



อิทธิพลของสารเติมแต่งประเภทกัมในการชุบนิเกิลด้วยไฟฟ้า  
Effect of Gum Additives on Nickel Electroplating

นางสาวชญานุช                      แสนทวีสุข  
นางสาวดวงตา                      สิทธิโชคเจริญ  
นางสาวมนัสวี                      มณีกัญญ์

โครงการทางวัสดุศาสตร์ เป็นส่วนหนึ่งของหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวัสดุศาสตร์  
ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ  
ปีการศึกษา 2564



อิทธิพลของสารเติมแต่งประเภทกัมในการชุบนิเกิลด้วยไฟฟ้า  
Effect of Gum Additives on Nickel Electroplating

นางสาวชญานุช                      แสนทวีสุข  
นางสาวดวงตา                      สิทธิโชคเจริญ  
นางสาวมนัสวี                      มณีกัญญ์

โครงการทางวัสดุศาสตร์ เป็นส่วนหนึ่งของหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวัสดุศาสตร์  
ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ  
ปีการศึกษา 2564

ชื่อเรื่อง อิทธิพลของสารเติมแต่งประเภทกัมในการชุบนิเกิลด้วยไฟฟ้า  
Effect of Gum Additives on Nickel Electroplating

ผู้วิจัย นางสาวชญานุช แสนทวิสุข  
นางสาวดวงตา สิทธิโชคเจริญ  
นางสาวมนัสวี มณีกันย

อาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุพิชฌา สุพรรณสมบุรณ์

---

---

โครงการทางวัสดุศาสตร์ เป็นส่วนหนึ่งของหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวัสดุศาสตร์  
ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

สุพิชฌา สุพรรณสมบุรณ์  
.....อาจารย์ที่ปรึกษา  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุพิชฌา สุพรรณสมบุรณ์)

## กิตติกรรมประกาศ

โครงการทางวัสดุศาสตร์นี้ สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความช่วยเหลือจากผู้มีพระคุณ คณะผู้จัดทำโครงการขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุพิชฌา สุพรรณสมบุรณ์ อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ ที่ได้กรุณาเสียสละเวลาอันมีค่าเพื่อให้คำปรึกษา คำแนะนำ ตรวจสอบแก้ไขความเรียบร้อย ตลอดจนการชี้แนะในการหาคำตอบในปัญหาต่างๆ ระหว่างจัดทำโครงการนี้ ด้วยความเอาใจใส่อย่างยิ่ง

ท้ายที่สุดนี้ทางคณะผู้จัดทำโครงการขอขอบพระคุณทุกคนในครอบครัวที่ให้การสนับสนุนให้กำลังใจในการศึกษาตลอดมา และหวังเป็นอย่างยิ่งว่าโครงการทางวัสดุศาสตร์นี้ จะเป็นประโยชน์ต่อผู้ที่สนใจ นำไปศึกษาไม่มากก็น้อยต่อไป ความดีและประโยชน์ใดๆ จากโครงการทางวัสดุศาสตร์นี้ ขอมอบให้กับผู้มีพระคุณทุกท่านที่ได้กล่าวมาทั้งหมด



## บทคัดย่อ

ในปัจจุบันเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำมีการใช้งานมากในอุตสาหกรรมต่าง ๆ แต่มักมีความต้านทานการกัดกร่อนค่อนข้างต่ำ และการกัดกร่อนที่เกิดขึ้น ส่งผลกระทบต่อความปลอดภัย และมีระยะในการใช้งานที่สั้นลง วิธีหนึ่งในการป้องกันการกัดกร่อนในเหล็กกล้า คือการชุบเคลือบด้วยไฟฟ้า ซึ่งการชุบนิเกิลเป็นที่นิยม และมีการใช้งานอย่างกว้างขวาง โดยทั่วไปอ่างชุบนิเกิลจะเพิ่มประสิทธิภาพด้วยการเติมสารเติมแต่ง สารเติมแต่งประเภทกำมะถันเป็นทางเลือกในการป้องกันการกัดกร่อน อีกทั้งยังหาได้ง่ายและราคาไม่แพง ดังนั้นในงานวิจัยนี้ทำการศึกษาผลของการเติมเจลาติน กำมะระปิกและกำกัม ลงในอ่างชุบนิเกิล และได้ทำการเคลือบลงบนเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ SS400 ภายใต้อ่างชุบไฟฟ้า 5 โวลต์ เป็นเวลา 25 นาที จากนั้นทำการวิเคราะห์ผิวเคลือบที่ได้ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่ามีความหนาเฉลี่ยของผิวเคลือบเท่ากับ  $45.791 \pm 2.538$  ไมโครเมตร ผิวเคลือบที่ได้จากอ่างชุบนิเกิลที่เติมสารเติมแต่งประเภทกำมะถัน มีค่าความแข็งเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับผิวเคลือบที่ได้จากอ่างชุบนิเกิลที่ไม่เติมสารเติมแต่ง ซึ่งผิวเคลือบที่ได้จากอ่างชุบนิเกิลที่เติมกำมะระปิก มีความแข็งสูงถึง  $357 \pm 6.08$  HV สันฐานวิทยามีพื้นผิวเรียบสม่ำเสมอ ในขณะที่ผิวเคลือบชิ้นงานที่ได้จากอ่างชุบนิเกิลที่เติมเจลาตินและจากอ่างชุบนิเกิลที่เติมกำกัม มีสันฐานวิทยาของพื้นผิวไม่สม่ำเสมอหรือมีรอยแตก ส่งผลให้มีค่าความแข็งที่ต่ำกว่า การเติมสารเติมแต่งประเภทกำมะถันส่งผลต่อสีของชิ้นงาน หลังจากนั้นศึกษาพฤติกรรมการกัดกร่อนในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 3.5% โดยใช้เทคนิคการจุ่มแช่ เป็นระยะเวลา 24 วัน ซึ่งเห็นได้ว่าเมื่อเติมสารเติมแต่งประเภทกำมะถันส่งผลให้มีอัตราการกัดกร่อนน้อย เมื่อเทียบกับไม่เติมสารเติมแต่ง ชิ้นงานที่ชุบเคลือบผิวในอ่างชุบนิเกิลที่มีการเติมกำมะระปิก มีอัตราการกัดกร่อนน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับสารเติมแต่งอื่น

**คำสำคัญ:** ชุบเคลือบผิวด้วยไฟฟ้า, นิเกิล, สารเติมแต่งประเภทกำมะถัน, อ่างชุบ, การกัดกร่อน

## Abstract

Presently, Low carbon steel is widely used in various industries. However, Low carbon steel has low corrosion resistance. Corrosion affects safety issues and may result in reduction of service lifetime. One way to prevent this is by electroplating, nickel electroplating is the most common and frequently used in electroplating processes. It is generally enhanced with additives. Gum is used as an additive for preventing corrosion. Gum is also easy to find and cheap. In this research work, the effect of adding gelatin, gum arabic and guar gum in a nickel electroplating bath at 5V for 25 minutes was investigated. SS400 low carbon steel was prepared as a substrate. The morphology of surface coating was also characterized by Scanning Electron Microscopy (SEM). It was found that an average thickness of nickel coating is  $45.791 \pm 2.538 \mu\text{m}$ . Nickel plating with gum additives showed higher hardness than the one without additive. The hardness of nickel plating with gum arabic is about  $357 \pm 6.08 \text{ HV}$ . Its morphology is smooth while morphologies of nickel plating with gelatin and guar gum are uneven or crack. As a result of lower hardness. Gum additives affect the color of the samples. The effect of corrosion was examined by using the immersion in 3.5% NaCl solution for 24 days. Conclusion, using gum additives into the in nickel plating bath provides low a corrosion rate compared to nickel plating without additives. Nickel plating with gum arabic demonstrated the lowest corrosion rate compared to other additives.

**Keyword:** Electroplating, Nickel, Gum additives, Watts bath, Corrosion

## สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ก
บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญรูปภาพ	ช
สารบัญตาราง	ฎ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย/ปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	3
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	4
1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ	4
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง และการทบทวนวรรณกรรม	5
2.1 การกักกร่อน	5
2.1.1 ประเภทของการกักกร่อนที่เกิดในเหล็ก	7
2.1.2 การวัดศักย์ไฟฟ้าการกักกร่อน ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกักกร่อน และอัตราการกักกร่อน	9
2.1.3 การทดสอบการกักกร่อน	10
2.2 การชุบเคลือบด้วยไฟฟ้า	12
2.2.1 หลักการชุบเคลือบด้วยไฟฟ้า	12
2.2.2 กระบวนการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า	14
2.2.3 การชุบนิกเกิล	17
2.3 กฎของฟาราเดย์	18
2.4 สารเติมแต่งประเภทกัมที่ใช้ในกระบวนการชุบเคลือบด้วยไฟฟ้า	20
2.4.1 กัมที่มาจากสัตว์	20

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.4.2 กัมที่มาจากยางพีช	21
2.4.3 กัมที่มาจากเมล็ดพีช	21
2.5 การวิเคราะห์ชั้นเคลือบ	22
2.4.1 กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด	22
2.4.2 ตรวจวัดความแข็งระดับจุลภาคแบบวิกเกอร์	22
2.4.3 เครื่องวัดสี	23
2.6 การทบทวนวรรณกรรม	24
บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย	26
3.1 วัสดุและสารเคมีที่ใช้ในการวิจัย	26
3.1.1 ชิ้นงานที่ใช้ในการดำเนินการวิจัย	26
3.1.2 สารเคมีที่ใช้ในการดำเนินการวิจัย	27
3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการดำเนินการวิจัย	27
3.2.1 อุปกรณ์สำหรับเตรียมผิวชิ้นงาน	27
3.2.2 อุปกรณ์สำหรับกระบวนการชุบเคลือบ	27
3.2.3 เครื่องมือสำหรับตรวจสอบผิวชั้นเคลือบ	28
3.2.4 เครื่องมือสำหรับทดสอบกระบวนการกัดกร่อน	28
3.3 วิธีดำเนินการวิจัย	28
3.3.1 ขั้นตอนการเตรียมผิวชิ้นงาน	30
3.3.2 ขั้นตอนการชุบเคลือบด้วยไฟฟ้า	30
3.3.3 การตรวจสอบผิวชั้นเคลือบ	31
3.3.4 การทดสอบการกัดกร่อน	31
บทที่ 4 ผลการวิจัย และอภิปรายผล	32
4.1 การทดสอบความแข็ง	32
4.1.1 การทดสอบความแข็งของการเคลือบผิวพิกเก็ตที่สภาวะแตกต่างกัน	32
4.1.2 การทดสอบความแข็งของการเคลือบผิวพิกเก็ตกับสารเติมแต่งต่างชนิด	33

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
4.2 การวิเคราะห์พื้นผิว	34
4.2.1 การวิเคราะห์ลักษณะผิวของชิ้นงานจากการสังเกตด้วยตาเปล่า ของการเคลือบนิกเกิลที่สภาวะแตกต่างกัน	34
4.2.2 การวิเคราะห์ลักษณะผิวของชิ้นงานจากการสังเกตด้วยตาเปล่า ของการเคลือบนิกเกิลกับสารเติมแต่งต่างชนิด	35
4.2.3 การวิเคราะห์ห้วงค์ประกอบทางเคมีของพื้นผิว ของการเคลือบนิกเกิล กับสารเติมแต่งต่างชนิดด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด	36
4.2.4 การวิเคราะห์พื้นผิวชั้นเคลือบนิกเกิลกับสารเติมแต่งต่างชนิด ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด	41
4.3 ผลของการวัดสีของการเคลือบนิกเกิล เคลือบนิกเกิลเงา และเคลือบนิกเกิล กับสารเติมแต่งประเภทกัม	42
4.4 การทดสอบการกัดกร่อนแบบจุ่มแช่	43
4.4.1 การทดสอบการกัดกร่อนของชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ SS400	43
4.4.2 การทดสอบการกัดกร่อนของชิ้นงานการเคลือบผิวนิกเกิล	45
4.4.3 การทดสอบการกัดกร่อนของชิ้นงานการเคลือบผิวนิกเกิล/เจลาติน	46
4.4.4 การทดสอบการกัดกร่อนของชิ้นงานการเคลือบผิวนิกเกิล/กัมอะราบิก	48
4.4.5 การทดสอบการกัดกร่อนของชิ้นงานการเคลือบผิวนิกเกิล/แก้วกัม	49
4.4.6 การทดสอบการกัดกร่อนของชิ้นงานการเคลือบผิวนิกเกิล กับสารเติมแต่งต่างชนิด	51
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ	53
5.1 สรุปผลการวิจัย	53
5.2 ข้อเสนอแนะ	53

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
เอกสารอ้างอิง	54
ภาคผนวก	57
ภาคผนวก ก	58
ภาคผนวก ข	62
ประวัติย่อผู้วิจัย	68



## สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 การจำลองการกัดกร่อนแบบรูเข็ม	7
รูปที่ 2.2 การจำลองการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นสม่ำเสมอทั่วผิวน้ำ	7
รูปที่ 2.3 การจำลองการกัดกร่อนแบบกัลวานิก	8
รูปที่ 2.4 การจำลองการกัดกร่อนในที่อับ	8
รูปที่ 2.5 การจำลองการกัดกร่อนตามขอบเกรน	9
รูปที่ 2.6 การวัดศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน และอัตราการกัดกร่อนด้วยเครื่องโพเทนชิโอสแตท	9
รูปที่ 2.7 หน่วยในการคำนวณอัตราการกัดกร่อน	12
รูปที่ 2.8 หลักการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า	12
รูปที่ 2.9 การล้างทำความสะอาดเบื้องต้น	15
รูปที่ 2.10 การล้างผิวก่อนชุบ	15
รูปที่ 2.11 การชุบเคลือบด้วยไฟฟ้า	15
รูปที่ 2.12 กระบวนการหลังการชุบ	15
รูปที่ 2.13 โครงสร้างเจลาติน	20
รูปที่ 2.14 โครงสร้างกัมอะราบิก	21
รูปที่ 2.15 โครงสร้างกัวกัม	21
รูปที่ 2.16 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	22
รูปที่ 2.17 ลักษณะการทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์	22
รูปที่ 2.18 CIELAB 1976	23
รูปที่ 3.1 ขนาดของชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ SS400	26
รูปที่ 3.2 แผนภาพระเบียบวิธีการดำเนินงานวิจัย	29
รูปที่ 4.1 ค่าความแข็งแบบวิกเกอร์ของการเคลือบนิเกิล โดยใช้แรงดันไฟฟ้า 2 5 และ 8 โวลต์ เป็นเวลา 15 20 และ 25 นาที	32
รูปที่ 4.2 ผิวเคลือบของนิเกิลด้วยกล้องจุลทรรศน์ทางแสง โดยใช้แรงดันไฟฟ้า (ก) 5 โวลต์ และ (ข) 8 โวลต์ เป็นเวลา 25 นาที	33

## สารบัญรูป(ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.3 ค่าความแข็งขึ้นงานที่เคลือบผิวด้วยนิกเกิลร่วมกับสารเติมแต่งชนิดต่าง ๆ เปรียบเทียบกับชิ้นงานที่ไม่เติมสารเติมแต่งและไม่มีการเคลือบผิว โดยใช้แรงดันไฟฟ้า 5 โวลต์ เป็นเวลา 25 นาที	34
รูปที่ 4.4 ภาคตัดขวาง และองค์ประกอบทางเคมีของการเคลือบของการชุบนิกเกิลโดยใช้ แรงดันไฟฟ้า 5 โวลต์ เป็นเวลา 25 นาที	37
รูปที่ 4.5 สัณฐานวิทยา และองค์ประกอบทางเคมีของการเคลือบนิกเกิล/เจลาติน โดยใช้แรงดันไฟฟ้า 5 โวลต์ เป็นเวลา 25 นาที	38
รูปที่ 4.6 สัณฐานวิทยา และองค์ประกอบทางเคมีของการเคลือบนิกเกิล/กัมอะราบิก โดยใช้แรงดันไฟฟ้า 5 โวลต์ เป็นเวลา 25 นาที	39
รูปที่ 4.7 สัณฐานวิทยา และองค์ประกอบทางเคมีของการเคลือบนิกเกิล/กัวกัม โดยใช้แรงดันไฟฟ้า 2 โวลต์ เป็นเวลา 25 นาที	40
รูปที่ 4.8 สัณฐานวิทยาของการเคลือบนิกเกิลกับสารเติมแต่งต่างชนิดกำลังขยาย 500X และ 2000X (ก) นิกเกิล (ข) นิกเกิล/เจลาติน (ค) นิกเกิล/กัมอะราบิก และ (ง) นิกเกิลกัวกัม	41
รูปที่ 4.9 ค่าสีในระบบ CIELAB ของการเคลือบนิกเกิลเปรียบเทียบกับ นิกเกิลเงา นิกเกิล/เจลาติน นิกเกิล/กัมอะราบิก และนิกเกิล/กัวกัม โดยใช้แรงดันไฟฟ้า 5 โวลต์ เป็นเวลา 25 นาที	42
รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างการสูญเสียน้ำหนัก และอัตราการกัดกร่อนของ เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ SS400 หลังจุ่มแช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ความเข้มข้น 3.5% เป็นเวลา 24 วัน	44
รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างการสูญเสียน้ำหนัก และอัตราการกัดกร่อนของนิกเกิล หลังจุ่มแช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 3.5% เป็นเวลา 24 วัน	46
รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างการสูญเสียน้ำหนัก และอัตราการกัดกร่อนของ นิกเกิล/เจลาติน หลังจุ่มแช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 3.5% เป็นเวลา 24 วัน	47

## สารบัญรูป(ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างการสูญเสียน้ำหนัก และอัตราการกัดกร่อนของ นิกเกิล/กัมอะราบิก หลังจุ่มแซในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 3.5% เป็นเวลา 24 วัน	49
รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างการสูญเสียน้ำหนัก และอัตราการกัดกร่อนของ นิกเกิล/กัวกัม หลังจุ่มแซในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 3.5% เป็นเวลา 24 วัน	50
รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างการสูญเสียน้ำหนักหลังการจุ่มแซในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ความเข้มข้น 3.5% ของชิ้นงานที่เคลือบผิวด้วยนิกเกิลร่วมกับสารเติมแต่งชนิดต่าง ๆ เปรียบเทียบกับชิ้นงานที่ไม่เติมสารเติมแต่งและไม่มีการเคลือบผิว โดยใช้แรงดันไฟฟ้า 5 โวลต์ เป็นเวลา 25 นาที เป็นเวลา 24 วัน	52
รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการกัดกร่อนหลังการจุ่มแซในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ความเข้มข้น 3.5% ของชิ้นงานที่เคลือบผิวด้วยนิกเกิลร่วมกับสารเติมแต่งชนิดต่าง ๆ เปรียบเทียบกับชิ้นงานที่ไม่เติมสารเติมแต่งและไม่มีการเคลือบผิว โดยใช้แรงดันไฟฟ้า 5 โวลต์ เป็นเวลา 25 นาที เป็นเวลา 24 วัน	52

## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 3.1 ส่วนประกอบทางเคมีของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ	26
ตารางที่ 4.1 ลักษณะผิวของชิ้นงานจากการสังเกตด้วยตาเปล่าของการเคลือบนิกเกิลที่สถานะแตกต่างกัน โดยใช้แรงดันไฟฟ้า 2 5 และ 8 โวลต์ เป็นเวลา 15 20 และ 25 นาที	35
ตารางที่ 4.2 ลักษณะผิวของชิ้นงานจากการสังเกตด้วยตาเปล่า ของชิ้นงานที่เคลือบผิวด้วยนิกเกิลร่วมกับสารเติมแต่งชนิดต่าง ๆ เปรียบเทียบกับชิ้นงานที่ไม่เติมสารเติมแต่งและไม่มีการเคลือบผิว โดยใช้แรงดันไฟฟ้า 5 โวลต์ เป็นเวลา 25 นาที	36
ตารางที่ 4.3 ชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ SS400 หลังจุ่มแช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ความเข้มข้น 3.5% เป็นเวลา 24 วัน	44
ตารางที่ 4.4 ชิ้นงานการเคลือบผิวนิกเกิล โดยใช้แรงดันไฟฟ้า 5 โวลต์ เวลา 25 นาที หลังจุ่มแช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 3.5% เป็นเวลา 24 วัน	45
ตารางที่ 4.5 ชิ้นงานการเคลือบผิว นิกเกิล/เจลาติน โดยใช้แรงดันไฟฟ้า 5 โวลต์ เวลา 25 นาที หลังจุ่มแช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 3.5% เป็นเวลา 24 วัน	47
ตารางที่ 4.6 ชิ้นงานการเคลือบผิว นิกเกิล/กำมะถัน โดยใช้แรงดันไฟฟ้า 5 โวลต์ เวลา 25 นาทีหลังจุ่มแช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 3.5% เป็นเวลา 24 วัน	48
ตารางที่ 4.7 ชิ้นงานการเคลือบผิว นิกเกิล/กำมะถัน โดยใช้แรงดันไฟฟ้า 5 โวลต์ เวลา 25 นาที หลังจุ่มแช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 3.5% เป็นเวลา 24 วัน	50

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย/ปัญหา

เหล็กเป็นแร่ธาตุโลหะที่มีอยู่บนพื้นผิวโลกมากที่สุด เป็นอันดับสองรองจากอะลูมิเนียม ในปัจจุบันเหล็กนับเป็นโลหะที่มีการนำมาใช้ประโยชน์มากที่สุดในโลก โดยมีปริมาณการผลิตเหล็กคิดเป็นร้อยละ 95 ของปริมาณการผลิตโลหะทั้งหมด สำหรับทางอุตสาหกรรมมีการนำเหล็กมาใช้อย่างแพร่หลายในรูปของเหล็กหล่อ (Cast iron) และเหล็กกล้า (Steel) [1] ซึ่งเหล็กกล้ามีความสำคัญและถูกใช้มากที่สุดในอุตสาหกรรม โดยมีปริมาณคาร์บอนผสมอยู่ระหว่าง 0.05 ถึง 1.7% มีค่าอยู่ระหว่างเหล็กอ่อนและเหล็กหล่อ [2] โดยทั่วไปเหล็กกล้าจะหมายถึงเหล็กกล้าคาร์บอน (Carbon steel) ที่ประกอบด้วยธาตุหลัก ๆ คือ เหล็ก (Fe) คาร์บอน (C) แมงกานีส (Mn) ซิลิคอน (Si) และธาตุอื่น ๆ อีกเล็กน้อย เหล็กกล้าเป็นวัสดุโลหะที่ไม่ได้ มีอยู่ตามธรรมชาติ แต่ถูกผลิตขึ้นโดยฝีมือมนุษย์ มีการนำมาใช้งานทั่ว ๆ ไป การที่มีคาร์บอนผสมอยู่ปริมาณน้อยทำให้มีความแข็งและความแข็งแรงไม่มาก สามารถนำมาขึ้นรูปผ่านเครื่องมือกลได้ง่าย ซึ่งชนิดของเหล็กกล้าคาร์บอนและสมบัติของเหล็กกล้าคาร์บอน จะแปรผันไปตามปริมาณของคาร์บอนที่ผสมอยู่ จะแบ่งเหล็กกล้าคาร์บอนออกได้ 3 ประเภท คือ เหล็กกล้าคาร์บอนสูง (High carbon steel) เหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง (Medium carbon steel) และเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ (Low carbon steel) [3]

จากตลาดเหล็กกล้าคาร์บอนทั่วโลกมีมูลค่าถึง 887.7 พันล้านดอลลาร์สหรัฐในปี ค.ศ. 2019 และในปี ค.ศ. 2018 มีแนวโน้มความต้องการผลิตภัณฑ์เหล็กกล้าคาร์บอนที่เพิ่มขึ้นจากอุตสาหกรรมยานยนต์ที่มีอัตราการเติบโต 3.2% ในปี ค.ศ. 2020 ถึง 2027 จากเหล็กกล้าทั้ง 3 ประเภทพบว่าเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำมีการใช้งานมากที่สุดในอุตสาหกรรมต่าง ๆ และมีส่วนแบ่งการตลาดถึง 90.7% ในปี ค.ศ. 2019 เนื่องจากสมบัติความเหนียวและความสามารถในการขึ้นรูปของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ ทำให้สามารถนำไปใช้ในการสร้างตัวถังและส่วนท้ายของยานพาหนะ [4] แต่ก็มีมีความต้านทานการกัดกร่อนค่อนข้างต่ำ และส่วนใหญ่เกี่ยวข้องกับการกัดกร่อนที่เกิดปฏิกิริยากับสิ่งแวดล้อมคือการสูญเสียเนื้อโลหะมักเป็นปฏิกิริยาเคมี อัตราการผุกร่อนนั้นจะขึ้นอยู่กับระดับความเข้มข้นของตัวทำปฏิกิริยา และมีปัจจัยอื่น ๆ เช่น แร่กรด การกัดเซาะ การรอยเชื่อม โดยทั่วไปเมื่อเกิดปัญหาการกัดกร่อน ทำให้ส่งผลกระทบต่อความปลอดภัย ระยะในการใช้งานที่สั้นลงและต้องเปลี่ยนวัสดุใหม่แทนวัสดุเก่าที่เกิดการเสื่อมสภาพจากการกัดกร่อน จากข้อมูลที่ได้มีการสำรวจในประเทศที่พัฒนาแล้ว เช่น สหรัฐอเมริกา ได้มีการสำรวจมูลค่าการเสียหายเนื่องจากการกัดกร่อน ในปี ค.ศ. 1998 พบว่า

มีการสูญเสียงบประมาณที่เกิดจากการกักตุนประมาณ 3.1 % GDP คิดเป็นเงิน 276 พันล้านดอลลาร์ และเพิ่มขึ้นเป็น 1.1 ล้านล้านดอลลาร์ภายในสิ้นปี ค.ศ. 2016 หรือผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม มีรายงานว่า การกักตุนคิดเป็น 15% ของเหตุการณ์ที่ร้ายที่สุดในประเทศสหรัฐอเมริกา ระหว่างปี ค.ศ. 1994 ถึง 2000 เช่น การรั่วไหลของน้ำมันนอกจากนี้ยังมีสิ่งปนเปื้อน แบคทีเรีย แอมโมเนีย และสารประกอบกำมะถันซึ่งเป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อมเป็นอย่างมาก จึงจำเป็นต้องหาวิธีการป้องกันการกักตุน เพื่อลดปัญหาการเสื่อมสภาพของวัสดุและเพิ่มอายุการใช้งานให้นานขึ้น [5]

