

สัมประสิทธิ์การแพร่ของไฮโดรเจนผ่านผิวเคลือบทองคำ และผิวเคลือบนิเกิลบนเหล็กกล้าไร้สนิม  
AISI 304



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการและวัสดุ ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
ปีการศึกษา 2562  
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Hydrogen diffusivity through stainless steel AISI 304 with gold and nickel coated layer



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Engineering in Metallurgical and Materials Engineering

Department of Metallurgical Engineering

FACULTY OF ENGINEERING

Chulalongkorn University

Academic Year 2019

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	สัมประสิทธิ์การแพร่ของไฮโดรเจนผ่านผิวเคลือบทองคำ และผิวเคลือบนิกเกิลบนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304
โดย	นายกฤตยชญ์ วรรณโพธิ์กลาง
สาขาวิชา	วิศวกรรมโลหการและวัสดุ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ศาสตราจารย์ ดร.กอบบุญ หล่อทองคำ

---

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง  
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

.....	คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)	
คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์	
.....	ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.ปฐมา วิสุทธิพิทักษ์กุล)	
.....	อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ศาสตราจารย์ ดร.กอบบุญ หล่อทองคำ)	
.....	กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มาวิน สุประดิษฐ์ ณ อยู่ธยา)	
.....	กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ดร.พงศ์ภัทร หล่อตระกูล)	

กฤตยชญ์ วรรณโพธิ์กลาง : สัมประสิทธิ์การแพร่ของไฮโดรเจนผ่านผิวเคลือบทองคำ และผิวเคลือบนิกเกิลบนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304. ( Hydrogen diffusivity through stainless steel AISI 304 with gold and nickel coated layer) อ.ที่ปรึกษาหลัก : ศ. ดร.กอบบุญ หล่อทองคำ

งานวิจัยนี้เกิดจากพื้นฐานความคิดว่าชั้นเคลือบโลหะบนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 เป็นชั้นต้านทานการแพร่ของไฮโดรเจนเพื่อชะลอการแตกร้าวจากการช่วยของไฮโดรเจน (Hydrogen Assisted Cracking, HAC) ในงานวิจัยใช้ขั้นตอนการดำเนินงานตามมาตรฐาน ASTM G148-97 ตรวจวัดสัมประสิทธิ์การแพร่ไฮโดรเจนประสิทธิผล ชั้นเคลือบนิกเกิลและทองคำด้วยไฟฟ้าบนชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 แผ่นบางตามขั้นตอนในอุตสาหกรรมซึ่งเป็นด้านเซลล์อัดประจุ ถูกตรวจสอบเพสโดยใช้การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ และวัดขนาดความหนาเฉลี่ยด้วยภาพถ่าย อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ด้านเซลล์ออกซิไดซ์ถูกเคลือบด้วยชั้นเคลือบนิกเกิล ผลการทดลองพบว่า ที่อุณหภูมิ 301 K จากการคำนวณใช้เวลาการซึมผ่านและเวลาล่าช้า ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ไฮโดรเจนประสิทธิผลเฉลี่ยของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ที่ไม่มีชั้นเคลือบด้านการอัดประจุเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ที่มีชั้นเคลือบนิกเกิลด้วยไฟฟ้าด้านการอัดประจุ และเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ที่มีชั้นเคลือบทองคำด้วยไฟฟ้าด้านการอัดประจุ เท่ากับ  $5.98 \times 10^{-13}$ ,  $6.05 \times 10^{-13}$  และ  $3.57 \times 10^{-14} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$  ตามลำดับ จากการคำนวณสัมประสิทธิ์การแพร่ไฮโดรเจนประสิทธิผลในเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ในชั้นเคลือบนิกเกิลและในชั้นเคลือบทองคำ มีค่าเท่ากับ  $7.99 \times 10^{-13}$ ,  $3.40 \times 10^{-14}$  และ  $5.19 \times 10^{-16} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$  ตามลำดับ จากผลข้างต้น กล่าวได้ว่า ชั้นเคลือบทองคำด้วยไฟฟ้ามีประสิทธิภาพการต้านทานการแพร่ของไฮโดรเจนดีที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 และชั้นเคลือบนิกเกิลด้วยไฟฟ้า

สาขาวิชา วิศวกรรมโลหการและวัสดุ

ปีการศึกษา 2562

ลายมือชื่อนิสิต .....

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก .....

# # 5971469621 : MAJOR METALLURGICAL AND MATERIALS ENGINEERING

KEYWORD: Metallic coatings, AISI 304 stainless steel, Hydrogen Assisted Cracking, Industrial electrocoating, Effective hydrogen diffusivity

Krittayot Wannapoklang : Hydrogen diffusivity through stainless steel AISI 304 with gold and nickel coated layer. Advisor: Prof. GOBBOON LOTHONGKUM, Dr.Ing.

Metallic coatings on AISI 304 stainless steels were thought to be a barrier for hydrogen diffusion to reduce Hydrogen Assisted Cracking (HAC). In this research, the experimental procedures following ASTM G148-97 were used to evaluate their effective hydrogen diffusivity. The industrial electrocoated layers of nickel and gold on a thin AISI 304 stainless-steel specimen as the charging cell were identified the phase using an XRD and measured the average thicknesses using back-scattered scanning electron images. On the other side, nickel coating layer performed as the oxidizing cell. From breakthrough time and time lag methods, it showed that the average effective hydrogen diffusivities of AISI 304 stainless steel without coated charging layer, AISI 304 stainless steel with electrocoated nickel charging layer and AISI 304 stainless steel with electrocoated gold charging layer were  $5.98 \times 10^{-13}$ ,  $6.05 \times 10^{-13}$  and  $3.57 \times 10^{-14}$   $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$  at 301 K, respectively. From the calculation, the effective hydrogen diffusivities in AISI 304 stainless steel, nickel layer and gold layer were  $7.99 \times 10^{-13}$ ,  $3.40 \times 10^{-14}$  and  $5.19 \times 10^{-16}$   $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ , respectively. It can say that electrocoated gold layer is the most effective prevention layer for hydrogen diffusion compared with AISI 304 stainless steels and the electrocoated nickel layer.

Field of Study: Metallurgical and Materials Engineering Student's Signature .....

Academic Year: 2019

Advisor's Signature .....

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ด้วยความช่วยเหลือจากหลายฝ่าย ผู้วิจัยขอกราบ  
ขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ศาสตราจารย์ ดร.กอบบุญ หล่อทองคำ ที่ให้ความรู้  
ข้อเสนอแนะ แนวคิด ตลอดจนแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ มาโดยตลอด จนวิทยานิพนธ์เล่มนี้เสร็จสมบูรณ์

ขอกราบขอบพระคุณโครงการพัฒนานักวิจัยและงานวิจัยเพื่ออุตสาหกรรม (พวอ.) และบริษัท  
ระยองวิศวกรรมและซ่อมบำรุง จำกัด ที่ให้การสนับสนุนทุนวิจัยในครั้งนี้จนสำเร็จลุล่วงด้วยดี

ขอขอบพระคุณ อาจารย์ ดร.ศิริชัย ลีลาเขาว์ สำหรับคำแนะนำและให้ความอนุเคราะห์  
อุปกรณ์ปรับค่ากระแสไฟฟ้า

ขอขอบพระคุณบริษัท โพลสโค ไทยน็อกซ์ จำกัด (มหาชน) ที่ให้ความอนุเคราะห์ชิ้นงาน  
เหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304

ขอขอบพระคุณบริษัท ยูนิคอร์ จำกัด และ บริษัท วาย.เอ.เอส.โกลด์ อีเล็กโทรเพลทิง จำกัด  
ที่เป็นทั้งที่ปรึกษาและให้ความช่วยเหลือเรื่องการเคลือบไฟฟ้า

ขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์และเจ้าหน้าที่ประจำภาควิชาวิศวกรรมโลห  
การทุกท่านที่ให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นที่เป็นประโยชน์ต่อการทำวิจัย

สุดท้ายนี้ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดาและครอบครัวที่สนับสนุนในด้านต่าง ๆ  
ด้วยดี และเป็นแรงผลักดันตลอดจนสำเร็จการศึกษา ขอขอบคุณเพื่อน ๆ พี่ ๆ น้อง ๆ ทุกท่านที่ให้ความ  
ช่วยเหลือทั้งด้านการศึกษาหาความรู้และเป็นกำลังใจแก่ผู้วิจัยด้วยดีเสมอมา ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งในความ  
กรุณาและความปรารถนาดีของทุกท่านเป็นอย่างยิ่ง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

กฤตยชญ์ วรรณโพธิ์กลาง

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....	ง
กิตติกรรมประกาศ .....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูป .....	ญ
บทที่ 1 บทนำ .....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตการศึกษา .....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 ปรีทอร์ศน์วรรณกรรม.....	4
2.1 เหล็กกล้าไร้สนิม .....	4
2.2 ปัจจัยที่ส่งผลต่อการเกิดโครงสร้างจุลภาคมาร์เทนไซต์จากโครงสร้างจุลภาคออสเทนไนต์.....	4
2.3 การเชื่อมโลหะ .....	8
2.3.1 ผลกระทบจากการเชื่อมโลหะ .....	9
2.4 พฤติกรรมของไฮโดรเจนที่มีต่อโลหะ .....	10
2.5 การแพร่.....	13
2.6 การวัดสัมประสิทธิ์การแพร่ไฮโดรเจนประสิทธิภาพตามมาตรฐาน “Standard practice for evaluation of hydrogen uptake, permeation, and transport in metals by an electrochemical technique (ASTM G148-97)” .....	15
2.6.1 ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่าง.....	15

2.6.2	ขั้นตอนการทดลองวัดสัมประสิทธิ์การแพร่ไฮโดรเจนประสิทธิผล .....	16
2.6.3	ปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นระหว่างการทดลองวัดสัมประสิทธิ์การแพร่ไฮโดรเจนประสิทธิผล .....	17
2.6.4	การคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ไฮโดรเจนประสิทธิผล .....	18
2.7	การวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ไฮโดรเจนประสิทธิผล .....	18
2.8	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	20
2.8.1	พฤติกรรมของแก๊สไฮโดรเจนบนผิวโลหะที่สภาวะอุณหภูมิต่ำ .....	20
2.8.2	สัมประสิทธิ์การแพร่ของไฮโดรเจนในเหล็กกล้าไร้สนิม นิกเกิล เงิน ทองแดง แพลทินัม พาราเดียมและทองคำ .....	21
2.8.2.1	สัมประสิทธิ์การแพร่ของไฮโดรเจนผ่านเหล็กกล้าไร้สนิม .....	21
2.8.2.2	สัมประสิทธิ์การแพร่ของไฮโดรเจนในนิกเกิล .....	23
2.8.2.3	สัมประสิทธิ์การแพร่ของไฮโดรเจนในพาราเดียม ทองแดง เงิน แพลทินัมและทองคำ.....	25
2.9	การเคลือบไฟฟ้า (Electrocoating) .....	27
บทที่ 3	ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	29
3.1	สารเคมีและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย .....	29
3.1.1	สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย.....	29
3.1.2	อุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย.....	30
3.2	วิธีการทดลอง .....	30
3.2.1	การเคลือบนิกเกิลและทองคำบนแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 .....	30
3.2.1.1	การเตรียมพื้นผิวเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304.....	31
3.2.1.2	การสร้างชั้นเคลือบบนผิวเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 .....	31
3.2.2	การตรวจสอบชั้นเคลือบ.....	34
3.2.3	การทดลองหาสัมประสิทธิ์การแพร่ไฮโดรเจนประสิทธิผล .....	34
3.2.4	การศึกษาลักษณะชั้นงานและวัดความหนาเฉลี่ย .....	40



บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	41
4.1 การตรวจสอบชั้นเคลือบด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction) .....	41
4.2 ลักษณะชิ้นงานและการตรวจสอบชั้นเคลือบด้วยเทคนิคอิเล็กตรอนกระเจิงกลับ (Back scatter electron).....	42
4.3 ความหนาเฉลี่ยของชั้นเคลือบและชั้นเนื้อพื้น .....	46
4.4 ผลของชั้นเคลือบต่อพฤติกรรมการแพร่ของไฮโดรเจน.....	47
4.5 สัมประสิทธิ์การแพร่ไฮโดรเจนประสิทธิผล .....	52
4.6 การคำนวณสัมประสิทธิ์การแพร่ไฮโดรเจนประสิทธิผลในเหล็กกล้าโรสนิม AISI 304 ในชั้นเคลือบนิกเกิลด้วยไฟฟ้า และในชั้นเคลือบทองคำด้วยไฟฟ้า .....	54
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง.....	57
ภาคผนวก.....	58
ภาคผนวก ก .....	59
ภาคผนวก ข .....	63
บรรณานุกรม.....	64
ประวัติผู้เขียน.....	67

## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 สัมประสิทธิ์การแพร่ของไฮโดรเจนในพาราเดียม ทองแดง เงิน เหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304, AISI 316, AISI 310 แพลทินัม นิกเกิลและทองคำ .....	27
ตารางที่ 2.1 สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย .....	29
ตารางที่ 3.2 องค์ประกอบเคมี (wt. %) ของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 .....	30
ตารางที่ 4.1 ความหนาเฉลี่ยของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ชั้นเคลือบนิกเกิลด้วยไฟฟ้าและชั้นเคลือบทองคำด้วยไฟฟ้า .....	47
ตารางที่ 4.2 เวลาการซึมผ่าน (Breakthrough time, $t_b$ ) และเวลาล่าช้า (Time lag, $t_{lag}$ ) .....	50
ตารางที่ 4.3 สัมประสิทธิ์การแพร่ไฮโดรเจนประสิทธิผลจากเวลาการซึมผ่าน (Breakthrough time, $t_b$ ) เวลาล่าช้า (Time lag, $t_{lag}$ ) ค่าเฉลี่ยระหว่างเวลาการซึมผ่านและเวลาล่าช้า (Average effective hydrogen diffusivity, $D_{ave\_eff}$ ) .....	54
ตารางที่ 4.4 สัมประสิทธิ์การแพร่ไฮโดรเจนประสิทธิผลในเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ในชั้นเคลือบนิกเกิลด้วยไฟฟ้า และในชั้นเคลือบทองคำด้วยไฟฟ้า .....	56
ตารางที่ ก.1 ค่าการคำนวณสัมประสิทธิ์การแพร่ไฮโดรเจนประสิทธิผลในเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ชั้นเคลือบนิกเกิลและชั้นเคลือบทองคำด้วยไฟฟ้า .....	63

## สารบัญรูป

## หน้า

รูปที่ 1.1 ภาพจำลองของถังเก็บบรรจุแก๊สปิโตรเลียม.....	1
รูปที่ 2.1 แผนภูมิสมมูลเหล็กกล้าคาร์บอน โดยที่ $\alpha$ , $\gamma$ และ $Fe_3C$ คือโครงสร้างจุลภาคแอลฟา แกรมมาและซีเมนไต์ ตามลำดับ [9].....	5
รูปที่ 2.2 การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าผสมคาร์บอนในปริมาณ 0.76 wt. % ที่อุณหภูมิคงที่เทียบกับเวลา โดยที่ A, P, B และ M คือโครงสร้างจุลภาคออสเทนไนต์ เฟอร์ไรต์ เบไนต์ และมาร์เทนไซต์ ตามลำดับ และ M(start) คืออุณหภูมิเริ่มเป็นโครงสร้างจุลภาคมาร์เทนไซต์ [9].....	6
รูปที่ 2.3 โครงสร้างผลึกแบบ Face centered cubic (Fcc) [9] .....	7
รูปที่ 2.4 โครงสร้างผลึกแบบ Body centered tetragonal (Bct) โดยที่ x คือตำแหน่งที่อะตอมคาร์บอนสามารถครอบครองได้ a คือระยะห่างระหว่างอะตอมตามแนวความกว้างและความยาวของหน่วยเซลล์และ c คือระยะห่างระหว่างอะตอมตามแนวความสูงของหน่วยเซลล์ [9] .....	8
รูปที่ 2.5 ภาพจำลองพฤติกรรมของไฮโดรเจนกับโลหะระหว่างการเชื่อม [1] .....	10
รูปที่ 2.6 อัตราส่วนระหว่างฟลักซ์ของไฮโดรเจน ณ เวลาใดเวลาหนึ่งและฟลักซ์ของไฮโดรเจนในการทำโพลาริเซชันครั้งที่ 1 และครั้งที่ 2 ของเหล็กบริสุทธิ์และเหล็กที่มีธาตุไทเทเนียมผสมในปริมาณ 1.5 wt. % [4].....	11
รูปที่ 2.7 ภาพจำลองพฤติกรรมการแพร่ของไฮโดรเจนและการบวมของโลหะ [4] .....	12
รูปที่ 2.8 การแพร่ของแก๊สในสถานะคงที่ผ่านพื้นที่หน้าตัด (A) ของแผ่นโลหะซึ่งมีความหนา (x) ภายใต้อุณหภูมิและความดันแก๊ส (P) [9].....	14
รูปที่ 2.9 ความเข้มข้นของสสารที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา (t) และระยะทาง [9].....	14
รูปที่ 2.10 ภาพจำลองการต่อเซลล์การทดลองและการต่อวงจรไฟฟ้าสำหรับการทดลองหาสัมประสิทธิ์การแพร่ไฮโดรเจนประสิทธิผล [14] .....	17
รูปที่ 2.11 กราฟแสดงความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าซึมผ่าน (J) กับเวลา และปริพันธ์ของกระแสไฟฟ้าซึมผ่าน (Q) กับเวลา [17].....	20
รูปที่ 2.12 การเปลี่ยนแปลงความต่างศักย์ไฟฟ้า ( $\Delta SP$ ) บนพื้นผิวฟิล์มนิเกิลภายใต้อุณหภูมิและความดันของแก๊สไฮโดรเจน $10^{-4}$ -10 Pa ที่อุณหภูมิ 78 และ 298 K [18] .....	21

รูปที่ 2.13 ความแข็งจุลภาค (Microhardness) ที่ความลึกจากพื้นผิว 40-320  $\mu\text{m}$  ของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304, AISI 310 และ AISI 316 ซึ่งผ่านการอัดประจุในสารละลายกรดซัลฟิวริก ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ )  $0.5 \text{ mol}\cdot\text{m}^{-3}$  และไอออนอาร์เซนิตประจุสามลบ ( $\text{AsO}_4^{3-}$ ) 100 ppm เป็นเวลา 43.20 ks [7]..... 23

รูปที่ 2.14 ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าซึมผ่าน ( $P_t$ ) และเวลา ( $t$ ) [19]..... 24

รูปที่ 2.15 สัมประสิทธิ์การแพร่ของไฮโดรเจนในแพลทินัม ทองแดง เงิน พาราเดียมและทองคำ ที่อุณหภูมิ 280-330 K [5]..... 26

รูปที่ 2.16 ภาพจำลองการสร้างชั้นเคลือบด้วยไฟฟ้า [20] ..... 28

รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการเคลือบนิเกิลและทองคำบนด้วยไฟฟ้าบนแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304..... 33

รูปที่ 3.2 ภาพจำลองขั้นตอนการทดลองหาสัมประสิทธิ์การแพร่ไฮโดรเจนประสิทธิภาพตามมาตรฐาน ASTM G148-97 ..... 35

รูปที่ 3.3 กราฟจำลองแสดงความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าซึมผ่าน (Permeation current density) ที่เปลี่ยนแปลงกับเวลา และค่าเวลาการซึมผ่าน (Breakthrough time,  $t_b$ ) ..... 36

รูปที่ 3.4 กราฟจำลองแสดงอัตราส่วนระหว่างฟลักซ์ของไฮโดรเจน ณ เวลาใดเวลาหนึ่งและฟลักซ์ของไฮโดรเจน ณ สภาวะคงตัว (Normalized flux) กับเวลา..... 37

รูปที่ 3.5 กราฟจำลองแสดงอัตราส่วนระหว่างฟลักซ์ของไฮโดรเจน ณ เวลาใดเวลาหนึ่งและฟลักซ์ของไฮโดรเจน ณ สภาวะคงตัว (Normalized flux) กับเวลา กราฟจำลอง “Boltzmann” และค่าเวลาล่าช้า (Time lag,  $t_{lag}$ ) ..... 38

รูปที่ 3.6 กราฟแสดงอัตราส่วนระหว่างฟลักซ์ของไฮโดรเจน ณ เวลาใดเวลาหนึ่ง และฟลักซ์ของไฮโดรเจน ณ สภาวะคงตัว (Normalized flux) กับเวลา และกราฟจำลองตามกฎการแพร่ข้อที่ 2 ของฟิคส์ (Fick’s second law)..... 39

รูปที่ 4.1 X-ray diffraction ของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ที่ไม่มีชั้นเคลือบด้านการอัดประจุ (1ก) เหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ที่มีชั้นเคลือบนิเกิลด้วยไฟฟ้าด้านการอัดประจุ (1ข) และเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ที่มีชั้นเคลือบทองคำด้วยไฟฟ้าด้านการอัดประจุ (1ค) ..... 42

รูปที่ 4.2 ภาคตัดขวาง (Cross section) ของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ที่ไม่มีชั้นเคลือบด้านการอัดประจุ (ก และ ข) เหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ที่มีชั้นเคลือบนิเกิลด้วยไฟฟ้าด้านการอัดประจุ (ค และ ง) และเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ที่มีชั้นเคลือบทองคำด้วยไฟฟ้าด้านการอัดประจุ (จ และ ฉ)..... 44

รูปที่ 4.3 ภาคตัดขวาง (Cross section) และสเปกตรัมแสดงองค์ประกอบทางเคมีของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ที่ไม่มีชั้นเคลือบด้านการอัดประจุ (ก และ ข) เหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ที่มีชั้นเคลือบนิกเกิลด้วยไฟฟ้าด้านการอัดประจุ (ค และ ง) และเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ที่มีชั้นเคลือบทองคำด้วยไฟฟ้าด้านการอัดประจุ (ฉ และ จ) ..... 45

รูปที่ 4.4 ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าซึมผ่านที่เปลี่ยนแปลงกับเวลา และค่าเวลาการซึมผ่าน (Breakthrough time,  $t_b$ ) ..... 48

รูปที่ 4.5 กราฟแสดงอัตราส่วนระหว่างฟลักซ์ของไฮโดรเจน ณ เวลาใดเวลาหนึ่งและฟลักซ์ของไฮโดรเจน ณ สภาวะคงตัว (Normalized flux) กับเวลา กราฟจำลอง “Boltzmann” และค่าเวลาล่าช้า (Time lag,  $t_{lag}$ )..... 49

รูปที่ 4.6 กราฟแสดงอัตราส่วนระหว่างฟลักซ์ของไฮโดรเจน ณ เวลาใดเวลาหนึ่งและฟลักซ์ของไฮโดรเจน ณ สภาวะคงตัว (Normalized flux) กับเวลา และกราฟจำลองตามกฎการแพร่ข้อที่ 2 ของฟิกส์ (Fick’s second law)..... 52

รูปที่ ก.1 กราฟจำลองแสดงความเข้มข้นของไฮโดรเจนและระยะทาง ..... 59

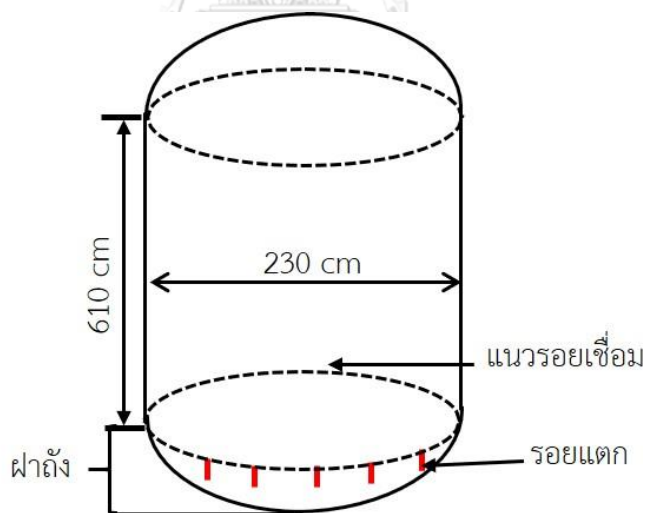
รูปที่ ก.2 กระแสไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลง (i) ปริพันธ์ของกระแสไฟฟ้า (Q) เทียบกับเวลา (t) เวลาการซึมผ่าน (Breakthrough time,  $t_b$ ) และเวลาล่าช้า (Time lag,  $t_{lag}$ ) [3]..... 62

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

บริษัท ระยองวิศวกรรมและซ่อมบำรุง จำกัด เป็นบริษัทในเครือ เอสซีจี เคมิคอลส์ ทำหน้าที่ตรวจสอบและซ่อมบำรุงอุปกรณ์ของบริษัทที่อยู่ในเครือ บริษัท ฯ ตรวจสอบรอยแตกของถังบรรจุแก๊สปิโตรเลียมที่ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ซึ่งแก๊สที่บรรจุภายในประกอบด้วยแก๊สไฮโดรเจนเป็นองค์ประกอบประมาณ 6 vol. % ในขณะที่บรรจุแก๊สตัวถังจะมีอัตราการเย็นตัวประมาณ  $0.09 \text{ K}\cdot\text{s}^{-1}$  จนกระทั่งรักษาความดันและอุณหภูมิที่ 4.3 MPa และ 153 K ตามลำดับ ระหว่างการใช้งานตรวจพบรอยแตกเกิดขึ้นที่ขอบฝาถังด้านล่าง (Bottom head) โดยที่รอยแตกมีทิศตั้งฉากกับรอยเชื่อมแนวเส้นรอบวง (Circumferential weld seam) ดังรูปที่ 1.1 ซึ่งทำให้ถังแก๊สไม่สามารถใช้งานต่อได้ จากการวิเคราะห์สาเหตุเบื้องต้นพบว่าบริเวณใกล้รอยแตกมีโครงสร้างจุลภาคมาร์เทนไซต์ประมาณ 25 vol. % เนื่องจากฝาถังด้านล่างได้ผ่านกระบวนการขึ้นรูปเย็นซึ่งอาจเป็นสาเหตุของการเกิดเฟสมาร์เทนไซต์ อีกทั้งบริเวณรอยเชื่อมมีค่า Ferrite number ประมาณ 12 vol. % ซึ่งโดยปกติควรมีค่าอยู่ระหว่าง 8-10 vol. %



รูปที่ 1.1 ภาพจำลองของถังเก็บบรรจุแก๊สปิโตรเลียม

ผู้วิจัยตั้งสมมติฐานว่ารอยแตกที่พบอาจเกิดจากการแตกร้าวจากการช่วยของไฮโดรเจน (Hydrogen Assisted Cracking, HAC) [1-4] ซึ่งมีองค์ประกอบ 3 ข้อ คือ 1. ความเค้นคงค้างแรงดึง (Tensile residual stress) จากกระบวนการเชื่อม 2. โครงสร้างจุลภาคมาร์เทนไซต์จากกระบวนการเชื่อมโลหะและกระบวนการขึ้นรูปเย็น 3. การละลายของไฮโดรเจนระหว่างกระบวนการเชื่อมและการแพร่ของไฮโดรเจนระหว่างกระบวนการบรรจุแก๊ส

แนวทางการป้องกันความเสียหายดังกล่าวนี้สามารถจำแนกออกเป็น 3 วิธี คือ 1. การอบอ่อน (Annealing) เพื่อบรรเทาความเค้นคงค้างแรงดึง 2. การควบคุมบรรยากาศของแก๊สไฮโดรเจนระหว่างกระบวนการเชื่อมโลหะ และ 3. การสร้างชั้นเคลือบเพื่อชะลอการแพร่ของไฮโดรเจนระหว่างกระบวนการบรรจุแก๊ส ผู้วิจัยมีความสนใจเกี่ยวกับการลดความเสียหายดังกล่าวด้วยการเคลือบผิวเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 โดยการเลือกวัสดุเคลือบที่มีสัมประสิทธิ์การแพร่ของไฮโดรเจนต่ำ จากการศึกษาพบว่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของไฮโดรเจนในพาราเดียม ทองแดง เงิน แพลทินัม ทองคำ [5] และนิกเกิล [6] มีค่าเท่ากับ  $6.00 \times 10^{-9}$ ,  $6.00 \times 10^{-12}$ ,  $5.00 \times 10^{-12}$ ,  $1.00 \times 10^{-13}$ ,  $5.00 \times 10^{-14}$  และ  $6.02 \times 10^{-14} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$  ที่อุณหภูมิ 301 K ตามลำดับ ในขณะที่ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของไฮโดรเจนในเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 [7] มีค่าเท่ากับ  $2.86 \times 10^{-13} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$  ที่อุณหภูมิ 304 K จะเห็นว่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของไฮโดรเจนในทองคำและนิกเกิลมีค่าต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 จึงเหมาะแก่การนำไปเคลือบผิวเพื่อต้านทานการแพร่ของไฮโดรเจน

วิธีการเคลือบทองคำและนิกเกิลที่ผู้วิจัยใช้ในการทดลอง คือการเคลือบไฟฟ้า (Electrocoating) ซึ่งเป็นวิธีเคลือบผิวโลหะที่พบในอุตสาหกรรมเครื่องประดับ โดยหลังจากการเคลือบจะได้ชั้นเคลือบนิกเกิลและชั้นเคลือบทองคำ ดังนั้นผู้วิจัยจึงมีความประสงค์ที่จะเคลือบผิวเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ด้วยชั้นเคลือบนิกเกิลและชั้นเคลือบทองคำด้วยไฟฟ้า จากนั้นทำการวัดและเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์การแพร่ไฮโดรเจนประสิทธิผลตามมาตรฐาน ASTM G148-97

