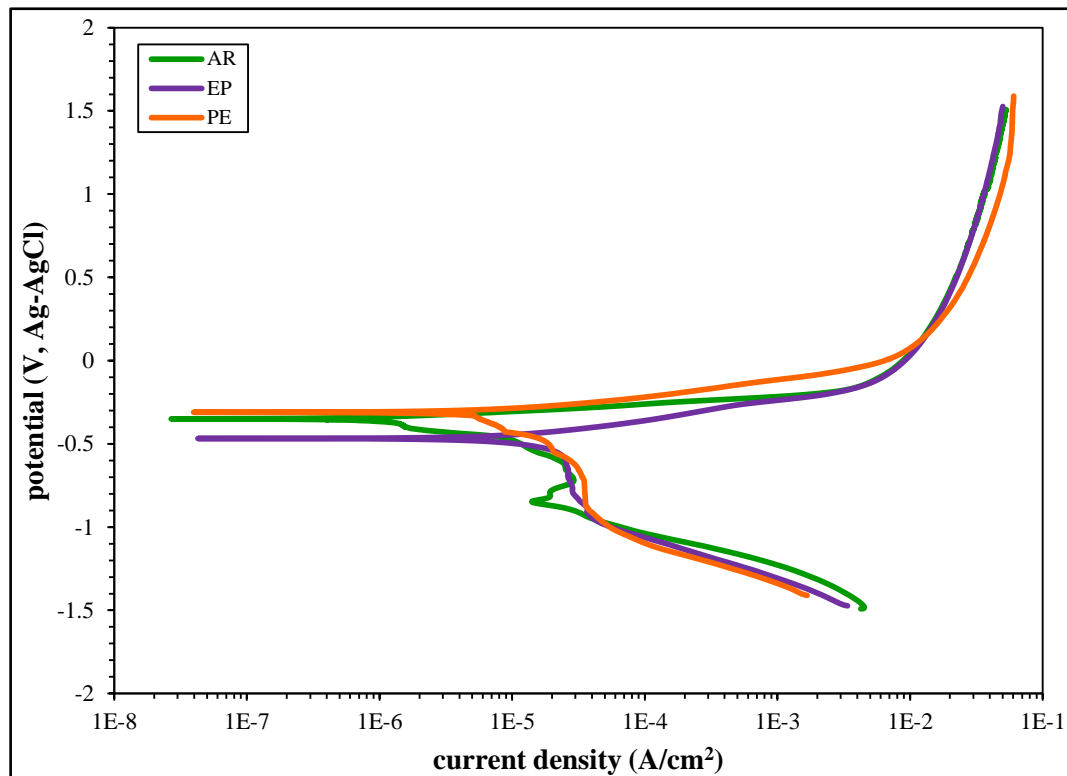
การชุบโครเมียมด้วยไฟฟ้าร่วมกับการทำไนตรายดิงแบบพลาสมา จะไม่มีความแข็งผิวที่สูงขึ้นเลย เนื่องจากชั้นโครเมียมไนตรายด์ที่เกิดขึ้น ทำให้อะตอมไนโตรเจนแพร่เข้าสู่เนื้อพื้นของชิ้นงานได้ช้ามาก ในการทำไนตรายดิงแบบพลาสมา ทำให้ไม่เกิดการตกตะกอนของสารประกอบไนตรายด์ที่มีความแข็งสูง แต่เมื่อพิจารณา H13 ที่ผ่านการทำไนตรายดิงแบบพลาสมา ก่อนการชุบโครเมียมด้วยไฟฟ้าจะพบชั้นผิวแข็งหนา 132 ไมครอนในโครงสร้างจุลภาค ซึ่งไม่พบชั้นสารประกอบเกิดขึ้นที่ผิวชิ้นงาน พบเพียงชั้นการแพร่ที่มีเฟสเหล็กไนตรายด์ ($Fe_{2-3}N$) ตกตะกอนอยู่ ตรวจสอบจากเครื่อง X-Ray Diffractometer (XRD) และเมื่อทำการทดสอบความแข็งพบว่าความแข็งผิวสูงขึ้น เท่ากับ 1426 $HV_{0.05}$ ซึ่งความแข็งที่ได้นั้นเป็นผลมาจากเนื้อพื้นที่ทำไนตรายดิงแบบพลาสมา ไม่ได้มาจากผลของการชุบโครเมียมบางด้วยไฟฟ้า ในโครงสร้างจุลภาคตรวจไม่พบชั้นโครเมียมที่ผิวเนื่องจากเป็นชั้นที่บางมาก

4.2.2 ความต้านทานการกัดกร่อน (Corrosion Resistance)

ในงานวิจัยนี้ ได้ทำการทดสอบเพื่อหาความต้านทานการกัดกร่อนของชิ้นงาน โดยใช้พื้นที่ทดสอบ 1 ตารางเซนติเมตร ด้วยเครื่องทดสอบสมบัติทางเคมีไฟฟ้า (potentiostat/galvanostat) ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ความเข้มข้นร้อยละ 0.9 โดยมวลต่อปริมาตร โดยใช้ขั้วมาตรฐานอ้างอิง (standard reference electrode) คือ ซิลเวอร์-ซิลเวอร์คลอไรด์ (Ag-AgCl) และใช้ขั้วจ่ายกระแส (counter electrode) คือ แพลตินัมแบบแผ่น (platinum plate) โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ในการทดสอบและวิเคราะห์ คือ โปรแกรม NOVA รุ่น 1.9

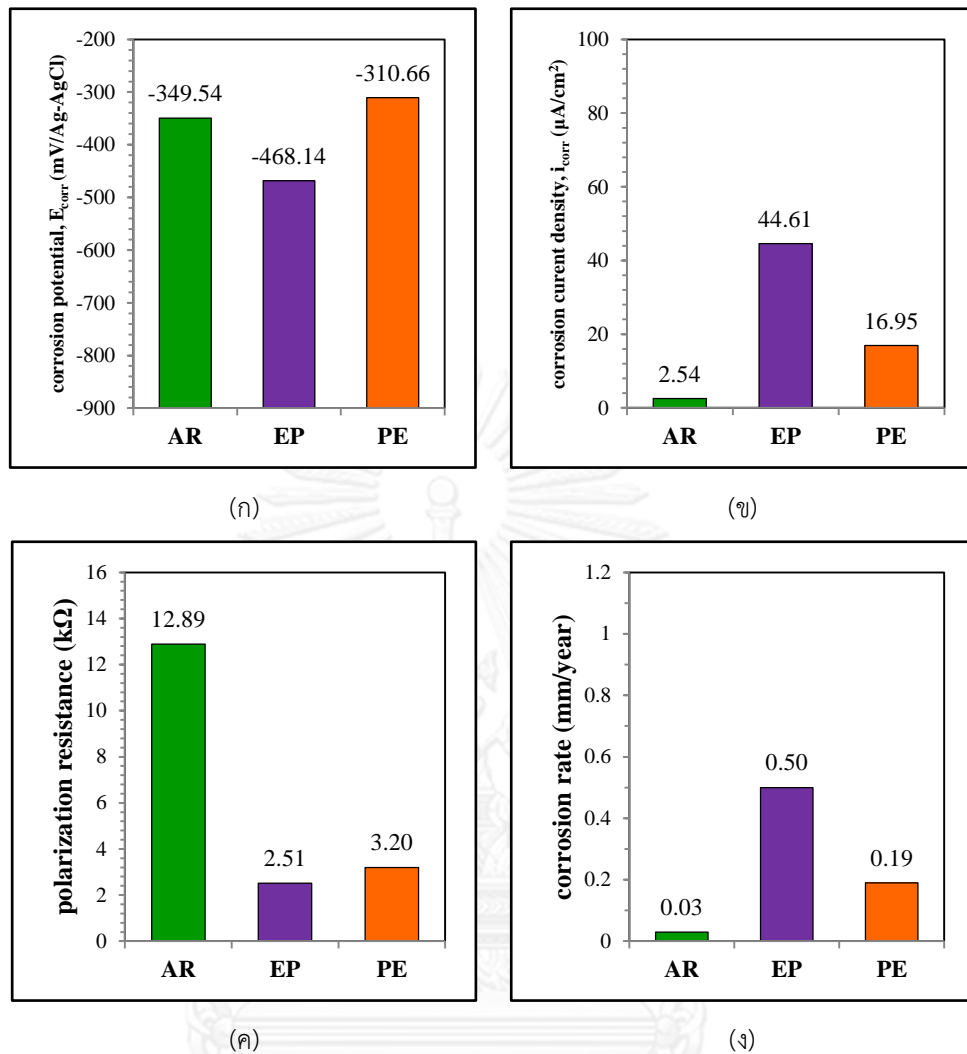
4.2.2.1 เทคนิคโพเทนชิโอดนามิกส์ (Potentiodynamics Technique)

การทดสอบนี้เป็นกระบวนการทดสอบสมบัติด้านการกัดกร่อนของโลหะและวัสดุ โดยในการทดสอบนี้จะต้องทำการทดสอบการเปิดวงจรเพื่อหาศักย์ไฟฟ้าแบบเปิดวงจร (E_{OCP} , open circuit potential) ซึ่งใช้เวลาทดสอบ 1,800 วินาที จากนั้นเครื่องทดสอบจะมีการป้อนศักย์ไฟฟ้า โดยเริ่มตั้งแต่ (start potential) -1.00 โวลต์ จนถึง (stop potential) +2.00 โวลต์ โดยมีอัตราการเพิ่มของศักย์ไฟฟ้า (scan rate) เท่ากับ 0.001 โวลต์ต่อวินาที ซึ่งจะได้เส้นโค้งโพลาไรเซชันแสดงความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้า (E , potential) กับลอการิทึมความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า ($\log i$, logarithm of current density)



ภาพที่ 4.25 เส้นโค้งโพลาริเซชันเปรียบเทียบกันของชิ้นงาน H13 ที่ผ่านการชุบโครเมียมร่วมกับการทำไนตรายดิงแบบพลาสติกที่ทดสอบโดยเทคนิคโพเทนชิโอดนามิกส์

จากภาพที่ 4.25 แสดงเส้นโค้งโพลาริเซชัน (potentiodynamics polarization curve) ของชิ้นงาน H13 ที่ผ่านการชุบโครเมียมร่วมกับการทำไนตรายดิงแบบพลาสติก พบว่าชิ้นงาน H13 ที่ผ่านการชุบโครเมียมด้วยไฟฟ้าตามด้วยการทำไนตรายดิงแบบพลาสติก ชิ้นงาน H13 ที่ผ่านการทำไนตรายดิงแบบพลาสติกตามด้วยการชุบโครเมียมด้วยไฟฟ้า และ H13 ที่ไม่ได้ทำการปรับปรุงผิวมีความแตกต่างกันในสมบัติด้านการกัดกร่อนเพียงเล็กน้อย ซึ่งลักษณะของเส้นโค้งโพลาริเซชันว่า H13 ไม่ต่างกัน กล่าวคือไม่มีบริเวณแพสซีฟ (passive region) เกิดขึ้น แต่ตำแหน่งของกราฟต่างกันอย่างน้อยซึ่งต้องนำไปวิเคราะห์เพื่อหาค่าพารามิเตอร์แสดงสมบัติด้านการกัดกร่อนต่อไป



ภาพที่ 4.26 ค่าพารามิเตอร์แสดงสมบัติด้านการกัดกร่อน (corrosion parameters) เปรียบเทียบกันของชิ้นงาน H13 ที่ผ่านการชุบโครเมียมร่วมกับการทำไนตรรายดิงแบบพลาสติก

(ก) ศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน (corrosion potential)

(ข) ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน (corrosion current density)

(ค) ความต้านทานโพลาไรเซชัน (polarization resistance)

(ง) อัตราการกัดกร่อน (corrosion rate)

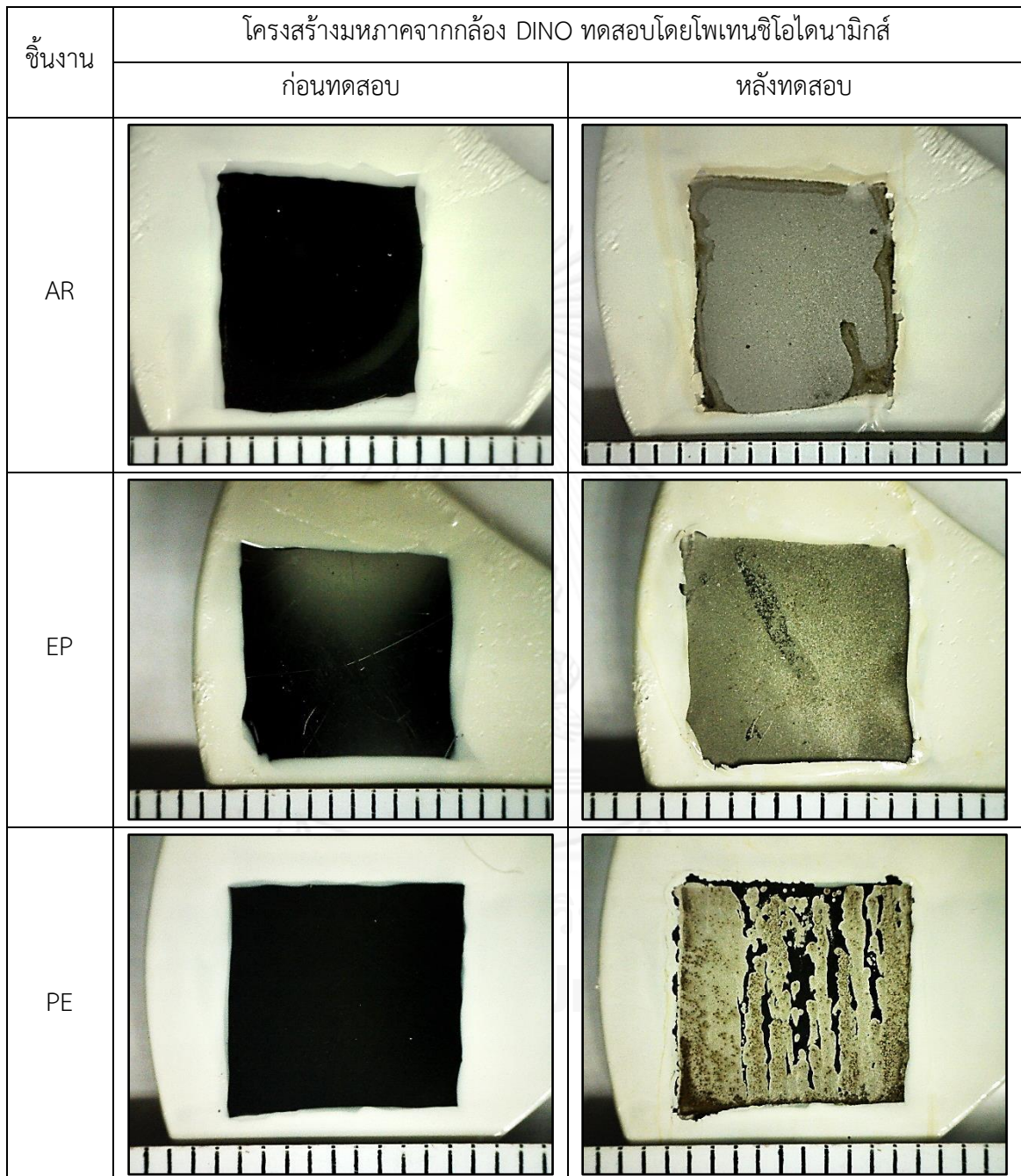
จากภาพที่ 4.26 เมื่อนำเส้นโค้งโพลาไรเซชัน (polarization curve) ไปทำการประมาณนอกช่วงทาเฟล (tafel extrapolation) เพื่อวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์แสดงสมบัติด้านการกัดกร่อน (corrosion parameters) จะพบว่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน (E_{corr} , corrosion potential) มีค่าลดลงมากในชิ้นงาน H13 ที่ผ่านการชุบโครเมียมด้วยไฟฟ้าตามด้วยการทำไนตรรายดิงแบบพลาสติก ในขณะที่ชิ้นงาน H13 ที่ผ่านการทำไนตรรายดิงแบบพลาสติกตามด้วยการชุบโครเมียมด้วยไฟฟ้ามีค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนสูงขึ้นเล็กน้อย เมื่อเทียบกับ H13 ที่ไม่ได้ทำการปรับปรุงผิว

เมื่อพิจารณาค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน (i_{corr} , corrosion current density) ซึ่งเป็นค่าพารามิเตอร์ที่มีความสัมพันธ์เดียวกันกับอัตราการกัดกร่อน (corrosion rate) จะพบว่าชิ้นงาน H13 ที่ผ่านการชุบโครเมียมร่วมกับการทำไนตรายดิงแบบพลาสมา มีค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนและอัตราการกัดกร่อนที่เพิ่มขึ้นอย่างมากเมื่อเทียบกับ H13 ที่ไม่ได้ทำการปรับปรุงผิว โดย H13 ที่ผ่านการชุบโครเมียมด้วยไฟฟ้าตามด้วยการทำไนตรายดิงแบบพลาสมา มีค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนและอัตราการกัดกร่อนสูงที่สุด ตามด้วย H13 ที่ผ่านการทำไนตรายดิงแบบพลาสมาตามด้วยการชุบโครเมียมด้วยไฟฟ้า

จากนั้นเมื่อพิจารณาค่าความต้านทานโพลาริเซชัน (R_p , polarization resistance) ซึ่งสามารถนำมาเป็นตัวแทนของความต้านทานการกัดกร่อนได้ จะพบว่า ชิ้นงาน H13 ที่ไม่ได้ทำการปรับปรุงผิวมีความต้านทานโพลาริเซชันสูงที่สุด ตามด้วยชิ้นงาน H13 ที่ผ่านการทำไนตรายดิงแบบพลาสมาตามด้วยการชุบโครเมียมด้วยไฟฟ้า และชิ้นงาน H13 ที่ผ่านการชุบโครเมียมด้วยไฟฟ้าตามด้วยการทำไนตรายดิงแบบพลาสมามีความต้านทานโพลาริเซชันต่ำที่สุด

4.2.2.2 โครงสร้างมหภาค/จุลภาคภายหลังการทดสอบโดยเทคนิคโพเทนซิโอดินามิกส์

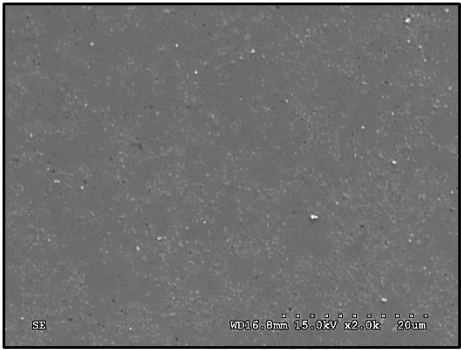
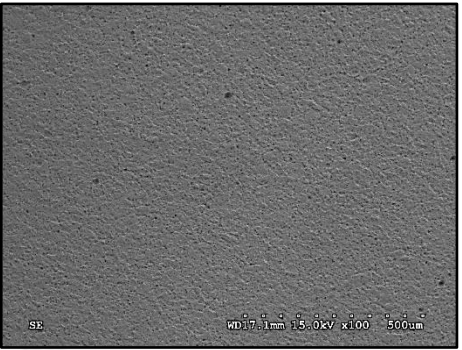
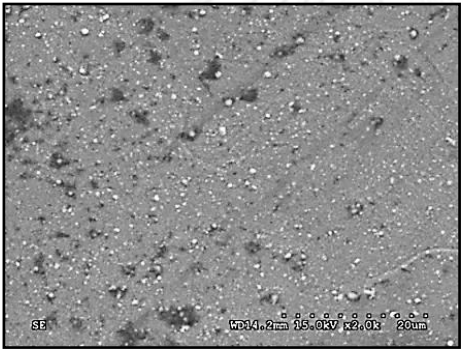


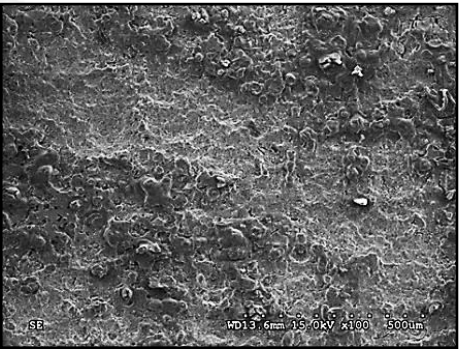
- โครงสร้างมหภาคภายหลังการทดสอบโดยเทคนิคโพเทนซิโอดินามิกส์



ภาพที่ 4.27 โครงสร้างมหภาคของชั้นงาน H13 ที่ผ่านการชุบโครเมียมร่วมกับการทำไนตรายดิงแบบพลาสมา ก่อนและหลังทดสอบการกัดกร่อนโดยเทคนิคโพเทนซิโอดินามิกส์

จากภาพที่ 4.27 เมื่อพิจารณาโครงสร้างมหภาคของชิ้นงาน H13 ภายหลังจากชุบโครเมียมด้วยไฟฟ้าร่วมกับการทำไนตรายดิงแบบพลาสติก ก่อนและหลังการทดสอบการกัดกร่อนโดยเทคนิคโพเทนชิโอดนามิกส์จะพบว่า โครงสร้างมหภาคภายหลังจากทดสอบชิ้นงาน H13 ที่ไม่ได้ทำการปรับปรุงผิว มีผิวที่มีความเรียบสูง ไม่ปรากฏบริเวณที่ขรุขระ มีพื้นผิวสีเทาซึ่งเป็นสีของเนื้อพื้นเหล็ก แต่ความเงาเป็นกระจกได้หายไป ซึ่งกล่าวได้ว่า ชิ้นงาน H13 ที่ไม่ได้ทำการปรับปรุงผิว เกิดการกัดกร่อนแบบทั่วผิวหน้า (uniform corrosion) เมื่อพิจารณาโครงสร้างมหภาคภายหลังจากทดสอบชิ้นงาน H13 ที่ผ่านการชุบโครเมียมด้วยไฟฟ้าตามด้วยการทำไนตรายดิงแบบพลาสติก จะพบว่าพื้นผิวมีลักษณะเดียวกับ H13 ที่ไม่ได้ทำการปรับปรุงผิว กล่าวคือ มีผิวที่มีความเรียบสูง ไม่ปรากฏบริเวณที่ขรุขระ มีพื้นผิวสีเทาซึ่งเป็นสีของเนื้อพื้นเหล็ก แต่ความเงาเป็นกระจกได้หายไป ซึ่งกล่าวได้ว่า ชิ้นงาน H13 ที่ผ่านการชุบโครเมียมด้วยไฟฟ้าตามด้วยการทำไนตรายดิงแบบพลาสติก เกิดการกัดกร่อนแบบทั่วผิวหน้า (uniform corrosion) เช่นเดียวกัน เมื่อพิจารณาโครงสร้างมหภาคภายหลังจากทดสอบชิ้นงาน H13 ที่ผ่านการทำไนตรายดิงแบบพลาสติกตามด้วยการชุบโครเมียมด้วยไฟฟ้า มีลักษณะใกล้เคียงกับ H13 ที่ทำไนตรายดิงแบบพลาสติก การพบว่าพื้นผิวของชิ้นงานถูกกัดกร่อนหลายบริเวณ โดยเหลือบางบริเวณที่ไม่เกิดการกัดกร่อน ซึ่งยังคงสภาพของพื้นผิวหน้าแบบเดิม ผิวมีความขรุขระปานกลาง เมื่อตรวจสอบในบริเวณที่เกิดการกัดกร่อนซึ่งมีพื้นที่มาก จะพบว่ามีพื้นผิวสีเทาของเนื้อพื้นเหล็กเช่นเดียวกันกับ H13 ที่ไม่ได้ทำการปรับปรุงผิว ซึ่งกล่าวได้ว่า ชิ้นงาน H13 ที่ผ่านการทำไนตรายดิงแบบพลาสติกตามด้วยการชุบโครเมียมด้วยไฟฟ้า เกิดการกัดกร่อนแบบทั่วผิวหน้า (uniform corrosion) เช่นเดียวกัน

- โครงสร้างจุลภาคภายหลังการทดสอบโดยเทคนิคโพเทนซิโอดนามิกส์

ชั้นงาน	โครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด ทดสอบโดยโพเทนซิโอดนามิกส์	
	ก่อนทดสอบ	หลังทดสอบ
AR		
EP		
PE		

ภาพที่ 4.28 โครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด แสดงภาพพื้นผิวของชั้นงาน H13 ที่ผ่านการชุบโครเมียมร่วมกับการทำไนตรายดิงแบบพลาสมา ก่อนและหลังทดสอบการกัดกร่อนโดยเทคนิคโพเทนซิโอดนามิกส์

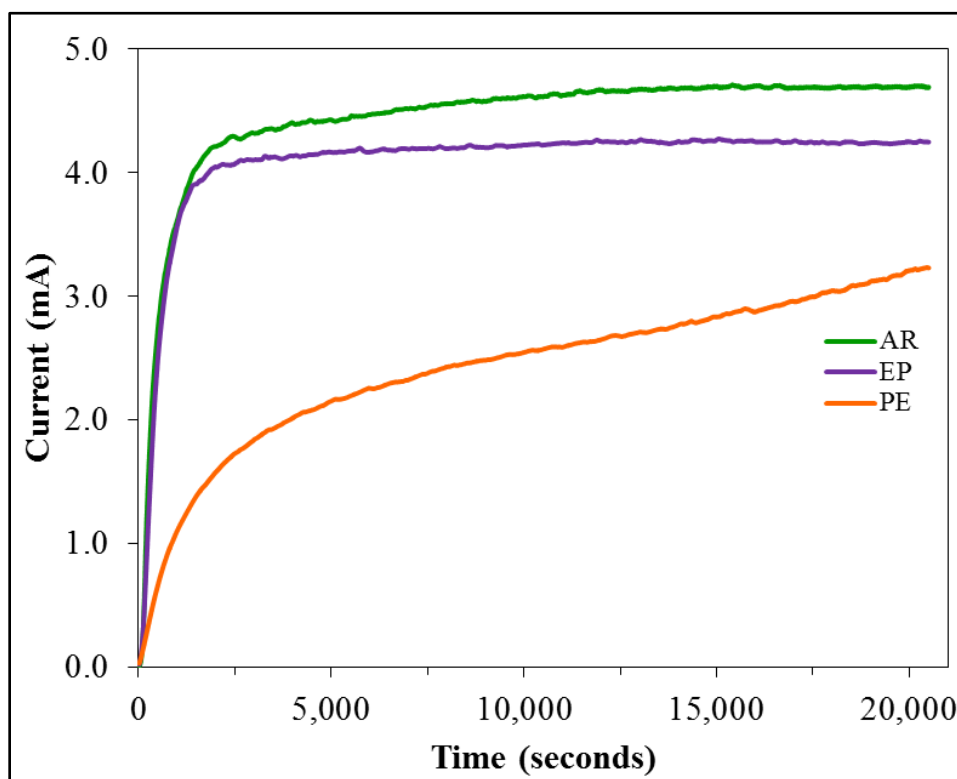
จากภาพที่ 4.28 เมื่อนำชั้นงาน H13 ที่ผ่านการชุบโครเมียมร่วมกับการทำไนตรายดิงแบบพลาสมา มาทำการศึกษาเพิ่มเติม โดยพิจารณาโครงสร้างจุลภาคก่อนและหลังการทดสอบการกัดกร่อนโดยเทคนิคโพเทนซิโอดนามิกส์จะพบว่าโครงสร้างจุลภาคของชั้นงาน H13 ที่ไม่ได้ทำการปรับปรุงผิว จะพบว่า ก่อนทดสอบจะมีพื้นผิวชั้นงานที่เรียบสูง มีความสม่ำเสมอ และหลังทดสอบพบว่าพื้นผิวเกิดความขรุขระขึ้นเล็กน้อย แต่ยังคงเรียบอยู่แม้จะเกิดการกัดกร่อนแล้ว ซึ่งกล่าวได้ว่า

ชิ้นงาน H13 ที่ไม่ได้ทำการปรับปรุงผิว เกิดการกัดกร่อนแบบทั่วผิวหน้า (uniform corrosion) แต่เมื่อพิจารณาโครงสร้างจุลภาคภายหลังจากทดสอบชิ้นงาน H13 ที่ผ่านการชุบโครเมียมด้วยไฟฟ้าตามด้วยการทำไนตรายดิงแบบพลาสมา จะพบว่า ก่อนทดสอบผิวมีความเรียบสูง มีอนุภาคสีขาวกระจายอยู่ทั่วทั้งผิวชิ้นงาน และหลังทดสอบพื้นผิวของชิ้นงานแบ่งออกเป็นสามบริเวณ คือ บริเวณที่ไม่เกิดการกัดกร่อน บริเวณเกิดการกัดกร่อนแบบทั่วผิวหน้า (uniform corrosion) และบริเวณที่เกิดการกัดกร่อนตามขอบเกรน (intergranular corrosion) เมื่อพิจารณาโครงสร้างจุลภาคภายหลังจากทดสอบชิ้นงาน H13 ที่ผ่านการทำไนตรายดิงแบบพลาสมาตามด้วยการชุบโครเมียมด้วยไฟฟ้า จะพบว่า ก่อนทดสอบผิวของชิ้นงานมีความขรุขระ มีอนุภาคเกิดขึ้นจำนวนมากที่ผิวของชิ้นงานจากการชุบโครเมียมด้วยไฟฟ้า และหลังทดสอบพื้นผิวแบ่งออกเป็นสองบริเวณ คือบริเวณมีอนุภาคที่ผิวซึ่งไม่ถูกกัดกร่อน และบริเวณที่เกิดการกัดกร่อน ซึ่งบริเวณที่เกิดการกัดกร่อนนั้นมีพื้นผิวหลังทดสอบเช่นเดียวกับ H13 ที่ไม่ผ่านการปรับปรุงผิว กล่าวคือ ชิ้นงาน H13 ที่ผ่านการทำไนตรายดิงแบบพลาสมาตามด้วยการชุบโครเมียมด้วยไฟฟ้า เกิดการกัดกร่อนแบบทั่วผิวหน้า (uniform corrosion)

4.2.2.3 เทคนิคโพเทนชิโอสแตติก (Potentiostatics Technique)

การทดสอบนี้เป็นกระบวนการทดสอบสมบัติด้านการกัดกร่อนของโลหะและวัสดุ โดยการทดสอบนี้จะมีการป้อนศักย์ไฟฟ้าทดสอบ (set potential) ที่มีค่าคงที่ตลอดการทดสอบ ซึ่งการเลือกศักย์ไฟฟ้าที่เหมาะสมนั้นจะต้องอยู่ในบริเวณแอโนดิกจากผลการทดสอบโดยเทคนิคโพเทนซิโอดนามิกส์ (potentiodynamics technique) ซึ่งเป็นการจำลองการกัดกร่อนเมื่อใช้งานที่สถานะที่มีการป้อนศักย์ไฟฟ้าคงที่กับชิ้นงาน จากการทดสอบจะได้เส้นโค้งแสดงความสัมพันธ์ของกระแสไฟฟ้า (current) หรือการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นเทียบกับเวลา (time) โดยสามารถนำผลทดสอบมาเปรียบเทียบกันในแต่ละชิ้นงานว่า มีความต้านทานการกัดกร่อนสูงกว่าเมื่อมีการป้อนศักย์ไฟฟ้าคงที่ หรือ มีกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นต่ำกว่าเมื่อมีการป้อนศักย์ไฟฟ้าคงที่ โดยในงานวิจัยทำการทดสอบโดยโพเทนซิโอสแตติกที่ศักย์ไฟฟ้าคงที่ เท่ากับ -300 และ 0 มิลลิโวลต์ (Ag-AgCl) ทดสอบเป็นเวลา 5 ชั่วโมง 30 นาที

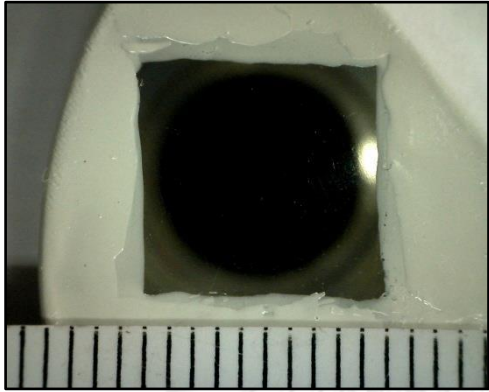
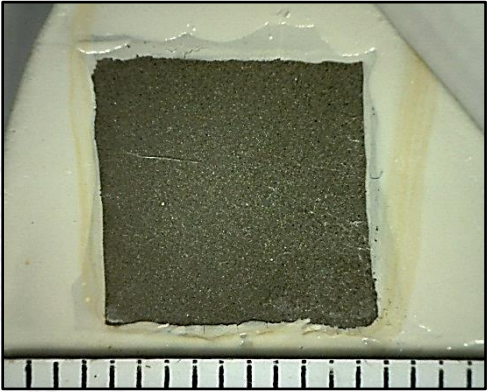
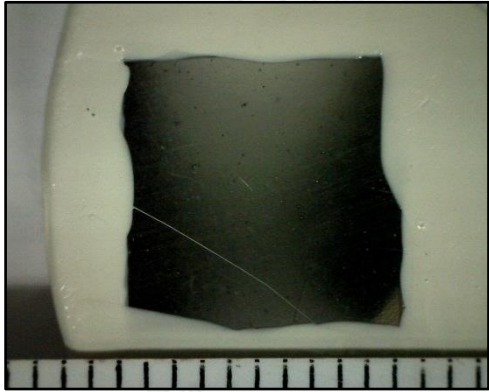
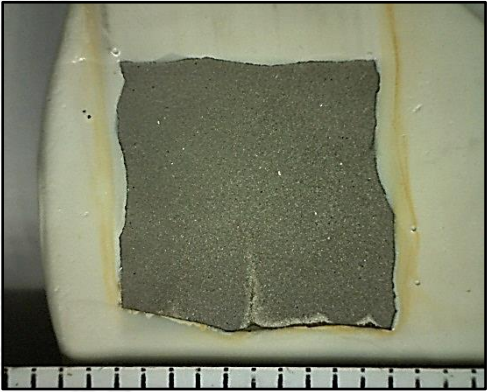
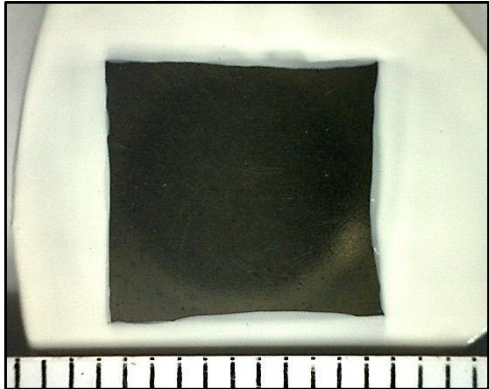
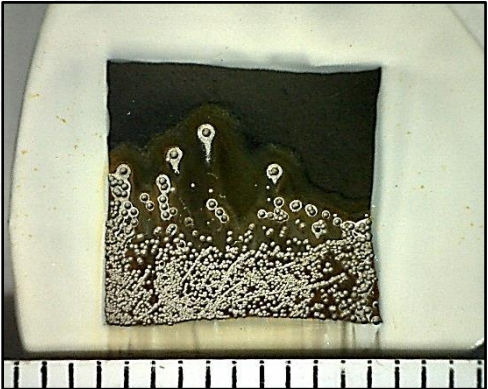
- ทดสอบที่ -300 มิลลิโวลต์ (Ag-AgCl) ทดสอบเป็นเวลา 5 ชั่วโมง 30 นาที