กระบวนการชุบเคลือบด้วยไฟฟ้า (Electroplating) เป็นกระบวนการทางเคมีที่ถูกใช้งานอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมเกือบทุกประเภท ได้แก่ อุตสาหกรรมก่อสร้าง อุตสาหกรรมยานยนต์ อุตสาหกรรมการบินอวกาศ ชิ้นส่วนทางการแพทย์ ตลอดจนอุตสาหกรรมเคมีและปิโตรเลียม เนื่องจากสามารถใช้ชุบเคลือบผิวชิ้นงานได้เกือบทุกชนิด ได้ผิวเคลือบบางขนาดไมครอน ทำได้ง่าย รวดเร็ว และมีราคาถูก ซึ่งนิเกิล (Ni) นำมาใช้เป็นโลหะที่นิยมเป็นผิวเคลือบ เนื่องจาก มีสีขาวเงิน มีความมันวาว มีความต้านทานการกัดกร่อนที่ดี ไม่เป็นสนิม และยังเป็นตัวนำไฟฟ้าได้ดี [6, 7] โดยจากการศึกษาการเคลือบนิเกิลลงบนเหล็กกล้าคาร์บอนในอ่างชุบแบบวัตต์ (Watt bath) พบว่านิเกิลช่วยปรับปรุงสัณฐานวิทยาและความแข็ง เมื่อใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 10 ถึง 50 mA/cm<sup>2</sup> จากการศึกษาสัณฐานวิทยาพบว่าเมื่อใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 30 mA/cm<sup>2</sup> ได้ผิวเคลือบมีความพรุนต่ำที่สุดสำหรับค่าความแข็งแบบวิกเกอร์ของผิวเคลือบนิเกิลที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 10 ถึง 50 mA/cm<sup>2</sup> เห็นได้ชัดว่าความแข็งเพิ่มขึ้นจาก 185 HV ที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 10 mA/cm<sup>2</sup> และมีความแข็งเพิ่มขึ้นถึง 290 HV ที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 30 mA/cm<sup>2</sup> เมื่อความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นอีก ความแข็งของผิวเคลือบเริ่มลดลงเหลือ 237 HV ที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 50 mA/cm<sup>2</sup> ดังนั้นถ้าเพิ่มความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าสูงมากเกินไป ปฏิกริยารีดักชันที่แคโทดไม่เพียงทำให้เกิดการสะสมของโลหะ ยังทำให้อัตราการเคลือบของอนุภาคที่เข้าไปเคลือบช้าลงและยังปล่อยฟองไฮโดรเจนออกมา จึงส่งผลต่อสัณฐานวิทยาและความแข็ง ซึ่งการกวนช่วยในการกระจายฟองอากาศ และลดแนวโน้มที่จะทำให้เกิดรูพรุนในสารเคลือบ [8] และการใช้อ่างชุบแบบวัตต์มีการใช้งานอย่างแพร่หลายเนื่องจากง่ายต่อการใช้งานและการเก็บรักษา สารเคมีที่ใช้ประกอบไปด้วย นิเกิลซัลเฟต (Nickel sulfate) นิเกิลคลอไรด์ (Nickel chloride) และกรดบอริก (Boric acid) โดยทั่วไปจะมีการใช้สารเติมแต่ง เช่น แซ็กคาริน (Saccharin) กรดเบนซีนซัลโฟนิก (Benzene-sulphonic acid) และกรดอัลลิลซัลโฟนิก (Allylsulphonic acid) เติมลงไปอ่างชุบเพื่อช่วยปรับปรุงสัณฐานวิทยาซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวพาและตัวลดความเครียดที่เกิดขึ้นในชั้นผลึก สารเติมแต่งประเภทนี้มีมักประกอบไปด้วยโครงสร้างเฮเทอโรอะตอม มีโครงสร้างอะโรมาติกที่มีกำมะถัน ไนโตรเจนและออกซิเจน [9]

นอกจากนี้ยังพบว่าสารเติมแต่งอินทรีย์กาว (Glue) และกัม (Gum) ได้รับความนิยมเป็นอย่างมากเนื่องจาก หาง่าย ราคาถูกกว่าเกลือแอมโมเนียมชนิดจตุรภูมิ (Quaternary ammonium salt) ของเหลวไอออนิก (Ionic liquid) สารลดแรงตึงผิว (Surfactant) และกรดอินทรีย์ (Organic acids) ในการศึกษากัมประเภทเจลาติน เพื่อใช้เป็นสารเติมแต่งในอ่างชุบซัลเฟตของการเคลือบทองแดงลงบนเหล็กกล้าคาร์บอน จากการศึกษาพื้นฐานวิทยาลัยพบว่าเมื่อเติมเจลาติน เกรนละเอียดสม่ำเสมอ และเมื่อเติมสารเติมแต่งเจลาตินมีความแข็งเพิ่มขึ้นถึง 219 HV เมื่อเปรียบเทียบกับไม่เติมสารเติมแต่งเจลาตินมีความแข็ง 100 HV หรือในอ่างชุบวัตต์ของการเคลือบนิเกิล-โคบอลต์ลงบนเหล็กกล้าคาร์บอน จากการศึกษาพฤติกรรมการกัดกร่อนด้วยเส้นโค้งโพลาไรเซชัน พบว่าเมื่อเติมเจลาตินกระแสแคโทดิกต่ำกว่าถึง 100 เท่า ทั้งยังลดการเกิดออกซิเดชันค่าศักย์ไฟฟ้า การกัดกร่อนเปลี่ยนไปเป็นค่าลบ ซึ่งบ่งชี้ว่าเจลาตินทำหน้าที่เป็นตัวช่วยยับยั้งการกัดกร่อนเนื่องจากสร้างชั้นเจลาตินปิดกั้นพื้นผิวเป็นอุปสรรคต่อการแพร่กระจายของออกซิเจน ลดการโตของเกรน ดังนั้นการเติมเจลาตินจึงเพิ่มความต้านทานการกัดกร่อนเมื่อเทียบกับที่ไม่เติมเจลาติน [10-15]

จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องที่ได้กล่าวมาข้างต้นพบว่าได้มีการศึกษาพัฒนาการเติมสารเติมแต่งประเภทกัมในกระบวนการชุบเคลือบด้วยไฟฟ้าทำให้ได้สมบัติที่ดีขึ้น เช่น ความแข็งและความต้านทานการกัดกร่อน ดังนั้นผู้วิจัยจึงสนใจที่จะศึกษาพื้นฐานวิทยาลัย สมบัติทางกลและพฤติกรรมการกัดกร่อนเมื่อมีการเติมสารเติมแต่งประเภทกัม ในกระบวนการการชุบเคลือบด้วยไฟฟ้าด้วยนิเกิลลงบนเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ โดยมีการใช้สารเติมประเภทกัม คือ เจลาติน กัมอะราบิกและกัวกัม โดยเป็นกัมที่มาจากสัตว์ ยางพืชและเมล็ดพืชตามลำดับ เนื่องจากมีน้ำหนักโมเลกุลมากประกอบไปด้วยไฮดรอกซิลและอะมิโนของไนโตรเจนและออกซิเจน เป็นตัวช่วยพาไอออนในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ให้ไปเคลือบบนพื้นผิวชิ้นงาน ราคาถูก หาง่ายและไม่เป็นพิษ อย่างไรก็ตามงานวิจัยนี้อาจนำไปเป็นข้อมูลพื้นฐานสำหรับงานวิจัยและกระบวนการพัฒนาผลิตภัณฑ์ในอนาคต

## 1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาผลของชนิดสารเติมแต่งประเภทกัมที่เหมาะสมต่อการเคลือบนิเกิลลงบนเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำด้วยกระบวนการชุบเคลือบด้วยไฟฟ้า
2. เพื่อศึกษาพื้นฐานวิทยาลัย สมบัติทางกล และพฤติกรรมการกัดกร่อนของการเคลือบนิเกิลลงบนเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำด้วยกระบวนการชุบเคลือบด้วยไฟฟ้าที่มีการใช้สารเติมแต่งประเภทกัม

### 1.3 ขอบเขตงานวิจัย

1. ทำการเคลือบนิกเกิลลงบนเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำด้วยกระบวนการชุบเคลือบด้วยไฟฟ้า โดยเปรียบเทียบสารเติมแต่งประเภทกัม เช่น เจลาติน กัมอะราบิก และกัวกัม
2. วิเคราะห์ผิวเคลือบที่ได้ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM)
3. วิเคราะห์สมบัติทางกลของผิวเคลือบด้วยการวัดความแข็งแบบวิกเกอร์ (Vickers hardness tester)
4. ศึกษาพฤติกรรมการกัดกร่อนของการเคลือบนิกเกิลลงบนเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำด้วยการจุ่มแช่ในสถานะเกลือ (Immersion test)

### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. เพื่อทราบถึงชนิดสารเติมแต่งประเภทกัมที่เหมาะสมต่อการเคลือบนิกเกิลบนเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำด้วยกระบวนการชุบเคลือบด้วยไฟฟ้า
2. เพื่อทราบถึงสัณฐานวิทยา สมบัติทางกล และพฤติกรรมการกัดกร่อนของการเคลือบนิกเกิลบนเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำด้วยกระบวนการชุบเคลือบด้วยไฟฟ้าที่มีสารเติมแต่งประเภทกัม
3. เพื่อใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานอ้างอิงการกัดกร่อน โดยต้องการทราบรายละเอียดการกัดกร่อนตลอดจนประมาณอายุการใช้งานเมื่อต้องอยู่ในสภาวะการใช้งานที่มีสภาพสิ่งแวดล้อมเสี่ยงต่อการเกิดการกัดกร่อน

## บทที่ 2

### ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง และการทบทวนวรรณกรรม

ในการวิจัยครั้งนี้ ผู้วิจัยได้ศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ตามหัวข้อดังนี้ ได้แก่ การกัดกร่อน การชุบเคลือบด้วยไฟฟ้า สารเติมแต่งประเภทกัมที่ใช้ในกระบวนการชุบเคลือบด้วยไฟฟ้า การวิเคราะห์ชั้นเคลือบ กฎของฟาราเดย์และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 การกัดกร่อน

การกัดกร่อน (Corrosion) คือ การสูญเสียเนื้อโลหะโดยการเกิดปฏิกิริยาเคมีกับสิ่งแวดล้อม อาจเป็นปฏิกิริยาเคมีหรือปฏิกิริยาทางไฟฟ้าเคมี การกัดกร่อนเป็นปรากฏการณ์ทางธรรมชาติอย่างหนึ่ง กล่าวคือ สินแร่ต่าง ๆ ที่มีอยู่บนพื้นโลกเป็นสภาพที่มีเสถียรภาพอยู่แล้ว เมื่อนำสินแร่มาถลุงให้ได้เนื้อโลหะบริสุทธิ์จะทำให้โลหะอยู่ในสภาพไม่เสถียร โลหะที่ไม่เสถียรจึงพยายามกลับสู่สภาพเดิม จึงเกิดกระบวนการกัดกร่อนขึ้น [16]

การกัดกร่อนของโลหะ สามารถเกิดขึ้นได้เมื่อมี 4 องค์ประกอบของเซลล์การกัดกร่อน ได้แก่ แอโนด (Anode) แคโทด (Cathode) อิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte) และตัวกลางในการถ่ายโอนอิเล็กตรอน (Electron transfer)

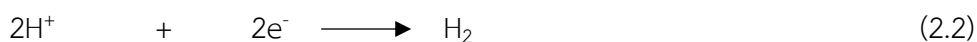
ในกระบวนการกัดกร่อนนั้นจะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของโลหะซึ่งเป็นปฏิกิริยาให้อิเล็กตรอน โดยที่อะตอมโลหะที่ยึดเหนี่ยวกันด้วยพันธะโคเวเลนต์ ที่มีคู่อิเล็กตรอนที่ไม่เป็นพันธะประจำ โลหะจึงมีอิเล็กตรอนที่เคลื่อนย้ายได้และอิเล็กตรอนที่ยึดเหนี่ยวทั้งหมดเข้าด้วยกัน และมีสภาวะไฟฟ้าเป็นกลาง เมื่อโลหะเกิดการกัดกร่อนอิเล็กตรอนที่พันธะหลุดออก ทำให้อะตอมเปลี่ยนเป็นไอออนประจุ

ในกระบวนการกัดกร่อนนั้นจะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation) ของโลหะ (M) เกิดการสูญเสียแรงยึดระหว่างอะตอมของโลหะ แล้วอะตอมเปลี่ยนเป็นไอออนหลุดเข้าไปในสิ่งแวดล้อมที่ทำให้เกิดการกัดกร่อนดังสมการที่ 2.1 [17]

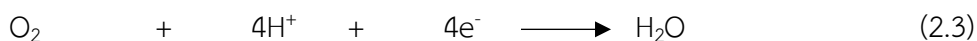


ปฏิกิริยาออกซิเดชันหรือปฏิกิริยาแอโนดิก (Anodic reaction) จะเกิดขึ้นที่ขั้วแอโนด เพื่อให้เกิดสมดุลขึ้นภายในระบบ และมีการเกิดปฏิกิริยารีดักชัน (Reduction reaction) หรือปฏิกิริยาแคโทดิก

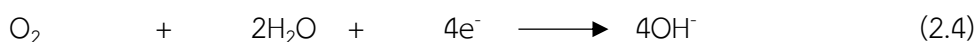
(Cathode reaction) ขึ้นที่ขั้วแคโทด โดยทั่วไปปฏิกิริยารีดักชันแบ่งออกเป็น 4 ประเภทดังสมการที่ 2.2 – 2.5



มีไฮโดรเจนเกิดขึ้น (ในน้ำที่มีฤทธิ์เป็นกรด)



เกิดรีดักชันของออกซิเจน (ในน้ำที่มีค่า pH>5)

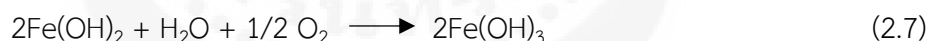
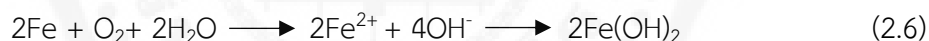


เกิดรีดักชันของออกซิเจน (ในน้ำที่มีค่า pH<5)



เกิดรีดักชันของไอออนของโลหะ

หลังจากการเกิดปฏิกิริยาของการกัดกร่อนเบื้องต้น ต่อไปนี้ก็คือการรวมตัวของไอออนในสารละลาย ทำให้เกิดผลิตภัณฑ์จากการกัดกร่อน ตัวอย่างเช่น เหล็กที่เกิดการกัดกร่อนในสารละลายที่มีฤทธิ์เป็นกลาง ปฏิกิริยาของการกัดกร่อนทั้งหมดจะเป็นไปตามสมการ (2.1) และ (2.4) รวมกัน ทำให้เกิดสารประกอบของเฟอร์รัสไฮดรอกไซด์  $\text{Fe}(\text{OH})_2$  ขึ้นที่ผิวของเนื้อเหล็ก และสารประกอบนี้ยังเกิดการออกซิเดชันได้อย่างรวดเร็วด้วยออกซิเจนที่มีอยู่ในระบบ ทำให้เกิด  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  ดังสมการที่ 2.6 – 2.7



ดังนั้น การกัดกร่อนจึงสามารถเกิดขึ้นได้กับโลหะเกือบทุกชนิด ขึ้นอยู่กับอัตราการกัดกร่อนที่แตกต่างกัน

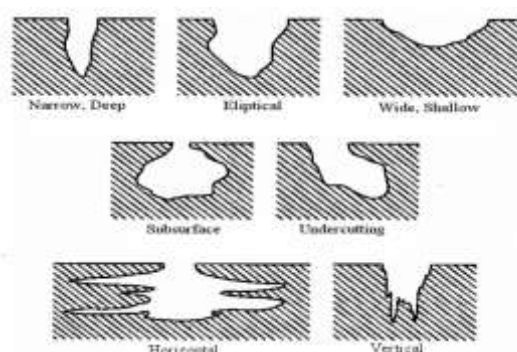
### 2.1.1 ประเภทของการกัดกร่อนที่เกิดในเหล็ก [18]

การกัดกร่อนสามารถเกิดขึ้นได้ทั่วไปบนโลหะ โดยสาเหตุของการกัดกร่อนนั้นมาจากโลหะและสิ่งแวดล้อม สามารถแบ่งการกัดกร่อนออกเป็นประเภทได้ดังนี้

#### 1. การกัดกร่อนแบบรูเข็ม (Pitting corrosion)

การกัดกร่อนแบบรูเข็มหรือการกัดกร่อนเฉพาะจุด (Localized attack) ดังแสดงในรูปที่ 2.1 เป็นรูปแบบการกัดกร่อนที่รุนแรงมาก เนื่องจากลักษณะของรูปแบบการกัดกร่อนประเภทนี้มีลักษณะเป็นจุดเล็กกระจายหรืออาจอยู่ใกล้กันคล้ายกับผิวขรุขระ มักเป็นปัญหาที่เกิดขึ้นมากโดยเฉพาะกับโลหะ

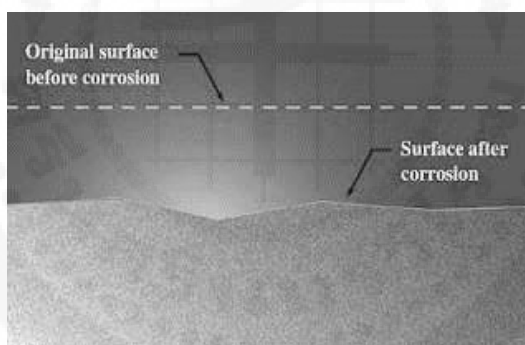
รูปแบบการกัดกร่อนประเภทนี้มักเกิดจากชั้นเคลือบ (Coating) ฟิล์มออกไซด์ (Oxide film) ได้รับความเสียหายเนื่องจากแรงกลหรือปฏิกิริยาเคมี



รูปที่ 2.1 แสดงการจำลองการกัดกร่อนแบบรูเข็ม (ที่มา : สยาม แก้วคำไสย. 2553)

## 2. การกัดกร่อนที่เกิดขึ้นสม่ำเสมอทั่วผิวหน้า (General or uniform corrosion)

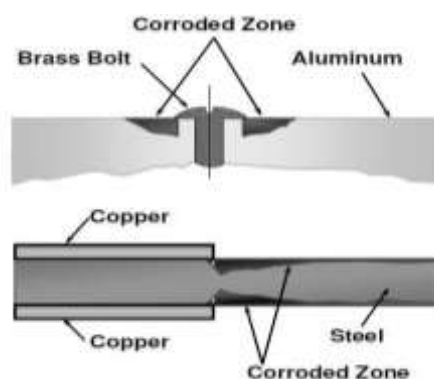
โลหะจะถูกกัดกร่อนอย่างสม่ำเสมอทั่วผิวหน้าขึ้นงานหรือเป็นบริเวณกว้าง ซึ่งจะเกิดขึ้นจากปฏิกิริยาเคมีหรือปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้า มีผลให้โลหะบางเรื่อย ๆ หรือมีน้ำหนักหายไป ดังแสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 แสดงการจำลองการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นสม่ำเสมอทั่วผิวหน้า (ที่มา : สยาม แก้วคำไสย. 2553)

## 3. การกัดกร่อนแบบกัลวานิก (Galvanic corrosion)

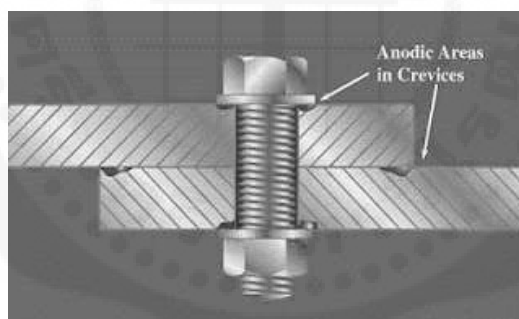
โลหะสองชนิดมีค่าศักย์ไฟฟ้าเฉพาะตัว เมื่อโลหะเชื่อมต่อกันและมีสารละลายอิเล็กโทรไลต์เมื่อเวลาผ่านไปโลหะที่ศักย์ไฟฟ้าต่ำจะเกิดการกัดกร่อน และโลหะที่มีศักย์ไฟฟ้าสูงจะไม่เกิดการกัดกร่อน จะเกิดความรุนแรงขึ้นอยู่กับค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า ความต่างศักย์ไฟฟ้าจะทำให้เกิดการไหลของอิเล็กตรอนของโลหะทั้งสอง ทำให้เพิ่มอัตราการกัดกร่อนของโลหะที่มีค่าความต้านทานการกัดกร่อนน้อยและจะลดอัตราการกัดกร่อนของโลหะที่มีความต้านทานมาก เนื่องจากกระบวนการดังกล่าวเกี่ยวข้องกับกระแสไฟฟ้าและความแตกต่างกันของโลหะ ดังแสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 แสดงการจำลองการกัดกร่อนแบบกัลวานิก (ที่มา : สยาม แก้วคำไสย. 2553)

#### 4. การกัดกร่อนในที่อับ (Crevice corrosion)

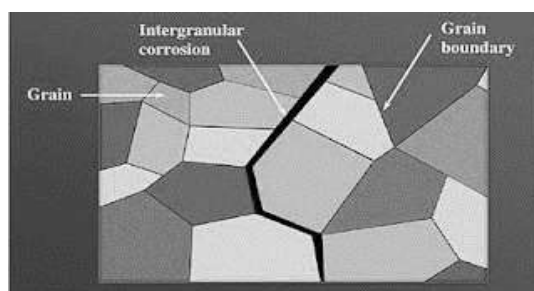
การกัดกร่อนในที่อับคือการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นในพื้นที่อับบนผิวโลหะที่สัมผัสโดยตรงกับสารกัดกร่อน การกัดกร่อนประเภทนี้เกี่ยวข้องกับปริมาณของสารละลายที่ค้างอยู่ตามพื้นที่ที่เป็นหลุมหรือพื้นที่ที่เป็นซอก บริเวณแคบที่มีสารละลายเข้าไปขังอยู่ได้เป็นเวลานานโดยไม่มีการถ่ายเท ทำให้ความเข้มข้นของออกซิเจนในน้ำหรือสารละลายภายในซอกไม่เท่ากับภายนอก โดยข้อแอนโดจะเกิดการสูญเสียเนื้อโลหะบริเวณซอกหรือในที่อับ ดังแสดงในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 แสดงการจำลองการกัดกร่อนในที่อับ (ที่มา : สยาม แก้วคำไสย. 2553)

#### 5. การกัดกร่อนตามขอบเกรน (Intergranular corrosion)

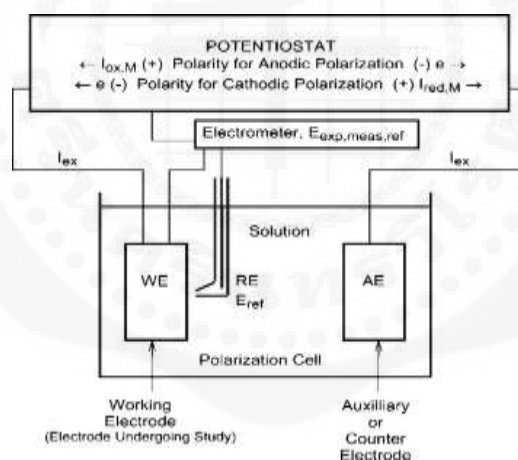
โดยปกติขอบเกรนมักเกิดปฏิกิริยาได้ง่ายกว่าเนื้อเกรน ขอบเกรนจะเป็นข้อแอนโด เนื้อเกรนจะเป็นข้อแคโทด หากบริเวณขอบเกรนมีอนุภาคอื่น ๆ มาตกตะกอนอยู่หรือมีธาตุหนึ่งมากหรือน้อยเกินไป ขอบเกรนอาจจะถูกกัดกร่อนหรือทำปฏิกิริยาได้ง่ายขึ้น การกัดกร่อนแบบนี้จะเกิดตลอดทั่วผิวหน้าหรือกัดเซาะทั้งก้อน ดังแสดงในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 แสดงการจำลองการกัดกร่อนตามขอบเกรน (ที่มา : สยาม แก้วคำไสย. 2553)

### 2.1.2 การวัดศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน และอัตราการกัดกร่อน [19]

ศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน (Corrosion potential,  $E_{corr}$ ) คือ ศักย์ไฟฟ้าที่อัตราการรวมของปฏิกิริยาแอโนดิกทั้งหมดเท่ากับอัตราการรวมของปฏิกิริยาแคโทดิก โดยความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน (Corrosion current density,  $i_{corr}$ ) คือ อัตราการกัดกร่อนการวัดศักย์ไฟฟ้าและกระแสขณะเกิดปฏิกิริยาการกัดกร่อน สามารถหาได้โดยใช้เครื่องโพเทนชิโอสแตท (Potentiostat) ซึ่งมีลักษณะการวัดดังแสดงในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 แสดงการวัดศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนและอัตราการกัดกร่อนด้วยเครื่องโพเทนชิโอสแตท (ที่มา : Gareth Hinds. 2003)

อิเล็กโทรดที่ใช้มี 3 ชนิด ได้แก่ อิเล็กโทรดอ้างอิง (Reference electrode) อิเล็กโทรดกระแส (Counter electrode) และอิเล็กโทรดตัวอย่าง (Specimen)

การวัดศักย์ไฟฟ้าได้มาจากการวัดเทียบค่าศักย์ไฟฟ้าของอิเล็กโทรดอ้างอิงกับอิเล็กโทรดตัวอย่าง ส่วนค่ากระแสไฟฟ้าจะได้อาจมาจากการวัดเทียบระหว่างอิเล็กโทรดกระแสกับอิเล็กโทรดตัวอย่าง

จากค่าศักย์ไฟฟ้าและค่ากระแสที่วัดได้ เมื่อนำมาสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์จะได้กราฟที่เรียกว่า กราฟเส้นโพลาริเซชัน (Polarization curve)

เมื่อทราบค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนและกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนแล้ว สามารถหา อัตราการกัดกร่อนได้จากสมการที่ 2.8

$$R_{\text{moy}} = 0.13 I_{\text{corr}} e / \rho \quad (2.8)$$

เมื่อ  $R_{\text{moy}}$  คือ อัตราการเกิดการกัดกร่อน (มิลลิเมตรต่อปี)

$I_{\text{corr}}$  คือ ความหนาแน่นกระแสการกัดกร่อน (ไมโครแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร)

$e$  คือ น้ำหนักกรัมสมมูลของโลหะ

$\rho$  คือ ความหนาแน่นของโลหะ (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)

### 2.1.3 การทดสอบการกัดกร่อน [20]

การทดสอบการกัดกร่อนโดยการจุ่มแช่ (Immersion test) ใช้เพื่อตรวจสอบความต้านทานของวัสดุต่อสภาพแวดล้อมที่รุนแรง และใช้เพื่อตรวจสอบการลดของน้ำหนักที่เกี่ยวข้องกับการกัดกร่อน โดยทำให้อัตราการกัดกร่อนเป็นหน่วยเวลาโดยปกติจะมีหน่วยเป็น มิลลิเมตรต่อปี หรือ ไมล์ต่อปี เงื่อนไขการทดสอบแตกต่างกันไป แต่โดยทั่วไปจะทดสอบ 1 10 หรือ 20 วัน โดยต้องคำนึงถึงปัจจัยต่าง ๆ ดังนี้

#### 1. เงื่อนไขการทดสอบ

1.1 ต้องกำหนดขอบเขตของปัจจัยควบคุม เช่น อุณหภูมิ ค่า pH และคุณลักษณะที่สำคัญอื่น ๆ ของสารละลาย

1.2 ควรรายงานปริมาณสารเคมีเป็นเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของสารละลาย

1.3 อุณหภูมิของสารละลาย

อุณหภูมิของสารละลายการกัดกร่อนในการควบคุมควบคุมภายใน 61 องศาเซลเซียส (141.8 องศาฟาเรนไฮต์) และต้องระบุไว้ในรายงานผลการทดสอบ และหากไม่ต้องการอุณหภูมิจำเพาะ เช่น จุดเดือด หรือหากต้องการตรวจสอบช่วงอุณหภูมิ ต้องรายงานอุณหภูมิที่เลือกใช้ในการทดสอบและระยะเวลาตามลำดับ สำหรับการทดสอบที่อุณหภูมิแวดล้อมการทดสอบควรทำที่อุณหภูมิสูงสุดที่คาดการณ์ไว้

#### 1.4. ระยะเวลาการทดสอบ

วัสดุที่มีการกัดกร่อนอย่างรุนแรงโดยทั่วไป ปกติไม่ต้องทดสอบเป็นเวลานานเพื่อให้ได้อัตราการกัดกร่อนที่ถูกต้องแม่นยำ อย่างไรก็ตามมีบางกรณีที่เหมาะสมนี้ไม่ถูกต้อง ตัวอย่างเช่น ตะกั่วที่สัมผัสกับกรดซัลฟิวริก กัดกร่อนในอัตราที่สูงมากในตอนแรก ขณะสร้างฟิล์มป้องกัน จากนั้นอัตราจะลดลงอย่างมาก ดังนั้นการทดสอบสั้น ๆ เกี่ยวกับวัสดุดังกล่าวจะบ่งชี้ว่ามีอัตราการกัดกร่อนที่สูง

และทำให้เข้าใจผิดโดยสิ้นเชิงการทดสอบในระยะเวลาอันสั้น อาจจำเป็นต้องทำการทดสอบเป็นเวลานาน เพื่อให้ฟิล์มเสียหาย การทดสอบที่ดำเนินการเป็นเวลานานจึงมีความสมจริงมากกว่าการทดสอบในระยะเวลาสั้น ๆ โดยระยะเวลาการทดสอบที่พบบ่อยที่สุดคือ 48 ถึง 168 ชั่วโมง หรือ 2 ถึง 7 วัน