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

วัตถุประสงค์การแพร่ไฮโดรเจนประสิทธิผลในเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ที่ไม่มีชั้นเคลือบด้านการอัดประจุ ในเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ที่มีชั้นเคลือบนิกเกิลด้วยไฟฟ้าด้านการอัดประจุ และเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ที่มีชั้นเคลือบทองคำด้วยไฟฟ้าด้านการอัดประจุ

## 1.3 ขอบเขตการศึกษา

1. ทดลองเคลือบนิกเกิลและทองคำด้วยไฟฟ้าบนชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ตามขั้นตอนการเคลือบในอุตสาหกรรมเครื่องประดับ ที่ด้านการอัดประจุ ส่วนด้านเซลล์ออกซิเดชันถูกเคลือบด้วยชั้นเคลือบนิกเกิล

2. ตรวจสอบชั้นเคลือบของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ที่ไม่มีชั้นเคลือบด้านการอัดประจุ เหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ที่มีชั้นเคลือบนิกเกิลด้วยไฟฟ้าด้านการอัดประจุ และเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ที่มีชั้นเคลือบทองคำด้วยไฟฟ้าด้านการอัดประจุ ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction, XRD)

3. วัดขนาดความหนาเฉลี่ยของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ชั้นเคลือบนิกเกิลและชั้นเคลือบทองคำด้วยไฟฟ้า ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM)

4. วัตถุประสงค์การแพร่ไฮโดรเจนประสิทธิผลในเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ที่ไม่มีชั้นเคลือบด้านการอัดประจุ ในเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ที่มีชั้นเคลือบนิกเกิลด้วยไฟฟ้าด้านการอัดประจุ และเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ที่มีชั้นเคลือบทองคำด้วยไฟฟ้าด้านการอัดประจุ ตามมาตรฐาน “Standard practice for evaluation of hydrogen uptake, permeation, and transport in metals by an electrochemical technique (ASTM G148-97)” ที่อุณหภูมิ 301 K

## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทราบถึงสัมประสิทธิ์การแพร่ไฮโดรเจนประสิทธิผลในเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ที่ไม่มีชั้นเคลือบด้านการอัดประจุ ในเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ที่มีชั้นเคลือบนิกเกิลด้วยไฟฟ้าด้านการอัดประจุ และเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ที่มีชั้นเคลือบทองคำด้วยไฟฟ้าด้านการอัดประจุ

2. เสนอแนะแนวทางการลดความเสียหายที่มีสาเหตุจากการแตกร้าวจากการช่วยของไฮโดรเจน (Hydrogen Assisted Cracking, HAC) ในถังบรรจุแก๊สไฮโดรเจนซึ่งทำมาจากเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ด้วยการเคลือบนิกเกิลหรือทองคำด้วยไฟฟ้า



## บทที่ 2

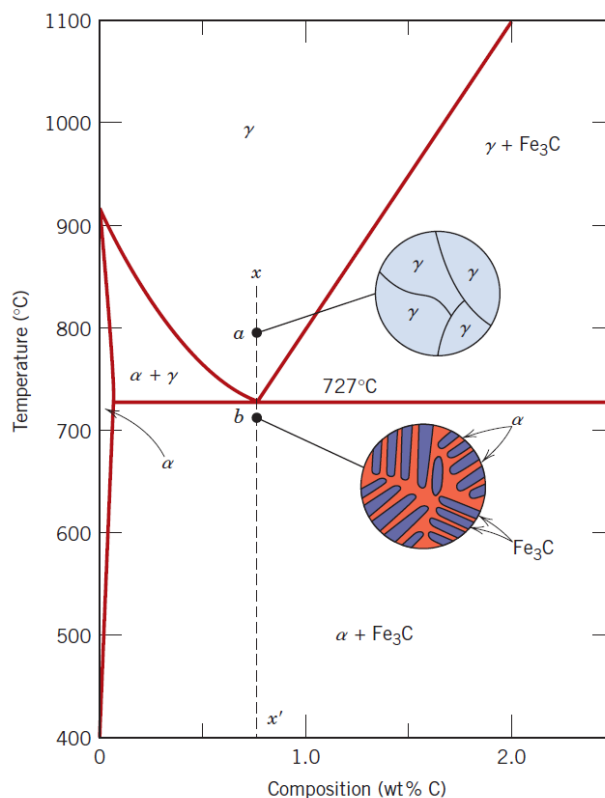
### ปริทรรศน์วรรณกรรม

#### 2.1 เหล็กกล้าไร้สนิม [8]

เหล็กกล้าไร้สนิม คือเหล็กที่มีส่วนผสมของธาตุโครเมียมที่มีปริมาณตั้งแต่ 11 wt. % เป็นต้นไปและมีคุณสมบัติเด่นด้านการทนต่อสิ่งแวดล้อมที่มีฤทธิ์กัดกร่อนเนื่องจากการสร้างชั้นฟิล์มออกไซด์บนพื้นผิวเหล็กกล้าไร้สนิม เหล็กกล้าไร้สนิมสามารถจำแนกออกเป็น 5 ประเภทตามลักษณะโครงสร้างจุลภาค ได้แก่ 1. เหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนไซต์ (Martensitic stainless steel) มีโครงสร้างจุลภาคมาร์เทนไซต์ 2. เหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ไรต์ (Ferritic stainless steel) มีโครงสร้างจุลภาคเฟอร์ไรต์ 3. เหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนไนต์ (Austenitic stainless steel) มีโครงสร้างจุลภาคออสเทนไนต์ 4. เหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ (Duplex stainless steel) มีโครงสร้างจุลภาคเฟอร์ไรต์ 50 vol. % และออสเทนไนต์ 50 vol. % และ 5. เหล็กกล้าไร้สนิมชุบแข็งตกตะกอน (Precipitation hardening stainless steel) คือเหล็กกล้าไร้สนิมที่ผ่านการอบให้เกิดการตกตะกอนในโครงสร้างจุลภาคมาร์เทนไซต์หรือออสเทนไนต์เพื่อเพิ่มความแข็งแรง

#### 2.2 ปัจจัยที่ส่งผลต่อการเกิดโครงสร้างจุลภาคมาร์เทนไซต์จากโครงสร้างจุลภาคออสเทนไนต์ [8, 9]

โครงสร้างจุลภาคออสเทนไนต์หรือแกมมา ( $\gamma$ ) และมาร์เทนไซต์เป็นโครงสร้างจุลภาคที่พบในโลหะ เช่น เหล็กกล้าคาร์บอน โดยที่โครงสร้างจุลภาคออสเทนไนต์ปรากฏในแผนภูมิสมดุลเหล็กกล้าคาร์บอนดังแสดงในรูปที่ 2.1 พบว่าที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิปฏิกิริยายูเทกทอยด์ (Eutectoid reaction temperature) หรือมีค่ามากกว่า 1000 K เหล็กกล้าที่มีธาตุคาร์บอนผสมในปริมาณ 0.76 wt. % จะมีโครงสร้างจุลภาคออสเทนไนต์ เมื่อได้รับการลดอุณหภูมิด้วยอัตราการเย็นตัวอย่างช้า ๆ ใกล้เคียงสภาพสมดุล อะตอมคาร์บอนจะเริ่มเกิดการแพร่ออกจากโครงสร้างจุลภาคแกมมา จากนั้นรวมตัวกับอะตอมเหล็กกลายเป็นโครงสร้างจุลภาคซีเมนไทต์ ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ) ในขณะเดียวกันโครงสร้างจุลภาคออสเทนไนต์ที่มีปริมาณคาร์บอนลดลงจะเริ่มเปลี่ยนแปลงเป็นโครงสร้างจุลภาคเฟอร์ไรต์หรือแอลฟา ( $\alpha$ ) ตามลำดับ



รูปที่ 2.1 แผนภูมิสมดุลเหล็กกล้าคาร์บอน โดยที่  $\alpha$ ,  $\gamma$  และ  $\text{Fe}_3\text{C}$  คือโครงสร้างจุลภาคแอลฟา แกรมมาและซีเมนไทต์ ตามลำดับ [9]

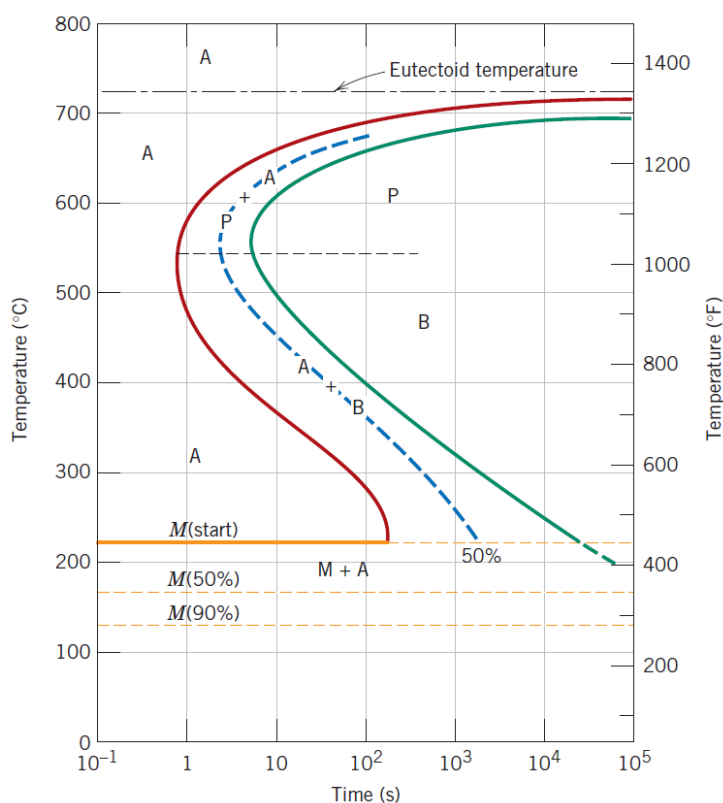
สำหรับโครงสร้างจุลภาคมาร์เทนไซต์ คือโครงสร้างจุลภาคที่ไม่ปรากฏในโลหะภายใต้สภาวะสมดุล ซึ่งอุณหภูมิและความเครียดเป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อการเกิดโครงสร้างจุลภาคมาร์เทนไซต์จากโครงสร้างจุลภาคออสเทนไนต์ โดยมีรายละเอียดดังแสดงต่อไปนี้

1. อุณหภูมิ รูปที่ 2.2 แสดงการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าผสมคาร์บอนในปริมาณ 0.76 wt. % ที่อุณหภูมิต่างกันที่เทียบกับเวลา โครงสร้างจุลภาคที่เกิดขึ้นสามารถจำแนกออกเป็น 3 รูปแบบตามลักษณะของอัตราการเย็นตัว ได้แก่ 1. อัตราการเย็นตัวช้า จะเกิดโครงสร้างจุลภาคเพิร์ลไลต์ซึ่งประกอบด้วยโครงสร้างจุลภาคซีเมนไทต์ ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ) กระจายตัวในโครงสร้างจุลภาคแอลฟา ( $\alpha$ ) ตามลำดับ 2. อัตราการเย็นตัวไม่ช้ามากหรือเร็วขึ้นพอควร จะเกิดโครงสร้างจุลภาคเบไนต์ซึ่งประกอบด้วยโครงสร้างจุลภาคซีเมนไทต์ ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ) ที่มีลักษณะอนุภาคคล้ายรูเข็มกระจายตัวในโครงสร้างจุลภาคแอลฟา ( $\alpha$ ) และ 3. อัตราการเย็นตัวสูงผ่านอุณหภูมิเริ่มเกิดโครงสร้างจุลภาคมาร์เทนไซต์ (Martensite starting temperature,  $M_s$ ) ซึ่งมีความเกี่ยวข้องกับอะตอมคาร์บอนที่ไม่มีเวลาเพียงพอสำหรับการแพร่ออกจากโครงสร้างจุลภาคออสเทนไนต์ ทำให้เกิดโครงสร้างจุลภาคมาร์เทนไซต์ซึ่งมีลักษณะคล้ายคลึงกับโครงสร้างจุลภาคเพิร์ไรต์แต่มีอะตอมคาร์บอนละลายอยู่ในปริมาณมาก

เรียกโครงสร้างจุลภาคดังกล่าวว่าแอลฟาพราวม ( $\alpha'$ ) นอกจากนี้พบว่า การเติมธาตุผสม ได้แก่ คาร์บอน ไนโตรเจน แมงกานีส นิกเกิล โครเมียม ทองแดงและโมลิบดีนัม ส่งผลให้อุณหภูมิเริ่มเป็นโครงสร้างจุลภาคมาร์เทนไซต์ลดลง ดังแสดงในสมการที่ 2.1

$$M_s = 502.00 - 810.00(\%C) - 1230.00(\%N) - 13.00(\%Mn) - 30.00(\%Ni) - 12.00(\%Cr) - 54.00(\%Cu) - 6.00(\%Mo) \quad 2.1$$

โดยที่  $M_s$  คืออุณหภูมิเริ่มเป็นโครงสร้างจุลภาคมาร์เทนไซต์ ( $^{\circ}C$ )



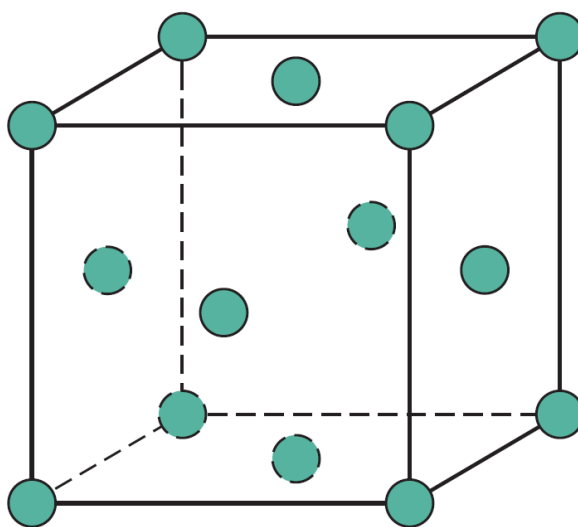
**รูปที่ 2.2** การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าผสมคาร์บอนในปริมาณ 0.76 wt. % ที่อุณหภูมิคงที่เทียบกับเวลา โดยที่ A, P, B และ M คือโครงสร้างจุลภาคออสเทนไนต์ เฟอร์ไรต์ เบไนต์ และมาร์เทนไซต์ ตามลำดับ และ M(start) คืออุณหภูมิเริ่มเป็นโครงสร้างจุลภาคมาร์เทนไซต์ [9]

2. การให้ความเครียด เป็นกระบวนการทางกลรูปแบบหนึ่งทำให้การจัดเรียงอะตอมในโครงสร้างผลึกโลหะเปลี่ยนแปลงจากโครงสร้างจุลภาคออสเทนไนต์ซึ่งมีโครงสร้างผลึกแบบ Face centered cubic (Fcc) ดังแสดงในรูปที่ 2.3 กลายเป็นโครงสร้างจุลภาคมาร์เทนไซต์หรือแอลฟาพราวม ( $\alpha'$ ) ซึ่งมีโครงสร้างผลึกแบบ Body centered tetragonal (Bct) ดังแสดงในรูปที่ 2.4

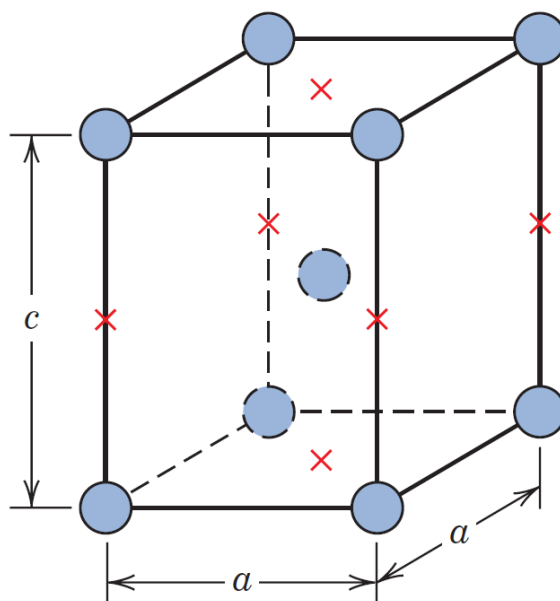
ตามลำดับ โดยที่โครงสร้างผลึกแบบ Fcc ประกอบด้วยอะตอมโลหะ เช่นอะตอมของเหล็กอาศัยอยู่ที่มุมและกึ่งกลางผิวด้านหน้าของหน่วยเซลล์ ในขณะที่โครงสร้างผลึกแบบ Bct ประกอบด้วยอะตอมโลหะอาศัยอยู่ที่จุดกึ่งกลางและอยู่ที่มุมของหน่วยเซลล์ ซึ่งอะตอมคาร์บอนสามารถแทรกที่ในช่องว่างออกตาฮีตรัล (Octahedral) และช่องว่างออกเตตราฮีตรัล (Tetrahedral) ตามลำดับ นอกจากนี้พบว่าการเติมธาตุโลหะผสมส่งผลต่ออุณหภูมิการเกิดโครงสร้างจุลภาคมาร์เทนไซต์เมื่อได้รับความเครียด สมการที่ 2.2 แสดงผลของธาตุผสมได้แก่ คาร์บอน ไนโตรเจน ซิลิคอน แมงกานีส นิกเกิล โครเมียมและโมลิบดีนัม ทำให้อุณหภูมิการเกิดโครงสร้างจุลภาคมาร์เทนไซต์เมื่อได้รับความเครียด 30 % ลดลง ซึ่งโครงสร้างจุลภาคมาร์เทนไซต์ที่ได้จากปัจจัยของอุณหภูมิและการให้ความเครียดมีคุณสมบัติเด่นด้านการเพิ่มความแข็งแรงและการลดความเหนียว เป็นต้น

$$M_{d30} = 497.00 - 462.00(\%C + \%N) - 9.20(\%Si) - 8.10(\%Mn) - 20.00(\%Ni) - 13.10(\%Cr) - 18.50(\%Mo) \quad 2.2$$

โดยที่  $M_{d30}$  คืออุณหภูมิที่เหล็กกล้าผสมได้รับความเครียด 30 % ทำให้โครงสร้างจุลภาคออสเทนไนต์ 50 vol. % เปลี่ยนเป็นโครงสร้างจุลภาคมาร์เทนไซต์ (°C)



รูปที่ 2.3 โครงสร้างผลึกแบบ Face centered cubic (Fcc) [9]



**รูปที่ 2.4** โครงสร้างผลึกแบบ Body centered tetragonal (Bct) โดยที่ x คือตำแหน่งที่อะตอมคาร์บอนสามารถครอบครองได้  $a$  คือระยะห่างระหว่างอะตอมตามแนวความกว้างและความยาวของหน่วยเซลล์และ  $c$  คือระยะห่างระหว่างอะตอมตามแนวความสูงของหน่วยเซลล์ [9]

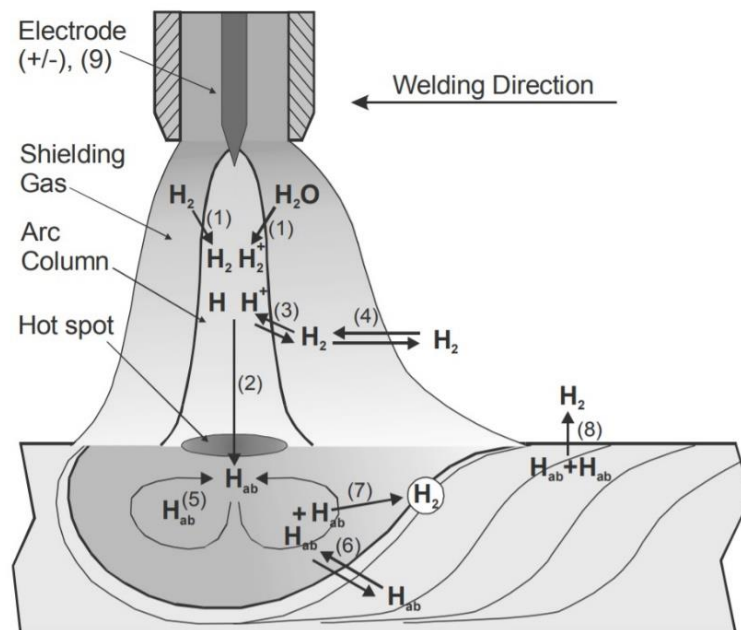
### 2.3 การเชื่อมโลหะ [1, 2, 10]

การเชื่อมโลหะ คือกระบวนการประสานโลหะโดยการอาศัยพลังงานความร้อน (Heat) ในปริมาณมากส่งผลทำให้อุณหภูมิที่บริเวณกระทบร้อน (Heat affected zone) มีอุณหภูมิสูงกว่าจุดหลอมเหลว (Melting point) ทำให้โลหะเกิดการหลอมละลายเข้าหากัน การเชื่อมโลหะแบ่งออกเป็น 4 ประเภทตามลักษณะของแหล่งพลังงาน ได้แก่ 1. แหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้า เป็นการสร้างพลังงานความร้อนจากการอาร์คพลาสมา จากความต้านทานไฟฟ้าหรือจากการเหนี่ยวนำความร้อนระหว่างขั้วไฟฟ้าและโลหะที่ต้องการเชื่อม ตัวอย่างของการเชื่อมประเภทนี้ ได้แก่ การเชื่อมอัด (Spot welding) การเชื่อมทิก (TIG: Tungsten inert gas welding) และการเชื่อมใต้ผงฟลักซ์ (Submerged arc welding) เป็นต้น 2. ปฏิกิริยาของสารเคมี เป็นการสร้างพลังงานความร้อนจากการทำปฏิกิริยาจากสารเคมีซึ่งทำให้เกิดปฏิกิริยาคายความร้อน เช่น การเชื่อมด้วยการเผาไหม้แก๊ส (Gas welding) การเชื่อมด้วยแก๊สอะเซทิลีน (Oxy-fuel welding) 3. ลำแสงพลังงานสูง เป็นการสร้างพลังงานความร้อนด้วยพลังงานจลน์จากการชนของลำอนุภาคไปยังแนวรอยเชื่อม และ 4. กระบวนการทางกล เป็นการสร้างพลังงานความร้อนด้วยการเสียดสีหรือการแปรรูปทางกล เช่น การเชื่อมด้วยแรงเสียดทาน (Friction welding) เป็นต้น

### 2.3.1 ผลกระทบจากการเชื่อมโลหะ

ผลกระทบจากการเชื่อมโลหะสามารถจำแนกออกเป็น 3 ประเภท ได้แก่ 1. โครงสร้างจุลภาค เช่น การเชื่อมเหล็กกล้าคาร์บอน เกิดการเปลี่ยนโครงสร้างจุลภาคที่บริเวณกระทบร้อนจากโครงสร้างจุลภาคออสเทนไนต์เป็นมาร์เทนไซต์ ซึ่งเกิดจากโครงสร้างจุลภาคออสเทนไนต์ที่อุณหภูมิสูงเย็นตัวลงด้วยอัตราการเย็นตัวสูงผ่านอุณหภูมิเริ่มการเป็นโครงสร้างจุลภาคมาร์เทนไซต์ 2. ความเค้นคงค้าง (Residual stress) เกี่ยวข้องกับการขยายตัวและหดตัวทางความร้อนเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงปริมาตรเหนี่ยวนำให้เกิดความเค้นคงค้างแรงดึง (Tensile residual stress) และ 3. พฤติกรรมของไฮโดรเจนกับโลหะ ซึ่งไฮโดรเจนสามารถละลายเข้าสู่โลหะจากกระบวนการเชื่อม พฤติกรรมการละลายของไฮโดรเจนสามารถอธิบายด้วยการเชื่อมทิก (TIG: Tungsten inert gas) ดังแสดงในรูปที่ 2.5 ซึ่งจำแนกออกเป็น 8 ขั้นตอน ดังนี้

1. การแยกตัว (Dissociation) และการแตกตัวให้อิออน (Ionization) ของแก๊สไฮโดรเจน ( $H_2$ ) ในแนวการอาร์ค (Arc column) กลายเป็นอะตอมไฮโดรเจน (H) หรืออิออนไฮโดรเจนประจุบวก ( $H^+$ )
2. อิออนไฮโดรเจนประจุบวก ( $H^+$ ) ที่บริเวณแนวการอาร์คเปลี่ยนเป็นอะตอมไฮโดรเจน (H) และถูกดูดซึม (Absorption) เข้าสู่แอ่งหลอมเหลว (weld pool)
3. การดูดซับ (Adsorption) ของอิออนไฮโดรเจนประจุบวก ( $H^+$ ) และการคายการดูดซับ (Desorption) กลายเป็นแก๊สไฮโดรเจน ( $H_2$ ) ที่บริเวณรอยต่อระหว่างแนวการอาร์คและแก๊สปกคลุม (Shielding gas)
4. การเคลื่อนที่ของแก๊สไฮโดรเจน ( $H_2$ ) ระหว่างบริเวณแก๊สปกคลุม (Shielding gas) และบรรยากาศล้อมรอบแนวการเชื่อม
5. การกระจายตัวของอะตอมไฮโดรเจนดูดซึม ( $H_{ab}$ ) จากขั้นตอนที่ 2 ไปยังแนวการไหลของแอ่งหลอมเหลว (weld pool)
6. การเคลื่อนที่ของอะตอมไฮโดรเจนดูดซึม ( $H_{ab}$ ) จากแอ่งหลอมเหลวและแนวการอาร์คไปยังบริเวณโลหะแข็งตัวใหม่
7. การรวมตัวกัน (Combination) ของอะตอมไฮโดรเจนดูดซึม ( $H_{ab}$ ) กลายเป็นฟองแก๊สไฮโดรเจน ( $H_2$ ) เนื่องจากความเข้มข้นของไฮโดรเจนมีค่ามากกว่าขีดจำกัดการละลาย (Solubility limit) เมื่ออุณหภูมิลดต่ำลง
8. การคายการดูดซับของอะตอมไฮโดรเจนดูดซึม ( $H_{ab}$ ) และรวมตัวกันกลายเป็นโมเลกุลระหว่างการเย็นตัวในสภาวะเข้าใกล้สมดุล



รูปที่ 2.5 ภาพจำลองพฤติกรรมของไฮโดรเจนกับโลหะระหว่างการเชื่อม [1]

## 2.4 พฤติกรรมของไฮโดรเจนที่มีต่อโลหะ [3, 4]

พฤติกรรมของไฮโดรเจนที่มีต่อโลหะสามารถจำแนกออกเป็น 6 ปรากฏการณ์ ดังนี้

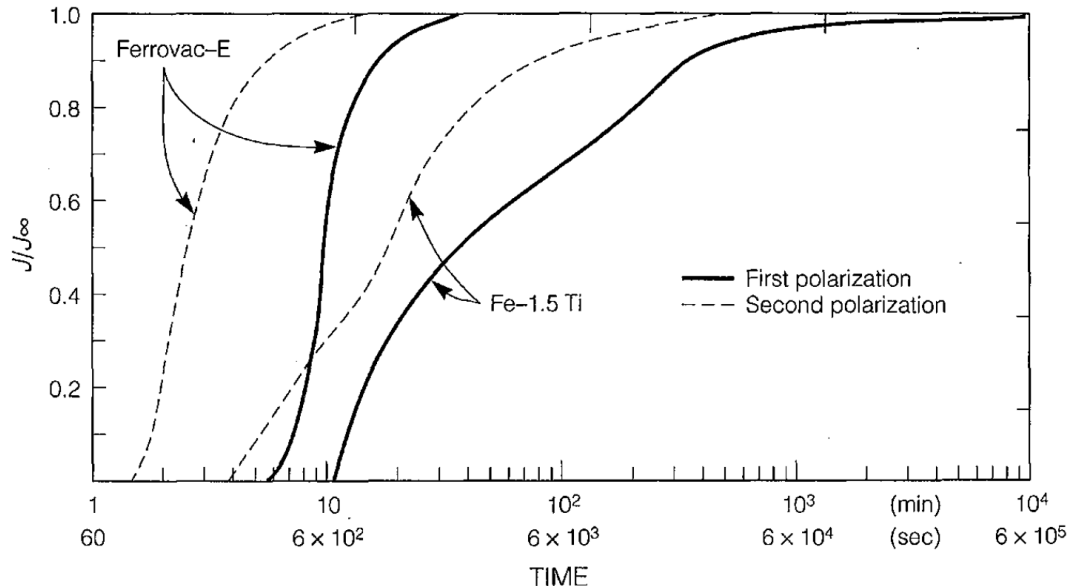
### 1. การแตกเปราะจากไฮโดรเจน (Hydrogen Embrittlement, HE)

คือปรากฏการณ์ของความเสียหายเนื่องจากการละลายของอะตอมไฮโดรเจน ซึ่งการแตกร้าจากการเหนี่ยวนำของไฮโดรเจน (Hydrogen Induced Cracking) เป็นรูปแบบหลักของความเสียหายประเภทนี้ มีความเกี่ยวข้องกับการเกิดรอยแตกภายใต้ภาระแรงดึง (Tensile load) และการดูดซับ (Adsorption) ของอะตอมไฮโดรเจนที่บริเวณปลายรอยแตก (Crack tips) ส่งผลให้พลังงานที่จำเป็นสำหรับการสร้างพื้นผิวใหม่ของรอยแตกลดลงจึงสามารถขยายตัว (Propagation) กลายเป็นรอยแตกที่มีขนาดใหญ่ขึ้น รอยแตกที่เกิดขึ้นมีลักษณะการแตกหักผ่ากลางเกรน (Transgranular fracture) หรือการแตกหักผ่าระหว่างเกรน (Intergranular fracture) โดยที่พื้นผิวของรอยแตกมีลักษณะเป็นร่างแหเล็กน้อย

## 2. การกักขังไฮโดรเจน (Hydrogen Trapping)

คือปรากฏการณ์ที่อะตอมไฮโดรเจนสามารถแพร่เข้าสู่โครงสร้างจุลภาคของโลหะและถูกชะลอด้วยบริเวณไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (Inhomogeneities) หรือกับดัก (Traps) ได้แก่ ขอบเกรน (Grain boundaries) รูที่มีขนาดเล็ก (Micro voids) ดิสโลเคชัน (Dislocations) ตะกอนตกผลึก (Precipitates) และอะตอมแทนที่ (Substituted atoms) เป็นต้น

