

การศึกษาการแปลงสนิมเหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง

STUDY ON MEDIUM CARBON STEEL  
RUST CONVERSION



กนกวรรณ แก้วเข้ม  
ณัฐฐา สามงามอ่อง

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)  
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงแก้ไขเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้  
ปีการศึกษา 2565

STUDY ON MEDIUM CARBON STEEL  
RUST CONVERSION



KANOKWAN KAEWKHEM  
NATTHA SAMNGAMONG

A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF  
THE REQUIREMENT FOR  
THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE (INDUSTRIAL CHEMISTRY)  
DEPARTMENT OF CHEMISTRY, SCHOOL OF SCIENCE  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ **ACADEMIC YEAR 2022** ภาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ	การศึกษาการแปลงสนิมเหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง STUDY ON MEDIUM CARBON STEEL RUST CONVERSION
ชื่อนักศึกษา	นางสาว กนกวรรณ แก้มเข้ม รหัสนักศึกษา 62050253 นางสาว ณัฐธา สามงามอ่อง รหัสนักศึกษา 62050279
ปริญญา	วิทยาศาสตร์บัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)
ภาควิชา	เคมี
ปีการศึกษา	2565
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.ดร. สุธา สุทธิเรืองวงศ์

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.) อนุมัติให้โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม) ประจำปีการศึกษา 2565

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
รศ.ดร. ภัทราวุธ มนต์วิเศษ ประธานกรรมการ	
รศ.ดร. ปุณณมา ศิริพันธ์โนน กรรมการ	
ผศ.ดร. สุธา สุทธิเรืองวงศ์ กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษา	

ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ	การศึกษาการแปลงสนิมเหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง
ชื่อนักศึกษา	นางสาว กนกวรรณ แก้วเข้ม รหัสนักศึกษา 62050253 นางสาว ณัฐภา สามงามอ่อง รหัสนักศึกษา 62050279
ปริญญา	วิทยาศาสตร์บัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)
ภาควิชา	เคมี
คณะ	วิทยาศาสตร์
มหาวิทยาลัย	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.)
ปีการศึกษา	2565
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.ดร.สุธา สุทธิเรืองวงศ์

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการแปลงสนิมของเหล็กกล้าคาร์บอนปานกลางชนิด S45C พฤติกรรมการกัดกร่อน และความเข้มข้นที่เหมาะสมของโซเดียมโอดีเตคซิลซัลเฟตที่เติมในสารละลาย สำหรับการแปลงสนิมในการป้องกันการกัดกร่อนของโลหะ ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์เข้มข้นร้อยละ 3 โดยน้ำหนักที่อุณหภูมิห้อง พฤติกรรมการกัดกร่อนของโลหะถูกตรวจสอบด้วยเทคนิคทางเคมีไฟฟ้าโพเทนชิโอดีนามิกโพลาริเซชัน โดยใช้ขั้วไฟฟ้าชนิดคาโธดลิเทียมตัวเป็นขั้วอ้างอิงและแผ่นแพลทินัมเป็นขั้วตรงข้าม จากผลการทดสอบพบว่าค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน และค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนมีค่าแตกต่างกันไม่มากนักสำหรับสารแปลงสนิมกรดแทนนิกแต่ละชนิด อย่างไรก็ตามพบว่า โซเดียมโอดีเตคซิลซัลเฟตที่เติมลงในสารละลายสำหรับการแปลงสนิม ช่วยเพิ่มค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน ทำให้เกิดการกัดกร่อนของโลหะที่น้อยลงในสารละลายที่ใช้ทดสอบการกัดกร่อน (โซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้นร้อยละ 3 โดยน้ำหนักอย่างเห็นได้ชัด)

**คำสำคัญ :** การแปลงสนิมของเหล็กกล้าคาร์บอนปานกลางชนิด S45C , โซเดียมโอดีเตคซิลซัลเฟต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<b>Title</b>	STUDY ON MEDIUM CARBON STEEL RUST CONVERSION
<b>Students</b>	Miss Kanokwan Kaewkhem    Student ID 62050253 Miss Natta Samngamong    Student ID 62050279
<b>Degree</b>	Bachelor of Science (Industrial chemistry)
<b>Department</b>	Chemistry
<b>School</b>	Science
<b>University</b>	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL)
<b>Academic Year</b>	2022
<b>Advisor</b>	Asst. Prof. Dr. Sutha Sutthiruangwong

### Abstract

The aim of this research was to study the rust conversion of medium carbon steel (S45C), corrosion behavior and the appropriate concentration of sodium dodecyl sulfate added to the rust conversion solution to prevent metal corrosion in sodium chloride solution 3 percent concentration by weight at room temperature. The metal corrosion behavior was investigated by potentiodynamic polarization electrochemical technique. The saturated calomel electrode was used as the reference electrode and a platinum plate was a counter electrode. From the results show that the corrosion potential and the corrosion current density were slightly different for each type of tannic acid rust converter. However, sodium dodecyl sulfate added to rust conversion solution was found to increase the corrosion potential and decrease the corrosion current density of the samples in sodium chloride solution.

**Keywords :** Rust conversion of medium carbon steel S45C , Sodium dodecyl sulfate

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีเนื่องจากได้รับความอนุเคราะห์จากกลุ่มบุคคลและหน่วยงานต่างๆ ซึ่งคณะผู้จัดทำขอขอบพระคุณไว้ ณ ที่นี้

ผศ.ดร.สุธา สุทธิเรืองวงศ์ ที่ให้คำปรึกษา ดูแล ให้ความรู้ และสอนทักษะการทำงานให้แก่กลุ่มของข้าพเจ้าในการทำโครงการพิเศษครั้งนี้ จึงขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงมา ณ ที่นี้ด้วย

รศ.ดร.ภัทราวุธ มนต์วิเศษ และรศ.ดร.บุญณมา ศิริพันธ์โนน ที่ช่วยเป็นคณะกรรมการในการสอบและตรวจทาน รวมทั้งให้คำแนะนำอื่นๆ เพื่อนำไปปรับปรุงแก้ไขจนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

น.ส.พิมพ์ภรณ์ มั่นพิริยะกุล ที่ช่วยดูแล ให้ความรู้ในการใช้เครื่องโพเทนชิโอสแตท/กัลวานอสแตท และให้คำแนะนำตลอดระยะเวลาในการทำโครงการพิเศษ

อาจารย์ทุกท่านของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังที่เพิ่มพูนความรู้ทั้งในทางทฤษฎีและปฏิบัติ ควบคู่กับการอบรมสั่งสอนความมีระเบียบวินัยและคุณธรรม

สาขาวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ และเจ้าหน้าที่ที่เกี่ยวข้องที่อำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือ อุปกรณ์ สารเคมี และให้คำแนะนำตลอดระยะเวลาในการทำโครงการพิเศษ

ขอบคุณเพื่อนๆ ทุกคนที่คอยให้ความช่วยเหลือในเรื่องเครื่องมืออุปกรณ์ยามขาดแคลน รวมทั้งคอยแนะนำและให้กำลังใจตลอดระยะเวลาในการทำโครงการพิเศษ

ขอกราบขอบพระคุณพ่อ คุณแม่ และทุกคนในครอบครัวที่เป็นผู้อยู่เบื้องหลังความสำเร็จที่ได้สนับสนุนให้โอกาสได้ศึกษาเรียนรู้ทุกสิ่งทุกอย่างและคอยให้กำลังใจมาโดยตลอด

กนกวรรณ แก้วเข้ม  
ณัฐฐา สามงามอ่อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย .....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....	ข
กิตติกรรมประกาศ .....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ซ
คำย่อ/สัญลักษณ์ .....	ฎ
<b>บทที่ 1 บทนำ</b> .....	<b>1</b>
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ .....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขต .....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ .....	3
<b>บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง</b> .....	<b>4</b>
2.1 การกัดกร่อน (Corrosion) .....	4
2.1.1 กลไกการกัดกร่อน (Mechanism of corrosion) .....	4
2.1.2 ไฟฟ้าเคมี (Electrochemistry).....	6
2.1.3 ประเภทของการกัดกร่อน (Classifications of corrosion) .....	7
2.1.4 การกัดกร่อนแบบสม่ำเสมอ (Uniform Corrosion).....	8
2.1.5 กลไกการสึกกร่อนสม่ำเสมอ.....	17
2.2 เทคนิคโพเทนชิโอสแตติกโพลาริเซชัน (Potentiodynamic polarization).....	18
2.3 การแปลงสนิม (rust converter).....	20
2.4 สารลดแรงตึงผิว (Surfactant).....	21
2.4.1 ชนิดของสารลดแรงตึงผิว .....	21
2.4.2 การนำไปใช้ประโยชน์ .....	23
2.4.3 ประเภทของสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุลบที่นิยม (Types of popularity anionic surfactant) .....	24

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ

	หน้า
2.4.4 โซเดียมโดเดคซิลซัลเฟต (Sodium dodecyl sulfate) .....	26
2.4.5 ความเข้มข้นวิกฤตของการเกิดไมเซลล์ (Critical micelle concentration, CMC) .....	28
2.4.6 การวัดค่าสภาพการนำไฟฟ้า (Conductivity) .....	33
2.5 การดูดซับ (Adsorption) .....	35
2.5.1 ไอโซเทอมแบบแลงเมียร์ (Langmuir isotherm).....	37
2.5.2 ไอโซเทอมแบบฟรอนด์ลิช (Freundlich isotherm) .....	37
.....2.5.3	
ไอโซเทอมแบบบรูเนาเออร์-เอมเมทท์-เทลเลอร์ (Brunauer-Emmett-Teller isotherm) .....	38
2.6 กรดแทนนิก (Tannic acid) .....	38
2.6.1 กลไกการกัดกร่อนของกรดแทนนิก (Corrosion mechanism of tannic Acid) .....	40
2.6.2 ประโยชน์ของแทนนินในอุตสาหกรรม .....	41
2.7 2-บิวทอกซีเอทานอล (2-Butoxyethanol) .....	43
2.8 เหล็กกล้า (Steel) .....	45
2.8.1 ประเภทของเหล็กกล้า (Type of steel) .....	45
2.8.2 อิทธิพลของธาตุต่างๆที่ผสมในเหล็กกล้า .....	48
2.9 เหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง (Carbon medium steel).....	52
2.9.1 เหล็กกล้าคาร์บอนปานกลางชนิด S45C (S45C Carbon medium steel) .....	52
2.10 การเปียกผิววัสดุและมุมสัมผัส .....	53
2.11 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	55
<b>บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย .....</b>	<b>58</b>
3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง.....	58
3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง.....	58
3.3 วิธีการทดลอง.....	59
3.3.1 การเตรียมชิ้นงานโลหะ.....	59
3.3.2 การทำสนิม.....	59

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ

	หน้า
3.3.3 การวัดค่าการนำไฟฟ้าของสารละลายที่ประกอบด้วยโซเดียมโตะเดคซิลซัลเฟต กรดแทนนิก และไดบิวทอกซีเอทานอล ที่ความเข้มข้นของโซเดียมโตะเดคซิลซัลเฟต แตกต่างกัน .....	59
3.3.4 การแปลงสนิม .....	63
3.3.5 การวัดทางเคมีไฟฟ้าด้วยเทคนิคโพเทนชิโอะไดนามิกโพลาริเซชัน .....	65
3.3.6 การวิเคราะห์โครงสร้างของผลึกด้วยเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray diffractometer; XRD) .....	65
3.3.7 การทดสอบความสามารถในการเปียกผิวของวัสดุและมุมสัมผัส (Wettability and contact angle test).....	66
<b>บทที่ 4 ผลการวิจัยและการอภิปรายผล .....</b>	<b>67</b>
4.1 การวัดค่าการนำไฟฟ้าของสารละลายที่ประกอบด้วยโซเดียมโตะเดคซิลซัลเฟต กรดแทนนิก และไดบิวทอกซีเอทานอล โดยมีความเข้มข้นของโซเดียมโตะเดคซิลซัลเฟตแตกต่างกัน .....	67
4.2 การวิเคราะห์โครงสร้างและองค์ประกอบของชิ้นงานโลหะด้วยเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray diffractometer; XRD) .....	69
4.3 การยับยั้งการกัดกร่อนของเหล็กกล้าคาร์บอนปานกลางชนิด S45C ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์เข้มข้นร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก โดยใช้สารแปลงสนิมกรดแทนนิก .....	75
4.4 การทดสอบความสามารถในการเปียกผิวของวัสดุและมุมสัมผัส (Wettability and contact angle test).....	83
<b>บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....</b>	<b>88</b>
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	88
5.2 ข้อเสนอแนะ .....	89
เอกสารอ้างอิง .....	90

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

F

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 เปรียบเทียบความสามารถของสารลดแรงตึงผิวทั้ง 4 ชนิด ในการทำให้เกิดฟอง การซักล้าง และการทำให้พื้นผิวเกิดความอ่อนนุ่ม.....	23
2.2 การแสดงการใช้งานของสารลดแรงตึงผิวชนิดต่างๆ.....	24
2.3 แสดงตัวอย่างค่าความเข้มข้นวิกฤตของการเกิดไมเซลล์และจำนวนโมเลกุลของการรวมกลุ่ม จากสารลดแรงตึงผิวต่างๆ.....	29
2.4 สมบัติของการดูดซับทางเคมีและทางกายภาพ.....	36
2.5 แสดงส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าคาร์บอน ตามมาตรฐาน SAE.....	50
3.1 ความเข้มข้นของโซเดียมโตะเคคซิลซัลเฟตต่างๆ ในสารละลายผสมระหว่างโซเดียมโตะเคค ซิลซัลเฟต กรดแทนนิก และไดบิวทอกซีเอทานอล.....	60
3.2 องค์ประกอบของสารแปลงสนิมชุดที่ 1.....	64
3.3 องค์ประกอบของสารแปลงสนิมชุดที่ 2.....	64
3.4 ค่ามุมสัมผัสต่างๆและปฏิสัมพันธ์ที่เกี่ยวข้อง.....	66
4.1 ความเข้มข้นของโซเดียมโตะเคคซิลซัลเฟตในสารแปลงสนิมชุดที่ 1.....	67
4.2 ความเข้มข้นของโซเดียมโตะเคคซิลซัลเฟตในสารแปลงสนิมชุดที่ 2.....	68
4.3 ผลการทดลองของชิ้นงานโลหะที่เกิดสนิมที่ผ่านการแปลงด้วยสารแปลงสนิมกรดแทนนิกเข้มข้น ร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก โดยการใส่โซเดียมโตะเคคซิลซัลเฟตที่ความเข้มข้นแตกต่างกัน ในสารละลาย โซเดียมคลอไรด์เข้มข้นร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก.....	76
4.4 ผลการทดลองของชิ้นงานโลหะที่เกิดสนิมที่ผ่านการแปลงด้วยสารแปลงสนิมกรดแทนนิกเข้มข้น ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก โดยการใส่โซเดียมโตะเคคซิลซัลเฟตที่ความเข้มข้นแตกต่างกัน ในสารละลาย โซเดียมคลอไรด์เข้มข้นร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก.....	80
4.5 ค่ามุมสัมผัสของสารแปลงสนิมชุดที่ 1 ที่ความเข้มข้นของโซเดียมโตะเคคซิลซัลเฟตแตกต่างกัน	83
4.6 ค่ามุมสัมผัสของสารแปลงสนิมชุดที่ 2 ที่ความเข้มข้นของโซเดียมโตะเคคซิลซัลเฟตแตกต่างกัน	85

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ปฏิกริยาการเกิดสนิมเหล็กกล้า.....	4
2.2 ภาพตัดขวางของชิ้นโลหะแสดงความเสียหายที่เกิดจากการกัดกร่อนในรูปแบบแบบต่างๆ (ก) แบบสม่ำเสมอ (ข) แบบกัลวานิก (ค) แบบช่องแคบ (ง) แบบกัดเซาะ (จ) การกัดกร่อนโดย ความเค้น (ฉ) แบบรูเข็ม (ช) การกัดกร่อนที่เกิดขึ้นที่ขอบของผลึกของโลหะ และ (ซ) การกัดกร่อน แบบเลือกแบบ .....	7
2.3 ลักษณะการกัดกร่อนแบบสม่ำเสมอ.....	8
2.4 ตารางศักย์ไฟฟ้ามาตรฐาน .....	9
2.5 ความสมดุลของระบบการกัดกร่อนแบบสม่ำเสมอ โหมดการแสดงเชิงเส้น (บน) และกึ่งล็อก (ล่าง) .....	10
2.6 แผนภาพอีวานส์ของระบบการกัดกร่อนแบบสม่ำเสมอ.....	12
2.7 เส้นโค้งโพลาริซชันของระบบการกัดกร่อนที่สม่ำเสมอ .....	13
2.8 ภาพประกอบของการต้านทานโพลาริซชัน.....	15
2.9 ผลของค่าสัมประสิทธิ์ทาเฟล $b_0$ ต่อเส้นโค้งขั้วบวกของอิเล็กโทรด $Fe/Fe^{2+}$ .....	15
2.10 ตัวอย่างของเส้นโค้งโพลาริซชันโดยทั่วไปของระบบการกัดกร่อนแบบสม่ำเสมอ: เหล็กแอกทีฟ เป็นสีแดง และเหล็กแบบพาสซีฟเป็นสีน้ำเงิน.....	16
2.11 การเกิดสนิมในสภาวะที่มีน้ำเป็นองค์ประกอบ.....	17
2.12 องค์ประกอบของเซลล์ไฟฟ้าแบบสามขั้ว .....	18
2.13 เส้นกราฟ polarization ที่ได้จากเทคนิค Potentiodynamic polarization .....	19
2.14 โครงสร้างของสารลดแรงตึงผิว.....	22
2.15 โครงสร้างโมเลกุลของโซเดียมโดเดคซิลซัลเฟต.....	27
2.16 รูปจำลองสองมิติแสดงบริเวณชั้นต่างๆของไมเซลล์ .....	31
2.17 กระบวนการรวมตัวของสารลดแรงตึงผิว (ก) รวมตัวที่ผิววัสดุ และ (ข) การเกิดไมเซลล์ ทรงกลม .....	32
2.18 การเปลี่ยนแปลงสมบัติของสารละลายเมื่อเติมสารลดแรงตึงผิว .....	34
2.19 ลักษณะโครงสร้างของกรดแทนนิก (Tannic acid) .....	39
2.20 แผนผังแสดงกระบวนการกัดกร่อนของเหล็กกล้าคาร์บอนในสารละลายที่มีฤทธิ์กัดกร่อนด้วย กรดแทนนิก.....	40
2.21 แสดงแรงยึดเหนี่ยวที่กระทำระหว่างโมเลกุลของเหลวและของแข็ง.....	53

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.22 แสดงระดับการเปียกของพื้นผิว .....	54
3.1 การหาค่าความเข้มข้นวิกฤตของการเกิดไมเซลล์ของสารละลายผสมที่ประกอบด้วยกรดแทนนิกเข้มข้นร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก ไตบิวทอกซีเอทานอลเข้มข้นร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก และโซเดียมโดเดคซิลซัลเฟตที่ความเข้มข้นต่างๆ .....	62
3.2 การหาค่าความเข้มข้นวิกฤตของการเกิดไมเซลล์ของสารละลายผสมที่ประกอบด้วยกรดแทนนิกเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ไตบิวทอกซีเอทานอลเข้มข้นร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก และโซเดียมโดเดคซิลซัลเฟตที่ความเข้มข้นต่างๆ .....	62
4.1 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของชิ้นงานโลหะที่ไม่เกิดสนิม .....	69
4.2 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของชิ้นงานโลหะเกิดสนิม .....	70
4.3 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของชิ้นงานโลหะที่เกิดสนิมที่ผ่านการแปลงสนิมด้วยแทนนิก 2% [SDS 0.0026] .....	71
4.4 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของชิ้นงานโลหะที่เกิดสนิมที่ผ่านการแปลงสนิมด้วยแทนนิก 5% [SDS 0.0060] .....	72
4.5 ชิ้นงานโลหะที่ไม่เกิดสนิม .....	74
4.6 ชิ้นงานโลหะที่เกิดสนิม .....	74
4.7 กราฟโพเทนซีโอไดนามิกโพลาริเซชันของชิ้นงานโลหะที่เกิดและไม่เกิดสนิม และชิ้นงานโลหะที่เกิดสนิมที่ผ่านการแปลงด้วยสารแปลงสนิมที่ประกอบด้วยกรดแทนนิกเข้มข้นร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก โดยเติมโซเดียมโดเดคซิลซัลเฟต (SDS) ที่ความเข้มข้นต่างๆ และไตบิวทอกซีเอทานอลเข้มข้นร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์เข้มข้นร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก .....	75
4.8 ชิ้นงานโลหะที่เกิดสนิมที่ผ่านการแปลงด้วยสารแปลงสนิมกรดแทนนิกเข้มข้นร้อยละ 2 โดย น้ำหนัก โดยมีโซเดียมโดเดคซิลที่ความเข้มข้นแตกต่างกันหลังทำการทดลองในสารละลายโซเดียมคลอไรด์เข้มข้นร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก (a) TA2% (b) TA2% [SDS 0.0013] (c) TA2% [SDS 0.0026] (d) TA2% [SDS 0.0052] (e) TA2% [SDS 0.0104] .....	78
4.9 กราฟโพเทนซีโอไดนามิกโพลาริเซชันของชิ้นงานโลหะที่เกิดและไม่เกิดสนิม และชิ้นงานโลหะที่เกิดสนิมที่ผ่านการแปลงด้วยสารแปลงสนิมที่ประกอบด้วยกรดแทนนิกเข้มข้นร้อยละ 5 โดย น้ำหนัก โดยเติมโซเดียมโดเดคซิลซัลเฟต (SDS) ที่ความเข้มข้นต่างๆ และไตบิวทอกซีเอทานอลเข้มข้นร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์เข้มข้นร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก .....	79

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
4.10 เหล็กกล้าคาร์บอนปานกลางชนิด S45C ที่เกิดสนิมที่ผ่านการแปลงด้วยสารแปลงสนิมกรดแทนนิกเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก โดยมีโซเดียมโอดีเตคซิลที่ความเข้มข้นแตกต่างกัน หลังทำการทดลองในสารละลายโซเดียมคลอไรด์เข้มข้นร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก (a) TA5% (b) TA5% [SDS 0.0030] (c) TA5% [SDS 0.0060] (d) TA5% [SDS 0.0120] (e) TA5% [SDS 0.0240] .....	82
4.11 ภาพถ่ายหดยดสารแปลงสนิมของสารแปลงสนิมกรดแทนนิกเข้มข้นร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก ที่ความเข้มข้นของโซเดียมโอดีเตคซิลซัลเฟตแตกต่างกัน (a) TA2% (b) TA2% [SDS 0.0013] (c) TA2% [SDS 0.0026] (d) TA2% [SDS 0.0052] (e) TA2% [SDS 0.0104] .....	84
4.12 แผนภูมิระหว่างค่ามัมส์สัฟของสารแปลงสนิมกรดแทนนิกที่ความเข้มข้นร้อยละ 2 โดยน้ำหนักบนชิ้นงานโลหะ และความเข้มข้นของโซเดียมโอดีเตคซิลซัลเฟตที่แตกต่างกัน .....	84
4.13 ภาพหดยดสารแปลงสนิมของสารแปลงสนิมกรดแทนนิกเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก บนชิ้นงานโลหะ ที่ความเข้มข้นของโซเดียมโอดีเตคซิลซัลเฟตแตกต่างกัน (a) TA5% (b) TA5% [SDS 0.0030] (c) TA5% [SDS 0.0060] (d) TA5% [SDS 0.0120] (e) TA5% [SDS 0.0240] .....	86
4.14 แผนภูมิระหว่างค่ามัมส์สัฟของสารแปลงสนิมกรดแทนนิกที่ความเข้มข้นร้อยละ 5 โดย น้ำหนักบนชิ้นงานโลหะ และความเข้มข้นของโซเดียมโอดีเตคซิลซัลเฟตที่แตกต่างกัน .....	86

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## คำย่อ/สัญลักษณ์

คำย่อ/สัญลักษณ์	คำอธิบาย
SDS	โซเดียมโดเดซิลซัลเฟต
CMC	ความเข้มข้นวิกฤตของไมเซลล์
TA	กรดแทนนิก
TA2%	กรดแทนนิกความเข้มข้นร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก
TA5%	กรดแทนนิกความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การกัดกร่อน (corrosion) เป็นปรากฏการณ์ที่มีค่าใช้จ่ายสูงและอันตราย ซึ่งส่งผลกระทบต่ออุตสาหกรรมต่างๆมากมาย ซึ่งนำไปสู่ความสูญเสียทางเศรษฐกิจอย่างมาก และในบางกรณีอาจถึงขั้นเสียหายร้ายแรง เป็นกระบวนการทาง ธรรมชาติที่เกิดขึ้นเมื่อโลหะสัมผัสกับสภาพแวดล้อมที่มีออกซิเจนและความชื้น เป็นผลให้โลหะสึกกร่อนและล้มเหลวในที่สุด นำไปสู่การซ่อมแซมและเปลี่ยนที่มีค่าใช้จ่ายสูง โชคดีที่มีหลายวิธีในการปกป้องโลหะจากการกัดกร่อน [1] หนึ่งในวิธีที่มีประสิทธิภาพและใช้กันอย่างแพร่หลายคือการใช้สารเคลือบผิวและการสร้างพื้นผิวใหม่ การเคลือบเป็นชั้นบางๆของวัสดุที่เข้ากับพื้นผิวโลหะเพื่อป้องกันการกัดกร่อน สารเคลือบเหล่านี้สามารถทำจากวัสดุหลายชนิดรวมทั้งโพลีเมอร์ เซรามิก และโลหะผสม [2] การเคลือบสามารถใช้ได้หลายรูปแบบ เช่น การทาสี การชุบ และการชุบด้วยไฟฟ้า ประเภทของการเคลือบที่เลือกสำหรับการใช้งานเฉพาะจะขึ้นอยู่กับระดับการป้องกันที่ต้องการ ค่าใช้จ่าย และสภาพแวดล้อมที่โลหะจะสัมผัส การเคลือบยังสามารถให้การป้องกันการกัดกร่อนได้หลายวิธี ประโยชน์หลักอย่างหนึ่งของการเคลือบผิวคือเป็นเกราะป้องกันระหว่างพื้นผิวและสิ่งแวดล้อม [3] แผ่นกั้นนี้สามารถป้องกันไม่ให้ความชื้น ออกซิเจน และสารกัดกร่อนอื่นๆสัมผัสกับพื้นผิว ซึ่งจะช่วยลดความเสี่ยงของการกัดกร่อนได้อย่างมาก ข้อดีอีกประการของการเคลือบผิวคือ สามารถทำหน้าที่เป็นชั้นเสียสละ ซึ่งหมายความว่า จะสึกกร่อนก่อนที่วัสดุโลหะจะสึกกร่อน นอกจากนี้ สารเคลือบยังสามารถให้การป้องกันแคโทดิก (cathodic) ได้ ซึ่งหมายความว่า สารเคลือบสามารถยับยั้งกระบวนการกัดกร่อนโดยทำหน้าที่เป็นตัวให้อิเล็กตรอนหรือตัวรับ [4] สิ่งนี้สามารถช่วยป้องกันการก่อตัวของผลิตภัณฑ์กัดกร่อนบนพื้นผิวของวัสดุโลหะ และลดความเสี่ยงของการกัดกร่อนได้อย่างมาก โดยรวมแล้วสารเคลือบสามารถให้การป้องกันการกัดกร่อนที่มีประสิทธิภาพ โดยการสร้างสิ่งกีดขวางระหว่างพื้นผิวกับสิ่งแวดล้อม ทำหน้าที่เป็นชั้นเสียสละและให้การป้องกันแคโทดิก [5] โดยการสร้างพื้นผิวใหม่เกี่ยวข้องกับการใช้การเชื่อมหรือประสานที่อุณหภูมิสูงเพื่อซ่อมแซมพื้นผิวโลหะที่เสียหาย กระบวนการนี้มักใช้ในการซ่อมแซมพื้นผิวที่สึกกร่อนและเป็นหลุม ตลอดจนการคืนรูปร่างและขนาดเดิมของโลหะ การสร้างพื้นผิวใหม่สามารถใช้เพื่อสร้างชั้นป้องกันบนพื้นผิวของโลหะ ซึ่งจะช่วยป้องกันการกัดกร่อนเพิ่มเติม [6] นอกจากนี้ การสร้างพื้นผิวใหม่ซึ่งเป็นเทคนิคการป้องกันการกัดกร่อนสามารถยืดอายุการใช้งานของส่วนประกอบหรือโครงสร้างได้หลายปี ปรับปรุงประสิทธิภาพและความน่าเชื่อถือ ประหยัดเงินในระยะยาว ปรับปรุงรูปลักษณ์ ป้องกันการกัดกร่อนเพิ่มเติม และเป็นต้นทุนทางเลือกที่มีประสิทธิภาพในการทดแทน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เหล็กกล้าคาร์บอน (Carbon Steel) [7] หรือ “Mild Steel” มีส่วนผสมของคาร์บอนเป็นหลักที่ไม่เกิน 1.7% และมีธาตุอื่นผสม เช่น ซิลิคอน ฟอสฟอรัส กำมะถัน แมงกานีส ในปริมาณน้อย จะติดมากับเนื้อเหล็กตั้งแต่เป็นสินแร่ เป็นวัสดุที่ได้รับความนิยมในการนำมาใช้ในกระบวนการผลิต เนื่องจากคุณสมบัติที่ทนทาน แข็งแรง และยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้หลากหลาย เช่น ผลิตภัณฑ์ท่อ ข้อต่อ ข้องอ เป็นต้น อีกทั้งผลิตภัณฑ์ที่ผลิตจากเหล็กกล้าคาร์บอนนั้น จะมียุคสูงกว่าเหล็กกล้าชนิดอื่น ๆ เช่น เหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง (Medium Carbon Steel) เป็นเหล็กที่มีความแข็งแรงและความเค้นแรงดึงมากกว่าเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ แต่มีความเหนียวน้อยกว่า นอกจากนี้ยังให้คุณภาพในการแปรรูปที่ดีกว่าและยังสามารถนำไปชุบผิวแข็งได้ เหมาะกับงานที่ต้องการความเค้นดึงปานกลาง ต้องการป้องกันการสึกหรอที่ผิวหน้า และต้องการความแข็งแรง เช่น อะไหล่ชิ้นส่วนเครื่องจักรกล รางรถไฟ เพลากล่อง เฟือง หัวค้อน ก้านสูบ สปริง ชิ้นส่วนรถไถนา ไชคอง ท่อเหล็กนอต สกรูที่ต้องแข็งแรง เป็นต้น แต่ปัญหาการเกิดการกัดกร่อนยังคงเป็นปัญหาหลักที่สามารถพบในขณะที่มีการใช้งานโลหะเหล่านี้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งกับการอุตสาหกรรมหรือกับโลหะที่ต้องสัมผัสกับสภาพแวดล้อมเป็นเวลานานๆ ดังนั้นจึงควรมีการป้องกันการกัดกร่อนที่เหมาะสมสำหรับการใช้งานแต่ละประเภท และการป้องกันการกัดกร่อนก็มีด้วยกันหลายวิธี เช่น การเลือกวัสดุที่เหมาะสม การเคลือบผิวหรือทาสี การชุบด้วยไฟฟ้า การรมดำ ซึ่งหนึ่งในวิธีการป้องกันการกัดกร่อนที่นิยมใช้กับโลหะที่ต้องสัมผัสกับสภาพแวดล้อมเป็นเวลานาน คือ การเคลือบผิวหรือการทาสี (Coating) อาศัยการแปลงสนิมให้กลายเป็นสนิมสีดำ (Rust Converter) เมื่อทาน้ำยา RC ลงไปบนโลหะที่เป็นสนิมแล้ว จะเข้าไปช่วยยับยั้งการแพร่กระจายของสนิม และทำให้สนิมใหม่ไม่เกิดบนเหล็ก หลังจากทาน้ำยา RC ด้วยเหตุนี้จึงนำไปสู่การศึกษาการแปลงสนิมเหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง โดยทางคณะผู้จัดทำได้นำสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุลบโซเดียมโดเดคซิลซัลเฟต (Sodium dodecyl sulfate, SDS) มาใช้ในการทดลอง โดยสันนิษฐานว่าสารลดแรงตึงผิวโซเดียมโดเดคซิลซัลเฟตจะช่วยปกคลุมพื้นที่ผิวของตัวอย่างเหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง ส่งผลให้สารละลายเข้ามาทำปฏิกิริยากับพื้นที่ผิวได้น้อยลงทำให้โลหะเกิดการกัดกร่อนแบบหลุมยากขึ้น

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1) เพื่อศึกษาการแปลงสนิมของเหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง (S45C) โดยใช้กรดแทนนิกที่ความเข้มข้นต่างๆ
- 2) เพื่อศึกษาความเข้มข้นของโซเดียมโดเดคซิลซัลเฟตที่เหมาะสมในการแปลงสนิมของเหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง (S45C)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นศึกษาและทดลองใช้กรดแทนนิกในการแปลงสนิมของเหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง (S45C) โดยเปรียบเทียบความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวประจุลบโซเดียมโดเดคซิลซัลเฟต ที่ความเข้มข้นต่างๆ และสารละลายไดบิวทอกซีเอทานอลร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก

### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1) สามารถบ่งบอกความสามารถในการแปลงสนิมของเหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง (S45C) ในสารละลายผสมระหว่างกรดแทนนิกและสารละลายไดบิวทอกซีเอทานอล โดยใช้สารลดแรงตึงผิวโซเดียมโดเดคซิลซัลเฟต

2) สามารถเลือกใช้ความเข้มข้นของโซเดียมโดเดคซิลซัลเฟต ในการแปลงสนิมของเหล็กกล้าคาร์บอนปานกลางในสารละลายผสมระหว่างกรดแทนนิกและสารละลายไดบิวทอกซีเอทานอล ได้อย่างมีประสิทธิภาพและเหมาะสม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

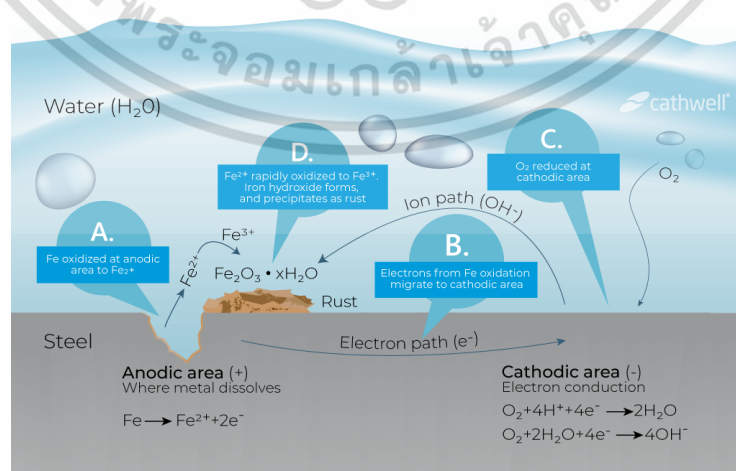
# ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 การกัดกร่อน (Corrosion)

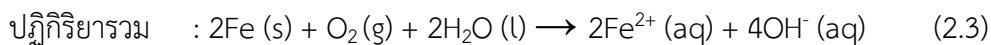
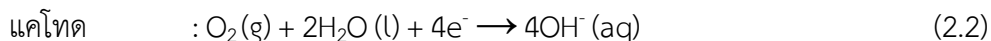
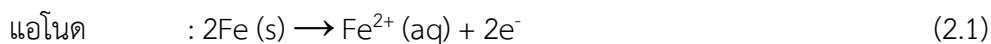
การกัดกร่อนตามมาตรฐาน ISO 8044 หมายถึง ปฏิกริยาทางเคมีกายภาพ โดยทั่วไปจะเป็นลักษณะทางเคมีไฟฟ้า ระหว่างโลหะกับสิ่งแวดล้อม ซึ่งส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงในคุณสมบัติของโลหะ และมักนำไปสู่การสูญเสียการทำงานของโลหะ [8] ในเชิงเทคนิค การกัดกร่อนเป็นปฏิกิริยารีดักชันกับปฏิกิริยาออกซิเดชัน ที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวของวัสดุ ซึ่งโดยปกติจะเป็นโลหะ โดยที่อิเล็กตรอนจะถูกปล่อยออกมาเนื่องจากการละลายของโลหะและถ่ายโอนไปยังตำแหน่งอื่น เพื่อรีดิวซ์ไอออนของไฮโดรเจนหรือน้ำที่มีออกซิเจน ทำให้เกิดการเสื่อมสภาพอย่างช้าๆของวัสดุ [9]

#### 2.1.1 กลไกการกัดกร่อน (Mechanism of corrosion) [10]

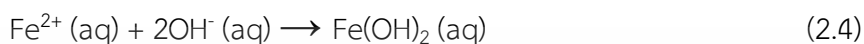
โลหะในธรรมชาติเกิดการผุกร่อนมีสาเหตุหลายประการ สาเหตุหนึ่งคือเกิดจากผิวของโลหะสัมผัสกับน้ำและออกซิเจน การผุกร่อนของโลหะเกิดจากการที่อะตอมของโลหะถูกออกซิไดซ์เป็นไอออนแล้วรวมตัวกับออกซิเจนในอากาศได้ผลิตภัณฑ์เป็นออกไซด์ของโลหะนั้น เช่น สนิมเหล็ก ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) สนิมทองแดง ( $\text{CuO}$ ) หรือสนิมอะลูมิเนียม ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) ปฏิกิริยาการเกิดสนิมมีกระบวนการซับซ้อนและมีลักษณะเฉพาะตัว เช่น การเกิดสนิมเหล็กเนื่องจากบริเวณผิวเหล็กที่สัมผัสน้ำจะมีการให้และรับอิเล็กตรอนโดยอะตอมของเหล็กจะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation reactions) หรือถูกออกซิไดซ์เป็น  $\text{Fe}^{2+}$  ส่วนน้ำและออกซิเจนในอากาศจะรับอิเล็กตรอนหรือถูกรีดิวซ์เป็น  $\text{OH}^-$  แสดงได้ดังรูปที่ 2.1 ปฏิกิริยาการเกิดสนิมเหล็กในธรรมชาติเป็นดังนี้



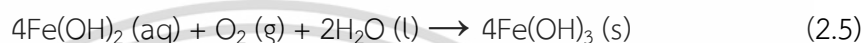
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่ควรเผยแพร่ให้ผู้อื่นนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
รูปที่ 2.1 ปฏิกิริยาการเกิดสนิมเหล็กกล้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



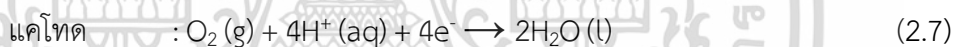
$2\text{Fe}^{2+} \text{ (aq)}$  และ  $\text{OH}^- \text{ (aq)}$  จะรวมกันได้  $\text{Fe(OH)}_2$  ซึ่งไม่ละลายน้ำดังสมการ



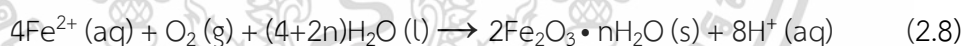
$\text{Fe(OH)}_2$  ที่เกิดขึ้นจะทำปฏิกิริยากับน้ำและออกซิเจนในอากาศต่อไปได้  $\text{Fe(OH)}_3$



ไฮดรอกไซด์ (III) ไฮดรอกไซด์ ( $\text{Fe(OH)}_3$ ) ที่เกิดขึ้นโดยทั่วไปจะเขียนในรูปไฮดรอกไซด์ (III) ออกไซด์ ที่มีน้ำผลึกอยู่ในโมเลกุลและน้ำผลึกอาจมีปริมาณแตกต่างกัน จึงเขียนสูตรทั่วไปเป็น  $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$  คาร์บอนไดออกไซด์ ( $\text{CO}_2$ ) มีส่วนทำให้เกิดสนิมในธรรมชาติได้เนื่องจากคาร์บอนไดออกไซด์สามารถละลายน้ำได้ ( $\text{H}_2\text{CO}_3$ ) ซึ่งแตกตัวให้โปรตอน จากนั้นโปรตอนจะรับอิเล็กตรอนจากเหล็กและเกิดการเปลี่ยนแปลงดังสมการ



$\text{Fe}^{2+}$  ที่เกิดขึ้นถูกออกซิไดซ์ต่อไปได้สนิมเหล็กดังสมการ



การผุกร่อนของเหล็ก หรือเกิดสนิมอาจเกิดได้เร็วขึ้นเมื่อเหล็กสัมผัสกับสารเคมีที่เป็นตัวออกซิไดซ์เช่น กรด สารละลายของสารประกอบไอออนิกบางชนิด เช่น  $\text{NaCl}$  หรือสัมผัสกับโลหะที่มีศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานของครึ่งเซลล์สูงกว่าโลหะอื่น ๆ ที่สามารถผุกร่อนได้ เช่น ทองแดง ( $\text{Cu}$ ) หรือ (เงิน)  $\text{Ag}$  แต่จะเกิดการผุกร่อนอย่างช้าๆ เนื่องจากเป็นธาตุที่ให้อิเล็กตรอนยากสนิมเหล็กจะมีสีน้ำตาลแดงเมื่อเปื้อนเสื้อผ้าจะล้างออกยาก แต่สามารถกำจัดรอยเปื้อนได้โดยใช้กรดออกซาลิก ( $\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4$ ) ซึ่งมี pH ประมาณ 4-5 เมื่อละลายน้ำจะแตกตัวได้โปรตอนและ ( $\text{CrO}_4^{2-}$ ) จะรวมกับ  $\text{Fe}^{3+}$  ในสนิมเหล็กเกิดเป็นไตรออกซาเลตไฮดรอกไซด์ (III) ไฮดรอกไซด์ที่ละลายน้ำได้

### 2.1.2 ไฟฟ้าเคมี (Electrochemistry) [11]

ปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้า (Electrochemical reactions) เป็นปฏิกิริยาเคมีที่มีการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนระหว่างสารตั้งต้น ทำให้เลขออกซิเดชันมีการเปลี่ยนแปลงไป ซึ่งจะทำให้มีอะตอมของธาตุบางตัวสูญเสียหรือได้รับอิเล็กตรอน เรียกปฏิกิริยาที่เกิดการเสียอิเล็กตรอนว่าปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation) และเรียกปฏิกิริยาที่มีการรับอิเล็กตรอนว่าปฏิกิริยารีดักชัน (Reduction) ดังตัวอย่าง



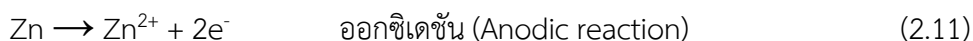
2.1.2.1 การกัดกร่อนจากปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าในโลหะ (Electrochemical corrosion) ส่วนใหญ่ที่เกิดขึ้นจะมีขั้นตอนการถ่ายเทประจุไฟฟ้า (Electronic charge) ในสารละลาย พิจารณาจากตัวอย่างการกัดกร่อน ระหว่างสังกะสี (Zn) กับกรดไฮโดรคลอริก (HCl)