## 2. วิธีการทำความสะอาดตัวอย่างหลังการทดสอบ

ก่อนทำความสะอาดตัวอย่าง ควรสังเกต และบันทึกลักษณะที่ปรากฏของตัวอย่าง เช่น การเกิด Pitting การทำความสะอาดชิ้นงานทดสอบหลังการทดสอบเป็นขั้นตอนสำคัญในขั้นตอนการทดสอบการกัดกร่อน และหากทำไม่ถูกต้องอาจทำให้เกิดผลลัพธ์ที่ผิดพลาดได้

## 3. การตีความผลลัพธ์ (Interpretation of results)

หลังจากทำความสะอาดชิ้นงานทดสอบที่สึกกร่อนแล้ว ควรชั่งน้ำหนักใหม่ด้วยความถูกต้องแม่นยำเทียบเท่ากับการชั่งน้ำหนักดั้งเดิม การสูญเสียมวลระหว่างช่วงการทดสอบสามารถใช้เป็นตัวชี้วัดหลักของการกัดกร่อนได้ หลังจากชั่งน้ำหนักตัวอย่างใหม่แล้ว ควรตรวจสอบอย่างละเอียดว่ามีหลุมใดอยู่หรือไม่ หากมีหลุมใด ๆ ควรหาค่าความลึกเฉลี่ยและควรสังเกตขนาด รูปร่างและการกระจายของหลุม

4. การคำนวณอัตราการกัดกร่อน (Calculating corrosion rate) ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.9 และค่าคงที่ของการกัดกร่อน ดังแสดงในรูปที่ 2.7

$$\text{Corrosion rate} = (K \times W)/(A \times T \times D) \quad (2.9)$$

เมื่อ K คือ ค่าคงที่ของการกัดกร่อน

W คือ น้ำหนักที่สูญเสียของชิ้นงาน (กรัม)

A คือ พื้นที่ของชิ้นงาน (ตารางเซนติเมตร)

T คือ เวลาในการจุ่มแช่ (ชั่วโมง)

D คือ ความหนาแน่นของชิ้นงาน (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)

Corrosion Rate Units Desired	Constant (K) in Corrosion Rate Equation
mils per year (mpy)	$3.45 \times 10^6$
inches per year (ipy)	$3.45 \times 10^3$
inches per month (ipm)	$2.87 \times 10^2$
millimetres per year (mm/y)	$8.76 \times 10^4$
micrometres per year ( $\mu\text{m}/\text{y}$ )	$8.76 \times 10^7$
picometres per second (pm/s)	$2.78 \times 10^6$
grams per square metre per hour ( $\text{g}/\text{m}^2\text{-h}$ )	$1.00 \times 10^4 \times D^4$
milligrams per square decimetre per day (mdd)	$2.40 \times 10^6 \times D^4$

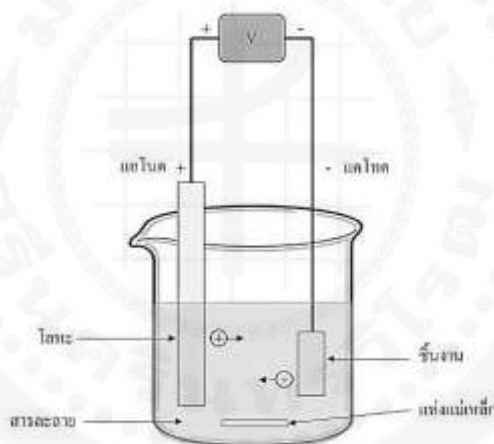
รูปที่ 2.7 แสดงหน่วยในการคำนวณอัตราการกัดกร่อน (ที่มา : ASTM G 31 – 72. 1999)

## 2.2 การชุบเคลือบด้วยไฟฟ้า

ปัจจุบันกระบวนการชุบเคลือบด้วยไฟฟ้าเป็นกระบวนการที่ได้รับการยอมรับในการเคลือบผิวโลหะ โดยการชุบเคลือบด้วยไฟฟ้าเป็นการปรับปรุงสมบัติพื้นผิวของวัสดุโดยวัตถุประสงค์ในการชุบเคลือบผิวโลหะด้วยไฟฟ้านั้น จะแตกต่างกันออกไปตามความต้องการ เช่น ชุบเพื่อป้องกันการสึกหรอ ชุบเพื่อความสวยงาม ชุบเพื่อเพิ่มความหนาของโลหะหรือชุบเพื่อป้องกันการกัดกร่อน เป็นต้น

### 2.2.1 หลักการชุบเคลือบด้วยไฟฟ้า [21]

การชุบเคลือบผิวโลหะด้วยไฟฟ้า (Electroplating) หมายถึง กระบวนการอิเล็กโทรไลซิสที่ต้องอาศัยพลังงานไฟฟ้า ทำให้ไอออนของโลหะชนิดหนึ่งกลายเป็นโลหะเคลือบหรือเกาะบนผิวของโลหะอีกชนิดหนึ่ง โดยนำเอาชิ้นงานที่ต้องการชุบต่อเข้ากับขั้วแคโทด (ขั้วลบ) สำหรับโลหะที่จะไปเคลือบบนผิวชิ้นงาน (ตัวล่อ) ต่อเข้ากับแอโนด (ขั้วบวก) จากนั้นนำชิ้นงานและตัวล่อจุ่มในน้ำยาชุบ ซึ่งมีไอออนของโลหะที่ใช้เคลือบอยู่ จากนั้นปรับกระแสไฟฟ้าให้เกิดแรงดันไฟฟ้าที่เหมาะสม จะทำให้ไอออนของโลหะที่อยู่ในน้ำยาชุบเกิดปฏิกิริยา ดังแสดงในรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 แสดงหลักการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า (ที่มา : Synchrotron. 2563)

องค์ประกอบพื้นฐานของการชุบเคลือบผิว ประกอบไปด้วย

1. อุปกรณ์ชุดจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง (DC supply, Rectifier)
2. น้ำยาชุบ (Electrolyte)
3. ชิ้นงานที่ต้องการชุบ (Substrate)
4. แอโนดหรือตัวล่อ (Anode) ซึ่งสามารถแบ่งออกเป็น 2 ชนิดคือ ตัวล่อที่ละลายได้ (Soluble-anode) ตัวอย่างเช่น Copper, Nickel และ Silver และตัวล่อที่ไม่ละลาย (Insoluble anode) ตัวอย่างเช่น Stainless steel, PT/Ti และ Graphite

ชิ้นงานที่จะทำการชุบควรเป็นโลหะหรือวัสดุอื่นที่เคลือบผิวด้วยวัสดุสื่อนำไฟฟ้าไว้ก่อนแล้ว เพื่อให้เป็นสื่อไฟฟ้า กระแสที่ใช้ชุบต้องเป็นไฟฟ้ากระแสตรง (Direct current, D.C.) มีแรงดันไฟฟ้าและความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่เหมาะสม ในการชุบต้องจุ่มชิ้นงานที่จะชุบลงในน้ำยาชุบหรืออิเล็กโทรไลต์ โดยต่อชิ้นงานเข้ากับขั้วลบและต่อแผ่นตัวล่อซึ่งเป็นโลหะชนิดเดียวกันกับเนื้อโลหะที่จะนำมาเคลือบผิวชิ้นงาน (หรือใช้โลหะอื่นที่เหมาะสม) ต่อขั้วบวก

การชุบเคลือบผิวด้วยไฟฟ้า มีหลายประเภท เช่น ชุบทองแดงต่าง ชุบทองแดงกรด ชุบนิกเกิล ชุบเงิน ชุบทอง ชุบแพลทินัม ชุบโรเดียม เป็นต้น โดยใช้หลักการเดียวกันเพียงแต่เปลี่ยนน้ำยาชุบ เปลี่ยนแผ่นตัวล่อ และปรับแรงดันไฟฟ้า (โวลต์) หรือปรับความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า (แอมแปร์/ตารางเดซิเมตร) ให้เหมาะสม

น้ำยาชุบหรืออิเล็กโทรไลต์ เป็นสารละลายของเกลือโลหะชนิดต่าง ๆ กับสารเคมีชนิดอื่น ๆ ที่ผสมลงไป เพื่อเพิ่มสมบัติบางประการให้เหมาะกับการใช้งานและช่วยให้ประสิทธิภาพของน้ำยาชุบดียิ่งขึ้น โดยน้ำยาชุบสามารถแบ่งออกเป็น 2 ลักษณะคือ

1. น้ำยาชุบที่ใช้ตัวล่อที่สามารถละลายได้ คือตัวล่อจะละลายลงมาเป็นส่วนหนึ่งของความเข้มข้นของโลหะในน้ำยา เช่น น้ำยาชุบทองแดงต่างและน้ำยาชุบทองแดงเงาใช้แผ่นทองแดงเป็นตัวล่อ น้ำยาชุบนิกเกิลใช้แผ่นนิกเกิล น้ำยาชุบเงินเงาใช้แผ่นเงินเป็นตัวล่อ

2. น้ำยาชุบที่ใช้ตัวล่อที่ไม่สามารถละลายได้ เช่น น้ำยาชุบทอง โรเดียม พาลาเดียม และแพลทินัม จะใช้แพลทินัมไทเทเนียม (Platinized Titanium) เป็นตัวล่อ ซึ่งตัวล่อประเภท Inert anode ที่ไม่ละลายลงไปในน้ำยาชุบ แต่จะควบคุมความเข้มข้นของโลหะที่เคลือบในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ได้โดยการเติมสารประกอบโลหะที่เหมาะสมหรือเรียกว่า เกลือโลหะ (Metal salt) ลงในสารละลายอิเล็กโทรไลต์โดยตรง

### 2.2.2 กระบวนการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า [22]

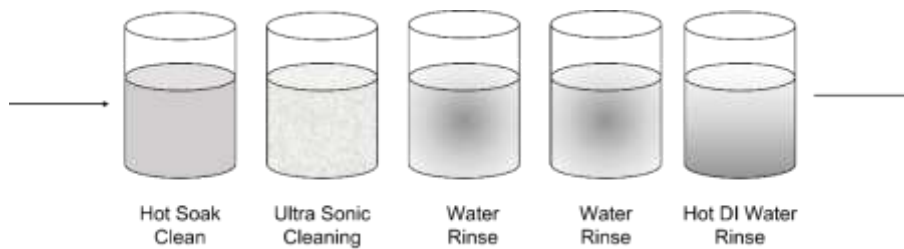
ในกระบวนการชุบโลหะด้วยไฟฟ้านั้น การทำความสะอาดผิวชิ้นงานก่อนการชุบเป็นสิ่งจำเป็น ผิวของชิ้นงานก่อนทำการชุบจะต้องสะอาดปราศจากสิ่งสกปรก เช่น คราบสนิม คราบน้ำมัน รอยขีดข่วน และรอยเปื้อนอื่น ๆ เพราะประสิทธิภาพของการชุบจะขึ้นอยู่กับการเกาะติดของเนื้อโลหะกับชิ้นงานที่ทำการชุบ ซึ่งการชุบชิ้นงานที่สกปรกนั้นจะทำให้ผิวชิ้นงานที่ผ่านการชุบเคลือบหลุดลอกได้ง่าย

ขั้นตอนหลักของการชุบเคลือบผิวด้วยไฟฟ้าแบ่งเป็น 5 ช่วงใหญ่ ๆ คือ

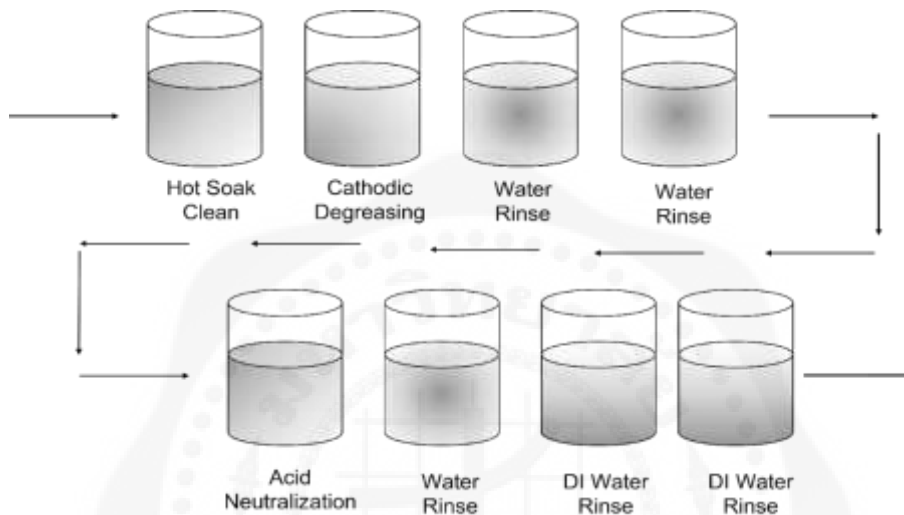
1. การขัดผิว (Polishing)
2. การล้างทำความสะอาดเบื้องต้น (Off plant cleaning)

3. การล้างผิวก่อนการชุบ (Pre-treatment)
4. การชุบเคลือบผิวด้วยไฟฟ้า
5. กระบวนการหลังการชุบ (Post-treatment)

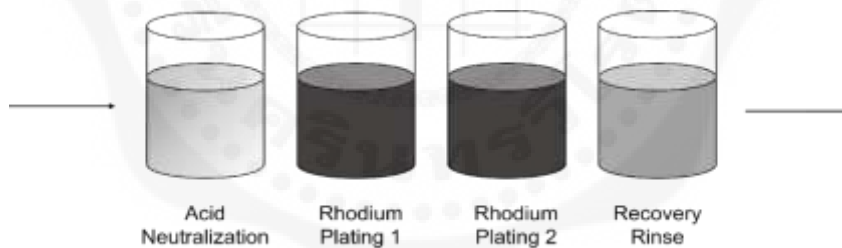
การเตรียมชิ้นงานก่อนชุบนับว่าเป็นสิ่งสำคัญมาก ชิ้นงานที่ผ่านการหล่อออกมามักจะมีผิวหยาบ ขรุขระ รอยขีดข่วนต่าง ๆ เมื่อจะทำการชุบจะต้องผ่านการขัดผิวให้เรียบก่อน โดยมีจุดมุ่งหมายหลัก เพื่อระเปิดผิวชิ้นงานที่มีออกไซด์ปกคลุมอยู่ แล้วทำความสะอาดชิ้นงานให้หมดคราบไขมันต่าง ๆ ด้วยหลักการใหญ่ของการเตรียมผิวชิ้นงานให้สะอาดสมบูรณ์คือ การขัดชิ้นงานด้วยล้อยขัด แบ่งเป็นการขัดหยาบ ขัดละเอียดและขัดเงา ต่อจากนั้นจึงนำชิ้นงานมาล้างไขมันออก ซึ่งเป็นการล้างทำความสะอาดเบื้องต้น ดังแสดงในรูปที่ 2.9 ในกรณีที่ขัดด้วยล้อยขัด ชิ้นงานจะมีคราบยาขัดซึ่งเป็นสารอินทรีย์ ดังนั้นจึงต้องใช้ตัวทำละลายที่นำมาล้างคราบอินทรีย์ดังกล่าวให้ออกไป ตัวอย่างของตัวทำละลาย เช่น ไตรคลอโรอีเทน และเพื่อให้ชิ้นงานสะอาดขึ้นอีกจะต้องนำชิ้นงานมาล้างผิวก่อนชุบ ดังแสดงในรูปที่ 2.10 โดยนำมาล้างด้วยไฟฟ้า สูตรของสารเคมีที่ใช้จะเหมือนการต้มล้างด้วยด่างร้อนทุกประการ แต่ต้องเพิ่มกระแสไฟฟ้าเข้าไปช่วย โดยมีแผ่นสแตนเลสอยู่ที่ขั้วหนึ่งและชิ้นงานอยู่ที่อีกขั้วหนึ่ง ในระหว่างการเตรียมผิวชิ้นงานก็มีโอกาสสัมผัสกับออกซิเจนอาจเกิดเป็นออกไซด์บาง ๆ ขึ้นได้ ดังนั้นในกระบวนการชุบจึงต้องมีการจุ่มกรดกระตุ้นผิวก่อนนำชิ้นงานลงชุบ ดังแสดงในรูปที่ 2.11 ในขั้นตอนสุดท้ายจะต้องมีกระบวนการหลังการชุบเพื่อล้างชิ้นงานให้สะอาดจากน้ำยาชุบและทำการเป่าให้แห้ง ดังแสดงในรูปที่ 2.12



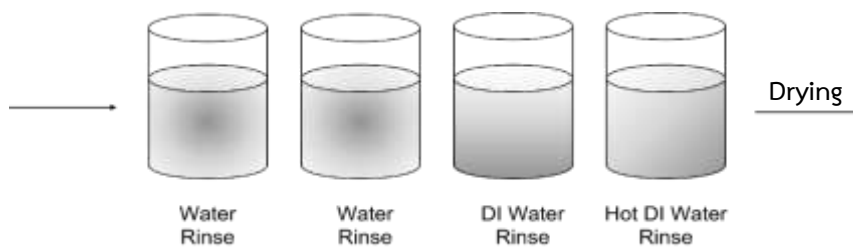
รูปที่ 2.9 แสดงการล้างทำความสะอาดเบื้องต้น



รูปที่ 2.10 แสดงการล้างผิวก่อนชุบ



รูปที่ 2.11 แสดงการชุบเคลือบด้วยไฟฟ้า



รูปที่ 2.12 แสดงกระบวนการหลังการชุบ

โดยสภาวะการทำงานที่สำคัญของการชุบ สามารถดูได้จาก ความเข้มข้นของโลหะ อุณหภูมิ ที่ทำการชุบ ค่า pH ที่ใช้ ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่ใช้ ความหนาแน่นของน้ำยาและสภาวะ การกวนน้ำยา โดยมีปัจจัยที่มีผลต่อการชุบ ดังนี้

1. อุณหภูมิของน้ำยาชุบโลหะควรเป็นไปตามคำแนะนำของผู้ขายน้ำยาชุบ น้ำยาชุบสูตร ต่าง ๆ ต้องการอุณหภูมิที่แน่นอนจุดหนึ่งเพื่อผลการชุบเคลือบผิวที่ดีที่สุด
2. สภาวะทางไฟฟ้า เป็นความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า การกำหนดกระแสไฟฟ้าที่ใช้ ต่อพื้นที่ผิวของชิ้นงาน (แอมแปร์ต่อตารางเดซิเมตร) ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้านี้มีความสำคัญ ต่อคุณภาพในการชุบ ถ้ากระแสไฟฟ้าสูงจะทำให้มีความเร็วในการเคลือบผิวมาก แต่ก็อาจทำให้เกิด รุตามตได้ ถ้ากระแสไฟฟ้าต่ำอาจได้ลักษณะปรากฏที่ไม่ดีและทำให้การชุบช้าลง
3. ค่า pH เช่นเดียวกับอุณหภูมิต้องมีการกำหนดค่า pH ที่แน่นอน โดยการกวนน้ำยา ในการชุบเคลือบผิว ต้องมีการกวนน้ำยาเพื่อให้ประจุของโลหะในน้ำยามีการกระจายอย่างสม่ำเสมอ ในขณะที่ชุบจะต้องมีการโยกหรือกวนสารละลายเพื่อให้มีสภาวะเหมาะสมและส่วนผสมในสารละลาย กระจายสม่ำเสมอ
4. ส่วนผสมของน้ำยาชุบโลหะ น้ำยาชุบโลหะที่ดีต้องมีความเข้มข้นของโลหะ ที่ต้องการ เคลือบเพียงพอ และมีตัวเติมต่าง ๆ ในปริมาณที่เหมาะสม ตัวเติมเหล่านี้จะทำหน้าที่ในการปรับปรุงน้ำยา ให้มีสมบัติที่ดีขึ้น เช่น เพิ่มความเงาของผิวเคลือบ ลดความเครียดภายใน การชุบ รักษาเสถียรภาพของ สารเคมีในน้ำยา เป็นต้น

### 2.2.3 การชุบนิกเกิล [23]

สารละลายชุบนิกเกิลมีหลายชนิด แต่ละชนิดมีความเหมาะสมกับชิ้นงานที่แตกต่างกัน สำหรับ สารละลายชุบนิกเกิลแบบวัตต์และแบบคลอไรด์ เป็นแบบที่นิยมชุบโดยทั่วไปในวงการอุตสาหกรรม

#### 1. การชุบนิกเกิลแบบวัตต์

นิกเกิลที่เคลือบผิวชิ้นงานที่ได้จากสารละลายชุบนิกเกิลแบบวัตต์ส่วนมากได้มาจากนิกเกิลซัลเฟต ทำหน้าที่เป็นแหล่งกำเนิดของนิกเกิลไอออน นิกเกิลคลอไรด์ ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของแคโทดและ ช่วยเพิ่มการนำไฟฟ้าของสารละลาย กรดบอริก ทำหน้าที่เป็นบัฟเฟอร์ ช่วยให้ผิวเรียบขึ้น นอกจากนี้ ในสารละลายจะมีคลอไรด์อยู่ด้วยเป็นจำนวนน้อย ส่วนผสมของสารละลายมีดังนี้

$\text{NiSO}_4$	300	กรัมต่อลิตร
$\text{NiCl}_2$	48	กรัมต่อลิตร
$\text{H}_3\text{BO}_3$	40	กรัมต่อลิตร

ส่วนผสมนี้จะมีประสิทธิภาพสูง เมื่อชุบโดยใช้กระแสไฟฟ้า 3 ถึง 4 โวลต์ อุณหภูมิของสารละลาย 40 ถึง 70 องศาเซลเซียส การใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ใช้อยู่ในช่วง 2.5 ถึง 10 แอมแปร์ต่อตารางเดซิเมตร ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับกระบวนการละลายหรือการเคลื่อนที่ของชิ้นงาน สำหรับการเติมสารอินทรีย์หรือสารอินทรีย์ลงไปในการละลายชุบแบบวัตต์ จะมีผลทำให้สมบัติของผิวที่เคลือบแตกต่างออกไป อาจจะทำให้ผิวที่เคลือบเป็นแบบกึ่งเงา (Semi-bright) หรือให้ผิวที่มีความเงาวาว (Fully bright) นอกจากนี้การใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ต่างกัน จะมีผลต่อสมบัติของนิเกิลที่เคลือบบนชิ้นงานด้วย

ข้อดีของสารละลายชุบนิกเกิลแบบวัตต์ ได้แก่

1. ง่ายต่อการใช้และเก็บรักษา
2. ราคานิกเกิลซัลเฟตถูกกว่าเกลือนิกเกิลชนิดอื่น เช่น นิกเกิลคลอไรด์ที่มีความบริสุทธิ์เท่ากัน
3. สารละลายแบบวัตต์มีอันตรายต่อพิษน้อยกว่าสารละลายแบบคลอไรด์
4. ผิวนิเกิลที่เคลือบบนชิ้นงานจากสารละลายแบบวัตต์ มีความเปราะ (Brittle) และมีความเค้นภายใน (Internal stress) น้อยกว่าที่ชุบจากสารละลายแบบคลอไรด์

## 2. การชุบนิกเกิลแบบคลอไรด์ (All Chloride Electrolyte)

สารละลายชุบนิกเกิลแบบคลอไรด์ ประกอบไปด้วย นิกเกิลคลอไรด์กับกรดบอริก (All Chloride Solution) โดยส่วนผสมของสารละลายชุบนิกเกิลแบบคลอไรด์ มีดังนี้

$\text{NiCl}_2$	225 – 300	กรัมต่อลิตร
$\text{H}_3\text{BO}_3$	30 – 35	กรัมต่อลิตร

ทำการชุบโดยใช้ค่า pH 1 ถึง 4 อุณหภูมิของสารละลาย 50 ถึง 70 องศาเซลเซียส ถ้าผ่านกระแสไฟฟ้าจำนวนหนึ่งลงไปในการละลายแบบคลอไรด์กับแบบวัตต์ พบว่าแบบคลอไรด์นำไฟฟ้าได้ดีกว่าแบบวัตต์ ดังนั้นสารละลายแบบคลอไรด์จึงเหมาะสำหรับ การชุบชิ้นงานที่รูปร่างไม่สม่ำเสมอ ทั้งนี้เพราะมีการกระจายของกระแสไฟฟ้าได้ดี

ข้อเสียของสารละลายแบบคลอไรด์

1. นิกเกิลคลอไรด์ที่ใช้เป็นส่วนผสมของสารละลายมีราคาแพงกว่านิกเกิลซัลเฟตในเมื่อมีความบริสุทธิ์เท่ากัน
2. นิกเกิลคลอไรด์ถ้าเก็บไว้เป็นเวลานานจะจับเป็นก้อน จึงยากที่จะเก็บรักษานิเกิลที่ได้จากการชุบมีความเปราะ (Brittle) และมีความเค้นภายใน (Internal stress) สูงกว่าการชุบแบบวัตต์

3. การชุบจะให้ได้ผิว निकเกิดที่เคลือบมีสมบัติที่ดี จะต้องควบคุมปริมาณของคลอไรด์ที่เพิ่มขึ้นในสารละลาย

## 2.3 กฎของฟาราเดย์ (Faraday's)

ปริมาณของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านสารละลาย จะมีความสัมพันธ์กับปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นและระยะเวลาที่ให้กระแสผ่านสารละลาย โดยฟาราเดย์ได้ตั้งกฎความสัมพันธ์ระหว่างปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นที่ขั้วทั้งสอง ดังนี้

1. ปริมาณของสารที่ถูกปล่อยออกมาที่ขั้วทั้งสองระหว่างการแยกสลายสารละลายด้วยไฟฟ้า เป็นสัดส่วนโดยตรงกับปริมาณของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านสารละลาย
2. ปริมาณของสารต่างชนิดกันที่ถูกปล่อยออกมาด้วยปริมาณกระแสไฟฟ้าที่เท่ากันเป็นสัดส่วนโดยตรงกับน้ำหนักสมมูลของสารนั้น ๆ

จากกฎของฟาราเดย์สามารถหาค่าน้ำหนักและความหนาของโลหะที่ไปเคลือบบนผิวของชิ้นงานจากปริมาณกระแสไฟฟ้าและระยะเวลาที่ใช้ไปได้ โดยน้ำหนักของโลหะที่ไปเกาะบนชิ้นงานสามารถหาได้ดังสมการที่ 2.10

$$M = eq \cdot It \quad (2.10)$$

โดยที่  $eq = \frac{gE}{F}$

และ  $gE = \frac{AW}{n}$

ดังนั้น  $M = \frac{AWIt}{nF}$

เมื่อ	M	คือ น้ำหนักของโลหะที่หายไป (กรัม)
	eq	คือ สมมูลไฟฟ้าเคมี (กรัมต่อแอมแปร์นาที)
	I	คือ กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่าน (แอมแปร์)
	t	คือ ระยะเวลาที่กระแสไฟฟ้าไหลผ่าน (นาที)
	gE	คือ น้ำหนักกรัมสมมูล (กรัม)
	F	คือ ปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ใช้ไป 1 ฟาราเดย์ (แอมแปร์นาที) (1 ฟาราเดย์ = 1608 แอมแปร์นาที)
	AW	คือ น้ำหนักอะตอมของโลหะที่ไปเกาะ
	n	คือ ค่าเวเลนซ์ของโลหะที่ไปเกาะ