ภาพที่ 4.29 เส้นโค้งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้า (current) ในแกน y กับ เวลา (time) ในแกน x เปรียบเทียบกันของชิ้นงาน H13 ที่ผ่านการชุบโครเมียมร่วมกับการทำไนตรายดิงแบบพลาสมา ที่ทดสอบโดยเทคนิคโพเทนชิโอสแตติก โดยตั้งค่าศักย์ไฟฟ้าในการทดสอบ เท่ากับ -300 มิลลิโวลต์ (Ag-AgCl) ทดสอบเป็นเวลา 5 ชั่วโมง 30 นาที

จากภาพที่ 4.29 เมื่อทดสอบโดยเทคนิคโพเทนชิโอสแตติก ที่ศักย์ไฟฟ้าคงที่ -300 มิลลิโวลต์ (Ag-AgCl) ทดสอบเป็นเวลา 5 ชั่วโมง 30 นาที ได้เส้นโค้งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับ เวลาของชิ้นงาน H13 ที่ผ่านการชุบโครเมียมร่วมกับการทำไนตรายดิงแบบพลาสมา พบว่าชิ้นงาน H13 ที่ไม่ได้ทำการปรับปรุงผิวนั้นมีค่ากระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นจาก 0 มิลลิแอมแปร์ในช่วงเวลาสั้นๆ (ประมาณ 2000 วินาที) จากนั้นกระแสไฟฟ้ามีค่าคงที่ตลอดการทดสอบเท่ากับ 4.5 มิลลิแอมแปร์ ซึ่งมีค่าสูงที่สุดในทุกกลุ่มชิ้นงาน เมื่อพิจารณา H13 ที่ผ่านการชุบโครเมียมด้วยไฟฟ้าตามด้วยการทำ ไนตรายดิงแบบพลาสมา พบว่ามีค่ากระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นจาก 0 มิลลิแอมแปร์ในช่วงเวลาสั้นๆ (ประมาณ 2000 วินาที) จากนั้นกระแสไฟฟ้ามีค่าคงที่ตลอดการทดสอบเท่ากับ 4 มิลลิแอมแปร์ ซึ่งมีค่าต่ำกว่า H13 ที่ไม่ได้ทำการปรับปรุงผิว เมื่อพิจารณาชิ้นงาน H13 ที่ผ่านการทำไนตรายดิงแบบ พลาสมาตามด้วยการชุบโครเมียมด้วยไฟฟ้า จะพบว่ากระแสไฟฟ้าจะมีค่าเพิ่มขึ้นตลอดการทดสอบ แต่จะมีค่าน้อยกว่า H13 ที่ไม่ได้ทำการปรับปรุงผิวในทุกช่วงเวลา โดยค่ากระแสไฟฟ้าของชิ้นงาน

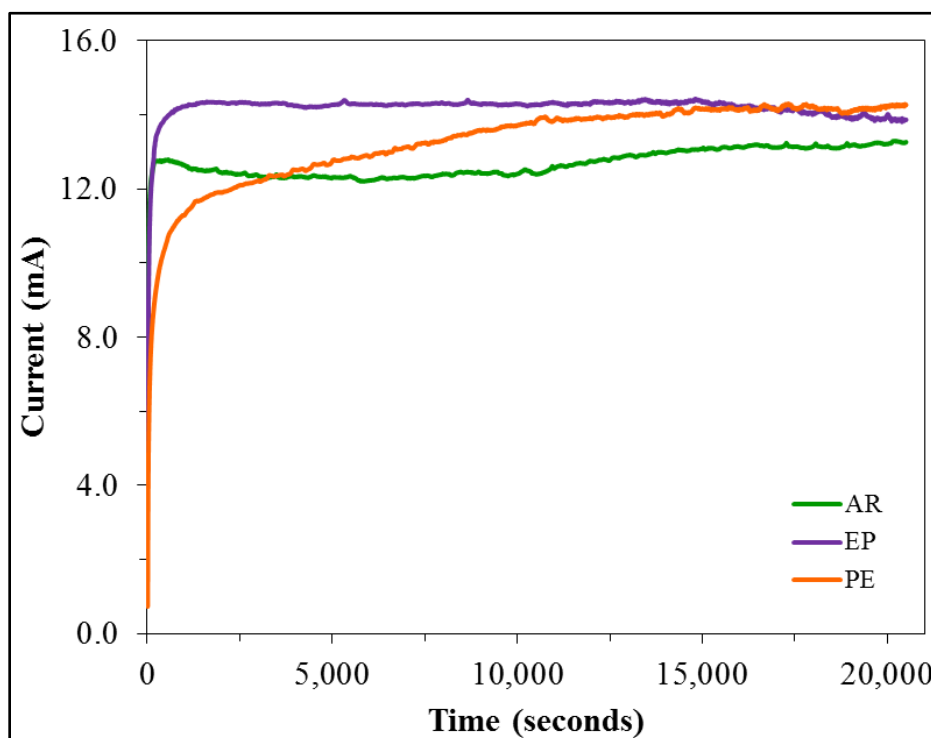
H13 ที่ผ่านการทำไนตรายดิงแบบพลาสติกตามด้วยการชุบโครเมียมด้วยไฟฟ้าที่เวลา 20000 วินาที มีค่า 3 มิลลิแอมแปร์

ชิ้นงาน	โครงสร้างมหภาคจากกล้อง DINO ทดสอบโดยโพเทนชิโอสแตติก	
	ก่อนทดสอบ	หลังทดสอบ
AR		
EP		
PE		

ภาพที่ 4.30 โครงสร้างมหภาคของชิ้นงาน H13 ที่ผ่านการชุบโครเมียมร่วมกับการทำไนตรายดิงแบบพลาสติก ก่อนและหลังทดสอบการกัดกร่อนโดยเทคนิคโพเทนชิโอสแตติก โดยตั้งค่าศักย์ไฟฟ้าในการทดสอบ เท่ากับ -300 มิลลิโวลต์ (Ag-AgCl) ทดสอบเป็นเวลา 5 ชั่วโมง 30 นาที

จากภาพที่ 4.30 เมื่อพิจารณาโครงสร้างมหภาคของชิ้นงาน H13 ที่ผ่านการชุบโครเมียม ร่วมกับการทำไนตรายดิงแบบพลาสมา ก่อนและหลังการทดสอบการกัดกร่อนโดยเทคนิค โพเทนชิโอสแตติก ที่ศักย์ไฟฟ้าคงที่ -300 มิลลิโวลต์ (Ag-AgCl) ทดสอบเป็นเวลา 5 ชั่วโมง 30 นาที จะพบว่า โครงสร้างมหภาคภายหลังการทดสอบชิ้นงาน H13 ที่ไม่ได้ทำการปรับปรุงผิว มีผิวที่เรียบ ไม่ปรากฏบริเวณที่ขรุขระ เกิดการกัดกร่อนทุกบริเวณ มีพื้นผิวสีเทาซึ่งเป็นสีของเนื้อพื้นเหล็ก แต่ความเงาเป็นกระจกได้หายไป ซึ่งกล่าวได้ว่า ชิ้นงาน H13 ที่ไม่ได้ทำการปรับปรุงผิว เกิดการกัดกร่อนจนไม่เหลือพื้นผิวเดิม แต่เมื่อพิจารณาโครงสร้างมหภาคภายหลังการทดสอบชิ้นงาน H13 ที่ผ่านการชุบโครเมียมด้วยไฟฟ้าตามด้วยการทำไนตรายดิงแบบพลาสมา จะพบว่าพื้นผิวมีผิวที่เรียบ ไม่ปรากฏบริเวณที่ขรุขระ เกิดการกัดกร่อนทุกบริเวณ มีพื้นผิวสีเทาซึ่งเป็นสีของเนื้อพื้นเหล็ก แต่ความเงาเป็นกระจกได้หายไป ซึ่งกล่าวได้ว่า ชิ้นงาน H13 ที่ผ่านการชุบโครเมียมด้วยไฟฟ้าตามด้วยการทำไนตรายดิงแบบพลาสมา เกิดการกัดกร่อนจนไม่เหลือพื้นผิวเดิม เมื่อพิจารณาโครงสร้างมหภาคภายหลังการทดสอบชิ้นงาน H13 ที่ผ่านการทำไนตรายดิงแบบพลาสมาตามด้วยการชุบโครเมียมด้วยไฟฟ้า จะพบว่าพื้นผิวของชิ้นงานถูกกัดกร่อนหลายบริเวณ ลักษณะเดียวกับชิ้นงาน H13 ที่ทำไนตรายดิงแบบพลาสมา โดยเหลือบางบริเวณที่ไม่เกิดการกัดกร่อน ซึ่งยังคงสภาพของพื้นผิวหน้าแบบเดิมซึ่งมีสีเข้มเป็นชั้นเคลือบโครเมียม พื้นผิวมีความขรุขระสูง กล่าวได้ว่า ชิ้นงาน H13 ที่ผ่านการทำไนตรายดิงแบบพลาสมาตามด้วยการชุบโครเมียมด้วยไฟฟ้า มีผิวที่ต้านทานต่อการกัดกร่อนที่ไม่ดีนักเมื่อทดสอบที่ศักย์ไฟฟ้าคงที่เท่ากับ -300 มิลลิโวลต์ (Ag-AgCl) แต่ยิ่งดีกว่าเมื่อเทียบกับ H13 ที่ไม่ได้ทำการปรับปรุงผิว

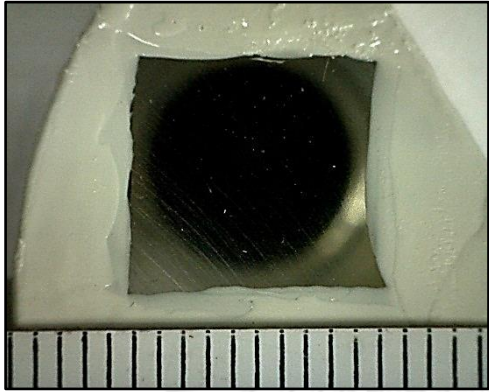
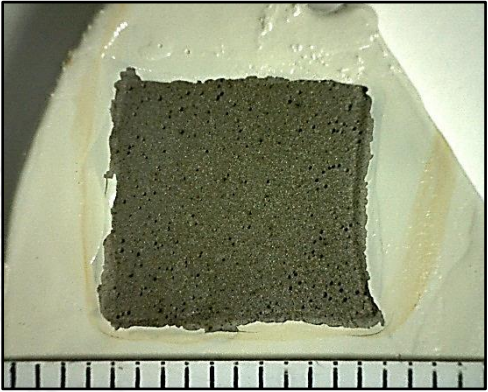
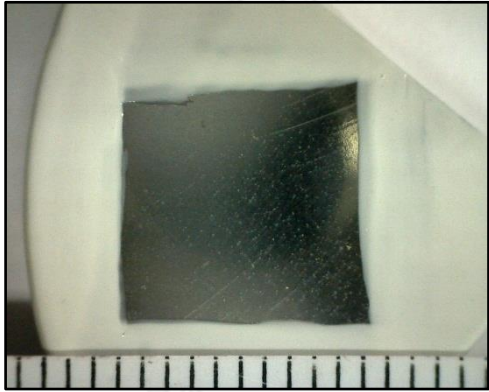
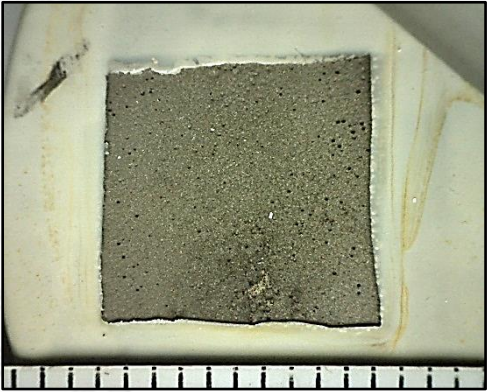
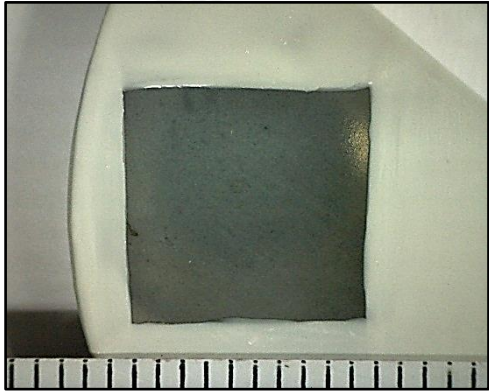
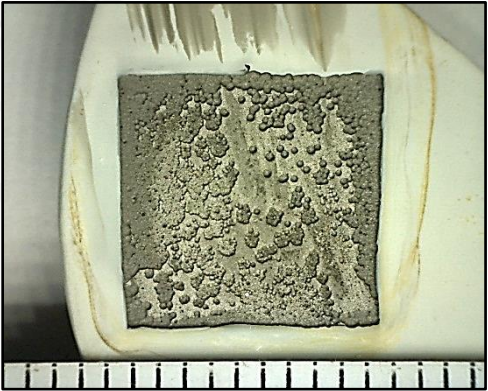
- ทดสอบที่ 0 มิลลิโวลต์ (Ag-AgCl) ทดสอบเป็นเวลา 5 ชั่วโมง 30 นาที



ภาพที่ 4.31 เส้นโค้งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้า (current) ในแกน y กับ เวลา (time) ในแกน x เปรียบเทียบกันของชิ้นงาน H13 ที่ผ่านการชุบโครเมียมร่วมกับการทำไนตรายดิงแบบพลาสติก ที่ทดสอบโดยเทคนิคโพเทนชิโอสแตติก โดยตั้งค่าศักย์ไฟฟ้าในการทดสอบ เท่ากับ 0 มิลลิโวลต์ (Ag-AgCl) ทดสอบเป็นเวลา 5 ชั่วโมง 30 นาที

จากภาพที่ 4.31 เมื่อทดสอบโดยเทคนิคโพเทนชิโอสแตติก ที่ศักย์ไฟฟ้าคงที่ 0 มิลลิโวลต์ (Ag-AgCl) ทดสอบเป็นเวลา 5 ชั่วโมง 30 นาที ได้เส้นโค้งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับ เวลาของชิ้นงาน H13 ที่ผ่านการชุบโครเมียมร่วมกับการทำไนตรายดิงแบบพลาสติก โดยเมื่อเพิ่มค่า ศักย์ไฟฟ้าที่ทดสอบจาก -300 เป็น 0 มิลลิโวลต์ (Ag-AgCl) จะพบว่ากระแสไฟฟ้าที่วัดได้มีค่าสูงขึ้น ทุกกลุ่ม พบว่าชิ้นงาน H13 ที่ไม่ได้ทำการปรับปรุงผิวนั้นมีค่ากระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นจาก 0 มิลลิแอมแปร์ ในช่วงเวลาสั้นๆ (น้อยกว่า 500 วินาที) จากนั้นกระแสไฟฟ้ามีค่าคงที่ตลอดการทดสอบเท่ากับ 13 มิลลิแอมแปร์ เมื่อพิจารณา H13 ที่ผ่านการชุบโครเมียมด้วยไฟฟ้าตามด้วยการทำไนตรายดิงแบบ พลาสติก จะพบว่ากระแสไฟฟ้าจะมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 0 มิลลิแอมแปร์ในช่วงเวลาสั้นๆ (ประมาณ 500 วินาที) จากนั้นกระแสไฟฟ้ามีค่าคงที่ตลอดการทดสอบเท่ากับ 14 มิลลิแอมแปร์ ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับ H13 ที่ไม่ได้ทำการปรับปรุงผิว เมื่อพิจารณาชิ้นงาน H13 ที่ผ่านการทำไนตรายดิงแบบพลาสติกตาม ด้วยการชุบโครเมียมด้วยไฟฟ้า จะพบว่ากระแสไฟฟ้าจะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงแรก จนเวลา ทดสอบผ่านไป 15000 วินาที จึงมีกระแสไฟฟ้าที่คงที่ เท่ากับ 14 มิลลิแอมแปร์ ซึ่งจากผลทดสอบ

ด้วยเทคนิคโพเทนชิโอสแตติก ที่ศักย์ไฟฟ้าคงที่ 0 มิลลิโวลต์ สรุปได้ว่าชิ้นงานทุกกลุ่มมีความต้านทานการกัดกร่อนที่ใกล้เคียงกัน

ชิ้นงาน	โครงสร้างมหภาคจากกล้อง DINO ทดสอบโดยโพเทนชิโอสแตติก	
	ก่อนทดสอบ	หลังทดสอบ
AR		
EP		
PE		

ภาพที่ 4.32 โครงสร้างมหภาคของชิ้นงาน H13 ที่ผ่านการชุบโครเมียมร่วมกับการทำไนไตรดิงแบบพลาสมา ก่อนและหลังทดสอบการกัดกร่อนโดยเทคนิคโพเทนชิโอสแตติก โดยตั้งค่าศักย์ไฟฟ้าในการทดสอบ เท่ากับ 0 มิลลิโวลต์ (Ag-AgCl) ทดสอบเป็นเวลา 5 ชั่วโมง 30 นาที

จากภาพที่ 4.32 เมื่อพิจารณาโครงสร้างมหภาคของชิ้นงาน H13 ภายหลังจากชุบโครเมียมด้วยไฟฟ้าร่วมกับการทำไนตรายดิงแบบพลาสมา ก่อนและหลังการทดสอบทดสอบการกัดกร่อนโดยเทคนิคโพเทนชิโอสแตติก ที่ศักย์ไฟฟ้าคงที่ 0 มิลลิโวลต์ (Ag-AgCl) ทดสอบเป็นเวลา 5 ชั่วโมง 30 นาที จะพบว่า โครงสร้างมหภาคภายหลังจากทดสอบชิ้นงาน H13 ที่ไม่ได้ทำการปรับปรุงผิวมีผิวที่เรียบ ไม่ปรากฏบริเวณที่ขรุขระ เกิดการกัดกร่อนทุกบริเวณ มีพื้นผิวสีเทาซึ่งเป็นสีของเนื้อพื้นเหล็ก แต่ความเงาเป็นกระจกได้หายไป ซึ่งกล่าวได้ว่า ชิ้นงาน H13 ที่ไม่ได้ทำการปรับปรุงผิว เกิดการกัดกร่อนจนไม่เหลือพื้นผิวเดิม แต่เมื่อพิจารณาโครงสร้างมหภาคภายหลังจากทดสอบชิ้นงาน H13 ที่ผ่านการชุบโครเมียมด้วยไฟฟ้าตามด้วยการทำไนตรายดิงแบบพลาสมา จะพบว่าพื้นผิวมีผิวที่เรียบ ไม่ปรากฏบริเวณที่ขรุขระ เกิดการกัดกร่อนทุกบริเวณ มีพื้นผิวสีเทาซึ่งเป็นสีของเนื้อพื้นเหล็ก แต่ความเงาเป็นกระจกได้หายไป ซึ่งกล่าวได้ว่า ชิ้นงาน H13 ที่ผ่านการชุบโครเมียมด้วยไฟฟ้าตามด้วยการทำไนตรายดิงแบบพลาสมา เกิดการกัดกร่อนจนไม่เหลือพื้นผิวเดิม เมื่อพิจารณาโครงสร้างมหภาคภายหลังจากทดสอบชิ้นงาน H13 ที่ผ่านการทำไนตรายดิงแบบพลาสมาตามด้วยการชุบโครเมียมด้วยไฟฟ้า จะพบว่าพื้นผิวของชิ้นงานถูกกัดกร่อนหลายบริเวณ ลักษณะเดียวกับชิ้นงาน H13 ที่ทำไนตรายดิงแบบพลาสมา โดยเหลือบางบริเวณที่ไม่เกิดการกัดกร่อน ซึ่งยังคงสภาพของพื้นผิวหน้าแบบเดิมซึ่งมีสีเข้มเป็นชั้นเคลือบโครเมียม พื้นผิวมีความขรุขระสูง กล่าวได้ว่า ชิ้นงาน H13 ที่ผ่านการทำไนตรายดิงแบบพลาสมาตามด้วยการชุบโครเมียมด้วยไฟฟ้า มีผิวที่ต้านทานต่อการกัดกร่อนที่ไม่ดีนักเมื่อทดสอบที่ศักย์ไฟฟ้าคงที่เท่ากับ 0 มิลลิโวลต์ (Ag-AgCl) แต่ยิ่งดีกว่าเมื่อเทียบกับ H13 ที่ไม่ได้ทำการปรับปรุงผิว

4.2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติด้านการกัดกร่อนกับสมบัติทางพื้นผิวของกลุ่มชิ้นงาน H13 ที่ผ่านการชุบโครเมียมร่วมกับการทำไนตรายดิงแบบพลาสมา

จากหัวข้อ 4.2.1 การหาคุณลักษณะทางผิว (Surface Characterization) พบว่าที่ผิวของชิ้นงานที่ผ่านการชุบโครเมียมร่วมกับการทำไนตรายดิงแบบพลาสมา มีสี ความแข็ง เฟสและสารประกอบที่เกิดขึ้นที่ต่างกัน โดยที่ผิวของ H13 ที่ผ่านการชุบโครเมียมด้วยไฟฟ้าร่วมกับการทำไนตรายดิงแบบพลาสมา จะมีชั้นโครเมียมไนตรายด์บาง (100 นาโนเมตร) อยู่ที่ผิว และได้ชั้นโครเมียมไนตรายด์นั้นยังคงเป็นเนื้อพื้น H13 ในขณะที่ H13 ที่ผ่านการชุบโครเมียมด้วยไฟฟ้าร่วมกับการทำไนตรายดิงแบบพลาสมา มีผิวนอกเป็นชั้นโครเมียมบาง (100 นาโนเมตร) มีชั้นการแพร่จากการทำไนตรายดิงแบบพลาสมา ต่อมาในหัวข้อ 4.2.2 เมื่อนำมาทดสอบด้านการกัดกร่อนโดยเทคนิคโพเทนชิโอสแตติก พบว่า H13 ที่ผ่านการชุบโครเมียมด้วยไฟฟ้าตามด้วยการทำไนตรายดิงแบบพลาสมา มีสมบัติด้านการกัดกร่อนที่แย่ลง โดยส่งผลคือ ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนต่ำลง กระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนสูงขึ้น อัตราการกัดกร่อนสูงขึ้น และความต้านทานโพลาไรเซชันลดลง เป็นผลมาจากชั้น

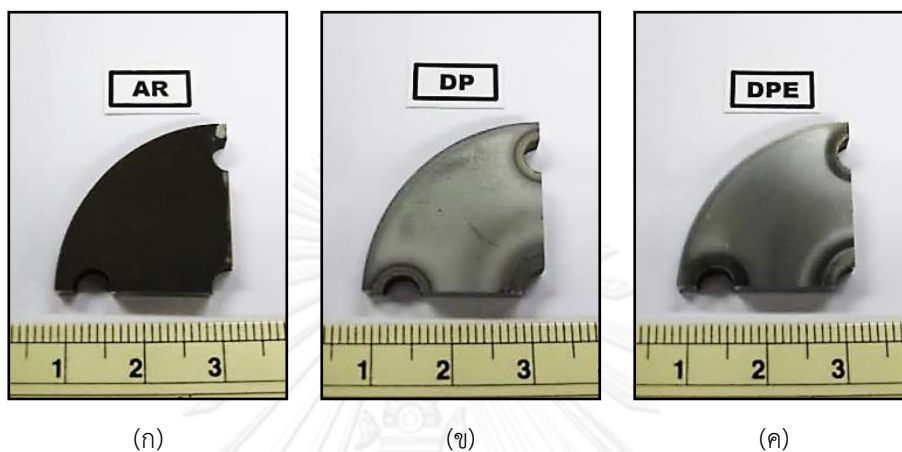
โครเมียมไนไตรด์ที่เกิดมีความเค้นตกค้างอยู่มาก เกิดการแตกได้ง่าย [24-27] ไม่ทำให้เกิดการป้องกันการกัดกร่อนที่ผิวชิ้นงาน และทำให้ปริมาณโครเมียมอิสระในเนื้อพื้น H13 มีค่าลดลง ส่งผลให้สมบัติด้านการกัดกร่อนแย่ลง เกิดการกัดกร่อนแบบทั่วผิวหน้า (uniform corrosion) ในขณะที่ H13 ที่ผ่านการทำไนไตรดิงแบบพลาสมาตามด้วยการชุบโครเมียมด้วยไฟฟ้า มีชั้นโครเมียมบางอยู่ที่ผิว ซึ่งเพิ่มสมบัติที่ดีด้านการกัดกร่อน คือ ศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนมีค่าสูงขึ้น แต่พารามิเตอร์อื่นๆ แย่ลง

แต่เมื่อทดสอบด้านการกัดกร่อนโดยเทคนิคโพเทนชิโอสแตติก พบว่าชิ้นงาน H13 ที่ผ่านการทำไนไตรดิงแบบพลาสมาตามด้วยการชุบโครเมียมด้วยไฟฟ้า ซึ่งมีชั้นโครเมียมบาง (Cr) อยู่ที่ผิวนั้น มีกระแสไฟฟ้าเกิดขึ้นต่ำ ในขณะที่ H13 ที่ผ่านการชุบโครเมียมด้วยไฟฟ้าตามด้วยการทำไนไตรดิงแบบพลาสมา มีชั้นโครเมียมไนไตรด์บาง (CrN) อยู่ที่ผิว มีกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นมากกว่า และ H13 ที่ไม่ได้ทำการปรับปรุงผิว มีกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นมากที่สุด กล่าวได้ว่า เมื่อมีชั้นเซรามิกส์หรือชั้นโลหะที่เกิดแพสซีฟอยู่ที่ผิวของชิ้นงานจะส่งผลให้กระแสไฟฟ้าเกิดขึ้นปริมาณน้อยลง หรือ มีความต้านทานการกัดกร่อนดีขึ้นในการทดสอบโดยโพเทนชิโอสแตติก

4.3 กลุ่มที่ 3 กลุ่มชิ้นงานเหล็กกล้า H13 ที่ผ่านการสูญเสียคาร์บอนที่ผิวก่อนทำการปรับปรุงผิว

4.3.1 การหาคุณลักษณะทางผิว (Surface Characterizations)

4.3.1.1 โครงสร้างมหภาค (Macrostructure)



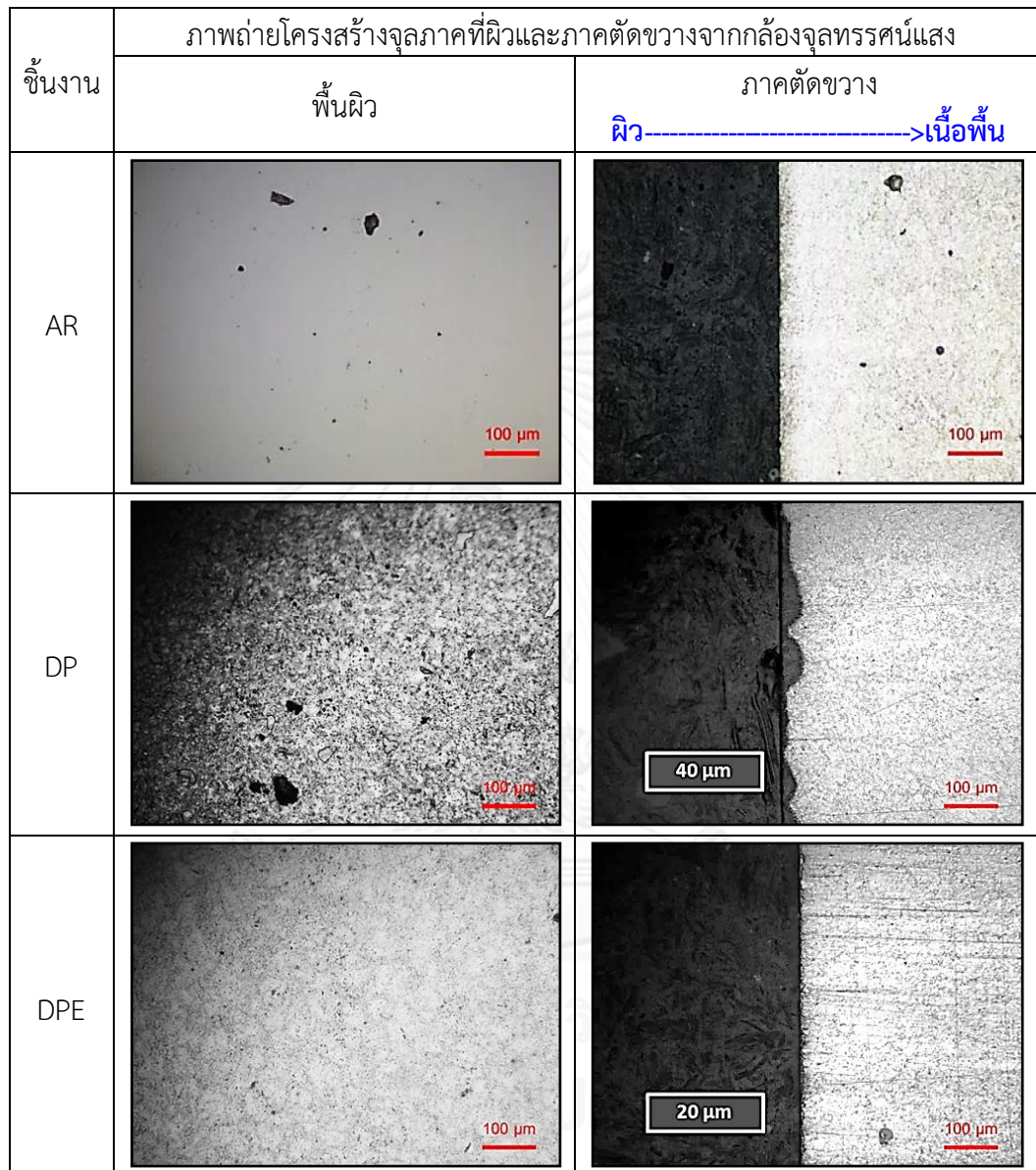
ภาพที่ 4.33 โครงสร้างมหภาคของชิ้นงาน H13 ที่ผ่านการสูญเสียคาร์บอนที่ผิวก่อนทำการปรับปรุงผิว

- (ก) ชิ้นงานกลุ่ม AR : H13 ที่ไม่ได้ทำการปรับปรุงผิว
 (ข) ชิ้นงานกลุ่ม DP : H13 ที่ผ่านการสูญเสียคาร์บอนที่ผิวตามด้วยการทำไนตรายดิงแบบพลาสมา
 (ค) ชิ้นงานกลุ่ม DPE : H13 ที่ผ่านการสูญเสียคาร์บอนที่ผิวตามด้วยการทำไนตรายดิงแบบพลาสมา และตามด้วยการชุบโครเมียมด้วยไฟฟ้า

จากภาพที่ 4.33 พบว่าพื้นผิวชิ้นงานที่ผ่านการสูญเสียคาร์บอนที่ผิวก่อนทำการปรับปรุงผิว มีลักษณะผิวที่แตกต่างกันออกไป โดยชิ้นงานตั้งต้นของทุกกลุ่มนั้นมีลักษณะพื้นผิวเช่นเดียวกับภาพที่ 4.33 (ก) ซึ่งเป็นพื้นผิวของ H13 ที่ไม่ได้ทำการปรับปรุงผิวใดๆ แต่มีการเตรียมผิวชิ้นงานโดยทำการขัดหยาบและละเอียดจนมีผิวเงาลักษณะคล้ายกระจก จากภาพที่ 4.33 (ข) ชิ้นงาน H13 ที่ผ่านการสูญเสียคาร์บอนที่ผิวตามด้วยการทำไนตรายดิงแบบพลาสมา จะได้ลักษณะผิวที่ไม่เรียบและไม่เงาเป็นกระจก มีพื้นผิวสีเทาอ่อน และจากภาพที่ 4.33 (ค) เมื่อชิ้นงาน H13 ที่ผ่านการสูญเสียคาร์บอนที่ผิวตามด้วยการทำไนตรายดิงแบบพลาสมาและตามด้วยการชุบโครเมียมด้วยไฟฟ้า จะได้ลักษณะผิวที่ไม่เรียบและไม่เงาเป็นกระจก มีพื้นผิวสีเทา แต่จะมีสีเข้มกว่าชิ้นงาน H13 ที่ผ่านการสูญเสียคาร์บอนที่ผิวตามด้วยการทำไนตรายดิงแบบพลาสมา เนื่องจากมีการเพิ่มการชุบโครเมียมด้วยไฟฟ้า