เมื่อสังกะสีทำปฏิกิริยากับสารละลายกรดไฮโดรคลอริก จะได้ผลิตภัณฑ์เป็น สารประกอบระหว่างสังกะสีกับคลอไรด์ ( $ZnCl_2$ ) และไฮโดรเจน ( $H_2$ ) และเมื่อพิจารณาแล้วว่า คลอไรด์ไอออนไม่เกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาดังกล่าว สามารถเขียนให้อยู่ในปฏิกิริยาอย่างง่ายได้ดังนี้



จากสมการเมื่อสังกะสีทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจนไอออน ( $H^+$ ) ที่ได้จากสารละลายกรด ได้ผลิตภัณฑ์เป็นสังกะสีไอออน ( $Zn^{2+}$ ) และไฮโดรเจน เมื่อพิจารณาจากปฏิกิริยาข้างต้นจะเห็นได้ว่าการเกิดปฏิกิริยา สังกะสี (Zn) จะถูกออกซิไดซ์กลายเป็นสังกะสีไอออน ( $Zn^{2+}$ ) และไฮโดรเจนไอออน ( $H^+$ ) ถูกรีดิวซ์กลายเป็นไฮโดรเจน ( $H_2$ ) ดังนั้นเพื่อความง่าย จึงแบ่งปฏิกิริยาดังกล่าวเป็น สองปฏิกิริยา คือ ปฏิกิริยาออกซิเดชันของสังกะสี และปฏิกิริยารีดักชันของไฮโดรเจนไอออน

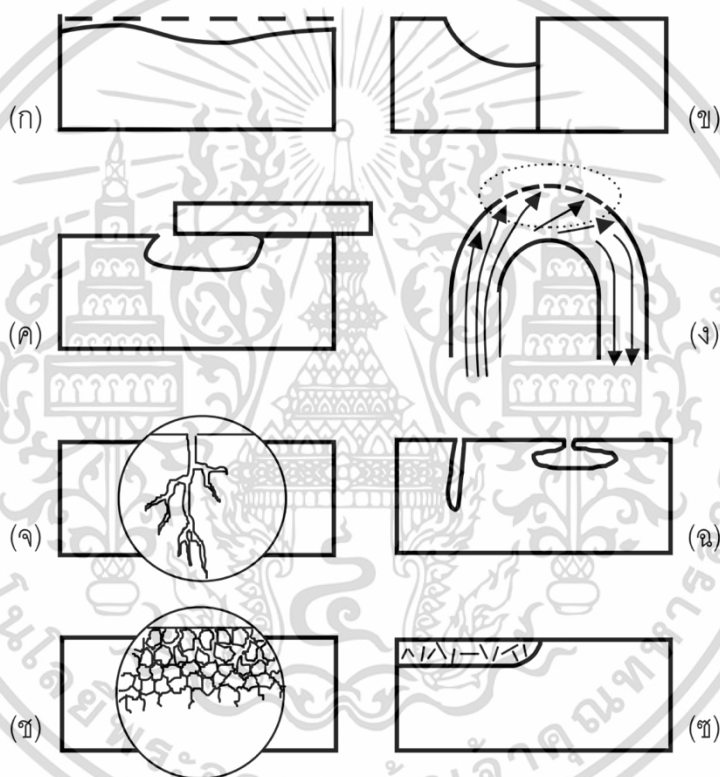


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปฏิกิริยาออกซิเดชันหรือแอโนดิก จะพิจารณาจากการเพิ่มขึ้นของอิเล็กตรอนวงนอกสุด (Valence electron) และในทางกลับกันปฏิกิริยารีดักชันหรือแคโทดิกจะพิจารณาจากการลดลงของอิเล็กตรอนวงนอกสุดเช่นเดียวกัน

### 2.1.3 ประเภทของการกัดกร่อน (Classifications of corrosion) [12]

การกัดกร่อนมีหลายประเภท แสดงดังรูปที่ 2.2 ซึ่งเป็นรูปของภาคตัดขวางแสดงความเสียหายที่เกิดจากการกัดกร่อน ประเภทที่ต้องตรวจสอบอย่างเป็นระบบ จึงจะสามารถชี้ชัดได้ว่าเกิดปัญหาการกัดกร่อน และเป็นการกัดกร่อน ประเภทใด เนื่องจากการกัดกร่อนแต่ละประเภทยังมีสาเหตุและแนวทางแก้ไขที่แตกต่างกันไป



รูปที่ 2.2 ภาพตัดขวางของชิ้นโลหะแสดงความเสียหายที่เกิดจากการกัดกร่อนในรูปแบบแบบต่างๆ (ก) แบบสม่ำเสมอ (ข) แบบกัลวานิก (ค) แบบช่องแคบ (ง) แบบกัดเซาะ (จ) การกัดกร่อนโดยความเค้น (ฉ) แบบรูเข็ม (ช) การกัดกร่อนที่เกิดขึ้นที่ขอบของผลึกของโลหะ (ซ) การกัดกร่อนแบบเลือกแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.1.4 การกัดกร่อนแบบสม่ำเสมอ (Uniform Corrosion)

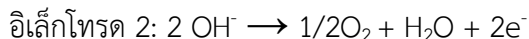
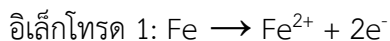
เกิดจากการกัดกร่อนในอัตราที่เท่าๆกันทุกบริเวณพื้นผิวของโลหะทำให้เกิดสนิมหลุดร่อนสามารถพบเห็นได้ง่าย เมื่อโลหะถูกกัดกร่อนและบางลงเรื่อยๆ การกัดกร่อนรูปแบบนี้ง่ายต่อการจัดการสามารถคาดการณ์ความเสียหายได้โดยง่าย เช่น ผิวโลหะ เปื่อยที่ไม่ได้มีการทาสีทับ หรือเคลือบผิว บริเวณเหล่านี้จะเกิดการกัดกร่อนขึ้นอย่างสม่ำเสมอทั่วทั้งบริเวณ หากการกัดกร่อนเกิดขึ้นกับพื้นผิวบริเวณกว้างปริมาณวัสดุที่สูญเสียก็จะมีปริมาณมากเช่นกัน การป้องกันสามารถทำได้หลายแนวทางวิธีการที่ง่ายที่สุดคือ การทาสีทับ หรือการเคลือบผิว เพื่อป้องกันไม่ให้ผิวโลหะสัมผัสกับสิ่งแวดล้อมในระบบปิด เช่น แผงระบายความร้อนของรถยนต์ อาจใช้สารยับยั้งการกัดกร่อนผสมในของเหลวที่สัมผัสกับผิวโลหะ การยับยั้งทางปฏิกิริยาเคมีที่อาจเกิดขึ้นได้ระหว่างของเหลวที่ใช้ระบายความร้อนและผิวโลหะภายในแผงระบายความร้อนอีกวิธีการหนึ่งคือ การป้องกันแบบแคโทดิก (cathodic protection) เช่น การใช้โลหะที่ถูกกัดกร่อนง่ายกว่า (มีเสถียรภาพทางเคมีต่ำกว่า) มายึดติดกับชิ้นงานโลหะที่ต้องการป้องกัน การกัดกร่อนทำให้การสูญเสียอิเล็กตรอน (ปฏิกิริยาออกซิเดชัน) ไปเกิดขึ้นกับชิ้นโลหะที่นำมายึดติดนั้นแทน สำหรับระดับของเสถียรภาพทางเคมีของโลหะชนิดต่าง ๆ



รูปที่ 2.3 ลักษณะการกัดกร่อนแบบสม่ำเสมอ

การกัดกร่อนแบบสม่ำเสมอสามารถกำหนดได้จากควมคู่ทางไฟฟ้าของอิเล็กโทรดที่กลับด้านได้ไม่สิ้นสุดสองขั้ว ซึ่งจะบอกได้ว่าความใกล้เคียงพื้นที่ของอิเล็กโทรดทั้งสองช่วยให้มองข้ามผลกระทบโอห์มมิกเนื่องจากความต้านทานของอิเล็กโทรไลต์ ในกรณีที่ไม่มีควมต้านทานไฟฟ้าระหว่างแอโนดิกและแคโทด เป็นผลให้ศักย์ภาพสมดุลของระบบคู่มีความสม่ำเสมอ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง การกัดกร่อนของเหล็กในคอนกรีตเป็นผลมาจากการนำอิเล็กโทรดที่เปลี่ยนกลับได้สองขั้ว ซึ่ง

กำหนดโดยสมการสมดุลต่อไปนี้ เข้าสู่การสัมผัสด้วยไฟฟ้า:  
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของโครงการวิจัยนี้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



นี่คือลักษณะที่เป็นผลมาจากข้อเท็จจริงที่ว่าอิเล็กโทรด 2 ( $\text{O}_2/\text{OH}^-$ ) มีอยู่ในรูปแบบที่ละลายในอิเล็กโทรไลต์ (คอนกรีต) เมื่อสัมผัสกับเหล็กกล้า ดังนั้นจึงสามารถสันนิษฐานได้ว่าอิเล็กโทรด 2 มีอยู่ทั่วพื้นผิวทั้งหมดของอิเล็กโทรด 1 แสดงดังตารางรูปที่ 2.4 อิเล็กโทรดทั้งสองนี้มีลักษณะเฉพาะด้วยศักย์ไฟฟ้าที่ผันกลับได้ต่างกัน:  $E_{\text{rev}2} > E_{\text{rev}1}$  เป็นที่น่าสังเกตว่าตารางในรูปที่ 2.4 แสดงศักยภาพที่วัดได้ภายใต้เงื่อนไขมาตรฐานภายใต้เงื่อนไขอื่นๆ ค่าของศักยภาพที่ผันกลับได้ถูกกำหนดโดยกฎของเนิร์นสต์ ข้อสังเกตนี้ไม่ได้ทำให้เกิดคำถามเกี่ยวกับการพัฒนาทางทฤษฎีด้านล่าง

Half-reaction	Standard electrode potential (V / NHE)
$\text{Au} \rightleftharpoons \text{Au}^{3+} + 3\text{e}^-$	+1.50
$2\text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{O}_2 + 4\text{H}^+ + 4\text{e}^-$	+1.23
$\text{Ag} \rightleftharpoons \text{Ag}^+ + \text{e}^-$	+0.80
$4\text{OH}^- \rightleftharpoons \text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{O} + 4\text{e}^-$	+0.40
$\text{H}_2 \rightleftharpoons 2\text{H}^+ + 2\text{e}^-$	0
$\text{Pb} \rightleftharpoons \text{Pb}^{2+} + 2\text{e}^-$	-0.13
$\text{Fe} \rightleftharpoons \text{Fe}^{2+} + 2\text{e}^-$	-0.44
$\text{Zn} \rightleftharpoons \text{Zn}^{2+} + 2\text{e}^-$	-0.76
$\text{Al} \rightleftharpoons \text{Al}^{3+} + 3\text{e}^-$	-1.67
$\text{Mg} \rightleftharpoons \text{Mg}^{2+} + 2\text{e}^-$	-2.37

รูปที่ 2.4 ตารางศักย์ไฟฟ้ามาตรฐาน

การควบคุมของอิเล็กโทรดทั้งสองนี้ช่วยให้สามารถถ่ายโอนอิเล็กตรอนโดยตรงจากอิเล็กโทรดหนึ่งไปยังอีกอิเล็กโทรดหนึ่ง ทำให้เกิดสถานะสมดุลใหม่ ซึ่งตอนนี้ขึ้นอยู่กับระบบที่ประกอบด้วยอิเล็กโทรดคู่สองตัว ในกรณีปัจจุบัน ลำดับชั้นของศักยภาพของขั้วไฟฟ้าทั้งสองเผยให้เห็นว่าปฏิกิริยาขั้วบวกที่ได้รับการสนับสนุนจากการควบคุมสอดคล้องกับการละลายของเหล็กโลหะเพื่อประโยชน์ในการลดลงของไดออกซิเจน แบบจำลอง Butler-Volmer ช่วยให้เราเข้าใจว่าเหตุใดจึงเป็นเช่นนั้น นอกจากนี้ยังช่วยให้สามารถกำหนดสถานะสมดุลของระบบการกัดกร่อนแบบสมรมาเสมอได้อย่างแม่นยำ แสดงดังรูปที่ 2.5 แสดงให้เห็นถึงการสร้างสถานะสมดุลของระบบที่เกิดขึ้นจากอิเล็กโทรดที่ผันกลับได้สองตัวที่เชื่อมต่อกัน และปิดสนิทเส้นโค้งสีแดงและสีน้ำเงินแสดงถึงเส้นโค้งโพลาริเซชันของขั้วไฟฟ้า 1 และ 2 ตามลำดับ การประกบกันทางไฟฟ้าของอิเล็กโทรดทั้งสองส่งผลให้เกิดโพลาริเซชันซึ่งกันและกันไปสู่ศักย์อิสระทั่วไปที่เรียกว่า  $E_{\text{corr}}$  ศักย์การกัดกร่อนและประกอบด้วยระหว่าง  $E_{\text{rev}1}$

และ  $E_{\text{rev}2}$  ศักย์การกัดกร่อนอิสระจึงถือเป็นศักย์สมดุลของระบบที่ประกอบด้วยสองขั้วที่ปิดสนิท ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



หนาแน่นกระแสกัดกร่อนสถานะสมดุลของระบบการกัดกร่อนแบบสมำเสมอ ( $E_{corr}$ ) ถูกกำหนดโดยสมการบัตเลอร์-โวลเมอร์ที่เกี่ยวข้องกับอิเล็กโทรดที่ผันกลับได้แต่ละตัว (สมการ 2.13 และ 2.14)

$$i_1 = i_{0,1} \left[ \exp\left(\frac{E-E_{rev,1}}{\beta_{a,1}}\right) \right] - \exp\left(-\frac{E-E_{rev,1}}{\beta_{c,1}}\right) \quad (2.13)$$

$$i_2 = i_{0,2} \left[ \exp\left(\frac{E-E_{rev,2}}{\beta_{a,2}}\right) \right] - \exp\left(-\frac{E-E_{rev,2}}{\beta_{c,2}}\right) \quad (2.14)$$

สมมติว่าโพลาริเซชันที่แต่ละอิเล็กโทรดอยู่ภายใต้ันั้นมีความแข็งแรงเพียงพอ จึงเป็นไปได้ที่จะมองข้ามเงื่อนไขแคโทดและแอโนดิกตามลำดับของสมการที่เกี่ยวข้องกับอิเล็กโทรด 1 และ 2 ดังนั้นกฎพฤติกรรมจึงสามารถสรุปได้โดย (สมการ 2.15 และ 2.16)

$$i_1 = i_{0,1} \cdot \exp\left(\frac{E-E_{rev,1}}{\beta_{a,1}}\right) \quad (2.15)$$

$$i_2 = i_{0,2} \cdot \exp\left(-\frac{E-E_{rev,2}}{\beta_{c,2}}\right) \quad (2.16)$$

ที่สถานะสมดุล ความหนาแน่นกระแสสุทธิ (สมการ 2.17) ที่ผลิตโดยระบบการกัดกร่อนแบบสมำเสมอเป็นศูนย์:

$$i = i_1 + i_2 = i_{0,1} \cdot \exp\left(\frac{E_{corr}-E_{rev,1}}{\beta_{a,1}}\right) - i_{0,2} \cdot \exp\left(-\frac{E_{corr}-E_{rev,2}}{\beta_{c,2}}\right) = 0 \quad (2.17)$$

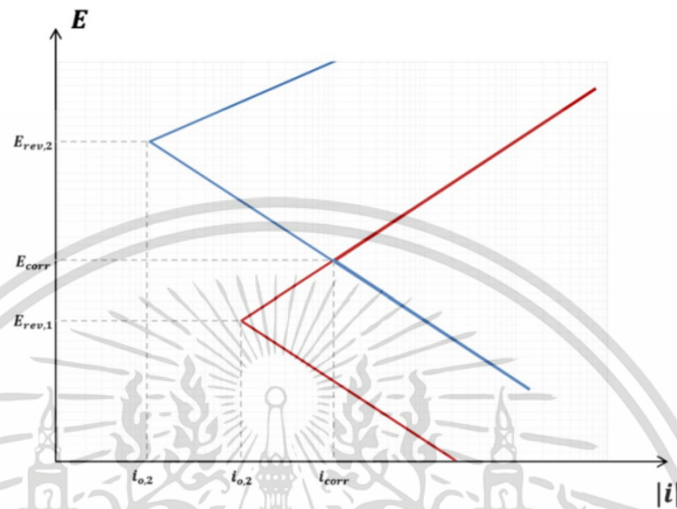
สมการหลังประกอบด้วยค่าที่ไม่ทราบค่าเดียว ( $E_{corr}$ ) ดังนั้นจึงสามารถแก้ไขได้เพื่อหาศักย์ภาพในการกัดกร่อน จากนั้นความหนาแน่นกระแสการกัดกร่อนจะคำนวณได้ง่ายๆ โดยใช้สมการ (2.18)

$$i_{corr} = i_{0,1} \cdot \exp\left(\frac{E_{corr}-E_{rev,1}}{\beta_{a,1}}\right) \quad (2.18)$$

ในขั้นตอนนี้ ความสมดุลจะถูกกำหนดอย่างแม่นยำ ให้เราแนะนำแผนภาพอีวานส์ ซึ่งประกอบด้วยโหมดการแสดงเพิ่มเติมซึ่งช่วยให้สามารถแสดงตัวอย่างง่ายๆ ของระบบการกัดกร่อนแบบสมำเสมอที่ประกอบขึ้นโดยการต่ออิเล็กโทรดสองขั้วที่ผันกลับได้ (รูปที่ 2.6) แผนภาพอีวานส์สามารถเปรียบได้กับการแสดงบันทึกถึงบันทึกที่กำหนดไว้ข้างต้น ยกเว้นรายละเอียดสองประการ:

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

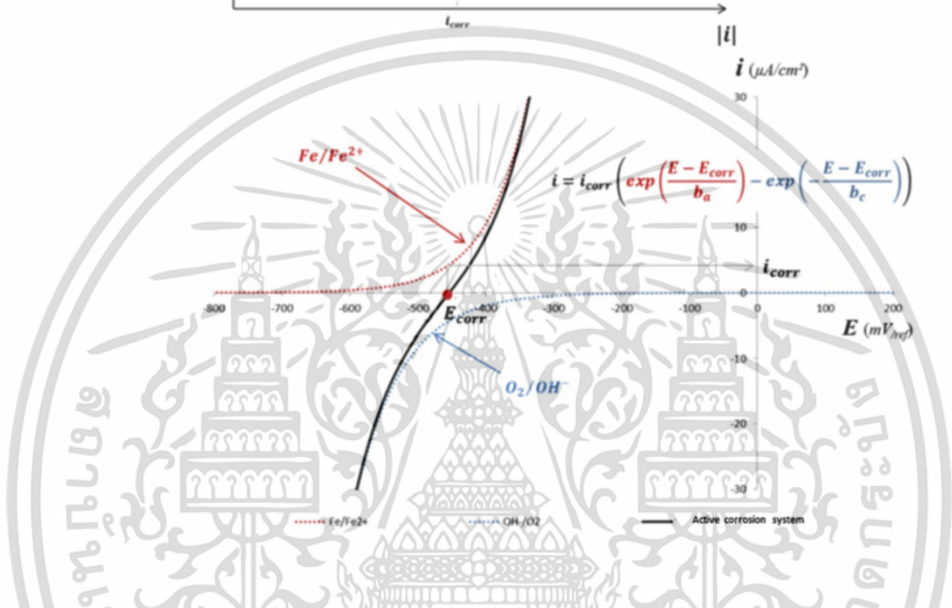
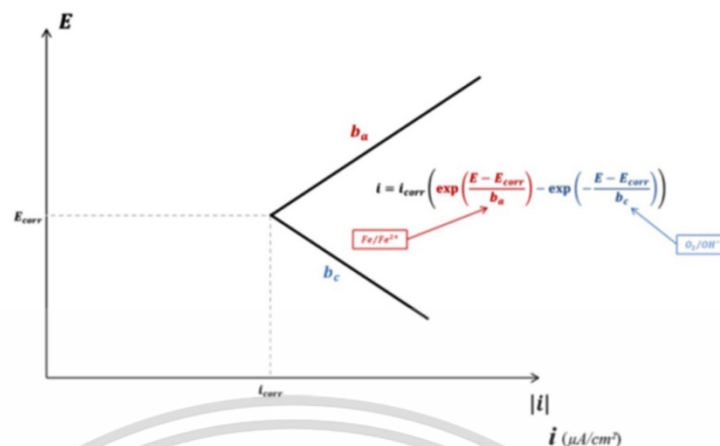
- แกน  $i$  และ  $E$  เรียงสลับเปลี่ยน
- แสดงเฉพาะความลาดเทของอิเล็กโทรดต่างๆ



รูปที่ 2.6 แผนภาพอีวานส์ของระบบการกัดกร่อนแบบสมำเสมอ

จากรูปที่ 2.6 สามารถอนุมานตัวแปรเชิงพรรณนา ( $E_{corr}$ ,  $i_{corr}$ ) ของระบบการกัดกร่อนแบบสมำเสมอที่สมดุลจากจุดตัดของความชันแอนดิกทาเฟลของอิเล็กโทรด 1 และความชันทาเฟลแบบแคโทดของอิเล็กโทรด 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.7 เส้นโค้งโพลารไรซ์ของระบบการกัดกร่อนที่สม่าเสมอ

เมื่อสังเกตแผนภาพอีแวนส์ที่แสดงในรูปที่ 2.6 จะสังเกตเห็นว่าการตอบสนองของระบบการกัดกร่อนแบบสม่าเสมอต่อโพลารไรเซชันที่กำหนดนั้นเป็นไปตามกฎของบัตเลอร์-โวลเมอร์ด้วย (รูปที่ 2.7) ดังนั้นจึงเป็นไปได้ที่จะกำหนดสมการ BV ของระบบการกัดกร่อนแบบสม่าเสมอ ซึ่งได้มาจากสมการ BV ของอิเล็กโทรดที่ผันกลับได้ที่เกี่ยวข้อง (สมการ 2.19) ที่นี้ สมการนี้อธิบายการตอบสนองของระบบการกัดกร่อนสม่าเสมอต่อโพลารไรเซชันที่กำหนดไว้ โดยคำนึงถึง  $E_{corr}$  ที่มีศักย์ภาพอิสระต่อจากนั้นเพื่อความง่าย ค่าคงที่ของทาเฟลจะไม่แสดงรายการตามอิเล็กโทรดแบบย้อนกลับที่เกี่ยวข้องอีกต่อไป และจะใช้  $\beta_a$  สำหรับ  $\beta_{a,1}$  และ  $\beta_c$  สำหรับ  $\beta_{c,2}$

$$i = i_{corr} \left[ \exp\left(\frac{E - E_{corr}}{\beta_a}\right) \right] - \exp\left(-\frac{E - E_{corr}}{\beta_c}\right) \tag{2.19}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เส้นโค้งโพลาริเซชันของระบบการกัดกร่อนแบบสมำเสมอแสดงในรูปที่ 2.7 (เส้นโค้งที่วาดเป็นเส้นต่อเนื่องสีดำ) จึงเป็นผลมาจากผลรวมของสมการ BV ขั้วบวก ( $i_1$ ) และแคโทดิก ( $i_2$ ) ตามลำดับของขั้วไฟฟ้าที่ผันกลับได้ 1 และ 2

ความต้านทานโพลาริเซชันเชิงเส้น  $R_p$  (สมการ 2.20) ของระบบการกัดกร่อนแบบสมำเสมอ ถูกกำหนดโดยความชันผกผันของเส้นโค้งโพลาริเซชันใน  $E_{corr}$  (การแสดงเชิงเส้น):

$$R_p = \frac{dE}{di} \Big|_{E = E_{corr}} \quad (2.20)$$

ความต้านทานโพลาริเซชันเชิงเส้นแสดงเป็น ohm.m<sup>2</sup> โดยทำให้สมการ BV เชิงเส้นของระบบการกัดกร่อนแบบสมำเออรอบๆ  $E_{corr}$  ศักย์ไฟฟ้าอิสระ จะได้สมการ (2.21)

$$i = i_{corr} \frac{\beta_a + \beta_c}{\beta_a \beta_c} (E - E_{corr}) \quad (2.21)$$

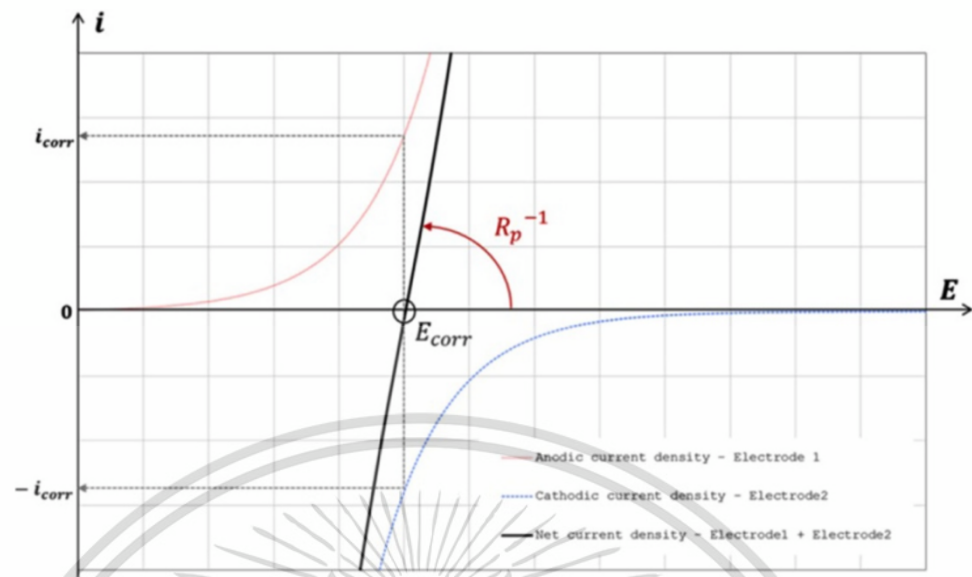
การใช้  $\Delta E = E - E_{corr}$  เพื่อสังเกตโพลาริเซชันที่ระบบอยู่ภายใต้ และ  $\Delta i = i - 0 = i$  สำหรับความหนาแน่นกระแสสุทธิที่ปรากฏที่เกี่ยวข้องกับความหนาแน่นกระแสการกัดกร่อนอาจแสดงได้ดังนี้ (สมการ 2.22)

$$i_{corr} = \frac{\beta_a \beta_c}{\beta_a + \beta_c} \frac{\Delta i}{\Delta E} \quad (2.22)$$

โดยที่โพลาริเซชันต่ำลง อัตราส่วน  $\frac{\Delta E}{\Delta i}$  จะถูกรวมเข้ากับความต้านทานโพลาริเซชันเชิงเส้นของ,  $R_p$  โดยการแนะนำ  $B = \frac{\beta_a \beta_c}{\beta_a + \beta_c}$  สมการ Stern-Geary (สมการ 2.23) สามารถอนุมานได้จากสมการ (2.22)

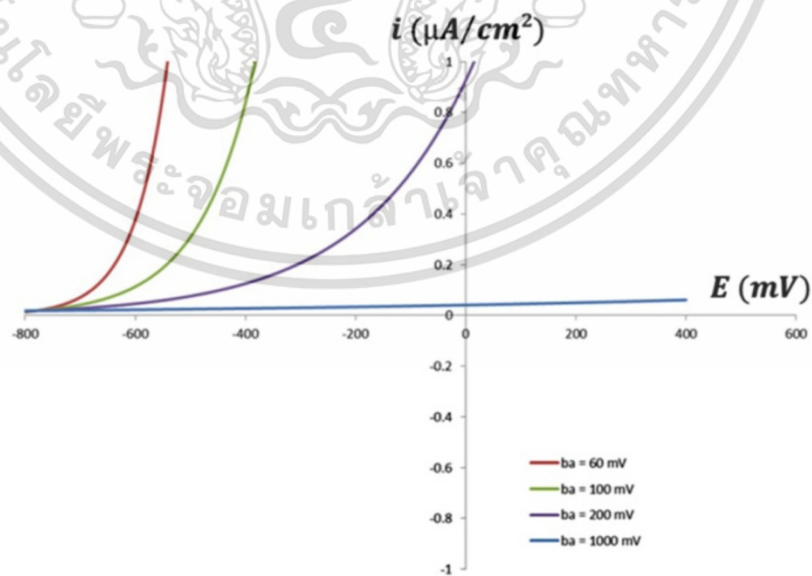
$$i_{corr} = \frac{B}{R_p} \quad (2.23)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



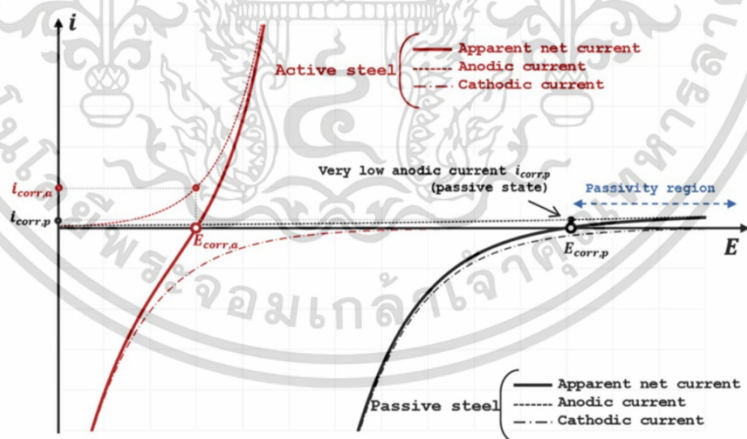
รูปที่ 2.8 ภาพประกอบของการต้านทานโพลาไรซ์

สมการนี้แสดงถึงพื้นฐานทางทฤษฎีของการวัดจลนพลศาสตร์ของระบบการกัดกร่อนแบบสม่ำเสมอ โปรโตคอลปกติสำหรับการวัดค่า  $R_p$  ประกอบด้วย การกำหนดโพลาไรเซชันตามศักย์ภาพในการกัดกร่อนและการวัดกระแสที่เกี่ยวข้อง หรือในทางกลับกัน เมื่อวัดค่าความต้านทานโพลาไรเซชันแล้ว จะถูกแปลงเป็นความหนาแน่นกระแสกัดกร่อนผ่านสมการสเติร์น-เกียร์ จากนั้นความหนาแน่นนี้ จะถูกแปลงเป็นการสูญเสียมวลโลหะโดยใช้กฎของคูลอมบ์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 รูปที่ 2.9 ผลของค่าสัมประสิทธิ์ทาเฟล  $ba$  ต่อเส้นโค้งขั้วบวกของอิเล็กโทรด  $Fe/Fe^{2+}$   
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ก็ตาม หากพบเห็นข้อบกพร่องใดๆ และต้องยื่นข้อร้องเรียนของเอกสารที่พิมพ์ออกมาแล้ว

สมการของบัตเลอร์-โวลเมอร์ทำให้สามารถจำลองการตอบสนองของระบบแอคทีฟและพาสซีฟโดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์แอโนดิกทาเพล  $\beta_a$  รูปที่ 2.9 ให้การแสดงเชิงคุณภาพของผลกระทบของค่าสัมประสิทธิ์  $\beta_a$  ต่อเส้นโค้งแอโนดิกของอิเล็กโทรด  $Fe/Fe^{2+}$  ค่าสัมประสิทธิ์ต่ำจะสะท้อนถึงพฤติกรรมของเหล็กที่ใช้งานอยู่ โดยแสดงเส้นโค้งการตอบสนองที่สูงชันมาก (เส้นโค้งสีแดง) ในทางกลับกัน ค่าสัมประสิทธิ์ทาเพลขั้วบวกสูงช่วยให้ความชันถูกจำกัดอย่างมาก เช่น เพื่อให้เส้นโค้งการตอบสนองขั้วบวกมีค่าเกือบคงที่ จากรูปที่ 2.10 แสดงเส้นโค้งโพลาริเซชันสองเส้น โดยการเปลี่ยนค่าสัมประสิทธิ์ทาเพลขั้วบวกของครึ่งปฏิกิริยา  $Fe/Fe^{2+}$  (โดยตั้งค่าพารามิเตอร์ระบบอื่นๆ ทั้งหมด) เส้นโค้งสีแดงและสีน้ำเงินสะท้อนถึงพฤติกรรมในการตอบสนองต่อโพลาริเซชันของเหล็กแอคทีฟและพาสซีฟ ตามลำดับ สามารถสังเกตได้ว่าระบบแอคทีฟนั้นมีศักยภาพในการกัดกร่อนต่ำกว่าระบบพาสซีฟอย่างเห็นได้ชัด ในทำนองเดียวกันความชันของเส้นโค้ง ( $E_{corr,i}$ ) เผยให้เห็นความต้านทานโพลาริเซชันที่ต่ำกว่ามากในกรณีของระบบที่ใช้งานอยู่ในทางกายภาพ ความต้านทานโพลาริเซชันนี้อาจเปรียบได้กับความต้านทานการถ่ายโอนประจุไฟฟ้าที่ส่วนต่อประสานระหว่างโลหะกับอิเล็กโทรไลต์ (การเปลี่ยนรูปของกระแสไอออนิกเป็นกระแสไฟฟ้าอิเล็กทรอนิกส์) ดังนั้นความต้านทานต่อโพลาริเซชันที่สูงทำให้มีความสามารถในการถ่ายโอนประจุต่ำ ดังนั้นจึงมีจลนพลศาสตร์ในการกัดกร่อนต่ำ และในทางกลับกัน [13]

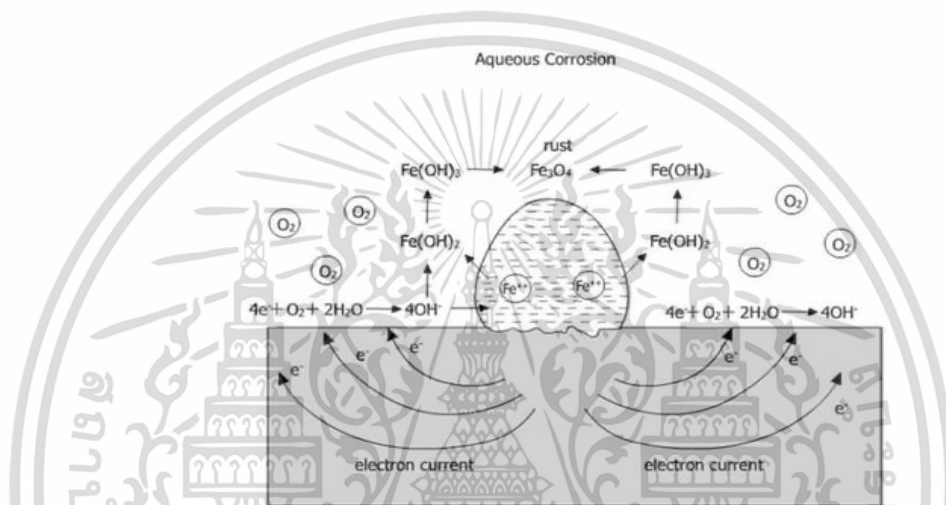


รูปที่ 2.10 ตัวอย่างของเส้นโค้งโพลาริเซชันโดยทั่วไปของระบบการกัดกร่อนแบบสม่าเสมอ: เหล็กแอคทีฟเป็นสีแดง และเหล็กแบบพาสซีฟเป็นสีน้ำเงิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.1.5 กลไกการสึกกร่อนสม่ำเสมอ [14]

มีการแสดงกลไกการกัดกร่อนในสารละลายที่เป็นน้ำอย่างชัดเจน มีชั้นอิเล็กโทรไลต์ที่บางมาก วิธีนี้จะแสดงให้เห็นได้ดีที่สุดโดยการหยดน้ำทะเลหยดเล็กๆบนแผ่นเหล็กและพื้นผิวโลหะที่สัมผัสกับบรรยากาศ จะมีน้ำและไอออนที่ละลายอยู่ในปริมาณจำกัด ในขณะที่ออกซิเจนในอากาศเข้าถึงได้ไม่จำกัด ผลลัพธ์จากการกัดกร่อนจะเกิดขึ้นใกล้กับพื้นผิวโลหะ ซึ่งแตกต่างจากกรณีการกัดกร่อนในน้ำ และอาจป้องกันการกัดกร่อนเพิ่มเติมโดยทำหน้าที่เป็นเกราะป้องกันทางกายภาพระหว่างพื้นผิวโลหะกับสิ่งแวดล้อม โดยเฉพาะอย่างยิ่งหากไม่ละลายน้ำ เช่น ในกรณีของทองแดงหรือตะกั่วต่อไปนี้เป็นกลไกง่ายๆ ของการกัดกร่อนเหล็กในน้ำ ที่บริเวณขั้วบวกจะเกิดปฏิกิริยาขั้วบวก:



รูปที่ 2.11 การเกิดสนิมในสถานะที่มีน้ำเป็นองค์ประกอบ



ที่พื้นที่แคโทดิก การลดลงของออกซิเจนจะเกิดขึ้น



ไอออน OH ทำปฏิกิริยากับไอออนของเหล็ก ซึ่งเกิดขึ้นที่ขั้วบวก



ด้วยการเข้าถึงออกซิเจนในอากาศได้มากขึ้น  $\text{Fe(OH)}_2$  จะออกซิไดซ์เป็น  $\text{Fe(OH)}_3$



เฟอร์รัสไฮดรอกไซด์ถูกแปลงเป็นไฮเดรตเฟอร์ริกออกไซด์หรือสนิมด้วยออกซิเจน

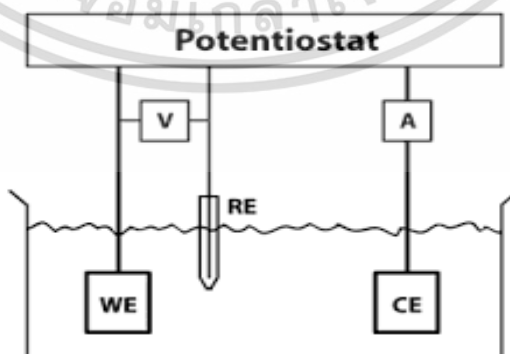


สนิม ( $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ ) เกิดขึ้นกึ่งกลางระหว่างจุดศูนย์กลางและส่วนรอบนอก อิเล็กตรอนจะไหลจากขั้วบวก (จุดศูนย์กลาง) ไปยังแคโทด (ส่วนรอบ) ในวงจรโลหะ การไหลของกระแสจะแสดงในไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปด้านบน ไอออนของเหล็กบนพื้นผิวของเหล็กสามารถละลายได้ในขณะที่ไอออนในสารละลายจะถูกออกซิไดซ์โดยออกซิเจนไปยังไฮดรอกไซด์ที่ไม่ละลายน้ำของเฟอร์ริกที่เรียกว่าสนิม สนิมจะก่อตัวขึ้นจากบริเวณที่สึกกร่อน

## 2.2 เทคนิคโพเทนชิโอดนามิกโพลาริเซชัน (Potentiodynamic polarization) [15]

เป็นเทคนิคการวิเคราะห์พฤติกรรมการกัดกร่อนของชิ้นงานโลหะตัวอย่างในสิ่งแวดล้อม กำหนด โดยเฉพาโลหะหรือโลหะผสมที่มีสมบัติสภาวะกักร่อน-สภาวะป้องกัน (Active-passive) หรือฟิล์มบางที่มีสมบัติปกป้อง (Passive film) โดยใช้เซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบสามขั้ว ประกอบด้วย ชิ้นงานโลหะตัวอย่างเป็นขั้วไฟฟ้าใช้งาน (Working electrode) ซึ่งเป็นขั้วไฟฟ้าในระบบเคมีไฟฟ้าที่ใช้ศึกษาการกัดกร่อน อยู่ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่มีสภาวะของความเข้มข้น อุณหภูมิ ปริมาณ ออกซิเจนในสารละลาย ตามกำหนด ขั้วอ้างอิงมาตรฐาน (Reference electrode) ใช้เพื่อสร้างความเสถียรให้กับการวัดค่าความต่างศักย์ในระบบ เนื่องจากเมื่อเกิดปฏิกิริยาที่ ขั้วไฟฟ้าใช้งานและขั้วไฟฟ้าใช้งาน จะเกิดค่าความต่างศักย์ตกร่วมขั้วทั้งสอง ทำให้การวัดค่าความต่างศักย์บริเวณนี้มีความคลาดเคลื่อน ดังนั้นจึงใช้ขั้วไฟฟ้าอ้างอิงซึ่งวัดความต่างศักย์ของขั้วไฟฟ้าใช้งาน โดยขั้วไฟฟ้านี้ต้องไม่มีกระแสที่เกิดจากขั้วไฟฟ้าใช้งานไหลผ่าน จากนั้นต่อให้ครบวงจรด้วยขั้วไฟฟ้าคู่ใช้งาน (Counter Electrode หรือ Auxiliary electrode) ซึ่งเป็นขั้วไฟฟ้าที่ทำให้กระแสไฟฟ้าไหลครบวงจร โดยขั้วไฟฟ้านี้จะถูกออกแบบให้กระแสที่เกิดขึ้นในวงจรไหลผ่านได้ โดยป้อนศักย์ไฟฟ้าไป ทางบวกเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ เพื่อเร่งการกัดกร่อน และติดตามกระแสไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไปที่ค่าศักย์ไฟฟ้าต่างๆ ทำให้ได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้าและความหนาแน่นกระแส (i) หรือกราฟโพลาริเซชัน (Polarization curve) ซึ่งแสดงพฤติกรรมการกัดกร่อนของโลหะ ทั้งการกัดกร่อน การเกิดขึ้นของฟิล์ม การคงอยู่ของฟิล์ม และการแตกของฟิล์ม



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับรูปที่ 2.12 องค์ประกอบของเซลล์ไฟฟ้าแบบสามขั้วไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เส้นกราฟ polarization เป็นเทคนิคนี้จะได้รับข้อมูล พฤติกรรมการกัดกร่อนของวัสดุ โดยพิจารณาจากค่า ศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน ( $E_{corr}$ ) กระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน ( $i_{corr}$ ) คำนวณหาอัตราการกัดกร่อน จากสมการที่ (2.13)

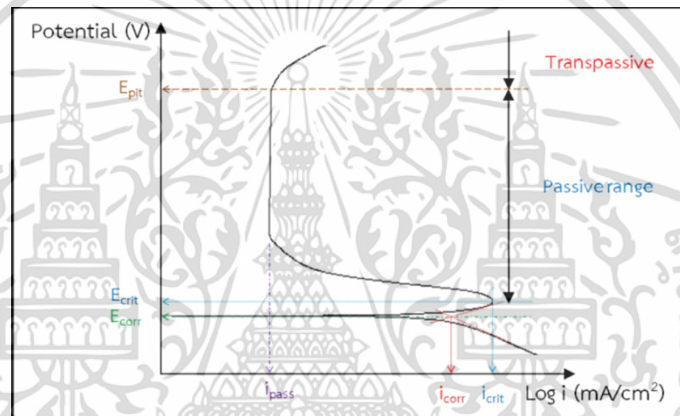
$$C.R. (mmpy) = \frac{0.13 \times I_{corr} \times EW}{d} \quad (2.29)$$