และสามารถหาความหนาของโลหะที่ไปเกาะบนชิ้นงาน ได้ดังสมการที่ 2.11

$$D = \frac{M}{V} \quad (2.11)$$

โดยที่  $V = Ah$

ดังนั้น  $h = \frac{M}{AD}$

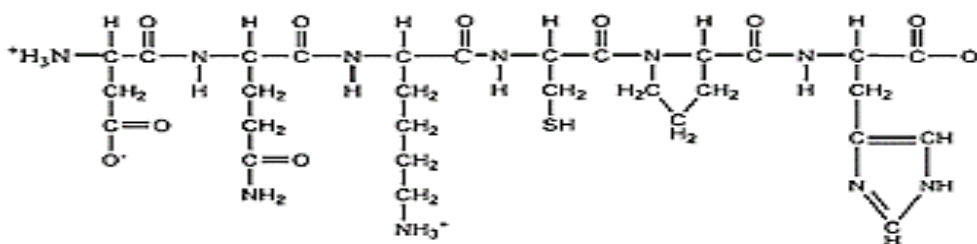
เมื่อ	D	คือ ความหนาแน่นของโลหะที่ไปเกาะ (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)
	M	คือ น้ำหนักของโลหะที่ไปเกาะ (กรัม)
	V	คือ ปริมาตรของโลหะที่ไปเกาะ (ลูกบาศก์เซนติเมตร)
	A	คือ พื้นที่ผิวของชิ้นงานที่ไปเกาะ (ตารางเซนติเมตร)
	h	คือ ความหนาของโลหะที่ไปเกาะ (เซนติเมตร)

## 2.4 สารเติมแต่งประเภทกัมที่ใช้ในกระบวนการชุบเคลือบด้วยไฟฟ้า

กัม (Gum) เป็นโพลีแซคคาไรด์ที่จัดอยู่ในกลุ่มไฮโดรคอลลอยด์ มีโครงสร้างประกอบด้วย โพลีเมอร์ของน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว ชนิดเดียวหรือหลายชนิด สามารถพบได้ทั่วไปในส่วนต่าง ๆ ของสัตว์ ผลไม้ จุลินทรีย์ และสาหร่าย เป็นต้น มีราคาถูก หาง่าย ไม่มีพิษ สามารถย่อยสลายได้ เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม [24] โดยกัมสามารถแบ่งประเภทได้ดังนี้

### 2.4.1 กัมที่มาจากสัตว์ [25]

ในงานวิจัยนี้สนใจกัมที่มาจากสัตว์คือ เจลาติน โดยเจลาติน (Gelatin) ได้มาจากการสกัดคอลลาเจนของสัตว์ในส่วน เนื้อเยื่อในหนัง กระดูกและเอ็น โดยการใช้กรดหรือด่างและสกัดด้วยน้ำร้อน เจลาตินเป็นโพลีเมอร์ของสายพอลิเพปไทด์คือ สายโซ่แอลฟา ( $\alpha$ -chain) ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของคอลลาเจน ที่หมุนพันเป็นเกลียว มีขนาดมวลโมเลกุลโดยประมาณ 50,000-200,000 ล้านตัน ทั้งนี้เจลาติน มีกรดอะมิโนเป็นหน่วยย่อย ได้แก่ ไกลซีน โพรลีน และไฮดรอกซีโพรลีน ดังโครงสร้างที่แสดง ในรูปที่ 2.13

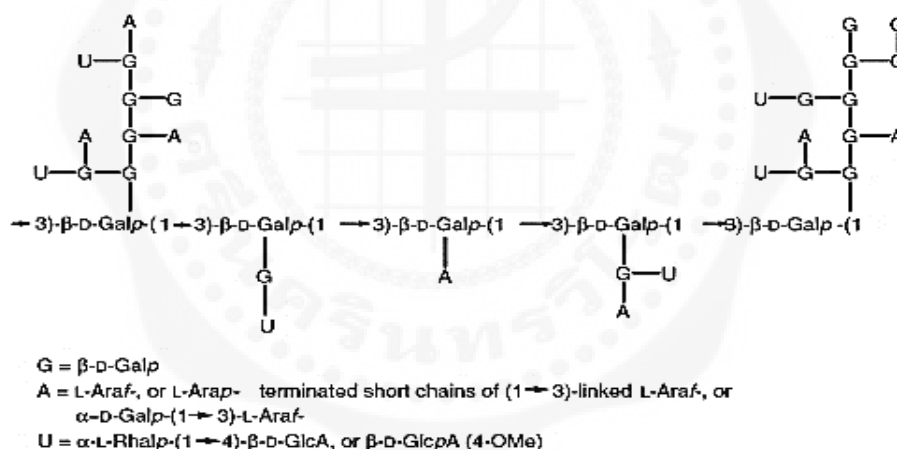


รูปที่ 2.13 แสดงโครงสร้างเจลาติน (ที่มา : Liu et al. 2011)

เจลาตินแบ่งออกเป็น 2 ชนิดคือ เจลาตินชนิดเอและบี โดยจะแบ่งชนิดของเจลาตินตามการปรับสภาพที่เหมาะสมกับวัตถุดิบแต่ละชนิด สำหรับการสกัดเจลาติน เจลาตินที่ได้จากการปรับสภาพด้วยกรด มีจุดไอโซอิเล็กทริกอยู่ในช่วง 7 ถึง 9 เจลาตินที่ได้เรียกว่า เจลาตินชนิดเอ (Gelatin type-A) และเจลาตินที่ได้จากการปรับสภาพด้วยด่างมีจุดไอโซอิเล็กทริกอยู่ในช่วง 4 ถึง 5 เจลาตินที่ได้เรียกว่า เจลาตินชนิดบี (Gelatin type-B)

#### 2.4.2 กัมที่มาจากยางพืชมะพร้าว [26]

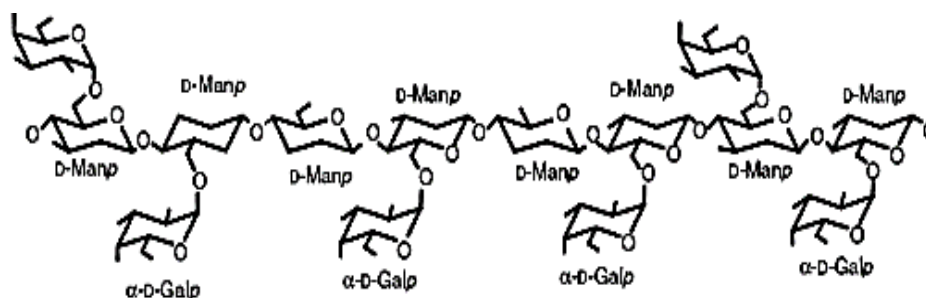
ในงานวิจัยนี้สนใจกัมที่มาจากยางพืชมะพร้าวคือ กัมอะราบิก โดยกัมอะราบิก (Gum arabic) เป็นยางที่ได้จากต้นไม้สกุลอะคาเซีย โดยน้ำยางจะไหลเกาะกันเป็นก้อน เมื่อกระทบกับความร้อนจากแสงแดดจะทำให้แห้งและแข็งตัว อยู่ตามกิ่งก้านและลำต้นของพืช มีตั้งแต่สีขาวใสจนถึงเหลืองรูปทรงคล้าย หยอดน้ำและทรงกลมรี โครงสร้างโมเลกุลของกัมอะราบิก เป็นเฮเทอโรพอลิแซคคาไรด์ที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่และซับซ้อน ประกอบด้วยกรดกลูคูโรนิก น้ำตาลกาแล็กโทส แรมโนสและแอราบิโนส นอกจากนี้โมเลกุลยังประกอบด้วยกรดอะมิโน ดังโครงสร้างที่แสดงในรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 แสดงโครงสร้างกัมอะราบิก (ที่มา : ปิยะนุช กิจเจริญ. 2555)

#### 2.4.3 กัมที่มาจากเมล็ดพืชมะพร้าว [27]

ในงานวิจัยนี้สนใจกัมที่มาจากเมล็ดพืชมะพร้าวคือ กัวกัม โดยกัวกัม (Guar gum) สกัดได้จากเนื้อในเมล็ดของเมล็ดกัวกัม มีถิ่นกำเนิดในประเทศอินเดียและปากีสถาน กัวกัมเป็นโพลีแซคคาไรด์ประเภทเฮเทอโรพอลิแซคคาไรด์ ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ของกาแล็กโทส แมนแนน ซึ่งประกอบด้วยโมเลกุลของน้ำตาลแมนโนส ต่อกันด้วยพันธะไกลโคไซด์ที่ตำแหน่ง บีตา1, 4 และมีกิ่งแขนงของน้ำตาลกาแล็กโทส ซึ่งต่อกันด้วยพันธะไกลโคไซด์ที่ตำแหน่งแอลฟา1, 6 ดังแสดงในรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 แสดงโครงสร้างก้ำกั้ม (ที่มา : ปิยะนุช กิจเจริญ. 2555)

## 2.5 การวิเคราะห์ชั้นเคลือบ

สำหรับการวิเคราะห์ชั้นเคลือบในการวิจัยในครั้งนี้จะใช้ Scanning Electron Microscope (SEM) เพื่อศึกษาสัณฐานวิทยาของชั้นเคลือบ ตรวจสอบชั้นเคลือบด้วยการวัดความแข็งแบบวิกเกอร์ ด้วยเครื่อง Vickers hardness tester และทำการวัดสีด้วยเครื่อง Colorimeter ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

### 2.5.1 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM)

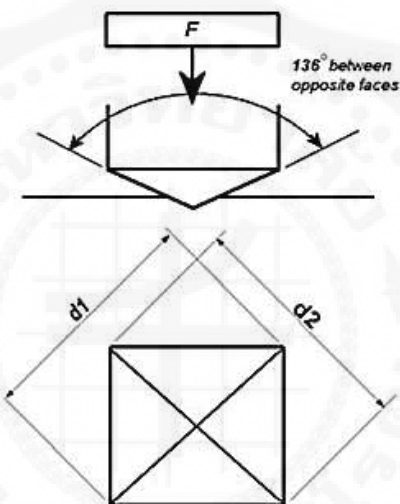
กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด แสดงในรูปที่ 2.8 ใช้สำหรับศึกษารายละเอียดของโครงสร้างภายนอกหรือผิวของตัวอย่าง มีกำลังขยายตั้งแต่ 20 ถึง 30,000 ส่องผลให้สามารถวิเคราะห์ผิวที่ละเอียดได้ แสดงภาพ 3 มิติ ทำให้สามารถแยกลักษณะของพื้นผิวชิ้นงานได้ดีอีกด้วย และหากชิ้นงานไม่นำไฟฟ้าก็ต้องเคลือบด้วยคาร์บอนหรือทองคำบนผิวชิ้นงาน ดังแสดงในรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16 แสดงกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (ที่มา : Jelol. 2020)

### 2.5.2 เครื่องวัดความแข็งแบบวิกเกอร์ (Vickers hardness tester)

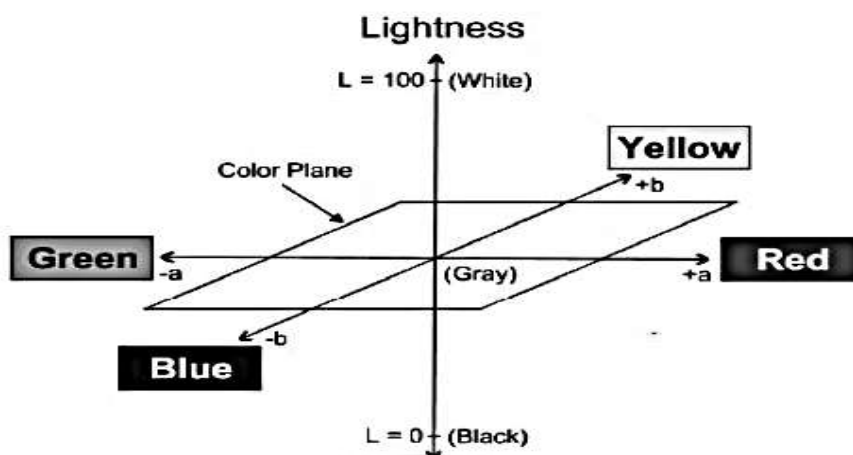
การทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ มีช่วงการวัดที่กว้างที่สุด ครอบคลุมความต้องการในการวัดความแข็งทั้งหมดและสามารถประยุกต์ใช้งานกับวัสดุเกือบทุกชนิดได้ด้วย scale เดียว เมื่อเปรียบเทียบกับ การวัดแบบ Brinell hardness จะได้ผลการวัดที่คงที่ ไม่เปลี่ยนแปลงตามแรงกด ซึ่งการวัดความแข็งแบบวิกเกอร์ เป็นการวัดค่าความแข็งโดยออกแรงกดไปยังชิ้นงานผ่านหัวกดซึ่งทำจากเพชร มีลักษณะเป็นพีระมิดฐานสี่เหลี่ยมจัตุรัส มุมยอด 136 องศา กดลงบนผิวชิ้นงานที่เรียบในแนวตั้งฉาก ภายใต้แรงกดมากกว่า 1 กิโลกรัมแรง จะอยู่ในระดับ Macrohardness สำหรับแรงกดที่น้อยกว่าหรือเท่ากับ 1 กิโลกรัมแรง จะอยู่ในระดับ Microhardness ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้แรงกด 0.9807 นิวตัน (0.1 กิโลกรัมแรง) ในการทดสอบความแข็งของชิ้นงาน ดังแสดงในรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 แสดงลักษณะการทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์(ที่มา : Cal-laboratory. 2015)

### 2.5.3 เครื่องวัดสี (Colorimeter)

การวัดค่าเป็นตัวเลขได้มีการพัฒนาโดย International Commission on Illumination (CIE) ซึ่งระบบสี CIE  $L^*a^*b^*$  (CIELAB) เป็นระบบการวัดสีที่คำนึงถึงองค์ประกอบ 3 ประการ คือ 1) Light source คือ แหล่งกำเนิดแสง เช่น แสงมาตรฐาน D 65 2) Color object คือ วัตถุมีสี และ 3) Observer คือ ผู้สังเกตการณ์ CIELAB เป็นระบบการวัดสีที่พัฒนาจากระบบ CIE Tristimulus value ( $x$ ,  $y$  และ  $z$ ) และ CIE Chromaticity coordinates ( $x$ ,  $y$  และ  $Y$ ) โดยปรับปรุงและเปลี่ยนแปลงจนสามารถบอกความแตกต่างของสีได้อย่างสม่ำเสมอและใกล้เคียงกับความแตกต่างของสีที่ตามองเห็น ปัจจุบันสมการที่ใช้ในการระบุสีเป็นที่ยอมรับกว้างขวางคือ CIELAB-1976 ซึ่งมีลักษณะ Color space ดังรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.18 CIELAB 1976 ซึ่งแสดง  $L^*$   $a^*$   $b^*$  color space (ที่มา : Appendix. 2010)

โดยที่  $L^*$  แทนค่าสำหรับความสว่าง ถ้าหากชิ้นงานมีค่าความสว่างมาก ค่าตัวเลขในการวัดชิ้นงาน จะมีค่าเป็นบวกและมีตัวเลขมาก หากว่าความสว่างมีน้อยตัวเลขในการวัดผลก็จะมีค่าที่เข้าใกล้ศูนย์  $a^*$  แทนค่าของสีแดงและสีเขียว ถ้าตัวเลขมีค่าติดลบ แสดงว่าชิ้นงานมีสีออกไปทางสีเขียว ถ้าตัวเลขมีค่าเป็นบวก แสดงว่าชิ้นงานมีสีออกไปทางสีแดง และ  $b^*$  แทนค่าของสีเหลืองและสีน้ำเงิน ถ้าตัวเลขมีค่าติดลบ แสดงว่าชิ้นงานมีสีออกไปทางสีน้ำเงิน ถ้าตัวเลขมีค่าเป็นบวก แสดงว่าชิ้นงานมีสีออกไปทางเหลือง ในการแสดงค่าเป็นผลกราฟจะให้  $a^*$  แทนแกน X และ  $b^*$  แทนแกน Y

## 2.6 การทบทวนวรรณกรรม

จากการศึกษาของ Birlik และคณะ [28] ได้ศึกษาการเติมปริมาณของนิกเกิลคลอไรด์ 0.08 0.13 0.17 0.21 และ 0.25 โมลาร์ ในอ่างชุบแบบวัตต์ของการเคลือบนิกเกิลลงบนเหล็ก พบว่าสัณฐานวิทยาไม่แตกต่างกันมากนัก มีลักษณะเกรนละเอียดและนิกเกิลที่เข้าไปเคลือบมีรูปร่างเป็นทรงกลมขนาดเล็ก ความแข็งอยู่ระหว่าง 231 ถึง 262 HV เมื่อเติมนิกเกิลคลอไรด์ 0.17 โมลาร์ มีความแข็งมากที่สุด ซึ่งมีค่า 262 HV เมื่อเติมนิกเกิลคลอไรด์เป็น 0.25 โมลาร์ พบว่าความแข็งต่ำสุดมีค่า 231 HV นอกจากนี้ยังพบว่าความต้านทานการกัดกร่อนเมื่อเติมนิกเกิลคลอไรด์ 0.17 โมลาร์ ให้ผลดีที่สุด โดยค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนสูงและค่ากระแสไฟฟ้าต่ำ

Srijan และคณะ [29] ได้ศึกษาผลกระทบที่มีต่อการเคลือบนิกเกิลลงบนทองแดงโดยใช้ศักย์ไฟฟ้า 3 ถึง 9 โวลต์ พบว่าเมื่อเพิ่มศักย์ไฟฟ้าตั้งแต่ 6 โวลต์ ผิวเคลือบจะมีลักษณะของสัณฐานวิทยาคล้ายดอกกะหล่ำ เริ่มมีรูพรุนเกิดขึ้นและมีขนาดใหญ่ขึ้นเมื่อศักย์ไฟฟ้า 9 โวลต์ สำหรับเวลาในการเคลือบนิกเกิล

มีการศึกษาที่ 2 10 30 60 180 300 และ 600 วินาที พบว่าเมื่อใช้เวลานานเกินไปจะเกิดการรวมตัวของนิกเกิลเพิ่มขึ้น และจากการศึกษาของ Amel และคณะ [30] ได้เปรียบเทียบความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าของการเคลือบนิกเกิลลงบนนิกเกิลในอ่างชุบแบบวัตต์โดยใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 10 20 50 70 และ 100 mA/cm<sup>2</sup> พบว่าเมื่อใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 10 mA/cm<sup>2</sup> เกรนที่ได้มีขนาดเล็กที่สุด มีความสม่ำเสมอ ความพรุนต่ำและมีความแข็งมากที่สุดซึ่งมีค่า 355 HV แต่เมื่อเพิ่มความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าพบว่าเกรนมีขนาดใหญ่ขึ้น ความแข็งลดลงเมื่อใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 50 mA/cm<sup>2</sup> โดยมีค่าความแข็งอยู่ที่ 245 HV เนื่องจากเมื่อความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้นเรื่อย ๆ จะเพิ่มอัตราการสะสม แต่ลดความสามารถในการตกตะกอนของนิกเกิล

Hiroaki และคณะ [31] ได้เปรียบเทียบการเคลือบโดยมีการใช้สารเติมแต่งอินทรีย์ ได้แก่ โพลีเอทิลีนไกลคอล เจลาติน สเตียริลไดเอทิลเบนซิล แอมโมเนียมคลอไรด์ แซ็กคารินและโซเดียมลอริลซัลเฟต ในอ่างชุบโซเดียมซัลเฟตของการเคลือบสังกะสีลงบนเหล็กแผ่น จากการศึกษาสถาบันวิทยาพบว่าเมื่อเติมสารเติมแต่งอินทรีย์มีจำนวนการสะสมของสังกะสีเพิ่มขึ้น ขนาดเกรนเล็กลงกว่าเมื่อเทียบกับการไม่เติมแต่งสารอินทรีย์ลงในอ่างชุบ ผิวชุบที่ได้จากอ่างชุบที่มีสารเติมแต่งอินทรีย์ประเภทเจลาติน พื้นผิวมีความหยาบกร้านน้อยที่สุด เนื่องจากการวางแผนผลึกเพราะการเพิ่มขึ้นของแนวระนาบ {0001} เจลาตินจะสร้างชั้นดูดซับปิดพื้นผิวและยับยั้งการเจริญเติบโตของผลึก และ Schreiber และคณะ [32] ได้เปรียบเทียบสารเติมแต่งจากกระดูกสัตว์ โพลีเอทิลีน อะวิโทนและไทโอยูเรีย ในอ่างชุบกรดซัลฟิวริกของการเคลือบทองแดงลงบนสแตนเลส เกรด 316 จากการศึกษา สถาบันวิทยาพบว่า เมื่อเติมสารเติมแต่งจากกระดูกสัตว์ มีความหยาบต่ำ แต่เมื่อเพิ่มเวลาการเคลือบจะทำให้ก้าวจากกระดูกสัตว์มีความหยาบมากขึ้นประมาณ 580 นาโนเมตร เนื่องจากมีความเสถียรต่ำในสารละลาย อิเล็กโทรไลต์ที่เป็นกรด ต่อมา Honorata และคณะ [33] ได้ศึกษาสารเติมแต่งทำให้เจลาตินและกัมอะราบิกในอ่างชุบกรดซัลฟิวริกของการเคลือบสังกะสี-ซิลิกอนคาร์ไบด์ พบว่าเจลาตินมีการสะสมของซิลิกอนคาร์ไบด์มากที่สุด รองลงมาเป็นกัมอะราบิก ทั้งสองมีลักษณะเฉพาะโดยมีน้ำหนักโมเลกุลสูงและโครงสร้างแบบกิ่ง จึงชี้ให้เห็นว่าขนาดและโครงสร้างของโมเลกุลขนาดใหญ่เหล่านี้ อาจส่งผลต่อการรวมตัวสามารถครอบคลุมโลหะที่มีพื้นที่กว้างกว่าได้ ซึ่งส่งผลให้เจลาตินและกัมอะราบิกมีการสะสมอนุภาคซิลิกอนคาร์ไบด์ได้ปริมาณมากบนพื้นผิว

Tsing-Wei และคณะ [34] ได้ศึกษาปริมาณของสารเติมแต่งเจลาติน 1 3 และ 5 ppm ในอ่างชุบกรดซัลฟิวริกของการเคลือบทองแดงลงบนเส้นลวดทองแดง จากการศึกษาสถาบันวิทยาพบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณสารเติมแต่งเจลาติน ทำให้เกรนมีขนาดเล็กลง การกระจายตัวสม่ำเสมอขึ้น มีความหยาบน้อยกว่าที่ไม่เติมสารเติมแต่ง เนื่องจากการเติบโตของนิวเคลียสของทองแดงลดลงและสร้างชั้นดูดซับเจลาตินที่เพิ่มขึ้นปกคลุมพื้นผิวทำให้ปิดกั้นแอคทีฟไซต์และยับยั้งการเติบโตของผลึกของตะกอนทำให้ซึ่ง

ส่งผลทำให้รูปร่างของพื้นผิวมีขนาดเกรนลดลง Charline และคณะ [35] ได้ศึกษาปริมาณของสารเติมแต่ง เจลาตินในอ่างชุบกรดซัลฟิวเรอของการเคลือบทองแดง-ดีบุกลงบนแพลตินัม จากการศึกษาสัณฐานวิทยา พบว่าเมื่อเติมสารเติมแต่งอินทรีย์ เจลาติน 1 กรัมต่อลิตร มีความเป็นเนื้อเดียวกัน เกรนถูกปรับเปลี่ยน การก่อตัวของผลึกมีความสม่ำเสมอ มีเกรนขนาดเล็ก 10 ถึง 15 ไมโครเมตร เนื่องจากเกิดนิวเคลียสขึ้นทันทีและสามารถยับยั้งการเติบโตของผลึกเมื่อเปรียบเทียบกับ 5 กรัมต่อลิตร



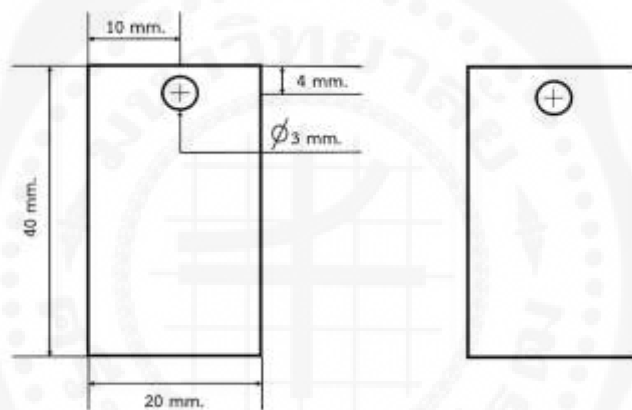
## บทที่ 3

### วิธีการดำเนินการวิจัย

#### 3.1 วัสดุและสารเคมีที่ใช้ในการดำเนินการวิจัย

##### 3.1.1 ชิ้นงานที่ใช้ในการดำเนินการวิจัย

ในงานวิจัยนี้ใช้เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ SS400 เป็นชิ้นงาน หรือ Substrates โดยมีการเตรียมชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ SS400 ขนาดกว้าง 20 มิลลิเมตร ยาว 40 มิลลิเมตรหนา 2.5 มิลลิเมตร และเจาะรูขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 3.1 โดยที่เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ SS400 มีส่วนประกอบเคมี ดังแสดงในตารางที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แสดงขนาดของชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ SS400

ตารางที่ 3.1 ส่วนประกอบทางเคมี (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) ของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ SS400

ชิ้นงาน	Al	Si	P	S	Mn	Fe
เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ SS400	0.0402	0.0386	0.0089	0.0083	0.5400	99.4000

### 3.1.2 สารเคมีที่ใช้ในการดำเนินการวิจัย

1. นิกเกิลซัลเฟต
2. นิกเกิลคลอไรด์
3. โซเดียมคลอไรด์
4. กรดบอริก
5. กรดไฮโดรคลอริก
6. อะซิโตน
7. เจลาติน
8. กัมอะราบิก
9. กัวกัม
10. น้ำกลั่น

## 3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการดำเนินการวิจัย

### 3.2.1 อุปกรณ์สำหรับเตรียมผิวชิ้นงาน

1. เครื่องขัดชิ้นงานแบบจานหมุน ใช้เป็นอุปกรณ์ในการขัดหยาบขัดละเอียดและขัดเงา
2. กระดาษทรายเบอร์ 180 320 600 และ 1200
3. ผ้าขัด ใช้สำหรับขัดเงา
4. ผงอลูมินา 0.3 และ 1 ไมครอน
5. เครื่องล้างอัลตราโซนิก

### 3.2.2 อุปกรณ์สำหรับกระบวนการชุบเคลือบ

1. แผ่นนิกเกิล เป็นตัวล่ออยู่ที่ขั้วบวก
2. DC Power Supply เป็นแหล่งกำเนิดกระแสไฟฟ้าตรง (D.C.) หรือแปลงกระแสไฟฟ้ากระแสสลับ (A.C.) ที่ใช้ตามบ้านให้เป็นกระแสไฟฟ้าตรง
3. ปีกเกอร์
4. ลวดทองแดง เพื่อแขวนชิ้นงานให้ชิ้นงานนำไฟฟ้า
5. สายไฟฟ้าหุ้มพลาสติก
6. เต้าไฟฟ้า (Heater)
7. เทอร์โมมิเตอร์
8. ราวโลหะทำจากสแตนเลส สตีล

9. กระดาษกรองเบอร์ 4 ขนาด 90 มิลลิเมตร
10. ภาชนะบรรจุน้ำที่แยกกรดและต่าง
11. เครื่องชั่ง
12. ไตร่เป่าผม