รูปที่ 2.6 แสดงอัตราส่วนระหว่างฟลักซ์ของไฮโดรเจน ณ เวลาใดเวลาหนึ่งและฟลักซ์ของไฮโดรเจนในสภาวะคงตัว (Normalized flux) ในการทำโพลาริเซชันครั้งที่ 1 และครั้งที่ 2 ของเหล็กบริสุทธิ์และเหล็กที่มีธาตุไทเทเนียมผสมในปริมาณ 1.5 wt. % พบว่ากราฟแสดงอัตราส่วนระหว่างฟลักซ์ของไฮโดรเจน ณ เวลาใดเวลาหนึ่งและฟลักซ์ของไฮโดรเจนในสภาวะคงตัวของเหล็กในการทำโพลาริเซชันครั้งที่ 1 ใช้เวลาเริ่มต้นช้ากว่าการทำโพลาริเซชันครั้งที่ 2 เนื่องจากการชะลอการแพร่โดยกับดักไฮโดรเจนจากการทำโพลาริเซชันครั้งที่ 1 ในขณะที่กราฟแสดงอัตราส่วนระหว่างฟลักซ์ของไฮโดรเจน ณ เวลาใดเวลาหนึ่งและฟลักซ์ของไฮโดรเจนในสภาวะคงตัวของเหล็กที่มีธาตุไทเทเนียมผสมในปริมาณ 1.5 wt. % พบว่ามีเวลาเริ่มต้นช้ากว่าเหล็กบริสุทธิ์เนื่องจากการชะลอการแพร่ของไฮโดรเจนด้วยการแทนที่ของอะตอมไทเทเนียม เป็นต้น

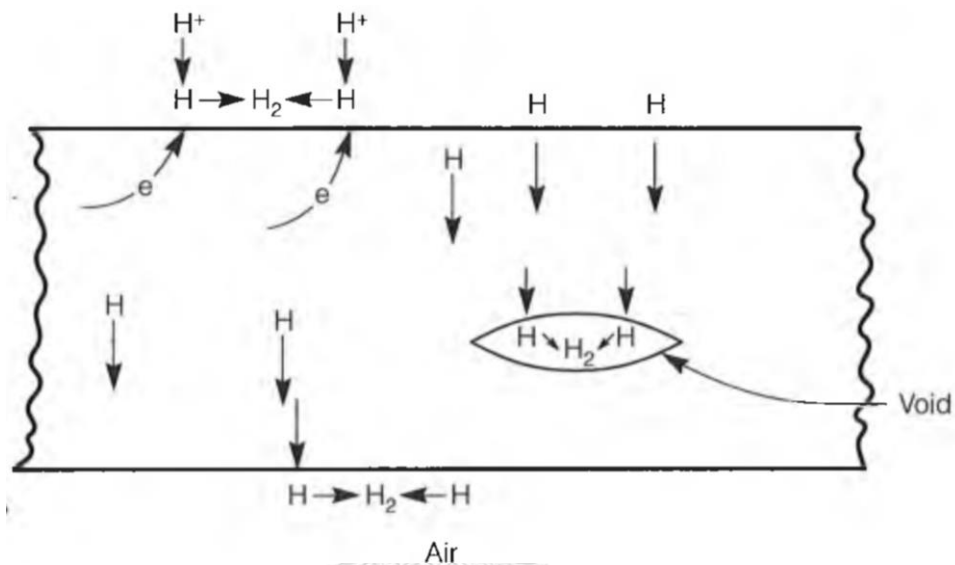


รูปที่ 2.6 อัตราส่วนระหว่างฟลักซ์ของไฮโดรเจน ณ เวลาใดเวลาหนึ่งและฟลักซ์ของไฮโดรเจนในการทำโพลาริเซชันครั้งที่ 1 และครั้งที่ 2 ของเหล็กบริสุทธิ์และเหล็กที่มีธาตุไทเทเนียมผสมในปริมาณ 1.5 wt. % [4]



### 3. การบวมเนื่องจากไฮโดรเจน (Hydrogen Blistering)

คือปรากฏการณ์ที่เกี่ยวข้องกับการรวมตัวของอะตอมไฮโดรเจนกลายเป็นแก๊สไฮโดรเจน ( $H_2$ ) และสะสมที่บริเวณไม่เป็นเนื้อเดียวกันหรือกับดัก ดังแสดงในรูปที่ 2.7 ทำให้เกิดความดันของแก๊สภายใน (Internal pressure) เป็นสาเหตุทำให้เกิดการบวมของโลหะ การบวมเนื่องจากไฮโดรเจนสามารถถูกพบในเหล็กที่มีออกซิเจนและกำมะถัน หรือการใช้งานภายใต้บรรยากาศของแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ ( $H_2S$ ) เป็นต้น



รูปที่ 2.7 ภาพจำลองพฤติกรรมการแพร่ของไฮโดรเจนและการบวมของโลหะ [4]

### 4. การตกตะกอนไฮโดรเจนภายใน (Internal Hydrogen Precipitation)

คือปรากฏการณ์ที่เกี่ยวข้องกับการดูดซับอะตอมไฮโดรเจนเข้าสู่โครงสร้างจุลภาคโลหะที่อุณหภูมิสูง เช่น อุณหภูมิหลอมเหลว และการแพร่ของอะตอมไฮโดรเจนออกจากโครงสร้างจุลภาคโลหะเมื่ออุณหภูมิเริ่มลดลงเนื่องจากความเข้มข้นของไฮโดรเจนมีค่ามากกว่าขีดจำกัดการละลาย และอะตอมไฮโดรเจนบางส่วนที่ไม่สามารถแพร่ออกจากโครงสร้างจุลภาคโลหะได้ จะรวมตัวกันกลายเป็นแก๊สไฮโดรเจน ( $H_2$ ) จากนั้นสะสมเป็นความดันของแก๊สภายในที่บริเวณสารฝังใน (Inclusion) และเฟสจากการตกตะกอน (Precipitated phase) ซึ่งความดันของแก๊สไฮโดรเจนสามารถถูกบรรเทาด้วยการบ่ม (Aging) ภายใต้บรรยากาศแก๊สเฉื่อย เป็นต้น

## 5. การโจมตีจากไฮโดรเจน (Hydrogen Attack)

คือปรากฏการณ์ที่อุณหภูมิสูงซึ่งไฮโดรเจนในโครงสร้างจุลภาคโลหะทำปฏิกิริยากับสารประกอบคาร์ไบด์กลายเป็นแก๊สมีเทน ( $\text{CH}_4$ ) และสะสมตามรอยแยกที่บริเวณขอบเกรน ทำให้โครงสร้างจุลภาคที่บริเวณดังกล่าวสูญเสียคาร์บอน (Decarburizing) ส่งผลให้ความแข็งแรง (Strength) และความเหนียว (Ductility) มีค่าลดลง ตามลำดับ

## 6. การเกิดไฮไดรด์ (Hydride Formation)

คือปรากฏการณ์ของโลหะที่มีความสามารถในการทำปฏิกิริยา (Reactivity) กับไฮโดรเจน ได้แก่ แทนทาลัม ไนโอเบียม เซอร์โคเนียมและยูเรเนียม เกิดการตกตะกอนของเฟสโลหะ (Metal hydrogen phase) ซึ่งเป็นเฟสที่มีความเปราะสูง ส่งผลให้ความแข็งแรงเพิ่มขึ้นและความเหนียวมีค่าลดลง

### 2.5 การแพร่ [9, 11-13]

จากการวิเคราะห์ปัญหาของรอยแตกเบื้องต้นพบว่านอกจากการแพร่ของไฮโดรเจนนั้นสามารถเกิดขึ้นได้จากกระบวนการเชื่อมแล้ว การแพร่ของไฮโดรเจนสามารถเกิดขึ้นได้ระหว่างขั้นตอนการบรรจุแก๊สปีโตรเลียมเนื่องจากผลต่างของความเข้มข้นของไฮโดรเจนของพื้นผิวของถังบรรจุแก๊สและภายในเนื้อโลหะของถังบรรจุแก๊สซึ่งเป็นแรงผลักดันทำให้เกิดการแพร่ของไฮโดรเจน

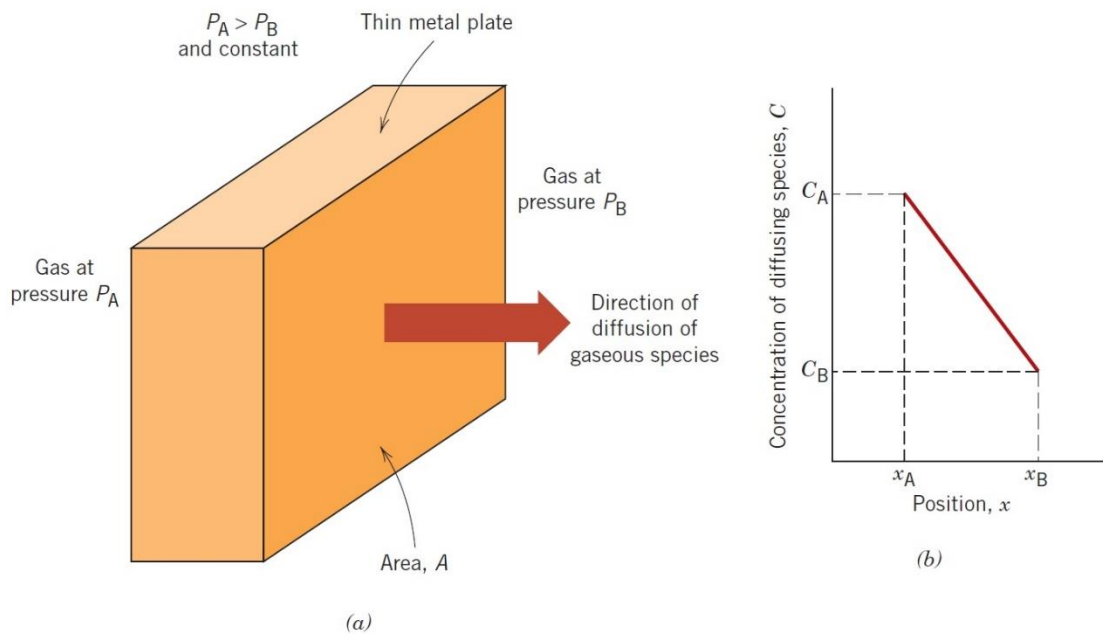
การแพร่ของไฮโดรเจนหรือการแพร่ของสสารใด ๆ สามารถพิจารณาในรูปแบบของฟลักซ์ โดยที่ฟลักซ์คือปริมาณสสารที่แพร่ผ่านพื้นที่หน้าตัดในหนึ่งหน่วยเวลา และสามารถจำแนกออกเป็น 2 ข้อ ได้แก่ กฎข้อที่หนึ่งของฟิกส์ (Fick's first law) และกฎข้อที่สองของฟิกส์ (Fick's second law) ตามลำดับ

กฎข้อที่หนึ่งของฟิกส์แสดงถึงการแพร่ของสสารที่เวลาใดเวลาหนึ่งที่มีฟลักซ์คงที่ รูปที่ 2.8 แสดงการแพร่ของแก๊สในสภาวะคงที่ผ่านพื้นที่หน้าตัดของแผ่นโลหะภายใต้ความแตกต่างของความดันแก๊ส ซึ่งกำหนดให้อัตราส่วนระหว่างผลต่างความเข้มข้นของสสารและผลต่างของระยะทางรวมถึงสัมประสิทธิ์การแพร่ (Diffusivity) ให้เป็นค่าคงที่ ดังนั้นฟลักซ์ของสสารจึงมีค่าคงที่ดังสมการที่ 2.3 ในขณะที่การแพร่ภายใต้กฎข้อที่สองของฟิกส์ดังสมการที่ 2.4 แสดงฟลักซ์ของสสารซึ่งมีค่าไม่คงที่เนื่องจากความเข้มข้นของสสารมีค่าเปลี่ยนแปลงตามเวลาและระยะทางการแพร่ดังแสดงในรูปที่ 2.9

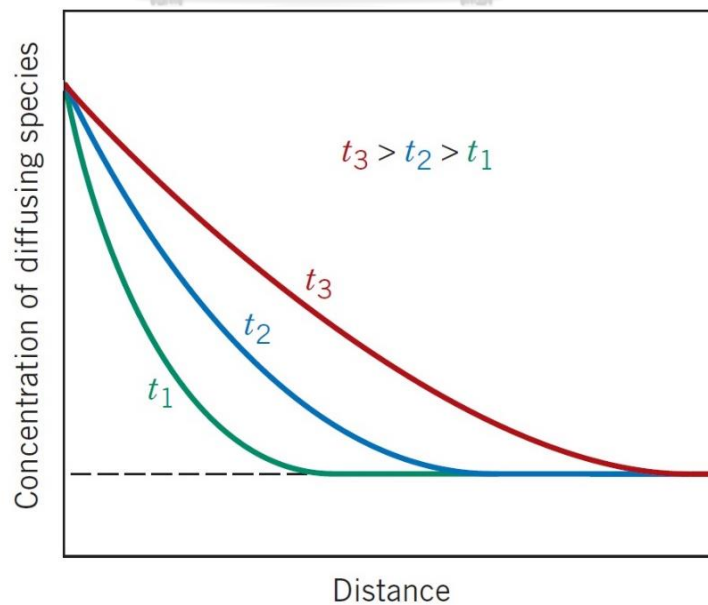
$$J = -D \cdot (\Delta C / \Delta X) \quad 2.3$$

$$\partial C / \partial t = \partial \{ D \cdot (\partial C / \partial X) \} \quad 2.4$$

โดยที่  $J$  คือฟลักซ์ ( $\text{amount} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ )  
 $D$  คือสัมประสิทธิ์การแพร่ ( $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ )  
 $C$  คือความเข้มข้น ( $\text{amount} \cdot \text{m}^{-3}$ )  
 $X$  คือระยะทาง (m)



รูปที่ 2.8 การแพร่ของแก๊สในสภาวะคงที่ผ่านพื้นที่หน้าตัด (A) ของแผ่นโลหะซึ่งมีความหนา (x) ภายใต้ความแตกต่างของความดันแก๊ส (P) [9]



รูปที่ 2.9 ความเข้มข้นของสสารที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา (t) และระยะทาง [9]

จากการวิเคราะห์สาเหตุที่ทำให้เกิดรอยแตกขึ้นที่แนวรอยเชื่อม ผู้วิจัยตั้งสมมติฐานออกเป็น 3 ข้อ ดังนี้

1. โครงสร้างจุลภาคมาร์เทนไซต์ที่เกิดจากกระบวนการขึ้นรูปเย็นและกระบวนการเชื่อมโลหะ เป็นโครงสร้างจุลภาคที่มีคุณสมบัติเด่นด้านการเพิ่มความแข็งแรงและมีความเหนียวลดลง

2. ความเค้นคงค้างแรงดึงจากกระบวนการเชื่อมนั้นอาจส่งผลให้โครงสร้างจุลภาคมาร์เทนไซต์เกิดการแตกออกเป็นรอยแตกที่มีขนาดเล็ก

3. อะตอมไฮโดรเจนสามารถละลายระหว่างกระบวนการเชื่อมโลหะและอะตอมไฮโดรเจนสามารถแพร่เข้าสู่โลหะจากกระบวนการบรรจุแก๊สเนื่องจากผลต่างความเข้มข้นของไฮโดรเจนจากกระบวนการบรรจุแก๊ส ส่งผลให้พลังงานที่จำเป็นสำหรับการสร้างพื้นผิวใหม่ของรอยแตกลดลง ดังนั้นรอยแตกจึงสามารถขยายตัวกลายเป็นรอยแตกที่มีขนาดใหญ่ขึ้น เรียกปรากฏการณ์นี้ว่าการแตกร้าวจากการช่วยของไฮโดรเจน (Hydrogen Assisted Cracking, HAC) [1, 2]

แนวทางการป้องกันความเสียหายดังกล่าวสามารถจำแนกออกเป็น 3 วิธี ได้แก่ 1. การอบอ่อน (Annealing) เพื่อบรรเทาความเค้นคงค้างแรงดึง 2. การควบคุมบรรยากาศของแก๊สไฮโดรเจนระหว่างกระบวนการเชื่อมโลหะ และ 3. การสร้างชั้นเคลือบเพื่อชะลอการแพร่ของไฮโดรเจนระหว่างกระบวนการบรรจุแก๊ส

ผู้วิจัยมีความต้องการลดความเสียหายดังกล่าวด้วยการสร้างชั้นเคลือบบนผิวเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 โดยการเลือกวัสดุเคลือบที่มีสัมประสิทธิ์การแพร่ไฮโดรเจนประสิทธิภาพ (Effective hydrogen diffusivity) มีค่าต่ำ ซึ่งการวัดสัมประสิทธิ์การแพร่ไฮโดรเจนประสิทธิภาพสามารถทำการทดลองตามมาตรฐาน “Standard practice for evaluation of hydrogen uptake, permeation, and transport in metals by an electrochemical technique (ASTM G148-97)”

## 2.6 การวัดสัมประสิทธิ์การแพร่ไฮโดรเจนประสิทธิภาพตามมาตรฐาน “Standard practice for evaluation of hydrogen uptake, permeation, and transport in metals by an electrochemical technique (ASTM G148-97)” [14]

ASTM G148-97 เป็นมาตรฐานการทดลองเพื่อวัดสัมประสิทธิ์การแพร่ไฮโดรเจนประสิทธิภาพในโลหะ มีขั้นตอนแบ่งออกเป็นการเตรียมตัวอย่างและการทดลองวัดสัมประสิทธิ์การแพร่ไฮโดรเจนประสิทธิภาพ ดังนี้

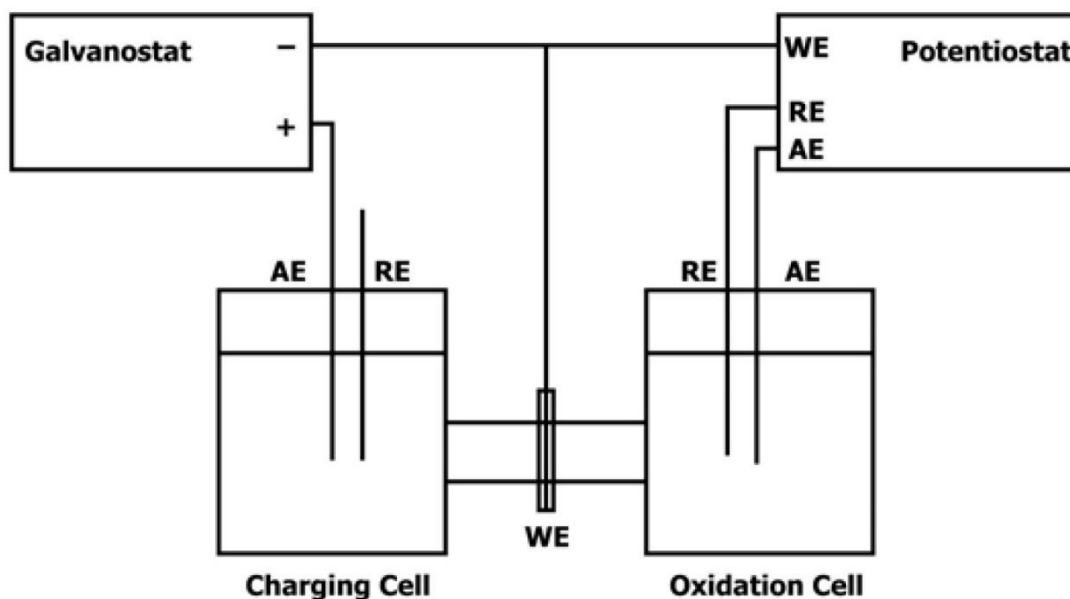
### 2.6.1 ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่าง

1. ตัวอย่างควรมีอัตราส่วนระหว่างรัศมีและความหนามากกว่าหรือเท่ากับ 10:1
2. ตัวอย่างควรมีความสม่ำเสมอของความหนาและมีผลต่างของความหนาน้อยกว่า 5 %
3. ขัดผิวตัวอย่างด้วยกระดาษทรายที่มีความหยาบผิวต่ำถึงความหยาบผิวประมาณ 600

4. ทำความสะอาดตัวอย่างด้วยตัวสารละลายที่ไม่มีองค์ประกอบของคลอไรด์
5. เคลือบผิวตัวอย่างด้วยพาราเดียมหรือนิกเกิล เพื่อลดความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าซึมผ่าน (Permeation current density) ที่เซลล์ออกซิไดซ์ (Oxidizing cell) และกำหนดเป็นความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าพื้นฐาน (Background current density)

### 2.6.2 ขั้นตอนการทดลองวัดสัมประสิทธิ์การแพร่ไฮโดรเจนประสิทธิผล

1. นำเซลล์แก้วจำนวน 2 เซลล์ ได้แก่ เซลล์อัดประจุ (Charging cell) และเซลล์ออกซิไดซ์ (Oxidizing cell) ประกอบเข้าด้วยกันโดยมีแผ่นโลหะคั่นเป็นตัวกลางสำหรับการแพร่ไฮโดรเจนและทำหน้าที่เป็นขั้วไฟฟ้าทำงาน (Working electrode, WE) ดังแสดงในรูปที่ 2.10
2. เติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH)  $0.1 \text{ mol}\cdot\text{m}^{-3}$  ในเซลล์ออกซิไดซ์และเติมแก๊สไนโตรเจน ( $\text{N}_2$ ) แก่เซลล์เพื่อไล่แก๊สออกซิเจน ( $\text{O}_2$ )
3. ต่อขั้วไฟฟ้าอ้างอิง (Reference electrode, RE) ขั้วไฟฟ้าวัดกระแส (Auxiliary electrode, AE) และขั้วไฟฟ้าทำงาน (Working electrode, WE) เข้ากับเซลล์ทั้ง 2 เซลล์
4. ควบคุมความต่างศักย์ไฟฟ้า  $+300 \text{ mV}$  (SHE) ที่เซลล์ออกซิไดซ์และวัดความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าซึมผ่าน
5. เมื่อความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าซึมผ่านมีค่าต่ำกว่า  $0.1 \mu\text{A}\cdot\text{cm}^{-2}$  จึงเติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH)  $0.1 \text{ mol}\cdot\text{m}^{-3}$  แก่เซลล์อัดประจุและเติมแก๊สไนโตรเจน ( $\text{N}_2$ ) เพื่อไล่แก๊สออกซิเจน ( $\text{O}_2$ )
6. ควบคุมความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าให้มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ  $1 \text{ mA}\cdot\text{cm}^{-2}$  แก่เซลล์อัดประจุ
7. วัดความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าซึมผ่านที่เปลี่ยนแปลงในเซลล์ออกซิไดซ์

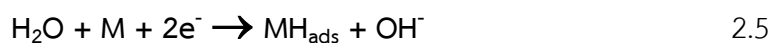


รูปที่ 2.10 ภาพจำลองการต่อเซลล์การทดลองและการต่อวงจรไฟฟ้าสำหรับการทดลองหาสัมประสิทธิ์การแพร่ไฮโดรเจนประสิทธิผล [14]

### 2.6.3 ปฏิริยาเคมีที่เกิดขึ้นระหว่างการทดลองวัดสัมประสิทธิ์การแพร่ไฮโดรเจนประสิทธิผล [15, 16]

ในการทดลองวัดสัมประสิทธิ์การแพร่ไฮโดรเจนประสิทธิผล ปฏิริยาเคมีสามารถเกิดขึ้นที่เซลล์อัดประจุ ที่แผ่นโลหะและเซลล์ออกซิไดซ์ดังแสดงในสมการที่ 2.5-2.9 ซึ่งสามารถจำแนกปฏิริยาออกเป็น 3 กลุ่ม ดังนี้

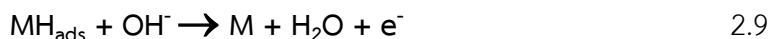
1. ปฏิริยาเคมีในเซลล์อัดประจุแสดงในสมการที่ 2.5-2.7 จะเห็นว่าสมการที่ 2.5 แสดงปฏิริยาที่เกี่ยวข้องกับการสร้างอะตอมไฮโดรเจนและถูกดูดซับ ( $H_{ads}$ ) เข้าสู่แผ่นโลหะ (M) ในขณะที่สมการที่ 2.6 และ 2.7 แสดงปฏิริยาที่เกี่ยวข้องกับการคายการดูดซับของอะตอมไฮโดรเจนบางส่วนและเกิดการรวมตัวกันกลายเป็นโมเลกุลของแก๊สไฮโดรเจน ( $H_2$ )



2. ปฏิริยาเคมีในแผ่นโลหะ เกี่ยวข้องกับอะตอมไฮโดรเจนดูดซับ ( $H_{ads}$ ) เปลี่ยนเป็นอะตอมดูดซึม ( $H_{abs}$ ) ในชั้นความหนาของแผ่นโลหะนั้นแสดงในสมการที่ 2.8



3. ปฏิกิริยาเคมีในเซลล์ออกซิไดซ์แสดงในสมการที่ 2.9 เกี่ยวข้องกับอะตอมไฮโดรเจนที่ดูดซึม ( $H_{abs}$ ) เปลี่ยนเป็นอะตอมไฮโดรเจนดูดซับ ( $H_{ads}$ ) อีกครั้งที่บริเวณพื้นผิวโลหะด้านการออกซิไดซ์ จากนั้นทำปฏิกิริยากับไอออนไฮดรอกไซด์ประจุลบ ( $OH^-$ ) กลายเป็นโมเลกุลน้ำ ( $H_2O$ ) ตามลำดับ



#### 2.6.4 การคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ไฮโดรเจนประสิทธิผล [2, 3, 14]

สัมประสิทธิ์การแพร่ไฮโดรเจนประสิทธิผล (Effective hydrogen diffusivity,  $D_{eff}$ ) สามารถคำนวณได้จากเวลาการซึมผ่าน (Breakthrough time,  $t_b$ ) และเวลาล่าช้า (Time lag,  $t_{lag}$ ) ดังแสดงในสมการที่ 2.10 และ 2.11 ตามลำดับ ดังนี้

$$D_{eff} = L^2/(15.3t_b) \quad 2.10$$

$$D_{eff} = L^2/(6t_{lag}) \quad 2.11$$

โดยที่  $L$  คือความหนาของตัวอย่าง (m)

$D_{eff}$  คือสัมประสิทธิ์การแพร่ไฮโดรเจนประสิทธิผล ( $m^2 \cdot s^{-1}$ )

$t_{lag}$  คือเวลาล่าช้า (s)

$t_b$  คือเวลาการซึมผ่าน (s)

#### 2.7 การวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ไฮโดรเจนประสิทธิผล [3, 17]

สัมประสิทธิ์การแพร่ไฮโดรเจนประสิทธิผลสามารถคำนวณได้จากปัจจัยของเวลาซึ่งจำแนกออกเป็น 4 ประเภท ได้แก่ 1. เวลาการซึมผ่าน (Breakthrough time,  $t_b$ ) 2. เวลา ณ จุดเปลี่ยนความชัน (Inflection point time,  $t_i$ ) 3. เวลาครึ่งชีวิต (Half-life time,  $t_{1/2}$ ) และ 4. เวลาล่าช้า (Time lag,  $t_{lag}$ ) ตามลำดับ เวลาดังกล่าวสามารถระบุได้จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าซึมผ่านกับเวลา และกราฟแสดงปริพันธ์ของกระแสไฟฟ้าซึมผ่านเทียบกับเวลาดังแสดงในรูปที่ 2.11

สมการที่ 2.12 แสดงกระแสไฟฟ้าซึมผ่านที่ตำแหน่งพื้นผิวโลหะในเซลล์ออกซิไดซ์มีค่าเท่ากับผลคูณระหว่างจำนวนประจุ ( $n$ ) ของไอออนไฮโดรเจน ค่าคงที่ฟาราเดย์ ( $F$ ) และฟลักซ์ไฮโดรเจนตามลำดับ โดยที่ฟลักซ์ไฮโดรเจนถูกกำหนดให้มีค่าเท่ากับผลคูณระหว่างสัมประสิทธิ์การแพร่ของไฮโดรเจน ( $D$ ) และอนุพันธ์ของความเข้มข้นไฮโดรเจนเทียบกับระยะทาง ( $\partial C / \partial X$ ) ซึ่งความเข้มข้นไฮโดรเจน ( $C$ ) มีค่าเปลี่ยนตามเงื่อนไข 2 ข้อ ดังต่อไปนี้

1. เงื่อนไขเริ่มต้นซึ่งกำหนดให้ความเข้มข้นของไฮโดรเจนที่ตำแหน่งลึกจากพื้นผิวในเซลล์อัดประจุ (X) ไปยังเซลล์ออกซิไดซ์ (L) มีค่าเท่ากับ 0 amount·m<sup>-3</sup> ที่เวลา 0 s

$$t = 0, 0 < x < L, C = 0$$

2. เงื่อนไขขอบเขตซึ่งกำหนดให้ความเข้มข้นของไฮโดรเจนที่ตำแหน่งพื้นผิวในเซลล์อัดประจุและเซลล์ออกซิไดซ์มีค่าเท่ากับ C<sub>i</sub> และ 0 amount·m<sup>-3</sup> ที่เวลาเริ่มต้นการอัดประจุหรือมากกว่า 0 s

$$t > 0, x = 0; C = C_i, x = L; C = 0$$

$$i_{H,s} = nFJ_H = nFD \left( \frac{\partial C}{\partial x} \right) = \frac{nFDC_i}{L} \left[ 1 + \sum_{b=1}^{\infty} (-1)^b \exp \left( \frac{-b^2 \pi^2 Dt}{L} \right) \right] \quad 2.12$$