เมื่อ C.R. คือ อัตราการกัดกร่อน (มิลลิเมตรต่อปี)

$i_{corr}$  คือ ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าต่อพื้นที่ผิว โลหะตัวอย่าง (มิลลิแอมแปร์/ซม.<sup>2</sup>)

E.W. คือ มวลสมมูลของโลหะตัวอย่าง ซึ่งมีค่า เท่ากับ มวลอะตอม / ประจุ (หรือ n)

d คือ ค่าความหนาแน่นของโลหะ(กรัม/ซม.<sup>3</sup>)



รูปที่ 2.13 เส้นกราฟ polarization ที่ได้จากเทคนิค Potentiodynamic polarization

ใช้สำหรับการหาประสิทธิภาพการหน่วงการกัดกร่อน (Inhibition Efficiency) [ 16 ]

สามารถหาได้จากการนำค่าอัตราการกัดกร่อนของชิ้นงานตัวอย่างมาคำนวณตาม สมการที่ (2.14)

$$\% IE = \frac{|CR_0 - CR_i|}{CR_0} \times 100 \quad (2.30)$$

เมื่อ % IE คือ ประสิทธิภาพการหน่วงการกัดกร่อน

$CR_0$  คือ อัตราการกัดกร่อนของเหล็กกล้าคาร์บอนในสารละลาย  
ที่ไม่เติมสารยับยั้งการกัดกร่อน (มม./ปี)

$CR_i$  คือ อัตราการกัดกร่อนของเหล็กกล้าคาร์บอนในสารละลาย  
ที่เติมสารยับยั้งการกัดกร่อน (มม./ปี)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.3 การแปลงสนิม (rust converter) [17-19]

ตัวแปลงสนิมส่วนใหญ่นิยมใช้กรดแทนนิกและกรดฟอสฟอริก ซึ่งไม่ทำลายและเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม ซึ่งแตกต่างจากสารยับยั้งพิษ เช่น ตะกั่วแดงหรือสังกะสีโครเมต ซึ่งผลที่เกี่ยวกับประสิทธิภาพของตัวแปลงสนิมและผลลัพท์อาจขัดแย้งกันขึ้นอยู่กับเงื่อนไขการทดลอง เหตุผลหลายประการโดยเฉพาะธรรมชาติที่แตกต่างกันของชั้นของเหล็กออกไซด์ที่จะแปลง (ชนิด ความหนาแน่น ความหนา ฯลฯ) ค่า pH และความเข้มข้นหรือแหล่งกำเนิดของสารละลายแทนนิน กลไกการเกิดปฏิกิริยาหรือการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นที่ชั้นออกไซด์นั้นไม่ได้รับการพิสูจน์อย่างชัดเจน มีข้อตกลงบางประการว่าตัวแปลงสนิมทำปฏิกิริยากับผลึกเหล็กออกไซด์ที่นำไปสู่ชั้นออกไซด์พื้นฐาน ปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วกับเลพิโดโครไซด์ ( $\gamma$ -FeOOH) ซ้ำกว่าเล็กน้อยด้วยแมกนีไทต์ ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) และช้ากว่ามากด้วยโกเอไทต์ ( $\alpha$ -FeOOH)

ตัวแปลงสนิมเหมาะสมสำหรับใช้กับพื้นผิวที่เป็นสนิมเพื่อเปลี่ยนสนิม หรือออกไซด์ของเหล็ก ซึ่งไม่สามารถขจัดออกจากพื้นผิวได้ง่าย เป็นชั้นป้องกันที่ยึดเกาะที่ไม่เป็นอันตรายและสามารถทาสีทับได้ สารเปลี่ยนสภาพสนิมมีความน่าสนใจเนื่องจากมีการป้องกันการกัดกร่อนใช้ได้กับพื้นผิวที่เป็นสนิม มีต้นทุนที่ต่ำ สามารถหลีกเลี่ยงการทำความสะอาดพื้นผิวอย่างครอบคลุม เช่น การพ่นทราย และปรับปรุงการยึดเกาะของสีเคลือบด้านบน เทคนิคนี้มีความเกี่ยวข้องอย่างยิ่งเมื่อนำไปใช้กับพื้นผิวขนาดใหญ่ เช่น ตัวเรือ ซึ่งวิธีการกำจัดสนิมแบบดั้งเดิมนั้นใช้เวลานานและไม่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม การแปลงสนิมจะเห็นผลได้ดีก็ต่อขึ้นอยู่กับธรรมชาติและคุณสมบัติของทั้งชั้นสนิมและสารประกอบที่ทำให้เกิดสนิม เช่น ความหนาของฟิล์มสนิม โครงสร้างและองค์ประกอบของสนิม โครงสร้าง ความเข้มข้น ความสามารถในการละลาย pH ความสามารถในการคีเลตด้วยเฟอริกไอออน เป็นต้น

สนิมเริ่มต้นที่ก่อตัวประกอบด้วย  $\gamma$ -FeOOH จำนวนมาก และถูกแปลงเป็น  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  แบบ nonstoichiometric การแปลงสนิมแทนนินเป็นสิ่งสำคัญให้การทำปฏิกิริยากับเหล็กออกไซด์เปลี่ยนเป็นเหล็กแทนเนต ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์การกัดกร่อนสีน้ำเงินหรือดำที่มีความเสถียร แทนนินเป็นกลุ่มของผลิตภัณฑ์จากธรรมชาติที่ละลายในน้ำและแอลกอฮอล์ซึ่งสกัดจากพืชหลากหลายชนิด ไม่ค่อยมีใครรู้เกี่ยวกับโครงสร้างที่แท้จริงเนื่องจากมีความซับซ้อนและแปรปรวน

การทำงานทางเคมีของตัวแปลงสนิมคือการเปลี่ยนสารประกอบเหล็กที่มีรูพรุนและหลุดร่อนไปเป็นสารประกอบยึดเกาะที่ละลายน้ำได้น้อย สูตรที่ใช้บ่อยที่สุดคือกรดฟอสฟอริกซึ่งทำให้สนิมเปลี่ยนเป็นชั้นฟอสเฟตเหล็กที่เกาะแน่น นอกจากนี้ยังใช้สูตรที่ขึ้นอยู่กับโพลีฟีนอลที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติหรือแทนนิน เนื่องจากปฏิกิริยากับไอออนของเหล็ก สิ่งเหล่านี้นำไปสู่สารประกอบเชิงซ้อนของเหล็กที่ไม่ละลายน้ำสารแปลงสนิมที่มีกรดฟอสฟอริกประกอบด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- กรดพอสฟอริกเป็นองค์ประกอบหลัก
- สารทำให้เปียกเพื่อลดแรงตึงผิวและช่วยให้กรดแทรกซึมเข้าไปในสนิมได้ดีขึ้น
- ตัวทำลายสำหรับขจัดสิ่งเจือปนที่เป็นไขมันและไม่มีขี้
- รวมถึง องค์ประกอบอื่น ๆ ซึ่งแตกต่างกันไปตามผู้ผลิต

การใช้สารกันสนิมนั้นไม่ใช่ง่ายนักในทางปฏิบัติ เนื่องจากไม่สามารถวัดได้อย่างถูกต้องตามความหนาและองค์ประกอบของฟิล์มกันสนิม หากใช้ตัวแปลงสนิมมากเกินไป พื้นผิวที่เป็นกรดจะยังคงอยู่ หากใช้ในปริมาณที่ไม่เพียงพอ สนิมจะไม่ถูกแปลงทั้งหมด และสนิมที่หลงเหลืออยู่จะยังคงอยู่และเป็นจุดเริ่มต้นของกระบวนการกัดกร่อนใหม่

## 2.4 สารลดแรงตึงผิว (Surfactant) [20]

สารลดแรงตึงผิวมีบทบาทที่สำคัญในการดำรงชีวิตของมนุษย์ ในแต่ละวันมนุษย์ใช้สารลดแรงตึงผิวแทบทุกกิจกรรม เช่น การทำความสะอาดร่างกายและของใช้ การใช้เครื่องสำอาง การย่อยอาหาร กระบวนการผลิตในอุตสาหกรรม เป็นต้น นอกจากนี้สารลดแรงตึงผิวยังมีบทบาทที่สำคัญในการแก้ปัญหาสิ่งแวดล้อม เช่น ในกระบวนการบำบัดน้ำเสีย ในการกำจัดคราบน้ำมันและสิ่งสกปรก ในการกำจัดสารแขวนลอยหรือคอลลอยด์ในน้ำ การเลือกประเภทของสารลดแรงตึงผิว ปริมาณหรือความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวรวมถึงสถานะอื่นๆ ให้เหมาะสมกับวัตถุประสงค์ของการใช้งานต่างๆ เป็นสิ่งสำคัญอย่างยิ่ง ทั้งนี้เพื่อให้สารลดแรงตึงผิวทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุดและไม่สร้างปัญหาเพิ่มให้กับสิ่งแวดล้อม สารลดแรงตึงผิวส่วนใหญ่จะสามารถย่อยสลายได้โดยธรรมชาติ ความสามารถในการถูกย่อยสลายจะขึ้นกับโครงสร้างของสารลดแรงตึงผิวรวมทั้งปริมาณของสารลดแรงตึงผิวที่เหลืออยู่จากการใช้ การใช้สารลดแรงตึงผิวในปริมาณที่เหมาะสมนอกจากจะช่วยลดต้นทุนการบำบัดแล้วยังมีส่วนช่วยลดปัญหาสิ่งแวดล้อมในน้ำดื่ม โดยปริมาณสารลดแรงตึงผิวที่สามารถเจือปนได้โดยไม่ก่อให้เกิดอันตรายเท่ากับ 0.5 มิลลิกรัมต่อลิตร

### 2.4.1 ชนิดของสารลดแรงตึงผิว

สารลดแรงตึงผิวส่วนใหญ่เป็นสารประกอบอินทรีย์ซึ่งประกอบด้วย 2 ส่วน คือ ส่วนที่ชอบน้ำ (Hydrophilic group) และส่วนที่ไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic group) ส่วนที่ไม่ชอบน้ำมักจะเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอน คือมีธาตุคาร์บอนและไฮโดรเจนเป็นองค์ประกอบหลัก ส่วนใหญ่จะมาจากไขมันและน้ำมันตามธรรมชาติรวมทั้งผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียมและพอลิเมอร์สังเคราะห์ ลักษณะที่สำคัญของสารลดแรงตึงผิวคือเมื่อใส่สารลดแรงตึงผิวเพียงเล็กน้อยลงในน้ำ สารลดแรงตึงผิวจะไปลด

แรงตึงผิวของน้ำเพื่อให้เกิดกระบวนการต่างๆง่ายขึ้น ยกตัวอย่างเช่น การเกิดฟอง การทำให้เปียกและ  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ประจุลบอื่นๆ ตัวอย่างผลิตภัณฑ์ที่ใช้ในสารนี้ ได้แก่ สารขจัดคราบฝังแน่น เช่น COGNIS Deutschland และ Polyoxyethylene alcohol ซึ่งมีสูตรโมเลกุล คือ  $(C_nH_{2n+1}(OCH_2CH_2)_mOH)$

4) สารลดแรงตึงผิวชนิดสองประจุ (Zwitterionic surfactant) สารกลุ่มนี้มีทั้งประจุบวกและประจุลบอยู่ในโมเลกุลเดียวกัน เมื่อละลายน้ำจะแสดงประจุใดขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อม เช่น ถ้าสภาพแวดล้อมเป็นกรดจะแสดงประจุบวก ถ้าสภาพแวดล้อมเป็นด่างจะแสดงประจุลบ สมบัติหลักของสารกลุ่มนี้คือ สามารถทนน้ำกระด้าง อ่อนละมุนต่อผิว มีสมบัติการเกิดการป้องกันไฟฟ้าสถิตและให้ความนุ่มได้ เช่น b-N-Alkylaminopropionic Acids มีสูตรโมเลกุล คือ  $RN^+H_2CH_2CH_2COO^-$  ซึ่งเป็นส่วนประกอบในเครื่องสำอาง สารป้องกันการกัดกร่อน และสารยับยั้งแบคทีเรีย เป็นต้น

ตารางที่ 2.1 เปรียบเทียบความสามารถของสารลดแรงตึงผิวทั้ง 4 ชนิด ในการทำให้เกิดฟอง การซักล้าง และการทำให้พื้นผิวเกิดความอ่อนนุ่ม [19]

ประเภท / คุณสมบัติ สารลดแรงตึงผิว	การเกิดฟอง	ความสามารถในการ ซักล้าง	ความสามารถในการ ทำให้อ่อนนุ่ม
ประจุลบ	ดีที่สุด	ค่อนข้างดี	ไม่แน่นอน
ไม่มีประจุ	ดี	ดี	ดี
ประจุบวก	ไม่ดี	ปานกลาง	ไม่ดี
ประจุบวกและลบ	ค่อนข้างดี	ดี	ดีที่สุด

#### 2.4.2 การนำไปใช้ประโยชน์

สารลดแรงตึงผิวมีบทบาทที่สำคัญอย่างยิ่งในชีวิตประจำวันของมนุษย์ ในร่างกายมนุษย์ก็มีสารลดแรงตึงผิวประกอบอยู่ เช่น Gall Acid ซึ่งจะย่อยสารประเภทไขมันได้ สารลดแรงตึงผิวมีประโยชน์หลายๆ ด้าน โดยเป็นส่วนประกอบที่สำคัญของผลิตภัณฑ์ต่างๆ และเป็นส่วนสำคัญในกระบวนการผลิตต่างๆ ได้แก่

- 1) สารลดแรงตึงผิวเป็นส่วนประกอบในผลิตภัณฑ์ทำความสะอาด เช่น ผงซักฟอก สบู่ ยาสีฟัน ยาสระผม ครีมนวดผม และผลิตภัณฑ์ที่มีฟอง เป็นต้น
- 2) สารลดแรงตึงผิวเป็นส่วนประกอบในเครื่องสำอางและครีมกันแดด
- 3) สารลดแรงตึงผิวถูกนำมาใช้ในทางการแพทย์ ผลิตยา
- 4) สารลดแรงตึงผิวถูกนำมาใช้ในอุตสาหกรรม เช่น กระบวนการย้อมผ้า การเคลือบสีไม้หรือโลหะ การผลิตพลาสติก การทำหนังสือ การผลิตเนยเทียม เค้กและไอศกรีม เป็นต้น

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5) สารลดแรงตึงผิวถูกนำมาใช้ในการแก้ไขปัญหาล้างแวล้อม เช่น บำบัดน้ำเสีย กำจัดมลพิษทางดิน ดูดซับของเสีย เป็นต้น

6) สารลดแรงตึงผิวถูกนำมาใช้ในกระบวนการสกัดแยก เช่น การสกัดแยกแร่ การแยกน้ำมันออกจากน้ำ เป็นต้น

นอกจากนี้ยังมีการนำสารลดแรงตึงผิวมาใช้ในเทคโนโลยีสมัยใหม่ เช่น นาโนเทคโนโลยี เทคโนโลยีชีวภาพ งานพิมพ์อิเล็กทรอนิกส์ และเครื่องบันทึกแถบแม่เหล็ก เป็นต้น นอกจากนี้สารลดแรงตึงผิวจะมีบทบาทในชีวิตประจำวันแล้ว เช่น ในกระบวนการทำความสะอาด สารลดแรงตึงผิวยังมีบทบาทที่สำคัญและนำไปใช้ประโยชน์ในด้านต่างๆมากมาย รวมทั้งทางด้านสิ่งแวดล้อม เช่น ในกระบวนการบำบัดน้ำเสีย อย่างไรก็ตามการนำสารลดแรงตึงผิวไปใช้ประโยชน์จะต้องพิจารณาอย่างรอบคอบ ทั้งนี้เพราะสารลดแรงตึงผิวสามารถทำลายสิ่งแวดล้อมได้เช่นกันถ้ามีการใช้ในปริมาณที่ไม่ถูกต้องและมีน้ำสารลดแรงตึงผิวผิวดินประเภทยาใช้ ตัวอย่างเช่นในการปล่อยน้ำซักผ้าหรือน้ำยาล้างจานที่เข้มข้นซึ่งมีสารลดแรงตึงผิวเป็นส่วนประกอบลงในแม่น้ำลำคลอง จะทำให้เกิดฟองอย่างมาก นอกจากจะทำลายสุนทรียภาพของแม่น้ำลำคลองแล้ว ยังสร้างผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำ และอาจต้องใช้เวลาอันยาวนาน ที่กระบวนการธรรมชาติโดยแบคทีเรียหรือจุลินทรีย์จะย่อยสลายสารลดแรงตึงผิวได้หมด

#### 2.4.3 ประเภทของสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุลบที่นิยม (Types of popularity anionic surfactant) [21-22]

ในปัจจุบันสารลดแรงตึงผิวที่ใช้อย่างกว้างขวางนั้นเป็นชนิดสารลดแรงตึงผิวประจุลบซึ่งมีมากถึงร้อยละ 70-75 ของสารลดแรงตึงผิวทั้งหมดในโลกโดยมีกลุ่มย่อยคือ อัลคาลีน คาร์บอกซิลิก สบู่อัลเฟต ซัลโฟเนต และฟอสเฟตที่สามารถใช้ให้เกิดประโยชน์ได้หลายชนิดสามารถแก้ไขปรับปรุงโดยการเติมประเภทของสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุลบที่เหมาะสมได้

#### ตารางที่ 2.2 การแสดงการใช้งานของสารลดแรงตึงผิวชนิดต่างๆ [22]

ชนิด	จำนวน	ร้อยละของการใช้ทั้งหมด
Anionic	4284	65
Nonionic	1845	28
Other (Amphoterics,Cationics,etc)	461	7
Total	6590	100

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของสำนักงานทรัพย์สินส่วนพระมหากษัตริย์ และผู้จัดทำขึ้นโดยระบบอัตโนมัติ การนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตถือว่าผิดกฎหมาย การนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตถือว่าผิดกฎหมาย

สบู่ที่พัฒนามาจากไขมันสัตว์ไขมันพืชและน้ำมันจัดได้ว่าเป็นสารลดแรงตึงผิวที่มนุษย์ได้ค้นพบมากกว่าหนึ่งพันปีทำให้เกิดประโยชน์ทางเศรษฐกิจอย่างมหาศาล กรดไขมันนั้นจะพบได้มากจากธรรมชาติ ส่วนการผลิตสบู่จะขึ้นอยู่กับวัสดุที่ได้จากธรรมชาติ เช่น กรดไขมันจากสัตว์ประกอบด้วยกรดโอเลอิกร้อยละ 40-45 กรดปาล์มมิกร้อยละ 25-30 กรดสเตียริกร้อยละ 15-20 นอกจากนี้ยังมีกรดมันที่ได้จากพืชคือ กรดไขมันมะพร้าวประกอบด้วย  $C_{12}$  ร้อยละ 45-50  $C_{14}$  ร้อยละ 16-20 Oleic ร้อยละ 5-6  $C_{12}$  ร้อยละ 10-15 วัสดุเพิ่มเติมได้มาจาก น้ำมันสูง (กรดไขมัน 50-70% และกรดโรซิน 30-50%) ในวัสดุกรดคาร์บอกซิลิกเกือบทั้งหมด กรดจะถูกทำให้เป็นกลางกับเกลือโซเดียมหรือโพแทสเซียม แม้ว่าเกลือเอมีนจะเป็นที่นิยมสำหรับการใช้งานบางอย่าง ดังที่ได้กล่าวไปแล้ว ข้อเสียที่สำคัญของสบู่กรดคาร์บอกซิลิกคือ สบู่มีความว่องไวสูงต่อการมีอยู่ของ ไดไอออนและไตรวาเลนต์ไอออนบวก, ความเข้มข้นของเกลือทุกชนิดสูง, pH ต่ำ (ซึ่งผลิตกรดไขมันอิสระที่ไม่ละลายน้ำ) และอุณหภูมิต่ำ อีกทั้งยังมีลักษณะการดูดซับพื้นผิวที่ทำให้ล้างออกยาก ทั้งคราบสบู่ที่ไม่พึงประสงค์บนผิวหนังหรือเสื้อผ้าซึ่งอาจทำให้เกิดอาการคันเมื่อแห้ง

การพัฒนาการสังเคราะห์สารลดแรงตึงผิวนั้นเริ่มขึ้นเมื่อต้องการปรับปรุงหน้าที่ของสบู่ชนิดเดิมเพื่อนำไปใช้ในหลากหลายอุตสาหกรรมสมัยใหม่ พบว่าการใช้สารลดแรงตึงผิวมีบทบาทที่สำคัญมากในกระบวนการผลิตสมัยใหม่โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกระบวนการสังเคราะห์เคมีอินทรีย์ เช่นการตอบสนองที่ว่องไวของสบู่ต่อการเปลี่ยนแปลงความเป็นกรดเบส จากการสังเคราะห์ต่างๆที่ได้กล่าวมา กลุ่มของสารลดแรงตึงผิวที่มีบทบาทอย่างมาก ได้แก่ กรดซัลโฟเนต และกรดซัลฟิวริก

2.4.3.1 ซัลเฟต เอสเทอร์ เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน (Esterification) ของแอลกอฮอล์กับกรดซัลฟิวริก ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์หรือกรดคลอโรซัลโฟนิค หรือการเพิ่มเข้าไปของกรดซัลฟิวริกในพันธะคู่ที่มีอยู่ตามปกติจะไม่ถูกทำร้ายจนกว่าแอลกอฮอล์จะทำปฏิกิริยาจนหมด เนื่องจากสารตั้งต้นมีความซับซ้อนมาก ในกรณีของกรดไขมันไฮดรอกซีและเอสเทอร์ สภาวะที่ค่อนข้างรุนแรงของกระบวนการทำปฏิกิริยาสามารถนำไปสู่ปฏิกิริยาด้านอื่นๆ ได้



จะเห็นได้ว่าสารลดแรงตึงผิวซัลเฟต เอสเทอร์ ประกอบไปด้วยกลุ่มของกรดซัลโฟนิค ซึ่งมักจะมีการพบอัลคาไลน์หรือเกลือแอมโมเนียม ซึ่งสูตรโครงสร้างโดยทั่วไปนั้นจะเป็น  $\text{ROSO}_3\text{H}$  เช่น โซเดียมโดเดซิลซัลเฟต นอกจากนี้ยังมีสารประกอบอีกมากมายที่มีประโยชน์ในการใช้งาน เช่นเดียวกันปฏิกิริยาที่แสดงนั้นเป็นปฏิกิริยาอย่างง่าย ซึ่งมักเกิดขึ้นในกระบวนการการผสมกัน เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระหว่างไอโซเมอร์หรือหมู่ฟังก์ชันต่างๆ ผลลัพธ์ที่ได้จะเป็นจำพวกสารประกอบเป็นส่วนมาก โดยสารที่ได้จะเริ่มต้นจากซัลเฟตที่มีฟังก์ชันของแอลกอฮอล์ที่อิมิตัวและไม่อิมิตัว

2.4.3.2 กรดเกลือซัลโฟนิก ถึงแม้ว่าจะมีสารเคมีคล้ายกับซัลเฟตเอสเทอร์ แต่สารลดแรงตึงผิวกรดเกลือซัลโฟนิกอาจมีแตกต่างกันมากในด้านคุณสมบัติและความเสถียรทางเคมี เช่นเดียวกับซัลเฟต มีกลุ่มที่ไม่ชอบน้ำหลากหลายกลุ่มที่ควบคุมคุณสมบัติและการประยุกต์ใช้งาน กรดซัลโฟนิกบางกลุ่มในยุคแรกๆที่มีสามารถอธิบายกระบวนการผลิตได้คือ ซัลเฟตออยล์ (Sulfate oil) ในศตวรรษที่ 19 นับได้ว่าเป็นจุดเริ่มต้นในการนำสารลดแรงตึงผิวมาใช้ให้เกิดประโยชน์ทางการค้า

อย่างไรก็ตาม สารลดแรงตึงผิวซัลโฟเนตที่มีจำหน่ายในท้องตลาดชนิดแรกนั้นผลิตขึ้นจากการขาดแคลนวัตถุดิบในเยอรมนีในช่วงสงครามโลกครั้งที่ 1 โซเดียมอัลคิลแนฟทาซีน (Sodium alkyl naphthalene) สายสั้นบางชนิดได้รับการพัฒนาขึ้นและแม้ว่าสารซักฟอกจะมีคุณสมบัติค่อนข้างต่ำ แต่ก็พบว่าเป็นสารทำให้เปียกที่ดีและยังคงใช้อยู่เช่นทุกวันนี้ อีกทั้งยังพบว่าใช้เป็นสารอิมัลซิไฟเออร์และสารช่วยกระจายตัวในการใช้งานด้านการเกษตรและการถ่ายภาพ

หลังจากสงครามโลกจบลงทำให้เกิดการขยายตัวของอุตสาหกรรมเคมีในประเทศอังกฤษ เยอรมนี และสหรัฐอเมริกาถือได้ว่าเป็นผู้นำทางด้าน การสังเคราะห์สารลดแรงตึงผิวซัลเฟตซึ่งนับได้ว่ามีความหมายที่สำคัญในด้านเศรษฐกิจทางการค้าด้วย และยังพบอีกว่าซัลเฟตสามารถได้จากการกลั่นแยกส่วนประกอบของกระบวนการปิโตรเลียม Olefin sulfonates N-acyl-N-alkyltaurines Sulfosuccinate ester และจากสารประกอบอื่นๆ

2.4.3.3 สบู่และผงซักฟอกจากคาร์บอกซิเลต ในอดีตนั้นได้มีเอกสารบันทึกไว้อย่างยาวนานเกี่ยวกับสบู่และผงซักฟอกจากคาร์บอกซิเลตที่เกี่ยวกับสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุลบ พบว่ากรดเกลือคาร์บอกซิเลตได้มีสมบัติที่เด่นกว่าประเภทของสบู่จำพวกอื่นๆ ทั้งในด้านความเสถียรและค่าความเป็นกรดเบสต่างๆ ในน้ำ พบว่าสารส่วนมากจะประกอบไปด้วยการเพิ่มเข้าของหมู่ที่มีขั้ว เช่นเอสเทอร์ เอไมด์ สารประกอบกรดไขมันซึ่งมีข้อดีด้านสภาพการละลายและความมีเสถียรภาพ

#### 2.4.4 โซเดียมโดเดซิลซัลเฟต (Sodium dodecyl sulfate) [23]

โซเดียมโดเดซิลซัลเฟต (SDS) หรือโซเดียมลอริลซัลเฟต (SLS) เป็นสารประกอบอินทรีย์ที่มีสูตร  $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{11}\text{OSO}_3\text{Na}$  มีน้ำหนักโมเลกุล 288.5 กรัมต่อโมล เป็นของแข็งสีขาวหรือสีครีม ไม่มีกลิ่น ความหนาแน่นเท่ากับ 1.01 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร และมีจุดหลอมเหลวอยู่ที่ 206 องศาเซลเซียส เป็นสารลดแรงตึงผิวที่มีประจุลบ โดยมากนิยมนำมาใช้ในการทำความสะอาดและผลิตภัณฑ์

สุภาพ เป็นเกลือ Organosulfate ที่ประกอบด้วยคาร์บอน 12 ตัวที่ติดกับหมู่ซัลเฟตทำให้วัสดุมีคุณสมบัติเป็นAmphiphilic ที่มีความจำเป็นต่อการผลิตผงซักฟอกที่ได้มาจากมะพร้าวและน้ำมันปาล์มที่มีราคาไม่แพง และยังเป็นองค์ประกอบที่พบบ่อยในผลิตภัณฑ์ทำความสะอาดในประเทศจำนวนมาก

โซเดียมโดเดคซิลซัลเฟต ถูกสังเคราะห์โดยแก๊สซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ , น้ำมัน หรือกรดคลอโรซัลฟิวริก ในการผลิตไฮโดรเจนลอริลซัลเฟต วิธีการผลิตในอุตสาหกรรมมักจะใช้แก๊สซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่ได้จะถูกทำให้เป็นกลางโดยการเติมโซเดียมไฮดรอกไซด์หรือโซเดียมคาร์บอเนต โดยในทางกลับกันลอริลแอลกอฮอล์มักจะได้จากมะพร้าวหรือน้ำมันในเมล็ดปาล์มโดยการไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) ซึ่งจะได้จำพวกกรดไขมันออกมาและตามด้วยทำปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชัน (Hydrogenation) ต่อไป และเนื่องจากวิธีการสังเคราะห์นี้โซเดียมโดเดคซิลซัลเฟตเป็นสารตัวอย่างในเชิงพาณิชย์ สามารถใช้ได้ในรูปแบบผงและแบบเม็ดซึ่งโซเดียมโดเดคซิลซัลเฟตรูปแบบเม็ดจะละลายในน้ำเร็วกว่ารูปแบบผงและโซเดียมโดเดคซิลซัลเฟตมักจะมีส่วนผสมของอัลคิลซัลเฟตตัวอื่นๆ ด้วยแต่มีโดเดคซิลซัลเฟตเป็นส่วนประกอบหลัก



รูปที่ 2.15 โครงสร้างโมเลกุลของโซเดียมโดเดคซิลซัลเฟต

ความเข้มข้นของไมเซลล์วิกฤต (CMC) ของโซเดียมโดเดคซิลซัลเฟตในน้ำบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส คือ 8.2 มิลลิโมลาร์ และจำนวนการรวมตัวที่ความเข้มข้นนี้จะประมาณ 62 ส่วนไมเซลล์ไอออนไนเซชัน ( $\alpha$ ) อยู่ที่ประมาณ 0.3 หรือ 30 เปอร์เซ็นต์

โซเดียมโดเดคซิลซัลเฟตส่วนใหญ่จะใช้ในผงซักฟอกสำหรับซักผ้าและมีการใช้งานเกี่ยวกับการทำความสะอาดมากมาย เป็นสารลดแรงตึงผิวที่มีประสิทธิภาพสูง และใช้ในงานที่ต้องการขจัดคราบมันและสารตกค้างต่างๆ เช่น ในผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มักพบความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวที่สูง เช่น น้ำยาล้างคราบมันเครื่องยนต์ น้ำยาทำความสะอาดพื้น และน้ำยาทำความสะอาดภายนอกเครื่องยนต์ เป็นต้น อีกทั้งยังพบในส่วนผลิตภัณฑ์จำพวกยาสีฟัน แชมพู ครีมโกนหนวด และสูตรทำฟองสำหรับอาบน้ำเนื่องจากความสามารถในการสร้างฟอง ส่วนหนึ่งมีผลในการทำให้หน้าขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การใช้งานในห้องปฏิบัติการสามารถใช้เพื่อช่วยในการ Lysing เซลล์ในระหว่างการสกัดดีเอ็นเอและโปรตีนใน SDS-PAGE โดยโซเดียมโดเดคซิลซัลเฟตหรือ Duponol เป็นที่นิยมใช้ในการเตรียมโปรตีนสำหรับทำอิเล็กโตรโฟรีซิสในเทคนิค SDS-PAGE ซึ่งสารประกอบนี้ทำงานโดยการทำลายพันธะที่ไม่ใช่โควาเลนต์ในโปรตีนทำให้ลักษณะทางธรรมชาติเปลี่ยนไปและก่อให้เกิดการสูญเสียรูปร่างโมเลกุลที่เป็นพื้นฐานของพวกมันหรือโครงสร้างพื้นฐานของโมเลกุล โดยประจุลบนี้มีความสำคัญมากกว่าประจุตั้งเดิมของโปรตีนซึ่งโซเดียมโดเดคซิลซัลเฟตจะสร้างพันธะที่มีแรงผลักรวมของไฟฟ้าสถิตทำให้เกิดโปรตีนที่เป็นรูปร่างเหมือนแท่งจึงช่วยลดความแตกต่างในรูปร่างที่เป็นปัจจัยหลักสำคัญสำหรับการแยกในเจล โซเดียมโดเดคซิลซัลเฟต น่าจะเป็นงานวิจัยมากที่สุดของสารลดแรงตึงผิวที่มีประจุลบส่วนใหญ่สารลดแรงตึงผิวจะเป็นพวกผงซักฟอก โซเดียมโดเดคซิลซัลเฟตจะกำจัดคราบไขมันออกจากผิวและสามารถก่อให้เกิดการระคายเคืองต่อผิวหนังและตาได้ โซเดียมโดเดคซิลซัลเฟตยังเป็นที่นิยมใช้สำหรับการกระจายหรือความไม่คงที่ของท่อนโน เช่น ท่อนโนคาร์บอน (CNTs) แต่อย่างไรก็ตามโซเดียมโดเดคซิลเบนซีนซัลโฟเนต (NaDDBS) และ Triton X -100 ได้มีการรายงานให้เป็นสารช่วยกระจายตัวที่ดีกว่าของผนังเดี่ยวในท่อนาโนคาร์บอน

#### 2.4.5 ความเข้มข้นวิกฤตของการเกิดไมเซลล์ (Critical micelle concentration, CMC) [24]

สารลดแรงตึงผิวเป็นสารที่มีประโยชน์และถูกนำมาใช้อย่างกว้างขวางทั้งในทางเภสัชกรรม อาหาร และเครื่องสำอาง เมื่อละลายสารลดแรงตึงผิวในน้ำที่ความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวสูงกว่าความเข้มข้นค่าหนึ่ง ซึ่งเรียกว่าความเข้มข้นวิกฤตของการเกิดไมเซลล์ (critical micelle concentration) โมเลกุลของสารลดแรงตึงผิวสามารถจับเป็นกลุ่มทรงกลมเรียกว่าไมเซลล์ การเกิดปฏิกิริยาในสารละลายที่มีไมเซลล์พบว่ามีกลไกที่แตกต่างไปจากการเกิดปฏิกิริยาในตัวกลางที่ปราศจากไมเซลล์โดยการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นนี้คาดว่าเกิดจากอันตรกิริยาของไฟฟ้าสถิต และอันตรกิริยาของภาวะไม่ชอบน้ำ การเกิดอันตรกิริยาเหล่านี้มีผลต่อการเกิดความเข้มข้นเฉพาะที่ของสารตั้งต้นและสภาวะแวดล้อมจุลภาคขึ้นในโครงสร้างของไมเซลล์ ซึ่งสารในปฏิกิริยาสามารถกระจายตัวเข้าไปได้ โดยในสภาวะแวดล้อมจุลภาคนั้นมีสภาพขั้วต่างไปจากสารละลายที่ปราศจากไมเซลล์ อิทธิพลของสารละลายไมเซลล์สามารถให้ผลเร่งหรือยับยั้งปฏิกิริยานั้นทั้งนี้ขึ้นกับคุณสมบัติของสารลดแรงตึงผิวที่ใช้ สารตั้งต้นในปฏิกิริยา และสารอื่นที่เติมลงในระบบ

สารละลายเจือจางของสารลดแรงตึงผิวในน้ำ โมเลกุลของสารลดแรงตึงผิวจะเป็นโมเลกุลเดี่ยวที่ผิวประจันระหว่างอากาศและน้ำโดยหันส่วนที่มีขั้วของโมเลกุลเข้าไปในวัฏภาคน้ำและส่วนที่ไม่มีขั้วของโมเลกุลเข้าไปในวัฏภาคอากาศ เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิว โมเลกุลของสารลดแรงตึงผิวจะเริ่มจับกันเองเป็นกลุ่มเรียกว่าไมเซลล์ โดยส่วนที่ไม่มีขั้วของโมเลกุลหันเข้าหากันเองแล้วหันส่วนที่มีขั้วเข้าสู่วัฏภาคน้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารต้นฉบับที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการศึกษาวิจัยเท่านั้น ไม่สามารถนำออกจำหน่ายหรือใช้เพื่อวัตถุประสงค์อื่นใดได้โดยไม่ได้รับความเห็นชอบจากเจ้าของลิขสิทธิ์

ตารางที่ 2.3 แสดงตัวอย่างค่าความเข้มข้นวิกฤตของการเกิดไมเซลล์และจำนวนโมเลกุลของการรวมกลุ่มจากสารลดแรงตึงผิวต่างๆ [24]

สารลดแรงตึงผิว	ความเข้มข้นวิกฤตของการเกิดไมเซลล์ (M)	อุณหภูมิ (°C)	จำนวนโมเลกุลของการรวมกลุ่ม (N)
สารลดแรงตึงผิวประจุบวก			
Cencylammonium bromide	$5.0 \times 10^{-3}$	25	1100
Dodecyltrimethyl ammonium bromide	$6.5 \times 10^{-2}$	25	48
Dodecylammonium chloride	$1.5 \times 10^{-2}$	25	55.5
Dodecyltrimethylammonium bromide	$1.5 \times 10^{-2}$	25	50
สารลดแรงตึงผิวประจุลบ			
Sodium decyl sulfate	$3.3 \times 10^{-2}$	25	50
Sodium dodecyl sulfonate	$4.4 \times 10^{-2}$	30	40
Sodium dodecanoate	$2.4 \times 10^{-2}$	25	56 (in 0.013 M KBr)
Sodium dodecyl sulfate	$8.1 \times 10^{-3}$	25	62
สารลดแรงตึงผิวประจุขั้วคู่			
Dodecyltrimethylammoniumpropane Carboxylate	$5.3 \times 10^{-3}$	30	N/A*
N-Dodecyl-N, N-dimethylglycine	$1.8 \times 10^{-3}$	23	N/A*
C-Dodecyl-N, N-dimethylglycine	$1.3 \times 10^{-3}$	27	N/A*
สารลดแรงตึงผิวไม่มีประจุ			
Polyoxyethylene(6)octanol	$9.9 \times 10^{-3}$	25	32
Polyoxyethylene(6)decanol	$9.0 \times 10^{-4}$	25	73
Polyoxyethylene(6)hexadecanol	$2.3 \times 10^{-6}$	25	150

เอกสารนี้เป็นทรัพย์สินทางปัญญาของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์อื่นใด  
 \*ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

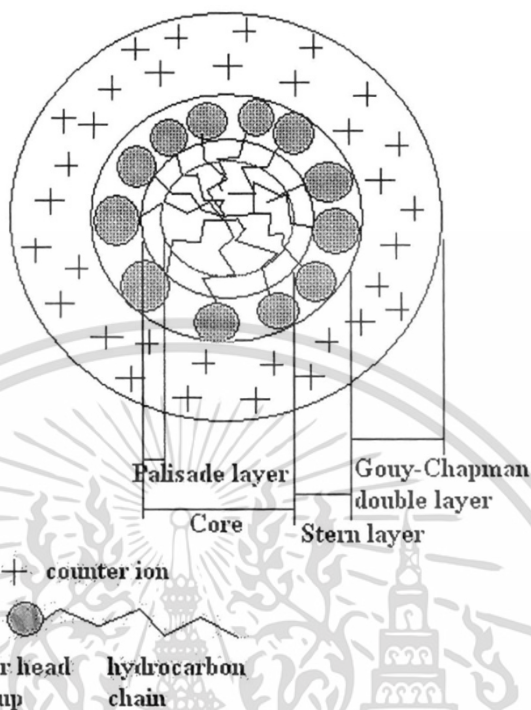
Polyoxyethylene(20)sorbitan monooleate (tween 80, Polysorbate 80)	$1.3 \times 10^{-3}$ (g/dliter)	25	N/A*
--	------------------------------------	----	------

\*N/A ไม่พบรายงาน

ความเข้มข้นที่สารลดแรงตึงผิวเริ่มจับกันเป็นไมเซลล์นี้เรียกว่า ความเข้มข้นวิกฤตของการเกิดไมเซลล์ (Critical micelle concentration) พบว่าสารลดแรงตึงผิวส่วนใหญ่ที่มีสายโซ่ไฮโดรคาร์บอนเป็นส่วนหนึ่งของโครงสร้างที่ไม่มีขั้วในโมเลกุลมักมีความเข้มข้นวิกฤตของการเกิดไมเซลล์อยู่ในช่วง  $10^{-4}$ - $10^{-2}$  โมลาร์ ดังแสดงตัวอย่างในตารางที่ 2.3 สำหรับการหาค่าความเข้มข้นวิกฤตของการเกิดไมเซลล์นั้นสามารถทำได้หลายวิธี เช่น การวัดแรงตึงผิว การใช้ความสามารถของสารลดแรงตึงผิวในการเพิ่มการละลาย และการนำไฟฟ้า เป็นต้น ค่าความเข้มข้นวิกฤตของการเกิดไมเซลล์จากวิธีวัดที่แตกต่างกันจะได้ค่าที่ต่างกันเล็กน้อย

โมเลกุลของสารลดแรงตึงผิวจะจับกันอยู่ในรูปของไมเซลล์เมื่อสารลดแรงตึงผิวมีความเข้มข้นเท่ากับหรือสูงกว่าความเข้มข้นวิกฤตของการเกิดไมเซลล์ ไมเซลล์เป็นสถานะที่อยู่ในสมดุลระหว่างการอยู่เป็นโมเลกุลเดี่ยว ๆ และการจับเป็นกลุ่มของโมเลกุลสารลดแรงตึงผิว มีรายงานว่าแต่ละโมเลกุลของ Sodium lauryl sulfate ซึ่งเป็นสารลดแรงตึงผิวประจุลบจะอยู่เป็นองค์ประกอบของไมเซลล์นาน  $10^{-5}$  วินาที แล้วเปลี่ยนเป็นรูปโมเลกุลอิสระก่อนเปลี่ยนกลับมาอยู่ในรูปของไมเซลล์อีก โดยแต่ละไมเซลล์มีค่าครึ่งชีวิต  $10^{-3}$  วินาที ผิวของไมเซลล์จะมีประจุเช่นเดียวกับประจุของสารลดแรงตึงผิวที่จับกันเป็นไมเซลล์ โครงสร้างของไมเซลล์ที่มีประจุมักมีลักษณะเป็นทรงกลมซึ่งสามารถแบ่งโครงสร้างนี้เป็นชั้นต่าง ๆ ได้ตามสภาพขั้วของชั้นนั้นๆ ประกอบด้วยส่วนชั้นในของทรงกลมที่ไม่มีขั้วเป็นบริเวณของสายโซ่ไฮโดรคาร์บอน สารไม่มีขั้วที่ไม่ละลายในน้ำหลายชนิดสามารถมาละลายอยู่ในบริเวณนี้ของไมเซลล์ บริเวณที่ไม่มีขั้วนี้หุ้มด้วยบริเวณของชั้นที่มีขั้ว โดยบริเวณที่มีสภาพขั้วนี้สามารถแบ่งได้เป็นชั้นต่าง ๆ คือ Stem layer, Gouy-Chapman layer โครงสร้างไมเซลล์แสดงในรูปที่ 2.16 ปริมาณโมเลกุลของน้ำที่ปรากฏในโครงสร้างไมเซลล์จะลดลงเรื่อยๆ จากผิวนอกของไมเซลล์เข้าสู่บริเวณชั้นในทรงกลม ในส่วนแกนกลางของไมเซลล์จะไม่พบโมเลกุลของน้ำเลย โดยมีรายงานว่าแกนกลางนี้มีค่า Dielectric constant ประมาณ 2.1 สำหรับบริเวณผิวนอกของไมเซลล์ที่ยังมีโมเลกุลของน้ำแทรกตัวอยู่มีชื่อเฉพาะเรียกว่า Palisade layer

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



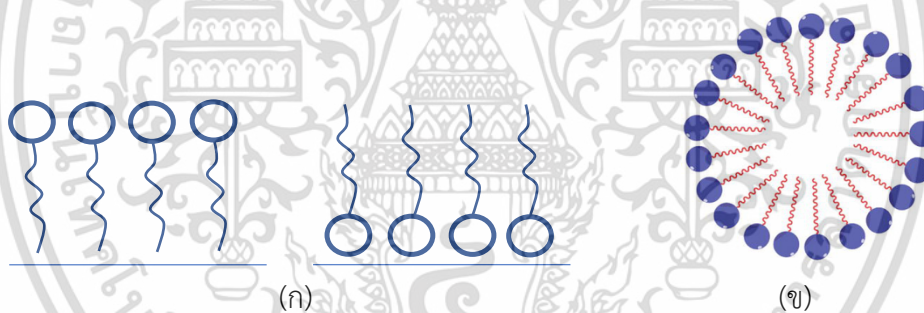
รูปที่ 2.16 รูปจำลองสองมิติแสดงบริเวณชั้นต่างๆของไมเซลล์

การตรวจสอบคุณสมบัติทางกายภาพของไมเซลล์ เช่น จำนวนโมเลกุลของสารลดแรงตึงผิวในแต่ละไมเซลล์ (Aggregation number, N) ดังตัวอย่างในตารางที่ 2.3 ขนาด และรูปร่างของไมเซลล์สามารถตรวจสอบได้โดยใช้หลายเทคนิคด้วยกัน ได้แก่ Light scattering fluorescence, Ultracentrifugation, Neutron specula reflection, Fourier transform-infrared (FTIR), X-ray diffraction spectroscopy, Dye solubilization และ Monte Carlo calculations.

ปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดไมเซลล์พบว่าการเกิดไมเซลล์นั้นขึ้นกับคุณสมบัติของสารลดแรงตึงผิวที่ใช้ในการเตรียม สารลดแรงตึงผิวที่มีสายโซ่ไฮโดรคาร์บอนยาวเอื้อต่อการเกิดไมเซลล์เมื่อเทียบกับสารที่มีสายโซ่ไฮโดรคาร์บอนสั้นโดยสังเกตจากสารลดแรงตึงผิวที่มีสายโซ่ไฮโดรคาร์บอนยาวมีค่าความเข้มข้นวิกฤตของการเกิดไมเซลล์ที่ต่ำกว่าพวกที่มีสายโซ่ไฮโดรคาร์บอนสั้น ดังตัวอย่างในตารางที่ 2.3 การเติมเกลือลงในสารละลายของสารลดแรงตึงผิวมีผลทำให้ความเข้มข้นวิกฤตของการเกิดไมเซลล์ต่ำลง ซึ่งแสดงว่าระบบมีการเกิดไมเซลล์ได้ดีขึ้นทั้งนี้เนื่องจากเกลือช่วยลดแรงผลักระหว่างประจุของส่วนที่มีขั้วบนโมเลกุลสารลดแรงตึงผิวทำให้จับกันเป็นไมเซลล์ได้ดีขึ้น และจำนวนโมเลกุลเอกสารนี้สารลดแรงตึงผิวที่จับกันในแต่ละไมเซลล์เพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของเกลือที่เติมลงไป โยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนการเติมแอลกอฮอล์ที่มีโมเลกุลขนาดเล็กทำให้ค่าความเข้มข้นวิกฤตของการเกิดไมเซลล์สูงขึ้นเนื่องจากแอลกอฮอล์ไปลดพันธะไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic bonding) แต่ถ้าเติมแอลกอฮอล์ที่มีโมเลกุลยาว (Long chain alcohol) จะทำให้ค่าความเข้มข้นวิกฤตของการเกิดไมเซลล์ลดลง นอกจากนี้อุณหภูมิ ความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวที่ใช้ และโครงสร้างของสารลดแรงตึงผิวมีผลต่อลักษณะรูปร่าง และจำนวนโมเลกุลสารลดแรงตึงผิวในแต่ละไมเซลล์ด้วย โดยรูปร่างของไมเซลล์สามารถเปลี่ยนจากทรงกลมไปเป็นทรงรี หรือทรงกระบอก เป็นต้น

การศึกษาการเกิดปฏิกิริยาในระบบที่มีไมเซลล์เป็นตัวกลางนั้นได้รับความสนใจอย่างกว้างขวาง เนื่องจากปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในระบบไมเซลล์นี้สามารถมีผลในการยับยั้งปฏิกิริยา หรือให้ผลในการเร่งปฏิกิริยา เมื่อเปรียบเทียบกับปฏิกิริยาเดียวกันในตัวกลางที่ไม่มีไมเซลล์ ทั้งนี้ขึ้นกับคุณสมบัติของสารที่เกิดปฏิกิริยาและคุณสมบัติของไมเซลล์ โดยการหาค่าความเข้มข้นวิกฤตของการเกิดไมเซลล์ของสารลดแรงตึงผิว สามารถกระทำได้โดยอาศัยการวัดสมบัติทางเคมีและกายภาพของสารละลายที่ค่าความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวต่างๆ กัน รูปที่ 2.17 แสดงการเปลี่ยนแปลงสมบัติต่างๆ เมื่อมีการเติมสารลดแรงตึงผิวลงในน้ำกลั่น



รูปที่ 2.17 กระบวนการรวมตัวของสารลดแรงตึงผิว

(ก) รวมตัวที่ผิววัสดุ และ (ข) การเกิดไมเซลล์ทรงกลม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 2.4.6 การวัดค่าสภาพการนำไฟฟ้า (Conductivity) [25]

การวัดค่าสภาพนำไฟฟ้า (Conductivity) ของสารละลายถือเป็นวิธีหนึ่งที่ได้รับคามนิยมในการหาค่าความเข้มข้นวิกฤตของการเกิดไมเซลล์ เนื่องจากใช้เวลาเพียงเล็กน้อย และให้ผลการเปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจน โดยเฉพาะกับสารลดแรงตึงผิวที่มีการแตกตัวให้อิออนในสารละลาย เช่น สารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวก ลบ และแอมโฟเทอริก อย่างไรก็ตามหากเป็นสารลดแรงตึงผิวชนิดไม่มีประจุ การหาค่าความเข้มข้นวิกฤตของการเกิดไมเซลล์ด้วยวิธีนี้อาจไม่เหมาะสมเนื่องจากค่าการนำไฟฟ้า (Conductance) ของสารละลายมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมากเมื่อเติมสารลดแรงตึงผิวลงไป

ค่าสภาพนำไฟฟ้าและค่าการนำไฟฟ้ามีความสัมพันธ์ดังแสดงในสมการที่ 2.31 ซึ่งค่าสภาพนำไฟฟ้ามีหน่วยเป็นซีเมนส์ต่อเมตร ( $S m^{-1}$ ) หรือซีเมนส์ต่อเซนติเมตร ( $S cm^{-1}$ ) ซึ่งค่านี้จะแปรผันโดยตรงกับปริมาณอิออนอิสระในสารละลาย

$$G = \frac{K \cdot A}{\lambda} \quad (2.31)$$

โดยที่

$G$  = ค่าการนำไฟฟ้า (Conductance)

$K$  = ค่าสภาพการนำไฟฟ้า (Conductivity)

$A$  = พื้นที่หน้าตัดของขั้วไฟฟ้า

$\lambda$  = ระยะห่างของขั้วไฟฟ้า

ในการวัดค่าสภาพนำไฟฟ้าโดยทั่วไปด้วยเครื่องมือ Conductometer ปกติจะต้องต่อเครื่องมือเข้ากับขั้วไฟฟ้า (Electrode) สำเร็จรูป ซึ่งขั้วไฟฟ้าประเภทนี้มักจะมีระยะห่างของขั้วไฟฟ้าต่อพื้นที่หน้าตัดของขั้วไฟฟ้า (NA) คงที่ และจะถูกระบุเป็นค่าคงที่ของขั้วไฟฟ้า (Cell constant)

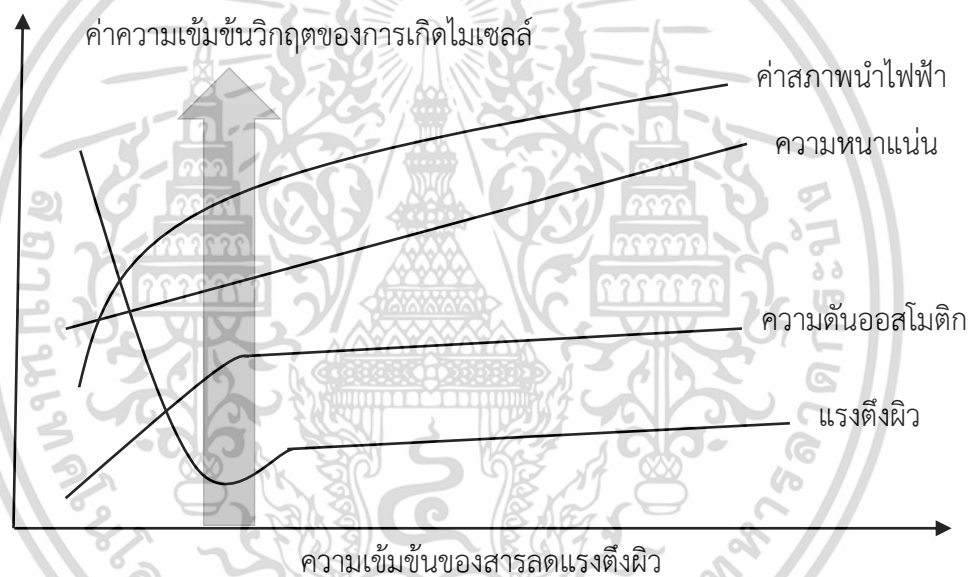
อยู่ที่ด้านข้างของขั้วไฟฟ้าสำเร็จรูปเสมอ ดังนั้นค่าสภาพนำไฟฟ้าจึงสามารถหาได้อีกทางหนึ่งจากสมการที่ 2.32

$$K = G \cdot \text{Cell constant} \quad (2.32)$$

ถ้าค่าคงที่ของขั้วไฟฟ้ามีค่าเท่ากับ  $1 cm^{-1}$  ตัวเลขหรือขนาดที่ได้จากการวัดค่าสภาพนำไฟฟ้าและค่าการนำไฟฟ้าจะมีค่าเท่ากัน แต่อย่างไรก็ตามค่าสภาพนำไฟฟ้าที่ได้จะมีหน่วยเป็น  $S cm^{-1}$  ในขณะที่ค่าการนำไฟฟ้าจะมีหน่วยเป็น S เสมอ นอกจากนี้บางแหล่งอ้างอิงยังนิยามให้ค่าการนำไฟฟ้า (Conductance) เป็นค่าสภาพนำไฟฟ้า (Conductivity) และนิยามให้ค่าสภาพนำไฟฟ้าเป็นค่าสภาพนำไฟฟ้าจำเพาะ (Specific conductivity) ซึ่งอาจทำให้เกิดความสับสนได้ อย่างไรก็ตาม หน่วยของค่าเหล่านี้ถือเป็นเรื่องที่บ่งบอกได้อย่างชัดเจนว่าค่านั้นคือค่าอะไร และอยู่ตำแหน่งใดทั้งในสมการ

ที่ 2.31 และ 2.32 เมื่อสารลดแรงตึงผิวที่มีประจุถูกเติมลงในน้ำกลั่น ค่าสภาพนำไฟฟ้าจะเริ่มเพิ่มขึ้นไม่ช้าก็เร็ว ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากจำนวนไอออนในสารละลายเพิ่มมากขึ้น เมื่อความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวมีค่ากับความเข้มข้นวิกฤตของการเกิดไมเซลล์ สารลดแรงตึงผิวจะเริ่มรวมตัวกันเองเกิดเป็นไมเซลล์อยู่ในสารละลาย และเมื่อเติมสารลดแรงตึงผิวลงไปเพิ่มมากขึ้นจนความเข้มข้นมีค่ามากกว่าค่าความเข้มข้นวิกฤตของการเกิดไมเซลล์ จะทำให้เกิดไมเซลล์ในสารละลายเพิ่มมากขึ้นด้วยในขณะที่ความเข้มข้นของโมเลกุลสารลดแรงตึงผิวเดี่ยวๆ (Monomer) มีค่าเกือบคงที่ ไมเซลล์ที่เกิดขึ้นจากกระบวนการรวมตัวกันเองนั้นมีขนาดใหญ่มากเมื่อเทียบกับโมเลกุลของสารลดแรงตึงผิว ไมเซลล์จึงแพร่ในสารละลายได้ช้ากว่า และมีประสิทธิภาพในการนำมีความเป็นไปได้ว่า ไฟฟ้าที่แยกกว่า ด้วยเหตุนี้เมื่อนำค่าสภาพนำไฟฟ้ามาวาดกราฟที่ความเข้มข้นต่างๆของสารลดแรงตึงผิว จะเกิดการเปลี่ยนแปลงความชันของกราฟ ณ ค่าความเข้มข้นวิกฤตของการเกิดไมเซลล์ ซึ่งถือเป็นจุดเริ่มแรกที่มีไมเซลล์เกิดขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ดังแสดงในรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.18 การเปลี่ยนแปลงสมบัติของสารละลายเมื่อเติมสารลดแรงตึงผิว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.5 การดูดซับ (Adsorption) [26]

การศึกษาการดูดซับโมเลกุลบนพื้นผิวเป็นสิ่งสำคัญที่ทำให้เกิดความเข้าใจกระบวนการทางการเคมีพื้นผิว เช่น ปฏิกิริยาอะตอมเลซิสที่พื้นผิวมีกระบวนการต่างๆ ที่เป็นวัฏจักร คือการแพร่ของสารตั้งต้นไปยังตำแหน่งที่ว่องไวบนพื้นผิว (Active surface) การดูดซับของสารตั้งต้นบนพื้นผิว ปฏิกิริยาที่พื้นผิวที่เกิดการดูดซับ (Surface reaction) การคายของผลิตภัณฑ์ต่างๆ จากพื้นผิว และการแพร่ของ ผลิตภัณฑ์ออกจากพื้นผิว นอกจากกระบวนการดูดซับต้องคำนึงถึงกระบวนการคายโมเลกุลที่ถูกดูดซับ ด้วยเพื่อศึกษาผลการดูดซับของโมเลกุลนั้นๆ บนพื้นผิว คำนียามที่สำคัญในการศึกษาการดูดซับ โมเลกุลบนพื้นผิวมีดังนี้

- 1) ซับสเตรต (Substrate) บางครั้งเรียกว่าตัวดูดซับ (Adsorbent) หมายถึง พื้นผิวของแข็งหรือของเหลวที่เกิดการดูดซับอะตอมหรือโมเลกุลของสารต่างๆ
- 2) ตัวถูกดูดซับ (Adsorbate) หมายถึง อะตอมหรือโมเลกุลของสารต่างๆ ที่ถูกดูดซับบนพื้นผิวซับสเตรต
- 3) การดูดซับ (Adsorption) หมายถึง กระบวนการที่อะตอมหรือโมเลกุลของสารต่างๆ ถูกดูดซับบนพื้นผิวของซับสเตรต
- 4) การปกคลุม (Coverage) หมายถึง การตรวจวัดการดำเนินไปของการดูดซับของอะตอมหรือโมเลกุลต่างๆ บนพื้นผิวของซับสเตรต
- 5) การสัมผัส (Exposure) หมายถึง การตรวจวัดปริมาณแก๊สบนพื้นผิวที่สังเกตได้ ซึ่งเป็นผลคูณของความดันและเวลาในการสัมผัส หน่วยปกติจะเรียกว่า แลงเมียร์ (Langmuir, L) ซึ่ง 1 L มีค่าเท่ากับ  $10^{-6}$  Torr

การดูดซับ (Adsorption) หมายถึง การที่โมเลกุลของสารถูกดึงเข้ามาติดผิวของสารดูดซับหรือการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารที่พื้นผิวของสารถูกดูดซับ (Adsorbate) ที่สัมผัสโดยตรงกับสารดูดซับ (Adsorbent) โดยสารที่มีพลังงานอิสระที่ผิวต่ำจะถูกดูดซับได้แต่สารที่มีพลังงานอิสระที่ผิวสูงจะไม่ถูกดูดซับ พลังงานอิสระที่ผิวของสารถูกดูดซับจะมีความสัมพันธ์กับแรงตึงผิวและพื้นที่ผิวดังสมการที่ 2.33 เมื่อความตึงผิว (Surface tension) หรือพื้นที่ผิว (Surface area) เปลี่ยนไปซึ่งเป็นผลทำให้เกิดการเพิ่มขึ้นหรือลดลงของพลังงานอิสระที่ผิว ( $\Delta G_{\text{surface}}$ )

$$\Delta G_{\text{surface}} = \gamma A \quad (2.33)$$

เมื่อ	$\Delta G_{\text{surface}}$	คือ พลังงานอิสระที่ผิว
	$\gamma$	คือ ความตึงผิว
	A	คือ พื้นที่ผิว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริมาณสารดูดซับขึ้นอยู่กับอุณหภูมิสัมบูรณ์ ความดัน และพลังงานศักย์ของอันตรกิริยา (Interaction potential energy) ระหว่างสารดูดซับซึ่งอาจเป็นของแข็ง ของเหลวหรือแก๊สกับ สารดูดซับซึ่งอาจเป็นของเหลวหรือของแข็ง ดังนั้นเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความดันหรือความเข้มข้น และการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจะทำให้ปริมาณการดูดซับเปลี่ยนแปลง

การดูดซับบนพื้นผิวของแข็งแบ่งออกได้ตามแรงที่ดูดซับระหว่างพื้นผิวโมเลกุลเป็น 2 ชนิด คือ การดูดซับทางกายภาพ (Physical adsorption หรือ physisorption) แรงที่ใช้ดูดซับเป็นแรง แวนเดอร์วาลส์ (Van der Waals) เนื่องจากแรงดึงดูดระหว่างสารที่อยู่ในของเหลวกับสารดูดซับมี มากกว่าแรงดึงดูดระหว่างสารในของเหลวกับของเหลวทำให้สารที่อยู่ในของเหลวเขาติดอยู่ที่สารดูดซับแทน เช่น การดูดซับของถ่านกัมมันต์ภายในโครงสร้างของพื้นที่ผิวมีรูพรุนมากทำให้มีการดูดซับ บนพื้นที่ผิวของสารดูดซับสูงขึ้นดังนั้นรูพรุนของสารดูดซับจึงมีความสำคัญ ส่วนการดูดซับทางเคมี (Chemical adsorption หรือ chemisorption) แรงที่ใช้ดูดซับเป็นพันธะโควาเลนต์มักเกิดขึ้นเมื่อ อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิวิกฤตของสารที่ถูกดูดซับโดยมีค่าพลังงานสูงมากในการเกิดพันธะและการดูด ททางเคมีเป็นการดูดซับอย่างแท้จริง สมบัติการดูดซับทางเคมีและทางกายภาพ ดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 สมบัติของการดูดซับทางเคมีและทางกายภาพ [26]

การดูดซับทางเคมี	การดูดซับทางกายภาพ
ค่าความร้อนของการดูดซับ 100-500 KJ/mol	ค่าความร้อนของการดูดซับประมาณ 20 kJ/mol หรือน้อยกว่า
เกิดได้ที่อุณหภูมิสูง	เกิดได้ที่อุณหภูมิต่ำ
ไม่เกิดการผันกลับ	เกิดการผันกลับได้เป็นส่วนใหญ่
เกิดการดูดซับเพียงชั้นเดียว	เกิดการดูดซับหลายชั้น
มีพลังงานก่อกัมมันต์เกี่ยวข้อง	ไม่มีพลังงานก่อกัมมันต์ในกระบวนการ
แรงดึงดูดของสารดูดซับกับสารถูกดูดซับเป็นแรงดึงดูดอย่างแข็งแรง	แรงดึงดูดของสารดูดซับกับสารถูกดูดซับเป็นแรงดึงดูดอย่างอ่อนๆ

ไอโซเทอมของการดูดซับ (adsorption isotherm) เป็นความสัมพันธ์ของปริมาณสารที่ถูกดูดซับที่พื้นผิวกับความดันของแก๊สหรือความเข้มข้นของสารละลายที่อุณหภูมิคงที่ สำหรับการดูดซับตัวถูกละลายบนผิวแข็งจะเป็นความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการดูดซับกับความเข้มข้นของสารละลาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าที่ภาวะสมดุลที่อุณหภูมิใดๆ ไอโซเทอมการดูดซับแบ่งออกได้เป็นดังนี้

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**2.5.1 ไอโซเทอมแบบแลงเมียร์ (Langmuir isotherm)** ในปี ค.ศ. 1916 เออร์วิง แลงเมียร์ (Irving Langmuir) ได้เสนอไอโซเทอมแบบง่ายที่สุดโดยมีสมมติฐานคือ

- 1) ใช้สำหรับการดูดซับแบบชั้นเดียว (Monolayer adsorption)
- 2) โมเลกุลที่ถูกดูดซับมีจำนวนที่แน่นอนและมีตำแหน่งของการดูดซับที่แน่นอน
- 3) ในแต่ละโมเลกุลของสารดูดซับจะดูดซับโมเลกุลของสารถูกดูดซับได้เพียงหนึ่งโมเลกุลเท่านั้น ในแต่ละตำแหน่งค่าความร้อนของการดูดซับเท่ากันและคงที่ ไม่มีแรงกระทำระหว่างโมเลกุลที่อยู่ในตำแหน่งใกล้เคียงกัน

จากการศึกษาไอโซเทอมของแลงเมียร์ที่สภาวะสมดุลสามารถแสดงความสัมพันธ์ ของการดูดซับสารละลายได้ดังสมการที่ 2.34

$$q_e = Q^{\circ} b C_e / (1 + b C_e) \quad (2.34)$$

เมื่อ  $q_e$  คือ ปริมาณของสารถูกดูดซับบนสารดูดซับหนักหนึ่งกรัม

$C_e$  คือ ความเข้มข้นของสารละลายที่สภาวะสมดุล

$Q^{\circ}$  คือ ปริมาณของสารถูกดูดซับอิ่มตัวแบบชั้นเดียว

$b$  คือ ค่าคงที่แลงเมียร์ที่อุณหภูมิหนึ่งๆ

หรือ 
$$C_e / q_e = 1 / b Q^{\circ} + C_e / Q^{\circ} \quad (2.35)$$

เมื่อพลอตกราฟระหว่าง  $C_e / q_e$  กับ  $C_e$  จะได้กราฟเส้นตรงมีจุดตัดแกน  $C_e / q_e$  เป็น  $1 / b Q^{\circ}$  และมีความชันเท่ากับ  $1 / Q^{\circ}$

**2.5.2 ไอโซเทอมแบบฟรอนด์ลิช (Freundlich isotherm)** ในปี ค.ศ. 1880-1941 นักฟิสิกส์เคมีชาวเยอรมัน Herbert Max Finlay Freundlich ได้เสนอสมการแสดงความสัมพันธ์ปริมาณของสารถูกดูดซับกับความเข้มข้นของสารละลายดังสมการที่ 2.36

$$q_e = X/m = k_f C_e^{1/n} \quad (2.36)$$

เมื่อ  $C_e$  คือ ความเข้มข้นของสารละลายที่เหลือหลังการดูดซับที่สมดุล

$X/m$  คือ ปริมาณของตัวถูกละลายที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักของสารดูดซับ

$K_f$  และ  $n$  คือ ค่าคงที่ที่อุณหภูมิหนึ่งๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการพรอยด์ลิซ เมื่อใส่ลอการิทึม (Logarithm) จะได้สมการ

$$\log q_e = \log X/m = \log k_f + (1/n) \log C_e \quad (2.37)$$

เมื่อพลอตกราฟระหว่าง  $\log X/m$  กับ  $\log C$  ที่อุณหภูมิคงที่จะได้กราฟเส้นตรงจุด ตัดแกน สามารถนำมาหาค่า  $k_f$  ได้และความชันของกราฟเป็น  $1/n$  บางกรณีที่พลอตกราฟระหว่าง  $\log X/m$  กับ  $\log C_e$  แล้วไม่ได้เส้นตรงแสดงว่าเกิดการเบี่ยงเบนไปจากสมการของพรอยด์ลิซ เช่น การดูดซับ สารละลายที่ไม่ได้วัดจากน้ำหนักจริงของสารดูดซับ แต่ค่าจากสารถูกดูดซับในตัวทำละลายปริมาณ มากทำให้สารถูกดูดซับที่เหลือที่ความเข้มข้นสูงจึงมีปริมาณลดลง

**2.5.3 ไอโซเทอมแบบบรูเนาเออร์-เอมเมทท์-เทลเลอร์ (Brunauer-Emmett-Teller isotherm)** ในปี ค.ศ. 1903-1986 นักวิทยาศาสตร์ชาวอเมริกัน Stephen Brunauer และในปี ค.ศ. 1900-1985 Paul Emmett และ Edward Teller ได้ศึกษาการดูดซับหลายชั้นและเสนอสมการที่ 2.38

$$P \cdot P_0 / (P_0 - P) = 1/V_0 k + P/P_0 \quad (2.38)$$

เมื่อ

- P คือ ความดันสมดุลของสารถูกดูดซับ
- V คือ ปริมาตรที่ถูกดูดซับที่ความดัน
- $V_0$  คือ ปริมาตรที่ถูกดูดซับที่เพื่อให้เกิดเป็นชั้นเดียว
- $P_0$  คือ ความดันไออิ่มตัวของโมเลกุลที่ถูกดูดซับ
- k คือ ค่าคงที่

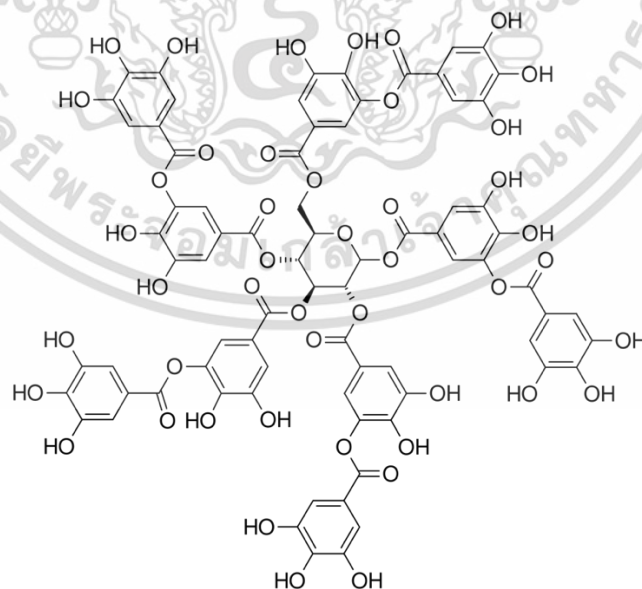
## 2.6 กรดแทนนิก (Tannic acid) [27-29]

กรดแทนนิก (Tannic acid) หรือแทนนิน (Tannin) เป็นสารที่มีโมเลกุลใหญ่และโครงสร้างที่ ซับซ้อน เกิดจากกลุ่มฟีนอลจำนวนมากในโครงสร้าง สูตรทางเคมีคือ  $C_{76}H_{52}O_{46}$  มีสถานะเป็นกรด อ่อน (pKa ประมาณ 6) มีน้ำหนักโมเลกุลและความหนาแน่นของโมเลกุลเท่ากับ 1701.19 กรัมต่อ โมลและ 2.12 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตรตามลำดับ เป็นสารให้ความฝาดในพืช พบได้ในพืชหลาย ชนิด แทนนินมี 2 ชนิด คือ คอนเดนส์แทนนิน (condensed tannins) หรือเรียกอีกอย่างว่า โปรแอนโทไซยานิน (proanthocyanin) พบได้ในส่วนเปลือกต้น และแก่นไม้เป็นส่วนใหญ่ และสาร ไฮโดรไลซ์แทนนิน (hydrolysable tannins) คือแบบที่สามารถถูกแยกออกเป็นโมเลกุลเล็กๆได้ พบ มากในส่วนใบ ฝัก และส่วนที่ปูดออกมาจากปกติเมื่อต้นไม้ได้รับอันตราย (gall) แทนนินมีคุณสมบัติ

ตกตะกอนโปรตีน ทำให้หนังสือตัวไม่เนาเปื่อย จึงนิยมใช้ในอุตสาหกรรมฟอกหนัง มีฤทธิ์ฝาดสมานใช้เป็นยารักษาโรคท้องเสียได้ อีกทั้งแทนนินยังมีฤทธิ์ยับยั้งการเจริญของแบคทีเรียได้อีกด้วย ตัวอย่างแทนนินได้แก่ theogallin, gallic acid, ellagic acid

การกระจายตัวในธรรมชาติของแทนนินนั้น พบว่ามีการกระจายตัวอยู่ในพืชเกือบทุกชนิด และเกิดเป็นองค์ประกอบสำคัญที่เด่นมากในพืชใบเลี้ยงคู่จำนวนมาก แต่สำหรับในพืชชั้นต่ำ เช่น เชื้อรา สาหร่าย มอสส์ ลิฟเวอร์เวิร์ท ตลอดจนพวกหญ้าทั้งหลายจะพบว่ามีแทนนินเป็นองค์ประกอบอยู่น้อยมาก บทบาททางนิเวศวิทยาของแทนนินที่พบอยู่ในพืช ยังไม่เป็นที่ทราบกันอย่างชัดเจนนัก และโดยทั่วไปแล้ว พืชทั้งหลายก็มักจะมีแทนนินเป็นองค์ประกอบเสมอ มักจะพบแทนนินสูงในส่วนของแก่นไม้และเปลือกไม้ ในส่วนของใบพืชที่มีอายุมากกว่า 1 ปี จะมีแทนนินสูงกว่าใบที่อายุเพียงปีเดียว และพืชที่มีใบสีเขียวตลอดปี ก็มีแทนนินมากกว่าพืชประเภทผลัดใบ

สมบัติของแทนนินที่สำคัญคือ "ความฝาด" ซึ่งเกิดจากส่วนโพลิเมอร์ (Polymeric) ของสารประกอบที่มีกลุ่มฟีนอลและแคเทคอลหรือฟลาโวนอลซึ่งมีมวลโมเลกุลสูง ๆ เนื่องจากสามารถเกิด cross linking ระหว่างไกลโคโปรตีนกับแทนนินทำให้เกิดการหล่อลื่น (lubricating action) ในปากลดลง การเกิดรสฝาดจะพบอยู่ในแทนนินที่มีลักษณะโอลิโกเมอร์ (oligomeric) จะไม่พบในแทนนินแบบโมโนเมอร์ (monomeric) และโพลิเมอร์ริค (polymeric) ดังนั้นในผลไม้ดิบจะมีคอนเดนซ์แทนนินชนิดลิวโคแอนโธไซยานินที่มีขนาดโมเลกุลพอเหมาะ (โอลิโกเมอร์) ที่มีรสฝาดและจะค่อย ๆ ลดลง จนกระทั่งผลไม้สุกเพราะการเกิดโพลิเมอร์ไรเซชันเป็นโพลิเมอร์ของลิวโคแอนโธไซยานินเปลี่ยนเป็นตะกอนแข็งไม่สามารถรวมตัวกับแทนนินหรือเกิด cross linking ได้

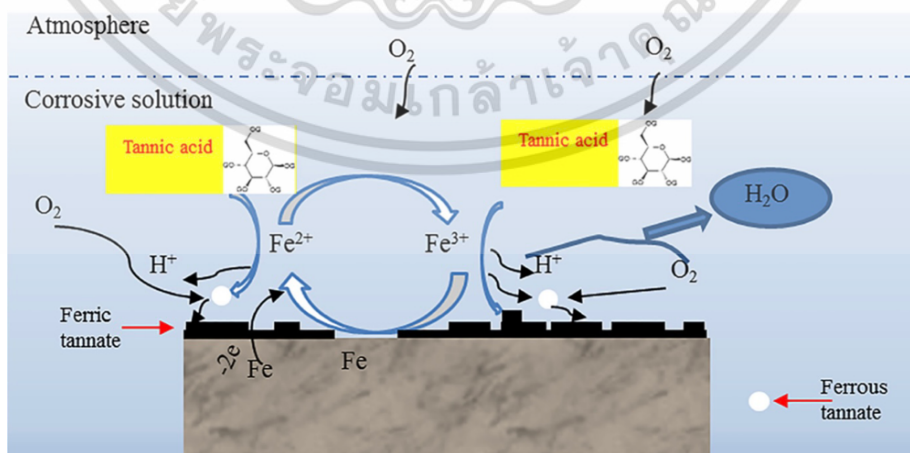
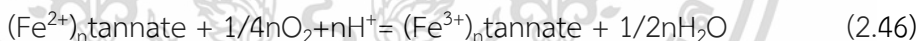
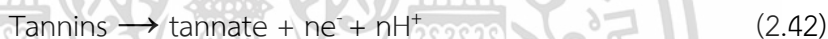
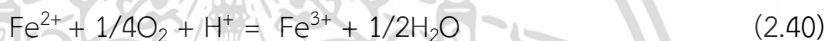


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานี้เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
**รูปที่ 2.19** ลักษณะโครงสร้างของกรดแทนนิก (Tannic acid)  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.6.1 กลไกการกัดกร่อนของกรดแทนนิก (Corrosion mechanism of tannic acid)

[37]

ปฏิกิริยาออกซิเดชันของ  $Fe^{2+}$  แปลงเป็น  $Fe^{3+}$  ด้วยออกซิเจน ตามกลไกวงจร  $Fe^{3+}$  จะถูกรีดิวซ์เป็น  $Fe^{2+}$  เมื่อมีการสัมผัสกับโลหะเหล็กในรูปของชั้นผลิตภัณฑ์กัดกร่อน และสารประกอบ  $Fe^{2+}$  เหล่านี้สามารถถูกออกซิไดซ์ใหม่เป็นออกไซด์ของเหล็ก (III) ได้ง่าย กรดแทนนิกทำหน้าที่กับไอออนของเหล็กในสามวิธี อย่างแรกคือ แทนนินสามารถเกิดปฏิกิริยาเชิงซ้อนกับ  $Fe^{2+}$  เพื่อสร้างเฟอร์รัสแทนเนต ซึ่งจะถูกรีดิวซ์เป็นเฟอร์ริกแทนเนตได้ง่ายเมื่อมีออกซิเจน ต่อมาวิธีที่สอง แทนนินสามารถทำปฏิกิริยาโดยตรงกับ  $Fe^{3+}$  เพื่อสร้างเฟอร์ริกแทนเนต และวิธีที่สาม เนื่องจากความสามารถในตัวรีดิวซ์ของแทนนิน  $Fe^{3+}$  สามารถถูกรีดิวซ์เป็น  $Fe^{2+}$  ซึ่งสามารถทำให้เกิดสารประกอบแทนนินเพื่อสร้างเฟอร์รัสแทนเนตได้ และเฟอร์รัสแทนเนตจะถูกเปลี่ยนเป็นเฟอร์ริกแทนเนตเมื่อสัมผัสกับ  $O_2$  ในขณะเดียวกันในปฏิกิริยาคาโทดิกบางส่วนจะเกิดปฏิกิริยารีดักชัน ดังนั้นปฏิกิริยาการตกตะกอนของเฟอร์ริกแทนเนตจึงอธิบายได้ด้วยกลไกสุดท้ายนี้:



เอกสารนี้ **รูปที่ 2.20** แผนผังแสดงกระบวนการกัดกร่อนของเหล็กกล้าคาร์บอนในสารละลายที่มีฤทธิ์กัดกร่อน คำ  
ไม่ว่าการด้วยกรดแทนนิก ทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในทางกลับกัน กรดแทนนิกจะยับยั้งการเปลี่ยนแปลงของสื่อที่มีฤทธิ์กัดกร่อนโดยการดูดซึมโมเลกุลของแทนนิน ทฤษฎีฟรอนเทียร์ออร์บิทัลแสดงให้เห็นว่าการดูดซับสามารถดำเนินการผ่านการแบ่งกลุ่มผู้donor (-OH) อิเล็กตรอนหรืออะโรมาติก  $\pi$ -อิเล็กตรอน ระหว่างโมเลกุลฟลาโวนอยด์กับเหล็ก d-orbitals ที่เต็มบางส่วน ในกระบวนการดูดซับ แทนนินหนึ่งโมเลกุลสามารถแทนที่โมเลกุลของน้ำสี่โมเลกุลได้โดยใช้แรงไฟฟ้าสถิตที่กระทำระหว่างไดโพลโมเลกุลกับพื้นผิวเหล็กที่มีประจุ นอกจากนี้ ปฏิสัมพันธ์ของปลายข้าวบวกของไดโพลโมเลกุลกับพื้นผิวโลหะซึ่งมีประจุลบเนื่องจากการสัมผัสการดูดซับของคลอไรด์ไอออน อาจนำไปสู่ลักษณะไฟฟ้าสถิตที่เด่นของพันธะการดูดซับโลหะแบบยับยั้งและทำให้เกิดผลเสีย การวางแผนของโมเลกุลด้วยยับยั้งในระยะเริ่มต้น กรดแทนนิกช่วยให้กระบวนการสึกกร่อนง่ายขึ้น และอัตราการกัดกร่อนจะลดลงตามความเข้มข้นของกรดแทนนิกสำหรับกรดแทนนิก 1% แม้ว่ากรดแทนนิกจะยับยั้งการสึกกร่อนได้ส่วนหนึ่งโดยการดูดซึม แต่ก็มีผลในการกัดกร่อนที่น้อยกว่าของกรดแทนนิก 3% และ 5% ทั้งทำให้ผลิตภัณฑ์จากการกัดกร่อนจะหลุดออกไป

ในทางตรงกันข้าม โมเลกุลอินทรีย์ที่มากขึ้นจะดูดซับบนพื้นผิวของเหล็กกล้าคาร์บอนสำหรับกรดแทนนิก 3% และ 5% ส่งผลให้อัตราการกัดกร่อนลดลง ในขณะที่ผลการกัดกร่อนของกรดแทนนิกยังคงได้เปรียบในเรื่องนี้ ในระยะการดูดซึมของกรดแทนนิกจะมีการลดลงของ  $C_{dl}$  ในขณะที่ปฏิกิริยาดำเนินไป การสะสมของผลิตภัณฑ์กัดกร่อนบนพื้นผิวจะลดพื้นที่ทำงานบนพื้นผิว และยับยั้งการซึมผ่านของตัวกลางที่มีฤทธิ์กัดกร่อนได้ส่วนหนึ่ง ดังนั้น ฤทธิ์การกัดกร่อนของกรดแทนนิกจึงถูกยับยั้งได้ในระดับหนึ่ง ในช่วงกลางและช่วงหลังของการแช่ กรดแทนนิก 1% ยังคงเร่งการกัดกร่อนของเหล็กกล้าคาร์บอน ในขณะที่กรดแทนนิก 3% และ 5% มีผลในการยับยั้ง สำหรับกรดแทนนิก 1% การกัดกร่อนของกรดแทนนิกจะเหนือกว่าการดูดซึม เนื่องจากโมเลกุลของกรดแทนนิกมีความเข้มข้นต่ำ ในทางตรงกันข้ามกรดแทนนิก 3% และ 5% มีโมเลกุลอินทรีย์มากกว่า และการดูดซึมกรดแทนนิกจะควบคุมปฏิกิริยาอย่างค่อยเป็นค่อยไป และยับยั้งกระบวนการกัดกร่อนของเหล็กกล้าคาร์บอนในที่สุด สิ่งนี้อธิบายพฤติกรรมของโพลาริเซชันได้ดีและการวัด EIS

## 2.6.2 ประโยชน์ของแทนนินในอุตสาหกรรม [28]

แทนนินในการฟอกหนังได้แก่ แทนนินที่ได้จากเปลือกไม้ป่าชายเลน เช่น *Rhizophora* spp. ไม้มีโมซา เช่น *Acacia* spp. ไม้แคบวาซอ เช่น *Schinopsis* spp. และเปลือกไม้โอ๊ค เป็นต้นใช้ในการผลิตกาวไม้อัด และผลิตพลาสติกโดยผสมแทนนินเปลือกแคบวาซอกับพอร์มัลดีไฮด์ หรือเปลือกไม้มีโมซาหรือเปลือกไม้โกกังกกับพอร์มัลดีไฮด์ ซึ่งใช้แทนกาวในอุตสาหกรรมไม้อัด และอุตสาหกรรมแผ่นขึ้นไม้อัด อีกทั้งยังใช้งานเคลือบผิวไม้ เช่น พื้นบ้านที่เป็นไม้ โดยให้แทนนินทำปฏิกิริยากับเบนโซอิลเลต (benzoylated) จะได้สารประกอบ benzoylated wattle tannins ที่สามารถละลายในโทลูอีน (toluene) เมื่อทำปฏิกิริยาอีกครั้งกับไดไอโซไซยาเนต (diisocyanates)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของกรมส่งเสริมการค้าระหว่างประเทศ กระทรวงพาณิชย์  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะได้โพลียูรีเทน (polyurethane) สามารถใช้ในการบำบัดเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติความคงทนต่อโพลีเอไมด์ที่ย้อมด้วยกรด และเป็นทางเลือกสำหรับการบำบัดฟลูออโรคาร์บอนเพื่อให้เกิดคุณสมบัติการป้องกันการเกิดคราบบนเส้นด้ายโพลีเอไมด์หรือพรมได้อีกด้วย อย่างไรก็ตามในปัจจุบันมักใช้กันอย่างแพร่หลายในฐานะสารช่วยสิ่งทอคือการใช้เป็นสารปรับปรุงความคงทนต่อคลอรีน เช่น การต้านทานต่อการฟอกสีย้อมเนื่องจากการทำความสะอาดด้วยสารละลายไฮโปคลอไรต์ในพรมและชุดว่ายน้ำที่มีส่วนประกอบของโพลีเอไมด์ 6,6 ระดับไฮเอนด์ และมักถูกใช้ในปริมาณที่ค่อนข้างน้อยสำหรับการใช้งานสำหรับเบาะ

นอกจากนี้ยังสามารถใช้ในการอนุรักษ์วัตถุโลหะที่เป็นเหล็ก (มีธาตุเหล็กเป็นส่วนประกอบ) เพื่อทำให้เป็นเนื้อเดียวกันและยับยั้งการกัดกร่อน โดยจะทำปฏิกิริยากับผลิตภัณฑ์กัดกร่อนเพื่อสร้างสารประกอบที่เสถียรมากขึ้น จึงสามารถป้องกันไม่ให้เกิดการกัดกร่อนขึ้นอีกได้ หลังจากผ่านการบำบัด โดยทั่วไปแล้วกรดแทนนิกจะตกค้างอยู่บนวัตถุ ดังนั้นหากความชื้นมาถึงยังบริเวณพื้นผิว กรดแทนนิกจะสามารถคืนน้ำและช่วยป้องกันหรือชะลอการกัดกร่อน การบำบัดด้วยกรดแทนนิกเพื่อการอนุรักษ์นั้นมีประสิทธิภาพอย่างมากและใช้กันอย่างแพร่หลาย แต่มีผลต่อการมองเห็นที่สำคัญต่อวัตถุ ทำให้ผลิตภัณฑ์ที่สีกร่อนเปลี่ยนเป็นสีดำและโลหะที่สัมผัสเป็นสีน้ำเงินเข้ม จึงควรใช้ด้วยความระมัดระวังกับวัตถุที่มีส่วนประกอบของโลหะผสมทองแดง เนื่องจากกรดแทนนิกสามารถทำให้เกิดรอยกัดบนโลหะเหล่านี้ได้เล็กน้อย ทั้งนี้กรดแทนนิกยังพบในการบำบัดการกัดกร่อน ของเหล็กหรือเหล็กกล้า เช่น Hammerite Kurust อีกด้วย