### 3.2.3 เครื่องมือสำหรับทดสอบ

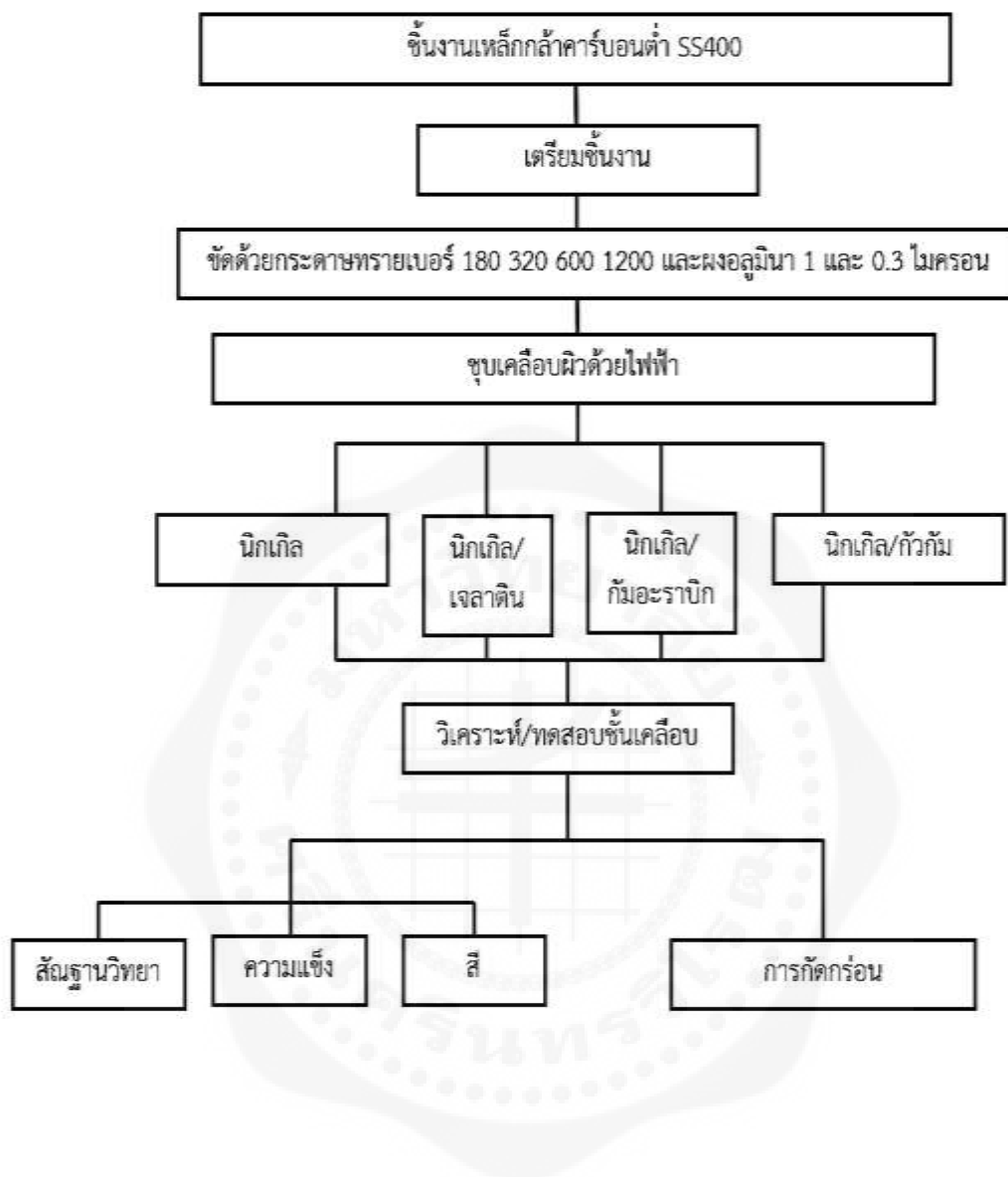
1. กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical Microscope, OM)
2. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM)
3. เครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (X-Ray Fluorescence Spectrometry, XRF)
4. เครื่องวัดความแข็งแบบวิกเกอร์ (Vickers hardness tester)
5. เครื่องวัดสี (Colorimeter)

### 3.2.4 เครื่องมือสำหรับทดสอบกระบวนการกัดกร่อน

1. ปีกเกอร์ 5 ลิตร
2. ฝาปิด

## 3.3 วิธีดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการวิจัยเพื่อศึกษาอิทธิพลของสารเติมแต่งประเภทกัม ในการชุบนิเกิลด้วยไฟฟ้า บนเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ SS400 โดยศึกษาการเตรียมผิวชิ้นงาน การชุบเคลือบด้วยไฟฟ้า และการวิเคราะห์ชิ้นงาน โดยมีขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยตามแผนภาพระเบียบวิธีการดำเนินงานวิจัย ดังแสดงในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 แสดงแผนภาพระเบียบวิธีการดำเนินงานวิจัย

### 3.3.1 ขั้นตอนการเตรียมผิวชิ้นงาน

1. ขัดชิ้นงานเหล็กด้วยเครื่องขัดแบบจานหมุน โดยทำการขัดหยาบด้วยกระดาษทรายเบอร์ 180 320 600 และ 1200 ตามลำดับ จากนั้นขัดเงาด้วยผ้าขัดและผงอลูมินาขนาด 0.3 และ 1 ไมครอน ตามลำดับ
2. ล้างด้วยน้ำ DI 2 ครั้ง
3. ตรวจสอบความขรุขระด้วยกล้องจุลทรรศน์ทางแสง
4. นำลวดทองแดงมาขัดด้วยกระดาษทรายและผูกกับชิ้นงาน
5. ล้างชิ้นงานด้วยอะซิโตน
6. ล้างทำความสะอาดชิ้นงานด้วยเครื่องอัลตราโซนิค ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที
7. ล้างด้วยน้ำ DI 2 ครั้ง
8. จุ่มกรดไฮโดรคลอริกเจือจาง เป็นเวลา 5 วินาที เพื่อปรับสภาพผิว
9. ล้างด้วยน้ำ DI 2 ครั้ง

### 3.3.2 ขั้นตอนการชุบเคลือบผิวด้วยไฟฟ้า

1. ทำการผสมสารละลายอิเล็กโทรไลต์ โดยมีส่วนผสม ดังนี้

นิกเกิลซัลเฟต	250	กรัมต่อลิตร
นิกเกิลคลอไรด์	40	กรัมต่อลิตร
กรดบอริก	40	กรัมต่อลิตร
ค่าความเป็นกรดต่าง	3.5	
แรงดันไฟฟ้า	5	โวลต์
อุณหภูมิ	40	องศาเซลเซียส
2. ผูกชิ้นงานไว้กับราวโลหะเพื่อยึดชิ้นงาน
3. นำสายไฟฟ้าหุ้มพลาสติกต่อระหว่างขั้วแบตเตอรี่กับแผ่นนิกเกิลเป็นขั้วบวกและชิ้นงานเป็นขั้วลบ
4. ทำการชุบเคลือบผิวชิ้นงาน
  - ก. เบื้องต้นทำการทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการเคลือบผิวนิกเกิล ให้มีสมบัติที่ดีที่สุดก่อนที่จะศึกษาตัวแปรของสารเติมแต่ง
  - ข. เมื่อได้สภาวะการเคลือบนิกเกิลที่เหมาะสมแล้วทำการเติมสารเติมแต่งแต่ละชนิดปริมาณ 1 กรัมต่อลิตร ลงในน้ำยาชุบ
5. นำชิ้นงานต้มในน้ำร้อนที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที เพื่อให้สีผิวชิ้นงานมีความสม่ำเสมอ แล้วเป่าให้แห้ง

### 3.3.3 การตรวจสอบผิวชั้นเคลือบ

นำชิ้นงานที่ทำการชุบเคลือบเสร็จไปวิเคราะห์ผิวเคลือบที่ได้ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด วัดความแข็งแบบวิกเกอร์และวัดสีของผิวเคลือบ

### 3.3.4 การทดสอบการกัดกร่อน

การกัดกร่อนแบบจุ่มในสถานะเกลือตามมาตรฐาน ASTM G31-72 มีขั้นตอนดังนี้

- 1) ทำความสะอาดชิ้นงานด้วยอะซิโตนเพื่อล้างสิ่งสกปรก
- 2) ล้างด้วยน้ำ DI 2 ครั้ง และเป่าให้แห้ง
- 3) นำชิ้นงานมาชั่งน้ำหนัก และบันทึกผลที่ได้
- 4) ชิ้นงานทั้งหมดจะถูกแช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 3.5% ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 วัน โดยทำในระบบปิด
- 5) ทำการเก็บชิ้นงานทดสอบทุก ๆ 3 วัน โดยนำชิ้นงานมาล้างออกไซด์ด้วยกรดซัลฟิวริก ความเข้มข้น 10% ด้วยเครื่องอัลตราโซนิก
- 6) เป่าให้แห้งและชั่งน้ำหนักพร้อมบันทึกผล

## บทที่ 4

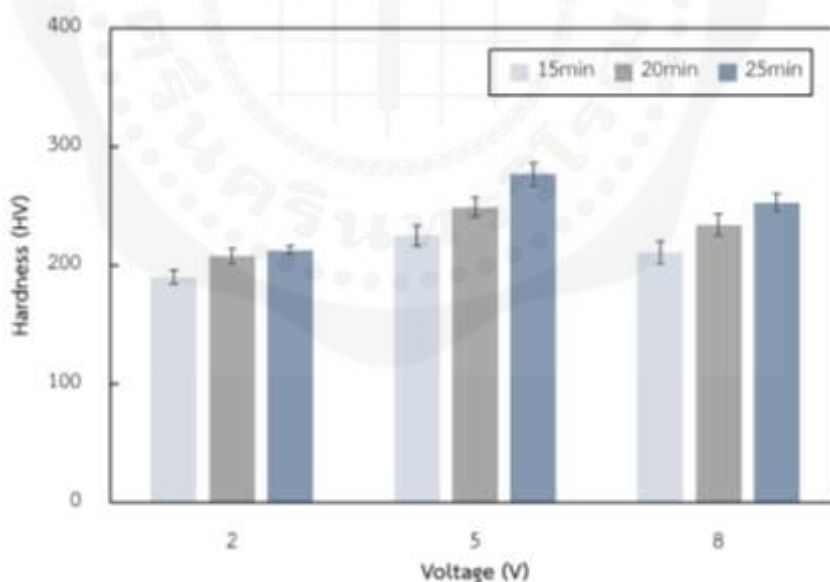
### ผลการวิจัย และอภิปรายผล

จากการเตรียมชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ SS400 เมื่อทำการชุบเคลือบนิกเกิลและการชุบเคลือบนิกเกิลโดยใส่สารเติมแต่งประเภทกัม ในสภาวะต่าง ๆ จากนั้นได้ทำการทดสอบความแข็ง วิเคราะห์ลักษณะผิวของชิ้นงานจากการสังเกตด้วยตาเปล่า วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของการเคลือบนิกเกิลกับสารเติมแต่งต่างชนิดด้วย SEM-EDX วิเคราะห์พื้นผิวของการเคลือบนิกเกิลกับสารเติมแต่งต่างชนิดด้วย SEM วัดสีของผิวเคลือบและทดสอบการกัดกร่อนแบบจุ่มแซ่ ซึ่งมีรายละเอียด ดังนี้

#### 4.1 การทดสอบความแข็ง

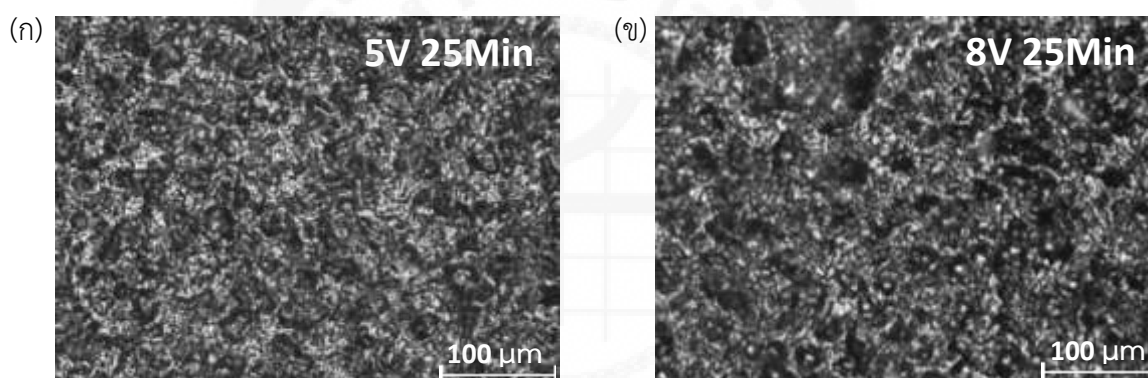
##### 4.1.1 การทดสอบความแข็งของการเคลือบผิวนิกเกิลที่สภาวะแตกต่างกัน

ในเบื้องต้น ผู้วิจัยได้ทำการทดลองการชุบเคลือบผิวนิกเกิล โดยไม่ใส่สารเติมแต่งประเภทกัม โดยมีการศึกษาสภาวะที่แตกต่างกัน ได้แก่ แรงดันไฟฟ้าที่ 2 5 และ 8 โวลต์ เป็นเวลา 15 20 และ 25 นาที



รูปที่ 4.1 แสดงค่าความแข็งแบบวิกเกอร์ของการเคลือบนิกเกิลโดยใช้แรงดันไฟฟ้า 2 5 และ 8 โวลต์ เป็นเวลา 15 20 และ 25 นาที

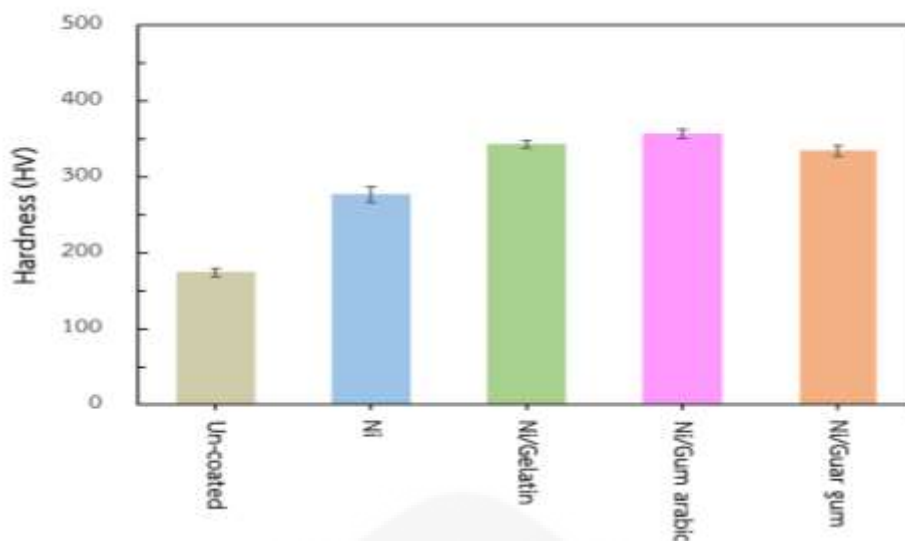
ค่าความแข็งแบบวิกเกอร์ของการเคลือบนิกเกิลที่สภาวะแรงดันไฟฟ้าและเวลาต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.1 พบว่าเมื่อใช้แรงดันไฟฟ้าที่ 2 5 และ 8 โวลต์ จะมีความแข็งเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มระยะเวลาในการชุบเคลือบนิกเกิล ในการชุบที่ 5 โวลต์ เป็นเวลา 25 นาที ให้ค่าความแข็งสูงสุดคือ  $277 \pm 9.98$  HV ส่วนค่าความแข็งต่ำที่สุดคือ  $190 \pm 5.81$  HV ในการชุบที่ 2 โวลต์ เป็นเวลา 15 นาที เมื่อเพิ่มระยะเวลาในการเคลือบมากขึ้น ความแข็งมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นไปด้วย เนื่องจากมีการสะสมผิวเคลือบให้หนามากขึ้น อย่างไรก็ตามเมื่อเพิ่มแรงดันไฟฟ้าขึ้นเป็น 8 โวลต์ ค่าความแข็งมีแนวโน้มลดลงเมื่อเทียบกับ 5 โวลต์ และเมื่อสังเกตภาพจากกล้องจุลทรรศน์ทางแสง พบว่าผิวเคลือบนิกเกิลที่ใช้แรงดันไฟฟ้า 8 โวลต์ มีรูพรุนมากกว่า ดังแสดงในรูปที่ 4.2 ซึ่งอาจเป็นสาเหตุทำให้ความแข็งลดลง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Fan และคณะ [37] ที่ได้ศึกษาการเคลือบนิกเกิลที่แรงดันไฟฟ้า 1 ถึง 5 โวลต์ และพบว่าเมื่อใช้แรงดันไฟฟ้าเพิ่มขึ้นสูงถึง 5 โวลต์ มีความแข็งลดลง เนื่องจากสัณฐานวิทยา มีความไม่สม่ำเสมอและมีรูพรุนเป็นจำนวนมาก เมื่อเทียบกับที่ 4 โวลต์ มีความแข็งสูงที่สุดเนื่องจากมีรูพรุนเกิดขึ้นน้อยกว่า



รูปที่ 4.2 แสดงผิวเคลือบของนิกเกิลด้วยกล้องจุลทรรศน์ทางแสง โดยใช้แรงดันไฟฟ้า (ก) 5 โวลต์ เป็นเวลา 25 นาที และ (ข) 8 โวลต์ เป็นเวลา 25 นาที

#### 4.1.2 การทดสอบความแข็งของการเคลือบนิกเกิลกับสารเติมแต่งต่างชนิด

เมื่อได้สภาวะที่เหมาะสมสำหรับการชุบเคลือบนิกเกิล คือ แรงดันไฟฟ้า 5 โวลต์ เป็นเวลา 25 นาที จากนั้นทำการชุบเคลือบนิกเกิล โดยเติมสารเติมแต่งประเภทกัมต่างชนิด ได้แก่ เจลาติน กัมอะราบิกและกัวกัม จากการทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ โดยใช้แรงกด 980.7 มิลลินิวตัน เป็นเวลา 15 วินาที พบว่าการเคลือบนิกเกิลด้วยสารเติมแต่งประเภทกัมให้ค่าความแข็งที่เพิ่มขึ้นโดยค่าความแข็งสูงสุดคือ กัมอะราบิก มีค่า  $357 \pm 6.08$  HV ส่วนเจลาตินและกัวกัม มีค่าความแข็ง  $343 \pm 4.44$  HV และ  $335 \pm 6.78$  HV ตามลำดับ สำหรับกรณีที่ไม่เติมสารเติมแต่งและไม่ได้ผ่านการเคลือบผิว มีค่าความแข็ง  $277 \pm 9.98$  HV และ  $174 \pm 5.35$  HV ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 แสดงค่าความแข็งชิ้นงานที่เคลือบผิวด้วยนิกเกิลร่วมกับสารเติมแต่งชนิดต่าง ๆ เปรียบเทียบกับชิ้นงานที่ไม่เติมสารเติมแต่งและไม่มีการเคลือบผิว โดยใช้แรงดันไฟฟ้า 5 โวลต์ เป็นเวลา 25 นาที

## 4.2 การวิเคราะห์พื้นผิว

นำชิ้นงานที่ชุบเคลือบผิวด้วยนิกเกิล ที่สภาวะแตกต่างกันและที่เติมสารเติมแต่งประเภทกัมชนิดต่าง ๆ มาเปรียบเทียบลักษณะผิวของชิ้นงานจากการสังเกตด้วยตาเปล่า และวิเคราะห์สัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ซึ่งมีรายละเอียด ดังนี้

4.2.1 การวิเคราะห์ลักษณะผิวของชิ้นงานจากการสังเกตด้วยตาเปล่าของการเคลือบนิกเกิลที่สภาวะแตกต่างกัน

ลักษณะผิวของชิ้นงานจากการสังเกตด้วยตาเปล่าของการเคลือบนิกเกิล ที่แรงดันไฟฟ้า 2 และ 8 โวลต์ เป็นเวลา 15 20 และ 25 นาที พบว่าเมื่อใช้แรงดันไฟฟ้า 2 และ 5 โวลต์ ที่เวลา 15 20 และ 25 นาที ผิวเคลือบมีลักษณะเรียบ แต่ที่แรงดันไฟฟ้า 8 โวลต์ ผิวเคลือบด้านข้างมีลักษณะขรุขระ ยิ่งใช้ระยะเวลาในการเคลือบนานขึ้นทำให้ผิวเคลือบมีลักษณะหนา และขรุขระขึ้นด้วย สาเหตุมาจากการใช้แรงดันไฟฟ้า และระยะเวลาในการเคลือบที่นานเกินไปส่งผลให้อัตราการเคลือบของนิกเกิลสูงขึ้น ทำให้เกรนเกิดการเติบโตขึ้นเรื่อย ๆ เมื่อเพิ่มระยะเวลา ดังแสดงในตารางที่ 4.1 ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Willi และคณะ [38] ที่ได้ศึกษาการเคลือบนิกเกิลลงบนทองแดงโดยใช้แรงดันไฟฟ้า 1 ถึง 5 โวลต์ พบว่าเมื่อใช้แรงดันไฟฟ้าที่ 1 โวลต์ มีความหนาของผิวชั้นเคลือบ  $7.40 \pm 0.07 \times 10^5$  เซนติเมตร และเมื่อแรงดันไฟฟ้าเพิ่มขึ้นสูงถึง 5 โวลต์ มีความหนาของผิวชั้นเคลือบ  $96.35 \pm 0.07 \times 10^5$  เซนติเมตร แสดงให้เห็นว่าความหนาของผิวชั้นเคลือบแปรผันกับแรงดันไฟฟ้า เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของแรงดันไฟฟ้า ทำให้เพิ่มจำนวนอิเล็กตรอนที่ไหลจากขั้วแอโนดไปยังขั้วแคโทด เกิดการเพิ่มขึ้นของนิกเกิลไอออน

และยังระยะเวลาในการชุบเคลือบนานขึ้นทำให้ความหนาเพิ่มขึ้นมาจากการสะสมของนิกเกิลไอออนที่เพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ

**ตารางที่ 4.1** แสดงลักษณะผิวของชิ้นงานจากการสังเกตด้วยตาเปล่าของการเคลือบนิกเกิลที่สภาวะแตกต่างกัน โดยใช้แรงดันไฟฟ้า 2 5 และ 8 โวลต์ เป็นเวลา 15 20 และ 25 นาที

แรงดันไฟฟ้า (โวลต์)	เวลา (นาที)			การสังเกตด้วยตาเปล่า
	15	20	25	
2				มีลักษณะบาง และเรียบ สม่ำเสมอ
5				มีลักษณะเรียบสม่ำเสมอ สีมีความสว่างขึ้น
8				เกิดการรวมตัวเป็นเม็ด บริเวณขอบและด้านหน้า เมื่อเพิ่มระยะเวลานานขึ้น ยิ่งเกิดมาก

4.2.2 การวิเคราะห์ลักษณะผิวของชิ้นงานจากการสังเกตด้วยตาเปล่าของการเคลือบนิกเกิลกับสารเติมแต่งต่างชนิด

เมื่อทำการสังเกตลักษณะของพื้นผิวชิ้นงานที่เคลือบนิกเกิลกับสารเติมแต่งประเภทกัมชนิดต่าง ๆ โดยใช้แรงดันไฟฟ้า 5 โวลต์ เป็นเวลา 25 นาที พบว่า ผิวของชิ้นงานที่เคลือบด้วยนิกเกิล มีลักษณะผิวเคลือบสว่าง เป็นผิวซาติน เมื่อใช้เจลาตินเป็นสารเติมแต่ง พบว่า ชิ้นงานมีลักษณะผิวเคลือบที่ไม่เรียบ สีของผิวเคลือบไม่สม่ำเสมอ อาจมาจากสีของเจลาตินที่มีสีเหลือง ถ้าใช้กัมอะราบิกเป็นสารเติมแต่ง ชิ้นงานมีลักษณะผิวเคลือบที่เรียบ และเมื่อใช้กัวกัมเป็นสารเติมแต่ง ชิ้นงานมีลักษณะผิวเคลือบที่ขรุขระ และมีรอยแตก ดังนั้นผู้วิจัยจึงทำการลดแรงดันไฟฟ้าเหลือ 2 โวลต์ เป็นเวลา 25 นาที เพื่อดูความแตกต่างพบว่าผิวเคลือบเมื่อเติมสารเติมแต่งกัวกัมมีผิวเคลือบที่บางลง และผิวของชิ้นเคลือบมีรอยแตกที่ลดลง ดังแสดงในตารางที่ 4.2

**ตารางที่ 4.2** แสดงลักษณะผิวของชิ้นงานจากการสังเกตด้วยตาเปล่า ของชิ้นงานที่เคลือบผิวด้วยนิกเกิล ร่วมกับสารเติมแต่งชนิดต่าง ๆ เปรียบเทียบกับชิ้นงานที่ไม่เติมสารเติมแต่งและไม่มีการเคลือบผิว โดยใช้แรงดันไฟฟ้า 5 โวลต์ เป็นเวลา 25 นาที

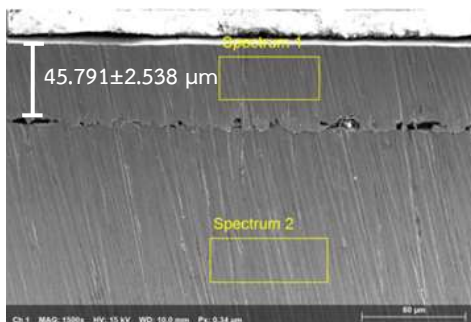
แรงดันไฟฟ้า (โวลต์)	ชิ้นงาน				
	ชิ้นงานที่ไม่ผ่านการชุบเคลือบผิว	นิกเกิล	นิกเกิล/ เจลาติน	นิกเกิล/ กัมอะราบิก	นิกเกิล/ กัวกัม
5					

4.2.3 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของพื้นผิวของการเคลือบนิกเกิลกับสารเติมแต่งต่างชนิด ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (SEM-EDX)

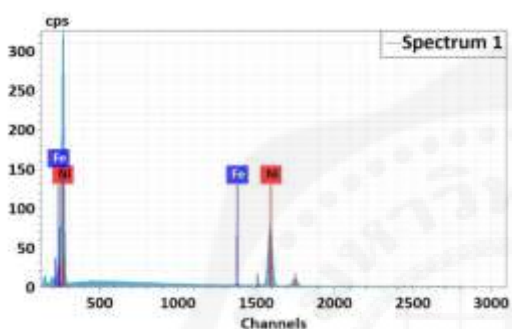
หลังการชุบเคลือบ ได้ตรวจองค์ประกอบทางเคมีบนพื้นผิวชิ้นงานด้วยเทคนิค EDX ของบริเวณผิวชั้นเคลือบเพื่อเป็นการยืนยันผิวชั้นเคลือบที่ได้ มีนิกเกิลและสารเติมแต่งเคลือบอยู่ในเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ SS400 ดังแสดงในรูปที่ 4.4 ถึง 4.7

จากผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยเทคนิค EDX จากภาคตัดขวาง (Cross section) ที่แสดงในรูปที่ 4.4 (ก) บริเวณสเปกตรัมที่ 1 มีองค์ประกอบของธาตุนิกเกิลเป็นส่วนประกอบมากที่สุด และบริเวณสเปกตรัมที่ 2 พบว่ามีองค์ประกอบของธาตุเหล็กและคาร์บอน จึงยืนยันได้ว่าผิวเคลือบที่ได้มีนิกเกิลเคลือบอยู่ในเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำจริง เมื่อนำชิ้นงานมาวัดความหนาของชั้นเคลือบด้วยโปรแกรม ImageJ มีความหนาเฉลี่ยเท่ากับ  $45.791 \pm 2.538$  ไมโครเมตร

นอกจากนี้ ทำการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยเทคนิค EDX บนผิวเคลือบที่มีการใช้สารเติมแต่งชนิดต่าง ๆ พบว่าในบริเวณสเปกตรัมที่ 1 มีองค์ประกอบของธาตุนิกเกิล เป็นส่วนประกอบมากที่สุดและยังประกอบไปด้วยคาร์บอนและออกซิเจน ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของกัม เช่น เจลาติน กัมอะราบิกและกัวกัม แสดงให้เห็นว่าผิวชั้นเคลือบมีสารเติมแต่งเป็นองค์ประกอบ ดังแสดงในรูปที่ 4.5 ถึง 4.7



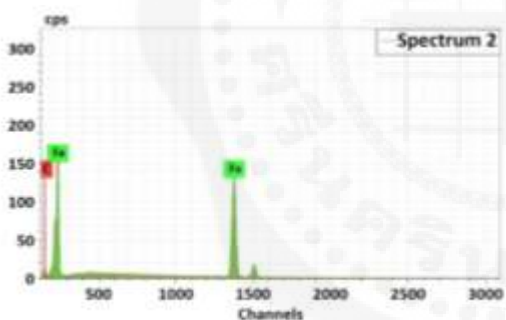
(ก) ภาควัดตัดขวางของผิวเคลือบ



Spectrum 1

Element	Mass Norm. [%]	Atom [%]	abs. error [%] (3 sigma)
Fe	1.07	1.12	0.22
Ni	98.93	98.88	7.80
	<b>100.00</b>	<b>100.00</b>	