4.3.1.2 โครงสร้างจุลภาค (Microstructure)

- โครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์แสง (Optical Microscope; OM)

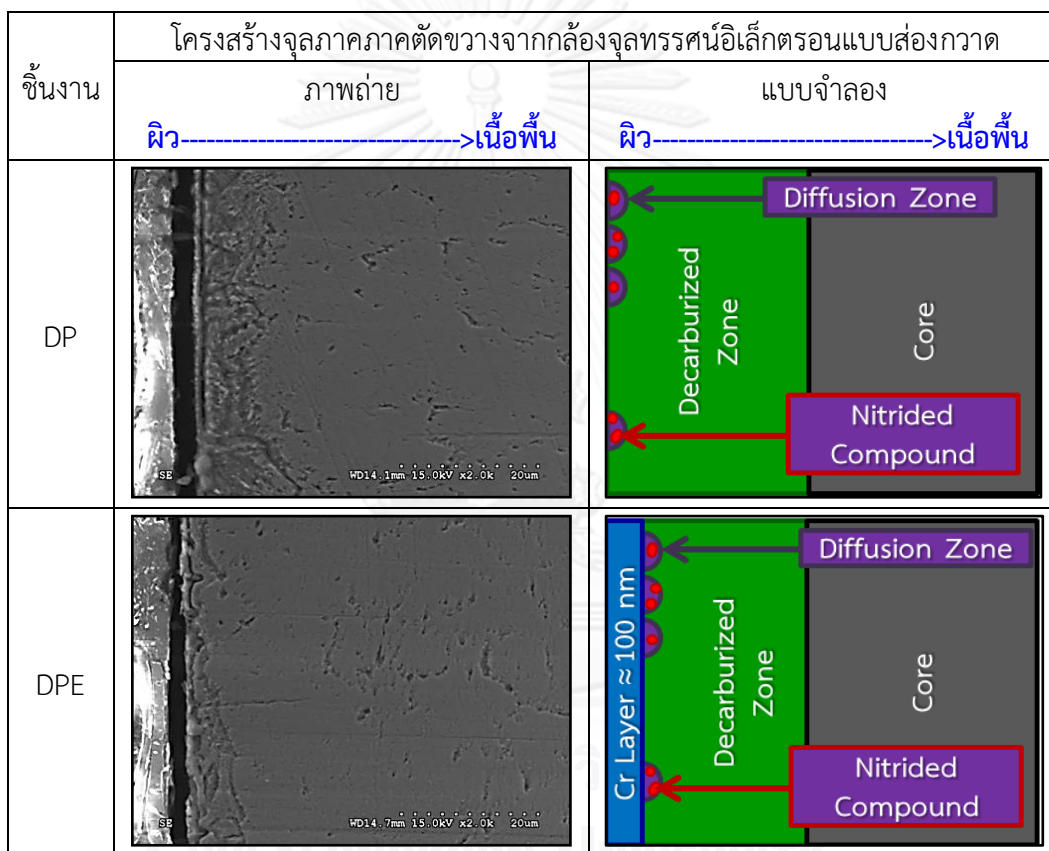


ภาพที่ 4.34 โครงสร้างจุลภาคที่ผิวและภาคตัดขวางจากฝั่งผิวของชิ้นงาน H13 ที่ผ่านการสูญเสียคาร์บอนที่ผิวก่อนทำการปรับปรุงผิว จากกล้องจุลทรรศน์แสง

จากภาพที่ 4.34 แสดงโครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์แสง โดยภาพพื้นผิวของชิ้นงาน ที่ผ่านการสูญเสียคาร์บอนที่ผิวก่อนทำการปรับปรุงผิว พบว่า ลักษณะพื้นผิวมีโครงสร้างจุลภาคที่เปลี่ยนแปลงไปจาก H13 ที่ไม่ได้ทำการปรับปรุงผิว กล่าวคือ มีการเกิดเฟสที่มีลักษณะและสี รวมถึงความขรุขระแตกต่างไปจากลักษณะพื้นผิวเดิมที่แสดงแต่เนื้อเหล็กและมีเฟสสีเข้มเป็นจุดเล็กๆ เพียงเล็กน้อย และเมื่อนำชิ้นงานไปทำการตัดขวาง ขัดเตรียมผิวและกัดกรดด้วยสารละลายไนตอล 2%

พบว่าโครงสร้างจุลภาคตรงผิวชิ้นงาน H13 ที่ผ่านการสูญเสียคาร์บอนที่ผิวตามด้วยการทำไนตรายดิงแบบพลาสมาและ H13 ที่ผ่านการสูญเสียคาร์บอนที่ผิวตามด้วยการทำไนตรายดิงแบบพลาสมาและตามด้วยการชุบโครเมียมด้วยไฟฟ้าไม่ปรากฏเป็นชั้นไนตรายด์ แต่จะเกิดไนตรายด์เกิดขึ้นบางบริเวณอย่างไม่สม่ำเสมอ มีความลึก 20 ถึง 40 ไมครอน โดย H13 ที่ผ่านการสูญเสียคาร์บอนที่ผิวตามด้วยการทำไนตรายดิงแบบพลาสมาจะพบบริเวณไนตรายด์ปริมาณมากกว่า

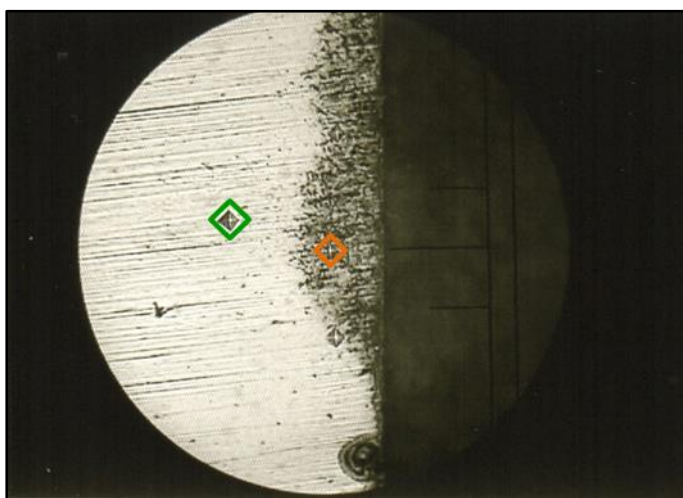
- โครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (Scanning Electron Microscope; SEM)



ภาพที่ 4.35 โครงสร้างจุลภาคภาคตัดขวางจากฝั่งผิวของชิ้นงาน H13 ที่ผ่านการสูญเสียคาร์บอนที่ผิวก่อนทำการปรับปรุงผิว จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด

จากภาพที่ 4.35 แสดงโครงสร้างจุลภาคภาคตัดขวางจากฝั่งผิวของชิ้นงาน H13 ที่ผ่านการสูญเสียคาร์บอนที่ผิวก่อนทำการปรับปรุงผิว จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด พบว่าชิ้นงานทั้งสองกลุ่มนั้น ไม่ปรากฏชั้นสารประกอบที่ผิวของชิ้นงานและไม่มีชั้นการแพร่เกิดขึ้นที่ผิวของชิ้นงาน ดังแสดงในภาพแบบจำลอง

4.3.1.3 ศึกษาการเกิดบริเวณไนตรายด์ที่ผิวของชิ้นงานในบางบริเวณ



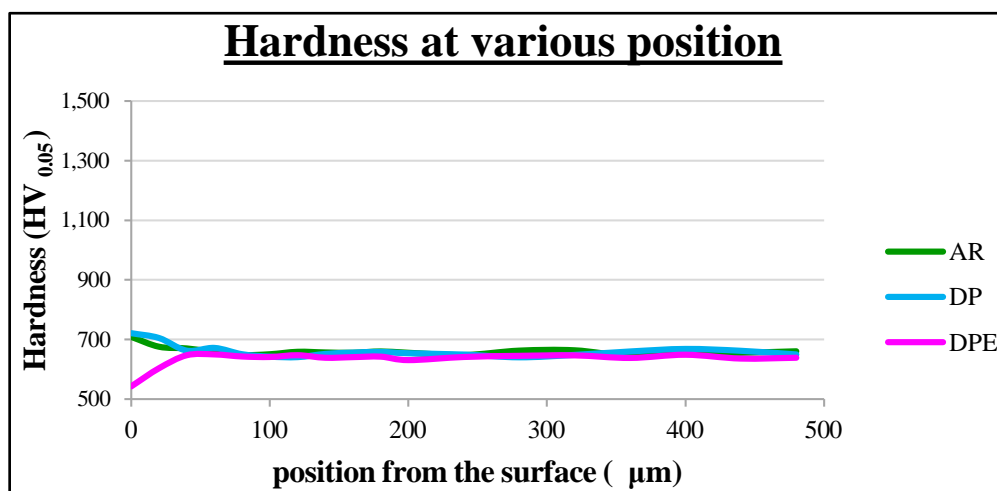
ภาพที่ 4.36 โครงสร้างจุลภาคภาคตัดขวางแสดงการวัดความแข็งเฟสสีดำและเฟสสีเทาบนผิวของชิ้นงาน ที่ผ่านการสูญเสียคาร์บอนที่ผิวตามด้วยการทำไนตรายดิ้งแบบพลาสมา

จากการวัดความแข็งผิวของชิ้นงาน H13 ที่ผ่านการสูญเสียคาร์บอนที่ผิวตามด้วยการทำไนตรายดิ้งแบบพลาสมา พบว่าที่ผิวของชิ้นงานประกอบด้วยเฟส 2 เฟส คือ เฟสสีดำและเฟสสีเทา เมื่อทำการวัดความแข็งบริเวณเฟสสีดำและเฟสสีเทา จะได้ค่าความแข็งแสดงในตารางที่ 4.1 ซึ่งพบว่าเฟสสีดำมีความแข็งระดับเดียวกับเหล็กไนตรายด์ และเฟสสีเทามีความแข็งระดับเดียวกับเนื้อพื้น H13 ซึ่งสามารถสรุปได้ว่า เฟสสีดำ คือ เหล็กไนตรายด์ และเฟสสีเทา คือ เนื้อพื้นเหล็ก H13 โดยถ้าจะกล่าวถึงความแข็งผิวของชิ้นงานที่ผ่านการสูญเสียคาร์บอนที่ผิวตามด้วยการทำไนตรายดิ้งแบบพลาสมา จะรายงานเป็นของเฟสสีเทาแล้ววัดเข้าไปที่เนื้อพื้นของชิ้นงาน เนื่องจากเหล็กไนตรายด์ที่ผิวเกิดขึ้นแบบไม่สม่ำเสมอ และมีปริมาณน้อย อีกทั้งมีความหนาที่กินลึกลงไปเนื้อชิ้นงานเพียง 20 ถึง 40 ไมครอน

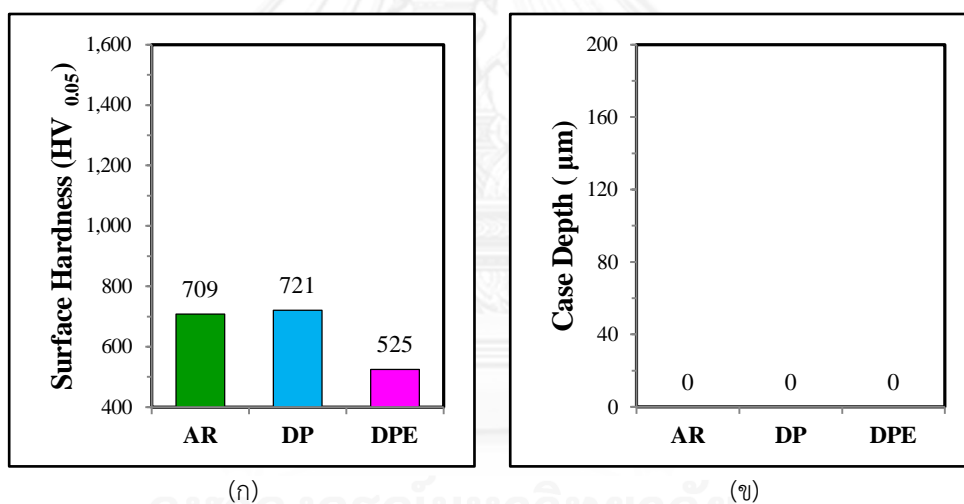
ตารางที่ 4.1 แสดงความแข็งของเฟสสีดำและเฟสสีเทาที่เกิดขึ้นที่ผิวของชิ้นงานที่ผ่านการสูญเสียคาร์บอนที่ผิวตามด้วยการทำไนตรายดิ้งแบบพลาสมา

เฟส	D_1 (μm)	D_2 (μm)	ความแข็ง ($\text{HV}_{0.05}$)
สีเทา	11.01	11.02	764.2
สีดำ	8.68	8.47	1261.0

4.3.1.4 ความแข็ง (Hardness)



ภาพที่ 4.37 ผลการวัดความแข็งตามแนวตัดขวางจากฝั่งผิวลึกเข้าไปในเนื้อชิ้นงานตามแนวแกน X ของชิ้นงาน H13 ที่ผ่านการสูญเสียคาร์บอนที่ผิวก่อนทำการปรับปรุงผิว

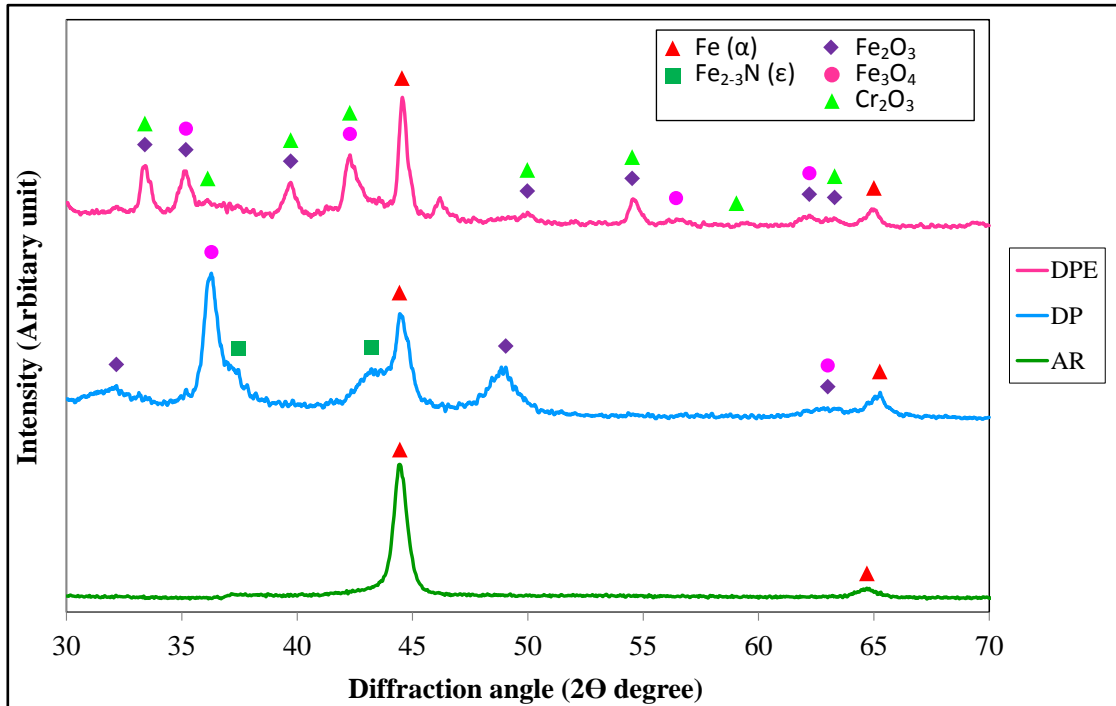


ภาพที่ 4.38 (ก) ความแข็งผิว และ (ข) ความลึกชั้นผิวแข็ง ของชิ้นงาน H13 ที่ผ่านการสูญเสียคาร์บอนที่ผิว ก่อนทำการปรับปรุงผิว

เมื่อนำชิ้นงานภายหลังสูญเสียคาร์บอนที่ผิวก่อนทำการปรับปรุงผิวที่ผ่านการสูญเสียคาร์บอนที่ผิวก่อนทำการปรับปรุงผิว ที่ทำการตัดขวางและขัดเตรียมผิว แล้วนำมาวัดความแข็งโดยเริ่มวัดจากฝั่งผิวชิ้นงาน และวัดลึกเข้าไปยังเนื้อพื้น ด้วยเครื่องวัดความแข็งแบบไมโครวิกเกอร์ โดยใช้น้ำหนักกด 50 กรัม ดังแสดงผลในภาพที่ 4.37 และความแข็งผิวกับความลึกชั้นผิวแข็งที่ได้ แสดงในภาพที่ 4.38 พบว่าชิ้นงาน H13 ที่ผ่านการสูญเสียคาร์บอนที่ผิวตามด้วยการทำไนตรายดิงแบบพลาสมา มีความแข็งผิวสูงชันเล็กน้อย มีค่าเท่ากับ 721 HV_{0.05} ซึ่งเพิ่มขึ้นจาก H13 ที่ไม่ได้ทำการปรับปรุงผิวที่มีค่าเท่ากับ 709 HV_{0.05} ส่วนชิ้นงาน H13 ที่ผ่านการสูญเสียคาร์บอนที่ผิวตามด้วยการทำไนตรายดิงแบบพลาสมาและตามด้วยการชุบโครเมียมด้วยไฟฟ้า มีความแข็งผิวต่ำลงมาก มีค่าเท่ากับ 525

HV_{0.05} โดยไม่พบความลึกลับในชั้นงาน H13 ที่ผ่านการสูญเสียคาร์บอนที่ผิวก่อนทำการปรับปรุงผิว

4.3.1.5 เฟสและสารประกอบที่เกิดขึ้น



ภาพที่ 4.39 ผลการวิเคราะห์เฟสและสารประกอบ โดยเครื่องมือวิเคราะห์รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์แบบ GIXD จากผิ้วงผิวของชั้นงาน H13 ที่ผ่านการสูญเสียคาร์บอนที่ผิวก่อนทำการปรับปรุงผิว

จากภาพที่ 4.39 แสดงการตรวจสอบชั้นงาน โดยเครื่องมือวิเคราะห์รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ แบบ GIXD ด้วยมุมตกกระทบ 1 องศา พบเฟสและสารประกอบต่างๆ เปรียบเทียบกับข้อมูลในมาตรฐานของ JCPDS คือ ในชั้นงานทุกกลุ่มที่ผ่านการสูญเสียคาร์บอนที่ผิวก่อนทำการปรับปรุงผิว พบสารประกอบเหล็กแอลฟา (α : Fe ตามมาตรฐาน หมายเลข #851410) และสารประกอบของเหล็กออกไซด์ในรูปต่างๆ (Fe_2O_3 ตามมาตรฐาน หมายเลข #882359 Fe_3O_4 ตามมาตรฐาน หมายเลข #890688) ที่ผิว โดยสารประกอบอื่นๆ ที่พบแตกต่างกันคือ ในชั้นงาน H13 ที่ผ่านการสูญเสียคาร์บอนที่ผิวตามด้วยการทำไนตรายดิงแบบพลาสมา พบสารประกอบเหล็กไนตรายด์แบบเอปซิลอน (ϵ : Fe_{2-3}N ตามมาตรฐาน หมายเลข #830877) ที่ผิว ส่วนชั้นงาน H13 ที่ผ่านการสูญเสียคาร์บอนที่ผิวตามด้วยการทำไนตรายดิงแบบพลาสมาและตามด้วยการชุบโครเมียมด้วยไฟฟ้า พบสารประกอบโครเมียมออกไซด์ (Cr_2O_3 ตามมาตรฐาน หมายเลข #850730) ที่ผิวเพิ่มเติมเล็กน้อย

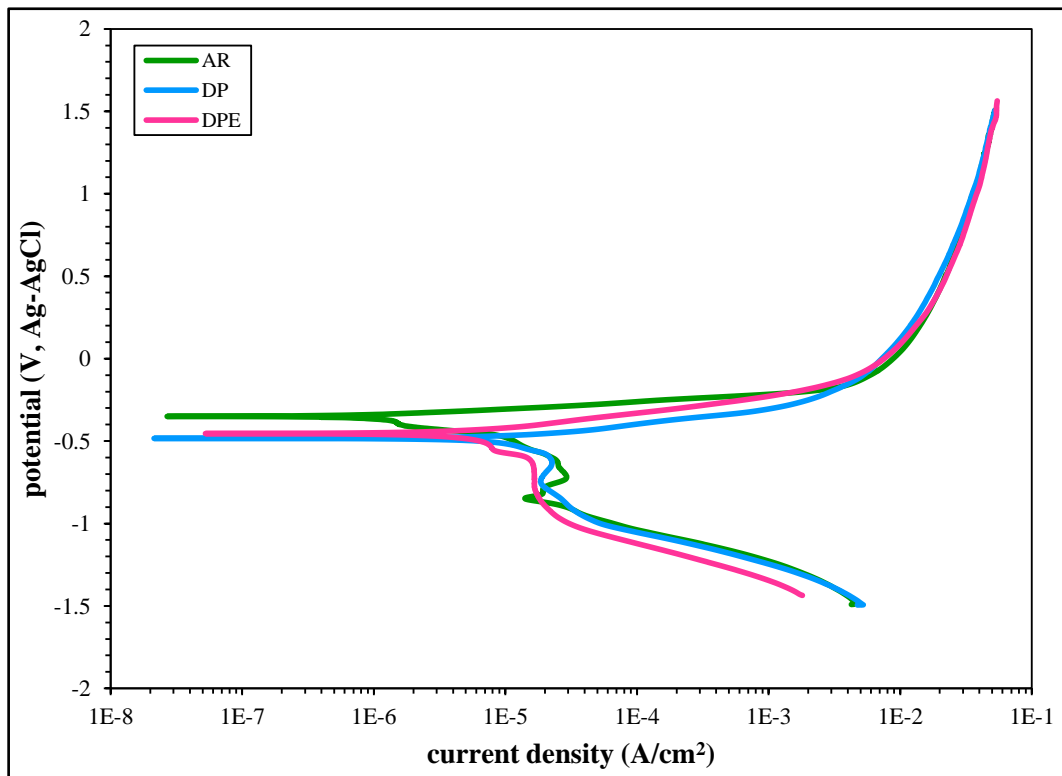
จากผลวิเคราะห์คุณลักษณะทางผิวของกลุ่มชิ้นงานเหล็กกล้า H13 ที่ผ่านการสูญเสียคาร์บอนที่ผิวก่อนทำการปรับปรุงผิว จะพบว่าชิ้นงานกลุ่มนี้ไม่มีชั้นผิวแข็งเกิดขึ้นในโครงสร้างจุลภาค เมื่อนำไปวัดความแข็งผิว พบว่าไม่สามารถเพิ่มความแข็งผิว ส่งผลให้ความแข็งยังคงมีค่าเท่ากับ H13 ที่ไม่ได้ทำการปรับปรุงผิว จากโครงสร้างจุลภาคในบางบริเวณจะพบสารประกอบไนตรายด์เกิดขึ้นที่ผิวปริมาณน้อยและมีความหนาเพียง 20 ถึง 40 ไมครอน และจากการวิเคราะห์เฟสและสารประกอบที่ผิวพบว่า ที่ผิวชิ้นงาน H13 ที่ผ่านการสูญเสียคาร์บอนที่ผิวตามด้วยการทำไนตรายด์แบบพลาสมา พบเฟสของ Fe , $Fe_{2-3}N$, Fe_2O_3 , Fe_3O_4 และ ที่ผิวชิ้นงาน H13 ที่ผ่านการสูญเสียคาร์บอนที่ผิวตามด้วยการทำไนตรายด์แบบพลาสมาและตามด้วยการชุบโครเมียมด้วยไฟฟ้า พบเฟสของ Fe , Fe_2O_3 , Fe_3O_4 , Cr_2O_3

4.3.2 ความต้านทานการกัดกร่อน (Corrosion Resistance)

ในงานวิจัยนี้ ได้ทำการทดสอบเพื่อหาความต้านทานการกัดกร่อนของชิ้นงาน โดยใช้พื้นที่ทดสอบ 1 ตารางเซนติเมตร ด้วยเครื่องทดสอบสมับัติทางเคมีไฟฟ้า (potentiostat/galvanostat) ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ความเข้มข้นร้อยละ 0.9 โดยมวลต่อปริมาตร โดยใช้ขั้วมาตรฐานอ้างอิง (standard reference electrode) คือ ซิลเวอร์-ซิลเวอร์คลอไรด์ (Ag-AgCl) และใช้ขั้วจ่ายกระแส (counter electrode) คือ แพลตินัมแบบแผ่น (platinum plate) โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ในการทดสอบและวิเคราะห์ คือ โปรแกรม NOVA รุ่น 1.9

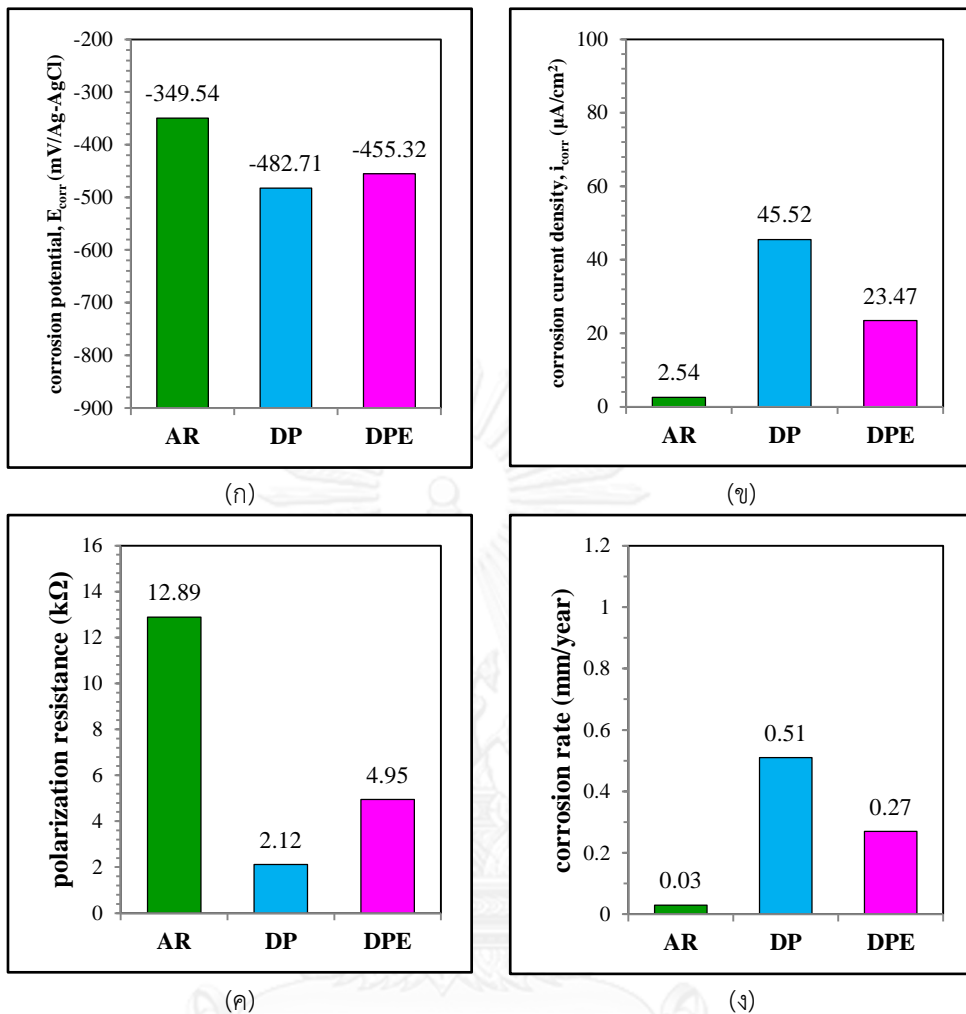
4.3.2.1 เทคนิคโพเทนซีโอไดนามิกส์ (Potentiodynamics Technique)

การทดสอบนี้เป็นกระบวนการทดสอบสมับัติด้านการกัดกร่อนของโลหะและวัสดุ โดยในการทดสอบนี้จะต้องทำการทดสอบการเปิดวงจรเพื่อหาคักย์ไฟฟ้าแบบเปิดวงจร (E_{OCP} , open circuit potential) ซึ่งใช้เวลาทดสอบ 1,800 วินาที จากนั้นเครื่องทดสอบจะมีการป้อนศักย์ไฟฟ้า โดยเริ่มตั้งแต่ (start potential) -1.00 โวลต์ จนถึง (stop potential) +2.00 โวลต์ โดยมีอัตราการเพิ่มของศักย์ไฟฟ้า (scan rate) เท่ากับ 0.001 โวลต์ต่อวินาที ซึ่งจะไดเส้นโค้งโพรวาไรเซชันแสดงความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้า (E, potential) กับลอการิทึมความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า ($\log i$, logarithm of current density)



ภาพที่ 4.40 เส้นโค้งโพลาริเซชันเปรียบเทียบกันของชิ้นงาน H13 ที่ผ่านการสูญเสียคาร์บอนที่ผิวก่อนทำการปรับปรุงผิว

จากภาพที่ 4.40 แสดงเส้นโค้งโพลาริเซชัน (potentiodynamics polarization curve) ของชิ้นงาน H13 ที่ผ่านการสูญเสียคาร์บอนที่ผิวก่อนทำการปรับปรุงผิว พบว่าชิ้นงาน H13 ที่ผ่านการสูญเสียคาร์บอนที่ผิวตามด้วยการทำไนตรายดิงแบบพลาสมา ชิ้นงาน H13 ที่ผ่านการสูญเสียคาร์บอนที่ผิวตามด้วยการทำไนตรายดิงแบบพลาสมาและตามด้วยการชุบโครเมียมด้วยไฟฟ้าและ H13 ที่ไม่ได้ทำการปรับปรุงผิว มีความแตกต่างกันในสมบัติด้านการกัดกร่อนเพียงเล็กน้อย ซึ่งลักษณะของเส้นโค้งโพลาริเซชันไม่ต่างกัน กล่าวคือไม่มีบริเวณแพสซีฟ (passive region) เกิดขึ้น แต่ตำแหน่งของกราฟต่างกันอย่างมีนัยยะซึ่งต้องนำไปวิเคราะห์เพื่อหาค่าพารามิเตอร์แสดงสมบัติด้านการกัดกร่อนต่อไป



ภาพที่ 4.41 ค่าพารามิเตอร์แสดงสมบัติด้านการกัดกร่อน (corrosion parameters) เปรียบเทียบกันของชิ้นงาน H13 ที่ผ่านการสูญเสียคาร์บอนที่ผิวก่อนทำการปรับปรุงผิว
 (ก) ศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน (corrosion potential)
 (ข) ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน (corrosion current density)
 (ค) ความต้านทานโพลาไรเซชัน (polarization resistance)
 (ง) อัตราการกัดกร่อน (corrosion rate)