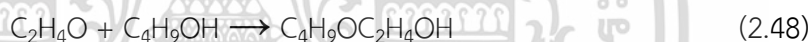
การใช้กรดแทนนิกควรใช้อย่างระมัดระวังและใช้ในปริมาณที่เหมาะสม เนื่องจากอาจทำให้เกิดอันตรายต่อสุขภาพ เช่น การทำลายดวงตา ผิวหนัง ระบบทางเดินหายใจ และระบบทางเดินอาหาร ซึ่งก่อให้เกิดการระคายเคือง ตาแดง เจ็บปวด ตาพร่ามัว และอาจทำลายเนื้อเยื่อดวงตาได้ เมื่อกรดแทนนิกถูกดูดซึมผ่านผิวหนังในปริมาณที่เป็นอันตราย อาจทำให้เกิดการระคายเคือง มีอาการปวด เกิดรอยแดงบริเวณผิวหนัง หากได้รับเข้าไปทางบริเวณปากในปริมาณมาก อาจเกิดอาการคลื่นไส้ อาเจียน และท้องร่วงตามมา ทั้งนี้การได้รับสารเคมีชนิดนี้เป็นเวลานานอาจทำให้ตับถูกทำลาย เมื่อสูดดมหรือหายใจเข้าไป อาจทำให้เกิดการระคายเคืองต่อระบบทางเดินหายใจ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.7 2-บิวทอกซีเอทานอล ( 2-Butoxyethanol ) [30-31]

เป็นสารประกอบอินทรีย์ที่มีสูตรทางเคมี  $\text{BuOC}_2\text{H}_4\text{OH}$  ( $\text{Bu} = \text{CH}_3\text{CH}_2\text{CH}_2\text{CH}_2$ ) ความหนาแน่นเท่ากับ 0.90 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร เป็นของเหลวใส ไม่มีสี มีกลิ่นอ่อน ๆ มีสภาพเป็นกลาง ( $\text{pH}=7$ ) สามารถละลายในน้ำและละลายในตัวทำละลายอินทรีย์ได้ มีจุดเดือดอยู่ที่ 171 องศาเซลเซียส จุดเยือกแข็งอยู่ที่  $-70$  องศาเซลเซียส มีความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 0.9 จุดวาบไฟเท่ากับ 62 องศาเซลเซียส และจุดติดไฟเท่ากับ 238 องศาเซลเซียส มีรสหวานคล้ายอีเทอร์เนื่องมาจากกลุ่มของอีเทอร์ไกลคอลและเป็นบิวทิลอีเทอร์ของเอทิลีนไกลคอล ในฐานะที่เป็นตัวทำละลายที่ค่อนข้างไม่ระเหย ราคาไม่แพง จึงถูกนำมาใช้ในผลิตภัณฑ์อุปโภคบริโภคและอุตสาหกรรมจำนวนมาก เนื่องจากมีคุณสมบัติเป็นสารลดแรงตึงผิว และเป็นที่ยอมรับกันว่า สารเคมีชนิดนี้มีการระคายเคืองต่อระบบทางเดินหายใจและอาจเป็นพิษเฉียบพลันรุนแรงได้ แต่การศึกษาในสัตว์ทดลองไม่พบว่าเป็นสารที่ก่อให้เกิดการกลายพันธุ์ และไม่มีการศึกษาใดบ่งชี้ว่าสารนี้เป็นสารก่อมะเร็งในมนุษย์ จากการศึกษาสารปนเปื้อนในอากาศในห้องเรียน 13 ชั้นในโปรตุเกสรายงานความสัมพันธ์ที่มีนัยสำคัญทางสถิติกับอัตราการดูดตันของจมูกที่เพิ่มขึ้น และความสัมพันธ์เชิงบวกที่ต่ำกว่าระดับนัยสำคัญทางสถิติ โดยมีความเสี่ยงสูงที่จะเป็นโรคหอบหืดจากโรคอ้วนและค่าดัชนีมวลกายของเด็กที่เพิ่มขึ้น

การผลิต 2-บิวทอกซีเอทานอล เกิดผ่านสองกระบวนการปฏิกิริยา ethoxylation ของบิวทานอลและเอทิลีนออกไซด์ต่อหน้าตัวเร่งปฏิกิริยา:



หรือการทำอีเทอร์ริฟิเคชันของบิวทานอลด้วย 2-คลอโรเอทานอล สามารถรับ 2-บิวทอกซีเอทานอล โดยทำการเปิดวงแหวนของ 2-โพรพิล-1,3-ไดออกโซเลนด้วยโบรอนไตรคลอไรด์ มักผลิตในเชิงอุตสาหกรรมโดยการผสมเอทิลีนไกลคอลและบิวทิลรีดิไฮด์ในเครื่องปฏิกรณ์ Parr กับแพลเลเดียมบนคาร์บอน

ในปี 2549 การผลิตบิวทิลไกลคอลอีเทอร์ ในยุโรปมีจำนวน 181 กิโลตัน ประมาณ 50% (90 kt/a) เป็น 2-บิวทอกซีเอทานอล การผลิตทั่วโลกคาดว่าจะอยู่ที่ 200 ถึง 500 kt/a โดยประมาณ 75% เป็นสีและสารเคลือบ และ 18% สำหรับน้ำยาทำความสะอาดโลหะและน้ำยาทำความสะอาดในครัวเรือน ในประเทศสหรัฐอเมริกาถือได้ว่าเป็นสารเคมีที่มีปริมาณการผลิตสูงเนื่องจากการผลิตสารเคมีนี้มากกว่า 100 ล้านปอนด์ต่อปี

การใช้งานในเชิงพาณิชย์ จะใช้เป็นตัวทำละลายสำหรับสีและสารเคลือบผิว รวมถึงผลิตภัณฑ์ทำความสะอาดและหมึกพิมพ์ ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่มีส่วนประกอบเป็น 2-บิวทอกซีเอทานอล ได้แก่ สสูตรเรซินอะคริลิก สารช่วยปลดปล่อยอย่างชะลอ โฟมดับเพลิง น้ำยาปกป้องหนัง สารกระจายคราบน้ำมัน น้ำยาขจัดคราบไขมัน น้ำยาถ่ายภาพ ไวท์บอร์ด และน้ำยาเช็ดกระจก สบู่เหลว เครื่องสำอาง การซักแห้ง แลคเกอร์ วาร์นิช สารกำจัดวัชพืช สีลาเท็กซ์ สีเคลือบพื้น เพสต์สำหรับพิมพ์ น้ำยาล้างเคลือบ

เอกสารนี้แจก และซิลิโคนอุดรูรั่ว ผลิตภัณฑ์ที่มีสารเคมีชนิดนี้เป็นส่วนประกอบ สามารถพบได้ทั่วไปในสถานที่ ไม่ว่าจะเป็น ก่อสร้าง ร้านซ่อมรถยนต์ ร้านพิมพ์ และโรงงานที่ผลิตผลิตภัณฑ์ฆ่าเชื้อและทำความสะอาด เป็น

ส่วนผสมหลักของน้ำยาทำความสะอาดสำหรับบ้าน ทั้งเชิงพาณิชย์และอุตสาหกรรม เนื่องจากโมเลกุลมีทั้งปลายที่มีขั้วและไม่มีขั้ว 2-บิวทอกซีเอทานอลจึงมีประโยชน์ในด้านการกำจัดทั้งสารที่มีขั้วและไม่มีขั้ว เช่น จาระบีและน้ำมัน นอกจากนี้ยังได้รับการอนุมัติจาก US FDA ให้ใช้เป็นวัตถุเจือปนทางอาหารทั้งทางตรงและทางอ้อม ซึ่งรวมไปถึงสารต้านจุลชีพ สารลดฟอง สารเพิ่มความคงตัว และกาว

ในอุตสาหกรรมปิโตรเลียม มักถูกผลิตขึ้นสำหรับอุตสาหกรรมน้ำมันเนื่องจากมีคุณสมบัติของสารลดแรงตึงผิว 2-บิวทอกซีเอทานอลเป็นส่วนประกอบของของไหลสำหรับการแตกตัวของหิน สารปรับความคงตัวในการเจาะและสารช่วยกระจายคราบน้ำมันสำหรับการแตกหักแบบไฮดรอลิกทั้งแบบน้ำและน้ำมัน เมื่อของเหลวถูกสูบลบเข้าไปในบ่อของไหลที่แตกตัว จะถูกสูบลบภายใต้แรงดันที่รุนแรง ดังนั้น 2-บิวทอกซีเอทานอลจึงถูกใช้เพื่อทำให้เกิดการเสถียรโดยการลดแรงตึงผิว ในฐานะที่เป็นสารลดแรงตึงผิว จะสามารถดูดซับที่ส่วนต่อประสานกับน้ำและน้ำมันของการแตกหักได้ สารประกอบนี้ยังใช้เพื่ออำนวยความสะดวกในการปลดปล่อยก๊าซโดยช่วยป้องกันการจับตัวเป็นก้อนอีกด้วย นอกจากนี้ยังใช้เป็นตัวทำละลายข้อต่อระหว่างน้ำมันดิบและน้ำสำหรับการเตรียมการในบ่อน้ำมันทั่วไป เนื่องจากคุณสมบัติของสารลดแรงตึงผิว จึงเป็นองค์ประกอบหลัก (30–60%w/w) ในสารช่วยกระจายคราบน้ำมัน Corexit 9527 ซึ่งใช้กันอย่างแพร่หลายหลังจากเหตุการณ์น้ำมันรั่วไหลของ Deepwater Horizon ในปี 2010

อันตรายที่เกิดจากการใช้สารเคมีชนิดนี้ในเด็ก หากกลืนกินขนาดน้อยกว่า 10 ml (น้อยกว่า 10% Ethylene glycol butyl ether; EGBE) ไม่มีรายงานการเกิดพิษ ในผู้ใหญ่มีรายงานว่าเกิดภาวะ Acidosis, CNS depression, Renal injury, Hematuria, oxaluria, ARDS และ Hypotension ภายหลังการรับประทาน 30-60 ml ของ EGBE หากสารเคมีอยู่ในรูปของเหลว การสัมผัสกับผิวหนังจะทำให้เกิดการระคายเคืองผื่นแดง และอาการเจ็บปวด การดูดซึมผ่านผิวหนังจะมีผลต่อระบบต่างๆ ของร่างกาย หากกลืนกินเข้าไปทำให้ระคายเคืองต่อหลอดอาหารและกระเพาะอาหาร มีอาการคลื่นไส้ อาเจียน ท้องร่วง หากกระเด็นเข้าตาจะทำให้เกิดการระคายเคืองและเจ็บปวดทันที ตาบวม แต่ถ้าอยู่ในรูปของแก๊สหรือไอระเหย การสูดดมเข้าไปจะทำให้เกิดการระคายเคืองต่อทางเดินหายใจ ทำให้เกิดอาการลำคออักเสบ ไอ ปวดศีรษะ คลื่นไส้ และหายใจถี่เร็วตามมาได้ ถ้าได้รับสารเคมีที่มีความเข้มข้นสูงๆ มีผลทำให้เกิดอาการมีนเมา หากไอระเหยสัมผัสกับดวงตา จะส่งผลให้เกิดการระคายเคืองต่อดวงตา มีอาการตาแดง น้ำตาไหล และเมื่อสัมผัสสารเคมีชนิดนี้เป็นเวลานาน จะเข้าไปทำลายอวัยวะภายในร่างกาย ได้แก่ ตับ ไต ต่อม้ำเหลือง ระบบเลือดและอวัยวะต่างๆ อาจทำให้มีอาการผิวหนังอักเสบ และปัสสาวะเป็นเลือด เกิดอาการเรื้อรังได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.8 เหล็กกล้า ( Steel ) [7]

เหล็กกล้า เกิดจากการนำเหล็กที่ผ่านการเพิ่มธาตุโลหะอื่นๆเข้าไปเพื่อปรับคุณสมบัติของเหล็กเป็นโลหะผสมมีปริมาณคาร์บอนประมาณ 0.2-2.04% คาร์บอนเป็นวัสดุผสมที่ลดต้นทุน แต่มีการใช้ธาตุอื่นๆผสมด้วย เช่น แมงกานีส โครเมียม วานาเดียม ทังสเทน คาร์บอน และอื่นๆ การเปลี่ยนแปลงปริมาณธาตุโลหะเป็นตัวกำหนดคุณภาพทั้งด้านความแข็ง การขึ้นรูป การรีด ซึ่งส่งผลกับระดับความตึงของเหล็กที่มีโครงสร้างแกรไฟต์แบบกลมจะมีความอ่อนตัวสูง เหล็กกล้าที่มีการเพิ่มคาร์บอนจะแข็งแรงแรง และมีความแข็งมากกว่าเหล็ก แต่จะเปราะ ค่าสูงสุดในการละลายของคาร์บอนในเหล็กเป็น 2.14% เกิดขึ้นที่อุณหภูมิ 1149 องศาเซลเซียส ในการอบใช้อุณหภูมิประมาณ 950 องศาเซลเซียส ความเข้มข้นที่สูงหรืออุณหภูมิต่ำ จะทำให้เหล็กเกิดลักษณะเป็นซีเมนต์ โลหะผสมที่มีคาร์บอนมาก จะเป็นเหล็กที่มีความแข็งมาก เพราะมีจุดหลอมเหลวต่ำ โดยเหล็กกล้าจะแตกต่างจากเหล็กบริสุทธิ์ตรงที่เหล็กกล้าจะมีอะตอมของธาตุน้อยมาก แต่มีกากแร่ 1-3% โดยน้ำหนักอยู่ในรูปของอนุภาคในทิศทางหนึ่ง ซึ่งมีความทนทานกว่าเหล็ก และโค้งงอได้ง่ายกว่า

### 2.8.1 ประเภทของเหล็กกล้า (Type of steel) [7]

1) เหล็กกล้าคาร์บอน (Carbon Steel) หรือ “Mild Steel” มีส่วนผสมของคาร์บอนเป็นหลักที่ไม่เกิน 1.7% และมีธาตุอื่นผสม เช่น ซิลิคอน ฟอสฟอรัส กำมะถัน แมงกานีส ในปริมาณน้อยจะติดมากับเนื้อเหล็กตั้งแต่เป็นสินแร่ เหล็กชนิดนี้เป็นวัสดุช่างชนิดเดียวที่มีคุณสมบัติทางความแข็งแรง (Strength) ความเหนียว (Ductility) ที่สามารถเลือกใช้ได้ตามลักษณะงาน เหล็กกล้าคาร์บอนแบ่งได้เป็น 3 ชนิด คือ

1.1 เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ (Low Carbon Steel) เป็นเหล็กเหนียวแต่ไม่แข็งแรงนัก สามารถนำไปกลึง กัด ไส เจาะได้ง่าย เนื่องจากเป็นเหล็กที่อ่อน สามารถรีดหรือตีเป็นแผ่นได้ง่าย เหมาะกับงานที่ไม่ต้องการความเค้นแรงดึงสูงนัก ไม่สามารถนำมาชุบแข็งได้ แต่ถ้าต้องการชุบแข็งต้องใช้วิธีเติมคาร์บอนที่ผิวก่อน เพราะมีคาร์บอนน้อย (ไม่เกิน 0.2%) ตัวอย่างการใช้งาน เช่น เหล็กแผ่นหม้อน้ำ ท่อน้ำประปา เหล็กเส้นในอุตสาหกรรมก่อสร้าง เหล็กเคลือบตีบุก เช่น กระจ่างบรรจุอาหาร เหล็กอาบสังกะสี เช่น แผ่นสังกะสีมุงหลังคา ตัวถังรถยนต์ ถังน้ำมัน งานย้ำหมุด สกรู ลวด สลักเกลียว ชิ้นส่วนอะไหล่เครื่องจักร โซ่ บานพับประตู

1.2 เหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง (Medium Carbon Steel) เป็นเหล็กที่มีความแข็งแรงและความเค้นแรงดึงมากกว่าเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ แต่มีความเหนียวน้อยกว่า นอกจากนี้ยังให้คุณภาพในการแปรรูปที่ดีกว่าและยังสามารถนำไปชุบผิวแข็งได้ เหมาะกับงานที่ต้องการความเค้นดึงปานกลาง ต้องการป้องกันการสึกหรอที่ผิวหน้า และต้องการความแข็งแรง แต่มีความแข็งบ้างพอสมควร เช่น อะไหล่ชิ้นส่วนเครื่องจักรกล รางรถไฟ เพลารถือรถ เฟือง หัวค้อน ก้านสูบ สปริง ชิ้นส่วนรถไถนา ไชควง ท่อเหล็ก นอต สกรูที่ต้องแข็งแรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3 เหล็กกล้าคาร์บอนสูง (High Carbon Steel) เป็นเหล็กที่มีความแข็งแรง และทนความเค้นแรงดึงสูง มีเปอร์เซ็นต์คาร์บอน 0.5-1.5% สามารถทำการชุบแข็งได้แต่จะเปราะ เหมาะสำหรับงานที่ต้องการความต้านทานต่อการสึกหรอ เช่น ดอกสว่าน สกัด กรรไกร มีดคulling ใบเลื่อยตัดเหล็ก ดอกทำเกลียว (Tap) ใบมีดโกน ตะไบ แผ่นเกจ เหล็กกัด สปริงแหนบ ลูกบอล แบริ่งลูกปืน

2) เหล็กกล้าผสม (Alloy Steel) เป็นเหล็กกล้าผสมคาร์บอนไม่เกิน 1.7% และมีธาตุอื่นๆผสม เช่น แมงกานีส นิกเกิล โครเมียม วาเนเดียม โมลิบดีนัม โคบอลต์ ทังสเตน การผสมธาตุต่างๆ ช่วยปรับคุณสมบัติให้เหมาะสมกับความต้องการ เช่น การทนต่อความร้อนเพื่อใช้ทำ เตากระทะ เตาไฟฟ้า และ เตาอินดักชัน เป็นต้น จุดมุ่งหมายของการผสมธาตุอื่นๆ คือ เพิ่มความแข็งแรง เพิ่มทนทานต่อการสึกหรอ และทนการเสียดสี เพิ่มความเหนียวทนต่อแรงกระแทก เพิ่มคุณสมบัติต้านทานการกัดกร่อน ปรับปรุงคุณสมบัติด้านแม่เหล็ก เหล็กกล้าผสมสามารถแบ่งตามปริมาณของวัสดุที่ผสมได้ 2 ชนิด คือ

2.1 เหล็กกล้าผสมสูง (High Alloy Steel) เป็นเหล็กที่ผสมธาตุอื่นๆกว่า 10% เหล็กกล้าในกลุ่มนี้รวมถึง เหล็กเครื่องมือผสม (Alloy Tool Steel) มีคุณสมบัติในด้าน ทนต่อการกัดกร่อน ทนต่อการสึกหรอได้ดี จึงถูกใช้งานในการทำเหล็กงานเครื่องมือต่างๆ

2.2 เหล็กกล้าผสมต่ำ (Low Alloy Steel) เป็นเหล็กที่ผสมธาตุอื่นๆไม่เกิน 10% มีโครงสร้างคล้ายเหล็กคาร์บอนธรรมดา (Plain Carbon Steel) และมีคุณสมบัติเหมือนเหล็กกล้าผสมสูง

3) เหล็กกล้าผสมพิเศษ (Special Alloy Steel) เหล็กกล้าผสมพิเศษ เป็นเหล็กกล้าผสมที่พัฒนาขึ้นมาเพื่อให้เหมาะกับงานเฉพาะ เช่น

3.1 เหล็กกล้าผสมทนแรงดึงสูง (High Tensile Strength Alloy Steel) เป็นเหล็กกล้าที่มีคุณสมบัติต่างจากเหล็กกล้าผสมทั่วไปมีคุณสมบัติทนแรงดึงได้สูงมาก และมีความเหนียวสูง นอกจากนี้วิธีการชุบแข็งยังแตกต่างไปจากเหล็กกล้าผสมทั่วไป มีคาร์บอนอยู่ประมาณ 0.2% เหมาะกับงาน เพลาส่งกำลัง หรือ เฟือง เป็นต้น

3.2 เหล็กกล้าทนการเสียดสี และรับแรงกระแทก (Wear Resistant Steel) คือ เหล็กกล้าผสมแมงกานีส หรือ “เหล็กกล้าฮาร์ดฟิลด์” มีธาตุผสมเช่น ซิลิคอน 0.4-1% แมงกานีส 11-14% แต่เหล็กที่ผลิตออกมาในตอนแรกยังไม่สามารถนำไปใช้งานได้ เพราะมีความเปราะต้องนำไปชุบที่อุณหภูมิ 1000-1100°C และจุ่มน้ำอย่างรวดเร็ว จะทำให้เหล็กชนิดนี้มีคุณสมบัติเหนียว ทนทานต่อการเสียดสี และรับแรงกระแทกได้ดี จึงไม่เหมาะกับ งานตัดเฉาะ หรือกลึงขึ้นรูป เนื่องจากต้องใช้มีดกลึงที่มีความแข็งแรงสูง และใช้ความเร็วในการตัดต่ำมาก เช่น ตะแรงแเหล็ก อุปกรณ์ชุดแร่ รางรถไฟ เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 เหล็กกล้าความเร็วสูง (High Speed Steel หรือ HSS) เป็นเหล็กที่พัฒนาขึ้นสำหรับงานเครื่องมือตัด กัด เจาะ ไส ซึ่งเดิมใช้เหล็กคาร์บอนสูง เหล็กชนิดนี้มีทั้งสแตนเป็นธาตุหลักประสมก่อนนำไปใช้งานจะต้องชุบแข็งที่อุณหภูมิ ประมาณ 950-1300°C ขึ้นอยู่กับส่วนผสม

คุณสมบัติทั่วไป

- มีความแข็ง (หลังจากชุบแข็งแล้วจะเปราะ)
- รักษาความแข็งแรงที่อุณหภูมิสูง
- ชุบแข็งได้ดีทนต่อการสึกหรอได้ดี
- เปอร์เซ็นต์คาร์บอน 0.6-0.8%
- ธาตุที่ผสมอยู่ ทั้งสแตน 6% ไนลิบดินัม 6% โครเมียม 4% วาเนเดียม 1%
- การใช้งาน ดอกสว่าน ดอกทำเกลียว มีด กัด มีดไส แม่พิมพ์ เครื่องมือวัดต่างๆ

3.4 เหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless Steel) มีธาตุโครเมียมผสมอยู่เพื่อให้มีคุณสมบัติต้านทานสนิม และต้องผสมโครเมียมให้สูงพอสมควร

คุณสมบัติทั่วไป

- ป้องกันการเกิดสนิม การกัดกร่อนจากสารเคมีประเภทกรด
- ทนความร้อน (ขึ้นอยู่กับปริมาณโครเมียมต้องสูง)
- เปอร์เซ็นต์คาร์บอน ไม่เกิน 0.4%
- ธาตุที่ผสม เช่นโครเมียม 15-18% นิกเกิล แมงกานีส อะลูมิเนียม
- การใช้งานที่ยืดส่วนต่างๆ เช่น ที่ยึดเตาท่อ มีด ซ้อนล้อ หรืออุปกรณ์ในงานเคมี หรืออ่างล้างในครัว (Sink)

4) เหล็กกล้าหล่อ (Cast Steel) คือ เหล็กกล้าที่นำมาขึ้นรูปโดยวิธีการหล่อ มีลักษณะรูปร่างซับซ้อนเกินกว่าที่จะทำการตีขึ้นรูป การอัด หรือการรีด ซึ่งการหล่อจะได้ชิ้นงานที่ขนาดใกล้เคียงกับที่ต้องการเหล็กกล้าหล่อนี้ เมื่อเปรียบเทียบกับเหล็กกล้าที่ผ่านการขึ้นรูปด้วยการตี หรือการรีดจะมีส่วนที่แตกต่างกัน คือ ชิ้นส่วนเครื่องจักรกลที่ผ่านการหล่อจะปรากฏมีรูพรุนเล็กๆ เหล็กกล้าหล่อแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่ม คือ

4.1 เหล็กกล้าคาร์บอนหล่อ (Carbon Casting Steel) เป็นเหล็กกล้าที่มีคาร์บอนเป็นหลักเพียงอย่างเดียวโดยมีคาร์บอนผสมไม่เกิน 0.6% ธาตุโลหะอื่นที่ผสมอยู่ เช่น แมงกานีส 0.5-1% ซิลิคอน 0.2-0.75% กำมะถัน < 0.5% ฟอสฟอรัส < 0.5% ซึ่งเป็นสารมลทิน ยกเว้นเฉพาะแมงกานีส ซิลิคอน อะลูมิเนียม เพราะมีหน้าที่เป็นตัวกำจัดแก๊ส (Deoxidizer) ส่วนใหญ่การใช้งานจะใช้ทำ กังหันเทอร์ไบต์ เหล็กกล้าคาร์บอนหล่อแบ่งเป็น 3 ชนิด ดังนี้

4.1.1 เหล็กกล้าหล่อคาร์บอนต่ำ (มีคาร์บอนไม่เกิน 0.2%)

4.1.2 เหล็กกล้าหล่อคาร์บอนปานกลาง (มีคาร์บอน 0.2-0.5%)

4.1.3 เหล็กกล้าหล่อคาร์บอนสูง (มีคาร์บอน 0.5-0.6%)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์หรือการสงวนสิทธิ์ในเนื้อหา และข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น ยกเว้นกรณีเห็นได้ชัดและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 เหล็กกล้าประสมหล่อ (Alloy Casting Steel) เป็นเหล็กกล้าคาร์บอนที่มีเปอร์เซ็นต์คาร์บอนไม่เกิน 1.7% และธาตุอื่นผสม เช่น แมงกานีส ซิลิคอน โครเมียม นิกเกิล วาเนเดียม โมลิบดีนัม โมลิบดีนัม ทั้งสแตน ทองแดง หรือโคบอลต์ การที่มีธาตุต่างๆ ผสมในเหล็กกล้าคาร์บอนเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติ เช่น การชุบแข็ง การต้านทานการกัดกร่อนทั้งที่อุณหภูมิปกติและสูง การนำไฟฟ้า และ คุณสมบัติเกี่ยวกับแม่เหล็ก กรรมวิธีการผลิตจะผลิตใน เตากระทะ เตาไฟฟ้า และ เตาอินดักชั่น ส่วนใหญ่จะนำไปใช้งานทำชิ้นส่วนอุปกรณ์ในงานอุตสาหกรรมเคมี

เหล็กกล้าประสมหล่อ สามารถแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม คือ

4.2.1 เหล็กกล้าประสมต่ำ (ธาตุผสม เช่น แมงกานีส โครเมียม นิกเกิล ทั้งสแตน ไม่เกิน 10%)

4.2.2 เหล็กกล้าประสมสูง (มีธาตุผสมที่สำคัญเกินกว่า 10%)

5) เหล็กอ่อน (Wrought Iron) เป็นเหล็กที่มีส่วนผสมของธาตุคาร์บอน ไม่เกิน 0.1% และธาตุผสมอื่นๆ เช่น ซิลิคอน กำมะถัน ฟอสฟอรัส แมงกานีส ทำให้ได้เหล็กที่มีความบริสุทธิ์สูงถึง 99.9% เมื่อเผาให้ร้อนเหล็กอ่อนนี้จะไม่หลอมละลาย แต่จะอ่อนเปื่อยดีขึ้นรูปได้ง่ายมาก สามารถตีขึ้นเหล็กให้ประสานกันได้ดี ตัวอย่างการใช้งาน เช่น ท่อ หรือผลิตภัณฑ์ที่ต้องพบกับการเสื่อมสภาพโดยสนิม ข้อต่อรถไฟ โซ่ ขอบเกี่ยว หรือ อุปกรณ์ที่ขึ้นรูปอย่างง่าย

### 2.8.2 อิทธิพลของธาตุต่างๆที่ผสมในเหล็กกล้า [32]

1) คาร์บอน (C) เป็นธาตุที่สำคัญในการช่วยเพิ่มความแข็งแรงแก่เหล็กกล้า เมื่อมีปริมาณคาร์บอนผสมอยู่สูงขึ้นเหล็กกล้า จะมีความสามารถในการชุบแข็งและความต้านทานต่อแรงดึงจะสูงขึ้น แต่ความเหนียวและความสามารถในการเชื่อมจะลดลงเมื่อ ทำการเชื่อมเหล็กกล้าที่มีปริมาณคาร์บอนผสมอยู่มากกว่า 0.25% และทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็วบริเวณใกล้เคียงกับรอย เชื่อมหรือเรียกว่าบริเวณกระทบร้อน (Heat Affect Zone: HAZ) จะมีความแข็งและเปราะหรือถ้าบริเวณบ่อหลอมเหลว ได้รับคาร์บอนในปริมาณมากในขณะที่ทำการเชื่อม รอยเชื่อมอาจจะมีความแข็งแรงมากกว่าปกติ

2) แมงกานีส (Mn) เป็นธาตุที่ช่วยเพิ่มความสามารถชุบแข็งและความแข็งแต่จะมีผลน้อยกว่าธาตุคาร์บอน สมบัติของเหล็กกล้าที่มีธาตุแมงกานีสผสมอยู่ขึ้นอยู่กับปริมาณคาร์บอน ถ้าแมงกานีสน้อยกว่า 0.30% อาจทำให้เกิดตามดและรอยร้าว ภายในรอยเชื่อมและถ้ามีแมงกานีส มากกว่า 0.80% รอยเชื่อมอาจจะมีโอกาสเกิดการแตกร้าวได้ง่ายเช่นเดียวกัน โดยทั่วไปแล้วแมงกานีสจะเป็นธาตุที่ช่วยเร่งอัตราการแทรกซึมของคาร์บอนขณะที่ทำการอบเตมคาร์บอน และมีผลดีต่อการตกแต่งผิวสำเร็จ ส่วนผสมของแมงกานีสต่อกำมะถันในอัตราส่วน 10:1 จะทำให้เหล็กกล้ามีความสามารถในการเชื่อมที่ดี ถ้าเหล็กกล้า มีแมงกานีสและคาร์บอนต่ำ แสดงว่าการลดปริมาณออกซิเจนกระทำไม่

เหมาะสม แมงกานีสในเหล็กกล้าจะรวมตัวกับกำมะถัน ซึ่งจะไม่เป็นอันตรายแต่อย่างใด อย่างไรก็ตาม ถ้าเหล็กมีอัตราส่วนต่ำ จะทำให้รอยเชื่อมแตกร้าวได้ง่ายขณะที่รอยเชื่อมยังร้อนอยู่

3) กำมะถัน (S) กำมะถันจะช่วยเพิ่มความสามารถในการตัดแต่งของเหล็กกล้า แต่จะไปลดความอ่อนในแนวขวาง ความต้านทานต่อแรงกระแทกและความสามารถในการเชื่อมกำมะถันจะทำให้รอยเชื่อมเกิดแตกง่ายได้ง่ายในขณะร้อน (Hot- Short) แม้ว่าจะมีปริมาณเพียงเล็กน้อยก็ตาม และมีโอกาสที่จะเกิดมากขึ้นถ้ามีปริมาณกำมะถันสูงขึ้น ปกติแล้วจะให้มีกำมะถัน ได้ไม่เกิน 0.35% แต่ต้องมีแมงกานีสเพียงพอด้วยถ้ามีมากเกินไปจะทำให้เกิดปัญหาารุนแรง เป็นอันตรายต่อคุณภาพ ผิวของ เหล็กกล้าคาร์บอน และเหล็กกล้าแมงกานีสต่ำ เหล็กกล้าที่มีกำมะถันผสมอยู่จะมีความสามารถในการเชื่อมไม่ดี เพราะกำมะถันจะรวมตัวกับเหล็กกลายเป็นฟิล์มซึ่ง ทำให้เกิดรอยแตกง่ายและรอยตำหนิอื่น ๆ ตามบริเวณแนวหลอมเหลว ของการอาร์ก

4) ฟอสฟอรัส (P) จะมีผลทำให้เหล็กกล้ามีความแข็งและความแข็งแรงสูงขึ้น แต่ความต้านทาน ต่อแรงกระแทกจะลดลง โดยเฉพาะในเหล็กกล้าเกรดคาร์บอนสูงในเหล็กกล้าเกรดคาร์บอนต่ำ ฟอสฟอรัสจะช่วยเพิ่มความสามารถในการตัดแต่งและความต้านทานต่อการกัดกร่อนของบรรยากาศได้ดี เมื่อพิจารณาในด้านของงานเชื่อมจะถือว่าฟอสฟอรัสจะเป็นสารมลทินจึงต้องพยายามควบคุมให้ต่ำที่สุดเท่าที่จะทำได้ถ้ามีมากกว่า 0.04% จะทำให้รอยเชื่อมเปราะและแตกง่ายได้ง่ายขึ้น นอกจากนี้ฟอสฟอรัสทำให้การไหลของน้ำโลหะดีขึ้น จึงทำให้การควบคุมการเชื่อมได้ยาก

5) ซิลิคอน (Si) เป็นธาตุที่ช่วยลดออกซิเจนในเหล็กกล้าซึ่งจะเติมลงไปในขณะที่ทำการผลิตเหล็กกล้าและยังช่วยเพิ่ม ความแข็งและความแข็งแรงแต่จะให้ผลน้อยกว่าธาตุแมงกานีส ถ้าเหล็กกล้ามีคาร์บอนค่อนข้างสูงซิลิคอนจะมีโอกาสทำให้ เหล็กแตกง่ายได้ง่ายขึ้น เหล็กกล้าที่มีความสามารถในการเชื่อมที่ดีต้องมีซิลิคอนไม่เกิน 0.10% แต่ถ้าสูงถึง 0.30% จะมี ผลเสียน้อยกว่า เมื่อเทียบกับการมีกำมะถันหรือฟอสฟอรัสสูง 6. ทองแดง (Cu) เป็นธาตุที่มีสมบัติปรับปรุงความต้านทานการกัดกร่อนจากบรรยากาศ ถ้าเติมทองแดงจนถึง 0.50% จะไม่มีผลต่อความสามารถในการเชื่อมแต่ถ้ามีเพียงเล็กน้อยจะมีผลต่อความสามารถในการตีประสานแต่ถ้าเป็นเหล็กกล้าที่ ต้องผ่านการอบชุบ หากมีทองแดงมากกว่า 0.50% จะทำให้สมบัติเชิงกลลดลง

การแบ่งชนิดของเหล็กกล้าคาร์บอนโดยทั่วไปจะแบ่งตามปริมาณของคาร์บอนที่ผสม ซึ่งจะแบ่งได้ดังนี้ เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ มีคาร์บอนไม่เกิน 0.30% เหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง มีคาร์บอนระหว่าง 0.30 - 0.45 % และเหล็กกล้าคาร์บอนสูง มีคาร์บอนมากกว่า 0.45% เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำจะแบ่งเป็น เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำมากมีคาร์บอนไม่เกิน 0.15% และเหล็กกล้าละมุน มีคาร์บอน 0.15 - 0.30% ส่วนผสมของเหล็กกล้าคาร์บอนตามมาตรฐานSAE ดังแสดงในตารางที่ 2.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Ladle Chemical Composition,c Limits,%				
No.	C	Mn	P,max	S,max
1006	0.08 max	0.25-0.45	0.04	0.05
1008	0.10 max	0.25-0.50	0.04	0.05
1009	0.15 max	0.60 max	0.04	0.05
1010	0.08-0.13	0.30-0.60	0.04	0.05
1012	0.10-0.15	0.30-0.60	0.04	0.05
1015	0.12-0.18	0.30-0.60	0.04	0.05
1016	0.12-0.18	0.60-0.90	0.04	0.05
1017	0.14-0.20	0.30-0.60	0.04	0.05
1018	0.14-0.20	0.60-0.90	0.04	0.05
1019	0.14-0.20	0.70-1.00	0.04	0.05
1020	0.17-0.23	0.30-0.60	0.04	0.05
1021	0.17-0.23	0.60-0.90	0.04	0.05
1022	0.17-0.23	0.70-1.00	0.04	0.05
1023	0.19-0.25	0.30-0.60	0.04	0.05
1024	0.18-0.25	1.30-1.65	0.04	0.05
1025	0.22-0.28	0.30-0.60	0.04	0.05
1026	0.22-0.28	0.60-0.90	0.04	0.05
1027	0.22-0.29	1.20-1.55	0.04	0.05
1030	0.27-0.34	0.60-0.90	0.04	0.05
1033	0.29-0.36	0.70-1.00	0.04	0.05
1035	0.31-0.38	0.60-0.90	0.04	0.05
1036	0.30-0.38	1.20-1.55	0.04	0.05
1037	0.31-0.38	0.70-1.00	0.04	0.05
1038	0.34-0.42	0.60-0.90	0.04	0.05
1039	0.36-0.44	0.70-1.00	0.04	0.05

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

SAE	Ladle Chemical Composition,c Limits,%			
No.	C	Mn	P,max	S,max
1040	0.36-0.44	0.60-0.90	0.04	0.05
1041	0.36-0.45	1.30-1.65	0.04	0.05
1042	0.39-0.47	0.60-0.90	0.04	0.05
1043	0.39-0.47	0.70-1.00	0.04	0.05
-	-	-	-	-
1045	0.42-0.50	0.60-0.90	0.04	0.05
1046	0.42-0.50	0.70-1.00	0.04	0.05
-	-	-	-	-
1048	0.43-0.52	1.05-1.40	0.04	0.05
1049	0.45-0.53	0.60-0.90	0.04	0.05
1050	0.47-0.55	0.60-0.90	0.04	0.05
1052	0.46-0.55	1.20-1.55	0.04	0.05
1055	0.52-0.60	0.60-0.90	0.04	0.05
1060	0.55-0.66	0.60-0.90	0.04	0.05
1064	0.59-0.70	0.50-0.80	0.04	0.05
1065	0.59-0.70	0.60-0.90	0.04	0.05
1070	0.65-0.76	0.60-0.90	0.04	0.05
1074	0.69-0.80	0.50-0.80	0.04	0.05
1078	0.72-0.86	0.30-0.60	0.04	0.05
1080	0.74-0.88	0.60-0.90	0.04	0.05
1084	0.80-0.94	0.60-0.90	0.04	0.05
1085	0.80-0.94	0.70-1.00	0.04	0.05
1086	0.80-0.94	0.30-0.50	0.04	0.05
1090	0.84-0.98	0.60-0.90	0.04	0.05
1095	0.90-1.04	0.30-0.50	0.	