(ข) องค์ประกอบทางเคมีบริเวณ สเปกตรัมบริเวณที่ 1

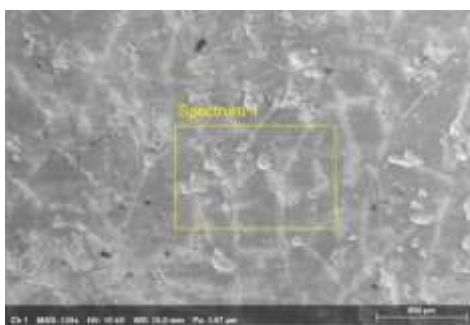


Spectrum 2

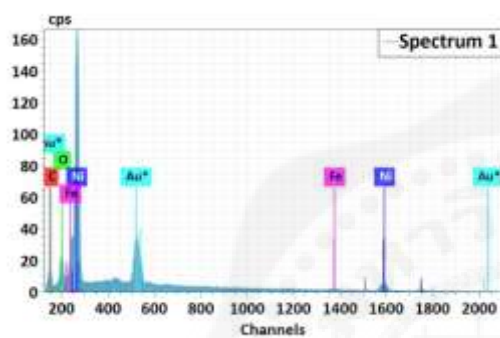
Element	Mass Norm. [%]	Atom [%]	abs. error [%] (3 sigma)
C	5.52	21.37	5.01
Fe	94.48	78.63	8.59
	<b>100.00</b>	<b>100.00</b>	

(ค) องค์ประกอบทางเคมีบริเวณ สเปกตรัมบริเวณที่ 2

รูปที่ 4.4 แสดงภาควัดตัดขวาง และองค์ประกอบทางเคมีของการเคลือบของการชุบนิเกิลโดยใช้แรงดันไฟฟ้า 5 โวลต์ เป็นเวลา 25 นาที



(ก) นิกเกิล/เจลาติน



Spectrum 1

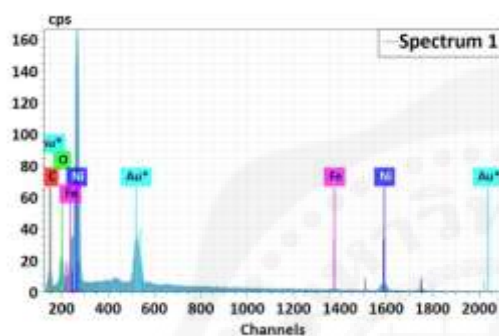
Element	Mass Norm. [%]	Atom [%]	abs. error [%] (3 sigma)
C	7.40	22.44	3.52
O	7.23	17.91	3.01
Ni	88.37	57.65	26.75
Au	0.00	0.00	0.00
	<b>100.00</b>	<b>100.00</b>	

(ข) องค์ประกอบทางเคมีบริเวณ สเปกตรัมบริเวณที่ 1

รูปที่ 4.5 แสดงสัณฐานวิทยา และองค์ประกอบทางเคมีของการเคลือบ นิกเกิล/เจลาติน โดยใช้แรงดันไฟฟ้า 5 โวลต์ เป็นเวลา 25 นาที



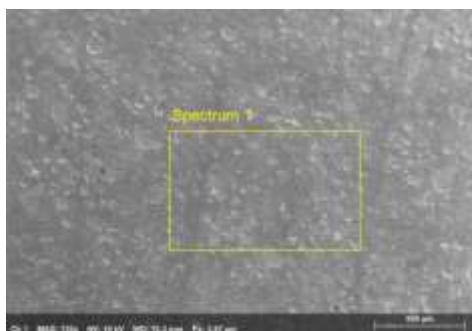
(ก) นิกเกิล/กัมอะราบิก



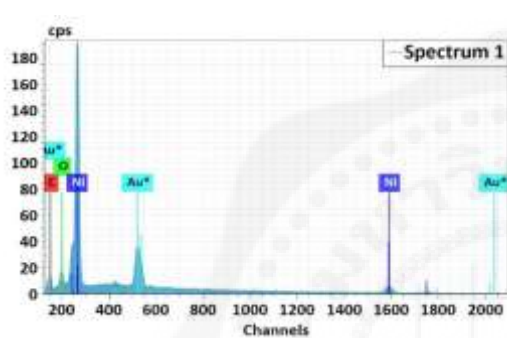
Element	Mass Norm. [%]	Atom [%]	abs. error [%] (3 sigma)
C	7.97	27.12	4.10
O	4.74	12.10	2.36
Ni	87.29	60.78	29.57
Au	0.00	0.00	0.00
	<b>100.00</b>	<b>100.00</b>	

(ข) องค์ประกอบทางเคมีบริเวณ สเปกตรัมบริเวณที่ 1

รูปที่ 4.6 แสดงสัณฐานวิทยา และองค์ประกอบทางเคมีของการเคลือบ นิกเกิล/กัมอะราบิก โดยใช้แรงดันไฟฟ้า 5 โวลต์ เป็นเวลา 25 นาที



(ก) นิกเกิล/กั้วกัม



Spectrum 1

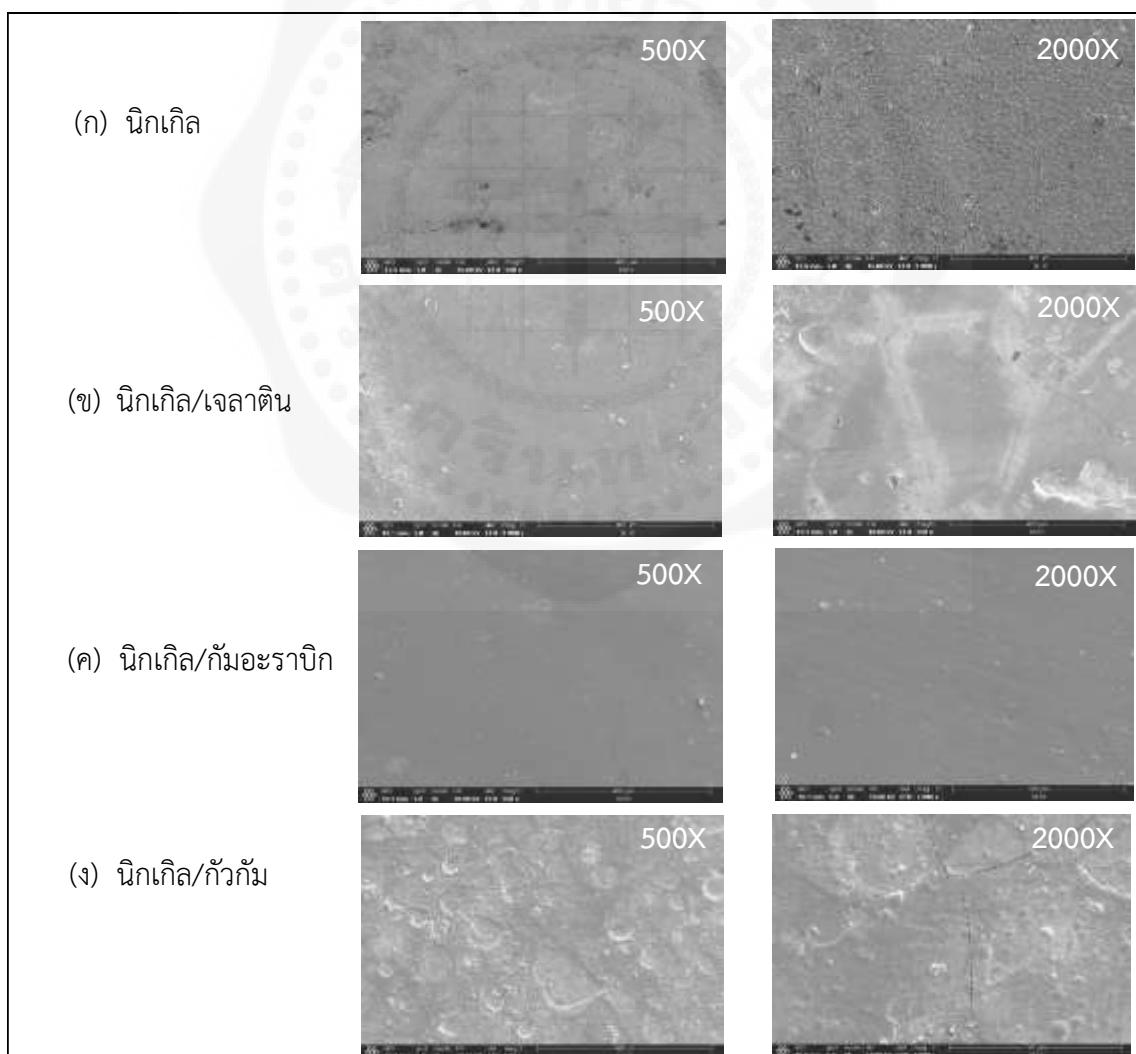
Element	Mass Norm. [%]	Atom [%]	abs. error [%] (3 sigma)
C	7.35	24.26	7.04
O	7.30	18.09	5.49
Ni	85.35	57.66	35.72
Au	0.00	0.00	0.00
	<b>100.00</b>	<b>100.00</b>	

(ข) องค์ประกอบทางเคมีบริเวณ สเปกตรัมบริเวณที่ 1

รูปที่ 4.7 แสดงสัณฐานวิทยา และองค์ประกอบทางเคมีของการเคลือบ นิกเกิล/กั้วกัม โดยใช้แรงดันไฟฟ้า 2 โวลต์ เป็นเวลา 25 นาที

#### 4.2.4 การวิเคราะห์พื้นผิวของการเคลือบนิกเกิลกับสารเติมแต่งต่างชนิดด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (SEM)

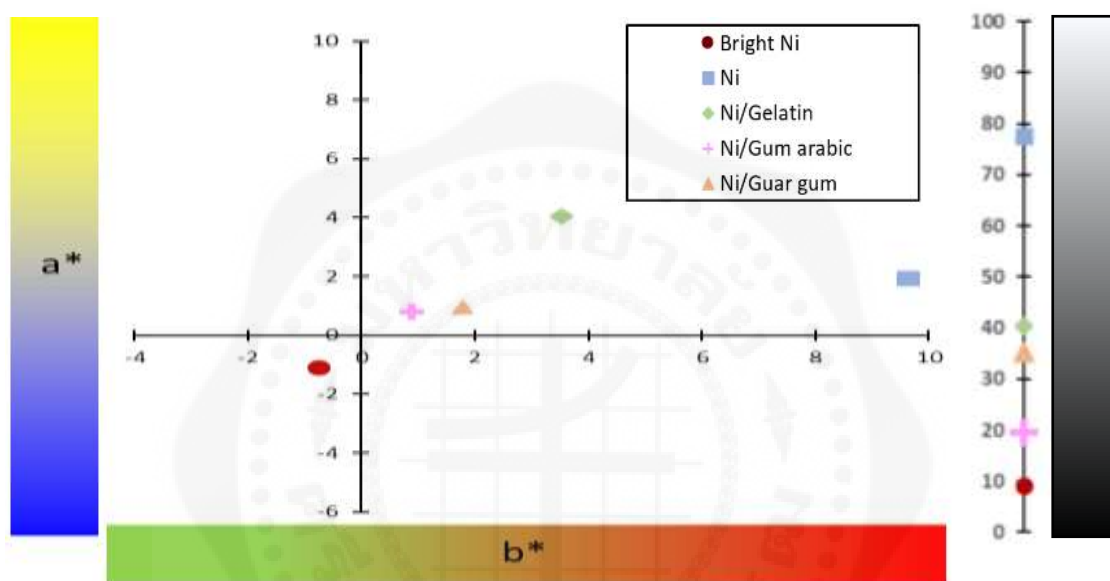
ผลการวิเคราะห์สัณฐานวิทยาของชิ้นงานที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยนิกเกิลกับสารเติมแต่งเจลาติน กัมอะราบิกและกัวกัม ที่ความเข้มข้น 1 กรัมต่อลิตร โดยใช้แรงดันไฟฟ้า 5 โวลต์ เป็นเวลา 25 นาที ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่าเมื่อเติมสารเติมแต่งประเภทกัม มีพื้นผิวที่สม่ำเสมอมากกว่าไม่เติมสารเติมแต่ง ซึ่งจะเห็นได้ว่าผิวเคลือบนิกเกิลที่ไม่ได้เติมสารเติมแต่ง จะมีพื้นผิวที่ไม่เรียบและมีรูพรุนเป็นจำนวนมาก ดังแสดงในรูปที่ 4.8 (ก) ส่วนผิวเคลือบนิกเกิล/กัมอะราบิก มีพื้นผิวเรียบสม่ำเสมอมากที่สุด ดังแสดงในรูปที่ 4.8 (ค) สำหรับผิวเคลือบนิกเกิล/เจลาติน มีพื้นผิวที่เรียบ แต่เมื่อสังเกตที่กำลังขยาย 2000 เท่า กลับพบว่ามีพื้นผิวที่ไม่เรียบและมีรูพรุนเล็กน้อย ดังแสดงในรูปที่ 4.8 (ข) และผิวเคลือบนิกเกิล/กัวกัม มีพื้นผิวที่ไม่เรียบมีรอยแตกเกิดขึ้นบริเวณผิวชั้นเคลือบ ดังแสดงในรูปที่ 4.8 (ง)



รูปที่ 4.8 แสดงสัณฐานวิทยาของการเคลือบนิกเกิลกับสารเติมแต่งต่างชนิดที่กำลังขยาย 500X และ 2000X (ก) นิกเกิล (ข) นิกเกิล/เจลาติน (ค) นิกเกิล/กัมอะราบิก และ (ง) นิกเกิล/กัวกัม

### 4.3 ผลของการวัดสีของการเคลือบนิกเกิล เคลือบนิกเกิลเงา และเคลือบนิกเกิลกับสารเติมแต่งประเภทกัม

การทดสอบสีของการเคลือบนิกเกิลกับสารเติมแต่งเมื่อเทียบกับนิกเกิลเงา ซึ่งผลของการวัดสีแสดงค่าสีในระบบ CIE Lab โดย  $L^*$  = ค่าความสว่าง (โดย  $L^*$  มีค่า 100-0 )  $a^*$  = ค่าความเป็นสีแดงหรือสีเขียว (ค่า + หมายถึงสีแดง ค่า - หมายถึง สีเขียว) และ  $b^*$  = ค่าความเป็นสีเหลืองหรือสีน้ำเงิน (ค่า + หมายถึงสีเหลือง ค่า - หมายถึงน้ำเงิน)



รูปที่ 4.9 แสดงค่าสีในระบบ CIELAB ของการเคลือบนิกเกิลเปรียบเทียบกับ นิกเกิลเงา นิกเกิล/เจลาติน นิกเกิล/กัมอะราบิก และนิกเกิล/กัวกัม ที่สภาวะ 5 โวลต์ เวลา 25 นาที

นำชิ้นงานที่ผ่านการชุบเคลือบผิวในสภาวะต่าง ๆ มาวัดสีด้วยเครื่อง Colorimeter จากนั้นนำค่าที่ได้มาเปรียบเทียบกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.9 พบว่าเมื่อเติมสารเติมแต่งประเภทกัม จะให้ค่า  $a^*$  และ  $b^*$  เป็นค่าบวก แต่มีค่า  $L^*$  ที่ต่ำ เมื่อเทียบกับการชุบนิกเกิลที่ไม่เติมสารเติมแต่ง โดยชิ้นงานที่ชุบนิกเกิลเงา มีความสว่าง ( $L^*$ ) ที่  $8.96 \pm 5.62$  ซึ่งมีค่าความสว่างต่ำสุด ชิ้นงานที่ชุบนิกเกิลมีความสว่างมากที่สุดคือ  $77.43 \pm 2.59$  และเมื่อทำการเติมสารเติมแต่งประเภทกัมต่างชนิดกัน คือ นิกเกิล/กัมอะราบิก นิกเกิล/กัวกัม นิกเกิล/เจลาติน จะมีค่าความสว่างอยู่ที่  $19.33 \pm 3.76$   $35.23 \pm 4.95$  และ  $40.13 \pm 9.78$  ตามลำดับ ค่าสีแดง-สีเขียว ( $a^*$ ) นิกเกิลเงาอยู่ในช่วงค่าสีเขียว มีค่า  $0.76 \pm 0.55$  ส่วนค่าของสีแดงมากที่สุดคือนิกเกิลมีค่า  $9.63 \pm 0.87$  ค่าของสีแดงต่ำสุดคือนิกเกิล/กัมอะราบิก มีค่า  $0.9 \pm 0.43$  และนิกเกิล/กัวกัม นิกเกิล/เจลาติน มีค่า  $1.8 \pm 0.45$  และ  $4.03 \pm 3.35$  ตามลำดับ ค่าสีเหลือง-น้ำเงิน ( $b^*$ ) นิกเกิลเงาอยู่ในช่วงค่าสีน้ำเงินมีค่า  $-1.12 \pm 0.51$  ส่วนค่าของสีเหลืองมากที่สุดคือนิกเกิล/เจลาติน มีค่า  $3.53 \pm 0.98$  ค่าของสีแดงต่ำสุด

คือ นิกเกิล/กัมมะฮราบิกมีค่า  $0.76 \pm 0.55$  และ นิกเกิล/กัวกัมมีค่า  $1.24 \pm 1.85$  และ  $1.93 \pm 0.62$  ที่ได้ตามลำดับ สามารถสรุปได้ว่าเมื่อเติมสารเติมแต่งประเภทกัมจะส่งผลต่อค่าสีของผิวเคลือบ

#### 4.4 การทดสอบการกัดกร่อนแบบจุ่มแช่

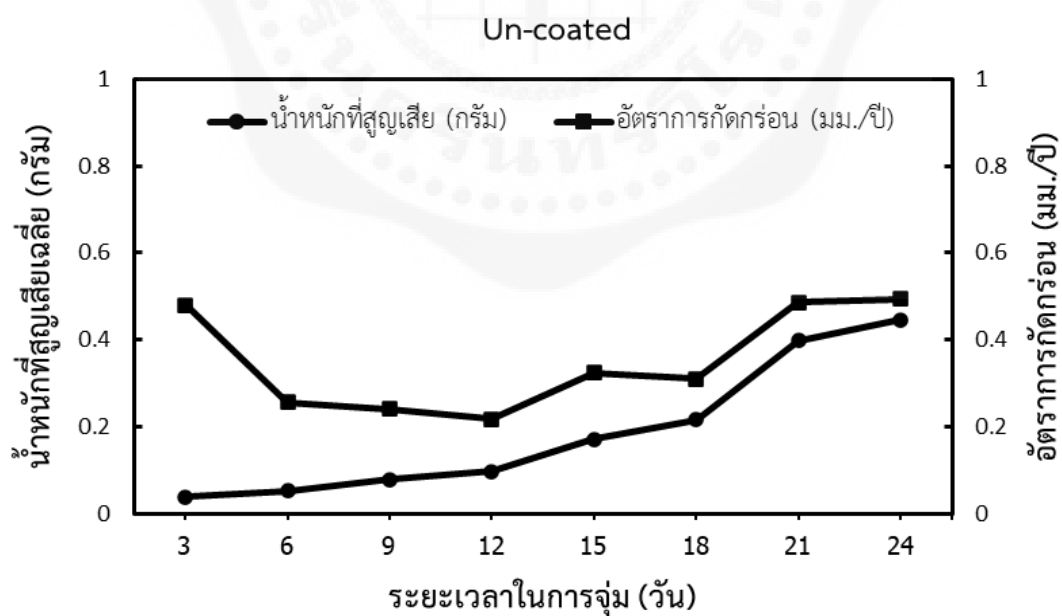
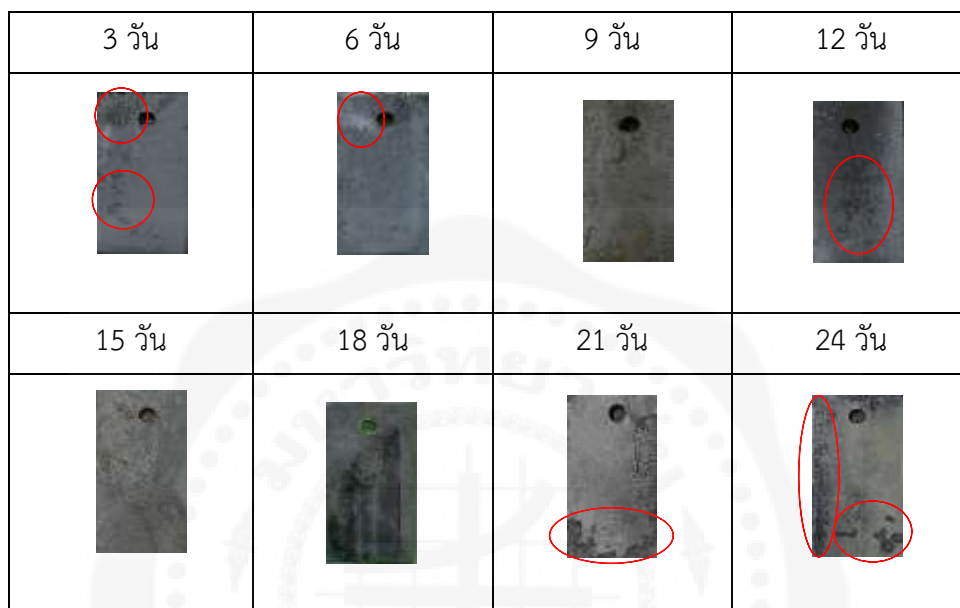
สำหรับการทดสอบการกัดกร่อน ดำเนินการโดยใช้วิธีการจุ่มแช่ หรือ Immersion test ทำโดยนำชิ้นงานที่ไม่ผ่านการชุบเคลือบผิว ชิ้นงานที่ชุบเคลือบผิวด้วยนิกเกิล และชุบเคลือบผิวด้วยนิกเกิลที่ใส่สารเติมแต่งประเภทกัม จุ่มแช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 3.5% เป็นเวลา 24 วัน ทำการสังเกตและเก็บผลทดสอบทุก ๆ 3 วัน ได้ผลการทดสอบ ดังนี้

##### 4.4.1 การทดสอบการกัดกร่อนของชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ SS400

เมื่อนำชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ SS400 หลังจากการจุ่มแช่ มาสังเกตด้วยตาเปล่า และบันทึกการเปลี่ยนแปลงที่สามารถเห็นได้ชัดเจน พบว่าที่ผิวของชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ SS400 ในวันที่ 3 ถึง 6 เกิดการกัดกร่อนเป็นจุดขนาดเล็กเล็กน้อยบริเวณขอบด้านข้าง และมีคราบสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ในวันที่ 12 เกิดการกัดกร่อนเป็นจุดขนาดเล็กที่ตรงกลางชิ้นงาน และในช่วงวันที่ 21 ถึง 24 เกิดการกัดกร่อนมากขึ้นเรื่อย ๆ ดังแสดงในตารางที่ 4.3

จากนั้นทำการหาน้ำหนักที่สูญเสียหลังจุ่มแช่ พบว่ามีแนวโน้มการสูญเสียน้ำหนักเพิ่มขึ้นอย่างสม่ำเสมอในช่วงวันที่ 3 ถึง 24 และในวันที่ 24 มีการสูญเสียน้ำหนักมากที่สุดมีค่า 0.457 กรัม จากนั้นหาอัตราการกัดกร่อนหลังจุ่มแช่ พบว่ามีแนวโน้มเพิ่มขึ้นและลดลงสลับกัน ในช่วงวันที่ 3 มีอัตราการกัดกร่อนสูง และมีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่องจนถึงวันที่ 12 ซึ่งมีอัตราการกัดกร่อนต่ำที่สุดมีค่า 0.2175 มิลลิเมตรต่อปี ในวันที่ 15 มีอัตราการกัดกร่อนเพิ่มขึ้น และลดลงจนถึงวันที่ 18 ส่วนในช่วงวันที่ 21 ถึง 24 มีอัตราการกัดกร่อนเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องมากที่สุด มีค่า 0.4942 มิลลิเมตรต่อปี สาเหตุที่อัตราการกัดกร่อนมากในช่วงแรก เกิดจากชิ้นงานเกิดปฏิกิริยากับสารละลายโซเดียมคลอไรด์ที่ใช้ทดสอบและสูญเสียน้ำหนักมากในระยะเวลาดังกล่าว จึงทำให้เกิดการกัดกร่อนที่รวดเร็ว ดังแสดงในรูปที่ 4.10

ตารางที่ 4.3 แสดงชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ SS400 หลังจุ่มแช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ความเข้มข้น 3.5% เป็นเวลา 24 วัน



รูปที่ 4.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการสูญเสียน้ำหนัก และอัตราการกัดกร่อนของเหล็กกล้า









คาร์บอนต่ำ SS400 หลังการจุ่มแช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 3.5%  
เป็นเวลา 24 วัน

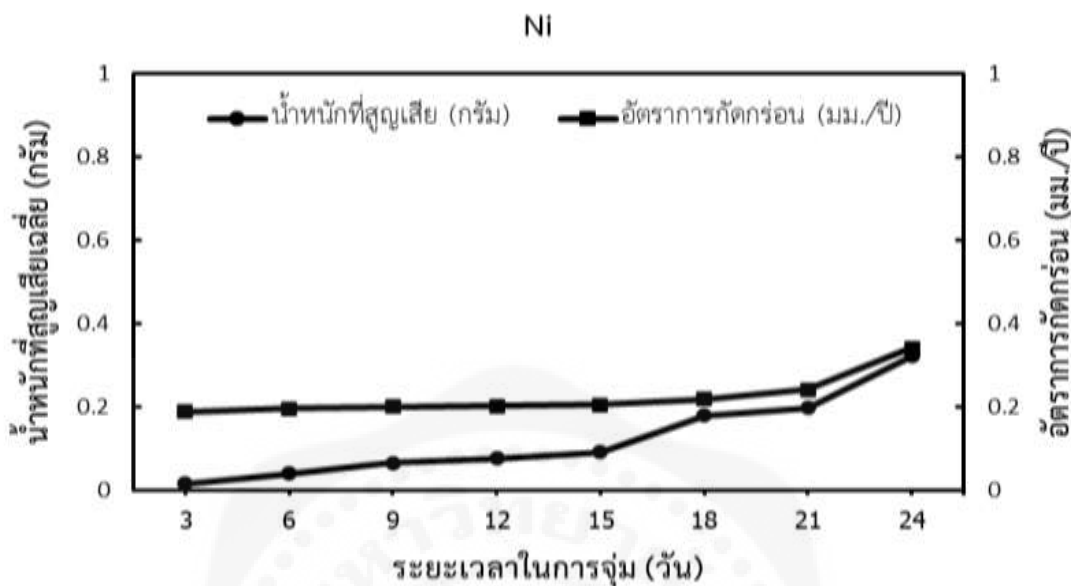
#### 4.4.2 การทดสอบการกัดกร่อนของชิ้นงานการเคลือบผิวนิกเกิล

เมื่อนำชิ้นงานที่ชุบเคลือบผิวด้วยนิกเกิลหลังจากการจุ่มแช่ มาสังเกตด้วยตาเปล่า และบันทึกการเปลี่ยนแปลงที่สามารถเห็นได้ชัดเจน พบว่าผิวของชิ้นงานที่ชุบเคลือบผิวด้วยนิกเกิล ในช่วงวันที่ 9 ถึง 24 เกิดการกัดกร่อนเป็นจุดขนาดเล็กเล็กน้อยบริเวณขอบด้านข้าง และมีคราบสารละลายโซเดียมคลอไรด์ในวันที่ 12 เกิดการกัดกร่อนเป็นจุดขนาดเล็กที่ตรงกลางชิ้นงาน และในวันที่ 18 ถึง 24 เกิดการกัดกร่อนมากขึ้นเรื่อย ๆ ดังแสดงในตารางที่ 4.4