สมการที่ 2.13 แสดงปริพันธ์ของกระแสไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลง (Q) ด้วยขอบเขตเวลาตั้งแต่ 0 s ถึงเวลาใดเวลาหนึ่ง (t) ดังนี้

$$Q = \int_0^t i_H dt = \frac{FDC_i}{L} \left[ t - \frac{L^2}{6D} - \frac{2L^2}{\pi^2} \sum_{b=1}^{\infty} \frac{(-1)^b}{b^2} \exp \left( \frac{-b^2 \pi^2 Dt}{L} \right) \right] \quad 2.13$$

โดยที่  $i_{H,s}$  คือกระแสไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงตามความเข้มข้นของไฮโดรเจน (A)

n คือจำนวนประจุของไฮโดรเจนซึ่งมีค่าเท่ากับ +1

F คือค่าคงที่ฟาราเดย์ 9.6485×10<sup>4</sup> (C)

C<sub>i</sub> คือความเข้มข้นของไฮโดรเจนเริ่มต้น (amount·m<sup>-3</sup>)

L คือความหนารวมทั้งหมด (m)

D คือสัมประสิทธิ์การแพร่ไฮโดรเจนประสิทธิผลซึ่งกำหนดเป็นค่าคงที่ (m<sup>2</sup>·s<sup>-1</sup>)

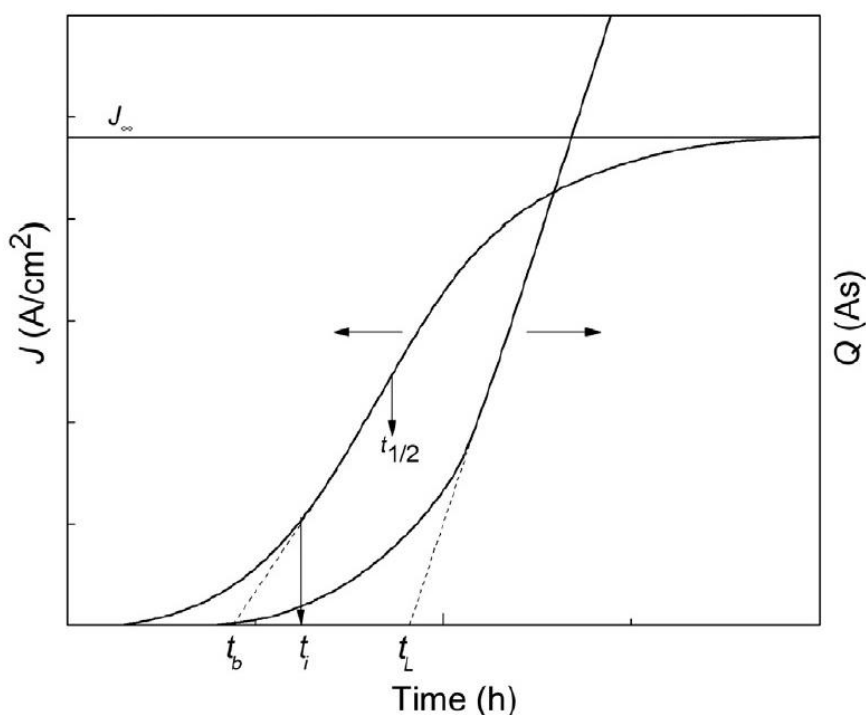
t คือเวลา (s)

เวลาการซึมผ่าน คือเวลาที่อะตอมของไฮโดรเจนใช้ในการแพร่จากพื้นผิวของเยื่อเลือกผ่านในเซลล์อัดประจุไปยังเซลล์ออกซิไดซ์ โดยที่เวลาในการซึมผ่านระบุได้จากจุดตัดระหว่างเส้นตรงซึ่งลากผ่านจุดเปลี่ยนความชันของกราฟแสดงความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าซึมผ่านและเส้นตรงที่ลากผ่านแกนเวลา

เวลาครึ่งชีวิต คือเวลาครึ่งชีวิตสำหรับการแพร่ของไฮโดรเจน ซึ่งเวลาครึ่งชีวิตระบุได้จากอัตราส่วนของฟลักซ์ของไฮโดรเจน ณ เวลาใดเวลาหนึ่งและฟลักซ์ของไฮโดรเจน ณ สภาวะคงตัว (Normalized flux) มีค่าเท่ากับ 0.58



เวลาล่าช้า คือเวลาเพียงพอที่ทำให้ฟลักซ์ของไฮโดรเจนมีค่าคงที่ ซึ่งเวลาล่าช้าระบุได้จากจุดตัดระหว่างเส้นตรงที่ลากผ่านกราฟแสดงปริพันธ์ของกระแสไฟฟ้าที่มีค่าเพิ่มขึ้นด้วยอัตราคงที่และเส้นตรงที่ลากผ่านแกนเวลาหรือระบุได้จากอัตราส่วนฟลักซ์ของไฮโดรเจน ณ เวลาใดเวลาหนึ่งและฟลักซ์ของไฮโดรเจน ณ สภาวะคงตัว มีค่าเท่ากับ 0.63 เป็นต้น

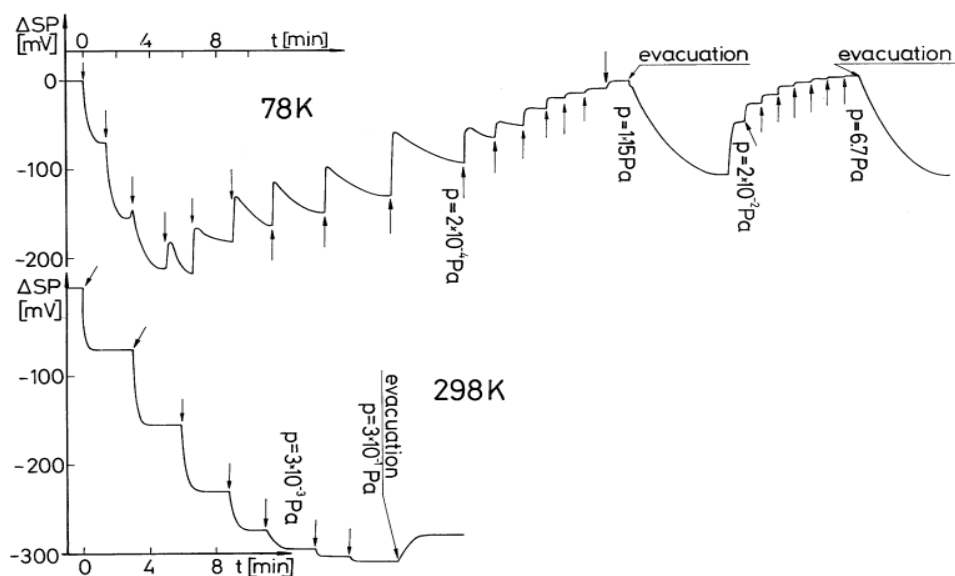


รูปที่ 2.11 กราฟแสดงความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าซึมผ่าน ( $J$ ) กับเวลา และปริพันธ์ของกระแสไฟฟ้าซึมผ่าน ( $Q$ ) กับเวลา [17]

## 2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.8.1 พฤติกรรมของแก๊สไฮโดรเจนบนผิวโลหะที่สภาวะอุณหภูมิต่ำ [18]

R. Dus และ E Nowicka ได้ศึกษาพฤติกรรมของแก๊สไฮโดรเจน ( $H_2$ ) บนฟิล์มนิกเกิลภายใต้ความดันของแก๊สไฮโดรเจน  $10^{-4}$ – $10$  Pa ที่อุณหภูมิ 78 และ 298 K โดยวัดความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงบนฟิล์มนิกเกิลและนำวัสดุที่มีส่วนผสมระหว่างทินออกไซด์ ( $SnO$ ) และแอนติโมนีเพนทอกไซด์ ( $Sb_2O_5$ ) ทำหน้าที่เป็นขั้วไฟฟ้าอ้างอิง (Reference electrode) ดังแสดงในรูปที่ 2.12 พบว่าความต่างศักย์ไฟฟ้ามีค่าเปลี่ยนแปลงซึ่งจำแนกออกเป็นช่วงที่มีความต่างศักย์ไฟฟ้าลดลงและช่วงที่มีความต่างศักย์ไฟฟ้าเพิ่มขึ้นซึ่งแสดงถึงไอออนไฮโดรเจนประจุลบ ( $H^-$ ) และไอออนไฮโดรเจนประจุบวก ( $H^+$ ) ตามลำดับ จากกราฟแสดงว่าไฮโดรเจนโมเลกุล ( $H_2$ ) สามารถแตกตัวเป็นไอออนไฮโดรเจนที่อุณหภูมิต่ำได้



รูปที่ 2.12 การเปลี่ยนแปลงความต่างศักย์ไฟฟ้า ( $\Delta SP$ ) บนพื้นผิวฟิล์มนิกเกิลภายใต้ความดันของแก๊สไฮโดรเจน  $10^{-4}$ - $10$  Pa ที่อุณหภูมิ 78 และ 298 K [18]

## 2.8.2 สัมประสิทธิ์การแพร่ของไฮโดรเจนในเหล็กกล้าไร้สนิม นิกเกิล เงิน ทองแดง

แพลทินัม พาราเดียมและทองคำ

### 2.8.2.1 สัมประสิทธิ์การแพร่ของไฮโดรเจนผ่านเหล็กกล้าไร้สนิม [7]

P. Kumar และ R. Balasubramaniyam ทำการทดลองวัดสัมประสิทธิ์การแพร่ของไฮโดรเจนในแท่งเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304, AISI 310 และ AISI 316 ตามลำดับ ซึ่งใช้วิธี “Subscale microhardness profiling” ที่อุณหภูมิ 304 K โดยชิ้นงานมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและความหนาเท่ากับ 23.00 และ 3.50 mm ตามลำดับ

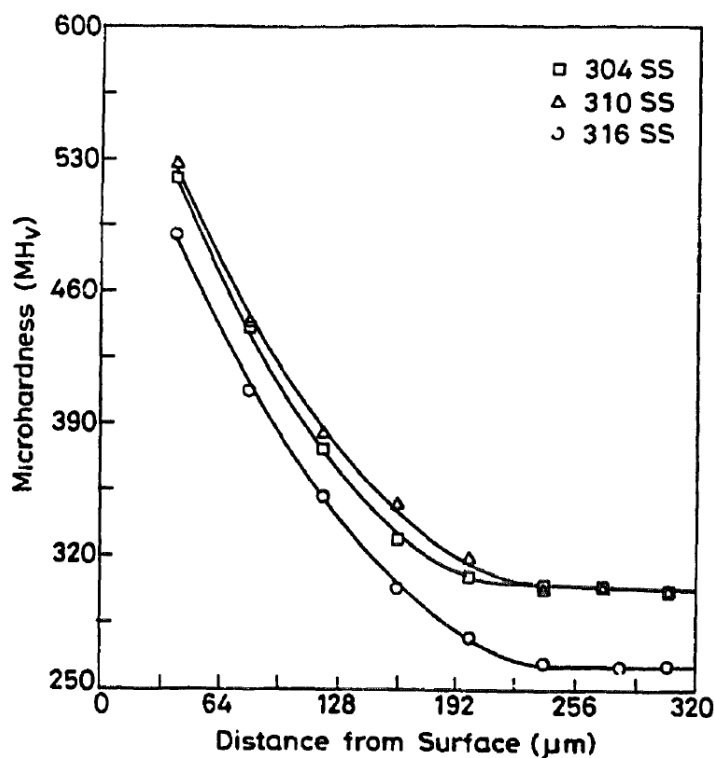
การเตรียมชิ้นงานแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอน ดังนี้ 1. การอบอ่อนที่อุณหภูมิ 1323 K เป็นเวลา 1.80 ks เพื่อลดความเค้นค้างค้างและเย็นตัวในน้ำเพื่อลดการเกิดเฟสคาร์ไบด์ 2. การขัดพื้นผิวแท่งเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ด้วยกระดาษทรายที่มีความหยาบผิว 320

ในการทดลองการแพร่ของไฮโดรเจน จะนำชิ้นงานไปทำการอัดประจุในสารละลายที่มีองค์ประกอบของกรดซัลฟิวริก ( $H_2SO_4$ )  $0.5 \text{ mol} \cdot \text{m}^{-3}$  และไอออนอาร์เซนเตประจุสามลบ ( $AsO_4^{-3}$ ) 100 ppm เป็นเวลา 43.20 ks ใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและความต่างศักย์ไฟฟ้า  $0.1 \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2}$  และ -1350 mV (SCE) จากนั้นวัดค่าความแข็งจุลภาค (Microhardness) บนชิ้นงานที่ทำการอัดประจุเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่ไม่ถูกอัดประจุ ที่ความลึกจากพื้นผิวชิ้นงานระหว่าง 40-320  $\mu\text{m}$

จากการทดลองพบว่าความเข้มข้นของชั้นงานที่ไม่ถูกการอัดประจุมีค่าไม่เปลี่ยนแปลงตามความลึกจากพื้นผิว ในขณะที่ชั้นงานที่ผ่านการอัดประจุทำให้ค่าความเข้มข้นลดลงตามความลึกจากพื้นผิวดังแสดงในรูปที่ 2.13 ดังนั้นสัมประสิทธิ์การแพร่ของไฮโดรเจนนั้นสามารถวัดได้จากการเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มข้นของชั้นงาน ดังแสดงในสมการที่ 2.14 พบว่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของไฮโดรเจนในเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304, AISI 310 และ AISI 316 มีค่าเท่ากับ  $2.86 \times 10^{-13}$ ,  $1.61 \times 10^{-13}$  และ  $1.78 \times 10^{-13} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$  ตามลำดับ ที่อุณหภูมิ 304 K

$$\frac{(MHv_{x_1} - MHv_b)/(MHv_{x_2} - MHv_b)}{(C_{x_1} - C_b)/(C_{x_2} - C_b)} = \frac{(1 - \text{erf}(x_1/2\sqrt{Dt}))}{(1 - \text{erf}(x_2/2\sqrt{Dt}))} \quad 2.14$$

- โดยที่  $MHv_x$  คือค่าความเข้มข้นของชั้นงานระยะ  $x$  ( $MHv$ )  
 $MHv_b$  คือค่าความเข้มข้นที่ปลายชั้นงาน ( $MHv$ )  
 $C_x$  คือค่าความเข้มข้นของไฮโดรเจนที่ความลึกชั้นงานระยะ  $x$  ( $\text{amount} \cdot \text{m}^3$ )  
 $C_b$  คือค่าความเข้มข้นของไฮโดรเจนที่ปลายชั้นงาน ( $\text{amount} \cdot \text{m}^3$ )  
 $X$  คือความลึกของชั้นงาน ( $\text{m}$ )  
 $D$  คือสัมประสิทธิ์การแพร่ของไฮโดรเจน ( $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ )  
 $t$  คือเวลาที่ใช้การทดลอง ( $\text{s}$ )



รูปที่ 2.13 ความแข็งจุลภาค (Microhardness) ที่ความลึกจากพื้นผิว 40-320  $\mu\text{m}$  ของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304, AISI 310 และ AISI 316 ซึ่งผ่านการอัดประจุในสารละลายกรดซัลฟิวริก ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ )  $0.5 \text{ mol}\cdot\text{m}^{-3}$  และไอออนอาร์เซนิตประจุสามลบ ( $\text{AsO}_4^{3-}$ ) 100 ppm เป็นเวลา 43.20 ks [7]

### 2.8.2.2 สัมประสิทธิ์การแพร่ของไฮโดรเจนในนิกเกิล [6, 19]

W. Beck และคณะ ทำการทดลองหาสัมประสิทธิ์การแพร่ของไฮโดรเจนในโลหะผสมเหล็ก-นิกเกิล ซึ่งมีความหนา 0.1 cm ที่อุณหภูมิ 300-390 K การเตรียมชิ้นงานมี 3 ขั้นตอน 1. การอบอ่อนและเย็นตัวในสารละลายเบนซีน ( $\text{C}_6\text{H}_6$ ) 2. การกำจัดฟิล์มออกไซด์ด้วยสารละลายกรดซัลฟิวริก ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) และเมทานอล ( $\text{CH}_3\text{OH}$ ) และ 3. การเคลือบพาราเดียมจำนวน 1 ด้าน

การทดลองหาสัมประสิทธิ์การแพร่ของไฮโดรเจนใช้เทคนิค “bipolar electrode” ซึ่งโลหะจะถูกคั่นเป็นตัวกลางระหว่างเซลล์ทดลอง 2 เซลล์ คือ เซลล์อัดประจุ (Charging cell) ทำหน้าที่ควบคุมความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าคงที่แก่สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{NaOH}$ )  $0.1 \text{ mol}\cdot\text{m}^{-3}$  และเซลล์ออกซิไดซ์ (Oxidizing cell) ทำหน้าที่ควบคุมความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ -600 mV (SCE) แก่สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{NaOH}$ )  $0.1 \text{ mol}\cdot\text{m}^{-3}$  จากนั้นทำการวัดความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าซึมผ่านที่เปลี่ยนแปลง

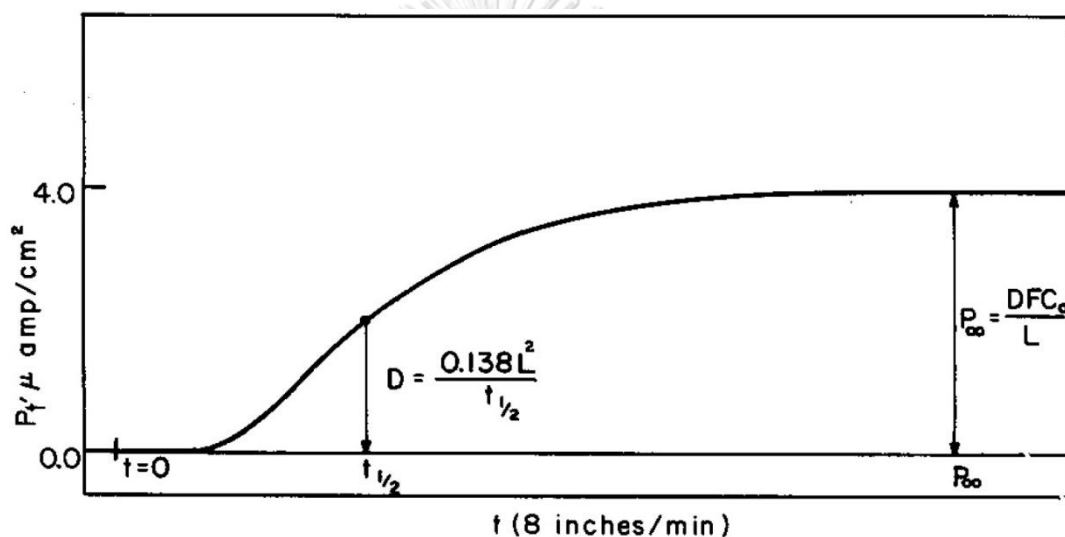
สัมประสิทธิ์การแพร่ของไฮโดรเจนพิจารณาได้จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าซึมผ่านที่เปลี่ยนแปลงและเวลาที่ใช้ในการทดลองดังรูปที่ 2.14 และคำนวณได้จากสมการที่ 2.15 ซึ่งสัมประสิทธิ์การแพร่ของไฮโดรเจนในนิกเกิลมีค่าเท่ากับ  $9.00 \times 10^{-14} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$  ที่อุณหภูมิ 300 K

$$D = 0.138L^2/t_{1/2} \quad 2.15$$

โดยที่  $t_{1/2}$  คือเวลาครึ่งชีวิตสำหรับการแพร่ (s)

L คือความหนาชิ้นงาน (m)

D คือค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของไฮโดรเจน ( $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ )



รูปที่ 2.14 ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าซึมผ่าน ( $P_t$ ) และเวลา ( $t$ ) [19]

H. Hagi ทำการทดลองวัดสัมประสิทธิ์การแพร่ของไฮโดรเจนในโลหะผสมนิกเกิล-ทองแดง และ โลหะผสมนิกเกิล-โคบอลต์ ซึ่งมีความหนา 19-56  $\mu\text{m}$  ที่อุณหภูมิ 273-340 K ชิ้นงานผ่านการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 973 K และการเคลือบพาราเดียมจำนวน 1 ด้าน

ในการทดลองวัดสัมประสิทธิ์การแพร่ของไฮโดรเจน โลหะจะถูกคั่นเป็นตัวกลางระหว่างเซลล์ทดลอง 2 เซลล์ คือ เซลล์อัดประจุซึ่งทำหน้าที่ควบคุมความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าคงที่แก่สารละลายกรดซัลฟิวริก  $0.5 \text{ k} \cdot \text{mol} \cdot \text{m}^{-3}$  ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) และอาร์เซนิกไตรออกไซด์ ( $\text{As}_2\text{O}_3$ )  $5 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$  และเซลล์ออกซิไดซ์ทำหน้าที่ควบคุมความต่างศักย์ไฟฟ้า +45 mV (SCE) แก่สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{NaOH}$ )  $0.2 \text{ mol} \cdot \text{m}^{-3}$  จากนั้นวัดความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าซึมผ่านที่เปลี่ยนแปลง

สัมประสิทธิ์การแพร่ของไฮโดรเจนในนิกเกิลคำนวณได้จากความชันของกราฟระหว่างผลบวกลอการิทึมของฟลักซ์ไฮโดรเจนซึ่งเป็นฟังก์ชันกับรากที่สองของเวลา  $\log J(t)^{1/2}$  และเศษหนึ่งส่วนเวลา  $1/t$  ซึ่งสัมประสิทธิ์การแพร่ของไฮโดรเจนในนิกเกิลมีค่าเท่ากับ  $6.02 \times 10^{-14} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$  ที่อุณหภูมิ 301 K

### 2.8.2.3 สัมประสิทธิ์การแพร่ของไฮโดรเจนในพาราเดียม ทองแดง เงิน แพลทินัม และทองคำ [5]

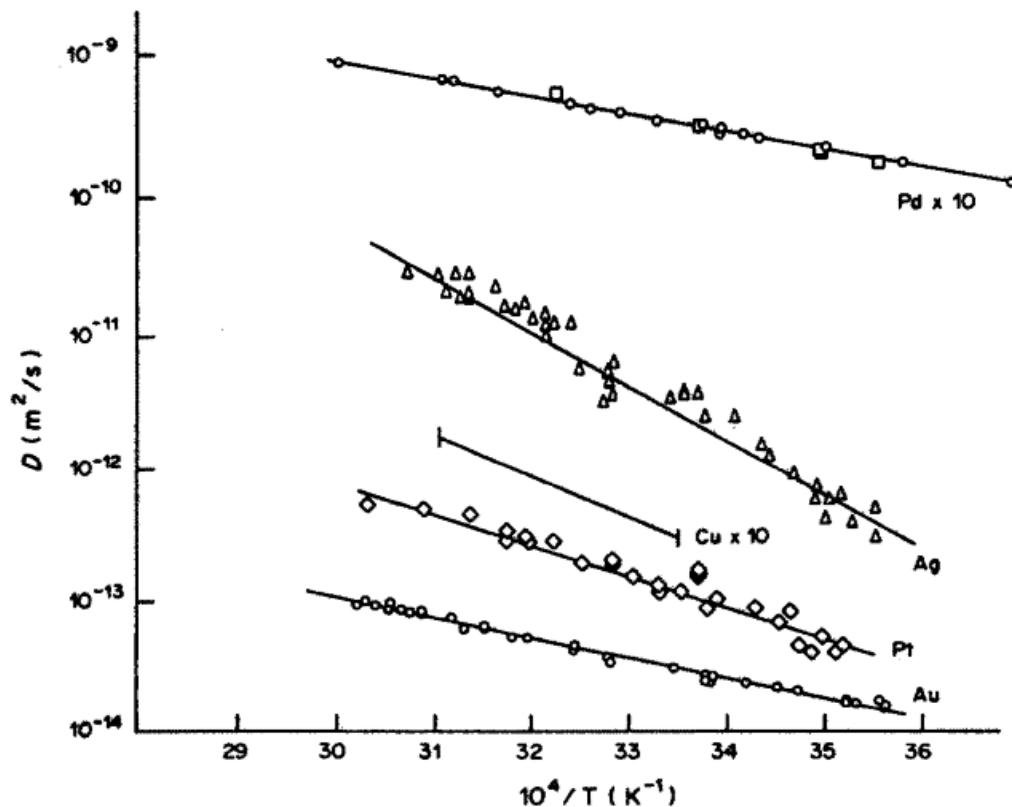
T. Ishikawa และ R. B. McLellan ทำการทดลองหาสัมประสิทธิ์การแพร่ของไฮโดรเจนในพาราเดียม ทองแดง เงิน แพลทินัมและทองคำ โดยที่ความหนาชิ้นงานเงินมีค่าเท่ากับ  $75 \pm 5 \text{ } \mu\text{m}$  ในขณะที่ความหนาชิ้นงานแพลทินัมและทองคำมีค่าเท่ากับ  $25 \pm 2 \text{ } \mu\text{m}$  นำชิ้นงานไปอบอ่อนที่อุณหภูมิ 1273 K ในระบบสุญญากาศระดับสูงยิ่งยวด

การทดลองหาสัมประสิทธิ์การแพร่ของไฮโดรเจนนั้นใช้เทคนิค “Current pulse” ซึ่งโลหะจะถูกคั่นเป็นตัวกลางระหว่างเซลล์ทดลอง 2 เซลล์ คือ เซลล์อัดประจุซึ่งทำหน้าที่ควบคุมความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าให้มีค่าคงที่และเซลล์ออกซิไดซ์ซึ่งทำหน้าที่วัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลง

สัมประสิทธิ์การแพร่ของไฮโดรเจนพิจารณาได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงและเวลาที่ใช้ในการทดลองและคำนวณได้จากสมการที่ 2.16 พบว่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของไฮโดรเจนในพาราเดียม เงิน ทองแดง แพลทินัมและทองคำจากการทดลองในช่วงอุณหภูมิ 280-330 K แสดงในรูปที่ 2.15 ซึ่งมีค่าประมาณ  $6.00 \times 10^{-9}$ ,  $6.00 \times 10^{-12}$ ,  $5.00 \times 10^{-12}$ ,  $1.00 \times 10^{-13}$  และ  $5.00 \times 10^{-14} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$  ที่อุณหภูมิ 301 K ตามลำดับ

$$D = 0.494L^2/\pi^2t_b \quad 2.16$$

- โดยที่  $t_b$  คือเวลาการซึมผ่าน (s)  
 $L$  คือความหนาชิ้นงาน (m)  
 $D$  คือค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของไฮโดรเจน ( $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ )



รูปที่ 2.15 สัมประสิทธิ์การแพร่ของไฮโดรเจนในแพลทินัม ทองแดง เงิน พาราเดียมและทองคำ ที่อุณหภูมิ 280-330 K [5]

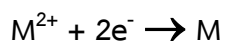
จากงานวิจัยที่ได้กล่าวมาทั้งหมด สัมประสิทธิ์การแพร่ของไฮโดรเจนในพาราเดียม ทองแดง เงิน เหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304, AISI 316, AISI 310 แพลทินัม นิกเกิลและทองคำสามารถสรุปดังตารางที่ 2.1 พบว่า สัมประสิทธิ์การแพร่ของไฮโดรเจนในทองคำและนิกเกิลมีค่าต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ดังนั้นชั้นเคลือบทองคำหรือชั้นเคลือบนิกเกิลน่าจะเหมาะแก่การนำไปเคลือบผิวเพื่อดำเนินการแพร่ของไฮโดรเจนเข้าสู่โลหะ ผู้วิจัยมีความประสงค์ที่จะทำการวัด และเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์การแพร่ไฮโดรเจนประสิทธิผลในเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ที่ไม่มีชั้นเคลือบเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ที่มีชั้นเคลือบนิกเกิล และเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ที่มีชั้นเคลือบทองคำ โดยวิธีการเคลือบทองคำและนิกเกิลที่ผู้วิจัยสนใจคือวิธีการเคลือบไฟฟ้า (Electrocoating) เพราะเป็นวิธีการเคลือบผิวโลหะซึ่งพบในอุตสาหกรรมเคลือบผิวโลหะประเภทเครื่องประดับ

**ตารางที่ 2.1** สัมประสิทธิ์การแพร่ของไฮโดรเจนในพาราเดียม ทองแดง เงิน เหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304, AISI 316, AISI 310 แพลทินัม นิกเกิลและทองคำ

ตัวอย่าง	สัมประสิทธิ์การแพร่ของไฮโดรเจน ( $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ )	อุณหภูมิ (K)
พาราเดียม [5]	$6.00 \times 10^{-9}$	301
ทองแดง [5]	$6.00 \times 10^{-12}$	301
เงิน [5]	$5.00 \times 10^{-12}$	301
เหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 [7]	$2.86 \times 10^{-13}$	304
เหล็กกล้าไร้สนิม AISI 316 [7]	$1.78 \times 10^{-13}$	304
เหล็กกล้าไร้สนิม AISI 310 [7]	$1.61 \times 10^{-13}$	304
แพลทินัม [5]	$1.00 \times 10^{-13}$	301
นิกเกิล [19]	$9.00 \times 10^{-14}$	300
นิกเกิล [6]	$6.02 \times 10^{-14}$	301
ทองคำ [5]	$5.00 \times 10^{-14}$	301