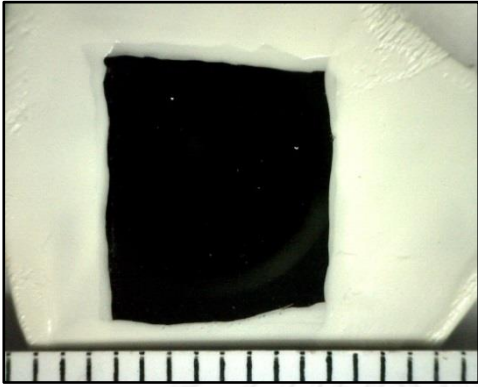
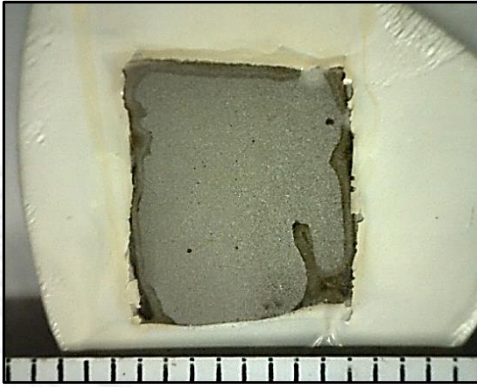
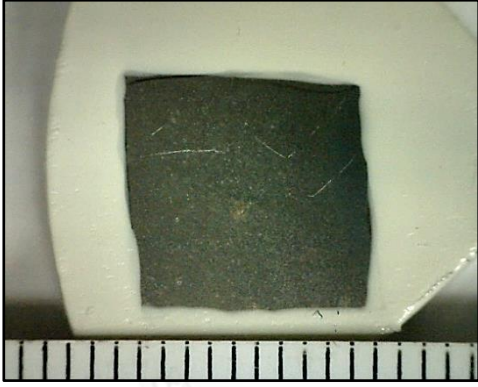
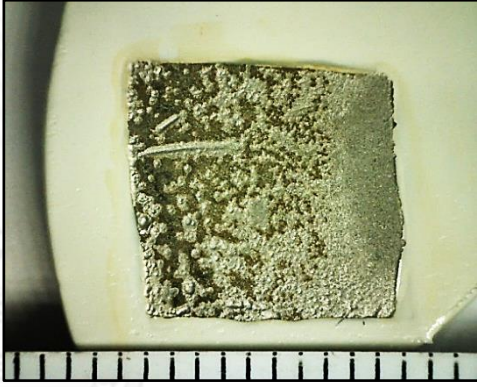
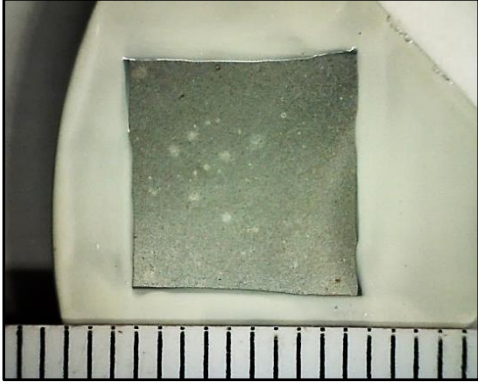
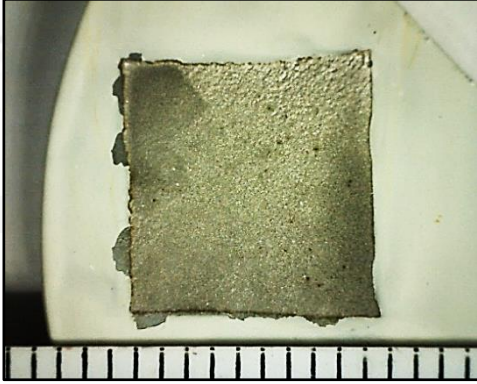
จากภาพที่ 4.41 เมื่อนำเส้นโค้งโพลาไรเซชัน (polarization curve) ไปทำการประมาณนอกช่วงทาเฟล (tafel extrapolation) เพื่อวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์แสดงสมบัติด้านการกัดกร่อน (corrosion parameters) จะพบว่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน (E_{corr} , corrosion potential) มีการลดลงมากในชิ้นงาน H13 ที่ผ่านการสูญเสียคาร์บอนที่ผิวตามด้วยการทำไนตรายดิงแบบพลาสมา และชิ้นงาน H13 ที่ผ่านการสูญเสียคาร์บอนที่ผิวตามด้วยการทำไนตรายดิงแบบพลาสมาและตามด้วยการชุบโครเมียมด้วยไฟฟ้า เมื่อเทียบกับ H13 ที่ไม่ได้ทำการปรับปรุงผิว

เมื่อพิจารณาค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน (i_{corr} , corrosion current density) ซึ่งเป็นค่าพารามิเตอร์ที่มีความสัมพันธ์เดียวกันกับอัตราการกัดกร่อน (corrosion rate) จะพบว่าชิ้นงาน H13 ที่ผ่านการสูญเสียคาร์บอนที่ผิวก่อนทำการปรับปรุงผิว มีค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนและอัตราการกัดกร่อนที่เพิ่มขึ้นอย่างมากเมื่อเทียบกับ H13 ที่ไม่ได้ทำการปรับปรุงผิว โดย H13 ที่ผ่านการสูญเสียคาร์บอนที่ผิวตามด้วยการทำไนตรรายดิงแบบพลาสติก มีค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนและอัตราการกัดกร่อนสูงที่สุด ตามด้วย H13 ที่ผ่านการสูญเสียคาร์บอนที่ผิวตามด้วยการทำไนตรรายดิงแบบพลาสติกและตามด้วยการชุบโครเมียมด้วยไฟฟ้า

จากนั้นเมื่อพิจารณาค่าความต้านทานโพลาไรเซชัน (R_p , polarization resistance) ซึ่งสามารถนำมาเป็นตัวแทนของความต้านทานการกัดกร่อนได้ จะพบว่า ชิ้นงาน H13 ที่ไม่ได้ทำการปรับปรุงผิวมีความต้านทานโพลาไรเซชันสูงที่สุด ตามด้วยชิ้นงาน H13 ที่ผ่านการสูญเสียคาร์บอนที่ผิวตามด้วยการทำไนตรรายดิงแบบพลาสติกและตามด้วยการชุบโครเมียมด้วยไฟฟ้า และชิ้นงาน H13 ที่ผ่านการสูญเสียคาร์บอนที่ผิวตามด้วยการทำไนตรรายดิงแบบพลาสติกมีความต้านทานโพลาไรเซชันต่ำที่สุด

4.3.2.2 โครงสร้างมหภาค/จุลภาคภายหลังการทดสอบโดยเทคนิคโพเทนซิโอดีนามิกส์

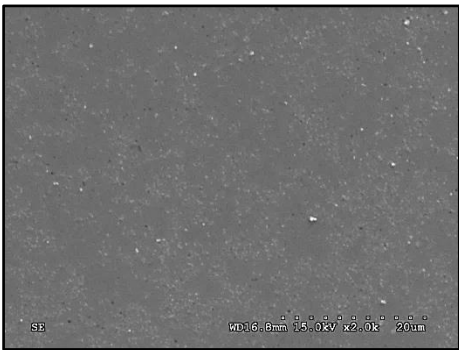
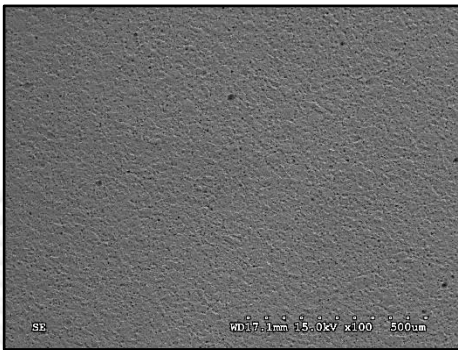
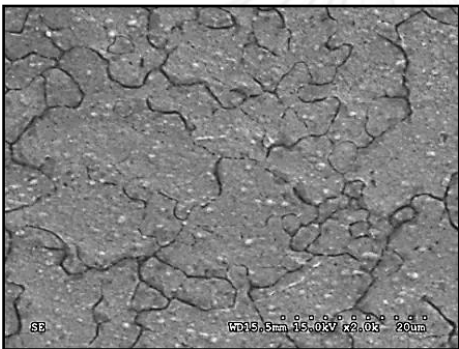
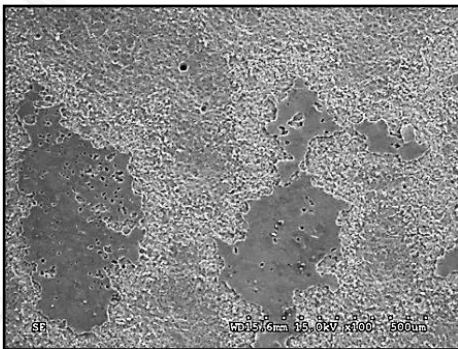
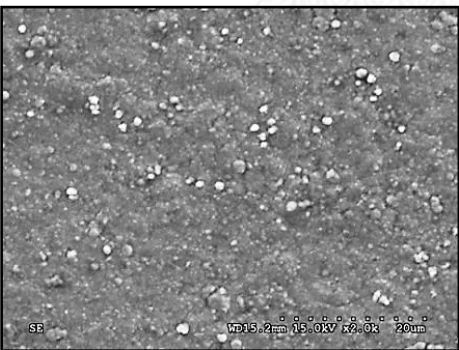
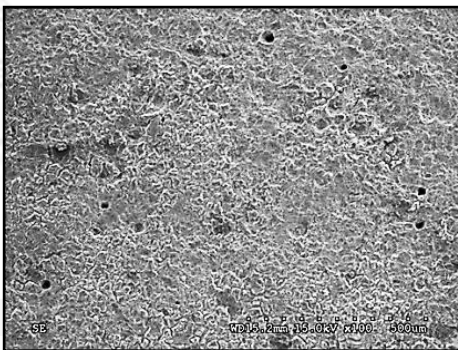
- โครงสร้างมหภาคภายหลังการทดสอบโดยเทคนิคโพเทนซิโอดีนามิกส์

ชิ้นงาน	โครงสร้างมหภาคจากกล้อง DINO ทดสอบโดยโพเทนซิโอดีนามิกส์	
	ก่อนทดสอบ	หลังทดสอบ
AR		
DP		
DPE		

ภาพที่ 4.42 โครงสร้างมหภาคของชิ้นงาน H13 ที่ผ่านการสูญเสียคาร์บอนที่ผิวก่อนทำการปรับปรุงผิว ก่อนและหลังทดสอบการกัดกร่อนโดยเทคนิคโพเทนซิโอดีนามิกส์

จากภาพที่ 4.42 เมื่อพิจารณาโครงสร้างมหภาคของชิ้นงาน H13 ที่ผ่านการสูญเสียคาร์บอนที่ผิวก่อนทำการปรับปรุงผิว ก่อนและหลังการทดสอบทดสอบการกัดกร่อนโดยเทคนิคโพเทนชิโอดีนามิกส์ จะพบว่าโครงสร้างมหภาคภายหลังการทดสอบชิ้นงาน H13 ที่ไม่ได้ทำการปรับปรุงผิว มีผิวที่มีความเรียบสูง ไม่ปรากฏบริเวณที่ขรุขระ มีพื้นผิวสีเทาซึ่งเป็นสีของเนื้อพื้นเหล็ก แต่ความเงาเป็นกระจกได้หายไป ซึ่งกล่าวได้ว่า ชิ้นงาน H13 ที่ไม่ได้ทำการปรับปรุงผิวเกิดการกัดกร่อนแบบทั่วผิวหน้า (uniform corrosion) เมื่อพิจารณาโครงสร้างมหภาคภายหลังการทดสอบชิ้นงาน H13 ที่ผ่านการสูญเสียคาร์บอนที่ผิวตามด้วยการทำไนตรายดิงแบบพลาสมา มีลักษณะใกล้เคียงกับ H13 ที่ทำไนตรายดิงแบบพลาสมา การพบว่าพื้นผิวของชิ้นงานถูกกัดกร่อนหลายบริเวณ โดยเหลือบางบริเวณที่ไม่เกิดการกัดกร่อน ซึ่งยังคงสภาพของพื้นผิวหน้าแบบเดิมผิวมีความขรุขระปานกลาง เมื่อตรวจสอบในบริเวณที่เกิดการกัดกร่อนซึ่งมีพื้นที่มาก จะพบว่ามีพื้นผิวสีเทาของเนื้อพื้นเหล็กเช่นเดียวกันกับ H13 ที่ไม่ได้ทำการปรับปรุงผิว ซึ่งกล่าวได้ว่า ชิ้นงาน H13 ที่ผ่านการสูญเสียคาร์บอนที่ผิวตามด้วยการทำไนตรายดิงแบบพลาสมา เกิดการกัดกร่อนแบบทั่วผิวหน้า (uniform corrosion) เช่นเดียวกัน เมื่อพิจารณาโครงสร้างมหภาคภายหลังการทดสอบชิ้นงาน H13 ที่ผ่านการสูญเสียคาร์บอนที่ผิวตามด้วยการทำไนตรายดิงแบบพลาสมาและตามด้วยการชุบโครเมียมด้วยไฟฟ้า จะพบว่าพื้นผิวมีลักษณะเดียวกับ H13 ที่ไม่ได้ทำการปรับปรุงผิว กล่าวคือ มีผิวที่มีความเรียบสูง ไม่ปรากฏบริเวณที่ขรุขระ มีพื้นผิวสีเทาซึ่งเป็นสีของเนื้อพื้นเหล็ก แต่ความเงาเป็นกระจกได้หายไป ซึ่งกล่าวได้ว่า ชิ้นงาน H13 ที่ผ่านการสูญเสียคาร์บอนที่ผิวตามด้วยการทำไนตรายดิงแบบพลาสมาและตามด้วยการชุบโครเมียมด้วยไฟฟ้า เกิดการกัดกร่อนแบบทั่วผิวหน้า (uniform corrosion) เช่นเดียวกัน

- โครงสร้างจุลภาคภายหลังการทดสอบโดยเทคนิคโพเทนซิโอดนามิกส์

ชิ้นงาน	โครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด ทดสอบโดยโพเทนซิโอดนามิกส์	
	ก่อนทดสอบ	หลังทดสอบ
AR		
DP		
DPE		

ภาพที่ 4.43 โครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด
แสดงภาพพื้นผิวของชิ้นงาน H13 ที่ผ่านการสูญเสียคาร์บอนที่ผิวก่อนทำการปรับปรุงผิว
ก่อนและหลังทดสอบการกัดกร่อนโดยเทคนิคโพเทนซิโอดนามิกส์

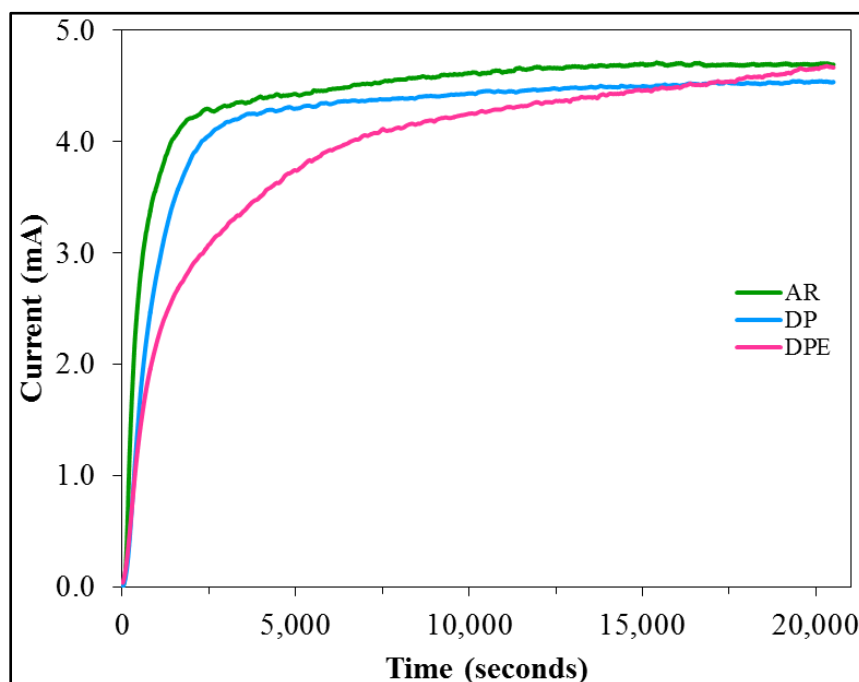
จากภาพที่ 4.43 เมื่อนำชิ้นงาน H13 ที่ผ่านการสูญเสียคาร์บอนที่ผิวก่อนทำการปรับปรุงผิว
มาทำการศึกษาเพิ่มเติม โดยพิจารณาโครงสร้างจุลภาคก่อนและหลังการทดสอบการกัดกร่อนโดย
เทคนิคโพเทนซิโอดนามิกส์จะพบว่าโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน H13 ที่ไม่ได้ทำการปรับปรุงผิว
จะพบว่า ก่อนทดสอบจะมีพื้นผิวชิ้นงานที่เรียบสูง มีความสม่ำเสมอ และหลังทดสอบพบว่าพื้นผิวเกิด
ความขรุขระขึ้นเล็กน้อย แต่ยังคงเรียบอยู่แม้จะเกิดการกัดกร่อนแล้ว ซึ่งกล่าวได้ว่า ชิ้นงาน H13

ที่ไม่ได้ทำการปรับปรุงผิว เกิดการกัดกร่อนแบบทั่วผิวหน้า (uniform corrosion) แต่เมื่อพิจารณาโครงสร้างจุลภาคภายหลังการทดสอบชิ้นงาน H13 ที่ผ่านการสูญเสียคาร์บอนที่ผิวตามด้วยการทำไนตรายดิงแบบพลาสติกจะพบว่าก่อนทดสอบมีความเรียบสูง มีอนุภาคสีขาวกระจายอยู่ทั่วทั้งผิวชิ้นงาน แต่จะพบบริเวณที่เป็นลักษณะของการแยกตัวในระดับจุลภาค (microsegregation) ซึ่งในที่นี้คาดว่า เป็นของไนตรายด์ (ที่ตรวจพบในโครงสร้างจุลภาคภาคตัดขวางในหัวข้อก่อนหน้า) มีลักษณะเป็นเส้นๆ สีเข้มกระจายตัวอยู่ทั้งพื้นผิว และหลังทดสอบพื้นผิวแบ่งออกเป็นสองบริเวณ คือบริเวณที่ไม่ถูกกัดกร่อนซึ่งมีปริมาณน้อย และบริเวณที่เกิดการกัดกร่อน ซึ่งบริเวณที่เกิดการกัดกร่อนนั้นมีพื้นผิวหลังทดสอบเช่นเดียวกับ H13 ที่ไม่ผ่านการปรับปรุงผิว กล่าวคือ ชิ้นงาน H13 ที่ผ่านการสูญเสียคาร์บอนที่ผิวตามด้วยการทำไนตรายดิงแบบพลาสติก เกิดการกัดกร่อนแบบทั่วผิวหน้า (uniform corrosion) แต่เมื่อพิจารณาโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน H13 ที่ผ่านการสูญเสียคาร์บอนที่ผิวตามด้วยการทำไนตรายดิงแบบพลาสติกและตามด้วยการชุบโครเมียมด้วยไฟฟ้า จะพบว่า ก่อนทดสอบจะมีพื้นผิวชิ้นงานที่เรียบสูง มีความสม่ำเสมอ ของชั้นเคลือบโครเมียมจนไม่เกิดการแยกตัวในระดับจุลภาค (microsegregation) เกิดขึ้นที่ผิวของชิ้นงาน และหลังทดสอบพบว่าพื้นผิวเกิดความขรุขระขึ้นเล็กน้อย แต่ยังคงเรียบอยู่แม้จะเกิดการกัดกร่อนแล้ว โดยจะพบรู (pits) จากการกัดกร่อนจำนวนน้อย และบริเวณอื่นๆ เกิดการกัดกร่อนแบบทั่วผิวหน้า ซึ่งกล่าวได้ว่า ชิ้นงาน H13 ที่ผ่านการสูญเสียคาร์บอนที่ผิวตามด้วยการทำไนตรายดิงแบบพลาสติกและตามด้วยการชุบโครเมียมด้วยไฟฟ้า เกิดการกัดกร่อนแบบทั่วผิวหน้า (uniform corrosion)

4.3.2.3 เทคนิคโพเทนชิโอสแตติก (Potentiostatics Technique)

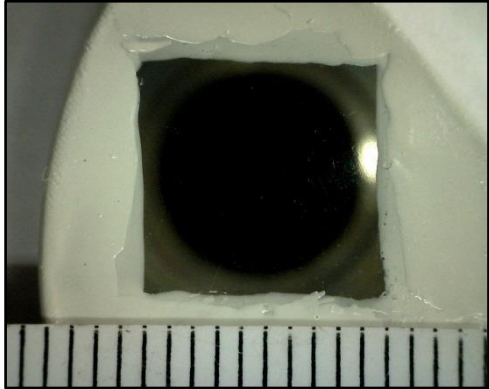
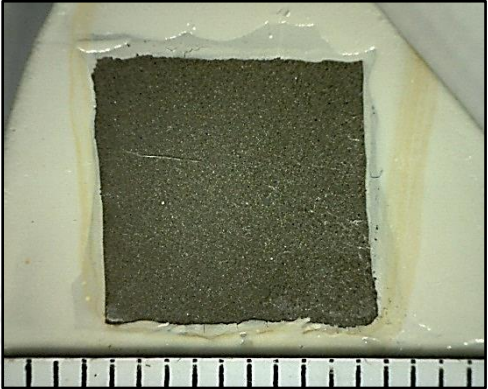
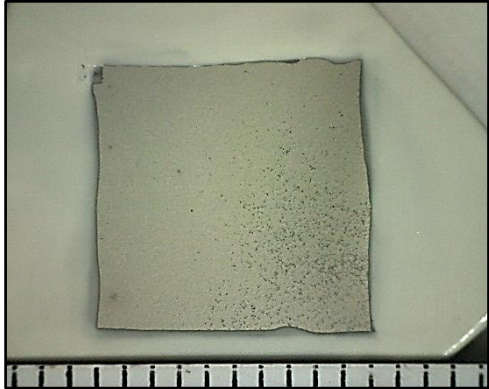
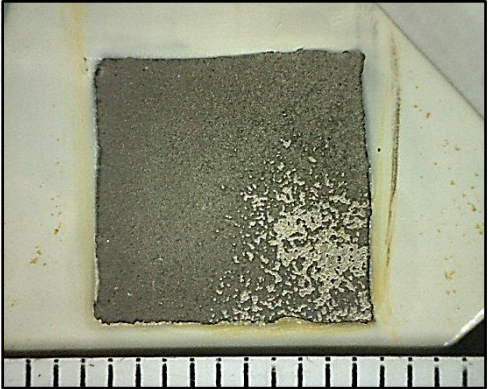
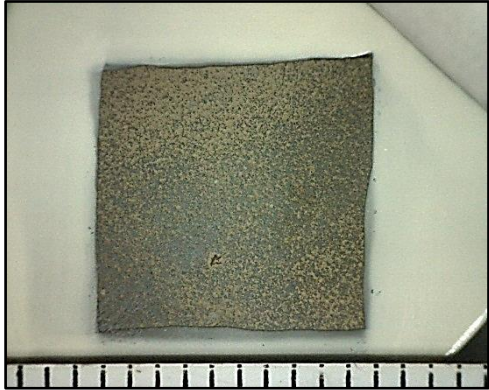
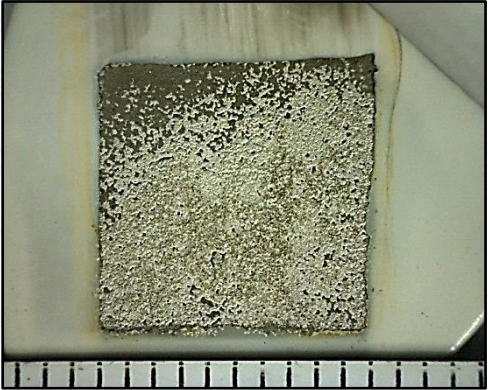
การทดสอบนี้เป็นกระบวนการทดสอบสมบัติด้านการกัดกร่อนของโลหะและวัสดุ โดยการทดสอบนี้จะมีการป้อนศักย์ไฟฟ้าทดสอบ (set potential) ที่มีค่าคงที่ตลอดการทดสอบ ซึ่งการเลือกศักย์ไฟฟ้าที่เหมาะสมนั้นจะต้องอยู่ในบริเวณแอโนดิกจากผลการทดสอบโดยเทคนิคโพเทนชิโอดนามิกส์ (potentiodynamics technique) ซึ่งเป็นการจำลองการกัดกร่อนเมื่อใช้งานที่สถานะที่มีการป้อนศักย์ไฟฟ้าคงที่กับชิ้นงาน จากการทดสอบจะได้เส้นโค้งแสดงความสัมพันธ์ของกระแสไฟฟ้า (current) หรือการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นเทียบกับเวลา (time) โดยสามารถนำผลทดสอบมาเปรียบเทียบกันในแต่ละชิ้นงานว่า มีความต้านทานการกัดกร่อนสูงกว่าเมื่อมีการป้อนศักย์ไฟฟ้าคงที่ หรือ มีกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นต่ำกว่าเมื่อมีการป้อนศักย์ไฟฟ้าคงที่ โดยในงานวิจัยทำการทดสอบโดยโพเทนชิโอสแตติกที่ศักย์ไฟฟ้าคงที่ เท่ากับ -300 และ 0 มิลลิโวลต์ (Ag-AgCl) ทดสอบเป็นเวลา 5 ชั่วโมง 30 นาที

- ทดสอบที่ -300 มิลลิโวลต์ (Ag-AgCl) ทดสอบเป็นเวลา 5 ชั่วโมง 30 นาที



ภาพที่ 4.44 เส้นโค้งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้า (current) ในแกน y กับ เวลา (time) ในแกน x เปรียบเทียบกันของชิ้นงาน H13 ที่ผ่านการสูญเสียคาร์บอนที่ผิวก่อนทำการปรับปรุงผิว ที่ทดสอบโดยเทคนิคโพเทนชิโอสแตติก โดยตั้งค่าศักย์ไฟฟ้าในการทดสอบ เท่ากับ -300 มิลลิโวลต์ (Ag-AgCl) ทดสอบเป็นเวลา 5 ชั่วโมง 30 นาที

จากภาพที่ 4.44 เมื่อทดสอบโดยเทคนิคโพเทนชิโอสแตติก ที่ศักย์ไฟฟ้าคงที่ -300 มิลลิโวลต์ (Ag-AgCl) ทดสอบเป็นเวลา 5 ชั่วโมง 30 นาที ได้เส้นโค้งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับ เวลาของชิ้นงาน H13 ที่ผ่านการสูญเสียคาร์บอนที่ผิวก่อนทำการปรับปรุงผิว พบว่าชิ้นงาน H13 ที่ไม่ได้ทำการปรับปรุงผิวนั้นมีค่ากระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นจาก 0 มิลลิแอมแปร์ในช่วงเวลาสั้นๆ (ประมาณ 2000 วินาที) จากนั้นกระแสไฟฟ้ามีค่าคงที่ตลอดการทดสอบเท่ากับ 4.5 มิลลิแอมแปร์ ซึ่งมีค่าสูงที่สุดในทุกกลุ่มชิ้นงาน เมื่อพิจารณา H13 ที่ผ่านการสูญเสียคาร์บอนที่ผิวตามด้วยการทำไนตรรายดิงแบบพลาสมา พบว่ามีค่ากระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นจาก 0 มิลลิแอมแปร์ในช่วงเวลาสั้นๆ (ประมาณ 2500 วินาที) จากนั้นกระแสไฟฟ้ามีค่าคงที่ตลอดการทดสอบเท่ากับ 4.4 มิลลิแอมแปร์ ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับ H13 ที่ไม่ได้ทำการปรับปรุงผิว เมื่อพิจารณาชิ้นงาน H13 ที่ผ่านการสูญเสียคาร์บอนที่ผิวตามด้วยการทำไนตรรายดิงแบบพลาสมาและตามด้วยการชุบโครเมียมด้วยไฟฟ้า จะพบว่ากระแสไฟฟ้าจะมีค่าเพิ่มขึ้นตลอดการทดสอบ แต่จะมีค่าน้อยกว่า H13 ที่ไม่ได้ทำการปรับปรุงผิวในช่วงแรก และมุ่งเข้าสู่ค่ากระแสไฟฟ้าของ H13 ที่ไม่ได้ทำการปรับปรุงผิว โดยค่ากระแสไฟฟ้าของชิ้นงาน H13 ที่ผ่านการสูญเสียคาร์บอนที่ผิวตามด้วยการทำไนตรรายดิงแบบพลาสมาและตามด้วยการชุบโครเมียมด้วยไฟฟ้าที่ เวลา 20000 วินาที มีค่า 4.5 มิลลิแอมแปร์

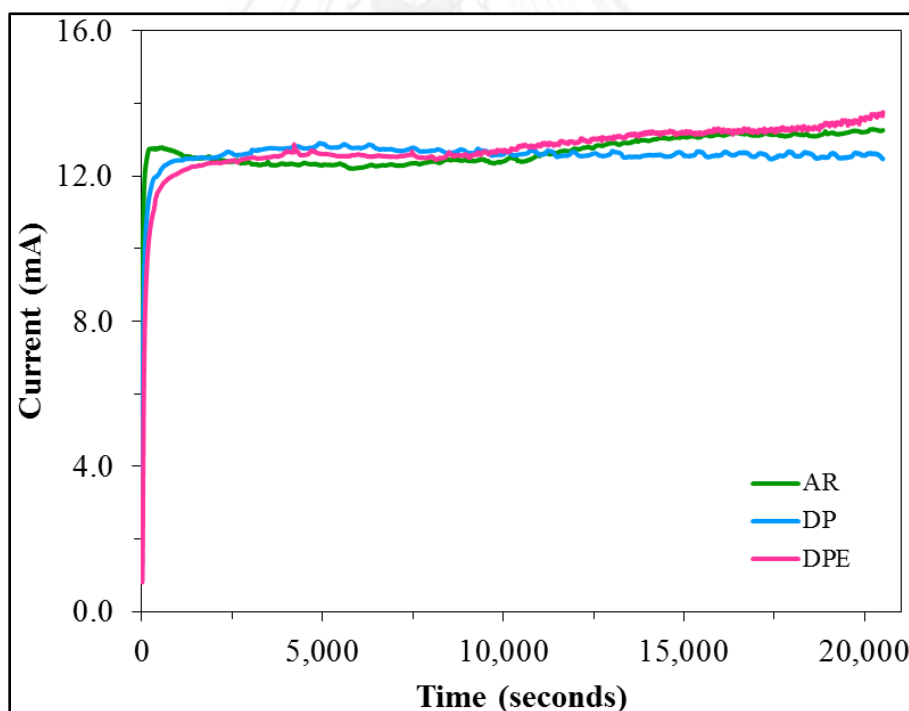
ชิ้นงาน	โครงสร้างมหภาคจากกล้อง DINO ทดสอบโดยโพเทนชิโอสแตติก	
	ก่อนทดสอบ	หลังทดสอบ
AR		
DP		
DPE		

ภาพที่ 4.45 โครงสร้างมหภาคของชิ้นงาน H13 ที่ผ่านการสูญเสียคาร์บอนที่ผิวก่อนทำการปรับปรุงผิว ก่อนและหลังทดสอบการกัดกร่อนโดยเทคนิคโพเทนชิโอสแตติก โดยตั้งค่าศักย์ไฟฟ้าในการทดสอบ เท่ากับ -300 มิลลิโวลต์ (Ag-AgCl) ทดสอบเป็นเวลา 5 ชั่วโมง 30 นาที

จากภาพที่ 4.45 เมื่อพิจารณาโครงสร้างมหภาคของชิ้นงาน H13 ที่ผ่านการสูญเสียคาร์บอนที่ผิวก่อนทำการปรับปรุงผิว ก่อนและหลังการทดสอบการกัดกร่อนโดยเทคนิคโพเทนชิโอสแตติก ที่ศักย์ไฟฟ้าคงที่ -300 มิลลิโวลต์ (Ag-AgCl) ทดสอบเป็นเวลา 5 ชั่วโมง 30 นาที จะพบว่า โครงสร้างมหภาคภายหลังการทดสอบชิ้นงาน H13 ที่ไม่ได้ทำการปรับปรุงผิว มีผิวที่เรียบ ไม่ปรากฏ

บริเวณที่ขรุขระ เกิดการกัดกร่อนทุกบริเวณ มีพื้นผิวสีเทาซึ่งเป็นสีของเนื้อพื้นเหล็ก แต่ความเงาเป็นกระจกได้หายไป ซึ่งกล่าวได้ว่า ชิ้นงาน H13 ที่ไม่ได้ทำการปรับปรุงผิว เกิดการกัดกร่อนจนไม่เหลือพื้นผิวเดิม แต่เมื่อพิจารณาโครงสร้างมหภาคภายหลังการทดสอบชิ้นงาน H13 ที่ผ่านการสูญเสียคาร์บอนที่ผิวตามด้วยการทำไนตรายดิงแบบพลาสมา จะพบว่าพื้นผิวมีผิวที่เรียบ ไม่ปรากฏบริเวณที่ขรุขระ เกิดการกัดกร่อนเป็นส่วนใหญ่ มีพื้นผิวสีเทาซึ่งเป็นสีของเนื้อพื้นเหล็ก แต่ความเงาเป็นกระจกได้หายไป มีเพียงบางบริเวณที่ไม่เกิดการกัดกร่อน คงสภาพพื้นผิวเดิม ซึ่งกล่าวได้ว่า ชิ้นงาน H13 ที่ผ่านการสูญเสียคาร์บอนที่ผิวตามด้วยการทำไนตรายดิงแบบพลาสมา เกิดการกัดกร่อนจนแทบไม่เหลือพื้นผิวเดิม เมื่อพิจารณาโครงสร้างมหภาคภายหลังการทดสอบชิ้นงาน H13 ที่ผ่านการสูญเสียคาร์บอนที่ผิวตามด้วยการทำไนตรายดิงแบบพลาสมาและตามด้วยการชุบโครเมียมด้วยไฟฟ้า จะพบว่าพื้นผิวมีผิวที่เรียบ ไม่ปรากฏบริเวณที่ขรุขระ พื้นผิวส่วนใหญ่ไม่เกิดการกัดกร่อน คงสภาพผิวเดิม แต่ก็พบบริเวณที่เกิดการกัดกร่อน มีพื้นผิวสีเทาซึ่งเป็นสีของเนื้อพื้นเหล็ก แต่ความเงาเป็นกระจกได้หายไปยังมีเพียงบางบริเวณที่ไม่เกิดการกัดกร่อน คงสภาพพื้นผิวเดิม