จากนั้นทำการหาน้ำหนักที่สูญเสียหลังจุ่มแช่ พบว่ามีแนวโน้มการสูญเสียน้ำหนักเพิ่มขึ้นอย่างสม่ำเสมอในช่วงวันที่ 3 ถึง 24 และในวันที่ 24 สูญเสียน้ำหนักมากที่สุด มีค่า 0.3212 กรัม จากนั้นหาอัตราการกัดกร่อนหลังการจุ่มแช่ พบว่ามีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างสม่ำเสมอ ในวันที่ 24 มีอัตราการกัดกร่อนสูงสุด มีค่า 0.3417 มิลลิเมตรต่อปี ดังแสดงในรูปที่ 4.11

**ตารางที่ 4.4** แสดงชิ้นงานการเคลือบผิวนิกเกิล โดยใช้แรงดันไฟฟ้า 5 โวลต์ เวลา 25 นาที หลังจุ่มแช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 3.5% เป็นเวลา 24 วัน

3 วัน	6 วัน	9 วัน	12 วัน
			
15 วัน	18 วัน	21 วัน	24 วัน
			



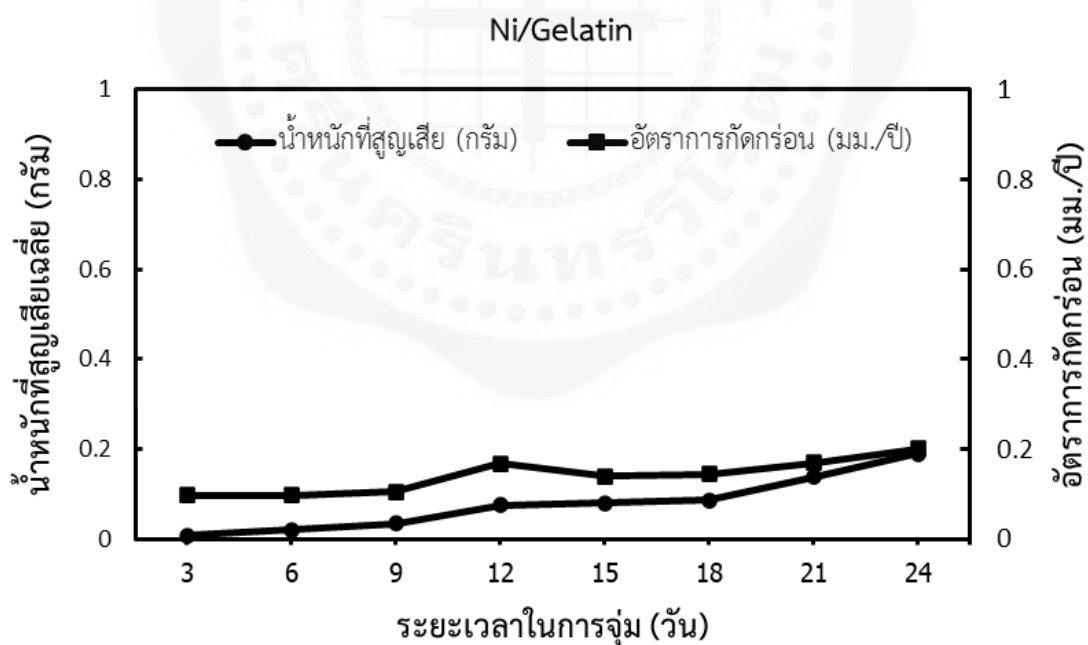
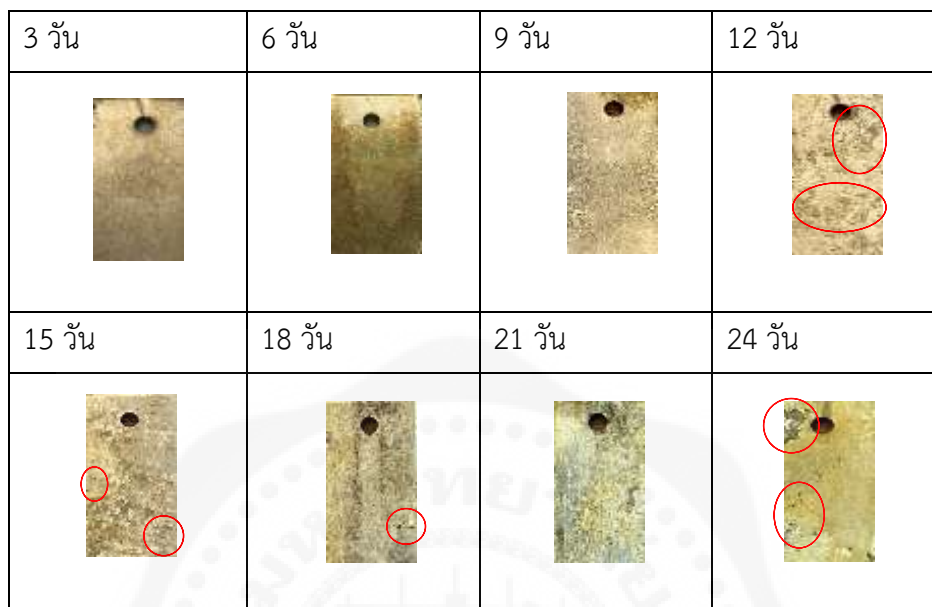
รูปที่ 4.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการสูญเสียน้ำหนัก และอัตราการกักต่อน้ำหนักของนิกเกลีหลังการจุ่มแช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 3.5% เป็นเวลา 24 วัน

#### 4.4.3 การทดสอบการกักต่อน้ำหนักของชิ้นงานการเคลือบผิว นิกเกลี/เจลาติน

เมื่อนำชิ้นงานที่ชุบเคลือบผิวด้วยนิกเกลีกับสารเติมแต่งเจลาตินหลังจากการจุ่มแช่มาสังเกตด้วยตาเปล่า และบันทึกการเปลี่ยนแปลงที่สามารถเห็นได้ชัดเจน พบว่าในช่วงวันที่ 3 ถึง 9 ชิ้นงานไม่ค่อยเกิดการเปลี่ยนแปลง จนในช่วงวันที่ 12 ถึง 21 ชิ้นงานเริ่มเกิดการกักต่อน้ำหนักขึ้น และเกิดการกักต่อน้ำหนักเพิ่มขึ้นเป็นจุดเล็ก ๆ และในวันที่ 24 สังเกตได้อย่างชัดเจนว่าเกิดการกักต่อน้ำหนักขนาดใหญ่ตรงบริเวณขอบด้านบนของชิ้นงาน ดังแสดงในตารางที่ 4.5

จากนั้นทำการหาน้ำหนักที่สูญเสียน้ำหนักหลังจุ่มแช่ พบว่ามีแนวโน้มการสูญเสียน้ำหนักเพิ่มขึ้นอย่างสม่ำเสมอในช่วงวันที่ 3 ถึง 24 และในวันที่ 24 มีการสูญเสียน้ำหนักมากที่สุดมีค่า 0.1891 กรัม จากนั้นหาอัตราการกักต่อน้ำหนักหลังการจุ่มแช่ พบว่ามีแนวโน้มเพิ่มขึ้นและลดลงสลับกัน ในวันที่ 12 มีอัตราการกักต่อน้ำหนักสูง เนื่องจากชิ้นงานเกิดปฏิกิริยากับสารละลายโซเดียมคลอไรด์ที่ใช้ทดสอบจึงทำให้เกิดการกักต่อน้ำหนักในระยะเวลาที่สั้น และเมื่อเพิ่มระยะเวลาในการทดสอบ อัตราการกักต่อน้ำหนักของชิ้นงานจะเริ่มคงที่ในวันที่ 15 และเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจนถึงวันที่ 24 ซึ่งมีอัตราการกักต่อน้ำหนักมากที่สุด มีค่า 0.2012 มิลลิเมตรต่อปี ดังแสดงในรูปที่ 4.12

ตารางที่ 4.5 แสดงชิ้นงานการเคลือบผิว นิกเกิล/เจลาติน โดยใช้แรงดันไฟฟ้า 5 โวลต์ เวลา 25 นาที หลังจุ่มแช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 3.5% เป็นเวลา 24 วัน











รูปที่ 4.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการสูญเสียน้ำหนัก และอัตราการกัดกร่อนของ นิกเกิล/เจลาติน หลังการจุ่มแช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 3.5% เป็นเวลา 24 วัน

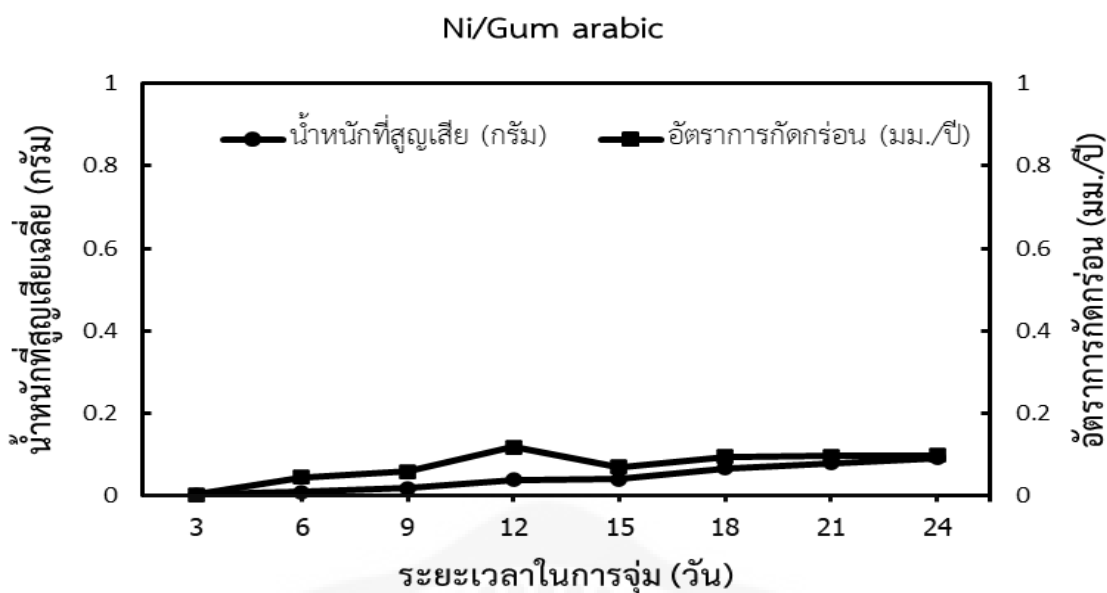
#### 4.4.4 การทดสอบการกัดกร่อนของชิ้นงานการเคลือบผิว นิกเกิล/กัมอะราบิก

เมื่อนำชิ้นงานที่ชุบเคลือบผิวด้วยนิกเกิลกับสารเติมแต่งกัมอะราบิกหลังจากการจุ่มแช่มาสังเกตด้วยตาเปล่า และบันทึกการเปลี่ยนแปลงที่สามารถเห็นได้ชัดเจน พบว่าผิวของชิ้นงานที่ชุบเคลือบผิวด้วยนิกเกิล/กัมอะราบิก ในช่วงวันที่ 3 ถึง 9 ผิวของชิ้นงานไม่ค่อยเกิดการเปลี่ยนแปลง ในวันที่ 12 เกิดการกัดกร่อนเป็นบริเวณเล็ก ๆ บนชิ้นงาน และเกิดการกัดกร่อนอย่างต่อเนื่องจนถึงวันที่ 24 ดังแสดงในตารางที่ 4.6

จากนั้นทำการหาน้ำหนักที่สูญเสียหลังจุ่มแช่ พบว่ามีแนวโน้มการสูญเสียน้ำหนักเพิ่มขึ้นอย่างสม่ำเสมอในช่วงวันที่ 3 ถึง 24 และในวันที่ 24 มีการสูญเสียน้ำหนักมากที่สุด มีค่า 0.9207 กรัม จากนั้นหาอัตราการกัดกร่อนหลังการจุ่มแช่ พบว่ามีแนวโน้มเพิ่มขึ้นและลดลงสลับกัน ในช่วงวันที่ 3 ถึง 9 มีอัตราการกัดกร่อนเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ในวันที่ 12 มีอัตราการกัดกร่อนเพิ่มสูงขึ้นถึง 0.118 มิลลิเมตรต่อปี ในวันที่ 15 มีอัตราการกัดกร่อนลดลงและเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจนถึงวันที่ 24 ดังแสดงในรูปที่ 4.13

**ตารางที่ 4.6** แสดงชิ้นงานการเคลือบผิว นิกเกิล/กัมอะราบิก โดยใช้แรงดันไฟฟ้า 5 โวลต์ เวลา 25 นาที หลังจุ่มแช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 3.5% เป็นเวลา 24 วัน

3 วัน	6 วัน	9 วัน	12 วัน
			
15 วัน	18 วัน	21 วัน	24 วัน
			



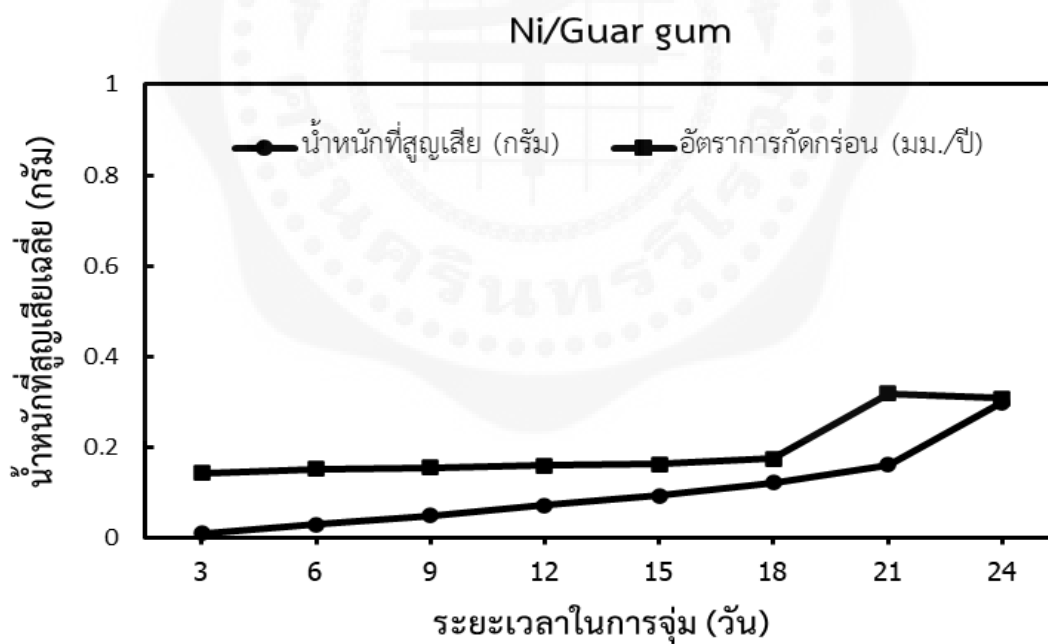
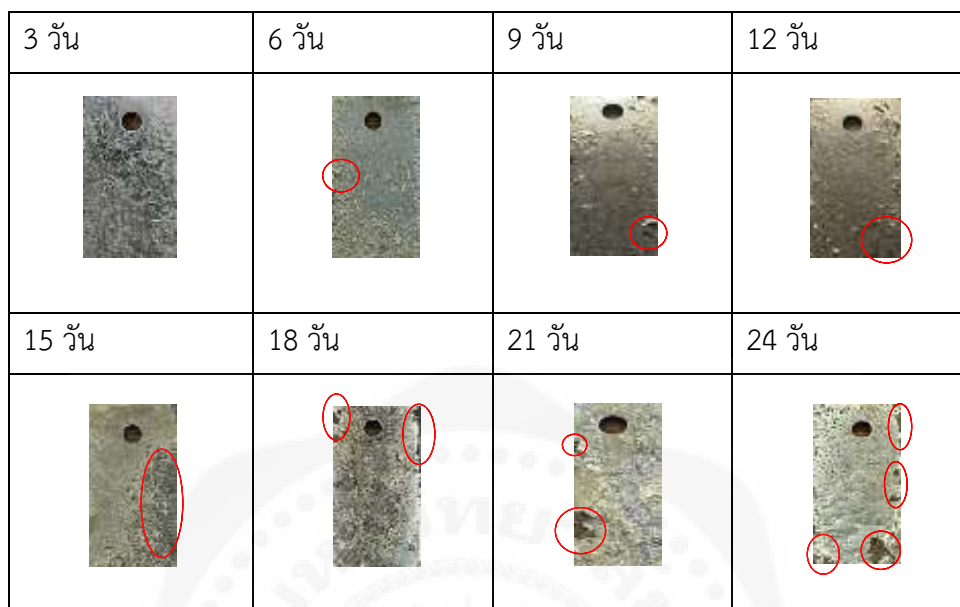
รูปที่ 4.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการสูญเสียน้ำหนัก และอัตราการกักต่อน้ำของนิกเกิล/กัมอะราบิก หลังการจุ่มแช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 3.5% เป็นเวลา 24 วัน

#### 4.4.5 การทดสอบการกักต่อน้ำของชิ้นงานเคลือบผิว นิกเกิล/กัมอะราบิก

เมื่อนำชิ้นงานที่ผ่านการชุบเคลือบผิวด้วยนิกเกิลกับสารเติมแต่งกัมอะราบิกหลังจากการจุ่มแช่ มาสังเกตด้วยตาเปล่า และบันทึกการเปลี่ยนแปลงที่สามารถเห็นได้ชัดเจน พบว่าในช่วงวันที่ 3 ผิวเคลือบมีลักษณะพองตัวขึ้นและในช่วงวันที่ 6 ถึง 18 ผิวเคลือบหลุดออกมาจากชิ้นงานเล็กน้อย จนในช่วงวันที่ 21 ถึง 24 ผิวเคลือบหลุดออกมาจากชิ้นงานเป็นขนาดใหญ่มากขึ้นจนเกิดการกักต่อน้ำ สังเกตได้ว่าผิวเคลือบที่หลุดออกยิ่งจุ่มแช่ชิ้นงานเป็นระยะเวลาที่นานขึ้นผิวเคลือบเริ่มหลุดออกมากขึ้น ดังแสดงในตารางที่ 4.7

จากนั้นทำการหาน้ำหนักที่สูญเสียน้ำหนักหลังจุ่มแช่ พบว่ามีแนวโน้มการสูญเสียน้ำหนักเพิ่มขึ้น อย่างสม่ำเสมอในช่วงวันที่ 3 ถึง 18 และในวันที่ 24 มีการสูญเสียน้ำหนักมากที่สุดมีค่า 0.2995 กรัม สาเหตุที่สูญเสียน้ำหนักมากในวันที่ 24 เกิดจากผิวเคลือบที่หลุดออก ยิ่งจุ่มแช่ชิ้นงานเป็นระยะเวลาที่นานขึ้น ผิวเคลือบเริ่มหลุดออกมากขึ้น ทำให้สูญเสียน้ำหนักมากขึ้น จากนั้นหาอัตราการกักต่อน้ำหลังการจุ่มแช่ พบว่ามีแนวโน้มเพิ่มขึ้นและลดลงสลับกัน ในช่วงวันที่ 3 ถึง 18 มีอัตราการกักต่อน้ำเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง และในวันที่ 21 มีอัตราการกักต่อน้ำมากที่สุด มีค่า 0.3186 มิลลิเมตรต่อปี ดังแสดงในรูปที่ 4.14

ตารางที่ 4.7 แสดงชิ้นงานการเคลือบผิว นิกเกิล/กัวร์กัม ที่สภาวะ 5 โวลต์ เวลา 25 นาที หลังจุ่มแช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 3.5% เป็นเวลา 24 วัน

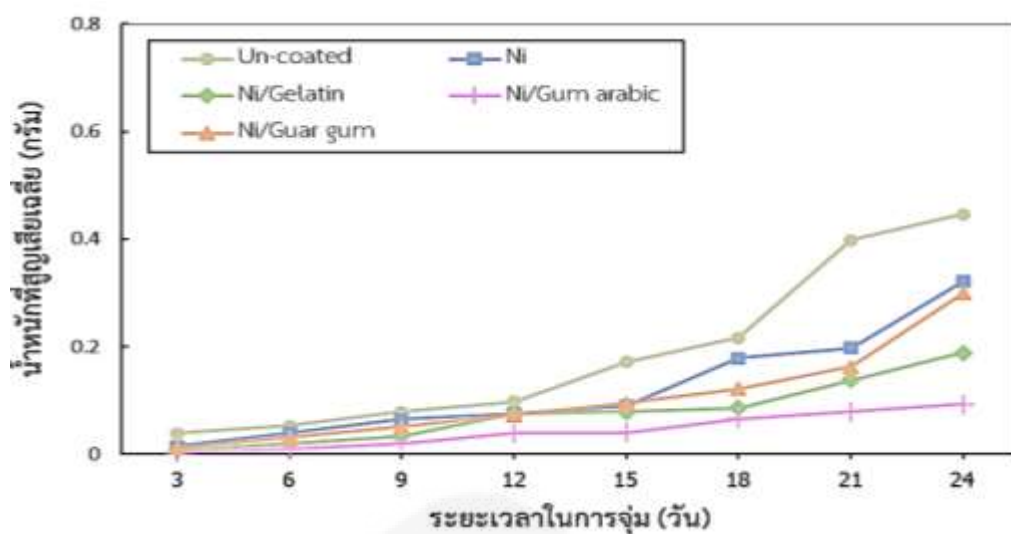


รูปที่ 4.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการสูญเสียน้ำหนัก และอัตราการกัดกร่อนของนิกเกิล/กัวร์กัม หลังการจุ่มแช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 3.5% เป็นเวลา 24 วัน

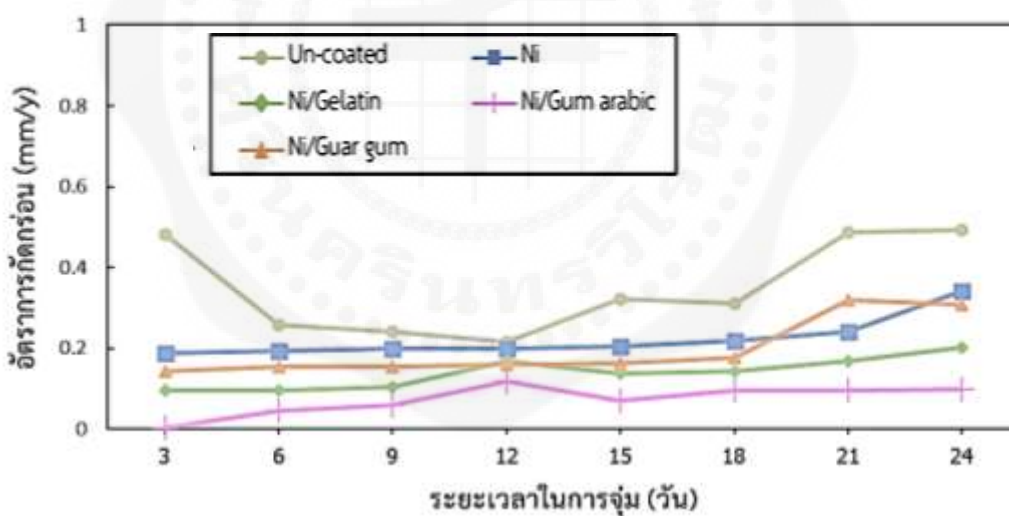
#### 4.4.6 เปรียบเทียบการทดสอบการกัดกร่อนของชิ้นงานการเคลือบผิวนิกเกิลกับสารเติมแต่งต่างชนิด

หลังจากที่ได้ค่าน้ำหนักที่สูญเสียหลังการจุ่มแช่จากการเคลือบผิวชิ้นงานที่เคลือบผิวด้วยนิกเกิลร่วมกับสารเติมแต่งชนิดต่าง ๆ เปรียบเทียบกับชิ้นงานที่ไม่เติมสารเติมแต่งและไม่มีการเคลือบผิวแล้วแสดงผลในรูปของกราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการสูญเสียน้ำหนักหลังการจุ่มแช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 3.5% ดังแสดงในรูปที่ 4.15 พบว่าเมื่อเติมสารเติมแต่งประเภทกัมชนิดต่าง ๆ มีแนวโน้มการสูญเสียน้ำหนักน้อยกว่าไม่เติมสารเติมแต่งและชิ้นงานที่ไม่ผ่านการชุบเคลือบผิว โดยในช่วงวันที่ 3 ถึง 9 มีแนวโน้มการสูญเสียน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นอย่างสม่ำเสมอ ในวันที่ 3 ชิ้นงานสูญเสียน้ำหนักน้อยโดยนิกเกิล/กัมอะราบิก สูญเสียน้ำหนักน้อยที่สุด มีค่า 0.0033 กรัม และชิ้นงานที่ไม่ผ่านการชุบเคลือบผิว สูญเสียน้ำหนักมากที่สุด มีค่า 0.0393 กรัม ส่วนนิกเกิล/เจลาติน นิกเกิล/กัวกัมและนิกเกิล มีค่าน้ำหนักที่สูญเสีย 0.0079 0.0118 และ 0.0154 กรัม ตามลำดับ และในช่วงวันที่ 12 ถึง 24 มีแนวโน้มการสูญเสียน้ำหนักแตกต่างกัน โดยในวันที่ 24 ชิ้นงานสูญเสียน้ำหนักมากที่สุด ซึ่งชิ้นงานที่ไม่ผ่านการชุบเคลือบผิวสูญเสียน้ำหนักมากที่สุด มีค่า 0.4457 กรัม และชิ้นงานนิกเกิล/กัมอะราบิก สูญเสียน้ำหนักน้อยที่สุด มีค่า 0.0925 กรัม แสดงให้เห็นว่ายิ่งระยะเวลาในการจุ่มแช่นานขึ้น การสูญเสียน้ำหนักเพิ่มขึ้นตามไปด้วย

เมื่อได้ค่าน้ำหนักที่สูญเสียของชิ้นงาน และนำมาคำนวณหาอัตราการกัดกร่อน ดังสมการที่ 2.9 แล้วแสดงผลในรูปของกราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการสูญเสียน้ำหนักหลังการจุ่มแช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 3.5% พบว่าเมื่อเพิ่มสารเติมแต่งประเภทกัมชนิดต่าง ๆ มีอัตราการกัดกร่อนน้อยกว่าที่ไม่เติมสารเติมแต่งและชิ้นงานที่ไม่ผ่านการชุบเคลือบผิว เมื่อครบระยะเวลาการทดสอบเป็นเวลา 24 วัน ในช่วงวันที่ 3 ถึง 24 มีอัตราการกัดกร่อนเพิ่มขึ้นและลดลงสลับกัน ชิ้นงานที่ไม่ผ่านการชุบเคลือบผิวมีอัตราการกัดกร่อนมากที่สุดถึง 0.4942 มิลลิเมตรต่อปี เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับชิ้นงานอื่น ๆ แสดงให้เห็นว่า ชิ้นงานที่ผ่านการชุบเคลือบผิวด้วย นิกเกิล/กัมอะราบิก มีอัตราการกัดกร่อนน้อยที่สุดถึง 0.0986 มิลลิเมตรต่อปี ดังแสดงในรูปที่ 4.16



รูปที่ 4.15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการสูญเสียน้ำหนักหลังการจุ่มแช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ความเข้มข้น 3.5% ของชิ้นงานที่เคลือบผิวด้วยนิกเกิลร่วมกับสารเติมแต่งชนิดต่าง ๆ เปรียบเทียบกับชิ้นงานที่ไม่เติมสารเติมแต่งและไม่มีการเคลือบผิว โดยใช้แรงดันไฟฟ้า 5 โวลต์ เป็นเวลา 25 นาที เป็นเวลา 24 วัน



รูปที่ 4.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการกัดกร่อนหลังการจุ่มแช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ความเข้มข้น 3.5% ของชิ้นงานที่เคลือบผิวด้วยนิกเกิลร่วมกับสารเติมแต่งชนิดต่าง ๆ เปรียบเทียบกับชิ้นงานที่ไม่เติมสารเติมแต่งและไม่มีการเคลือบผิว โดยใช้แรงดันไฟฟ้า 5 โวลต์ เป็นเวลา 25 นาที เป็นเวลา 24 วัน