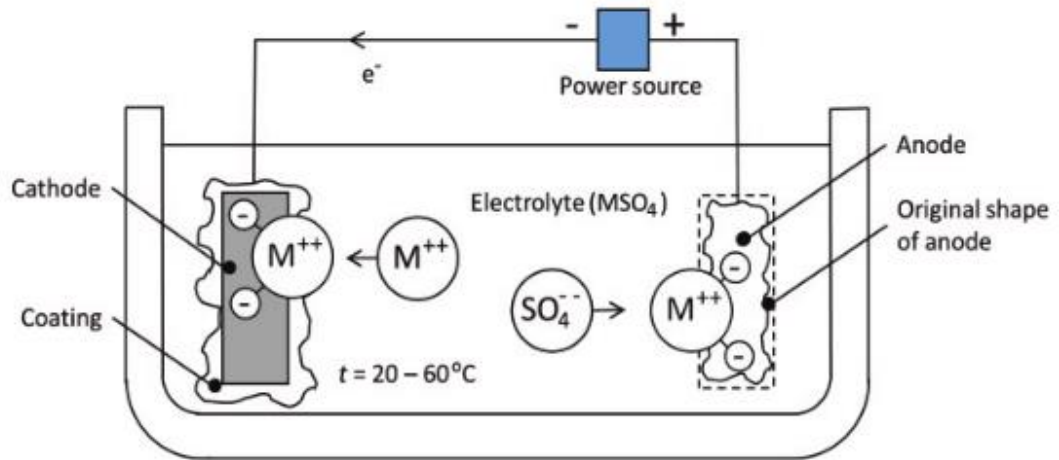
## 2.9 การเคลือบไฟฟ้า (Electrocoating) [20]

การสร้างชั้นเคลือบโลหะด้วยการเคลือบไฟฟ้าแสดงในรูปที่ 2.16 จะพบว่าอุปกรณ์สำหรับการเคลือบโลหะด้วยไฟฟ้าแบ่งออกเป็น 4 ชนิด ได้แก่ 1. ขั้วไฟฟ้าแคโทด 2. ขั้วไฟฟ้าแอโนด 3. สารละลายอิเล็กโทรไลต์ และ 4. เครื่องควบคุมกระแสไฟฟ้า ซึ่งขั้นตอนการสร้างชั้นเคลือบโลหะเริ่มต้นโดยการต่อขั้วไฟฟ้าลบแก่ขั้วแคโทดซึ่งต่อเข้ากับชิ้นงานที่ต้องการสร้างชั้นเคลือบและต่อขั้วไฟฟ้าบวกที่ขั้วแอโนด จากนั้นทำการควบคุมความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างขั้วไฟฟ้าเหนี่ยวนำให้สารละลายโลหะซัลเฟต ( $\text{MSO}_4$ ) เกิดการแตกตัวเป็นไอออนโลหะประจุสองบวก ( $\text{M}^{2+}$ ) และไอออนซัลเฟตประจุสองลบ ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) ตามลำดับ จากนั้นเกิดการแลกเปลี่ยนประจุระหว่างไอออนโลหะประจุสองบวก ( $\text{M}^{2+}$ ) และอิเล็กตรอนประจุลบ ( $\text{e}^-$ ) ที่ผิวชิ้นงานซึ่งต่อเข้ากับขั้วแคโทดทำให้เกิดชั้นเคลือบโลหะ (M) ดังแสดงในสมการที่ 2.17



2.17





รูปที่ 2.16 ภาพจำลองการสร้างชั้นเคลือบด้วยไฟฟ้า [20]



บทที่ 3  
ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

3.1 สารเคมีและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

3.1.1 สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

ตารางที่ 2.1 สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

ชื่อสารเคมี	สูตรเคมี
โซเดียมไฮดรอกไซด์	NaOH
โพแทสเซียมไซยาไนด์	KCN
นิกเกิลซัลเฟต	NiSO <sub>4</sub> ·6H <sub>2</sub> O
นิกเกิลคลอไรด์	NiCl <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O
กรดซัลฟิวริก	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>
กรดบอริก	H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub>
โกลด์โพแทสเซียมไซยาไนด์	KAu(CN) <sub>2</sub>
กรดซิตริก	C <sub>6</sub> H <sub>10</sub> O <sub>8</sub>
โพแทสเซียมซิติเรท	C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> K <sub>3</sub> O <sub>7</sub>
โคบอลต์ซัลเฟต	CoSO <sub>4</sub> ·7H <sub>2</sub> O
อะซีโตน	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> O
น้ำยาทาเล็บ	C <sub>7</sub> H <sub>8</sub> , CH <sub>2</sub> O, C <sub>16</sub> H <sub>22</sub> O <sub>4</sub>

### 3.1.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

1. แผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ขนาด 3.00 x 5.00 x 0.04 cm ซึ่งมีส่วนผสมเคมีตามตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 องค์ประกอบเคมี (wt. %) ของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304

ธาตุ	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu
ปริมาณ	0.080	1.000	2.000	0.045	0.003	18.330	8.030	0.080	0.162

2. กระดาษทรายที่มีความหยาบผิวเบอร์ 80, 180, 240, 400, 600, 800, 1200, 1500 และ 2000 ตามลำดับ

3. ผงเพชรผสมเสร็จที่มีขนาดอนุภาค 1  $\mu\text{m}$

4. เซลล์แก้วขนาด 1.5 l จำนวน 2 เซลล์ ได้แก่ เซลล์อัดประจุ (Charging cell) และเซลล์ออกซิไดซ์ (Oxidizing cell)

5. เครื่องคอมพิวเตอร์

6. เครื่องวิเคราะห์สมบัติทางเคมีไฟฟ้า (Potentiostat) รุ่น  $\mu$ -Autolab type-II

7. ขั้วไฟฟ้าอ้างอิง (Reference electrode) ชนิดซิลเวอร์ ซิลเวอร์คลอไรด์ (Ag/AgCl)

8. ขั้วไฟฟ้าวัดกระแส (Auxiliary electrode) ชนิดแพลทินัม (Pt)

9. วงจรปรับแรงดันไฟฟ้า สำหรับการควบคุมแรงดันไฟฟ้าเพื่อให้เกิดความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าแก่เซลล์อัดประจุ

10. แอมมิเตอร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

11. ถังแก๊สไนโตรเจน ( $\text{N}_2$ )

### 3.2 วิธีการทดลอง

#### 3.2.1 การเคลือบนิกเกิลและทองคำบนแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304

ในการทดลองนี้ทำการเคลือบนิกเกิลและการเคลือบทองคำบนแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ด้วยการเคลือบไฟฟ้า (Electrocoating) ซึ่งได้รับความร่วมมือจากบริษัท ยูนิคอร์ จำกัด และ บริษัท วาย.เอ.เอส. โกลด์ อีเล็กโทรเพลทติ้ง จำกัด กระบวนการเคลือบไฟฟ้าแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอน คือการเตรียมพื้นผิวเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 และการสร้างชั้นเคลือบ ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 3.1

### 3.2.1.1 การเตรียมพื้นผิวเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304

1. ขัดแผ่นผิวเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 เพื่อลดขนาดความหนาจาก 0.04 cm ให้มีค่าประมาณ 0.02 cm ด้วยกระดาษทรายที่มีความหยาบผิวต่ำถึงความหยาบผิวเท่ากับ 2000 และผงเพชรผสมเสร็จ
2. กำจัดชั้นไขมันด้วยสารละลายโพแทสเซียมไซยาไนด์ (KCN) เป็นเวลา 60 s ใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า  $80 \text{ A}\cdot\text{m}^{-2}$
3. กำจัดฟิล์มออกไซด์ด้วยสารละลายกรดซัลฟิวริก ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) เป็นเวลา 60 s

### 3.2.1.2 การสร้างชั้นเคลือบบนผิวเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304

#### 3.2.1.2.1 ชั้นเคลือบนิเกิล 1 ด้าน

1. เคลือบน้ำยาทาเล็บบนผิวเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 จำนวน 1 ด้าน และนำไปอบที่อุณหภูมิ 353 K เป็นเวลา 43.20 ks
2. เคลือบนิเกิลบนผิวเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ด้วยสารละลายผสมระหว่างนิเกิลซัลเฟต ( $\text{NiSO}_4\cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ) นิเกิลคลอไรด์ ( $\text{NiCl}_2$ ) และกรดบอริก ( $\text{H}_3\text{BO}_3$ ) ที่อุณหภูมิ 328 K เป็นเวลา 0.30 ks ใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า  $500 \text{ A}\cdot\text{m}^{-2}$
3. ล้างน้ำยาทาเล็บด้วยสารละลายอะซีโตน ( $\text{C}_3\text{H}_6\text{O}$ )
4. กำจัดชั้นไขมันด้วยสารละลายโพแทสเซียมไซยาไนด์ (KCN) เป็นเวลา 60 s ใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า  $80 \text{ A}\cdot\text{m}^{-2}$
5. กำจัดฟิล์มออกไซด์ด้วยสารละลายกรดซัลฟิวริก ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) เป็นเวลา 60 s
6. กำหนดให้ชิ้นงานจากกระบวนการเคลือบดังกล่าวเป็นเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ที่ไม่มีชั้นเคลือบด้านการอัดประจุ

#### 3.2.1.2.2 ชั้นเคลือบนิเกิล 2 ด้าน

1. เคลือบนิเกิลบนผิวเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ด้วยสารละลายผสมระหว่างนิเกิลซัลเฟต ( $\text{NiSO}_4\cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ) นิเกิลคลอไรด์ ( $\text{NiCl}_2$ ) และกรดบอริก ( $\text{H}_3\text{BO}_3$ ) ที่อุณหภูมิ 328 K เป็นเวลา 0.30 ks ใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า  $500 \text{ A}\cdot\text{m}^{-2}$
2. กำจัดชั้นไขมันด้วยสารละลายโพแทสเซียมไซยาไนด์ (KCN) เป็นเวลา 60 s ใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า  $80 \text{ A}\cdot\text{m}^{-2}$
3. กำจัดฟิล์มออกไซด์ด้วยสารละลายกรดซัลฟิวริก ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) เป็นเวลา 60 s
4. กำหนดให้ชิ้นงานจากกระบวนการเคลือบดังกล่าวเป็นเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ที่มีชั้นเคลือบนิเกิลด้วยไฟฟ้าด้านการอัดประจุ

### 3.2.1.2.3 ชั้นเคลือบนิเกิล 1 ด้าน และชั้นเคลือบทองคำ 1 ด้าน

1. เคลือบน้ำยาทาเล็บบนผิวเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 จำนวน 1 ด้าน และนำไปอบที่อุณหภูมิ 353 K เป็นเวลา 43.20 ks
2. เคลือบนิเกิลบนผิวเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ด้วยสารละลายผสมระหว่างนิเกิลซัลเฟต ( $\text{NiSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ) นิเกิลคลอไรด์ ( $\text{NiCl}_2$ ) และกรดบอริก ( $\text{H}_3\text{BO}_3$ ) ที่อุณหภูมิ 328 K เป็นเวลา 0.30 ks ใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า  $500 \text{ A}\cdot\text{m}^{-2}$
3. ล้างน้ำยาทาเล็บด้วยสารละลายอะซีโตน ( $\text{C}_3\text{H}_6\text{O}$ )
4. กำจัดชั้นไขมันด้วยสารละลายโพแทสเซียมไซยาไนด์ (KCN) เป็นเวลา 60 s ใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า  $80 \text{ A}\cdot\text{m}^{-2}$
5. กำจัดฟิล์มออกไซด์ด้วยสารละลายกรดซัลฟิวริก ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) เป็นเวลา 60 s
6. เคลือบน้ำยาทาเล็บบนชั้นเคลือบนิเกิล และนำไปอบที่อุณหภูมิ 353 K เป็นเวลา 43.20 ks
7. เคลือบทองคำบนผิวเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ด้วยสารละลายผสมระหว่างโกลด์โพแทสเซียมไซยาไนด์ ( $\text{KAu}(\text{CN})_2$ ) กรดซิตริก ( $\text{C}_6\text{H}_{10}\text{O}_8$ ) โพแทสเซียมซีเตรท ( $\text{C}_6\text{H}_5\text{K}_3\text{O}_7$ ) และโคบอลต์ซัลเฟต ( $\text{CoSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ) ที่อุณหภูมิ 313 K เป็นเวลา 0.60 ks ใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า  $400 \text{ A}\cdot\text{m}^{-2}$
8. ล้างน้ำยาทาเล็บด้วยสารละลายอะซีโตน ( $\text{C}_3\text{H}_6\text{O}$ )
9. กำจัดชั้นไขมันด้วยสารละลายโพแทสเซียมไซยาไนด์ (KCN) เป็นเวลา 60 s ใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า  $80 \text{ A}\cdot\text{m}^{-2}$
10. กำจัดฟิล์มออกไซด์ด้วยสารละลายกรดซัลฟิวริก ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) เป็นเวลา 60 s
11. กำหนดให้ชิ้นงานจากกระบวนการเคลือบดังกล่าวเป็นเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ที่มีชั้นเคลือบทองคำด้วยไฟฟ้าด้านการอัดประจุ



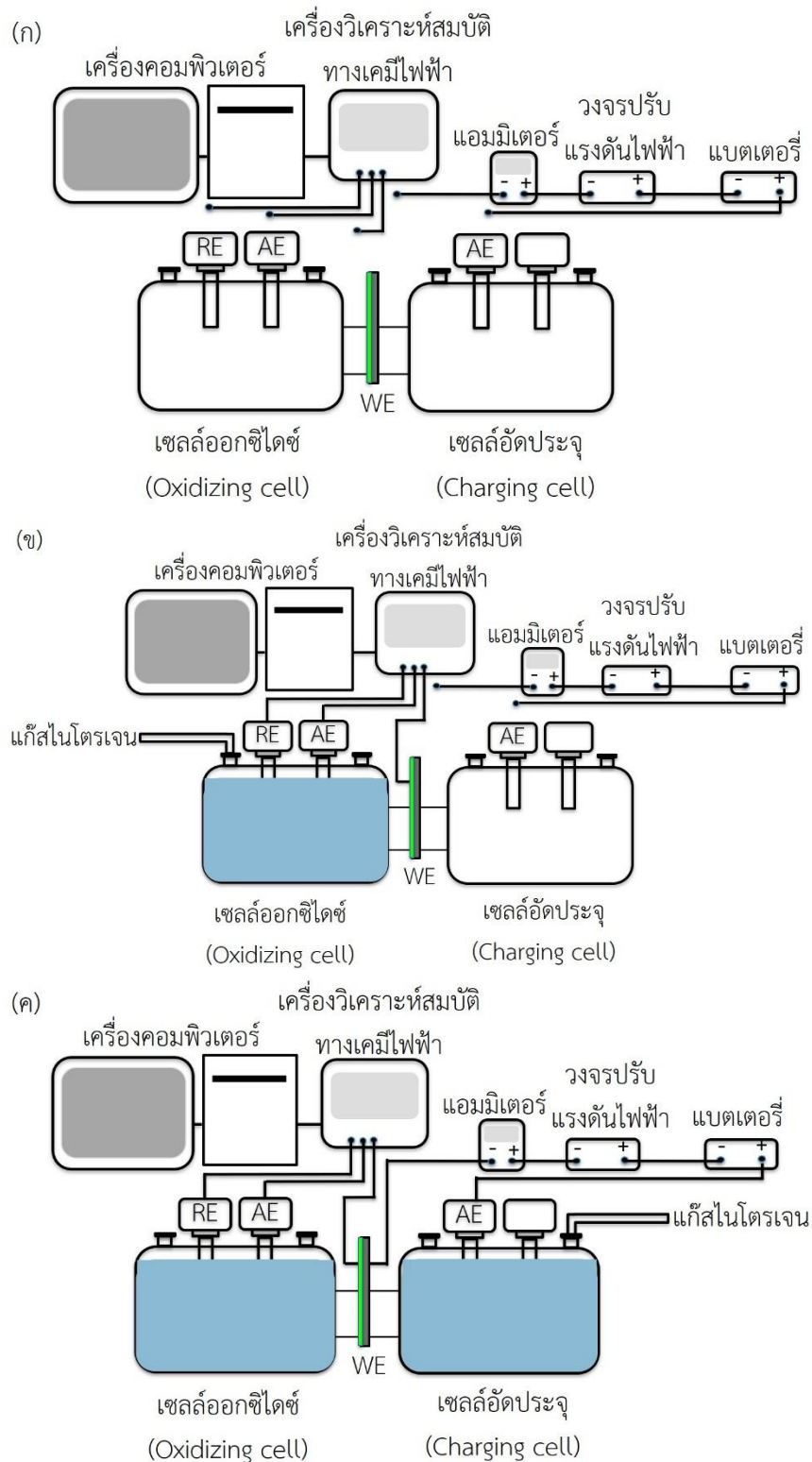
รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการเคลือบนิเกิลและทองคำบนด้วยไฟฟ้าบนแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304

### 3.2.2 การตรวจสอบชั้นเคลือบ

ตรวจสอบชั้นเคลือบของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ที่ไม่มีชั้นเคลือบการอัดประจุ เหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ที่มีชั้นเคลือบนิกเกิลด้วยไฟฟ้าด้านการอัดประจุ และเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ที่มีชั้นเคลือบทองคำด้วยไฟฟ้าด้านการอัดประจุ โดยใช้เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction, XRD)

### 3.2.3 การทดลองหาสัมประสิทธิ์การแพร่ไฮโดรเจนประสิทธิผล

1. ประกอบเซลล์อัดประจุและเซลล์ออกซิไดซ์โดยมีแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 คั่นเป็นตัวกลางระหว่างเซลล์ ทำหน้าที่เป็นขั้วไฟฟ้าทำงาน ดังแสดงในรูปที่ 3.2ก
2. เติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH)  $0.1 \text{ mol}\cdot\text{m}^{-3}$  ลงในเซลล์ออกซิไดซ์และเติมแก๊สไนโตรเจน ( $\text{N}_2$ ) แก่เซลล์เพื่อไล่แก๊สออกซิเจน ( $\text{O}_2$ )
3. นำขั้วไฟฟ้า 3 ชนิด ได้แก่ 1. ขั้วไฟฟ้าอ้างอิง 2. ขั้วไฟฟ้าวัดกระแส และ 3. ขั้วไฟฟ้าทำงาน ต่อเข้ากับเซลล์ออกซิไดซ์ เครื่องวิเคราะห์สมบัติทางเคมีไฟฟ้าและเครื่องคอมพิวเตอร์ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 3.2ข
4. ควบคุมความต่างศักย์ไฟฟ้า  $+281 \text{ mV}$  (Ag/AgCl) และวัดความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าซึมผ่านแก่เซลล์ออกซิไดซ์
5. เมื่อความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าซึมผ่านมีค่าต่ำกว่า  $0.1 \mu\text{A}\cdot\text{cm}^{-2}$  ทำการเติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH)  $0.1 \text{ mol}\cdot\text{m}^{-3}$  ลงในเซลล์อัดประจุและเติมแก๊สไนโตรเจน ( $\text{N}_2$ ) แก่เซลล์เพื่อไล่แก๊สออกซิเจน ( $\text{O}_2$ )
6. นำขั้วไฟฟ้าวัดกระแสต่อเข้ากับขั้วบวกของแบตเตอรี่ วงจรปรับแรงดันไฟฟ้าและแอมมิเตอร์ ดังแสดงในรูปที่ 3.2ค
7. ควบคุมความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า  $5.5 \text{ mA}\cdot\text{cm}^{-2}$  แก่เซลล์อัดประจุ
8. วัดความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าซึมผ่านที่เปลี่ยนแปลงในเซลล์ออกซิไดซ์



รูปที่ 3.2 ภาพจำลองขั้นตอนการทดลองหาสัมประสิทธิ์การแพร่ไฮโดรเจนประสิทธิผลตามมาตรฐาน

ASTM G148-97

\*RE = ขั้วไฟฟ้าอ้างอิง, AE = ขั้วไฟฟ้าวัดกระแส, WE = ขั้วไฟฟ้าทำงาน



9. สร้างกราฟแสดงความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าซึมผ่านที่เปลี่ยนแปลงกับเวลา

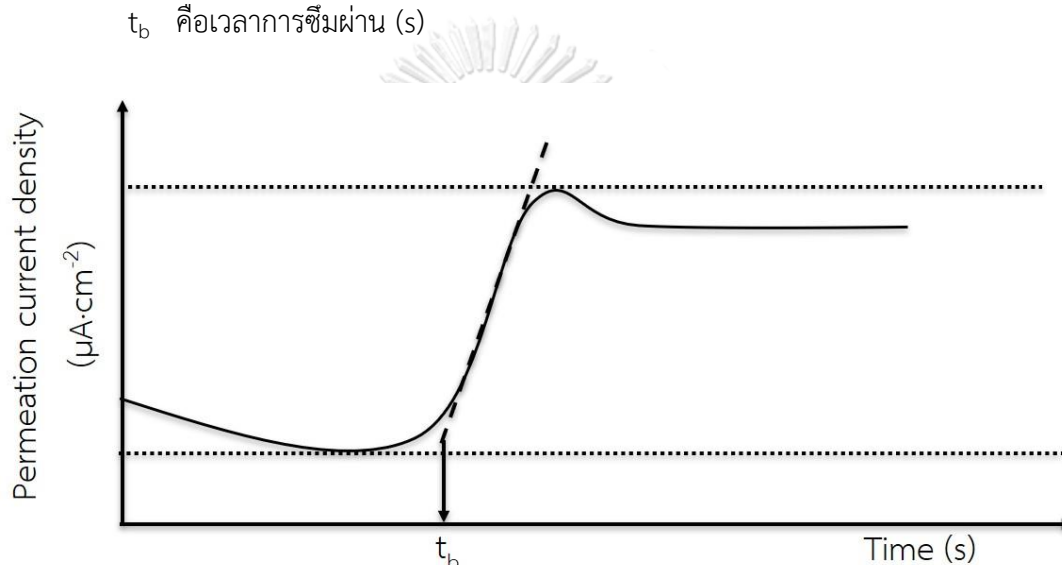
10. ระบุเวลาการซึมผ่าน (Breakthrough time,  $t_b$ ) ที่จุดตัดของเส้นตรงระหว่างเส้นตรงที่ลากผ่านจุดเปลี่ยนความชันของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าซึมผ่านและเส้นตรงที่ลากผ่านแกนเวลาดังแสดงในรูปที่ 3.3 จากนั้นคำนวณสัมประสิทธิ์การแพร่ไฮโดรเจนประสิทธิผลตามสมการที่ 3.1

$$D_{\text{eff}} = L^2 / (15.3t_b) \quad 3.1$$

โดยที่  $L$  คือความหนาของตัวอย่าง (m)

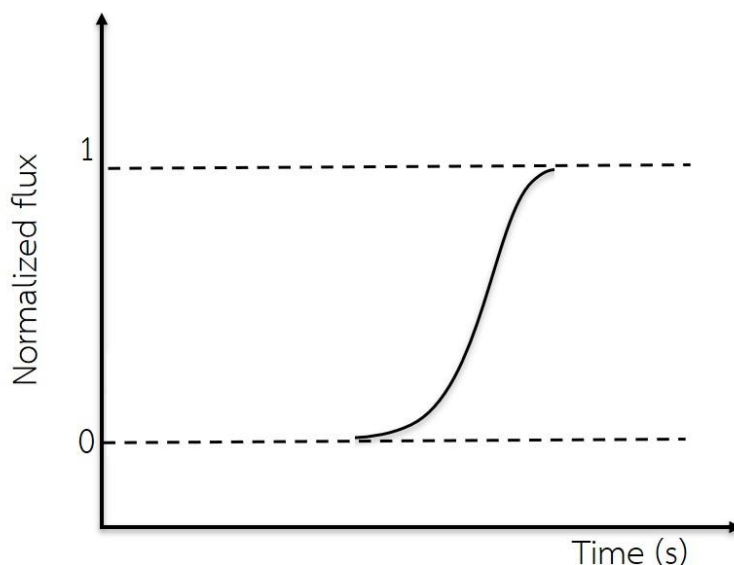
$D_{\text{eff}}$  คือสัมประสิทธิ์การแพร่ไฮโดรเจนประสิทธิผล ( $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ )

$t_b$  คือเวลาการซึมผ่าน (s)



รูปที่ 3.3 กราฟจำลองแสดงความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าซึมผ่าน (Permeation current density) ที่เปลี่ยนแปลงกับเวลา และค่าเวลาการซึมผ่าน (Breakthrough time,  $t_b$ )

11. จากรูปที่ 3.3 เลือกช่วงข้อมูลของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าซึมผ่านที่มีค่าต่ำสุดและค่าสูงสุด เพื่อสร้างกราฟแสดงอัตราส่วนระหว่างฟลักซ์ของไฮโดรเจน ณ เวลาใดเวลาหนึ่งและฟลักซ์ของไฮโดรเจน ณ สภาวะคงตัว (Normalized flux) กับเวลา ดังแสดงในรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 กราฟจำลองแสดงอัตราส่วนระหว่างฟลักซ์ของไฮโดรเจน ณ เวลาใดเวลาหนึ่งและฟลักซ์ของไฮโดรเจน ณ สภาวะคงตัว (Normalized flux) กับเวลา

12. จากรูปที่ 3.4 ทำการจำลองกราฟแสดงอัตราส่วนระหว่างฟลักซ์ของไฮโดรเจน ณ เวลาใดเวลาหนึ่งและฟลักซ์ของไฮโดรเจน ณ สภาวะคงตัว ด้วยโปรแกรม “OriginPro 8.6” เพื่อเป็นกราฟขึ้นอัตราส่วนระหว่างฟลักซ์ของไฮโดรเจน ณ เวลาใดเวลาหนึ่งและฟลักซ์ของไฮโดรเจน ณ สภาวะคงตัวมีค่าเข้าใกล้ 0 และ 1 ดังแสดงในรูปที่ 3.5 โดยที่โปรแกรมดังกล่าวเลือกสมการที่ 3.2 ซึ่งเป็นสมการตามแบบจำลอง “Boltzmann”

$$Y = A_2 + (A_1 - A_2) / (1 + \exp((X - X_0)/dx)) \quad 3.2$$

โดยที่ Y คืออัตราส่วนระหว่างฟลักซ์ของไฮโดรเจน ณ เวลาใดเวลาหนึ่งและฟลักซ์ของไฮโดรเจน ณ สภาวะคงตัว

A1 คืออัตราส่วนระหว่างฟลักซ์ของไฮโดรเจน ณ เวลาใดเวลาหนึ่งและฟลักซ์ของไฮโดรเจน ณ สภาวะคงตัวที่มีค่าต่ำสุด

A2 คืออัตราส่วนระหว่างฟลักซ์ของไฮโดรเจน ณ เวลาใดเวลาหนึ่งและฟลักซ์ของไฮโดรเจน ณ สภาวะคงตัวที่มีค่าสูงสุด

X คือเวลา (s)

$X_0$  คือเวลาที่ถูกระบุกำหนดเป็นจุดศูนย์กลาง (s)

dx คืออนุพันธ์ของเวลา

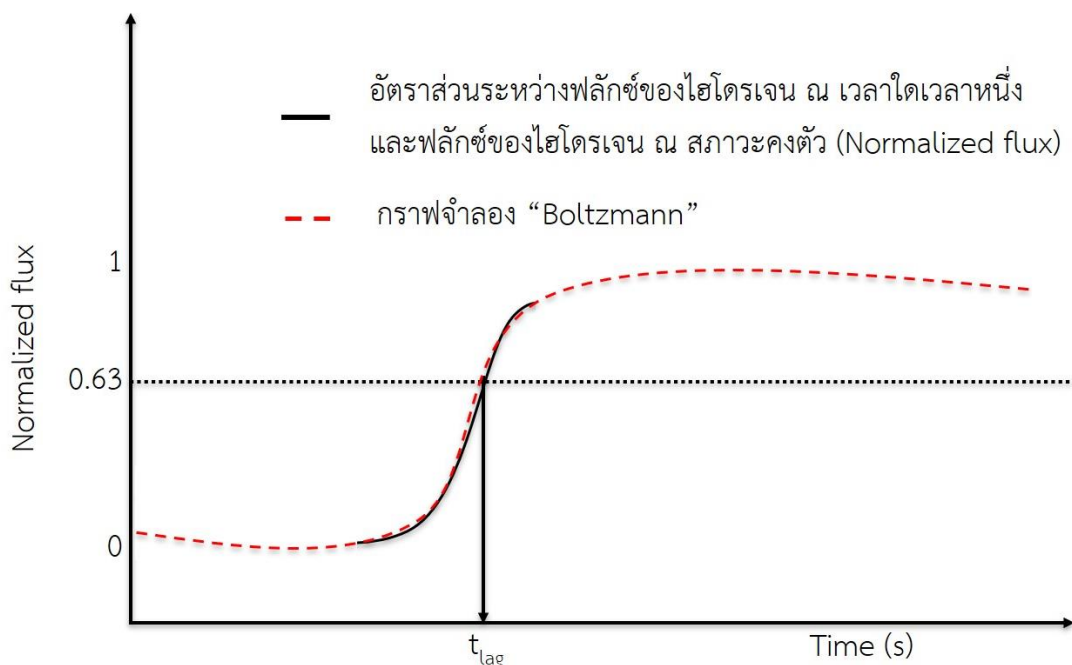
13. ระบุเวลาล่าช้า (Time lag,  $t_{lag}$ ) ที่อัตราส่วนระหว่างฟลักซ์ของไฮโดรเจน ณ เวลาใดเวลาหนึ่งและฟลักซ์ของไฮโดรเจน ณ สภาวะคงตัว มีค่าเท่ากับ 0.63 s ดังแสดงในรูปที่ 3.5 จากนั้นคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ไฮโดรเจนประสิทธิผลตามสมการที่ 3.3

$$D_{eff} = L^2/(6t_{lag}) \quad 3.3$$

โดยที่  $L$  คือความหนาของตัวอย่าง (m)

$D_{eff}$  คือสัมประสิทธิ์การแพร่ไฮโดรเจนประสิทธิผล ( $m^2 \cdot s^{-1}$ )

$t_{lag}$  คือเวลาล่าช้า (s)