ตารางที่ 2.5 แสดงส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าคาร์บอน ตามมาตรฐาน SAE [32]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.9 เหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง (Carbon medium steel ) [33]

เหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง เป็นเหล็กกล้าคาร์บอนชนิดหนึ่งที่มีปริมาณคาร์บอน 0.25% - 0.6% มีความเป็นพลาสติก ความเหนียว ความแข็งแรง และความสามารถในการขึ้นรูปที่ดีหลังจากการอบเช่นเดียวกับประสิทธิภาพการตัด แต่มีประสิทธิภาพการเชื่อมต่ำ ความแข็งแรงและความแข็งสูงกว่าเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ ความเป็นพลาสติกและความเหนียวต่ำกว่าเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ สามารถใช้วัสดุรีดร้อนและรีดเย็นได้โดยไม่ต้องผ่านกรรมวิธีทางความร้อน และยังสามารถใช้หลังจากผ่านกรรมวิธีทางความร้อนได้อีกด้วย

เหล็กกล้าคาร์บอนปานกลางมีคุณสมบัติเชิงกลที่ดีหลังจากผ่านกระบวนการชุบแข็งและอบคืนตัวแล้ว ดังนั้นเหล็กกล้าคาร์บอนปานกลางจึงนิยมนำมาใช้อย่างแพร่หลายมากที่สุดในการใช้งานต่างๆ ในระดับความแข็งแรงปานกลาง นอกจากจะใช้เป็นวัสดุก่อสร้างแล้ว ยังใช้กันอย่างแพร่หลายสำหรับการผลิตชิ้นส่วนเครื่องจักรกลต่างๆ เช่น เครื่องอัดอากาศ ลูกสูบของปั๊ม ใบพัดของกังหันไอน้ำ เพลลาของเครื่องจักรหนัก เฟืองตัวหนอน เฟืองและชิ้นส่วนที่มีพื้นผิวทนทานต่อการสึกหรอ เช่น เพลลาข้อเหวี่ยง แกนหมุนของเครื่องจักร ลูกกลิ้ง เครื่องมือช่างฟิต เป็นต้น

### 2.9.1 เหล็กกล้าคาร์บอนปานกลางชนิด S45C (S45C Carbon medium steel) [33-34]

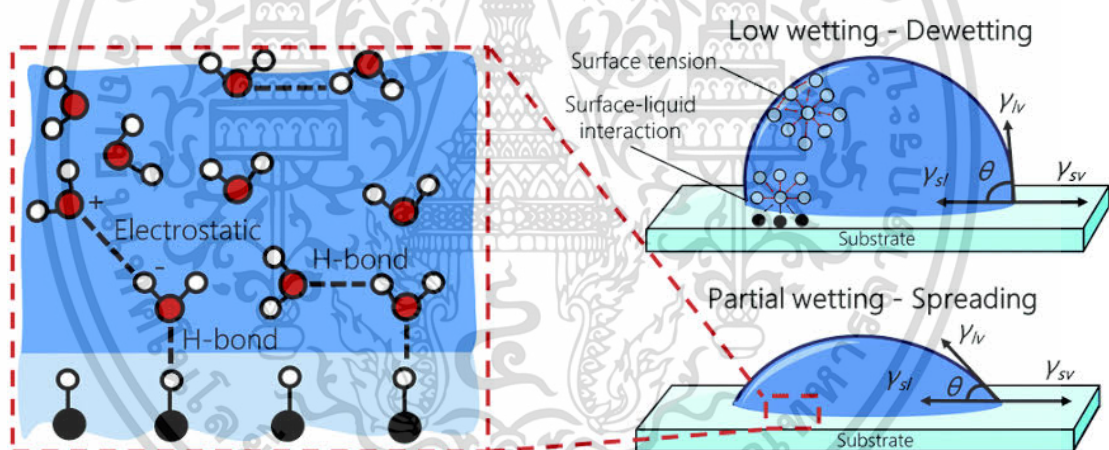
นิยมนำมาประยุกต์ใช้กับงานที่ต้องการความแข็งแรงและความทนทานต่อแรงกระแทกของส่วนประกอบ เนื่องจากส่วนประกอบมีคาร์บอนสูง จึงมีความต้านทานแรงดึง ความเหนียว และความต้านทานการสึกหรอที่สูงกว่า ทนการเสียดสีได้ดี ชุบแข็งง่าย มีความแข็งแรงสูง สามารถชุบแข็งได้ทั้งตัว และชุบผิวให้แข็งด้วยวิธีอินดักชั่น เหมาะสำหรับทำแม่พิมพ์ทั่วไป แม่พิมพ์พลาสติก แผ่นรองยึดต่างๆ ชิ้นส่วนแม่พิมพ์ โครงสร้างแม่พิมพ์ต่างๆ มีความสามารถในการเชื่อมต่ำไม่เหมาะกับการขึ้นรูปเกรดเหล็กนี้สามารถจำหน่ายในรูปแบบมาตรฐานมากมาย รวมทั้งกลม สี่เหลี่ยม หกเหลี่ยม และแผ่น โดยทั่วไปจะใช้กับน็อตและโบลต์ เพลลา ลูกกลิ้ง สปริง สายไฟ โครงล้อ แท่ง ชิ้นส่วนเครื่องยนต์ แม่พิมพ์ปั๊ม ค้อน แหวนล้อค/ปะเก็นขาล้อค ใบพัดเทอร์ไบน์ รางรถไฟ ปลอกสูบ เครื่องมือช่าง สกรูล้อรถไฟ เกียร์ ชิ้นส่วนงานการเกษตร เช่น จอบ เสียม คราด และงานอื่นๆที่ต้องการการลดต้นทุน

## 2.10 การเปียกผิววัสดุและมุมสัมผัส [35]

การเปียกผิว (Wetting) คือความสามารถของของเหลวที่จะรักษาหน้าผิวสัมผัสกับของแข็ง ซึ่งมีผลมาจากการกระทำของแรง 2 ชนิด แสดงดังรูปที่ 2.21 ได้แก่

1. แรงเชื่อมแน่น (Cohesive force) คือ แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของเหลวด้วยกันเอง ซึ่งเป็นแรงที่ทำให้ของเหลวพยายามหดตัวลงเป็นหยดกลม เพื่อลดพื้นที่สัมผัสกับผิวของแข็ง และ
2. แรงยึดติด (Adhesive force) แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของของเหลวกับของแข็ง จะทำให้ของเหลว พยายามแผ่ตัวออก เพื่อเพิ่มพื้นที่สัมผัสกับผิวของแข็ง

หากแรงเชื่อมแน่นมากกว่าแรงยึดติด ของเหลวมีแนวโน้มจะไม่เปียกของแข็ง แต่หากแรงเชื่อมแน่นน้อยกว่าแรงยึดติดของเหลว มีแนวโน้มจะเปียกของแข็ง ซึ่งระดับการเปียกผิว (Degree of wetting) สามารถวัดได้จากการดูค่า มุมสัมผัสของของเหลวบนผิวของแข็ง โดยมุมสัมผัสยิ่งน้อยแสดงว่าของเหลวเปียกผิวของแข็งได้ดี แต่หากของเหลวไม่เปียกผิวหรือเปียกผิวได้ไม่ดีจะมีค่ามุมสัมผัสที่สูง แสดงดังรูปที่ 2.22



รูปที่ 2.21 แสดงแรงยึดเหนี่ยวที่กระทำระหว่างโมเลกุลของเหลวและของแข็ง

ค่ามุมสัมผัส (Contact angle) คือ มุมระหว่างหยดของของเหลววัดเทียบกับผิววัสดุ ณ จุดที่ผิวทั้งสองเกาะติดกัน มุมสัมผัสใช้ชี้วัดความสามารถในการเปียกผิวได้ ถ้ามุมสัมผัสมีค่าน้อย แสดงว่าหยดของเหลวมีแนวโน้มที่จะมีพื้นที่สัมผัสกับพื้นผิวมาก นั่นคือเปียกผิวได้ดี และใช้ค่ามุมสัมผัสนี้เป็นเกณฑ์แบ่งความชอบน้ำบนผิวของแข็งว่ามีคุณสมบัติชอบน้ำได้ดีหรือไม่ดี มีเกณฑ์ดังนี้

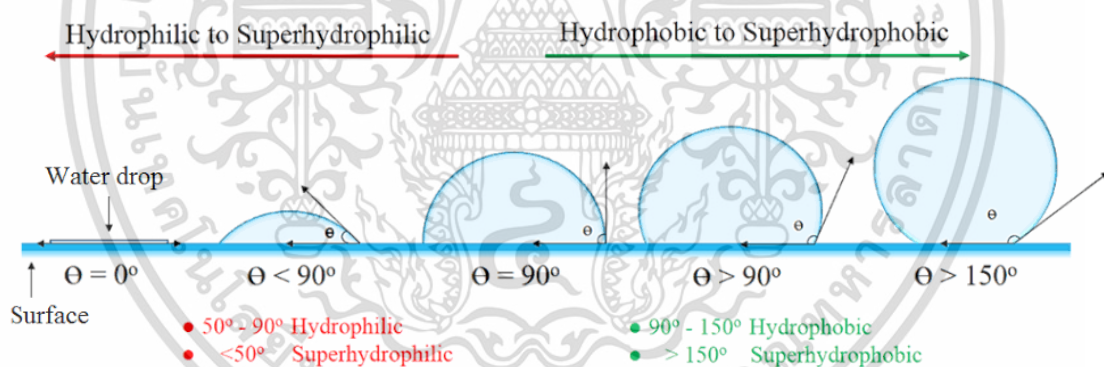
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. มุมสัมผัสมีค่าระหว่าง 0 ถึง 10 องศา คือ มีคุณสมบัติชอบน้ำยิ่งยวด (Superhydrophilic) ซึ่งเป็นกรณีที่แรงยึดติดมีค่ามากกว่าแรงเชื่อมแน่นมาก ๆ เมื่อของเหลวถูก หยดลงบนผิว ของเหลวจะกระจายไปตามผิวของของแข็งจนกลายเป็นชั้นของของเหลวบาง ๆ ครอบคลุม พื้นผิวของของแข็งเป็นบริเวณกว้างที่สุด

2. มุมสัมผัสมีค่าระหว่าง 10 ถึง 90 องศา คือ มีคุณสมบัติชอบน้ำ (Hydrophilic) ของเหลวจะกระจายไปบนผิวได้เป็นบริเวณกว้าง แต่ก็ยังคงเกาะกันเป็นหยดนูนขึ้นเล็กน้อยจากผิว ของของแข็ง

3. มุมสัมผัสมีค่าตั้งแต่ 90 แต่ไม่ถึง 150 องศา คือ มีคุณสมบัติไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) ของเหลวจะรวมกันเป็นหยดรูปทรงค่อนข้างกลม บริเวณฐานของหยดของเหลว แตะกับผิวของแข็งเล็กน้อย

4. มุมสัมผัส มีค่ามากกว่า 150 องศา คือ มีคุณสมบัติไม่ชอบน้ำยิ่งยวด (Superhydrophobic) เกิดขึ้นเมื่อแรงยึดติดมีค่าน้อยกว่าแรงเชื่อมแน่นมาก ๆ ดังนั้นของเหลวจะรวมกันเป็นหยดทรงกลม บริเวณที่ของเหลวแตะกับผิวของแข็งจะอยู่ที่ฐานของทรงกลม ซึ่งเล็กมากจนแทบจะเป็นจุด ทำให้ของเหลวสามารถลื่นไถลไปมาบนผิวได้อย่างอิสระเหมือนลูกบอลกลิ้งบนพื้นเรียบ



รูปที่ 2.22 แสดงระดับการเปียกของพื้นผิว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.11 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

L.M.Ocampo และคณะ [36] ได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพของตัวแปลงสนิมจากกรดฟอสฟอริกและกรดแทนนิก ของเหล็กกล้าในสารละลายที่แตกต่างกัน ได้แก่ น้ำกลั่น สารละลายโซเดียมซัลเฟต และสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ที่ความเข้มข้นต่างๆ โดยบทบาทของตัวแปลงสนิมที่มีกรดแทนนิกและกรดฟอสฟอริกได้รับการประเมินสำหรับเหล็กกล้าที่มีการทาสีและไม่มีการทาสี ซึ่งมีระดับการกัดกร่อนและการปนเปื้อนของเกลือในสนิมที่ต่างกัน จะถูกตรวจสอบด้วยการวัดอิมพีแดนซ์และการระบุลักษณะด้วยเทคนิคเอ็กซ์เรย์ อินฟราเรด และรามานสเปกโทรสโกปี ผลลัพธ์ที่ได้จะแสดงการดำเนินการระยะยาวของตัวแปลงที่เกิดขึ้น ผลการทดลองพบว่าการแปลงสนิมที่เกิดขึ้นในการทดสอบการแช่แบบสลับกันนั้น ประสบความสำเร็จด้วยสูตรที่อิงตามกรดแทนนิกและกรดฟอสฟอริก ซึ่งได้รับการพิสูจน์โดยการวิเคราะห์ทางสเปกโทรสโกปี ผลที่ตามมาคือ ตัวอย่างที่สึกกร่อนจนถึงเกรด C และ D ในสารละลายที่มีซัลเฟตและคลอไรด์ไอออนในปริมาณต่างๆ กัน จะทำให้เหล็กออกซิไดซ์-ดรอกไซด์เปลี่ยนไปเป็นเหล็กฟอสเฟตและแทนเนตเป็นส่วนใหญ่ นั้นแสดงให้เห็นว่ากรดฟอสฟอริกและกรดแทนนิกนั้น มีบทบาทอย่างมากในการแปลงสนิม

J.Gust and J.Bobrowicz [37] ได้ทำการศึกษาการปิดผนึกและการต้านการกัดกร่อนของเหล็กกล้าคาร์บอนด้วยสารแปลงสนิมแทนนิน โดยการนำตัวอย่างเหล็กกล้าคาร์บอนที่เคลือบด้วยสนิมมาผ่านการบำบัดหรือเคลือบด้วยสารแปลงสนิมแทนนินเป็นระยะเวลาต่างๆ ซึ่งตัวอย่างที่มีสนิมที่ยังไม่ผ่านการเคลือบด้วยสารแปลงสนิมและตัวอย่างสนิมที่ผ่านการเคลือบด้วยสารแปลงสนิมนั้น จะถูกวิเคราะห์ด้วยเทคนิคเอ็กซ์เรย์ การวัดความพรุน การส่องผ่านด้วยกล้องจุลทรรศน์ การวัดโพเทนทิโอไดนามิกส์และการวิเคราะห์โดยน้ำหนัก ผลการทดลองพบว่า การปิดผนึกสนิมด้วยสารที่มีแทนนินสามารถเชื่อมต่อและแทรกซึมเข้าไปในชั้นที่มีรูพรุนของผลิตภัณฑ์กัดกร่อน พร้อมกับทำปฏิกิริยาระหว่างแทนนินกับส่วนประกอบของเฟสการเกิดสนิม ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงบางส่วนของส่วนประกอบในโครงสร้างออสถุฐาน เกิดโครงสร้างของสนิมที่กะทัดรัดกว่าสนิมในตอนแรกที่ไม่มีการปิดผนึกด้วยสารแทนนิน จะเห็นได้ว่าประสิทธิภาพการป้องกันของสนิมที่ถูกแปลงด้วยสารแทนนิน ทำให้ศักยภาพของการกัดกร่อนเปลี่ยนไปในทิศทางบวก และมีความหนาแน่นของกระแสกัดกร่อนที่ลดลง อีกทั้งยังเกิดการเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบและโครงสร้างผลิตภัณฑ์การกัดกร่อนซึ่งเป็นผลมาจากการกระทำของแทนนิน ทำให้คุณสมบัติของชั้นสนิมบนผิวเหล็กเปลี่ยนไป จะช่วยปกป้องพื้นผิวของเหล็กจากการกัดกร่อนได้ดีกว่าสนิมที่ไม่ผ่านการเคลือบด้วยสารแปลงสนิม การทดสอบนี้บ่งชี้ได้ว่า ทั้งระดับการปิดผนึกและประสิทธิภาพการป้องกันการกัดกร่อนที่ดีของสนิมที่ถูกแปลงนั้น ไม่เพียงแต่ใช้สารละลายแทนนินเพียงอย่างเดียว แต่ยังประกอบไปด้วยสารอื่นๆ ได้แก่ สารยับยั้งการกัดกร่อน สารลดแรงตึงผิว ที่ส่งผลให้สารแปลงสนิมนั้นมีประสิทธิภาพที่ดียิ่งขึ้นอีกด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Wenhua Xu, En-Hou han และ Zhenyu Wang [38] ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมการกัดกร่อนของเหล็กกล้าคาร์บอน Q235 ที่ไม่ขึ้นสนิมในสารละลาย NaCl 3.5% ด้วยการเติมกรดแทนนิก 1-5% โดยน้ำหนัก โดยใช้วิธีเคมีไฟฟ้ารวมถึงสเปกตรัมอิมพีแดนซ์ไฟฟ้าเคมี (EIS), โพลาริเซชันโพเทนชิโอไดนามิก และ เทคนิคอิเล็กโทรดสั้นแบบสแกน (SVET) ร่วมกับการวิเคราะห์พื้นผิว ผลลัพธ์จะแสดงอัตราการกัดกร่อนที่ลดลงเมื่อความเข้มข้นของกรดแทนนิกเพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับสารละลายที่ปราศจากกรดแทนนิกและสารละลายกรดแทนนิกที่ความเข้มข้นต่างๆ วิเคราะห์ผลด้วยเทคนิคทางเคมีไฟฟ้า การวัดน้ำหนักที่หายไป การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค การก่อตัวของเพอริกแทนเนตได้รับการตรวจสอบโดย X-ray photoelectron spectroscopy (XPS) และ Raman spectra มีการเสนอกลไกการเกิดปฏิกิริยาระหว่างกรดแทนนิกกับเหล็กกล้าคาร์บอนที่ไม่ขึ้นสนิม ผลการทดลองพบว่า ผลยับยั้งการกัดกร่อนจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของกรดแทนนิก เป็นผลมาจากการดูดซึมกรดแทนนิกในเหล็กและการลดลงของ pH ของกรดแทนนิก สามารถเร่งกระบวนการกัดกร่อนโดยการลด pH และสร้างสารประกอบเชิงซ้อนกับเหล็ก ในทางตรงกันข้าม กรดแทนนิกจะยับยั้งการหมุนเวียนของสื่อที่กัดกร่อนโดยการดูดซึมโมเลกุลแทนนิน และสามารถทำปฏิกิริยากับเหล็กกล้าคาร์บอนในการสร้าง ferric-tannates โดยอย่างแรกคือ แทนนินจะเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับไอออน  $Fe^{2+}$  เพื่อสร้าง ferrous-tannates ซึ่งจะถูกรีดออกซิไดซ์เป็น ferric-tannates ได้อย่างง่ายดาย ประการที่สอง แทนนินสามารถทำปฏิกิริยาโดยตรงกับไอออน  $Fe^{3+}$  เพื่อสร้าง ferric-tannates และประการที่สามออกไซด์  $Fe^{3+}$  สามารถจะถูกรีดด้วยกรดแทนนิกกลายเป็นไอออน  $Fe^{2+}$  สร้างสารประกอบเชิงซ้อนกับแทนนินเพื่อสร้าง ferrous-tannates เมื่อมีการสัมผัสกับออกซิเจน ดังนั้นจะเห็นได้ว่ากรดแทนนิกมีประสิทธิภาพที่ดีในการยับยั้งการกัดกร่อนของเหล็กกล้าคาร์บอนในสารละลายโซเดียมคลอไรด์

Javadian และคณะ [39] ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมการกัดกร่อนของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 3.5 เปอร์เซ็นต์ โดยใช้สารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวก CTAB และสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุลบ SDS เป็นสารยับยั้งในการกัดกร่อน วิเคราะห์ผลด้วยเทคนิคโพเทนชิโอไดนามิกโพลาริเซชัน เทคนิคทางเคมีไฟฟ้า Electrochemical impedance spectroscopy, EIS) และ SEM ผลการทดลองพบว่า เมื่อนำสารลดแรงตึงผิวทั้งสองชนิดมาผสมกันจะส่งผลให้มีประสิทธิภาพในการยับยั้งการกัดกร่อนดีกว่าใช้ CTAB หรือ SDS เพียงชนิดใดชนิดหนึ่ง เนื่องจากมีการดูดซับที่แข็งแรงบนพื้นผิวของโลหะและทำให้เกิดการสร้างชั้นป้องกันขึ้น ผลจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคโพเทนชิโอไดนามิกโพลาริเซชันสามารถบ่งบอกได้ว่า สารยับยั้งการกัดกร่อนที่คณะผู้ทำการวิจัยศึกษาเป็นสารยับยั้งการกัดกร่อนแบบผสม สำหรับการดูดซับของสารลดแรงตึงผิวทั้งสองชนิดนี้สามารถอธิบายได้จากไอโซเทอมการดูดซับของฟลอรีและฮักกินส์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Zhao และ Mu [40] ได้ทำการศึกษาความสามารถในการดูดซับและการยับยั้งการกัดกร่อนของสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุลบ ได้แก่ Dodecyl Sulphonic Acid Sodium Salt (DSASS), Dodecyl Benzene Sulfonic Acid Sodium Salt (DBSASS) และ SDS บนพื้นผิวของอลูมิเนียมในสารละลายกรดไฮโดรคลอริก ทำการศึกษาด้วยวิธีการหาน้ำหนักที่หายไป (Weight loss method) ซึ่งพบว่าการดูดซับของสารลดแรงตึงผิวสามารถช่วยป้องกันการหายไปของน้ำหนักอลูมิเนียมได้ อีกทั้งยังสอดคล้องกับสมการของแลงเมียร์ (Langmuir equation) อีกด้วย การดูดซับของสารลดแรงตึงผิว DSASS, DBSASS และ SDS บนพื้นผิวของอลูมิเนียมเป็นเหตุผลสำคัญที่ก่อให้เกิดการยับยั้งการกัดกร่อน เมื่อใดที่ความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวเข้าใกล้ค่าความเข้มข้นวิกฤตของการเกิดไมเซลล์ จะพบว่า สารลดแรงตึงผิวสามารถดูดซับบนพื้นผิวอลูมิเนียมได้ดี น้ำหนักของอลูมิเนียมหายไปน้อย และมีคุณสมบัติในการต้านทานการกัดกร่อนได้ดี ซึ่งจากผลการทดลองของงานวิจัยนี้ จะได้กราฟน้ำหนักที่หายไปเพื่อใช้ในการคำนวณหาค่าต่างๆ และจากกราฟที่ได้สามารถบอกได้ว่า การยับยั้งการกัดกร่อนจะเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวเพิ่มขึ้นจนถึงค่าความเข้มข้นหนึ่ง หลังจากนั้นกราฟจะคงที่ เนื่องมาจากค่าความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวเข้าถึงค่าความเข้มข้นวิกฤตของการเกิดไมเซลล์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 3

### วิธีการดำเนินงานวิจัย

ในบทนี้จะกล่าวถึงรายละเอียดเกี่ยวกับอุปกรณ์ สารเคมี และกระบวนการที่ใช้ในการศึกษาการแปลงสปีชีส์ของเหล็กกล้าคาร์บอนปานกลางชนิด S45C

#### 3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

- 1) กรดแทนนิก (Tannic acid,  $C_{76}H_{52}O_{46}$ ) ความบริสุทธิ์ 94% จากบริษัท Carlo Erba Reagents จำกัด
- 2) ไดบิวทอกซีเอทานอล (2-Butoxyethanol,  $C_6H_{14}O_2$ ) ความบริสุทธิ์ 99% จากบริษัท K-ME Mart จำกัด
- 3) โซเดียมโดเดคซิลซัลเฟต (Sodium dodecyl sulfate,  $C_{12}H_{25}NaSO_4$ ) ความบริสุทธิ์ 92% จากบริษัท Carlo Erba Reagents จำกัด
- 4) น้ำปราศจากไอออน

#### 3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

- 1) เหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง ชนิด S45C
- 2) กระดาษทราย เบอร์ 280 600 1200 2000
- 3) ถังมือยาง
- 4) ปริมาตรเครื่องแก้ว
- 5) คีมหนีบ
- 6) เครื่องชั่งน้ำหนัก 4 ตำแหน่ง
- 7) เครื่องกวนสารละลายด้วยแท่งแม่เหล็ก (Magnetic stirrer)
- 8) เครื่องโพเทนชิโอสแตต/กัลวานอสแตต (Potentiostat/ Galvanostat) รุ่น Autolab PGSTAT302N
- 9) เครื่องวัดค่าการนำไฟฟ้า (Conductometer) รุ่น C860
- 10) เครื่องวัดมุมสัมผัส (Contact angle meter) รุ่น OCA20
- 11) เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray diffractometer; XRD) รุ่น SmartLab

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3 วิธีการทดลอง

#### 3.3.1 การเตรียมชิ้นงานโลหะ

- 1) ตัดโลหะ S45C ให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.6 เซนติเมตร และหนา 0.25 เซนติเมตร
- 2) ขัดผิวชิ้นงานเพื่อกำจัดออกไซด์และสารปนเปื้อนที่บริเวณผิวหน้าของโลหะด้วยกระดาษทรายขัดโลหะเบอร์ 280 ตามด้วยเบอร์ 600 และ 1200 เพื่อให้ผิวหน้าของชิ้นงานเรียบสม่ำเสมอ และขัดละเอียดเพื่อลดความร้อนและแรงเสียดทานที่เกิดจากการขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์ 2000 ที่ใช้ร่วมกันกับน้ำ
- 3) ทำความสะอาดชิ้นงานโลหะโดยการล้างด้วยน้ำปราศจากไอออนให้สะอาดและซับให้แห้ง

#### 3.3.2 การทำสนิม

- 1) วางชิ้นงานโลหะลงในภาชนะพลาสติกขนาดเล็ก นำกรดแอสซิติคเข้มข้นร้อยละ 4 โดยปริมาตร ปริมาณ 100 ml เทลงบนชิ้นงานโลหะให้ท่วมแล้วเหวี่ยงกล่องพลาสติกไปมา จากนั้นทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง
- 2) นำชิ้นงานโลหะออกจากสารละลายไปยังภาชนะอีกภาชนะหนึ่งที่ไม่มีการละลาย จากนั้นนำสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เข้มข้นร้อยละ 3 โดยมวลต่อปริมาตร ปริมาณ 0.15 ml หยดลงบนชิ้นงานโลหะ
- 3) นำสารละลายโซเดียมคลอไรด์เข้มข้นร้อยละ 25 โดยน้ำหนัก ปริมาณ 0.15 ml หยดลงบนชิ้นงานโลหะ
- 4) ทำซ้ำ 2-3 ซ้ำอีกครั้ง
- 5) ปล่อยให้ชิ้นงานโลหะทิ้งไว้จนแห้งเป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อให้เกิดปฏิกิริยากับอากาศและเกิดสนิมโลหะที่เพิ่มขึ้น
- 6) เมื่อได้สนิมบนชิ้นงานโลหะแล้ว เก็บชิ้นงานโลหะสนิมลงในถุงพลาสติกที่มีการปิดผนึกแน่น เพื่อป้องกันไม่ให้คราบสนิมหลุดออกและปนเปื้อนจากสิ่งภายนอก

#### 3.3.3 การวัดค่าการนำไฟฟ้าของสารละลายที่ประกอบด้วยโซเดียมโตะเคซิลลัลเฟตกรดแทนนิก และไดบิวทอกซีเอทานอล ที่ความเข้มข้นของโซเดียมโตะเคซิลลัลเฟตแตกต่างกัน

- 1) เตรียมสารละลายผสมที่ประกอบด้วยกรดแทนนิกเข้มข้นร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก, ไดบิวทอกซีเอทานอลเข้มข้นร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก และโซเดียมโตะเคซิลลัลเฟตที่ความเข้มข้นต่างๆ โดยเริ่มต้นที่ความเข้มข้นของโซเดียมโตะเคซิลลัลเฟตเท่ากับ 0.01 M แสดงดังตารางที่ 3.1

2) วัดค่าการนำไฟฟ้าของสารละลายผสมในแต่ละบีกเกอร์ พร้อมทั้งจดบันทึก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการศึกษาวิจัยเท่านั้น ไม่ควรนำข้อมูลไปใช้ในการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3) พล็อตกราฟระหว่างค่าความเข้มข้นของโซเดียมโอดีเคซิลซัลเฟตและค่าการนำไฟฟ้าที่วัดได้จากสารละลายผสม จากนั้นหาค่าความเข้มข้นวิกฤตของการเกิดไมเซลล์ (CMC) โดยพิจารณาที่จุดที่เกิดการเปลี่ยนแปลงความชันของกราฟ

4) ทำซ้ำทั้งหมดอีกครั้ง โดยเปลี่ยนความเข้มข้นของกรดแทนนิกเป็นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก

**ตารางที่ 3.1** ความเข้มข้นของโซเดียมโอดีเคซิลซัลเฟตต่างๆ ในสารละลายผสมระหว่างโซเดียมโอดีเคซิลซัลเฟต กรดแทนนิก และไดบิวทอกซีเอทานอล

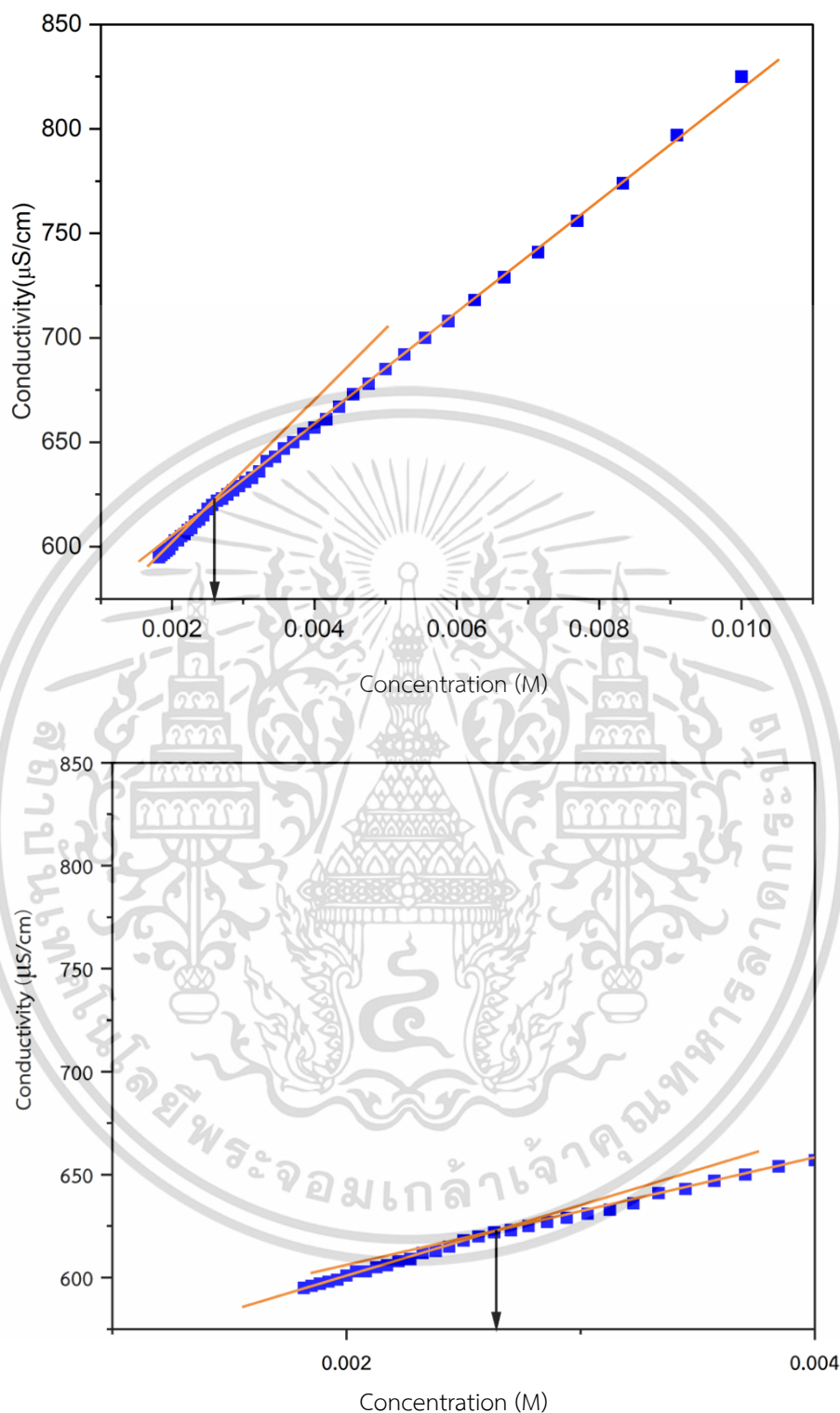
การวัดครั้งที่	ความเข้มข้นของโซเดียมโอดีเคซิลซัลเฟต (M)
1	$1.00 \times 10^{-2}$
2	$9.09 \times 10^{-3}$
3	$8.33 \times 10^{-3}$
4	$7.69 \times 10^{-3}$
5	$7.14 \times 10^{-3}$
6	$6.67 \times 10^{-3}$
7	$6.25 \times 10^{-3}$
8	$5.88 \times 10^{-3}$
9	$5.56 \times 10^{-3}$
10	$5.26 \times 10^{-3}$
11	$5.00 \times 10^{-3}$
12	$4.76 \times 10^{-3}$
13	$4.55 \times 10^{-3}$
14	$4.35 \times 10^{-3}$
15	$4.17 \times 10^{-3}$
16	$4.00 \times 10^{-3}$
17	$3.85 \times 10^{-3}$
18	$3.70 \times 10^{-3}$
19	$3.57 \times 10^{-3}$
20	$3.45 \times 10^{-3}$
21	$3.33 \times 10^{-3}$
22	$3.23 \times 10^{-3}$
23	$3.13 \times 10^{-3}$
24	$3.03 \times 10^{-3}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีกรนำไปใช้

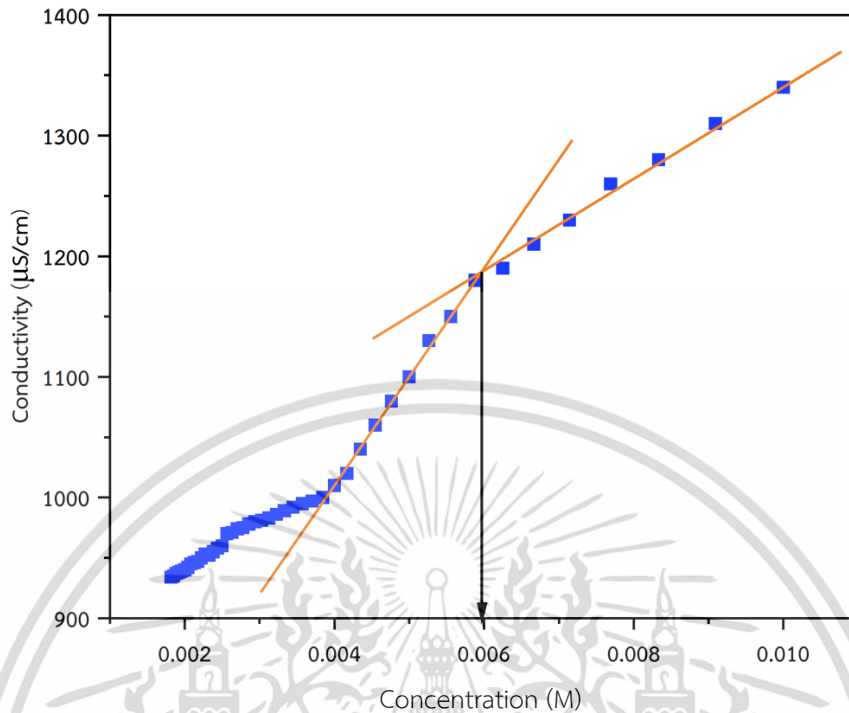
25	$2.94 \times 10^{-3}$
26	$2.86 \times 10^{-3}$
27	$2.78 \times 10^{-3}$
28	$2.70 \times 10^{-3}$
29	$2.63 \times 10^{-3}$
30	$2.56 \times 10^{-3}$
31	$2.50 \times 10^{-3}$
32	$2.44 \times 10^{-3}$
33	$2.38 \times 10^{-3}$
34	$2.33 \times 10^{-3}$
35	$2.27 \times 10^{-3}$
36	$2.22 \times 10^{-3}$
37	$2.17 \times 10^{-3}$
38	$2.13 \times 10^{-3}$
39	$2.08 \times 10^{-3}$
40	$2.04 \times 10^{-3}$
41	$2.00 \times 10^{-3}$
42	$1.96 \times 10^{-3}$
43	$1.92 \times 10^{-3}$
44	$1.89 \times 10^{-3}$
45	$1.85 \times 10^{-3}$

จากการพล็อตกราฟระหว่างค่าความเข้มข้นของโซเดียมโตนดิลซัลเฟตและค่าการนำไฟฟ้าที่วัดได้จากสารละลายผสม สามารถหาค่าความเข้มข้นวิกฤตของการเกิดไมเซลล์ (CMC) ได้โดยพิจารณาที่จุดที่เกิดการเปลี่ยนแปลงความชันของกราฟ แสดงดังรูปที่ 3.1 และ รูปที่ 3.2 ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**รูปที่ 3.1** การหาค่าความเข้มข้นวิกฤตของการเกิดไมเซลล์ของสารละลายผสมที่ประกอบด้วยกรดแทนนิกเข้มข้นร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก ไตบิวทอกซีเอทานอลเข้มข้นร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก และโซเดียมเอคสารนี้ไดเตคซิลซัลเฟตที่ความเข้มข้นต่างๆ เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2 การหาค่าความเข้มข้นวิกฤตของการเกิดไมเซลล์ของสารละลายผสมที่ประกอบด้วยกรดแทนนิกเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ไตบิวทอกซีเอทานอลเข้มข้นร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก และโซเดียมโดเดคซิลซัลเฟตที่ความเข้มข้นต่างๆ

### 3.3.4 การแปลงสนิม

เมื่อได้ชิ้นงานโลหะที่เกิดสนิมขึ้นทั่วทั้งชิ้นงานแล้วจะทำการแปลงด้วยสารแปลงสนิมกรดแทนนิกทั้งสองความเข้มข้น โดยที่แทนนิกจะทำปฏิกิริยาโดยตรงกับไอออน (III) ออกไซด์ ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) หรือสนิมเกิดเป็นสารประกอบใหม่นั้นคือ ไอออน (II) ออกไซด์ ( $\text{FeO}$ ) หรือ  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  เกิดขึ้น มีลักษณะเป็นสีดำหรือสีน้ำเงิน เพื่อช่วยลดการเกิดการกัดกร่อนให้น้อยลง โดยมีขั้นตอนการเตรียมสารแปลงสนิมดังนี้

- 1) ชั่งกรดแทนนิกลงในปิกลเกอร์ที่มีน้ำกลั่น คนให้สารละลายเป็นเนื้อเดียวกัน
- 2) เติมโซเดียมโดเดคซิลซัลเฟตลงไปในการละลายข้อ 1 กวนสารละลายเป็นเวลา 1 นาที จากนั้นเติมไตบิวทอกซีเอทานอลลงไปและกวนอย่างสม่ำเสมอเป็นเวลา 15 นาที เพื่อให้สารละลาย ละลายเป็นเนื้อเดียวกัน โดยจะเตรียมสารแปลงสนิมทั้งหมด 2 ชุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเตรียมสารแปลงสนิมชุดที่ 1 ประกอบด้วยกรดแทนนิกเข้มข้นร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก และไดบิวทอกซีเอทานอลเข้มข้นร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก โดยมีความเข้มข้นของโซเดียมโดเดคซิลซัลเฟตแตกต่างกัน ทั้งหมด 5 สูตร แสดงดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 องค์ประกอบของสารแปลงสนิมชุดที่ 1

สูตรที่	Sodium Dodecyl Sulfate (M)	Tannic acid (%wt)	2-Butoxyethanol (%wt)
1	0	2%	1%
2	0.0013	2%	1%
3	0.0026	2%	1%
4	0.0052	2%	1%
5	0.0104	2%	1%

ถัดมา การเตรียมสารแปลงสนิมชุดที่ 2 ประกอบด้วยกรดแทนนิกเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก และไดบิวทอกซีเอทานอลเข้มข้นร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก โดยมีความเข้มข้นของโซเดียมโดเดคซิลซัลเฟตที่แตกต่างกัน ทั้งหมด 5 สูตร แสดงดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 องค์ประกอบของสารแปลงสนิมชุดที่ 2

สูตรที่	Sodium Dodecyl Sulfate (M)	Tannic acid (%wt)	2-Butoxyethanol (%wt)
1	0	5%	1%
2	0.0030	5%	1%
3	0.0060	5%	1%
4	0.0120	5%	1%
5	0.0240	5%	1%

- 3) ทาสารแปลงสนิมแต่ละชุดปริมาณ 0.30 ml ลงบนชิ้นงานโลหะให้ทั่ว รอประมาณ 15 นาทีแล้วจึงทาเพิ่มอีก 0.30 ml จากนั้นวางชิ้นงานโลหะทิ้งไว้ให้แห้ง สังเกตการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3.5 การวัดทางเคมีไฟฟ้าด้วยเทคนิคโพเทนชิโอสแตติกโพลาริเซชัน

- 1) ล้างชุดทดสอบการกัดกร่อนด้วยน้ำปราศจากไอออน ทิ้งไว้ให้แห้ง
- 2) เปิดเครื่องคอมพิวเตอร์และเครื่องโพเทนชิโอสแตท/กัลวานอสแตทเลือกโปรแกรมควบคุม กรอกข้อมูลพื้นที่ผิวของชิ้นงานตัวอย่าง เลือกสภาวะทดสอบ ปรับค่าศักย์ไฟฟ้าในช่วง  $\pm 500$  V เทียบกับค่าศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิด (Open circuit potential, OCP) ความเร็วในการสแกนคือ 0.000278 V/s
- 3) ต่อขั้วไฟฟ้าจากเครื่องโพเทนชิโอสแตท/กัลวานอสแตทกับชุดทดสอบการกัดกร่อน โดยต่อขั้วอ้างอิงเป็นขั้วไฟฟ้าชนิดคาโลเมลล์อิ่มตัว ขั้วตรงข้ามเป็นแผ่นแพลทินัม ขั้วทำงานเป็นโลหะที่จะใช้ทดสอบและเติมสารละลายที่เตรียมไว้ลงในเซลล์ทดสอบการกัดกร่อน พร้อมทั้งพ่นแก๊สไนโตรเจนตลอดการทดลอง
- 4) เริ่มปรับค่าศักย์ไฟฟ้า และวัดค่ากระแสไฟฟ้า เมื่อวัดเสร็จจึงทำการบันทึกข้อมูล
- 5) หาค่า  $i_{\text{corr}}$  และ  $E_{\text{corr}}$  โดยการประมาณการนอกช่วงตามแบบทาเฟิล (Tafel extrapolation)

### 3.3.6 การวิเคราะห์โครงสร้างของผลึกด้วยเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray diffractometer; XRD) [41]

เทคนิควิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์อาศัยหลักการของการยิงรังสีเอกซ์ไปกระทบที่ชิ้นงาน ทำให้เกิดการเลี้ยวเบนและสะท้อนออกมาที่มุมต่างๆกันโดยมีหัววัดสัญญาณ (Detector) เป็นตัวรับข้อมูล องค์ประกอบและโครงสร้างของสารจะมีองค์การในการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ในมุมที่แตกต่างกันออกไปขึ้นกับองค์ประกอบ รูปร่าง และลักษณะผลึก ซึ่งผลที่ได้จึงสามารถบ่งชี้ชนิดของสารประกอบที่มีอยู่ในสารตัวอย่างและสามารถนำมาใช้ศึกษารายละเอียดเกี่ยวกับโครงสร้างของผลึกของสารตัวอย่างนั้นๆได้ นอกจากนั้นแล้วยังสามารถศึกษาและวิเคราะห์ปริมาณความเป็นผลึก ขนาดของผลึก ความสมบูรณ์ของผลึก และความเค้นของสารประกอบในสารตัวอย่าง และเมื่อวิเคราะห์กับอุปกรณ์เสริม เช่น อุปกรณ์ให้ความเย็น-ร้อน ก็จะสามารถศึกษาการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผลึกในขณะสภาวะทดสอบเปลี่ยนไป โดยจะวิเคราะห์ที่ Start (deg) เท่ากับ 10, Stop (deg) เท่ากับ 80, Step size (deg) เท่ากับ 0.02, Time/Step (Sec.) เท่ากับ 1 และเปรียบเทียบกับข้อมูลมาตรฐาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3.7 การทดสอบความสามารถในการเปียกผิวของวัสดุและมุมสัมผัส (Wettability and contact angle test) [42]

การทดสอบความสามารถของของเหลวในการรักษาหน้าสัมผัสกับพื้นผิวของแข็ง ซึ่งเป็นผลมาจากปฏิสัมพันธ์ระหว่างโมเลกุล โดยระดับชั้นของภาวะการเปียกขึ้นอยู่กับความสมดุลระหว่างแอดฮีชัน (Adhesion) คือแรงระหว่างของเหลวและของแข็งที่ทำให้ของเหลวกระจายตัวไปทั่วพื้นผิว และโคฮีชัน (Cohesion) คือแรงภายในของของเหลวที่ทำให้ของเหลวเกาะกันเป็นทรงกลมและไม่สัมผัสกับผิวของของแข็ง แสดงเป็นมุมสัมผัสเกิดขึ้น โดยมุมสัมผัสจะบอกถึงแนวโน้มที่หยดของเหลวจะกระจายตัวบนพื้นผิวเรียบของของแข็ง ซึ่งแปรผกผันกับความสามารถในการกระจายตัวของของเหลว แสดงดังตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 ค่ามุมสัมผัสต่างๆและปฏิสัมพันธ์ที่เกี่ยวข้อง

Contact angle	Degree of wetting	Strength of:	
		Sol./Liq. interactions	Liq./Liq. interactions
$\theta = 0$	Perfect wetting	strong	weak
$0 < \theta < 90^\circ$	high wettability	strong	strong
		weak	weak
$90^\circ \leq \theta < 180^\circ$	low wettability	weak	strong
$\theta = 180^\circ$	perfectly non-wetting	weak	strong

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

โครงการพิเศษนี้ได้ทำการศึกษาผลการแปลงสนิมของเหล็กกล้าคาร์บอนปานกลางในสารละลายกรดแทนนิกเข้มข้นร้อยละ 2 และ 5 โดยน้ำหนัก และสารละลายไดบิวทอกซีเอทานอลเข้มข้นร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก โดยเปรียบเทียบความเข้มข้นของโซเดียมโอดีเคซิลซัลเฟตที่ความเข้มข้นแตกต่างกัน ทำการศึกษาผลของสารแปลงสนิมที่มีผลต่อการยับยั้งการกัดกร่อน และพฤติกรรมการกัดกร่อนด้วยเทคนิคโพเทนชิโอดีนามิกโพลาริเซชันที่อัตราเร็วตรวจวัดเท่ากับ 0.000278 V/s

#### 4.1 การวัดค่าการนำไฟฟ้าของสารละลายที่ประกอบด้วยโซเดียมโอดีเคซิลซัลเฟตกรดแทนนิก และไดบิวทอกซีเอทานอล โดยมีความเข้มข้นของโซเดียมโอดีเคซิลซัลเฟตแตกต่างกัน