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุป

ผลการวิจัย และอภิปรายผลในการวิเคราะห์สมบัติทางกล ผิวเคลือบ และศึกษาพฤติกรรม การกัดกร่อนด้วยการจุ่มแช่ในสภาวะเกลือของการเคลือบนิเกิลที่มีสารเติมแต่งประเภทกำมะถัน เหล็กกล้า คาร์บอนต่ำ

5.1.1 ปัจจัยที่ส่งผลต่อการเคลือบนิเกิล และการเคลือบนิเกิลกับสารเติมแต่งประเภทกำมะถัน คือ แรงดันไฟฟ้าและเวลา เมื่อใช้แรงดันไฟฟ้าและระยะเวลามากเกินไปจะทำให้ผิวไม่เรียบและมีรูพรุนเกิดขึ้น ซึ่งส่งผลต่อค่าความแข็ง

5.1.2 สภาวะการเคลือบที่ดีที่สุด คือ การเติมสารเติมแต่งประเภทกำมะถันทุกชนิดลงในอ่างชุบ นิเกิล ทำให้มีความแข็งเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับที่ไม่ได้เติมสารเติมแต่ง โดยนิเกิล/กำมะถัน มีความแข็งมากที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับสัญญาณวิทยาที่ปรากฏ โดยผิวเคลือบนิเกิล/กำมะถัน มีพื้นผิว เรียบและสม่ำเสมอ

5.1.2 การเติมสารเติมแต่งประเภทกำมะถันได้แก่ เจลาติน กำมะถันและกำมะถัน ลงในอ่างชุบนิเกิล ส่งผลต่อสีของผิวเคลือบ

5.1.3 การเติมสารเติมแต่งประเภทกำมะถันทุกชนิดจะเพิ่มความต้านทานการกัดกร่อน โดยอัตราการ กัดกร่อนน้อยที่สุดคือ ผิวเคลือบของนิเกิล/กำมะถัน

#### 5.2 ข้อเสนอแนะ

จากการวิจัยศึกษาการชุบเคลือบผิวด้วยไฟฟ้าของนิเกิลที่ใช้สารเติมแต่งประเภทกำมะถัน เหล็กกล้า คาร์บอนต่ำ ผู้วิจัยมีข้อเสนอแนะดังนี้

5.2.1 วิธีการชุบเคลือบผิวด้วยไฟฟ้า ควรคำนึงถึง อุณหภูมิ ค่า pH ระยะห่างระหว่างขั้วแคโทด กับขั้วแอโนดให้เหมาะสม เนื่องจากเป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อผิวเคลือบที่ได้

5.2.2 ควรทำการทดสอบเพื่อหาความต้านทานการกัดกร่อนของชิ้นงานด้วยเทคนิคโพเทนชิโอ ไดนามิกส์ควบคู่ไปกับการทำ Immersion test เพื่อให้ได้ผลที่แม่นยำและชัดเจนมากยิ่งขึ้น

## เอกสารอ้างอิง

1. Sergey Mikhailov, Valentina Sharapova, Ekaterina Skobelina, and Leonid Molokov. (2021). Deformation Aging in Low Carbon Steels. *Journal Metallic Alloys*.
2. Huirong Li, Yueying He, Haichao Zhang, Tao Ma and Yungang Li. (2021). Study on the Bonding Mechanism of Copper-Low Carbon Steel for Casting Compounding Process. *Metals*. 11(11):1818
3. เหล็กกล้าคาร์บอน. (2558). สืบค้นเมื่อ 13 ธันวาคม 2564, จาก <http://www.tpa.or.th>
4. Advance Interior Materials. (2020). Carbon Steel Market Size, Share & Trends Analysis Report By Type (Low Carbon Steel, Medium Carbon Steel, High Carbon Steel), By Application (Shipbuilding, Automotive, Construction), By Region, And Segment Forecasts, 2020 – 2027. pp.16, Retrieved December 14 2021, from <https://www.grandviewresearch.com/carbon-steel-market>.
5. NACE international leaders in corrosion control technology. (n.d.). Corrosion Costs and Preventive Strategies in the United States. Retrieved December 14 2021, from <http://impact.nace.org/documents/ccsupp.com>
6. ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ. (2546). การชุบโลหะด้วยไฟฟ้า. สืบค้นเมื่อ 6 ธันวาคม 2564, จาก <https://www2.mtec.or.th/th/e-magazine>
7. Olruntoba Daniel, Eghwubare Oghenedoro and Oluwole Oluleke. (2010). Effect of Some Process Variables on Nickel Electroplating of Low Carbon Steel. *Leonardo Electronic Journal of Practices and Technologies*. 6:815-820
8. Nur Azam Badarulzaman, Ahmad Azmin Mohamad, Sunara Puwadaria and Zainal Arifin Ahmad. (2010). The Evaluation of Nickel Deposit Obtained Via Watts Electrolyte at Ambient Temperature. *Journal of Coatings Technology and Research*. 6:815–820
9. Jarostaw Wojciechowski, Marek Baraniak, Juliusz Pernak and Grzegorz Lota. (2017). Nickel Coatings Electrodeposited from Watts Type Baths Containing Quaternary Ammonium Sulphate Salts. *International Journal of Electrochemical Science*. 12:3350-3360

## เอกสารอ้างอิง(ต่อ)

10. Nabil Soroura, Wei Zhanga, Edward Ghalia and Georges Houlachib. (2017).  
A Review of Organic Additives in Zinc Electrodeposition  
Process (Performance and Evaluation). *Hydrometallurgy*. 171:320–332
11. Ewa Rudnik and Grzegorz Chowanec. (2018). Effect of Organic Additives On  
Electrodeposition of Tin from Acid Sulfate Solution. *Metallurgy and Foundry  
Engineering*. 44:41–52
12. Masataka Hakamada, Yoshiaki Nakamoto, Hiroshi Matsumoto, Hajime Iwasaki,  
Youqing Chen, Hiromu Kusuda and Mamoru Mabuchi. (2007). Relationship  
Between Hardness and Grain Size in Electrodeposited Copper Films. *Materials  
Science and Engineering: A*. 457:1-2, pp.120-126
13. Wangping Wu. (2016). Effect of Gelatin Additive on Microstructure and  
Composition of Electrodeposited Rhenium–Nickel Alloys in Aqueous Solutions.  
*Applied Physic A*. pp.122
14. Tsung-Wei Zeng and Shi-Chern Yen. (2021). Effects of Gelatin on Electroplated  
Copper Through the Use of a Modified-Hydrodynamic Electroplating  
Test Cell. *International Journal of Electrochemical Science*. pp.16
15. Kharmachi, L. Dhouibi, P. Berçot, M. Rezrazi and B. Lakard. (2017).  
Electrodeposition Behavior, Physicochemical Properties and Corrosion Resistance  
of Ni–Co Coating Modified by Gelatin Additive. *Protection of Metals and Physical  
Chemistry of Surfaces*. 53:1059–1069
16. ชีร์ เซาวนนทปัญญา. (2560). การกัดกร่อนในบรรยากาศของเหล็กกล้า : ทบทวนวรรณกรรม  
และกรณีศึกษา. *วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีมหาวิทยาลัยอุบลราชธานี*. 19 (2), 178-  
183
17. พรวิสา วงศ์ปัญญา. (2553). ความต้านทานการกัดกร่อนของเหล็กกล้า AISI 4140 ที่เคลือบผิว  
ด้วยไอทังคาบภาพ (ปริญญาโท). นครศรีธรรมราช: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
18. ภัทรพร มั่นกิจ. (2562). การศึกษาอัตราการกัดกร่อนของรอยเชื่อมทิกทอต่อชนระหว่างท่อ  
เหล็กกล้าไร้สนิม AISI304 และ AISI316L (ปริญญาโท). ปทุมธานี: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี  
ราชมงคลธัญบุรี
19. นิพนธ์ ชุ่มเชย. (2559). อิทธิพลของธาตุникเกิดต่อความต้านทานการกัดกร่อนในสารละลาย  
โซเดียมคลอไรด์ที่อุณหภูมิต่าง ๆ (ปริญญาโท). กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

## เอกสารอ้างอิง(ต่อ)


20. ASTM International. (1999). Standard Practice for Laboratory Immersion Corrosion Testing of Metals. 100 Barr Harbor Drive, West Conshohocken  
ASTM Standards.
21. ไตรภพ ไตรย์พีชน์. (2528). การศึกษาการชุบเคลือบผิวใบไม้สดบางชนิดด้วยทองแดงและ  
นิกเกิลโดยใช้ไฟฟ้า (ปริญญาานิพนธ์). เชียงใหม่: มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
22. ชีรศักดิ์ เจริญเศรษฐกุล. (2550). การศึกษาการใช้สารประกอบโลหะผสมกันในกระบวนการชุบ  
นิกเกิลและโครเมียมด้วยไฟฟ้า (ปริญญาานิพนธ์). กรุงเทพฯ: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
23. ศุภรัตน์ จิตต์จำนง. (2523). การชุบเคลือบผิวพลาสติกบางชนิดด้วยทองแดงและนิกเกิล โดยใช้  
ไฟฟ้า (ปริญญาานิพนธ์). เชียงใหม่: มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
24. ปิยนุสรณ์ น้อยด้วง. (2554). กัมและมิวซีเลจจากพืช (ปริญญาานิพนธ์). กรุงเทพฯ:  
มหาวิทยาลัยสยาม
25. Abdalbasit Adam Mariod and Hadia Fadol Adam. (2013). Gelatin, Source,  
Extraction and Industrial Applications. Scientiarum Polonorum.
26. สาธิต ทองสุกงาม. (2561). การพัฒนาผลิตภัณฑ์ขนมชั้นแห้งแข็งจากแป้งข้าวเจ้ามีสี  
(ปริญญาานิพนธ์). กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
27. กรรจิตมา ศรีรักษา. (2557). การศึกษาปริมาณเจลแลนกัมที่มีผลต่อการกระจายตัวของวุ้น  
มะพร้าวในน้ำส้ม 25 เปอร์เซ็นต์ (ปริญญาานิพนธ์). กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล  
กรุงเทพ
28. Isil Birlık and Funda Ak Azem. (2018). Influence of Bath Composition on The  
Structure and Properties of Nickel Coatings Produced by Electrodeposition  
Technique. Deu Muhendislik Fakultesi Fen ve Muhendislik. 20:679-687
29. Srijan Sengupta, Arghya Patra, Sambedan Jena, Karabi Da and Siddhartha Da.  
(2018). A Study on the Effect of Electrodeposition Parameters on the Morphology  
of Porous Nickel Electrodeposits. Metallurgical and Materials Transactions.
30. Amel BOUKHOUIETE, Saliha BOUMENDJEL and Nour-El-Houda SOBHI. (2021).  
Effect of Current Density on The Microstructure and Morphology of the  
Electrodeposited Nickel Coatings. Turkish Journal of Chemistry. 45:1599-1608

## เอกสารอ้างอิง(ต่อ)

31. Hiroaki Nakano, Takashi Ura, Satoshi Oue and Shigeo Kobayashi. (2014).  
Effect of Preadsorption of Organic Additives on the Appearance and Morphology of Electrogalvanized Steel Sheets. *ISIJ International*. 54:1653-1660
32. R. Schrebler Arratia, Horacio Aros, R. Schrebler and Carlos Carlesi Jara. (2012).  
Use of Polyethylene Glycol as Organic Additive in Copper Electrodeposition Over Stainless Steel Cathodes. *Latin American Applied Research*. 42:371-376
33. Honorata Kazimierczak, Krzysztof Szymkiewicz, Eliezer Gileadi and Noam Eliaz. (2019).  
The Effect of Direct and Pulsed Current in the Presence of Surfactants on the Electrodeposition of Zn–SiC Nanocomposite Coatings. *Coatings*. pp.9
34. Tsung-Wei Zeng and Shi-Chern Yen. (2021). Effects of Additives in an Electrodeposition Bath on The Surface Morphologic Evolution of Electrodeposited Copper. *International Journal of Electrochemical Science*. pp.16
35. Charline Meudre, Laurence Ricq, Jean-Yves Hihn, Virginie Moutarlier and Alexandra Monnin. (2014). Adsorption of Gelatin During Electrodeposition of Copper and Tin–Copper Alloys from Acid Sulfate Electrolyte. *Surface & Coatings Technology*.
36. Fan Zhang, Zhengjun Yao, Oleksandr Moliar, Xuewei Tao and Chen Yang. (2019). Preparation of A Nanocrystalline Ni Coating by Droplet Contact Electrodeposition. *Materials Research Express*.
37. Sudarsono, Aminur, Irma Nurjannah, Hidayat and Rozaini Othman. (2003).  
Effect of Current Density on Hardness of Low Carbon Steel Electroplated by Copper, Nickel and Copper-Nickel. *Materials Science and Engineering*.
38. Willi Anindita Wijanarka and Moh Toifur. (2020). Effect of Deposition Voltage on Layer Thickness, Microstructure, Cu/Ni Sheet Resistivity of Deposition Results by Magnetic Field Electroplating Assisted Technique. *Indonesian Review of Physics (IRiP)*, pp.23–29



ภาคผนวก



ภาคผนวก ก  
ผลการทดสอบชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ SS400  
ด้วยเครื่อง X-ray Fluorescence

2022- 4- 5 11:49

## SQX Calculation Result

Sample : L C S ss400l  
 Application : F-U\_Solid\_N\_134  
 Balance :  
 Matching library :  
 Sample film corr. :

Date analyzed : 2022- 3-23 16:39  
 Sample type : Metal & Alloy

File : L C S ss400l

Impurity corr. :

No.	Component	Result	Unit	Det. limit	El. line	Intensity	w/o normal
1	Al	0.0402	mass%	0.00503	Al-KA	0.0682	0.0395
2	Si	0.0386	mass%	0.00466	Si-KA	0.0677	0.0379
3	P	0.0089	mass%	0.00239	P-KA	0.0339	0.0088
4	S	0.0083	mass%	0.00224	S-KA	0.0274	0.0082
5	Mn	0.540	mass%	0.02016	Mn-KA	1.1916	0.5312
6	Fe	99.4	mass%	0.07598	Fe-KA	291.9896	97.6669

XRF Analysis

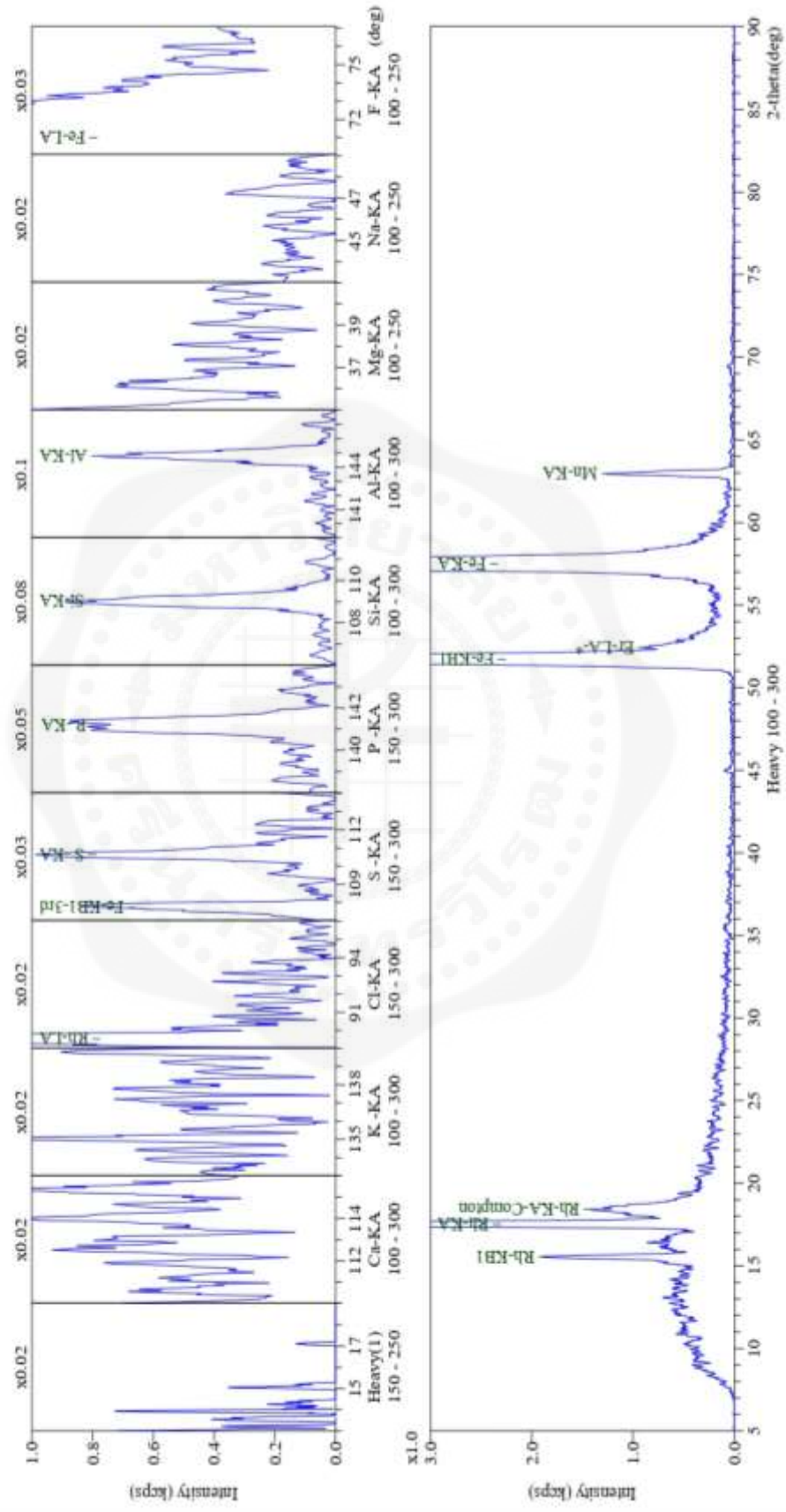
Qualitative Analysis Chart

Rigaku

Sample L C S ss4001

File name L C S ss4001

2022-3-23 16:39



2022-4-5 11:50

Peak Identification Result					
Sample : L C S ss400l			Measured date : 2022-3-23 16:39		
Application : F-U_Solid_N_134			File : L C S ss400l		
Spectrum	No.	Peak position (deg)	Net int. (kcps)	BG int. (kcps)	Element line
Heavy 100 - 300	1	15.525	1.368	0.503	Rh-KB1
	2	17.518	5.989	0.605	Rh-KA
	3	18.403	1.123	0.217	Rh-KA-Compton
	4	51.719	54.178	0.158	Fe-KB1
	5	52.416	0.644	0.249	Er-LA-*
Cl-KA 150 - 300	6	57.486	291.990	0.794	Fe-KA
	7	62.945	1.192	0.030	Mn-KA
S-KA 150 - 300	1	89.544	0.023	0.014	Rh-LA
	1	107.724	0.018	0.006	Fe-KB1-3rd
P-KA 150 - 300	2	110.623	0.027	0.002	S-KA
	1	141.163	0.034	0.004	P-KA
Si-KA 100 - 300	1	109.016	0.068	0.003	Si-KA
	1	144.774	0.068	0.003	Al-KA
F-KA 100 - 250	1	70.983	0.435	0.188	Fe-LA

Rigaku



ภาคผนวก ข

ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบการกักกรองน้โดยการจุ่มแช่

ตารางที่ ข.1 น้ำหนักชิ้นงานก่อนและหลังการทดสอบการกัดกร่อนของชิ้นงาน SS400

วันที่	ชิ้นงานที่	น้ำหนักก่อนแช่	น้ำหนักหลังแช่	น้ำหนักที่สูญเสีย
3	1	17.3257	17.2861	0.0396
	2	17.1792	17.1394	0.0398
	3	17.0126	16.9740	0.0386
6	1	16.9460	16.8947	0.0513
	2	17.3291	17.2753	0.0538
	3	16.6692	16.6168	0.0524
9	1	17.1329	17.0551	0.0778
	2	16.9120	16.8325	0.0795
	3	17.0184	16.9398	0.0786
12	1	17.3812	17.2839	0.0973
	2	17.0375	16.9399	0.0976
	3	17.1639	17.0653	0.0986
15	1	16.3648	16.1823	0.1725
	2	17.2749	17.1029	0.1720
	3	17.1736	17.0020	0.1716
18	1	17.2755	17.0596	0.2159
	2	17.0537	16.8365	0.2173
	3	16.6539	16.4384	0.2155
21	1	17.0726	16.6732	0.3994
	2	17.1863	16.7885	0.3978
	3	17.1637	16.7679	0.3958
24	1	16.6925	16.2462	0.4463
	2	16.8631	16.4171	0.4460
	3	17.0273	16.5825	0.4448

ตารางที่ ข.2 น้ำหนักชิ้นงานก่อนและหลังการทดสอบการกัดกร่อนของชิ้นงาน นิกเกิล

วันที่	ชิ้นงานที่	น้ำหนักก่อนแช่	น้ำหนักหลังแช่	น้ำหนักที่สูญเสีย
3	1	17.4290	17.4138	0.0152
	2	17.9739	17.9592	0.0147
	3	17.1083	17.0921	0.0162
6	1	17.3102	17.2705	0.0397
	2	17.7915	17.7520	0.0395
	3	16.8169	16.7768	0.0401
9	1	17.3846	17.3183	0.0663
	2	17.7849	17.7198	0.0651
	3	17.7849	17.7206	0.0643
12	1	17.6123	17.5343	0.0780
	2	17.5211	17.4460	0.0751
	3	17.1556	17.0801	0.0755
15	1	17.3812	17.2901	0.0911
	2	17.6242	17.5328	0.0914
	3	17.0363	16.9480	0.0883
18	1	16.9721	16.7332	0.0836
	2	17.3606	16.9776	0.0861
	3	17.1759	17.4960	0.0868
21	1	17.3423	17.1456	0.1967
	2	17.3463	17.1475	0.1988
	3	17.2648	17.0677	0.1971
24	1	17.1731	16.8520	0.3211
	2	17.2548	16.9340	0.3208
	3	17.1836	16.4697	0.3218

ตารางที่ ข.3 น้ำหนักชิ้นงานก่อนและหลังการทดสอบการกัดกร่อนของชิ้นงาน นิกเกิล/เจลาติน

วันที่	ชิ้นงานที่	น้ำหนักก่อนแช่	น้ำหนักหลังแช่	น้ำหนักที่สูญเสีย
3	1	16.9521	16.9457	0.0064
	2	17.0965	17.0881	0.0084
	3	16.7025	16.6935	0.0090
6	1	17.2432	17.2236	0.0196
	2	17.1187	17.0987	0.0200
	3	17.0088	17.0088	0.0201
9	1	17.2310	17.1964	0.0346
	2	16.9449	16.9109	0.0340
	3	17.0428	17.0090	0.0338
12	1	17.0557	16.9814	0.0743
	2	16.8910	16.8143	0.0767
	3	17.4385	17.3636	0.0749
15	1	17.0845	17.0055	0.0790
	2	17.1315	17.0516	0.0799
	3	17.0428	16.6937	0.0791
18	1	16.8168	16.7332	0.0836
	2	17.0637	16.9776	0.0861
	3	17.5828	17.4960	0.0868
21	1	17.1835	17.0460	0.1375
	2	17.1627	17.0242	0.1385
	3	17.1265	16.9878	0.1387
24	1	17.1746	16.9868	0.1878
	2	17.1847	16.9940	0.1907
	3	16.6584	16.4697	0.1887

ตารางที่ ข.4 น้ำหนักชิ้นงานก่อนและหลังการทดสอบการกัดกร่อนของชิ้นงาน นิกเกิล/กัมมะราบิก

วันที่	ชิ้นงานที่	น้ำหนักก่อนแช่	น้ำหนักหลังแช่	น้ำหนักที่สูญเสีย
3	1	17.2852	17.2820	0.0032
	2	16.9446	16.9402	0.0044
	3	16.6912	16.6890	0.0044
6	1	17.0946	17.0855	0.0091
	2	16.8783	16.8687	0.0096
	3	17.3975	17.3887	0.0088
9	1	17.6775	17.6571	0.0204
	2	17.1446	17.1257	0.0189
	3	17.4105	17.3910	0.0195
12	1	17.0674	17.0275	0.0399
	2	16.9756	16.9380	0.0376
	3	17.6420	17.4236	0.0384
15	1	17.3282	17.2884	0.0398
	2	16.9739	16.9339	0.0400
	3	17.2639	17.2232	0.0407
18	1	16.9720	16.9055	0.0665
	2	16.9818	16.9159	0.0659
	3	17.0486	16.9817	0.0669
21	1	17.1746	17.0945	0.0801
	2	17.0447	16.6954	0.0793
	3	17.3652	17.2873	0.0779
24	1	16.7494	16.6530	0.0964
	2	17.2746	17.1773	0.0973
	3	16.8548	16.7580	0.0968

ตารางที่ ข.5 น้ำหนักชิ้นงานก่อนและหลังการทดสอบการกัดกร่อนของชิ้นงาน นิกเกิล/แก้ว

วันที่	ชิ้นงานที่	น้ำหนักก่อนแช่	น้ำหนักหลังแช่	น้ำหนักที่สูญเสีย
3	1	17.0362	17.0249	0.0113
	2	16.5712	16.7391	0.0121
	3	16.9461	16.9342	0.0119
6	1	16.9212	16.8891	0.0321
	2	16.4345	16.4040	0.0305
	3	17.1846	17.1531	0.0315
9	1	17.1411	17.0893	0.0518
	2	17.1378	17.0862	0.0516
	3	16.6917	16.9126	0.0491
12	1	17.0176	16.9461	0.0715
	2	16.5845	16.5110	0.0735
	3	16.8438	16.7712	0.0726
15	1	17.2406	17.1453	0.0953
	2	16.7519	16.6570	0.0949
	3	16.9219	16.8276	0.0943
18	1	16.9214	16.7995	0.1219
	2	16.8832	16.7608	0.1221
	3	17.2865	17.1640	0.1225
21	1	16.6255	16.4636	0.1619
	2	16.9635	16.8050	0.1585
	3	16.9640	16.7970	0.1670
24	1	17.4726	17.1633	0.3092
	2	17.3582	17.0450	0.3132
	3	17.7538	17.4778	0.2760



ประวัติย่อผู้วิจัย

## ประวัติย่อผู้วิจัย

ชื่อ-สกุล	นางสาวชญานุช แสนทวีสุข
วันเดือนปีเกิด	26 กันยายน 2542
สถานที่เกิด	โรงพยาบาลสรรพสิทธิประสงค์ 122 ถนนสรรพสิทธิ์ ตำบลในเมือง อำเภอเมืองอุบลราชธานี อุบลราชธานี 34000
วุฒิการศึกษา	มัธยมศึกษาตอนปลาย โรงเรียนเกาะสมุย จังหวัดสุราษฎร์ธานี พ.ศ.2560 วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวัสดุศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ พ.ศ.2564
ชื่อ-สกุล	นางสาวดวงตา สิทธิโชคเจริญ
วันเดือนปีเกิด	20 กุมภาพันธ์ 2543
สถานที่เกิด	โรงพยาบาลตำรวจ 492/1 ถนน พระรามที่ ๑ แขวง ปทุมวัน เขตปทุมวัน กรุงเทพมหานคร 10330
วุฒิการศึกษา	มัธยมศึกษาตอนปลาย โรงเรียนศรีอยุธยา ในพระอุปถัมภ์สมเด็จพระเจ้าภคินีเธอ เจ้าฟ้าเพชรรัตนราชสุดา สิริโสภาพรรณวดี จังหวัดกรุงเทพมหานคร พ.ศ.2560 วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวัสดุศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ พ.ศ.2564
ชื่อ-สกุล	นางสาวมนัสวี มณีกันภัย
วันเดือนปีเกิด	9 ตุลาคม 2542
สถานที่เกิด	โรงพยาบาลเจริญกรุงประชารักษ์ 8 ถ. เจริญกรุง แขวงบางค้อแหลม เขตบางค้อแหลม กรุงเทพมหานคร 10120
วุฒิการศึกษา	มัธยมศึกษาตอนปลาย โรงเรียนสตรีศรีสุริโยทัย จังหวัดกรุงเทพมหานคร พ.ศ.2560 วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวัสดุศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ พ.ศ.2564