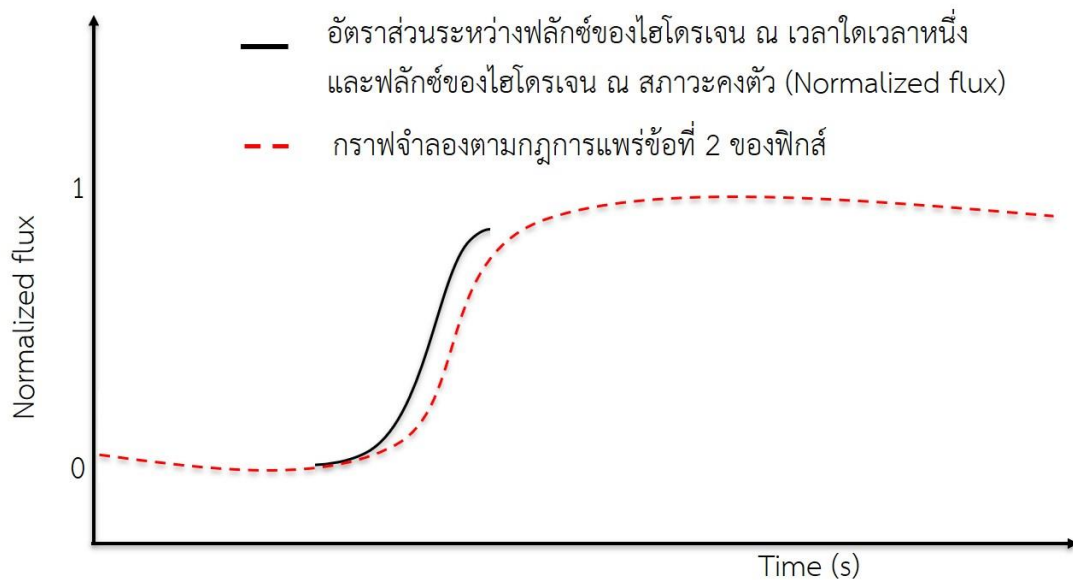
รูปที่ 3.5 กราฟจำลองแสดงอัตราส่วนระหว่างฟลักซ์ของไฮโดรเจน ณ เวลาใดเวลาหนึ่งและฟลักซ์ของไฮโดรเจน ณ สภาวะคงตัว (Normalized flux) กับเวลา กราฟจำลอง “Boltzmann” และค่าเวลาล่าช้า (Time lag,  $t_{lag}$ )

14. จำลองกราฟแสดงอัตราส่วนระหว่างฟลักซ์ของไฮโดรเจน ณ เวลาใดเวลาหนึ่งและฟลักซ์ของไฮโดรเจน ณ สภาวะคงตัว ตามกฎการแพร่ข้อที่ 2 ของฟิกส์ (Fick’s second law) ดังสมการที่ 3.4 ซึ่งถูกการคำนวณโดยการใส่ค่าเวลาการอัดประจุและสัมประสิทธิ์ไฮโดรเจนประสิทธิผลจากเวลาการซึมผ่าน

$$J(t)/J_{ss} = 1 + 2\sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \exp(-n^2\pi^2\tau) \quad 3.4$$

โดยที่  $J_{ss}$  คือฟลักซ์ของไฮโดรเจน ณ สภาวะคงตัว (amount·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>)  
 $J(t)$  คือฟลักซ์ของไฮโดรเจน ณ เวลาใดเวลาหนึ่ง (amount·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>)  
 $\tau$  คือเวลาปรับปรุง (Normalized time,  $D_{eff}t/L^2$ )  
กำหนดให้  $n$  มีค่าตั้งแต่ 0 ถึง 15

15. สร้างกราฟแสดงอัตราส่วนระหว่างฟลักซ์ของไฮโดรเจน ณ เวลาใดเวลาหนึ่ง และฟลักซ์ของไฮโดรเจน ณ สภาวะคงตัวกับเวลา เปรียบเทียบกับกราฟจำลองตามกฎการแพร่ข้อที่ 2 ของฟิกส์ เพื่อวิเคราะห์ปัจจัยที่ส่งผลต่อการแพร่ของไฮโดรเจนดังแสดงในรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 กราฟแสดงอัตราส่วนระหว่างฟลักซ์ของไฮโดรเจน ณ เวลาใดเวลาหนึ่ง และฟลักซ์ของไฮโดรเจน ณ สภาวะคงตัว (Normalized flux) กับเวลา และกราฟจำลองตามกฎการแพร่ข้อที่ 2 ของฟิกส์ (Fick's second law)

### 3.2.4 การศึกษาลักษณะชิ้นงานและวัดความหนาเฉลี่ย

ศึกษาลักษณะชิ้นงานและวัดความหนาเฉลี่ยของชั้นเคลือบนิกเกิลด้วยไฟฟ้า ชั้นเคลือบทองคำด้วยไฟฟ้า และชั้นเนื้อพื้นหรือเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ในแนวภาพภาคตัดขวาง (Cross section) ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM) โหมดอิเล็กตรอนกระเจิงกลับ (Back scatter electron) และการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยโหมดสเปกโทรเมตรีรังสีเอกซ์แบบกระจายพลังงาน (Energy dispersive x-ray spectroscopy) ด้วยการตรวจเชิงเส้น (Line scan)



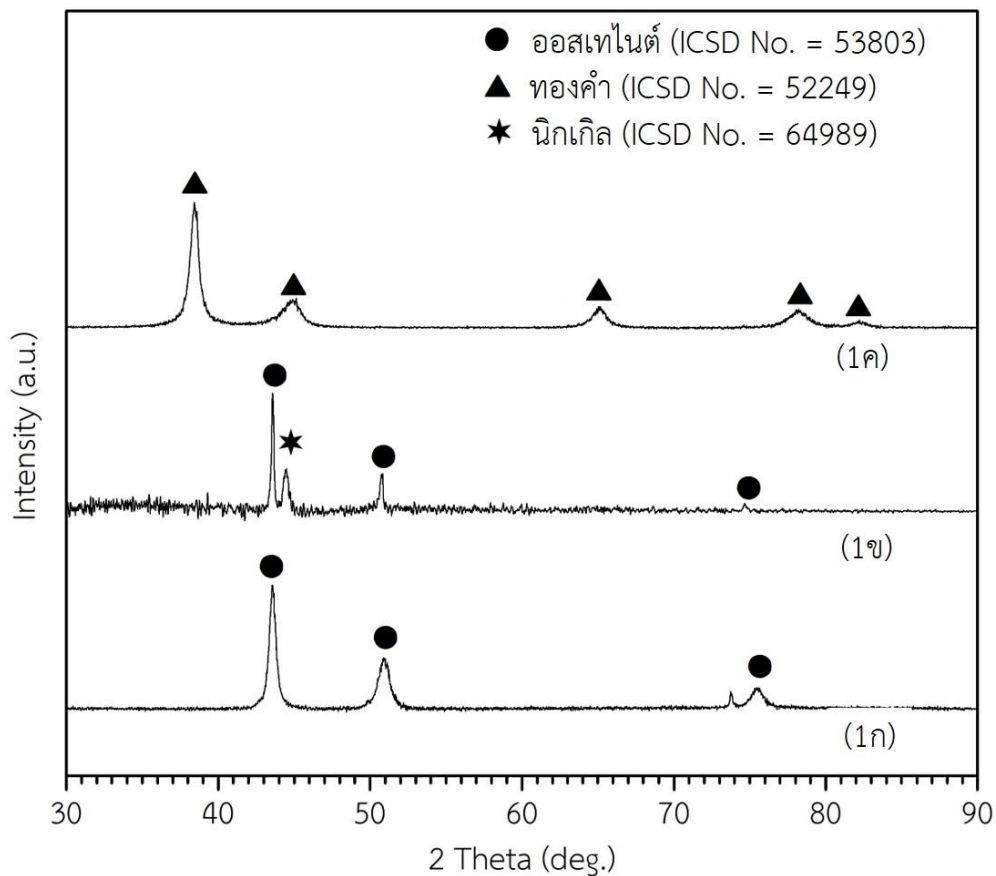
## บทที่ 4

### ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

#### 4.1 การตรวจสอบชั้นเคลือบด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction)

ผลการตรวจสอบชั้นเคลือบของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ที่ไม่มีชั้นเคลือบด้านการอัดประจุ (1ก) เหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ที่มีชั้นเคลือบนิกเกิลด้วยไฟฟ้าด้านการอัดประจุ (1ข) และเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ที่มีชั้นเคลือบทองคำด้วยไฟฟ้าด้านการอัดประจุ (1ค) ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์แสดงในรูปที่ 4.1 พบว่าเฟสของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 (1ก) ที่ไม่มีชั้นเคลือบด้านการอัดประจุปรากฏที่มุม  $2\theta$  เท่ากับ  $43.5^\circ$ ,  $44.5^\circ$ ,  $50.9^\circ$ ,  $73.7^\circ$  และ  $75.4^\circ$  ตามลำดับ ในขณะที่เฟสของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ที่มีชั้นเคลือบนิกเกิลด้วยไฟฟ้าด้านการอัดประจุ (1ข) ปรากฏที่มุม  $2\theta$  เท่ากับ  $43.5^\circ$ ,  $44.5^\circ$ ,  $50.7^\circ$  และ  $74.6^\circ$  ตามลำดับ และเฟสของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ที่มีชั้นเคลือบทองคำด้วยไฟฟ้าด้านการอัดประจุ (1ค) ปรากฏที่มุม  $2\theta$  เท่ากับ  $38.4^\circ$ ,  $44.9^\circ$ ,  $65.1^\circ$ ,  $78.1^\circ$  และ  $82.1^\circ$  ตามลำดับ ซึ่งเฟสของออสเทนไนต์ (ICSD 53803) ปรากฏที่มุม  $2\theta$  เท่ากับ  $43.5^\circ$ ,  $50.9^\circ$  และ  $75.4^\circ$  ตามลำดับ ในขณะที่เฟสของนิกเกิล (ICSD 64989) ปรากฏที่มุม  $2\theta$  ประมาณ  $44.5^\circ$  และเฟสของทองคำ (ICSD 52249) ปรากฏที่มุม  $2\theta$  เท่ากับ  $38.4^\circ$ ,  $44.9^\circ$  และ  $65.1^\circ$  ตามลำดับ

จากผลการทดลองดังกล่าวพบว่าเฟสที่ปรากฏบนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ที่ไม่มีชั้นเคลือบด้านการอัดประจุ (1ก) คือออสเทนไนต์ และเฟสที่ปรากฏบนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ที่มีชั้นเคลือบนิกเกิลด้วยไฟฟ้าด้านการอัดประจุ (1ข) คือนิกเกิลและออสเทนไนต์ซึ่งเป็นเฟสของชั้นเคลือบและชั้นเนื้อพื้น ตามลำดับ ในขณะที่เฟสที่ปรากฏบนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ที่มีชั้นเคลือบทองคำด้วยไฟฟ้าด้านการอัดประจุ (1ค) คือทองคำซึ่งไม่ปรากฏเฟสของชั้นเนื้อพื้นเนื่องจากสัมประสิทธิ์การดูดซับเชิงมวล (Mass absorption coefficient) ของรังสีในทองคำมีค่ามาก [21] ทำให้รังสีทะลุผ่านไปยังพื้นผิวชั้นเนื้อพื้นมีปริมาณน้อย โอกาสของการเลี้ยวเบนของรังสีจึงมีค่าต่ำ ดังนั้นเฟสของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ที่มีชั้นเคลือบทองคำด้วยไฟฟ้าด้านการอัดประจุ (1ค) จึงปรากฏเพียงเฟสของทองคำ



รูปที่ 4.1 X-ray diffraction ของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ที่ไม่มีชั้นเคลือบด้านการอัดประจุ (1ก) เหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ที่มีชั้นเคลือบนิกเกิลด้วยไฟฟ้าด้านการอัดประจุ (1ข) และเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ที่มีชั้นเคลือบทองคำด้วยไฟฟ้าด้านการอัดประจุ (1ค)

#### 4.2 ลักษณะชิ้นงานและการตรวจสอบชั้นเคลือบด้วยเทคนิคอิเล็กตรอนกระเจิงกลับ (Back scatter electron)

รูปที่ 4.2 แสดงภาพภาคตัดขวาง (Cross section) ของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ที่ไม่มีชั้นเคลือบด้านการอัดประจุ เหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ที่มีชั้นเคลือบนิกเกิลด้วยไฟฟ้าด้านการอัดประจุ และเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ที่มีชั้นเคลือบทองคำด้วยไฟฟ้าด้านการอัดประจุ ด้วยเทคนิคอิเล็กตรอนกระเจิงกลับ และรูปที่ 4.3 แสดงผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของชิ้นงานด้วยเทคนิคสเปกโตรเมตรีรังสีเอกซ์แบบกระจายพลังงาน (Energy dispersive x-ray spectroscopy) ด้วยการตรวจเชิงเส้น (Line scan) พบว่าลักษณะชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ที่ไม่มีชั้นเคลือบด้านการอัดประจุ ประกอบด้วยชั้นเนื้อพื้นและชั้นเคลือบจำนวน 1 ด้าน ดังแสดงในรูปที่ 4.2ก และ 4.2ข โดยที่ชั้นเนื้อพื้นถูกพบว่ามีองค์ประกอบของธาตุเหล็ก โครเมียมและนิกเกิล ตามลำดับ ในขณะที่ชั้นเคลือบพบธาตุนิกเกิลดังแสดงในรูปที่ 4.3ก และ 4.3ข

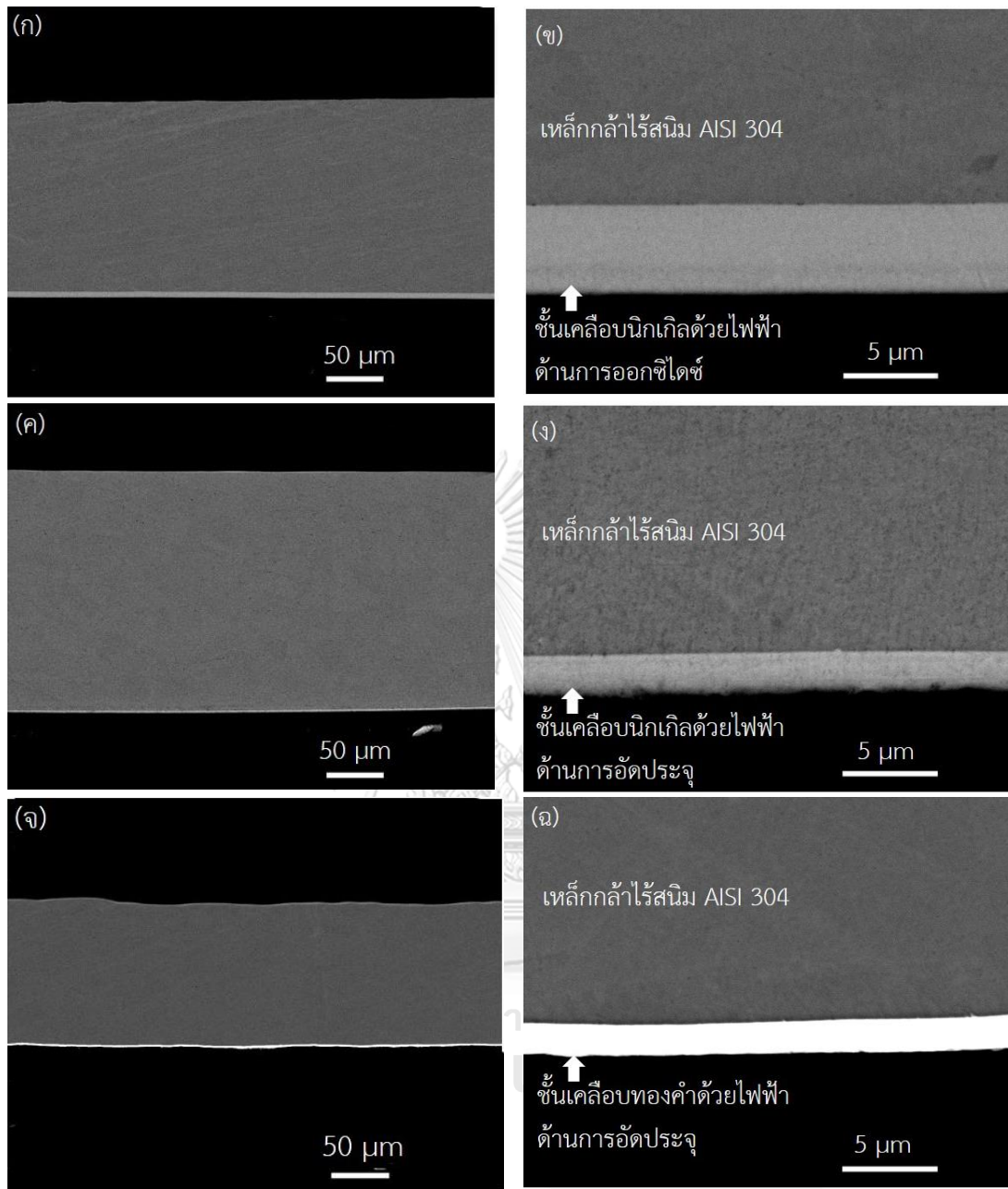
สำหรับเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ที่มีการเคลือบนิกเกิลด้วยไฟฟ้าด้านการอัดประจุ พบว่ามีชั้นเนื้อพื้นซึ่งมีองค์ประกอบของธาตุเหล็ก โครเมียมและนิกเกิล ตามลำดับ และชั้นเคลือบจำนวน 2 ด้าน ซึ่งมีองค์ประกอบของธาตุนิกเกิล ดังแสดงในรูปที่ 4.2ค-4.2ง และ 4.3ค-4.3ง

ในขณะที่เหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ที่มีการเคลือบทองคำด้วยไฟฟ้าด้านการอัดประจุ พบว่ามีชั้นเนื้อพื้นซึ่งมีองค์ประกอบของธาตุเหล็ก โครเมียมและนิกเกิล ตามลำดับ และมีชั้นเคลือบจำนวน 2 ด้าน ได้แก่ 1. ชั้นเคลือบที่มีองค์ประกอบของธาตุทองคำ และ 2. ชั้นเคลือบที่มีองค์ประกอบของธาตุนิกเกิลดังแสดงในรูปที่ 4.2จ-4.2ฉ และ 4.3จ-4.3ฉ

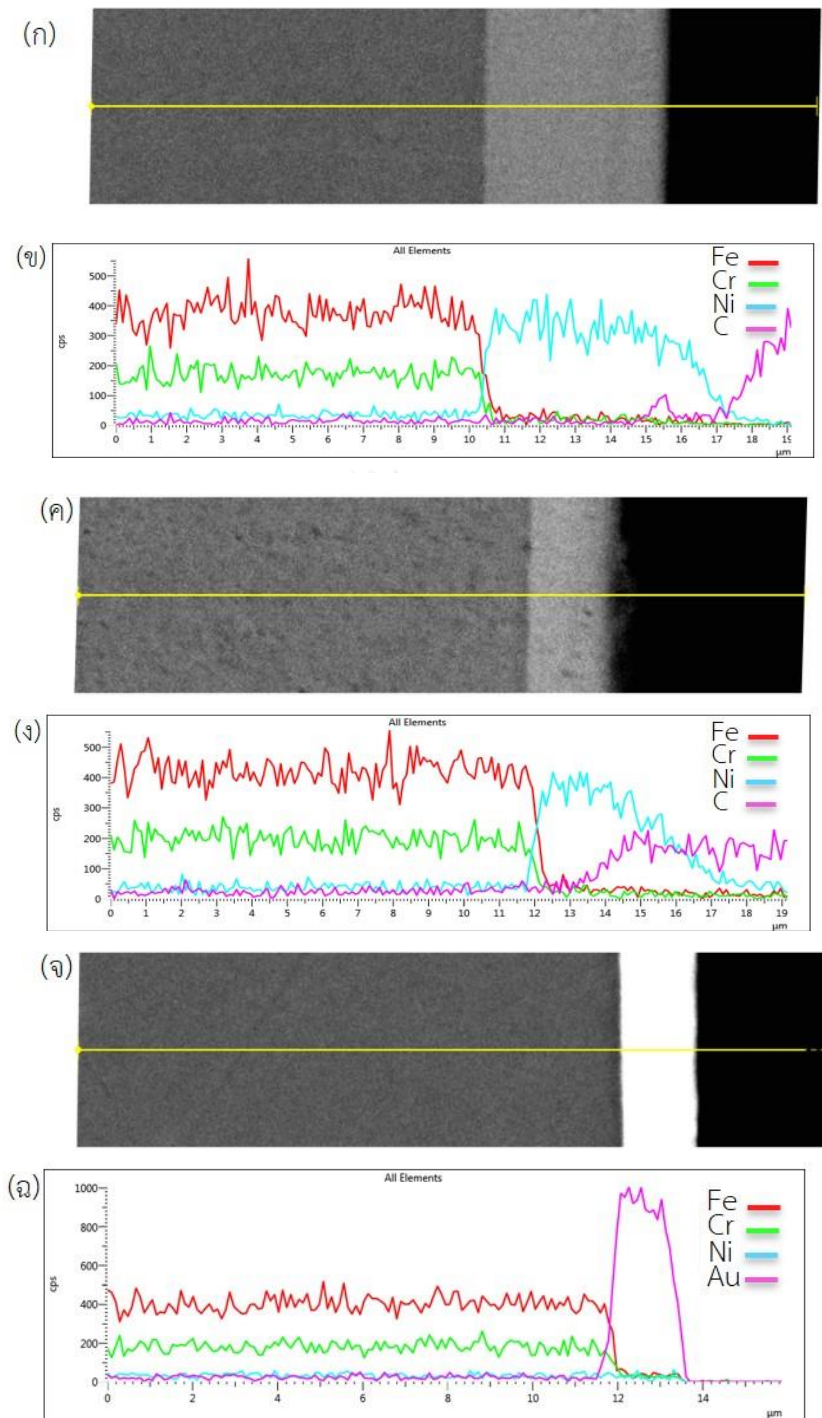
จากการทดลองพบว่าธาตุเหล็ก โครเมียมและนิกเกิล ซึ่งถูกพบในชั้นเนื้อพื้นเป็นองค์ประกอบหลักของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ในขณะที่ชั้นเคลือบนิกเกิลและชั้นเคลือบทองคำด้วยไฟฟ้าที่มีองค์ประกอบของธาตุนิกเกิลและทองคำนั้น สอดคล้องกับเฟสซึ่งถูกระบุด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction, XRD) ดังแสดงในรูปที่ 4.1 เป็นต้น







รูปที่ 4.2 ภาคตัดขวาง (Cross section) ของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ที่ไม่มีชั้นเคลือบด้านการอัดประจุ (ก และ ข) เหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ที่มีชั้นเคลือบนิกเกิลด้วยไฟฟ้าด้านการอัดประจุ (ค และ ง) และเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ที่มีชั้นเคลือบทองคำด้วยไฟฟ้าด้านการอัดประจุ (จ และ ฉ)



รูปที่ 4.3 ภาคตัดขวาง (Cross section) และสเปกตรัมแสดงองค์ประกอบทางเคมีของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ที่ไม่มีชั้นเคลือบด้านการอัดประจุ (ก และ ข) เหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ที่มีชั้นเคลือบนิกเกิลด้วยไฟฟ้าด้านการอัดประจุ (ค และ ง) และเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ที่มีชั้นเคลือบทองคำด้วยไฟฟ้าด้านการอัดประจุ (ฉ และ จ)

### 4.3 ความหนาเฉลี่ยของชั้นเคลือบและชั้นเนื้อพื้น

ตารางที่ 4.1 แสดงความหนาเฉลี่ยของชั้นเคลือบและชั้นเนื้อพื้นของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ที่ไม่มีชั้นเคลือบด้านการอัดประจุ (1ก) เหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ที่มีชั้นเคลือบนิกเกิลด้วยไฟฟ้าด้านการอัดประจุ (1ข) และเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ที่มีชั้นเคลือบทองคำด้วยไฟฟ้าด้านการอัดประจุ (1ค) พบว่า 1. เหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ที่ไม่มีชั้นเคลือบด้านการอัดประจุ (1ก) มีความหนารวมประมาณ  $171.80 \mu\text{m}$  ซึ่งแบ่งออกเป็นความหนาเฉลี่ยของชั้นเนื้อพื้นหรือเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 และชั้นเคลือบนิกเกิลด้วยไฟฟ้าด้านการออกซิไดซ์ มีค่าเท่ากับ  $167.10 \pm 1.10$  และ  $4.70 \pm 0.07 \mu\text{m}$  ตามลำดับ 2. เหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ที่มีชั้นเคลือบนิกเกิลด้วยไฟฟ้าด้านการอัดประจุ (1ข) มีความหนารวมประมาณ  $211.00 \mu\text{m}$  ซึ่งแบ่งออกเป็นความหนาเฉลี่ยของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ความหนาเฉลี่ยของชั้นเคลือบนิกเกิลด้วยไฟฟ้าด้านการออกซิไดซ์และชั้นเคลือบนิกเกิลด้วยไฟฟ้าด้านการอัดประจุ มีค่าเท่ากับ  $208.00 \pm 0.24$ ,  $0.90 \pm 0.17$  และ  $2.10 \pm 0.10 \mu\text{m}$  ตามลำดับ 3. เหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ที่มีชั้นเคลือบทองคำด้วยไฟฟ้าด้านการอัดประจุ (1ค) มีความหนารวมประมาณ  $124.30 \mu\text{m}$  ซึ่งแบ่งออกเป็นความหนาเฉลี่ยของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ความหนาเฉลี่ยของชั้นเคลือบนิกเกิลด้านการออกซิไดซ์และชั้นเคลือบทองคำด้านการอัดประจุ มีค่าเท่ากับ  $120.70 \pm 1.02$ ,  $1.90 \pm 0.11$  และ  $1.70 \pm 0.06 \mu\text{m}$  ตามลำดับ

จากผลของความหนาเฉลี่ยของชั้นเคลือบและเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 พบว่า 1. ความหนารวมของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ที่มีชั้นเคลือบนิกเกิลด้วยไฟฟ้าด้านการอัดประจุ (1ข) มีค่ามากที่สุด ในขณะที่ความหนารวมของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ที่มีชั้นเคลือบทองคำด้วยไฟฟ้าด้านการอัดประจุ (1ค) มีค่าน้อยที่สุด 2. ความหนาเฉลี่ยของชั้นเคลือบนิกเกิลด้วยไฟฟ้าด้านการออกซิไดซ์ของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ที่ไม่มีชั้นเคลือบด้านการอัดประจุ (1ก) มีค่ามากที่สุด ในขณะที่เหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ที่มีชั้นเคลือบนิกเกิลด้วยไฟฟ้าด้านการอัดประจุ (1ข) มีค่าน้อยที่สุด 3. ความหนาเฉลี่ยของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 และชั้นเคลือบด้านการอัดประจุ พบว่าเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ที่มีชั้นเคลือบนิกเกิลด้วยไฟฟ้าด้านการอัดประจุ (1ข) มีค่ามากกว่าเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ที่มีชั้นเคลือบทองคำด้วยไฟฟ้าด้านการอัดประจุ (1ค) ตามลำดับ

**ตารางที่ 4.1** ความหนาเฉลี่ยของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ชั้นเคลือบนิกเกิลด้วยไฟฟ้าและชั้นเคลือบทองคำด้วยไฟฟ้า

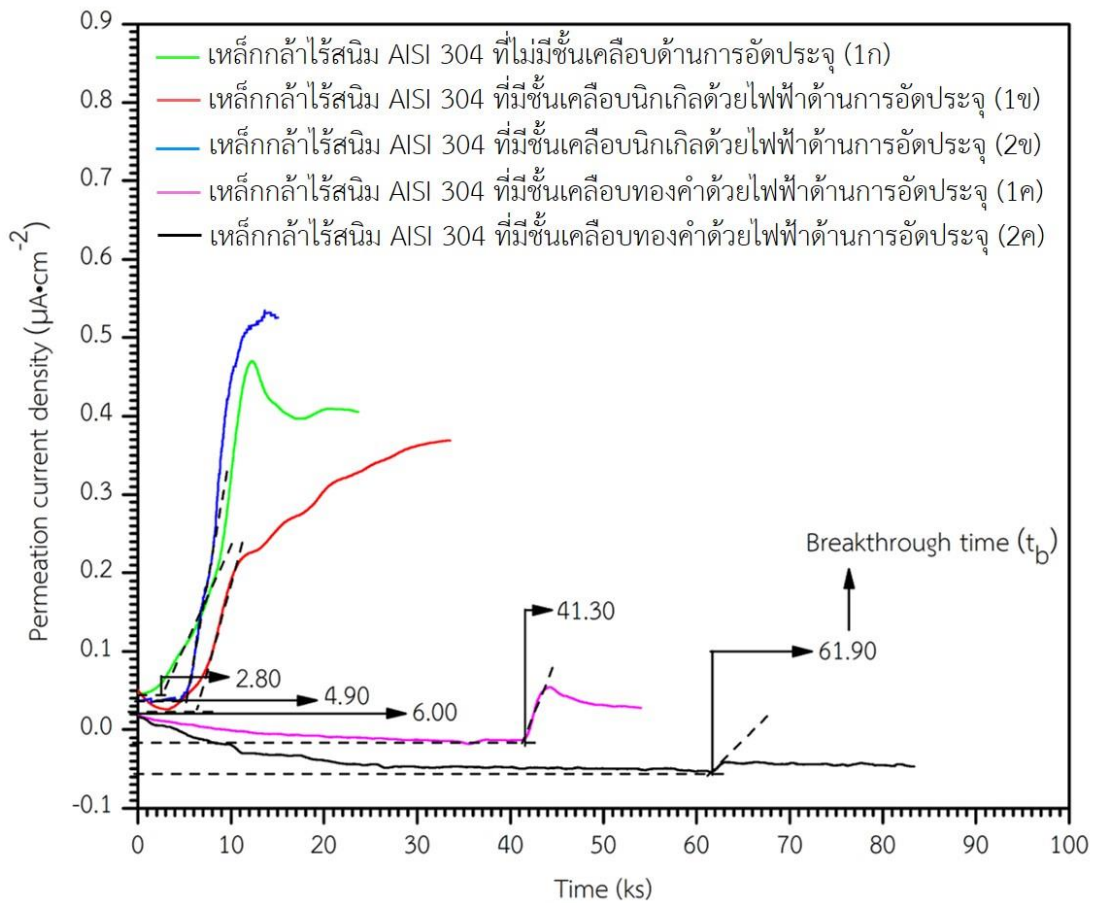
ตัวอย่าง	ชั้นเคลือบนิกเกิล ด้วยไฟฟ้า ด้านการออกซิไดซ์ ( $\mu\text{m}$ )	เหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ( $\mu\text{m}$ )	ชั้นเคลือบนิกเกิล ด้วยไฟฟ้า ด้านการอัดประจุ ( $\mu\text{m}$ )	ชั้นเคลือบทองคำ ด้วยไฟฟ้า ด้านการอัดประจุ ( $\mu\text{m}$ )
1ก	4.70±0.07	167.10±1.10	-	-
1ข	0.90±0.17	208.00±0.24	2.10±0.10	-
1ค	1.90±0.11	120.70±1.02	-	1.70±0.06