- ทดสอบที่ 0 มิลลิโวลต์ (Ag-AgCl) ทดสอบเป็นเวลา 5 ชั่วโมง 30 นาที

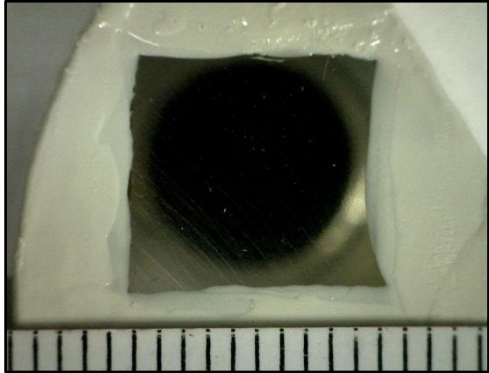
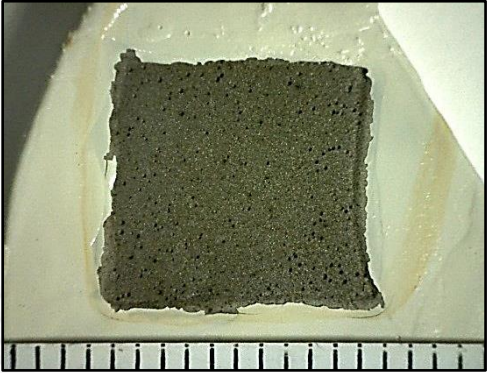
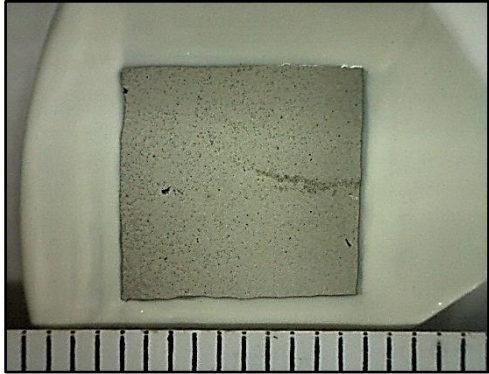
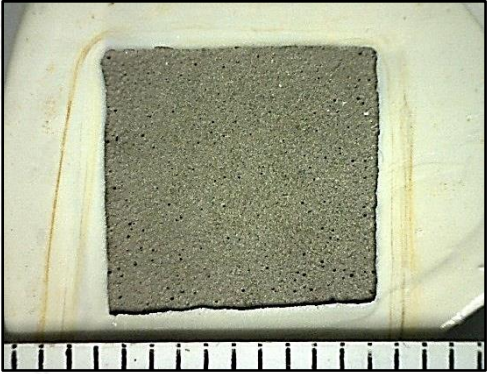
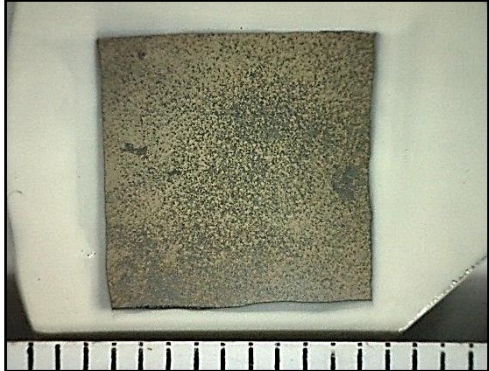



ภาพที่ 4.46 เส้นโค้งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้า (current) ในแกน y กับ เวลา (time) ในแกน x เปรียบเทียบกันของชิ้นงาน H13 ที่ผ่านการสูญเสียคาร์บอนที่ผิวก่อนทำการปรับปรุงผิว ที่ทดสอบโดยเทคนิคโพเทนชิโอสแตติก โดยตั้งค่าศักย์ไฟฟ้าในการทดสอบ เท่ากับ 0 มิลลิโวลต์ (Ag-AgCl) ทดสอบเป็นเวลา 5 ชั่วโมง 30 นาที

จากภาพที่ 4.46 เมื่อทดสอบโดยเทคนิคโพเทนชิโอสแตติก ที่ศักย์ไฟฟ้าคงที่ 0 มิลลิโวลต์ (Ag-AgCl) ทดสอบเป็นเวลา 5 ชั่วโมง 30 นาที ได้เส้นโค้งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับเวลาของชิ้นงาน H13 ที่ผ่านการสูญเสียคาร์บอนที่ผิวก่อนทำการปรับปรุงผิว โดยเมื่อเพิ่มค่าศักย์ไฟฟ้าที่ทดสอบจาก -300 เป็น 0 มิลลิโวลต์ (Ag-AgCl) จะพบว่ากระแสไฟฟ้าที่วัดได้มีค่าสูงขึ้นทุกกลุ่ม พบว่าชิ้นงานทุกกลุ่มได้ผลทดสอบที่ไม่มีความแตกต่างกัน กล่าวคือ มีค่ากระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นจาก 0 มิลลิแอมแปร์ในช่วงเวลาสั้นๆ (น้อยกว่า 500 วินาที) จากนั้นกระแสไฟฟ้ามีค่าคงที่ตลอดการทดสอบเท่ากับ 13 มิลลิแอมแปร์



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ชั้นงาน	โครงสร้างมหภาคจากกล้อง DINO ทดสอบโดยโพเทนชิโอสแตติก	
	ก่อนทดสอบ	หลังทดสอบ
AR		
DP		
DPE		

ภาพที่ 4.47 โครงสร้างมหภาคของชั้นงาน H13 ที่ผ่านการสูญเสียคาร์บอนที่ผิวก่อนทำการปรับปรุงผิว ก่อนและหลังทดสอบการกัดกร่อนโดยเทคนิคโพเทนชิโอสแตติก โดยตั้งค่าศักย์ไฟฟ้าในการทดสอบ เท่ากับ 0 มิลลิโวลต์ (Ag-AgCl) ทดสอบเป็นเวลา 5 ชั่วโมง 30 นาที

จากภาพที่ 4.47 เมื่อพิจารณาโครงสร้างมหภาคของชั้นงาน H13 ที่ผ่านการสูญเสียคาร์บอนที่ผิวก่อนทำการปรับปรุงผิว ก่อนและหลังการทดสอบทดสอบการกัดกร่อนโดยเทคนิคโพเทนชิโอสแตติก ที่ศักย์ไฟฟ้าคงที่ 0 มิลลิโวลต์ (Ag-AgCl) ทดสอบเป็นเวลา 5 ชั่วโมง 30 นาที จะพบว่า โครงสร้างมหภาคภายหลังการทดสอบชั้นงาน H13 ที่ไม่ได้ทำการปรับปรุงผิวและชั้นงาน H13 ที่ผ่านการสูญเสียคาร์บอนที่ผิวตามด้วยการทำไนตรารายดิงแบบพลาสมา มีผิวที่เรียบ ไม่ปรากฏบริเวณ

ที่ขรุขระ เกิดการกัดกร่อนทุกบริเวณ มีพื้นผิวสีเทาซึ่งเป็นสีของเนื้อพื้นเหล็ก แต่ความเงาเป็นกระจก ได้หายไป ซึ่งกล่าวได้ว่า ชิ้นงาน H13 ที่ไม่ได้ทำการปรับปรุงผิว และ H13 ที่ผ่านการสูญเสียคาร์บอนที่ผิวตามด้วยการทำไนตรายดิงแบบพลาสมา เกิดการกัดกร่อนจนไม่เหลือพื้นผิวเดิม แต่เมื่อพิจารณาโครงสร้างมหภาคภายหลังการทดสอบชิ้นงาน H13 ที่ผ่านการสูญเสียคาร์บอนที่ผิวตามด้วยการทำไนตรายดิงแบบพลาสมาและตามด้วยการชุบโครเมียมด้วยไฟฟ้า จะพบว่าพื้นผิวของชิ้นงานถูกกัดกร่อนเกือบทุกบริเวณ โดยเหลือบางบริเวณที่ไม่เกิดการกัดกร่อน ซึ่งยังคงสภาพของพื้นผิวหน้าเดิม ซึ่งมีสีเข้มเป็นชั้นเคลือบโครเมียม

4.3.3 ความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติด้านการกัดกร่อนกับสมบัติทางพื้นผิวของกลุ่มชิ้นงาน H13 ที่ผ่านการสูญเสียคาร์บอนที่ผิวก่อนทำการปรับปรุงผิว

จากหัวข้อ 4.3.1 การหาคุณลักษณะทางผิว (Surface Characterization) พบว่าที่ผิวของชิ้นงาน H13 ที่ผ่านการสูญเสียคาร์บอนที่ผิวก่อนทำการปรับปรุงผิว มีสี ความแข็ง เฟสและสารประกอบที่เกิดขึ้นที่ต่างกัน โดยที่ผิวของ H13 ที่ผ่านการสูญเสียคาร์บอนที่ผิวตามด้วยการทำไนตรายดิงแบบพลาสมา และที่ผ่านการสูญเสียคาร์บอนที่ผิวตามด้วยการทำไนตรายดิงแบบพลาสมาและตามด้วยการชุบโครเมียมด้วยไฟฟ้า จะไม่เกิดชั้นผิวแข็งขึ้นที่ผิวของชิ้นงาน แต่จะเกิดเป็นสารประกอบไนตรายด์ที่มีความแข็งสูงกระจายตัวอยู่ที่ผิวชิ้นงานอย่างไม่สม่ำเสมอและมีปริมาณน้อย ซึ่งทำให้ผิวของชิ้นงานส่วนใหญ่เป็นเนื้อเหล็กที่สูญเสียคาร์บอนเป็นหลัก อาจเกิดออกไซด์ขึ้นด้วยจากการควบคุมการทำไนตรายด์ที่ผิวที่ไม่ดีพอ ต่อมาในหัวข้อ 4.3.2 เมื่อนำมาทดสอบด้านการกัดกร่อนโดยเทคนิคโพเทนชิโอสแตติก พบว่า H13 ที่ผ่านการสูญเสียคาร์บอนที่ผิวตามด้วยการทำไนตรายดิงแบบพลาสมา และ H13 ที่ผ่านการสูญเสียคาร์บอนที่ผิวตามด้วยการทำไนตรายดิงแบบพลาสมาและตามด้วยการชุบโครเมียมด้วยไฟฟ้า มีสมบัติด้านการกัดกร่อนที่แย่ง โดยส่งผลคือค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนต่ำลง กระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนสูงขึ้น อัตราการกัดกร่อนสูงขึ้น และความต้านทานโพลาไรเซชันลดลง เป็นผลมาจากชั้นโครเมียมไนตรายด์ที่เกิดมีความเค้นตกค้างอยู่มาก เกิดการแตกได้ง่าย และทำให้ปริมาณโครเมียมอิสระในเนื้อพื้น H13 มีค่าลดลง ส่งผลให้สมบัติด้านการกัดกร่อนแย่ง เกิดการกัดกร่อนแบบทั่วผิวหน้า (uniform corrosion) แต่เมื่อทดสอบด้านการกัดกร่อนโดยเทคนิคโพเทนชิโอสแตติก พบว่าชิ้นงาน H13 ที่ผ่านการสูญเสียคาร์บอนที่ผิวตามด้วยการทำไนตรายดิงแบบพลาสมาและตามด้วยการชุบโครเมียมด้วยไฟฟ้า ซึ่งมีชั้นโครเมียมบาง (Cr) อยู่ที่ผิวนั้น มีกระแสไฟฟ้าเกิดขึ้นแต่มีค่าต่ำกว่าอีกสองกลุ่ม กล่าวได้ว่า เมื่อมีชั้นโลหะที่เกิดแพสซีฟอยู่ที่ผิวของชิ้นงานจะส่งผลให้กระแสไฟฟ้าเกิดขึ้นปริมาณน้อยลง หรือ มีความต้านทานการกัดกร่อนดีขึ้นในการทดสอบโดยโพเทนชิโอสแตติก

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง และ ข้อเสนอแนะ

1. การปรับปรุงผิวชิ้นงานเหล็กกล้าเครื่องมือทำงานร้อน H13 ด้วยการทำไนตรายดิงแบบก๊าซ อ่างเกลือ และพลาสติกจะทำให้ได้ความแข็งผิวที่สูงขึ้นจากการตกตะกอนของเหล็กไนตรายด์ ($Fe_{2-3}N$) ที่ผิวของชิ้นงาน แต่ในขณะเดียวกันก็จะส่งผลกระทบต่อสมบัติด้านการกัดกร่อนของ H13 อีกด้วย กล่าวคือ เมื่อทดสอบหาสมบัติด้านการกัดกร่อนด้วยเทคนิคโพเทนชิโอสแตติก จะพบว่าชิ้นงานที่ทำไนตรายดิงแบบต่างๆ จะทำให้ค่าพารามิเตอร์การกัดกร่อนแย่งทุกตัว (ศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน ความต้านทานโพลาไรเซชัน และอัตราการกัดกร่อน) แต่เมื่อพิจารณาประกอบกับโครงสร้างจุลภาค จะพบว่าชิ้นงานที่มีชั้นสารประกอบอยู่ที่ผิว (ทำไนตรายดิงแบบก๊าซ และอ่างเกลือ) จะทำให้เกิดการกัดกร่อนแบบในซอก (crevice corrosion) ของรูพรุนระดับจุลภาคที่ผิวชิ้นงานภายหลังทำไนตรายดิง ส่งผลให้ศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนมีค่าลดลงอย่างมาก ขณะที่ชิ้นงานที่ไม่มีชั้นสารประกอบ (ทำไนตรายดิงแบบพลาสติก) จะเกิดการกัดกร่อนแบบทั่วผิวหน้า (uniform corrosion) และศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนมีค่าลดลงเล็กน้อย แต่เมื่อทำการทดสอบด้วยเทคนิคโพเทนชิโอสแตติก ซึ่งเป็นการทดสอบที่ป้อนศักย์ไฟฟ้าคงที่ พบว่าชิ้นงานที่มีสารประกอบที่ผิวจะเกิดกระแสไฟฟ้าที่ต่ำกว่าชิ้นงานที่ไม่มีชั้นสารประกอบ กล่าวคือมีความต้านทานการกัดกร่อนสูงกว่า เนื่องจากชั้นสารประกอบเป็นชั้นเซรามิกที่มีความต้านทานทางไฟฟ้าสูง และการทดสอบจะคำนึงถึงสัดส่วนโดยพื้นที่เป็นสำคัญ ทำให้ผลของรูพรุนระดับจุลภาคที่ผิวชิ้นงานไม่ส่งผลเสียในการทดสอบด้วยเทคนิคนี้
2. การเพิ่มกระบวนการปรับปรุงผิวด้วยการชุบโครเมียมด้วยไฟฟ้าหรือการสูญเสียคาร์บอนที่ผิว ร่วมกับการทำไนตรายดิงแบบพลาสติกจะส่งผลกระทบต่อสมบัติของชิ้นงาน H13 ดังนี้
 - 2.1 การชุบโครเมียมด้วยไฟฟ้าก่อนทำไนตรายดิงแบบพลาสติก จะทำให้เกิดเป็นชั้นโครเมียมไนตรายด์ที่ผิว ทำให้อะตอมไนโตรเจนแพร่เข้าไปในเนื้อพื้นได้ช้ามาก ทำให้ไม่เกิดการตกตะกอนของอนุภาคไนตรายด์ ส่งผลให้ความแข็งผิวไม่เพิ่มขึ้น เมื่อทดสอบด้วยโพเทนชิโอสแตติก สมบัติด้านการกัดกร่อนก็จะแย่ง แต่เมื่อทดสอบด้วยโพเทนชิโอสแตติก สมบัติการต้านกัดกร่อนก็จะดีขึ้นเล็กน้อย เทียบกับ H13 ที่ไม่ได้ปรับปรุงผิว
 - 2.2 การชุบโครเมียมด้วยไฟฟ้าหลังทำไนตรายดิงแบบพลาสติก จะทำให้เกิดเป็นชั้นโครเมียมที่ผิวช่วยเพิ่มความต้านทานการกัดกร่อน ได้ความแข็งผิวเพิ่มจากการทำไนตรายดิงแบบพลาสติก เมื่อทดสอบด้วยโพเทนชิโอสแตติก สมบัติด้านการกัดกร่อนก็จะแย่งเล็กน้อย แต่เมื่อทดสอบด้วยโพเทนชิโอสแตติก สมบัติด้านการกัดกร่อนก็จะดีขึ้น เทียบกับ H13 ที่ไม่ได้ปรับปรุงผิว
 - 2.3 การสูญเสียคาร์บอนที่ผิวก่อนทำไนตรายดิงแบบพลาสติก จะทำให้ไม่เกิดชั้นผิวแข็ง พบการเกิดออกไซด์ที่ผิวของชิ้นงาน ทำให้อะตอมไนโตรเจนแพร่ได้ช้า ความแข็งผิวไม่เพิ่มขึ้น

เมื่อทดสอบด้วยโพเทนชิโอสแตติกและโพเทนชิโอสแตติก สมบัติด้านการกัดกร่อนก็จะแย่งเทียบกับ H13 ที่ไม่ได้ปรับปรุงผิว

3. ข้อเสนอแนะ สำหรับการท่วิจัยในอนาคต

3.1 การปรับปรุงผิวชิ้นงานเครื่องมือเหล็กกล้าทำงานร้อน H13 ด้วยการทำไนตรายดิงแบบต่างๆ ควรจะพิจารณาถึงโครงสร้างจุลภาคเป็นสำคัญ ซึ่งจะส่งผลต่อสมบัติทางกลและความต้านทานการกัดกร่อน โดยจะต้องทำให้ที่ผิวของชิ้นงานไม่มีชั้นสารประกอบเกิดขึ้น หรือ มีชั้นสารประกอบที่ไม่มีรูพรุน เพื่อให้ได้ความต้านทานการกัดกร่อนที่แย่งเล็กน้อยหรือดีขึ้น เทียบกับ H13 ที่ไม่ทำการปรับปรุงผิว

3.2 การทำไนตรายดิงแบบพลาสมาเป็นการปรับปรุงผิวที่เหมาะสมสำหรับการท่วิจัยในอนาคต เนื่องจากเป็นกระบวนการที่สามารถทำซ้ำได้จากการกำหนดค่าพารามิเตอร์การทำไนตรายดิง อีกทั้งยังกำหนดโครงสร้างจุลภาคที่ผิวของชิ้นงานได้อีกด้วย เช่น บังคับให้เกิดชั้นสารประกอบหรือไม่เกิดชั้นสารประกอบก็ได้ สามารถนำไปออกแบบการท่วิจัยได้หลากหลายวิธีมากขึ้น เพื่อให้ได้มาซึ่งกระบวนการปรับปรุงผิวที่เพิ่มสมบัติทางกลและเพิ่มความต้านทานการกัดกร่อน

3.3 การชุบโครเมียมด้วยไฟฟ้าโดยตรงลงบนชิ้นงานในงานท่วิจัยนี้ อาจจะไม่เหมาะสมเนื่องจากชั้นโครเมียมที่ผิวจะมีตำหนิ (defects) เช่น รอยแตก (cracks) เป็นต้น ซึ่งจะทำให้ชั้นโครเมียมที่ผิวไม่ทำหน้าที่เป็นชั้นฟิล์มป้องกันผิวชิ้นงานจากการกัดกร่อน โดยงานท่วิจัยในอนาคตสามารถเลือกวิธีการชุบโครเมียมด้วยไฟฟ้าภายหลังการชุบทองแดงด้วยไฟฟ้าหรือการชุบนิเกิลด้วยไฟฟ้า เนื่องจากจะช่วยคลุมผิวได้สม่ำเสมอว่าการชุบโดยตรง และต้องพิจารณาถึงความหนาและโครงสร้างจุลภาคที่เกิดขึ้นที่ผิวด้วย ซึ่งจะส่งผลต่อความต้านทานการกัดกร่อน

3.4 สำหรับงานท่วิจัยในอนาคต การสูญเสียคาร์บอนที่ผิวเป็นกระบวนการที่มีความน่าสนใจ เนื่องจากสามารถลดปริมาณธาตุคาร์บอนที่ผิวได้จากการสลายตัวของคาร์ไบด์ ทำให้โครงสร้างจุลภาคที่ผิวของชิ้นงานเปลี่ยนไป อาจก่อให้เกิดผลดีต่อการทำไนตรายดิงแบบพลาสมาในสมบัติทางกลและความต้านทานการกัดกร่อน แต่สิ่งสำคัญในเมื่อทำการสูญเสียคาร์บอนที่ผิวคือจะต้องควบคุมบรรยากาศสูญเสียคาร์บอนไม่ให้เกิดการปนเปื้อน อีกทั้งยังต้องทำการสูญเสียคาร์บอนที่ผิวในบรรยากาศอื่นๆ เพื่อหาบรรยากาศที่เหมาะสมเพื่อปรับปรุงผิวชิ้นงาน

รายการอ้างอิง

- [1] George Roberts, George Krauss, Richard Kennedy, Tool Steels, ASM International, 1998.
- [2] George E. Totten, Steel Heat Treatment, Metallurgy and Technologies, CRC Press, 2006.
- [3] ASTM Standard, A681 - 94 : Specification for Tool Steels Alloy, ASTM International, West Conshohocken, PA 19428-2959, United States., 1999.
- [4] รองศาสตราจารย์ มนต์ สติรจินดา, วิศวกรรมการอบชุบเหล็ก, วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์, กรุงเทพมหานคร, พ.ศ.2537.
- [5] MatWeb LLC., AISI Type H13 Hot Work Tool Steel, Blacksburg, VA 24060 USA.
- [6] David Pye, Practical Nitriding and Ferritic Nitrocarburizing, ASM International, Materials Park, Ohio 44073-0002, United States., 2003.
- [7] Nasser Kanani, in: Nasser Kanani (Ed.), Electroplating, Elsevier, Oxford, 2004, pp. 87-140.
- [8] C.G. Zoski, Handbook of Electrochemistry, Elsevier, 2007.
- [9] Mordechai Schlesinger, Milan Paunovic, Modern Electroplating, John Wiley & Sons, Inc., 2000.
- [10] อนันต์ ทองมอญ, ชุบโลหะด้วยไฟฟ้า, สำนักพัฒนาอุตสาหกรรมสนับสนุน, กรุงเทพมหานคร, พ.ศ. 2544.
- [11] Oliver C. Ralston, Iron Oxide Reduction Equilibria: A Critique from the Standpoint of the Phase Rule and Thermodynamics, 1929.
- [12] Numan R. Stansel, Industrial electric heating, John Wiley & Sons, Inc., 1933.
- [13] John A. Webber, Furnace Atmospheres and Decarburizing, American Society for Metals, 1938.
- [14] G. Parrish, G.S. Harper, in: G. Parrish, G.S. Harper (Eds.), Production Gas Carburizing, Pergamon, 1985, pp. 26-41.
- [15] Geoffrey Parrish, Carburizing: Microstructures and Properties, ASM International, 1999.
- [16] ชุติพรย์ ป่าไร่, การหาคุณลักษณะของเหล็กกล้าเครื่องมือ H13 ที่ทำไนตรายดิงแบบพลาสมา, ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, พ.ศ.2548.
- [17] Samuel A. Bradford, Corrosion Control Van Nostrand Reinhold, 1993.
- [18] Denny A. Jones, Principles and prevention of corrosion, Prentice Hall, 1996.
- [19] Philip A . Schweitzer, in, Fundamentals of Corrosion, CRC Press, 2009, pp. 5-26.
- [20] ศิริลักษณ์ นิรัฐจรรยา, การกัดกร่อนและการเลือกใช้วัสดุ, กองบริการการศึกษา สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, กรุงเทพมหานคร, พ.ศ.2545.

- [21] M.G. Fontana, Corrosion engineering, McGraw-Hill, 1986.
- [22] R.L.O. Basso, H.O. Pastore, V. Schmidt, I.J.R. Baumvol, S.A.C. Abarca, F.S. de Souza, A. Spinelli, C.A. Figueroa, C. Giacomelli, Corrosion Science 52 (2010) 3133-3139.
- [23] N. Corlett, L.E. Eiselstein, N. Budiansky, in: B. Cottis, M. Graham, R. Lindsay, S. Lyon, T. Richardson, D. Scantlebury, H. Stott (Eds.), Shreir's Corrosion, Elsevier, Oxford, 2010, pp. 753-771.
- [24] BryCoat Inc., Chromium Nitride (CrN) PVD Coating, Oldsmar, Florida 34677.
- [25] J. Pina, A. Dias, M. François, J.L. Lebrun, Surface and Coatings Technology 96 (1997) 148-162.
- [26] C.A. Huang, W. Lin, M.J. Liao, Corrosion Science 48 (2006) 460-471.
- [27] K.H. Thulasi Raman, M.S.R.N. Kiran, U. Ramamurty, G. Mohan Rao, Materials Research Bulletin 47 (2012) 4463-4466.
- [28] D.A. Jones, Principles and prevention of corrosion, Prentice Hall, 1996.
- [29] อธิพิล เตี้ยวณิชย์, การทดสอบความแข็งและการทดสอบการกระแทก, สถาบันเหล็กและเหล็กกล้าแห่งประเทศไทย, โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรุงเทพฯ, พ.ศ. 2550, 1-44.



ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก ก
การหามวลสมมูล (Equivalent Weight) ของ H13

การหาค่า Equivalent weight (EQ) ของ H13 หาได้จากสูตร [28]

$$N_{EQ} = \sum \left(\frac{f_i}{a_i/n_i} \right) = \sum \left(\frac{f_i n_i}{a_i} \right)$$

โดยที่ f_i คือ สัดส่วนมวลของธาตุผสม

n_i คือ จำนวนอิเล็กตรอนที่แลกเปลี่ยนของธาตุผสม

a_i คือ น้ำหนักอะตอมของธาตุผสม

โดย H13 มีส่วนผสม คือ

ไอออน หรือธาตุ	C	Mn ²⁺	P	S	Si	Cr ³⁺	V ³⁺	Mo ³⁺
% โดย น้ำหนัก	0.32– 0.45	0.2– 0.6	0.03 max	0.03 max	0.8– 1.25	4.75– 5.50	0.8– 1.2	1.10– 1.75

แทนค่าในสูตร จะได้

$$\therefore N_{EQ} = \frac{(\%Mn)(2)}{(54.94)} + \frac{(\%Cr)(3)}{(52.00)} + \frac{(\%V)(3)}{(50.94)} + \frac{(\%Mo)(3)}{(95.94)} + \frac{(\%Fe)(2)}{(55.85)}$$

$$\therefore EQ = (N_{EQ})^{-1}$$

กรณี ธาตุผสม min $N_{EQ} = 0.0369855 \quad \therefore EQ = 27.0376$

กรณี ธาตุผสม max $N_{EQ} = 0.0372148 \quad \therefore EQ = 26.8710$

เฉลี่ย $EQ \approx 26.95$

$$\rho = 7.8 \text{ g/cm}^3$$

ภาคผนวก ข
การวัดความแข็งผิวแบบไมโครวิกเกอร์

การทดสอบแบบไมโครวิกเกอร์ [29] แปลงผลค่าความแข็งจากอัตราส่วนของน้ำหนักที่ใช้กดต่อพื้นที่รอยกด โดยหัวกดมีรูปร่างจตุรัสทำจากเพชร มุมระหว่างหน้าพีระมิดด้านที่ตรงกันข้ามจะเท่ากับ 136 องศา สามารถคำนวณค่าความแข็งแบบวิกเกอร์ (HV) ได้จากสูตร

$$HV = \frac{2P \sin(136^\circ/2)}{d^2} = 1.8544 \frac{P}{d^2}$$

โดยที่ P คือ น้ำหนักที่ใช้กด ในหน่วยกิโลกรัม

d คือ ขนาดเส้นทแยงมุมของรอยกดรูปทรงสี่เหลี่ยมจตุรัสในหน่วยมิลลิเมตร

หาได้จากสูตร

$$d = \frac{d_1 + d_2}{2}$$

โดยที่ d_1 และ d_2 คือเส้นทแยงมุมที่วัดได้จากรอยกดในสองแนวซึ่งทำมุมกัน 90 องศา

จากการวัดค่า d_1 และ d_2 ของชิ้นงานต่างๆ ด้วยน้ำหนักกด 50 กรัม และคำนวณเป็นค่าความแข็งที่ผิวและระยะลึกต่างๆ แบบวิกเกอร์ ดังแสดงในตารางดังต่อไปนี้

ข้อมูลดิบ การวัดความแข็งของชิ้นงานด้วยเครื่องไมโครวิกเกอร์
 AR : ชิ้นงาน H13 ที่ไม่ทำการปรับปรุงผิว
 ทำการกดด้วยน้ำหนัก 50 กรัม ใช้เวลาทดสอบ 15 วินาที

X (μm)	d ₁ (μm)	d ₂ (μm)	Hardness (HV _{0.05})
0	11.33	11.53	709.7
	11.46	11.55	700.5
	11.60	11.49	695.6
	11.46	11.44	707.2
	11.53	11.35	708.5
20	11.75	11.68	675.6
40	11.71	11.82	669.9
60	11.88	11.86	658.1
80	11.84	12.09	647.7
100	11.97	11.91	650.4
120	11.82	11.91	658.6
140	11.81	11.96	656.4
160	11.94	11.85	655.3
180	11.80	11.91	659.7
200	11.84	11.95	655.3
240	11.87	12.06	647.7
280	11.85	11.81	662.5
320	11.80	11.84	663.6
360	11.99	12.00	644.4
400	11.89	11.94	653.1
440	11.82	11.97	655.3
480	11.76	11.94	660.3

ข้อมูลดิบ การวัดความแข็งของชิ้นงานด้วยเครื่องไมโครวิกเกอร์
 AG : ชิ้นงาน H13 ที่ผ่านการทำไนตรายดิงแบบก๊าซ
 ทำการกดด้วยน้ำหนัก 50 กรัม ใช้เวลาทดสอบ 15 วินาที

X (μm)	D ₁ (μm)	D ₂ (μm)	Hardness (HV _{0.05})
0	9.04	9.24	1109.9
	9.02	9.33	1101.4
	9.16	9.20	1100.2
	9.25	9.17	1093.1
	9.29	9.10	1096.7
20	9.71	9.75	979.4
40	10.54	10.51	837.0
60	11.21	11.50	719.1
80	11.55	11.84	677.9
100	11.91	12.16	640.1
120	12.07	12.03	638.6
140	11.84	11.92	657.0
160	11.96	11.95	648.7
180	12.12	12.04	635.4
200	11.92	12.01	647.7
240	12.06	11.87	647.7
280	11.87	11.91	655.9
320	11.86	12.06	648.2
360	11.89	12.01	649.3
400	11.83	12.02	652.0
440	12.07	11.92	644.4
480	11.88	11.95	653.1

ข้อมูลดิบ การวัดความแข็งของชิ้นงานด้วยเครื่องไมโครวิกเกอร์
 AS : ชิ้นงาน H13 ที่ผ่านการทำไนตรายดิงแบบอ่างเกลือ
 ทำการกดด้วยน้ำหนัก 50 กรัม ใช้เวลาทดสอบ 15 วินาที

X (μm)	D ₁ (μm)	D ₂ (μm)	Hardness (HV _{0.05})
0	8.58	8.62	1253.7
	8.64	8.57	1252.2
	8.67	8.70	1229.2
	8.78	8.70	1213.8
	8.82	8.65	1215.2
20	9.15	9.47	1069.7
40	10.08	10.36	887.7
60	11.17	11.37	730.0
80	11.87	11.91	655.9
100	11.89	12.10	644.4
120	12.08	11.98	640.7
140	11.92	11.97	649.8
160	12.00	11.86	651.5
180	12.02	11.82	652.6
200	11.86	12.03	649.8
240	11.96	11.89	652.0
280	11.80	12.02	653.7
320	11.91	12.07	645.0
360	11.96	11.80	657.0
400	11.73	11.86	666.5
440	11.89	11.83	659.2
480	11.86	11.88	658.1

ข้อมูลดิบ การวัดความแข็งของชิ้นงานด้วยเครื่องไมโครวิกเกอร์
 AP : ชิ้นงาน H13 ที่ผ่านการทำไนตรายดิงแบบพลาสมา
 ทำการกดด้วยน้ำหนัก 50 กรัม ใช้เวลาทดสอบ 15 วินาที

X (μm)	D ₁ (μm)	D ₂ (μm)	Hardness (HV _{0.05})
0	8.02	8.09	1429.0
	8.08	8.14	1409.7
	8.18	8.06	1406.2
	8.21	8.17	1382.3
	8.24	8.18	1375.6
20	8.55	8.71	1244.9
40	9.14	9.33	1087.2
60	9.62	9.71	992.6
80	9.86	9.97	943.2
100	10.36	10.38	862.2
120	11.13	10.91	763.5
140	11.59	11.41	701.1
160	11.90	12.06	646.0
180	11.97	11.97	647.1
200	12.15	12.02	634.9
240	11.91	12.12	642.3
280	12.02	12.10	637.5
320	12.09	11.98	640.1
360	11.87	11.88	657.5
400	12.03	12.00	642.3
440	12.18	11.97	635.9
480	11.92	11.93	652.0

ข้อมูลดิบ การวัดความแข็งของชิ้นงานด้วยเครื่องไมโครวิกเกอร์
 EP : ชิ้นงาน H13 ที่ผ่านการชุบโครเมียมด้วยไฟฟ้าตามด้วยการทำไนตรายดิงแบบพลาสมา
 ทำการกดด้วยน้ำหนัก 50 กรัม ใช้เวลาทดสอบ 15 วินาที

X (μm)	D ₁ (μm)	D ₂ (μm)	Hardness (HV _{0.05})
0	11.60	11.77	679.1
	11.55	11.69	686.7
	11.67	11.53	689.1
	11.53	11.73	685.5
	11.61	11.74	680.2
20	11.81	12.26	640.1
40	11.92	11.94	651.5
60	11.88	12.16	641.7
80	11.86	12.09	646.6
100	12.07	12.06	637.0
120	11.96	12.03	644.4
140	11.89	12.14	642.3
160	11.91	12.13	641.7
180	11.99	12.19	634.3
200	11.84	12.08	648.2
240	12.15	12.05	633.3
280	11.91	12.15	640.7
320	11.81	12.16	645.5
360	12.04	12.13	634.9
400	11.92	12.15	640.1
440	12.05	12.01	640.7
480	12.06	12.13	633.8

ข้อมูลดิบ การวัดความแข็งของชิ้นงานด้วยเครื่องไมโครวิกเกอร์
 PE : ชิ้นงาน H13 ที่ผ่านการทำไนตรายดิงแบบพลาสมาตามด้วยการชุบโครเมียมด้วยไฟฟ้า
 ทำการกดด้วยน้ำหนัก 50 กรัม ใช้เวลาทดสอบ 15 วินาที