จากการวัดค่าการนำไฟฟ้าของสารละลายผสมที่ประกอบด้วยกรดแทนนิกเข้มข้นร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก และไดบิวทอกซีเอทานอลเข้มข้นร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก โดยมีความเข้มข้นของโซเดียมโอดีเคซิลซัลเฟตแตกต่างกัน ค่าที่ได้แสดงดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ความเข้มข้นของโซเดียมโอดีเคซิลซัลเฟตในสารแปลงสนิมชุดที่ 1

สูตรที่	ความเข้มข้นของโซเดียมโอดีเคซิลซัลเฟต ในสารแปลงสนิม (M)
1	0
2	0.0013
3	0.0026
4	0.0052
5	0.0104

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

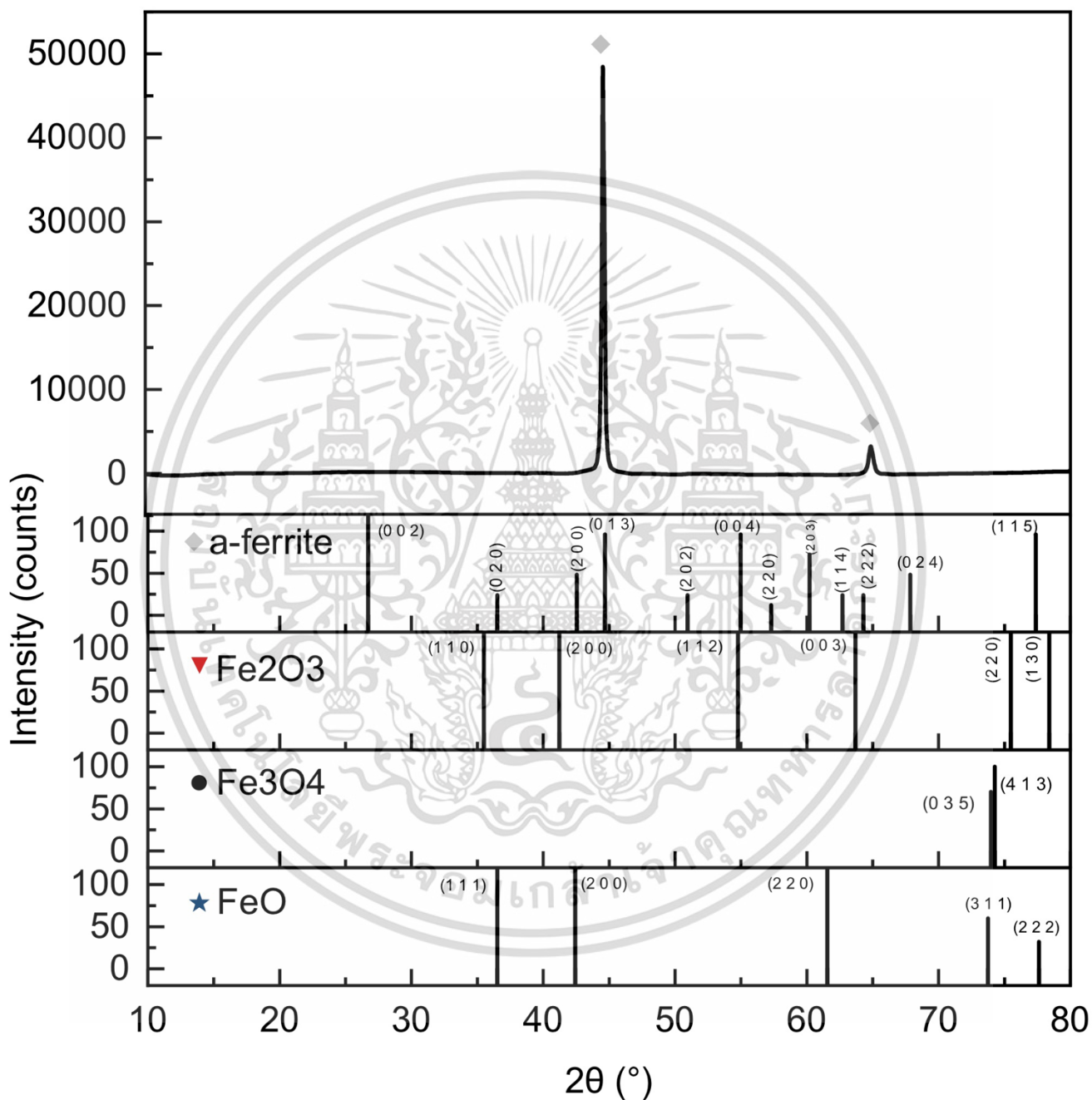
การวัดค่าการนำไฟฟ้าของสารละลายผสมที่ประกอบด้วยกรดแทนนิกเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก และไดบิวทอกซีเอทานอลเข้มข้นร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก โดยมีความเข้มข้นของโซเดียมโตะเดคซิลซัลเฟตแตกต่างกัน ค่าที่ได้แสดงดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ความเข้มข้นของโซเดียมโตะเดคซิลซัลเฟตในสารละลายผสมที่ 2

สูตรที่	ความเข้มข้นของโซเดียมโตะเดคซิลซัลเฟต ในสารละลายผสม (M)
1	0
2	0.0030
3	0.0060
4	0.0120
5	0.0240

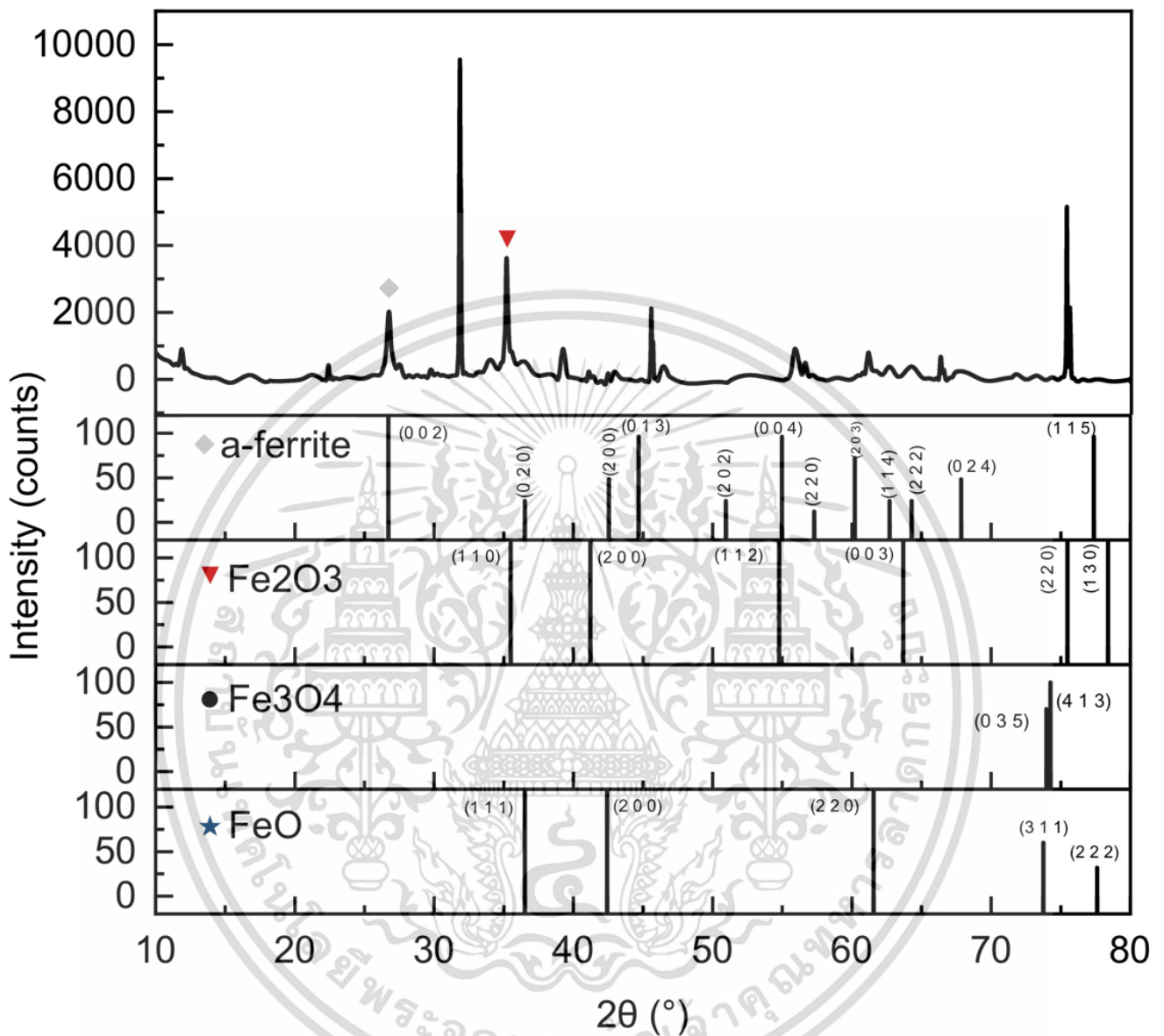
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.2 การวิเคราะห์โครงสร้างและองค์ประกอบของชิ้นงานโลหะด้วยเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray diffractometer; XRD)



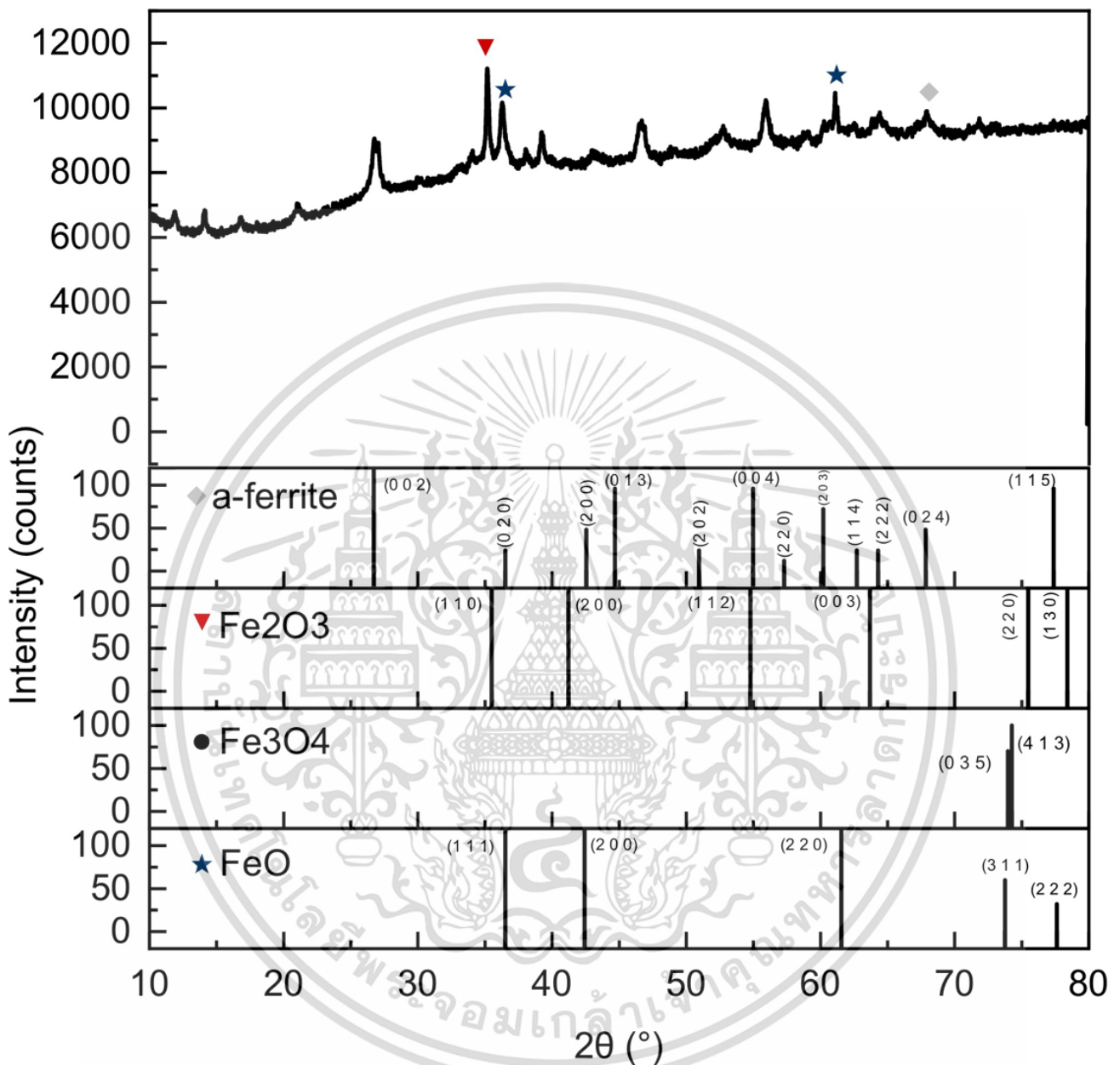
รูปที่ 4.1 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของชิ้นงานโลหะที่ไม่เกิดสนิม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



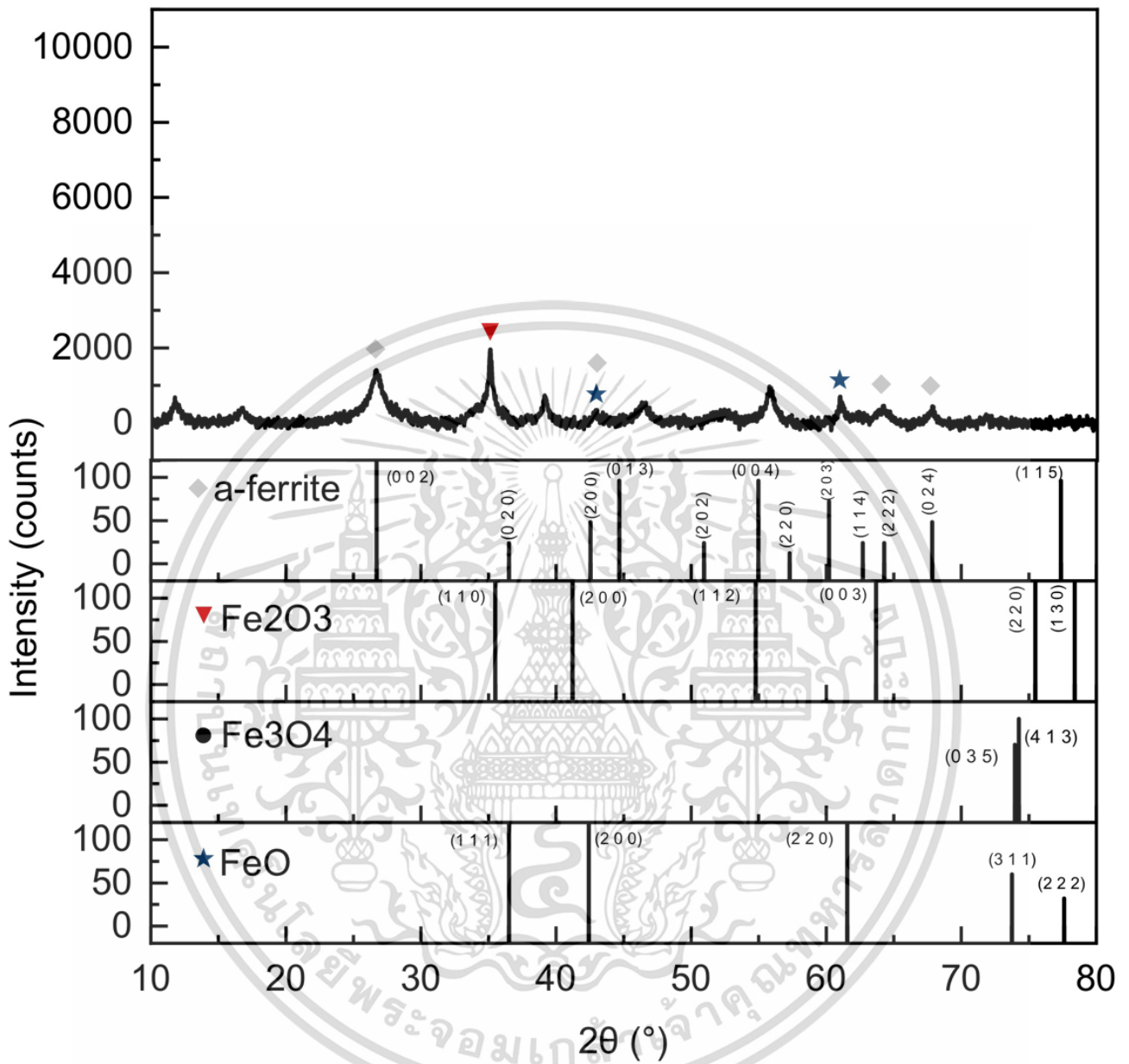
รูปที่ 4.2 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของชิ้นงานโลหะที่เกิดสนิม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.3 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของชิ้นงานโลหะที่เกิดสนิมที่ผ่านการแปลงสนิมด้วยแทนนิก 2% [SDS 0.0026]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของชิ้นงานโลหะที่เกิดสนิมที่ผ่านการแปลงสนิมด้วยแทนนิก 5% [SDS 0.0060]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

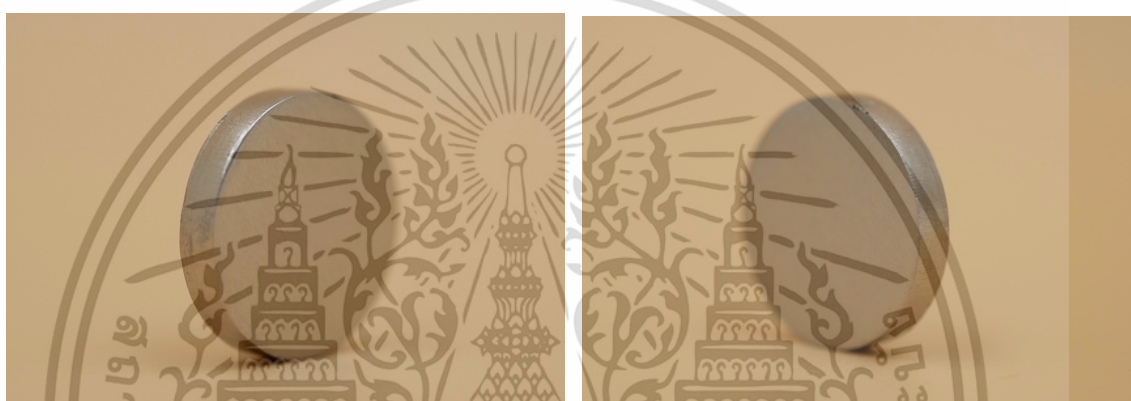
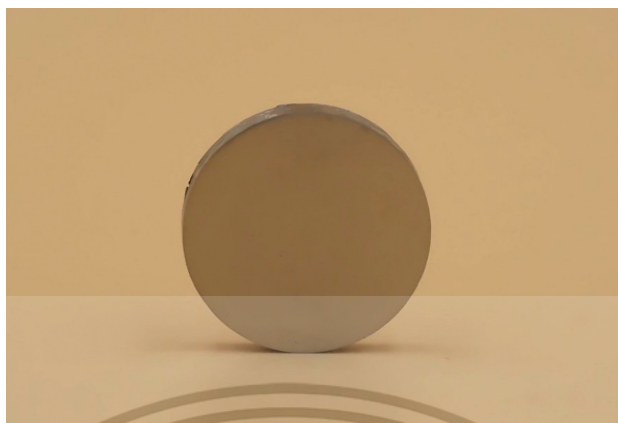
จากการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (XRD) ของตัวอย่างชนิดต่างๆ ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.1 พบว่า ตัวอย่างชิ้นงานโลหะที่ไม่เกิดสนิมหรือเหล็กกล้าคาร์บอนปานกลางชนิด S45C มีรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ที่ตรงกับกราฟมาตรฐานของอัลฟาเฟอร์ไรต์ ( $\alpha$ -ferrite; JCPDS 03-0411) ซึ่งเป็นสารละลายระหว่างของแข็งของเหล็กกับคาร์บอน สามารถละลายได้ในเหล็กที่มีระบบโครงสร้างผลึกแบบบอดี เซ็นเตอร์คิวบิก (Body Center Cubic) โดยพบพีการเลี้ยวเบนขึ้นที่ตำแหน่ง 2-Theta ที่ 44.69 และ 64.29 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเป็นชิ้นงานโลหะบริสุทธิ์ที่ไม่มีการเกิดสนิมเกิดขึ้น แต่เมื่อพิจารณารูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของชิ้นงานโลหะที่เกิดสนิมพบว่า มีพีการที่สำคัญตรงกับกราฟมาตรฐานของเหล็กออกไซด์ ( $Fe_2O_3$ ; JCPDS 02-1165) ที่ตำแหน่ง 2-Theta ที่ 35.50 ซึ่งเป็นสารประกอบทางเคมีระหว่างเหล็กและออกซิเจน เกิดเป็นลักษณะคราบสีน้ำตาลแดงบนโลหะที่เรียกว่าสนิมนั่นเอง ซึ่งบ่งชี้ได้ว่าเกิดสนิมบนชิ้นงานโลหะได้สำเร็จ

ถัดมาชิ้นงานโลหะที่เกิดสนิมที่ถูกแปลงด้วยสารแปลงสนิมกรดแทนนิกเข้มข้นร้อยละ 2 และ 5 โดยน้ำหนัก ที่ความเข้มข้นของโซเดียมโอดีเตคซิลซัลเฟตเท่ากับ 0.0026 และ 0.0060 พบว่า ทั้งสองชนิดมีพีการรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ที่สำคัญเด่นชัดตรงกับกราฟมาตรฐานของเหล็กออกไซด์ ( $FeO$ ; 01-1223) ซึ่งเป็นสารประกอบอนินทรีย์ชนิดหนึ่ง มีลักษณะเป็นผงสีดำ โดยชิ้นงานโลหะที่เกิดสนิมที่ถูกแปลงด้วยสารแปลงสนิมกรดแทนนิกเข้มข้นร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก พบพีการเลี้ยวเบนขึ้นที่ตำแหน่ง 2-Theta ที่ 36.52, 61.56 และชิ้นงานโลหะที่เกิดสนิมที่ถูกแปลงด้วยสารแปลงสนิมกรดแทนนิกเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก พบพีการเลี้ยวเบนขึ้นที่ตำแหน่ง 2-Theta ที่ 42.43, 61.56 แสดงให้เห็นว่าสารแปลงสนิมกรดแทนนิกทั้งสองความเข้มข้น สามารถทำปฏิกิริยาโดยตรงกับสนิมเหล็กได้สำเร็จ เกิดเป็นสารประกอบใหม่ที่มีลักษณะเป็นสีดำหรือน้ำเงินเกิดขึ้น ซึ่งสามารถป้องกันให้เกิดการกัดกร่อนที่น้อยลงได้ ทั้งนี้กราฟทั้งสองชนิดยังพบรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ที่ตรงกับกราฟมาตรฐานของเหล็กออกไซด์ ( $Fe_2O_3$ ; JCPDS 02-1165) ที่ตำแหน่ง 2-Theta ที่ 35.50 อีกด้วย

และเนื่องจากในขั้นตอนการทำสนิมในหัวข้อที่ 3.3.2 ของชิ้นงานโลหะ ได้มีการใช้โซเดียมคลอไรด์ในการทำสนิม ซึ่งแท้จริงแล้วควรที่จะพบพีการรูปแบบการเลี้ยวเบนของโซเดียมคลอไรด์ด้วยแต่พีการเลี้ยวเบนกลับไม่ปรากฏขึ้น มีความเป็นไปได้ว่า ในขณะที่เติมโซเดียมคลอไรด์ลงไปขั้นตอนการทำสนิมนั้น โซเดียมคลอไรด์อาจไปรวมตัวกันกับกรดแทนนิกในสารแปลงสนิม เกิดเป็นสารประกอบใหม่ของเกลือแทนนิกเกิดขึ้น เมื่อเราทาสารแปลงสนิมลงไปบนชิ้นงานโลหะที่เกิดสนิมซ้ำหลายๆรอบ อาจเกิดการชะล้างของโซเดียมคลอไรด์ละลายหายไป จึงทำให้ไม่มีโซเดียมคลอไรด์หลงเหลือหรือปรากฏอยู่ในเฟสของของแข็ง (Solid phase) เมื่อเรานำชิ้นงานโลหะที่เกิดสนิมที่ผ่านการแปลงด้วยสารแปลงสนิมที่ได้นี้ไปตรวจวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD) จึงไม่ปรากฏพีการเลี้ยวเบนของโซเดียมคลอไรด์เกิดขึ้นดังเช่นพีการเลี้ยวเบนอื่นๆที่ผ่านมา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



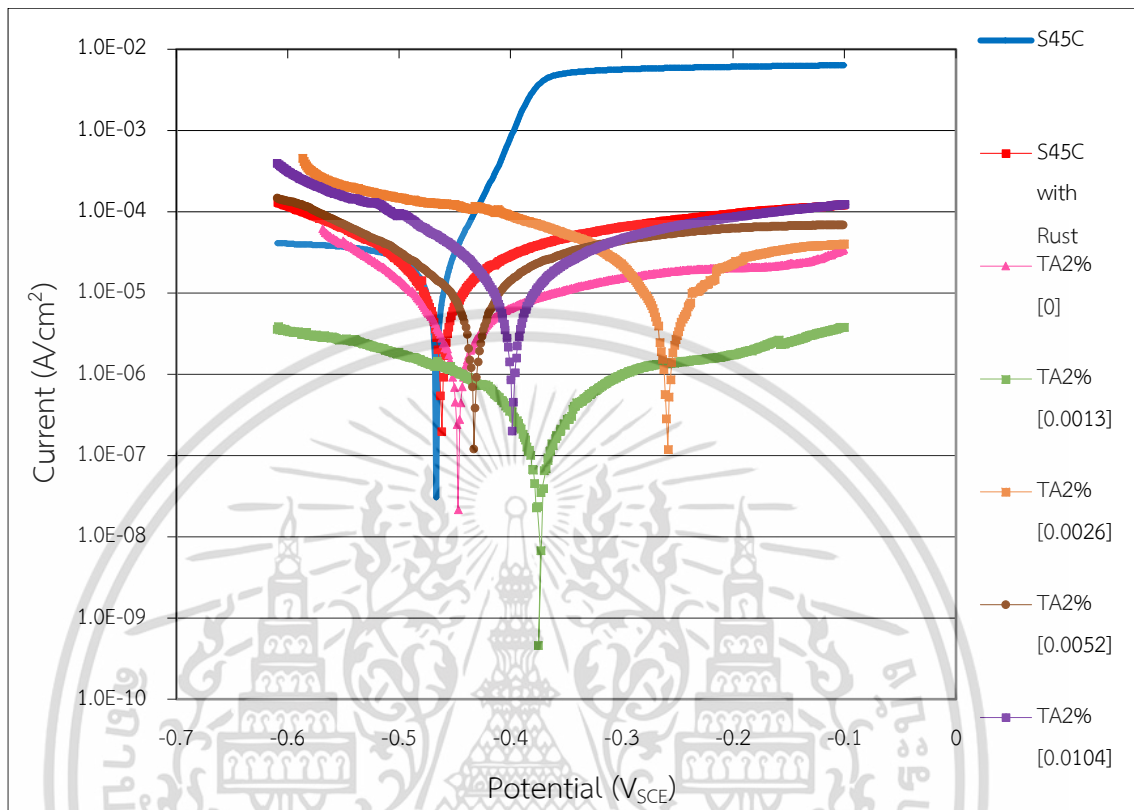
รูปที่ 4.5 ชิ้นงานโลหะที่ไม่เกิดสนิม



รูปที่ 4.6 ชิ้นงานโลหะที่เกิดสนิม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.3 การยับยั้งการกัดกร่อนของเหล็กกล้าคาร์บอนปานกลางชนิด S45C ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์เข้มข้นร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก โดยใช้สารแปลงสนิมกรดแทนนิก



รูปที่ 4.7 กราฟโพเทนชิโอไดนามิกโพลาริเซชันของชิ้นงานโลหะที่เกิดและไม่เกิดสนิม และชิ้นงานโลหะที่เกิดสนิมที่ผ่านการแปลงด้วยสารแปลงสนิมที่ประกอบด้วยกรดแทนนิกเข้มข้นร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก โดยเติมโซเดียมโดเดซิลซัลเฟต (SDS) ที่ความเข้มข้นต่างๆ และไดบิวทอกซีเอทานอลเข้มข้นร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์เข้มข้นร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก

รูปที่ 4.4 เป็นลักษณะกราฟของชิ้นงานโลหะที่เกิดสนิมที่ผ่านการแปลงด้วยสารแปลงสนิมกรดแทนนิกเข้มข้นร้อยละ 2 โดยน้ำหนักในการยับยั้งการกัดกร่อนในสารละลายโซเดียมคลอไรด์เข้มข้นร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก ซึ่งสามารถหาค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน และค่าอัตราการกัดกร่อนได้ดังแสดงในตารางที่ 4.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ตารางที่ 4.3** ผลการทดลองของชิ้นงานโลหะที่เกิดสนิมที่ผ่านการแปลงด้วยสารแปลงสนิมกรดแทนนิกเข้มข้นร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก โดยการใช้โซเดียมโตะเดคซิลซัลเฟตที่ความเข้มข้นแตกต่างกันในสารละลายโซเดียมคลอไรด์เข้มข้นร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก

ตัวอย่างชิ้นงาน	$E_{corr}$ (V <sub>SCE</sub> )	$i_{corr}$ (A/cm <sup>2</sup> )
ชิ้นงานโลหะที่ไม่เกิดสนิม	-0.464	7.80E-6
ชิ้นงานโลหะที่เกิดสนิม	-0.459	5.82E-6
TA2% [SDS 0]	-0.448	2.24E-6
TA2% [SDS 0.0013]	-0.376	2.86E-7
TA2% [SDS 0.0026]	-0.262	4.56E-6
TA2% [SDS 0.0052]	-0.433	5.13E-6
TA2% [SDS 0.0104]	-0.395	5.25E-6

จากการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากตารางที่ 4.3 ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน ( $E_{corr}$ ) ของชิ้นงานโลหะที่ไม่เกิดสนิม, เกิดสนิม และสภาวะชิ้นงานโลหะที่เกิดสนิมผ่านการแปลงด้วยสารแปลงสนิมกรดแทนนิกเข้มข้นร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก โดยมีการเติมโซเดียมโตะเดคซิลซัลเฟตที่ความเข้มข้นแตกต่างกันดังตารางที่ 4.3 พบว่า พฤติกรรมการกัดกร่อนของแต่ละชิ้นงานเกิดการเปลี่ยนแปลง เนื่องด้วยการเติมสารโซเดียมโตะเดคซิลซัลเฟตที่ความเข้มข้นต่างกัน สำหรับตัวอย่างชิ้นงานโลหะที่ไม่เกิดสนิม มีค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน ( $E_{corr}$ ) เท่ากับ  $-0.464$  V<sub>SCE</sub> และค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า ( $i_{corr}$ ) เท่ากับ  $7.80E-6$  A/cm<sup>2</sup> ส่วนตัวอย่างชิ้นงานโลหะที่เกิดสนิม จะมีค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน ( $E_{corr}$ ) เท่ากับ  $-0.460$  V<sub>SCE</sub> และค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า ( $i_{corr}$ ) มีค่าเท่ากับ  $5.82E-6$  (A/cm<sup>2</sup>) ดังนั้น เมื่อนำมาเปรียบเทียบกันจะเห็นได้ว่า ตัวอย่างชิ้นงานโลหะที่เกิดสนิมมีค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน ( $E_{corr}$ ) ที่มากกว่า และมีค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า ( $i_{corr}$ ) ที่น้อยกว่าชิ้นงานโลหะที่ไม่เกิดสนิม ซึ่งแสดงให้เห็นว่าชิ้นงานตัวอย่างโลหะที่เกิดสนิมนั้น สามารถป้องกันการกัดกร่อนของโลหะไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ได้มากกว่าชิ้นงานโลหะที่ไม่เกิดสนิม ซึ่งอาจเป็นผลมาจากการที่มีสนิมปกคลุมทั่วพื้นผิวโลหะ จึงสามารถช่วยป้องกันให้เกิดการกัดกร่อนที่น้อยลงได้

ถัดมาชิ้นงานโลหะที่เกิดสนิมที่ผ่านการแปลงด้วยสารแปลงสนิมกรดแทนนิกเข้มข้นร้อยละ 2 โดยน้ำหนักที่มีการเติมโซเดียมโตะเดคซิลซัลเฟตที่ความเข้มข้นต่างๆดังตารางที่ 4.3 พบว่า ค่าที่ได้จากกราฟมีค่าแตกต่างกันไม่มากนัก โดยเมื่อเติมโซเดียมโตะเดคซิลซัลเฟตที่ความเข้มข้นเท่ากับ 0 0.0013 และ 0.0026 พบว่า ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน ( $E_{corr}$ ) มีค่าเป็นบวกเพิ่มขึ้นตามลำดับ อีกทั้งยังส่งผลให้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน ( $i_{corr}$ ) มีค่าลดลงอีกด้วย ซึ่งแสดงให้เห็นว่า การใช้สารแปลงสนิมกรดแทนนิกเข้มข้นร้อยละ 2 โดยน้ำหนักนี้ สามารถลดการเกิดการกัดกร่อนที่น้อยลงได้ [43] อันเนื่องมาจากการเพิ่มความเข้มข้นของโซเดียมโตะเดคซิลซัลเฟตที่สามารถช่วยลดแรงดึงผิวระหว่างสารแปลงสนิมกับรูพรุนของสนิม ทำให้สารแปลงสนิมสามารถแทรกซึมเข้าไปยังรูพรุนของสนิมได้ง่าย ส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาการแปลงสนิมจากไอออน (III) ออกไซด์ ( $Fe_2O_3$ ) หรือสนิม เพื่อเปลี่ยนเป็นสารประกอบไอออน (II) ออกไซด์ ( $FeO$ ) หรือ  $Fe_3O_4$  ได้ดียิ่งขึ้น มีลักษณะเป็นสีดำหรือสีน้ำเงิน

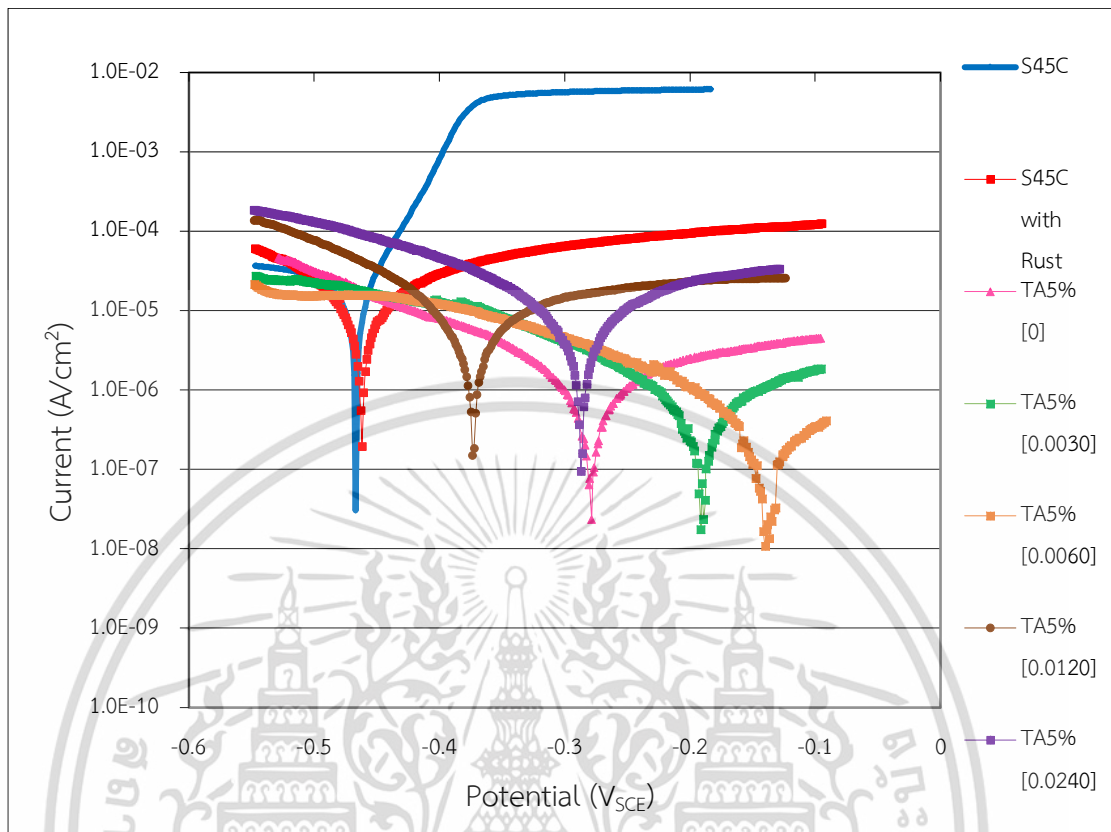
แต่เมื่อพิจารณาที่กราฟโพเทนชิโอไดนามิกของชิ้นงานโลหะที่เกิดสนิมที่ผ่านการแปลงด้วยสารแปลงสนิมกรดแทนนิกที่มีการเติมโซเดียมโตะเดคซิลซัลเฟตที่ความเข้มข้นเท่ากับ 0.0052 และ 0.0104 พบว่ามีค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน ( $E_{corr}$ ) น้อยลงและมีค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน ( $i_{corr}$ ) ที่สูงขึ้นเมื่อเทียบกับชิ้นงานโลหะที่เกิดสนิมที่ผ่านการแปลงด้วยสารแปลงสนิมที่เติมสารโซเดียมโตะเดคซิลซัลเฟตที่ความเข้มข้นอื่นที่ผ่านมา (0 0.0013 และ 0.0026) ทั้งนี้ เนื่องจากการเพิ่มความเข้มข้นของโซเดียมโตะเดคซิลซัลเฟตที่มากเกินไปที่ประกอบไปด้วยโซเดียมอยู่เป็นจำนวนมากนั้น จำนวนโซเดียมที่มากเกินไป อาจเป็นไปได้ว่า โซเดียมจะเกิดการแย่งชิงกับเหล็กในการจับตัวกับกรดแทนนิกในสารแปลงสนิม ซึ่งปกติแล้วเหล็กจะทำหน้าที่ยึดจับกับออกซิเจนในโครงสร้างของแทนนิกในปฏิกิริยาการแปลงสนิมแล้วจึงเกิดเป็นสารประกอบใหม่ที่เสถียร มีลักษณะของฟิล์มที่หนาและแข็งแรง แต่เมื่อมีโซเดียมมาแย่งจับกับออกซิเจนในโครงสร้างของกรดแทนนิกในสารแปลงสนิมนั้น ทำให้สารประกอบใหม่ที่ม่มีลักษณะของฟิล์มที่บางและไม่แข็งแรง โดยที่จำนวนครั้งในการทาสารแปลงสนิมลงบนชิ้นงานโลหะที่เกิดสนิมก็มีผลต่อการเกิดลักษณะฟิล์มด้วยเช่นกัน เมื่อเราทาสารแปลงสนิมลงบนชิ้นงานซ้ำลงไปหลายๆรอบ อาจทำให้เกิดการชะล้างสารแปลงสนิมที่ได้ทำการทาลงไปก่อนหน้านี้ การเกิดฟิล์มที่ได้จึงมีลักษณะที่บางลงเรื่อยๆ และเหล็กก็จะเกิดการลอยตัวสูงขึ้นเรื่อยๆจากผิวของชิ้นงาน โดยลักษณะของฟิล์มจะส่งผลต่อค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน ( $E_{corr}$ ) และค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน ( $i_{corr}$ ) กล่าวคือ หากมีการเติมโซเดียมโตะเดคซิลซัลเฟตที่ประกอบด้วยโซเดียมอยู่เป็นจำนวนมากลงไปในสารแปลงสนิมกรดแทนนิก โซเดียมจะทำหน้าที่แย่งจับกับออกซิเจนในโครงสร้างของแทนนิกในปฏิกิริยาการแปลงสนิม เกิดเป็นลักษณะฟิล์มที่บาง และจะบางลงเรื่อยๆเมื่อมีการทาสารแปลงสนิมลงบนชิ้นงานโลหะที่เกิดสนิมซ้ำหลายๆครั้ง เหล็กที่มีอยู่ก็จะเกิด

การลอยตัวสูงขึ้นเรื่อยๆจากผิวของชิ้นงานเช่นกัน ซึ่งฟิล์มที่มีลักษณะบางนี้ จะทำให้ค่าศักย์ไฟฟ้า-การกัดกร่อน ( $E_{\text{corr}}$ ) ที่ได้มีค่าลดลงหรือเลื่อนไปทางซ้ายมากขึ้น ค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน ( $i_{\text{corr}}$ ) ที่ได้ก็จะมีค่าเพิ่มขึ้น จึงนำไปสู่การเกิดการกัดกร่อนที่เพิ่มมากขึ้นนั่นเอง



**รูปที่ 4.8** ชิ้นงานโลหะที่เกิดสนิมที่ผ่านการแปลงด้วยสารแปลงสนิมกรดแทนนิกเข้มข้นร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก โดยมีโซเดียมโดเดคซิลที่ความเข้มข้นแตกต่างกัน หลังทำการทดลองในสารละลายโซเดียมคลอไรด์เข้มข้นร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก (a) TA2% [SDS 0] (b) TA2% [SDS 0.0013] (c) TA2% [SDS 0.0026] (d) TA2% [SDS 0.0052] (e) TA2% [SDS 0.0104]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.9 กราฟโพเทนชิโอไดนามิกโพลาริเซชันของชิ้นงานโลหะที่เกิดและไม่เกิดสนิม และชิ้นงานโลหะที่เกิดสนิมที่ผ่านการแปลงด้วยสารแปลงสนิมที่ประกอบด้วยกรดแทนนิกเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก โดยเติมโซเดียมโดเดคซิลซัลเฟต (SDS) ที่ความเข้มข้นต่างๆ และไดบิวทอกซีเอทานอลเข้มข้นร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์เข้มข้นร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก

รูปที่ 4.6 เป็นลักษณะกราฟของชิ้นงานโลหะที่เกิดสนิมที่ผ่านการแปลงด้วยสารแปลงสนิมกรดแทนนิกเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนักในการยับยั้งการกัดกร่อนในสารละลายโซเดียมคลอไรด์เข้มข้นร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก ซึ่งสามารถหาค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน และค่าอัตราการกัดกร่อนได้ดังแสดงในตารางที่ 4.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ตารางที่ 4.4** ผลการทดลองของชิ้นงานโลหะที่เกิดสนิมที่ผ่านการแปลงด้วยสารแปลงสนิมกรดแทน-นิก เข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก โดยการใช้โซเดียมโอดีเคซิลซัลเฟตที่ความเข้มข้นแตกต่างกันในสารละลายโซเดียมคลอไรด์เข้มข้นร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก

ตัวอย่างชิ้นงาน	$E_{corr}$ (V <sub>SCE</sub> )	$i_{corr}$ (A/cm <sup>2</sup> )
ชิ้นงานโลหะที่ไม่เกิดสนิม	-0.464	7.80E-6
ชิ้นงานโลหะที่เกิดสนิม	-0.459	5.82E-6
TA5% [SDS 0]	-0.272	5.03E-7
TA5% [SDS 0.0030]	-0.189	4.84E-7
TA5% [SDS 0.0060]	-0.117	4.03E-7
TA5% [SDS 0.0120]	-0.376	5.50E-6
TA5% [SDS 0.0240]	-0.289	5.60E-6

จากการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากตารางที่ 4.4 ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน ( $E_{corr}$ ) ของชิ้นงานโลหะในสถานะที่ไม่เกิดสนิม, เกิดสนิม และสถานะที่ชิ้นงานโลหะที่เกิดสนิมผ่านการแปลงด้วยสารแปลงสนิมกรดแทนนิกเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ที่มีการเติมโซเดียมโอดีเคซิลซัลเฟตที่ความเข้มข้นแตกต่างกันดังตารางที่ 4.4 สังเกตได้ว่า ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน ( $E_{corr}$ ) ของชิ้นงานโลหะที่เกิดสนิม (-0.459 V<sub>SCE</sub>) มีค่าเป็นบวกมากกว่าชิ้นงานโลหะที่ไม่เกิดสนิม (-0.464 V<sub>SCE</sub>) อีกทั้งค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน ( $i_{corr}$ ) ของชิ้นงานโลหะที่เกิดสนิม (5.82E-6 A/cm<sup>2</sup>) ยังมีค่าน้อยกว่าชิ้นงานโลหะที่ไม่เกิดสนิม (7.80E-6 A/cm<sup>2</sup>) อีกด้วย ซึ่งบ่งชี้ได้ว่าแนวโน้มการกัดกร่อนของชิ้นงานโลหะที่เกิดสนิมจะมีค่าลดลง สันนิษฐานได้ว่าเป็นผลมาจากชั้นของสนิมที่เกิดการปกคลุมไปทั่วพื้นผิวโลหะ สามารถลดการเกิดการกัดกร่อนที่น้อยลงได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถัดมาชิ้นงานโลหะที่เกิดสนิมที่ผ่านการแปลงด้วยสารแปลงสนิมกรดแทนนิกเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนักที่มีการเติมโซเดียมโตะเดคซิลซัลเฟตที่ความเข้มข้นต่างๆดังตารางที่ 4.4 พบว่าค่าที่ได้จากแต่ละกราฟมีค่าแตกต่างกันไม่มากนัก เช่นเดียวกับการแปลงด้วยสารแปลงสนิมกรดแทนนิกเข้มข้นร้อยละ 2 โดยน้ำหนักข้างต้น ซึ่งชิ้นงานโลหะที่เกิดสนิมที่ผ่านการแปลงด้วยสารแปลงสนิมกรดแทนนิกเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ที่มีการเติมโซเดียมโตะเดคซิลซัลเฟตที่ความเข้มข้นเท่ากับ 0.0030 และ 0.0060 พบว่า ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน ( $E_{corr}$ ) มีค่าเป็นบวกเพิ่มมากขึ้นตามลำดับ อีกทั้งยังส่งผลให้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน ( $i_{corr}$ ) มีค่าลดลงตามไปอีกด้วย แสดงให้เห็นว่าสารแปลงสนิมกรดแทนนิกเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนักนี้ สามารถลดการเกิดการกัดกร่อนที่น้อยลงได้ [43] อันเนื่องมาจากการเพิ่มความเข้มข้นของโซเดียมโตะเดคซิลซัลเฟตที่สามารถช่วยลดแรงดึงผิวระหว่างสารแปลงสนิมกับรูพรุนของสนิม ทำให้สารแปลงสนิมสามารถแทรกซึมเข้าไปยังรูพรุนของสนิมได้ง่าย ส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาการแปลงสนิมจากไอออน (III) ออกไซด์ ( $Fe_2O_3$ ) หรือสนิม เพื่อเปลี่ยนเป็นสารประกอบไอออน (II) ออกไซด์ ( $FeO$ ) หรือ  $Fe_3O_4$  ได้ดียิ่งขึ้น มีลักษณะเป็นสีดำหรือสีน้ำเงิน เช่นเดียวกับสารแปลงสนิมกรดแทนนิกเข้มข้นร้อยละ 2 โดยน้ำหนักข้างต้น

แต่เมื่อพิจารณาที่กราฟโพเทนชิโอไดนามิกของชิ้นงานโลหะที่เกิดสนิมที่ผ่านการแปลงด้วยสารแปลงสนิมที่มีการเติมโซเดียมโตะเดคซิลซัลเฟตที่ความเข้มข้นเท่ากับ 0.0120 และ 0.0240 พบว่า ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนที่ได้ ( $E_{corr}$ ) มีค่าลดลงและมีค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน ( $i_{corr}$ ) ที่สูงขึ้นเมื่อเทียบกับชิ้นงานโลหะที่เกิดสนิมที่ถูกแปลงด้วยสารแปลงสนิมที่ความเข้มข้นของโซเดียมโตะเดคซิลซัลเฟตอื่นที่ผ่านมา (0.0030 และ 0.0060) ทั้งนี้ เนื่องจากการเพิ่มความเข้มข้นของโซเดียมโตะเดคซิลซัลเฟตที่มากเกินไปที่ประกอบไปด้วยโซเดียมอยู่เป็นจำนวนมากนั้น จำนวนโซเดียมที่มากเกินไป อาจเป็นไปได้ว่า โซเดียมจะเกิดการแย่งชิงกับเหล็กในการจับตัวกับกรดแทนนิกในสารแปลงสนิม ซึ่งปกติแล้วเหล็กจะทำหน้าที่ยึดจับกับออกซิเจนในโครงสร้างของแทนนิกในปฏิกิริยาการแปลงสนิมแล้วจึงเกิดเป็นสารประกอบใหม่ที่เสถียร มีลักษณะของฟิล์มที่หนาและแข็งแรง แต่เมื่อมีโซเดียมมาแย่งจับกับออกซิเจนในโครงสร้างของกรดแทนนิกในสารแปลงสนิมนั้น ทำให้สารประกอบใหม่ที่ไม่มีลักษณะของฟิล์มที่บางและไม่แข็งแรง โดยที่จำนวนครั้งในการทาสารแปลงสนิมลงบนชิ้นงานโลหะที่เกิดสนิมก็มีผลต่อการเกิดลักษณะฟิล์มด้วยเช่นกัน เมื่อเราทาสารแปลงสนิมลงบนชิ้นงานซ้ำลงไปหลายๆรอบ อาจทำให้เกิดการชะล้างสารแปลงสนิมที่ได้ทำการทาลงไปก่อนหน้านี้ การเกิดฟิล์มที่ได้จึงมีลักษณะที่บางลงเรื่อยๆ และเหล็กก็จะเกิดการลอยตัวสูงขึ้นเรื่อยๆจากผิวของชิ้นงาน โดยลักษณะของฟิล์มจะส่งผลต่อค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน ( $E_{corr}$ ) และค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน ( $i_{corr}$ ) กล่าวคือ หากมีการเติมโซเดียมโตะเดคซิลซัลเฟตที่ประกอบด้วยโซเดียมอยู่เป็นจำนวนมากลงไปในสารแปลงสนิมกรดแทนนิก โซเดียมจะทำหน้าที่แย่งจับกับออกซิเจนในโครงสร้างของแทนนิกในปฏิกิริยาการแปลงสนิม เกิดเป็นลักษณะฟิล์มที่บาง และจะบางลงเรื่อยๆเมื่อมีการทาสารแปลงสนิมลงบนชิ้นงานโลหะที่เกิดสนิมซ้ำหลายๆครั้ง เหล็กที่มีอยู่ก็จะเกิดการลอยตัวสูงขึ้นเรื่อยๆจากผิวของชิ้นงานเช่นกัน ซึ่งฟิล์มที่มีลักษณะบางนี้ จะทำให้ค่าศักย์ไฟฟ้าการ

กัดกร่อน ( $E_{corr}$ ) ที่ได้มีค่าลดลงหรือเลื่อนไปทางซ้ายมากขึ้น ค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน ( $i_{corr}$ ) ที่ได้ก็จะมีค่าเพิ่มขึ้น จึงนำไปสู่การเกิดการกัดกร่อนที่เพิ่มมากขึ้นนั่นเอง เช่นเดียวกับสารแปลงสัณนิกรทดแทนนิกเขมข้นร้อยละ 2 โดยน้ำหนักที่ผ่านมา



รูปที่ 4.10 ชิ้นงานโลหะที่เกิดสนิมที่ผ่านการแปลงด้วยสารแปลงสัณนิกรทดแทนนิกเขมข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก โดยมีโซเดียมโดเดคซิลที่ความเข้มข้นแตกต่างกัน หลังทำการทดลองในสารละลายโซเดียมคลอไรด์เข้มข้นร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก (a) TA5% [0] (b) TA5% [SDS 0.0030] (c) TA5% [SDS 0.0060] (d) TA5% [SDS 0.0120] (e) TA5% [SDS 0.0240]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.4 การทดสอบความสามารถในการเปียกผิวของวัสดุและมุมสัมผัส (Wettability and contact angle test)

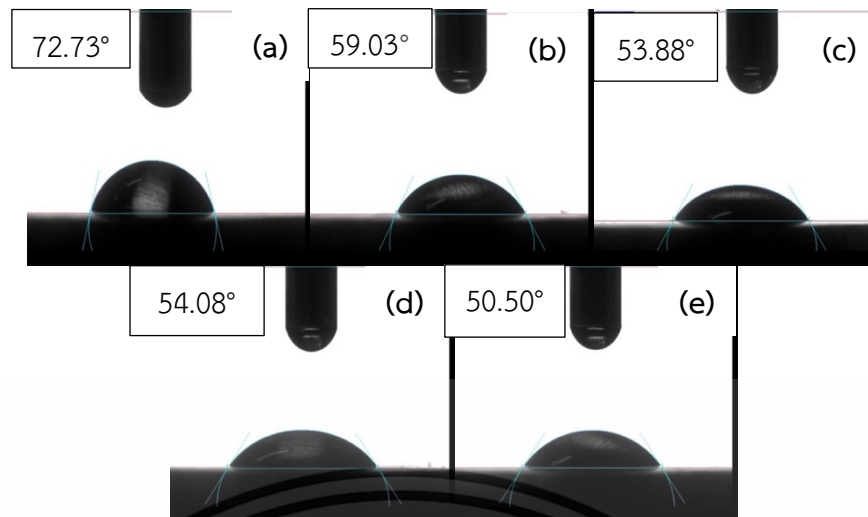
ได้ทำการศึกษาสมบัติการเปียกของผิววัสดุของชิ้นงานโลหะที่เกิดสนิมโดยการนำไปวัดค่ามุมสัมผัส (Contact angle) เพื่อทำการเปรียบเทียบความสามารถในการกระจายตัวของของเหลวบนพื้นผิวของของแข็งและการเปียกผิวของวัสดุของสารแปลงสนิมแต่ละชุด ที่มีความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวโซเดียมโดเดคซิลซัลเฟตที่แตกต่างกัน โดยค่ามุมสัมผัสของสารแปลงสนิมชุดที่ 1 ที่ประกอบด้วยกรดแทนนิกเข้มข้นร้อยละ 2 โดยน้ำหนักและไดบิวทอกซีเอทานอลเข้มข้นร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก แสดงดังตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 ค่ามุมสัมผัสของสารแปลงสนิมชุดที่ 1 ที่ความเข้มข้นของโซเดียมโดเดคซิลซัลเฟตแตกต่างกัน

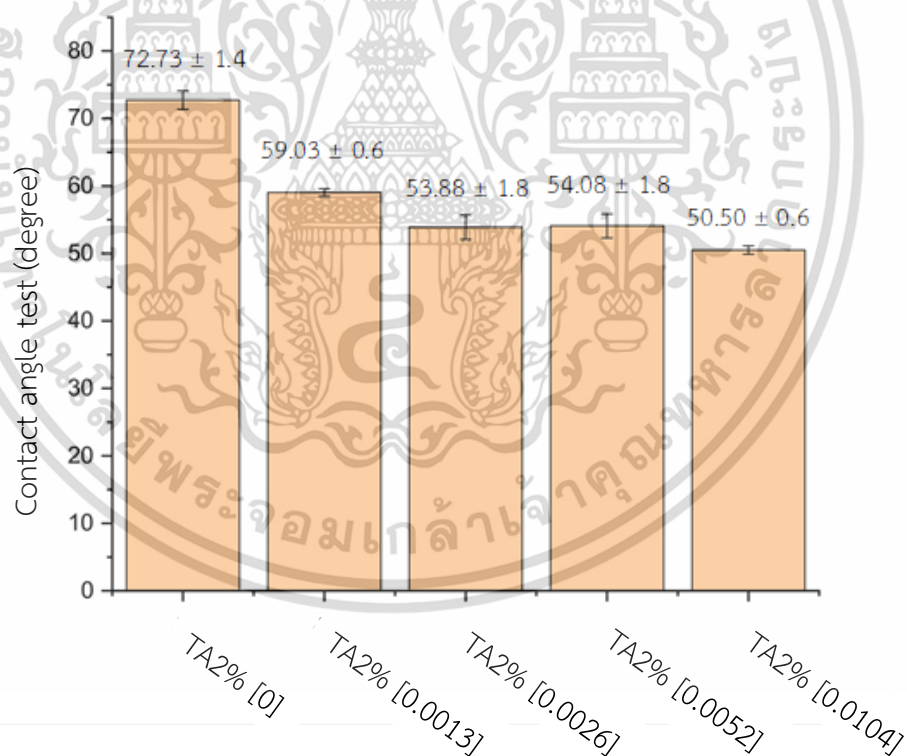
ตัวอย่าง	ค่ามุมสัมผัส $\pm$ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (องศา)
TA 2%	72.73 $\pm$ 1.4
TA 2% [SDS 0.0013]	59.03 $\pm$ 0.6
TA 2% [SDS 0.0026]	53.88 $\pm$ 1.8
TA 2% [SDS 0.0052]	54.08 $\pm$ 1.8
TA 2% [SDS 0.0104]	50.50 $\pm$ 0.6

จากการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากตารางที่ 4.5 พบว่า ค่ามุมสัมผัสที่วัดได้จากสารแปลงสนิมชุดที่ 1 ที่ประกอบด้วยกรดแทนนิกเข้มข้นร้อยละ 2 โดยน้ำหนักและไดบิวทอกซีเอทานอลเข้มข้นร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก โดยมีโซเดียมโดเดคซิลซัลเฟตที่ความเข้มข้นแตกต่างกัน ค่ามุมสัมผัสที่ได้มีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 90 องศา แสดงให้เห็นว่า สารแปลงสนิมเกิดการกระจายตัวบนชิ้นงานโลหะที่เกิดสนิมทำให้เกิดการเปียกผิววัสดุได้ดี อันเป็นผลมาจากโซเดียมโดเดคซิลซัลเฟตที่สามารถลดแรงตึงผิวระหว่างสารแปลงสนิมและรูพรุนของสนิม ส่งผลให้ปฏิกิริยาการแปลงสนิมเกิดได้ดียิ่งขึ้น มีคุณสมบัติชอบน้ำ (Hydrophilic) [35] โดยที่ของเหลวจะกระจายไปบนผิวได้เป็นบริเวณกว้าง แต่ก็ยังคงเกาะกันเป็นหยดบนชิ้นเล็กน้อยกว่าผิวของของแข็ง ซึ่งรูปหยดสารแปลงสนิมชุดที่ 1 บนชิ้นงานโลหะแสดงดังรูปที่ 4.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.11 ภาพหดยดสารแปลงสนิมของสารแปลงสนิมกรดแทนนิกเข้มข้นร้อยละ 2 โดยน้ำหนักบน  
ชิ้นงานโลหะ ที่ความเข้มข้นของโซเดียมโดเดคซิลซัลเฟตแตกต่างกัน (a) TA2% [SDS 0] (b) TA2%  
[SDS 0.0013] (c) TA2% [SDS 0.0026] (d) TA2% [SDS 0.0052] (e) TA2% [SDS 0.0104]



รูปที่ 4.12 แผนภูมิระหว่างค่ามุมสัมผัสของสารแปลงสนิมกรดแทนนิกที่ความเข้มข้นร้อยละ 2 โดย  
น้ำหนักบนชิ้นงานโลหะ และความเข้มข้นของโซเดียมโดเดคซิลซัลเฟตที่แตกต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

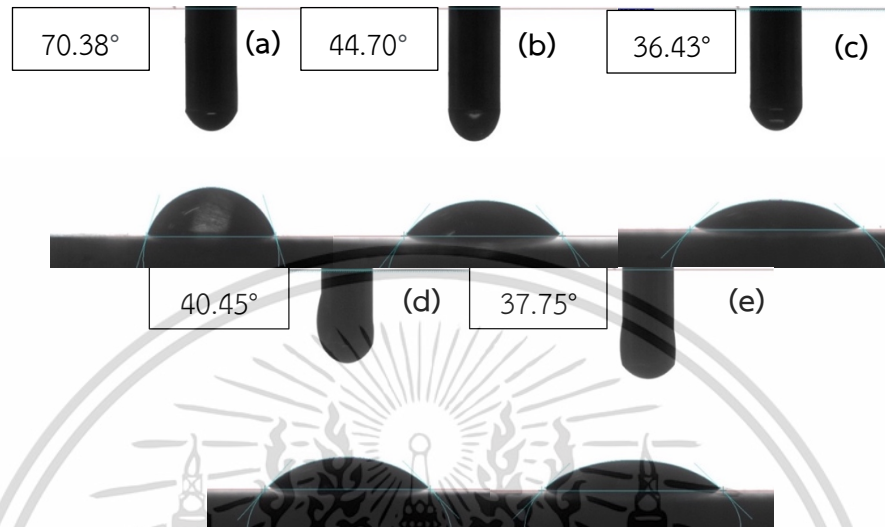
เมื่อพิจารณาแผนภูมิดังรูปที่ 4.9 พบว่า เมื่อมีการเพิ่มความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวโซเดียมโดเดซิลซัลเฟตที่เพิ่มขึ้นในสารแปลงสนิมชุดที่ 1 ที่ประกอบด้วยกรดแทนนิกเข้มข้นร้อยละ 2 โดยน้ำหนักและไดบิวทอกซีเอทานอลร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก ส่งผลให้ค่ามูสมัมผัสที่ได้มีค่าลดลงซึ่งมีค่าเท่ากับ  $72.73 \pm 1.4$ ,  $59.03 \pm 0.6$ ,  $53.88 \pm 1.8$ ,  $54.08 \pm 1.8$  และ  $50.50 \pm 0.6$  ตามลำดับ โดยที่ค่ามูสมัมผัสจะบอกถึงแนวโน้มที่หยดของของเหลวกระจายตัวบนพื้นผิวเรียบของของแข็ง ซึ่งแปรผกผันกับความสามารถในการกระจายตัวของของเหลวและการเปียกผิวของวัสดุ [35] จากข้อมูลสามารถวิเคราะห์ได้ว่า เมื่อมูสมัมผัสที่ได้มีค่าลดลง จะทำให้การกระจายตัวของของเหลวหรือสารแปลงสนิมมีค่าเพิ่มขึ้น ส่งผลให้เกิดการเปียกผิวบนวัสดุที่ดีขึ้นตามไปด้วย จึงเกิดการแปลงสนิมที่ดีครอบคลุมทั่วทั้งหมดของพื้นผิวชิ้นงานโลหะที่เกิดสนิม การกัดกร่อนที่ได้จึงมีค่าลดลง และในทางกลับกัน หากค่ามูสมัมผัสที่ได้มีค่าเพิ่มขึ้น ก็จะส่งผลให้การกระจายตัวของของเหลวหรือสารแปลงสนิมมีค่าลดลง ทำให้เกิดการเปียกผิวบนวัสดุที่แย่ลง เกิดการแปลงสนิมที่ไม่ครอบคลุมทั่วทั้งหมดของพื้นผิวชิ้นงานโลหะที่เกิดสนิม นำไปสู่การกัดกร่อนที่เพิ่มขึ้นนั่นเอง

ตารางที่ 4.6 ค่ามูสมัมผัสของสารแปลงสนิมชุดที่ 2 ที่ความเข้มข้นของโซเดียมโดเดซิลซัลเฟตแตกต่างกัน

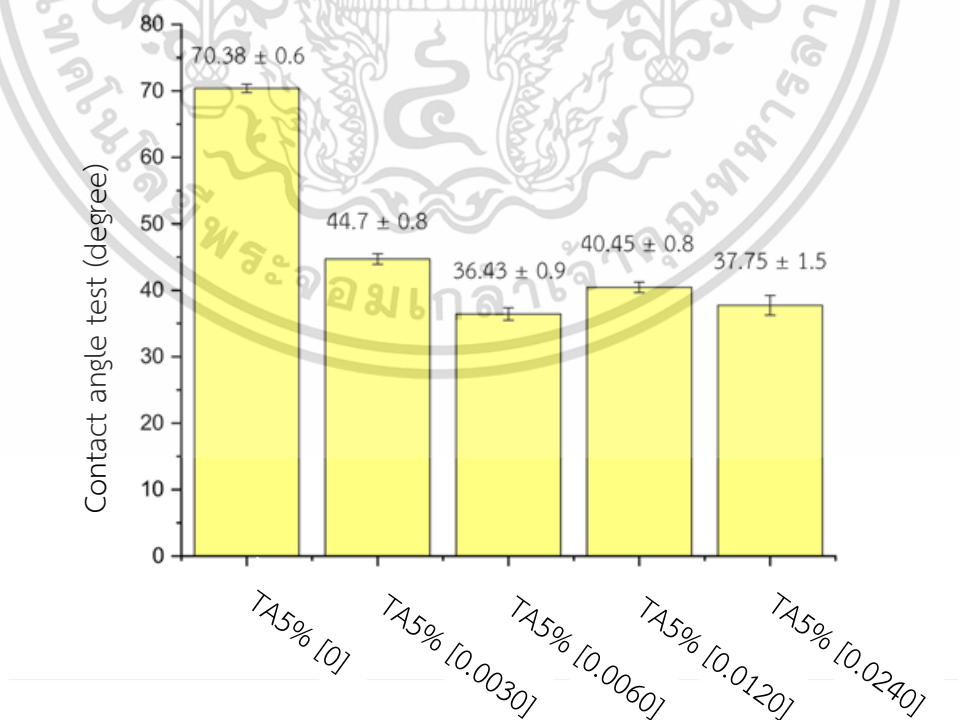
ตัวอย่าง	ค่ามูสมัมผัส $\pm$ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (องศา)
TA 5%	$70.38 \pm 0.6$
TA 5% [SDS 0.0030]	$44.7 \pm 0.8$
TA 5% [SDS 0.0060]	$36.43 \pm 0.9$
TA 5% [SDS 0.0120]	$40.45 \pm 0.8$
TA 5% [SDS 0.0240]	$37.75 \pm 1.5$

จากการวิเคราะห์ที่ได้จากตารางที่ 4.6 พบว่า ค่ามูสมัมผัสที่วัดได้จากสารแปลงสนิมชุดที่ 2 ที่ประกอบด้วยกรดแทนนิกเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนักและไดบิวทอกซีเอทานอลเข้มข้นร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก โดยมีโซเดียมโดเดซิลซัลเฟตที่ความเข้มข้นแตกต่างกัน ค่ามูสมัมผัสที่ได้มีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 90 องศา แสดงให้เห็นว่า สารแปลงสนิมเกิดการกระจายตัวบนชิ้นงานโลหะ ทำให้เกิดการเปียกผิววัสดุได้ดี อันเป็นผลมาจากโซเดียมโดเดซิลซัลเฟตที่สามารถลดแรงตึงผิวระหว่างสารแปลงสนิมและรูพรุนของสนิม ส่งผลให้ปฏิกิริยาการแปลงสนิมเกิดได้ดียิ่งขึ้น มีคุณสมบัติชอบน้ำ (Hydrophilic) [35] โดยที่ของเหลวจะกระจายไปบนผิวได้เป็นบริเวณกว้าง แต่ก็ยังคงเกาะกันเป็นหยดบนชิ้นไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เล็กน้อยจากผิวของของแข็ง เช่นเดียวกับสารแปลงสนิมชุดที่ 1 ดังกล่าวข้างต้น ซึ่งรูปหดยดสารแปลงสนิมชุดที่ 2 บนชิ้นงานโลหะ แสดงดังรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.13 ภาพหดยดสารแปลงสนิมของสารแปลงสนิมกรดแทนนิกเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก บนชิ้นงานโลหะ ที่ความเข้มข้นของโซเดียมโดเดคซิลซัลเฟตแตกต่างกัน (a) TA5% (b) TA5% [SDS 0.0030] (c) TA5% [SDS 0.0060] (d) TA5% [SDS 0.0120] (e) TA5% [SDS 0.0240]



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
รูปที่ 4.14 แผนภูมิระหวางคามัมสัมพันธ์ของสารแปลงสนิมกรดแทนนิกที่ความเข้มข้นร้อยละ 5 โดย  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้  
นำหนักบนชิ้นงานโลหะ และความเข้มข้นของโซเดียมโดเดคซิลซัลเฟตที่แตกต่างกัน

และเมื่อพิจารณาแผนภูมิดังรูปที่ 4.11 พบว่า เมื่อมีการเพิ่มความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวโซเดียมโดเดซิลซัลเฟตที่เพิ่มขึ้นในสารแปลงสนิมชุดที่ 2 ที่ประกอบด้วยกรดแทนนิกเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนักและไดปิวทอกซีเอทานอลร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก ส่งผลให้ค่ามูสมัมผัสที่ได้มีค่าลดลง ซึ่งมีค่าเท่ากับ  $70.38 \pm 0.6$ ,  $44.70 \pm 0.8$ ,  $36.43 \pm 0.9$ ,  $40.45 \pm 0.8$  และ  $37.75 \pm 1.5$  ตามลำดับ โดยที่ค่ามูสมัมผัสจะบอกถึงแนวโน้มที่หยดของของเหลวกระจายตัวบนพื้นผิวเรียบของของแข็ง ซึ่งแปรผกผันกับความสามารถในการกระจายตัวของของเหลวและการเปียกผิวของวัสดุ [35] จากข้อมูลสามารถวิเคราะห์ได้ว่า เมื่อมูสมัมผัสที่ได้มีค่าลดลง จะทำให้การกระจายตัวของของเหลวหรือสารแปลงสนิมมีค่าเพิ่มขึ้น ส่งผลให้เกิดการเปียกผิวบนวัสดุที่ดีขึ้นตามไปด้วย จึงเกิดการแปลงสนิมที่ดีครอบคลุมทั่วทั้งหมดของพื้นผิวชิ้นงานโลหะที่เกิดสนิม การกัดกร่อนที่ได้จึงมีค่าลดลง และในทางกลับกัน หากค่ามูสมัมผัสที่ได้มีค่าเพิ่มขึ้น ก็จะส่งผลให้การกระจายตัวของของเหลวหรือสารแปลงสนิมมีค่าลดลง ทำให้เกิดการเปียกผิวบนวัสดุที่แย่ลง เกิดการแปลงสนิมที่ไม่ครอบคลุมทั่วทั้งหมดของพื้นผิวชิ้นงานโลหะที่เกิดสนิม จึงนำไปสู่การกัดกร่อนที่เพิ่มขึ้น เช่นเดียวกับกับสารแปลงสนิมชุดที่ 1 ดังกล่าวข้างต้น

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาการแปลงสนิมเหล็กกล้าคาร์บอนปานกลางชนิด S45C ด้วยสารแปลงสนิมกรดแทนนิกเข้มข้นร้อยละ 2 และ 5 โดยน้ำหนัก ที่มีการเติมสารลดแรงตึงผิวประจุลบโซเดียมโตะเดซิลซัลเฟตที่ความเข้มข้นต่างๆ และไดบิวทอกซีเอทานอลเข้มข้นร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก สามารถสรุปผลได้ดังนี้

- 1) การแปลงชิ้นงานโลหะที่เกิดสนิมด้วยสารแปลงสนิมกรดแทนนิกที่ความเข้มข้นร้อยละ 2 และ 5 โดยน้ำหนัก สามารถรักษาสนิมของโลหะที่เกิดจากการกัดกร่อนโดยธรรมชาติได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยการทำปฏิกิริยาการแปลงสนิมจากไอออน (III) ออกไซด์ ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) เพื่อเปลี่ยนเป็นสารประกอบใหม่ของไอออน (II) ออกไซด์ ( $\text{FeO}$ ) หรือ  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  มีลักษณะเป็นสีดำหรือสีน้ำเงิน
- 2) การเติมสารลดแรงตึงผิวประจุลบโซเดียมโตะเดซิลซัลเฟตในสารแปลงสนิมกรดแทนนิกทั้งสองความเข้มข้น ช่วยให้สารแปลงสนิมเกิดการแปลงสนิมได้ดียิ่งขึ้น เนื่องมาจากการลดแรงตึงผิวของสารระหว่างเกิดปฏิกิริยา จะเห็นได้ว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของโซเดียมโตะเดซิลซัลเฟต จะทำให้สารแปลงสนิมสามารถแทรกซึมเข้าไปยังรูพรุนของสนิมได้ง่ายขึ้น เกิดการแปลงสนิมที่ดีมากยิ่งขึ้น ส่งผลให้ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนที่ได้มีค่าเป็นบวกที่เพิ่มขึ้น อีกทั้งยังส่งผลให้ค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนมีค่าลดลงตามไปอีกด้วย เมื่อเทียบกับชิ้นงานโลหะที่เกิดสนิมที่ไม่มีการแปลงด้วยสารแปลงสนิม
- 3) การเติมสารลดแรงตึงผิวประจุลบโซเดียมโตะเดซิลซัลเฟตลงในสารแปลงสนิม จะทำให้มุมสัมผัสที่ได้มีค่าเปลี่ยนแปลงไป โดยค่ามุมสัมผัสที่ได้จะแปรผกผันกับการกระจายตัวของของเหลวและการเปียกผิวของวัสดุ กล่าวคือ เมื่อมุมสัมผัสที่ได้มีค่าลดลง จะทำให้การกระจายตัวของของเหลวหรือสารแปลงสนิมมีค่าเพิ่มขึ้น ส่งผลให้เกิดการเปียกผิวบนวัสดุที่ดีขึ้นตามไปด้วย จึงเกิดการแปลงสนิมที่ดีครอบคลุมทั่วทั้งหมดของพื้นผิวชิ้นงานโลหะที่เกิดสนิม การกัดกร่อนที่ได้จึงมีค่าลดลง และในทางกลับกัน หากค่ามุมสัมผัสที่ได้มีค่าเพิ่มขึ้น ก็จะทำให้การกระจายตัวของของเหลวหรือสารแปลงสนิมมีค่าลดลง ทำให้เกิดการเปียกผิวบนวัสดุที่แย่งลง เกิดการแปลงสนิมที่ไม่ครอบคลุมทั่วทั้งหมดของพื้นผิวชิ้นงานโลหะที่เกิดสนิม จึงนำไปสู่การกัดกร่อนที่เพิ่มขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

ควรทำการทดลองเพื่อศึกษาความสามารถในการแปลงสปีมของชิ้นงานโลหะในการป้องกันการกัดกร่อนในสภาวะอื่นๆให้หลากหลายมากขึ้น รวมถึงการใช้สารลดแรงตึงผิวชนิดอื่นๆร่วมด้วย พร้อมทั้งพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิคต่างๆที่เพิ่มขึ้น เพื่อที่จะสามารถนำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์ให้ได้ผลการทดลองที่ละเอียด แม่นยำและครอบคลุมมากยิ่งขึ้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

- [1] M. Esmaily, J.E. Svensson, S. Fajardo, N. Birbilis, G.S. Frankel, S. Virtanen, R. Arrabal, S. Thomas and L.G. Johansson 2017. “Fundamentals advances in magnesium alloy corrosion.” *Progress in Materials Science*. 89 : 92-193.
- [2] A. Aditharajan, N. Radhika and B. Saleh. 2022. “Recent advances and challenges associated with thin film coatings of cutting tools: A critical review.” *Transactions of the IMF*.
- [3] R. Fathi, H. Wei, B. Saleh, N. Radhika, J. Jiang, A. Ma, M.H. Ahmed, Q. Li and K.K. Ostrikov. 2023. “Past and present of functionally graded coatings: Advancements and future challenges.” *Applied Materialstoday*. 26 : 101373.
- [4] M. Sathish, N. Radhika and B. Saleh, 2021. “A critical review on functionally graded coatings: Methods properties, and challenges.” *Composites Part B: Engineering*. 225 : 109278.
- [5] W. Fürbeth. 2020. “Special issue: Advanced coatings for corrosion protection.” *Materials*. 13 : 3401.
- [6] T. Li, Z. Ye, Y. Cai, T. Tu, B. Zhang, S. Zhang, L. Fang, X. Mao, S. Xu, X. Ye and B. Liang. 2022. “Electrode surface rebuilding for electrochemical assembling of conductive PEDOT:PSS hydrogel towards biosensing.” *Journal of Electroanalytical Chemistry*. 911 : 116183.
- [7] 2020. ประเภทของเหล็กกล้า. [Online]. Available : <https://www.maxsteelthai.com/>
- [8] J. Reza. 1962. “A Stort Journey to the Realm of Corrosion.” *Microbiologically Influenced Corrosion*. 1-8.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[9] D. Brylee, B.R. Tiu and C. Advincula. 2015. “Polymeric corrosion inhibitors for the oil and gas industry: Design principles and mechanism.” *Reactive and Functional Polymers*. 95 : 25-45.

[10] วรวิทย์ จันทร์สุวรรณ. 2554. โลหะและการกัดกร่อนของโลหะ (Metals and metal corrosion). [Online]. Available : <https://sc.sci.rmutp.ac.th/sctank/appchem/wcs-metal.pdf>

[11] ชวันรัตน์ ศิริรัตนสุวรรณ, ธนกาญจน์ สุทธิโรจน์ และ อีรณีย์ วิมลศิลป์. 2560. “พฤติกรรม การกัดกร่อนนสารละลายกรดเบส และโซเดียมคลอไรด์ของโลหะผสมนิกเกิล-เหล็กจากการเคลือบผิว ด้วยไฟฟ้า.” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตร์บัณฑิต (เคมี อุตสาหกรรม) ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง.

[12] ธาชาย เหลืองวรานันท์. 2011. “การกัดกร่อนของโลหะในงานวิศวกรรม.” *Techno & InnoMag*. 38(216) : 78-79.

[13] F. panelRaoul, L. Stéphane and D. Fabrice. 2018. “1 – Steel Corrosion in Reinforced Concrete.” *Corrosion and its Consequences for Reinforced Concrete Structures*. 1-41

[14] CORROSION FORM. [Online]. Available : [https://www.uobabylon.edu.iq/eprints/paper\\_12\\_1893\\_228.pdf](https://www.uobabylon.edu.iq/eprints/paper_12_1893_228.pdf)

[15] พนิกาญจน์ เกตุแก้ว. 2555. “การสังเคราะห์และการวิเคราะห์ชั้นเคลือบแคลเซียม-ฟอสฟอรัส บนไททานเนียมที่ผลิตโดยกระบวนการไมโครอาร์คออกซิเดชัน.” ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ.

[16] นครินทร์ ศรีสุพรรณ, ณรงค์ พังวิวัฒน์ และณัฐพงศ์ เกียรติเสรีกุล. 2555. ประสิทธิภาพการ ป้องกันการกัดกร่อนของสารยับยั้งการกัดกร่อน โปตัสเซียม โนนาโนเอต บนเหล็กกล้าคาร์บอน. [Online]. Available : <http://www.dms.eng.su.ac.th/filebox/FileData/MPM053.pdf>

[17] Viswanathan S. Saji. 2019. “Progress in rust converters.” *Progress in Organic Coating*. 127 : 88-99.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่วางไว้เพื่อให้บริการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [18] R. Pierre. Rust converter. [Online]. Available : <https://www.corrosion-doctors.org/MetalCoatings/rust-converter.htm>
- [19] A. Collazo, X.R. Novoa, C. Perez and B. Puga. 2009. "The corrosion protection mechanism of rust converters: An electrochemical impedance spectroscopy study." *Electrochimica Acta*. 55(2010) 6156-6162
- [20] วิสาขา ภูจินดา. 2549. มารู้อัจฉารลดแรงตึงผิวกันดีกว่า. [Online]. Available : <http://www.chemtrack.org/News-Detail.asp?TID=4&ID=3>
- [21] Myers D. 2006. "Surfactant science and Technology." Third Edition. New jersey : John Wiley & Sons.
- [22] Myers D. 1988. "Surfactant science and Technology." New york : VCH Publishers.
- [23] Wikipedia. 2558. Sodium dodecyl sulfate. [Online]. Available: [http://en.wikipedia.org/wiki/Sodium\\_dodecyl\\_sulfate](http://en.wikipedia.org/wiki/Sodium_dodecyl_sulfate)
- [24] พรเพ็ญ วีระวัฒนานนท์. 2548. "การเกิดปฏิกิริยาเคมีในสารละลายไมเซลล์." วารสารวิจัยวิทยาศาสตร์การแพทย์ 19(2) : 168-171.
- [25] ภาควิชาเคมี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. "ความสามารถในการทำมาสะอาดของสารลดแรงตึงผิว." เอกสารปฏิบัติการทางเคมีอุตสาหกรรม.
- [26] มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. 2558. การดูดซับ. [Online]. Available: [http://archive.lib.cmu.ac.th/full/T/2551/chem0451sk\\_ch1.pdf](http://archive.lib.cmu.ac.th/full/T/2551/chem0451sk_ch1.pdf)
- [27] Wikipedia. 2022. Tannin. [Online]. Available: <https://th.m.wikipedia.org/wiki/Tannin>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[28] มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบุรี. เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง. [Online]. Available: <https://book.pbru.ac.th/images/R0/02/R0023767c.pdf>

[29] Wikipedia. 2023. Tannic acid. [Online]. Available: [https://en.m.wikipedia.org/wiki/Tannic\\_acid](https://en.m.wikipedia.org/wiki/Tannic_acid)

[30] Wikipedia. 2023. 2-Butoxyethanol. [Online]. Available: <https://en.m.wikipedia.org/wiki/2-Butoxyethanol>

[31] โรงพยาบาลนพรัตน์ราชชนนี. 2013. [Online]. Available: [http://www.occmnop.com/nrhc/web/search/chemical\\_attribute\\_show.php?UN\\_Number=111-76-2&Chemical\\_name=Ethylene%20glycol%20monobutyl%20ether&Att\\_parent=0](http://www.occmnop.com/nrhc/web/search/chemical_attribute_show.php?UN_Number=111-76-2&Chemical_name=Ethylene%20glycol%20monobutyl%20ether&Att_parent=0)

[32] วิทยาลัยการอาชีพบางสะพาน. 2021. [Online]. Available: [http://www.bspc.ac.th/files/210609088215125\\_22102013133743.pdf](http://www.bspc.ac.th/files/210609088215125_22102013133743.pdf)

[33] Ju Feng Special Steel. 2021. [Online]. Available: <https://www.jfs-steel.com/th/category/2.html>

[34] Master Tech & System. 2021. [Online]. Available: <https://www.mastertechandsystems.com/carbonsteel>

[35] สำเร็จ ลำเจียก. 2561. “สมบัติความไม่ชอบน้ำที่ยาวของฟิล์มบางพอลิเตตระฟลูออโรเอทีลีนที่เคลือบบนฟิล์มอะลูมิเนียมผิวขรุขระ.” ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ.

[36] L.M. Ocampo, I.C.P. Margarit, O.R. Mattos, S.I. Cordoba-Torresi, F.L. Fragata. 2004. "Performance of rust converter based in phosphoric and tannic acids." Corrosion Science. 46 : 1515-1525.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [37] J. Gust and J. Bobrowicz. 1993. "Sealing and Anti-Corrosive Action of Tannin Rust Converters." National Association of Corrosion Engineerings.
- [38] Xu, En-Hou Han, Zhenyu Wang.2018. "Effect of tannic acid on corrosion behavior of carbon steel in NaCl solution." Materials Science & Technology. 35 : 64-75.
- [39] Soheila Javadiana, Ali Yousefia, Jaber Neshati. 2013."Synergistic effect of mixed cationic and anionic surfactants on the corrosion inhibitor behavior of mild steel in 3.5% NaCl." Applied Surface Science. 285 : 674-681.
- [40] Tianpei Zhaoa, Guannan Mub. 1999. "The adsorption and corrosion inhibition of anion surfactants on aluminium surface in hydrochloric acid." Corrosion Science. 41 : 1937-1944.
- [41] สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน(องค์การมหาชน) กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. X-Ray Diffractometer (XRD) [Online]. Available : <https://www.slri.or.th/bdd/th>
- [42] Wikipedia. 2021. ภาวะการเปียก. [Online]. Available: <https://en.m.wikipedia.org/wiki/ภาวะการเปียก>
- [43] Xin Wang, Qingjun Zhu, Xiangju Liu, Baorong Hou. 2021. "Rust Conversion Performance of Phosphoric Acid-Gallic Acid in Vinyl Chloride Acrylic Emulsion." Coatings. 2021, 11, 152.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



งานทะเบียนคณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

คำรับรองเล่มโครงการพิเศษ/ปัญหาพิเศษ/สหกิจศึกษา

วันที่ 25 เดือน มิถุนายน พ.ศ. 2566

ข้าพเจ้า นางสาว กนกวรรณ แก้วเข้ม

รหัสประจำตัว 62050253

นางสาว ณิชฎา สามงามอ่อง

รหัสประจำตัว 62050279

นักศึกษาหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชา เคมีอุตสาหกรรม ภาควิชา เคมี ขอรับรองว่าโครงการพิเศษเรื่อง

ชื่อภาษาไทย การศึกษาการแปลงสนิมเหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง

ชื่อภาษาอังกฤษ STUDY ON MEDIUM CARBON STEEL RUST CONVERSION

ปีการศึกษา 2565

เป็นผลงานวิจัยที่ได้คัดลอกหรือละเมิดลิขสิทธิ์ของผู้อื่นและได้ผ่านการตรวจสอบความซ้ำซ้อนเรียบร้อยแล้ว และได้แนบเอกสารการตรวจสอบการลอกเลียนงานวรรณกรรมที่ตรวจสอบจากเล่มโครงการพิเศษฉบับสมบูรณ์แล้ว

โปรแกรมอักขราวิสุทธิ์ 2.49%

ลงชื่อ กนกวรรณ แก้วเข้ม

ลงชื่อ ณิชฎา สามงามอ่อง

(นางสาวกนกวรรณ แก้วเข้ม)

(นางสาวณิชฎา สามงามอ่อง)

นักศึกษา

นักศึกษา

ข้าพเจ้า ผศ.ดร. สุธา สุทธิเรืองวงศ์ อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการพิเศษ ได้ตรวจสอบโครงการพิเศษของนักศึกษาข้างต้นแล้ว ขอรับรองว่าเป็นผลงานวิจัยของนักศึกษาจริงและมีเนื้อหาสมบูรณ์ จึงลงชื่อไว้เป็นหลักฐาน

ลงชื่อ.....

อาจารย์ที่ปรึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้