\*1 = ชิ้นงานลำดับที่ 1, ก = เหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ที่ไม่มีชั้นเคลือบด้านการอัดประจุ, ข = เหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ที่มีชั้นเคลือบนิกเกิลด้วยไฟฟ้าด้านการอัดประจุ, ค = เหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ที่มีชั้นเคลือบทองคำด้วยไฟฟ้าด้านการอัดประจุ

#### 4.4 ผลของชั้นเคลือบต่อพฤติกรรมการแพร่ของไฮโดรเจน

รูปที่ 4.4 แสดงความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าซึมผ่านที่เปลี่ยนแปลงกับเวลา ของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ที่ไม่มีชั้นเคลือบด้านการอัดประจุ (1ก) เหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ที่มีชั้นเคลือบนิกเกิลด้วยไฟฟ้าด้านการอัดประจุ (1ข และ 2ข) และเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ที่มีชั้นเคลือบทองคำด้วยไฟฟ้าด้านการอัดประจุ (1ค และ 2ค) พบว่ากราฟดังกล่าวสามารถแบ่งออกเป็น 3 ช่วง ได้แก่ 1. ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าซึมผ่านมีค่าต่ำ เกี่ยวข้องกับการผลิตอะตอมไฮโดรเจนที่พื้นผิวชั้นเคลือบในเซลล์อัดประจุ 2. ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าซึมผ่านมีค่าเพิ่มขึ้นจนกระทั่งมีค่าสูงสุด เกี่ยวข้องกับการแพร่ของอะตอมไฮโดรเจนจากพื้นผิวชั้นเคลือบในเซลล์อัดประจุไปยังพื้นผิวเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 หรือชั้นเคลือบในเซลล์ออกซิไดซ์ และ 3. ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าซึมผ่านเริ่มเข้าสู่ค่าอิ่มตัว (Saturated current density,  $I_{\text{sat}}$ ) เกี่ยวข้องกับการแพร่ของไฮโดรเจนในสภาวะคงตัว ตามลำดับ

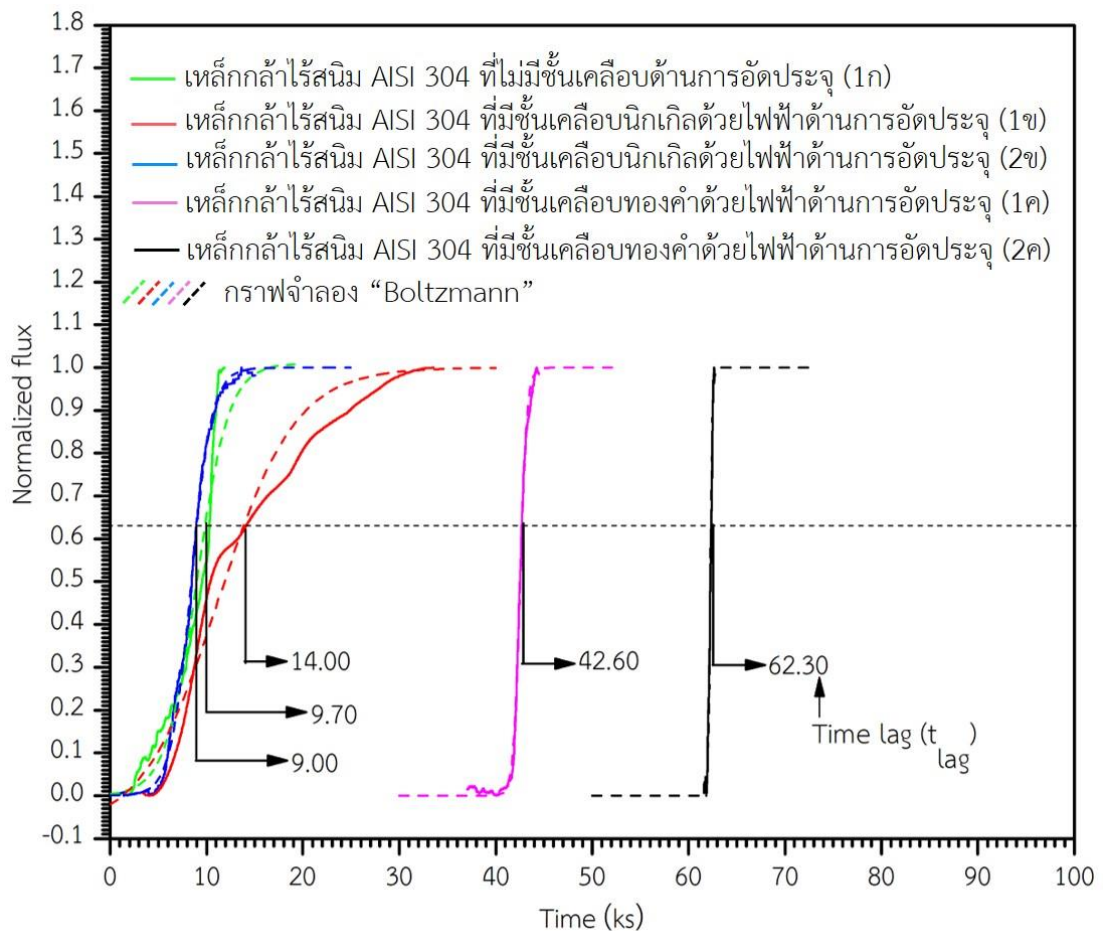
เวลาการซึมผ่าน (Breakthrough time,  $t_b$ ) ระบุได้จากช่วงที่ 2 ของกราฟแสดงความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าซึมผ่านที่เปลี่ยนแปลงกับเวลา พบว่าเวลาการซึมผ่านของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ที่ไม่มีชั้นเคลือบด้านการอัดประจุ (1ก) มีค่าประมาณ 2.80 ks ในขณะที่เหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ที่มีชั้นเคลือบนิกเกิลด้วยไฟฟ้าด้านการอัดประจุ (1ข และ 2ข) มีค่าประมาณ 6.00 และ 4.90 ks ตามลำดับ และเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ที่มีชั้นเคลือบทองคำด้วยไฟฟ้าด้านการอัดประจุ (1ค และ 2ค) มีค่าประมาณ 41.30 และ 61.90 ks ตามลำดับ



รูปที่ 4.4 ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าซึมผ่านที่เปลี่ยนแปลงกับเวลา และค่าเวลาการซึมผ่าน (Breakthrough time,  $t_b$ )

รูปที่ 4.5 กราฟแสดงอัตราส่วนระหว่างฟังก์ชันของไฮโดรเจน ณ เวลาใดเวลาหนึ่งและฟังก์ชันของไฮโดรเจน ณ สภาวะคงตัวกับเวลา และกราฟจำลอง “Boltzmann” ของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ที่ไม่มีชั้นเคลือบด้านการอัดประจุ (1ก) เหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ที่มีชั้นเคลือบนิกเกิลด้วยไฟฟ้าด้านการอัดประจุ (1ข และ 2ข) และเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ที่มีชั้นเคลือบทองคำด้วยไฟฟ้าด้านการอัดประจุ (1ค และ 2ค) พบว่ากราฟดังกล่าวสามารถแบ่งออกเป็น 3 ช่วง ดังนี้ 1. อัตราส่วนระหว่างฟังก์ชันของไฮโดรเจน ณ เวลาใดเวลาหนึ่งและฟังก์ชันของไฮโดรเจน ณ สภาวะคงตัวมีค่าเข้าใกล้ 0 ซึ่งเกี่ยวข้องกับฟังก์ชันของไฮโดรเจนสะสมที่พื้นผิวในเซลล์ออกซิไดซ์มีปริมาณน้อย 2. อัตราส่วนระหว่างฟังก์ชันของไฮโดรเจน ณ เวลาใดเวลาหนึ่งและฟังก์ชันของไฮโดรเจน ณ สภาวะคงตัวมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งเกี่ยวข้องกับการแพร่ของไฮโดรเจนไปยังเซลล์ออกซิไดซ์อย่างต่อเนื่อง ทำให้ฟังก์ชันของไฮโดรเจนมีค่าเพิ่มขึ้น และ 3. อัตราส่วนระหว่างฟังก์ชันของไฮโดรเจน ณ เวลาใดเวลาหนึ่งและฟังก์ชันของไฮโดรเจน ณ สภาวะคงตัวมีค่าเข้าใกล้ 1 ซึ่งเกี่ยวข้องกับการสะสมฟังก์ชันของไฮโดรเจนที่พื้นผิวในเซลล์ออกซิไดซ์มีอัตราคงที่ ตามลำดับ

เวลาล่าช้า (Time lag,  $t_{lag}$ ) ระบุได้จากช่วงที่ 2 ของกราฟแสดงอัตราส่วนระหว่างฟลักซ์ของไฮโดรเจน ณ เวลาใดเวลาหนึ่งและฟลักซ์ของไฮโดรเจน ณ สภาวะคงตัวกับเวลา พบว่าเวลาล่าช้าของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ที่ไม่มีชั้นเคลือบด้านการอัดประจุ (1ก) มีค่าประมาณ 9.70 ks ในขณะที่เหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ที่มีชั้นเคลือบนิกเกิลด้วยไฟฟ้าด้านการอัดประจุ (1ข และ 2ข) มีค่าประมาณ 14.00 และ 9.00 ks ตามลำดับ และเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ที่มีชั้นเคลือบทองคำด้วยไฟฟ้าด้านการอัดประจุ (1ค และ 2ค) มีค่าประมาณ 42.60 และ 62.30 ks ตามลำดับ



**รูปที่ 4.5** กราฟแสดงอัตราส่วนระหว่างฟลักซ์ของไฮโดรเจน ณ เวลาใดเวลาหนึ่งและฟลักซ์ของไฮโดรเจน ณ สภาวะคงตัว (Normalized flux) กับเวลา กราฟจำลอง “Boltzmann” และค่าเวลาล่าช้า (Time lag,  $t_{lag}$ )



ตารางที่ 4.2 แสดงค่าเวลาการซึมผ่านและเวลาล่าช้า พบว่า 1. ชั้นเคลือบนิกเกิลและชั้นเคลือบทองคำด้วยไฟฟ้าด้านการอัดประจุส่งผลให้เวลาการซึมผ่านมีค่าเพิ่มขึ้น ตามลำดับ 2. ชั้นเคลือบนิกเกิลด้วยไฟฟ้าด้านการอัดประจุบนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 (1ข) ส่งผลให้เวลาล่าช้ามีค่ามากขึ้น 3. ชั้นเคลือบทองคำด้วยไฟฟ้าด้านการอัดประจุบนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 (1ค และ 2ค) มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ 4. ชั้นเคลือบนิกเกิลด้วยไฟฟ้าด้านการอัดประจุบนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 (2ข) พบว่ามีเวลาล่าช้าน้อยกว่าหรือมีค่าใกล้เคียงเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ที่ไม่มีชั้นเคลือบด้านการอัดประจุ (1ก) ดังนั้นผลการทดลองแสดงว่าชั้นเคลือบทองคำด้วยไฟฟ้าด้านการอัดประจุสามารถต้านทานการแพร่ระลอกของไฮโดรเจนบนเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 เป็นต้น

**ตารางที่ 4.2** เวลาการซึมผ่าน (Breakthrough time,  $t_b$ ) และเวลาล่าช้า (Time lag,  $t_{lag}$ )

ตัวอย่าง	เวลาการซึมผ่าน ( $t_b$ ) (ks)	เวลาล่าช้า ( $t_{lag}$ ) (ks)
1ก	2.80	9.70
1ข	6.00	14.00
2ข	4.90	9.00
1ค	41.30	42.60
2ค	61.90	62.30

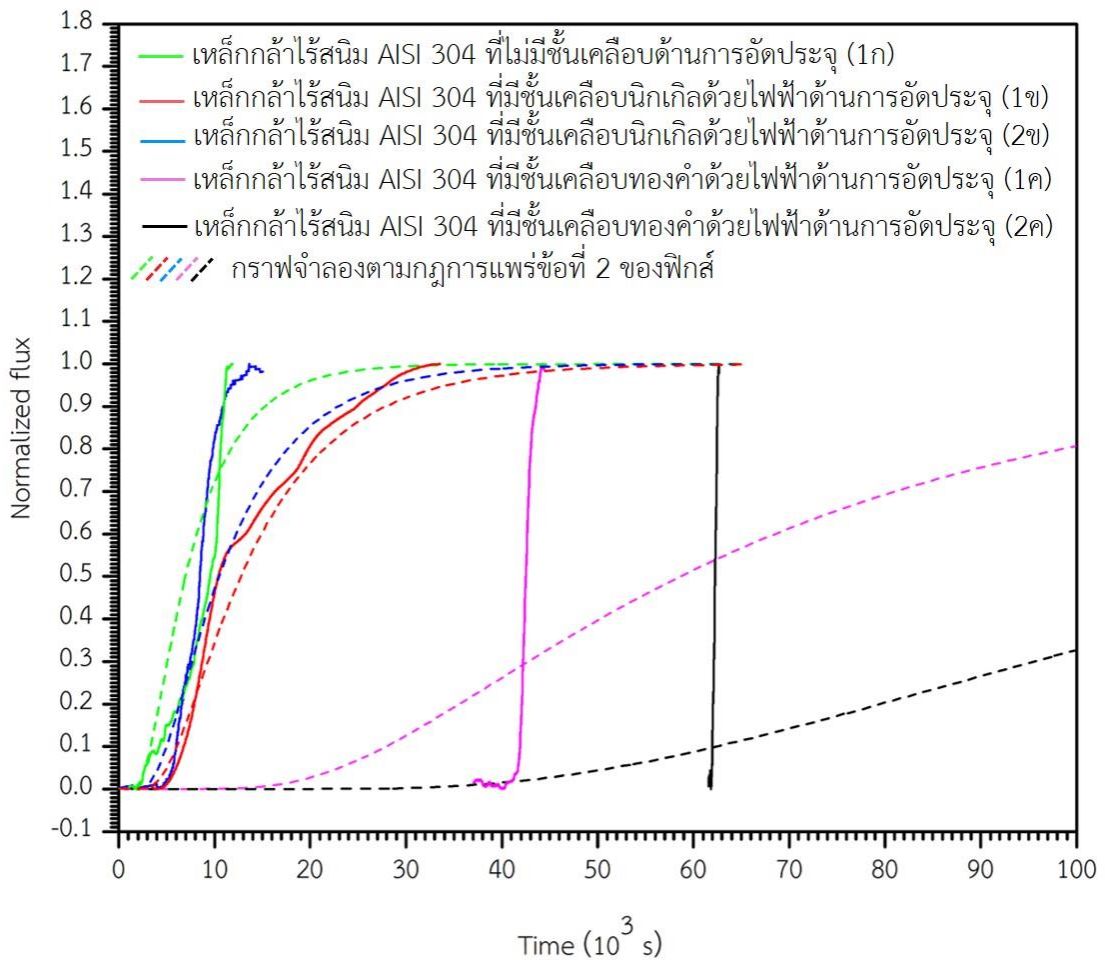
\*1, 2 = ชั้นงานลำดับที่ 1 และ 2, ก = เหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ที่ไม่มีชั้นเคลือบด้านการอัดประจุ, ข = เหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ที่มีชั้นเคลือบนิกเกิลด้วยไฟฟ้าด้านการอัดประจุ, ค = เหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ที่มีชั้นเคลือบทองคำด้วยไฟฟ้าด้านการอัดประจุ

ปัจจัยที่ส่งผลต่อการแพร่ของไฮโดรเจนวิเคราะห์ได้จากการเปรียบเทียบกราฟแสดงอัตราส่วนระหว่างฟลักซ์ของไฮโดรเจน ณ เวลาใดเวลาหนึ่งและฟลักซ์ของไฮโดรเจน ณ สภาวะคงตัว และกราฟจำลองตามกฎการแพร่ข้อที่ 2 ของฟิกส์ ดังแสดงในรูปที่ 4.6 การเปรียบเทียบกราฟแบ่งออกเป็น 2 ช่วง ได้แก่ 1. ช่วงเวลาเริ่มต้นของกราฟแสดงอัตราส่วนระหว่างฟลักซ์ของไฮโดรเจน ณ เวลาใดเวลาหนึ่งและฟลักซ์ของไฮโดรเจน ณ สภาวะคงตัว 2. กราฟแสดงอัตราส่วนระหว่างฟลักซ์ของไฮโดรเจน ณ เวลาใดเวลาหนึ่งและฟลักซ์ของไฮโดรเจน ณ สภาวะคงตัวมีค่าเพิ่มขึ้นซึ่งกำหนดให้เป็นช่วงเปลี่ยนแปลง

สำหรับเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ที่ไม่มีชั้นเคลือบด้านการอัดประจุ (1ก) พบว่า 1. ช่วงเวลาเริ่มต้นของกราฟแสดงอัตราส่วนระหว่างฟลักซ์ของไฮโดรเจน ณ เวลาใดเวลาหนึ่งและฟลักซ์ของไฮโดรเจน ณ สภาวะคงตัว ใช้เวลาเริ่มต้นเท่ากับกราฟจำลองตามกฎการแพร่ข้อที่ 2 ของฟิกส์ และ 2. ช่วงเปลี่ยนแปลง พบว่ากราฟแสดงอัตราส่วนระหว่างฟลักซ์ของไฮโดรเจน ณ เวลาใดเวลาหนึ่งและฟลักซ์ของไฮโดรเจน ณ สภาวะคงตัวมีความชันต่ำกว่ากราฟจำลองตามกฎข้อที่ 2 ของฟิกส์ซึ่งเกี่ยวข้องกับความไม่คงตัวของพื้นผิวด้านการอัดประจุ [14]

สำหรับเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ที่มีชั้นเคลือบนิกเกิลด้วยไฟฟ้าด้านการอัดประจุ (1ข และ 2ข) และเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ที่มีชั้นเคลือบทองคำด้วยไฟฟ้าด้านการอัดประจุ (1ค และ 2ค) พบว่า 1. ช่วงเวลาเริ่มต้นของกราฟแสดงอัตราส่วนระหว่างฟลักซ์ของไฮโดรเจน ณ เวลาใดเวลาหนึ่งและฟลักซ์ของไฮโดรเจน ณ สภาวะคงตัว ใช้เวลาเริ่มต้นนานกว่ากราฟจำลองตามกฎการแพร่ข้อที่ 2 ของฟิกส์ และ 2. ช่วงเปลี่ยนแปลง พบว่ากราฟแสดงอัตราส่วนระหว่างฟลักซ์ของไฮโดรเจน ณ เวลาใดเวลาหนึ่งและฟลักซ์ของไฮโดรเจน ณ สภาวะคงตัวมีความชันสูงกว่ากราฟจำลองตามกฎการแพร่ข้อที่ 2 ของฟิกส์ซึ่งเกี่ยวข้องกับการมีกับดักไฮโดรเจน (Hydrogen trap) [4, 14] ทำหน้าที่ชะลอการแพร่ของไฮโดรเจน [1] ซึ่งกับดักไฮโดรเจนสามารถจำแนกออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่ 1. กับดักแบบผันกลับได้ (Reversible trapping) ได้แก่ ขอบเกรนและดิสโลเคชัน คือตำแหน่งในโครงสร้างจุลภาคที่ทำให้อะตอมไฮโดรเจนใช้เวลาอาศัยนานกว่าเวลาอาศัยในแลตทิซโลหะ 2. กับดักแบบผันกลับไม่ได้ (Irreversible trapping) ได้แก่ รูที่มีขนาดเล็กและสารฝังใน คือตำแหน่งในโครงสร้างจุลภาคที่อะตอมไฮโดรเจนใช้เวลาอาศัยยาวนานเมื่อเทียบกับเวลาในการอัดประจุ เป็นต้น





รูปที่ 4.6 กราฟแสดงอัตราส่วนระหว่างฟลักซ์ของไฮโดรเจน ณ เวลาใดเวลาหนึ่งและฟลักซ์ของไฮโดรเจน ณ สภาวะคงตัว (Normalized flux) กับเวลา และกราฟจำลองตามกฎการแพร่ข้อที่ 2 ของฟิกส์ (Fick's second law)

#### 4.5 สัมประสิทธิ์การแพร่ไฮโดรเจนประสิทธิผล

สัมประสิทธิ์การแพร่ไฮโดรเจนประสิทธิผล (Effective hydrogen diffusivity,  $D_{eff}$ ) ในเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ที่ไม่มีชั้นเคลือบด้านการอัดประจุ (1ก) ในเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ที่มีชั้นเคลือบนิกเกิลด้วยไฟฟ้าด้านการอัดประจุ (1ข และ 2ข) และในเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ที่มีชั้นเคลือบทองคำด้วยไฟฟ้าด้านการอัดประจุ (1ค และ 2ค) ถูกคำนวณจากเวลาการซึมผ่าน (Breakthrough time,  $t_b$ ) และเวลาล่าช้า (Time lag,  $t_{lag}$ ) ตามสมการที่ 3.1 และ 3.3 ตามลำดับ

จากผลการคำนวณพบว่า สัมประสิทธิ์การแพร่ไฮโดรเจนประสิทธิผลจากเวลาการซึมผ่านในเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ที่ไม่มีชั้นเคลือบด้านการอัดประจุ (1ก) มีค่าเท่ากับ  $6.89 \times 10^{-13} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$  ในขณะที่เหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ที่มีชั้นเคลือบนิกเกิลด้วยไฟฟ้าด้านการอัดประจุ (1ข และ 2ข)

มีค่าเท่ากับ  $4.85 \times 10^{-13}$  และ  $5.90 \times 10^{-13} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$  มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ  $5.38 \times 10^{-13} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$  ตามลำดับ สำหรับเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ที่มีชั้นเคลือบทองคำด้วยไฟฟ้าด้านการอัดประจุ (1ค และ 2ค) มีค่าเท่ากับ  $2.45 \times 10^{-14}$  และ  $1.63 \times 10^{-14} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$  มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ  $2.04 \times 10^{-14} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$  ตามลำดับ

สัมประสิทธิ์การแพร่ไฮโดรเจนประสิทธิผลจากเวลาล่าช้าในเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ที่ไม่มีชั้นเคลือบด้านการอัดประจุ (1ก) มีค่าเท่ากับ  $5.07 \times 10^{-13} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$  ในขณะที่เหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ที่มีชั้นเคลือบนิกเกิลด้วยไฟฟ้าด้านการอัดประจุ (1ข และ 2ข) มีค่าเท่ากับ  $5.23 \times 10^{-13}$  และ  $8.24 \times 10^{-13} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$  มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ  $6.74 \times 10^{-13} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$  ตามลำดับ สำหรับเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ที่มีชั้นเคลือบทองคำด้วยไฟฟ้าด้านการอัดประจุ (1ค และ 2ค) มีค่าเท่ากับ  $6.06 \times 10^{-14}$  และ  $4.14 \times 10^{-14} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$  มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ  $5.10 \times 10^{-14} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$  ตามลำดับ

สัมประสิทธิ์การแพร่ไฮโดรเจนประสิทธิผลเฉลี่ยระหว่างเวลาการซึมผ่านและเวลาล่าช้า (Average effective hydrogen diffusivity,  $D_{ave\_eff}$ ) ของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ที่ไม่มีชั้นเคลือบด้านการอัดประจุ เหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ที่มีชั้นเคลือบนิกเกิลไฟฟ้าด้านการอัดประจุ และเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ที่มีชั้นเคลือบทองคำไฟฟ้าด้านการอัดประจุ มีค่าเท่ากับ มีค่าเท่ากับ  $5.98 \times 10^{-13}$ ,  $6.05 \times 10^{-13}$  และ  $3.57 \times 10^{-14} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$  ตามลำดับ

ตารางที่ 4.3 แสดงผลการคำนวณสัมประสิทธิ์การแพร่ไฮโดรเจนประสิทธิผลจากเวลาในการซึมผ่านหรือเวลาล่าช้า และสัมประสิทธิ์การแพร่ไฮโดรเจนประสิทธิผลเฉลี่ย พบว่า 1. สัมประสิทธิ์การแพร่ไฮโดรเจนประสิทธิผลเฉลี่ยระหว่างเวลาการซึมผ่านและเวลาล่าช้าของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ที่ไม่มีชั้นเคลือบด้านการอัดประจุมีค่าใกล้เคียงกับเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ที่มีชั้นเคลือบนิกเกิลด้วยไฟฟ้าด้านการอัดประจุ 2. เหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ที่มีชั้นเคลือบทองคำด้วยไฟฟ้าด้านการอัดประจุมีค่าต่ำที่สุด แสดงว่าชั้นเคลือบทองคำด้านการอัดประจุ ส่งผลให้สัมประสิทธิ์การแพร่ไฮโดรเจนประสิทธิผลมีค่าลดลง ในขณะที่ชั้นเคลือบนิกเกิลด้วยไฟฟ้าด้านการอัดประจุ ไม่ส่งผลให้สัมประสิทธิ์การแพร่ไฮโดรเจนประสิทธิผลมีค่าลดลง ดังนั้นจึงมีความจำเป็นในการคำนวณและเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์การแพร่ไฮโดรเจนประสิทธิผลในเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 และชั้นเคลือบนิกเกิลหรือชั้นเคลือบทองคำด้วยไฟฟ้า

**ตารางที่ 4.3** สัมประสิทธิ์การแพร่ไฮโดรเจนประสิทธิผลจากเวลาการซึมผ่าน (Breakthrough time,  $t_b$ ) เวลาล่าช้า (Time lag,  $t_{lag}$ ) ค่าเฉลี่ยระหว่างเวลาการซึมผ่านและเวลาล่าช้า (Average effective hydrogen diffusivity,  $D_{ave\_eff}$ )

ตัวอย่าง	$t_b$ ( $m^2 \cdot s^{-1}$ )		$t_{lag}$ ( $m^2 \cdot s^{-1}$ )		ค่าเฉลี่ย ( $m^2 \cdot s^{-1}$ )
1ก	$6.89 \times 10^{-13}$	$(6.89 \times 10^{-13})$	$5.07 \times 10^{-13}$	$(5.07 \times 10^{-13})$	$5.98 \times 10^{-13}$
1ข	$4.85 \times 10^{-13}$	$(5.38 \times 10^{-13})$	$5.23 \times 10^{-13}$	$(6.74 \times 10^{-13})$	$6.05 \times 10^{-13}$
2ข	$5.90 \times 10^{-13}$		$8.24 \times 10^{-13}$		
1ค	$2.45 \times 10^{-14}$	$(2.04 \times 10^{-14})$	$6.06 \times 10^{-14}$	$(5.10 \times 10^{-14})$	$3.57 \times 10^{-14}$
2ค	$1.63 \times 10^{-14}$		$4.14 \times 10^{-14}$		

\*1, 2 = ชั้นงานลำดับที่ 1 และ 2, ก = เหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ที่ไม่มีชั้นเคลือบด้านการอัดประจุ, ข = เหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ที่มีชั้นเคลือบนิกเกิลด้วยไฟฟ้าด้านการอัดประจุ, ค = เหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ที่มีชั้นเคลือบทองคำด้วยไฟฟ้าด้านการอัดประจุ

#### 4.6 การคำนวณสัมประสิทธิ์การแพร่ไฮโดรเจนประสิทธิผลในเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ในชั้นเคลือบนิกเกิลด้วยไฟฟ้า และในชั้นเคลือบทองคำด้วยไฟฟ้า

การคำนวณสัมประสิทธิ์การแพร่ไฮโดรเจนประสิทธิผลในเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ในชั้นเคลือบนิกเกิลด้วยไฟฟ้า และในชั้นเคลือบทองคำด้วยไฟฟ้าสามารถพิจารณาได้จากการแพร่ของไฮโดรเจนในสภาวะคงตัวและการอนุรักษ์มวล [22] โดยสมการที่ 4.1 แสดงผลต่างความเข้มข้นของไฮโดรเจนรวมมีค่าเท่ากับผลรวมระหว่างผลต่างความเข้มข้นของไฮโดรเจนในเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 และชั้นเคลือบ ในขณะที่สมการที่ 4.2 แสดงการแพร่ของไฮโดรเจนในสภาวะคงตัวซึ่งกำหนดให้ฟลักซ์ของไฮโดรเจนมีค่าคงที่มีค่าเท่ากับฟลักซ์ของไฮโดรเจนในเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 และฟลักซ์ของไฮโดรเจนในชั้นเคลือบ