X (μm)	D ₁ (μm)	D ₂ (μm)	Hardness (HV _{0.05})
0	8.12	7.98	1430.8
	8.04	8.10	1423.7
	8.11	8.07	1416.7
	7.95	8.11	1437.9
	8.00	8.13	1425.5
20	8.33	8.82	1261.0
40	8.88	9.38	1112.3
60	9.50	9.58	1018.8
80	9.94	9.74	957.6
100	10.32	10.22	879.1
120	11.18	10.83	765.6
140	11.41	11.56	702.9
160	12.00	11.85	652.0
180	11.59	12.09	661.4
200	11.60	12.00	665.9
240	11.98	11.85	653.1
280	11.81	11.85	662.0
320	11.63	12.13	657.0
360	12.13	11.86	644.4
400	11.99	12.07	640.7
440	12.15	11.83	645.0
480	11.97	11.82	655.3

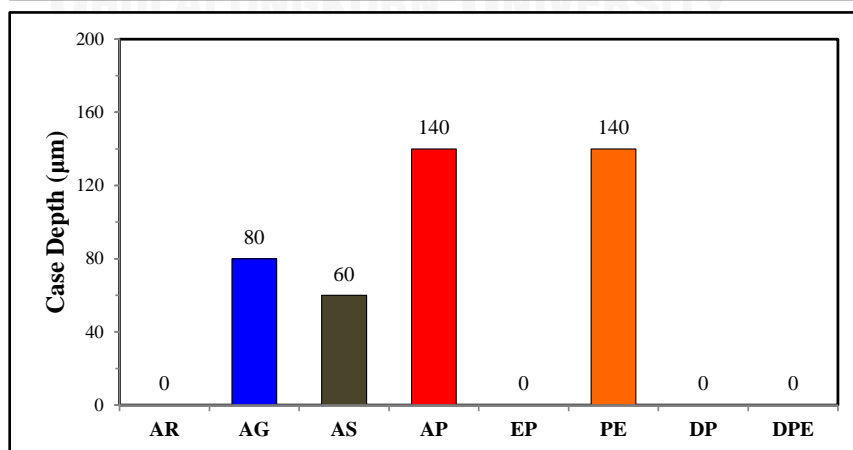
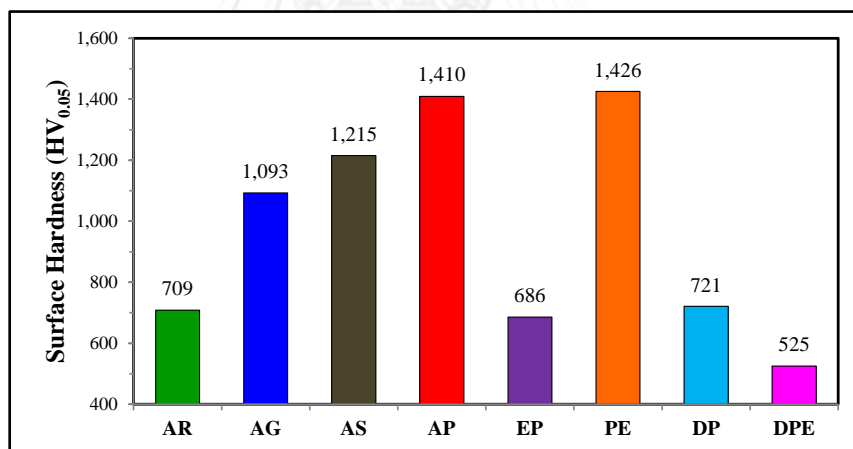
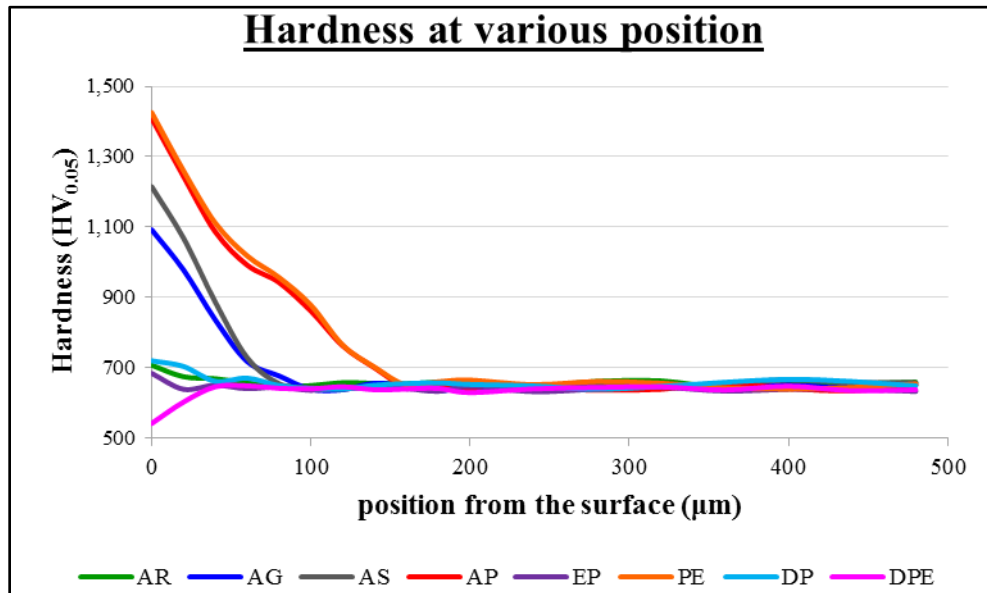
ข้อมูลดิบ การวัดความแข็งของชิ้นงานด้วยเครื่องไมโครวิกเกอร์
 DP : ชิ้นงาน H13 ที่ผ่านการสูญเสียคาร์บอนที่ผิวตามด้วยการทำไนตรายดิงแบบพลาสมา
 ทำการกดด้วยน้ำหนัก 50 กรัม ใช้เวลาทดสอบ 15 วินาที

X (μm)	D ₁ (μm)	D ₂ (μm)	Hardness (HV _{0.05})
0	11.39	11.41	713.5
	11.41	11.56	702.9
	11.59	11.14	701.1
	11.37	11.17	730.0
	11.36	11.32	721.0
20	10.95	11.99	704.8
40	11.58	12.08	662.5
60	11.39	12.11	671.6
80	11.73	12.15	650.4
100	11.77	12.26	642.3
120	11.78	12.28	640.7
140	11.99	11.87	651.5
160	11.68	12.10	655.9
180	11.70	12.04	658.1
200	11.61	12.21	653.7
240	11.73	12.17	649.3
280	11.55	12.52	640.1
320	11.43	12.49	648.2
360	11.25	12.46	659.7
400	11.33	12.23	668.2
440	11.39	12.28	662.0
480	11.62	12.27	649.8

ข้อมูลดิบ การวัดความแข็งของชิ้นงานด้วยเครื่องไมโครวิกเกอร์
 DPE : ชิ้นงาน H13 ที่ผ่านการสูญเสียคาร์บอนที่ผิวตามด้วยการทำไนตรายดิงแบบพลาสมา
 และตามด้วยการชุบโครเมียมด้วยไฟฟ้า
 ทำการกดด้วยน้ำหนัก 50 กรัม ใช้เวลาทดสอบ 15 วินาที

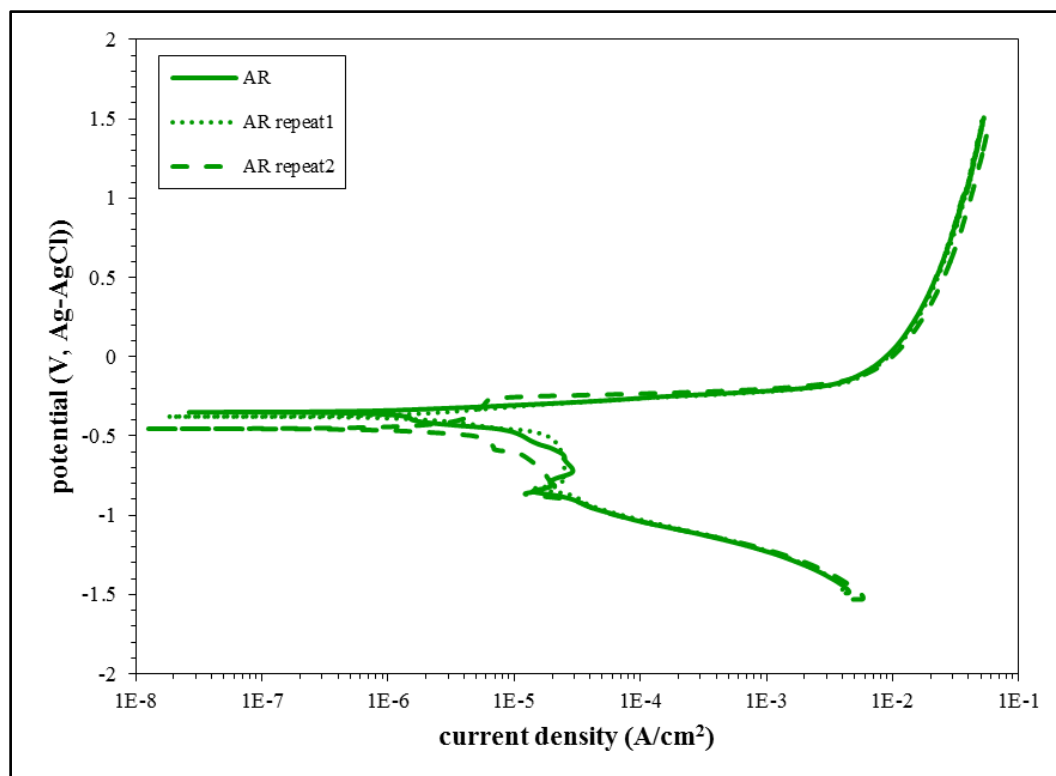
X (μm)	D ₁ (μm)	D ₂ (μm)	Hardness (HV _{0.05})
0	12.85	13.29	542.8
	12.41	13.97	532.9
	13.03	13.18	539.9
	12.96	13.35	535.8
	12.94	13.38	535.4
20	12.20	12.59	603.5
40	11.82	12.12	647.1
60	11.70	12.19	649.8
80	12.02	12.00	642.8
100	11.92	12.13	641.2
120	11.90	12.04	647.1
140	11.98	12.12	638.6
160	12.03	12.03	640.7
180	11.91	12.12	642.3
200	12.06	12.19	630.7
240	12.13	11.92	641.2
280	11.91	12.07	645.0
320	11.88	12.07	646.6
360	11.99	12.12	638.0
400	11.94	11.97	648.7
440	12.05	12.10	635.9
480	12.06	12.04	638.6

ภาคผนวก ค
เปรียบเทียบความแข็งผิวแบบไมโครวิกเกอร์

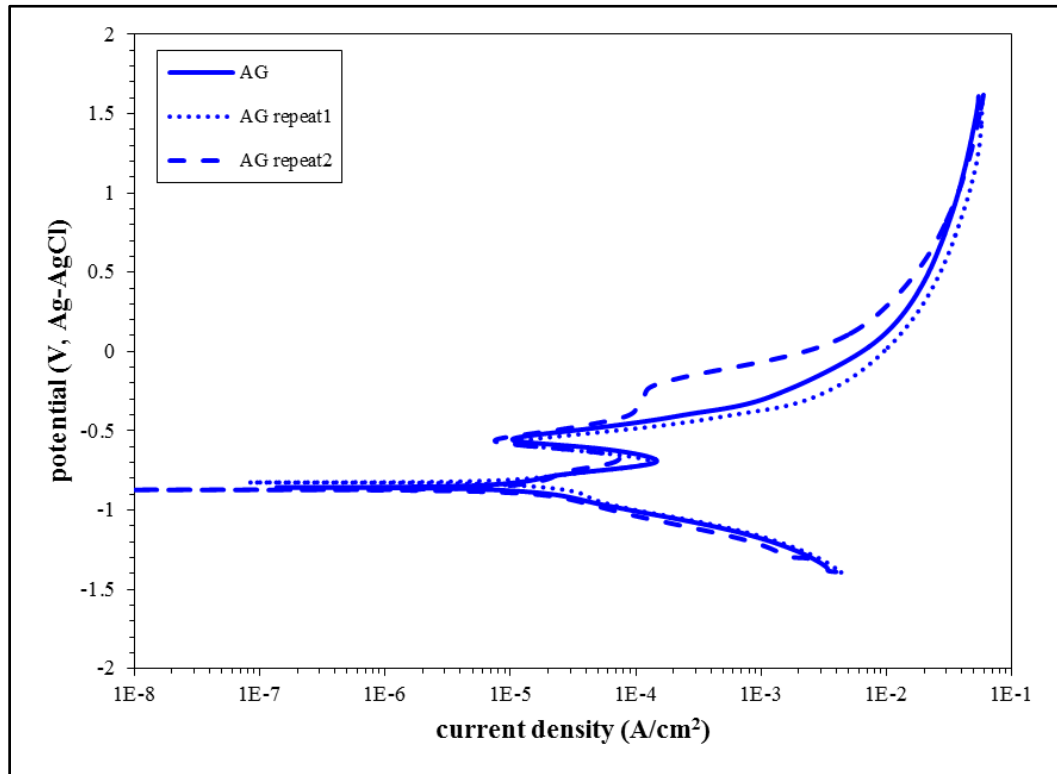


ภาคผนวก ง
ผลการทดสอบการกัดกร่อนโดยเทคนิคโพเทนชิโตนามิกส์

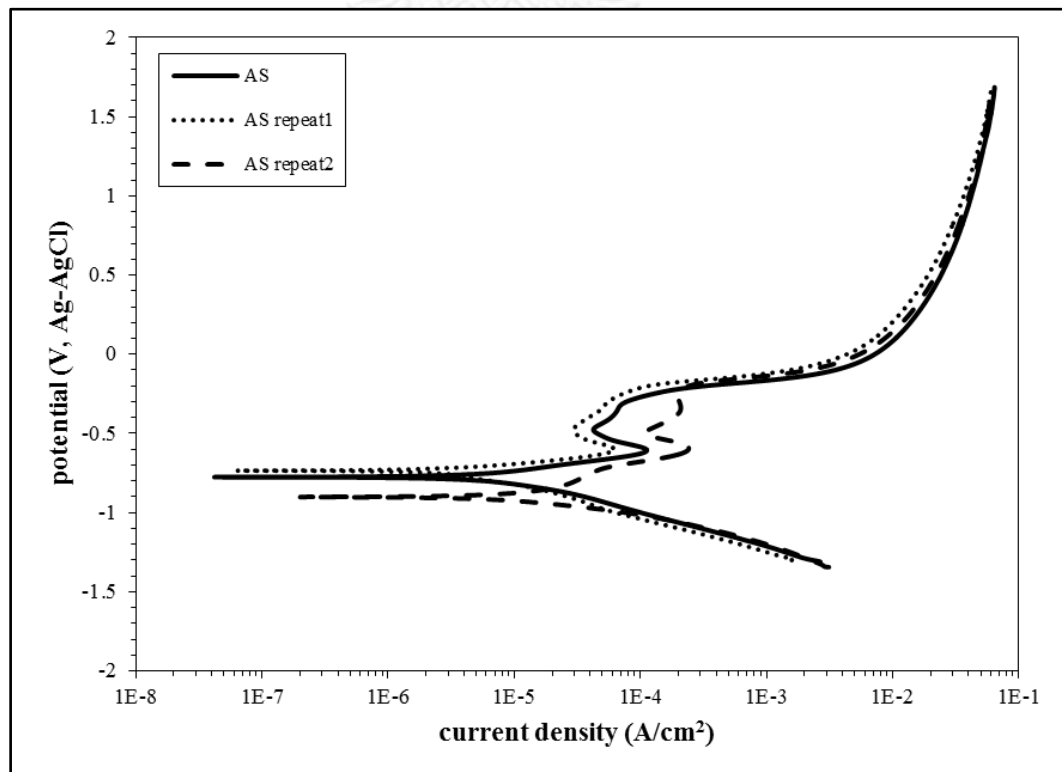
AR : ชิ้นงาน H13 ที่ไม่ทำการปรับปรุงผิว



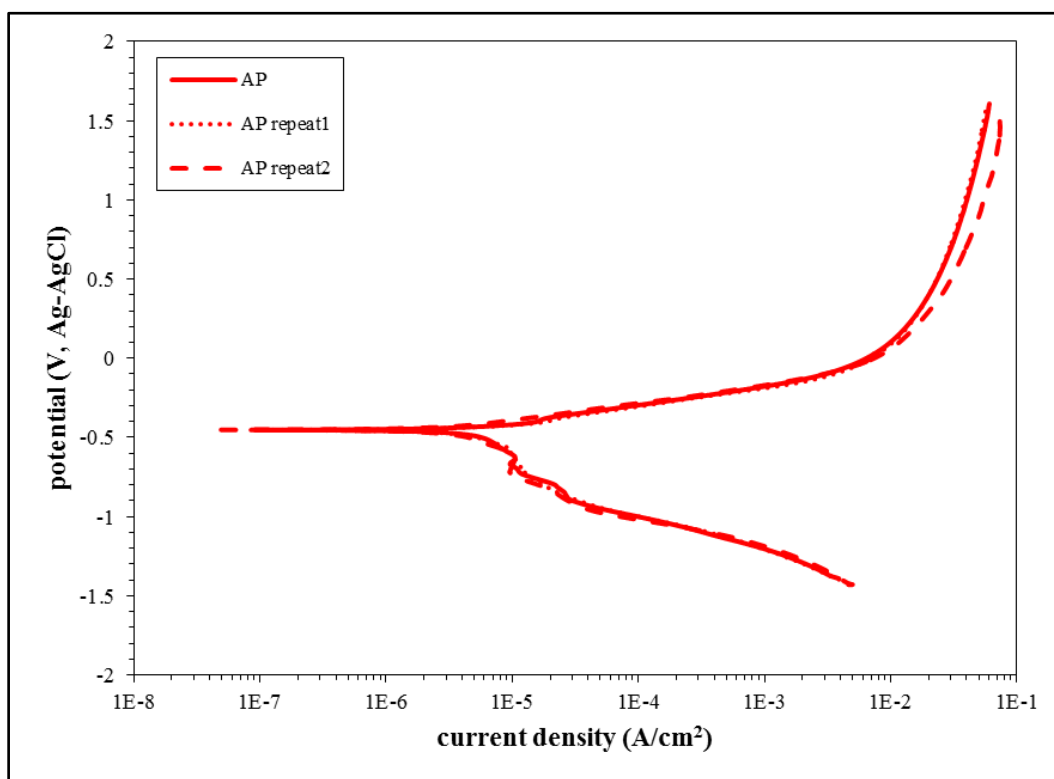
AG : ชิ้นงาน H13 ที่ผ่านการทำไนตรรายดิงแบบก๊าซ



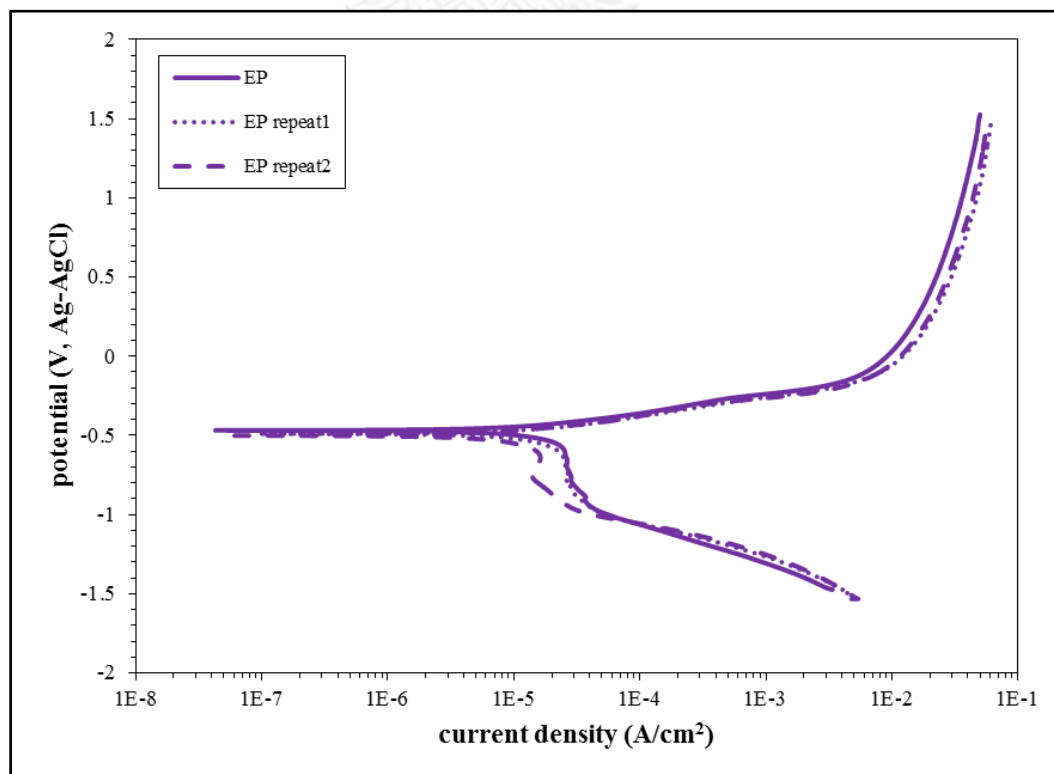
AS : ชิ้นงาน H13 ที่ผ่านการทำไนตรรายดิงแบบอ่างเกลือ



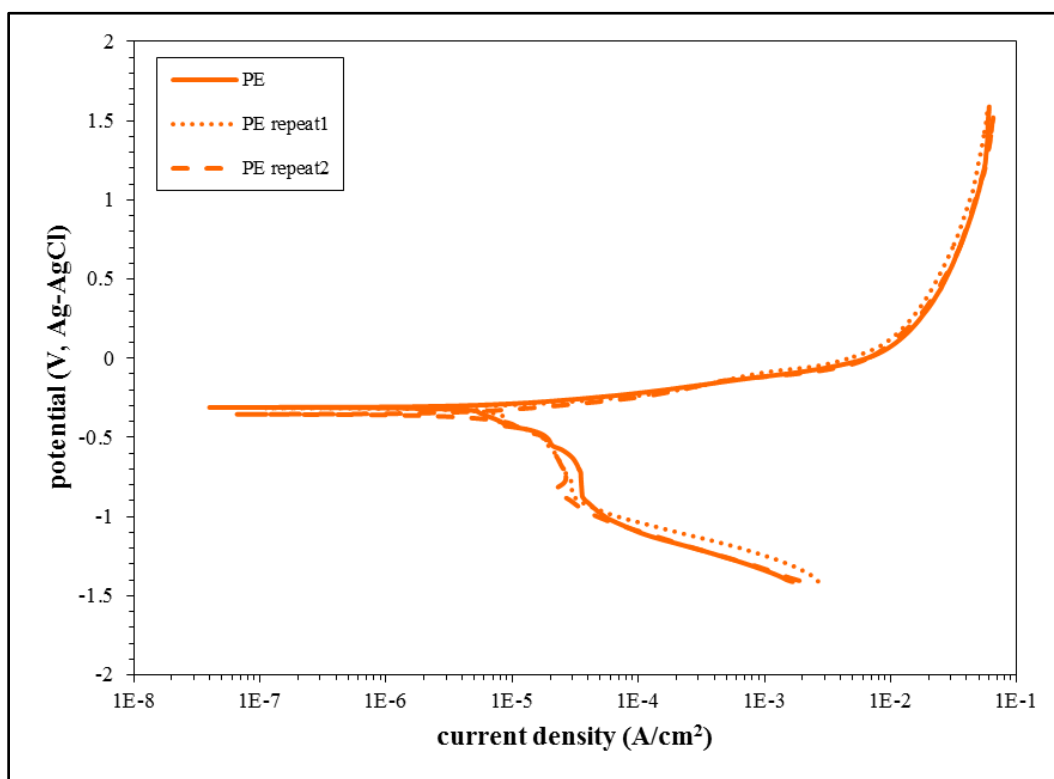
AP : ชิ้นงาน H13 ที่ผ่านการทำไนตรายดิงแบบพลาสมา



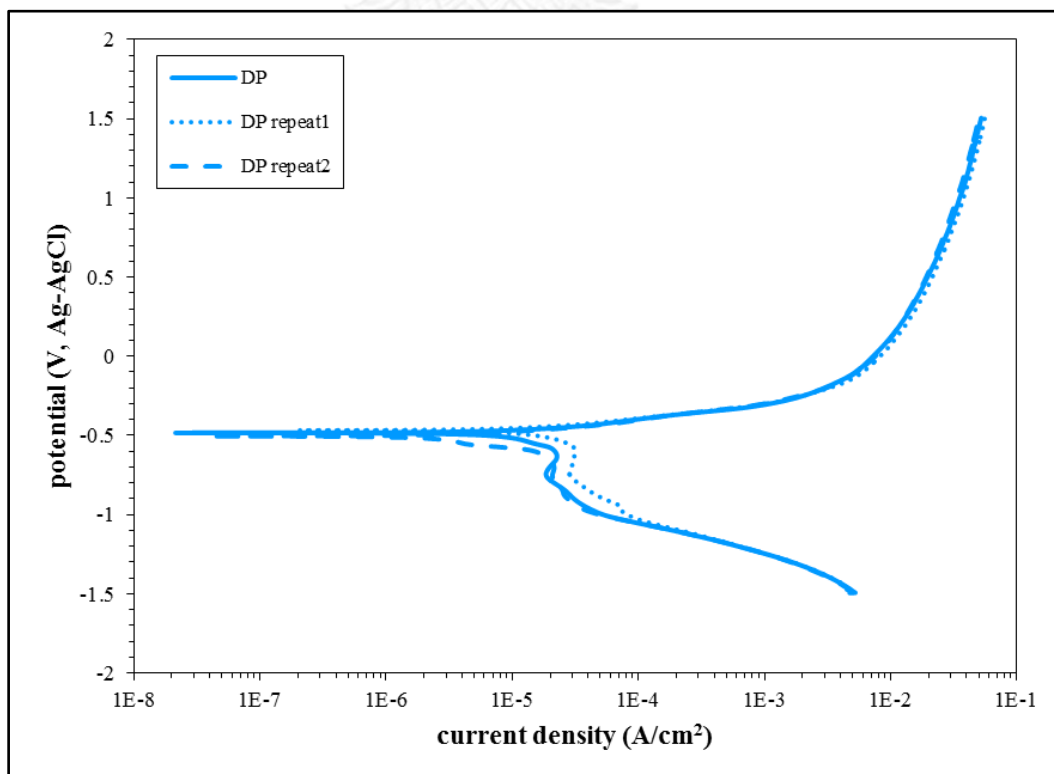
EP : ชิ้นงาน H13 ที่ผ่านการชุบโครเมียมด้วยไฟฟ้าตามด้วยการทำไนตรายดิงแบบพลาสมา



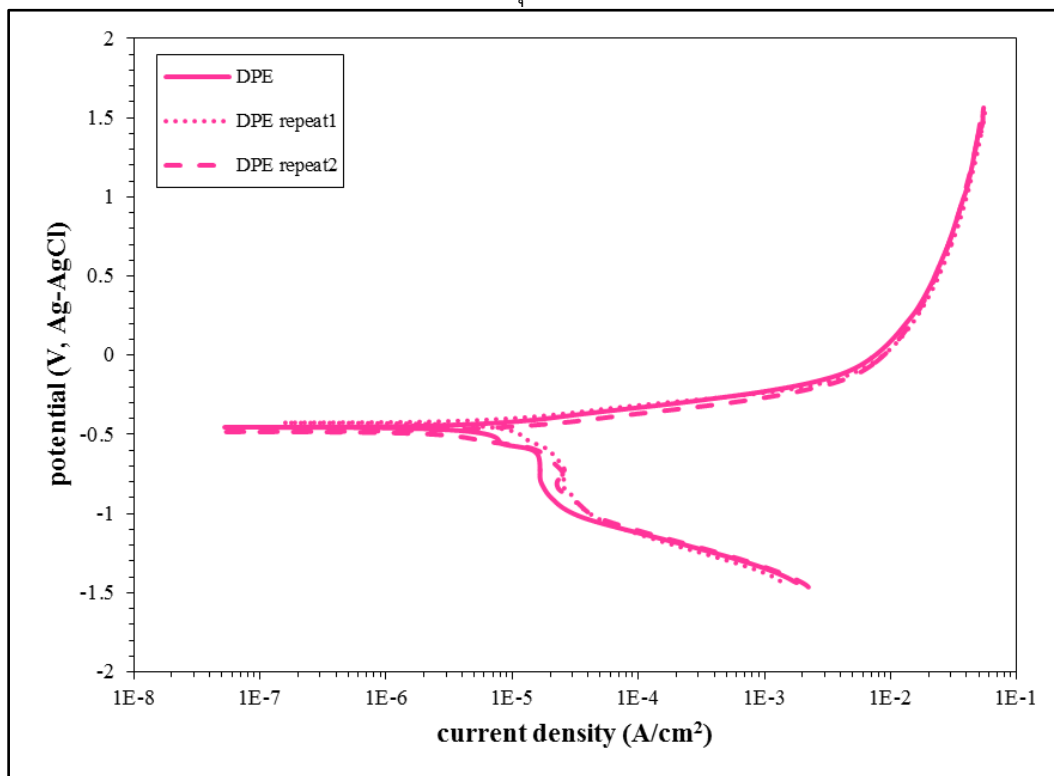
PE : ชิ้นงาน H13 ที่ผ่านการทำไนตรายดิงแบบพลาสมาตามด้วยการชุบโครเมียมด้วยไฟฟ้า



DP : ชิ้นงาน H13 ที่ผ่านการสูญเสียคาร์บอนที่ผิวตามด้วยการทำไนตรายดิงแบบพลาสมา



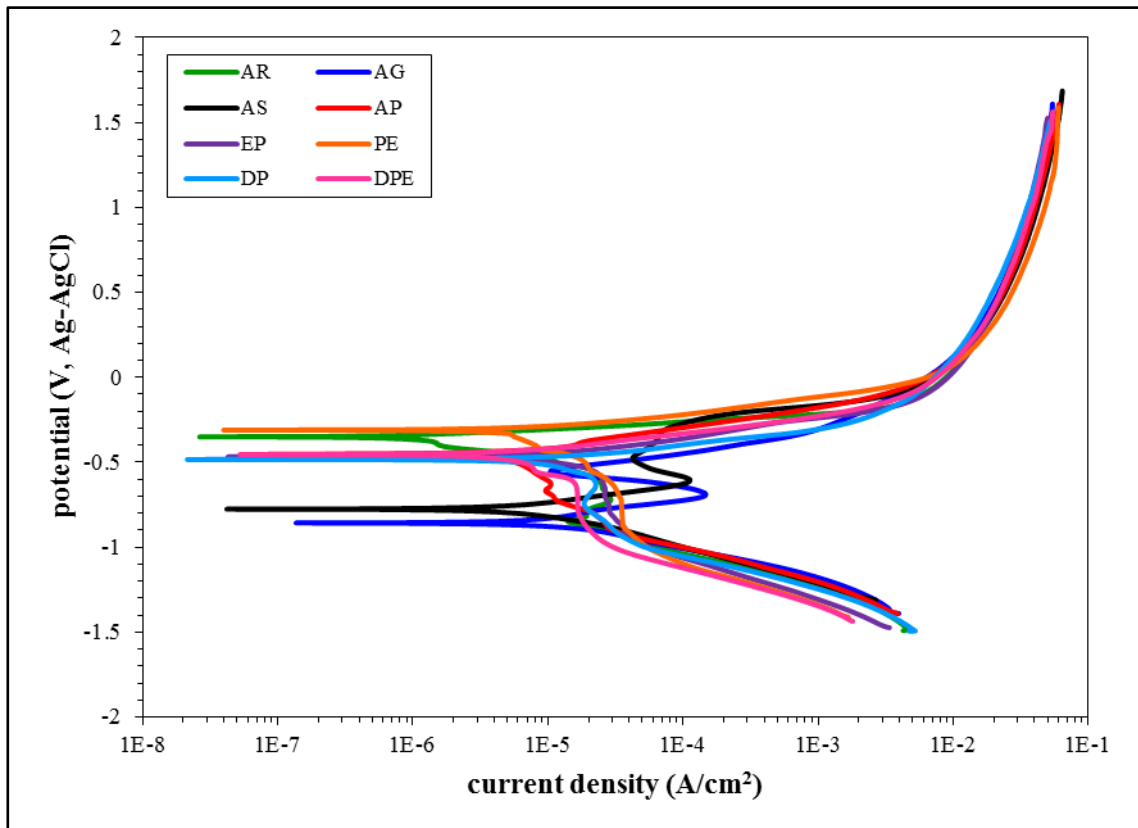
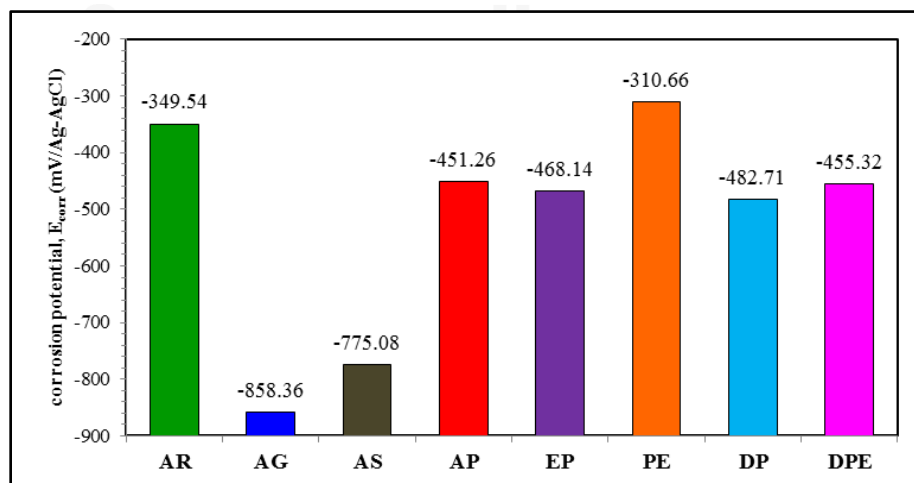
DPE : ชิ้นงาน H13 ที่ผ่านการสูญเสียคาร์บอนที่ผิวตามด้วยการทำไนตรายดิงแบบพลาสมา
และตามด้วยการชุบโครเมียมด้วยไฟฟ้า



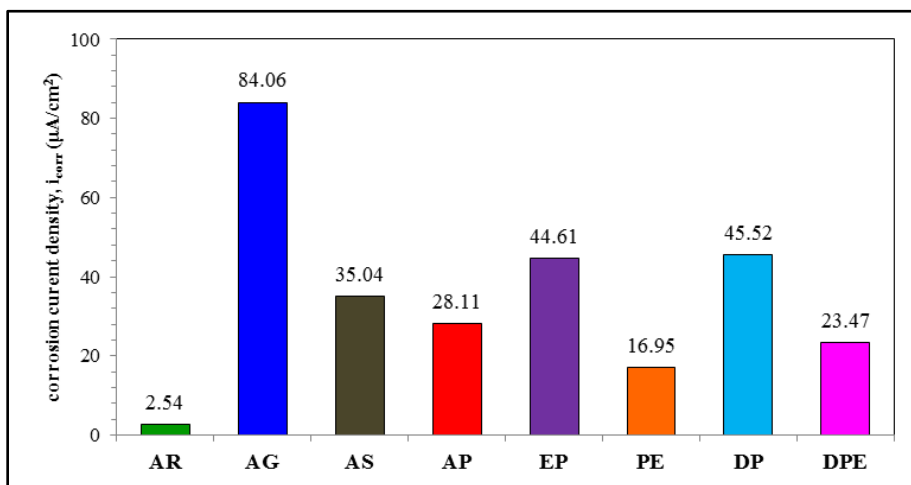
ภาคผนวก จ

เปรียบเทียบผลการทดสอบการกัดกร่อนโดยเทคนิคโพเทนชิโอดีนามิกส์

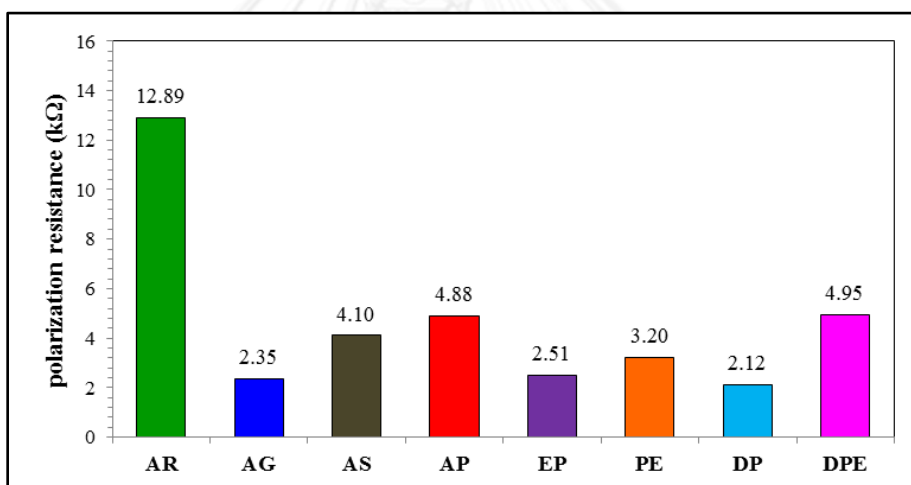
เปรียบเทียบเส้นโค้งโพรวาไรเซชันของชิ้นงาน 8 กลุ่ม

ศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน (E_{corr} , corrosion potential)

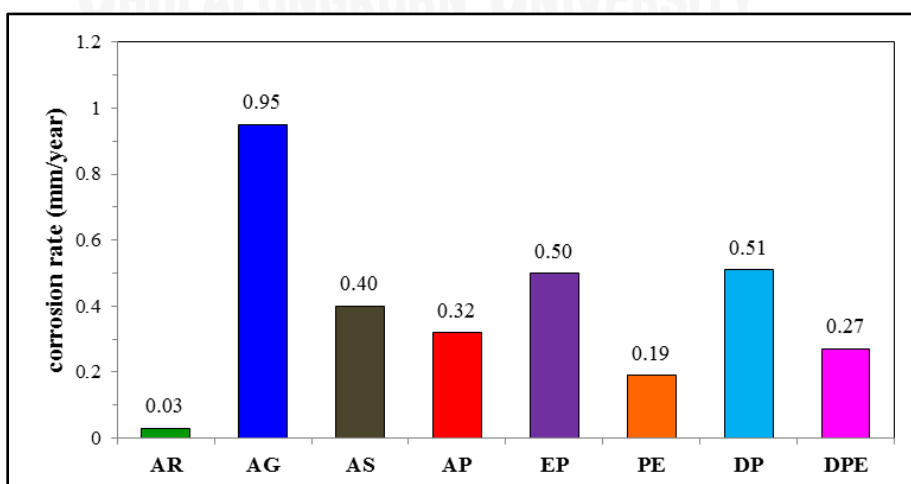
ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน (i_{corr} , corrosion current density)



ความต้านทานโพลาไรเซชัน (R_p , polarization resistance)

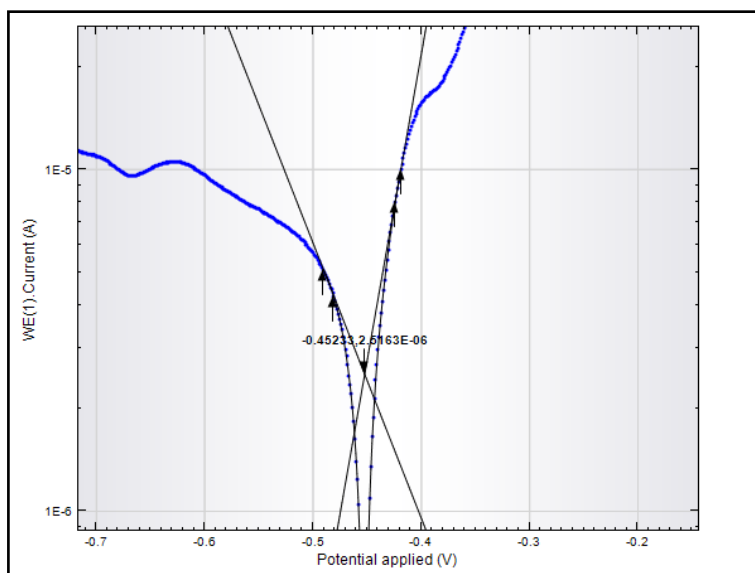


อัตราการกัดกร่อน (corrosion rate)



ภาคผนวก ฉ

วิธีการประมาณนอกค่าทาเฟล (Tafel Extrapolation)



ขั้นตอนการประมาณนอกค่าทาเฟล (Tafel Extrapolation) ด้วยโปรแกรม NOVA 1.9 โดยจะต้องใส่ความหนาแน่น (density) ของ H13 เท่ากับ 7.8 g/cm^3 และค่ามวลสมมูล (Equivalent Weight) ของ H13 เท่ากับ 26.95 g ลงในโปรแกรม จากนั้นตามด้วยการกำหนด จุด 2 จุดเพื่อสร้างเส้น β_a และทำซ้ำ เพื่อสร้างเส้น β_c เพื่อหาจุดตัดของทั้งสองเส้น โดยเกณฑ์เพื่อพิจารณาค่าพารามิเตอร์ ประกอบด้วย

1. ลักษณะเส้นโค้งที่โปรแกรมจำลองขึ้นกับเส้นโค้งที่ได้จากการทดสอบจะต้องซ้อนทับกัน
2. พิจารณาค่า $E_{\text{corr, calculation}}$ ศักย์ไฟฟ้าที่ได้จากการประมาณนอกค่าทาเฟลต้องใกล้เคียงกับ $E_{\text{corr, observation}}$ ศักย์ไฟฟ้าที่ได้จากเส้นโค้งโพลาริเซชัน
3. พิจารณาค่า χ^2 คือ ค่าความเบี่ยงเบนระหว่างจุดที่ทดสอบได้กับเส้นสมมติที่โปรแกรมสร้างขึ้นจากสมการทางเคมีไฟฟ้า จะต้องมามีค่ามากๆ มากกว่า 10^{-12}
4. พิจารณาค่า iterations คือจำนวนจุดที่อยู่บนเส้นสมมติที่โปรแกรมสร้างขึ้น จะต้องมามีค่ามากๆ อยู่ในหลักสิบหรือหลักร้อย
5. พิจารณาความแตกต่างของค่า E_{Begin} และ E_{End} จะต้องมามีค่าประมาณกันในกลุ่มขึ้นงานขึ้นเดิม โดยจะต้องมีค่าห่างกันไม่ต่ำกว่า 100 มิลลิโวลต์

โดยทุกครั้งที่ทำกรประมาณนอกค่าทาเฟลจะต้องมีเส้นโค้งโพลาริเซชันที่มีรูปกราฟซ้อนทับกันจากการทดสอบโดยเทคนิคโพเทนชิโอดนามิกส์ขึ้นงานกลุ่มเดียวกันแต่คนละชิ้น ให้ได้ 3 เส้นโค้ง (repeat) จะทำให้ได้ข้อมูลที่มีความน่าเชื่อถือ จากนั้นทำการประมาณนอกค่าทาเฟลเส้นโค้งทีละเส้น

โดยทำการกดจุด 2 จุด เพื่อสร้างเส้น β_a และ β_c โดยเริ่มตั้งแต่การกดตั้งแต่ช่วง E_{Begin} และ E_{End} กว้าง (ประมาณ 300 มิลลิโวลต์) และทำการกดใหม่โดยกำหนดช่วง E_{Begin} และ E_{End} แคบลงเรื่อยๆ (แต่ไม่ต่ำกว่า 100 มิลลิโวลต์) โดยเส้นโค้งโพลาริเซชันหนึ่งเส้น ควรทำการประมาณนอกค่าไม่ต่ำกว่า 30 ครั้ง เพื่อหาค่าพารามิเตอร์การกักกร่อนที่เหมาะสม กล่าวคือจะมีช่วงบางบริเวณที่พารามิเตอร์การกักกร่อนจะมีค่าคงที่ ซึ่งเป็นตัวแทนของสมบัติการกักกร่อนของชิ้นงานที่ดีที่สุด

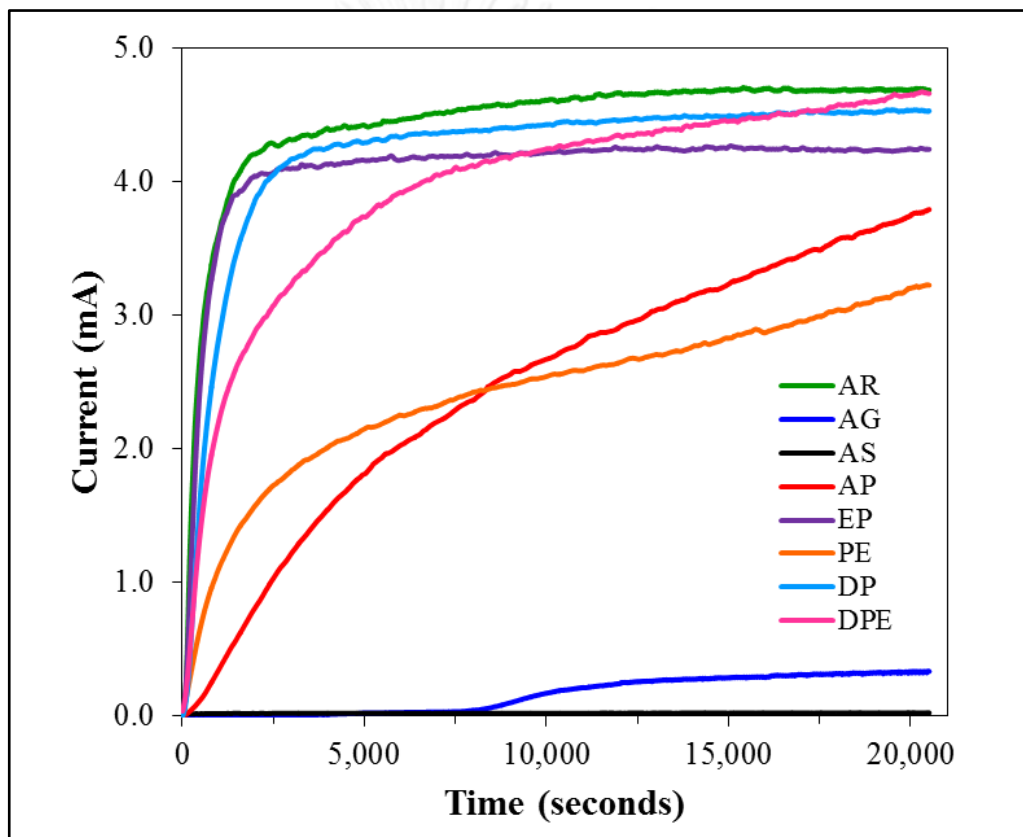


จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก ข

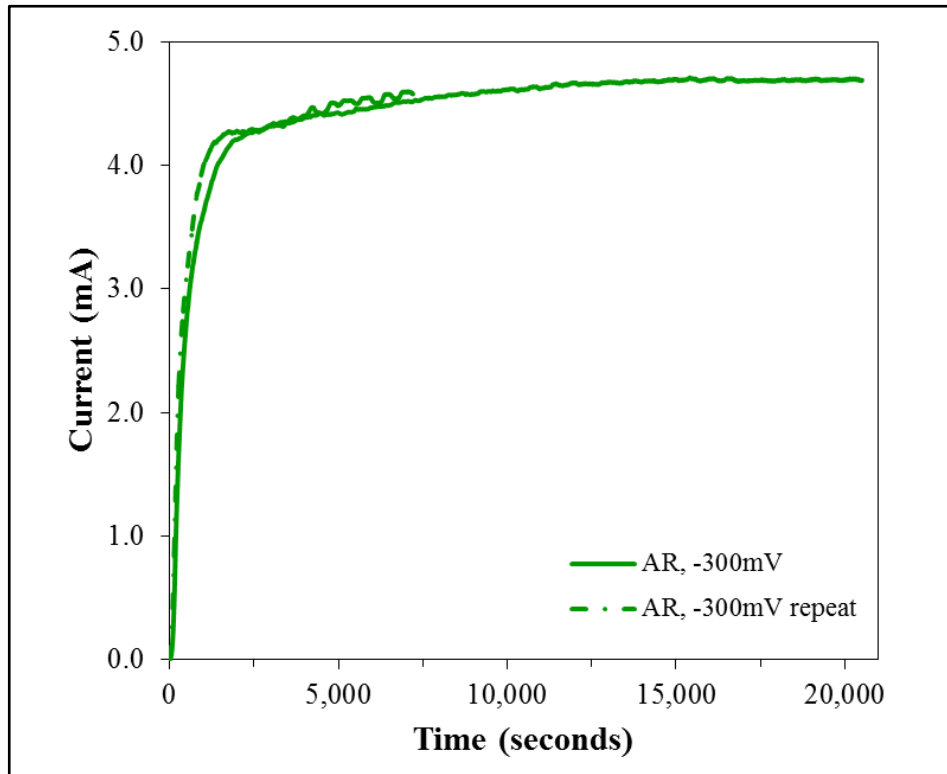
เปรียบเทียบผลการทดสอบการกัดกร่อนโดยเทคนิคโพเทนชิโอสแตติก
ทดสอบโดยใช้ศักย์ไฟฟ้าคงที่ เท่ากับ -300 mV, Ag-AgCl เป็นเวลา 5.5 ชั่วโมง

เปรียบเทียบผลการทดสอบโดยเทคนิคโพเทนชิโอสแตติก
ทดสอบที่ -300 มิลลิโวลต์ (Ag-AgCl) ทดสอบเป็นเวลา 5 ชั่วโมง 30 นาที ของชิ้นงาน 8 กลุ่ม

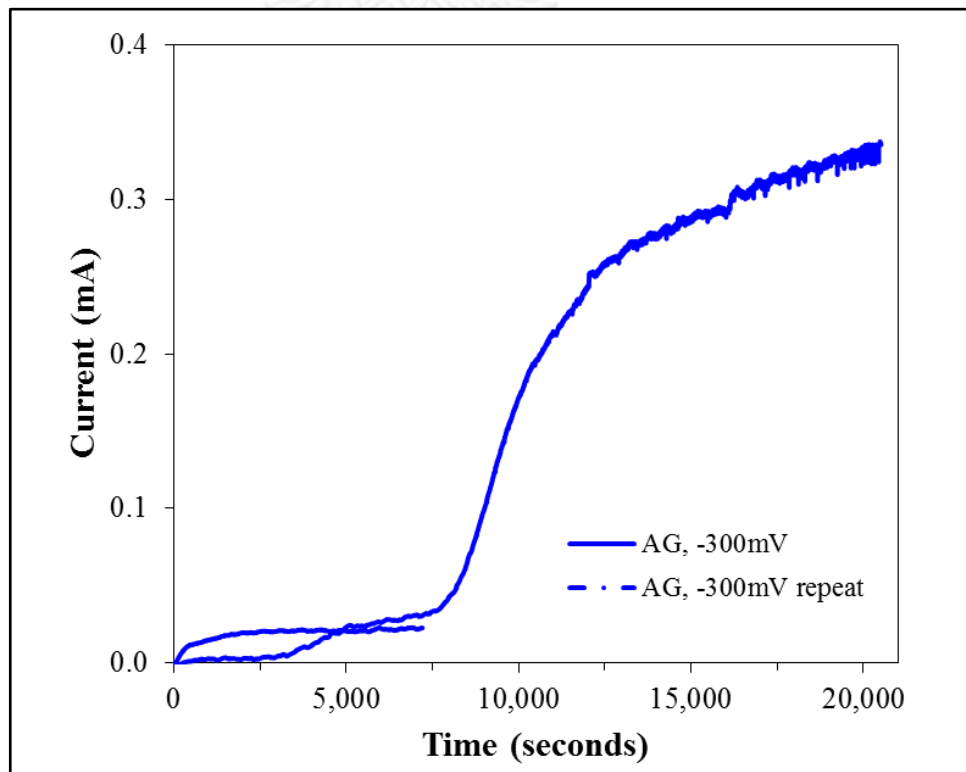


CHULALONGKORN UNIVERSITY

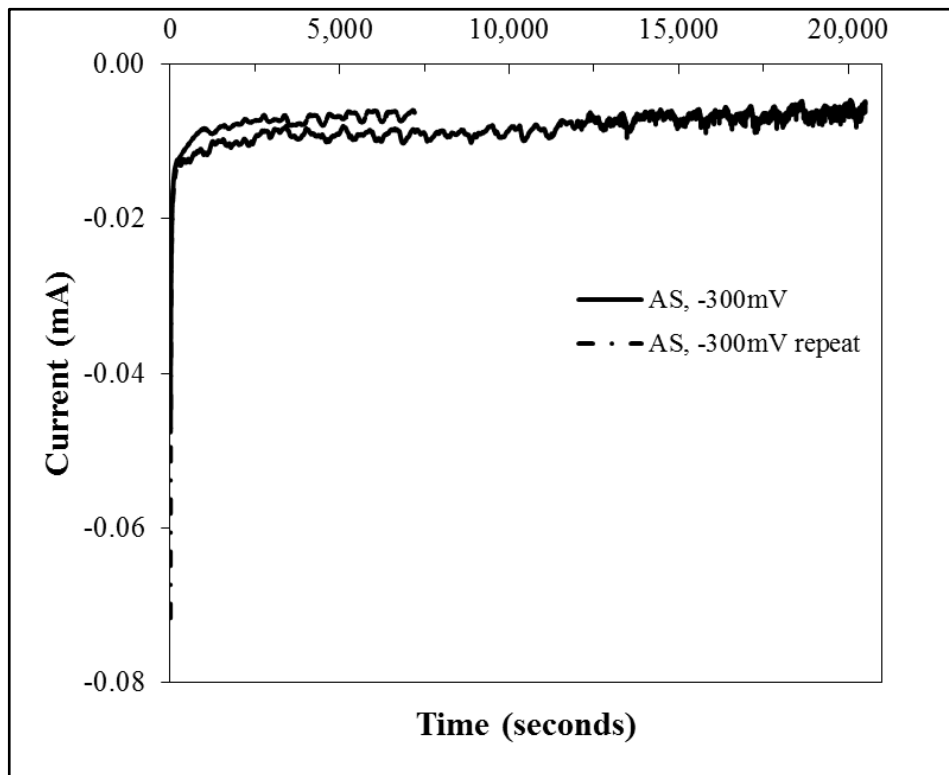
AR : ชิ้นงาน H13 ที่ไม่ทำการปรับปรุงผิว



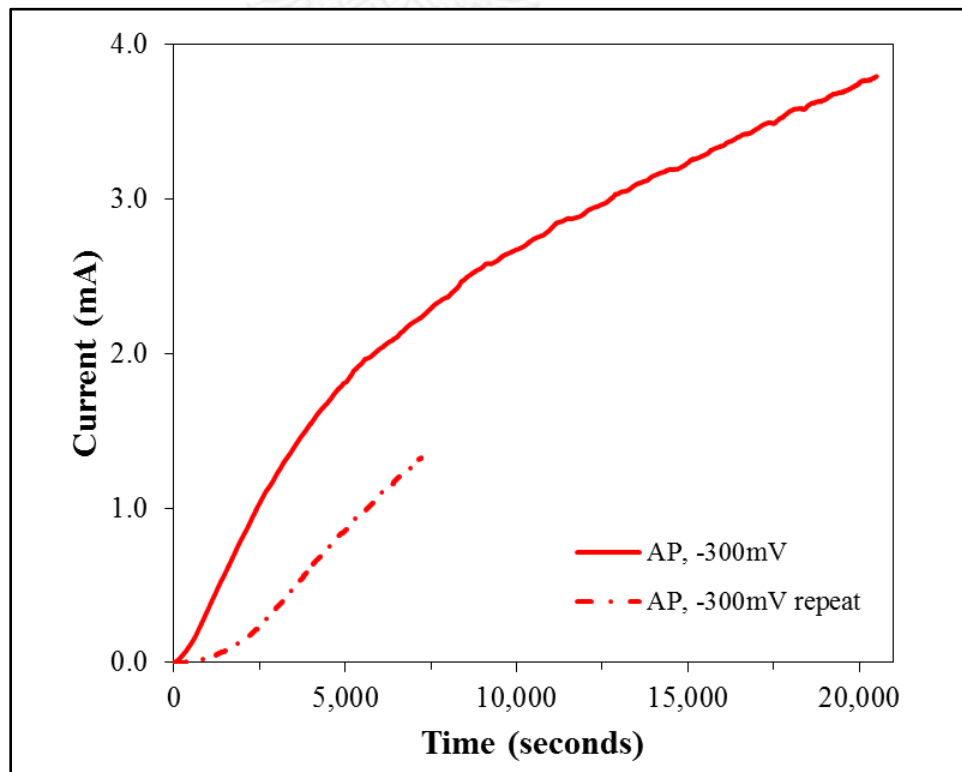
AG : ชิ้นงาน H13 ที่ผ่านการทำไนตรรายดิงแบบก๊าซ



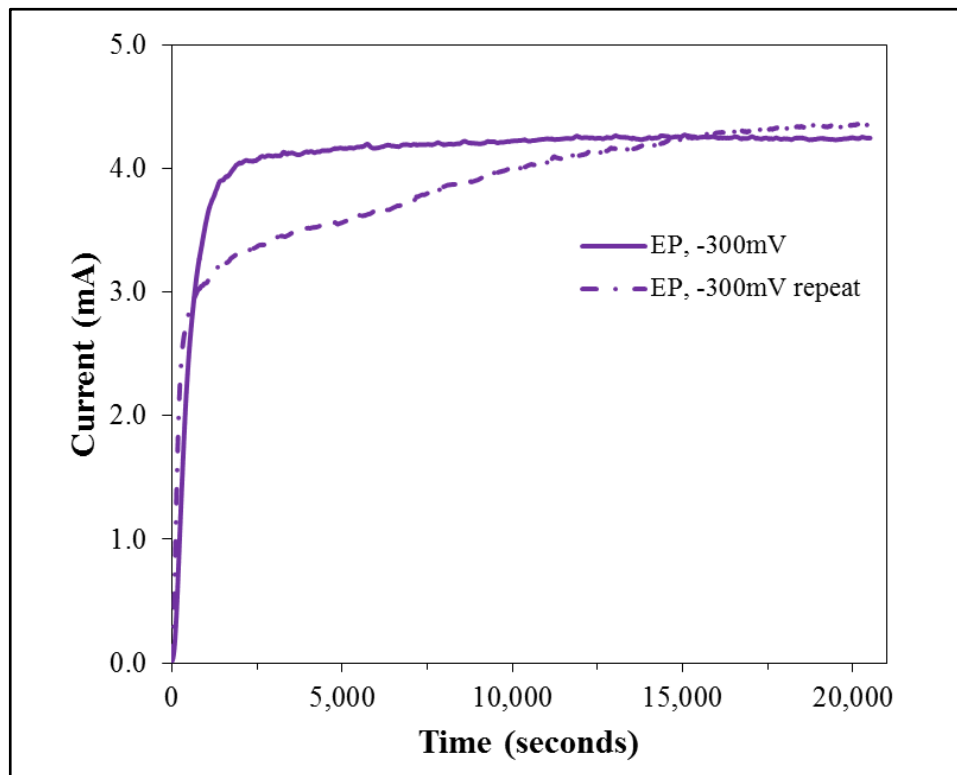
AS : ชิ้นงาน H13 ที่ผ่านการทำไนตรายดิงแบบอ่างเกลือ



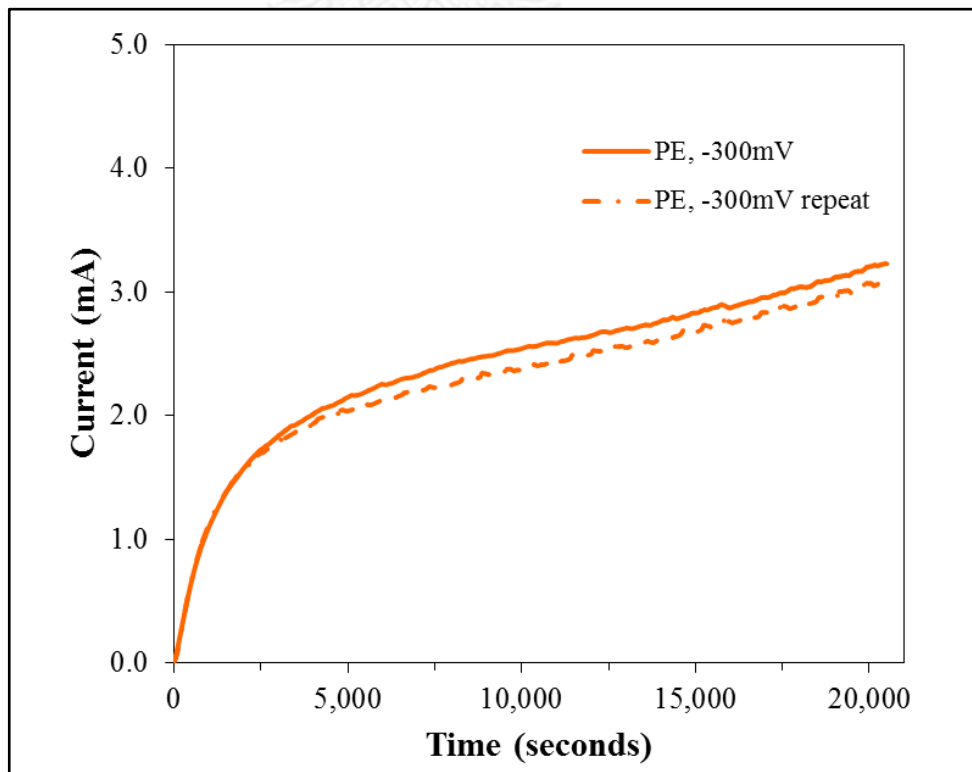
AP : ชิ้นงาน H13 ที่ผ่านการทำไนตรายดิงแบบพลาสมา



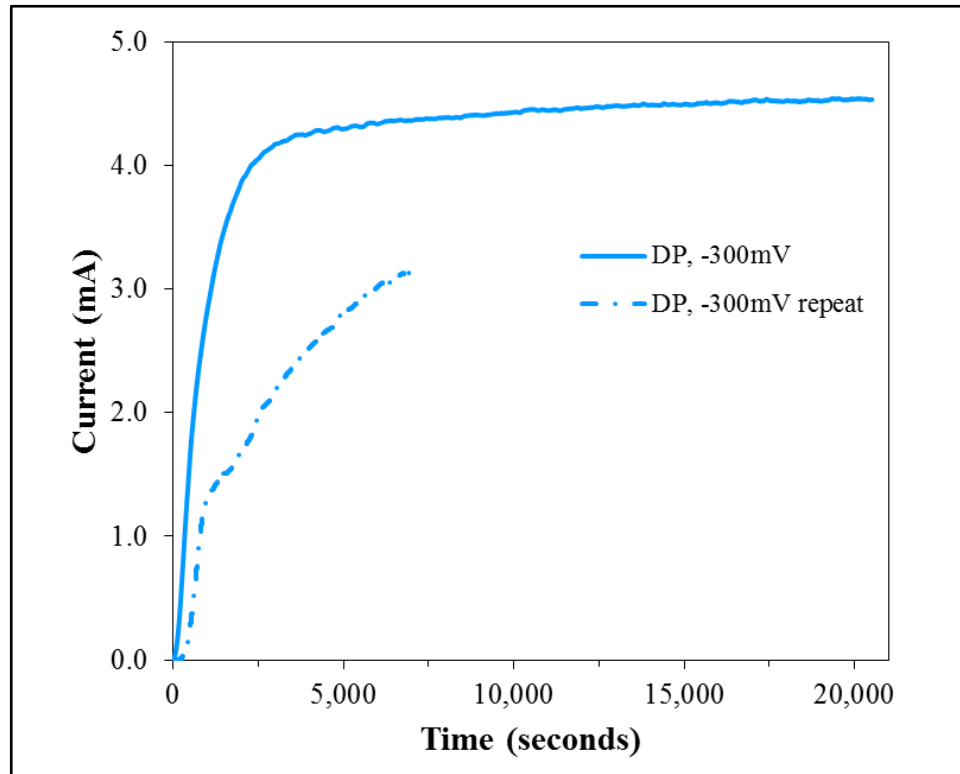
EP : ชิ้นงาน H13 ที่ผ่านการชุบโครเมียมด้วยไฟฟ้าตามด้วยการทำไนตรายดิงแบบพลาสมา



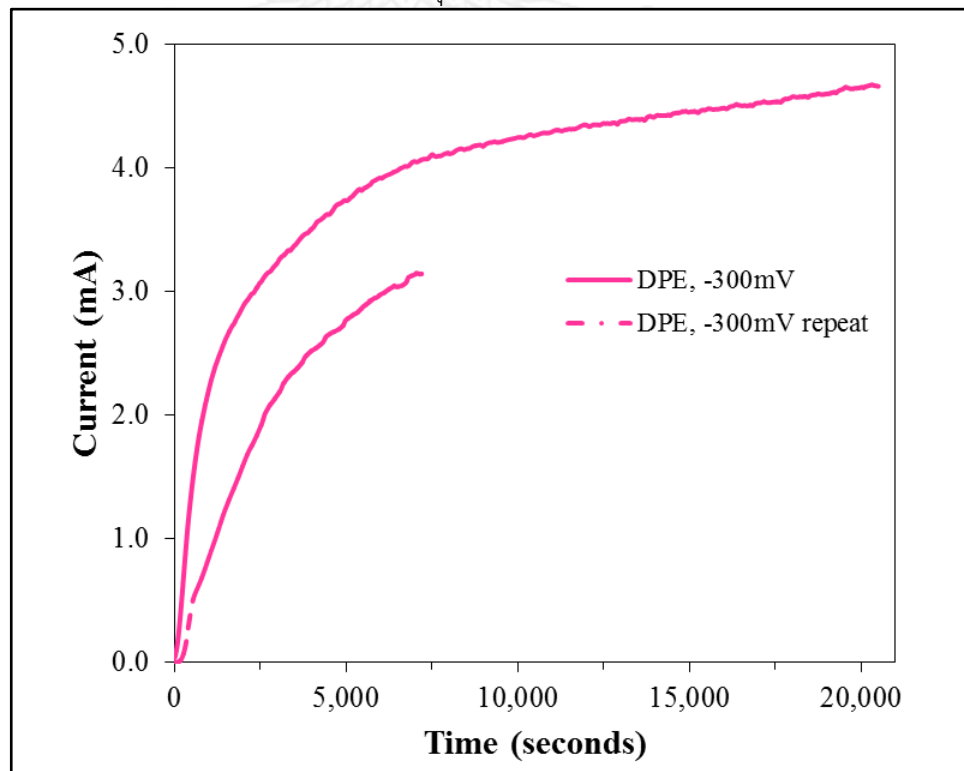
PE : ชิ้นงาน H13 ที่ผ่านการทำไนตรายดิงแบบพลาสมาตามด้วยการชุบโครเมียมด้วยไฟฟ้า