เมื่อทำการจัดสมการในรูปแบบของผลต่างความเข้มข้นของไฮโดรเจนดังแสดงในสมการที่ 4.3-4.5 จากนั้นรวบรวมเข้ากับสมการที่ 4.1 จะได้สมการที่ 4.6 ซึ่งมีความเกี่ยวข้องกับอัตราส่วนระหว่างความหนาเฉลี่ยรวมและสัมประสิทธิ์การแพร่ไฮโดรเจนประสิทธิผลเฉลี่ยสัมประสิทธิ์การแพร่ไฮโดรเจนประสิทธิผลเฉลี่ยระหว่างค่าการคำนวณจากเวลาการซึมผ่านและเวลาล่าช้า มีค่าเท่ากับผลรวมของอัตราส่วนระหว่างความหนาเฉลี่ยและสัมประสิทธิ์การแพร่ไฮโดรเจนประสิทธิผลในเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 และผลรวมของอัตราส่วนระหว่างความหนาเฉลี่ยและสัมประสิทธิ์การแพร่ไฮโดรเจนประสิทธิผลในชั้นเคลือบ ตามลำดับ

$$\Delta C_{\text{all}} = \Delta C_{304 \text{ layer}} + \Delta C_{\text{coating}} \quad 4.1$$

$$J_{\text{ss}} = -D_{\text{ave\_eff}}(\Delta C_{\text{all}}/L_{\text{all}}) = -D_{304 \text{ layer\_eff}}(\Delta C_{304 \text{ layer}}/L_{304 \text{ layer}}) = -D_{\text{coating\_eff}}(\Delta C_{\text{coating}}/L_{\text{coating}}) \quad 4.2$$

$$\Delta C_{\text{all}} = -(J_{\text{ss}} \cdot L_{\text{all}})/D_{\text{ave\_eff}} \quad 4.3$$

$$\Delta C_{304 \text{ layer}} = -(J_{\text{ss}} \cdot L_{304 \text{ layer}})/D_{304 \text{ layer\_eff}} \quad 4.4$$

$$\Delta C_{\text{coating}} = -(J_{\text{ss}} \cdot L_{\text{coating}})/D_{\text{coating\_eff}} \quad 4.5$$

$$L_{\text{o}}/D_{\text{ave\_eff}} = (L_{304 \text{ layer}}/D_{304 \text{ layer\_eff}}) + (L_{\text{coating}}/D_{\text{coating\_eff}}) \quad 4.6$$

โดยที่ $J_{\text{ss}}$	คือฟลักซ์ของไฮโดรเจนที่สภาวะคงตัว ( $\text{amount} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )
$\Delta C_{\text{all}}$	คือผลต่างของความเข้มข้นของไฮโดรเจนรวม ( $\text{amount} \cdot \text{m}^{-3}$ )
$\Delta C_{304 \text{ layer}}$	คือผลต่างความเข้มข้นของไฮโดรเจนในเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ( $\text{amount} \cdot \text{m}^{-3}$ )
$\Delta C_{\text{coating}}$	คือผลต่างความเข้มข้นของไฮโดรเจนในชั้นเคลือบ ( $\text{amount} \cdot \text{m}^{-3}$ )
$L_{\text{o}}$	คือความหนาเฉลี่ยรวม (m)
$L_{304 \text{ layer}}$	คือความหนาเฉลี่ยของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 (m)
$L_{\text{coating}}$	คือความหนาเฉลี่ยของชั้นเคลือบ (m)
$D_{\text{ave\_eff}}$	คือสัมประสิทธิ์การแพร่ไฮโดรเจนประสิทธิผลเฉลี่ยสัมประสิทธิ์การแพร่ไฮโดรเจนประสิทธิผลเฉลี่ยระหว่างเวลาการซึมผ่านและเวลาล่าช้า ( $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ )
$D_{304 \text{ layer\_eff}}$	คือสัมประสิทธิ์การแพร่ไฮโดรเจนประสิทธิผลในเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ( $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ )
$D_{\text{coating\_eff}}$	คือสัมประสิทธิ์การแพร่ไฮโดรเจนประสิทธิผลในชั้นเคลือบ ( $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ )

สัมประสิทธิ์การแพร่ไฮโดรเจนประสิทธิผลในเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ในชั้นเคลือบนิกเกิลด้วยไฟฟ้า และในเคลือบทองคำด้วยไฟฟ้าถูกคำนวณโดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของไฮโดรเจนในนิกเกิลจากงานวิจัยของ H. Hagi [6] ซึ่งมีค่าเท่ากับ  $6.02 \times 10^{-14} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$  ผลการคำนวณสัมประสิทธิ์การแพร่ไฮโดรเจนประสิทธิผลในเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ในชั้นเคลือบนิกเกิล และในชั้นเคลือบทองคำด้วยไฟฟ้ามีค่าเท่ากับ  $7.99 \times 10^{-13}$ ,  $3.40 \times 10^{-14}$  และ  $5.19 \times 10^{-16} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$  ตามลำดับ ในขณะที่ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของไฮโดรเจนในเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ในนิกเกิลและทองคำจากงานวิจัยของ P. Kumar และ R. Balasubramaniarn [7], H. Hagi [6] และ T. Ishikawa และ R. B.

Mclellan [5] ซึ่งมีค่าเท่ากับ  $2.86 \times 10^{-13}$ ,  $6.02 \times 10^{-14}$  และ  $5.00 \times 10^{-14} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$  ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 4.4

จากผลการคำนวณ พบว่าสัมประสิทธิ์การแพร่ไฮโดรเจนประสิทธิผลในชั้นเคลือบนิกเกิลด้วยไฟฟ้ามีค่าต่ำกว่าเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ในขณะที่สัมประสิทธิ์การแพร่ไฮโดรเจนประสิทธิผลในชั้นเคลือบทองคำด้วยไฟฟ้ามีค่าต่ำที่สุด

การเปรียบเทียบผลการคำนวณสัมประสิทธิ์การแพร่ไฮโดรเจนประสิทธิผลและสัมประสิทธิ์การแพร่ของไฮโดรเจนในเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ในนิกเกิลและทองคำจากงานวิจัย พบว่า 1. สัมประสิทธิ์การแพร่ไฮโดรเจนประสิทธิผลในเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 มีค่าสูงกว่าและมีค่าใกล้เคียงกับสัมประสิทธิ์การแพร่ของไฮโดรเจนในเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 จากงานวิจัยของ P. Kumar และ R. Balasubramaniarn [7] 2. สัมประสิทธิ์การแพร่ไฮโดรเจนประสิทธิผลในชั้นเคลือบนิกเกิลด้วยไฟฟ้ามีค่าต่ำกว่าและมีค่าใกล้เคียงกับสัมประสิทธิ์การแพร่ของไฮโดรเจนในนิกเกิลจากงานวิจัยของ H. Hagi [6] และ 3. สัมประสิทธิ์การแพร่ไฮโดรเจนประสิทธิผลในชั้นเคลือบทองคำด้วยไฟฟ้ามีค่าต่ำกว่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของไฮโดรเจนในทองคำจากงานวิจัยของ T. Ishikawa และ R. B. Mclellan [5] ดังนั้นชั้นเคลือบทองคำด้วยไฟฟ้าตามขั้นตอนการเคลือบในอุตสาหกรรมมีประสิทธิภาพในการต้านทานการแพร่ของไฮโดรเจน

**ตารางที่ 4.4** สัมประสิทธิ์การแพร่ไฮโดรเจนประสิทธิผลในเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ในชั้นเคลือบนิกเกิลด้วยไฟฟ้า และในชั้นเคลือบทองคำด้วยไฟฟ้า

ตัวอย่าง	จากการทดลอง ( $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ )	จากงานวิจัย ( $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ )
ก	$7.99 \times 10^{-13}$	$2.86 \times 10^{-13}$ [7]
ข	$3.40 \times 10^{-14}$	$6.02 \times 10^{-14}$ [6]
ค	$5.19 \times 10^{-16}$	$5.00 \times 10^{-14}$ [5]

\*ก = เหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304, ข = ชั้นเคลือบนิกเกิลด้วยไฟฟ้า, ค = ชั้นเคลือบทองคำไฟฟ้า

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลอง

การทดลองเคลือบนิกเกิลและเคลือบทองคำด้วยไฟฟ้าบนผิวเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ตามขั้นตอนในอุตสาหกรรม และวัดสัมประสิทธิ์การแพร่ไฮโดรเจนประสิทธิผล (Effective hydrogen diffusivity,  $D_{eff}$ ) ในเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ที่ไม่มีชั้นเคลือบด้านการอัดประจุ เหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ที่มีชั้นเคลือบนิกเกิลด้วยไฟฟ้าด้านการอัดประจุและเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ที่มีชั้นเคลือบทองคำด้วยไฟฟ้าด้านการอัดประจุ ตามมาตรฐาน ASTM G148-97 ที่อุณหภูมิ 301 K สามารถสรุปผลได้ดังนี้

1. สัมประสิทธิ์การแพร่ไฮโดรเจนประสิทธิผลเฉลี่ย (Average effective hydrogen diffusivity,  $D_{ave\_eff}$ ) จากเวลาการซึมผ่าน (Breakthrough time,  $t_b$ ) ของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ที่ไม่มีชั้นเคลือบด้านการอัดประจุ เหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ที่มีชั้นเคลือบนิกเกิลด้วยไฟฟ้าด้านการอัดประจุ และเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ที่มีชั้นเคลือบทองคำด้วยไฟฟ้าด้านการอัดประจุ มีค่าเท่ากับ  $6.89 \times 10^{-13}$ ,  $5.38 \times 10^{-13}$  และ  $2.04 \times 10^{-14} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$  ตามลำดับ

2. สัมประสิทธิ์การแพร่ไฮโดรเจนประสิทธิผลเฉลี่ยจากเวลาล่าช้า (Time lag,  $t_{lag}$ ) ของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ที่ไม่มีชั้นเคลือบด้านการอัดประจุ เหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ที่มีชั้นเคลือบนิกเกิลด้วยไฟฟ้าด้านการอัดประจุ และเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ที่มีชั้นเคลือบทองคำด้วยไฟฟ้าด้านการอัดประจุ มีค่าเท่ากับ  $5.07 \times 10^{-13}$ ,  $6.74 \times 10^{-13}$  และ  $5.10 \times 10^{-14} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$  ตามลำดับ

3. สัมประสิทธิ์การแพร่ไฮโดรเจนประสิทธิผลเฉลี่ยระหว่างเวลาการซึมผ่านและเวลาล่าช้าของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ที่ไม่มีชั้นเคลือบด้านการอัดประจุ เหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ที่มีชั้นเคลือบนิกเกิลด้วยไฟฟ้าด้านการอัดประจุ และเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ที่มีชั้นเคลือบทองคำด้วยไฟฟ้าด้านการอัดประจุ มีค่าเท่ากับ  $5.98 \times 10^{-13}$ ,  $6.05 \times 10^{-13}$  และ  $3.57 \times 10^{-14} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$  ตามลำดับ

4. สัมประสิทธิ์การแพร่ไฮโดรเจนประสิทธิผลในเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ในชั้นเคลือบนิกเกิลด้วยไฟฟ้า และในชั้นเคลือบทองคำด้วยไฟฟ้า มีค่าเท่ากับ  $7.99 \times 10^{-13}$ ,  $3.40 \times 10^{-14}$  และ  $5.19 \times 10^{-16} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$  ตามลำดับ ดังนั้น ผลการทดลองแสดงว่าชั้นเคลือบทองคำด้วยไฟฟ้ามีประสิทธิภาพในการต้านทานการแพร่ของไฮโดรเจนสูงกว่าชั้นเคลือบนิกเกิลด้วยไฟฟ้าและเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ตามลำดับ



## ภาคผนวก ก

1. การพิสูจน์หาสมการแสดงสัมประสิทธิ์การแพร่ไฮโดรเจนประสิทธิผลจากเวลาการซึมผ่าน (Breakthrough time,  $t_b$ ) [13]

ความเข้มข้นของไฮโดรเจนซึ่งเป็นฟังก์ชันของระยะทางและเวลาแสดงดังสมการที่ ก.1 และรูปที่ ก.1

$$C_{(x,t)} = \frac{LC_i}{\sqrt{\pi Dt}} \exp\left(\frac{-x^2}{4Dt}\right) \quad \text{ก.1}$$

โดยที่  $C_i$  คือความเข้มข้นของไฮโดรเจนเริ่มต้น ( $\text{amount}\cdot\text{m}^{-3}$ )

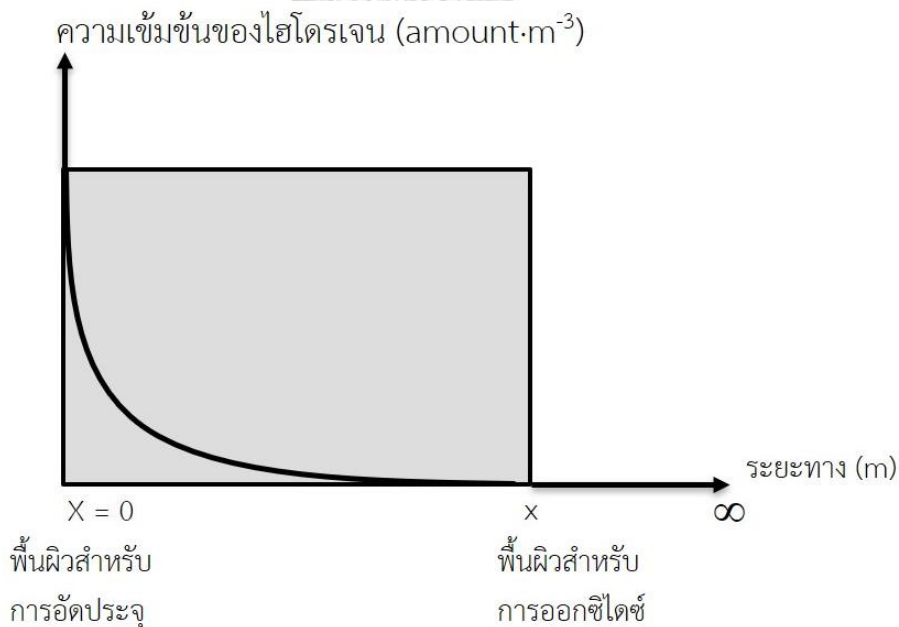
$L$  คือความหนารวมทั้งหมด (m)

$D$  คือสัมประสิทธิ์การแพร่ไฮโดรเจนประสิทธิผลซึ่งกำหนดเป็นค่าคงที่ ( $\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$ )

$t$  คือเวลา (s)

โดยกำหนดเงื่อนไขเริ่มต้น  $x = 0, C \rightarrow \infty, t \rightarrow 0$

และเงื่อนไขขอบเขต  $|x| > 0, C \rightarrow 0, t \rightarrow \infty$



รูปที่ ก.1 กราฟจำลองแสดงความเข้มข้นของไฮโดรเจนและระยะทาง



กำหนดให้ผลคูณระหว่างความเข้มข้นของไฮโดรเจนเริ่มต้นและความหนารวมทั้งหมดมีค่าเท่ากับความเข้มข้นของไฮโดรเจนรวมผ่านตำแหน่ง 0 ถึง  $\infty$  ดังสมการที่ ก.2

$$LC_i = \int_0^{\infty} C_x dx \quad \text{ก.2}$$

กำหนดให้ความเข้มข้นของไฮโดรเจนรวมผ่านตำแหน่ง X ถึง  $\infty$  มีค่าเท่ากับ 0.57 % ของความเข้มข้นของไฮโดรเจนรวมทั้งหมดดังสมการที่ ก.3

$$\left(\frac{0.57}{100}\right) LC_i = \int_x^{\infty} C_x dx \quad \text{ก.3}$$

$$\left(\frac{0.57}{100}\right) = \frac{\int_x^{\infty} LC_i \exp\left(\frac{-x^2}{4Dt}\right) dx}{LC_i}$$

กำหนด  $du = \frac{x}{2\sqrt{Dt}}$

$$\frac{du}{dx} = \frac{1}{2\sqrt{Dt}}$$

$$0.0057 = \int_{\frac{x}{2\sqrt{Dt}}}^{\infty} \frac{2}{\sqrt{\pi}} \exp(-u^2) du$$

$$0.0057 = \int_0^{\infty} \frac{2}{\sqrt{\pi}} \exp(-u^2) du - \int_0^{\frac{x}{2\sqrt{Dt}}} \frac{2}{\sqrt{\pi}} \exp(-u^2) du$$

จากสมการ Error function  $\text{erf}(z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^z \exp(-u^2) du$  ก.4

$$0.0057 = \text{erf}(\infty) - \text{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right)$$

$$0.0057 = 1 - \text{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right)$$

$$0.9942 = \operatorname{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right)$$

$$1.9558 = \frac{x}{2\sqrt{Dt}}$$

$$x = 3.9115\sqrt{Dt}$$

$$\text{จะได้สมการสำหรับเวลาการซึมผ่าน } t = \frac{x^2}{15.3D}$$

ก.5

## 2. การพิสูจน์หาสมการแสดงสัมประสิทธิ์การแพร่ไฮโดรเจนประสิทธิผลจากเวลาล่าช้า (Time lag, $t_b$ ) [3]

รูปที่ ก.2 และสมการที่ ก.6 แสดงกระแสไฟฟ้าซึมผ่านที่ตำแหน่งพื้นผิวโลหะในเซลล์ออกซิไดซ์ (L) มีค่าเท่ากับผลคูณระหว่างจำนวนประจุ ( $n$ ) ของไอออนไฮโดรเจน ค่าคงที่ฟาราเดย์ (F) และฟลักซ์ไฮโดรเจน ตามลำดับ ซึ่งฟลักซ์ไฮโดรเจนถูกกำหนดให้มีความเท่ากับผลคูณระหว่างสัมประสิทธิ์การแพร่ของไฮโดรเจน (D) และอนุพันธ์ของความเข้มข้นไฮโดรเจนเทียบกับระยะทาง ( $\partial C / \partial x$ ) โดยที่ความเข้มข้นไฮโดรเจนมีค่าเปลี่ยนตามเงื่อนไขดังต่อไปนี้

$$\text{โดยกำหนดเงื่อนไขเริ่มต้น } t = 0, 0 < x < L, C = 0$$

$$\text{และเงื่อนไขขอบเขต } t > 0, x = 0; C = C_i, x = L; C = 0$$

$$i_{H,s} = nFJ_H = nFD \left( \frac{\partial C}{\partial x} \right) = \frac{nFDC_i}{L} \left[ 1 + \sum_{b=1}^{\infty} (-1)^b \exp\left( \frac{-b^2 \pi^2 Dt}{L} \right) \right] \quad \text{ก.6}$$

โดยที่  $i_{H,s}$  คือกระแสไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงตามความเข้มข้นของไฮโดรเจน (A)

$n$  คือจำนวนประจุของไฮโดรเจนซึ่งมีค่าเท่ากับ +1

$F$  คือค่าคงที่ฟาราเดย์  $9.6485 \times 10^4$  (C)

$C_i$  คือความเข้มข้นของไฮโดรเจนเริ่มต้น ( $\text{amount} \cdot \text{m}^{-3}$ )

$L$  คือความหนารวมทั้งหมด (m)

$D$  คือสัมประสิทธิ์การแพร่ไฮโดรเจนประสิทธิผลซึ่งกำหนดเป็นค่าคงที่ ( $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ )

$t$  คือเวลา (s)

ปริพันธ์ของกระแสไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลง (Q) เทียบกับเวลา แสดงดังสมการที่ ก7-ก8 และรูปที่ ก.2

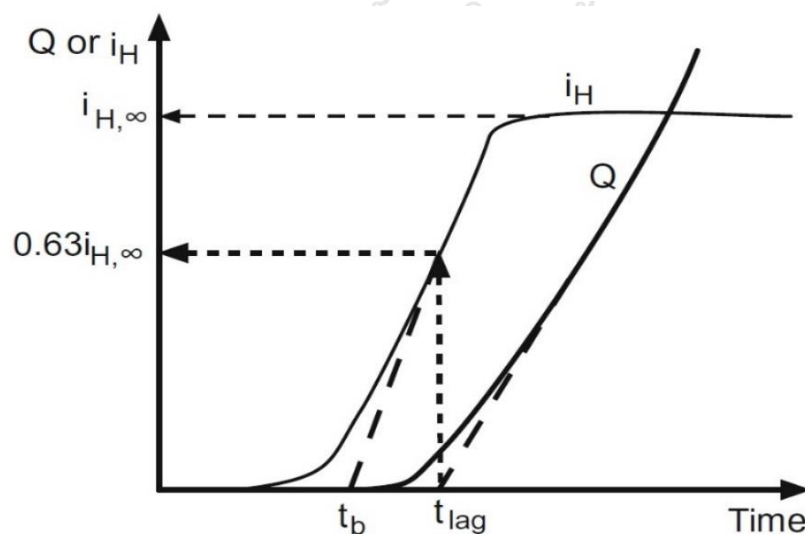
$$Q = \int_0^t i_H dt = \frac{FDC_i}{L} \left[ t - \frac{L^2}{6D} - \frac{2L^2}{\pi^2} \sum_{b=1}^{\infty} \frac{(-1)^b}{b^2} \exp\left(\frac{-b^2 \pi^2 Dt}{L^2}\right) \right] \quad \text{ก.7}$$

$$Q \approx \frac{FDC_i}{L} \left( t - \frac{L^2}{6D} \right) \quad \text{ก.8}$$

รูปที่ ก.2 แสดงปริพันธ์ของกระแสไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลง (Q) เทียบกับเวลา จำแนกออกเป็น 3 ช่วง 1. ปริพันธ์ของกระแสไฟฟ้าไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา และมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ ซึ่งไม่แสดงถึงการสะสมฟลักซ์ของไฮโดรเจน 2. ปริพันธ์ของกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ซึ่งแสดงถึงการสะสมฟลักซ์ของไฮโดรเจน และ 3. ปริพันธ์ของกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นด้วยอัตราคงที่ ซึ่งแสดงถึงการสะสมฟลักซ์ของไฮโดรเจนด้วยอัตราคงที่ เป็นต้น ดังนั้นจุดตัดของเส้นตรงที่ลากผ่านช่วงที่ 3 ของกราฟ และเวลาเริ่มต้น แสดงถึงเวลาที่ การสะสมฟลักซ์ของไฮโดรเจนมีค่าคงที่ ดังแสดงในสมการที่ ก.9-ก.10

$$0 \approx \frac{FDC_i}{L} \left( t - \frac{L^2}{6D} \right) \quad \text{ก.9}$$

$$t = \frac{L^2}{6D} \quad \text{ก.10}$$



รูปที่ ก.2 กระแสไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลง (i) ปริพันธ์ของกระแสไฟฟ้า (Q) เทียบกับเวลา (t) เวลาการซึมผ่าน (Breakthrough time,  $t_b$ ) และเวลาล่าช้า (Time lag,  $t_{lag}$ ) [3]

## ภาคผนวก ข

ตารางที่ ก.1 ค่าการคำนวณสัมประสิทธิ์การแพร่ไฮโดรเจนประสิทธิผลในเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ชั้นเคลือบนิเกิลและชั้นเคลือบทองคำด้วยไฟฟ้า

ตัวอย่าง	$L_o/D_{ave\_eff}$	$L_{304\ layer}/D_{304\ layer\_eff}$	$L_{Ox}/D_{Ox\_eff}$	$L_{Ch}/D_{Ch\_eff}$	$D_{i\_eff} (m^2 \cdot s^{-1})$
ก	$2.87 \times 10^{14}$	$167.10/D_{304\ layer\_eff}$	$0.78 \times 10^{14}$	-	$7.99 \times 10^{-13}$
ข	$3.48 \times 10^{14}$	$2.60 \times 10^{14}$	$0.90/D_{Ni\_eff}$	$2.10/D_{Ni\_eff}$	$3.40 \times 10^{-14}$
ค	$3.48 \times 10^{15}$	$1.51 \times 10^{14}$	$0.56 \times 10^{14}$	$1.70/D_{Au\_eff}$	$5.19 \times 10^{-16}$

\*ก = เหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304, ข = ชั้นเคลือบนิเกิลด้วยไฟฟ้า, ค = ชั้นเคลือบทองคำด้วยไฟฟ้า,  $L_o$ ,  $L_{304\ layer}$ ,  $L_{Ox}$  และ  $L_{Ch}$  = ความหนาเฉลี่ยรวม, ความหนาเฉลี่ยของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304, ความหนาเฉลี่ยของชั้นเคลือบด้วยไฟฟ้าด้านการออกซิไดซ์ และชั้นเคลือบด้วยไฟฟ้าด้านการอัดประจุ ตามลำดับ,

$D_{ave\_eff}$  = สัมประสิทธิ์การแพร่ไฮโดรเจนประสิทธิผลเฉลี่ยระหว่างเวลาการซึมผ่านและเวลาล่าช้า

$D_{304\ layer\_eff}$ ,  $D_{Ni\_eff}$ ,  $D_{Au\_eff}$ ,  $D_{Ox\_eff}$ ,  $D_{Ch\_eff}$  และ  $D_{i\_eff}$  = สัมประสิทธิ์การแพร่ไฮโดรเจนประสิทธิผลในเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304, ชั้นเคลือบนิเกิลด้วยไฟฟ้า, ชั้นเคลือบทองคำด้วยไฟฟ้า, ชั้นเคลือบสำหรับการออกซิไดซ์, ชั้นเคลือบสำหรับการอัดประจุ และชั้นเคลือบที่สนใจ ตามลำดับ

### บรรณานุกรม

1. E. Viyanit, Numerical simulation of hydrogen assisted cracking in supermartensitic stainless steel welds. 2005: Defense technical information center.
2. G. K. Padhy and Y. Komizo, Diffusible hydrogen in steel welds - a status review. Transactions of JWRI, 2013. 42: p. 2013.
3. T. Ohtsuka, et al., Electrochemistry for corrosion fundamentals. 2018.
4. D. A. Jones, Principles and prevention of corrosion. 2nd ed. 2001: Pearson education (US).
5. T. Ishikawa and R. B. McLellan, The diffusivity of hydrogen in the noble metals at low temperature. Acta metallurgica, 1985. 33(11): p. 1979 - 1985.
6. H. Hagi, Diffusion coefficient of hydrogen in Ni-Cu and Ni-Co alloys. Journal of the Japan institute of metals and materials, 1983 47(12): p. 1029-1035.
7. P. Kumar and R. Balasubramaniam, Determination of hydrogen diffusivity in austenitic stainless steels by subscale microhardness profiling. Journal of alloys and compounds, 1997. 255(1): p. 130 - 134.
8. G. Lothongkum, Stainless steels. 2 ed. 2012: ห้างหุ้นส่วนจำกัด บี.เอ็น.ซี. เอ็นเตอร์ไพรส์ (สำนักงานใหญ่).
9. W. D. Callister Jr. and D. G. Rethwisch, Materials science and engineering: an introduction, 8th edition. 2009: Wiley.
10. Robert W. Messler Jr., Chapter 6-Welding as a joining process. 2004: p. 285 - 348.
11. J. Crank, The mathematics of diffusion. 2nd ed. 1980, U.S.A: Oxford university press.
12. D. R. Poirier and G. H. Geiger, Transport phenomena in materials processing. 2016.
13. P. Shewmon, Diffusion in solids. 2016. 1-246.
14. G148-97, Standard practice for evaluation of hydrogen uptake, permeation, and transport in metals by an electrochemical technique. 2018, ASTM international: West Conshohocken.

15. H. J. Grabke and E. Riecke, Absorption and diffusion of hydrogen in steels. *Mater. Tehnol*, 2000. 34(6).
16. Q. Liu, et al., Determination of the hydrogen fugacity during electrolytic charging of steel. *Corrosion Science*, 2014. 87: p. 239 - 258.
17. B. N. Popov, J. Lee, and M. B. Djukic, Chapter 7 - Hydrogen permeation and hydrogen-induced cracking. 2018: p. 133 - 162.
18. R. Duš and E. Nowicka, Hydrogen distribution between the surface and the bulk of thin nickel film at low temperatures. *Vacuum*, 2001. 63(1): p. 249 - 256.
19. W. Beck, et al., Diffusivity and solubility of hydrogen as a function of composition in Fe-Ni alloys. *Metallurgical transactions*, 1971. 2(3): p. 883-888.
20. M. Mäkinen, et al., Preliminary comparison of properties between Ni-electroplated stainless steel parts fabricated with laser additive manufacturing and conventional machining. *Physics procedia*, 2015. 78: p. 337 - 346.
21. B. D. Cullity and S. R. Stock, *Elements of x-ray diffraction*. 1956, Reading, Mass.: Addison-Wesley pub. co.
22. P. E. V. De Miranda and F. D. Fassini, New methodology for the determination of hydrogen permeation parameters in layered materials. *Journal of materials science*, 1993. 28(19): p. 5148-5154.



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
**CHULALONGKORN UNIVERSITY**

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	กฤตยชญ์ วรรณโพธิ์กลาง
วัน เดือน ปี เกิด	20 พฤศจิกายน 2536
สถานที่เกิด	โรงพยาบาลบุรีรัมย์
วุฒิการศึกษา	- ประถมศึกษา โรงเรียนประโคนชัยวิทยา - มัธยมศึกษา โรงเรียนประโคนชัยพิทยาคม - อุดมศึกษา วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวัสดุขั้นสูงและนาโนเทคโนโลยี คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร
ที่อยู่ปัจจุบัน	283 หมู่ 7 ถนนพิบูลย์สวัสดิ์ อำเภอประโคนชัย ตำบลประโคนชัย จังหวัดบุรีรัมย์ 31140
ผลงานตีพิมพ์	K. Wannapoklang, S. Leelachao, A. W. Lothongkum and G. Lothongkum. Effective hydrogen diffusivities of AISI 304 stainless steel with Ni or Au coating. Materials Testing, 2020. 62(6) :P. 593-596.