DP : ชิ้นงาน H13 ที่ผ่านการสูญเสียคาร์บอนที่ผิวตามด้วยการทำไนตรรายดิงแบบพลาสมา



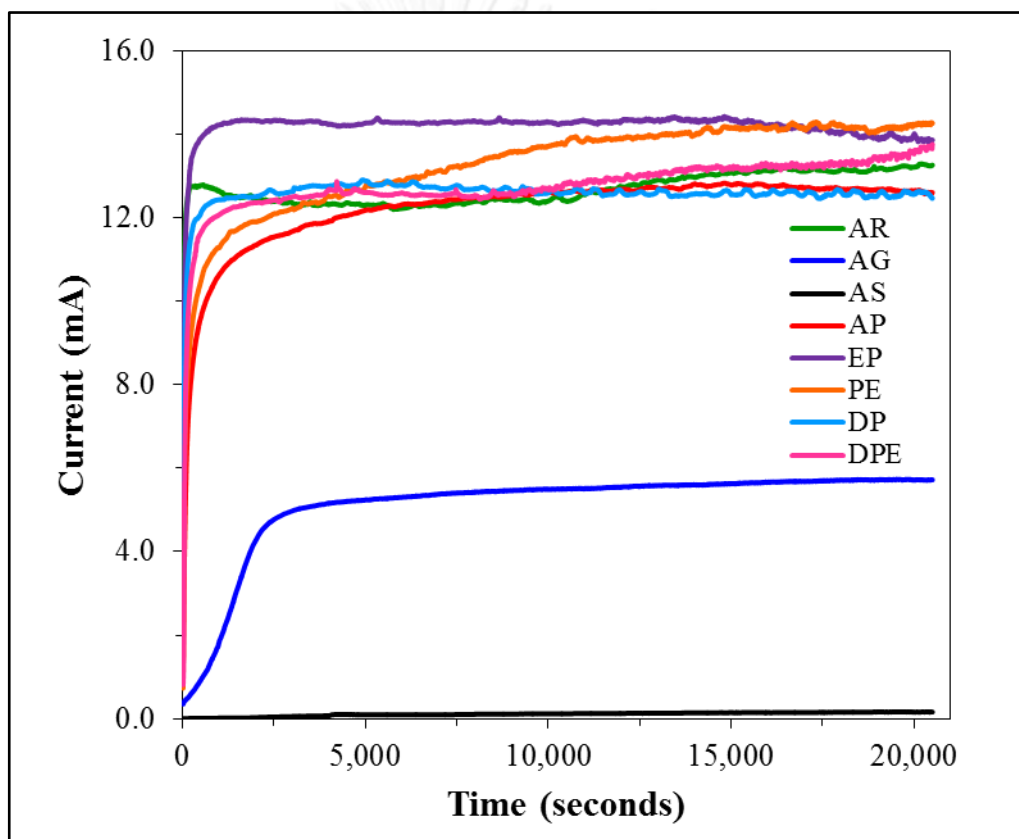
DPE : ชิ้นงาน H13 ที่ผ่านการสูญเสียคาร์บอนที่ผิวตามด้วยการทำไนตรรายดิงแบบพลาสมา และตามด้วยการชุบโครเมียมด้วยไฟฟ้า



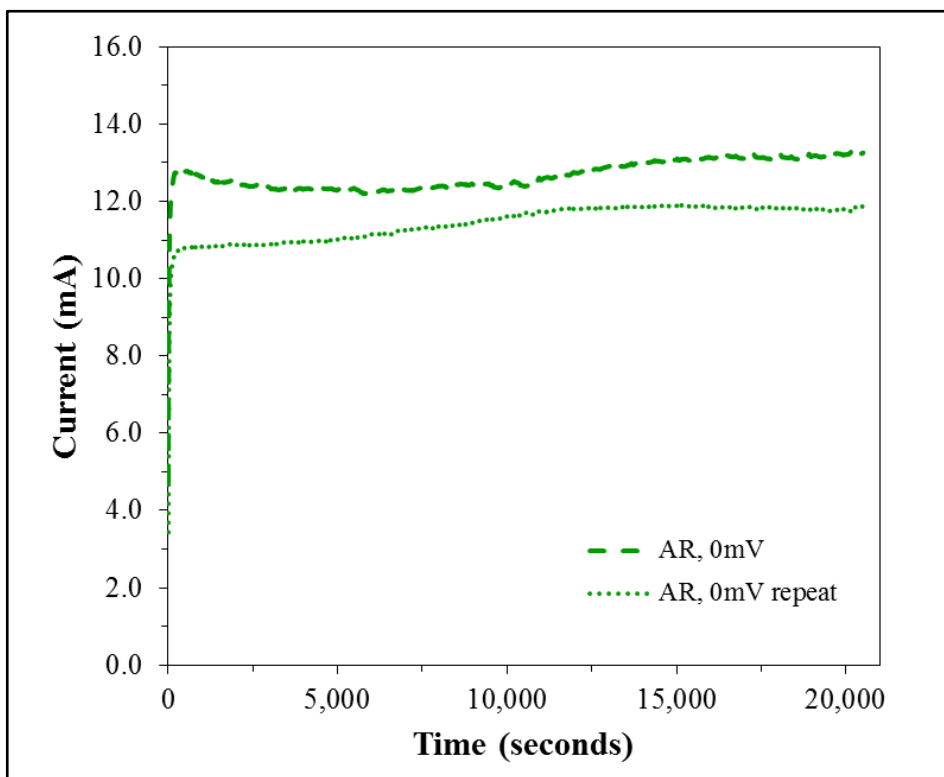
ภาคผนวก ซ

เปรียบเทียบผลการทดสอบการกัดกร่อนโดยเทคนิคโพเทนชิโอสแตติก
ทดสอบโดยใช้ศักย์ไฟฟ้าคงที่ เท่ากับ 0 mV, Ag-AgCl เป็นเวลา 5.5 ชั่วโมง

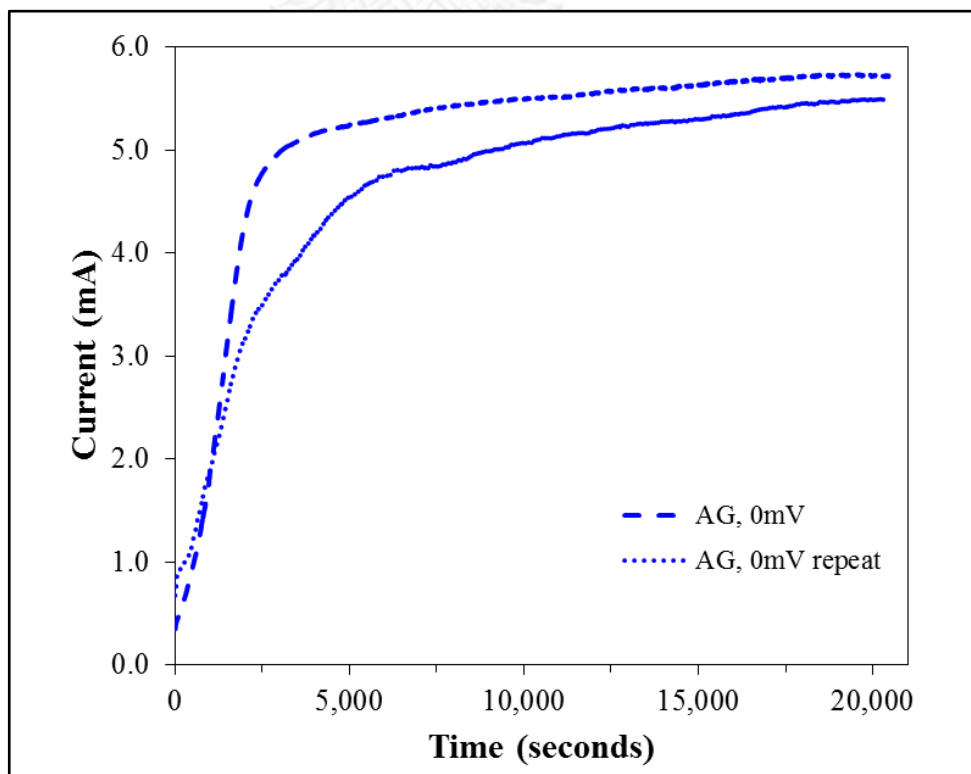
เปรียบเทียบผลการทดสอบโดยเทคนิคโพเทนชิโอสแตติก
ทดสอบที่ 0 มิลลิโวลต์ (Ag-AgCl) ทดสอบเป็นเวลา 5 ชั่วโมง 30 นาที ของชิ้นงาน 8 กลุ่ม



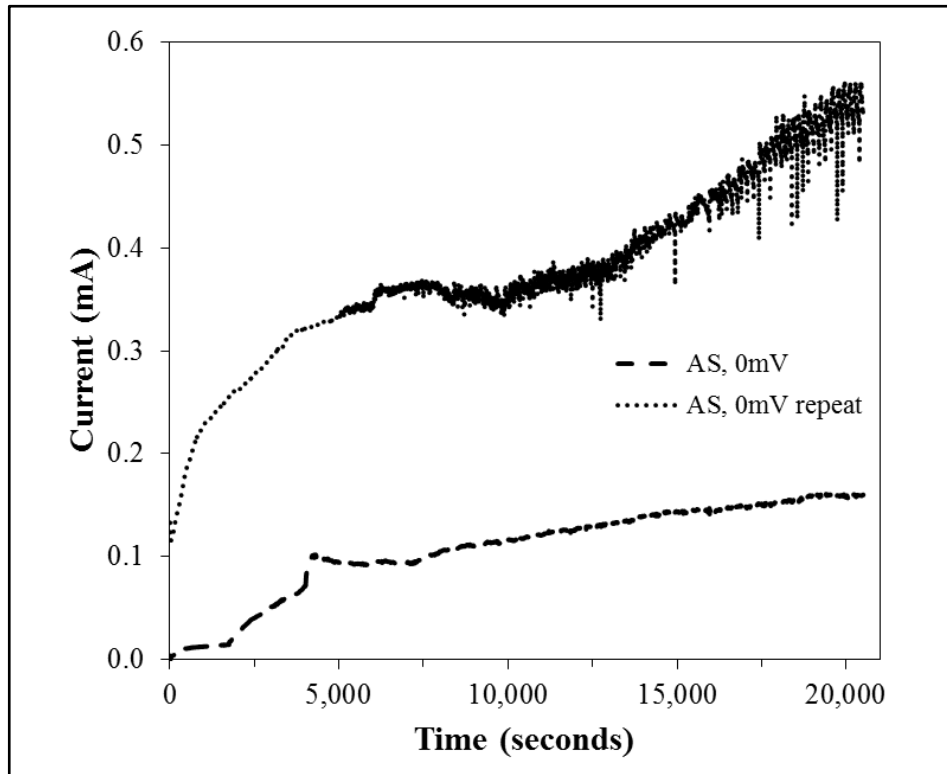
AR : ชิ้นงาน H13 ที่ไม่ทำการปรับปรุงผิว



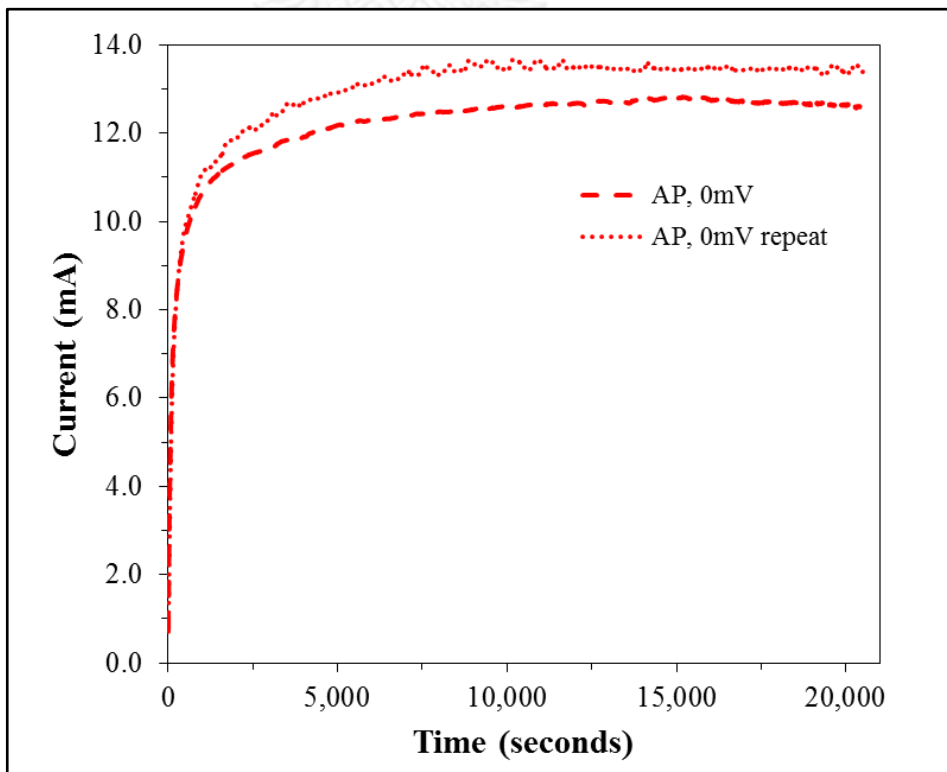
AG : ชิ้นงาน H13 ที่ผ่านการทำไนตรรายดิงแบบก๊าซ



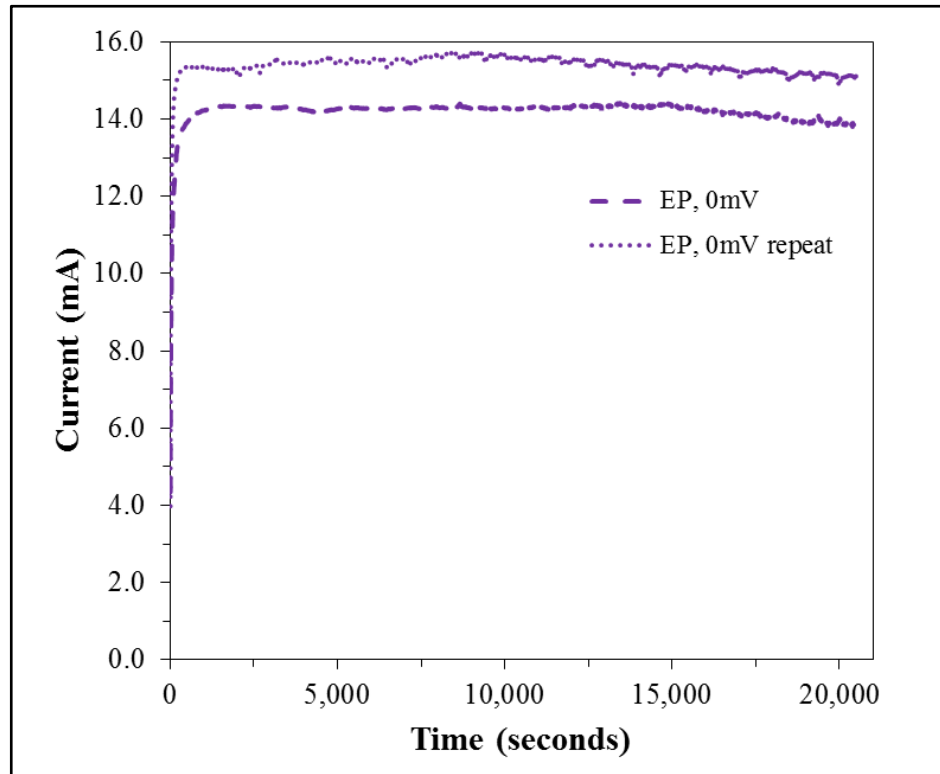
AS : ชิ้นงาน H13 ที่ผ่านการทำไนตรายดิงแบบอ่างเกลือ



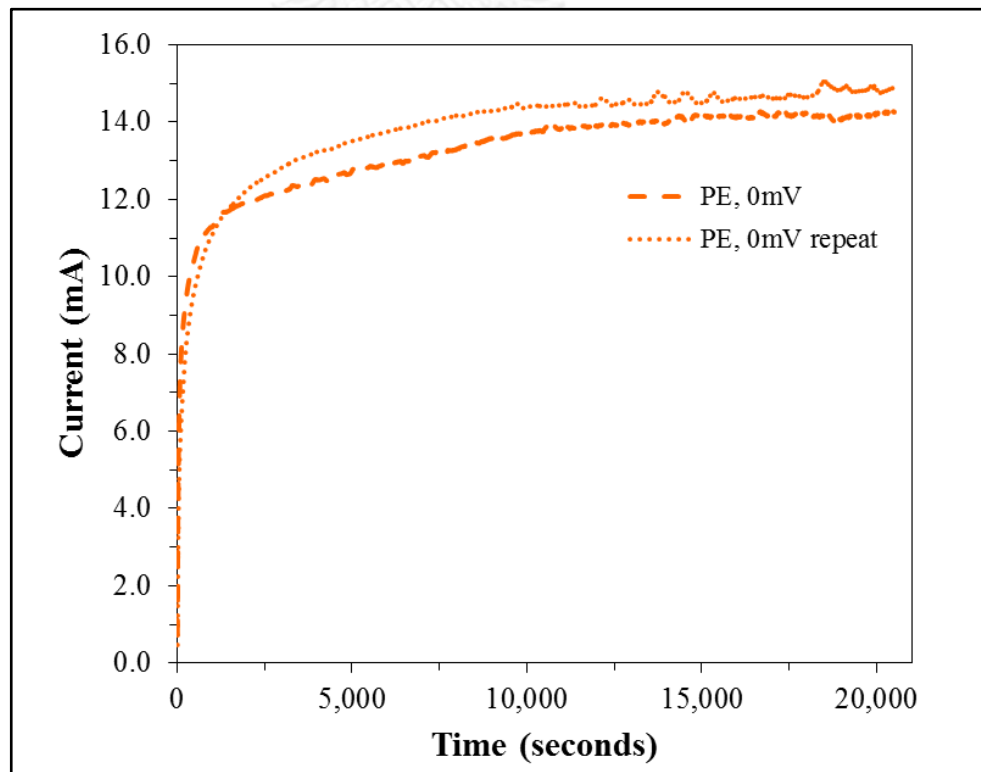
AP : ชิ้นงาน H13 ที่ผ่านการทำไนตรายดิงแบบพลาสมา



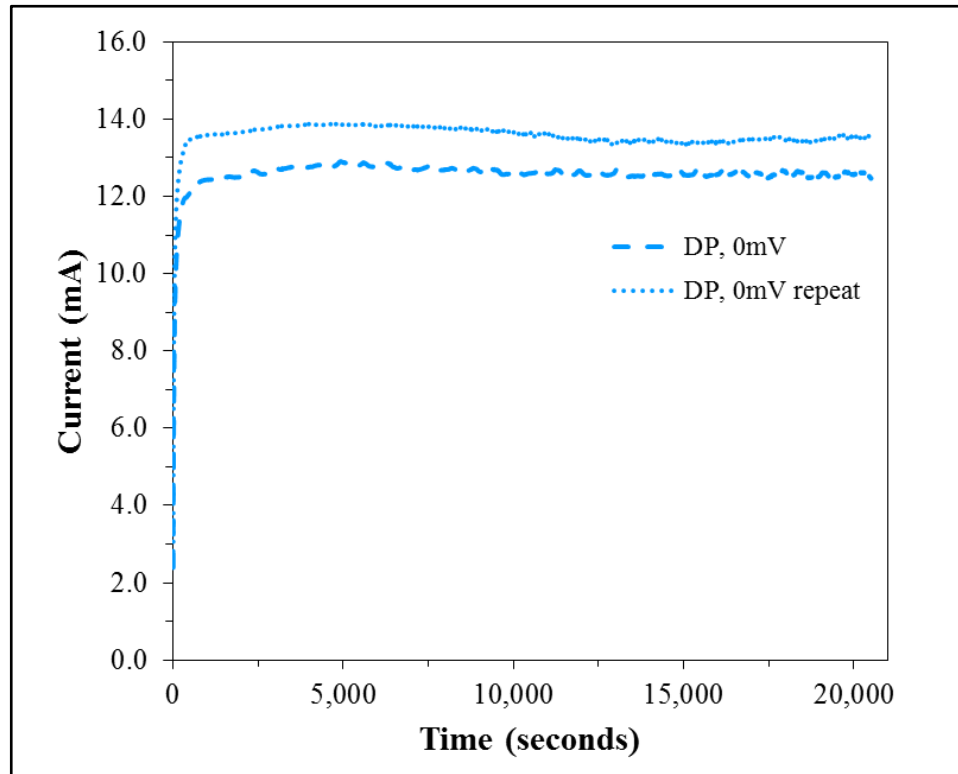
EP : ชิ้นงาน H13 ที่ผ่านการชุบโครเมียมด้วยไฟฟ้าตามด้วยการทำไนตรายดิงแบบพลาสมา



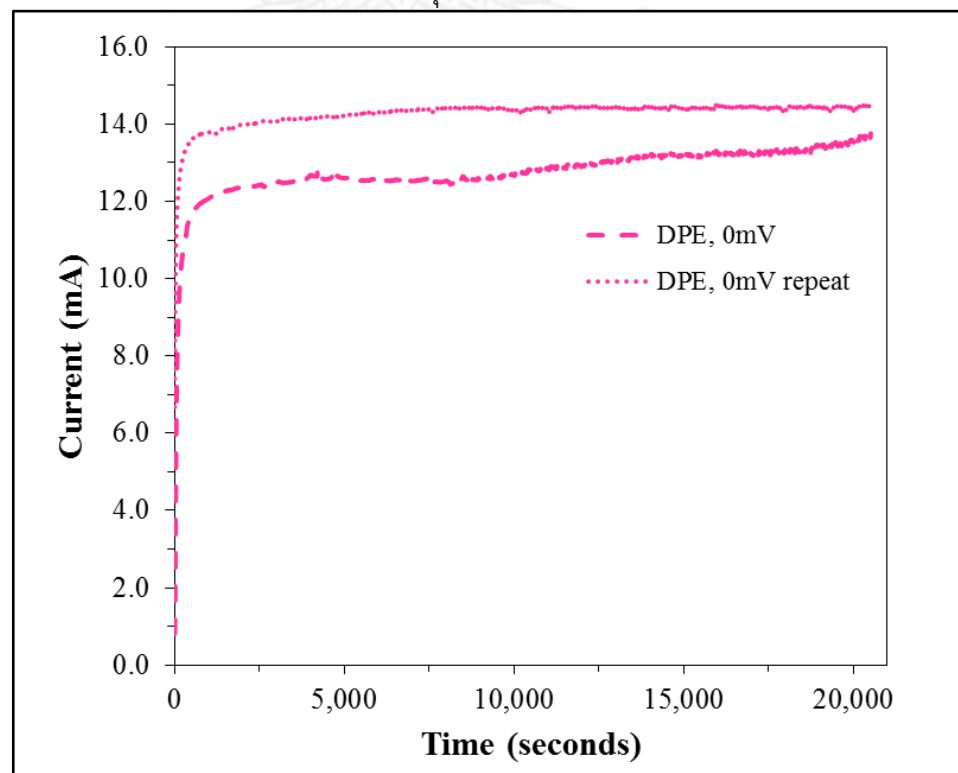
PE : ชิ้นงาน H13 ที่ผ่านการทำไนตรายดิงแบบพลาสมาตามด้วยการชุบโครเมียมด้วยไฟฟ้า



DP : ชิ้นงาน H13 ที่ผ่านการสูญเสียคาร์บอนที่ผิวตามด้วยการทำไนตรรายดิงแบบพลาสมา

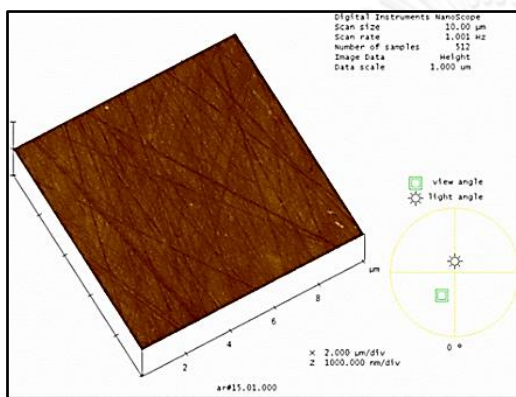


DPE : ชิ้นงาน H13 ที่ผ่านการสูญเสียคาร์บอนที่ผิวตามด้วยการทำไนตรรายดิงแบบพลาสมา และตามด้วยการชุบโครเมียมด้วยไฟฟ้า

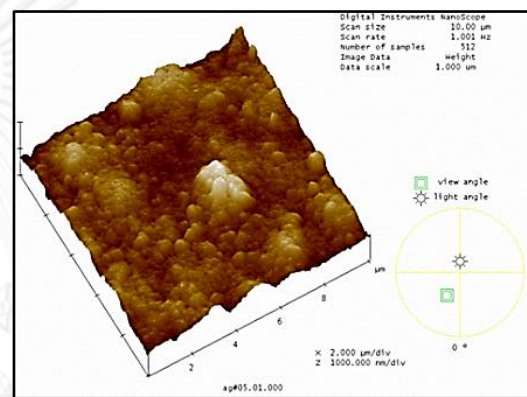


ภาคผนวก ฉ
 ความขรุขระผิวของชิ้นงานกลุ่มต่างๆ

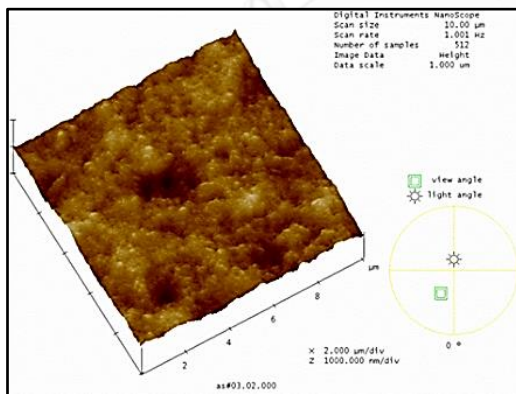
ผลการวิเคราะห์ความขรุขระผิวของชิ้นงานกลุ่มต่างๆ ด้วยเครื่อง Atomic Force Microscope (AFM) โดยใช้พื้นที่ในการวิเคราะห์เท่ากับ 10×10 ตารางไมครอน ดังแสดง



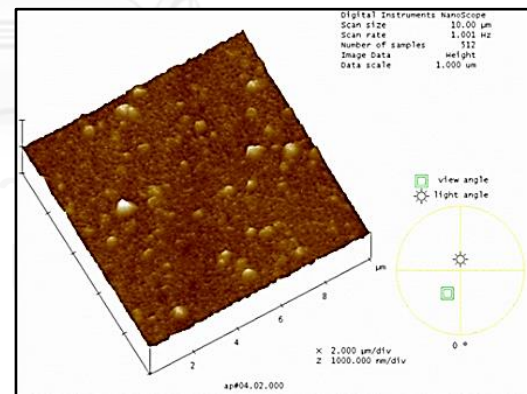
AR



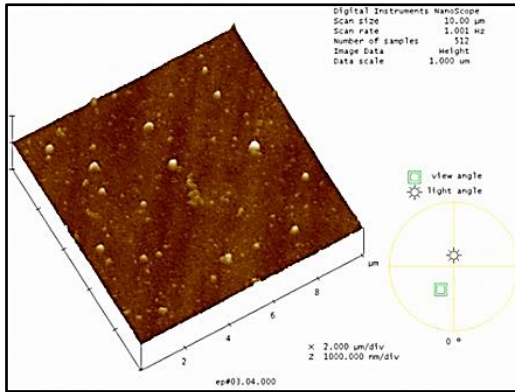
AG



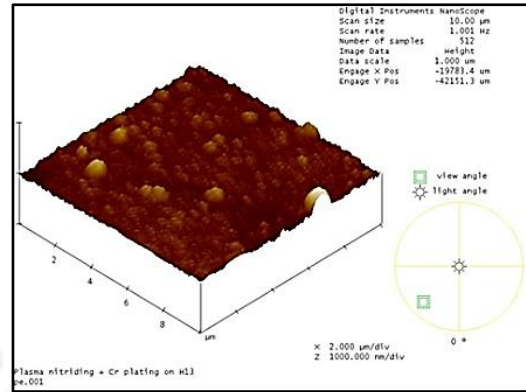
AS



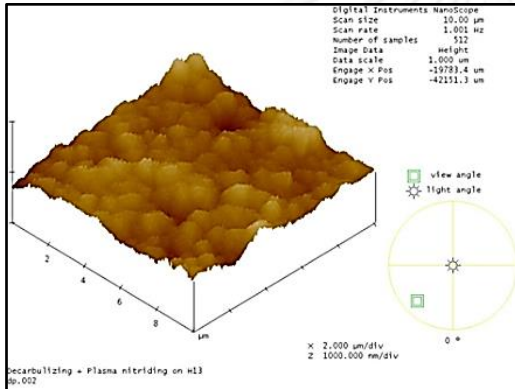
AP



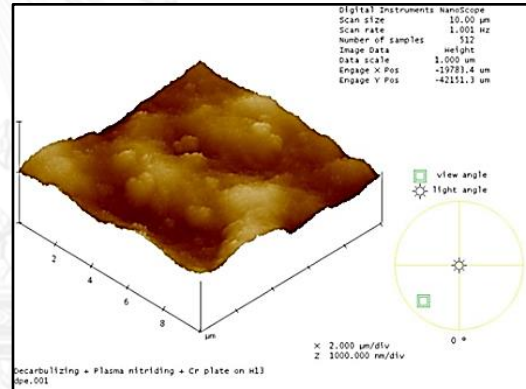
EP



PE

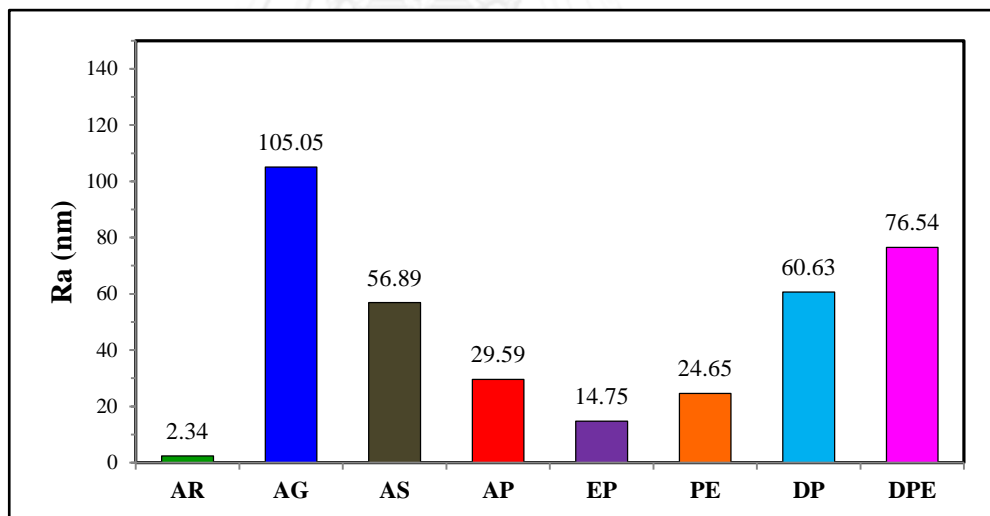
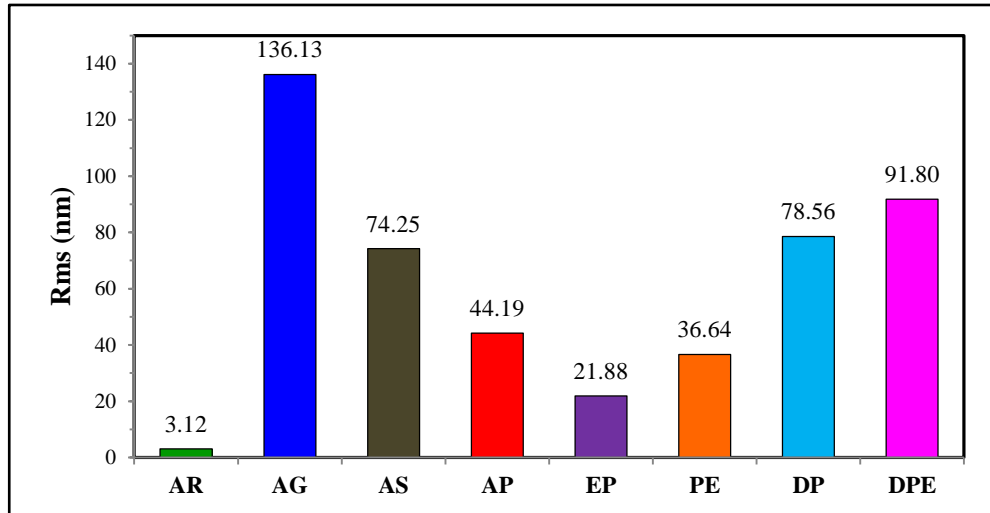


DP



DPE

เปรียบเทียบความขรุขระผิวของชิ้นงาน 8 กลุ่ม



ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

- ชื่อ - นามสกุล : นาย ธนกร เลิศจิระกุล
- วัน - เดือน - ปีเกิด : วันจันทร์ที่ 31 สิงหาคม พ.ศ.2530
- ที่อยู่ : 555/29 หมู่บ้าน ปิ๋วเวนิว-วัชรพล ถนนสุขุมวิท 5 แขวงออเงิน
เขตสายไหม กรุงเทพมหานคร 10220
- วุฒิการศึกษา : - สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาบัณฑิต (เกียรตินิยมอันดับสอง)
ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปีการศึกษา 2552
- สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาโทบัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปีการศึกษา 2556
- อีเมล : chaiiahc@hotmail.com